

水生生态一、二级分区技术框架

刘星才¹, 徐宗学^{1,*}, 徐琛²

(1. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 四川大学吴玉章学院, 成都 610207)

摘要:水生生态功能分区是流域水环境分类、分级、分区、分期管理的基础。回顾总结国内外水生生态功能分区工作的基础上, 针对我国流域水生生态功能一、二级分区工作, 提出了一个可供参考的分区指标体系, 探讨了流域尺度水生生态分区技术框架的构建以及可能存在的问题。该技术框架主要由3部分内容组成: 环境要素对水生生态因子的驱动机制、分区指标体系和分区技术。作为技术框架的理论依据, 驱动机制分析首先以水-陆生态水文耦合模型为框架对环境要素如何影响水生生态系统功能进行阐述。指标体系是技术框架的基础部分, 主要包括水生生态因子和环境要素两大类, 其中一级分区指标包括气候、水文和地貌等要素, 二级分区指标包括水质、水生动植物、藻类、土壤、植被、土地利用和社会经济要素。针对一、二级水生生态功能区采用“自上而下”和“自下而上”的分区方法, 为技术框架付诸现实提供了保障。为正在进行的各大流域水生生态功能分区工作提供一定的参考依据, 同时也希望在这些具体分区工作的基础上能进一步完善本分区技术框架。

关键词:流域; 水生生态; 分区; 指标; 框架

A framework for aquatic ecoregion zoning

LIU Xingcai¹, XU Zongxue¹, XU Chen²

1 Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Wuyuzhang College, Sichuan University, Chengdu 610207, China

Abstract: Recently, systematical studies on aquatic ecoregion zoning have been launched in several representative basins in China. Both theory and application of aquatic ecoregion zoning at watershed scale are involved, which is toward a framework including an integrated indicators system for ecoregion zoning. National ecoregion zoning based on aquatic ecosystem function is the basis of water environment management in China. Theorization of driving mechanism, standardization of indicators and quantification of zoning technique are key issues to be solved for the national ecoregion zoning. On the basis of previous studies, a framework comprising of a series of indicators and a technique for aquatic ecoregion is proposed, and potential problems are analyzed as well. The framework includes: (i) selection of indicators, (ii) the mechanism demonstrating the impact of environmental factors on aquatic ecosystem, and (iii) an operational technique for ecoregion zoning. The indicators including environmental and aquatic elements are the basis of the framework. The indicators system is expressed as two layers: data and application. The former is comprised of sample and monitoring data for environmental and aquatic factors, while the latter united the data for universal application in ecoregion zoning by standardization approaches. Data is selected by some statistical methods such as Canonical Correspondence Analysis (CCA) and Principal Components Analysis (PCA). The indicator system is proposed based on previous studies but is unintentional to be the final ecoregion indicators. Future studies and practices on ecoregion zoning may modify those indicators. The mechanism provides scientific supports for the framework, which is described by an aqua-terrestrial ecohydrological model covering hydrological and ecological processes based on hydrological models. The aqua-terrestrial ecohydrological model reflects the environmental influences on aquatic ecosystem and expresses them in statistical or physical manner. The operational technique makes it

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题(2008ZX07526-001-001)

收稿日期:2010-02-11; **修订日期:**2010-06-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

possible to perform the zoning. This technique combines the “top-down” and “bottom-up” approaches. The former is mainly applied at large scales while the latter is applied at subcoregions and inferior. The “bottom-up” approach is performed based on the delineation of subbasins (catchments), which is considered as a unit for subcoregion zoning that involves all aquatic and terrestrial components. Statistically significant difference in defined ecoregion indicators between two subbasins is examined and non-significant different subbasins will be merged. This procedure processes until no significant differences are detected. The combination of two approaches may facilitate the operation of zoning and reduce influence of subjective factors. The framework is supposed to facilitate and ensure the practice of the national ecoregion zoning. The issue of scale is also discussed. The scale of aquatic ecosystem should be represented in the indicator system. Though the size of watershed is not a scale for ecoregion, discussion is still based on watershed in this paper since there are no general acknowledged sizes for ranked ecoregions. However, further investigation and practices are needed to test and examine the framework proposed in this study. The objective of this study is to provide some references and theoretic support for the on-going aquatic ecoregion zoning in China. Those practices may further improve and even modify the framework proposed in this study.

Key Words: basin; aquatic ecosystem; ecoregion; indicator; framework

2008 年,国家水体污染控制与治理科技重大专项主题五《流域水污染防治监控预警技术与综合示范》项目“流域水生态功能分区与质量目标管理技术”启动。该项目的一项重要内容即“水生态功能分区”。根据项目目标,其主要工作为“系统开展流域水生态功能区划理论与方法研究,建立水生态功能区划分指标体系,建立全国水生态功能分区技术框架”,分区方案将作为流域水体污染控制和管理的基础,最终与水质目标管理、水环境监控预警和水污染治理综合决策等技术综合集成,构建我国流域水环境管理技术体系^[1]。

流域水生态分区是“针对流域水生态系统管理的需要而提出的,是以流域内不同尺度的水生态系统及其影响因素为研究对象”,采用景观格局和尺度分析等方法对特定水体及其周围相关陆地环境进行区划得到的不同尺度和类别的区域^[2]。作为“生态区”,它应具有相似的生态系统或相似的潜在生态功能^[3]。以水生态系统为核心,明确其与环境要素的相互关系,将水生态因子及对水生态系统敏感的环境要素共同作为分区指标确定某一尺度或分区等级上与水生态功能密切相关的陆地环境,这一水陆联合区域即为水生态功能分区。

