

基于GIS与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析

王正雄, 蒋勇军, 张远喁, 段世辉, 刘九缠, 曾 泽, 曾思博

(西南大学地理科学学院 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 岩溶区土地石漠化已成为中国西部继沙漠化和水土流失后的第三大生态问题, 近年来岩溶槽谷区石漠化表现出增加趋势。通过获取槽谷区石漠化、岩性、坡度、海拔、降雨量、土地利用、人口密度和第一产业生产总值等数据, 利用GIS空间分析功能和地理探测器模型, 探讨了岩溶槽谷区石漠化空间分布特征及驱动因子。主要结论为: ① 岩溶槽谷区总石漠化面积为21323.7 km², 占研究区土地面积的8.3%, 其中轻度、中度和重度石漠化面积分别是11894.8 km²、8615.8 km²和813.1 km², 分别占石漠化面积的55.8%、40.4%和3.8%; ② 从石漠化的空间分布来看, 槽谷区石漠化主要发生在连续性灰岩中, 轻度、中度和重度石漠化面积分别为占槽谷区相应石漠化类型面积的22.1%、22.4%和1.9%; 槽谷区石漠化主要发生在15°~25°的坡度范围, 轻度、中度和重度石漠化面积分别为占槽谷区相应石漠化类型面积的27.1%、18.2%和2.3%; 从海拔来看, 主要分布于400~800 m范围内, 轻度、中度和重度石漠化面积分别为占槽谷区相应石漠化类型面积的24.9%、18.4%和0.2%; 从土地利用类型来看, 主要发生于山地旱地中; 从人口密度来看, 集中分布于100~200人/km²中; 从第一产业生产总值来看, 集中分布于25亿~50亿元中; ③ 地理探测器的因子探测器揭示了岩性($q = 0.58$)、土地利用($q = 0.48$)和坡度($q = 0.42$)3个因子是槽谷区石漠化形成的主要驱动因子, 交互式探测器进一步揭示了岩性与土地利用类型($q = 0.85$)、坡度与土地利用类型的组合($q = 0.75$)共同驱动槽谷区石漠化的形成。

关键词: 岩溶槽谷; 石漠化; 空间分析; 驱动因子; 地理探测器

DOI: 10.11821/dlxb201905014

土地石漠化是不同时期在全球热带和亚热带喀斯特地区普遍发生的现象^[1-2], 在中国南方岩溶地区分布最为广泛、程度最为严重, 受到国际岩溶学界的广泛关注^[3]。石漠化不仅造成生态系统退化, 而且被称之为“灾害之源、贫困之因、落后之根”, 严重制约着经济社会的发展, 尽管第一期(2006-2015年)石漠化治理工程取得明显效果, 但问题依然不少^[4]。中国西南地区根据地貌划分为中高山、断陷盆地、岩溶高原、岩溶峡谷、峰丛洼地、岩溶槽谷、峰林平原、溶丘洼地(槽谷)八大岩溶地貌类型, 岩溶槽谷地貌是指在地质上表现为碳酸盐岩与碎屑岩相间分布, 在地貌上表现为北东向脊垄条带状山岭与槽谷或长条形洼地平行分布的地貌^[5]。岩溶槽谷区也是中国南方岩溶分布面积最大的“老、少、边、山、穷”地区^[6]。遥感数据表明: 2015年岩溶槽谷区的土地石漠化面积达

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2019-02-18

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502306); 国家自然科学基金项目(41472321); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2017jcyj-ysxX0004) [Foundation: National Key Research and Developmental Program of China, No.2016YFC0502306; National Natural Science Foundation of China, No.41472321; Chongqing Municipal Science and Technology Commission Fellowship Fund, No.CSTC2017jcyj-ysxX0004]

作者简介: 王正雄(1994-), 男, 湖北荆州人, 硕士生, 研究方向为资源环境与GIS。E-mail: wangzhengxiong16@163.com

通讯作者: 蒋勇军(1968-), 男, 汉族, 湖南安化人, 博士, 教授, 研究方向为岩溶环境与全球变化。

E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

21323.7 km², 比2000年增加了6.4%^[7], 但什么原因导致岩溶槽谷区土地石漠化仍在进一步扩展并恶化并不清楚。

近年来基于RS和GIS对石漠化的空间分布特征与影响因素研究有了很大的进展, 国内学者如张信宝等通过研究贵州石漠化空间分布与地貌、岩性、年均降水、坡度和人口密度的关系, 指出石漠化景观及其等级的空间分布与下垫面的物质组成和降雨量的空间变化存在着密切的关系^[8]; 李瑞玲基于GIS研究贵州土地石漠化形成的自然背景及其空间地域分异后指出, 连续性碳酸盐岩是石漠化发生的主控因素, 决定了土层厚度及土壤类型的分布^[9]; Jiang等利用GIS空间分析的方法研究云南南洞流域石漠化的空间分布与人口关系, 发现大部分石漠化发育在距离人口4 km范围内^[10]; 白晓永等通过研究贵州省石漠化的空间分布与人文因素后发现, 石漠化的严重程度与人口密度, 农村聚居的密集程度, 及单位面积上的壮劳力有关^[11]。这些研究揭示了流域或省域范围的岩溶土地石漠化的空间分布规律, 并定性或半定量地分析了石漠化形成的驱动力, 而对不同岩溶地貌类型区土地石漠化的空间分布与驱动力的定量研究尚未涉及。地理探测器是探测地理要素的空间分异性, 以及揭示其背后驱动因子的一种新的空间分析模型^[12-16], 不仅能够定量的分析各个因子所占的权重, 还能分析多因子之间的交互作用。该模型具有其他模型不能比拟的优势, 既可以探测数值型数据, 也可以探测定性数据。

因此, 本文基于GIS的空间分析方法和地理探测器模型, 对西南岩溶槽谷地区石漠化的空间分布及其驱动因子进行定量分析, 尝试回答以下科学问题: ① 岩溶槽谷区石漠化的空间分布具有什么特征? ② 岩溶槽谷区石漠化的空间分布或石漠化形成的控制因素是什么?

1 研究区概况

西南岩溶槽谷区包括以贵州为中心的黔西北、川东、湘西、鄂西以及渝东南、渝中、渝东北的130个县, 土地总面积为26.5万km², 其中岩溶面积为13.2万km² (图1)。2014年区域总人口为7415万人, 平均人口密度为250人/km², 农业人口为5875万人, 占总人口的79.2%, 另外贫困人口为923万人, 国家级贫困县有55个^①。该区地处中亚热带到北亚热带, 年均气温14℃~18℃, 年均降雨量800~1600 mm, 人均耕地面积为1.3亩。海拔在30~2500 m的范围内, 土壤类型主要是黄壤, 其次是石灰土和黄棕壤土。

