

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2010.06.009

洱海表层水体中氮素空间变异分析

王世岩¹, 刘晓波^{1,2}, 刘 畅¹

(1. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038; 2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要 基于地理信息系统与地统计学技术, 对洱海表层水体中不同形态氮素空间变异特征进行了分析。结果表明: 洱海表层水体中不同形态氮呈现自南向北逐步增高的空间变化特征; NO_3^- -N 质量浓度高值出现在洱海南部区域; 溶解性氮和 TN 质量浓度在洱海中部地区出现高值区; NH_4^+ -N 在弥苴河江口及万花溪入洱海处出现两处高值区。TN 质量浓度数值差异较大, 变异系数为 34.84%; NH_4^+ -N、溶解性氮和 TN 在空间分布上除了受湖水流速、水文情势、水动力学性质、水文气象等结构性因素的控制以外, 还受到外来污染、水利工程控制、用排水等人类活动的随机性因素影响。

关键词 洱海; 氮素; 地统计学; Kriging 插值; GIS

中图分类号: X132 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2010)06-0037-05

Analysis on spatial variation of nitrogen in top layer water of Erhai Lake

WANG Shi-yan¹, LIU Xiao-bo^{1, 2}, LIU Chang¹

(1. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on geographical information systems and geostatistical analysis technology, the spatial variation of nitrogen in different forms in the top layer water of Erhai Lake was studied. The different forms of nitrogen in the top layer gradually increased from south to north. A region of high NO_3^- -N content appeared in southern Erhai Lake, the high mass concentration of dissolved nitrogen and TN appeared in the middle of Erhai Lake, and the NH_4^+ -N had two high value regions in Erhai Lake, in the estuaries of the Miju River and the Wanhuaxi River. The spatial difference in TN mass concentration was large and the variation coefficient was 34.84%. The spatial variation of NH_4^+ -N, dissolved nitrogen, and TN was mainly caused by some construction factors such as flow velocity, hydrologic patterns, hydrodynamic properties and hydro-meteorology, and was also affected by some random factors such as external pollution, regulation of hydraulic engineering, water consumption, and drainage. This study has contributed to water quality protection, eutrophication mechanism study, and comprehensive water environment prevention of Erhai Lake.

Key words: Erhai Lake; nitrogen; geostatistical analyst; kriging interpolation; GIS

氮素是生命体的重要组成元素,也是引起水体污染、水体富营养化的主要因素^[1]。大量农业氮肥的施用以及生活污水的肆意排放等人类活动,使得水体中的氮素逐步成为制约水质的重要因子。国外对于氮磷元素在水体中的分布规律开展了大量研究工作,近年国内学者也开展了氮磷元素在水体中的空间异质

化特征研究,如李一平等^[2]对太湖中 TN、TP 等指标空间异质性特征进行了研究,苑韶峰等^[3]对曹娥江干流氮素时空变异特征进行研究,赵光影等^[4]对三江平原主要河流氮磷营养元素时空变化规律进行了研究,等等。氮磷等生源要素在水体中迁移转化的过程中,受物理、化学、生物等过程作用,形态、通量、化学价位等

基金项目: 国家自然科学基金(50709044), 国家水体污染控制与治理重大专项(2008ZX07526-002)

作者简介: 王世岩(1974—),男,山东济南人,高级工程师,博士,主要从事 GIS 技术在水环境中的应用、湿地生态及退化湿地修复等研究。

E-mail: wangsy@iwhr.com

指标呈现出时间、空间变化特征,控制生源要素输送、滞留过程^[5]。分析不同形态氮素在水环境中的空间分布规律,一方面有助于分析水体富营养化的特征和趋势,了解水体水质状况,另一方面也有助于分析氮素对于外界影响的空间响应特征。

近几十年以来,随着湖区经济快速发展和人口急剧增加,人类对自然资源的开发不断加剧,洱海生态环境出现恶化,富营养化进程加快,水质呈现下降趋势,因此洱海水质广受关注。众多学者也对洱海的水质评价、污染防治等方面开展了相关研究^[6]。氮素是洱海水体富营养化的重要影响元素,研究洱海氮素的生物地球化学循环演化规律,了解湖泊表层水中不同形态氮质量浓度的空间分布特征,是对湖泊氮素的生物地球化学循环演化规律认识 and 进行环境评价的重要前提。

