

川中丘陵区桤木、柏木对紫色土风化与养分特征的影响

陆传豪^{1,2}, 邓利梅^{1,2}, 崔荣阳^{1,2}, 汪璇^{1,2}, 周涛^{1,2}, 刘刚才¹

(1.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 研究川中丘陵区桤木、柏木树种对紫色土风化与养分特征的影响, 为该区水土流失防治与农业生产提供科学依据。[方法] 选择川中丘陵区万安小流域为研究区, 以桤木、柏木为研究对象, 运用野外调查、剖面挖掘采样等方法, 研究桤木、柏木对紫色土剖面风化与养分的影响。[结果] ①桤木、柏木下土壤剖面分形维数分别为 2.07 和 2.13, 较对照分别提高了 6.47% 和 9.03%, 其中柏木对物理风化的提升幅度高于桤木。②桤木、柏木、对照剖面的化学风化程度差异并不显著, 桤木、柏木生长对土壤剖面化学风化的影响较小。③桤木、柏木下土壤剖面综合肥力指数较之对照分别提高了 14.08% 和 11.27%, 其中桤木的提升效果优于柏木, 其对有机质、全 N、碱解 N、速效 K 的提升尤为显著。④桤木、柏木根系分布密度与剖面分形维数、综合肥力指数均呈现较强的正相关关系 ($p < 0.05$), 但与化学风化指数的相关关系并不显著 ($p > 0.05$)。[结论] 桤木、柏木在提升川中丘陵区紫色土物理风化速率与养分特征方面均发挥了积极的作用。

关键词: 川中丘陵区; 桤木; 柏木; 紫色土; 风化; 养分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0034-09

中图分类号: S714.5

文献参数: 陆传豪, 邓利梅, 崔荣阳, 等. 川中丘陵区桤木、柏木对紫色土风化与养分特征的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 34-42. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.006; Lu Chuanhao, Deng Limei, Cui Rongyang, et al. Effects of alder and cypress on weathering and nutrient characteristics of purple soil in hilly area of Central Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 34-42.

Effects of Alder and Cypress on Weathering and Nutrient Characteristics of Purple Soil in Hilly Area of Central Sichuan Province

Lu Chuanhao^{1,2}, Deng Limei^{1,2}, Cui Rongyang^{1,2}, Wang Xuan^{1,2}, Zhou Tao^{1,2}, Liu Gangcai¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The influence of alder and cypress on the weathering and nutrient characteristics of purple soil profiles in the hilly area of Central Sichuan Province was analyzed, in order to provide a scientific basis for soil erosion control and agricultural production. [Methods] The Wanan basin in the hilly area of Central Sichuan Province was selected as the study area, and alder and cypress were used as the study objects. Field survey and profile excavation were conducted to study the effects of alder and cypress on the weathering and nutrients of purple soil profiles. [Results] ① The profile fractal dimension of alder and cypress were 2.07 and 2.13, respectively, which increased by 6.47% and 9.03%, respectively, compared with the control, among which the effect of cypress was better than that of alder. ② The differences in chemical weathering between alder, cypress, and control profiles were not significant. Alder and cypress growth has less effect on chemical weathering of the profile. ③ The integrated fertility index of alder and cypress profile increased by 14.08% and 11.27%, respectively, compared with the control. Alder showed a better enhancement effect than cypress, which was especially obvious in organic matter, total N, alkali-hydrolyzable N, and effective K. ④ The root distribution density of alder and cypress showed a significant positive correlation

收稿日期: 2021-06-21

修回日期: 2021-08-11

资助项目: 四川省重点研发项目“防止水体富营养化的紫色土坡耕地施肥的限量值及增效技术”(2021YFN0010); 国家自然科学基金“气候变化对紫色土容许土壤流失量的影响”(41471232)

第一作者: 陆传豪(1988—), 男(汉族), 浙江省诸暨市人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: luchh@foxmail.com。

通讯作者: 刘刚才(1967—), 男(汉族), 四川省安岳县人, 博士, 研究员, 主要从事土壤生态与健康、土壤侵蚀与水土保持方面的研究。Email: liugc@imde.ac.cn。

($p < 0.05$) with the profile fractal dimension and the integrated fertility index, however, the correlation with chemical weathering index was not significant ($p > 0.05$). [Conclusion] Alder and cypress significantly promote the physical weathering rate and nutrients characteristics of purple soil in the hilly area of Central Sichuan Province.

Keywords: hilly area of Central Sichuan Province; alder; cypress; purple soil; weathering; nutrients

植物是影响风化的主要因素之一,根系的根劈作用能有效促进物理风化,凋落物分解与根系分泌产生的有机酸会腐蚀岩石和土壤中的矿物,加速化学风化^[1]。土壤表层是受植物凋落物和根系影响最为集中的区域,对植物带来的影响敏感度最高^[2];而在表层以下,植物主要通过根系对剖面的风化状况产生影响。在山地区域许多暴露的垂直剖面中,可以观察到植物根系穿越土层,而后沿着裂隙进入岩层向下生长,并使得剖面变得较为破碎,风化层厚度显著提升的现象^[3]。在植物对风化影响方面的研究已有较长的历史,早在 1949 年 Jackson 和 Sheldon^[4]首次研究了树木根系在石灰岩崩解过程中所起的作用;而后 Almeida 等^[5]分析了高等植物在促进风化成土方面的能力;李勇等^[6]2005 年在黄土高原的研究表明,不同剖面的风化差异,主要受直径 ≤ 1 mm 须根在剖面中的缠绕分布特征影响。Hasenmueller 等^[7]2017 年在宾夕法尼亚州的研究表明,植物根系在页岩风化成土过程中,对矿物成分转变、元素迁移等均有显著的促进作用。但迄今为止,受制于根系作用周期长、野外挖掘观测困难等,研究进展一直较为缓慢,许多问题尚不明晰。养分是形成土壤肥力的物质基础,养分积累与肥力形成也是风化成土过程中土壤开始发育并显著区别于母质的主要特征之一。植物在改变剖面风化进程的同时,对土壤乃至整个剖面的养分特征也产生着显著的影响。植物在生长过程中不断从地下环境中吸取必要的营养元素,而其凋落物、根系等的腐败又将养分元素归还于土壤,这一系列过程影响了养分的积累和分布^[7]。在植物对土壤养分影响方面已有较为悠久的历史,研究方法包括了单项指标评价、主成分分析法^[8]、内梅罗指数法等^[9],近年来,将地统计学与 GIS 等数字化技术进行结合的研究方法,逐步成为了该领域的研究热点^[10]。已有研究^[11]表明植物生长能显著提升土壤养分含量,但截止目前,在乔木对剖面养分特征的影响方面尚研究较少。川中丘陵区是紫色土的主要分布区域,面积约 1.20×10^5 km²,区内人口承载量大,农耕活动密集,是四川省社会经济的核心区^[12]。20 世纪 50 年代后,该区原生林地在人口压力下,被大量转化为耕地,林地面积占比一度降至 9%,致使水土流失加剧,耕地肥力下降等^[13]。20 世纪 70 年代起,该区开始大量营造桉柏混交林,至 20 世纪末,桉柏混交林面积已占到

