

引文格式:赵学胜,苑争一,赵龙飞,等.一种改进的近似等面积 QTM 剖分模型[J].测绘学报,2016,45(1):112-118.DOI:10.11947/j. AGCS.2016.20140598.

ZHAO Xuesheng, YUAN Zhengyi, ZHAO Longfei, et al. An Improved QTM Subdivision Model with Approximate Equal-area [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(1): 112-118. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2016. 20140598.

一种改进的近似等面积 QTM 剖分模型

赵学胜,苑争一,赵龙飞,朱思坤

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083

An Improved QTM Subdivision Model with Approximate Equal-area

ZHAO Xuesheng, YUAN Zhengyi, ZHAO Longfei, ZHU Sikun

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: To overcome the defect of large area deformation in the traditional QTM subdivision model, an improved subdivision model is proposed which based on the “parallel method” and the thought of the equal area subdivision with changed-longitude-latitude. By adjusting the position of the parallel, this model ensures that the grid area between two adjacent parallels combined with no variation, so as to control area variation and variation accumulation of the QTM grid. The experimental results show that this improved model not only remains some advantages of the traditional QTM model (such as the simple calculation and the clear corresponding relationship with longitude/latitude grid, etc), but also has the following advantages: ①this improved model has a better convergence than the traditional one. The ratio of area_{max}/min finally converges to 1.38, far less than 1.73 of the “parallel method”; ②the grid units in middle and low latitude regions have small area variations and successive distributions; meanwhile, with the increase of subdivision level, the grid units with large variations gradually concentrate to the poles; ③the area variation of grid unit will not cumulate with the increasing of subdivision level.

Key words: discrete global grid system; QTM; parallel ring method; geometry deformation of grid

Foundation support: General Program of the National Natural Science Foundation of China(No. 41171306); Young Program of the National Natural Science Foundation of China(No. 41201416)

摘要:为克服传统 QTM 格网面积变形较大的缺陷,在“纬线法”剖分的基础上,引入变经纬度等面积剖分的思想,提出了一种新的等面积改进剖分模型。该模型通过调整纬线的位置,确保两条相邻纬线间的格网面积总和无变化,从而达到控制 QTM 格网面积变化及变化积累的目的。试验结果表明,该改进模型在保留了“纬线法”QTM 剖分的优点(如计算简单、与经纬度格网间的对应关系明确等)以外,还具有以下优势:①模型的收敛性更好,格网单元面积最大、最小比最终收敛到 1.38,远小于“纬线法”的 1.73;②中低纬度区的格网单元面积变化较小,分布连续,且随剖分层次的增加,变化大的格网区域逐渐向两极移动集中;③格网单元的面积变化不会随层次的增加而累积增大。

关键词:全球离散格网;四元三角网;纬线环;格网几何变形

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2016)01-0112-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41171306);国家自然科学基金青年项目(41201416)

随着全球一体化研究的深入,越来越多的宏观应用需要在大范围甚至全球尺度上进行,传统地图投影在有效性、精确性和连续性等方面具有一定的局限性^[1-2]。而全球离散格网(discrete global grid, DGG)模型的提出,为构建大范围、多

分辨率、全球统一无缝的空间定位基础框架提供了一个新的解决思路。其中,文献[3]提出的四元三角网(quaternary triangular mesh, QTM)模型具有层次组织、全球连续和格网单元形状统一等特性,在许多领域得到了较为广泛的应用,如全球