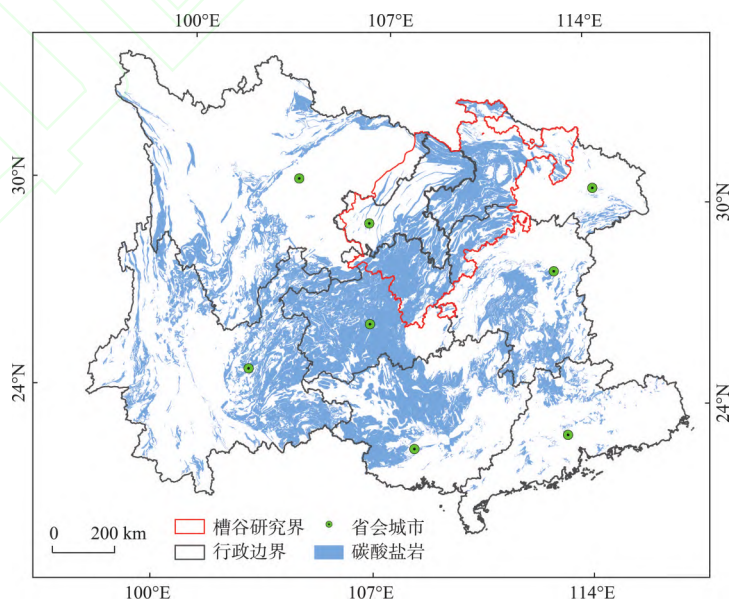


图1 西南岩溶槽谷区概况

Fig. 1 Geological situation of karst valley

① 数据来源:2014年国家统计局网站及地方统计网站(<http://www.stats.gov.cn/>)。

2 数据来源

岩性与石漠化数据来源于2015年的中国科学院地球化学研究所 (<http://www.gyig.ac.cn/>), 石漠化数据来源于Landsat-7ETM数据, 空间分辨率为30 m。DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为30 m。降雨数据来源于中国气象局 (<http://www.cma.gov.cn/>), 时间范围为1970-2013年, 经过克里金插值处理得到西南地区多年平均降雨数据。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 时间为2015年, 空间分辨率分别为1 km。人口、第一产业生产总值等数据来源于2015年国家及地方政府统计局年鉴 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>)。

3 研究方法

3.1 代理变量的选择

图2代理变量图可以帮助理解变量选取的过程与机理, 并且帮助解释统计结果^[17]。由于坡度和海拔分类数据无法直接得到, 所以基于DEM数据在GIS软件中通过坡度分析工具提取分析, 分别得到每一个石漠化图斑所对应的坡度及海拔值属性。同理, 人口密度数据是基于统计年鉴计算得到。

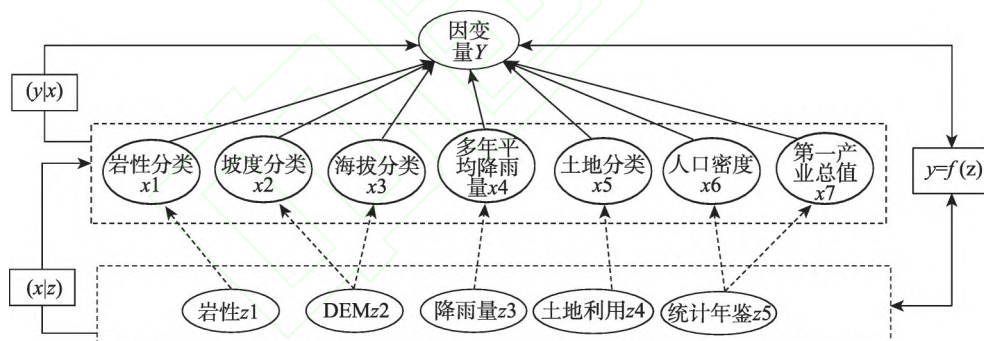


图2 代理变量图

Fig. 2 Proxy variogram

3.2 数据分析

3.2.1 石漠化等级划分 根据已有的岩溶槽谷区石漠化资料及大量的野外实地考察, 将槽谷区石漠化划分为轻度、中度、重度3个等级。

3.2.2 岩性划分 按碳酸盐岩与碎屑岩在地层中的厚度差以及组合特征, 岩性数据划分为4类: 连续性灰岩、连续性白云岩、灰岩与白云岩互层以及碳酸盐岩夹碎屑岩。其中连续性灰岩主要是薄层灰岩夹中厚层灰岩、龟裂纹泥质灰岩、碳质灰岩、泥灰岩; 连续性白云岩主要是厚至块状白云岩(娄山关组可达340~520 m); 灰岩与白云岩互层主要是灰岩和白云岩中夹少量砂岩以及燧石结核; 碳酸盐岩夹碎屑岩主要是泥灰岩灰岩或白云质灰岩、白云岩灰岩夹较纯石英砂岩、砂页岩偶夹赤铁矿。

3.2.3 基于地形数据的坡度分析 将DEM数据镶嵌、裁剪和坡度分析后, 按照平地、缓坡、缓陡坡和陡坡将坡度分为4类: $0^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 、 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 和 $> 25^{\circ}$ 。

3.2.4 基于DEM数据的海拔分析 根据前人研究结果和经验, 将研究区范围内的海拔划

分为4类: 0~400 m、400~800 m、800~1200 m和> 1200 m。

3.2.5 气象数据分析 将1970-2013年间槽谷区44个国家级气象站降雨数据的多年平均值分为4个等级: 800~1000 mm、1000~1200 mm、1200~1400 mm和> 1400 mm。

3.2.6 土地利用数据分析 剔除水域河流以及城市工业建设用地, 分为耕地、林地、草地和未利用地4类。

3.2.7 人口密度和第一产业生产总值数据处理 通过收集整理西南槽谷区130个县的统计年鉴资料获取每个县级市的人口数量及第一产业生产总值经济属性数据, 将人口密度分为4个等级: 0~100 人/km²、100~200 人/km²、200~300 人/km²和> 300 人/km²; 第一产业生产总值也分4个等级, 分别为: 0~10 亿元、10 亿~25 亿元、25 亿~50 亿元和> 50 亿元。

3.2.8 基于GIS的石漠化空间分布分析 将槽谷区不同等级石漠化与各因素分别进行叠加分析, 得到不同等级石漠化在不同因子中的空间分布。

3.3 基于地理探测器的驱动因子分析

地理探测器的理论核心是通过空间异质性来探测因变量与自变量之空间分布格局的一致性, 据此度量因变量对自变量的解释度即 q 值。首先, 在ArcGIS中将石漠化图层与各个驱动因子图层进行空间叠加分析, 并将因子做重分类处理得到类型变量。其中因变量 Y 值为数值量, 代表每一个石漠化斑块的面积属性。自变量 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 为类型量, 分别是岩性、坡度、海拔、年均降雨、人口密度、土地利用、第一产业生产总值的分类属性值。将 X 、 Y 数据代入到模型软件中运行得到 q 值结果, 最后通过调节自变量 X 的分类标准可以得到最大 q 值。 q 的值域为 $[0, 1]$, 值越大, 说明这个因子对 Y 值的解释力越强。该软件的原理如下:

因子探测器是用来定量检测某个地理因子是否影响某个指标值空间分布差异的原因, 以及所占权重, 交互式探测器分别计算和比较各单因子 q 值及两因子叠加后的 q 值, 可以判断两因子是否存在交互作用以及交互作用的强度等, 其模型如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (1)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad SST = N \sigma^2$$

式中: $h=1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层 (Strata), 即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。 SSW 和 SST 分别为层内方差之和 (Within Sum of Squares) 和全区总方差 (Total Sum of Squares)。

4 结果分析

4.1 石漠化空间分布现状

岩溶槽谷区土地石漠化空间分布如图3所示。岩溶槽谷区土地石漠化总面积为21323.7 km², 占槽谷地区土地总面积的8.3%, 占槽谷区岩溶面积的16.1%。其中轻度、中度和重度石漠化面积分别为11894.8 km²、8615.8 km²和813.1 km², 分别占石漠化面积的55.8%、40.4%和3.8%。

