引文格式:丁俊杰,周建彬,贲进,等.六边形全球离散格网海洋等深线生成算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(4):814-822.DOI:10.13203/j.whugis20220738

Citation:DING Junjie,ZHOU Jianbin,BEN Jin,et al.Ocean Depth Contour Generating Algorithm for Hexagonal Discrete Global Grids[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(4):814-822.DOI:10.13203/j.whugis20220738

六边形全球离散格网海洋等深线生成算法

丁俊杰[1] 周建彬[1] 贲 进[1] 黄心海[1] 梁启爽[1] 卢 雪[2]

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 92292部队沿岸测量中队,山东 青岛,266000

摘 要:等深线生成是海洋数据处理的重要环节。传统算法先在投影面构建规则格网再追踪计算,由于海域空间覆盖范围较大,通常需分幅处理,由此导致图幅拼接较复杂;若直接由水深数据构建不规则三角网,算法复杂且效率较低,不适用于大区域、大数据量处理。全球离散格网系统是空间基准一致、无缝覆盖全球的多分辨率格网,从结构上支持广域地球空间数据处理与分析。提出利用六边形全球离散格网生成等深线的算法,首先将水深数据量化到全球离散格网,然后利用两格网顶点直接在球面大圆弧上内插等深线折点,并采用顶点符号法处理等深线交叉的格网。实验结果表明,相同条件下所提算法相较于平面六边形格网上的同类算法,不仅生成的等深线精度更高,而且在不同纬度地区的等深线精度差异更小。

关键词:六边形;全球离散格网;大区域;海洋等深线

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-01-19

DOI:10.13203/j.whugis20220738 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0814-09

Ocean Depth Contour Generating Algorithm for Hexagonal Discrete Global Grids

DING Junjie[1] *ZHOU Jianbin*[1] *BEN Jin*[1] *HUANG Xinhai*[1] *LIANG Qishuang*[1] *LU Xue*[2]

1 Institute of Geographical Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 Coastal Survey Squadron, 92292 Troops, Qingdao 266000, China

Abstract: **Objectives**: Depth contour is one of the key factors in the expression of submarine geomorphology. With the increasingly urgent need of exploring the ocean, how to quickly and accurately generate the depth contour of a large area has become an urgent problem to be solved. The traditional ocean depth contour generation algorithm converts the data to the plane, then building regular grids for tracking processing. The expansion of the ocean area needs to be processed by framing, and the map splicing is complex, especially in the high latitude areas where the projection deformation is large. The triangulated irregular network can be directly constructed for the original data, but the algorithm is complex and too slow, which is not suitable for large area and large data processing. **Methods**: The discrete global grid system is a multi-resolution grid with consistent spatial datum and seamless global coverage. It supports the processing and analysis of wide area geospatial data structurally, of which polyhedral grid are most commonly used. In the polyhedral grid, the icosahedral hexagonal discrete grid has a more uniform global distribution, and its geometric properties are more ideal than others. The hexagonal global discrete grid system is applied to the generation of depth contour. First, the original data are sampled to the hexagonal grid with appropriate resolution, when the depth contour are traced using the hexagonal grid, and the grid crossed by the depth contour is processed using the hexagonal vertex symbol method. Two vertices of a grid are interpolated on the spherical arc. Finally, the depth contour generated by ArcGIS are used as the reference depth contour with the

基金项目:国防科技创新特区项目(20-163-14-LZ-001-003-01)。

第一作者:丁俊杰,博士生,主要从事全球离散格网方面的研究。dingjunjie0510@126.com

通信作者:贲进,博士,教授。benj@lreis.ac.cn

original data, and the hexagonal discrete global grid and the plane hexagonal grid with the same resolution are respectively constructed. **Results:** From this, two sets of experimental groups of depth contour are generated, where the average and standard deviations of the spherical distance of the offset reference depth contour are used as the quality evaluation indicators. The comparison results show that, under the same resolution, each quality evaluation index of the hexagon global discrete grid depth contour is better than the plane hexagon grid depth contour, and it is visually close to the reference depth contour, and the degree of deviation of the depth contour at different latitudes is uniform. **Conclusions:** This algorithm can uniformly process global ocean areas without considering the problem of depth contour joining caused by map mosaic. What's more, we verify the accuracy advantage of it compared to traditional planar grid depth contour generation algorithms.

Key words: hexagon; discrete global grid system; large area; ocean depth contour

等深线是海底地貌表达的关键因素之一,能够有效反映海底地形的高低起伏特征,是一种兼顾海底地形定性与定量信息的高层次表达手段[1]。随着测深设备和技术的高速发展,人类对海洋的探索正由近岸向远海扩展,获取实测水深数据的范围不断扩大,精度不断提高,利用实测数据生成等深线成为反映海底地形的有效手段。

