

DOI: 10.5846/stxb202008162130

习丹, 翁浩东, 胡亚林, 吴建平. 林冠氮添加和林下植被去除对杉木林土壤有机碳组分的影响. 生态学报, 2021, 41(21): 8525-8534.

Xi D, Weng H D, Hu Y L, Wu J P. Effects of canopy nitrogen addition and understory removal on soil organic carbon fractions in a Chinese fir plantation. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8525-8534.

林冠氮添加和林下植被去除对杉木林土壤有机碳组分的影响

习 丹¹, 翁浩东¹, 胡亚林¹, 吴建平^{2, *}

1 福建农林大学林学院森林生态稳定同位素中心, 福州 350002

2 云南大学云南省植物繁育适应与进化生态学重点实验室, 昆明 650500

摘要:为探讨氮添加和林下植被管理对杉木人工林土壤有机碳组分的影响,以福建沙县官庄国有林场杉木人工林为对象,设置对照(CK)、林冠氮添加(CN)、林下植被去除(UR)、林冠氮添加和林下植被去除(CNUR)4个处理的野外控制实验,研究林冠氮添加和林下植被去除对土壤总有机碳、惰性有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳、微生物生物量碳和水溶性有机碳的影响。结果表明:5年CN添加处理显著降低易氧化有机碳(10—20 cm)和微生物生物量碳(20—40 cm)含量,增加表层土壤颗粒有机碳占总有机碳的比例。UR处理对土壤有机碳组分的作用不显著,而CNUR处理显著降低表层土壤水溶性有机碳含量及其比例。土壤各有机碳组分均与土壤含水量、可溶性有机氮、微生物生物量氮和铵态氮呈显著正相关。研究表明,土壤活性有机碳比惰性有机碳对林冠氮添加(5年)的响应更敏感,且表现为中下层土壤响应大于表层土壤,短期氮添加能促进土壤活性有机碳的分解,而林下植被去除在短时间内可能通过改变土壤含水量和可利用氮减缓有机碳的分解与转化,从而补偿由于氮添加引起的土壤活性有机碳下降,未来需要通过长期氮添加实验进一步研究土壤有机碳动态变化的响应机制。

关键词:林冠氮添加;林下植被去除;活性有机碳;惰性有机碳;杉木人工林

Effects of canopy nitrogen addition and understory removal on soil organic carbon fractions in a Chinese fir plantation

XI Dan¹, WENG Haodong¹, HU Yalin¹, WU Jianping^{2, *}

1 Forest Ecology Stable Isotope Center, College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Yunnan Key Laboratory of Plant Reproductive Adaption and Evolutionary Ecology, Yunnan University, Kunming 650500, China

Abstract: Increased nitrogen (N) deposition due to anthropogenic activities has been recognized to have important effects on forest carbon dynamic and plant diversity. However, most N manipulative experiments from the understory have suggested that external N addition can influence soil organic carbon pool, very little is known about the effects of canopy N addition on soil organic carbon fractions. To investigate these effects, a field experiment was carried out with four different treatments including control (CK), canopy N addition (CN, 25 kg N hm⁻² a⁻¹), understory removal (UR), and canopy N addition plus understory removal (CNUR, 25 kg N hm⁻² a⁻¹) in a Chinese fir plantation at Shaxian State Forest Farm, Fujian Province. The experiment was started in June 2014 and was a random block design with four replicates. After 5-years treatment, soil samples were collected by a stainlessness core (3.5 cm diameter, 60 cm length) and separated into three depths of 0—10 cm, 10—20 cm, and 20—40 cm. Then, total organic carbon (TOC), recalcitrant organic carbon (ROC), readily oxidizable organic carbon (ROOC), particular organic carbon (POC), microbial biomass carbon

基金项目:国家自然科学基金项目(41703068, 31570444)

收稿日期:2020-08-16; 网络出版日期:2021-07-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianping.wu@ynu.edu.cn

(MBC), and water-soluble organic carbon (WSOC) were determined. The results showed that soil TOC and ROC contents in the CN treatment had no significant changes, but the contents of soil ROOC at the 10—20 cm layer and MBC at the 20—40 cm layer, and the proportion of WSOC to TOC in surface soil layer significantly decreased and increased, respectively, compared to CK treatment. Moreover, single UR treatment did not influence soil organic carbon components, while CNUR treatment significantly decreased soil WSOC contents and proportions to TOC. Pearson analysis showed that both soil labile and recalcitrant organic carbons were positively correlated with soil moisture, water-soluble organic nitrogen, microbial biomass nitrogen, and ammonium nitrogen. These results indicated that soil labile organic carbon (LOC) was more sensitive to the short-term CN (5 years) compared to ROC, and the responses of subsoil (10—40 cm) were larger than top soil (0—10 cm). CN could promote soil LOC decomposition and consequently have a negative effect on the accumulation of soil organic carbon. However, UR was likely to offset the decrease of soil LOC induced by CN in the short time since UR would change the soil water and available nitrogen to decline the decomposition and transformation of soil organic carbon. All these findings suggest that the effects of CN and UR on soil organic carbon fractions and dynamics are complex, which requires a much longer-term manipulative experiment to understand the responding mechanism of soil carbon dynamics in the future.

