

# 南方崩岗侵蚀风险评估构想

程冬兵, 张平仓

(长江科学院 水土保持研究所, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** [目的] 探讨南方崩岗侵蚀风险评估构架, 为崩岗防治规划及分期治理提供科学依据。[方法] 通过引入风险评估的理念和方法, 结合崩岗发育研究进展, 参照生态环境、地质灾害等风险评估流程。[结果] 界定了崩岗侵蚀风险内涵, 拟定了崩岗侵蚀风险评估方法, 构建了崩岗侵蚀风险评估指标体系, 并提出了崩岗侵蚀风险评估程序。[结论] 风险评估为崩岗侵蚀乃至土壤侵蚀研究领域提供了一种新的理念和方法。

**关键词:** 崩岗侵蚀; 风险评估; 评估指标; 中国南方

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)04-0346-05

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 程冬兵, 张平仓. 南方崩岗侵蚀风险评估构想[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 346-350. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.059

## Conception of Risk Assessment of Collapse Gully Erosion in South China

CHENG Dongbing, ZHANG Pingcang

(Institute of Soil and Water Conservation, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** [Objective] Through exploring the framework of collapsed gully erosion risk assessment, to provide a scientific basis for prevention planning and staging control of collapse gully erosion in the South China. [Methods] The concept and methods of risk assessment, in combination with the research progress on the developing process of collapsed gully erosion were reviewed. Methods of risk assessment process was put forward with reference to the assessments of risk-labile ecological environment and geological disaster. [Results] Results in this paper included defining the connotation of risk of collapsed gully erosion, proposing the risk assessment method of collapsed gully erosion, establishing the risk assessment index system of collapsed gully erosion, and putting forward the risk assessment procedures of collapsed gully erosion. [Conclusion] Risk assessment provided a new idea and method for the study on collapse gully erosion and soil erosion.

**Keywords:** collapse gully erosion; risk assessment; assessment index; the South China

崩岗侵蚀是中国南方水土流失的一种特殊类型, 尽管崩岗在水土流失面积中所占的比例不大, 但侵蚀模数巨大, 平均土壤侵蚀模数高达  $5.90 \times 10^4$  t/(km<sup>2</sup> · a), 是剧烈侵蚀的 4 倍, 且发展速度快, 具有突发性、长期性等特点, 危害十分严重<sup>[1-2]</sup>。由于崩岗侵蚀具有一定的地域性, 国外没有此类侵蚀, 极少见到国外与崩岗相关的研究报导。中国对崩岗侵蚀的研究始于 20 世纪 60 年代, 主要在崩岗分类、发展过程、形成机理和治理措施等方面开展了一些科研工作<sup>[3-11]</sup>, 为崩岗的防治提供了一定的理论指导。尽管近年来崩岗侵蚀受到社会广泛关注, 相关科研单位与学者也投入大量精力<sup>[12-19]</sup>, 但由于崩岗成因复杂, 研究手段有限, 崩

岗侵蚀过程与机理亟待深入剖析, 崩岗治理缺乏分类系统的科学指导, 治理措施单一零散, 治理进程缓慢, 在有些地方甚至仍呈加剧发展的状态, 迫切需要创新理念。风险评估起源于 20 世纪 30 年代, 20 世纪 80 年代发展较快, 历经约 30 a 的发展, 在评估内容、评价范围和评价方法等方面均有了极大的发展, 风险评估理论与方法日趋成熟, 在金融、能源、交通、防灾减灾等诸多行业中得到广泛应用<sup>[20-21]</sup>。风险评估为崩岗侵蚀乃至土壤侵蚀研究领域提供了一种新的理念和方法。20 世纪末, 国外有学者开始根据影响因子的重要程度, 分别赋予不同权重, 通过因子加权或加权平均, 根据风险值大小来判断区域土壤侵蚀风险。

收稿日期: 2015-08-13

修回日期: 2015-09-06

资助项目: 水利部公益性行业科研专项“崩岗侵蚀风险评估及分类防控关键技术研究”(201501047)

第一作者: 程冬兵(1979—), 男(汉族), 江西省乐平市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持、土壤水动力学研究。E-mail: xiao2005zhu@163.com。

