

湖泊型流域水生态功能分区的理论与应用

高俊峰,高永年,张志明

(中国科学院流域地理学重点实验室,中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

摘要:地域分异是地理学核心研究方向之一,水生态功能分区是地学分区面向生态环境领域的发展和应用。基于水生态分区的管理是流域水环境管理的趋势,流域水生态功能分区是建立中国新型水环境管理的基础。论文在界定水生态功能分区涉及的主要概念基础上,分析了湖泊型流域水生态系统的尺度,为湖泊型流域水生态功能分区体系的建立奠定了理论基础;根据分区的目的,建立了分区的原则和指标体系,研发了分区技术、结果验证校核方法;以巢湖流域为例,进行了一级至四级水生态功能分区,并对分区结果进行验证。湖泊型流域水生态功能分区有助于丰富地域分异规律研究,对水生态目标管理的理论与方法具有指导作用。

关键词:湖泊型流域;水生态功能分区;尺度;等级;巢湖流域

分区是地学领域独特的研究分支,是地理学及其相关研究领域研究热点之一(冷疏影, 2016)。地学分区的研究在学科发展和社会进步方面发挥了巨大的作用。如19世纪俄国地理学家道库恰耶夫的土壤分区与20世纪初德国气候学家柯本的气候分区,是地学界最早的经典分区成果。黄秉维先生的综合自然区划对认识中国地带性和非地带性自然规律起到指导作用(黄秉维, 1958),傅伯杰院士的中国生态区划对认识生态的区域一致性规律起到重要作用(傅伯杰等, 2001),郑度院士的生态地理区划是生物多样性研究的空间分异基础(郑度, 2008)。

基于水生态分区的流域水环境管理是环境管理发展的趋势,流域水生态功能分区是建立中国新型水环境管理、水质目标管理的基础,也是水生态保护、修复、管理的基础,水生态功能分区有助于丰富流域生态功能区划和目标管理的理论与方法,对同类水生态管理和环境控制具有示范作用(高永年等, 2010; 高永年等, 2012; 高俊峰等, 2016; 高俊峰等, 2017)。国家水污染控制与治理重大专项提出

按照“分区、分类、分级、分期”实施水环境治理和管理的理念,水生态功能分区的研究将回答“分区、分类、分级”的科学问题,同时面向应用需求,实现和管理的对接和示范应用(高俊峰, 高永年, 2012; 于宏兵等, 2016; 高俊峰等, 2017; 陈利顶等, 2018; 黄艺等, 2018)。流域水生态功能分区可为保护生态和环境,维持水生生物及其栖息环境的健康,合理开发利用水资源,实现水污染控制、治理和预防、水生态管理目标与制定措施方案等提供科学依据。

相对于水生态功能分区,中国类似的分区研究还包括水功能区划、水环境功能区划、水生态地理分区、生态分区等(李艳梅等, 2009)。水功能区划依据水域主导功能不同来划分,用于水资源的开发利用及保护。它简单直观地将不同水域进行了划分,利于水资源的开发利用及保护,而对水体的自然、生态特征方面考虑较少;未充分考虑水环境容量。水环境功能区划是据水域污染物种类以及水质类型不同来划分,用于控制水污染,保障水环境容量。它更加注重水环境的保护,充分考虑水环境容量,而对水生态系统完整性考虑不足;缺乏流域整

收稿日期:2019-02-18;修订日期:2019-06-11。

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301-001-02)。[Foundation: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment, No. 2017ZX07301-001-02.]

第一作者简介:高俊峰(1967—),男,内蒙古鄂尔多斯人,研究员,博士生导师,研究方向为流域水生态功能评估与流域过程模拟。E-mail: gaojunf@niglas.ac.cn

引用格式:高俊峰,高永年,张志明. 2019. 湖泊型流域水生态功能分区的理论与应用[J]. 地理科学进展, 38(8): 1159-1170. [Gao J F, Gao Y N, Zhang Z M. 2019. Theory and application of aquatic ecoregion delineation in lake-basin. Progress in Geography, 38(8): 1159-1170.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.08.005

体层面上的协调和统一;对容量总量的考虑需加强。水生态地理分区是依据水域生态地理的异同性来划分,用于表征自然要素(温度、水文、生物等)的空间格局,它考虑了自然要素与资源、环境的匹配,仅仅是通过自然地理要素的差异进行划分未考虑其与河流生态系统类型之间的因果关系,更没有考虑人类活动对水体环境的影响。水生态分区是应用生态学原理和方法,并依据水体资源功能和生态功能的协调来划分,满足区域水资源的可持续开发利用和环境保护需要,它注重自然因素与河流生态系统类型之间的因果关系,并反映水生态系统的基本特征,但未充分考虑水生态服务功能以及人类活动对水体的影响。

水生态功能分区是协调水资源、水环境和水生态3个方面的划分方法,并同时考虑自然因素以及人类活动对水生态系统的影响,但目前水生态功能分区体系尚不完善。为保障流域水质以及实现水生态系统的健康和安全的目标,在“十一五”期间启动的国家水体污染控制与治理科技重大专项(水专项)中专门设置了“流域监控”主题,其中一项重要任务是要“系统地开展流域水生态功能分区理论与方法研究,建立水生态功能分区分指标体系,建立全国水生态功能分区技术框架,完成重点流域水生态功能一级、二级区划,完成示范流域三级区划和污染控制单元划定方案”。“十二五”将在完善分区理论体系的基础上开展重点流域水生态功能三、四级分区研究。其中,重点流域水生态功能四级分区的研究及其相关研究成果将为实现面向水生态系统健康的流域污染控制单元的划分及水生态管理模式提供依据和强有力的技术支持,为维护流域水生态系统生物多样性、实现流域水生态系统健康这一终极目标奠定基础(高俊峰, 高永年, 2012; 高俊峰等, 2016; 于宏兵等, 2016; 高俊峰等, 2017; 陈利顶等, 2018; 黄艺等, 2018)。

本文在分析湖泊型流域空间分异特点和尺度的基础上,提出了水生态功能分区的原则、指标体系、分区方法,并对巢湖流域进行水生态功能四级分区,以期推动自然地域分区理论与方法的发展和实际应用。

1 湖泊型流域空间结构特征与尺度

1.1 湖泊型流域空间结构特征

水系的集水区域称为流域。集水区的终点为

湖泊的称为湖泊型流域,集水区的终点为河口或海洋的,称为河流型流域。湖泊型流域空间结构特征主要表现为圈层性结构,这是与河流型流域在空间结构上的主要差异。具体到流域对象上,如水系、水量、水质、水生物、地形地貌、降水、气温等要素一般都表现出圈层性的湖泊型流域特征。在空间结构上,湖泊型流域主要表现为“山区—丘陵区—山前区—平原河网湖荡区—入湖河口区(湖滨带)—湖体”圈层性结构特征。

1.2 湖泊型流域的尺度

尺度是地学研究的关键和核心,决定生态系统的结构、功能和过程。不同尺度上,生态功能所面临的问题和解决方法有很大的区别(Bailey, 2009, 2014; 吕一河等, 2001)。不同的尺度上,影响水生态功能的主要因子不同;在一个尺度得到的结果和解释,在另一个尺度里可能不合适甚至错误(Fisher, 1994),尺度分为时间和空间2种形式。水生态功能分区必须考虑到尺度问题,通过尺度来反应分区的等级(高俊峰, 高永年, 2012; 高俊峰等, 2017)。

