



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

The Principles and Methods of Discrete Global Grid Systems for
Geospatial Information Subdivision Organization

童晓冲 贲进 著

空间信息剖分组织的 全球离散格网 理论与方法



测绘出版社

空间信息剖分组织的全球离散格网 理论与方法

The Principles and Methods of Discrete Global Grid Systems for
Geospatial Information Subdivision Organization

童晓冲 贲进



测绘出版社

• 北京 •

©童晓冲 2016

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

为构建具有全球连续性、层次性和动态性的地球空间数据模型,本书围绕全球离散格网系统组织、管理地球大范围的空间信息这一主题展开研究,重点论述了格网构建、格网编码、格网索引、空间数据建模、格网数据可视化与应用模式等内容,建立了一套完整的六边形全球离散格网下空间信息剖分组织的理论与方法。

本书可供地球空间信息科学、遥感科学与技术、地理信息系统研发、对地观测、信息资源开发、空间信息系统集成、资源环境及国土资源调查与测绘、卫星技术应用、地理影像管理等学科领域的研究开发者、管理者阅读参考,也可作为大学相关专业高年级学生和研究生的教学用书或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

空间信息剖分组织的全球离散格网理论与方法/童晓冲,贲进著. —北京:测绘出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-5030-3576-0

I. ①空… II. ①童… ②贲… III. ①地理信息系统—研究 IV. ①P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 017676 号

责任编辑	贾晓林	执行编辑	侯杨杨	封面设计	李伟
责任校对	曹平	责任印制	陈超		
出版发行	测绘出版社	电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045		010—68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司	经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm				
印 张	14.25	字 数	357 千字		
版 次	2016 年 6 月第 1 版	印 次	2016 年 6 月第 1 次印刷		
印 数	001—800	定 价	56.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3576-0

审 图 号 GS(2016)634 号

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

前 言

随着对地观测手段的不断进步,在广大区域甚至全球范围应用遥感数据和其他类型空间信息的几率大大增加。在这种应用背景下,以传统平面数据模型为基础,分区域进行局部空间数据组织的模式,已不能合理、有效地满足全球空间信息管理与应用的需要。构建具有连续性、层次性和动态性的全球数据模型已成为广受关注的重要研究方向,其中构建全球离散格网系统(discrete global grid system, DGGS),正是针对该问题提出的一种有效的解决方案。

全球离散格网采用特定方法将地球均匀剖分,形成无缝无叠的多分辨率格网层次结构,采用单元地址编码代替传统地理坐标参与数据操作,其优势在于:①以整个地球为研究对象,更适合处理全球尺度的问题;②单元图形与地面位置一一对应,有助于建立以位置为对象的多源数据处理模式;③单元大小随格网层次不断变化,在结构上支持多分辨率数据处理;④单元具有严密的层次隶属关系,是一个天然的全球空间索引结构;⑤单元运算可完全借助编码实现,有利于提高数据计算和处理效率。因此,我们认为全球离散格网为海量空间数据的统一建模、处理与分析提供了新的途径,有望弥补当前各类数据共享、使用过程中的不足。

全球离散格网系统是一种与存储、处理、分发、可视化、聚合、转换等空间计算系统具有天然关联性的数学参考模型,它在全球表面无缝且同质,可以被用来整合各类空间数据。离散格网的单元就像地球表面多维的电子数据表格,既可以像数据库一样对空间数据做各种统计、计算,又可以利用格网间的集合算子实现空间分析与处理。其中,六边形格网由于其几何与拓扑属性的特殊性,受到许多学者的关注,与传统矩形格网相比,它具有更多的优秀属性,这些属性有助于提高类似空间分析、系统模拟、模式识别、特征提取、影像匹配等应用的效果与精度。另外,现有的空间数据应用模式是对原始数据本身进行加工、处理、融合,形成数据产品后,叠加到全球格网上,进行数据的管理与显示。随着终端用户对空间数据需求的多元化,这种以产品为中心的数据组织模式,在应对多用户需求的过程中,用户是被动方,并不参与数据组织的任何环节,无法满足多用户不同种类的需求。而采用直接在全球格网上进行空间数据处理与分析的方式,数据在源头就进行了格网化建模,数据与格网单元进行同构化处理,用户可以依据个人的需求,动态地选择相应的数据类型、区域、比例尺、波段,并按需重组后进行数据融合、多分辨率分析、特征提