Key Words: canopy nitrogen addition; understory removal; labile organic carbon; recalcitrant organic carbon; *Cunninghamia lanceolata* plantation

人工林生态系统是陆地生态系统重要的碳库之一,对全球碳平衡产生重要影响^[1]。近年来人类活动引起大气活性氮沉降的增加影响了凋落物分解速率^[2-3]、土壤酶活性、微生物群落组成和结构^[4]等,进而显著影响土壤碳库的稳定性^[5]。土壤有机碳由不同稳定程度的组分构成,可分为惰性、慢性和活性有机碳。各有机碳组分间相互转化,共同决定土壤有机碳的分解和积累^[6]。活性有机碳易被分解和氧化、能快速指示土壤对环境变化的响应,而慢性和惰性有机碳难分解、稳定性高,可以反映土壤碳库的长期变化^[6-7]。目前关于氮沉降对人工林土壤有机碳组分的研究主要集中在活性有机碳方面^[8-10],对惰性有机碳研究较少,对其响应机制更是缺乏系统认识。已取得的绝大多数研究成果起始于林下施氮实验,而关于林冠层氮添加的研究相对缺乏^[11-13]。有研究表明森林冠层能截留 30%—80% 的沉降氮^[11, 14-15],减少外源氮输入对土壤性质的影响^[16]。不同土壤有机碳组分对氮沉降的响应不同^[9],土壤有机碳组分对林冠施氮的响应规律是否有别于传统的林下施氮研究,目前依然不清楚。因此,研究林冠氮添加对人工林土壤有机碳组分的影响,对深入理解人工林生态系统碳循环及其固碳潜力对氮沉降的响应具有重要意义。

林下植被作为森林生态系统重要的组成部分,可通过改变土壤生物化学过程、凋落物的数量与质量等影响土壤中碳的输入量^[17-18],进而影响土壤有机碳的变化。去除林下植被是人工林经营中最常用的管理措施之一^[19]。林下植被的移除可引起土壤水热条件、林地群落结构等要素发生改变^[20],同时还能减少对沉降氮的截留效应,增加凋落物和土壤中活性氮量^[17],促进或抑制土壤有机碳的分解与形成。有研究表明植被去除通过减少地上部的碳输入显著降低人工林土壤总有机碳^[21-22]和活性有机碳含量^[20, 23],也有研究认为植被去除通过提高土壤温度来增加土壤微生物活性^[19],促进土壤碳积累^[24]。然而,在当前氮沉降增加背景下,林下植被去除是否会加快氮沉降对森林土壤有机碳组分的影响,目前尚不清楚,有待进一步的研究。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国特有的速生用材树种,其种植面积约占我国人工林面积的 25%^[25],对维持区域气候和碳氮循环方面具有重要作用。目前氮沉降对杉木人工林影响研究已在微生物群落结构^[26-27]、酶活性^[28]和活性有机碳^[9]等方面陆续开展,而土壤有机碳组分如何响应林冠氮添加和林下植被管理有待深入研究^[27]。因此,以杉木人工林为研究对象,通过野外模拟氮沉降和嵌套灌草去除实验,探讨林冠氮添加和林下植被去除对土壤总有机碳、惰性有机碳和活性有机碳的影响,为更好了解氮沉降对人工林生态系统的影响机理以及人工林可持续经营提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省三明市沙县官庄国有林场(117°43'29"E, 26°30'47"N), 年均气温约 19.6 °C, 无霜期 271 d, 降水充沛, 年均降雨量约 1628 mm, 主要集中在 4—9 月; 气候温和湿润, 属于亚热带季风湿润型气候^[27, 29]。试验地位于该林场的罗溪工区, 海拔约 100 m, 为 2008 年营造的杉木人工林, 面积约 4 hm², 坡度平缓(<4°)。土壤类型为山地红壤, 土层厚度>60 cm。林下植被稀疏, 盖度不超过 5%, 以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、地稔(*Melastoma dodecandrum*)、粉单竹(*Bambusa chungii*)和菝葜(*Smilax china*)等植物为主^[27, 29]。

1.2 试验设计

在 2013 年 12 月, 随机选择立地条件基本相似的杉木人工林(6 年生)样地, 设置 4 个区组, 每个区组内随机建立 2 个 15 m×15 m 样方, 分别对应不加氮和加氮处理(25 kg N hm⁻²a⁻¹), 并在各样方内嵌套设置 5 m×10 m 林下去除植被处理, 共设置对照(CK)、林下植被去除(UR)、林冠氮添加(CN)、林冠氮添加和林下植被去除(CNUR)4 个处理, 每个处理 4 个重复。样方间设置 3—10 m 不等的隔离带, 以防止相互之间造成干扰。在开始实验处理前, 对样地林分特征和立地条件进行了调查, 结果见表 1^[29]。林冠施氮量是依据 Wei 等^[30]研究提出的杉木林氮饱和基准(25 kg N hm⁻²a⁻¹)和当地大气氮沉降情况(9—18.9 kg N hm⁻²a⁻¹), 并结合国内外氮沉降研究的处理方法^[28, 31-32]。所有处理均从 2014 年 6 月开始, 氮添加处理是采用汽油型高压喷雾器(最高可达 19 m)将硝酸铵(NH₄NO₃)溶液均匀喷洒在林冠层, 每 2 个月进行一次, 每次是称取 269 g NH₄NO₃ 固体溶于 15 L 水中于月中旬进行。对照样方喷洒与氮处理样方等剂量的水。去除林下植被主要采用手工方式割除灌草的地上部分并带离样方外, 在每次氮添加处理之前进行。

表 1 各处理前样地基本概况^[29]

Table 1 The basic properties of sample plots before treatments^[29]

处理 Treatments	密度 Density/ (株/hm ²)	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	平均树高 Mean tree height/m	土壤 pH Soil pH	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	有机碳 Total organic carbon/ (g/kg)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg/kg)	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg/kg)
对照 Control (CK)	3730	7.05	5.03	4.52	1.98	33.84	4.04	1.00
林下植被去除 Understory removal (UR)	3600	7.62	4.89	4.53	1.90	34.08	5.08	1.00
林冠氮添加 Canopy N addition (CN)	3500	7.04	5.23	4.37	1.89	32.98	5.26	0.98
林冠氮添加和林下植被去除 Canopy N addition plus understory removal (CNUR)	3350	7.63	5.28	4.35	1.88	32.58	4.45	0.99

