

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.003

基于 PSR 模型的塔里木河流域生态脆弱性评价

薛联青¹,王 晶¹,魏光辉²

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 新疆塔里木河流域管理局,新疆 库尔勒 832000)

摘要:采用“压力-状态-响应”(PSR)评价框架,结合模糊层次分析法定量评价塔里木河流域 2005—2015 年生态脆弱性,分析其时空分布和动态变化。研究表明:塔里木河流域 2005—2015 年生态脆弱性指数平均值为 0.538,处于重度脆弱Ⅲ级;生态脆弱性持续增加,综合指数最小值为 2005 年的 1.14,2009 年到达一个峰值 3.07,2015 年达到最大值 3.69;各地区的综合指数都处于 2~3 范围,总体呈现由西向东递增趋势,流域生态脆弱性空间分布呈现西低东高状态;研究时段内高度脆弱地区的脆弱性增加显著,而低度脆弱地区脆弱性变化不显著,处于中间过渡阶段。

关键词:生态脆弱性;PSR 模型;模糊层次分析;变化斜率法;塔里木河流域;时空分布

中图分类号:X171.1;TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2019)01-0013-07

Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River Basin in Xinjiang

XUE Lianqing¹, WANG Jing¹, WEI Guanghui²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau, Korla 832000, China)

Abstract: Quantitative evaluation of the ecological vulnerability for the Tarim River Basin (TRB) in Xinjiang from 2005 to 2015 was achieved through the combination of the Pressure-State-Response (PSR) model and the fuzzy analytical hierarchy process (FAHP). The distribution and dynamics of ecological vulnerability over the decade were analyzed after the establishment of evaluation system. The results show that the ecological vulnerability in the TRB during the time of 2005–2015 is at Heavy level Ⅲ with the average value of 0.538, and shows a continuously rising trend. The ecological vulnerability synthetic index (EVS_I), based on the different levels of ecological vulnerability over the time, has a minimum of 1.14 in 2005 as well as a maximum of 3.69 in 2015, and increases significantly with a fluctuation after reaching a peak of 3.07 in 2009. In addition, the ecological vulnerability in this basin displays a noticeable spatial distribution, which are strongly vulnerable areas mainly in the east with significantly increasing vulnerability and lightly vulnerable areas in the west at the transition stage of increase.

Key words: ecological vulnerability; Pressure-State-Response(PSR); fuzzy analytical hierarchy process (FAHP); variable slope method; Tarim River Basin; space-time distribution

近年来,气候变化及人类活动的日益加剧对生态系统构成了极大的威胁,造成大量的生态环境问题,生态脆弱性问题极为突出^[1]。尽管缺乏明确的定义,但普遍认为生态脆弱性是由暴露、敏感、适应等因素组成的^[2],表示为对自然环境或特定生态系统的破坏风险^[3],是生态系统对外部干扰做出的微弱抵御力^[4]。进

基金项目:国家自然科学基金(51779074,41371052);水利部公益性行业科研专项(201501059);江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修项目(苏教师[2015]35号)

作者简介:薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事环境水文及生态水文研究。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn

引用本文:薛联青,王晶,魏光辉.基于 PSR 模型的塔里木河流域生态脆弱性评价[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):13-19.
XUE Lianqing, WANG Jing, WEI Guanghui. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River Basin in Xinjiang[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(1):13-19.

行有关生态脆弱性研究是了解一个地区或一个流域的生态状况和分布特征的重要前提,也是制定区域可持续发展规划和实施生态修复的基础^[5]。我国生态脆弱性研究于1989年开始^[6],不同尺度上的评价区域多涉及一些典型生态脆弱地带,由西南喀斯特脆弱区^[7]扩展到北方农牧交错带^[8]、南方丘陵区^[9]、高寒山地区^[10]。最近,西北干旱半干旱区的生态脆弱性问题^[11]逐渐引起人们关注。塔里木河流域是我国西北地区典型的干旱区^[12],地域的特殊性使得生态本底环境脆弱^[13]。近50年来,流域植被类型单一(以胡杨林为主),社会经济结构相对简单(以种植农业为主)^[14],由于水土资源的非理性开采等人为活动干预,自然生态过程不断恶化,导致“先天”已经十分脆弱的流域生态系统在外界强大的干扰后变得愈发脆弱^[15],开展有关塔里木河流域生态脆弱性的评价研究具有重要的现实意义。本文利用GIS对塔里木河流域进行实证研究,定量地揭示多因素影响下塔河生态脆弱区的空间格局及变化趋势,旨在为流域生态治理提供一定的参考^[1]。

