

# 黄土高原典型流域生态环境脆弱性的集对分析

张 鑫,杜朝阳,蔡焕杰

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**生态脆弱性评价可为生态脆弱流域生态经济系统的恢复与重建提供重要的依据。在分析影响该流域生态脆弱性因素的基础上,从成因和表现结果两个方面构建了佳芦河流域生态脆弱性评价指标体系,并将人口素质等人文信息纳入生态脆弱性指标体系。利用集对分析方法对佳芦河流域生态脆弱性进行了评价,结果表明:当  $i=0$  时,联系度  $\mu(A, B_I)$  最大,为 0.5,说明该流域的生态脆弱性处于高度脆弱状态;当  $i=(a-c)/(a+c)$  时,无论  $a, c$  取何值,  $\mu(A, B_{II})$  恒为 1,采用级间比较进行评价,因为  $\mu(A, B_I)$  比  $\mu(A, B_{III})$  更为接近  $\mu(A, B_{II})$ ,表明佳芦河流域生态处于 I ~ II 之间,该流域生态处于比较高的脆弱状态。集对分析法以联系度为核心,在处理不确定性问题时,具有计算方便、方法简单,评判结果客观、合理等特点,为流域生态脆弱性综合评价提供了一种新的途径。

**关键词:**黄土高原;集对分析;流域;生态脆弱性

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)04-0096-04

## Assessment of Ecological Vulnerability Based on Set Pair Analysis in Typical Loess Plateau Watershed

ZHANG Xin, DU Chao-yang, CAI Huan-jie

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** An important basis is provided ecological vulnerability assessment for ecologically fragile watershed ecosystem economic systems restoration and reconstruction. Based on an analysis of the Impact factors on the ecological vulnerability in the basin, an ecological fragility assement index system is built to consider the causes and the results of manifestations in JiaLu river basin, and the quality of the population and other cultural information is contained in the index system of ecological fragility. The set pair analysis method is utilized to evaluate the ecological vulnerability in contrast to the first method in JiaLu River basin. The results show that: when  $i=0$ ,  $\mu(A, B_I)$  of the largest connection degree is equal to 0.5, indicating the ecological vulnerability of the basin is highly vulnerable state; when  $i=(a-c)/(a+c)$ , whether  $a, c$  take what the value,  $\mu(A, B_{II})$  as a constant, using inter-stage evaluation of comparison, the value of  $\mu(A, B_I)$  than the  $\mu(A, B_{III})$  closer to  $\mu(A, B_{II})$ , the ecological vulnerability that is in between I ~ II in JiaLu River Basin, at a relatively high vulnerability state. The Set Pair analysis is an calculation convenient method with simpleness and judge the results of objective, rational characteristics to compare with the first method, a new way is provided for a comprehensive assessment of watershed ecological vulnerability.

**Key words:** Loess plateau; set pair analysis; basin; ecological vulnerability

20 世纪 80 年代以来,随着生态学的发展,特别是景观生态学的兴起。脆弱生态环境领域的研究日趋活跃<sup>[1-3]</sup>。研究生态脆弱性的方法主要包括:模糊综合评判法<sup>[4-6]</sup>、EFI(Ecological Frangibility Index)法<sup>[7]</sup>、层次分析(AHP)法<sup>[8]</sup>、主成分分析法<sup>[9]</sup>、基于

RS 与 GIS 的评价方法<sup>[10]</sup>、物元模型<sup>[11]</sup>等。生态脆弱性是指生态环境受到外界干扰作用超出自身调节范围而表现出对干扰的敏感程度,其脆弱性由自然的系统内部演变和人类活动所引起的,也就是它是自然系统和人文系统共同作用的结果。但是目前针对人

收稿日期:2010-02-25

资助项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(14110209);国家重大科技支撑项目(10712);西北农林科技大学博士科研启动基金(01140504);西北农林科技大学科研专项(08080230)

作者简介:张鑫(1968—),男,河南浙川人,博士,副教授,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:zhxin@nwsuaf.edu.cn

文系统的脆弱性研究还不够深入,如脆弱性的因果结构、贫困与人文脆弱性的关系等也还需要深入探讨<sup>[12]</sup>。生态脆弱性研究具有很强的地域性和综合性,本文在构建流域包含人文因素的生态脆弱性评价指标体系的基础上,利用基于集对分析方法对生态脆弱性进行评价,探讨流域生态脆弱性评价的新思路。

