

DOI: 10.5846/stxb202106051486

庞宗清, 陈伟彬, 苏芳龙, 毛庆功, 刘滔, 熊美新, 钟部卿, 李慧, 官惠玲, 莫江明, 鲁显楷. 凋落物和根系输入对南亚热带季风常绿阔叶林土壤养分的影响. 生态学报, 2022, 42(22): 9143-9152.

Pang Z Q, Chen W B, Su F L, Mao Q G, Liu T, Xiong M X, Zhong B Q, Li H, Guan H L, Mo J M, Lu X K. Short-term effects of altered litter and root inputs on soil water-extractable ions in a subtropical monsoon evergreen broadleaf forest, Southern China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9143-9152.

凋落物和根系输入对南亚热带季风常绿阔叶林土壤养分的影响

庞宗清^{1,2}, 陈伟彬¹, 苏芳龙¹, 毛庆功¹, 刘滔¹, 熊美新¹, 钟部卿¹, 李慧^{1,2}, 官惠玲¹, 莫江明¹, 鲁显楷^{1,*}

1 中国科学院华南植物园, 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 植被凋落物和根系输入在调节森林土壤元素生物地球化学循环中扮演着关键作用。目前仍然不清楚凋落物和根系输入对热带原始林土壤主要元素含量的调控作用。针对该研究现状, 以中国亚热带季风常绿阔叶林为研究对象, 通过开展凋落物与根系输入改变的控制试验(6 个处理, 每处理 4 次重复: 对照、凋落物加倍、凋落物去除、断根、断根+凋落物加倍、断根+去除凋落物), 探讨了凋落物和断根处理对土壤可溶性离子、土壤酸中和能力(ANC)和阳离子交换量(CEC)的短期影响。凋落物与根系处理半年后的结果显示: (1) 凋落物去除与加倍处理都显著增加了 0—40 cm 土壤 NO_3^- 含量, 并且凋落物去除效应大于添加效应; 去除凋落物增加了表层土壤(0—20 cm) Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 的含量。(2) 断根处理显著增加 0—40 cm 土壤 NO_3^- 和表层土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量。(3) 断根和去除凋落物交互处理显著增加了 0—40 cm 土壤 NO_3^- 和表层土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 含量, 产生了叠加效应。(4) 凋落物和断根处理并没有改变土壤 pH, 但降低了土壤酸中和能力(除凋落物加倍外), 其降低的原因主要与阳离子交换量的降低和 NO_3^- 含量的增加有关。这些结果表明, 土壤养分离子的可利用性(尤其是 NO_3^- 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 和酸缓冲能力对凋落物和根系输入改变响应敏感, 森林植物及其凋落物对土壤养分保留和缓冲性能具有重要调节作用。在人为干扰和气候变化加剧背景下, 该研究可为森林生态系统可持续管理提供重要的理论参考。此外, 植被凋落物和根系输入改变引起的长期生态学效应仍值得进一步关注。

关键词: 凋落物输入; 断根处理; 酸中和能力; 季风常绿阔叶林; 鼎湖山

Short-term effects of altered litter and root inputs on soil water-extractable ions in a subtropical monsoon evergreen broadleaf forest, Southern China

PANG Zongqing^{1,2}, CHEN Weibin¹, SU Fanglong¹, MAO Qinggong¹, LIU Tao¹, XIONG Meixin¹, ZHONG Buqing¹, LI Hui^{1,2}, GUAN Huiling¹, MO Jiangming¹, LU Xiankai^{1,*}

1 Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Plant litter and root inputs play a key role in regulating soil biogeochemical cycles in forest ecosystems. However, it remains unclear how the alterations in litter aboveground litter inputs and belowground root inputs affect soil nutrients in the primary tropical forests or the intact tropical forests. This study aimed to investigate the impact of alterations in plant

基金项目: 国家优秀青年科学基金项目(41922056); 中科院青年创新促进会优秀会员项目(Y201965); 国家自然科学基金青年科学基金(32101395)

收稿日期: 2021-06-05; 网络出版日期: 2022-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luxiankai@scbg.ac.cn

litter and root inputs on soil extractable cations and anions, acid neutralizing capacity (ANC) and cation exchange capacity (CEC), through the field litter- and root-manipulation experiment in a monsoon evergreen broadleaf forest at Dinghushan Biosphere Reserve of Southern China. The manipulation experiment consisted of six treatments, with four replications per treatment: Control (no change in both litter and root inputs), Double litter, Litter removal (No Litter), Root pruning (exclusion of root ingrowth), Root pruning+Double litter, Root pruning+Litter removal. After a half year of litter- and root-manipulations, the results of the experiment were as follows. (1) Litter removal and double litter treatments significantly increased soil NO_3^- concentration in the 0—40 cm layer, with higher values in the litter removal treatment than that in the double litter treatment, while litter removal treatment greatly increased soil concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ in the surface 0—20 cm layer. (2) Root pruning treatment significantly increased soil NO_3^- concentration in all layers and soil Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations in the surface 0—20 cm layer. (3) The interactive effect of root pruning and litter removal treatments significantly increased soil NO_3^- concentrations in all soil layers, and Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ concentrations in the surface 0—20 cm layer, causing an additive effect. (4) Litter and root manipulations did not alter soil pH, but decreased soil acid neutralizing capacity in all plots except the double litter treatment. The decreased acid neutralizing capacity was attributed to the decreased soil cation exchange capacity and the increased soil NO_3^- concentration. These findings suggest that short-term alterations in plant litter and root inputs can strongly affect soil nutrient availability (especially for NO_3^- , Ca^{2+} and Mg^{2+}) and acid neutralizing capacity, thereby regulating soil nutrient retention and buffering capacity in forest ecosystems. Under the conditions of intensive human activities and climate change, this study can provide a valuable theoretical guideline for the sustainable management of forest ecosystem. And it merits further study to explore the long-term ecological consequences induced by changes in plant aboveground litter inputs and belowground root inputs into forest ecosystem.

