

DOI: 10.5846/stxb201803240583

王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 唐立涛, 所尔阿芝, 罗雪萍, 李洁, 王长庭. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征. 生态学报, 2019, 39(11):

Wang Y L, Zi H B, Cheng R X, Tang L T, Suoer Azhi, Luo X P, Li J, Wang C T. Forest soil organic carbon and nitrogen storage and characteristics of vertical distribution in Qinghai Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11):

青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征

王艳丽¹, 字洪标², 程瑞希¹, 唐立涛², 所尔阿芝¹, 罗雪萍², 李洁¹, 王长庭^{2,*}

1 西南民族大学生命科学与技术学院, 成都 610041

2 西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041

摘要: 森林土壤在调节森林生态系统碳、氮循环和减缓全球气候变化中起着关键的作用。但是, 由于林型、林龄以及环境因子(海拔)的差异, 至今对于森林土壤碳、氮储量的估算依然存在极大的不确定性。因此, 本研究利用森林土壤实测数据估算了青海森林土壤有机碳、氮密度和碳、氮储量, 分析了土壤有机碳、氮密度的垂直分布格局。结果表明: 1) 土壤有机碳密度随海拔的增加呈单峰曲线变化, 在海拔 3100—3400 m 达到最大 34.33 kg/m²; 氮密度随海拔的增加而增加, 范围为 1.39—2.93 kg/m²。2) 在 0—30 cm 土层, 土壤有机碳、氮密度均随土层的增加而降低, 范围分别为 3.84—4.63 kg/m²、0.22—0.27 kg/m²。3) 青海省森林土壤碳储量为 1098.70 Tg, 氮储量为 61.78 Tg。4) 海拔与氮含量和密度之间存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$, $P < 0.01$)。土层深度与有机碳含量存在极显著负相关关系 ($P < 0.01$); 与有机碳密度、氮密度存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$, $P < 0.01$)。说明海拔和土层是影响青海省森林土壤有机碳、氮分布的关键因子。

关键词: 土壤碳储量; 土壤氮储量; 森林生态系统; 有机碳密度; 海拔梯度

Forest soil organic carbon and nitrogen storage and characteristics of vertical distribution in Qinghai Province

WANG Yanli¹, ZI Hongbiao², CHENG Ruixi¹, TANG Litao², SUOER Azhi¹, LUO Xueping², LI Jie¹, WANG Changting^{2,*}

1 College of Life Science & Technology of Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

2 Institute of Qinghai-Tibetan Plateau of Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

Abstract: Forest soil plays a key role in regulating carbon and nitrogen cycle and mitigating the effects of global climate change. However, due to the differences in forest type, age, and altitude, there is still a great uncertainty about the estimation of forest soil carbon and nitrogen reserves. In this study, we used the measured data from Qinghai forest soil to estimate the density of organic carbon, nitrogen, and the storage of organic carbon and nitrogen pool, and their vertical distribution patterns. The results indicated that 1) the soil organic carbon density showed a unimodal change with the altitude with a maximum (34.33 kg/m²) at the altitude of 3100—3400 m; the nitrogen density increased with the increase in altitude, and ranged from 1.39 to 2.93 kg/m². 2) In the 0—30 cm soil layer, the soil organic carbon and nitrogen density decreased with an increase in the soil depth, and their ranges were from 3.84 to 4.63 kg/m² and 0.22 to 0.27 kg/m², respectively. 3) Total soil carbon storage was 1098.70 Tg, and the total nitrogen storage was 61.78 Tg in the forest soil of Qinghai province at 0—100 cm soil layer. 4) There was a positive correlation between the altitude and nitrogen content,

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370542); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050207); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018NZD13); 四川省教育厅创新团队项目(14TD0049); 西南民族大学研究生“创新型科研项目”重点项目(CX2018SZ62)

收稿日期: 2018-03-24; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangct@swun.edu.cn; wangct@163.com

as well as between the altitude and nitrogen density ($P < 0.01$). There was a negative correlation between the soil depth and organic carbon content, and a positive correlation between the soil depth and organic carbon density and nitrogen density ($P < 0.01$). These results indicate that the altitude and soil depth are key factors influencing the distribution of organic carbon and nitrogen in forest soils in Qinghai Province.

Key Words: soil carbon storage; soil nitrogen storage; forest ecosystem; organic carbon density; altitude gradient

土壤有机碳、氮是土壤碳、氮储量的重要组成部分,全球约有 1500 Gt 碳、95 Gt 氮是以有机质形态储存于地球土壤中^[1-2],其积累和分解的速率决定着土壤碳、氮储量。陆地生态系统作为人类的居住环境和人类活动的主要场所,其土壤碳储量约是大气碳储量的 2 倍^[3-7],其土壤氮储量约是植被氮储量的 3 倍^[8],因此土壤圈的碳、氮循环是全球生物化学循环的重要组成部分。森林是陆地生态系统的主体^[9],森林生态系统碳、氮储量主要由森林植被、凋落物和土壤 3 个分室组成,土壤是森林生态系统中物质循环和能量流动的重要组成部分^[10]。森林土壤碳储量约为森林生态系统碳储量的 2/3^[11],其氮储量超过森林植被氮储量的 85%^[12]。土壤碳、氮储量能在一定程度上反映土壤肥力,也能作为衡量森林土壤质量及植被恢复情况的重要指标^[13]。

森林土壤碳、氮储量的变化对全球气候变化也有巨大的影响^[14-15],此外碳储量的垂直分布特征有助于了解土壤有机碳对气候变化的响应^[16-17]。因此土壤碳、氮储量在调节森林生态系统生物化学循环和减缓全球气候变化中起着重要作用。目前研究者对森林生态系统土壤碳储量的研究数据主要通过土壤普查资料和文献获得,但对土壤氮储量的关注较少,如宋满珍等^[18]根据江西省第二次土壤普查资料与森林资源二类调查资料,对江西省森林土壤有机碳密度和碳储量进行了估算;彭舜磊等^[19]分析了河南省宝天曼自然保护区森林土壤碳氮储量分布格局。区域尺度上森林土壤碳、氮储量的研究为全国森林土壤碳、氮储量研究提供了重要的理论参考依据。青海省森林作为青藏高原的重要组成部分,是全球气候变化的响应区^[20],由于缺乏全面、详细、可靠的实测数据,其森林土壤碳氮储量估算仍有较大的不确定性,及其与环境因子的关系仍不明确。