全区林地面积的近 1/3。目前,桉柏混交林及其演替而成的柏木纯林已成为川中丘陵区主要林地类型^[14]。但至今为止,在桉木、柏木对紫色土风化成土影响方面的研究尚未见报道,对桉木、柏木影响下紫色土的养分特征尚缺乏基本了解。为此,本研究选择川中丘陵区盐亭县境内的万安小流域为研究区,以桉木、柏木为研究对象,通过野外调查、剖面挖掘采样等,分析桉木、柏木对紫色土风化和养分特征的影响。研究有利于提升对紫色土的了解,促进农业的可持续发展,维持区域的生态安全以及水土保持措施的有效性等,并可为同类研究的开展提供借鉴。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本次研究选择川中丘陵区盐亭县万安小流域(31°16'N, 105°27'E)为研究区,该小流域为典型的川中紫色土丘陵地貌,地处涪江支流弥江、湍江分水岭附近,流域面积 1 236 hm²。该地为亚热带湿润季风气候,年均气温 17.3 °C,无霜期 294 d,多年平均降雨量 826 mm,降雨年内分布不均,大部分降雨集中在 5—9 月^[15]。流域海拔 400~600 m,地形以中深丘陵为主,坡度介于 3°~15°之间。小流域出露地层为侏罗系上统蓬莱镇组上部,与白垩系下统城壩岩群下部,两组呈假整合接触,砂泥岩互层,裂隙发育强烈。主要土壤类型为钙质紫色土和水稻土。小流域土地利用类型中林地面积占比 56.3%,林地植被类型中柏木为优势树种,同时分布有桉木、松树等乔木,以及马桑等灌木^[16]。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 基于前期调查,于 2019 年 6 月在万安小流域内林龄在 50 a 左右的成熟林地中,选择位于不同坡向、不同坡位的 20 m×20 m 样区 6 个,每个样区中选择生长高度和直径接近、生长健康、干形通直的成年桉木、柏木植株各 3~5 株,进行剖面挖掘。挖掘前记录 GPS 坐标、海拔等,并测定树高和胸径。而后按照剖面挖掘方法^[1],沿树木根系往下挖掘剖面,并在相邻的无植物生长区域挖掘对照剖面。挖掘完成后,首先沿坑壁在横向和纵向放置 1 m×1 m 的刻度尺,进行剖面观测并记录,而后从表层往下按照 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 分层采样。指标测定前将样品按四分法取出 1 kg,挑出杂物,风

干,过筛确定颗粒组成,并研磨过筛备用。本次试验分别挖掘柞木、柏木下土壤剖面 19 个和 30 个。

1.2.2 样品分析测定 颗粒筛分方面,由于剖面中粗细颗粒混杂,故充分参考谢贤健^[17]、张丹^[18] 在同类研究中基于土工规程与土壤粒径分级标准设置的粒径梯度,将自然风干样过 60,40,20,10,5,2,1,0.5,0.25 mm 标准筛,统计每一组粒径的质量百分含量,并进行分形维数的计算。指标测定方面,pH 值采用 pHHS-3E 酸度计测定;有机质采用高温外热重铬酸钾容量法测定;总 N 利用干燥燃烧元素分析仪测定;碱解 N 利用氢氧化钠碱解扩散法测定;有效 P 利用碳酸氢钠法测定;速效 K 利用乙酸铵提取法测定。K₂O,Na₂O,CaO,MgO 均采用火焰原子吸收分光光度法测定;Al₂O₃ 采用氟化物取代络合滴定法测定^[19]。

1.2.3 数据处理与分析

(1) 分形维数计算方法。已有研究表明,岩石崩解后颗粒存在很高的统计自相似性,符合分形特征,因此部分研究者从分形几何理论出发,运用分形维数来衡量岩石的物理风化程度^[20],并将该方法应用于剖面分型特征研究中^[17]。通常提到的分维是立足于自相似的,对于分形描述,可采用关联分数维,其表达式为:

$$D = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(x)}{\ln \epsilon} \quad \text{或} \quad N(x) \propto x^{-D} \quad (1)$$

式中: x 为标度; $N(x)$ 为在该标度下所得的量度值; D 为分维数值。

已有研究多采用 Gate-Gaudin-Schuhmann 分布函数来表征岩石破碎后的分布特征。设崩解后碎石的总质量为 M ,筛孔直径为 ϵ ,通过该孔径 ϵ 的碎石质量为 $M(\epsilon)$, σ 为碎石平均尺寸。则该分布函数表达式为:

$$M(\epsilon)/M = (\epsilon/\sigma)^b \quad (2)$$

对其求导则可获得 $dM(\epsilon) \propto \epsilon^{b-1} d\epsilon$ 。

与此同时,根据分维数概念 $N(\epsilon) \propto \epsilon^{-D}$,求导可获得 $dN(\epsilon) \propto \epsilon^{-D-1} d\epsilon$ 。

根据前人对分形维数中碎石岩块数增量与岩块体增量之间关系的相关研究^[21],二者关系为 $dM \propto \epsilon^3 dN$,故可以获得如下关系式:

$$\epsilon^{b-1} d\epsilon \propto \epsilon^3 \epsilon^{-D-1} d\epsilon \quad (3)$$