数据的组织与管理^[4-6]、全球数据质量与地图综合^[3]、全球地形可视化^[7]、全球多分辨率水淹模拟^[8-9]、全球影像数据检索^[10]、数字地形索引及压缩模型^[11],等。但是该模型同层格网面积变化较大,且变化区域呈带状分布,误差较难控制,使许多地学应用的统计分析无法进行。所以,构建 QTM 等面积(或近似等面积)剖分单元模型问题,已成为目前制约其广泛应用的主要因素之一。而传统的球面等面积格网剖分模型,除了应用等面积投影(如 Rosca&Plonka 等面积投影^[12]、Snyder 等面积投影^[13])外,大多数是采用变经纬度剖分方案^[14-19],其格网单元多为球面四边形,不但存在着嵌套困难及邻近搜索复杂等缺陷^[2,20],且很难移植到 QTM 模型上。为此,文献^[21]提出了一种基于小圆弧的等面积剖分模型,但该方法计算复杂,坐标转换困难。而文献^[22]针对传统投影方法计算复杂的缺陷,推导出一种新的等面积投影公式。该公式具有对称性,计算简便,但是仍然没有解决传统投影方法边界扭曲严重的缺陷,且球面点定位复杂,影响坐标转换的效率。文献^[23]提出的基于传统 QTM 剖分的改进模型——“纬线法”剖分方案,主要提高了格网数据与地理坐标的转换效率,但其剖分单元面积变化问题仍然没有得到实质性的改变。

为此,本文在“纬线法”QTM 剖分的基础上,引入 Björke 变经纬度剖分的思想,提出一个基于“纬线环法”的球面近似等面积四元三角剖分模型。该方案既保留了传统 QTM 剖分模型的层次嵌套性、格网统一性和全球无缝连续等特点,又将同层格网单元的面积变化控制在了很小的范围内,完全满足了绝大部分应用的需求。

1 “纬线环法”剖分方案基本原理

1.1 “分割纬线”的纬度计算方法

将球面上两条相邻纬线间的环状区域称为“纬线环”(图 1)。以八分之一球面为例,具体剖分原理如下:对于某个特定的剖分层次,首先用八分之一球面的面积去除该层次包含格网单元的个数,得到理想剖分单元的面积;接下来从极点开始($B_0=90^\circ$),依次确定每条分割纬线的位置,使得相邻两条纬线间的“纬线环”面积,等于该条“纬线环”所包含的三角形的个数与理想剖分单元面积的乘积,从而确保该条“纬线环”的面积无变化。该方法可以将剖分单元面积变化控制在“纬线环”的内

部,从而控制面积变化及变化积累,达到近似等面积剖分的效果。所以,该剖分方法称为“纬线环法”。分割纬线纬度的计算方法及推导过程如下。

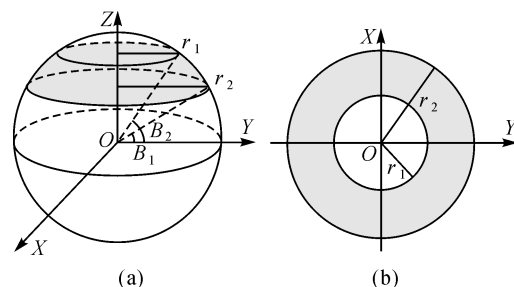


图 1 “纬线环”及其在 XOY 面上的投影

Fig.1 “Parallel loop” and its projection on the XOY

式(1)为球心位于坐标原点的球面方程。根据二重积分的原理,可以求得相邻两条纬线所夹的“纬线环”的面积(如图 1(a)中阴影部分),计算过程如下

$$z = f(x, y) = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \quad (1)$$

$$A = \iint_{D_{xoy}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy = \iint_{D_{xoy}} \frac{R}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} dx dy \quad (2)$$

上述积分中, A 表示“纬线环”的面积; D_{xoy} 为纬线环在 XOY 面上的投影区域; R 为球面半径。化为极坐标形式解上述二重积分可得

$$A = \int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_1}^{r_2} \frac{R}{\sqrt{R^2 - r^2}} r dr = 2\pi R (\sqrt{R^2 - r_1^2} - \sqrt{R^2 - r_2^2}) \quad (3)$$

