

洱海流域水生态分区*

杨顺益^{1,2} 唐涛¹ 蔡庆华^{1**} 肖文³ 汪兴中^{1,2} 李凤清^{1,2} 唐佳³

(¹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; ²中国科学院研究生院,北京 100049;

³大理学院东喜玛拉雅资源与环境研究所,云南大理 671000)

摘要 分区边界的确定是生态分区的重要步骤,但目前多数水生态分区的边界确定以定性分析、专家判断为主。本研究以洱海流域为例,建立了一套两级分区体系。该体系基于GIS技术,用子流域作为分区基本单元,并用相关分析法,定量筛选一、二级分区指标。其中,一级分区指标为高程、坡度和植被归一化指数(NDVI),二级分区指标为农田百分比和城镇百分比。通过指标图层的叠加和重分类,合并同质性子流域,从而将洱海流域划分为5个一级区和9个二级区。藻类群落分布的验证结果表明分区合理。本研究将定量分析和子流域边界应用于水生态分区,使分区边界的确定更科学,在实际管理中更具有可操作性。本研究结果为水生态分区研究提供了新的方法,为洱海流域水生态管理提供了基本管理单元。

关键词 洱海流域; 水生态分区; 子流域

中图分类号 S917 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2012)7-1798-09

Aquatic eco-regionalization of Erhai Lake Basin, Yunnan Province of Southwest China. YANG Shun-yi^{1,2}, TANG Tao¹, CAI Qing-hua^{1**}, XIAO Wen³, WANG Xing-zhong^{1,2}, LI Feng-qing^{1,2}, TANG Jia³ (¹State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy Sciences, Wuhan 430072, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Institute of Eastern-Himalaya Biodiversity Research, Dali University, Dali 671000, Yunnan, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(7): 1798 - 1806.

Abstract: Delineation of regional boundary is an important procedure in ecological regionalization, but at present, this delineation for aquatic eco-regionalization is mostly dependent on qualitative analysis and expert judgment. In this paper, a two-level eco-region framework was established to delineate the aquatic eco-regions in Erhai Lake Basin. In this framework, sub-basin was taken as the basic unit based on GIS technique, and the indices for the two-level regionalization were quantitatively screened by correlation analysis. Altitude, slope, and normalized difference vegetation index were identified as the indices for level I, and farmland and urban area percentages were the indices for level II. The index maps were overlaid and re-classified, and the sub-basins were further merged into several regions. Five level-I eco-regions and nine level-II eco-regions were delineated finally. The examination through the comparison of the distribution of algal communities in different eco-regions showed that the regionalization result was reasonable. It was suggested that applying quantitative analysis and sub-basin boundaries in aquatic eco-regionalization could make the delineation of regional boundary more scientific and the actual management more operational. This study provided a new method for the study of aquatic eco-regionalization, and the basic units for the aquatic ecological management of Erhai Lake Basin.

Key words: Erhai Lake Basin; aquatic eco-regionalization; sub-basin.

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07526-002-07)资助。

** 通讯作者 E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

收稿日期: 2011-11-08 接受日期: 2012-03-15

生态区划是对生态系统客观认识和充分研究的基础上,应用生态学原理和方法,揭示各自然区域的相似性和差异性规律,从而进行整合和分异,划分生态环境的区域单元(刘国祥和傅伯杰,1998)。生态分区始于19世纪,早期的生态分区多基于单一指标来进行划分,随着人们对生态系统认识的深入,基于多指标的生态分区逐渐开展开来(Omernik,2004)。1976年,Bailey利用自然植被和气候等首次提出了美国生态分区(Bailey,1976)。但由于该方案实质是一种陆地区划,并不适应水生态区划,所以1987年Omernik基于地表地貌、土壤、植被和土地利用提出美国3级水生态分区方案。目前该分区已经开展到5级(Omernik,1987)。此后,许多国家也开展了水生态分区的研究。例如,新西兰环境保护部将全国分成25个水生态区(Harding & Winterbourn,1997);南非水务及森林部将全国分成18个一级水生态区(Kleynhans *et al.*,1998);世界自然基金会(World Wildlife Fund,WWF)和美国大自然保护协会(The Nature Conservancy,TNC)联合绘制了首张基于淡水鱼类生物多样性差异的世界淡水生态分区图(Abell *et al.*,2008)等。

分区边界的确定是生态分区的重要步骤,对分区结果精度及实际应用都具有显著影响。目前,多数水生态分区边界确定以定性分析、专家判断为主。例如,傅伯杰等(2001)根据气候和地势类指标和人类活动等指标进行中国生态区划分案研究,邹长新等(2010)根据自然地理和生态环境对湖北省进行了水生态分区研究,梁静静等(2011)根据地理位置和自然环境等对淮河流域进行了水生态分区研究。该方法的缺点在于容易受到研究者主观影响,分区结果具有不可重复性(孟伟等,2007a)。Bailey(2004)建立了确定分区边界的20条原则以减少专家经验带来的主观性,但确定边界依然是比较复杂的过程且专家的经验依然会占主导。随着多元统计和GIS技术的发展,定量分析逐渐成为主流。如Host等(1996)基于GIS结合多变量统计分析对威斯康辛州西南部区域重新确定了分区边界。Hargrove和Hoffman(2005)对分区聚类分析和可视化做了相关研究,Snedler等(2010)在对瑞士的分区中用3种聚类分析进行比较。于世伟等(2010)也基于系统聚类对辽河流域进行了生态分区。这些定量分析进一步提高了分区边界的精度。但流域完整性的问题在众多研究中并没有考虑。因为流域内的高

地、沿岸带和水体等各个子系统间的物质、能量、信息流动都是一个整体,割裂了流域会导致对环境问题认识的偏差(蔡庆华,1997),所以有必要保证流域的完整性,而将子流域应用于水生态分区是解决上述问题的有效途径。在流域管理中,依据生态特征的差异进行分区管理,能使管理措施更具针对性,从而取得更好的管理效果。所以本研究以洱海流域为例,尝试用子流域作为分区基本单元,开展水生态一级二级分区研究。依据该方法划分的分区单元能将分区管理细化到对各个子流域的管理。对水质管理、水生态系统健康保护、污染物控制等管理目标的实现具有重要的意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