1 研究区概况

选择黄河的一级支流佳芦河流域作为研究区。该流域地处毛乌素沙漠南缘,陕北黄土高原北端,发源于陕西榆林市榆阳区双山乡断桥村,由西北向东南,至佳县佳芦镇木厂湾村注入黄河,地理坐标为东经 109°59′10″—110°30′00″,北纬 37°59′18″—38°28′25″,流域面积 1 134 km<sup>2</sup>,水土流失面积高达 1 125 km<sup>2</sup>。流域西北部属片沙丘陵区,东南部为土石丘陵区,中南部为黄土丘陵区。流域多年平均气温 10℃,多年平均降雨量 395 mm,年际变化大,年内分布不均匀且多暴雨,主要集中在 7—9 月,汛期降雨量占到年降雨量的 63.8%。佳芦河多年平均流量 2.85 m<sup>3</sup>/s,

平均含沙量 168.5 kg/m<sup>3</sup>,年输沙量 1 410 万 t,其中 7—9 月输沙量 1 238 万 t,占年总输沙量的 87.8%,输沙量中大于 0.05 mm 的粗沙占 57.2%。流域自然植被很少,主要为人工林草,生态环境比较脆弱。佳芦河流域包括榆林市榆阳区和佳县的 11 个乡镇,206 个行政村,14.8 万人,人口密度为 131 人/km<sup>2</sup>,其中农业人口 13.3 万人。2005 年流域共完成国内生产总值 4.72 亿元,人均 GDP 3 185 元,第一、第二、第三产业增加值分别为:3.03 亿元、0.17 万元、1.52 亿元,一、二、三产业增加值之比为:64:4:32。

2 生态脆弱性指标体系

依据目的性、代表性、整体性、科学性和可操作性的原则,结合佳芦河流域的现状,构建佳芦河流域生态脆弱性的评价指标体系。以自然环境因素为主,综合考虑人类活动因素,兼顾指标的可操作性和可比性,最终选取了 14 项指标作为该流域本次生态脆弱性评价指标体系,对该流域生态脆弱性进行分析和综合评价(见表 1)。

表 1 佳芦河流域生态脆弱性评价指标

一级指标	二级指标	三级指标项	计算方法	与脆弱性关系
主要成因 指标(A <sub>1</sub> )	自然成因 指标(B <sub>1</sub> )	每平方公里水资源总量(C <sub>1</sub> )	C <sub>1</sub> =水资源总量/总面积	负相关
		干燥度(C <sub>2</sub> )	C <sub>2</sub> =0.16∑T(T≥10℃/R)	正相关
		地表植被覆盖度(C <sub>3</sub> )	C <sub>3</sub> =植被面积/土地总面积×100%	负相关
		水土流失率(C <sub>4</sub> )	C <sub>4</sub> =土地流失总面积/土地总面积×100%	正相关
	社会成因 指标(B <sub>2</sub> )	垦殖率(C <sub>5</sub> )	C <sub>5</sub> =土地垦殖面积/总土地面积	正相关
		人口密度(C <sub>6</sub> )	C <sub>6</sub> =居住人口数量/区域面积	正相关
		人口自然增长率(C <sub>7</sub> )	C <sub>7</sub> =人口出生率-人口死亡率	正相关
结果表现 指标(A <sub>2</sub> )	经济发展 水平指标 (B <sub>3</sub> )	人均 GDP(C <sub>8</sub> )	C <sub>8</sub> =该地区 GDP 总值/该地区总人口数	负相关
		人均工业产值(C <sub>9</sub> )	C <sub>9</sub> =总工业产值/工业人口	负相关
		人均粮食产量(C <sub>10</sub> )	C <sub>10</sub> =该地区总粮食产量/总人口	负相关
		农民人均纯收入(C <sub>11</sub> )	C <sub>11</sub> =(农民的收入-支出)/农业人口	负相关
	社会发展 水平指标 (B <sub>4</sub> )	城镇化率(C <sub>12</sub> )	C <sub>12</sub> =城镇人口/总人口数	负相关
		人口素质(C <sub>13</sub> )	C <sub>13</sub> =用 15 岁以上人口高中入学率表示	负相关
		贫困率(C <sub>14</sub> )	C <sub>14</sub> =地区贫困人口数/总人口数	正相关

