

黄山不同海拔植被带土壤活性有机碳、氮及其与酶活性的关系

姚 兰^{1,2}, 张焕朝^{1,2}, 胡立煌^{1,2}, 王艮梅^{1,2}, 方炎明^{1,3}

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037; 3. 南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 以黄山海拔 870~1 760 m 的常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林 I 和 II 以及高山草甸 4 种不同海拔植被带的土壤为研究对象, 分析土壤碳氮及其活性组分的分布特征, 并结合土壤酶活性、pH 值及林下植被多样性等因子进行相关分析。结果表明: 不同海拔植被带土壤微生物生物量碳(MBC)、溶解性有机碳(DOC)及全氮(TN)、微生物生物量氮(MBN)质量分数存在显著差异($P<0.01$)。不同植被带土壤微生物熵(MBC/TOC)、DOC/TOC 存在显著差异($P<0.01$), 且总体上随着海拔升高而增加; 高山草甸的土壤 MBN/TN(5.79%)显著高于其他植被带($P<0.05$)。土壤脲酶活性总体上随着海拔升高而减弱, 而 β -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶活性总体上随海拔升高呈增强趋势。Pearson 相关及冗余分析表明: 土壤活性有机碳、氮组分不仅依赖于土壤总有机碳(TOC)和 TN, 而且与土壤酶活性和 pH 值密切相关。溶解性有机氮(DON)对黄山土壤酶分布影响显著(蒙特卡罗检验, $P=0.006$)。综上所述, 黄山森林土壤活性有机碳氮组分与植被类型直接或间接相关, 且极大影响土壤酶活性。图 2 表 4 参 29

关键词: 土壤学; 黄山; 植被带; 土壤活性有机碳氮; 土壤酶活性

中图分类号: S714.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)06-1069-08

Soil labile organic carbon and nitrogen and their relationship with enzyme activities in different vegetation zones along an altitudinal gradient on Mount Huangshan

YAO Lan^{1,2}, ZHANG Huanchao^{1,2}, HU Lihuang^{1,2}, WANG Genmei^{1,2}, FANG Yanming^{1,3}

(1. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: To understand the distribution characteristics of soil carbon and nitrogen and their labile fractions as well as their relationship with environmental factors (enzyme activities, soil pH, and understory vegetation diversity), soil samples were collected from four vegetation zones (evergreen broadleaf forest, mixed evergreen deciduous broadleaf forest I and II, and alpine meadow) along an altitudinal gradient (870–1 760 m) on Mount Huangshan. Three 10 m × 10 m plots were arranged in each vegetation zones, and 10 sub-samples (0–10 cm depth) were randomly collected in each plot and mixed into one soil sample. Variables tested included soil total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC), readily oxidization carbon (ROC), total nitrogen (TN), microbial biomass nitrogen (MBN), dissolved organic nitrogen

收稿日期: 2018-12-24; 修回日期: 2019-01-28

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0855); 安徽省黄山区维管植物多样性观测项目(2016–2017); 环境保护部生物多样性保护专项(021108024); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 姚兰, 从事森林土壤碳氮循环研究。E-mail: yaolanease@163.com。通信作者: 张焕朝, 教授, 博士, 从事土壤养分循环研究。E-mail: hc Zhang@njfu.edu.cn

(DON), soil urease activity, β -glucosidase activity, catalase activity, soil pH, Shannon-Wiener and Simpson diversity indices of the understory vegetation. Analysis included one-way ANOVA and Duncan multiple comparison, Pearson correlation, redundancy analysis, and Monte-Carlo permutation test. Results showed significant differences in soil MBC, DOC, TN, and MBN in different vegetation zones ($P < 0.01$). The soil microbial quotient (MBC/TOC) and DOC/TOC in different vegetation zones were significantly different ($P < 0.01$) and generally increased with elevation. The soil MBN/TN (5.79%) in alpine meadows was significantly higher than in other vegetation zones ($P < 0.05$). Soil urease activities generally decreased with elevation ($P < 0.05$); whereas, β -glucosidase and catalase activities generally increased with elevation ($P < 0.01$). The Pearson correlation and redundancy analysis showed that soil labile organic carbon and N fractions were not only dependent on TOC and TN, but also closely related to urease, β -glucosidase, catalase activities, and soil pH. Also, according to the Monte-Carlo permutation test DON had a significant effect ($P = 0.006$) on the distribution of soil enzymes. In conclusion, soil labile organic carbon and N fractions in the Mount Huangshan Forest Ecosystem were directly and indirectly related to vegetation types, and greatly impacted soil enzyme activities. [Ch, 2 fig. 4 tab. 29 ref.]