青海省位于我国西北内陆腹地、青藏高原东北部,是我国第一级地势阶梯的重要组成部分,与西藏自治区同称为“世界屋脊”,而有关青海省森林生态系统土壤碳氮储量的研究并不多,如钟聪等^[21]利用青海省第二次土壤普查资料,估算了青海省土壤有机碳储量;王根绪等^[22]分析了青藏高原各类草地 0—65 cm 深度范围内有机碳储量;王建林等^[23]运用样点的实测数据,分析了青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布规律;胡卫国等^[24]估算了青海湖环湖区表土的氮储量。因此本文以青海省森林土壤为研究对象,通过大量的土壤碳、氮含量的实测数据,计算了不同海拔土壤剖面上不同土层的土壤有机碳、氮含量及密度,并估算了青海省森林土壤碳、氮储量。旨在分析和探讨青海省森林碳氮储量的垂直分布格局及其与环境因子的关系,以期了解青海省森林土壤碳氮储量在青藏高原及我国土壤碳氮储量的重要地位,这对于评价青藏高原生物地球化学循环对全球气候变化的响应和反馈作用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

青海省位于我国西北内陆腹地、青藏高原东北部(31°39′—39°19′N, 89°35′—103°4′E),东西长约 1200 km,南北宽约 800 km,面积为 $72.15 \times 10^6 \text{ km}^2$,是我国第一级地势阶梯的重要组成部分。青海省土地总面积 $72.15 \times 10^6 \text{ km}^2$,扣除冰川雪被、水体及裸岩等未利用地外,土壤面积 $65.49 \times 10^5 \text{ km}^2$,森林面积 $32.96 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。平均海拔 3500 m 以上,属典型高原大陆性气候。年均气温 $-3.7 \sim 6.0^\circ\text{C}$,年日照 2340—3550 h,年降水量 16.7—776.1 mm(大部 400 mm 以下),年蒸发量 1118.4—3536.2 mm。森林植被主要分布在东经 96°—102°的江河及其支流的河谷两岸,森林主要分布在海拔 2000—4000 m,以寒温带针叶林为主,其次为落叶阔叶林。青海省典型土壤类型有山地草甸土、石灰性灰钙土、黑钙土、草甸盐土、沼泽土、泥炭沼泽土、山地草原草甸土^[21],其森林土壤类型主要

有落叶阔叶林灰褐土、针阔叶混交林灰褐土、针叶林碳酸盐灰褐土和针叶林淋溶灰褐土^[25]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及取样

本研究依托中国科学院战略性先导科技专项(碳专项),按照《生态系统固碳现状、速率、机制和潜力》项目制定的统一要求,于2011—2013年在青海省21个县进行。在上述县内分别选取环境条件(如坡度、坡向、郁闭度等)相似且具有代表性的落叶阔叶林和寒温性针叶林,并结合青海省森林资源连续清查成果,充分考虑全省各森林类型(优势种)分布面积、蓄积比重、起源等情况,将研究区海拔(2175—3852 m)以高程400 m为一个单元等距划分为<2500 m、2500—2800 m、2800—3100 m、3100—3400 m、3400—3700 m、>3700 m共6个梯度(表1)。在全省21个县(图1)布设主要森林类型的标准样地80个样地,每个样地中随机设置3块50 m×20 m的乔木样方,各样地间距大于100 m,共计240个样点。在每个乔木调查样方下的林下草本层内采用对角线设置3个1 m×1 m草本调查样方,草本层样方总共计720个。

在每个草本调查样方内用土钻法(内径5 cm)分5层(0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—50 cm、50—100 cm)分别钻取土壤样品(不够100 cm至基岩为止),相同样方的相同土层的土壤样品混合为1个土壤样品。取各土壤样品鲜土若干,风干、磨碎、过筛(1 mm和2 mm筛)后用于碳、氮含量的测定,并同时测定>2 mm石砾含量,由于《青海土种志》中的记载和样品实际勘察,几乎所有的土壤粒径均<2 mm,所以本文中石砾含量为0。同时使用容积为100 cm³的环刀采集各层土壤,每层重复2次,野外测定环刀+土壤鲜质量,带回实验室测定环刀+土壤干质量以及环刀质量,计算土壤容重(表2)。

1.2.2 土壤有机碳、氮含量的测定

土壤有机碳含量(soil organic carbon content, SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。土壤全氮含量(nitrogen content, TN)采用凯氏法测定,土壤样品在硫代硫酸钠、浓硫酸、高氯酸和催化剂的作用下,经氧化还原反应全部转化为铵态氮。消解后的溶液碱化蒸馏出的氨被硼酸吸收,用标准盐酸溶液滴定,根据标准盐酸溶液用量来计算土壤中全氮含量。

1.2.3 土壤有机碳、氮密度及储量的计算

土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)、氮密度(nitrogen density, Nd)分别指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳、氮的储量。土壤氮密度与土壤有机碳密度计算公式相似,计算采用公式如下:

$$\text{SOCD} = 0.1 \times \text{SOC}_i \times \gamma \times H_i \times \left(1 - \frac{\delta_{2\text{mm}}}{100}\right) \quad (1)$$

$$\text{Nd} = 0.1 \times \text{TN}_i \times \gamma \times H_i \times \left(1 - \frac{\delta_{2\text{mm}}}{100}\right) \quad (2)$$

式中,SOCD、Nd分别代表土壤有机碳密度、氮密度,kg/m²;i代表不同土层层次;SOC、TN分别代表土壤有机碳含量、氮含量,%;γ表示容重,g/cm³;H表示土层的厚度,cm;δ_{2mm}表示土壤中直径>2 mm的石砾含量百分比,%。

