

基于 PSR-TOPSIS 模型的宁夏回族自治区 土地生态安全评价

王磊¹, 郭灿¹, 李慧明²

(1. 天津城建大学 经济与管理学院, 天津 300384; 2. 南开大学 循环经济研究中心, 天津 300071)

摘要:土地生态安全问题是区域可持续发展的核心问题之一。基于 PSR-TOPSIS 模型构建土地生态安全评价体系, 选取处于“一带一路”关键节点的生态脆弱典型区域宁夏回族自治区为研究区域, 系统评价其 2003—2013 年的土地生态安全状况。结果显示: 宁夏地区土地整体生态状况呈好转趋势, 但仍处于较不安全状态, 土地生态环境较恶劣, 生态系统功能、结构受损, 抗外界干扰能力较差; 植树造林、退耕还林、废气、废水及固废的控制与处理、经济效益的提高对研究区域土地生态安全的改善起到了积极作用; 而区域本身脆弱的生态环境、经济发展产生的环境污染以及响应政策的不连续性却加剧了土地生态的不安全性。在此基础上, 从生态防护体系建设、产业优化升级和生态治理长效机制建立等方面提出了对策建议。

关键词:土地生态安全评价; PSR-TOPSIS 模型; 宁夏回族自治区

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)06-0154-06

Evaluation of Land Security in Ningxia Hui Autonomous Region Based on PSR-TOPSIS Model

WANG Lei¹, GUO Can¹, LI Huiming²

(1. School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Research Center on Circular Economy, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Land security is the one of the keys of the regional sustainable development. Choosing Ningxia Hui Autonomous Region as the study area, the key nodes of ‘One Belt and One Road’ and typical ecological fragile area, we evaluate land security in 2003—2013 by the PSR-TOPSIS model. The results show that: the overall situation of the land security in Ningxia Hui Autonomous Region is better, but is still in the less safety status, bad land environment, broken land ecosystem, poor ability to resist outside interference; the forestation, returning farmland to forest, control and processing of waste gas, waste water and solid waste, the improvement of the economic benefit of the study area have played the positive role in improving the land security of the study area; fragile land ecosystem, pollution caused by economic development and discontinuities in response policy have aggravated the land insecurity. In addition, some suggestions were put forward on based on above research with respect to building the ecology protection forest system, optimization and upgrade of the industrial structure and establishing the mechanism of land ecological management.

Keywords: evaluation of the land security; PSR-TOPSIS framework; Ningxia Hui Autonomous Region

土地是人类赖以生存和发展的基础, 我国快速城市化、工业化和迅速增长的人口加速了人们对土地资源的开发利用, 同时引发了一系列土地生态安全问题, 危及到粮食供给、人类生存、区域发展空间。土地生态安全问题是区域可持续发展核心问题之一, 是我国生态文明建设的重要内容。近年来, 土地生态安全问题引起了国内外学者的广泛关注, Hughey K F

D^[1]、张军以^[2]、杨春红^[3]等基于 PSR 模型框架分别构建新西兰、三峡库区、汕头市土地生态安全评价指标体系, 并在此基础上, 运用综合指数法对研究区域的土地生态安全进行了评价; 吕添贵^[4]、关小克^[5]、余敦^[6]、吕建树^[7]等学者分别采用生态足迹法、灰色关联分析、物元分析法、GIS/RS 等评价方法对不同研究区域进行生态安全评价, 为区域生态安全建设提供了