Key words: soil science; Mount Huangshan; vegetation zone; soil labile organic carbon and nitrogen; soil enzyme activity

森林作为重要的生态系统,其碳储量是陆地碳的46%,但是近几十年来,森林对全球变暖的正反馈作用,导致森林土壤中碳的大量流失^[1]。土壤碳库的动态变化主要体现在土壤活性碳库中。土壤活性有机碳受植被和土壤微生物影响强烈,并与大气二氧化碳存在较频繁的相互作用,因此在全球气候变暖的背景下,研究环境变量和土壤有机碳储量对未来气候变化的影响具有重要意义^[1-2]。溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)和易氧化有机碳(readily oxidization carbon, ROC)作为土壤活性碳库的3个重要指标,由于其周转率高且快,所以相较于总有机碳(total organic carbon, TOC),更能反映森林环境随海拔梯度的变化^[3]。DOC不仅能够从森林底部向矿质土壤进行水文输送,而且是矿质土壤中有机碳的重要来源,是全球碳循环中的重要碳通量^[4]。MBC是土壤有机质的重要组成部分,占土壤有机碳的2%~5%,在养分循环和整个有机质动态中起着重要作用^[5]。ROC指能被333 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化的碳,在土壤碳库中其含量通常大于MBC,能代表驱动反硝化和甲烷生成过程所需的碳源^[6]。由于碳和氮循环之间的相互作用,森林生态系统氮素的储存与碳库之间紧密耦合,在全球气候变化中起重要作用^[7]。溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)是微生物和植物的一种重要氮源,而微生物和植物通过产生和吸收各种温室气体从而对当地气候变化起作用^[8]。微生物生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)不仅在土壤氮矿化等过程中起重要作用,而且对气候变化具有敏感的生物指示作用^[9]。土壤酶在许多涉及土壤有机质降解、转化和矿化的生化过程中起重要作用^[10]。已有研究表明:土壤酶活性与土壤养分动态密切相关,尤其是DON^[11]。土壤活性有机碳不仅依赖于TOC,也与土壤脲酶(urease, UE)、过氧化氢酶(catalase, CAT)等酶活性密切相关^[12]。土壤酶如 β -葡萄糖苷酶(β -glucosidase, β G)与土壤DOC和DON储量密切相关,DOC和DON储量对土壤碳通量和循环至关重要^[8]。黄山具有明显的植被和土壤垂直地带性^[13],关于该区域的森林土壤碳氮库及相关酶活性的研究报道较少。本研究以黄山4种不同海拔典型植被带的土壤为研究对象,分析不同植被带土壤碳氮及其活性组分与相关土壤酶活性关系,以期评价黄山森林生态系统的土壤碳储量和生产力以及保护区森林土壤管理等提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄山位于安徽省南部(30°01'~30°18'N, 118°01'~118°17'E),景区面积为160.6 km²,地势高差达1 400 m,地处亚热带季风气候带。黄山植物群落分布自下而上为次生林、常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、山地矮林与灌丛及山地草甸;土壤自下而上分别为黄红壤、黄壤、暗黄棕壤、酸

性棕壤, 山顶局部分布有山地草甸土及山地草甸沼泽土^[13]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 2018 年 7 月, 沿黄山云谷寺—光明顶步道, 以海拔、植被类型及实际情况为指标, 按约 300 m 的间隔、远离步道处选择 4 个海拔植被带样地, 样地基本情况见表 1。每个海拔植被带设置 3 个 10 m × 10 m 的样方, 每个样方内按 S 型采集 10 个表层 10 cm 深的土样, 用冰盒运回实验室。一份土样过 2 mm 筛后保存于 4 ℃冰箱中用于溶解性有机碳、氮以及微生物生物量的测定, 另一份风干过筛后用于其他指标的测定。

表 1 样地概况

Table 1 Basic situations of the sampling sites

代码	植被类型	海拔/m	土壤类型	主要树种
EBF	常绿阔叶林	870	黄壤	细叶香桂 <i>Cinnamomum subavenium</i> , 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> , 小叶青冈 <i>Cyclobalanopsis myrsinifolia</i> , 薄叶山矾 <i>Symplocos anomala</i> , 甜槠 <i>Castanopsis eyrei</i>
EDF I	常绿落叶阔叶混交林 I	1 100	棕壤	青冈, 小叶青冈, 窄基红褐桤 <i>Eurya rubiginosa</i> , 马银花 <i>Rhododendron ovatum</i> , 浙江新木姜子 <i>Neolitsea aurata</i> , 白木乌桕 <i>Sapium japonicum</i> , 野桐 <i>Mallotus japonicus</i> , 板栗 <i>Castanea mollissima</i>
EDF II	常绿落叶阔叶混交林 II	1 440	棕壤	黄山杜鹃 <i>Rhododendron maculiferum</i> , 映山红 <i>Rhododendron simsii</i> , 青冈, 马银花, 薄叶山矾, 多脉榆 <i>Ulmus castaneifolia</i> , 红豆杉 <i>Taxus chinensis</i>
AM	高山草甸	1 760	草甸土	龙须草 <i>Eulaliopsis binata</i> , 地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i> , 野古草 <i>Arundinella anomala</i>

