

基于 GIS 下的太湖水质富营养化模糊综合评价

龚绍琦¹, 黄家柱¹, 李云梅¹, 韦玉春¹, 顾征帆²

(1. 南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室, 南京 210097; 2. 无锡市环境监测中心站, 无锡 214023)

摘要: 在地理信息系统和地统计学的支持下, 探讨了模糊数学与层次分析法相结合的方法在水体富营养化评价中的应用. 以太湖为研究对象, 选取总磷、总氮、叶绿素、化学需氧量、5 日生化需氧量、溶解氧和透明度 7 项指标进行评价. 在对研究区域采样数据进行地统计分析后估算出整个区域评价指标的值, 在此基础上建立不同指标的隶属度函数, 并计算其隶属度; 同时根据层次分析法的原理, 确定了各项评价指标的权重, 最终得到研究区域的综合结果, 绘制出富营养化评价图. 结果表明: 北部、西北部湖区营养水平最高, 属重富营养; 中部湖区营养程度为中富营养; 东南部湖区营养水平最低, 属中营养.

关键词: 地理信息系统; 地统计学; 太湖; 富营养化; 评价

中图分类号: X821 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)05-0034-04

Integrated Fuzzy Evaluation of Water Eutrophication Based on GIS in the Taihu Lake

GONG Shao-qi¹, HUANG Jia-zhu¹, LI Yun-mei¹, WEI Yu-chun¹, GU Zheng-fan²

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 2. Wuxi Centre Station of Environmental Monitoring, Wuxi 214023, China)

Abstract: Supported by geographic information system and geostatistics, the application of fuzzy mathematics and analytic hierarchy process for water eutrophication evaluation was discussed. Taking Taihu Lake as an example, the research selected total phosphorus, total nitrogen, chlorophyll a, COD, BOD₅, DO and transparency as evaluation index. After geostatistical analysis of the datum of monitoring site, the values of evaluation indices were estimated in the whole research area. Given that, the different dependence functions were developed for these indices and the function values were calculated. Furthermore, according to the principle of analytic hierarchy process, the weight of every index was calculated, then integrated evaluation value was obtained for the whole research area and the evaluation map for water eutrophication was drawn. The result shows that the level of nutrition is the highest in the north and north-west of lake, which is hypertrophic, that is meso-eutrophic in the middle and that is the lowest in the south-east of lake, which is mesotrophic.

Key words: geographic information system; geostatistics; Taihu Lake; eutrophication; evaluation

目前国内外对水质富营养化评价的方法很多, 有生态学评价^[1]、参数法、营养状态指数法、营养度指数法(AHP-PCA)、评分法^[2,3]、灰色聚类法^[4]、模糊综合评价法^[5,6], 同时建立不同预测水体富营养化的数学模型等^[7~9]. 这些方法在不同程度上都能客观地反映湖泊营养水平, 但由于富营养化程度本身是一个模糊的概念, 而各项评价指标所代表的类别, 分类界限具有模糊性, 因此应用模糊数学来描述水质富营养化更能反映湖泊的实际状况. 然而, 在确定各项评价指标权重时许多学者都倾向于用实测值的隶属度与各指标分级阈值的隶属度之间进行一系列计算得到, 这种做法受分级标准的影响较大, 忽视了各指标本身对水体富营养化的贡献, 从而影响了评价结果的准确性. 笔者提出用层次分析法来确定各指标的权重, 使定性和定量相结合, 试图能取得更好的结果. 此外, 通过监测湖泊若干个点来达到评价整个湖泊富营养化水平的做法, 它忽略样点之间的

相关性以及不同区域间的差异性, 评价的结果同样缺乏客观性, 利用地理信息系统结合地统计学的方法能很好地解决这一问题. 本文旨在对太湖富营养化程度有客观全面的了解, 为促进太湖流域的经济发展以及太湖环境规划和管理决策提供科学依据.