水体中元素空间分布具有不均匀性特征^[7],不同形态氮素在洱海表层水体中的空间分布也具不均匀性,这种空间变异特征既有随机性也有结构性,因此使用传统方法进行不同形态氮质量浓度的空间分布研究具有一定的局限性,而基于 GIS 技术和地统计学方法相结合的研究思路则可以较好地弥补传统方法中的不足,主要表现在 GIS 技术可较好地实现空间信息分析与可视化,地统计学方法可最大限度地保留空间变异信息。

1 研究区域概况

洱海位于大理白族自治州中心地带(100°05' ~ 100°17'E, 25°36' ~ 25°58'N),跨大理、洱源两市县,在正常水位 1 974 m(海防高程,下同)时水面面积 251 km²,平均水深 10.5 m,最大水深 20.9 m,湖容约 28.8 亿 m³,年输送水量 8.25 亿 m³,湖水停留时间约 2.75 年。洱海属澜沧江水系,地处我国最强大的一条径向构造带(即康藏构造褶皱带)的东部边沿上,盆地山脉呈南北走向,西北高,东南低,西侧的苍山连脊屏列十九座山峰,山峰南北绵延,形成一道巨大的天然屏障。洱海地理位置特殊,在大理白族自治州的经济发展中发挥着重要的作用。

洱海流域属亚热带高原季风气候,年平均气温 15.1 °C,年平均降水量 1 060 mm,湖面年均蒸发量 1 208.6 mm。洱海水源补给主要来自大气降水和入湖径流,入湖河流共 117 条,北有西湖和海西海等经洱源盆地、邓川盆地由弥苴河、罗时江和永它江等进入洱海,西有苍山十八溪,南部有波罗江,东有海潮河、凤尾阱和玉龙河等溪水注入。天然出湖河流为西洱河,全长 23 km,流入澜沧江。

2 研究方法

2.1 样品采集、试验与分析方法

按照典型性和一致性的原则,采用 GPS 定位技术均匀地布设洱海水样采样点(图 1),并同步监测水体的 pH 值、水温、透明度等水质物理化学指标。具体采样与试验测试分析过程如下:

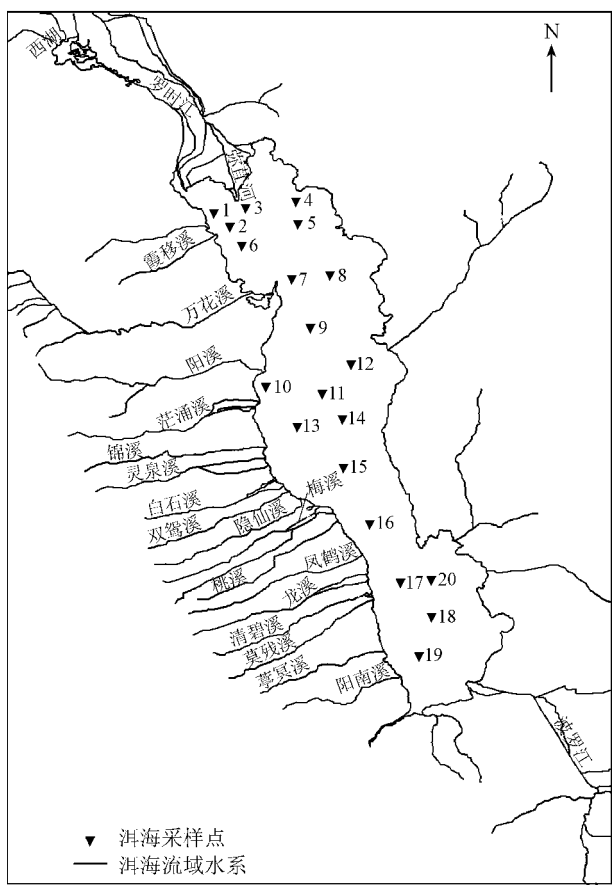


图 1 洱海表层水采样点分布

用带有不同刻度记号的采样绳,将采样瓶下沉到水下 0.5 m 处进行水样采集,采集的水样使用聚乙烯塑料瓶盛放,加入浓硫酸,之后带回实验室,在 24 小时内完成常规化学成分的测试分析。氮素分析包括 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、溶解性氮和 TN 指标,分析方法按照地表水环境要素观测与分析标准方法进行^[8]。

