

青藏高原东缘乔灌交错带地被物和土壤碳氮储量特征

马志良¹, 顾国军², 赵文强³, 刘 美^{3,4}

(1.西华师范大学 生命科学学院, 四川 南充 637009; 2.阿坝州川西林业局, 四川 理县 623102; 3.中国科学院 成都生物研究所, 中国科学院 山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育 四川省重点实验室, 成都 610041; 4.绵阳师范学院, 生态安全与保护四川省重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要:为揭示青藏高原群落交错带地被物(枯落物和苔藓)和土壤碳、氮过程,以青藏高原东缘典型乔灌交错带云杉针叶林、云杉针叶林—高山柳灌丛交错区(乔灌)和窄叶鲜卑花灌丛 3 个林型为研究对象,采用野外调查和对地被物、土壤的采样分析,研究了乔灌交错带地被物和土壤有机碳和全氮储量及其分配特征。结果表明:3 个林型的地被物有机碳和全氮储量大小顺序为乔灌>针叶林>灌丛,有机碳大小分别为 28.73, 19.96, 5.31 t/hm², 全氮储量大小分别为 0.96, 0.54, 0.12 t/hm²。灌丛 0—30 cm 土壤有机碳储量(148.37 t/hm²)显著高于针叶林(118.19 t/hm²)和乔灌(114.93 t/hm²),而土壤全氮储量大小顺序则表现为灌丛(19.53 t/hm²)>乔灌(14.60 t/hm²)>针叶林(11.79 t/hm²), 10—20 cm 土壤有机碳和全氮储量显著高于 0—10 cm 和 20—30 cm 土壤。综合地被物和土壤有机碳和全氮储量,3 个林型地表有机碳、全氮储量大小顺序均表现为灌丛>乔灌>针叶林,0—30 cm 土壤有机碳和全氮储量均显著高于地被物,分别占总储量的 80.0%~96.5%和 93.8%~99.3%。这些研究表明青藏高原东缘高寒灌丛群落扩张将增加地表碳、氮库,有利于生态系统碳、氮固存。

关键词:碳氮储量; 枯落物; 苔藓; 土壤; 乔灌交错带

中图分类号:S718

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0017-07

Carbon and Nitrogen Storage of Ground Covers and Soils in the Forest-Shrub Ecotone of Eastern Qinghai-Tibet Plateau

MA Zhiliang¹, GU Guojun², ZHAO Wenqiang³, LIU Mei^{3,4}

(1.College of Life Science, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 2.Forestry Bureau of Aba Prefecture in Western Sichuan; Lixian, Sichuan 623102, China; 3.Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization, Sichuan Province Key Laboratory of Ecological Restoration and Biodiversity Conservation, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 4.Ecological Security and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: In order to reveal carbon and nitrogen processes of ground covers (litter and moss) and soils in the ecotone on the Qinghai-Tibet Plateau, the organic carbon and total nitrogen storage and allocation characteristics of ground covers and soils among three forest types in a typical ecotone (i. e., *Picea likiangensis* coniferous forest, *Picea likiangensis* coniferous forest—*Salix oritrepha* shrub, *Sibiraea angustata* shrub) on the eastern Qinghai-Tibet Plateau were investigated through field investigation and the sample analysis of ground covers and soils. The results show that the organic carbon and total nitrogen storage of ground covers followed the order of forest-shrub>coniferous forest> shrub, with the value of 28.73 t/hm², 19.96 t/hm², 5.31 t/hm² and 0.96 t/hm², 0.54 t/hm², 0.12 t/hm², respectively. The organic carbon storage in 0—30 cm soil layer in shrub (148.37 t/hm²) were significantly higher than those in coniferous forest (118.19 t/hm²) and forest-shrub (114.93 t/hm²), and the total nitrogen storage of soils followed the order of shrub (19.53 t/hm²)>forest-shrub (14.60 t/hm²)>coniferous forest (11.79 t/hm²). Moreover, the organic carbon and total nitrogen storage in 10—20 cm soil layers were significantly higher than those in 0—10 cm and 20—30 cm

收稿日期:2019-11-13

修回日期:2019-11-21

资助项目:西华师范大学博士科研启动基金“青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛群落各物种对土壤碳过程的相对贡献研究”(18Q047)

