

# 喀斯特地区土地石漠化风险及评价指标体系

张军以<sup>1</sup>, 苏维词<sup>1,2</sup>, 苏凯<sup>1</sup>

(1. 重庆师范大学 地理科学学院, 重庆 400047; 2. 贵州科学院 山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

**摘 要:** 土地石漠化是西南喀斯特地区一种突出的生态环境问题, 是西南喀斯特地区经济发展与生态建设中所面临的特殊的地域性环境问题, 也是西南喀斯特地区实现全面可持续发展的主要障碍因素之一。在参考国内外相关研究成果的基础上, 根据对石漠化概念的内涵及特点的分析, 构建了石漠化概念模型, 论述了土地石漠化与基底环境的基本反馈响应机制。根据模型将风险压力分为干扰、累积、演替、破碎这 4 大类, 分析提取土地石漠化风险因子, 按“压力—状态—响应”模型对土地石漠化风险因子进行了分级, 初步建立了喀斯特地区土地石漠化风险评价指标体系。

**关键词:** 土地石漠化; 风险评价; 指标体系; 喀斯特地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0172-05

中图分类号: P96, P931.5

## Evaluation Index System for Risk Assessment of Land Desertification in Karst Area

ZHANG Jun-yi<sup>1</sup>, SU Wei-ci<sup>1,2</sup>, SU Kai<sup>1</sup>

(1. Department of Geography, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2. Institute of Mountain Resource, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China)

**Abstract:** Desertification, as a prominent environmental problem in southwest karst rocky region, is a problem particularly for the regional economic development and ecological construction, challenging the comprehensively sustainable development in this region. According to domestic and foreign literature, a desertification model was developed based on analysis of the concept and characteristics of desertification. The feedback mechanisms between desertification and background environment were discussed. The model divided risk pressure into four categories, i. e., disturbance, accumulation, succession, and fragmentation. The risk factors of desertification were then analyzed and classified based on the pressure—state—response model. An assessment system for desertification risk was establishment for karst rocky areas.

**Keywords:** soil desertification; risk assessment; index system; karst area

在热带、亚热带湿润气候带的碳酸盐岩类分布区, 成土速率低且侵蚀作用强烈, 在长期的岩溶作用下产生了地表及地下双重二元结构及特殊的垂直径流系统, 降水常通过地表的裂隙、漏斗、落水洞等, 迅速渗入地下岩溶管网, 造成地表生境干旱缺水。土被分布离散且不连续, 抗逆力差, 在受人类干扰下, 极易造成水土流失, 土地退化。喀斯特石漠化区主要分布在以贵州高原为中心的贵州、广西、重庆等省市区, 并集中分布在贵州、云南和广西这 3 省区。目前西南喀斯特山区土地石漠化从总体上看呈加剧态势, 1987—1999 年期间, 土地石漠化面积从  $8.30 \times 10^4 \text{ km}^2$  增

加到  $1.05 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 年均新增石漠化面积近 2 000  $\text{km}^2$ , 土地石漠化的扩展进一步加剧了该地域生态系统的脆弱性, 降低了生态系统的容量, 对该地区社会经济的可持续发展危害极大。喀斯特地区生态环境问题也引起了国家的高度重视, 对土地石漠化问题的研究也有了较多成果, 但对土地石漠化风险的评价研究较少, 定量研究土地石漠化风险是喀斯特石漠化治理的基础, 并直接关系到喀斯特石漠化地区的生态重建。为此, 本研究在初步界定喀斯特石漠化概念的基础上, 初步提出了一套喀斯特地区土地石漠化风险评价指标体系。

收稿日期: 2010-08-10

修回日期: 2010-10-14

资助项目: 贵州省省长基金“贵州喀斯特山区农村循环经济型庭院/村庄发展的优化模式研究与典型示范”〔黔省专合字 J 字(2010)76〕, “贵州典型喀斯特退化生态系统修复及维护技术与示范”〔黔省专合字 J 字(2007)89〕; 贵州省科技计划项目〔黔科合院所能(2010)4001; 院所创能(2008)009〕; 贵州省科技攻关计划〔黔科合 SY(2010)3015; 黔科合 SZ(2008)3016〕

