

基于 PSR 模型的民勤县绿洲—荒漠 交错带生态系统健康评价

杜娟, 陈英

(甘肃农业大学 资源与环境学院, 兰州 730070)

摘要: 生态系统健康评价是目前生态系统管理和宏观生态研究的热点问题之一, 是区域生态系统能否可持续发展的关键。以民勤县绿洲—荒漠交错带为例, 构建生态系统健康评价体系, 运用熵值法、极差标准化法及多因素综合评价法来评价民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康程度。研究表明: 利用 PSR 模型的评价结果与研究区的生态系统实际情况相符, 民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康综合指数处于较健康状态, 健康状况不断上升。民勤县绿洲—荒漠交错带生态环境整体良好, 同时为其他绿洲—荒漠交错带生态系统健康评价提供了参考依据。

关键词: 生态系统评价; 绿洲—荒漠交错带; PSR; 健康状况; 民勤县

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0215-06

Ecosystem Health Evaluation of Oasis-Desert Ecotone in Minqin County Based on PSR Model

DU Juan, CHEN Ying

(College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Ecosystem health assessment is one of the hot issues on the ecosystem management and the macroscopic ecology research at present, as well as the key to the sustainable development of regional ecosystem. We took the oasis-desert ecotone of Minqin County as an example, built the ecosystem health evaluation system, and used the entropy value method, maximum difference dormalization method and multi-factor comprehensive evaluation method to evaluate the ecosystem health condition. The results showed that the evaluation results were consistent with the actual situation in the study area, and the comprehensive index of ecosystem health in the oasis-desert ecotone was in the state of health in Minqin County based on the PSR model, which is rising. The ecological environment of the oasis-desert ecotone in Minqin County is good on the whole; meanwhile, it provided the reference basis for the ecosystem health evaluation of the other oasis-desert ecotone.

Keywords: ecosystem evaluation; oasis-desert ecotone; PSR; health status; Minqin County

生态系统健康评价是 20 世纪 80 年代末期提出的, 目前已成为生态学领域的研究热点之一^[1-2]。健康的生态系统具有良好的恢复能力和自净能力, 能够发挥正常的生态功能、景观功能和区域调节功能^[3-4]; 生态系统不健康就是生态系统出现疾病, 即生态系统的组织受到损害或削弱^[5]。绿洲—荒漠交错带是指贴近绿洲边缘的荒漠地段, 受到一定程度人为作用过程的产物, 发育在固定半固定风沙土壤的稀疏植被带, 其植物种类少, 结构简单, 植物总覆盖率为 10%~30%, 地下水埋深 2~7 m 间的非线性生态过渡

带^[6-7], 属于一个相对独立的自然—社会—经济的复合生态系统^[8]。近年由于受全球气候变化和区域沙漠化的影响, 民勤县绿洲—荒漠交错带这一独立特殊地带的生态环境持续恶化, 气候灾害频发, 加之该区域土地资源质量差, 在人为因素的剧烈扰动下, 生态环境越来越脆弱, 以避免民勤县成为第二个罗布泊为科学出发点, 探讨民勤县绿洲—荒漠交错带生态安全问题显得尤为重要。

生态系统健康评价是衡量生态系统破碎稳定程度的有效方法^[9-11], 为有效地恢复和保护民勤县绿

洲—荒漠交错带的生态环境,需要多指标、多尺度以及定性描述和定量评价相结合的模式全面地评价它的生态系统健康状况。压力—状态—响应(PSR)模型是由互为因果关系的压力、状态和响应 3 部分组成的概念性框架,这种新颖的评估思路,表现出强大的应用生命力,目前已广泛运用于土地资源利用评价^[12]、城市规划环境影响评价^[13]、湿地生态系统健康评价^[14-15]等领域。近年来,不少专家也开始尝试把 PSR 模型运用于生态系统健康评价之中^[16-18],其定性与定量相结合的因果评价模式更能说明区域实际情况。为此,本文在充分考虑民勤县绿洲—荒漠交错带的整体性、等级结构性、动态平衡性和时序性的情况下,以西北干旱区,同时是大面积压井灌溉区域,即石羊河流域重点治理的典型区域——民勤县绿洲—荒漠交错带为例,选取与区域结合紧密的指标^[19],如环境污染治理投资增长率、土地荒漠化率、水土流失率、灌溉指数等,运用信息熵值法确定相关指标的权重,并采用多因素综合评价法对该区生态系统健康进行评价,根据实际情况将结果分为 5 个等级,以期对绿洲—荒漠交错带环境保护决策的制定提供一定的科学依据,也可为整个河西走廊以及甘肃省其他绿洲—荒漠交错带的生态环境的评价和保护提供参考。

