

网络出版时间:2018-04-26 15:24

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.10.003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180426.1522.006.html>

藏东南色季拉山不同海拔森林土壤碳氮分布特征

杨红^{1,2,3}, 扶胜兰¹, 刘合满^{1,2}, 曹丽花², 曹舰艇², 郭丰磊²

(1 信阳农林学院, 河南 信阳 464000; 2 西藏农牧学院, 西藏 林芝 860000; 3 青藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000)

摘要 【目的】明确藏东南色季拉山不同海拔森林土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)、易氧化有机碳(Readily oxidized carbon, ROC)及全氮(Total nitrogen, TN)含量的垂直分布特征。【方法】以藏东南色季拉山不同海拔高度(3 000, 3 200, 3 500, 3 700 及 3 900 m)的森林土壤为研究对象, 采集 0~5, 5~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 cm 土层土壤样品, 通过测定 SOC、ROC 及 TN 含量, 研究不同海拔高度及剖面土壤 SOC、ROC 及 TN 含量垂直分布特征, 阐述 SOC、ROC 及 TN 含量的海拔及剖面效应。【结果】在土壤剖面垂直分布上, SOC、ROC 和 TN 含量均随土层深度增加而降低, 且主要集中在表层(0~5 cm)土壤中。随着土层深度增加, 土壤易氧化有机碳占有有机碳的比例(ROC/SOC)总体呈增加趋势, 而土壤 C/N(SOC/TN)的变化趋势并不一致。SOC 和 ROC 平均含量随海拔高度的增加均呈增大趋势; 除 3 500 m 海拔高度 TN 含量较低外, 其余各海拔的 TN 含量均随海拔高度增加而增大; ROC/SOC 随海拔增加总体呈减小趋势, 而 C/N 无明显变化规律。【结论】色季拉山森林 SOC、ROC 和 TN 主要储存于表层土壤和高海拔区域土壤中, 在未来气候变暖的背景下, 高海拔区域表层土壤将成为大气二氧化碳浓度升高的潜在碳源。

关键词 色季拉山; 森林土壤; 土壤有机碳; 易氧化有机碳; 土壤全氮

[中图分类号] S718.55

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2018)10-0015-09

Distribution characteristics of carbon and nitrogen in forest soil at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet

YANG Hong^{1,2,3}, FU Shenglan¹, LIU Heman^{1,2}, CAO Lihua², CAO Jianting², GUO Fenglei²

(1 Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang, Heman 464000, China;

2 Xizang Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi, Tibet 860000, China;

3 Tibet Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Ministry of Education, Linzhi, Tibet 860000, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to investigate the vertical distribution characteristics of soil organic carbon (SOC), readily oxidized carbon (ROC) and total nitrogen (TN) in alpine regions at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet. 【Method】 Soil samples at different altitudes (3 000, 3 200, 3 500, 3 700 and 3 900 m) of Sejila Mountains were collected and the contents of SOC, ROC and TN were measured at different layers (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 and 40-50 cm). Then, the vertical distribution characteristics of SOC, ROC and TN contents and the altitude and section effects were analyzed. 【Result】 The SOC, ROC and TN contents decreased with the depth of soil layer in vertical distribution and mainly concentrated in the surface soil. With the increase of soil depth, ROC/SOC showed an increasing trend, while C/N trend was not consistent. In the altitude distribution, the SOC and ROC average contents showed an increasing trend with the increase in altitude, while TN contents increased with height except for

[收稿日期] 2017-07-07

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41461055, 41561052, 31360119); 西藏农牧学院“雪域英才工程”人才发展支持计划项目(2015XYD06); 西藏农牧学院研究生创新计划项目(YJS2016-7); 2016年高校青年教师创新支持计划项目(QCZ2016-49); 西藏科技厅-农牧学院厅联合基金项目(2016-NY-03)

[作者简介] 杨红(1991-), 男, 甘肃甘南人, 在读硕士, 主要从事土壤养分循环研究。E-mail: hyang2016@163.com

[通信作者] 刘合满(1979-), 男, 河南南阳人, 副教授, 博士, 主要从事高原土壤物质循环与环境效应研究。E-mail: liuh-m@163.com

3 500 m. The ROC/SOC decreased with increasing altitude, and C/N had no significant change. 【Conclusion】 SOC, ROC and TN were mainly stored in the surface soil at high altitudes in forests in Sejila Mountains. High-altitude surface soil could be a potential carbon source for elevated atmospheric carbon dioxide concentrations in future climate.

Key words: Sejila Mountains; forest soil; soil organic carbon; readily oxidized carbon; soil total nitrogen

森林是最重要的陆地生态系统之一,全球有超过 $4.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 的森林生态系统,森林碳库作为最大的陆地碳库之一,在调节全球碳平衡和减缓大气 CO_2 浓度上升等方面有不可替代的作用。相关研究表明,森林植被和地下 1 m 深土壤碳储量(纯 C)约为 1 146 Pg,其中土壤有机碳储量(纯 C)约为 787 Pg,超过森林生态系统碳储量的 $2/3$ ^[1],而森林土壤碳库主要受森林植被枯落物的矿化分解速率、植物根系分泌物及海拔高度等因素的影响^[2]。辜翔等^[3]研究表明,不同植被类型枯落物矿化分解产物及植物根系分泌物将会导致其下土壤有机碳库存在明显的差异。海拔作为影响森林群落结构和物种组成的重要要素之一,包含了多种环境因子的梯度效应,随着海拔变化,生态系统的气候、植被类型、土壤养分等要素均会发生显著的变化^[4]。已有研究表明,随着海拔的升高,大气及土壤温度逐渐降低,导致土壤动物及微生物的活性降低,造成微生物分解枯落物的速率下降,从而使得高海拔地区土壤有机碳含量明显高于低海拔地区^[5]。土壤中地表植被生长的主要营养源除了有机碳之外,还有一个重要指标即氮素,由于二者在森林生态系统中占有很大比重,因此碳氮含量常被作为土壤质量和土地可持续利用评价的重要指标^[6]。

