

基于 LUCC 的生态型城市土地生态敏感性评价

刘焱序¹, 李春越², 任志远^{1,2}, 文雯³

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710062;

2. 陕西师范大学 西北国土资源研究中心, 西安 710062; 3. 陕西省城乡规划设计研究院, 西安 710032)

摘要:土地生态敏感性评价是分析区域生态安全的重要方法之一, 基于 Landsat 影像解译结果, 应用土地利用与覆被变化相关研究方法, 对商洛市土地利用程度进行分析, 通过水土保持、灾害防治、生境保护 3 大指标对研究区土地生态敏感性进行分级, 并通过灰色模型和变异系数改进分级模式, 对比各敏感性等级中土地利用程度变化, 分析研究区生态恢复模式。结果表明: 1990—2009 年商洛市土地利用程度呈衰退趋势, 退耕还林面积较大, 生态环境逐渐改善; 基于指标等级进行敏感性分区, 中敏感区面积较大; 基于不确定性根据变异系数分区, 分区比例较为合理; 由于高敏感区土地利用退化量最少, 研究区生态建设布局模式仍值得讨论。

关键词:土地利用程度; 敏感性评价; 商洛市

中图分类号: Q148; X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)04-0125-06

Land Eco-sensitivity Assessment Based on LUCC in Ecological City

LIU Yan-xu¹, LI Chun-yue², REN Zhi-yuan^{1,2}, WEN Wen³

(1. College of Tourism and Environment Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an

710062, China; 2. Center for Land Resources Research in Northwest China, Shaanxi Normal University,

Xi'an 710062, China; 3. Urban and Rural Planning and Design Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710032, China)

Abstract: Land eco-sensitivity assessment is an important method in analyzing regional Eco-environmental safety. This article is based on the studies of land use and coverage change with the interpretation result from Landsat images. It analyzes the land use degree of Shangluo City and gave the land eco-sensitivity classification, which included soil and water conservation, disaster prevention and ecological protection. Then an improved classification model was taken through the gray model and the variation coefficient. By contrasting sensitivity in each level of land use degree change, the ecological recovery mode in study area was analyzed. The results showed; the land use degree in Shangluo City has been declined from 1990 to 2009, large area converted from cropland to forest which gave a better environment; the sensitivities of partition based on the index level showed the middle sensitive area was the largest. According to the variation coefficient gave the more reasonable proportion, the partition was improved based on uncertainties. Because of the least amount of land use degradation area was taken in high sensitive region, it was considered that the ecological construction model in study area was still worth discussing.

Key words: land use degree; sensitivity assessment; Shangluo City

自 1995 年国际地圈—生物圈计划 (IGBP) 和人文领域计划 (IHDP) 联合发表了《土地利用/土地覆被变化 (LUCC) 科学研究计划》以来, 国内外学者基于 LUCC 进行了时空变化、驱动机制、生态环境效应等一系列研究。在生态环境效应研究方面, 敏感性评价

是分析区域生态环境稳定性的主要方法之一^[1], 是生态安全区划的重要组成部分。土地生态敏感性评价通过调整土地开发和保护的布局, 可以有效地促进土地资源的可持续利用。然而, 目前的土地生态敏感性分析多基于静态的土地格局, 结合 LUCC 的研

收稿日期: 2011-12-30

修回日期: 2012-02-27

资助项目: 国家自然科学基金资助项目 (41071057); 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目 (2009JJD770025); 陕西省科学计划自然科学基金项目 (2011JQ5014); 陕西省社会科学基金项目 (11E045)

作者简介: 刘焱序 (1988—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境与 GIS。E-mail: liuyanxu00777@126.com

通信作者: 李春越 (1978—), 女, 陕西凤翔人, 博士, 助理研究员, 主要从事水土资源与生态环境研究。E-mail: chunyueli@snnu.edu.cn

究较少,不能反应敏感性分区与土地覆被动态变化的关系。同时,目前的研究方法在指标选取中多基于层次分析法、专家打分法、德尔菲法等,对连续变量的处理和最终级别的划分依据尚有改进的空间。将 LUCC 研究方法应用于土地生态敏感性评价,可将不同的敏感性格局与土地利用变化程度相结合,从时间角度对比分析生态保护的空间布局。

