

# 不同尺度下皎口水库水体主要指标空间变异研究

魏文娟<sup>1</sup>, 毛跃军<sup>2</sup>, 郝虎林<sup>1\*</sup>, 秦伟颖<sup>1</sup>, 朱莹静<sup>1</sup>, 王翔<sup>1</sup>, 方琳<sup>1</sup>

(1.宁波原水集团有限公司, 浙江 宁波 315100; 2.皎口水库管理局, 浙江 宁波 315161)

**摘要:**通过不同取样尺度下采集皎口水库水样,测定水体主要指标总氮、总磷、氨氮及高锰酸盐指数含量,研究了地统计分析法在不同取样尺度下对水库水体空间变异的适用性和空间插值的质量。研究表明,皎口水库 100 m 尺度与 200 m 取样尺度相比,4 种主要水质指标在不同取样尺度下空间变异最佳变异模型、插值模拟及空间分布均存在一定差异。空间拟合模型方面,总氮、高锰酸盐指数最佳拟合模型为高斯模型,总磷、氨氮最佳拟合模型为球面模型;结合模型特征参数和空间插值综合评价,总氮和氨氮在 200 m 取样尺度下表现出较好的空间相关性,插值模拟质量较好,而总磷和高锰酸盐指数则在 100 m 尺度下表现出一定优势;空间分布上,水体氨氮、高锰酸盐的影响主要是人为因素,总磷受水库内源环境影响较大,而总氮则与库周农业种植等活动密切相关。以上结果表明,总氮和氨氮更适合在 200 m 尺度下取样,而总磷和高锰酸盐指数宜在 100 m 尺度下取样。

**关键词:**水质指标;空间变异;取样尺度;地统计;插值分析

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2016)02-0157-07 doi: 10.13254/j.jare.2015.0241

引用格式:

魏文娟, 毛跃军, 郝虎林, 等. 不同尺度下皎口水库水体主要指标空间变异研究[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 157-163.

WEI Wen-juan, MAO Yue-jun, HAO Hu-lin, et al. Spatial Variability of Indicators of Jiaokou Reservoir Under Different Sampling Scales[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 157-163.

## Spatial Variability of Indicators of Jiaokou Reservoir Under Different Sampling Scales

WEI Wen-juan<sup>1</sup>, MAO Yue-jun<sup>2</sup>, HAO Hu-lin<sup>1\*</sup>, QIN Wei-ying<sup>1</sup>, ZHU Ying-jing<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, FANG Lin<sup>1</sup>

(1.Ningbo Raw Water Group Co Ltd, Ningbo 315100, China; 2.Jiaokou Reservoir Administration, Ningbo 315161, China)

**Abstract:** This research determined total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen and potassium permanganate contents in different scales of Jiaokou reservoir with the purpose of exploring the applicability of spatial variability and its characteristic in different sampling scales. The results showed that, compared the sampling scales of 100 m with 200 m, there were some differences among four indicators in the spatial variation, interpolation simulation and spatial distribution. About the testing model fit, the fitting model for the total nitrogen, permanganate index was Gaussian model, the fitting model for total phosphorus, ammonia nitrogen was the spherical model; Combining evaluation of parameters of models and comprehensive evaluation of spatial interpolation, total nitrogen, total phosphorus showed stronger spatial correlation and better interpolation simulation quality on the sampling scales of 200 m, while total phosphorus and permanganate index showed certain advantages on the 100 m scale; On the aspect of spatial distributions, the contents of ammonia nitrogen and potassium permanganate were mainly affected by human factors, the total phosphorus was affected by internal factors of the reservoir, while total nitrogen was closely related to farming activities around reservoir. The above results showed that total nitrogen, ammonia nitrogen were more available for the 200 m scales and total phosphorus, potassium permanganate were more available for the 100 m scales.

