

DOI: 10.5846/stxb201908161713

吴玥, 赵盼盼, 林开森, 周嘉聪, 吕茂奎, 张秋芳, 郑蔚, 程蕾, 徐建国, 陈岳民. 戴云山黄山松林土壤碳组分的海拔变化特征及影响因素. 生态学报, 2020, 40(16): 5761-5770.

Wu Y, Zhao P P, Lin K M, Zhou J C, Lü M K, Zhang Q F, Zheng W, Cheng L, Xu J G, Chen Y H. Elevation gradient characteristics and impact factors of soil carbon fractions in the *Pinus taiwanensis* Hayata forests of Daiyun Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5761-5770.

戴云山黄山松林土壤碳组分的海拔变化特征及影响因素

吴 玥^{1,2}, 赵盼盼^{1,2}, 林开森³, 周嘉聪^{1,2}, 吕茂奎^{1,2}, 张秋芳^{1,2}, 郑 蔚^{1,2}, 程 蕾^{1,2}, 徐建国⁴, 陈岳民^{1,2,*}

1 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

2 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

3 武夷学院旅游学院, 武夷山 354300

4 福建戴云山国家级自然保护区管理局, 泉州 362500

摘要: 海拔梯度可能通过多种环境因子影响土壤有机质, 土壤有机碳库是土壤有机质的重要组成部分, 其微小变化将会产生极其重要的影响。因此海拔差异可能导致海拔间土壤碳库差异。土壤有机碳是反映土壤肥力的重要指标, 可能受土壤理化性质和微生物等多种因素的影响。黄山松是高山地绿化和用材的优良树种, 近年来戴云山自然保护区内高海拔地区的黄山松群落呈现衰退趋势。研究戴云山黄山松林土壤有机碳组分沿海拔梯度的变化情况, 不仅可以为该区域碳库估算提供科学依据, 而且有助于揭示影响黄山松生长变化的机理。因此, 选取戴云山不同海拔[1300 m (L)、1450 m (M) 和 1600 m (H)]梯度的黄山松林, 对其土壤基本理化性质、有机碳组分及微生物特征进行测定和分析。研究发现, 海拔梯度下土壤养分含量呈先升高后降低的变化趋势, 土壤碳组分含量与其变化一致, 且微生物生物量碳和微生物生物量氮均在 M 海拔处最高, 海拔梯度对碳水解酶没有显著影响。冗余分析表明, 总氮是影响土壤有机碳变化的最主要因素, 其次是碳氮比。因此在海拔跨度不大的情况下, 土壤有机碳动态可能主要受氮素而非温度的影响。高海拔地区土壤惰性碳占比高, 未来可能会持续加剧该地区黄山松的生长困境, 使该区域碳库受到影响。

关键词: 碳组分; 海拔梯度; 微生物生物量碳; 碳水解酶; 黄山松

Elevation gradient characteristics and impact factors of soil carbon fractions in the *Pinus taiwanensis* Hayata forests of Daiyun Mountain

WU Yue^{1,2}, ZHAO Panpan^{1,2}, LIN Kaimiao³, ZHOU Jiacong^{1,2}, LÜ Maokui^{1,2}, ZHANG Qiufang^{1,2}, ZHENG Wei^{1,2}, CHENG Lei^{1,2}, XU Jianguo⁴, CHEN Yuemin^{1,2,*}

1 Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Tourism College, Wuyi University, Wuyishan 354300, China

4 Daiyun Mountain National Nature Reserve Administration Bureau, Quanzhou 362500, China

Abstract: The elevation gradient may affect soil organic matter through a variety of environmental factors. The soil organic carbon pool is an important component of soil organic matter; its any slight changes may have an extremely important impact. Therefore, there may be variations in the soil carbon pool at different elevations. Soil organic carbon is an important

基金项目: 国家自然科学基金(31670620); 海峡联合基金(U1505233); 福建省自然科学基金(2019J05163)

收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2020-01-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ymchen@fjnu.edu.cn

indicator of soil fertility, which is affected by various factors, including soil physical and chemical properties and microorganisms. *Pinus taiwanensis* Hayata, which is an excellent tree species for afforestation and timber in high mountain areas, has recently experienced a decline in the high altitudes of Daiyun Mountain Nature Reserve. A study of the change in soil organic carbon fractions along the elevation gradient in the *P. taiwanensis* forests of Daiyun Mountain Nature Reserve can therefore not only provide a scientific basis for estimation of the carbon pool in this region, but also can help to elucidate the mechanisms influencing the growth and change in the dynamics of the *P. taiwanensis* forest. Therefore, in this study, the *P. taiwanensis* forests of Daiyun Mountain along different elevation at 1300 m (L), 1450 m (M), and 1600 m (H) were analyzed for the basic physicochemical properties, organic carbon fractions, and microbial characteristics of the soil. Our results showed that the soil nutrient content first increased and then decreased along the elevation gradient, and was consistent with the trends in the soil carbon fractions. The microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen were both the highest at M altitude (1450 m), and the elevation gradient had no significant effect on carbon hydrolase. A redundancy analysis showed that total nitrogen was the most important factor that affected the change in soil organic carbon, followed by the carbon/nitrogen ratio. Therefore, in the case of a small elevation span, it was mainly nitrogen, rather than temperature, that affected the change in soil organic carbon. The high-altitude area with a high recalcitrant carbon pool ratio may aggravate the growth dilemma of the *P. taiwanensis* forests in this area in the future, thereby affecting the carbon pool in this region.