1.3 样品采集与测定

2019 年 4 月下旬, 用不锈钢土钻(内径 3.5 cm、长 60 cm)分层钻取不同处理下 0—10、10—20 和 20—40 cm 土壤样品, 每层 5 点取样, 混合成 1 个样品, 带回实验室去除根系、动植物残体等杂物后过 2 mm 筛, 分成 2 份, 一份用于土壤含水量、铵态氮、硝态氮、可溶性有机氮、水溶性有机碳和微生物生物量碳氮测定, 另一份自然风干后用于土壤总有机碳、全氮、pH、颗粒有机碳、易氧化有机碳和惰性有机碳测定。

土壤总有机碳和全氮含量测定使用 Elementar 元素分析仪 (Vario isotope cube, 德国)。惰性有机碳测定采用 6 mol/L 盐酸消解, 过滤、烘干后上元素分析仪测定。采用高锰酸钾氧化法测定易氧化有机碳^[33], 六偏磷酸钠提取法^[34]测定颗粒有机碳, 氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法测定微生物生物量碳氮^[6]。水溶性有机碳先采用去离子水(土:水为 1:5, w/w)浸提, 经滤膜(0.45 μm)过滤后上总有机碳分析仪(TOC-VCPH/CPN, 日本)分析。铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)用 2 mol/L KCl 溶液浸提, 间断性化学分析仪(SmartChem 200, 意大

利)测定,可溶性有机氮采用过硫酸钾氧化-分光光度法测定。土壤含水量和 pH 值分别采用烘干法和电位法进行测定。

1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 软件进行数据统计分析。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA, Duncan 法进行多重比较)分析不同处理间和不同土层间土壤总有机碳、惰性有机碳和活性有机碳组分含量及其比例的差异显著性,三因素方差分析(Three-Way ANOVA)检验氮添加、植被去除和土层对土壤总有机碳及其组分的影响($P < 0.05$)。土壤有机碳组分与土壤理化性质的相关性采用 Pearson 相关系数表示($P < 0.05$)。采用 Origin 8.5 软件绘制所有图。

2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳

CK 和 UR 处理中土壤总有机碳平均含量分别为 (15.59 ± 2.11) g/kg 和 (15.73 ± 2.29) g/kg, 差异不显著, 而均在土层间降幅显著(图 1)。与 CK 处理相比, 土壤总有机碳含量在 CN 处理中下降了 0.06%—15.0%, 在 CNUR 处理中增加了 0.70%—15.2%, 但差异均未达到显著水平($P > 0.05$)。在 0—20 cm 土层中, CN 处理下土壤总有机碳含量比 UR 和 CNUR 处理分别低了 9.5%—33.8% 和 16.4%—19.6%, 而两两处理间差异不显著($P > 0.05$)。整体而言, CN 和 UR 对土壤总有机碳含量无显著影响(表 2)。

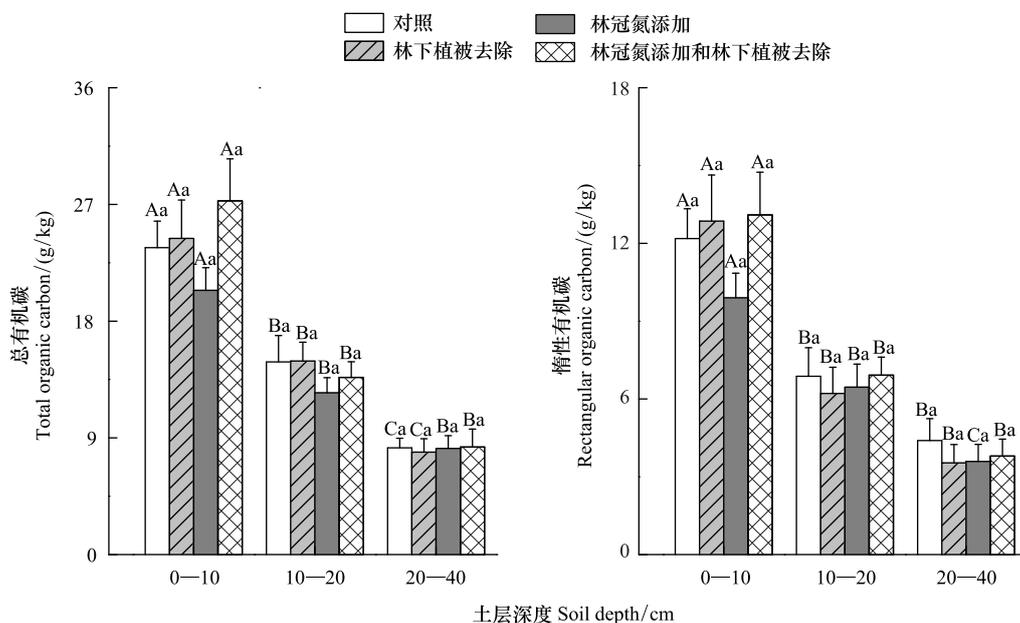


图 1 不同处理土壤总有机碳和惰性有机碳含量

Fig.1 Contents of soil total organic carbon and rectangular organic carbon under different treatments

不同大写字母表示土层间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

2.2 土壤惰性有机碳

由图 1 可知, 土壤惰性有机碳含量介于 3.53—12.85 g/kg 之间, CN 处理呈现三个土层差异梯度, 而其他处理仅仅在 0—10 和 10—40 cm 土层间呈现差异显著。在 0—10 cm 土层中, 土壤惰性有机碳含量在 CN 处理中最低, 比 CK、UR 和 CNUR 处理分别降低了 18.7%、23.0% 和 24.4%, 差异均未达到显著水平($P > 0.05$); UR 和 CNUR 处理略高于 CK 处理, 两两间差异不显著($P > 0.05$)。在 10—40 cm 土层中, CN 和 UR 处理土壤惰性有机碳含量均略低于 CK 和 CNUR 处理, 而 CNUR 处理在 10—20 cm 土层中略高于 CK 处理, 在 20—40 cm 土层中则相反, 所有处理间无显著差异($P > 0.05$)。多因素方差分析结果显示, CN 和 UR 对土壤惰性有机碳含