如 Vrieling 等<sup>[22]</sup>在评估哥伦比亚东部平原上侵蚀风险时,在专家打分基础上确定地质、土壤、地貌、气候 4 个因子权重,最后通过加权平均得出各点位的潜在侵蚀风险。Angima, Lu 等<sup>[23-24]</sup>借助 GIS 和 RS 技术基于 RUSLE 分别评价了肯尼亚中部高原、巴西亚马逊地区的土壤侵蚀风险。Cohen 等利用 USLE 中 5 个因子在流域中的平均值将每个因子的原始值转化为相对危险度值,当此值小于 1 时表明低危险,大于 1 时则为高危险,然后运用对数回归模型来计算各因子权重,从而根据综合评分值将土壤侵蚀危险程度分为了 3 个等级,并绘制出整个研究区侵蚀危险度分布图<sup>[25]</sup>。

中国将风险评估技术引入土壤侵蚀领域相对较晚,且只有一些零星的报导。万军等<sup>[26]</sup>提出一种通过求取石漠化扩展速度,从而得到土壤抗蚀年限,对土壤侵蚀进行风险评价的方法。胡宝清等<sup>[27]</sup>引入地质灾害风险计算模式,认为喀斯特石漠化地区的土壤侵蚀灾害风险可通过建立 4 级风险评估指标体系,在利用层次分析法确定其权重的方法予以计算。也有学者采用水利部土壤侵蚀潜在危险度的分级方法,分别对土地利用方式、植被覆盖度和地形坡度等要素进行分级,进而计算研究区域的土壤侵蚀强度分级,以该分级结果来估计土壤侵蚀风险<sup>[28-32]</sup>。潘树林等<sup>[33]</sup>使用人口环境容量失衡度、年降雨量、植被覆盖度等 8 个指标对金沙江宜宾段进行计算土壤侵蚀风险。李晓松等<sup>[34]</sup>借鉴 USLE 的因子选择及综合方法,在遥感和 GIS 的支撑下对海河流域的水土流失风险进行评估,戴露莹<sup>[35]</sup>也采用类似的方法对东苕溪典型小流域的土壤侵蚀强度进行了估算评价,识别出土壤侵蚀的关键源区。张志国等<sup>[36]</sup>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。王文娟等<sup>[37]</sup>选择东北典型黑土区作为研究区,以 SPOT 5 影像为基础数据源获取了侵蚀沟分布数据,基于地形图数据提取了与沟蚀形成相关的 11 个地形因子,并构建 Logistic 模型,据此对研究区沟蚀发生风险进行了评价,进而进行了沟蚀发生风险分级评价研究。总体而言,风险评估技术在土壤侵蚀领域应用较少,且未见在崩岗侵蚀领域的应用报道。因此,本研究拟引入风险评估的理念和方法,探讨南方崩岗侵蚀风险评估构架,以期能达到抛砖引玉之效果,从而为崩岗防治规划及分期治理提供科学依据。

## 1 崩岗侵蚀风险内涵

关于“风险”的定义,不同的行业有不同的解释。

一般说来,风险是不确定性结果的一种度量<sup>[38]</sup>。参考现有的生态、环境、地质灾害等风险评估研究<sup>[39-44]</sup>,崩岗侵蚀风险内涵可分为狭义和广义两种,狭义的崩岗侵蚀风险仅指某一特定区域某一时段发生崩岗侵蚀的概率,简单说就是崩岗侵蚀发生的风险;而广义的崩岗侵蚀风险指某一特定区域某一时段发生崩岗侵蚀及造成危害的可能性,包括发生风险和危害风险。综合崩岗侵蚀研究现状及数据获取难易程度,本研究所指崩岗侵蚀风险侧重于发生风险,适当兼顾危害风险。

