

## 基于正交试验选优的湖底地形分区插值方法

龚懿, 陈再扬, 张维, 汪靓, 王玉琳, 杨小玲

### Research on interpolation method of lake terrain zoning based on orthogonal experiment optimization

GONG Yi, CHEN Zaiyang, ZHANG Wei, WANG Liang, WANG Yulin, YANG Xiaoling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211103004>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 基于正交设计的膨胀土冻融循环试验研究

Experimental studies on freeze-thaw cycles of expansive soil based on orthogonal design

水利水运工程学报. 2017(2): 51 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.007>

##### GIS多源数据图层叠置法研究山东省干旱分区

Study on drought zoning in Shandong Province based on GIS multi-source data layer overlapping method

水利水运工程学报. 2021(3): 67 <https://doi.org/10.12170/20200408001>

##### 基于MLP方法的长江-洞庭湖江湖水沙交换演变规律研究

Preliminary study on evolutions of Yangtze River and Dongting Lake water and sediment fluxes exchanges based on MLP method

水利水运工程学报. 2020(5): 24 <https://doi.org/10.12170/20190627001>

##### 城镇化背景下平原河网区暴雨洪水重现期变化分析——以太湖流域武澄锡虞区为例

Change in return period of storm flood in plain river network area under urbanization—taking Wuchengxiyu region of Taihu Lake basin as a case study

水利水运工程学报. 2019(5): 27 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.004>

##### 基于突变理论的区域洪灾脆弱性评价

Assessing regional flood vulnerability based on catastrophe theory

水利水运工程学报. 2018(1): 32 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.006>

##### 岛礁地形抛石护岸稳定性试验研究

Experimental studies on stability of riprap revetment on fringing reefs

水利水运工程学报. 2019(5): 69 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.009>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20211103004

龚懿, 陈再扬, 张维, 等. 基于正交试验选优的湖底地形分区插值方法 [J]. 水利水运工程学报, 2022(6): 78-85. (GONG Yi, CHEN Zaiyang, ZHANG Wei, et al. Research on interpolation method of lake terrain zoning based on orthogonal experiment optimization[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(6): 78-85. (in Chinese))

# 基于正交试验选优的湖底地形分区插值方法

龚懿<sup>1</sup>, 陈再扬<sup>1</sup>, 张维<sup>2</sup>, 汪靓<sup>1</sup>, 王玉琳<sup>3</sup>, 杨小玲<sup>4</sup>

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 江苏省水利工程建设局, 江苏南京 210029; 3. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225009; 4. 重庆市农业科学院, 重庆 401329)

**摘要:** 为降低湖底高程采样点变异较大对插值计算的影响, 获得精度较高的湖底地形, 将高程采样点变异程度对插值的影响引入普通的反距离加权插值法中, 提出了考虑高程采样点变异程度的湖泊地形分区插值方法。通过正交试验优化方法, 得到各分区反距离最优幂值。以太湖为研究实例, 对比了几种插值方法对太湖湖底地形的插值效果。结果表明分区反距离加权插值法具有良好的适应性: 在高程方面, 经实测验证, 其均方根误差最小; 在库容方面, 该方法与克里金法、反距离加权插值法、自然邻域法相比, 平均相对误差分别减少 0.97%、0.90%、1.37%, 插值效果明显更优。因此, 在湖泊地形起伏较大情况下, 分区反距离加权插值法能够获得较高精度的湖底形态, 可用于不同类型的湖底地形插值计算。