流域的气候、地质特点决定水体的特点,是水体理化自然特征的主要影响因子,进而决定流域内生物/生态特性(高俊峰, 高永年, 2012; 高俊峰等, 2017)。气温、光照、降水等气候因子和土壤、土地利用等地表因子在较大的空间和时间尺度上表现出显著的差异性,时间变化尺度为百年,空间差异性可以在10000 km²以上,这些差异性鱼类、大型水生高等植物的生物量或种类组成最重要的决定因子(Kalff, 2002; 高俊峰等, 2016);降雨和水文状况、水体的浊度和营养物等因子时间变化尺度在年际之间,空间上差异性体现在500~10000 km²范围的尺度,在此尺度上对生物的生物量或种类组成影响明显;流速、底质、河流比降、水深、波浪等在月度时间尺度、10~500 km²的空间尺度上表现出差异性,通过水深、水化学等因素影响生物生长类型、生长率和生物量;温度、光照等在小时和天时间尺度、0.1~10 km²空间尺度上,影响到浮游植物的沉降、紊流,底栖动物的摄食(Fisher, 1994; Kalff, 2002)。

2 湖泊型流域水生态功能分区理论方法

2.1 湖泊型流域水生态功能分区内涵

水生态功能分区是在研究流域水生态系统结构、过程和功能的空间分异规律基础上,按照一定

的原则、指标体系和方法进行区域的划分,同一类型具有相对一致的水生态系统的组成、结构、格局、过程和功能。水生态系统具有很强的地域性,地区差异十分明显,按区内相似和区际差异来划分水生态功能区,可以反映流域水生态系统的特征、空间分布规律,及其与自然因素的对应关系(高俊峰, 高永年, 2012; 高俊峰等, 2017)。

2.2 湖泊型流域水生态功能分区级别

湖泊型流域水生态功能分区不同级别表达不同尺度上的水生态系统特征,如一级水生态功能分区主要表达流域尺度上气候及其关联因子,如气温、降水、光照和地形等要素决定下的水生态系统的空间差异特征;二级水生态功能分区主要表达流域内区域尺度上土地因子,如土地利用、土地覆被、土壤和地质等要素决定下的水生态系统的空间差异特征;三级水生态功能分区主要表达子流域尺度上水体因子,如河网(水系)数量、河网(水系)形态结构、河网(水系)连通性等要素决定下的水生态系统的空间差异特征;四级水生态功能分区主要表达河段尺度上生物生境因子如水物理、水生物、水化学等要素决定下的水生态系统的空间差异特征(高永年等, 2010; 高永年等, 2012; 高俊峰等, 2017)(图1)。

2.3 湖泊型流域水生态功能分区原则

分区原则是进行流域水生态功能分区的依据、准则和基础,在分区过程中起指导性作用,其合理

与否直接关系到分区结果的正确性与可信度,为此,在依据湖泊型流域空间结构和尺度特征、水生态系统原理进行不同级别水生态功能分区时遵循以下总体原则:① 体现湖泊型流域水生态系统的潜在特征及其空间分异;② 体现以湖泊为核心的湖泊型流域的圈层性水生态特征;③ 体现湖泊型流域水生态系统的层级性及其与陆域要素的关联,表达流域水生态系统的空间尺度特征;④ 子流域完整性原则;⑤ 以水定陆与水陆耦合原则:陆地气候、土壤、水文、生物等自然条件以及人类活动等是流域水生态特征与功能的重要影响或决定因素,在水文汇流过程下,各种陆源营养盐或污染物输移到水体中,形成特定的水生态结构和特征,从而体现出不同的功能特征;考虑水体特征,体现陆水一致性是进行水生态功能分区的必要选择;⑥ 发生学原则;⑦ 其他原则:区内相似性原则、区间差异性原则、等级性原则、综合性与主导性原则、共轭性原则。另外,三级分区尚需遵循以下特有原则:体现流域水体类型(河网水系)特征、重要大型湖体的差异;突出与湖泊等重要水体的关系特征;突出水系完整性。四级分区尚需遵循以下特有原则:突出珍稀、特有等关键水生生物物种的保护;突出重要水生生境的维持;四级分区落实到水体上,及其对应子流域;与各分区(如水功能区、水环境功能区、生态功能区、生态红线等)的衔接。

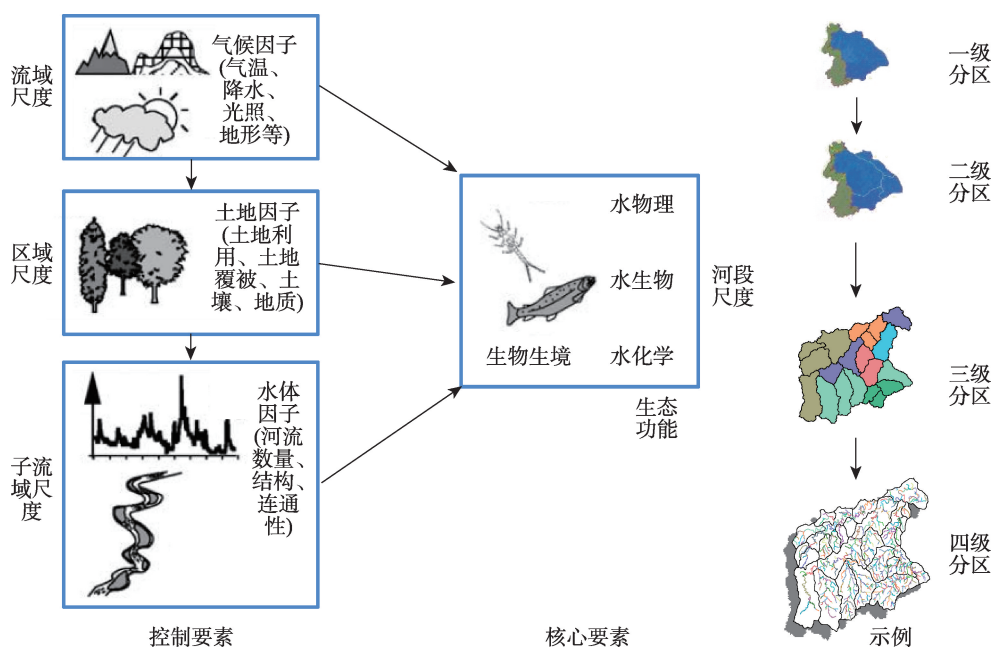


图1 湖泊型流域水生态功能分区尺度、控制要素、核心要素及其关联特征

Fig.1 Scale, control elements, core elements, and relationship of aquatic ecoregion delineation of lake-basin

2.4 湖泊型流域水生态功能分区指标体系

依据湖泊型流域特征,结合水生态功能各级分区的目的和原则,面向湖泊型流域水生态功能分区的现实需求,建立湖泊型流域水生态功能分区指标体系(高永年等, 2010; 高永年等, 2012; 高俊峰等, 2017)(表1)。

2.5 湖泊型流域水生态功能分区技术流程

湖泊型流域水生态功能分区的技术流程见图2。其中,湖泊型流域水生态功能分区与一般性流域水生态功能分区主要区别体现在水生态功能四级分区上(图2b)。具体来说,依据湖泊型流域水生态功能分区目的和原则,提出四级分区指标,并分别进行河段分类和湖体划分;在此基础上,形成湖泊型流域水生态功能四级分区;接着识别湖泊型流域水生态功能四级分区的水生态功能,并进行水生

态功能区水生态功能重要性排序与综合,定位湖泊型流域水生态功能四级区主导水生态功能,最终实现水生态功能四级区的应用。

2.5.1 一级至三级分区技术流程

开展湖泊型流域水生态综合调查,重点调查并收集流域水生物、水环境、栖息地质量、服务功能、土地利用、土壤类型等资料。选取合适精度的DEM(Digital Elevation Model),通过水文分析划分出湖泊型流域的自然水文单元及其水系,并以自然水文单元为边界,分割水系。将分割得到的河段和面状水体作为水生态功能分区的基本单元。依据分区的目的、原则与分区指标,借助流域综合调查资料,识别分区基本单元河段、湖库的类型、面积及其相应的水生态功能。并以河段和面状水体为分区基本单元,对分区要素进行空间离散,随后进行

