



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 一种基于 DQG-3D 格网的全球与局部编码映射方法
作者: 罗东旭, 赵学胜, 张耀元, 柳世雄, 卢梦蝶
DOI: 10.13203/j.whugis20220144
收稿日期: 2022-03-17
网络首发日期: 2022-09-28
引用格式: 罗东旭, 赵学胜, 张耀元, 柳世雄, 卢梦蝶. 一种基于 DQG-3D 格网的全球与局部编码映射方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220144>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220144

引用格式：

罗东旭, 赵学胜, 张耀元, 等. 一种基于DQG-3D格网的全球与局部编码映射方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220144 (LUO Dongxu, ZHAO Xuesheng, ZHANG Yaoyuan, et al. A global and local coding mapping method based on DQG-3D grid[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220144)

一种基于 DQG-3D 格网的全球与局部编码映射方法

罗东旭 赵学胜 张耀元 柳世雄 卢梦蝶

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京, 100083

摘要：地球球体剖分格网是实现三维空间数据组织、管理、表达的有效方法之一。现有地球球体剖分框架大多适用于全球尺度范围，而在小尺度局部范围应用中存在格网冗余、编码长度过长而计算效率低下的问题。为此，本文提出了一种基于 DQG-3D 格网的全球与局部编码的直接映射算法：首先，将二维 DQG 格网扩展为 DQG-3D 格网；然后，根据研究范围确定局部剖分的 DQG-3D 格网；最后，根据编码位运算和局部与全球格网的行号、列号、层号映射规则，实现局部格网与全球格网编码的映射。实验结果表明：在一个格网和非退化区域内，本文算法的效率是传统基于经度、纬度、高度坐标编码映射方法效率的 30 倍和 11 倍；局部格网建模效率是全球格网建模效率的 13 倍。可以满足全球统一模型与局部精细模型的高效表达与应用需求。

关键词：DQG-3D；全球格网；局部格网；编码映射

中图分类号：P208

文献标识码：A

全球离散格网 (discrete global grids, DGGS)^[1, 2]是一种适合表达大区域与全球范围的格网系统，它摒弃地图投影的束缚，根据不同的剖分方法将地球剖分成无缝隙、无重叠、多分辨率的格网单元。随着地球科学探索和生产活动的增多，空间数据管理需求也由地表向地下、空中、太空的立体维发展^[3]。为解决维度缺陷，吴立新提出了地球系统空间格网 (Earth System Spatial Grid, ESSG)^[4]的概念，众多学者在球面剖分的基础上，将其扩展成球体剖分格网，形成空天地一体化的新一代集成空间数据模型^[5-8]，并将其应用于全球岩石圈板块可视化^[9]，全球电离层三维建模，三维地质建模等^[10]。空间地理实体在地球上的分布存在尺度范围差异，既有全球宏观范围也有局部微观范围，例如智慧城市、智慧交通、智慧矿山、机场等，受研究范围尺度大小、格网精度要求，以及数据计算处理能力等因素的影响，局部微观范围采用局部格网计算处理更加

具有优势，但是又不能丢失全球格网的统一性。因此，如何围绕全球和局部三维空间信息的管理，设计一种全球与局部统一的三维格网框架并实现局部格网与全球格网编码的映射是亟待解决的难题。

近年来，为构建全球与局部同构的格网，国内外学者进行了深入的研究。其中，童晓冲^[11]基于全球六边形格网，通过点与球面多边形的拓扑关系判断以及跨面区域裁剪的方法，提出了单一层次格网和层次格网生成算法，构建局部高精度格网，并提出了局部格网在全球格网寻址算法^[12]；郑明阳^[13]在菱形结构基础上建立离散格网坐标系，提出了多孔六边形局部区域格网生成算法；邬群勇^[14]针对室内模型缺乏统一的空间参考框架，提出了全球离散格网系统框架下的室内空间数据模型；在格网编码互操作方面，Arimi^[15]为了交换不同 DGGS 中的数据，提出两个 DGGS 的共同域概念，通过格网编码与多面体、球体的映射和投影，实现不同格

收稿日期：2022-03-17

项目资助：国家自然科学基金项目 (No: 41671394, 41671383)。

第一作者：罗东旭，硕士研究生，主要从事全球离散格网应用研究。543878432@qq.com

通讯作者：赵学胜，博士，教授，博士生导师。zxs@cumtb.edu.cn

网框架下的编码映射；Qingmei Li^[16]在 GeoSOT 格网基础上提出了 GeoSOT 等效聚合模型（GEA 模型），对六边形格网进行尺度拟合，然后进行格网多尺度聚合，形成编码关联索引查询，实现了 GeoSOT 格网与六边形格网之间的空间关联规则和信息交换模型；陈艺航^[17]基于格点、格心及格元的数量与分布模式，按照拓扑关系从极点到赤道的“等差圈层”特征，提出了全球离散格网系统结构要素一体化编码与生成方法，并给出了三角形、菱形、六边形格网编码方案。尽管当前在二维球面上基于全球格网的局部格网生成以及不同格网框架下的编码互操作取得一定进展。但在三维空间上，由于地理实体的尺度差异，对于小尺度的研究区域，当剖分到格网单元粒度满足精度需求时，会造成格网的冗余、格网编码长度过长，超出计算机位数而降低计算效率。在格网编码映射中，传统方法需要借助经度、纬度、高度坐标进行频繁的数据转换，大量的浮点数运算造成编码转换效率低下。

因此，本文针对全球格网应用的统一性和局部格网应用的高效性需求以及经度、纬度、高度作为编码映射中间件存在的效率问题，在现有的 DQG 格网的基础上，扩展成三维 DQG 格网，根据研究区域跨越格网单元情况确定局部基础格网，对基础格网进行八叉树剖分与编码，基于编码位运算和行号、列号、层号转换，实现局部与全球编码的映射，以期提高全球与局部格网编码的转换效率，为三维格网的高效计算与分析应用提供基础。

