

# 武夷山不同海拔典型森林土壤有机碳和全氮储量分布特征

熊小玲<sup>1,2</sup>, 任寅榜<sup>1,2</sup>, 吕茂奎<sup>1,2</sup>, 李晓杰<sup>1,2</sup>, 聂阳意<sup>1,2</sup>, 谢锦升<sup>1,2</sup>

(1.福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007; 2.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)

**摘要:**为探究武夷山森林土壤碳氮储量的分布特征,以武夷山国家公园不同海拔高度(600, 1 000, 1 400 m)的典型森林土壤为研究对象,研究土壤有机碳和全氮含量及储量随海拔高度的变化规律,分析了影响土壤有机碳和全氮储量变化的因子。结果表明:随着海拔的升高,土壤有机碳和全氮的含量在 0—5 cm 土层和 5—10 cm 土层变化规律不同,5—10 cm 土层的土壤碳氮含量随海拔变化趋势更为明显,而 0—5 cm 土层的土壤碳氮含量表现为 1 000 m 海拔较高;海拔 1 000 m 的土壤 C/N 明显高于海拔 1 400 m 和 600 m;在土壤有机碳和全氮储量方面,1 400 m 明显高于 1 000 m 和 600 m,且高海拔区域土壤碳氮储量的变化幅度显著大于低海拔区域,两土层间差异不显著;相关分析和 RDA 分析表明细根 C/N 和土壤温度是影响土壤有机碳和全氮储量的主导因子。综上所述,土壤有机碳和全氮的分布随海拔升高并非线性增长,受到气候、植被特征及土壤状况的综合影响,高海拔地区土壤碳氮储量对气候变化的响应更为敏感。

**关键词:**海拔; 森林土壤; 碳氮含量; 碳氮储量; 武夷山

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)04-0083-06

## Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Storage in Typical Forest Soils at Different Altitudes in Wuyishan Mountain

XIONG Xiaoling<sup>1,2</sup>, REN Yinbang<sup>1,2</sup>, LÜ Maokui<sup>1,2</sup>, LI Xiaojie<sup>1,2</sup>, NIE Yangyi<sup>1,2</sup>, XIE Jinsheng<sup>1,2</sup>

(1.School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2.Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Processes, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** In order to explore the distribution characteristics of forest soil carbon and nitrogen storage in Wuyishan Mountain, typical forest soils at different altitudes (600, 1 000, 1 400 m) were selected as research objects. The changes of soil organic carbon and total nitrogen contents and reserves with altitude were studied, and the factors affecting the changes of soil organic carbon and total nitrogen reserves were analyzed. The results show that: with the increase of altitude, the changes of soil organic carbon and total nitrogen contents in 0—5 cm soil layer and 5—10 cm soil layer were different; the changes of soil carbon and nitrogen contents in 5—10 cm soil layer were more obvious with the increase of altitude, while the soil carbon and nitrogen contents in 0—5 cm soil layer were higher at 1 000 m altitude; soil C/N at 1 000 m was significantly higher than that at 1 400 m and 600 m; soil organic carbon and total nitrogen storage at 1 400 m were significantly higher than those at 1 000 m and 600 m; the variation ranges of soil carbon and nitrogen storage at high altitude were significantly greater than those at low altitude, and there was no significant difference between the two soil layers; correlation analysis and RDA analysis showed that fine root C/N and soil temperature were the dominant factors affecting soil organic carbon and total nitrogen storages. In conclusion, the distribution of soil organic carbon and total nitrogen does not increase linearly with the elevation, but is affected by the climatic and vegetation characteristics and soil conditions. Soil carbon and nitrogen storage at high altitude is more sensitive to climate change.