表1 湖泊型流域水生态功能一级至四级分区指标体系

Tab.1 Lake-basin aquatic ecoregion delineation index system

分级	尺度	目标	备选指标	适用对象
一级	流域	自然地理因素	地面高程、河网密度、降雨量、温度	
二级	区域	本底/人类活动干扰	土壤类型、坡度、建设用地面积比、耕地面积比、植被覆盖度、	
三级	子流域	水体类型和特征	水系格局、水面率、河流节点度、河流等级、河频率、水系类别、子流域形状、河流长度与水面比、河频率与节点密度比	
四级	河段	生物栖息地	河道比降、河岸带类型、河段蜿蜒度 湖泊类型(海拔、深度、面积、底质)、水动力(流速、流向)、浮游植物(叶绿素a) 水库类型(水库容量)	河流 湖泊 水库

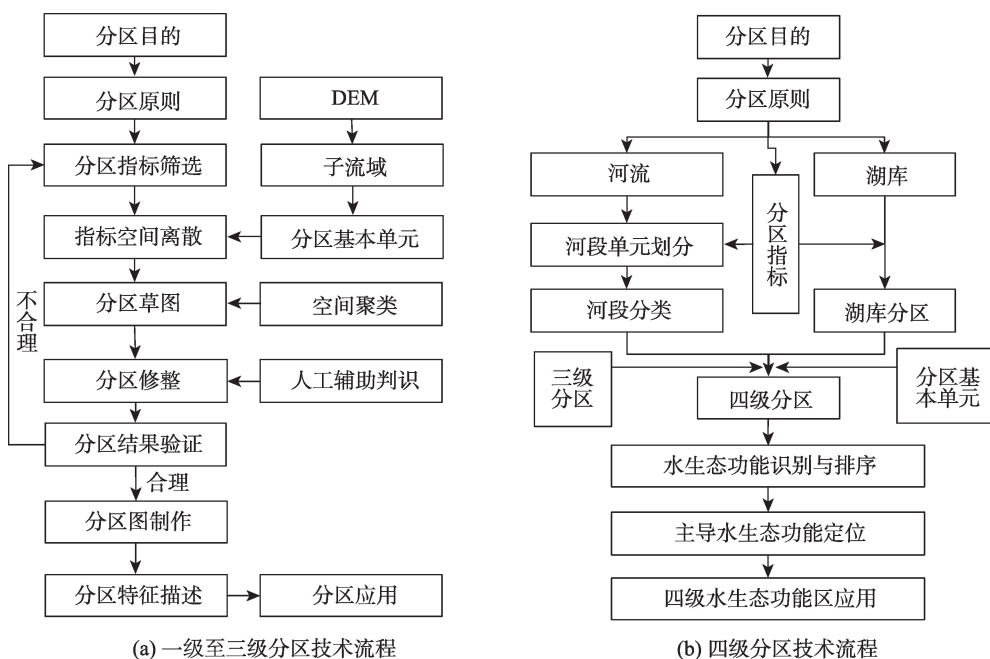


图2 湖泊型流域水生态功能分区技术流程

Fig.2 Lake-basin aquatic ecoregion delineation framework

水生态功能区重要性排序与综合,辅以人工判识,考虑湖泊型流域水生态功能上一级分区边界,确定本级水生态功能分区边界,形成的本级水生态功能分区草图。在此基础上,在人工辅助识别下,对初步分区结果进行修正,并应用生物指标对分区结果进行验证,如不合理,则重新筛选分区指标进行分区工作;如分区结果合理,则进行分区命名、特征描述、分区图制作、分区说明书编写等下一步工作。判断分区是否合理可以采用定性与定量相结合的方法进行,定性的方法可以采用专家咨询法,定量方法可以采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)或者典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)等方法判断。

2.5.2 四级分区过程

- (1) 河段分类和湖库划分。依据湖泊型流域水生态功能四级分区的目的与原则,借助流域综合调查资料,首选通过四级分区指标对河段进行分类,并按照湖泊、水库等四级分区指标区分不同水体类型和划分湖体。
- (2) 四级分区划分。将相同类型的河段所在的基本分区单元合并,结合湖库划分结果,同时考虑三级分区结果,辅以人工判识,形成湖泊型流域水生态功能四级分区。
- (3) 主导水生态功能识别。对于四级分区来说,首先确定水生态功能类型(表2)。针对识别出的

水生态功能,采取下述方式进行功能优先度排序,并借助GIS空间分析功能将水生态功能区综合。排序方式为:a.珍稀、濒危物种保护功能区>特有物种保护功能区>敏感物种保护功能区>种质资源保护功能区;b.水生物产卵索饵越冬功能区/鱼类洄游通道功能区;c.涉水重要保护与服务功能区;d.淡咸水生态交错维持功能区/湖滨带生态生境维持功能区;e.调节与循环功能区;f.森林岸带生境区/城镇岸带生境区/农田岸带生境区。

针对湖泊型流域水生态功能类型确定,还需要注意以下几方面:

划分水体岸带类型。针对湖泊型流域特征,将其栖息地划分为3种类型:森林岸带生境区,城镇岸带生境区,农田岸带生境区。其中森林岸带生境区指的是岸带以森林生境为主的河段和中小型湖库等;城镇岸带生境区指岸带以城镇生境为主的河段和中小型湖库等;农田岸带生境区指岸带以农田生境为主的河段和中小型湖库等。按照上述水体岸带类型,将流域内相应的河段和面状水体归类,并基于GIS工具制作其空间分布图。

过渡带类型划分。湖泊型流域过渡带类型为湖滨带生态生境维持功能区,指与湖泊生态系统密切相关的并与湖泊相交或相邻的主要入湖、出湖河流域水系,属河流生态系统与湖泊生态系统交错的综合生态系统。按照过渡带类型,将流域内相应的过

表2 湖泊型流域水生态功能类型
Tab.2 Aquatic function types of lake-basin

水生态功能类型	说明
珍稀、濒危物种保护功能区	指有代表性的珍稀、濒危等各类野生水生动植物物种的天然集中分布区
特有物种保护功能区	指我国或地方特有的鱼类等物种的天然集中分布区
敏感物种保护功能区	指有代表性的、对环境敏感或已消失的各类野生水生动植物物种的天然集中分布区
丰富生物多样性维持功能区	在底栖动物、鱼类等水生生物类型方面具有丰富多样性的区域
种质资源保护功能区	指具有重要经济价值、遗传育种价值或生态价值,或属于中国或地方特有的水生物种产区等
水生物产卵索饵越冬功能区	指对维护鱼类等水生物多样性具有重要作用的水域,包括鱼虾类产卵场、索饵场、越冬场、鱼虾贝藻休养生场等
鱼类等洄游通道功能区	指洄游性经济鱼、虾类的群体主群、集群由越冬场游向产卵场生殖的必经水域
涉水重要保护与服务功能区	指自然保护区、湿地、水源地等需要加以特别保护的区域
淡咸水生态交错维持功能区	指与咸水海洋生态系统密切相关的并与流域河流相交或相邻的主要入海河流域水系,需要采取有效的保护措施和科学的开发方式进行特殊管理的区域,属河流生态系统与海洋生态系统过渡的综合生态系统
湖滨带生态生境维持功能区	指与太湖湖泊生态系统密切相关的、并与太湖相交或相邻的主要入湖、出湖河流域水系,属河流生态系统与湖泊生态系统交错的综合生态系统
调节与循环功能区	指承担营养物质循环、泥沙输送、水文循环、水运保障等功能的流域性河流,包括引江济太工程河道,以及向重要水源地供水的骨干河道等
森林岸带生境区	指岸带以森林生境为主的河段、湖库等
城镇岸带生境区	指岸带以城镇生境为主的河段、湖库等
农田岸带生境区	指岸带以农田生境为主的河段、湖库等