由于国内外均无统一的生态脆弱性及其相关指标的评价标准,根据全国、陕西省、榆林市等各类指标的取值范围,参照该流域规划以及咨询专家意见后形成如下评价指标标准取值范围,并进行灰类划分,分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类,其类别级数越小,表示脆弱性的程度越大:Ⅰ表示高度脆弱、Ⅱ表示中度脆弱、Ⅲ表示低度脆弱。

3 评价方法

由赵克勤于 1989 年提出的集对分析法<sup>[14]</sup>(Set Pair Analysis, SPA)的核心思想是对不确定性系统中的两个有关联的集合构造为集对,对集对的某特性

做同一性、差异性、对立性分析,然后建立集对的同异反联系度。

根据所讨论问题需要对集合 A(x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, ..., x<sub>N</sub>)和集合 B(y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>, ..., y<sub>N</sub>)所组成的集对 H=(A, B)展开分析。共得到 N 个特性,其中有 S 个特性为 A、B 所共有, P 个特性相对立,其余 F=N-S-P 个相异,一般称:S/N 为集合 A 与集合 B 在所论问题下的同一度,简记为 a; F/N 为集合 A 与集合 B 在所论问题下的差异度,简记为 b; P/N 为集合 A 与集合 B 在所论问题下的对立度,简记为 c。为全面刻画两个集合 A、B 总的联系状况,用联系度 μ(A, B)表示如式(1)。

$$\mu(A, B) = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + ci; a + b + c = 1 \tag{1}$$

式中： $i$ ——差异度系数； $j$ ——对立系数。

表 2 佳芦河流域生态脆弱性评价标准

指标项	I (高度脆弱)	II (中度脆弱)	III (低度脆弱)
$C_1/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	<4	4~10	>10
$C_2$	>4	4~1.5	<1.5
$C_3/\%$	<35	35~50	>50
$C_4/\%$	>70	70~40	<40
$C_5/\%$	>15	15~10	<10
$C_6/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	>100	100~60	<60
$C_7/\%$	>10	10~6	<6
$C_8/\text{元}$	<2500	2500~3500	>3500
$C_9/\text{元}$	<1000	1000~2000	>2000
$C_{10}/(\text{kg}/\text{人})$	<400	400~500	>500
$C_{11}/\text{元}$	<1500	1500~2000	>2000
$C_{12}/\%$	<16	16~25	>25
$C_{13}/\%$	<70	70~80	>80
$C_{14}/\%$	>20	20~10	<10

将集对分析方法应用于生态脆弱性综合评价。将评价流域各项定量指标组成一个集合；将佳芦流域

表 3 2005 年佳芦河流域生态脆弱性评价指标值

指标	$C_1/$ ( $\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ )	$C_2$	$C_3/$ %	$C_4/$ %	$C_5/$ %	$C_6/$ ( $\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$ )	$C_7/$ %	$C_8/$ 元	$C_9/$ 元	$C_{10}/$ ( $\text{人} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$C_{11}/$ %	$C_{12}/$ %	$C_{13}/$ %	$C_{14}/$ %
	7.38	1.82	48.10	89.10	17.02	131	6.1	3189	1360	535.3	1320	10.10	65	29.50

根据佳芦河流域各指标 2005 年的具体数据与指标标准值，根据公式(1)可以得到：

①在  $\mu(A, B_I)$  中  $S=8, F=5, P=1$

$$\begin{aligned} \text{所以 } \mu(A, B_I) &= a_{B_I} + b_{B_I}i + c_{B_I}j = \frac{8}{14} + \frac{5}{14}i + \frac{1}{14}j \\ &= 0.571 + 0.357i + 0.071j \end{aligned}$$

②在  $\mu(A, B_{II})$  中  $S=5, F=9, P=0$

$$\begin{aligned} \text{所以 } \mu(A, B_{II}) &= a_{B_{II}} + b_{B_{II}}i + c_{B_{II}}j = \frac{5}{14} + \frac{9}{14}i + \frac{0}{14}j \\ &= 0.357 + 0.643i \end{aligned}$$

③在  $\mu(A, B_{III})$  中  $S=1, F=5, P=8$

$$\begin{aligned} \text{所以 } \mu(A, B_{III}) &= a_{B_{III}} + b_{B_{III}}i + c_{B_{III}}j = \frac{1}{14} + \frac{5}{14}i + \frac{8}{14}j \\ &= 0.071 + 0.357i + 0.571j \end{aligned}$$

