

DOI: 10.5846/stxb201903300618

操玥, 王世杰, 白晓永, 李汇文, 陈飞, 王明明, 吴路华, 许燕, 李琴, 田诗琪, 杨钰杰, 李朝君, 胡泽银, 邓元红, 路茜, 习慧鹏, 陈欢, 王金凤, 冉晨, 罗旭玲. 喀斯特槽谷区土壤侵蚀时空演变及未来情景模拟. 生态学报, 2019, 39(16): 6061–6071.

Cao Y, Wang S J, Bai X Y, Li H W, Chen F, Wang M M, Wu L H, Xu Y, Li Q, Tian S Q, Yang Y J, Li C J, Hu Z Y, Deng Y H, Lu Q, Xi H P, Chen H, Wang J F, Ran C, Luo X L. Spatial-temporal evolution processes and simulation of future soil erosion scenario in the karst valley of Southern China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6061–6071.

喀斯特槽谷区土壤侵蚀时空演变及未来情景模拟

操玥^{1,2}, 王世杰^{1,4}, 白晓永^{1,3,5,*}, 李汇文^{1,2}, 陈飞¹, 王明明^{1,2}, 吴路华^{1,2},
许燕^{1,2}, 李琴^{1,2}, 田诗琪¹, 杨钰杰¹, 李朝君¹, 胡泽银^{1,2}, 邓元红^{1,2}, 路茜¹,
习慧鹏^{1,2}, 陈欢¹, 王金凤¹, 冉晨¹, 罗旭玲¹

1 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 550081

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061

4 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 安顺 562100

5 贵州师范学院贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵阳 550018

摘要: 以中国南方喀斯特槽谷区为研究对象, 基于改进的喀斯特地区土壤侵蚀算法, 定量分析了槽谷区土壤侵蚀时空演变特征, 并利用 CA-Markov 模型对土壤侵蚀状况的未来情景进行预测。结果表明: (1) 喀斯特槽谷区 2000—2015 年土壤侵蚀总量由 61.86×10^7 t/a 减少至 2.97×10^7 t/a, 区域年平均侵蚀模数由 $21.61 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 降低至 $1.04 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 轻度及轻度以下侵蚀等级的面积增加了 $76.13 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 重度及重度以上侵蚀面积减少了 $46.90 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 侵蚀状况明显减轻; (2) 不同地貌类型之间的土壤侵蚀状况存在一定差异, 平原地区侵蚀模数最小, 盆地地区侵蚀模数最大, 达到平原地区侵蚀模数的近 4 倍; (3) 2000—2015 年间, 槽谷区轻度及轻度以上侵蚀等级都逐渐向微度侵蚀等级转移, 土壤侵蚀等级由高等级向低等级转移率达到了 98% 以上, 总体呈现出好转的趋势; (4) 基于 CA-Markov 模型模拟槽谷区 2020 年土壤侵蚀等级的未来演变趋势, 其总体 Kappa 系数达到了 0.9788, 一致性最佳; (5) 到 2020 年, 槽谷区土壤侵蚀等级基本为微度和轻度侵蚀, 土壤侵蚀状况将进一步改善。本研究的结果可为喀斯特槽谷区当前土壤侵蚀治理成效的评价以及未来的防治提供理论和数据方面的参考。

关键词: 土壤侵蚀; 喀斯特; 时空格局; CA-Markov 模型; 槽谷

Spatial-temporal evolution processes and simulation of future soil erosion scenario in the karst valley of Southern China

CAO Yue^{1,2}, WANG Shijie^{1,4}, BAI Xiaoyong^{1,3,5,*}, LI Huiwen^{1,2}, CHEN Fei¹, WANG Mingming^{1,2}, WU Luhua^{1,2},
XU Yan^{1,2}, LI Qin^{1,2}, TIAN Shiqi¹, YANG Yujie¹, LI Chaojun¹, HU Zeyin^{1,2}, DENG Yuanhong^{1,2}, LU Qian¹,
XI Huipeng^{1,2}, CHEN Huan¹, WANG Jinfeng¹, RAN Chen¹, LUO Xuling¹

1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Chinese Academy of Sciences Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China

4 Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Anshun 562100, China

5 Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502300, 2016YFC0502102); “西部之光”人才培养计划(A类)([2018]X); 贵州省科技计划(2017-2966)

收稿日期: 2019-03-30; 修订日期: 2019-06-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baixiaoyong@126.com

<http://www.ecologica.cn>

Abstract: Based on an improved soil erosion algorithm for the karst area of Southern China, we quantitatively analyzed the spatial-temporal evolution processes of soil erosion, and used the CA-Markov model to predict the future situation of soil erosion in the karst valley in Southern China. Our major findings are as follows: (1) The total amount of soil erosion in the karst valley decreased from 61.86×10^7 t/a to 2.97×10^7 t/a from 2000 to 2015, and the annual average erosion modulus of the area reduced from $21.61 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ to $1.04 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. The area of erosion corresponding to the grades mild and below mild increased by $76.13 \times 10^5 \text{ hm}^2$, while that corresponding to the grades strong and above strong decreased by $46.90 \times 10^5 \text{ hm}^2$, indicating that the erosion situation reduced significantly. (2) There are some differences in soil erosion between different geomorphological types. The erosion modulus in the plain area was the smallest, while that in the basin area was the largest, nearly four times the erosion modulus in the plains. (3) From 2000 to 2015, the mild and above mild erosion levels in the karst valley gradually shifted to the level of micro-erosion, and the rate of shift in soil erosion grade from the high to low grade reached more than 98%, showing a general trend of improvement. (4) We simulated the future trend of the soil erosion grade evolution in the trough valley in 2020 based on the CA-Markov model. The overall Kappa coefficient reached 0.9788, and the consistency was the best. (5) By 2020, the soil erosion level in the trough area would be micro-degree i.e., mild erosion and the soil erosion condition would be further improved. The results of this study could provide theoretical and data references for the evaluation of current soil erosion control strategies and future prevention and control measures in the karst valley.