4.2 石漠化在不同岩性中的空间分布

从表1中看到, 西南岩溶槽谷石漠化主要分布于连续性灰岩中, 其次分布于碳酸盐岩夹碎屑岩、灰岩与白云岩互层和连续性白云岩中, 石漠化在连续性灰岩、碳酸盐岩夹

碎屑岩、灰岩与白云岩互层和连续性白云岩中的分布面积分别为 9906.8 km²、5625.2 km²、3193.4 km²，和 2598.3 km²，占槽谷区石漠化面积的 46.4%、26.4%、15.0%和 12.2%；同时，各个岩性中石漠化的发生率存在明显的差异，连续性灰岩的石漠化发生率最高，达 24.8%，且重度石漠化的比例也最高，其次是连续性白云岩，石漠化发生率为 16.1%，灰岩与白云岩互层岩性中石漠化发生率为 12.0%，而碳酸盐岩夹碎屑岩岩性中石漠化的发生率最低为 11.4%，且重度石漠化的比例也最低。可知，纯碳酸盐岩包括连续性灰岩和白云岩是石漠化发生最主要的岩性。

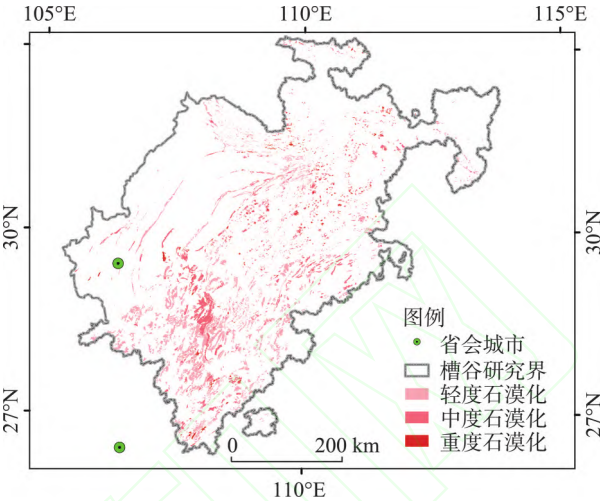


图3 岩溶槽谷区石漠化空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of rocky desertification in karst trough area

表1 岩溶槽谷区石漠化在不同岩性的空间分布

Tab. 1 Distribution of rocky desertification in different types of lithology in karst trough area					
岩性类型 (面积/km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠 (km ²)	石漠化总面积 (km ²)	发生率 (%)
连续性灰岩(39995.2)	4722.9(39.7%)	4771(55.4%)	412.9(50.8%)	9906.8	24.8
连续性白云岩(19153.2)	1383.3(11.6%)	986.5(11.4%)	228.5(28.1%)	2598.3	16.1
灰岩与白云岩互层(23568.7)	1860.8(15.6%)	1250.5(14.5%)	82.1(10.1%)	3193.4	12.0
碳酸盐岩夹碎屑岩(49402.8)	3927.8(33.1%)	1607.8(18.7%)	89.6(11.0%)	5625.2	11.4
总计(132119.9)	11894.8(100%)	8615.8(100%)	813.1(100%)	21323.7	16.1

4.3 石漠化在不同坡度中的空间分布

岩溶槽谷区石漠化主要分布在坡度 15°~25°的范围内，石漠化在该等级下发生率最高达到 22.9%（表 2）。不同程度石漠化在该坡度等级下的的比例分别占到 48.6%、45.2%、60.9%（分母为该等级下石漠化总面积）。同时重度石漠化也主要分布在 15°~25°的缓陡坡之间。然而在坡度> 25°的石漠化区却主要以轻度石漠化为主，重度石漠化只占 4.8%。

表2 岩溶槽谷区石漠化在不同坡度中的空间分布

Tab. 2 Distribution of rocky desertification in different grades in karst trough area					
坡度(°) (面积/km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠 (km ²)	石漠化总面积 (km ²)	发生率 (%)
0~8(21096.1)	1048.5(8.8%)	765.1(8.9%)	47.8(5.9%)	1861.4	8.8
8~15(36956.2)	3520.4(29.6%)	2584.2(30.0%)	230.9(28.4%)	6335.5	17.1
15~25(44495.3)	5780(48.6%)	3899.9(45.2%)	495(60.9%)	10174.9	22.9
> 25(29572.3)	1545.9(13.0%)	1366.6(15.9%)	39.4(4.8%)	2951.9	10.0
总计(132119.9)	11894.8(100%)	8615.8(100%)	813.1(100%)	21323.7	16.1

4.4 石漠化在不同海拔中的空间分布

从表 3 中看到，槽谷区石漠化在不同海拔中存在显著差异。岩溶槽谷区石漠化主要分布在 400~800 m 的海拔范围内，石漠化面积为 9786.3 km²，占槽谷区石漠化总面积的

表3 岩溶槽谷区石漠化在不同海拔的空间分布

Tab. 3 Spatial distribution of rocky desertification in different slopes in karst trough area

海拔(m) (面积/km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠 (km ²)	石漠化总面积 (km ²)	发生率 (%)
0~400(51526.7)	2048.6(17.2%)	865.1(10.0%)	47.8(5.9%)	2961.5	5.7
400~800(27745.2)	5299.6(44.6%)	3922.9(45.5%)	563.8(63.3%)	9786.3	35.3
800~1200(35672.4)	3520.5(29.6%)	2642.2(30.7%)	165.6(20.4%)	7586.0	21.3
> 1200(17175.6)	1026.1(8.6%)	1185.6(13.8%)	35.9(4.4%)	2247.6	13.1
总计(132119.9)	11894.8(100%)	8615.8(100%)	813.1(100%)	21323.7	16.1

45.9%，在400~800 m海拔范围内石漠化的发生率最高达到35.3%。不同程度石漠化在该等级海拔上所占的比例分别是44.6%、45.5%、63.3%。在> 1200 m海拔以上的地区，石漠化面积仅有2247.6 km²，占总石漠化面积的6.5%。

4.5 石漠化在不同降雨量地区中的分布

从表4中看到，槽谷区石漠化在不同年均降雨量地区中存在显著差异。岩溶槽谷区石漠化主要分布在年均降雨量为1200~1400 mm范围内，石漠化面积为8010.3 km²，占槽谷区土地总面积的28.0%，在该范围内石漠化的发生率最高为25.0%。不同程度石漠化在该年均降雨等级上所占的比例分别是48.6%、23.3%、27.3%。

4.6 石漠化在不同土地利用类型中的空布

从表5中看到，槽谷区石漠化在不同土地利用方式下中存在显著差异。岩溶槽谷区石漠化主要分布在耕地中（其中绝大部分为山地旱地），石漠化面积为10165.6 km²，占槽谷区石漠化总面积的47.7%，其中轻度、中度和重度石漠化在耕地中的比例分别为49.6%、55.7%和20.1%，耕地中的石漠化发生率为38.1%；在未利用地中土地类型中，石漠化面积为5267.4 km²，占槽谷区石漠化总面积的24.7%，不同程度石漠化在该土地利用类型中所占比例分别为17.1%、24.8%和11.6%，石漠化发生率为33.0%；草地中石漠化

表4 岩溶槽谷区石漠化在不同降雨量下的空间分布

Tab. 4 Distribution of rocky desertification under different rainfall in karst trough area

