

贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价

白晓永^{1,2,4}, 王世杰^{2,3}, 陈起伟⁵, 程安云^{2,4}, 倪雪波^{2,4}

- (1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;
2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
3. 中国科学院地球化学研究所 贵州省科技厅普定喀斯特研究综合试验站, 贵州 安顺 562100;
4. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
5. 贵州教育学院, 贵阳 550003)

摘要: 构建了贵州 20 世纪 80 年代、90 年代和 21 世纪初等 3 期历史石漠化数据, 利用其空间变换和数学模型详细探讨和评价了石漠化的时空演变过程, 研究发现: (1) 研究时段内贵州省石漠化总面积变化不明显, 但石漠化内部类型之间的相互演变非常显著, 各类型之间的演变具有转移、多变、“此消彼长”的特点。(2) 石漠化的时空演变过程可分为单变方式、层变方式、返变方式等 3 种基本类型, 其中以层变方式为主, 单变方式为辅, 返变方式较少。(3) 石漠化正向演变与逆向演变并存, 治理速度赶不上恶化速度, 两者的比值为 82.29%, 局部治理, 整体恶化。(4) 各石漠化类型总的演变速率是 $398.31 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 石漠化等级越高, 演变速率越慢。(5) 石漠化演变频率最快的是中度石漠化和潜在石漠化, 轻度石漠化的演变频率明显低于中度石漠化。对石漠化的空间演变区域特征和影响因子做了宏观的定性分析, 并根据石漠化演变特点对综合治理提出了相应的建议。

关键词: 石漠化; 时空演变; 贵州

1 引言

石漠化是中国西南最严重的生态灾难^[1-6]。石漠化的时空演变虽然只反映了一个区域的生态环境变迁, 但它的结果却直接会影响整个区域的经济和社会发展^[4-10]。受种种条件的制约, 目前石漠化的时空演变研究呈现出“三多三少”的趋势, 即: 静态的定性分析居多, 动态的定量分析偏少; 对小区域研究居多, 对大尺度、大格局研究偏少; 单一方面研究居多, 多角度综合分析偏少。此外, 用哪种方式来诠释石漠化的时空演变过程也是研究中的一个难点。本文拟从省域角度, 用 20 世纪 80 年代、90 年代和 21 世纪初等 3 期历史数据的空间变换, 通过数学建模的方法, 对石漠化演变过程中的主要方式、演变方向与规模、演变速率、演变频率等几个方面入手, 来探讨石漠化的时空演变过程。

2 数据来源与处理

根据岩石裸露率和土地利用状况^[3, 7-9], 建立石漠化的分级指标体系 (表 1), 框架与目前国务院批复的《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲 (2006-2015)》基本相同。

收稿日期: 2008-08-20; 修订日期: 2008-12-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403200); 中科院知识创新重要方向项目 (KZCX2-YW-306); 国家科技支撑计划重大项目(2006BAC01A09, 2008BAD98B07)资助 [Foundation: Basic Research Program of China, No.2006CB403200; Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences, No.KZCX2-YW-306; National Key Technology R&D Program, No.2006BAC01A09 and 2008BAD98B07]

作者简介: 白晓永(1978-), 男, 河北石家庄人, 在读博士生, 研究方向: 岩溶环境与土地利用。

通讯作者: 王世杰(1966-), 男, 浙江温岭人, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事岩溶生态环境研究。

E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

表 1 石漠化等级划分标准及特征编码

Tab. 1 The classification criterion and characteristic code of KRD types

石漠化等级及其编码	岩石裸露率 (%)	裸岩分布特征	主要特征
无石漠化 (NKRD)	< 20	点状	地表组成物质丰富, 多为水田、有林地、建筑用地等。
潜在石漠化 (PKRD)	20~30	点、线状	地表组成物质一般, 有岩石裸露趋势, 多为非梯土化旱地、草地等。
轻度石漠化 (LKRD)	31~50	线状	地表组成物质减少, 岩石初步裸露, 多为稀疏的灌草丛。
中度石漠化 (MKRD)	51~70	线、面状	地表组成物质较少, 岩石裸露较大, 多为石质坡耕地。
强度石漠化 (SKRD)	71~90	面、线状	地表组成物质很少, 岩石裸露很大, 多为即将丧失农用价值土地。
极强度石漠化 (ESKRD)	> 90	面状	地表组成物质极少, 岩石裸露极大, 农用价值彻底丧失, 多为难利用地。
非岩溶 (NK)	非岩溶地区不涉及石漠化问题		

本次分级指标与前期工作^[3,9]相比有所细化, 主要原因是经过许多学者的研究发现^[7, 8, 10], 潜在石漠化土地虽然是一种非石漠化土地, 但极有可能变为石漠化土地, 是联系无石漠化和石漠化的桥梁, 是讨论石漠化演变过程的一个重要环节。国家林业总局发布的《岩溶地区石漠化状况公报》和贵州省人民政府颁布的《贵州省石漠化综合治理规划