洱海流域位于云南省大理白族自治州境内,地处澜沧江、金沙江和元江三大水系分水岭地带(唐秉奕,1994),属澜沧江水系,位于滇西中部 $26^{\circ}36'N-25^{\circ}36'N$; $99^{\circ}50'E-100^{\circ}26'E$,其流域面积为 2565 km^2 。整体地势为西北高,东南低,中高山地环绕着高原小盆地(洱源县水利电力局,1995)。洱海流域的气温水平分布(坝区)差异小,垂直分布差异大(张玉华,2003)。洱海流域水系发达,北部有弥苴河及支流凤羽河,东南有波罗江,西有从苍山发源的十八条溪流(如清碧溪、黑龙溪、桃溪等,简称十八溪),十八溪平行排列汇入洱海。西湖、茈碧湖、海西海位于洱源县境内,与弥苴河和凤羽河相通。西洱河位于西南,为洱海唯一天然出口。

洱海流域所在的大理市是滇西北地区经济、文化、交通中心。主要的土地利用形式有林地、灌丛、水域、农田、城镇。近年来随着人口的增长和城市化的发展,以农田和城镇用地增长速度最快(李运刚等,2008)。目前洱海流域存在的问题主要是:1)洱海流域水质的不断恶化,整体水质表现为上游污染较小,中上游有一定农业影响,下游污染较严重(任泽等,2011)。洱海曾经多次爆发水华。现仍然处于中度营养向富营养转变的阶段(吴庆龙和王云飞,1999;彭文启等,2005;常锋毅等,2009)。洱海寡毛类和摇蚊科比例的增加,表明湖泊有机污染有进一步加重的趋势(张敏等,2011)。2)水电站建设导致部分河流断流。由于设计上的失误,西洱河电站的建设造成洱海水位下降,洱海湖面面积缩小。同时洱海土著鱼种呈现资源衰竭的局面(费骥慧等,

2011)。3) 全流域水资源分配极为不均,西多东少,东部严重缺水,人畜和农田用水导致部分河道干涸。4) 农田和城镇的比例逐年上升,流域内农业面源污染和水土流失较为严重。城镇点源污染较为严重。所以只对水体环境的治理已经不能解决洱海流域污染现状,必须扩展到流域尺度,进行分区管理,划定管理单元,制定管理目标。为流域水生态治理奠定基础。

1.2 数据获取及分析

高程数据为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的数字高程模型(digital elevation model, DEM)。坡度基于 DEM 生成。植被归一化指数(normalized differential vegetation index, NDVI)为 2008 年洱海流域遥感数据生成。土地利用为 2008 年洱海流域遥感数据解译,并通过实地采样调查核对生成。

水质指标有总氮(TN)、总磷(TP)、铵氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、溶解氧(DO)、pH。将采集的水样现场添加浓硫酸,调整 pH 至 2,带回实验室后, TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89)测定, TP 用钼酸铵分光光度法(GB 7493-87)测定, NH_4 用纳氏试剂分光光度法(GB 7974-87), DO 和 pH 用哈希 HQ40D 便携式水质分析仪现场测定。叶绿素 a 参考《水和废水监测分析方法》,在 $0.45\ \mu\text{m}$ 微孔滤膜抽滤后丙酮萃取,用 UV1800 紫外分光光度计在 750、665、645 和 630 nm 波段测定(国家环保局 2002)。

浮游藻类的采集方法参照《水域生态系统观测规范》的采样方法(蔡庆华 2007)。底栖藻类的采集遵照美国环保局(USEPA)的标准方法(Lazorchak *et al.*, 1998)。

高程、坡度、NDVI、土地利用的数据用 ArcGIS 9.3 处理、分析。相关性分析在 SPSS 13.0 中完成。除去势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)在 CANOCO 4.5 中完成。

1.3 子流域划分

流域的水生态分区的关键在于子流域的划分。基于现有的水系图,利用 ArcGIS 9.3 的水文模块(Hydrology),调整集水栅格阈值为 2500,并自动生成子流域。经过手工修剪,去除错误信息。最终将洱海流域划分为 242 个子流域(图 1)。

1.4 分区原则与依据

分区原则: 1) 流域完整性原则。以子流域为分区的最小单元,不得割裂子流域。2) 综合性和主导

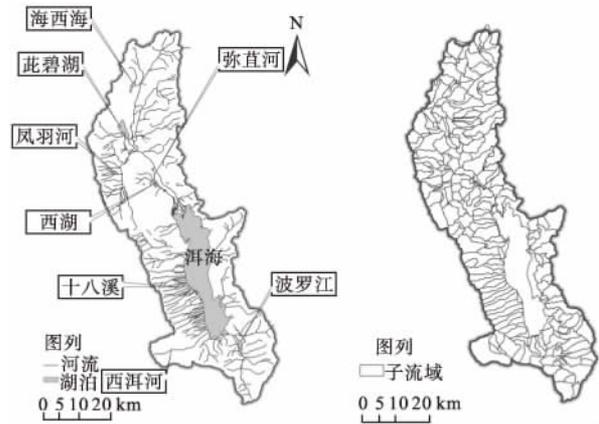


图 1 洱海流域水系、湖泊以及子流域示意图

Fig. 1 Rivers, lakes and sub-basins in Erhai Lake Basin

因子原则。水生态系统会受到若干因子综合影响,而且由个别因子主导。3) 同质性原则。将具有相对同质的子流域合并,相对异质的子流域分离,形成区域。4) 等级性原则。等级高的区域由等级低的区域组成。

利用环境响应因子来验证分区结果的合理性。水资源是水生态系统结构的基础。一级分区的依据是水资源的时空异质性。水质是流域水生态系统的重要组成部分,水质的优劣直接影响水生态系统结构。二级分区的依据是水质的空间异质性。

1.5 分区指标选择

分区研究中一直有两种相反的技术路线,一个是通过环境驱动因子自上而下的演绎法,另一个是环境响应因子自下而上的归纳法。而由于环境驱动因子具有关联性、稳定性以及 GIS 技术的可操作性,通常人们选用第一种方法(唐涛和蔡庆华 2010)。

