

基于遥感反演参数与双约束空间聚类算法的 湖泊营养物生态分区

柯新利^{1,2}, 刘 曼², 邓祥征^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 咸宁学院资源与环境科学学院, 湖北咸宁, 437100;
3. 中国科学院农业政策研究中心, 北京 100101)

摘 要:中国湖泊营养物水平和富营养化效应存在显著区域分异特征,开展湖泊营养物生态分区研究,是实现湖泊分区控制的前提和基础。本文以云贵高原亚热带湿润区为案例区,通过遥感反演得到研究区域湖泊水体的叶绿素a(Chl-a)、总氮(TP)和总磷(TN)含量,从自然地理要素、生态系统和人类活动3方面建立指标体系;根据研究区域DEM数据划分小流域,将各指标因子投影到小流域;在小流域尺度上,采用数理统计方法定量分析各指标分别对Chl-a/P与Chl-a/N的作用,计算两种湖泊营养物生态分区评价分值;采用双约束空间聚类算法对小流域尺度上两种湖泊营养物生态分区评价分值共同进行聚类,形成湖泊营养物生态分区结果。研究发现:①通过遥感反演模型可以将少数呈点状分布的监测数据推演到面上,这在一定程度上弥补了有限的野外监测数据量难以支撑湖泊营养物生态分区的不足;②通过构建各指标因子分别与湖泊水体中Chl-a/P、Chl-a/N的定量关系,实现了湖泊营养物生态分区中湖泊水体微观指标与湖泊流域宏观指标的有机结合;③采用双约束空间聚类进行湖泊营养物生态分区,保证了分区结果在空间上的连续性和评价分值上的接近性;④根据自然地理条件、土地利用和人类活动强度的不同,将云贵高原亚热带湿润区分为4个区:北云南高原湖区、滇南河谷山原湖区、桂西-滇东-黔南岩溶湖区、贵州高原东北部湖区。本文提出的基于双约束空间聚类的湖泊营养物生态分区方法也可以作为其它地区乃至国家尺度湖泊营养物生态分区的借鉴。

关键词:湖泊营养物;生态分区;遥感反演;双约束空间聚类;云贵高原亚热带湿润区

目前在中国131个主要湖泊中,已达到富营养程度的湖泊有67个^[1],其中滇池、巢湖、太湖的氮、磷污染严重,富营养化问题突出。不同区域湖泊的富营养化成因、类型、演变过程以及物理、化学、生物学特性存在显著差异,中国湖泊营养物水平和富营养化效应具有显著的区域差异性。因此,有必要开展湖泊营养物生态分区,并针对不同的分区制定不同的控制标准和控制策略。

20世纪80年代,Omernik首先提出了水生态区的概念和划分方法,选择植被、土壤、土地利用和地形等构建指标体系开展美国水生态分区^[2]。以此为基础,USEPA于1987年提出了美国水生态功能区划方案^[3]。Hughes等根据俄勒冈州、俄亥俄州、阿肯色州、明尼苏达州不同生态区间所存在的水质及

其水生生物群落的自然差异,建立了水生态区、水质类型和鱼类群落的关系模型^[4]。Warry等认为水生态区是挑选受干扰程度最小的河流参考区域的有效手段^[5]。Bedford在湿地标准的研究中指出,水生态区是大尺度湿地管理和标准建立的基础^[6]。美国环境合作组织委员会(commission for Environment cooperation, CEC)研究人员将美国水生态区划方法扩展到了整个北美地区,认为水生态区对跨边界的流域水生态资源管理非常重要^[7]。此后,澳大利亚^[7]、英国^[8]和奥地利^[9]等国家纷纷开始水生态分区研究。2000年,欧盟颁布“欧盟水政策管理框架”,指出根据不同的水生态区确定水体的参考条件,以此评估水体的生态状况,并确定水体生态保护和恢复的目标^[10]。

收稿日期:2011-10; 修订日期:2012-02。

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001-03;2009ZX07106-001-07);国家科技支撑项目(2008BAC43B01)。

作者简介:柯新利(1977-),男,博士,主要研究方向为土地利用变化及其气候/生态效应。E-mail: kexl@igsrr.ac.cn

通讯作者:邓祥征(1971-),男,研究员。E-mail: dengxz.ccap@igsrr.ac.cn

315-323页

21世纪初,中国开始水生态分区的研究。为满足生态水量标准制定的需求,尹民等综合考虑水文要素与水生态特征开展水生态区划研究,提出生态水文区划方案^[12]。孟伟等研究了辽河流域自然要素及水生态特征,开展了辽河流域水生态分区^[13]。杨爱民等综合分析了水文分区、水资源分区、生态分区、综合自然分区等相关研究,界定了生态水文分区的概念^[14]。张璐等以南水北调中线一期工程受水区涉及的112个县(市、区)为单元,进行生态水文分区^[15]。梁静静等建立了一套水生态区划理论与方法,形成全国水生态区划方案^[16]。然而,到目前为止,中国有关湖泊水体营养物生态分区研究仍然比较少见。

本文以云贵高原亚热带湿润区为案例区,以湖泊营养物生态效应的区域差异为核心,从自然地理要素、生态系统和人类活动3个方面构建指标体系,借助遥感和地理信息系统技术,构建湖泊营养物生态效应与评价指标之间关系的定量模型,在小流域划分的基础上,计算各小流域湖泊营养物生态分区评价分值,采用双约束空间聚类方法实现湖泊营养物生态分区。