**关键词:** 分区地形插值; 正交试验选优; IDW; 太湖

中图分类号: P343

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)06-0078-08

水文水资源、水环境数值模拟等研究需要高精度的河流或湖泊地形数字信息<sup>[1-2]</sup>。建立数字高程模型较为成熟的方法是将现有地形图数字化通过内插方法生成 DEM(Digital Terrain Model), 国内常利用多种高程信息(等高线、高程点、骨架点)通过插值算法生成 DEM<sup>[3]</sup>。湖底高程信息测量的主要手段有网络 RTK 联合声波探测仪<sup>[4]</sup>、水下测量机器人<sup>[5]</sup>等。然而, 由于研究区域地形地貌、测量手段等多方面因素限制, 湖底设置观测点的数量有限, 其布局也无法完全满足研究要求<sup>[6-9]</sup>, 利用观测点高程数据进行空间插值展布, 成为获得高精度湖底地形数据的主要手段之一。空间地形插值的方法有很多, 最为常见的是克里金插值<sup>[10]</sup>和反距离加权插值<sup>[11]</sup>, 其中反距离加权插值法采用插值点到所有空间已知高程点的反距离加权平均来控制插值, 计算简单, 应用最为广泛<sup>[12-14]</sup>。很多学者将反距离加权插值法引入水下地形研究, 如华祖林等<sup>[5]</sup>利用对比三角网格法、反距离加权插值法和克里金法, 分析河道强弯段、干支交汇处等地形复杂区域的插值效果, 并将获得的黄浦江全段插值地形用于潮位计算, 结果表明克里金法对黄浦江全段的适应性最好、精度最高; 蒋伟达等<sup>[6]</sup>研究埤岛海域地形演变, 利用多种插值方法进行适应性比较, 发现反距离加权插值法能够很好地生成埤岛海域范围内的水深地形; 李冕等<sup>[7]</sup>基于自适应凸包选点改进反距离加权插值法, 并将其应用于 2011 年的渤海无机氮评价, 相比传统的反距离加权插值法(Inverse Distance Weight, IDW), 改进的插值法能够更好地反映海水污染物空间分布状况; 秦俊桃等<sup>[8]</sup>比较了反距离加权插值法等 8 种空间插值方法在地下水水位插值中的应用效果, 认为反距离加权插值法较适用于西北干旱地区的地下水水位插值。

然而在以往对反距离加权插值法的研究中, 主要涉及利用反距离加权插值法解决实际问题, 对反距离加权插值算法本身的研究相对匮乏, 有关距离加权插值的长度幂值对插值影响的研究较少。Li 等<sup>[9]</sup>在反距

收稿日期: 2021-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51909230); 江苏省水利科技项目(2020011); 中国博士后科学基金资助项目(2019M661948)

作者简介: 龚懿(1983—), 男, 江苏常熟人, 副教授, 博士, 主要从事水利优化规划与管理研究。

E-mail: gongyi\_8@163.com 通信作者: 汪靓(E-mail: right628@126.com)

离加权插值法公式中添加系数  $K$  以调整距离采样点的权重,提高了插值精度;李翔宇等<sup>[20]</sup>研究了全国不同密度的近海岸反距离加权插值法的参数选取,近海岸插值的加权幂值选 2 为最优;张锦明等<sup>[21]</sup>研究了插值参数对插值精度的影响,认为权指数对插值精度影响最为显著。与普通的反距离加权插值方法相比,这些方法虽然都考虑了权指数对插值精度的影响,但对地形变化较大的湖泊,如整个湖泊给定同一幂值,存在平滑效应影响插值效果的问题。

由于反距离加权插值法通过长度幂值来控制插值周边采样点对插值点的影响,地形起伏较大的湖泊幂值的选取对模拟精度会产生较大影响。本文提出对采样点进行方差计算,分析每个采样点与其周围采样点高程的变异程度;再利用 K-means 聚类,对采样点以方差为指标进行聚类分析;对不同类别点的幂值采用正交试验表进行选优,以高程-库容曲线的库容值为衡量指标选取最优幂值,最终得到湖底地形形态。

## 1 研究方法

### 1.1 普通反距离加权插值法

反距离加权插值法也称为反距离倒数乘方法,每个高程数据已知点对插值点都有影响,即为权重,反距离加权插值法主要依赖反距离的权重来控制插值。采样点距离插值点越近将被赋予越大的权重;反之,距离越远,其权重越小<sup>[22]</sup>。将插值函数  $Z(x, y)$  定义为各已知高程点  $Z^*(x_i, y_i)$  的加权平均值,设有  $n$  个已知高程数据点,平面坐标为  $(x_i, y_i)$ ,其计算式为:

$$Z(x, y) = w_i Z^*(x_i, y_i) \quad (1)$$

$$w_i = h_i^{-p} \left/ \sum_{j=1}^n h_j^{-p} \right. \quad (2)$$

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3)$$

式中:  $w_i$  为每个已知高程点的长度权重;  $p$  为长度的幂值,为任意正实数;  $h_i$  为第  $i$  个已知高程点到插值点间的距离(m);  $h_j$  为第  $j$  个已知高程点到插值点间的距离(m);  $n$  为已知高程点的数量。