2.2 地统计学方法

地统计学是以区域化变量为核心和理论基础,以空间相关和变异函数为基本工具的一种数学方法,一般以变异函数作为描述空间变异性的工具。假设区域化变量满足二阶平稳性,其变异函数的计算可使用下式表示^[9]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2$$

式中: h 为样点空间间隔距离; $\gamma(h)$ 为变异函数; i 为步长; $N(h)$ 为间隔距离为 h 的样点数; $Z(X_i)$ 和

$Z(X_i + h)$ 分别为区域化变量 $Z(X_i)$ 在空间位置 X_i 处和 $X_i + h$ 处的实测值。

以 h 为横坐标, $\gamma(h)$ 为纵坐标作图, 即得到变异函数图, 通过变异函数图可以直观地分析区域变量空间分布特征。

Kriging 插值是一种较好的空间局部估计方法, 用其作为地统计的主要分析方法, 综合考虑变量的随机性和结构性, 可以根据采样点的监测数据、采样点的相互位置关系及变差函数模型, 估测研究区域内各点的相应元素质量浓度。Kriging 法产生的估计量是线性、无偏和最优的^[10-11]。在分析洱海表层水体不同形态氮素的统计学指标特征基础上, 笔者采用在地学上具有广泛应用的 Kriging 空间插值法对洱海表层水体中不同形态氮素的空间分异进行研究。

2.3 地理信息系统技术

应用地理信息系统软件 ArcGIS 中的地统计学分析模块(Geostatistical Analyst)进行空间变异性分析。地统计学模块包含数据分析工具集地统计分析向导工具, 通过探索性空间数据分析、结构分析(计算和模拟临近位置的空间表面属性)、空间表面预测与结果评估等步骤进行空间信息分析。Geostatistical Analyst 模块中提供了 Circular、Spherical、Exponential、Tetraspherical、Pentasheral、Gaussian 等 11 种 Kriging 插值模型^[12]。使用该模块进行空间分析的工作流程为: ①利用 Geostatistical Analyst 模块中的 ESDA 数据检验工具(如 Hisgram 直方图、QQ 图、Trend Analysis 预测图、Voronoi 图等)剔除数据的特异值; ②分析数据的分布特点, 如是否为正态分布、有无趋势效应、各向异性情况等; ③依据数据分析结果进行转换, 得到 $\gamma(h) \sim h$ 的散点图; ④通过比较不同类型空间模型的检验参数和误差情况, 选取出符合实际规律的空间插值模型。

3 结果与分析

3.1 不同形态氮质量浓度的描述性统计分析

对洱海表层水体中不同形态氮进行描述性统计分析, 结果如表 1 所示。可以看出, 数据总体上符合正态分布特征, TN 指标数值差异最大, 变异系数为 34.84%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度变异相对较小, 变异系数为 16.14%。变异系数的大小不仅能够反映各样点监测数据之间差异, 还可以表示氮素空间变异性的特征, 据相关研究^[13], 当变异系数 $C_V \leq 0.1$ 时, 空间变异为弱变异性; 当变异系数 $0.1 < C_V < 1$ 时, 空间变异性为中等变异; 当变异系数 $C_V \geq 1$ 时, 空间变异特性为强变异性。从表 1 可知, 不同形态氮素变异系数 C_V 处于 0.1~1.0 之间, 说明洱海表层水体中氮质量浓度在

空间上的变异特征表现为中等空间变异性。

表 1 洱海表层水体中氮质量浓度的描述性统计特征值

项目	最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	C_V / %	分布 类型
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.18	0.30	0.24	0.010	16.14	正态分布
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.020	0.048	0.030	0.002	33.50	正态分布
溶解性氮	0.21	0.55	0.34	0.086	25.34	正态分布
TN	0.28	0.81	0.44	0.030	34.84	正态分布