1 模型和方法

1.1 湖泊营养物生态分区方案

氮、磷是导致湖泊发生富营养化的重要营养盐,对湖泊藻类生长和蓝藻爆发具有重要影响^[17-18],叶绿素a(Chl-a)是衡量水体初级生产力和富营养化的基本指标^[19]。Kwang等^[20]研究表明,湖泊水体中的叶绿素a与总磷之比存在着明显的空间差异性以及湖泊水体中的叶绿素a与氮也存在着空间的差异性^[21],可以反映入湖营养物富营养化效应的区域分异,能作为湖泊营养物生态分区的标准。因此,可以用湖泊水体中Chl-a/P和叶绿素a与总氮的比值来反映湖泊营养盐生态效应的区域差异。本文以Chl-a/P和Chl-a/N为核心指标,根据各评价单元Chl-a/P和Chl-a/N的空间差异进行湖泊营养物生态分区,分区总体方案如图1所示。首先根据Landsat TM遥感影像,采用经验统计算法反演得到研究区域湖泊水体叶绿素a和TP、TN含量;利用研究区域DEM数据划分小流域,在小流域划分的基础上,将栅格尺度的Chl-a/P、Chl-a/N、土地利用、DEM、年降水、年积温、土壤含磷量及土壤含氮量数据等投影到小流域尺度上;栅格尺度的Chl-a/P和Chl-a/N

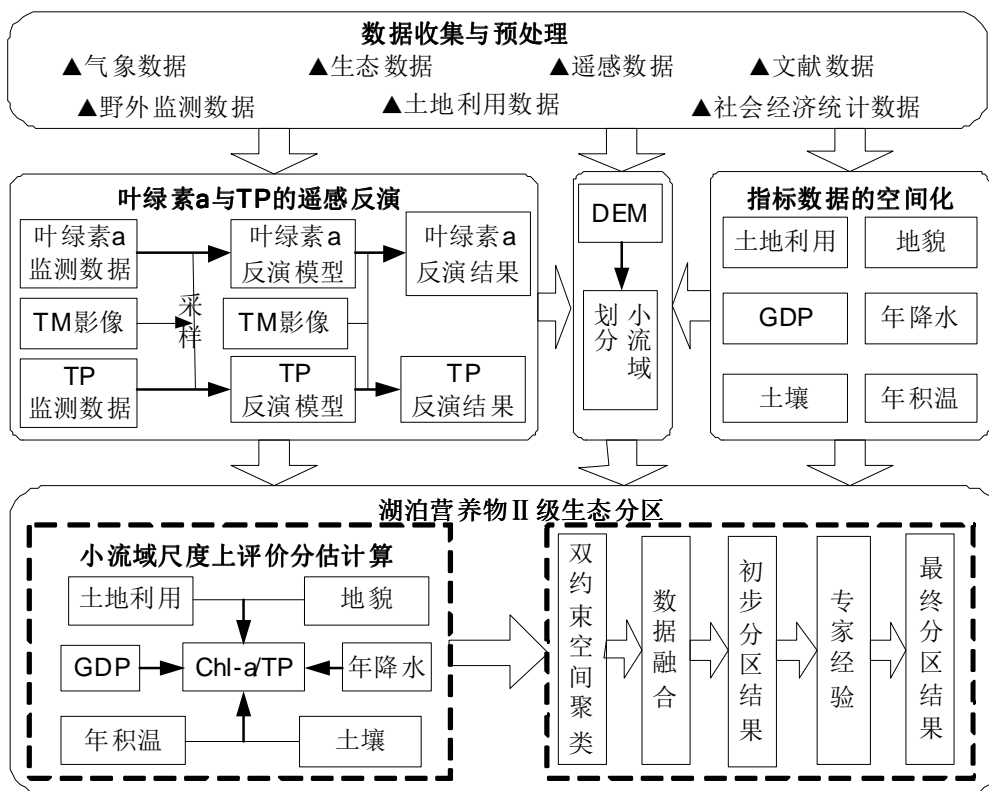


图1 基于遥感反演和双约束空间聚类的湖泊营养物生态分区方案

Fig.1 Scheme for lake nutrient ecology regionalization based on remote sensing inversion model and dual-constraint spatial cluster

投影到小流域尺度后,只有少数小流域上有值,对此采用线性回归方法分别构建Chl-a/P比值和土地利用、地貌、年降水、年积温、土壤含磷量、土壤含氮量、人口密度和GDP影响因素之间的关系,Chl-a/N和土地利用、地貌、年降水、年积温、土壤含磷量、土壤含氮量、人口密度和GDP影响因素之间的关系;在小流域尺度上,根据流域土地利用、DEM、年降水、年积温、土壤含磷量、土壤含氮量等因素对Chl-a/P的影响,流域土地利用、DEM、年降水、年积温、土壤含磷量、土壤含氮量等因素对Chl-a/N的影响,计算两种各评价单元湖泊营养物生态分区评价分值;采用双约束空间聚类方法在小流域尺度上对两种各评价单元湖泊营养物生态分区评价分值共同进行聚类分析,对聚类分析结果进行数据融合得到研究区域湖泊营养物生态分区初步结果;对初步分区结果中少数零散分布的小流域单元进行适当调整和合并,得到最终分区结果。

