

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.023

李雪, 李春培, 李永梅, 等. 典型植物根系对紫色土化学属性和化学蚀变指数的影响. 土壤, 2024, 56(2): 425–432.

典型植物根系对紫色土化学属性和化学蚀变指数的影响^①

李雪, 李春培, 李永梅, 范茂攀, 赵吉霞*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 为探究植物根系形态对紫色土风化的影响, 以云南元谋干热河谷区典型植被(锥连栎、华西小石积、牛筋草和裸地)覆盖条件下的紫色土为研究对象, 研究了不同植被类型根系在不同土层的分布特征及其对各土层养分含量和化学蚀变指数(CAI)的影响。结果表明: 裸地、乔木、灌木、草本覆盖下紫色土化学蚀变指数分别为 73.98~78.87、78.53~84.68、77.89~82.18、77.91~81.04, 且均表现为随土层深度增加而降低。各植被的根系均集中分布于 0~20 cm 土层, 不同植物根系体积存在明显差异, 乔木、草本和灌木覆盖下的根系体积与裸地相比分别增加 145.17%、144.78%、74.98%, 乔木、灌木和草本的根系表面积与裸地相比分别增加 651.16%、610.79%、181.62%。土壤中养分含量随土层深度的增加而降低。随着土层深度的增加, 有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量呈降低趋势, 裸地和乔木覆盖下的 pH 呈增加趋势, 而草本和灌木覆盖下的 pH 则呈相反趋势。相关性分析结果表明, 土壤的 CAI 值与土壤有机质、碱解氮含量呈显著正相关($P<0.05$), 相关系数高达 0.520、0.591; 土壤 pH、有效磷含量与土壤 CAI 值呈显著负相关($P<0.05$), 土壤 CAI 值与根系体积、根系表面积呈极显著正相关($P<0.01$), 相关系数高达 0.693、0.621。综上, 植物根系对于土壤的化学风化具有较明显的促进作用。

关键词: 植被类型; 根系形态; 土壤养分; 化学蚀变指数(CAI); 紫色土

中图分类号: S1 **文献标志码:** A

Influence of Typical Plant Roots on Chemical Properties and Chemical Alteration Index of Purple Soil

LI Xue, LI Chunpei, LI Yongmei, FAN Maopan, ZHAO Jixia*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In this study, the purple soils under different typical vegetation cover conditions (*Quercus franchetii* Skan, tree; *Osteomeles schwerinae* C.K.Schneid, shrub; *Eleusine indica* (L.) Gaerth, grass) were selected in the dry-hot valley area of Yuanmou of Yunnan Province in order to investigate the effects of root morphological characteristics in different soil layers on soil nutrient contents and chemical alteration index (CAI). The results showed that soil CAI was ranged from 73.98–78.87 for bare soil (CK), 78.53–84.68 under trees, 77.89–82.18 under shrubs and 77.91–81.04 under grasses, respectively, and all were decreased with the increase of soil depth. The roots of all kinds of plants were concentrated within the 0–20 cm soil layer, and plant type significantly affected root volume, compared to CK, root volume was enhanced by 145.17% under trees, 144.78% under grasses and 74.98% under shrubs, respectively; and root surface area was increased by 651.16% under trees, 610.79% under shrubs and 181.62% under grasses, respectively. Soil nutrient contents were generally decreased with the increase of soil depth, particularly for the contents of organic matter (SOM), alkali-hydrolyzable (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK), soil pH showed an increasing trend in CK and under trees, but showed a decreasing trend under grasses and shrubs. The results of correlation analysis showed that soil CAI value was significantly positively correlated with SOM and AN content, with correlation coefficients as high as 0.520 and 0.591 ($P<0.05$); soil pH and AP content were significantly negatively correlated with soil CAI value ($P<0.05$), and soil CAI value was highly significantly positively correlated with root volume and root surface area, with correlation coefficients as high as 0.693 and 0.621 ($P<0.01$), respectively. In conclusion, plant root

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42007002)和云南省基础研究计划项目(202101AT070220)资助。

* 通讯作者(zhaojixiacc@163.com)

作者简介: 李雪(1998—), 女, 云南临沧人, 硕士研究生, 主要从事土壤发生演化研究。E-mail: lixue0614@163.com

distribution has a more significant contribution to the chemical weathering of purple soils.