第一作者:马志良(1988—),男,河南周口人,博士,讲师,主要从事全球变化下高寒生态过程研究。E-mail:feng281@126.com

soil layers. Combining the organic carbon and total nitrogen storage of ground covers and soils, the organic carbon and total nitrogen storage of soil surface were significantly different among the three forest types, following the order of shrub>forest-shrub> coniferous forest. Furthermore, the storage in 0—30 cm soil layer accounted for 80.0%~96.5% and 93.8%~99.3% of the organic carbon and total nitrogen storage of soil surface, which were significantly higher than those in ground covers. These results indicate that the expansion of alpine shrub communities can increase carbon and nitrogen pools, which is beneficial to ecosystem carbon and nitrogen sequestration on the eastern Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: carbon and nitrogen storage; litter; moss; soil; forest-shrub ecotone

森林地被物(枯落物和苔藓等)是森林生态系统的重要组成部分,同时也是陆地生态系统重要的碳、氮等养分贮存库,其积累和分解变化将直接影响森林土壤碳、氮等养分动态^[1]。土壤是植物根系—土壤微生物进行物质交换与转化的重要场所,植物根系和土壤微生物生命活动需要从土壤中吸收大量的碳、氮等养分元素,同时植物根系残体和土壤微生物残体分解也将碳、氮等养分元素释放到土壤中^[2]。因此,森林地被物和表层土壤是一个连续的有机整体,共同构成森林地表碳和养分循环的重要组成部分^[3]。森林地表碳、氮库是生态系统碳、氮循环的活跃成分,其大小及动态推动整个森林生态系统碳、氮循环过程^[4]。森林地表碳、氮库受植被类型、物种组成、地形、气候变化和人类活动干扰等的综合影响^[5]。刘玉林等^[6]研究了黄土高原植被恢复过程对土壤碳、氮储量的影响,发现自然恢复草地有利于土壤氮的积累,而种植人工林则有利于增加土壤碳储量。刘顺等^[7]的研究也表明,植被类型是影响川西亚高山森林地表植物残体碳、氮储量的主要因素。以上研究表明,植物群落结构改变可显著影响地被物和土壤碳、氮储量。

岷江源头区位于青藏高原东缘,该区域地带性植被类型为以岷江冷杉(*Abies faxoniana*)和川西云杉(*Picea likiangensis*)为优势种的高山/亚高山针叶林和以窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)和高山柳(*Salix oritrepha*)为优势种的高寒灌丛^[8]。该区域森林地表有机碳、氮库容量巨大,在维持区域碳、氮的生物地球化学循环乃至整个陆地生态系统碳、氮平衡中起着非常重要的作用^[9]。然而,这些局域生境条件下相对稳定的植物群落正在受到全球气候变暖和人类活动干扰(森林砍伐、放牧)的影响,其群落结构与分布面积正在发生明显变化^[10]。例如,该区域高寒灌丛分布上限明显上升,且其分布面积仍在逐步扩张,出现大面积的乔灌交错区(以下简称为“乔灌”),沿海拔梯度在河谷—山麓—山坡上逐渐形成灌丛—乔灌—针叶林垂直分布格局^[11]。植物群落结构与分

布改变将显著影响该区域森林初级生产力和林下植物群落生长,直接影响森林地表地被物储量和碳、氮库。同时,植物群落结构改变也可通过影响土壤生物活动和土壤物理、化学性质间接影响土壤碳和氮等养分循环与周转过程^[12]。由此可见,植物群落结构变化将会对该区域地表碳、氮循环过程有重要影响。但到目前为止,对该区域森林群落地被物和土壤有机碳、氮储量和分配及其对植物群落结构变化的响应研究还缺乏报道,这在一定程度上限制了对高寒生态系统碳、氮过程的认识。因此,有必要开展乔灌交错区不同林型地表有机碳、全氮储量与分配特征的影响研究。

本文以青藏高原东缘岷江源头区的一个典型的高寒针叶林—灌丛垂直分布带为研究对象,调查 3 个海拔梯度上典型植被类型的地被物与土壤的有机碳、全氮储量及分配特征,以期科学管理青藏高原东缘群落交错带生态系统碳汇提供基础数据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院设立在四川省阿坝州松潘县川主寺镇卡卡山,地理坐标为 32°58'N,103°40'E,海拔范围 2 800~4 000 m,距离岷江源 3.5 km。山体坡度介于 20°~50°。气候类型为典型的高原山地气候,昼夜温差大。年平均温度为 4.8℃,年平均降水量 693 mm,且主要集中于 5—8 月。季节性冻土期长达 5 个月。研究区域主要土壤类型为棕色针叶林土和高山草甸土,土层较薄。山体植被乔木层植物主要有岷江冷杉、川西云杉、方枝柏(*Sabina saltuaria*)等。灌木层植物主要有窄叶鲜卑花、高山柳、峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、高山绣线菊(*Spiraea alpina*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、刺黑珠(*Berberis sargentiana*)等。草本层植物主要有矮生蒿草(*Kobresia humilis*)、羊茅(*Festuca ovina*)、红花绿绒蒿(*Meconopsis punicea*)、条纹龙胆(*Gentiana stria-*

ta)、黄花野青茅(*Deyeuxia flavens*)、钟花报春(*Primula sikkimensis*)、长叶火绒草(*Leontopodium longifoliaris*)等。苔藓层植物主要有锦丝藓(*Actinohydium hookeri*)、塔藓(*Hylocom splendens*)和地钱(*Marchantiaceae*)等。