量影响不显著(表 2)。

表 2 林冠氮添加、林下植被去除和土层对总有机碳、惰性碳及活性碳影响的三因素方差分析(F)

Table 2 Three-way ANOVA test results for the effects of canopy nitrogen addition, understory removal, and soil layer on soil organic carbon and its fractions (F)

处理 Treatments	总有机碳 TOC	惰性有机碳 ROC	易氧化 有机碳 ROOC	颗粒 有机碳 POC	微生物 生物量碳 MBC	水溶性 有机碳 WSOC	惰性有机 碳比例 ROC/TOC	活性有机 碳比例 LOC/TOC
林冠氮添加 Canopy N addition (CN)	0.34	0.39	0.47	0.11	6.57 *	0.96	0.015	0.37
林下植被去除 Understory removal (UR)	1.86	0.67	0.42	0.50	1.11	1.04	0.91	0.02
土层 Soil layer (SL)	76.15 **	60.58 **	41.95 **	24.03 **	50.80 **	12.30 **	1.79	4.81 **
林冠氮添加×林下 植被去除(CN×UR)	1.50	1.63	3.51	0.431	0.03	4.17 *	1.66	1.12
林冠氮添加×土层 (CN×SL)	0.34	0.31	1.08	2.73	0.18	5.39 **	4.08	1.92
林下植被去除×土层 (UR×SL)	1.30	1.36	0.30	0.46	0.59	2.06	0.27	1.15
林冠氮添加×林下植被 去除×土层(CN×UR×SL)	0.74	0.15	2.69	0.065	4.34 *	0.68	1.08	0.61

* 和 ** 分别表示差异显著($P < 0.05$)与极显著($P < 0.01$); TOC: Total organic carbon; ROC: Recalcitrant organic carbon; ROOC: Readily oxidizable organic carbon; MBC: Microbial biomass carbon; POC: Particulate organic carbon; WSOC: Water-soluble organic carbon

2.3 土壤活性有机碳组分

土壤活性有机碳含量在 0—10 cm 土层中显著高于 10—40 cm 土层($P < 0.05$),各活性有机碳组分在不同处理中表现不同(图 2 和表 2)。在 0—10 cm 土层,土壤易氧化有机碳含量在 UR 和 CN 处理中均略低于 CK 和 CNUR 处理,颗粒有机碳含量在 CNUR 处理中增幅要高于 CN 和 UR 处理,微生物生物量碳含量在 CN 处理中低于其他处理,各处理间差异不显著($P > 0.05$),而水溶性有机碳含量在 CNUR 处理中显著低于其他处理($P < 0.05$),CN 处理略低于 CK 和 UR 处理,三者之间无显著差异($P > 0.05$)。在 10—20 cm 土层,UR 处理的土壤微生物生物量碳含量显著高于 CNUR 处理,而 CN 处理的土壤易氧化有机碳比 CK 显著降低了 41.3%;各组分活性有机碳在其它处理间差异不显著。在 20—40 cm 土层,CK 处理的土壤微生物生物量碳含量高于其他处理,且 CN 处理与 CK 相比显著降低了 53.2%,其他处理间差异不显著($P > 0.05$);UR、CN 和 CNUR 处理的土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳及水溶性有机碳含量均趋向增加,但未达到显著水平($P > 0.05$)(图 2)。

2.4 土壤有机碳组分占总有机碳比例

由表 3 可知,不同土层土壤有机碳组分所占比例在各处理间表现不同。土壤惰性有机碳所占比例在 CN 和 CNUR 处理 0—10、20—40 cm 土层和 UR 处理 10—40 cm 土层中均呈下降趋势,其余土层则呈增加趋势,但均与 CK 未达到显著水平。不同处理间土壤易氧化有机碳所占比例差异不显著,CN 处理下土壤颗粒有机碳所占比例在 0—10 cm 土层显著高于 CK。土壤水溶性有机碳和微生物生物量碳所占比例在 CNUR 处理 0—10、10—20 cm 土层中均显著低于其他处理,而在 CN 处理 10—20、20—40 cm 土层中分别显著低于和高于其他处理,其他处理间差异不显著。土壤活性有机碳所占比例在 UR 处理 0—10 cm 和 10—40 cm 土层、CNUR 处理 0—10 cm 和 20—40 cm 土层间差异显著。整体而言,活性有机碳所占比例的变化主要受土层的影响(表 2)。

2.5 土壤有机碳组分与理化因子的相关性

由表 4 可知,土壤活性有机碳与惰性有机碳呈极显著正相关,且均与总有机碳呈极显著正相关。土壤含水量、总氮、铵态氮、微生物生物量氮及可溶性有机氮与总有机碳、惰性有机碳、活性有机碳均呈极显著正相关。土壤 pH 与总有机碳、惰性有机碳呈显著正相关,而硝态氮与易氧化有机碳呈显著正相关。