取、分类识别、空间关系分析等相关操作,完成用户自定义数据的制作。

本书围绕全球六边形离散格网的空间数据组织、管理与应用进行展开,在结构体系上采取的是渐进式结构。首先是对现有国内外全球离散格网的研究现状进行综述,尤其是对六边形格网的发展,进行了系统的梳理。其次,从数学空间定义的角度深入研究了六边形格网数学空间的构建,基本运算与操作等内容,并将平面无限空间中的数学定义扩展到球面有限空间上,实现了球面六边形格网数学空间的设计。在此基础上,通过启发式算法优化设计了球面几何属性更优异的全球格网。完成了格网空间的各类定义后,本书将重点放在格网上的空间数据模型,探讨了传统矢量、栅格数据模型在全球六边形离散格网上的构建、设计与表达方法,并通过全球格网可视化的方式进行显示。最后,本书针对全球格网下的典型空间运算与操作进行讨论,并给出了部分有益的结论。

在本书出版之际,首先感谢导师张永生教授多年来的指导、培养与帮助,本书的写作倾注了导师大量的心血,不论是选题还是撰写与修改,都得到了导师多次耐心的点拨与指导。在本书的研究和整理过程中,解放军信息工程大学的高俊院士从战略的高度给予了前瞻性的指导;武汉大学李德仁院士、肖志峰老师在 SIMG 网格模型方面给予了很多帮助;作者的博士后导师北京师范大学的吴立新教授以及北京大学的程承旗教授、中科院地理所的周成虎院士、中国矿业大学(北京)的赵学胜教授等也在全球离散格网的研究中给予了作者大力的支持。值此书稿完成之际,谨向各位老师表示衷心的感谢!同时,感谢佛罗里达大学(University of Florida)的郑熙强博士,他给作者提供了他的博士论文,并给予了帮助;感谢南俄勒冈大学(Southern Oregon University)的凯文·萨赫尔(Kevin Sahr)教授,在和他的交流中,作者受益匪浅;感谢加拿大罗盘新技术公司(PYXIS Innovation Inc)的首席执行官佩里·彼得森(Perry Peterson),给作者提供了相关资料,并邀请作者参加国际开放地理空间联盟(Open Geospatial Consortium, OGC)全球离散格网标准工作组(Discrete Global Grid Systems Standards Working Group, DGGS SWG)的相关工作。感谢武汉大学的乐鹏教授邀请参加 OGC 在国内的推广工作中德青年学者的双边交流活动。感谢解放军信息工程大学地理空间信息学院的秦志远教授、冯伍法教授、余旭初教授、张占睦教授、朱述龙教授、刘智教授、朱宝山教授、姜挺教授、万刚教授、戴晨光教授、江刚武教授等师长及遥感技术教研室全体同事在作者研究过程中给予的大力支持与帮助;感谢本书所有参考文献的作者,他们的研究给予了作者很多启迪与灵感。

感谢国家自然科学基金(41201392、41271391、40671163)、国家“863”项目(2009AA12Z218)、国家“973”项目(61399)的资助,使得我们能够顺利进行相关课

题的研究。本书的出版得到了测绘地理信息科技出版基金和解放军信息工程大学地理空间信息学院出版基金的资助。

全球离散格网系统是解决全球空间数据无缝集成、共享与动态模拟的关键和基础,是下一代地球空间信息系统数据模型发展的一个重要方向,涉及许多理论与方法,且处于加速发展阶段。本书只是该领域中一个方面的缩影,远未涵盖其所有细节。另外,限于作者的研究深度和学术水平,虽然历经数稿的修改,书中错误与疏漏之处仍在所难免,敬请读者不吝赐教。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 引 言	1
§ 1.2 全球离散格网系统的研究现状	2
§ 1.3 研究意义	15
§ 1.4 结构安排	17
第 2 章 平面六边形格网层次结构 HQBS 与空间运算	19
§ 2.1 引 言	19
§ 2.2 六边形格网层次结构 HQBS 的建立	19
§ 2.3 HQBS 单元的标识	24
§ 2.4 HQBS 的运算	32
§ 2.5 HQBS 的空间索引	46
§ 2.6 HQBS 与其他坐标系的快速转换	48
§ 2.7 实验与分析	51
§ 2.8 本章小结	54
第 3 章 六边形层次格网结构 HQBS 在球面的扩展	55
§ 3.1 引 言	55
§ 3.2 HQBS 结构在二十面体上的排布	55
§ 3.3 HQBS 结构在正二十面体上的扩展	60
§ 3.4 适用于 HQBS 结构的高精度全球离散格网生成	79
§ 3.5 实验与分析	101
§ 3.6 本章小结	108
第 4 章 全球离散格网上的空间数据建模	109
§ 4.1 引 言	109
§ 4.2 全球离散格网上的矢量数据建模	109
§ 4.3 全球离散格网上的栅格数据建模	133
§ 4.4 实验与分析	151
§ 4.5 本章小结	154