1 材料分析与方法

1.1 研究区概况

民勤县位于 101°49′41″—104°12′10″E, 38°3′45″—39°27′37″N, 在甘肃省西北部,河西走廊东北部,石羊河流域下游,东邻腾格里大沙漠,北接内蒙古巴丹吉林沙漠,西连祁连山,是黄土高原上的一片美丽的绿洲。全县最低海拔 1 298 m,最高海拔 1 936 m,平均海拔 1 400 m。总土地面积 15 907 km²,耕地面积 6.37 万 hm²。境内沙漠戈壁和盐碱滩点占 91%,农田绿洲占 9%。

民勤县绿洲—荒漠交错带位于民勤绿洲及其周边巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间,是阻挡巴丹吉林沙漠风沙入侵的天然屏障。民勤县属温带大陆性干旱气候区,大陆性沙漠气候特征十分明显,年均降水量 110 mm,昼夜温差 25.2℃,无霜期 162 d,特别适宜农作物生长,尤其是瓜果类的糖份积累。粮食生产以优质小麦、玉米和啤酒大麦为主,年总产量 1.5 亿 kg,是甘肃省重要的商品粮基地县。2012 年,民勤的荒漠化面积已占土地面积的 94%,荒漠边缘以每年 3~4 m 的速度向绿洲推进。

1.2 数据来源

本文涉及的数据主要来源于《甘肃省统计年鉴(2003—2012 年)》、《民勤县统计年鉴(2003—2012

年)》、《民勤县社会经济统计资料(2003—2012 年)》及石羊河流域生态数据。

1.3 评价指标选取

根据指标选取的整体性、空间性、可比性、操作性等原则。综合国内外的研究成果^[2-8]及实地考察,基于生态系统健康评价的特点,选取“压力”层指标,从当前的人口压力和农业经济、生产压力出发;“状态”层选取目前生态环境所处的状况;“响应”层指标是对土地资源利用和农业经济发展的回应(表 1)。为了避免人为因素的影响,使指标权重确定更加具有科学性,采用客观赋权法中的信息熵值法来计算指标权重。

1.4 标准化处理

为消除各指标在量纲、数量级上的差别需对原始数据进行标准化处理。本研究采用极差标准化处理,消除量纲差别,使得各指标值为 0~1。极差标准化处理用以下公式:

$$\begin{cases} r_{ij} = (x_{ij} - x_{imin}) / (x_{imax} - x_{imin}) & \text{正效应} \\ r_{ij} = (x_{imax} - x_{ij}) / (x_{imax} - x_{imin}) & \text{负效应} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{ij} ——指标原始值; r_{ij} ——标准化后的某指标值; i ——指标个数,相应取值为 1~22; j ——年份(2003—2012 年),取值范围为 1~10; x_{imax} ——第 i 个指标最大值; x_{imin} ——第 i 个指标最小值。

为使指标权重更具科学性,避免人为因素的影响,本文采用客观赋权法中的熵值法来确定指标权重。

(1) 计算熵值。在有 m 个指标, n 个被评价对象的评价问题中,将第 i 个指标的熵值定义为 E_i ,则熵值的计算^[9]如下:

$$E_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$f_{ij} = x_{ij} / \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

式中: k ——待定常数, $k=1/\ln n$; f_{ij} 为第 j 个年份下第 i 个指标值的比重,当 $f_{ij}=0$ 时,令 $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ 。

(2) 计算指标的差异性系数。将第 i 个指标的差异性系数定义为 e_i ,则差异性系数的计算:

$$e_i = 1 - E_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

(3) 确定指标权重。将第 i 个指标的权重定义为 w_i ,则权重的计算:

$$w_i = e_i / \sum_{i=1}^m e_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