海底地形等深线是一种深度属性等值线,其生成方法与常规等值线生成方法类似[2]。目前常见的等值线生成算法[1-8]可分为基于不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)和基于规则格网两类。基于TIN的方法充分保留了海底地形信息,可有效避免精度损失,但构建TIN算法复杂、效率较低,不适合大区域、大数据量水深数据的等深线生成[8]。基于规则格网的方法计算简单、速度快,是最经典的等值线生成方法。矩形规则格网具有双轴正交、编码简单等优势,得到广泛应用,但最新研究表明,六边形规则格网相较于矩形格网在谷地线提取[9]、等高线生成[10]方面具有显著优势,是一类极具潜力的方案。然而上述研究基本上都是针对局部区域,在地图投影平面上进行处理。实际上地球表面属于非欧空间,通过平面数据模型处理大范围乃至全球尺度数据时,会将球面上各向异性的度量扭曲为欧氏空间中各向同性的情况[11],使得距离的计算具有一定的变形与误差。而且对大范围数据进行分幅处理,不同图幅的拼接比较复杂。

全球离散格网系统(discrete global grid system,DGGS)是基于球面的可以无限细分的地球体拟合格网,具有离散性和全球连续性的特点,有望从根本上解决传统平面数据模型在全球地理空间数据处理与分析中的数据断裂、几何畸变等问题[12]。格网单元的形状一般有三角形、四边形以及六边形,六边形具有更加理想的几何性质。首先,六边形具有邻接一致性的特点[13],即六边形单元与其邻近单元的距离一致,而四边形和三角形均有多种邻接关系,导致与三角形单元和四边形单元有关的算法必须考虑多种情况;其次,六边形格网角分辨率高[14],有利于弯曲线的表示;最后,六边形的形状最接近圆,采样效率最高。

根据以上分析,本文选择六边形全球离散格网处理大区域海洋水深数据,提出了球面等深线生成算法,该算法在球面两点间的大圆弧上内插等深线,采用顶点符号法[5,10]判断等深线在单元内的走向。实验结果验证了本文算法相比于平面六边形格网等深线生成算法的优势。

1　六边形DGGS选择

正二十面体最接近球面,能减少在多面体表面和球面映射时的变形[15],因而二十面体格网系统应用最广泛。从正二十面体表面映射到与地球表面有多种方法,其中Snyder投影能够保持单元面积不变[15]。DGGS是多分辨率的格网系统,其相邻层次单元面积之比称为孔径[14],六边形格网的孔径有三孔、四孔和七孔3种。三孔格网相邻层次单元方向发生30°周期变化,导致奇偶层单元排列规则不同;四孔格网相邻层次单元方向不变,便于建立多层次结构;七孔格网相邻层次单元面积变化太大且方向也发生了19.1°的旋转[16]。

因此,本文选择正二十面体Snyder等积四孔六边形格网(icosahedral Snyder equal area aperture 4 hexagonal grid,ISEA4H)[17]开展研究。正二十面体的20个三角面投影到球面后两两组合成四边形面[18],以四边形面左顶点即正二十面体一个顶点处的五边形单元中心为原点,以该顶点顺时针方向的四边形边为i轴、逆时针方向的四

边形边为j轴,在该格网分辨率层次下沿坐标轴方向的相邻六边形单元中心之间的距离记为1,建立四边形离散坐标系。如图1所示,每个六边形格网单元的中心(简称为格心)用行列号坐标进行标识,例如单元A的坐标为(2,0),B的坐标为(0,2),C的坐标为(2,2);格网单元的6个顶点(简称为格点)则用行列号坐标和格点序列号来标识,六边形单元的右下角格点序列号为1,从该点开始沿逆时针方向,其他格点的序列号递增,如单元C的第一个格点C_1的标识码为(2,2,1)。

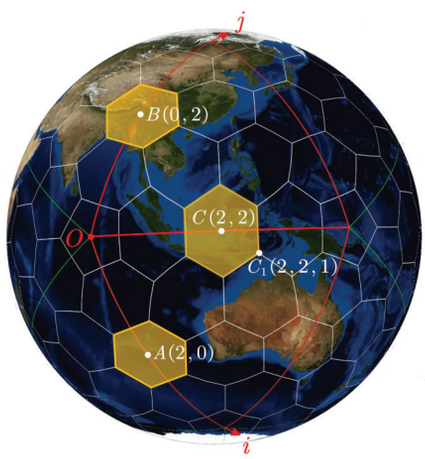


图1 四边形离散坐标系

Fig. 1 Discrete Coordinate System in Quadrangle

每个格心和格点的标识码均可转换为地理坐标,且存储有该点的水深值。其中,格心的水深值由落在该六边形单元内的数据点的平均水深值得到,格点的水深值由邻近的3个格心的平均水深值得到。

2 球面等深线生成

2.1 球面格边上内插等深点

格网单元的边(简称为格边)上有等深线通过的条件是:等深线的水深值介于格边两端格点的水深值之间,因此每条格边上至多有一个等深点。当等深线的水深值恰与一个格点的水深值相等时,为保障舰船航行安全,遵循“扩浅缩深”的原则[19],将深度小于或等于等深线水深值的部分划入浅的一边,因此本文将该格点水深值减去一个极小的正数,故等深线与单个六边形单元的交点个数只可能为0、2、4或6。

将等深线与格边的交点称为等深点,平面格网上等深点的坐标可直接由对应格边上两个格点的坐标线性内插得到。然而球面格网中格边为地球表面的大圆弧,相应的等深点也应位于球面大圆弧上,因此简单地通过线性内插得到的等深点必然存在一定的误差。