3.2 氮质量浓度的空间插值模型

描述性统计只是说明了各指标浓度变化的基本特征, 并不能反映各指标在空间上的变化规律, 也就是说不能反映各指标浓度的结构性和随机性, 以及相关性和独立性的空间特征。采用地统计学分析方法则可以较好地弥补这种不足, 可对洱海表层水体中不同形态氮浓度空间变异特征进行描述。由于半变异函数的计算要求数据符合正态分布或近似正态分布, 否则可能存在比例效应, 由表 1 可知, 洱海表层水体中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、溶解性氮和 TN 质量浓度均呈正态分布特征, 因此可直接用来进行分析。

按照地理信息系统中地统计学分析模块(Geostatistical Analyst)空间插值分析工作步骤, 根据洱海的水质监测数据, 通过比较预测误差均值和标准均方差误差等检验参数, 选取出适合洱海表层水体中不同形态氮浓度特征的半方差模型。基于 ArcGIS 地统计学模块进行模型模拟分析, 选取的 Kriging 模型和检验参数见表 2。

表 2 洱海表层水体中不同形态氮的 Kriging

指标	Kriging 插值 模型	模拟模型和检验参数				标准均 方差预 测误差
		预测 误差 均值	预测 误差的 均方根	平均 预测 标准差	平均 标准差	
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	Exponential	-0.001109	0.03249	0.0334	-0.01912	0.9853
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	Gaussian	0.0004456	0.00459	0.003741	0.09491	1.242
溶解性氮	Spherical	-0.0005879	0.07684	0.0747	-0.006042	1.007
TN	Gaussian	0.002544	0.1441	0.1434	0.01013	1.007

由表 2 可以看出, 指数模型(Exponential 模型)适合于洱海表层水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 空间插值, 高斯模型(Gaussian 模型)对于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TN 插值较适合, 球形模型(Spherical 模型)适用于溶解性氮空间 Kriging 插值模拟。

3.3 氮质量浓度的空间变异性

空间变异特征可根据半变异函数的拟合参数进行分析, 块金值表示由实验误差和小于采样尺度引起的变异, 较大的块金方差值表明较小尺度上的某种过程不容忽视。洱海表层水体中不同形态氮的块金值均较小, 均远小于 1, 这说明小尺度生态水文过程不会对洱海整体的营养元素空间分布产生明显影响。

