



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

海量天文数据在线可视化研究

作者姓名: 张磊

指导教师: 崔辰州 研究员

中国科学院国家天文台

学位类别: 理学硕士

学科专业: 天文技术与方法

培养单位: 中国科学院国家天文台

2019 年 5 月

**Research on Online Visualization of Massive Data for
Astronomy**

**A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Nature Science
in Astronomical Technology and Method**

By

Zhang Lei

Supervisor : Professor Cui Chenzhou

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

May 2019

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

天文学是一门以观测为基础的学科。从古至今,记录观测目标的手段发生了从简单手绘记录到客观照相记录再到 CCD 数字化记录的转变。现代的天文望远镜或探测器产生了图像、星表、光谱、运行日志、观测足迹等各种类型的数据,天文数据可视化也变得越来越复杂。以斯隆数字化巡天为代表的大量巡天项目和以阿波罗计划为代表的行星探测项目产生了海量的、不同波段的天文数据,其中图像数据尤为庞大。如何有效展示、灵活使用、快速证认这些海量的数据是全球各大天文数据中心的研究热点。类似谷歌地图等互联网地图的天图在线可视化系统近年来越来越受到各数据中心的青睐。这些系统往往以图像数据为底图,之上叠加星表、望远镜观测天区等其它数据图层或星座连线、星座图案、着陆器位置等图层。使用该类系统,科研人员可以以可视化的方式访问、对比、下载天文数据,普通公众也有机会接触到科研级别的天文图像及相关知识。

近年来,各天文项目正大力开发相关的海量天文数据在线可视化系统。基于不同的目的,天文学家开展了各种的巡天观测计划和行星探测项目,获取了图像、星表等各类海量的数据。传统的方式是将图像下载到本地再进行处理,但下载如此巨大的数据量会极度地耗时并且需要很大的存储空间。使用者其实并不需要一次获得全部数据,只需探索感兴趣的区域即可。分层可视化技术通过将大图像切分为小瓦片进行分层保存,在浏览器端分层显示、按需加载可以很好地解决这一问题。海量天文数据在线可视化研究主要关注数据分层分块技术、图像拼接与瓦片生成工具、在线可视化系统开发三个方面的内容。HiPS、TOAST 以及基于地图 GIS 工具是当前主流的三种分层可视化技术,分别将数据切分为菱形、三角形、矩形小瓦片。各分层可视化技术也有相应的天文数据拼接和瓦片生成工具,如生成 HiPS 的 Aladin、Hipsgen、Hipsgen-cat,生成 TOAST 的 Montage、WWT SDK 等。基于不同分层可视化技术,各天文项目开发了 Aladin Lite、WWT、Google Sky 等多款成熟的海量天文数据在线可视化系统,服务于科学研究工作并且在科普教育领域广泛使用。以上三个方面仍有一些问题需要解决,比如数据分层分块使得数据量再一次增加、图像拼接切分耗时较长、系统功能优化及多信使数据的融合显示等。

LAMOST、BASS 等巡天观测计划和嫦娥等行星探测项目正在产生着海量的

数据,然而我国目前并没有可用的海量天文数据在线可视化系统。本文通过研究主流的分层可视化技术及其瓦片切分、在线展示等相关工具,基于 Aladin Lite 将我国的 BASS、嫦娥二号全月 7 米 DOM 等数据整合到 China-VO SkyView 在线可视化系统中进行在线展示。此外还梳理了几款主流海量天文数据在线可视化系统的特点及优缺点,研究了此类系统在科学研究及科普教育领域的应用,分析了系统目前的开发趋势。本系统的数据资源目前包括 BASS DR1 和 DR2 的图像与星表、LAMOST 类星体星表、嫦娥二号全月 7 米 DOM 以及中国虚拟天文台 (China-VO) 镜像的国外巡天数据。本系统将作为 China-VO 可视化门户,为用户提供服务。

关键词: 在线可视化, 瓦片地图, 海量天文数据, HiPS

Abstract

Astronomy is an observation-based science. The method of recording observation objects have evolved from simple hand-drawn records to objective photographic records and then to CCD digital records. Modern telescopes or detectors produce images, catalogs, spectras, operational logs, and other types of data. The visualization of astronomical data is also becoming increasingly complex. A large number of sky survey projects (e.g. Sloan Digital Sky Survey) and planetary exploration projects (e.g. Apollo program) have produced massive astronomical data of different bands, among which the image data is particularly huge. How to effectively display, flexibly use and quickly verify these massive data is the research focus of many astronomical data centers around the world. In recent years, sky atlas online visualization system, which is similar to internet map (e.g. Google Maps), is being favored and adopted by data centers. These systems usually lay the images as the base map and overlay other data layers, e.g. star catalogue, telescope footprint, constellation connection, et al. With this kind of system, researchers can access, compare and download the astronomical data in a visual way. General public can also be able to access the scientific astronomical images and related knowledge without tough learning.

In recent years, various astronomical projects are vigorously developing the related massive astronomical data online visualization system. For different purposes, astronomers have carried out a variety of sky survey and planetary exploration program, to obtain images, catalogs and other kinds of massive data. In tradition, users must download images to their own computer. But to download such a huge amount of data will be extremely time-consuming, and requires a lot of storage space. Users usually do not really need to get all the data at once, but just explore the areas of interest. Hierarchical visualization technology can solve this problem by dividing large images into small tiles. Then tiles can be hierarchically stored, and display on the browser side. Tiles will only loaded when demand. The research on massive astronomical data online visualization mainly focuses on three aspects: data mosaic and indexing technology, image stitching and tile generation tools, and the development of online visualization system. HiPS, TOAST and GIS based map tools are three major hierarchical visualization technologies, which divide data into

diamond, triangle or rectangle tiles. Each hierarchical visualization technology also has corresponding astronomical data mosaic and tile generation tools. For example, Aladin, Hipsgen and Hipsgen-cat generate HiPS; Montage and WWT SDK produce TOAST. Based on different hierarchical visualization technologies, various astronomical projects have developed a number of mature massive astronomical data online visualization systems, such as Aladin Lite, WWT and Google Sky. These systems are widely used in scientific research and popular science education. There are still some problems to be solved in the above three aspects, such as the data volume is increased again due to data partitioning, the time consumption of sky survey image mosaic and tile generation is too long, the system function optimization and the data fusion display of multi-messenger data needs more development.

LAMOST, BASS, Chang'E and other sky survey or planetary exploration projects are producing massive data. However, there is no available massive astronomical data online visualization system in China. Based on Aladin Lite, this article integrates China's BASS, Chang'E-2 Global Digital Orthophoto Model (7m) and other data into the China-VO SkyView online visualization system, by studying the major hierarchical visualization technology, tile generation, online display and other related tools. In addition, the characteristics, advantages and disadvantages of several major massive astronomical data online visualization systems are analyzed. The application of such systems in scientific research and popular science education is also be studied, and the current development trend of the system is analyzed. At present, the data resources of this system includes BASS DR1 and DR2 images and catalogs, LAMOST Quasar Catalog, Chang'E-2 Global DOM (7m) and overseas survey data mirrored by Chinese Virtual Observatory (China-VO). This system will serve as the visualization portal of China-VO, provide services for users.

Key Words: online visualization, tile maps, massive astronomical data, HiPS

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	6
1.3 本文的内容和框架	8
1.4 本课题的来源	9
第 2 章 分层可视化技术	11
2.1 引言	11
2.2 HiPS	13
2.2.1 HiPS 简介及原理	13
2.2.2 HiPS 瓦片生成	18
2.2.3 HiPS 文件在线展示	19
2.2.4 HiPS 可视化构建	19
2.3 TOAST	21
2.3.1 TOAST 简介及原理	21
2.3.2 TOAST 瓦片生成	23
2.3.3 TOAST 文件在线展示	24
2.3.4 TOAST 可视化构建	24
2.4 HiPS 和 TOAST 性能对比	25
2.5 小结	25
第 3 章 在线可视化系统及其应用	27
3.1 引言	27
3.2 主流在线可视化系统	28
3.2.1 Aladin	29
3.2.2 WWT	33
3.2.3 Google Sky	34
3.3 在线可视化系统的应用	36
3.3.1 科学研究	36
3.3.2 科普教育	38
3.4 在线可视化系统的开发趋势	40

3.5 小结.....	41
第4章 China-VO SkyView.....	43
4.1 引言.....	43
4.2 技术基础	43
4.3 巡天数据在线可视化.....	45
4.3.1 BASS 巡天数据介绍.....	45
4.3.2 BASS 数据可视化	46
4.3.3 LAMOST 类星体星表数据介绍.....	49
4.3.4 LAMOST 类星体星表可视化	50
4.4 行星数据在线可视化.....	51
4.4.1 嫦娥二号 7 米 DOM 数据介绍	51
4.4.2 嫦娥二号 7 米 DOM 数据在线可视化.....	53
4.5 数据资源	55
4.6 后续开发	58
第5章 总结与展望	59
参考文献	61
附录	65
致谢	71
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	73

第1章 引言

1.1 研究背景与意义

天文学是一门以观测为基础的学科，通过对天体的观测、记录、分析来研究天体^[1]。从观测手段来看，数千年前中西方的古人均用肉眼或一些天文仪器（如浑仪、象限仪等）进行观察，获得了诸如彗星形态、恒星位置等天体信息，探讨了人类在宇宙中的位置。四百多年前伽利略划时代地将望远镜指向星空得以比肉眼更加仔细地观察星星，获取了更加详细的信息，同时也刷新了人类对于宇宙的认识。近现代的天文学家们致力于建造更大的望远镜、更多不同类型的探测器来从不同的波段观测天体，尽可能地通过不同手段来获取天体全部的信息。从记录介质来看，1839 年照相技术发明以前一直是通过肉眼来记录^[2]，尽管伽利略等著名天文学家已使用望远镜观测星空。中国古人在《彗星占》（长沙马王堆汉墓出土）中描绘了肉眼看到的各种形态的彗星、宋代的天文学家把通过肉眼辅助天文仪器观测到的恒星位置绘制成星图、伽利略虽然使用望远镜却依旧是用肉眼观察然后通过手绘进行记录。这一时期的天文学家大都需要有点艺术天赋，因为他们把用眼睛看到的東西画下来是记录观测结果的唯一方式^[3]。1839 年法国的尼普斯和达盖尔发明了银版照相技术，之后美国的德雷伯拍摄了第一张月亮照片，这是人类历史上最早的天文照片。照相术可以使天文学家在很短的时间内完成之前极其繁重、精确且细致的工作，最重要的是照相术与目视观测相比具有客观性、文献性、积累性等优点^[4]。之后照相技术迅速发展，如发明了湿片法、干版法、底片的敏化技术、胶片等不同的照相方法。1969 年电荷耦合器件（Charge-coupled Device, CCD）的发明使得天文学走向数字时代，天文学家通过 CCD 对这些信息进行数字编码^[5]。由于 CCD 具有比照相底片的灵敏度高 100 倍以及输出信号的强度线性与天体呈现的亮度成正比等优点，受到了天文学家的青睐，并且成为了天文望远镜的标准配备。这些基础的可视化工作不仅展示了天文学家的研究成果，也对人类认识宇宙起到了重要的作用。图 1.1 显示了天文数据可视化发展的历程。

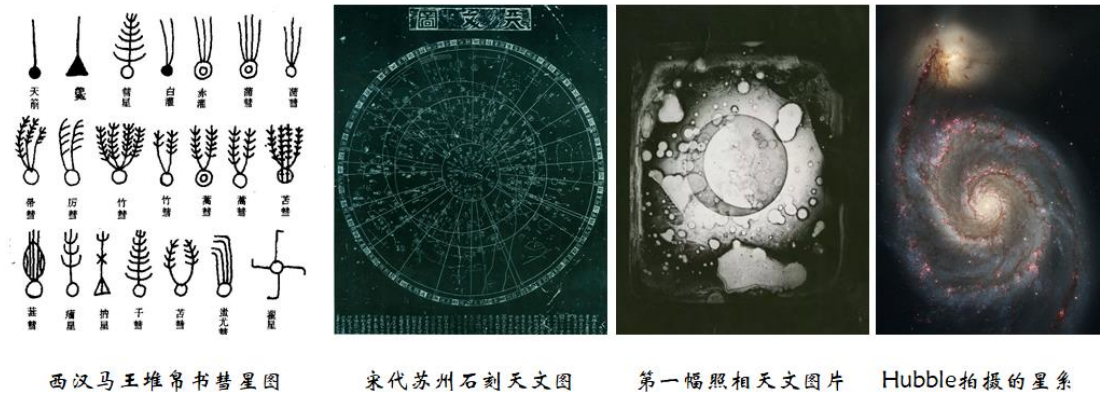


图 1.1 天文数据可视化的发展——从肉眼到照相记录到数字时代

数据可视化非常重要，这点毋庸置疑。大多数人从图片中可以更快地理解概念而非文字；几乎所有有经验的科学家都要先阅读一篇期刊文章的摘要，然后查看图表，最后再决定是否阅读整篇文章；任何级别的文献阅读者都可以欣赏和学习照片，以阐明所讨论的概念；插图丰富的期刊文章会具有较高的引用次数^[6]。数据可视化是对数据产品进行二次加工，以图形图像形式表示大型数据集中的数据，并通过数据分析和开发工具发现其中未知信息的处理过程，目的是方便寻找数据特征、展示研究成果等^[7]。近 100 年来，天文学从光学观测发展到射电观测再到包括红外、高能观测等的多波段天文学。激光干涉引力波观测台（Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO）¹2016 年两次直接探测到引力波标志着天文学进入到包括多波段、引力波、中微子的多信使天文学时代^[8]。天文学家也发射了如阿波罗系列、嫦娥系列、水手系列等行星探测器，获取了月亮、火星等很多太阳系天体数据。现代天文学家获取的数据类型多样，包括图像、星表、光谱以及其它相关数据等等。天文数据可视化是一个涉及面极广的领域，如大规模天文时序粒子数据的可视化^[9]、月球和火星等行星遥感数据可视化^[10]、光谱可视化^[11]等。本论文主要关注的是天文数据可视化中的海量天文数据的在线可视化。

为了更好地了解宇宙，在过去的几十年中天文学家对星星开展了“查户口”——巡天的工作^[12]。最著名的巡天项目当属斯隆数字化巡天（Sloan Digital Sky Survey, SDSS）²，此外还有数字化巡天（Digitized Sky Survey, DSS）³、北京

¹ <https://www.ligo.caltech.edu/>

² <https://www.sdss.org/>

³ <http://archive.stsci.edu/dss/>

—亚利桑那巡天(Beijing-Arizona Sky Survey, BASS)⁴、郭守敬望远镜巡天(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope, LAMOST)⁵、盖亚天文卫星巡天(GAIA)⁶等众多巡天项目。这些巡天项目产生了海量的数据集,包括图像、星表等。盖亚发布的第二批数据(GAIA DR2)包含超过16.9亿颗恒星的位置及亮度信息、13.3亿颗恒星的视差和自行数据、约13.8亿颗恒星的颜色、超过七百万颗恒星的视向速度、55万个变源数据等(共计文件数62389个,数据量550GB)。天文学家还基于恒星的位置和亮度信息生成了一张震撼人心的全彩天空地图(下称天图),如图1.2。

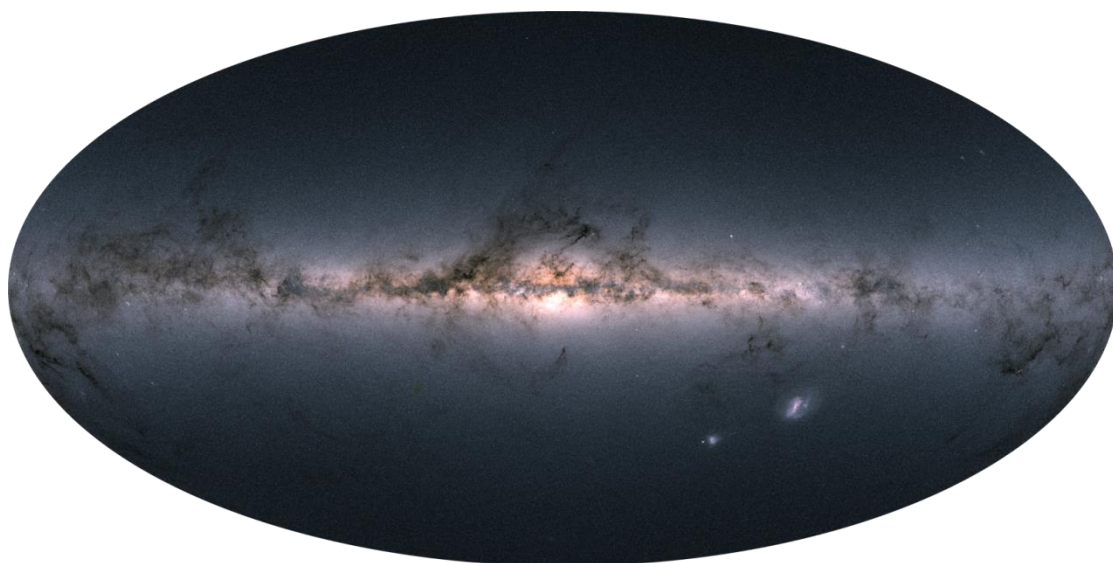


图 1.2 盖亚第一张全天彩色图像^[13]

未来还将建设一批大型巡天设备,如大口径全天巡视望远镜(Large Synoptic Survey Telescope, LSST)⁷、欧几里得空间望远镜(Euclid space telescope)⁸,将获得数量级更大的数据,这些海量数据集对天文学家提出了新的挑战。各团体和个人都试图通过开发能够显示和可视化大型数据集的新天文应用来应对这一挑战^[14]。如何最大限度地利用这些海量的天文数据,满足天文学家对巡天数据的直观、快速和可视化访问的需求以及将科研成果有效地展示给普通大众,是一个热门的研究课题。很多天文项目都在努力使用巡天数据创造非常详细的天图,然而一张非常详细的天图的尺寸都比较大,不便于科研人员获取或向公众传播。比

⁴ <http://batc.bao.ac.cn/BASS/doku.php>

⁵ <http://www.lamost.org/public/?locale=zh>

⁶ <http://sci.esa.int/gaia/>

⁷ <https://www.lsst.org/>

⁸ http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Euclid_overview

如, 2016 年 2 月欧洲南方天文台 (European Southern Observatory, ESO)⁹ 公布了一张银河系全景图¹⁰, 像素高达 1.87 亿, 而文件大小则为 24.6GB——非常之大。如此庞大的数据对计算机硬件和软件要求非常高。对于硬件来说, 需要的内存更多、硬盘更大、CPU 的功能更强大; 对于软件来说, 需要使用尽可能少的内存和效率更高的算法^[15]。

天文领域有不少桌面应用程序可以通过下载 FITS 数据对远程图像数据库进行高效访问, 然而所有的工作都在客户端进行, 包括图像缩放、动态范围压缩、颜色合成和伽马校正等^[16]。如果提高硬件配置, 往往成本很高。近些年, 由于 Web 浏览器在桌面和移动平台上无处不在, 基于 Web 的应用程序已成为实现可视化的极具吸引力的解决方案。现代 Web 浏览器有很多优点, 比如具有更快、更高效的 JavaScript 引擎, 支持 HTML5 和 CSS3 等高级标准等。由于网络速度、渲染能力的限制, 流畅地加载显示海量巡天数据生成的天图是现阶段的一个难题。其实使用者并不需要一次获得全部的数据, 只需关注感兴趣的天区即可。因此目前主流的天图在线可视化系统均采用地图在线可视化系统使用的图像分层分块技术, 即将一张大的天图切分成若干尺寸相同的小图片, 只需要显示对应天区的小图片即可。这样的技术可以不加载不需要的数据, 极大地加快显示速度。近些年出现了很多基于不同图像分层分块技术的天图在线可视化系统, 在科学研究和科普教育领域得到广泛的应用。

天文学家的科研工作对于数据有很多需求, 如需要通过整个电磁波段来了解目标天体、从尽可能多的天文观测台站获取数据、了解哪些天文仪器在天空的特定区域观测过、希望对观测数据或计算结果进行快速判、以可视化的方式提供多波段数据和多信使数据的下载、在同一平台获取需要的数据以减少多方收集数据的麻烦等等^[17]。普通公众由于城市光污染及空气污染的影响想看到璀璨的星空很不容易, 而想要观察美丽的星云、星团更是奢望。通过这些在线可视化系统, 公众可以在真实的宇宙中自由遨游, 观察科研级望远镜拍摄的不同波段的星空。

随着数据集的复杂性和数量的增加以及模块化、开源、易于实现、可视化工具等的发展, 天文学家对数据可视化的需求也越来越高。国外很多天文数据中心都致力于将各自的在线可视化系统作为其数据中心的可视化门户, 方便天文学家

⁹ <https://www.eso.org/public/>

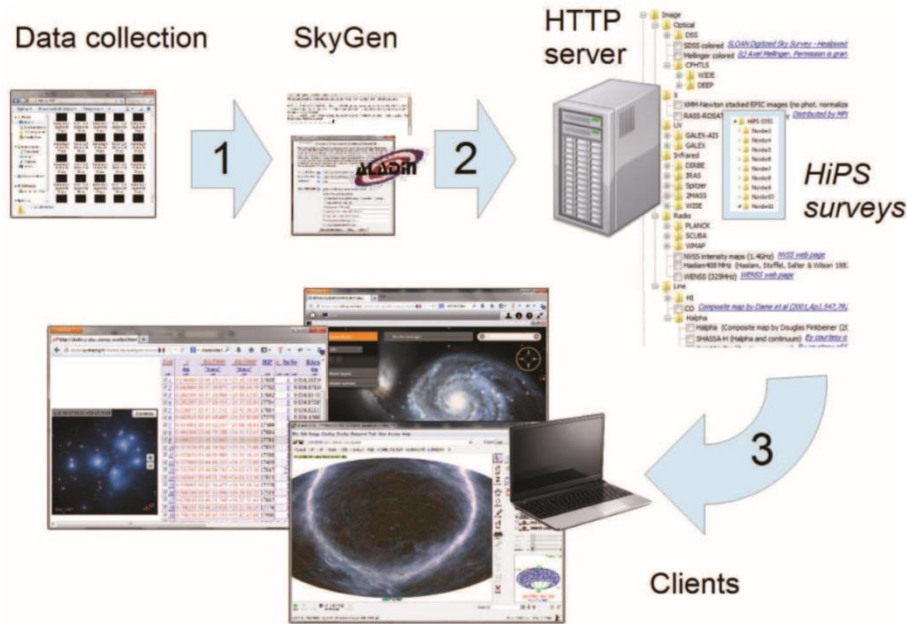
¹⁰ <http://www.eso.org/public/images/eso1606a/zoomable/>