如图2所示,地球球心为O,半径为R,P、Q为球面上的两个格点,蓝色虚线为弦PQ,红色实线为大圆弧$\overset{\frown}{PQ}$,过O、P、Q 3点作大圆面。设等深线水深值为h,且位于P、Q两点的水深值h_P和h_Q之间,则在大圆弧$\overset{\frown}{PQ}$上计算等深点坐标的具体方法如下所示。

1)计算比例系数。计算等深线水深值相对于P、Q两点水深值的比例系数r,用于后续根据P、Q两点的坐标按比例内插等深点的坐标,计算公式为:

$$r=\frac{h-h_P}{h_Q-h_P} \tag{1}$$

2)确定线性内插点坐标。在空间直角坐标系下,在弦PQ上线性内插得到S_0的坐标,计算公式为:

$$\begin{cases} x_{S_0}=x_P+r\left(x_Q-x_P\right) \\ y_{S_0}=y_P+r\left(y_Q-y_P\right) \end{cases} \tag{2}$$

3)计算大圆弧上等深点坐标。延长OS_0交$\overset{\frown}{PQ}$于点S,计算OS_0的长度$|OS_0|$,球面上等深点S的坐标的计算公式为:

$$\begin{cases} x_S=x_{S_0}\dfrac{|OS_0|}{R} \\ y_S=y_{S_0}\dfrac{|OS_0|}{R} \end{cases} \tag{3}$$

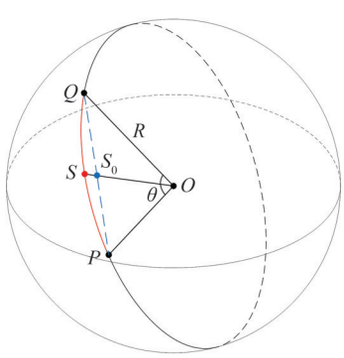


图2 球面上求两点间插值点

Fig. 2 Interpolate Between Two Points on Sphere

2.2 等深线交叉格网的处理

当等深线从格边上的等深点进入一个格网单元时,需计算位于该单元其他格边上的下一个等深点。在海底地形复杂区域,六边形单元的4条格边或6条格边上可能同时有等深点,一般来说,只要等深点的连接方式不导致等深线交叉就可以,但是为了更加符合真实的海底地形,需要根据特殊的准则判断等深线的连接方式。现有

的判断准则[20]包括固定方向搜索法、最短连接法、顶点符号法。固定方向搜索法规定在单元内按顺时针或逆时针搜索,但不同的方向搜索会产生不同的结果;最短连接法通过比较该单元的起始搜索点到两条邻近格边上等深点的距离,取距离最小的等深点作为下一个搜索点,但从不同的起始点搜索会产生不同的结果。

本文在六边形格网上追踪等深线时采用顶点符号法来处理交叉格网,即根据格点、格心的水深值与等深线水深值的差值来判断等深线的连接方式。设一个格点或格心的水深值为 Z,追踪的等深线水深值为 h,记 $F=Z-h$。若 $F>0$,该点的符号为“+”;若 $F<0$,该点的符号为“−”;若 $F=0$,由“扩浅缩深”原则,令 $Z=Z-\Delta Z$,其中 ΔZ 是一个十分接近于 0 的正数。显然,同一单元内符号为“+”的格点和相邻的符号为“−”的格点之间的格边上才有等深点。

例如在图 3 中,格心 M 以及格点 V_1、V_3、V_5 的符号为“+”,格点 V_2、V_4、V_6 的符号为“−”,格边上有 6 个等深点 A、B、C、D、E、F,则格心与同符号的格点的连线(即图 3 中的红色虚线 MV_1、MV_3、MV_5)上不会有等深线通过,因此,等深线的正确连接方法是 AB、CD 与 EF。显然,无论等深线从哪条格边进入该格网单元,等深线的连接结果都是唯一的,既不会出现等深线交叉的拓扑错误,也不会出现等深线有多种连接结果的情况。

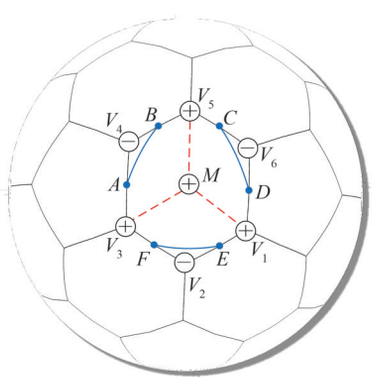


图 3　顶点符号法

Fig. 3　Vertex Symbol Method

2.3　等深线的追踪

将水深数据量化到六边形全球离散格网后,需要根据单元间的邻域关系逐个单元追踪等深线,使得等深线是由等深点连接起来的连续折线段。等深线的具体追踪流程图如图 4 所示,过程如下:

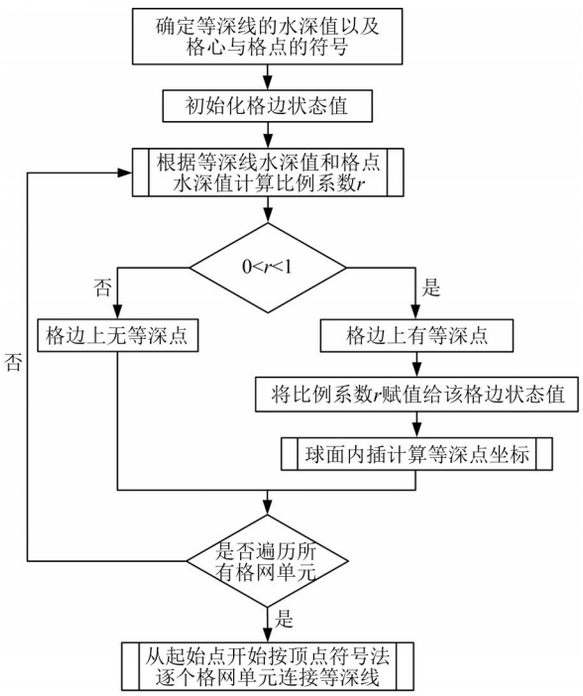


图 4　等深线追踪流程

Fig. 4　Depth Contour Tracing Process

1)确定所追踪的等深线水深值以及所有格心与格边的符号。在确定当前所追踪等深线的水深值 h 后,遍历区域内所有格网单元,根据每个六边形格心和格点的水深值,由§2.2 中的方法计算每个格心和格点的符号。

2)初始化格边状态值,以标识格边上无等深点。

3)计算比例系数,更新格边状态值。根据§2.1 中的方法计算等深线水深值相对于同一格边上两端格点水深值的比例系数 r,以此判断对应的格边上是否含有等深点:若 $0<r<1$,则格边上有等深点,并将比例系数 r 赋值给对应格边的状态值;若 $r<0$ 或 $r>1$,则等深线水深值不位于两端格点的水深值之间,即格边上无等深点;由于在计算格点和格心的符号时采取了“扩浅缩深”的方法,对与等深线水深值相等的格点进行了特殊处理,故比例系数 r 不会出现等于 0 或 1 的情况。

4)计算等深点坐标。对于有等深点的格边,根据§2.1 中的方法由两端格点的坐标计算对应的格边大圆弧上等深点的坐标。

5)连接等深线。对于开曲线的追踪,从位于边界的格边上的等深点出发,按照追踪方向逐个格网单元根据规则连接等深线,直到达到下一条位于边界的格边时停止追踪;对于闭曲线的追踪,从不位于边界的格边上的等深点出发,追踪

原理与开曲线一致,直到追踪到的等深点与起始搜索点重合时停止追踪。

6)单个格网单元内等深线连接规则为:若单元内的6条格边上均没有等深点,则等深线不经过这个单元。从进入该单元的格边上的等深点出发,若其他格边上等深点数量为1,该等深点即为追踪到的下一个点;若其他格边上等深点数量为3或5,则需要通过顶点符号法准确判断所追踪的下一个等深点。

3 等深线精度对比实验

3.1 实验设计

由于传统平面格网在低纬地区的格网单元也较为均匀,与同分辨率DGGS单元大小几乎一致,故选择67°N—87°N、10°W—10°E范围高纬度海域开展实验,该区域位于格陵兰岛东侧、欧洲西北部的北冰洋与挪威海交界,最大水深值为5 561 m,最小水深值为1 m,平均水深值为2 686.4 m。实验数据为全球海洋地形模型GEBCO_2022[21],提供15″经纬度间隔格网上的水深数据。

传统平面六边形格网等深线的生成过程为:首先将原始水深数据转换到墨卡托投影平面,在确定格网分辨率大小后对水深数据重采样形成相应分辨率的六边形格心数据,格心水深值由该单元内的原始水深数据取平均值得到,格点坐标和水深值由与该格点邻近的3个六边形格心的坐标和水深值分别取平均值得到;然后,直接在墨卡托平面的规则六边形格网上采用线性内插方法生成等深线。

利用格网生成连续不间断等深线的前提是将水深数据量化到格网系统中,并使得格网单元紧致地铺满整个实验区域。当格网层次为14层时,平面六边形格网存在较大区域的格网空缺;当格网层次为13层时,实验区域内的六边形全球离散格网(简称为球面六边形格网)和平面六边形格网均无空缺。因此,为尽可能保留原始水深数据精度,本文选取9~13层格网进行等深线实验,表1为各个分辨率层次下球面六边形格网单元的面积与格心间距[22]。

为方便计算与处理,并在实验区域内生成相对均匀、不影响整体可视化效果的等深线,以500 m为等深线间距,0 m为起始等深线水深值,4 000 m为终止等深线水深值。将海底高程数据量化到格网系统是对落在每个六边形单元内的数据点取平均水深值,当格网层次为9~13层时,

表1 六边形全球离散格网各层次分辨率

Table 1 Hexagonal Discrete Global Discrete Grid Resolution at Some Levels

分辨率层次	单元面积/km^2	格心间距/km^2
9	194.574 59	15.074 10
10	48.643 65	7.537 19
11	12.160 91	3.768 63
12	3.040 23	1.884 32
13	0.760 06	0.942 17

量化过程基本上不会改变实验区域内的水深范围值,因此等深线间距的选取与格网层次无尺度对应关系。

首先,全球公开数据集中没有海洋等深线数据,实验时需要自行规定等深线参考值;其次,原始水深数据点平均间距约为0.219 6 km,数据分辨率远高于13层格网分辨率,故在ArcGIS中可将利用“等值线”工具对原始水深数据进行处理得到的等值线作为参考等深线。实验区域中参考等深线的结果如图5所示,可见该区域海底地形呈现北深东西浅。