**Keywords:** water quality index; spatial variability; sampling scale; geostatistics; interpolation analysis

近年来,随着经济和社会的高速发展,水环境问题日益凸显,水体富营养化已成为当今水环境主要

问题之一,影响到城镇供水安全和社会经济持续发展<sup>[1]</sup>。宁波市城区供水水源主要是水库,水质总体状况在国内大多数城市供水水质中属于优良水平,然而水体富营养化程度也呈现出逐年加剧的趋势<sup>[2]</sup>。要明晰目标水域的水体富营养化状况,就要对水库水质主要指标的空间输入有准确定位和描述,而水体主要指标空间输入情况的科学性和准确性受水质取样尺度

收稿日期:2015-10-12

基金项目:浙江省水利厅重大项目(RB1310);宁波市科技局重大项目(2012C10003)

作者简介:魏文娟(1988—),女,湖北孝感人,硕士,主要从事水环境保护工作。E-mail: wwj060507004@126.com

\*通信作者:郝虎林 E-mail: haohulin88@163.com

的影响较大, 如何合理确定适宜的水体取样尺度, 从而更准确地反映水体真实情况, 是利用地理信息系统地统计学方法解决该问题的关键。

然而, 当前水库水环境的研究中, 传统的研究主要是针对水环境中污染物特征、水体污染控制方法及周边土地利用方式对水质影响的建模分析方面, 运用地理信息系统(GIS)地统计学和空间插值法的研究虽然较多, 但相关研究主要集中在土壤重金属方面<sup>[3-7]</sup>, 缺乏对水体不同尺度下主要污染物指标的空间变异分析, 少量涉及水体空间变异的分析也都是基于某一固定取样尺度下进行的, 缺乏对不同尺度的对比性研究, 如何针对性地选取较为合理的取样尺度来更好地反映水体及周边实际问题的研究较少。因此, 在实际研究中, 对于不同的水体污染物、不同的河道流域, 应确定较优的取样尺度进行空间变异分析来获得较高的空间插值的适用性与空间插值的质量, 进而与实际存在的环境问题更契合, 充分反应随机因素对水体的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

宁波皎口水库位于鄞西奉化江支流, 樟溪上游的大皎、小皎二溪汇合处——密岩村(东经 121°15'30", 北纬 29°50'48")。水库以防洪、灌溉为主, 兼供水、发电、养鱼等综合利用, 目前是宁波市区供水系统的重要水源之一。皎口水库始建于 1970 年 5 月, 1975 年 1 月建成投入运行, 其控制集雨面积为 259 km<sup>2</sup>, 总库容 1.198 亿 m<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

本研究以宁波市皎口水库为例, 采用网格布点法于 2012 年 11 月 27 日在皎口水库均匀布置 88 个采样点, 其中 I 号区域(小皎溪段)34 个采样点间隔为 100 m 左右, II 号区域(其他库面)54 个采样点间隔为 200 m 左右, 取样点分布见图 1。

采样点采用 GPS 定位, 记录经纬度, 水样用 1 000 mL 的有机玻璃分层采水器(WB-PM)采集水库水面下 0.5 m 水样, 水样收集于 500 mL 的塑料瓶中待测。

### 1.3 研究方法

分别对水库 2 个区域不同尺度下的数据样点进行建模验证: 在 ArcGIS10.2 的地统计模块支持下, 随机选取尺度为 100 m 的 34 个样点中的 20 个作为建模数据集, 其余 14 个作为验证数据集; 选取尺度为 200 m 的 54 个样点中的 38 个作为建模数据集, 另外的 16 个作为验证数据集<sup>[8]</sup>。运用 GIS 地统计模型中的普通克里格模型作为基础模型, 同时选择合适的变异函数来构建水质指标预测模型, 拟通过水质指标模型预测参数来确定合适的取样尺度。

### 1.4 指标检测

水样总氮采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定(GB 11894—1989); 总磷采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定(GB 11893—1989), 氨氮采用水杨酸-分光光度法测定(HJ 536—2009), 高锰酸盐指数采用高锰酸钾法测定(GB 11892—1989)<sup>[9]</sup>。