普通的 IDW 插值利用采样点距离插值点的长度确定权重,虽然每个采样点都定义了幂值以考虑所有采样点的影响,但仅考虑了距离因素未考虑采样点的变异程度对插值的影响。因此,在地形起伏较大的区域应用有一定的局限性。

### 1.2 分区域反距离加权插值方法构建

**1.2.1 地形分区** 方差在统计学中是衡量一组数据离散程度的重要度量,选取方差作为衡量采样点数据起伏程度的指标,计算每个点与其周围  $z$  个采样点的高程值之间的方差。本文采用 K-means 聚类算法对衡量数据起伏程度的方差进行分析,对起伏程度相似的采样点赋相同的长度幂值。选取欧式距离作为相似的测度,每个采样点的方差作为聚类样本, K-means 算法的具体步骤如下:

- (1) 在  $n$  个高程方差样本中选取  $k$  个样本作为初始聚类中心  $c_i (i=1, 2, \dots, k)$ 。
- (2) 计算除聚类中心外其他高程方差样本  $p_j$  到聚类中心的欧式距离:

$$L_{ij} = \sqrt{(p_j - c_i)(p_j - c_i)^T} \quad (4)$$

式中:  $j$  为高程采样点中除聚类中心外的其他样本点,  $j=1, 2, \dots, n-1$ 。

- (3) 根据聚类中心构造  $k$  个集合,每个样本依据与聚类中心的欧式距离,划归到与之最近的集合中。
- (4) 采用均值更新聚类中心:

$$c_i = \frac{1}{n_i} \sum_{r=1}^{n_i} p_{ir} \quad (5)$$

式中:  $n_i$  为第  $i$  个集合的样本个数;  $p_{ir}$  为第  $i$  个聚类中第  $r$  个采样点到聚类中心的距离(m)。

(5)重复步骤(2)~(4),直到满足精度要求,聚类中心不发生改变。

**1.2.2 幂值选优** 由于区域的幂值选择数目较多,若将所有组合遍历选优,则工作量过大。正交试验方法遵循“均衡搭配”的原则,通过尽可能少的试验次数求解出最优方案。因此,本文采用正交试验选优的方法,通过构造正交试验表选取一部分组合试验,然后根据试验值推求得到全部组合的理论最优解。

在正交试验表  $L_p(t^q)$  中,  $t$  为水平数,即幂值  $n$  在可行域内的离散个数;  $q$  为正交表最多安排因素的个数,即地形划分的区域数;  $p$  为正交表的总方案数。其中  $p, t, q$  之间的关系<sup>[23]</sup>如下:

$$p = t^v \quad (6)$$

$$q = \frac{t^v - 1}{t - 1} \geq Y - 1 \quad (7)$$

式中:  $v$  为任意整数;  $Y$  为正交表实际因素的个数。

### 1.3 分区域反距离加权插值方法实现

与传统的插值法相比,分区域反距离加权插值法据所属类别赋予每个插值点特定幂值,但在实际插值中,划分插值点所属类别较为困难。因此,本文采用 K 近邻算法来划分插值点的类别:如果一个样本在特征空间中  $m$  个最相似(即距离样本距离最近的  $m$  个点)的样本都属于同一类别,则该样本也属于这个类别。将高程采样点按照聚类分析构建  $k$  个数据集:

$$\begin{cases} T_1 = \{(x_{11}, y_{11}, z_{11}, p_1), \dots, (x_{1a}, y_{1a}, z_{1a}, p_1)\} \\ \vdots \\ T_k = \{(x_{k1}, y_{k1}, z_{k1}, p_k), \dots, (x_{kc}, y_{kc}, z_{kc}, p_k)\} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T_1, T_2, \dots, T_k$  为  $k$  个区域构建的高程采样点集合;  $p_k$  为每个区域给定的幂值;  $x_{kc}, y_{kc}, z_{kc}$  分别为第  $k$  个数据集中第  $c$  个采样点的坐标。

选用欧式距离作为计算插值点与各个数据集中采样点之间的距离,按照距离递增关系进行排序,选取距离最小的  $M$  个点;计算前  $M$  个点在各数据集出现的频率,选取出现频率最高的数据集作为插值点的所属区域,即选用该数据集的长度幂值作为该插值点的长度幂值。