土壤碳储量(soil organic carbon storage, SOCR)、氮储量(nitrogen storage, Ns)的计算采用公式如下:

$$\text{SOCR}_i = \text{SOCD}_i \times A \quad (3)$$

$$\text{Ns}_i = \text{Nd}_i \times A \quad (4)$$

式中,SOCR、Ns分别代表土壤碳储量、氮储量,Tg;i代表土层不同土层层次;A代表青海省森林面积,hm²(采用青海省森林资源连续清查第五次复查成果)。

样地尺度的土壤有机碳、氮的密度及储量是通过实地调查采样并进行有机碳、氮含量分析后计算得到的。各层土壤有机碳、氮密度是土壤有机碳、氮含量与土壤容重和土层厚度的乘积,各层土壤有机碳、氮密度的平均值相累加即得到整个剖面(深度为1 m)的土壤有机碳、氮密度的平均值。各层土壤有机碳、氮密度乘以该森林生态系统的占地面积即各层土壤碳、氮储量,各层土壤有机碳、氮储量的平均值相累加即得到整个森林生态系统的土壤碳、氮储量。

1.3 数据处理

实验所得数据用 Excel 2003 进行整理,用 SPSS 19.0 进行统计学分析。采用(One-way ANOVA)单因素方差分析比较不同海拔下土壤有机碳、氮含量和密度的差异,以及比较不同土层下土壤有机碳、氮含量,密度和储量的差异,若方差为齐性,用 LSD 法进行显著性多重比较;若方差非齐性,则用 Tamhane's2 法进行多重比较,显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。采用 Pearson 检验分析海拔、土壤容重与土壤有机碳、氮含量及密度间的相关性显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。图表数据为平均值 \pm 标准误。

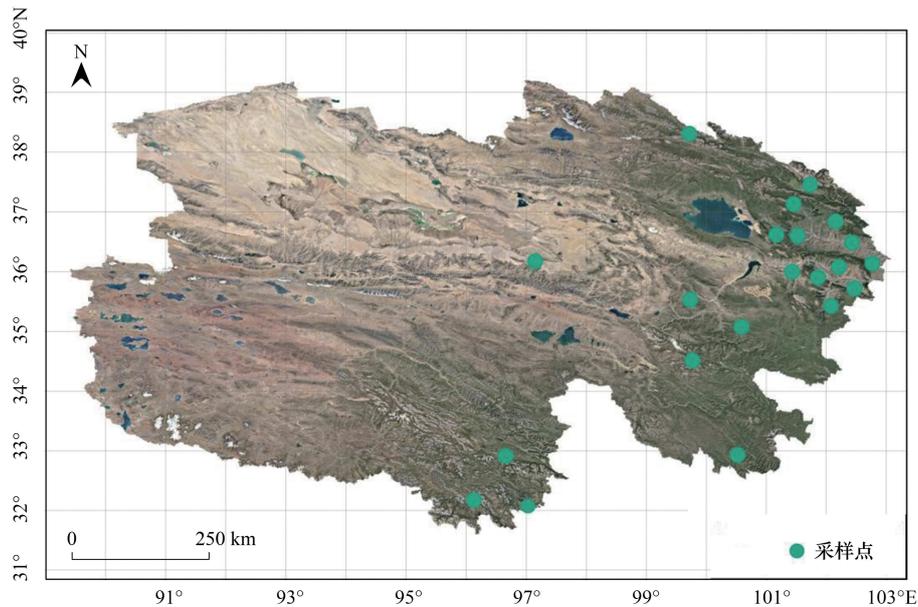


图 1 青海省样地点位图

Fig.1 Map of the sample locations in Qinghai Province

表 1 样地信息表

Table 1 Sample information

海拔 Altitude/m	植被类型 Vegetation types	主要人为扰动 Major anthropogenic disturbances	样点数 Number of plots
<2500	山地落叶阔叶林、山地寒温性针叶林	放牧、旅游	24
2500—2800	山地落叶阔叶林、山地寒温性针叶林	放牧、旅游、伐林	67
2800—3100	山地落叶阔叶林、山地寒温性针叶林	放牧、旅游	68
3100—3400	高原寒温性针叶林	放牧、旅游	19
3400—3700	高原寒温性针叶林	放牧、伐林	43
>3700	高原寒温性针叶林	放牧、伐林	19
总计 Total	—	—	240

表 2 不同海拔梯度不同土层的土壤容重

Table 2 Soil bulk density in different soil layers under the gradient of altitude

海拔 Altitude/m	土壤容重 Soil bulk densities/(g/cm ³)					样本数 Number of sample
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—100 cm	
<2500	0.48 \pm 0.20	0.68 \pm 0.25	0.77 \pm 0.22	0.93 \pm 0.22	1.15 \pm 0.22	96
2500—2800	0.49 \pm 0.20	0.62 \pm 0.22	0.74 \pm 0.22	0.89 \pm 0.22	1.09 \pm 0.29	268
2800—3100	0.59 \pm 0.26	0.65 \pm 0.27	0.76 \pm 0.25	0.88 \pm 0.23	1.03 \pm 0.29	272
3100—3400	0.74 \pm 0.23	0.93 \pm 0.27	1.09 \pm 0.22	1.16 \pm 0.25	1.22 \pm 0.35	76
3400—3700	0.59 \pm 0.23	0.82 \pm 0.21	0.90 \pm 0.20	0.95 \pm 0.18	1.02 \pm 0.21	172
>3700	0.76 \pm 0.24	0.86 \pm 0.21	0.98 \pm 0.21	1.04 \pm 0.20	1.16 \pm 0.22	76
总计 Total	—	—	—	—	—	960

2 结果与分析

2.1 海拔高度与土层厚度对有机碳、氮含量垂直分布特征的影响

在同一海拔不同土层, <2500 m、2500—2800 m、2800—3100 m、3400—3700 m、>3700m 海拔 0—10 cm 土层的 SOC 均显著高于其他土层 ($P < 0.05$); 其最大值 (88.19 g/kg) 出现在 0—10 cm 土层, 最小值 (27.66 g/kg) 出现在 50—100 cm 土层, 表明青海省森林土壤 SOC 随土层的增加而降低 (表 3)。

在同一土层不同海拔, 50—100 cm 土层各海拔间的 SOC 差异不显著 ($P > 0.05$)。0—100 cm 土层 SOC 的最大值 (64.39 g/kg) 出现在海拔 2500—2800 m, 最小值 (46.30 g/kg) 出现在海拔 >3700 m, 表明青海省森林土壤 SOC 随海拔的增加呈单峰曲线变化 (表 3)。