通常的环境驱动因子有地形、气候和土地利用等。地形可以影响水文条件,而水文条件又能影响到水生态系统中水质、食物来源、初级生产者和消费者的组成和生物量(Doisy & Rabeni 2001; Rosenberg *et al.* 2001; Atkinson *et al.* 2009)。区域的气候也会影响水生态系统,如气温、光照、降雨等因素(Li *et al.* 2009; Barbour *et al.* 2010; Stamp *et al.* 2010)。大量研究表明,土地利用能影响水质、光照、底质等因素从而影响水生生物(Fulton *et al.*, 1993; Newall & Walsh 2005; Catford *et al.* 2007; Couceiro *et al.*, 2007; 贾兴焕等, 2009; Ye *et al.*, 2009; Akasaka *et al.* 2010; Nunes *et al.* 2011)。

选择能够影响水资源量空间异质性的年均气温、湿润度指数、植被归一化指数、高程、坡度为一级

表1 一级分区备选指标

Table 1 Candidate indexes of level I of aquatic eco-regions in Erhai Lake Basin

指标	对水资源的影响
年均气温	年均气温大致反映了研究区域所处的温度带,可以影响降雨、蒸发速度。洱海流域气温高的地区,降水量少,蒸发量大。气温低的地区降水量多,蒸发量小
湿润度指数	湿润度指数为降水量和蒸发量的比值。湿润度高的地区,降水量大,蒸发量小。湿润度低的地区降水量小,蒸发量大
植被归一化指数	植被归一化指数体现了流域的水源涵养能力,自然植被覆盖度高,水源涵养能力强,对水资源的调节能力强。林地覆盖度低,则对水资源的调节功能弱,易造成水土流失
高程坡度	高程和坡度能反映研究区域内高程的空间变化情况,可以表征河流等水体的坡降河道等特征,这些物理特征间接指示了水流特点、水资源存储

表2 二级分区备选指标

Table 2 Candidate indexes of level II of aquatic eco-regions in Erhai Lake Basin

指标	对水质的影响
林地百分比	林地发达的根系可以巩固土壤,可增强水源涵养,减少水土流失,减少土壤中的物质进入水体。吸收水体中的营养物质,净化水体,起到对水质的调节作用
灌丛百分比	灌丛根系发达,萌生力强,耐寒耐旱,在高海拔区域也具有良好的水土保持和水质涵养作用
农田百分比	农田物种单一,多样性低,根系浅,巩固土壤的能力差,水土流失相对严重,人工施肥和农药喷洒以及流域内农村驯养的畜禽家畜粪便随着灌溉和降雨通过土壤空隙渗透进入水体,造成面源污染
城镇百分比	城市生活污水,工业废水等。污水不是通过渗透进入水体,而是通过排污管道进入水体,造成点源污染

分区备选指标。选择能影响水质空间分布的林地百分比、灌丛百分比、农田百分比、城镇百分比为二级分区备选指标。

一级分区水资源空间异质性以径流深的空间异质性为代表。二级分区水质的空间异质性可以考虑 TN、TP、NH₄⁺-N、DO、pH、叶绿素等指标。以地表水环境质量标准 GB 3838-2002 为标准,根据 2009 年全流域水质数据分析表明, TN 和 TP 超标的样点较多,尤其是 TN,属于 V 类水的样点较多,且空间差异较大。NH₄⁺-N、DO 基本上为 I 类水。pH 值为 6.11~8.90,平均值为 7.46,在允许范围 6~9。底栖藻类叶绿素 a 浓度为 2.69~233.90 mg·m⁻²,平均值为 23.62 mg·m⁻²,整体水平较低。浮游藻类叶绿素 a 浓度在 0.003~0.118 mg·L⁻¹,平均值为 0.017 mg·L⁻¹,整体水平也较低,且单位不统一,不

宜作为表征水质的指标。所以二级分区选用 TN 和 TP 的综合值的空间特征代表洱海流域水质空间差异性。

将一级、二级分区的各个备选指标与子流域在 ArcGIS 9.3 中进行区域统计分析,得到各子流域的指标平均值。剔除相关性较高的指标,剩余指标与水资源量和水质综合值分别做相关性分析,选取相关性显著的指标。结果表明,一级分区备选指标中,高程与年均气温和湿润度的相关性显著 ($P < 0.05$),但由于洱海地区的气温和湿润度均受到高程的影响,所以将年均气温与湿润度剔除,剩余指标与水资源量的相关性分析表明植被归一化指数、高程和坡度与水资源量相关性显著 ($P < 0.05$),所以这 3 个指标选为一级分区指标。二级分区备选指标之间无显著相关性 ($P > 0.05$)。各指标与水质综合值的相关性分析表明农田百分比和城镇百分比与水质综合值相关性显著。将农田百分比和城镇百分比作为二级分区指标。

将一级分区 3 个指标和二级分区 2 个指标分别等权叠加,并用 ArcGIS 9.3 将子流域重分类(图 2)。

1.6 分区边界确定及命名

将子流域合并,分区边界是由子流域边界确定。区域中可能出现与其他子流域不同质的区域,但数量较少,为保证区域的连续性,可以认为该区域大部分子流域是同质的。由于分区是有等级性的,所以首先确定一级分区的边界,然后再确定二级分区边界。

按照区域位置、地貌和水体的总体特点,对一级区进行命名。具体为:区域位置+地貌特征+水体类

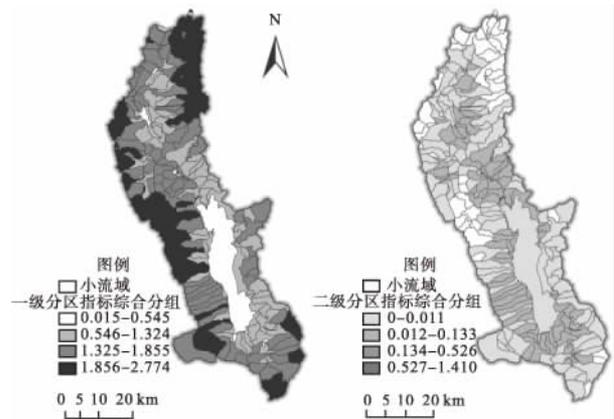


图2 一级、二级分区指标叠加与重分组结果示意图
Fig.2 Result of overlaying and reclassifying levels I and II indexes