以正八面体的一个面为例,解出八面体上一条“纬线环”(如图 2(b)中阴影部分)的面积如下

$$A' = \frac{\pi R}{2} (\sqrt{R^2 - r_1^2} - \sqrt{R^2 - r_2^2}) \quad (4)$$

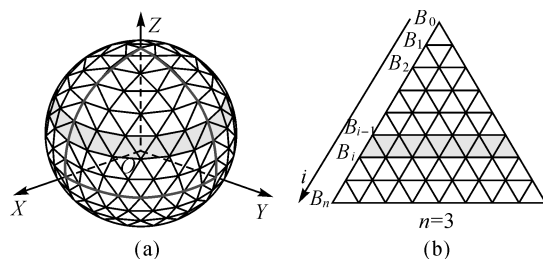


图 2 分割纬线求解过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of solving segmentation parallel

式(4)中, $r_1 = R \cos B_1$ 、 $r_2 = R \cos B_2$,其中,

B_1, B_2 为待求的未知数,用每一条“纬线环”所包含的格网单元个数乘以理想剖分单元面积,得到该条“纬线环”的理想面积,并代入式(4)的右端构造方程,可解出每条分割纬线的纬度。进而按照等分经度的方法进一步分割,得到每一个 QTM 格网结点的经纬度坐标。分割纬线纬度求解的具体步骤如下。

(1) 首先确定第 1 条分割纬线的位置 ($i = 1$)。此时, $B_0 = 90^\circ, r_1 = R \cos B_0, r_2 = R \cos B_1, n$ 表示剖分层次。代入式(4)可得

$$A'_1 = \frac{\pi R^2}{2} (1 - \sqrt{1 - \cos^2 B_1}) = \frac{1}{4^n} \frac{\pi R^2}{2} \quad (5)$$

解式(5)可得,第 1 条纬线的纬度 B_1 为

$$B_1 = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{4^n}\right)^2} \right) \quad (6)$$

(2) 根据第 1 条分割纬线的位置确定第 2 条的位置 ($i = 2$)。将 $r_1 = R \cos B_1, r_2 = R \cos B_2$ 代入式(4)可得

$$A'_2 = \frac{\pi R^2}{2} (\sqrt{1 - \cos^2 B_1} - \sqrt{1 - \cos^2 B_2}) = \frac{3}{4^n} \frac{\pi R^2}{2} \quad (7)$$

解式(7),得到第 2 条纬线的纬度 B_2 为

$$B_2 = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\sqrt{1 - \cos^2 B_1} - \frac{3}{4^n} \right)^2} \right) \quad (8)$$

(3) 以此类推,递归求解各分割纬线的位置,第 i 条纬线的纬度 B_i 见式(9),其中 $0 \leq i \leq 2^n, B_0 = 90^\circ$

$$B_i = \cos^{-1} \sqrt{1 - \left(\sqrt{1 - \cos^2 B_{i-1}} - \frac{2i-1}{4^n} \right)^2} \quad (9)$$

(4) 接下来按“平分经度”的方法确定模型的经度间隔,得到剖分单元节点的经纬度坐标。借鉴“纬线法”QTM 剖分方案^[20],用大圆弧线连接三角形格网的左右两边,而底边用两点间的纬线代替。

总之,在本文的剖分方法中,由于采用了“纬线环”的递归细分方法,下一级单元将保留其上一级单元的分割纬线,而“经度平分”则保证了上下层单元的格网节点具有简单明确的层次对应关系。这些特性将有利于全球多层次格网数据之间的查询与检索。

1.2 剖分单元面积计算

球面三角形的 3 条边是大圆弧线,由于上述剖分方案中的三角形格网的底边是纬线,因此不

能直接应用球面三角形面积计算公式进行计算。笔者采取文献[23]求解的方法,将三角形格网的底边纬线细分,用大圆弧线代替细分后的纬线求解子三角形的面积(如图 3 所示)。细分得越密,计算精度越高。