从生态分区到水生态功能分区,国外已开展了大量工作并形成了一些初步成果。1976 年,美国生态学家 Bailey 从生态系统的观点出发,首次对各种专题地图(如森林、气候等)进行整合,提出了美国生态区域的等级系统,并编制了美国生态区域图^[4]。之后 Bailey 还编制了北美和美国范围内的陆地生态系统区域图和海洋生态区划图^[5]。Bailey 生态区划的每个等级均基于其他特定的地图,如最小单元区块基于 Küchler^[6]的潜在自然植被图,而较区块尺寸大两级的分区则基于气候图^[7]。然而, Bailey 的陆地生态系统分区方法对水生态系统分区效果并不十分理想。在以上工作基础上,研究者提出了水生态系统分区方法以及水生和陆生生态系统综合分区方法,即将水质水量特征以及影响水生态系统空间分布特征的要素如气候、地貌、土壤、地质以及植被等统一纳入生态分区指标体系^[8-9]。该分区方法中用到的基础地图有:土地利用、地形、潜在自然植被以及土壤图,认为这些要素是水生生物区系的决定因子。McMahon 等^[10]提出了美国范围内生态区划分的通用方案。该方案划分的生态区具有相似的生物和非生物特征、地形、水生容量和潜力。因此,可以说,美国水生态区是在已有生态分区基础上再综合考虑水生态因子进行划分的。20 世纪末,欧洲国家统一开展了水生态分区工作。2000 年,欧盟委员会提出欧洲水框架指令(European Water Framework Directive, WFD),首次全面阐述了欧洲淡水生态系统的管理和保护概念^[11],以及水生生物区系在水质评价中的重要作用。WFD 将地表水分成了河流、湖泊、过渡水区和沿海水域,据此对水生态系统进一步分区分类,并对不同类型水域的管理选择不同生态系统状态参照基准^[12]。在各欧盟成员国分区过程中,可供选择的指标类别除了 WFD 给出的地理、地质、水文、气象、化学和土壤等,通常还包括用来确定生物保护状态和生态状况的鱼类、浮游植物、藻类和底

栖生物,以及某些两栖动物等^[13-14]。河流生态分区中有关指标包括经纬度、流域大小、离河源距离、水流势能、河宽、水深、流量、降水、气温、河床或河谷形状、酸中和能力、基质组成;湖泊型水生态分区中具体指标包括水深、水位、湖泊型状、滞留时间、混合特性、酸中和能力、营养物背景值^[11]。

在国内外的水生态分区探索中,指标的选择一直是比较重要的问题。物种组合可以根据生物因子直接区分或根据物理因子间接区分,同时考虑了生态和演化因子以及物种数量等因素,被认为是一个较适宜的可用于生物保护的基本单元^[15]。此外,如何综合表现水生态因子和陆地环境要素特征也是水生态分区技术的一个重要方面。Elton^[16]和 Southwood^[17]提出了以生境为中心的生态系统观点,研究表明这种观点对河流管理颇有用处^[18-19]。一般认为河流生境的结构和动态由流域环境决定^[20]。据此,美国学者试图找到一种分类方法将水生和陆生生态系统进行整合^[21-23]。世界野生动物基金会(World Wildlife Fund-US)在北美地区的水生态分区中提出了“主要生境类型(Major Habitat Type, MHT)”^[24-25]这一概念,旨在联系水生生物及其环境要素^[26]。MHT 根据大尺度上的生态系统变化和物种多样性结构和格局定义;在此基础上,根据生物差异性指数(biological distinctiveness index, BDI)和保护状态指示因子(conservation status indicator, CSI)划分水生态分区。

20 世纪 90 年代,我国开始关于生态(功能)分区、水环境功能分区等研究^[27-30]。水环境功能分区是目前水环境管理的一个基本单元,它以水体污染防治和人类社会的发展需要为主要目标,根据污染物种类和水质类别进行区划^[31]。不过该区划上存在一些问题,如缺乏流域综合管理模式、过于注重人类需求而忽视水生态系统的保护以及管理目标体系的不完整等^[32]。随着研究者对生态系统认识的深入以及对水体保护的关注日益增强,以水环境保护为主要目标的水生态系统分区研究工作逐渐开展^[2, 33-35],并提出了“分类、分区、分级、分期”的水生态系统保护理念^[36-37]。然而,目前还未形成全国统一的水生态分区框架和技术。Zhou 和 Zheng^[38]以水库和湖泊为对象进行了全国范围的水生态分区,但由于没有考虑河流这一重要的水生态系统,其分区结果尚值得商榷。最近孙小银和周启星对我国水生态分区框架进行了探讨,提出了一个较完整的指标体系^[39];不过该指标体系基于宏观、中等和小尺度对指标进行分类,而没有明确针对某个级别的分区给定指标。孟伟等认为水生态功能区是水环境功能区划的基础,同时前者还弥补了后者的不足之处^[34];然而,由于水环境功能区划已经应用到众多省市的水环境管理工作中并取得了一定成效,有学者建议水生态功能分区工作宜在已有的水环境功能区划基础上进行,以保证两个分区框架的衔接和区划工作的可操作性^[39]。北美、欧盟等已对水生态分区进行了长时间的深入研究^[11, 26],其中很多方法和理论成果(如分区指标、区划方法等)均可供我国水生态功能分区参考。然而,各国进行分区时出发点并不完全相同,而且由于地理条件差异及社会经济发展水平不同,各国对水生态系统保护的目标及恢复标准也不一样。因此,在参考其他水生态分区研究成果时,还需要根据我国具体情况作更深入的探索,以确保我国水生态功能分区技术的可操作性与标准化,并提供充分的理论支撑。本文认为水生态功能分区技术框架可以从 3 个方面来阐述:首先是理论基础,即环境要素对水生态系统的影响研究;其次是分区指标体系的构建;最后是标准化的分区技术。目前我国水生态分区工作刚刚开展,为了使不同机构在不同的流域分区保持一致性,有必要对分区理论和技术框架进行探讨,以期对相关研究人员提供参考。

1 尺度和范围确定

水生态功能分区技术框架,必须体现出系统的分级结构^[40]。不同等级的分区对应不同的空间尺度,因此,首先有必要明确技术框架研究所针对的分区等级和尺度。本文所涉及的水生态因子和环境要素空间异质性均指其在流域尺度上的差异。理论上,流域不宜作为一种尺度;因为不同流域尺度相差甚远,对应的各要素空间异质性的生态学和物理意义也难以在同一层次得到解释。正如不同尺度的生物多样性测度往往采用不同指标(α 、 β 和 γ 多样性指数)一样,不同等级的分区也应采用不同指标,以体现不同尺度分区的结构和功能差异。目前国内水生态分区体系尚未形成,各级分区的尺度也尚未统一,不过不同尺度流域在某种程度上具有类似的生态结构特征^[41],因此,关于一、二级分区均主要基于大型河流流域尺度上进行讨论。根据前人研

