

DOI: 10.5846/stxb202101050036

王吉高,汪依妮,陈超,李舟,王昭懿,金宝成,张乾,赵学春.岩溶地区不同石漠化程度下草地细根对土壤养分的贡献.生态学报,2022,42(1):313-321.

Wang J G, Wang Y N, Chen C, Li Z, Wang Z Y, Jin B C, Zhang Q, Zhao X C. Contribution of fine root to soil nutrient in different rocky desertification grasslands in karst area. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 313-321.

## 岩溶地区不同石漠化程度下草地细根对土壤养分的贡献

王吉高<sup>1,2</sup>,汪依妮<sup>3</sup>,陈超<sup>1</sup>,李舟<sup>1</sup>,王昭懿<sup>1</sup>,金宝成<sup>1</sup>,张乾<sup>1</sup>,赵学春<sup>1,\*</sup>

1 贵州大学动物科学学院,贵阳 550025

2 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室,成都 610041

3 贵州省草地技术试验推广站,贵阳 550025

**摘要:**细根分解和周转是土壤有机质和养分的重要来源。为探明不同石漠化程度天然草地细根对土壤养分的贡献,于 2017 年 3 月至次年 1 月,采用土柱法和分解袋法,研究不同石漠化程度下天然草地的细根生物量、分解和养分释放动态及对石漠化的响应。结果表明:3 种不同石漠化程度下草地的细根生物量随季节均呈现先增加后降低的趋势,随石漠化程度的加剧均呈现逐渐降低的趋势,潜在、中度和强度石漠化草地的细根生物量分别为 3355.65、2944.02 g/m<sup>2</sup>和 1806.80 g/m<sup>2</sup>。细根分解速率呈现先快后慢的趋势,分解 300 天后的残留率均低于 50%。细根有机碳、全氮、全磷和全钾的释放过程具有显著不同,释放模式最终均表现为“释放”,潜在、中度和强度石漠化草地细根的有机碳、全氮、全磷、全钾的年归还量分别为 32.46—161.08、0.24—3.88、0.08—0.32、0.15—2.78 g/m<sup>2</sup>。随石漠化程度的加剧,细根生物量和分解率呈现逐渐降低趋势,土壤有机碳、全氮归还量呈现逐渐增加趋势。

**关键词:**石漠化草地;细根分解;养分释放;土壤养分

## Contribution of fine root to soil nutrient in different rocky desertification grasslands in karst area

WANG Jigao<sup>1,2</sup>, WANG Yini<sup>3</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>, LI Zhou<sup>1</sup>, WANG Zhaoyi<sup>1</sup>, JIN Baocheng<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>1</sup>, ZHAO Xuechun<sup>1,\*</sup>

1 College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2 Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3 Guizhou Grassland Technology Test and Extension Station, Guiyang 550025, China

**Abstract:** The degradation land of rocky desertification is one of the most serious problems on economic development, ecosystem restoration and reconstruction in Southwest China. Grassland is one of the main vegetation types in karst area, and its fine root is sensitive to the response of environmental conditions, which determines the growth and development of plants and soil nutrition status. Fine root also has an indicator effect on the environmental changes, and can reflect the health status of grassland ecosystem. As the intermediary connecting the aboveground and underground parts of vegetation, fine root plays an important role in the matter exchange and energy transfer between plants and soil, helps plants sequester carbon

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]1Y076号,[2021]一般503);贵州省草地生态畜牧业人才基地(RCJD 2018-13)

收稿日期:2021-01-05; 网络出版日期:2021-08-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xczhao@gzu.edu.cn

and provide for nutrient and water uptake into plants. Fine root decomposition and turnover contribute significantly to element cycling in grassland ecosystems. In karst area, fine root dynamics are controlled by the complex interaction of environmental and biotic factors. In order to explore the contribution of fine root to soil nutrients in three grasslands with different degrees of rocky desertification, the sequential soil coring and root bag methods were used to study the fine root biomass, dynamic of decomposition and release of nutrient and their responses to rocky desertification in the potential, medium and severe rocky desertification grasslands from March 2017 to January 2018. The results showed that the fine root biomass increased first and then decreased with the seasons in the three types of grasslands with different degrees of rocky desertification, while decreased with the intensification of rocky desertification. The fine root biomass was 3355.65 g/m<sup>2</sup>, 2944.02 g/m<sup>2</sup> and 1806.80 g/m<sup>2</sup> in the potential, medium and severe rocky desertification grasslands. The decomposition rate of fine root showed the “fast-slow” trend, and the residual rate of dry matter was all less than 50% after 300 days. The releasing process of fine root organic carbon, nitrogen, phosphorus and potassium was significantly different, and the pattern of releasing was “release” finally. The annual return amount of fine root organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium was 32.46—161.08 g/m<sup>2</sup>, 0.24—3.88 g/m<sup>2</sup>, 0.08—0.32 g/m<sup>2</sup> and 0.15—2.78 g/m<sup>2</sup>, respectively. With the intensification of rocky desertification, fine root biomass and fine root decomposition rate showed a gradually decreasing trend, while the releasing of soil organic carbon and total nitrogen showed a gradually increasing trend. Therefore, knowledge of fine root dynamics and nutrient release across a broad karst area with the ability to examine the feedbacks occurring between fine root and rocky desertification is critical to our understanding of the nutrient cycle and for protecting degraded grassland and restoring vegetation.