Key Words: litter manipulations; root-pruning treatment; acid neutralizing capacity; monsoon evergreen broadleaf forest; Dinghushan

土壤营养元素以水溶性离子形式(NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 等)发挥其有效性,参与到生物地球化学循环,供植物和土壤生物吸收利用,对维持土壤养分平衡和缓冲土壤酸化中起着重要作用。 NO_3^- 和 NH_4^+ 是植物吸收利用的主要氮素形态,其有效性对植物生长至关重要。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 是植物生长发育不可缺少的营养元素,它们在维持细胞结构与功能、调节酶活性、合成蛋白质及光合作用等过程中发挥重要作用^[1-3]。并且,盐基阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+)可与土壤中 H^+ 进行交换,起到缓解土壤酸化的作用,其含量的高低决定着土壤酸中和能力的大小^[4]。因此,研究森林土壤水溶性离子的动态特征及其缓冲性能,对于维持森林生态系统健康和稳定具有重要意义。

森林植被可通过改变地上凋落物和地下根系的资源分配,从而影响土壤元素离子的迁移和释放^[5-6]。目前,国内外学者普遍采用添加/去除凋落物以及断根的方法分别控制植物地上和地下有机质的输入。研究表明,凋落物添加或去除可以改变土壤水溶性离子含量。例如,在巴拿马热带森林中,凋落物加倍可以提高土壤铵盐(NH_4^+)和硝酸盐(NO_3^-)含量(尤其是 NO_3^- 含量);去除凋落物则会降低土壤中 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 K^+ 含量^[6],而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 未受到显著影响^[7]。在亚热带森林开展的凋落物处理实验发现,与去除凋落物相比,凋落物的输入可增加土壤中硝酸盐淋失^[8]。但在亚热带人工林的实验表明,去除凋落物可显著增加土壤中 NH_4^+ 含量,对 NO_3^- 影响不大^[9]。这些研究表明,热带森林凋落物输入对土壤有效元素含量的影响程度随着森林类型和元素种类而不同。目前研究主要关注地上凋落物改变对土壤水溶性离子的作用,但对地下根系的作用的研究尚较薄弱。根系主要通过吸收、物理捕获、与微生物协同作用(如,菌根)和根系分解来调节土壤离子含量。根系将植物同化的光合产物输送到土壤中,提供离子来源。研究表明根系对土壤离子含量具有明显调控作用,

目前根系对 NO_3^- 的调控作用因森林类型不同而存在差异。如,在加拿大杨树人工林中,有根区与断根相比减少了土壤 30 kg/hm^2 的 NO_3^- 淋失,增加了土壤 NO_3^- 含量^[10],但在中国大兴安岭次生林中,断根处理对土壤 NO_3^- 无显著改变^[11]。在亚寒带针叶林和亚热带杉木林中发现,断根处理增加了土壤 NH_4^+ 含量^[11-12]。目前野外断根处理对盐基离子的调控实验还较少,还需进一步研究。通过室内土柱模拟实验可知,油松根系对 0—30 cm 土层深度 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 有明显稳定强化作用^[13]。此外,死去根系存在养分释放,根分解使氮呈现富集—释放的格局^[14]。尽管,植物凋落物和根系对森林生态系统土壤营养元素的研究已广泛受到国内外关注^[6,15],但仍然不清晰凋落物和根系输入对热带原始林(primary forest or intact forest)土壤主要元素离子含量和缓冲能力的调控作用,尤其是根系的调控作用。

亚热带季风常绿阔叶林是我国分布范围最广、生物多样性最高的森林类型。与针叶林和草地生态系统相比,亚热带森林植被凋落物和根系周转更快,可在较短的时间内影响到土壤元素循环^[16]。亚热带森林土壤通常呈显酸性,盐基饱和度低,酸中和能力弱^[17],对外界环境变化的响应更为敏感。当前,我国亚热带地区面临着严峻的生态环境问题,如氮沉降加剧、气候变暖等,这些变化正影响着森林植被光合作用和生产力,进而改变植被向土壤输送有机质(凋落物和根系资源)的过程。例如,氮沉降导致凋落物量的增多和细根生物量的显著减少^[18,19], CO_2 浓度和温度升高导致凋落物量的增加^[18]。然而,目前尚不清楚植物有机质资源输入的改变对亚热带森林土壤中水溶性离子的迁移释放会造成怎样的影响,进而是否会影响土壤酸缓冲能力。因此,亟需探讨植物有机质资源输入变化引起的土壤盐基离子迁移释放规律。本研究以南亚热带地带性森林——季风常绿阔叶林为研究对象,通过添加和去除凋落物以及断根处理来改变植物地上、地下资源的输入,旨在探究凋落物和根系输入改变对亚热带森林土壤水溶性离子含量及其缓冲性能的影响,以期对森林土壤生态系统可持续性经营管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究样地概况

研究地点位于广东省肇庆市鼎湖山自然保护区($23^\circ 10' \text{N}$, $112^\circ 30' \text{E}$)。该保护区处于热带与亚热带的过渡区域,属于亚热带湿润季风气候,年降水量约为 $1,927 \text{ mm}$,年均温约为 20.9°C 。鼎湖山的土壤母质为砂岩,土壤类型以砖红壤为主,土层厚约 40 cm ,pH 范围为 $3.5—4.4$ ^[20]。研究对象为鼎湖山保护区完整保存了具有 400 多年历史的地带性植被——亚热带季风常绿阔叶林。

该森林植物种类丰富,结构复杂,经调查乔木层优势树种以黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、荷木(*Schima superba*)、华润楠(*Machilus chinensis*)、红车(*Syzygium rehderianum*)等为主^[21];林下层植物以黄果厚壳桂、柏拉木(*Blastus cochinchinensis*)、香楠(*Aidia canthioides*)、省藤(*Calamus simplicifolius*)、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)、沙皮蕨(*Hemigramma decurrens*)居多。鼎湖山季风常绿阔叶林林分特征和土壤性质(表 1)、2019.9—2020.4 期间鼎湖区降雨量(表 2)如下。

1.2 样地设置

2019 年 9 月在鼎湖山季风常绿阔叶林内建立试验样地,采取随机区组试验设计,设置 4 个区组,每个区组有 6 个处理,每个处理有 4 个重复样方,共 24 个样方。每个样方面积为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,样方之间的缓冲带间隔 $3—5 \text{ m}$,区组之间的缓冲带间隔 $>10 \text{ m}$ 。该试验设置 3 种凋落物处理(保留、去除或加倍凋落物)和 2 种根系处理(不断根、断根),共 6 个处理组:对照(凋落物和根系输入均无变化,Control)、凋落物加倍(+L)、凋落物去除(-L)、断根(排除根长入,-R)、断根和凋落物加倍(-R+L)以及断根和去除凋落物(-R-L)。方法如下:(1)凋落物加倍:定期(每月)将去除凋落物样方中的凋落物均匀洒落在样方内。(2)去除凋落物:将地表凋落物去除干净,并在样方内设置尼龙网,阻隔外部凋落物进入样方。(3)断根:使用 PVC 板插入土壤基岩,切断与外部根系的联系,同时去除样方内的地表植物。