据集对分析原理， $j=-1$ ，因此  $\mu$  的计算关键是  $i$  如何取值。理论上  $i$  在  $[-1, 1]$ ，实际上，不同角度、不同性质问题和不同观点均影响  $i$  取值。目前有几种取值方法<sup>[1]</sup>。另外还有一种比例法，结合本文所研究的问题，选  $i=0$  和  $i=(a-c)/(a+c)$  两种情况，第一种情况是在计算  $\mu$  值时不考虑相异部分，主要计及起关键作用的“同”和“反”部分。第二种情况是考虑将相异部分按同与反所占的比例分配到同和异的部

生态环境脆弱性标准相应指标组成另外一个集合。这两个集合构成一个集对。设相应Ⅰ级标准的集合为  $B_I$ ，相应Ⅱ级标准的集合为  $B_{II}$ ，相应Ⅲ级标准的集合为  $B_{III}$ ；同时设评价地区的集合为  $A$ ，这样在流域生态脆弱性评价指标特性上以联系度  $\mu(A, B_I)$  表示评价地区和Ⅰ级标准的关系；以联系度  $\mu(A, B_{II})$  表示评价地区和Ⅱ级标准的关系；以联系度  $\mu(A, B_{III})$  表示评价地区和Ⅲ级标准的关系；在评价过程中，如要比较集合  $A$  是接近集合  $B_I$  或  $B_{II}$  或  $B_{III}$ ，只要比较联系度  $\mu(A, B_I)$ 、 $\mu(A, B_{II})$  和  $\mu(A, B_{III})$  三者的大小便可确定。若  $\mu(A, B_I) > \mu(A, B_{II})$ ，则  $A$  就评价为接近  $B_I$  集合。

## 4 结果分析

确定的联系度实际运算中要考虑同异反的判别标准。本文采取的判别标准是：当评价因子处于级别范围内时认为是同一(S)；当评价因子处于相隔的标准级别中，认为是对立(P)；当评价因子处于相邻的标准级别中，则认为是异(F)<sup>[15]</sup>。

2005 年佳芦河流域生态脆弱性评价指标的具体值见表 3。

分。根据这些原则计算不同评价指标因子对佳芦流域生态脆弱性综合评价标准集合的联系度。见表 4。

表 4 联系度  $\mu$  的计算

$\mu$ 的计算式	$i=0$ 时的 $\mu$	$i=\frac{a-c}{a+c}$ 时的 $\mu$
$\mu(A, B_I) = 0.571 + 0.357i + 0.071j$	0.500	0.778
$\mu(A, B_{II}) = 0.357 + 0.643i$	0.357	1.000
$\mu(A, B_{III}) = 0.071 + 0.357i + 0.571j$	-0.500	-0.778

由集对分析计算得到联系度

①  $i=0$  时， $\mu(A, B_I) = 0.5, \mu(A, B_{II}) = 0.357, \mu(A, B_{III}) = -0.5$

得  $\mu(A, B_I) > \mu(A, B_{II}) > \mu(A, B_{III})$

得出  $\mu(A, B_I)$  为最大表明佳芦河流域的生态指标特征值与Ⅰ级评价标准接近，即该流域的生态脆弱性处于高度脆弱状态。

②  $i=\frac{a-c}{a+c}$  时， $\mu(A, B_I) = 0.778, \mu(A, B_{II}) = 1, \mu(A, B_{III}) = -0.778$

得  $\mu(A, B_{II}) > \mu(A, B_I) > \mu(A, B_{III})$

由于  $i$  这样取值时，无论  $a、c$  取何值  $\mu(A, B_{II})$  恒为 1，所以采用级间比较进行评价。因为  $\mu(A,$

$B_I$ )比 $\mu(A, B_{III})$ 更为接近 $\mu(A, B_{II})$ ,表明佳芦河流域生态处于Ⅰ~Ⅱ之间,该流域生态处于比较高的脆弱区。