土壤氮素作为重要的生态因子和土壤肥力的物质基础,其动态变化不仅影响整个生态系统的平衡和稳定,而且对缓解全球温室效应也产生着深远影响^[7]。不同研究区域土壤氮元素的分布特征存在差异,丁咸庆等^[8]对土壤碳氮素分布特征的研究表明,随着土壤深度的增加,土壤氮素含量呈降低趋势。王琳等^[9]对贡嘎山东坡自然垂直带土壤有机质和氮素分布特征的研究表明,碳氮比随海拔升高而升高,在土壤剖面中的分布因植被类型不同而有所差异。除此之外,不同时空尺度下土壤质量存在差异,土壤质量的差异会使得植被类型及土壤性状不同,从而影响土壤有机碳和氮的动态变化,导致不同时空尺度下土壤氮的分布特征出现明显差异。

色季拉山位于藏东南林芝地区,是西藏的主要林区之一,由于其海拔跨度较大,不同海拔区域森林

长期所处的生态及气候条件差异明显,导致不同海拔森林及土壤类型、水热条件、干扰程度等存在差异,从而影响土壤碳库组分在海拔梯度上的垂直分布规律。本研究以藏东南色季拉山不同海拔高度的森林土壤为对象,研究土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、易氧化有机碳(ROC)含量以及 SOC 含量与 TN 含量的比值(C/N)、易氧化有机碳占有有机碳的比例(ROC/SOC)等垂直分布特征,以期为进一步揭示高寒森林生态系统土壤碳库组分及其垂直分布特征提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

藏东南色季拉山地处雅鲁藏布江中下游,隶属念青唐古拉山脉,主峰海拔 5 200 m 左右。随海拔降低,植被分布主要为高寒草甸、高山寒带灌丛、亚高山寒温带暗针叶林、松林、落叶阔叶林和山地温带针阔混交林。由于雅鲁藏布江的水气通道作用,研究区(3 000~3 900 m, 29.65°~29.70° N, 94.71°~94.89° E)受印度洋暖湿季风的影响,处于亚高山寒温带半湿润区,冬春少雨,夏秋雨丰,年降水量 650~1 134 mm,降雨主要集中在 6—9 月;平均相对湿度 78%;年平均气温 $-0.73 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 月平均气温 $-7.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 7 月平均气温 $9.8 \text{ }^\circ\text{C}$;土壤以山地棕壤和酸性棕壤为主。

在色季拉山,急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *Smithii*)、林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiersis* Cheng et)和川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)是主要乔木层组成树种,是构成群落外貌的主要建群种。随海拔高度变化,植被分布具有明显规律性,在海拔 3 000~3 200 m,以杜鹃属(*Rhododendron*)灌木林为主,林下多蕨菜(*Pteridium excelsum* (Bl.) Ching)、五裂蟹甲草(*Parasenecio quinquelobus*)、峨眉蔷薇(*Rosa omelensis*)等;在海拔 3 200~3 500 m,以川滇高山栎林为主,林下主要有凉山悬钩子(*Rubus fockeanus* Kurz)、五裂蟹甲草及宽叶苔草(*Carex siderosticta* Hance)等;在海拔 3 500~3 700 m,以林芝云杉林为主,林下主要有杯

萼忍冬(*Lonicera inconspicua*)、柳叶忍冬(*Lonicera lanceolata* Wall. var. *Lanceolat*)、峨眉蔷薇、越桔忍冬(*Lonicera myrtillos* Hook. f. et Thoms)、小舌紫菀(*Aster albescens* Hand. Mazz)、长芽绣线菊(*Spiraea longigemmis* Maxim);在海拔 3 700~3 900 m,广布着急尖长苞冷杉原始森林,林下多为杜鹃属灌木及锈毛西南花楸(*Sorbus rehderiana* Koehne var. *cupreonitens* Hand. Mazz)、宽叶苔草、直立悬钩子(*Rubus stans* Focke)等。

1.2 样品采集及测定

选择藏东南色季拉山不同海拔高度森林土壤作为研究对象,于 2016 年 9 月在海拔 3 000,3 200,3 500,3 700 及 3 900 m 区域各选择 1 块样地,每样地选择 3 个样点作为重复,在每个样点分别采集 6 个土层土壤样品,即 0~5,5~10,10~20,20~30,30~40,40~50 cm 土层土壤样品,共采集土壤样品 90 个,装入自封袋带回实验室,室内去除石块、植物残体等非土壤成分后自然风干,用于以下指标的测定:土壤有机碳含量采用重铬酸钾-外加加热法测定;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定;土壤易氧化有机碳(ROC)采用 333 mmol/L KMnO_4 氧化法测定,具体方法为:在 25 °C 条件下称取过 0.25 mm 筛的风干土样 2 g,装入 100 mL 离心管中,加 333 mmol/L KMnO_4 溶液 25 mL,盖好离心管盖,250 r/min 条件下振荡 1 h,同时做空白样(CK 不加土壤样品),并在 4 000 r/min 条件下离心 5 min 后,取上清液 4 mL 用去离子水稀释 250 倍,然后在波长 565 nm 的分光光度计上进行比色,测定稀释样品的吸光率,由 CK 与土壤样品的吸光率之差计算高锰酸钾溶液浓度的变化量,根据高锰酸钾的消耗量,即可求出土壤样品的 ROC 含量(每消耗 1 mmol 高锰酸钾溶液相当于氧化 9 mg 碳)。

1.3 数据分析

采用 Excel 2007 进行数据处理,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)法分析不同海拔高度 SOC、ROC 及 TN 含量之间的差异性,采用 Origin 9.0(Originlab 公司,美国)制图。

不同海拔高度 SOC、ROC 及 TN 平均含量的计算公式如下:

$$\text{SOC(TN、ROC)平均含量} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times H_i}{\sum_{i=1}^n H_i}$$

