

云贵高原湖区湖泊营养物生态分区技术方法研究

姜甜甜^{1,2}, 高如泰¹, 席北斗^{1*}, 夏训峰¹, 许其功¹, 杨志新², 张慧^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071001)

摘要:提出一种基于主成分分析、聚类分析、判别分析和空间自相关的分区模型,用于对云贵高原湖区湖泊营养物生态分区的研究.首先运用主成分分析方法对众多指标进行了降维综合处理,产生彼此互补相关又能综合反映湖区情况的4个新指标,累计贡献率达到93.69%,具有充分的代表性,构建了云贵高原湖区湖泊营养物生态分区指标体系.在此基础上,根据各区域新指标值,结合聚类模型初步将湖泊流域分为5类,再利用判别分析完成非湖泊流域的类别判别,最后运用空间自相关分析方法,按聚类结果进行全局自相关分析, Moran's I 为 0.32 > 0, 且检验值 Z 值为 68.2, 远大于临界值(显著水平 1% 所对应的临界值 2.58), 表明聚类结果与空间位置具有显著相关性,之后运用局部自相关对区域各因素的主成分综合得分的空间分布格局进行了量化分析,揭示了零散分类区块在空间地域分布上的关联和差异,根据关联结果完成最终的分区.结果表明,利用此分区模型可以尽量避免人为因素,得到更为客观的分区结果,具有良好的适应性和可行性,可为探索适合我国湖泊营养物生态分区的指标体系和分区技术方法,完成全国湖泊营养物生态分区和科学地制定我国湖泊营养物基准和富营养化控制标准提供技术支持.

关键词:湖泊营养物;分区技术;主成分分析;聚类分析;判别分析;空间自相关

中图分类号:X321 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)11-2599-08

Study on Ecoregion Techniques of Lake Nutrients in Yunnan-Guizhou Plateau Lake Regions

JIANG Tian-tian^{1,2}, GAO Ru-tai¹, XI Bei-dou¹, XIA Xun-feng¹, XU Qi-gong¹, YANG Zhi-xin², ZHANG Hui^{1,2}

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agriculture University, Baoding 071001, China)

Abstract: The primary objective of this research is to present an ecoregion model based on the principle components analysis (PCA), the cluster analysis (CA), the discriminant analysis (DA) and the spatial autocorrelation analysis (SAA), which were applied to establish the ecoregion of lake nutrients in Yunnan-Guizhou Plateau Lakes. First, the principle components analysis method was used not only to reduce the dimensionality of the feature space, but also to deal with new indexes. The accumulation contribution ratio of the four new indexes achieved 93.69%, which had the full representation. These complementary indexes which reflect the conditions of lakes were helpful to establish the index system of ecoregion of lake nutrients in Yunnan-Guizhou Plateau Lakes. Second, initial classification of lake drainage area was accomplished by new indicator values and cluster analysis which contained five classes, and then the categories of non-lake drainage area could be identified by the discriminant analysis. Finally, the cluster result was carried on the global statistics, Moran's I was 0.32 which was higher than 0, and the examination value Z was 68.28 which was higher than marginal value (remarkable level 1% correspond 2.58), it was indicated that the cluster result and the space position had the remarkable relativity, afterward spatial distribution pattern of the region was achieved by the quantificational analysis about over score of principle components and application of local spatial autocorrelation method. Then the ecoregion of lake nutrients was accomplished by the association and difference between different districts of the scattered regions' spatial character. These results indicated that the ecoregion model initiated in the paper was appropriate and feasible to receive objective results and avoid artificial factors. Also it has provided a new method to explore the index system and techniques about the ecoregion of lake nutrients. Scientifically, the model was in favor of the foundation of lake nutrient criteria and eutrophication control standards in China.

Key words: lake nutrients; zoning technology; principle components analysis; cluster analysis; discriminant analysis; spatial autocorrelation

国内外的现状调查结果表明,在全球范围内 30% ~ 40% 的湖泊遭受不同程度富营养化影响,我国近年来湖泊富营养化发展趋势,从 20 世纪 80 年代后期的 41% 上升到 90 年代后期的 77%^[1]. 为此,有的国家在营养物生态分区基础上制定了湖泊营养物评价基准和标准,如美国;有的国家、地区直接为

湖泊营养化评价制定标准或基准,如日本、韩国等;

收稿日期:2009-12-17;修订日期:2010-05-10

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001)

作者简介:姜甜甜(1983~),女,硕士研究生,主要研究方向为水环境管理, E-mail: jiangtiantian1983@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xibeidou@263.net

而我国则是就地表水统一制定的水质标准. 由于国家面积大小、地区差异等原因, 在生态分区基础上进行水生态分区研究较多^[2-9], 再进行湖泊营养状态分区评价标准和基准研究的就很少. 迄今为止, 世界上比较有影响、较为完善的、科学的、有借鉴意义营养状态分区的国家主要是美国^[10].

