

## 保安湖生态因子场格局分析

马 凯 蔡庆华 谢志才 刘瑞秋 黎道丰

(中国科学院水生生物研究所; 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 利用地质调查和实验分析数据构建保安湖理化因子 GIS 数据库, 以此模拟保安湖生态因子场, 并通过栅格统计获得保安湖水环境的整体特征。得到的 15 个生态因子场非常直观地展示出各项理化因子在全湖分布范围内的浓度分布情况, 体现了保安湖水环境强烈的空间异质性。栅格统计结果则显示该湖整体而言, 其营养状况目前已相当高。

**关键词:** 保安湖; 生态因子场; GIS; 栅格统计

中图分类号: Q178.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2004)06-0581-06

生物有机体的生命活动可以引起周围环境中相关生态因子发生变化, 这些变化产生的综合效应的空间分布就形成了生态场<sup>[1]</sup>。生态场的复杂性表现在由多种生态因子场组成, 每一生态因子由于生物的生命存在及存在状态的改变而产生空间、时间分布的异质性<sup>[2]</sup>。淡水生态系统具有相对明确和稳定的边界, 常为复杂的生态学思考提供研究对象<sup>[3]</sup>。生态因子场的概念就非常适用于诸如湖泊、水库这类具有清晰轮廓的生态系统<sup>[4-6]</sup>。水体岸线为生态因子场勾勒了天然边界, 为研究创造了条件。

长江中下游的草型线水湖泊中, 水生高等植物, 尤其是沉水植物, 为其中主要生物类群。水生植物的分布格局对这类湖泊中一些关键生态因子的水平分布存在着一定影响作用, 生态因子场研究可以较好地用来探讨水生植物与环境因子的相互关系<sup>[7,8]</sup>。当前, 过度开发已给长江中下游湖泊生态系统带来了巨大影响, 严重的点源污染加剧了湖泊理化因子在局部湖区中的异质性。而局部水环境的恶化往往是整个水体环境退化的不祥之兆, 在这种背景下, 探索外力扰动作用下的湖泊生态因子场也颇显重要。

在诸如保安湖这样典型的浅水湖泊中, 由于无明显温跃层的存在, 湖泊表层与底层水环境差异较

小<sup>[9,10]</sup>。此时, 生态因子场的描述则可以由三维降低为二维, 为进一步深入研究提供了便利。

### 1 研究方法

**1.1 研究地点** 保安湖(114°23' E, 30°15' N)位于湖北省大冶市西北部, 为长江中游南岸的一个典型浅水湖泊。湖区地处中亚热带, 水热条件较为丰富, 气候温和<sup>[9,10]</sup>。湖中淤积层厚, 沉水植被丰茂。和周围其他湖泊类似, 渔业活动为该湖主要的人为利用形式<sup>[9,10]</sup>。湖表面积为 39.3 km<sup>2</sup>, 由主体湖区(26.7 km<sup>2</sup>)、桥墩湖(8.0 km<sup>2</sup>)、扁担塘(3.3 km<sup>2</sup>)和肖四海(1.3 km<sup>2</sup>)等四个湖区组成, 平均水深为 1.5—2.5 m<sup>[9,10]</sup>。透明度在湖区间差异较大, 桥墩湖区大部分均可透明见底, 而主体湖区略低, 平均透明度为 1.0—1.5 m。现今肖四海和扁担塘已建围堤, 独立成湖, 故本研究选择在水流流通的主体湖和桥墩湖进行。

**1.2 湖泊理化因子的检测** 2001 年 8 月 21—23 日, 在湖内均匀设置 81 个采样点, 用 GPS(Magellan GPS 315)记录每样点坐标。采样期间, 天空晴朗, 气温始终维持在 35 ℃左右, 天气因素对整个采样工作无影响。收集足量水样, 用清洁的塑料瓶装存用于水化学分析。TN、TP 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 需要消解而带回实验

收稿日期: 2003-12-20; 修订日期: 2004-03-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-12); 中国科学院知识创新工程前沿项目(220208); 国家自然科学基金项目(30070153, 39670150), 湖北省涝渍灾害与湿地农业重点实验室基金(HNKJ2002A02)资助

