

凉山地区生态环境脆弱性的时空动态变化

姚昆¹, 吴亮², 相恒星³, 何超¹, 刘汉湖¹

(1. 成都理工大学 国土资源部地学空间信息技术重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 水利部新疆水利水电勘测设计研究院测绘工程院, 新疆 昌吉 831117; 3. 延边大学 理学院 地理系, 吉林 延吉 133000)

摘要: [目的] 了解凉山地区 2000—2010 年生态环境脆弱性动态变化状况, 为地区生态环境治理与保护提供参考依据。[方法] 将 RS 与 GIS 技术相结合, 以生态敏感性—生态恢复力—生态压力度 (SRP) 为模型选取 16 个评价指标, 利用空间主成分综合与动态变化分析模型从时间与空间相结合角度, 对凉山地区 2000—2010 年生态环境脆弱性动态变化进行定量分析。[结果] 凉山地区生态环境脆弱性整体呈现南高北低的分布规律, 就单一动态度而言潜在脆弱最大中度脆弱最小, 就综合动态度分析该地区整体变化速度接近中度水平, 而生态脆弱性综合指数则反映出该地区整体生态环境脆弱性有缓慢恶化趋势。[结论] 凉山地区生态环境脆弱性空间分布规律明显, 生态环境治理力度仍需加大。

关键词: 凉山地区; 生态环境脆弱性; SRP; 空间主成分; 时空动态变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0329-06

中图分类号: X171.4

文献参数: 姚昆, 吴亮, 相恒星, 等. 凉山地区生态环境脆弱性的时空动态变化[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):329-334. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.058; Yao Kun, Wu Liang, Xiang Hengxing, et al. Spatio-temporal variation of ecological environment vulnerability in Liangshan region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1):329-334. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.058

Spatio-temporal Variation of Ecological Environment Vulnerability in Liangshan Region

YAO Kun¹, WU Liang², XIANG Hengxing³, HE Chao¹, LIU Hanhu¹

(1. Key Laboratory of Geoscience Spatial Information Technology, Ministry of Land and Resources of China,

Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Xinjiang Water Conservancy and

Hydropower Survey and Design Institute, Ministry of Water Resources of China, Changji, Xinjiang Uygur Autonomous Region 831117, China; 3 Department of Geography, College of Science, Yanbian University, Yanji, Jilin 133000, China)

Abstract: [Objective] The paper aims to understand the dynamic change of ecological environment vulnerability in Liangshan region from 2000 to 2010, and to provide references for regional ecological environment management and protection. [Methods] Using the technologies of RS and GIS and taking ecological sensitivity-resilience-pressure (SRP) model, we selected 16 evaluation indicators to conduct quantitative analysis on the spatio-temporal change of ecological environment vulnerability in Liangshan region during in 2000—2010. [Results] The ecological environment vulnerability of Liangshan region exhibited an overall trend of higher in south and lower in north; In terms of the single dynamic degree, the potential vulnerability was highest while moderate vulnerability was lowest, and the region's overall change speed was close to moderate level based on the comprehensive dynamic analysis, but the comprehensive index of ecological vulnerability indicated that the whole ecological environment vulnerability of the region exhibited a slow deteriorating trend. [Conclusion] The spatial distribution of ecological environment vulnerability in Liangshan region is obvious, and the ecological environment control efforts need to be strengthened.

收稿日期: 2016-06-30

修回日期: 2016-07-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“汶川强震区潜在泥石流危险性判识及其差异性分析”(41102225); 四川省科技支撑计划项目“川中丘陵区退耕还林工程的生态响应”(2014SZ0070)

第一作者: 姚昆(1991—), 男(汉族), 四川省西昌市人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术与数字国土。E-mail: jiangshan996@126.com。

通讯作者: 刘汉湖(1978—), 男(汉族), 山东省烟台市人, 博士, 副教授, 主要从事遥感技术与应用、生态遥感与定量遥感研究。E-mail: liuhanhu@cdut.cn。

Keywords: Liangshan region; ecological environment vulnerability; SRP; space principal component; temporal and spatial dynamic change

随着社会经济的快速发展,人类活动的愈加频繁,人与生态环境的矛盾也愈加突出。因此,科学合理的实现人与自然的和谐相处已成为当今世界的迫切需求。对区域生态环境状况进行科学的监测与评价分析,有助于人们实时了解地区生态环境质量,及时采取相应措施。生态环境脆弱性指特定区域条件下生态系统受外界刺激或干扰时,所表现出的敏感性与自我恢复能力,是自然、人文、生态系统内部演替变化共同作用的结果^[1-3],能定量反映出区域生态环境状况变化。