1.2 湖泊营养物生态分区指标体系

根据研究区域实际情况,参照美国流域水生态功能区划,以湖泊富营养化的营养和非营养驱动因子为主要依据,结合数据的可得性,本文选取自然地理要素、生态系统和人类活动3方面14个指标构建湖泊营养物生态分区指标体系(表1)。在自然地理要素方面,主要选取与湖泊营养物生态效应密切相关的年降水量、年均气温、高程、地貌类型、土壤含氮量和土壤含磷量作为评价指标;在生态系统方面,选择评价单元的林地比重、草地比重、水域比重

表1 湖泊营养物生态分区指标体系

主要因素	分区指标	指标描述
自然地理要素	年降水量/mm	反映水热条件对湖泊水生态系统和富营养化的影响
	年均气温/℃	反映水热条件对湖泊水生态系统和富营养化的影响
	高程/m	表征水力物理参数
	地貌类型	表征湖泊流域地貌特征
	土壤含磷量/(g/kg)	表征湖泊流域土壤特性
生态系统	土壤含氮量/(g/kg)	表征湖泊流域土壤特性
	林地比重/%	表征陆地生态系统与湖泊营养物生态特征的联系
	草地比重/%	表征陆地生态系统与湖泊营养物生态特征的联系
	水域比重/%	表征湖泊流域土壤特性
	未利用地比重/%	表征湖泊流域土壤特性
人类活动	建设用地比重/%	表征人类活动的剧烈程度及其对湖泊营养物生态分区的作用程度
	耕地比重/%	表征人类活动的剧烈程度及其对湖泊营养物生态分区的作用程度
	GDP/万元	表征人类活动的剧烈程度及其对湖泊营养物生态分区的作用程度
	人口密度/(人/km ²)	表征人类活动的剧烈程度及其对湖泊营养物生态分区的作用程度

和未利用地比重作为评价指标;在人类活动方面,选取建设用地比重、耕地比重、GDP和人口密度作为评价指标。

1.3 叶绿素a、TP和TN遥感反演模型的方法

以研究区TM影像为基础,采用经验统计算法反演Chl-a/P含量。经验统计算法是根据叶绿素a的光学吸收特性,将现场实测的叶绿素浓度值与光学测量值结合起来进行回归分析,以此计算叶绿素浓度值^[22]。赵碧云等利用滇池TM数据与准同步湖面监测资料,对滇池全湖水体叶绿素a浓度与不同波段遥感值的关系进行了关联度分析,并据此建立了基于TM图像的叶绿素a水质遥感反演模型^[23]。本文借鉴此方法反演出云贵高原湖区叶绿素a浓度值。目前对TP和TN遥感反演的研究很少,往往利用水体中不同物质之间的关系进行间接的遥感分析。为了计算出云贵高原湖区TP和TN的浓度值,本文采用经验统计算法,反演得到研究区域TP和TN的浓度值。

1.4 双约束空间聚类

聚类分析方法可以对多因素及其之间的相似性程度进行分析,来研究区域之间的差异,是定量研究地理事物分类问题和地理分区问题的重要方法,常见的聚类分析方法有系统聚类法、动态聚类法和模糊聚类法^[24]。传统聚类算法在处理空间对象时,仅仅将空间对象聚类成满足在空间域分布紧凑簇,而忽略空间对象在非空间域上分布特性^[25]。针对这一问题,周脚根提出了双约束空间聚类的算法^[26]。柯新利等在此基础上,采用广义Euclid距离替代空间几何距离作为双约束空间聚类的聚类统计量,实现了双约束空间聚类^[27]。在进行湖泊营养物生态分区时,不仅要使同一分区内各分区单元具有相似的地理特征,同时应该满足同一分区内各分区单元在空间位置上的邻近性。因此,本文采用双约束空间聚类方法实现湖泊营养物生态分区。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区域概况

本文以云贵高原亚热带湿润区为案例区(图2),其范围包括四川盆地以南,点苍山-丽江-哀牢山以东直到广西西部的广大地区,除占有滇黔两省绝大部分外,还有川西南和桂西。本区是中国南北走向和东北-西南走向两组山脉的交汇处,地势西北

高、东南低,海拔 1000~2000 m。东略偏北是贵州高原,平均海拔 1000 m,有乌蒙山、大娄山、武陵山、苗岭等,基本呈东北-西南走向,其中部是长江和珠江两大流域分水岭,地势由此以西部最高,分别向北、东、南倾斜,地形崎岖。西部云南高原,平均海拔 1800~1900 m,有点苍山、龙山等,以南北走向为主,除了边缘区被河流切割,地形比较破碎外,大部地区高原面保存比较完好^[28]。研究区为四季温差小、干湿分明、气候资源垂直变化显著的低纬高原季风气候,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, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温,元江、河口地区在 8000 $^{\circ}\text{C}$ 以上,滇西北、滇东北的高海拔地区在 1400 $^{\circ}\text{C}$ 以下,金沙江干热河谷出现南亚热带“飞地”,为 7000~8000 $^{\circ}\text{C}$ ^[29]。该区域是中国淡水湖泊分布较多的地区之一,其中面积 1 km²以上的湖泊 60 个,合计面积 1199.4 km²,约占全国湖泊总面积的 1.3%。大于 10 km²的湖泊 13 个,合计面积 1088.2 km²,占本区湖泊面积的 90.8%,主要包括云南省的滇池、洱海、抚仙湖、程海、泸沽湖、杞麓湖、星云湖、异龙湖、阳宗海、大屯海和长桥海等 11 个湖泊,以及四川省的邛海和贵州的草海^[30]。