作者简介: 马 凯(1977—), 陕西省西安市人; 硕士; 研究方向: GIS 和淡水生态学。研究使用的 GIS 软件由中国生态系统研究网络水域生态系统分中心提供, 王骥、叶麟同志参加了采样工作, 一致表示感谢

通讯作者: 蔡庆华, E-mail: qhc@ihb.ac.cn

室处理, 其余项目均在 24h 内完成测定。滴定法检测项目参考中国生态系统研究网络(CERN)制定的观测与分析方法<sup>[11]</sup>, 比色法检测项目利用便携式水质分析仪(HACH/2010 Water Quality Laboratory)完成。

**1.3 保安湖理化因子数据库的构建** 利用专业数字化仪(Calcomp DrawingBoard III)数字化得到保安湖轮廓图(1:90 000), 底图来源于《湖北省湖泊变迁图》<sup>[12]</sup>。参照1:1 000 000中国基础地理信息图水系图层完成地面校正(Georeference), 赋予轮廓图地理信息。将实验分析数据输入计算机, 构建保安湖理化因子数据库。基于专业GIS软件ArcView 3.2 (ESRI, Environmental Systems Research Institute, USA)平台, 将数字化的湖廓图作为底图, 导入GPS记录的地理坐标进行样点定位, 样点通过编号与保安湖理化因子数据库相连。

**1.4 保安湖主要生态因子场模拟** 生态因子场模拟同样于ArcView 3.2软件平台上完成, 并辅以空间分析的扩展模块Spatial Analyst 2.0(ESRI, USA)及用于Kriging插值的扩展模块Kriging Interpolator 3.22 SA(下载于ESRI官方主页 $http://www.esri.com$ )。首先打开湖泊轮廓图和样点分布图, 调用理化因子数据库。以每样点各项理化指标为变量, 运用Kriging插值法进行内插运算, 模拟保安湖主要的生态因子场。模拟得到的生态因子场可以用ArcView的栅格图格式进行展示, 栅格精度为20m。栅格模型设计思想是将地理空间看成一个连续的整体, 在这个空间中处处有定义, 非常适合用于生态因子场的模拟<sup>[13]</sup>。

**1.5 保安湖主要理化因子特征分析** 观察模拟得到的保安湖主要生态因子场, 分析各理化因子在湖中的水平分布规律。模拟结果中, 每栅格代表一定水域内的理化特征, 利用统计软件对各项理化因子的总体特征进行计算。

## 2 结果

### 2.1 生态因子场的模拟结果及全湖水平分布特征

图1展示出利用保安湖15项理化因子分别构建的生态因子场。从模拟得到的生态因子场可以清楚地发现, 各项理化因子在湖中分布具有非常明显的空间异质性, 且各自的变化趋势亦非常迥异。

电导率场在湖中表现出一定的规律性。西部的桥墩湖和主体湖北部地区, 湖水电导率较低, 并向主体湖东部近岸处逐渐增高, 在黄风口达到最大值, 为 $846\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。硬度场的全湖变化情况与电导率相似, 从湖区西部向东逐渐增大, 同样至黄风口处达到

最大值, 高达20.39德国度。从pH场可以观察到全湖有两处pH水平较高区域, 一处位于桥墩湖西北部, 另一处则位于主体湖中心地带。碱度场在主体湖北部及南部近岸水域的浓度水平相对较高。化学耗氧量场在桥墩湖和主体湖南部浓度相对较低, 但在整个主体湖北部地区有着较高的浓度分布。

主要离子中,  $\text{Ca}^{2+}$ 含量由桥墩湖、主体湖北部和南部向中部及东部逐渐增加, 并同样在黄风口达到最大值。 $\text{Cl}^-$ 在湖中分布较为独特, 其大部分湖区比较均值, 但在主体湖中部偏北地区分布形成突兀的峰值和谷值, 峰谷之间非常临近, 且落差较大, 达 $17.71\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而 $\text{SO}_4^{2-}$ 场与 $\text{Ca}^{2+}$ 场较为相似, 且同样在黄风口形成峰值。 $\text{SiO}_2$ 在湖中心地带浓度较低, 并向四周岸边方向逐渐增高, 在主体湖最北端的透水坝沿线有较高浓度水平。