第 5 章 离散格网数据的空间可视化方法·····	156
§ 5.1 引 言 ·····	156
§ 5.2 可视化区域裁剪与格网动态生成 ·····	156
§ 5.3 离散格网数据的实时显示 ·····	162
§ 5.4 从平面格网到球面格网的可视化 ·····	166
§ 5.5 空间数据的格网化调度与尺度综合 ·····	166
§ 5.6 实验与分析 ·····	168
§ 5.7 本章小结 ·····	171
第 6 章 全球离散格网的空间域操作与若干应用·····	172
§ 6.1 引 言 ·····	172
§ 6.2 全球离散格网的空间域操作 ·····	172
§ 6.3 全球离散格网的若干应用 ·····	187
§ 6.4 本章小结 ·····	207
第 7 章 总结与展望·····	208
§ 7.1 总 结 ·····	208
§ 7.2 展 望 ·····	209
参考文献·····	211

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Introduction	1
§ 1.2	Research Status of Discrete Global Grid System (DGGS)	2
§ 1.3	Research Significance	15
§ 1.4	Structure	17
Chapter 2	Hexagonal Quaternary Balanced Structure (HQBS) and Spatial Arithmetic	19
§ 2.1	Introduction	19
§ 2.2	Design of the Hexagonal Quaternary Balanced Structure (HQBS)	19
§ 2.3	Identifying of the Hexagonal Quaternary Balanced Structure (HQBS)	24
§ 2.4	Operations of the Hexagonal Quaternary Balanced Structure (HQBS)	32
§ 2.5	Spatial Index of the Hexagonal Quaternary Balanced Structure (HQBS)	46
§ 2.6	Coordinate Transformation between HQBS and other Coordinate Systems	48
§ 2.7	Experiments and Analyses	51
§ 2.8	Conclusions	54
Chapter 3	Extention of Plane HQBS Structure on Spheres	55
§ 3.1	Introduction	55
§ 3.2	Arrangement of the HQBS Structure on Icosahedron	55
§ 3.3	Extention of the HQBS Structure on Icosahedron	60
§ 3.4	Generation of High Precision Discrete Global Grid System (DGGS) Suiting for the HQBS Structure	79
§ 3.5	Experiments and Analyses	101
§ 3.6	Conclusions	108

Chapter 4 Spatial Data Modeling on Discrete Global Grid System (DGGS)	
.....	109
§ 4.1 Introduction	109
§ 4.2 Vector Data Modeling on Global Grids	109
§ 4.3 Raster Data Modeling on Global Grids	133
§ 4.4 Experiments and Analyses	151
§ 4.5 Conclusions	154
Chapter 5 The Spatial Visualization Methods of Discrete Grid Data	156
§ 5.1 Introduction	156
§ 5.2 Visualization Area Reduction and Dynamic Generation Algorithms of Global Grid	156
§ 5.3 Real-time Display of Discrete Grid Data	162
§ 5.4 Visualization from Planar Grids to Spherical Grids	166
§ 5.5 Schedule and Integration Rules of Spatial Data on Global Grids	166
§ 5.6 Experiments and Analyses	168
§ 5.7 Conclusions	171
Chapter 6 Operations and Applications of Discrete Global Grid on Spatial Domain	172
§ 6.1 Introduction	172
§ 6.2 Operations of Discrete Global Grid on Spatial Domain	172
§ 6.3 Applications of Discrete Global Grid	187
§ 6.4 Conclusions	207
Chapter 7 Summary and Prospect	208
§ 7.1 Summary	208
§ 7.2 Prospect	209
References	211