1.2.2 土壤活性组分及基本性质 总有机碳(TOC)用重铬酸钾氧化-外加热法测定; 全氮(total nitrogen, TN)用开氏法测定; pH 值用电位法测定, 水土质量比为 2.5:1.0^[14]。微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)用氯仿熏蒸浸提法测定^[15], 熏蒸土和未熏蒸土均用 0.5 mol·L⁻¹ 的硫酸钾浸提 30 min(土液质量比为 1:4), 提取液中的有机碳质量分数用有机碳分析仪测定, 全氮质量分数用开氏消化法测定。 $w_{MBC}=E_C/0.45$; $w_{MBN}=E_N/0.45$ 。其中: E_C 和 E_N 分别为熏蒸和未熏蒸土壤有机碳、全氮质量分数之差, 转换系数为 0.45。溶解性有机碳(DOC)和溶解性有机氮(DON)的测定^[16]: 用去离子水振荡浸提(水土质量比为 5:1) 30 min, 高速(15 000 r·min⁻¹)离心 10 min, 用 0.45 μm 滤膜抽滤, 用有机碳分析仪测定滤液碳浓度得到 DOC, 用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定滤液 TN, 靛酚蓝比色法测定 NH₄⁺-N, 紫外分光光度法测定 NO₃⁻-N, 则 $w_{DON}=w_{TN}-(w_{NH_4^+-N}+w_{NO_3^--N})$ 。易氧化有机碳(ROC)用高锰酸钾氧化法测定, 过 0.25 mm 的风干土加 333 mol·L⁻¹ 高锰酸钾溶液 25 mL, 震荡 1 h 后离心, 取上清液稀释 250 倍, 在分光光度计 565 nm 波长下比色^[16]。

1.2.3 土壤酶活性 脲酶(UE)用靛酚蓝比色法测定, 酶活性以 24 h 土中产生 NH₃-N 表示(mg·g⁻¹·d⁻¹); β-葡萄糖苷酶(βG)用硝基酚比色法测定, 酶活性以土中产生对硝基苯酚表示(mg·g⁻¹·d⁻¹); 过氧化氢酶(CAT)用高锰酸钾滴定法测定, 酶活性以土中消耗的高锰酸钾表示(mL·g⁻¹·h⁻¹)^[17]。

1.2.4 林下植被多样性 调查样地林下植被种类、株数或多度、盖度、高度等, 并计算其多样性和重要值。Shannon-Wiener 多样性指数(H'): $H'=-\sum P_i \ln P_i$; Simpson 优势度指数(D'): $D'=\sum P_i^2$ 。其中: P_i 为样方内物种的重要值, $P_i=(\text{相对盖度}+\text{相对高度})/2$ 。

1.2.5 数据分析 用 SPSS 20 软件统计分析, 单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 法比较不同海拔植被带间的差异。Origin 2016 软件制图。用 R 3.3.4 软件 Performance Analytics 包做 Pearson 相关矩阵图; Vegan 包做酶活性和活性有机碳、氮组分冗余分析(redundancy analysis, RDA), 对酶的数据进行 Hellinger 转化, 999 次蒙特卡罗置换检验(Monte-Carlo permutation test)考察环境因子的显著性。

2 结果与分析

2.1 不同海拔植被带土壤碳氮及其活性组分

不同植被带土壤碳及其活性组分呈现随海拔变化的特征(表 2)。各海拔植被带的土壤 TOC 和 ROC 质量分数差异均不显著。高山草甸的土壤 MBC 平均质量分数最高, EDF II 的 DOC 平均质量分数最高, 且各海拔植被带的 MBC 和 DOC 质量分数存在极显著差异($P<0.01$)。说明不同树种覆盖的植被带, 导

致土壤活性碳及微生物生物量的差异。

由表2可知：高山草甸土TN、MBN及DON质量分数均最高，分别为4.487、260.99、74.01 mg·kg⁻¹。常绿阔叶混交林下土壤TN和MBN质量分数较低，分别为2.85和65.70 mg·kg⁻¹；常绿阔叶林下的土壤DON质量分数最低，为39.35 mg·kg⁻¹。说明高海拔土壤氮素有效性较高。不同海拔植被带土壤TN和MBN质量分数存在极显著差异($P<0.01$)，而各海拔植被带间的土壤DON质量分数无显著差异。