主要营养物质: 总N(TN)及三类主要无机形态N( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )的因子场中, TN的高浓度带位于湖的中部, 且形态不很规则;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在湖中有三处高浓度区, 其中桥墩湖与主体湖邻接处的浓度最高;  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在整个湖中的浓度变化较为平缓, 主体湖中部和桥墩湖区都相对较低, 只是在主体湖南部存在两个浓度水平较高区域;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在湖中起伏较大, 全湖出现了数个浓度峰。TP在桥墩湖与主体湖出现了峰点, 另在湖东北角有一较高浓度区域, 其他湖区的浓度变化相对平缓。P的主要无机化合物 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 在湖中的高浓度区域主要位于桥墩湖的东北部。

### 2.2 保安湖理化因子总体特征

本文通过对各生态因子场进行栅格数值统计, 得到湖水的理化特征(表1)。总体看来, 保安湖水呈弱碱性, 电导率较之周围其他湖泊略微偏高<sup>[14]</sup>。由于保安湖pH值常低于8.3, 因此重碳酸盐为保安湖碱度的主要组成部分, 全湖湖水碱度均较低。硬度以德国度计, 总体偏高, 属中等硬水<sup>[15]</sup>。主要离子中, 除 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度偏高外,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度均属正常。保安湖水中总N含量平均为 $0.731\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 等无机氮含量占总N的25.6%, 无机N化合物中又以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量最高, 平均占总无机N的71.1%,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 仅占2.4%。湖水含P化合物含量略有偏高, 达 $0.123\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而其中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为 $0.028\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 仅占总磷的22.8%, 说明湖水中有机磷含量是相当高的。湖水中总氮、磷比为5.9:1, 说明湖水中磷元素含量相对并不缺乏。