收稿日期: 2021-05-16

修回日期: 2021-06-12

资助项目: 福建省对外合作项目“侵蚀红壤区退化马尾松林土壤微生物残体有机质提升机制与关键技术研究”(2019I0010)

第一作者: 熊小玲(1995—), 女, 湖南娄底人, 博士研究生, 研究方向为生态与环境。E-mail: 1604520293@qq.com

通信作者: 谢锦升(1972—), 男, 福建龙岩人, 博士, 教授, 主要从事生态恢复与全球变化研究。E-mail: jshxie@163.com

**Keywords:** altitude; forest soil; carbon and nitrogen content; carbon and nitrogen storage; Wuyishan Mountain

作为陆地生态系统中的重要化学元素,土壤碳和氮在调节植物生长和维持生态系统养分循环中起着关键作用<sup>[1]</sup>,碳氮循环是生态系统的重要过程<sup>[2]</sup>。森林是陆地生态系统最重要的组成部分,森林土壤有机碳库占全球土壤有机碳库的70%~73%<sup>[3]</sup>,其储量的微小变化都将影响着大气CO<sub>2</sub>浓度及碳循环<sup>[4]</sup>,土壤氮储量为 $(3.5\sim 5.5)\times 10^{14}$  kg<sup>[5]</sup>,森林生态系统中90%以上的氮元素都储存在土壤中<sup>[6]</sup>。森林土壤有机碳(SOC)主要贮存于林下枯落物和表层土壤中<sup>[7]</sup>,其主要来源是动植物和微生物残体、分泌物、排泄物及一些分解产物和土壤腐殖质<sup>[8]</sup>,而土壤氮素的输入量主要取决于植物残体的归还量及生物固氮,以及大气沉降<sup>[9]</sup>。

森林土壤碳氮储量的研究是生态学领域的热点问题,其分布特征受各种因素的影响,以往一些研究者从不同林龄<sup>[10]</sup>、不同林分等<sup>[11]</sup>方面对森林土壤的碳氮储量展开了研究,结果表明,凋落物的数量、化学组成以及分解速率会受到森林类型的影响<sup>[12]</sup>。不同的气候条件会对植被的分布及生产力产生影响,并通过改变地上与地下凋落物输入的数量和质量,进而影响土壤有机碳与氮的沉积;此外,改变土壤温度和水分状况影响着微生物对有机碳的分解和转化,从而影响温室气体的排放<sup>[13]</sup>。海拔高度对土壤碳氮含量的分布有重要影响,海拔梯度上气候、植被和土壤类型会发生改变,进一步影响土壤理化性质与养分供应<sup>[14]</sup>,因此海拔梯度是研究植被类型、土壤条件和气候对土壤碳氮影响的一个综合性的研究平台。有学者研究发现森林土壤的碳氮储量与海拔存在显著的线性关系,土壤碳氮储量随海拔的升高而增加<sup>[15]</sup>;但也有研究发现土壤有机碳储量随海拔的升高呈现减少的趋势<sup>[16]</sup>;王艳杰等<sup>[17]</sup>在雾灵山地区的研究发现土壤有机质含量随海拔升高呈现先减少后增加的趋势。上述有关研究土壤碳氮随海拔梯度变化规律的不一致,很可能与响应的植被类型、土壤类型和气候等的综合作用有关;因为不同海拔高度上植被输入的数量和质量与气候(温度和水分)对土壤碳氮的相对影响程度可能存在很大的差异。

武夷山国家公园是福建省保存最好的原始森林植被保护区,这里的气候环境独特,生物种类丰富多样,是一个良好的天然试验场。近年来也有学者对武夷山不同海拔土壤有机碳含量进行了相关研究<sup>[18]</sup>,发现土壤有机碳含量随海拔高度升高而升高,但并未综合气候和森林植被类型对其进行分析。本研究在