## 2 研究区域与数据

选取太湖湖底高程进行模拟插值。太湖地处长江三角洲的南部,是中国第三大淡水湖,横跨江、浙两省,北临无锡,南靠湖州,西近宜兴,东依苏州。太湖整体呈西高东低,平均年出湖流量约 75 亿  $m^3$ ,蓄水量约 44 亿  $m^3$ 。太湖湖泊面积 2 427.8  $km^2$ ,水域面积为 2 338.1  $km^2$ 。太湖湖底高程一般为 1.0 m,中东部为洼地,其地面高程为 3.0~4.5 m,最低处仅 2.5 m,其他区域地面高程为 5.0~8.0 m。

### 2.1 数据基础

试验数据来源于太湖湖底的实测数据,实测高程点有 6 242 个,区域范围为整个湖区,离散点空间密度为 2.57 个/ $km^2$ ,测点的平均高程为 -0.64 m。实测点空间分布见图 1,其数据格式为“X-Y”。由图 1 可以看出,测点主要分布在湖岸、人工岛周围和

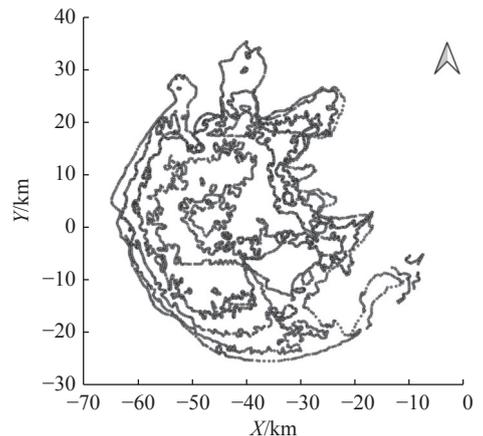


图 1 实测点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of measured points

湖心区, 其中湖的东侧、东南侧实测点分布较为集中。

### 2.2 分区域反距离加权插值方法应用

**2.2.1 太湖采样点分区** 太湖水面面积较大, 湖底高程采样点较为分散。为更好衡量湖泊地形采样点的局部变异程度, 选取每个采样点与其周围最近的 10 个采样点为对象, 进行方差分析(见图 2)。

从图 2 可以看出, 湖心区域地形趋于平缓, 靠近湖岸区域有较小地形起伏, 太湖的西北侧、湖心岛等区域地形起伏较大, 这符合太湖地形的实际情况, 因为太湖湖心区域分布多座小型岛屿。根据太湖的湖底地形起伏情况, 将湖区分成 3 个区域: 湖心平缓区、湖心岛周边区、湖岸区, 故将 K-means 聚类的初始聚类中心设置为 3。

K-means 聚类将地形采样点方差数据划分为 3 个区间, 即  $[0, 0.20)$ 、 $[0.20, 0.45)$ 、 $[0.45, 1.00]$ 。

**2.2.2 太湖各区域幂值选优** 试验因素、试验水平、试验指标的确定与正交表的构建如下。

(1) 试验因素: K-means 聚类依据局部地形起伏程度将太湖湖底划分为 3 个区域, 选取划分的区域作为试验因素, 试验因素数量为 3。

(2) 试验水平: 选取反距离插值法的幂值作为试验水平。为了试验选优的方便性, 试验水平的可行区间取  $[1, 4]$ , 但考虑到各区域连接处的平顺插值, 各区域幂值不能相差太大, 所以将幂值可行区间划分为 3 段: 1~2、2~3、3~4, 各可行区间步长取 0.2, 幂值水平数为 5。

(3) 试验指标: 选取实测高程为正交试验的指标。

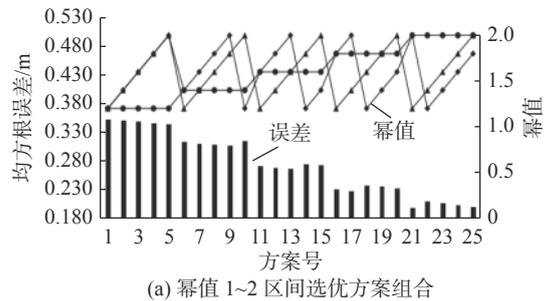
(4) 正交表选择: 3 因素 5 水平, 全部组合为  $3 \times 5^3 = 375$ , 将全部方案代入分区域反距离加权插值法生成高程工作量较大。为此, 采用部分试验选优的方法, 构建 3 个 3 因素 5 水平的正交试验表  $L_{25}(5^3)$ , 按正交表选择 75 种试验组合方案, 即可获得对应全部试验组合的理论最优区域幂值方案。试验组合方案详见图 3。