2.2 数据来源

本文采用的数据包括研究区域 2005 年的气候数据、地形数据、地貌数据、土壤数据、土地利用数据、人口密度数据、GDP 数据、湖泊数据、TM 数据、

Chl-a 和 TP 监测数据。

(1) 气候数据。气候数据包括年降水量数据和年均气温数据。以中国气象局气象站点观测数据为基础,采用样条插值算法对气象站点的观测数据进行插值,得到研究区域栅格形式的年降水量数据和年均气温数据^[31]。

(2) 地形地貌数据。DEM 数据和地貌类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,经重采样后生成空间分辨率为 100 m \times 100 m 的 DEM 数据和地貌类型数据^[32]。

(3) 土壤数据。利用 1:400 万的土壤类型数据与土壤普查的剖面数据,计算了研究区域的土壤含氮量和土壤含磷量,采用空间插值的方法得到栅格尺度上连续分布的土壤含氮量数据和土壤含磷量数据^[33]。

(4) 土地利用数据。该数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心土地利用数据库^[34]。该数据库由 Landsat TM/ETM⁺影像解译得到,空间分辨率为 30 m \times 30 m;后经对解译结果重采样,得到 100 m \times 100 m 的栅格数据。涵盖耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地 6 大用地类型。

(5) 人口密度数据和 GDP 数据。人口数据和 GDP 数据均来源于研究区域的统计年鉴,然后采用基于格点生成法的人口密度空间分布模拟模型和 GDP 空间分布模拟模型^[35],将行政区域上的人口数据和 GDP 数据投影到栅格上,形成栅格尺度上的

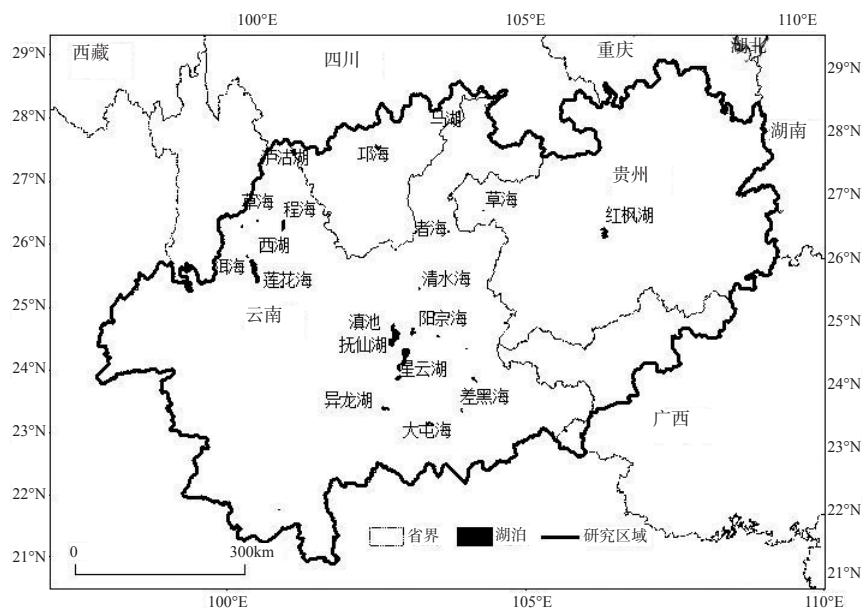


图2 研究区域

Fig.2 Location of the study area

人口密度数据和GDP数据。

(6) 湖泊数据和TM数据。Landsat TM/ETM⁺数据来源于马里兰大学全球观测实验室及地理科学与资源研究所的联合实验室,空间分辨率为30 m×30 m。湖泊数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心。

(7) 叶绿素a和TP监测数据。叶绿素a和TP监测数据来源于国家水体污染控制与治理科技重大专项“湖泊富营养化治理与控制技术及工程示范”主题“湖泊水污染治理与富营养化控制共性关键技术研究”项目“中国湖泊营养物基准和富营养化控制标准研究”课题。