式中: C_i 为某一土层土壤有机碳、易氧化有机碳或全氮含量(g/kg), H_i 为某一土层的厚度(cm)。

2 结果与分析

2.1 不同海拔森林土壤 SOC 含量的分布特征

由图 1 可知,色季拉山不同海拔高度森林土壤的 SOC 含量(y)随土层深度(x)的变化关系可用幂函数表示,在海拔 3 000 m 为: $y = 280.96x^{-0.773}$, $R = 0.990$;海拔 3 200 m 为: $y = 272.99x^{-0.778}$, $R = 0.955$;海拔 3 500 m 为: $y = 344.77x^{-0.699}$, $R = 0.993$;海拔 3 700 m 为: $y = 231.72x^{-0.699}$, $R = 0.988$;海拔 3 900 m 为: $y = 200.55x^{-0.341}$, $R = 0.996$;可见,各拟合公式的幂指数均小于 0,表明各海拔高度 SOC 含量与土层深度呈极显著负相关,不同海拔高度处 SOC 含量表现出明显的表层富集现象,且主要富集在 0~5 cm 土层。0~5 cm 土层的 SOC 含量与其他各土层之间的差异均达极显著水平($P < 0.001$),5~10 cm 土层 SOC 含量除了与 10~20 cm 土层之间差异不显著之外,与其余各土层之间的差异均达显著水平($P < 0.05$)。在剖面垂直分布上,不同海拔高度 SOC 土壤剖面分布存在较大差异,空间变异性以海拔 3 200 m 最大,变异系数为 129.71%,其次依次为海拔 3 000 m(变异系数 102.39%),3 500 m(93.23%),3 700 m(69.44%)和 3 900 m(41.78%)。

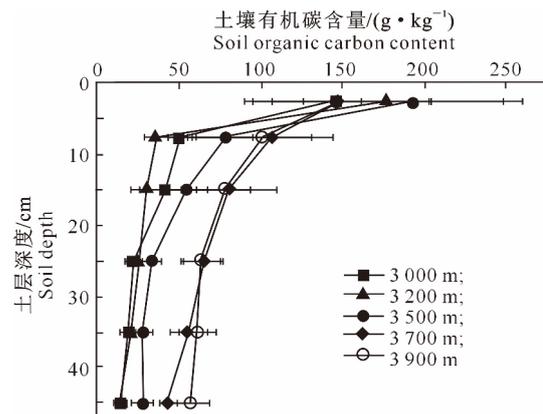
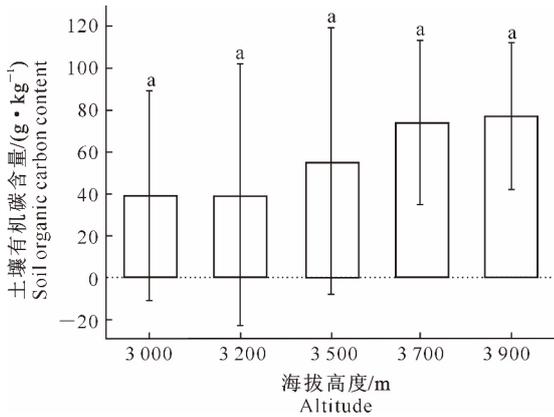


图 1 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤 SOC 含量随土层深度的变化

Fig. 1 Variation of SOC content with soil depth at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet

由图 2 可知,藏东南色季拉山土壤 SOC 平均含量随海拔升高而增大,海拔从 3 000 m 增加至 3 900 m, SOC 平均含量从 (38.80 ± 49.83) g/kg 增加至 (76.89 ± 35.50) g/kg,海拔 3 900 m 区域 SOC 的平均含量分别是海拔 3 700,3 500,3 200 和 3 000 m 区域的 1.03,1.39,1.96 和 1.98 倍,但各海拔高度 SOC 含量之间的差异均未达显著水平($P > 0.05$)。



图柱上标不同小、大写字母表示差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)。图 4,6,8 同

Different capital lowercase or capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) or extremely significant differences ($P < 0.01$). Fig. 4,6,8 are the same

图 2 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤 SOC 平均含量的比较

Fig. 2 Comparison of SOC content in forest soil at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet

2.2 不同海拔森林土壤 TN 含量的分布特征

由图 3 可以看出,色季拉山 3 000~3 900 m 海拔高度下 TN 含量随土壤深度的变化趋势与 SOC 含量基本相同,将 5 个海拔高度下的 TN 含量在土壤垂直剖面上的分布按土层进行平均后,可知 TN

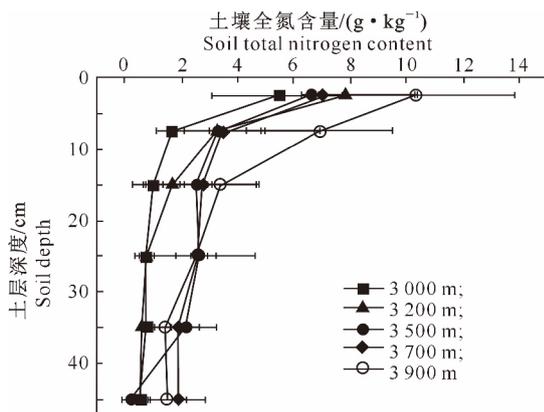


图 3 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤 TN 含量随土层深度的变化

Fig. 3 Variation of TN content with soil depth at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet

2.3 不同海拔森林土壤 ROC 含量的分布特征

ROC 是表征土壤肥力变化及碳库稳定性的重要指标之一,是 SOC 中周转最快、最敏感的组分。由图 5 可知,在剖面垂直分布上,ROC 含量(y)随着土层深度(x)的增加而降低,二者之间的关系可用幂函数 $y = 11.746x^{-0.152}$ ($R = 0.982$) 表示,表明 ROC 含量与土层深度之间呈极显著负相关,且 0~5