在同一海拔不同土层, 0—10 cm 土层的 TN 显著高于其他土层 ($P < 0.05$); 其最大值 (4.79 g/kg) 出现在 0—10 cm 土层, 最小值 (1.50 g/kg) 出现在 50—100 cm 土层, 表明青海省森林土壤 TN 随土层的增加而降低 (表 4)。

在同一土层不同海拔, <3100 m 各海拔间的 TN 均差异不显著 ($P > 0.05$); >3100 m 各海拔间的 TN 均差异不显著 ($P > 0.05$), 且后者显著高于前者 ($P < 0.05$); 这与胡启武等^[26]在祁连山北坡垂直带上对土壤氮分布特征的研究结果一致, 即海拔 3100 m 以上土壤 TN 显著高于 3100 m 以下的土壤。0—100 cm 土层 TN 的最小值 (2.37 g/kg) 出现在海拔 <2500 m; 最大值 (4.38 g/kg) 出现在海拔 >3700 m, 表明青海省森林土壤 TN 随海拔的增加而增加 (表 4)。

表 3 不同海拔梯度不同土层的有机碳含量

Table 3 Soil organic carbon content in different soil layers under the gradient of altitude

海拔 Altitude/m	有机碳含量 (soil organic carbon content, SOC)/(g/kg)					平均值 Mean/(g/kg)
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—100 cm	
<2500	86.74±6.22Ab	63.50±5.02Bb	52.73±4.69Bb	38.84±4.36Cab	23.01±2.68Da	52.96
2500—2800	105.64±4.11Aa	81.37±3.58Ba	65.72±3.49Ca	44.05±2.64Da	24.59±1.97Ea	64.39
2800—3100	80.05±3.99Ab	62.05±3.77Bb	47.21±2.65Cbc	42.68±2.41Cab	29.91±2.43Da	52.83
3100—3400	75.64±10.03Ab	49.83±7.25ABb	41.78±8.00Bbc	30.85±6.46Bb	33.99±10.41Ba	49.94
3400—3700	86.68±5.59Ab	51.16±4.09Bb	38.13±2.86Cc	34.19±3.37Cab	31.82±2.45Ca	47.86
>3700	69.11±6.77Ab	59.84±5.20Bb	43.27±4.86Cbc	36.67±3.93BCDab	25.82±3.54Da	46.30
平均值 Mean/(g/kg)	88.19	64.69	50.69	40.08	27.66	—

平均值±标准误; 不同大写字母表示同一海拔不同土层下 SOC 的差异性; 不同小写字母表示同一土层不同海拔下 SOC 的差异性 ($P < 0.05$)

表 4 不同海拔梯度不同土层的氮含量

Table 4 Nitrogen content in different soil layers under the gradient of altitude

海拔 Altitude/m	氮含量 (nitrogen content, TN)/(g/kg)					平均值 Mean/(g/kg)
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—100 cm	
<2500	3.73±0.32Ac	2.85±0.36Bb	2.39±0.29BCb	1.81±0.30CDb	1.08±0.15Db	2.37
2500—2800	4.18±0.16Ac	3.20±0.14Bb	2.40±0.15Cb	1.86±0.14Db	1.25±0.14Eb	2.62
2800—3100	3.49±0.21Ac	2.65±0.15Bb	2.07±0.14Cb	1.79±0.11Cb	1.27±0.11Db	2.72
3100—3400	6.10±0.91Ab	4.66±0.80ABa	3.35±0.63Ba	2.80±0.49Ba	2.46±0.81Ba	4.24
3400—3700	7.23±0.38Aa	4.80±0.34Ba	3.60±0.26Ca	3.21±0.25Ca	2.09±0.25Da	4.32
>3700	6.35±0.50Aab	4.91±0.49Ba	3.88±0.43BCa	3.50±0.23Ca	2.71±0.19Ca	4.38
平均值 Mean/(g/kg)	4.79	3.57	2.75	2.24	1.50	—

平均值±标准误; 不同大写字母表示同一海拔不同土层下 TN 的差异性; 不同小写字母表示同一土层不同海拔下 TN 的差异性 ($P < 0.05$)

2.2 海拔高度与土层厚度对土壤有机碳、氮密度垂直分布特征的影响

青海省森林土壤 0—100 cm 土层 SOC 的平均值为 31.89 kg/m²。在同一海拔不同土层, 30—50 cm、50—100 cm 土层的递进为 20 cm、50 cm, 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 土层的递进均为 10 cm, 因此 50—100 cm

土层的 SOCD 显著高于其他土层 ($P < 0.05$)。0—30 cm 土层, SOCD 的最大值 (4.63 kg/m^2) 出现在 0—10 cm 土层, 最小值 (3.84 kg/m^2) 出现在 20—30 cm 土层, 表明青海省森林土壤在 0—30 cm 土层, SOCD 随土层的增加而降低 (表 5)。

在同一土层不同海拔, 30—50 cm、50—100 cm 土层的 SOCD 差异不显著 ($P > 0.05$)。0—100 cm 土层 SOCD 的最大值 (34.33 kg/m^2) 出现在海拔 3100—3400 m, 最小值 (28.32 kg/m^2) 出现在海拔 $> 3700 \text{ m}$, 表明青海省森林土壤 SOCD 随海拔的增加呈单峰曲线变化 (表 5)。

青海省森林土壤 0—100 cm 土层 Nd 的平均值为 1.88 kg/m^2 。土层 Nd 的土层递进与上述土层 SOCD 的土层递进相同, 因此与 SOCD 沿土层的变化规律一致。0—30 cm 土层, Nd 的 (0.27 kg/m^2) 最大值出现在 0—10 cm, 最小值 (0.22 kg/m^2) 出现在 20—30 cm, 表明青海省森林土壤 Nd 在 0—30 cm 土层, 随土层的增加而降低 (表 6)。

在同一土层不同海拔, $< 3100 \text{ m}$ 、 $> 3100 \text{ m}$ 各海拔间的 Nd 差异不显著 ($P > 0.05$), 且后者显著高于前者 ($P < 0.05$)。0—100 cm 土层 Nd 的最大值 (2.93 kg/m^2) 出现在海拔 $> 3700 \text{ m}$, 最小值 (1.39 kg/m^2) 出现在海拔 $< 2500 \text{ m}$, 表明青海省森林土壤 Nd 随海拔增加而增加 (表 6)。

