

DOI: 10.11929/j.swfu.201812035

引文格式: 刘鹏, 张紫霞, 杨波, 等. 基于信息熵与层次分析法的石漠化形成驱动因素分析 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2019, 39(5): 100-109.

基于信息熵与层次分析法的石漠化形成驱动因素分析

刘鹏^{1,2} 张紫霞^{1,2} 杨波¹ 王妍¹ 刘云根^{2,3} 李乡旺¹ 张叶飞¹

(1. 西南林业大学石漠化研究院, 云南昆明 650233; 2. 西南林业大学生态与水土保持学院, 云南昆明 650233;
3. 西南林业大学水科学与工程中心, 云南昆明 650233)

摘要: 以喀斯特石漠化分布较多的地区云南县域尺度石漠化分布为研究对象, 探讨影响土地石漠化形成与发展的主导因子, 采用信息熵和层次分析相结合的方式对各驱动因子进行定量化分析。结果表明: 石漠化发生发展的驱动因素重要性排序为人口数量 (0.278) > 农业生产 (0.223) > 工业活动 (0.187) > 经济因素 (0.123) > 气候因素 (0.080) > 土壤因素 (0.044) > 地形地貌 (0.043) > 植被因素 (0.023); 人口自然增长率、土地利用方式、采矿挖煤、地区生产总值、人口密度和陡坡耕作是石漠化形成的核心驱动因素; 云南省中、高山地区是石漠化最为集中的区域, 石漠化土地面积达 280.3 万 hm^2 , 占全省石漠化土地面积的 97.3%; 不同土地利用类型中的林地及耕地类型下石漠化面积分布最广, 为 184.6 万 hm^2 , 占石漠化总面积的 64.1%。从土地石漠化的成因来看, 过度樵采和毁林 (草) 开荒造成的石漠化面积最多, 程度也最严重。

关键词: 石漠化; 驱动因素; 层次分析法; 信息熵; 云南省

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2019)05-0100-10

Analysis of Driving Factors of Rock Desertification Formation Based on Information Entropy and Analytic Hierarchy Process

Liu Peng^{1,2}, Zhang Zixia^{1,2}, Yang Bo¹, Wang Yan¹, Liu Yungen^{2,3}, Li Xiangwang¹, Zhang Yefei¹

(1. Research Institute of Stony Desertification, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China; 2. College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China; 3. Research Institute of Rural Sewage Treatment, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China)

Abstract: The distribution of rocky desertification in Yunnan County with a large distribution of karst rocky desertification was the research object. To explore the dominant factors affecting the formation and development of rocky desertification, and use the combination of information entropy and analytic hierarchy to quantitatively analyze the driving factors. Results show that the order of importance of driving factors for rocky desertification is as population (0.278) > agricultural production (0.223) > industrial activity (0.187) > economic factor (0.123) > climate factor (0.080) > soil factor (0.044) > topography and landform (0.043) > vegetation factor (0.023). Natural population growth rates, land use patterns, mining for coal, gross regional product, population density and steep slope tillage are the core drivers of rocky desertification. The middle and high mountain areas of Yunnan Province are the areas with the highest concentration of rocky desertification. The area of rocky desertification reaches 2.80 million hm^2 , accounting for 97.3% of the whole province's rocky desertification area. Among different land use

收稿日期: 2018-11-01; 修回日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31560237, 31760245) 资助。

第 1 作者: 刘鹏 (1995—), 男, 硕士研究生。研究方向: 脆弱生态系统修复。Email: 1564385618@qq.com。

通信作者: 王妍 (1980—), 女, 副教授。研究方向: 脆弱生态系统恢复。Email: wycaf@126.com。

types, the area of rocky desertification is most widely distributed under the types of woodland and arable land, which is 1.85 million hm^2 , accounting for 64.1% of the total area of rocky desertification. From the causes of land rocky desertification, excessive woodcutting and deforestation (grass) caused the most rocky desertification area, the most serious degree.

Key words: rock desertification; driving factors; analytic hierarchy process; information entropy; Yunnan

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、水土流失、岩石逐渐裸露、土地生产力衰退甚至丧失, 地表呈现石质荒漠景观的演变过程。表现为水土流失加重、植被覆盖率和土壤涵养水源能力降低、生态环境恶化^[1], 给当地人民的生产、生活及经济发展带来了严重的影响^[2-3]。云南是全国石漠化最严重的省区之一, 岩溶面积为 11.1 万 km^2 , 占全省土地面积的 28.1%, 居全国第 2 位^[4]。由于长期以来对资源不合理的利用, 土地不堪重负, 致使岩溶地区石漠化日趋严重, 其生态系统处于崩溃边缘, 是云南省最为严重的生态问题之一, 影响着长江、珠江、澜沧江等国内、国际河流的生态安全, 制约着全省经济社会的可持续发展。

日益严重的石漠化问题已成为当前地理学界的研究热点, 大批国内外专家学者分别从石漠化的特征及成因、治理策略^[5-8]和石漠化地区土壤性质^[9-10]、景观格局演变特征^[11]进行了深入研究。也有专家学者致力于石漠化驱动机制的研究, 但大多是基于 3S 技术或统计分析进行的研究^[12-13], 且主要集中于贵州、广西等地, 省内类似研究则鲜有报道。当前关于喀斯特石漠化研究仍存在较多科学问题, 尤其是石漠化形成的主导因素和喀斯特坡地水土流失的相关研究有待进一步探索。为此, 本研究以云南省县域尺度石漠化分布为研究对象, 运用信息熵和层次分析法, 从喀斯特生态系统的气候、土壤、植被、地形地貌及人类活动入手。确定云南省石漠化形成的驱动因素, 并进行量化分析, 研究结果对石漠化防治工作有参考价值。