依照国外经验, 湖泊营养物生态分区具有极其重要的作用, 是开展湖泊水环境“分区、分类、分级、分期”综合管理的先决条件. 湖泊营养物生态分区是湖泊营养物基准和富营养化控制标准制定的基础, 是对湖泊富营养化进行综合评估、预防、控制和管理科学基础和重要手段. 然而, 到目前为止, 我国还缺乏统一的湖泊营养物生态分区技术方法体系, 对现有水生态区域的划分多以水体现状使用功能和行政区为基础进行^[11-13], 迫切需要根据不同区域特点和不同类型的湖泊, 科学地进行分区, 并在此基础上制定出具有针对性的不同分区湖泊营养物基准和富营养化控制标准及其分级技术体系.

本研究以云贵高原湖区作为全国湖泊营养物生态分区的切入点, 拟建立云贵高原湖区湖泊营养物生态分区指标体系, 探索研究分区技术方法, 完成云贵高原湖区湖泊营养物生态分区, 以期探索适合我国湖泊营养物生态分区的指标体系和分区技术方法, 完成全国湖泊营养物生态分区和科学地制定我国湖泊营养物基准和富营养化控制标准提供一定的基础.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

云贵高原地处低纬度, 海拔高, 又受季风气候制约的综合影响, 形成四季温差小、干湿分明、气候资源垂直变化显著的低纬高原季风气候. 太阳辐射年 $\perp$ 经向分布差异大, 西部大于东部, 东部为 $3\,400 \sim 3\,800 \text{ MJ/m}^2$, 西部为 $5\,000 \sim 6\,000 \text{ MJ/m}^2$. 热量垂直分布差异明显, 从河谷至山顶分别出现热带、亚热带、温带、寒带的热量条件. 热量资源的地区分布南多北少. 热量资源年内各月分配相对均匀, 冬季温暖, 夏无酷暑. 受西南季风的影响, 形成冬干夏湿、干湿季节分明水分资源特征. 夏半年暖湿气流沿着山间河谷地吹向内陆, 滇西南、滇南边境、怒江河谷以及南北盘江、都柳江上游的部分地区, 全年降水量在 $1\,500 \sim 1\,750 \text{ mm}$ 之间, 高黎贡山西南迎风坡的盈江达到 $4\,000 \text{ mm}$ 以上, 但楚雄、大理仅为 $500 \sim 700 \text{ mm}$. 4~10月降水量占全年总降水量的 $85\% \sim$

95% . 雨季常出现山洪暴发, 发生洪涝灾害; 而旱季时间长, 季节性干旱, 特别是春旱十分严重. 贵州东部因受东南季风影响, 各季较湿润.

由于东面和西南受海洋性季风的影响较大, 气候比较湿润, 而高原的中心则具有比较干热的高原型亚热带气候特点. 因此, 云贵高原的 $\perp$ 水平分布在黔中高原(贵阳)一带分布黄壤, 而滇中高原(昆明)一带则为红壤, 往西至下关逐渐过渡至褐红壤, 继续往西南, 在芒市则分布砖红壤性红壤.

云贵高原分布着广泛的岩溶地貌, 是喀斯特地形. 它是石灰岩在高温多雨的复杂化学反应条件下, 经过漫长的岁月, 被水溶解和侵蚀而逐渐形成的. 地下和地表分布着许多溶洞、暗河、石芽、石笋、峰林等. 在山岭之间分布着许多小盆地. 盆地内土层深厚而肥沃, 是农业比较发达的地方, 高原上的村镇也都集中在这里.

据土地利用详查资料汇总^[14], 云贵高原地区耕地有 $1\,325.4 \text{ 万 hm}^2$, 园地 23.55 万 hm^2 , 林地 $3\,324.11 \text{ 万 hm}^2$, 牧草地 369.38 万 hm^2 , 居民工矿用地 116.68 万 hm^2 , 交通用地 36.55 万 hm^2 , 水域 103.60 万 hm^2 , 未利用地 $1\,287.53 \text{ 万 hm}^2$. 旱地与水田之比为 $7:3$, 有林地和非林地之比为 $67:33$. 在土地利用类型中, 林地占绝对优势, 是我国第二大天然用材林基地; 其次是耕地, 主要分布在海拔 $3\,800 \text{ m}$ 以下的河谷坝区及坡度小于 25° 的丘陵山地上; 连片牧草地主要集中在云南东北部、贵州的南部、北部和西部的边缘地区, 其次大多数草场呈零散分布在河谷、盆地、山前丘陵山地以及林地和农地中.