表 1 鼎湖山季风常绿阔叶林林分特征和土壤性质

Table 1 Forest characteristics and soil properties of monsoon evergreen broadleaf forest in Dinghushan

参数 Parameters	季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broadleaf forest	参考文献 Reference
演替阶段 Succession stage	顶极	[22]
林龄 Forest age/a	>400	[22]
海拔 Altitude/m	250—300	[22]
坡度 Slope/(°)	25—30	[22]
立木密度 Stem density/(株/hm ²)	5682	[22]
凋落物年均产量 Average annual litter yield/(g m ⁻² a ⁻¹)	830.71	[23]
凋落物平均分解速率(<i>k</i> 值) Average decomposition rate of litter	2.21±0.38	[24]
凋落物分解 50%所需时间 Time required for litter decomposition 50%/月	4.3±0.9	[24]
土壤 pH Soil pH	3.65±0.07	采样测量
土壤全碳 Soil total carbon/(g/kg)	39.65±4.06	采样测量
土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)	2.74±0.22	采样测量

表 2 2019.9—2020.4 期间鼎湖区降雨量

Table 2 Rainfall in Dinghu District from September 2019 to April 2020

参数 Parameters	月份 Month							
	2019-09	2019-10	2019-11	2019-12	2020-01	2020-02	2020-03	2020-04
降雨量 Rainfall/mm	85.34	17.53	0.00	0.25	21.84	106.68	127.76	110.24

数据来自国家气象科学数据中心

1.3 样品采集

2020 年 4 月,在每个样方内随机选取 3 个采样点进行混合取样,使用内径为 4.5 cm 土钻分别采集 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm 土壤样品。每个土样均为 3 个样点的混合样品。将土壤样品过 2 mm 筛网,剔除可见碎石和细根后自然风干,用于测定阴阳离子。

采用离子色谱仪(930 Compact IC Flex 1/A, Switzerland)测定土样中的水溶性(water-extractable)阴阳离子浓度。土壤浸提液制备方法如下:每个土样取 10 g 风干土,加入 25 mL 去离子水浸提(土:水=1:2.5),振荡过滤后,取上清液测定 pH、溶解性阳离子(NH₄⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺)和阴离子(NO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻)浓度。通过土壤浸提液中主要阳离子和阴离子的电荷摩尔数来计算:(1)土壤酸中和能力(Acid Neutralizing Capacity, ANC),ANC(molc·kg⁻¹)=2[Ca²⁺]+2[Mg²⁺]+[Na⁺]+[K⁺]+[NH₄⁺]-2[SO₄²⁻]-[Cl⁻]-[NO₃⁻]-3[PO₄³⁻]^[17];(2)土壤阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC),CEC(molc·kg⁻¹)=2[Ca²⁺]+2[Mg²⁺]+[Na⁺]+[K⁺]^[17]。

土壤性质的测定:土壤 pH 值使用 FE28-STANDARD 型 pH 计测定,土壤全碳和全氮使用 Vario MAX cube CN 高通量全自动元素分析仪测定。

1.4 数据统计分析

在统计分析前,所有数据均经过正态性和同质性的验证,必要时使用算术平方根、自然对数、平方转换以满足假设(20—30 cm 的 NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 含量使用平方转换、20—30 cm 的 Cl⁻ 含量使用倒数转换、20—30 cm 的 NH₄⁺ 和 30—40 cm 的 NO₃⁻ 含量使用自然对数转换)。先使用双因素方差分析(Two-ways ANOVA)研究了不同土壤深度下,凋落物和根系处理对水溶性阴阳离子的影响。然后使用单因素方差分析(One-way ANOVA),同时 Duncan 多重比较(显著性水平 $P<0.05$)以研究 6 个处理间的差异。此外,土壤溶液中 PO₄³⁻ 含量极低,多数结果接近零值,固未呈现。

2 结果

2.1 土壤水溶性阴离子对不同凋落物和根系处理的响应

总体来看,土壤 NO₃⁻ 含量对各处理的响应比 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 敏感。同土层离子含量的顺序为:[NO₃⁻] >

$[\text{SO}_4^{2-}] > [\text{Cl}^-]$ (图 1)。与 Control 相比,对于 NO_3^- 含量,所有处理具有普遍增加效果,尤其是 -R-L 处理: +L、-L、-R 和 -R-L 在 0—10 cm 土层分别显著增加了 27.8%、77.9%、71.8%、140.8%,在 10—20 cm 土层分别显著增加了 46.7%、151.2%、62.82%、120.10%。下层土壤(20—40 cm)对处理的响应格局与表层土壤(0—20 cm)相似,并且随着土层加深, NO_3^- 含量呈降低趋势。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量对凋落物和根系处理响应普遍不显著,随土层深度增加也缺乏明显规律,尽管个别处理出现了显著响应。如,对于 Cl^- 含量,在 10—20 cm 土层,-L 和 -R-L 具有显著增加效果,-R 有降低效果($P > 0.05$);在 0—10 cm 土层,-R+L 显著低于 +L。对于 SO_4^{2-} 含量,在 20—30 cm 土层,-L 具有显著增加效果;在 10—30 cm 土层,-R-L 显著低于 -L。