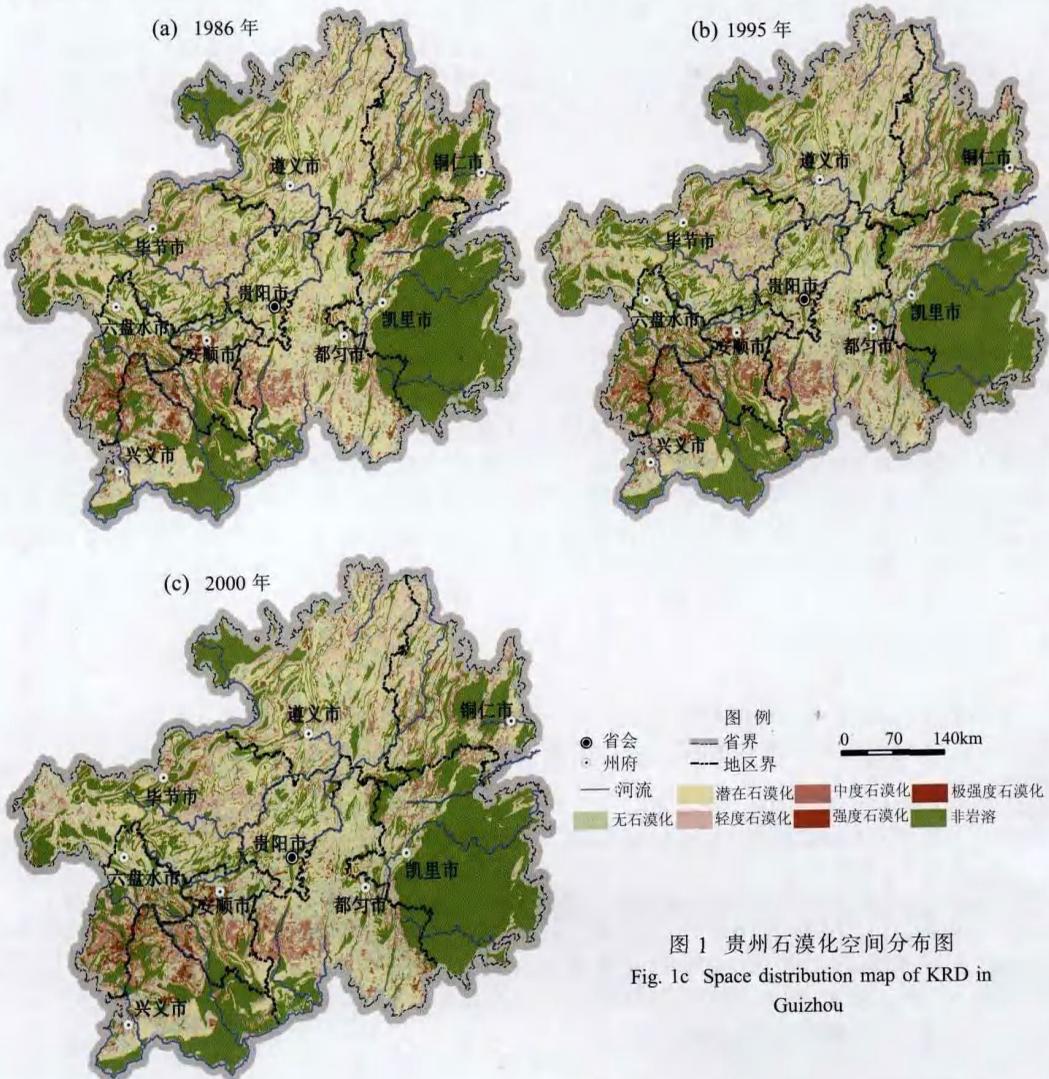


图 1 贵州石漠化空间分布图
Fig. 1c Space distribution map of KRD in Guizhou

表 2 贵州省不同石漠化类型在岩溶区的面积和比例 (1986-2000 年)

Tab. 2 Area and proportion of different KRD types in karst area of Guizhou (1986-2000)

石漠化类型	无石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	强度石漠化	极强度石漠化	已石漠化
1986 年	面积 (km ²) 38527.42	32089.88	23618.23	13001.4	2191.04	19.13	38829.80
	比例 (%) 35.20	29.32	21.58	11.88	2.00	0.02	35.48
1995 年	面积 (km ²) 38260.66	32623.36	22950.51	13378.79	2214.66	19.12	38563.08
	比例 (%) 34.96	29.81	20.97	12.22	2.02	0.02	35.23
2000 年	面积 (km ²) 38725.33	31818.67	23695.15	12985.68	2203.02	19.26	38903.11
	比例 (%) 35.38	29.07	21.65	11.86	2.01	0.02	35.55

注：已石漠化土地 = 轻度以上石漠化土地 (轻度 + 中度 + 强度 + 极强度)

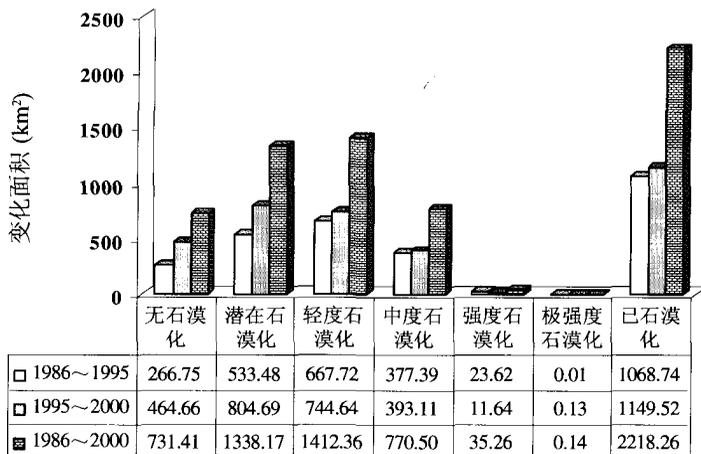


图 2 1986-2000 年贵州省岩溶区不同石漠化类型变化面积

注：已石漠化土地 = 轻度以上石漠化土地 (轻度 + 中度 + 强度 + 极强度)

