

喀斯特石漠化的驱动因子分析

——以贵州省为例

蓝安军, 熊康宁, 安裕伦

(贵州师范大学 资源与环境科学系, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 采用地理信息系统 (GIS) 与遥感 (RS) 技术, 对贵州省喀斯特石漠化状况进行全面调查, 建立了全省 1: 10 万喀斯特石漠化数据库。利用相关分析和主成分分析法, 分析了导致石漠化的影响因子, 确立指标体系, 指出地表植被覆盖率、喀斯特面积、河网密度、未利用地、耕地面积、平均海拔高程、土地垦殖率、草地和 $\geq 25^\circ$ 坡地面积等 9 个因子是喀斯特石漠化的重要驱动力。建立了喀斯特石漠化动力指数模型, 计算出了各因子对石漠化的贡献值, 指出石漠化产生的根本原因是不合理的人为活动。所建动力指数模型输出结果与遥感调查有高度的一致性, 表明石漠化动力指数能较好地反映该地区石漠化过程, 可为石漠化治理提供理论依据。

关键词: 地理信息系统; 遥感; 喀斯特石漠化; 驱动因子; 贵州省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2001)06-0019-05

中图分类号: P642.25

Analysis on Driving Factors of Karst Rock-desertification

——With a Special Reference to Guizhou Province

LAN An-jun, XIONG Kang-ning, AN Yu-lun

(Department of Resource and Environment Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, Guizhou Province, PRC)

Abstract Based on the geographic information system and remote sensing, the spatial distribution of karst rock-desertification is studied, and the 1: 100000 map of rock-desertification is made. The methods of bivariate correlation and principal component are used to pick up the information included in driving factors. The relations between rock-desertification and each factor are discussed, and then the system of influential factors indexes are built. As a result, the percentage of forest cover, area of karst regions, drainage networks density, arable land, area of cultivated land, average altitude, cultivation index, grassland and $\geq 25^\circ$ surface slope are proved to be the key factors to the rock-desertification. The rock-desertification dynamic index (I_R) is also established and the significant value of each factor is calculated. The most important factor of karst rock-desertification is irrational human activity. Its comparison with the GIS-RS derived data shows that I_R can reflect the potential capacity of the rock-desertification and also the dynamic process is studied to reveal the dominant factors in karst regions. All these studies may be of great help for the mitigation of the rock-desertification.

Keywords GIS; remote sensing; karst rock-desertification; driving factors; Guizhou province

1 贵州省喀斯特石漠化概况

喀斯特石漠化是在喀斯特脆弱生态环境下, 人类不合理的社会经济活动, 造成人地矛盾突出, 植被破坏, 土壤侵蚀, 岩石逐渐裸露, 土地生产力衰退丧失, 地表在视觉上呈现类似于荒漠景观的演变过程^[1]。在西部大开发中, 石漠化问题正成为区域生态环境建设的重点、热点和难点。

贵州省喀斯特地貌极为发育, 其面积占国土面积 73%。由于地处长江、珠江源头的分水岭地带, 解决好

石漠化问题, 重建良好的生态环境, 不仅关系到自身发展, 而且关系到两江中下游地区的生态安全。石漠化强烈发育的区域, 生态环境脆弱, 土层浅薄, 土地产出率低, 区域交通闭塞, 文化落后, 多为少数民族聚居区。人民贫困, 形成贫困——人口增长——石漠化加剧——贫困的恶性循环, 人地矛盾紧张。

利用遥感技术和 GIS 研究方法, 采用 2000 年全省 TM 影像为背景资料, 在地形图、土地利用图、土壤图、地质图、坡度图以及 GPS 实测数据库等相关资料综合分析的基础上建立石漠化分级的遥感影像解

译指标体系。宏观、系统、准确地对石漠化强度、石漠化土地的空间分布及其面积进行解译,生成全省石漠化空间分布 GIS 数据库。利用遥感数据的多时相动态变化,为今后石漠化动态监测作铺垫。遥感解译结果显示,目前贵州省已经存在的喀斯特石漠化土地面积为 $3.59 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省国土面积的 20.39%。其中强度及极强度石漠化土地面积为 $2.70 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占全省石漠化面积的 1.52%; 中度以上石漠化土地面积为 $1.32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省石漠化面积的 7.49%; 潜在石漠化土地面积为 $4.37 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省石漠化面积的 24.81%, 石漠化现状十分严峻。