1 研究区概况

塔里木河地处以农业经济为主的西北干旱区,是我国最长的内流河,其流域由环塔里木盆地9大水系144条源流组成^[16],总面积102万km²^[17]。流域远离海洋,四周高山环绕,干流自身不产流,其径流量主要来自源流和天山、昆仑山的融雪和冰川融水^[18]。多年来,流域年均降水量不到50mm,而年均蒸发量高达2300~3000mm^[19],使得流域内自然生态系统和人类活动多依赖塔里木河。近年来,随着农业灌溉面积的逐步扩大^[20],人口持续增长等强烈的人工干扰使得水资源过度开发,水资源不断减少,河道两岸的植被衰败,自然生态系统严重退化^[21]。

2 研究方法

2.1 评价方法

层次分析法是一种系统的分析评价方法,其将复杂的多指标体系定量化,分为若干层次,根据权重进行计算比较。本研究采用模糊层次分析法构建生态脆弱性评价模型,以流域生态脆弱性为目标层次,压力-状态-响应(PSR)为准则层次,选取气候、地形、水资源和社会经济变量为指标层次,建立层次分析体系,计算指标权重见表1(w 为权重)。

2.1.1 评价指标体系

PSR框架符合脆弱性评价的要求,具有清晰的人与自然相互作用的因果关系,在生态评价方面应用广泛^[1]。结合这种情况,基于PSR框架,遵循科学性、系统性与可操作性原则,选择12个能较为全面反映生态脆弱情况且具有代表性的指标构建塔里木河流域生态脆弱性评价体系。其中指标土地垦殖率(耕地面积/土地面积)反映了农事活动对土地资源的开发利用,指标绿地覆盖率可反映植被对流域生态环境变化的抗干扰和缓冲能力,指标干燥度(蒸发量/同期降水量)描述了地区的综合水热条件,指标农业依赖度(农业产值/GDP)反映了传统农业活动对生态系统变化的响应,指标文化程度(具有初中文化以上居民比例)反映了生态规划与建设的可能。

2.1.2 指标权重计算

根据专家意见,采用AHP和Delphi法确定每个级别指标的相对重要性,判断矩阵随机生成的概率。利用一致性指数 C 和一致性比率 R 验证相一致性:

$$C = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}$$
$$R = \frac{C}{I}$$

(1)

式中: $\lambda_{\max}$ ——主要的特征值矩阵; m ——矩阵的阶数; I ——一致性指数的平均值。

只有 R 值低于0.1,才是一个合理的一致性水平。本研究 R 的最大值为0.01,可以接受。每个级别内指标的相对重要性等级顺序参考相关专家和文献^[22-24],采用配对比较^[25]的方法对指标的重要程度作出排名,

表1 塔里木河流域生态脆弱性评价指标体系及其权重

Table 1 Index system and relative weights of factors for the EV assessment in the TRB		
目标层	准则层	指标
塔里木河流域生态脆弱性	压力($w=0.1742$)	人口密度($w=0.0337$)
		废水排放量($w=0.0281$)
		土地垦殖率($w=0.1124$)
		绿地覆盖率($w=0.1887$)
	状态($w=0.4719$)	人均水资源量($w=0.0624$)
		降水量($w=0.0478$)
		$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温($w=0.0668$)
	响应($w=0.3539$)	干燥度($w=0.1061$)
		人均GDP($w=0.0455$)
		农业依赖度($w=0.0959$)
		生态用水率($w=0.1821$)
		文化程度($w=0.0304$)