1 研究区域的自然概况与研究方法

1.1 自然概况

太湖是我国长江中下游地区著名的五大淡水湖之一, 位于长江三角洲南缘, 界于 N30° 55' 40" ~ 31° 32' 58", E119° 53' 32" ~ 120° 36' 10", 湖泊面积为 2 338.1 km², 平均深度 2 m, 最大水深 4 m, 是个典型的碟型浅水性湖泊. 太湖湖底地形十分平坦, 平均高

收稿日期: 2004-11-24; 修订日期: 2005-02-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003 AAI 31060); 南京师范大学引进人才科研启动基金资助

作者简介: 龚绍琦(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为遥感与地理信息系统.

程为 1.1 m,是一片被湖水淹没覆盖的平原洼地.全部水系以太湖为中心,北部以无锡的直湖港为界,南部以原吴江市的吴淞港为界,向西河流以入湖为主,属上游;向东河流以出湖为主,属下游.水系特点是上游为树枝状排列,下游呈现为扇状排水系统.湖中各种浮游植物、动物和栖息类动物种类繁多,具有良好的水生态系统.太湖不仅是国内外享有盛名的旅游胜地,而且是太湖水系的主要水源,兼有航运、灌溉、渔业等多种功能,是我国经济最发达的区域之一.

1.2 点位数据的采集与分析

本研究于 2004-07-27 ~ 2004-08-05 共采集 36 个样品,样品的采集和测试由无锡市环境监测中心站进行,样点分布如图 1.样品测试的项目主要有总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素 a(Chl-a)、化学需氧量(COD)、5 日生化需氧量(BOD₅)、溶解氧(DO)和透明度(SD)等.样品分析方法按文献[10]进行.

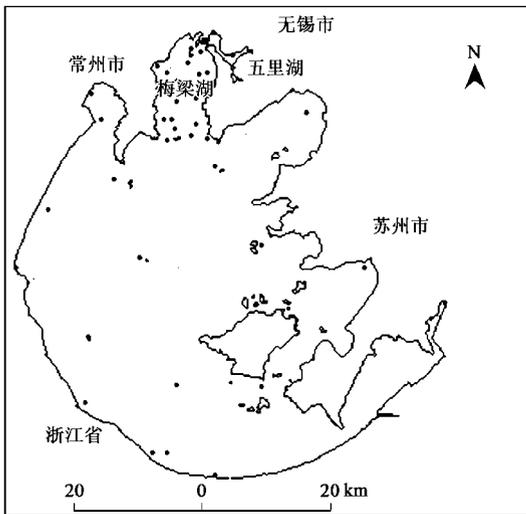


图 1 研究区域水质采样点分布

Fig.1 Distribution of water sampling sites in research area

2 湖泊富营养化评价模式

2.1 评价指标的选取

目前的研究对湖泊富营养化的划分和描述比较模糊,各种评价指标的选取不尽相同.本文根据相关性、可操作性、简洁性和科学性相结合的原则^[2],在综合考虑湖泊的生物、理化特性的基础上,选取与湖泊富营养化密切相关的 TP、TN、Chl-a、COD、BOD₅、DO 和 SD 7 个指标进行评价.