降雨量(mm) (面积/km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠化 (km ²)	石漠化总面积 (km ²)	发生率 (%)
800~1000(31708.4)	1605.8(13.5%)	1852.4(21.5%)	158.6(19.5%)	3616.8	11.4
1000~1200(47564.1)	2533.6(21.3%)	3325.6(38.6%)	289.5(35.6%)	6148.7	12.9
1200~1400(32011.4)	5780.9(48.6%)	2007.5(23.3%)	221.9(27.3%)	8010.3	25.0
> 1400(20835.9)	1974.5(16.6%)	1430.2(16.6%)	143.1(17.6%)	3547.8	17.0
总计(132119.9)	11894.8(100%)	8615.8(100%)	813.1(100%)	21323.7	16.1

表5 岩溶槽谷区石漠化在不同土地利用方式下的空间分布

Tab. 5 Distribution of rocky desertification under different land use patterns in karst trough area

土地利用方式 (面积/km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠化 (km ²)	石漠化总面积 km ²	发生率 (%)
耕地(28515.8)	5900.4(49.6%)	4795.6(55.7%)	164.2(20.1%)	10165.6	38.1
林地(61669.1)	1881(15.8%)	683.3(7.9%)	469.6(57.8%)	2728.5	1.9
草地(29009.1)	2080.2(17.5%)	996.7(11.6%)	85.3(10.5%)	3162.2	4.9
未利用地(12925.9)	2033.2(17.1%)	2140.2(24.8%)	94.1(11.6%)	5267.4	33.0
总计(132119.9)	11894.8(100%)	8615.8(100%)	813.1(100%)	22141.7	16.8

面积为3162.2 km², 占槽谷区石漠化总面积的14.8%, 其中轻度、中度和重度石漠化比例分别为17.5%、11.6%和10.5%, 石漠化发生率为4.9%; 林地中石漠化面积小, 石漠化的发生率也低, 仅为1.9%。

4.7 石漠化在不同人口密度中的分布

从表6中看到, 槽谷区石漠化在不同人口密度中存在显著差异, 但是与人口密度并不呈线性正相关关系。岩溶槽谷区石漠化主要分布在100~200人/km²的地区中, 石漠化面积为9864.5 km², 占槽谷区石漠化总面积的46.3%, 其中轻度、中度和重度石漠化在100~200人/km²地区中的比例分别为47.5%、44.9%和42.0%, 石漠化发生率最大, 为25.7%; 其次为0~100人/km², 石漠化面积为5800.1 km², 占槽谷区石漠化总面积的27.2%, 其中轻度、中度和重度石漠化在0~100人/km²的比例分别为23.5%、33.3%和17.4%, 石漠化发生率为15.7%; 200~300人/km²中石漠化面积为3766.3 km², 占槽谷区石漠化总面积的17.7%, 其中轻度、中度和重度石漠化比例分别为16.0%、20.4%和12.6%, 石漠化发生率为9.5%; 在> 300人/km²中石漠化面积小, 石漠化的发生率也低, 仅11.0%。

表6 岩溶槽谷区石漠化在不同人口密度下的空间分布
Tab. 6 Distribution of rocky desertification under different population densities in karst trough area

人口密度(人/km ²) (面积/km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠化 (km ²)	石漠化 总面积	发生率 (%)
0~100(36993.6)	2789.3(23.5%)	2869.2(33.3%)	141.5(17.4%)	5800.1	15.7
100~200(38314.8)	5654.8(47.5%)	3868.4(44.9%)	341.3(42.0%)	9864.5	25.7
200~300(39636.0)	1905.4(16.0%)	1758.1(20.4%)	102.8(12.6%)	3766.3	9.5
> 300(17175.6)	1545.3(13.0%)	120.0(1.4%)	227.5(28.0%)	1892.8	11.0
总计(132119.9)	11894.8(100%)	8615.8(100%)	813.1(100%)	21323.7	16.1

4.8 石漠化与第一产业生产总值

从表7中看到, 槽谷区石漠化在不同第一产业总值中存在显著差异。岩溶槽谷区石漠化主要分布在> 50亿元范围中, 在该范围内的石漠化面积为7871.2 km², 占槽谷区石漠化总面积的36.9%, 其中轻度、中度和重度石漠化在> 50亿元范围中的比例分别为32.4%、42.3%和44.8%, 石漠化发生率最大为28.0%; 其次为25亿~50亿, 石漠化面积为5416.8 km², 占槽谷区石漠化总面积的25.4%, 其中轻度、中度和重度石漠化在25~50亿的比例分别为25.5%、26.6%和11.7%, 石漠化发生率为24.7%; 10亿~25亿中石漠化面积为4874.5 km², 占槽谷区石漠化总面积的22.9%, 其中轻度、中度和重度石漠化比例分别为24.6%、19.5%和33.2%, 石漠化发生率为10.8%; 在0~10亿中石漠化面积小, 石漠化的发生率也低, 仅为6.7%。

表7 岩溶槽谷区石漠化在不同第一产业总值下的分布
Tab. 7 Distribution of rocky desertification under different total output value of primary industry in karst trough area

第一产业总值(亿元) (面积/km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠化 (km ²)	石漠化 总面积	发生率 (%)
0~10(47260.2)	2080.2(17.5%)	996.7(11.6%)	84.3(10.3%)	3161.2	6.7
10~25(45223.8)	2921.6(24.6%)	1683.3(19.5%)	269.6(33.2%)	4874.5	10.8
25~50(20294.3)	3033.2(25.5%)	2288.6(26.6%)	95(11.7%)	5416.8	24.7
> 50(19341.6)	3859.8(32.4%)	3647.2(42.3%)	364.2(44.8%)	7871.2	28.0
总计(132119.9)	11894.8(100%)	8615.8(100%)	813.1(100%)	20323.7	16.10

5 讨论

5.1 岩溶槽谷区石漠化空间分布与形成的单一驱动因子分析

因子探测器分析结果如表 8 所示，各因子对石漠化空间分布的影响权重分别为：岩性（ $q = 0.58$ ）>土地利用（ $q = 0.48$ ）>坡度（ $q = 0.42$ ）>第一产业（ $q = 0.37$ ）>人口密度（ $q = 0.36$ ）>海拔高度（ $q = 0.31$ ）>年均降雨量（ $q = 0.28$ ）。

表 8 因子探测器结果
Tab. 8 The results by factor detector

	岩性	坡度	海拔高度	年均降雨	人口密度	土地利用	第一产业总值
q 值	0.58	0.42	0.31	0.28	0.36	0.48	0.37

5.1.1 岩性因子对石漠化形成与分布的影响 与其他岩性相比，连续性灰岩中方解石含量大于 95%，酸不溶物低，比溶蚀度高（值越高表征岩性越纯，越容易发育成岩溶地貌）：石灰岩>白云岩>泥灰岩。白云岩中方解石含量小于 5%，白云石含量大于 95%，酸不溶物多于连续性灰岩，比溶蚀度低于连续性灰岩，较之连续性灰岩不易被侵蚀。正是因为有这样的特性导致在连续性灰岩地区石漠化发育程度高。对比非岩溶地区，岩溶地区本身成土速率慢，其受控于成土母质的影响，形成 1 m 厚土层需要 25 万~85 万年的时间，相当于同纬度非岩溶区的 10~40 倍^[18]。张信宝等通过研究贵州石漠化与岩性，降雨量及人口密度的关系后，指出易溶蚀的碳酸盐岩是石漠化发育的基础^[8]。在相同的水动力条件下，石灰岩纯度越高，碎屑岩比例越低的岩性地层更容易被水溶蚀，进而发育石漠化景观^[19-20]。