Key Words: soil erosion; karst; spatial-temporal pattern; CA-Markov model; valley

土壤侵蚀是陆地生态系统普遍存在的主要环境威胁之一^[1-2],土壤侵蚀直接导致土地退化,破坏土地资源,降低土壤质量,可能会对农业可持续发展造成一系列威胁^[3-5]。而在我国南方喀斯特地区,岩溶作用强烈,地质背景特殊,水土流失后,常常会出现土地石漠化^[6-7],严重制约区域的社会经济发展。因此,定量评估喀斯特地区土壤侵蚀状况,揭示其时空演变特征是防治区域水土流失的基础。

目前国内外已经有很多学者针对喀斯特地区特殊的地貌特征开展研究。Vigiak 等利用 SWAT 模型对多瑙河流域年输沙量的估算,认为该模型在高山和喀斯特地区存在低估^[8]; Zeng 等基于 RUSLE 模型分析了典型喀斯特地区土壤侵蚀的时空演化及其与空间要素的相关性^[9]; Aksoy 等利用室内试验装置模拟了喀斯特石漠化地区降雨和侵蚀情况,并建立了经验模型^[10]; López-Vicente 等通过对西班牙比利牛斯山脉内陆河流域准确 DEM 的获取,提供了一个新的 DEM 以计算 RUSLE 模型中的 LS 因子来准确评估喀斯特环境的地形地貌特征^[11]; 钱庆欢等根据喀斯特地区特殊的地质背景,对传统的 RUSLE 模型进行改进,建立了一套适用于喀斯特地区土壤侵蚀估算的模型^[12]。以上研究,为喀斯特地区的土壤侵蚀研究以及可持续发展提供了相应的参考。然而,以往的研究大多侧重于传统经典模型在喀斯特地区的直接使用,或是侧重估算方法的探讨,而有关精确模拟喀斯特地区土壤侵蚀的时空演变过程,尤其是未来的演变趋势分析和模拟研究较少,而这对于下一步针对性的土壤侵蚀防治工作十分必要。因此,本研究基于改进的喀斯特地区土壤侵蚀计算方法,对槽谷区的土壤侵蚀时空演变过程进行定量分析,并对土壤侵蚀等级的未来演变方向进行预测,以期对喀斯特槽谷区土壤侵蚀治理与防治提供理论依据和科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

喀斯特槽谷区是中国南方喀斯特分布面积最大的“老、少、边、山、穷”地区^[13],行政区划上横跨湖北、湖南、重庆、四川和贵州五个省市,其地理坐标为北纬 $105^{\circ}31'$ 到 $13^{\circ}47'$,东经 $26^{\circ}23'$ 到 $33^{\circ}37'$,面积约为 28.6 km^2 ,占到了整个中国南方的 14.77%,是南方喀斯特的重要组成部分。气候类型为亚热带季风性气候,年平均降雨在 800 mm 以上,土壤以黄壤、石灰土为主。区域内裸露型喀斯特占到了总面积的 46.06%,岩溶作用强

烈, 土被不连续, 且地下溶洞及裂隙发育, 广泛分布的土壤侵蚀导致了研究区的土层变薄, 生态系统脆弱。

1.2 数据来源

本研究主要使用了气象数据(基于国家气象站点观测的日值数据累加至全年)、地形数据、土地利用与土壤类型数据、遥感影像数据及地理区划数据。为了准确计算研究区的土壤侵蚀状况, 本研究利用克里格插值法对以上数据进行重采样, 使其空间分辨率均为 100m。数据具体来源如表 1 所示。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据类型 Data types	数据来源 Data Sources	网址 Websites
槽谷区边界 Boundary of Valley	喀斯特科学数据中心	http://www.karstdata.cn/
喀斯特分布图 Distribution Map of Karst		
岩性图 Lithology Map		
数字高程模型(DEM) Digital Elevation Model	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn/
归一化植被指数(NDVI) Normalized Difference Vegetation Index	NASA LP DAAC	https://lpdaac.usgs.gov
日气象数据 Daily meteorological data	中国气象数据网	http://data.cma.cn
土地利用 Land Use	中国科学院资源环境科学数据云平台	http://www.resdc.cn
土壤类型 Soil types		
地貌类型分区 Landform types		

本研究采用的日气象数据包括研究区内及周边区域 90 个站点的降雨(P , mm)、蒸发(E , mm) 及平均温度(T , $^{\circ}\text{C}$) 数据

1.3 土壤侵蚀的估算

本研究基于目前广泛应用的修正的通用土壤流失模型^[14] 其计算公式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中 A 为年平均土壤流失量($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); R 为降雨及径流因子($(\text{MJ mm}) / (\text{hm}^2 \text{h})$); K 为土壤可蚀性因子($(\text{t hm}^2 \text{h}) / (\text{hm}^2 \text{MJ mm})$); L 、 S 为坡长、坡度因子; C 表示植被与经营管理因子; P 表示水土保持措施因子。

根据喀斯特地区特殊的地质背景, 对以上模型中的降雨侵蚀力因子进行改进, 并结合土壤允许流失量对计算结果进行校正, 具体参数及其计算方法与过程见文献^[12]。依据 SL190—2007《土壤侵蚀分类分级中的水力侵蚀强度分级标准》将槽谷区的土壤侵蚀进行分级。

1.4 CA-Markov 模型

CA-Markov 模型是基于马尔科夫链, 根据事件目前的状态预测其将来变动状况的一种预测方法, 作为一种具有时空计算特征的动力学模型, 被广泛用于土壤侵蚀等领域^[15-16]。将土壤侵蚀等级分布格局中的每一个栅格模拟为一个元胞, 每个元胞的土壤侵蚀等级类型为元胞的状态。基于影响土壤侵蚀等级的年均降水、土壤可蚀性、海拔、坡度、植被与经营管理因子、水土保持措施因子以及岩性等影响土壤侵蚀等级的因子数据, 并应用 IDRISI 软件中的 Logistic 模块获取适宜性分布图集, 在 CA-Markov 模块下完成模拟运算, 从而模拟土壤侵蚀等级空间格局的变化。

1.5 精度验证

模拟预测的关键在于其预测结果的正确性。本研究采用 Kappa 系数作为模型精度的评价标准, 来评价计算结果与预测结果之间的一致性, 其评价标准如表 2 所示^[17-18]。