## 2 崩岗侵蚀风险评估原理

风险评估是指通过客观地认识到事物(或系统)存在的风险因素,评估这些因素导致的危险程度大小的过程,为采取合适的措施降低风险概率提供科学依据<sup>[38]</sup>。根据崩岗侵蚀风险内涵,崩岗侵蚀风险度量表示为:

$$P_i = P_{f,i} + P_{f,i} \cdot W_i \quad (1)$$

式中: $P_i$ ——某个栅格崩岗侵蚀风险值; $P_{f,i}$ ——某个栅格发生崩岗的概率; $W_i$ ——某个栅格崩岗侵蚀可能造成的危害风险权重。

参考目前国内外风险评估方法<sup>[39-44]</sup>, $P_{f,i}$ 拟采用 Logistic 模型,Logistic 模型是一种对二分类因变量(因变量取值有 1 或 0 两种可能)进行回归分析时经常采用的非线性分类统计方法<sup>[45]</sup>,该模型能对二值响应的因变量和分类自变量进行回归建模,根据建立的模式可对未知的每个栅格崩岗侵蚀可能发生的概率进行预测,进而依据发生概率大小进行风险评价,计算公式为:

$$P_{f,i} = \frac{\exp(a + b_1 x_{1,i} + b_2 x_{2,i} + \dots + b_n x_{n,i})}{1 + \exp(a + b_1 x_{1,i} + b_2 x_{2,i} + \dots + b_n x_{n,i})} \quad (2)$$

式中: $P_{f,i}$ ——每个栅格出现崩岗侵蚀的概率( $P_{f,i}$ 在 0~1 之间),即出现崩岗侵蚀的地方为 1,不出现崩岗侵蚀的地方为 0; $x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{n,i}$ ——崩岗侵蚀发生的  $n$  个影响因子; $a$ ——常数项; $b_i$ ——Logistic 的偏回归系数。

$W_i$  拟采用专家打分法,对某个栅格崩岗侵蚀可能对周边不同土地利用类型造成的危害风险赋予权重,界定 0~1 之间,总权重不大于 1。计算公式为:

$$W_i = \sum_{j=1}^m W_{i,j} \cdot S_j \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中: $W_i$ ——某个栅格崩岗侵蚀可能造成的危害风险权重(0~1 之间,总权重不大于 1); $S_j$ ——某个栅格中某种土地利用类型的面积比重; $j$ ——土地利用类型编号。

### 3 崩岗侵蚀风险评估程序

参考现有的生态、环境、地质灾害等风险评估流程<sup>[39-44]</sup>,同时结合崩岗侵蚀自身的特点,崩岗侵蚀风险评估可分为以下4个过程:(1)问题提出。明确存在的问题、风险评估目标、评估范围等;(2)风险分析。包括风险源识别,筛选风险评估指标;(3)风险表征。即风险评估,包括计算风险值,风险分级及区划,描述风险特征;(4)风险管理。针对风险评估结果,提出降低风险对策。其评估程序如图1所示。

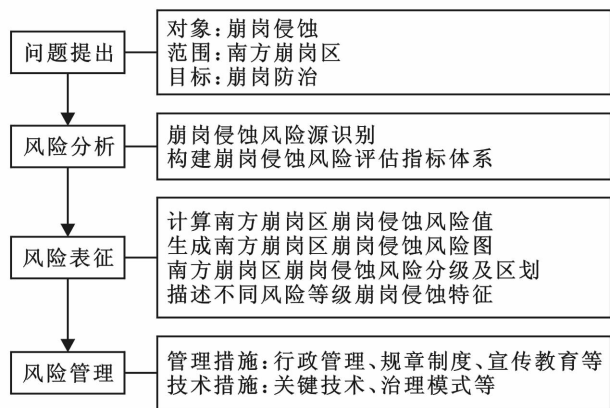


图1 崩岗侵蚀风险评价框架图

#### 3.1 问题提出

崩岗侵蚀我国南方水土流失的一种特殊类型,给当地经济社会的可持续发展造成严重威胁,急需开展防治工作。通过开展崩岗侵蚀风险评估,为国家实施崩岗防治提供决策依据。评估范围为南方崩岗区,即《南方崩岗防治规划(2008—2020年)》所涉及的规划范围,涉及湖北、湖南、江西、安徽、福建、广东、广西等7省(自治区),土地总面积 $4.84 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

#### 3.2 风险分析

针对崩岗侵蚀,风险源识别即为崩岗侵蚀发生的影响因子。史德明<sup>[4]</sup>将崩岗归为水蚀范围,张淑光等<sup>[5]</sup>认为应该属重力侵蚀范畴。更多学者认为崩岗既有重力侵蚀,又有水蚀,两者缺一不可<sup>[12]</sup>。在崩岗侵蚀过程中,大量碎屑物质随重力作用或径流作用发生高强度的迁移、重定位或由于后续外营力作用再迁移。目前,研究崩岗侵蚀机理大多从影响崩岗发育的因素着手。丘世均认为影响崩岗发育的因子很多,各因子所起的作用及相互之间的关系也非常复杂<sup>[7]</sup>。牛德奎<sup>[12]</sup>提出崩岗的发生发展是诸如土壤、地质、植被、水文、人类活动等多种因素影响的结果,尤其是土壤、地质因素做起的作用更大。其后有更多学者先后总结出岩性、地形地貌、气候、植被、人为活动等因素