第1章 绪论

§ 1.1 引言

随着科技的发展,人们观察世界的视角、手段和方式正在逐步发生变化,传统的以局部区域为研究对象的方法和思路正面临极大的挑战,面向全球的研究正悄然兴起。根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要》,我国将在2020年前后拥有数十颗在轨运行的对地观测卫星(中华人民共和国科学技术部,2006;李德仁,2007),它们不仅能全天时、全天候地完成全球普查覆盖,而且能对众多热点地区实施详查,为我国进行全球可持续发展的研究、资源环境变化监测、灾害预警预报、国家安全和“数字地球”建设等诸多方面提供丰富的基础数据。但是,当前相关的应用手段、工具和方法并未得到同步发展,致使大部分数据都只是被存储,并没有得到充分地利用。美国前副总统戈尔在《数字地球》一文中明确指出:“问题的根源在于信息的处理和显示方法”(Gore,1998)。因此,如何对全球海量空间数据进行有效地组织、管理和利用已成为国内外学术界与应用科学界面临的一大难题。

从对全球的覆盖观测到对重点区域的详查,将获得热点地区从低到高不同分辨率的空间数据。这就需要一种新型的全球多尺度数据模型,更好地支持从背景到目标、从整体到局部的空间观察视角,以保证数据间的平滑过渡以及目标自身的叠加与融合。传统的平面区域数据模型显然不能有效地满足这一需求。因此,构建具有连续性、层次性和动态性的全球数据模型已成为广受关注的重要研究方向(胡鹏等,2001;李德仁等,2005a;Goodchild et al,1992)。从目前地理信息科学及其相关技术的发展趋势来看,无论是“数字地球”还是“数字城市”,都需要人们打破几千年来采用地图投影表达地理空间数据的框框,去探求地理空间数据与全球开展的网格计算相适应的空间数据处理新方法(李德仁等,2003)。如何建立新型的适合全球空间信息无缝多尺度组织、管理与表达的框架,是在实际应用中亟须解决的问题。

1.1.1 从平面数据模型到球面数据模型

人们对空间三维坐标向二维坐标进行转换的理论和方法的研究,已有一百多年的历史,其主要任务是解决由曲面(地球表面)到平面(地图)之间转化的问题。在长期的实践过程中,人们找到了过渡的方法:地图投影。今天,地图投影的种类已多达600多种(Frank et al,2001),投影类型的丰富为空间数据处理提供了极大

的自由度,使复杂的球面数据能够在平面上更加方便地处理。

现有的全球数据分析系统多采用传统的平面数据模型,即通过地图投影把球面数据变换到平面上进行分析和处理。但是,传统的地理数据模型与真正的全球数据模型存在一定的差异,这样的平面地理坐标系统,适合表达和处理地球表面的局部区域数据,而难以处理大范围的全球数据(周成虎,2009)。

投影理论基本解决了球面或椭球面不可展的矛盾,从而建立了二维平面与实际三维空间的对应关系。在以纸张为主要信息载体的过去,由于纸面上只能记录二维信息,因而这样的处理方式是必须的,除此之外别无选择。步入信息时代,数字化的二维平面信息也许最符合人们长期形成的思维定式和使用习惯,却未必是空间数据在计算机中的最佳表示方法。在科学技术突飞猛进的今天,我们完全可以突破平面的限制,按照地球的真实方式存储、管理空间信息,至于平面地图只是空间信息发布时的一种表现方式而已。目前,全球空间数据组织和处理模型的研究已经取得了可喜进展(胡鹏等,2001;林宗坚,1999;王卉等,2004;周启明,2001),其中构建全球离散格网系统(discrete global grid systems,DGGS),正是针对该问题提出的一种解决方案(Goodchild,2000;Sahr et al,2003;Vince et al,2009;White,2000)。

