

陈彦君, 赵筱青, 普军伟, 等. 滇东南喀斯特山区石漠化程度与坡位因子的关联机制研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 379-391.

DOI: 10.11932/karst20240205

# 滇东南喀斯特山区石漠化程度与坡位因子的关联机制研究

陈彦君<sup>1</sup>, 赵筱青<sup>1</sup>, 普军伟<sup>1,2</sup>, 石小倩<sup>1</sup>, 冯 严<sup>1</sup>, 周世杰<sup>1</sup>

(1. 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 石漠化作为一种土地退化现象, 是中国西南喀斯特地区的主要生态问题之一。探寻石漠化分布规律及影响机制是石漠化有效治理的关键。文章以滇东南喀斯特山区的3个典型实验区为研究对象, 提取石漠化程度及坡位信息, 探讨不同等级石漠化沿坡位的分布规律, 并采用通径分析法研究石漠化程度与坡位的关联机制。结果表明: (1) 实验区内从山脊到山谷石漠化面积逐渐减少, 而非石漠化面积逐渐上升, 石漠化主要分布在坡位高的地方; 其中轻度石漠化多发生在山脊和上坡, 中度石漠化多发生在山脊、上坡和下坡, 重度石漠化在各坡位的分布较均匀。(2) 坡位与石漠化程度的相关性显著, 坡位直接影响着石漠化的分布规律。同时, 坡位对石漠化的影响受到坡度与地形切割深度间接的强化作用。(3) 坡位与石漠化程度的关联机制是: 当区域以自然演化状态为主时, 坡位与石漠化程度呈负关联, 坡位越高, 伴随坡度与地形切割深度变大, 导致高坡位区域物质迁移更加频繁, 石漠化的程度加剧; 当区域人类活动影响明显时, 坡位与石漠化程度呈正关联, 坡位越低, 随同坡度与地形切割深度较小, 人类活动更加方便且频繁, 消耗了由高坡位到低坡位的堆积物质, 使石漠化程度加深。研究结果能为喀斯特山区石漠化程度综合影响机制的深入分析提供参考, 为山区石漠化治理及生态恢复措施制定提供依据。

**关键词:** 石漠化; 坡位; 通径分析; 关联机制; 喀斯特山区

**创新点:** 以往学者对坡位与石漠化的关系分析的浅显且片面。作者定量分析坡位对石漠化程度的影响, 明确坡位与石漠化发生的内在关联机制, 为山区石漠化的监测预警和生态恢复治理提供科学依据。

**中图分类号:** X171.1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810 (2024) 02-0379-13

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

石漠化是一种十分严峻的土地退化现象, 指喀斯特地区因植被覆盖度降低、土壤侵蚀量加剧而导致基岩出露的过程。近年来, 石漠化已成为影响中国西南地区的关键生态问题<sup>[1]</sup>, 其具有自然、社会、灾害等多重属性的特点, 是导致喀斯特地区经济发

展滞后的重要因素之一<sup>[2]</sup>。喀斯特山区为了发展经济, 大量开垦土地, 降低了土地的生产力, 同时也加剧了石漠化的发育程度, 形成恶性循环, 极不利于生态文明建设。因此, 探讨喀斯特山区石漠化的地理空间分布规律及驱动因子, 明确石漠化的影响机制, 对于石漠化防治和区域生态恢复至关重要。

目前, 许多学者对西南喀斯特石漠化的形成与

基金项目: 云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目(2018FY001-017); 云南大学研究生创新人才培养项目(C176230200); 2020年云南省教育厅科学研究基金项目[研究生类(2020Y0030)]

第一作者简介: 陈彦君(1998—)女, 硕士研究生, 主要从事喀斯特地区生态安全与土地利用规划研究。E-mail: chenyj9980@163.com。

通信作者: 赵筱青(1969—), 女, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为土地利用安全格局及国土空间开发与保护。E-mail: xqzhao@ynu.edu.cn。

收稿日期: 2022-03-10

演变机制开展了研究,主要从自然与人文结合角度分析探讨。喀斯特石漠化是在特殊的自然环境条件下,由于自然本底作用和人类不合理活动造成的<sup>[3-10]</sup>。从人地系统综合角度分析石漠化的演化机制,能找到短期内石漠化发生的最直接因素,却会弱化长时间尺度下石漠化与自然环境条件之间的作用。如果单独分析自然地形因素对石漠化的影响及关联机制,就有利于找到石漠化的自然空间分布规律,从而确定其治理的范围与措施<sup>[11-12]</sup>。近年来,国内有关喀斯特石漠化驱动因子的研究发展较快,已经有一些公认且明确的结论,单纯的自然因素方面,地貌和岩性是决定石漠化发生与否的直接因素<sup>[13]</sup>;坡度是土壤侵蚀的重要趋动因素之一,随着坡度增大,石漠化的发育程度也逐渐上升<sup>[14]</sup>;由于不同坡向存在日照辐射与降水方面的差异,中度、强度和极强度的石漠化类型受坡向影响较明显<sup>[15]</sup>;地形切割深度对石漠化的形成有明显影响,深切的地貌区比浅切割的地貌区更容易发生石漠化<sup>[16]</sup>;Huang X 等<sup>[17]</sup>在贵州后寨河流域,研究得出坡位通过影响坡度和土层厚度的变化引起石漠化的发生;Zhang Z 等<sup>[18]</sup>认为石漠化的关键驱动因素取决于采样尺度,在小尺度下(特别是在 300 m×300 m 的格网),岩石裸露率和坡位呈极显著正相关( $r=0.913$ )。这些关于坡位与喀斯特石漠化的研究仅探讨了两者的相关关系,可以证实坡位与石漠化之间存在关系,但缺乏具体关联机制的分析。由于喀斯特脆弱的生态环境,石漠化发生后土地恢复代价极大,因此,关于坡位对喀斯特石漠化的影响及两者间的关联机制的研究有必要深入探讨。作者在云南省东南部喀斯特区域考察时发现,石漠化普遍集中分布在高坡位区域,这种现象是单纯由坡位决定?还是与坡度、坡向、地形切割深度等其他地形因子共同作用形成?值得进一步研究探讨。

云南省作为全国喀斯特分布最广的省份之一,其石漠化面积位居全国石漠化面积第二位,石漠化危害程度、治理难度也处于全国前列<sup>[19]</sup>。云南省东南部喀斯特区石漠化明显,属于典型的高原山区,亟需开展该区域石漠化形成及演变机制的研究。本次研究选择地貌类型相同的位于滇东南喀斯特山区的广南县内典型区域为实验区,提取石漠化和坡位信息,分析石漠化发育程度与坡位因子的相关关系,并运用通径分析方法研究石漠化发育程度与坡位因子的关联机制,以及坡度、坡向、地形切割深度等地形

因子在该关联机制中的作用,进一步厘清自然状态和人为干扰情况下石漠化发育程度在不同坡位中分布规律。本研究为喀斯特山区石漠化分布规律和影响机制提供案例支撑,为区域生态环境监测及修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于滇东南的广南县是云南喀斯特高原向广西喀斯特平原过渡斜坡地带的典型裸露型喀斯特山区(图 1)<sup>[20]</sup>,以峰丛洼地、谷地、溶丘洼地等喀斯特地貌形态为主,而峰丛洼地区是喀斯特地貌最典型、石漠化最严重的区域之一<sup>[21]</sup>。因此,在具有石漠化状况普遍性和代表性的广南县<sup>[22]</sup>,分别选取石漠化较为严重的 3 个面积为 10 km×10 km 的大实验区,作为石漠化与坡位关系分析的研究对象,3 个大实验区分别分布在广南县的东部、南部以及西部区域。其中,东部实验区位于广南县莲城镇与杨柳井乡交界处,南部实验区位于广南县黑支果乡,西部实验区位于广南县珠琳镇,3 个实验区均属于典型的峰丛洼地、灰岩与白云岩混杂区域(地貌和岩性类型相同,以排除研究不受其他自然因素变量的干扰),平均海拔分别为 1356 m、1232 m 和 1457 m,海拔高差分别为 586 m、1110 m 和 428 m。