**Key Words:** rocky desertification grassland; fine root decomposition; nutrient release; soil nutrient

大多数研究均把直径≤2 mm 的根系作为同一个单元进行研究,称之为细根。细根的生产、分解和周转是陆地生态系统碳和养分循环的主要途径<sup>[1]</sup>,相对于具有季节性的地上凋落物,细根处于不断生长、衰老、死亡和分解的动态过程,可通过持续分解将养分输入到土壤中<sup>[2-4]</sup>,且比地上凋落物更好的并入土壤团聚体<sup>[5]</sup>,改善土壤的理化状况。细根分解和周转是土壤有机质和养分的重要来源<sup>[6-7]</sup>,研究表明,细根通过分解和周转归还到土壤中的碳、氮等营养物质的量均大于地上凋落物的输入<sup>[8-9]</sup>,归还到土壤中的有机质占其总归还量的 25%—80%<sup>[10]</sup>。细根动态和养分归还主要受细根质量、气候和土壤等因素的综合影响<sup>[7,11]</sup>。

贵州省是我国岩溶地貌发育最典型的地区,有岩溶草地 2.47 万 km<sup>2</sup>,占国土面积的 14.02%,约 70%的岩溶草地具有不同程度的石漠化现象发生<sup>[12]</sup>,表现为岩石裸露、土层浅薄、保水保肥能力差等<sup>[13]</sup>。草地作为贵州喀斯特地区主要植被类型之一,具有巨大的根系生物量,且细根占根系比例极高<sup>[14]</sup>,在养分循环和碳固持等方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。石漠化地区由于土壤瘠薄和持水力差,决定了其细根生长、分解和周转的特殊性。

目前,国内外关于细根的研究主要集中在森林细根分布、分解及养分释放<sup>[10,15-16]</sup>和温带草原细根分解对氮沉降的响应<sup>[2,17]</sup>,在土层浅薄、土被不连续的喀斯特山区尚不多见<sup>[18]</sup>,特别是对不同石漠化程度下天然草地细根养分释放的研究更为少见。本文以贵州省岩溶地区 3 种不同石漠化程度(潜在、中度和强度)的天然草地为研究对象,采用连续土柱法和分解袋法研究细根生产、分解和养分释放,分析不同石漠化程度对细根分解和养分释放的影响,以期深入了解细根对石漠化的响应和岩溶地区草地的养分循环,为石漠化草地保护和植被恢复提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于西南地区贵州省,境内碳酸盐分布广泛、喀斯特地貌发育强烈,地势西高东低,自中部向北、

东、南三面倾斜,平均海拔 1100 m。属中亚热带季风湿润气候,年均温度 15 ℃,年均降水量 1133 mm。土壤类型以黄壤为主,pH 为 4.60—6.80。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,但天然草地植被广泛发育,有 4.28 万 km<sup>2</sup>,占贵州省土地总面积的 24.30%<sup>[19]</sup>。

根据国家林业局制度的《西南岩溶地区石漠化监测技术规定(2011 年修订)》分类标准,选取 3 种不同石漠化程度(潜在、中度和强度)的天然草地为研究对象,地理位置见图 1。其中,潜在石漠化草地位于黔南布依族苗族自治州独山县贵州省草地试验技术推广站,地理坐标为 107°32'E,25°38'N,年降水量 1260 mm,年均温 15.9 ℃,土壤类型为黄壤,pH 为 5.42—6.07,建群种为五节芒(*Miscanthus floridulus*),伴生种为青香茅(*Cymbopogon caesius*);中度石漠化草地位于毕节市大方县油杉河牧场,地理坐标为 105°52'E,27°23'N,年降水量 1155.1 mm,年均温 11.8 ℃,土壤类型为黄壤,pH 为 4.61—5.32,建群种为五节芒(*Miscanthus floridulus*),伴生种为朝天罐(*Osbeckia opipara*)和灯芯草(*Juncus effusus*);强度石漠化草地位于安顺市关岭县盛世畜牧有限公司牧场,地理坐标为 105°31'E,25°45'N,年降水量 1205.1—1656.8 mm,年均温 16 ℃,土壤类型为黄壤,pH 为 6.20—6.80,建群种为青香茅(*Cymbopogon caesius*),伴生种为多花木兰(*Magnolia multiflora*)和车桑子(*Dodonaea viscosa*)。各样地基本情况见表 1。