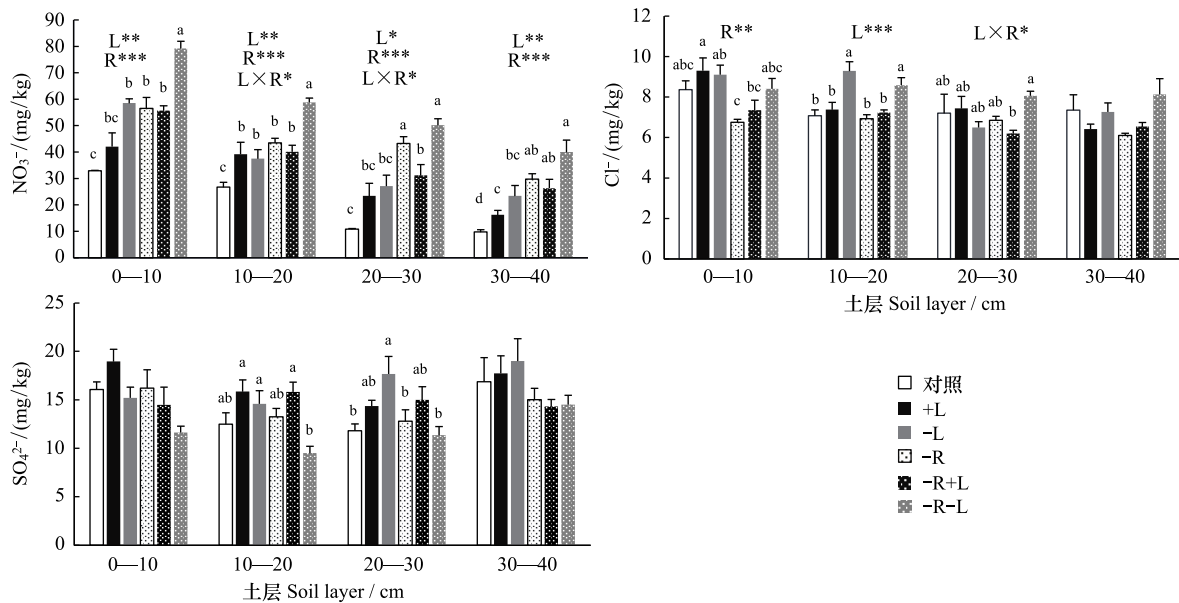


图 1 土壤阴离子含量对不同凋落物和根系处理的响应

Fig.1 Response of soil anion content to different litter and root treatments

Control: 对照处理; +L: 凋落物加倍; -L: 去除凋落物; -R: 断根; -R+L: 断根和凋落物加倍; -R-L: 断根和去除凋落物。误差线为标准误差。

小写字母表示处理间的差异 ($P < 0.05$)。双因素方差分析结果以 L、R、L×R 表示; * 为 $P < 0.05$; ** 为 $P < 0.01$; *** 为 $P < 0.001$

2.2 土壤水溶性阳离子对不同凋落物和根系处理的响应

总体看来,随着土层加深,土壤阳离子含量呈现降低趋势,在 0—20 cm 土层对各处理的响应敏感,20—30 cm 土层不敏感(图 2)。与 Control 相比,所有处理对 NH_4^+ 含量均无显著影响。所有凋落物去除和与断根相关的处理普遍增加了表层(0—20 cm)土壤 Ca^{2+} 含量,其中 -R-L 的含量最高,仅凋落物加倍无显著效果。如,在 0—10 cm 土层,-L、-R+L 和 -R-L 的 Ca^{2+} 含量分别显著增加了 39.42%、42.94%、78.63%;在 10—20 cm 土层,-R 显著增加了 90.65%。去除凋落物和断根处理普遍增加了表层土壤(0—20 cm) Mg^{2+} 含量,但是凋落物加倍无显著影响。如,在 10—20 cm 土层,-L 和 -R 的 Mg^{2+} 含量显著增加了 56.5%、47.9%;-R-L 在 10—20 cm 和 10—20 cm 土层分别显著增加了 44.12% 和 51.12%。 K^+ 含量对凋落物和根系处理响应普遍不显著,仅在 10—20 cm 土层,-R+L 有显著增加效果。-L 增加了 0—20 cm 土层 Na^+ 含量;在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层分别增加了 70.30% 和 86.84%。

2.3 土壤 pH、酸中和能力(ANC)、阳离子交换量(CEC)对不同凋落物和根系处理响应

土壤 pH 在各处理间无显著变化,但存在土层差异,即表层(0—20 cm)较低,并随土层加深而升高,所有土层 pH 值在 3.5—4.1 范围(图 3)。随着土层深度增加,土壤酸中和能力(ANC)呈下降趋势。与 Control 相比,-R+L 和 -R-L 显著降低了 0—10 cm 土层 ANC,+L、-L 和 -R 也有降低效果($P > 0.05$)。对于 CEC,所有土层 Control 和 0—20 cm 的 +L 较其他处理高;与 Control 相比,所有与断根相关的处理普遍降低了 CEC,所有断