本文采用留一法进行最优方案的确定, 选取 10% 的实测高程数据作为验证点, 其高程点的平均高程值为  $-0.635$  m, 然后利用规则网格模型内插得出对应点的高程并与之比较。采用与实测高程点的均方根误差来表征空间插值结果的相对误差, 将其作为试验的最后评定指标, 分析结果见图 3。

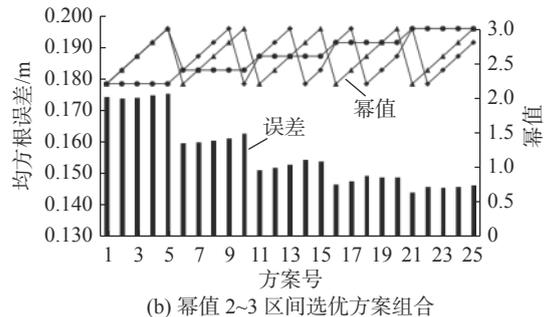


图 2 太湖地形采样点局部起伏分布

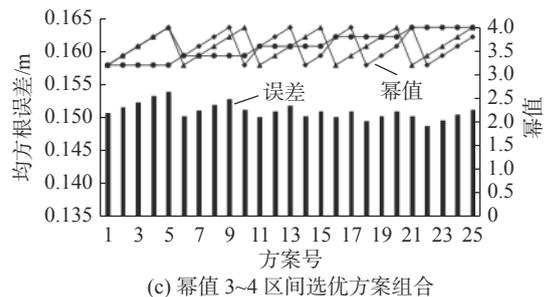
Fig. 2 Local undulation distribution map of Taihu Lake terrain sampling points



(a) 幂值 1~2 区间选优方案组合



(b) 幂值 2~3 区间选优方案组合



(c) 幂值 3~4 区间选优方案组合

图 3  $L_{25}(5^3)$  正交表区域幂值选优方案组合

Fig. 3  $L_{25}(5^3)$  orthogonal table region power selection scheme combination

通过正交分析,可以获得全部试验组合的理论最优解。在幂值范围 1~2 中,各方案与实测高程点的平均均方根误差为 0.273 m,方案 21 为最优,与实测高程点的均方根误差为 0.198 m。在幂值范围 2~3 中,各方案与实测高程点的平均均方根误差为 0.156 m,方案 21 最优,均方根误差为 0.145 m。在幂值范围 3~4 中,各方案与实测高程点的平均均方根误差为 0.146 m,方案 22 最优,均方根误差为 0.144 m。通过各正交表的误差分析,可得区域 1 幂值取 4.0、区域 2 幂值取 3.4、区域 3 幂值取 3.2 时,空间插值得到的高程值与实测高程值均方根误差最小,空间插值结果最优。

### 3 结果分析与讨论

为考量分区域反距离加权插值法在地形插值中的效果,将本文的分区域反距离加权插值法与经典的 IDW 法、普通克里金方法、自然邻域法对比,利用上述留一法对空间插值结果与实测高程值进行验证。根据《多尺度数字高程模型生产技术规定》<sup>[24]</sup>,平地、山地、丘陵地和高山地的 2 m 网格 DEM 点位中误差限分别为 0.7、1.7、3.3 和 6.7 m,表 1 中均方根误差数据表明分区反距离加权法、反距离加权法、克里金法和自然邻域法不同地形区中误差皆在允许范围之内。同时,由表 1 可以看出,克里金法与反距离加权法精度相近,自然邻域法的插值精度与克里金法、反距离加权法相比明显提高,本文提出的分区域反距离加权法精度略高于自然邻域法。

表 1 4 种空间插值方法的误差分析结果(高程)  
Tab. 1 Error analysis results of four spatial interpolation methods (elevation)

插值方法	高程平均值/m	最大相对误差/%	均方根误差/m
实测高程	-0.635	/	/
分区域反距离加权法	-0.637	93.24	0.144
反距离加权法	-0.642	73.31	0.175
克里金法	-0.640	89.42	0.178
自然邻域法	-0.647	85.61	0.165

以太湖湖底高程为插值对象,对比反距离加权法、克里金法、分区域反距离加权法对太湖地形空间展布结果:在湖心与岸边交界区域、湖心岛附近,反距离加权法和克里金法的空间展布都有明显的梯度,出现了由湖岸向湖心高程陡降的异常突变,反距离加权法的突变更明显(见图 4),与实际情况不符。分区域的反距离加权法较好地反映了插值结果受采样点起伏程度而表现出的空间变异性,能够正确处理采样点变异性较大而引起的数据异常,更加接近太湖湖底高程分布的实际情况。