含量(y)与土层深度(x)的关系可用幂函数 $y = 14.451x^{-0.618}$ ($R = 0.991$) 表示,表明 TN 含量与土层深度呈极显著负相关。海拔 3 000,3 200,3 500,3 700 和 3 900 m 区域 0~5 cm 土层 TN 含量分别为 (5.47 ± 2.39)、(6.65 ± 2.25)、(8.88 ± 2.43)、(7.01 ± 0.71) 和 (10.37 ± 5.48) g/kg,分别占各海拔 0~50 cm 土层 TN 总量的 54.51%,38.03%,56.31%,35.92% 和 39.74%。0~5 cm 土层 TN 含量与其他各土层之间的差异均达极显著水平($P < 0.01$),5~10 cm 与 20~30 cm 土层之间的差异达显著水平($P < 0.05$),与 30~40 和 40~50 cm 土层之间的差异达极显著水平($P < 0.01$)。

由图 4 可知,海拔 3 000,3 200,3 500,3 700 及 3 900 m 区域土壤 TN 平均含量分别为 (1.30 ± 0.54)、(2.50 ± 0.77)、(1.94 ± 0.81)、(2.86 ± 1.49) 和 (3.49 ± 1.71) g/kg,各海拔高度之间差异均未达显著水平($P > 0.05$)。除海拔 3 500 m 区域土壤 TN 平均含量较低外,其余各海拔高度下土壤 TN 平均含量(y)均随海拔(x)的升高呈增加趋势,且二者之间的关系可用线性函数 $y = 0.474x + 0.994$ ($R = 0.890$) 表示。在相同土层中,土壤 TN 平均含量随海拔高度的变化趋势与 TN 平均含量的变化趋势相同。

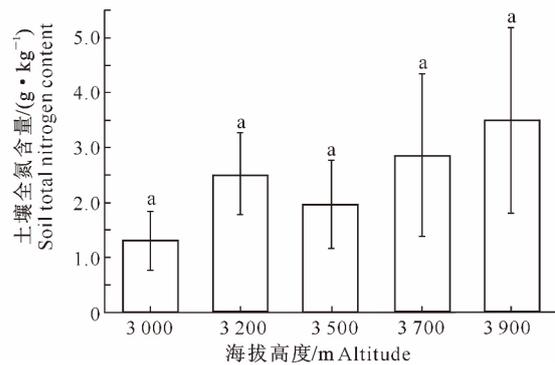


图 4 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤 TN 平均含量的比较

Fig. 4 Comparison of TN content in forest soil at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet

cm 土层 ROC 含量与其他各土层之间的差异均达极显著水平($P < 0.01$),5~10 cm 土层与 40~50 cm 土层之间差异达显著水平($P < 0.05$),其他各土层之间差异均未达显著水平($P > 0.05$)。ROC 含量垂直空间变异以海拔 3 200 m 区域最大,变异系数为 24.07%;海拔 3 500 m 区域垂直空间变异最小,变异系数为 8.34%。将各海拔高度下土壤 ROC 含量

垂直分布分为 2 大土层来看:在 0~20 cm 土层, ROC 含量变化较大;在 20~50 cm 土层, ROC 含量变化较小。这主要是因为表层土壤作为深层土壤与大气的连接层,其氧气含量、微生物种类和数量、受

干扰程度等均高于下层土壤;其次,表层土壤作为凋落物与深层土壤的连接层,是各种养分高收入和高产出的关键层。

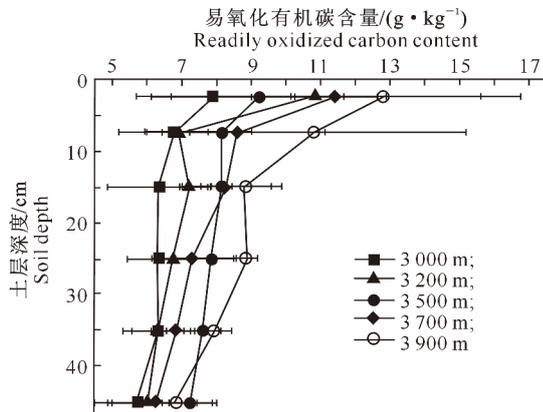


图 5 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤 ROC 含量随土层深度的变化

Fig. 5 Variation of ROC content with soil depth at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet

由图 6 可知,色季拉山海拔 3 000,3 200,3 500, 3 700 及 3 900 m 区域土壤 ROC 平均含量分别为 (6.41 ± 1.19)、(7.05 ± 0.89)、(7.74 ± 0.83)、(7.91 ± 1.47)和(8.87 ± 1.33) g/kg。各海拔 ROC 平均含量(y)随着海拔(x)升高而增加,二者之间的关系可用线性函数 $y=0.575x+5.87(R=0.984)$ 表示,可见 ROC 平均含量与海拔高度之间呈极显著正相关关系。海拔 3 900 区域土壤 ROC 平均含量与 3 000 m 区域之间的差异达极显著水平($P<0.01$),与海拔 3 200 区域之间差异达显著水平($P<0.05$),

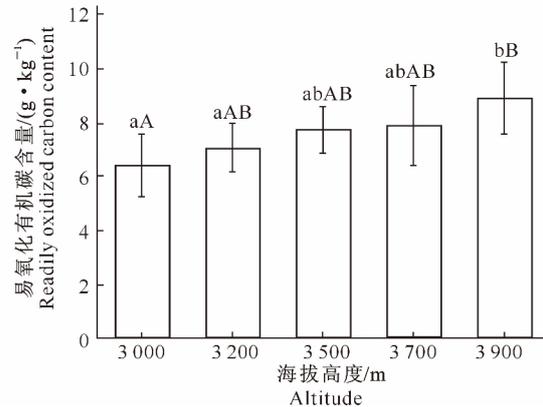


图 6 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤 ROC 平均含量的比较

Fig. 6 Comparison of ROC content in forest soil at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet

其余各海拔高度之间差异均未达显著水平($P>0.05$)。

2.4 不同海拔森林土壤 C/N(SOC/TN)的变化

由表 1 可知,色季拉山各海拔高度下不同土层 C/N 之间存在差异。随着土层深度的增加,海拔 3 700 m 区域土壤 C/N 呈增加趋势,海拔 3 200 m 区域土壤 C/N 呈降低趋势,其余海拔高度下的土壤 C/N 均呈先增加后降低的趋势。垂直空间变异性以海拔 3 900 m 区域最大,变异系数为 45.21%;以海拔 3 500 m 区域最小,变异系数为 15.82%。

表 1 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤碳氮比的比较

Table 1 Soil carbon to nitrogen ratios at different altitudes

土层深度/cm Soil depth	海拔/m Altitude				
	3 000	3 200	3 500	3 700	3 900
0~5	26.78 aA	16.64 aB	21.45 aAB	21.78 aAB	14.42 aBC
5~10	30.10 aA	10.99 bB	23.68 aA	23.82 aAB	14.62 aAB
10~20	41.84 aA	11.96 bcA	20.25 aA	31.65 abA	22.99 abA
20~30	30.74 aA	9.63 bdA	17.86 aA	41.52 abA	25.16 abA
30~40	24.78 aA	7.09 deA	17.06 aA	44.75 abA	43.20 bA
40~50	30.49aAB	4.40 efB	15.46 aAB	52.74 bA	38.01 abAB
均值 Average	30.79	10.11	19.29	36.04	26.40
标准差 SD	5.91	4.21	3.05	12.30	11.94
变异系数/% CV	19.21	41.65	15.81	34.13	45.22

注:同列数据后标不同小写字母表示不同土层间差异显著($P<0.05$),同行数据后标不同大写字母表示不同海拔高度间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in each column indicate significant differences between soil layers ($P<0.05$), and different capital letters in each row indicate significant differences between altitudes ($P<0.05$).

对土壤 C/N 值随海拔高度变化的进一步分析 表明(表 1),土壤 C/N 平均值在不同海拔高度下差

异较大,表现为 $3\ 200\ \text{m} < 3\ 500\ \text{m} < 3\ 900\ \text{m} < 3\ 000\ \text{m} < 3\ 700\ \text{m}$ 。将本研究区分为 $3\ 000 \sim 3\ 200$ 和 $3\ 500 \sim 3\ 900\ \text{m}$ 2 个区域进行分析,则海拔 $3\ 000 \sim 3\ 200\ \text{m}$ 区域土壤 C/N 为 20.62 ± 9.57 ,海拔 $3\ 500 \sim 3\ 900\ \text{m}$ 区域土壤 C/N 为 31.22 ± 6.82 ,即土壤 C/N 在海拔高度上表现为高海拔 > 低海拔。

2.5 不同海拔森林土壤易氧化有机碳占有有机碳的比例(ROC/SOC)

由图 7 可知,随土层深度增加,ROC/SOC 总体呈增加趋势,且以海拔 $3\ 200\ \text{m}$ 区域土壤 ROC/SOC 的增加幅度最大,垂直空间变异系数为 64.01% ;而海拔 $3\ 900\ \text{m}$ 区域 ROC/SOC 的增加幅度最小,垂直空间变异系数为 16.17% 。将 5 个海拔高度的 ROC/SOC 值按土层进行平均,然后将其与土层深度进行拟合,可得到 ROC/SOC(y)与土层深度(x)之间的关系可用幂函数表示为: $y = 4.017x^{0.538}$ ($R =$

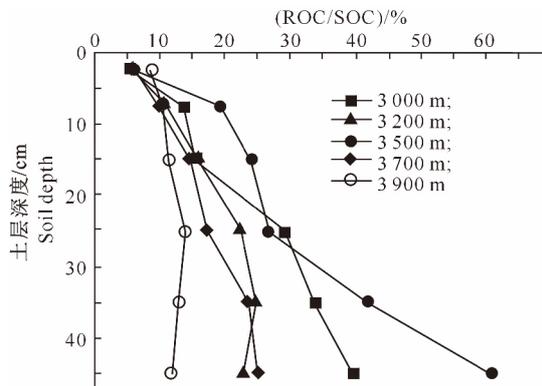


图 7 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤 ROC/SOC 值随土层深度的变化

Fig. 7 Variation of ROC/SOC with soil depth at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet

3 讨论

3.1 色季拉山不同海拔森林土壤 SOC 的分布特征及影响因素

本研究发现,色季拉山各海拔高度下的 SOC 含量均随土层深度的增加呈逐渐降低趋势,表明土层深度对 SOC 含量有明显影响,这与前人的研究结果^[10-11]相一致。各海拔高度下不同土层之间 SOC 含量存在显著差异,这种差异性主要在于本研究区森林地表聚集了大量枯落物,枯落物返还至土壤中的 SOC 含量由土壤上层至下层呈递减趋势^[12]。同时,随着土层深度的增加,土壤透气性逐渐降低,植物根系比较粗大,难以分解,可供降解的有机质来源缺乏,加之微生物数量下降,从而导致土壤深层

0.996),表明 ROC/SOC 与土层深度呈极显著正相关。在 $0 \sim 5\ \text{cm}$ 土层,高海拔区域土壤 ROC/SOC 较低海拔区域大,其中海拔 $3\ 900\ \text{m}$ 区域土壤 ROC/SOC 为 8.61% ,海拔 $3\ 000\ \text{m}$ 区域土壤 ROC/SOC 为 5.40% 。