究^[2],本文认为一级分区主要反映水文过程和气候条件对水生态系统的影响,应具有相似的地貌和气象特征;二级分区应该反映水生态系统的空间差异以及土壤、植被和人类活动等对水生态系统功能的影响。

为了保证水生态分区在空间上连续,必须使水生态因子和环境要素特征在不同尺度上得到统一表达。集水区(子流域或水文响应单元)作为一个水文单元,同时也是水生物种集合一个较完整的生境^[26],因此,将其作为一个基本分区单元,可实现多个空间尺度区划的衔接。集水区(流域)和生态系统框架应该是互补的,前者可以定义一个水陆联合区,后者反映了区域的生态系统特征并扩展了该区域^[42]。

2 驱动机制分析框架

河流中的生物状态与区域环境的物理状况和条件关系密切,因此,水生和陆生环境整合问题的关键就在于对这些物理因素时空特征的理解,基于河流系统空间组织和演变规律的分类方法才有意义^[20]。在过去人们对水生态系统的认识 and 实际经验基础上,以一些数学统计方法为工具,可初步识别关键的水生态因子及其密切相关的环境要素。然而,这些因素之间的相互作用及其物理过程尚不清楚。只有深入理解环境要素对水生态系统影响的机制,才可能在分区基础上实现水生态系统的管理和保护。图1解释了影响水生态系统各因子的主要环境要素。对于水生态系统,环境要素总体上可以分为三类:气候或气象,地表特征和人类活动。气候要素主要包括降水和气温;地表特征指地形地貌、土壤和植被类型等;人类活动对水生态系统的影响主要体现在土地利用和社会经济要素(如人口、产业结构和工业布局等)的变化对水体的影响。各种环境要素主要通过改变水文过程而对水生态系统施加影响。对于水体中的生物来说,水文过程不仅是连接和传递环境影响的纽带,本身也是一个影响因素。

气候因素中温度和降水的改变对水生态系统的影响最为直接。在中高纬度,有些对温度敏感的水生生物很可能对未来气候变暖产生积极响应。因此,区域径流和温度情势变化很可能影响河流环境,减少水文-生态系统中扰动事件的严重程度^[43-44]。如果外界扰动对维持生境复杂度、物种丰富度和多样性具有重要作用,这些影响则会进一步影响水生生物(如藻类)的分布及相关的多样性格局^[45]。在较小尺度上,坡度坡向等地形特征也是影响生物多样性的的重要因素^[46-47]。研究者通常综合考虑多种环境要素如气候、地形地貌、地质以及土地利用类型,结合大气环流模式(General Circulation Model, GCM)等手段在不同尺度上进行了陆地生物物种分布的预测^[48-50]。

流域水文模型是流域管理的一个有效工具。在所有水生态因子中,水是连接水生生物和环境要素的纽带。河流生态系统的生态过程所涉及的范围往往在流域尺度与水文过程重合,而且水文过程在一定程度上决定了水生态系统的空间差异,因此,可以在流域尺度上实现水文过程与生态过程的耦合^[41, 51]。若以水生态系统为首要保护对象,考虑到其环境要素的影响及水文过程在水陆连接中的重要作用,可以水文模型或陆面模式为框架,结合生物或生态统计模型,建立可以充分反映环境要素对水生态系统影响、具有一定物理机制或生态学意义的水—陆生态耦合模型。

3 指标体系构建

3.1 分区指标

水生态功能分区旨在为全国不同流域管理提供统一的管理框架和基础,相应的分区技术也应该是标准化、不受地域限制的可重复操作过程。然而,我国地域辽阔,不同流域的环境地理条件差异不可忽视,在保证分区技术通用时还应考虑不同流域的特殊情况。因此,作为该技术框架的一个主要部分,分区指标的选取至

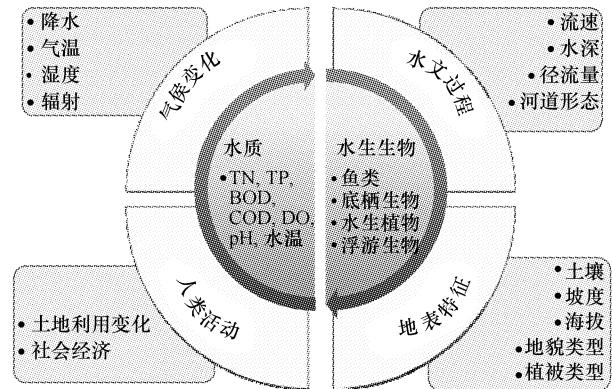


图1 水生态系统特征与环境要素的相互作用关系

Fig. 1 Interactions between aquatic ecosystem and environmental factors

关重要,除了要体现不同级别分区的内涵,还应该能反映流域水生态环境的主要特征。图2显示了不同尺度环境要素与水生态系统因子之间的关系。在大中尺度上,环境要素往往通过改变(河流、湖泊等)水体的物理环境而间接对水生态系统产生影响^[52]。一般在流域尺度上的一、二级水生态功能分区指标以较大尺度因子为宜^[2]。所谓较大尺度因子,是指某因子的属性值所能代表或表征的空间范围较大。比如,一个流域中某个雨量站可表征的范围通常都要大于某个水质监测站。虽然水生态功能分区本质上是一个动态的概念,但从其为流域管理服务及分区实际操作角度来说,它至少在短期内应该是一个相对稳定的区划。因此,对应的分区指标也选取性质或统计量短期较稳定的指标为主。此外,对于自然特征差异较大的水体,如河流(流水)和湖泊(静水)等,分区指标也应有所区别。下面列出了可用于分区的主要因子,分为水生态因子和环境要素两大类。

3.1.1 水生态因子

(1) 鱼类 目前,人们对河流生态系统中脊椎动物的了解较无脊椎动物要全面一些。鱼类大约占已记录脊椎动物数量的一半,几乎在世界淡水生态系统中的脊椎动物都属于优势种^[53]。

(2) 底栖动物 底栖动物大多为无脊椎动物,种类繁多,目前人们对它的了解还比较有限。但对于已知的种类,一般地,同一生态分区中底栖动物的变化较其在分区之间的变化要小得多^[54]。因此,底栖动物可以作为水生态功能分区的一个重要因子。

