

陈 飞, 周德全, 白晓永, 等. 典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 174-180.

CHEN Fei, ZHOU De-quan, BAI Xiao-yong, et al. Spatial-temporal Evolution of Karst Rocky Desertification and Future Trends Based on CA-Markov Methods in Typical Karst Valley[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2): 174-180.

典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟

陈 飞^{1,2}, 周德全^{1,2*}, 白晓永², 肖建勇^{1,2}, 钱庆欢^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081)

摘 要:石漠化已成为我国西南地区最严重的生态灾难, 探寻石漠化时空演变的规律, 对于生态修复和区域的可持续发展是非常重要的和亟需的。本文利用改进后更为精确的遥感影像石漠化解译方法, 基于最新的且长时间线的研究区 1990、2004、2016 年遥感影像图, 并利用 CA-Markov 预测方法, 探寻研究区 1990—2016 年并预测 2016—2021 年石漠化时空演变规律。研究表明: 研究区近 30 年的石漠化时空演变呈现出先恶化再好转的趋势, 1990—2004 年受到高强度超负荷人类活动及自然灾害影响, 石漠化程度加剧, 生态环境恶化; 2004—2016 年一系列治理工程的实施加之大量农村劳动力从土地依附中解放出来, 使得石漠化程度好转, 自然环境得到恢复, 生态系统越来越好。预测的 2016—2021 年石漠化演变趋势显示: 石漠化不断呈现好转趋势, 区域生态环境持续变好。

关键词:喀斯特; 石漠化; 时空演变; CA-Markov

中图分类号: X144

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2018)02-0174-07

doi: 10.13254/j.jare.2017.0291

Spatial-temporal Evolution of Karst Rocky Desertification and Future Trends Based on CA-Markov Methods in Typical Karst Valley

CHEN Fei^{1,2}, ZHOU De-quan^{1,2*}, BAI Xiao-yong², XIAO Jian-yong^{1,2}, QIAN Qing-huan^{1,2}

(1. School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Karst rocky desertification (KRD) has become the most serious ecological disaster in Southwest China. It is very important and much-needed to explore the rule of spatial-temporal evolution of KRD for ecological restoration and sustainable development of the region. In this paper, the improved accurate remote sensing image interpreting method and CA-Markov prediction method were used to explore the spatial-temporal evolution rule of KRD in the study area from 1990 to 2021 based on the long time line remote sensing image of the year of 1990, 2004 and 2016. The results were as follows: the spatial-temporal evolution rule of KRD presented "first deterioration and then improvement" in the study area at nearly 30 years. The deterioration of KRD was affected by high intensity overload human activities and natural disasters in 1990—2004, which made the ecological environment deterioration. However, the KRD had gradually improved with the implementation of a series of governance projects, and a large number of rural labor forces were liberated from the land in 2004—2016, which made the natural environment restoration, and ecological system was getting better and better. At the same time, the trend of KRD evolution was showing improvement from the predicted years of 2016—2021 and the ecological environment in the region continued to become better.

Keywords: Karst; rocky desertification; spatial-temporal evolution; CA-Markov

收稿日期: 2017-11-28 录用日期: 2018-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502300, 2016YFC0502102)

作者简介: 陈 飞(1992—), 女, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 主要从事遥感生态环境研究。E-mail: 598298593@qq.com

* 通信作者: 周德全 E-mail: 1460176514@qq.com

中国南方喀斯特地貌是全球最典型的热带-亚热带喀斯特集中连片区^[1],该区域的喀斯特石漠化(Karst rocky desertification)分布十分广泛,已成为最严重的生态灾难^[2-4],严重影响和威胁当地人们的生存环境和生活水平,导致了一系列的社会问题^[5-6]。