武夷山国家公园选取3个海拔的典型森林(针叶林、针阔混交林和阔叶林),分析土壤有机碳、全氮含量和储量在海拔高度及不同土层的变化规律,探讨植被输入凋落物数量、质量和气候如何影响不同海拔森林土壤碳氮储量,为进一步了解森林土壤碳氮变化规律及对海拔高度变化的响应具有重要的理论意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究区位于福建省武夷山国家公园(117°27′—117°51′E, 27°33′—27°54′N),地处武夷山脉偏北部分,全区面积约570 km<sup>2</sup>,平均海拔1200 m,黄岗山为主峰,海拔2158 m,也是中国大陆东南部最高峰。属于典型的亚热带季风气候,年均温17.6℃,年降雨量1864 mm,年相对湿度78%~84%,无霜期253~272 d。火山岩和粗晶花岗岩是主要母岩,坡积母质比较多,土壤类型包括红壤、黄红壤、黄壤和山地草甸土<sup>[19]</sup>。本区自然植被资源丰富,原始森林与植物群落保留较好,垂直带谱明显,地带性植被为常绿阔叶林,随着海拔的升高,依次可见到针阔叶混交林、针叶林、中山苔藓矮曲林和亚热带山地草甸。主要优势树种为米槠(*Castanopsis carlesii*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、黄山松(*Pinus taiwanensis*)、肿节竹(*Oligostachyum oedogonatum*)、白檀(*Symplocos paniculata*)、青茅(*Calamagrostis brachytricha*)等<sup>[20]</sup>。

### 1.2 试验设计与样品采集

本研究选取3个不同海拔的典型森林群落作为试验地,于2016年10月,选择坡向、坡度和坡位基本一致的样地(表1),分别为1400 m(针叶林),1000 m(针阔混交林),600 m(常绿阔叶林)。在每个海拔设置4个20 m×20 m的样方,用内径为2 cm的土钻“S”型随机,多点取表层0—5 cm和5—10 cm土样并混合,各层土壤采用环刀法取土以测定容重,每个海拔4个重复,共24个土样,装入样品袋中并迅速冷藏带回实验室处理。挑去石砾、根系和杂物,然后过2 mm土壤筛,每个土壤样品分为2份:一份在常温下风干,用于土壤常规性质分析;另一份放置在4℃的冰箱中,用于其他指标的测定。年凋落量根据每月在凋落物框中收集的凋落物来计算;在每个样方内随机选取一块区域,利用PVC管垂直于地表打入土壤中,将土块带回实验室,挑出细根,根据土面积计算细根生物量。

### 1.3 测定方法

土壤含水率采用烘干法测定,pH值采用1:2.5土水比电位法测定,土壤颗粒组成用土壤粒径分析仪测定,有机碳和全氮含量用土壤碳氮元素分析仪(Elementar Vario max,Germany)测定,土壤基本性质见表2,凋落物和细根的C、N含量采用植物碳氮元素分析仪(Elementar Vario EL III)测定(表1)。

土壤剖面有机碳和全氮储量用下列公式计算<sup>[21-22]</sup>：

$$C = \text{SOC} \times D \times E \times (1 - G) / 10$$

$$N = \text{TN} \times D \times E \times (1 - G) / 10$$

式中:C、N为土壤有机碳、全氮储量(t/hm<sup>2</sup>);SOC、TN为土壤有机碳或全氮含量(g/kg);D为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);E为土层厚度(cm);G为直径>2mm的石砾所占的体积比例(%)。

表1 样地基本概况

|  | 1400    | 1000                                | 600                               |
|--|---------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 海拔/m                                       | 1400    | 1000                                | 600                               |
| 植被类型                                       | 针叶林(CF) | 针阔混交林(CBF)                          | 常绿阔叶林(EBF)                        |
| 坡向   | 东南坡     | 东南坡                                 | 东南坡                               |
| 坡度/(°)                                     | 31      | 24                                  | 26                                |
| 降水量/mm                                     | 3487    | 2671                                | 2374                              |
| 土壤温度/℃                                     | 13.20   | 15.20                               | 17.20                             |
| 土壤类型                                       | 山地黄壤    | 山地黄壤                                | 山地红壤                              |
| 优势树种                                       | 黄山松     | 黄山松、木荷( <i>Schima superba</i> )、肿节竹 | 米槠、甜槠( <i>Castanopsis eyrei</i> ) |
| 树高/m                                       | 17.20   | 13.00                               | 10.30                             |
| 胸径/cm                                      | 25.80   | 14.60                               | 12.00                             |
| 密度/(棵·hm <sup>-2</sup> )                   | 451     | 1425                                | 1588                              |
| 年凋落量/(g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) | 588.70  | 652.50                              | 580.40                            |
| 细根生物量/(g·m <sup>-2</sup> )                 | 140.80  | 625.80                              | 197.77                            |
| 凋落叶 C/N                                    | 36.19   | 53.11                               | 31.31                             |
| 细根 C/N                                     | 59.57   | 52.37                               | 36.67                             |