Key words: Vegetation type; Root morphology; Soil nutrients; Chemical alteration index; Purple soil

风化是土壤形成的基础,是自然生态系统中植物所需矿质养分的重要来源,同时也是生物地球化学过程中的重要组成部分^[1]。化学风化作为地球表面元素化学循环的一个重要过程,为人类了解古气候环境的演变过程提供了重要的研究记录。矿物的化学风化作用作为一个持续的、动态的地球化学过程,提高了土壤中的盐基离子含量,进而促进了植物营养元素的长期有效性及土壤化学成分的可持续性^[2],并影响海洋化学性质和全球地质时间尺度的大气 CO₂ 浓度调节^[3]。矿物风化产生的盐基离子通常被认为具有对流域大气化学沉降的缓冲作用^[4]。土壤中盐基离子主要是通过植物吸收和淋溶而损失,若矿物风化产生的盐基离子不能补充植物吸收,并消耗酸沉降中的 H⁺,则将发生土壤酸化^[5-7]。因此,土壤风化速率是确定土壤生态系统酸缓冲负荷持久性的重要参数^[8],对评价区域尺度酸沉降的缓冲作用具有重要意义^[9-10]。植物在土壤发生和发育过程中起着极为重要的作用,其通过维持生态平衡、改善生态环境而对地表物质的演化过程产生显著的影响^[11]。植物对水、大气、矿物养分和微量元素生物地球化学循环的影响主要通过影响光合作用、自身生长、养分利用、水分利用、蒸腾作用和凋落物降解等过程来实现^[12-13]。土壤的形成过程是植物营养物质的地质大循环(地质淋溶过程)和生物小循环(生物积累过程)之间的协同过程。其中,植物根系对成土过程的发展具有重要的影响。植物根系通过保持或改变土壤物理结构和化学成分等,对地球薄层土壤圈生态和生产功能产生重要影响。其具体作用主要体现在:①植物根系具有重要的作用,能够大大提高土壤的抗侵蚀能力;②植物根系能够穿透土壤,促进土壤剖面和水平面上的物质交换和水分循环;③植物根系分泌物中的低分子化合物(单糖、氨基酸、有机酸和酚类等)能够活化根际难溶的钙、磷、钾、砷等养分元素^[14],同时植物根系分泌的柠檬酸、草酸、苹果酸等物质对于根际营养物质的提取、有害金属物质的脱毒、矿物质的风化和根际生物群落的调节等均有重要的作用^[15-16]。

紫色土作为我国重要的土壤类型之一,由于其继承了母岩的高肥力属性,土壤生产能力较高,加之风化速度快且侵蚀能力强,因而被视为一种特殊的土类。紫色土在我国主要分布在于长江上游部分地区,其中四川与云南分布较为集中^[17-18],分布面积超过全

国紫色土分布面积的 75%。已有较多学者开展了针对紫色土风化的研究,研究多集中于紫色土的物理与化学风化,主要探讨了自然状态下紫色母岩的风化崩解^[19],以及酸环境下母岩矿物崩解^[20]形成土壤的过程。而在土壤风化过程中植物的贡献是不可忽视的,李勇等^[21]的研究表明植物根系生长对黄土的风化具有显著的促进作用,而在紫色土的风化研究中植物的贡献鲜有报道。因此,本研究以云南元谋典型植被覆盖下的紫色土为研究对象,开展植物根系分布对紫色土风化的影响研究,以为紫色土的生物风化研究提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省元谋县干热河谷区凉山乡(25°44'12" N ~ 25°44'18" N, 101°56'40" E ~ 101°56'42" E),该区域属于南亚热带干热季风气候,年均气温和年均降水量分别为 22 °C 和 643 mm。基于前期调研,以该地区的主要植被锥连栎(*Quercus franchetii* Skan, 乔木)、华西小石积(*Osteomeles schwerinae* C.K.Schneid, 灌木)、牛筋草(*Eleusine indica*(L.) Gaerth, 草本)覆盖下的紫色土为主要研究对象。

1.2 样品采集

在研究区内,选择典型植被覆盖地设置样带(地),并以多年植被覆盖度较低的紫色土裸地为对照(CK)。各样地海拔均分布于 1 887 ~ 1 907 m,标准样带设置为 10 m×10 m,草本与裸地覆盖下的每一标准样带沿对角线取 3 个 1 m×1 m 的样地,在每个样地中选取植被盖度均匀的 25 cm×25 cm 的样方,采用土块法^[22]进行土壤样品与根系的分层采集;乔木与灌木在标准样地中选取生长良好的 3 株,在植株主树干两侧挖掘相互平行的条状沟,使条状沟的长度与树冠的半径相等,在两平行的条状沟之间形成的土梁上进行土壤样品、根系的分层采集。样品采集挖掘至母岩层,每 20 cm 划分为一层,其中草本、裸地与灌木覆盖条件下土层挖掘至 80 cm 深度(具体层次划分为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 cm),乔木覆盖下的土层挖掘至 90 cm 深度(具体层次划分为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 90 cm)。将各植被覆盖条件下相同深度土层的 3 个土壤样品混匀后装入密封袋带回实验室,风干后用于土壤养分和风化程度的测

表 1 采样点植被覆盖情况
Table 1 Vegetation covers at different sampling points

植被类型	土属	优势植物	海拔(m)	群落状况
乔木	紫泥土	锥连栎(<i>Quercus franchetii</i> Skan)	1 904	树龄 10~20 a, 密度 2 500 棵/公顷, 郁蔽度 50%, 平均株高 3 m
灌木	紫泥土	华西小石积(<i>Osteomeles schwerinae</i> C.K.Schneid.)	1 888	树龄 10~20 a, 郁蔽度 40%, 平均株高 1.5 m
草本	紫泥土	牛筋草(<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaerth)	1 887	总盖度 70%, 牛筋草占 80%
裸地	紫泥土	无	1 907	总盖度 10%, 鼠尾粟占 100%