2.2 评价指标空间分布研究

由于对湖泊点位监测所获得的有限数据所能提

供的信息是不完全和不确定的,因此利用地理信息系统和地统计学方法对空间上已知点位数据进行分析后,通过克里格(Kriging)插值得到未采样点的数据,并生成各项指标的分布图,从而可以很好地了解单项指标的空间分布情况.具体步骤如下:①根据已知点位的地理坐标在地理信息系统中生成监测点的矢量图;②对监测点的数据进行统计分析,考察数据的分布情况,对于不满足正态分布的指标可进行对数变换、幂变换(Box-Cox)或反正弦变换,使各项指标数据成正态分布,否则在半方差计算时可能存在比例效应,从而使实际半方差值发生变化,基台值和块金值增大,估计精度降低,导致某些空间结构特征不明显^[11,12];③计算所有监测点之间的距离和半方差,确定合理的步长,并在一定方向角(Angle Direction)、带宽(Bandwidth)和容限角(Angle Tolerance)上按步长分组,计算每组样点的平均距离和平均半方差值;④根据监测点平均距离和平均半方差值,用最小二乘法拟合最佳半方差理论模型;⑤生成由所有点对的半方差值和每一观测值与预测值之间的半方差值构成的矩阵,并计算预测点周围监测点的权重系数.其中每一观测点与预测点之间的半方差值根据它们之间的距离在半方差理论模型中计算得到;⑥选取预测点周围若干个观测值进行加权求和,计算出预测点的最佳估计值;⑦用交叉验证法检验所选拟合模型的合理性以及预测的精度,并根据平均误差(Mean Error, ME)绝对值接近 0、标准化平均误差(Mean Standardized Error, MSE)接近 0、平均标准误差(Average Standardized Error, ASE)与均方根误差(Root-Mean Square Error, RMSE)最接近以及标准化均方根(Root-Mean Square Standardized Error, RMSSE)接近 1 的原则选择最佳半方差理论模型.各项评价指标地统计分析过程的参数见表 1.

2.3 评价指标隶属度的计算

根据以往的研究成果发现,各评价指标与湖泊富营养化水平在其一定浓度范围内呈线性关系^[4,5,13],故本文对 TP、TN、Chl-a、COD 和 BOD₅ 选用增大型升半梯形分布的隶属度函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq x_2 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 0.1 & x < x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, x :某指标的实测值, x_1 :某指标表征水体富营养化程度最低时的临界值, x_2 :某指标表征水

体富营养化程度最高时的临界值, $f(x)$ 为某指标的隶属度, x_1 和 x_2 为某指标的统计分析的参数

Table 1 The parameter for geostatistical analysis of every evaluation index

评价指标	分布类型	偏度	峰度	理论模型	邻近 点个数	预测误差				
						ME	RMSE	ASE	MSE	RMSSE
TP	正态分布	1.612	5.099	指数模型	10	0	0.057	0.078	-0.011	0.774
TN	正态分布	0.958	3.454	圆状模型	11	-0.033	0.685	0.859	-0.028	0.857
Chl-a	对数正态分布	0.557	3.037	球状模型	9	-0.021	0.197	0.276	-0.154	1.004
COD	正态分布	0.304	1.996	球状模型	13	-0.003	1.911	2.161	-0.005	0.905
BOD ₅	对数正态分布	0.405	3.322	高斯模型	12	-0.185	3.494	3.170	-0.092	1.171
DO	正态分布	0.989	6.091	高斯模型	7	-0.093	1.999	2.034	-0.035	1.094
SD	对数正态分布	0.730	4.153	指数模型	10	-1.390	12.20	13.16	-0.071	1.010

隶属度函数,而 DO 和 SD 则选用偏小型降半梯形分布的隶属度函数:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \geq x_2 \\ 0.9(x_2 - x)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 1.0 & x < x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, x :某指标的实测值, x_1 :某指标表征水体富营养化程度最高时的临界值, x_2 :某指标表征水体富营养化程度最低时的临界值, $f(x)$:某指标的隶属度函数.

根据金相灿和朱庆蜂等人对湖泊富营养化指标的分级标准,确定隶属度函数中 2 临界点的值^[14,4](表 2),利用上述公式分别计算各项评价指标的隶属度,该值大小在 0.1~1.0 之间.最大值 1.0 表明该评价指标所处状态对水体富营养化影响最大;最小值 0.1 表明该评价指标所处状态对水体富营养化完全不影响,同时也为了避免在计算时 0 值过多,因此最小值没有取 0.