鉴于石漠化重要性和危害性,众多学者对石漠化的时空演变进行了系统研究,Yang等^[7]对广西北部喀斯特地区进行了石漠化时空演变研究,Zuo等^[8]对贵州毕节地区的石漠化时空演变过程进行了研究,蒋忠诚等^[9]对21世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素进行了研究。但是,以往的研究所选择的研究时段多集中在20世纪90年代,对于现今的石漠化治理很难提供参考意义,很难做到对20世纪以来实施的石漠化治理工程的成效评价。

为此,本文利用改进后更为精确的遥感影像石漠化解译方法,基于最新的且长时间线的研究区遥感影像图,解译3期石漠化等级图,并利用CA-Markov模拟预测2021年石漠化等级图,探寻中国南方典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变的规律。该研究得到的最新多期石漠化等级图将为同行的其他学者提供数据上的参考,同时石漠化时空演变规律将为研究区的政府决策者和环境管理者宏观决策提供依据,以减轻石漠化灾害对社会、经济造成的负面影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

朗溪槽谷位于黔东北印江土家族苗族自治县境

内(图1),槽谷流域面积为167 km²,其中,喀斯特面积为153.67 km²,年降雨量1 100 mm左右,年均气温16.8℃,人口密度为256人·km⁻²,贫困发生率27%。流域内最低海拔497 m,最高海拔1 440 m,垂直高差达943 m,槽谷宽阔,多为1~1.5 km。

朗溪槽谷为向斜槽谷,其轴部构成朗溪河的河道,河道两侧岸坡较陡,地面物质组成多为土石质-石质;向斜两翼分布灰岩兼碎屑岩地层,坡度一般为15°~30°,顺层坡土被较厚,逆层坡土被薄且不连续;坡麓岗地断续分布,多为土石质坡地,为正在耕种或弃耕的中低产旱地;向斜两翼的顶部发育地带性黄壤。依据研究区归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)多年均值(2000—2016年)分布情况(图1c),可以看出研究区的植被覆盖情况主要为:槽谷底部的植被覆盖相对于槽谷两侧而言要差,槽谷两侧的植被覆盖比较好。

1.2 数据与方法

1.2.1 数据源

(1)石漠化解译所涉及的数据源来自于Landsat TM 1990、1995、2000、2004、2011年以及Landsat OLI 2016年遥感影像,分辨率为30 m,来自地理空间数据云;

(2)用于提取遥感影像中的水体、建筑用地等图斑的土地利用类型图数据是利用各年份的遥感影像通过波段提取得到;