定。同时挑拣出每个土层中的根系装入密封袋,用于分析根系的分布情况。样品采集点信息见表 1。

1.3 指标测定

1.3.1 根系指标 将现场收集到的各土层根系运回实验室,清洗后将根系置于扫描仪(仪器型号: Epson perfection V800 photo)带水的扫描盘中,扫描过程中避免扫描盘中根系相互交叉。用根系分析软件(WinRHIZO)分析根系表面积、根系体积。

1.3.2 土壤化学属性 根据《土壤农化分析》^[23]中方法测定各土层 pH、有机质(SOM)、速效钾(AK)、有效磷(AP)、碱解氮(AN),其中 pH 采用 pH 计测定;SOM 采用重铬酸钾外加热法;AP 采用钼蓝比色法;AK 采用火焰光度计法;AN 采用碱解扩散法。

1.3.3 化学蚀变指数 本研究选用土壤化学蚀变指数(CAI)反映不同土层的化学风化程度。首先,采用乙酸铵和水将各土层土样中交换态和水溶态的盐基离子去除,以防止水溶态和交换态盐基离子引起 CAI 值计算误差。其次,去除盐基离子后的样品采用偏硼酸锂熔融-ICP 测定 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、CaO 的含量,用于计算 CAI 值,计算公式为:

$$CAI = \left[\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO^*} \right] \times 100$$

式中:氧化物表示其摩尔质量百分比, CaO^* 为硅酸盐矿物中的 Ca 含量。

1.4 数据分析

试验数据通过 Excel 2019 进行预处理,采用 SPSS 27.0 进行 Pearson 相关性分析,采用 Origin 2021 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 植被类型对紫色土化学性质的影响

研究区裸地、草本、乔木和灌木覆盖下的紫色土 pH 分别为 7.0~7.5、6.5~8.0、5.25~6.5 和 6.3~6.6。随着土层深度的增加,裸地和灌木覆盖土壤 pH 呈下降趋势,而草地和乔木覆盖土壤 pH 则呈相反趋势(如

图 1A)。在同一土层深度下,土壤 pH 因植被覆盖差异而不同。其中,在 0~20 cm 土层,不同植被覆盖下土壤 pH 表现为裸地>灌木>草本>乔木,与裸地相比,灌木、草本与乔木覆盖下分别降低了 10.24%、11.19%、28.98%;在 >20 cm 土层,不同植被覆盖下土壤 pH 表现为草本>裸地>灌木>乔木,与裸地相比,草本覆盖下增加了 3.04%(20~40 cm 土层)、12.06%(40~60 cm 土层)、11.23%(60~80 cm 土层),灌木与乔木覆盖下分别降低了 10.71%、24.56%(20~40 cm 土层),10.06%、16.5%(40~60 cm 土层),9.70%、10.99%(60~80 cm 土层)。

裸地、草本、乔木和灌木 4 类植被覆盖的紫色土 SOM 含量分别为 4.43~13.35、4.50~10.10、4.29~14.39 和 5.91~12.73 g/kg,且不同植被覆盖类型下 SOM 含量均随土层深度的增加而呈现降低趋势(图 1B)。在 <60 cm 土层,不同植被覆盖下 SOM 含量表现为乔木>裸地>灌木>草本,与裸地相比,乔木覆盖下 SOM 含量分别增加了 7.75%(0~20 cm 土层)、22.61%(20~40 cm 土层),灌木与草本覆盖下 SOM 含量分别降低了 4.61%、17.67%(0~20 cm 土层),11.98%、27.98%(20~40 cm 土层)。在 40~60 cm 土层,不同植被覆盖下 SOM 含量表现为草本>乔木>灌木>裸地,灌木、乔木、草本覆盖下 SOM 含量较裸地分别提高了 64.42%、42.56%、17.93%(40~60 cm 土层)。在 60~80 cm 土层,不同植被覆盖下 SOM 含量表现为:灌木>乔木>草本>裸地,与裸地相比,灌木、乔木与草本覆盖下 SOM 含量分别增加了 30.07%、3.41%、1.47%。

裸地、草本、乔木、灌木 4 类植被覆盖下紫色土 AN 含量为:14.00~50.75、18.67~68.25、28.00~63.00、30.33~73.50 mg/kg,不同植被覆盖下 AN 含量随土层深度的增加呈下降趋势(图 1C)。在 0~20 cm 土层,不同植被覆盖下 AN 含量表现为灌木>裸地>乔木>草本,与裸地相比,灌木覆盖条件下 AN 含量增加了 7.69%,乔木与草本覆盖条件下降低了 7.69%、25.64%。在 20~40 cm 土层,4 种不同植被覆盖下