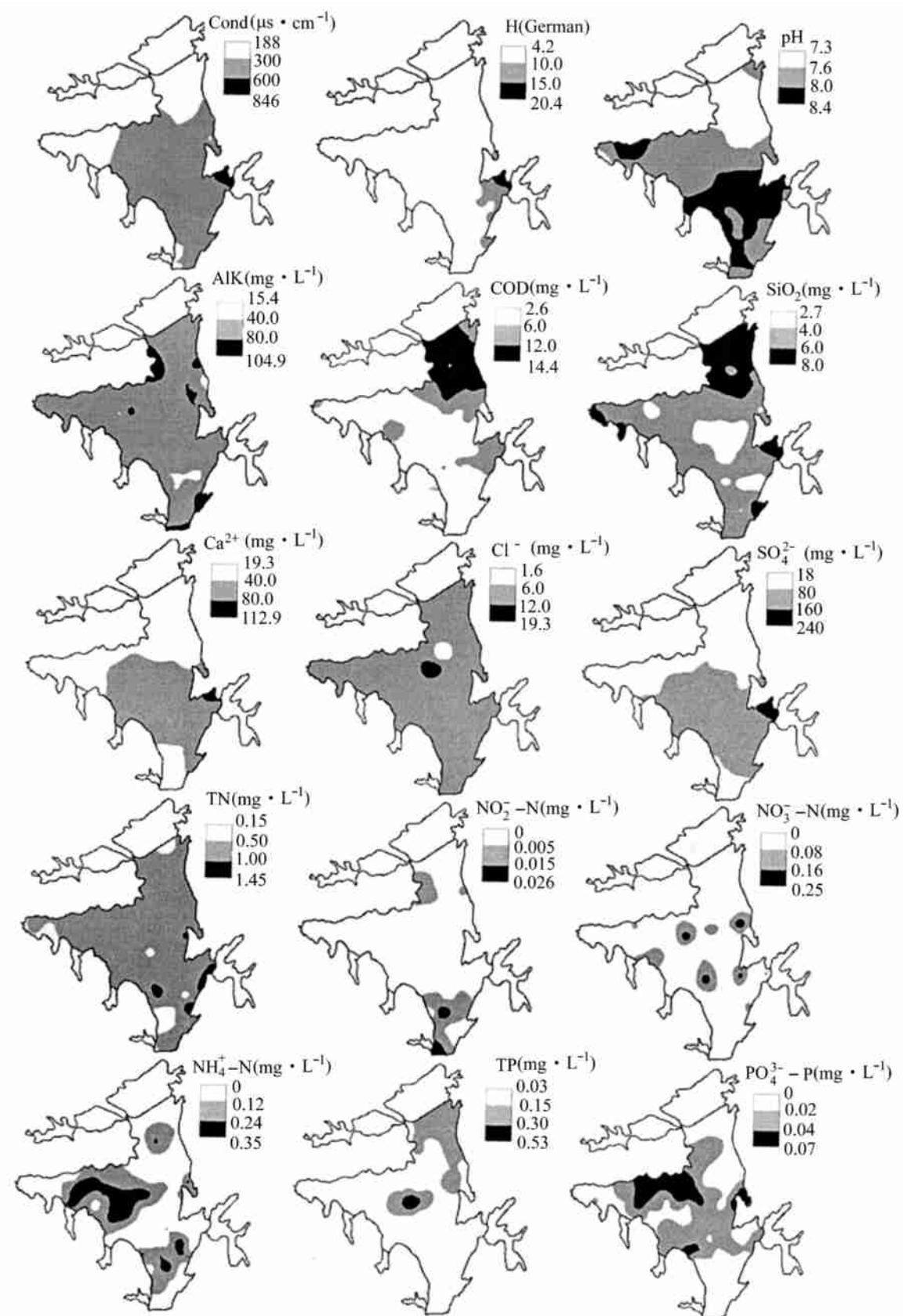


图 1 保安湖水环境生态因子场

Fig. 1 Ecological factor fields of water environment in Baoan Lake

表 1 基于栅格统计法和样点统计法计算的保安湖水理化特征

Tab. 1 Characteristics of water physicochemistry of Baoan Lake based on Grid statistics and Site statistics

项目 Item	栅格统计法 Grid Statistics		样点统计法 Site Statistics	
	均值 Average	标准差 SD	均值 Average	标准差 SD
Cond( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	353( 188—846 )	86	349( 188—846 )	98
H(German)	8.00( 4.15—20.39 )	2.03	7.95( 4.15—20.39 )	2.33
pH	7.88( 7.25—8.41 )	0.26	7.85( 7.25—8.41 )	0.27
Alk( 以 $\text{CaCO}_3$ 计, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	61.97( 15.37—104.87 )	12.22	61.68( 15.37—104.87 )	15.19
COD( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	6.92( 2.59—14.42 )	3.56	7.18( 2.17—14.41 )	3.74
$\text{SiO}_2$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	5.11( 2.70—8.03 )	1.07	5.20( 2.70—7.88 )	1.19
$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	40.69( 19.26—112.92 )	10.61	40.14( 19.26—112.92 )	12.68
$\text{Cl}^{-}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	8.75( 1.63—19.34 )	1.29	8.75( 1.76—19.34 )	1.67
$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	77.8( 18.3—239.8 )	32.2	76.4( 23.9—239.8 )	36.3
TN( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.731( 0.155—1.448 )	0.149	0.739( 0.159—1.448 )	0.197
$\text{NO}_2^-$ -N( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.004( 0.001—0.026 )	0.003	0.004( 0.001—0.026 )	0.004
$\text{NO}_3^-$ -N( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.050( 0.000—0.248 )	0.035	0.054( 0.000—0.248 )	0.051
$\text{NH}_4^+$ -N( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.133( 0.000—0.354 )	0.078	0.127( 0.032—0.354 )	0.094
TP( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.123( 0.030—0.526 )	0.056	0.128( 0.040—0.526 )	0.063
$\text{PO}_4^{3-}$ -P( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.028( 0.001—0.067 )	0.013	0.027( 0.001—0.067 )	0.015

### 3 讨论

本工作构建了 15 个生态因子场, 较为真实地反映了湖水环境中各理化因子在全湖中的水平分布情况。结果同时表现出保安湖水环境存在着强烈的空间异质性。各个生态因子场彼此间差异显著, 展现出各自不同的异质性。其中, 硬度、电导率、TP、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Cl}^{-}$  等因子场均只在全湖范围出现了一个浓度高峰或低谷, 这些因子由此极值点向四周浓度逐渐降低或升高, 整个湖区变化趋势较为平缓。而其他因子场则起伏较大, 在全湖出现数个浓度峰, 变化趋势非常强烈。除湖泊本身的天然成因外, 湖泊流域中的人为干扰在一定程度上对保安湖生态因子场的异质性格局的形成起到了加剧作用。对比观察生态因子场图, 发现在主体湖东部黄风口附近  $\text{SO}_4^{2-}$ 、硬度、电导率、 $\text{Ca}^{2+}$  等因子场均出现了浓度高峰, 且峰值异常。在采样过程中, 注意到黄风口近岸地区为居住人口密度较大的村庄, 且有数条明渠将各类生活污水直排湖中。