与崩岗的形成和发展均密切相关<sup>[6-19]</sup>。刘瑞华等<sup>[46]</sup>在前人大量研究的基础上,总结出了崩岗形成的3个基本条件:①具有深厚的风化壳。风化壳一般石英砂粒含量高,结构松散,孔隙度大,有机质含量甚微,渗透力强,降雨时土壤水分极易达到饱和,抗剪强度迅速减小。因此在地表径流和重力作用下,土体极易崩塌形成崩岗<sup>[47]</sup>。南方地区高温多雨,而且受季节性气候和昼夜温差的影响,使岩体产生热胀冷缩作用。随着风化深度增大,风化结构疏松,难以抵抗暴雨暴流的侵蚀<sup>[46]</sup>。②丰富的降水为崩岗侵蚀发育提供了源动力。自然降水是崩岗土壤水分的最主要的来源,南方崩岗区处于亚热带季风气候区,该区降水充沛,且多以大雨、暴雨的形式出现。雨量多、强度大、降雨集中,产生了强大的降雨侵蚀动力,有利于促进岩体本身机械崩解<sup>[47]</sup>。而且相对于降雨强度,降雨量对于崩岗的侵蚀量的影响要更大。另外,松散的母质层中地下水运动,会带走许多土壤细颗粒,进而使得母质层变得进一步疏松。③植被及有机质层次遭到破坏。植被对防止土壤侵蚀和崩岗发育起着重要的作用,几乎任何条件下,都有缓和流水侵蚀和风蚀的作用。侵蚀地貌的发育与植被条件的好坏是密切相关的<sup>[46]</sup>。《南方崩岗防治规划(2008—2020年)》中,认为第4个条件必须有气温条件,促进岩体本身机械崩解,降低抗蚀力、减少土体内聚力创造了必要的前提。自然因素,主要涵盖土壤、地质、地形、气候、植被等;人为因素,包括滥砍乱伐、开矿采矿、陡坡开荒、过度放牧、辟山建房、开山修路等。自然因素是崩岗发生、发展的潜在条件和外部因素,人类活动也是加剧崩岗发生与发展的重要原因。人类活动对崩岗的发育起到诱发和促进作用,是崩岗形成的重要因素。近现代人类对土地资源的不合理开发、掠夺性开矿、水库选址不当、基建围垦取土不当等都加速了崩岗侵蚀的发展<sup>[1]</sup>。

根据以上崩岗侵蚀机理及影响因子研究成果,崩岗侵蚀风险源可以确定为地质、土壤(母质)、地形、植被、气候、人为活动等。风险受体可以确定为耕地、房屋、交通道路、水域等。因此,崩岗侵蚀风险评估指标体系详见表1。

崩岗侵蚀风险评估指标体系分为3层,第1层指标包括发生风险和危害风险2个方面。第2层指标为专题指标,即为第一层指标的风险分解指标。发生风险根据影响因子分解为地质、土壤(母质)、地形、植被、气候等5类专题,危害风险根据土地利用类型分解为耕地、房屋、交通道路、水域等4类专题。第3层指标为基础数据指标,即为第2层指标的风险表征指

标。发生风险地质专题表征指标包括断裂、岩土类型及性质、岩土体结构特征参数、岩土体力学参数、岩体风化强度与风化深度、新构造运动特征、地层岩性组合、水文地质条件等,土壤(母质)专题表征指标包括土壤(母质)类型、土层(母质)厚度、颗粒组成、渗透性、孔隙度、土力学参数等,地形专题表征指标包括地形起伏度、坡度、坡向、高程等,植被专题表征指标包括植被覆盖度、植被类型、NDVI 等,气候专题表征指标包括年平均降雨量、年平均气温等,人为活动专题表征指标包括开挖取土、削坡拦挡等防护措施。危害风险表征指标为面积比重。