表 2 Kappa 系数分类标准
Table 2 Classification Criteria of Kappa

Kappa	(-∞ 0.00)	[0.00 0.20)	[0.20 0.40)	[0.40 0.60)	[0.60 0.80)	[0.80 1.00)
一致性程度 Consistency	很差	微弱	弱	适中	显著	最佳

http://www.ecologica.cn

2 结果与分析

2.1 槽谷区土壤侵蚀的空间分布特征

槽谷区 2000 年土壤侵蚀总量约为 61.86×10^7 t/a ,年平均侵蚀模数约为 $21.61 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 2005 年土壤侵蚀总量约为 16.48×10^7 t/a ,年平均侵蚀模数约为 $5.76 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 2010 年土壤侵蚀总量约为 15.93×10^7 t/a ,年平均侵蚀模数约为 $5.57 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 2015 年土壤侵蚀总量约为 2.97×10^7 t/a ,年平均侵蚀模数约为 $1.04 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。与 2000 年相比,2005 年、2010 年以及 2015 年整个区域土壤侵蚀总量和平均侵蚀模数分别降低了 73.36%、74.25% 及 95.20%; 2000 至 2015 年间,槽谷区的土壤侵蚀总量逐年减少,平均侵蚀模数逐年降低,侵蚀状况整体在减轻。此外,根据中国科学院资源环境科学数据云平台提供的地貌分区依据,本研究对喀斯特槽谷区不同地貌类型下的土壤侵蚀状况进行分析,结果发现:不同地貌类型之间的土壤侵蚀状况存在较大差异。其中,淮南与长江中下游平原年平均侵蚀模数最小,为 $3.34 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 其次为江南与南岭山地和贵州高原,分别为 $7.52 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $7 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 约为平原地区侵蚀模数的两倍; 而四川盆地与汉中盆地土壤侵蚀模数较大,分别为 $12.81 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $11.82 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 达到平原地区侵蚀模数的近四倍。

由图 1 可以看出,4 个时期槽谷区土壤侵蚀等级空间分布相似,均以微度侵蚀为主。2000 年时重度以上

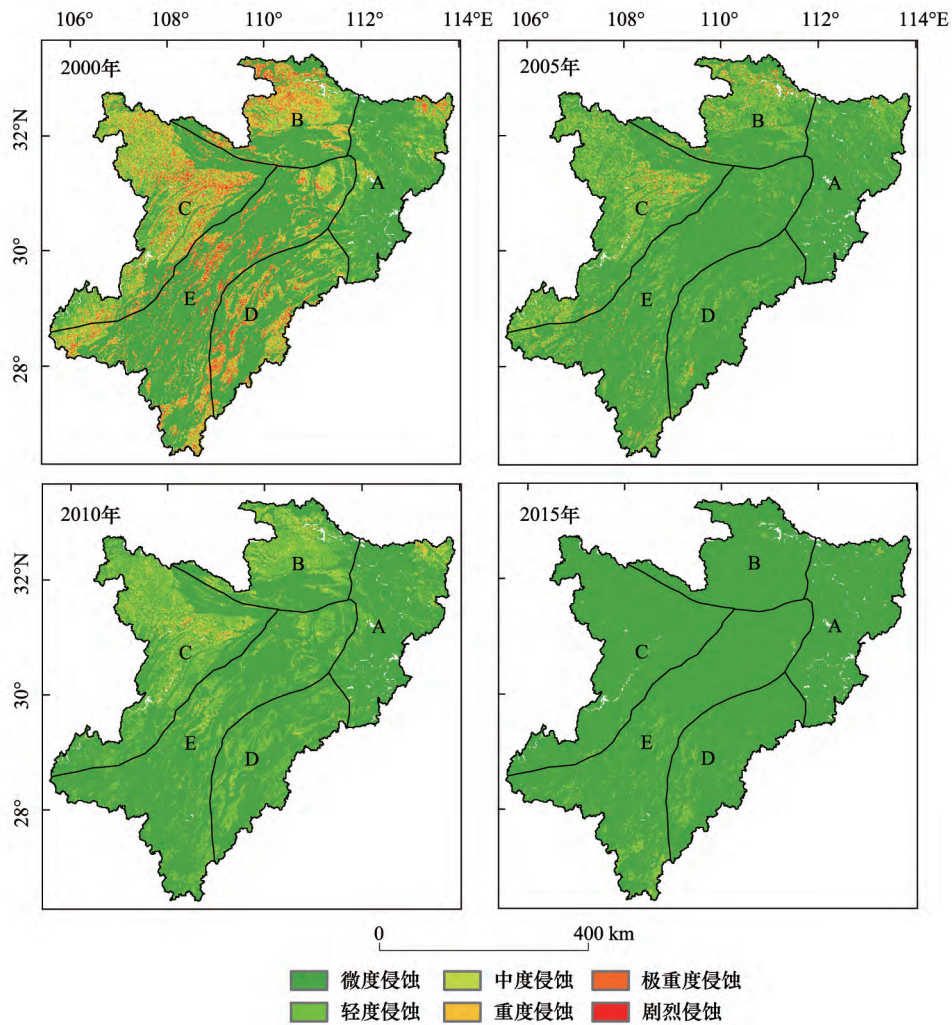


图 1 喀斯特槽谷区土壤侵蚀等级空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of soil erosion intensity in karst valley

图中 A—E 为地貌单元分区,依次代表淮南与长江中下游平原、汉中盆地、四川盆地、江南与南岭山地以及贵州高原

侵蚀主要发生在四川盆地以及汉中盆地, 而其他地区均有微度以上的侵蚀状况; 2005—2010 年, 淮南与长江中下游平原、江南与南岭山地以及贵州高原地区的侵蚀都逐渐降低到微度或轻度侵蚀, 与此同时汉中盆地以及四川盆地也由重度以上侵蚀转为中度以下侵蚀; 到 2015 年, 整个区域以微度侵蚀为主, 土壤侵蚀状况进一步好转。

在计算出槽谷区各像元的土壤侵蚀等级图后, 对四个时期的土壤侵蚀总量和侵蚀面积进行统计, 结果如表 3 所示。

由表 3 为可以看出, 轻度及轻度以下侵蚀等级的面积在不断增加, 分别为 $209.59 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、 $270.91 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、 $272.26 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 以及 $285.72 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占研究区总面积的 73.21%、94.64%、95.10% 以及 99.81%; 而其他侵蚀等级的面积逐年减少, 其中重度及重度以上侵蚀面积在四个时期分别为 $46.97 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、 $5.84 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、 $2.09 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 以及 $0.07 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占区域总面积的 16.4%、2.04%、0.73% 以及 0.02%。15 年来轻度及轻度以下侵蚀等级的面积增加了 $76.13 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 增幅达 36.32%; 重度及重度以上侵蚀面积减少了 $46.90 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 降幅达到 99.85%。从侵蚀面积来看, 槽谷区 2000—2015 年侵蚀等级总体上由高等级在向低等级转移。

