

DOI: 10.11766/trxb202204190189

杨威, 彭旭东, 戴全厚, 刘婷婷, 许胜兵. 石漠化山区露石岩面流对岩-土界面土壤氮磷淋溶与输入作用的研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 86–97.

YANG Wei, PENG Xudong, DAI Quanhou, LIU Tingting, XU Shengbing. Leaching and Input Effects of Exposed Rock Surface Flow on Soil Nitrogen and Phosphorus at Rock-soil Interface in Rocky Desertification Mountainous Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 86–97.

# 石漠化山区露石岩面流对岩-土界面土壤氮磷淋溶与输入作用的研究\*

杨 威<sup>1, 2</sup>, 彭旭东<sup>1, 2, 3†</sup>, 戴全厚<sup>1, 2, 3</sup>, 刘婷婷<sup>1, 2</sup>, 许胜兵<sup>1, 2</sup>

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025; 3. 贵州喀斯特环境生态系统教育部野外科学观测研究站, 贵阳 550025)

**摘要:** 基岩出露的石漠化区露石岩面在承接降水(含穿透雨)后易形成岩面流, 并携带岩面有机或无机物质输送至岩周土壤中, 对岩-土界面土壤养分变化具有重要影响。为探明岩面流对岩-土界面土壤氮磷的淋溶与输入影响, 选取基岩明显出露的休耕地(1年岩面流作用)、退耕灌草地(5年岩面流作用)和坡耕地(无/少岩面流作用)3种样地, 并分别选择外凸、平直和内凹3种特殊的岩面形状, 研究了距岩面不同水平距离及土层的岩-土界面及非岩-土界面土壤的全氮和全磷变化特征。结果表明: 岩面流对0~10 cm表层岩-土界面土壤氮磷产生输入或淋溶作用, 对10~20 cm层岩-土界面土壤氮磷作用不明显。不同岩面形状形成的岩面流对岩-土界面土壤氮磷的淋溶与输入作用强度依次为: 内凹型>平直型>外凸型。其中, 在1年岩面流作用的休耕地中, 内凹型岩面形成的岩面流对岩-土界面土壤氮素的影响主要表现为淋溶, 而平直型和外凸型岩面表现为输入作用; 不同形状岩面流对岩-土界面土壤磷素的影响均表现为淋溶。然而, 在植被生长较好的退耕灌草地中, 5年岩面流作用下不同形状岩面流对岩-土界面土壤氮磷的影响主要表现为输入。研究结果可为深入认识出露岩石对喀斯特生态系统土壤特性的影响提供科学依据。

**关键词:** 岩面流; 露石形状; 氮磷; 淋溶与输入; 岩-土界面

**中图分类号:** S153.6      **文献标志码:** A

## Leaching and Input Effects of Exposed Rock Surface Flow on Soil Nitrogen and Phosphorus at Rock-soil Interface in Rocky Desertification Mountainous Area

YANG Wei<sup>1, 2</sup>, PENG Xudong<sup>1, 2, 3†</sup>, DAI Quanhou<sup>1, 2, 3</sup>, LIU Tingting<sup>1, 2</sup>, XU Shengbing<sup>1, 2</sup>

(1. College of Forestry, Institute of Soil Erosion and Ecological Restoration, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou University, Guiyang

\* 国家自然科学基金项目(42007067)、贵州省科技计划项目(黔科合基础〔2020〕1Y176)、贵州省科技计划项目(黔科中引地[2022]4022)资助  
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42007067), Guizhou Province Science and Technology Plan Project (No. Guizhou Science and Technology Foundation [2020] 1Y176), Guizhou provincial science and technology development project (QKZDYD [2022]4022).

† 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bjpxd@126.com

作者简介: 杨 威, 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要从事喀斯特土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 1405080356@qq.com

收稿日期: 2022-04-19; 收到修改稿日期: 2022-11-29; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-04-11

550025, China; 3. Guizhou Karst Environmental Ecosystems Observation and Research Station, Ministry of Education, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** 【Objective】After receiving precipitation, exposed rock surface in a rocky desertification area exposed to bedrock is easy to form rock surface flow, which carries organic and inorganic substances on the rock surface to the surrounding soil. This has a significant impact on the change of soil nutrients at the rock-soil interface. 【Method】This study was designed to investigate the effect of rock surface flow on the leaching and input of nitrogen and phosphorus in the soil at the rock-soil interface. Three plots: fallow land (one-year rock surface flow), abandoned irrigated grassland (five-year rock surface flow), and sloping farmland (no/little rock surface flow) with obvious bedrock exposure, were chosen. We chose three special shapes of the rock surface, namely convex, straight, and concave, at different horizontal distances from the rock surface and soil layer to study the variation characteristics of total nitrogen and total phosphorus in the soil at rock-soil interfaces and non-rock-soil interfaces. 【Result】The results indicated that rock surface flow contributed either to the input or leaching of nitrogen and phosphorus in the 0-10 cm surface of the rock-soil interface soil. However, it had a minimal effect on nitrogen and phosphorus in the 10-20 cm deep rock-soil interface soil. The intensity of the leaching and input of nitrogen and phosphorus in the surface soil of the rock-soil interface formed by different rock surface shapes followed concave > straight > convex. In the 1-year fallow land, under the action of rock surface flow, the influence of rock surface flow formed by concave rock surface on soil nitrogen at the rock-soil interface was mainly manifested as leaching, while flat and convex rock surfaces exhibited input effects. Also, the effects of rock surface flow with different shapes on soil phosphorus at the rock-soil interface showed leaching. For the 5-year rock surface flow, the result depicted mainly an input phenomenon. 【Conclusion】These results can provide a scientific basis for further understanding the influence of exposed rock on soil characteristics of the karst ecosystem.

**Key words:** Rock surface flow; Exposed stone shape; Nitrogen and phosphorus; Leaching and input; Rock-soil interface

喀斯特石漠化是指在亚热带脆弱的喀斯特地区中，人类不合理的陡坡开垦、乱砍滥伐和岩石开采等社会经济活动的干扰和破坏，导致土壤侵蚀严重、基岩大规模裸露、土地生产力严重下降、地表出现类似沙漠景观的土地退化过程<sup>[1-4]</sup>。出露岩石与土壤镶嵌分布成为严重石漠化区最显著的特征<sup>[5-6]</sup>。与其他地区相比，在石漠化坡地上土壤呈小块不规则地分布在裸露的岩石和裂缝中，这种出露岩石和土壤的镶嵌增加了地形的复杂性和微生境的多样性，使之呈现出高度的空间异质性<sup>[7-8]</sup>。前期研究认为，裸露的岩石具有负面的生态功能，拦截了喀斯特系统的地表径流，并将大量的水引入地下管网，加重土壤漏失<sup>[9-11]</sup>；且裸露的岩石阻碍了水和养分在土壤之间的流动，这对土壤功能的正常维持构成了挑战。然而，目前已有研究发现，裸露的岩石可以起到“漏斗”的作用，露石形成的岩面流将其接收到的雨水并携带岩面有机或无机物质输入到附近的斑块土壤，从而对露石相邻斑块土壤的水分和部分养分分配产生一定影响<sup>[12-17]</sup>。