表2 黄山不同海拔植被带土壤碳氮及其活性组分

植被带	TOC/(g·kg ⁻¹)	MBC/(mg·kg ⁻¹)	DOC/(mg·kg ⁻¹)	ROC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	MBN/(mg·kg ⁻¹)	DON/(mg·kg ⁻¹)
EBF	58.43 ± 17.16 a	664.36 ± 232.03 b	45.66 ± 19.72 c	21.51 ± 11.30 a	3.01 ± 0.70 b	82.28 ± 71.41 b	39.35 ± 18.71 b
EDF I	47.99 ± 7.64 a	614.31 ± 81.71 b	50.67 ± 5.4 9 bc	13.22 ± 1.88 a	2.85 ± 0.43 b	70.66 ± 46.52 b	54.41 ± 11.40 ab
EDF II	49.89 ± 9.78 a	627.00 ± 91.62 b	102.29 ± 17.58 a	16.27 ± 4.69 a	2.85 ± 0.60 b	65.70 ± 28.53 b	65.55 ± 15.77 ab
AM	56.67 ± 4.13 a	1 331.57 ± 103.41 a	74.36 ± 10.41 b	17.77 ± 3.05 a	4.487 ± 0.20 a	260.99 ± 80.22 a	74.01 ± 3.01 a
<i>F</i>	0.67	18.34	9.64	0.88	7.06	7.36	3.65
<i>P</i>	ns	**	**	ns	**	**	ns

说明：不同字母表示差异显著($P<0.05$)。**表示差异极显著($P<0.01$)，ns表示差异不显著

2.2 不同海拔植被带土壤活性有机碳氮分配比例

MBC/TOC 称为土壤微生物熵^[18]。从表3可见：高山草甸土的微生物熵(2.35%)明显高于其他植被带，而常绿阔叶林的土壤微生物熵(1.12%)最低；常绿阔叶混交林Ⅱ的DOC平均分配比例(20.65%)显著高于其他植被带，常绿阔叶林的DOC平均分配比例最低(7.95%)，不同海拔植被带的微生物熵以及DOC/TOC存在显著差异($P<0.01$)。总体上常绿阔叶混交林的ROC分配比例最大(35.11%)，常绿阔叶混交林Ⅰ则最小(27.66%)。不同植被带土壤活性有机氮分配比例呈现不同的海拔变化特征。高山草甸土的MBN/TN(5.79%)明显高于其他植被带，但是高山草甸的DON/TN(1.66%)较低。相较于其他植被类型，常绿阔叶混交林MBN的分配比例较低，DON的分配比例较高。说明不同植被类型影响土壤微生物生物量和活性，从而在一定程度上影响土壤DON分配比例。

表3 黄山不同海拔植被带土壤活性有机碳氮的分配比例

植被带	MBC/TOC/%	DOC/TOC/%	ROC/TOC/%	MBN/TN/%	DON/TN/%
EBF	1.12 ± 0.08 b	0.08 ± 0.03 c	35.11 ± 10.66 a	2.47 ± 2.07 b	1.41 ± 0.86 a
EDF I	1.29 ± 0.11 b	0.11 ± 0.01 bc	27.66 ± 2.72 a	2.38 ± 1.26 b	1.96 ± 0.60 a
EDF II	1.26 ± 0.06 b	0.21 ± 0.02 a	32.26 ± 2.98 a	2.42 ± 1.22 b	2.32 ± 0.41 a
AM	2.35 ± 0.10 a	0.13 ± 0.01 b	31.28 ± 3.88 a	5.79 ± 1.53 a	1.66 ± 0.14 a
<i>F</i>	119.12	25.59	0.78	3.51	1.44
<i>P</i>	**	**	ns	ns	ns

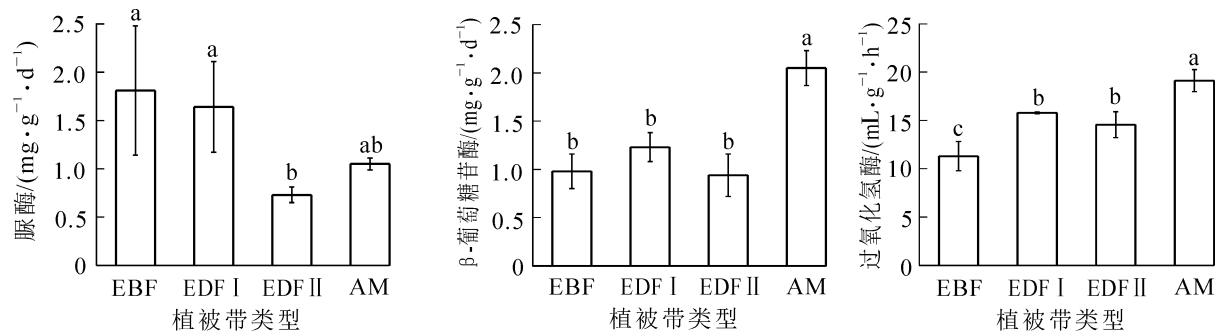
说明：不同字母表示差异显著($P<0.05$)。**表示差异极显著($P<0.01$)，ns表示差异不显著