由图 8 可知,各海拔之间相比,除海拔 $3\ 200\ \text{m}$ 区域土壤 ROC/SOC 平均值高于海拔 $3\ 000\ \text{m}$ 区域外,其余各海拔高度下的土壤 ROC/SOC 平均值均小于海拔 $3\ 000\ \text{m}$ 区域,即随海拔高度增加 ROC/SOC 平均值呈降低的趋势,土壤 ROC/SOC 平均值(y)与海拔高度(x)的关系可用线性函数表示为: $y = -0.016x + 75.178$ ($R = 0.841$)。各海拔高度下土壤 ROC/SOC 平均值差异明显,海拔 $3\ 200\ \text{m}$ 与 $3\ 700$ 、 $3\ 900\ \text{m}$ 区域之间差异达显著水平 ($P < 0.05$),但与海拔 $3\ 000$ 和 $3\ 500\ \text{m}$ 区域之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

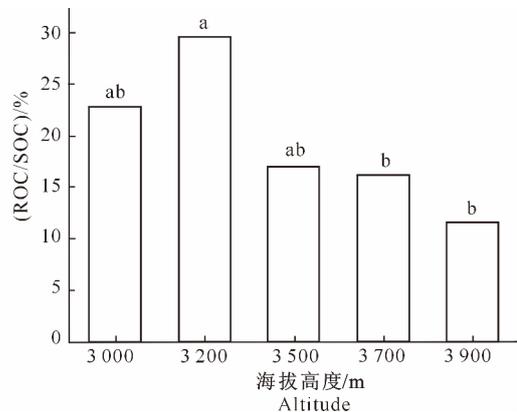


图 8 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤平均 ROC/SOC 值的比较

Fig. 8 Comparison of ROC/SOC in forest soil at different altitudes in Sejila Mountains, Southeast Tibet

SOC 含量较低^[13]。

周晨霓等^[14]对色季拉山森林 SOC 分布特征的研究发现,SOC 含量随海拔的升高而增加。本研究结果与其一致,原因在于高海拔区域土壤常年处于低温缺氧条件下,季节性冻融普遍,大气降水较多,土壤相对湿润,微生物数量较少,丰富度较小,导致 SOC 的累积速率较大而分解缓慢;在低海拔区域,土壤温度较高,含水量较低,土壤生物群落组成复杂,使得 SOC 易被矿化分解,从而使 SOC 含量较低^[15]。同时,森林 SOC 含量取决于植被类型、凋落物的输入和分解。本研究发现,色季拉山高海拔区域分布着急尖长苞冷杉原始林,其郁闭度大,平均年龄 200 年,为过熟原始林,处于衰老死亡阶段,相对于低海拔高度的其他林型,其凋落物层甚为发

达^[16],而凋落物层又是下层土壤养分的主要来源,故高海拔 SOC 含量高于低海拔区域。另外,植被类型、气候特点以及土壤性质的差异,均会导致不同土层 SOC 含量分布的差异^[17]。本研究中,样点之间海拔落差最大可达 900 m,这使得不同样点的气候特点、植被类型及成土母质存在较大的异质性,形成了 SOC 含量随海拔增加而增加的空间分布特征。

3.2 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤 ROC 的分布及占 SOC 的比例

作为土壤活性有机碳的重要指标和指示因子之一,ROC 变化可以更加准确地显示其与 SOC 变化的关系,且对 SOC 有更强的指示性和敏感性^[18]。刘正刚等^[19]研究表明,ROC 随土层深度的加深而递减,且与 SOC 含量之间呈显著正相关。本研究结果同样表明,ROC 含量随土层深度的增加而减少,且与 SOC 含量关系密切,二者之间呈极显著正相关(不同海拔 ROC 含量(x)与 SOC 含量(y)的关系,在海拔 3 000 m 为 $y=0.014x+5.886, R=0.958$;海拔 3 200 m 为 $y=0.028x+6.005, R=0.992$;海拔 3 500 m 为 $y=0.010x+7.536, R=0.887$;海拔 3 700 m 为 $y=0.046x+4.274, R=0.971$;海拔 3 900 m 为 $y=0.059x+4.385, R=0.962$)。可见,ROC 分布特征在很大程度上取决于 SOC 的分布特征^[20]。同时,森林 ROC 在不同土层分布的差异主要与植被根系分布、生物活动、人为干扰及有机质来源等有关^[21],森林枯落层在为土壤提供大量有机质的同时,使表层土壤具有较高的养分浓度和较好的水分条件,从而为植物细根向表土层聚集提供了良好的条件^[22]。然而,ROC 来源于微生物对枯落物和植物根系分泌物的分解^[23],故表层 ROC 含量显著高于深层土壤。从海拔的垂直分布上来看,ROC 与 SOC 含量分布规律一致,即亦随海拔高度上升而呈增加趋势。

一般而言,ROC/SOC 能反映 SOC 库的稳定性,ROC 所占比例越高,土壤碳活性越大,SOC 库越不稳定^[24]。本研究发现,在色季拉山 3 000 m 海拔以上区域,随着海拔高度的增加,ROC/SOC 值总体呈减小趋势,这主要是因为高海拔低温缺氧少生物的环境减缓了 SOC 向 ROC 的转化,致使高海拔区域土壤的 SOC 含量远高于 ROC 含量,两者之差较大,而低海拔区域的 ROC 与 SOC 含量均较低,两者之差较小,使得 ROC/SOC 值较大,从而表现为高海拔 ROC/SOC 值较低海拔小。可见,在未来气候变暖背景下,对色季拉山而言,短期内低海拔区的土壤

碳排放可能会高于高海拔区,但就长期而言,高海拔区碳库才是大气 CO₂ 升高的潜在碳源。

3.3 藏东南色季拉山不同海拔森林土壤 TN 的分布及 C/N 特征

氮是森林生态系统生产力构成的重要因素,是植物生长发育的必需元素,且 90% 以上的氮存在于森林土壤中^[25]。耿增超等^[26]的研究表明,随着土层深度增加 TN 含量呈减小趋势,且与 SOC 之间呈极显著正相关。本研究结果同样表明,TN 含量(y)与 SOC 含量(x)之间呈极显著正相关关系(海拔 3 000 m: $y=0.038x-0.174, R=0.994$;海拔 3 200 m: $y=0.031x+1.356, R=0.920$;海拔 3 500 m: $y=0.044x-0.587, R=0.998$;海拔 3 700 m: $y=0.047x-0.683, R=0.958$;海拔:3 900 m 为 $y=0.099x-4.101, R=0.988$)。从海拔的垂直分布上看,TN 含量与海拔高度呈显著正相关,这与前人研究结果^[27]一致。究其原因,是由于随海拔高度的增加,土壤含水量呈增加趋势,土壤温度和 pH 呈降低趋势,较低的土壤温度和 pH 及较高的含水量环境,使土壤微生物活动趋于缓慢,植物凋落物很难被微生物分解而沉积进入到土壤中,从而使高海拔区域 TN 含量高于低海拔区域^[28]。

