

DOI: 10.5846/stxb202005251329

田晓龙,汪依妮,柳鑫,金宝成,何胜江,田思惠,张乾,陈超,赵学春.喀斯特地区不同石漠化程度草地根系分解与周转特征.生态学报,2021,41(10):4203-4212.

Tian X L, Wang Y N, Liu X, Jin B C, He S J, Tian S H, Zhang Q, Chen C, Zhao X C. Root decomposition and turnover characteristics of different rocky desertification grasslands in karst area. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4203-4212.

喀斯特地区不同石漠化程度草地根系分解与周转特征

田晓龙¹, 汪依妮², 柳鑫³, 金宝成¹, 何胜江¹, 田思惠³, 张乾¹, 陈超¹, 赵学春^{1,*}

¹ 贵州大学动物科学学院, 贵阳 550025

² 贵州省草地技术试验推广站, 贵阳 550025

³ 中国科学院植物研究所, 北京 100093

摘要:为探明喀斯特地区不同草地根系动态及其对石漠化的响应,本文以 3 种不同石漠化程度(潜在、中度和强度)的草地为研究对象,采用连续根钻法和分解袋法,于 2017 年 3 月—2018 年 1 月,分析了不同石漠化草地的根系垂直分布、季节动态、分解、周转及其与土壤因子的关系。结果表明,3 种石漠化草地的根系生物量随着土层的深度增加呈逐渐降低的趋势,潜在和中度石漠化草地的根系生物量均呈现明显的单峰型季节变化,强度石漠化草地的根系生物量变化不显著。3 种石漠化草地的根系分解速率受土壤有机碳、全钾、全氮、含水量、电导率、温度等的影响显著,随分解时间均表现为“快—慢—快”的变化趋势,根系的年分解率分别为 64%、56% 和 58%。3 种草地根系完全分解(分解率为 95%)时,分别需要 1174 天、1351 天和 1878 天。随石漠化程度的加剧,3 种草地的根系周转速率呈逐渐降低的趋势,分别为 1.70 次/a、1.36 次/a 和 0.87 次/a。

关键词:天然草地;根系分解;根系周转;石漠化

Root decomposition and turnover characteristics of different rocky desertification grasslands in karst area

TIAN Xiaolong¹, WANG Yini², LIU Xin³, JIN Baocheng¹, HE Shengjiang¹, TIAN Sihui³, ZHANG Qian¹, CHEN Chao¹, ZHAO Xuechun^{1,*}

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

² Guizhou Grassland Technology Test and Extension Station, Guiyang 550025, China

³ Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: Rocky desertification is a major kind of land desertification. The degradation land of karst 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 region of Guizhou, its root is sensitive to the response of to environmental conditions, which determines the growth and development of plants and soil nutrition status. Root dynamics also has an indicator effect on environmental changes, and can reflect the health status of grassland ecosystem. As the intermediary connecting the aboveground and underground parts of vegetation, root plays an important role in the matter exchange and energy transfer between plants and soil, root decomposition and turnover contributes significantly to element cycling in grassland ecosystems. In order to identify the root dynamics and their response to rocky desertification in different

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]1Y076 号);国家自然科学基金项目(31700390);贵州省科技重大专项计划(黔科合重大专项字[2016]3002 号);贵州省草地生态畜牧业人才基地(RCJD 2018-13)

收稿日期:2020-05-25; **网络出版日期:**2021-03-26

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

grasslands in the karst region, this paper took three different rocky desertification grasslands (potential rocky desertification grasslands, moderate rocky desertification grasslands, and intensity rocky desertification grasslands) as research objects. The continuous soil drilling method and root bag method were used to investigate the monthly root dynamic, root production and turnover from March 2017 to January 2018. The results show that the root biomass of the three rocky desertification grasslands decreased gradually with the depth of soil, root biomass in the 0—10 cm soil layer accounted for more than 57% of the total biomass in the 0—30 cm soil layer. The root biomass of potential and medium rocky desertification grasslands showed significantly seasonal variation of single-peak, and the root biomass of the severely rocky desertification grassland was not significant. The root decomposition rate all showed the "fast-slow-fast" status, was significantly influenced by soil organic carbon, total potassium, total nitrogen, soil water content, soil electrical conductivity, soil temperature in the three rocky desertification grasslands. When the complete decomposition rate reached 95%, 1174, 1351 and 1878 days were needed in the three grasslands, respectively. With the intensifying of rocky desertification, the root turnover rate decreased gradually, and were 1.70 times/year, 1.36 times/year, and 0.87 times/year in the three grasslands, respectively. The above conclusions provide an important scientific basis for a deeper understanding of the nutrient cycle, soil fertility maintaining and the restoration of rocky desertification grasslands. It is necessary to strengthen the research on the nutrient release mechanism of the root in rocky desertification grassland in Southwest China.

