

文章编号: 1001-1595(2011)02-0243-06

基于 QTM 的 WGS 84 椭球面层次剖分及其特点分析

白建军¹, 孙文彬², 赵学胜²

1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

Character Analysis and Hierarchical Partition of WGS 84 Ellipsoidal Facet Based on QTM

BAI Jianjun¹, SUN Wenbin², ZHAO Xuesheng²

1. College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China

Abstract In order to building multi-resolution global data model, the existent partition methods of spherical surface were analysed, and a hierarchical tessellation meshes of WGS 84 ellipsoidal surface based on quaternary triangular meshes(QTM) is put forward. The area and side length of the multi-resolution meshes on different levels are calculated, and the character of the cells is also analyzed. The research indicates that the cells are approximately regular, hierarchical nesting, and so on, which can be the basis of its utility and error control.

Key words: quaternary triangular meshes(QTM); WGS 84 ellipsoidal facet; hierarchical partition; discrete global grid systems

摘 要: 在分析现有球面剖分的基础上, 发展出一种基于四元三角格网(QTM)的 WGS 84 椭球面层次剖分方法; 并计算不同层次剖分格网的面积、边长变化情况, 分析格网的特点。研究表明该格网近似规则, 且具有层次嵌套性等特征, 为其实用化和误差控制提供了依据。

关键词: QTM WGS 84 椭球面; 层次剖分; 全球离散格网系统

中图分类号: P208 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40971213)

1 引言

为更加高效、便捷、无缝地组织、管理和应用全球尺度的各种分辨率的数据, 自 20 世纪 80 年代以来, 人们对全球离散网格系统进行了大量的研究^[1]。这些离散网格系统均是建立在球面剖分的基础上的, 球面剖分方法可以分成 3 种类型, 即基于经纬线的球面剖分、基于 TIN 的不规则球面剖分和基于球内接正多面体的球面剖分方法。基于经纬度的球面剖分方法, 由于其格网形状、面积变化较大, 格网点分布不均匀, 以此为基础组织、管理全球多分辨率数据时, 必然会产生大量的数据冗余; 基于 TIN 的不规则球面剖分方法建立的数据模型, 数据存储和操作复杂, 而且层次之间关联困难, 从现有的文献来看, 仅仅用来建立单分辨率的全球地形模型^[2]。

而基于球内接正多面体剖分的格网单元比较规则, 格网点分布较均匀, 且具有层次性和连续

性、全球坐标系统统一的特点, 可以用于解决 GIS 空间定位、空间检索机制的网格划分, 可以作为适应时空坐标系变化的一种空间数据的表示和组织方法, 能更方便地实现对空间信息资源的整合^[3]。为此, 众多学者对基于正多面体的球面剖分方法进行了研究^[1, 3-11]。主要应用在: 全球空间数据的层次索引^[4-6]、制图综合^[7]、全球空间数据建模^[8-9]、球面动态数据结构^[10-11]、全球气象模拟等方面^[12]。其中, 基于球面内接正八面体和正二十面体的 QTM 层次格网研究较多。文献[8, 13]分析了该类格网的特点及单元变形特点。球面 QTM 格网形状一致、大小近似相等, 并具有层次嵌套性, 便于空间数据的多分辨率层次表达及规范化管理^[8]。然而这种剖分是在球面上进行的, 不是对更接近于地球的椭球面的剖分, 因此剖分没有顾及到地球的真实形状, 这样在表达全球尺度数据时, 数据质量难以保证, 进而影响其实用化。为此, 作者在分析传统的基于正多面体的球

面剖分的基础上, 将其改进并发展到椭球面上, 实现对 WGS-84 椭球面的层次剖分, 并对剖分后不同层次格网单元的面积、边长变化情况进行了计算, 分析了格网的特点, 旨在为后续基于椭球面 QTM 格网的实用化和误差控制提供理论依据。