(3) 水生植物 大型水生植物在河流中的种类和数量一般都比较少,但在湖泊型水体中却是比较重要的水生植物。在水产养殖业发达地区(如太湖流域),湖泊和水库水体大多用于鱼类养殖。这种情况下,鱼类数量和种类很大程度上受人为控制,因此,鱼类指标已不适合作为分区因子,换之以大型水生植物或藻类更为合理。

(4) 藻类 藻类通常包括着生藻类和浮游藻类(即浮游植物)。在湖泊(尤其是浅水湖)中,藻类往往都是主要生产者,也是富营养化水体出现“水华”现象的来源^[55-56]。河流水体中则以底栖(即着生)藻类的多样性最高^[53]。如上文所述,在受人类活动影响较明显的水体中,藻类作为有效的水质和初级生产力表征指标,是一个较合理的分区因子。

(5) 水质 水质往往是影响水生生物多样性的主要原因之一^[57-58]。水质标准评估指标多达数十种,要测定这些指标需要花费很大财力、物力和人力,无法将这些指标全部纳入分区指标体系。因此,一般只选择具有代表性、容易监测的几种水质指标。目前最常用的指标有 BOD₅、COD、溶解氧(DO)、总氮(TN)和总磷(TP)等。

(6) 水文 水文过程是连接水生生态系统和陆地环境的纽带。水陆间大量的能量和信息交换都与水文过程有关,如污染物迁移、水土流失等,目前水体污染物很大一部分来自于与水文过程密切相关的非点源污染。河川径流瞬时波动程度的变化也会对水生生物造成一定影响,而土地利用变化则往往容易导致这样的径流变化^[59]。在河流生态系统中,除了径流量,流速也是影响水生生物的一个重要指标。

3.1.2 环境要素

由于一、二级分区尺度较大,有些环境要素未必对水生态系统产生直接影响,却有着不可忽略的间接影响,因此,有必要将这些要素纳入水生态功能分区指标体系。

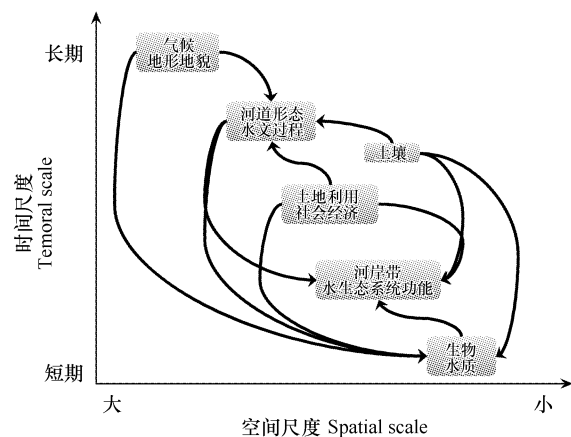


图2 水生态系统影响因子及其时空尺度^[2]

Fig. 2 Factors affecting aquatic ecosystem at different spatiotemporal scales

(1) 气候 气候在大、中尺度上影响甚至主导着水文循环,改变水文情势与潜在的热量循环。全球气候变化如大气环流变化、气温升高及由此可能带来的海平面上升等往往导致区域洪水/干旱等极端事件发生频率和强度增加;这些环境要素的变化均可直接或间接地影响陆/水生生物的生长和数量分布,并导致生态系统组成和功能的改变^[44],或者通过改变地球化学循环而间接对生物多样性产生影响^[46],最终结果可能使某些生物的生境消失或迁移。

(2) 地形地貌 地貌对水生生物的分布有重要影响。尤其是在物种演化历史上,不同地貌类型如高山、丘陵或平原等对物种的扩散影响不同。复杂、崎岖的地貌往往容易导致不同物种的相互隔离,从而使得物种在空间上差异明显^[53],也可能使得物种多样性降低。地形在大、中尺度上影响水文情势及侵蚀和沉积物传输。地形地貌还可以通过改变流域地面坡度坡向、河道形状甚至河相关系等,进而影响水文情势、土壤侵蚀以及沉积物传输等过程,这些影响最终会在水质和水生生物种类和数量变化,或水生态系统功能的变化上得到体现。此外,水域/水系的连通性也会对水生生物物种的数量和多样性产生一定影响^[57]。

(3) 土地利用 在社会经济快速发展、人类活动日益剧烈的今天,人为因素(直接或通过改变其他环境要素而间接地)所导致的生态系统变化常常更加明显而且恶劣。土地利用变化可以通过改变地表截留和蒸散发影响水文循环过程,而不同土地利用类型对水质也有很大影响。

(4) 社会经济 在一些城市化速度较快、程度较高的区域,如长江三角洲地区(尤其是太湖流域),不仅要关注土地利用变化,还应考虑某些社会经济指标对分区的影响;主要表现在工业布局、产业结构对水域生态系统的间接影响,具体如工农业及生活污染、过度取用水、湖泊与河流滩地的围垦以及人为引种导致的生物入侵等对生态系统健康的破坏^[60-61]。

3.1.3 指标筛选

表征水生态系统功能的指标以及对其存在潜在影响的环境要素很多,要构建一个简单有效、便于推广和实施的分区指标体系,首先必须筛选出最关键的表征指标和环境要素。一般地,收集足够的水生态因子和环境要素相关数据之后,可以采用统计分析方法考察两类数据之间的关系,识别关联最为密切的几种变量,将其作为主要分区指标。生态学研究常用的相关和对应分析统计方法有:主成分分析(PCA),典范对应分析(CCA,DCCA)等,前者用于数据降维,后者一般用于分析两组或多组变量之间的对应关系。

本文在前人研究工作的基础上^[9, 26, 62-67],列出了较为合理的可选分区指标(图3)。在该指标体系中,一级分区指标包括了气候、地貌和水文(径流深)等信息;二级分区指标则在一级分区指标基础上还包括水生态因子如水文(流速和水深等)、水质、水生动植物、藻类,以及土壤、植被和社会经济因子。藻类和水生动植物种类繁多,本文选择了易于监测并能反映水生态系统特征的常见因子。如水生动物包括鱼类和底栖动物,水生植物以大型水生植物为主,藻类则考虑了着生藻类和浮游植物。图3中将指标体系分为两层:数据层和应用层。数据层表示分区所需用到的历史及现状采样或监测数据;应用层则通过对前面的数据进行适当加工和处理,采用可充分反映出流域水生态系统和环境特征的表达方式(如标准化的指数、指标等)将采样和监测数据信息表现出来。然而,需要指出的是,这里提出的指标并无意作为最终的体系架构,相反,还需要大量的实证和研究工作(如增加或删减某些数据和指标)来完善这一体系。