### 1.5 数据分析

数据分析采用 ArcGIS 10.2 软件进行统计及建模

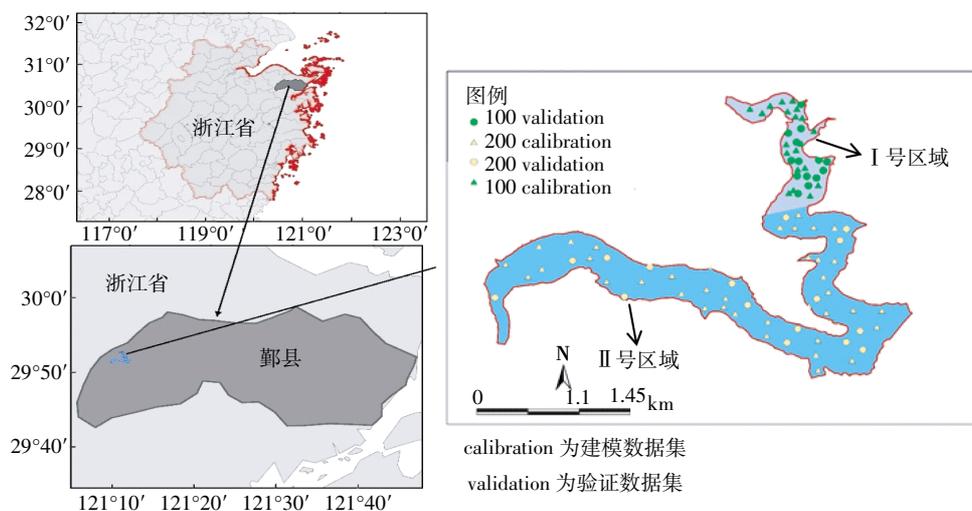


图 1 皎口水库不同尺度库面取样点分布

Figure 1 Distribution of sample points under different sampling scales of Jiaokou reservoir

分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同尺度下水质主要指标的描述性统计

由表1可以看出,2种不同采样尺度下,水体总氮、氨氮、总磷及高锰酸盐指数的最大值、最小值之间均存在较大差异,表明在不同取样尺度下,上述4种水体主要指标均存在明显的空间分布差异。200m取样尺度下,水体总氮、氨氮标准差较100m取样尺度下分别低89.9%和100%,而总磷、高锰酸盐指数标准差则随取样尺度的增大而增加,其中总磷增幅为100%,高锰酸盐指数增幅为355%。表明水体总氮、氨氮在200m取样尺度下的分布较100m取样尺度下均匀,而总磷、高锰酸盐则在200m取样尺度下表现较大变异。

数理统计特征值方面,偏度主要反映正态分布双尾特征,峰度反映样本的集中程度,标准正态分布对应偏度为0,峰度为3<sup>[9]</sup>。对照表1的统计结果发现,皎口水库水体4种主要水质指标在2种取样尺度下均

大于0,属于正偏斜分布,说明无论是在200m还是100m取样尺度上,4种水质主要指标都是高含量样点多,含量较低的样点普遍偏少,呈现一定程度的偏态分布<sup>[10]</sup>。此外,表1统计结果表明,2种尺度下4种水体主要指标的峰度均显著低于3,表明样点数据都较集中<sup>[11]</sup>。上述统计结果与现实水质性质十分统一,在正常无明显排污或人为影响的情况下,水质本身具有的流动性特征注定其参数分布较均匀,因此,同类水质指标分布较集中。

### 2.2 不同尺度下水质主要指标空间变异结构分布

根据 $\gamma(h)-h$ 的半方差图,分别用不同类型的模型进行拟合,得到模型参数值,再用地统计学软件进行分析,得到各种模型拟合的相关参数,选取决定系数( $R^2$ )最大,残差(RSS)最小的模型,此模型即为最佳拟合模型<sup>[12]</sup>。本研究中,水体总氮、氨氮、总磷和高锰酸盐在2种尺度下的最佳拟合模型依次为高斯函数模型、球面模型、球面模型和高斯模型,模型结构参数见表2。

块金值通常反映随机因素引起的变异强度,块金

表1 不同尺度下总氮含量描述性统计( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

Table 1 Descriptive statistics of total nitrogen contents under different sampling scales ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

尺度 Scale/m	水质指标 Water quality indicators	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 Std deviation	方差 Variance	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
100	总氮 TN	2.012b	2.460b	2.165b	0.129a	0.958a	0.403a	0.788a
	总磷 TP	0.014a	0.230a	0.037a	0.000b	3.857a	0.403a	0.788a
	氨氮 $\text{NH}_4\text{-N}$	0.023b	0.070a	0.044a	0.01a	0.622a	0.403a	0.788a
	高锰酸盐指数 $\text{COD}_{\text{Mn}}$	1.440a	2.000a	1.734a	0.029b	0.163b	0.403a	0.788a
200	总氮 TN	2.096a	2.506a	2.262a	0.013b	0.321b	0.325b	0.639b
	总磷 TP	0.014a	0.038b	0.026b	0.046a	0.277b	0.325b	0.639b
	氨氮 $\text{NH}_4\text{-N}$	0.027a	0.065b	0.43b	0.00b	0.031b	0.325b	0.639b
	高锰酸盐指数 $\text{COD}_{\text{Mn}}$	1.310b	1.920b	1.600b	0.132a	0.303a	0.325b	0.639b