自 20 世纪 80 年代初,中国学者开始对区域生态环境脆弱性做研究起,经过约 30 a 的努力与探索,学者们已在地区生态环境脆弱性的评价方法、成因分析与治理等热点问题上取得诸多成果。目前,国内已形成综合指数法^[4-6]、景观格局法^[7]、主成分分析法^[8-11]、层次分析法^[2,12-14]等系列生态环境脆弱性评价方法,研究区也从最初的喀斯特地区^[3]、高原寒区^[2]、流域湿地^[6,12,15]扩展到平原城市^[8,16-17]、水土保持功能区^[13]等地区。然而,生态环境脆弱性受多因素的共同影响与制约,研究地区与角度不同其结果亦不同。

凉山州位于四川省西南部,幅员面积 6.04×10^4 km²,有山地、平原、丘陵等多种地形。近年来,该地区受乱砍乱伐、乱开荒、工程建设等人为活动与区域先天自然条件的共同影响,地区生态环境状况不断恶化。然而,截至目前对该地区进行生态环境脆弱性变化的研究却相对较少。因此,本研究拟在参考大量前人成果^[5-6,9-10,14]的基础上,兼顾评价指标选取的可获得性、可操作性与科学性原则,同时结合凉山地区生态环境实际特征,以 SRP 模型为框架选取评价指标,采用空间主成分综合与动态变化分析模型,从时间与空间相结合的角度,对凉山地区 2000—2010 年生态环境脆弱性动态变化状况进行定量分析,以期对地区生态环境保护提供参考。

1 生态环境脆弱性评价

1.1 指标体系构建

科学的构建评价指标体系是生态环境脆弱性评价的重难点。生态敏感性—生态恢复力—生态压力度(ecological sensitivity-resilience-pressure, SRP)型从生态环境脆弱性定义出发,综合考虑人与自然的相互作用关系,从而实现地区生态环境脆弱性评价指标取。研究中,生态敏感性指生态系统受外界干扰时

所表现的敏感程度,用气象因子、地形因子、地表因子表现,其中气象因子有降水量、温度、相对湿度、风速;地形因子有高程、坡度;地表因子有多样性指数、破碎化指数、土壤有机碳含量、土壤有机氮含量;生态恢复力则表征生态系统受破坏时的自我修复能力,通过净植被初级生产力(NPP)与植被覆盖度描述;生态压力指对生态系统稳定性造成破坏的外界因素,通过人口密度、人均 GDP、年末实有耕地面积、化肥施用量描述。

1.2 数据来源与预处理

景观破碎度描述了地区景观结构受外界因素干扰由单一向复杂转变的过程,是描述生态景观格局变化的客观指标^[9,18]。

$$FN = MPS(N_f - 1)/N_c \quad (1)$$

式中:FN——某类型景观破碎化指数;MPS——某类型景观斑块平均面积; N_f ——某类型景观斑块数量; N_c ——区域斑块总数。

植被覆盖度用 MODIS 中国区 NDVI 月合成产品计算得到,取 6—8 月的均值。

$$f = \sum_{i=6}^9 \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} / 3 \quad (2)$$

式中: f ——平均植被覆盖度; $NDVI_{\max}$, $NDVI_{\min}$ ——NDVI 灰度分布置信度的 5% 截取上下阈值^[19]。

研究中高程、坡度数据由 DEM 提取;气象、人口密度、土壤有机碳、土壤有机氮含量、NPP 数据利用行政区划矢量数据裁剪得到;年末实有耕地面积、化肥施用量均利用反距离权重法插值得到。所有数据均采用 Albers 投影,栅格化为 1 000 m。

因为指标量纲与数量级差异将造成评价结果的偏差,因此研究采用极差法完成指标标准化处理。此方法需考虑各指标与生态环境脆弱性的相关性关系^[5,10,14],指标与生态环境脆弱性呈正相关,则生态环境脆弱性随指标数值的增大而加重,呈现负相关则相反。正相关指标包括:温度、风速、坡度、多样性指数等;负相关指标包括:降雨量、相对湿度、土壤有机氮含量等(表 1)。