研究中模拟生态因子场所采用的 Kriging 插值法为地统计学中经典的插值技术。该方法基于一组数据间的关系, 应用地统计学有关公式对研究

区域内未知数据作出一种无偏内插、最小方差估计<sup>[16]</sup>。因其建立于区域化随机变量的理论基础上, 故较其他插值方法更加优越。Kriging 插值法在陆地生态学中已取得非常广泛的应用, 目前研究表明淡水生态系统中该方法同样具有良好的应用性<sup>[17]</sup>。通过模拟直观展示生态因子场, 利用栅格统计描述各项理化因子的总体特征, 对于研究湖泊或水库存存在的水环境空间异质化问题, 这无疑是一种较为理想的方法。常规的样点均值法求得的湖水理化特征(表 1)与栅格统计结果并无较大偏差, 这主要因为文中样点数目较多, 当样点数目减少时, 偏差则随之增大。若用标准差间接反映湖水异质化程度, 生态因子场的栅格统计法较之样点统计法显得更为客观。

从保安湖 N、P 因子的全湖总体特征来看, 目前整个水体的营养程度已相当高。湖泊富营养化问题则是长江中下游地区浅水湖泊普遍存在且不容忽视的问题, 点源污染和非点源污染为其主要成因<sup>[18]</sup>。在湖泊中的构建生态因子场, 其最大优点在于能够发现水体中水质异常区域。这一特点对湖泊富营养化外在成因的探讨将有所帮助。通过找出湖泊中营养程度异常区域, 综合考察该区域水环境特征, 结合