本区湖泊总面积为 $1\,200 \text{ km}^2$, 湖泊率为 0.3% , 多为构造湖. 湖水依靠地表水和地下水补给. 区内湖泊分属金沙江和 $\perp$ 江水系, 入湖支流众多而出湖河道很少, 甚至只有一条. 湖泊尾间落差大, 水力资源丰富, 湖水换水周期长, 生态系统较脆弱. 湖泊含盐量不高, 水色清澈, 并以风景秀丽而名闻中外. 主要湖泊有滇池、洱海、抚仙湖、泸沽湖、阳宗海和程海等, 其中抚仙湖深 155 m , 为我国第二深水湖. 贵州省的草海是我国最大的岩溶湖.

1.2 研究方法

1.2.1 分区依据

湖泊营养物生态分区是针对湖泊生态系统管理的需要而提出的, 是以湖泊流域内不同尺度的湖泊生态系统及其营养物影响因素为研究对象, 应用格局与尺度等原理与方法, 对湖泊及其周围陆地所进行的区域分类方法, 其目的是反映湖泊营养物在不

同空间尺度下的分布格局. 与一般意义上的生态分区和水文分区等自然地理分区不同, 湖泊营养物生态分区过程要更多考虑到自然因素与湖泊营养物之间的因果关系, 力图通过不同尺度下的地形、气候、水文以及地貌类型等原因要素来反映湖泊营养物的基本特征.

1.2.2 分区最小单元

从分区的管理目的出发, 分区不宜打破小流域尺度, 即以湖泊流域为最小分区单元. 从分区指标来看, 多数都可以用湖泊流域作为最小图斑单位.

1.2.3 数据来源

分区要求大量的空间数据支撑. 其中小流域边界图是根据国家地理基础数据库的 1:250 000 分辨率为 86.18 m × 86.18 m 的云贵高原区域的 DEM 图, 用 ArcGIS 空间分析模块中的水文分析来进行流域边界提取而获得的. 温度和降雨量数据采集自相关的气象站点, 土壤质地数据来自《中国土种志》和地方土种志, 土地类型数据来自云南和贵州两省的土地利用现状图(1:25 万), 由于此次分区以自然因素的影响为主, 因此氮磷负荷是通过吸附态氮磷模拟计算获得.

1.2.4 分区指标体系建立方法

在 SPSS13.0 中应用主成分分析建立湖泊营养物分区指标体系. 优点是可以消除原始指标之间的相关而给聚类分析带来的偏差, 避免信息重叠, 形成新的少量综合指标. 其中氮磷负荷是通过吸附态氮磷模拟计算获得. 计算公式如下:

$$LS_{ki} = a \cdot CS_{ki} \cdot X_{ki} \cdot TS_{ki} \cdot Sd \quad (1)$$

式中, a 是单位换算常数; LS_{ki} 是颗粒态氮磷污染物负荷 ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$); CS_{ki} 是 Ⅰ 固 态 氮 磷 污 染 物 浓 度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); X_{ki} 是土壤流失量 ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$); TS_{ki} 是污染物富集比; Sd 是流域泥沙输移比.

1.2.5 分区技术方法

以 SPSS13.0 和 ArcGIS9.2 等技术为平台, 综合运用聚类分析、判别分析、空间自相关等定量分析法对湖区湖泊营养物生态分区技术进行研究(图 1).

聚类分析是多元分析中研究物以类聚的一种方法, 可以避免普通分类中的主观随意性, 应用聚类分析根据主成分分析得分建立的综合指标体系, 进行湖泊流域聚类.

判别分析可以根据表明事物特点的变量值和它们所属的类, 求出判别函数, 是根据判别函数对未知所属类别的事物进行分类的一种分析方法. 此方法基于湖泊流域聚类的结果, 对其他非湖泊流域进行

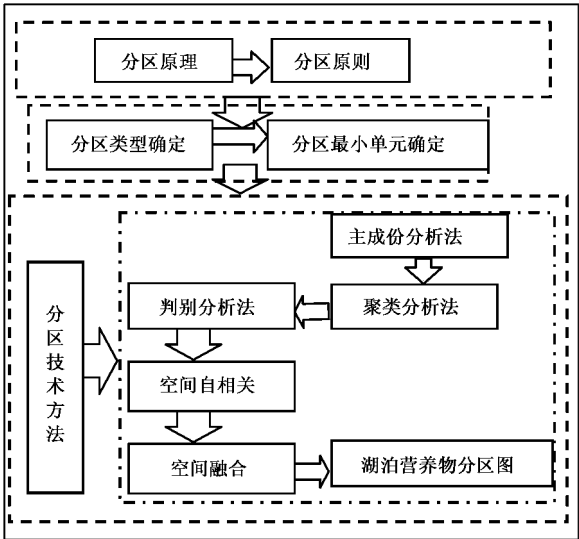


图 1 湖泊营养物生态分区技术方法
Fig. 1 Sketch map of ecoregion techniques of lake nutrients

判别分析, 以完成整个流域区域的类别归属分析.

