

文章编号:1671-6523(2011)03-0083-07

基于 PSR 框架模型的流域生态系统健康评价研究现状及展望

陈美球,刘桃菊*,许莉

(江西省鄱阳湖流域农业与生态工程技术中心,江西 南昌 330045)

摘要:从指标体系构建、评价单元与数据来源、健康状况的评判三个方面对我国基于 PSR 框架模型流域生态系统健康评价研究进行综述,并根据 PSR 框架模型的评价思路与流域生态系统特征,对基于 PSR 框架模型流域生态系统健康评价的研究进行展望。最后提出因地制宜是 PSR 框架模型流域生态系统健康评价方法的生命力所在;应突出水环境状况变化核心内容,依“人—地—水”脉络确定健康评价指标体系;评价指标的观测应重视时间尺度上的纵向变化。“3S”是流域生态系统健康评价的必要技术手段。

关键词:流域生态系统;PSR 框架模型;健康评价;研究展望

中图分类号:X826 文献标志码:A

Advances and Prospects in Assessing of Watershed Eco-system Health Based on PSR Model

CHEN Mei-qiu, LIU Tao-jiu*, XU Li

(Jiangxi Provincial Research Center for Agricultural Ecology of Po-yang Lake Watershed, Nanchang 330045, China)

Abstract: This paper first summarized the advances achieved in assessing watershed eco-system health based on PSR model from the perspective of index system, evaluation units and data sources, and health status diagnosis. And, according to the PSR framework model and watershed ecosystem characteristics, it put forward the prospect on the research of watershed eco-system health assessment: Focusing on local conditions is the most important factor in evaluating watershed eco-system health based on PSR model; the index system should be established based on water environment and “people-land-water” clue; more attention should be paid to the observation of longitudinal changes in time scales; and “3S” is the necessary technical means.

Key words: watershed eco-system; PSR model; health assessment; prospects

维持自然生态系统健康,是关系到人类前途和命运的重大课题。流域作为由分水线所包围的河流集水区,是一个独立的地貌单元,具有生态完整性,同时也是人类社会活动相对活跃的区域,是一个典型的社会、经济、自然复合生态系统。与单

一的草地生态系统、森林生态系统、农田生态系统生态系统相比较,流域生态系统的综合性特征更加突出:纵向连续性、生物结构特殊性、自我修复性、关系复杂性和动态平衡性^[1-2]。

随着工业化、城镇化的推进,不合理的人类活

收稿日期:2011-05-16 修回日期:2011-06-27

基金项目:江西省自然科学基金项目(2009GZN0026)和江西省教育厅科技项目(GJJ10415)

作者简介:陈美球(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生态研究,E-mail:cmq12@263.net; * 通讯作者:刘桃菊,教授。

动对流域生态系统造成了严重威胁:工业废水、城镇生活污水的排放、畜禽养殖污染和农药化肥的过度施用,对流域水环境造成严重污染;土地资源的不合理占用,导致植被破坏、水土流失加剧,进而影响流域的水文生态过程,造成洪涝等灾害频繁发生^[3-4]。流域生态系统健康已开始恶化。为了寻求流域生态系统和社会经济发展的平衡点,近年来,流域生态系统健康评价逐渐成为一个研究热点,特别是如何寻找一个适合于流域生态系统特征的健康评价方法,成为了研究者的普遍关注点。Pressure—State—Response (PSR) 模型是世界银行、联合国粮农组织、联合国发展署、联合国环境署联合开展的土地质量指标(Land Quality Indicators, LQI) 研究项目,所提出的研究成果^[5]。它是一个概念性框架,由互为因果关系的压力、状态和反应三部分组成:即由于人类活动对生态环境资源产生压力;生态环境资源因压力改变了其原有的性质或自然资源的数量(状态);人类又可通过技术及管理政策对这些变化作出反应(响应)。压力指标、状态指标和响应指标之间有时没有明确的界线,在分析应用过程中,必须把压力指标、状态指标和响应指标结合起来考虑,而不能仅仅依赖某一项指标。PSR 评价指标体系主要提供的是一种评价思路,它非常强调各国各地区在实际应用过程中,要结合各国各地区具体情况,通过补充、完善,来灵活运用。PSR 模型这种新颖的评估思路,表现出强大的应用生命力,目前已广泛运用于水环境安全评价^[6-7]、土地资源利用评价^[8-9]、城市规划环境影响评价^[10]、湿地生态系统健康评价^[11-12]等领域。近年来,不少专家也开始尝试把 PSR 模型运用于流域生态系统健康评价之中,逐渐成为了开展流域生态系统健康评价研究的主流^[13-16]。本文试图在对现有的基于 PSR 流域生态系统健康评价研究综述的基础上,对这一领域的研究方向进行展望,以期为进一步开展该类研究提供参考。