值得借鉴的依据;李茜^[8]、郭永杰^[9]、马莉娅^[10]等分别采用不同的方法对宁夏土地环境安全、宁夏市域生态安全以及宁夏盐池县生态安全进行了动态评价,为宁夏开展环境治理提供了参考。前期研究中,在评价响应框架方面,PSR 响应评价框架因能有效判定环境状态与环境问题之间的因果联系而得到广泛应用;在评价方法方面,大部分学者多采用主观性强、动态性弱的AHP、因子分析等评价方法,对研究区域生态安全现状的真实反映存在一定局限性;在研究区域方面,国内外学者对宁夏回族自治区土地生态安全的研究多集中于市域或县级层面,对宁夏整体土地生态安全的研究相对较少,难以全面反映宁夏区域土地生态安全的整体发展状态。基于此,本研究应用相对成熟的PSR 响应框架构建研究区域土地生态安全评价体系,选取客观评价与主观评价相结合,直接表征原始数据信息的逼近理想解法(TOPSIS法),开展区域土地生态安全评价,具有一定理论价值。此外,本研究选取宁夏回族自治区为研究对象,该区域是我国生态环境脆弱典型区域,同时还是我国“一带一路”战略中向西开放的“桥头堡”,未来土地资源负载压力较大。因此,对宁夏回族自治区土地生态安全进行科学评价,测度其土地生态安全指数的动态变化过程,不仅有利于判断宁夏地区的土地生态安全现状,识别土地生态安全相关政策的响应效果,而且对于未来优化区域土地利用方式,促进土地资源功能维持,具有重要实践意义。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域概况

宁夏回族自治区是我国五大少数民族自治区之一,地处我国西北地区的东部,黄河上游,东邻陕西、北靠内蒙、南连甘肃,是我国内接中原、西通西域、北连大漠,各民族南来北往的重要区域。同时,宁夏也是我国发展“丝绸之路经济带”,连接新亚欧大陆桥的重要节点,拥有明显区位优势。

从发展现状来看,宁夏积极把握发展机遇,不断加速工业化和城市化进程,至2013年国民生产总值攀升至2 565.06亿元,城镇化率也由2000年的32.5%上升至2013年的52.0%,但经济的迅速发展也给宁夏带来了一定的环境压力,威胁宁夏地区土地生态安全。数据表明:2013年工业废气排放总量达10 026.2亿立方米;工业废水和城镇生活污水排放总量达38 517.92万t;固体废弃物总量达3 281.94 t。加之近十年土地开发利用强度加剧,建设用地、耕地、林地等各类用地比例失衡^[8],宁夏土地生态安全面临严峻挑战。

从自然气候来看,宁夏位处东部季风、西北干旱以及青藏高寒的交汇地带,地跨三个气候带的独特地理位置决定了其自然环境的过渡性和生态脆弱性,同时涵盖了西部地区所有的土地生态问题,包括土壤侵蚀、土地沙质荒漠化、土地盐渍化等^[11-12]。脆弱的土地生态环境使得宁夏成为土地生态安全评价的典型区域。同时,干旱少雨、蒸发强烈的水热组合使得“基础薄弱”的土地资源质量持续下降,植被覆盖率降低,水土流失、沙化、盐渍化等加剧,脆弱的土地生态环境进一步恶化。

1.2 数据来源

本研究原始数据源于《宁夏回族自治区统计年鉴》(2004—2014年)、《宁夏回族自治区环境状况公报》(2003—2014年)、《宁夏回族自治区环境保护“十二五”规划》、《宁夏“十二五”规划纲要》、《宁夏农业和农村经济发展“十二五”规划》。

2 研究方法

2.1 评价方法及指标选取

PSR 框架是由OECD于20世纪90年代提出的研究环境问题的框架体系,具有较强综合性、系统性以及灵活性等特点,能清晰表征人类活动、自然环境、经济发展之间的因果关系,且能有效分解细化复杂问题,将其应用于土地生态安全评价,具有较强的适用性和针对性^[13-15]。

因此,本文基于PSR 框架模型,参考前期学者研究成果,充分考虑宁夏回族自治区社会经济、自然资源、生态环境质量状况,特别是土地资源及土地利用的实际情况,遵循科学性、可操作性、数据可获得性等原则,建立了包括压力、状态、响应三个分系统的区域生态安全评价指标体系(表1)因地制宜的选取30个评价指标。其中压力系统依据人口压力、经济压力和环境污染压力三个维度选取12个指标,状态系统依据反映经济发展、自然资源及环境质量三个维度选取9个指标,响应系统依据为缓解土地生态压力而采取的相关经济、环境、社会治理三个维度措施,选取9个指标。