2 基于 WGS 84 椭球面的层次剖分方法

2.1 层次剖分原理

基于 WGS-84 椭球面进行剖分时, 首先选择该椭球面上的六个点, 即两极极点、赤道与主子午线、 90° 、 180° 和 270° 子午线的交点。将这六个点按图 1 所示进行连接, 形成八个初始的三角形区域 $r_i (i= 0, 1, \dots, 7)$, 由于这些点位于椭球面上, 因此称为椭球面三角形, 八个初始的椭球面三角形区域就成为椭球面 Ω 的一个初始剖分 Σ 。

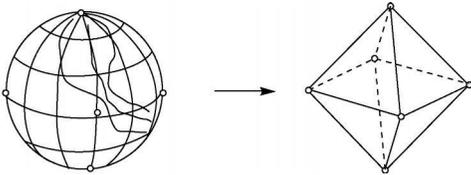


图 1 由六个椭球面点连接而成的初始椭球面三角格网剖分

Fig.1 The original triangular meshes connected by six sample points on the ellipsoidal surface

对于椭球面区域 $D \in \Omega$ 的剖分 Σ 中的每个子区域 r 又可以通过在其边界或内部增加新点, 来细化成一个子剖分 Σ_r 。在本文中, 对每个区域三个顶点的经纬度进行两两平分, 得到三个新的顶点 (这三个顶点位于椭球面上)。将这三个新顶点和原顶点通过如图 2 所示彼此连线, 形成四个新的三角形面片, 用这四个新的三角形面片替代原来的三角形面片, 就得到一个对椭球面较高分辨率的逼近, 如此递归进行, 直到满足一定的分辨率要求为止。这样的递归剖分称为四元三角剖分(QTM)。

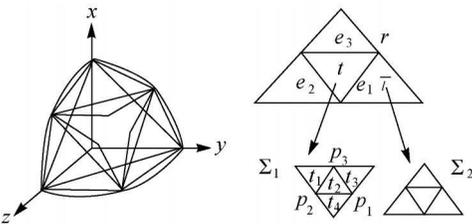
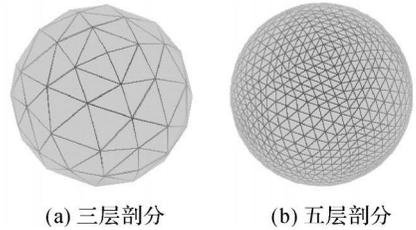


图 2 椭球面三角形区域的递归剖分

Fig.2 The recursive partition of the triangular region on the ellipsoidal surface

图 3 是不同层次的 QTM 剖分, 其中图 3(a) 是第三层剖分, 图 3(b) 是第五层剖分。需要说明的是这里的 QTM 格网是基于椭球面的, 格网点位于椭球面上, 是以总地球椭球面作为空间参考基准的, 因此所有的几何量算均可在椭球面上进行。



(a) 三层剖分 (b) 五层剖分

图 3 椭球面在不同层次的递归剖分

Fig.3 The recursive partition of the ellipsoidal surface at different level

上述层次剖分是一个三元组, 可以表示成

$$H = (\alpha, \beta, \gamma)$$

式中,

$$\alpha = \left\{ \Sigma_0, \Sigma_1, \dots, \Sigma_m \right\}$$

使得

$$\forall j = 0, \dots, m, \quad \Sigma_j = (V_j, E_j, F_j), \quad F_j > 1$$

$D(\Sigma_0)$ 覆盖初始区域 D , 且 $\forall j > 0 \exists ! i < j$, 使得

$$\exists r_j \in F_i \text{ 有 } r_j \equiv D(\Sigma_j)$$

$$\beta = \left\{ \left(\Sigma_i, \Sigma_j \right) \mid \Sigma_j \in \alpha, \exists r_j \in F_i, r_j \equiv D(\Sigma_j) \right\}$$