Key Words: soil carbon composition; altitudinal gradient; microbial biomass carbon; carbon hydrolase; *Pinus taiwanensis* Hayata

海拔梯度是一个复杂的环境因子,它可能通过温度、水分等环境因子的变化直接或间接影响土壤性质^[1]、微生物活性^[2]、土壤有机质动态^[3]以及养分循环^[4]等。土壤有机质是指存在于土壤中的所有含碳的有机物质,它在土壤肥力、环境保护、农业可持续等方面,都有着十分重要的作用和意义,而其中的有机碳库是表层陆地生态系统中最大的碳库,其微小变化将会产生极其重要的影响^[5]。因此海拔梯度差异可能导致不同海拔间土壤肥力差异,对土壤有机质造成影响,进而可能影响土壤碳库。

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是森林土壤碳库的重要组成部分,也是反映林地土壤肥力的重要指标^[6]。有研究表明海拔变化对森林土壤有机碳积累有显著影响^[7],因此,森林土壤有机碳库可能随着海拔梯度变化发生改变。如 Yang 等^[8]在河西走廊的研究表明,土壤碳库随海拔梯度呈上升趋势,而 Kobler 等^[9]位于阿尔卑斯山脉北部的研究结果却相反。目前大多数研究主要集中于海拔对土壤有机碳库的影响,而土壤有机碳可根据其分解速率大致分为活性碳、慢性碳和惰性碳^[10],其中活性碳是土壤肥力质量的标志,其大小可以反映潜在的养分含量,其周转又可以反映养分循环和供应状况;活性碳和慢性碳控制着土壤养分的流失;而慢性碳又可以和惰性碳一同稳定地储存在土壤中,维持土壤肥力^[11]。因此利用酸水解将土壤碳库分组的方法^[12]来定量分析戴云山黄山松林土壤有机碳变化,更有利于研究该地区土壤有机碳库的变化。

有研究表明,海拔梯度下土壤有机碳的分布可能受土壤理化性质的影响,如戴万宏等^[13]通过研究发现我国西南地区土壤有机碳与 pH 呈现负相关,孟苗婧等^[14]则认为有机碳的稳定性与土壤总氮含量成极显著正相关关系。土壤微生物参与土壤中各种生物化学过程,其生长活性也可能影响土壤有机碳的分布^[15]。其中, β -葡萄糖苷酶(β -glucosidase, β G)是土壤多糖分解酶系中主要的一种,可将多糖分解为单糖^[16],而纤维素水解酶(cellobiohydrolase, CBH)的活性可以反映土壤有机碳分解转化的规律^[17]。聂阳意等^[18]研究表明高海拔土壤的 β G 和 CBH 活性高于低海拔土壤,因此高海拔土壤可溶性有机碳含量显著低于低海拔土壤。孟苗婧^[19]的研究则表明微生物生物量碳与活性碳具有正相关关系。综上可知,微生物在土壤碳循环过程中起着重要作用^[20],海拔梯度下微生物和酶活性变化可能是影响土壤碳组分变化的重要机制。

黄山松(*Pinus taiwanensis* Hayata)又称台湾松,常绿乔木,是我国亚热带地区高山地绿化和用材的优良树

种^[21]。戴云山自然保护区的黄山松林是我国东南沿海面积最大、保存最完好的原生性黄山松群落,也是研究亚热带地区生物多样性与植被演替的理想对象。近年来,随着气候、土壤、病虫害等自然条件的不断变化,戴云山保护区内的黄山松受到了严重的挑战^[22-23],群落整体呈衰退趋势^[24],地处高海拔的黄山松林尤其明显。研究海拔梯度下戴云山黄山松林土壤有机碳组分及其影响因素,有利于揭示黄山松生长趋势对土壤有机质的影响机理。因此,本研究选取戴云山不同海拔梯度的黄山松林,对其土壤基本理化性质、有机碳组分及微生物特征进行分析,以此来研究戴云山黄山松林土壤碳组分的海拔变化特征及影响因素,为该区域碳库估算提供更好的科学依据。

1 材料与方法

1.1 样地基本情况

实验样地位于福建省泉州市德化县赤水镇戴云山自然保护区(25°38′07″—25°43′40″ N, 118°05′22″—118°20′15″ E),位于亚热带与中亚热带的过渡带。该地区气候属于亚热带海洋性季风气候,年平均气温 15.6—19.5℃,年均降雨量为 1700—2000 mm,降雨主要集中在 3—9 月份,全年平均雾日达 220 d。该区域主要土壤类型有山地红壤、山地黄壤、赤红壤、山地黄红壤和泥炭沼泽土。样地的优势树种为黄山松,林下植被优势种为肿节少穗竹(*Oligostachyum oedogonatum*),伴生植物有钝齿冬青(*Llex crenata* Thunb.)、岩杜鹃(*Rhododendron latoucheae* Franch.)、短尾越桔(*Vaccinium carlesii* Dunn)和窄基红褐桤(*Eurya rubiginosa* var. *attenuata*)等,草本层以里白(*Diplopterygium glaucum*)为主,伴生有黑藜芦(*Veratrum nigrum*)、黑莎草(*Gahnia tristic*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)和德化假卫茅(*Microtropis dehuaensis fokiensis*)等^[25]。不同海拔黄山松林的生长情况如表 1 所示。

表 1 不同海拔黄山松林基本特征

Table 1 General information of *Pinus taiwanensis* Hayata forests along elevation gradients

样地海拔 Elevation/m	郁闭度 Crown density	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	平均树高 Mean height of trees/m	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)
1300	0.65	17.23	10.19	750
1450	0.60	12.05	10.83	2805
1600	0.50	8.24	3.66	1514

1.2 实验设计

本研究为了研究气候与土壤碳循环关系沿海拔梯度的变化规律,于 2017 年 12 月,沿戴云山海拔梯度上的 3 个海拔[1300 m (L)、1450 m (M)和 1600 m (H)]上,选取了坡向和坡度相近的 3 个黄山松纯林。这 3 个海拔上统一的植被类型,为我们研究气候与土壤之间的关系提供了理想的条件。因此本研究在每个海拔上随机布设 5 个 2 m × 2 m 的样方,每两个样方之间的距离不小于 5 m。

1.3 取样方法

2017 年 12 月,在每个样方内按“S”型分别随机设置 5 个取样点,去除地表凋落物,用土钻分别采集淋溶层(A 层)和淀积层(B 层)的土壤,同一个样方内的 5 个取样点混合后作为一个样品,最后每个海拔获得 5 个重复的土壤样品。随后将土壤样品迅速带回实验室,挑出根系和石砾,过 2 mm 土筛后分为两部分,一部分自然风干后测定土壤化学性质和碳组分;另一部分于 4℃低温储存,用于测定微生物生物量和酶活性。

1.4 测定指标与方法

土壤 pH 通过玻璃电极 pH 计(STARTER 300, OHAUS, USA)测定,水土比为 2.5:1;土壤含水率的测定采用烘干法;土壤总碳(TC, Total Carbon)和总氮(TN, Total Nitrogen)用碳氮元素分析仪(Elementar Vario EL III, Elementar, Germany)测定^[26];土壤可溶性有机碳(DOC, Dissolved Organic Carbon)和可溶性有机氮(DON,