(3)用于切除遥感影像中非喀斯特区域的1:50 000地质图来源于喀斯特科学数据中心。

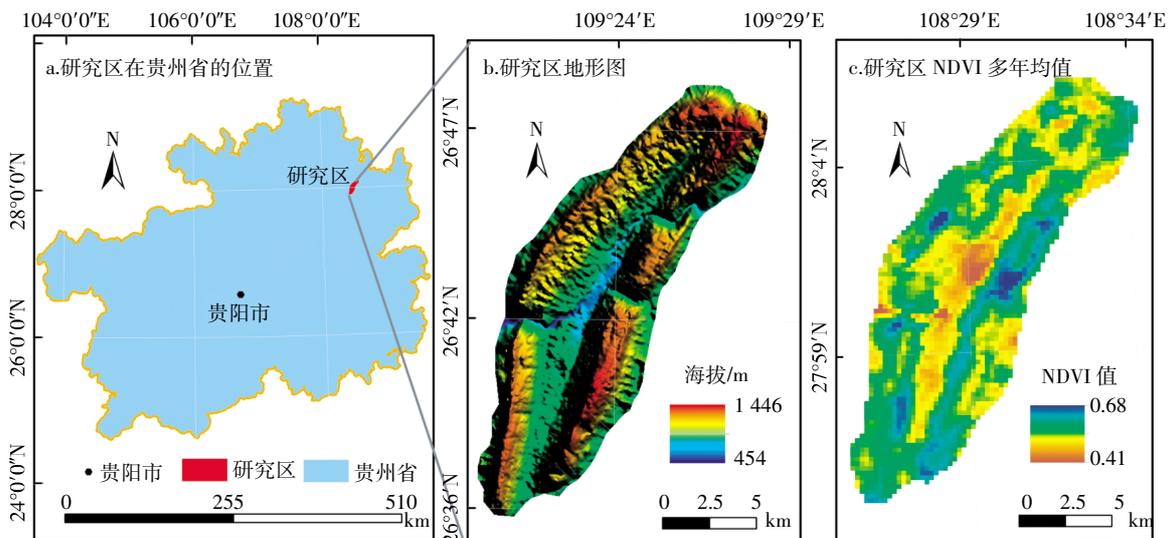


图1 研究区位置图

Figure 1 Location map of the study area

1.2.2 石漠化解译方法

本文所采用的石漠化解译方法是基于 CART 决策树的石漠化解译方法,方法流程为:首先,针对误判石漠化发生在非喀斯特区域的错误,本文用岩性图切除研究区内的非喀斯特区域;其次,利用土地利用图将喀斯特区域的城镇、水体等不可能发生石漠化的地方进行扣除,进一步避免石漠化发生区域的误判;第三,基于 CART 决策树分类方法以及参照石漠化分级指标体系进行解译(表 1)。

1.2.3 CA-Markov 模型

马尔科夫(Markov)模型是一种预测事件发生概率的方法。它是基于马尔科夫链,根据事件的目前状况预测其将来各个时刻(或时期)变动状况的一种预测方法,在土地覆被变化建模中有广泛应用。但是传统 Markov 模型难以预测土地覆被的空间格局变化^[10]。元胞自动机(Cellular automaton, CA)模型具有强大的空间运算能力,可以有效地模拟系统的空间变化^[11]。CA-Markov 模型综合了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力和 Markov 模型长期预测的优势,既提高了土地覆被类型转化的预测精度,又可以有效地模拟土地利用格局的空间变化,具有较大的科学性与实用性^[12]。

CA-Markov 模型在石漠化领域的应用就是将石漠化空间分布格局中的每一个栅格模拟为一个元胞,每个元胞的石漠化等级类型即为元胞的状态。应用 Logistic 模块获取适宜性分布图集,在 CA-Markov 模块下完成模拟运算,从而模拟石漠化空间格局变化。

在石漠化变化研究中,利用马尔可夫过程,将石漠化类型对应 Markov 过程中的可能状态,石漠化类型间相互转换的面积数量或比例即为状态转移概率,可用式(1)对石漠化结构变化状态进行预测:

$$S(T)=P_{ij}+S(T_0) \quad (1)$$

式中, $S(T)$ 和 $S(T_0)$ 分别为 T 和 T_0 时刻石漠化结构状

态, P_{ij} 为石漠化转移矩阵,可由式(2)表示:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ & & \cdots & \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 石漠化时空演变的总体特征

从图 2 可以看出,研究区的石漠化在空间上的演变特征表现为槽谷底部地区石漠化类型转换最为剧烈,槽谷两侧石漠化类型转换较缓。在研究时段初期到末期,槽谷底部地区不仅石漠化严重程度在快速变化,而且各类型的石漠化强度等级之间的转换也十分频繁;槽谷两边地区是无石漠化及轻度石漠化的主要分布区域;整体而言,研究区的石漠化在空间上体现出“中间重两侧轻”的特点。

将图 2 进行数据统计得到表 2。由表 2 可以清楚地看到,1990—2004 年,无石漠化面积从 42.21 km² 变为 31.73 km²,而极强度石漠化从 0 变为 15.74 km²,说明石漠化恶化趋势;2004—2016 年,无石漠化面积从 31.73 km² 到 94.61 km²,大幅增加,而极强度石漠化从 15.74 km² 变为 0.25 km²,在不断减少,表明该时段石漠化在好转。从预测结果来看,2016—2021 年,无石漠化面积从 94.61 km² 变为 90.26 km²,无石漠化面积在减少,无石漠化面积的减少就意味着已石漠化面积(已石漠化面积=轻度+中度+强度+极强度石漠化)的增加,似乎石漠化出现恶化趋势。但是,从表 2 中的中度、强度、极强度石漠化面积也在减少,面积增加的是潜在石漠化,而潜在石漠化并不算在已石漠化的类型中^[4],说明 2016—2021 年,已石漠化面积还是在减少,从而从研究区石漠化整体而言,石漠化还是有持续好转的趋势。