在已建指标体系的基础上,利用TOPSIS法测度研究区域的生态安全指数。TOPSIS法是由C. L. Hwang和K. Yoon于1981年提出的多目标决策方法,该方法是在充分分析原始数据信息的基础上,通过测算评价对象与正、负理想解的接近程度评估区域土地生态安全状况,得出的评价结果不仅能客观、真实的反映区域实际情况,而且更具指向性,能明确反映区域土地生态安全所受压力、所处状态以及相关治理政策效果的动态变化。

表 1 宁夏土地生态安全评价指标体系

总系统层	分系统层	指标层	单位	安全趋向	权重
区域土地生态安全系统	压力系统	X ₁ 人口密度	人/km ²	—	0.0095257
		X ₂ 人口自然增长率	%	—	0.0108792
		X ₃ 原煤消耗比例	%	—	0.0109971
		X ₄ 万元 GDP 能耗	吨标煤	—	0.034994
		X ₅ 恩格尔系数	%	—	0.0047221
		X ₆ 城市化水平	%	—	0.0215868
		X ₇ 化肥使用量	kg/hm ²	—	0.0204151
		X ₈ 农药使用量	kg/hm ²	—	0.0216705
		X ₉ SO ₂ 排放量	t/km ²	—	0.0225935
		X ₁₀ 工业烟尘排放量	t/km ²	—	0.0419869
		X ₁₁ 废水排放量	t/km ²	—	0.0411228
		X ₁₂ 固废负荷水平	t/km ²	—	0.0359743
区域土地生态安全系统	状态系统	X ₁₃ 人均 GDP	万元	+	0.0620768
		X ₁₄ 人均耕地面积	hm ²	+	0.0540279
		X ₁₅ 林地覆盖率	%	+	0.0649597
		X ₁₆ 人均水资源总量	m ³ /人	+	0.0156491
		X ₁₇ 黄河干流 I—III 类水质断面比例	%	+	0.0668237
		X ₁₈ 城市空气综合污染指数	—	—	0.0519411
		X ₁₉ 农业受灾面积	千 hm ²	—	0.0470167
		X ₂₀ 城市区域环境噪声等效声级	分贝	—	0.0518987
		X ₂₁ 酸雨频率	%	—	0.0710268
区域土地生态安全系统	响应系统	X ₂₂ 污水处理厂污水处理量	万 t	+	0.0413752
		X ₂₃ 工业废气治理设施套数	套	+	0.0311038
		X ₂₄ 工业固废综合利用率	%	+	0.0149538
		X ₂₅ 工业污染治理项目投资占 GDP 比例	%	+	0.0522903
		X ₂₆ 第三产业占 GDP 比例	%	+	0.0034566
		X ₂₇ 自然保护区面积	万 hm ²	+	0.0137714
		X ₂₈ 水土流失治理面积	千 hm ²	+	0.0093375
		X ₂₉ 每万人高等院校在校学生数	人	+	0.0613461
		X ₃₀ 每万人拥有医生数	人	+	0.0104767

注：“+”为效益型指标；“—”为成本型指标。

2.2 生态安全评价标准划分

评价标准的划分是生态安全评价的关键环节,科学合理的评价标准能有效确保评价结果的准确性和客观性。

然而现阶段我国并没有统一的土地生态安全划

分标准,对于该方面的研究也仍处于探索阶段。因此,本文通过参考相关学者的研究成果^[16-19],结合宁夏地区的特点以及国家、行业和地方规定的相关标准,采用传统等间距法划分安全等级,将宁夏地区土地生态安全状况分为 5 个等级(表 2)。