Dissolved Organic Nitrogen), 用去离子水为浸提液(水土比为 4:1), 振荡离心后, 经 0.45 μm 滤膜抽滤, 用总有机碳分析仪(TOC-VCPH/CPN, Japan)测定滤液中 DOC 含量, 用连续流动分析仪(Skalar san++, Netherlands)测定滤液中的 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量, 并用公式: $\text{DON} = \text{TN} - (\text{NH}_4^+\text{-N}) - (\text{NO}_3^-\text{-N})$ [27] 计算 DON 含量; 土壤矿质氮(Mineral N)的测定用 20 mL 2 mol/L KCl 加入 5 g 鲜土中进行浸提, 振荡离心后, 上清液经定量滤纸过滤, 用连续流动分析仪测得。

土壤微生物生物量碳(MBC, Microbial Biomass Carbon)和微生物生物量氮(MBN, Microbial Biomass Nitrogen)采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法[28], 用总有机碳分析仪测定提取液中有机碳含量, 用连续流动分析仪测定提取液中总氮含量。土壤 MBC 计算公式: $B_c = \Delta E_c / k_c$, 式中: ΔE_c 为熏蒸与未熏蒸土壤有机碳含量的差值, k_c 为微生物碳的浸提系数为 0.45。土壤 MBN 计算公式: $B_N = \Delta E_N / k_N$, k_N 为微生物氮的浸提系数, 为 0.54。

土壤酶活性参照 Saiya-Cork 和 Sinsabaugh[30]的方法测定纤维素水解酶(CBH)、 β -葡萄糖苷酶(βG)活性, 具体方法如下: 取 1 g 新鲜土壤, 加入 125 mL 的醋酸盐缓冲液(50 mmol/L, pH = 5), 用磁力搅拌器搅拌 5 min 使其均质化, 待溶液澄清后用移液器取 200 μL 澄清液移于 96 孔微孔板, 用伞形酮(MUB, Methylumbelliferyl)作为标示底物测定水解酶活性。微平板置于暗环境下经过 20 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养后, 用多功能酶标仪(SpectraMax M5, Molecular Devices, USA)测定其荧光度。

土壤碳组分采用两步酸水解的方法[12,31], 步骤如下: 取 1 g 0.149 mm 风干土样, 加 20 mL 2.5 mol/L H_2SO_4 于消煮管中, 在 105 $^{\circ}\text{C}$ 下水解 30 min, 用 20 mL 去离子水转移至离心管中离心, 将上清液过 0.45 μm 滤膜, 得到滤液为活性碳(labile carbon pool I, LP I-C), 主要包括淀粉、半纤维素、可溶性糖类等碳水化合物。残留土样加去离子水离心清洗数次, 并在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干, 加入 2 mL 的 13 mol/L H_2SO_4 , 室温下震荡 10 h 后用去离子水将酸稀释到 1 mol/L 并转移至消煮管中, 于 105 $^{\circ}\text{C}$ 下水解 3 h, 后续操作同前, 得到滤液为慢性碳(labile carbon pool II, LP I-C), 主要包括纤维素等碳水化合物。LP I-C 和 LP I-C 之和构成酸水解有机物, 其滤液分别用总有机碳分析仪测定。剩余土样用去离子水清洗数次后转移至 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干, 得到惰性碳(recalcitrant carbon pool, RP-C), 主要包括木质素等, 称重后用碳氮元素分析仪测定。

1.5 数据处理

由于本研究每个海拔的 5 个重复均在一个海拔梯度上, 使用 SPSS 24.0 软件进行线性混合模型效应(Linear Mixed Model Effect, LMME)分析不同海拔土壤理化性质、微生物生物量、碳水解酶活性和碳组分含量的差异显著性。在 LMME 分析中, 每个海拔的 5 个重复作为独立的重复, 并作为随机效应(Random Effect), 因此可以排除每个样方本底之间的差异[32-33]。以土壤碳组分作为物种因子, 土壤基本理化性质、微生物生物量和碳水解酶活性作为环境因子, 用 Canoco 5 软件进行冗余分析, 以分析其之间的相关性。图表用 Origin 2017 画图软件绘制。

2 结果

2.1 土壤基本理化性质

相同海拔不同土层黄山松林的土壤理化性质存在显著差异, 但是随着海拔梯度变化趋势基本一致(表 2)。随海拔升高, 土壤温度和 pH 逐渐降低; SWC、TN、DON、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 Mineral N 的含量则随海拔上升呈现出先升高后降低的趋势, 在 M 海拔处达到最高值; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随海拔上升而递增, 在 H 海拔处达到最高, 为 25.16 mg/kg。DOC 含量在 A 层和 B 层土壤中有所不同, A 层表现为 M 海拔处最高, 为 186.31 mg/kg; B 层则在 L 海拔处最高, 为 54.52 mg/kg。

2.2 土壤碳组分

海拔梯度下不同土层黄山松林土壤碳组分变化显著(图 1)。相同海拔梯度下 B 层土壤的总碳含量显著低于 A 层($P < 0.05$), 且 A 层和 B 层土壤的总碳、惰性碳、慢性碳和活性碳含量随着海拔升高均呈现先升高后降低的趋势, 在海拔 M 处达到最大值。3 个组分的含量均为惰性碳 > 活性碳 > 慢性碳。

表 2 不同海拔不同土层黄山松林土壤基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical characteristic of soils in *Pinus taiwanensis* Hayata forests along elevation gradients