Key Words: natural grassland; root decomposition; root turnover; rocky desertification

根系是植物吸收养分和水分的主要器官,处于不断生长、衰老、死亡和再生长的动态过程中^[1]。作为连接植被地上部分与地下部分的介质^[2],根系在植物与土壤进行物质与能量交换中起着重要作用^[3]。研究表明,细根作为草地生态系统根系的主要部分,仅占地下总生物量的 3%—30%,但其周转却消耗了生态系统净初级生产力的 10%—75%^[1,4-5]。根系的动态主要表现为生物量、垂直分布、分解和周转的变化,受生态系统类型、气候和土壤等环境因子影响明显^[1]。

石漠化是喀斯特地区植被破坏,水土流失,基岩大面积裸露,土地生产力严重下降,地表呈现石质荒漠景观的演变过程或结果^[6-7],已成为制约我国西南地区可持续发展最严重的生态地质环境问题^[8-9]。贵州省是中国典型喀斯特山区,具有多相多层复杂界面体系,环境界面变异度高,环境容量低,稳定性差,承灾能力低等特征,属典型的生态脆弱区^[10],对外界的干扰表现出不稳定特征^[11]。作为石漠化最严重的省份之一,贵州轻度以上石漠化面积为 3.59 万 km²,占国土面积的 20.39%;其中,轻度石漠化面积 2.27 万 km²,中度石漠化面积 1.05 万 km²,强度石漠化面积 0.27 万 km²;处于潜在石漠化趋势的土地面积为 4.37 万 km²^[12]。

草地作为贵州喀斯特地区主要植被类型之一,根系对环境条件的反应敏感^[13],决定着植物的生长发育和土壤营养状况,其动态对环境变化亦有指示作用,可反映草地生态系统的健康状况^[14]。目前,对喀斯特地区根系的研究主要集中于植被恢复过程中根系的形态特征^[15-16]、生物量、分布^[17-19]和碳储量^[20]等方面,而对草地根系研究尤其根系分解与周转的研究报道较少。不同石漠化程度草地在植被、土壤条件等方面均呈现出极大差异,是否预示着地下根系,尤其是根系生物量、分解和周转率是否也会发生相应变化?引起这种变化的原因又是什么?本文旨在通过野外调查,比较分析不同石漠化程度草地根系的生物量、分解和周转及相应的环境因素,探讨不同石漠化草地根系动态变化机理,为更深入地了解喀斯特地区草地养分循环过程,恢复石漠化脆弱生态系统和草地经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省位于我国西南地区,介于 24°37'—29°13'N, 103°36'—109°35'E 之间,属中亚热带季风湿润气候,雨热同期,年平均降雨量 1000—1300 mm,平均气温 15 ℃,植被类型丰富,碳酸盐岩分布广泛,主要为石灰岩

和白云岩,92.5%的面积为山地和丘陵^[21]。土壤类型以黄壤、红壤和黄棕壤为主。现有各类天然草地面积达 $4.28 \times 10^4 \text{ km}^2$,占贵州省土地总面积的 24.3%^[22]。维管植物 203 科 1025 属 4725 种(包括变种),以禾本科、豆科、菊科、莎草科植物为主要优势种和建群种。

本研究选取 3 种不同石漠化程度草地(潜在、中度和强度)作为研究对象,其中,潜在石漠化草地位于黔南州独山县上司镇,年降水量 1429.9 mm,年平均温度 15.9 ℃,土壤类型以黄壤为主;中度石漠化草地位于毕节市大方县星宿乡,年降水量 1155.1 mm,年平均温度 11.8 ℃,土壤类型以黄壤为主;强度石漠化草地位于安顺市关岭县普利乡,年降水量 1205.1—1656.8 mm,年平均温度 16 ℃,土壤类型以黄壤为主。基本情况见表 1。

表 1 三种不同石漠化程度草地的基本情况

Table 1 Characteristics of the three different rocky desertification grasslands

草地类型 Grassland types	标记 Mark	位置 Location	经纬度 Longitude & latitude	海拔 Altitude/m	pH 值 pH value	岩石裸露率 Percentage of exposed rock/%	建群种 Constructive species
潜在石漠化 Potential rocky desertification	PD	贵州黔南州上司镇	E107°32' N25°38'	1035	6.07	20—30	五节芒 (<i>Miscanthus floridulus</i>)
中度石漠化 Medium rocky desertification	MD	贵州毕节市星宿乡	E105°52' N25°23'	1820	4.61	51—70	五节芒 (<i>Miscanthus floridulus</i>)
强度石漠化 Severe rocky desertification	SD	贵州安顺市普利乡	E105°31' N25°45'	1270	6.82	71—90	青香茅 (<i>Cymbopogon caesius</i>)

1.2 试验设计

在上述每个草地内分别设置 3 个 25 m × 25 m 的样方。沿样方对角线选取 3 个样点,于 2017 年 3 月至 2018 年 1 月,每隔 2 月进行土壤样品采集,采集时去掉地表凋落物,利用土钻依次分别钻取 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 土层土样约 300 g,用于测定土壤理化指标(含水量、pH 值、电导率等)。并在用环刀(内径 50.46 mm,高 50.02 mm)垂直采样测量上述土层容重,采用土壤温度计测定土壤温度。