通过整理,即可将分形维数 D 表述为:

$$D = 3 - b \quad (4)$$

式中: b 为在 $\lg \epsilon$ 为横轴, $\lg[M(\epsilon)/M]$ 为纵轴情况下一元线性回归的斜率值; $M(\epsilon)/M$ 是直径小于 ϵ 的碎石的质量百分含量^[22]。

(2) 化学风化指数计算方法。化学蚀变指数 CIA 是判断化学风化程度的重要指标,能有效指示风化剖面中长石风化成黏土矿物的程度,其值越大,化学风化程度越高。CIA 的计算方法为:

$$CIA = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})] \times 100 \quad (5)$$

式中:氧化物均以分子摩尔数表示^[23]。

风化淋溶系数 BA 可表征盐基元素的淋失程度,其计算方式为:

$$BA = (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (6)$$

式中:均为分子摩尔数,风化淋溶系数 BA 越小,盐基元素淋失越多,化学风化越强烈^[24]。

(3) 综合肥力指数计算方法。

① 利用全国第二次土壤普查结果,对各土壤养分指标进行分级标准化,分别计算各项指标的分肥力系数^[25]。分肥力系数计算公式为:

$$IFI_i = \begin{cases} X/X_a & (X \leq X_a) \\ 1 + [(X - X_a)/(X_b - X_a)] & (X_a < X \leq X_b) \\ 2 + [(X - X_b)/(X_c - X_b)] & (X_b < X \leq X_c) \\ 3 & (X > X_c) \end{cases} \quad (7)$$

式中:IFI_i 为分肥力系数; X 为养分含量; X_a, X_b, X_c 分别为表 1 中各项指标的分级标准。

表 1 土壤养分指标分级标准

等级	pH 值	有机质 SOC/ (g · kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮 AN/ (g · kg ⁻¹)	全磷 TP/ (g · kg ⁻¹)	速效磷 AP/ (g · kg ⁻¹)	全钾 TK/ (g · kg ⁻¹)	速效钾 AK/ (g · kg ⁻¹)
X _a	4.5	10	0.75	60	0.4	3	5	40
X _b	6.5	20	1.5	120	0.6	10	20	100
X _c	8.5	30	2	180	1	20	25	150

② 采用内梅罗指数法计算综合肥力指数。内梅罗指数法是当前综合肥力指数计算中的较为通用的方法之一,且在西南紫色土区已有一定应用^[26]。

$$IFI = \sqrt{[(IFI_{i \cdot \text{Avg}})^2 + (IFI_{i \cdot \text{Min}})^2] / 2} \times [(n-1)/n] \quad (8)$$

式中:IFI_{i · Avg} 为分肥力系数的均值;IFI_{i · min} 为分肥力

系数最小值; n 为指标个数。IFI 值越大,则综合肥力越高。

(4) 统计分析方法。本文利用 SPSS 11.5 进行数据处理及统计分析;运用 Sigmaplot 10.0 进行制图;数据差异显著性分析采用 Duncan 法;相关性分析采用 Pearson 相关系数法。

2 结果与分析

2.1 桉木、柏木根系分布特征

由于桉木、柏木根系较为庞大,故本次基于剖面挖掘法,对剖面进行数字化,进而确定剖面中根系暴露面积占总面积的比例,即根系截面积比率,来表征根系在剖面中的分布状况^[27]。由图 1 可知,桉木下土壤剖面根系截面积比率为 13.57%,其中 0—20 cm 层为 32.65%,20—40 cm 层为 10.83%,深度 40 cm 以下根系截面积比率较低。柏木下土壤剖面根系截面积比率达到了 21.91%,较桉木下土壤剖面偏高 8.34%,其中 0—20 cm 层为 40.74%,20—40 cm 层为 20.76%,深度 40 cm 以下根系迅速减少,根系截面积比率同样较低。在垂直分布上,桉木根系在剖面中相比柏木更趋向于表层,其 62.65%的根系分布于 0—20 cm 土层中,根系截面积比率随深度下降的速度较快。柏木根系截面积比率随深度下降的速度显著慢于桉木,其 0—20 cm 层根系占剖面总量的 50.52%,在各层分布也更为均匀。总体而言,相较于桉木根系,柏木根系密度更大,粗根和细根数量均显著偏多,呈现出更强的竞争力。

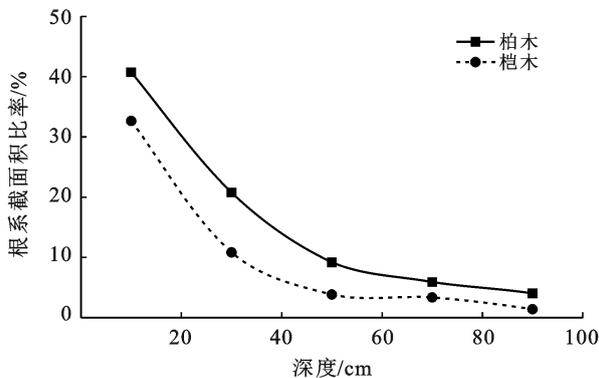


图 1 不同树种下土壤剖面根系截面积比率特征

2.2 物理风化特征

2.2.1 剖面颗粒级配特征 颗粒级配反映了各级粒度组成所占的比例,是较为通用的物理风化程度衡量方法。通常认为紫色土颗粒粒径 <2 mm 即为成土,而粒径 ≥ 2 mm 的砾石含量是物理风化的主要表征指标之一,砾石含量越少,物理风化程度越高^[12]。各剖面的颗粒级配如图 2 所示,表层 0—20 cm 均以 <2 mm 的成土颗粒为主,桉木、柏木、对照剖面表层成土颗粒占比分别达到了 86.06%,78.19%和 72.19%,而粒径 >10 mm 的大颗粒占比均极低,其中桉木下土壤剖面表层质地最细。

自表层往下,细颗粒占比减少,粗颗粒含量迅速增加,其中柏木下土壤剖面颗粒组成变化最慢,对照剖面变化最快。80—100 cm 深度范围多为完整的母

岩或刚开始崩解的大颗粒母质,桉木、柏木、对照剖面 80—100 cm 层粒径 >60 mm 颗粒质量百分数分别占到了 88.35%,74.44%,93.01%。总体上桉木、柏木下土壤剖面的破碎程度较之对照均有明显提升,说明根系在一定程度上促进了剖面的物理崩解。