$\forall: \alpha \rightarrow \bigcup_{i=0}^m F_i$ 是自反的

$$\forall (\Sigma_i, \Sigma_j) \in \beta, \Sigma_i \leftrightarrow \Sigma_j \in F_i \text{ 且 } r_j \equiv D(\Sigma_j)$$

对于每个 $(\Sigma_i, \Sigma_j) \in \beta$, Σ_i 叫做 Σ_j 的父亲, 相反 Σ_j 叫做 Σ_i 的孩子。

2.2 剖分格网点的经纬度坐标计算

基于椭球面的三角格网本身就是一种坐标系, 其三角格网点位可以通过行列号来标识, 如图 4 所示。三角格网点的坐标用 (i, j) 表示, 其中 i, j 分别表示行号和列号。该坐标也可以用一维数组来表示, 其顺序采用从上向下, 从左到右的次序, 如图 4 所示。数组的序列号可以用来表示三角格网高程点在数据文件的存储位置, 它和三角格网点的行列坐标的转换关系如下:

设格网点 (i, j) 在一维数组中的顺序号为 $D(i, j)$, 由 (i, j) 计算 $D(i, j)$ 有

$$D(i, j) = 0 + \dots + i + j + 1$$

由 $D(i, j)$ 计算 (i, j) 有

$$i = \max n (n \text{ 满足 } 2D(i, j) - n^2 - n > 0)$$

$$j = D(i, j) - \frac{i^2 + i}{2} - 1$$

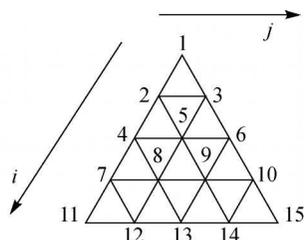


图 4 格网点的行列坐标示意图

Fig. 4 Sketch map of row/column coordinates of the grid vertex

对于给定的一个层次, 每个三角格网点的经纬度坐标和行列号存在一定的对应关系。

对于一个椭球面三角格网来说, 只要知道初始三角形格网点的经纬度坐标, 就可以通过其经纬度坐标的两两平分求得下一级格网点的经纬度坐标, 如此递归, 可以计算出任意剖分层数的格网点的经纬度坐标。其计算公式简单, 这里不详细说明。但是对于其中一个顶点为极点的三角形, 由于极点的奇异性, 其经度无法确定, 则需要进行特别处理, 下面对此进行介绍。

首先, 根据格网的剖分层数 m , 求出格网点的总行数为: $n = 2^m + 1$ 。格网点的行列号按图 4 所示标定, 满足 $(i = 0, 1, \dots, n - 1, 0 \leq j \leq i)$, 第 i 行的格网点数为 $i + 1$, 总格网点数为

$$Z = 1 + 2 + \dots + n = \frac{n^2 + n}{2}$$

以 0° 经线和 45° 纬线围成的椭球面三角形剖分为例, 三个格网角点的经差 $L = 90^\circ$, 纬差 $B = 45^\circ$ 。设格网点 (i, j) 的经纬度坐标分别为 $\lambda_{i,j}$ 、 $\varphi_{i,j}$, 对于同一行格网点, 其纬度相同, 各行纬度用下式计算

$$\varphi_{i,j} = 90 - Bi / (n - 1)$$

各点的经度计算则较复杂, 当行号 $i = 2^k$, ($k = 1, 2, \dots, n$), 其经度为

$$\lambda_{i,j} = 0 + Lj / i$$

当 $2^k < i < 2^{k+1}$, 取 q 为满足 $i > 2^k$ 的 $\max(2^k)$, $p = i - q$

当 $j \leq p$ 时

$$\lambda_{i,j} = 0 + Lj / 2^{n+1}$$

当 $2^n > j > p$ 时

$$\lambda_{i,j} = 0 + L(2j - p) / 2^{n+1}$$

当 $j \geq 2^n$ 时

$$\lambda_{i,j} = 0 + L(2^n + j - p) / 2^{n+1}$$

3 WGS 84 椭球面 QTM 剖分的特点分析

3.1 剖分格网的几何变化分析

文献[8]对基于球面 QTM 剖分进行了研究, 并通过计算发现, 对于球面 QTM 格网空间, 随着格网的不断细化, 三角形的最大和最小面积的比值与最大和最小边长的比值越来越大, 但是其变化速度越来越小, 最终收敛到 1.73 和 1.86 左右, 都不超过 1.9。

