

# 基于 GIS 的区域水土流失生态风险评价

张志国<sup>1,2</sup>, 李锐<sup>1</sup>, 王国梁<sup>1</sup>

(11 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 21 中国科学院研究生院, 100049, 北京)

**摘要** 为了给区域尺度的水土流失治理、规划及评价提供科学的依据, 将生态风险评价的概念引入水土保持学科之中, 定义了区域水土流失生态风险评价的概念, 提出了评价的方法与步骤, 构建了区域水土流失生态风险评价模型框架, 并以延河流域为例进行了应用。结果表明: 延河中游及安塞县和宝塔区为优先治理区; 证明区域水土流失生态风险评价可以为政府水土保持管理决策提供参考。

**关键词** 风险; 生态风险; 区域

## Evaluation of regional ecological risk of soil erosion based on GIS

Zhang Zhiguo<sup>1, 2</sup>, Li Rui<sup>1</sup>, Wang Guoliang<sup>1</sup>

(11 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi; 21 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing: China)

**Abstract** In order to support the soil and water conservation, planning and the assessment of soil erosion, this paper introduced the concept of ecological risk into the research of water and soil conservation. In this article, we defined the regional ecological risk of soil erosion, and showed how to evaluate it, then built the framework of the evaluation. We had made a preliminary application in Yanhe River Basin. The results showed that the key controlling areas in Yanhe River Basin include the middle Yanhe River Basin, Ansai County and Baota district. Regional ecological risk of soil erosion can help the government to make the decision in soil and water conservation management.

**Key words** risk; ecological risk; region

生态风险评价是研究由于 1 个或多个因素作用使生态系统可能受到的不同程度的危害。生态风险评价研究起于 20 世纪 80 年代初, 在 90 年代基本形成, 是目前环境科学研究领域的热点。现在研究主要集中在重金属或洪涝干旱等自然灾害作为风险源的生态风险评价中<sup>[28]</sup>。水土流失是我国最大的生态环境问题, 对我国的生态安全有很大的影响。研究区域水土流失引发的生态风险, 并对其加以评价, 可以为政府决策提供参考, 并为区域水土流失风险管理提供依据。

### 1 区域水土流失生态风险及其评价方法

根据已有的研究<sup>[29]</sup>, 区域性的风险评价研究

主要集中在 2 个领域: 一是地震、滑坡、泥石流等自然灾害评估, 主要是研究自然灾害发生的概率、灾害强度的空间分布、可能造成的财产损失等直接经济损失和人员伤亡等间接经济损失, 这部分研究属于灾害学研究领域; 二是区域生态风险评价, 属于环境科学研究领域。区域水土流失生态风险评价研究来源于以上研究, 又有所不同。水土流失和地震等类似, 也属地质灾害的一种, 也有强度的分级, 但是它的突发性和瞬间破坏力明显弱于其他地质灾害, 对于群众的生命财产几乎难以造成危害。区域生态风险评价的风险源是多种的, 而区域水土流失生态风险评价的风险源只有水土流失 1 种, 但水土流失又是多种因素造成的, 它的形成有人为和自然的 2 种

收稿日期: 20070218 修回日期: 20070611

项目名称: 中国科学院水土保持研究所领域前沿项目/黄土高原丘陵沟壑区植被恢复过程及其土壤物理效益(SWO5502); 西北农林科技大学人才基金

第一作者简介: 张志国(1974), 男, 博士研究生。主要研究方向: GIS 在土壤侵蚀中的应用。E-mail: sxbertzzg@163.com

责任作者简介: 李锐(1946), 男, 研究员。主要研究方向: RS 与 GIS、区域水土保持与环境效应研究。E-mail: lirui@ms.iswc.

ac.cn

因素,所以它是多种风险源构成的风险源。

## 111 区域水土流失生态风险评价的概念及原理

11111 概念 参考现有的生态风险评价研究<sup>[3,5,8]</sup>,笔者把区域水土流失生态风险评价定义如下:某一特定区域内发生的水土流失对该区域生态系统可能造成的危害。

11112 评价原理 根据风险的定义,风险度量的基本公式<sup>[12]</sup>为

$$R = PD \quad (1)$$

式中:R为灾难或事故的风险;P为灾难或事故发生的概率;D为灾难或事故可能造成的损失。

根据风险度量的基本公式(1),可以用下式表示一个特定的灾害或事故x的风险:

$$R(x) = P(x)D(x) \quad (2)$$

那么,对于一组灾害或事故,它的风险可以表示为单个灾害或事故的风险之和,即

$$R(x_i) = \sum P(x_i)D(x_i) \quad (3)$$

在有些情况下,灾害或事故可能被认为是连续的作用,它的概率和影响都随x而变化,则这种风险是一种积分形式,可以表示为

$$R(x) = \int P(x)D(x)dx \quad (4)$$

根据式(1)~(4)以及区域水土流失生态风险评价的概念,得出区域水土流失生态风险评价的基本公式

$$R_L = P_L D_L \quad (5)$$

式中:R<sub>L</sub>为区域水土流失生态风险指数;P<sub>L</sub>为土壤侵蚀危害性指数;D<sub>L</sub>为潜在生态损失指数。

## 112 区域水土流失生态风险的评价步骤和方法

参照环境风险评价的步骤和水土流失自身的特点<sup>[2,45,7]</sup>,将区域水土流失生态风险评价分成以下4个步骤:1)研究区界定及背景分析;2)水土流失危害力评价;3)区域景观潜在生态损失度量;4)区域水土流失生态风险综合评价。

11211 研究区背景分析与评价单元划分 评价一个区域的水土流失引发的生态风险,首先要确定评价区域的地理位置和面积,对评价区域的地质地貌、气候、土壤、植被、土地利用、景观特点和经济社会等背景有一个全面准确的掌握,为研究区风险评价中的各种分析提供坚实的基础和可靠的依据。

一个区域是由不同景观单元组成的,这些景观单元就是进行区域水土流失生态风险评价的单元。所谓景观,就是一个由不同土地单元镶嵌组成,具有明显视觉特征的地理实体,处于生态系统之上、大地理区域之下的中间尺度,兼具经济、生态和文化的多

重价值。肖笃宁等<sup>[13]</sup>总结了目前景观分类的原则和命名方法,提出了景观分类要点。根据景观分类的原则,具体到研究区,再考虑地貌、植被、土地利用等实际情况,科学划分区域的景观类型。对于区域景观分类,最好是使用遥感调查的方法,同时结合野外抽样调查方法。

11212 研究区水土流失危害力评价 水土流失评价主要是根据区域的实际状况,分析当地影响水土流失的因子,研究区域水土流失危害力的大小及其空间分布。笔者利用已有的土壤侵蚀预报模型,如WEPP、RUSLE等,使用RS和GIS技术计算出土壤侵蚀强度后,根据侵蚀模数消除量纲,得到1个量纲为1、大小在[0,1]之间的数值,即水土流失危害力指数P<sub>L</sub>,用以表示水土流失危害力的强弱。

11213 研究区景观潜在生态损失度量 水土流失会带来许多危害,比如会减少土层,降低土壤肥力和持水能力,使土壤质地变糙,降低作物产量,带走植物种子,影响生物多样性,淤积河道库坝,增加洪涝危险等。用潜在生态损失指数D<sub>L</sub>表示景观可能受到的损失,它是该生态系统景观重要性指数E和景观易损性指数F的乘积。景观重要性指数E表示生态系统的生态意义和地位,景观易损性指数F表示生态系统的易损性。

系统越稳定,在受到外来干扰或胁迫时,越不容易受到损害。相反地,系统越脆弱,在受到外力的侵害时,越容易受到危害。虽然生态脆弱性提法很多,但这方面的研究相对并不充分,并没有合适的评价指标;所以,采用专家打分法对景观的4个指标,即生物多样性、土壤质量、主要物种抗逆性、负熵(人为管理)进行评价,然后计算景观易损性指数,对景观的脆弱性进行评价。

由景观重要性指数E和景观易损性指数F可以计算潜在生态损失指数

$$D_{Lj} = E_j F_j \quad (6)$$

式中j表示第j小区。

11214 研究区水土流失生态风险综合评价 区域研究通常都是把研究区按照一定的原则和方法划分成若干评价小区,然后对每一个评价单元分别进行分析研究,最后综合在一起,得到总的结论。区域水土流失生态风险评价中,小区的划分要遵循以下原则:风险源一致性原则,即同一小区的潜在土壤侵蚀强度要相同;完整性原则,即划分小区时,要保证景观类型的完整性。

划分小区后,利用式(5)和式(6)计算第j小区的生态风险值

$$R_{Lj} = P_{Lj} E_j F_j \quad (7)$$

得出各个小区的生态风险值后,通过聚类分析,合并同级小区,将研究区分成不同的等级,对整个区域做综合评价。

## 2 延河流域水土流失生态风险评价

### 2.1 研究区概况

延河流域地处陕西北部, E 108°39'42"~ 110°30', N 36°10'40"~ 37°19'41", 位于黄土高原丘陵沟壑区第 2 副区。延河流域属大陆性温和半湿润气候, 多年平均降雨量 500~ 565 mm, 年内降雨主要集中在 6) 9 月。流域内主要土类为黄土性土。延河流域植被区划属森林草原地带, 历史上曾经林密草盛, 由于人类的破坏和不合理利用, 现在形成了以干旱草本植物占优势的植被群落。延河流域地形破碎, 起伏剧烈, 属于多沙粗沙极强度侵蚀区, 流域水土流失面积达 6 423 103 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的 88.19%, 平均土壤侵蚀模数为 8 000~ 15 000 t/(km<sup>2</sup>·a)。