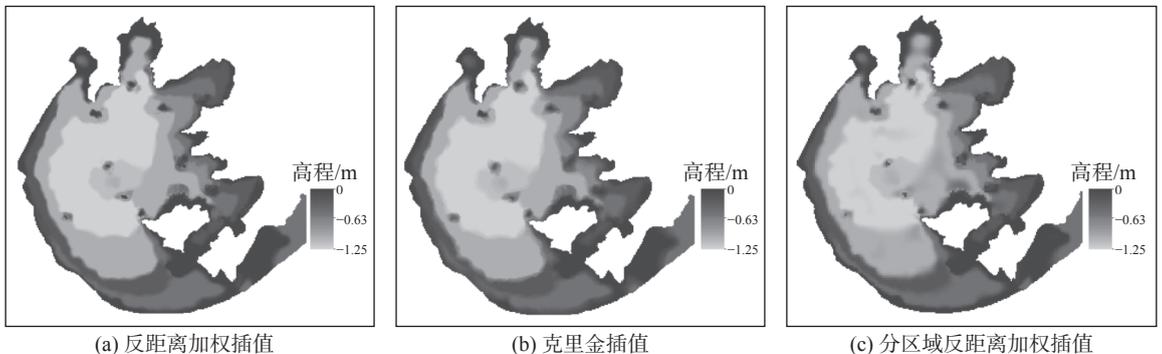


图 4 太湖湖底地形空间展布

Fig. 4 Spatial distribution of topography at the bottom of Taihu Lake

为衡量分区域反距离加权法在湖底地形模拟中的整体效果,提取不同高程对应的库容值与实测库容值<sup>[25]</sup>进行误差分析(表 2)。4 种插值方法得到的太湖湖泊库容与实测值都存在一定差异,自然邻域法插值提取的库容数据与实测数据的偏差最大,均方根误差达到 2.72 亿  $m^3$ ,反距离加权法与克里金法的插值均方根误差相近,均方根误差分别为 2.47 亿  $m^3$  和 2.48 亿  $m^3$ ,分区域的反距离加权法误差最小,其插值效果明显优于反距离加权法、克里金法和自然邻域法。

表2 多种方法插值结果误差分析(库容)  
Tab. 2 Error analysis of interpolation results by various methods (storage capacity)

插值方法	最大相对误差/%	平均相对误差/%	均方根误差/亿m <sup>3</sup>
分区域反距离加权法	9.65	7.70	2.34
反距离加权法	16.29	8.67	2.47
克里金法	14.69	8.60	2.48
自然邻域法	16.26	9.07	2.72

## 4 结 语

通过 K-means 聚类将太湖湖底进行区域划分,针对深水湖泊湖底高程起伏较大的特点,以插值后地形数据提取的库容曲线与实测库容曲线的均方根误差为指标,提出对湖底分区域给定幂值,并通过正交试验选优的优化方法,充分考虑了湖底高程采样点的变异程度,优化确定各区域幂值,这对提高插值精度有重要意义。

在其他条件相同的情况下,对比反距离加权法、克里金法和自然邻域法,分区域反距离加权插值法能够更好地适应地形起伏,插值效果良好,可以获得比较精确的湖泊地形数据,对湖泊研究和管理具有积极作用。