将本研究区 5 个海拔高度分为海拔 3 000~3 200 和 3 500~3 900 m 2 个区域后,土壤 C/N 在海拔高度上表现为高海拔>低海拔,这与前人的研究结果^[29]一致。这可能是由于土壤 C/N 在很大程度上受植被类型的影响,如周志文等^[30]研究表明,针叶林土壤 C/N 高于阔叶林。而本研究中,低海拔主要分布着阔叶林,高海拔分布着针叶林,故表现为高海拔土壤 C/N 高于低海拔区域。同时,相对于低海拔而言,高海拔区域低温缺氧湿度大的土壤环境不利于微生物活动,严重抑制了土壤 SOC 的矿化速率,使得高海拔区域 SOC 大量累积。另外,由于高海拔区域季节性冻融明显,导致土壤氮素淋溶损失量较大^[31],从而导致高海拔 C/N 大于低海拔区域。罗由林等^[32]研究表明,成土母质、土壤类型和地形等均会对土壤 C/N 产生显著影响。本研究区位于海拔 3 000~3 900 m 区域,各样地之间地形、成土母质、小气候、植被及土壤类型等因素均可能存在差异,故本研究区土壤 C/N 的这种分布格局也可能是因上述差异所导致。目前,关于本研究区地形、成土母质、小气候、植被及土壤类型等因素对土壤 C/N 的影响机制尚未见报道,故在以后的工作中尚待进一步研究。

4 结 论

1) 在藏东南色季拉山 3 000~3 900 m 海拔 0~50 cm 土壤中,就剖面垂直分布而言,SOC、ROC 和 TN 含量均随着土壤深度的增加而减少,且均具有明显的表聚现象,在 0~5 cm 土层 3 个指标的含量均显著高于下层土壤;就海拔垂直分布而言,3 个指标的含量总体上均随着海拔的升高而增加。

2) 随土层深度的增加,土壤 C/N 变化规律不明显,而 ROC/SOC 总体呈增加趋势;不同海拔高度下土壤 C/N 值为 11.79~36.04,且表现为 3 200 m < 3 500 m < 3 900 m < 3 000 m < 3 700 m,ROC/SOC 随海拔的增加总体呈降低趋势。

[参考文献]

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] 葛 萍. 安徽大别山海拔梯度上森林土壤碳氮动态研究 [D]. 上海:华东师范大学,2014.
Ge P. Soil nitrogen and nitrogen dynamics in forest soils at altitude gradient in Dabie Mountains, Anhui Province [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [3] 辜 翔,张仕吉,项文化,等. 中亚热带 4 种森林类型土壤活性有机碳的季节动态特征 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(10): 1064-1076.
Gu X, Zhang S J, Xiang W H, et al. Seasonal dynamics of active soil organic carbon in four subtropical forests in Southern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(10): 1064-1076.
- [4] 方江平. 西藏色季拉山土壤的性状与垂直分布 [J]. *山地研究*, 1997, 15(4): 228-233.
Fang J P. Properties and vertical distribution of soil on shergyla mountain in Xizang [J]. *Mountain Research*, 1997, 15(4): 228-233.
- [5] 胡 健,吕一河,傅伯杰,等. 祁连山排露沟流域土壤水热与降雨脉动沿海拔梯度变化 [J]. *干旱区研究*, 2017, 34(1): 151-160.
Hu J, Lü Y H, Fu B J, et al. Soil hydrothermal variation and rainfall pulses along altitudinal gradient in Pailugou watershed in the Qilian Mountain [J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(1): 151-160.
- [6] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2010.
Huang C Y. Soil science [M]. 3rd. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2010.
- [7] 李 龙,姚云峰,秦富仓,等. 黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1306-1312.
Li L, Yao Y F, Qin F C, et al. Spatial distribution pattern of soil nitrogen in Huanghuadianzi watershed and related affecting factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5): 1306-1312.
- [8] 丁咸庆,马慧静,朱晓龙,等. 大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征 [J]. *环境科学*, 2015, 36(10): 3809-3815.
Ding X Q, Ma H J, Zhu X L, et al. Vertical distribution characteristics of typical forest soil organic nitrogen in Dawei Mountain [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(10): 3809-3815.
- [9] 王 琳,欧阳华,周才平,等. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征 [J]. *地理学报*, 2004, 59(6): 1012-1019.
Wang L, Ouyang H, Zhou C P, et al. Distribution characteristic of soil organic matter and nitrogen on the eastern slope of Mt. Gongga [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 1012-1019.
- [10] 胡慧蓉,胡庭兴,谭九龙,等. 华西雨屏区不同植被类型对土壤氮磷钾及有机碳含量的影响 [J]. *土壤*, 2014, 46(4): 630-637.
Hu H R, Hu T X, Tan J L, et al. Effects of different vegetation types on soil nitrogen, phosphorus, potassium and organic carbon in rainy area of west China [J]. *Soils*, 2014, 46(4): 630-637.
- [11] 王 宁,杨 雪,李世兰,等. 不同海拔红松混交林土壤微生物量碳、氮的生长季动态 [J]. *林业科学*, 2016, 52(1): 150-158.
Wang N, Yang X, Li S L, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon-nitrogen in the *Korean pine* mixed forests along elevation gradient [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(1): 150-158.
- [12] 陈小华,余雪标,薛 杨,等. 海南文昌 3 种森林类型凋落物及土壤有机碳现状分析 [J]. *热带作物学报*, 2014, 35(10): 2043-2049.
Chen X H, Yu X B, Xue Y, et al. Litter and soil soluble organic carbon feature of three vegetation types in Wenchang, Hainan island [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2014, 35(10): 2043-2049.
- [13] 蔡春轶,黄建辉. 四川都江堰地区桉楠林、杉木林和常绿阔叶林土壤 N 库的季节变化 [J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2540-2548.
Cai C Y, Huang J H. Seasonal dynamics of soil N pools under *Phoebe zhennan*, *Cunninghamia lanceolata* and evergreen broad-leaved forests in Dujiangyan Region, Sichuan, China [J]. *Acta Ecologica Sinicae*, 2006, 26(8): 2540-2548.
- [14] 周晨霓,马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征 [J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1246-1251.
Zhou C N, Ma H P. Distribution of labile organic carbon in soil as affected by vegetation typical of Sygera Mountains, Tibet, China [J]. *Acta Pedologica Sinicae*, 2013, 50(6): 1246-1251.
- [15] 龚 伟,胡庭兴,王景燕,等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后枯落物对土壤的影响 [J]. *林业科学*, 2007, 43(7): 112-119.
Gong W, Hu T X, Wang J Y, et al. Impacts of litter on soil in the natural evergreen broadleaved forests after artificial regeneration in southern Sichuan [J]. *Cientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(7): 112-119.