1 DQG-3D格网剖分与编码原

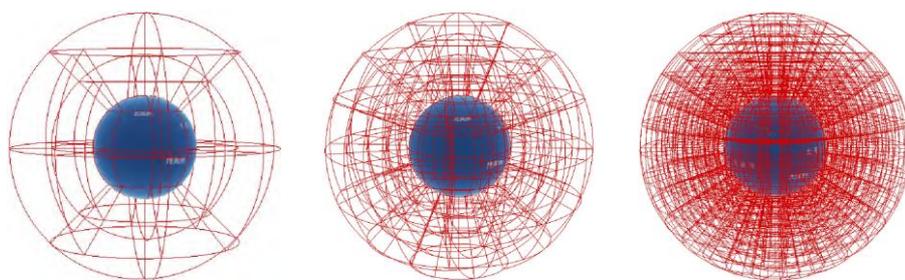


图1 DQG-3D 格网 1~3 层剖分网格的可视化

Fig.1 Visualization of DQG-3D grid with 1~3 layers

理

1.1 DQG-3D格网的剖分方法

DQG 全称为“球面退化四叉树格网”（Degenerate QuadTree Grid, 简称 DQG）^[18]，是一种地球表面格网剖分与编码方法。DQG 格网单元具有几何结构简单，几何变形稳定，径向对称，方向一致等特性^[19]，较好的实现了对球面空间的剖分。

DQG 格网在三维空间扩展得到了球体退化八叉树格网（Sphere Degenerated Octree Grid, SDOG）。SDOG 格网在高度上进行了退化剖分，原点位于球心，径向高度视研究范围而定，当研究范围为地球表面以上时，格网单元体积变化悬殊。本文提出一种 DQG-3D 格网的剖分方法，球面采用 DQG 格网剖分，径向采用二分法，以地球表面为剖分基准面进行地表以上空间或地表以下空间剖分。为避免主观取值，同时为使格网粒度更加均匀，初始径向高度与八分体弧长保持一致，约为赤道周长的四分之一，以及顾及径向剖分的二分性，因此，选择径向高度为 10000km，随 DQG 格网进行同步剖分。由于 DQG-3D 格网径向采用二分法比 SDOG 格网径向采用退化剖分方法更加简单，因此在编码解码效率上，DQG-3D 格网更加具有优势，同时 DQG-3D 格网选择球面为剖分基准面，高度层利用率和分辨率较高，格网单元体积变化小。基于 DQG-3D 格网的剖分方法，采用 JavaScript+Cesium 进行编程，对 DQG-3D 的剖分过程和结果进行可视化，如图 1 所示。

剖分层级决定了格网单元粒度，格网单元粒度是确定格网应用尺度的重要指标，剖

分层级和格网分辨率对应关系，如表1所示。

表1 格网剖分层次与分辨率对应关系表

Table 1 Corresponding relation between grid classification and resolution

层次	平均面积(m ²)	平均体积(m ³)	层次	平均面积(m ²)	平均体积(m ³)
1	2.13003E+13	9.731599E+21	10	91411051.09	8.626954E+13
2	5.80918E+12	1.351944E+21	11	22852770.94	2.156949E+12
3	1.48607E+12	1.756749E+20	12	5713193.247	1.348159E+12
4	3.7369E+11	2.231262E+19	13	1428298.344	1.685240E+11
5	93559277708	2.809001E+18	14	357074.5879	2.106549E+10
6	23398383989	3.523008E+17	15	89268.6471	2.633202E+09
7	5850131527	4.410886E+16	16	22317.16178	3.291682E+08
8	1462566356	5.517993E+15	17	5579.290446	8.229217E+06
9	365643681.3	6.900209E+14			

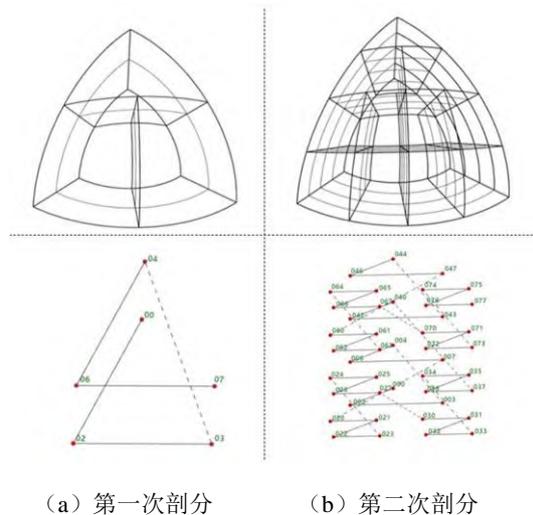
1.2 DQG-3D格网编码规则与行列号的定义

DQG-3D 格网第0次剖分将球体剖分成8个八分体，根据其所在的位置由一个八分码(0-7)来标识，其标识规则见文献[18]。

DQG-3D 格网编码采用三维 Z 曲线填充，用八进制数表示，具体规则如下(以0号八分体为例)：八分体初始单元经过第一次剖分后生成两层格网，包含6个子格网。对于底层格网，顶部球面三棱柱为00，左、右下角两个球面六面体为02和03，对于上层格网，顶部球面三棱柱为04，左、右下角两个球面六面体为06和07。第二次剖分的格网单元，球面三棱柱和第一次格网剖分编码方法相同，球面三棱柱格网生成12个子格网，其编码分别为000、002、003、004、006、007、040、042、043、044、045、047。球面六面体格网剖分后生成32个子格网，子格网的编码规则为：在父编码的基础上按照Z曲线依次添加0、1、2、3、4、5、6、7。则第二次剖分的球面六面体格网编码分别为020、021、022、023、030、031、032、033、024、025、026、027、034、035、036、037、060、061、062、063、070、071、072、073、064、065、066、067、074、075、076、077，其他层级依次类推。当八分体递归剖分成较小的格网单元时，每经过一次剖分，

编码长度增加一位，八分码拼接上 Morton 码即为格网单元编码，如图2所示。

DQG-3D 格网的行号、列号、层号定义规则如下(以0号八分体为例)，行号*i*与纬线对应，列号*j*为从0°经线开始自西向东各行剖分单元的个数，层号*h*为从地球表面开始向上到虚拟球面的格网层数，行号、列号、层号分别在向下、向右、向上的方向上递增，三坐标轴相交于原点O，在极点处的行号、列号、层号都为0，如图3所示。