正相关指标:

$$L_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

负相关指标:

$$L_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (4)$$

式中: L_i ——第 i 个指标的标准值; X_i , X_{\max} , X_{\min} ——第 i 个指标的真实值、真实最大值和真实最小值。

1.3 评价方法

利用主成分综合分析模型,将各指标对生态环境脆弱性的影响进行综合,计算出生态环境脆弱性指数 EVI ,可定量描述地区生态环境脆弱性状况。生态环境脆弱性受多因素作用的影响,各评价指标间存在一定的关联性,指标重复将干扰评价结果的准确性。空间主成分分析(spatial principal component analysis, SPCA)基于数理统计原理,对各指标进行相关性分

析,筛选出少数几个关联性极低的综合指标。研究通过 ArcGIS10.0 对 16 个指标进行空间主成分分析,最终选取累积因子贡献率达到 75% 的前 5 个指标作为主成分因子(表 2),进行生态环境脆弱性指数计算。

$$EVI = \beta_1 Y_1 + \beta_2 Y_2 + \beta_3 Y_3 + \dots + \beta_n Y_n \quad (5)$$

式中: EVI ——生态环境脆弱性指数; Y_i ——第 i 个主成分; β_i ——第 i 个主成分对应的贡献率。

表 1 数据来源及描述

项目	指标描述	时间	数据来源
年均温度	全国 1 km 网格年均温度数据	3 期	国家地球系统科学数据共享平台 (http://www.geodata.cn)
年均风速	全国 1 km 网格年均风速数据	3 期	
年均降雨量	全国 1 km 网格年均降水数据	3 期	
年均相对湿度	全国 1 km 网格年均相对湿度数据	3 期	
土壤有机碳含量	全国 1 km 网格土壤有机碳含量	多年平均	
土壤有机氮含量	全国 1 km 网格土壤有机氮含量	多年平均	
DEM 值	全国 1 km SRTM DEM 数据	—	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
行政区划	行政区划矢量数据	—	
人口密度	全国 1 km 网格人口密度	3 期	
人均 GDP	全国 1 km 网格人均 GDP	3 期	
土地利用	全国 1 km 网格土地利用类型	3 期	
NDVI 值	MODND1M 1 km 中国月合成产品	3 期	中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(http://www.gscloud.cn)
NPP 值	MOD17A3 的全球年度 NPP 数据,空间分辨率 30s	6—8 月	
年末实有耕地面积	统计数据	3 期	美国蒙大拿大学森林学院(NTSG) 四川统计年鉴
化肥施用量	统计数据	3 期	

表 2 各主成分因子特征值、贡献率、累积因子贡献率

年份	主成分系数	主成分				
		PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₅
2000	特征值 λ	0.0541	0.0378	0.0297	0.0125	0.0112
	贡献率/%	29.06	20.29	15.95	6.71	6.04
	累计贡献率/%	29.06	49.34	65.30	72.00	78.04
2005	特征值 λ	0.0548	0.0431	0.0350	0.0137	0.0121
	贡献率/%	27.70	21.82	17.69	6.94	6.10
	累计贡献率/%	27.70	49.52	67.21	74.15	80.25
2010	特征值 λ	0.0553	0.0456	0.0293	0.0135	0.0113
	贡献率/%	28.70	23.67	15.20	6.98	5.87
	累计贡献率/%	28.70	52.37	67.57	74.54	80.41

研究区生态环境脆弱性指数分级划定,对全面认识生态环境脆弱性状况有重大意义。目前,大多数学者采用专家经验判定法^[4-5,12],该方法受主观因素影响较大。自然断点法既能最大限度地实现“物以类聚”将具有相似值的栅格像元进行恰当分组,又能最大化的凸显各类别间的差异^[2,6](表 3)。

2 生态环境脆弱性动态变化

2.1 变化速度

生态环境脆弱性变化速度是表征区域各等级评价单元和整体生态状况变化进程的重要指标,采用单一动态度与综合动态度对速度进行表达。单一动态度可衡量区域各等级评价单元的变化速度,综合动态

度则用于描述区域整体变化速度^[15-16]。

$$K = \left(\sqrt[T]{\frac{U_a + (\Delta U_{in} - \Delta U_{out})}{U_a}} - 1 \right) \times 100\% \quad (6)$$

$$Q = \left[\sqrt[T]{\frac{\sum_{i=1}^n U_{ai} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (|\Delta U_{in-i} - \Delta U_{out-i}|)}{\sum_{i=1}^n U_{ai}}} - 1 \right] \times 100\% \quad (7)$$