表 3 喀斯特槽谷区不同侵蚀等级统计

Table 3 Statistics of soil erosion in karst valley

年份 Year	侵蚀等级分级 Erosion class	侵蚀面积 Area ratio/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	面积所占百分比 Proportion of area/%	平均侵蚀模数 Average modulus/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	侵蚀总量 Total soil loss/ ($\times 10^5 \text{ t/a}$)	侵蚀总量 所占百分比 Erosion ratio/%
2000	微度	171.67	59.96	1.18	202.15	3.27
	轻度	37.91	13.24	13.51	512.39	8.28
	中度	29.73	10.38	36.77	1093.25	17.67
	重度	23.14	8.08	63.61	1471.79	23.79
	极重度	19.45	6.79	105.63	2054.07	33.21
	剧烈	4.39	1.53	194.04	852.01	13.77
2005	微度	223.10	77.94	1.21	270.02	16.39
	轻度	47.81	16.70	11.16	533.46	32.38
	中度	9.50	3.32	34.86	331.23	20.10
	重度	3.50	1.22	62.28	217.77	13.22
	极重度	1.89	0.66	104.04	196.16	11.91
	剧烈	0.46	0.16	216.58	99.00	6.01
2010	微度	206.03	71.97	1.23	253.44	15.91
	轻度	66.23	23.13	12.15	804.51	50.50
	中度	11.94	4.17	33.38	398.40	25.01
	重度	1.80	0.63	60.12	108.38	6.80
	极重度	0.28	0.10	94.67	26.22	1.65
	剧烈	0.01	0.00	203.87	2.09	0.13
2015	微度	275.98	96.41	0.56	153.91	51.80
	轻度	9.74	3.40	10.93	106.42	35.82
	中度	0.47	0.17	55.60	26.40	8.89
	重度	0.05	0.02	126.60	6.76	2.27
	极重度	0.01	0.004	217.10	2.70	0.91
	剧烈	0.0014	0.0005	663.14	0.92	0.31

从侵蚀总量上来看, 21 世纪以来槽谷区各侵蚀等级的侵蚀总量总体上都呈减少趋势。其中微度侵蚀和轻度侵蚀量先增加后减少, 中度侵蚀量先减少再增加又减少, 而重度及重度以上侵蚀量在不断减少。15 年间, 重度侵蚀、极重度侵蚀以及剧烈侵蚀分别减少了 $1465.03 \times 10^5 \text{ t/a}$ 、 $2051.37 \times 10^5 \text{ t/a}$ 以及 $851.09 \times 10^5 \text{ t/a}$, 降

幅达到了 99.95%、99.87% 及 99.89%。2000 年时,虽然重度及重度以上侵蚀面积仅占研究区面积的 15% 左右,但其侵蚀模数大,进而贡献了超过 70% 的土壤侵蚀量;而到了 2015 年,重度及重度以上侵蚀面积锐减,其贡献率也降低至 3.49%,此时土壤侵蚀总量的主要来源转移至微度及轻度侵蚀等级,其贡献率超过了 85%。以上结果表明,自 2000 年以来槽谷区土壤侵蚀程度逐渐降低,水土保持措施成效明显。

2.2 土壤侵蚀等级的动态变化

为了进一步了解喀斯特槽谷区土壤侵蚀的定量变化,对四个时期的不同土壤侵蚀等级进行两两对比,计算研究区 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年以及 2000—2015 年四个时间段土壤侵蚀变化的转移矩阵表(表 4—表 7)和转移矩阵图(图 2),并根据土壤侵蚀等级转移的方向,将其变化程度分为九个等级,分别为剧烈好转(土壤侵蚀等级降低 5 个等级)、重度好转(土壤侵蚀等级降低 4 个等级)、中度好转(土壤侵蚀等级降低 3 个等级)、轻度好转(土壤侵蚀等级降低 2 个等级)、微度好转(土壤侵蚀等级降低 1 个等级)、保持稳定(土壤侵蚀等级不变)、微度恶化(土壤侵蚀等级升高 1 个等级)、轻度恶化(土壤侵蚀等级升高 2 个等级)、中度恶化(土壤侵蚀等级升高 3 个等级)、重度恶化(土壤侵蚀等级升高 4 个等级)以及剧烈恶化(土壤侵蚀等级升高 5 个等级)。