各个指标的权重值应满足 $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

表 1 PSR 框架下生态系统健康评价指标体系

目标层	准则层	指标层(权重)	指标说明
生态系统健康评价	压力 (0.2567)	人口密度(0.0565)	人口数量/土地总面积
		人类干扰强度(0.0182)	(耕地+建设用地)/土地总面积
		土地垦殖指数(0.0175)	耕地面积/土地总面积
		年均降水量(0.0565)	多年降雨量总和/年数
		农民人均纯收入(0.0482)	农民总收入/农村总人口
	状态 (0.4486)	农业生产压力(0.0598)	农作物播种面积/土地总面积
		人均耕地(0.0466)	耕地总面积/人口总数
		人均 GDP(0.0499)	生产总值/GDP
		人均牧畜占有量(0.0389)	畜牧总量/总人口数
		第三产业贡献率(0.0704)	(第三产业当年增量/国内生产总值当年增量)×100%
		化肥投入比例(0.0593)	化肥折纯使用量/耕地面积
		环境污染治理投资增长率(0.0375)	(当年环境污染治理投资/前一年环境污染治理投资)-1
		机械力投入比例(0.0496)	农业机械总动力/耕地面积
		灌溉指数(0.0524)	有效灌溉面积/耕地面积
		土地荒漠化率(0.0440)	早涝保收面积/耕地面积
	响应 (0.2947)	退耕还林率(0.0519)	(退耕还林面积/土地面积)×100%
		土壤侵蚀强度(0.0509)	单位时间内被剥蚀并发生位移的土壤侵蚀量/单位土地面积
		农牧产值比重(0.0396)	农业产值比重/牧业产值比重
		土地利用强度(0.0322)	土地投资强度/单位用地面积
		恩格尔系数(0.0386)	食品支出总额/个人消费支出总额
		水土流失程度(0.0495)	水土流失面积/土地总面积
		土地集约利用水平(0.0320)	固定资产投资/土地总面积

1.5 综合评价

生态系统健康评价是一个衡量生态健康程度的指标,其数值为 0~1。根据生态系统健康评价指标数据,各指标通过加权累加计算各评价单元的综合评价分值。本研究采用综合评价分值,把标准化后的值和指标权重带入综合评价模型,民勤县绿洲—荒漠交错带综合评价分值计算公式如下:

$$f_i = \sum_{i=1}^n w_i (\sum_{j=1}^m w_j r_{ij}) \tag{6}$$

式中: f_i ——某评价单元的综合评分值; w_i ——准则层因子的权重; w_j ——指标层因子的权重; r_{ij} ——标准化后的某指标值; $\sum_{j=1}^m w_j r_{ij}$ ——压力、状态、响应 3 个分类评价指标的综合评价价值。本文借鉴前人的研究成果并根据评价决策的实际需要,将生态系统健康综合指数从高到低排序反映健康状况从优到劣的变化,按照等间距分布将评价结果分为 5 个等级^[20]: $[0.8,1)$ 处于很健康状态; $[0.6,0.8)$ 处于健康状态; $[0.4,0.6)$ 处于较健康状态; $[0.2,0.4)$ 处于一般病态状态; $[0,0.2)$ 处于病态状态,然后根据生态系统健康综合指数所对应的等级,最终确定民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康综合状况。

2 结果与分析

2.1 压力指数、状态指数及响应指数变化

根据上述区域生态系统健康评价指标体系和综合评价模型,得出民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康压力、状态、响应指数(图 1)。

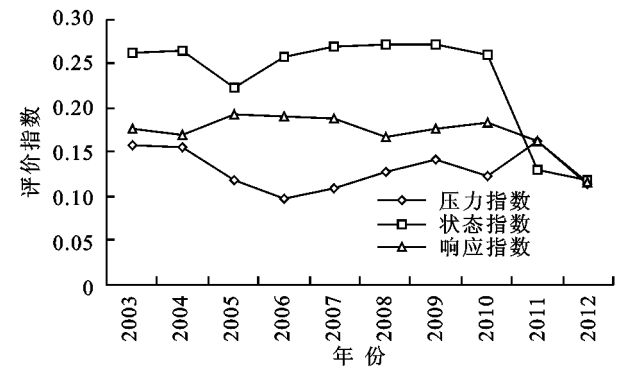


图 1 民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康评价结果

(1) 生态系统健康压力指数。生态系统健康压力指数反映的是理论生态系统承受力和实际生态系统承受力之间的比较,用来衡量研究区域的生态系统压力程度。由于生态系统是一个动态变化的过程,所以不同区域或不同时期的生态系统健康压力指数也会呈现不同动态变化趋势。