### 2.1.2 研究区水土流失生态风险评价

2.1.2.1 数据来源 主要数据来源于延河流域土壤类型分布图、土地利用图、降雨资料、1B5 万 DEM 和 2000 年 ETM+ 影像。主要处理软件为 ArcGIS 9.10 和 ERDAS 8.17。

2.1.2.2 评价过程 具体数据处理过程如下。

1) 延河流域景观分类。用 ERDAS 8.17 解译 ETM+ 影像, 同时参照土地利用图, 将延河流域主要景观分为耕地、林地和草地。由于居民地、交通建设用地和水体面积较小, 忽略不计。

2) 水土流失危害力指数  $P_L$  的计算。首先根据通用土壤流失方程(USLE) 计算延河流域水土流失侵蚀模数。

降雨侵蚀力因子: 标定各气象站的位置, 根据章文波等<sup>[14]</sup> 提出的利用日雨量计算降雨侵蚀力公式和气象资料计算各站点的降雨侵蚀力, 然后在 ArcMAP 中进行克力格插值处理, 得到流域不同月份和全年的降雨侵蚀力的空间分布图。

土壤可蚀性因子: 延河流域主要土壤类型是黄绵土, 根据黄绵土的性质<sup>[15]</sup>, 按照 EPIC 模型计算出土壤可蚀性, 最后在 ArcMAP 中制图。

植被覆盖度因子: 将 ETM+ 影像用 ERDAS 软件处理, 得到归一化植被指数  $I$ , 然后利用欧洲土壤局提出的公式计算  $C$ , 即

$$C = \exp\left[-A \frac{I}{B-I}\right] \quad (8)$$

式中:  $A$ 、 $B$  为决定 NDVI  $C$  曲线形状的参数;  $A=2$ ,  $B=1$ 。得到  $C$  值后, 将该结果图转换成 Grid 格式。

在 ArcMAP 中出图。

地形因子 (LS): 在 ArcMAP 中输入 1B5 万的 DEM (栅格大小为 25 m @ 25 m), 提取坡度和坡长, 坡度和坡长图获取后, 用 USLE 模型 LS 定义公式计算得到 LS 值分布图, 然后计算出 LS 值, 输出 LS 图层。

水土保持因子: 研究中暂时不考虑水土保持措施, 所以把该值定为 1。

侵蚀模数计算: 根据通用水土流失方程 (USLE), 在 ArcMAP 中使用空间分析模块将以上各图层在空间上相乘, 就得到了延河流域土壤侵蚀的空间分布图。

根据水利部颁布的 SL 190219965 侵蚀强度分级标准<sup>6</sup>, 侵蚀模数大于 1 万 5 000 t/(km<sup>2</sup>·a) 的都是剧烈侵蚀, 故规定侵蚀模数大于 1 万 5 000 t/(km<sup>2</sup>·a) 的, 其侵蚀危害力指数为 1, 同时将其他侵蚀模数都除以 1 万 5 000 t/(km<sup>2</sup>·a), 消除量纲, 得到水土流失危害力指数。

3) 景观重要性指数  $E$  的计算。根据延河流域实际情况, 选用了有机质生产、气体调节、净化大气、土壤保持、涵养水源和栖息地 6 项生态系统服务功能作为流域景观的生态系统服务功能, 参照生态系统服务功能计算方法, 进行专家打分, 得到每项生态系统服务功能的分值后, 求和, 然后标准化得到  $E$  值 (表 1) 及其图层。

表 1 延河流域景观重要性指数

Tab. 1 Importance index of landscape in Yanhe River Basin

景观	有机质生产	气体调节	净化大气	土壤保持	涵养水源	栖息地	重要性指数
耕地	0.1	0.1	0.1	0	0	0.1	0.093
林地	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.498
草地	0.4	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.409

4) 景观易损性指数  $F$  的计算。采用专家打分法对景观 4 个指标, 即生物多样性、土壤质量、主要物种抗逆性、负熵 (人为管理) 进行评价, 分别给出分值, 然后进行标准化处理后得到  $F$  值 (表 2)。

表 2 延河流域景观易损性指数

Tab. 2 Vulnerability index of landscape in Yanhe River Basin

景观	生物多样性	土壤质量	主要物种抗逆性	负熵	易损性指数
耕地	0.4	0.3	0.4	0	0.349
草地	0.2	0.3	0.2	0.3	0.333
林地	0.1	0.1	0.1	0.3	0.318