1.1.2 全球离散格网系统的基本思想

所谓全球离散格网系统,是指把地球表面按一定规则离散分割成不同尺度的许多区域,在每块区域中都有一个单独的点与之关联,区域和点的组合定义为单元。根据应用目的不同,任何数据对象均可与区域、点或单元关联。如果仅仅定义了区域的边界,则其中心构成一组与之关联的点集;如果只定义了点,则这些点的沃罗诺伊(Voronoi)图同样可以构成一组与之关联的区域。规则格网适用于地球空间信息组织管理,其基本原理是将球面或者参考椭球面递归分割为面积、形状近似或相等且具有多分辨率层次结构的格网单元,同时采用每个单元对应的地址编码代替地理坐标在球面上进行各种操作(张永生等,2007)。因为不同层次的格网单元在记录位置信息的同时也携带了比例尺和精度信息,所以具有处理多尺度空间数据的潜力。从数据质量的角度思考,任何地球空间数据都有一定精度,可用一系列分辨率不同的格网与之匹配(赵学胜等,2007)。

§ 1.2 全球离散格网系统的研究现状

1.2.1 国外研究现状

近年来,国际学术界和相关应用部门从不同侧面对全球离散格网进行了研究,内容涉及剖分方案的设计、剖分格网的互用性、误差及变形分析、格网编码与索引、

空间分析与应用等。国际地理信息科学权威期刊《国际地理信息科学期刊》(International Journal of Geographic Information Science)、《摄影测量工程与遥感》(Photogrammetric Engineering & Remote Sensing)、《制图学与地理信息科学》(Cartography and Geographic Information Science)、《计算机与地理科学》(Computers & Geosciences)、《国际数字地球期刊》(International Journal of Digital Earth)和《国际摄影测量与遥感学会:地理信息科学国际期刊》(ISPRS International Journal of Geo-Information)等近几年相继刊登了一些与全球格网相关的论文。在学术交流方面,美国已分别于2000年和2004年举办了两次“全球离散格网国际会议”(NCGIA,2000;Southern Terra Cognita,2004),研讨该领域的研究动态。国际摄影测量与遥感学会(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)于2013年11月在中国徐州举行了“全球空间格网与云服务技术”专题研讨会。国际开放地理空间联盟(Open Geospatial Consortium, OGC)于2014年4月成立了全球离散格网标准工作组(discrete global grid systems standards working group, DGGS SWG),正式开展全球离散格网相关国际标准的讨论与制定工作。国际地球观测联盟(Group on Earth Observation, GEO)也将地球空间格网列为2012年至2015年的工作计划内容(吴立新等,2013)。按照构建格网方法的不同,全球离散格网系统当前的研究可大致划分为等经纬度全球格网、变经纬度全球格网、自适应全球格网和正多面体全球格网系统4类(赵学胜等,2007)。

1. 等经纬度全球格网系统

等经纬度全球格网是指采用等间隔的经线和纬线将地球交织分割成若干格网单元,这是地学界最早建立,也是目前应用最广泛的一类全球格网。它将地球表面按相等经纬度增量(如 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 等)划分成一个个单元格,所有的数据都与这些单元相关。等经纬度格网系统在计算机时代之前就得到了广泛的使用,是现有大量空间数据集、处理算法以及软件的空间基础,与空间相关的数据均离不开等经纬度格网系统的使用。等经纬格网对于大多数使用者来说非常熟悉,也易于映射成为普通的数据结构并被显示表达出来,是目前地理信息系统(geographic information system, GIS)软件中的数据、处理算法等的基础(Sahr et al, 2003)。

近年来,国外一些机构对等经纬度格网又进行了一些新的探索。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布的开源软件World Wind就是采用等经纬度全球剖分的典型系统。World Wind把逻辑上相关的影像或地形组织成一个数据集,第0层的分辨率可以是任意合理值,其他层次则采用等经纬度间隔的方法进行递归细分(吕雪峰等,2011)。类似的成果还包括美国佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)研制的VGIS(virtual GIS)、美国国家航空航天局开发的虚拟行星探测工程(virtual planetary

exploration project, VPEP)、美国海军研究生院(Naval Postgraduate School, NPS)研发的 NPSNET(NPS Network)和斯坦福研究所(Stanford Research Institute International, SRI)开发的分布式地形浏览器 TerraVision 等。