同时,沿样方对角线选取 3 个 50 cm × 50 cm 的采样点,利用连续土柱法垂直挖取样点内 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 土层的土样。将采集的土样置于细筛上用水冲洗,仅留干净的根系,根据根系的颜色、弹性、表皮是否存在区分死根系与活根系,于 65 ℃ 下烘干至恒重后称重,根据每次采样所得死根系与活根系的生物量计算根系年死亡量、根系年生产量、死根系现存量及活根系现存量。

采用尼龙网袋法进行根系分解实验^[23]。于 2017 年 3 月,称取上述处理好的根系 3 g 与样地内 10 cm 深的磨碎土壤混匀,装入尼龙袋(长 10 cm,宽 15 cm,孔径 0.2 mm)中,埋入 10—15 cm 深的土层中,每个样地放置 25 袋。每隔 2 月从各样地取 5 个分解袋,带回实验室,去除杂质,转移置信封,置于 65 ℃ 下烘干至恒重后称重,计算根系分解率。

1.3 室内分析

土壤样品置于干燥阴凉处风干,过 0.15 mm 孔径土壤筛,用 pH 计和 DDSJ-308 型电导仪测定土壤 pH 值和电导率,采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法测定土壤有机碳含量,凯氏定氮法测定土壤全氮含量,钼锑抗比色法测定土壤全磷含量,火焰光度计法测定土壤全钾含量。

1.4 数据处理

根系周转率计算方法如下:

$$D = \sum_{i=1} v_i \times d_i$$

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

$$P = P_{\max} - P_{\min} + M$$

$$T = \frac{P}{Y}$$

式中, v_i 为第 i 次 ($i=1,2,3,4,5$) 取样根系的分解速率; d_i 为第 i 次取样死根系的生物量; M 为根系年死亡量 ($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$); P 为根系年生产量 ($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$); D 为根系年分解量 ($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$); T 为根系周转速率 (次/a); $M_{\max}$ 为死根系现存量的最大值; $M_{\min}$ 为死根系现存量的最小值; $P_{\max}$ 为活根系现存量的最大值; $P_{\min}$ 为活根系现存量的最小值; Y 为活根系现存量的平均值。

应用 Olson 指数衰减模型对根系分解速率进行拟合^[24]:

$$F_t = F_0 e^{-kt}$$

式中, t 是分解时间, F_0 为起始时根系重量, F_t 为时间 t 时根系残留重量, k 是根系分解速率系数。

基础数据利用 Excel 进行整理归类; 采用 SPSS 20.0 进行方差分析和逐步回归分析; 利用 SigmaPlot 14.0 软件作图。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 土壤理化性质和土壤养分

不同草地类型的土壤理化性质指标见表 2。土壤容重、温度、电导率和 pH 等土壤理化性质指标在 3 种不同石漠化程度草地中具有显著地差异, 随着石漠化程度的增加, 土壤温度、电导率和 pH 均表现为先降低后增加的趋势 ($P<0.05$), 而土壤含水量变化不显著 ($P>0.05$)。其中, 中度石漠化草地的土壤温度、土壤电导率和土壤 pH 均显著低于潜在和强度石漠化草地。

表 2 三种不同石漠化程度草地的土壤理化性质

Table 2 Soil physiochemical properties of the three different rocky desertification grasslands

草地类型 Grassland types	土壤含水量 Soil water content/%	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm^3)	土壤温度 Soil temperature/ $^{\circ}\text{C}$	土壤电导率 Soil electrical conductivity/ ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	土壤 pH Soil pH
潜在石漠化 Potential rocky desertification	28.08±5.35a	1.20±0.26ab	26.36±5.46a	1.27±0.25a	6.07±0.10b
中度石漠化 Medium rocky desertification	27.82±6.05a	1.28±0.26a	15.79±1.49b	0.99±0.10b	4.61±0.32c
强度石漠化 Severe rocky desertification	29.09±2.01a	1.07±0.11b	26.77±3.73a	1.29±0.26a	6.83±0.26a

同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

不同草地类型的土壤养分情况见图 1。土壤全氮、全磷和全钾等土壤养分指标在不同石漠化程度草地均表现为差异显著 ($P<0.05$)。其中, 强度石漠化草地的土壤全氮和全磷显著高于潜在和中度石漠化草地 ($P<0.05$); 潜在石漠化草地的土壤全钾显著高于中度和强度石漠化草地 ($P<0.05$); 各草地类型的土壤有机碳差异不显著 ($P>0.05$)。

2.2 根系生物量分布和季节动态

不同草地类型的根系生物量垂直分布特征表明 (表 3), 潜在、中度和强度石漠化草地各土层的根系生物量差异显著 ($P<0.05$), 随着土层的增加, 均表现为逐渐降低的趋势。其中, 潜在、中度和强度石漠化草地的根系生物量最大值均出现在 0—10 cm 土层, 0—10 cm 占 0—30 cm 土层根系生物量的比例分别为 57.66%、81.02% 和 72.18%。