表 5 不同海拔梯度不同土层的有机碳密度

Table 5 Soil organic carbon density in different soil layers under the gradient of altitude

海拔 Altitude/m	有机碳密度 (soil organic carbon density, SOCD)/(kg/m ²)					平均值 Mean/(g/kg)
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—100 cm	
<2500	3.90±0.30Cb	4.11±0.32Cab	3.84±0.28Cab	7.31±0.94Ba	13.24±1.81Aa	32.40
2500—2800	4.68±0.23Cab	4.65±0.20Ca	4.64±0.26Ca	7.64±0.51Ba	10.83±0.73Aa	32.44
2800—3100	4.29±0.25Cab	3.56±0.18Cb	3.29±0.16Cab	6.98±0.34Ba	14.74±1.30Aa	32.86
3100—3400	5.24±0.39BCa	4.37±0.31Cab	4.01±0.52Cb	8.00±1.49Ba	12.71±4.80Aa	34.33
3400—3700	5.12±0.33BCa	4.12±0.25CDab	3.41±0.24Db	6.23±0.55Ba	9.45±1.27Aa	28.33
>3700	4.99±0.30BCa	4.65±0.25BCa	3.66±0.29Cb	6.40±0.57Ba	8.62±1.57Aa	28.32
平均值 Mean/(kg/m ²)	4.63	4.17	3.84	7.09	12.16	—

平均值±标准误; 不同大写字母表示同一海拔不同土层下 SOCD 的差异性; 不同小写字母表示同一土层不同海拔下 SOCD 的差异性 ($P < 0.05$)

表 6 不同海拔梯度不同土层的氮密度

Table 6 Nitrogen density in different soil layers under the gradient of altitude

海拔 Altitude/m	氮密度 (nitrogen density, Nd)/(kg/m ²)					平均值 Mean/(g/kg)
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—100 cm	
<2500	0.18±0.02Cb	0.19±0.02Cb	0.17±0.02Cb	0.35±0.07Bb	0.50±0.07Ab	1.39
2500—2800	0.20±0.01Bb	0.18±0.01Bb	0.19±0.01Bb	0.32±0.03ABb	0.54±0.11Ab	1.43
2800—3100	0.23±0.02Cb	0.15±0.01Cb	0.15±0.01Cb	0.30±0.01Bb	0.61±0.05Ab	1.45
3100—3400	0.38±0.03Ba	0.36±0.03Ba	0.33±0.04Ba	0.58±0.07Ba	1.01±0.33Aa	2.64
3400—3700	0.39±0.02Ca	0.38±0.02Ca	0.34±0.02Ca	0.60±0.05Ba	0.96±0.10Aa	2.67
>3700	0.41±0.03Ca	0.39±0.03BCa	0.33±0.02BCa	0.59±0.04Ba	1.21±0.15Aa	2.93
平均值 Mean/(kg/m ²)	0.27	0.24	0.22	0.40	0.75	—

平均值±标准误; 不同大写字母表示同一海拔不同土层下 Nd 的差异性; 不同小写字母表示同一土层不同海拔下 Nd 的差异性 ($P < 0.05$)

2.3 青海省森林土壤不同土层的碳、氮储量

青海省森林土壤 30—50 cm、50—100 cm 土层的 SOCR (234.06 、 444.60 Tg) 都显著高于 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 土层的 SOCR (154.78 、 138.58 、 126.68 Tg) ($P < 0.05$)。0—100 cm 土层的 SOCR 为 1098.70 Tg (图 2)。青海省森林土壤 30—50 cm、50—100 cm 土层的 N_s (13.24 、 24.55 Tg) 都显著高于土层 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 的 N_s (8.82 、 7.98 、 7.19 Tg) ($P < 0.05$), 且 0—30 cm 土层间差异不显著 ($P > 0.05$)。0—100 cm 土层的 N_s 为 61.78 Tg (图 2)。在 0—30 cm 土层中, 对 SOCR、 N_s 贡献最大是土壤表层 0—10 cm 土层, 分别是

36.85%、36.77%。但表层土壤的稳定性较差,易受人为活动的影响。如过度放牧和不合理开垦等人为扰动都会导致土壤肥力水平下降,因此减少人为对森林生态系统干扰活动,这对于维持和增加土壤碳氮储量以及减少碳氮等温室气体具有重要意义^[24,27]。

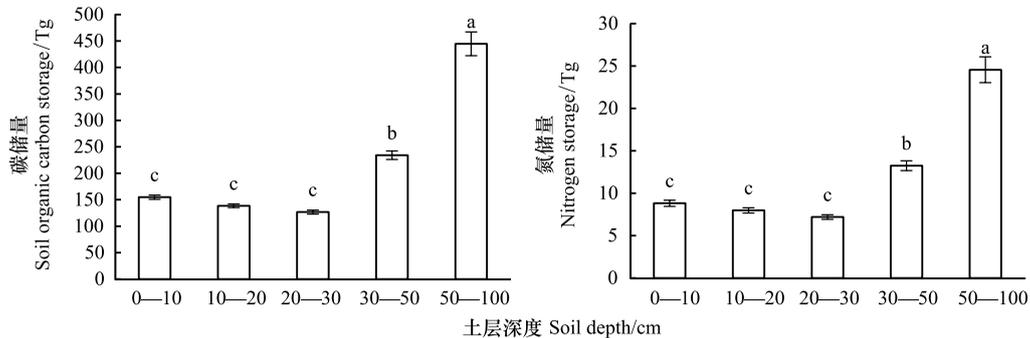


图2 不同土层的碳、氮储量

Fig.2 The soil organic carbon storage and nitrogen storage in different soil layers

2.4 海拔高度、土层深度与有机碳、氮之间的相关性

海拔高度与SOC存在显著负相关关系($P < 0.05$);与TN、Nd存在极显著正相关关系($P < 0.01, P < 0.01$)。土层深度与SOC存在极显著负相关关系($P < 0.01$);与TN存在显著负相关关系($P < 0.05$);与SOCd、Nd存在极显著正相关关系($P < 0.01, P < 0.01$)(表7)。