注:不同字母表示100m和200m尺度下指标差异显著( $P<0.05$ )。

表2 不同尺度下水质指标的半方差结构

Table 2 Half variance structure of water quality indicators under different sampling scale

尺度 Scale/m	水质指标 Water quality indicators	模型 Models	变程/m $A_0$	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C$	块基比/% $C_0/C_0+C$
100	总氮 TN	高斯函数	1 814.8	0.008 2	0.021	39.04
	总磷 TP	球面模型	410.66	0	0	-
	氨氮 $\text{NH}_4\text{-N}$	球面模型	1 171	0.002 5	0.050 6	4.94
	高锰酸盐指数 $\text{COD}_{\text{Mn}}$	高斯模型	1 171	0.002 5	0.050 6	4.94
200	总氮 TN	高斯函数	383.02	0.000 8	0.018	4.44
	总磷 TP	球面模型	584.92	0.001	0.001	100
	氨氮 $\text{NH}_4\text{-N}$	球面模型	246.2	0	0.023 2	0
	高锰酸盐指数 $\text{COD}_{\text{Mn}}$	高斯模型	246.2	0	0.023 2	0

值小,说明在研究尺度上由试验误差和小于试验误差取样尺度引起的变异均较小,反之,则表明随机因素引起的变异较大<sup>[13]</sup>。块基比通常称为基底效应,块基比小于 25%时,空间变异主要由空间自相关因素引起,变量有极强的空间相关性;块基比在 25%~75%之间时,变量有中等的空间相关性;块基比大于 75%时,变量的空间相关性较弱。变程则是指区域变量在空间自相关上的自相关范围<sup>[14]</sup>。

由表 2 可以看出,100 m 取样尺度下,总氮块基比介于 25%和 75%之间,具有中等的空间自相关性,总磷、氨氮和高锰酸盐指数块基比均显著低于 25%的分界点,具有极强的空间自相关性;200 m 取样尺度下,总磷块基比达 100%,远超出 75%的上限,而总氮、氨氮和高锰酸盐指数的块基比仍介于 0~10%之间,空间自相关性显著。由此不难看出,水体这 4 种主要指标的空间变异在不同取样尺度下会呈现一定的差异,随着取样尺度的增大,总氮指标的空间自相关性逐渐增强,反之总磷则减弱,氨氮、高锰酸盐指数在 2 种尺度下均呈现较强的空间自相关性,这一现象与宁茂岐等<sup>[15]</sup>在 2 种取样尺度下关于土壤重金属的研究结果类似。随着采样尺度增加,各变量的块金系数的变化不同,反映了用地统计学方法进行变量的空间分析时,不同变量应在不同尺度下进行分析,与土壤环境元素多样性一样,水环境中也存在各种不同的水质指标,由于各个研究指标所受的环境、气候影响因素的差异<sup>[16]</sup>,决定了在空间变异分析中,不同的变量适应的取样尺度会有所差异。

从 2 种尺度下 4 项水质指标的基底效应(块金值)来分析,100 m 取样尺度和 200 m 取样尺度下各类指标块金值普遍较低,但随着取样尺度的增大,总氮、氨氮和高锰酸盐指数的块金值略有下降,表明 100 m 取样尺度下水体总氮、氨氮及高锰酸盐指数含量由随机因素引起的变异较大,而 200 m 取样尺度下其空间变异主要由空间自相关因素引起<sup>[17]</sup>,随着采样尺度的增大,基底效应随之减小,充分表明 200 m 取样尺度能有效控制由随机因素带来的影响,这与张庆利等<sup>[18]</sup>的研究结论一致,其在关于土壤的相关研究中发现,增大采样尺度对显示随机因素对土壤性质空间变异不利。