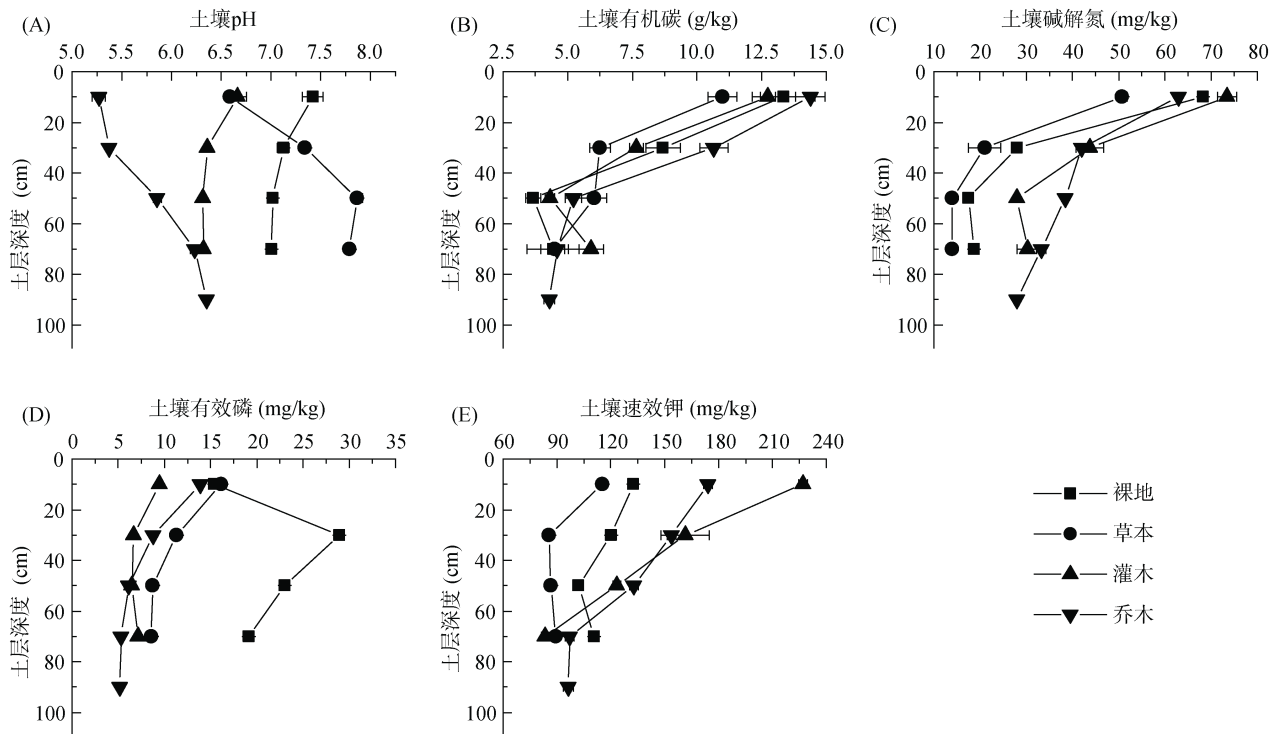


图 1 不同植被覆盖下紫色土剖面 pH 和养分分布

Fig. 1 pH and nutrient distributions in purple soil profiles under different vegetation covers

AN 含量呈现：灌木>乔木>裸地>草本，与裸地相比，灌木与乔木覆盖下分别增加了 56.25%、50.00%。在 >40 cm 土层，不同植被覆盖下 AN 含量表现为乔木>灌木>裸地>草本，与裸地相比，乔木与灌木覆盖下分别增加了 120.00%、60.00%(40 ~ 60 cm 土层)，78.13%、62.50%(60 ~ 80 cm 土层)，草本覆盖下分别降低了 20.00%(40 ~ 60 cm 土层)、25.00%(60 ~ 80 cm 土层)。

裸地、草本、乔木、灌木 4 类植被覆盖下紫色土 AP 含量分别为 15.40 ~ 19.15、8.60 ~ 16.15、5.20 ~ 13.9、7.15 ~ 9.45 mg/kg，除裸地 AP 含量随土层深度的增加先增加后降低、最大值出现在 20 ~ 40 cm 土层外，其他植被类型覆盖下 AP 含量随土层深度的增加呈下降趋势(图 1D)。在 0 ~ 20 cm 土层，不同植被覆盖下 AP 含量表现为草本>裸地>乔木>灌木，与裸地相比，草本覆盖下增加了 4.87%，乔木与灌木覆盖下分别降低了 38.64%、9.74%。在 20 ~ 40 cm 土层，不同植被覆盖下 AP 含量呈裸地>草本>乔木>灌木，与裸地相比，草本、乔木与灌木覆盖下 AP 含量降低了 60.97%、69.78%、76.97%。在 >40 cm 土层，AP 含量呈现了裸地>草本>灌木>乔木，与裸地相比，草本、灌木与乔木覆盖下分别降低了 62.03%、71.74%、73.48%(40 ~ 60 cm 土层)，55.09%、62.66%、72.15%(60 ~ 80 cm 土层)。