## 参 考 文 献:

- [1] 黄牧涛,田勇. 湖泊三维流场数值模拟及其在东湖的应用[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2014, 29(1): 114-124. (HUANG Mutao, TIAN Yong. Three-dimensional lake hydrodynamic numerical modeling and its application to Lake Donghu[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(1): 114-124. (in Chinese))
- [2] 钱明霞,路川藤,孙高霞,等. 地形变异条件下长江口南港河段水动力变化[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 51-58. (QIAN Mingxia, LU Chuanteng, SUN Gaoxia, et al. Hydrodynamic changes in south channel of Yangtze River Estuary under topographic variation conditions[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(1): 51-58. (in Chinese))
- [3] 孙东坡,谢锋,张先起,等. 基于图像识别的水下地形冲刷过程监测[J]. 水利水运工程学报, 2011(3): 53-58. (SUN Dongpo, XIE Feng, ZHANG Xianqi, et al. Monitoring technology of scouring process of underwater topography based on image recognition[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(3): 53-58. (in Chinese))
- [4] 程剑刚. 网络RTK联合声波测深仪在水下地形测量中的应用[J]. 测绘工程, 2014, 23(3): 63-65, 80. (CHENG Jiangang. Application of network RTK combined with sonic depth finder to underwater topographic survey[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2014, 23(3): 63-65, 80. (in Chinese))
- [5] 冀大雄,方文巍,朱华,等. 基于相对测量的水下机器人主动定位方法研究[J]. 电子学报, 2021, 49(7): 1249-1256. (JI Daxiong, FANG Wenwei, ZHU Hua, et al. Active localization of autonomous underwater vehicle using noisy relative measurement[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(7): 1249-1256. (in Chinese))
- [6] CARTER G S, SHANKAR U. Creating rectangular bathymetry grids for environmental numerical modelling of gravel-bed rivers[J]. Applied Mathematical Modelling, 1997, 21(11): 699-708.
- [7] 徐洋,战超,王庆,等. 基于海图数据的水下岸坡插值精度分析对比研究[J]. 海洋通报, 2019, 38(6): 632-639. (XU Yang, ZHAN Chao, WANG Qing, et al. A comparative study on interpolation accuracy of underwater slope terrain based on sea chart data[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 632-639. (in Chinese))
- [8] ZHANG Y J, XIAN C L, CHEN H J, et al. Spatial interpolation of river channel topography using the shortest temporal distance[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 450-462.
- [9] THANH V Q, ROELVINK D, VAN DER WEGEN M, et al. Spatial topographic interpolation for meandering channels[J].

Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2020, 146(5): 04020024.

- [10] 张亮亮, 曹永强, 朱明明. 近50年辽宁省大雨与暴雨时空变化特征分析[J]. *水利水运工程学报*, 2017(1): 49-56. (ZHANG Liangliang, CAO Yongqiang, ZHU Mingming. Spatiotemporal variation characteristics of heavy rainfall and rainstorm in Liaoning Province over past 50 years[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2017(1): 49-56. (in Chinese))
- [11] 高真, 叶学义, 周天琪, 等. 基于反距离加权插值的水声数据可视化算法[J]. *计算机工程*, 2015, 41(9): 266-270, 275. (GAO Zhen, YE Xueyi, ZHOU Tianqi, et al. Visualization algorithm of underwater acoustic data based on inverse distance weight interpolation[J]. *Computer Engineering*, 2015, 41(9): 266-270, 275. (in Chinese))
- [12] 范玉洁, 余新晓, 张红霞, 等. 降雨资料Kriging与IDW插值对比分析—以漓江流域为例[J]. *水文*, 2014, 34(6): 61-66. (FAN Yujie, YU Xinxiao, ZHANG Hongxia, et al. Comparison between Kirging interpolation method and inverse distance weighting tension for precipitation data analysis: taking Lijiang River Basin as a study case[J]. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(6): 61-66. (in Chinese))
- [13] ACHILLEOS G A. The Inverse Distance Weighted interpolation method and error propagation mechanism-creating a DEM from an analogue topographical map[J]. *Journal of Spatial Science*, 2011, 56(2): 283-304.
- [14] CHANDRAKAR A, KHARE D, KRISHAN R. Assessment of spatial and temporal trends of long term precipitation over Kharun Watershed, Chhattisgarh, India[J]. *Environmental Processes*, 2017, 4(4): 959-974.
- [15] 华祖林, 王海燕, 汪靓, 等. 非连续河道地形插值方法的比选[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(3): 16-19, 51. (HUA Zulin, WANG Haiyan, WANG Liang, et al. Comparison of different methods for interpolation of topography of discrete rivers[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(3): 16-19, 51. (in Chinese))
- [16] 蒋伟达, 孙永福, 刘绍文, 等. 基于IDW的埕岛海域水下三角洲地形演变[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(4): 697-707. (JIANG Weida, SUN Yongfu, LIU Shaowen, et al. Terrain evolution of subaqueous delta in Chengdao Sea area based on IDW[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(4): 697-707. (in Chinese))
- [17] 李冕, 赵辉, 鲍晨光, 等. 改进的IDW插值模型在海水水质评价中的应用[J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(2): 258-261. (LI Mian, ZHAO Hui, BAO Chenguang, et al. Application of an improving IDW interpolation in seawater quality assessment[J]. *Marine Environmental Science*, 2014, 33(2): 258-261. (in Chinese))
- [18] 秦俊桃, 冯绍元, 霍再林, 等. 几种地下水位空间插值方法在干旱内陆区的应用比较[J]. *中国农业大学学报*, 2010, 15(5): 124-129. (QIN Juntao, FENG Shaoyuan, HUO Zailin, et al. Applications of spatial interpolation methods for groundwater levels in arid inland area[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(5): 124-129. (in Chinese))
- [19] LI Z Q, WANG K, MA H, et al. An adjusted inverse distance weighted spatial interpolation method[C]//Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Communications, Information Management and Network Security (CIMNS 2018). Paris, France: Atlantis Press, 2018: 5.
- [20] 李翔宇, 李翌, 包艳英, 等. 基于反距离加权插值法评价海域水质类别空间分布[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(6): 70-77. (LI Xiangyu, LI Zhao, BAO Yanying, et al. Assessment of seawater quality spatial distribution based on inverse distance weighted interpolation[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(6): 70-77. (in Chinese))
- [21] 张锦明, 郭丽萍, 张小丹. 反距离加权插值算法中插值参数对DEM插值误差的影响[J]. *测绘科学技术学报*, 2012, 29(1): 51-56. (ZHANG Jinming, GUO Liping, ZHANG Xiaodan. Effects of interpolation parameters in inverse distance weighted method on DEM accuracy[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 29(1): 51-56. (in Chinese))
- [22] 刘光孟, 汪云甲, 王允. 反距离权重插值因子对插值误差影响分析[J]. *中国科技论文在线*, 2010, 5(11): 879-884. (LIU Guangmeng, WANG Yunjia, WANG Yun. Impact of inverse distance weighted interpolation factors on interpolation error[J]. *Sciencepaper Online*, 2010, 5(11): 879-884. (in Chinese))
- [23] 程吉林, 郭元裕, 金兆森, 等. 大系统数学规划试验选优方法及其应用[J]. *中国科学E辑: 技术科学*, 1998, 28(3): 254-258. (CHENG Jilin, GUO Yuanyu, JIN Zhaosen, et al. Optimization method of large scale system mathematical programming experiment and its application[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 1998, 28(3): 254-258. (in Chinese))
- [24] 国务院第一次全国地理国情普查领导小组办公室. 多尺度数字高程模型生产技术规定: GDPJ 08—2013[S]. 北京: 国家基础地理信息中心, 2013. (Office of the Leading Group of the First National Geographical Conditions Survey of the State

