

水库生态安全评估方法(I): IROW 框架*

王丽婧^{1,2}, 郑丙辉^{1,2**}

(1: 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

(2: 中国环境科学研究院河流海岸带创新基地, 北京 100012)

摘要: 近年来, 生态安全评估在方法和实践上得到较大发展, 然而, 受水库特殊性、系统性认识缺乏等限制, 目前尚无水库型水体的有效评估方法. 本研究借鉴国外相关理念, 分析了水库生态系统特征, 强调了水库演变规律特殊性、水库时空异质性、水库生态系统管理综合性. 着眼于此, 提出了基于 IROW (Inflow-Reservoir-Outflow-Watershed) 框架的评估方法, 将水库上游来水安全、水库水体安全、水库下泄水安全、库区流域影响 4 类要素纳入框架综合考虑; 并阐述了评估预处理与结果分析的关注要点, 包括分区、分时段评估等建议.

关键词: 水库生态系统; 生态安全; IROW 框架; 评估方法

Method for ecological security assessment of reservoirs (I): IROW framework

WANG Lijing^{1,2} & ZHENG Binghui^{1,2}

(1: *College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, P. R. China*)

(2: *River and Coastal Environment Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P. R. China*)

Abstract: Ecological security assessments in the method and practice have a rapid progress recently. However, due to the lack of particularity understanding and systematic analysis for reservoir, specific method used in reservoir is still underdeveloped. Referencing with the related abroad concept, characteristics of reservoir ecosystem were analyzed, including its special evolution processes, spatiotemporal dynamics and integrated management approach. In view of these features, the method based on IROW (Inflow-Reservoir-Outflow-Watershed) framework was put forward. Four elements were incorporated in the framework, namely the reservoir inflow, reservoir as proper, reservoir outflow and watershed influence. In additional, some points on assessment preparation and result discussion were proposed, especially concerning the sub-regional and sub-period evaluation.

Keywords: Reservoir ecosystem; ecological security; IROW framework; assessment methods

随着人类对水资源调控能力的增强, 水库已经成为一种重要的水体存在形式, 具有发电、饮用水源、灌溉、养殖和航运等功能, 在人类社会经济发展中的作用不可替代. 由于人类活动对水库的压力越来越大, 水库生态系统受到了损害, 三峡水库、大伙房水库等部分重点水库富营养化问题已然凸显^①, 水库生态安全问题愈发受到重视. 据此, 水库生态安全评估具有重要现实意义, 是诊断分析相关问题、提出有效管理对策的重要途径. 然而, 受水库特殊性、系统性认识缺乏等限制, 目前尚未建立有效评估方法. 本研究拟着眼于水库生态系统特征, 探索水库型水体的生态安全评估方法.

1 生态安全评估研究进展

生态安全 (Ecological Security) 是一种全新的管理目标. 1989 年, 国际应用系统分析研究所 (IASA) 在研

* 国家国际科技合作计划项目“三峡库区水环境特征与支流富营养化机制研究”(2007DFA90510) 和国家科技重大专项课题“流域水环境预警技术研究三峡库区示范”项目(2009ZX07528-003) 联合资助. 2009-11-30 收稿; 2009-12-12 收修改稿. 王丽婧, 女, 1981 年生, 博士, 助理研究员; E-mail: wanglj@craes.org.cn.

** 通讯作者; E-mail: zhengbh@craes.org.cn.

① 数据来源: 2007 年中国环境状况公报; 环境保护部项目“三峡水库生态安全调查及评估”报告.

究建立优化的全球生态安全监测系统时,首次明确提出生态安全的概念^[1]. 20世纪90年代初期国内学者亦开始关注生态安全. 目前生态安全的概念表述仍存在争议,但学术界就其内涵已形成诸多共识^[2-3]. 生态安全首先是指生态系统的安全,是生态系统相对于“生态威胁”的一种功能状态. 生态安全具有相对性,即某个地域某个时间段不存在绝对的安全. 生态安全状况在时间上有变化发展,在空间上有分布差异,具有动态性、空间地域性. 在环境领域,生态安全有广义和狭义两种理解. 广义生态安全是生物层面(包括微生物、植物、动物)的安全,狭义生态安全是以“人类”为终点的安全. 其中,后一种观点得到较多的引申和发展. 本研究亦倾向于狭义理解,认为生态安全是指人类赖以生存和发展的生态环境处于健康和可持续发展状态^[3]. 就水体而言,则延伸为“水生态环境”处于健康和可持续发展的状态.