一、基于 PSR 框架模型流域生态系统健康评价的指标体系构建

评价指标体系是 PSR 模型的核心所在,不仅要充分反映评估流域的地域特征,还要考虑指标的可获取性、敏感性,以及压力、状态与反应指标之间的逻辑关系。PSR 框架模型的优点就是仅提供一个评价思路,具体评价指标根据评价对象来确定,这样可以最大限度地真实反映评价对象的

自身特征。

从表 1 可以看出,不同研究者针对不同评价流域所构建的指标体系存在很大差别,可以归纳出以下几个特征:

(1) 充分体现了评价流域的地域特征。由于不同流域所处的区位不同,气候条件、地质基础、社会经济因素各不相同,人们对流域资源利用的需求(压力)、土地利用方式不同,流域自身生态系统的变化规律千差万别,反映系统健康的指标也应各具特色。如针对东溪流域的南亚热带海洋性季风气候,雨量充沛、雨热同期,陡坡地形,土壤类型多样,人类活动对环境污染潜在威胁大的特征,把水资源的利用与保护作为重要的评价指标,“压力”中包括水资源利用率指标,“状态”中包括人均拥有水资源量、饮用水源水质达标率、水域面积率、水土流失程度等一系列指标;在“响应”中的脱水河段最小下泄流量保证率、工业废水达标处理率和城市生活污水处理率指标,都是与水资源密切相关。又如位于三峡库区腹地地带的大宁河流域,山峦重叠、岩层破碎、河道纵横,耕地资源紧缺,土地过垦、森林植被破坏和水土流失威胁大,研究者就把土地垦殖指数、 $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积、人口密度、人口干扰指数作为主要“压力”指标,自然格局指数为一个重要的“状态”指标,土壤侵蚀指数为主要的“响应”指标。同样,针对普定后寨流域的喀斯特地貌特征,研究者选取了表层带水开发利用程度、土地侵蚀状况、石漠化程度分别作为“压力”、“状态”、“响应”的一个重要评价指标。

(2) 突出了评价流域生态系统的脆弱性特征。系统的脆弱性是其对环境变化的敏感性表现,是生态系统内部结构格局、过程和功能容易受到外界干扰,特别是人类活动的影响,而使系统表现不稳定的某些特征。不同的生态系统,其系统稳定性内在机理不同,脆弱性也不同,而脆弱性特征恰恰就是生态系统健康恶化的最大薄弱点所在,对一个生态系统脆弱性的正确把握就是对生态系统健康的最好诊断。作为流域生态系统,水土流失是共同的脆弱性表现,因此,水土流失理所当然地成为流域生态系统健康评价的一个重要指标。在表 1 中,“水土流失”就分别出现在东溪流域生态系统健康评价中的“状态”指标和大宁河流域、后寨地下河流域、沱江流域的“响应”指标中;具有喀斯特地貌特征的普定后寨流域流域,提出了石漠化这一生态脆弱性指标;在易发生水土流失的农业生产区域的大宁河流域,又提出了