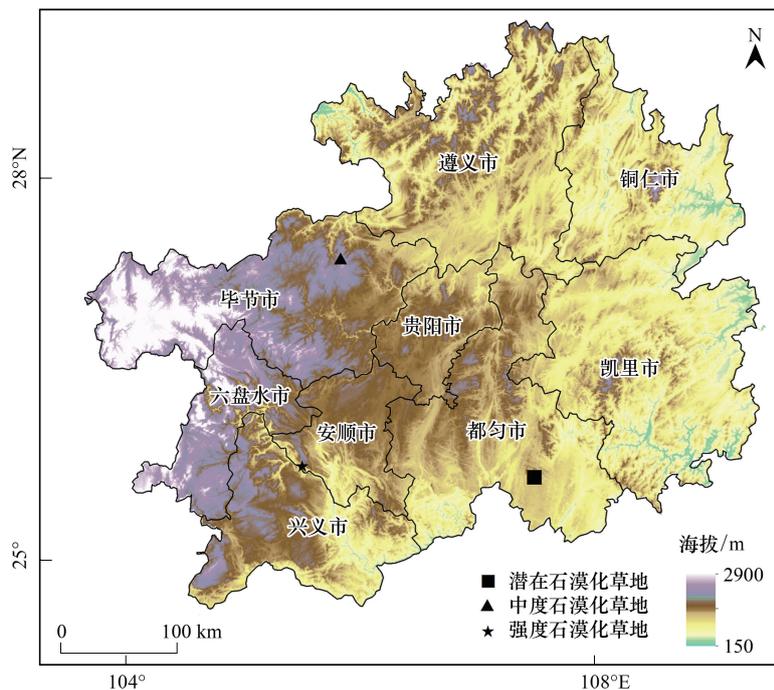


图 1 研究区位置及其概况

Fig.1 Location and basic information of experiment sites in this study

表 1 三种石漠化草地的基本情况

Table 1 Characteristics of three rocky desertification grasslands

草地类型 Grassland type	经纬度 Longitude & Latitude	海拔 Elevation/m	pH	裸岩率 Rock exposed rate/%	建群种 Constructive species
潜在石漠化 Potential rocky desertification	107° 32'E 25° 38'N	1035	5.42—6.07	20—30	五节芒 ( <i>Miscanthus floridulus</i> )
中度石漠化 Medium rocky desertification	105° 52'E 27° 23'N	1820	4.61—5.32	51—70	五节芒 ( <i>Miscanthus floridulus</i> )
强度石漠化 Severe rocky desertification	105° 31'E 25° 45'N	1270	6.20—6.80	71—90	青香茅 ( <i>Cymbopogon caesius</i> )

## 1.2 试验设计

于 2017 年 3 月,在上述 3 个草地内均设置 3 个 25 m × 25 m 的样方,每 2 个月沿样方对角线设置与样地盖度相一致的 3 个 50 cm × 50 cm 采样点,采用连续土柱法,每隔 10 cm 依次挖取采样点内土层,直到鲜有根系时为止,至 2018 年 1 月结束。将采集的土样带回实验室,置于细筛上并用水冲洗,除去杂质,留土样内直径小于 2 mm 的所有细根,根据细根的颜色、表皮、质地地区分活细根和死细根,于 65 °C 下烘干至恒重。

同时,在上述每个采样点附近,去除土表凋落物,采用土钻法钻取 0—10 cm 土层约 300 g 土样,用于测定土壤有机碳、全氮、全钾和全磷。

采用尼龙网袋法进行根系分解实验<sup>[20]</sup>。于 2017 年 3 月,准确称取已烘干活细根 3.0 g,装于规格为 10 cm × 15 cm (孔径 0.2 mm) 的尼龙网袋中,放置于样方 10—15 cm 深土壤中,每个样方放置 25 个分解袋,每 2 个月从各样方分别取回 5 个分解袋,共取 5 次。将取回的分解袋,除去杂质和新生的细根,转移至信封,于 65 °C 下烘干至恒重,用于分析细根残留量和养分含量。

## 1.3 室内分析

将采集的土样置于阴凉处风干,挑出石子、根系等杂质,过筛,用于分析土壤有机碳、全氮、全磷和全钾的含量。土壤和细根有机碳采用  $K_2Cr_2O_7$  外加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定,全钾采用火焰光度计法测定<sup>[21]</sup>。

## 1.4 数据处理与分析

细根残留率的计算公式为:

$$R = W_t / W_0 \times 100\%$$

式中, $R$  为细根残留率, $W_0$  为分细根起始干重(g); $W_t$  为  $t$  时刻细根干重(g)。

细根养分残留率计算公式为:

$$N = (M_t \times C_t) / (M_0 \times C_0)$$

式中, $N$  为细根养分残留率, $M_t$  为  $t$  时刻细根干重(g), $C_t$  为  $t$  时刻细根养分含量(%), $M_0$  为细根初始干重(g), $C_0$  为细根初始养分含量(%).