随着生态安全认识的深入,生态安全评估在方法和实践上得到较大发展. 国内相关研究主要涉及的评价方法包括数学模型法(包括综合指数法、层次分析法、灰色关联度、物元评判、主成分投影法)、生态模型法(生态足迹法)、景观模型法(景观生态安全格局法、景观空间邻接度法)等^[4],其中,数学模型法应用相对更为普遍,其所构建的指标体系主要属多因子大综合类,通常在一定的概念框架下予以展开和实现^[5-6]. 最为突出的代表是联合国经济合作开发署(OECD)最初提出的表征人类与环境系统的压力-状态-响应(P-S-R)框架模式^[7]. 欧洲环境署(EEA)则又增加了“驱动力”和“影响”两类指标,构成了D-P-S-I-R框架^[8]. 此外,2008年全国重点湖库生态安全评估项目组在DPSIR框架基础上,以湖泊为主要关注对象,又发展提出了社会经济影响、生态健康、生态服务功能、生态灾变4类单项评估加1类生态安全综合评估的“4+1”评估体系^①,进一步推动了生态安全评估方法的探索进程.

一般而言,生态安全评估的基本步骤主要包括5项:确立评估对象、构建评价指标体系、建立评估标准、确定评估数学模式、形成评估结果并开展分析. 由于生态安全评估针对某类或某个具体生态系统开展,因此,在评价指标体系构建、评估标准确定、评估时段和地域划分处理等方面必须充分了解该类生态系统的特征,充分依据评估对象的调查研究结果,充分考虑保障该类生态系统安全的管理需求,通过调整完善已有方法或重新构建新方法等途径,建立科学适宜的评估方法.

2 水库生态系统特征

水库是人类在河道上建坝或堤堰创造蓄水条件而造成的人工水体,是一种人类干扰下的生态系统类型. 虽然水库的水文现象与天然湖泊较为相似,但其发展和生态系统的演替受到人类塑造的严重影响,因而具有独特的水动力学特征和水库调节方式,与河流、湖泊等类型水体的生态系统特征仍有很大差异. 由于水库湖沼学(Reservoir Limnology)学科发展相对于传统的湖沼学、河流学较为滞后^[9-10],其作为现代湖沼学一个相对独立的学科于20世纪90年代才正式出现^[11],一定程度上阻碍了水库生态安全问题的针对性分析与评估方法探索.

2.1 水库的形成及演变过程

理解水库的形成特点与演化规律,对于判定水库生态安全状况所处的阶段、未来发展趋势具有重要作用. 筑坝拦截对原河流生态环境产生巨大影响^[13],首先是水体形态、水循环等物理过程的变化,直接表现为水位抬升、流速减缓、混合减弱、河流连通性破坏等;伴随着物质循环等水化学过程的变化,表现为沉淀与溶解、吸附与解吸、氧化还原、界面迁移变化等;继而体现为浮游生物、大型水生动物等生物过程变化,是从水文、水质到水生态的一系列响应. 筑坝拦截后,水库长期演变一般具有两个阶段^[12],一是水库发育阶段(reservoir aging process),自水库蓄水开始至水环境基本稳定为止,一般为4-10年,不同水库持续年份不一样,该阶段生境变化更多地受成库期间物化过程、生物过程影响;二是水库湖沼化阶段(reservoir limnological evolution),是水库发育成熟后的稳定变化发展时期,演变趋势与湖泊大体类似,该阶段生境变化主要受流域人类活动的影响. 水库发育阶段又可进一步划分为蓄水期(蓄水开始至蓄水完成,1-2年)、发育期(3-4年)、成熟期(4-5年),各时期水生态指标变化趋势具有一定规律,总体上,以溶解氧为表征的水环境质量

① 环境保护部项目“全国重点湖泊水库生态安全调查及评估”总报告. 中国环境科学研究院,2008.