3 结果分析

3.1 叶绿素a、TP和TN遥感反演

采用经验统计算法,利用 $(TM7 \times TM3) / (TM1 \times TM4)$ 的值来反演叶绿素a浓度,得到叶绿素a与TM影响各波段之间的关系可以表示为:

$$Chl-a = 300.48 \times [(TM7 \times TM3) / (TM1 \times TM4)] \quad (1)$$

模型决定系数为0.9046,回归方程在显著性水平0.005下具有显著意义。

采用经验统计算法,利用 $(TM6 - TM7)$ 的值反演TP浓度,得到TP浓度与TM影响各波段之间的关系可以表示为:

$$TP = 0.3395 \times (TM6 - TM7) - 34.597 \quad (2)$$

模型决定系数为0.967,回归方程在显著性水平0.005下具有显著意义。

同理,采用经验统计算法,利用 $(TM1 + TM6)$ 的值反演TN浓度,得到TN浓度与TM影响各波段之间的关系可以表示为:

$$TN = 0.0652 \times (TM1 + TM6) - 8.5517 \quad (3)$$

模型决定系数为0.9683,回归方程在显著性水平0.005下具有显著意义。

3.2 湖泊营养物生态分区

在小流域划分的基础上,将栅格尺度的Chl-a/P、Chl-a/N与各指标数据投影到小流域尺度上,采用数量统计的方法构建Chl-a/P和各指标影响因素之间的关系,计算各评价单元湖泊营养物生态分区评价分值(图3a),采用数量统计的方法构建Chl-a/N和各指标影响因素之间的关系,计算各评价单元湖泊营养物生态分区评价分值(图3b)。采用双约束空间聚类的方法对小流域尺度上的两种评价分值

一起聚类,得到初步的分区结果(图3c)。

根据专家经验对双约束空间聚类结果进行适当修正,将研究区域分为4个湖泊营养物生态区:北云南高原湖区,滇南河谷山原湖区,桂西-滇东-黔南岩溶湖区,贵州高原东北部湖区(图4)。

北云南高原湖区,处于川滇黔3省接壤地区,社会经济比较发达。攀西地区是中国西南最大的钢铁基地,六盘水市是中国南方最大的煤城,是个典型的工矿城市型地区。滇东北水利条件好,具有温、光、水较丰富和冷热、干湿适中的气候特点,是主要的农业区,林地比重大,耕地比重小^[36]。滇池是本区的主要湖泊,也是中国著名的高原淡水湖泊,滇池草海水质转好,由富营养化湖泊变成中营养湖泊,但滇池的内海为重度富营养化状态^[37]。

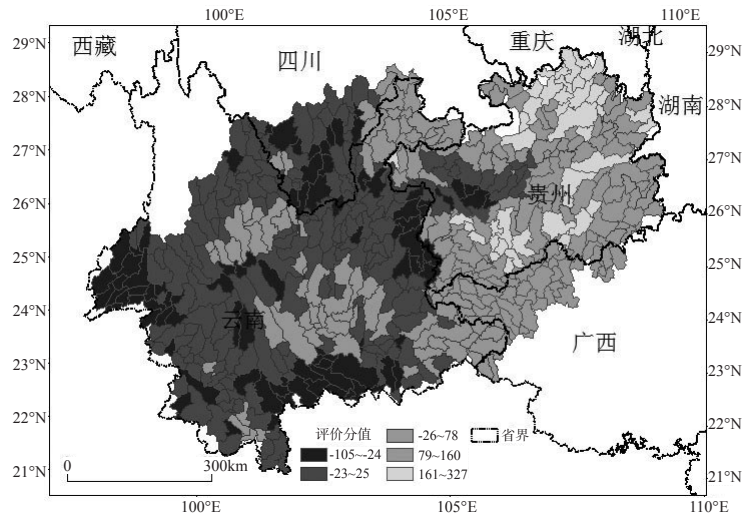
滇南河谷山原湖区,是少数民族比较集中的地区,同时又是贫困地区,经济状况较为落后。区内云南高原面已遭受严重破坏和改变,河流深切,峡谷众多,属热带季风气候和亚热带季风气候的过渡地带,森林覆盖率高,耕地占土地面积比重很低,是以农业生产为主的生态区域。本区的代表性湖泊抚仙湖是中国第二深水湖泊。抚仙湖水质目前总体仍保持I类,但水质呈缓慢下降趋势^[38]。

桂西-滇东-黔南岩溶湖区,是多民族聚居的地方,且人口多、贫困人口多、人均耕地少、经济收入少、土地生产力低,人类活动对生态干扰少。本区地处云贵高原东南缘,岩溶地貌为主,是云贵高原海拔较低的一个地区,属低纬度亚热带温暖湿润的季风气候,雨热同季,森林覆盖率很高。区内的万峰湖是全国五大人工淡水湖泊之一,水体营养程度总体评价为轻度富营养^[39]。

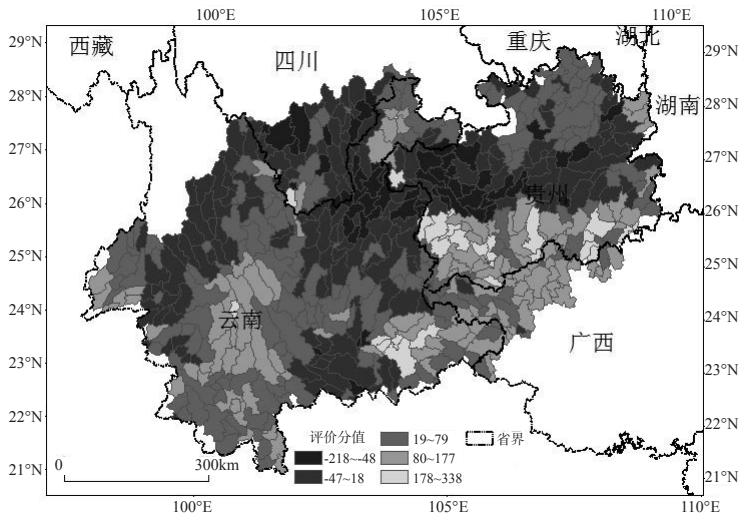
贵州高原东北部湖区,处于云贵高原区经济水平中等值偏上水平。是一个城市分布点较少、人多地少、粮食不能自给的贫苦地区之一。森林覆盖率达到50%以上,生态环境良好。区内的代表性湖泊红枫湖位于贵州高原中部,是一座综合功能的人工深水型湖泊,湖泊富营养化状态由中营养型向中一富营养型过渡^[40]。