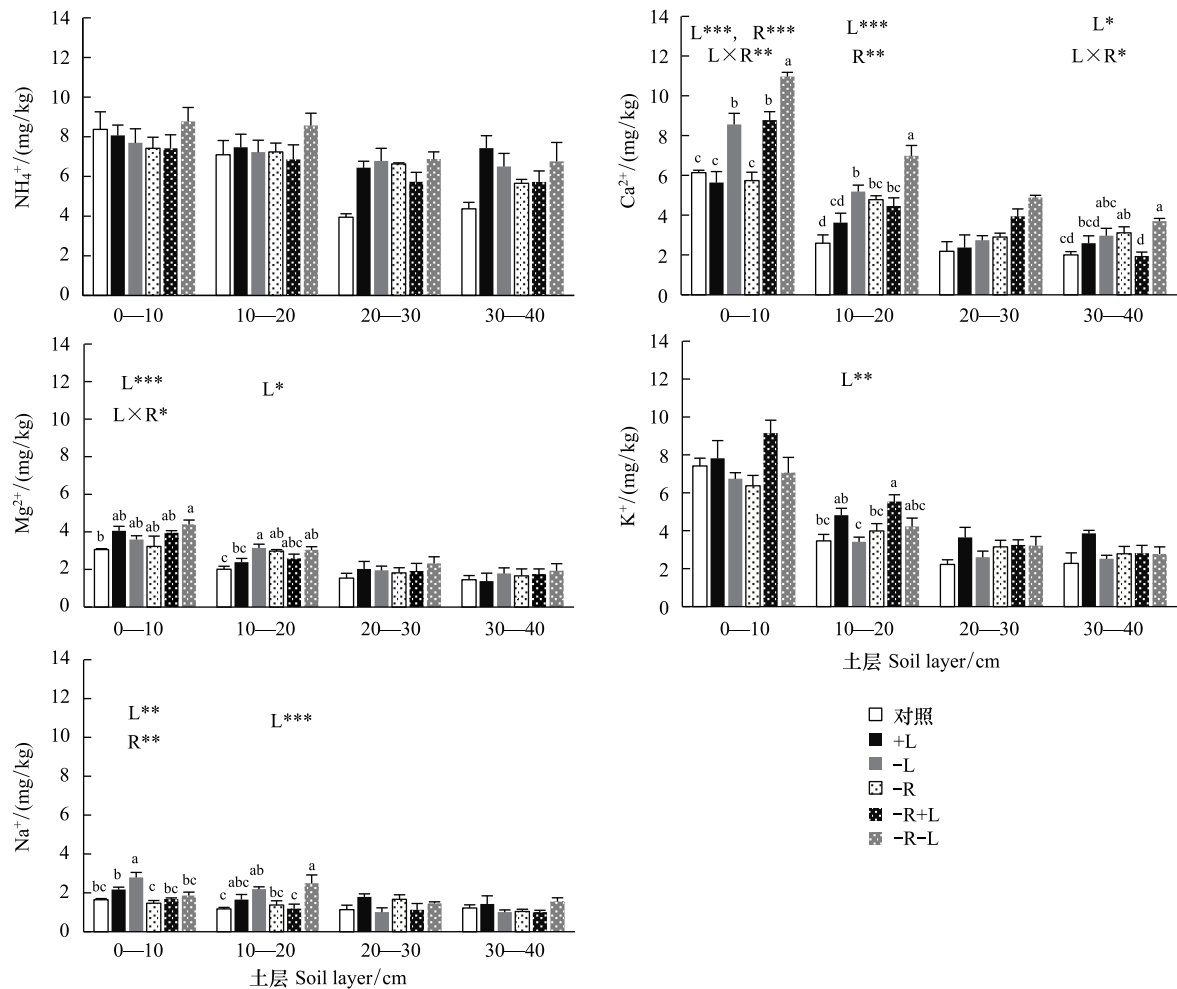


图2 土壤阳离子含量对不同凋落物和根系处理的响应

Fig.2 Response of soil cation content to different litter and root treatments

误差线为标准误差;小写字母表示处理间的差异($P < 0.05$)。双因素方差分析结果以L、R、L×R表示; * 为 $P < 0.05$; ** 为 $P < 0.01$; *** 为 $P < 0.001$

根处理间 CEC 无差异;在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层, +L 分别增加了 30.70% 和 28.71%, -R 分别降低了 58.25% 和 88.70%;在 10—20 cm 土层, -L 降低了 41.04%。

3 讨论

3.1 凋落物输入改变对土壤水溶性离子的影响

地上凋落物是热带森林土壤养分的重要来源^[25],凋落物数量和质量的変化会引起土壤微生物群落组成的改变,进而影响土壤盐基离子的释放^[7,16,26]。本研究中,加倍添加凋落物处理显著增加了土壤 NO₃⁻ 含量,对土壤 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 含量无显著改变效果(图 1,2),这与多数研究结果一致,如,巴拿马热带森林、夏威夷热带森林和中欧温带混交林凋落物添加试验^[6,27–28]。这说明,亚热带森林土壤中无机氮(尤其是 NO₃⁻) 含量易受到凋落物数量增加的影响。其原因主要是:(1)凋落物添加可能分解释放更多硝酸盐^[7,16]; (2)加倍凋落物使土壤微生物量和活性提高,从而可能提高了硝化速率^[29]。

而在本研究中,去除凋落物处理显著增加了土壤 NO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ 含量(图 1,2),这一发现与以往大多数研究结果不同^[30–31]。一般研究认为,去除凋落物通常减少向土壤中的有机物输入,进而减少土壤盐基离

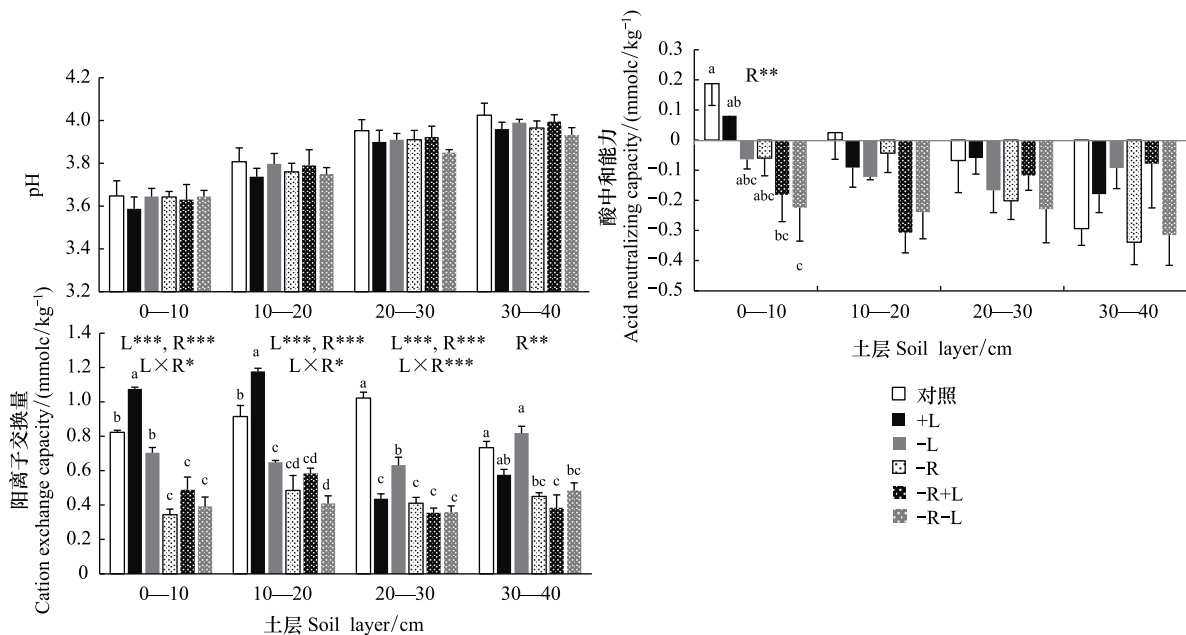


图3 土壤 pH、酸中和能力和阳离子交换量对不同凋落物和根系处理响应

Fig.3 Responses of soil pH, acid neutralizing capacity and cation exchange capacity to different litter and root treatments

误差线为标准误差;小写字母表示处理间的差异 ($P < 0.05$);双因素方差分析结果以 L、R、L×R 表示; * 为 $P < 0.05$; * * 为 $P < 0.01$; * * * 为 $P < 0.001$

子释放^[6]。然而,也有少数研究与本研究的发现一致,如中国西双版纳州热带雨林和加拿大云杉人工林中,去除凋落物增加了土壤 NO_3^- 含量^[32-33]。由此可见,不同类型森林凋落物输入对 NO_3^- 含量的影响依然存在不一致性,这可能与森林类型(凋落物质量)、土壤性质、当地气候及处理时间等因素密切相关。凋落物去除导致土壤 NO_3^- 增加的原因有以下两点:(1)凋落物去除可能使得土壤中的微生物量降低,从而使微生物对 NO_3^- 的利用减少^[34],则使 NO_3^- 存在短期积累^[33];(2)凋落物去除可能导致表层土壤温度上升,从而提高了净硝化量^[32]。此外,凋落物去除降低了土壤对酸雨的缓冲作用,增加了土壤直接淋溶的风险,酸雨输入可能驱动土壤盐基离子释放,进而增加可交换阳离子的含量。