的使用。海量天文数据在线可视化系统也可认为是虚拟天文台的一种实现方式。虚拟天文台 (Virtual Observatory, VO) 是在天文数据资源急剧增长的背景下提出的概念, 通过先进的计算机和网络技术, 致力于实现分布在世界各地的各种大型天文数据的互联、融合和发现, 各天文大国均有自己的虚拟天文台计划。国际虚拟天文台联盟 (International Virtual Observatory Alliance, IVOA)¹¹ 于 2002 年成立, 旨在推进国际合作, 协调各国虚拟天文台项目的研究开发, 共享资源和交流经验, 最终建成一个能充分利用国际天文数据资源, 完善的国际虚拟天文台体系。中国虚拟天文台 (China-VO)¹² 由崔辰州等人^[18] 于 2002 年提出并持续推进, 致力于研究和开发符合国内实际情况和需求的, 符合国际虚拟天文台联盟规范的虚拟天文台技术和服务, 包括以下几个重点研发领域: China-VO 系统平台建设; 国内外天文数据的统一访问; 现有天文工具的虚拟天文台集成; 天文设备的虚拟天文台集成; 虚拟天文台基础上的科普教育。中国天文数据中心 (Chinese Astronomical Data Center, CASDC)¹³ 由 China-VO 维护和运行, 是中国天文界面向天文学的科学研究、科普教育以及相关学科和社会的需求提供的天文科学数据服务基础设施, 整合了国内大部分数据资源。现有数据量超过 4PB 并且在快速增长。中国近年来已开展或即将开展众多巡天观测或天体遥感工作, 如 LAMOST 巡天、BASS 巡天、FAST 巡天、嫦娥工程全月遥感等, 但是目前还没有一套类似的天图在线可视化系统可供使用。本课题是天文联合基金《面向时域天文学的虚拟天文台核心能力建设与科学应用》的一部分, 解决的是数据融合结果的可视化呈现问题。本文通过对当前流行的几种分层可视化技术研究, 基于现有技术、工具对我国巡天数据进行在线展示、增加交互功能。系统将集成到中国虚拟天文台平台, 为用户提供数据服务。图 1.3 以当前一种广泛使用的 HiPS 分层可视化技术为例说明了一个天图在线可视化系统的创建以及发布过程。

¹¹ <http://www.ivoa.net/>

¹² <http://astrocloud.china-vo.org/>

¹³ <http://explore.china-vo.org/>

图 1.3 创建并发布 HiPS^[19]

1.2 国内外研究现状

从 2005 年起,陆续出现了谷歌地图¹⁴、百度地图¹⁵、必应地图¹⁶、高德地图¹⁷、腾讯地图¹⁸等众多的地图在线可视化系统^[20]。这些系统均以地图为底图,之上叠加交通线路、地名标记等信息层,极大地方便了人们出行相关的需求。这些地图在线可视化系统均采用图像金字塔规则,使用瓦片技术对地图进行分层可视化。通过加载相应地区的瓦片而不是整张地图,人们可以流畅地查看感兴趣区域的地图。由于天球和地球均为球体,因此望远镜拍摄的天图也可以采用与遥感卫星拍摄的地图类似的方式进行在线可视化。此外,星座图形图案、星表、望远镜观测区域等数据也可以叠加层的形式显示在底图(即天图)之上,方便寻找数据特征或进行对比分析。

基于分层可视化技术的天图在线可视化技术近些年也发展十分迅速。2006 年, Konstantin Lysenko 和 Sergei Goshko 创建并发布了 WikiSky¹⁹,这是一个涵盖超过 5 亿个天体的维基互动式天图,包括 DSS、SDSS、IRAS、GALEX 等巡天数据。WikiSky 最大的特点是互动,用户可以进行简单的搜索,也可以通过编

¹⁴ <http://www.google.cn/maps>

¹⁵ <https://map.baidu.com/>

¹⁶ <https://cn.bing.com/maps?wip=2&v=2&rtp=~&form=msnh>

¹⁷ <https://www.amap.com/>

¹⁸ <https://map.qq.com/>

¹⁹ <http://www.sky-map.org/>

写文章、添加 Internet 链接、上传图像或为特定任务创建特殊兴趣组来编辑关于不同星星的信息。2007 年,谷歌 (Google) 发布了 Google Sky²⁰, 从此人们在 Google Earth 中不仅可以观察美丽的地球又可欣赏浩瀚的星空。随后谷歌又发布了 Google Moon 和 Google Mars 使人们可以漫步月球和火星。WikiSky 和 Google Sky 都使用类似地图在线可视化系统的正方形瓦片分层方法。2008 年,微软 (Microsoft) 推出了一款十分酷炫的软件——万维望远镜 (WorldWide Telescope, WWT)²¹, 使用的是三角形瓦片分层方法。该软件相比 WikiSky 和 Google Sky 有更加丰富的巡天数据, 还有全景数据、行星数据等各种类型的数据, 功能也更加强大。2010 年, 法国斯特拉斯堡天文数据中心 (Centre de Données astronomiques de Strasbourg, CDS)²² 推出了具有全天模式, 支持平移、缩放巡天图像和星表数据功能的第七版 Aladin。2013 年 CDS 发布在线版本 Aladin Lite²³, 天文学家可以不需要下载 Aladin 桌面应用程序, 直接通过浏览器即可访问众多巡天图像、星表数据。2016 年, 欧洲空间天文中心 (European Space Astronomy Centre, ESAC) 下属的科学数据中心发布了第一版的 ESASky 天图在线可视化系统, 目前版本为 ESASky3.1²⁴。ESASky 基于 Aladin Lite 技术开发而来, 比 Aladin Lite 功能更加强大, 而且具有很多适合天文学家的实用功能, 比如光谱可视化、相关论文等。Aladin 基于菱形瓦片分层技术, 并被多个天图在线可视化系统所采用, 如 ESASky、MIZAR、JUDO2 等, 应用十分广泛。

以上这些海量巡天数据在线可视化系统都是基于 Web 的应用程序, 专注于高分辨率图像的可视化, 并具有星表叠图层或图像分析功能。这些系统虽然对巡天数据使用的分层可视化技术有所不同, 系统具有各自不同的特点和交互功能, 但实现过程基本相同。将巡天数据进行在线展示主要包括巡天数据拼接、瓦片数据生成、浏览器端显示与交互等几个主要环节。目前主流的分层可视化技术为国际虚拟天文台联盟推出的 HiPS、微软万维望远镜 (WWT) 制作的 TOAST 以及谷歌使用的地图 GIS 工具。各种分层可视化技术均有自己较为成熟的巡天数据拼接及瓦片生成工具, 如 Aladin、Hips-gen.jar 可以生成 HiPS 瓦片, Montage、WWT SDK 可以生成 TOAST 瓦片。这些分层可视化技术也有相应的 API, 可以方便地

²⁰ <http://www.google.com.hk/sky/>

²¹ <http://worldwidetelescope.org/webclient/>

²² <http://cds.u-strasbg.fr/>

²³ <http://aladin.u-strasbg.fr/AladinLite/>

²⁴ <http://sky.esa.int>

展示巡天数据并进行二次开发，比如展示 HiPS 的 Aladin Lite 以及 TOAST 的 WWT 等。仅仅将巡天数据在线展示是远远达不到天文学家对于数据使用要求的，还需要通过相应的 API、JavaScript 等前端技术进行二次开发，使在线可视化系统具有更加强大的功能。表 1.1 总结了当前流行的三种分层可视化技术、瓦片生成工具及在线可视化系统。

表 1.1 当前流行的在线可视化系统

瓦片管理	HiPS	TOAST	Leaflet
投影	HEALPix	TOAST	Mercator
瓦片创建	Aladin/Hips-gen	Montage	ImageMagick
	Hips-gen-cat	WWT SDK	
在线可视化系统	Alain Lite	WWT	Google Sky
	ESASky 等		WikiSky/Sky-Map 等

1.3 本文的内容和框架

在上述背景及天文联合基金课题对数据融合结果可视化呈现的实际需求下，本论文通过研究当前几种流行的在线可视化技术及瓦片生成与在线展示工具的使用，将我国的 BASS 巡天数据与嫦娥二号 7 米 DOM 数据进行了在线展示。基于 Aladin Lite，开发了我国自己的天图在线可视化系统——China-VO SkyView²⁵。作为中国虚拟天文台的可视化门户，使用者可以交互式访问查看我国的巡天数据、全月 7 米分辨率 DOM 数据以及镜像的国外巡天数据。

本文分为五大章节内容：

第一章 引言。本章阐述了课题的背景与意义、国内外研究现状、本文的内容与章节安排。

第二章 分层可视化技术。本章对当前几种主流的分层可视化技术进行研究，包括技术原理、瓦片生成工具的使用、如何进行在线展示等主要内容，并且使用小型巡天数据集进行了瓦片生成与在线展示的测试工作，同时针对两种分层可视化技术在生成数据量与所需时间方面进行了性能对比分析，最后讨论了分层可视化技术遇到的问题及发展方向。

²⁵ <http://skyview.china-vo.org/>

第三章 在线可视化系统及其应用。本章研究了 Aladin、WWT、GoogleSky 几款当前主流在线可视化系统，并对比了它们的特点及优缺点，分析了在线可视化系统的开发趋势，此外还梳理了在线可视化系统在科研以及科普教育领域的应用，最后讨论了在线可视化系统遇到的问题及发展方向。

第四章 China-VO SkyView。本章介绍基于 Aladin Lite 开发的 China-VO SkyView 在线可视化系统，包括技术基础、数据资源、后续开发等几个方面的内容，重点介绍巡天数据在线可视化（以 BASS 巡天数据和 LAMOST 类星体数据为例）和行星数据在线可视化（以嫦娥二号 7 米 DOM 数据为例）。

第五章 总结与展望。本章对本文的研究内容和研究成果进行了总结与展望。

1.4 本课题的来源

本课题得到国家自然科学基金（11573019, 11803055），国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金（U1531246, U1731125, U1731243），中国科学院“十三五”信息化建设专项（XXH13503-03-107），国家科技部国家科技基础条件平台项目“国家地球系统科学数据共享服务平台”、“国家基础科学数据共享服务平台”（DKA2017-12-02-07）资助。

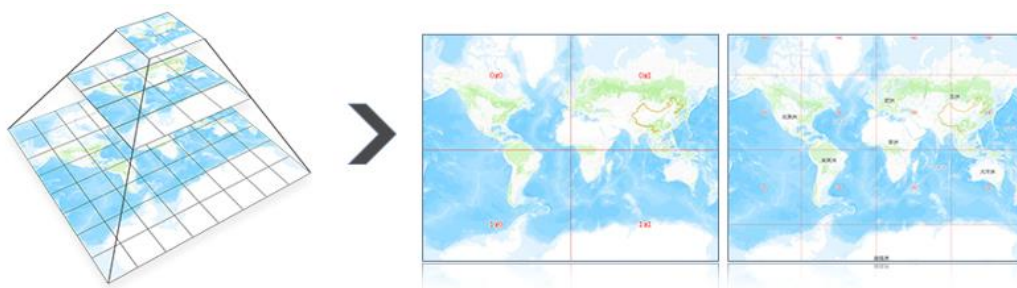
第2章 分层可视化技术

2.1 引言

观测天文学中不断增长的数据集在许多方面对科学家提出了挑战,其中包括有效的交互式数据探索和可视化^[14]。天文学家已经开发了许多工具来应对这一挑战,诸如 FITS²⁶等天文标准文件格式也促进了通用可视化工具的开发,比如 Aladin Lite、VisiOmatic、SkyCat、ds9 等。由于 HTML5、CSS 和 JavaScript 等 Web 技术日益强大以及网络带宽得到改进,现在可以在浏览器中执行更复杂的任务。随着图形设计 JavaScript 库的大量使用,Web 浏览器已成为可视化项目的沃土。然而,存储容量和数据访问带宽之间的差距越来越大,使得需要通过网络向客户端传输某种形式的预处理数据。移动设备的显示和接口能力日益提高,然而它们提供的 I/O 性能和存储容量明显有限,并且负载下的电池续航时间不足。因此基于 Web 的客户端或简单的 Web 应用程序是首选应用程序。

当前流行的互联网地图在线可视化系统背后的主要概念都是“滑动地图”。“滑动地图”或平铺网页地图是在网络上提供大型地图的标准方法。“滑动地图”通过瓦片金字塔技术提供多分辨率结构来避免重负载,事实上它已被证明是非常有效的。瓦片是将地图按照指定的尺寸切成若干行与列的正方形栅格图片^[21]。谷歌地图是采用这种方法的一个著名例子,通过瓦片地图技术,全球用户可以轻而易举地交互使用地图。使用这种技术,前端的 JavaScript 引擎只需要请求可以显示的瓦片并忽略其余部分以提高效率。浏览器可以并行显示多张小图,这比显示一张大图要高效的多。通过这种方法,显示地图可以和显示图片一样简单,互联网地图因此可以承载巨大规模的用户。图 2.1 为互联网地图使用的瓦片金字塔原理示意图。

²⁶ https://fits.gsfc.nasa.gov/fits_home.html

图 2.1 地图瓦片金字塔结构示意图²⁷

天文学家在浏览天图时并不需要一次获得全部的数据,因此天图在线可视化系统也普遍采用和互联网地图类似的瓦片金字塔方法,对海量巡天数据进行分层可视化。这些系统使用分层可视化技术,把数量庞大的巡天图像拼接生成的数据量极大的天图进行瓦片切分并分层保存,然后在浏览器端分层显示。如图 2.2 所示,显示了不同缩放级别的图像在内容方面相同但分辨率不同。缩放级别越高,图像的分辨率就越高。在每个缩放级别,图像被分成许多小瓦片,每片尺寸为 256×256 像素。天图瓦片金字塔的每层分别对应某个视场大小的瓦片集合,每层的每个瓦片大小都是一样的,最底层的天图视场最小,最顶层的天图视场最大。从最顶层瓦片开始,浏览器窗口显示的天区逐渐变小,天体的细节逐渐丰富。

图 2.2 具有 4 级分辨率的天图瓦片多分辨率金字塔示例^[16]

Google Sky、Aladin Lite、WorldWide Telescope 等现今流行的可视化工具都可以对巡天数据进行即时平移和缩放操作,使得天图得以交互。这些系统都采

²⁷ <https://blog.csdn.net/supermapsupport/article/details/80350506>

用分层可视化技术,目的是以尽可能快的速度显示使用者感兴趣区域的天空瓦片。这些系统有着共同的目标,但对于瓦片使用的索引不同。数据大小、天空投影、数据结构和客户端显示性能是这些系统必须要处理四个问题,核心是划分天空的方法。这个问题将影响数据结构(特别是这些可视化系统所需的天空索引)、客户端的显示性能。图 2.3 为当前主流的三种划分天空的方法,Google Sky 采用互联网地图使用的圆柱形方法,将天图切成正方形瓦片;微软开发的 WWT 使用 HTM²⁸ 方案——将天图切分为三角形瓦片;Aladin 选择将天图切分为菱形,使用的是 HEALPix²⁹ 技术。

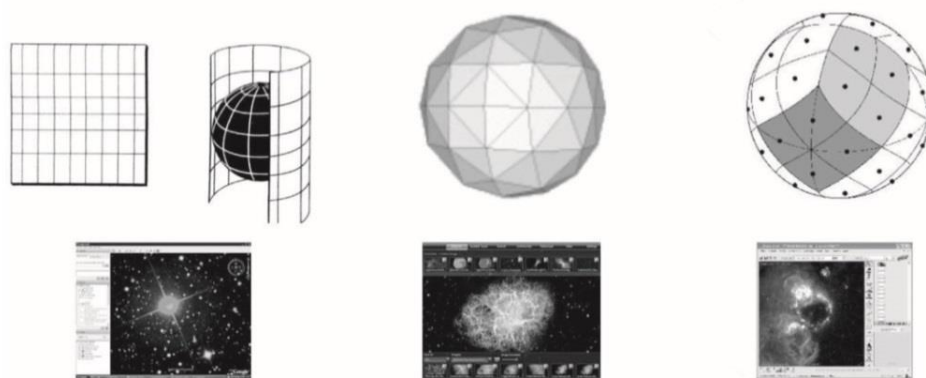


图 2.3 不同的瓦片切分方法,从左至右为:正方形、三角形、菱形^[22]

基于不同的瓦片切分方法,各天文数据中心发展了几种分层可视化技术。基于球面的矩形切分方法在地图可视化系统中广泛应用,本文主要研究在天文领域应用较多的两种技术。

2.2 HiPS

2.2.1 HiPS 简介及原理

CDS 为了可视化巡天数据开发了 HiPS³⁰ 技术。图 2.4 显示了自 2009 年以来关于 HiPS 的讨论以及相关软件开发的时间轴线。经过众多科学家多年的努力,HiPS 被列为国际虚拟天文台联盟标准。HiPS (Hierarchical Progressive Surveys) 是用于描述、存储和访问巡天数据的分层可视化方案,目的是使客户端或浏览器

²⁸ <http://www.skyserver.org/htm/>

²⁹ <https://healpix.sourceforge.io/>

³⁰ <https://aladin.u-strasbg.fr/hips/>

工具能够根据“您在特定天区缩放会显示更多细节”的原则逐步访问和显示巡天数据，并以交互的方式轻松地使用巡天数据。HiPS 依赖于一些 VO 标准，特别是 MOC、IVOA 标识符、资源元数据、VOTable 和 ObsCoreDM 等。HiPS 也基于一些非 IVOA 标准，尤其是 FITS 和 HEALPix，以及 PNG 和 JPEG 图像格式。2015 年，Fernique 等人描述了 HiPS 的完整背景和动机^[23]。

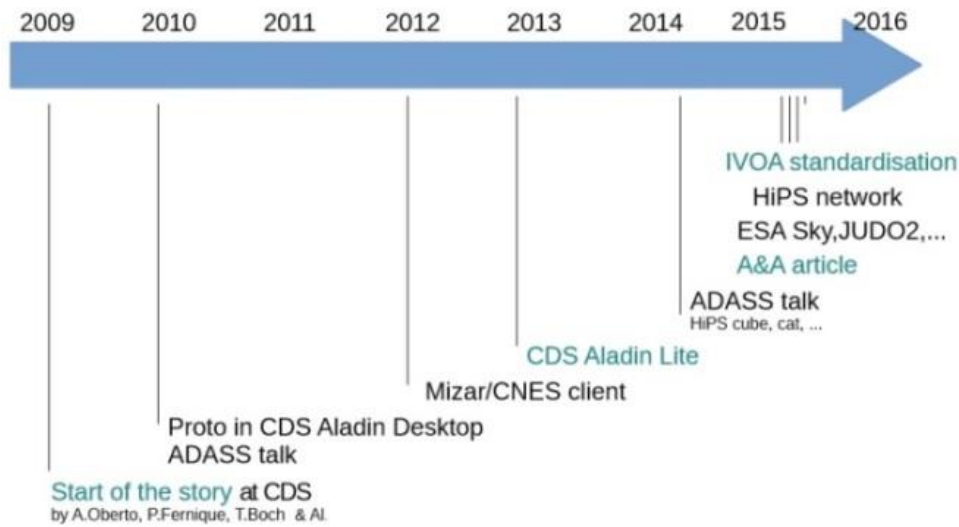


图 2.4 HiPS 技术的发展历程

当前使用 HiPS 技术公布的巡天数据系统数量不断增加，已经由几个天文数据中心（CDS、CADE / IRAP、ROE、SSC / XMM-Newton、IAS、CAsDC（中国天文数据中心）等）公布了 550 多个 HiPS 巡天。这些 HiPS 巡天包括 SDSS、DSS、2MASS、Galex、Planck、HST、XMM、Spitzer、UltraVista 等等。可以在 CDS 网站访问公开的 HiPS 分类列表（包括 HiPS 天空地图、HiPS 行星地图、HiPS 立方体、HiPS 星表）以及公开的 HiPS 服务器列表³¹。此外，小团队或个人也可以使用自己的数据集来创建自己的 HiPS，并不限于大数据中心。图 2.5 为 CDS 网站的 HiPS HTTP 服务器列表截图。

³¹ <https://aladin.u-strasbg.fr/hips/list>

HiPS servers (list of HiPS HTTP servers - required a VO registration)

<http://aladin.unistra.fr/hips/registry>

#	Origin	Type	HiPS list URL
1	wfau.roe.ac.uk	image, catalog	http://surveys.roe.ac.uk/hips71/hipslist
2	CASDA	image	https://casda.csiro.au/hips/hipslist
3	PADC	image	http://voparis-srv-paris.obspm.fr/vo/planeto/hips/perf_hipslist.pl
4	IPAC	image	http://irsa.ipac.caltech.edu/data/hips/list
5	ANU	image	http://skymapper.anu.edu.au/_hips/hipslist.txt
6	Leiden	image, catalog	http://tgsadr.stw.leidenuniv.nl/hips_list
7	IRAP	image	http://cade.irap.omp.eu/documents/Ancillary/4Aladin/hipslist-IRAP.txt
8	SSC	image	http://saada.unistra.fr/cgi-bin/hipslist
9	CDS	image, cube	http://alasky.unistra.fr/hipslist
10	CDS	image, cube	http://alaskybis.unistra.fr/hipslist
11	CDS	image, cube	https://alaskybis.unistra.fr/hipslist
12	CDS	catalog	http://axel.u-strasbg.fr/HIPSCatService/hipslist
13	AMIGA		http://amiga.iaa.es/hipslist
14	svo.cab	image	http://gtc.sdc.cab.inta-csic.es/hips/hipslist
15	IAS	image	http://healpix.ias.u-psud.fr/hipslist
16	ESAC	image	http://skies.esac.esa.int/hipslist
17	JAXA	image, catalog	http://darts.isas.jaxa.jp/pub/judo2/HIPS/hipslist.txt
18	CADC	image	http://hips.canfar.net/hipslist.txt
19	CADC	image	http://hips2.canfar.net/hipslist.txt
20	HEASARC	image	https://skyview.gsfc.nasa.gov/hips/skyview.hips
21	China-VO	image	http://hips.china-vo.org/hipslist

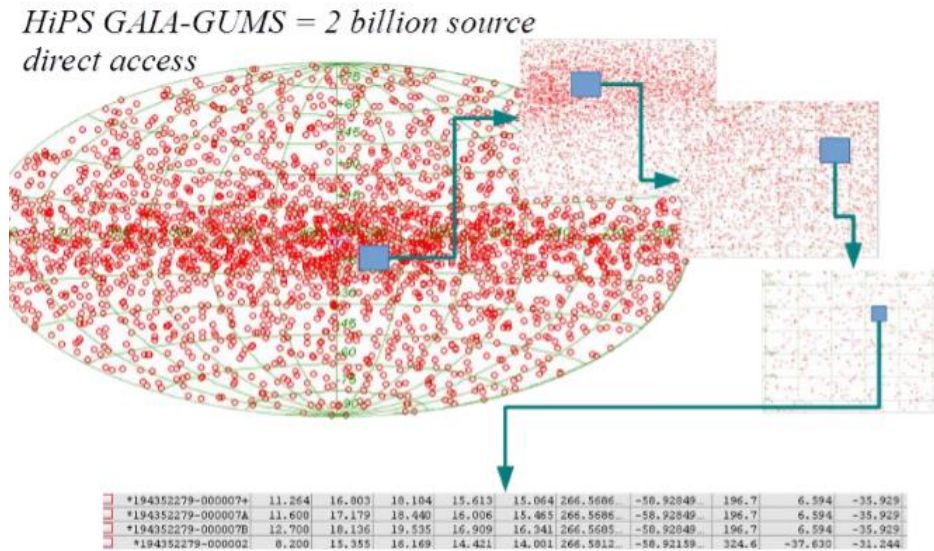
图 2.5 HiPS HTTP 服务器列表

HiPS 最常见的用法是大型天文数据的可视化^[24]。HiPS 允许用户浏览“大数据”：使用通过互联网访问数据的 HiPS 客户端，平移并缩放巡天数据的每个区域。只有当前用户视图所需的部分数据会从服务器传输到客户端。这种远程可视化技术使得能够从广泛的视场探索大型图像数据集，并以用于巡天图像的最佳空间分辨率进行缩放，如图 2.6 所示。