Fig. 2 Change area of different KRD types in karst area of Guizhou (1986-2000)

(2005-2050 年)》，也都明确了防治潜在石漠化的重要性。

TM 影像来源于 TM 官方网站^[11]和中国地球科学数据共享网^[12]；1:10 万土地利用矢量图来源于国家自然科学基金委员会中国西部环境与生态科学数据中心^[13]；1:10 万政区图、地形图、土壤图、地质图、坡度图以及社会经济等相关资料由喀斯特数据中心提供^[14]；进行石漠化人机交互式详细翻译^[7-8, 15-20]，获取 1986、1995 和 2000 年的 1:10 万石漠化空间分布图，生成 GIS 数据库 (图 1)。

3 分析结果

3.1 石漠化时空演变的总体特征

在 MAPGIS 操作平台下，将 3 期石漠化数据 (图 1) 进行空间叠加对比 (表 2 和图 2)。由表 2 发现，从 1986-2000 年的 15 年间，已石漠化土地 (KRD) 的总面积由 38829.80 km² 变为 38903.11 km²，净面积变化仅为 73.31 km²，由此可见，石漠化总面积变化并不明显。由图 2 发现，从 1986-1995 年，无石漠化、潜在、轻度、中度、强度、极强度石漠化的变化面积分别是 266.75 km²、533.48 km²、667.72 km²、377.39 km²、23.62 km²、0.01 km²，而从 1995-2000 年，变化面积分别是 464.66 km²、804.69 km²、744.64 km²、393.11 km²、11.64 km²、0.13 km²，在 1986-2000 年期间，石漠化总的变化面积达到 6506.10 km²。

如果除掉石漠化直接变化为无石漠化土地 73.31 km²，可以发现：石漠化内部各类型之间的演变异常剧烈。有 6432.79 km² 的变化面积发生在相互演变之中，占整个总变化面

积的 98.87%。也就是说，石漠化的变化大多是从一个等级变到了另一个等级，而并非在石漠化和无石漠化之间直接变化。贵州省土地石漠化类型发生变化比较大的区域主要分布在黔西北喀斯特高原—中山区，黔中喀斯特丘原—谷盆区，黔西南喀斯特中山、低山—河谷区，黔东北喀斯特低山—丘陵谷盆区等，几乎占整个喀斯特区域的 35% (图 1)。

3.2 石漠化时空演变动态过程

石漠化时空格局演变是一个相当复杂的过程，它不仅是一种空间概念上的表达，而且还是时间序列上的演绎。探讨石漠化的时空演变过程，必须要解决 4 个基本的科学问题：一是要明确石漠化的主要演变方式；二是要分析和计算出不同石漠化类型的“演变规模与方向”，以了解研究时段初期不同石漠化类型的转移去向以及研究时段末期不同石漠化类型的来源与构成；三是要明确不同石漠化类型的演变速率，以反映不同区域石漠化类型的变化快慢；四是要计算出不同石漠化类型的演变频率，以真实地反映出区域石漠化类型反复变化的剧烈程度。由于石漠化的变化涉及因素繁多，过程错综复杂。因而以抽象化和精炼化为特征的数学模型对于理解和研究石漠化的格局具有不可替代的作用。

3.2.1 石漠化演变方式 (L) 贵州省石漠化演变有转移、多变的特点。在演变过程中，石漠化各类型之间有此消彼长、相互转化的规律。根据石漠化演变特点与规律，可以将石漠化的时空演变分为以下 3 种主要方式：(1) 单变方式。由一种石漠化类型向另一种石漠化类型转变。如由无石漠化直接向中度石漠化变化，结果是导致无石漠化面积的减少而中度石漠化面积的增加，即 "a→b" 型，体现了石漠化类型变化频繁和快速的特点，这种石漠化类型的演变，称之为单变方式，反映了石漠化演变的直接性和跳跃性。(2) 层变方式。一种石漠化类型首先转变为另一种石漠化类型，又转变为第 3 种石漠化类型。如由无石漠化先演变为潜在石漠化，再演变为轻度石漠化，这是一种多重变化类型，即 "a→b→c" 型，体现了石漠化层层逐级演变的特点，这种石漠化类型的演变称之为层变方式，反映了石漠化演变的等级性和程序性。(3) 返变方式。一种石漠化类型首先变化为另一种石漠化类型，但最后又变回原类型。如轻度石漠化由于封山育林或是退耕还林，变为无石漠化，但由于封禁或退耕期已过，当地百姓生产、生活条件并未改善，重新复垦，导致无石漠化又变回了原来的轻度石漠化。这种变化虽然不具备长期战略意义，属于无效的转变过程，但生态环境的反复变化与影响却不能忽视，同时又充分体现了石漠化的敏感性、动态性和易变性，即 "a→b→a" 型，这种石漠化类型的演变，称之为返变方式，反映了石漠化演变的反弹性和可逆性。

设 $E(x)$, $N(x)$, $T(x)$ 分别为 1986 年、1995 年和 2000 年贵州石漠化类型的空间分布函数， $H = E(x)/N(x)$ 、 $J = N(x)/T(x)$ 和 $K = E(x)/T(x)$ 分别表示 1986-1995 年、1995-2000 年和 1986-2000 年的石漠化类型分布函数的比值，若 $H = 1$ 、 $J = 1$ 和 $K = 1$ 分别表示相应时段内石漠化类型没有发生变化，若 $H \neq 1$ 、 $J \neq 1$ 和 $K \neq 1$ 则分别表示相应时段内石漠化类型发生了改变；L 为 1986-2000 年的石漠化的演变类型，则有：