表2 土壤基本性质

| 海拔/m | 土层/cm | pH值         | 容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 含水率/%         | 砂粒/%         | 粉粒/%         | 黏粒/%         |
|------|-------|-------------|--------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| 1400 | 0—5   | 4.63±0.11Aa | 0.56±0.10Bb              | 70.57±4.42Aa  | 27.08±2.58Aa | 56.78±1.54Aa | 16.15±1.43Ba |
|      | 5—10  | 4.60±0.06Aa | 0.96±0.12Aa              | 47.44±6.48Ba  | 23.32±4.30Ab | 55.54±2.76Aa | 21.14±2.87Aa |
| 1000 | 0—5   | 4.21±0.24Ab | 0.34±0.10Bc              | 72.09±10.05Aa | 29.95±4.44Aa | 60.32±3.48Aa | 9.73±1.31Bb  |
|      | 5—10  | 4.63±0.09Aa | 0.78±0.10Ab              | 38.74±2.12Bb  | 24.06±3.37Ab | 60.38±2.17Aa | 15.56±2.20Ab |
| 600  | 0—5   | 4.76±0.04Aa | 0.81±0.16Aa              | 37.30±3.47Ab  | 34.13±3.86Aa | 53.07±3.44Aa | 12.80±0.47Aa |
|      | 5—10  | 4.78±0.13Aa | 1.04±0.16Aa              | 29.97±4.90Bc  | 42.18±3.29Aa | 45.13±2.50Ab | 12.69±0.80Ab |

注:不同小写字母表示同一土层不同海拔间差异显著;不同大写字母表示同一海拔不同土层间差异显著,下同( $p < 0.05$ )。

### 1.4 数据统计与分析

所有数据用Excel进行整理后,采用Excel和SPSS 19.0软件进行统计分析,运用Origin 9.0软件进行作图。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和独立样本t检验方法进行差异显著性检验,利用Pearson相关分析以及RDA分析评价土壤碳氮储量与各因子之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同海拔土壤碳氮含量和C/N分布特征

土壤有机碳和全氮含量随海拔升高而增加,但海拔1000m处0—5cm土层的土壤有机碳含量高于海拔1400m(图1),该海拔处0—5cm土层的土壤全氮含量也高于海拔1400m处。从土层方面来看,

1000m和600m海拔不同土层的土壤有机碳和全氮含量存在显著差异,土层0—5cm显著高于5—10cm( $p < 0.05$ )。0—5cm和5—10cm土层碳氮含量的变化规律不同,与0—5cm土层相比,5—10cm土层碳氮含量随海拔变化趋势更为明显。

海拔1000m的土壤C/N明显高于海拔1400m和600m,其中土层0—5cm的土壤C/N分别比海拔1400m和海拔600m高了6.75,7.05,而5—10cm土层的C/N比其余两个海拔高4.67,4.73。1400m和1000m处土层0—5cm的C/N显著高于土层5—10cm(图2)( $p < 0.05$ )。