5.1.2 土地利用因子对石漠化分布的影响 岩溶槽谷区的地貌以中低山为主，决定了当地的土地利用类型以山地旱地为主，槽谷底部中间少许的平坦土地被厂房、城市和农村居民点所利用，岩溶槽谷区相比较于中高山石漠化治理区和岩溶高原石漠化综合治理区而言，山体坡度较为平缓，绝对海拔相对较低，不同土地利用类型决定了土壤的肥力，土壤抗侵蚀性，土壤颗粒组成，水稳定团聚体以及地表植被，这些因子和人类的耕作活动共同决定了石漠化发育的方向和程度。李阳兵等通过研究峰丛洼地的石漠化与土地利用关系后发现，连续性灰岩上的坡耕地更容易发生石漠化景观^[21-22]。坡耕地发生石漠化的原因实质是人口原因，耕地资源数量不足，迫使农民“春种一坡，秋收一箩；越垦越穷，越穷越垦”，部分学者甚至认为农户对土地的粗放式经营才是石漠化形成的本质原因。岩溶槽谷区重度石漠化主要分布在疏林地中，植被破坏较严重，当植被覆盖条件从有林地—疏林地—灌木林转化的时候，就会驱动水土流失最后导致石漠化景观。张信宝等通过研究农耕对坡地石质化后指出农耕能促进土壤流失间接驱动石质化形成，耕作疏松土壤，有利土壤和水分的接触，和非岩溶地区相比，更易引起土壤的强烈流失^[23]。Peng 等发现不同土地利用方式下的产流产沙差异显著，总体上表现为受人类干扰强度越大，径流场的产流产沙强度越大^[24]；Wang 等也发现了相同的规律^[25-26]。

5.1.3 坡度对石漠化分布的影响 较大的坡度一方面促进土壤发生蠕移和渗漏，另一方面增加了坡面流水的侵蚀力，加大岩溶槽谷区的水土流失。对比槽谷底部，坡腰地带由于在较大的坡度情况下，岩石风化后产生的酸不溶解物质难以附着在地表，在缺乏植物根系固结且又有适当的降雨情况下比较容易往山脚迁移，较大的降雨促进坡面径流携带大量的侵蚀泥沙从岩溶裂隙，管道，落水洞和地下暗河转移到地下，从而加剧石漠化景观

的发育过程。李瑞玲等提出在坡度大于 18° 的地区, 石漠化的发生率随着坡度的增大而增大^[27]。李阳兵等基于RS与GIS的技术来研究贵州高原上王家寨小流域的坡度与石漠化的相关关系后指出该流域石漠化最主要发育在 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的坡度范围内^[28]。

5.1.4 第一产业与人口密度对石漠化分布的影响 石漠化发育的另一个非常重要的因素是不合理的人类活动, 人口是石漠化诸因素中最活跃, 最复杂, 最积极的因子^[29-30]。一方面岩溶槽谷区的人口数量大, 人口自然增长率高, 已经大大的超出了区域资源环境的承载能力, 尤其是土地资源。另一方面西南地区是中国贫困人口的聚居区之一, 农业人口比例高, 农业生产方式落后, 人们为了生存加大对森林、土地的掠夺式开发, 使本身就脆弱的岩溶地区植被和土壤极易遭到破坏, 低承载力的土地资源在高强度的人类活动干扰下使土地生产力迅速下降, 从而逼迫人类寻求更肥沃的土壤, 导致毁林开荒, 陡坡开垦。这一恶性循环的最终结果就是导致石漠化面积不断增加, 石漠化程度不断加剧^[31-33]。据国家林业检测局显示人类不合理的活动主要表现为4类: 陡坡开垦、过度乔采、过度放牧、不合理的经济建设, 造成的石漠化比例分别是36.2%、44.9%、8.2%、10.7%。白晓永等指出石漠化分布与人口指标密切相关^[11], Zhang等也发现相同的规律, 他指出人口因素是驱动石漠化最重要的因子之一^[34]。

人类不合理的活动归根结底其目的在于获取更高的经济收入, 基于县市尺度, 分析第一产业生产总值与石漠化面积之间的叠加关系后发现, 西南岩溶槽谷区的石漠化面积与第一产业生产总值具有较为显著的正相关关系, 分析其原因可能表明, 一个县的第一产业生产总值越大, 农业人口数量越多, 耕种土地面积越大, 对土地的人为干扰活动越剧烈, 相对地地越容易发育石漠化景观。值得注意的一点是: 由于人为因素对石漠化的作用具有双重性, 既可以通过各种不合理的活动加速石漠化进程, 也可以通过综合治理措施改善石漠化进程, 所以关键在于如何正确发挥人的主观性^[35-36]。

5.1.5 海拔因子对石漠化分布的影响 海拔高度决定了坡度, 坡长, 土壤厚度以及植被类型, 从更小尺度上来看, 还决定了土壤温度湿度, 以及微生物生境。另外最重要的一点是决定了农耕地的上限, 在山麓顶端由于坡度大, 土壤层薄, 再加上距离居民点远, 最终导致受人类活动影响比较小, 保持了较为原始的生态环境, 石漠化发育程度较轻。400~800 m海拔范围内主要分布着三叠系石灰岩, 易溶蚀的岩性因子再加上此海拔人类活动频繁, 两种因子叠加作用造成该海拔范围内容易发育石漠化。岩溶槽谷地区相较于川西地区中高山石漠化治理区和云南横断山脉地区的高山峡谷石漠化治理区而言海拔相对较低, 增加了人类活动的范围, 人们往往翻山越岭寻找优质土地开垦为农田, 果园和经木林地。在海拔高度 < 400 m的范围内, 各个等级下的石漠化比例都是最低的, 尤其是重度石漠化, 这可能是由于在 < 400 m的范围内土地利用类型主要是河流, 湖泊以及农村城市建设用地, 所以不易发生石漠化。张信宝等在研究西南岩溶地区农耕驱动石漠化的机制后指出, 山顶石质坡多为次生林和裸地, 山腰土石质坡地和山麓土质坡地多为农耕地^[23]。

5.1.6 多年平均降雨因子对石漠化分布的影响 岩溶槽谷区年均降水充沛, 年均降雨量在1000~1400 mm, 为石漠化的形成提供了侵蚀动力和溶蚀条件。岩溶地区岩溶作用随着温度的升高而增强, 加上降雨集中在温度较高的4-9月份, 适宜的温度和降水共同促进化学风化作用的进行。Eyal等通过对比研究实验发现在相同的降雨条件下, 当外界温度条件不同时土壤随着温度的上升侵蚀量具有增加的趋势^[37]。夏季雨水充沛且暴雨集中还提供了强大的侵蚀动力条件, 最终导致土壤易被侵蚀, 形成石漠化景观。岩溶槽谷区降雨特

征不仅表现在降雨量充沛，还表现为季节性分配不均，降雨量多集中在夏季且多暴雨。降雨是影响水土流失的重要因素，是降雨溅蚀、坡面径流、地下漏失的主要动力。雨水可以充当可溶性养分的溶剂，当降雨量超过产流阈值形成坡面径流后，雨水又是携带其他形态养分的介质，在这个过程中雨水又能充当润滑剂的作用，促进土壤通过蠕动转移到地下裂隙和岩溶管道，所以降雨特征（历时，强度，雨量等）是岩溶坡地产流产沙及元素流失的重要影响因素^[38-41]。