2.3 不同海拔植被带土壤酶活性

如图1所示：脲酶活性在常绿阔叶林下达最高值，为1.81 mg·g⁻¹·d⁻¹，在常绿阔叶混交林Ⅱ下达最低值，为0.73 mg·g⁻¹·d⁻¹，且这2种植被类型的脲酶活性差异显著($P<0.05$)。β-葡萄糖苷酶和过氧化氢酶均在高山草甸表现为最高活性，分别是2.05 mg·g⁻¹·d⁻¹和19.12 mL·g⁻¹·h⁻¹；β-葡萄糖苷酶在常绿阔叶混交林Ⅱ下的活性最低，为0.94 m·g⁻¹·d⁻¹，过氧化氢酶在常绿阔叶林下的活性最低，为11.30 mL·g⁻¹·h⁻¹。不同海拔植被带的β-葡萄糖苷酶($F=23.85$, $P<0.01$)和过氧化氢酶($F=23.24$, $P<0.01$)均呈极显著差异，脲酶呈显著差异($F=4.47$, $P<0.05$)。

2.4 相关性及冗余分析

如表4所示：不同海拔植被带的土壤碳氮及其活性组分与土壤酶及其他土壤因子之间存在一定的相关性。就土壤碳组分而言，TOC与TN($R=0.65$, $P<0.05$)、ROC($R=0.90$, $P<0.001$)存在显著正相关关系；MBC与TN($R=0.96$)、MBN($R=0.92$)、β-葡萄糖苷酶活性($R=0.86$)呈极显著正相关关系($P<0.001$)，



不同小写字母表示植被带间差异显著($P<0.05$)

图 1 黄山不同海拔植被带土壤酶活性

Figure 1 Soil enzyme activities in different vegetation zones along an altitudinal gradient on Mount Huangshan

与过氧化氢酶($R=0.66$, $P<0.05$)显著正相关; DOC 与 pH 值显著负相关($R=-0.65$, $P<0.05$)。就土壤氮组分而言, TN 与 MBN($R=0.89$, $P<0.001$)、 β -葡萄糖苷酶活性($R=0.76$, $P<0.01$)极显著正相关; MBN 与 β -葡萄糖苷酶($R=0.82$, $P<0.01$)、过氧化氢酶($R=0.66$, $P<0.05$)活性均显著正相关; DON 与过氧化氢酶活性($R=0.58$, $P<0.05$)显著正相关, 与脲酶活性($R=-0.97$, $P<0.01$)呈极显著负相关关系。此外, 本研究发现所选样地的林下植被多样性与各因子之间均无相关关系。

表 4 环境变量的 Pearson 相关分析

Table 4 Pearson correlation analysis between environmental variables

变量	TOC	MBC	DOC	ROC	TN	MBN	DON	pH	UE	β G	CAT	H	D
TOC	1	0.51	0.14	0.90**	0.65*	0.50	-0.25	-0.38	0.47	0.16	-0.12	-0.04	0.02
MBC		1	0.20	0.34	0.96**	0.92**	0.39	-0.04	-0.08	0.86**	0.66*	0.10	0.01
DOC			1	0.06	0.21	0.26	0.27	-0.65*	-0.49	0.01	0.34	0.14	-0.23
ROC				1	0.45	2.31	-0.18	-0.44	0.30	0.05	-0.31	-0.05	-0.04
TN					1	0.89**	0.37	-0.08	0.02	0.76**	0.57	0.14	-0.03
MBN						1	0.19	0.00	0.04	0.82**	0.66*	-0.09	0.21
DON							1	-0.04	-0.79**	0.48	0.58*	0.53	-0.51
pH								1	0.14	0.26	0.16	-0.13	0.24
UE									1	-0.23	-0.40	-0.23	0.30
β G										1	0.81**	0.09	0.08
CAT											1	0.35	-0.17
H												1	-0.96**
D													1

说明: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

以土壤酶活性作为响应变量, 活性有机碳、氮组分作为解释变量, 并结合不同海拔植被带样点进行 RDA 分析。由图 2 可知: 土壤酶活性与活性有机碳、氮组分关系显著, 可以解释 86.96% 的变异, 其中第 1 轴解释了 75.11% 的变异, 第 2 轴解释了 11.85% 的变异。从各酶活性与环境因子夹角可知, 土壤脲酶与 DON 有很强的负相关性, 过氧化氢酶与 DOC 以及 β -葡萄糖苷酶与 MBC, MBN 均有很强的正相关性, 这基本上与相关性检验结果一致。蒙特卡罗检验结果显示: 仅 DON 对于土壤酶的分布的影响达到显著水平($r^2=0.6957$, $P=0.006$), 土壤活性有机碳氮组分对土壤酶分布的决定系数从大到小依次为 DON, MBC, DOC, MBN 和 ROC。

3 讨论

3.1 不同海拔植被带土壤碳氮及其活性组分特征

黄山较高海拔土壤 TOC 及其活性组分质量分数高于较低海拔, 且存在较明显的海拔植被带差异。可能的原因是随着海拔高度增加, 温度降低, 土壤微生物活性降低, 从而导致土壤 TOC 释放速率降低^[19]。孙海燕等^[20]研究也证明: 海拔较高的高寒草甸群落内的杂类草物种数目和盖度较低, 温度较低且湿度较

