

基于集对分析的喀斯特生态景观退化诊断研究 ——以毕节地区为例

邵技新^{1,2}, 张凤太^{1,2,3}, 苏维词⁴, 曹欢⁵

(1. 贵州师范学院 地理与旅游学院, 贵阳 55001; 2. 贵州师范学院 资源环境与灾害研究所, 贵阳 55001; 3. 南京大学 地理与海洋学院, 南京 210093; 4. 贵州省科学院山地资源研究所, 贵阳 550001; 5. 贵州大学 资源与环境学院, 贵阳 55003)

摘要:从生态景观的结构退化、功能退化和环境污染等3个方面选择了21个评价指标,组成喀斯特地区生态景观退化评价诊断指标体系,并制定诊断评价标准,借助集对分析方法,以毕节地区为例进行分析,得出毕节地区的2003–2006年生态景观分别处于中度退化、中度退化、轻退化、中度退化4个阶段。生态景观退化处于波动状态,但整体趋势趋于良好。评价结果与已有喀斯特生态系统健康研究相互印证,研究确定的喀斯特生态景观退化诊断指标体系和诊断标准以及诊断方法具有一定科学价值,对指导喀斯特地区的生态景观优化、设计和修复具有一定参考价值。

关键词:集对分析; 喀斯特; 生态景观; 退化; 诊断

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0011-05

Diagnosis of Karst Ecological Landscape Degradation Based on Set of Analysis – A Case Study in Bijie

SHAO Ji-xin^{1,2}, ZHANG Feng-tai^{1,2,3}, SU Wei-ci⁴, CAO Huan⁵

(1. Department of Geography and Tourism, Guizhou Normal College, Guiyang 55001, China;

2. Institute of Environment, Resources and Disaster, Guizhou Normal College, Guiyang 55001, China; 3. College of Geography and Sea, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 4. Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China; 5. College of Resources and Environment, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: 21 indicators to form a karst index system of diagnosis of landscape ecological evaluation degradation were selected to develop diagnostic evaluation criteria from three aspects of the degradation of ecological landscape structure, function and environment pollution in this paper. With the set of analysis methods, a case study in Bijie was conducted. From 2003 to 2006, Bijie experienced four stages of moderate degradation, moderate degradation, light degradation and moderate degradation. Landscape degradation in the volatile, but the overall trend tended to good. Evaluation results with existing karst ecosystem health and confirms each other, the indicators of karst eco-system, landscape degradation diagnostic criteria and diagnostic method are some scientific values and have some reference value for guiding the optimization of ecological landscape karst area, designing and repairing of ecological landscape.

Key words: set of analysis methods; Karst; ecological landscape; degradation; diagnosis

景观是指由地貌过程和种种干扰作用形成的,具有特定结构、功能和动态特征的一种宏观系统^[1]。目前,关于生态景观的研究主要集中在对农业^[2-3]、城市^[4]、河流^[5]、森林^[6]等生态景观的格局分析^[7]、景观的优化与设计^[1]、景观的修复^[9]等方面,对生态景观

的评价和诊断相对较少,研究较薄弱。当前对生态系统健康和安全的等的评价较多^[10-11],研究也较成熟。但对生态景观退化程度的诊断研究大多停留在初始阶段,尤其是对喀斯特地区生态景观的退化研究文献更少,已有研究主要是定性和单一因子评价^[12],缺乏科

收稿日期: 2010-12-0

修回日期: 2011-02-16

资助项目: 国家科技支撑计划子专题(2007BAD53B001); 国家社会科学基金(10CJY044); 贵州省自然科学基金子课题(黔科合S字(2007)101-1); 贵州省省长基金子课题(黔省专合字(2006)72-1); 贵州省科学技术基金(黔科合J字(2009)2030); 贵州省教育厅青年基金(黔教200060); 贵州师范学院校内重点课题

作者简介: 邵技新(1960-),男,副教授,从事自然地理、土壤地理教学和研究。E-mail: sjxin2004@126.com

通信作者: 张凤太(1979-),男,讲师,博士研究生,从事喀斯特生态与水文教学和研究。E-mail: zhftthero@126.com

学定量的综合评价指标体系及合适的评价方法。本研究在此尝试性地从生态系统的结构、功能和环境污染状况上选择指标,建立生态景观退化的诊断指标体系,采用量化(集对分析)的方法,对喀斯特地区生态景观退化程度进行诊断,为喀斯特地区生态景观的恢复和重建提供有益参考。