很多全球数据集的组织也采用等经纬度剖分,如美国地质调查局(US Geological Survey, USGS)提供的 GTOPO 30 数据集和 ETOPO 5 数据集,还有美国国家航空航天局戈达德宇航中心(Goddard Space Flight Center)提供的 JGP95E5' 数据集等。等经纬度全球格网符合人们的习惯,数据的显示和表达都非常方便。而且经纬度与其他坐标系统之间的转换较简单,相关算法也很成熟。但是,等经纬度格网系统也存在着明显的缺陷,如:

(1)由于格网单元面积不等造成统计分析的复杂性。

(2)格网单元的面积变形、形状变形以及内点位置误差由赤道向南北极逐渐递增。

(3)格网系统的最顶端和最底端的单元形状实际上并不是显示在平面上的矩形而是三角形。

(4)等经纬度全球格网系统的矩形单元具有复杂的邻接特性,每一个单元都有四个与之共边的且中心点等距的邻接单元,同时它还有四个与之共顶点的且与中心点不等距的邻接单元,这种复杂的邻接关系不利于模拟与应用。

同时,基于传统等经纬度格网在处理海量空间数据时也存在如下几个问题(赵学胜,2004):

(1)传统的空间数据按专题分层、分图幅组织管理,每一图层有一个空间参考系和投影坐标系,因投影形变分布不均匀导致像素的地面位置大小分布不均匀。

(2)对多分辨率和大尺度转换的支持较弱,缺乏从本地到全球的透视转换机制。

(3)空间索引面向图幅范围,缺乏大范围或全球统一的标准,以至于跨图幅接边处理复杂。

(4)等经纬度格网没有顾及空间数据的密度和大小,极易导致数据冗余。

(5)难以进行数据质量的评估和比较,不利于建模及科学计算。

2. 变经纬度全球格网系统

近年来,为了使同一层次格网的面积近似相等,业界提出了变间隔的经纬格网剖分,其典型代表是椭球四叉树(ellipsoid quad tree, EQT)剖分(Ottoson et al, 2002)。基本思想是采用经差固定、纬差变化,或纬差固定、经差变化的经纬线剖分地球,以保证同一层次的格网单元面积相等。2005年6月底,世界互联网巨鳄 Google 发布了极具震撼力的全球三维搜索工具——Google Earth。Google Earth 采用的也是变经纬度全球格网,经差固定,纬度方向则是在通用横轴墨卡托投影(universal transverse Mercator, UTM)基础上再做等间隔划分,两极地区做特殊

处理(龚健雅,2007)。也有一些全球数据集的组织采用变经纬度格网,如美国国家地理空间情报局(National Geospatial Intelligence Agency,NGA)的前身美国国家影像制图局(National Imagery and Mapping Agency,NIMA)提供的数字高程数据(digital terrain elevation data,DTED)采用了纬度间隔固定($3''$),而经度间隔从赤道到两极逐渐增大的方案(NIMA,2003)。挪威学者 Bjørke(2003)在此基础上采用了比数字高程数据更细的全球格网方案,进一步保证了格网单元的面积相等。

一些著名的国际组织和面向全球的国际科学活动也设计了有针对性的变经纬度全球格网,其中比较具有代表性的为国际卫星云气候项目(international satellite cloud climatology project,ISCCP)设计的 ISCCP 格网。该格网基于地球等距圆柱投影,采用水平分带,将全球分成 72 个投影带,每个纬度带宽为 2.5° ,然后在每一个投影带上再进行垂直分带,每个投影带上垂直划分的份数不等,保证划分的每一单元在面积上与赤道处 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的格网单元面积相等。这样在赤道处可以划分出 144 个单元,而在两极处只有 3 个单元,见图 1.1(a)。还有就是在全球海洋和冰川模拟中常用的并行海洋规划格网(parallel ocean program grid,POP grid)和海洋资源保护格网(ocean resources conservation association grid,ORCA grid),它们利用非均匀的矩形单元覆盖整个海洋,只是在两极处的处理有所区别,如图 1.1(b)、(c)所示(NCL,2014)。