自然状态对于塔里木河流域生态的影响是最主要的,随之采取的生态恢复措施对生态脆弱性的降低影响显著。

2.2 生态脆弱度模型建立及计算

2.2.1 指标标准化及生态脆弱性指数

运用极差标准化方法对原始数据无量纲化。选取的指标对脆弱性有正面和负面影响:正向影响是脆弱性随着评价指标值增大而增加,易造成生态破坏,如人口密度、废水排放量、土地垦殖率、≥10℃年积温、干燥度、农业依赖度等;负向影响是脆弱性随着评价指标减小而增加,可以改善生态环境,如绿地覆盖率、人均水资源量、降水量、人均 GDP、生态用水率、文化程度等。采用不同处理计算公式如下^[1]:

正向评价指标

$$Z_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

(2)

负向评价指标

$$Z_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}}$$

(3)

$$E = \sum_{i=1}^n Z_i w_i$$

(4)

式中: Z_i ——第 i 指标标准化处理后的无量纲值; X_i ——第 i 指标的实际数值; E ——生态脆弱度,其值越高则生态环境越脆弱; w_i ——模糊分析法得出的指标权重(表 1)。

根据研究区的生态特征,参照赵跃龙^[24]脆弱度分级方法划为 4 个生态脆弱等级,即 $E \geq 0.65$ 的定义为极度脆弱区Ⅳ; $0.65 > E \geq 0.5$ 的为重度脆弱区Ⅲ, $0.5 > E \geq 0.4$ 的为中度脆弱区Ⅱ, $E < 0.40$ 的为轻度脆弱区Ⅰ^[5]。

为更加直观地对生态脆弱度度量和比较,采用能定量反映地区生态综合脆弱程度的指标,其利用乘算模型^[25]计算如下:

$$V = \sum_{j=1}^4 P_j \frac{A_j}{S}$$

(5)

式中: V ——生态脆弱性综合指数; P_j ——等级 j 的脆弱度赋值,轻度脆弱区Ⅰ赋值 1,中度脆弱区Ⅱ赋值 2,重度脆弱区Ⅲ赋值 3,极度脆弱区Ⅳ赋值 4; A_j ——等级 j 脆弱性面积; S ——流域总面积。

2.2.2 变化斜率法

变化斜率法是采用最小二乘法对逐个地区的生态脆弱度与时间进行回归拟合,用来模拟生态脆弱度的年际变化。斜率计算公式如下:

$$X = \frac{l \sum_{k=1}^l k E_k - \sum_{k=1}^l k \sum_{k=1}^l E_k}{l \sum_{k=1}^l k^2 - (\sum_{k=1}^l k)^2}$$

(6)

式中: X ——变化斜率; l ——时间(年数); E_k ——第 k 年的生态脆弱性指数值。

变化趋势显著性检验采用 F 检验,根据生态脆弱度的变化趋势和显著性水平,分为 3 类^[1]:显著增加($X > 0, P \leq 0.05$)、显著降低($X < 0, P \leq 0.05$)和变化不显著($P > 0.05$)。

3 结果分析

3.1 生态脆弱性时空分布特征

塔里木河流域 2005—2015 年生态脆弱度标准化平均值为 0.538,总体处于重度脆弱区阶段。据图 1 分析,不同年份流域生态脆弱性情况不同,近 10 年生态脆弱性增加显著;但其空间分布特征较明显,生态脆弱度大体呈现源流区低、干流区高的格局。2005 年流域生态情况整体较好,处于轻度脆弱段,中度脆弱集中在重农抑生态的阿克苏地区;2010 年生态破坏加重,处于中度脆弱段,干流区下游巴州地区生态已呈现重度脆弱;2015 年整个塔里木河流域生态已遭受严重破坏,生态极度脆弱地区占总面积的 68.92%,主要集中在高度开发的叶尔羌河流域的喀什地区和干流区。