土层 Soil horizon 海拔 Altitude	A 层 A horizon			B 层 B horizon		
	L	M	H	L	M	H
土温 ST/℃	10.00±2.20Aa	9.64±0.25Bb	9.42±0.24Ab	8.32±0.36Ba	8.10±0.21Bb	7.96±0.15Bb
pH	4.45±0.11Ba	4.29±0.10Bb	4.12±0.09Bc	4.60±0.16Aa	4.49±0.07Aab	4.41±0.04Ab
含水率 SWC/(%)	28.12±2.58Aa	49.28±16.10Aa	35.31±4.93Aa	24.20±2.86Aa	40.01±11.44Aa	20.87±4.02Ba
总氮 TN/(g/kg)	2.59±0.38Aa	3.89±0.93Aa	1.81±0.41Aa	1.07±0.15Ba	1.28±0.34Ba	0.60±0.05Ba
碳氮比 C/N	17.54±1.43Aa	17.30±1.12Aa	14.21±0.39Ab	13.04±0.83Ba	13.71±1.14Ba	8.74±1.09Bb
可溶性有机碳 DOC/(mg/kg)	144.27±42.11Aa	186.31±62.93Aa	162.36±32.45Aa	54.52±11.90Aa	18.58±5.37Bb	31.84±8.11Bab
可溶性有机氮 DON/(mg/kg)	3.54±0.98Ab	8.98±3.09Aa	4.87±1.55Ab	0.28±0.11Ba	1.46±0.24Ba	1.19±0.25Ba
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg/kg)	15.44±2.42Ab	23.82±5.47Aa	25.16±6.38Aa	9.17±0.69Ba	11.88±2.25Ba	8.51±0.87Ba
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg/kg)	0.62±0.30Ab	2.38±0.42Aa	0.49±0.18Ab	0.43±0.07Ab	2.46±0.65Ba	0.17±0.06Bb
矿质氮 Mineral N/(mg/kg)	16.06±2.63Aa	26.20±5.42Aa	25.65±6.52Aa	9.59±0.66Aa	14.34±2.18Aa	8.67±0.91Aa

表中数据为平均值±标准差(n=5);不同大写字母表示同一海拔不同土层间差异显著,不同小写字母表示不同海拔相同土层间差异显著(P<0.05);ST:土温 Soil temperature;SWC:土温含水率 Soil water content;TN:总氮 Total nitrogen;C/N:碳氮比 Carbon nitrogen ratio;DOC:可溶性有机碳 Dissolved organic carbon;DON:可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen

2.3 土壤微生物生物量与碳相关的水解酶活性

相同海拔梯度下,A 层土壤微生物生物量显著高于 B 层(图 2)。微生物生物量碳和微生物生物量氮均在 M 海拔处含量最高,A 层、B 层分别为 843.97 mg/kg 和 88.68 mg/kg,365.65 mg/kg 和 35.77 mg/kg。不同海拔梯度下微生物生物量氮的差异达到了显著水平(P<0.05),而微生物生物量碳并未达到显著水平。

海拔梯度对碳水解酶没有显著影响,但不同土层间酶活性差异显著(图 3),A 层酶活性显著高于 B 层(P<0.05)。A 层土壤纤维素酶活性变化范围在 0.72—0.77 μmol g⁻¹ h⁻¹之间,β-葡糖苷酶介于 12.96—17.91 μmol g⁻¹ h⁻¹之间。B 层土壤纤维素酶活性变化范围在 1.28—1.52 μmol g⁻¹ h⁻¹之间,β-葡糖苷酶介于 0.22—0.32 μmol g⁻¹ h⁻¹之间。

2.4 土壤碳组分与环境因子的相关性

冗余分析显示,相同土层不同海拔土壤样点均具有较好的聚类(图 4),表明海拔梯度对碳组分有显著影响。A 层土壤和 B 层土壤的环境因子分别解释了土壤碳组分变异的 98.1%和 98.2%。A 层土壤第一轴和第二轴分别解释了变量的 97.3%和 0.8%,B 层土壤第一轴和第二轴分别解释了变量的 97.3%和 0.9%。TN 与各碳组分含量之间呈正相关的作用最为明显,在 A 层和 B 层的解释度最高,C/N 次之。另外,pH、Mineral N 和 NH₄⁺-N、MBN 也是影响土壤碳组分的重要因子。

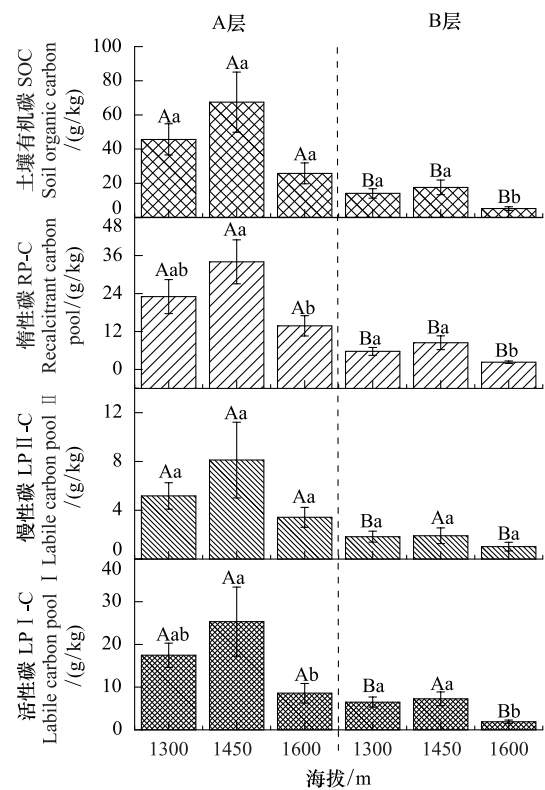


图 1 海拔梯度下黄山松林土壤中总碳、惰性碳、慢性碳、活性碳含量

Fig.1 SOC、RP-C、LP I-C、LP II-C contents in *Pinus taiwanensis* Hayata forests along elevation gradients

图为每千克土壤中总碳、惰性碳、慢性碳、活性碳的含量(g);不同大写字母表示同一海拔不同土层间差异显著,不同小写字母表示不同海拔相同土层间差异显著(P<0.05);LP I-C:活性碳,Labile carbon pool I;LP II-C:慢性碳,Labile carbon pool II;RP-C:惰性碳,Recalcitrant carbon pool;SOC:土壤有机碳,soil organic carbon