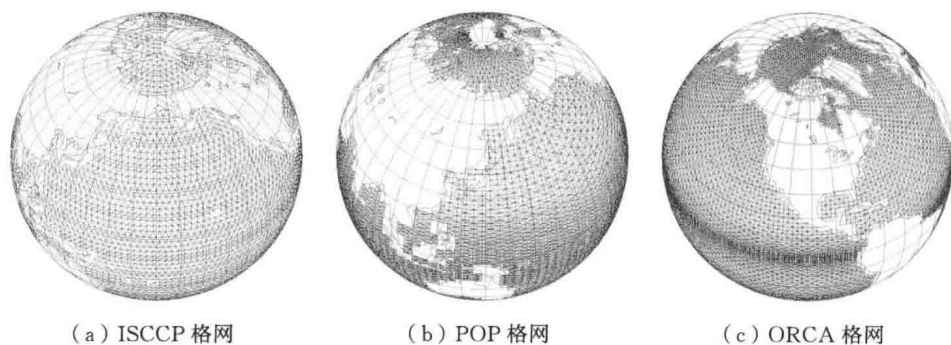


图 1.1 变经纬度全球格网

总体而言,基于经纬度坐标的全球格网产生的单元都存在高纬地区单元变形严重的问题。为了改进上述缺陷,GeoFusion(2010)将全球划分为 6 个区域,其中 4 个处于南北纬 45° 之间,采用矩形格网覆盖,两个处于高纬地区,采用三角形格网覆盖。GeoFusion 通过这种方式,充分利用了两者的优势,避免了在高纬地区使用矩形格网带来的形变。而在专业领域,美国环境系统研究公司(Environmental Systems Research Institute,ESRI)于 2003 年发布的 ArcGlobe 9 更是独占鳌头。作为地理信息产业界的领袖,美国环境系统研究公司历来重视空间数据模型的改进与完善。为了给空间数据库(geodatabase)提供一个基于全球的三维数据组织、

浏览和交互标准,美国环境系统研究公司于2002年6月在ArcGIS系列产品中集成了GeoFusion的全球格网技术(单蕴睿,2006)。由此可见,美国环境系统研究公司的最终目标并不仅仅是解决空间数据三维可视化的问题,而是试图建立一种新颖的数据模型。另外,澳大利亚和新西兰政府在Landcare Research计划中,设计了一套用于空间分析与科学数据采集的全球格网SCENZ-Grid(Purse et al, 2013),该格网的初始划分方法与GeoFusion相似。类似的处理方法还有Zhou等(2013)设计的四进制四边形格网。这些方案的基本思想仍然是对中、低纬及高纬、两级地区分别处理,因而数学模型较复杂。

3. 自适应全球格网系统

自适应全球格网是以球面上的实体要素为基础,按照实体的某种特征对地球表面进行格网化。Lukatela(1987)在其开发的Hipparchus系统中利用球面Voronoi多边形剖分建立了全球不规则三角格网模型(triangulated irregular network, TIN),格网单元可根据实体数据的密度自适应调整。图1.2是两类自适应格网的例子。

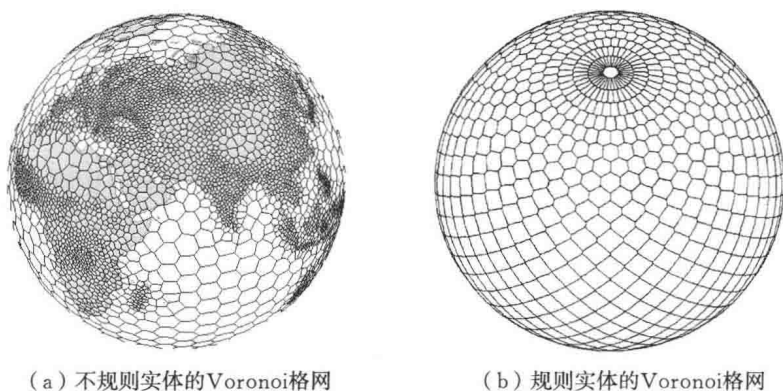
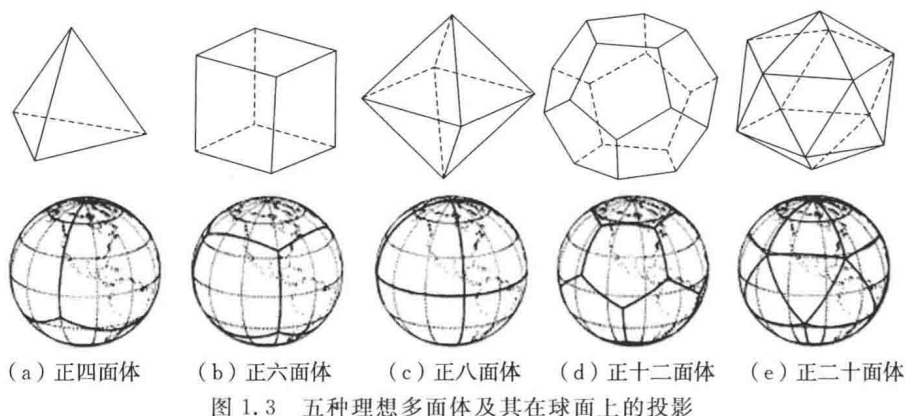