从各水质指标不同尺度下变程发现,100 m 取样尺度下,各水质指标变程约在 410.66~1 814.8 m 之间,远大于 200 m 的取样尺度;100 m 取样尺度下,各项指标函数模拟变程也均在 200 m 以上。说明在 2 种

取样尺度下,上述 4 项主要水质指标的函数模拟插值都能很好地体现相应参数的空间变异。

### 2.3 不同尺度下水质主要指标空间插值误差估计与交互校验

采用普通克里格方法对不同尺度下的建模样本进行空间插值,并以高斯函数模型对总氮和高锰酸盐,球面模型对总磷和氨氮进行拟合,然后以交互检验的方法对模型估测值和实测值进行数值统计,对验证数据点进行检验,得到各项水质指标模型预测的误差参数表(表 3)。

表 3 模型预测误差与交互检验

Table 3 Prediction error and interactive test of different models

尺度 Scale/m	水质指标 Water quality indicators	模型 Models	校正均方根误差 RMSEC	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE
100	总氮 TN	高斯函数模型	0.107 0	0.062 9	0.081 4
	总磷 TP	球面模型	0.003 3	0.003 2	0.004 2
	氨氮 NH <sub>3</sub> -N	球面模型	0.009 0	0.006 6	0.008 5
	高锰酸盐指数 COD <sub>Mn</sub>	高斯函数模型	0.087 9	0.101 7	0.127 5
200	总氮 TN	高斯函数模型	0.055 8	0.039 3	0.057 8
	总磷 TP	球面模型	0.042 2	0.024 6	0.052 2
	氨氮 NH <sub>3</sub> -N	球面模型	0.007 6	0.003 1	0.003 9
	高锰酸盐指数 COD <sub>Mn</sub>	高斯函数模型	0.149 7	0.114 1	0.149 0

注:RMSEC 为 root mean square error of calibration,表示校正集均方误差;MAE 为 mean absolute error,表示平均绝对误差;RMSE 为 root mean square error,表示均方根误差。下同。

平均绝对误差(MAE)是标准化预测误差与标准化均方差的比值,如果模型是无偏估计的,MAE 的值为 0。2 种取样尺度下,4 个水质指标的 MAE 值均有所差异,其中,总氮和氨氮 MAE 在 200 m 取样尺度下略低于 100 m 取样尺度,而总磷和高锰酸盐指数 MAE 则在 100 m 取样尺度下更接近 0<sup>[19]</sup>,但由表 3 可见,各个指标的 MAE 值均较小,表示在这 2 种尺度下采用空间预测模型对水体水质指标进行预测都是适合的,这与詹林庆等<sup>[20]</sup>在西南丘陵地区开展的不同尺度下土壤养分的空间变异研究结论一致。校正集均方误差(RMSEC)和均方根误差(RMSE)反映的都是模型预测结果对空间变异预测的准确性<sup>[19]</sup>,由表 3 可以看出,RMSEC 和 RMSE 两误差分析的结果十分一致,具体表现为 100 m 取样尺度下 4 种主要水质指标中的总氮和氨氮的 RMSEC 和 RMSE 高于 200 m 尺度,而总磷和高锰酸盐指数则呈现相反的变化趋势,表明总氮、氨氮在 200 m 取样尺度下的模型拟合误差

较小,而总磷、高锰酸盐指数在小尺度下模型拟合误差较小。

### 2.4 不同尺度下水质主要指标空间分布

在半方差函数最佳拟合模型的基础上,采用 ArcGIS 10.2 绘制了 4 种水质指标的空间分布图(图 2)。

从图 2 可以看出,2 种取样尺度下 I、II 2 个取样区域水质指标的空间分布表现出一定差异。其中, I 号区域总氮含量表现为南北两端含量低,中间段含量高;总磷和氨氮含量呈现南北高、中间低的分布特征;高锰酸盐指数则在区域内呈斑块状分布,4 种水质指标的分布总体上以斑块状分布为主,线型分布较少。 II 号区域 4 种指标呈现明显的南北向带状分布特征,均表现中段(大皎溪河道中段)含量高于东西两边的特点,而总磷和氨氮的高浓度区域相对偏东侧,聚集在大皎溪中下段和水库大坝附近区域。上述现象与研究区域河道曲折形态、库周山坡林地、水库上游居民