基于以上的分析和表 2 的数值,研究区的石漠化

表 1 石漠化等级划分标准及特征编码^[4]

Table 1 The classification criterion and characteristic code of KRD types^[4]

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
微度石漠化(PKRD)	20~30	线状	地表组成物质一般,有岩石裸露趋势,多为非梯土旱地、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	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	线状	地表组成物质很少,岩石裸露很大,多为即将丧失农用地价值的土地
极强度石漠化(ESKRD)	>90	面状	地表组成物质极少,岩石裸露极大,多为难利用地
非喀斯特(NK)	非喀斯特地区不涉及石漠化问题		

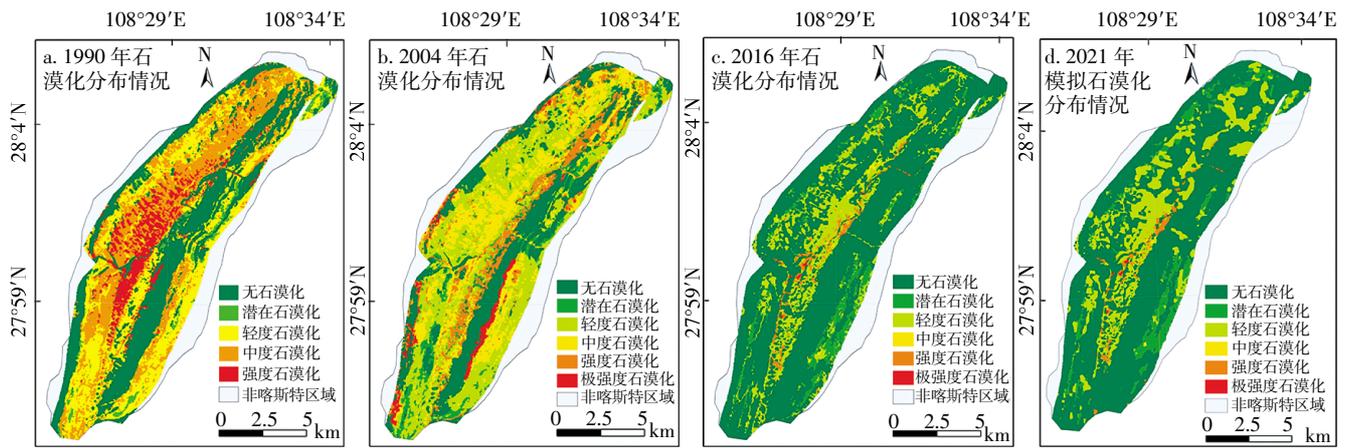


图 2 研究区石漠化空间分布图(1990—2021 年)

Figure 2 The spatial distribution map of Karst rocky desertification in the study area(1990—2021)

表 2 研究区不同石漠化类型在喀斯特区域的面积和比例(1990—2021 年)

Table 2 Area and proportion of different KRD types in the Karst study areas(1990—2021)

年份		无石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	强度石漠化	极强强度石漠化
1990	面积/km ²	42.21	3.83	37.98	37.12	12.04	0.00
	比例/%	31.69	2.88	28.52	27.87	9.04	0.00
2004	面积/km ²	31.73	8.06	47.77	26.38	3.61	15.74
	比例/%	23.81	6.05	35.84	19.79	2.71	11.81
2016	面积/km ²	94.61	10.15	24.74	0.54	2.91	0.25
	比例/%	71.03	7.62	18.57	0.41	2.18	0.19
2021	面积/km ²	90.26	11.72	27.91	0.31	2.25	0.20
	比例/%	68.04	8.84	21.04	0.23	1.70	0.15