4 结论与讨论

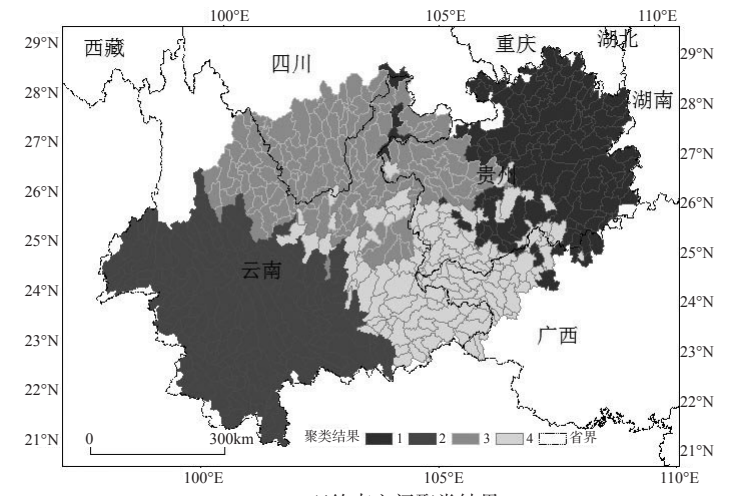
湖泊营养物生态分区是实现湖泊水体分区控制的基础,具有重要的意义。本文以云贵高原亚热带湿润区为研究区域,采用遥感反演算法反演湖泊



a. 营养物生态分区评价分值



b. 营养物生态分区评价分值



c. 双约束空间聚类结果

图3 营养物生分区评价分值与双约束空间聚类结果

Fig.3 Score of lake nutrient ecoregion and result of dual-constraint spatial cluster

水体叶绿素 a 和 TP 浓度,运用双约束空间聚类算法实现湖泊营养物生态分区,结果表明:

(1) 采用遥感反演模型将为数不多的湖泊水体水质监测点的数据推演到面上,可以在一定程度上克服野外监测数据数量难以支撑湖泊营养物生态分区的不足,适合于当前中国湖泊营养物生态分区数据处理。经验统计法通过直接建立遥感数据与水质参数浓度值之间的统计关系模型,其反演结果的精度较高,区域性强。本文通过此方法反演出叶绿素 a、TP 和 TN,三者的关系系数都是 0.9 以上,反演精度较高。

(2) 以 Chl-a/P、Chl-a/N 为核心指标,选取自然地理要素、生态系统和人类活动 3 方面建立指标体系,采用线性回归方法定量分析各影响因素分别对 Chl-a/P 和 Chl-a/N 的作用,可以定量表达小流域尺度上各影响因素与湖泊水体富营养化效应之间的关系。

(3) 采用双约束空间聚类算法实现湖泊营养物生态分区,既考虑了各评价单元湖泊富营养化效应的相对一致性,也考虑了各评价单元在空间上的接近性。使分区结果在同一分区内湖泊富营养化相对一致的基础上保证了空间上的连续性。

基于遥感反演参数与双约束空间聚类算法,将云贵高原亚热带湿润区分为 4 个湖泊营养物生态区:北云南高原湖区、滇南河谷山原湖区、桂西-滇东-黔南岩溶湖区、贵州高原东北部湖区。北云南高原湖区,社会经济比较发达,人类活动对该区域

湖泊富营养化具有一定的影响。滇南河谷山原湖区,森林覆盖率高,湖泊富营养化潜在威胁最低。桂西-滇东-黔南岩溶湖区,具有较高的森林覆盖率,人类活动对湖泊富营养化影响相对很小,但较滇南河谷山原湖区的湖泊富营养化潜在威胁要高。贵州高原东北部湖区,虽然森林覆盖率很高,但是处于云贵高原区经济水平中等值偏上水平,湖泊富营养化潜在威胁较高。

可以看出,基于遥感反演参数与双约束空间聚类算法进行湖泊营养物生态分区可以获得较为合理的湖泊营养物生态分区结果。然而,本文所采用的湖泊营养物生态分区的指标体系是在参照美国流域水生态功能区划指标体系的基础上,根据研究区域实际情况适当调整后得到,该指标体系的适用性需要进一步深入研究。此外,在本研究中,各指标对分区的贡献是在遥感反演参数的基础之上采用统计学方法获得,其作用机理有待于以后研究。

参考文献

- [1] 赵永宏,邓祥征,战金艳,等.我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展.环境科学与技术,2010,33(3):92-98.
- [2] Omernik J M. Ecoregions of the conterminous United States (Map Supplement). Annals of Associations of American Geographers, 1987, 77(1): 118-125.
- [3] Omernik J M, Gallant A L. Defining regions for evaluating environmental resources//Proceedings of the Global Natural Resource Monitoring and Assessment Sympos-