表 2 宁夏地区土地生态安全评价标准划分

等级	生态安全指数	土地生态系统特征
不安全	0~0.2	土地生态系统破坏严重,功能丧失,结构破碎;生态环境极为脆弱,生态恢复、重建极其困难;人地关系失衡,严重威胁社会发展
较不安全	0.2~0.4	土地生态系统破坏明显,系统功能的发挥受限制;生态环境脆弱,水土流失、土地沙化严重,抗外界干扰能力差;人地关系的和谐发展受到威胁
临界安全	0.4~0.6	土地生态系统中度破坏,系统结构有恶化趋势,但尚能维持基本功能;生态环境受到一定破坏,受干扰后易恶化;人地关系的和谐发展受到一定影响
较安全	0.6~0.8	土地生态系统破坏较小,系统结构尚且完整,功能发挥正常;生态环境良好,系统自我恢复能力较强;人地关系较为和谐
安全	0.8~1.0	土地生态系统保持其自然属性,结构完整、功能完善;生态环境基本未受干扰,能自我修复和再生;人地关系和谐,有利于社会发展

2.3 土地生态安全计算模型

2.3.1 构建评价样本矩阵 定义 t_{ij} 为第 i 年、第 j 项指标的实际值,以此构建研究区域土地生态安全评

价 m 个评价指标和 n 个评价对象的样本矩阵 T,

$$T = (t_{ij})_{n \times m} \quad (1)$$

2.3.2 指标标准化 为消除量纲影响,本文采用极

差标准化对原始矩阵 T 进行标准化处理, 得出规范化样本矩阵 P , 记为: $P = (p_{ij})_{n \times m}$,

正向指标:

$$p_{ij} = \frac{t_{ij} - \min t_{ij}}{\max t_{ij} - \min t_{ij}} \quad (2)$$

负向指标:

$$p_{ij} = \frac{\max t_{ij} - t_{ij}}{\max t_{ij} - \min t_{ij}} \quad (3)$$

式中: p_{ij} 为指标标准化后的数值, $p_{ij} \in (0, 1)$; $\max t_{ij}$ 与 $\min t_{ij}$ 分别为第 j 个指标的最大值与最小值。

2.3.3 确定指标权重 为了使评价结果能够更加准确的反映宁夏回族自治区土地生态安全状况, 本研究采用客观与主观赋权相结合的方法确定指标权重, 一方面充分挖掘各指标原始数据信息^[20], 另一方面反映专家经验, 使指标权重与其实际重要程度相一致。

(1) 利用变异系数法确定指标权重:

$$C_j = S_j / E_j, \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$W_j = C_j / \sum_{j=1}^m C_j \quad (5)$$

式中: C_j 为第 j 项指标的变异系数; S_j 为第 j 项指标的标准偏差; E_j 为第 j 项指标的平均值; W_j 为第 j 项指标的权重; m 为指标的个数。

(2) 利用主观赋权法修正客观赋权法确定的权重值, 得到 W_j' 。(表 1)

(3) 加权规范化决策矩阵 X 的确定:

$$X = (X_{ij})_{m \times n} = (W_j' \times p_{ij})_{m \times n} \quad (6)$$

2.3.4 计算正理想解和负理想解 确定正理想解 $X^+ = \max(X_{ij}), (i=1, 2, \dots, n)$ 和负理想解 $X^- = \min(X_{ij}), (i=1, 2, \dots, n)$, 并计算各评价对象到正理想解的距离 D_i^+ , 负理想解的距离 D_i^- 。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - X^+)^2} \quad (7)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - X^-)^2} \quad (8)$$

2.3.5 确定生态安全指数 计算评价对象与理想解的贴近程度 U_i , 即生态安全指数, $U_i \in (0, 1)$, 其值越大表明土地安全程度越高:

$$U_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (9)$$

3 结果与分析

3.1 生态安全水平的评价结果及总体特征

依据土地生态安全计算模型, 基于宁夏回族自治区 2003—2013 年的各项指标数据计算得出总系统层和分系统层的生态安全指数。

见图 1, 2003—2013 年宁夏回族自治区土地生态安全指数介于 0.2~0.4, 土地生态安全处于较不安全状

态, 土地生态环境较恶劣, 生态系统功能和结构受损, 土壤污染、水土流失、土地沙化等现象严重, 生态恢复和重建较为困难。从生态安全动态变化趋势来看, 宁夏地区 2003—2013 年的土地生态安全呈波动上升, 生态安全状况在近年有所好转, 并于 2008 年达到峰值。