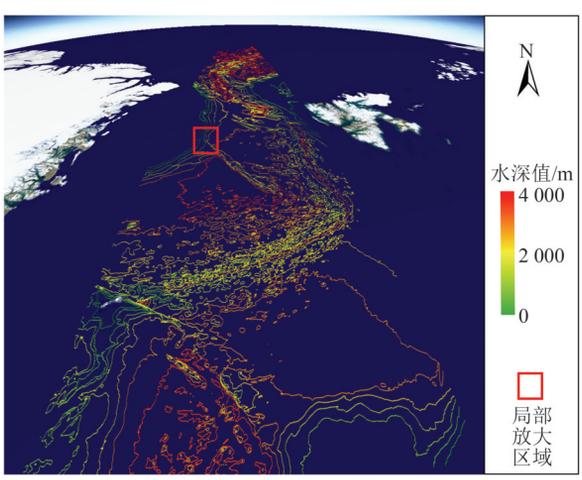


图5 参考等深线示例

Fig. 5 Example of Reference Depth Contour

借助等高线回放法的思想[23],采用多分辨率分析方法设置了5层分辨率下的对比实验:先根据第9~13层分辨率的球面六边形格网分别生成5个分辨率下的精度不同的等深线,然后通过与对应分辨率层次下密度相等的平面六边形格网分别生成5个分辨率下的等深线。

由于在投影平面构建规则格网忽略了地球曲率特性,导致平面六边形格网单元在不同地理位置处存在面积变形,因此以单元面积定义格网密度并不合适。本文以单元数量定义格网密度,为使得实验海域内球面六边形格网与平面正六

边形格网的密度相同,只需在相同区域内保证两种格网单元数量相等即可。

3.2　结果分析

由于实验区域大、比例尺小,为直观对比球面和平面这两种格网分别生成等深线的精度,取图5中红色框内局部区域的结果进行展示。该区域中参考等深线、各个分辨率下的球面六边形格网等深线以及平面六边形格网等深线见图6。

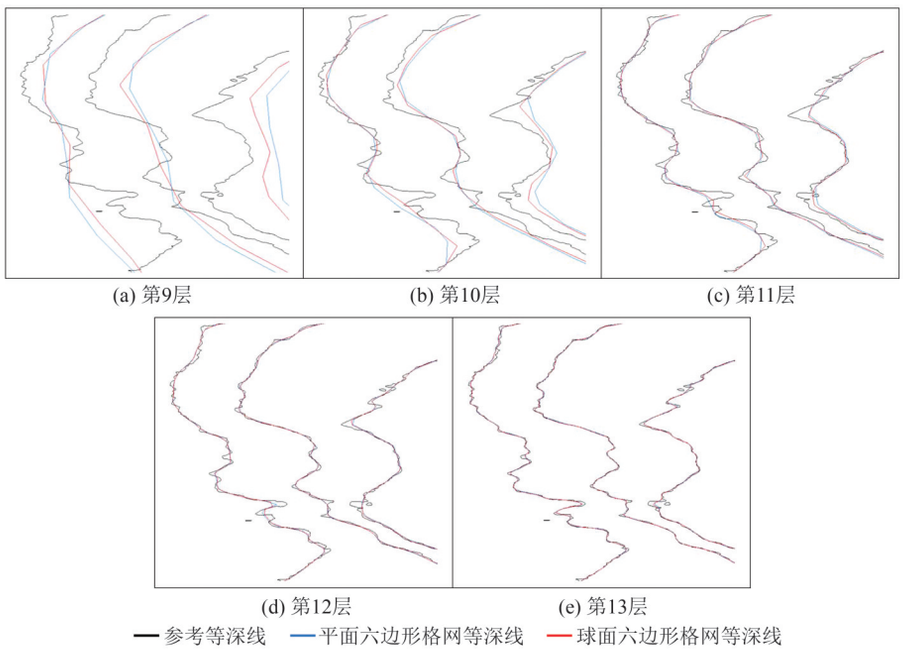


图6　不同等深线局部细节对比图

Fig. 6　Comparison of Local Details of Different Depth Contours

由图6可知,当格网分辨率较低时,例如第9层和第10层,球面六边形格网等深线更贴近参考等深线;而当格网分辨率较高时,例如第12层和第13层,球面六边形格网等深线和平面六边形格网等深线都十分贴近参考等深线,甚至几乎达到了相互重叠的程度,仅凭视觉无法判断精度高低。

因此,为了定量评价基于不同格网生成等深线的精度,计算实验组等深线偏离参考等深线的平均距离以及标准差,具体过程如下:

1)图2中,在空间直角坐标系下对于实验组等深线上的任意一点$P(x,y,z)$与参考等深线上任意一点$Q(x_0,y_0,z_0)$,可在球面上找到一条大圆弧,使得点P和点Q均位于大圆弧上,利用两点间距离公式$s=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}$计算弦长$|PQ|$。