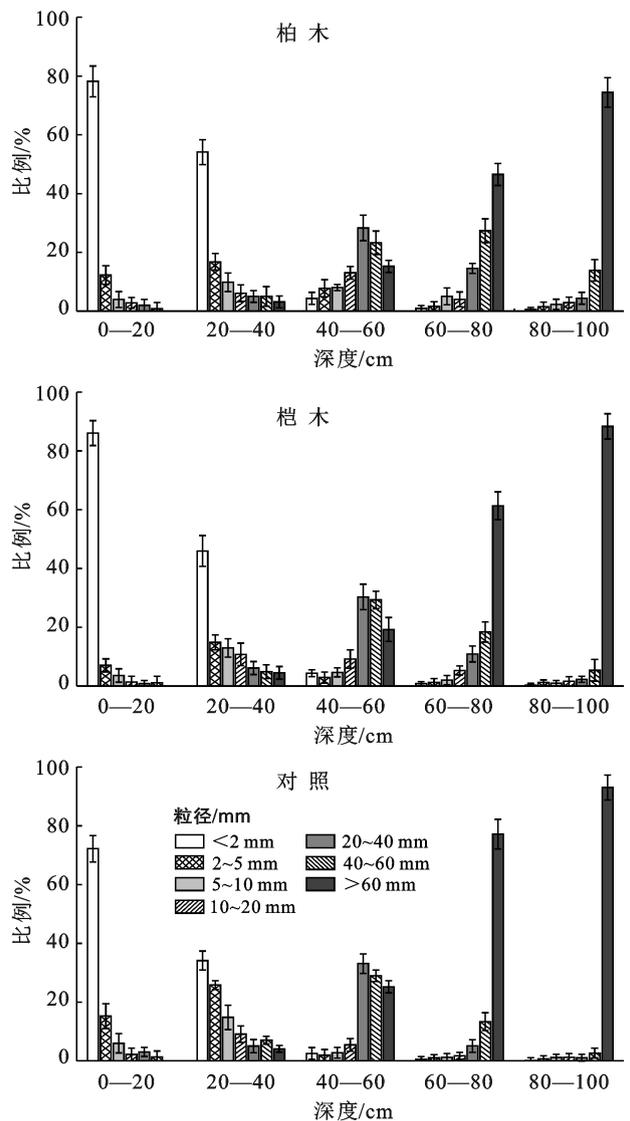


图 2 不同树种下土壤剖面土壤颗粒级配特征

2.2.2 剖面分形维数特征 分形维数将岩石崩解过程中大小不一的粒径组分,统一到分形维数中进行衡量。根据分形维数计算方法,获得不同剖面的分形维数(表 2)。结果表明,研究区桉木、柏木下土壤剖面分形维数分别为 2.07 和 2.13,二者较之对照提升幅度分别达到了 6.47%和 9.03%,其中柏木下土壤剖面崩解程度最高,物理风化最强烈。垂直深度上,各剖面分形维数均呈现自表层往下迅速递减的变化态势;其中表层 0—20 cm 区间上,桉木下土壤剖面分形维数最高为 2.72,对照剖面最低为 2.60;底层 80—100 cm 区间分形维数均较低。不同剖面方面,桉木、柏木下土壤剖面

0—20, 20—40 cm 深度分形维数在 0.05 水平上差异均不显著, 60—80, 80—100 cm 区间差异同样不显著, 而 40—60 cm 与其余各层均呈显著性差异 ($p < 0.05$), 表明桉木、柏木下土壤剖面的物理风化程度均在 40—60 cm 深度区间发生了显著转变。而对照剖面除了 60—80 cm 与 80—100 cm 深度区间呈现差异不显著, 其余各层的分形维数之间均呈显著性差异 ($p < 0.05$)。可见桉木、柏木根系的生长, 一定程度上提升了剖面中上各层的分形维数, 并减小了层间差异。

2.3 化学风化特征

本研究选用化学蚀变指数 CIA, Na/K 摩尔比、风化淋溶系数 BA 来表征紫色土剖面的风化强度特征。根据公式计算获得各剖面的化学风化指数, 结果如图 3 所示。桉木、柏木树种下土壤剖面化学蚀变指数 CIA 分别为 51.72 和 52.15, 较之对照剖面分别小幅偏高了 1.14 和 1.57。根据化学蚀变指数分级标准, 各剖面均处于低等化学风化水平, 化学风化程度

较弱。Na/K 摩尔比方面, 桉木下土壤剖面为 0.62, 柏木下土壤剖面为 0.60, 二者较之对照剖面分别偏低了 0.02, 0.04。风化淋溶系数 BA 方面, 桉木、柏木下土壤剖面分别为 1.24 和 1.21, 较对照分别偏低了 0.03 与 0.06, 各剖面盐基元素的淋失均较少, 风化强度均较低。在垂直深度上风化强度随深度小幅减弱。总体而言, 桉木、柏木生长对紫色土剖面化学风化的影响较小, 各剖面化学风化程度均较低, 且剖面间差异不显著。

表 2 不同树种下土壤剖面土壤分形维数特征

深度/cm	土壤分形维数		
	柏木	桉木	对照
0—20	2.67±0.21 ^a	2.72±0.17 ^a	2.60±0.22 ^a
20—40	2.62±0.17 ^a	2.53±0.26 ^a	2.28±0.18 ^b
40—60	1.96±0.14 ^b	1.94±0.19 ^b	1.76±0.14 ^c
60—80	1.71±0.20 ^c	1.63±0.12 ^c	1.59±0.19 ^d
80—100	1.66±0.15 ^c	1.55±0.15 ^c	1.51±0.13 ^d