渡带归类,并基于GIS工具制作其空间分布图。

调节与循环功能区划分。调节与循环功能区指承担营养物循环、泥沙输送、水文循环、水运保障等功能的流域性河流,包括调水引流工程河道以及向重要水源地供水的骨干河道等。按照上述调节与循环功能区定义,将流域内相应的调节与循环功能区归类,并基于GIS工具制作其空间分布图。

涉水重要保护与服务功能区划分。涉水重要保护与服务功能区指自然保护区、湿地、水源地等需要加以特别保护的区域。按照上述涉水重要保护与服务功能区定义,将流域内相应的涉水重要保护与服务功能区归类,并基于GIS工具制作其空间分布图。

生物保护区划分。生物保护区主要包括珍稀、濒危物种保护功能区、特有物种保护功能区、敏感物种保护功能区和种质资源保护功能区。珍稀、濒危物种保护功能区指有代表性的珍稀、濒危等各类野生水生动植物物种的天然集中分布区;特有物种保护功能区指中国或地方特有的鱼类等物种的天然集中分布区;敏感物种保护功能区指有代表性的对环境敏感或已消失的各类野生水生动植物物种的天然集中分布区;种质资源保护功能区指具有重要经济价值、遗传育种价值或生态价值或属于中国或地方特有的水生物苗种区等。按照上述生物保护区类型,将流域内相应的生物保护区归类,并基于GIS工具制作其空间分布图。

渔业资源保护区划分。渔业资源保护区主要包括鱼类洄游通道功能区和水生物产卵索饵越冬功能区。前者指洄游性经济鱼、虾类的群体主群、集群由越冬场游向产卵场生殖的必经水域;后者指对维护鱼类等水域生物多样性具有重要作用的水域,包括鱼虾类产卵场、索饵场、越冬场、鱼虾贝藻休养场等。

(4) 分区应用。在确定湖泊性流域水生态功能四级分区主导水生态功能的基础上,形成最终分区结果,可为流域水生态功能健康评估和主导水生态保护目标制定提供依据。

2.6 湖泊型流域水生态功能分区关键技术

2.6.1 分区基本单元确定技术

利用流域DEM数据,经过填洼、流向生成、水流累积量分析等步骤,获得分区功能单元分布图。平原区有圩区分布的,以圩区边界作为分区功能单元;其他地区,以每一单元内单一土地利用类型所占比例大于80%作为判别标准,若单元内某一类土

地利用类型所占比例大于80%,则确定为一个基本分区功能单元;若没有任何一类土地利用类型所占的比例大于80%,则将分区功能单元进一步细化,直到单元内单一土地利用类型大于80%为止,最后结合流域河流水系分布,采用人工修整的方式对其进行整理,从而获得水生态功能分区的功能单元。

2.6.2 分区指标筛选技术

依据湖泊型流域水生态功能分区的目的和原则,借助相关统计分析方法(CCA、RDA等),对备选指标与调查获得的水环境、水生态数据进行分析,从备选指标中选取与调查数据(水环境、水生态数据)空间变化显著相关的指标,并结合湖泊型流域的实际情况,筛选出不同尺度与水生生物关系密切的指标。

2.6.3 分区指标空间离散技术

依据选取的水生态功能分区指标,以水生态功能分区功能单元为基础,利用GIS空间分析方法将各级分区指标进行空间离散。空间离散的方法根据指标的不同有所差别,一般有整体插值离散和局部插值离散2类。整体插值法以整个研究区的样点数据为基础计算,通过使用方差分析和回归分析等标准的统计方法,计算比较简单,分为边界内插值法、趋势面分析、变换函数插值法等类型。局部插值方法只使用临近的数据点来估计未知点的值,所使用的插值函数,区域大小、形状和方向,数据点的个数,数据点的分布形式是否规则等都会影响插值结果,插值方法包括泰森多边形法、移动平均插值法、样条函数插值法、空间子协方差最佳插值法(Kriging插值法)等。

2.6.4 分区指标空间聚类技术

采用二阶聚类模型(two step cluster)进行空间聚类分析。二阶聚类算法分为两步进行:第一步称为准聚类过程,采用BIRCH(balanced iterative reducing and clustering using hierarchies)算法(Zhang et al, 1996)构建一个高度稳定的多水平结构聚类特征树(cluster feature tree, CF-tree);第二步为具体的聚类分析,主要利用似然函数作为测距公式对前一步结果的样本进行聚类分析,常用算法是一般的层次聚类方法(hierarchical cluster)(祝迎春, 2005)。该聚类模型可对一阶数据再聚类成几个自然组或类。对零散分布的单元结合专家判断和就近合并的原则进行人工辅助识别,同时兼顾相关规划方案,初步确定水生态功能分区边界,形成水生态功能分区草图。传统意义上的二阶聚类是对样本数

据的类别划分,而水生态功能分区指标具有地表空间连续性,利用传统二阶聚类方法聚类后的结果投射到地理空间上后,往往得不到理想的分区结果,即聚类结果在空间上不完整,存在不同程度的破碎化状况,最常见的是零星分布、面积较小的类别,这主要是地表参数自身的复杂性和不确定性造成的。因此,传统的二阶聚类法无法直接应用到水生态功能分区过程中,需要基于空间要素信息改进传统二阶聚类方法,形成改进后的二阶空间聚类法,以便进行分区应用。二阶空间聚类不仅可以发现分区聚类单元(即子流域)指标属性间的内在联系和相似度,而且也融合了聚类单元的空间属性信息,即能够有效解决空间不连续的问题。

2.6.5 分区结果验证技术

为验证水生态功能分区结果的科学性和合理性,考虑到水质指标众多,持续监测难度较大,且河流水质状况易受周边环境的影响而产生波动,而河流浮游生物和大型底栖动物对水质变化较为敏感,在一段时间内与环境的相关指标比较稳定,能够较准确的反映区域水质状况,因此采用浮游生物和大型底栖动物从定性和定量的角度进行比较分析验证分区的合理性和可靠性。主要选择多样性指数,主要包括 Margalef 种类丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 指数和 BP 生态优势度指数等指标进行对分区结果进行分析验证。采用去除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)等分析方法检验选取指标在水生态功能分区内的空间差异性是否显著,若差异显著则说明水生态功能分区结果合理可靠,则进行水生态功能分区图的制作;如果不显著则应返回水生态功能分区指标,对分区草图进行必要的调整和修正,然后重复以上步骤,直到水生态功能分区结果合理可靠。

3 湖泊型水生态功能分区实践和应用

3.1 巢湖流域概况

选择巢湖流域作为湖泊型流域进行水生态功能分区研究。巢湖流域位于安徽省中部,属长江中下游北岸水系,流域西北以江淮分水岭为界,南临长江,西接大别山,东北邻滁河流域(水利部长江水利委员会, 1999; 李建军等, 2010)。巢湖流域总面积为 1.35 万 km²,流域地形总体由西向东渐低,流域

西南部杭埠河上游为山区,海拔最高达到 1500 m 左右,东北为丘陵及浅山区,沿江、沿湖为平原水网区,地面高程一般在 7.5~13.0 m 之间(高俊峰, 蒋志刚, 2012)。巢湖面积为 779 km²,流域内大于 20 km² 的湖泊和水库 4 个。