Council. Technical regulations for production of multi-scale digital elevation model: GDPJ 08—2013[S]. Beijing: National Geomatics Center of China, 2013. (in Chinese))

[25] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 2019. (Nanjing Institute of Geography and Limnology Chinese Academy of Sciences. China lake survey report[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese))

## Research on interpolation method of lake terrain zoning based on orthogonal experiment optimization

GONG Yi<sup>1</sup>, CHEN Zaiyang<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, WANG Yulin<sup>3</sup>, YANG Xiaoling<sup>4</sup>

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Construction Bureau, Nanjing 210029, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 4. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China)

**Abstract:** In order to reduce the influence of large variation of lake bottom elevation sampling points on interpolation calculation and obtain high precision lake bottom topography, the influence of variation degree of elevation sampling points on interpolation is introduced into the ordinary Inverse Distance Weight (IDW) interpolation, and a lake terrain partition interpolation method considering the variation degree of elevation sampling points is proposed. By introducing the optimization method of orthogonal test optimization, the optimal power value of inverse distance in each partition is obtained. Taking Taihu Lake as an example, the interpolation effects of several interpolation methods on the bottom topography of Taihu Lake are compared. The results suggest that the regional inverse distance weighted interpolation method keeps good adaptability, it is verified by the measured elevation value, and the root mean square error is the smallest. Considering the terms of storage capacity error, comparing with Kriging method, inverse distance weighted interpolation method as well as natural neighborhood method, the average relative error is decreased by 0.97%, 0.90% and 1.37%, respectively. The interpolation effect is obviously superior to these interpolation methods. Therefore, when it comes to large topographic relief of the lake, the subregional inverse distance weighted interpolation method can obtain a high-precision lake bottom shape, and is of high application value for different types of lake bottom topography interpolation calculation.

**Key words:** regional terrain interpolation; orthogonal experiment optimization; Inverse Distance Weight (IDW); Taihu Lake