不同草地类型根系生物量的季节变化见图 2。潜在、中度和强度石漠化草地根系生物量月平均值分别为 3355.65、2944.02、1806.80 g/m^2 。潜在和中度石漠化草地根系生物量均呈现先增加后降低的趋势, 在 9 月达到最大值, 分别为 6051.44、3591.38 g/m^2 ; 强度石漠化草地群落根系生物量无明显的变化 ($P>0.05$)。

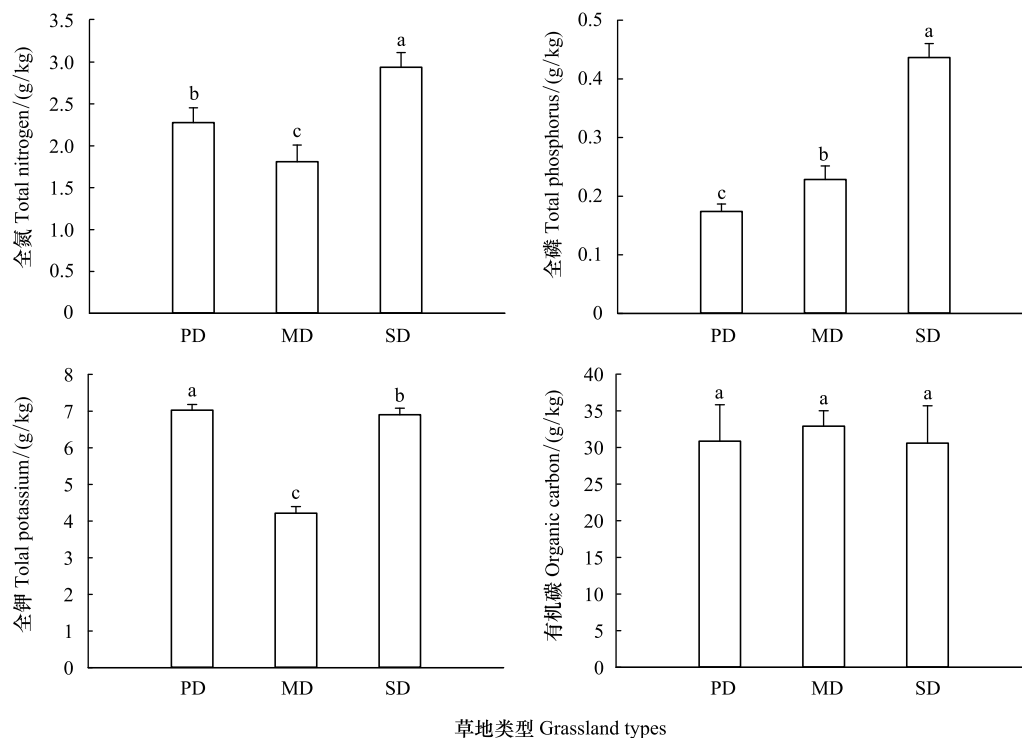


图1 三种不同石漠化程度草地的土壤养分

Fig.1 The soil nutrient situation of the three different rocky desertification grasslands

不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), PD: 潜在石漠化草地 Potential rocky desertification grassland; MD: 中度石漠化草地 Medium rocky desertification grassland; SD: 强度石漠化草地 Severe rocky desertification grassland

表3 三种不同石漠化程度草地根系生物量的垂直分布

Table 3 Vertical distribution of the root biomass in three different rocky desertification grasslands

参数 Parameter	土层深度 Soil depth/cm	草地类型 Grassland types		
		潜在石漠化 Potential rocky desertification	中度石漠化 Medium rocky desertification	强度石漠化 Severe rocky desertification
根系生物量	0—10	1934.99±1268.49b	2385.12±628.15b	1304.14±393.70b
Root biomass/(g/m ²)	10—20	973.21±378.53c	412.57±176.97c	415.07±114.29c
	20—30	447.46±229.05c	164.40±64.41c	150.25±92.70d
	0—30	3355.65±1410.87a	2944.02±765.02a	1806.80±470.67a

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 根系分解和周转

不同草地类型的根系分解速率随时间的变化规律见图3,潜在、中度和强度石漠化草地的根系分解速率随时间变化明显。分解初期较大,60 d后逐渐降低,在180 d时下降至最小值,随后逐渐增大。

不同草地类型的根系分解残留量随分解时间的变化表明(表4),潜在、中度和强度石漠化草地根系的年分解速率分别为64%、56%和58%。当根系分解量达到50%时,潜在石漠化草地需要173 d,中度石漠化草地需要304 d,强度石漠化草地需要233 d;当根系分解量达到95%时,潜在石漠化草地需要1174 d,中度石漠化草地需要1351 d,强度石漠化草地需要1878 d。