2 喀斯特石漠化驱动因子分析

喀斯特石漠化是喀斯特地区特有的土地退化问题,与严重的土壤侵蚀一起共同塑造了喀斯特地区极度脆弱的生态环境。石漠化是地质、地貌、植被、土壤、降水等自然背景因素和不合理的人类活动综合作用的产物。“导致石漠化的原因虽然多种多样,石漠化主要是由于长期的人工乱砍滥伐所致。我国西部岩溶山区土地小片分散,土地瘠薄,大量的原始森林被砍伐,加剧了土壤侵蚀,可适宜耕作的土地越来越少。当地农民只能在有限的土地土壤分布地带继续破坏植被,开垦耕地,而这种开垦结果又引起土壤侵蚀的加剧,形成恶性循环,终使土地石漠化”^[2]。本文在贵州省石漠化遥感与 GIS 解译的基础上,建立相关分析数据库,采用相关分析法和主成分分析法,探讨石漠化的主导影响因子。

2.1 指标体系建立

喀斯特石漠化是喀斯特区特有的地理过程,是人地系统失衡发展的产物,是多因子相互作用的结果,研究各因子之间的相关关系,确定其主导因子,建立一套合理的评价指标体系,对深入研究石漠化系列问题,具有重要的意义。从喀斯特石漠化的人地矛盾出发,既考虑各单因子的影响,又考虑区域人地系统的综合影响。根据石漠化形成过程和演化特征,考虑其可能影响因子的系统性、整体性和可比性,挑选出 16 个指标来进行分析,将各可能因子分属 3 类指标,即自然背景类指标、人口特征类指标、人地关系类指标。

2.2 相关分析

根据石漠化的空间分布现状,在建立了石漠化的可能影响指标体系的基础上,经过大量的野外工作和室内资料收集,对数据进行无量纲化处理,建立了 82 组石漠化相关影响因子数据库,进一步做数学分析,对初步估计指标进行筛选,确定出导致石漠化的主导影响因子。应用相关分析法揭示因变量与各自变量之

间的内在联系。采用皮尔逊 (Pearson) 相关系数,其计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\left\{ \sum_{i=1}^x (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right\}^{1/2}}$$

式中: R_{xy} ——相关系数; X ——自变量,即所选指标; Y ——因变量,即石漠化指标。

在列出的所有参考指标中,部分实际上与石漠化并无明显相关性,需根据相关系数进行取舍,取舍的依据是给定 T 条件下的假设检验。采用双侧百分位检验 (2-tailed), 即计算在 $1 - T$ 的置信度下假设两者不相关的概率,进一步对这些相关系数做显著性检验,引入临界相关系数,即在一定样本 (N) 范围内,确定两者相关的最小系数, N 不同时,临界相关系数也不同,样本数 $N = 82$, 分析结果见表 1-3。

分析结果显示植被覆盖率与石漠化极为密切,呈负相关关系。典型的喀斯特区域,土层浅薄,植被稀疏,随着森林覆盖率的降低,喀斯特土壤失去了植被的保护后,土壤流失,母质母岩出露,形成石漠化土地。森林覆盖率减少,势必破坏脆弱的喀斯特生态环境,导致石漠化土地的增加。从目前的森林分布来看,多分布在非喀斯特区域,如黔东南州、黔北赤水市等,而广大的喀斯特区域,森林极为稀少,故植被覆盖与石漠化呈显著负相关关系。

贵州省碳酸岩岩性主要为石灰岩、白云岩、白云质灰岩,岩石坚硬,抗风化能力强,均为可溶岩,自然土层厚度小,土壤抗蚀年限低,极易形成无土可流的毁坏型强度石漠化土地。岩性对石漠化的影响极为显著,不同岩性条件下,石漠化程度极为不同,两者具有高度的相关性,喀斯特面积比例越大,石漠化常表现得较为严重,如黔南、黔西南、安顺、六盘水和毕节广大地区,是全省石漠化严重区域。

表 1 轻度石漠化与环境背景脆弱性指标类相关系数

指标 X_i	相关系数 R	$1 - T$ 假设检验置信度
喀斯特面积比例 $X_1 / \%$	0.664 ^②	0.000
平均海拔高程 X_2	0.443 ^②	0.000
地表起伏指数 X_3	0.108	0.336
$\geq 25^\circ$ 坡地面积比例 X_4	0.321 ^②	0.003
高原区占国土面积 $X_5 / \%$	0.255 ^①	0.021
植被覆盖率 X_6	-0.733 ^③	0.000
多年平均降水量 X_7	0.215 ^①	0.052
河网密度 X_8	-0.627 ^②	0.000