表1 国内基于 PSR 框架模型流域生态系统健康评价指标体系

研究对象	研究者	压力指标	状态指标	响应指标
东溪流域	颜利,王金坑,黄浩(2008) ^[3]	人口密度、GDP 年增长率、水资源开发利用、万元 GDP COD 排放强度、农药施用强度、化肥施用强度	人均拥有水资源量、年降雨量、饮用水源水质达标率、森林覆盖率、水域面积率、植物种类数、动物种类数、水土流失程度和河道原有自然生境自然改变率	脱水河段最小下泄流量保证率、工业废水达标处理率和城市生活污水处理率
塔里木河流域	段树国(2006) ^[17]	人口密度	水量变化率、景观多样性指数、高质量植被重要值、生态弹性度、水质状况	人均 GDP、农民人均纯收入、城镇化率、平均每万人中大学生数、平均每万人拥有的床位数
大宁河流域	吴炳方,罗治敏(2007) ^[18]	土地垦殖指数和 $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积、人口密度、人口干扰指数、路网密度	NPP、生物多样性、自然格局指数、生态弹性指数	面源污染指数、土壤侵蚀指数、林草覆盖率、人均国内生产总值
普定后寨流域	薛敏(2009) ^[14]	人口密度、地下水开发利用、人均水资源量、表层带水开发利用程度	生物第一性潜在生产力、地表水质等级、湖泊水库水质、植被覆盖率、平均坡度、平均生物弹性指数、土地侵蚀状况、生物多样性、多年平均降雨量	陡坡耕地面积比、水土流失率、石漠化程度、人均收入
沱江流域	孟兆鑫,李春艳,邓玉林(2009) ^[4]	单位面积化肥施用量、农业人口比例、单位面积农药施用量、文盲率、农业灾害指数	人均耕地面积、农村居民人均用电量、人均粮食产量、路网密度、灌溉指数	水土流失率、森林覆盖率、农村居民人均纯收入、景观多样性指数、农村恩格尔系数

面源污染指数这一生态脆弱性指标。

(3) 抓住了水文过程是流域生态系统命脉而水环境变化是水文过程健康最主要表现这一重点。水文过程是流域生态系统的命脉,这是流域生态系统与其它类型生态系统的主要区别。一个流域内水文过程受到过分的干扰,水环境状况出现恶化,就必然意味着流域生态系统健康的受损。所以,对流域生态系统健康的评价,必须紧紧围绕水环境状况变化这个核心内容来选取相关评价指标(表1中反映水环境状况的水质、水量指标特别多)。

(4) 突出了人口是流域生态系统健康的原始压力。人类活动是流域生态系统健康变化最大的压力源,同时人类活动又是流域价值的具体体现,维持流域生态系统健康并不是单纯地保持生态系统原始状态,而是生态系统良性循环的维持与系统功能(满足人类发展需求)持续发挥的协调。因此在表1中,除了沱江流域健康评价中采取了农业人口比例指标外,其它4个流域都选取了人口密度作为压力指标,其中在塔里木河流域健康

评价中,人口密度还是唯一的压力指标。

当然,现有的研究在指标体系构建中也存在一些值得商榷的地方,如塔里木河流域评价中仅选取“人口密度”这一个压力指标,指标过于单一;而响应指标里的“平均每万人中大学生数”、“平均每万人拥有的床位数”,并没有与状态指标建立相应的因果逻辑关系;在东溪流域健康评价中,把“年降雨量”作为状态指标也不够恰当,虽然流域内人类活动可能会对“年降雨量”产生影响,但真正对流域“年降雨量”有决定性作用的是更加宏观的气候变化。

二、基于 PSR 框架模型流域生态系统健康评价单元与数据来源

流域生态系统健康评价单元的确定,通常取决于评价流域面积的大小、评价目的和数据的可获取性三个方面因素。当评价流域面积相对较小时,一般直接以整个流域为评价单元;但当流域面积较大、流域内具有比较明显的区域分区、且评价目的可用于指导评价流域内不同区域社会实践