3.2 根系输入改变对土壤水溶性离子的影响

植物根系对土壤主要元素保留具有吸收、物理拦截和分解释放作用,断根会减少植物的吸收和地下碳源输入。本研究中发现断根处理可显著增加土壤 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量,表层土壤(0—20 cm)响应敏感(图 1, 2),同美国温带森林的挖沟断根处理和中国温带橡树人工林去除根系实验使 NO_3^- 浓度明显升高的结果相一致^[35-36];但也有少数实验发现去除根系会降低土壤氮浓度,如中国新疆云杉林两年断根实验^[37]。因此,不同类型的森林根系输入改变对土壤 NO_3^- 含量影响存在不确定性,结果具有差异,可能是受森林所处气候带以及森林类型(根系质量)的影响。通常天然林和阔叶林比杉木人工林的根系更加丰富,根系生物量更高^[38],从而影响根系元素分解释放。本研究出现这样现象的原因主要是:(1)断根后,根系维管束及与根系共生的菌根都将失去作用,从而可能减少植物对 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸收^[39],造成短期内积累;(2)去除根系后,缺乏根系分泌物(如糖类、蛋白质、氨基酸、酯类等化合物),可能降低了细菌和真菌代谢,从而减少了微生物对元素的消耗^[40-41];(3)断掉的根在土壤经历分解,可能作为元素输入源而导致 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 增加^[42]。本实验中断根处理对 NH_4^+ 含量无显著影响(图 2),而一般认为断根减少了植物对氮的吸收, NH_4^+ 呈现增加现象^[43-44]。本实验出现该现象的原因主要是:(1)增加的 NH_4^+ 多可能被黏土矿物吸附固定,以固定态 NH_4^+ 形式存在^[45-46],因此水溶性 NH_4^+ 无明显变化;(2)底物 NH_4^+ 含量可能增加促进了硝化过程,从而观察到 NO_3^- 的明显

增加;(3)可能与处理时间尚短有关,因为在亚热带人工林 4 年的灌木清除(部分断根)研究中观察到氨化率和 NH_4^+ 含量的提高^[9]。这说明长期断根(如,砍伐森林)可能使 NH_4^+ 有所上升,还需要长期监测数据来验证。

3.3 凋落物和根系共同作用对土壤水溶性离子的影响

本研究发现,断根和凋落物改变共同效应对所有土层 NO_3^- 和表层土壤的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 含量有明显交互效果,无输入(断根和凋落物去除共同处理)使 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量增幅最大(图 1,2)。在断根处理下,凋落物加倍对 NO_3^- 、 Mg^{2+} 影响不大,凋落物去除有显著增加效果;不管如何改变凋落物,与断根相关的处理普遍增加 Ca^{2+} 含量。有研究表明改变凋落物输入量不会显著影响根系分泌物(如,根际土壤的硝酸还原酶和脲酶等)活性和氮含量^[47],说明根系输入改变较凋落物对 NO_3^- 的调控作用更为主导,这与 Yano Y 和林宝平的研究相似,他们认为根系可能是森林土壤氮库的主要贡献者^[43,48]。在本研究中,断根和凋落物加倍共同处理与单独凋落物加倍相比,使得表层土壤 K^+ 含量明显增加,断根放大了凋落物加倍对 K^+ 的释放效果^[49]。出现这种现象的原因主要是:(1)根系对 K^+ 吸收的减少以及死根分解输入可能增加 K^+ 含量;(2)凋落物加倍使凋落物层加厚,可能提高了土壤湿度,从而增加了 K^+ 的释放^[50]。

本研究目前主要集中在植物凋落物和根系输入改变后对土壤水溶性离子的短期激发效应,并观察到植物凋落物和根系输入的改变会明显影响到土壤营养元素(尤其是 NO_3^- 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的可利用性和酸缓冲能力。目前实验处理时间仅 6 个月,加倍凋落物和断根处理的根系仍处于不断分解状态,可能短期激发效应和长期实验效应会存在差异;因此,需要进一步关注植被凋落物和根系输入改变引起的长期生态学效应。

3.4 土壤缓冲能力对凋落物和根系输入改变的响应

通常土壤的缓冲能力可以通过 pH 值、酸中和能力和阳离子交换量等指标来体现^[4,17,51]。虽然在本研究中土壤 pH 无显著变化(结果与多数研究一致)^[6,15],但凋落物去除和断根及其共同效应普遍削弱了土壤酸中和能力和水溶性阳离子交换量(图 3),4 土层呈现一致趋势。并且,所有断根处理的降幅比凋落物去除更大,断根处理和凋落物加倍或去除的共同处理与单独断根相比无明显差异。这说明凋落物和根系输入量的变化对土壤的缓冲能力具有关键的调控作用,并且根系的调控能力尤为重要。

凋落物去除和断根处理使 0—10 cm 土壤酸中和能力由正值转为负值,并且 4 土层均具有降低趋势,这主要可能与 NO_3^- 含量增加和阳离子交换量的降低相关(图 1,3)。凋落物去除和断根导致土壤阳离子交换量显著减少,主要可能是由于有机质输入量的减少,从而减少了土壤阳离子库总量^[52—53]。地上和地下有机质输入减少,导致土壤缓冲性能降低,从而影响土壤养分保留能力,可能对植物和微生物生长不利^[54]。随着土壤 NO_3^- 含量的升高,存在更高的氮和盐基离子淋溶风险。 NO_3^- 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基阳离子的淋失,会导致 H^+ 浓度的上升和 Al^{3+} 的活化^[17],从而进一步削弱土壤酸缓冲能力^[55—57]。

4 结论

研究表明:(1)短期凋落物去除与添加处理都显著增加了各层土壤 NO_3^- 含量,并且凋落物去除效应高于添加效应;去除凋落物增加了表层土壤(0—20 cm) Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 的含量。(2)断根处理显著增加 0—40 cm 土壤 NO_3^- 和表层土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量。断根和去除凋落物交互处理显著增加了 0—40 cm 土壤 NO_3^- 和表层土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 含量,产生了叠加效应。(3)短期凋落物和断根处理并没有改变土壤 pH,但降低了土壤酸中和能力(除凋落物加倍外),其降低的原因主要归结于阳离子交换量的降低和 NO_3^- 含量的增加。这些结果表明,短期植物凋落物和根系输入的改变会影响到土壤酸缓冲能力和营养元素的可利用性(尤其是 NO_3^- 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+});与凋落物相比,植物根系对土壤养分离子具有更强的调控作用,0—20 cm 表层土壤响应更敏感。在人类活动和全球变化加剧背景下,该研究可为森林生态系统管理提供重要的理论参考。此外,植被凋落物和根系输入改变引起的长期生态学效应仍值得进一步关注。

参考文献(References):

- [1] Kaspari M, Garcia M N, Harms K E, Santana M, Wright S J, Yavitt J B. Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest.