表3 洱海流域各级区域特征

Table 3 Characteristics of each hierarchical level eco-regions in Erhai Lake Basin

一级分区	基本特征	二级分区	基本特征
西北高山河流生态区(I)	位于西部苍山十八溪流域和北部弥苴河流域上游的高海拔山地,平均海拔2758 m、平均坡度18.83°、NDVI 0.34。降雨量丰富可达1183 mm,河网密度高,为965 m·km ⁻² 。主要水生生物类群有底栖生物	北部灌丛型河流生态亚区(I ₁)	位于弥苴河流域上游山区。为河流生态系统。主要土地利用类型为灌丛和森林,其农田占9.73%、城镇占0.24%。河岸土质松软,植被固水能力较差,水土流失较为严重。TN含量1.34 mg·L ⁻¹ 、TP含量0.012 mg·L ⁻¹ 。底栖藻类优势种有席藻(<i>Phormidium</i> sp.)、 <i>Achnanthes deflexm</i> 等。底栖动物优势种有四节蜉(<i>Baetis</i> sp.)、短尾石蝇(<i>Nemoura</i> sp.)等
		西部农田型河流生态亚区(I ₂)	位于苍山十八溪流域。为河流生态系统。主要土地利用类型为农田和森林,其农田占28%、城镇占7.96%。点源和非点源污染突出,TN含量1.29 mg·L ⁻¹ 、TP含量0.101 mg·L ⁻¹ 。底栖藻类优势种有极细微曲壳藻(<i>Achnanthes minutissima</i>)、极小桥弯藻(<i>Cymbella minuta</i>)、 <i>Achnanthes rivulare</i> 等。底栖动物优势种有颤蚓(<i>Tubificidae</i> sp.)、长跗摇蚊(<i>Tanytarsus</i> sp.)、四节蜉等
北部平地河流生态区(II)	位于洱源县弥苴河流域中游的平坝地区。平均海拔2432 m、平均坡度13.19°、NDVI 0.25。水量丰富、还西海库容2227万m ³ 、茈碧湖9322.4万m ³ 、河网密度高、多年平均径流量4.82亿m ³ 。主要水生生物类群有底栖生物、浮游生物以及鱼类	北部灌丛型湖泊水生态亚区(II ₁)	位于茈碧湖和海西河流域,为湖泊水生态系统。主要土地利用类型为灌丛,其农田占23.06%、城镇占7.96%。水质较好,TN含量0.59 mg·L ⁻¹ 、TP含量0.024 mg·L ⁻¹ 。浮游藻类优势种有密集锥囊藻(<i>Dinobryon sertularia</i>)、湖生卵囊藻(<i>Oocystis lacustris</i>)等。底栖动物优势种有摇蚊(<i>Chironomus</i> sp.)、幽蚊(<i>Chaoborus</i> sp.)、正颤蚓(<i>Tubifex tubifex</i>)等。鱼类面临外来物种入侵,逐渐走向灭绝,目前优势鱼类有棒花鱼(<i>Abbottina rivularis</i>)、长身鱮(<i>Acheilognathus elongatus</i>)是海西海和茈碧湖的优势鱼种
		北部农田型河流生态亚区(II ₂)	位于弥苴河中游,为河流生态系统。主要土地利用类型为农田,农田占49.4%、城镇占7.14%。是洱源县经济较为发达的地区,点源和非点源污染相对严重,TN含量0.81 mg·L ⁻¹ 、TP含量0.129 mg·L ⁻¹ 。底栖藻类优势物种为席藻、 <i>Achnanthes rivulare</i> 、 <i>Achnanthes deflexm</i> 等。底栖动物优势物种为四节蜉、真涡虫(<i>Dugesia</i> sp.)、凸旋螺(<i>Gyraulus convexiusculus</i>)等
南部中山河流生态区(III)	位于流域南部凤仪镇上游波罗江流域以及西洱河河谷。平均海拔2355 m、平均坡度22.00°、NDVI 0.35。水量较为充沛,年径流量1.141亿m ³ 。主要水生生物类群为底栖生物	南部森林型河流生态亚区(III ₁)	位于流域南部凤仪镇上游波罗江流域以及西洱河河谷。为河流生态系统。主要土地利用类型是森林,其农田占26.26%、城镇占4.03%。西洱河为洱海唯一天然出口,污染很严重,TN含量1.68 mg·L ⁻¹ 、TP含量0.229 mg·L ⁻¹ ,TN和TP严重超标。底栖藻类优势物种为微型舟形藻(<i>Navicula minima</i>)、隐头舟形藻(<i>Navicula cryptocephala</i>)、扁圆卵形藻(<i>Cocconeis placentula</i>)等。底栖动物优势物种为颤蚓、霍甫水丝蚓(<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>)、费氏拟仙女虫(<i>Paranais frici</i>)等
东南低山河流生态区(IV)	位于弥苴河下游邓川坝子,海东凤仪镇和大理市地区。平均海拔2182 m、平均坡度12.85°、NDVI 0.17。邓川和凤仪镇由于弥苴河和波罗江,水资源相对充足,但海东地区水资源缺乏,年径流深只有280 mm。主要水生生物类群为底栖生物	东部农田型河流生态亚区(IV ₁)	位于弥苴河下游邓川坝子,主要为河流生态系统,主要土地利用类型为农田和城镇,农田44.55%、城镇24.1%。是洱源城镇人口最集中的地区,其TN含量1.99 mg·L ⁻¹ 、TP含量0.113 mg·L ⁻¹ ,TN严重超标。底栖藻类优势物种为极小桥弯藻、扁圆卵形藻、隐头舟形藻、异极藻(<i>Gomphonema</i> sp.)。底栖动物优势物种为霍甫水丝蚓、萝卜螺(<i>Radix</i> sp.)、中国圆田螺(<i>Cipangopaludina chinensis</i>)等
		东部灌丛型河流生态亚区(IV ₂)	位于洱海流域东部的海东地区,为河流生态系统,主要土地利用类型为灌丛,其农田占36.19%、城镇占7.84%。水资源量少,农业污染较为严重,TN含量0.77 mg·L ⁻¹ 、TP含量0.142 mg·L ⁻¹ 。底栖藻类优势物种为窄双菱藻(<i>Surirella angusta</i>)、线形曲壳藻(<i>Achnanthes linearis</i>)、极细微曲壳藻等。底栖动物优势物种为颤蚓、鹳虻科(<i>Athericidae</i> sp.)等
		南部城镇型河流生态亚区(IV ₃)	位于凤仪镇和大理市区,为河流生态系统,主要土地利用类型为农田和城镇,农田43.06%、城镇29.55%。农业和城镇污染较为严重,TN含量0.76 mg·L ⁻¹ 、TP含量0.134 mg·L ⁻¹ 。底栖藻类优势物种极细微曲壳藻、 <i>Achnanthes rivulare</i> 、席藻等。底栖动物优势物种为颤蚓、真凯氏摇蚊(<i>Eukiefferiella</i> sp.)、直突摇蚊(<i>Parakiefferiella</i> sp.)、蚋(<i>Simulium</i> sp.)等
洱海湖泊水生态区(V)	洱海流域的汇水区域,平均海拔1979 m,由湖盆凹陷形成,蓄水量28.8亿m ³ ,主要水生生物鱼类、大型维管束植物、底栖生物、浮游生物	洱海湖泊水生态亚区(V ₁)	洱海湖岸带基本上为农田和城镇,受点源和非点源污染较重,TN含量0.81 mg·L ⁻¹ 、TP含量0.097 mg·L ⁻¹ 。有土著鱼类大理裂腹鱼,但优势种类为鲤科鱼类(<i>Cyprinidae</i> sp.)如鲫鱼(<i>Cyprinus carpio</i>)、鲤鱼(<i>Carassius auratus</i>)、麦穗鱼(<i>Pseudorasbora parva</i>)等。浮游植物优势种有小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)、水化束丝藻(<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>)、美丽星杆藻(<i>Asterionella formosa</i>)、颗粒直链藻(<i>Asterionella formosa</i>)、密集锥囊藻(<i>Dinobryon sertularia</i>)等。底栖动物优势种有霍甫水丝蚓、萝卜螺等