1 研究区概况

云南地处中国西南边陲 ($97^{\circ}31'39''\text{E} \sim 106^{\circ}11'47''\text{E}$, $21^{\circ}08'32''\text{N} \sim 29^{\circ}15'08''\text{N}$), 全省石漠化土地面积为 284.0 万 hm^2 , 潜在石漠化面积为 177.1 万 hm^2 , 合计占国土总面积的 12%^[4]。云南地貌总体上可以分为 3 大台阶: 第 1 台阶为德

钦、香格里拉, 第 2 台阶为云南高原, 第 3 台阶为南部边境地区。境内大部分地区属于山地高原地形, 地势自西北向东南呈阶梯状逐级下降, 省内最高点为梅里雪山卡格博峰, 海拔 6 740 m; 最低点为河口县红河出水口处, 海拔 76.4 m; 云南属于亚热带高原季风气候区, 全省平均气温, 最热 (7 月) 月均温在 $19 \sim 22^{\circ}\text{C}$ 之间, 最冷 (1 月) 月均温在 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$ 以上, 年温差一般只有 $10 \sim 12^{\circ}\text{C}$ 。降水在季节上和地域上的分配极不均匀, 干湿季节分明, 雨季为 5—10 月, 集中了全年 85% 的降雨量; 根据云南省第 2 次土壤普查结果, 石漠化地区主要地带性土壤有砖红壤、赤红壤、红壤、黄壤、棕色土。此外, 在垂向分布上有褐土、棕壤及非地带性紫色土及石灰土等^[14]; 南部热带地区的地带性植被是热带雨林和季雨林, 在北纬 $23^{\circ}30' \sim 25^{\circ}00'$ 亚热带南部季风常绿阔叶林占有最大的分布面积, 亚热带北部 (半湿润) 常绿阔叶林是云南省分布最广的地带性植被类型, 西北部为横断山脉中段, 优势分布的植被为寒温性针叶林, 东北角则主要为湿性常绿阔叶林所分布。

云南省石漠化集中分布在滇中、滇东的岩溶断陷盆地, 滇东北的岩溶峡谷石漠化地区, 滇东南的峰丛洼地石漠化地区; 滇西北的中高山石漠化地区也有小片石漠化集中分布^[15-16], 具体如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 数据获取

2017 年 12 月从《云南省石漠化状况公报》中收集了石漠化县域分布、石漠化面积、石漠化程度基础数据制成《云南省石漠化分布图》(图 1); 2018 年 2 月从《云南气候》中获取年均温、年均降雨量、干燥度数据; 地带性土壤根据云南省第 2 次土壤普查数据资料集结果; 人口密度及农村居民人均纯收入数据于 2018 年 10 月从《云南省 2017 年国民经济和社会发展统计公报》中收集到。

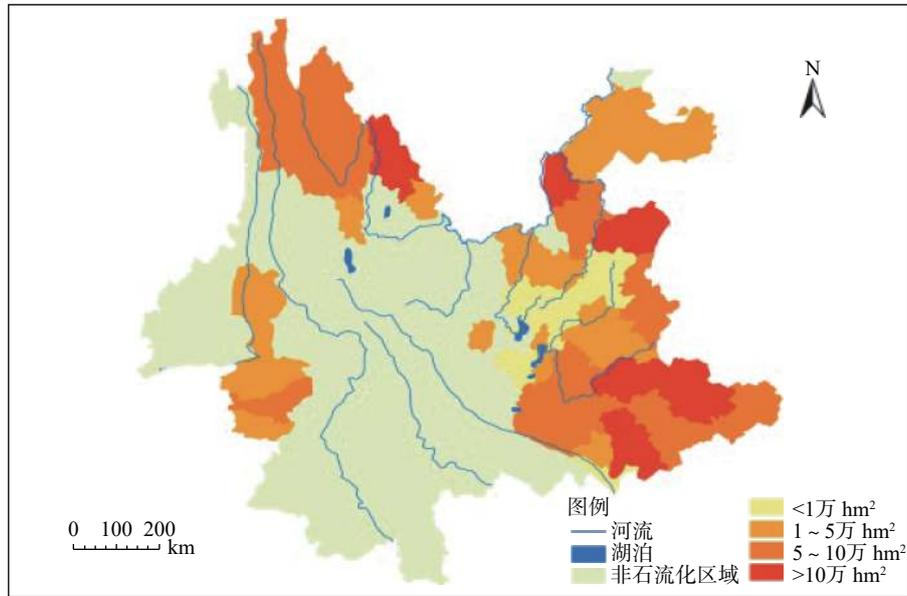


图1 石漠化分布

Fig. 1 Distribution of rocky desertification

2.2 指标体系及权重确立

气候、土壤、植被、地形地貌对石漠化分布有影响，但影响程度不一。运用层次分析法把和决策相关的元素拆分成目标层、方案层、准则层等^[17]，并在此基础上进行定性分析与定量分析。具体计算步骤如下^[18]：建立层次结构模型。构造判断矩阵并邀请石漠化领域专家进行指标间两两重要性的判评，构建判断矩阵 C ；矩阵 C 的最大特征根 λ_{\max} 和其对应的特征向量 W ，满足 $CW=\lambda_{\max}W$ ，其中特征向量 W 的分量就是各影响因素的权重。计算一致性指标（consistency index, C_1 ）为 $C_1=(\lambda_{\max})/(n-1)$ ， n 是矩阵的阶数。根据 n 查出平均随机一致性指标（ R_1 ）。当 $C_1/R_1\leq 0.1$ 时，认为判断矩阵的一致性是可以接受的，否则应对判断矩阵作出适当修正；经过上述步骤即可得出其权重集： $W=[W_1, W_2, \dots, W_n]$ 。