5.2 岩溶槽谷区石漠化形成与分布的因子组合驱动分析

借助地理探测器的交互式探测器模块，本文评估驱动因子 $X1$ 和 $X2$ 共同作用时是否会增加或者减少对因变量 Y 的解释力。值越大越能说明其共同作用比单个驱动因子对 Y 的影响程度要大。据表 9，可以得到解释力较大的两个交互式驱动因子分别是岩性∩土地利用（ $q = 0.85$ ）、坡度∩土地利用（ $q = 0.75$ ）。

结合因子探测器的结果和交互式探测器的结果（表 9），可以看到岩性、坡度、以及土地利用 3 个驱动因子无论是单个因子还是相互组合因子，其 q 值都大于其他单个因子或者组合因子。岩性与土地利用组成的交互式驱动因子其值最大为 0.85，这说明在脆弱的地质基础上（广泛分布的碳酸盐岩）由于人类的不合理活动（陡坡开垦等不合理的耕作方式）是造成石漠化形成的首要原因。而适当的坡度条件加速了坡面侵蚀过程，导致地表土壤更容易被坡面径流侵蚀和搬运。

表 9 交互式探测器结果(q 值)
Tab. 9 The results by interactive probe

	岩性	坡度	海拔高度	年均降雨量	人口密度	土地利用	第一产业总值
坡度	0.21	0					
海拔高度	0.47	0.27	0				
年均降雨	0.15	0.14	0.32	0			
人口密度	0.35	0.34	0.27	0.15	0		
土地利用	0.85	0.75	0.26	0.34	0.32	0	
第一产业总值	0.14	0.19	0.15	0.18	0.34	0.28	0

5.2.1 岩性及土地利用与石漠化空间分布和形成 根据不同土地利用及岩性中石漠化的分布（表 10）可以看出，耕地主要分布在连续性灰岩中，面积为 15302.7 km²，石漠化发生率仅次于未利用地为 19.9%；林地主要分布在碳酸盐岩夹碎屑岩中，面积为 29712.9 km²，石漠化发生率为 0.1%；草地主要分布在连续性灰岩中，面积为 13094.1 km²，石漠化发生率为 19.1%；未利用地主要分布在连续性灰岩中，面积为 6936.5 km²，石漠化发生率最大达到 20.1%。4 类岩性中石漠化发生率由高到低分别是：未利用地>耕地>草地>林地。

5.2.2 坡度及土地利用与石漠化空间分布和形成 根据不同土地利用及坡度中石漠化的分布（表 11）可以看出，在 0°~8°坡度范围内，林地面积最大为 19275.6 km²，占该范围内总面积的 45.5%，石漠化发生率最高是未利用地达到 17.6%；在 8°~15°范围内林地面积最大为 37476.9 km²，占该范围内总面积的 50.5%，石漠化发生率最高的是未利用地，达到 21.8%；在 15°~25°范围内林地面积最大为 32002.3 km²，占该范围内总面积的 47.0%，石漠化发生率最高，是未利用地达到 24.3%；在 > 25°范围内林地面积最大，为 27522.6 km²，占该范围内总面积的 46.4%，石漠化发生率最高的是未利用地，达到 17.9%，其次是耕地用地类型，石漠化发生率为 15.5%。

表 10 岩溶槽谷区不同土地利用及岩性中石漠化的分布

Tab. 10 Distribution of rocky desertification in different types of land use and lithology in karst trough area

岩性	土地利用 (km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠化 (km ²)	总计 (km ²)	石漠化 发生率(%)
连续性灰岩	耕地(12024.1)	1216.3(16.4%)	1629.2(13.5%)	196.9(1.6%)	3042.4	31.6
	林地(10288.7)	23.1(0.2%)	5.9(0.1%)	0.1(0%)	29	0.3
	草地(12232.1)	1977.8(9.9%)	960.5(7.9%)	39.0(0.3%)	2977.2	18.1
	未利用地(5450.4)	1121.3(20.6%)	258.9(4.8%)	16.6(0.3%)	1396.8	25.6
小计	39995.2	4338.4(36.5%)	2854.4(33.1%)	252.6(31.1%)	7445.4	15.7
连续性白云岩	耕地(4133.9)	1548.3(37.5%)	960.5(23.2%)	98.5(2.4%)	2607.3	17.0
	林地(8940.1)	75.5(0.6%)	5.8(0.1%)	1.7(0.2%)	83	0.3
	草地(4205.3)	441.8(10.5%)	213.0(5.1%)	29.0(3.6%)	683.7	4.4
	未利用地(1873.9)	870.1(7.3%)	750.4(8.7%)	59.4(7.3%)	1679.9	24.2
小计	19153.2	2935.8(15.3%)	1929.7(10.1%)	188.5(1.0%)	5054	10.7
灰岩与白云岩互层	耕地(5086.9)	1396.7(11.7%)	1015.9(11.8)	120.3(14.8%)	2533	18.1
	林地(11001.1)	0.8(0%)	5.1(0.1%)	1.9(0.2%)	7.8	0.0
	草地(5174.9)	524.2(4.4%)	203.8(2.4%)	13.4(1.6%)	741.4	5.8
	未利用地(2305.9)	757.7(6.4%)	338.5(3.4%)	84.7(10.4%)	1181	20.7
小计	23568.7	2679.4(22.5%)	1563.3(18.1%)	220.4(27.1%)	4463.1	9.3
碳酸盐岩夹碎屑岩	耕地(10662.8)	1054.9(9.9%)	923.3(8.7%)	82.9(0.8%)	2061.2	19.3
	林地(23059.5)	18.1(0.2%)	12.1(0.1%)	0.0(0%)	30.2	0.1
	草地(10847.2)	397.9(3.3%)	419.5(4.9%)	28.4(3.5%)	845.8	6.1
	未利用地(4833.3)	470.3(9.7%)	913.5(18.9%)	40.2(0.8%)	1424	22.9
小计	49402.8	1941.2(3.9%)	2268.4(4.6%)	151.6(0.3%)	4361.2	8.8

表 11 岩溶槽谷区不同土地利用及坡度中石漠化的分布

Tab. 11 Distribution of rocky desertification in different types of land use and slope in karst trough area

坡度	土地利用 (km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠化 (km ²)	总计 (km ²)	石漠化 发生率(%)
0~8°	耕地(4591.7)	334.1(7.3%)	82.5(1.8%)	17.0(2.1%)	758.3	9.4
	林地(9602.7)	151.6(1.6%)	156.5(1.8%)	4.9(0.6%)	547.7	0.3
	草地(4666.3)	167.9(2.2%)	101.1(1.2%)	7.2(0.9%)	583.1	5.9
	未利用地(2235.3)	265.4(2.2%)	175.1(2.0%)	39.8(1.3%)	789.4	17.6
小计	21096.1	919.1(7.7%)	515.2(6.0%)	100.7(12.4%)	2678.5	7.0
8°~15°	耕地(7752.5)	580.5(7.5%)	327.1(4.2%)	38.4(0.5%)	1653.5	12.2
	林地(18670.2)	212.6(1.1%)	181.3(1%)	16.6(0.1%)	717.1	1.9
	草地(7914.9)	539.6(4.7%)	342.3(4.0%)	72.0(8.9%)	1663.5	10.5
	未利用地(2618.5)	411.3(3.5%)	219.4(2.5%)	26.2(3.2%)	1148.3	21.8
小计	36956.2	1744.0(14.7%)	1070.2(12.4%)	153.3(18.9)	5182.4	7.0
15°~25°	耕地(10786.7)	981.2(9.1%)	667.3(6.2%)	31.0(0.3%)	2938.9	15.6
	林地(17952.9)	411.5(3.5%)	556.8(6.5%)	19.1(2.3%)	1726.4	4.1
	草地(10976.8)	496.5(4.2%)	294.7(3.4%)	15.4(1.9%)	1411.5	7.2
	未利用地(4778.9)	564.5(4.7%)	581.0(6.7%)	59.7(7.3%)	2104.1	24.7
小计	44495.3	2453.8(20.6%)	2099.8(24.4%)	125.1(15.4%)	8180.9	9.2