细根养分归还量计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$C = (M \times C_0) - (P \times C_t)$$

$$M = M_{\max} - M_{\min} - D$$

$$P = M - D$$

式中, $C$  为细根养分归还量( $g/m^2$ ), $M$  为细根年死亡量( $g m^{-2} a^{-1}$ ), $C_0$  为细根初始养分含量(%), $P$  为分解残留量( $g m^{-2} a^{-1}$ ), $C_t$  为残留细根养分含量(%), $M_{\max}$  为死根现存量的最大值; $M_{\min}$  为死根现存量的最小值, $D$  为细根年分解量( $g m^{-2} a^{-1}$ )。

统计分析在 SPSS 16.0 软件中进行,采用单因素方差分析和多重比较(ANOVA-Duncan)法检验不同石漠化草地的土壤养分、细根生物量、死亡量、分解残留量、残留率、细根养分含量和归还量的差异,显著性水平  $\alpha = 0.05$ ;采用 Pearson 法检测裸岩率与细根生物量、分解速率和养分归还量的相关性;利用软件 SigmaPlot 14.0 作图。图表中所有数据均表示为平均值 ± 标准差(Mean ± SD)。

## 2 结果分析

### 2.1 土壤养分

由图 2 可知,3 种石漠化草地的土壤全氮、全磷、全钾含量差异显著( $P < 0.05$ )。其中,土壤全氮和全磷含量均表现为强度石漠化草地显著大于潜在和中度石漠化草地( $P < 0.05$ ),土壤全钾含量表现为潜在石漠化草地显著大于中度和强度石漠化草地( $P < 0.05$ );土壤有机碳含量差异不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.2 细根生物量和养分含量

由图 3 可知,随石漠化程度的加深,细根生物量呈现逐渐降低趋势,潜在、中度和强度石漠化草地的细根

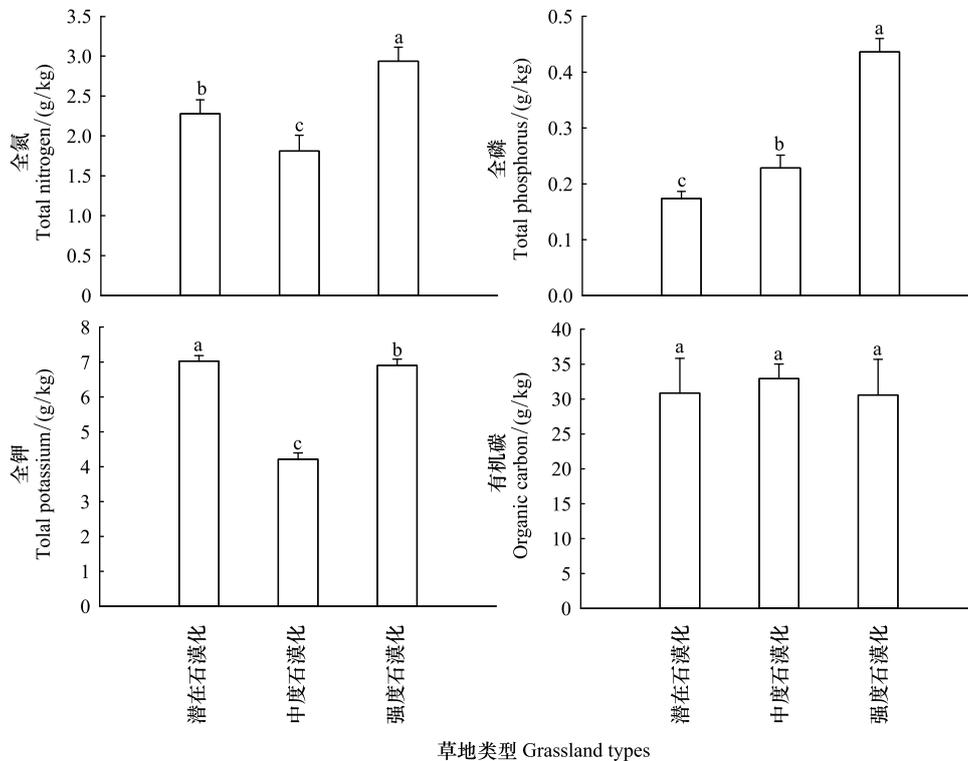


图2 三种石漠化草地的土壤养分

Fig.2 Soil nutrients in three rocky desertification grasslands

不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

生物量分别为 3355.65、2944.02  $\text{g}/\text{m}^2$  和 1806.80  $\text{g}/\text{m}^2$ 。除潜在石漠化草地在 7 月份外,3 种草地的细根生物量均呈现先增加后减小的趋势,均在 9 月达到最大值,分别为 6051.44、3591.38  $\text{g}/\text{m}^2$  和 2181.03  $\text{g}/\text{m}^2$ 。

由表 2 可知,3 种不同石漠化程度草地细根的全氮、全磷、全钾的初始含量和碳氮比存在显著差异 ( $P < 0.05$ ),细根有机碳含量差异不显著 ( $P > 0.05$ )。其中,潜在石漠化草地细根全氮、全磷含量显著高于中度和轻度石漠化草地 ( $P < 0.05$ ),强度石漠化草地细根碳氮比显著高于潜在和中度石漠化草地 ( $P < 0.05$ )。