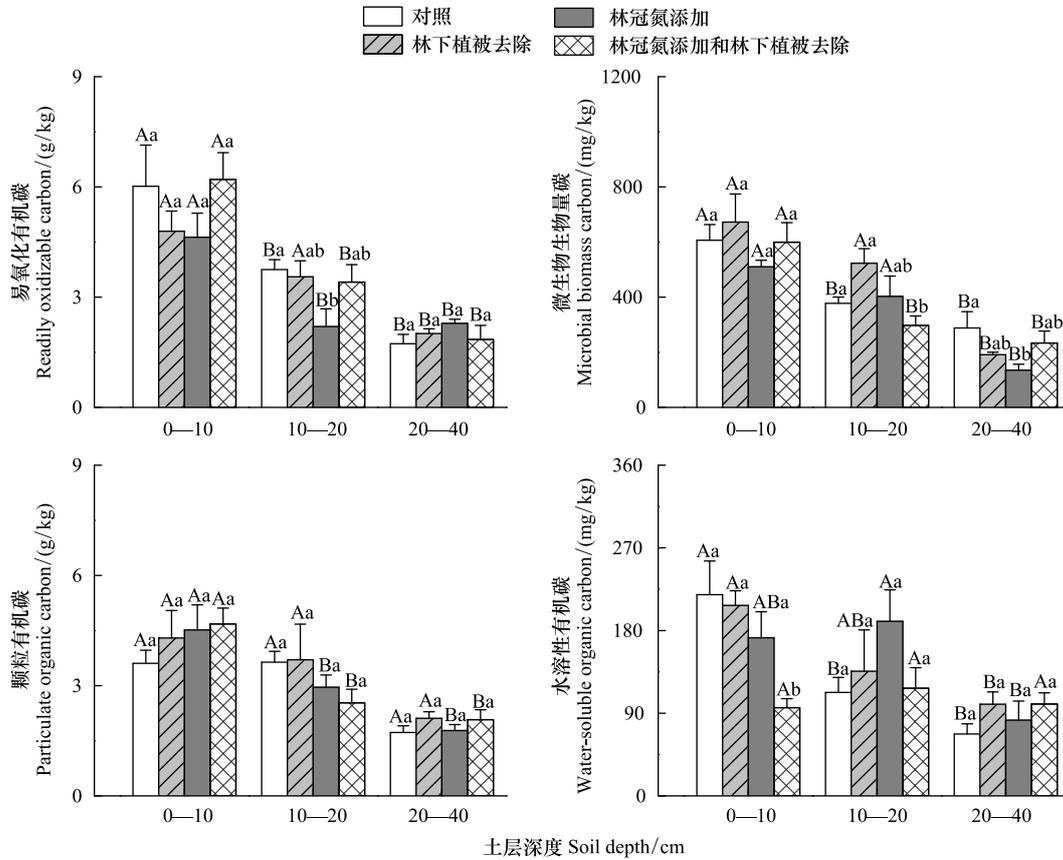


图2 不同处理土壤活性有机碳含量

Fig.2 Contents of soil labile organic carbon under different treatments

不同大写字母表示土层间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

表3 不同处理土壤有机碳组分占总有机碳的比例/%

Table 3 Ratios of soil carbon fractions to total organic carbon in different soil layers under different treatments

土层 Soil layer/cm	处理 Treatments	各碳组分占总有机碳比例/% Ratios of soil organic fractions to total organic carbon				
		惰性有机碳 Recalcitrant carbon	易氧化有机碳 Readily oxidizable organic carbon	颗粒性有机碳 Particulate organic carbon	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	水溶性有机碳 Water-soluble organic carbon
0—10	对照	51.7±3.3Aa	25.2±4.4Aa	15.2±0.9Bb	2.6±0.17Aa	0.93±0.14Aa
	林下植被去除	52.7±2.7Aa	19.9±1.2Aa	17.8±2.4Aab	2.9±0.51Aa	0.90±0.14Aa
	林冠氮添加	48.6±2.0Aa	23.4±4.0Aa	22.0±2.3Aa	2.6±0.31ABa	0.84±0.13Ba
	林冠氮添加和林下植被去除	47.9±1.4Aa	22.9±1.5Aa	17.6±1.5Bab	2.3±0.25Aa	0.38±0.08Bb
10—20	对照	46.2±2.6Aa	26.2±2.5Aa	25.1±1.5Aa	2.6±0.28Aab	0.83±0.20Ab
	林下植被去除	41.5±4.7Aa	24.4±3.5Aa	24.7±5.4Aa	3.5±0.22Aa	0.85±0.24Ab
	林冠氮添加	51.0±3.3Aa	18.1±4.2Aa	24.3±3.2Aa	3.2±0.45Aa	1.5±0.20Aa
	林冠氮添加和林下植被去除	50.8±2.7Aa	24.7±1.9Aa	18.5±2.4Ba	2.2±0.19Ab	0.89±0.14Ab
20—40	对照	52.3±5.3Aa	21.8±3.9Aa	21.5±3.0ABa	3.5±0.76Aa	0.85±0.17Aa
	林下植被去除	43.8±2.9Aa	26.4±2.8Aa	27.3±1.8Aa	2.5±0.29Aa	1.3±0.27Aa
	林冠氮添加	42.9±2.9Aa	28.7±2.2Aa	22.0±0.9Aa	1.7±0.24Bb	0.96±0.17ABa
	林冠氮添加和林下植被去除	45.7±1.3Aa	21.9±1.7Aa	25.6±1.7Aa	3.0±0.72Aa	1.2±0.10Aa

不同大写字母表示土层间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

表 4 土壤有机碳组分与土壤理化因子的关系

Table 4 Pearson's correlations between soil organic carbon fractions and soil properties

土壤参数 Soil parameters	颗粒有机碳 Particulate organic carbon	易氧化有机碳 Readily oxidizable organic carbon	水溶性有机碳 Water-soluble organic carbon	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	惰性有机碳 Recalcitrant organic carbon	总有机碳 Total organic carbon
pH	0.278	0.138	0.126	0.202	0.304 *	0.287 *
土壤含水量 Soil water content	0.638 **	0.748 **	0.447 **	0.752 **	0.786 **	0.804 **
全氮 Total nitrogen	0.771 **	0.846 **	0.468 **	0.787 **	0.942 **	0.981 **
铵态氮 Ammonium nitrogen	0.555 **	0.724 **	0.480 **	0.710 **	0.663 **	0.694 **
硝态氮 Nitrate nitrogen	0.058	0.318 *	0.187	0.181	0.107	0.144
微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen	0.626 **	0.740 **	0.374 **	0.791 **	0.722 **	0.759 **
可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen	0.485 **	0.508 **	0.335 *	0.487 **	0.547 **	0.582 **
总有机碳 Total organic carbon	0.786 **	0.854 **	0.479 **	0.802 **	0.970 **	
惰性有机碳 Recalcitrant organic carbon	0.692 **	0.774 **	0.466 **	0.756 **		
微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	0.638 **	0.750 **	0.515 **			
水溶性有机碳 Water-soluble organic carbon	0.408 **	0.391 **				
易氧化有机碳 Readily oxidizable organic carbon	0.587 **					