续表 11

坡度	土地利用 (km ²)	轻度石漠化 (km ²)	中度石漠化 (km ²)	重度石漠化 (km ²)	总计 (km ²)	石漠化 发生率(%)
> 25°	耕地(1525.0)	679.7(6.1%)	430.0(5.2%)	30.5(0.2%)	1994.3	15.5
	林地(17185.3)	307.0(1.8%)	209.4(1.2%)	10.2(0.1%)	921.4	3.1
	草地(6154.0)	424.6(3.6%)	299.8(3.5%)	20.9(2.6%)	1303.2	10.0
	未利用地(3707.3)	249.9(2.1%)	306.3(3.6%)	54.2(6.7%)	1062.9	17.9
小计	28571.6	1661.2(14.0%)	1245.5(9.5%)	115.8(14.2%)	5281.9	8.9

6 结论

西南岩溶槽谷区因其特殊的地貌构造单元，石漠化的驱动因子更具复杂性。结合 GIS 空间分析工具和地理探测器模型，得到以下结论：

(1) GIS 工具为地理探测器模型提供了空间数据，地理探测器模型的优势在于可以不受自变量数据类型的限制， q 值具有明确的物理意义。

(2) 岩溶槽谷区总石漠化面积为 21323.7 km²，占研究区土地面积的 8.3%，其中轻度、中度和重度石漠化面积分别是 11894.8 km²、8615.8 km²和 813.1 km²，分别占石漠化面积的 55.8%、40.4%和 3.8%。

(3) 轻度石漠化，中度石漠化，重度石漠化都主要分布在 400~800 m 海拔范围内。这与岩溶槽谷区主要分布的是中低山地貌有关。

(4) 地理探测器的因子探测器揭示了岩性 ($q = 0.58$)、土地利用 ($q = 0.48$) 和坡度 ($q = 0.42$) 3 个因子是槽谷区石漠化形成的主要驱动因子，交互式探测器进一步揭示了岩性与土地利用类型 ($q = 0.85$)、坡度与土地利用类型的组合 ($q = 0.75$) 共同驱动槽谷区石漠化的形成。

参考文献(References)

[1] Yuan, D X. Rock desertification in the subtropical karst of south China. Zeitschrift fur Geomorphologie, 1997, 108: 81-90.

[2] 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: Phenomena and mechanisms, Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 123-131.

[3] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.

[4] Planning Outline for Comprehensive Management of Rocky Desertification in Karst Area (2006-2015). National Development and Reform Commission and State Forestry Administration, Ministry of Agriculture, Ministry of Water Resources. [岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006-2015 年). 国家发展改革委会同林业局、农业部、水利部.]

[5] Yuan D X. Major Environmental Geological Problems and Strategies in Southwest Karst Rocky Mountains. Beijing: Science Press, 2014. [袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究. 北京: 科学出版社, 2014.]

[6] Wang Shijie, Li Yangbing, Li Ruiling. Formation background, evolution and treatment of Karst Rocky Desertification. Quaternary Sciences, 2003, 23(6): 657-666. [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. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.]

[7] Jiang Zhongcheng, Luo Weiqun, Tong Liqiang, et al. Evolution characteristics and influencing factors of Karst Rocky Desertification in Southwest China in the 21st Century. Chinese Journal of Karst, 2016, 35(5): 461-468. [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. 中国岩溶, 2016, 35(5): 461-468.]

[8] Zhang Xinbao, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. The relationship between spatial distribution of rocky desertification

- and karst landform, lithology, annual average precipitation and population density in Guizhou. *Earth and Environment*, 2013, 41(1): 1-6. [张信宝, 王世杰, 白晓永, 等. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、年均降水和人口密度密度的关系. *地球与环境*, 2013, 41(1): 1-6.]
- [9] Li Ruiling. Natural background and spatial regional differentiation of rocky desertification in karst areas of Guizhou [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004. [李瑞玲. 贵州岩溶地区土地石漠化形成的自然背景及其空间地域分异[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2004.]
- [10] Jiang Y, Li L, Groves C, et al. Relationships between rocky desertification and spatial pattern of land use in typical karst area, Southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2009, 59(4): 881-890.
- [11] Bai Xiaoyong, Xiong Kangning, Li Yangbing, et al. Quantitative study on spatial difference of rocky desertification and population factors in different karst mountain areas. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(2): 242-248. [白晓永, 熊康宁, 李阳兵, 等. 喀斯特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.]
- [12] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geographical detectors: Principles and prospects. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [13] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20(10): 114-115.
- [14] Dong Yuxiang, Xu Wei, Yang Ren, et al. Discussion on the northern boundary of China's terrestrial tropics based on geographical detectors. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 135-147. [董玉祥, 徐茜, 杨忍, 等. 基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨. *地理学报*, 2017, 72(1): 135-147.]
- [15] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [16] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [17] Wang Jinfeng, Ge Yong, Li Lianfa, et al. Geographic spatiotemporal data analysis methods. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1326-1345. [王劲峰, 葛咏, 李连发, 等. 地理学时空数据分析方法. *地理学报*, 2014, 69(9): 1326-1345.]
- [18] Pu Junbing, Yuan Daoxian, Pei Zhengjiao, et al. Water environment problems in karst areas in Southwest China. *Science*: Shanghai, 2010, 62(2): 32-36. [蒲俊兵, 袁道先, 覃政教, 等. 我国西南岩溶区水环境问题. *科学*, 2010, 62(2): 32-36.]
- [19] Liu Zaihua, Dreybrodt W, Li Huaju. Comparison of dissolution rate control mechanisms of limestone and dolomite. *Earth Science*, 2006, 31(3): 411-416. [刘再华, Dreybrodt W, 李华举. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较. *地球科学*, 2006, 31(3): 411-416.]
- [20] Jiang Yongjun, Zhang Cheng, Li Linli, et al. Analysis of the current situation and genesis of rocky desertification in Hanjiang District of Chongqing based on RS and GIS. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2007, 34(1): 81-85. [蒋勇军, 章程, 李林立, 袁道先, 等. 基于RS、GIS的重庆黔江区石漠化现状与成因分析. *水文地质工程地质*, 2007, 34(1): 81-85.]
- [21] Li Yangbing, Bai Xiaoyong, Zhou Guofu, et al. Relationship between land use and rocky desertification in typical rocky desertification areas of China. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(6): 624-632. [李阳兵, 白晓永, 周国富, 等. 中国典型石漠化地区土地利用与石漠化的关系. *地理学报*, 2006, 61(6): 624-632.]
- [22] Li Yangbing, Bai Xiaoyong, Qiu Xingchun, et al. Correlation between Karst Rocky desertification and land use. *Journal of Resource Science*, 2006, 28(2): 67-73. [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. *资源科学*, 2006, 28(2): 67-73.]
- [23] Zhang Xinbao, Wang Shijie, Meng Tianyou, et al. Mechanism of farming driving rocky land in karst areas of Southwest China. *Earth and Environment*, 2010, 38(2): 123-128. [张信宝, 王世杰, 孟天友, 等. 农耕驱动西南喀斯特地区坡地石质化的机制. *地球与环境*, 2010, 38(2): 123-128.]
- [24] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China. *Catena*, 2012, 90(1): 53-62.
- [25] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(2): 115-121.
- [26] Xiong Kangning, Li Jin, Long Mingzhong. Characteristics and key issues of soil erosion in typical karst rocky desertification control areas. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 878-888. [熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题. *地理学报*, 2012, 67(7): 878-888.]
- [27] Li Ruiling, Wang Shijie, Xiong Kangning, et al. Spatial correlation analysis between slope and rocky desertification in