半变异函数块金值与基台值的比例可用来表示

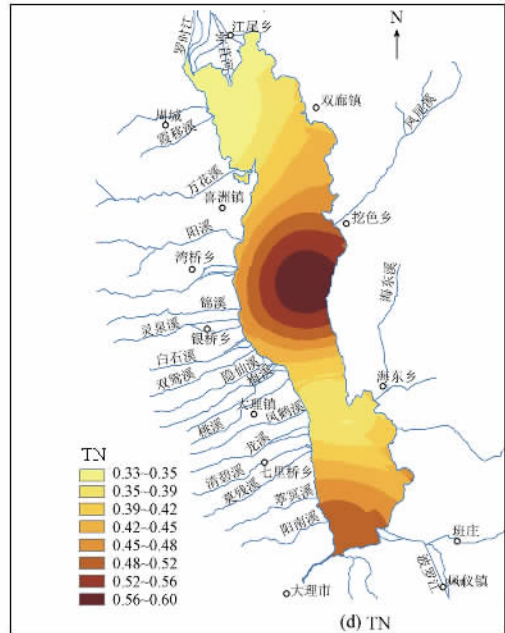
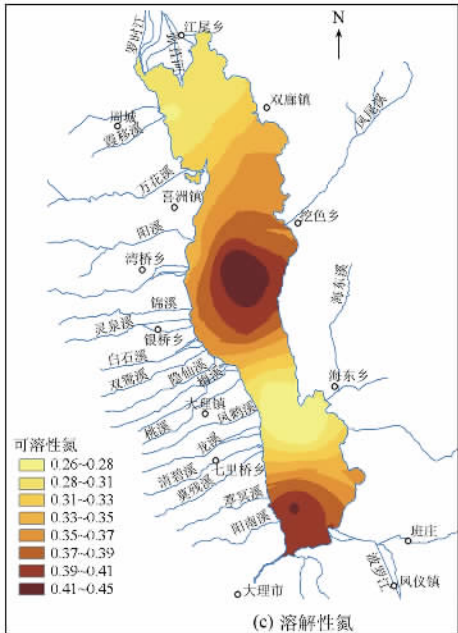
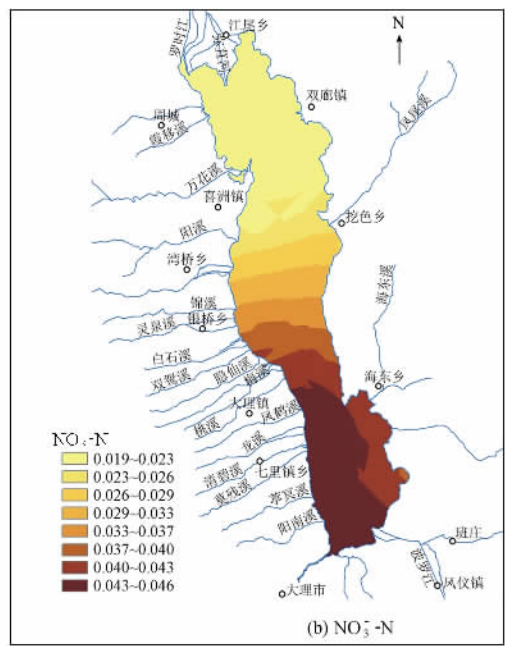
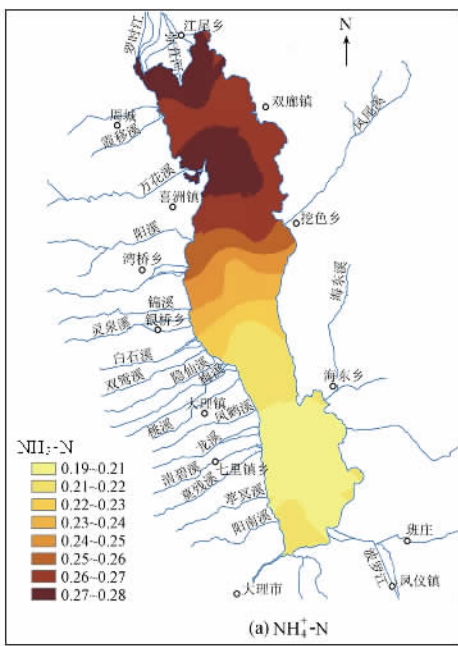


图 2 洱海表层水体中氮素 Kriging 空间插值 (单位: mg/L)

区域化变量的变异特征,是系统变量空间相关性程度的表征,该比值越大说明随机因素引起的空间变异越大。当块金值与基台值的比例小于 25% 时,说明系统具有强烈的空间相关性;比例在 25% ~ 75% 之间表明系统具有中等的空间相关性;大于 75% 则说明系统空间相关性很弱^[4]。根据上述地统计学分析参数,分析洱海表层水体氮质量浓度的块金值与基台值比值特征(表 3),可以看出,NO₃⁻-N 指标块金值/基台值比例远小于 25%,说明该指标具有较好的空间相关性。其他指标(NH₄⁺-N、溶解性氮和 TN)块金值与基台值的比值高于 25%,表明上述指标具有中等空间相关性特征。从上述指标空间变异特征也可以看出,洱海表层水体中 NH₄⁺-N、溶解性氮和 TN 在空间分布上除了受湖水流速、水动力学

性质、水文气象等内在水文情势的结构因素控制外,还受到多种外来因素如人为污染、水利工程控制、用排水等随机性因素的影响。

表 3 洱海表层水体中不同形态氮浓度的理论模型和半变异函数的拟合参数

指标	Kriging 模型	块金值	基台值	块金值/基台值/%	变程/m
NH ₄ ⁺ -N	Exponential	0.00062797	0.00192937	32.55	2682.1
NO ₃ ⁻ -N	Gaussian	0.0000094233	0.000215223	4.38	2400.0
溶解性氮	Spherical	0.0027778	0.0081592	34.05	2682.1
TN	Gaussian	0.014155	0.028925	48.94	2682.1

3.4 氮质量浓度的空间分布规律

应用 ArcGIS 中的 Geostatistics Analysis 模块空间表面插值技术,对洱海不同形态氮进行空间表面内插,插值结果如图 2 所示。由图 2(a)可见,洱海表层水