由于 10 km×10 km 区域冗余信息较多,无法准确进行石漠化与坡位关联机制的定量分析,同时考虑到坡位、坡度等地形因子在喀斯特山区地表的小、微区域作用更加明显。因此,在每个大实验区中又选择 1 个面积为 1 km×1 km 的实验小区开展关联机制定量分析<sup>[23]</sup>。根据人类活动干扰程度,在东部实验区中,选择 1 个 1 km×1 km 几乎不受人干扰的实验小区(远离居民点,且区域内以人类难以到达的高山为主);在南部实验区中,选择 1 个 1 km×1 km 受人类干扰较小的实验小区(只有交通与放牧这两种干扰方式,交通道路为村道,主要满足当地村民出行<sup>[24-25]</sup>;放牧为当地居民散养放牧,无大规模养殖,所以视为人为干扰程度小);在西部实验区中,选择 1 个 1 km×1 km 受人类干扰较大的实验小区(以农业活动为主,农业活动主要为坡耕地种植,是石漠化的主要来源地<sup>[26]</sup>,而且乡县级交通、居民点错杂分布,干扰方式众多且活动强度大,所以视为人为干扰程

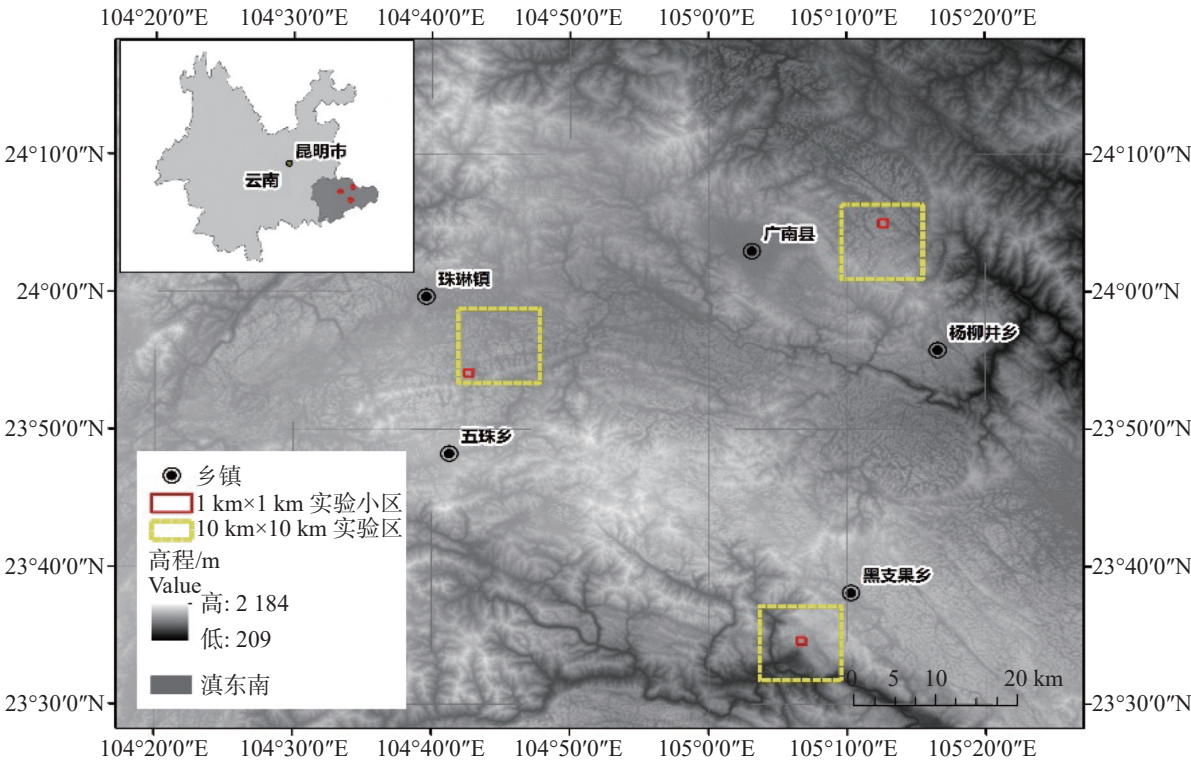


图 1 实验区空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of experimental areas

度大), 利用 3 个面积为  $1\text{ km}^2$  实验小区开展关联机制定量分析。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

在多次野外实地考察的基础上, 研究采用监督分类与人工校正结合的方法, 从 2019 年早季的 Sentinel-2B 遥感影像(数据来源: 欧洲航天局 ESA 网站, <https://scihub.copernicus.eu/>; 空间分辨率:  $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ )中提取研究区的石漠化状况和程度信息, 总体精度超过 85%, 可信度较高; 利用 NASADEM 数据(数据来源: 美国航空宇航局, <https://search.asf.alaska.edu/>; 空间分辨率:  $12.5\text{ m}\times 12.5\text{ m}$ )提取研究区的坡位、坡向、坡度、地形切割深度等基本地形因子信息。研究在综合考虑输出效果和运行速度的情况下, 将所有空间数据的栅格大小统一为  $12.5\text{ m}\times 12.5\text{ m}$ , 同时将坐标系统一为 WGS1984-UTM48N 投影坐标系。

1.2.2 石漠化发育程度分级

目前对石漠化发育程度的分级主要以综合景观指标分类为主<sup>[27]</sup>, 王明明等<sup>[28]</sup>通过文献分析, 得出植被覆盖度、岩石裸露率作为石漠化的评价因子, 评价

效果通常比较好的结论, 熊康宁等<sup>[29]</sup>将岩石裸露、土被、坡度、植被加土被和土层厚度作为石漠化等级划分的指标依据, 根据研究区的实际情况, 借鉴国家林草局最新发布的《LY/T 1840—2020 喀斯特地区植被恢复技术规程》中石漠化分级标准以及团队在研究区已有的石漠化分级研究结果<sup>[30-31]</sup>, 采用岩石裸露度、植被加土被覆盖率来划分石漠化状态与发育程度(表 1), 将石漠化分为非石漠化和石漠化两种状态, 再将两种状态分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化。

表 1 石漠化分级体系

Table 1 Classification standard of rocky desertification

| 石漠化状态 | 石漠化程度 | 岩石裸露率/% | 植被+土被覆盖度/% |
|-------|-------|---------|------------|
| 非石漠化  | 无石漠化  | <20     | >70        |
|       | 潜在石漠化 | 20~30   | 50~70      |
|       | 轻度石漠化 | 30~50   | 35~50      |
| 石漠化   | 中度石漠化 | 50~70   | 20~35      |
|       | 重度石漠化 | >70     | <20        |

1.2.3 坡位因子提取

坡位是对山坡纵剖面上下位置的表述, 即某一

点所处的地貌位置,反映该点与邻域内其他点在地形上的相对位置关系。研究引入 Weiss 在 2001 年 ESRI 国际用户大会上提出的地形位置指数 (Topographic Position Index, TPI)进行坡位计算<sup>[32]</sup>,其基本原理是通过计算研究点与其邻域内高程平均值的差值,由差值的正负和大小来确定目标点所处的地形位置,即坡位。公式如下:

$$TPI = Z - \bar{Z} \tag{1}$$

式中: TPI 为地形位置指数, Z 为研究点的高程值,  $\bar{Z}$  为邻域内的高程均值。TPI 为正表示研究点高于领域内其他点的高程平均值,越大即该点越趋于山脊; TPI 为负则表示它低于领域点高程均值,越小即该点越趋于山谷<sup>[32-33]</sup>。