表 2 细根的初始化学组成

Table 2 Initial chemical composition of fine root

草地类型 Grassland type	C/%	N/%	P/%	K/%	C/N
潜在石漠化 Potential rocky desertification	37.83±0.59a	0.744±0.03a	0.077±0.006a	0.209±0.02c	50.88±1.47c
中度石漠化 Medium rocky desertification	37.49±0.63a	0.692±0.02b	0.054±0.002c	0.380±0.03a	54.17±1.13b
强度石漠化 Severe rocky desertification	40.41±2.30a	0.611±0.01c	0.066±0.004b	0.264±0.01b	66.10±1.39a

同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 2.3 细根分解和养分释放

由图 4 可知,3 种石漠化草地的细根在分解初期(0—60 d)残留率下降较快,随后细根残留率下降速度逐渐变缓。分解 300 d 后,潜在、中度和强度石漠化草地的细根残留率分别为 39.21%、48.34%、47.13%,表现为:中度石漠化草地>强度石漠化草地>潜在石漠化草地。

由图 5 可知,在整个分解过程中,细根有机碳、全氮、全磷和全钾的释放过程具有显著不同。分解 300 d 后,有机碳、全氮、全磷、全钾均表现为净释放状态,其中潜在、中度和强度石漠化草地细根的有机碳释放率分别为 59.68%、50.89%、78.68%,全氮释放率分别为 57.87%、60.61%、61.64%;全磷释放率分别为 62.06%、67.09%、46.85%,全钾释放率分别为 75.98%、81.81%、37.79%。

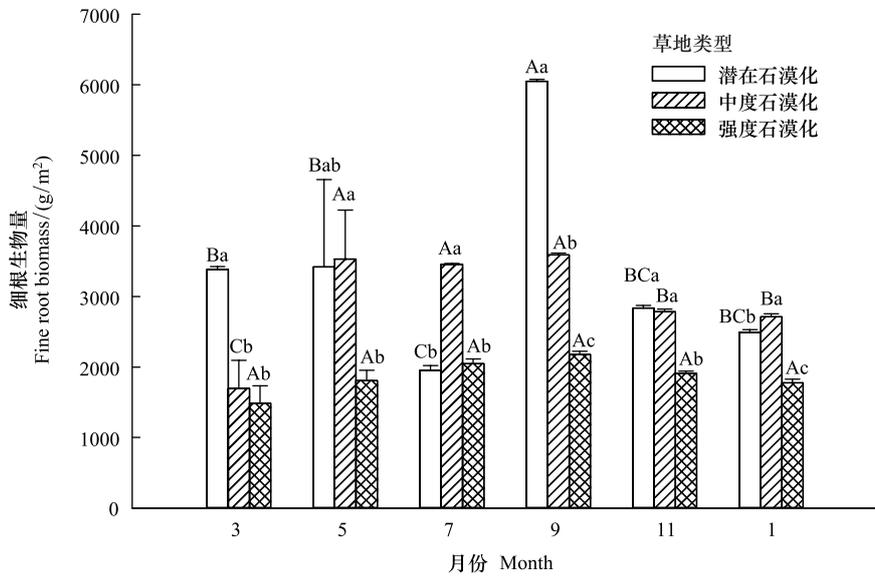


图3 三种石漠化草地细根生物量的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of fine root biomass in three different rocky desertification grasslands

不同大写字母表示同一样地不同月份差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一月份不同样地差异显著 ( $P < 0.05$ )

由表3可知,3种石漠化草地的细根死亡量、残留量、有机碳、全氮、全磷和全钾归还量差异显著 ( $P < 0.05$ )。随石漠化程度的加剧,细根死亡量和残留量呈逐渐减小的趋势。细根有机碳和全氮的归还量表现为中度石漠化草地>强度石漠化草地>潜在石漠化草地,细根全磷和全钾的归还量表现为中度石漠化草地>潜在石漠化草地>强度石漠化草地。

Pearson 相关分析显示细根生物量、分解速率与裸岩率均呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ) (表4)。细根有机碳归还量与裸岩率呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ );全氮和全钾与裸岩率呈正相关,全钾与裸岩率呈负相关,但相关性均不显著 ( $P > 0.05$ )。