将脆弱度等级赋值后,计算不同脆弱性等级面积,得到 2005—2015 年塔里木河流域生态脆弱性综合指

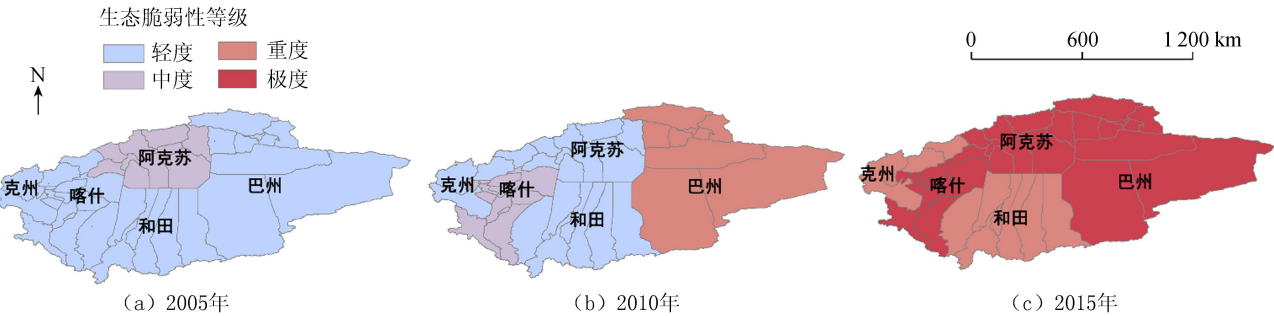


图1 塔里木河流域生态脆弱性分布

Fig.1 Distribution of ecological vulnerability grades in the TRB

数。据图2(a)分析:综合指数最小值为2005年的1.14,之后波动上升,2009年综合指数上升到一个峰值3.07,生态急剧破坏,2010年综合指数值有所降低,随后逐年递增,到2015年综合指数到达近10年的最大值3.69,生态状况极差。根据塔里木河流域不同地区2005—2015年多年综合指数的平均值(图2(b)),比较各地区综合指数的差异性。流域各地区的综合指数都处于2~3段,总体呈现由西向东递增的趋势。位于塔里木河干流的巴州地区综合指数值最高(为2.73),阿克苏地区、克州和喀什地区的综合指数低于2.5,位于源流区的和田地区综合指数最低(为2),生态情况较流域其他地区稳定。

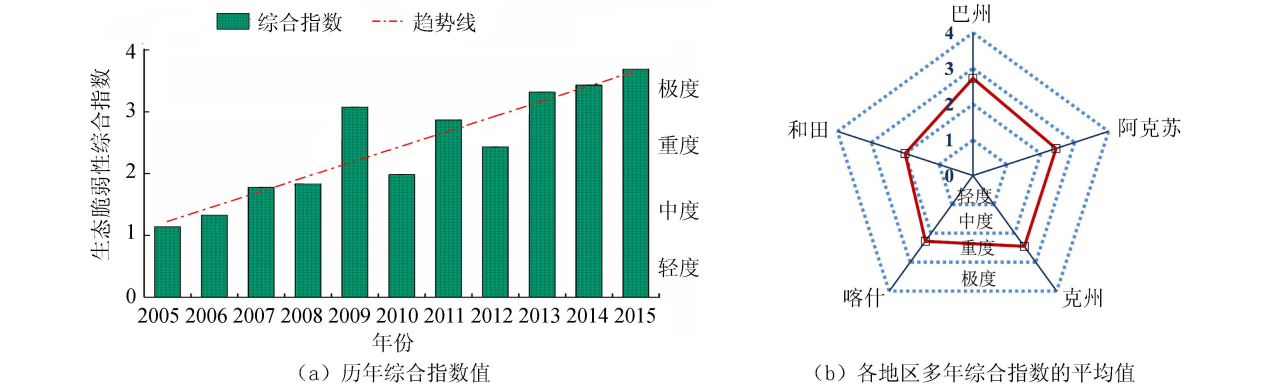


图2 2005—2015年塔里木河流域生态脆弱性综合指数及各地区多年平均值

Fig.2 EVSI in the TRB from 2005 to 2015 and its mean value in all prefectures of the TRB