* 表示在 $P=0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $P=0.01$ 水平显著相关

3 讨论

本研究发现林冠氮添加 5 年后对土壤总有机碳含量的影响并不显著(图 1)。相似的研究结果在江西千烟洲杉木人工林^[9]和河南鸡公山落叶混交林^[12] 3 年氮添加研究中能观察到。另有研究表明氮添加对土壤有机碳的积累有促进作用^[35-36]。比如 Zak 等^[31] 研究发现氮添加 ($30 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 10 年后北美阔叶林土壤有机碳显著增加了 12%; Wei 等^[30] 研究发现杉木林土壤有机碳随着氮沉降的增加而下降。出现差异的原因可能是本研究在林冠层进行施氮 ($25 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 林冠对氮素截留吸收作用强^[16], 杉木枝叶具有宿存久和难分解特点^[37], 而林内地表凋落物少, 氮添加在短期内并不能快速引起凋落物分解发生很大改变, 影响土壤有机碳的变化。可见, 氮素添加量、处理时间长短及树种特征等都会影响土壤有机碳对外源氮添加的响应方式^[36]。此外, 植被覆盖度的变化也会影响土壤有机碳的分解与积累^[19]。Wang 等^[21] 在桉树林和 Zhang 等^[22] 在板栗林研究中均发现 UR 显著降低了土壤总有机碳含量。而本研究中 UR 对土壤有机碳的影响相对较小(图 1, 表 2), 这可能与本研究处理时间较短, 林分密度较大(表 1) 带来透光性弱和林下植被稀少有关。在采样过程中, 我们能清楚地观察到样地内林下植被的种类和数量都非常少。另外, 虽然表 2 中的方差分析结果表明 CN 和 UR 均对土壤总有机碳无显著影响, 但与 CK 相比, CNUR 处理下土壤有机碳含量有所上升, 而 CN 处理反而下降, 且在表层能清楚地观察到(图 1), 这说明林下植被去除可能在短期内会减缓氮添加对土壤有机碳分解的影响。可能是因为林下植被去除后氮素输入有所增加, 提高了微生物对凋落物及地下根系残体的分解活性^[38], 从而增加土壤中有机质的含量。然而, 这种效应是否会在所有土层中随着处理时间和氮添加水平的增加而增强, 有待后续的深入研究。

惰性有机碳与总有机碳的积累密切相关, 其含量和所占总有机碳比例的变化可以指示土壤碳库的稳定性^[39]。本研究中 CN 处理有轻微降低土壤惰性有机碳含量及所占比例的趋势(图 1 和表 3), 表明氮添加可能对土壤碳的稳定性产生了影响, 有促进惰性有机碳向活性组分碳转化趋势。本研究相关分析结果也表明土壤惰性有机碳与各活性组分有机碳均呈显著正相关(表 4)。氮添加通过引起土壤氮组分的变化影响微生物分解活性^[35], 进而影响土壤稳定性碳的累积^[36]。有研究表明高的土壤湿度和充足的氮素能促进微生物对凋落物分解速度, 增加土壤有机碳输入^[40]。本研究的确发现土壤含水量、无机氮、微生物生物量氮及可溶性有机氮在氮添加处理后有降低趋势, 与惰性有机碳的响应相一致, 表 4 相关分析结果也证实这种关系存在, 这表明

土壤水分和有效氮素可能是引起惰性有机碳出现轻微变化的重要因素。此外,也有研究发现高氮添加($>60 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)抑制了土壤惰性有机碳的矿化,提高了较难分解的重组有机碳的比重,从而增加土壤碳的稳定性^[41],说明氮添加水平的不同会对土壤惰性有机碳产生影响。由于本研究仅进行单个水平氮添加处理,而当前大气氮沉降量逐年增加^[42],未来需要考虑增加不同氮添加水平处理及其对土壤惰性有机碳的影响机制研究。本研究中 CNUR 对土壤惰性有机碳含量及所占比例无显著影响(表 2),但进一步分析发现中深层土壤的响应可能要比表层更敏感(图 1 和表 3)。这可能是由于 UR 处理后地表温度和微生物数量增加^[19-20],促进凋落物分解释放有机碳进入土壤^[27],以减缓根系分泌物碳输入不足带来的影响,而根系分泌物碳是中深层土壤有机碳的重要源,其减少很有可能降低有机碳输入量,引起惰性有机碳在不同土层响应不同。总之, CN 和 UR 对土壤惰性有机碳分解与转化的影响,在短时间内并不明显,因此还需要长期的监测来深入探讨氮沉降对土壤有机碳稳定性的影响。