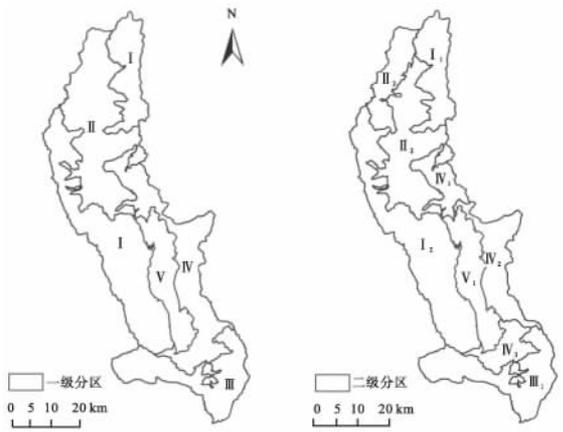


图3 洱海流域水生态一级、二级分区结果示意图
Fig.3 Levels I and II of aquatic eco-regions in Erhai Lake Basin

型 + 水生态区。

按照区域主要土地利用类型,对二级区进行命名。具体为:区域位置 + 流域内土地利用主体类型 + 水体类型 + 水生态亚区。

2 结果与分析

2.1 分区方案

洱海流域被划分为5个一级区和9个二级区。一级区的I、II、VI区被划分,III、V区没有继续划分,而直接作为二级区(图3)。

2.2 分区验证

用环境响应因子来验证分区的合理性。如果验证不合理,则说明所采用的分区指标不合理,或者是分区方法不合理。应该重新考虑新的指标和方法。水生生物是水生态系统的重要组成部分,对环境的变化敏感。对水生态系统的保护很大程度上也是对水生生物的保护。因此可用水生生物作为分区校验

的指标。国外许多学者用鱼类验证分区结果(Larsen *et al.*, 1986; Lyons, 1989; Newall & Magnuson, 1999; Pinto *et al.*, 2009)。而洱海流域的鱼类资源近几十年来由于盲目引种,盲目捕捞、产卵场遭到破坏等人类活动的干扰,呈现出生物多样性(特别是本地种)显著降低、外来种成为绝对优势种,优势种不断更替的现象(杜宝汉和李永安, 2001)。同时很多地方几乎没有鱼的存在。因此,不宜用鱼类作为分区验证的指标。藻类对环境变化的灵敏度高,反应速度快,繁殖力强,易于采集和保存(Pan *et al.*, 2000; Tang *et al.*, 2006; 贾兴焕等, 2008; 吴乃成等, 2009)。群落结构随环境的变化而产生空间上的差异,本研究即采用藻类相对丰度作为分区验证的指标。将样点按分区结果进行分组后,用除去势对应分析(DCA)对分区结果进行校验。

一级分区中,图4a并不能体现I、II、III区的分离情况。主要是因为V区的水生态系统主要类型为湖泊,浮游藻类与河流底栖藻类组成差异较大。将I、II、III单独分析(图4b)可以看出三个区并不是完全分离而是有小部分的重叠。因为这些区域相邻,由于空间自相关性,在相邻的地区会有部分样点具有相似性(van Sickle *et al.*, 2000)。所以藻类组成呈现出连续的变化且有一定的分离,分区合理。

二级分区各区的分离较为明显。图5a为I区的两个亚区的验证结果。由于两亚区分别位于十八溪和弥苴河。地理上差异明显,但由于都处于高海拔地带,某些样点还是具有相似的藻类群落组成。图5b为II区的两个亚区的验证结果。两区的水生态系统类型差异很大。II₁位于茈碧湖和海西海,主要是浮游藻类。II₂位于弥苴河和凤羽河流域,主要是底栖藻类。两区的土地利用形式也大不相同,II₁