时,需要在流域内进行局部区域比较评价,对流域划分评价单元,这时就必须充分考虑单元的数据可获取性。由于评价中涉及诸多社会经济指标,这些数据能否正确获取直接影响到评价工作的进行。实现中,社会经济指标都是以行政单元统计的,因此,在评价单元确定时,应充分考虑行政区划。

从空间数据属性看,目前国内外生态系统健康评价单元的划分主要有两类,一是基于点状的栅格评价单元,二是基于面状的矢量评价单元。栅格点状评价单元的优点是具有空间“精确位置”的含义,这使得评价结果具有“真正空间性”的意义,缺点是评价结论的区域之间直接比较不太方便和评价结论在现实管理中的应用不方便。面状评价单元是以矢量面元作为评价的信息载体和评价单元,通常包括行政单元、小流域、景观单元、土地利用类型图斑等,其优点是数据相对容易获取,特别是相关的社会经济数据通常都是以行政区域为单位进行统计的,同样研究结果也具有较强的针对性,可直接用于实践指导,不足是数据及评价结论的“精确空间位置性”不能得到保证,数据和评价结论的空间性意义具有“平均性”^[19]。

表 1 中所罗列的 5 个案例都采取了面状的矢量评价单元,都充分考虑了行政区域,其中东溪流域健康评价,由于评价对象范围与诏安县行政界线比较吻合,研究直接引用了诏安县的相关统计年鉴和报告数据。塔里木河流域健康评价是以中段的景观单元为研究对象,土地利用格局及景观数据来源于美国 Landsat 卫星的影像数据;社会经济数据来源于轮台县和尉犁县统计年鉴。大宁河流域健康评价研究则利用 DEM 数据,通过利用 ENVI 软件,自动提取边界而得到的 34 个小流域,作为评价单元;土地利用格局及景观数据来源于 TM 影像数据、法国 SPOT 全色波段数据和“中国陆地 1 km AVHRR 数据集”中 NOAA/AVHRR;人口密度是将以行政单元为统计单元的数据根据城镇人口和农村人口分布特点上的差异,依据不同的土地利用类型散离化得到。普定后寨流域健康评价,将评价对象分为上游、中游、下游三个评价单元,数据来源于土地利用类型图等部门专业图件;社会经济数据细化到村界进行调查。沱江流域健康评价,以流域所涉及的 31 个市、县、区为评价单元,数据主要来源于各类统计年鉴与报告以及土地利用类型图等部门专业图件。

三、基于 PSR 框架模型流域生态系统健康状况的评判

(一) 指标标准化

由于指标体系中各项评价指标的类型复杂,各系数之间的量纲不一样,有些指标之间没有可比性,对系统健康影响方向也不尽相同。例如,水土流失治理率、森林覆盖率等指标与流域生态系统健康成正相关,而人类干扰指数、城镇化压力等指标与流域生态系统健康成负相关。为了简便、明确和易于直接比较,必须以各指标因子作用的程度、性质及表现形式为依据选用标准化模型,对指标进行标准化处理,即无量纲化。为了更好地体现 PSR 三大类指标间的因果关系,同样不可避免需要对各指标进行标准化处理^[20-22]。

各研究者在对各指标进行量纲统一时,会先界定相应的取值范围,如东溪流域生态系统健康评价,设定在 0~1 之间;塔里木河流域生态系统健康评价和大宁河流域生态系统健康评价,取值设定在 0~10 之间。处理数据时,有的是对原始数据直接量化分级,有的是先对原始数值进行等级划分,然后将它们与生态系统健康的标准值进行对比,获取各个指标的量化值。

(二) 指标权重的确定

根据各评价指标对评价对象贡献的大小,指标权重的确定分为主观赋权法和客观赋权法两大类。主观赋权法主要是由专家根据经验判断而得到。如特尔菲法(Delphi 法)、层次分析法(AHP 法)等;客观赋权法的原始数据是各指标在评价单位的调查数据中形成的,如变异系数法,变异系数法直接根据指标实测值经过一定数学处理后获得权重,不依赖于人的主观判断,因而客观性较强。在流域生态系统健康评价中,由于各种指标的重要程度不一,一般采用特尔菲法、层次分析法确定各评价指标的权重^[23-24]。