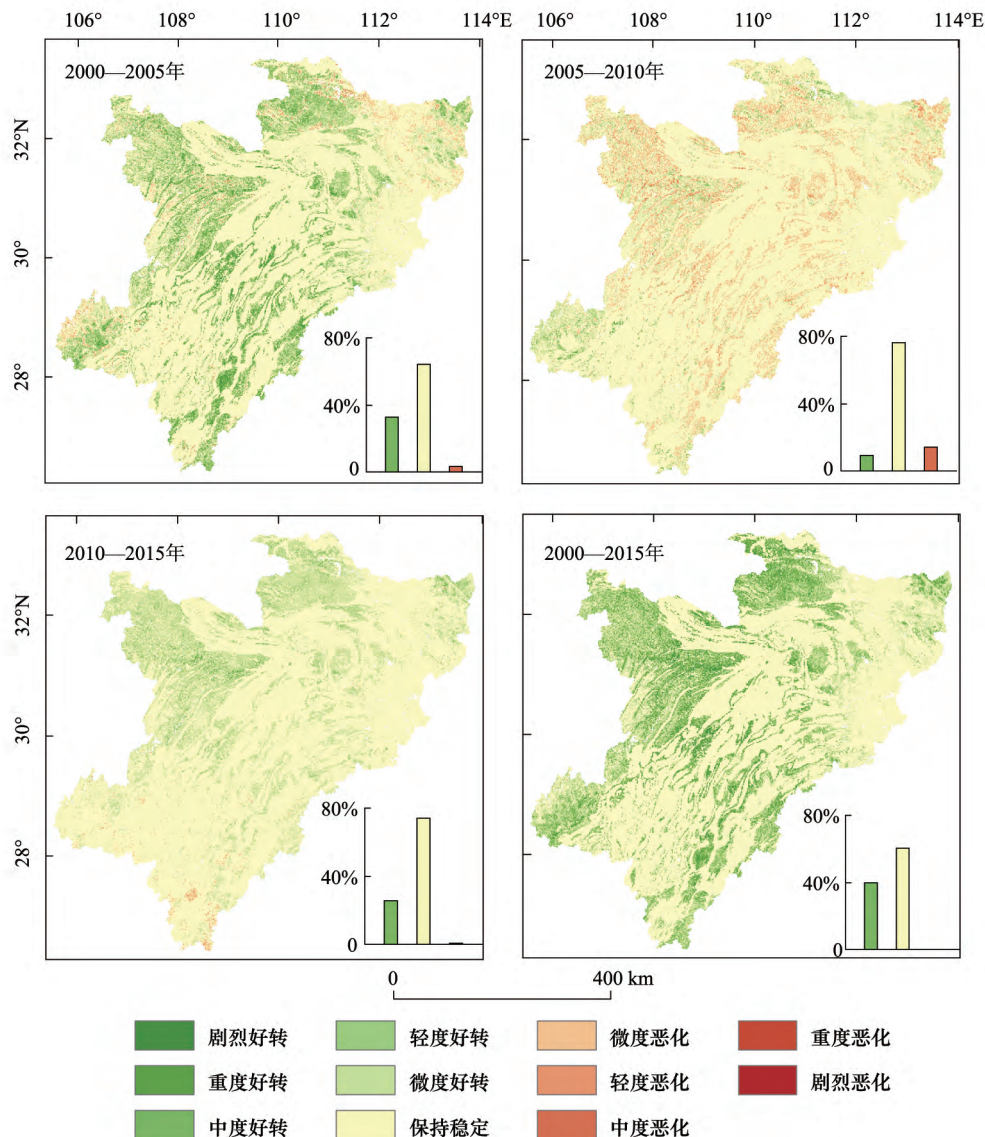


图 2 槽谷区土壤侵蚀等级变化空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of changes in soil erosion intensity in karst valley

由图 2 可以看出 4 个时段槽谷区土壤侵蚀等级转移方向相似, 均有超过 60% 的地区土壤侵蚀等级保持稳定。研究时段内(2000—2015 年)有 39.80% 的区域土壤侵蚀等级降低, 仅有 0.03% 的区域土壤侵蚀等级升高, 总体呈现出好转的趋势。其中 2000 年—2005 年好转的面积最大, 占到了研究区面积的 32.49%, 2005—2010 年好转面积最小, 仅占研究区面积的 9.47%。此外, 在 2005—2010 年这一时期, 土壤侵蚀等级恶化的区域(14.29%)超过了好转的区域(9.47%), 这是由于 2010 年该地区降雨量较 2005 年增加了近 10%^[19], 降雨侵蚀力增加从而导致土壤侵蚀更加严重。但总体而言, 槽谷区的土壤侵蚀在向好转的方向发展。

由表 4 可以看出, 在 2000—2005 年这一时段, 轻度侵蚀、中度侵蚀以及重度侵蚀以向微度侵蚀等级转移为主, 极重度侵蚀以及剧烈侵蚀都以向轻度侵蚀等级转移为主。其中, 微度侵蚀等级的面积基本保持稳定; 轻度侵蚀等级主要向微度侵蚀转移为主, 其转移率为 61.25%; 中度侵蚀向微度及轻度侵蚀等级转移为主, 其转移率分别为 48.35% 和 36.03%; 重度、极重度以及剧烈侵蚀同样以向微度及轻度侵蚀等级转移为主, 其转移率为 43.65% 和 41.34%、36.89% 和 45.36% 以及 26.32% 和 46.23%。重度及重度以上侵蚀等级向低侵蚀等级的转移率都达到了 90% 以上, 表明在 2000—2005 年这一时段槽谷区的土壤侵蚀状况显著好转。

表 4 槽谷区 2000—2005 年土壤侵蚀面积转移矩阵/ $\times 10^3 \text{hm}^2$

Table 4 Transition matrixes of various soil erosion grade area from 2000 to 2005 in valley

2000 年	2005 年					
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	极重度侵蚀	剧烈侵蚀
微度侵蚀 Micro-degree	166978.55	4545.5	71.38	6.15	0.55	0.01
轻度侵蚀 Mild	23233.04	12204.42	1970.15	384.46	117.36	19.24
中度侵蚀 Moderate	14372.33	10709.15	2968.04	1114.21	482.47	80.58
重度侵蚀 Strong	10099.01	9563.93	1983.15	873.23	507.76	108.76
极重度侵蚀 Pole Strong	7172.01	8819.86	1908.02	840.3	549.79	153.99
剧烈侵蚀 Violent	1155.96	2030.04	603.52	279.1	227.93	94.57

由表 5 可以看出, 在 2005—2010 年这一时段, 轻度侵蚀以向微度侵蚀等级转移为主, 中度及中度以上侵蚀等级都以向轻度侵蚀等级转移为主。其中, 微度侵蚀等级的面积依然保持基本稳定; 轻度侵蚀等级主要向微度侵蚀转移为主, 其转移率为 29.48%; 中度侵蚀向轻度及微度侵蚀等级转移为主, 其转移率分别为 61.29% 和 16.72%; 重度、极重度以及剧烈侵蚀以向轻度及中度侵蚀等级转移为主, 其转移率为 62.18% 和 20.32%、57.98% 和 25.26% 以及 46.52% 和 33.68%。重度及重度以上侵蚀等级向低侵蚀等级的转移率依然在 93% 以上, 较上一时段而言, 高等级侵蚀从以向微度侵蚀转移为主转变为向轻度侵蚀等级为主, 转移强度较上一个五年稍有降低, 但仍然呈现出高侵蚀等级向低侵蚀等级转变的趋势, 表明在 2005—2010 年这一时段槽谷区的土壤侵蚀状况持续好转。

表 5 槽谷区 2005—2010 年土壤侵蚀面积转移矩阵/ $\times 10^3 \text{hm}^2$

Table 5 Transition matrixes of various soil erosion grade area from 2005 to 2010 in valley

2005 年	2010 年					
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	极重度侵蚀	剧烈侵蚀
微度侵蚀 Micro-degree	189679.3	30306.48	2780.25	229.22	15.86	0.1
轻度侵蚀 Mild	14112.46	26666.9	6157.92	841.7	93.35	0.65
中度侵蚀 Moderate	1584.59	5824.92	1664.18	357.29	71.98	1.3
重度侵蚀 Strong	397.19	2174.81	710.58	180.02	33.59	1.26
极重度侵蚀 Pole Strong	132.42	1093.37	476.38	144.43	37.57	1.69
剧烈侵蚀 Violent	9.27	212.68	153.99	51.18	24.79	5.24