位于秦巴山区的商洛市植被茂密,生态服务功能显著^[2],近年来,由于保障南水北调中线工程水源与建设生态旅游城市需要,当地政府政策不断向生态保护方向倾斜。本文利用研究区 1990 年、2000 年、2009 年 3 期遥感影像,基于 LUCC 相关理论,对研究区土地利用现状进行分析,并结合 DEM 和有关图鉴,对研究区进行土地生态敏感性评价并分区。基于各敏感区土地利用动态统计,可分析研究区生态保护在时间上的持续性和空间上的合理性,从而为生态型城市的建设布局模式提供建议。

1 数据准备

1.1 研究区概况

秦岭山区位于我国中部,是我国南北地理与气候分界线,植被茂密,生态服务功能显著。商洛市地处陕西省东南部秦岭山中,总面积 19 293 km²,2010 年总人口 244 万人,内设商州区、洛南县、丹凤县、商南县、山阳县、镇安县、柞水县六县一区。商洛市总体地势西北高,东南低,高山少,低山和川原丘陵较多。最高点位于秦岭主脊牛背梁,海拔 2 802.1 m;最低点位于商南县丹江谷地,海拔 216.4 m。年均温 7.8~14.0℃,年较差 23~25℃,年降水量 706.1~844.6 mm,主要集中于 4—10 月,年太阳总辐射量 501.6~1 518.3 kJ/cm²,年均日照时间 1 874~2 123 h,可以满足植物旺盛生长的需要。作为陕西省重点生态保护区和南水北调重要水源涵养基地,研究区大部分地区属于限制开发区,经济条件较差,生态基础较好,环境保护与生态建设意义重大。

1.2 数据来源

本研究选用商洛地区 1990 年 Landsat-5 TM, 2000 年与 2009 年 Landsat-7 ETM+3 期影像,每期 4 景,图像拍摄时间在 4 月至 9 月,来源于中科院数据应用环境中心。2009 年 ETM+ 影像已由该中心进行条带修复,可基本消除 2003 年后传感器损坏的影响。同时选用该中心提供的 30 m 分辨率 DEM 数据。降水数据取自 1980—2000 年陕西省 96 个气象站点月平均数据,并统计 20 a 间降水月数据平均值。土壤侵蚀程度来源于《商洛地区地理志》中的土壤分

布图,并对照南京土壤所中国土壤数据库对各土类的疏松或黏化程度描述进行分类。地质灾害发生率与生态保护区或水源涵养地空间位置来源于《商洛市地质灾害防治规划》和《商洛市土地利用总体规划(2006—2020 年)》中的纸质图集。

1.3 数据处理

通过监督分类与人机交互结合的方法将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地、未利用地 6 大类,随机抽样 500 个栅格点进行检验,总体解译精度均大于 85%。拼接 30 m 分辨率 DEM 数据生成坡度图。土壤分布类型共 10 类,侵蚀从弱到强依次为褐土、棕壤、黄棕壤。资料中地质灾害发生率的分区同时考虑了灾害发生次数和造成的损失量,可直接使用。将地质灾害发生率、生态保护区与水源涵养地、土壤分布类型 3 个图集扫描并矢量化。依据先前的土地类型解译结果进行投影的配准以保证精度。降水数据采用普通克里金法进行插值,并使用商洛市矢量边界裁切后将结果转化为 30 m 分辨率栅格图像。最终将所有图像转为 Albers 投影,中央经线设为 33°E,两条中央纬线分别设为 33°N 与 34°N,以保持投影的一致性和美观性。

2 土地利用与覆被变化分析

基于遥感影像得出 19 a 间研究区土地利用面积变化情况:1990—2009 年研究区耕地面积不断减少;林地与建筑用地面积有所增加,建筑用地面积增幅超过一半;水域与草地面积呈现波动但总体上减少;未利用地大幅减少。同时,各地类在不同时段变化幅度差异很大。耕地在 1990—2000 年仅减少 3% 左右,而在 2000 年后减少超过 20%。这主要是由于 1999 年后陕西省实施退耕还林政策导致坡耕地面积减少,但也有部分是由于粮食作物收益低导致农户转而经营果园。建设用地在前 10 a 和后 9 a 增长幅度分别超过 20% 与 24%,说明近年来城市扩展迅速。林地增幅分别达 3.4% 和 6.24%,且林地基数较大,可知研究区林业规模明显扩大。通过 1990 年与 2009 年解译图像叠置分析得出,耕地转出为林地的面积占总转移面积的 43.97%。由于总转移面积包括转入面积与转出面积且两者相等,即可得耕地向林地与园地转移面积占土地变化面积的 87.94%。仅通过地类数量的变化难以对人类活动的效应进行度量,因此有必要对研究区土地集约程度进行分析。根据刘纪远等提出的土地利用程度综合分析方法,可将土地利用程度分级指数表(表 1)代入土地利用程度综合指数模型和土地利用程度变化模型中,得出研究区土地利