不同植被覆盖下紫色土 AK 含量均呈随土层深度的增加而降低的趋势(图 1E)。裸地、草本、乔木、灌木覆盖下 AK 含量分别为：110.67 ~ 132.5、89.5 ~ 115.5、96.5 ~ 174、83.5 ~ 227 mg/kg。在 0 ~ 40 cm 土层，不同植被覆盖下 AK 含量表现为灌木>乔木>裸地>草本，与裸地相比，灌木、乔木覆盖下 AK 含量分别增加了 71.32%、31.32%(0 ~ 20 cm 土层)，34.21%、27.98%(20 ~ 40 cm 土层)，草本覆盖下降低了 12.83%(0 ~ 20 cm 土层)、28.95%(20 ~ 40 cm 土层)。在 40 ~ 60 cm 土层，不同植被覆盖下 AK 含量呈现乔木>灌木>裸地>草本，与裸地相比，乔木与灌木覆盖下 AK 含量增加了 30.39%、21.08%，草本覆盖下降低了 15.20%。在 60 ~ 80 cm 土层，不同植被覆盖下土壤 AK 含量呈现裸地>乔木>草本>灌木，与裸地相比，乔木、草本与灌木覆盖下土壤 AK 含量分别降低了 12.35%、19.13%、24.55%。

2.2 植被类型对紫色土风化程度的影响

乔木、灌木、草本和裸地覆盖下紫色土化学蚀变指数分别为 78.53 ~ 84.68、77.89 ~ 82.18、77.91 ~ 81.04、73.98 ~ 78.87。乔木覆盖下 CAI 值随土层深度的增加而降低，且同一土层深度下，乔木覆盖下土壤 CAI 值皆高于其他植被覆盖；草本覆盖下 CAI 值随土层深度增加呈先增加后降低的趋势，最大值出现在 20 ~ 40 cm 土层；灌木与裸地覆盖下 CAI 值随土层深

度的增加呈先降低后增加的趋势，最大值出现在 0~20 cm 土层。在 0~20 cm 与 40~60 cm 土层，不同植被覆盖的紫色土 CAI 值表现为乔木>灌木>草本>裸地，相比于裸地，乔木、灌木和草本覆盖下分别增加了 7.37%、4.20%、2.76%(0~20 cm 土层)，7.80%、5.62%、3.13%(40~60 cm 土层)；在 20~40 cm 土层，

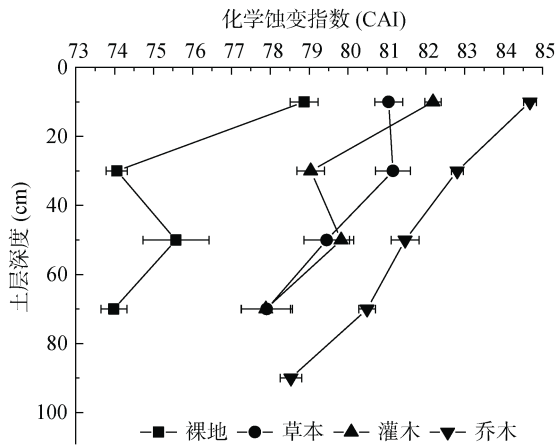


图 2 不同植被覆盖下不同土层深度的紫色土 CAI 值
Fig. 2 CAI values of purple soils in different soil depths under different vegetation covers

不同植被覆盖的紫色土 CAI 值表现为乔木>草本>灌木>裸地，相比于裸地，乔木、草本与灌木覆盖下分别增加了 11.83%、9.59%、6.74%；在 60~80 cm 土层，不同植被覆盖下的紫色土 CAI 值表现为乔木>草本>灌木>裸地，相比于裸地，乔木、草本和灌木覆盖下分别增加了 8.80%、5.31%、5.28%。

2.3 植被类型对紫色土根系分布的影响

4 类植被根系分布情况调查表明，草本与裸地覆盖条件下根系仅存于 0~20 cm 土层，灌木根系在 60~80 cm 土层无根系分布，乔木根系在 0~90 cm 土层皆有分布。各植被单位体积根系表面积均随土层深度的增加而降低(图 3A)，最大值皆出现在 0~20 cm 土层，且呈现乔木>草本>灌木>裸地的规律。乔木、草本、灌木、裸地覆盖条件下单位体积根系表面积分别为 94 011.43、93 862.50、67 097.44、38 345.83 cm²/m³，相比于裸地，乔木、草本和灌木覆盖条件下分别增加了 145.17%、144.78%、74.98%。在 20~40 cm 与 40~60 cm 土层，灌木覆盖下的单位体积根系表面积分别比乔木高 72.69%、24.33%。