区域人类利用方式和强度的分析,可以有针对性地探索其成因,并对整个湖泊水环境营养状况可能发生变化有所预测。

### 参考文献:

- [ 1 ] Wu H I, Sharp P J H, Walker J, et al. Ecological field theory: A spatial analysis of resource interference among plants[ J ]. *Ecological Modelling* 1985, 29: 215—243
- [ 2 ] Zhou R. Theory and characteristics of ecological field[ J ]. *Chinese Journal of Ecology*, 1995, 14(1): 49—53[ 邹锐. 生态场理论及生态场特性. 生态学杂志, 1995, 14(1): 49—53]
- [ 3 ] Harris G P. Pattern, process and prediction in aquatic ecology A limnological view of some general ecological problems[ J ]. *Freshwater Biology*, 1994, 32: 143—160
- [ 4 ] Zhao B. Nonlinear study on “ ecological factor field” of freshwater ecosystem[ D ]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, 2002[ 赵斌. 生态系统“生态因子场”空间格局的非线性分析. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 1998]
- [ 5 ] Zhao B, Cai Q H. Fractal character of ecological factor field in Meiziyu Reservoir[ J ]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24(5): 481—486[ 赵斌, 蔡庆华. 梅子垭水库生态因子场的分形特征. 水生生物学报, 2000, 24(5): 481—486]
- [ 6 ] Zhao B, Cai Q H. Geostatistical analysis of ecological factor field in Meiziyu Reservoir[ J ]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24(5): 487—492[ 赵斌, 蔡庆华. 梅子垭水库生态因子场的地统计学分析. 水生生物学报, 2000, 24(5): 487—492]
- [ 7 ] Ma K, Cai Q H, Xie Z C, et al. Influence of submerged macrophytes distribution pattern on nitrogen and phosphorous factors water environment in lakes. [ J ]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, 27(3): 12—17[ 马凯, 蔡庆华, 谢志才, 等. 沉水植物分布格局对湖泊水环境N, P 因子影响. 水生生物学报, 2003, 27(3): 12—17]
- [ 8 ] Ma K. A GIS approach to the influence of macrophytes distribution pattern on physicochemical factors in lakes: A case study in Baoan Lake, Hubei[ D ]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, 2002[ 马凯. 基于 GIS 的大型水生植物分布格局对湖泊理化因子的影响研究——以湖北保安湖为例. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2002]
- [ 9 ] Liang Y L, Liu H Q. Resources, environment and fishery ecological management of macrophytic lakes ( I )[ M ]. Beijing: Sciences Press, 1995[ 梁彦龄, 刘伙泉. 草型湖资源、环境与渔业生态学管理 (一). 北京: 科学出版社, 1995]
- [ 10 ] Hu C L, Huang X F. Collected papers on the fishery ecology and exploitation technology of the Bao'an lake[ C ]. Beijing: Sciences Press, 1991[ 胡传林, 黄祥飞. 保安湖渔业生态和渔业开发技术研究文集, 北京: 科学出版社, 1991]
- [ 11 ] Huang X F. Survey, observation and analysis of lake ecology[ M ]. Beijing: Standards Press of China, 1999[ 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1999]
- [ 12 ] Ministry of Water Resources of Hubei Province, Hubei Institute of Water Resources in Water Resource and Design. *Atlas of lake vicissitude of Hubei Province*[ M ]. 1991[ 湖北省水利厅, 湖北省水利勘测设计院. 湖北省湖泊变迁图集, 1991]
- [ 13 ] Wu L, Liu Y, Zhang J. *Geographical information system Principle, method and application*. Beijing: Sciences Press, 2001[ 邬伦, 刘瑜, 张晶, 等. 地理信息系统-原理、方法和应用. 北京: 科学出版社, 2001]
- [ 14 ] Liu R Q, Zhang S Y. Multivariable analyzing and comparing of water quality of shallow lakes in middle and lower reaches of the Changjiang River[ J ]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24(5): 439—445[ 刘瑞秋, 张水元. 长江中下游地区若干湖泊水质的多元分析与比较. 水生生物学报, 2000, 24(5): 439—445]
- [ 15 ] Shen X C. *Natural water chemistry*[ M ]. Beijing: Environmental Sciences Press of China, 1994[ 申献辰. 天然水化学. 北京: 中国环境科学出版社, 1994]
- [ 16 ] Zhou G F, Xu R M. *Biogeostatistics*[ M ]. Beijing: Sciences Press, 1998[ 周国法, 徐汝梅. 生物地理统计学. 北京: 科学出版社, 1998]
- [ 17 ] Tang T, Cai Q H, Pan W B. Application of geostatistics in the freshwater ecology[ J ]. *Journal of Lake Science*, 2000, 12(3): 280—288[ 唐涛, 蔡庆华, 潘文斌. 地统计学在淡水生态学中的应用. 湖泊科学, 2000, 12(3): 280—288]
- [ 18 ] Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [ J ]. *Journal of Lake Science*, 2002, 14(3): 193—202[ 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193—202]

## PATTERN ANALYSIS ON ECOLOGICAL FACTOR FIELDS IN THE BAOAN LAKE, CHINA

MA Kai, CAI Qing-Hua, XIE Zhi-Cai, LIU Rui-Qiu and LI Dao-Feng

(Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Wuhan 430072)

**Abstract:** Ecological factor field is presented to quantify spatial heterogeneity of physicochemical factors in bound inland waters. On August 21—23, 2001, a water sampling was carried out in the Baoan Lake at eighty-one stations with assistant of a GPS setting. The results of laboratory analysis were put into computer to establish the GIS database of physicochemical factors of the Baoan Lake. Under the support of GIS software ArcView 3.2, ecological factor fields were simulated using Kringing interpolation technique. Then Grid statistics of simulated fields could demonstrate general characteristic of each environmental factor in the lake.

The figures of fifteen simulated ecological factor fields reflected distinctly spatial concentration distributions of these factors. Also, factor concentration in any position could be easily read from the figures. Field fluctuation well described strong heterogeneity of the water environment in the lake. Variation tendency differs to each other among all ecological factor fields. The pattern of heterogeneity, while can't be explained by only one reason, is introduced by the integrated effect of natural process and artificial disturbance. It suggested that lake uses by human being play more important role in the heterogeneity formation. Continuous effluents of domestic wastewater could be considered as another key element to disturb the homogeneity of water phase.

Physicochemical characteristics calculated by grid statistics method brought an overview on water quality of Baoan Lake. The concentration of TN and TP was  $0.731\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $0.123\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  respectively, implying a high trophic status in Baoan Lake.

**Key words:** Baoan Lake, Ecological factor field; GIS; Grid statistics