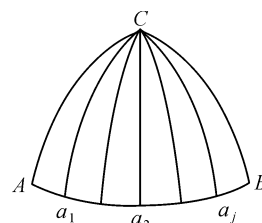


图 3 剖分单元面积的近似计算

Fig.3 Approximate computation of area of subdivision unit

设 A, B, C 为球面上任意 3 点, $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$ 分别为 A, B, C 3 点的向量(笛卡儿坐标系坐标),则球面三角形 ABC 的曲面面积为

$$S = R^2 \left[\sum_{i=1}^3 \alpha_i - \pi \right] \quad (10)$$

$$\alpha_i = \cos^{-1} \frac{|\mathbf{X}_i \times \mathbf{X}_{i-1}|}{|\mathbf{X}_i| |\mathbf{X}_{i-1}|} \cdot \frac{|\mathbf{X}_i \times \mathbf{X}_{i+1}|}{|\mathbf{X}_i| |\mathbf{X}_{i+1}|}$$

$$i = 1, 2, 3; \mathbf{X}_0 = \mathbf{X}_3; \mathbf{X}_4 = \mathbf{X}_1 \quad (11)$$

如图 3 所示,现将三角形格网单元 ABC 的纬线底边 AB 按经度平分成分 n 段,纬线 AB 的长度用 n 段大圆弧线 $a_j a_{j+1}$ 代替,三角形格网 ABC 的面积用 n 个小的球面三角形 $a_j C a_{j+1}$ 来代替,三角形格网的曲面面积的计算公式如下

$$S = \sum_{j=0}^{n-1} S_{a_j C a_{j+1}} = \sum_{j=0}^{n-1} R^2 \left[\sum_{i=1}^3 \alpha_i - \pi \right] \quad (12)$$

2 试验结果及分析

本试验采用上述方法构建了改进的球面 QTM 模型,并与“纬线法”QTM 模型进行了对比。以八分之一球面为例,两种 QTM 剖分模型及它们之间的叠加效果如图 4 所示。从图中可以看出,改进后的“纬线环”法剖分,其分割纬线向极点方向移动,纬度大于相应的“纬线法”分割纬线的纬度。本节将从剖分模型的收敛性、格网单元面积的空间分布以及格网单元面积变化率的分布区段 3 个方面出发,对比两种剖分模型的差异。

2.1 剖分模型收敛性分析

以八面体的一个面为例,计算了 10 个层次的格网单元面积的最大最小值比(area_max/min)、标准差(area_SD)(表 1)及其两种剖分模型随层次

变化的变化趋势图(图 5)。从图中可以看出:随着剖分层次的增加,两种模型的剖分单元面积最大、最小值比越来越大,但其变化速度越来越小,最终收敛到 1.38 和 1.73 左右;剖分单元面积标准差越来越小,其变化速度也越来越小,最终趋于稳定。