1 研究区域概况

毕节地区是典型的喀斯特山区,处在滇东高原向黔中山原丘陵过渡的倾斜地带,境内多山,高原山地占全区总面积的 93.3%。大部分地方属北亚热带温凉湿润季风气候,水热资源适中。毕节地区是贵州省石漠化集中分布区域,石漠化广泛分布于全区,分布范围广、面积大。从无石漠化到极强度石漠化均有分布。喀斯特生态景观呈不同程度的退化状态。

2 指标体系确定

根据喀斯特地区生态系统的状况及分析建模的

要求,在指标确定上要依据如下原则:(1)指标要具有可比性。(2)指标的分辨意义和差异性显著,以避免选用指标因地域差异过小给归类带来困难。(3)指标不能高度相关;(4)指标数据收集的可行性。

依据以上原则,结合生态景观退化的表现形式以及资料来源等情况,从生态景观的结构退化、功能退化和环境污染等 3 个方面选择 21 个评价指标,组成喀斯特地区生态景观退化评价诊断指标体系(表 1)。

另外,查阅贵州统计年鉴、贵州年鉴、毕节地区年鉴、毕节地区统计年鉴、贵州省水资源公报、毕节地区国民经济和社会发展统计公报、贵州省土地利用总体规划资料和毕节地区环境质量报告书等资料并结合已有文献^[13-14]得出指标体系各指标的数据(表 1)。

决定评价是否成功的关键是如何选择适宜的评价指标与评价标准。在生态景观评价指标提出之后,评价标准就是生态景观退化评价最困难的问题之一。

表 1 喀斯特生态景观退化诊断评价指标体系

要素	指标	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
结构	草地面积比率 $X_1/\%$	23.2	20.60	26.67	24.610
	耕地面积比率 $X_2/\%$	13.54	13.5	13.60	13.50
	建设用地面积比率 $X_3/\%$	3.14	3.0	3.02	2.960
	水域面积比率 $X_4/\%$	0.93	0.70	1.13	0.950
	水土流失面积占全区土地面积比率 $X_5/\%$	64.50	62.70	61.10	60.210
	石漠化率(重度、中度) $X_6/\%$	10.06	10.04	10.04	10.040
	景观多样性指数 X_7	0.90	0.93	0.96	0.990
	自然保护区覆盖率 $X_8/\%$	1.25	1.54	1.95	2.120
	人口密度 $X_9/(\text{人}\cdot\text{km}^{-2})$	262.5	266.00	273.47	275.0
	城镇化率 $X_{10}/\%$	14.7	15.43	16.14	17.50
功能	粮食单产 $X_{11}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	0.33	0.3	0.39	0.390
	人均耕地面积 $X_{12}/(\text{m}^2/\text{人})$	510.41	511.0	502.51	49.970
	人均占有粮食 X_{13}/kg	2.20	334.04	340.0	342.940
	水资源总量 $X_{14}/\text{亿 m}^3$	6.606	99.59	122.714	74.503
	土地抗灾度(有效灌溉面积/耕地面积) $X_{15}/\%$.10	.30	.40	.000
	森林覆盖率 $X_{16}/\%$	33.92	32.52	33.92	34.40
	生态环境用水量 $X_{17}/\text{亿 m}^3$	0.03	0.03	0.0	0.070
环境污染	可吸入颗粒物浓度年均值 $X_{18}/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	0.045	0.065	0.067	0.070
	生活污水排放占污水排放总量比率 $X_{19}/\%$	7.00	72.00	74.00	5.470
	农田化肥平均使用量 $X_{20}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	460.40	44.31	497.62	516.40
	年均降水 pH 平均值 X_{21}	6.75	6.7	7.00	6.90