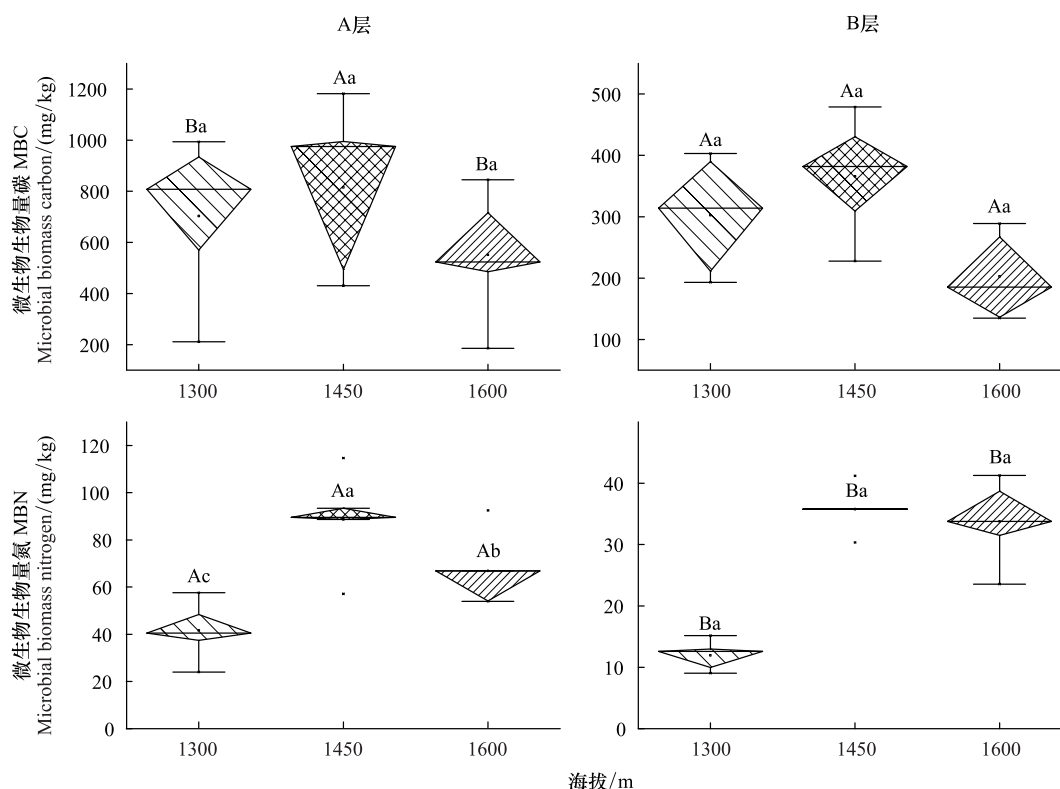


图2 海拔梯度下微生物生物量变化

Fig.2 Changes of microbial biomass along elevation gradients

图为每千克土壤中微生物生物量碳和微生物生物量氮的含量(mg);不同大写字母表示同一海拔不同土层间差异显著,不同小写字母表示不同海拔相同土层间差异显著($P < 0.05$);MBC:微生物生物量碳, Microbial biomass carbon; MBN:微生物生物量氮, Microbial biomass nitrogen

3 讨论

3.1 土壤碳组分的海拔梯度变化

本研究中 SOC 和各个碳组分含量均随海拔升高呈现出先上升后下降的趋势, A 层与 B 层变化趋势一致, 同一土层不同海拔间 SOC 含量并未达到显著水平(图 1)。De 等^[34]的研究结果认为海拔间温度差异会影响土壤有机碳积累, 而本研究样地海拔和海拔间土温跨度并不大(表 2); 且其研究样地年均温度(9—10 °C)远低于本研究样地, Crowther^[35]等也认为温度差异对 SOC 含量的影响在低温地区表现得更为明显, 因此本样地海拔对 SOC 的影响并不显著。再者, 由于土壤有机碳库本底值大, 异质性高等特征^[36], SOC 并非是一个反映土壤碳库变化的有效指标^[37]。因此, 根据化学组成的差异对有机碳组分进行划分进一步探究 SOC 的变化, 结果表明各个碳组分中, 惰性碳含量和活性碳含量存在显著差异, 在 M 处达到最高值(图 1)。通常认为, 不同的碳组分其温度敏感性不同, 难分解碳组分的温度敏感性高而易变碳组分低^[38-39], 尽管也不总是如此^[40]。同时, 土壤有机碳库是一个动态平衡的过程, 取决于碳源的输入与输出差异。本研究区, H 处海拔植物长势较差势必会影响凋落物的归还, 通过影响碳源输入而影响该区域有机碳, 这与 Garcia-Pausas^[41]等研究结果一致。另一方面, 海拔的差异也影响着土壤 pH(表 2), pH 可通过影响有机碳溶解性、改变微生物种群和数量及微生物活性等途径直接或间接影响 SOC 含量^[42]。然而, 本研究中纤维素水解酶并未有显著差异(图 3), 这可能是导致以纤维素为主的慢性碳组分^[31]并未有显著差异的原因。

3.2 土壤微生物生物量和碳水解酶的海拔梯度变化

土壤微生物生物量是土壤微生物发挥作用的物质基础, 由于其周转快、灵敏度高, 可以直接或间接反映土

壤肥力和土壤环境质量的微小变化^[43-44]。MBC 和 MBN 分别是有机碳和有机氮中最活跃、最易变化的部分,虽然所占比例很小,却是整个生态系统养分和能源循环的关键和动力^[45]。本研究结果显示 A 层土壤和 B 层土壤的变化趋势一致,但 B 层不同海拔间 MBN 存在显著差异(图 2),这可能是由于土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 等氮的速效成分存在显著差异导致的(表 2)。一般认为水分含量高的地方微生物含量较高,王卫霞^[46]的研究也表明土壤湿度条件更有利于土壤微生物的生长,表明含水量与微生物量相关。本研究结果显示不同海拔 MBC 没有显著差异可能是由于海拔间 SWC 没有显著差异造成的(表 2)。另一方面,刘秉儒^[47]的研究表明 MBC 含量在 TN 和 SOC 丰富的地区较高,而本研究中两个土层的 TN 和 SOC 在不同海拔间没有显著差异(表 2),这可能也是导致本研究区 MBC 没有显著差异的原因。

微生物特性对环境的响应通常会比土壤理化性质更快、更敏感^[48],因此常被用作评估土壤质量的指标^[49],并且研究土壤微生物酶活性有利于了解土壤养分循环过程的变化。本研究中两种与碳相关的水解酶活性均不随海拔的升高而呈现相应的变化趋势(图 3),表明海拔梯度变化对碳水解酶活性没有显著影响。这与陈双林等^[50]在不同海拔毛竹林中的研究结果不一致,其研究发现海拔升高对土壤肥力有促进作用,从而导致土壤酶活性随海拔升高而升高。本研究样地所在的亚热带森林的碳循环速率快,土壤 DOC 和土壤养分在凋落物分解初期从有机层向地下土壤传输速度快,因而 DOC 被认为与酶活性具有显著相关性^[51],已有的研究也证明碳水解酶活性与土壤 SWC 和 DOC 含量显著相关^[52-53],本研究海拔梯度对 SWC 和 DOC 含量影响不明显(表 2),这可能是导致本研究区酶活性无显著差异的原因。本研究中酶活性不具有海拔变化趋势,表明碳水解酶可能不是影响海拔梯度下碳组分变化的主要因素。