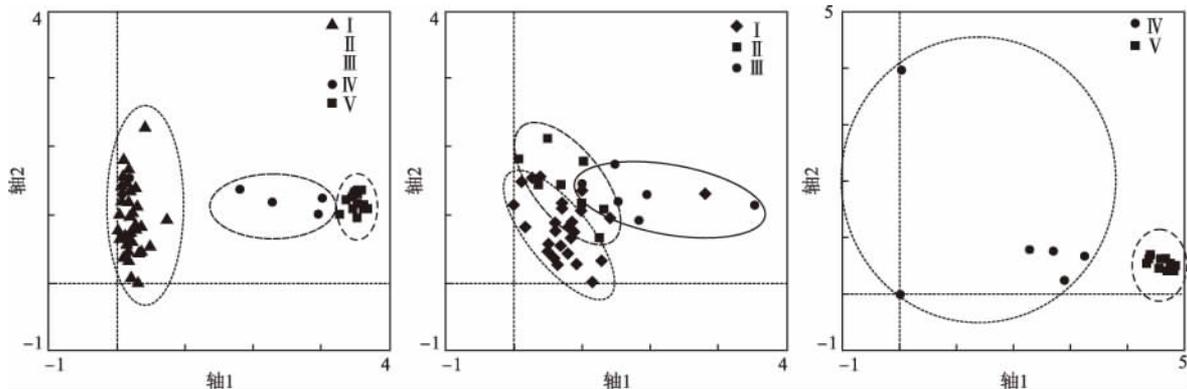


图4 一级分区藻类群落验证
Fig.4 Examination of level I of eco-regions

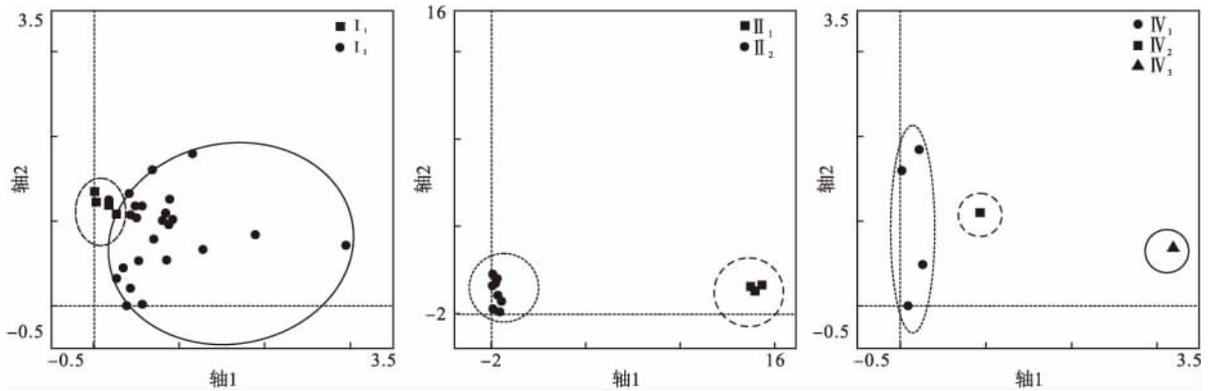


图5 二级分区藻类群落验证

Fig.5 Examination of level II of eco-regions

以灌丛居多,人口较少。 II_2 以农田居多,人口较多,面源污染较大。图5c为IV三个亚区的验证结果。由于IV区位于干热河谷,水系极少,采集水生生物十分困难,但各区分离依旧相对明显,表明本研究所采用的分区体系是合理的。

3 讨论

涉及到洱海流域的分区研究主要有大理州水功能分区和洱海流域环境功能区划等。大理州水功能分区对大理州进行了两级水功能区划,其目的是对水资源的科学规划和有效保护,使水资源可持续利用。该区划划分的主要标准是《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),《污水综合排放标准》(GB 8979-96),《渔业水质标准》(GB 11607-89),《景观娱乐用水水质标准》(GB 12941-91)。一级分区根据开发利用程度划分了保护区、保留区、开发利用区和缓冲区以解决水资源开发和保护问题,二级分区根据各个用水部门划分了饮用水源区,工业用水区,农业用水区,渔业用水区,景观用水区,过渡区和排污控制区以协调用水部门之间的关系(大理白族自治州水利局,2006)。洱海流域环境功能区划属于洱海流域环境规划的一个重要部分,其总体目标是提高森林覆盖率,提高城镇污水处理率,减少点源和面源污染,治理水土流失,控制并减少流域内营养盐输入,使洱海水水质达到地表水II类标准。该区划没有设立分区等级体系,以海拔界限,水域边界和行政范围等综合划定了5个区域,分别是洱海水生态保护区、湖滨带保护区、基本农田保护及农业污染整治区、村镇污染综合整治区和水源涵养及水土流失治理区。并分析了每个区域的主要环境问题和整治措施为洱海流域环境治理提供管理单元(尚榆民

等2003)。上述研究都涉及了洱海流域的分区,为洱海流域以后的区划研究奠定了基础,但存在共性问题:1)水功能分区和流域水环境功能分区只关注人类的需求,水功能分区片面的考虑水功能对人类需求的影响,而没有考虑对水生生物和陆地生物对水的需求。流域水环境分区也从人类的需求出发进行研究,忽略了水生态系统整体情况,对环境的认识有一定的局限性。2)两种分区都以单一因素考虑分区问题,两种分区均主要以水质作为分区的依据,忽略了其他因素对水体的影响。也表现出对水生态系统认识的不深入。3)两种分区均利用定性分析和专家判断确定分区边界,研究者的经验主导分区结果,不具有可重复性。4)两种分区边界均以行政边界为基础,未考虑流域完整性,且区域边界比较模糊,在实际管理中很难界定分区边界。

水生态分区揭示的是水生态系统的空间差异性(孟伟等,2007b)。既考虑人类对水生态系统需求,同时也考虑到水生态系统自身的健康发展。本研究基于洱海现有的水系将洱海流域划分为242个子流域,选用若干影响因素,预先在子流域内统计其平均值(姜甜甜等,2010;高如泰等,2011;Gao *et al.*, 2011),即以子流域为单元,用定量方法分析备选因素对水生态系统的影响并选取主导因素作为分区指标,将分区指标图层叠加形成综合图层后对子流域进行分类,合并具有同质性的子流域并作为一个水生态区(亚区)。对于个别无法划归区域的子流域可用专家判断进行微调保证每个子流域划分到每个区域中。该方法的优点在于:1)将水-陆作为统一整体进行划分,考虑到水-陆的耦合关系;2)多指标分析更加全面的体现洱海流域自然环境和资源现状,综合把握洱海流域水生态系统的空间格局;3)定量