- Ecology Letters, 2008, 11(1): 35-43.
- [2] Geilfus C M. Review on the significance of chlorine for crop yield and quality. Plant Science, 2018, 270: 114-122.
- [3] Cai L, Liu M H, Liu Z W, Yang H K, Sun X C, Chen J N, Xiang S Y, Ding W. MgONPs can boost plant growth: evidence from increased seedling growth, *Morpho*-physiological activities, and Mg uptake in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). Molecules; Basel, Switzerland, 2018, 23(12): 3375.
- [4] Bowman W D, Cleveland C C, Halada L, Hreško J, Baron J S. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity. Nature Geoscience, 2008, 1(11): 767-770.
- [5] Leff J W, Wieder W R, Taylor P G, Townsend A R, Nemergut D R, Grandy A S, Cleveland C C. Experimental litterfall manipulation drives large and rapid changes in soil carbon cycling in a wet tropical forest. Global Change Biology, 2012, 18(9): 2969-2979.
- [6] Sayer E J, Tanner E V J. Experimental investigation of the importance of litterfall in lowland semi-evergreen tropical forest nutrient cycling. Journal of Ecology, 2010, 98(5): 1052-1062.
- [7] Sayer E J, Joseph Wright S, Tanner E V J, Yavitt J B, Harms K E, Powers J S, Kaspari M, Garcia M N, Turner B L. Variable responses of lowland tropical forest nutrient status to fertilization and litter manipulation. Ecosystems, 2012, 15(3): 387-400.
- [8] Franklin H M, Chen C R, Carroll A R, Saeck E, Fisher P, Burford M A. Leaf litter of two riparian tree species has contrasting effects on nutrients leaching from soil during large rainfall events. Plant and Soil, 2020, 457(1/2): 389-406.
- [9] Fang X M, Wang G G, Xu Z J, Zong Y Y, Zhang X L, Li J J, Wang H M, Chen F S. Litter addition and understory removal influenced soil organic carbon quality and mineral nitrogen supply in a subtropical plantation forest. Plant and Soil, 2021, 460(1/2): 527-540.
- [10] Bergeron M, Lacombe S, Bradley R L, Whalen J, Cogliastro A, Jutras M F, Arp P. Reduced soil nutrient leaching following the establishment of tree-based intercropping systems in eastern Canada. Agroforestry Systems, 2011, 83(3): 321-330.
- [11] 郝娜. 大兴安岭南段次生林土壤氮矿化对不同碳输入的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [12] 章宪, 范跃新, 罗茜, 谢锦升, 孙杰. 凋落物和根系处理对杉木人工林土壤氮素的影响. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(2): 39-44.
- [13] 李勇, 张晴雯, 万国江, 黄荣贵, 朴河春. 特大暴雨下油松林根系对土壤元素迁移的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 51-56.
- [14] 林成芳. 中亚热带森林细根分解动态及影响因素[D]. 福州: 福建师范大学, 2008.
- [15] Huang W J, Spohn M. Effects of long-term litter manipulation on soil carbon, nitrogen, and phosphorus in a temperate deciduous forest. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 83: 12-18.
- [16] Xu S, Liu L L, Sayer E J. Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments. Biogeosciences, 2013, 10(11): 7423-7433.
- [17] Lu X K, Mao Q G, Gilliam F S, Luo Y Q, Mo J M. Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems. Global Change Biology, 2014, 20(12): 3790-3801.
- [18] Hyvönen R, Ågren G I, Linder S, Persson T, Cotrufo M F, Ekblad A, Freeman M, Grelle A, Janssens I A, Jarvis P G, Kellomäki S, Lindroth A, Loustau D, Lundmark T, Norby R J, Oren R, Pilegaard K, Ryan M G, Sigurdsson B D, Strömberg M, van Oijen M, Wallin G. The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. New Phytologist, 2007, 173(3): 463-480.
- [19] Li W B, Jin C J, Guan D X, Wang Q K, Wang A Z, Yuan F H, Wu J B. The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: a meta-analysis. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 82: 112-118.
- [20] Lu X K, Gilliam F S, Yu G, Li L, Mao Q G, Chen H, Mo J M. Long-term nitrogen addition decreases carbon leaching in a nitrogen-rich forest ecosystem. Biogeosciences, 2013, 10(6): 3931-3941.
- [21] Lu X K, Mo J M, Gilliam F S, Zhou G Y, Fang Y T. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest. Global Change Biology, 2010, 16(10): 2688-2700.
- [22] Zhou G Y, Houlton B Z, Wang W T, Huang W J, Xiao Y, Zhang Q M, Liu S Z, Cao M, Wang X H, Wang S L, Zhang Y P, Yan J H, Liu J X, Tang X L, Zhang D Q. Substantial reorganization of China's tropical and subtropical forests: based on the permanent plots. Global Change Biology, 2014, 20(1): 240-250.
- [23] 李跃林, 刘世忠, 黄健强, 韦思敏, 褚国伟, 张倩媚, 张德强, 孟泽. 1999—2016 年鼎湖山季风常绿阔叶林凋落物月回收量数据集. 中国科学数据, 2020, 5(2): 51-60.
- [24] Mo J M, Brown S, Xue J H, Fang Y T, Li Z A. Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China. Plant and Soil, 2006, 282(1/2): 135-151.
- [25] Tanner E V J, Vitousek P M, Cuevas E. Experimental investigation of nutrient limitation of forest growth on wet tropical mountains. Ecology, 1998, 79(1): 10-22.
- [26] Liu R, Zhang Y, Hu X F, Wan S Z, Wang H M, Liang C, Chen F S. Litter manipulation effects on microbial communities and enzymatic activities vary with soil depth in a subtropical Chinese fir plantation. Forest Ecology and Management, 2021, 480: 118641.
- [27] Leitner S, Dirnböck T, Kobler J, Zechmeister-Boltenstern S. Legacy effects of drought on nitrate leaching in a temperate mixed forest on Karst. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110338.
- [28] Porder S, Chadwick O A. Climate and soil-age constraints on nutrient uplift and retention by plants. Ecology, 2009, 90(3): 623-636.
- [29] Wang Q K, He T X, Wang S L, Liu L. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 178/179: 152-160.
- [30] Bowden R D, Deem L, Plante A F, Peltre C, Nadelhoffer K, Lajtha K. Litter input controls on soil carbon in a temperate deciduous forest. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(S1): S66-S75.