2.4 评价指标权重的确定^[15]

由于各项评价指标对水体富营养化的贡献不同,故应对各个指标赋予不同的权重系数,本研究采用层次分析法确定各项指标的权重.首先邀请有关

专家按 Saaty 提出的因素梯度表对任意 2 指标的相对重要性进行判断,构造 7 个评价指标的判断矩阵

$$\begin{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \frac{1}{2} & 1 & 5 & 7 & 7 & 8 & 9 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 4 & 4 & 5 & 7 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{7} & \frac{1}{4} & 1 & 2 & 1 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & 1 & 2 \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{8} & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} & ; \text{其次由判断矩阵} \end{matrix}$$

计算最大特征根 $\lambda_{\max} = 7.615$ 和特征向量 $w = (1.064, 1.077, 0.712, 0.266, 0.175, 0.090)$,对特征向量归一化处理得到各评价指标的权重 $(0.2989, 0.3027, 0.2001, 0.0748, 0.0493, 0.0491, 0.0252)$;最后对判断矩阵进行一致性检验.其中一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) = 0.103$,查随机一致性指标表得 RI 为 1.36,计算随机一致性比率 $CR = CI/RI = 0.075 < 0.1$,说明判断矩阵具有满意的一致性,所得的权重能很好地反映各项指标对富营养化的贡献大小.

表 2 各项评价指标隶属度函数的临界值

Table 2 The critical values for dependence function of every evaluation index

临界值	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Chl-a/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	BOD ₅ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SD/m
x_1	0.004 6	0.079	0.001 6	0.480	1.41	2.0	0.4
x_2	0.250 0	2.300	0.160 0	14.000	6.41	8.5	4.4

2.5 湖泊富营养化的模糊综合评价模型

以往的模糊综合评判模型在对水体富营养化评价时通过极值取小-取大运算来确定最终值,这使得运算结果容易丢失有价值的中间信息,使评价结果均化或失真,从而影响评价结果的准确性.本文根据加法合成的原则,将求得的各项评价指标隶属度进行加权求和,即可得到湖泊富营养化的综合评价值,

其数学模型为: $Y = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (i = 1, 2, \dots, 7)$,

其中 Y 为湖泊富营养化综合评价值; W_i 为第 i 个评价指标的权重; X_i 为第 i 个评价指标的隶属度.

3 结果与讨论

3.1 评价结果

根据上述数学模型,利用地理信息系统的空间分析功能计算整个研究区域富营养化的综合值,并对计算结果进行统计,找出评价结果中的自然分节点,同时结合太湖水质的实际情况,把太湖的营养程度划分为中营养(≤ 0.365)、轻富营养($0.365 \sim 0.435$)、中富营养($0.435 \sim 0.550$)、富营养($0.550 \sim 0.720$)、重富营养(≥ 0.720) 5 级,得到整个太湖富营养化综合评价图(图 2),这与文献[14]太湖 1987 年 7 月丰水期营养分布状况相一致。从图上可以看出,北部、西北部湖区营养水平最高,属重富营养;中部湖区营养程度中等;东南部湖区营养水平最低,属中营养。造成这种现象的主要原因可能是上游的梁溪河、直湖港、漕桥河、太湖运河、社渚港、官渚港、小溪港和武进港是严重的纳污河流,其各种污染物、营养盐类经河道水体的输送流入太湖,使太湖北部、西北部湖区达到重富营养,而下游的吴淞江、太浦河是太湖的出湖河流,能带走湖内部分污染物、营养盐类,使东南部湖区营养水平最低。