具有先变差后变好的演变特征(图1)。

2.2 水库的基本形态特征

诸多研究长期以来将水库、湖泊等同考虑,由于本研究对水库型水体的针对性,有必要尽量区别于湖泊。两者最直接的区别在于基本形态特征^[11-12]。例如,一般说来,水库平均较深、湖泊平均较浅;水库建立于河谷之上,横向坡面呈V型或峡谷型,湖泊则呈U型或盆型;水库纵向坡面有明显梯度,水库坝首深、库尾浅,湖泊则湖滨浅中间深;汇水流域面积与水面面积之比值水库大,湖泊小;水库的水动力特征年内变化大、人为控制强,湖泊水动力变化则较为自然、规律。对上述形态特征分析予以拓展分析可见,与湖泊相比,水库水体分层现象更为明显、风对水动力的影响较弱,水库水体受流域影响更显著,水库水体具有空间异质性与季节变动性等。

2.3 水库的空间异质性

受水库形态特征、水流强度、分层特征的影响,水库水体在水平、垂直方向具有显著的空间异质性,体现为物理环境差异以及相应的水化学、生物特征差异。理论上,水库从库尾至库首的水平方向上依次存在3个区域,即河流区、过渡区、湖泊区^[11-12,14-15]。河流区仍保留河流的特征,水面狭窄、水深较浅,在3个区域中流速最快、水力停留时间最短、垂向混合较充分、水体浑浊、营养物质含量高、浮游植物生长属于光限制且生长率较低;湖泊区具有类似湖泊的特征,在3个区域中最宽最深、流速最小、垂向混合弱且分层明显、颗粒物吸附沉淀较强且水体较清澈、营养物质含量较低、浮游植物生长属于营养盐限制;过渡区特征介于两者之间,但由于该区营养物质含量、透明度条件均较好,浮游植物生长率在3个区域中最高。不同的水库各区空间范围不同,甚至可能整个水库全为河流区或者湖泊区;同一个水库不同水利调度方式下各区空间范围亦有变动。水库生态安全状况的分析应考虑水库生境的空间异质性,根据水库实际情况予以分区判断。

2.4 水库的时间异质性

水库的时间异质性一方面表现为2.1节所述的水库生态系统长期演替,另一方面体现为水库生态系统特征随年内水利调度运行、季节节律变化而有差异。成库后,原河流的枯、平、丰水期季节性变动叠加加上人为兴利调度控制,形成新的水文过程。根据防洪、发电等功能需求,年内调度一般分为泄水变动期、低水位运行期(防洪限制水位)、蓄水变动期、高水位运行期(正常蓄水位)。经调控后,枯水期水位较高、丰水期水位较低,呈反季节变化;泄水变动期、低水位运行期水库下泄流量等于或大于上游来水量,水动力条件较好,相反,蓄水变动期、高水位运行期水动力条件较差。水库调节使得水位波动、水动力条件改变,水环境随之变化。水动力条件较差的调度运行期,有利于水华灾害的发生,是水库管理需要重点关注的敏感时段。正常蓄水位与低水位之间的涨落形成水库消落区,是水库管理必须关注的特殊生境。消落区呈夏季出露、冬季淹没的特征,替代了湖泊湖滨带、河流河岸带的景观格局。成库初期,其污染物二次释放、景观荒漠化问题突出。随着水库长期演变,其生态效应是正面或是负面取决于消落区生境的自然演替状况与人为干扰强度。

2.5 水库生态系统管理的综合性

Straskraba 与 Tundisi^[12]从水库水质管理的角度,认为完整的水库生态系统至少包括4类要素(图2):水库上游来水(Inflow),水库水体(Reservoir)、水库下泄水(Outflow)、流域社会经济影响(Watershed)。水库建立于河道之上,上游来水量在水库来水构成中占据绝对优势,上游来水的水量水质对水库水环境具有决定性作用。同理,水库下泄水量水质对下游地区水环境至关重要。流域社会经济影响在水库水质管理中占据重要地位,水质变化取决于水体物理化学过程与生物区(含人类)之间的相互作用,从下至上的经典生物关

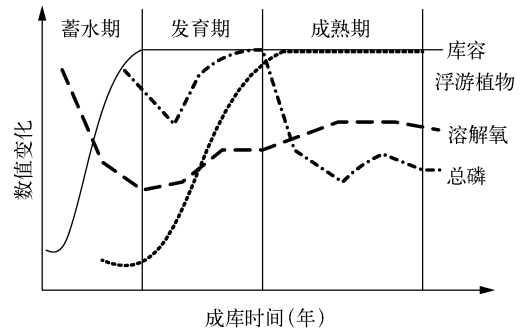


图1 水库发育阶段的演变过程概念图^[12]

Fig. 1 Concept map of reservoir evolution in the aging process

系(物理-化学-植物-动物)让位于从上至下的控制作用关系,即人类-鱼-动物-植物-化学-物理. 据此,水库生态系统管理的综合性十分显著,水库生态安全状况的分析应该兼顾考虑上下游影响、人类活动影响等要素.