氮、磷作为土壤养分循环的核心和主要成分，

在陆地生态系统物质循环、能量流动及养分动态平衡等过程中具有重要意义<sup>[18-20]</sup>。目前，众多学者对喀斯特石漠化区土壤氮磷等养分元素的研究较为深入<sup>[21-22]</sup>，但对出露岩石对岩周土壤氮磷含量的差异性研究相对较少。喀斯特石漠化区大量岩石出露地表，出露岩石形成的岩面流对岩周土壤中氮磷的影响规律还不明确，限制了对喀斯特石漠化生态系统土壤养分循环等重要过程的深入理解和认识。加上石漠化区出露岩石岩面形状多样<sup>[23-24]</sup>，不同岩面形状下形成岩面流的汇集或分散作用不同，而岩面流对岩-土界面土壤氮磷的影响究竟是以岩面流的淋溶作用为主还是输入为主？成为当前亟待证实的一个问题。因此，亟需开展不同露石岩面水文路径对岩-土界面土壤养分淋溶或输入的影响研究，这有助于深入认识出露岩石对喀斯特土壤特性的影响，并促进喀斯特水文生态学学科的进展。本研究采用土壤理化分析法，研究了距岩面不同水平距离及土层的岩-土界面及非岩-土界面土壤的氮磷含量变化特征，揭示岩面流对岩-土界面土壤氮磷淋溶与输入的影响，以为喀斯特石漠化的生态恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于贵州省黔南布依族苗族自治州长顺县甘河村，地理位置为 $26^{\circ}1'30''\text{N}$ 、 $106^{\circ}29'59''\text{E}$ ，该区地势较高，海拔为 $1\,250\sim1\,580\text{ m}$ ，地处中亚热带季风湿润气候区，雨热同季，冬无严寒，夏无酷暑，年均气温 $13.5\sim18.5^{\circ}\text{C}$ ，年均降雨量 $1\,250\sim1\,400\text{ mm}$ 。研究区大量基岩出露地表，岩石裸露率高达80%以上，主要以碳酸盐岩类为主。土壤类型主要以黄壤、紫色土、石灰土和水稻土4个土类为主。土地利用方式主要为坡耕地和弃耕地。长顺县石漠化面积为 $1\,220\text{ km}^2$ ，占全县面积的77.9%，而潜在石漠化占全县土地总面积的25.73%，轻度石漠化占21.12%，中度石漠化占13.42%，重度石漠化占12.35%，石漠化情况较为严重。

### 1.2 试验设计与样品采集

考虑岩面流对岩-土界面土壤氮、磷淋溶效应的明显性，在研究区选择退耕1年休耕地、退耕5年灌草地和坡耕地（对照）3种不同类型的典型石漠化样地，样地土壤类型均为石灰土。基于岩面形状对岩面流的汇集或分散作用不同，在各样地上选择外凸、平直和内凹3种特殊的岩面形状，调查其基本指标（如岩石高度、岩面倾角、岩面汇水面积等），各样地基本情况见表1。根据不同形状岩面的汇流特点，3种岩面形状采样点分别为岩面的最凸点、中间点和最凹点，于每一种岩面形状的岩-土界面处，以岩-土界面处为起点，距岩-土交界面水平每隔 $2\text{ cm}$ 开始采样，即分别采集距岩面 $0\sim2$ 、 $2\sim4$ 、 $4\sim6$ 、 $6\sim8$ 、 $8\sim10\text{ cm}$ 处的岩-土界面土壤和 $20\text{ cm}$ 处非岩-土界面土壤，并分层采集 $0\sim10\text{ cm}$ 和 $10\sim20\text{ cm}$ 层土壤，岩面形态及土壤采样位置示意图见图1。共采集108个土壤样品，将其自然风干并剔除根系等杂质，过 $1\text{ mm}$ 筛后备用。

### 1.3 土壤样品测定与参数计算

取过 $1\text{ mm}$ 筛的土样 $1\text{ g}$ ，采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消煮法消煮后进行测定。采用津岛公司型号为TOC-LCPH/CPN总有机碳分析仪测定样品全氮含量：消煮液经过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜进行过滤后采用火焰燃烧法测定。使用德国DeChem-Tech.GmbH公司的CleverChem ANNA全自动间断化学分析仪采用钼锑抗比色法对消煮液的全磷含量进行测定。

用“富集率（Enrichment ratio）”表示岩面流对岩-土界面土壤养分的富集程度<sup>[25]</sup>：

$$E_r = \frac{C_r - C_{nr}}{C_{nr}}$$

式中， $E_r$ 为富集率； $C_r$ 为岩-土界面土壤全氮/全磷含量； $C_{nr}$ 为非岩-土界面全氮/全磷含量。

### 1.4 数据处理

实验数据采用SPSS19.0软件进行单因素方差分析、主成分分析和多因素分析，同时采用Origin2021软件进行作图。

## 2 结果

### 2.1 不同形状岩面岩-土界面土壤氮磷含量差异

各石漠化样地中，不同形状的岩面对岩面流的汇集作用不同：内凹型>平直型>外凸型，岩-土界面土壤全氮含量差异显著（图2）。在1年岩面流作用的休耕地中，内凹型岩面岩-土界面土壤全氮含量均显著低于平直型和外凸型土壤全氮含量，岩面流对氮素产生淋溶作用。在5年岩面流作用的退耕灌草地和少岩面流作用的坡耕地中，结果与休耕地相反，外凸型岩面岩-土界面土壤全氮含量显著低于平直型和内凹型岩面，岩面流对氮素产生输入作用。不同石漠化样地中不同岩面形状岩-土界面土壤中的全磷含量差异显著，且与全氮含量变化有差异（图3）。在1年岩面流作用下的休耕地中，外凸型岩面在距岩面 $2\sim8\text{ cm}$ 水平距离内的岩-土界面土壤全磷含量显著小于平直型和内凹型岩面，但距岩-土界面水平距离较远处的土壤全磷含量变化规律不明显。在退耕灌草地和坡耕地中，不同形状岩面岩-土界面土壤全磷含量有显著差异但无明显变化规律。

结果表明，不同形状的露石对岩-土界面土壤全氮和全磷含量影响有显著差异，其主要原因在于不同形状的露石对岩面流的汇集作用不同，外凸型、平直型和内凹型岩面对岩面流的汇集作用的顺序从强到弱为：内凹型、平直型和外凸型，使得岩面流对岩土界面土壤氮磷的淋溶或输入作用程度不同，从而导致岩-土界面土壤全氮和全磷含量有显著差异。同时，由于三种石漠化样地在岩面流作用时间及上覆植被的不同，岩面流对岩-土界面氮磷的输入和淋溶作用不同。