3.2 生态脆弱性的动态变化

分析流域不同脆弱等级随时间的变化,发现2005—2010年期间生态脆弱性整体呈增加趋势(图3(a)),没有显现出大规模的等级变化,轻度脆弱等级变化较显著,所占面积降低41.06%,中度脆弱等级面积降低2.29%,以阿克苏地区为主,可以看到脆弱性等级的下降。2010年生态环境有较大的改善,由中等脆弱降至轻度脆弱,而重度脆弱等级增加较多,约43.35%。与2005—2010年相比,2010—2015年等级变化较大(图3(b)),流域大部分地区脆弱等级整体上升,出现极度脆弱等级,面积增加68.92%,挤占重度脆弱等级12.27%,源流和干流区等级变化从重度向极度转变比较明显,轻中度脆弱等级已不存在,分别减少45.01%和11.64%。由此可见,大部分地区(特别是脆弱性等级较高的地区)生态环境没有改善,生态破坏愈加严重。

借助变化趋势法,通过对生态脆弱度序列进行回归拟合,发现2005—2015年间,整个塔里木河流域生态脆弱度的变化斜率都为正值,即生态脆弱度都呈增加趋势(图3(c)),巴州地区变化斜率最高, $X>0.05$;阿克苏地区变化斜率最低,变化不明显。显著性检验结果(图3(d))表示:生态脆弱度显著增加($X>0, P\leq 0.05$)的区域占总面积的67.12%,主要集中在干流巴州地区和位于和田河流域的和田地区;其余地区由于生态状况不稳定,生态脆弱度较高,增长的幅度受限,近年来有增加的趋势,但不显著。

综合上述动态变化分析,塔里木河流域2005—2015年生态脆弱性呈增加趋势,生态环境状况恶化严重,其中南部和东部干流地区生态脆弱性显著增加(图3(d)),而本身多是重度脆弱类型,即生态脆弱度呈显著增加的多是重度脆弱地区。流域的西北部源流区不存在显著的增加趋势,多数地区是中度脆弱类型,即源流