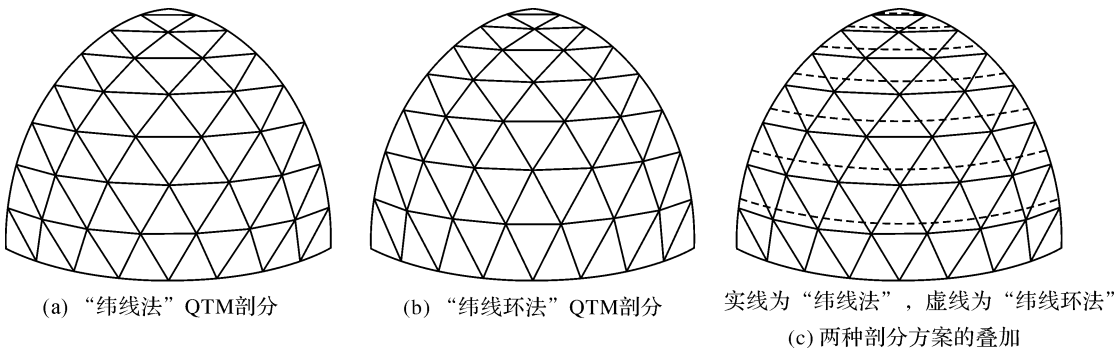


图 4 两种剖分方案及其叠加效果

Fig.4 Two kinds of subdivision schemes and their superposition

表 1 各指标在不同剖分层次的取值

Tab.1 Index values in different levels

层次	三角形 个数	纬线法		改进方法	
		area-max/min	area_SD	area-max/min	area_SD
1	4	1.353 812 565	0.517 136 445	1.186 661 755	0.471 404 521
2	16	1.530 463 278	0.343 590 689	1.269 627 924	0.304 228 748
3	64	1.677 029 977	0.258 487 516	1.338 029 710	0.167 748 119
4	256	1.714 716 465	0.236 651 898	1.364 597 114	0.095 451 834
5	1024	1.724 207 897	0.229 680 661	1.371 282 896	0.054 390 527
6	4096	1.726 584 916	0.227 455 224	1.372 956 182	0.030 400 488
7	16 384	1.727 178 871	0.226 769 805	1.373 372 874	0.016 687 041
8	65 536	1.727 326 077	0.226 565 927	1.373 472 871	0.009 031 593
9	262 144	1.727 359 000	0.226 507 913	1.373 485 470	0.004 836 264
10	1 048 576	1.727 344 400	0.226 498 479	1.373 420 285	0.002 568 582

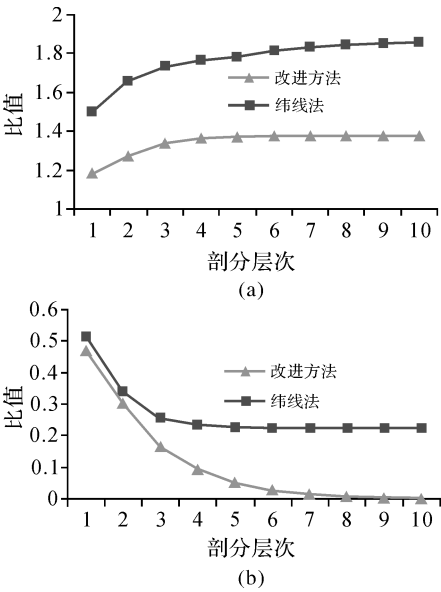


图 5 area_max/min 和 area_SD 随剖分层次的收敛特征

Fig.5 Convergent characters of area_max/min and area_SD by partition levels increasing

2.2 剖分单元面积变化分布区段研究

根据式(13)计算网格单元相对于理想剖分单元的面积变化率。其中,area 为剖分单元面积;area_{norm}为理想剖分单元面积。

$$\text{area_dis_rate} = \frac{\text{area} - \text{area}_{\text{norm}}}{\text{area}_{\text{norm}}} \quad (13)$$

原“纬线法”QTM 剖分单元面积变化率分布区段见表 2。可以看出:原有模型在前几层剖分中面积变化率的分布无明显规律,在第 4 层以后趋于稳定,只有 22%左右的网格单元面积变化率在±5%以内,同时,模型的面积变化情况并没有随着层次的增加得到改善。

改进后的“纬线环法”QTM 剖分单元面积变化率分布区段见表 3。可以看出:该改进模型在前几层剖分中面积变化率的分布无明显规律,在第 5 层以后趋于稳定,50%以上的网格单元面积变化率分布在(−1%,1%)以内;将该区段进一步细分,并

统计了剖分单元面积率在 6—10 层的分布情况,可以看出,格网单元面积变化情况继续得到改善,第 8 层以后剖分单元面积变化率被控制在±0.25%以内达 90%以上,到第 10 层则达到 99.3%。

表 2 “纬线法”剖分单元面积变化率分布区段
Tab.2 Distribution sections of area variation rate in subdivision units %