### 2.2 不同海拔土壤碳氮储量的变化规律

土壤碳氮储量随着海拔的升高变化明显,高海拔区域土壤碳氮储量的变化幅度显著大于低海拔区域。

海拔从 600 m 上升到 1 000 m, 0—10 cm 土层的土壤碳储量增加了 5.10%, 氮储量减少了 14.50%。在高

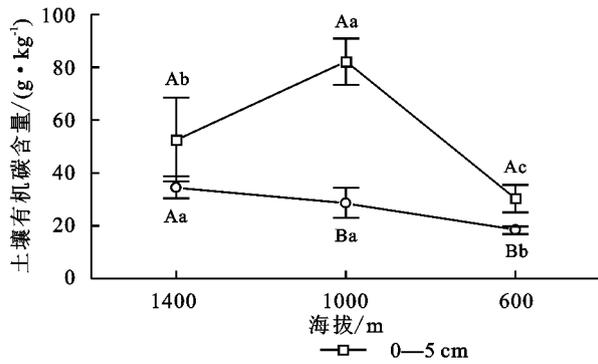


图 1 不同海拔土壤有机碳和全氮含量

海拔区域, 从海拔 1 000 m 到 1 400 m 土壤碳氮储量分别增加了 30.20%, 42.60% (图 3)。

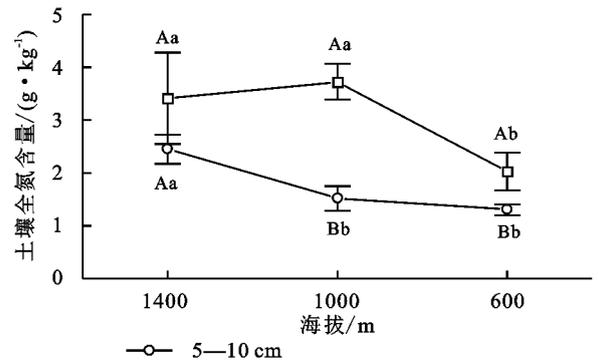


图 2 不同海拔土壤 C/N

率、黏粒含量和细根 C/N 间存在显著的正相关关系 ( $p < 0.05$ ), 土壤碳储量与土壤温度、细根 N 含量存在负相关关系, 与土壤温度的负相关系数达到  $-0.783$ 。对土壤氮储量而言, 与容重、凋落叶 N 含量极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与粉粒含量、凋落叶 C 含量、凋落叶 C/N 及细根生物量呈显著负相关 ( $p < 0.05$ )。对土壤碳氮储量与其他环境因子进行 RDA 分析, 结果发现 (图 4), 3 个海拔都按照一定的规律进行了很好的聚类, 说明不同海拔处理显著影响了表层土壤碳氮储量。RDA 第一轴和第二轴分别解释了变量的 65.63%, 21.50%, 细根 C/N 和土壤温度是影响土壤碳氮储量的关键因子。

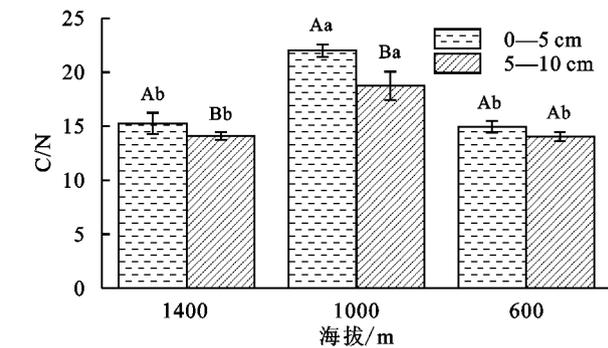


图 3 不同海拔土壤有机碳和全氮储量

### 2.3 土壤碳氮储量与其他因子间的相关关系

相关分析表明 (表 3), 土壤碳储量与土壤含水

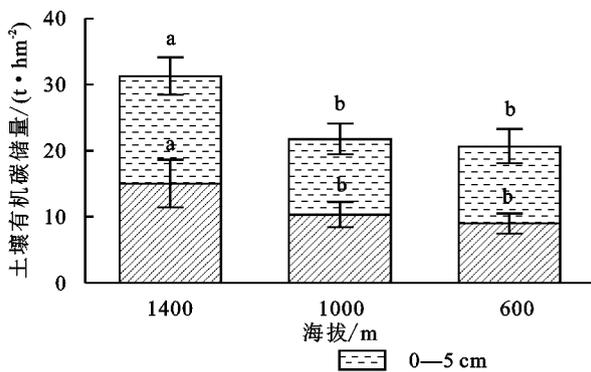


图 3 不同海拔土壤有机碳和全氮储量

表 3 土壤碳氮储量与其他因子之间的相关关系

| 项目   | 容重      | 含水率    | 粉粒      | 黏粒     | 土壤温度     | 凋落叶 C 含量 | 凋落叶 N 含量 | 凋落叶 C/N  | 细根生物量    | 细根 N 含量 | 细根 C/N |
|------|---------|--------|---------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|
| C 储量 | 0.183   | 0.592* | 0.244   | 0.622* | -0.783** | 0.075    | 0.117    | -0.195   | -0.551   | -0.675* | 0.609* |
| N 储量 | 0.738** | -0.186 | -0.705* | 0.356  | -0.221   | -0.698*  | 0.842**  | -0.839** | -0.814** | -0.296  | -0.212 |