生活及农业种植等因素的综合影响有关,由于水库上游居民较多,生活污水中携带的总磷及氨氮导致 I 号区域南北区域含量较高,而 I 号区域中段库周坡度较大,上游山坡地农业种植较多,可能是总氮中间区域偏高的主要原因;对 II 号区域而言,大皎溪中段为大皎村所在地,生产生活及农业种植相对其他区域更频繁,因此 II 号区域中段 4 项指标的含量均较高,此外,总磷在 II 号区域水库大坝附近呈现高浓度聚集,这与长年大坝附近取水导致库底淤积物的累积较多、底泥中含磷物质释放有关。综上可见,2 种取样尺度下,水体氨氮、高锰酸盐主要受人为因素的影响;总磷受水库内源环境影响较大;而总氮则与库周农业种植等活动密切相关。

结合上述分析结果发现,200 m 取样尺度下,总氮、氨氮空间自相关性较 100 m 取样尺度下更强,相应的由取样误差等随机因素引起的变异更小,同时,

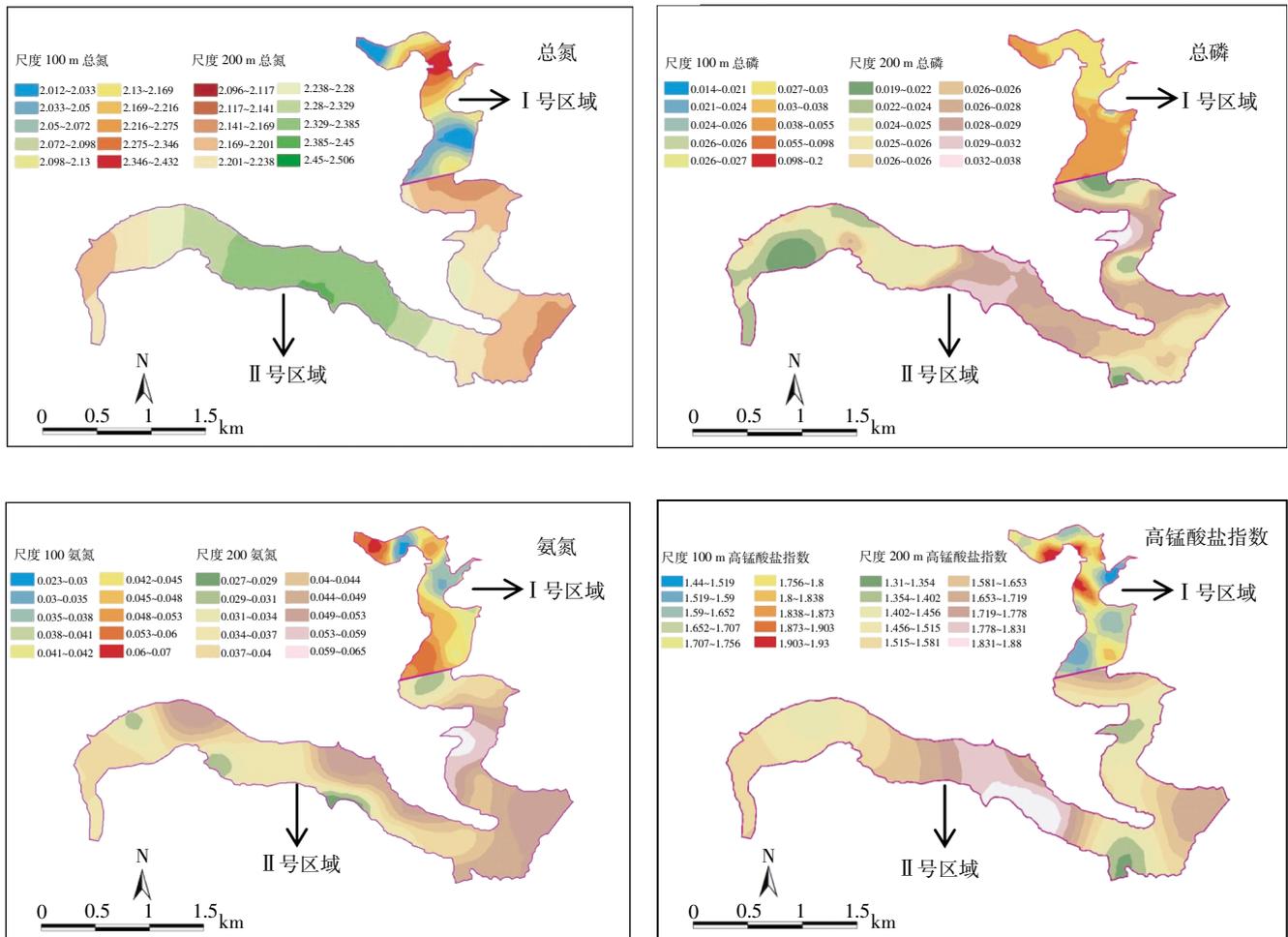


图 2 皎口水库各水质指标的空间分布图

Figure 2 Spatial distributions of water quality indicators of Jiaokou reservoir

在误差预测中,200 m 取样尺度总氮和氨氮指标的误差均低于 100 m 取样尺度,表明与 100 m 取样尺度相比,总氮和氨氮更适合大尺度下取样,此外,其200 m 取样尺度下地统计模型预测和空间插值结果更接近真实值,能更好地反映总氮和氨氮的空间结构。与此不同,水体总磷和高锰酸盐指数则呈现出完全相反的结果,对不同尺度的综合空间结构分析和模型预测误差检验发现,总磷和高锰酸盐指数在本研究中更适合 100 m 取样尺度下的取样分析。

### 3 结论

(1)皎口水库水体总氮、总磷、氨氮及高锰酸盐指数 4 类主要水质指标受不同取样尺度影响,100 m 和 200 m 取样尺度下,水质指标空间变异情况存在显著差异。

(2)不同水质参数对取样尺度的反响有一定差异,由指标本身含量分布及所受环境和自然因素的影响程度不同而异,总氮、氨氮受随机因素影响相对较小,总磷和高锰酸盐指数受随机因素影响较大。2 种取样尺度下,水体氨氮、高锰酸盐主要受人为因素的影响;总磷受水库内源环境影响较大;而总氮则与库周农业种植等活动密切相关。

(3)在皎口水库及类似山区水库条件下,取样尺度 100 m 和 200 m 相比,总氮、氨氮更适合选择 200 m 的取样尺度,其与 100 m 尺度相比,空间相关性及其克里格插值结果更接近实际测量值,能更准确地反映水体总氮、氨氮的分布情况;与取样尺度 200 m 条件相比,100 m 取样尺度下总磷、高锰酸盐指数的空间插值和分布估计更为精确,选择 100 m 的取样尺度更有利于全面掌握水库总磷、高锰酸盐指数的实际情况。