注: 各列数据后字母不同表示差异显著 ($p < 0.05$)。

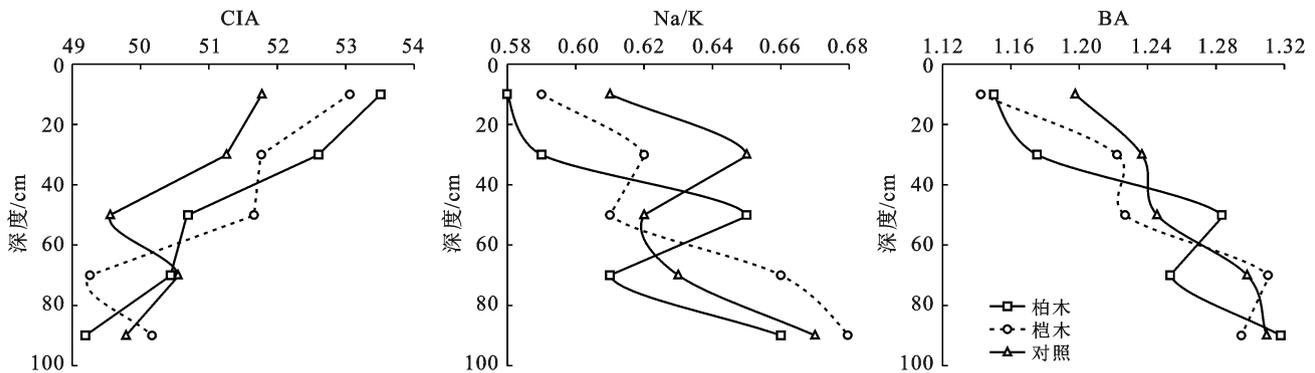


图 3 不同树种下土壤剖面的化学蚀变指数 CIA, Na/K 摩尔比, 风化淋溶系数 BA 特征

2.4 养分特征

2.4.1 剖面养分指标特征 基于同类研究中的指标选取方法, 选择有机质、全 N、全 P 等构成衡量养分状况的指标体系, 该指标体系已得到较为广泛的应用与验证, 可有效表征紫色土剖面的养分特征^[2, 25]。由图 4—5 可知, 桉木、柏木下土壤剖面除全 K 外各项养分指标均显著高于对照剖面。

不同指标方面, 剖面有机质、全 N、碱解 N、速效 K 表现为: 桉木 > 柏木 > 对照; 其中桉木下土壤剖面有机质、全 N、碱解 N、速效 K 平均含量分别达到了 5.14 g/kg, 0.35 g/kg, 45.25 mg/kg 和 46.35 mg/kg, 较之对照剖面分别提高了 67.20%, 28.68%, 32.79%, 24.38%。有效 P 表现为: 柏木 > 桉木 > 对照, 柏木下土壤剖面有效 P 平均含量达到了 2.86 mg/kg, 较之对照剖面提高了 45.51%, 提升幅度非常显著。在垂直分布上, 有机质、全 N、碱解 N、有效 P、速效 K 均随深度增加而迅速降低, 上述指标在各剖面 80—100 cm 层的平均含量仅分别为表层 0—20 cm 区间的

10.29%, 20.37%, 22.29%, 28.78%, 23.06%。全 P 含量在各层之间差异并不显著。而全 K 含量受淋溶作用影响, 随深度呈现小幅上升的变化态势, 但各层差异同样不显著。总体而言, 桉木、柏木生长对紫色土剖面有机质、全 N、碱解 N、速效 K 等的提升非常显著, 其中桉木的提升效果优于柏木。