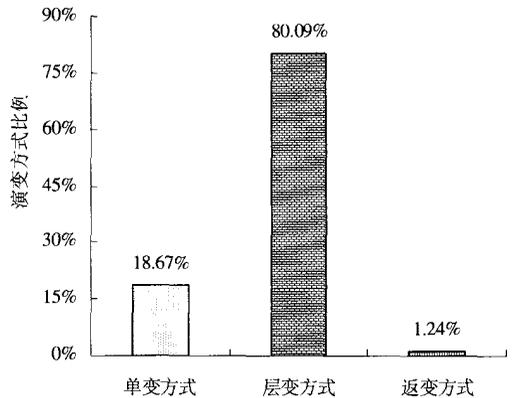


图 3 1986-2000 年贵州省石漠化各演变方式比例
Fig. 3 The proportion of different evolution way for KRD in Guizhou (1986-2000)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{单变方式: } L = a \rightarrow b \text{ (} H = 1, J \neq 1 \text{ 或 } H \neq 1, J = 1\text{)} \\ \text{变方式: } L = a \rightarrow b \rightarrow c \text{ (} H \neq 1, J \neq 1, K \neq 1\text{)} \\ \text{返变方式: } L = a \rightarrow b \rightarrow a \text{ (} H \neq 1, J \neq 1, K = 1\text{)} \end{array} \right. \quad (1)$$

利用方程式 (1), 在 GIS 平台上对图 1a, 图 1b, 图 1c 进行空间运算, 可以分别求出单变方式、层变方式和返变方式等石漠化演变类型的面积和比例(图 3)。由图 3 可知, 石漠化的演变类型呈现出以层变方式为主, 单变方式为辅, 返变方式较少的特点。其中, 层变方式演变比例最大, 占到了 80.09%; 其次是单变方式, 占 18.67%, 最少的是返变方式, 仅有 1.24%。

由此看来, 石漠化的演变从一种方式直接地、很快地过渡、跳跃到另一种方式的突变占的比例不是很大, 主要还是以“去土”、“跑水”、“减植被”、生物量降低、土地生产力下降的渐变过程, 按照石漠化等级层层演变的。这与 Clements F、E 提出的群落演替理论“生态系统的演替是渐进有序进行的”^[9]是基本吻合的。

返变方式的演变比例虽然最少, 但属于一种非常特殊的演变方式, 在石漠化治理过程中, 对石漠化土地进行治理使之返回到原来的无石漠化土地状态的应用过程中起着举足轻重的作用。它的存在说明石漠化演变过程中存在“治理好又破坏的”, 也存在“破坏了又治理好的”。

3.2.2 石漠化演变方向与规模 (S_{ij}) 为了研究时段内的石漠化类型结构及其类型的转移变化情况, 分析监测初期各类型石漠化的转移去向以及监测末期各石漠化类型的来源与构成, 需要建立转移矩阵模型来表征:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: S 代表面积, 单位 km^2 ; n 代表石漠化的类型数; i, j 分别代表监测初期与监测末期的石漠化类型; S_m 代表监测时段内石漠化类型的变化量, 单位 km^2 ;

利用图 1a 和图 1b 进行空间叠加运算, 先计算出由 1986-1995 年不同石漠化类型的转移矩阵; 同理, 图 1b 和图 1c 空间叠加运算, 再计算出 1995-2000 年石漠化的转移矩阵, 将两者相加即可得到 1986-2000 年不同石漠化类型的转移矩阵(表 3)。这样就充分考虑了石漠化类型转入和转出过程中发生的空间位置转换, 揭示了石漠化变化的真实情况, 对研究石漠化变化的过程极为有利。

由表 3 可知, 从 1986-2000 年, 无石漠化主要向潜在、轻度和中度石漠化演变, 分别为 875.45 km^2 , 476.73 km^2 和 412.83 km^2 , 占同类演变的 48.37%, 26.34% 和 22.81%, 石漠化有加剧的趋势; 而轻度主要向潜在和无石漠化转变, 分别为 481.22 km^2 和 471.52 km^2 , 占同类演变的 41.93% 和 41.09%, 石漠化有减少的趋势。

从 1986-2000 年, 演变到无石漠化的面积共有 1809.92 km^2 , 演变到潜在石漠化以上的面积 2199.41 km^2 , 若潜在石漠化既不算已石漠化土地, 也不算无石漠化土地, 则在 15 年内演变成石漠化的土地与演变成无石漠化的土地, 两者的比值为 121.52%, 说明石漠化的局部治理, 整体恶化。

3.2.3 石漠化演变速率 (V) 某种石漠化类型的变化面积除以相应的监测时段, 即为石漠化的演变速率:

$$V = \Delta S / T \quad (3)$$

式中: V 为与 T 时段对应的研究样区石漠化演变速率, 单位: $\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$; ΔS_i 为监测时段内某种石漠化类型的变化面积, 单位: km^2 ; T 为时间段, 单位: 年。

根据 1986-2000 年不同石漠化类型的空间转移矩阵(表 3), 将不同石漠化类型转移变

表 3 贵州省不同石漠化类型演变转移矩阵 (1986-2000 年) (单位: km²)
 Tab. 3 Conversion matrix of different rocky desertification types in Guizhou (1986-2000)