作者简介: 张军以(1985—), 男(汉族), 山东省沂南县人, 硕士研究生, 研究方向为区域可持续发展与生态环境。E-mail: okjunyi@163.com。

通信作者: 苏维词(1965—), 男(苗族), 湖南省绥宁县人, 研究员, 主要研究方向为生态环境与可持续发展。E-mail: suweici@sina.com。

## 1 石漠化概念

土地石漠化是西南喀斯特地区一种突出的生态环境问题。石漠化灾害的概念最早于 20 世纪 80 年代初期提出<sup>[1-2]</sup>,对石漠化也存在多个定义,但目前对石漠化的概念还没有完全统一的说法。国际荒漠化防治公约指出:“荒漠化是由包括气候变化和人类活动在内的各种因素所造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化”。1979 年 Legrad 首次提出了喀斯特地区的生态环境问题,在 1983 年美国科学促进会第 149 届年会上,正式把喀斯特和沙漠边缘地区等地列为脆弱环境<sup>[3]</sup>。喀斯特土地石漠化指的是在湿润气候条件下,受喀斯特作用及人类不合理活动的干扰,喀斯特地表土层流失殆尽、基岩大面积裸露,呈现出一种无土无水无林、类似于荒漠化的景观现象与过程<sup>[4]</sup>。袁道先<sup>[5]</sup>采用石漠化概念来表征植被、土壤覆盖的喀斯特地区转变为岩石裸露的喀斯特景观的过程,并指出石漠化是中国南方亚热带喀斯特地区严峻的生态问题,导致了喀斯特风化残积层土的迅速贫瘠化。石漠化是一个表征景观变化过程的概念,是一个动态的变化过程。综合以上概念作者认为喀斯特地区的土地石漠化是指喀斯特原生境在受到自然(如干旱,滑坡等)或人为活动的干扰下,原生境自然景观系统螺旋退化的一个过程,景观上表现为植被及生物多样性下降,土壤流失,最后植被消失,土壤流失殆尽,基岩裸露,呈现出类似于戈壁沙漠的景观退化过程。

## 2 土地石漠化风险概念模型

### 2.1 风险概念模型

土地石漠化作为一种景观退化过程,与多种自然因素、社会因素处于相互作用之中。植被因子、土壤因子和岩性因子是影响石漠化的内在主导因子。地表植被的景观变化过程与石漠化的发育阶段显著相关,表征了石漠化在时间序列上的发展变化<sup>[6]</sup>。土地石漠化直接驱动力是地表植被覆盖的减少,植被减少造成水土流失和土壤保水能力下降,土壤流失使植被难以生长,水土流失更加严重,形成恶性循环。岩溶地区水土流失的强敏感区域主要为植被覆盖率低的荒草地、裸岩石砾地<sup>[7]</sup>。土地石漠化的各类影响因子,首先作用于原生境表层植被,通过正反馈作用不断强化这种影响,最终导致土地的石漠化。喀斯特地区自然环境因素是土地石漠化形成的内因,而不合理人类活动是土地石漠化形成的诱导因素<sup>[8]</sup>。

基于土地石漠化与岩性、土壤、植被、降水、人类活动等存在密切的相关性,可以用函数关系方程

表征:

$$C = f(Y, Q, Z, J, S, R, \dots) \cdot P \cdot D \cdot T \cdot W$$

土地石漠化是各因子综合作用的结果,可表示为一个多元一次方程,它的发育过程可表示为由  $n$  个有序的数  $Y_n, Q_n, \dots, W_n (n \geq 1)$ , 所构成的  $N$  维向量的矩阵  $P$  表示:

$$P = \begin{bmatrix} Y_{11} & Q_{12} & \dots & W_{1n} \\ Y_{21} & Q_{22} & \dots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{m1} & Q_{m2} & \dots & W_{mn} \end{bmatrix}$$