用程度及变化^[3-4]。其土地利用程度的指数越高,则人类对土地利用的集约性越强。土地利用程度综合指数和变化模型如下:

$$L_j=100\times\sum_{i=1}^nA_i\times C_i$$
$$\Delta L_{b-a}=L_b-L_a=100\times(\sum_{i=1}^nA_i\times C_{ib}-\sum_{i=1}^nA_i\times C_{ia})$$
$$R=\frac{\sum_{i=1}^n(A_i\times C_{ib})-\sum_{i=1}^n(A_i\times C_{ia})}{\sum_{i=1}^n(A_i\times C_{ia})}$$

式中: L_j ——研究区土地利用程度综合指数; A_i ——研究区第 i 级土地利用程度分级指数; C_i ——研究区第 i 级利用类型面积百分比; n ——分级数。 L_b , L_a —— b 时间和 a 时间的区域土地利用程度综合指数; C_{ib} , C_{ia} —— b 时间和 a 时间的第 i 级利用类型面

积百分比。如 $\Delta L_{b-a}>0$,或 $R_j>0$,则研究区土地利用处于发展期,否则处于调整期或衰退期。

根据公式计算出研究区各区县土地利用综合指数(表 2),研究区土地利用程度变化率小于 0,说明商洛市研究区发现土地利用总体处于调整期或衰退期。其中洛南县土地利用程度变化率大于 0,表明该县仍处于发展期;镇安县土地利用变化率最小,表示其衰退最快或调整幅度最大。在全国土地利用总体处于发展期的大背景下,研究区土地利用程度却出现降低现象是由研究区 19 a 来尤其是近 9 a 来耕地面积大幅减少、林地面积显著增加引起的。尽管建筑用地面积有所增大,但林地面积增大有绝对数量上的优势,说明退耕还林还草等政策或农民自发经营果园起到了明显的作用。

表 1 土地利用程度分级

级别	未利用土地	林、草、水土地	农业用地	城镇聚落用地
土地利用类型	未利用地或难利用地	林地、草地、水域	耕地、园地、人工草地	居民点及工矿交通用地
分级指数	1	2	3	4

3 土地生态敏感性评价

3.1 评价指标

敏感性评价应明确研究区内可能发生的主要生态环境问题类型及可能性,内容包括沙漠化敏感性、盐渍化敏感性、冻融侵蚀敏感性、水土流失敏感性、酸雨敏感性、石漠化敏感性等^[5]。商洛市地处秦岭,植被茂密,不存在沙漠化盐渍化问题。但研究区地势高、坡度大,降水量充沛,导致水土流失情况较严重,滑坡泥石流等地质灾害时有发生。同时,商洛市处于南水北调中线工程项目区,水源涵养与生态保护在研究区内有重要意义。因此,本文选用年降水量、海拔高度、坡度分级、土地利用方式、水土流失强度、地质

灾害情况、生态保护区及水源涵养地建设等因素作为评价因子^[6-15](表 3)。

表 2 商洛市 1990—2009 年土地利用程度变化量与变化率

区域	土地利用度			变化量	变化率/%
	1990 年	2000 年	2009 年		
洛南	207.06	207.05	209.47	2.41	1.2
商州	212.71	212.79	211.63	-1.08	-0.5
丹凤	208.91	209.19	207.42	-1.49	-0.7
柞水	210.58	210.79	205.44	-5.15	-2.4
商南	209.60	209.60	204.21	-5.39	-2.6
山阳	214.11	213.94	209.07	-5.04	-2.4
镇安	219.77	219.58	212.19	-7.58	-3.4
全市	212.32	212.33	208.83	-3.49	-1.6