2.3 基于信息熵的权重修正

由于层次分析法评价过程有主观臆断性的缺陷，利用信息熵对不同指标的相对重要性进行比较，提供一个相对重要的测度，并引入评价者主观判断权值，合成一个实用权值，最终可以排除人为因素、风险因素等的干扰。用层次分析法求得评价指标集 $U=[u_1, u_2, \dots, u_n]$ 其权重为 $W=[W_1, W_2, \dots, W_n]$ ，其判断矩阵为 $B=(b_{gh})_{q\times q}$ ，用信息熵对其修正的步骤如下^[19]：

对 B 进行归一化处理：

$$b'_{gh}=b_{gh}/\sum_{g=1}^qb_{gh}(g,h=1,2,\dots,q) \quad (1)$$

定义指标 $U_h(1,2,\dots,q)$ 的输出熵：

$$E_h=-\sum_{g=1}^qb'_{gh}\ln b'_{gh}/\ln q \quad (2)$$

求指标 U_h 的偏差度：

$$d_h=1-E_h \quad (3)$$

确定指标 U_h 的信息权重：

$$\mu_h=d_h/\sum_{h=1}^qd_h \quad (4)$$

将权重分配集合 $W=[W_1, W_2, \dots, W_n]$ 修正为 $W'=[W'_1, W'_2, \dots, W'_n]$ ，计算公式：

$$W'_h=\mu_h W_h/\sum_{h=1}^q\mu_h W_h \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 石漠化驱动因子量化分析

3.1.1 层次结构模型

云南省岩溶地区碳酸盐岩致密坚硬、生态敏感度高、环境容量低、抗干扰能力弱，在这种环境背景下森林植被一旦遭到人为破坏，水土流失会直接导致岩石裸露和生产力降低，石漠化程度的加深和面积的不断扩大^[16]。因此，土地石漠化是自然因素与人为因素综合作用的产物。在深入调查云南省石漠化形成的自然条件和人为影响的基础上，结合前人已有的研究^[4-5, 12-13, 16]，以各驱动因子为基础构建层次结构模型见图2。

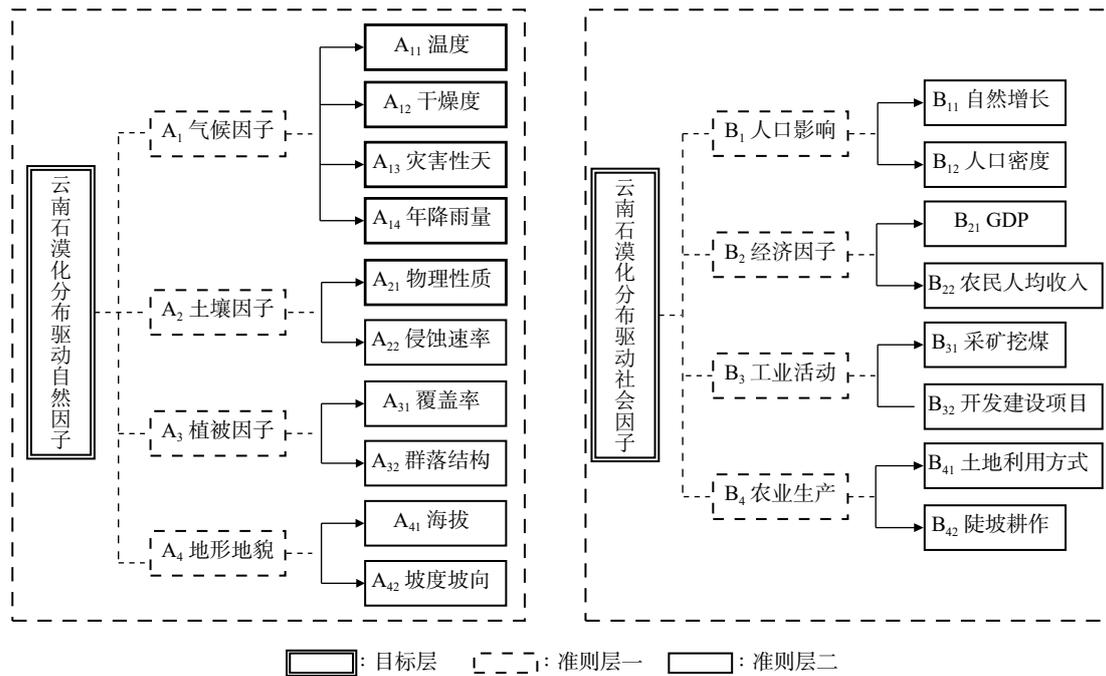


图 2 石漠化驱动因子层次结构模型

Fig. 2 Hierarchical model of rocky desertification driving factors

3.1.2 约请专家填写判断矩阵

为了提高指标权重的科学性、合理性，约请 5 位从事云南省石漠化治理与修复研究的专家填写判断矩阵，各位专家单独填写，不相互讨论。专家只填写矩阵对角线的上半部即可（如表 1），因判断矩阵满足 $P_{ij}=1, P_{ij}=1/P_{ji}$ ，是正的反商矩阵。填写矩阵时进行两两比较，客观反应两因素相互之间的重要程度。各个标度代表着相邻两个因素的重要性比较结果，具体含义见表 2。