考虑到邻域中像元高程的波动性, Weiss 提出根据像元的 TPI 与邻域内高程标准值的远近来设定阈值,结合 Weiss 提出的坡位分类标准以及实验区平地较少的实际情况,将坡位分级为山脊、上坡、中坡、下坡、山谷五种类型<sup>[32]</sup>,分别赋值为 1、2、3、4、5 (表 2,图 2)。根据 TPI 的计算原理以及坡位分类依据可知,即使像元具有相同的 TPI 值,由于所在区域不同,会被分为不同的坡位类型,故像元所在邻域大小的选择对坡位的提取准确度具有较大的影响<sup>[32-33]</sup>。

在进行邻域像元个数分别为 1×1、5×5、10×10 和 20×20 的多次计算对比后,当邻域窗口为 20×20 时,提取的实验区坡位呈现最佳的连续分布效果,因此选用这一邻域窗口大小提取 3 个实验区的坡位。

表 2 坡位的分类  
Table 2 Classification of slope positions

| 坡位 | 赋值 | 高低  | 分类依据                       |
|----|----|-----|----------------------------|
| 山脊 | 1  | 高坡位 | $TPI > 1.0SD$              |
| 上坡 | 2  |     | $0.5SD < TPI \leq 1.0SD$   |
| 中坡 | 3  |     | $-0.5SD < TPI < 0.5SD$     |
| 下坡 | 4  | 低坡位 | $-1.0SD < TPI \leq -0.5SD$ |
| 山谷 | 5  |     | $TPI < -1.0SD$             |

注: SD表示邻域内高程的标准差。  
Note: SD represents the standard deviation of elevation in the surrounding areas.

1.2.4 地形因子提取

研究在探讨坡位与石漠化的内在关联机制时,选择坡度、坡向与地形切割深度等与坡位相关联的地形因子作为参考因子。基于 DEM 数据,提取坡度图、坡向图、地形切割深度图。其中,坡度与坡向直接用 ArcGIS 软件中的 Slope 和 Slope aspect 工具包提取,汤国安等<sup>[34]</sup>认为自然断裂法能很好地揭示地

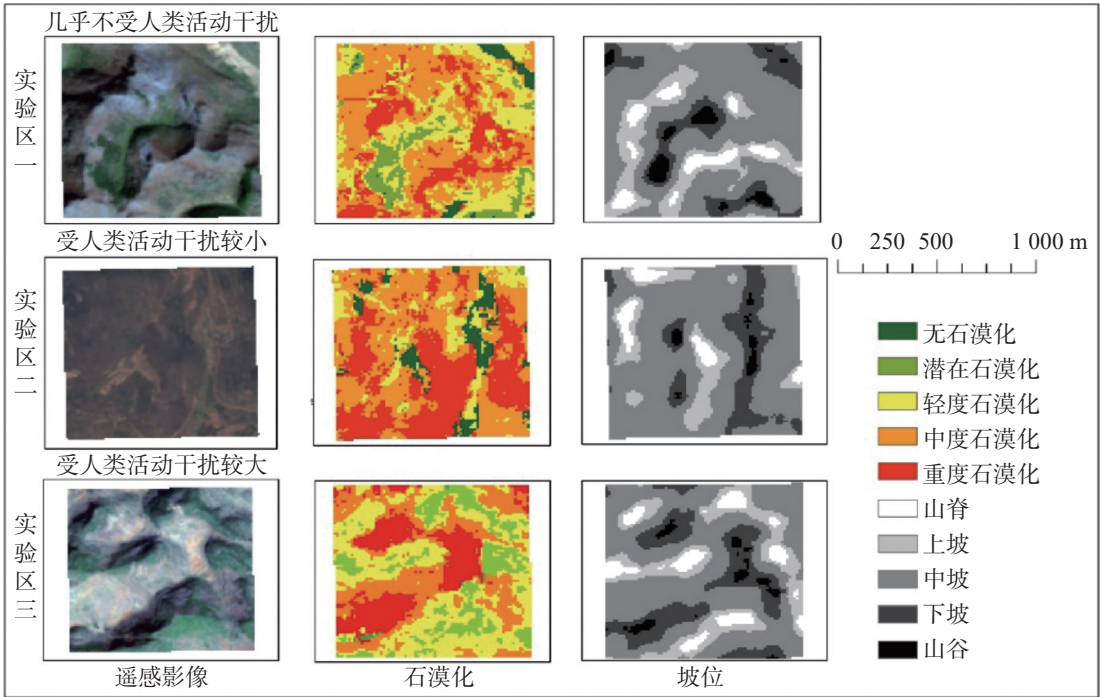


图 2 1 km×1 km 实验小区遥感影像、石漠化程度及坡位分级图

Fig. 2 Remote sensing image, degree of rocky desertification and classification of slope positions of each experimental area of 1 km×1 km

形类型分类与分布情况,可以有效地提取地貌类型界线,参考周忠发、韦金丽等<sup>[33-35]</sup>的坡度、坡向分级标准,结合滇东南喀斯特山区地形跌宕起伏以及实验区面积较小的特点,将研究区的坡度与坡向按自然断裂点连续分为 9 级(坡度按  $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ,  $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ,  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ,  $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,  $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,  $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,  $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,  $45^{\circ}\sim 52^{\circ}$ ,  $>52^{\circ}$  划分;坡向按北、西北、西、西南、南、东南、东、东北及平坡划分),并分别赋值为 1~9;地形切割深度采用  $3\times 3$  邻域内高程平均值与最低值的差值计算,公式如下<sup>[36]</sup>:

$$Q = Z_{mean} - Z_{min} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为地形切割深度;  $Z_{mean}$  为邻域内的高程均值;  $Z_{min}$  为邻域内的高程最低值。

#### 1.2.5 石漠化与坡位关联机制研究方法——通径分析

探讨两变量之间的相关系数,往往不能准确说明两变量之间真正的关系<sup>[37]</sup>。因为在自然界多变量系统中,两个变量之间的关系会受其他变量的影响。为探讨坡位与石漠化的真实线性相关关系,研究引入其他地形方面的关联因子——坡度、坡向、地形切割深度,采用通径分析法深入探讨坡位对石漠化程度的内在影响机制。

通径分析法是研究多个自变量与因变量间关系的一种重要统计方法,它是标准化的多元线性回归方程;通径分析法的原理是建立回归方程,把  $x_i$  对  $y$  的总作用  $r_{iy}$  (相关系数) 剖分为两部分:一是  $b_i$  (偏回归系数) 即  $x_i$  对  $y$  的直接作用,它是  $x_i$  对  $y$  ( $x_i \rightarrow y$ ) 的直接通径系数;二是  $r_{ij}b_j$  即  $x_i$  通过  $x_j$  对  $y$  ( $x_i \rightarrow x_j \rightarrow y$ ) 的间接作用 ( $i \neq j$ ), 称为  $x_i$  通过  $x_j$  对  $y$  的间接通径系数<sup>[37]</sup>。

$$\begin{cases} r_{1y} = b_1 + r_{12}b_2 + \cdots + r_{1n}b_n \\ r_{2y} = r_{21}b_1 + b_2 + \cdots + r_{2n}b_n \\ r_{ny} = r_{n1}b_1 + r_{n2}b_2 + \cdots + b_n \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $r_{iy}$  为  $x_i$  与  $y$  的相关系数;  $b_i$  是  $x_i$  的偏回归系数;  $r_{ij}$  为  $x_i$  与  $x_j$  的相关系数,  $i, j = 1, 2, \cdots, n$ 。