由表 6 可以看出, 在 2010—2015 年这一时段, 极重度及极重度以下侵蚀以向微度侵蚀等级转移为主, 剧烈侵蚀持续向重度及重度以下侵蚀等级转移。其中, 微度侵蚀等级的面积继续保持基本稳定; 轻度、中度、重

度以及极重度侵蚀等级主要向微度侵蚀转移为主,其转移率为 88.64%、86.18%、77.74%以及 69.81%; 剧烈侵蚀持续向重度、中度以及微度等更低侵蚀等级转移,其转移率分别为 27.83%、25.29%以及 24.90%。中度及中度以上侵蚀等级向低侵蚀等级的转移率都达到了 97% 以上,表明在 2010—2015 年这一时段槽谷区的土壤侵蚀状况明显好转。

表 6 槽谷区 2010—2015 年土壤侵蚀面积转移矩阵/ $\times 10^2 \text{hm}^2$

Table 6 Transition matrixes of various soil erosion grade area from 2010 to 2015 in valley

2010 年	2015 年					
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	极重度侵蚀	剧烈侵蚀
微度侵蚀 Micro-degree	204283.52	1587.78	68.46	5.75	0.58	0.02
轻度侵蚀 Mild	58755.67	7014.77	457.08	48.13	9.59	0.33
中度侵蚀 Moderate	10293.59	1407	201.14	33.72	7.32	1.28
重度侵蚀 Strong	1402.26	322.6	54.71	16.42	6.16	1.72
极重度侵蚀 Pole Strong	193.48	58.27	16.88	5.16	2.53	0.82
剧烈侵蚀 Violent	2.55	1.34	2.59	2.85	0.85	0.06

由表 7 可以看出,在 2000—2015 年这一时段,微度侵蚀等级的面积基本保持稳定,轻度、中度、重度、极重度以及剧烈侵蚀都以向微度侵蚀等级转移为主,其转移率分别为 98.30%、93.76%、87.74%、77.99%以及 62.16%。2000 至 2015 这 15 年间,槽谷区土壤侵蚀等级由高等级向低等级转移率达到了 98% 以上,表明在 2000—2015 年这一时段槽谷区的土壤侵蚀状况好转十分显著。

表 7 槽谷区 2000—2015 年土壤侵蚀面积转移矩阵/ $\times 10^2 \text{hm}^2$

Table 7 Transition matrixes of various soil erosion grade area from 2000 to 2015 in valley

2000 年	2015 年					
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	极重度侵蚀	剧烈侵蚀
微度侵蚀 Micro-degree	171563.63	60.77	0.51	0	0	0
轻度侵蚀 Mild	37289.04	618.7	21.09	3.93	0.57	0.02
中度侵蚀 Moderate	27876.07	1806.54	39.51	5.94	1.72	0.11
重度侵蚀 Strong	20302.87	2710.07	114.12	9.6	1.93	0.36
极重度侵蚀 Pole Strong	15169.03	3861.78	362.74	42.8	9.64	1.84
剧烈侵蚀 Violent	2730.05	1333.89	262.89	49.76	13.17	1.9

综合分析可得,槽谷区近 15 年来土壤侵蚀状况明显改善,整个研究区内有 $113924.8 \times 10^2 \text{hm}^2$ 的区域侵蚀程度减弱,仅有 $98.79 \times 10^2 \text{hm}^2$ 的区域侵蚀程度加剧。随着土壤侵蚀等级的升高,由高等级向低等级发生转移的比率逐渐增加;土壤侵蚀等级持续由高等级向低等级转移,轻度及轻度以上侵蚀等级以向微度侵蚀转移为主,表明当前的水土保持措施有效缓解了槽谷区的土壤侵蚀状况。

2.3 槽谷区土壤侵蚀未来情景预测

基于 Markov 模型模拟的 2010—2015 年土壤侵蚀等级转移矩阵建立的转换规则,以 2010 年和 2015 年为起始年份,利用 CA-Markov 模型模拟 2015 和 2020 年的土壤侵蚀等级分布格局,得到 2015 年和 2020 年土壤侵蚀等级的预测图。

由图 3 和表 8 可以看出,槽谷区 2015 年土壤侵蚀的实际计算值与预测值在各侵蚀等级的面积基本相当,其空间分布格局也很接近,表明预测结果具有一定的可靠性。到 2020 年,槽谷区土壤侵蚀等级基本为微度和轻度侵蚀,中度及中度以上侵蚀等级面积仅占研究区面积的 0.03%,土壤侵蚀程度继续向好转的趋势发展。

表 9 为槽谷区 2015—2020 年土壤不同侵蚀等级面积转移矩阵。由表 9 可以看出,在 2015—2020 年这一时段,高侵蚀等级继续向低侵蚀等级转移。其中,微度侵蚀等级面积继续以稳定为主;轻度侵蚀等级以向微度侵蚀等级转移为主,其转移率为 46.79%;中度及重度侵蚀等级以向微度侵蚀等级转移为主,其转移率为

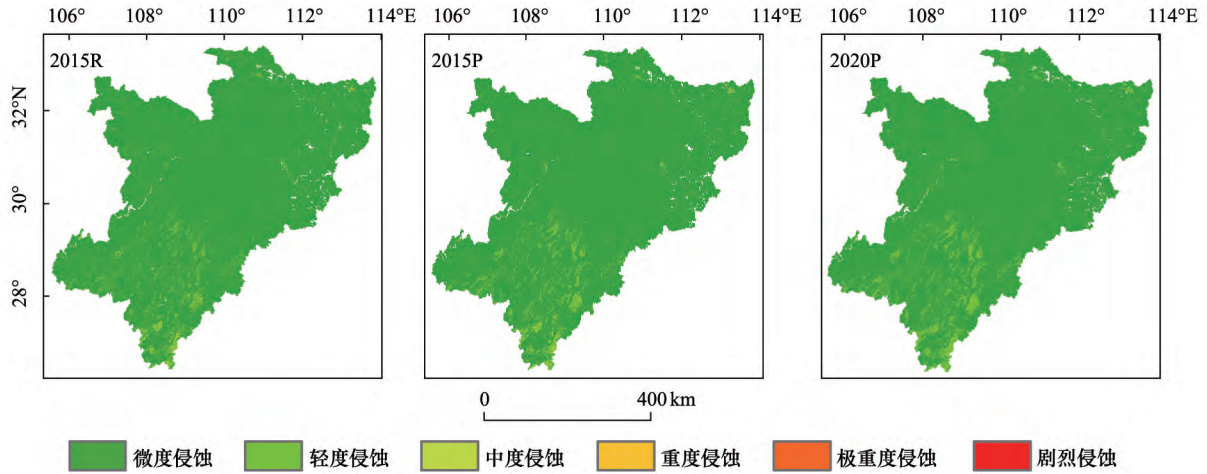


图3 槽谷区土壤侵蚀等级变化预测图(图中 R(real calculation) 表示实际计算结果 P(prediction) 表示预测结果)