- karst areas of Guizhou Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(4): 82-86. [李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 等. 贵州省岩溶地区坡度与土地石漠化空间相关分析. *水土保持通报*, 2006, 26(4): 82-86.]
- [28] Li Yangbing, Wang Shijie, Zhou Mengwei, et al. Relationship between karst rocky desertification and slope at different spatial scales. *Soil and Water Conservation Research*, 2009, 16(5): 70-72. [李阳兵, 王世杰, 周梦维, 等. 不同空间尺度下喀斯特石漠化与坡度的关系. *水土保持研究*, 2009, 16(5): 70-72.]
- [29] Zhang Yongrong, Zhou Zhongfa, Ma Shibin. Analysis of rocky desertification and climate change in karst mountainous area of Guizhou in recent 20 years. *Environmental Science and Technology*, 2014, 37(9): 192-197. [张勇荣, 周忠发, 马士彬. 近 20 年贵州喀斯特山区石漠化与气候变化特征分析. *环境科学与技术*, 2014, 37(9): 192-197.]
- [30] Wu Lianglin, Huang Qiuyan, Zhou Yongzhang, et al. Spatial correlation of karst rocky desertification and human activities based on GIS/RS: A case study of Du'an Yao Autonomous County in Guangxi. *Soil and Water Conservation Research*, 2007, 14(4): 121-125. [吴良林, 黄秋燕, 周永章, 等. 基于 GIS/RS 的喀斯特石漠化与人文活动空间相关性研究: 以广西都安瑶族自治县为例. *水土保持研究*, 2007, 14(4): 121-125.]
- [31] Xiong Y J, Qiu G Y, Mo D K, et al. Rocky desertification and its causes in karst areas: A case study in Yongshun County, Hunan Province, China. *Environmental Geology*, 2009, 57(7): 1481-1488.
- [32] Xiao Rongbo, Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, et al. Sensitivity evaluation and spatial analysis of rocky desertification in Southwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 1(5): 551-554. [肖荣波, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析. *生态学杂志*, 2005, 1(5): 551-554.]
- [33] Yin H, Jiang Z, Luo W. Study on dynamic evaluation of soil erosion and rocky desertification in karst area of Southwest China. *Water and Soil Conservation Research*, 2011, 18(1): 66-70.
- [34] Zhang H, Zhao X. Human drive mechanism of land use change in karst mountain areas: A case study of Guizhou Province. *Geographical Research*, 1999, 18(2): 136-142.
- [35] Lai C, Qin Z, Zhang W. Rocky desertification sensitivity assessment and spatial distribution characteristics of Sichuan Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(4): 99-104.
- [36] LI D, Wu X, Yu D. Evaluation on eco-environmental sensitivity of Yunnan Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 28(11): 5270-5271.
- [37] Sachs E, Sarah P. Effect of raindrop temperatures on soil runoff and erosion in dry and wet soils. A laboratory experiment. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(12): 106-112.
- [38] Huang Xiaoya, Chen Xi, Zhang Zhicai, et al. Analysis of rainfall concentration and its variation characteristics in karst areas of Southwest China: A case study of the upper reaches of the Wujiang River Basin. *Earth and Environment*, 2013, 41(3): 203-208. [黄晓亚, 陈喜, 张志才, 等. 西南喀斯特地区降雨集中度及其变化特征分析: 以乌江流域中上游为例. *地球与环境*, 2013, 41(3): 203-208.]
- [39] Hang X, Chen X, Zhang Z. Analysis of rainfall concentration and its change characteristics in karst region of Southwest China: A case study of the middle and upper reaches of Wujiang River Basin. *Earth and Environment*, 2013, 41(3): 203-208.
- [40] Mohamadi M A, Kaviani A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. *International Soil & Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 273-281.
- [41] Gonzálezpelayo O, Andreu V, Gimeno García E, et al. Rainfall influence on plot-scale runoff and soil loss from repeated burning Mediterranean-shrub ecosystem, Valencia, Spain. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4): 444-452.

Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification based on GIS and geodetectors

WANG Zhengxiong, JIANG Yongjun, ZHANG Yuanzhu, DUAN Shihui,

LIU Jiuchan, ZENG Ze, ZENG Sibao

(Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The rocky desertification in the karst area is becoming the third largest ecological problem in western China following desertification, as well as soil and water loss. In recent years, rocky desertification in the karst trough valley is increasing seriously, and puts more and more pressure on the environment. Therefore, by GIS spatial analysis functions and geodetector models, this paper aims to explore the spatial distribution of rocky desertification in different gradients and its driving factors based on rock desertification, lithology, slope, elevation, rainfall, land use, population density and the total output value of primary industry in the valley. The results are as follows: (1) The total rocky desertification area in the karst trough area is 21, 323.7 km², accounting for 8.3% of the land area in the study area; of which the light, moderate and severe rocky desertification areas are 11, 894.8 km², 8615.8 km² and 813.1 km², respectively, accounting for 55.8%, 40.4% and 3.8% of the desertified area. (2) From the spatial distribution, rocky desertification mainly occurs in the continuous limestone, and the light, moderate and severe rocky desertification areas respectively account for 22.1%, 22.4% and 1.9% of the corresponding rocky desertification types in the trough area; Rocky desertification in the trough area mainly occurs in the gradient range of 15° to 25°, and the light, moderate, and severe rocky desertification areas account for 27.1%, 18.2% and 2.3% of the corresponding rocky desertification in the trough area, respectively; From the elevation, it is mainly distributed in the range of 400-800 m, and the areas of rocky desertification with light, moderate, and severe erosion grades account for 24.9%, 18.4% and 0.2% of the corresponding rocky desertification area in the trough area, respectively; From the land use type, it mainly occurs in upland mountains; From the population density, it concentrates in areas with 100-200 persons/km²; From the total output value of primary industry, it concentrates in areas with 2.5–50 billion. (3) The factor detectors of geographical detectors revealed that the lithology, land use, and slope are the main driving factors for the formation of rocky desertification in the trough region. Interactive detectors further revealed that the lithology and land use types ($q = 0.85$) together with slopes and land use types ($q = 0.75$) drive the formation of rocky desertification in the trough area.

Keywords: karst trough valley; rocky desertification; spatial analysis; driving factors; geographic detector