式中:  $C$ ——土地石漠化风险程度;  $Y$ ——岩性;  $Q$ ——气候;  $Z$ ——植被;  $J$ ——降水;  $S$ ——坡度;  $R$ ——土壤类型及特性;  $P$ ——除去土地利用模式的各种人类活动的总和;  $D$ ——各种土地利用模式;  $T$ ——土地石漠化发育时间;  $W$ ——灾害因子。

### 2.2 模型因子影响分析

通过上述概念模型可知,喀斯特土地石漠化是人类活动、岩性、气候、土壤、植被及特有的二元地质结构综合作用的产物,是一个环境退化逆转过程。岩性、土壤、植被、水文及气候条件等与喀斯特基底环境不断进行耦合作用,形成了特有的上层土地石漠化和下层发达的水系及强烈的化学溶蚀作用。基岩提供了发育独特基底环境的物质基础及特有的地上地下二元地质结构,气候提供了特有的水文条件及侵蚀动力,并决定了植被类型及土壤形成的方向和强度,植被上层枝叶和下层根系与裂隙中的土壤构成了一个互利的垂直耦合体系,植被破坏,动态平衡被打破,植被覆盖度降低,降水直接形成地表径流冲刷土壤,造成水土流失及植被退化,表层岩溶水循环系统遭到破坏。流水对基底环境的破碎作用,主要作用于土壤整体连续性及对植被过渡带土壤的切割。对土地石漠化景观形成与演化驱动因素的分析,离不开对基底环境及其基础上的人类活动与自然生态系统耦合机制的研究,只有摸清其耦合机制才能把握土地石漠化的演化规律。(1) 岩性。基岩及其发达的裂隙及洞穴系统为地表与地下物质循环提供了结构基础,造就了石漠化的内部环境,并为土壤的形成提供物质基础。不同类型的碳酸盐岩产状、化学成分不同,成土速率也存在差异。如白云岩含  $MgO$  一般在 10.9% 以上,碎屑石灰岩的酸不溶物含量较高。因而,白云岩相对不易溶,岩溶作用强度较弱,碎屑石灰岩则成土能力强。故这两类碳酸盐岩抵抗岩溶石漠化能力较强<sup>[9]</sup>。(2) 气候。石漠化地区主要分布在热带、亚热带季风湿润气候区,雨热同季,降水充沛。雨季高温与强降水同时出现,为石漠化提供了侵蚀动力和适宜的溶蚀条件。此外,

气候决定了植被类型。(3) 植被。植被为土壤提供有机质并防治水土流失,地表植被的枝叶可以减少降水对地表土壤的击溅和冲刷作用,根系则具有固土及涵养降水的作用,并提高了土壤的抗侵蚀能力。此外,植被类型的演替可导致土壤类型的演变。(4) 降水。产生水土流失的降水,一般是强度较大的暴雨,降水强度超过土壤下渗能力形成的地表径流,为土壤流失提供了动力和载体。另一方面,降水因地形进行再分配,流水通过侵蚀、搬运,造成土壤斑块破碎。(5) 坡度。坡度为水土流失提供了潜在的重力势能。地形的破碎造成了植被类型及土壤的高度分异性,地表坡度缩短了岩溶二元结构的水循环周期,间接强化了表层岩溶带对植物群落调蓄降水的依赖。地形坡度决定着石漠化的类型和强度,喀斯特地区坡地上能否生长植被与区域喀斯特地貌类型存在着紧密联系<sup>[10]</sup>。(6) 土壤。理论上土壤的格局差异与岩性和植被差异显著相关,土壤的发育与地表植被类型的正向演替方向一致,表层岩溶作用—植被生物作用—土壤组成了一个相互作用的有机整体,由于人类不合理耕作等原因,造成植被退化,从而打破这一平衡,使整个岩溶—植被—土壤系统发生退化。从这个意义上讲,土地石漠化可以看作是岩溶环境中生态系统退化的结果。此外,人类开垦使土壤退化,颗粒粗化,土体结构破坏,容重增加了  $0.12\sim 0.60\text{ g/cm}^3$ ,总孔隙度降低了  $12.0\%\sim 39.8\%$ ,持水性变劣,养分下降<sup>[11]</sup>。(7) 人类活动。人类活动打破了自然的生态平衡,起到诱导作用。如人类过度获取薪柴、不合理耕作等,破坏了自然植被导致表层岩溶水循环中断,地表干旱,自然植被退化乃至消失,使土壤裸露质量下降,从而造成水土流失,最终形成土地的石漠化。土壤质量的演变,既有系统本身自然属性决定的内在原因,更重要的是人为外部干扰活动的驱动<sup>[11]</sup>。(8) 土地利用模式。工农业生产中为求短期效益,错位利用土地,如宜林荒地开垦为耕地、陡坡垦荒耕种等。人为耕作活动对土壤水稳性团聚体和有机质含量影响最大,岩溶山区林地、灌草坡遭到开垦破坏后,由于水稳性团聚体、有机质含量明显下降,进而影响到其抗水性和储水性,加剧生境的干旱<sup>[12]</sup>,干旱导致植被群落多样性下降,直接加速了土地石漠化进程。(9) 时间因子。土地石漠化的发育完成时间,因形成原因的不同而存在差异。突发灾害事件,可在短时间内造成土地石漠化,如滑坡、泥石流等。自然环境退化诱发的石漠化发育时间最长,如原生境地貌发生变化,原来的地上河下伏后,地下水位下降引起地表生态环境恶化,导致土地石漠化。(10) 灾害因子。灾害可以分