注: ① 为相关, $T = 0.05$; ② 为显著相关, $T = 0.01$

表 2 轻度石漠化与社会经济指标类相关系数

指标 X_i	相关系数 R	1 - T假设检验置信度
人口密度 X_9	0.040	0.721
农业人口密度 X_{10}	0.204 ^①	0.067
人均 GDP X_{11}	- 0.275 ^①	0.058
农民人均纯收入 X_{12}	- 0.256 ^①	0.069

注: ① 为相关, $\alpha = 0.05$

表 3 轻度石漠化与土地矛盾指标类相关系数

指标 X_i	相关系数 R	1 - T假设检验置信度
土地垦殖率 X_{13}	0.432 ^②	0.000
土壤侵蚀面积 X_{14}	0.230 ^①	0.038
耕地	0.450 ^②	0.000
土地利 旱地	0.449 ^②	0.000
用 X_{15} 草地	0.417 ^②	0.000
未利用地	0.467 ^②	0.000
公路密度 X_{16}	0.048	0.670

注: ① 为相关, $T = 0.05$; ② 为显著相关, $T = 0.01$

河流发育深刻地受到岩性、地质构造、地貌等因素的控制, 相关分析表明, 河网密度与石漠化呈显著负相关, 相关系数达 - 0.627。究其原因, 石漠化的发生发展具有其时间序列过程, 是历史长期发展的产物; 喀斯特区域具有特殊的二元结构, 即地表径流和地下径流。由于长期的溶蚀作用, 喀斯特地区地下水系已相当发育, 地表水与地下水转化敏捷, 表土被侵蚀后很快进入地下淤积, 大量洞穴黏土沉积物来源就是近地表, 只有部分经长距离搬运后沉积在喀斯特坡立谷、洼地等负地形中, 成为极为宝贵的耕地。由于喀斯特地下河网的发育, 客观上削弱了地表河流的发育, 使得地表河网密度不及非喀斯特区。如长顺乌麻河流域, 为典型的喀斯特峰丛谷地、峰丛洼地, 地下河网极为发育, 流域上游广大地区极少有地表河, 石漠化多中度、强度, 极为严重, 究其原因, 地下河流的强烈侵蚀作用使然。故地表河网密度与石漠化表现为显著的负相关。

石漠化不仅受上述诸多自然因素的影响, 而且人为活动的作用也极为明显。人为活动对石漠化影响可分为直接影响和社会经济条件造成的间接影响。根据其相关系数可知, 人口密度与石漠化无相关性, 农业人口密度和人均 GDP 与石漠化的相关性较低, 人均 GDP 与石漠化为负相关关系。农民人均纯收入是用来研究石漠化与贫困之间关系而设立的指标, 石漠化与地区贫困是一对孪生兄弟, 石漠化面积大小和程度极大地决定了当地居民的生存环境, 石漠化的加速发展, 对生存环境构成了新的威胁, 二者为负相关关系,

相关系数为 - 0.256。总之, 尽管间接人为活动对石漠化的影响作用有一定体现, 但无显著因果关系。

喀斯特地区复杂的人地关系从其和谐性来说, 大致分为 2 类: 既有利于人地和谐相处, 共同发展的一面; 又有严重对立的一面, 人地矛盾突出, 陷入恶性循环的困境^[4]。这里讨论的人类活动对石漠化的直接影响, 多以矛盾对立的负面影响方式出现。

土地垦殖率是地区自然因素和社会因素的综合体现, 其垦殖方式、垦殖强度取决于人口数量与质量、经济水平、农业生产习惯等。全省土地垦殖率最低的是黔南州和黔东南州, 而垦殖率较高的区域为西部高原山地, 以及乌江、北盘江等河流的中上游地带为高垦殖区, 石漠化严重, 高强度的土地垦殖是以毁林开荒、陡坡开垦为代价的, 无疑加剧了该区的土壤侵蚀, 为石漠化进一步发展创造条件。分析结果表明, 两者是正相关关系, 系数为 0.432。