3.2 指标的标准化

选取合理的指标之后,将指标应用到流域水生态系统状态及环境要素空间异质性评估时,还需对指标进行标准化,以便于在不同流域的应用。通常采用一些生物指数来对特定区域的生物特性进行描述,如生物多样性指数、生物完整性指数(IBM)以及保护状态指数(CSI)等。目前已有一些相关研究工作,如郑丙辉等^[64]采用栖息地综合指数对辽河流域栖息地进行了评价,并分析了其与水体理化指标的相关性;张远等^[63]采用B-IBM指数对辽河流域底栖动物完整性进行了评价,认为B-IBM指数是水体理化指标和栖息地质量的综合反映。不过,在不同的地理环境中,尽管水体环境或生境类似,计算得到的生物指数也会存在差异。比如,鱼类物种丰富度和河流流域或湖泊面积往往存在一定的相关性;也就是说,面积越大的河流或湖泊往往物种丰富度越

高^[53, 68]。然而,生态功能区的大小却与物种数量没有显著相关^[26]。因此,在生物/生态指数基础上还需作一些标准化工作,以保证其地理可移用性,从而正确区分不同类别的水生态系统健康状态。对于河流生态系统,可以采用径流量、断面面积等作为标准化背景值;而静水生态系统如湖泊、水库等,则可以采用蓄水容量/库容等对分区指标进行标准化。

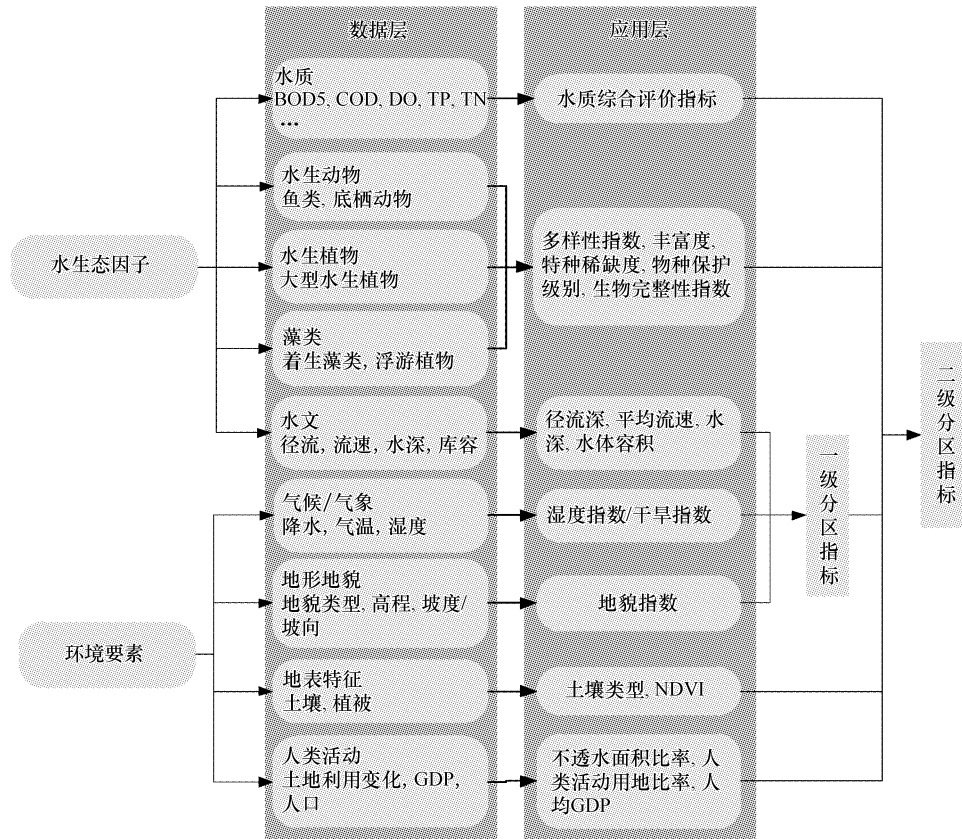


图3 一、二级水生态功能分区指标体系

Fig. 3 Framework of indicators for ecoregion and subcoregion zoning

4 分区技术

为了使分区能在全中国范围内采用标准化的通用技术,应当采用尽可能量化的方法以减少主观判断。从水-陆这一综合体来看,对于某特定水生态系统功能单元,陆生环境要素相当于水生态系统的背景,类似于统计学中的变量的均值;而水生生态因子的差异类似于变量方差间的差异,这在地理环境中即表现为空间异质性。前文的标准化即是为消除均值(背景值)差异的影响,在此基础上比较水生生态因子的空间差异。为了保证水生生态因子的空间差异显著性,在水生态功能基本单元基础上,比较各单元内标准化指标的平均值或方差的差异显著性。

“自上而下”与“自下而上”方法相结合是水生态功能分区的基本方法,如图4所示。“自上而下”区划方法可以保证区划结果相对一致性,“自下而上”区划方法则是为保证区域共轭性原则而设计^[69]。前者重在对宏观格局的把握,使分区结果具有直观的生态或物理学意义;后者在保证最低级区划单元完整性基础上,合并同类、相似的单元得到高级区划单元,是对前者的重要补充^[70]。水生态功能分区作为全国范围的多级区划,仅仅采用逐级划分的方法会较多的受到人为主观因素的影响,难以体现水生态系统空间分布的自然特征;而单纯的“自下而上”方法,从低级逐级归并到高级分区,则不能区分大尺度和中小尺度分区指标的特点。因为不同尺度上主导空间差异性的分区指标并不一样。因此,完整的分区技术应该融合这两种方法,使分区操作可行、结果合理,尽量减少主观上的分区调整。考虑到不同级别分区尺度的差异和指标的作用范围,一般地,