表7 海拔高度、土层深度与有机碳含量、氮含量、有机碳密度、氮密度之间的相关性

Table 7 The correlation between altitude, soil depth and soil organic carbon content, nitrogen content, soil organic carbon density, nitrogen density

项目 Items	海拔 Altitude	土壤容重 Soil bulk densities	土层深度 Soil depth	有机碳含量 SOC	氮含量 TN	有机碳密度 SOCd	氮密度 Nd
海拔高度 Altitude	1						
土壤容重 Soil bulk densities	0.088	1					
土层深度 Soil depth	0.000	-0.531 **	1				
有机碳含量 SOC	-0.139 *	-0.357 **	-0.538 **	1			
氮含量 TN	0.381 **	-0.161 *	-0.466 *	0.448 **	1		
有机碳密度 SOCd	-0.052	-0.005	0.570 **	0.448 **	0.194 **	1	
氮密度 Nd	0.373 **	0.097	0.484 **	0.163 *	0.664 **	0.408 **	1

* $P > 0.05$, ** $P > 0.01$

3 讨论

3.1 海拔对青海省森林土壤有机碳、氮含量及密度的影响

森林土壤碳主要来源于凋落物的转化累积与矿化分解^[28]。海拔影响温度和水分,从而影响植被分布、土壤微生物多样性及人为活动等,导致土壤有机碳存在差异。本文中青海省森林土壤有机碳含量、密度均随海拔的增加呈单峰曲线变化。这与太白山土壤有机碳含量沿海拔(1700—3500 m)变化趋势一致^[29]。其原因可能与植被的分布、凋落物的分解、土壤理化性质及人为活动等有关:1)在低中海拔区域,随着海拔的升高,植被类型也随之由山地落叶阔叶林过渡到寒温性针叶林,由于不同林带凋落物质量和数量的截然不同,导致阔叶林凋落物输入量大于针叶林;同时阔叶相较于针叶更易分解^[29-30],加之寒温性针叶林土壤碳密度远大于落叶阔叶林土壤^[31],因此土壤有机碳含量增多。另外在高海拔区域,随着海拔的继续升高,温度随之降低,温度成为土壤微生物活性最主要的限制因子,导致凋落物的分解速率减弱,土壤有机质积累变少最终促使土壤有

机碳含量减少^[30]。2) 土壤作为植被赖以生存的载体,其理化性质在时间和空间上是异质性分布的^[32]。低海拔区域降水量适宜,它可以明显影响土壤的导电率和含水率,致使土壤吸水溶胀,因而低海拔处土壤容重较小^[33];高海拔区域,土壤容重随着海拔的升高而减小^[34]。青海省森林土壤容重在中高海拔处较大(表2),也对估算土壤有机碳密度产生影响。3) 人为活动对土壤的影响具有双向性,合理利用使土壤质量、肥力等形成良性发展,反之使其退化^[35]。青海省森林中海拔地区适度的人为扰动(表1),如放牧、旅游等因践踏作用将植物凋落物碾碎,使其与土壤充分接触;另外,这也会使凋落物的堆叠积累量相对减少,这使其充分暴露;都加快了凋落物的分解,有助于土壤有机碳的增加^[36-37]。

森林土壤氮主要来源于氮素矿化与固定、硝化与反硝化等过程^[38]。本文中青海省森林土壤的氮含量、密度随海拔的增加而增加。此结果与云南省小江流域支流阿旺小河西北侧山地土壤及西藏色季拉山西坡表层土壤的氮含量随海拔的变化趋势一致^[28,38];四川盆地森林土壤氮密度也随海拔的增加而增加^[39]。并且文中海拔高度与两者间均呈现极显著正相关性($P < 0.01$),也进一步解释了两者的随海拔变化的规律性。此结果也遵循土壤氮含量会从较温暖地区到寒冷地带呈现增加的规律^[38],其主要原因之一可能是随着海拔的升高土壤温度会随之降低,温度过低会抑制土壤微生物的活动,腐殖作用变弱,分解速率变慢,阻碍了土壤的矿化作用^[30,38]。另外,海拔除影响温度、水分、土壤肥力外,也间接影响到林型的分布,青海省森林林型随海拔的升高逐渐由山地落叶林过渡到高原寒温性针叶林(表1)。在我国森林土壤氮密度分区排列中,青藏高原高寒植被区域>温带型针阔叶混交区域>暖温性落叶阔叶林区域^[40],因此,林型也可能是青海省森林土壤氮密度随海拔变化的原因之一。

3.2 土层对青海省森林土壤有机碳、氮含量及密度的影响

土壤碳、氮在土层上的空间分布影响着根系的垂直分布,而根系的垂直分布也影响着输送到土壤各层次的碳、氮含量^[41]。本研究表明青海省森林土壤碳、氮含量均随土层深度(0—100 cm)增加而降低,这与川西亚高山森林土壤和梵净山土壤的有机碳含量随土层深度的变化趋势基本一致^[30,42]。由于土壤表层碳氮含量主要来源于凋落物的分解,且表层土壤的凋落物较多,同时表层土壤良好的通气状况与水热条件也为微生物活动提供了更好的环境,这都促进了土壤表层中碳、氮含量的积累^[43],而深层土壤碳氮含量则多源于根系、根系分泌物及土壤微生物等,与表层土壤相比,与外界的交换作用较弱。文中土壤碳氮含量间呈现极显著的正相关性($P < 0.01$),也进一步说明了土层深度上土壤碳氮含量变化规律的相似性。本研究中因土层递进的差异,土壤碳氮密度在50—100 cm达到最大。在土层递进相同时,土壤碳氮密度在表层0—10 cm达到最大。这与青海湖南岸灌丛、草地覆盖的土壤有机碳密度均在表层0—10 cm土层达到最大的结论一致^[44],其原因是由表层土壤高的碳氮含量造成的。