年代	类型	无石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	强度石漠化	极强度石漠化
1986-	无石漠化		659.04	128.86	289.23	26.02	0.07
1995 年	潜在石漠化	335.09		85.38	236.80	11.74	0.03
	轻度石漠化	352.47	409.57		127.91	29.49	0.23
	中度石漠化	129.80	122.94	30.25		1.60	0.01
	强度石漠化	18.98	10.81	7.41	8.02		0.01
	极强度石漠化	0.08	0.19	0.05	0.02	0.02	
1995-2000 年	无石漠化		216.41	347.87	123.60	18.69	0.13
	潜在石漠化	710.68		458.00	109.50	17.92	0.21
	轻度石漠化	128.76	61.95		29.23	7.90	0.10
	中度石漠化	307.13	204.52	137.37		8.03	0.02
	强度石漠化	24.83	8.61	29.1	1.64		0.02
1986-2000 年	极强度石漠化	0.06	0.03	0.23	0.01		0.01
	无石漠化	0	875.45	476.73	412.83	44.71	0.19
	潜在石漠化	1045.77	0	543.38	346.29	29.66	0.24
	轻度石漠化	481.22	471.52	0	157.14	37.39	0.33
	中度石漠化	436.93	327.46	167.62	0	9.64	0.03
	强度石漠化	43.81	19.43	36.51	9.66	0	0.03
	极强度石漠化	0.14	0.22	0.28	0.03	0.02	0.01

化值汇总, 即可得到 ΔS_i , 根据方程式 (3), 进而可以得到石漠化演变速率 (图 4)。由图 4 可以看出, 石漠化总的演变速率是 $398.31 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 其中, 轻度以上石漠化土地 (RD) 的演变速率是 $146.63 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 轻度以下石漠化土地 (NKRD 与 PKRD 的和) 的演变速率是 $251.68 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。在各石漠化类型中, 演变速率最快的是潜在石漠化, 为 $131.02 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 其次无石漠化, 为 $120.66 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。石漠化演变速率由大到小的顺序排列分别是潜在石漠化、无石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化和极强度石漠化, 由此可见, 石漠化演变速率快慢与石漠化等级基本成反比, 即石漠化等级越高, 演变速率越慢。

石漠化 (KRD) 的演变速率与无石漠化的演变速率比值是 121.52%, 也就是每年变成石漠化的土地比变成无石漠化的土地要快 21.52%。在石漠化演变的长期过程中, 极强度石漠化演变速率最小, 轻度、中度、强度石漠化演变速率较大, 无石漠化、潜在石漠化最大, 看来石漠化只要演变到极强度石漠化, 在短时间内基本就处于一种稳定状态, 演变速率很慢, 变化的可能性不大。

3.2.4 石漠化演变频率 (f) 某种石漠化类型的变化面积除以监测初期原地类面积 (本底值), 再除以监测时段, 即为石漠化的演变频率:

$$f = (\Delta S_i / S_i) T^{-1} \times 100\% = V / S_i \times 100\% \quad (4)$$

式中: f 为石漠化演变频率, 单位: $\% \cdot \text{a}^{-1}$; S_i 为监测初期某种石漠化类型的面积, 即本底值, 单位: km^2 ; 其他符号意义同上。

对图 1a 进行空间运算, 可以提取出 1986 年不同石漠化类型的面积 S_i , 然后利用方程式

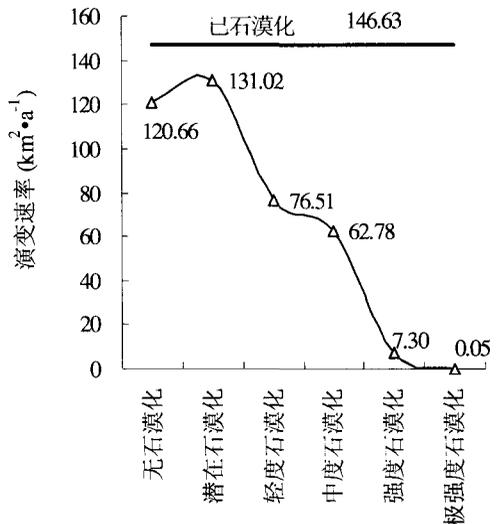


图 4 贵州各石漠化土地演变速率 (1986-2000 年)
 注: 图中粗黑线代表已石漠化土地 (轻度 + 中度 + 强度 + 极强度) 的总演变速率
 Fig.4 Evolution speed of different rocky desertification types in Guizhou (1986-2000)

(4), 即可得到贵州不同石漠化演类型演变频率(图 5)。由图 5 可知, 石漠化演变频率最快的是中度石漠化为 $0.48\% \cdot a^{-1}$, 其次为潜在石漠化, $0.41\% \cdot a^{-1}$, 说明这一区域土地利用变化最剧烈, 动态性更强。从生态学角度分析, 可能的原因是潜在、中度石漠化的岩石裸露率在 20%~70%之间, 是最好生态系统(无石漠化)和最差生态系统(强度以上石漠化)之间的生态过渡带, 其生境脆弱、敏感, 易变, 是两个生态系统(斑块)间物质循环、能量转换及信息传递的场所, 是能量、物质、信息交换最频繁的界面区域。从演变方式上分析, 石漠化演变以层变方式为主, 演变过程中需要潜在、中度石漠化来做中间过渡, 既是低等级石漠化通向高等级石漠化的廊道, 又是高等级石漠化通向低等级石漠化的桥梁, 处于中间环节、纽带地位, 因此演变往复、变化比较频繁。除潜在石漠化外, 石漠化演变频率最低的是极强度石漠化和无石漠化, 说明最差生态系统和最好生态系统是最稳定的, 符合传统的生态系统稳定性特点。