高,因此有机质的分解速率较慢,土壤活性有机碳含量相对较高。有机氮通过氨化和硝化作用由细菌转化为氨、硝酸盐或亚硝酸盐,变化的气象条件(温度和湿度)将改变细菌的氨化和硝化能力,因此 DON 沉积与温度和降水密切相关^[21];随着海拔升高,气温下降,降雨量增大^[20],因此本研究 1 760 m 高山草甸的土壤氮素及其活性组分的质量分数相较于其他海拔植被带最高。DOC 和 DON 主要来源于土壤有机质、根系分泌物以及微生物代谢产物,林分类型也通过这些过程影响土壤 DOC 和 DON 及其动态^[22]。TU 等^[23]研究也证明:DOC 主要来源于表层土壤中的凋落物,且 DOC 的主要来源可能随周围环境的变化而改变。凋落物数量、种类和化学组分是影响表土 DOC 和 DON 的主要因素^[24]。不同植物种类对养分的需求不同,产生的凋落物数量和质量也不同,从而影响微生物种群和多样性,进而影响土壤微生物生物量和微生物碳的利用效率^[5]。因此,植被类型是导致黄山不同海拔植被带土壤 MBC, DOC 和 MBN 质量分数存在极显著差异的重要因素,而海拔梯度所造成的温度与水分差异也对土壤 MBC, DOC 和 MBN 质量分数的海拔植被带差异具有重要贡献。

3.2 不同海拔植被带土壤活性有机质分配比例情况

土壤微生物熵(MBC/TOC)是监测土壤有机碳或微生物生物量的敏感参数,可解释为土壤有效底物和固定在微生物细胞中土壤总碳的比例^[18],比 MBC 更能反映植被类型对土壤有机碳的影响^[5]。本研究中山高山草甸的土壤微生物熵以及 MBN/TN 明显高于其他植被带,说明高山草甸土碳库处于积累状态,微生物对土壤氮库的利用效率较高,土壤氮素矿化和有效性也较高。ROC 分配比例从有机碳自身分解方面指示有机碳活性强度,该比值越大则土壤有机碳被分解矿化的潜力越大^[25]。土壤 DOC/TOC 比 DOC 更能反映林分类型对土壤碳的影响,其比值越大,说明土壤碳活性越强,稳定性越差^[22]。本研究中常绿阔叶林的 DOC 分配比例最小,且 ROC 分配比例最大,说明低海拔常绿阔叶林土壤有机碳稳定性较差,不利于土壤碳的积累。DON 质量分数可以影响土壤总氮的动态,较高的 DON/TN 说明通过淋溶作用而损失氮的可能性越大,从而影响氮的积累速率^[26]。本研究结果显示:不同海拔植被带的 DON/TN(1.41%~2.32%)无显著差异,可能是因为黄山地处亚热带季风气候带^[13],夏季(采样时间为 7 月)高温多雨,淋溶作用较强。

3.3 不同海拔植被带土壤酶活性特征及各因子之间的关系

β -葡萄糖苷酶与土壤活性碳循环相关^[28];脲酶对含氮有机质的水解有特殊的促进作用,与土壤中氮的形成和有效性密切相关^[29];过氧化氢酶能使代谢过程中产生的过氧化物分解,从而防止其对生物体的毒性作用,其活性与土壤有机质含量相关^[17]。本研究发现:随着海拔升高,土壤 β -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶活性总体上呈增强趋势,而脲酶活性总体上呈减弱趋势,该研究结果与聂阳意等^[27]和宋贤冲等^[28]的研究结果一致,说明高海拔土壤微生物可能更多地分解活性碳,更有利于土壤有机碳、氮的积累。本研究中 DON 显著影响黄山不同海拔植被带土壤酶活性分布。YANG 等^[29]研究发现:土壤酶活性可以作为温带森林生态系统土壤溶解性有机氮库的潜在指标。REN 等^[11]的研究也证明:土壤酶活性与土壤养分动态密切相关,尤其是 DON。 β -葡萄糖苷酶促作用产物是微生物的营养源,过氧化氢酶活性与微生物数量相关^[17],因此 MBC, MBN 与这 2 种酶活性显著正相关。

除 ROC 外,本研究发现 TOC 与其他有机碳活性组分均无显著关系,究其原因可能是土壤有机碳活性组分对环境变化极为敏感,各组分变化难以完全与土壤有机碳变化保持一致,土壤有机碳活性组分的变化受到诸多因素的共同制约,因此需充分考虑其影响因素的复杂性及多样性^[26]。土壤溶解性有机质(DOC