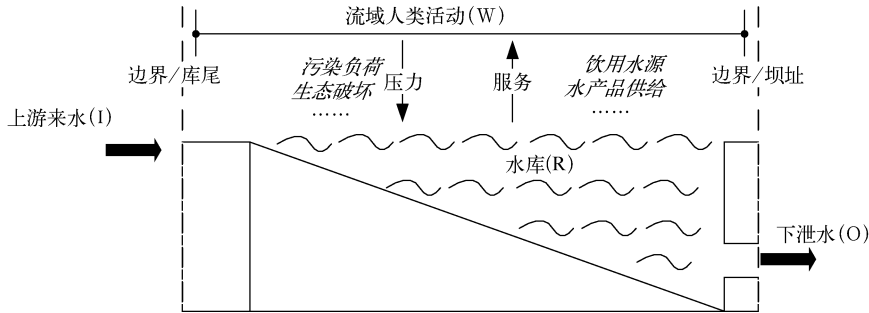


图2 水库生态系统组成示意图

Fig. 2 Sketch map of reservoir ecosystem components

3 水库生态安全评估方法

3.1 评估指标体系

在借鉴以往研究基础上,基于水库生态系统特征构建 IROW 概念框架,并建立水库生态安全评估指标体系(表1). 指标体系按照目标层(A层)、方案层(B层)、因素层(C层)、指标层(D层)设置,其中,方案层、因素层是指标体系概念框架的核心体现;突出了上游来水安全、下泄水安全2个重要组成部分,认为前者是水库安全的充分必要条件,后者是水库安全的重要责任体现;考虑了库区流域与水库水体的高度关联性,既从生态健康、服务功能等状态和响应角度分析水库水质安全,又从社会经济、污染负荷、生态破坏等驱动力、压力角度分析库区流域对水库的影响.

指标层筛选遵循了针对性、科学性、代表性、可度量性的原则,实际应用过程中允许根据具体情况完善和调整. 指标层中部分推荐指标依据水库典型特征予以设计.

① 上游来水(下泄水)水量保证率采用某年(月)来水(下泄水)水量相对于最枯年份(月份)水量的比例来表征,反应了水库运行需求、生态流量保障需求.

② 生态健康综合指数采用相关常用方法计算^[16-18],反映水体生态健康状况,其与生态服务功能相关指标共同体现水库自身安全状态;生态健康因素考虑亦可直接选取直观的水质、水生态指标来表示.

③ 饮用水源地水质达标率、鱼体残毒检测达标率采用其监测样本的达标比例来表征,考虑到水库饮用水源服务功能、水产品服务功能较受关注,且与水生态安全关系密切,选择其来表征水库服务功能受损的响应特征.

④ 相对资源承载力超载率采用库区相对资源承载力超载量与相对资源承载力的比例来表征,反映人口、经济增长对水库水质恶化的驱动力,其中,相对资源承载力的计算方法较为成熟^[19-20],引入相对资源承载力的优势在于既可以考虑自然资源的人口承载能力,又能兼顾经济资源增长对于人口容纳能力的正面效益.

⑤ 单位面积污染物入库负荷采用库区主要污染物入库总负荷与库区流域面积的比例来表征,用以反映流域人类活动污染排放对水库水体的直接压力.

⑥ 土壤侵蚀模数采用单位流域面积的土壤侵蚀量来表征,消落带开发强度采用消落带开发利用面积占消落带总面积的比例来表征,共同反映流域生态破坏对水体的负面影响,前者体现流域土地资源不合理开发利用的负面影响,保留和拓展林地草地等土地的正面生态效应,后者体现水库特殊生境的人为干扰影响,消落带的自然恢复与人工修复,促进消落带生境的良性演替与正面生态效应.