巢湖流域属于北亚热带湿润性季风气候区,多年平均气温 16℃,相对湿度 76%,气候温和湿润,四季分明,雨量适中,热量丰富,无霜期较长,一般在 200 d 以上(中国科学院《中国自然地理》编辑委员会, 1984)。巢湖流域多年平均年降水量 1215 mm,其中汛期 5—8 月降水量占年降水量的 51%。流域最大年降水量 1986 mm(1991 年),最小年降水量 672 mm(1978 年)。多年平均年径流量 59.2 亿 m³,51% 的径流量集中在汛期 5—8 月(王耀武等, 1999; 中国河湖大典编委会, 2010)。巢湖流域水资源丰富,多年平均水资源量为 65 亿 m³,其中 5—9 月占 64%(中国科学院《中国自然地理》编辑委员会, 1985)。

3.2 巢湖流域水生态功能分区结果

根据水生态功能分区方法,基于巢湖流域自然地理因素和人类活动特征等相关指标看,对巢湖流域进行了水生态功能一、二、三级分区(高俊峰等, 2017),将巢湖流域分为 3 个水生态功能一级区,7 个二级分区,28 个水生态功能三级区(图 3)。

根据水生态功能四级分区方法,基于体现巢湖流域生物栖息地特征差异的指标,对河段进行分类,采用水功能区划结果,划分湖体,将巢湖流域分为 62 个水生态功能四级区(图 4)。

3.3 巢湖流域水生态功能分区结果验证

3.3.1 一级至二级分区结果验证

采用 DCA 技术对一、二级分区方案进行验证。区域 LEI 底栖动物相对密度在 0~0.7 的范围内、底栖动物相似度在 0.5~1.2 之间变化;LEII,底栖动物相对密度在 0.95~2.1 的范围内、底栖动物相似度在 0~1.7 之间变化;LEIII,底栖动物相对密度在 0.95~1.15 的范围内、底栖动物相似度在 0.25~0.4 之间变化。尽管 LEII 和 LEIII 区域采样点的特征参数之间存在交叉现象,但巢湖湖体各采样点的底栖动物相似度更接近且相对密度变化也不明显。因此,采用底栖动物来验证一级分区的科学性还是较为合适的。

由于受水文气象条件、区域河流形态特征以及河流沿岸生活污水、工业废水和农田径流影响,一

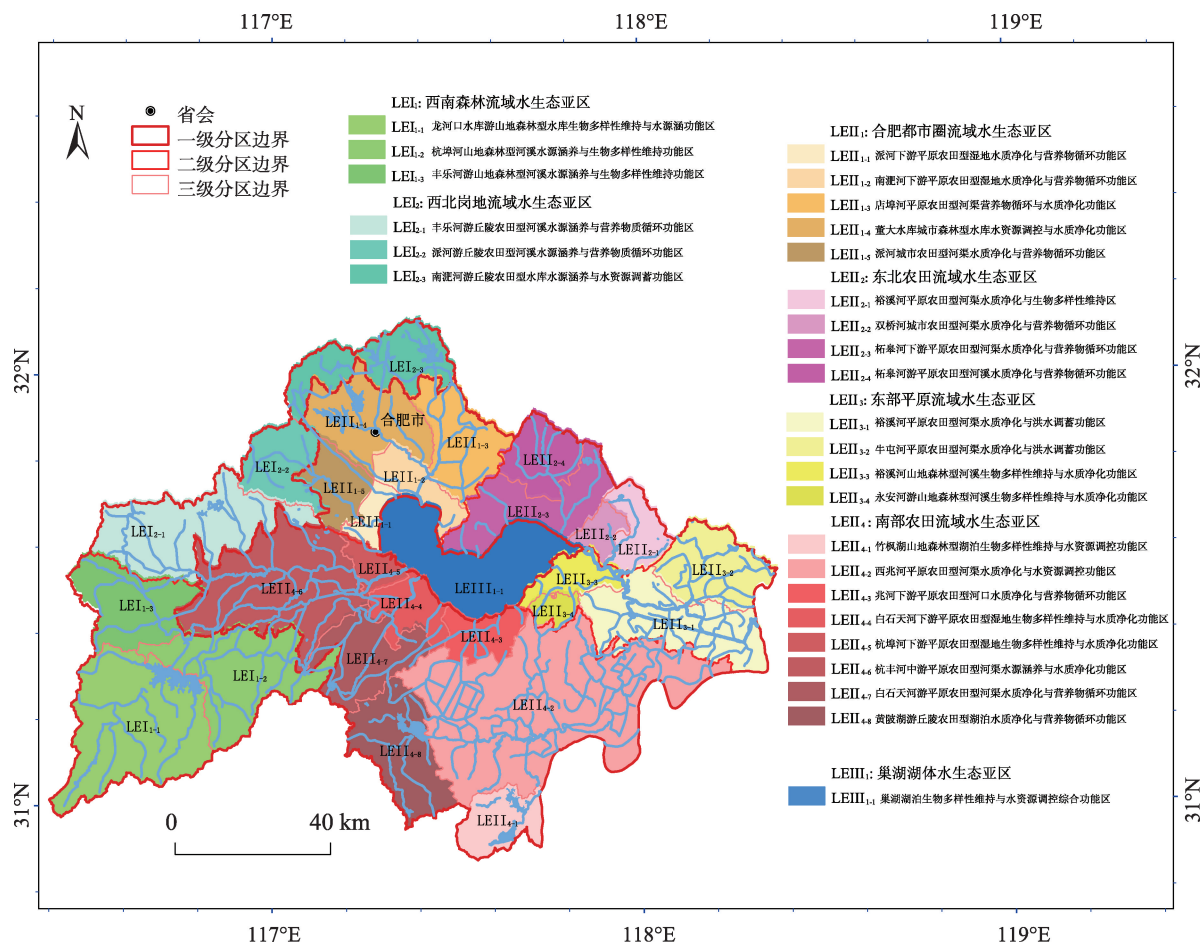


图3 巢湖流域水生态功能三级分区

Fig.3 Aquatic ecoregion levels I-III of Chao Lake Basin

级区内部仍然存在显著差异。每一个一级区域均可继续分化,区域LEI可分化出2个子区域(LEI₁和LEI₂);区域LEII分化出4个子区域(LEII₁、LEII₂、LEII₃和LEII₄),且6个子二级区域均有较好的分化(图5)。

3.3.2 三级分区结果验证

为验证分区结果的科学性和合理性,采用底栖动物指标从定性和定量的角度对三级分区结果进行比较分析验证。主要选择各区Margalef种类丰富度、Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数、Simpson指数和生态优势度指数进行对比分析。从三级区底栖动物的Margalef种类丰富度指数、Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数、Simpson指数和生态优势度指数来看,各三级区均存在较明显差异(图6)。对于Margalef种类丰富度指数,LEI_{1.3}区最大,为3.8845;其次是LEI_{1.1}区,为3.5416;再次是LEI_{2.2}区,为3.1199;最小是LEII_{4.1}区,为0.7623。对于Shannon-Wiener指数,LEI_{1.3}区最大,为2.1234;其

次是LEI_{1.1}区,为2.0558;再次是LEII_{2.1}区,为1.9964;最小是LEII_{4.1}区,0.5105。对于Pielou均匀度指数,LEI_{2.2}最大,为0.9284;其次是LEII_{2.2},为0.8410;再次是LEII_{2.3},为0.7401;最小是LEI_{4.1}区,为0.3172。对于Simpson指数,LEII_{2.1}区最大,为0.8171;其次是LEI_{1.3},为0.8045;再次是LEI_{1.2},为0.7876;最小是LEII_{4.1}区,为0.2712。对于生态优势度(BP)指数,LEII_{4.1}最大,为0.6400;其次是LEII_{1.4},为0.5132;再次是LEIII_{1.1},为0.4668;最小是LEI_{2.2},为0.0290。