空间自相关是指研究对象和其空间位置之间存在的相关. 它是检验某一要素的属性值是否显著地与其相邻空间点上的属性值相关联的重要指标, 可以分为正相关和负相关两类, 正相关表明某单元的属性值变化与其相邻空间单元具有相同变化趋势, 负相关则相反. 具体有两类空间数据分析方法, 一类为全局统计(global statistics), 是对属性值在整个区域的空间特征的描述. 另一类为局域统计(local statistics), 来衡量每个空间要素属性在“局部(一般为相邻)”的相关性质. 表示全局空间自相关的指标和方法很多, 主要包括连接统计 Moran's I ^[15], Geary's C ^[16] 和 Getis' G , 其中常用的是 Moran's I . 本研究全局统计用 Moran's I , 局域统计用 Local Moran's I .

Moran's I 系数取值在 $[-1, 1]$ ^[17] 之间. 如果 I 为正, 则区域变量在空间分布上呈现正的空间相关性; 为负, 则反之. 其公式如下:

$$I = \frac{n \cdot \sum_i \sum_j w_{ij} \cdot (x_i - \bar{x}) \cdot (x_j - \bar{x})}{\sum_i \sum_j w_{ij} \cdot \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

(其中 $j \neq i$)

式中, n 为研究区域内不规则空间单元的个数, x_i 和 x_j 分别表示某现象 x 或某属性特征 x 在空间地域单元 i 和 j 上的观测值, $\bar{x}$ 是研究对象 x 的平均值, w_{ij} 是空间权重矩阵. 空间权重矩阵 w_{ij} 的确定有多种方法. 采用距离标准构建, 即对于给定的距离 d , 当区

域 j 和区域 i 之间的距离小于 d 时,空间权重值 w_{ij} 为 1,否则为 0.

对于计算结果进行标准化可以更好地判断相关的正负性和显著性.其标准化形式 $Z(I)$ 采用 Moran's I 的数学期望 $E(I)$ 和方差 $\text{VAR}(I)$ 进行计算^[18]:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (3)$$

$$E(I) = -\frac{1}{n-1} \quad (4)$$

$$\text{VAR}(I) = n^2 w_1 - n w_2 + \frac{3w_0^2}{w_0(n^2 - 1)} \quad (5)$$

其中 w_0, w_1, w_2 分别为:

$$w_0 = \sum_i \sum_j w_{ij} \quad (6)$$

$$w_1 = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j (w_{ij} + w_{ji})^2 \quad (7)$$

$$w_2 = \sum_i \left(\sum_j w_{ij} + \sum_j w_{ji} \right)^2 \quad (8)$$

局域空间相关性指标的计算公式如下:

$$I_i = n \cdot (x_i - \bar{x}) \cdot \sum_{j \neq i} w_{ij} \cdot (x_j - \bar{x}) \quad (9)$$

$$I_i = z_i \sum_{j \neq i} w_{ij} z_j \quad (10)$$

式中, z_i, z_j 是观测值的标准化形式(平均值为 0, 标准差为 1),空间权重矩阵 w_{ij} 是行标准化形式.因此,值由 z_i 和其相邻接区域观测值的平均值确定.

应用空间自相关分析完成对零散的区块生态区归属的判定.

2 分区技术方法应用

2.1 分区指标体系建立

2.1.1 基础指标选择

指标的选择是分区的基础与关键,要与分区对象及其等级层次保持一致.美国营养物生态分区首先是选取 4 个区域性特征指标为基础对美国水生态区进行划分,即土地利用、 NDVI 、潜在植被和地形,它们是影响水生态系统特征、能够反映水生态与周围陆地生态相关关系的关键性因素^[19].然后,USEPA 根据影响营养物负荷的各种因素:如日照、气候、物理扰动、沉积物负荷、基岩类型和海拔高度等,在已划分的三级水生态区的基础上,将第三级水生态区归纳为 14 个生态集中区^[20].由于这些环境要素之间存在着相互关联性,在不同的区域这些因素的相互作用不同,因此,需要对其进行具体分析,从而筛

选出主导性指标进行具体分区.

云贵高原的亚热带湿润季风气候的雨热同期、降水季节分配不均,是造成该区湖泊环境问题的主要自然因素.夏季降水集中且强度大,容易引起洪涝灾害;夏季梅雨之后的副热带高压控制期间,气温高,降水少,往往造成湖泊底泥营养物质分解加快,水体严重缺氧,加剧湖泊的富营养化.冬春季节降水偏少,对入湖污水的稀释作用降低,导致枯水期水体中的总氮、总磷含量升高.自中新世晚期以来,云贵高原新构造运动强烈,夷平面、高山深谷和盆地等交错分布.一些较大的湖泊都分布于断裂带和各大水系的分水岭地带并沿褶皱断裂构造方向排列,多为构造湖,以其海拔较高,湖岸陡峻,面积较小而湖水较深为其主要特征.因此,区域内的气候、地貌、 NDVI 类型及植被的类型差异对湖泊水文、形态等物理条件的影响,导致了不同的湖泊生境条件,造成湖泊生态系统的组成与结构不同,进而影响了湖泊营养物的状况.