表 3 研究区单因素生态环境敏感性分级标准

指标	因子	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极度敏感
水土敏感性	年降水量/mm	—	≤800	800~900	≥900	—
	坡度分级/(°)	0~8	8~15	15~25	25~35	≥35
	土地覆被类型	水域及建设用地	疏林地、有林地	园地、水浇地	荒草地	旱地、裸岩、工矿
	土壤侵蚀程度	轻微	中度	强烈	严重	极严重
灾害敏感性	年降水量/mm	—	≤800	800~900	≥900	—
	坡度分级/(°)	0~8	8~15	15~25	25~35	≥35
	地质灾害发生率	不易发	低易发	—	中易发	高易发
生境敏感性	海拔高度/m	≤720	720~1100	1100~1500	1500~2250	≥2250
	生态保护区或水源涵养地	不是	—	市县级	省级	国家级

(1) 水土敏感性指标。研究区年均降水量为 700~1 000 mm,由于研究区降水变化率大,干旱与雨涝灾害交替,对生态环境产生了一定的负面影响,因此划分为轻、中、高 3 个等级。土地利用方式尤其是耕

地布局与坡度关系密切。通过解译图像叠置坡度图,可以清晰分辨出研究区土地覆被的合理性。根据土壤侵蚀模数将土壤侵蚀程度分为 5 级,中度以上土壤侵蚀面积占研究区总面积的 80%以上。

(2) 灾害敏感性指标。由于降水及地形坡度等原因,研究区滑坡、泥石流等地质灾害频繁发生。根据地质灾害发生率将其分为 4 级,中度以上地质灾害易发区占研究区总面积的 50% 以上。

(3) 生境敏感性指标。研究区动植物种类繁多,垂直差异性明显。海拔 720 m 以下为川道区,720~1 100 m 为浅山丘陵区,2 250 m 是秦岭南北坡桦林与杉林的平均分界带。根据《陕西省秦岭生态环境保护条例》,海拔 1 500~2 600 m 的中山针阔叶混交林生态功能区为限制开发区。

3.2 基于指标分类的敏感性评价

将不敏感到极度敏感 5 级指标分别用 1,2,3,4,5 表示,根据专家打分,并结合经验与当地实际情况,水土敏感性中降水、坡度、覆被与土壤侵蚀分别赋权重 0.2,0.15,0.15,0.5,灾害敏感性中降水、坡度、灾害发生率分别赋权重 0.15,0.15,0.7,生境敏感性中海拔高度与保护区分别赋权重 0.2,0.8。最终将图鉴及数据统一转换为 30 m 分辨率的 grid 格式,带入公式进行叠加运算:

$$P = \sum_{i=1}^n (A_i \times W_i)$$

式中: P ——生态敏感性评价; A_i ——指标贡献值; W_i ——各因素权重。

叠加结果(表 4)显示:水土敏感性 P 值范围在 1.2~4.15,其中近 90% 的区域位于 2~4 之间;灾害敏感性 P 值范围在 1.3~4.85,其中 42% 区域 P 值达 4 以上;生境敏感性 P 值范围在 1~5 均有分布。将 3 个指标叠加后除以 3 即可得综合敏感性分区图(图 1)。基于得出的 P 值在 1.45~4.17 之间,本文将研究区划标分准为低敏感区 1.45~2,中敏感区 2~3,高敏感区 3~4.17。

表 4 研究区敏感性分级

类型	水土敏感性	灾害敏感性	生境敏感性	综合敏感性
P 最小值	1.2	1.3	1	1.45
P 最大值	4.15	4.85	5	4.17
权重	1/3	1/3	1/3	1

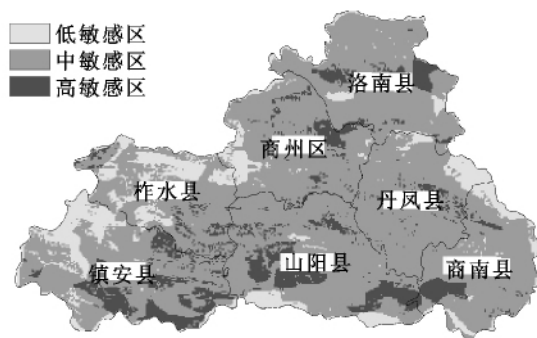


图 1 研究区敏感性分级

计算县域综合敏感性可知:中敏感区面积占全市的比例较大,各县均超过 60%;柞水县低敏感区比例最高,占县域面积的 26%;山阳县与镇安县高敏感区相对较大,分别占县域面积的 19.7% 和 18.7%。其中商南新开岭自然保护区与洛南大鲵自然保护区的存在使得商南县和洛南县具有较高的生境敏感性;镇安县与山阳县高敏感区水土敏感性与灾害敏感性等级较高,滑坡泥石流并由此引发的水土流失可能是该区的主要问题;商州区高敏感区西段是由于二龙山水库保护区生境敏感性高,东段环境属于地质灾害与水土流失均相对较重的区域。