Fig.3 Prediction map of changes in soil erosion intensity in karst valley(R in the figure is real calculation results and P is prediction results)

80.66%和 58.26%; 极重度及剧烈侵蚀等级逐渐向重度以下侵蚀等级转移。以上模拟预测的结果表明, 未来槽谷区土壤侵蚀状况将进一步改善, 这也是国家方针政策继续支持和人们对土地的依附性减少是密切相关且符合经济社会发展趋势的结果。

表8 槽谷区不同等级侵蚀面积实际值与预测值对比 / $\times 10^3 \text{hm}^2$

Table 8 Comparison of actual and predicted erosion area of different grades in valley

侵蚀等级	实际值 Real Calculation Results		预测值 Prediction Results	
	2015 年		2015 年	2020 年
	微度侵蚀 Micro-degree	275984.88	274952.95	277887.71
轻度侵蚀 Mild	9740.05	10370.83	8285.65	
中度侵蚀 Moderate	474.86	799.99	86.98	
重度侵蚀 Strong	53.38	111.97	4.99	
极重度侵蚀 Pole Strong	12.43	27.02	1.30	
剧烈侵蚀 Violent	1.39	4.23	0.36	

表9 槽谷区 2015—2020 年土壤侵蚀面积转移矩阵/ $\times 10^2 \text{hm}^2$

Table 9 Transition matrixes of various soil erosion grade area from 2015 to 2020 in valley

2015 年	2020 年					
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	极重度侵蚀	剧烈侵蚀
微度侵蚀 Micro-degree	272893.03	2037.48	0.57	0	0	0
轻度侵蚀 Mild	4862.13	5526.19	3.44	0	0	0
中度侵蚀 Moderate	100.77	645.99	53.92	0.18	0	0
重度侵蚀 Strong	23.38	65.27	21.61	1.77	0	0
极重度侵蚀 Pole Strong	7.56	10.20	6.71	1.93	0.56	0.07
剧烈侵蚀 Violent	0.84	0.52	0.73	1.11	0.74	0.29

3 讨论

为了定量验证 CA-Markov 模型计算结果的精度,对 2015 年土壤侵蚀等级的计算值和模拟值进行 Kappa 系数检验,其总体 Kappa 系数为 0.9788,各个等级的系数结果如表 10 所示。由表 10 可以看出,微度侵蚀、轻

度侵蚀、中度侵蚀、重度侵蚀、极重度侵蚀和剧烈侵蚀等级对应的 Kappa 系数分别为 0.9822、0.6586、0.8390、0.9112、0.8898 和 0.9353 根据表 2 的 Kappa 系数分类标准可得 2015 年土壤侵蚀等级的预测结果和计算结果表现为一致性显著(微度侵蚀等级)甚至最佳(其他等级),表明模型的计算结果可信度很高。

表 10 预测精度验证表

Table 10 Verification of prediction accuracy

计算结果 Calculation Results	预测结果 Prediction Results	Kappa	计算结果 Calculation Results	预测结果 Prediction Results	Kappa
微度侵蚀 Micro-degree	微度侵蚀	0.9822	重度侵蚀 Strong	重度侵蚀	0.9112
轻度侵蚀 Mild	轻度侵蚀	0.6586	极重度侵蚀 Pole Strong	极重度侵蚀	0.8898
中度侵蚀 Moderate	中度侵蚀	0.8390	剧烈侵蚀 Violent	剧烈侵蚀	0.9353

基于 RUSLE 模型的计算结果主要估算了由降雨引起的土壤侵蚀,与降雨、地形、土壤性质以及植被覆盖和土地利用有关^[14-20],因此对于水土流失变化的研究往往需要将降雨、土壤性质、地形地貌、植被覆盖以及土地利用结合起来考虑。土壤和地形对水蚀影响较大,但相对稳定。因此,有学者将土壤侵蚀的变化主要归因于暴雨、不当的土地利用以及退化的植被^[21]。而降雨是否产生侵蚀又往往取决于土地利用和植被条件,植被密度越大,对雨滴的截留作用越小,降雨对土壤表面颗粒的影响也就越小^[21-22],因此植被覆盖和土地利用在某种程度上超过了降雨强度和地形因素的影响,而被认为是导致土壤侵蚀量发生变化的关键因素^[23]。在过去的一个世纪里,人类活动加剧,自然植被大量减少。自 2000 年以来,喀斯特槽谷区开展了退耕还林还草、石漠化专项治理、天然林保护等一系列生态修复工程^[24-25],使得植被覆盖度显著增加^[26],土地利用发生重大变化^[27],生态环境明显改善,土壤侵蚀状况明显好转,治理成效显著。随着生态修复/保护工程的进一步实施与加强,槽谷区的生态环境可能会得到进一步的改善,进而使得土壤侵蚀以及石漠化等生态环境问题能够得到进一步的解决。

4 结论

喀斯特槽谷区 2000—2015 年土壤侵蚀分布以微度侵蚀为主,侵蚀总量由 61.86×10^7 t/a 减少至 2.97×10^7 t/a,区域年平均侵蚀模数由 $21.61 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 降低至 $1.04 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,侵蚀状况整体在减轻。15 年来轻度及轻度以下侵蚀等级的面积增加了 $76.13 \times 10^5 \text{ hm}^2$,增幅达 36.32%;重度及重度以上侵蚀面积减少了 $46.90 \times 10^5 \text{ hm}^2$,降幅达到 99.85%。不同地貌类型之间的土壤侵蚀状况存在一定差异,平原地区侵蚀模数最小,盆地地区侵蚀模数最大,达到平原地区侵蚀模数的近四倍。