(a) 第一次剖分 (b) 第二次剖分

图2 DQG-3D 编码规则

Fig.2 DQG-3D coding rules

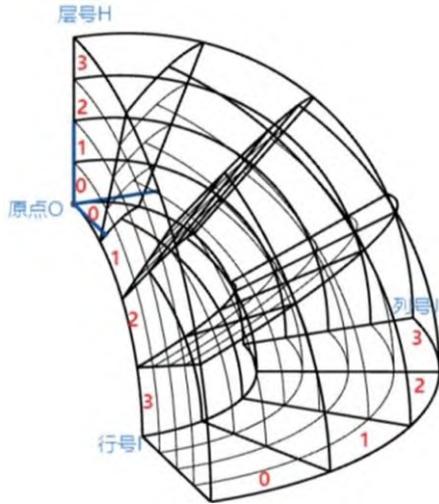


图3 DQG-3D行列层号

Fig.3 DQG-3D row column lay number

2 局部格网与全球格网编码的映射

2.1 局部格网剖分与编码

局部格网具有灵活、针对性强的特点，极大的降低了格网冗余和缩短编码长度。因此，将研究区域进行递归八叉树剖分，直到格网单元大小满足剖分层次和粒度需求。局部格网编码采用常规八叉树编码方法，与全球DQG-3D格网相比，编码缺少第一位八分码和退化编码。

局部格网的行号、列号、层号定义规则相对于全球DQG-3D格网的行号、列号、层号定义规则更加简明。以局部格网在北半球为例，以编码为0的格网单元作为行列层坐标的原点(0, 0, 0)，向下、向右、向上，行号、列号、层号递增。

2.2 DQG-3D格网框架下的局部基础格网确定

在全球DQG-3D格网剖分框架下，需要根据研究区域的大小，确定研究区域被包含于哪个或哪几个DQG-3D格网单元中，以包含研究区域的DQG-3D格网单元为局部剖分的基础格网(局部剖分初始格网)。

为了最大程度减少格网的冗余，需要确定DQG-3D格网的标识层级^[20]，采用研究区域的最小外包正方形来确定研究区域在全球格网的位置信息，从而确定合适的标识

层级，具体规则如下：定义 S 为研究区域的最小外接正方形的面积， S_{k-1} 为一个 $k-1$ 级DQG格网单元的面积， S_k 为 k 级DQG格网单元的面积，当 $S_{k-1} < S < S_k$ 时，确定全球格网标识层级为 k ，由表1可以查得具体 k 值。

对于任意研究区域，在标识层级全球格网下，研究区域的最小外接正方形会处于跨越DQG格网和非跨越DQG格网情况。由最小外接正方形四个顶点的经度和纬度坐标，根据文献[21]经度和纬度转格网编码的算法，计算四个顶点所在全球格网的编码，剔除重复编码，根据编码的数量可分为处于一个格网、两个格网、三个格网、四个格网的情况，如图4所示。

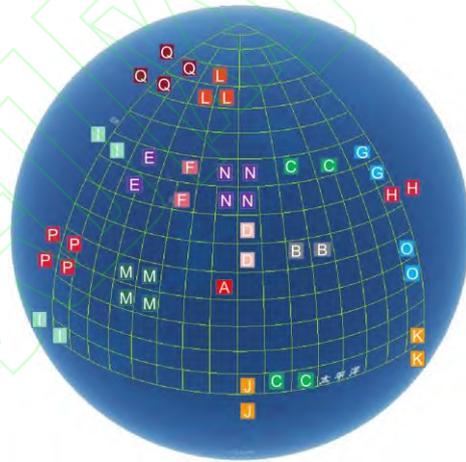


图4 研究区域跨格网单元类型

Fig.4 Study area cross grid cell type

A 为位于一个 DQG 格网单元；B 为位于两个横 DQG 格网单元；C 为位于两个横 DQG 格网单元而且在八分体下边缘或退化纬线上方；D 为位于两个竖格网；E 为位于两个竖格网，跨退化区域，且小格网位于左侧；F 为位于两个竖格网，跨退化区域，且小格网位于右侧；G 为位于两个竖格网，跨退化区域，且在八分体右边缘；H 为位于两个横格网且跨八分体；I 为位于两个横格网，跨八分体且位于八分体的下边缘；J 为位于两个竖格网，跨八分体；K 为位于两个竖格网，跨八分体且在八分体右边缘；L 为位于三个格网跨退化；M 为位于四个格网；N 为位于四个格网且跨退化；O 为位于两个竖格网且在八分体的右边缘；P 为位于四个格网，

跨八分体；Q 为位于四个格网，跨退化且跨八分体。

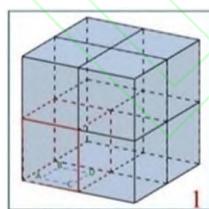
为满足局部格网八叉树剖分规则，对不同 类型格网的行号、列号、层号进行扩展，使其扩展成满足八叉树剖分的局部基础格网。不同类型格网行号、列号、层号扩展规则如表 2 所示。根据扩展后格网单元的行号、列号、层号，计算三维格网单元的经度、纬

度、高度坐标，将包含研究区域最小外接正方形的边界作为局部基础格网边界坐标。研究区域跨越不同格网数目的局部基础格网如图 5 所示，黑色线框表示标识层级的全球 DQG-3D 格网，蓝色线框表示研究区域的最小外接正方形，红色线框表示局部剖分的基础格网。

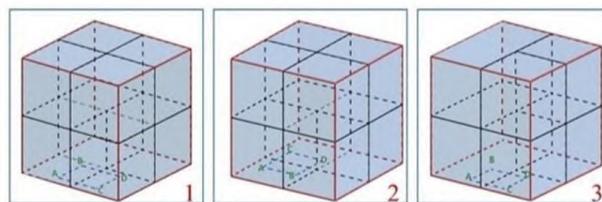
表 2 不同跨越类型格网行列层号扩展规则

Table 2 Rules for extending row and column numbers across different types of grids

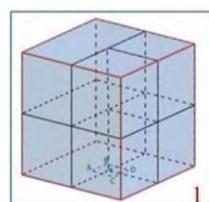
跨越格网面片数	跨越格网面片类型	行号	列号	层号	八分体编码
1	A	I	J	0	
	B	I+1	J	H+1	
	C	I-1	J	H+1	
	D	I	J+1	H+1	
	O	I	J-1	H+1	
	E,G	I	J+1	H+1	
2	F	I	J-1	H+1	
	H	I+1	J	H+1	相邻八分体八分码
	I	I-1	J	H+1	相邻八分体八分码
	J	I	J+1	H+1	相邻八分体八分码
	K	I	J-1	H+1	相邻八分体八分码
	3	L	I	J	H+1
4	M	I	J	H+1	
	N	I	小格网 J	H+1	
4	P	I	J	H+1	相邻八分体八分码
	Q	I	小格网 J	H+1	相邻八分体八分码