3.3 影响碳组分变化的因素

RDA 分析结果表明碳组分在不同海拔间有较好的聚类,土壤碳组分与土壤 TN 含量呈显著正相关关系(图 4),这与前人研究一致^[17,54-55],肖胜生^[56]的研究表明土壤氮素提高可能会加速有机碳的分解,而向慧敏等^[57]的研究表明土壤碳库组成与土壤氮之间存在极显著相关性,这是因为土壤有机质的氮含量会影响到微生物对有机质分解和利用速率。此外,廖丹^[42]的研究表明活性碳、慢性碳、惰性碳含量与 TN 呈极显著正相关,是因为 TN 能显著增加土壤碳汇集,降低 C/N,提高微生物活性,因此本研究可能也是由于 TN 对微生物、有机质分解等过程产生影响进而影响到碳组分的含量。

土壤 C/N 也是影响碳组分的重要因素之一(图 4),这与前人研究结果一致^[58-59],土壤 C/N 一般被认为是土壤氮素矿化的标志,低 C/N 能促进微生物分解和氮素矿化^[60];向慧敏等^[57]的研究发现,土壤的 C/N 比值大可能会导致微生物的降解速率降低,从而促进惰性碳的积累。本研究中 C/N 的海拔变化趋势也可能是造成碳组分在海拔间存在显著差异的原因之一。此外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MBN、Mineral N 也是影响碳组分的重要因素(图 4),这表明氮素有效性也是影响碳组分的关键。研究表明在一定范围内,含氮量高的有机质易被微生物分

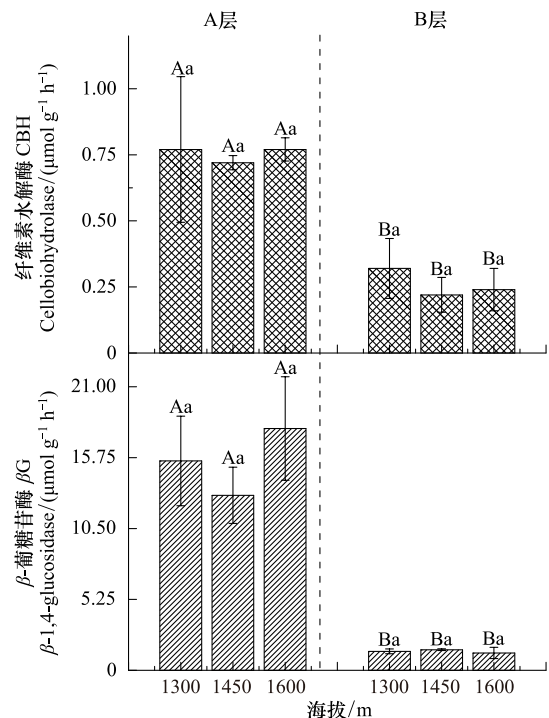


图 3 不同海拔黄山松林的土壤碳水解酶活性

Fig.3 Soil Carbon hydrolase activity in *Pinus taiwanensis* Hayata forests at different altitudes

不同大写字母表示同一海拔不同土层间差异显著,不同小写字母表示不同海拔相同土层间差异显著 ($P < 0.05$); βG : β -葡萄糖苷酶, $\beta\text{-1,4-glucosidase}$; CBH: 纤维素水解酶, Cellobiohydrolase

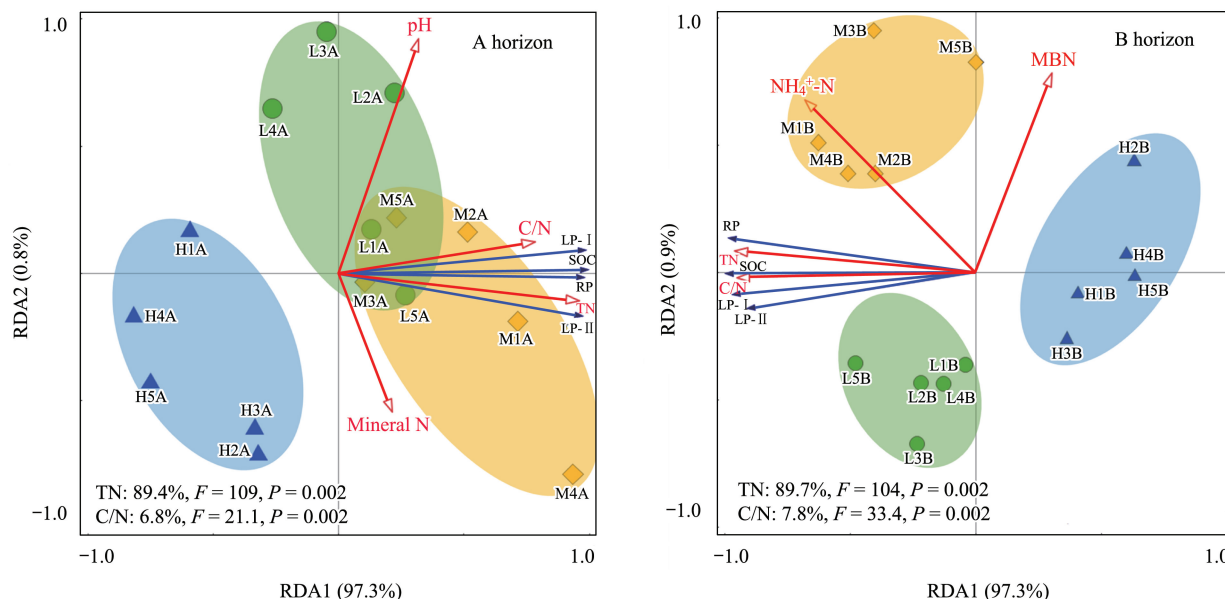


图4 不同海拔黄山松林土壤碳组分差异的冗余分析图

Fig.4 Redundancy analysis (RDA) of soil carbon fractions in *Pinus taiwanensis* Hayata forests at different altitudes