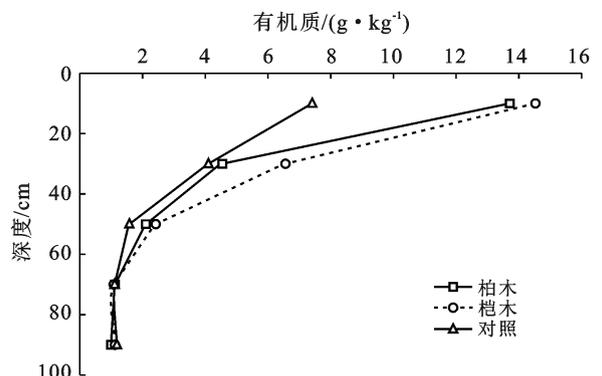


图 4 不同树种下土壤剖面有机质特征

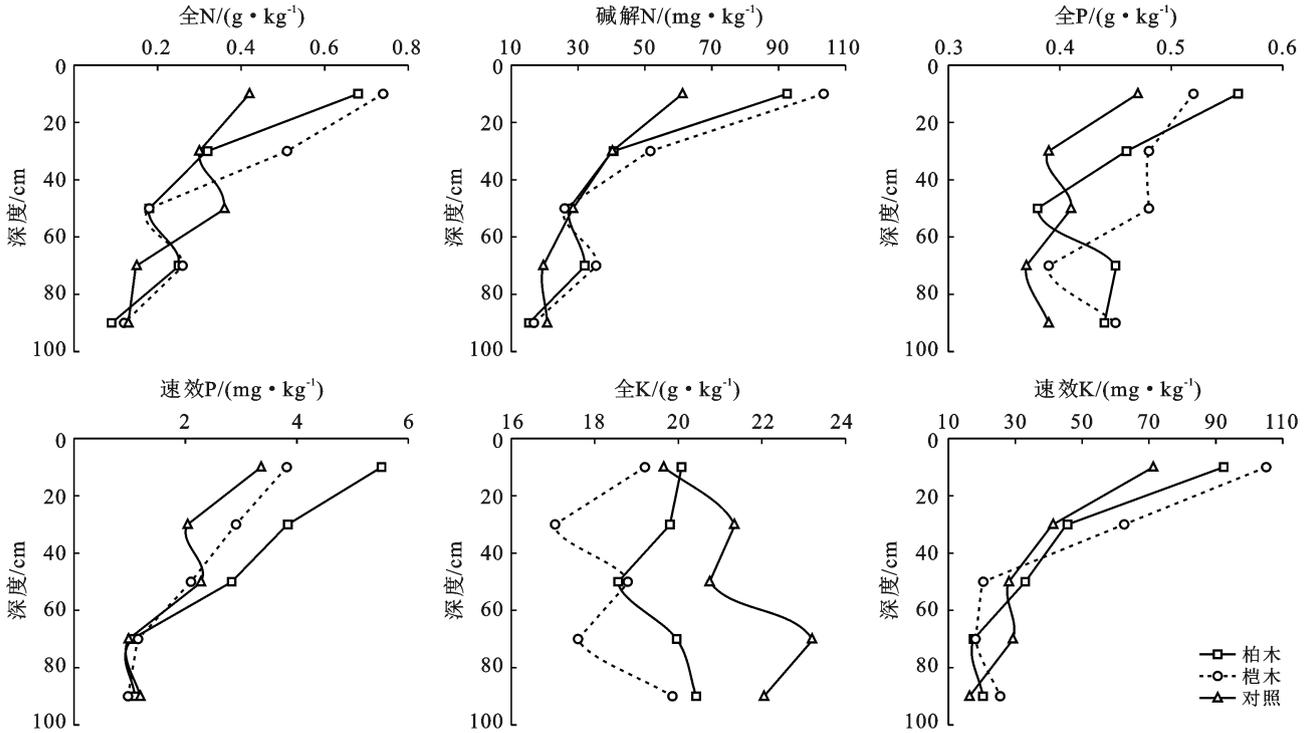


图 5 不同树种下土壤剖面养分指标特征

表聚系数指的是指表层元素含量占整个剖面总量的比值,表聚系数越大,表聚性就越强^[2]。本次研究将剖面分为 5 层,且每层厚度相同,因此当表聚系数大于 0.20,即认为产生了表聚现象。由图 6 可知,桉木、柏木下土壤剖面除全 K 和全 P 外各项养分指标的表聚系数相较于对照剖面均有显著提升。其中桉木下土壤剖面在碱解 N 和速效 K 方面的表聚系数要显著高于其余剖面;而柏木下土壤剖面在有机质、全 N 上的表聚系数最高。不同养分指标方面,有机质、全 N、碱解 N、有效 P、速效 K 的表聚系数均显著大于 0.20,表现出明显的表聚特征。其中有机质的表聚效应最为显著,其在桉木、柏木、对照土壤剖面中的表聚系数分别达到了 0.57,0.61,0.48。

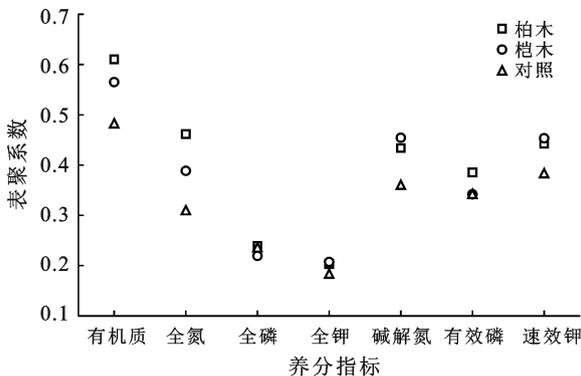


图 6 不同树种下土壤剖面养分的表聚系数

2.4.2 剖面综合肥力指数 综合肥力指数将众多养分指标统一到同一个评价指数中,有助于更好的了解肥力的总体变化特征。基于内梅罗综合肥力指数法,获得各剖面的综合肥力指数(图 7)。结果表明,桉木、柏木下土壤剖面的综合肥力指数分别为 0.81,0.79,二者较之对照剖面提升幅度分别达到了 14.08%和 11.27%,提升较为显著,其中桉木生长的提升效果优于柏木。垂直深度上,各剖面综合肥力指数均随深度呈下降趋势,其中桉木、柏木下土壤剖面的下降速度显著快于对照剖面,60 cm 深度以下,各剖面的综合肥力指数均较低,且值均介于 0.60~0.66 之间。总体而言,各剖面之间的综合肥力指数差异主要体现在 0—40 cm 深度区间,桉木、柏木对剖面中上层的综合肥力指数起到了显著的提升作用。

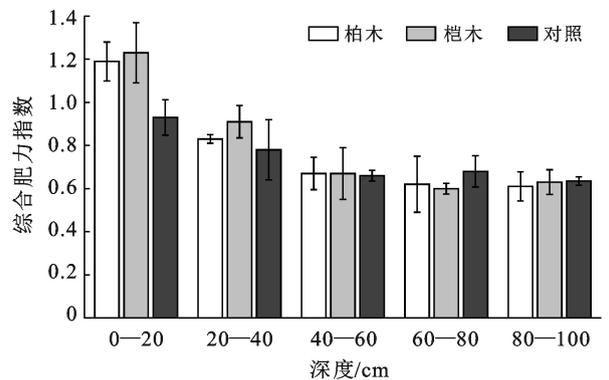


图 7 不同树种下土壤剖面综合肥力指数特征

2.5 根系分布、风化指标、养分指标之间相关性分析

桉木、柏木的生长与其所处环境时刻处于密切的相互作用过程中,单一指标的变化影响着其余指标的演变进程与速度,使得指标间往往存在一定的相关性。由表 3—4 可知,桉木、柏木根系截面积比率与所在剖面分形维数均呈现显著正相关关系($p < 0.05$),与综合肥力指数均呈现极显著正相关关系($p < 0.01$),与化学蚀变数之间的相关关系均不显著($p > 0.05$),说明桉木、柏木下土壤根系生长主要提升了剖面的物理崩解程度与养分特征。桉木、柏木下土壤剖面分形维数与综合肥力指数之间同样均呈现显著正相关关系($p < 0.05$),紫色土剖面物理崩解的进行,也在一定程度上为养分积累提供了条件。但其与化学风化指数之间的关系在不同剖面中有所差异,其中柏木下土壤剖面分形维数与化学蚀变数呈现显著的正相关关系($p < 0.05$),而在桉木下土壤剖面中二者相关性并不显著($p > 0.05$)。

表 3 桉木下土壤剖面各项指标间相关性分析

指标	根系截面积比率	分形维数	化学蚀变数 CIA	综合肥力指数
根系截面积比率	1			
分形维数	0.901*	1		
化学蚀变数 CIA	0.694	0.853	1	
综合肥力指数	0.975**	0.932*	0.796	1

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关。下同。

表 4 柏木下土壤剖面各项指标间相关性分析

指标	根系截面积比率	分形维数	化学蚀变数 CIA	综合肥力指数
根系截面积比率	1			
分形维数	0.897*	1		
化学蚀变数 CIA	0.729	0.886*	1	
综合肥力指数	0.982**	0.905*	0.775	1

3 讨论

3.1 桉木、柏木对风化的影响

本次研究结果表明桉木、柏木生长显著促进了紫色土剖面的物理崩解,二者较之无植物对照,分形维数分别提高了 6.47% 和 9.03%。紫色土区土层较浅,朱波等^[13]研究结果表明川中丘陵区 73% 的坡地土层厚度在 20—60 cm 之间,而本次野外调查发现林地土层平均厚度仅为 27 cm。浅薄的土层使得根系在作用于上层土壤的同时,与中下层基岩发生接触的状况非常频繁。与此同时,由于紫色母岩裂隙发育强烈,平均裂隙率能达到 4% 左右^[12],这一特征为植物细根