表 1 基于 IROW 框架的水库生态安全评估指标体系

Tab. 1 Index system of ecological security assessment in reservoir based on IROW framework

目标层(A层)	方案层(B层)	因素层(C层)	指标层(D层)
水库生态安全	上游来水安全 (I)	水量	上游来水水量保证率
		水质	上游来水水质超标率
	水库生态安全 (R)	生态健康	Ⅲ类以上水质比例, 营养状态指数 ¹⁾ , 生物多样性指数 ²⁾ , 水华发生频率; 或生态健康综合指数 ³⁾
		服务功能	饮用水源地水质达标率, 鱼体残毒检测达标率
	下泄水安全 (O)	水量	下泄水最枯月水量保证率
		水质	下泄水水质超标率
库区流域影响 程度(W)	社会经济	相对资源承载力超载率 ⁴⁾	
		污染负荷	单位面积污染物(COD/TN/TP)入库负荷
	生态破坏	土壤侵蚀模数、消落带开发强度	

1) 常用 TLI 营养状态指数^[21]; 2) 常用香农-韦弗(Shannon-Wiener)多样性指数^[21-22]; 3) 参照文献[18-20]计算; 4) 参照文献[16-17]计算。

3.2 评估标准与级别划分

评估标准主要通过资料调研法、国内外类比法、空间参照点法针对各个指标逐一确定。通过查阅文献资料判断安全状态下的评估标准值, 或通过收集、类比国内外水库的相关数据判断取值。部分生态健康指标亦可借鉴美国营养盐基准制定过程中提出的空间参照状态法^[23], 以该水体空间分布中相对较好的生态环境作为参照状态, 进而确定评估标准值。值得注意的是, 水库成库前后属于完全不同的两个生境类型, 成库前水体状况对成库后的参照意义不大, 据此, 水库评估标准值的选取应避免部分研究中采用的原始追踪法^[16, 18, 23], 即以历史状态为最佳参照值、归一化标准值。

为便于评估指数的计算, 评估级别的划分多为 3 级或 5 级, 评分多采用 3 分制、5 分制和百分制, 本研究建议采用 5 级 5 分制, 按照很安全、安全、基本安全、不安全、很不安全的类别予以设置, 其内涵及意义见表 2。

表 2 水库生态安全评估级别划分与内涵释义

Tab. 2 Classification of ecological security in reservoir and its interpretation

评估级别	安全状态	内涵释义
5 分	很安全	水库上游来水及下泄水水量稳定、水质优良; 水库生态系统健康完整、服务功能好; 库区流域社会经济发展对水库生态系统有轻微干扰。
4 分	安全	水库上游来水及下泄水水量稳定、水质好; 水库生态系统基本健康、服务功能尚好; 库区流域社会经济活动对水库生态系统干扰较小。
3 分	基本安全	水库上游来水及下泄水水量较稳定、水质基本达标; 水库生态健康受到一定影响、服务功能有所削弱; 库区流域社会经济活动对水库生态系统产生直接干扰, 但影响程度尚属一般。
2 分	不安全	水库上游来水及下泄水水量减少、水质超标; 水库生态健康状况较差、服务功能明显受损; 库区流域社会经济活动对水库生态系统干扰较大。
1 分	很不安全	水库上游来水及下泄水水量锐减、水质严重超标; 生态系统极不健康、服务功能大量丧失; 库区流域社会经济活动严重威胁水库生态安全。

3.3 评估数学模型

选择评估数学模型以满足评估需求为前提, 以可操作、简便实用为原则。经比较, 本研究推荐采用较为成熟的层次分析法(AHP)^[24]。首先, 对指标层各指标按照评估标准进行评分; 其次, 采用层次分析法进行权重赋值, 通过邀请专家两两比较构造判断矩阵, 经相关数学公式处理计算得到 D 层各评价指标相对与 A 层的权重, 专家权重判定过程中应结合实际情况充分考虑水库功能定位、上游来水影响约束需求、下游泄水影

响约束需求;最后,依据指标分值、指标权重,计算水库生态安全综合指数(ESRI, Index of Ecological Security of Reservoir). ESRI 指数的数学计算模式构建如下:

$$ESRI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot F_i$$

式中, W_i 为第 i 个指标相对于 A 层的权重, F_i 为第 i 个指标的评分值.

3.4 评估预处理与评估结果分析

水库型水体生态安全的评估要求全过程均着眼于水库生态系统特征、水库生态安全内涵与管理需求. 对此,除了构建上述评估方法以外,亦应在评估预处理、评估结果分析上予以考虑. 据此,提出关注点如下: ①分区开展水库生态安全评估. 考虑到水库空间异质性,评估前期应开展评估分区研究,识别河流区、过渡区、湖泊区在水库水体中的分布特征,结合分区研究结果,确定是否分区评估以及具体分区方案. ②分时段开展水库生态安全评估. 考虑到水库时间异质性,评估前期亦应识别生态安全问题的敏感时段,如春季水库水华高发时段,分析确定是否需要提取敏感时段的指标值,开展分时段评估. ③科学判断水库生态安全的变化趋势. 以成库后的跟踪观测数据为基础,分析水库生态安全状况历史变化;注重判断评估时间内水库生态系统所处的演变阶段,结合水库演变规律,合理预测水库生态安全未来变化趋势;对处于发育阶段,尤其蓄水期、稳定期的水库宜慎重开展生态安全评估,充分估计未来水质变化的可能性,客观看待水质生态指标短期内的剧烈变动.