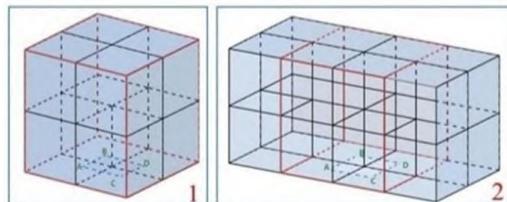
(a) 一个格网



(b) 两个格网



(c) 三个格网



(d) 四个格网

图 5 局部基础格网的确定

Fig.5 Determination of local basic grid

2.3 局部编码与全球编码的映射规则

将局部格网数字空间纳入到全球框架中，在全球格网剖分框架下，进行局部格网编码与全球格网码的映射，实现局部区域的数据组织管理。

传统的编码映射方法以经度、纬度、高度坐标做为全球 DQG-3D 编码与局部格网编码映射的中间件，对于给定一个局部格网编码，将局部格网编码转换为经度、纬度、高度坐标，再将经度、纬度、高度坐标转换为全球 DQG-3D 格网编码，即可实现局部格网与全球 DQG-3D 格网编码的映射。

$$Code_{Global} = Code_{Layer} \ll (LocalLevel \times 3)^{Code_{Local}} \quad (1)$$

式中： \ll 为左移运算； \wedge 按位异或运算

局部基础格网位于非退化区域，其中包括跨越八分体的情况。根据基础格网的确定方法，基础格网分别对应八个 DQG-3D 格网单元，其编码集为 $\{Code_{0Layer}, Code_{1Layer}, Code_{2Layer}, Code_{3Layer}, Code_{4Layer}, Code_{5Layer}, Code_{6Layer}, Code_{7Layer}\}$ ，局部格网的第一次剖分产生的八个子格网，其编码分别为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7。八个局部子格网分别对应基础格网所包含的标识层级 DQG-3D 格网集合，将两组编码集合按照 Z 曲线的填充方法进行一一对应。对于给定一个局部格网

本文编码映射方法借助格网的编码特性，实现编码映射。根据局部格网位于全球 DQG-3D 格网区域的不同，所对应的映射方法也不同，需要根据局部基础格网的位置进行详细分析。

局部基础格网对应一个 DQG-3D 格网，首先，计算研究区处于 DQG-3D 格网标识层级的编码 $Code_{Layer}$ ，对于给定的局部格网编码 $Code_{Local}$ ，计算局部格网的剖分等级 $LocalLevel$ ，即局部编码 $Code_{Local}$ 的编码长度。基于以上参数，计算局部格网编码所对应 DQG-3D 格网编码 $Code_{Global}$ ，公式如下：

编码，计算局部格网编码前缀（局部格网编码的第一位）所对应的标识层级下的 DQG-3D 格网编码，然后拼接局部格网编码的后缀（即除前缀以外的编码），即得到局部格网编码所对应的全局 DQG-3D 格网编码，其具体计算过程如下，计算示意图如图 6 所示。

(1) 根据局部格网编码 $Code_{Local}$ ，计算其编码的前缀 $Code_{First}$ ，以及局部格网的剖分等级 $LocalLevel$ ，公式如下：

$$Code_{First} = Code_{Local} \gg [(LocalLevel - 1) \times 3] \quad (2)$$

式中： \gg 为右移运算

(2) 根据局部格网编码 $Code_{Local}$ ，计算其编码的后缀 $Code_{Last}$ ，以及编码后缀的

长度 $LastLevel$ ，公式如下：

$$Code_{Last} = Code_{Local} \& [0xFFFFFFFF \gg [32 - (LocalLevel - 1) \times 3]] \quad (3)$$

式中： $\&$ 为按位与运算

(3) 根据局部格网编码前缀查找与其所对应的标识层级 DQG-3D 格网编码。

(4) 根据查找到的标识层级编码计算全球 DQG-3D 格网编码，公式如下：

$$Code_{Global} = Code_{Layer} \ll (LastLevel \times 3)^{Code_{Last}} \quad (4)$$

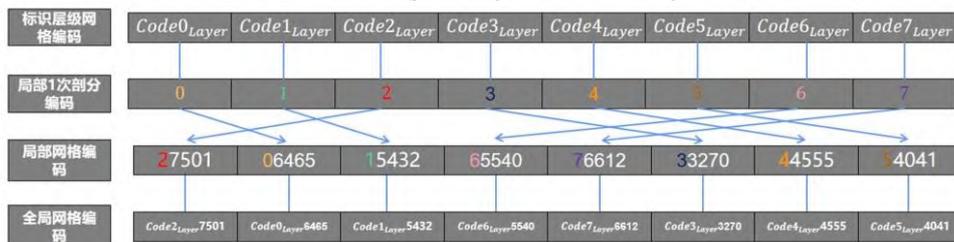
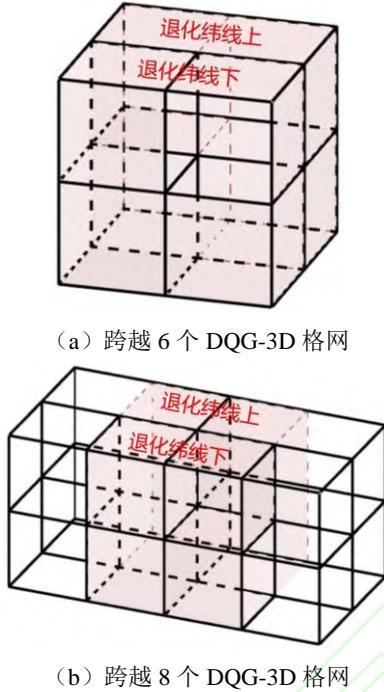


图 6 非退化区域局部格网编码映射全局 DQG-3D 编码过程

Fig.6 Nondegenerate region local grid coding maps the global DQG-3D coding process