土壤侵蚀是石漠化最直接的影响因素, 在脆弱的喀斯特区域, 成土条件差, 土层浅薄, 抗蚀年限短, 经过强烈的土壤侵蚀后, 土被丧失, 植被退化, 石漠化形成。全省土壤侵蚀严重地区, 如毕节、铜仁、遵义, 石漠化程度远不及其它喀斯特地区, 土壤侵蚀与石漠化呈正相关, 相关系数为 0.230。二者有因果关系, 石漠化是土壤侵蚀长期作用的结果, 土壤侵蚀是石漠化某一阶段作用强度的体现, 但两者各有其不同的划分原则和评价指标体系, 不能将两者等同起来。

土地利用结构不同, 表现出不同抗水土流失能力大小的功能差异, 进而与石漠化产生密切的联系。结果表明, 所选几项指标与石漠化呈显著正相关, 其相关系数分别为 0.450, 0.449, 0.417, 0.467。耕地, 尤其是旱地与石漠化正相关, 不合理的毁林开荒、陡坡耕种, 使得土地进一步石漠化; 贵州的草地, 无天然优质草场, 多为次生的轻度或中度石漠化的草山草坡, 故呈正相关; 未利用地多为历史时期非合理利用, 土壤已丧失了的中度和强度石漠化土地, 即所谓未利用地, 实为难利用地, 故其与石漠化呈显著正相关。须说明的是这一指标系列中, 耕地与旱地在实质意义上具有相似性, 因为耕地中的水田不存在石漠化, 在确定主导因子时, 避免重复计算, 只能二者取一。

综上所述, 石漠化形成的影响因素不仅有来自于其脆弱的环境背景方面, 也有来自人类不合理活动的直接和间接影响方面, 是一个多因子综合作用的产物。在复杂的自然和人为活动因子中, 对喀斯特石漠化起主导控制作用的因子有 9 个 (表 4)。各主导因子权重依次为 16, 14.6, 13.7, 10.3, 9.8, 9.7, 9.5, 9.2, 7.0。另外, 高原区占国土面积百分比、多年平均降水

量、农业人口密度、人均 GDP(元)、农民人均纯收入、土壤侵蚀面积等指标对石漠化有一定的影响,但相关系数小,不作为主导因子。

表 4 喀斯特石漠化主要影响因子及其排序

指标 X_i	相关系数 R	重要性序数
植被覆盖率	- 0.733	1
喀斯特面积	0.664	2
河网密度	- 0.627	3
未利用地	0.467	4
耕地	0.450	5
平均海拔高程	0.443	6
土地垦殖率	0.432	7
草地	0.417	8
$\geq 25^\circ$ 坡地面积	0.321	9

分析结果揭示出了一些与传统观念不一致的认识: (1) 石漠化与河网密度呈显著负相关,而传统观念认为河网密度越大导致的土壤侵蚀越严重,石漠化程度越大,即两者为正相关关系; (2) 关于土壤侵蚀与石漠化的关系问题,传统认为,石漠化是土壤侵蚀的必然结果,常将两者等同起来。而本文相关分析的结果表明,两者的相关性较小,缘于二者有着不同的发生学原理,既有联系又有较大差异,在理论研究和实践中应注意区别对待; (3) 土地利用中草地与石漠化的相关问题,传统认为,草地对涵养水源、保持水土、防止石漠化方面有积极的作用,两者之间应呈现明显的负相关关系,而本文分析结果却表现为显著的正相关。另外,作为影响石漠化的一个重要环境背景因子——土壤,尤其是土层厚度、土壤抗蚀年限等方面的资料缺乏,在本文分析中无法采用,只能通过其它指标如岩性等间接表征。

3 喀斯特石漠化综合动力指数分析

通过单因子相关分析提出的 9 个指标,能较为正确地反映出石漠化的空间分布规律。但其影响因子多,因子之间未作相互影响成分去除,仍需对其进行进一步数学分析,引入石漠化动力指数 I_R (Rock Desert Dynamic Index) 来表征县域单位的石漠化潜在威胁程度,将影响因子化为相互正交的几组公因子,作降维处理,建立石漠化影响因子的综合动力模型,得出喀斯特石漠化动力指数 I_R 及其石漠化潜在能力分级图,并与 GIS- RS 解译的石漠化现状结果作对比分析,以此作为石漠化综合治理的依据。