3.3 基于不确定性的敏感性评价

在指标分类中,对连续变量进行人工分级,如降水量 799 mm 和 801 mm 分属两个不同级别,而 801 mm 与 899 mm 却属于同一级别,显然有悖于其实际功效。因此,基于连续变量出现的不确定性,将敏感性指标中连续部分采用灰色系统法^[16]对变量间灰色关联度予以计算。其原理为选择第 k 个因子的最优指标集 $C^*(k)$ 作为参考数列,评价 $C(k)$ 与最优集的关联度,公式如下:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |C^*(k) - C(k)| + \sigma \max_i \max_k |C^*(k) - C(k)|}{|C^*(k) - C(k)| + \sigma \max_i \max_k |C^*(k) - C(k)|}$$

式中: $\xi_i(k)$ ——第 i 个单元内第 k 个评价因子与最优值关联度; $C(k)$ ——单元属性; σ ——分辨系数,一般取 0.5。本研究单元为像元大小,参考数列为最敏感对应的像元,关联度越高说明越敏感,结果在 $[0,1]$ 区间内。将其他敏感性因子也标准化至 $[0,1]$ 区间,则敏感度范围由 $[1,5]$ 调整至 $[0,1]$ 。

大尺度的生态安全等级有相对统一的划分标准,而市域生态敏感性计算则较为灵活,重在突出内部空间差异性。人为进行打分判定往往会使较多变量集中在某区间,从而使大部分区域处于某一个或两个等级内。为扩大不同像元的差异性,本研究使用客观的变异系数作为权重,以获得良好的区分度^[17-18]。其公式为:

$$w = \frac{v}{\sum_{i=1}^n v_i} = \frac{S/\bar{x}}{\sum_{i=1}^n (S_i/\bar{x}_i)}$$

式中: w ——评价因子权重; v ——变异系数; S ——标准差。 w 取值在 $(0,1)$ 之间。

为排除某些极值点,以乡为格网单元,在 ArcMAP 下进行区域统计,并计算统计结果的变异系数。得出水土敏感性中降水、坡度、覆被与土壤侵蚀分别赋权重 0.21,0.07,0.17,0.55,灾害敏感性中降水、

坡度、灾害发生率分别赋权重 0.28,0.09,0.63,生境敏感性中保护区与海拔高度分别赋权重 0.98 和 0.02。综合敏感性仍为 3 指标叠加后除以 3,所得敏感性在(0.1~0.78)区间内。依据使数量分布较均匀的几何分级法,选择 0.2 和 0.4 为断裂点,得出改进的综合敏感性分区图(图 2)。相比基于指标分类的敏感性评价方法,基于不确定性的评价方法显然具有更强的科学依据,可信度更高。由于所获得的 30 m 分辨率图像离散孤点更少,敏感区相对更集中,因此更便于进行市域环境保护与生态建设的区划。

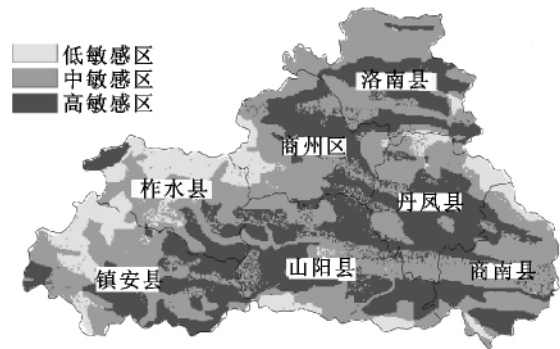


图 2 改进的研究区敏感性分级

4 生态敏感区 LUCC 响应

基于土地利用度级别为 1~4,将 2009 年与 1990 年土地利用度逐像元相减,可得-3~3 之间共 7 个等级的土地利用度变化。与改进的综合敏感性分区图套合,土地利用度为 0 表示未改变,不予统计,其他可依次表示为退化和进化的高中低 3 等共 6 个级别(表 5)。