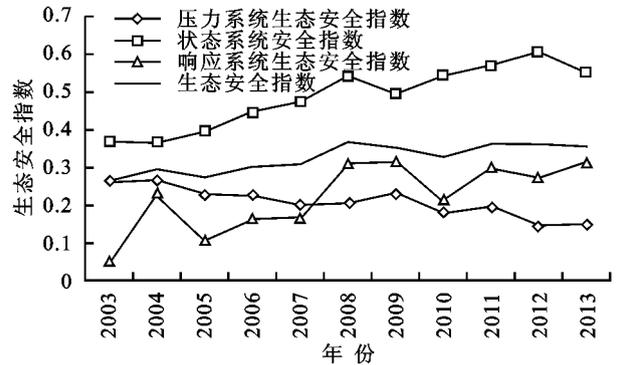


图 1 宁夏回族自治区土地生态安全变化图

3.2 生态安全状况分析

3.2.1 土地生态安全压力系统 宁夏回族自治区土地生态压力综合指数呈波动下降, 并于 2013 年达到最低值, 且始终处于不安全状态, 表明研究期间宁夏地区土地生态安全压力负荷逐年增大, 严重威胁该地区土地生态安全。由图 2 可知, 宁夏地区土地生态压力负荷主要受环境污染压力变化的影响, 尽管人口承载压力以及社会经济压力逐年缓解, 但依旧没能改变环境污染对土地生态安全造成的颓势。从 2012—2013 年土地生态压力综合指数的变化来看, 人口自然增长率的持续下降以及经济效益的不断提高仍在一定程度上延缓了土地生态压力负荷的持续增涨。总的来说, 随着西部大开发战略的深入实施, 宁夏建设发展工作全面展开, 经济迅速增长在提高人们生活水平的同时, 也使得环境压力一定程度上有所增加。SO₂、工业烟尘、废水以及固废排放量等指标增幅较大, 化肥、农药使用量的增加对土地生态安全造成巨大压力, 已经成为严重威胁宁夏回族自治区土地生态安全的主要因素。

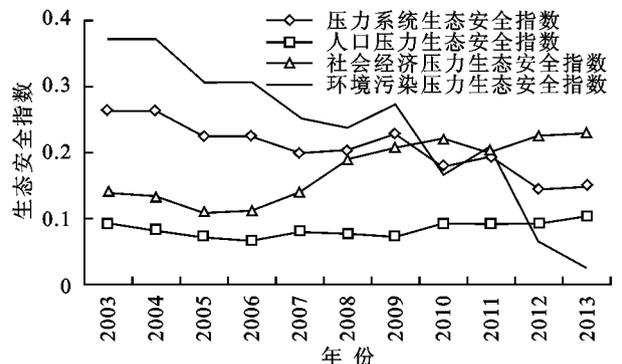


图 2 宁夏回族自治区土地生态压力变化

3.2.2 土地生态安全状态系统 由图 1 可知, 宁夏

回族自治区土地生态安全状态指数由2003年的0.37上升至2013年的0.55,尽管2009年、2013年有所波动,但整体处于持续增长态势,表明宁夏地区土地生态安全状况持续转好,状态系统的安全状态由较不安全状态转为临界安全状态。状态系统安全指数由低转高,一方面得益于不断加大的生态环境保护力度。主要体现在:植树造林、退耕还林等措施使林地覆盖率提升至9.09%,有效增强土地自我修复、水土保持能力,控制土地沙化及土地盐碱化;大力推广工业、生活污水再处理设施、关停多家直接排污入黄河的高污染企业,有效改善黄河干流水质,使Ⅰ—Ⅲ类水质断面比例由2003年的31.15%增至2013年的100%,且2008—2013年连续六年持续保持100%的比例;加大工业及生活废气的控制和治理,督促企业开展除尘、脱硫设施的增容改造,有效改善宁夏区域空气环境,城市空气综合污染指数由2003年的3.19降至2012年的1.8,且近三年也未出现酸雨现象。另一方面则受益于经济发展水平的提高。宁夏人均GDP指标由2003年的0.77万元升至2013年的3.94万元,客观上为生态建设、节能减排、污染物控制及处理工作提供了更多的经费,对土地生态状态系统安全水平的改善起到了积极的促进作用。