流域营养物质输移以水文循环为其载体,气候条件是驱动水文循环的关键.此外,流域营养物质输移还受地形地貌、土地利用等多因子驱动.在人类活动日益增强的时期,人类活动通过改变流域下垫面的地形、地貌、 NDVI 、植被等条件,概括为土地利用和土地覆被的变化,影响流域营养物质的输移.云贵高原山地面积约占全区土地面积的 94%.山地中喀斯特占全区土地面积的 30%^[14],溶蚀作用强烈,水土流失严重.土地利用率低且不合理,过度砍伐,陡坡开垦及过度放牧使得水土流失加剧,而水土流失携带的氮磷元素是导致受纳水体(如湖泊、河流等)发生污染的重要原因.

因此,借鉴美国分区经验并结合实际情况,选取气候、海拔高度、 NDVI 、植被和土地利用方式等 5 个因素以综合反映这种区域内的自然要素的影响规律,而对于云贵高原湖泊营养物生态分区来说,水土流失引发的吸附态氮磷负荷更成为与一般自然地理分区加以区别的显著标志指标.综上所述,云贵高原湖区湖泊营养物生态分区的指标如表 1 所示.

2.1.2 指标数据的处理

按照小流域边界图,将湖泊所在的流域称为湖泊流域,其他部分称为非湖泊流域.数据以小流域为单位进行建库.温度、降水量、高程是通过获得数据建立栅格图,在 ArcGIS 中按小流域进行区统计获得指标值.以土壤质地数据粉黏比数据建立栅格图,按流域进行区统计获得土壤质地指标值.植被类型是

通过植被覆盖度做代表,栅格图运算将林地与农用地所占比例相加拟合植被覆盖度,流域平均值作为植被类型指标值.土地利用类型通过农用地所占比例作为代表,栅格运算获得指标值.认为湖泊所处流域的氮磷为流入湖泊的氮磷量,流域氮磷负荷是通过氮磷负荷计算公式估算.

表 1 云贵高原湖区湖泊营养物生态分区的指标体系
Table 1 Indicator system of ecoregion of lake nutrients in Yunnan-Guizhou plateau lake regions

主要因素	分区指标	指标描述
气候	温度、降水量	反映水热条件对湖泊水生态系统和富营养化的影响
海拔高度	高程	表征水力物理参数,反映地形状况
土壤	土壤质地	反映湖泊底质及湖泊流域特点
生态系统	植被类型	体现陆地生态与湖泊生态的联系
人类活动影响	土地利用类型	体现湖泊生态系统人为干扰压力
营养物	氮负荷、磷负荷	反映不同区域湖泊营养物的分布情况

2.1.3 指标体系的建立

将原始数据标准化以避免由于各指标量纲不同而造成的影响,之后进行主成分分析,应用主成分分析可以消除原始指标之间的相关而给聚类分析带来的偏差.经过主成分分析,原有指标被浓缩为 4 个综合指标,分别代表了营养物状况,土地利用和植被状况,气候,地质海拔等 4 个方面.这 4 个综合指标就形成了一个新的指标体系.这些新指标不仅对信息起着浓缩作用,累计贡献率达到 93.69%,具有充分的代表性,还具有不相关的性质,这就使得在研究复杂的问题时避免了信息重叠所带来的虚假性,简化了系统结构,抓住了主要矛盾.之后利用 4 个方面综合指标的主成分得分值来代表 4 个新指标值,用以在下一步进行定量分析中进行使用.

2.2 分区方法应用

2.2.1 聚类方法应用

首先按照主成分分析得分形成的新指标的指标值,进行系统聚类分析,根据系统聚类的聚合系数,判断出最佳的分类数为 5 类.在具体操作中,由于方法的不同分类结果也会有差异,选择了类平均法、最长距离法、最短距离法等进行尝试,并进行了对比,综合各方法,发现分为 5 类较为合适,且应用两步聚类方法进行聚类分析,所得结果相对合理,进而得到分类结果.

结果表明,根据主成分得分进行聚类分析,最终的分类划区结果反映的是样本间的整体系统差异,而非个别指标上的异同,这正符合湖泊营养物分区的综合性原则.

通过这一步操作完成含有湖泊的流域的分类,如图 2 所示,图例中用 0 表示的白色区域为非湖泊流域,含湖泊流域被分为 5 个类别.