表 1 因子关系矩阵

Table 1 Factor relation matrix

A	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
A ₁	1	2	3	4	1/4	1/2	1/3	1/2
A ₂		1	2	3	1/5	1/3	1/4	1/3
A ₃			1	2	1/6	1/4	1/5	1/4
A ₄				1	1/7	1/5	1/6	1/5
B ₁					1	3	2	4
B ₂						1	1/2	2
B ₃							1	3
B ₄								1

表 2 标度及其含义

Table 2 Scale and its meaning

标度	含义
1	表示 2 个因素相比，具有相同重要性
3	表示 2 个因素相比，前者比后者稍重要
5	表示 2 个因素相比，前者比后者明显重要
7	表示 2 个因素相比，前者比后者强烈重要
9	表示 2 个因素相比，前者比后者极端重要
2、4、6、8	示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij} ，那么因素 j 与因素 i 重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

3.1.3 权重输出

运用层次分析法软件 yaahp 进行分析，权重输出结果见图 3。

3.1.4 一致性检验

经计算，各位专家评定权重的 C_1/R_1 值分别为（0.030 7、0.050 3、0.050 8、0.082 3、0.064 8）皆小于 0.1，判断矩阵的一致性可以接受，模型评价指标权重计算合理，判断矩阵得出的权重向量是可靠的。各专家给出的判断矩阵满足层次分析法的录用条件，权重汇总见表 3。