2)在$\triangle OPQ$中,由余弦定理,计算扇形区域的圆心角$\angle POQ$,记为θ,其计算公式为:

$$\theta=\arccos\left(1-\frac{|PQ|^2}{2R^2}\right) \tag{4}$$

3)球面上两点的大圆弧距离的计算公式为:

$$\overset{\frown}{PQ}=\theta R \tag{5}$$

4)重复步骤1)~3),遍历参考等深线上的所有点,找到一点$A(x_1,y_1)$,使得点A与实验组上点P的距离最小。

5)由于等深点是按照追踪顺序排列的,因此等深线序列中点A的前后两个点B和C在地理空间中也是邻近的等深点,通过计算点P分别到点B和C的大圆弧距离,取距离较小的点,以点B距离点A更近为例。

6)如图7所示,实验组等深线上的点P到参考等深线的距离即为点P到$\overset{\frown}{AB}$的距离。计算点P到大圆弧$\overset{\frown}{AB}$与球心O所确定的平面的距离$|PS|$,即求点P到大圆面α的距离;由点O、P、S确定的大圆面β与大圆面α相交于点H,显然α与β相互垂直,故$\overset{\frown}{PH}$垂直于$\overset{\frown}{AB}$。因此,点P到大圆弧线$\overset{\frown}{AB}$的距离为$\overset{\frown}{PH}$,在大圆面β中的计算公式为:

$$\overset{\frown}{PH}=R\arcsin\frac{|PS|}{R} \tag{6}$$

7)对实验组等深线上的每个点按步骤1)~6)计算其偏离参考等深线的距离,取平均值并计算标准差。

分别在第9、10、11、12、13层格网分辨率统计上述指标,结果见表2。

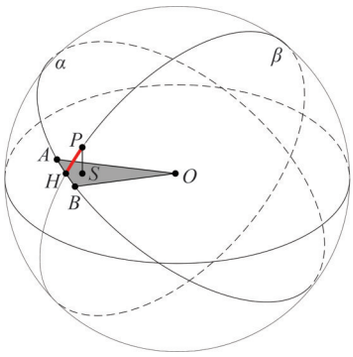


图7 计算点到大圆弧的距离

Fig. 7 Calculate Distance from a Point to the Great Arc

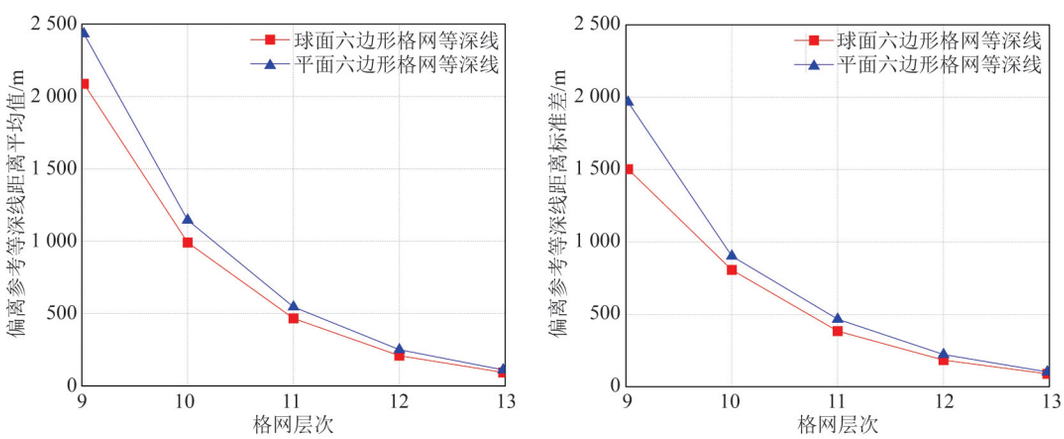
分析以上实验结果,得到如下结论:

1)相同分辨率层次下,由图8(a)可知,球面六边形格网等深线偏离参考等深线的距离平均值始终小于平面六边形格网等深线,说明总体上球面六边形格网等深线更贴近于参考等深线;同时,由图8(b)可知,球面六边形格网等深线偏离参考等深线距离的标准差更小,说明其偏离参考等深线的波动在等深线上各处更小。

表2 实验组等深线偏离参考等深线的距离平均值和标准差/m

Table 2 Mean Value and Standard Deviation of Distance Between Experimental Isobath and Reference Isobath/m

层次	球面六边形格网等深线		平面六边形格网等深线	
	平均值	标准差	平均值	标准差
9	2 087.725	1 503.126	2 433.042	1 965.976
10	991.099	807.383	1 146.272	902.698
11	467.110	384.345	546.421	466.866
12	209.596	184.032	251.004	222.681
13	93.873	89.386	111.636	102.680