本文计算了基于 WGS-84 椭球面 QTM 不同剖分层次的边长和面积的变化情况。已知格网点的经纬度坐标, WGS-84 椭球面三角格网的顶点之间的大地线长度 S 的计算公式如下^[14]

$$S = A \sigma + \left(\frac{2B}{\cos^2 A_0} x + \frac{2C}{\cos^4 A_0} y \right) \sin \sigma$$

为了计算椭球面三角形的面积, 将其按照纬线划分成许多小的格网条带区域, 如图 5 所示。设格网条带区域介于纬度 B_1 和 B_2 、经差 ΔL 之间, 则每个格网条带区域的椭球表面积采用下列公式计算

$$Z = b^2 \Delta L \left[\frac{\arctan h(e \sin B)}{2e} + \frac{\sin B}{2(1 - e^2 \sin^2 B)} \right]_{B_1}^{B_2}$$

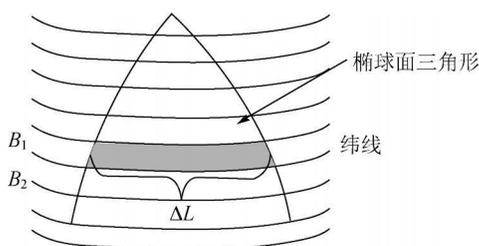


图 5 椭球面三角形表面面积的递归计算

Fig. 5 The recursive calculation of the area of ellipsoidal triangle

每个格网条带顶点的纬度采用三角形顶点纬度两两平均等分的方法计算, 其相应的经度根据归化纬度与大地纬度的关系在球面上求出, 再转换到椭球面上, 分别取条带左侧两点和右侧两点经度的平均值求得经差, 经度的详细计算过程参见文献[14]。椭球面三角形的表面积就是这些格网条带表面积的和。计算过程中, 采用迭代算法, 使两次计算结果变化小于 1%, 以保证计算精度。

计算结果如表 1、表 2 所示。通过与球面 QTM 剖分的比较, 发现基于 WGS-84 椭球面 QTM 剖分和基于圆球 QTM 剖分, 三角形面积及其最大与最小面积的比值 A_{\max} / A_{\min} 略有变化, 但变化不大(如图 6(a) 所示), 同样, 三角形边长

及其最大与最小边长的比值 L_{max}/L_{min} 也略有变化,变化也不大(如图 6(b)所示),其比值分别最

终收敛到 1.74 和 1.88 左右,都不超过 1.9。这保证了 QTM 格网点的近似规则和均匀性。

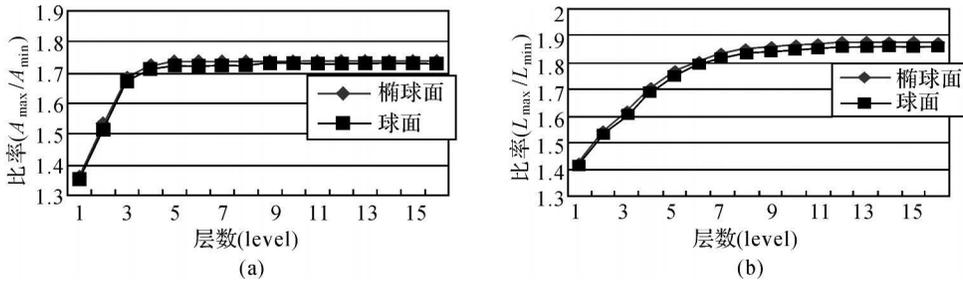


图 6 椭球面和球面 QTM 剖分三角形最大最小面积比率 A_{max}/A_{min} 及最大最小边长比率 L_{max}/L_{min} 比较

Fig. 6 The comparison between the ratio of L_{max}/L_{min} and A_{max}/A_{min} of ellipsoidal QTM and spherical QTM