研究时段内有 39.80% 的区域土壤侵蚀等级降低,侵蚀程度减弱,仅有 0.03% 的区域土壤侵蚀等级升高,侵蚀程度加剧,15 年间槽谷区轻度及轻度以上侵蚀等级都逐渐向微度侵蚀等级转移,土壤侵蚀等级由高等级向低等级转移率达到了 98% 以上,总体呈现出好转的趋势。

基于 CA-Markov 模型模拟槽谷区土壤侵蚀等级的未来演变趋势,总体 Kappa 系数达到了 0.9788,且各土壤侵蚀等级的系数也在 0.65 以上,表明预测结果和计算结果的一致性显著,能够较为准确的反映未来槽谷区土壤侵蚀等级的分布状况。到 2020 年,槽谷区土壤侵蚀等级基本为微度和轻度侵蚀,中度及中度以上侵蚀等级面积仅占研究区面积的 0.03%,土壤侵蚀程度继续好转,未来槽谷区土壤侵蚀状况将进一步改善。

参考文献(References):

- [1] Singer M J, Warkentin B P. Soils in an environmental context: an American perspective. *Catena*, 1996, 27(3/4): 179-189.
- [2] 杨正礼. 我国黄土高原生态建设历史实践与研究进展. *世界林业研究*, 2003, 16(6): 36-40.
- [3] Rickson R J. Can control of soil erosion mitigate water pollution by sediments? *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 1187-1197.
- [4] Guzmán G, Laguna A, Cañasveras J C, Boulal H, Barrón V, Gómez-Macpherson H, Giráldez J V, Gómez J A. Study of sediment movement in an irrigated maize-cotton system combining rainfall simulations, sediment tracers and soil erosion models. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 227-242.

- [5] Ouyang W , Wu Y Y , Hao Z C , Zhang Q , Bu Q W , Gao X. Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development. *Science of the Total Environment* , 2018 , 613-614: 798-809.
- [6] Wang S J , Li R L , Sun C X , Zhang D F , Li F Q , Zhou D Q , Xiong K N , Zhou Z F. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province , PR China: phenomena and mechanisms. *Land Degradation & Development* , 2004 , 15(2) : 123-131.
- [7] 白晓永, 王世杰. 岩溶区土壤允许流失量与土地石漠化的关系. *自然资源学报*, 2011 , 26(8) : 1315-1322.
- [8] Vigiak O , Malagó A , Bouraoui F , Vanmaercke M , Obreja F , Poesen J , Habersack H , Fehér J , Grošelj S. Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT. *Science of the Total Environment* , 2017 , 599-600: 992-1012.
- [9] Zeng C , Wang S J , Bai X Y , Li Y B , Tian Y C , Li Y , Wu L H , Luo G J. Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. *Solid Earth* , 2017 , 8(4) : 721-736.
- [10] Aksoy H , Eris E , Tayfur G. Empirical sediment transport models based on indoor rainfall simulator and erosion flume experimental data. *Land Degradation & Development* , 2017 , 28(4) : 1320-1328.
- [11] López-Vicente M , Navas A , Machín J. Geomorphic mapping in endorheic catchments in the Spanish Pyrenees: an integrated GIS analysis of karstic features. *Geomorphology* , 2009 , 111(1/2) : 38-47.
- [12] 钱庆欢, 王世杰, 白晓永, 周德全, 田义超, 李琴, 吴路华, 肖建勇, 曾成, 陈飞. 基于允许流失量和正负地形源汇理论的喀斯特关键带土壤侵蚀研究. *地理学报*, 2018 , 73(11) : 2135-2149.
- [13] 蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 何丙辉, 谢建平, 罗维均, 白晓永, 肖琼. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发. *生态学报*, 2016 , 36(22) : 7092-7097.
- [14] Renard K G , Foster G R , Weesies G A , McCool D K , Yoder D C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) . Vol. Handbook No 703. Washington DC: Department of Agriculture , 1997. <http://www.scrip.org/reference/ReferencesPapers.aspx? ReferenceID=1451417>
- [15] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版) . 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [16] 何丙辉, 何联君, 王仁新, 吴咏, 向明辉. 基于 CA-Markov 模型的植物篱坡面土壤侵蚀状况的动态模拟研究. *南昌工程学院学报*, 2014 , 33(4) : 5-10.
- [17] Feinstein A R , Cicchetti D V. High agreement but low kappa: I. The problems of two paradoxes. *Journal of Clinical Epidemiology* , 1990 , 43(6) : 543-549.
- [18] Cicchetti D V , Feinstein A R. High agreement but low kappa: II. Resolving the paradoxes. *Journal of Clinical Epidemiology* , 1990 , 43(6) : 551-558.
- [19] 操玥, 王世杰, 白晓永, 李汇文, 王明明, 吴路华. 近百年中国西南降雨侵蚀力反演计算与时空格局演变. *生态学报*, 2018 , 38(24) : 8766-8773.
- [20] Sun W Y , Shao Q Q , Liu J Y , Zhai J. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *Catena* , 2014 , 121: 151-163.
- [21] Mohammad A G , Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena* , 2010 , 81(2) : 97-103.
- [22] Wei W , Chen L D , Fu B J , Chen J. Water erosion response to rainfall and land use in different drought-level years in a loess hilly area of China. *Catena* , 2010 , 81(1) : 24-31.
- [23] Kosmas C , Danalatos N , Cammeraat L H , Chabart M , Diamantopoulos J , Farand R , Gutierrez L , Jacob A , Marques H , Martinez-Fernandez J , Mizara A , Moustakas N , Nicolau J M , Oliveros C , Pinna G , Puddu R , Puigdefabregas J , Roxo M , Simao A , Stamou G , Tomasi N , Usai D , Vacca A. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena* , 1997 , 29(1) : 45-59.
- [24] 熊康宁, 陈起伟. 基于生态综合治理的石漠化演变规律与趋势讨论. *中国岩溶*, 2010 , 29(3) : 267-273.
- [25] 李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 陈琼, 严祥. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例. *生态学报*, 2011 , 31(12) : 3255-3264.
- [26] Fu B J , Liu Y , Lü Y H , He C S , Zeng Y , Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity* , 2011 , 8(4) : 284-293.
- [27] Feng X M , Wang Y F , Chen L D , Fu B J , Bai G S. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology* , 2010 , 118(3/4) : 239-248.