表1 不同石漠化样地的基本情况

Table 1 Basic information of different rocky desertification sample plots

样地类型 Land use type	退耕年限 Conversion period/a	岩石形态 Rock morphology	地理位置 Geographical position	海拔 Altitude/m	植被覆 盖度 Vegetation coverage/%	岩石裸 露率 Rock exposure rate/%	岩石汇 水面积 Rock catchment area/cm <sup>2</sup>	岩石汇 水高度 Rock height cm	岩石倾角 Rock dip/ °	岩石轨迹 长度 Rock track length/cm	植被状况 Vegetation status
耕地 farmland	休耕地 Fallow	外凸 Plat	26°1'30"N, 106°30'0"E	1 003	65	35	1 524	50	46	63	小蓬草 ( <i>Erigeron canadensis</i> L.)、鬼 针草 ( <i>Bidens pilosa</i> L.)、清明菜 ( <i>Gnaphalium affine</i> D.Don)、苣荬菜 ( <i>Sonchus wightianus</i> DC.)、花椒 ( <i>Zanthoxylum bungeanum</i> Maxim.)
	平直 Plat	26°1'30"N, 106°29'59"E					326	41	77	51	
	内凹 Inlet	26°1'31"N, 106°29'59"E					4 289	70	42	60	
	灌草地 Shrubby	26°1'30"N, 106°29'59"E	1 005	60	45	628	114	76	73	风龙 ( <i>Sinomenium acutum</i> ( Thunb. ) Rehd. et Wils. )、秋葵 ( <i>Abelmoschus esculentus</i> ( Linn. ) Moench)、鬼针草 ( <i>Bidens pilosa</i> L.)、花椒 ( <i>Zanthoxylum bungeanum</i> Maxim. )、一年蓬 ( <i>Erigeron annuus</i> (L. ) Pers. )、朴树 ( <i>Celtis sinensis</i> Pers. )、打碗花 ( <i>Calystegia hederacea</i> Wall.ex.Roxb. )、芒 ( <i>Miscanthus sinensis</i> Anderss. )、荩草 ( <i>Arthraxon hispidus</i> ( Trin. ) Makino )	
草地 grassland	5	外凸 Plat	26°1'30"N, 106°29'59"E	1 005	708	114	77	51			
	平直 Plat	26°1'31"N, 106°29'58"E					2 955	94	64	58	
	内凹 Inlet										
坡耕地 Sloping farmland	/	外凸 Plat	26°1'31"N, 106°29'58"E	1 002	<10	30	1 580	76	45	63	花椒 ( <i>Zanthoxylum bungeanum</i> Maxim. )、玉米 ( <i>Zea mays</i> L.)、茅草 ( <i>Imperata cylindrica</i> ( L. ) Beauv. )、 蕓 ( <i>Cirsium japonicum</i> Fisch. ex DC. )、 鬼针草 ( <i>Bidens pilosa</i> L. )
	平直 Plat	26°1'31"N, 106°29'58"E					6 872	106	49.5	83	
	内凹 Inlet										

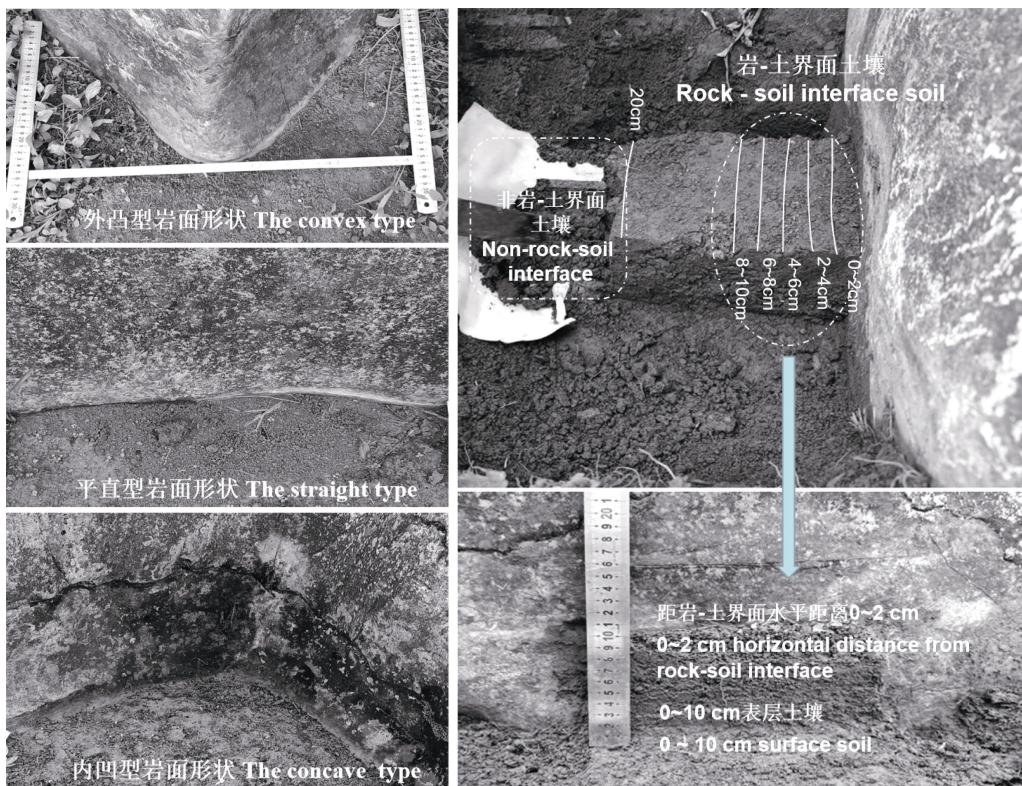


图 1 岩面形态及土壤采样位置示意图

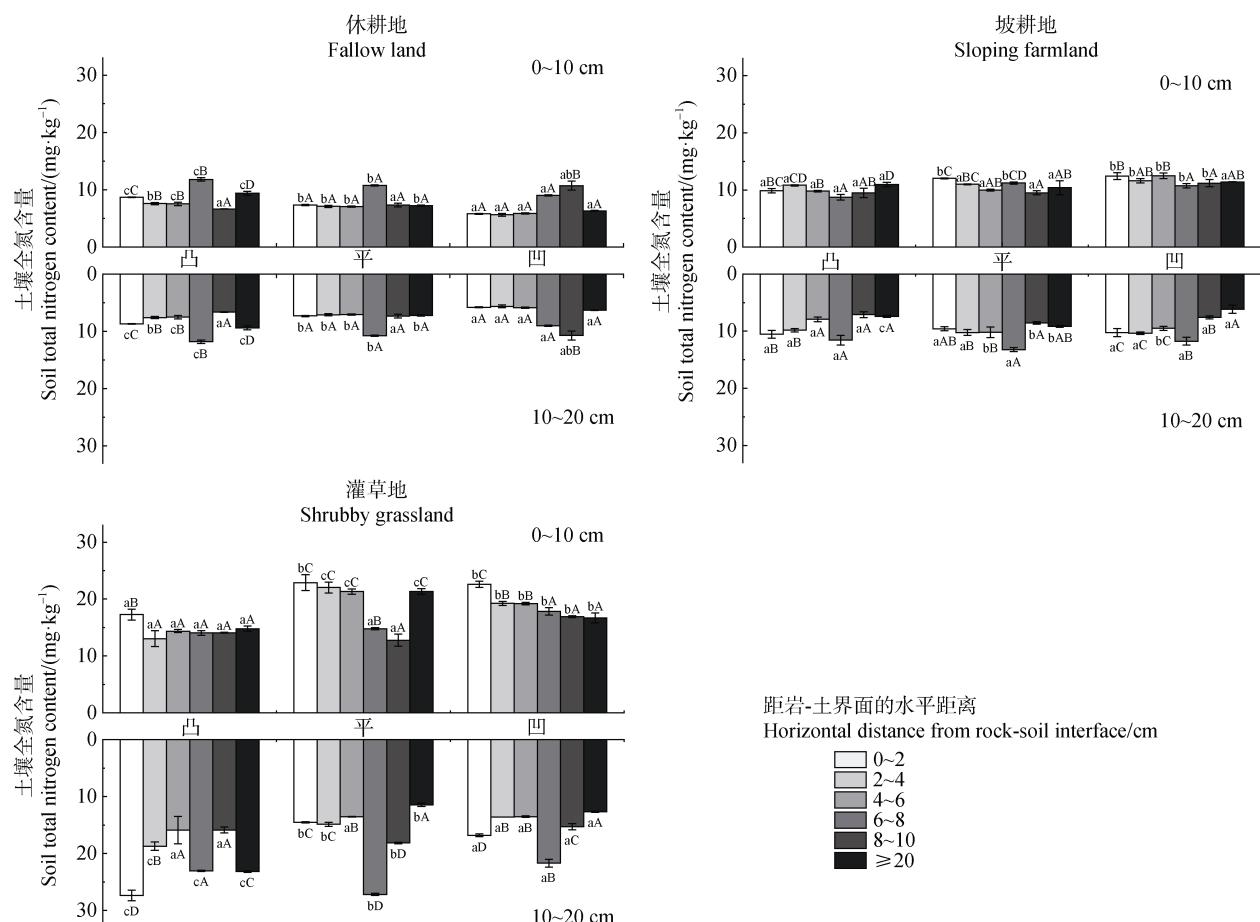
Fig. 1 Schematic diagram of rock surface morphology and soil sampling location