3.1.5 信息熵修正

在层次分析法所得权重的基础上，再运用信息熵对权重进行修正，结果见图 5。

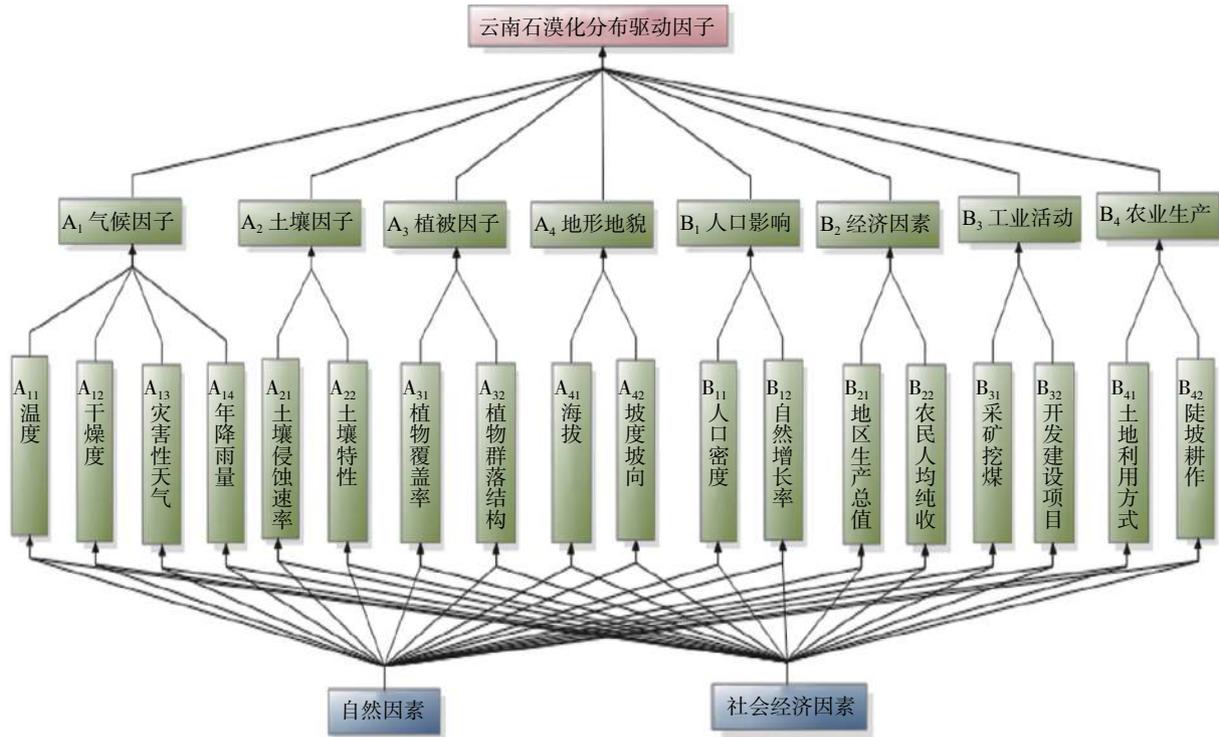


图3 AHP分析结果

Fig. 3 The results of AHP

表3 AHP权重汇总

Table 3 Summary of AHP weights

准则层一	准则层二	AHP结果输出					平均权重
		专家1	专家2	专家3	专家4	专家5	
A ₁	A ₁₁	0.038 9	0.039 4	0.046 9	0.057 3	0.046 4	0.045 8
	A ₁₂	0.023 1	0.022 2	0.020 5	0.021 9	0.019 5	0.021 4
	A ₁₃	0.013 3	0.012 8	0.011 2	0.013 0	0.009 0	0.011 9
	A ₁₄	0.007 9	0.007 2	0.006 1	0.007 5	0.004 6	0.006 7
A ₂	A ₂₁	0.013 7	0.012 7	0.019 4	0.018 7	0.017 5	0.016 4
	A ₂₂	0.041 0	0.038 2	0.038 8	0.037 4	0.035 1	0.038 1
A ₃	A ₃₁	0.030 8	0.028 5	0.028 9	0.026 5	0.024 1	0.027 8
	A ₃₂	0.006 2	0.005 7	0.005 8	0.005 3	0.004 8	0.005 6
A ₄	A ₄₁	0.006 6	0.005 8	0.005 3	0.004 7	0.004 7	0.017 0
	A ₄₂	0.002 0	0.017 5	0.015 8	0.014 1	0.014 0	0.060 2
B ₁	B ₁₁	0.080 2	0.080 0	0.063 3	0.060 9	0.061 5	0.073 6
	B ₁₂	0.240 5	0.240 1	0.253 2	0.243 8	0.246 1	0.199 8
B ₂	B ₂₁	0.085 8	0.081 1	0.085 4	0.081 4	0.087 5	0.088 2
	B ₂₂	0.028 6	0.027 0	0.028 5	0.027 1	0.029 2	0.029 4
B ₃	B ₃₁	0.108 3	0.104 5	0.105 4	0.120 6	0.120 6	0.125 4
	B ₃₂	0.036 1	0.034 8	0.035 1	0.040 2	0.040 5	0.041 8
B ₄	B ₄₁	0.164 6	0.181 6	0.172 9	0.167 5	0.175 3	0.172 4
	B ₄₂	0.054 9	0.060 5	0.057 6	0.055 8	0.058 4	0.057 4

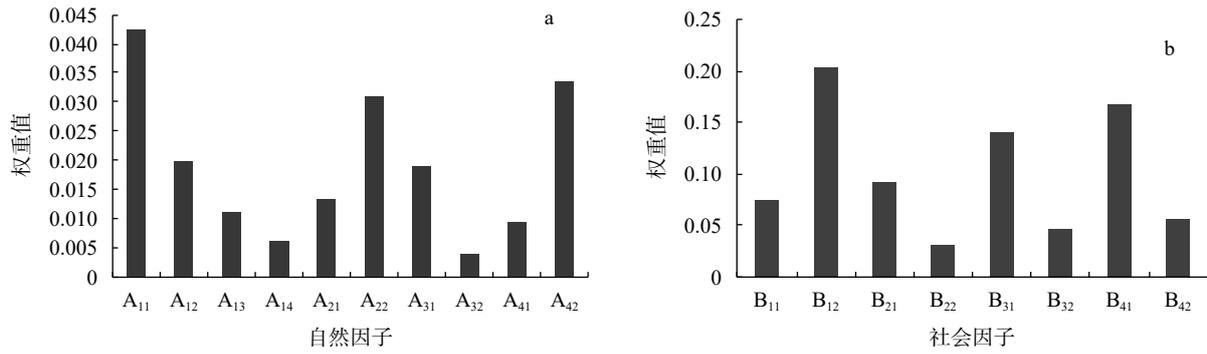


图 5 驱动因子权重
Fig. 5 Driving factor weight

分析说明，对云南省石漠化发生发展有直接影响的是人口压力、土地利用、资源开发等社会因子，合计权重值为 0.76，在石漠化综合治理中起关键作用。其中，人口自然增长率权重最大（0.2），其次是土地利用方式（0.17）；自然因子中气候、土壤特性、坡度 3 个因子所占权重值较高合计为 0.11，其余自然因子总权重为 0.13，驱动作用不明显。根据参考文献 [20] 关于石漠化

土地成因的调查结果（表 4）可知，人为原因造成的石漠化面积为 192.5 万 hm^2 ，占石漠化土地总面积的 66.8%，是自然原因造成石漠化土地面积（95.6 万 hm^2 ）的 2 倍。其中，过度樵采和毁林（草）开荒造成的石漠化面积最多，达 148.8 万 hm^2 ，石漠化程度也较为严重，多为中、强度石漠化类型，与本研究所得出的结论相一致。

表 4 石漠化土地按成因统计表

Table 4 Statistics according to the causes of rocky desertification land

万 hm^2

成因	轻度石漠化	中度石漠化	强度石漠化	极强度石漠化	合计	
人为原因	毁林（草）开荒	5.3	22.0	6.7	0.7	34.8
	过牧	3.9	5.6	4.3	0.5	14.4
	过度樵采	44.5	49.3	16.7	3.5	114.0
	火烧	0.8	1.3	0.8	0.2	3.1
	工矿工程建设	0.1	0.1	0.2	0.1	0.6
	工业污染	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05
	不适当经营方式	7.0	15.7	1.4	0.4	24.5
	其他	0.3	0.4	0.08	0.1	0.96
	小计	61.9	94.7	30.3	5.6	192.5
	自然原因	地质灾害	4.1	8.5	3.2	1.5
灾害性气候		5.0	5.1	2.2	3.5	15.8
其他		17.8	28.1	12.6	3.8	62.3
小计		26.9	41.7	18.0	8.8	95.6
合计	88.9	136.4	48.4	14.4	288.1	

注：数据来源为文献[20]。

3.2 各驱动因素对石漠化的影响分析

3.2.1 气候因素

植被在石漠化进程中扮演着无可替代的作用,云南岩溶地区在多雨的生长季节,也常出现蒸发量大于降雨量的干燥期,形成岩溶性干旱气候,不利于植被生长。在独特的地质地貌基底上,一旦植被破坏,水热优势则立即会转化为强烈的破坏营力,难以恢复^[21]。