但是, 同样作为中间环节的轻度石漠化的演变频率却远低于潜在和中度石漠化, 仅为 $0.32\% \cdot a^{-1}$ 。可见, 石漠化的演变频率不仅与人类活动的频繁程度有关, 可能还受其所在的地质背景影响。

4 讨论

从 20 世纪 80 年代中期到 21 世纪初叶的时段内, 贵州省石漠化总面积变化不明显, 但石漠化内部类型之间的相互转化非常显著, 石漠化各类型之间的演变具有转移、多变、此消彼长的特点。这样的时空演变格局与喀斯特的区域地质背景有很大的关系, 也与贵州在这段时期内的社会经济发展和生态建设状况存在着密切的相关。

4.1 生态建设成就与石漠化土地演变

尽管在 20 世纪政府还没有考虑石漠化的治理问题, 但由于贵州处于长江和珠江的上游地区, 肩负着保证中国经济最发达的“两江”下游地区(“长三角”和“珠三角”)生态安全的重任, 有关该区的生态恢复和脱贫工作一直没有停止过, 如长江防护林工程、珠江防护林工程、水土保持工程、扶贫工程, 以及一些国际援助项目, 通过退耕还林、封山育林、坡改梯、砌墙保土、改良土壤、开发岩溶水、种植适生经济作物等措施, 贵州在植被恢复、生态环境综合治理等方面取得了突出成果。但是, 贵州是一个亚热带强烈喀斯特化的高原山区, 是全国唯一没有平原支撑的农业省, 社会经济状况在全国一直处于落后的水平, 国民经济基础还相当薄弱, 农业综合生产力水平依然很低。在研究时段内, 贵州喀斯特地区面临着贫困和石漠化的双重压力, 贫困导致当地农民盲目扩大耕地、开垦陡坡、乱伐森林等不良人为活动, 加速了石漠化的演化; 石漠化使本已稀缺的土地更加贫瘠, 生产条件更加恶劣, 生活更加贫困。贫困化加重了石漠化, 石漠化又加剧了贫困化。可见, 在贵州特殊的区域地质背景下, 生态建设的成就与高度的贫困化、落后的社会经济发展水平交织在一起, 导致石漠化正向演变与逆向演变并存。一边植树造林、一边过度采伐; 一边退耕还林、一边毁林开垦; 一边退耕还草、一边过度放牧; 一边石

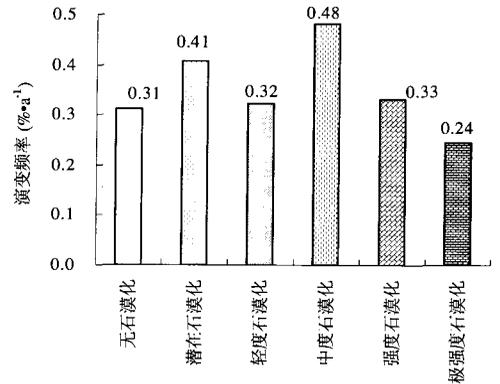


图 5 贵州不同石漠化土地演类型演变频率 (1986-2000 年)

Fig. 5 Evolution frequency for different rocky desertification types in Guizhou (1986-2000)

漠化治理、一边又继续破坏的现象依然存在^[22]。

4.2 石漠化土地演变的区域分异及影响因子

贵州地处长江和珠江两大水系的分水岭地带。西高东低，西部是中山区，海拔1600~2400 m，多岩溶峡谷发育；中、东部海拔分别为800~1400 m与500~800 m，为中、低山区，分别是乌江、南盘江、北盘江的中、下游地区；该区岩溶发育的物质基础三叠纪早期之前形成的碳酸盐岩具有明显的空间展布特点：南部富石灰岩、北部富白云岩；相应地，受岩性制约的地貌形态也具有明显的区域分布特征：南部多峰丛洼地、北部多丘丛^[3]；因此，受地质背景控制的岩溶生态系统的演变存在着明显的区域分异特征。

以单变方式演变为主的石漠化主要集中在岩性纯的碳酸盐岩分布区，特别是连续性石灰岩区，分布在海拔高、切割度深的高大山体中，这些地区暴雨发生率比较高、一次暴雨就可将大部分土壤冲走，人口密度极高、人均粮食产量和农民人均纯收入极低、人类破坏活动以火烧或砍伐为主，如赫章、纳雍、织金及水城西部等地，代表地层有石炭系的黄龙组(C₂h)、威宁组(C_{1,2}w)；二叠系的栖霞(P₂q)、茅口组(P₂m)；以及三叠系的嘉陵江组(T_j)等；以层变方式演变为主的石漠化主要集中在连续性白云岩区，分布在地表切割深度较浅、相对高差小、地表起伏变化不明显的低中山丘陵区，如呈条带状分布于册亨、镇宁、贵阳、遵义一线以西以南三叠系的杨柳井组(T_{2y})等、贵阳的寒武系娄山关组(∈0l)、石冷水组(∈2l)及出露于贵阳市、安顺地区及黔西南兴义等地的三叠系安顺组(T_{1a})等。这些地区环境压力不是最高，但人们生活还是极为贫困，人类破坏活动以过度开垦和放牧为主；以返变方式演变为主的主要集中在以前有很多生态建设项目而现在项目建设停止建设区，如水城、毕节、普定等。