## 2.2 岩-土界面土壤氮磷含量空间分布特征

不同石漠化样地中, 距露石岩-土界面不同水平距离的土壤全氮含量有显著差异(图2)。在0~10 cm的表层土壤中, 休耕地经1年岩面流作用下, 内凹型岩面距岩面水平距离0~2 cm处岩-土界面土壤全氮含量显著低于其他水平距离, 岩面流对岩-土界面土壤氮素产生淋溶作用; 外凸型和平直型岩面与内凹型相反, 在水平距离0~2 cm处的岩-土界面土壤全氮含量显著高于其他水平距离, 岩面流对氮素产生输入作用。退耕5年灌草地中, 三种岩面形状形成的岩面流均对土壤氮素产生了输入作用, 表征为距岩-土界面0~2 cm处土壤全氮含量均显著高于其他水平距离。在坡耕地中, 距外凸型岩面岩-土界面水平距离20 cm处的非岩-土界面土壤全氮含量显著高于其他水平距离的全氮含量, 表明岩面流对其岩-土界面土壤氮素产生淋溶作用; 距内凹型和平直型岩面岩-土界面水平距离为0~2 cm的岩-土界面土壤全氮含量均显著高于其他距离的土壤全氮含量, 岩面流对氮素产生输入作用。在10~20 cm层土壤中, 不同石漠化样地的土壤全氮含量大多受外凸型和内凹型岩面流的影响, 但与表层土壤的全

氮含量变化规律不一致, 平直型岩面距岩-土界面不同水平距离土壤全氮含量差异不显著。这可能是由于岩面流先作用于表层土壤并补给到下层土壤, 故土壤全氮含量表现为随土层深度增加而递减, 且岩面流对深层土壤中氮素输入作用不明显。

不同石漠化样地中, 全磷含量在0~10 cm的表层土壤中有显著差异, 在10~20 cm层土壤中无明显变化规律。表层土壤中, 休耕地在1年岩面流作用下, 三种形状的岩面形成的岩面流对磷素产生了淋溶作用, 距岩面岩-土界面水平距离大于20 cm处的非岩-土界面土壤全磷含量显著高于其他水平距离。在退耕5年灌草地中, 距外凸型岩面岩-土界面水平距离8 cm内的全磷含量显著高于8 cm外的全磷含量, 岩面流对岩-土界面土壤磷素产生输入作用; 距岩-土界面水平距离20 cm处的非岩-土界面土壤的全磷含量显著高于其他水平距离的岩-土界面土壤全磷含量, 表明岩面流产生了淋溶作用; 在内凹型岩面附近不同水平距离全磷含量差异不显著。在坡耕地中, 三种形状的岩面附近0~2 cm的全磷含量均显著高于其他水平距离, 岩面流对磷素起到了输入作用。



注: 图中上层为 0~10 cm 土层深度土壤、下层为 10~20 cm 土层深度土壤, 不同大写字母表明不同水平距离的岩-土界面全氮含量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表明不同露石形状的岩-土界面全氮含量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 所标误差线为标准误,  $n=3$ 。Note: The upper layer is 0~10 cm soil depth, and the lower layer is 10~20 cm soil depth. Different uppercase letters show that total nitrogen content of the rock-soil interface at different horizontal distances is significantly different ( $P < 0.05$ ). Different lowercase letters show that total nitrogen content of the rock-soil interface at different outcrop shapes is significantly different ( $P < 0.05$ ) . The standard error line is standard error,  $n = 3$ .

图 2 不同形状露石岩-土界面全氮含量差异

Fig. 2 Difference of total nitrogen content at rock-soil interface of exposed rock with different shapes