云南气象灾害种类较多,尤其是干旱、洪涝、低温冷害、风雹所造成的危害最为严重,是中国气象灾害频繁的省份之一。1)滇东北地处云贵高原准静止峰面上,雨季初期常会降暴雨或特大暴雨,大量泥沙被冲走,使基岩裸露在外;2)滇东南、滇西南地处亚热带,植物种类多为喜温物种,部分年份受西伯利亚低温影响,局部林木冻死,植被保土能力减弱^[22]。云南省岩溶地区治理开发协会提供的资料显示,云南省1950—1985年的36 a中,较大的洪涝灾害有15次,大旱14次,平均每2~3 a出现1次;最近10余年来,常出现三年两头大旱或连续干旱或先旱后涝。大旱大涝最严重的地方几乎都是喀斯特石漠化集中地区。昭通、曲靖、文山、红河等云南石漠化集中的地区的气象灾害发生频繁,已由原来的14 a 1次上升到现在的3 a 1次。

谷晓平等^[23]对贵州省石漠化驱动因子与石漠化强度指数进行相关性分析后得出结论:自然气候要素特别是暴雨为石漠化的发生发展提供了直接的驱动力,并随着雨量级的增加其对石漠化的驱动作用越强。云南岩溶地区的年降水量多在750~1 300 mm,雨季降雨多而集中,雨量占全年的85%~95%。短期内过于集中的降雨,对坡耕地及植被稀疏的岩溶山地裸露的土壤冲刷严重,加剧了水土流失速率。近年来云南年降雨日数减少,但是年暴雨日数增加,若不采取相应的石漠化治理措施,减少暴雨导致的水土流失,土地石漠化是必然结果。

3.2.2 土壤因素

云南土壤的种类及土壤厚度受地质环境的制约,石漠化地区土壤容重大,坚实度增加,而孔隙度低,土壤结构恶化,有机质含量大幅度降低。地表枯落物层也逐渐减少直至消失,这种现象在石漠化地区使地表水与地下水之间的良性循环向着恶性循环转变,水分储量大大减少,散失速度加快,生态系统向干旱生境退

化。植物在石漠化土壤上会因为细胞过度失水而死亡,导致植被覆盖率减小^[24]。在石漠化地区,由于碳酸盐岩与上层土壤之间通常存在着明显的软硬界面,使岩土之间的亲和力与粘着力变差,土壤易于流失^[25]。有研究表明,在岩溶地区平均每形成1 cm厚的土层,需要8 000 a时间^[26]。若考虑到自然剥蚀作用,成土速率更慢,土壤允许流失量远小于非喀斯特地区,土壤流失后难以再生。

3.2.3 植被因素

森林植被在自然界中对水土的涵养起着重要的作用。云南岩溶地区的森林植被覆盖率均较低,林地类型多为灌木林地或草地,林灌草复合型林地较少。这种植被类型涵养水源能力差,水土流失严重,土壤侵蚀模数远高于非岩溶区^[21]。且岩溶地区土壤贫瘠,地下水埋深大,旱涝频繁等脆弱性基底原因,植被生长缓慢,适生树种稀少,群落结构简单,自我调控力弱^[16]。植物根系对土壤的固定作用无可替代,植被的退化,降低了水土稳定性,增加了土地石漠化的风险。

3.2.4 地形地貌

云南岩溶区地形、水文气候、土壤等地理环境要素复杂,高山深谷、峰丛、洼地交错分布,这些特点决定了区内水土资源易流失,降低了生态环境的抗干扰能力^[16]。由于岩溶发育强烈,使地表水及地表径流很快通过漏斗、裂隙排入地下河^[27]。这是喀斯特地区特有的一种流失方式,它不是由地表径流引起的远距离物理冲刷导致的坡面水土流失,而是通过碳酸盐母岩间的裂隙或碳酸盐母岩中存在的孔隙直接流失,使得溶蚀残余物质或土壤颗粒“垂直丢失”。

从表5可知,中、高山地形地貌区域土地石漠化面积最大石漠化程度也最为严重,石漠化土地面积达280.3万 hm^2 ,占全省石漠化面积的97.5%。而平原、丘陵地区土地石漠化面积仅为1.48万 hm^2 ,且石漠化程度多为中、轻度石漠化。闫利会等^[28]的研究发现,喀斯特石漠化不敏感区域主要分布在低海拔平原、丘陵和台地区,轻度和中度敏感区域主要分布在高海拔丘陵、平原和台地,高度以上敏感区域主要分布在高、中、低山和河谷地区。所以,在今后的石漠化综合治理过程中,应重点关注中、高山石漠化区域,集中力量进行攻坚治理。

表 5 石漠化面积按地形地貌类型统计

Table 5 Rocky desertification area according to topographic and geomorphological types

万 hm^2

地形地貌	石漠化土地				潜在石漠化土地	合计
	轻度石漠化	中度石漠化	强度石漠化	小计		
平原	0	0	0	0	0.02	0.02
丘陵	0.4	0.9	0.06	1.3	0.2	1.5
低山	1.6	3.6	1.3	6.6	3.5	10.1
中山	87.0	131.9	47.0	280.3	168.9	449.1
合计	88.9	136.4	48.4	288.1	172.6	460.7

注：数据来源为文献[20]。

3.2.5 人口因素

研究表明，在岩溶地区人口密度超过 100 人/ km^2 时，就会出现不合理垦殖和严重水土流失，而当人口密度超过 150 人/ km^2 时，就极有可能发生石漠化^[16]。人口增长对粮食、耕地以及生活资源的需求总量增加，导致毁林废草开荒，不合理的土地利用，使得本已脆弱的喀斯特生态环境恶化，农业生产艰难，土地生产力低下，农业单位产量低，形成恶性循环^[29]。