2.2.2 判别分析方法应用

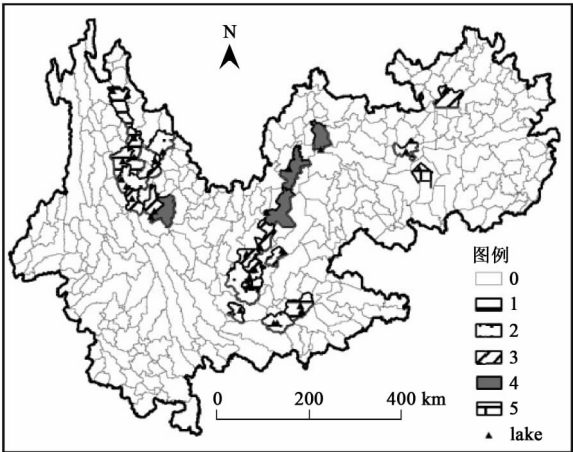


图 2 两步聚类湖泊流域分类
Fig. 2 Classified map of two-step cluster of lake basin

通过聚类分析手段,对云贵高原湖区的含湖泊流域已经进行了类别划分,在此基础上,进一步采用判别分析方法对非湖泊区的流域的类别进行确定,达到分区的要求.

首先,对聚类后的类别数据和之前各区域的分区指标数据按照判别分析数据形式进行整理.然后,分别采用典型判别和逐步判别 2 种判别分析方法对非湖泊流域地区进行了分区类别的判定.通过对 2 种方法得到的结果图进行分析比较,可以看到,应用逐步判别的方法得到的分区更加零散,达不到理想的效果,因此本研究采用典型判别的方法进行操作.通过判别分析以后,所有的区域(湖泊流域和非湖泊流域)都得到了类别的划分(图 3).

从图 3 可以看到,所有流域被分为 5 个类别,整体上看,大部分相同类别的区域是连续成区片分布的,具有一种整体的趋势,但还存在一些零散不连续的区块,不能完全满足分区要求.前人所做的研究大

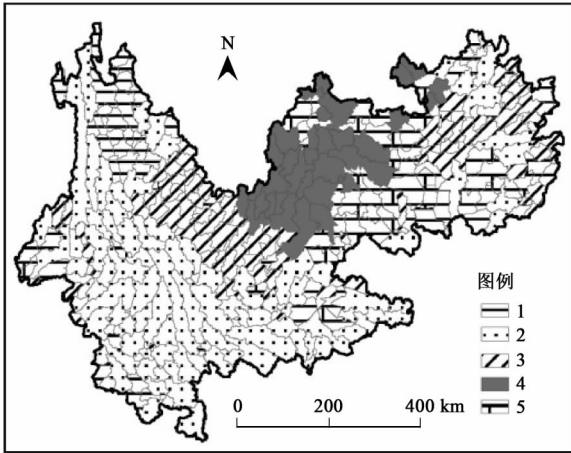


图3 非湖泊流域判别分析分类

Fig.3 Classified map of discriminant analysis of non-lake basin

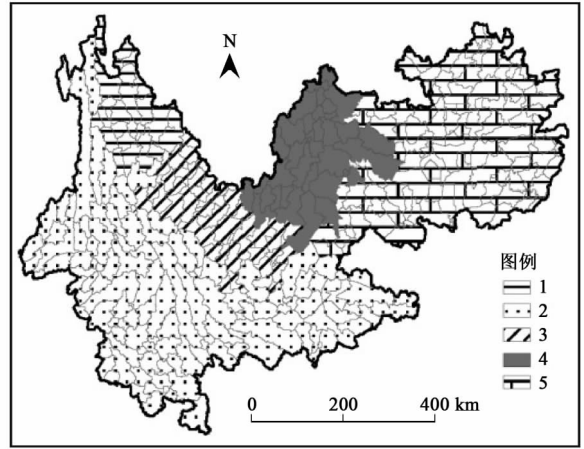


图4 空间自相关分析分类

Fig.4 Classified map of spatial auto-correlation analysis

多采用一些专家判定等较为主观的方法来进行后期处理,以得到较为理想的结果^[3~6,19,21].

由于本研究的对象均为空间数据,如果仅从经典统计学的角度来解释具有明显空间结构的数据,不但可能损失大量有用的信息,而且可能得出模糊或不合理的结论,给实验结果的分析、应用带来困难.因此,本研究尝试使用空间相关性来解决这一问题,以期所得到的结果更加客观,能较少添加主观人为影响.

2.2.3 空间自相关分析方法应用

在 ArcGIS9.2 中,运用空间统计功能中的分析模块进行空间自相关的分析.首先按聚类结果进行全局自相关分析,根据分析结果可知,Moran's I 为 0.32 > 0,且检验值 Z 值为 68.28,大于显著水平 1% 所对应的临界值 2.58,表明聚类结果与空间位置具有显著相关性.

对流域指标的主成分综合得分进行计算,综合得分反映的是流域的综合情况,以综合得分为指标,进行局部空间自相关的分析,得到局部自相关系数和检验值,以此作为判断零散区块归属的基础.经空间聚类分析后,零散区块的归属得到较为客观的判定,相同类别的区块在空间上基本上是连续的,见图 4.

2.2.4 空间融合

利用 ArcGIS9.2 中的空间融合功能对小流域图中的相同类别流域进行融合,根据云贵高原实际边界图对小流域进行叠加、合并、融合和校准,得到最终的分区图(图 5),研究区域被分为 5 个区域.