### 2.3 水平距离与岩面形状对土壤氮磷含量的影响

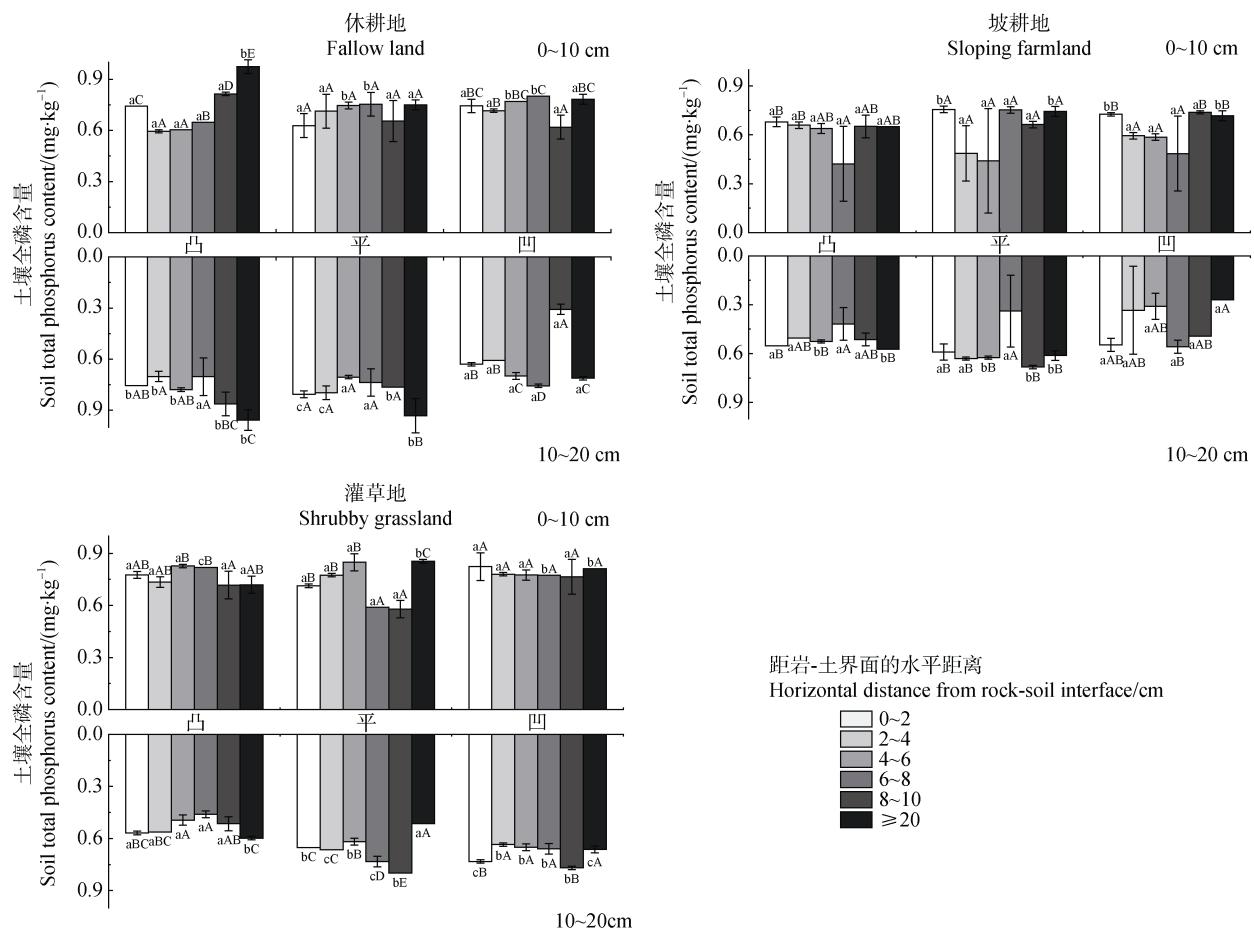
为了评价不同水平距离和岩面形状分别对岩-土界面土壤氮磷含量淋溶和输入影响的能力, 利用 SPSS 软件对 0~20 cm 土层的氮磷含量进行主成分分析, 结果如图 4 所示。通过得出的主成分方程, 对距岩-土界面不同水平距离和岩石形状的氮磷含量影响能力进行分析, 距岩面岩-土界面水平距离的影响能力依次为 20 cm 外的非岩-土界面和 0~2 cm、4~6 cm、8~10 cm、2~4 cm 和 6~8 cm, 岩面形状为外凸型、平直型和内凹型。

由表 2 可知, 在不同的石漠化样地中, 不同岩面形状、水平距离和土层深度均对岩-土界面土壤氮

素含量产生显著影响, 且岩面形状、水平距离和土层深度对土壤的全氮含量有交互作用。1 年岩面流作用下的休耕地中, 土层深度对土壤的全磷含量无显著影响, 土层深度和水平距离无交互作用; 5 年岩面流作用下灌草地中, 不同水平距离对土壤的全磷含量无显著影响; 在坡耕地中, 土层深度和水平距离、岩石形状和水平距离对全磷含量无交互作用。

### 2.4 岩面流对岩-土界面土壤淋溶与输入的富集效应

富集率是反映土壤养分聚集程度的一种度量方式。从表 3 可以看出, 不同石漠化样地岩-土界面土壤氮磷富集率变化不同。与距岩-土界面水平距离



注:图中上层为0~10 cm层土壤、下层为10~20 cm层土壤,不同大写字母表明不同水平距离的岩-土界面全磷含量差异显著( $P<0.05$ ),不同小写字母表明不同露石形状的岩-土界面全磷含量差异显著( $P<0.05$ ),所标误差线为标准误, $n=3$ 。Note: The upper layer is 0~10 cm soil depth and the lower layer is 10~20 cm soil depth. Different uppercase letters show that total phosphorus content of the rock-soil interface at different horizontal distances is significantly different ( $P < 0.05$ ). Different lowercase letters show that total phosphorus content of the rock-soil interface at different outcrop shapes is significantly different ( $P < 0.05$ ). The standard error line is standard error,  $n = 3$ .

图3 不同形状露石岩-土界面全磷含量差异  
Fig.3 Difference of total phosphorus content at rock soil interface of exposed rock with different shapes

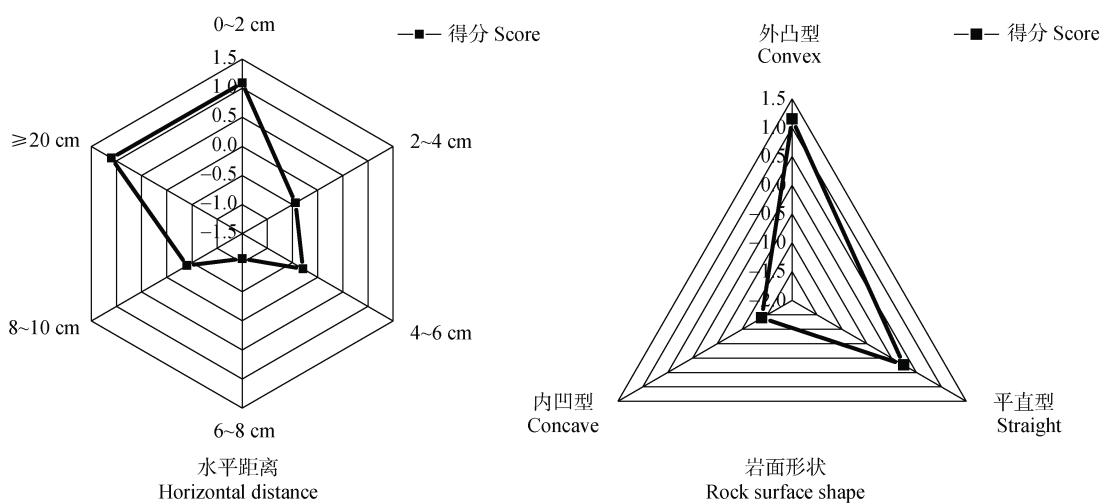


图4 水平距离与岩面形状影响土壤氮磷含量的能力评价  
Fig.4 Evaluation of the ability to affect soil nitrogen and phosphorus content

表 2 岩-土界面土壤氮磷含量差异的多因素方差分析

Table 2 Multifactor variance analysis of nitrogen and phosphorus content difference in rock - soil interface soil

因素 Factor	休耕地 Fallow land		灌草地 Shrubby grassland		坡耕地 Sloping farmland	
	N	P	N	P	N	P
A	0	0	0.013	0	0	0.013
B	0	0.457	0	0	0	0
C	0	0	0	0.135	0	0.001
A × B	0	0	0	0	0	0.027
B × C	0	0.295	0	0	0	0.451
A × C	0	0	0	0.01	0	0.373
A × B × C	0	0	0	0	0	0