局部基础格网处于退化区域，包含既跨退化也跨八分体的情况。对于退化区域的处理，将整个局部基础剖分空间分为两部分，分别是退化纬线上部分和退化纬线下部分，如图 7 所示。



(a) 跨越 6 个 DQG-3D 格网

(b) 跨越 8 个 DQG-3D 格网

图 7 局部基础格网跨退化分区

Fig.7 Local basic grid spans degenerate

黑色边框为全球 DQG-3D 格网，内部粉色格网为局部格网。退化纬线上，局部两个格网对应一个 DQG-3D 格网，退化纬线下，

$$Col_{Global} = \left\lfloor \frac{l_l}{2} \right\rfloor + L_{lb} \times 2^{localLevel-1} + localLevel - 1 \quad (8)$$

如果局部基础格网跨越 8 个 DQG-3D 格网且跨八分体，因为存在跨八分体的情况，左右两个八分体内格网的行列号是不连续的，因此对两个八分体进行分别计算，首先判断局部格网属于哪个八分体，如果 $i_l \leq 2^{localLevel-1} - 1$ 且 $l_l \leq 2^{localLevel-1} - 1$ ，则局部格网位于左侧八分体，行号、列号、层号的转换公式为式 (5)、式 (7) 和式 (8)。如果 $i_l > 2^{localLevel-1} - 1$ 且 $l_l > 2^{localLevel-1} - 1$ ，行号和层号转换公式分别为式 (5) 和式 (7)，列号计算公式如下：

$$Col_{Global} = \left\lfloor \frac{l_l}{2} \right\rfloor - localLevel + 1 \quad (9)$$

局部格网与 DQG-3D 格网一一对应。因此将局部剖分空间分为上半部分和下半部分进行分别处理。

对于上半部分，采用行号、列号、层号转换法，局部格网的行号、列号、层号转换为全局格网的行号、列号、层号，然后通过行号、列号、层号转换为全球 DQG-3D 格网编码，具体转换方法为：

(1) 对于给定一个局部格网单元编码，根据 Morton 码转行号、列号、层号，计算局部格网的行号 i_l 、列号 l_l 、层号 h_l 。

(2) 根据局部基础格网跨越的 DQG-3D 格网，计算其左上角 DQG-3D 格网的行号 I_{lb} 、列号 L_{lb} 、层号 H_l 。

(3) 局部格网的行号、列号、层号转换为全局格网的行号 Row_{Global} 、列号 Col_{Global} 、层号 Hei_{Global} ，公式如下：

$$Row_{Global} = i_l + I_{lb} \times 2^{localLevel-1} \quad (5)$$

$$Col_{Global} = \left\lfloor \frac{l_l}{2} \right\rfloor + L_{lb} \times 2^{localLevel-1} \quad (6)$$

$$Hei_{Global} = h_l \quad (7)$$

式中： $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算。

(4) 如果局部基础格网跨越 8 个 DQG-3D 格网，如图 7 (b) 所示。其局部格网的行号、层号转换方法为式 (5) 和式 (7)，局部格网列号转全局格网列号公式如下：

(5) 根据以上步骤计算全球 DQG-3D 格网的行号、列号、层号，通过行号、列号、层号计算 Morton，根据局部基础格网所处的八分体，将 Morton 码拼接八分体编码，实现局部基础格网退化纬线上的编码映射。

对于局部基础格网退化纬线下半部分，因为下半部分满足局部格网单元与全球 DQG-3D 格网单元一一对应的关系，因此编码映射方法与非退化区域的编码映射相似，因为退化纬线下半部分的全球格网的编码

集只有四个,因此与之对应的局部格网分别是前缀为 2, 3, 6, 7 的局部格网编码, 编码映射方法为式 (2)、式 (3) 和式 (4)。

3 实验分析

为了验证算法正确性、性能与效率, 设计了编码映射正确性、编码映射计算效率、全球与局部格网编码计算效率三组实验进行测试。实验运行环境为: CPU 为 Inter i7-9750H, 16G 内存, 1T 硬盘, 编程语言采用 JavaScript, NodeJS 运行环境。

3.1 编码映射正确性验证

为了验证本文算法的准确性, 分别选取

一个格网区域、非退化区域、退化 6 格网区域、退化 8 格网区域、跨八分体区域和退化且跨八分体区域进行局部格网划分。选取局部格网, 获取其编码, 根据 2.3 节编码映射规则计算全球格网编码。为验证编码映射的准确性, 分别根据局部格网编码和其映射的全球格网编码计算格网中心点的经度、纬度、高度, 如果二者计算的经度、纬度、高度一致, 说明编码映射准确, 如图 8 所示。在上述区域内局部格网编码与其映射的全球格网编码计算的经度、纬度、高度一致, 进而验证算法的准确性。