注: 表中数值是皮尔逊相关系数  $p$  值, \* 代表  $p < 0.05$ , \*\* 代表  $p < 0.01$ 。

## 3 讨论

### 3.1 不同海拔土壤碳氮含量的变化特征

作为土壤养分不可缺少的一部分, 土壤有机碳和全氮也是植物生长所需营养元素的主要来源<sup>[23]</sup>。大量研究表明, 随海拔的升高, 土壤碳氮含量升高<sup>[24]</sup>,

但本研究发现 3 个海拔森林土壤有机碳和全氮含量并未随海拔升高而增加, 两个土层碳氮含量随海拔的变化规律明显不同, 5—10 cm 土层的土壤碳氮含量随海拔升高有明显的变化趋势, 这主要是由气候 (温度和降水), 植物输入数量和质量、土壤共同作用的结果。由于本研究 3 个海拔降雨量基本相近 (表 1),

随着海拔的升高,温度降低(温差约 $4^{\circ}\text{C}$ ),土壤微生物活性减弱,凋落物分解减慢,沉积进入土壤中,进而导致土壤碳氮含量随海拔升高明显增加<sup>[25]</sup>。然而,本研究中0—5 cm土层的土壤碳氮含量随海拔变化的趋势并不明显,海拔1 000 m处0—5 cm土层的土壤有机碳和全氮含量高于1 400 m海拔,这可能与地上地下输入凋落物数量和质量有关,因为土壤中的有机物质主要来源于植物残体和细根分泌物,在本研究中,1 000 m海拔的凋落物输入量与高海拔相比并无明显差异,但凋落叶的质量低于其他两个海拔,难分解,更易积累有机质。此外,1 000 m海拔的细根生物量明显高于1 400 m海拔(表1),这也是造成1 000 m海拔土壤有机碳和全氮含量高于1 400 m海拔的一个原因。

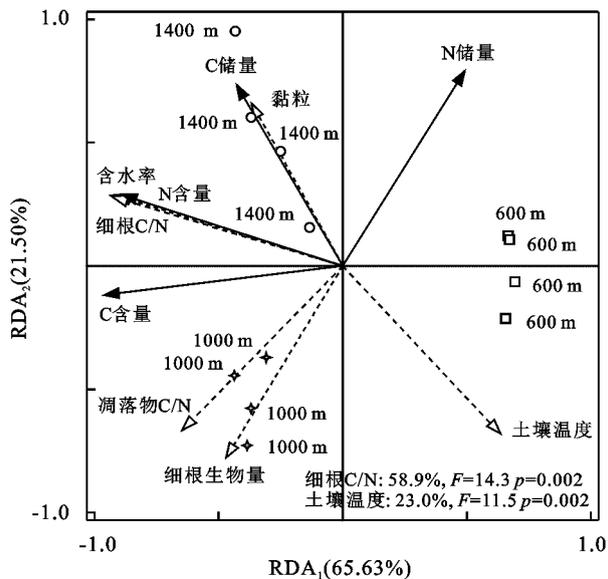


图4 土壤碳氮储量与环境因子的RDA分析

### 3.2 土壤碳氮储量随海拔的变化特征

在山地生态系统中,海拔高度的变化是影响土壤有机碳和全氮的重要因素之一<sup>[26-27]</sup>。海拔高度的变化造成植被类型发生改变,本研究区,海拔每升高100 m,气温则下降 $0.44^{\circ}\text{C}$ <sup>[28]</sup>。在本研究中,1 400 m海拔的碳氮储量明显高于1 000 m,相关分析表明土壤碳储量与土壤含水率和黏粒含量之间存在显著的正相关关系。土壤水分是影响土壤有机碳库的重要因子,微生物活动需要适当的温度和湿度条件,过多的水分会导致进入土壤的氧气减少,影响土壤的通气状况,进而改变土壤有机质的分解过程<sup>[13]</sup>。本研究中土壤含水率越高,会抑制微生物的活动,导致土壤有机碳的矿化降低,所以有机碳储量与含水率呈显著正相关,这与前人的研究结果一致<sup>[13,29]</sup>。土壤粉粒和黏粒是影响土壤有机碳积累的重要因素,粉粒对土壤水分有效性、植被生长有积极作用,同时,黏粒对土