流域内的一级分区可以采用“自上而下”区划方法,根据大尺度分区指标如地貌、气候水文特征或生物的气候分带特征划分(图4),在较大尺度上确定大类水生态系统范围;这样对整个流域的宏观格局把握较为容易,得到的一级分区结果也更为直观。为了保证各分区边界的合理性,并考虑到其作为一个地理单元的完整性,二级或以下分区采用“自下而上”区划方法确定,在一级分区基础上、从更低级的区划单元合并得到一个或多个二级分区。首先在各一级分区内(或整个流域上)划分出子流域,比较子流域与其相邻子流域间的分区指标差异的统计显著性;若某子流域与所有相邻子流域均存在显著差异,则将此子流域划为一个分区,否则将差异不显著的相邻子流域合并,继续上述过程,直至得到所有下一级分区。如果分区指标为单一的综合指标,则该过程简便有效;而且由于采用了统计显著性检验,分区结果具有统计学意义。对于多个分区指标情况,可以采用聚类方法如系统聚类、K-均值聚类法等。

5 结语

驱动机制理论化、指标体系标准化和分区技术量化是水生态功能分区技术框架要解决的主要问题。本文尝试从这3个方面进行了探讨,提出了可能的驱动机制分析方案,可供参考的指标体系以及可行的分区技术。驱动机制分析框架以水文模型为基础,耦合水文过程和生态过程,构建水-陆生态模型,在此框架上解释环境要素对水生态系统的影响。分区指标体系包含了水生态因子和环境要素两大类,以及数据层和应用层两个层次。数据层包括两大类因子的采样和监测数据,应用层则将这些数据通过标准化的方法表达形成分区指标。水生态因子和环境要素在集水区层次得到统一。分区技术结合了“自上而下”和“自下而上”两种方法。前者主要用于大尺度如一级分区,后者则适用于二级以下分区。量化的分区技术使得分区指标体系得以在全国范围付诸实际应用,可以保证分区技术的成功实施。目前我国的水生态功能分区刚刚起步,尚未形成完整、成熟的分区技术体系;本文旨在为正在进行的分区工作提供一定的参考和建议,同时希望该框架能在今后的工作中得到完善。

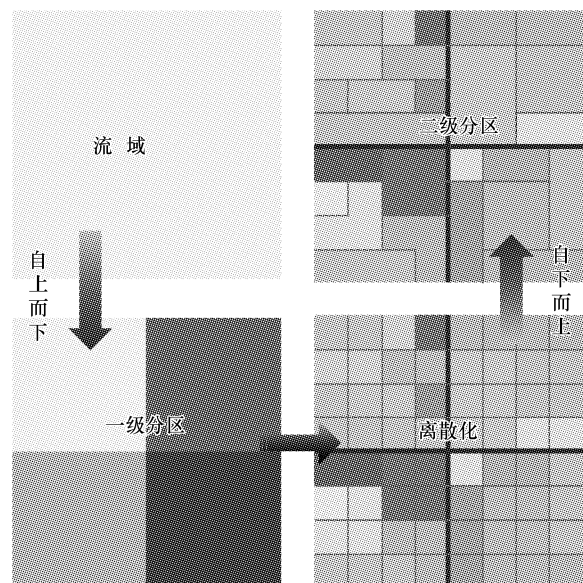


图4 基于“自上而下”与“自下而上”方法的分区技术路线
Fig. 4 A combination of “Top-down” and “Bottom-up” techniques for aquatic ecoregion

References:

- [1] Group of Water Pollution Control and Management Special Program. Scheme for National Science and Technique Special Project “Water Pollution Control and Management”. Beijing: Ministry of Environmental Protection of P. R. China, 2008 [2010-2-10]. http://nwpcp.mep.gov.cn/wjxz_1/200908/P020090811579138814892.doc.
- [2] Meng W, Zhang Y, Zheng B H. Study of aquatic ecoregion in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 911-918.
- [3] Crowley J M. Biogeography. *Canadian Geographer*, 1967, 11(4): 312-326.
- [4] Bailey R G. Ecoregions of the United States. Ogden, Utah: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Region, 1976.
- [5] Bailey R G. Explanatory supplement to ecoregions map of the continents. Map (scale 1: 30 000 000). *Environmental Conservation*, 1989, 16(4): 307-309.
- [6] Küchler A W. Potential natural vegetation//The National Atlas of the United States of America. Washinton D. C: U. S. Geological Survey, 1970.
- [7] Trewartha G T. An Introduction to Weather and Climate. 2d edition. New York: McGraw-Hill Book Company, inc., 1943.
- [8] Omernik J M, Shirazi M A, Hughes R M. A synoptic approach for regionalizing aquatic ecosystems//Inplace Resource Inventory: Principles & Practices, A National Workshop. Orono, Maine: University of Maine, 1981.
- [9] Omernik J M. Ecoregions of the conterminous United States. *Annals of the Association of American Geographers*, 1987, 77(1): 118-125.