目前,学术界尚没有统一认可的喀斯特生态景观退化诊断评价标准。本文参考喀斯特生态系统退化的评价标准^[13-14],将喀斯特生态景观退化的评价标准分 5 个等级,即微退化、轻退化、中退化、强退化、极强退化。由于对于喀斯特生态景观退化诊断评价的标准还没有具体的研究,文献很少,因此在退化诊断标准的制定上,主要参考的是各地区关于生态系统健康

的评价标准^[14-15],在此基础上再进行适当的调整和修正。本标准的制定主要依据国家环保总局制定的生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)、国家制定和颁布的有关环境标准、行业标准与设计标准,以及国内外公认的生态系统健康地区、生态城市标准的建议值,做适当的调整,作为喀斯特生态景观退化诊断的标准值(表 2)。

表 2 喀斯特生态景观退化诊断评价指标分级标准

要素	指标	分级标准				
		极强退化	强退化	中退化	轻退化	微退化
结构	草地面积比率/ %	< 5	5~ 10	10~ 15	15~ 20	> 20
	耕地面积比率/ %	< 5	5~ 10	10~ 15	15~ 20	> 20
	建设用地面积比率/ %	> 10	~ 10	6~	4~ 6	< 4
	水域面积比率/ %	< 5	5~ 10	10~ 15	15~ 20	> 20
	水土流失面积 占全区土地面积比率/ %	> 40	30~ 40	20~ 30	10~ 20	0~ 10
	石漠化率(重度、中度) / %	> 10	7~ 10	4~ 7	1~ 4	< 1
	景观多样性指数	< 0. 3	0. 3~ 0. 5	0. 5~ 0. 7	0. 7~ 0. 9	> 0. 9
	自然保护区覆盖率/ %	<	~ 12	12~ 15	15~ 20	> 20
	人口密度/ (人· km ⁻²)	> 10000	5000~ 10000	1000~ 5000	600~ 1000	< 600
功能	城镇化率/ %	> 60	50~ 60	40~ 50	30~ 40	< 30
	粮食单产/ (kg· m ⁻²)	< 0. 3	0. 3~ 0. 675	0. 675~ 1. 049	1. 049~ 1. 424	> 1. 424
	人均耕地面积(m ² / 人)	350	350~ 450	450~ 550	550~ 650	> 650
	人均占有粮食/ kg	< 100	100~ 200	200~ 300	300~ 400	> 400
	水资源总量/ 亿 m ³	< 40	40~ 60	60~ 0	0~ 100	> 100
	土地抗灾度(有效灌溉面积/ 耕地面积) / %	< 5	5~ 10	10~ 15	15~ 20	> 20
	森林覆盖率/ %	<	~ 26	26~ 44	44~ 65	> 65
	生态环境用水量/ 亿 m ³	< 0. 02	0. 02~ 0. 04	0. 04~ 0. 06	0. 06~ 0. 0	> 0. 0
环境污染	可吸入颗粒物浓度年均值/ (mg· m ⁻³)	> 0. 25	0. 2~ 0. 25	0. 15~ 0. 2	0. 1~ 0. 15	< 0. 1
	生活污水排放 占污水排放总量比率/ %	> 0	0~ 70	70~ 60	60~ 50	< 50
	农田化肥平均使用量/ (kg· hm ⁻²)	> 1300	950~ 1300	600~ 950	250~ 600	< 250
	年均降水 pH 平均值	< 4. 0	4. 0~ 4. 3	4. 3~ 4. 6	4. 6~ 5	> 5. 0

3 喀斯特生态景观退化程度综合诊断流程

3.1 模式决策模型构建

(1) 构建评级指标集合。退化景观的评价指标为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$, (m 为指标数, $m=23$), 则第 i 年的指标体系构成一个集合 $A_i=(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m})$, 其中 $i=1, 2, \dots, n, n$ 为年份。

(2) 建立评价指标的评价标准。标准的级数可以随意设定, 但不宜太多, 本研究设评价标准为 5 级。对于一级标准, 记为集合 $B_1=(1, 1, 1, 1, \dots, 1)$; 对于 2 级标准, 记为集合 $B_2=(2, 2, 2, 2, \dots, 2)$; 对于 3 级标准, 记为 $B_3=(3, 3, 3, 3, \dots, 3)$, 以此类推。