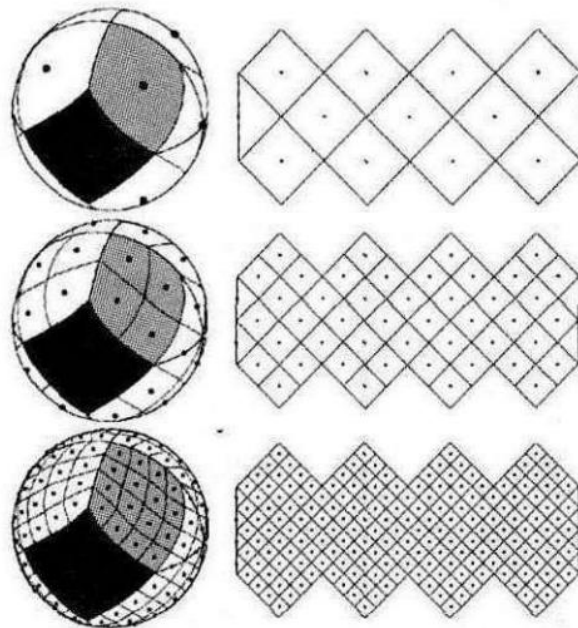


图 2.6 HiPS 对图像进行分层可视化

这种可视化技术不仅限于图像巡天，还可以用于其他数据类型：源星表、像素立方体等。HiPS 方案可用于描述源星表的多分辨率视图、选择不同参数。例如，我们可以显示更加明亮或更暗淡的源，因为它们可以放大到更高的地图顺序。因此，HiPS 目录可以提供星表的分层视图，其中层次结构可以基于每个星表的所选定量属性。图 2.7 显示了 HiPS 应用于星表数据的可视化。

图 2.7 HiPS 对星表进行分层可视化^[24]

HiPS 由 HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelisation) 发展而来, 是基于菱形的逐层划分方法。2004 年, Górski 等人描述了 HEALPix 详细的几何形状和特性^[25]。HiPS 基于 HEALPix 有几个主要原因, 包括具有等面积属性、可用库的准确性和性能、不依赖于层次级别的快速和恒定的计算时间以及在多个巡天任务中广泛使用等。图 2.8 为 HEALPix 空间和平面瓦片分布示意图。首先将天球分为 12 等分的菱形瓦片, 然后将每个菱形瓦片继续递归地四等分。最终天球被划分为 12×4^n 个瓦片, 每一层的瓦片均为 512×512 像素大小的图片。

图 2.8 HEALPix 空间和平面瓦片分布^[26]

HiPS 本质上是各种空间分辨率的巡天数据映射到存储在基本文件系统内的 HiPS 瓦片集合。通过 HEALPix 层级及其 HEALPix 单元索引可以完全标识 HiPS 瓦片。图 2.9 为 HiPS 基于 HEALPix 的多分辨率瓦片结构示意图。

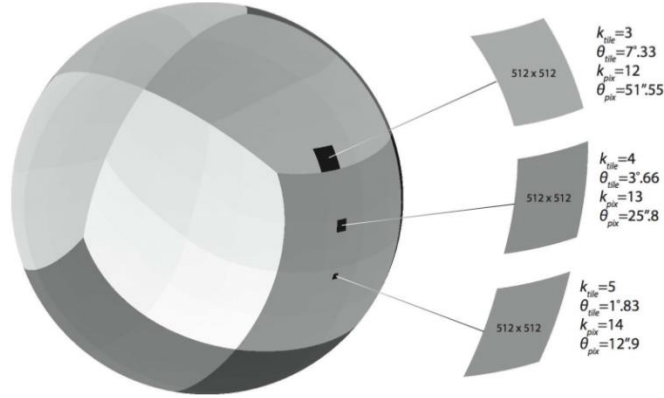


图 2.9 基于 HEALPix 的 HiPS 多分辨率瓦片结构^[23]

HiPS 采用文件夹的方法管理瓦片数据，将其存储在对应层的文件夹中。使用简单的文件和目录（而不是数据库）可以通过将文件移动到 HTTP 服务器来发布 HiPS 数据集。使用这种方法非常有用因为可以很容易地执行，并且与天文学家和数据中心站点的需求很好地匹配。天文学家可以创建、测试和发布 HiPS，而不需要专业的数据库知识，数据中心可以以最小的投资或风险测试和评估 HiPS 的使用。HiPS 文件夹的前缀为“Norder”，代表层（Order），文件夹内为瓦片，瓦片索引的前缀为“Npix”。随着切分层级的加大，文件夹内的瓦片数量会很多，此时需要使用前缀为“Dir”的子文件夹将每 10000 个瓦片分为一组。当使用者通过浏览器查看感兴趣天区时，将从服务器传输该天区的瓦片到客户端，这样可以按需加载数据。图 2.10 显示了基于文件夹的 HiPS 体系结构。

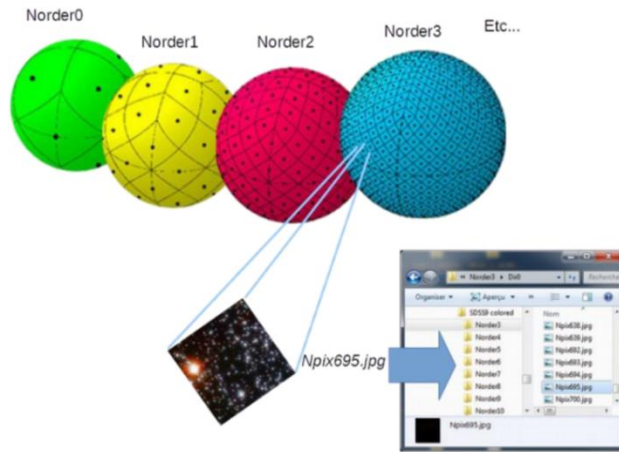


图 2.10 基于目录和文件的 HiPS 体系结构^[24]

2.2.2 HiPS 瓦片生成

海量巡天数据在线可视化需要进行数据生成工作，即图像拼接与瓦片切分。由于望远镜视场通常较小，巡天工作往往会获得上万张图像数据，需要将这些具有重叠区域的图像拼接成一张大图。拼接完成后还需要根据选定的瓦片金字塔将其切分为多层瓦片集。

Aladin Desktop 和 Hipsgen.jar 是生成图像 HiPS 的两种主要工具。使用 Aladin Desktop³²生成图像 HiPS 非常简单，只需点击 HiPS 对话框进行简单几步操作，即可生成符合自己需求的 HiPS。为了便于传播和应用，Hipsgen.jar³³内置于 Aladin Desktop，并可作为命令程序使用，默认代码为：

```
java -Xmx16g -jar AladinBeta.jar -hipsgen maxthread=20 in= OneImage.fits34
```

由于巡天图像数据量极大，因此这个创建过程会很长并且非常消耗 RAM 和 CPU。可以通过 java -XmxNNg 参数调整 RAM，通过 maxthread Hipsgen 参数调整线程数。

Hipsgen-cat.jar³⁵是生成星表 HiPS 的主要工具。只需一行代码便可以将 FITS、VOTable 或 CSV 格式的星表生成 HiPS。默认参数的代码为：

```
java -jar Hipsgen-cat.jar -cat <catalogue-name> -in <table input file> -ra <name or index of right ascension field> -dec <name or index or declination field> -out <output directory> -score <field name or formula used to sort sources according to their pertinence>
```

还有更多参数可以选择³⁶。如果星表中有需要修改的值，还可以在命令行中编写脚本进行操作。只需将脚本写在-score 之后即可，如：

```
java -jar Hipsgen-cat.jar -cat tycho2 -in tycho2.csv -ra RAmddeg -dec DEmddeg -score "((Double.isNaN(BTmag)?0:BTmag)+(Double.isNaN(VTmag)?0:VTmag))/((Double.isNaN(BTmag)?0:1)+(Double.isNaN(VTmag)?0:1))" -lm 9。
```

Aladin Desktop、Hipsgen.jar、Hipsgen-cat.jar 等工具使用简单，可以快速地生成图像、星表 HiPS。这些工具节省了开发人员的时间，可以方便地构建海量巡天数据在线可视化系统。

³² <https://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl?frame=downloading>

³³ <http://aladin.u-strasbg.fr/java/Hipsgen.jar>

³⁴ <https://aladin.u-strasbg.fr/hips/HipsIn10Steps.gml>

³⁵ <http://aladin.u-strasbg.fr/hips/Hipsgen-cat.jar>

³⁶ <http://aladin.u-strasbg.fr/hips/HipsCat.gml#man>

2.2.3 HiPS 文件在线展示

生成 HiPS 瓦片文件之后需要将其发布出去，也就是进行在线展示，Aladin Lite 可以轻松完成这一工作。它是一款简化的用于 Web 浏览器的 HiPS 在线可视化工具，只需复制并粘贴一小段网页代码即可³⁷。另外还可以通过开发其他天文软件的 HiPS 接口将其发布，如天文爱好者经常使用的 Stellarium 软件在 2018 年 3 月发布的 0.18.0 版本中增加了对于 HiPS 的支持³⁸，中国虚拟天文台的许允飞等人也测试在 WWT 中提供 HiPS 显示接口。图 2.11 为 Stellarium 软件截图，背景图为 DSS colored 巡天图像。

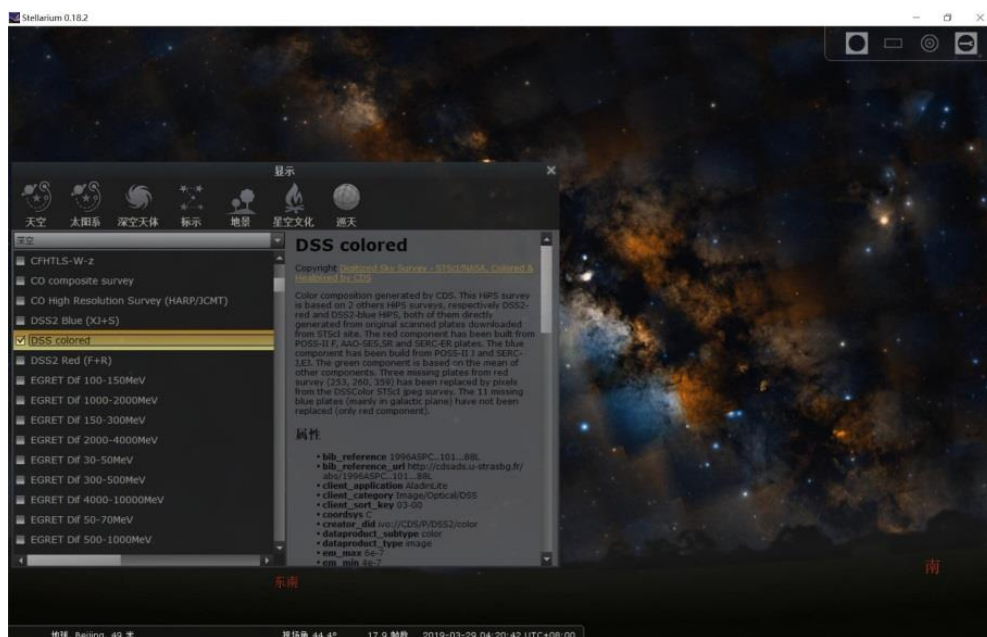


图 2.11 Stellarium 支持 HiPS 巡天数据

2.2.4 HiPS 可视化构建

本小节通过在本机上使用 HiPS 工具对小规模数据进行测试，熟悉如何对巡天数据进行 HiPS 瓦片切分工作。本机配置为 win10 系统、4GB 内存、64 位操作系统。

测试图像为国家天文台主持的南银冠 U 波段巡天项目（South Galactic Cap U-band Sky Survey, SCUSS）³⁹数据，来自中国虚拟天文台⁴⁰网站。该图像数据每张大小为 270MB，任意下载了相邻的 5 张，并将其放在 Data 文件夹下。在命令行中使用如下命令：

³⁷ <http://aladin.unistra.fr/AladinLite/doc/#embedding>

³⁸ <http://stellarium.org/release/2018/03/25/stellarium-0.18.0.html>

³⁹ <http://batc.bao.ac.cn/Uband/>

⁴⁰ <http://casdc.china-vo.org/archive/SCUSS/dr/images/big/>


```
java -Xmx16g -jar AladinBeta.jar -hipsgen maxthread=20 in=Data out=HiPS
creator_did=NAOC hips_order=12
```

对 Data 文件夹下的 5 张图片进行 12 层 HiPS 瓦片切分。该行代码中, `-Xmx16g` 和 `maxthread=20` 参数用来调节 RAM 和线程, `hips_order=12` 和 `creator_did=NAOC` 用来设置切分瓦片为 12 层以及标识瓦片创建者的身份。该过程结束后将生成该图像的 HiPS 文件夹, 可以双击里面的 `index.html` 文件在浏览器中进行本地查看, 也可以打开 Aladin Desktop 将整个文件夹拖入显示, 如图 2.12 所示。该工作也可在 Aladin Desktop 中的 HiPS 对话框或 Linux 环境下进行。

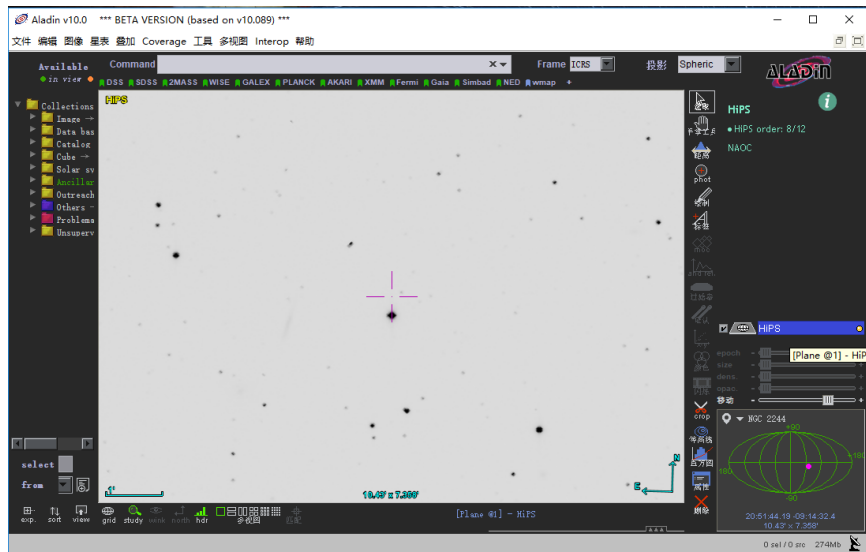


图 2.12 在 Aladin Desktop 中查看生成的 HiPS 图像

测试星表为喜帕恰斯主星表 (The Hipparcos Main Catalogue), Vizier⁴¹中表的名字为 `I/239/hip_main`, 共有 11.8 万行, 数据大小为 13MB。在命令行中使用如下命令:

```
java -jar Hipsgen-cat.jar -cat I_239_main -in I_239_hip_main.csv -ra _RAJ2000 -dec
_DEJ2000 -score Vmag -desc -lm 5
```

对该星表基于 V 星等进行 5 层 HiPS 瓦片切分。如果要基于其它特征, 可以更改 `-score` 后的参数, 如改成 `Plx` (视差)。该过程结束后将生成该星表 HiPS 文件夹, 可以双击里面的 `index.html` 文件查看, 也可以打开 Aladin Desktop 将整个文件夹拖入显示。如图 2.13 所示, 红色的方框为可视化的星表中的一行数据, 点击后可以在下方看到该行的详细信息。

⁴¹ http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=I/239/hip_main

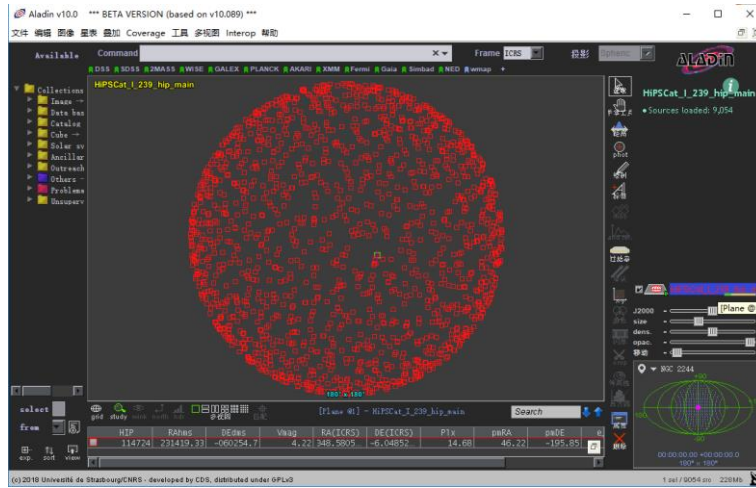


图 2.13 在 Aladin Desktop 中查看生成的 HiPS 星表

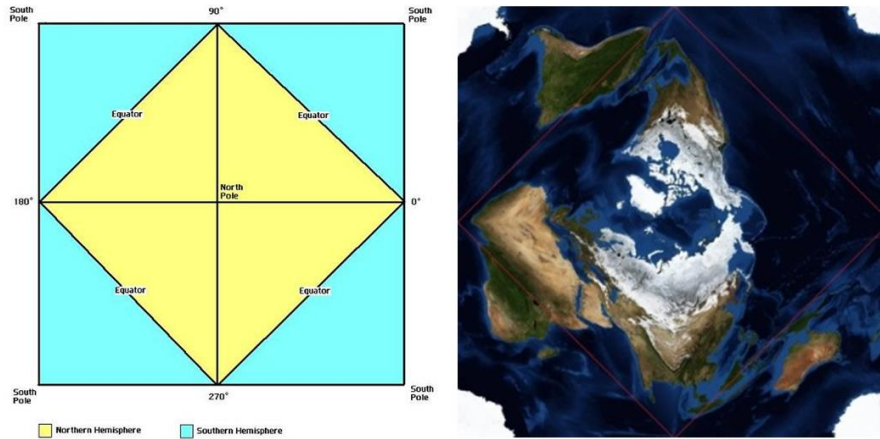
2.3 TOAST

2.3.1 TOAST 简介及原理

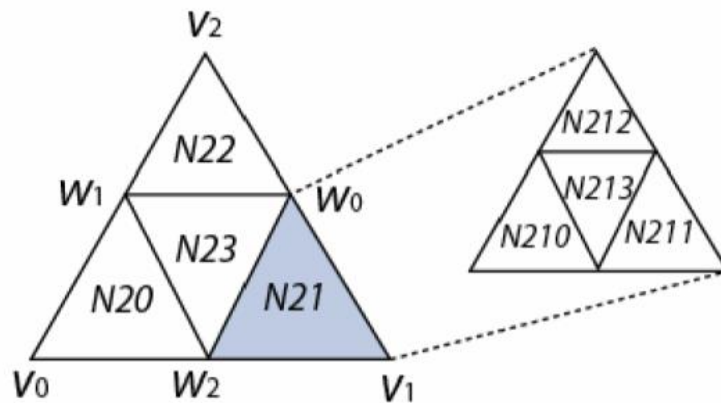
TOAST (Tessellated Octahedral Adaptive Subdivision Transform) 是另一种常用的分层可视化技术，主要在万维望远镜软件中使用。TOAST 由 HTM (Heirarchical Triangular Mesh, HTM) 技术发展而来，是基于三角形的逐层划分方法。HTM 是天文学家在斯隆数字化巡天计划中提出的一种球面表示方法，也是另一种天文中常用的球面索引方法。2012 年，Szalay 等人描述了 HTM 的几何形状和特性^[27]。图 2.14 显示了 HTM 天球网格划分的前三个层次。即使仅仅经过三次迭代，多面体也接近于一个球体。它首先将球体建模为正八面体，然后递归地细分每个三角形面，直到球体被高度网格化的多面体近似为止。

图 2.14 HTM 天球网格划分示意图^[27]

万维望远镜扩展了 HTM 的概念，将细分的八面体平折成正方形^[28]。如果把八面体折平，北极在中心，南极在四个角的每一个角，赤道则在正方形内形成一颗钻石。图 2.15 显示了矩形的地图是如何转换为 TOAST 的。

图 2.15 基于 HTM 的 TOAST 投影⁴²

HTM 迭代地将三角形切分为四个小三角形，下一层瓦片的顶点是上一层每边的中点。HTM 瓦片的命名是将瓦片的数字与上一级瓦片的名称联系起来，因此名字的长短也体现了该瓦片本身的层级。图 2.16 显示了 HTM 瓦片是如何进行命名的。

图 2.16 HTM 瓦片命名示例^[27]

万维望远镜使用 TOAST 分层可视化技术将全天数据进行显示，每个 TOAST 像素是一对 HTM 三角形。TOAST 的文件组织方式为：WWT 导入的所有 TOAST 数据都是 256x256 像素的瓦片，这些 TOAST 瓦片被存储为一个图像金字塔。第 0 层是 256x256 的单个瓦片，而默认的最深层级第七层则有 16384 个瓦片。

⁴² <http://www.worldwidetelescope.org/docs/worldwidetelescopeprojectionreference.html#TOASTProjection>

2.3.2 TOAST 瓦片生成

WWT SDK 和 Montage 是生成 TOAST 瓦片的两种主要工具。WWT SDK 是万维望远镜的官方 TOAST 分层分割工具，但目前不能对巡天图像进行拼接。该工具可在万维望远镜官方网页中下载⁴³。WWT SDK 的安装非常简单，成功后运行 `SphereToaster.exe`，在打开面板里的各选项卡下进行输入、输出、图像类型、金字塔层数等几步操作⁴⁴即可创建 TOAST 瓦片，如图 2.17 所示。生成的 TOAST 瓦片文件夹包括以下内容：充满瓦片的文件夹、在浏览器端使用的 WTML 文件、在本地使用的 WTML 文件、缩略图。

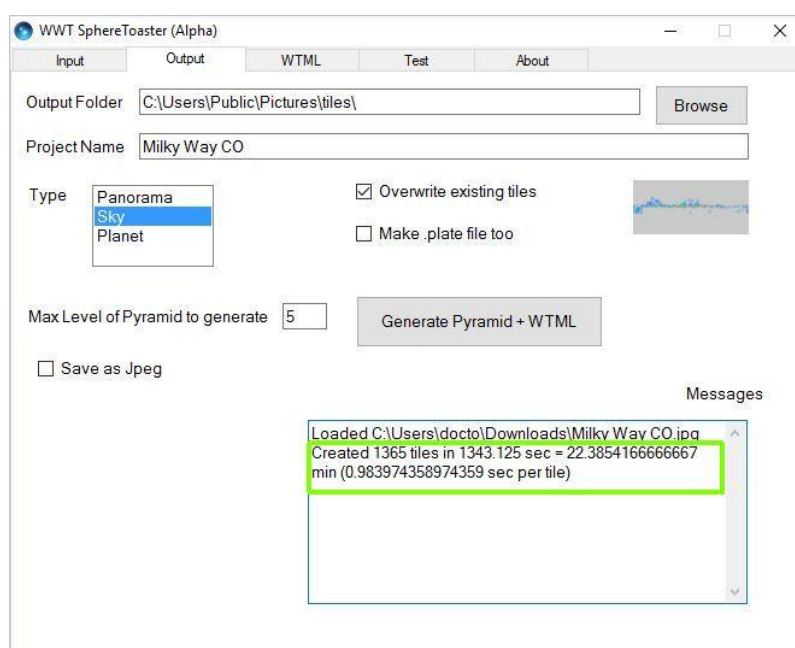


图 2.17 使用 WWT SDK 切分巡天数据

Montage⁴⁵ 是根据用户指定尺寸、旋转、符合 WCS 的投影和坐标系统生成天文图像马赛克的软件系统，具有背景建模和校正功能^[29]。2003 年 Berriman 等人描述了其架构^[30]。Montage 被设计为一个工具包，具有独立的图像重投影，背景矫正和共添加模块，并且可以在工作站、集群和网络上运行。该代码可以免费使用，在天文界的研究工作广泛使用^[32]。Montage 有很多优点，比如准确性、可移植性、可扩展性、通用性、灵活性等。可以通过在命令行中按顺序运行进程来进行图像拼接，也可以在脚本中自动执行。下载并解压 Montage 后，进入 Montage 文件夹，执行 `make` 命令。该命令将构建所有的库和可执行文件，构建所需时间

⁴³ <http://wwtweb.blob.core.windows.net/drops/WWTSDK.msi>.