方法选取指标能较为客观的体现区域空间特征,从而分区结果也具有客观性和可重复性,能尽量减少研究者经验造成的主观性;4)用专家判断法确定分区边界较为复杂,利用子流域边界直接确定分区边界能保证流域完整性。方法较为简单且区域边界更加清晰,在实际管理中也具有可操作性且权责明确。

目前国内水生态分区研究尚处于起步阶段,基于子流域的分区研究也存在某些不足。如子流域的划分是用数字高程模型(DEM)的栅格数据进行流向和汇流的运算而得。而在平原地区由于地势平坦,此方法划分的子流域不能真实地反应该区域的流域真实情况。对于该问题也有相应的解决办法。例如,基于SWAT模型用“分片区,分层次”的方法在平原地区所生成的子流域与实际情况比较接近(孙世明等,2011)。也有研究者提出,利用SWAT模型对河流进行合理概化也可以取得比较好的效果(罗运祥等,2011)。总而言之,用定量分析结合子流域的水生态分区可以得到比较好的分区结果,为水生态分区研究提供了新的途径。

致谢 感谢大理学院东喜玛拉雅资源与环境研究所的李延鹏、李进发等在野外采样以及遥感影像解译过程中给予的帮助。

参考文献

- 蔡庆华. 1997. 流域生态学: 水生态系统多样性研究和保护的一个新途径. 科技导报, (5): 24-26.
- 蔡庆华. 2007. 水域生态系统观测规范. 北京: 中国环境科学出版社.
- 常锋毅, 潘晓洁, 康丽娟, 等. 2009. 洱海螺旋鱼腥藻生长生理特性的初步研究. 水生生物学报, 33(3): 385-390.
- 大理白族自治州水利局. 2006. 大理州水功能区划. 大理: 大理白族自治州水利局.
- 杜宝汉, 李永安. 2001. 洱海鱼类多样性危机及解危对策. 环境科学研究, 14(3): 42-44.
- 洱源县水利电力局. 1995. 洱源县水利志. 昆明: 云南大学出版社.
- 费骥慧, 唐涛, 邵晓阳. 2011. 洱海渔业资源与渔业发展模式. 湿地科学, 9(3): 277-283.
- 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 2001. 中国生态区划方案. 生态学报, 21(1): 1-6.
- 高如泰, 姜甜甜, 席北斗, 等. 2011. 湖北省湖泊营养物生态分区技术方法研究. 环境科学研究, 24(1): 43-49.
- 国家环保局. 2002. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社.
- 贾兴焕, 蒋万祥, 李凤清, 等. 2009. 酸性矿山废水对底栖藻类的影响. 生态学报, 29(9): 4620-4629.
- 贾兴焕, 吴乃成, 唐涛, 等. 2008. 香溪河水系附石藻类

- 的时空动态. 应用生态学报, 19(4): 881-886.
- 姜甜甜, 高如泰, 席北斗, 等. 2010. 云贵高原湖区湖泊营养物生态分区技术方法研究. 环境科学, 31(11): 2599-2606.
- 李运刚, 何大明, 何承刚. 2008. 大理市土地利用变化及其驱动力分析. 云南地理环境研究, 20(1): 7-12.
- 梁静静, 左其亭, 奚明. 2011. 淮河流域水生态区划研究. 水电能源科学, 29(1): 21-22.
- 刘国祥, 傅伯杰. 1998. 生态区划的原则及生态特征. 环境科学进展, 6(6): 67-72.
- 罗运祥, 苏保林, 李卉, 等. 2011. 平原河网地区SWAT模型子流域概化方法. 北京师范大学学报(自然科学版), 47(4): 415-418.
- 孟伟, 张远, 郑丙辉. 2007a. 水生态区划方法以及其在中国的应用前景. 水科学进展, 18(2): 293-300.
- 孟伟, 张远, 郑丙辉. 2007b. 辽河流域水生态分区研究. 环境科学学报, 27(6): 911-918.
- 彭文启, 王世岩, 刘晓波. 2005. 洱海水质评价. 中国水利水电科学研究院学报, 3(3): 192-198.
- 任泽, 杨顺益, 汪兴中, 等. 2011. 洱海流域水质时空变化特征. 生态与农村环境学报, 27(4): 14-20.
- 尚榆民, 沈兵, 李宁波, 等. 2003. 洱海流域环境规划//白建坤. 大理洱海科学研究. 北京: 民族出版社: 543-558.
- 孙世明, 付丛生, 张明华. 2011. SWAT模型在平原河网区的子流域划分方法研究. 中国农村水利水电, (6): 17-20.
- 唐涛, 蔡庆华. 2010. 水生态功能分区研究中的基本问题. 生态学报, 30(22): 6255-6263.
- 唐秉奕. 1994. 苍山地貌演变//苍山植物科学考察. 昆明: 云南科技出版社: 8-13.
- 吴乃成, 唐涛, 黎道丰, 等. 2009. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流底栖藻类群落与环境因子的关系. 生态学报, 29(4): 1697-1703.
- 吴庆龙, 王云飞. 1999. 洱海生物群落的历史演变分析. 湖泊科学, 11(3): 267-273.
- 于世伟, 陈贺, 曾容, 等. 2010. 量化方法在生态分区过程中的应用及案例研究. 水土保持研究, 17(4): 247-257.
- 张敏, 蔡庆华, 唐涛, 等. 2011. 洱海流域湖泊大型底栖动物群落结构空间分布. 生态学杂志, 30(8): 1696-1702.
- 张玉华. 2003. 洱海区域气候特征分析//白建坤. 大理洱海科学研究. 北京: 民族出版社: 288-294.
- 邹长新, 燕守广, 方芳. 2010. 湖北省生态功能区划研究. 环境科学与管理, 35(6): 139-143.
- Abell R, Thieme ML, Revenga C, et al. 2008. Freshwater ecoregions of the world: A new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *Bioscience*, 58: 403-414.
- Akasaka M, Takamura N, Mitsunashi H, et al. 2010. Effects of land use on aquatic macrophyte diversity and water quality of ponds. *Freshwater Biology*, 55: 909-922.
- Atkinson CL, Golladay SW, Opsahl SP, et al. 2009. Stream discharge and floodplain connections affect seston quality and stable isotopic signatures in a coastal plain stream. *Journal of the North American Benthological Society*, 28: 360-370.