壤有机碳具有保护作用<sup>[29]</sup>。研究发现,黏粒含量高的林地其土壤有机碳储量相对较高<sup>[30]</sup>,我们的研究也发现土壤碳储量和黏粒含量间存在显著的正相关关系。相关分析和RDA分析均表明,温度与土壤碳储量间存在显著的负相关关系,在一定温度范围内,增温会导致异养呼吸的增加,从而降低土壤碳储量<sup>[31]</sup>。此外,温度升高会增强微生物活性,土壤有机质分解快,进而土壤有机碳储量低。

对土壤碳氮储量与其他因子的RDA分析发现,细根C/N是影响碳氮储量沿海拔变化的最主要因子,与土壤碳储量具有极显著的正相关关系,细根C/N越高,说明其质量越低,越难分解。1 400 m海拔针叶林的细根C/N相对较高,因而死的细根分解也是较慢的,因此对土壤有机碳积累的贡献越大。土壤氮储量与细根生物量呈显著的负相关关系,这可能是由于细根生长需要从土壤中吸收氮素,根系越多,则土壤中氮素含量减少。有报道指出,森林凋落物层的现存量变化对土壤碳储量的影响较大<sup>[31-32]</sup>,本研究中3个海拔的凋落物量没有显著差异,海拔1 000 m的根系现存量高于1 400 m,然而海拔1 000 m森林土壤有机碳储量却显著低于1 400 m,这可能与土壤有机碳积累取决于碳输入与碳释放之间的平衡有关<sup>[33]</sup>。我们前期在武夷山不同海拔的研究发现,在3个海拔中1 000 m处的土壤呼吸年通量最大<sup>[20]</sup>,这说明尽管1 000 m海拔根系输入量最大,但其土壤有机碳的排放量是最多的,加之该海拔的温度和水分条件可能刚好适合微生物的分解条件,最终导致土壤碳氮储量并未处在较高水平。我们发现从海拔600 m上升至1 000 m土壤碳氮储量的变化幅度明显低于海拔1 000~1 400 m,这可能是受气候和植被类型的共同影响。海拔600~1 000 m的区域以阔叶林为主,阔叶树种的凋落物质量高,容易分解,海拔低的区域气温高更加加速了凋落物分解,此外,土壤有机碳和氮矿化快,所以有机碳和全氮的储量低。而1 000~1 400 m区域温度较低,以针叶林为主,凋落物质量低,微生物活动缓慢,使得植物残体分解也慢,进而导致土壤有机碳和氮积累快而释放慢,有利于积累,所以高海拔区域土壤碳氮对气候变化的响应较低海拔敏感。

## 4 结论

土壤有机碳和全氮含量随海拔升高并未呈现增加的趋势,不同土层有机碳和全氮随海拔的变化规律不一致,海拔梯度上土壤有机质的分布并非由气候主导,而是气候与植被特征的共同作用所决定。高海拔地区土壤碳氮储量的变化幅度显著高于低海拔区域,