A horizon: A层; B horizon: B层; Mineral N: 矿质氮; $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 铵态氮; 图中的1—5分别代表同一海拔处的1—5个重复样品, H * A: A层H海拔处(1600 m)样品; M * A: A层M海拔处(1450 m)样品; L * A: A层L海拔处(1300 m)样品; H * B: B层H海拔处(1600 m)样品; M * B: B层M海拔处(1450 m)样品; L * B: B层L海拔处(1300 m)样品

解, 迁移、转化速度快, 从而对土壤中有效碳和惰性碳含量产生一定影响^[57]。另外也有研究发现无机氮含量高的地方凋落物分解速率更高^[61], 这可能是由于土壤氮元素在一定程度上可以通过提高微生物活性加速土壤有机质的分解^[62], 进而影响土壤碳组分的含量。本研究3个海拔间有效氮含量差异显著(表2), 可能导致了微生物对碳的分解率不同, 进而使更多碳转变为活性碳和慢性碳, 这表明土壤有效氮含量提高可能加速土壤有机碳的分解。这在M海拔A层土壤中有较好的体现。

4 结论

相比于土壤有机碳含量, 土壤碳组分的划分能更好地反映土壤有机碳的稳定性。本研究中, 海拔梯度下土壤养分含量呈先升高后降低的变化趋势, 在M海拔处达到最大值, 土壤碳组分含量变化趋势与其一致, 表明海拔变化所引起的土壤理化性质的改变是影响黄山松林土壤有机碳稳定性的重要因素。普遍认为海拔变化引起的温度变化是导致其他因素变化的主要因素, 而本研究结果发现, 在海拔跨度不大的情况下, 温度可能不是影响SOC及其组分变化的主要原因, 氮素通过影响微生物对有机质分解及利用速率, 改变着土壤碳组分, 因此后期应加强对该方向的关注。戴云山黄山松林土壤碳组分主要受土壤有机氮调节, 高海拔地区土壤有机碳含量少、惰性碳占比高, 未来可能会持续加剧该地区黄山松的生长困境, 并进一步导致黄山松群落逐渐衰退进而影响土壤碳库, 形成一个正反馈。该过程可能对区域碳平衡产生较大的影响。

参考文献 (References):

- [1] Chang E H, Chen T H, Tian G L, Chiu C Y. The effect of altitudinal gradient on soil microbial community activity and structure in moso bamboo plantations. *Applied Soil Ecology*, 2016, 98: 213-220.
- [2] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(3): 220-227.
- [3] Brevik E C. The potential impact of climate change on soil properties and processes and corresponding influence on food security. *Agriculture*, 2013, 3(3): 398-417.

- [4] Zhang G N, Chen Z H, Zhang A M, Chen L J, Wu Z J. Influence of climate warming and nitrogen deposition on soil phosphorus composition and phosphorus availability in a temperate grassland, China. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(2): 156-163.
- [5] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer, 2002: 369-397.
- [6] 马超, 周静, 刘满强, 郑学博, 崔键, 李辉信, 康炳龙. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响. *土壤学报*, 2013, 50(5): 915-921.
- [7] Sauer T J, Cambardella C A, Brandle J R. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt. *Agroforestry Systems*, 2007, 71(3): 163-174.
- [8] Yang R, Kong J Q, Du Z Y, Su Y Z. Altitude pattern of carbon stocks in desert grasslands of an arid land region. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2018, 10(5): 404-412.
- [9] Kobler J, Zehetgruber B, Dirnböck T, Jandl R, Mirtl M, Schindlbacher A. Effects of aspect and altitude on carbon cycling processes in a temperate mountain forest catchment. *Landscape Ecology*, 2019, 34(2): 325-340.
- [10] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [11] Paul E A, Collins H P, Leavitt S W. Dynamics of resistant soil carbon of midwestern agricultural soils measured by naturally occurring ^{14}C abundance. *Geoderma*, 2001, 104(3/4): 239-256.
- [12] Belay-Tedla A, Zhou X H, Su B, Wan S Q, Luo Y Q. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 110-116.
- [13] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 俞佳. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系. *土壤学报*, 2009, 46(5): 851-860.
- [14] 孟苗婧, 张金池, 郭晓平, 吴家森, 赵有朋, 叶立新, 刘胜龙. 海拔变化对黄山松阔叶混交林土壤有机碳组分的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(6): 106-112.
- [15] 边雪廉, 赵文磊, 岳中辉, 王慧一, 焦浩, 隋海霞. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展. *中国农学通报*, 2016, 32(4): 171-178.
- [16] Zeglin L H, Stursova M, Sinsabaugh R L, Collins S L. Microbial responses to nitrogen addition in three contrasting grassland ecosystems. *Oecologia*, 2007, 154(2): 349-359.
- [17] 聂阳意, 王海华, 李晓杰, 任寅榜, 金昌善, 徐自坤, 吕茂奎, 谢锦升. 武夷山低海拔和高海拔森林土壤有机碳的矿化特征. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 748-756.
- [18] 孟苗婧, 张金池, 郭晓平, 吴雁雯, 叶立新, 刘胜龙. 凤阳山不同海拔黄山松林土壤有机碳特征//2015 海峡两岸水土保持学术研讨会论文集. 太原: 中国水土保持学会, 2015: 5.
- [19] Baldrian P, Šnajdr J, Merhautová V, Dobiášová P, Cajthaml T, Valášková V. Responses of the extracellular enzyme activities in hardwood forest to soil temperature and seasonality and the potential effects of climate change. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 56: 60-68.
- [20] Li Z J, Taylor J E, Hou C L. An unusual *Lophodermium* species on needles of *Pinus taiwanensis* from China. *Mycological Progress*, 2016, 15(12): 1229-1237.
- [21] 苏松锦, 刘金福, 陈文伟, 旷开金, 唐蓉, 洪伟. 戴云山黄山松林土壤水分物理性质空间变异特征与格局. *资源科学*, 2014, 36(11): 2423-2430.
- [22] 林开森, 徐建国, 李文周, 陈文伟. 戴云山黄山松林森林群落类型分类及环境梯度解释. *内蒙古林业调查设计*, 2018, 41(6): 51-58.
- [23] 刘金福, 朱德煌, 兰思仁, 洪伟, 郑世群, 何中声, 徐道炜. 戴云山黄山松群落与环境的关联. *生态学报*, 2013, 33(18): 5731-5736.
- [24] 赵盼盼, 周嘉聪, 林开森, 张秋芳, 袁萍, 曾晓敏, 苏莹, 徐建国, 陈岳民, 杨玉盛. 海拔梯度变化对中亚热带黄山松土壤微生物生物量和群落结构的影响. *生态学报*, 2019, 39(6): 2215-2225.
- [25] Huang Z Q, Wan X H, He Z M, Yu Z P, Wang M H, Hu Z H, Yang Y S. Soil microbial biomass, community composition and soil nitrogen cycling in relation to tree species in subtropical China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 68-75.
- [26] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify Dissolved Organic Nitrogen (DON) and Dissolved Organic Carbon (DOC) in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 991-999.
- [27] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [28] Brookes P, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319-329.
- [29] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [30] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma*, 2002, 107(1/2): 109-141.
- [31] Millar R B, Anderson M J. Remedies for pseudoreplication. *Fisheries Research*, 2004, 70(2/3): 397-407.
- [32] Lyu M, Nie Y Y, Giardina C P, Vadeboncoeur M A, Ren Y B, Fu Z Q, Wang M H, Jin C S, Liu X M, Xie J S. Litter quality and site characteristics interact to affect the response of priming effect to temperature in subtropical forests. *Functional Ecology*, 2019, 33(11): 2226-2238.
- [33] De Feudis M, Cardelli V, Massaccesi L, Bol R, Willbold S, Cocco S, Corti G, Agnelli A. Effect of beech (*Fagus sylvatica* L.) rhizosphere on