(a) 距离平均值对比 (b) 距离标准差对比

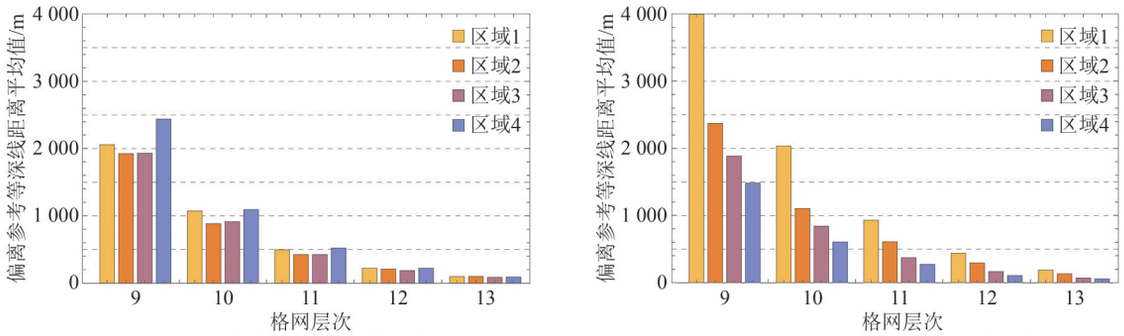
图8 实验组等深线偏离参考等深线的距离

Fig. 8 Distance of Experimental Depth Contour from Reference Depth Contour

2)格网分辨率低时,球面六边形格网生成的等深线精度优势明显;当格网分辨率升高时,两种等深线的精度都逐渐提高,当格网分辨率逐渐升高至接近原始水深数据密度时,两种等深线都贴近于参考等深线。

为进一步分析实验组等深线在不同纬度地区的精度,将实验区域按纬度划分为4个区域,从67°N开始,每间隔5°划分为一个区域。即区域1的范围为67°N—72°N,区域2的范围为72°N—77°N,区域3的范围为77°N—82°N,区域4的范围为82°N—87°N。分别对比4个区域内同一分辨率层次下球面六边形格网等深线与平面六边形格网等深线偏离参考等深线的距离平均值和标准差,结果如图9、图10所示。

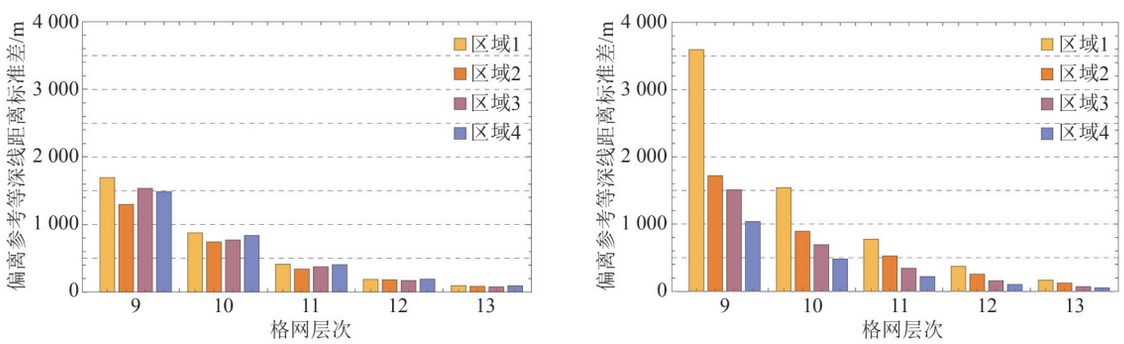
图9、图10表明,球面六边形格网等深线在不同纬度地区偏离参考等深线的程度相对均匀,而平面六边形格网等深线在不同纬度地区偏离参考等深线的差异大,且呈现出纬度越高、偏离程度越小的规律,使得区域1中球面格网等深线精度远高于平面格网等深线,区域2和3中两种等深线精度大致相当,区域4中球面格网等深线精度稍低于平面格网等深线。这是因为海图制图采用的墨卡托投影存在面积变形,且纬度越高,面积偏大越严重,因此在墨卡托投影平面构建的规则六边形格网实际上在高纬地区单元小、低纬地区单元大,导致随着纬度的升高,利用平面六边形格网生成的等深线精度也逐渐提升,甚至在纬度最高的区域4精度高于球面格网等深线。



(a) 球面六边形格网等深线　　(b) 平面六边形格网等深线

图 9　不同纬度区域等深线偏离参考等深线距离平均值

Fig. 9　Average Distance Between Experimental Isobath and Reference Isobath in Different Latitude Regions



(a) 球面六边形格网等深线　　(b) 平面六边形格网等深线

图 10　不同纬度区域等深线偏离参考等深线距离标准差

Fig. 10　Standard Deviation Between Experimental Isobath and Reference Isobath in Different Latitude Regions

4　结　语

本文针对现有研究仅关注小区域内平面等深线生成的局限性,充分利用六边形全球离散格网全球均匀的特点,提出大区域球面等深线的生成算法,可对全球海域统一处理,无需考虑传统平面格网方法由于图幅拼接导致的等深线接边问题;对比分析了本文算法相较于平面六边形格网等深线生成算法的精度优势,在高纬度海域时其优势明显,而且所生成的等深线在不同纬区偏差均匀。该算法有望应用于大范围海底地形图绘制,为潜艇航线规划提供辅助参考,具有较好的应用前景。

参　考　文　献

[1] 李海森, 陆丹, 魏玉阔, 等. 多波束海底地形等深线快速生成算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(5): 622-628.
LI Haisen, LU Dan, WEI Yukuo, et al. Fast Algorithm of Contour Generation for a Multibeam Seafloor Terrain [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(5): 622-628.