3.2.6 经济因素

安国英等^[30]的研究发现，石漠化面积与农民人均纯收入、人均第一产业生产总值和人均生产总值呈负相关；石漠化发生率、石漠化所占比例也与农民人均纯收入呈负相关。云南省石漠化集中分布的区域多为贫困地区，农业人口较多，人们只能依靠土地维持生计。而石漠化地区土地贫瘠，作物产量低。破坏了生态平衡，农民经济收入却依旧处于较低水平，陷入贫困与石漠化加剧的恶性循环中。此外在经济相对发达的地区，人们为了追求经济利益而肆意的毁林开荒、地表开采、大兴土木，使得本不具备石漠化发育条件的地质背景区域也开始了石漠化演替。

3.2.7 工业活动

云南省地质现象种类繁多，成矿条件优越，矿产资源极为丰富，尤以有色金属及磷矿著称，被誉为“有色金属王国”，有着得天独厚的矿产资源。滇东和滇东南地区的开远、蒙自、个旧等地工业活动最为频繁，也是石漠化现象最突出的区域^[31]。采矿挖煤等工业活动导致原有的生态环境遭到破坏，大量当地宜生乔木、灌木、草本和

苔藓等植物死亡，加快了石漠化进程。另外，如铁路、公路等交通枢纽的建设、新建水利工程等开发建设项目也增加了对表土的扰动，加剧水土流失的风险。

3.2.8 农业生产

云南省土地总面积为 $3\ 832.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，未利用土地 $736.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，占 19.2%，其中，文山、红河州未利用土地占比最高，分别为 27.4%、28.0%，怒江州为 20.8%，曲靖、昭通分别为 18.2%、19.4%。在上述未利用土地中，有很大部分是植被退化造成石漠化后的裸岩地、荒草地等^[32]。据 1980 年的统计数据，60 个岩溶县（市）耕地面积为 163.8 万 hm^2 ；20 世纪 90 年代末完成的土地详查结果，60 个岩溶县（市）耕地面积为 352.1 万 hm^2 ，增加了 114.9%^[16]，土地利用类型构成的不合理性也是石漠化形成不可忽略的影响因素。

从表 6 可以看出，林地和耕地土地利用类型下的石漠化面积最大，为 184.6 万 hm^2 ，占石漠化总面积的 64.1%。极强度石漠化主要发生在未利用土地类型上，面积为 12.5 万 hm^2 ，占全省极强度石漠化面积的 86.8%。其原因可能是随着人口迅速增长及对粮食需求大幅度增加，人们不断地毁林毁草开垦，使坡旱地呈增加趋势，而且增加的主要是坡度较大、水土流失严重的陡坡旱地（ $16^\circ \sim 35^\circ$ ），大规模的陡坡耕作又带来新的土壤侵蚀问题。因此，从不同土地利用类型为出发点进行石漠化综合治理，应重点关注植被恢复和坡耕地水土流失问题。

表6 不同地类石漠化的面积

Table 6 Area of rocky desertification of different land types

万 hm²

地类	石漠化土地					潜在石漠化土地	非石漠化土地	合计
	轻度石漠化	中度石漠化	强度石漠化	极强度石漠化	小计			
林地	76.9	83.9	22.3	1.4	184.5	166.9	119.6	470.9
耕地	9.9	44.1	7.6	0.5	62.1	5.3	192.3	259.8
牧草地	0.41	1.1	0.7	0.05	2.3	0.3	1.7	4.2
未利用地	1.7	7.4	17.7	12.5	39.3		0.7	40
建设用地							13.7	13.7
水域							2.6	2.6
合计	88.9	136.4	48.4	14.4	288.2	172.6	330.5	791.2

注：数据来源为文献[20]。

4 结论与讨论

1) 影响石漠化形成的驱动因子主要包括气候、土壤、植被、地形地貌等自然因子以及人口、经济、农业生产、工业活动等人为因子。驱动因子权重大小依次为：人口数量>农业生产>工业活动>经济因素>气候因素>土壤因素>地形地貌>植被因素。从影响因子权重上看，云南省石漠化的形成与发展是由自然因素和不合理的人为活动共同主导的，并无主次之别。但是，如果石漠化区域长期以往得不到合理有效的治理，人为因素将会占据主导。

2) 准则层二中核心驱动因素为：人口自然增长率、土地利用方式、采矿挖煤、地区生产总值、人口密度和陡坡耕作。极重要驱动因素：开发建设项目、土壤性质、农民人均纯收入、植被覆盖率、坡度坡向。重要驱动因素：干燥度、年均温、土壤侵蚀速率、灾害性天气、海拔、年降雨量、植被群落结构。

3) 云南省中、高山地区是石漠化最为集中的区域，石漠化土地面积达 280.3 万 hm²，占全省石漠化面积的 97.3%。不同土地利用类型中的林地及耕地石漠化面积最大，为 184.6 万 hm²，占全省的 64.1%。从土地石漠化的成因来看，过度樵采和毁林（草）开荒造成的石漠化面积最多，程度也最为严重。

我国石漠化地区环境条件不同，气候条件有异，治理难点也不尽相同。云南石漠化类型具有多样性，除湿润、半湿润，热带、亚热带的石漠化类型外，还有干旱、半干旱、温带、寒温带的石漠化类型。在许多环境恶劣的石漠化地区首先要使石漠化山地得到覆盖及治理，要摸索半干热、