3.3 青海省森林土壤的碳、氮密度及储量

我国各类型森林土壤有机碳密度具有高度的空间变异性,总体表现为东部高于西部,最高土壤碳密度出现在东北地区的北部和东部以及青藏高原的东南部,其主要受气候、植被凋落物以及人类活动的影响^[10,45]。本研究表明青海省森林土壤有机碳密度平均值为 31.89 kg/m^2 ,结果在解宪丽等^[10]对全国土壤全剖面有机碳密度的范围($1.19—176.46 \text{ kg/m}^2$)内,但远高于刘世荣等^[46]统计的全国森林生态系统土壤有机碳密度平均值 10.78 kg/m^2 。造成这一结果的原因,其一可能是在于本研究测定的土壤碳含量既包含有机碳成分又将无机碳(碳酸盐)成分计算其中。潘根兴^[47]研究证实,在我国干旱地区,土壤中无机碳的平均含量为 100 g/kg ,少有溶解释放过程,即碳元素被持续地截储于碳酸盐中。其二可能是青海省森林中寒温性针叶林中云冷杉比例较大,而云冷杉土壤有机碳密度在所有的森林类型中最高,可达到 36.079 kg/m^2 ^[31]。

我国土壤氮密度在空间分布整体呈现出西部地区大于东部^[8]。青海省森林土壤氮密度平均值为 1.88 kg/m^2 ,低于全国森林土壤平均氮密度 3.46 kg/m^2 ^[40],稍低于青藏高原陆地土壤0—100 cm土层氮密度 2.01 kg/m^2 ;高于全国土壤0—100 cm土层平均氮密度 1.31 kg/m^2 ^[8],也高于青海湖环湖区表土各类土壤氮密度^[24],略高于四川盆地森林土壤平均氮密度 1.849 kg/m^2 ^[45]。与刘纪远等^[48]估算的中国大区土壤氮密度相

比,发现青海省森林土壤氮密度高于东北、华北、华东、华南地区以及西南部分地区的土壤氮密度。这是因为青藏高原地区高寒草甸草本植物生长丰盛、温度较低、凋落物和土壤有机质分解缓慢,促进了土壤氮的积累。

土壤碳、氮储量能在一定程度上反映土壤肥力,也能作为衡量森林土壤质量及植被恢复情况的重要指标,同时也是森林生态系统中生物化学循环的重要组成部分。目前,对青藏高原土壤碳储量的研究相对较多,王根绪等^[22]估算了青藏高原各类草地 0—65 cm 土层的有机碳储量,估算面积为 $160 \times 10^6 \text{ hm}^2$,碳储量达到 33520 Tg,其土壤类型主要以高原草甸土和高原草原土为主,占中国土壤有机碳储量的 39.71%;范宇等^[49]利用土壤类型法估算了西藏自治区土壤全剖面的碳储量,估算面积为 $110 \times 10^6 \text{ hm}^2$,碳储量为 8230 Tg,占中国土壤有机碳储量的 9.75%;方精云等^[50]估算青藏高原草地土壤全剖面的碳储量,估算面积为 $197 \times 10^6 \text{ hm}^2$,碳储量 38400 Tg;占中国土壤有机碳储量的 45.50%;钟聪等^[21]利用土壤类型法估算了青海省土壤 0—65 cm 土层的碳储量,估算面积为 $65 \times 10^6 \text{ hm}^2$,碳储量为 8904 Tg,占中国土壤有机碳储量的 10.55%;本文估算了青海省森林土壤(0—100 cm)的碳储量,估算面积为 $32.96 \times 10^5 \text{ hm}^2$,碳储量为 1098.70 Tg,占中国土壤有机碳储量的 1.30%^[10]。本研究中碳储量都明显低于其他研究者对青藏高原地区土壤碳储量所占中国土壤全剖面有机碳储量的比例,这是因为本文中青海省森林估算面积为 $32.96 \times 10^5 \text{ hm}^2$,仅占中国陆地面积的 0.34%,占青藏高原土壤面积的 1.67%;其碳储量却占中国土壤有机碳储量的 1.30%,占青藏高原土壤碳储量的 28.28%^[51]。表明青海省森林土壤碳库在青藏高原乃至中国土壤碳库都具有十分重要的地位。

近年来,青海省土壤氮储量的研究相对较少,仅有胡卫国等^[24]估算了青海湖环湖区表土(0—20 cm)的氮储量,估算面积为 $35.84 \times 10^4 \text{ hm}^2$,氮储量为 3.024 Tg,占中国森林土壤氮储量的 0.47%;毕珍^[39]估算了四川盆地森林土壤氮储量,估算面积为 $1.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$,氮储量为 351.3 Tg,约占中国森林土壤氮储量的 54.05%^[40]。本文估算了青海省森林土壤(0—100 cm)的氮储量,估算面积为 $32.96 \times 10^5 \text{ hm}^2$,氮储量为 61.78 Tg,此结果低于四川盆地森林土壤氮储量,因为本文中估算的森林面积仅占中国森林土地面积的 2.56%,却占中国森林土壤氮储量的 9.51%^[40]。说明青海省森林土壤氮库是中国土壤氮库调节的重要组成部分。

4 结论

本研究结果表明青海省森林土壤碳密度为 31.89 kg/m^2 ,高于同类研究,且随海拔呈单峰曲线变化;氮密度为 1.88 kg/m^2 ,低于全国森林平均值,且随海拔的增加而增加;碳氮密度均随土层的增加而减低。森林土壤碳储量为 1098.70 Tg,占全国陆地土壤碳储量 1.30%;森林土壤氮储量为 61.78 Tg,占全国森林土壤氮储量的 9.51%。近年来森林保护工程广泛开展,森林碳氮汇是当今应对全球气候变暖的积极措施,也是林业对社会经济可持续发展做出贡献的途径和平台。因此,加强对森林资源的保护和管理是促进青海省森林生态系统碳氮库功能的重要途径。

参考文献(References):

- [1] Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [2] Post W M, Pastor J, Zinke P J, Stangenberger A G. Global patterns of soil nitrogen storage. *Nature*, 1985, 317(6038): 613-616.
- [3] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [4] Song G H, Li L Q, Pan G X, Zhang Q. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation. *Biogeochemistry*, 2005, 74(1): 47-62.
- [5] Gojts E, Van Wesemae B, Crucifix M. Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(5): 723-739.
- [6] Pan G X, Li L Q, Wu L S, Zhang X H. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2004, 10(1): 79-92.
- [7] 岳曼,常庆瑞,王飞,霍艾迪.土壤有机碳储量研究进展. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1173-1178.
- [8] 张春娜.中国陆地土壤氮库研究[D].重庆:西南农业大学,2004: 0-60.
- [9] Potter C S. Terrestrial biomass and the effects of deforestation on the global carbon cycle; results from a model of primary production using satellite observations. *BioScience*, 1999, 49(10): 769-778.
- [10] 解宪丽,孙波,周慧珍,李忠佩,李安波.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.