3.2.3 土地生态安全响应系统 见图1,宁夏土地生态安全响应指数总体上呈波动上升趋势,由不安全状态升至较安全状态,但从局部来看,个别年份波动较大,与压力、状态系统层相比,较不稳定。但响应系统高安全级别的转变表明宁夏回族自治区对区域土地生态系统的保护能力在不断增强,采取的环境保护措施对土地生态安全的提升起到了积极作用,如加大水土流失治理力度、提高污水处理厂处理能力、增加废气治理设施套数、提高工业固废综合利用率、增加工业污染治理项目投资比例等。土地生态安全响应指数在2005年及2010年产生较大波动,分析可得,主要是由当年工业污染治理项目投资占GDP比例的大幅下降导致,由此可见,土地生态安全的资金及人力的投入对土地生态安全的变化起着至关重要的作用。同时,宁夏政府对土地生态环境的治理长期处于被动状态,尚未形成持续改善土地生态环境的响应机制。因此,宁夏地区土地生态安全建设还存在巨大的改善空间,需要宁夏政府及公众的共同努力。

4 结论与建议

基于PSR模型构建宁夏回族自治区土地生态安全评价指标体系,并采用逼近理想解法(TOPSIS法)对该区域土地生态安全进行了动态评价,结果显示,

研究期间(2003—2013年)宁夏地区整体土地生态安全不断改善,但仍然处于较不安全状态,土地生态安全问题并未从根本上得到缓解,分析其主要原因有:一是自然因素,宁夏独特的地理位置以及干旱少雨、风大沙多的恶劣气候条件决定了其自然环境的脆弱性,也造成了土地生态环境的整体不安全性;二是经济因素,经济发展虽为土地生态环境的改善提供了更多治理经费,但也带来了更加严重的环境污染,给土地生态环境造成巨大压力;三是社会因素,为改善宁夏地区土地生态安全现状,社会各界共同努力,植树造林、退耕还林、节能减排、加强工业、生活废弃物的控制与处理等举措都对研究区域土地生态安全状况的改善起到了积极作用,但却未能形成长效的土地生态环境响应机制,治理效果出现反复波动。

根据研究结论,结合宁夏区情,本研究针对宁夏土地生态安全治理工作提出以下几条建议:

(1) 针对宁夏不同区域、地类,坚持分区规划、重点治理,因地制宜的选择植被种类,逐步构筑贯穿宁夏南北的防护林体系,即北部利用黄灌区的有利条件,在现有资源基础上,逐步完善已有防护林体系,并发展以枸杞、红枣等为主的林业产业体系;自然条件恶劣的中部地区则以乔、灌、草相结合的防控模式为基础建立防风固沙林和水土保持林;南部地区以小流域为单元,综合治理水、田、林、路,构建稳固的小流域生态防护林体系。

(2) 加快宁夏地区产业结构调整,实现产业优化升级,缓解经济发展对土地生态环境的破坏。依据宁夏区位优势特点,大力发展生态、节水型农业,减少化肥使用,控制水资源流失;提升改造“两高一低”传统产业,关闭小火电、小化工等企业,推广清洁生产,发展循环经济,实现废弃物的资源化、减量化和无害化,并围绕宁夏丰富的太阳能、风能发展清洁、可再生能源产业;同时,积极发挥宁夏旅游资源优势,大力发展现代服务业。

(3) 建立土地生态系统长效治理机制,根据宁夏区域自然生态特点以及经济发展现状,制定科学合理的土地生态环境长期治理规划,明确环境改善目标和治污减排时间表;构建政府主导、企业主体、多方参与、全民行动的环境保护格局;建立严格监管污染物排放的环境管理体制,综合运用法律、经济、技术和必要的行政手段,强化污染防治,保护生态环境。

参考文献:

- [1] Hughey K F D, Cullen R, Kerr G N, et al. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment

- [J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70(1):85-93.
- [2] 张军以, 苏维词, 张凤太. 基于PSR模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(6):1039-1044.
- [3] 杨春红, 张正栋, 田楠楠. 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.
- [4] 吕添贵, 吴次芳, 李冠, 等. 基于生态足迹的港口型城镇土地生态安全研究:以宁波市镇海区为例[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6):046.
- [5] 关小克, 吴克宁, 王秀丽, 等. 灰关联分析在城市生态安全评价中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(1):105-108.
- [6] 余摇, 敦摇, 陈文波. 基于物元模型的鄱阳湖生态经济区土地生态安全评价[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2681-2685.
- [7] 吕建树, 吴泉源, 张祖陆, 等. 基于RS和GIS的济宁市土地利用变化及生态安全研究[J]. *地理科学*, 2012, 32(8):928-935.
- [8] 李茜, 任志远. 区域土地生态环境安全评价:以宁夏回族自治区为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(5):75-79.
- [9] 郭永杰, 米文宝, 赵莹, 等. 宁夏市域生态安全动态评价及预测[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2):205-210.
- [10] 马莉娅, 吴斌, 张宇清, 等. 基于生态足迹的宁夏盐池县生态安全评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(5):57-62.
- [11] 丁彩霞, 延军平. 基于PSR模型的宁夏地区生态环境变化特征研究[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3):191-196.
- [12] 朱志玲, 吴咏梅, 张敏. 基于GIS的宁夏生态环境敏感性综合评价[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(4):101-105.
- [13] 赵源, 王丹, 黄成敏. 基于曲线投影动态聚类的区域土地资源可持续利用评价[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(6):241-246.
- [14] 徐美, 朱翔, 李静芝. 基于DPSIR-TOPSIS模型的湖南省土地生态安全评价[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5):1265-1272.
- [15] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于DPSIR模型的流域生态安全评价指标体系研究[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2012, 48(6):971-981.
- [16] 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于PSR模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(16):5090-5100.
- [17] 刘鹏飞, 秦耀辰, 赵萌. 基于土地利用变化的郑州市生态安全评价[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(4):324-329.
- [18] 许红红, 李小梅, 张江山, 等. 基于PSR-TOPSIS模型的闽侯县生态安全动态评价[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(2):72-79.
- [19] 陈西蕊, 张蓉珍. TOPSIS法在区域生态安全动态评价中的应用:以陕西省为例[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2011, 39(7):177-184.
- [20] 卢涛, 王占岐, 魏超, 等. 基于DPSIR模型的合肥市土地生态安全物元分析评价[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4):221-227.

(上接第153页)

- [5] Regonda S K, Rajagopalan B, Clark M, et al. Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(2):372-384.
- [6] 吕爱锋, 贾绍凤, 燕华云, 等. 三江源地区融雪径流时间变化特征与趋势分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(10):1704-1709.
- [7] Stewart I T, Cayan D R, Dettinger M D. Changes toward earlier streamflow timing across western North America[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(8):1136-1155.
- [8] 李杨, 顾建丽, 张璞, 等. 准噶尔盆地积雪储量的遥感反演及变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2010(4):623-629.
- [9] Stewart I T, Cayan D R, Dettinger M D. Changes in snowmelt runoff timing in western North America under a business as usual climate change scenario[J]. *Climatic Change*, 2004, 62(1/3):217-232.
- [10] Hodgkins G A, Dudley R W, Huntington T G. Changes in the timing of high river flows in New England over the 20th century[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 278(1):244-252.
- [11] Beebe R A, Manga M. Variation in the relationship between snowmelt runoff in Oregon and ENSO and PDO[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(4):1011-1024.
- [12] Regonda S K, Rajagopalan B, Clark M, et al. Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(2):372-384.
- [13] Maurer E P, Stewart I T, Bonfils C, et al. Detection, attribution, and sensitivity of trends toward earlier streamflow in the Sierra Nevada[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D11):71-81.
- [14] 宋倩, 穆振侠, 姜卉芳. SWAT模型在天山西部山区的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(3):46-49.