进入岩体生长提供了充足的条件。野外调查研究过程中对剖面 1 m×1 m 面积上,穿透土层并通过裂隙进入岩层生长的根系进行了一个初步的测定和统计,其中单个剖面中进入岩层生长的柏木粗根数量最多达 9 根,桉木粗根数量则平均在 3 根左右。另一方面,调查过程中发现研究区林地边缘、山间道路旁等曝露边坡上,柏木、桉木根系进入甚至穿透岩层生长,并导致岩层变得较为破碎的现象非常普遍。这些状况均表明桉木、柏木根系对整个剖面物理风化产生着非常强烈的影响。研究区桉木、柏木根系的持续生长,产生了显著的根劈作用,加速了紫色土剖面的物理崩解,这其中柏木根系由于根系密度与数量均高于桉木,在剖面中展现出来更为显著的破坏能力。桉木、柏木生长对紫色土风化成土速率的促进,可在一定程度上弥补紫色土较容易发生侵蚀而流失的不足,维持了风化成土速率与土壤侵蚀速率之间的平衡。但值得注意的是,在部分边坡区域,植物根系的作用有可能导致边坡稳定性降低,造成边坡垮塌等危害。

3.2 桉木、柏木对养分特征的影响

桉木、柏木生长对紫色土剖面的综合肥力指数有较为显著的提升,其提升幅度分别达到了 14.08% 和 11.27%,其中对有机质、全 N、碱解 N、有效 P、速效 K 的提升尤为明显。在地表,桉木、柏木凋落物中的有机质以及 N、P 等养分元素向下输移过程往往受到各类因素的阻隔,最终富集于表层,使得有机质、全 N、碱解 N、有效 P、速效 K 等产生了明显的表聚效应,从而显著提升了表层的养分,这一特征与相关研究结果基本一致^[7,11]。而在地表以下,本次研究结果表明剖面根系分布密度与综合肥力指数呈现较强的正向相关性($p < 0.05$),表明根系活动在一定程度上影响了剖面养分。植物根系的衰亡给土壤提供了有机质以及原本富集于根系的 N、P 等养分元素,同时根系在生长过程中会向根际输入由含 C 有机物构成的根系分泌物,也在一定程度上提升了剖面的养分条件。不同植物之间,桉木对剖面养分的提升效果总体上优于柏木,尤其在有机质、全 N、碱解 N、速效 K 方面最为典型。研究过程中对桉木、柏木不同器官组织的养分状况进行测定,结果表明两种植物除了在全 K 含量方面差异较小,在其他指标方面,桉木均显著高于柏木,其中桉木树叶的全 N、全 P、全 K 含量分别为 20.85, 4.32 和 8.75 g/kg,较之柏木分别偏高了 2.01, 2.23 和 1.01 g/kg。与此同时,桉木作为落叶阔叶植物,其凋落物归还量要显著高于柏木。在上述两方面因素的共同影响下,使得桉木对剖面综合肥力的提升作用优于柏木。总体而言,川中丘陵区桉柏混交林营

造至今,在提升土壤肥力,促进农业生产,以及防治水土流失等方面均起到了明显的作用。但值得注意的是随着研究区柃柏混交林逐步向柏木纯林演变,林分结构逐步转向单一,而柏木对紫色土养分的促进作用要低于柃木,这可能导致研究区林地植被对养分的提升效果会有所降低。因此需进一步关注研究区林地类型的演变方向,改善林地植被组成,提高林分结构的丰富度和抗干扰能力,以期发挥更大的生态和经济效益。

3.3 植物、风化和养分间的关系

柃木、柏木根系截面积比率与所在剖面分形维数、综合肥力指数均呈现较为显著的正相关关系($p < 0.05$),但与化学蚀变数 CIA 均呈现不显著的正相关关系($p > 0.05$)。说明柃木、柏木根系的生长,在一定程度上促进了剖面的物理崩解以及养分积累,这与研究过程中观察到的状况基本相符,与相关研究结果基本一致^[17]。与此同时,尽管有研究表明,植物根系分泌的低分子有机酸等,可加速对矿物的腐蚀溶解,在一定程度上提升剖面的化学风化程度^[1]。但本研究结果表明柃木、柏木根系生长对紫色土剖面化学风化的影响较为有限,这可能是由于紫色土作为初育土,化学风化程度较浅,加之侵蚀速率较快,使得剖面各层之间并未呈现较大的差异。在物理风化与化学风化间的关系方面,柏木下土壤剖面分形维数与化学风化指数之间呈显著的正相关关系($p < 0.05$),而柃木下土壤剖面中二者的相关性并不显著($p > 0.05$)。这可能是受柏木根系在各层分布较为均匀的影响,各层分形维数均较高,破碎度的增加也为化学风化提供了更多的反应面积和入渗水分,一定程度上提升了化学风化程度,进而使得分形维数和化学风化指数之间呈现一定的相关性;另一方面,由于柃木根系分布更趋于表层,导致柃木下土壤剖面分形维数随深度递减的速率较快,并未给剖面中下层的化学风化产生足够影响,使得二者并未呈现显著的相关关系。此外,柃木、柏木下土壤剖面中物理崩解速率与养分条件均呈现较强的正相关关系。这主要是因为根劈作用的进行使得岩层崩解速率加快,为矿质元素的释放,植物根系的进一步生长,低等生物的附着等提供了条件,进而促进了养分的积累。因而川中丘陵区柃柏混交林的营造,除了起到了水土保持的效果,还在一定程度上改善了养分条件,提升了紫色土成土速率,发挥了良好的生态效益。这可为其他地区人工林的营造,以及为相关研究的开展提供借鉴。

4 结论

(1) 柃木、柏木根系在剖面中的分布特征方面,

柏木根系在垂直截面上的根系截面积比率较柃木根系偏高 8.34%,其在根系密度与根系数量上均显著高于柃木,呈现出更强的竞争力。

(2) 对物理风化影响方面,柃木、柏木下土壤剖面的分形维数均高于对照剖面,两种乔木的生长显著促进了紫色土剖面的物理崩解程度,提升了成土速率,其中柏木的促进作用高于柃木。