- Bailey RG. 1976. Ecoregions of the united states. US Department of Agriculture, Forest Service. Map, Scale 1: 7500000.
- Bailey RG. 2004. Identifying ecoregion boundaries. *Environmental Management*, **34**(suppl. 1): S14 – S26.
- Barbour MT, Bierwagen BG, Hamilton AT, et al. 2010. Climate change and biological indicators: Detection, attribution and management implications for aquatic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, **29**: 1349 – 1353.
- Catford JA, Walsh CJ, Beardall J. 2007. Catchment urbanization increases benthic microalgal biomass in streams under controlled light conditions. *Aquatic Sciences*, **69**: 511 – 521.
- Couceiro SRM, Hamada N, Luz SLB, et al. 2007. Deforestation and sewage effects on aquatic macroinvertebrates in urban streams in Manaus, Amazonas, Brazil. *Hydrobiologia*, **575**: 271 – 284.
- Doisy KE, Rabeni CF. 2001. Flow conditions, benthic food resources, and invertebrate community composition in a low-gradient stream in Missouri. *Journal of the North American Benthological*, **20**: 17 – 32.
- Fulton MH, Scott GI, Fortner A, et al. 1993. The effects of urbanization on small high salinity estuaries of the south-eastern United States. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **25**: 476 – 484.
- Gao YN, Gao JF, Chen JF, et al. 2011. Regionalizing aquatic ecosystems based on the river subbasin taxonomy concept and spatial clustering techniques. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **8**: 4367 – 438.
- Harding J, Winterbourn M. 1997. New Zealand Ecoregions: A Classification for Use in Stream Conservation and Management. Wellington: Department of Conservation.
- Hargrove W, Hoffman F. 2005. Potential of multivariate quantitative methods for delineation and visualization of ecoregions. *Environmental Management*, **34**(Suppl. 1): S39 – S60.
- Host GE, Polzer PL, Mladenoff DJ, et al. 1996. A quantitative approach to developing regional ecosystem classifications. *Ecological Applications*, **6**: 608 – 618.
- Kleynhans C, Silberbauer M, Kemper N. 1998. Preliminary Ecoregion Level 1 Classification for South Africa. Institute for Water Quality Studies. Pretoria: Department of Water Affairs and Forestry and Institute for Water Research.
- Larsen DP, Omernik JM, Hughes RM, et al. 1986. Correspondence between spatial patterns in fish assemblages in Ohio streams and aquatic ecoregions. *Environmental Management*, **10**: 815 – 828.
- Lazorchak JM, Klemm D, Peck DV. 1998. Environmental monitoring and assessment program-surface waters: Field operations and methods for measuring the ecological condition of Wadeable streams. EPA/V620/R-94/004F. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C.
- Li FQ, Cai QH, Liu JK. 2009. Temperature-dependent growth and life cycle of *Nemoura sichuanensis* (Plecoptera: Nemouridae) in a Chinese mountain stream. *International Review of Hydrobiology*, **94**: 595 – 608.
- Lyons J. 1989. Correspondence between the distribution of fish assemblages in Wisconsin streams and Omernik's ecoregions. *American Midland Naturalist*, **122**: 163 – 182.
- Newall P, Magnuson J. 1999. The importance of ecoregion versus drainage area on fish distributions in the St. Croix River and its Wisconsin tributaries. *Environmental Biology of Fishes*, **55**: 245 – 254.
- Newall P, Walsh CJ. 2005. Response of epilithic diatom assemblages to urbanization influences. *Hydrobiologia*, **532**: 53 – 67.
- Nunes AN, de Almeida AC, Coelho COA. 2011. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography*, **31**: 687 – 699.
- Omernik JM. 1987. Map supplement: Ecoregions of the conterminous United States. *Annals of the Association of American Geographers*, **77**: 118 – 125.
- Omernik JM. 2004. Perspectives on nature and definition of ecological regions. *Environmental Management*, **34**(suppl. 1): S27 – S38.
- Pan YD, Stevenson RJ, Hill BH, et al. 2000. Ecoregions and benthic diatom assemblages in Mid-Atlantic Highlands streams, USA. *Journal of the North American Benthological Society*, **19**: 518 – 540.
- Pinto BCT, Araujo FG, Rodrigues VD, et al. 2009. Local and ecoregion effects on fish assemblage structure in tributaries of the Rio Paraiba do Sul, Brazil. *Freshwater Biology*, **54**: 2600 – 2615.
- Rosenberg DM, Wiens AP, Bilyj B, et al. 2001. Peatland Chironomidae (Diptera): Effects of flooding on emergence from lake 979, Experimental Lakes Area, Ontario. *Journal of the North American Benthological Society*, **20**: 448 – 467.
- Snelder T, Lehmann A, Lamouroux N, et al. 2010. Effect of classification procedure on the performance of numerically defined ecological regions. *Environmental Management*, **45**: 939 – 952.
- Stamp JD, Hamilton AT, Zheng L, et al. 2010. Use of thermal preference metrics to examine state biomonitoring data for climate change effects. *Journal of the North American Benthological Society*, **29**: 1410 – 1423.
- Tang T, Cai QH, Liu JK. 2006. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi river system. *Environmental Monitoring and Assessment*, **112**: 347 – 361.
- van Sickle JV. 2000. Classification strengths of ecoregions, catchments, and geographic clusters for aquatic vertebrates in Oregon. *Journal of the North American Benthological Society*, **19**: 370 – 384.
- Ye L, Cai QH, Liu RQ, et al. 2009. The influence of topography and land use on water quality of Xiangxi River in Three Gorges Reservoir region. *Environmental Geology*, **58**: 937 – 942.

作者简介 杨顺益,男,1986年出生于博士研究生,主要从事河流底栖藻类生态学研究。E-mail: ysy860519@ihb.ac.cn
责任编辑 李凤芹