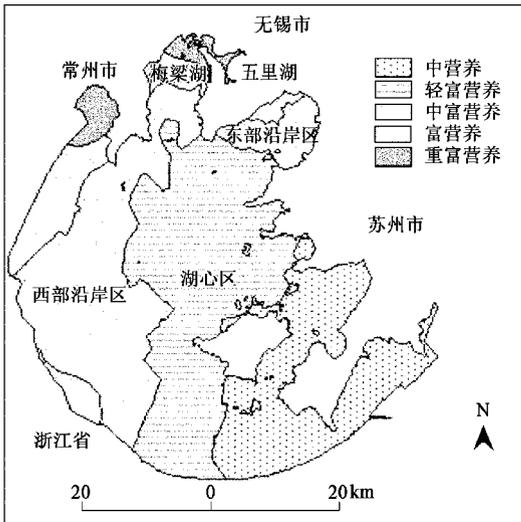


图 2 研究区域富营养化综合评价图

Fig. 2 The integrated evaluation map of eutrophication in research area

3.2 讨论

(1) 根据地统计学的原理计算各项评价指标的半方差,通过不同理论模型的克里格插值,估算出整个研究区域内评价指标的值。由于克里格插值方法是根据已知样点数据的统计特征而采取的一种不确定性插值方法,即在充分考虑样点数据的空间结构变化的基础上进行的最优无偏估计,因此该方法对获得各项指标值具有很好的科学性和准确性。同时还可以很好反映各项指标在整个研究区域内的空间变化以

及局部的变化情况,对于各项指标空间变化所引起的湖泊区域营养水平的差异可以做进一步研究。

(2) 利用地理信息系统强大的空间分析功能,把 GIS 作为湖泊富营养化评价的技术工具,通过数学运算,使得空间分析与定量分析相结合,既客观地评价了水体的营养状况,也提高了工作效率。

(3) 应用模糊数学和层次分析法分别确定评价指标的状态值和权重,将以往模糊的分级定量化,同时也对各项评价指标的贡献大小准确地赋值,提高了评价结果准确性,不失为一种较好的方法。

(4) 本研究采用不规则的随机采样,由于受实验条件的限制,样点数目较少,对引起湖泊富营养化的各指标的空间变异性以及合理取样数目的确定尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘永,郭怀成,戴永力,等.湖泊生态系统健康评价方法研究[J].环境科学学报,2004,24(4):723~729.
- [2] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J].中国环境监测,2002,18(5):47~49.
- [3] 陈旭华.用尼梅罗(Nemerow)污染指数评价地表水营养状况的探讨[J].安全与环境学报,2003,3(2):24~26.
- [4] 朱庆峰,廖秀丽,陈新庚,等.用灰色聚类法对荔湾湖水水质富营养化程度评价[J].中国环境监测,2004,20(2):47~50.
- [5] 朱雷,陈威.模糊综合指数在水质评价中的应用[J].武汉理工大学学报,2001,23(8):61~65.
- [6] Lu Rwei Shan, Hu Jin Yiao, Lo Shang Lien. Alternative tool to reservoir eutrophication index: Fuzzy synthetic evaluation [A]. Proceedings of the 1998 12th International Conference on Computational Methods in Water Resources, CMWR XII' 98 [C]. Greece: crete.
- [7] Sapanca, Akkoyunlu A, Ileri R. Evaluation of eutrophication process in Lake [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2003, 19(6):576~602.
- [8] Wu Ray Shyan, Liu Wen Cheng, et al. Eutrophication modeling in Shihmen Reservoir, Taiwan [J]. Journal of Environmental Science and Health, 2004, 39(6):1455~1477.
- [9] Jin Kang Ren, James R Thomas, Lung Wu Seng, et al. Assessing Lake Okeechobee eutrophication with water quality models [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1998, 124(1):22~30.
- [10] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第四版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002.248~370.
- [11] 张朝生,章申,何邦建.长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究[J].地理学报,1997,52(2):184~192.
- [12] 郑一,王学军,等.天津地区表层土壤多环芳烃含量的中尺度空间结构特征[J].环境科学学报,2003,23(3):311~316.
- [13] 胡著邦,徐建民,全为民.模糊评价在湖泊富营养化评价中的应用[J].农业环境保护,2002,21(6):535~536,539.
- [14] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛,等.中国湖泊富营养化[M].北京:中国环境科学出版社,1990.185~193.
- [15] 彭祖赠,孙温玉.模糊数学(Fuzzy)及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2002.142~162.