不同草地类型根系的年分解量、死亡量、生产力 and 周转速率如表5所示。潜在、中度和强度石漠化草地根系的年分解量、年死亡量、年生产力和周转速率差异变化显著 ($P < 0.05$),随着石漠化程度的增加,根系年死亡量、年生产力和周转速率逐渐降低。其中,潜在石漠化草地的根系年死亡量分别为中度石漠化草地、强度石漠化草地的1.40、2.46倍;潜在石漠化草地的根系年生产力分别为中度石漠化草地、强度石漠化草地的1.61、

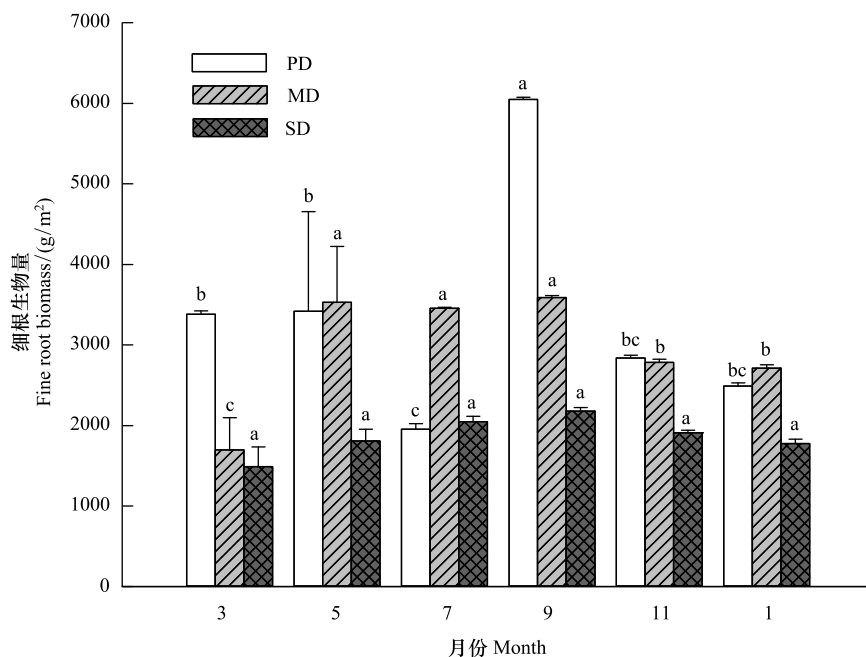


图2 三种不同石漠化程度草地根系生物量的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of root biomass in three different rocky desertification grasslands

同一样地不同字母表示不同月份差异显著 ($P < 0.05$)

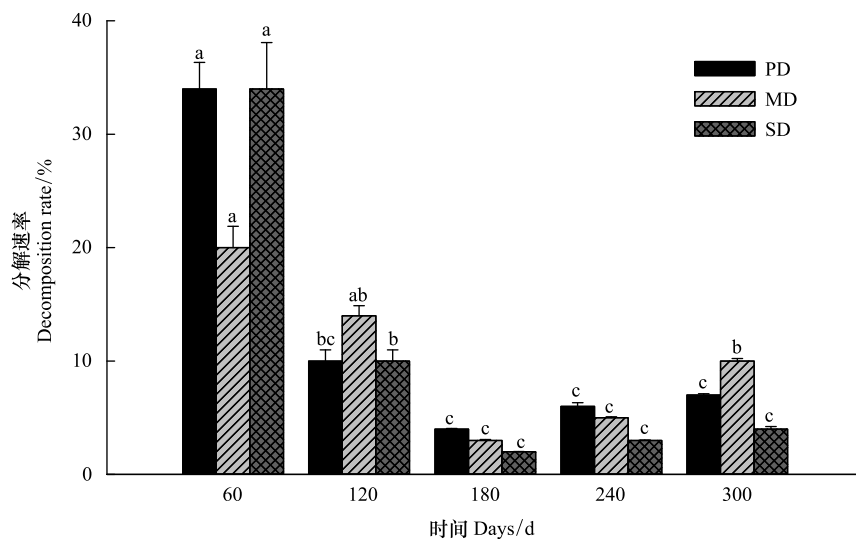


图3 三种不同石漠化程度草地根系分解速率随时间的变化

Fig.3 Variation of root decomposition rate with decomposition time in three different rocky desertification grasslands

同一样地不同字母表示不同时间差异显著 ($P < 0.05$)

3.83倍;潜在石漠化草地的根系周转速率分别为中度石漠化草地、强度石漠化草地的 1.24、1.94 倍。根系年分解量最大的是中度石漠化草地,为强度石漠化草地的 2.65 倍及潜在石漠化草地的 3.36 倍。

2.4 根系动态与土壤因子的关系

不同草地类型的根系分解速率与土壤有机碳、全氮、全钾、全磷等土壤养分因子的逐步回归分析表明(表6),影响潜在石漠化草地根系分解速率的主要因子是土壤全氮;影响中度石漠化草地根系分解速率的主