演变规律总体而言呈现出先恶化再好转的趋势。主要原因有两大方面：一是 20 世纪以来大批石漠化治理工程的实施以及退耕还林国策带来的结果^[13],二是人们对土地的依赖性减少,农业人口的减少、沼气的开发利用,降低了人类不合理活动对石漠化的影响^[14]。

2.2 石漠化土地动态变化特征

运用式(2)对研究区 1990—2021 年的石漠化进行运算,得到图 3 和表 3。1990—2004 年,主要以中度石漠化向强度石漠化转移为主,同时还有较多潜在向轻度、中度石漠化转移,石漠化呈恶化趋势。2004—2016 年,石漠化的转移主要是以轻度向潜在及无石漠化转移,以及潜在向无石漠化的转移,石漠化程度好转,生态环境逐渐恢复。2016—2021 年,大面积的无石漠化保持不变,同时也伴随着小面积的轻度向潜在转移的情况,石漠化程度不断减轻,生态环境越来越好(图 3)。

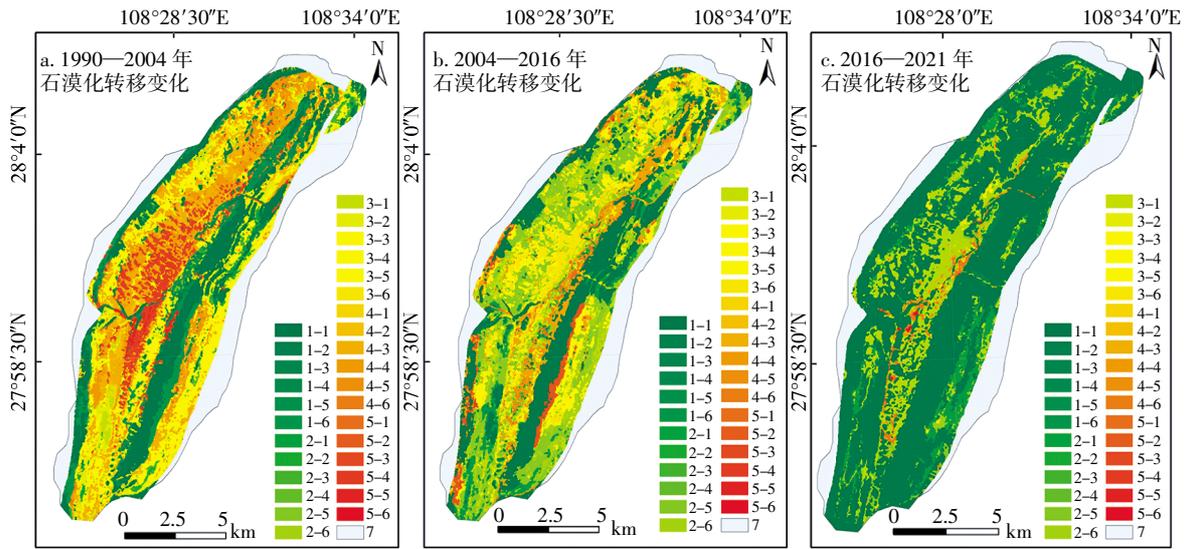
从表 3 可看出,从 1990—2004 年,无石漠化面积保持不变的有 25.18 km²,轻度石漠化保持不变的面