石漠化正向演变主要集中在岩性纯的碳酸盐岩分布区，尤其是连续性石灰岩、连续性白云岩和石灰岩、白云岩的混合组合地层中，这些地区地表切割度大、地形破碎、地下水埋藏很深、人口压力很大、社会经济水平发展缓慢的地区，如盘县、兴仁、安龙、兴义等；石漠化逆向演变主要集中在岩性不纯的碳酸盐岩分布区，如碳酸盐岩夹碎屑岩组合、碳酸盐岩与碎屑岩互层，地表起伏变化相对缓和，社会经济有所发展、人口和环境压力较小。演变速度比较快的主要集中在连续性碳酸盐岩组合，碳酸盐岩夹碎屑岩组合也有一定比例，这些地区地形切割深度显著、相对高度大、25°以上的坡地中，人口密度较大，社会经济变化或生态建设项目明显的地区，如关岭、贞丰、毕节等。特别要指出的是，石漠化严重区与石漠化演变的剧烈区有不一致的现象，石漠化最严重的地方恰恰是石漠化演变比较稳定的区域；而石漠化不严重的地方却往往是石漠化演变最为剧烈和明显的地区。

总的来说，石漠化演变比较明显的区域，具有以下共同的地域特征：(1)多集中于古生界上泥盆统、石炭系、二叠系和中生界中、下三叠统的石灰岩、白云岩中，主要在地台型的纯度较高的浅海碳酸盐岩相区。(2)地形起伏变化较大，切割比较明显，相对高差较大，区域性新构造运动、地貌演化显著的区域，特别是升降运动强烈的上升区和差异上升区。(3)人口和环境压力较大、社会经济发展变化明显、工农业活动影响明显的地区。因此，我们初步认为，碳酸盐岩提供了石漠化演化的物质基础，特定地貌类型及空间组合控制格局，季节性降水冲刷作用及人为陡坡垦殖、过度放牧、樵采等可能是石漠化演变的主要驱动力和关键影响因子。

5 对石漠化治理的建议

(1) 根据石漠化演变具有转移、多变，以层变方式为主的特点，石漠化治理需要采取循序渐进、动态演进的原则来进行，而不能一蹴而就。石漠化的正向演变多是经历了乔

—灌—草—地衣—苔藓—水土流失—裸岩出露的过程, 石漠化治理也要严格按照生态演替规律分阶段、分步骤地促进顺行演替。在石漠化等级较高的区域, 首先要重点引入先锋植物, 当先锋植物改善土壤肥力条件并达到一定覆盖度后, 再考虑乔木等植物的引入。

(2) 根据“石漠化演变过程中, 正向演变与逆向演变并存, 一边治理、一边破坏的现象没有得到根本遏制”的特点, 需要采取防治并举、标本兼治的办法, 一方面加大治理力度, 另一方面加强后期管护, 确保治理一片见效一片。同时, 要把石漠化治理与调整农村产业结构密切结合, 以增加群众收入、促进农民脱贫致富为重点, 因地制宜发展生态产业, 以增加群众的收入, 缓解人地矛盾, 彻底改变农民群众靠山吃山的生活方式。

(3) 根据“石漠化演变速率快慢与石漠化等级基本成反比”和“石漠化演变频率最快的是中度石漠化和潜在石漠化”的特点, 石漠化的治理重点优先应放在不太严重的区域。因为强度、极强度石漠化属于岩石大面积裸露, 农用价值几乎丧失的典型难利用土地, 加上碳酸盐岩成土速率又极慢, 在短期内很难恢复; 轻度、中度、强度石漠化区有一定的水、土资源, 是连接极强度石漠化和低等级石漠化的中间环节, 既可能向高等级演变、又可能向低等级演变, 从而拉动两个极端的面积。相对于发展到严重阶段之后的石漠化土地, 轻度以及中度石漠化土地更加容易治理。只要能够约束这些区域内人类的不合理活动, 以及采取有效的治理措施, 这些土地的石漠化可以相对容易地获得逆转。因此, 轻度、中度石漠化在石漠化治理中应当作为“核心”和“龙头”。

参考文献 (References)