要因子是土壤全钾、土壤全氮和土壤有机碳;影响强度石漠化草地根系分解速率的主要因子是土壤有机碳

表 4 三种不同石漠化程度草地根系分解残留量随分解时间的变化
Table 4 Root residual with decomposition time in three different rocky desertification grasslands

草地类型 Grassland types	拟合方程 Equation	R^2	50%分解时间 50% decomposition time/d	95%分解时间 95% decomposition time/d	年分解率 Annual decomposition rate/%
潜在石漠化 Potential rocky desertification	$F_t = 2.2362e^{-0.0023t}$	0.99 **	173	1174	64
中度石漠化 Medium rocky desertification	$F_t = 2.9303e^{-0.0022t}$	0.96 **	304	1351	56
强度石漠化 Severe rocky desertification	$F_t = 2.0806e^{-0.0014t}$	0.92 **	233	1878	58

显著性水平 Significance levels: * *, $P < 0.01$

表 5 三种不同石漠化程度草地根系年分解量、死亡量、生产力和周转速率

Table 5 Root annual decomposition amount, annual mortality amount, annual production, and turnover rates in three different rocky desertification grasslands

草地类型 Grassland types	分解量 Decomposition/ ($g\ m^{-2}\ a^{-1}$)	死亡量 Mortality/ ($g\ m^{-2}\ a^{-1}$)	生产力 Productivity/ ($g\ m^{-2}\ a^{-1}$)	周转速率 Turnover rate/ (times/a)
潜在石漠化 Potential rocky desertification	131.92±11.51b	1264.12±23.07a	4748.02±920.11a	1.70±0.55a
中度石漠化 Medium rocky desertification	443.45±34.94a	905.56±20.20b	2941.80±701.40b	1.36±0.29ab
强度石漠化 Severe rocky desertification	167.19±21.53b	512.89±50.67c	1240.05±260.52c	0.87±0.22b

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

表 6 三种不同石漠化程度草地根系分解速率与土壤养分的逐步回归分析

Table 6 Stepwise regression analysis of root decomposition rate and soil nutrients in three different rocky desertification grasslands

草地类型 Grassland types	逐步回归方程 Stepwise regression equations	n	R^2
潜在石漠化 Potential rocky desertification	$V = -1.317 + 0.649N$	15	0.69 **
中度石漠化 Medium rocky desertification	$V = -0.614 + 0.316K - 0.028SOC + 0.195N$	15	0.90 **
强度石漠化 Severe rocky desertification	$V = 0.785 - 0.021SOC$	15	0.84 **

显著性水平 Significance levels: * *, $P < 0.01$, V:分解速率 Decomposition rate/%; K:土壤全钾 Soil total potassium/(g/kg); SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg); N:土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)

不同草地类型的根系分解速率与土壤物理性质的逐步回归分析表明(表 7),影响潜在石漠化草地根系分解速率的主要因子是土壤电导率;影响中度石漠化草地根系分解速率的主要因子是土壤含水量;影响强度石漠化草地根系分解速率的主要因子是土壤温度、土壤含水量和土壤电导率。

3 讨论

3.1 根系生物量对石漠化响应

根系生物量的季节动态能够揭示草地植物的生长状况、土壤理化现状及根系周转快慢等特征。研究认为根系生物量在 1 年中常出现 1 个^[25]或 2 个^[26]峰值,峰值出现在春季、晚夏或秋季等,受植物自身特性及外界环境条件的影响,存在一定的波动^[27]。本研究结果表明,潜在、中度石漠化草地的根系生物量均在 9 月份最

大,峰值出现在晚夏,与 Du 等^[25]对西南喀斯特地区植被恢复过程中根系生物量的研究结论相似,其原因是此阶段土壤养分有效性较高,温湿条件较好^[28],利于植物的生长发育,根系生物量较高。

表 7 三个石漠化草地根系分解速率与土壤物理性质的逐步回归分析

Table 7 Stepwise regression analysis of root decomposition rate and soil physical properties in three different rocky desertification grasslands

草地类型 Grassland types	逐步回归方程 Stepwise regression equations	<i>n</i>	<i>R</i> ²
潜在石漠化 Potential rocky desertification	$V = 0.462 - 0.264\text{SEC}$	15	0.38 *
中度石漠化 Medium rocky desertification	$V = 0.372 - 0.009\text{SWC}$	15	0.37 *
强度石漠化 Severe rocky desertification	$V = -0.046 - 0.038\text{ST} + 0.048\text{SWC} - 0.169\text{SEC}$	15	0.76 **

显著性水平 Significance levels: **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$; V: 分解速率 Decomposition rate/%; SEC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity/($\mu\text{s}/\text{cm}$); SWC: 土壤含水量 Soil water content/%; ST: 土壤温度 Soil temperature/ $^{\circ}\text{C}$