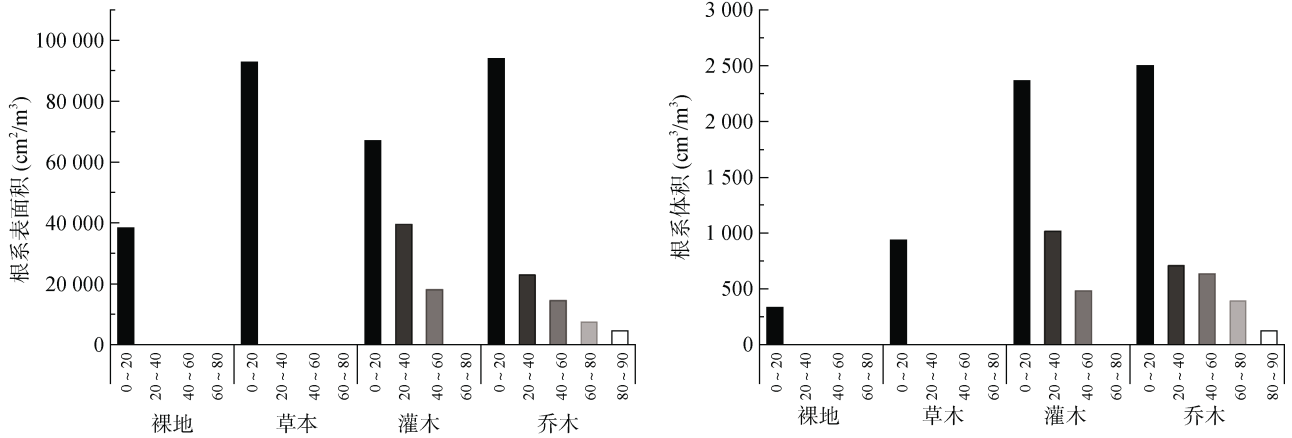


图 3 不同植被根系分布形态参数

Fig. 3 Root morphological parameters of different vegetation types

表 2 不同植被覆盖下土壤养分、根系形态与 CAI 值的相关性

Table 2 Correlations between soil CAI with pH, nutrients and root morphological parameters under different vegetation covers

	根系体积	根系表面积	pH	AN	SOM	AK	AP	CAI
根系体积	1							
根系表面积	0.857**	1						
pH	-0.550*	-0.421	1					
AN	0.805**	0.823**	-0.415	1				
SOM	0.723**	0.804**	-0.27	0.879**	1			
AK	0.878**	0.679**	-0.456	0.805**	0.701**	1		
AP	-0.138	0.017	0.300	-0.054	0.192	-0.023	1	
CAI	0.693**	0.621**	-0.562*	0.591*	0.520*	0.475	-0.559*	1

注：*表示在 P<0.05 水平显著相关，**表示 P<0.01 水平极显著相关。

4 类植被类型覆盖下根系体积随土层深度的增加而降低, 最大值出现在 0 ~ 20 cm 土层, 且乔木 > 灌木 > 草本 > 裸地, 根系体积分别为 2497.60、2363.38、936.38、332.50 cm³/m³, 相比于裸地, 乔木、灌木和草本覆盖条件下分别增加了 651.16%、610.79%、181.62%; 在 20 ~ 40 cm 与 40 ~ 60 cm 土层, 乔木覆盖下的根系体积分别高于乔木 43.56%、23.50%。

2.4 紫色土风化程度的影响因素

紫色土风化程度与土壤养分、根系分布特点的相关性表明, 根系体积、根系表面积与紫色土 CAI 值呈极显著正相关($P < 0.01$); 土壤 pH、AP 含量和与紫色土 CAI 值呈显著负相关($P < 0.05$); 土壤 SOM、AN 含量与紫色土 CAI 值在呈显著正相关($P < 0.05$); 土壤 AK 含量与 CAI 值无显著相关性。

3 讨论

3.1 不同植被覆盖下紫色土剖面根系分布对养分的影响

本研究发现, 4 类不同植被覆盖下, 根系的分布随土层深度的增加而降低, SOM、AN、AP、AK 含量随土层深度的增加呈下降趋势。乔木与草本覆盖下紫色土 pH 随土层深度的增加而增加, 灌木与裸地覆盖下则随之降低后趋于稳定。各剖面养分的分布表现出表聚的现象^[24-25], 主要受植物枯枝落叶的堆积与分解、死根的腐解、根系分泌物的影响。水分、土壤孔隙以及根系的穿插均有助于养分的下渗。各养分指标中, AN 与 SOM 含量随土层深度的增加降低最为明显, 与李青山等^[25]、郑力文^[26]的研究结果相一致, 因为植被的着生是碱解氮、有机质的主要来源。韩琳和王鸽^[27]的研究表明土壤中的氮大部分以可溶性 NO₃⁻、NO₂⁻和 NH₄⁺形态淋溶至土壤下层。4 类不同植被中, 裸地与草本覆盖条件下的紫色土剖面 AP 总体含量高于乔木与灌木。这一现象的出现可能受植被根系分泌物中低分子量有机酸的种类以及含量的影响。根系对土壤磷素的影响主要通过根系分泌物实现, 根系的分布特征决定了根系分泌物在土体里的分布以及影响范围。与乔木和灌木相比, 裸地与草本覆盖条件下的根系集中分布在 0 ~ 20 cm 土层, 且根系较为密集。根系分泌物中低分子量有机酸对土壤中难溶性磷具有较好的活化作用, 且不同有机酸类型对磷的活化作用效果不同。Harrold 和 Tabatabai^[28]的研究表明, 含有羧基和羟基官能团的脂肪族酸或含有邻羟基官能团的酚酸的活化效果强于其他官能团组合的类似有机酸。张乃于^[29]的研究表明, 常见的根系分泌物