表 1 WGS 84 椭球面和球面 QTM 格网在不同剖分层次的面面积变化

Tab. 1 The area difference between the ellipsoidal QTM and spherical QTM in different levels

| 层次 | 三角形个数 | 椭球面 | | | 球面 | | | 对应比例尺 |
|----|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------|
| | | A_{max}/m^2 | A_{min}/m^2 | A_{max}/A_{min} | A_{max}/m^2 | A_{min}/m^2 | A_{max}/A_{min} | |
| 1 | 4 | 18 682 860e+ 06 | 13 741 375e+ 06 | 1.359 61 | 18 714 788e+ 06 | 13 824 186e+ 06 | 1.353 77 | |
| 2 | 16 | 4 871 450e+ 06 | 3 169 992e+ 06 | 1.536 74 | 4 882 958e+ 06 | 3 217 334e+ 06 | 1.517 70 | |
| 3 | 64 | 1 319 585e+ 06 | 782 139e+ 06 | 1.687 15 | 1 320 293e+ 06 | 789 190e+ 06 | 1.672 97 | |
| 4 | 256 | 336 456e+ 06 | 194 931e+ 06 | 1.726 02 | 336 458e+ 06 | 196 352e+ 06 | 1.713 54 | |
| 5 | 1 024 | 84 527e+ 06 | 48 695e+ 06 | 1.735 83 | 84 516. 1e+ 06 | 49 029. 0e+ 06 | 1.723 80 | |
| 6 | 4 096 | 21 158e+ 06 | 12 172e+ 06 | 1.738 28 | 21 154. 2e+ 06 | 12 253. 6e+ 06 | 1.726 37 | |
| 7 | 16 384 | 5 290 364 481 | 3 042 757 053 | 1.738 67 | 5 290 115 024 | 3 063 160 475 | 1.727 01 | |
| 8 | 65 536 | 1 322 692 232 | 760 680 226 | 1.738 82 | 1 322 627 004 | 765 775 703 | 1.727 17 | 1: 1 亿 |
| 9 | 262 144 | 330 679 377 | 190 169 491 | 1.738 86 | 330 662 893 | 191 443 024 | 1.727 21 | 1: 5 000 万 |
| 10 | 1 048 576 | 82 670 239. 5 | 47 542 337. 7 | 1.738 87 | 82 666 106. 8 | 47 860 699. 9 | 1.727 22 | 1: 2 000 万 |
| 11 | 4 194 304 | 20 667 584. 6 | 11 885 582. 2 | 1.738 88 | 20 666 551. 6 | 11 965 171. 4 | 1.727 23 | 1: 1 000 万 |
| 12 | 16 777 216 | 5 166 896. 3 | 2 971 395. 4 | 1.738 88 | 5 166 639. 2 | 2 991 291. 1 | 1.727 23 | 1: 500 万 |
| 13 | 67 108 864 | 1 291 725. 5 | 742 847. 8 | 1.738 88 | 1 291 661. 2 | 747 821. 8 | 1.727 23 | 1: 200 万 |
| 14 | 2. 684 4e+ 08 | 322 931. 8 | 185 711. 2 | 1.738 89 | 322 915. 9 | 186 955. 3 | 1.727 24 | 1: 100 万 |
| 15 | 1. 073 7e+ 09 | 80 733. 0 | 46 427. 8 | 1.738 89 | 80 729. 0 | 46 738. 8 | 1.727 24 | 1: 50 万 |
| 16 | 4. 295 0e+ 09 | 20 183. 3 | 11 607 | 1.738 89 | 20 182. 3 | 11 684. 7 | 1.727 24 | 1: 25 万 |