通径分析可用于检验各自变量是否对因变量  $y$  产生显著影响。直接通径系数能反映自变量对因变量在不受其他因子干扰时的最直接影响,值越大表示该变量对因变量的直接影响越大,反之越小;间接通径系数表示一个变量通过另一个变量对因变量的影响,即该变量对因变量的影响受到另一个变量作

用的程度。直接通径系数与间接通径系数的正负性则与相关性的正负性含义一致,正系数表示各变量对因变量具有正向影响,负系数则为负向影响<sup>[37-39]</sup>。与相关性分析不同,单纯地计算变量间的相关关系,可能会存在相关关系虚高,即直接通径系数小、间接通径系数大的情况。通径分析可以看出  $x_i$  如何直接影响或如何通过其他变量间接影响因变量  $y$ , 这种影响力更具有客观性,更能说明因变量受自变量影响的规律。

## 2 结果分析

### 2.1 石漠化沿坡位的分布规律

#### 2.1.1 不同坡位的石漠化面积分布特点

将位于广南县东部、南部以及西部地区的 3 个  $10\text{ km}\times 10\text{ km}$  实验区石漠化数据与坡位数据叠加,用不同坡位石漠化或非石漠化的面积除以实验区石漠化或非石漠化总面积,分析石漠化沿坡位的分布规律。整体来看,石漠化(含轻度石漠化、中度石漠化与重度石漠化)面积比例从高坡位到低坡位呈下降趋势,下坡位处有较大波动,而非石漠化(含潜在石漠化以及无石漠化)面积比例则呈现上升趋势,且上升趋势波动较小。山脊的石漠化面积占石漠化总面积的 25.13%,而在山谷只占 14.96%;山脊的非石漠化面积只占非石漠化面积的 13.99%,而在山谷则占 27.96%(图 3),说明石漠化主要发生在山脊等高坡位范围,非石漠化主要分布在山谷等低坡位范围。

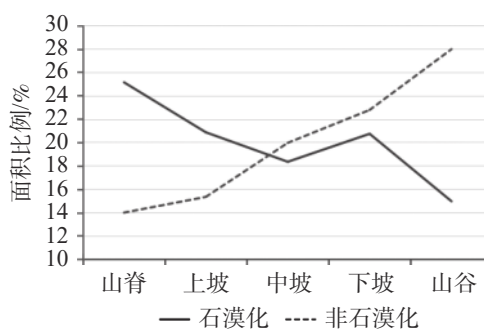


图 3  $10\text{ km}\times 10\text{ km}$  中不同坡位的石漠化面积比例(%)

Fig. 3 Ratio of rocky desertification area at different slope position in  $10\text{ km}\times 10\text{ km}$  (%)

#### 2.1.2 不同坡位的石漠化程度及分布特点

东部实验区的石漠化面积最大,占实验区总面

积的 63.26%。其中,中度石漠化面积最大,占 34.25%,主要发生在上坡、下坡、山脊;其次为轻度石漠化,占实验区总面积的 21.40%,在各坡位中分布

较为平均,但以上坡分布比例稍多;而重度石漠化较少,仅占总面积的 7.62%,主要分布在中坡、上坡和山脊(表 3)。

表 3 10 km×10 km 实验区石漠化面积与实验区总面积比例 (%)

Table 3 Ratio of rocky desertification area of 10 km×10 km to the total area of the experimental area (%)

| 实验区   | 石漠化程度 | 山脊   | 上坡   | 中坡   | 下坡   | 山谷   | 各石漠化总和 | 总和    |
|-------|-------|------|------|------|------|------|--------|-------|
| 东部实验区 | 轻度石漠化 | 3.82 | 5.51 | 3.73 | 4.66 | 3.68 | 21.40  | 63.26 |
|       | 中度石漠化 | 7.52 | 7.79 | 5.58 | 8.53 | 4.83 | 34.25  |       |
|       | 重度石漠化 | 1.63 | 1.97 | 2.34 | 1.02 | 0.66 | 7.62   |       |
| 南部实验区 | 轻度石漠化 | 8.18 | 4.64 | 4.70 | 5.43 | 3.16 | 26.11  | 46.39 |
|       | 中度石漠化 | 2.31 | 2.31 | 1.21 | 1.07 | 0.63 | 7.54   |       |
|       | 重度石漠化 | 1.90 | 1.07 | 6.69 | 1.88 | 1.20 | 12.74  |       |
| 西部实验区 | 轻度石漠化 | 7.45 | 3.93 | 3.94 | 4.81 | 3.63 | 23.76  | 51.98 |
|       | 中度石漠化 | 4.42 | 4.42 | 2.64 | 4.16 | 3.73 | 19.37  |       |
|       | 重度石漠化 | 1.45 | 1.78 | 1.90 | 1.40 | 2.32 | 8.85   |       |

南部实验区石漠化程度较低,仅占实验区总面积的 46.39%,以轻度石漠化(26.11%)为主,主要集中在山脊;其次为重度石漠化,面积比例为三个实验区中最大(12.74%),主要分布在中坡位;而中度石漠化面积较低(7.54%),主要集中在山脊和上坡位(表 3)。

西部实验区的石漠化面积超过了实验区总面积的一半,为 51.98%,其中多为轻度石漠化,面积比例达 23.76%,主要发生在山脊;中度石漠化占实验区总面积的 19.37%,且在各坡位中分布较为平均;重度石漠化面积最少,为 8.85%,主要分布在山谷与中坡(表 3)。

总之,三个实验区的轻度石漠化多发生在山脊和上坡,中度石漠化多发生在山脊、上坡和下坡,而重度石漠化总面积比例稍低,在各个坡位都有可能发生。因此,需要进一步分析石漠化程度与坡位的内在关联机制,从而确定石漠化与坡位的关系。

2.2 石漠化程度与坡位因子的内在关联

2.2.1 石漠化与坡位因子的相关性分析

基于 3 个 1 km×1 km 的实验小区的数据,引入坡度、坡向、地形切割深度作为参考的关联因子,采用通径计算各实验小区石漠化与关联因子间的相关性,以及直接通径系数与间接通径系数。对石漠化数据进行正态分布的检验,三个实验小区的 K-S 检验均超过了 0.2(样本数均>5 000),符合标准化回归

的要求<sup>[33]</sup>。

从实验小区石漠化与各因子之间的相关系数看(表 4),各因子中,3 个实验小区坡位因子与石漠化的相关性最高,其中几乎不受人干扰和人为干扰较少的两个实验小区都是负相关,即在自然状态下,石漠化程度沿山脊向山谷逐渐降低,这与上述分析的石漠化面积沿坡位的分布规律一致。而人为干扰较大的实验小区 3 中,坡位因子与石漠化程度呈正相关,即石漠化程度沿山脊向山谷逐渐增强;三个实验区的坡向、坡度以及地形切割深度与石漠化的相关系数较低,相关性均低于坡位因子。

表 4 1 km×1 km 实验小区石漠化与关联因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between rocky desertification degree and related factors in each experimental area of 1 km×1 km

| 因子     | 实验小区1<br>(几乎不受<br>人类干扰) | 实验小区2<br>(受人类干<br>扰较小) | 实验小区3<br>(受人类干<br>扰较大) |
|--------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 坡位     | -0.427                  | -0.312                 | 0.555                  |
| 坡向     | -0.051                  | -0.098                 | -0.083                 |
| 坡度     | 0.107                   | 0.286                  | -0.281                 |
| 地形切割深度 | 0.130                   | 0.304                  | -0.316                 |

2.2.2 石漠化与坡位因子的关联机制分析

将相关系数拆解成直接通径系数与间接通径系数,进一步分析石漠化与坡位的内在关联。从坡向、

坡度以及地形切割深度因子通过坡位因子作用于石漠化的间接途径系数来看,虽然其数值正负与坡位的直接途径系数相同,具有通过坡位影响石漠化的作用,但数值较小(都小于0.05),坡位自身的直接与间接作用对石漠化的影响比重仍然较大(图4)。从