3.3.3 四级分区结果验证

采用野外调查数据分别对河段、湖库等不同水体生境类型进行验证(表3)。结果显示,巢湖流域河流与湖库间大型底栖动物种类数量存在明显的差异,河流大型底栖动物种类数量平均值为58.1个,而湖库大型底栖动物物种数量平均值为15.7个。河流大型底栖动物优势种主要为霍甫水丝蚓、铜锈环棱螺、方格短沟蜷和放逸短沟蜷等种类;湖库中

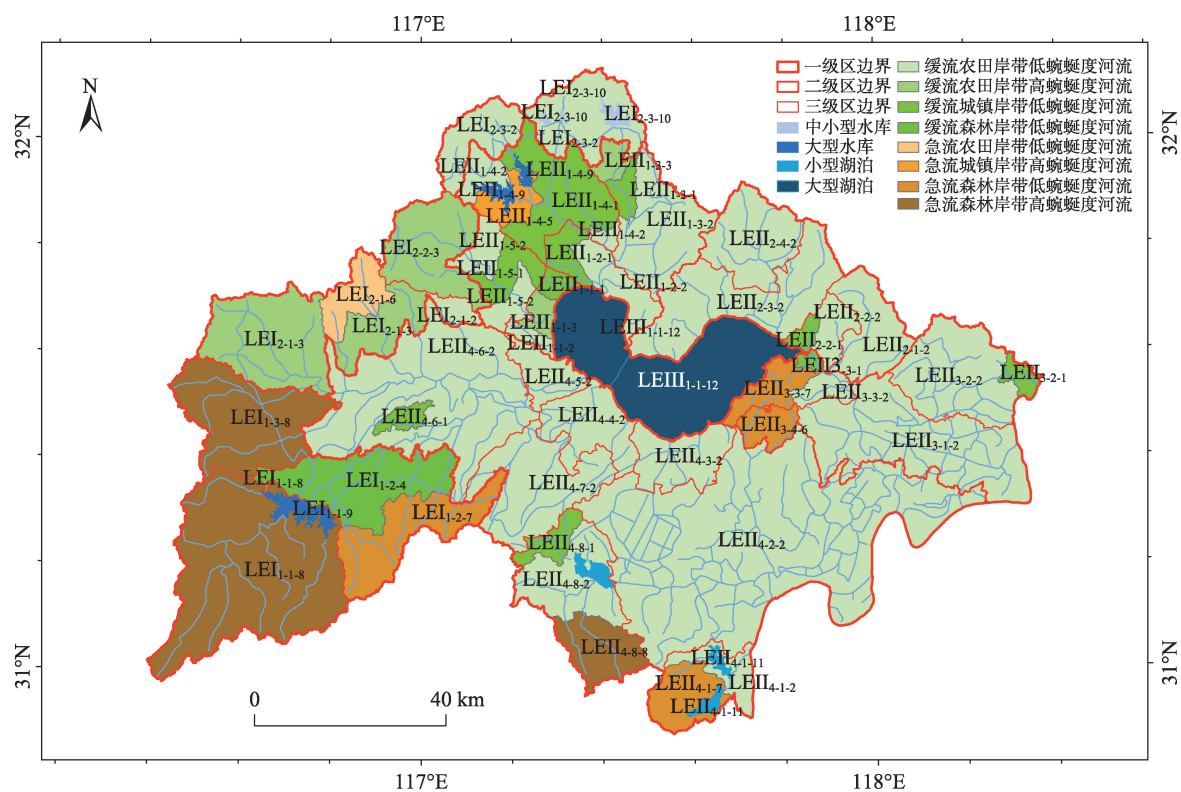


图4 巢湖流域水生态功能四级分区
Fig.4 Aquatic ecoregion level IV of Chao Lake Basin

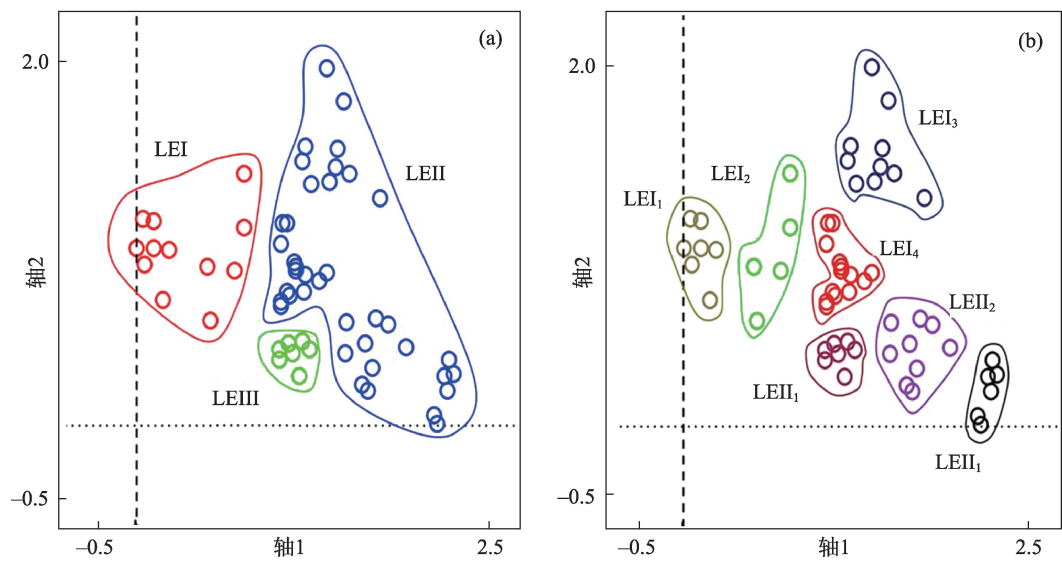


图5 巢湖流域一级水生态功能分区结果验证(a)和二级水生态功能分区结果验证(b)
Fig.5 Validation of aquatic ecoregion levels I (a) and II (b) of Chao Lake Basin

大型底栖动物优势种主要为浅白雕翅摇蚊、长角涵螺、铜锈环棱螺、红裸须摇蚊和铜锈环棱螺等物种。巢湖流域河流和湖库藻类物种数量虽然差异不明显,但优势种存在较大差异,河流中藻类优势种主要为钝胞杆藻、尖辐节藻、弧形峨眉藻线性变

种、肘状针杆藻、爆裂针杆藻和披针形曲壳藻等种类;湖库中藻类优势种主要为喙头舟形藻、卵圆双眉藻、微小内丝藻和微小微囊藻等种类。
针对不同类型河段而言,其中大型底栖动物、鱼类和藻类种类数量和优势种都存在较明显的差