- [10] McMahon G, Gregonis S M, Waltman S W, Omernik J M, Thorson T D, Freeouf J A, Rorick A H, Keys J E. Developing a spatial framework of common ecological regions for the conterminous United States. *Environmental Management*, 2001, 28(3): 293-316.
- [11] European Commission. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000: Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. Brussels, Belgium: Official Journal of the European Union, 2000.
- [12] Logan P, Furse M. Preparing for the European Water Framework Directive — making the links between habitat and aquatic biota. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2002, 12(4): 425-437.
- [13] Borja Á, Franco J, Valencia V, Bald J, Muxika I, Belzunce M J, Solaun O. Implementation of the European water framework directive from the Basque country (northern Spain): a methodological approach. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(3/4): 209-218.
- [14] Riain G Ó, Duff K, Long M. Water Framework Directive-Water Status: Identification and Ranking of Nature Conservation Designated Areas. Wexford, Ireland: Environmental Protection Agency, 2005.
- [15] Angermeier P L, Schlosser I J. Conserving aquatic biodiversity: beyond species and populations // American Fisheries Society Symposium. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, 1995.
- [16] Elton C S. The Pattern of Animal Communities. London: Methuen, 1966: 432.
- [17] Southwood T R E. Habitat, the templet for ecological strategies? *Journal of Animal Ecology*, 1977, 46(2): 337-365.
- [18] Hawkins C P. Substrate associations and longitudinal distributions in species of ephemereillidae (ephemeroptera: insecta) from Western Oregon. *Freshwater Invertebrate Biology*, 1984, 3(4): 181-188.
- [19] Hynes H B N. Ecology of Running Waters. Toronto: University of Toronto, 1970: 555.
- [20] Frissell C A, Liss W J, Warren C E, Hurley M D. A hierarchical framework for stream habitat classification: Viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, 1986, 10(2): 199-214.
- [21] Van Deusen R D. Maryland Freshwater Stream Classification, by Watersheds. Solomons, Maryland: State of Maryland, Board of Natural Resources, Department of Research and Education, Chesapeake Biological Laboratory, 1954: 106.
- [22] Slack K. A study of the factors affecting stream productivity by the comparative method. *Invest. Indiana Lakes Streams*, 1955, 4: 3-47.
- [23] Lotspeich F B, Platts W S. An integrated land-aquatic classification system. *North American Journal of Fisheries Management*, 1982, 2(2): 138-149.
- [24] Dinerstein E, Olson D M, Graham D J, Webster A L, Primm S A, Bookbinder M P, Ledec G, Young K R. A Conservation Assessment of the Terrestrial Ecoregions of Latin America and the Caribbean. Washington, D C: World Bank, 1995.
- [25] Olson D, Dinerstein E, Canevari P, Davidson I, Castro G, Morisset V, Abell R, Toledo E. Freshwater biodiversity of Latin America and the Caribbean: a Conservation assessment // Proceeding of a Workshop. Washington, DC: World Wildlife Fund, 1997.
- [26] Abell R A, Olson D M, Dinerstein E, Hurley P T, Diggs J T, Eichbaum W, Walters S, Wettengel W, Allnutt T, Loucks C J, Hedao P. Freshwater Ecoregions of North America. Washington DC: Island Press, 2000: 319.
- [27] Fu B J, Liu G H, Chen L D, Ma K M, Li J R. Scheme of ecological regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 1-6.
- [28] Yin M, Yang Z F, Cui B S. Eco-hydrological regionalization of river system in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 423-428.
- [29] Huang X W, Chen B M. Theory and application of ecological assets regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 602-606.
- [30] Yan N L, Yu X G. Goals, principles, and systems of eco-functional regionalization in China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(6): 579-585.
- [31] Department of Water Resources of MWR of PRC. Technical Specifications for Water Function Zoning. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [32] Yang P J, Guo H C, Zhou F, Liu Y. Problems identification of water function zoning and harmonious countermeasures. *China Environmental Science*, 2007, 27(3): 419-422.
- [33] Huang Y, Cai J L, Zheng W S, Zhou F, Guo H C. Research progress in aquatic ecological function regionalization and its approach at watershed scale. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 542-548.
- [34] Meng W, Zhang Y, Zheng B H. Aquatic ecological region approach and its application in China. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 293-300.
- [35] Zhou F, Liu Y, Huang K, Guo H C, Yang P J. Water environmental function zoning at watershed scale and its key problems. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 216-222.
- [36] Meng W, Zhang N, Zhang Y, Zheng B H. The study on technique of basin water quality target management I: pollutant total amount control technique in control unit. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(4): 1-8.
- [37] Meng W. The strategy of comprehensive pollution prevention and cure of water environment in Chinese watershed. *China Environmental Science*, 2007, 27(5): 712-716.
- [38] Zhou B H, Zheng B H. Research on aquatic ecoregions for lakes and reservoirs in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 147

- (1): 339-350.
- [39] Sun X Y, Zhou Q X. Primary study of freshwater ecoregionalization in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 415-423.
- [40] Allen T F H, Starr T B. *Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity*. Chicago, Illinois, USA: University of Chicago Press, 1982.
- [41] Dong Z R. Framework of research on fluvial ecosystem. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(2): 129-137.
- [42] Omerik J M. The misuse of hydrologic unit maps for extrapolation, reporting, and ecosystem management. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(3): 563-573.
- [43] Prowse T D, Wrona F J, Reist J D, Gibson J J, Hobbie J E, L vesque L M J, Vincent W F. Climate Change effects on hydroecology of Arctic freshwater ecosystems. *A Journal of the Human Environment*, 2006, 35(7): 347-358.
- [44] Wrona F J, Prowse T D, Reist J D, Hobbie J E, L vesque L M J, Vincent W F. Climate change effects on aquatic biota, ecosystem structure and function. *A Journal of the Human Environment*, 2006, 35(7): 359-369.
- [45] Scrimgeour G J, Prowse T D, Culp J M, Chambers P A. Ecological effects of river ice break-up: a review and perspective. *Freshwater Biology*, 1994, 32(2): 261-275.
- [46] Liu Y, Zhang J, Yang W Q. Responses of alpine biodiversity to climate change. *Biodiversity Science*, 2009, 17(1): 88-96.
- [47] Pickering C, Hill W, Green K. Vascular plant diversity and climate change in the alpine zone of the Snowy Mountains, Australia. *Biodiversity and Conservation*, 2008, 17(7): 1627-1644.
- [48] Dimböck T, Dullinger S, Grabherr G. A regional impact assessment of climate and land-use change on alpine vegetation. *Journal of Biogeography*, 2003, 30(3): 401-417.
- [49] Dullinger S, Dimb ck T, Grabherr G. Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. *Journal of Ecology*, 2004, 92: 241-252.
- [50] Gottfried M, Pauli H, Reiter K, Grabherr G. A fine-scaled predictive model for changes in species distribution patterns of high mountain plants induced by climate warming. *Diversity and Distributions*, 1999, 5(6): 241-251.
- [51] Deng W, Yan D H, He Y, Zhang G X. Study on ecological storeroom of water in the watershed. *Advances in Water Science*, 2004, 15(3): 341-345.
- [52] Bailey R G. *Ecoregion-based Design for Sustainability*. New York: Springer Science & Business, 2002: 222.
- [53] Allan J D, Flecker A S. Biodiversity Conservation in Running Waters. *BioScience*, 1993, 43(1): 32-43.
- [54] Moog O, Schmidt-Kloiber A, Ofenböck T, Gerritsen J. Does the ecoregion approach support the typological demands of the EU 'Water Framework Directive'? *Hydrobiologia*, 2004, 516(1): 21-33.
- [55] Zhao Q H, Qin B Q. The law of variation of light quantum yield of Algal in Meiliang Bay of Taihu Lake in spring. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4790-4797.
- [56] Zhang Z B, Shi X L, Liu G J, Yang X Y, Wang Y N, Liu X J. The relationship between planktonic algae changes and the water quality of the West Lake, Hangzhou, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2980-2988.
- [57] Chen X H, Li X P, Cheng X. Spatial-temporal distribution of fish assemblages in the upstreams of Huangpu River and Suzhou Creek. *Biodiversity Science*, 2008, 16(2): 191-196.
- [58] Zhang H, Zhu G P, Lu J J. Fish species composition and diversity of Yangtze River estuarine wetlands. *Biodiversity Science*, 2009, 17(1): 76-81.
- [59] Baker D B, Richards R P, Loftus T T, Kramer J W. A new flashiness index: characteristics and applications to midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(2): 503-522.
- [60] Dong Z R. Stress of hydraulic project to ecosystem. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2003, 34(7): 1-5.
- [61] Kong H M, Zhao J Z, Ji L Z, Lu Z H, Deng H B, Ma K M, Zhang P. Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 486-490.
- [62] Zhang N, Meng W, Zhang Y, Zheng B H. Multi-variable assessment of river ecosystem health in Liao River basin. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(2): 162-170.
- [63] Zhang Y, Xu C B, Ma X P, Zhang Z, Wang J C. Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 919-927.
- [64] Zheng B H, Zhang Y, Li Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 928-936.
- [65] Yang P J, Wu W Z, Meng W, Zhou F, Liu Y, Zhang Y, Zheng B H, Hu C, Li X. Ecosystem management oriented water environmental function zoning at watershed scale — Hun RiverBasin as a case study. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 944-952.
- [66] Tang T, Cai Q H, Liu J K. River ecosystem health and its assessment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1191-1194.