表 2 WGS 84 椭球面和球面 QTM 格网在不同剖分层次的边长变化

Tab. 2 The space difference between the ellipsoidal QTM and spherical QTM in different levels

| 层次 | 三角形个数 | 椭球面 | | | 球面 | | | 对应比例尺 |
|----|---------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|-------------------|------------|
| | | L_{max}/m | L_{min}/m | L_{max}/L_{min} | L_{max}/m | L_{min}/m | L_{max}/L_{min} | |
| 1 | 4 | 7. 096 22e+ 06 | 4. 984 94e+ 06 | 1. 423 53 | 7. 084 18e+ 06 | 5. 009 27e+ 06 | 1. 414 21 | |
| 2 | 16 | 3. 845 01e+ 06 | 2. 489 17e+ 06 | 1. 544 73 | 3. 833 93e+ 06 | 2. 504 63e+ 06 | 1. 530 73 | |
| 3 | 64 | 2. 009 24e+ 06 | 1. 244 12e+ 06 | 1. 614 99 | 2. 007 32e+ 06 | 1. 252 32e+ 06 | 1. 602 88 | |
| 4 | 256 | 1. 060 44e+ 06 | 622 000 | 1. 704 89 | 1. 058 47e+ 06 | 626 158 | 1. 690 41 | |
| 5 | 1 024 | 549 456 | 310 993 | 1. 766 78 | 548 103 | 313 079 | 1. 750 68 | |
| 6 | 4 096 | 281 100 | 155 495 | 1. 807 77 | 280 314 | 156 540 | 1. 790 68 | |
| 7 | 16 384 | 142 618 | 77 747. 6 | 1. 834 37 | 142 189 | 78 270 | 1. 816 65 | |
| 8 | 65 536 | 71 964. 7 | 38 873. 8 | 1. 851 24 | 71 745. 5 | 39 134. 9 | 1. 833 28 | 1: 1 亿 |
| 9 | 262 144 | 36 194. 6 | 19 436. 9 | 1. 862 16 | 36 080. 0 | 19 567. 4 | 1. 843 87 | 1: 5 000 万 |
| 10 | 1 048 576 | 18 164. 6 | 9 718. 44 | 1. 869 09 | 18 105. 7 | 9 783. 7 | 1. 850 59 | 1: 2 000 万 |
| 11 | 4 194 304 | 9 103. 59 | 4 859. 22 | 1. 873 47 | 9 073. 62 | 4 891. 86 | 1. 854 83 | 1: 1 000 万 |
| 12 | 16 777 216 | 4 558. 51 | 2 429. 61 | 1. 876 23 | 4 543. 37 | 2 445. 93 | 1. 857 52 | 1: 500 万 |
| 13 | 67 108 864 | 2 281. 38 | 1 214. 81 | 1. 877 98 | 2 273. 75 | 1 222. 97 | 1. 859 21 | 1: 200 万 |
| 14 | 2. 684 4e+ 08 | 1 141. 36 | 607. 40 | 1. 879 08 | 1 137. 53 | 611. 48 | 1. 860 28 | 1: 100 万 |
| 15 | 1. 073 7e+ 09 | 570. 89 | 303. 70 | 1. 879 77 | 568. 97 | 305. 74 | 1. 860 95 | 1: 50 万 |
| 16 | 4. 295 0e+ 09 | 285. 51 | 151. 85 | 1. 880 21 | 284. 55 | 152. 87 | 1. 861 38 | 1: 25 万 |

3.2 剖分格网的特点

基于 WGS-84 椭球面的 QTM 层次剖分与基于圆球内接正多面体的剖分具有很大的相似性,生成的格网和基于正多面体剖分的格网也存在相似的特性。通过对基于椭球面的 QTM 剖分的特点的分析,能够得出椭球面 QTM 格网具有以下特点:

(1) 近似规则性。该三角格网剖分近似规则,格网点分布较均匀,且在椭球面的任意位置,同一层次的三角形(格网)大小近似相等。

(2) 层次嵌套性。该三角格网剖分具有层次嵌套性,每一层次的三角形是上一层次三角形的细分,便于多分辨率层次表达。

(3) 格网点数量少且与经纬度格网转化容易。依据该三角格网的位置(即行列坐标)能够比较容易地求出相应的经纬度坐标。给定剖分层数 m ,每个初始三角形(全球对应八个初始三角形)剖分格网点数为

$$1 + 2 + \dots + (2^m + 1) = \frac{(2^m + 1)(2^m + 2)}{2} = 2^{2m-1} + 2^m + 2^{m-1} + 1$$

全球总的格网点数为

$$4(2^m + 1)^2 - 4[2(2^m + 1) - 1] + 2 = 2^{2m+2} + 2$$

在同等分辨率的情况下, QTM 格网点数量大约是经纬度格网点数量的一半。它们数据量之间的比例关系为

$$\frac{4n^2 - 4(2n-1)}{4(2n-1)(n-1)4} = \frac{(n-1)^2}{2n^2 - 3n + 1} \approx \frac{1}{2}$$

(4) 适于规范化管理。格网点的坐标以及点与点之间的关系隐含在记录位置中,便于规范化存储管理,且该三角格网层次剖分保留了拓扑关系,特别是邻近关系,便于格网的邻近搜索查询。

4 结 论

全球离散格网系统是一种基于球面的可以无限细分地球体拟合格网,它具有层次性和全球连续性特征,已成为国际 GIS 学术界一个新的研究热点。本文在分析已有球面 QTM 剖分的基础上,发展一种基于 WGS-84 椭球面的 QTM 层次剖分方法。分析格网的特性,重点计算 QTM 边长的变化情况,并将椭球面三角形细分成若干个条带区域,基于迭代的原理,通过求条带区域的面积和,计算 QTM 面积变化情况。分析和计算结

果表明:与基于球面剖分的 QTM 格网相比, WGS-84 椭球面 QTM 三角形的边长和面积及其最大与最小值的比率略有变化,但变化不大,保持了较好的规则性;格网点位分布较均匀,不仅较好地顾及到了地球的真实形状,而且具有层次性,保留了拓扑关系,实现了全球范围的统一定位。上述这些特性,一方面使得基于 WGS-84 椭球面的 QTM 格网系统的实用化成为可能,另一方面也为该类格网系统的精度分析和误差控制提供了依据。

参考文献:

- [1] SAHR K, WHITE D, KIMERLING A J. Geodesic Discrete Global Grid Systems[J]. Cartography and Geographic Information Science, 2003, 30(2): 12F-134.
- [2] BJØRKE J T, GRYTEN J K, HÆGER M, et al. Examination of a Constant-area Quadrilateral Grid in Representation of Global Digital Elevation Models [J]. International Journal of Geographic Information Science, 2004, 18(7): 653-664.
- [3] LI Deren, ZHU Xinyan, GONG Jianya. From Digital Map to Spatial Information Multigrad: A Thought of Spatial Information Multigrad Theory[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(6): 642-650. (李德仁,朱欣焰,龚健雅.从数字地图到空间信息格网:空间信息多级网格理论思考[J].武汉大学学报:信息科学版,2003,28(6):642-650.)
- [4] OTTO E J, ZHU Hongwen. Indexing on Spherical Surfaces Using Semi-quadrads [C] // Proceedings of the Third International Symposium on Advances in Spatial Databases. Singapore: Springer Verlag, 1993: 509-529.
- [5] YANG Weiping, GOLD C. Managing Spatial Objects with the VMO-tree [C] // Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Data Handling. Delft: [s. n.], 1996: 15-31.
- [6] GOODCHILD M F, YANG S. A Hierarchical Data Structure for Global Geographic Information Systems[J]. Computer Vision and Geographic Image Processing, 1992, 54(1): 3F-44.
- [7] DUTTON G. Encoding and Handling Geospatial Data with Hierarchical Triangular Meshes [C] // Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Data Handling. Delft: [s. n.], 1996: 34-43.
- [8] ZHAO Xuesheng, HOU Miaole, BAI Jianjun. Spatial Data Modeling Based on Global Discrete Grid[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007. (赵学胜,侯妙乐,白建军.全球离散格网的空间数字建模[M].北京:测绘出版社,2007.)
- [9] ZHAO Xuesheng, BAI Jianjun, WANG Zhipeng. An Adaptive Visualized Model of the Global Terrain Based on