注: 表中 A: 岩面形状、B: 土层深度、C: 水平距离, 数字表明岩-界面氮磷含量显著性 ( $P < 0.05$ )。Note: Table A: rock surface shape, B: soil depth, C: horizontal distance, the number shows that the content of nitrogen and phosphorus in the rock-interface is significant ( $P < 0.05$ )。

表 3 岩-土界面氮磷富集率

Table 3 Enrichment rate of nitrogen and phosphorus at the rock-soil interface

岩面形状 Rock surface	水平距离 Horizontal distance	休耕地 Fallow land		灌草地 Shrubby grassland		坡耕地 Sloping farmland	
		shape	/cm	N	P	N	P
外凸型	0~2	0.48	-0.24	0.48	0.08	0.48	0.05
Convex	2~4	8.51	-0.39	8.51	0.02	8.51	0.01
	4~6	-0.99	-0.38	-0.99	0.15	-0.99	-0.02
	6~8	-0.08	-0.33	-0.08	0.14	-0.08	-0.35
	8~10	0.67	-0.16	0.67	0.00	0.67	0.00
平直型	0~2	0.30	-0.16	0.30	-0.17	0.30	0.02
Straight	2~4	-0.22	-0.05	-0.22	-0.09	-0.22	-0.35
	4~6	-0.40	-0.01	-0.40	-0.01	-0.40	-0.41
	6~8	-0.90	0.01	-0.90	-0.31	-0.90	0.01
	8~10	-0.74	-0.13	-0.74	-0.32	-0.74	-0.11
内凹型	0~2	-0.74	-0.05	-0.74	0.01	-0.74	0.01
Concave	2~4	-0.20	-0.09	-0.20	-0.04	-0.20	-0.17
	4~6	0.82	-0.02	0.82	-0.04	0.82	-0.18
	6~8	0.28	0.02	0.28	-0.05	0.28	-0.32
	8~10	-0.79	-0.21	-0.79	-0.06	-0.79	0.03

20 cm 处的非岩土界面土壤相比, 1 年岩面流作用的休耕地中, 土壤氮磷富集率为负值, 表现为淋溶作

用。退耕 5 年灌草地中, 外凸型岩面岩-土界面土壤富集磷素、内凹型岩面富集氮素, 其余条件下氮磷

素缺失。在少/无岩面流作用的坡耕地土壤中，土壤中氮磷富集率低。

### 3 讨 论

裸露的岩石是喀斯特地区最显著的特征，裸露岩石的存在改变了微地貌。研究表明岩石露头可以作为收集板，用于接收降雨、森林穿透雨和干湿沉降<sup>[24]</sup>，石漠化地区露头岩石的生态功能值得深入研究，而露石承接降雨（含穿透雨）形成岩面流输入土壤后对土壤养分变化的影响却很少受到重视。与其他地区相比，西南喀斯特地区的岩石和土壤镶嵌分布增加了地形的复杂性和微生境的多样性，这种镶嵌可能在养分的空间分布中发挥重要作用<sup>[17, 26]</sup>。在露石覆盖率高的坡面，地表岩石能接收大部分降雨并转化为岩面流，对裸露的岩石附近土壤养分的空间异质性具有显著影响<sup>[13, 27]</sup>；Conn 等<sup>[28]</sup>发现，岩石露头对其周围土壤水分有一定影响，但影响的程度取决于岩石的形状和包括植被覆盖率在内的其他因素等；此外，裸露岩石径流可能对附近植物的营养物质起到补充作用<sup>[29]</sup>；本研究中不同岩面形状和距岩-土界面不同水平距离对土壤氮磷富集的影响，结果与以上观点一致。

本研究中，在1年岩面流作用的休耕地中，不同岩面形状下0~10 cm 表层和10~20 cm 亚表层岩-土界面土壤氮素含量大小依次为：外凸型、平直型和内凹型，此结果与设计研究时的设想一致，外凸型岩面对岩面流基本不起汇集作用，而内凹型岩面汇集岩面流对土壤氮素等进行淋溶，使得内凹型岩面岩-土界面土壤中全氮含量最低。与休耕地相比，在退耕5年灌草地的表层土壤和少/无岩面流作用的坡耕地0~10 cm 表层和10~20 cm 亚表层土壤中，研究结果与休耕地相反，内凹型岩面岩-土界面土壤全氮含量显著高于外凸型岩面岩-土界面土壤全氮含量，这可能是由于岩面流承接了上方的穿透雨，并携带了岩壁生物和有机质中所含的养分<sup>[30-32]</sup>，从而增加岩-土界面处土壤养分的异质性。岩-土界面土壤吸收和输出的养分量是动态的，这些动态变化可能与养分的输入、淋溶和保存能力、岩石表面的贡献、大气沉降以及生物和水文过程之间的相互作用有关<sup>[28, 33-34]</sup>，需要进一步验证。

大量研究显示，裸露岩石作为接收和储存养分

的重要介质，并通过岩面流将大部分有机碳和养分等重新分配到土壤中<sup>[16, 35]</sup>。本研究中，退耕5年灌草地中的三种形状岩面附近，距离岩-土界面水平距离0~2 cm 的土壤全氮含量显著高于远处的全氮含量，表明岩面流携带氮素输入紧靠岩-土界面的土壤，补充了岩-土界面土壤氮，这与上述观点一致。而休耕地上只有外凸型和平直型岩面的结果与灌草地一致，距内凹型岩面岩-土界面0~2 cm 的土壤全氮含量显著低于远处的含量，这与前文的讨论一致，主要是由于休耕地上植被少且低矮，加上内凹型岩面对岩面流产生的汇集作用，对岩-土界面进行冲刷，从而对土壤中的氮素产生了淋溶效应。在坡耕地中，外凸型岩面流对岩-土界面土壤氮素的作用表现为淋溶，内凹型和平直型岩面则向岩-土界面土壤中输入氮素，根据岩面形状的汇集作用可知，在总体上坡耕地中的露石对土壤氮磷素的输入或淋溶作用不明显，主要是因为坡耕地各种耕作活动，影响或改变了岩-土界面土壤氮磷素分布，还需进一步研究证实。

本研究中，不同形状岩面接收大部分降雨转化成岩面流，岩面附近土壤的氮素和磷素表现出不同的变化特征。在休耕地中，不同形状岩面的全磷含量大小依次为：内凹型、平直型和外凸型，且三种形状岩面附近均是20 cm 处的非岩-土界面土壤全磷含量最高，岩面流对岩-土界面土壤中全磷产生了淋溶作用。在1年岩面流作用的休耕地中，不同形状岩面产生的岩面流对氮素作用不同，但对磷素均表现为淋溶效应。这可能是因为磷和氮在雨水中的含量有所不同，降水对生态系统中氮的输入较磷更重要，这与 Peñuelas 等<sup>[36]</sup>的研究结果一致。在地球上的大多数地区，雨水中的氮素浓度远高于磷素，而磷素可能更强烈地吸附在风携带的尘埃颗粒上，母质的风化和相关的土壤化学成分是磷的主要来源，而不是氮的主要来源<sup>[37-38]</sup>，这些假设还需要进一步研究。