表 5 敏感区土地利用度变化 %

集约变化	低敏感区	中敏感区	高敏感区	总计
高度退化	0.01	0.02	0.01	0.01
中度退化	0.05	0.21	0.15	0.17
低度退化	75.69	77.38	71.46	74.73
高度进化	0.01	0.02	0.01	0.01
中度进化	5.06	8.66	12.10	9.93
低度进化	19.18	13.71	16.27	15.14

土地利用度变化以低度进化和低度退化为主,中度进化也占少量比例;高度进化与高度退化绝对数量很低,相差不明显。由此可知,虽然研究区土地集约程度整体降低,但升降幅度区域差异很大。低度退化即土地利用程度下降一级,主要体现了耕地向林地转化。低度进化即土地利用程度升高一级,包含未利用地造林植草、城市扩展占用耕地、草地水域被开垦为耕地等多种可能性。中度进化即 19 a 间土地利用程度连升两级,包含未利用地转变为耕地,林地/草地/

水域转变为居民点/工矿用地两种情况,表明研究区近年来耕地复垦和采矿业发展取得了一定实效。

通过生态敏感性分区统计可清晰反映土地利用度变化的空间差异。高敏感区的低度退化比率最低而中度进化比率最高,说明土地集约性下降最慢的区域为高敏感区域,而中、低敏感区集约性下降相对较快。鉴于土地集约性越高意味着人类活动越强,中度进化的比例表明研究区土地敏感性越高的区域人类活动强度降低度越慢。由于人类对土地的集约利用本身存在累积效应,其集约性越高,降低其利用度的成本也就越大。这也解释了低度退化占有 70% 以上的比例而中度退化比例不足 1% 的原因。由于敏感性值往往与人类活动关系密切,基于上述人类活动越强地区生态修复成本越高的规律,生态恢复侧重于中、低敏感区显然机会成本更小。然而,在生态敏感性较低区域进行生态环境建设,其生态安全效应显然低于对高敏感区进行生态修复。因此,该侧重方式从生态安全角度考虑并不尽合理。虽然研究区生态恢复效果显著,但其生态建设的布局模式仍值得讨论。

5 结论与讨论

本研究通过土地利用与覆被变化相关模型与生态敏感性分区相结合,选取水土、灾害、生境为评价要素,得出研究区各区县土地利用程度与土地生态敏感性的对比关系。结果表明:(1) 研究区土地利用程度有退化趋势,大量耕地向林地与园地转移,生态环境不断改善,说明近年来研究区生态城市的建设工作取得了一定成效。(2) 进一步对土地生态敏感性进行评价,发现研究区土地生态安全问题依然突出存在,高敏感区面积有限但存在较严重的水土流失、地质灾害或生态保护压力。(3) 使用灰色模型降低评价因子的不确定性,并使用变异系数扩大权重内部差异,得出改进的生态敏感性分级,可增大敏感性评价的区分度。(4) 研究区生态恢复更侧重于中低敏感性区域,而对高敏感性区域可能出于经济成本的考虑,生态恢复力度相对较低。

目前,在国家、省市、县乡等尺度上的生态敏感性评价尚无相对统一的评价指标体系,因此需要针对具体研究区域选取合理的指标进行评价。在评价过程中发现,研究区内降雨、坡度、地质灾害、土壤结构等指标年际变化不大,因此改变地表土地覆被类型,降低其土地利用程度,是未来一定时间内提高生态安全度的最有效途径。然而,在不同区域降低土地利用程度产生的生态效益差别明显。低敏感性区域本身覆被条件较好、坡度较缓、土壤侵蚀较少,其生态安全的

提升空间有限;而高敏感性区域生态环境脆弱或生态保护意义重大,应作为重点生态建设区域。然而在区域生态建设过程中,往往生态敏感性越高其生态恢复的经济成本越大,导致在具体布局中侧重数量上的提升而忽视质量上的提高,对生态安全的提升作用有限。随着生态环境建设在全国的逐步开展,以造林植草的数量作为成果衡量标准难以体现生态建设在水土保持、水源涵养、防风固沙等方面取得的实际功效。健康的生态发展模式应为低敏感区以保护为主,而高敏感区重视建设,从而进一步提高区域生态安全,改善人居环境。同时,对于土地生态高敏感性区域中生态安全程度不易提高的部分区域,进行合理的生态移民也是切实有效的措施。

参考文献:

- [1] 欧阳志云,郑华,高吉喜,等.区域生态环境质量评价与生态功能区划[M].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [2] 陕西师范大学地理系.陕西省商洛地区地理志[M].西安:陕西人民出版社,1981.
- [3] 王思远,刘纪远,张增祥,等.中国土地利用时空特征分析[J].地理学报,2001,56(6):631-639.
- [4] 刘纪元,张增祥,庄大方,等.20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J].地理研究,2003,22(1):1-12.
- [5] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J].生态学报,2000,20(1):9-12.
- [6] 杨月圆,王金亮,杨丙丰.云南省土地生态敏感性评价[J].生态学报,2008,28(5):2253-2260.
- [7] 刘康,欧阳志云,王效科.甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布[J].生态学报,2003,23(12):2711-2718.
- [8] 赵晓慧,严力蛟.生态敏感性的灰色关联投影评价模型及其应用[J].浙江大学学报,2006,32(3):341-345.
- [9] 万忠成,王治江,董丽新.辽宁省生态系统敏感性评价[J].生态学杂志,2006,25(6):677-681.
- [10] 吴克宁,韩春建,冯新伟.基于3S技术的土地生态敏感性研究[J].土壤,2008,40(2):293-298.
- [11] 林娟娟,潘文斌.基于GIS的流域生态敏感性评价及其区划方法研究[J].安全与环境工程,2005,12(2):23-34.
- [12] 孙国军.基于BP神经网络的内蒙古乌拉特前旗生态环境脆弱性评价[D].兰州:西北师范大学,2009.
- [13] 颜磊,许学工,谢正磊.北京市域生态敏感性综合评价[J].生态学报,2009,29(6):3117-3125.
- [14] 曹建军,刘永娟.GIS支持下上海城市生态敏感性分析[J].应用生态学报,2010,29(7):1805-1812.
- [15] 李君轶,吴晋峰,薛亮,等.基于GIS的陕西省土地生态环境敏感性评价研究[J].干旱区农业研究,2007,25(4):19-29.
- [16] 曾光明,杨春平,卓利.环境系统灰色理论与方法[M].北京:科学技术出版社,1994:58-70.
- [17] 周建飞,曾光明,黄国和.基于不确定性的城市扩展用地生态适宜性评价[J].生态学报,2007,27(2):774-783.
- [18] 吴金华,李纪伟,朱鸿儒.基于ArcGIS区统计的延安市土地生态敏感性评价[J].自然资源学报,2011,26(7):1180-1188.

(上接第124页)

参考文献:

- [1] 刘成武,李秀彬.1980年以来中国农地利用变化的区域差异[J].地理学报,2006,61(2):139-145.
- [2] Jean-Pierre C, Anver G. The role of the European Union in global change research[J]. AMBIO,1994,23(1):101-103.
- [3] 文娟,金大刚.不同造林模式人工林碳贮量的预估及比较分析:以广西西北部地区退化土地再造林项目为例[J].广西林业科学,2009,38(1):35-38.
- [4] 张兴榆,黄贤金.环太湖地区土地利用变化对植被碳储量的影响[J].自然资源学报,2009,24(8):1343-1353.
- [5] 周绪,刘志辉.基于RS和GIS分析干旱区土地利用/覆盖变化对陆地植被碳储量的影响:以新疆鄯善县绿洲为例[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):231-236.
- [6] 柳梅英,包安明,陈曦,等.近30年玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对植被碳储量的影响[J].自然资源学报,2010,25(6):926-938.
- [7] 姜群鸥,邓祥征,战金艳,等.黄淮海平原耕地转移对植被碳储量的影响[J].地理研究,2008,27(4):840-846.
- [8] 罗怀良,袁道先.南川市三泉镇岩溶区农田生态系统植被碳库的动态变化[J].生态环境,2008,17(5):2014-2017.
- [9] 王绍强,周成虎.中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨[J].地理科学进展,1999,18(3):238-244.
- [10] 王绍强,许珺,周成虎.土地覆被变化对陆地碳循环的影响[J].遥感学报,2001,5(2):142-148.
- [11] 罗天祥.中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型[D].北京:中国科学院自然资源综合考察委员会,1996.
- [12] 陈明皋,田育新.湖南低丘区不同植被类型组成、结构及碳贮量评价研究[J].中南林业大学学报,2008,28(2):13-18.
- [13] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳贮量[J].中国科学:D辑,2003,33(1):72-80.