- phosphorous availability in soils at different altitudes (Central Italy). *Geoderma*, 2016, 276: 53-63.
- [34] Crowther T W, Todd-Brown K E O, Rowe C W, Wieder W R, Carey J C, Machmuller M B, Snoek B L, Fang S, Zhou G, Allison S D, Blair J M, Bridgman S D, Burton A J, Carrillo Y, Reich P B, Clark J S, Classen A T, Dijkstra F A, Elberling B, Emmett B A, Estiarte M, Frey S D, Guo J, Harte J, Jiang L, Johnson B R, Kröel-Dulay G, Larsen K S, Laudon H, Lavalley J M, Luo Y, Lupascu M, Ma L N, Marhan S, Michelsen A, Mohan J, Niu S, Pendall E, Peñuelas J, Pfeifer-Meister L, Poll C, Reinsch S, Reynolds L L, Schmidt I K, Sistla S, Sokol N W, Templer P H, Treseder K K, Welker J M, Bradford M A. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 2016, 540(7631): 104-108.
- [35] Schmidt M W, Torn M S, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens I A, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning D A, Nannipieri P, Rasse D P, Weiner S, Trumbore S E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [36] 周嘉聪, 刘小飞, 纪宇骅, 张秋芳, 郑永, 陈岳民, 杨玉盛. 减少降雨对杉木幼林土壤有机质组分及稳定性的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2203-2210.
- [37] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [38] 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.
- [39] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, Smith J U. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*, 2005, 433(7021): 57-59.
- [40] Garcia-Pausas J, Casals P, Camarero L, Huguet C, Sebastià M T, Thompson R, Romanyà J. Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography. *Biogeochemistry*, 2007, 82(3): 279-289.
- [41] 廖丹, 于东升, 赵永存, 王宁, 张海东, 潘剑君, 史学正. 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究. *土壤学报*, 2015, 52(3): 517-527.
- [42] 胡嵩, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李慧, 徐慧. 长白山原始红松林次生演替过程中土壤微生物生物量和酶活性变化. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 366-372.
- [43] Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, Xu Z H, Duan J C, Hao Y B, Samill S. Soil extractable carbon and nitrogen, microbial biomass and microbial metabolic activity in response to warming and increased precipitation in a semiarid Inner Mongolian grassland. *Geoderma*, 2013, 206: 24-31.
- [44] 李延茂, 胡江春, 汪思龙, 王书锦. 森林生态系统中土壤微生物的作用与应用. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1943-1946.
- [45] 王卫霞, 史作民, 罗达, 刘世荣, 卢立华. 亚热带 3 种人工林土壤微生物生物量和微生物群落结构特征. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1784-1792.
- [46] 刘秉儒. 贺兰山东坡典型植物群落土壤微生物量碳、氮沿海拔梯度的变化特征. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 883-888.
- [47] Ma Y C, Zhu B, Sun Z Z, Zhao C, Yang Y, Piao S L. The effects of simulated nitrogen deposition on extracellular enzyme activities of litter and soil among different-aged stands of larch. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 7(3): 240-249.
- [48] Dalai R C. Soil organic phosphorus. *Advances in Agronomy*, 1977, 29: 83-117.
- [49] 陈双林, 郭子武, 杨清平. 毛竹林土壤酶活性变化的海拔效应. *生态学报*, 2010, 29(3): 529-533.
- [50] Weintraub S R, Wieder W R, Cleveland C C, Townsend A R. Organic matter inputs shift soil enzyme activity and allocation patterns in a wet tropical forest. *Biogeochemistry*, 2013, 114(1/3): 313-326.
- [51] 杨洋, 王继富, 张心昱, 李丹丹, 王辉民, 陈伏生, 孙晓敏, 温学发. 凋落物和林下植被对杉木林土壤碳氮水解酶活性的影响机制. *生态学报*, 2016, 36(24): 8102-8110.
- [52] 曹瑞, 吴福忠, 杨万勤, 徐振锋, 谭波, 王滨, 李俊, 常晨晖. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1257-1264.
- [53] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素效率的影响. *土壤与环境*, 1998, 7(1): 1-5.
- [54] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89-96.
- [55] 肖胜生. 温带半干旱草地生态系统碳固定及土壤有机碳库对外源氮输入的响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [56] 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拔梯度的变化. *生态学报*, 2015, 35(18): 6089-6099.
- [57] Cheng L, Leavitt S W, Kimball B A, Pinter Jr P J, Ottman M J, Matthias A, Wall G W, Brooks T, Williams D G, Thompson T L. Dynamics of labile and recalcitrant soil carbon pools in a sorghum Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2250-2263.
- [58] Springob G, Kirchmann H. Bulk soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(4): 629-632.
- [59] Fog K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. *Biological Reviews*, 1988, 63(3): 433-462.
- [60] 张社奇, 王国栋, 田鹏, 郭满才. 黄土高原刺槐林地土壤微生物的分布特征. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 128-131.