采用主成分分析法,提取几个不相关的潜在综合性指标而保持其原始指标所提供的大量信息,分析植被覆盖率、喀斯特面积、河网密度、未利用地、耕地、平均海拔高程、土地垦殖率、草地、 $\geq 25^\circ$ 坡地面积 9 个

指标驱动石漠化形成发展的多因子信息。各指标变量来源不同,表达方式不一样,首先进行标准化处理,处理方法如下:

$$y_i = (x_i - \bar{x}) / s \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中: \bar{x} ——均值; S ——样本标准差,在标准化后数据的基础上建立各变量的查相关数据阵:

$$R = (r_{i,j}) P_j^* p$$

然后再计算矩阵对应特征的单位特征向量,将向量作线性组合:

$$F_i = a_{1i} X_1 + a_{2i} X_2 + \dots + a_{pi} X_p$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

在输出 m 个主成分后,依据公式:

$$Y = a_1 Y_1 + a_2 Y_2 + \dots + a_m Y_m$$

进行综合指数的计算,主要结果见表 5

表 5 总方差解释

序号	初始特征值			再生特征值		
	T	$V\%$	$C\%$	T	$V\%$	$C\%$
1	4.26	347.370	47.370	4.26	347.370	47.370
2	1.61	317.927	65.298	1.61	317.927	65.298
3	1.13	212.581	77.878	1.13	212.581	77.878

注: T 为特征值; $V\%$ 为特征值占总方差比例; $C\%$ 为特征值占总方差累计值。

数据显示的是按特征值大于 1 的原则提取的 3 个因子特征值、占总方差百分数及其累加值。3 个因子所解释的方差约占整个方差的 80%,能比较全面地反映所有信息。

表 6 中, F_1, F_2, F_3 分别为公共因子,从各因子模型可以看出, F_1 主要由耕地、土地垦殖、碳酸盐岩面积、森林覆盖率、平均海拔、坡地面积和河网密度决定,它们在 F_1 中的荷载分别为 0.855, 0.846, 0.762, - 0.756, 0.747, 0.690, - 0.688。 F_2 主要由未利用地 (- 0.682) 决定, F_3 主要由草地 (0.749) 决定。利用 F_1, F_2 和 F_3 与 GIS- RS 数据作相关分析, F_1 为石漠化估算的最佳因子 (相关系数为 0.759), 得出喀斯特石漠化线型模型:

表 6 因子荷载矩阵

因子	F_1	F_2	F_3
碳酸岩盐面积	0.762	- 0.210	- 0.310
平均海拔	0.747	0.183	0.313
河网密度	- 0.688	0.364	0.324
森林覆盖	- 0.756	0.448	- 0.198
坡地面积	0.690	- 0.365	0.281
土地垦殖	0.846	0.404	0.172
耕地	0.855	0.404	0.154
草地	0.145	- 0.528	0.749
未利用地	0.369	- 0.682	- 0.315

$$I_R = \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (i = 1, 2, \dots, 9)$$

式中: a_i —— F 的荷载向量; X_i ——变量值。

根据特征向量得出每个主成分的权重值, 输出综合评价指数(图 1), 需要说明的是由这 9 个指标所提取的 I_R 代表的是可能发生的石漠化强度, 而不是代表现在已发生的石漠化强度。

考虑到以上相关指标均以县域为单位, 对 GIS-RS 解译出的石漠化数据作归并处理, 以轻度以上石漠化面积的百分比 P 来反映县域石漠化程度, 将全省各县域单位划分为 5 类: 无石漠化县 ($P < 5\%$), 轻度石漠化县 ($5\% \leq P < 15\%$), 中度石漠化县 ($15\% \leq P < 25\%$), 强度石漠化县 ($25\% \leq P < 35\%$) 和极强度石漠化县 ($P \geq 35\%$), 做县域石漠化简图(图 2), 以便与各因子进行相关分析。