其储量大小取决于特定海拔的气候、土壤和植物输入凋落物的数量和质量的相互影响。

#### 参考文献:

- [1] Sistla S A, Schimel J P. Stoichiometric as a regulator of carbon and nutrient cycling in terrestrial ecosystems under change[J]. *New Phytologist*, 2012, 196(1): 68-78.
- [2] 李守娟, 杨磊, 陈利顶, 等. 长三角典型城郊土地利用变化及其土壤碳氮响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7178-7188.
- [3] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [4] Chen D, Lan Z, Hu S, et al. Effects of nitrogen enrichment on belowground communities in grassland: Relative role of soil nitrogen availability vs. soil acidification[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 89: 99-108.
- [5] 路翔, 项文化, 刘聪. 中亚热带 4 种森林类型土壤有机碳氮贮量及分布特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 169-173.
- [6] 王敬, 李贤伟, 荣丽, 等. 森林土壤氮贮量及氮素输入过程研究进展[J]. *世界林业研究*, 2008, 21(1): 14-19.
- [7] Pregitzer K S, Euskirchen E S. Carbon cycling and storage in world forests: Biome patterns related to forest age[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10: 2052-2077.
- [8] 张乐, 孙向阳, 李素艳, 等. 辽宁仙人洞典型林分森林土壤碳氮分布特征[J]. *吉林农业大学学报*, 2017, 39(2): 183-188.
- [9] 郑棉海, 陈浩, 朱晓敏, 等. 矿质养分输入对森林生物固氮的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(24): 7941-7954.
- [10] 兰斯安, 杜虎, 曾馥平, 等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1125-1134.
- [11] 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J]. *生态学报*, 2015, 35(16): 5421-5429.
- [12] 弓文艳, 陈丽华, 郑学良. 基于不同林分类型下土壤碳氮储量垂直分布[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 152-157, 164.
- [13] 任玉连, 陆梅, 曹乾斌, 等. 南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(11): 104-115.
- [14] 李相檀, 张维勇, 刘峰, 等. 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 19-24.
- [15] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 629-639.
- [16] Gutiérrez-Girón A, Díaz-Pinés E, Rubio A, et al. Both altitude and vegetation affect temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in Mediterranean high mountain soils[J]. *Geoderma*, 2015, 237: 1-8.
- [17] 王艳杰, 付桦. 雾灵山地区土壤有机质全氮及碱解氮的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(S1): 85-90.
- [18] 程浩, 张厚喜, 黄智军, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳含量变化特征[J]. *森林与环境学报*, 2018, 38(2): 135-141.
- [19] 朱鹤健, 林振盛, 陈珍皋, 等. 武夷山土壤垂直分布和特征[J]. *武夷科学*, 1982, 2(1): 152-164.
- [20] 任寅榜. 沿武夷山海拔梯度土壤置换对异养呼吸的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- [21] Rodríguez-Murillo J C. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 33(1): 53-61.
- [22] Schwartz D, Namri M. Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo[J]. *Global and Planetary Change*, 2002, 33(1): 77-93.
- [23] 焦克强, 段建军, 王小利, 等. 不同土地利用方式土壤碳氮含量及储量分析[J]. *山地农业生物学报*, 2018, 37(1): 17-26.
- [24] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 160-170.
- [25] 杨红, 扶胜兰, 刘合满, 等. 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤碳氮分布特征[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2018, 46(10): 15-23.
- [26] Tsui C C, Tsai C C, Chen Z S. Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan[J]. *Geoderma*, 2013, 209: 119-127.
- [27] Chen L F, He Z B, Du J, et al. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China[J]. *Catena*, 2016, 137: 37-43.
- [28] 陈健飞. 武夷山土壤分类参比[J]. *土壤*, 1999, 31(3): 149-154.
- [29] 武小钢, 郭晋平, 杨秀云, 等. 芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量[J]. *生态学报*, 2011, 31(11): 3009-3019.
- [30] 渠开跃, 冯慧敏, 代力民, 等. 辽东山区不同林型土壤有机碳剖面分布特征及碳储量研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(6): 90-94.
- [31] 宋娅丽, 康峰峰, 韩海荣, 等. 自然因子对中国森林土壤碳储量的影响分析[J]. *世界林业研究*, 2015, 28(3): 6-12.
- [32] 王新闯, 齐光, 于大炮, 等. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2013-2020.
- [33] Zhou G Y, Guan L L, Wei X H, et al. Litterfall production along successional and altitudinal gradients of subtropical monsoon evergreen broadleaved forests in Guangdong, China[J]. *Plant Ecology*, 2007, 188(1): 77-89.