由图 1 得知,生态系统健康压力指数的变化趋势可以分为 3 个阶段。

第一阶段:递减阶段。生态压力健康指数从 2003 年 0.158 5 的下降到 2006 年的 0.098 5,下降幅度达 35.12%,年均下降幅度为 15.04%。其下降的原因是:近几年人口波动大,特色农业的种植使土地垦殖指数逐年增大,加上近几年外出务工的冲击,使农民人均纯收入逐年增加,种植农业的农户压力越来越大。例如,土地垦殖指数在 2003 年是 0.077,在 2006 年上升到了 0.081,上升幅度达到 5.19%。

第二阶段:上升阶段。2006—2009 年生态系统健康压力指数从 0.098 5 上升到 0.142 3,上升幅度达 44.47%,年均上升幅度为 11.12%。由于石羊河流域年降水量的匮乏和人类干扰指数的增加致使生态系统健康压力指数上升,如年降雨量基本上稳定在 150 mm 上下,使得荒漠化加剧。

第三阶段:波动阶段。生态系统健康压力指数从 2009 年的 0.142 3 下降到 2010 年的 0.122 2,再上升到 2011 年的 0.162 8,最后下降到 2012 年的 0.114 4,呈现一年高一年低的波动。主要原因是近年人类干扰强度强,土地垦殖率高,年均降水量变化不大,农户收入上升,农业收入压力的增大,因此出现近年时好时坏的波动。

(2) 生态系统健康状态指数。它是指利用效率和相应产生的经济效益。从图 1 中可知,生态系统健康状态指数经历了 2 个发展阶段。

第一阶段:下降阶段。生态系统健康状态指数由 2003 年的 0.263 1 下降到 2005 年的 0.223 7,下降了 17.61%,年均下降 5.87%。该阶段指数下降表明:人均耕地、人均畜牧占有量、第三产业贡献率和灌溉指数都有所下降,资源使用效率没有得到最大化的利用。例如,人均耕地、人均畜牧占有量、第三产业贡献率和灌溉指数分别从 2003 年的 0.132 6 人/km²,0.294 4,40.95%和 0.752 0%,下降到 2005 年的 0.13 人/km²,0.289 3,40.71%和 0.751 8%,分别下降了 2%,1.77%,0.59%和 0.000 9%。其原因主要是 2003—2005 年研究区域连续多天干旱少雨,荒漠化严重,灌溉水资源缺乏,影响了生态系统健康的稳定。生态系统健康状态指数由 2008 年的 0.272 8 下降到 2012 年的 0.119 3,下降了 128.78%,年均下降 25.75%。例如,化肥投入量和机械投入比例从 2008—2012 年分别增加了 15.14%和 37.03%。

第二阶段:上升阶段。生态系统健康状态指数从 2005 年的 0.223 7 上升到 2008 年的 0.272 8,上升了 4.91%,年均上升 1.23%。该阶段指数上升主要是因

为农业生物技术、农业生产技术、抗自然灾害能力和农民素质的提高,保护环境意识逐渐增强。主要表现在环境污染治理投资增长率、人均 GDP 的上升和土地荒漠化率的下降,其值分别由 2005 年的 9.86 kg/hm²,7 488.19 元/人和 0.676 8%,上升到 2008 年的 12.35 kg/hm²,9 409.59 元/人和下降到 0.665 1%;同时,近年国家加大西部农业基础设施投入和石羊河流域生态域的保护,加上防御自然灾害的能力增强,极大地提高了生态系统的健康状态。

(3) 生态系统健康响应指数。生态系统健康响应指数的变化分为两个阶段。

第一阶段:上升阶段。生态系统健康响应指数其值由 2003 年的 0.176 8 上升到 2005 年的 0.193 2,上升了 9.28%,年均上升 3.09%。从 2008 年的 0.167 9 上升到 2010 年的 0.183 5,上升了 9.29%,年均上升 3.097%。两个阶段响应指数的增大都是短暂性的,其主要原因是生态环境的恶化引起了国家的重视,但是治理的持续性不够。主要表现为土地集约利用水平、土地利用强度和退耕还林比例不断升高和水土流失率的降低,如 2003 年的 0.034 0,7.32%和 14.893 3%,上升到 2005 年的 0.092 0,7.38%和 14.993 4%,分别上升了 170.58%,0.82%和 0.67%。由此看出,农户生活水平的提升与生态系统健康响应呈正相关。农户生活越富裕,响应越积极,对压力的缓解帮助越大。