层次	-∞~-20%	-20%~-10%	-10%~-5%	-5%~5%	5%~10%	10%~20%	20%~+∞
1	0.00	50.00	0.00	0.00	25.00	25.00	0.00
2	12.50	12.50	0.00	43.75	12.50	0.00	18.75
3	12.50	21.88	0.00	28.13	14.06	15.63	7.81
4	6.25	22.66	10.16	22.27	12.50	19.53	6.64
5	3.13	23.05	14.84	21.00	10.55	22.27	5.18
6	4.64	22.85	12.70	21.95	10.69	21.80	5.37
7	3.87	24.28	11.43	22.36	10.75	21.20	6.12
8	3.49	24.46	11.93	22.17	10.68	20.68	6.59
9	3.68	24.31	11.74	22.33	10.70	20.57	6.67
10	3.77	24.29	11.74	22.25	10.69	20.57	6.69

表 3 “纬线环法”剖分单元面积变化率分布区段
Tab.3 Distribution sections of area variation rate in subdivision units %

层次	-∞~-5%	-5%~-3%	-3%~-1%	-1%~1%	1%~3%	3%~5%	5%~+∞
1	50.00	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	25.00
2	31.25	0.00	6.25	31.25	0.00	0.00	31.25
3	4.69	20.32	17.19	18.75	12.50	9.38	17.19
4	2.73	1.95	28.51	32.80	29.29	1.56	3.13
5	0.88	0.88	16.41	62.30	17.97	0.59	0.98

层次	-∞~-0.75%	-0.75%~-0.5%	-0.5%~-0.25%	-0.25%~-0.25%	0.25%~0.5%	0.5%~0.75%	0.75%~+∞
6	6.35	12.55	15.06	31.90	15.04	12.60	6.54
7	1.99	1.46	15.41	62.10	15.58	1.47	2.02
8	0.62	0.64	2.22	93.02	2.22	0.64	0.63
9	0.17	0.20	0.90	97.50	0.89	0.20	0.17
10	0.04	0.05	0.26	99.30	0.26	0.05	0.04

2.3 剖分单元面积变化位置分布研究

以八面体的一个面为例,将球面剖分 5、6、7 层,给每个面积变化率分布区段对应一个特定的灰度值,借助 DirectX 绘制了剖分模型面积变化率的位置分布灰度图(如图 6、7、8)。图中浅色区域的格网单元面积变化率较小,深色区域较大。

从图 6—图 8 及其层次变化可以看出:①“纬线法”剖分得到的 QTM 剖分模型,只有中纬度区域有少量格网面积变化在 1%以内,并呈带状分布,高纬度和赤道附近区域大部分格网单元的面积变化率均大于 5%;②改进后的“纬线环法”QTM 剖分模型,中低纬度区域大部分格网单元的面积变化率集中在 1%以内,且分布均匀,只有高纬度近极点区域格网面积变化率较大;③随着剖分层次的增加,“纬线法”剖分模型的变化区域

无明显变化,而改进后“纬线环法”剖分模型,其变化边界(变化率=1%)逐渐向极点方向移动,变化率<1%的范围越来越大。

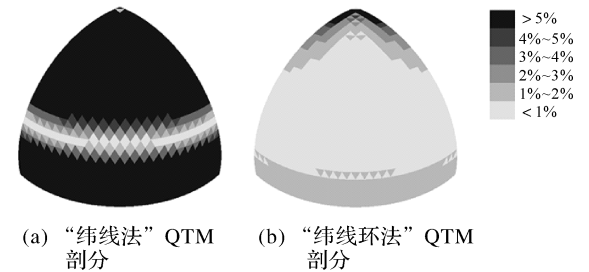


图 6 剖分单元面积变化率的位置分布(第 5 层)
Fig.6 Location distributions of the area variation rate of subdivision units (the 5th level)