积有 20.90 km²,从轻度石漠化转变为中度石漠化的土地有 19.09 km²,从中度石漠化转变为强度石漠化的有 6.24 km²,说明石漠化程度是不断加重的。从 2004—2016 年,无石漠化保持不变的面积有 30.73 km²,从轻度石漠化转变为无石漠化的面积有 29.78 km²,从中度石漠化转变为无石漠化的有 12.11 km²,从强度石漠化转变为无石漠化的有 11.15 km²,说明石漠化程度在好转。从预测的 2021 年石漠化分布结果显示,2016—2021 年无石漠化保持不变的有 84.60 km²,轻度石漠化保持不变的有 18.18 km²,从轻度石漠化转变为无石漠化的有 8.08 km²,说明石漠化情况在持续好转,生态环境越来越好(表 3)。

3 讨论

3.1 石漠化解译方法可行性验证

将 2016 年遥感解译和研究区人民政府调查数据进行对比得到表 4。从表 4 中可知,差额面积最大的是轻度及潜在石漠化,因为这两种石漠化解译时影像



图中 1:无石漠化 2:潜在石漠化 3:轻度石漠化 4:中度石漠化 5:强度石漠化 6:极强度石漠化 7:非喀斯特区域
1:NKRD 2:PKRD 3:LKRD 4:MKRD 5:SKRD 6:ESKRD 7:NK

图 3 研究区各时段石漠化强度等级变化趋势图

Figure 3 The trend map of Karst rocky desertification intensity in each period of the study area

表 3 研究区不同石漠化类型土地转移矩阵(1990—2021 年)(km²)

Table 3 Conversion matrix of different KRD types land in the study areas(1990—2021)(km²)

时间	石漠化类型	NKRD	PKRD	LKRD	MKRD	SKRD	ESKRD
1990—2004 年	NKRD	25.18	1.05	3.68	1.40	0.28	0.00
	PKRD	0.64	1.09	4.97	1.24	0.06	0.00
	LKRD	2.36	1.36	20.90	19.09	3.87	0.00
	MKRD	1.70	0.11	4.94	13.35	6.24	0.00
	SKRD	9.03	0.16	3.08	1.85	1.56	0.00
	ESKRD	3.11	0.05	0.24	0.17	0.03	0.00
2004—2016 年	NKRD	30.73	7.09	29.78	12.11	11.15	3.43
	PKRD	0.17	0.13	5.73	3.55	0.44	0.09
	LKRD	0.53	0.66	10.86	9.66	2.91	0.07
	MKRD	0.02	0.03	0.14	0.29	0.06	0.00
	SKRD	0.13	0.10	0.99	0.64	1.05	0.00
	ESKRD	0.01	0.01	0.06	0.08	0.07	0.00
2016—2021 年	NKRD	84.60	1.41	3.89	0.03	0.23	0.02
	PKRD	1.11	8.27	2.28	0.02	0.02	0.00
	LKRD	8.08	0.42	18.18	0.25	0.95	0.03
	MKRD	0.03	0.00	0.05	0.22	0.01	0.00
	SKRD	0.25	0.00	0.26	0.02	1.68	0.02
	ESKRD	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.16

注:表中 NKRD:无石漠化,PKRD:潜在石漠化,LKRD:轻度石漠化 MKRD:中度石漠化,SKRD:强度石漠化,ESKRD:极强度石漠化。

图斑特征比较容易混淆。出现最大差额面积的为轻度石漠化,其遥感解译和实际调查面积相差 2.83 km²,单看这个数值可能会让人觉得解译误差较大,因为有将近 3 km² 的轻度石漠化解译错误,但是,相对于整

个研究区 133.20 km² 的面积而言,3 km² 仅占整个研究区面积的 2.25%,分布到整个区域的轻度石漠化而言是很小的误差了。其余的石漠化类型的差额面积都是比较小的,特别是极强度、中度石漠化,遥感解译面积

和实际调查面积差距非常小, 说明这两种石漠化类型的解译精度很高。从无石漠化、潜在石漠化到强度、极强度石漠化的各个类型差额面积都较小, 而且很难做到遥感解译和实际调查数据完全一致的可能, 可以得出所用解译方法是较为可行的。