表 1 的 5 个案例中,大都采用的是主观赋权法来确定指标的权重,如沱江流域和普定后寨流域生态系统健康评价采用的是主观赋权法中的层次分析法来确定指标的权重;而东溪流域则采用的是主观赋权法中的专家经验法确定指标的权重,这种方法人们研究较早,也较为成熟,但客观性相对较差。

(三) 综合评价标准

研究通常采用流域生态系统健康综合指数来综合评价健康状况,如东溪流域和普定后寨流域

表2 流域生态系统健康状况等级判别

健康等级	健康状态	综合指数	指标特征
I	相对良好	0.8 ~ 1.0	生态结构十分合理、受人类干扰少,自然恢复力极强,无生态异常出现,生态系统的生态功能极其完善,系统极稳定,处于可持续状态,社会经济协调发展,最适合人类生存。
II	相对较好	0.6 ~ 0.8	生态结构比较合理、格局尚完善,受人类干扰较少,自然恢复力较强,无生态异常,生态功能较完善,系统尚稳定,适合人类生存。
III	相对一般	0.4 ~ 0.6	生态结构完整,具有一定的系统活力,外界压力较大,系统尚稳定,但敏感性较强,自然恢复力一般,已有少量的生态异常出现,可发挥基本的生态功能,生态问题显现。
IV	相对较差	0.2 ~ 0.4	生态结构出现缺陷,系统活力较低,自然恢复力较差,生态异常较多,流域生态功能已不能满足维持流域生态系统的需要,流域生态系统已开始退化。
V	相对极差	0 ~ 0.2	生态结构出现严重缺陷,生态结构极不合理,自然恢复力极差,流域生态系统已经严重恶化,不适合人类长期生存。

生态健康评价就采用了这一指数,其计算公式一般为:

$$E = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i \quad (1)$$

式中: E 表示流域生态系统综合指数; W_i 表示各指标的权重; X_i 表示各指标标准化后的值; n 为评价指标的数目。

大宁河流域和沱江流域的生态系统健康的评价却是采用的主成分分析法,这种方法可以实现用较少的综合指标最大限度地保留原来较多变量所反映的信息。

对于流域生态系统健康等级的划定,和其它生态系统健康评价一样^[25-26],大多使用相对评价方法,即将若干个待评事物的评价数量结果进行相互比较,最后对各待评事物的综合评价结果排出优劣次序。综观现有的研究,一般将流域生态系统健康分为五个等级:良好、较好、一般、较差、极差,以此反映从优到劣的变化(表2)。

四、基于 PSR 框架模型流域生态系统健康评价的研究展望

(一)因地制宜是 PSR 框架模型流域生态系统健康评价方法的生命力所在

对流域生态系统健康评价应建立在对评估流域健康机理认识之上,而一个流域生态系统健康取决于生态系统的新陈代谢,即生态系统内各种能量循环和物质转换是否正常,是否具有较强的

抵御外界干扰能力。由于所处的地理区位不同,不同流域的自然条件和社会经济基础不同,其流域健康机理也相差很大,对系统健康的潜在威胁因素也千差万别,对评价流域生态系统脆弱性特征的正确把握,就成了健康评价是否成功的关键。PSR 框架模型之所以日益受到流域生态系统健康评价的亲睐,就是因为 PSR 框架提供的是一种评价思路,强调系统生态变化过程的因果逻辑关系,要求使用者认真分析评价对象的变化过程,有针对性地确定具体评价指标。所以,当人们运用 PSR 框架模型开展流域生态系统健康评价时,就必须立足于评价流域健康机理剖析,因地制宜地选择相应的评价指标体系,这是 PSR 框架模型流域生态系统健康评价方法的生命力所在。