多数研究表明氮添加对土壤活性有机碳组分具有不同影响^[9, 41, 43]。Wang 等^[43]研究表明氮添加能显著降低微生物生物量碳而增加可溶性有机碳含量,也有研究发现氮添加对易氧化有机碳^[44]、颗粒有机碳^[9]含量无显著改变。而本研究表明 CN 对土壤易氧化有机碳和微生物生物量碳有显著影响。本研究中,10—20 cm 土层易氧化有机碳和 20—40 cm 土层微生物生物量碳含量在 CN 处理比 CK 分别显著降低了 41.2% 和 53.2% (图 2),表明中深层土壤活性有机碳对 CN 的响应可能比表层土壤更加敏感。这可能是由于氮添加改善了土壤中氮素状态,触发了微生物生长对有机碳源的需求^[19],表层土壤能接受更多凋落物分解输入的活性有机碳,避免该土层原有活性有机碳出现进一步分解,而深层土壤供应微生物利用的有机碳源较少,促使活性碳组分间出现相互转化,引起氮添加对活性有机碳影响呈现土层间差异。本研究表 3 中各活性组分碳间均呈显著相关,也与有效氮含量具有显著相关可以说明这一点。另外,部分研究表明林下植被管理对土壤活性有机碳也会产生影响。如李光敏等^[23]研究指出林下植被去除能显著降低毛竹林 0—5 cm 土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳含量,其它研究认为林下植被去除后土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳含量无变化^[22]。而本研究中 5 年 UR 处理对土壤活性碳组分无显著影响(图 1),说明土壤活性有机碳对 UR 的响应程度因处理时间年限短而不敏感。不过,本研究发现 CNUR 处理显著降低了 0—10 cm 土壤水溶性有机碳含量(图 2),CN 和 UR 对水溶性有机碳的影响存在交互作用(表 2)。这可能是由于本研究林分发育期间土壤处于相对缺氮状态^[45],氮输入后增加了表层土壤有效氮含量,而植被去除减少了根系与微生物对氮素吸收的竞争,增强了微生物生长活性^[27]。水溶性有机碳作为微生物的能量物质,能被微生物快速吸收利用,然而其具有较高的迁移能力^[46],容易随水分向下层土壤移动,综合引起水溶性有机碳在表层出现明显降低。本研究中土壤水分、铵态氮、可溶性有机氮及微生物生物量碳氮均与水溶性有机碳存在正相关(表 3),说明 CN 和 UR 可能通过改变土壤水分和有效氮的变化影响微生物活性,进而对水溶性有机碳产生交互影响。此外,我们前期研究表明季节变化显著影响了各处理的土壤微生物群落结构^[27],上述交互影响是否也发生在其他季节,由于本研究仅在生长季进行采样,缺乏这方面数据。因此,未来需要进一步关注不同处理下土壤活性碳组分的季节动态变化特征。

4 结论

5 年林冠氮添加($25 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)对杉木人工林土壤总有机碳和惰性有机碳的影响不显著,但显著降低了中深层土壤易氧化有机碳和微生物生物量碳含量,说明土壤有机碳库组分对短期氮沉降的响应不同,活性有机碳的响应更敏感,且中深层土壤比表层响应更快。林下植被移除在短期内可能会抵消氮添加对土壤活性有机碳的影响。此外,林冠氮添加和植被去除对表层土壤水溶性有机碳的影响存在交互作用。未来需要持续关注林冠氮添加和林下植被层移除对不同深度土壤有机碳组分动态变化的长期影响。

参考文献 (References):

- [1] Chen D M, Zhang C L, Wu J P, Zhou L X, Lin Y B, Fu S L. Subtropical plantations are large carbon sinks: evidence from two monoculture

- plantations in South China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(9): 1214-1225.
- [2] 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.
- [3] Wang X, Xu Z W, Lü X T, Wang R Z, Cai J P, Yang S, Li M H, Jiang Y. Responses of litter decomposition and nutrient release rate to water and nitrogen addition differed among three plant species dominated in a semi-arid grassland. *Plant and Soil*, 2017, 418(1/2): 241-253.
- [4] Zhou Z H, Wang C K, Jin Y. Stoichiometric responses of soil microflora to nutrient additions for two temperate forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(4): 397-406.
- [5] Schimel J. Soil carbon: microbes and global carbon. *Nature Climate Change*, 2013, 3(10): 867-868.
- [6] 习丹, 旷远文. 城市化梯度上亚热带常绿阔叶林土壤有机碳及其组分特征. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2149-2155.
- [7] 向慧敏, 温达志, 张玲玲, 李炯. 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海海拔梯度的变化. *生态学报*, 2015, 35(18): 6089-6099.
- [8] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 李仁洪, 何远洋, 田祥宇, 肖银龙, 景建飞. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤活性有机碳库和根生物量的影响. *生态学报*, 2010, 30(9): 2286-2294.
- [9] 张秀兰, 王方超, 方向民, 何平, 张宇飞, 陈伏生, 王辉民. 亚热带杉木林土壤有机碳及其活性组分对氮磷添加的响应. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 449-455.
- [10] 乔枫, 史伟, 薛元杰. 模拟氮沉降对云杉人工林土壤有机碳组分及理化性质的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(5): 852-858.
- [11] Liu N, Wu S H, Guo Q F, Wang J X, Cao C, Wang J. Leaf nitrogen assimilation and partitioning differ among subtropical forest plants in response to canopy addition of nitrogen treatments. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 1026-1034.
- [12] Liu T, Mao P, Shi L L, Eisenhauer N, Liu S J, Wang X L, He X X, Wang Z Y, Zhang W, Liu Z F, Zhou L X, Shao Y H, Fu S L. Forest canopy maintains the soil community composition under elevated nitrogen deposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 143: 107733.
- [13] Tian Y, Lu H F, Wang J, Lin Y B, Campbell D E, Jian S G. Effects of canopy and understory nitrogen addition on the structure and eco-exergy of a subtropical forest community. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105459.
- [14] Houle D, Marty C, Duchesne L. Response of canopy nitrogen uptake to a rapid decrease in bulk nitrate deposition in two eastern Canadian boreal forests. *Oecologia*, 2015, 177(1): 29-37.
- [15] Wang X, Wang B, Wang C Z, Wang Z H, Li J, Jia Z, Yang S, Li P, Wu Y T, Pan S N, Liu L L. Canopy processing of N deposition increases short-term leaf N uptake and photosynthesis, but not long-term N retention for aspen seedlings. *New Phytologist*, 2021, 229(5): 2601-2610.
- [16] Fan H B, Hong W. Estimation of dry deposition and canopy exchange in Chinese fir plantations. *Forest Ecology and Management*, 2001, 147(2/3): 99-107.
- [17] 鲁显楷, 莫江明, 张炜, 毛庆功, 刘荣臻, 王聪, 王森浩, 郑棉海, Mori T, 毛晋花, 张勇群, 王玉芳, 黄娟. 模拟大气氮沉降对中国森林生态系统影响的研究进展. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(5): 500-522.
- [18] 刘仁, 袁小兰, 刘俏, 张春阳, 郭春兰, 陈伏生, 王辉民, 李建军. 林下植被去除对杉木人工林土壤酶活性及其化学计量比的影响. *林业科学研究*, 2020, 33(5): 121-128.
- [19] 李炎真, 谢尧, 张晶玲, 赵琼, 曾德慧. 氮添加及林下植被去除对沙地樟子松人工林土壤呼吸组分的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 2997-3006.
- [20] 夏秀雪, 高国强, 王东男, 肖立娟, 谷加存. 林下植被去除对水曲柳人工林土壤呼吸、微生物和根系动态的短期影响. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1198-1207.
- [21] Wang F M, Zou B, Li H F, Li Z A. The effect of understory removal on microclimate and soil properties in two subtropical lumber plantations. *Journal of Forest Research*, 2014, 19(1): 238-243.
- [22] Zhang J J, Li Y F, Chang S X, Jiang P K, Zhou G M, Liu J, Wu J S, Shen Z M. Understory vegetation management affected greenhouse gas emissions and labile organic carbon pools in an intensively managed Chinese chestnut plantation. *Plant and Soil*, 2014, 376(1/2): 363-375.
- [23] 李光敏, 陈伏生, 徐志文, 刘娟, 张扬, 谌青, 万松泽. 间伐和林下植被剔除对毛竹林土壤活性有机碳的影响. *江西农业大学学报*, 2019, 41(4): 733-740.
- [24] 郑琳琳, 赵琼, 曾德慧. 林下植被去除对樟子松人工林土壤酶活性的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3056-3063.
- [25] 涂宏涛, 孙玉军, 刘素珍, 董云飞, 方景. 亚热带杉木人工林生物量及其碳储量分布——以福建将乐县杉木人工林为例. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(7): 94-99.
- [26] Tang Y Q, Zhang X Y, Li D D, Wang H M, Chen F S, Fu X L, Fang X M, Sun X M, Yu G R. Impacts of nitrogen and phosphorus additions on the abundance and community structure of ammonia oxidizers and denitrifying bacteria in Chinese fir plantations. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 103: 284-293.
- [27] 雷学明, 沈芳芳, 雷学臣, 刘文飞, 段洪浪, 樊后保, 吴建平. 模拟氮沉降和灌草去除对杉木人工林地土壤微生物群落结构的影响. *生物多样性*, 2018, 26(9): 962-971.