露石塑造了地表不同类型的地貌形态，是使喀斯特土壤斑块呈现高度异质性的主要原因<sup>[39-40]</sup>。但外部因素对土壤的影响会随着土层深度的影响而减弱，集中于表层和亚表层，深层土壤格局受到较小的外界干扰<sup>[41-45]</sup>。本研究中，降雨后露石岩面汇集雨水后形成岩面流并输送至岩周土壤中，对表层土壤氮磷产生淋溶或输入作用。但在10~20 cm 的亚

表层土壤中, 不同石漠化样地的土壤氮素含量与表层土壤氮素变化规律不一致, 且土壤磷素含量差异不显著。可能是由于当土壤达到一定深度后, 随着岩面流等干扰作用的减少会形成一个较稳定的空间格局, 深层土壤氮磷素含量主要决定于土壤稳定性能和上层土壤的氮磷素补充。由于土壤质地、地表坡度、岩石形状和大小不一等因素, 喀斯特地区出露岩石与土壤的关系非常复杂<sup>[46-47]</sup>, 要确定喀斯特地区不同土层深度土壤空间格局的具体特性, 还需要继续深入研究。

本研究对露石形状和水平距离等因素进行了单因素、多因素分析和主成分分析, 并通过计算氮磷富集率来表征淋溶与输入特征。综合研究结果说明, 休耕地中的岩面流对岩-土界面土壤氮磷有淋溶效应, 内凹型岩面相较于平直型和外凸型岩面更能汇集岩面流; 在退耕 5 年灌草地中, 岩面流向岩-土界面土壤中输入了氮素。在较少植被生长的石漠化区, 露石形成的岩面流冲刷岩-土界面导致土壤中氮磷素被淋溶; 当石漠化区有较多植被生长时, 大量裸露在外的岩石向附近的土壤斑块贡献大量氮磷素。王克林等<sup>[11-12]</sup>认为裸露的岩石阻碍了岩溶系统的地表径流, 并将大量的水引入地下管网加重土壤漏失; Goransson 等<sup>[15]</sup>认为裸露的岩石将营养物质输送至相邻的土壤中, 或通过对雨水的截留作用, 将其中的 N、P 和其他物质通过岩石表面流输入到周围的土壤斑块中<sup>[13, 15]</sup>, 从而促进附近的植被生长<sup>[32, 48]</sup>。本研究的结果可能从一个方面解释众多学者对于裸露在石漠化区的岩石的不同评价, 但石漠化区在全球的分布范围很广, 在生态环境方面差异巨大。本研究只选取了部分植被类型, 仅考虑了岩面的形状, 未涉及露石其他的物理、化学特征对岩面流产生的作用, 因此需要更大范围尺度的测量, 来揭示露石的岩面流规律和影响因素。

## 4 结 论

本研究通过选择典型石漠化样地, 以三种典型的岩面形状研究岩土界面土壤氮磷淋溶特征, 得到以下结论: (1) 降雨后露石岩面汇集雨水后形成岩面流并输送至岩周土壤中, 岩面流对土壤氮磷含量的影响会随着土层深度的影响而减弱: 在 0~10 cm 表层中, 岩面流对岩-土界面土壤氮磷产生输入或淋溶作

用; 在 10~20 cm 深层中, 岩面流对岩-土界面土壤氮磷素作用不明显。(2) 在三种石漠化样地中, 裸露岩石形成的岩面流对表层土壤中的氮磷素产生输入或淋溶作用, 不同岩面形状对岩面流的汇集作用由强到弱依次为: 内凹型>平直型>外凸型。(3) 1 年岩面流作用的休耕地中, 内凹型岩面汇集的岩面流对氮素淋溶, 平直型和外凸型岩面形成的岩面流向土壤输入氮素; 三种形状岩面形成的岩面流均对岩-土界面土壤磷素产生了淋溶。在植被生长较多的退耕灌草地中, 露石形成的岩面流向土壤输入氮磷素。

## 参考文献 ( References )

- [ 1 ] Huang Y Q, Zhao P, Zhang Z F, et al. Transpiration of *Cyclobalanopsis glauca* ( syn. *Quercus glauca* ) stand measured by sap-flow method in a Karst rocky terrain during dry season[J]. Ecological Research, 2009, 24( 4 ): 791—801.
- [ 2 ] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1—12.
- [ 3 ] Zhang J G, Chen H S, Su Y R, et al. Spatial variability of soil moisture in surface layer in depressed Karst region and its scale effect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45( 3 ): 544—549. [ 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性及其尺度效应[J]. 土壤学报, 2008, 45( 3 ): 544—549. ]
- [ 4 ] Wang S J. Concept deduction and its connotation of Karst rocky desertification[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21( 2 ): 101—105. [ 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. ]
- [ 5 ] Zhang X B, Wang S J, Cao J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on Karst rocky desertification in Southwest China Karst area[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29( 3 ): 274—279. [ 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29( 3 ): 274—279. ]
- [ 6 ] Peng W X, Song T Q, Zeng F P, et al. The coupling relationships between vegetation, soil, and topography factors in Karst mixed evergreen and deciduous broadleaf forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30( 13 ): 3472—3481. [ 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林植物与土壤地形因子的耦合关系[J]. 生态学报, 2010, 30( 13 ): 3472—3481. ]
- [ 7 ] Zhang Z H, Hu G, Ni J. Interspecific segregation of old-growth Karst forests in Maolan, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30( 9 ): 2235—2245. [ 张忠华, 胡刚, 倪健. 茂兰喀斯特森林群落的种间分离特