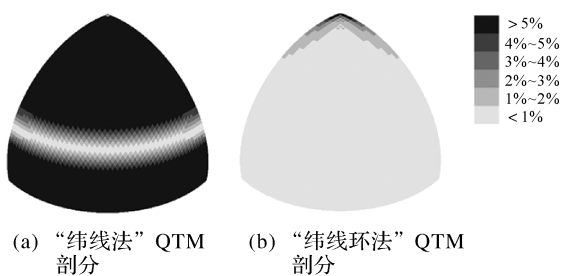


图 7 剖分单元面积变化率的位置分布(第 6 层)

Fig.7 Location distributions of the area variation rate of subdivision units (the 6th level)

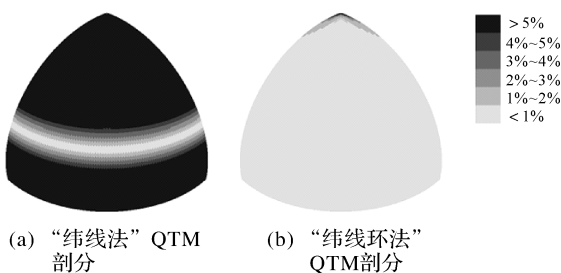


图 8 剖分单元面积变化率的位置分布(第 7 层)

Fig.8 Location distributions of the area variation rate of subdivision units (the 7th level)

3 结 语

本文针对传统 QTM 模型格网面积变形较大的缺陷,在“纬线法”QTM 剖分的基础上,提出一种近似等面积的剖分方案——“纬线环法”QTM 剖分模型。通过与“纬线法”剖分模型进行对比试验,得出以下结论:

(1) 面积变化小。随着格网的不断细化,格网单元面积的最大最小值之比越来越大,标准差越来越小,变化速度越来越小,最终都趋于收敛。相比之下,改进后的“纬线环法”剖分模型的面积收敛性更好,这表明改进模型的格网面积分布更加均匀,各格网单元之间有更好的相似性。改进后的剖分模型,格网单元的面积变化率更小,至第 10 层剖分,“纬线法”QTM 模型只有 22%左右的格网面积变化率在 5%以内,而“纬线环法”QTM 模型 99%以上的格网面积变化率被控制在 0.25%以内。

(2) 位置分布明确。随着剖分层次的增加,改进后的“纬线环法”剖分模型,变化边界向两极移动,中低纬度区域近似等面积剖分。此外,面积变化不会随剖分层次的增加而积累,相反会逐渐减小。这一特点,非常有利于误差控制与分析。

(3) 计算简便。相比于“投影法”以及“小圆弧法”得到的等面积球面离散格网模型,该改进后的 QTM 剖分模型由于不需要复杂的数学变换,计算更加简便。

此外,由于改进模型的三角形格网的底边或顶边(上三角形对应底边,下三角形对应顶边)为纬线,格网与常规地理坐标间的对应关系更加明确。

参考文献:

- [1] LUKATELA H. A Seamless Global Terrain Model in the Hipparchus System [EB/OL]. [2000-12-30]. <http://www.geodyssey.com/global/papers>.
- [2] 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.
ZHAO Xuesheng, HOU Miaole, BAI Jianjun. Spatial Digital Modeling of the Global Discrete Grids [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007.
- [3] DUTTON G H. Lecture Notes in Earth Sciences: A Hierarchical Coordinate System for Geoprocessing and Cartography[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [4] GOODCHILD M F, SHIREN Y. A Hierarchical Spatial Data Structure for Global Geographic Information Systems[J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1992, 54 (1): 31-44.
- [5] 白建军,孙文彬,赵学胜. 基于 QTM 的 WGS-84 椭球面层次剖分及其特点分析[J]. 测绘学报, 2011, 40 (2): 243-248.
BAI Jianjun, SUN Wenbin, ZHAO Xuesheng. Character Analysis and Hierarchical Partition of WGS-84 Ellipsoidal Facet Based on QTM[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(2): 243-248.
- [6] 关丽,程承旗,吕雪峰. 基于球面剖分格网的矢量数据组织模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25 (3): 23-27.
GUAN Li, CHENG Chengqi, LÜ Xuefeng. Study on the Organization Model for Vector Data Based on Global Subdivision Grid [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(3): 23-27.
- [7] 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.
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.
- [8] SATOSHI I, FENG X. A Global Shallow Water Model Using High Order Multi-moment Constrained Finite Volume Method and Icosahedra Grid [J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229(5): 1774-1796.
- [9] 邢华桥. 基于 QTM 的全球高分辨率水淹模拟[D]. 北京:

- 北京建筑工程大学, 2012.
- XING Huaqiao. Global Multi-resolution Submerging Simulation Based on QTM[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012.
- [10] SEONG J C. Implementation of an Equal-area Gridding Method for Global-scale Image Archiving[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(5): 623-627.
- [11] LUGO J A, CLARKE K C. Implementation of Triangulated Quadtree Sequencing for a Global Relief Data Structure[C]// Proceedings, AUTO CARTO 12, Charlotte, NC: [s.n.], 1995.
- [12] ROŞCA D, PLONKA G. An Area Preserving Projection from the Regular Octahedron to the Sphere[J]. Results in Mathematics, 2012, 62(3-4): 429-444.
- [13] SNYDER J P. An Equal-area Map Projection for Polyhedral Globes[J]. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 1992, 29(1): 10-21.
- [14] BJØRKE J T, GRYTTEN J K, HÆGER M, et al. A Global Grid Model Based on "Constant Area" Quadrilaterals[C]// ScanGIS, Horten: Norwegian Defence Research Establishment, 2003, 3: 238-250.
- [15] BJØRKE J T, NILSEN S. Examination of a Constant-area Quadrilateral Grid in Representation of Global Digital Elevation Models [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2004, 18(7): 653-664.
- [16] LEOPARDI P. A Partition of the Unit Sphere into Regions of Equal Area and Small Diameter[J]. Electronic Transactions on Numerical Analysis, 2006, 25(1): 309-327.
- [17] BECKERS B, BECKERS P. A General Rule for Disk and Hemisphere Partition into Equal-area Cells [J]. Computational Geometry, 2012, 45(7): 275-283.
- [18] ZHOU Mengyun, CHEN Jing, GONG Jianya. A Pole-oriented Discrete Global Grid System: Quaternary Quadrangle Mesh[J]. Computers & Geosciences, 2013, 61: 133-143.
- [19] TALBOT B G, TALBOT L M. Fast-earth: A Global Image Caching Architecture for Fast Access to Remote-sensing Data[C]// Proceedings of 2013 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2013: 1-10.
- [20] SAHR K, WHITE D, KIMERLING A J. Geodesic Discrete Global Grid Systems [J]. Cartography and Geographic Information Science, 2003, 30(2): 121-134.
- [21] SONG Lian, KIMERLING A J, SAHR K. Developing an Equal Area Global Grid by Small Circle Subdivision[C]// GOODCHILD M, KIMERLING A J. Discrete Global Grids, Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information & Analysis, 2002.
- [22] HOLHOŞ A, ROŞCA D. An Octahedral Equal Area Partition of the Sphere and Near Optimal Configurations of Points [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2014, 67(5): 1092-1107.
- [23] 赵学胜, 孙文彬, 陈军. 基于 QTM 的全球离散格网变形分布及收敛分析[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 438-442.
- ZHAO Xuesheng, SUN Wenbin, CHEN Jun. Distortion Distribution and Convergent Analysis of the Global Discrete Grid Based on QTM[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4): 438-442.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2014-11-17

修回日期: 2015-06-25

第一作者简介: 赵学胜(1967—),男,教授,研究方向为全球离散格网建模与三维可视化。

First author: ZHAO Xuesheng (1967—), male, professor, majors in modeling & 3D visualization of the global discrete grids.

E-mail: zxs@cumb.edu.cn

通信作者: 苑争一

Corresponding author: YUAN Zhengyi

E-mail: yuanzhengyi001@163.com