坡位的直接途径系数上看,与相关系数保持较高的一致性,说明坡位因子本身对石漠化程度的作用较强,不存在坡位与石漠化程度相关关系虚高的情况。不同的实验小区中,坡位对石漠化的直接或间接作用也有差异。

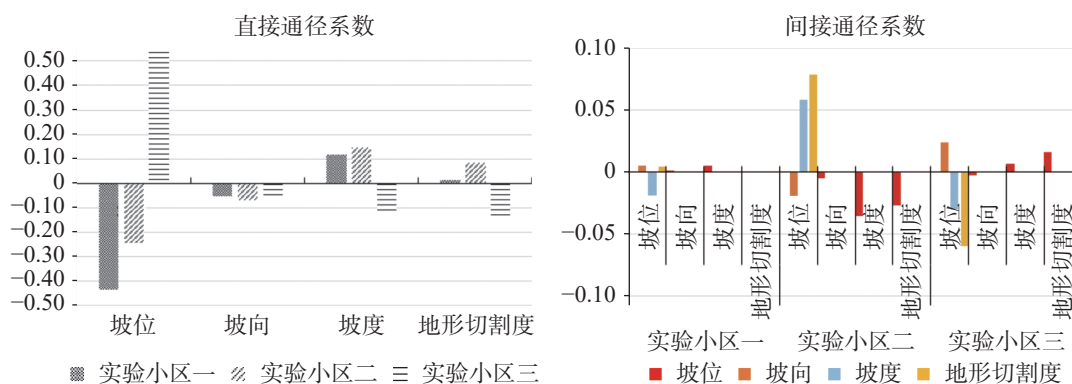


图4 1 km×1 km 实验小区石漠化与各因子的途径系数

Fig. 4 Path coefficient of rocky desertification degree and each factor in each experimental area of 1 km×1 km

在实验小区1中,区域几乎不受人干扰时,坡位对石漠化的直接作用较大且呈负关联,直接途径系数为-0.433,说明该区坡位越低,石漠化程度越低,即山谷的石漠化程度比山脊的石漠化程度低。此时坡位的间接途径系数都很小,几乎可以忽略不计;在实验小区2中,区域受人干扰较轻时,坡位对石漠化的直接作用在各因子中较大,直接途径系数为-0.243,仍是负关联。坡位的间接途径作用主要包括坡度与地形切割深度的正影响,最终影响石漠化程度,坡向导致的干扰极小,仅有-0.019,其中坡位通过地形切割深度与坡度对石漠化的间接正作用分别达到了0.079与0.058,坡位越高,伴随着地形切割深度与坡度变大,由此石漠化的程度也随即加深;在实验小区3中,区域受人干扰较大时,坡位对石漠化的直接作用最大,直接途径系数达到了0.535,且为正关联,石漠化与坡位的关系表现为极显著相关,说明从山脊到山谷,石漠化的程度越来越严重;同时,坡位还受坡度和地形切割深度的间接负影响,最终影响到石漠化程度。坡位越低,伴随坡度与地形切割深度变小,引起石漠化程度加深。坡位通过坡向对石漠化的影响较低,只有0.024,远小于坡位本身的直接作用,故可以忽略坡向的干扰。

总之,与坡向、坡度和地形切割深度等地形因子相比,坡位对石漠化的直接作用在3个实验小区中都最强。坡位通过本身的直接作用以及坡度和地形

切割深度的间接作用,共同影响石漠化程度。

### 3 讨论

#### 3.1 石漠化影响因子与研究尺度讨论

通过实地考察发现,喀斯特地区地貌构造比较复杂,不能将众多石漠化区域的驱动因子作为坡位与石漠化的参考关联因子,需要根据研究区域地理环境进行相关研究<sup>[28]</sup>。喀斯特山区特殊的地形、地貌因素直接影响了自然生态环境,导致坡位、坡度、坡向和地形切割深度等地理环境因子的多样性和复杂性<sup>[40]</sup>。选择坡度、坡向和地形切割深度作为坡位的关联因子,能更好地从地形角度探讨石漠化与坡位的关系。但从回归分析的结果来看,三个实验区坡位与石漠化发育程度的拟合度分别为0.202、0.167、0.378,  $R^2$  的值较低,说明在研究坡位与石漠化发育程度的关联机制时,仍有其他影响较大的因子未考虑,在下一步的研究中将考虑增加一些人类活动相关的因子,完善坡位与石漠化发育程度关联机制的研究。

大部分石漠化研究的尺度以流域尺度或者行政单元等大、中型尺度为主,研究区面积从几十平方千米到几千平方千米不等<sup>[8, 18, 28, 41]</sup>。在前期的实验中,以10 km×10 km的大实验区展开研究时,人类活动以及自然等各种因素相互交叉,信息冗杂,无法探讨

坡位与石漠化真正的内在关联,因为坡位研究的尺度多以样地或者单一山坡等小、微型尺度为主,通过在微地形与小生境尺度下选取不同坡位样地,探讨坡位对某一自然现象带来的差异,如不同坡位的土壤养分、植物多样性变化规律研究等<sup>[42]</sup>,故研究石漠化与坡位的关系时,必须统一研究尺度。一方面,在不同坡位选取样地的方式,空间上存在割裂性,不利于研究坡位与石漠化的连续关系;另一方面,喀斯特石漠化是一个综合的自然环境,是由多种地形、地貌以及人类活动因素相互作用形成的,流域、行政区尺度过大则会使坡位与石漠化的关联受到更多其他的因素的干扰,不利于结果的准确<sup>[24, 41]</sup>。基于此,综合考虑并结合实际操作结果,在尺度的选择上采用了大样方的理念,即先找出 3 个 10 km×10 km 的石漠化严重区域整体分析不同坡位的石漠化面积、程度分布特点;再从中选取 1 km×1 km 坡位分布完整、人为干扰情况不同的典型区域,进一步研究不同人为干扰情况的石漠化发育程度与坡位的内在关联机制。这样既保证了坡位与石漠化关系的连续性需要尽可能大的研究区面积的要求,又充分考虑坡位在小、微地形的变化以及最大程度地减少其他因子的影响需要研究区面积尽可能小的要求。

### 3.2 石漠化沿坡位分布规律讨论

从上述分析发现,山脊到山谷石漠化面积逐渐降低,而非石漠化面积逐渐上升,石漠化主要分布在坡位高的地方。自然分布情况下,坡位作用机理特征表明物质会在山脊流失,在山谷区域出现堆积现象。在石漠化地区,这种现象更显著,土壤等物质在山脊流失,而在山谷有一定留存。且不同的坡位位置其土壤的化学物理性质变异明显,其中包括对水土流失和养分流失的影响,而养分条件与水热条件的差异是造成这种小尺度微地形上景观差异的主要原因<sup>[23, 43]</sup>。Gregorich 等<sup>[44]</sup>在 1985 年发现土壤有机质含量具有从坡顶到坡脚逐渐增加,土层有逐渐增厚的特点;张盼盼等<sup>[45]</sup>分析了石漠化发生率与坡位因子之间的相关性,也发现极容易发生石漠化的面积变化与坡位之间存在显著线性负相关。这与本文石漠化程度沿坡位的分布情况类似,自然情况下,石漠化沿坡位应该呈现从山脊到山谷,石漠化程度逐渐降低的规律,表明即使该地没有人类活动,山脊的石漠化经时间演变会愈发严重。但是,这一自然现