(3) 根据步骤 2 的等级标准将集合 $A_i=(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m})$ 中的元素进行符号化处理。如落入 1 级区间, 该指标为第 1 级, 则该指标量化为符号“1”; 如落入第 2 级, 则该指标量化为符号“2”, 如落入第 3 级, 则该指标量化为符号“3”, 以此类推, 于是得到符号量化的集合 A_i

(4) 构造集对 $H(A_i, B_l)(l=1, 2, 3, 4, 5; i=1, 2, \dots, n)$ 。将集对中的 A_i 与 B_l 对应的元素进行对照,

统计符号相同的个数, 记为 S ; 相差 1 级的, 如 1 和 2, 2 和 3, 记为 F_1 ; 统计相差 2 级的个数, 如 1 和 3, 记为 F_2 ; 以此类推, 统计相差 $K-2$ 级的个数, 如 2 与 K , 记为 F_{K-2} ; 统计相差 $K-1$ 级的个数, 如 1 与 K , 记为 P 。得到 K 元联系度^[16]:

$$\eta(A_i-B_l)=\frac{S}{m}+\frac{F_1}{m}I_{1+}+\frac{F_2}{m}I_{2+}+\dots+\frac{F_{K-2}}{m}I_{K-2+}+\frac{P}{m}J$$

(1)

式中: $S+F_1+F_2+\dots+F_{K-2}+P=m$, 本研究 $K=5$, 即是具有 5 级联系度。

(4) 确定 I_1, I_2, \dots, I_{K-2} 和 J 的值, 在本文中即是 I_1 和 J 。采用经验取值法^[16], 得到 $I_1=0.5$ 和 $J=-1$ 。

(5) 模式优选。将第 3 级标准(好) 设为最优标准集合, 即 B_3 , 将 $I_1=0.5$ 和 $J=-1$ 。

带入公式(1) 得到综合评价联系数, 根据联系数的大小对待选模式进行排序, 联系数越大, 对应的方案就越优越^[16]。

3.2 数据符号化

依据上面的计算步骤, 首先将数据符号化, 见表 3。

表 3 符号化数据

指标	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
X_1	5	5	5	5
X_2	3	3	3	3
X_3	5	5	5	5
X_4	1	1	1	1
X_5	1	1	1	1
X_6	1	1	1	1
X_7	5	5	5	5
X_8	1	1	1	1
X_9	5	5	5	5
X_{10}	5	5	5	5
X_{11}	2	2	2	2
X_{12}	3	3	3	3
X_{13}	3	4	4	4
X_{14}	4	4	5	3
X_{15}	2	2	2	2
X_{16}	3	3	3	3
X_{17}	2	2	5	4
X_{18}	5	5	5	5
X_{19}	2	2	2	1
X_{20}	4	4	4	4
X_{21}	5	5	5	5

3.3 联系数的计算

将符号化的数据, 带入步骤 4 的公式 (1) 中进行计算, 得出以下 5 元联系度公式:

$$\left\{\begin{aligned}\eta(A_{2003}-B_1) &= \frac{4}{21} + \frac{4}{21}I_1 + \frac{4}{21}I_2 + \frac{2}{21}I_3 + \frac{7}{21}J \\ \eta(A_{2003}-B_2) &= \frac{4}{21} + \frac{1}{21}I_1 + \frac{2}{21}I_2 + \frac{7}{21}I_3 + \frac{0}{21}J \\ \eta(A_{2003}-B_3) &= \frac{4}{21} + \frac{6}{21}I_1 + \frac{11}{21}I_2 + \frac{0}{21}I_3 + \frac{0}{21}J \\ \eta(A_{2003}-B_4) &= \frac{2}{21} + \frac{11}{21}I_1 + \frac{4}{21}I_2 + \frac{4}{21}I_3 + \frac{0}{21}J \\ \eta(A_{2003}-B_5) &= \frac{7}{21} + \frac{2}{21}I_1 + \frac{4}{21}I_2 + \frac{4}{21}I_3 + \frac{4}{21}J\end{aligned}\right.$$