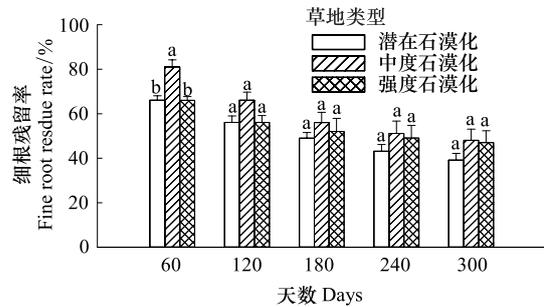


图4 三种石漠化草地的细根残留率

Fig.4 Fine root residue rate in three rocky desertification grasslands

不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

表3 三种石漠化草地的细根养分归还量

Table 3 Nutrient return of fine root in three rocky desertification grasslands

草地类型 Grassland types	死亡量 Mortality/ ( $g\ m^{-2}\ a^{-1}$ )	分解残留量 Residuals content/ ( $g\ m^{-2}\ a^{-1}$ )	养分归还量 Nutrient return content/( $g/m^2$ )			
			C	N	P	K
潜在石漠化 Potential rocky desertification	1264.12±23.07a	1132.21±16.29a	32.46±9.10b	0.24±0.18c	0.12±0.02b	1.18±0.05b
中度石漠化 Medium rocky desertification	905.56±20.20b	462.11±16.34b	161.08±13.27a	3.88±0.23a	0.32±0.02a	2.78±0.10a
强度石漠化 Severe rocky desertification	512.89±50.67c	345.70±38.21c	143.90±14.30a	1.36±0.14b	0.08±0.02c	0.15±0.08c

同列不同字母表示差异显著  $P < 0.05$

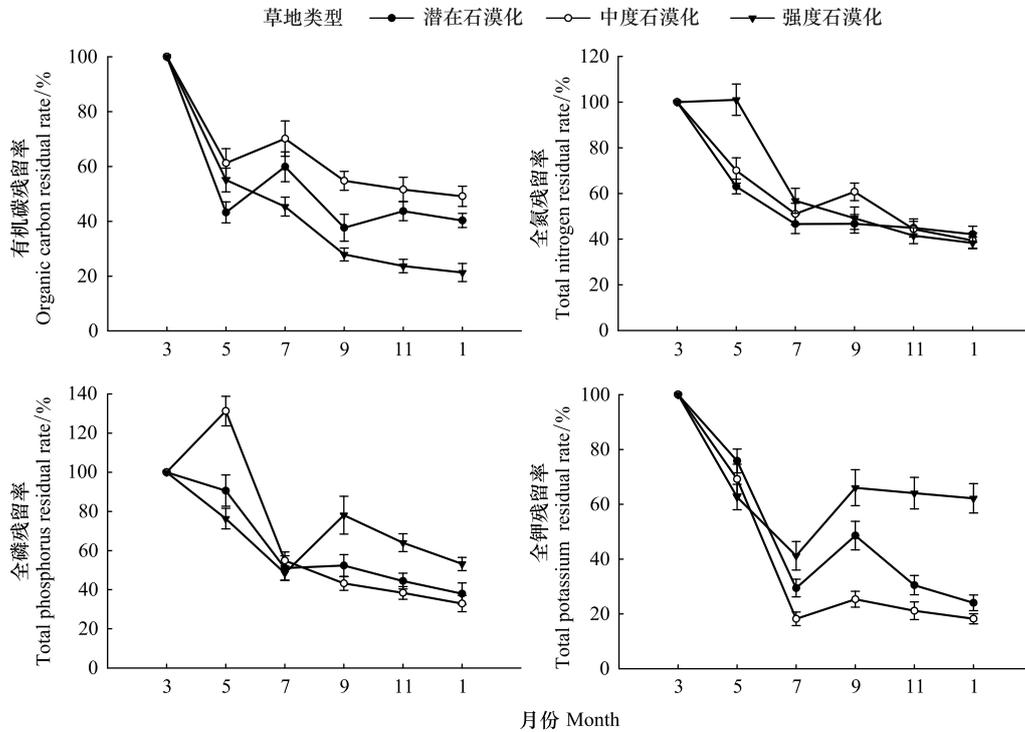


图5 三种石漠化草地的细根养分残留率

Fig.5 Nutrient residual rates of fine root in three rocky desertification grasslands

表4 裸岩率与细根生物量、分解率和养分归还量的相关分析

Table 4 Correlation analysis between rock exposed rate and fine root biomass, decomposition rate, nutrient return content

项目 Item	细根生物量 Fine root biomass	细根分解速率 Fine root decomposition rate	养分归还量 Nutrient return content			
			C	N	P	K
相关系数 <i>R</i> Correlation coefficient <i>R</i>	-0.95**	-0.62*	0.87**	0.44	0.01	-0.25
样本数 Number of samples	27	45	45	45	45	45

显著水平 Significance levels: \*,  $P < 0.05$ , \*\*,  $P < 0.01$

### 3 讨论

#### 3.1 不同石漠化草地细根分解

细根分解是指在土壤物理和化学作用下,发生淋溶和破碎,不断与土壤进行物质交换的过程<sup>[22]</sup>,其过程受细根质量、气候和土壤等因素的综合影响<sup>[7,11]</sup>,本研究中3种石漠化草地在分解初期(0—120 d)细根质量减少33.81%—43.97%,而在分解后期(180—300 d)细根质量仅减少16.96%—18.12%,具有明显的阶段性,初期分解较快,后期分解较慢<sup>[23]</sup>,主要是由于分解初期的细根碳水化合物含量相对较高,易淋溶和利于土壤微生物活动<sup>[10]</sup>,分解较快,随着分解的进行细根中的木质素、纤维素等难分解物质的相对含量高,致使分解速率减慢<sup>[24]</sup>,损失规律与前人的研究结果一致<sup>[2,10,25]</sup>。