象在受到人为干扰时会出现不同,即出现石漠化面积比例沿坡位在下降而升高的情况。人类活动加速了下坡位堆积的土壤消耗,引起了石漠化沿坡位分布规律的异常。由于喀斯特山区土地资源的短缺,下坡位区域存在开垦或者过度利用的现象,使本来水土侵蚀强烈的区域加速了土壤养分的流失。坡位对石漠化的影响主要体现在不同坡位养分与水热差异较大,高坡位地区生境恶劣,在降雨冲刷下更易发生片流侵蚀,导致土壤厚度变薄,土壤不断流失,最终从灌木林地、草地退化到荒地,石漠化程度加剧,而低坡位地区,如果人为干扰小,则由于物质堆积,土层一般较厚;如果人为干扰稍大,由于农业开发利用强度的增大和不合理地利用土地,使下坡位更易发生石漠化<sup>[40]</sup>。

### 3.3 石漠化与坡位的关联机制讨论

坡位与石漠化的通径分析表明,石漠化与坡位具有较强关联性,而坡位与石漠化的内在关联机制在不同的人类活动强度下有所差异(图 5)。

当几乎不受人干扰以及当人为干扰较轻时,坡位与石漠化程度的直接关系为显著负关联,山脊的石漠化程度更严重。当几乎不受人干扰时,坡位对石漠化的直接作用非常明显,坡向、坡度以及地形切割深度对坡位与石漠化的关系影响极小。自然情况下,坡位对石漠化的影响主要取决于自身的直接作用,几乎不受其他因子的干扰;人为干扰较轻时,除自身的直接作用外,坡位往往会通过坡度与地形切割深度正作用间接影响石漠化。沿山谷到山脊,伴随坡度与地形切割深度变大,高坡位存在更陡峭、地表侵蚀更严重的情况,进而导致石漠化程度也变高。白云星等对贵州省后寨河小流域进行石漠化研究时,也发现不同坡位的岩石裸露率差异较大,具有从洼地到坡顶,平均岩石裸露率逐渐增大的规律<sup>[40]</sup>。由于该区存在车辆往来的盘山公路以及放牧,导致土壤侵蚀加重,加速水土流失,在山脊部位的物质更易流失,坡度与地形切割深度同时促进了高坡位的物质迁移<sup>[43]</sup>。

当人为干扰较强时,坡位与石漠化程度呈显著正关联,从山脊到山谷,石漠化程度越来越严重。此时坡位主要通过坡度与地形切割深度的副作用间接影响石漠化,坡位沿山脊到山谷,坡度与地形切割深度变小,引起石漠化程度变高。区域受到较强的人

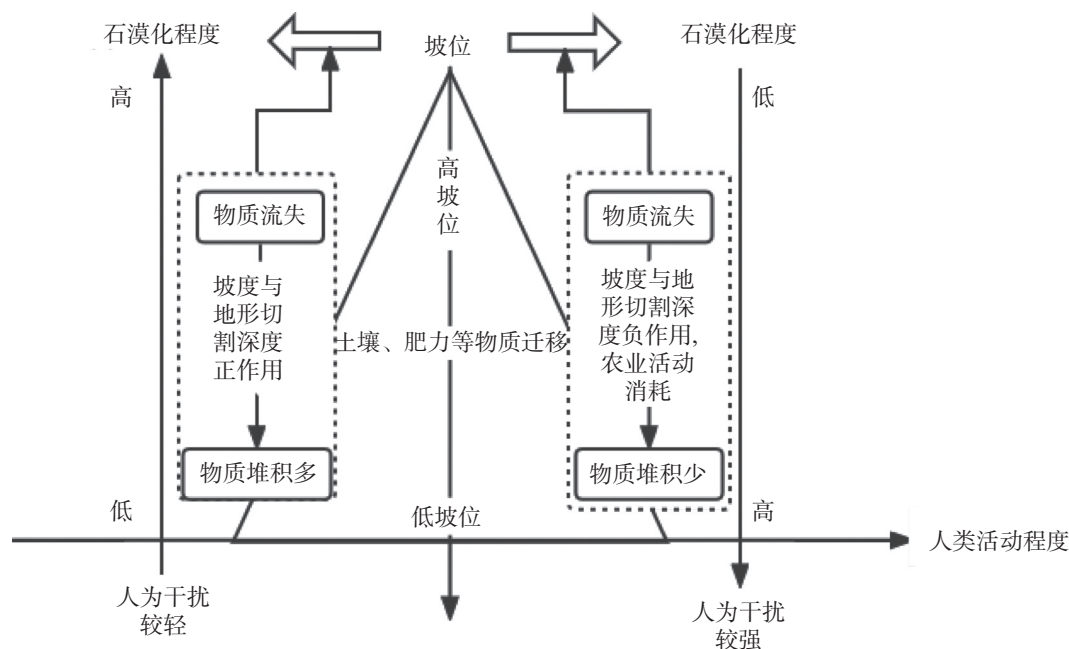


图5 坡位因子与石漠化程度的关联机制

Fig. 5 Correlation mechanism between slope position factors and rocky desertification degrees

类干扰时,农业活动强烈,因低坡位坡度小,地势平缓、水土流失不严重,地表因侵蚀而造成的沟壑少,适合耕种,导致山谷富集区的石漠化发生速度反而比山脊流失区的更快,同时坡度与地形切割深度由于人类活动也会促进低坡位所堆积的物质流失。在主观认知和行为的作用下,人们会优先选择地势平坦的低坡位区域进行农业生产活动,这些区域土壤厚且养分高,如果耕作者不采取一些措施来保护土地资源,农业生产活动中所破坏的地表植被,在降雨作用下失去了对土壤的截留与固定,造成严重的水土流失,加速低坡位石漠化的发生<sup>[28]</sup>。

虽然研究区的石漠化分布特点以及人类活动强度各有不同,导致坡位与石漠化的关联有正有负,但是坡位对石漠化的影响在关联因子中仍是最大的,坡位因子在喀斯特山区石漠化驱动因子分析中不容忽视。

#### 4 结 论

(1)石漠化面积方面,实验区石漠化面积占比沿坡位从山脊到山谷逐渐降低,而非石漠化面积比例逐渐升高。石漠化发育程度方面,轻度石漠化多发生在山脊和上坡,中度石漠化多发生在山脊与上坡、下坡,而重度石漠化面积总比例稍低,各个坡位都有可能发生。

(2)各地形因子中,坡位因子与石漠化程度的相关性最显著,直接影响着石漠化的分布规律;坡位对石漠化发生程度的影响主要包括因子本身的直接作用,以及坡度与地形切割深度因子的间接强化作用。

(3)当区域以自然演化状态为主时,坡位与石漠化发育程度的关系为负关联,坡位越高,伴随坡度与地形切割深度变大,导致高坡位区域物质迁移更加频繁,石漠化的程度加剧;当区域人类活动影响明显时,坡位与石漠化程度呈正关联,坡位越低,随同坡度与地形切割深度较小,人类活动更加方便且频繁,消耗了由高坡位到低坡位的堆积物质,使石漠化发育程度加深。

#### 参考文献

- [1] Yuan Daoxian. Rock desertification in the subtropical karst of South China[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband, 1997, 108: 81-90.
- [2] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.  
WANG Shijie, LI Yangbing, LI Ruiling. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(6): 657-666.
- [3] 蓝安军, 熊康宁, 安裕伦. 喀斯特石漠化的驱动因子分析: 以贵州省为例[J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 19-23.  
LAN Anjun, XIONG Kangning, AN Yulun. Analysis on driving factors of karst rock-desertification: With a special reference to

- Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(6): 19-23.
- [4] 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 Shijie. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 101-105.
- [5] 张殿发, 王世杰, 周德全, 李瑞玲. 土地石漠化的生态地质环境背景及其驱动机制: 以贵州省喀斯特山区为例[J]. *农村生态环境*, 2002, 18(1): 6-10.
- ZHANG Dianfa, WANG Shijie, ZHOU Dequan, LI Ruiling. Eco-geo-environment of rocky desertification and its driving mechanism: A typical example in karst mountainous areas of Guizhou Province[J]. *Rural Eco-environment*, 2002, 18(1): 6-10.
- [6] 胡宝清, 廖赤眉, 严志强, 蒋树芳, 黄秋燕, 李生明. 基于 RS 和 GIS 的喀斯特石漠化驱动机制分析: 以广西都安瑶族自治县为例[J]. *山地学报*, 2004, 22(5): 583-590.
- HU Baoqing, LIAO Chimei, YAN Zhiqiang, JIANG Shufang, HUANG Qiuyan, LI Shengming. Diving mechanism diagnosis of karst rocky desertification in Du'an Yao Autonomous County of Guangxi based on RS and GIS[J]. *Mountain Research*, 2004, 22(5): 583-590.
- [7] 史迎春, 舒英格. 喀斯特石漠化时空变化特征及驱动因子分析: 以贵州晴隆县为例[J]. *林业资源管理*, 2017(1): 135-143, 152.
- SHI Yingchun, SHU Yingge. Analysis on karst rocky desertification temporal and spatial variation characteristics and driving factors: A case study of Qinglong county of Guizhou Province[J]. *Forest Resources Management*, 2017(1): 135-143, 152.
- [8] 苏成杰, 岳涛, 蒋霖, 周海峰, 王文贯, 罗国夫. 喀斯特石漠化与人文驱动因素相关性研究: 以广西为例[J]. *广西科学*, 2018, 25(6): 709-714.
- SU Chengjie, YUE Tao, JIANG Lin, ZHOU Haifeng, WANG Wenguan, LUO Guofu. Correlation research between karst rocky desertification and human activities: A case of Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(6): 709-714.
- [9] Yan X, Cai Y L. Multi-scale anthropogenic driving forces of karst rocky desertification in Southwest China[J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(2): 193-200.
- [10] Liu Y, Wang J, Deng X. Rocky land desertification and its driving forces in the karst areas of rural Guangxi, Southwest China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 5(4): 350-357.
- [11] 吴协保, 孙继霖, 林琼, 吴照柏. 我国西南岩溶石漠化土地生态建设分区治理思路与途径探讨[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(4): 391-396.
- WU Xiebao, SUN Jilin, LIN Qiong, WU Zhaobai. Research on division treatment to eco-construction of karst rock deserted land in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(4): 391-396.
- [12] 田秀玲, 倪健. 西南喀斯特山区石漠化治理的原则、途径与问题[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 532-539.
- TIAN Xiuling, NI Jian. Comprehensive treatment of rocky desertification in karst mountainous areas, Southeast China: Fundamental approach and issues[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(4): 532-539.
- [13] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 王克林, 曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. *生态学报*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- SONG Tongqing, PENG Wanxia, DU Hu, WANG Kelin, ZENG Fuping. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [14] 党宇宁, 南亲江, 吴虹. 坡度因子对喀斯特石漠化的影响[J]. *地质学刊*, 2016, 40(4): 674-677.
- DANG Yuning, NAN Qinjiang, WU Hong. Effects of slope factors on karst rocky desertification[J]. *Journal of Geology*, 2016, 40(4): 674-677.
- [15] 周梦维, 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化小流域景观的空间因子分析: 以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. *地理研究*, 2007, 26(5): 897-905, 1070.
- ZHOU Mengwei, WANG Shijie, LI Yangbing. Spatial factor analysis of karst rocky desertification landscape patterns in Wangjiazhai catchment, Guizhou[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(5): 897-905, 1070.
- [16] 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: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2004.
- LI Ruiling. The nature settings and their diversity in different regions in the progressing of rocky desertification in Guizhou karst area[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [17] Huang X F, Zhou Y C, Wang S J, Zhang Z M. Occurrence mechanism and prediction of rocky land degradation in karst mountainous basins with the aid of GIS technology, a study case in Houzhai river basin in Southwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(6): 217.
- [18] Zhang Z M, Zhou Y C, Wang S J, Huang X F. Spatial distribution of stony desertification and key influencing factors on different sampling scales in small karst watersheds[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(4): 743.
- [19] 李乡旺, 陆素娟. 云南石漠化区划研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2019, 39(2): 1-10.
- LI Xiangwang, LU Sujuan. Regionalization of stony desertification in Yunnan Province[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2019, 39(2): 1-10.
- [20] 张贵, 周翠琼, 王波, 顾维芳, 戴文敏, 张文鉴. 滇东南岩溶区找水打井经验: 以云南省广南县珠琳地区为例[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(5): 626-632.
- ZHANG Gui, ZHOU Cuiqiong, WANG Bo, GU Weifang, DAI Wenmin, ZHANG Wenjun. Experiences of well drilling for water search in karst areas of southeastern Yunnan Province: An

- example of the Zhulin area, Guangan county[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(5): 626-632.
- [21] 李阳兵, 罗光杰, 白晓永, 王永艳, 王世杰, 谢静, 杨广斌. 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系: 案例研究[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2195-2207.  
LI Yangbing, LUO Guangjie, BAI Xiaoyong, WANG Yongyan, WANG Shijie, XIE Jing, YANG Guangbin. The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification: Cases study based on typical peak-cluster depression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2195-2207.
- [22] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 岳启发, 陈星宇, 石小倩. 滇东南喀斯特区域生态脆弱性时空演变与影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2180-2190.  
WANG Qian, ZHAO Xiaoqing, PU Junwei, YUE Qifa, CHEN Xingyu, SHI Xiaoqian. Spatial-temporal variations and influencing factors of eco-environment vulnerability in the karst region of southeast Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2180-2190.
- [23] 王德炉. 喀斯特石漠化的形成过程及防治研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.  
WANG Delu. Study on karst rocky desertification forming process and its control technology[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2003.
- [24] 贾少华, 李军峰, 王智慧, 张朝晖. 喀斯特山区公路石漠化边坡苔藓生态功能[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1928-1934.  
JIA Shaohua, LI Junfeng, WANG Zhihui, ZHANG Chaohui. Ecological function of bryophyte on karst rocky desertification slopes along mountainous roads[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1928-1934.
- [25] 许尔琪. 基于地理加权回归的石漠化影响因子分布研究[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1975-1988.  
XU Erqi. Spatial variation in drivers of karst rocky desertification based on geographically weighted regression model[J]. *Resources Science*, 2017, 39(10): 1975-1988.
- [26] 王玉红, 高儒学, 戴全厚, 甘艺贤, 姚一文. 喀斯特区石漠化坡耕地产流产沙模拟试验[J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2021, 19(4): 78-86.  
WANG Yuhong, GAO Ruxue, DAI Quanhong, GAN Yixian, YAO Yiwen. Simulation experiment on runoff and sediment yield in sloping farmland in the rocky desertification of karst region[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(4): 78-86.
- [27] 李森, 董玉祥, 王金华. 土地石漠化概念与分级问题再探讨[J]. 中国岩溶, 2007, 25(4): 279-284.  
LI Sen, DONG Yuxiang, WANG Jinhua. Re-discussion on the concept and classification of rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 25(4): 279-284.
- [28] 王明明, 王世杰, 白晓永, 李世杰, 李汇文, 操玥, 胡慧鹏. 典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6083-6097.  
WANG Mingming, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, LI Shijie, LI Huiwen, CAO Yue, HU Huipeng. Evolution characteristics of karst rocky desertification in typical small watershed and the key characterization factor and driving factor[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 6083-6097.
- [29] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 安裕伦, 吕涛, 蓝安军. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究: 以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 23-28.
- [30] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 李思楠, 苗培培. 滇东南喀斯特区域石漠化时空格局演变研究: 以广南县为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 707-717.  
WANG Qian, ZHAO Xiaoqing, PU Junwei, LI Sinan, MIAO Peipei. Study on temporal and spatial pattern evolution of karst rocky desertification region of southeast Yunnan: A case study of Guangan county[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 707-717.
- [31] 中国国家林业与草原局. LY/T 1840—2020 喀斯特地区植被恢复技术规程[S]. 2020.  
National Forestry and Grassland Administration of China. LY/T 1840—2020 Technology regulations of vegetation restoration in karst zone[S]. 2020.
- [32] WEISS A. Topographic position and landforms analysis[Z]. Poster presentation, ESRI User Conference, 2001.
- [33] 韦金丽, 王国波, 凌子燕. 基于高分辨率 DEM 的地形特征提取与分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(1): 33-36.  
WEI Jinli, WANG Guobo, LING Ziyang. The extraction and analysis of landform characters based on high-resolution DEM[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2012, 35(1): 33-36.
- [34] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 157-161.  
TANG Guoan, SONG Jia. Comparison of slope classification methods in slope mapping from DEMs[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 157-161.
- [35] 周忠发. 喀斯特地区石漠化与地形坡度的关系分析: 以贵州省清镇市为例[J]. 水土保持通报, 2006, 24(5): 1-3.  
ZHOU Zhongfa. Analysis of relation of rock desertification to landform and gradient in karst region: A case study of Qingzhen City of Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 24(5): 1-3.
- [36] 王毅, 郭跃. 喀斯特地貌区植被覆盖与地形因子的空间关系分析: 以贵州普定县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 157-167.  
WANG Yi, GUO Yue. Analysis of spatial correlation between vegetation coverage and terrain factors in karst landform: Taking Puding area in Guizhou for example[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(1): 157-167.
- [37] Gao Sheng, Zhao Lin, Sun Huihui, Cao Guangxi, Liu Wei. Evaluation and driving force analysis of marine sustainable development based on the grey relational model and path analysis[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, 11(6): 570-579.
- [38] 吴淑莲. 城市化与房地产业互动发展关系研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.