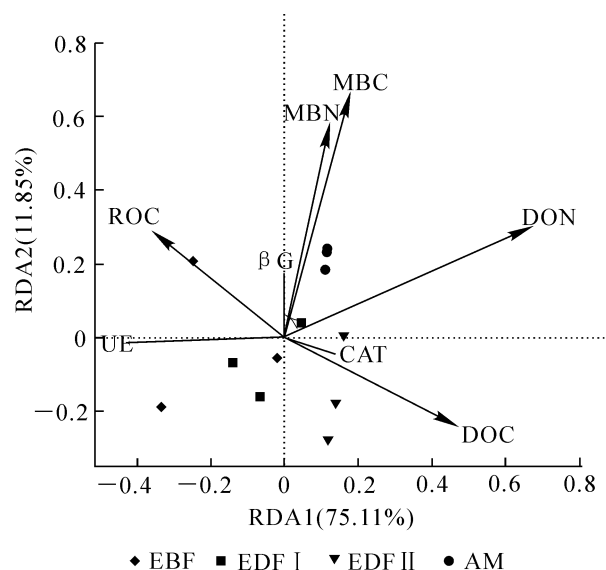


图2 土壤酶活性与土壤活性有机碳氮组分的冗余分析

Figure 2 Redundancy analysis (RDA) of the enzyme activities and soil labile organic carbon and nitrogen fractions

和 DON)主要由高分子和电解质组成,其溶解度由电荷密度决定,而土壤 pH 值是电荷密度的决定因素^[22]。此外,在酸性土壤中,微生物种类受限于以真菌为基础的环境,从而导致有机体和植物体分解缓慢,土壤有机质含量降低^[2]。因此,土壤 DOC 与 pH 值呈显著负相关。已有研究证明:植被多样性指数可能是影响土壤活性有机碳垂直分异的关键因子,而不是影响土壤活性有机碳沿海拔梯度分异的关键因子^[20]。本研究不同海拔植被带土壤活性有机碳与林下植被多样性之间无明显相关关系,但是未涉及土层作用,因此黄山土壤活性有机碳库与植被多样性之间的关系有待进一步研究。

4 结论

除 ROC 外,黄山较高海拔土壤 TOC, TN 及其活性组分质量分数总体上高于较低海拔,且存在比较明显的海拔植被带差异。相较于其他植被带,高山草甸的土壤 TOC, TN 及其活性组分质量分数均较高, MBC 及 MBN 的分配比例也较高。低海拔常绿阔叶林土壤 DOC/TOC 最小, ROC/TOC 最大,土壤有机碳库稳定性较差。土壤 DON 的分配比例整体较高且无明显海拔分异。随着海拔升高,脲酶活性总体上呈减弱趋势, β -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶活性总体上呈增强趋势。土壤活性碳、氮组分与 TOC 和 TN 质量分数、pH 值及酶活性密切相关。土壤活性碳氮组分中 DON 显著影响土壤酶的分布。植被类型直接或间接地影响黄山土壤碳氮及其活性组分海拔分布,因此加强对地表凋落物的科学管理,对改善森林土壤碳库以及保护区土壤管理具有重要意义。

5 参考文献

- [1] 王棣,耿增超,余雕,等. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(6): 1569 – 1577.
WANG Di, GENG Zengchao, SHE Diao, *et al.* Vertical distribution of soil active carbon and soil organic carbon storage under different forest types in the Qinling Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(6): 1569 – 1577.
- [2] MA Heping, YANG Xiaolin, GUO Qiqiang, *et al.* Soil organic carbon pool along different altitudinal level in the Sygera Mountains, Tibetan Plateau [J]. *J Mount Sci*, 2016, **13**(3): 476 – 483.
- [3] ZHANG Min, ZHANG Xiaoke, LIANG Wenju, *et al.* Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai Mountain, China [J]. *Pedosphere*, 2011, **21**(5): 615 – 620.
- [4] JUSTINE M F, YANG Wanqin, WU Fuzhong, *et al.* Dissolved organic matter in soils varies across a chronosequence of *Pinus massoniana* plantations [J]. *Ecosphere*, 2017, **8**(4): e01764. doi:10.1002/ecs2.1764.
- [5] BARGALI K, MANRAL V, PADALIA K, *et al.* Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan forest soils, India [J]. *Catena*, 2018, **171**(12): 125 – 135.
- [6] 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 [J]. *Aust J Agric Res*, 1995, **46**(7): 1459 – 1466.
- [7] LUO Y, SU B, CURRIE W S, *et al.* Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide [J]. *BioScience*, 2004, **54**(8): 731 – 739.
- [8] KONG Ling, CHU L M. Subtropical urban turfs: Carbon and nitrogen pools and the role of enzyme activity [J]. *J Environ Sci-China*, 2018, **65**(3): 18 – 28.
- [9] GOU Xiaolin, TAN Bo, WU Fuzhong, *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N along an elevational gradient on the Eastern Tibetan Plateau, China [J]. *PLoS One*, 2015, **10**(7): e0132443. doi: 10.1371/journal.pone.0132443.
- [10] ZHENG Haifeng, LIU Yang, ZHANG Jian, *et al.* Factors influencing soil enzyme activity in China's forest ecosystems [J]. *Plant Ecol*, 2018, **219**(1): 31 – 44.
- [11] REN Chengjie, KANG Di, WU Jianping, *et al.* Temporal variation in soil enzyme activities after afforestation in the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2016, **282**: 103 – 111.
- [12] 刘学东, 陈林, 杨新国, 等. 荒漠草原典型植物群落土壤活性有机碳组分特征及其与酶活性的关系[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(9): 1882 – 1890.
LIU Xuedong, CHEN Lin, YANG Xinguo, *et al.* Characteristics of soil labile organic carbon fractions and their relationship with soil enzyme activities in four typical communities in desert steppe [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*,