⁴⁴ <http://worldwidetelescope.org/Learn/Exploring#processingallskyimages>

⁴⁵ <http://montage.ipac.caltech.edu>

较长。如果在命令行中按顺序运行进程来拼接图像，则步骤较多，主要包括生成瓦片头文件、生成 FITS 图像、生成 PNG 图像、生成全天缩放图像等⁴⁶。Montage 6.0 版本还提供了 Python 扩展，可以在 Python 环境中进行拼接和切分工作。

2.3.3 TOAST 文件在线展示

将 WWT SDK 或者 Montage 生成的 TOAST 文件进行在线展示都很容易。如果是使用 WWT SDK 生成 TOAST 瓦片文件夹，会有两个 WTML 文件，一个可以在通过启动万维望远镜，然后双击本地版本的 WTML 文件来查看生成的全天图像。另一个 WTML 文件是指向 Web 服务器上的数据。创建图像金字塔之后，可以将其移动到 Web 服务器，然后使用该 WTML 文件来访问 Web 上的数据。如果将数据移动到不同的 Web 服务器，则需要更改 WTML 文件中的 url 标记中的服务器地址。

如果通过 Montage 生成 TOAST 瓦片文件夹，需要将数据放在可访问的 url 位置，并且创建一个 xml 文件。完成以上工作后，在网页中打开 WWT 软件并依次点击 Explore/Open/Collection，然后输入 xml 文件的 url，就可以在线加载该巡天数据。

2.3.4 TOAST 可视化构建

本小节主要介绍使用 Montage 进行图片拼接和 TOAST 瓦片切分工作。测试数据为 10 张 2MASS 的 J 波段原始图像⁴⁷，在命令行中按顺序运行进程来进行图像拼接与切分工作。首先进行拼接工作，通过 mImgtbl、mProjExec、mAdd 等模块创建一个没有任何背景校正的图像，对该图像使用 mOverlaps、mDiffExec、mFitExec、mBgModel、mBgExec 等模块纠正图像中的差异，获得一张用于可视化的拼接图像。然后使用 mHdrWWTExec、mProjWWTExec、mHistogram、mPNGWWTExec、mProjectQL 等模块依次进行生成瓦片头文件、FITS 图像、PNG 图像、全天图像的缩略图等工作，最后得到 TOAST 瓦片文件。

⁴⁶ <http://montage.ipac.caltech.edu/docs/WWT/>

⁴⁷ <http://montage.ipac.caltech.edu/docs/m101Example/tutorial-initial.tar.gz>

2.4 HiPS 和 TOAST 性能对比

HiPS 和 TOAST 是天文领域常用的两种分层可视化技术,有较多工具可以生成相应的瓦片金字塔文件。本小节对两种分层可视化技术的性能进行测试,主要关注其在拼接与切分环节所需时间及产生数据量。测试环境为 CentOS, 2GB 内存, 120GB 硬盘大小。数据来自 2MASS 网站⁴⁸, 以 M17 为中心天体, 下载其 1、2、3、4 平方度原始图像 (分别为 45、144、312、583 张图像)。使用 Hipsgen.jar 和 Montage 将 4 个数据集依次进行拼接并生成 HiPS 和 TOAST 瓦片, 结果如图 2.19 所示。结果显示 HiPS 的生成数据量远大于 TOAST, 这是由于在同一切分层级下 HiPS 生成瓦片数量较多。在耗时方面, 还可以通过调整线程和 RAM 来缩短所需时间。

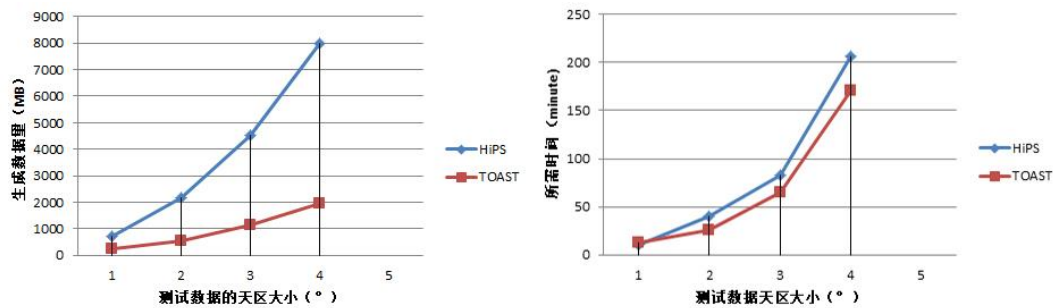


图 2.19 HiPS 和 TOAST 性能对比

2.5 小结

本章主要对 HiPS 和 TOAST 两种分层可视化的原理进行研究,基于 HEALPix 和 HTM 索引划分天区的方式与简单网格相比效率要高。熟悉巡天数据的在线可视化工作流程,使用小规模图像、星表数据对其瓦片切分工具以及在线展示工作进行测试。此外还对两种分层可视化技术在耗时与生成数据量方面进行了对比分析。研究发现,HiPS 和 TOAST 有很多优点适合对我国的巡天数据进行在线展示,比如两种分层可视化技术经过多年发展较为成熟、生成瓦片集的工具较多且成熟、在线展示比较简单、全球各大天文数据中心普遍使用等。

虽然分层可视化技术可以明显加快图像的显示速度,改善用户体验,但却有一个很严重的问题——数据量再次增加。不过在目前的条件下,以空间换时间是较明智之举,这也是计算机技术领域的基本策略。数据量增加的问题也得到了部分天文学家的关注,考虑使用 JPEG2000 来解决该问题。JPEG2000 有非常好的

⁴⁸ <https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/2MASS/IM/inventory.html>

压缩比^[35]，也可以逐层存储图像，适合用于在线可视化。但是 JPEG2000 目前在专利方面有较多限制，需要继续研究其他方法来解决数据量增加的问题。

在瓦片切分工具方面，目前已有一些工具可以使用，但是也存在一些问题，如拼接速度较慢或仅支持已经拼接好的图像的分层分割、切分耗时也较长等。本文作者在制作 BASS 巡天图像 HiPS 的过程中，发现 Hipsgen.jar 的性能达不到要求。当图像数量较多时，即使调整线程和 RAM，也需要一个多月才能完成拼接与切分工作。为了缩短全天图像拼接与切分所需时间，应考虑对其开源工具进行二次开发。

第3章 在线可视化系统及其应用

3.1 引言

天文学家与数据档案交互的传统方式是进入在线数据库,执行查询以确定想要的数据库,然后将数据下载到本地计算机。他们使用标准数据分析软件包或自己的脚本进一步分析数据,然后撰写科学论文。不同的档案通过使用基于仪器的高级查询参数和使用项目相关的术语,专注于特定任务的数据发现。探索和分析数据所需的工具对于观测仪器来说是复杂且具体的,这使得尝试进行多波段分析的科学家很难利用大量已有可用的档案数据。新的天文巡天项目也正在产生数百 GB 甚至 PB 的数据量以及各种波段、各个类型的数据。这需要新的模式来访问数据并与之进行交互^[36]。首先,查询庞大的数据库并将它们与其他星表进行交叉匹配可能需要比交互式查询会话期望的更长的时间,因此需要提供异步服务。其次,科学家无法将所有数据下载到自己的计算机上,因为这将花费很长时间,并且可能无法拥有足够的硬盘空间。通过望远镜获得的天文数据量的快速增长使得天文数据中心必须向其用户提供工具,以便有效地检索这些数据,从而最大限度地提高科学回报。

目前大多数主要的天文数据中心已经开发出功能强大的、可定制的数据档案接口,允许用户在从原始数据到科学数据的各种数据产品中进行非常具体的搜索。然而,这些接口通常在设计时考虑了专家用户,并且需要对任务、望远镜或仪器的特性有较多了解才能有效地利用可用数据集。因此,缺乏这种特定知识的使用者可能会避免使用这些数据来补充他们自己的研究,或者甚至不知道数据的存在及其对他们的潜在用处。另一方面,多波段研究在当前天体物理研究中日益重要使得有必要开发工具,以便于比较和检索多种数据及其他相关特征。虚拟天文台计划已经提供了工具和标准,可以快速有效地远程访问档案并比较不同资源的数据。但是,使用大多数 VO 工具需要先检索这些数据,然后再进行检查。

前端接口(包括图形用户界面和脚本接口)将决定天文学家等数据档案用户的体验是否友好。在 20 世纪 90 年代后期,丰富的图形用户界面无法用 HTML 构建,因此很多天文数据中心选择了 Java Applet 技术,该技术可以实现所有归档功能。之后,Java Applet 被 Java Web Start 应用程序所取代,但 Java 支持在

各种互联网浏览器中变得越来越受到限制，而 Web 技术则变得越来越先进。从 20 世纪后期开始，众多天文数据中心开始逐步将其图形用户界面从 Java 客户端应用程序迁移到基于 Web 的应用程序。这样的转变使得数据加载速度快了很多，也不需要进行任何 Java 安装，并且可以在任何浏览器中运行。这样的可视化工具有很多优点，比如可以轻松查询和检索多个科学档案中的数据，即使他们之前没有关于这些任务的知识；天文学家可以以无缝、用户友好的方式比较来自不同任务的数据集；天文学家可以以可视化的方式选择和下载他们感兴趣的科学产品。图 3.1 以 ESAC 数据档案图形用户界面的演变为例，说明了当前各数据中心进行海量天文数据在线可视化系统的原因。



图 3.1 ESAC 数据档案图形用户界面的演变

各天文数据中心不满足于仅仅将海量巡天数据进行简单的在线展示，更加注重通过 HTML5、JavaScript 等前端技术将天图在线可视化系统开发得更加简洁美观、简单方便以及功能强大。本章主要研究当前主流的几款天图在线可视化，包括页面特点、交互功能等，为我国的天图在线可视化系统开发提供参考。

3.2 主流在线可视化系统

世界上各大天文数据中心基于成熟的分层可视化技术及先进的前端技术开发了很多天图在线可视化系统，主要包括基于 HiPS 的 Aladin 及其相关系统、基于 TOAST 的万维望远镜、基于地图 GIS 工具的 Google Sky 等系统。

3.2.1 Aladin

Aladin 的第一个版本于 1999 年发布, 作为基本的 FITS 图像显示器, 能够叠加星表数据。它经过了几次重大的改进, 包括搜索和访问虚拟天文台服务(2003)、多视图模式(2005)以及通过 SAMP (Simple Application Messaging Protocol) 协议^[49]与其他桌面工具(2008)的互操作。Aladin 版本 7 是另一个重要的里程碑, 这个版本允许访问全天候数据, 实现无缝全天浏览。Aladin 强调的是为天文学家提供一个灵活的工具, 使他们能够轻松浏览其感兴趣的全天模式数据集。在 CDS 开发了 10 多年后, Aladin 从简单的天空图集演变成为一个丰富而强大的门户, 可以访问、可视化和操作图像和星表数据^[37]。Aladin 广泛应用于虚拟天文台社区及其以外领域。Aladin 桌面 java 应用程序 (Aladin Desktop) 是一个功能齐全的应用程序, 已被用作 HiPS 的主要展示平台。Aladin 提供 HiPS 的所有巡天数据可视化功能, 比如支持同步缩放和平移天空地图、透明度叠加以及与其他在线天文学服务的互操作性等^[39]。

Aladin Lite 是 Aladin Desktop 的一个轻量级版本, 运行在浏览器中。Aladin Lite 由 HTML5 canvas 技术支持, 目前任何现代浏览器都支持该技术^[40]。Aladin Lite 很容易嵌入到任何 Web 页面, 也可以通过 Javascript API 根据不同的需要进行自定义。Aladin Lite 对于实施 HiPS 非常重要^[41]。Aladin Lite 已集成在主要的 CDS 服务中, 比如在单个天体目标的 SIMBAD 页面上, 它提供了一个交互式预览图像⁵⁰; VizieR 结果页面有一个 “start Aladin Lite” 按钮, 用于可视化列出源的位置⁵¹。由于 Aladin Lite 代码开源⁵², 在 CDS 之外也使用非常广泛。这些使用主要可以分为两种。一种是基于 Aladin Lite 进行二次开发, 将其打造成本数据中心功能强大的天图在线可视化系统, 比如 ESO 档案科学门户⁵³、ALMA 科学档案⁵⁴、ESAC 开发了 ESASky、日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 开发了 JUDO2⁵⁵。另一种是仅将 Aladin Lite 用于简单的数据展示, 以网页嵌入的形式来使用, 比如由 C. Deil 和 A. Voruganti 开发

⁴⁹ <http://ivoa.net/samp>

⁵⁰ <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=M1>

⁵¹ <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-4?-source=I/259/tyc2&-c=M45&-c.rm=30>

⁵² <https://aladin.u-strasbg.fr/AladinLite/api/v2/latest/AladinLiteSrc.tar.gz>

⁵³ <http://archive.eso.org/scienceportal/home>

⁵⁴ <https://almascience.nao.ac.jp/aq/>

⁵⁵ <http://darts.isas.jaxa.jp/astro/judo2/>

的 Gamma Sky⁵⁶是 γ 射线天空的门户、J. Richards 开发的 SETI⁵⁷使用 Aladin Lite 显示当前观察到的目标、ARCHES Walker⁵⁸是一个展示不同波段目标天体的扩展工具、使用 Aladin Lite 显示当前莫普拉射电望远镜（MOPRA Radio Telescope）指向和状态⁵⁹、ADS All-Sky Survey⁶⁰利用 Aladin Lite 来显示文献中引用的 SIMBAD 对象的热图、Gaia 档案可视化⁶¹使用 Aladin Lite 可视化展示其发布的第二批数据的彩色全天地图等等。图 3.2 为 Aladin Lite 以网页嵌入形式使用的几个示例，左图为 All-Sky Survey，中图为莫普拉射电望远镜，右图为 Gaia DR2。接下来主要介绍 Aladin Lite 和基于其开发的 ESASky 天图在线可视化系统。

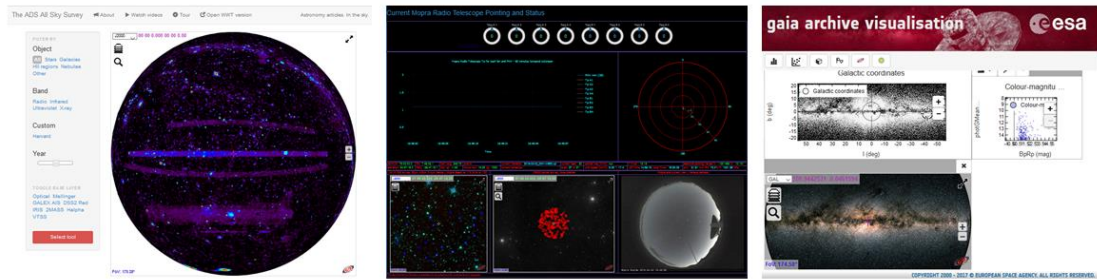


图 3.2 Aladin Lite 网页嵌入使用的几个示例

1. Aladin Lite

Aladin Lite 的页面十分简洁，分为左侧的搜索栏、巡天列表和右侧的天图探索区。在左侧的搜索框中输入感兴趣天体的编号，就可以进行快速定位，同时最下方的缩略图显示该天体在其他巡天项目中的图像。点击左侧的巡天列表，右侧的天图区将显示 Fermi、2MASS、IRAS 等巡天项目拍摄的该天体图像，方便对比同一天体在不同波段的信息。在右侧天图区，顶部左侧显示了当前天图使用的坐标系及中心天体的坐标。勾选左侧叠加层或右侧星表选项，可以以不同颜色和形状的小点显示 SIMBAD、Gaia TGAS 或 2MASS 巡天对该天体附近的那些点源或展源进行了观测。每个小点代表了星表中的一行数据，点击即可以弹出框的形式显示该天体的详细信息。如果对预设不满意，还可以点击星表的下拉箭头自行改变颜色、大小及形状，系统设计非常人性化。图 3.3 显示了 Aladin Lite 的界面和部分功能，底图是中心天体为火焰星云的 DSS 巡天图像，之上叠加了 2MASS

⁵⁶ <http://gamma-sky.net/#/map>

⁵⁷ <http://setiquest.info/>

⁵⁸ <http://saada.unistra.fr/ArchesWalker/>

⁵⁹ <http://hologhost.altervista.org/pointing/mopra.html>

⁶⁰ <http://www.adsass.org/aladin/>

⁶¹ <http://gea.esac.esa.int/archive/visualization/>

(红色十字图形)星表图层,左侧弹出框为随机选取的一个 2MASS 观测源的详细信息。

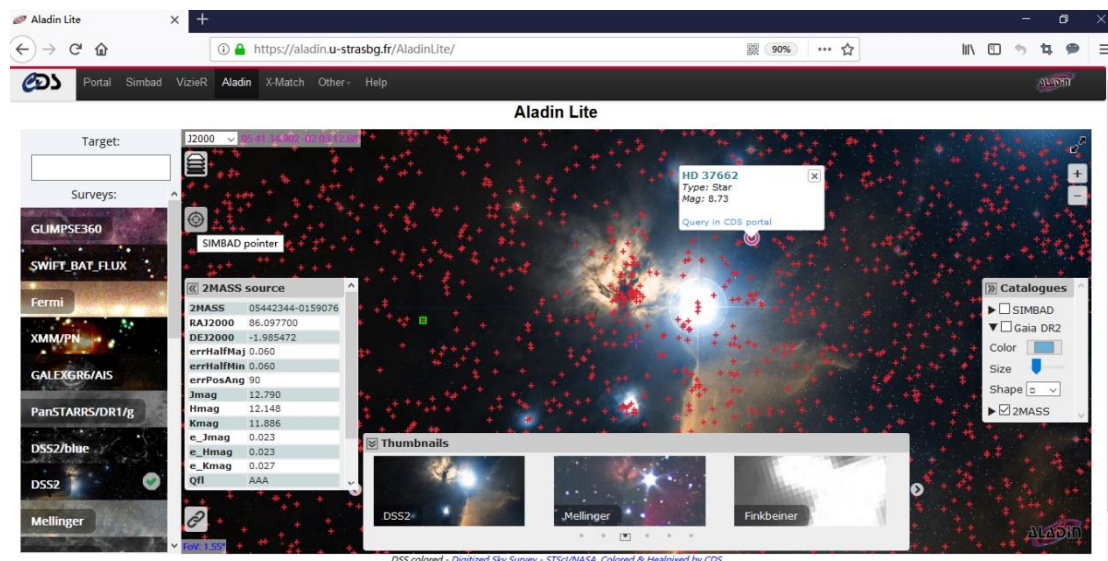


图 3.3 Aladin Lite 页面截图

此外, Aladin Lite 还进行了很多集成或者插件开发工作。比如 Ladislav Heller 已将 Aladin Lite 集成到使用 Xamarin 框架的 Android 应用程序中。ALiX、区域编辑器和漫游导航是 Aladin Lite 的三个主要插件。ALiX 是一个基于 Aladin Lite 的灵活星表门户。它被设计为使用交互式天图作为主要选择工具。ALiX 视图会随着主机数据库中查询的数据不断更新。它提供了高级功能,允许混合本地数据和 VO 数据。用户可以手工绘制感兴趣的区域,并管理视图的历史。ALiX 不依赖于任何特定的数据源;它可以集成到任何现有的门户中。区域编辑器允许用户当前星空视场上绘制多边形,并检索顶点的坐标。它被设计用来作为按区域或按中断服务进行搜索的接口。漫游导航允许轻松地实现感兴趣对象的虚拟漫游。它被设计用来作为在天空中从一个对象导航到另一个对象的接口,允许用户了解他们浏览的每一个天体。

2. ESASky

ESASky 基于 Aladin Lite 进行了持续的二次开发,目前版本为 ESASky3.1,相比之前版本搜索更加方便,功能更加强大^[42]。ESASky 页面也十分简洁,所有的功能按钮都放在了顶部区域。在底图展示方面,可以在 Select Sky 下根据波段进行选择,也可以在某个选定波段下选择不同的巡天任务生成的图像。ESASky 还可以显示当前视场天区内的星表、光谱等信息,以表格的形式展示在下方,表

格左侧还提供了定位、发送表格到虚拟天文台以及下载的功能。这一功能可以详细地知道该天区目标的各种数据，方便进行深入研究，大大方便了科研人员。Target List 选项提供了按照天体类别进行查看的方法，比如可以按照亮星云、球状星团、 γ 爆等类别选择其中的天体等。如图 3.4 所示，当前视场底图为 DSS 拍摄的心宿二和 M4 球状星团，不同颜色的叠加图形代表了当前区域钱德拉 X 射线天文台 (Chandra) 拍摄的图像、2MASS 的星表、ISO 的光谱数据，并以表格的形式在下方依次列出。ESASky 的数据服务功能相比 Aladin Lite 更加强大。

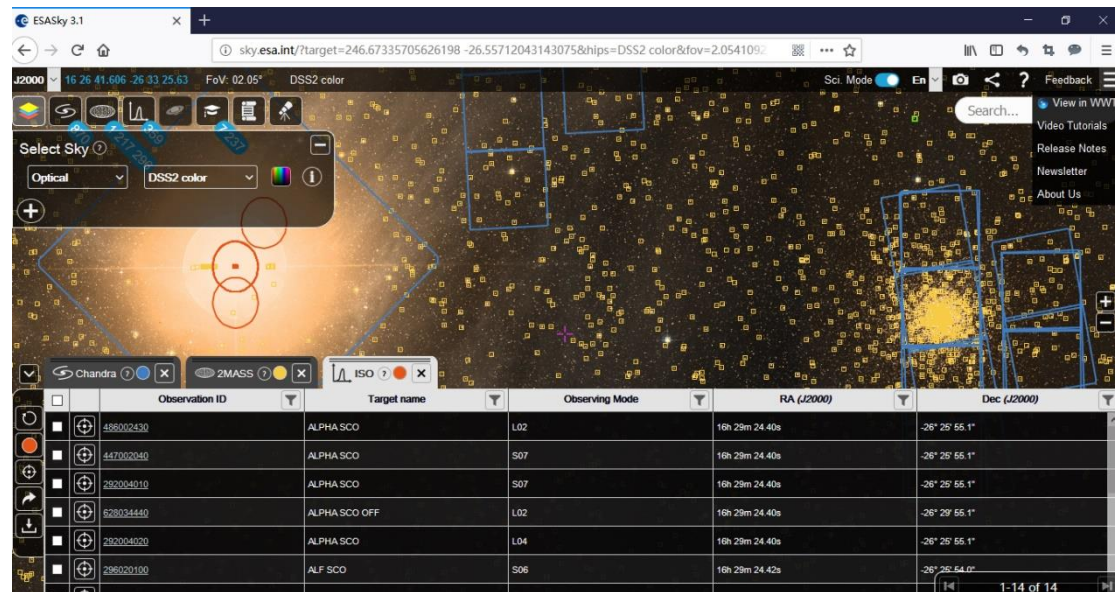


图 3.4 ESASky3.1 页面截图

最新的 3 版本相比之前的 2 版本进行较大改进，比如使用者可以选择使用科学研究模式或公众探索模式、提供了与 WWT 的链接使之可以跳转到 WWT 中查看相同视场的图像、使用者可以选择语言（目前仅支持英语和西班牙语）等。公众探索模式还提供了“Explore random target”功能，可以随机加载不同天体，并以弹出框的形式显示该天体的信息，点击链接还可以跳转到其他页面了解该天体的详细信息。ESASky 还有很多高级功能，比如论文出版物可视化、任务计划工具等。ESASky 已经实现了 ADS 的集成，可以显示与当前天体目标相关的出版物。任务计划工具允许用户将给定的仪器投射到天空中，并且不仅可以更改整个焦面组件 (Focal Plane Assembly, FPA) 的位置角和坐标，还可以更改其各个探测器的位置角和坐标。该工具目前可用于詹姆斯韦伯太空望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST)，并计划纳入其他欧空局任务。