区的生态脆弱性正处于中间过渡的重要阶段。

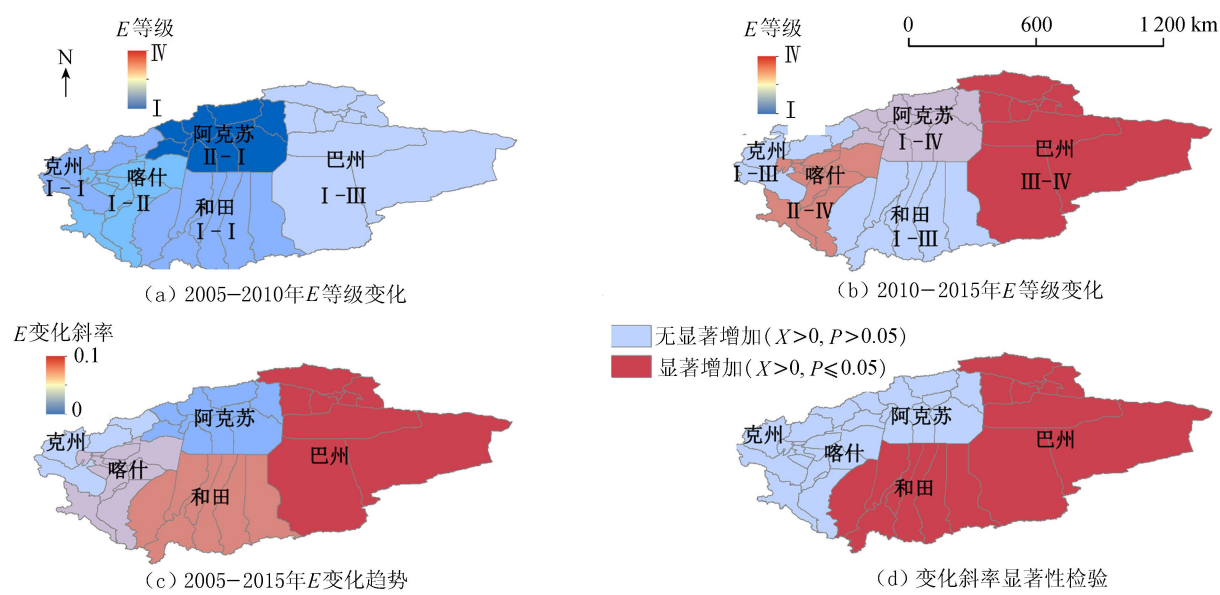


图 3 塔里木河流域生态脆弱性等级变化、变化趋势及显著性检验

Fig.3 Distribution change and inter-annual trend of vulnerability grades and significant test in the TRB

3.3 生态脆弱性时空分布原因分析

塔里木河流域是一个生态环境脆弱地带,本研究基于 AHP 的模糊综合评价方法计算得出的生态脆弱度等级是相对的,便于分析流域里不同地区的脆弱性差异,更易描述不同时间段的变化^[25]。关于脆弱性分布趋势,研究结果与薛英等^[26]的比较一致。从源流区到干流区,生态脆弱性逐渐增加,空间分布大体呈现西低东高的特征(图 2(b)和图 3(d)),生态脆弱性最高的地区是在巴州地区^[22]。巴州地区位于塔克拉玛干沙漠边缘,干旱少雨,径流汇入极少^[27],近年来不断受人类活动干扰,过度放牧和非法开荒造成大片耐旱的灌木和草地面积锐减,沙漠化加重。自然和人为双重脆弱因子使生态系统内部平衡失调,环境退化,成为流域环境破坏最剧烈的地区。相比较而言,脆弱度稍低的克州和和田地区由于地表起伏大、人口密集度较低、受人类活动干扰少,所以植被覆盖情况较好,而且源流区水资源较丰富,对减缓生态脆弱性有积极影响。

2005 年的综合指数值为 1.14,生态处于较低脆弱水平,流域处于经济发展的初期,有较充足的水资源维护生态环境,生态系统结构功能受人为干扰影响比较少。“十一五”建设期间(2006—2010 年),自然和人为脆弱因子随经济社会的发展发生显著变化,产生一系列连锁的社会和生态效应,使得生态脆弱性显著增加,致使 2009 年达到极度脆弱水平,后采取一定的生态恢复措施,2010 年脆弱性有所降低,但“十一五”建设期末已接近重度脆弱。进入“十二五”建设期(2010—2015 年),西部大开发的纵深发展使流域工业发展迅速,但高投入、低产出的生产方式使污染排放量急增,水资源供需矛盾突出,生态用水量急剧减少,生态脆弱性加剧。此阶段社会迅速发展,人口数量增加(截至 2015 年末达到高峰 1 134.39 万人),土地被大量占用,未利用土地面积锐减。人类活动的恶性干扰使流域生态抵御能力迅速降低,生态环境严重恶化。

4 结 语

以压力-状态-响应模型为基础,构建包括气象、土地利用、水资源和社会经济方面的生态脆弱性评价指标体系,分析塔里木河流域生态脆弱性的时空分布变化^[28-29],发现塔里木河流域生态脆弱性 2005—2015 年整体处于中等偏高水平:脆弱性整体上呈现干流区高、源流区低、东部高、西部低的特征,高度脆弱地区主要分布在东部的巴州地区,低度脆弱地区集中在西北和西南的克州和和田地区;生态脆弱性综合指数呈现增加趋势,2005—2010 年期间生态脆弱性波动增加,2009 年脆弱值到达一个峰值,2010—2015 年脆弱性增加显著,且不同地区增加趋势不同,高度脆弱地区的脆弱性增加尤其显著。人类活动与自然环境双重作用使得塔里木河流域的生态环境日益恶化,迫切需要进行生态修复,实现流域社会经济与生态环境的可持续发展。