干热地区及位于青藏高原东南缘高寒石漠化地区的治理方法，因此生态优先成了云南省石漠化治理应首先树立的理念。提出了适地适树、适地适草，宜乔则乔、宜灌则灌、宜草则草，提倡针阔混交，乔灌草结合，兼顾经济林木或经济作物为原则。多年来各省石漠化治理形成了封山育林模式、补乔植灌模式、乔灌草混交模式、针阔混交模式、灌草结合模式、混农林业模式、药材种植模式、经济林种植模式、高海拔地区建立优质牧场的模式。下一步也应大力总结和研发石漠化治理关键技术，依据岩溶环境的地形地貌、岩土结构和光热条件将现有的关键技术进行优化、组装和配套，形成生态系统服务功能提升和生态富民的石漠化综合治理技术集成体系和模式。

石漠化山地治理首当其冲的是植被的修复，有了植被的恢复才有水土流失的遏制，土壤结构的改变，土壤肥力的增加，秀美山川的再现。植被修复就要考虑“适地适树、适地适草”，要“适地适树、适地适草”就要考虑立地条件，那么年均温、活动积温、最高温、最低温、降雨特点、降雨量、干燥度、可能发生的灾害性天气评估、土壤类型、土壤 pH 值以及影响上述因子再分配的海拔、坡度、坡向等因素，就成为了影响初步设计、实施方案中植物措施的主要因素。上述条件对工程措施的部署也有影响，一是便于安排工期，二是使设计更加合理。调查发现在半干旱地区地势较平缓的云南建水县修建拦砂坝，即浪费经费又浪费人力物力，因为无砂可拦。而在坡度陡峻，雨量较多，植被破坏严重，易于发生泥石流的湿润地区，如云南东北部的大关县，修建拦砂坝群才显现出治理效果。因此在不同气候区进行石漠化综合治理过程中应该充分考虑气

候、土壤等环境因素。下一步应该针对云南省石漠化地区土壤流失/漏失阻控、种间优化配置、节水灌溉等进行更深层次的分析探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题 [J]. 大自然探索, 1996(4): 21-23.
- [2] Wang S J. The most serious eco-geologically environmental problem in southwestern China-Karst rocky desertification [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology & Geochemistry, 2003, 22(2): 120-126.
- [3] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation [J]. Land Degradation & Development, 2010, 15(2): 115-121.
- [4] 云南省林业厅. 云南省石漠化状况公报 [R]. 昆明: 云南省林业厅, 2013.
- [5] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策 [J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [6] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化治理的优化模式及对策 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 24-27, 110.
- [7] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 等. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性 [J]. 地球与环境, 2015, 43(3): 269-278.
- [8] Bai X Y, Wang S J, Xiong K N. Assessing spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification land: indications for restoration strategies [J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(1): 47-56.
- [9] 王霖娇, 盛茂银, 杜家颖, 等. 西南喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳分布特征及其影响因素 [J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1358-1365.
- [10] 王霖娇, 汪攀, 盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素 [J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6580-6593.
- [11] 马骊驰, 王金亮, 刘广杰. 滇东南喀斯特典型地区石漠化的空间变化 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 327-333.
- [12] 蓝安军, 熊康宁, 安裕伦. 喀斯特石漠化的驱动因子分析: 以贵州省为例 [J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 19-23.
- [13] 胡宝清, 蒋树芳, 廖赤眉, 等. 基于 3S 技术的广西喀斯特石漠化驱动机制图谱分析: 以广西壮族自治区为例 [J]. 山地学报, 2006, 24(2): 234-241.
- [14] 虞光复, 陈永森. 论云南土壤的地理分布规律 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 1998, 20(1): 55-58, 63.
- [15] 罗文生, 宋维峰, 尹义发. 云南石漠化防治现状 [J]. 亚热带水土保持, 2010, 22(1): 27-30, 55.
- [16] 王宇, 张贵. 滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 933-938.
- [17] Saaty T L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource Allocation[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [18] 高俊刚, 吴雪, 张懿铨, 等. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区 [J]. 生态学报, 2016, 36(1): 134-147.
- [19] 徐建华. 计量地理学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [20] 云南省林业调查规划院. 云南省岩溶地区石漠化监测报告 [R]. 昆明: 云南省林业调查规划院, 2005.
- [21] 邓菊芬, 崔阁英, 王跃东, 等. 云南岩溶区的石漠化与综合治理 [J]. 草业科学, 2009, 26(2): 33-38.
- [22] 解明恩, 程建刚, 范波. 云南气象灾害的时空分布规律 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13(5): 40-47.
- [23] 谷晓平, 于飞, 刘云慧, 等. 降雨因子对喀斯特石漠化发生发展的影响研究 [J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 66-70.
- [24] 姚家平, 李彪, 熊智, 等. 云南石漠化地区土壤性质分析 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(10): 43-46.
- [25] 李海霞. 岩溶裂隙土的剖面特征及演化规律研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2006.
- [26] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究 [J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1999(5): 441-449.
- [27] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.
- [28] 闫利会, 周忠发, 谢雅婷, 等. 贵州高原石漠化敏感性与宏观地貌的空间关联分析 [J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 400-407.
- [29] 张殿发, 欧阳自远, 王世杰. 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·资源与环境, 2001, 11(1): 77-81.
- [30] 安国英, 周璇, 温静, 等. 西南地区石漠化分布、演变特征及影响因素 [J]. 现代地质, 2016, 30(5): 1150-1159.
- [31] 王宇, 杨世瑜, 袁道先. 云南岩溶石漠化状况及治理规划要点 [J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 206-211.
- [32] 谭继中, 张兵. 云南省土地石漠化特征初步研究 [J]. 地质灾害与环境, 2003, 14(1): 32-37.

(责任编辑 张 坤)