3.2.2 WWT

微软亚洲研究院最初开发了 WWT，包括桌面版（WWT Desktop）和网页版（WWT Web Client），二者的界面和功能比较类似^[45]。2015 年 7 月，WWT 代码开源并且美国天文学会成为了所有者^[46]。China-VO 基于 WWT 源代码进行了深度开发工作，使之适合中国公众使用，并于 2018 年 2 月正式发布个人版万维望远镜。

WWT 相比 Aladin Lite 和 ESASky 更加酷炫，但页面却不够简洁，菜单栏和选择区占据了天图的不少空间。WWT 的信息层更为丰富，底图之上叠加了星座、各种天球坐标网格等图层，在中国虚拟天文台版的 WWT 中还可叠加中国星空图层。如图 3.5 所示，WWT 体现了强大的面向公众的知识探索功能，这是和 Aladin Lite 和 ESASky 明显的面向科研人员的数据服务功能不同的。

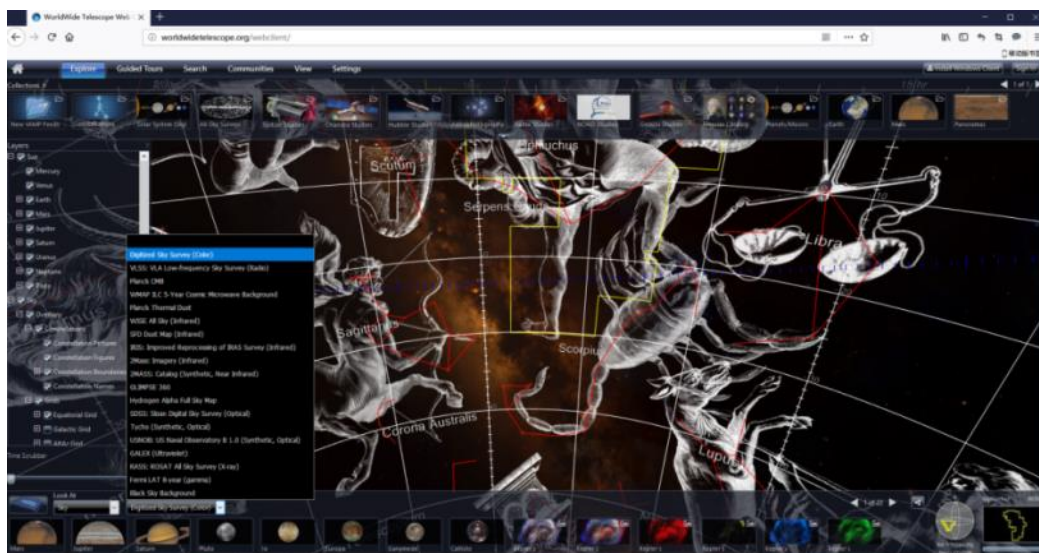


图 3.5 WWT 页面中的底图与信息层

与 Aladin Lite 和 ESASky 只有指向天空观察巡天数据不同，只需在 Look At 下更改观测指向，就可以通过全球数据来俯瞰火星、月球等天体，也可以通过全景数据“站”在月球、火星上看看周围的风光。向导漫游（Guided Tours）是 WWT 区别其他在线可视化系统的最大特色，该菜单下有很多“漫游”（Tour）可供使用者欣赏学习，也可以通过新建幻灯片制作一个漫游将自己的想法分享给朋友。WWT 还有其它一些特色功能，比如通过更改观测地点和时间，我们可以随时查看 2008 年发生在我国大西北的日全食、2012 年的世纪绝唱金星凌日。

WWT 不仅是电脑桌面上一座虚拟天文台,也是一个内容极其丰富的知识宝库和共享工具。图 3.6 为 WWT 中展示嫦娥四号登陆地点的全景图。

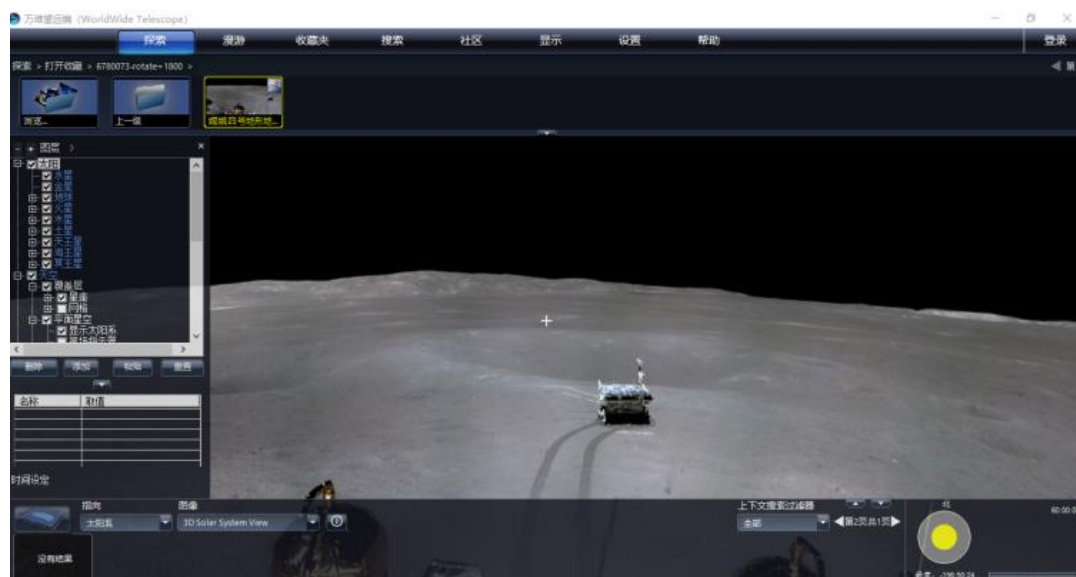


图 3.6 WWT 中展示的嫦娥四号登陆地点全景图

3.2.3 Google Sky

Google Sky 是 2008 年 3 月 13 日发布的一项基于浏览器的应用程序,由谷歌与空间望远镜研究所 (Space Telescope Science Institute, STScI) 合作开发^[47]。Google Sky 不止可以分别显示不同波段的星空,还具有同时显示多个波段图像的功能^[48]。如图 3.7 所示,只需调整滑块位置即可同时观看 M81 在光学和红外波段的图像。Google Sky 的信息层相比 WWT 略显单一,比如星座图层只有黄道十三星座,不能显示赤道、黄道等坐标网格。历史星座图层是 Google Sky 的一个特色,该信息层由 David Rumsey 历史地图集中的历史地图创建,为使用者提供一个了解古代星座的入口。Google Sky 最大的优势在于它整合、显示和分享用户生成的数据(图像、星表、时间变化数据、天空漫游以及课程计划)的能力。具有这样能力的原因是其使用 KML (Keyhole Markup Language) 标记语言。由于 KML 完全独立于平台,因此数据共享非常简单。



图 3.7 Google Sky 中调整滑块同时观看不同波段图像

WikiSky 和 Google Sky 同样采用 Mercator 投影，基于球面矩形对巡天数据进行逐层划分，也主要用于天文科普，拥有丰富的科普功能。WikiSky 也被称为 Sky-Map，是一个互动、免费、非商业性的网站。该网站加载速度快，使用图形界面导航相当直观。WikiSky 的底图数据来源相对较少，并且只进行巡天数据展示，如图 3.8 所示。WikiSky 相比其他可视化系统最大的特点是具有社区功能，允许使用者通过公开聊天或通过论坛发帖进行交互，为网站做出自己的贡献。使用者还可以通过添加 Internet 链接、编写文章、上传图像来编辑关于不同星星的信息。

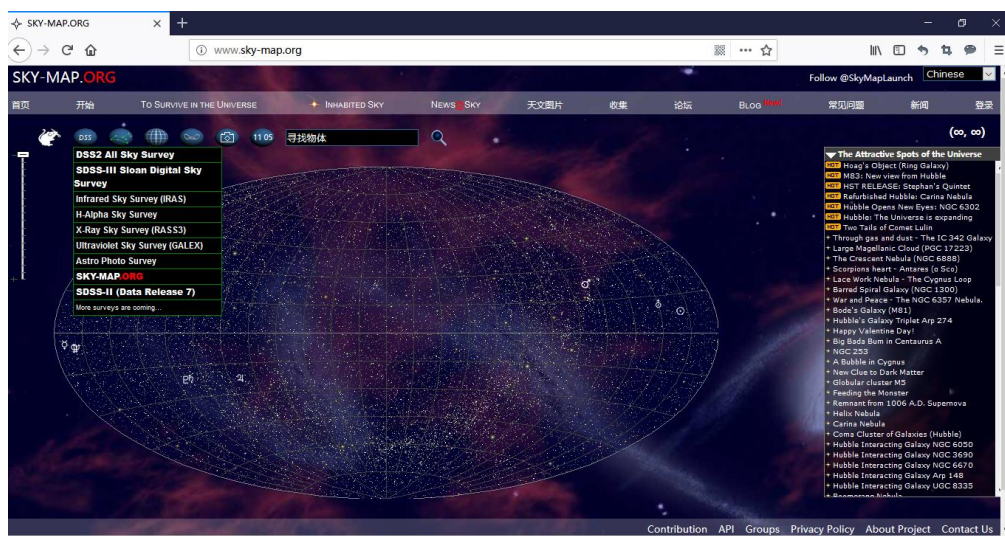


图 3.8 WikiSky/SKY-MAP 页面截图

3.3 在线可视化系统的应用

天图在线可视化系统能够将世界各地的天体物理数据不仅提供给研究人员，而且还提供给教室、天文馆和教育推广计划。SDSS 和 WMAP 等高质量数据集的融合、计算技术的进步以及摩尔定律的持续发展使得使用者能够在各种环境中使用非常漂亮的和科学准确的图像。因此，天图在线可视化系统不仅仅是一种帮助天文学研究和发现的工具，还有助于通过允许所有使用者进行平等的数据访问来实现天文数据和知识的平民化。当前天图在线可视化系统在科学研究与科普教育领域应用十分广泛。

3.3.1 科学研究

天图在线可视化系统主要应用于数据获取、分析、传播等方面的天文研究工作^[49]。在数据获取方面，系统作为各天文数据中心档案的可视化门户，为天文学家获取数据提供了一种方便的方式。图 3.9 显示了获取天文数据的传统方式。通过这种方式，使用者需要首先进入到某个特定的数据库并输入感兴趣的天体（如 M31）、视场大小（假设为 3° ）、波段（假设为 J）等条件，之后系统会显示所需的数据并通过输入邮箱的方式来获取数据。天图在线可视化系统可以以现代的、可视化的方式进行数据检索、对比、下载工作。如图 3.10 所示，在右上角的输入框输入感兴趣天体（假设为 M31）后系统会显示该天体的图像，在左上角图层面板选择图像、星表、光谱、论文等图层后会显示该天体图像上以图形的形式显示相关信息，勾选下方表格的某一行即可下载对应的不同格式的数据。

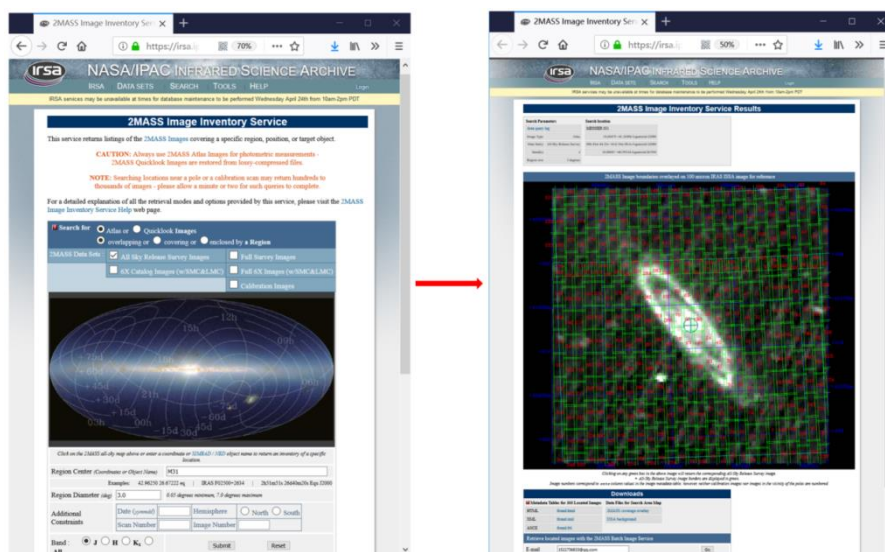


图 3.9 获取数据的传统方式

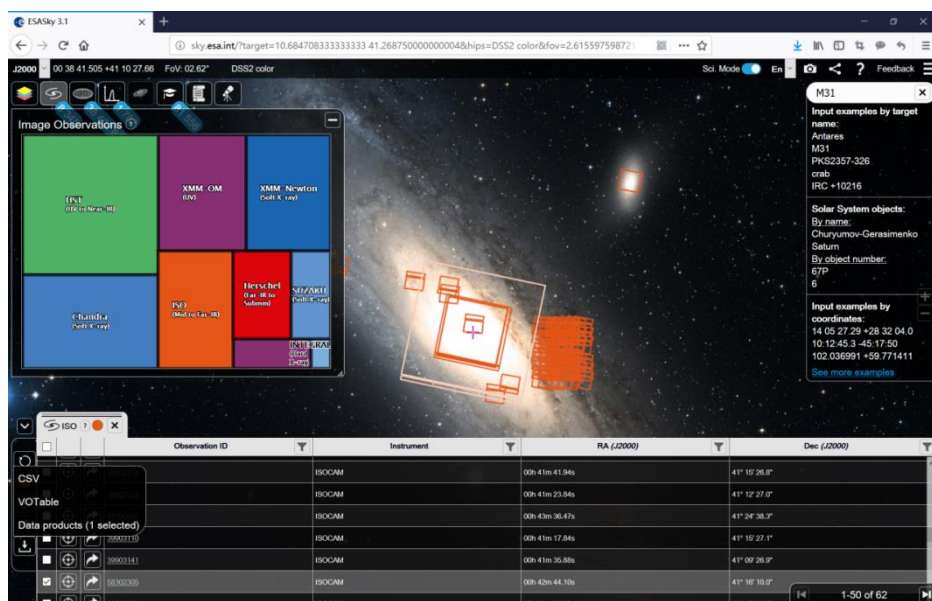


图 3.10 可视化的方式获取数据（以 ESASky 为例）

在数据分析方面,一些数据分析工具是基于 Web 控件 API 构建的,例如 AAS Astrolabe 项目已经建立了 JS9 和 WWT 之间的链接。使用此服务的用户可以将其图像上传到 JS9,像在 DS9 中那样操作它们,并在 WWT 中查看结果。在传播方面, WWT、Aladin 插件等具有漫游功能,研究人员可以将他们的发现制作成漫游提炼给其他研究人员或公众。在线可视化系统已被用于学术出版物的视频摘要,帮助科研人员快速可视化推广其科研成果。比如《奇异小天体-2018RR2》漫游就是根据《紫金山天文台再次发现奇异小天体》快讯制作的,如图 3.11 所示。未来的 WWT Web Control 开发将允许把 WWT 嵌入到 2D 和 3D 模式中作为学术出版物中的交互式图表。



图 3.11 奇异小天体-2018RR2 视频摘要截图

3.3.2 科普教育

广阔而神秘的宇宙未知深深地吸引了学生、公众参与天文学活动和讨论。然而，为学生和公众提供一些天体物理学条件和操作是很困难的。Google Sky、WWT 等在线可视化系统提供了主动研究夜空的能力，具有沉浸式视觉体验、真实数据以及用户添加内容的等特点，使得其成为用于演示、正式和非正式教育以及自我学习的强大工具。在线可视化系统已广泛用于几乎所有级别的天文教育与科普活动，如正式的学校课堂以及非正式的科普场馆等，产生了引人注目的参与式教育、科普体验。

1. 学校课堂

天图在线可视化系统在从小学到大学各年龄段的课堂中都有应用。在中小学阶段，让孩子们通过研究来回答自己的问题，可以提供更深刻的理解，并产生更强烈的激情和好奇心。这是探究式教学的实质。中国虚拟天文台在这方面做了有益的尝试，比如使用 WWT 在北京史家小学开展天文课程教学，也出版了《互动天文教学指南(小学教师版)》^[50]。在大学课堂中天图在线可视化系统主要应用于天文学课程或通识科普课程。WWT 大使项目 (WorldWide Telescope Ambassadors, WWT)⁶²项目创建了基于 WWT 桌面应用程序的天文学实验室介绍视差和哈勃定律，并且已被用于巴克内尔大学和马萨诸塞州阿默斯特大学；自 2009 年以来，WWT 一直是华中师范大学入门天文学课程的一部分^[51]；Andrey Kravtsov 开发了几个 Google Sky 实验，学生可以探索星系形态与星系光谱之间的联系或绘制 Google Sky 视场中恒星的颜色 - 星等图，如图 3.12 所示。

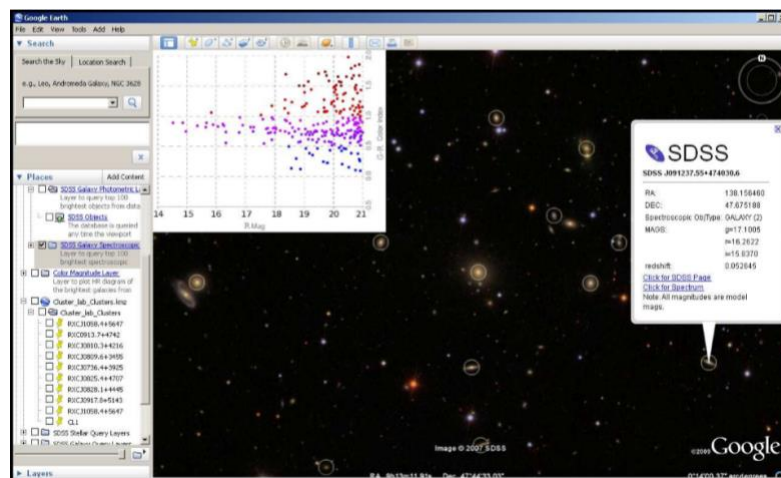


图 3.12 在 Google Sky 中使用 KML 编程的本科实验

⁶² <https://wwtambassadors.org>

2. 科普场馆

在非正式的科普场馆，在线可视化系统也应用十分广泛。WWT 是一个优秀的数据驱动的天文教育和公共宣传平台，被用于大型天文馆的节目展示，如阿德勒天文馆、莫里森天文馆等。WWT 也是小型天文馆的一个有吸引力的选择，因为该软件是免费的，它配备了强大的投影仪校准系统。中国虚拟天文台已经建造了 6 个由 WWT 驱动的天文馆，并且成立了一个基于互联网的 WWT 驱动的天文馆联盟，用于资源和经验交流。移动、便携的天文馆也开始使用 WWT，例如华盛顿大学、俄克拉荷马大学和哈佛大学都有 WWT 驱动的移动天文馆计划。几乎每个移动天文馆都参加了某种形式的当地科学节。图 3.13 显示了 WWT 在各类科普场馆里的应用，左图为 Adler 天文馆观众观看 WWT 宇宙奇迹节目，中图为重庆石新路小学生在天象厅内观看节目，右图为孩子们在便携式 WWT 天文馆观看天文漫游。



图 3.13 WWT 在线可视化系统在大型、小型及移动天文馆中进行天文漫游视频节目展示

除了在科普场馆里进行漫游视频节目播放展示，在线可视化系统还有很多其它好玩的使用。比如 WWT 具有展台模式，使用者可以与向导漫游进行交互。以这种方式使用 WWT 的科普场馆包括哈佛大学、阿德勒天文馆和夏威夷的伊米洛阿天文中心等。Christenberry 天文馆利用 WWT 的 VR 功能进行公共宣传，达到令人不禁惊叹的效果来推广最新的天文学发现和研究。图 3.14 显示了在线可视化系统在科普场馆里的不同使用场景，左图为 Adler 天文馆的多波段展览，中图为哈佛大学的展台，右图为 Samford 大学的学生在冥王星表面上体验 VR。



图 3.14 在线可视化系统在科普场馆里的其他使用

3.4 在线可视化系统的开发趋势

作为天文数据中心的可视化门户,可视化研究人员一直致力于优化系统界面、强化系统功能、增进系统应用等方面的工作,使天文学家可以通过可视化系统更加舒适、方便地进行研究工作。在界面设计方面,很难避免复杂的菜单和太多打开的窗口。因此,研究一系列用户界面选项,并将这些选项与用户的需求和他们的设备很好地匹配,将是至关重要的。如果使用者有一个巨大的显示器、触控台或显示墙,10个打开的窗口可能没有问题,但是一个需要这些窗口的系统不太可能在便携设备上运行良好。在系统功能方面,均已实现多波段数据的融合显示,目前正在努力实现光谱可视化、时域探索以及多信使数据融合功能。在系统应用方面,对3D选择的研究刚刚开始不久。鼠标、触控板和触摸屏在过去30年里不断发展,为在二维屏幕区域进行选择提供了非常好的条件。然而人类的手在三维自由空间中却无法像在二维平面上那样平稳地移动,因此,尽管Kinect、Leap Motion类设备提供了潜在的突破,但它们目前的使用效果并不是非常好。此外在手机端展示天图在线可视化系统以及开发球幕、AR、VR等功能,提升用户体验,也是研究的热点方向。当前很多在线可视化系统都非常注重以上几个方面,如Aladin Lite、ESKSky等系统在发布第一个版本至今已进行多次更新,不断地满足使用者对系统的使用要求。

电子连接、网络软件以及便携式设备的普遍使用改变着世界各地的社会、经济和文化生活。互联网技术是数据生产者和使用者之间前所未有的、非同寻常的双向沟通渠道。近年来天文学在提供开放的、用户友好的平台和服务方面做了很多工作,天文数据共享正向一个越来越透明和包容的工具和服务生态系统发展^[52]。为了促进天文学数据的广泛使用,将科学发现的潜力扩大到世界各地的参与者,意大利空间局(Italian Space Agency, ASI)⁶³提出了开放的宇宙倡议并于2017年11月发布了一个Web门户网站⁶⁴。该门户网站有很多优势,比如使用者可以在同一个地方找到由不同的天文数据中心开发的各种服务;使用者可以在单一网页上获取来自若干数据档案和相关信息系统的各类数据;它是一种空间科学数据“购物中心”,使用者可以访问和使用彼此相邻的许多网络服务;促进基于数据

⁶³ <https://www.asi.it/>

⁶⁴ <http://www.openuniverse.asi.it/>

密集型分析的新型科学研究。如图 3.12 所示, 输入感兴趣的天体, 就可以在多达 30 多种可视化系统中进行探索。

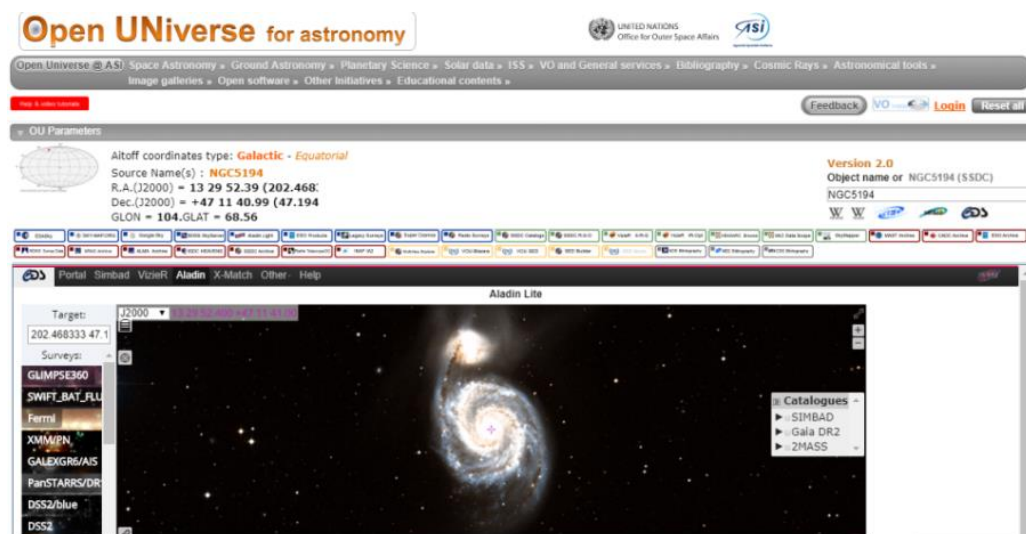


图 3.12 ASI Open Universe 网站截图

3.5 小结

本章首先讨论了天图在线可视化系统与传统天文数据档案之间的关系, 然后研究了以 Aladin、WWT、GoogleSky 为代表的当前主流的三种天图在线可视化系统, 并对比了它们的界面设计、交互功能以及优缺点。此外还梳理了天图在线可视化系统在科学研究以及科普教育领域的应用, 分析了天图在线可视化系统开发趋势。