3.2 石漠化时空演变特征的原因

石漠化的发生发展是受众多因素影响, 是人类活动和自然背景综合影响的结果。从 20 世纪 90 年代末期到 21 世纪初叶的时段内, 研究区石漠化总面积变化十分明显, 石漠化呈现先恶化再好转的趋势。时空演变格局与喀斯特的区域地质背景有很大的关系, 也与国家在该段时期内的社会经济发展和生态建设的大背景存在着密切的相关(图 4)。

研究区的石漠化时空演变特征主要分为两个阶段。第一阶段: 1990—2004 年为石漠化加重, 生态环境破坏阶段; 第二阶段: 2004—2016 年为石漠化好转生态环境恢复阶段; 从模拟预测的结果来看, 2016—2021 年研究区的石漠化还是在持续好转。

有以上演变规律的原因主要是: 第一阶段, 由于农村人口的主要经济来源是依靠粗放的土地种植, 对

土地的索取, 加之这一时段内的自然灾害频发, 从而造成研究区石漠化加剧; 第二阶段, 随着城镇化的不断发展, 大量农村劳动力从土地中解放出来转入到其他的工作中, 农业人口减少^[15], 1995、2005、2016 年研究区所在县份的农村劳动力为 15.09 万、13.13 万、0.88 万人^[16], 整个县份的农业人口在大幅减少, 此外, 随着经济社会的发展, 国家对生态环境治理工程投入也在增加, 这些工程的实施会促进石漠化情况好转, 石漠化发生逆转得到好转, 生态环境越来越好。

4 结论

研究区近 30 年的石漠化时空演变呈现出先恶化再好转的趋势。1990—2004 年受到高强度超负荷人类活动及自然灾害影响石漠化程度加剧, 生态环境恶化; 2004—2016 年一系列治理工程的实施加之大量农村劳动力从土地依附中解放出来, 使得石漠化程度好转。从通过 CA-Markov 预测的结果来看, 2021 年的石漠化的情况在持续好转, 生态环境朝着可持续发展的方向友好发展。

表 4 研究区 2016 年不同石漠化类型遥感解译与实际调查面积对比 (km²)

Table 4 The contrast of study area of different types of KRD remote sensing interpretation with the actual survey in 2016(km²)

面积对比	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
遥感解译面积	94.61	10.15	24.74	0.54	2.91	0.25
实际调查面积	95.62	12.22	21.91	0.63	2.61	0.21
差额面积	1.01	2.07	2.83	0.09	0.30	0.04