本文较全面地反映了 2005—2010 年塔里木河流域生态脆弱性的时空分布特征及变化趋势,可为流域制

定环境保护和经济发展计划提供依据,但是限于西北干旱区各类测站和统计资料支持能力较为有限^[30],指标的完整性略有不足,而且使用模糊评价法的局限性导致不可避免地增加了主观因素,在未来的研究中会进一步完善这些不足。

参考文献:

[1] 马骏,李昌晓,魏虹,等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015,35(21):7117-7129. (MA Jun, LI Changxiao, WEI Hong, et al. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Municipality, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21):7117-7129. (in Chinese))

[2] LI Bo, TONG Lianjun. Vulnerability and sustainable development mode of Coal Cities in Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2008,18(2):119-126.

[3] ZOU Taohong, KUNIHICO Y. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China[J]. Ecological Indicators, 2017,78:405-415.

[4] HONG Wuyang, JIANG Renhong, YANG Chenyun, et al. Establishing an ecological vulnerability assessment indicator system for spatial recognition and management of ecologically vulnerable areas in highly urbanized regions: a case study of Shenzhen, China[J]. Ecological Indicators, 2016,69:540-547.

[5] 钟晓娟,孙保平,赵岩,等. 基于主成分分析的云南省生态脆弱性评价[J]. 生态环境学报, 2011,20(1):109-113. (ZHONG Xiaojuan, SUN Baoping, ZHAO Yan, et al. Ecological vulnerability evaluation based on principal component analysis in Yunnan Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1):109-113. (in Chinese))

[6] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定[J]. 生态学报, 1989,9(2):97-105. (NIU Wenyuan. The discriminatory index with regard to the weakness, overlapness, and breadth of ECOTONE[J]. Acta Ecologica Sinica,1989, 9(2), 97-105. (in Chinese))

[7] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性[J]. 云南地理环境研究, 1990,2(1):21-29. (YANG Mingde. On the fragility of karst environment[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1990,2(1):21-29. (in Chinese))

[8] 徐广才,康慕谊, MARC M, 等. 锡林郭勒盟生态脆弱性[J]. 生态学报, 2012,32(5):1643-1653. (XU Guangcai, KANG Muiyi, MARC M, et al. Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5):1643-1653. (in Chinese))

[9] 田亚平,刘沛林,郑文武. 南方丘陵区生态脆弱度评估:以衡阳盆地为例[J]. 地理研究, 2005,24(6):843-852. (TIAN Yaping, LIU Peilin, ZHENG Wenwu. Vulnerability assessment and analysis of hilly area in Southern China: a case study in the Hengyang Basin[J]. Geographical Research, 2005,24(6):843-852. (in Chinese))

[10] ZHOU Xiaolei, YAN Yuee, WANG Hui, et al. Assessment of eco-environment vulnerability in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010,63(4):667-674.

[11] FENG Qi, MA Hua, JIANG Xuemei, et al. What has caused desertification in China? [J]. Scientific Reports, 2015,5:15998.

[12] XUE Lianqing, ZHU Boli, YANG Changbing, et al. Study on the characteristics of future precipitation in response to external changes over arid and humid basins[J]. Scientific Reports, 2017,7:15148.

[13] WANG Huaijun, CHEN Yaning, DENG Haijun, et al. Detecting changes in extreme streamflow in the Tarim River, Northwest China[J]. Quaternary International, 2015,380/381:149-158.

[14] GUO Ying, SHEN Yanjun. Agricultural water supply/demand changes under projected future climate change in the arid region of Northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2016,540:257-273.

[15] AISHAN T, HALIK Ü, CYFFKA B, et al. Monitoring the hydrological and ecological response to water diversion in the lower reaches of the Tarim River, Northwest China[J]. Quaternary International, 2013,311(9):155-162.