细根由于生长在地下,土壤缓冲了气候的作用,细根本身的化学性质被认为是其分解的主要控制因素<sup>[26]</sup>。细根若具有较高的氮含量和较低的碳氮比,其分解速率会更快<sup>[27]</sup>。本研究发现,潜在石漠化草地细根的氮含量显著高于中度和强度石漠化草地( $P < 0.05$ ),碳氮比显著低于中度和强度石漠化草地( $P < 0.05$ ) (表2),导致潜在石漠化草地的细根分解率显著大于其他两个草地。另一方面,随着石漠化程度加深,土层愈

加浅薄,持水性差,作为细根分解者的土壤动物和微生物数量减少,致使细根分解速率降低。而中度石漠化草地分解率低于强度石漠化草地,可能与中度石漠化草地较高的海拔(1820 m)和较低的年均温(11.8 °C)有关。

### 3.2 不同石漠化草地细根营养释放

细根通过分解将其固定的养分归还到土壤中,从而实现养分的循环利用和平衡,其养分归还量取决于细根养分含量、分解速率及分解量等。本研究区域由于环境裸露和岩石聚集效应,石漠化土壤会呈现先退化后改善的过程<sup>[28]</sup>,在土壤养分缺乏时,植物会提高细根的生物量和周转率,增强细根对土壤养分的吸收能力<sup>[29]</sup>,反过来细根周转可以将大量营养物质和养分释放到土壤中,改善土壤的理化条件,促进微生物活动,以补偿石漠化恶劣环境条件对植物生长造成的危害。本研究表明,中度石漠化草地的细根分解量是潜在和强度石漠化草地的3.36倍和2.65倍,可能是由于中度石漠化草地土壤养分缺乏所致(图2)。中度石漠化草地通过细根的大量分解,将有机碳、全氮、全磷和全钾等养分快速归还到土壤中,以弥补土壤营养匮乏。反过来,细根输入会促进土壤中有机质分解的正激发效应,引起土壤微生物活性增强,从而加速土壤原有有机质的分解<sup>[30]</sup>,使中度石漠化草地的土壤养分持续保持在较低水平。

养分释放量主要由细根养分含量和分解量决定。本研究中,石漠化草地细根全氮释放量为1.83 g/m<sup>2</sup>,小于甜楮林细根的归还量(5.21 g/m<sup>2</sup>)<sup>[31]</sup>,高于杉木、火力楠纯林及其混交林的释放量(0.20 g/m<sup>2</sup>)<sup>[15]</sup>,与杨树、刺槐纯林及其混交林相近(2.03 g/m<sup>2</sup>)<sup>[21]</sup>;全磷释放量为0.17 g/m<sup>2</sup>,小于杨树、刺槐纯林及其混交林的释放量(0.32 g/m<sup>2</sup>),高于杉木、火力楠纯林及其混交林(0.037 g/m<sup>2</sup>)和甜楮林(0.12 g/m<sup>2</sup>)的释放量;全钾释放量为1.37 g/m<sup>2</sup>,小于甜楮林的释放量(0.18 g/m<sup>2</sup>),高于杉木、火力楠纯林及其混交林(0.49 g/m<sup>2</sup>)和杨树、刺槐纯林及其混交林(0.58 g/m<sup>2</sup>)的释放量。造成上述差异的原因,一方面可能因为石漠化草地细根养分含量和分解量与其他林地不同,另一方面本区域岩石裸露率高,土层浅薄,具有特殊岩溶干旱特性<sup>[32]</sup>,不利于细根淋溶和土壤酶、微生物的活动,一定程度上限制了细根分解,致使细根分解率低,分解量小,3种石漠化草地的细根分解量仅为247.52 g/m<sup>2</sup>(表3),低于甜楮林的细根分解量(467.75 g/m<sup>2</sup>)和杨树、刺槐纯林及其混交林的细根分解量(522.00 g/m<sup>2</sup>)。

## 4 结论

综上所述,潜在、中度和强度石漠化草地的细根生物量随季节均呈现先增加后降低的趋势,随石漠化程度的加剧均呈现逐渐降低的趋势。细根的年分解率为51.66%—60.79%。有机碳、全氮、全磷、全钾的释放过程差异大,但均表现为净释放状态。细根有机碳、全氮、全磷、全钾的年归还量分别为32.46—161.08、0.24—3.88、0.08—0.32、0.15—2.78 g/m<sup>2</sup>。因此,石漠化草地能够通过细根的快速分解将养分归还到土壤中,以弥补土壤营养匮乏,细根养分的输入又促进了土壤中有机质分解的正激发效应,使中度石漠化草地的土壤养分持续保持在较低水平。

### 参考文献(References):

- [1] Jha P, Mohapatra K P. Leaf litterfall, fine root production and turnover in four major tree species of the semi-arid region of India. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 481-491.
- [2] 魏琳,程积民,井光花,赵洁,苏纪帅,刘建,金晶炜.黄土高原天然草地3种优势物种细根分解及养分释放对模拟氮沉降的响应. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 252-258.
- [3] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan Northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, 125(3): 389-399.
- [4] Norby R J, Jackson R B. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 3-12.
- [5] Sanaullah M, Chabbi A, Leifeld J, Bardoux G, Billou D, Rumpel C. Decomposition and stabilization of root litter in top-and subsoil horizons: what is the difference? *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2): 127-141.
- [6] Yuan Z Y, Chen H Y H. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in Boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: literature review and meta-analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2010, 29(4): 204-221.