注: 石漠化实际调查数据来自研究区人民政府提供的 2016 年详细数据。

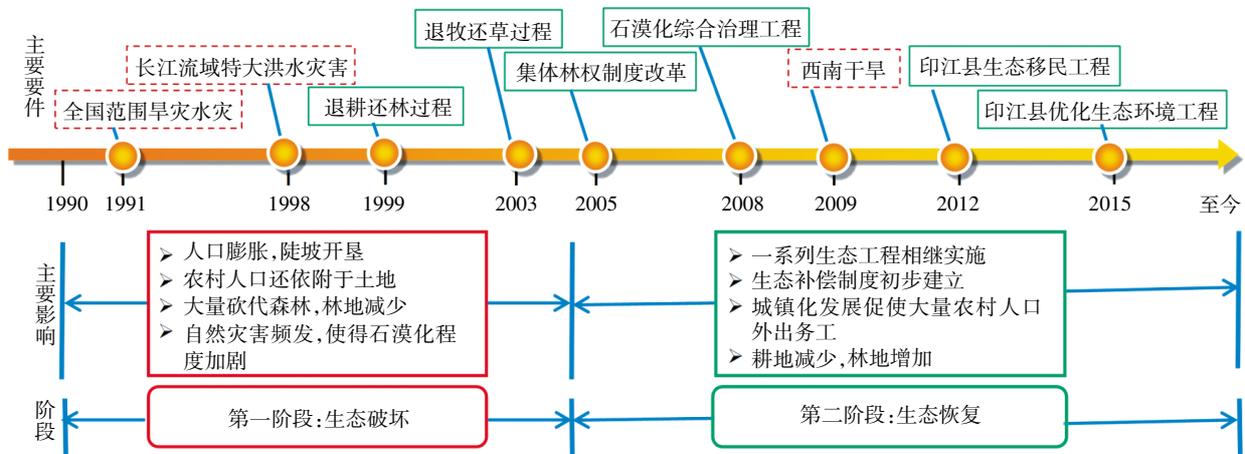


图 4 研究区近 30 年来可能影响石漠化发展的主要事件时间轴

Figure 4 The main events time axis that may affect the development of KRD in the last 30 years in the study area

参考文献:

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2):101-105.
WANG Shi-jie. Concept deduction and its connotation of Karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 101-105. (in Chinese)
- [2] 白晓永, 王世杰, 陈起伟, 等. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价[J]. 地理学报, 2009, 64(5):609-618.
BAI Xiao-yong, WANG, Shi-jie, CHEN, Qi-wei, et al. Spatio-temporal evolution process and its evaluation method of Karst rocky desertification in Guizhou Province[J]. *Acta Geographica Sinica*. 2009, 64(5): 609-618. (in Chinese)
- [3] Wang S J. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6):657-666.
- [4] 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.
- [5] Yuan D X. Global view on Karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(9): 19-25.
- [6] 李阳兵, 白晓永, 邱兴春, 等. 喀斯特石漠化与土地利用相关性研究[J]. 资源科学, 2006, 28(2):67-73.
LI Yang-bing, BAI Xiao-yong, QIU Xing-chun, et al. Karst rocky desertification and land use of correlation studies[J]. *Resources Science*, 2006, 28(2):67-73. (in Chinese)
- [7] Yang Q Q, Wang K L, Zhang C, et al. Spatio-temporal evolution of rocky desertification and its driving forces in Karst areas of Northwestern Guangxi, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(2):383-393.
- [8] Zuo T A, Diao C T, Su W C, et al. Spatial-temporal evolution process and its evaluation characteristic of rocky desertification in Bijie experimental area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23):7067-7077.
- [9] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 等. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5):461-468.
JIANG Zhong-cheng, LUO Wei-qun, TONG Li-qiang, et al. Evolution features of rocky desertification and influence factors in Karst areas of southwest China in 21st century[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 461-468. (in Chinese)
- [10] Luijten J C. A systematic method for generating land use patterns using stochastic rules and basic landscape characteristics: Results for a Colombian hillside watershed[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 95(2-3):427-441.
- [11] 刘继生, 陈彦光. 基于 GIS 的细胞自动机模型与人地关系的复杂性探讨[J]. 地理研究, 2002, 21(2):155-162.
LIU Ji-sheng, CHEN Yan-guang. GIS-based cellular automata models and researches on spatial complexity of man-land relationship[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(2):155-162. (in Chinese)
- [12] 杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5):414-418.
YANG Guo-qing, LIU Yao-lin, WU Zhi-feng. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-markov model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(5):414-418. (in Chinese)
- [13] 李建存, 涂杰楠, 童立强, 等. 贵州岩溶石漠化 20 年演变特征与影响因素分析[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(4):133-137.
LI Jian-cun, TU Jie-nan, TONG Li-qiang, et al. 20 years' evolution features and influence factor analysis of rocky desertification in Guizhou[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(4):133-137. (in Chinese)
- [14] 王 荣, 蔡运龙. 西南喀斯特地区退化生态系统整治模式[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4):1070-1080.
WANG Rong, CAI Yun-long. Management modes of degraded ecosystem in southwest Karst area of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4):1070-1080. (in Chinese)
- [15] 贵州省统计局. 贵州统计年鉴. 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
Statistics Bureau of Guizhou Province. Guizhou statistical yearbook. 2011[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011. (in Chinese)