由于各在线可视化系统开发背景不同, 因此各具特色。Aladin Lite、ESASky 等系统是基于各自数据中心的数据服务系统, 科研色彩浓厚, 底图之上叠加了星表、光谱、观测区域、论文等专业科研需要的图层; Google Sky、WWT 等系统具有显著的科普教育特色, 底图之上叠加的是星座图案、星座连线等图层, 另外还具有易于传播的漫游或 KML 功能。各天图在线可视化系统在逐步完善、改进功能服务自己主要的目标群体之外, 也努力将其系统打造的更加具有普适性, 使科研人员和普通公众都能够方便使用。

第4章 China-VO SkyView

4.1 引言

本课题的最终研究成果为 China-VO SkyView 在线可视化系统，目的是更好地展示中国虚拟天文台的数据资源并以更简便的方式为天文学家提供数据获取、分析和使用等服务。通过研究当前几种流行的在线可视化技术及瓦片生成与在线展示工具的使用，实现了将我国 BASS 巡天数据及嫦娥二号全月 7 米分辨率 DOM 数据进行展示的 China-VO SkyView 在线可视化系统。该系统也是天文联合基金重点项目《面向时域天文学的虚拟天文台核心能力建设与科学应用》中多波段、多信使海量数据融合结果的可视化呈现方法。

China-VO SkyView 将作为中国虚拟天文台可视化门户，方便使用者访问我国及镜像的国外天文数据。为了满足使用者的要求，本系统位于中国虚拟天文台所有数据档案的前面，以简单的方式呈现数据资源并提供相关数据服务。通过该系统能够以可视化的方式访问我国的巡天数据（图像、星表等）和行星数据（当前为月球）。图 4.1 显示了 China-VO SkyView 在线可视化系统和数据档案、使用者之间的关系。



图 4.1 China-VO SkyView 在线可视化系统所处的位置

4.2 技术基础

通过研究 HiPS 和 TOAST 等主流分层可视化技术及其瓦片生成和在线展示工具，最终决定使用基于 HiPS 的 Aladin Lite 来构建我国的海量天文在线可视化

系统——China-VO SkyView。这一选择主要有以下几点原因：

- 1) HiPS 已经成为 IVOA 的标准，技术相对成熟，使用十分广泛；
- 2) HiPS 有成熟的工具可供图像拼接与瓦片生成；
- 3) 通过 Aladin Lite 可以方便、简洁地展示巡天数据和行星数据；
- 4) Aladin Lite 有一个完整的、用户友好的 API，方便对系统进行二次开发，同时提供许多高级编程示例可供参考。

China-VO SkyView 实现过程中使用到的技术及工具主要包括：

- 1) HiPS 分层可视化技术；
- 2) Hipsgen.jar、Hipsgen-cat.jar 等 HiPS 瓦片文件生成工具；
- 3) AladinLiteSrc 和 Aladin Lite API；
- 4) HTML5、CSS3、JavaScript、jQuery⁶⁵、Nginx⁶⁶、SecureCRT⁶⁷ 等前端开发技术。

使用以上技术或工具实现 China-VO SkyView 的主要步骤如下：

- 1) 使用 Hipsgen.jar、Hipsgen-cat.jar 等工具将巡天和行星数据生成图像或星表 HiPS 瓦片文件；
- 2) 搭建 Nginx 服务器并进行相关配置；
- 3) 将生成的 HiPS 瓦片文件上传至 Nginx 服务器；
- 4) 编写 China-VO SkyView 的 html 文件并在其中引用 AladinLiteSrc 的 css、js、jquery 文件；
- 5) 安装可以在 Windows 系统下远程登录 Nginx 服务器的 SecureCRT 软件，并将 China-VO SkyView 的源代码上传至服务器；
- 6) 在浏览器地址栏中输入 <http://skyview.china-vo.org/> 即可访问 China-VO SkyView 在线查看巡天及行星数据。

后续还可以使用 HTML5、CSS3、JavaScript、Aladin Lite API 等技术对 China-VO SkyView 进行页面优化、增加交互功能等二次开发工作。以下通过 BASS 巡天数据、LAMOST 类星体星表数据和嫦娥二号全月 7 米分辨率 DOM 数据为例，说明巡天数据和行星数据如何进行在线可视化。

⁶⁵ <http://jquery.com/>

⁶⁶ <http://nginx.org/en/>

⁶⁷ <https://www.vandyke.com/products/securecrt/>

4.3 巡天数据在线可视化

4.3.1 BASS 巡天数据介绍

BASS 是一个以中国为首开展的巡天项目，该项目由国家天文台 BATC 团组⁶⁸和亚利桑那大学合作开展。BASS 巡天也是暗能量光谱巡天（Dark Energy Spectroscopic Instrument, DESI⁶⁹）中正在开展的三个深度光学图像巡天项目之一^[53]。DESI 由美国能源部支持，将测量暗能量对宇宙膨胀的影响，包括 BASS 巡天、MzLS 巡天和 DECaLS 巡天。BASS 对北银冠（North Galactic Cap）附近约 5200 平方度左右的区域进行 g 和 r 波段的深度光学图像观测。BASS 平均比 SDSS 深 1—2 星等，g 波段为 24.0 等，r 波段为 23.4 等。MzLS 与 BASS 的观测区域相同，但深度为 23 等且使用与 BASS 不同的 z 波段。DECaLS 观测沿赤道附近南北银冠约 9000 平方度左右的天区，极限星等略深，观测波段为 g、r 和 z。DESI 的总巡天面积约为 14000 平方度，如图 4.2 所示，红色曲线为银道。

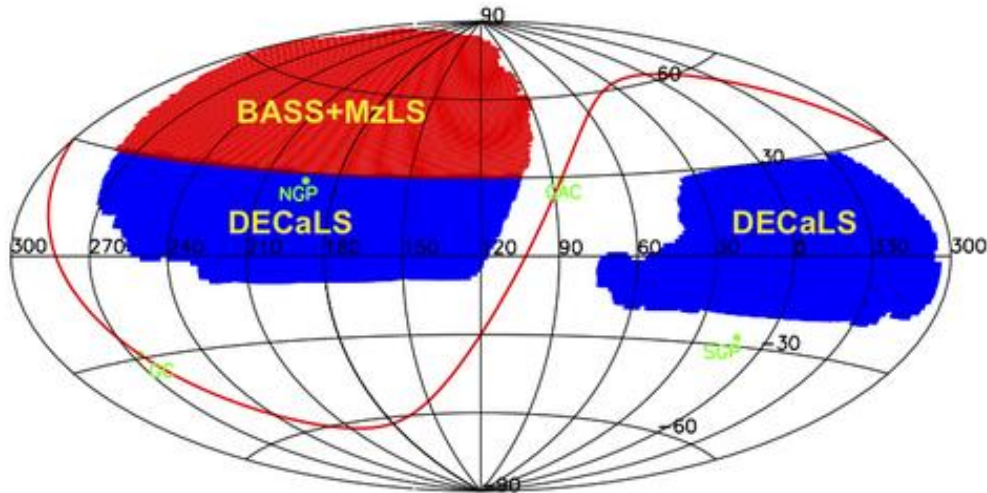


图 4.2 DESI 图像巡天的区域^[53]

BASS 巡天项目于 2015 年 1 月至 2019 年 2 月期间使用位于 Kitt Peak 观测基地的 BOK 2.3 米望远镜对北银冠附近 5200 平方度的天区进行了 4 年的巡天观测。2017 年 1 月，中国虚拟天文台正式发布 BASS DR1 数据集⁷⁰，包括 2015 和 2016 年观测的图像和星表⁷¹，2019 年中旬将释放最终版本的星表。BASS 总共 5194 个巡天天区，每个天区大小为 1 平方度左右，为了达到 24 等的累计深度对每个天

⁶⁸ <http://batc.bao.ac.cn/c-index-old.htm>

⁶⁹ <https://www.desi.lbl.gov/>

⁷⁰ <http://passport.china-vo.org/article/20170227162518>

⁷¹ <http://casdc.china-vo.org/archive/BASS/>

区进行 3 次重复拍摄。BASS 为大视场多波段深度巡天，比 SDDS 深 2 个左右星等，因此可以看到很多 SDDS 看不到的恒星和星系。图 4.3 为 BASS 和 SDSS 的对比图，可以看到 BASS 的图像在 g、r、z 波段都比 SDSS 亮不少。

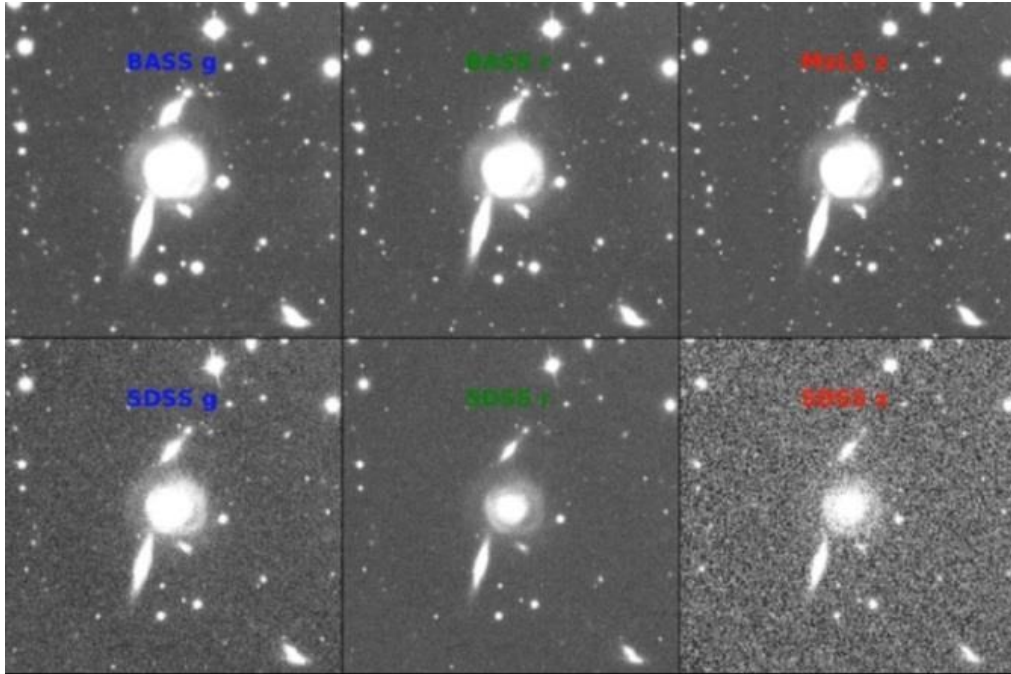


图 4.3 BASS 和 SDSS 对比图^[55]

4.3.2 BASS 数据可视化

BASS 数据可视化包括图像可视化和星表可视化两部分。使用 Hipsgen.jar 对 BASS 图像数据进行拼接和切分工作，生成 HiPS 瓦片文件。由于图像数据较大，图像数量极多，因此该过程耗时极长。即使调整 RAM 和线程，也花费了一个多月才完成拼接与切分工作。星表数据的 HiPS 文件使用 Hipsgen-cat.jar 生成，由于星表数据量较小因此该过程耗时较短。

生成 BASS 图像和星表数据的 HiPS 文件后将其上传至服务器，本系统选择 Nginx 作为 HiPS 瓦片文件存储的后端服务器。Nginx 是当前比较流行的服务器，有很多优点，比如安装十分简单、配置文件非常简洁、Bug 非常少等。作为 Web 服务器，相比著名的 Apache⁷²使用的资源更少、支持的并发连接更多，效率更高。

上传完 HiPS 瓦片文件后，开始编写 China-VO SkyView 的源代码文件。首先需要在 html 文件中引用 Aladin Lite 的 css、js 文件、依赖的 jQuery 库，然后编写展示 BASS DR1、DR2 图像和星表 HiPS 瓦片文件的 js 代码。Aladin Lite API

⁷² <http://www.apache.org/>

功能非常强大，可以十分方便地实现改变星表数据的显示图形、增加叠加图层等功能，对本系统的后续开发有重要作用。本系统设置视场大小为 3° ，中心天体为 M101 星系作为打开时的显示画面，具体代码如下。

```
<!DOCTYPE>
<html>
<head>
  <meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=utf-8">
  <link rel="shortcut icon" href="images/favicon.ico" type="image/x-icon">
  <title>China-VO SkyView</title>
  <!-- Aladin Lite CSS style file -->
  <link rel="stylesheet" href="aladin.css" />
  <!-- Aladin Lite has a dependency on the jQuery library -->
  <script type="text/javascript" src="jquery.min.js"
charset="utf-8"></script>
  <!-- Aladin Lite container at requested dimensions -->
  <div id="aladin-lite-div" >
    <div class="china-logo-container">
      <a href="http://astrocloud.china-vo.org/" target="_blank">
        <div class="china-logo china-logo-large" style="width:
60px;"></div>
      </a>
    </div>
  <!-- Aladin Lite JS code -->
  <script type="text/javascript" src="alaind.min.js"
charset="utf-8"></script>
  <!-- Creation of Aladin Lite instance with initial parameters -->
  <script type="text/javascript" charset="utf-8">
    var aladin = A.aladin('#aladin-lite-div',
    {
      survey: 'P/allWISE/color', // set initial image survey
      fov: 3, // initial field of view in degrees
      target: 'M101', // initial target
      cooFrame: 'J2000d', // set galactic frame, ICRSd
```

```

        showReticle: false,
        showShareControl:true,
        showShareControl:false,
    });

    //增加图像层
    aladin.setImageSurvey(aladin.createImageSurvey("NAOC", "BASS DR2 Image ",
        "http://hips.china-vo.org/bass-dr2-image/", "equatorial", 10, {imgFormat:
        'png'}));

    //增加星表层
    var hips =
    A.catalogHiPS('http://china-vo-sky.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/bass-dr1-coadde
    d/', {onClick: 'showPopup', name: 'BASS DR1 Coadded', shape: 'cross'});
    aladin.addCatalog(hips);
    hips.hide();
    var hips =
    A.catalogHiPS('http://china-vo-sky.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/bass-dr2-catalog',
    {onClick: 'showTable', name: 'BASS DR2 Coadded', shape: 'triangle'});
    aladin.addCatalog(hips);
    hips.hide();
    </script>
</head>
<body>
</body>
</html>

```

编写完 China-VO SkyView 的源代码后, 安装 SecureCRT 软件和 lrzsz 插件。SecureCRT 软件可以在 Windows 系统下远程登录 Nginx 服务器, 进行文件上传和下载等工作。lrzsz 插件是一款在 linux 环境下代替 ftp 上传和下载的程序, 可以非常方便地传输小文件。安装完成后将 China-VO SkyView 的源代码上传至服务器/data/www 文件夹下。图 4.4 为 China-VO SkView 中展示 BASS 巡天数据, 底图为 BASS DR2 图像数据, 红色叠加层为 DR1 星表, 蓝色叠加层为 DR2 星表。使用本系统查看天图和叠加的星表图层数据与我们使用高德地图等互联网地图

类似, 可以通过鼠标滚轮或者手指来平移或缩放视场。点击蓝色小三角形或红色小十字可以弹出框或表格的形式显示该观测目标的星表信息。

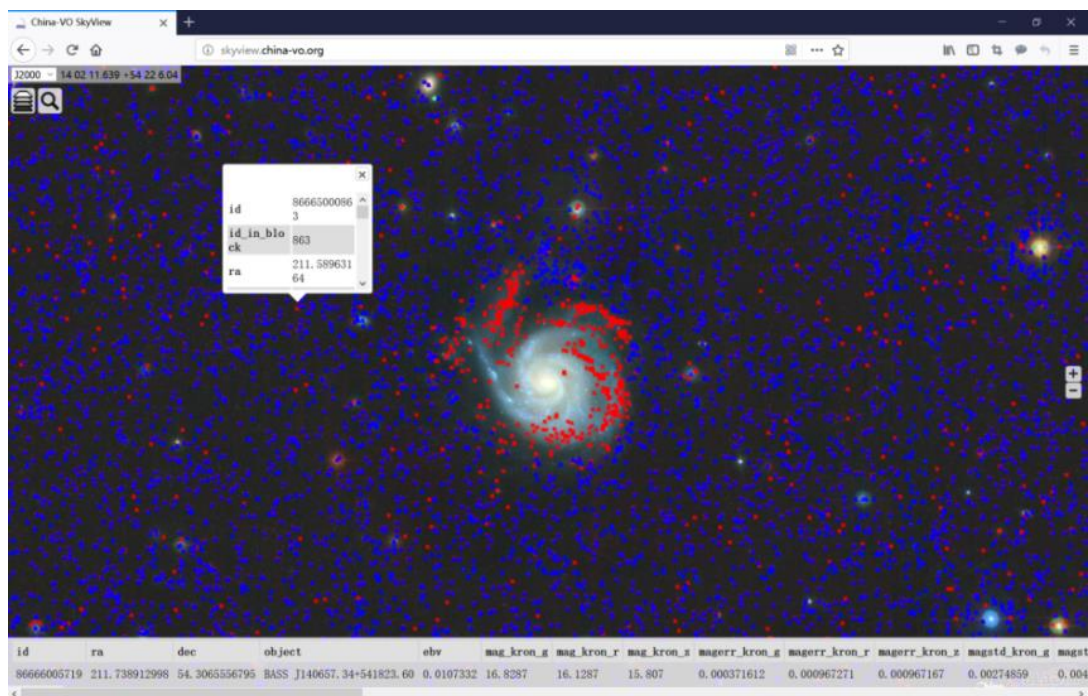


图 4.4 China-VO SkyView 中展示 BASS 巡天数据

4.3.3 LAMOST 类星体星表数据介绍

从 2012 年 9 月开始的 LAMOST 定期巡天主要包括两大组成部分: LAMOST 河外巡天 (LAMOST Extra-Galactic Survey, LEGAS) 和 LAMOST 星系理解与探索实验 (LAMOST Experiment for Galactic Understanding and Exploration, LEGUE) 对银河系恒星结构的巡天。LAMOST 类星体巡天是在 LEGAS 的指导下进行的, 由北京大学吴学兵教授领导的团队开展, LEGAS 覆盖了北部天空的银河高纬度区域。这项巡天的目的是对不同红移的类星体进行普查, 以便更好地理解超大质量黑洞的成长及其与宿主星系的共同演化。吴学兵团队经过数据处理和人工检查, 从 LAMOST 于 2012 年 9 月至 2017 年 6 月期间观测的光谱数据中共认证了 43102 个类星体, 红移范围从 $z=0$ 至 $z=4.5$ 。这些类星体其中有 24764 个是 LAMOST 独立发现的, 而有 17128 个是首次被发现。中国虚拟天文台发布了 LAMOST 2012 年至 2017 年的类星体巡天星表⁷³。

⁷³<http://explore.china-vo.org/article/20190107155838?cat=lamost-quasar&intro=%2Farticle%2F20190107155838>

4.3.4 LAMOST 类星体星表可视化

LAMOST 类星体星表数据为 CSV 文件，可在中国虚拟天文台网站下载⁷⁴。使用 Hipsgen-cat.jar 基于 Mi_z2（亮度）将 LAMOST 类星体星表数据生成 7 层 HiPS 文件。由于 Mi_z2 列有很多数据为 nan，需在 Hipsgen-cat.jar 命令行中编写脚本将其替换成空字符串。脚本为 `((Double.isNaN(MI_Z2)?99:MI_Z2))`，写在 -score 之后。生成 LAMOST 类星体星表 HiPS 文件的代码如下：

```
/usr/lib/jvm/java-1.8.0-openjdk/bin/java -Xmx12g -jar Hipsgen-cat.jar -cat "LAMOST Quasar Catalog" -in lamost_phase1_v01.csv -out lamost_phase1_v01 -ra RA -dec DEC -score "((Double.isNaN(MI_Z2)?99:MI_Z2))" -lm 7
```

生成 LAMOST 类星体星表 HiPS 瓦片文件后将其上传至 Nginx 服务器，并在 China-VO SkyView 的代码中加入如下代码引用 HiPS 瓦片文件中的 index.html 文件。在浏览器中访问本系统并在星表图层下选择 LAMOST Quasar Catalog 即可在线查看 LAMOST 类星体星表数据，如图 4.5 所示，蓝色小点代表星表中的单个观测源，点击后会变为绿色方框并在下方以表格形式或者弹出框的形式显示该观测源的一行数据。

```
var hips =
A.catalogHiPS('http://skyview.china-vo.org//HiPSCatalog//lamost_phase1_v01',
{onClick: 'showTable', name: 'LAMOST Quasar Catalog', shape: 'triangle'});
aladin.addCatalog(hips);
hips.hide();
```

⁷⁴http://explore.china-vo.org/s/dataset/lamost_quasar_catalog/lamost_phase1_v01.csv

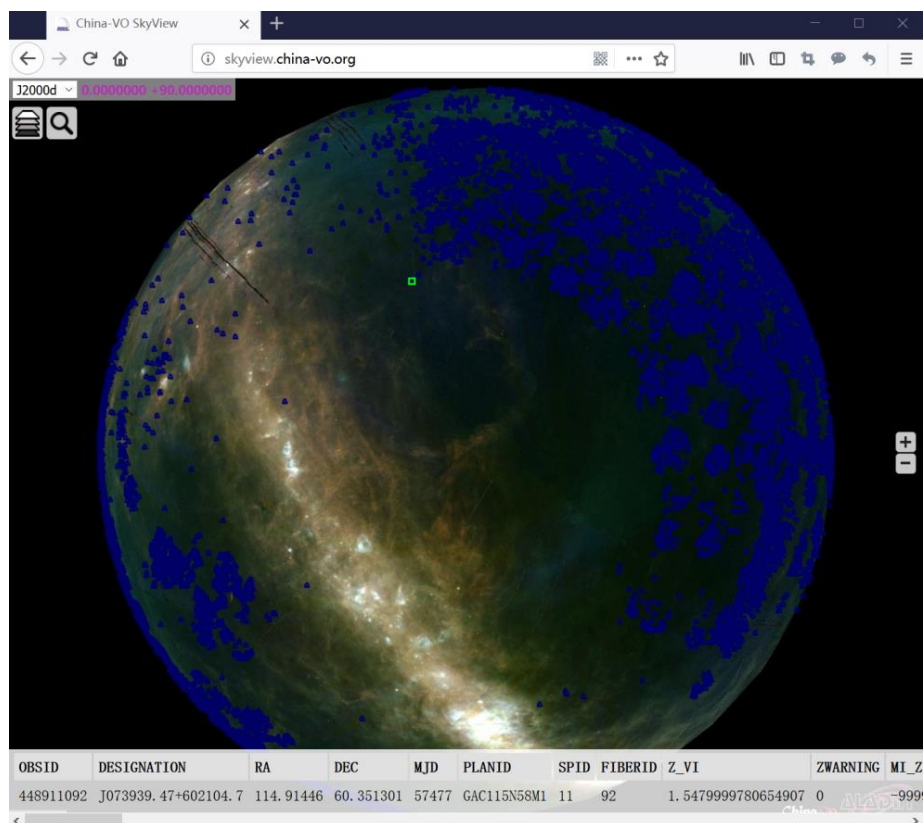


图 4.5 China-VO SkView 中展示 LAMOST 类星体星表数据

4.4 行星数据在线可视化

天文学研究天体目标除了使用望远镜从下往上观测星空，也发射人造卫星从上往下遥感天体。这一遥感工作目前集中在太阳系内的行星、卫星、小行星等天体，比如从 1961 年开始陆续发射的阿波罗号系列飞船获取了月球全月图像、1996 年发射的火星全球勘测者轨道器拍摄了火星表面的图像等。我国嫦娥一号、二号卫星也获取了月球全月从 7 米到 500 米不同分辨率的数字正射影像（Digital Orthophoto Map, DOM）数据或数字高程模型（Digital Elevation Mode, DEM）数据，并计划 2020 年左右发射卫星前往火星。未来将获取越来越多太阳系其它天体的全球图像，因此有必要研究如何将行星数据生成 HiPS 文件在 China-VO SkyView 中进行展示。本节以嫦娥二号全月 7 米分辨率 DOM 数据为例，介绍行星数据的在线可视化，为将来我国获取的火星等其它行星数据进行 HiPS 可视化提供借鉴。