表 1 崩岗侵蚀风险评估指标体系

总指标	第 1 层指标	第 2 层指标	第 3 层指标
风险评估指标	发生风险	地质	断裂
			岩土类型及性质
			岩土体结构特征参数
			岩土体力学参数
			岩体风化强度与风化深度
			新构造运动特征
			地层岩性组合
		水文地质条件	
		土壤(母质)	土壤(母质)类型
			土层(母质)厚度
颗粒组成			
地形	渗透性		
	孔隙度		
	土力学参数		
植被	地形起伏度		
	坡度		
	坡向		
气候	高程		
	植被覆盖度		
	植被类型		
人为活动	NDVI		
	年平均降雨量		
	年平均气温		
危害风险	耕地 房屋 交通道路 水域	开挖取土	
		削坡拦挡等防护措施	
		面积比重	
		面积比重	
		面积比重	

### 3.3 风险表征

首先在南方崩岗区选取若干个崩岗侵蚀评价单元(如县域单元),根据拟定的风险评估指标,收集获取相关数据和专题图件,通过拟定的评估方法,建立评估指标与崩岗发生(0 或 1)的 Logistic 模型。根据

Logistic 模型,收集获取南方崩岗区相关数据和专题图件,计算风险值,生成崩岗侵蚀风险分布图,采用随机抽样方法,对风险分布图进行验证。达到精度要求后,采用聚类分析法,对崩岗侵蚀风险进行分级,并对不同风险等级崩岗侵蚀描述具体的风险特征。

### 3.4 风险管理

根据崩岗风险评估结果,针对不同等级风险崩岗侵蚀提出相应的降低风险的对策。主要包括管理措施和技术措施。管理措施涉及行政管理、规章制度、宣传教育等,而技术措施包括崩岗发育环境背景整治治理技术,崩岗不同部位治理关键技术,崩岗治理模式等。

## 4 结论

本研究参考现有的生态、环境、地质灾害等风险评估成果,提出了南方崩岗侵蚀风险评估构想,包括界定了崩岗侵蚀风险内涵,拟定了崩岗侵蚀风险评估方法,构建了崩岗侵蚀风险评估指标体系,及提出了崩岗侵蚀风险评估程序,以期能达到抛砖引玉之效果。笔者也将在后续工作中,通过在南方崩岗区选取若干典型县作为评价单位,进行探索应用,以提出更加完善、具有可操作的崩岗侵蚀风险评估方法、指标体系及评估程序。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 冯明汉,廖纯燕,李双喜,等.我国南方崩岗现状调查[J].人民长江,2009,40(8):66-68.

[2] 长江水利委员会.南方崩岗防治规划(2008—2020年)[M].湖北武汉:长江水利委员会,2009.

[3] 曾昭璇,黄少敏.红层地貌与花岗岩地貌[M]//中国自然地理(地貌).北京:科学出版社,1980:139-150.

[4] 史德明.我国热带亚热带地区崩岗侵蚀的剖析[J].水土保持通报,1984,4(3):32-36.

[5] 张淑光,钟朝章.广东省崩岗形成机理与类型[J].水土保持通报,1990,10(3):8-16.

[6] 牛德奎.赣南山地丘陵区崩岗侵蚀阶段发育的研究[J].江西农业大学学报,1990,12(1):29-36.

[7] 丘世均.红土地崩岗侵蚀过程与机理[J].水土保持通报,1994,14(1):31-41.

[8] 阮伏水.福建崩岗沟蚀机理探讨[J].福建师范大学学报:自然科学版,1996(S):24-31.

[9] 吴志峰,李定强,丘世钧.华南水土流失区崩岗侵蚀地貌系统分析[J].水土保持通报,1999,19(5):24-26.

[10] 陈志彪,朱鹤健,刘强,等.根溪河小流域的崩岗特征及其治理措施[J].自然灾害学报,2006,15(5):83-88.

[11] 张大林,刘希林.崩岗侵蚀地貌的演变过程及阶段划分[J].亚热带资源与环境学报,2011,6(2):23-28.