[2] 行瑞星, 武芳, 李靖涵, 等. 一种顾及多义性的等深线快速生成算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(9): 1705-1712.
XING Ruixing, WU Fang, LI Jinghan, et al. A Fast Algorithm of Contour Generation Considering Ambiguity[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2017, 29(9): 1705-1712.

[3] VAN KREVELD M. Efficient Methods for Isoline Extraction from a TIN[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1996, 10(5): 523-540.

[4] 顾滨兵, 杨兆海, 高宇, 等. 基于网格序列法和端点量化的等值线生成算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2010, 28(1): 89-94.
GU Binbing, YANG Zhaohai, GAO Yu, et al. Algorithm of Contour Lines Drawing Based on Grid Using Technique of Grid Scan and Point Digital[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2010, 28(1): 89-94.

[5] 张显全, 刘忠平. 基于格网模型的等高线算法[J]. 计算机科学, 2005, 32(9): 199-201.
ZHANG Xianquan, LIU Zhongping. An Algorithm of Contour Lines Based on Regular Grid[J]. *Computer Science*, 2005, 32(9): 199-201.

[6] JONES N L, KENNARD M J, ZUNDEL A K. Fast Algorithm for Generating Sorted Contour Strings [J]. *Computers & Geosciences*, 2000, 26

(7):831-837.

[7] 王涛,毋河海,刘纪平.基于区间树索引的等高线提取算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2007,32(2):131-134.
WANG Tao, WU Hehai, LIU Jiping. An Algorithm for Extracting Contour Lines Based on Interval Tree from Grid DEM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(2): 131-134.

[8] 陆丹,李海森,魏玉阔,等.多波束测深系统中的海底地形可视化技术研究[J].仪器仪表学报,2012,33(2):450-456.
LU Dan, LI Haisen, WEI Yukuo, et al. Study on Seafloor Terrain Visualization Technology in Multibeam Bathymetry System[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(2): 450-456.

[9] 王璐,艾廷华.正六边形规则格网表达的DEM谷地线提取[J].测绘学报,2019,48(6):780-790.
WANG Lu, AI Tinghua. The Valley Extraction Based on the Hexagonal Grid-Based DEM[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(6): 780-790.

[10] 肖坤,艾廷华,王璐.正六边形格网DEM下的等高线生成算法及质量评价[J].地球信息科学学报,2022,24(4):643-656.
XIAO Kun, AI Tinghua, WANG Lu. Contour Generation Algorithm and Quality Evaluation of Regular Hexagon Grid DEM[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(4): 643-656.

[11] 赵学胜,王磊,王洪彬,等.全球离散格网的建模方法及基本问题[J].地理与地理信息科学,2012,28(1):29-34.
ZHAO Xuesheng, WANG Lei, WANG Hongbin, et al. Modeling Methods and Basic Problems of Discrete Global Grids[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(1): 29-34.

[12] 赵学胜,贲进,孙文彬,等.地球剖分格网研究进展综述[J].测绘学报,2016,45(S1):1-14.
ZHAO Xuesheng, BEN Jin, SUN Wenbin, et al. Overview of the Research Progress in the Earth Tessellation Grid[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(S1): 1-14.

[13] HE X J, JIA W J. Hexagonal Structure for Intelligent Vision[C]//2005 International Conference on Information and Communication Technologies. Karachi, Pakistan, 2005.

[14] SAHR K, WHITE D, KIMERLING A J. Geodesic Discrete Global Grid Systems[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2003, 30(2): 121-134.

[15] WHITE D, KIMERLING A J, SAHR K, et al. Comparing Area and Shape Distortion on Polyhedral-Based Recursive Partitions of the Sphere[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12(8): 805-827.

[16] BOUSQUIN J. Discrete Global Grid Systems as Scalable Geospatial Frameworks for Characterizing Coastal Environments[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 146: 105210.

[17] ZHOU J B, BEN J, WANG R, et al. Lattice Quad-Tree Indexing Algorithm for a Hexagonal Discrete Global Grid System[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(2): 83.

[18] ZHOU J B, BEN J, HUANG X H, et al. Efficient Cell Navigation Methods and Applications of an Aperture 4 Hexagonal Discrete Global Grid System[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2023, 37(3): 529-549.

[19] 中国国家标准化管理委员会.中国航海图编绘规范:GB 12320—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
Standardization Administration of China. Specifications for Chinese Nautical Charts: GB 12320—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[20] 赵洪伟.基于规则格网DEM的等高线自动提取技术研究[D].长春:吉林大学,2011.
ZHAO Hongwei. The Grid-Based DEM's Automatic Extraction of Contour Lines[D]. Changchun: Jilin University, 2011.

[21] GEBCO. Gridded Bathymetry Data [EB/OL]. (2022-11-17)[2022-11-17]. https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data.html.

[22] 周建彬,贲进,王蕊,等.四孔六边形全球离散格网一致瓦片层次结构编码运算[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(4):639-646.
ZHOU Jianbin, BEN Jin, WANG Rui, et al. Encoding and Operation for the Aperture-4 Hexagonal Discrete Global Grids on Uniform Tiles[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(4): 639-646.

[23] SHARMA A, TIWARI K N, BHADORIA P B S. Measuring the Accuracy of Contour Interpolated Digital Elevation Models[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2009, 37(1): 139-146.