为两类:自然灾害如干旱、泥石流、滑坡、山体崩落等;人为灾害如森林火灾、烧山耕种等。

### 3 基于土地石漠化风险响应的评价指标体系的构建

#### 3.1 风险响应的评价因子

在喀斯特地区,景观格局的异质性镶嵌并不单是人类活动的结果,相当部分是人类活动与环境基底综合作用的产物。岩性与地貌的组合构成了一个完整的垂直空间结构,流水作为介质,土壤、植被群落作为子系统,组成了一个复杂的多元耦合系统。在岩溶山区,表层水资源和土壤的空间分布与地貌演化阶段和岩性间存在着极为密切的关系,即地貌演化阶段和岩石类型决定着岩溶生境土壤空间异质性规律,而表层水和土壤斑块空间异质性又往往决定了群落的分布格局<sup>[13]</sup>。相反植物群落类型、发育程度对维持现有岩溶生态系统的稳定具有重要作用。已有研究表明,表层岩溶带水循环系统的调蓄能力强烈依附于表层植物群落,植被群落特征的不同决定了岩溶表层水循环系统的功能差异。岩性、地貌、土壤系统、流水、植物群落及岩溶表层水循环系统构成了一个内部耦合系统,不同的组合条件导致景观格局的差异。人类活动首先作用于岩溶表层植物群落,使地表土壤的下渗条件迅速改变,在降水后,流水通过裂隙、落水洞迅速进入岩溶地下水循环系统,使岩溶表层水循环系统失去稳定的水补给源,土壤含水量下降造成土地易干旱,如遇暴雨引起水土流失,土地逐步石漠化。人类活动打破了岩溶表层内部耦合系统的平衡,使生态系统多样性结构退化,功能逐步丧失,系统退化,最终致使喀斯特岩溶环境中石山、土地石漠化的出现。

各因子对土地石漠化风险的生态压力效应,归纳起来主要有 4 类:(1) 干扰效应。主要指自然及人类活动对喀斯特自然生态环境的扰动效应。(2) 阻断效应。人类活动及自然地貌对自然生态环境自然演替的阻断效应。(3) 累积效应。包括自然流水侵蚀、岩溶作用等对生境多样性形成的累积效应;人类活动排放的各种废弃物;人类不合理耕作、垦荒、过度放牧等对环境产生的累积压力。(4) 破碎效应。人类开垦土地、修建灌溉设施及自然地形、流水和岩溶作用等对喀斯特自然生态环境整体性的切割,造成生境的破碎。同一因子可包含多种生态压力效应,如气候因子对土地石漠化既有干扰效应,也有累积效应和演替效应。