- WU Shulian. Research on urbanization and real estate industry interaction development relations[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006.
- [39] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. *生物学通报*, 2010, 45(2): 4-6.
- DU Jiahu, CHEN Zhiwei. A path analysis method using SPSS linear regression[J]. *Biological Bulletin*, 2010, 45(2): 4-6.
- [40] 白云星, 周运超. 贵州省后寨河小流域地形因子、人为干扰与石漠化定量研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7087-7096.
- BAI Yunxing, ZHOU Yunchao. Quantitative relationships among topography anthropogenic disturbance, and rocky desertification in the Houzhai river basin, Guizhou Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(19): 7087-7096.
- [41] 马骊驰, 王金亮, 刘广杰. 滇东南喀斯特典型地区石漠化的空间变化[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 327-333,2.
- MA Lichi, WANG Jinliang, LIU Gunagjie. Spatial variation of rock desertification at typical karst region in southeastern part of Yunnan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5): 327-333,2.
- [42] 龙海飞, 苏维词. 喀斯特石漠化地区不同坡位土壤养分变化分析[J]. *贵州科学*, 2013, 31(3): 30-35.
- LONG Haifei, SU Weici. Analysis on soil nutrient change of different slope positions in karst rocky desertification area[J]. *Guizhou Science*, 2013, 31(3): 30-35.
- [43] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 53-56,60-79.
- GAO Xuesong, DENG Liangji, ZHANG Shirong. Soil physical properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 53-56,60-79.
- [44] Gregorich E G, Anderson D W. Effects of cultivation and erosion on soils of four toposequences in Canadian prairies[J]. *Geoderma*, 1985, 36: 343-354.
- [45] 张盼盼, 胡远满, 肖笃宁, 李秀珍, 殷洁. 地形因子对喀斯特高原山区潜在石漠化景观格局变化的影响分析[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1305-1310.
- ZHANG Panpan, HU Yuanman, XIAO Duning, LI Xiuzhen, YIN Jie. Influences of topographic on change of potential rocky desertification landscape pattern in karst plateau mountain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(6): 1305-1310.

## Correlation mechanism between rocky desertification degrees and slope position factors in karst mountainous area of southeast Yunnan

CHEN Yanjun<sup>1</sup>, ZHAO Xiaoqing<sup>1</sup>, PU Junwei<sup>1,2</sup>, SHI Xiaoqian<sup>1</sup>, FENG Yan<sup>1</sup>, ZHOU Shijie<sup>1</sup>

( 1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China )

**Abstract** As a kind of land degradation phenomenon, rocky desertification is one of the main ecological problems in karst areas in Southwest China. The key to the effective control of rocky desertification is to explore the distribution law and influence mechanism of rocky desertification. Taking three typical experimental areas in the karst mountainous area of southeast Yunnan as the research subjects, we extracted rocky desertification degrees and slope position factors as variables, and analyzed the correlation mechanism between these two variables. We also explored the roles of terrain factors such as slope gradients, slope aspects, terrain cutting depths, etc. in the correlation mechanism in order to further clarify the distribution law of different degrees of rocky desertification at different slope positions under the natural conditions as well as under the human interference. This study provides support for the case study on distribution and influence mechanism of rocky desertification in karst mountainous areas, and provides scientific basis for monitoring and restoring the regional ecological environment.

The results show as follows: (1) The area of rocky desertification decreased gradually from ridge to valley, mainly distributed in the areas in high slope positions. Accordingly, the area of non-rocky desertification increased gradually. Slight rocky desertification mostly occurs along the ridge and on the uphill slope, while moderate rocky desertification mostly occurs at the ridge, and on the uphill and downhill slopes. The heavy rocky desertification is distributed in a uniform way in each slope position. (2) Slope positions are significantly correlated with degrees of rocky desertification, and directly affect the distribution law of rocky desertification. At the same time, the effect of slope positions on rocky desertification is indirectly enhanced by slope gradients and terrain cutting depths. (3) The correlation mechanism between slope positions and degrees of rocky desertification is demonstrated below. If the area is dominated by natural evolution, slope positions are negatively correlated with degrees of rocky desertification. The

higher the slope position is, the greater the slope gradient and the deeper the terrain cutting will be. In this case, the increasing frequency of material migration in the area of high slope position will intensify the degree of rocky desertification. Conversely, the lower the slope position is, the smaller the slope gradient and the terrain cutting will be. In this case, human activities will become more convenient and frequent, which may consume the accumulated materials from the high slope position to the low and intensify the rocky desertification.

The implications of research findings indicate that the geomorphic structure of the karst area is relatively complex according to the field investigation, and relevant research should be carried out based on the geographical environment of the study area. Most studies on rocky desertification have been conducted at a large or medium scale such as at a scale of the river basin or of the administrative unit, and the driving factors of different research scales have different influences on the degrees of rocky desertification. In addition, degrees of rocky desertification in different slope positions are significantly different. In the natural distribution, materials are lost along the ridge and accumulate in the valley. In rocky desertification areas, soil and other materials are lost along the ridge, and some remain in the valley. Furthermore, rocky desertification degrees are significantly correlated with slope positions, and the internal correlation mechanisms between rocky desertification degrees and slope positions are different under different intensities of human activity. Human interference is also an important factor affecting the correlation between slope positions and rocky desertification degrees.

The research results can provide reference for in-depth analysis of the comprehensive influencing mechanism of rocky desertification degrees in karst mountainous areas, and provide basis for rocky desertification control and ecological restoration in mountainous areas.

**Key words** rocky desertification, slope position, path analysis, association mechanism, karst mountainous area

(编辑 张玲)