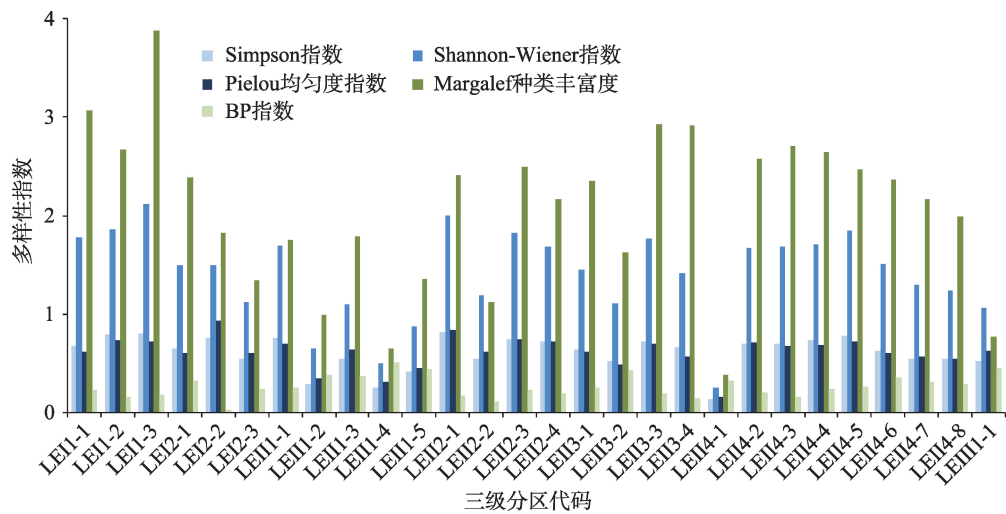


图6 巢湖流域水生态功能三级区验证

Fig.6 Validation of aquatic ecoregion level III of Chao Lake Basin

表3 巢湖流域水生态功能四级分区河段/湖库生境类型验证

Tab.3 Validation of aquatic ecoregion level IV of Chao Lake Basin

河段/湖库 主类型名称	大型底栖动物		鱼类		藻类	
	种类数	优势种	种类数	优势种	种类数	优势种
缓流城镇岸带 低蜿蜒度河流	32	霍甫水丝蚓、苏氏尾鳃蚓、黄色羽摇蚊、尖口圆扁螺、铜锈环棱螺、长角涵螺	12	鲤、鲫、鲮	76	钝脆杆藻、极细微曲壳藻和披针形曲壳藻可疑变种
缓流农田岸带 低蜿蜒度河流	133	铜锈环棱螺、长角涵螺、林间环足摇蚊	31	鲫、鲤、鲮	88	弧形峨眉藻线性变种、尖辐节藻和两尖辐节藻
缓流农田岸带 高蜿蜒度河流	58	铜锈环棱螺、长角涵螺、方格短沟蜷、尖膀胱螺	16	鲫、鲤、花鲢	79	钝脆杆藻、极细微曲壳藻、披针形曲壳藻可疑变种
缓流森林岸带 低蜿蜒度河流	48	方格短沟蜷、铜锈环棱螺、椭圆萝卜螺、尖膀胱螺	5	鲫、棒花鱼、沙塘鳢	35	弧形峨眉藻线性变种、尖辐节藻、两尖辐节藻
急流城镇岸带 高蜿蜒度河流	5	尖口圆扁螺	4	鲫、鲮、泥鳅	31	短小曲壳藻、肘状针杆藻尖喙变种、小型异极藻
急流农田岸带 低蜿蜒度河流	15	铜锈环棱螺、方格短沟蜷、河蚬	4	鲫、鲤、鲮	46	爆裂针杆藻、肘状针杆藻、环状扇形藻
急流森林岸带 低蜿蜒度河流	31	放逸短沟蜷、铜锈环棱螺、扁蜉属	9	宽鳍鳊、沙塘鳢、泥鳅	22	近棒形异极藻尖细变种、小型异极藻、极细微曲壳藻
急流森林岸带 高蜿蜒度河流	143	扁蜉属、铜锈环棱螺、毛翅目 <i>Hydropsyche</i> sp.、椭圆萝卜螺	22	鲫、泥鳅、和虾虎鱼属一种	109	披针形曲壳藻、短小曲壳藻、极细微曲壳藻
大型水库	9	雕翅摇蚊和铜锈环棱螺	—	—	25	喙头舟形藻、变异直链藻、钝脆杆藻
中小型水库	28	角涵螺、铜锈环棱螺、椭圆萝卜螺、尖膀胱螺、大沼螺、锯齿新米虾、纹沼螺、日本沼虾	—	—	71	卵圆双眉藻、尖顶异极藻、拟短缝藻
小型湖泊	5	铜锈环棱螺、大沼螺	—	—	25	近粘连菱形藻斯科舍变种、微小内丝藻、爆裂针杆藻
大型湖泊	21	霍甫水丝蚓、红裸须摇蚊、苏氏尾鳃蚓、中国长足摇蚊、多巴小摇蚊	—	—	113	微小微囊藻、水华鱼腥藻/铜绿微囊藻小型变种

异(表3)。缓流类型河段大型底栖动物优势种主要包括霍甫水丝蚓、铜锈环棱螺、长角涵螺和方格短沟蜷,藻类优势种主要包括钝脆杆藻、尖辐节藻和极细微曲壳藻等种类,鱼类优势种主要包括鲤、鲫、鲮、花鲢和棒花鱼等种类;而急流类型河段大型底栖动物优势种主要包括尖口圆扁螺、放逸短沟蜷、铜锈环棱螺、扁蜉属一种等种类,藻类主要包括短小曲壳藻、爆裂针杆藻、小型异极藻和披针形曲壳藻等类型,鱼类优势种主要包括鲫、鲮、泥鳅、宽鳍鳊、沙塘鳢和虾虎鱼等种类。此外,低蜿蜒度河段中大型底栖动物优势种主要包括霍甫水丝蚓、苏氏尾鳃蚓、铜锈环棱螺、长角涵螺、方格短沟蜷和放逸

短沟蜷等类型,高蜿蜒度河段中大型底栖动物优势种主要包括尖口圆扁螺、扁蜉属一种、铜锈环棱螺、长角涵螺和方格短沟蜷等种类;低蜿蜒度河段中藻类优势种主要包括钝脆杆藻、尖辐节藻、爆裂针杆藻、肘状针杆藻和小型异极藻等种类,鱼类优势种主要包括鲫、鲤、鲮、棒花鱼、宽鳍鱮和沙塘鳢等种类;高蜿蜒度河段中藻类优势种主要包括短小曲壳藻、钝脆杆藻、极细微曲壳藻、披针形曲壳藻和短小曲壳藻等类型,鱼类优势种主要包括鲫、鲤、花鲢、泥鳅和虾虎鱼等种类。

4 结语

地域分异规律是地理学的核心思想之一,分区是地理学面向理论和不同社会经济发展阶段对科学需求的贡献。“山水林田湖草”生命共同体理念的提出,以及生态环境保护和国家水污染控制与治理重大专项对科技的需求,使自然地域分区的内涵也不断拓展,从强调自然禀赋向人与自然耦合、相互作用、相互影响发展,从水陆分离、陆域大尺度向水陆一体、生物栖息地局部小尺度发展,从地理学的水土气生核心要素向与环境学、生态学、生物学、水文学等学科综合交叉方向发展,从实验、监测、模拟向大数据、人工智能方向发展。这些发展与需求需要地域分异方面的理论创新和技术发展,来面对不断增长应用需求的挑战。

按照尊重流域生态系统完整性的科学治理规律,建立流域统一的流域水生态功能分区体系,统筹协调水环境改善、生态功能保护、水资源优化利用与地方社会经济发展,为建立以保证流域生态系统健康为最终目标的分阶段、分类型、分区域的流域精细化治理体系提供技术支撑。通过建立流域水生态环境功能分区体系,切实落实地方政府对环境质量负责的法律要求,明确治理目标、指标、任务和责任人,为“山水林田湖草”一体化的管理服务。

参考文献(References)

陈利顶,孙然好,汲玉河. 2018. 海河流域水生态功能分区研究 [M]. 第2版. 北京: 科学出版社. [Chen L D, Sun R H, Ji Y H. 2018. Regionalization of aquatic ecoregions in Haihe River Basin. 2nd edition. Beijing, China: Science Press.]
傅伯杰,刘国华,陈利顶,等. 2001. 中国生态区划方案 [J]. 生态学报, 21(1): 1-6. [Fu B J, Liu G H, Chen L X, et al. 2001. Scheme of ecological regionalization in China. Acta Geographica Sinica, 21(1): 1-6.]