4 结语

随着环境领域学科发展的愈渐深入,以及水库管理决策支撑刚性需求的凸显,针对水库这类特殊水体,其理论体系的完善、研究方法的探索将成为国内外学者关注的热点. 生态安全管理是淡水生态学的前沿方向,生态安全评估是生态安全管理的重要内容. 然而,由于对水库的认识长期以来附属于湖沼学、借鉴于河流学,截至目前尚未针对水库开展生态安全评估方法探索. 本研究将水库尽量区别于湖泊与河流生态系统,吸收国外水库研究有关理念,综合分析了水库生态系统的特征,尝试性提出了基于 IROW 框架的水库生态安全评估方法. 该方法仍限于理论技术体系的初步探索范畴,其合理性、有效性期待进一步的实践论证.

5 参考文献

- [1] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [2] 王耕, 王利, 吴伟. 区域生态安全概念及评价体系的再认识. 生态学报, 2007, 27(4): 1627-1637.
- [3] 陈国阶. 论生态安全. 重庆环境科学, 2002, 24(3): 1-3.
- [4] 刘红, 王慧, 张兴卫. 生态安全评价研究述评. 生态学杂志, 2006, 25(1): 74-78.
- [5] 郭树宏, 王菲凤, 张江山等. 基于 PSR 模型的福建山仔水库生态安全评价. 湖泊科学, 2008, 20(6): 814-818.
- [6] 左伟. 基于 RS、GIS 的区域生态安全综合评价研究——以长江三峡库区忠县为例. 北京: 测绘出版社, 2004: 66-89.
- [7] OECD. Environmental indicators: Development measurement and use. Paris: OECD Publication, 2003.
- [8] European Environment Agency. Europe's environment: The second assessment. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1998.
- [9] 《湖泊及流域学科发展战略研究》秘书组. 湖泊及流域科学研究进展与展望. 湖泊科学, 2002, 14(4): 289-300.
- [10] 萨莫伊洛夫. 发展中国湖沼学和水化学的几点意见. 海洋与湖沼, 1958, 1(2): 153-165.
- [11] 林秋奇, 韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用. 生态学报, 2001, 21(6): 1034-1040.
- [12] Strskaba M, Tundisi JG. Guidelines of lake management Volume 9. Reservoir water quality management. International Lake Environment Committee, 1999: 1-60.
- [13] 毛战坡, 王雨春, 彭文启等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展. 水科学进展, 2005, 16(1): 134-140.
- [14] 张远, 郑丙辉, 富国等. 河道型水库基于敏感性分区的营养状态标准与评价方法研究. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1016-1021.
- [15] 富国. 湖泊富营养化敏感分级水动力概率参数研究. 环境科学研究, 2005, 18(6): 80-84.
- [16] 刘永, 郭怀成, 戴永立等. 湖泊生态系统健康评价方法研究. 环境科学学报, 2004, 24(4): 723-729.

- [17] 赵臻彦,徐福留,詹 巍等. 湖泊生态系统健康定量评价方法. 生态学报, 2005, **25**(6): 1466-1474.
- [18] 许文杰,许士国. 湖泊生态系统健康评价的熵权综合健康指数法. 水土保持研究, 2008, **15**(1): 125-127.
- [19] 王树通,郭怀成,王丽婧. 北京市相对资源承载力分析. 安全与环境学报, 2005, **5**(5): 90-94.
- [20] 刘兆德,虞孝感. 长江流域相对资源承载力与可持续发展研究. 长江流域资源与环境, 2002, **11**(1): 10-15.
- [21] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社, 1990: 291-295.
- [22] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学·原理与应用. 北京:科学出版社, 2001:155-156.
- [23] 孟 伟,王丽婧,郑丙辉等. 河口区营养物基准制定方法. 生态学报, 2008, **28**(10): 5133-5140.
- [24] 王丽婧,郭怀成,刘 永等. 邛海流域生态脆弱性及其评价研究. 生态学杂志, 2005, **24**(10):1192-1196.