- [1] The Chinese Academy of Sciences. Some propositions on advancing the comprehensive control of karst mountain areas in Southeast China. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 389-492. [中国科学院学部. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 389-492.]
- [2] Yuan Daoxian. Rock desertification in the subtropical karst of south China. *Z. Geomorph. N. F.*, 1997, 108(2): 81-90.
- [3] Wang S J, Li R L, Sun C X et al. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province, PR China. *Land Degradation & Development*, 2004, 15: 123-131.
- [4] Cao Jianhua, Yuan Daoxian. *Karst Ecosystem Constrained by Geological Conditions in Southwest China*. Beijing: Geology Press, 2005. 90-148. [曹建华, 袁道先. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 北京: 地质出版社, 2005. 90-148.]
- [5] Wang Shijie, Li Yangbing. Discussion on the classification of karst rocky desertification in ecological constructions. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(3): 192-195. [王世杰, 李阳兵. 生态建设中的喀斯特石漠化分级问题. *中国岩溶*, 2005, 24(3): 192-195.]
- [6] Huang Qiuhaio, Cai Yunlong. Hazardous assessment of karst rocky desertification in Guizhou Province: An application of the RBFN model. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5): 771-778. [黄秋昊, 蔡运龙. 基于RBFN模型的贵州省石漠化危险度评价. *地理学报*, 2005, 60(5): 771-778.]
- [7] Xiong Kangning, Li Ping, Zhou Zhongfa et al. *The RS and GIS Representative Study on Karst Rock Desertification*. Beijing: Geology Press, 2002. 1-182. [熊康宁, 黎平, 周忠发等. 岩溶石漠化的遥感—GIS典型研究. 北京: 地质出版社, 2002. 33-182.]
- [8] Bai Xiaoyong, Xiong Kangning, Su Xiaoliang et al. The ecological effects of karst rocky desertification landscape. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(4): 276-281. [白晓永, 熊康宁, 苏孝良等. 喀斯特石漠化景观及其土地的生态效应. *中国岩溶*, 2005, 24(4): 276-281.]
- [9] Li Ruiling, Wang Shijie, Zhou Dequan et al. The correlation between rock desertification and lithology in karst area of Guizhou. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 314-320. [李瑞玲, 王世杰, 周德全等. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析. *地理学报*, 2003, 58(2): 314-320.]
- [10] Bai Xiaoyong, Xiong Kangning, Li Yangbing, et al. Quantitative research of the space dependence of different grades rocky desertification and the factor of population in karst mountain area. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(2): 242-248. [白晓永, 熊康宁, 李阳兵等. 岩溶山区不同强度石漠化与人口因素空间差异性的定量研究. *山地学报*, 2006, 24(2): 242-248.]
- [11] <http://www.landsat.org/ortho/index.htm>
- [12] www.geodata.cn
- [13] <http://westdc.westgis.ac.cn>

- [14] www.karstdata.cn
- [15] Hu Baoqing, Jiang Shufang, Liao Chimei et al. TUPU Analysis on driving mechanism of Guangxi karst rocky desertification based on 3S technique. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(2): 234-241. [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. *山地学报*, 2006, 24(2): 234-241.]
- [16] Hu Baoqing, Liao Chimei, Yan Zhiqiang et al. Diving mechanism diagnosis of karst rocky desertification in Du'an Yao Autonomous County of Guangxi based on RS and GIS. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(5): 583-590. [胡宝清, 廖赤眉, 严志强等. 基于 RS 和 GIS 的喀斯特石漠化驱动机制分析. *山地学报*, 2004, 22(5): 583-590.]
- [17] Wang Yu. On the desertification and genesis of karst stone mountain area in east Yunnan. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(6): 933-938. [王宇. 滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因. *地球科学进展*, 2003, 18(6): 933-938.]
- [18] Wan Jun, Cai Yunlong. Applying linear spectral unmixing approach to the research of land cover change in karst area: A case in Guanling County of Guizhou Province. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 439-446. [万军, 蔡运龙. 应用线性光谱分离技术研究喀斯特地区土地覆被变化: 以贵州省关岭县为例. *地理研究*, 2003, 22(4): 439-446.]
- [19] Yang Shengtian, Zhu Qijiang. The rate of environmental degradation and natural rehabilitation in typical karst area of Guizhou. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 459-466. [杨胜天, 朱启疆. 贵州典型喀斯特环境退化与自然恢复速率. *地理学报*, 2000, 55(4): 459-466.]
- [20] Li Yangbing, Shao Jing'an, Yang Shaohua et al. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Environmental Geology*, 2008, DOI 10.1007/s00254-008-1331-z.
- [21] Clements F E. *Plant Succession: An Analysis of the Development of Vegetation*. Washington: Carnegie Institute, 1916, 1-512.
- [22] http://www1.www.gov.cn/ztzl/fszs/content_650610.htm

Spatio-temporal Evolution Process and Its Evaluation Method of Karst Rocky Desertification in Guizhou Province

BAI Xiaoyong^{1,2,4}, WANG Shijie^{2,3}, CHEN Qiwei⁵, CHENG Anyun^{2,4}, NI Xuebo^{2,4}

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;*

2. *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;*

3. *Puding Comprehensive Karst Research and Experimental Station, Institute of Geochemistry, CAS and Science and Technology Department of Guizhou Province, Puding 562100, Guizhou, China;*

4. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

5. *Guizhou Education Institute, Guiyang 550003, China)*

Abstract: In this paper the spatial-temporal evolution processes of KRD land in Guizhou Province was analyzed mathematically by using 1:100000 scale digital-distribution maps of KRD land obtained by user-computer interactive interpreting method from Landsat images in 1986, 1995 and 2000. The following conclusions are obtained: (1) From 1986 to 2000, the change in total area of KRD land in Guizhou was not obvious, but the mutual transformation of different KRD types is extremely remarkable. (2) The change patterns of KRD land are divided into three kinds: simple change mode, continuous change mode and returned change mode, and characterized by continuous change mode. (3) The forward and reversion evolution processes coexist, with the ratio of the former to the latter being 82.29%, demonstrating that the situation is getting better partially and on the whole it is worsening. (4) The rate of the KRD evolution is 398.31 km² per year, and the change rate of different type KRD land is inverse proportion to its degree of degradation. (5) The change frequencies of moderate and potential KRD land is highest and obviously higher than that of light KRD land. The regional characteristics of KRD spatial evolution and its influencing factors are analyzed, and some suggestions on comprehensive control of KRD land are put forward.

Key words: karst rocky desertification; spatial-temporal evolution; Guizhou