体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的质量浓度变化范围 0.19 ~ 0.28 mg/L, 在空间上出现两处高值区域, 分别在弥苴河和罗时江的江口(北侧)以及苍山十八溪的万花溪入洱海处(西侧), 且 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度呈现自南向北逐步增高的变化, 这主要是由于洱海流域北部地区主要以农业生产为主, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 来自周边农业面源污染。洱海表层水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度高值出现在南部区域(图 2b), 估计与洱海水动力及风生流的变化规律有关, 另外与苍山十八溪的面源输送也不无关系, 具体驱动机制还有待深入研究。

可溶性氮和 TN 质量浓度均在洱海中部出现高值分布区(图 2c、图 2d)。根据对洱海风生流的模拟以及现场观测, 海东区挖色乡附近(洱海中部地区)为洱海水流汇集处, 该水域水动力条件相对较弱, 蓝绿藻出现聚集, 是洱海水体富营养化较明显的区域之一^[15]。由此可推断 TN、溶解性氮质量浓度的高值区域与该水域水体中富集 TN 的藻类有关。

4 结论与讨论

a. 洱海表层各水样样点之间不同形态氮质量浓度以 TN 质量浓度变化较大, 变异系数 34.84%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度变异相对较小, 变异系数 16.14%。

b. 洱海表层水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、溶解性氮和 TN 在空间分布上除了受湖水流速、水动力学性质、水文气象等内在水文情势的结构性因素控制外, 还受到多种外来因素如人为污染、水利工程控制、用排水等随机性因素的影响。

c. 洱海表层水体中不同形态氮质量浓度空间分布规律为: $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 出现两处高值分布区, 分别位于弥苴河、罗时江的江口(洱海北侧)以及苍山十八溪的万花溪入洱海处(洱海西侧), 空间上呈现出自南向北逐步增高的变化趋势; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度高值区出现在洱海南部水域; 可溶性氮和 TN 质量浓度在洱海中部水域出现高值区。

总之, 洱海表层水中不同形态氮质量浓度在空间上具有结构性和随机性双重属性特征, 这是本研究进行氮素空间变异分析的基础。由于传统统计学描述方法在空间分析上具有一定的局限性, 因此基于 GIS 空间分析及地统计学插值分析方法相结合的技术可以较好地弥补传统描述方法的不足。笔者利用 ArcGIS 的地统计学分析模块中 Kriging 空间插值技术, 实现了不同形态氮在洱海表层水中的空间分布规律地统计学插值分析, 研究结果具有综合性和直观性强的特点。

参考文献:

[1] PRETTY J N, MASON C F, NEDWELL D B, et al. Environmental

costs of freshwater eutrophication in England and Wales[J]. Environmental Science & Technology 2003, 37(2):201-208.

- [2] 李一平, 严莹, 韩广毅. 太湖水质时空相关性分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5):505-508.
- [3] 苑韶峰, 吕军, 曹娥江干流氮素与水环境因子时空变异特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5):186-189.
- [4] 赵光影, 刘景双, 王洋, 等. 三江平原主要河流氮、磷营养元素时空变化规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2):144-149.
- [5] RUNKEL R L. Toward a transport-based analysis of nutrient spiraling and uptake in streams[J]. Limnol Oceanogr Methods, 2007, 5:50-62.
- [6] 彭文启, 王世岩, 刘晓波. 洱海水质评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3):192-199.
- [7] YAN Hai-yu, FENG Xin-bin, TANG Shun-lin. The concentration and distribution of mercury species in the water columns of Baina Reservoir[J]. Journal De Physique, 2003, 107(4):1385-1388.
- [8] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [9] 邬建国. 景观生态学-格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [10] WEBSTER R, OLIVER M A. Statistical methods in soil and land resource survey[M]. New York: Oxford University Press, 1990.
- [11] 刘瑞民, 王学军, 郑一, 等. 地统计学在太湖水质研究中的应用[J]. 环境科学学报, 2002, 22(2):3.
- [12] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究: 以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4):557-563.
- [13] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [14] 侯亚敏, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州百花湖中不同形态汞的分布规律[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2):125-132.
- [15] 杜宝汉. 洱海富营养化研究[J]. 云南环境科学, 1997, 16(2):30-34.

(收稿日期 2010-03-24 编辑 徐娟)