- QTM[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(3): 316-320. (赵学胜, 白建军, 王志鹏. 基于 QTM 的全球地形自适应可视化模型[J]. 测绘学报, 2007, 36(3): 316-320.)
- [10] TONG Xiaochong, BEN Jin, ZHANG Yongsheng. The Generation Algorithm for Spherical Voronoi Diagram of Different Aggregation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(1): 83-89. (童晓冲, 賁进, 张永生. 不同集合的球面矢量 VORONOI 图生成算法[J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 83-89.)
- [11] FEKETE G, TREINISH L. Sphere Quadrees: A New Data Structure to Support the Visualization of Spherically Distributed Data [C] // Proceedings of SPIE, 1990. 242-253.
- [12] WHITE D. Global Grids from Recursive Diamond Subdivisions of the Surface of an Octahedron or Icosahedron[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 4(1): 93-103.
- [13] WHITE D, KIMMERLING A J, SAHR K, et al. Comparing Area and Shape Distortion on Polyhedral Based Recursive Tessellations of the Sphere[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(8): 808-827.
- [14] KONG Xiangyuan, GUO Jiming, LIU Zongquan. Foundation of Geodesy[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001: 265. (孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001: 265.)
- (责任编辑: 丛树平)
-
- 收稿日期: 2010-05-24
 修回日期: 2010-09-10
 第一作者简介: 白建军(1969—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为空间数据模型和 GIS 应用。
 First author: **BAI Jianjun** (1969—), male, PhD, associate professor, majors in spatial data model and application of GIS.
 E mail: **bjj@snnu.edu.cn**
-
- (上接第 242 页)
 武汉: 武汉大学出版社, 2008.)
- [11] YANG Yuanxi. Theory of Robust Estimation and Its Application[M]. Beijing: Ba Yi Publishing House, 1993. (杨元喜. 抗差估计理论及其应用[M]. 北京: 八一出版社, 1993.)
- [12] YANG Yuanxi, SONG Lijie, XU Tianhe. Theory of Robust Estimation for Geodetic Correlated Observation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(2): 95-99. (杨元喜, 宋力杰, 徐天河. 大地测量相关观测抗差估计理论[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 95-99.)
- [13] CARPENTER R N, HARRIS J D, FOREMAN C R. Bathymetric Survey: Using a SeaBat 8101 Multibeam Echo Sounder Mounted in the Forward Looking Direction[C] // Proceedings of IEEE Conference and Exhibition of OCEANS' 2000 MTS. Providence: IEEE, 2000.
- [14] ZHU Qing, LI Deren. Error Analysis and Processing of Multibeam Sounding[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1998, 23(1): 2-4. (朱庆, 李德仁. 多波束测深数据的误差分析与处理[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(1): 2-4.)
- [15] WU Ziyin, LI Jiabiao. The Editing Methods of Multi-beam Survey Data[J]. Marine Science Bulletin, 2000, 19(3): 74-78. (吴自银, 李家彪. 多波束测深的数据编辑方法[J]. 海洋通报, 2000, 19(3): 74-78.)
- (责任编辑: 雷秀丽)
-
- 收稿日期: 2010-07-15
 修回日期: 2010-11-13
 第一作者简介: **王海栋**(1983—2011), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事测量数据处理理论与方法研究。
 First author: **WANG Haidong**(1983—2011), male, master, assistant engineer, majors in the theory and method of surveying data processing.