喀斯特地区土壤具有高度的空间异质性,不同土层间养分差异明显^[29]。土壤空间异质性是导致根系分布空间差异的主要原因^[30],石漠化程度越剧烈,土壤越瘠薄且土壤持水力越差,草地根系生长和分布的越具有特殊性。不同石漠化程度的草地根系生物量分布均随土层深度增加而逐渐减少,这与其他研究结果基本一致^[18,25]。根系在 0—10 cm 土层的生物量占 0—30 cm 土层总生物量的 57% 以上,且 10—30 cm 土层的根系生物量急剧下降,可能与喀斯特特殊的地貌结构有关。研究区属亚热带季风气候区,水热资源丰富但分布不均,岩石裸露率高,土层浅薄且不连,二元结构明显,湿润气候条件下的特殊岩溶干旱重^[18],水分成为限制因子。因此,喀斯特地区植物常具有发达而强壮的根系,通过攀附岩石、穿透裂隙,吸收储存在岩石空隙、裂隙中的水分和养分,发展高密度的浅层根系提高浅层水分利用效率,以适应特殊的环境^[31-32],从而喀斯特植物根系发育具有明显的表聚现象^[18]。另一方面,3 个群落的建群种均为禾本科植物,其根系属浅根性根系,加之石漠化的土层相对较浅,有机质和养分都储存于土壤表层,根系为获取更多的资源而趋于浅层分布。

3.2 根系分解和周转对石漠化的响应

根系分解主要是在淋溶、破碎等物理作用下,伴随土壤生物代谢对化学元素的吸收和释放,不断与外界环境进行物质交换的过程^[33],其分解速率主要受土壤的理化性质、环境条件和根系本身的化学特性影响^[34]。逐步回归分析表明在生态环境脆弱的石漠化地区,土壤水分和养分是其生态系统功能实现的主要限制因子,根系分解和周转作为养分循环的关键环节受水分影响明显,土壤养分亦成为根系分解和周转的间接限制因子。3 种不同石漠化程度草地的根系分解均表现为“快—慢—快”的变化特征,与前人的研究结果相似^[35-36]。主要因为分解初期受非生物作用的影响较大,根系中碳水化合物等可溶解物质快速淋溶;分解后期主要受生物作用影响,随着分解进行,大多数可溶性化合物消耗,木质素、纤维素等难溶物质残留下来,由微生物缓慢降解^[34]。另一方面,根系年分解量在中度石漠化草地中显著高于潜在和强度石漠化草地(表 5, $P < 0.05$),可能是因为典型喀斯特石漠化生态系统土壤随着石漠化程度增加是一个先退化后改善的趋势^[37];土壤养分缺乏时,植物会显著提高根系生物量在总根系中的比例^[38],以提高根系对土壤资源的获取能力,加快根系周转,从而促进根系分解。结合表 1 和图 1 可知,中度石漠化草地的土壤情况较潜在、重度石漠化草地差,中度石漠化草地根系通过快速分解以弥补土壤养分的缺乏。

根系周转主要是植物为了适应环境的变化,需发育新根系代替老根系以保证对土壤水分和营养物质的吸收,从而保持植物生长和生命活动的继续^[39]。Jackson 等分析表明,植物的细根周转速率在 0.02—2.64 次/a 之间,平均周转速率为 0.56 次/a^[40]。本研究中潜在、中度和强度石漠化草地的根系周转率分别为 1.70 次/a、1.36 次/a 和 0.87 次/a,处于 Jackson 等报道的周转速率范围内,但高于其研究的平均周转速率。主要因为随着石漠化等级不断增加,裸露岩石聚集效应逐渐明显,汇集大气沉降养分和岩溶产物,增加了土壤氮素和有机物的输入;同时随着石漠化程度增加,流失的土壤越来越少,导致水土流失越来越弱,土壤养分流失微弱,强度

石漠化环境土壤养分和物理性能得到了明显的改善^[37]。因此,较高的根系周转速率可能是由于石漠化环境下的裸露岩石聚集效应,使土壤环境得到改善从而加速了根系的周转,以利于植物适应石漠化环境。另一方面,3种石漠化草地群落建群种和优势种均为禾本科植物,根系为须根系,相关研究表明植物根系直径越小,比根长和比根面积越大,与土壤微生物接触机会就更多,被微生物分解利用的可能就更大^[41],因此周转速率较高。也有研究报道表明,植物维持相对较高的根系生物量需要消耗大量的营养物质和能量,保持较高的根系周转率可以以较低现存根系生物量满足植物旺盛的生命活动对水分和营养物质的需求,是植物降低能耗的一种适应方式^[42]。

参考文献 (References):