- [ 7 ] Solly E F, Schöning I, Boch S, Kandeler E, Marhan S, Michalzik B, Müller J, Zscheischle J, Trumbore S E, Schrumpf M. Factors controlling decomposition rates of fine root litter in temperate forests and grasslands. *Plant and Soil*, 2014, 382(1/2): 203-218.
- [ 8 ] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15: 303-377.
- [ 9 ] Ruess R W, Van Cleve K, Yarie J, Viereck L A. Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(8): 1326-1336.
- [ 10 ] Lin C F, Yang Y S, Guo J F, Chen G S, Xie J S. Fine root decomposition of evergreen broadleaved and coniferous tree species in mid-subtropical China: dynamics of dry mass, nutrient and organic fractions. *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2): 311-327.
- [ 11 ] Chen H, Harmon M E, Sexton J, Fasth B. Fine-root decomposition and N dynamics in coniferous forests of the Pacific Northwest, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(2): 320-331.
- [ 12 ] 高渐飞, 苏孝良, 熊康宁, 周玮. 贵州岩溶地区的草地生态环境与草地畜牧业发展. *草业学报*, 2011, 20(4): 279-286.
- [ 13 ] 陈超, 杨丰, 刘洪来, 姚红艳, 宋高翔. 贵州喀斯特地区草地开垦对土壤微量元素的影响与评价. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 230-237.
- [ 14 ] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(14): 7362-7366.
- [ 15 ] 廖利平, 杨跃军, 汪思龙, 高洪. 杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、火力楠(*Michelia macclurei*)纯林及其混交林细根分布、分解与养分归还. *生态学报*, 1999, 19(3): 342-346.
- [ 16 ] 王娜, 程瑞梅, 肖文发, 沈雅飞. 三峡库区马尾松细根分解及其养分释放. *林业科学研究*, 2017, 30(1): 18-24.
- [ 17 ] Dong L L, Berg B, Sun T, Wang Z W, Han X G. Response of fine root decomposition to different forms of N deposition in a temperate grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 147: 107845.
- [ 18 ] 符裕红, 喻理飞, 黄宗胜. 岩溶区不同根系生境白栎的细根分解. *林业科技开发*, 2015, 29(5): 27-31.
- [ 19 ] 赵熙贵. 浅议贵州草业发展的潜力与对策. *草业科学*, 2006, 23(5): 33-35.
- [ 20 ] Fahey T J, Hughes J W, Pu M, Arthur M A. Root decomposition and nutrient flux following whole-tree harvest of Northern hardwood forest. *Forest Science*, 1988, 34(3): 744-768.
- [ 21 ] 翟明普, 蒋三乃, 贾黎明. 杨树刺槐混交林细根养分动态研究. *林业科学*, 2004, 40(4): 46-51.
- [ 22 ] Vivanco L, Austin A T. Intrinsic effects of species on leaf litter and root decomposition: a comparison of temperate grasses from North and South America. *Oecologia*, 2006, 150(1): 97-107.
- [ 23 ] Berg B, McClaugherty C. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [ 24 ] Yang Y S, Chen G S, Guo J F, Lin P. Decomposition dynamic of fine roots in a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odoratum* in mid-subtropics. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(1): 65-72.
- [ 25 ] Lai Z R, Zhang Y Q, Liu J B, Wu B, Qin S G, Fa K Y. Fine-root distribution, production, decomposition, and effect on soil organic carbon of three revegetation shrub species in Northwest China. *Forest Ecology and Management*, 2016, 359: 381-388.
- [ 26 ] Silver W L, Miya R K. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, 2001, 129(3): 407-419.
- [ 27 ] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer Verlag, 2002: 151-175.
- [ 28 ] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应. *生态学报*, 2013, 33(19): 6303-6313.
- [ 29 ] Lynch J. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, 1995, 109(1): 7-13.
- [ 30 ] Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1363-1371.
- [ 31 ] 李凌浩, 林鹏, 邢雪荣. 武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究. *应用生态学报*, 1998, 9(4): 337-340.
- [ 32 ] 苏樑, 宋同清, 杜虎, 曾馥平, 王华, 彭晚霞, 张芳, 张家涌. 喀斯特峰丛洼地不同植被恢复阶段细根生物量、形态特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 783-789.