[16] 薛联青,张卉,张洛晨,等. 基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(3):189-196. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luo Chen, et al. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(3):189-196. (in Chinese))

[17] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018,46(1):1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018,46(1):1-6. (in Chinese))

[18] YU Guoan, DISSE M, HUANG Heqing, et al. River network evolution and fluvial process responses to human activity in a

- hyper-arid environment: case of the Tarim River in Northwest China[J]. *Catena*, 2016,147:96-109.
- [19] YU Yang, YU R, CHEN Xi, et al. Agricultural water allocation strategies along the oasis of Tarim River in Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2017,187:24-36.
- [20] FEIKE T, MAMITIMIN Y, LI Lin, et al. Development of agricultural land and water use and its driving forces along the Aksu and Tarim River, P. R. China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,73(2):517-531.
- [21] YE Zhaoxia, CHEN Yaning, LI Weihong. Ecological water rights and water-resource exploitation in the three headwaters of the Tarim River[J]. *Quaternary International*, 2014,336(12):20-25.
- [22] 曾庆敏,刘新平. 基于主成分聚类分析法的塔里木河流域生态脆弱性评价:以巴音郭楞蒙古自治州为例[J]. *广东农业科学*, 2015,42(10):133-138. (ZENG Qingmin, LIU Xinping. Evaluation on ecological vulnerability of Tarim River Basin based on principal component-clustering analysis: taking Mongolia Autonomous Prefecture of Bayingolin as example [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015,42(10):133-138. (in Chinese))
- [23] 李滨勇,陈海滨,唐海萍. 基于AHP和模糊综合评判法的北疆各地州生态脆弱性评价[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010,46(2):197-201. (LI Binyong, CHEN Haibin, TANG Haiping. Assessing ecological fragility with AHP and fuzzy integrated evaluation in autonomous prefectures of northern Xinjiang [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Sciences)*, 2010, 46(2):197-201. (in Chinese))
- [24] 赵跃龙,张玲娟. 脆弱生态环境定量评价方法的研究[J]. *地理科学*, 1998,18(1):78-84. (ZHAO Yuelong, ZHANG Lingjuan. A study on index and method of quantitative assessment of fragile environment[J]. *Progress in Geography*, 1998,18(1):78-84. (in Chinese))
- [25] LIU Di, CAO Chunxiang, DUBOVYK O, et al. Using fuzzy analytic hierarchy process for spatio-temporal analysis of eco-environmental vulnerability change during 1990–2010 in Sanjiangyuan region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2017,73:612-625.
- [26] 薛英,王让会,张慧芝,等. 塔里木河干流生态风险评价[J]. *干旱区研究*, 2008,25(4):562-567. (XUE Ying, WANG Ranghui, ZHANG Huizhi, et al. Ecological risk assessment of ecosystems in the mainstream area of the Tarim River[J]. *Arid Zone Research*, 2008,25(4):562-567. (in Chinese))
- [27] FENG Qi, LIU Wei, SI Jianhua, et al. Environmental effects of water resource development and use in the Tarim River Basin of Northwestern China[J]. *Environmental Geology*, 2005,48(2):202-210.
- [28] 杨帆,薛联青,张洛晨,等. 塔里木河生态水流形势分析及其适应性利用[J]. *水资源保护*, 2018,34(5):41-49. (YANG Fan, XUE Lianqing, ZHANG Luochen, et al. Analysis of ecological water regime in Tarim River and its adaptive utilization [J]. *Water Resources Protection*, 2018,34(5):41-49. (in Chinese))
- [29] 薛联青,张卉,张洛晨,等. 塔里木灌区引水前后环境流特性变化[J]. *水资源保护*, 2017,33(3):31-37. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Changes in characteristics of environmental flow in Tarim irrigation area before and after water diversion[J]. *Water Resources Protection*, 2017,33(3):31-37. (in Chinese))
- [30] 宋一凡,郭中小,卢亚静,等. 一种基于SWAT模型的干旱牧区生态脆弱性评价方法:以艾布盖河流域为例[J]. *生态学报*, 2017,37(11):3805-3815. (SONG Yifan, GUO Zhongxiao, LU Yajing, et al. An ecological vulnerability evaluation method for arid pasturing areas based on the SWAT model: a case study in the Aibugai Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11):3805-3815. (in Chinese))

(收稿日期:2018-04-18 编辑:高建群)