- [1] Norby R J, Jackson R B. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 3-12.
- [2] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205-218.
- [3] Farrar J F, Jones D L. The control of carbon acquisition by roots. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 43-53.
- [4] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecology*, 1989, 70(5): 1346-1354.
- [5] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, Boon P, O'Hara J, Asbjornsen H. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil*, 1995, 187(2): 159-219.
- [6] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. *Land Degradation and Development*, 2004, 15(2): 115-121.
- [7] Xu E Q, Zhang H Q, Li M X. Mining spatial information to investigate the evolution of Karst rocky desertification and its human driving forces in Changshun, China. *Science of the Total Environment*, 2013, 458-460: 419-426.
- [8] 杨胜天, 朱启疆. 论喀斯特环境中土壤退化的研究. *中国岩溶*, 1999, 18(2): 169-175.
- [9] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 29-32, 79-79.
- [10] 何敏, 王鹤松, 孙建新. 基于植被生产力的西南地区生态系统脆弱性特征. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 429-438.
- [11] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 屈双荣. 西南岩溶山地生态脆弱性研究. *中国岩溶*, 2002, 21(1): 25-29.
- [12] 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.
- [13] Bloomfield J, Vogt K, Wargo P M. Tree root turnover and senescence//Waisel Y, Eshel A, Kafafi U, eds. *Plant Roots: The Hidden Half*. New York, USA: Marcel Dekker, 1996: 363-381.
- [14] Vogt K A, Publicover D A, Bloomfield J, Perez J M, Vogt D J, Silver W L. Belowground responses as indicators of environmental change. *Environmental and Experimental Botany*, 1993, 33(1): 189-205.
- [15] 杜有新, 潘根兴, 李恋卿, 胡忠良, 王新洲. 贵州中部喀斯特山地不同植被生态系统细根生态特征及养分储量. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 1926-1932.
- [16] 苏樑, 杜虎, 王华, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 陈莉, 张芳. 喀斯特峰丛洼地不同植被恢复阶段优势种根系构型特征. *西北植物学报*, 2018, 38(1): 150-157.
- [17] 罗东辉, 夏婧, 袁婧薇, 张忠华, 祝介东, 倪健. 我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 611-618.
- [18] 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.
- [19] Ni J, Luo D H, Xia J, Zhang Z H, Hu G. Vegetation in Karst terrain of southwestern China allocates more biomass to roots. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 799-810.
- [20] 卢立华, 农友, 李华, 杨予静, 明安刚, 雷丽群, 何日明, 陈琳. 植被恢复模式对石漠化生态系统碳储量的影响. *生态学报*, 2019, 39(19): 7229-7236.
- [21] 符裕红, 喻理飞, 黄宗胜, 李豪, 侯德华. 典型岩溶石漠化区根系生境及其类型研究. *中国水土保持科学*, 2012, 10(2): 66-72.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331.
- [25] Du H, Liu L, Su L, Zeng F P, Wang K L, Peng W X, Zhang H, Song T Q. Seasonal changes and vertical distribution of fine root biomass during vegetation restoration in a Karst area, Southwest China. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 9: 2001.
- [26] Yang L Y, Wu S T, Zhang L B. Fine root biomass dynamics and carbon storage along a successional gradient in Changbai mountains, China.

- Forestry: An International Journal of Forest Research, 2010, 83(4): 379-387.
- [27] Guo L B, Halliday M J, Gifford R M. Fine root decomposition under grass and pine seedlings in controlled environmental conditions. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(1): 22-29.
- [28] Espeleta J F, Donovan L A. Fine root demography and morphology in response to soil resources availability among Xeric and Mesic Sandhill tree species. *Functional Ecology*, 2002, 16(1): 113-121.
- [29] 俞月凤, 何铁光, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杜虎, 韩畅, 李莎莎. 喀斯特峰丛洼地不同类型森林养分循环特征. *生态学报*, 2015, 35(22): 7531-7542.
- [30] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, Mooney H A, Sala O E, Schulze E D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411.
- [31] Schwinning S. The ecohydrology of roots in rocks. *Ecohydrology*, 2010, 3(2): 238-245.
- [32] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, Ding Y L. Rooting characteristics of two widely distributed woody plant species growing in different Karst habitats of Southwest China. *Plant Ecology*, 2014, 215(10): 1099-1109.
- [33] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick P L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, 125(3): 389-399.
- [34] Silver W L, Miya R K. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, 2001, 129(3): 407-419.
- [35] 王娜, 程瑞梅, 肖文发, 沈雅飞. 三峡库区马尾松不同直径细根分解动态及其影响因素. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 391-398.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Wilson J B. Shoot competition and root competition. *Journal of Applied Ecology*, 1988, 25(1): 279-296.
- [39] Stothoff S A, Or D, Groeneveld D P, Jones S B. The effect of vegetation on infiltration in shallow soils underlain by fissured bedrock. *Journal of Hydrology*, 1999, 218(3/4): 169-190.
- [40] 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.
- [41] 唐仕姗, 杨万勤, 王海鹏, 熊莉, 聂富育, 徐振锋. 川西亚高山 3 个优势树种不同径级根系分解特征. *应用生态学报*, 2015(10): 2921-2927.
- [42] Burke M K, Raynal D J. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil*, 1994, 162(1): 135-146.