(二)突出水环境状况变化核心内容,依“人—地—水”脉络确定健康评价指标体系

水文过程为命脉是流域生态系统与其它生态系统的主要区别,正是由于水文过程,把广阔集水区域、河流、湖泊连成一个密不可分的生态整体:广阔的集水面,承纳雨水,通过地表径流(地表水)或渗入地下(地下水),经由大小水系,逐渐向湖泊汇集,维持着湖泊的存在。流域集水面积的大小决定着区域的水量,流域的地形地貌与植被决定着集水的快慢和泥沙含量,通过各级河流,最终决定了湖泊的水量、泥沙堆积,甚至于湖盆形态特征,这些现象所表现出来的规律性都是水文过程。流域的水文过程与流域生态系统各组成要素

具有紧密的耦合关系^[27],如果流域的水文过程受到外界过分干扰,丧失其应有的完整性,最直观的表现就是水环境状况随之恶化,流域生态系统也将面临退化的危险。因此,对流域生态系统健康的评价,必须突出水环境状况变化这一核心内容。

“人—地—水”是流域生态系统健康变化机理的主要脉络,“人”是指人类的各项社会经济活动,“地”是指因人们在实施社会经济活动时,反映在土地利用格局(包括景观格局)的变化,“水”即水文过程,因流域土地利用格局的变化而对水文过程产生影响。之所以把“人”作为生态系统的一个重要主体,是基于人类社会经济活动是流域生态系统变化的主要驱动力,城镇化进程、工业生产、农业生产、道路等基础设施建设,这些人类必不可少的活动,都会对流域生态系统产生干扰。有的干扰是处于生态系统阈值范围之内,不会对整体生态系统产生负面影响;而有的干扰超出生态系统阈值范围,对整体生态系统负面影响;如流域内城镇化进程大量蚕食森林、工业生产的点源污染、农业生产中的面源污染,都会直接对水质产生影响,对系统水环境产生破坏(大量泥沙淤积、水体富营养化、水生物急剧下降,等等)。“人—地—水”脉络也是一种因果逻辑关系的表现,这和PSR框架模型评价思路不谋而合。

(三)评价指标的观测应重视时间尺度上的纵向变化

作为一个相对宏观的生态系统,流域生态系统的变化,时刻保持一种动态的状态^[28-31]。伴随

着经济社会发展等环境条件的变化,其组成要素也随着进行动态变化,某一历史时期、某一阶段呈现这一种状态,而在另外的时期和阶段则很快会呈现另一种状态。以流域某一时间点的评价指标来判断系统健康状态具有一定的片面性,而以评价指标的变化值更显合理。特别是在PSR框架模型中,所采取的响应指标(尤其是相关政策措施),本身就需要经历一段时间后才能发挥出作用,即客观上响应指标本身在时间上存在滞后性,简单地把同一时段的“压力”、“状态”、“响应”综合在一起来对流域生态系统健康作出诊断,在逻辑上不够严谨。因此,应强调具有时间尺度的纵向观测,尽可能多地获取一定时序的连续数据,以某一基本时间段为本底,进行生态系统健康状况动态变化的研究,并加以比较,从而准确得出流域生态系统在长期变化下的健康状况。

(四)“3S”是流域生态系统健康评价的必要技术手段

流域生态系统健康评价涉及大量的土地利用格局及景观等面状数据,具有很强的空间特性,对这些数据的收集、处理、分析,传统的定量分析方法是难以完成的。“3S”技术的兴起,为此提供了强有力的技术支撑。目前,RS技术可以快速、客观、重复地提供大量的地面信息;GIS则可以提供与之相关的空间分析和数据管理技术;GPS能够实地调查,保证数据的精度。因此,将这三大技术手段相结合,用于流域生态系统健康评价研究,是一个必然趋势。

参考文献:

- [1]席秋义,徐建光,张洪波,等. 河流生态水文系统研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(8): 11-12.
- [2]魏晓华,孙阁. 流域生态系统过程与管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [3]颜利,王金坑,黄浩. 基于PSR框架模型的东溪流域生态系统健康评价[J]. 资源科学, 2008(1): 107-113.
- [4]孟兆鑫,李春艳,邓玉林. 沱江流域生态安全预警及其生态调控对策[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(2): 1-8.
- [5]Rapport D J, Singh A. An eco-health based framework for status of environment reporting[J]. Ecological Indicators, 2006, 6(2): 409-428.
- [6]彭晶倩,李琳,曹雯,等. 城市湖泊水环境安全评价研究[J]. 环境保护科学, 2010, 36(5): 62-64.
- [7]游文荪,丁惠君,许新发. 鄱阳湖水生态安全现状评价与趋势研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(12): 1173-1180.
- [8]杨蕾蕾,刘新平. 基于PSR模型的城市土地集约利用评价——以乌鲁木齐市为例[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(8): 1681-1686.
- [9]冯科,吴次芳,刘勇. 浙江省城市土地集约利用的空间差异研究——以PSR与主成分分析的视角[J]. 中国软科学, 2007(2): 103-108.
- [10]石晓枫,兰芬. PSR模式在城市规划环境影响评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2006, 32(6C): 442-445.
- [11]林倩,张树深,刘素玲. 辽河口湿地生态系统健康诊断与评价[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 41-46.
- [12]陈奕,许有鹏,宋松. 基于“压力—状态—响应”模型和分形理论的湿地生态健康评价[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(6): 27-31, 59.

- [13] 龙笛. 国外健康流域评价理论与实践[J]. 河海水利, 2005(3): 1-5.
- [14] 薛敏. 喀斯特流域生态系统健康评价与管理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [15] 徐明德, 李静, 彭静, 等. 基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1809-1814.
- [16] 蔡燕, 王会肖. 生态系统健康及其评价研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 184-187.
- [17] 段树国. 塔里木河流域生态系统健康评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2006.
- [18] 吴炳方, 罗治敏. 基于遥感信息的流域生态系统健康评价——以大宁河流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 102-106.
- [19] 袁春霞. 基于 RS 与 GIS 的金川河流域生态系统健康评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [20] 刘瑛, 高甲荣, 崔强, 等. 4 种国外河溪健康评价方法述评[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 40-44.
- [21] 李晓东, 曾光明, 梁婕, 等. 基于层次分析法的洞庭湖健康评价[J]. 人民长江, 2009, 40(4): 22-25.
- [22] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 基于层次分析法的塔里木河流域生态系统健康评价[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1535-1544.
- [23] 李春晖, 崔崑, 庞爱萍, 等. 流域生态健康评价理论与方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2008, 27(1): 9-17.
- [24] 段树国, 奚秀梅. 塔里木河流域生态系统健康评价指标体系的构建[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19(5): 114-117.
- [25] 李苏楠, 赵延治, 史培军. 青藏高原生态安全评价方法与应用——以西藏自治区曲松县为例[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 142-146.
- [26] 蒋卫国, 李京, 李加洪, 等. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 408-414.
- [27] Davenport T E, Philips N J, Kirschner B A et al. The watershed protection approach: a framework for ecosystem protection [J]. Water Science and Technology, 1996, 33(4): 23-26.
- [28] 金苗, 王光社, 武晟. 兴庆湖生态系统健康评价方法研究[J]. 水利科技与经济, 2009, 15(8): 708-710.
- [29] 赵峰. 武汉市浅水湖泊生态系统健康评价指标重要度分析[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(12): 31-33.
- [30] Rapport D J, Gaudet C L, Calow P. Evaluating and monitoring the health of large scale ecosystems [J]. Global Environment Change Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, 1993, 28: 52-39.
- [31] Haskell B D, Norton B G, Costanza R. What is ecosystem health and why should we worry about it [M]. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management, Washington: Island Press, 1992: 3-20.

(责任编辑: 康兰媛, 英摘校译: 吴伟萍)