#### 3.2 响应评价指标体系的构建

关于喀斯特地区土地石漠化的现状评价指标体

系,不同学科背景的学者考虑的角度不同,对指标持续性作用的界定不同,指标的选择差异也较大,评价指标的量化标准(阈值)也不尽相同<sup>[14]</sup>。现有研究主要集中在对土地石漠化现状进行评价,评价指标也多是针对土地石漠化现状,多数研究是以小流域内的喀斯特土地石漠化为例,对土地石漠化风险评价的研究较少,但有些学者也进行了一定的探索,如胡宝清等<sup>[15]</sup>试图构建一个具有实际操作意义的石漠化灾害预警与风险评估模型库系统。土地石漠化可以看作是喀斯特原生境环境中的“坏点”,高度破碎的镶嵌于整个喀斯特原生境景观中。它包含了喀斯特生态系统的各个次级要素子系统,各个次级子系统通过一定的结构及耦合机制,组成了具有一个新功能的有机整体。喀斯特地区土地生态系统作为一个开放的体系,

与外界不断进行着复杂的物质、能量及信息交换。系统的开放性使得其自身的演化过程与外界条件变化息息相关,演变过程具有高度的复杂性和自组织性,但其演化过程的实质就是组成其自身系统的各次级子系统(如岩性、气候、植被、降水、土壤等)在受到外界条件变化及系统本身反馈调节机制的共同作用下,通过各个次级子系统的竞争与协同,从无序到相对稳定的动态过程,在此过程中各次级子系统通过自身的反馈机制对外界条件变化做出反应,并通过一定的景观演变表现出来。土地石漠化作为各个子系统综合的结果,也就是系统的各级子系统及系统本身,遭受到外界条件变化的干扰作用下(原因或压力),系统表现出一定的动态波动(状态),再进一步通过系统自身的反馈调节机制对外界的变化作出反应(响应)(表 1)。

表 1 土地石漠化风险评价指标体系

指标分类	类型	指标层	响应途径
系统压力	收入压力	种植业年收入比重(%)	反映对土地的依赖程度
		人均农业产值(元)	
	资源压力	城市化率(%)	强化了土地的承载压力状况
		农村人均居住面积(m <sup>2</sup> ) 人均耕地面积(hm <sup>2</sup> )	
	人口压力	人口密度(人/km <sup>2</sup> )	影响人类对环境的干扰强度
		人口增长率(%)	
环境压力	暴雨占全年降水量的比重(%) 酸雨频率(%)	破坏土体结构,提供土壤流失载体	
地形压力	坡度(°) 坡耕地比重(%)	(增加)流水的(势能)侵蚀作用	
系统状态	经济状态	人均纯收入(元)	
	环境状态	植被覆盖率(%) 物种多样性 植被优势度指数	弱化流水的(势能)侵蚀作用,增强地表土壤的抗侵蚀能力
		土壤侵蚀模数[t/(km <sup>2</sup> ·a)] 单位面积水土流失量(t/km <sup>2</sup> )	使土壤瘠薄化,进而影响植被生长
		资源状况	成土速率(μm/a) 岩石溶蚀速率(μm/a)
	文化响应	人均受教育年限(a)	影响环保意识
系统响应	经济响应	环保投入占 GDP 比重(%) 人均环保资金投入量(%)	反映环保的投入状况,弱化环境压力
		退耕还林、还草面积(m <sup>2</sup> ) 封山育林面积(hm <sup>2</sup> ) 水土流失治理面积(hm <sup>2</sup> ) 人工造林面积(hm <sup>2</sup> )	弱化流水的(势能)侵蚀作用,增强地表的抗侵蚀能力
	环境响应	工业废气排放达标率(%)	影响土壤结构、植物生长

以“压力—状态—响应”框架模型为基础,可以较好地反映土地石漠化的驱动因子及系统自身的调节响应途径,对各评价指标进行判别分类,分为压力指标、状态指标和响应指标 3 类,对指标进行分类,便于