中对磷的活化效果: 草酸 > 柠檬酸 > 其他酸, 表明草酸和柠檬酸在土壤磷素的活化作用中具有较高的潜力。裸地覆盖下土壤 AP 含量随土层深度的增加呈先上升后降低的趋势, 在土层深度为 20 ~ 40 cm 出现最大值, 这一现象的出现可能由表层土壤无植被覆盖, 导致水分下渗带动表层磷的向下迁移造成。不同植被覆盖下的紫色土 AK 含量与根系在剖面中的分布规律相似, 乔木与灌木覆盖条件下的紫色土 AK 含量随土层深度的增加具有明显的下降趋势, 裸地、草本覆盖下的紫色土 AK 含量在 40 ~ 80 cm 土层趋于稳定。相比于裸地与草本, 乔木与灌木对土壤钾元素具有更强的活化作用。紫色土受成土母质的影响, 导致土壤含钾量较高。除根系的穿插为土壤中钾元素的迁移提供路径外, 根系对土壤中 AK 的吸收促进了土壤中各形态钾的相互转换, 根系的分泌物则会促进土壤中钾离子的释放。崔建宇等^[30]的研究表明, 当根系分泌物中的低分子量有机酸浓度为 1mmol/L 时, 各有机酸对土壤钾的活化效果: 草酸 > 酒石酸 > 苹果酸。钾在土壤中的移动性介于氮与磷之间, 具有良好的迁移性。

3.2 不同植被覆盖下紫色土剖面根系分布对土壤 CAI 的影响

本研究发现, 不同植被覆盖下紫色土 CAI 值表层高于底层, 与根系和养分在土壤剖面中的分布规律一致, 且土壤 CAI 值与植物根系体积、表面积呈极显著正相关, 4 类植被中乔木根系的表面积与体积值最大, 在相同的土层深度下乔木覆盖下的 CAI 值最大。土壤 CAI 值与土壤 pH、AP 含量呈显著负相关, 与土壤 SOM、AN 含量呈显著正相关。李勇等^[21]的研究发现, 植物根系对土壤风化作用的强化效应随土层深度的增加而减小, 覆盖的植被种类不同, 其根系对土壤风化的加强作用具有明显的差别, ≤ 1 mm 的根系对土壤风化具有较好的强化作用。本研究中涉及的 4 类植被根系中均含有 ≤ 1mm 的根系, 其对土壤的风化具有较好的促进作用。4 类植被覆盖下, 裸地的土壤风化程度整体最低, 乔木、灌木与草本 3 类植被覆盖下的土壤属于自然形成, 土壤剖面表层的化学蚀变指数相近。随土层深度的增加, 根系对土壤风化的影响开始出现明显的区别, 根系的长度决定了根系对土壤风化影响的区域范围。草本植物根长受限, 导致根系对土壤的风化作用效果集中在 0 ~ 20 cm 土层, 乔木与灌木的根系对风化的影响仍在深层土层持续。植物驱动土壤矿物风化的大量研究表明, 根系对土壤风化的直接作用主要表现在: 根系分泌物中低分

子量有机酸以及 H^+ 的酸解、根际微生物的对土壤矿物的分解^[31]。酸性环境对土壤矿物的风化具有促进作用^[20], 随 pH 的降低促进风化的效果越好。Dontsova 等^[32]研究表明, 与无菌根定殖相比, 被几种外生菌根真菌定植的苏格兰松树幼苗能够在更大程度上溶解磷灰石并吸收相关的磷, 且幼苗对白云母的风化作用也有所增强。植物根系对土壤风化间接驱动作用还体现在有机质的分解为土壤微生物提供丰富的碳源与氮源。土壤的风化过程除受植被着生的影响外, 还受成土母岩、气候等因素的影响。虽然紫色土与其他土壤相比具有风化快的特点, 在本研究中根系的各指标与土壤 CAI 值具有较明显的相关性, 但自然的成土过程极为缓慢, 植物根系对土壤风化的影响较为有限。

4 结论

1) 4 类植被覆盖类型的根系在紫色土中主要分布在 0~20 cm 土层, 均呈现随土层深度的增加而减少的趋势, 根系表面积与体积也随之降低。乔木根系分布至 90 cm 深度, 灌木根系分布至 60 cm 深度, 草本与裸地覆盖下的根系仅存在于 0~20 cm 土层。

2) 4 类不同植被覆盖条件下, 土壤养分含量均随土层深度的增加而降低, 其中有机质、碱解氮与速效钾含量下降幅度最为显著。有机质与碱解氮含量主要受地表枯枝落叶腐解的影响。紫色土含钾量丰富, 土壤表层根系活化最为强烈, 钾元素得以释放, 促进了养分的表聚现象。有效磷含量的变化较小, 受根系分布的影响较小, 在土壤中的移动性较差。

3) 乔木、灌木、草地与裸地覆盖下的土壤 CAI 值随土层深度的增加而降低, 表明紫色土表层风化程度高, 深层风化程度低。土壤 CAI 值与根系表面积、根系体积呈极显著正相关($P < 0.01$), 相关系数高达 0.621、0.693, 表明根系的分布对紫色土的风化具有促进作用。

参考文献:

[1] Hartmann J, West A J, Renforth P, et al. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(2): 113–149.