由均匀取值法^[16]得出, $I_1 = 0.5, I_2 = 0, I_3 = -0.5, J = -1$, 带入联系度公式, 得出 2003 年:

$$\eta(A_{2003}-B_1) = -0.0955; \eta(A_{2003}-B_2) = 0.214; \eta(A_{2003}-B_3) = 0.333; \eta(A_{2003}-B_4) = 0.262; \eta(A_{2003}-B_5) = 0.096$$

同理得出 2004 年、2005 年和 2006 年的联系度如下:

2004 年:

$$\eta(A_{2004}-B_1) = -0.119; \eta(A_{2004}-B_2) = 0.19; \eta(A_{2004}-B_3) = 0.3095; \eta(A_{2004}-B_4) = 0.26; \eta(A_{2004}-B_5) = 0.119$$

2005 年:

$$\eta(A_{2005}-B_1) = -0.215; \eta(A_{2005}-B_2) = 0.0955; \eta(A_{2005}-B_3) = 0.262; \eta(A_{2005}-B_4) = 0.26; \eta(A_{2005}-B_5) = 0.215$$

2006 年:

$$\eta(A_{2006}-B_1) = -0.119; \eta(A_{2006}-B_2) = 0.1425; \eta(A_{2006}-B_3) = 0.309; \eta(A_{2006}-B_4) = 0.26; \eta(A_{2006}-B_5) = 0.119$$

4 喀斯特生态景观综合诊断结果及分析

根据大数原则^[16], 2003-2006 年联系数分别取 $\eta(A_{2003}-B_3) = 0.333; \eta(A_{2004}-B_3) = 0.3095; \eta(A_{2005}-B_3) = 0.26; \eta(A_{2006}-B_3) = 0.309$ 。

依据以上计算的联系数, 仅从数值归类, 2003-2006 年毕节地区生态景观处于中度退化、中度退化、轻退化、中度退化 4 个阶段。从图 1 看出, 2003-2006 年各年毕节地区生态系统退化状态基本上都处于第 3 阶段和第 4 阶段的过渡区域, 即处于中度退化和轻度退化的过渡阶段, 强退化、中退化和轻退化的总趋势远远大于微退化的比率, 整体不容乐观。但从图 1 看出, 2003-2005 年极强退化、强退化、中退化 3 个阶段都存在缓慢减少趋势, 轻退化和微退化的比例在缓慢增加。说明前期毕节地区生态治理(石漠化治理)的成效开始显现, 毕节地区的生态效益向着好的方向发展。2005-2006 年在极强退化、强退化、中退化阶段出现明显的增加趋势, 其主要原因是 2005-2006 年, 贵州省出现干旱灾害(2005 年秋季至 2006 年冬季, 西南大部分地区持续少雨, 一度出现了较严重的秋冬连旱, 2006 年夏季, 重庆、四川、贵州部分地区降水持续偏少, 并遭受罕见高温热浪袭击, 出现特大伏旱), 加剧了喀斯特地区生态景观的退化。

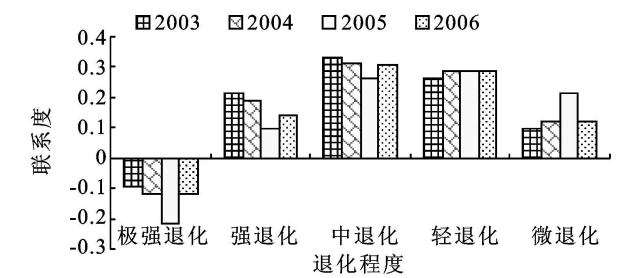


图 1 毕节地区生态景观退化诊断

5 结论

(1) 从生态景观的结构退化、功能退化和环境污染等 3 个方面选择了 21 个评价指标, 组成喀斯特地区生态景观退化评价诊断指标体系。

(2) 依据已有标准, 结合喀斯特地区的特点, 制订了喀斯特地区的生态景观退化诊断的分级标准。

(3) 依据诊断指标体系和评价标准, 借助集对分析方法, 以毕节试验区为例, 分析得出毕节地区 2003-2006 年的各年毕节地区生态系统退化状态基本上都处于第 3 阶段和第 4 阶段的过渡区域, 即处于中度退化和轻度退化的过渡阶段。