- [31] Xiao R H, Man X L, Duan B X, Cai T J. Short-term litter manipulations have strong impact on soil nitrogen dynamics in *Larix gmelinii* forest of northeast China. *Forests*, 2020, 11(11): 1205.
- [32] Matsushima M, Chang S X. Effects of understory removal, N fertilization, and litter layer removal on soil N cycling in a 13-year-old white spruce plantation infested with Canada bluejoint grass. *Plant and Soil*, 2007, 292(1/2): 243-258.
- [33] Gao J B, Zhou W J, Liu Y T, Zhu J, Sha L Q, Song Q H, Ji H L, Lin Y X, Fei X H, Bai X L, Zhang X, Deng Y, Deng X B, Yu G R, Zhang J H, Zheng X H, Grace J, Zhang Y P. Effects of litter inputs on N₂O emissions from a tropical rainforest in southwest China. *Ecosystems*, 2018, 21(5): 1013-1026.
- [34] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749.
- [35] Lajtha K, Crow S E, Yano Y, Kaushal S S, Sulzman E, Sollins P, Spears J D H. Detrital controls on soil solution N and dissolved organic matter in soils: a field experiment. *Biogeochemistry*, 2005, 76(2): 261-281.
- [36] Wang Y, Zhang C, Zhang G N, Wang L Z, Gao Y, Wang X L, Liu B, Zhao X Y, Mei H P. Carbon input manipulations affecting microbial carbon metabolism in temperate forest soils-A comparative study between broadleaf and coniferous plantations. *Geoderma*, 2019, 355: 113914.
- [37] Zhu H Q, Gong L, Ding Z L, Li Y F. Effects of litter and root manipulations on soil carbon and nitrogen in a Schrenk's spruce (*Picea schrenkiana*) forest. *PLoS One*, 2021, 16(2): e0247725.
- [38] Cotrufo M, Wallenstein M, Boot C, Deneff K, Paul E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 988-995.
- [39] Govindarajulu M, Pfeffer P E, Jin H, Abubaker J, Douds D D, Allen J W, Bücking H, Lammers P J, Shachar-Hill Y. Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Nature*, 2005, 435(7043): 819-823.
- [40] Zhao M L, Zhao J, Yuan J, Hale L, Wen T, Huang Q W, Vivanco J M, Zhou J Z, Kowalchuk G A, Shen Q R. Root exudates drive soil-microbe-nutrient feedbacks in response to plant growth. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(2): 613-628.
- [41] Zhao J, Wan S Z, Fu S L, Wang X L, Wang M, Liang C F, Chen Y Q, Zhu X L. Effects of understory removal and nitrogen fertilization on soil microbial communities in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310: 80-86.
- [42] Tripathi S K, Sumida A, Shibata H, Uemura S, Ono K, Hara T. Growth and substrate quality of fine root and soil nitrogen availability in a young *Betula ermanii* forest of northern Japan: effects of the removal of understory dwarf bamboo (*Sasa kurilensis*). *Forest Ecology and Management*, 2005, 212(1/2/3): 278-290.
- [43] 林宝平, 何宗明, 郜士垒, 桑昌鹏, 温秀萍, 林宇, 黄志群, 林思祖. 去除根系和凋落物对滨海沙地 3 种防护林土壤碳氮库的短期影响. *生态学报*, 2017, 37(12): 4061-4071.
- [44] 谢君毅, 蔡斌, 张惠光, 徐侠. 碳输入方式对森林土壤活性氮库及氮循环的影响研究进展. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021.
- [45] Johnson D W, Cheng W, Burke I C. Biotic and abiotic nitrogen retention in a variety of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4): 1503-1514.
- [46] 廖继佩, 林先贵, 曹志洪, 张杨株. 土壤固定态铵的影响因素. *土壤*, 2003, 35(1): 36-40.
- [47] 张成富, 赵庆霞, 蔡银美, 李昕颖, 何腾兵. 凋落物输入对根系分泌物碳输入及土壤氮的影响. *森林与环境学报*, 2021, 41(3): 263-271.
- [48] Yano Y, Lajtha K, Sollins P, Caldwell B A. Chemistry and dynamics of dissolved organic matter in a temperate coniferous forest on andic soils: effects of litter quality. *Ecosystems*, 2005, 8(3): 286-300.
- [49] Tanner E V J, Sheldrake M W A, Turner B L. Changes in soil carbon and nutrients following 6 years of litter removal and addition in a tropical semi-evergreen rain forest. *Biogeosciences*, 2016, 13(22): 6183-6190.
- [50] Du N N, Li W R, Qiu L P, Zhang Y J, Wei X R, Zhang X C. Mass loss and nutrient release during the decomposition of sixteen types of plant litter with contrasting quality under three precipitation regimes. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(7): 3367-3382.
- [51] Fang K, Kou D, Wang G Q, Chen L Y, Ding J Z, Li F, Yang G B, Qin S Q, Liu L, Zhang Q W, Yang Y H. Decreased soil cation exchange capacity across Northern China's grasslands over the last three decades. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(11): 3088-3097.
- [52] Wang R Z, Zhang Y L, Cerdà A, Cao M M, Zhang Y Y, Yin J F, Jiang Y, Chen L J. Changes in soil chemical properties as affected by pyrogenic organic matter amendment with different intensity and frequency. *Geoderma*, 2017, 289: 161-168.
- [53] Zhang Y G, Xu Z W, Jiang D M, Jiang Y. Soil exchangeable base cations along a chronosequence of *Caragana microphylla* plantation in a semi-arid sandy land, China. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(1): 42-50.
- [54] Jiang J, Wang Y P, Yu M X, Cao N N, Yan J H. Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils. *Chemical Geology*, 2018, 501: 86-94.
- [55] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [56] Schreeg L A, Mack M C, Turner B L. Nutrient-specific solubility patterns of leaf litter across 41 lowland tropical woody species. *Ecology*, 2013, 94(1): 94-105.
- [57] Jiang J, Wang Y P, Yu M X, Cao N N, Yan J H. Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils. *Chemical Geology*, 2018, 501: 86-94.