(4)本文所采用的地统计学研究方法和结论对类似水库及水域有一定的借鉴作用,但由于个体水域的差异性,采用地统计分析水质指标区域变异情况时,还应结合当地实际情况,分析指标的主要污染源和影响因素,科学合理确定合适的尺度和插值方法。

#### 参考文献:

[1] 龙晓辉,周卫军,郝吟菊,等.我国水资源现状及高效节水型农业发展对策[J].现代农业科技,2010,11:303-304.  
LONG Xiao-hui, ZHOU Wei-jun, HAO Yin-ju, et al. Status of water resources and developing countermeasures of efficient water-saving agriculture in China[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2010, 11:303-304.(in Chinese)

[2] 方航,胡玮.宁波市水功能区水质现状及保护对策[J].浙江水利

科技,2010(6):303-304.  
FANG Hang, HU Wei. Water quality of water function area in Ningbo city and protection measures[J]. *Zhejiang Hydro-technics*, 2010(6):303-304.(in Chinese)

[3] 王淑英,路莘,王建立,等.不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征——北京市平谷区为例[J].生态学报,2008,28(10):4957-4964.  
WANG Shu-ying, LU Ping, WANG Jian-li, et al. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: A case study in Pinggu county, Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10):4957-4964.(in Chinese)

[4] Bioschl G, Srpavalan M. Scale issues in hydrological modelling: A review [J]. *Hydrology Processes*, 1995, 9:251-290.

[5] Martin Y, Rossiter D, Njomgang R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon[J]. *Geoderma*, 2005, 12(5):117-143.