在定量化评价中计算各类指标对土地石漠化风险的贡献率,为制定治理措施提供理论依据。各个自然因子及社会因子都含有次级因子,如地质因子包括岩性的不同、基岩的产状等。因子可分为直接影响因子和

间接影响因子两类,直接影响因子如人类活动中的土地利用方式就直接对喀斯特原生境的演替和完整性造成影响;间接影响因子,如产业结构、人口文化素质等,产业结构合理其效率就高,对自然环境的压力及破坏则较小,利于环境的自我恢复;人口文化素质的高低影响到人们的生活习惯、环境保护意识的强弱等,决定了同等条件下自然生境所承受的人为压力的大小。

## 4 结论

土地石漠化与岩溶地区生态系统的退化密切相关,要根治土地石漠化,首要的是要了解岩溶生态系统中岩性、土壤、地貌、植物群落、水文条件等之间的响应反馈机制,表层岩溶生态系统作为一个多元耦合系统,其功能的稳定在一定程度上决定了土地石漠化风险的几率。从系统的角度讲,掌握了表层岩溶生态系统的运行机制,才能有目的的去优化系统,提高系统的稳定性和效益,只有基底生态环境和其所支持的生物群落系统相适应,系统才能稳定健康的运行。

加强对喀斯特生态系统基本过程的研究,摸清岩溶景观形成与演化的驱动因素,找出各因素与基底环境之间的效应反馈机制,构建喀斯特岩溶区土地石漠化—环境脆弱性耦合框架,探明土地石漠化发育与环境基底的反馈途径,才能合理地评价土地石漠化,探索土地石漠化防治的有效措施。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李阳兵,王世杰,容丽. 关于喀斯特石漠化和石漠化概念的讨论[J]. 中国沙漠,2004,24(6):689-695.
- [2] Williams P W. Environmental change and human impact on karstter-rains: Anintroduction [J]. Catena, 1993, (S25):1-19.
- [3] 廖赤眉,胡宝清,研志强,等. 广西喀斯特地区土地石漠化与生态重建模式研究[M]. 北京:商务印书馆,2006:5-6.
- [4] 苏维词. 贵州岩溶山区石漠化灾害及防治[J]. 长江流域资源与环境,1995,4(2):177-183.
- [5] 袁道先. 袁道先院士1981年在美国科技促进年会(AAAS)上的学术报告[R]. 美国:科技促进会,1981.
- [6] 王德炉,朱守谦,黄宝龙. 喀斯特石漠化内在影响因素分析[J]. 浙江林学院学报,2005,22(3):266-271.
- [7] 李阳兵,邵景安,王世杰,等. 基于岩溶生态系统特性的水土流失敏感性评价[J]. 山地学报,2007,25(6):671-677.
- [8] 苏维词,杨华,李晴,等. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治[J]. 土壤通报,2006,37(3):447-451.
- [9] 单洋天. 我国西南岩溶石漠化及其地质影响因素分析[J]. 中国岩溶,2006,25(2):163-167.
- [10] 周忠发. 喀斯特地区石漠化与地形坡度的关系分析[J]. 水土保持通报,2006,26(6):1-3.
- [11] 龙键,李娟,汪境仁,等. 典型喀斯特地区石漠化演变过程对土壤质量性状的影响[J]. 水土保持学报,2005,42(3):77-81.
- [12] 李阳兵,邵景安,魏朝富,等. 岩溶山区不同土地利用方式下土壤质量指标响应[J]. 生态与农村环境学报,2007,23(1):12-15.
- [13] 邵景安,李阳兵,王世杰,等. 岩溶山区不同岩性和地貌类型下景观斑块分布与多样性分析[J]. 自然自源学报,2007,22(3):478-485.
- [14] 黄秋昊,蔡运龙,王秀春. 我国西南喀斯特地区石漠化研究进展[J]. 自然灾害学报,2007,16(2):107-111.
- [15] 胡宝清,王世杰,李玲,等. 喀斯特石漠化预警和风险评估模型的系统设计:以广西都安瑶族自治县为例[J]. 地理科学进展,2005,24(2):122-130.