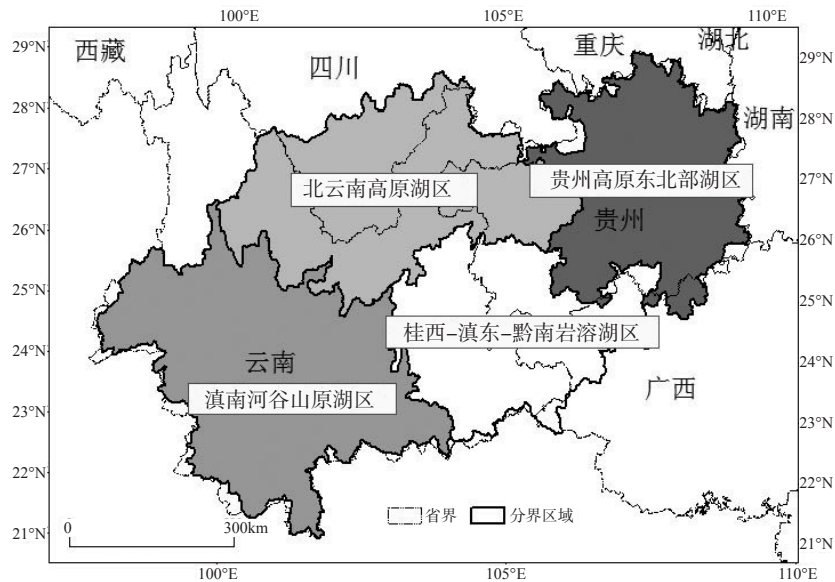


图4 湖泊营养物生态分区结果

Fig.4 Result of lake nutrient ecology regionalization

- sium, Preparing for 21st Century. Vellice, Italy, 1991: 936-947.
- [4] Hughes R M, Larsen D P. Ecoregions: An approach to surface water protection. *Journal of the Water Pollution control Federation*, 1988, 60(4): 486-493.
- [5] Warry N D, Hanau M. The use of terrestrial ecoregions as regional-scale screen for selecting representative reference sites for water quality monitoring. *Environment Management*, 1993, 17(2): 267-76.
- [6] Bedford B L. The need to define hydrologic equivalence at the landscape scale for freshwater wetland mitigation. *Ecological Applications*, 1996, 6(1): 57-68.
- [7] Commission for Environmental Cooperation. *Ecological Regions of North America: Toward a Common Perspective*. Quebec, Canada: Commission for Environment Cooperation, 1997: 71.
- [8] Davies P E. Development of a national river bioassessment system, AUSRIVAS in Australia//Wright J F, Sutcliffe D W, Furse M T. *Assessing the Biological Quality of Fresh Waters—RIVPACS and other Techniques*. Freshwater: Biological Association, 2000: 113-124.
- [9] Hemsley F B. Classification of the biological quality of rivers in England and Wales//Wright J F, Sutcliffe D W, Furse M T, *Assessing the Biological Quality of Fresh Waters: RIVPACS and other Techniques*. Freshwater: Biological Association, 2000: 55-69.
- [10] Austrian Standards ONORM M 6232. Guidelines for the Ecological Survey and Evaluation of Flowing Surface Waters. Vienna: Austrian standards Institute, 1997: 38.
- [11] Moog O, Kloiber A S, Thomas O, et al. Does the ecoregion approach support the typological demands of the EU Water Framework Directive. *Hydrobiologia*, 2004, 516: 21-33.
- [12] 尹民, 杨志峰, 崔保山. 中国河流生态水文分区初探. *环境科学学报*, 2005, 25(4): 423-428.
- [13] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域水生态分区研究. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 911-918.
- [14] 杨爱民, 唐克旺, 王浩, 等. 中国生态水文分区. *水利学报*, 2008, 39(3): 332-338.
- [15] 张璐, 杨爱民, 吴赛男, 等. 南水北调中线一期工程受水区生态水文分区. *水利水电技术*, 2009, 40(12): 8-12.
- [16] 梁静静, 左其亭, 夏军, 等. 水生态区划理论方法及全国水生态区划方案. *灌溉排水学报*, 2010, 29(4): 47-51.
- [17] 杨清心. 太湖水华成因及控制途径初探. *湖泊科学*, 1996, 8(1): 67-74.
- [18] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. *太湖水环境演化过程与机理*. 北京: 科学出版社, 2004.
- [19] 付宇, 韦玉春, 王国祥. 水质参数的遥感反演和遥感监测. *环境监测与预警*, 2010, 2(6): 27-30.
- [20] Kwang G A, Seok S P. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: A case study. *Ecological Modelling*, 2002, 152(2): 191-203.
- [21] 杨志岩, 李畅游, 张生, 等. 内蒙古乌梁素海叶绿素 a 浓度时空分布及其与氮、磷浓度关系. *湖泊科学*, 2009, 21(3): 429-433.
- [22] 张加晋. 近岸 II 类水体叶绿素浓度遥感反演的算法综述. *福建水产*, 2009(1): 43-47.
- [23] 赵碧云, 贺彬, 朱云燕, 等. 滇池水体中叶绿素 A 含量的遥感定量模型. *云南环境科学*, 2001, 20(3): 1-3.
- [24] 徐建华. *现代地理学中的数学方法*. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 69-84.
- [25] Kaufman L, Rousseeuw P J. *Finding Groups in Data: an Introduction to Cluster Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [26] 周脚根. 双约束和粒度可变空间聚类以及分布式离群点检测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [27] 柯新利, 边馥苓. 基于空间数据挖掘的分区异步元胞自动机模型研究. *中国图象图形学报*, 2010, 15(6): 921-930.
- [28] 赵济, 陈传康. *中国地理*. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [29] 孙鸿烈. *中国资源科学百科全书*. 北京: 中国大百科全书出版社, 2003.
- [30] 于洋, 张民, 钱善勤, 等. 云贵高原湖泊水质现状及演变. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 820-828.
- [31] Deng X Z, Su H B, Zhan J Y. Integration of multiple data sources to simulate the dynamics of land systems. *Sensors*, 2008, 8(2): 620-634.
- [32] 李仁东, 隋晓丽, 彭映辉, 等. 湖北省近期土地利用变化的遥感分析. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(4): 322-326.
- [33] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(12): 1031-1040.
- [34] 刘纪远, 岳天祥, 王英安, 等. 中国人口密度数字模拟. *地理学报*, 2003, 58(1): 17-24.
- [35] 邓祥征, 刘纪远, 战金艳, 等. 太仆寺旗土地利用变化时空格局的动态模拟. *地理研究*, 2004, 23(2): 147-156.
- [36] 楼惠新. 云贵高原土地利用. *国土与自然资源研究*, 2000(1): 9-12.
- [37] 于洋, 张民, 钱善勤, 等. 云贵高原湖泊水质现状及演变. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 820-828.
- [38] 庞志华, 陈泽涛, 罗隽, 等. 大型高原湖泊富营养化湖水生态净化工程设计与分析. *中国给水排水*, 2010, 26(8): 37-40.
- [39] 瞿丽雅, 孙嘉龙, 董泽琴, 等. 万峰湖水质评价及水白菜成因初探. *贵州农业科学*, 2008, 36(3): 169-172.
- [40] 杨飞, 支崇远. 喀斯特高原地区人工湖泊富营养化治理初探: 以红枫湖、百花湖为例. *安徽农业科学*, 2009, 37(9): 4181-4184.