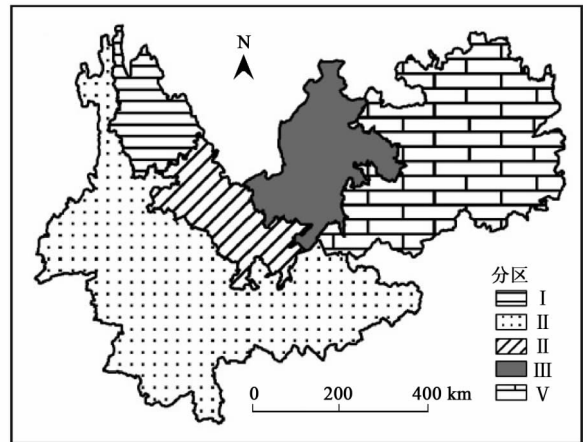


图5 云贵高原湖区湖泊营养物生态分区

Fig.5 Ecoregion map of lake nutrients in Yunnan-Guizhou plateau lake regions

3 讨论

科学选取指标是分区的前提,指标不仅要能够准确反映出湖泊营养物区域差异特性,而且还要具有可操作性,便于运用定量化方法进行分区,得到分区结果和分区标准.本研究增加和删减任何一个指标都会使得分区结果发生改变.对于湖泊营养物生态分区的众多相关性指标来说,在指标初选的基础上,对其进行更深一步的指标优选就显得极为重要.优选可考虑先对湖区区域差异性调查获取的多年多指标数据进行相关分析,识别指标之间的相关性,并根据专家判断识别具有代表性的独立性指标;随后基于层次聚类分析进行空间尺度分类分析;之后利用后退式判别分析方法进行指标降维,从而验证聚类分析结果和识别表征空间分异性的显著性指标;

最终结合专家系统归纳出最终优选指标.但是,在不同的区域这些因素的相互作用不同,因此需要对其进行具体分析,才能判断出主要的影响要素.此次本研究着重于分区方法的探索,对于分区指标的选取及合理性还有待于更深一步探讨.

前人对于分区方法多是以专家综合判断为主,使得分区结果具有一定的主观性,并且难以重复.定量分析分区方法很大程度上避免了人为因素的主观性,它是用高等数学和数理统计的方法进行分区,主要有聚类分析法、判别法、系统评价层次分析法、主成分分析法、人工神经网络和 GIS 空间分析法等^[22-26].但单独使用某种定量方法也具有自身缺陷:聚类分析法只是通过数量统计方法最后客观地形成一个分类体系^[28,29],不能完全满足分区要求;判别分析法是根据区间的同异性和区内相似性原理建立的,虽然定量的考虑了多因子的综合作用,可操作性强,但是难免会出现有个别样本跨越区界,出现“跳区”现象^[28];层次分析法权重的确定主观干扰因素较多,专家评判要花费大量的人力物力;主成分分析法必须利用一定的分类方法才能确定科学可靠的分区方案^[22].本研究运用聚类、判别及空间自相关分析的组合方法,对分区方法进行了探索,弥补了单一定量分析方法的不足,可重复运用,分区结果更为客观合理.由于分区的指标尚有商榷之处,造成分区结果不够完善,因此暂未对分区结果进行命名和区域分析.

湖泊营养物生态分区作为一种新的管理单元,可以为湖泊富营养化的治理及流域环境管理提供重要手段.从国家层面出发,可以通过实行湖泊营养物生态分区这一管理方式,从上到下贯彻环境保护资源规划的科学管理目标和措施,以分区为基础科学地制定具有区域差异性的湖泊营养物基准和富营养化控制标准,为湖泊富营养化的评估、预防、控制和管理奠定科学基础,建立湖泊环境质量统一监控,减少决策的管理与实施过程盲目性,为流域生态环境可持续发展与管理决策提供技术支持.湖泊营养物生态分区概念和方法都比较新,不同的学科和学者对这一概念尚有不同的解释和理解,而将其作为一项管理策略去执行,用于湖泊污染控制和资源管理,方法本身还需要进一步进行深入地研究.

4 结论

(1) 湖泊营养物生态分区是湖泊管理的重要单元,划分基础在于对湖泊营养物与自然要素之间的

影响关系的识别.通过对影响因素的筛选和评价,来认识人类活动对湖泊生态系统及湖泊营养物的影响机制与关键所在,以求更好地保护湖泊生态环境.

(2) 提出一种基于主成分分析、聚类分析、判别分析和空间自相关的分区模型,对分区方法进行了探索,基本实现了定量化的分区,并可重复运用,很大程度上避免了人为因素的主观性,并以云贵高原湖区为例,完成了湖泊营养物生态分区的尝试.为探索适合我国湖泊营养物生态分区的指标体系和分区技术方法,完成全国湖泊营养物生态分区和科学地制定我国湖泊营养物基准和富营养化控制标准提供技术支持.