[6] 王永东,冯娜娜,李廷轩,等.不同尺度下低山茶园土壤阳离子交换量空间变异性研究[J].中国农业科学,2007,40(9):1980-1988.  
WANG Yong-dong, FENG Na-na, LI Ting-xuan, et al. Study on the spatial variability of the soil cation exchange capacity in hilly tea plantation soils with different sampling scales[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9):1980-1988.(in Chinese)

[7] 胡伟,邵明安,王全九,等.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J].农业工程学报,2005,21(8):11-16.  
HU Wei, SHAO Ming-an, WANG Quan-jiu, et al. Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(8):11-16.(in Chinese)

[8] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58:1501-1511.

[9] 国家环境保护总局.水和废水的监测分析方法(第4版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002:223-284.  
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis method (fourth edition)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:223-284.(in Chinese)

[10] 张世焯,孙波,赵其国,等.南方丘陵区土壤氮素尺度效应的影响因素[J].生态学报,2007,27(10):4057-4064.  
ZHANG Shi-rong, SUN Bo, ZHAO Qi-guo, et al. Analysis on influence factors for scale effect of soil nitrogen in hilly region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10):4057-4064.(in Chinese)

[11] Schotzko D J, O'Keefe L E. Geostatistical description of the special distribution of *Lygus Hesperus* (Heteroptera: Miridae) in lentils[J]. *Journal of Entomol.*, 1989, 82(5):1277-1288.

[12] 刘建康.高级水生生物学[M].北京:科学出版社,1999:395-397.  
LIU Jian-kang. Advanced aquatic biology[M]. Beijing: Science Press, 1999:395-397.(in Chinese)

[13] 罗歆,代数,何丙辉,等.缙云山不同植被类型林下土壤养分含量及物理性质研究[J].水土保持学报,2011,25(1):64-69,91.  
LUO Xin, DAI Shu, HE Bing-hui, et al. Investigation of nutrients and physical properties of the soil under different types of forest vegetation in Jinyun mountain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011,

- 25(1):64-69, 91.(in Chinese)
- [14] 王 岩, 范晓光, 张保华, 等. 基于污染指数与 ArcGIS 的聊城市耕地 OCPs 污染研究[J]. 中国环境监测, 2013, 29(3):152-157.  
WANG Yan, FAN Xiao-guang, ZHANG Bao-hua, et al. Research on OCPs pollution in arable land from Liaocheng based on pollution index and ArcGIS[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(3):152-157.(in Chinese)
- [15] 宁茂岐, 刘洪斌, 武 伟. 两种取样尺度下土壤重金属空间变异特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3):86-91.  
NING Mao-qi, LIU Hong-bin, WU Wei. Determination of the characteristics of soil heavy metal spatial variability with two soil sampling scales[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2007, 15(3):86-91.(in Chinese)
- [16] 李 春, 丁新军, 全 波, 等. 利用 ArcGIS8 Desktop 地理信息系统描绘水质站点和数据分析[J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36(6):128-130.  
LI Chun, DING Xin-jun, QUAN Bo, et al. Data analysis of water quality using ArcGIS8 Desktop geographic information system[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2008, 36(6):128-130.(in Chinese)
- [17] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1999:88-94.  
WANG Zheng-quan. *Statistics and its application in ecology*[M]. Beijing:Science Press, 1999:88-94.(in Chinese)
- [18] 张庆利, 潘贤章, 王洪杰. 中等尺度上土壤肥力质量的空间分布研究及定量评价[J]. 土壤通报, 2003, 34:493-497.  
ZHANG Qing-li, PAN Xian-zhang, WANG Hong-jie. Study on spatial distribution of soil quality and quantitative evaluation of soil fertility quality under middle spatial scale[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34:493-497.(in Chinese)
- [19] 唐 涛, 蔡庆华, 潘文斌. 地统计学在淡水生态学中的应用[J]. 湖泊科学, 2000, 12(3):280-288.  
TANG Tao, CAI Qing-hua, PAN Wen-bin. Application of geostatistics in freshwater ecology[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(3):280-288.(in Chinese)
- [20] 詹林庆, 胡 蕾, 武 伟, 等. 丘陵地区不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(9):129-135.  
ZHAN Lin-qing, HU Lei, WU Wei, et al. Study on spatial variability of soil nutrients at multi-scale in a hilly region[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2008, 30(9):129-135.(in Chinese)