高俊峰,蔡永久,夏霆,等. 2016. 巢湖流域水生态健康研究 [M]. 北京: 科学出版社. [Gao J F, Cai Y J, Xia T, et al. 2016. Aquatic ecosystem health of Chao Lake Basin. Beijing, China: Science Press.]
高俊峰,高永年. 2012. 太湖流域水生态功能分区研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. [Gao J F, Gao Y N. 2012. Regionalization of aquatic ecoregions in Tai Lake Basin. Beijing, China: China Environmental Press.]
高俊峰,蒋志刚. 2012. 中国五大淡水湖保护与发展 [M]. 北京: 科学出版社. [Gao J F, Jiang Z G. 2012. Conservation and development of China's five largest freshwater lakes. Beijing, China: Science Press.]
高俊峰,张志明,黄琪,等. 2017. 巢湖流域水生态功能分区研究 [M]. 北京: 科学出版社. [Gao J F, Zhang Z M, Huang Q, et al. 2017. Aquatic eco-function regions of Chao Lake Basin. Beijing, China: Science Press.]
高永年,高俊峰. 2010. 太湖流域水生态功能分区 [J]. 地理研究, 29(1): 111-117. [Gao Y N, Gao J F. 2010. Delineation of aquatic ecoregions in Taihu Lake Basin. Geographical Research, 29(1): 111-117.]
高永年,高俊峰,陈炯峰,等. 2012. 太湖流域水生态功能三级分区 [J]. 地理研究, 31(11): 1942-1951. [Gao Y N, Gao J F, Chen J F, et al. 2012. Delineation of level III aquatic ecological function regionalization in the Taihu Lake Basin. Geographic Research, 31(11): 1942-1951.]
黄秉维. 1958. 中国综合自然区划的初步草案 [J]. 地理学报, 25(4): 348-365. [Huang B W. 1958. A preliminary draft of integrated physical regionalization in China. Acta Geographica Sinica, 25(4): 348-365.]
黄艺,曹晓峰,樊灏,等. 2018. 滇池流域水生态功能分区研究 [M]. 北京: 科学出版社. [Huang Y, Cao X F, Fan H, et al. 2018. Regionalization of aquatic ecoregions in Dianchi Basin. Beijing, China: Science Press.]
冷疏影. 2016. 地理科学三十年: 从经典到前沿 [M]. 北京: 商务印书馆. [Leng S Y. 2016. 30 years of geography: From classic to cutting-edge. Beijing, China: The Commercial Press.]
李建军,张文培,何继. 2010. 安徽河湖概览 [M]. 武汉: 长江出版社. [Li J J, Zhang W P, He J. 2010. Rivers and lakes of Anhui. Wuhan, China: Changjiang Press.]
李艳梅,曾文炉,周启星. 2009. 水生态功能分区的研究进展 [J]. 应用生态学报, 20(12): 3101-3108. [Li Y M, Zeng W L, Zhou Q X. 2009. Research progress in water eco-functional regionalization. Chinese Journal of Applied Ecology, 20(12): 3101-3108.]
吕一河,傅伯杰. 2001. 生态学中的尺度及尺度转换方法 [J]. 生态学报, 21(12): 2096-2105. [Lv Y H, Fu B J. 2001. Ecological scale and scaling. Acta Ecologica Sinica, 21(12): 2096-2105.]

- 水利部长江水利委员会. 1999. 长江流域地图集 [M]. 北京: 中国地图出版社. [Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. Atlas of the Changjiang River Basin. Beijing, China: China Cartographic Publishing House.]
- 王耀武, 陈昌新, 王宗观, 等. 1999. 巢湖流域暴雨洪水特性分析 [J]. 水文, (4): 50-52. [Wang Y W, Chen C X, Wang Z G, et al. 1991. Characteristic analysis on rainstorm flood in Chaohu Basin. Hydrology, (4): 50-52.]
- 于宏兵, 周启星, 郑力燕. 2016. 松花江流域水生生态功能分区研究 [M]. 北京: 科学出版社. [Ding H B, Zhou Q X, Zheng L Y. 2016. Regionalization of aquatic ecoregions in Songhua River Basin. Beijing, China: Science Press.]
- 郑度. 2008. 中国生态地理区域系统研究 [M]. 北京: 商务印书馆. [Zheng D. 2008. Study on eco-geographic regional systems in China. Beijing, China: The Commercial Press.]
- 中国河湖大典编委会. 2010. 中国河湖大典·长江卷 [M]. 北京: 中国水利水电出版社. [Editorial Committee of Encyclopedia of Rivers and Lakes in China. 2010. Encyclopedia of rivers and lakes in China. Beijing, China: China Water & Power Press.]
- 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 1984. 中国自然地理·气候 [M]. 北京: 科学出版社. [Editorial Committee of Physical Geography of China (Chinese Academy of Sciences). 1984. Physical geography of China: Climate. Beijing, China: Science Press.]
- 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 1985. 中国自然地理·地表水 [M]. 北京: 科学出版社. [Editorial Committee of Physical Geography of China (Chinese Academy of Sciences). 1985. Physical geography of China: Surface water. Beijing, China: Science Press.]
- 祝迎春. 2005. 二阶聚类模型及其应用 [J]. 市场研究, (1): 40-42. [Zhao Y C. 2005. Twostep cluster model and its application. Marketing Research, (1): 40-42.]
- Bailey R G. 2009. Ecosystem geography: From ecoregions to sites [M]. 2nd edition. New York: Springer-Verlag.
- Bailey R G. 2014. Ecoregions: The ecosystem geography of the ocean and continents [M]. 2nd edition. New York: Springer-Verlag.
- Fisher S G. 1994. Pattern, process and scale in freshwater systems: Some unifying thoughts [C]// Giller P S, Hildrew A G, Raffaelli D G. Aquatic ecology: Scale, pattern and process. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications: 575-591.
- Kalff J. 2002. Limnology: Inland water ecosystems [M]. New Jersey, NJ: Prentice Hall.
- Zhang T, Ramakrishnan R, Livny M. 1996. Birch: An efficient data clustering method for very large databases [C]// Proceedings of the ACM SIGMOD conference on management of data. Montreal, Canada.

Theory and application of aquatic ecoregion delineation in lake-basin

GAO Jungfeng, GAO Yongnian, ZHANG Zhiming

(Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: Spatial differentiation is one of the core research directions of geography. Aquatic ecoregion delineation is the development and application of geographic regionalization in the field of ecological environment. Management based on aquatic ecoregions is the trend of water environmental management in watersheds. Aquatic ecoregion is the foundation of future water environmental management in China. Existing work cannot meet the technical requirements of water quality management for aquatic ecosystem protection. Based on the analysis of the main concepts involved in aquatic ecoregion, this study analyzed the scale of aquatic ecosystem in lake-basins, and laid a theoretical foundation for the delineation of aquatic ecoregion system in lake-basins. Taking the Chao Lake Basin as an example, the method was used to delineate the aquatic ecoregion at four levels, and the results were validated. Aquatic ecoregion delineation of lake-basin is helpful for enriching the study of spatial differentiation of geographical regions, and has important implications for advancing the theory and methods of aquatic ecosystem target management.

Keywords: lake-basin; aquatic ecoregion; levels; scale; Chao Lake Basin