参考文献:

- [1] 马经安,李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 12(6): 575-578.
- [2] Isaac B. The conceptual development and use of ecoregion classifications[D]. Oregon: Oregon State University, 1999.
- [3] Omerik J M, Gallant A L. Defining regions for evaluating environmental resources [A]. In: Proceedings of the global natural resource monitoring and assessment symposium, preparing for 21st century[C]. Venice, Italy:1990. 936-947.
- [4] Davies P E. Development of a national river bioassessment system (AUSRIVAS) in Australia [A]. In: Wright J F, Sutcliffe D W, Furse M T. Assessing the biological quality of fresh waters-RIVPACS and other techniques[C]. Cumbria, U K: Freshwater Biological Association, 2000. 113-124.
- [5] Hemsley F B. Classification of the biological quality of rivers in England and Wales[A]. In: Wright J F, Sutcliffe D W, Furse M T. Assessing the biological quality of freshwaters-RIVPACS and other techniques [C]. Cumbria, U K: Freshwater Biological Association, 2000. 55-69.
- [6] Austrian Standards ONORM M 6232. Guidelines for the ecological survey and evaluation of flowing surface water[S]. Vienna: Austrian Standards Institute, 1997. 38.
- [7] Moog O, Kloiber A S, Thomas O, et al. Does the ecoregion approach support the typological demands of the EU ' Water Frame Directive' [J]. Hydrobiologia, 2004, 516(1-3): 21-33.
- [8] George E H, Philip L P, David J M, et al. A quantitative approach to developing regional ecosystem classification [J]. Ecological Applications, 1996, 6(2): 608-618.
- [9] Wells F, Peter N. An examination of an aquatic ecoregion protocol for Australia [R]. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (ANZECC), 1997.
- [10] 周保华, 潘恒健, 谷长强. 湖泊水库营养状态分区研究进展[J]. 环境与可持续发展, 2006, (3): 10-13.
- [11] 王超, 朱党生, 程晓冰. 地表水功能区划分系统的研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 7-11.
- [12] 夏青. 水环境保护功能区划分[M]. 北京: 海洋出版社, 1989.
- [13] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 水生态区划方法及其在中国的应用前

- 景[J]. 水科学进展, 2007, **18**(2):293-300.
- [14] 楼惠新. 云贵高原土地利用[J]. 国土与自然资源研究, 2000, (1):9-12.
- [15] Moran P A P. Notes on continuous statistic phenomena [J]. *Biometrika*, 1950, **37**(1/2):17-23.
- [16] Geary R C. The contiguity ratio and statistical mapping[J]. *The Incorporated Statistician*, 1954, **5**(3):115-145.
- [17] Ord K J, Getis A. Testing for local spatial autocorrelation in the presence of global autocorrelation [J]. *Journal of Regional Science*, 2002, **41**(3):441-432.
- [18] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, **27**(2):93-115.
- [19] Omernik J M. Ecoregions of the conterminous United States (Map Supplement) [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1987, **77**(1): 118-125.
- [20] United States Environmental Protection Agency. Nutrient criteria technical guidance manual lakes and reservoirs [EB/OL]. http://www.water.epa.gov/pd/criteria/everglades_epa2000.pdf, 2000-04.
- [21] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域水生态分区研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(6):911-918.
- [22] Thierfelder T K E. Orthogonal variance structures in lake water quality data and their use for geo-chemical classification of dimictic, glacial/boreal lakes[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2000, **6**(1):47-64.
- [23] Annett W, Milada M, Jörg M. Hydromorphological assessment within the EU-WaterFramework Directive—trans-boundary cooperation and application to different water basins [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **603**:53-72.
- [24] Astrid S K, Rebi C N. The effect of taxonomic resolution on the assessment of ecological water quality classes[J]. *Hydrobiologia*, 2004, **516**: 269-283.
- [25] Otto M, Astrid S K, Thomas O, *et al.* Does the ecoregion approach support the typological demands of the EU 'Water Framework Directive'? [J]. *Hydrobiologia*, 2004, **516**: 21-33.
- [26] Anne L S, Seppo R S, Jannicke M, *et al.* Ecological threshold responses in European lakes and their applicability for the Water Framework Directive (WFD) implementation: synthesis of lakes results from the REBECCA project[J]. *Aquatic Ecology*, 2008, **42**: 317-334.
- [27] Jenerette G D, Lee J, Waller D W, *et al.* Multivariate analysis of the ecoregion delineation for aquatic systems[J]. *Environmental Management*, 2002, **29**(1): 67-75.
- [28] 吴启勋. 环境单元的模糊聚类分析[J]. *青海师专学报(自然科学)*, 2002, (5):44-46.
- [29] 宁龙梅, 王学雷, 朱明勇. 聚类分析在江汉湖群典型湖泊分类中的应用[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, **16**(1): 910-914.