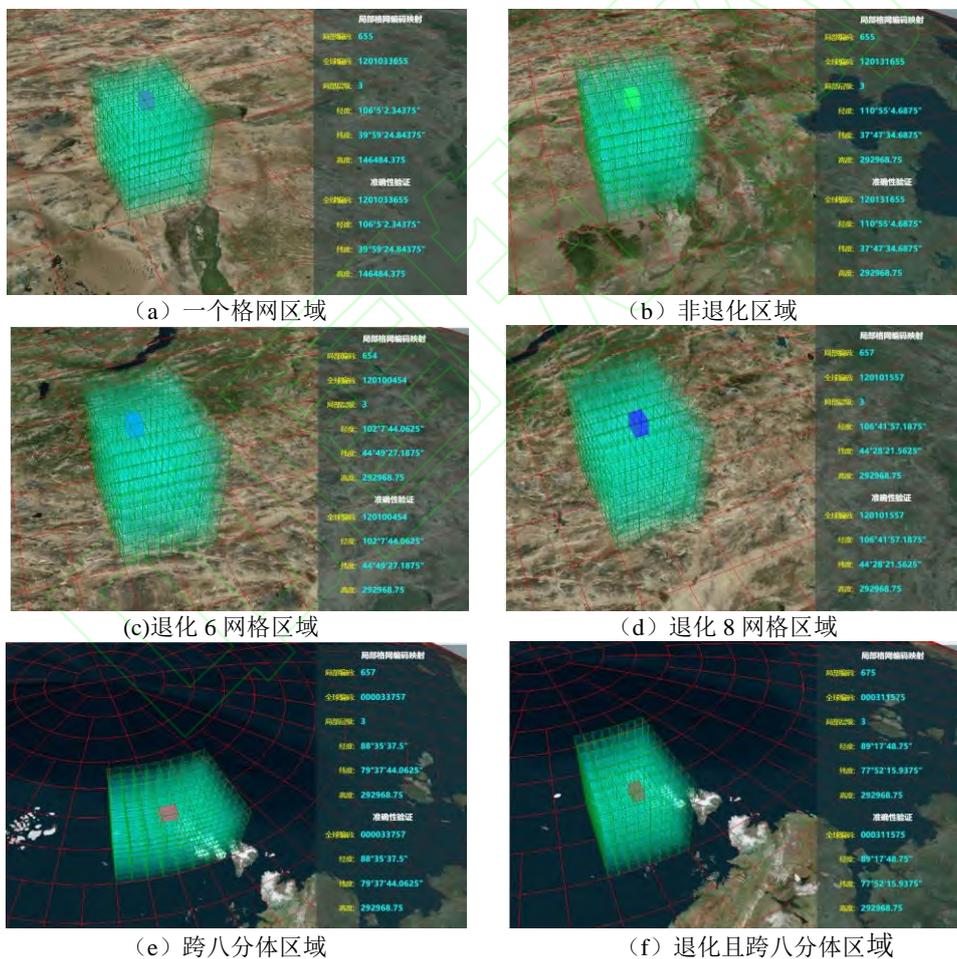


图 8 编码映射准确性验证

Fig.8 Validation of coding mapping accuracy

3.2 编码映射效率分析

分别对 3.1 节中的局部格网区域进行剖分, 剖分等级为 7 级, 每个区域生成 200 多个局部格网编码进行算法效率分析, 对传

统的经度、纬度、高度做为中间件编码映射方法和本文方法进行效率对比, 不同区域下两种编码映射方法平均转换耗时如表 3 所示。随着剖分等级的增加, 研究区域位于跨

退化区域和跨八分体区域逐渐减小,当标识层级为 10 级时,全球占比仅为 0.44%和 0.43%,如图 9 所示。由此可知,在实际应用中,局部区域大多数位于一个格网和非退

化区域。因此,由表 3 可知,在一个格网内和非退化区域,本文方法编码映射效率是传统基于经度、纬度、高度坐标编码映射方法效率的 30 倍和 11 倍。

表 3 编码转换算法耗时

Table 3 Encoding conversion algorithm time consuming

转换方法	耗时(s)					
	一个格网	非退化	退化 6 网格	退化 8 网格	跨八分体	退化且跨八分体
经纬度方法	12.919	13.101	12.561	12.467	12.782	12.892
本文方法	0.425	1.181	8.772	8.663	1.212	8.898
算法效率比	30.40	11.09	1.43	1.44	10.55	1.45

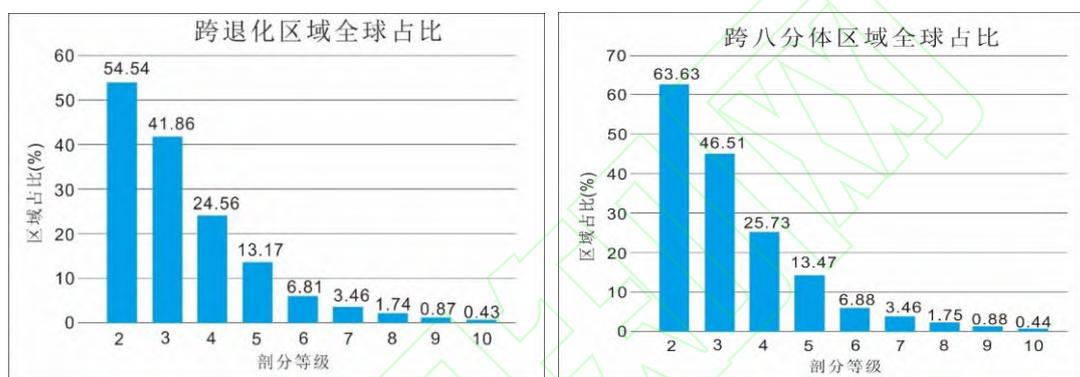


图 9 退化与跨八分体区域全球占比

Fig.9 Global proportions of degraded and trans-octetic regions

3.3 全球与局部格网编码效率对比

计算机的系统位数大多为 64 位,在 JavaScript 语言中,Number 数据类型所能表达的最大整数为 $2^{53}-1$,根据编码交叉取位,将其分配给行号、列号、层号三个坐标轴,则每个坐标轴的取值范围为 $0\sim 2^{17}-1$,即格网编码计算的最大层级为 17 级,当剖分等级超过 17 级时,由于位数的不足,导致计算错误。然而在格网精细化建模中剖分等级会大于 17 级,JavaScript 语言中提供了 BigInt 数据类型,其解除了位数的限制,解决了位数不足的问题。当剖分等级大于 17 时只能采用 BigInt 数据类型进行计算,但是其计算

效率会降低。在格网相同分辨率下,局部格网相较于全球格网,格网编码长度短,所占用的位数少,可以基于 Number 数据类型进行计算。

为比较全球与局部格网编码应用的效率,以运城市机场净空区数据为例,分别基于全球格网编码与局部格网编码进行格网建模,如图 10 所示。全球格网编码与局部格网编码建模效率如图 11 和表 4 所示,由表 4 可知,随着剖分等级的增加,格网数量的增加当剖分等级为 22 级时,局部格网建模的效率是全球格网建模效率的 13 倍。