[2] Guicharnaud R, Paton G I. An evaluation of acid deposition on cation leaching and weathering rates of an Andosol and a Cambisol[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88(1/2/3): 279–283.

[3] Goldsmith S T, Carey A E, Johnson B M, et al. Stream geochemistry, chemical weathering and CO_2 consumption

potential of andesitic terrains, Dominica, Lesser Antilles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(1): 85–103.

[4] Hornung M, Le-Grice S, Brown N, et al. The role of geology and soils in controlling surface water acidity in Wales[M]//Edwards RW, Gee AS, Stoner JH. *Acid Waters in Wales*. Dordrecht: Springer, 1990: 55–66.

[5] Augustin F, Houle D, Gagnon C, et al. Evaluation of three methods for estimating the weathering rates of base cations in forested catchments[J]. *CATENA*, 2016, 144: 1–10.

[6] Sverdrup H, Warfvinge P. Weathering of primary silicate minerals in the natural soil environment in relation to a chemical weathering model[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1988, 38(3/4): 387–408.

[7] 李春培, 李雪, 汪璇等. 酸化环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其酸缓冲容量的影响[J/OL]. *土壤学报*: 1–16 [2023-09-15].

[8] Bain D C, Roe M J, Duthie D M L, et al. The influence of mineralogy on weathering rates and processes in an acid-sensitive granitic catchment[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(7/8): 931–937.

[9] 杨金玲, 张甘霖. 土壤风化速率研究及其应用[J]. *土壤*, 2010, 42(6): 882–888.

[10] Drever J I, Hurcomb D R. Neutralization of atmospheric acidity by chemical weathering in an alpine drainage basin in the North Cascade Mountains[J]. *Geology*, 1986, 14(3): 221.

[11] 付天岭. 植被参与对煤矸石表生地球化学过程的影响[D]. 贵阳: 贵州大学.

[12] 马源, 张德罡. 草地根际过程对养分循环调控机制研究进展[J]. *草业学报*, 2020, 29(11): 172–182.

[13] 张昌顺, 李昆. 人工林养分循环研究现状与进展[J]. *世界林业研究*, 2005, 18(4): 35–39.

[14] 朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 等. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(6): 1107–1116.

[15] 翁倩, 袁大刚, 余兴星, 等. 植物多酚与低分子量有机酸联合作用对紫色土铁形态分布的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 575–580.

[16] Liu Y, Xu R K. The forms and distribution of aluminum adsorbed onto maize and soybean roots[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(3): 491–502.

[17] 刘刚才. 紫色土侵蚀规律及其防治技术[M]. 成都: 四川大学出版社, 2008.

[18] 何毓蓉. 川中丘陵干旱区紫色土的耐旱性及其与土壤物理特性的关系[J]. *土壤*, 1983, 15(4): 144–148.

[19] 张丹, 陈安强, 刘刚才. 紫色泥岩崩解特性差异的试验研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(2): 459–464.

[20] 赵吉霞, 陆传豪, 刘刚才. 紫色母岩在不同酸环境中的崩解分维特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 127–133.

[21] 李勇, 张晴雯, 李璐, 等. 植物根系强化黄土土层化学风化速率的作用[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 5–9.

[22] 马维伟, 王辉, 李广, 等. 甘南尕斯湖湿地退化过程中植被生物量变化及其季节动态[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5091–5101.

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- [24] 匡文浓, 钱建强, 马群, 等. 五种荒漠灌木群落土壤有机碳垂直分布及其与根系分布的关系[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 275–281.
- [25] 李青山, 王冬梅, 信忠保, 等. 漓江水陆交错带典型灌木群落根系分布与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5104–5109.
- [26] 郑力文. 林木根系对土壤性质的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [27] 韩琳, 王鸽. 氮沉降增加对青藏高原林地氮淋溶通量的影响[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(3): 86–93.
- [28] Harrold S A, Tabatabai M A. Release of inorganic phosphorus from soils by low-molecular-weight organic acids[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37(9/10): 1233–1245.
- [29] 张乃于. 低分子量有机酸对土壤磷的综合效应及应用研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2020.
- [30] 崔建宇, 任理, 王敬国, 等. 有机酸影响矿物钾释放的室内试验与数学模拟[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 341–350.
- [31] 孙启彪. 外生菌根真菌促进矿物风化机制及其生态效应[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [32] Dontsova K, Balogh-Brunstad Z, Chorover J. Plants as drivers of rock weathering[J]. *Biogeochemical cycles: Ecological drivers and environmental impact*, 2020: 33–58.