5) 区域水土流失生态风险指数  $R_L$  的计算。用

ArcGIS 910 先将水土流失危害力指数图、景观重要性指数图和景观易损性指数图3个图层进行投影坐标和栅格大小的统一,然后利用式(7),再对这3个经过处理的图层用空间分析模块进行运算,得到延河流域水土流失生态风险指数图。由于水土流失生态风险指数都是小数,为了计算和在 ArcMAP 中运算方便,且不影响最终的分级结果,将这些小数统一放大1000倍。最后分析数据,计算得出划分3级时的分级点值分别为33133和66166,利用 ArcGIS 的分类功能将其分为3级(图1)。

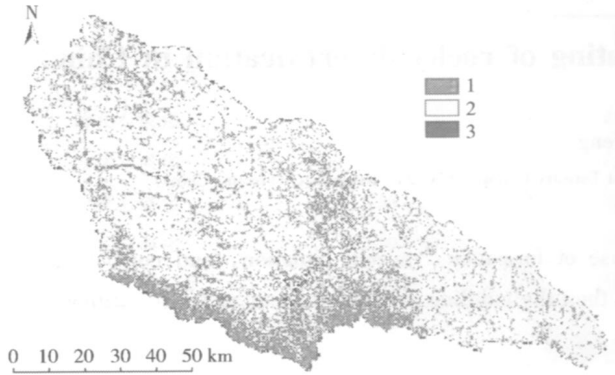


图1 延河流域水土流失生态风险分级图

Fig. 1 Ecological risk classification of soil erosion in Yanhe River Basin

### 213 结果分析

从延河流域水土流失风险分级图可以看出,延河流域水土流失生态风险级别大多集中在一级上,说明延河流域内部的风险级别差异不大,此处特别需要注意的是,由于结果是相对的,是区域内部相比较而言的,延河流域风险级别大多在一级并不是在全国范围内它的风险级别就是低的。延河流域南部林区和蟠龙川流域的风险级别基本都是一级,延河中游二、三级较多,安塞县和宝塔区二、三级风险面积较大,说明从流域尺度出发,延河中游是应该优先治理的地区,从行政区划上看,安塞县和宝塔区应该是优先治理的区域。研究结果基本符合延河流域实际情况,说明区域水土流失生态风险评价的框架基本正确。

### 3 结语

从延河流域水土流失生态风险评价的结果,可以看出,区域水土流失生态风险评价方法可行,但仍需要做很大的改进。通过区域水土流失生态风险评价的研究,可以为区域水土保持规划的科学合理性提供一定参考。

由于是初步研究,所以目前还存在许多问题。

1) 研究中给出的评价结果是相对的,即所得的区域水土流失生态风险评价等级只是在区域内相对而言的,并无绝对的意义,因此和研究区外的评价结果亦无可比性。

2) 区域问题研究就有可能出现尺度效应问题。尺度不同,则景观类型不同,景观重要性和易损性评价指标也各不相同。

3) 水土流失危害机制和模型是区域水土流失生态风险评价的关键,但是目前的研究只是零星的、不完整和不系统的,这就造成了评价的困难性,也是目前采用相对评价方法进行评价的根本原因。

4) 未考虑基于风险评价的风险管理。风险评价是为了风险管理,在进行完风险评价后,就应该依据风险评价的结果进行风险管理。

### 4 参考文献

- [1] 顾镜清. 风险管理. 北京: 中国国际广播出版社, 1993
- [2] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2000
- [3] 毛小苓, 刘阳生. 国内外环境风险评价研究进展. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(3): 2662273
- [4] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. 地球科学进展, 2001(4): 262271
- [5] EPA(美国环保署). Guidelines for ecological risk assessment EPA 630 R- 95- 002F. Washington, D C: USA Office of Water, 1998
- [6] 毛小苓, 倪晋仁. 生态风险评价研究述评. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(4): 646654
- [7] 付在毅, 许学工, 林辉平, 等. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价. 生态学报, 2004, 70(3): 252262
- [8] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 等. 生态风险评价进展. 生态学报, 2006, 26(5): 15521566
- [9] 汪晶. 风险评价技术的原理与进展. 环境科学, 1998, 19(2): 95-96
- [10] 黄崇福. 自然灾害风险评价: 理论与实践. 北京: 科学出版社, 2005
- [11] 周寅康. 自然灾害风险评价的初步研究. 自然灾害学报, 1995, 4(1): 6211
- [12] Smith K. Environmental Hazard: Assessing risk and reducing disaster. 2nd ed. New York: Routledge, 1996
- [13] 肖笃宁, 钟林生. 景观分类与评价的生态原则. 应用生态学报, 1998, 9(2): 212221
- [14] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. 地理科学, 2002, 22(6): 7052711
- [15] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土壤资源及其合理利用. 中国科学技术出版社, 1991

(责任编辑: 宋如华)