图1.2 两类自适应格网

基于Voronoi剖分的自适应格网比规则或半规则剖分产生的格网具有更大的灵活性。但是,Voronoi格网的递归剖分相当困难,几乎不可能建立多分辨率金字塔结构,这对大规模场景的三维可视化等需要多尺度数据支持的应用非常不利。

4. 正多面体全球格网系统

20世纪80年代末,为了有效管理全球多分辨率数据,满足不同应用的需求,许多学者研究了采用正多面体剖分地球的方法。研究发现,基于多面体剖分的全球格网系统由理想多面体、多面体的定位、多面体面上的层次剖分、平面与球面的对应和点在格网单元中的分布五个相互独立的要素唯一确定(Sahr et al, 2003)。只有五种正多面体投影到球面上能产生形状相同的球面多边形且顶点所在多边形的数目相等(White et al, 1992),故称为“理想多面体”(platonic solids),如图1.3所示。



美国著名学者 Fuller 较早从事球面离散化的研究并且发明了网格球顶结构 (Wikipedia, 2014), 一些与全球格网系统相关的研究都直接或间接地受到了他的影响, 图 1.4 是一个典型的 Geodesic 格网和格网球顶建筑的例子。

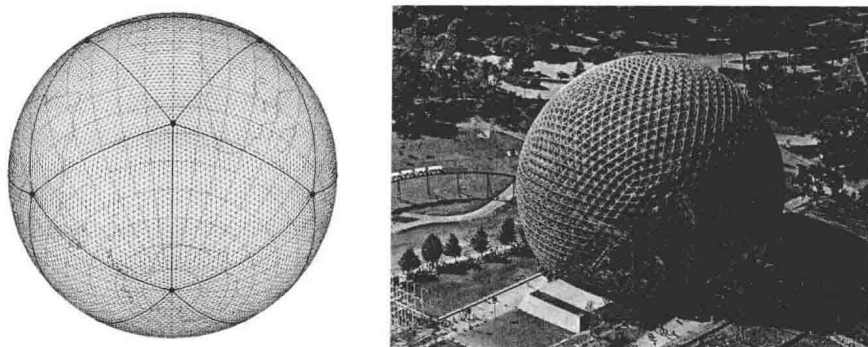


图 1.4 Fuller 的 Geodesic 格网和格网球顶建筑

近年来, 在全球离散格网系统相关的基础理论方面: Dutton (1984, 1989)、Goodchild 等 (1992)、Szalay 等 (2005) 研究了在正八面体上进行的三角剖分, 如图 1.5(a) 所示; Alborzi 等 (2000) 研究了基于立方体的四边形剖分, 如图 1.5(b) 所示; White (2000) 研究了基于正二十面体的菱形剖分, 如图 1.5(c) 所示; Sahr 等 (2003)、Vince (2006)、Zheng (2007)、Peterson (2011) 和 Tong 等 (2013b) 研究了正二十面体上六边形剖分的全球格网, 如图 1.5(d) 所示。基于多面体的全球格网数据系统在矢量数据结构 (Dutton, 1999)、空间数据索引 (Dutton, 1996a)、制图综合 (Dutton, 1996b)、全球动态数据结构 (Goodchild et al, 1992)、全球土地监测 (Suess et al, 2004; Wagner, 2005)、全球海洋分析 (Kidd et al, 2003)、全球气候模型 (David et al, 2002)、海洋路径规划 (Tsatcha et al, 2014) 等诸多方面得到了广泛应用。