- [67] Zhao Y W, Yang Z F. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3): 349-355.
- [68] McAllister D E, Hamilton A L, Harvey B. Global freshwater biodiversity: striving for the integrity of freshwater ecosystems. *Sea Wind*, 1997, 11(3): 1-140.
- [69] Chen C K, Wu G H, Li C W. *Comprehensive Physical Geography*. Beijing: Higher Education Press, 1993.
- [70] Wang P, Shi P J. The research of regional natural disaster regionalization with the "bottom-up" methods — case study of hunan province. *Journal of Natural Disasters*, 1999, 8(3): 54-60.

参考文献:

- [1] 水体污染控制与治理科技重大专项领导小组, 水体污染控制与治理重大专项实施方案(公开版), 北京: 国家环境保护部, 2008 [2010-2-10]. http://nwpep.mep.gov.cn/wjxz_1/200908/P020090811579138814892.doc.
- [2] 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.
- [27] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. *生态学报*, 2001, 21(1): 1-6.
- [28] 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.
- [29] 黄兴文, 陈百明. 中国生态资产区划的理论与应用. *生态学报*, 1999, 19(5): 602-606.
- [30] 燕乃玲, 虞孝感. 我国生态功能区划的目标、原则与体系. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(6): 579-585.
- [31] 水利部水资源司. 水功能区划分技术规范. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [32] 阳平坚, 郭怀成, 周丰, 刘永. 水功能区划的问题识别及相应对策. *中国环境科学*, 2007, 27(3): 419-422.
- [33] 黄艺, 蔡佳亮, 郑维爽, 周丰, 郭怀成. 流域水生态功能分区以及区划方法的研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 542-548.
- [34] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 水生态区划方法及其在中国的应用前景. *水科学进展*, 2007, 18(2): 293-300.
- [35] 周丰, 刘永, 黄凯, 郭怀成, 阳平坚. 流域水环境功能区划及其关键问题. *水科学进展*, 2007, 18(2): 216-222.
- [36] 孟伟, 张楠, 张远, 郑丙辉. 流域水质目标管理技术研究(I)——控制单元的总量控制技术. *环境科学研究*, 2007, 20(4): 1-8.
- [37] 孟伟. 中国流域水环境污染综合防治战略. *中国环境科学*, 2007, 27(5): 712-716.
- [39] 孙小银, 周启星. 中国水生态分区初探. *环境科学学报*, 2010, 30(2): 415-423.
- [41] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架. *水利学报*, 2009, 40(2): 129-137.
- [46] 刘洋, 张健, 杨万勤. 高山生物多样性对气候变化响应的研究进展. *生物多样性*, 2009, 17(1): 88-96.
- [51] 邓伟, 严登华, 何岩, 章光新. 流域水生态空间研究. *水科学进展*, 2004, 15(3): 341-345.
- [55] 赵巧华, 秦伯强. 春季太湖梅梁湾水体中藻类光量子产额的变化规律. *生态学报*, 2009, 29(9): 4790-4797.
- [56] 张志兵, 施心路, 刘桂杰, 杨仙玉, 王娅宁, 刘晓江. 杭州西湖浮游藻类变化规律与水质的关系. *生态学报*, 2009, 29(6): 2980-2988.
- [57] 陈小华, 李小平, 程曦. 黄浦江和苏州河上游鱼类多样性组成的时空特征. *生物多样性*, 2006, 16(2): 191-196.
- [58] 张衡, 朱国平, 陆健健. 长江河口湿地鱼类的种类组成及多样性分析. *生物多样性*, 2009, 17(1): 76-81.
- [60] 董哲仁. 水利工程对水生态系统的胁迫. *水利水电技术*, 2003, 34(7): 1-5.
- [61] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 陆兆华, 邓红兵, 马克明, 张萍. 生态系统健康评价方法初探. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 486-490.
- [62] 张楠, 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法. *环境科学研究*, 2009, 22(2): 162-170.
- [63] 张远, 徐成斌, 马溪平, 张铮, 王俊臣. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 919-927.
- [64] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 928-936.
- [65] 阳平坚, 吴为中, 孟伟, 周丰, 刘永, 张远, 郑丙辉, 胡成, 李璇. 基于生态管理的流域水环境功能区划——以浑河流域为例. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 944-952.
- [66] 唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1191-1194.
- [67] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探. *水科学进展*, 2005, 16(3): 349-355.
- [69] 陈传康, 伍光 and, 李昌文. *综合自然地理学*. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [70] 王平, 史培军. 自下而上进行区域自然灾害综合区划的方法研究——以湖南省为案例. *自然灾害学报*, 1999, 8(3): 54-60.