式中: K ——单一动态度; U_a ——研究初期某等级评价单元的面积(hm^2); ΔU_{in} , ΔU_{out} ——整个研究阶段内某等级评价单元转入、转出面积总和(hm^2); Q ——综合动态度; U_{ai} —— i 等级评价单元研究初期的面积(hm^2); ΔU_{in-i} , ΔU_{out-i} ——整个研究阶段第 i 等级评价单元转入、转出面积总和(hm^2); T ——研究时段(a)。下同。

表 3 凉山地区生态环境脆弱性指数分级

脆弱性	等级	特征描述
潜在脆弱	I	生态系统结构完整,系统稳定性、自我修复与抗干扰能力强,生态环境脆弱性低,无明显生态问题
微度脆弱	II	生态系统结构比较完整,系统稳定性、自我修复与抗干扰能力较强,生态环境脆弱性较低,生态问题较明显
轻度脆弱	III	生态系统结构受一定程度破坏,生态压力尚在其承受范围内,系统稳定性、自我修复与抗干扰能力较弱,生态环境脆弱性较高,生态问题明显
中度脆弱	IV	生态系统结构残缺较多,部分生态压力已超过其承受范围,系统稳定性、自我修复与抗干扰能力弱,生态环境脆弱性高,生态问题十分明显,生态治理难度较大
重度脆弱	V	生态系统结构残缺严重,系统稳定性、抗干扰与自我修复能力极弱,生态脆弱性极高,生态问题极度明显,生态扭转难度极大,生态恢复与治理需要高度重视,长期坚持

2.2 变化趋势

生态环境脆弱性综合指数 EEVI 是对整个地区生态环境质量全面的客观描述,而其变化率则可定量描述区域生态环境质量的变化趋势^[6,13-14,16]。

$$EEVI = \sum_{i=1}^n P_i \times \frac{A_i}{S} \quad (8)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times A_{a_i} - \sum_{i=1}^n P_i \times A_{b_i}}{S \times T} \times 100\% \quad (9)$$

式中:EEVI——生态环境脆弱性综合指数; P_i ——脆弱性分级值; A_i —— i 等级脆弱性面积; R ——综合指数变化率; A_{a_i} 与 A_{b_i} —— a, b 时间,第 i 等级评价单元面积(hm^2); S ——研究区总面积(hm^2)。

如果 $R < 0$ 则表示研究区生态环境状况整体趋于好转,生态环境质量比较乐观。

3 结果分析

3.1 生态脆弱性空间分布

如图 1 所示,2000—2010 年内凉山地区生态环境脆弱性呈现由南向北降低的变化特征,中度、重度脆弱主要分布于会理县与会东县的南部、西昌市、宁南县、普格县、德昌县等的人口密度较大的核心区域,该地区具有人口密度大、城市化现象明显、耕地面积比例大、人类活动频繁等环境特征。