第二阶段:递减阶段。响应指数由 2005 年的 0.193 2,下降到 2008 年的 0.167 9,下降了 15.07%,年均下降 3.77%。从 2010 年的 0.183 5 下降到 2012 年的 0.117 2,下降幅度 56.57%。其原因主要是由于土壤侵蚀强度、农牧产值比重的增幅较大,严重损伤了刚建立起的生态平衡;加上农膜的扩大化使用,使生态系统健康压力进一步增大。

2.2 生态系统健康评价综合分析

根据综合评价模型可以得出各年份的健康值(表 2),民勤县绿洲—荒漠交错带 2003—2012 年的生态系统健康评价的综合指数都在 0.45 以上,说明民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康总体处于较健康状态。

民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康的综合指数在 2003 年处于“较健康”状态,从 2004 年的 0.613 1 下降到 2012 年的 0.312 2,生态系统健康有所恶化。根据生态系统健康分级判断标准,民勤县绿洲—荒漠交错带 2004 年处于“健康”状态,2005—2012 年生态系统健康处于“较健康”状态。总体来看,民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康处于“较健康”状态,这与民勤县近年来的实际生态环境是相吻合的。

2005 年后健康状况较差,健康值下降较为明显,源于自然状态差,经济发展快,生态环境恶化。如民勤湖区已有 3.33 万 hm² 天然灌木林枯萎、死亡,有 2 万 hm² 农田弃耕,部分已风蚀为沙漠;2009 年民勤县农业更是受到了几十年不遇的干旱;祁连山最近几年出现了严重的雪线上移、冰川退缩、草原退化等现象。近年民勤县绿洲—荒漠交错带综合生态安全评价价值大多处于 0.5 以上,即处于较健康向健康转变。一方面,由于近 10 年来,随着退耕还林工程的实施不

仅已使退耕区域土地利用发生了重大变化,同时也产生了明显的生态效应,使民勤县绿洲—荒漠交错带生态环境有所改善;另一方面,近几年武威市西营河水调到民勤县的石羊河,使下游的灌溉业得到了一定的发展,促进了农业的集约经营,对区域性的生态也有一定的促进作用。因此,民勤县绿洲—荒漠交错带总体处于较健康状态,想要恢复破坏后的生态环境需要付出巨大的资金代价和时间代价,同时警示人类在经济发展的同时要不以牺牲生态环境为代价。

表 2 民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康状况等级判别

年份	健康评价值	健康状况	指标特征
2003	0.5983	较健康	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
2004	0.6131	健康	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,绿洲—荒漠交错带适合人类生存
2005	0.5297	较健康	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
2006	0.5432		
2007	0.5525		
2008	0.5520		
2009	0.5535		
2010	0.4550		
2011	0.4509		
2012	0.5122		

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文以西北干旱区典型区域民勤县绿洲—荒漠交错带为例,基于 PSR 模型,建立生态系统健康评价模型,运用熵值法、极差标准化法及多因素综合评价法来评价生态健康程度,发现民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康状况逐渐变好。民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康评价体系的构建、研究方法的选择,对研究绿洲—荒漠交错带生态系统健康评价具有重要意义,在一定程度上完善了国内该领域的研究体系。研究结论揭示了绿洲—荒漠交错带生态系统健康状况处于较安全状态,田青^[21]、刘海娟^[22]等的研究也证明了这一点,这为其他区域更加科学、合理地构建绿洲—荒漠交错带生态系统健康评价体系提供了重要的参考和经验。通过实证分析可知,近几年国家对石羊河流域和民勤县生态环境的治理,已经取得了显著的效果。因此,要进一步改善绿洲—荒漠交错带的生态环境,需要政府进一步加大生态补偿和保护机制。当然,由于 PSR 是一个以时间为轴的开放性螺旋形循环链关系,实践中生态系统健康评价是一个动态变化的过程^[23]。未来要更多地对评价结果进行修正和调控,用更先进的研究模型进行系统分析,有待进一步的研究。

3.2 结论

(1) 民勤县绿洲—荒漠交错带由于其特殊的地理位置,在生态系统健康评价时方法的选择与评价指标的选取都应与其他区域生态评价有所不同。本文采用 PSR 模型,从人地关系的角度入手,将民勤县绿洲—荒漠交错带的生态状况当作一个由压力—状态—响应共同构成的综合系统,选取指标时考虑各个子系统间的相互作用和相互关系。民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康呈现健康状态,与实际情况基本相符,也表明了选取 PSR 模型构建体系是可行的。民勤县绿洲—荒漠交错带生态系统健康评价研究表明:生态系统健康评价综合指数在 10 年中处于逐年提高趋势,处于较健康状态。