- [12] 牛德奎. 华南红壤丘陵区崩岗发育的环境背景与侵蚀机理研究[D]. 江苏南京:南京林业大学, 2009.
- [13] 张晓明, 丁树文, 蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 241-245.
- [14] 李双喜, 桂惠中, 丁树文. 中国南方崩岗空间分布特征[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(1): 83-86.
- [15] 姜超, 陈志彪, 陈志强. 我国崩岗侵蚀与国外劣地侵蚀机制类比[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 116-122.
- [16] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对花岗岩崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 1-5.
- [17] 熊传祥, 王涛, 鲁晓兵. 降雨作用下崩岗形成细观机理模拟[J]. 山地学报, 2013, 31(6): 710-715.
- [18] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 花岗岩崩岗崩积体颗粒组成及分形特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 175-180.
- [19] 刘希林, 张大林. 崩岗地貌侵蚀过程三维立体监测研究: 以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 26-31.
- [20] 汪晶. 风险评价技术的原理与进展[J]. 环境科学, 1998, 19(2): 95-96.
- [21] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 等. 生态风险评价进展[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [22] Vrieling A, Sterk Gbeaulieu N. Erosion risk mapping: A methodological case study in the Colombian Eastern Plains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(3): 158-163.
- [23] Angima S D, Stott D E, OtNeill M K, et al. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 97(1/3): 295-308.
- [24] Lu D, Li G, Valladares G, et al. Mapping soil erosion risk in Rondnia, Brazilian Amazonia: Using RUSLE, remote sensing and GIS[J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(5): 499-512.
- [25] Cohen M J, Shepherd K D, Walsh M G. Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed[J]. *Geoderma*, 2005, 124(3/4): 235-252.
- [26] 万军, 蔡运龙, 路云阁. 喀斯特地区土壤侵蚀风险评价[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 149-155.
- [27] 胡宝清, 王世杰, 李玲, 等. 喀斯特石漠化预警和风险评价模型的系统设计[J]. 地理科学进展, 2005, 24(2): 123-129.
- [28] 闵婕, 杨华, 赵纯勇. GIS支持下的土壤侵蚀潜在危险度分级方法研究与应用[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 61-64.
- [29] 周为峰, 吴炳方. 区域土壤侵蚀研究分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 31-34.
- [30] 崔金鑫, 何政伟, 赵文吉, 等. 基于RS与GIS的密云县集水区土壤侵蚀风险评价[J]. 首都师范大学学报, 2010, 31(2): 65-68.
- [31] 蔡德所, 李荣辉, 万魁, 等. 基于DEM和土地利用的水土流失风险评价[J]. 中国水土保持, 2012(2): 29-36.
- [32] 张雪才, 崔晨风, 王伟. 陕西境内渭河流域水土流失的风险评估[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(4): 107-111.
- [33] 潘树林, 冉玲. 金沙江宜宾段土壤侵蚀潜在危险度[J]. 宜宾学院院报, 2012, 12(12): 81-83.
- [34] 李晓松, 吴炳方, 王浩, 等. 区域尺度海河流域水土流失风险评估[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 372-387.
- [35] 戴露莹, 王飞儿, 俞洁. 基于GIS的东苕溪典型小流域土壤侵蚀风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1777-1784.
- [36] 张志国, 李锐, 王国梁. 基于GIS的区域水土流失生态风险评价[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 98-101.
- [37] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文. 东北典型黑土区沟蚀发生风险评估研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2058-2067.
- [38] 胡宝清, 王世杰. 基于3S技术的区域喀斯特石漠化过程、机制及见险评估[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [39] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 267-271.
- [40] 毛小苓, 倪晋仁. 生态风险评价研究述评[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(4): 646-654.
- [41] 黄崇福. 自然灾害风险评估: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [42] 吴树仁, 石菊松, 王涛, 等. 滑坡风险评估理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [43] 徐为, 胡瑞林, 吴菲, 等. 浅谈我国的地质灾害风险评估[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 126-129.
- [44] 巫丽芸, 何东进, 洪伟, 等. 自然灾害风险评估与灾害易损性研究进展[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 129-135.
- [45] 王济川, 郭志刚. Logistic回归模型方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [46] 刘瑞华. 华南地区崩岗侵蚀灾害及其防治[J]. 水文地质工程地质, 2004(4): 54-57.
- [47] 梁音, 宁堆虎, 潘贤章, 等. 南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理[J]. 中国水土保持, 2009(1): 31-34.