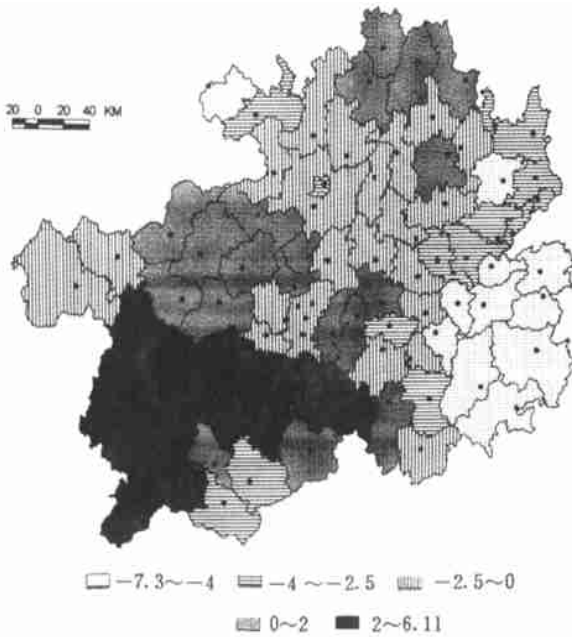


图 1 贵州省喀斯特石漠化动力指数分级

对比分析图 1, 2 可知, 两者有较好的一致性, 说明此研究方法可行, 结果有价值。同时, 两者有一定的差异性, 原因是前者表示现状, 而后者表示石漠化能力, 即一种潜在趋势。就石漠化的程度来说, 后者明显强于前者, 这又得到了更好的应证。如不采取有效的防治措施, 及时遏制石漠化的进一步发展, 若干年后, 动力指数显示的石漠化潜在趋势将成为现实, 这将给生活在这一地区的人们带来更大的威胁。根据 I_R 输出结果, 将全省石漠化潜在趋势划分为: 黔东无石漠化安全区, 黔东轻度石漠化趋势区, 黔北赤水习水轻度石漠化趋势小区, 黔西南册亨, 望谟轻度石漠化趋

势小区, 黔中、黔北中度石漠化危险区, 黔西北威宁、赫章中度石漠化危险小区, 黔南强度石漠化威胁区, 黔西北强度石漠化威胁区, 黔东北强度石漠化威胁区, 黔南、黔西南和西部极强度石漠化威胁区。

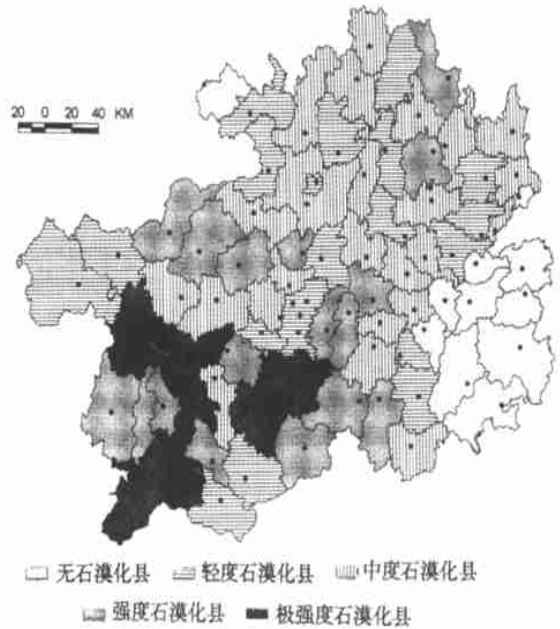


图 2 贵州省喀斯特石漠化现状示意图

I_R 指数的提出, 对于石漠化土地的生态恢复, 有侧重地进行石漠化防治, 具有较强的指导意义。根据现状与潜在危险的差值大小, 评判今后一段时期各区域石漠化发展的速度与趋势, 因地制宜, 实施不同的治理措施, 才能更有效地防止石漠化的进一步恶化。如在极强度石漠化地区, 实施环境移民、封山育林、国家公园建设; 在强度石漠化威胁区, 如黔西北、黔东北等广大地区, 应大力实施水土流失防治工程, 退耕还林, 草地畜牧业, 坡改梯工程。治理恢复工作将是长期的、艰巨的、必须的任务。

[参 考 文 献]

- [1] Yuan Daoxian. Rock Desertification in the Subtropical Karst of South China[Z]. In: Webmaster. Copyrights by Karst Dynamics Laboratory and Network Center of Guangxi Normal University, 1995-1999.
- [2] 潘锋. 科学时报 [N]. <http://www.sciencetimes.net/D1-xw001.htm>, 2001-02-15.
- [3] 刘燕华, 王强. 中国适宜人口分布研究 [J]. 中国人口·资源·环境, 2001, 11(1): 34-35.
- [4] 张殿发, 等. 中国西南喀斯特地区人口、资源、环境与可持续发展 [J]. 中国人口·资源·环境, 2001, 11(1): 34-35.