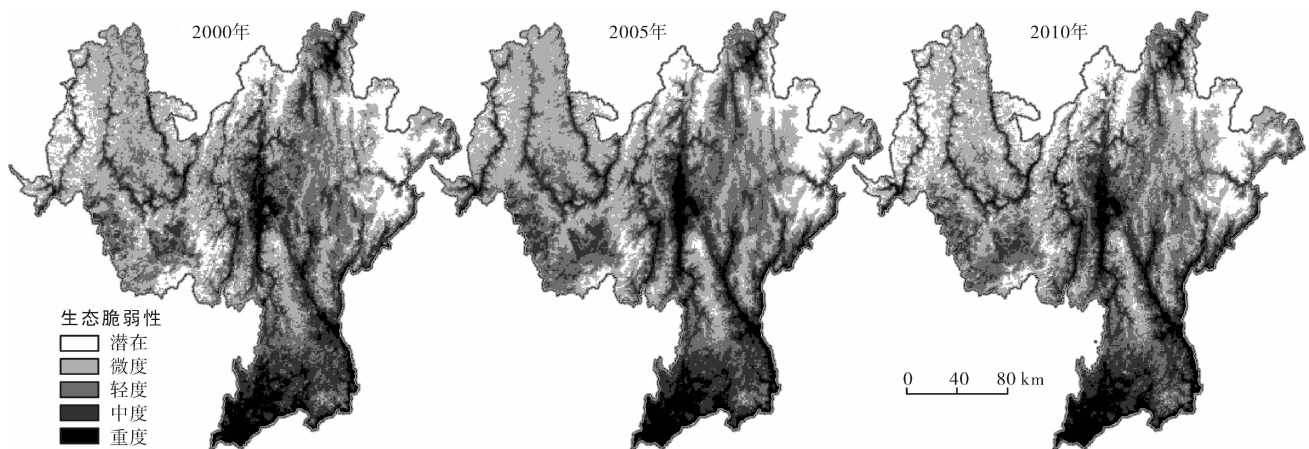


图 1 凉山地区生态脆弱性空间分布状况

这些特征均不利于地区生态环境扭转恢复,并且很大程度上驱使地区生态环境向生态系统稳定性差,自我修复能力薄弱,生态问题显著,生态治理难度大的方向发展。轻度脆弱区主要分布于重度与极重度的周边向周围发散开。微度与潜在脆弱主要分布于凉山州西部的木里县与盐源县、东北部的美姑县、雷波县与金阳县等的大部分地区,该地区虽然受到海拔高、坡度大、交通落后等劣势条件的限制,但这些限制性条件却形成了地区特有的人口密度小、人类活动

不明显、森林草地受破坏程度较小、空气相对湿度大、植被类型多样且覆盖度高等环境友好型特征,这些限制指标较大限度的对地区自然生态环境进行了有力保护,促使地区生态系统向稳定性、抗干扰与自我恢复能力持续增强的趋势发展。

3.2 变化速度分析

根据单一动态度与综合动态度数学表达式(6)和(7)计算得出凉山地区各阶段各评价单元与整体速度变化结果(表 4)。

表 4 凉山地区生态环境脆弱性单一与综合动态度

时间	单一动态度 K					综合动态度 Q
	潜在脆弱	微度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	
2000—2005 年	-4.68	-0.72	0.22	2.63	2.72	0.75
2005—2010 年	7.96	-0.59	-1.13	-1.83	-0.27	0.87
2000—2010 年	1.44	-0.66	-0.46	0.37	1.22	0.34

凉山地区生态环境脆弱性变化速度由表 4 可知,从 K 进行分析,研究期内微度、轻度脆弱 2 种评价单元单一动态度为负值,表明这 2 种评价单元的面积正呈现减少的状态;其中,微度脆弱的单一动态度为-0.66%,面积减少的速度最快;潜在脆弱、中度脆弱、重度脆弱的单一动态度均为正,表明这些评价单元的面积均呈现增加的发展状态。

潜在脆弱的单一动态度最大,该评价单元的面积扩张速度最快,这是由于人们环保意识增强,环保治

理力度加大的明显成效;从综合动态度看,凉山地区综合动态度随时间的改变而增大,表明整个地区生态脆弱性整体变化速度呈加快的状态;就整个阶段而言,综合动态度为 0.34%,接近中度水平研究区整体变化速度不容乐观。

3.3 综合变化分析

利用生态环境脆弱性综合指数及变化率数学式(8)和(9),得出凉山地区 2000,2005,2010 年生态环境脆弱性综合指数及各阶段变化率(表 5)。

表 5 凉山地区生态环境脆弱性综合指数变化

脆弱性综合指数 (EEVI)			综合指数变化率 R/%		
2000 年	2005 年	2010 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2000—2010 年
2.7410	2.8500	2.7512	2.1760	-1.9760	0.2000

由表 5 可知,凉山地区 2000,2005 与 2010 年生态环境脆弱性综合指数值分别为 2.7410,2.8500,2.7512。在整个研究时段内,凉山地区生态环境脆弱性综合指数呈现先增大后减小的变化状态,这主要由于轻度、中度、重度脆弱 3 类评价单元的脆弱性指数均为该种变化方式,较大限度的影响了地区生态环境状况整体变化趋势。

通过分析 2000—2005 与 2005—2010 年的生态环境脆弱性综合指数的变化率,可以发现 2000—2005 年内凉山地区生态环境状况整体处于恶化的趋势,而研究后期 2005—2010 年内凉山地区生态状况则整体处于持续好转的变化状态。

然而,就整个研究时段而言,10 a 来凉山地区生态环境整体状况发展不容乐观,生态环境治理仍需要坚持。

4 结论

(1) 空间分布状况进行分析,凉山地区生态环境脆弱性呈现由南部向北部降低的变化趋势,总体上看凉山州西北部、东北部地区生态环境质量较好,生态环境脆弱性相对较轻,这主要得力于这些地区自然条件占据主要优势,对地区生态环境质量有较大帮助;而南部以及中部地区生态环境较脆弱性较高主要是由于人类活动频繁对地区生态破坏程度过大,导致区域生态环境较差。