4.4.1 嫦娥二号 7 米 DOM 数据介绍

嫦娥二号卫星于 2010 年 10 月 1 日成功发射，是我国第二颗探月卫星。2011

年4月1日设计寿命期满，圆满完成预定科学目标和工程目标^[56]。它的主要科学目标包括获取分辨率优于10米月球表面三维影像；探测月球物质成分；探测月壤特性；探测地月与近月空间环境。

嫦娥二号上面搭载的有效载荷有7种，立体相机（CCD）是主要有效载荷之一。立体相机的主要作用是获取月球表面三维影像。全月数字正射影像数据是利用立体相机在100km的轨道高度处获取的影像制作的，以分幅的形式发布，有7m、20m和50m三种分辨率。7米分辨率DOM共有844个分幅（分幅方式如图4.6），每个分幅包括一个数据文件（tif）、一个同名坐标信息文件（tfw）和一个同名投影文件（prj），数据总量为747.9GB。数据可在中国科学院国家天文台探月工程数据发布与信息服务系统⁷⁵下载。

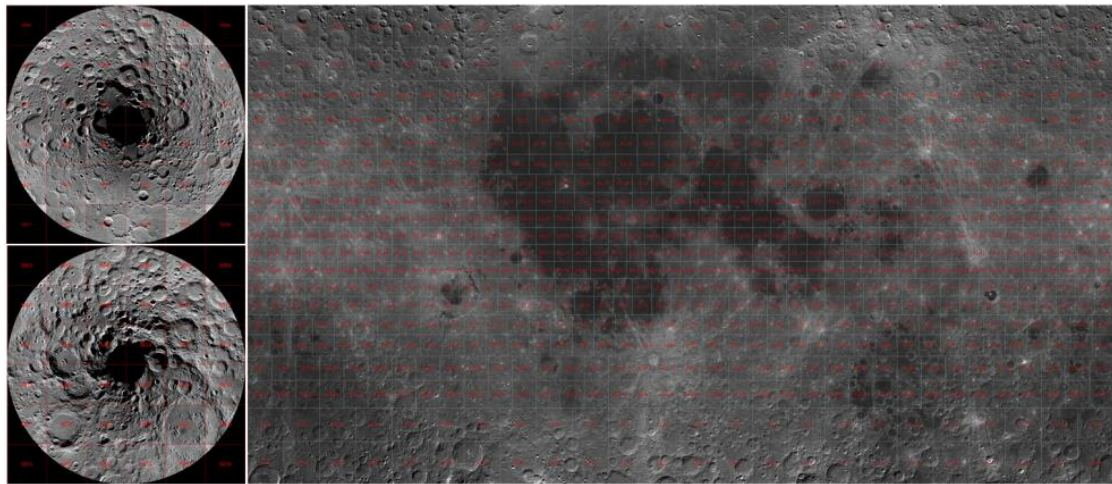


图4.6 嫦娥二号全月7米分辨率DOM分幅格网图

（左上：北极，左下：南极；右：70° S~ 70° N）

根据图像的纬度，分幅数据采用不同的投影方式：北极（70° N~ 90° N）和南极（70° S~ 90° S）为极区方位投影，70° S~ 70° N之间为正轴等角墨卡托投影。这两种投影也是处理地球数据时常用的投影，百度地图、Google Maps等互联网地图普遍采用。正轴等角墨卡托投影的地图虽然长度和面积变形较为严重，但保证了方向和相互位置关系正确。为了减小面积变形的影响，南北极采用方位投影，纬线为同心圆，经线为同心圆的半径，经线间的夹角等于相应的经度差。分幅数据产品的命名规范为：CE2_GRAS_xxx_aaa_bbbb_yyMzzzF_v.ext，具体含义如表4.1：

⁷⁵ http://moon.bao.ac.cn/searchOrder_hyperSearchData.search

表 4.1 嫦娥二号分幅数据产品命名规范⁷⁶

字段	含义
CE2	表示探测任务，即嫦娥二号任务
GRAS	表示数据制作单位，即地面应用系统
xxx	表示产品数据类型，即 DEM 或 DOM
aaa	表示分辨率，分别为 07m, 20m 和 50m
bbbb	表示地图图幅号，第一位为字符，后三位为数字，如 C001
yyMzzzF	表示分幅数据的中心地理位置,yy 为 2 位纬度值,M 为北纬(N)或南纬(S),zzz 为 3 位经度值,F 为东经(E)或西经(W)
v	表示产品版本，取值 A~Z，即第一版为‘A’，最后一版位‘Z’
ext	为产品格式后缀，为 tif（数据文件）和 tfw（坐标信息文件）

4.4.2 嫦娥二号 7 米 DOM 数据在线可视化

可以使用 Aladin Desktop 对行星数据进行快速生成 HiPS 文件工作。本工作使用 JPG 格式的嫦娥二号全月 7 米分辨率 DOM 数据分幅格网图(大小为 13.4MB)进行简单的 HiPS 文件生成测试。首先需要进行数据预处理，使用 PhotoShop⁷⁷对墨卡托投影的格网图进行画布大小调整和图像拉伸操作，保存的新图像中上下空白区域为南北极地区；然后在 Aladin Desktop 的图像菜单栏下进行天体校准，这是为了将行星数据和天球网格进行匹配，需要注意的两点是计算像素角大小

($360/5747*60=3.758$, 其中 5747 为图像长边的长度)和赤经对称选择为错误(这是必须的，否则生成的图像经度会颠倒)；接着在工具菜单栏下选择基于当前图像生成 HiPS，将进行校准后的图像转换为 hpx 文件；最后使用 Hipsgen.jar 或 Aladin Desktop 将该 hpx 文件生成所需层数的 HiPS 瓦片文件。图 4.7 为使用 Aladin Desktop 生成行星数据 HiPS 的过程示意图。

⁷⁶ http://moon.bao.ac.cn/searchOrder_dataSearch.search

⁷⁷ <https://www.adobe.com/cn/products/photoshop.html>

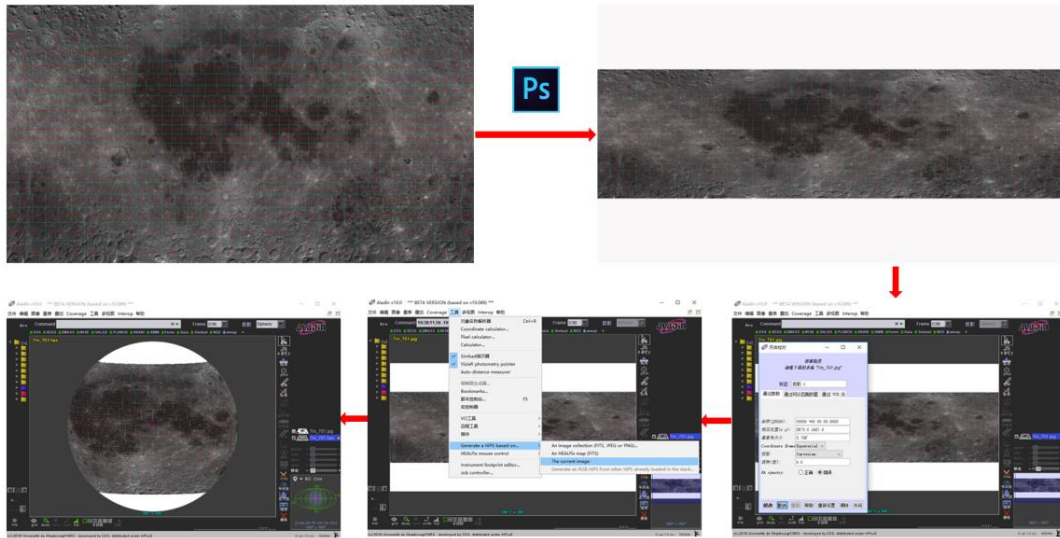


图 4.7 使用 Aladin Desktop 对嫦娥二号 7 米 DOM 分幅数据进行 HiPS 可视化

由于嫦娥二号全月 7 米分辨率 DOM 数据格式与天文数据常用的 FITS 不同并且数据量极为庞大，因此需要使用脚本进行数据格式转换及后续相关工作。该过程比较复杂，需要使用到的软件和库也较多，包括 GDAL (Geospatial Data Abstraction Library)⁷⁸、QGIS (Quantum GIS)⁷⁹、Aladin 等。GDAL 是一个开源的栅格空间数据转换库，提供对 GeoTIFF 等地理数据格式的支持。QGIS 是一个开源的地理信息系统软件，可以将 TIFF 格式的数据转换为 GeoTIFF。此外还需要对本数据相关的数据格式和地图投影有一定的了解，如 TIFF 和 GeoTIFF 的区别、墨卡托和极区方位投影等地理数据投影、如何将 Gtiff 转为 fits 等。标签图像文件格式 (Tagged Image File Format, TIFF) 以 .tif 为扩展名，具有文件头、文件目录和文件数据的 3 级体系结构。GeoTIFF 是 TIFF 格式的一种扩展，是基于 TIFF 的地理空间栅格数据存储格式，并且已成为 TIFF 规范的一部分。安装好以上所需软件和库以后，主要的几步为：

- 1) 使用 QGIS 将 tiff、prj、tfw 数据组转换为 GeoTiff 格式；
- 2) 使用 Gdal2fits.py 将 GeoTiff 转换为 fits 格式；
- 3) 使用 HiPSGen.jar 将 fits 数据生成 HiPS 瓦片文件；
- 4) 将 HiPS 瓦片文件上传至服务器；

5) 在 China-VO SkyView 的 js 文件中使用以下代码引用生成 HiPS 瓦片中的 index.html 文件。

⁷⁸ <https://www.gdal.org/>

⁷⁹ <https://www.qgis.org/en/site/>

```
var moon = aladin.createImageSurvey('China-VO', 'Lunar DOM 7M',
'http://hips.china-vo.org/change2-moon-7m-dom/', 'j2000', 9, {imgFormat: 'png'},
{longitudeReversed: true});
aladin.setImageSurvey(moon);
```

6) 在任一浏览器打开 China-VO SkyView, 在图层面板选择 Lunar DOM 7M 即可在线查看嫦娥二号全月 7 米分辨率 DOM 数据, 如图 4.8 所示。

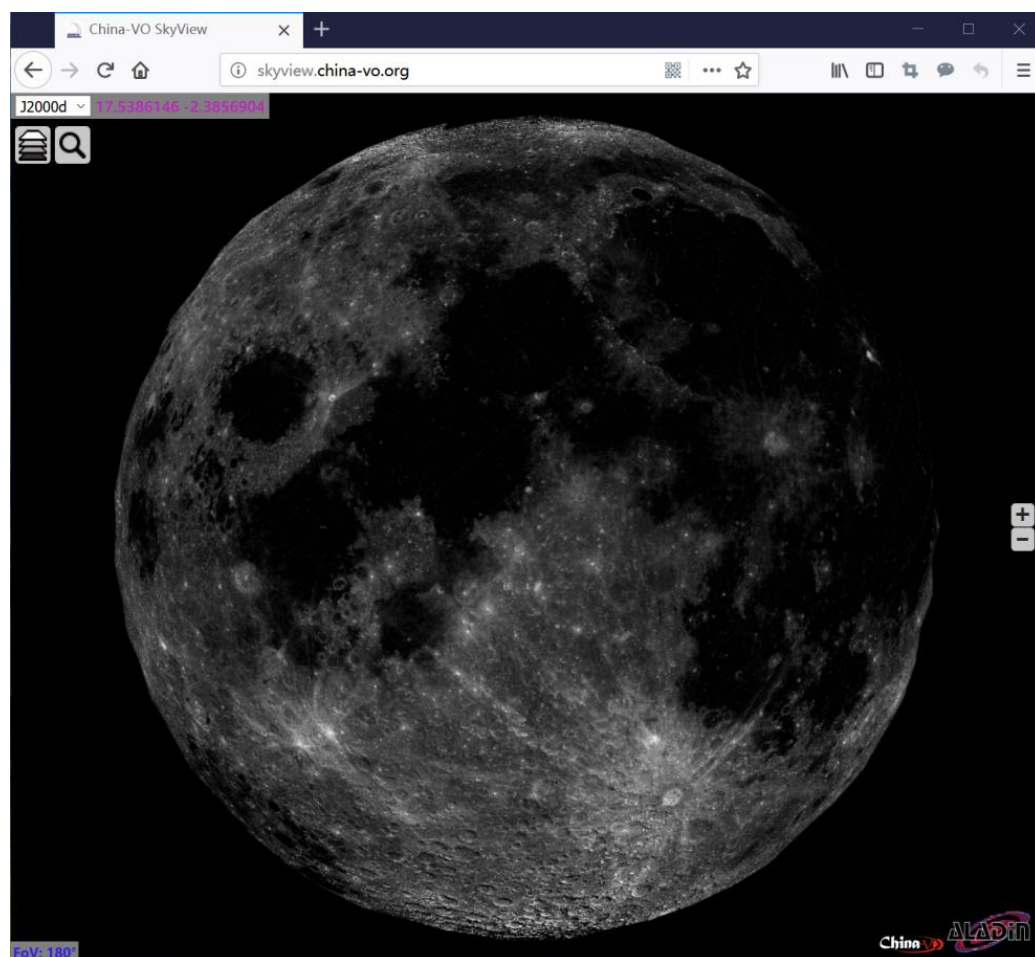


图 4.8 China-VO SkyView 中展示嫦娥二号 7 米 DOM 数据

4.5 数据资源

China-VO SkyView 在线可视化系统目前的数据资源⁸⁰包括 BASS 巡天数据 (DR1、DR2 的图像和星表)、嫦娥二号全月 7 米分辨率 DOM、LAMOST 类星体星表以及中国虚拟天文台镜像的国外巡天数据 (DSS colored、SDSS9 color、Herschel PACS (color composition) 等)。使用本系统还可以访问来自其他数据中心的数 据, 如 P. Fernique 创建的海盗号火星全球数据。未来还将加入 LAMOST

⁸⁰ <http://china-vo-sky.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/>

巡天光谱数据、FAST 巡天观测数据、更多国外镜像数据及 12 米光学/红外望远镜巡天数据、我国获取的火星等太阳系天体的全球地形数据、月球和火星等行星的化学元素和矿物全球分布图等各类数据。

除了巡天观测和行星探测数据，还使用 Aladin Lite API 编写相关代码（见附录）为系统加入了其它叠加层数据，使系统的信息更加丰富、交互更加友好。目前为巡天数据、月球全球数据、火星全球数据添加了叠加层数据。

巡天图像上添加了星座名称、星座连线等星空文化图层以及梅西耶等著名深空天体标记。使用者可以在浏览我国的巡天数据时，方便地知道当前视场有哪些星座，点击超链接还可以跳转到相关页面来了解更多信息。图 4.9 为 China-VO SkyView 巡天数据的叠加层，标注了当前视场的大熊座和猎犬座星座名称、北斗七星和猎犬座连线、梅西耶天体（红色小点）。点击其中一个红色小点，会以弹出框的形式显示 M101 星系的信息，包括名称、星等、光谱类型等。如果了解该天体详细科学信息或科普知识，可以点击弹出框中的 Simbad 或 wikipedia。

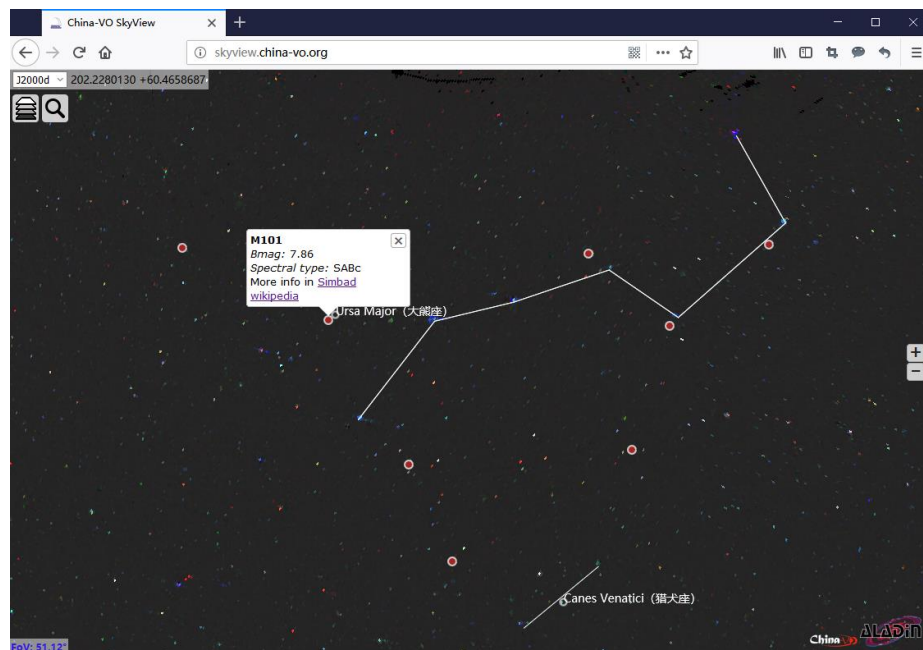


图 4.9 China-VO SkyView 巡天数据的叠加层

嫦娥二号全月 7 米分辨率 DOM 数据添加了主要地形特征标记、月球上的中国名、嫦娥和阿波罗探测器着陆点位置等地理或文化叠加图层。通过这些图层，我们可以知道当前区域里月海、月陆、环形山等主要地貌的名称，也可以快速辨认出月球上哪些地貌有中国名字。点击嫦娥、阿波罗探测器着陆点位置，弹出框会显示该探测器的名称、降落时间等相关信息，还可以点击链接跳转到相关页面

了解该探测器的更多信息。图 4.10 为 China-VO SkyView 月球数据的叠加层，标注了当前区域冯·卡门撞击坑地貌和织女、牛郎、天津、泰山这四个月球上的中国名以及嫦娥四号着陆器的着陆点位置。

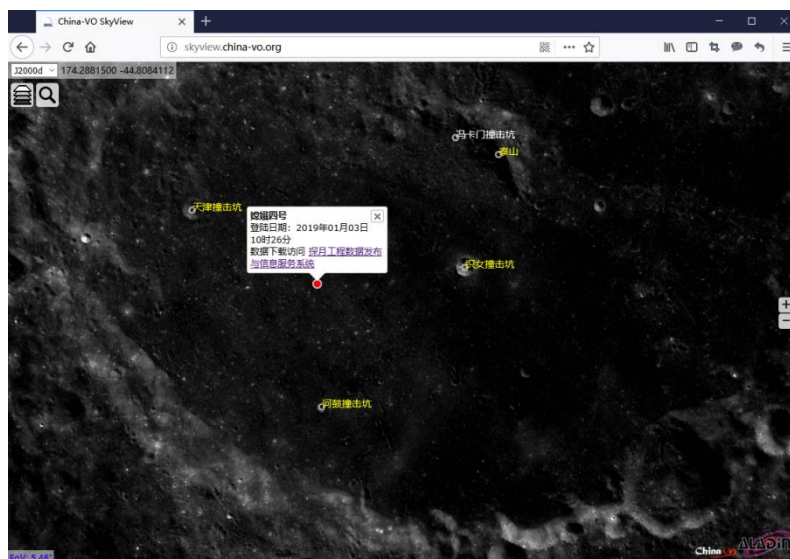


图 4.10 China-VO SkyView 月球的叠加数据层

火星全球数据（海盗号获取的）也添加了主要地形特征标记、探测器着陆点位置等地理叠加图层，将来可以直接迁移到我国获取的火星全球数据上进行显示。通过这些图层，我们可以知道当前区域里火星的主要地貌的名称和探测器着陆点位置。弹出框会显示该探测器的名称、降落时间等相关信息，还可以点击链接跳转到相关页面了解该探测器的更多信息。图 4.11 为 China-VO SkyView 火星数据的叠加层，标注了当前区域水手谷地貌和探路者号等探测器的着陆点位置。

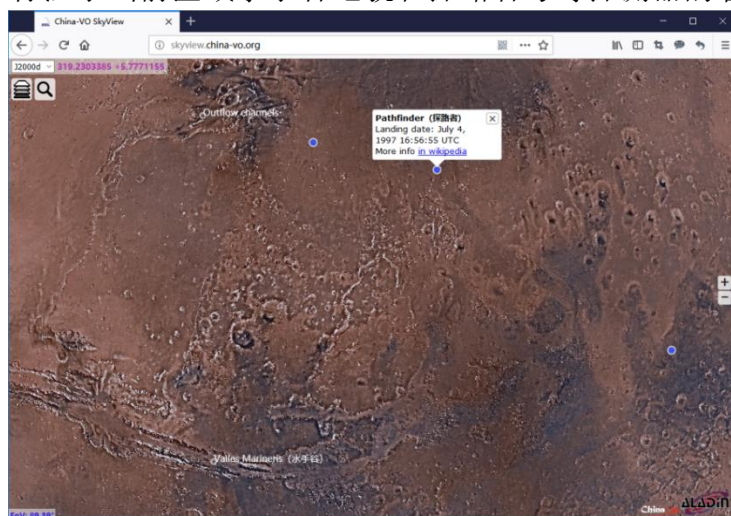


图 4.11 China-VO SkyView 火星的叠加数据层

4.6 后续开发

China-VO SkyView 在线可视化系统未来将基于国内天文学家的使用需求,同时参考国外类似系统开发的方向,对本系统进行持续的开发改进。在界面方面,将进行进一步优化,使界面更加简洁、美观。还可以增加中英文语言选择、科学研究与公众探索模式的切换选择等,使系统的使用更符合中国人的使用习惯。

在数据资源方面,①增加我国的巡天观测数据,目前系统中仅有我国 BASS 光学巡天图像和星表数据,随着 12 米光学/红外望远镜等其它巡天项目的建成运行,系统将持续加入其它波段的巡天数据;②增加我国的行星探测数据,目前系统中仅有我国嫦娥二号全月 7 米分辨率 DOM 数据,随着 2020 年左右我国火星探测及太阳系其它天体探测任务的运行,将持续加入火星等其他太阳系天体的全球地图;③增加更多国外镜像数据,目前中国虚拟天文台镜像的国外巡天 HiPS 数据有 9 个,随着后续镜像更多国外 HiPS 数据将持续将其加入本系统;④增加星座、主要地貌、着陆器位置等各类信息图层,真正将本系统打造成信息详细的互联网宇宙天空地图,使公众可以像使用互联网地图一样在本系统探索未知的宇宙世界。