- [11] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/3): 242-258.
- [12] Cole D W, Rapp M. Elemental cycling in forest ecosystems//Reichle D E. *Dynamic Properties of Forest Ecosystems*. London: Cambridge University Press, 1981: 341-409.
- [13] 黄从德, 张健, 杨万勤, 张国庆, 王永军. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征. *生态学报*, 2009, 29(3): 1217-1225.
- [14] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [15] 周峻宇. 中国气态活性氮气候效应及氮沉降临界负荷研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 1-117.
- [16] Fontaine S, Barot S, Barré P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 2007, 450(7167): 277-280.
- [17] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2): 143-158.
- [18] 宋满珍, 刘琪璟, 吴自荣, 欧阳勋志. 江西省森林土壤有机碳储量研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(2): 6-10.
- [19] 彭舜磊, 王华太, 陈昌东, 齐光, 赵干卿. 宝天曼自然保护区森林土壤碳氮储量分布格局分析. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 30-34.
- [20] 伏洋, 张国胜, 李凤霞, 汪青春, 肖建设, 杨琼. 青海高原气候变化的环境响应. *干旱区研究*, 2009, 26(2): 267-276.
- [21] 钟聪, 杨忠芳, 夏学齐, 侯青叶, 姜伟. 青海省土壤有机碳储量估算及其源汇因素分析. *现代地质*, 2012, 26(5): 896-909.
- [22] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 693-700.
- [23] 王建林, 钟志明, 王忠红, 陈宝雄, 余成群, 胡兴祥, 沈振西, 大次卓嘎, 张宪洲. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征. *生态学报*, 2014, 34(22): 6678-6691.
- [24] 胡卫国, 曹军骥, 韩永明, 王旭. 青海湖环湖区表土有机碳氮储量估算. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(9): 85-88.
- [25] 高霞, 庞宁菊, 李月梅. 浅谈青海森林土壤基本特征. *青海农林科技*, 1998, (1): 24-26, 65-65.
- [26] 胡启武, 欧阳华, 刘贤德. 祁连山北坡垂直带土壤碳氮分布特征. *山地学报*, 2006, 24(6): 654-661.
- [27] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 冯兆忠, 张红星, 徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. *生态学报*, 2005, 25(12): 3146-3154.
- [28] 张广帅, 邓浩俊, 杜锐, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 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. *生态学报*, 2016, 36(3): 675-687.
- [29] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 和王祥, 耿增超. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征. *土壤学报*, 2017, 54(1): 160-170.
- [30] 李相楹, 张维勇, 刘峰, 张珍明, 何腾兵, 林昌虎. 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 19-24.
- [31] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [32] Campbell B D, Grime J P. A comparative study of plant responsiveness to the duration of episodes of mineral nutrient enrichment. *New Phytologist*, 1989, 112(2): 261-267.
- [33] 乔宇鑫, 朱华忠, 钟华平, 伍兆文, 孟雷, 周李磊. 内蒙古地区草地表层土壤容重空间格局分析. *草地学报*, 2016, 24(4): 793-801.
- [34] 王荣新, 车宗玺, 祁连山青海云杉林土壤理化指标空间变异性分析. *甘肃林业科技*, 2012, 37(1): 6-12.
- [35] 张乃明, 田光明, 吕贻忠, 史静副. *环境土壤学*. 北京: 中国农业出版社, 2013: 1-445.
- [36] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 祁栋林, 王力, 傅华. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响. *草业科学*, 2015, 32(1): 11-18.
- [37] Xie R, Wu X Q. Effects of grazing intensity on soil organic carbon of rangelands in Xilin Gol League, Inner Mongolia, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(11): 1550-1560.
- [38] 马和平, 郭其强, 刘合满, 钱登锋. 西藏色季拉山西坡不同海拔梯度表层土壤碳氮变化特性的研究. *林业科学研究*, 2013, 26(2): 240-246.
- [39] 毕珍. 四川盆地森林土壤的有机碳氮存储及其空间分布特征[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009: 1-46.
- [40] 张春娜, 延晓冬, 杨剑虹. 中国森林土壤氮储量估算. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2004, 26(5): 572-575, 579-579.
- [41] 万晓华, 黄志群, 何宗明, 胡振宏, 杨靖宇, 余再鹏, 王民煌. 阔叶和杉木人工林对土壤碳氮库的影响比较. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 345-350.
- [42] 邓仁菊, 杨万勤, 张健, 胡建利, 冯瑞芳, 简毅, 林静. 川西亚高山森林土壤有机层碳、氮、磷储量特征. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(4): 492-496.
- [43] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 邹建军. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 513-517.
- [44] 王振群, 乔有明, 段中华. 青海湖南岸不同植被类型土壤碳氮含量比较. *青海大学学报: 自然科学版*, 2008, 26(5): 54-58.
- [45] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(1): 72-80.
- [46] 刘世荣, 王晖, 梁军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [47] 潘根兴. 中国干旱性地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义. *南京农业大学学报*, 1999, 22(1): 51-57.
- [48] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 刘明亮, 庄大方. 1990—2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. *地理学报*, 2004, 59(4): 483-496.
- [49] 范宇, 刘世全, 张世熔, 邓良基. 西藏地区土壤表层和全剖面背景有机碳库及其空间分布. *生态学报*, 2006, 26(9): 2834-2846.
- [50] 方精云, 郭兆迪. 寻找失去的陆地碳汇. *自然杂志*, 2007, 29(1): 1-6.
- [51] Xu L, Yu G, He N, Wang Q F, Gao Y, Wen D, Li S G, Niu S L, Ge J P. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: A synthesis. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 121.