Lake Nutrient Concentration Oriented Ecological Division Based on Remote Sensing Inversion Parameters and Dual-constraint Spatial Clustering Algorithm

KE Xinli^{1,2}, LIU Man², DENG Xiangzheng^{1,3}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. School of Resources & Environment Science, Xianning College, Xianning 437000, Hubei, China;

3. Center for Chinese Agricultural Policy, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: There exist remarkable regional differences on the lake nutrient and its eutrophication effect in China. It is the premise to explore the features of lake nutrient and its determinacy on the ecological division to carry out effective measures on the breaking-out of lake eutrophication. In the case study of Yunnan-Guizhou Plateau, the contents of Chlorophyll-a(Chl-a), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) of lake water are inverted via the remote sensing inversion algorithm. An index system is also established by including the information from geophysical, geographical, ecosystem and human dimensions to evaluate the levels of land nutrients and all the information is mapped onto the small watersheds delimited based on DEM data covering the entire study region. Meanwhile, the effect of each index on the ratio of Chl-a over P (Chl-a/P) and the ratio of chl-a over N(Chl-a/N) is quantitatively analyzed by applying mathematical statistics method on the small watershed scale so as to calculate the evaluation scores of two lake nutrient ecological zones who will then be clustered according to the small watershed scale via the dual-constraint space clustering algorithm. After a couple rounds of handlings, ecological zones reflecting the pattern of the lake nutrient concentrations are finally formed.

The paper concludes a couple of key findings. A small number of sites based monitoring data can be used to deduce the surface of lake nutrient level through the remote sensing inversion model, which makes up the deficiency that the few sites-based monitoring data are always hard to supply enough information for the lake nutrient ecological division. By exploring the relationship between each index factor and Chl-a/P and Chl-a/N on the lake water, organic combination of microscopic indexes of the lake water and macroscopic indexes of the watersheds on the lake nutrient ecological division is thus realized. By applying the dual-constraint spatial clustering algorithm to carry on the lakes nutrient ecological zoning to meet the requirements of space continuity kept while the evaluation scores are guaranteed. Corresponding to the spatial difference of geophysical and geographical conditions, land use and human intervention intensity, the Yunnan-Guizhou Plateau is divided into four ecological parts, i.e., north Yunnan Plateau lakes, the southern Yunnan valley, mountain lakes and karst lakes zones located between east Yunnan, west Guangxi and south Guizhou and northeast Guizhou plateau. The study indicates that the lake nutrient ecological division approach base one dual-constraint space clustering algorithm can be used to other places and be recommended as reference approach of the lake nutrient ecological division to multiple scales of areas.

Key words: lake nutrient; ecoregion; remote sensing inversion; dual-constraint spatial cluster; subtropical moist zone on the Yunnan-Guizhou Plateau

本文引用格式:

柯新利, 刘曼, 邓祥征. 基于遥感反演参数与双约束空间聚类算法的湖泊营养物生态分区. 地理科学进展, 2012, 31(3): 315-323.