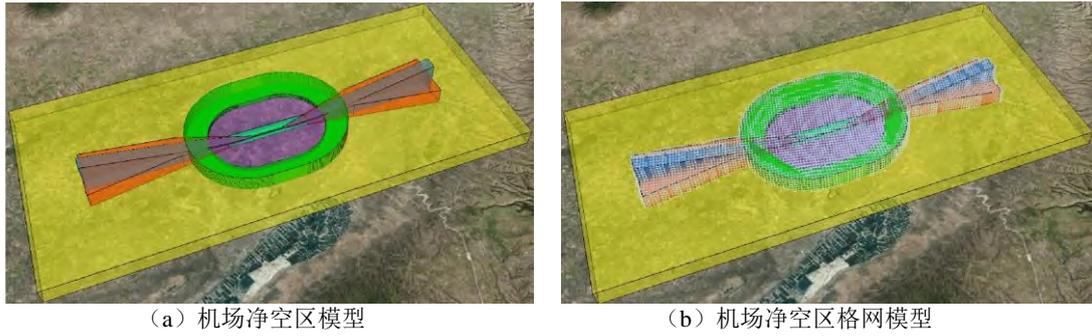


图10 全球与局部格网机场净空建模

Fig 10 Global and local grid airport clearance modeling

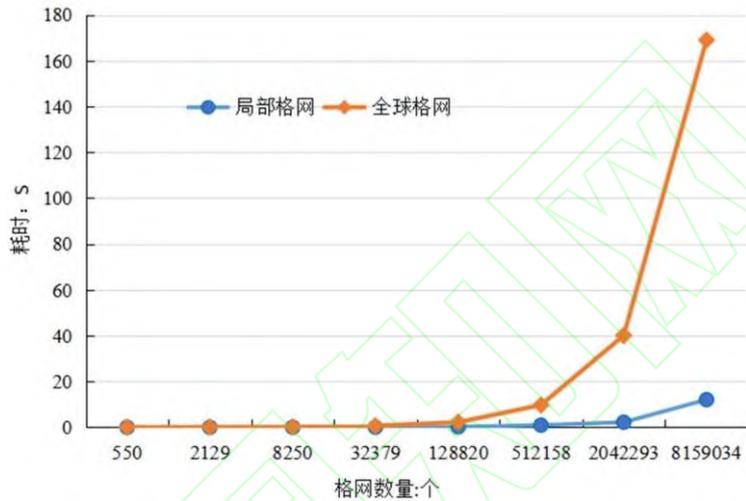


图11 全球与局部格网建模效率对比

Fig 11 Comparison of global and local grid modeling efficiency

表4 全球与局部格网编码建模效率

Table 4 Modeling efficiency of global and local grid coding

全球层级	局部层级	格网分辨率(米)	格网数量(个)	全球格网编码耗时(秒)	局部格网编码耗时(秒)
15	8	250.3746	550	0.0129	0.0047
16	9	125.1873	2129	0.0442	0.0100
17	10	62.5936	8250	0.1399	0.0290
18	11	31.2968	32379	0.5873	0.0600
19	12	15.6484	128820	2.0230	0.3913
20	13	7.8242	512158	8.7779	0.9505
21	14	3.9121	2042293	37.8433	2.2469
22	15	1.9561	8159034	156.898	12.0835

4 结论

全球与局部统一的三维格网框架是解决全球宏观范围和局部微观范围三维空间问题的基础。本文基于 DQG 格网，将其扩

展至三维，以地球表面为基准面，球面上采用 DQG 剖分方式，径向上采用二分的方法，形成 DQG-3D 格网，并对格网进行编码。针对小范围的研究区域，在全球 DQG-3D 格网框架的基础上，对局部区域采用八叉树剖分与编码方法，实现局部格网与全球格网编码

的映射, 并进行了实验分析与算法效率对比。分析表明, 在一个格网和非退化区域内, 本文算法的效率是传统基于经度、纬度、高度坐标编码映射方法效率的 30 倍和 11 倍; 局部格网建模效率是全球格网建模效率的 13 倍。下一步的研究将基于二进制进行编码运算, 以及局部与全球格网编码的空间分析。

参 考 文 献

- [1] Kevin S, Denis W, A. J. K. Geodesic Discrete Global Grid Systems[J]. *Cartography and Geographic Information Science*,2003, 30(2):121-134.
- [2] 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 (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)
- [3] Benjamin U, John H, Faramarz S. General Method for Extending Discrete Global Grid Systems to Three Dimensions[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*,2020, 9(4):233
- [4] WU Lixin, YU Jieqing. Earth System Spatial Grid and Its Application Modes[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012,28(01): 7-13 (吴立新, 余接情. 地球系统空间格网及其应用模式[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(01): 7-13)
- [5] Hu X, Cheng C, A. J. K. The Three-Dimensional Data Organization Method based on GeoSOT-3D[J]. *IEEE*,2014.
- [6] CAO Xuefeng. Research on Earth Sphere Shell Space Grid Theory and Algorithms[D]. *zhengzhou: Information Engineering University*,2012 (曹雪峰. 地球圈层空间网格理论与算法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012)
- [7] WU Lixin, YU Jieqing. Global 3D-Grid Based on Sphere Degenerated Octree and Its Distortion Features[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009,25(01):1-4 (吴立新, 余接情. 基于球体退化八叉树的全球三维网格与变形特征[J]. 地理与地理信息科学. 2009, 25(01): 1-4)
- [8] Wang Jinxin, LU Fengnian, GUO Tongde, et al. Global 3D-Grids Based on Great Circle Arc QTM Sphere Octree and Unequal Octree[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2013,38(03):344-348 (王金鑫, 禄丰年, 郭同德, 等. 球体大圆弧 QTM 八叉树剖分[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2013, 38(03): 344-348)
- [9] YU Jieqing, WU Lixin, ZI Guojie, et al. SDOG-based multi-scale 3D modeling and visualization on global lithosphere[J]. *Sci China Earth Sci*, 2012,42(05):755-763 (余接情, 吴立新, 訾国杰, 等. 基于 SDOG 的岩石圈多尺度三维建模与可视化方法[J]. 中国科学:地球科学,2012, 42(05):755-763)
- [10] WANG Jinxin, ZHAO Guangcheng, LU Fengnian, et al. Sphere geodesic octree grid method for true three-dimensional geological model construction[J]. *Journal of Geo-information Science*,2019,21(8):1161-1169 (王金鑫, 赵光成, 禄丰年, 等. 真三维地质模型构建的球体测地线八叉树网格方法[J]. 地球信息科学学报,2019, 21(08):1161-1169)
- [11] TONG Xiaochong, BEN Jin, QIN Zhiyuan, et al. The Subdivision of Partial Grid Based on Discrete Global Grid Systems[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2009,38(06): 506-513 (童晓冲, 贲进, 秦志远, 等. 基于全球离散网格框架的局部网格划分[J]. 测绘学报,2009, 38(06): 506-513)
- [12] TONG Xiaochong. The Construct of Digital Space of Global Multi-resolution Grid System and the Study of Index Mechanism[D]. *zhengzhou: Information Engineering University*,2006 (童晓冲. 全球多分辨率网格系统数字空间构建及索引机制研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2006)
- [13] ZHENG Mingyang, BEN Jin, ZHOU Jianbin, et al. Fast generation algorithm of multi-aperture hexagonal grid systems of regional-scale[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2020:1-13 (郑明阳, 贲进, 周建彬, 等. 局部区域多孔径六边形格网系统快速生成算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020: 1-13)
- [14] WU Qunyong, ZENG Qingquan, ZHANG Aiguo. An indoor spatial grid data model in the frame of DGGS[J]. *Journal of Navigation and Positioning*,2020,8(02):55-62 (鄂群勇, 曾庆权, 张爱国. 一种全球离散格网系统框架下的室内空间网格数据模型[J]. 导航定位学报. 2020, 8(02): 55-62)
- [15] Ali M A, Faramarz S, Perry P. Categorization and Conversions for Indexing Methods of Discrete Global Grid Systems[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*