由以上结果看出不论差异度系数*i*取何值,各评价结果一致,佳芦河流域生态处于脆弱状态。

## 5 结 论

黄土高原是黄河泥沙的主要来源。佳芦河流域位于陕北黄土高原丘陵沟壑区,是多沙粗沙区,也是生态环境脆弱区。

(1)通过分析影响佳芦河流域生态脆弱性的因素,从成因和表现结果两个方面构建了佳芦河流域生态脆弱性评价指标体系,并将人口素质等人文信息纳入生态脆弱性指标体系。

(2)利用集对分析方法对佳芦河流域生态脆弱性进行了评价。结果表明:当*i*=0时,联系度 $\mu(A, B_I)$ 最大,为0.5,说明该流域的生态脆弱性处于高度脆弱状态;当*i*=(*a*-*c*)/(*a*+*c*)时,无论*a*、*c*取何值 $\mu(A, B_{II})$ 恒为1,采用级间比较进行评价,因为 $\mu(A, B_I)$ 比 $\mu(A, B_{III})$ 更为接近 $\mu(A, B_{II})$ ,表明佳芦河流域生态处于Ⅰ~Ⅱ之间,该流域生态处于比较高的脆弱状态。

(3)将集对分析方法引入到流域生态脆弱性综合评价中,丰富和改进了流域生态脆弱性的评价理论和方法。集对分析法以联系度为核心,在处理不确定性问题时,具有计算方便、方法简单,评判结果客观、合理等特点;不足之处在于“集对”的数学本质、“联系度”的确定等理论问题仍需要进行更深入的研究,如差异度系数*i*和对立度系数*j*的取值问题等。

(上接第 95 页)

### 参考文献:

[1] 史志华,蔡崇法,王天巍,等.红壤丘陵区土地利用变化对土壤质量影响[J].长江流域资源与环境,2001,10(6):537-543.

[2] Fu B J, Chen L D, Ma K M, et al. The relationship between land use and soil conditions in the hilly area of Loess Plateau in northern Shanxi, China [J]. Catena,2000,39:69-78.

[3] 傅伯杰,陈利顶,马克明.黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响:以延安市羊圈沟流域为例[J].地

### 参考文献:

[1] 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.

[2] 常学礼,赵爱芬,李胜功.生态脆弱带的尺度与等级特征[J].中国沙漠,1999,19(2):115-119.

[3] 王让会,游先祥.西部干旱内陆河流域脆弱生态环境研究进展[J].地球科学进展,2000,16(1):39-44.

[4] 冯利华.生态环境脆弱度的模糊综合评判[J].国土开发与整治,1999(2):59-63.

[5] 王言荣,郝永红,刘洁.山西省生态环境脆弱性分析[J].中国水土保持,2004(12):16-18.

[6] 刘茹,张晶晶,雷蕾.岷江上游生态脆弱性的模糊评价[J].资源开发与市场,2006,22(6):500-501.

[7] 王让会,樊自会.塔里木河流域生态脆弱性评价研究[J].干旱环境监测,1998,12(4):39-44.

[8] 张祚,李江风,黄琳,等.基于 AHP 对生态脆弱性的灰色综合评价方法:以湖南省临湘市为例[J].资源开发与市场,2007,23(4):305-307.

[9] 冯利华,黄亦君.生态环境脆弱度的综合评价[J].热带地理,2003,23(2):102-114.

[10] 张红梅,沙晋明.基于 RS 与 GIS 的福州市生态环境脆弱性研究[J].自然灾害学报,2007,16(2):133-137.

[11] 张鑫,蔡焕杰,王化齐.民勤绿洲生态环境脆弱性模糊物元分析评价[J].干旱区农业研究,2009,27(1):195-199.

[12] 王小丹,钟祥浩.生态环境脆弱性概念的若干问题探讨[J].山地学报,2003,2(增刊):21-25.

[13] 张祚,李江风,黄琳,等.基于 AHP 对生态脆弱性的灰色综合评价方法研究:以湖南临湘市为例[J].资源环境与发展,2007(2):13-17.

[14] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000.

[15] 万星,周建中.岷江上游生态脆弱性综合评价的集对分析[J].中国农村水利水电,2006(12):33-35.

理学报,1999,54(3):241-246.

[4] Lal R, Mokma D, Lowery B. Relation between soil quality and erosion [C]//Rattan Lal. Soil quality and soil erosion. Washington D C: CRC Press, 1999: 237-258.

[5] Warkentin B P. The changing concept of soil quality [J]. J. Soil Water Cons, 1995, 50: 226-228.

[6] Crist P J, Thomas W K, John O. Assessing land-use impacts on biodiversity using an expert system tool [J]. Landscape Ecology, 2000, 15: 47-62.

[7] 宗树森.土地工作手册[M].北京:农村读物出版社.1987:12.