- [16] 陈 歆. 西藏东南地区色季拉山土壤养分空间变异性的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2007.
Chen X. Study on spatial variability of soil nutrients in mountain shegyla in the southeast of Tibet [D]. Nanning: Guangxi University, 2007.
- [17] 马和平, 郭其强, 刘合满, 等. 西藏色季拉山土壤微生物量碳和易氧化态碳沿海拔梯度的变化 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 163-166.
Ma H P, Guo Q Q, Liu H M, et al. Variations of soil microbial biomass and readily oxidizable organic carbon along elevation gradient in Sejila Mountain, Tibet [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 163-166.
- [18] 唐 政, 李继光, 李 慧, 等. 喀斯特土壤微生物和活性有机碳对生态恢复的快速响应 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1130-1135.
Tang Z, Li J G, Li H, et al. Rapid responses of soil microbes and active organic carbon to ecorestoration in Karst region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1130-1135.
- [19] 刘正刚, 裴柏洋, 王宪帅, 等. 岷江上游干旱河谷不同土地利用类型的土壤有机碳和易氧化态碳特征 [J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 24-27.
Liu Z G, Pei B Y, Wang X S, et al. Characteristics of SOC and ROC under different land use types at arid valley in the upper reaches of Minjiang River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3): 24-27.
- [20] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系 [J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 513-519.
- [21] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响 [J]. 林业科学, 2002, 38(4): 19-29.
Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, et al. The effects of land changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(4): 19-29.
- [22] Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depth related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forest [J]. Journal of Ecology, 1996, 84(2): 167-176.
- [23] 徐 侠, 王 丰, 栾以玲, 等. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1115-1121.
Xu X, Wang F, Luan Y L, et al. Soil readily oxidizable carbon along an elevation gradient of Wuyi Mountains in southeastern China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1115-1121.
- [24] 王晓君, 王宪帅, 黄丛德, 等. 岷江上游森林、干旱河谷交错带不同土地利用类型土壤有机碳和活性有机碳特征 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 167-172.
Wang X J, Wang X S, Huang C D, et al. Characteristics of soil organic carbon and labile organic carbon under different land use types at forest-drought valley ecotone in the upper reaches of Minjiang River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2): 167-172.
- [25] 徐 媛, 张军辉, 韩士杰, 等. 长白山阔叶红松林土壤无机氮空间异质性 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1627-1634.
Xu Y, Zhang J H, Han S J, et al. Spatial heterogeneity of soil inorganic nitrogen in a broad leaved-Korean pine mixed forest in Changbai Mountains of northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1627-1634.
- [26] 耿增超, 姜 林, 李珊珊, 等. 祁连山中段土壤有机碳和氮素的剖面分布 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 665-672.
Geng Z C, Jiang L, Li S S, et al. Profile distribution of organic carbon and nitrogen in major soil types in the middle of Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 665-672.
- [27] 马和平, 郭其强, 刘合满, 等. 西藏色季拉山东麓垂直带土壤碳氮分布特征及其影响因素 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 91-96.
Ma H P, Guo Q Q, Liu H M, et al. Distribution and affecting factors of soil organic carbon and total nitrogen along the altitudinal [J]. Journal of Northwest A and F University(Nat Sic Ed), 2013, 41(1): 91-96.
- [28] Davidson E A, Janssens I A, Liu Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems moving beyond Q10 [J]. Global Change Biology, 2006, 12(2): 154-164.
- [29] 张广帅, 邓浩俊, 杜 锟, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征: 以云南省小江流域为例 [J]. 生态学报, 2016, 36(3): 675-687.
Zhang G S, Deng H J, Du K, et al. Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: a case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 675-687.
- [30] 周志文, 潘剑君, 居为民, 等. 神农架不同坡位 3 种林型土壤碳氮比分布特征 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 210-217.
Zhou Z W, Pan J J, Ju W M, et al. Distribution of soil C : N ratio in three forest types on different slope positions in Mt Shennongjia, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 210-217.
- [31] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 等. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤氮素淋溶损失的影响 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 439-448.
Gou X L, Wu F Z, Yang W Q, et al. Effect of changes in seasonal freeze-thaw pattern on nitrogen loss from leaching in the alpine forest soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(2): 439-448.
- [32] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 177-185.
Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil C : N ratio and its influence factors at a county scale in hilly area of Mid-Sichuan Basin, Southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 177-185.