- ation,2015, 4(1):320-336.
- [16] Li Q M,Chen X,Tong X C et al. An Information Fusion Model between GeoSOT Grid and Global Hexagonal Equal Area Grid[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information,2022,11(4):265-280.
- [17] CHEN Yihang, Wang Jinxin, CAO Zening, et al. The uniform encoding and generation method of structure elements of Discrete Global Grid Systems[J]. Journal of Geo-information Science,2021,23(08):1382-1390 (陈艺航,王金鑫,曹泽宁,等. 全球离散格网系统结构要素一体化编码与生成方法[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(08): 1382-1390)
- [18] CUI Majun, ZHAO Xuesheng. Tessellation and Distortion Analysis Based on Spherical DQG[J]. *Geography and Geo-Information Science*,2007(06):23-25 (崔马军, 赵学胜. 球面退化四叉树格网的剖分及变形分析[J]. 地理与地理信息科学, 2007(06): 23-25)
- [19] ZHAO Xuesheng, CUI Majun, LI Ang, et al. An adjacent Searching Algorithm of Degenerate Quadtree Grid on Spherical Facet[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2009,34(04):479-482 (赵学胜, 崔马军, 李昂, 等. 球面退化四叉树格网单元的邻近搜索算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(04): 479-482)
- [20] CHENG Chengqi, REN Fuhu, PU Guoliang, et al. Introduction to partition organization of spatial information[M]. *beijing: Science Press*, 2012 (程承旗, 任伏虎, 濮国梁, 等. 空间信息剖分组织导论[M]. 北京: 科学出版社, 2012)
- [21] DING Jiacheng, ZHAO Xuesheng. An Improved Efficient Conversion Algorithm between DQG Grid Code and Geographic Coordinate[J]. *Geography and Geo-Information Science*,2021,37(01):1-4 (丁加成, 赵学胜. 一种改进的DQG格网编码与经纬度高效转换算法[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(01): 1-4)

A global and local coding mapping method based on DQG-3D grid

LUO Dongxu ZHAO Xuesheng ZHANG Yaoyuan LIU Shixiong LU Mengdie

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

Abstract: Objectives: With the increase of exploration and production activities of earth science, the demand for space data management is also developing from the surface to the three-dimensional dimension of underground, air and space. The global discrete grid is a new generation of integrated space data model integrating space and earth Space geographic entities on earth distribution scale differences, both global macro scope and local micro scope, the research range scale size, mesh, accuracy requirements, and data processing capacity, the influence of such factors as local micro range using local grid computing is more advantage, but not lost the unity of global grid. Therefore, a global and local unified three-dimensional grid framework is designed and the mapping method between local grid and global grid code is implemented to provide a basis for global and local three-dimensional spatial information management. **Methods:** Firstly, based on the spherical DQG grid partitioning method, the three-dimensional extension is carried out. The sphere is still divided by degraded quadtree, and the binary tree is divided radially to form DQG-3D grid, The DQG-3D grid cells are encoded using Z-curve coding, which consists of octet coding and 3D Morton code. Then, in the framework of global DQG-3D grid, the identification level of the global grid is determined by comparing the area of the outer square of the study area with the area of the spherical DQG grid. At the level of identification, the local basic grid is determined, and the local basic grid is divided and coded by octree. Finally, the mapping between local grid and global grid code is realized. For non-degenerate regions, grid code bit operation is used for direct mapping. For degenerate regions, local row number, column number and layer number are used to calculate global row number, column number and layer number. **Results:** Experimental results show that in a grid and non-degenerate region, the efficiency of the proposed algorithm is 30 times and 11 times higher than that of the traditional method based on longitude, latitude and altitude. The modeling efficiency of local grid is 13 times that of global grid. **Conclusions:** The proposed

method can meet the requirements of efficient expression and application of global unified model and local refined model. Further research will be based on binary coding operations and spatial analysis of local and global grid coding.

Keywords: DQG-3D; Global Grid; Local Grid; Coding mapping

First Author: LUO Dongxu, master candidate, specializes in the theories and applications of discrete global grid.
E-mail: 543878432@qq.com

Corresponding author: ZHAO Xuesheng, PhD, professor. E-mail: zxs@cumtb.edu.cn

Foundation Support: The National Natural Science Foundation of China (41671394,41671383) .

网络首发:

标题: 一种基于DQG-3D格网的全球与局部编码映射方法

作者: 罗东旭, 赵学胜, 张耀元, 柳世雄, 卢梦蝶

DOI: 10.13203/j.whugis20220144

收稿日期: 2022-03-17

引用格式:

罗东旭, 赵学胜, 张耀元, 等. 一种基于DQG-3D格网的全球与局部编码映射方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220144 (LUO Dongxu, ZHAO Xuesheng, ZHANG Yaoyuan, et al. A global and local coding mapping method based on DQG-3D grid[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220144)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

四孔六边形全球离散格网一致瓦片层次结构编码运算

周建彬, 贲进, 王蕊, 郑明阳

武汉大学学报 信息科学版, doi: 10.13203/j.whugis20200530

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200530>