(3) 对化学风化影响方面,柃木、柏木、对照剖面之间化学风化程度差异并不显著,各剖面表层化学风化程度略高于底层,但各层之间差异同样不显著。

(4) 对养分影响方面,柃木、柏木下土壤剖面综合肥力指数均显著高于对照剖面,两种植物的生长显著提升了紫色土剖面的养分特征。其中柃木的提升效果优于柏木,其对有机质、全 N、碱解 N、速效 K 的提升尤为显著。

[参 考 文 献]

- [1] Hasenmueller E A, Xin G, Weitzman J N, et al. Weathering of rock to regolith: The activity of deep roots in bedrock fractures [J]. *Geoderma*, 2017, 300 (1):11-31.
- [2] 郝丽婷,吴发启.黄土丘陵沟壑区坝地和梯田土壤养分特征与演变[J].*水土保持通报*,2019,39(5):16-22.
- [3] Graham R C, Allen M F, Jimenez O J, et al. The importance of limestone bedrock and dissolution karst features on tree root distribution in northern Yucatan, Mexico [J]. *Plant Soil*, 2013,362(1):37-50.
- [4] Jackson G, Sheldon J. The vegetation of magnesian limestone cliffs at Markland Grips near Sheffield [J]. *Journal of Ecology*, 1949,37(1):38-50.
- [5] Almeida M T, Mouga T, Barracosa P. The weathering ability of higher plants. The case of *Ailanthus altissima* (Miller) Swingle [J]. *Int. Biodeterior. Biodegrad*, 1994, 33(4):333-343.
- [6] 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.
- [7] 张璐,文石林,蔡泽江,等.湘南红壤丘陵区不同植被类型下土壤肥力特征[J].*生态学报*,2014,34(14):3996-4005.
- [8] 冯嘉仪,储双双,王婧,等.华南地区 5 种典型林分类型土壤肥力综合评价[J].*华南农业大学学报*,2018,39(3):73-81.
- [9] 王芳,黄玫,孙希华,等.大小兴安岭林区不同林型土壤养分综合评价[J].*水土保持通报*,2013,33(1):182-187.
- [10] 余泓,潘剑君,李加加,等.长三角地区农用地土壤肥力特征及综合评价:以朱林镇为例[J].*土壤通报*,2017,48 (2):372-379.
- [11] 温淑红,李生宝,许浩,等.宁南黄土丘陵区不同生态恢复模式对土壤养分的影响[J].*水土保持通报*,2015,35

- (5):199-204.
- [12] 中国科学院成都分院土壤研究室.中国紫色土(上篇)[M].北京:科学出版社,1991.
- [13] 朱波,况福虹,高美荣,等.土层厚度对紫色土坡地生产力的影响[J].山地学报,2009,27(6):735-739.
- [14] 龚固堂,陈俊华,黎燕琼,等.四川盆地 4 种柏木林分类型的水文效应[J].生态学报,2011,31(10):2716-2726.
- [15] 杨小林,朱波,董玉龙,等.紫色土丘陵区小流域非点源氮迁移特征研究[J].水利学报,2013,44(3):276-283.
- [16] 田琳琳,朱波,汪涛,等.川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素[J].环境科学,2017,38(5):2074-2083.
- [17] 谢贤健.不同岩性风化物分形特征及其与渗透系数关系研究[J].水土保持研究,2017,24(5):204-208.
- [18] 张丹.紫色母岩成土的物理作用机制[D].北京:中国科学院研究生院,2013.
- [19] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[D].北京:中国标准出版社,1996.
- [20] 谢和平,高峰,周宏伟,等.岩石断裂和破碎的分形研究[J].防灾和减灾工程学报,2003,23(4):1-9.
- [21] Macias G, Cuerda C, Diaz D, et al. Application of the Rosin-Rammler and Gates-Gaudin-Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork [J]. *Materials Characterization*, 2004, 52(2): 159-164.
- [22] 赵吉霞.模拟酸雨对典型紫色母岩风化特征的影响[D].北京:中国科学院大学,2018.
- [23] 郭媛媛,莫多闻,毛龙江,等.澧阳平原岩板岩剖面地球化学特征与风化强度研究[J].地理科学,2013,33(3): 335-341.
- [24] 杜静.四川盆地紫色丘陵区成土特征[D].重庆:西南大学,2014.
- [25] 陈轩敬,赵亚南,柴冠群,等.长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J].农业工程学报,2016,32(1):139-144.
- [26] 谢军,方林发,徐春丽,等.西南紫色土不同施肥措施下土壤综合肥力评价与比较[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1500-1507.
- [27] 樊维.裂隙岩体植物根劈作用机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.

(上接第 33 页)

- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:农业出版社,2000.
- [12] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:农业出版社,1986.
- [13] 吴金水.土壤微生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [14] 韦春强,唐赛春,岑艳喜,等.入侵植物银胶菊对氮、磷营养的响应[J].广西师范大学学报(自然科学版),2009,27(4):99-103.
- [15] 许浩,胡朝臣,许士麒,等.外来植物入侵对土壤氮有效性的影响[J].植物生态学报,2018,42(11):1120-1130.
- [16] Cusack, Daniela F. Soil nitrogen levels are linked to decomposition enzyme activities along an urban-remote tropical forest gradient [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013,57:192-203.
- [17] Neto C F O, Lobato A K S, Costa R C L, et al. Nitrogen compounds and enzyme activities in sorghum induced to water deficit during three stages [J]. *Plant Soil & Environment*, 2009,55(6):238-244.
- [18] Hu Yalin, Jung Kanghong, Zeng Dehui, et al. Nitrogen-and sulfur-deposition-altered soil microbial community functions and enzyme activities in a boreal mixedwood forest in Western Canada [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014,43(9):777-784.
- [19] Haynes R. Effects of lime and phosphate additions on changes in enzyme activities, microbial biomass and levels of extractable nitrogen, sulphur, and phosphorus in an acid soil [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1988, 6(2):153-158.
- [20] Jung J Y, Lal R, Ussiri D A N. Changes in CO₂, ¹³C abundance, inorganic nitrogen, β-glucosidase, and oxidative enzyme activities of soil during the decomposition of switchgrass root carbon as affected by inorganic nitrogen additions [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2011,47(7):801-813.