- 征[J]. 生态学报, 2010, 30 (9): 2235—2245.]
- [ 8 ] Zhang W, Chen H S, Wang K L, et al. The heterogeneity of soil nutrients and their influencing factors in peak-cluster depression areas of Karst region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 (9): 1828—1835. [张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39 (9): 1828—1835.]
- [ 9 ] Zhang Z H , Hu G , Zhu J D , et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and its impact on tree species distribution in a karst forest of Southwest China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011. [张忠华, 胡刚, 祝介东, 倪健. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35 (10): 1038—1049.]
- [ 10 ] Shen Y X , Wang D J , Chen Q Q , et al. Large heterogeneity of water and nutrient supply derived from runoff of nearby rock outcrops in Karst ecosystems in SW China[J]. *Catena*, 2019, 172: 125—131.
- [ 11 ] Wang K L , Su Y R , Zeng F P , et al. Ecological process and vegetation restoration in Karst region of southwest China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, 29 (6): 641—645. [王克林, 苏以荣, 曾馥平, 等. 西南喀斯特典型生态系统土壤特征与植被适应性恢复研究[J]. 农业现代化研究, 2008, 29 (6): 641—645.]
- [ 12 ] Jiang Z C , Luo W Q , Deng Y , et al. The leakage of water and soil in the Karst peak cluster depression and its prevention and treatment[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35 (5): 535—542. [蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J]. 地球学报, 2014, 35 (5): 535—542.]
- [ 13 ] Zhang Z C , Chen X , Shi P , et al. Influences of rock on soil moisture distribution in the Karst cluster-peach mountains[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28 (6): 41—44. [张志才, 陈喜, 石朋, 等. 岩石对喀斯特峰丛山体土壤水分布特征的影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28 (6): 41—44.]
- [ 14 ] Göransson H, Edwards P J, Perreijn K, et al. Rocks create nitrogen hotspots and N: P heterogeneity by funnelling rain[J]. *Biogeochemistry*, 2014, 121 (2): 329—338.
- [ 15 ] Wang D J , Shen Y X , Huang J , et al. Rock outcrops redistribute water to nearby soil patches in Karst landscapes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23 (9): 8610—8616.
- [ 16 ] Wang D J , Shen Y X , Li Y H , et al. Rock outcrops redistribute organic carbon and nutrients to nearby soil patches in three Karst ecosystems in SW China[J]. *PLoS One*, 2016, 11 (8): e0160773.
- [ 17 ] Clements R, Sodhi N S, Schilthuizen M, et al. Limestone karsts of Southeast Asia: Imperiled arks of biodiversity[J]. *BioScience*, 2006, 56 (9): 733—742.
- [ 18 ] Leroux S J , Wal E V , Wiersma Y F , et al. Stoichiometric distribution models : Ecological stoichiometry at the landscape extent[J]. *Ecology Letters*, 2017, 20 (12): 1495—1506.
- [ 19 ] He Y L , Qi Y C , Peng Q , et al. Carbon availability affects soil respiration response to drying-rewetting cycles in semiarid grasslands of China under nitrogen deposition[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2019, 93: 103089.
- [ 20 ] Gao X L , Li X G , Zhao L , et al. Regulation of soil phosphorus cycling in grasslands by shrubs[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 133: 1—11.
- [ 21 ] Xiao D , Xiao L M , Che R X , et al. Phosphorus but not nitrogen addition significantly changes diazotroph diversity and community composition in typical Karst grassland soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 301: 106987.
- [ 22 ] Piao H C , Li S L , Yan Z F , et al. Understanding nutrient allocation based on leaf nitrogen isotopes and elemental ratios in the Karst region of Southwest China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 294: 106864.
- [ 23 ] Crowther J. Ecological observations in tropical Karst terrain, west Malaysia. III. dynamics of the vegetation-soil-bedrock system[J]. *Journal of Biogeography*, 1987, 14 (2): 157.
- [ 24 ] Descroix L , Viramontes D , Vauclin M , et al. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre ( Durango , Northwest Mexico ) [J]. *Catena*, 2001, 43 (2): 115—135.
- [ 25 ] Zhan Y Y , Xue Z Y , Ren W , et al. Characteristics of nitrogen content between rhizosphere and bulk soil under seven shrubs in arid desert area of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (1): 59—66. [詹媛媛, 薛梓瑜, 任伟, 等. 干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征[J]. 生态学报, 2009, 29 (1): 59—66.]
- [ 26 ] Clark K , Nadkarni N , Schaefer D , et al. Atmospheric deposition and net retention of ions by the canopy in a tropical montane forest, Monteverde, Costa Rica[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 1998, 14: 27—45.
- [ 27 ] Li S , Ren H D , Xue L , et al. Influence of bare rocks on surrounding soil moisture in the Karst rocky desertification regions under drought conditions[J]. *Catena*, 2014, 116: 157—162.
- [ 28 ] Conn J , Snyder-Conn E. The relationship of the rock outcrop microhabitat to germination, water relations, and phenology of *Erythrina flabelliformis* ( Fabaceae ) in southern Arizona[J]. *Southwestern Naturalist*, 1981, 25: 443—451.
- [ 29 ] Zhao Z M , Shen Y X , Jiang R H , et al. Rock outcrops change infiltration and water flow behavior in a Karst soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2020, 19 (1): e20002.

- [ 30 ] Alcock M, Morton A. Nutrient content of throughfall and stem-flow in woodland recently established on heathland[J]. *Journal of Ecology*, 1985, 73: 625—632.
- [ 31 ] Wang L X, Zhang Z Q. Advances in the study of ecohydrological effects from vegetation changes[J]. *World Forestry Research*, 1998, 11 ( 6 ): 14—23. [王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 1998, 11 ( 6 ): 14—23.]
- [ 32 ] Liu W, Luo Q, Li J, et al. The effects of conversion of tropical rainforest to rubber plantation on splash erosion in Xishuangbanna, SW China[J]. *Hydrology Research*, 2015, 46 ( 1 ): 168—174.
- [ 33 ] Eaton J, Likens G, Bormann F. Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest[J]. *Journal of Ecology*, 1973, 61: 495.
- [ 34 ] Gersper P L, Holowaychuk N. Some effects of stem flow from forest canopy trees on chemical properties of soils[J]. *Ecology*, 1971, 52 ( 4 ): 691—702.
- [ 35 ] Kidron G J, Starinsky A. Chemical composition of dew and rain in an extreme desert( Negev ) : Cobbles serve as sink for nutrients[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420/421: 284—291.
- [ 36 ] Peñuelas J, Poulter B, Sardans J, et al. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2934.
- [ 37 ] Walker T W, Syers J K. The fate of phosphorus during pedogenesis[J]. *Geoderma*, 1976, 15 ( 1 ) : 1—19.
- [ 38 ] Liptzin D, Sanford R L, Seastedt T R. Spatial patterns of total and available N and P at alpine treeline[J]. *Plant and Soil*, 2013, 365 ( 1/2 ) : 127—140.
- [ 39 ] Liu F, Wang S J, Luo H B, et al. Micro-habitats in Karst forest ecosystem and variability of soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 ( 6 ): 1055—1062. [刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. 土壤学报, 2008, 45 ( 6 ): 1055—1062.]
- [ 40 ] Zhang J G, Chen H S, Su Y R, et al. Spatial variability of soil moisture content and reasonable sampling number in cluster-peak depression areas of Karst region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 ( 2 ): 114—117, 134. [张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特地区典型峰丛洼地表层土壤水分空间变异及合理取样数研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20 ( 2 ): 114—117, 134.]
- [ 41 ] Liu H L, Jiang T M, Liu H B, et al. Impact of land use on spatio-temporal variation of soil moisture of sloping upland in Karst mountainous area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 ( 3 ): 428—433. [刘海隆, 蒋太明, 刘洪斌, 等. 不同土地利用方式对岩溶山区旱坡地土壤水分时空分异的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42 ( 3 ): 428—433.]
- [ 42 ] Pachepsky Y A, Guber A K, Jacques D. Temporal persistence in vertical distributions of soil moisture contents[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69 ( 2 ) : 347—352.
- [ 43 ] Martínez-Fernández J, Ceballos A. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 ( 6 ) : 1647—1656.
- [ 44 ] Guber A K, Gish T J, Pachepsky Y A, et al. Temporal stability in soil water content patterns across agricultural fields[J]. *Catena*, 2008, 73 ( 1 ) : 125—133.
- [ 45 ] Vanderlinde K, Vereecken H, Hardelauf H, et al. Temporal stability of soil water contents: A review of data and analyses[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11 ( 4 ) : vzh2011.0178.
- [ 46 ] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. *Catena*, 1994, 23 ( 1/2 ) : 1—28.
- [ 47 ] Poesen J, de Luna E, Franca A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content[J]. *Catena*, 1999, 36 ( 4 ): 315—329.
- [ 48 ] Chesson P. Mechanisms of maintenance of species diversity[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000, 31 ( 1 ) : 343—366.

(责任编辑: 檀满枝)