(2) 从时间角度进行动态变化分析,10 a 来凉山地区生态环境脆弱性呈现如下变化规律:面积增加的 3 种评价单元中潜在脆弱的单一动态度最大,面积增加速度最快;微度脆弱的单一动态度则是面积减少评价单元中最大的;比较 2 个阶段研究区综合动态度,

可以发现研究区生态环境脆弱性状况整体变化速度随着时间的退役呈加快的发展速度,就整个阶段而言地区综合动态度总体处于中偏下水平;生态环境脆弱性综合指数及其变化率,表明该地区 2005 年生态环境脆弱性状况最严重,10 a 间整个凉山地区生态环境状况整体发展不容乐观,生态治理仍需坚持。

[参 考 文 献]

- [1] 刘正佳,于兴修,李蕾,等.基 SRP 概念模型的沂蒙山区生态环境[J].应用生态学报,2011,22(8):2084-2091.
- [2] 于伯华,吕昌河.青藏高原高寒区生态脆弱性评[J].地理研究,2011,30(12):2289-2295.
- [3] 张笑楠,王克林,张伟,等.桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性[J].生态学报,2009,29(2):749-757.
- [4] 秦旭芝,黎宁,温中海,等.基于广西河池市胁迫风险的土壤环境脆弱性评价[J].中国环境监测,2015,31(6):71-76.
- [5] 樊哲文,刘木生,沈文清,等.江西省生态脆弱性现状 GIS 模型评价[J].地球信息科学学报,2009,11(2):202-208.
- [6] 邵秋芳,彭培好,黄洁,等.长江上游安宁河流域生态环境脆弱性遥感监测[J].国土资源遥,2016,28(2):175-181.
- [7] 宋豫秦,曹明兰.基于 RS 和 GIS 的北京市景观生态安全评价[J].应用生态学报,2010,21(11):2879-2895.
- [8] 王钊齐,李建龙,杨悦,等.基于遥感的城市生态环境质量动态变化定量评价:以江苏宜兴市为例[J].宁夏大学学报:自然科学版,2015,36(3):1-8.
- [9] 韦晶,郭亚敏,孙林,等.区域生态环境脆弱性评价:以三江源地区生态环境脆弱性评价[J].生态学杂志,2015,34(7):1-7.
- [10] 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):7117-7124.
- [11] 廖炜,李璐,吴宜进,等.丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价[J].自然资源学报,2011,26(11):1879-1889.
- [12] 杨斌,詹金凤,李茂娇.岷江上游流域环境脆弱性评价[J].国体资源遥感,2014,26(4):138-144.
- [13] 赵乾坤,王治国,张光灿,等.山西省水土保持功能区生态脆弱性评价[J].中国水土保持科学,2014,12(6):16-22.
- [14] 杨存建,陈静安,白忠,等.利用遥感和 GIS 进行四川省生态安全评价研究[J].电子科技大学学报,2009,38(5):700-706.
- [15] 谢余初,巩杰,张玲玲.基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J].地理科学,2015,35(6):790-797.
- [16] 李永化,范强,王雪,等.基于 SRP 模型的自然灾害多发区生态:以辽宁省朝阳县为例[J].地理学,2015,35(11):1452-1459.
- [17] 蔡海生,刘木生,陈美球,等.基于 GIS 的江西省生态环境脆弱性动态评价[J].水土保持通报,2009,29(5):190-196.
- [18] 郑新奇,付梅臣.景观格局空间分析技术及其应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [19] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.

(上接第 328 页)

- [15] 徐文铎.内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林的基本特征、存在问题与解决途径[J].生态学杂志,1993,12(5):39-44.
- [16] 李得禄,刘世增,康才周,等.沙地云杉种子育苗试验[J].防护林科技,2011(2):19-21.
- [17] 朱国庆,刘世增,李得禄,等.沙地云杉种子萌发及育苗试验[J].中国农学通报,2011,27(16):22-26.
- [18] 康才周,刘世增,严子柱,等.干旱沙区沙地云杉育苗技术及幼苗生长节律[J].防护林科技,2010(5):10-13,25.
- [19] 李得禄,刘世增,康才周,等.水分胁迫下云杉属两种植物荧光参数特征研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(6):117-121.
- [20] 马良清.甘肃武威地区几个树种根系的调查报告[J].生态学杂志,1987,6(2):13-17.
- [21] 张海忠.人工云杉幼龄林根系发育和环境关系的研究[J].园艺与种苗,2015(5):73-75.
- [22] 于柱英.武威灌区农田防护林体系可持续经营研究[D].兰州:甘肃农业大学,2004.