- [28] 樊后保, 刘文飞, 徐雷, 许鲁平, 孟庆银. 杉木人工林土壤酶活性对氮沉降的响应. 林业科学, 2012, 48(7): 8-13.
- [29] 赵楠, 王德福, 蒋亚南, 黄国敏, 樊后保, 段洪浪. 林冠氮添加和灌草去除对杉木生理生态特征的影响. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2192-2198.
- [30] Wei X H, Blanco J A, Jiang H, Kimmins J P H. Effects of nitrogen deposition on carbon sequestration in Chinese fir forest ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2012, 416: 351-361.
- [31] Zak D R, Holmes W E, Burton A J, Pregitzer K S, Talhelm A F. Simulated atmospheric NO₃- deposition increases soil organic matter by slowing decomposition. *Ecological Applications*, 2008, 18(8): 2016-2027.
- [32] 莫江明, 方运霆, 林而达, 李玉娥. 鼎湖山主要森林土壤 N₂O 排放及其对模拟 N 沉降的响应. 植物生态学报, 2006, 30(6): 901-910.
- [33] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [34] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [35] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, Gundersen P, Fang Y T, Li D J, Wang H. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 403-412.
- [36] 李嵘, 常瑞英. 土壤有机碳对外源氮添加的响应及其机制. 植物生态学报, 2015, 39(10): 1012-1020.
- [37] 郜士垒, 何宗明, 黄志群, 林思祖, 刘桌明. 杉木宿存叶片的分解及稳定性碳氮同位素和化学组成. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2457-2463.
- [38] Gao Q, Hasselquist N J, Palmroth S, Zheng Z M, You W H. Short-term response of soil respiration to nitrogen fertilization in a subtropical evergreen forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 297-300.
- [39] Knorr W, Prentice I C, House J I, Holland E A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, 433(7023): 298-301.
- [40] Zeng Z Q, Wang S L, Zhang C M, Tang H, Li X Q, Wu Z J, Luo J. Soil microbial activity and nutrients of evergreen broad-leaf forests in mid-subtropical region of China. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(3): 673-678.
- [41] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J, Turnbull J, Bowman W D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 2002, 419(6910): 915-917.
- [42] Yu G R, Jia Y L, He N P, Zhu J X, Chen Z, Wang Q F, Piao S L, Liu X J, He H L, Guo X B, Wen Z, Li P, Ding G A, Goulding K. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade. *Nature Geoscience*, 2019, 12(6): 424-429.
- [43] Wang H, Mo J M, Lu X K, Xue J H, Li J, Fang Y T. Effects of elevated nitrogen deposition on soil microbial biomass carbon in major subtropical forests of southern China. *Frontiers of Forestry in China*, 2009, 4(1): 21-27.
- [44] 孙宇, 彭天驰, 李顺, 周培, 王婷, 钱学诗, 刘泉鹏, 陈雨琴, 马豪宇, 李曾燕, 涂利华. 模拟氮沉降对湿性常绿阔叶次生林土壤碳氮组分和酶活性的影响. 水土保持学报, 2019, 33(2): 235-243, 250-250.
- [45] 李惠通, 张芸, 魏志超, 贾代东, 刘雨晖, 刘爱琴. 不同发育阶段杉木人工林土壤肥力分析. 林业科学研究, 2017, 30(2): 322-328.
- [46] 张剑, 王利平, 谢建平, 赵庭伟, 曹建军. 敦煌阳关湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2455-2464.