(4) 由以上确定的喀斯特生态景观退化诊断指标体系和诊断标准, 借助集对分析方法得出的毕节试验区喀斯特景观退化状况, 与该地区已有的喀斯特生态系统健康评价研究^[14-15], 可以相互印证。因此, 本研究确定的生态景观退化诊断指标体系、诊断标准以及诊断方法具有一定的科学意义。

由于收集数据和经费有限原因, 本研究在研究退化生态景观退化诊断评价时是以县为单位划分的, 尺度相对较大, 但也具有一定的参考和借鉴以及研究价值, 以后应进一步以此为基础, 进行研究, 将喀斯特退化生态系统的评价范围进一步缩小, 以群落、小流域为单位, 或者是借助遥感和 GIS 的图像叠加合成技术, 以各生态景观退化指标的栅格数据图(如石漠化分布图、植被类型分布图等), 通过叠加分析, 来确定贵州省喀斯特退化生态景观的等级类型和范围, 将会是具有重要的科研和生态修复实践的指导意义。

参考文献:

[1] 肖笃宁, 赵弈. 沈阳西郊景观格局变化研究: 景观生态学原理、方法与应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1991: 16-195.

[2] 孔达, 龚文峰. 基于 GIS 的帽儿山景观生态综合评价[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 139-145.

[3] 何艳芬, 张柏, 马超群, 等. 东北黑土区农业生态景观格局及变化研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 200, 3(5): 37-42.

[4] 宁龙梅, 王学雷, 吴后建. 武汉市湿地景观格局变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 44-50.

[5] 朱闻博, 胡仁贵, 洪忠. 深圳市河道水环境综合治理的典型实例: 新洲河生态景观改造[J]. 中国农村水利水电, 2006(9): 2-3.

[6] 姜艳, 尹光天, 孙冰. 我国森林景观生态研究进展[J]. 生态科学, 200, 27(4): 23-2.

[7] 黄俊芳, 王让会, 师庆东. 基于 RS 与 GIS 的三工河流域生态景观格局分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(1): 33-3.

[8] 杨瑞卿, 肖扬, 马占元. 徐州市云龙山侧柏纯林生态景观优化[J]. 徐州工程学院学报, 2007, 22(10): 6-73.

[9] 侯湖平, 张绍良, 闫艳. 基于 RS, GIS 的徐州城北矿区生态景观修复研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 504-509.

[10] 常学礼, 吕世海, 叶生星. 辉河湿地自然保护区生态系统健康评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9): 1905-1910.

[11] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 572-57.

[12] 李阳兵, 王世杰, 谢德体. 西南岩溶山区景观生态特征与景观生态建设[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 702-706.

[13] 曹欢, 苏维词. 喀斯特生态系统健康评价方法比较研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(1): 13-1.

[14] 曹欢, 苏维词. 基于模糊数学综合评价法的喀斯特生态系统健康评价[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 14-153.

[15] 曹欢, 苏维词, 范新瑞. 浅析喀斯特生态系统健康影响因素及评价指标: 以毕节地区为例[J]. 环境科学与管理, 200, 33(10): 142-14.

[16] 王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

(上接第 10 页)

[7] 张金池, 李海东, 林杰, 等. 基于小流域尺度的土壤可蚀性 K 值空间变异[J]. 生态学报, 200, 2(5): 2019-2206.

[8] 吕喜玺, 沈荣明. 土壤可蚀性因子 K 值的初步研究[J]. 水土保持学报, 1992, 9(1): 63-70.

[9] 蔡永明, 张科利, 李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 511-517.

[10] 刘宝元, 史培军. WEPP 水蚀预报流域模型[J]. 水土保持通报, 199, (5): 7-13.

[11] 安培浚, 刘树林, 颀耀文, 等. 植被指数遥感定量研究: 以民勤绿洲为例[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(6):

574-50.

[12] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1-9.

[13] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62-6.

[14] 张永新. 吉林省水土流失现状分析及防治对策[D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[15] 徐清艳, 周跃. 基于 GIS 和 USLE 的土壤侵蚀预测研究: 以云南新平大红山铁矿为例[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 72-75.