- 2016, **36**(9): 1882 – 1890.
- [13] 巩劼, 陆林, 晋秀龙, 等. 黄山风景区旅游干扰对植物群落及其土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(5): 2239 – 2251.
- GONG Jie, LU Lin, JIN Xiulong, *et al.* Impacts of tourist disturbance on plant communities and soil properties in Huangshan Mountain scenic area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(5): 2239 – 2251.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [16] GONG Wei, YAN Xiaoyuan, WANG Jingyan, *et al.* Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat-maize cropping system in North China Plain [J]. *Plant Soil*, 2009, **314**(2): 67 – 76.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] ZHANG Chao, XUE Sha, LIU Guobin, *et al.* A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China [J]. *Plant Soil*, 2011, **347**(1/2): 163 – 178.
- [19] YU Fazhan, ZHANG Zhongqi, CHEN Longqian, *et al.* Spatial distribution characteristics of soil organic carbon in subtropical forests of mountain Lushan, China [J]. *Environ Monit Assess*, 2018, **190**(9): 545. doi: 10.1007/s10661-018-6906-x.
- [20] 孙海燕, 万书波, 李林, 等. 贺兰山西坡不同海拔梯度土壤活性有机碳分布特征及影响因子[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(4): 194 – 205.
- SUN Haiyan, WAN Shubo, LI Lin, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of soil active organic carbon at different elevations on west slope of Helan Mountain [J]. *J Soil Water Conserv*, 2014, **28**(4): 194 – 205.
- [21] HU Zhaoyong, WANG Genxu, SUN Xiangyang. Precipitation and air temperature control the variations of dissolved organic matter along an altitudinal forest gradient, Gongga Mountains, China [J]. *Environ Sci Pollut R*, 2017, **24**(11): 10391 – 10400.
- [22] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(4): 1031 – 1038.
- XIAO Haoyan, LIU Bao, YU Zaipeng, *et al.* Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(4): 1031 – 1038.
- [23] TU Chenglong, LIU Congqiang, LU Xiaohui, *et al.* Sources of dissolved organic carbon in forest soils: evidences from the differences of organic carbon concentration and isotope composition studies [J]. *Environ Earth Sci*, 2011, **63**(4): 723 – 730.
- [24] ZHOU Wenjun, SHA Liqing, SCHAEFER D A, *et al.* Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest [J]. *Soil Biol Biochem*, 2015, **81**(6): 255 – 258.
- [25] 张文敏, 吴明, 王蒙, 等. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 土壤学报, 2014, **51**(6): 1351 – 1360.
- ZHANG Wenmin, WU Ming, WANG Meng, *et al.* Distribution characteristics of organic carbon and its components in soils under different types of vegetation in wetland of Hangzhou bay [J]. *Acta Pedol Sin*, 2014, **51**(6): 1351 – 1360.
- [26] MA Junyong, HAN Hairong, ZHANG Wenwen, *et al.* Dynamics of nitrogen and active nitrogen components across seasons under varying stand densities in a *Larix principis-rupprechtii* (Pinaceae) plantation [J]. *Peer J*, 2018, **6**: e5647. doi: 10.7717/peerj.5647.
- [27] 聂阳意, 王海华, 李晓杰, 等. 武夷山低海拔和高海拔森林土壤有机碳的矿化特征[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(3): 748 – 756.
- NIE Yangyi, WANG Haihua, LI Xiaojie, *et al.* Characteristics of soil organic carbon mineralization in low altitude and high altitude forests in Wuyi Mountains, southeastern China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29**(3): 748 – 756.
- [28] 宋贤冲, 陈晓鸣, 郭丽梅, 等. 猫儿山不同海拔典型植被带土壤酶活性变化特征[J]. 基因组学与应用生物学, 2016, **35**(12): 3545 – 3551.
- SONG Xianchong, CHEN Xiaoming, GUO Limei, *et al.* Soil enzyme activities in typical vegetation zones along an altitude gradient in Mao'er Mountain [J]. *Gen Appl Biol*, 2016, **35**(12): 3545 – 3551.
- [29] YANG Kai, ZHU Jiaojun, YAN Qiaoling, *et al.* Soil enzyme activities as potential indicators of soluble organic nitrogen pools in forest ecosystems of Northeast China [J]. *Ann For Sci*, 2012, **69**(7): 795 – 803.