在功能上,可以考虑增加以下功能:①光谱检索;②与其他外部服务建立联系,如增加与万维望远镜的链接,使用者可以跳转到 WWT 中查看相同视场的数据;③更改图层透明度,方便与其他任务或其它波段的数据进行直观对比;④论文可视化,方便使用者及时了解当前视场的目标有哪些相关文章;⑤时域探索功能;⑥任务计划工具,可以为 12 米光学/红外望远镜或其它观测任务提供规划。

第5章 总结与展望

海量天文数据在线可视化系统是当前各大天文项目的研究热点,将成为其数据中心的可视化门户,在科学研究和科学普及方面有重要作用。我国已经或即将开展多个巡天观测和行星探测项目,也亟需一个合适的在线可视化系统将获得的巡天数据进行有效的展示,使用户可以及时地以简单的方式接触到最新的科研数据。因此本文根据以上需求,对当前主流的在线可视化系统进行深入研究,实现了 China-VO SkyView 在线可视化系统。本系统将中国虚拟天文台数据档案的巡天数据及行星数据进行了有效展示。

本文的主要研究内容包括以下几个方面:

1) 对当前主流的 HiPS 和 TOAST 两种分层可视化技术及瓦片生成、在线展示工具进行了深入研究,确定了 China-VO SkyView 在线可视化系统使用 HiPS 分层可视化技术及相关工具。选择 HiPS 主要是因为其已成为 IVOA 标准并且有较多工具可以生成瓦片文件和进行在线展示,因此技术比较成熟。使用 Aladin Desktop、Hipsgen.jar、Hipsgen-cat.jar、WWT SDK、Montage 等多个瓦片生成工具以交互面板或命令行的方法在 Windows 和 Linux 系统上对小规模数据进行了图像拼接和瓦片切分测试工作,熟悉巡天数据在线可视化的工作流程。此外还对 HiPS 和 TOAST 在生成数据量和所需时间方面进行了性能测试。

2) 对当前主流的在线可视化系统进行了深入研究,分析了其界面特点、交互功能,对比了它们的特点及优缺点。使用该类系统可以实现在同一平台上分层显示数据融合结果及相关区域的多种不同观测数据,方便天文学家对观测数据或计算结果进行快速判断,并以可视化的方式提供多波段数据下载,减少天文学家多方收集数据的麻烦。该类系统也可以充分利用虚拟天文台丰富的资源和先进的技术开展科学数据驱动的天文教育、教学和科学普及活动,对于天文科普教育也有十分重要的作用。此外分析了在线可视化系统的开发趋势,讨论了在线可视化系统遇到的问题。

3) 基于 HiPS 分层可视化技术及其相关工具,实现了 China-VO SkyView 在线可视化系统,将我国的 BASS 巡天数据、LAMOST 类星体星表数据、嫦娥二号全月 7 米 DOM 数据以及镜像的国外巡天数据进行了有效的展示。以 BASS 巡

天数据和 LAMOST 类星体星表为例介绍了巡天数据(图像和星表)在线可视化。以嫦娥二号全月 7 米 DOM 数据为例介绍了行星数据可视化,这项工作国际上其他天文数据中心也处在测试阶段,因此技术并不成熟,过程也十分复杂。

国际上针对海量巡天数据在线可视化的研究开展不久,虽然已有多个成熟的技术和广泛使用的系统,但仍有一些问题需要改进或者完善。这些问题主要包括数据的分层存储导致了数据量的再次增加、现有工具在拼接巡天图像和切分瓦片时性能欠佳,多信使数据的融合显示以及开发球幕、VR、AR 等多种不同方式的展示功能等。虽然 China-VO SkyView 在线可视化系统达到了在线展示我国巡天、行星数据的要求,但仍然存在许多不足。针对海量巡天数据在线可视化的研究内容,后续还应在以下几个方面进行改进:1) 界面需要进行进一步优化使系统更符合我国使用者的使用习惯;2) 增加光谱可视化、论文等数据档案中的其它数据,将系统打造成强大的 China-VO 可视化门户;3) 增加对于多信使数据的支持;4) 增加时域探索、任务计划工具等功能。

未来 China-VO SkyView 将能够展示更多的天文数据,如我国 12 米光学/红外望远镜的巡天观测数据、火星等太阳系其它天体的全球数据、各类叠加信息图层数据等等。本系统将成为数据资源众多、信息极其丰富的互联网宇宙天空地图,为使用者提供专业的天文数据服务。

本论文得到中国虚拟天文台和中国天文数据中心提供的数据资源和技术支持。中国天文数据中心得到国家科技部国家科技基础条件平台项目“地球系统科学数据共享服务平台”和“国家基础科学数据共享服务平台”

(DKA2017-12-02-07) 的资助。感谢国家天文台-阿里云天文大数据联合研究中心对本项工作的支持。

参考文献

- [1] 王绶琯. 现代自然科学中的天文学[J]. 自然杂志, 1992(9): 647-650.
- [2] Goodman A A. Principles of high-dimensional data visualization in astronomy[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2012, 333(5-6):505-514.
- [3] 贝尔, 天文之书[J]. 2015.
- [4] 李竞. 照相天图的一百年发展[J]. 自然科学史研究, 1988(2): 135-141.
- [5] 王传晋, 叶彬浚, 孟新民. 电荷耦合器件(CCD)及其在天文中的应用[J]. 天文学进展, 1983, 1(2): 222-233.
- [6] Goodman A A, Borkin M A, Robitaille T P. New Thinking on, and with, Data Visualization[J]. 2018.
- [7] 刘勘, 周晓峥, 周洞汝. 数据可视化的研究与发展[J]. 计算机工程, 2002, 28(8): 1-2.
- [8] 曹周键. 从引力波探测到包含引力波的多信使天文学[J]. 大学物理, 2018, 37(2): 1-9.
- [9] 单桂华, 谢茂金, 李逢安, 等. 大规模天文时序粒子数据的可视化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015(1): 1-8.
- [10] 饶玫瑰. “嫦娥二号”影像数据分层切片技术的研究[D]. 成都理工大学, 2012.
- [11] 向俊敏. LAMOST 光谱数据的可视化研究[D]. 山东大学, 2014.
- [12] 金文敬. 天体测量星表与巡天观测的进展[J]. 天文学进展, 2009, 27(3): 247-269.
- [13] Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties[J]. *Astronomy & astrophysics*, 2018.
- [14] W. Yu, M.C. Kind, R.J. Brunner. Vizic: A jupyter-based interactive visualization tool for astronomical catalogs[J]. *Astronomy & Computing*, 2017, 20.
- [15] 宋江洪, 赵忠明. 图像分块分层结构在海量数据处理中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(33): 31-33.
- [16] Bertin E, Pillay R, Marmo C. Web-based visualization of very large scientific astronomy imagery[J]. *Astronomy and Computing*, 2015, 10:43-53.
- [17] Baines D, Giordano F, Racero E, et al. Visualisation of Multi-mission Astronomical Data with ESASky[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2017, 129(972):028-001.
- [18] 崔辰州, 赵永恒, 赵刚, et al. 虚拟天文台的技术进展[J]. 天文学进展, 2002, 20(4):302-311.
- [19] Fernique P, Boch T, Pineau F, et al. Create and Publish a Hierarchical Progressive

- Survey (HiPS)[C]// Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIII. Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIII, 2014:281.
- [20]周侗, 龙毅. 我国近期移动地图与互联网地图发展综述[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(5): 1-5.
- [21]殷福忠, 孙立民. 基于瓦片金字塔技术的地图发布平台开发研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2010, 33(5): 16-17.
- [22]Fernique P, Oberto A, Boch T, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2010, 434:163.
- [23]Fernique P, Allen M G, Boch T, et al. Hierarchical progressive surveys. Multi-resolution HEALPix data structures for astronomical images, catalogues, and 3-dimensional data cubes[J]. Astronomy & Astrophysics, 2015.
- [24]Fernique P, Allen M, Boch T, et al. IVOA Recommendation: HiPS - Hierarchical Progressive Survey[J]. 2017.
- [25]Gorski K M, Hivon E, Banday A J, et al. HEALPix -- a Framework for High Resolution Discretization, and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere[J]. Astrophysical Journal, 2004, 622(2):759-771.
- [26]陈强, 朱青. 基于 HEALPix 的全球地形可视化技术[J]. 计算机仿真, 2015, 32(5): 422-427.
- [27]Szalay A S, Gray J, Fekete G, et al. Indexing the Sphere with the Hierarchical Triangular Mesh[J]. Microsoft Research, 2012.
- [28]Berriman G B, Good J C. The Application of the Montage Image Mosaic Engine To The Visualization Of Astronomical Images[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2017, 129(975):058-006.
- [29]Berriman G B, Good J C, Rusholme B, et al. The Next Generation of the Montage Image Mosaic Toolkit[J]. 2016.
- [30]Berriman G B, Good J C, Laity A C, et al. Montage: A Grid Enabled Image Mosaic Service for the National Virtual Observatory[C]// Astronomical Data Analysis Software & Systems XII. 2004.
- [31]Berriman G B, Good J C, Laity A C, et al. Montage: a grid-enabled engine for delivering custom science-grade mosaics on demand[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004, 54-93.
- [32]Jacob J C, Katz D S, Berriman G B, et al. Montage: a grid portal and software toolkit for science-grade astronomical image mosaicking[J]. International Journal of Computational Science & Engineering, 2010, 4(2):73-87.

- [33] LaityAC, AnagnostouN, BerrimanGB, et al. Montage: An Astronomical Image Mosaic Service for the NVO[J]. *Astronomical Data Analysis Software & Systems XIV*, 2005, 347:34.
- [34] BerrimanGB, GoodJC, LaityAC, et al. Chapter 19: Web-based tools-montage: An astronomical image mosaic engine[J]. *The National Virtual Observatory : tools and techniques for astronomical research : proceedings of summer schools held at Aspen, Colorado, USA in 2004, 2005 and 2006*, 2008.
- [35] Ouaret M, Dufaux F, Tescher A G, et al. A comparative study of JPEG2000, AVC/H.264, and HD photo[C]// *Optical Engineering + Applications*. International Society for Optics and Photonics, 2007:669602-669602-12.
- [36] 李建, 崔辰州, 何勃亮. 基于虚拟天文台的天文数据库[J]. *科研信息化技术与应用*, 2011(3): 75-80.
- [37] Boch T, Oberto A, Fernique P, et al. Aladin: An Open Source All-Sky Browser[C]// *Astronomical Data Analysis Software & Systems XX*. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*, 2011.
- [38] Bonnarel F, Fernique P, Bienayme O, et al. The ALADIN Interactive Sky Atlas[J]. 1997.
- [39] Allen M G, Fernique P. An Hierarchical approach to Big Data[J]. *Iau General Assembly*, 2016, 22.
- [40] Boch T, Fernique P. Aladin Lite: Embed your Sky in the Browser[C]// *Astronomical Data Analysis Software & Systems XXIII*. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIII*, 2014.
- [41] Boch 2016, in ADASS XXV, edited by N. P. F. Lorente, & K. Shortridge (San Francisco: ASP), vol. TBD of ASP Conf. Ser., TBD
- [42] Mer í, Bruno, Salgado, Jesús, Giordano F, et al. ESA Sky: a new Astronomy Multi-Mission Interface[J]. *Physics*, 2015.
- [43] Mer í B, Giordano F, Norman H, et al. ESASky v.2.0: all the skies in your browser[J]. 2017.
- [44] Bel ín L ópez Mart í Bruno Mer í, Giordano F, et al. ESASky: The whole of space Astronomy at your fingertips[J]. 2016.
- [45] 崔辰州. 天文学的 GS-WWT 时代[J]. *天文爱好者*, 2008(7): 63-67.
- [46] Landsberg R H, Subbarao M U, Dettloff L. WorldWide Telescope and Google Sky: New Technologies to Engage Students and the Public[J]. 2010.
- [47] Scranton R, Connolly A, Krughoff S, et al. Sky in Google Earth: The Next Frontier

- in Astronomical Data Discovery and Visualization[J]. Ads Abstract Service, 2007.
- [48] Connolly A S R, Ornduff T. Google Sky: A Digital View of the Night Sky[C]// Preparing for the International Year of Astronomy: A Hands-on Symposium. Preparing for the 2009 International Year of Astronomy: A Hands-On Symposium, 2008.
- [49] Rosenfield P, Fay J, Gilchrist R K, et al. AAS WorldWide Telescope: A Seamless, Cross-platform Data Visualization Engine for Astronomy Research, Education, and Democratizing Data[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2018, 236(1):22.
- [50] 乔翠兰, 李珊珊, 杜康玉. 小学天文教学: 教师用书[M]. [北京]: 科学普及出版社. 2017.9
- [51] 乔翠兰, 崔辰州, 郑小平, 等. 基于真实数据的天文教学实践探索[J]. 大学物理, 2013, 32(6): 48-48.
- [52] Giommi P, Arrigo G, Almeida U B D, et al. The Open Universe Initiative[J]. 2018.
- [53] Zou H, Zhou X, Fan X, et al. Project Overview of the Beijing-Arizona Sky Survey [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2017, 129(976):064-101.
- [54] Zou H, Zhang T, Zhou Z, et al. The First Data Release of the Beijing-Arizona Sky Survey[J]. Astronomical Journal, 2017, 153(6).
- [55] Zou H, Zhang T, Zhou Z, et al. The Second Data Release of the Beijing-Arizona Sky Survey[J]. 2017.
- [56] 叶培建, 黄江川, 张廷新, 等. 嫦娥二号卫星技术成就与中国深空探测展望[J]. 中国科学:技术科学, 2013(5): 467-477.

附 录

1. 巡天图像叠加层代码（部分）：

```
var c = document.createElement('canvas'); c.width = c.height = 11; var ctx =
c.getContext('2d'); ctx.beginPath(); ctx.arc(5, 5, 4, 0, 2 * Math.PI, false);
ctx.closePath(); ctx.strokeStyle = '#ccc'; ctx.lineWidth = 2; ctx.stroke();
//增加星座名称图层
var majorName = A.catalog({shape: c, labelColumn: 'name', displayLabel: true,
labelColor: '#fff', labelFont: '14px sans-serif', name: '星座名称'});
aladin.addCatalog(majorName);
majorName.addSources(A.source(210.2, 54.65, {name: 'Ursa Major (大熊座)'}));
majorName.addSources(A.source(191.128, 39.549, {name: 'Canes Venatici (猎犬座)'}));
majorName.hide();
//增加星座连线图层
var majorLine = A.graphicOverlay({name: '星座连线', color: '#F0FFFF',
lineWidth: 1});
aladin.addOverlay(majorLine);
majorLine.add(A.polyline([ [2.29452158, 59.14978110], [10.12683778,
56.53733116],
[14.1772154, 60.7167403], [21.45396446, 60.23528403], [28.59885697, 63.670
10079]]));
majorLine.add(A.polyline([ [165.934, 61.760], [165.466, 56.387], [178.470,
53.705], [183.859, 57.037], [193.512, 55.956], [200.997, 54.956],
[206.929, 49.315] ]));
majorLine.add(A.polyline([ [188.431, 41.359], [194.008, 38.318] ]));
majorLine.hide();
//增加梅西耶天体图层
```

```

var cat = A.catalog({name: '梅西耶天体', sourceSize: 14, color: '#aa2222'});
aladin.addCatalog(cat);
cat.addSources([A.marker(210.8022083333, 54.3488888889, {popupTitle: 'M101',
  popupDesc: '<em>Bmag:</em> 7.86<br/><em>Spectral type:</em> SABc<br/>More info in <a target="_blank" href="https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=m101&submit=submit+id">Simbad</a> <a target="_blank" href="https://en.wikipedia.org/wiki/Pinwheel_Galaxy"> wikipedia</a>' } )]);

```

2. 月球叠加层代码（部分）：

```

var c = document.createElement('canvas'); c.width = c.height = 11; var ctx =
c.getContext('2d'); ctx.beginPath(); ctx.arc(5, 5, 4, 0, 2 * Math.PI, false);
ctx.closePath(); ctx.strokeStyle = '#ccc'; ctx.lineWidth = 2; ctx.stroke();
//增加特征地形标记（环形山、月海、月陆）
var geoFeatures = A.catalog({shape: c, labelColumn: 'name', displayLabel: true,
labelColor: '#fff', labelFont: '14px sans-serif', name: '月面主要地貌'});
aladin.addCatalog(geoFeatures);
//环形山
geoFeatures.addSources(A.source(-11.36, -43.31, {name: '第谷环形山'}));
geoFeatures.addSources(A.source(-20.5, 10.1, {name: '哥白尼环形山'}));
//月海
geoFeatures.addSources(A.source(59.1, 17.0, {name: '危海'}));
geoFeatures.addSources(A.source(51.3, -7.8, {name: '丰富海'}));
//月陆
geoFeatures.addSources(A.source(10.0, 38.4, {name: '高加索山脉'}));
geoFeatures.addSources(A.source(-3.7, 18.9, {name: '亚平宁山脉'}));
geoFeatures.hide();
//增加月球上的中国名
var ChineseNameOnTheMoon = A.catalog({shape: c, labelColumn: 'name',
displayLabel: true, labelColor: '#FFFF00', labelFont: '14px sans-serif', name:

```

```
'月球上的中国名'}});
aladin.addCatalog(ChineseNameOnTheMoon);
//嫦娥三号着陆区
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(-19.52, 44.12, {name: '紫微撞
击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(-19.45, 44.10, {name: '天市撞
击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(-19.49, 44.15, {name: '太微撞
击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(-19.51, 44.12, {name: '广寒宫
着陆区'}));
//嫦娥四号着陆区
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(176.15, -45.34, {name: '织女撞
击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(177.57, -46.30, {name: '河鼓撞
击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(178.81, -44.93, {name: '天津撞
击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(175.83, -44.56, {name: '泰 山
'}));
//其它区域
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(148.46, 78.35, {name: '毕昇撞
击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(113.66, 80.12, {name: '蔡伦撞
击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(-137.82, -69.07, {name: '张钰
哲撞击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(-138.91, -9.96, {name: '万户撞
击坑'}));
ChineseNameOnTheMoon.addSources(A.source(-134.66, 8.10, {name: '郭守敬
```

```

撞击坑' }));

ChineseNameOnTheMoon. hide();

//增加探测器着陆点位置

var landingSites = A. catalog({color: '#FF0000', sourceSize: 16, name: '月球探测器着陆点'});

aladin. addCatalog(landingSites);

//嫦娥

landingSites. addSources([A. marker(-19.51, 44.12, {popupTitle: '嫦娥三号',
popupDesc: '登陆日期: 2013 年 12 月 14 日 21 时 11 分<br/>数据下载访问 <a href="http://moon.bao.ac.cn/" target="_blank">探月工程数据发布与信息服务系统</a>' })]);

landingSites. addSources([A. marker(177.6, -45.45, {popupTitle: '嫦娥四号',
popupDesc: '登陆日期: 2019 年 01 月 03 日 10 时 26 分' })]);

//Apollo

landingSites. addSources([A. marker(23.47297, 0.67408, {popupTitle: 'Apollo 11',
popupDesc: 'Launch date: July 20, 1969, 20:18:04 UTC<br/>More info <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_11" target="_blank">in wikipedia</a>' })]);

landingSites. addSources([A. marker(-23.42157, -3.01239, {popupTitle: 'Apollo 12',
popupDesc: 'Launch date: November 19, 1969, 06:54:35 UTC<br/>More info <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_12" target="_blank">in wikipedia</a>' })]);

landingSites. hide();

```

3. 火星叠加层代码（部分）：

```

var geoMarsFeatures = A. catalog({shape: c, labelColumn: 'name', displayLabel: true,
labelColor: '#fff', labelFont: '14px sans-serif', name: '火星主要地貌'});

aladin. addCatalog(geoMarsFeatures);

//火星表面主要地貌

geoMarsFeatures. addSources(A. source(226.2, 18.65, {name: 'Olympus Mons

```

```

(奥林匹斯山)')));
geoMarsFeatures.addSources(A.source(-59.2, -13.9, {name: 'Valles Marineris
(水手谷)')));
geoMarsFeatures.hide();
//火星探测器着陆点位置
var landingSitesMars = A.catalog({sourceSize: 16, name: '火星探测器着陆点',
color: '#4050F0'});
aladin.addCatalog(landingSitesMars);
landingSitesMars.addSources([A.marker(-47.95, 22.27, {popupTitle: 'Viking 1
(海盗一号)', popupDesc: 'Landing date: July 20, 1976 11:53:06 <br/>More
info <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Viking_1" target="_blank">in
wikipedia</a>'}))]);
landingSitesMars.addSources([A.marker(-125.7, 68.22, {popupTitle: 'Phoenix
(凤凰号)', popupDesc: 'Landing date: May 25, 2008 23:53:44 UTC <br/>More
info <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Phoenix_(spacecraft)"
target="_blank">in wikipedia</a>'}))]);
landingSitesMars.addSources([A.marker(-33.22, 19.13, {popupTitle:
'Pathfinder (探路者)', popupDesc: 'Landing date: July 4, 1997 16:56:55 UTC
<br/>More info <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_Pathfinder"
target="_blank">in wikipedia</a>'}))]);
landingSitesMars.hide();

```


致 谢

光阴荏苒，日月如梭，转瞬间三年已经过去了。由衷感谢崔辰州老师对我的关怀和指导。最早认识崔老师是在 2015 年于北师大举办的第二届 WWT 颁奖典礼上，当时崔老师的随和以及对天文的热情给我留下了很深的印象，没想到第二年我就有幸成为了崔老师的研究生。犹记 2016 年 5 月拖着行李刚到国家天文台，崔老师亲自来到电梯口接我还要帮忙拿行李，让我深受感动。崔老师待人十分友善，没有一点架子，是值得尊敬的师者。在科研方面，崔老师严格要求，鼓励我们积极参加相关会议并要求做学生报告，这对我们的表达能力和学术见识是很好的锻炼。在论文写作方面也离不开崔老师的详细指导与严格要求，再次感谢！

由衷感谢樊东卫老师。作为我的第二导师，在科研上详细的指导给与了我极大的帮助。很多时候我花很长时间搞不定的问题，经樊老师指点很快就解决了。

由衷感谢中国虚拟天文台团队的所有老师和学长学姐们。感谢米琳莹、李珊珊、许允飞、韩军、何勃亮、李正、崔顺、王川中。大家在学习和生活中给与了我大量的关心与帮助，我同时也从大家身上学到了很多学习工作和为人处世的道理。

由衷感谢国家天文台教育处的杜红荣老师、马怀宇老师和艾华老师以及中国科学院大学天文学院的高原老师、王亚明老师、黄亚芳老师、毛永娜老师，在课程学习和社会活动方面给予我的帮助与支持。

由衷感谢国家天文台、中国科学院大学天文学院、中国科学院大学天文协会的小伙伴们，能认识大家是我的荣幸。感谢张昶、邓霖、吕令杰、王远明、马晓辉等，难忘和你们一起晚上观星、拍星的时光。

由衷感谢所有曾经给予我关心和帮助的老师、同学和朋友！也希望大家能够实现自己心中的理想。

由衷感谢我的父母和妹妹，你们的关怀与支持时时陪伴着我、激励着我。你们是我最大的动力和幸福，使我顺利完成学业。

研究生毕业不是学习的终点，而是下一个起点。终身学习，才能不断进步。

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

2011 年 09 月——2015 年 06 月,在陕西师范大学旅游与环境学院获得学士学位。

2016 年 09 月——2019 年 06 月, 在中国科学院国家天文台攻读硕士学位。

获奖情况:

- 1.2016-2017 年度“优秀学生干部”
- 2.2017-2018 年度“优秀学生干部”
- 3.2018-2019 年度“优秀学生”

已发表（或正式接受）的学术论文:（书写格式同参考文献）

[1]张磊, 樊东卫, 崔辰州等. 海量巡天在线可视化技术综述[J]. 天文学进展, 2019（已接收）