(2) 近 10 年来民勤县绿洲—荒漠交错带的生态系统健康状况不断提高,逐渐趋于健康状态发展,说明还要继续加强民勤县绿洲—荒漠交错带可持续发展建设。随着生态系统压力的增大,人们的响应不断增强,这就需要人们提高自身素质,参与到环境保护中;加强和引导产业的节能减排,实现经济增长与环境之间的脱钩;国家加大政策引导农户去保护环境;重视对沙漠化的治理,合理利用水资源,提高农民的外部性收益。

参考文献:

- [1] Rapport D J. What constitutes ecosystem health[J]. Perspectives in Biology and Medicine, 1989, 33(1): 120-132.
- [2] Rapport D J. Ecosystem Health[M]. Oxford: Blackwell Science, 1998.
- [3] 唐涛, 蔡庆华, 刘健康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1191-1194.
- [4] 边博, 程小娟. 城市河流生态系统健康及其评价[J]. 环境保护, 2006(4): 66-69.
- [5] 张晓琴, 石培基. 基于 PSR 模型的兰州城市生态系统健康评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 77-82.
- [6] 樊自立, 马英杰, 王让会, 等. 干旱区内陆河流域生态系统的类型及整治途径[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 393-397.
- [7] 杨春红, 张正栋, 田楠楠, 等. 基于 PSR 模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 209-214.
- [8] 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, 30(1): 107-113.
- [9] 任建丽, 金海龙, 叶茂, 等. 基于 PSR 模型对艾比湖流域生态系统健康评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 37-41.
- [10] 史永亮, 杨东峰, 王如松, 等. 基于 PSR 模型的大丰市城市生态系统健康综合评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 120-124.
- [11] 张秀娟, 周立华. 基于 DFSR 模型的北方农牧交错区生态系统健康评价: 以宁夏盐池县为例[J]. 中国环境科学, 2012, 32(6): 1134-1140.
- [12] 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): 102-108.
- [13] 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(6): 442-445.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 乔蕻强, 陈英. 基于 PSR 模型的干旱绿洲灌区耕地集约利用评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 238-243.
- [17] 陈美球, 刘桃菊, 许莉. 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[J]. 江西农业大学学报: 社会科学版, 2011, 10(3): 83-89.
- [18] 陈美球, 许莉, 刘桃菊, 等. 基于 PSR 框架模型的赣江上游生态系统健康评价[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(4): 839-845.
- [19] 林和山, 陈本清, 许德伟, 等. 基于 PSR 模型的滨海湿地生态系统健康评价: 以辽河三角洲滨海湿地为例[J]. 台湾海峡, 2012, 31(3): 420-429.
- [20] 罗遵兰, 赵志平, 孙光, 等. 松花江流域湿地生态系统健康评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 105-110.
- [21] 田青, 李宗杰, 宋玲玲, 等. 甘肃河西地区 1986—2011 年水土保持生态安全格局[J]. 中国沙漠, 2015, 34(6): 1692-1698.
- [22] 刘海娟, 陆凡. 遗传投影寻踪插值模型在生态安全评价中的应用: 以甘肃省民勤县为例[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1): 118-124.
- [23] 谢余初, 巩杰, 赵彩霞, 等. 干旱区绿洲土地利用变化的生态系统服务价值响应: 以甘肃省金塔县为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 165-170.

~~~~~

(上接第 214 页)

- [10] 夏库热·塔依尔, 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 等. 基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 142-147.
- [11] 爱勤, 王文科, 段磊, 等. 渭河流域基流及降雨的多尺度特征和突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 144-148.
- [12] 米热古力·艾尼瓦尔, 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 等. 基于小波分析的伊塞克湖水位变化特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 168-172.
- [13] 王欢, 李栋梁, 蒋元春. 1956—2012 年黄河源区流量演变的新特征及其成因[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 403-412.
- [14] 沈雪峰, 艾成. 新疆玛纳斯河径流时间变化特征及其趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 14-19.
- [15] 杨丁丁, 欧阳华, 周才平, 等. 青藏高原年楚河 1961—2000 年的径流变化特征分析[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1272-1277.