1.2 试验设计

采用平行样带法收集地被物和土壤层样品。于 2017 年 10 月下旬在研究区域内选择具有代表性的典型针叶林—灌丛交错带,平行于等高线从低海拔

至高海拔依次经窄叶鲜卑花灌丛(海拔 3 300 m)、乔灌(川西云杉—窄叶鲜卑花,海拔 3 380 m)和川西云杉针叶林(海拔 3 450 m)分别设置一条宽 30 m 的平行样带。然后在每一植被类型的平行样带内设置 3 个重复的样方,其中,在灌丛和乔灌样带设置样方面积为 10 m × 10 m,在针叶林样带设置样方面积为 20 m × 20 m,分别调查各样带内植物物种组成、平均高度、盖度等因子。各研究点地理特征和植被基本特征详情见表 1。

表 1 青藏高原东缘乔灌交错带植被基本特征

植被类型	优势种	海拔/m	坡度/(°)	平均高度/m			平均盖度/%			
				乔木	灌木	草本	乔木	灌木	草本	苔藓
灌丛	窄叶鲜卑花、高山柳	3300	25	0	1.6	0.3	0	70	85	15
乔灌	川西云杉、窄叶鲜卑花、高山柳	3380	32	15	2.5	0.5	30	40	65	75
针叶林	川西云杉	3450	38	25	1.5	0.2	80	20	30	90

然后,在各平行样带内的每一个样方内随机布设 4 个 20 cm × 20 cm 采样点,分别收集各采样点内地表枯落物和苔藓,并记录其厚度。在灌丛样方内,由于苔藓的厚度和盖度过低,因而将地表苔藓与枯落物合并收集,并标记为地被物层。在乔灌和针叶林样带,分别收集各采样点内地表苔藓和枯落物,并分别标记。将所收集的地被物样品带回实验室,于 65℃ 下烘干并称重,用于计算单位面积内苔藓和枯落物的储量。烘干的苔藓和枯落物样品研磨后用于测定有机碳、全氮含量。

地被物样品收集完成后,在每个采样点内用环刀分别采集 0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土壤样品,带回实验室,用于土壤容重的测定。另外,在每个采样点用土钻再采集 1 份 0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土壤样品,风干、研磨、过筛后,用于测定土壤有机碳、全氮含量。

1.3 数据与方法

交错带地被物和土壤样品有机碳、全氮含量均使用 C,N 元素分析仪(MACRO cube,Elementar,Germany)测定。

交错带苔藓和枯落物单位面积有机碳、全氮储量采用以下公式进行计算:

$$S_i = B_i \times C_i \times 10^{-3}$$

式中: S_i 为交错带苔藓和枯落物有机碳、全氮储量(t/hm^2); B_i 为交错带苔藓和枯落物单位面积生物量(t/hm^2); C_i 为交错带苔藓和枯落物有机碳、全氮含量(g/kg)。交错带地被物有机碳、全氮储量为苔藓和枯落物有机碳、全氮储量之和。

交错带 0—30 cm 土壤有机碳、全氮储量为各层土壤有机碳、全氮储量之和。各层土壤有机碳、全氮

储量采用以下公式进行计算:

$$S_j = C_j \times D_j \times E_j \times (1 - G_j) \times 10^{-1}$$

式中: S_j 为第 j 层土壤有机碳、全氮储量(t/hm^2); C_j 为第 j 层土壤有机碳、全氮含量(g/kg); D_j 为第 j 层土壤容重(g/cm^3); E_j 为第 j 层土壤厚度(cm); G_j 为第 j 层砾石占土壤体积的百分比(%)。

1.4 数据统计分析

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行不同林型间苔藓、枯落物、地被物碳氮储量以及土壤有机碳、全氮储量差异性检验($\alpha = 0.05$),采用双因素方差分析(two-factor ANOVA)检验土层、林型对土壤有机碳、全氮储量的影响($\alpha = 0.05$)。所有统计分析均在 SPSS 20.0 中进行,作图使用 Origin 9.0 软件完成。图表中的数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

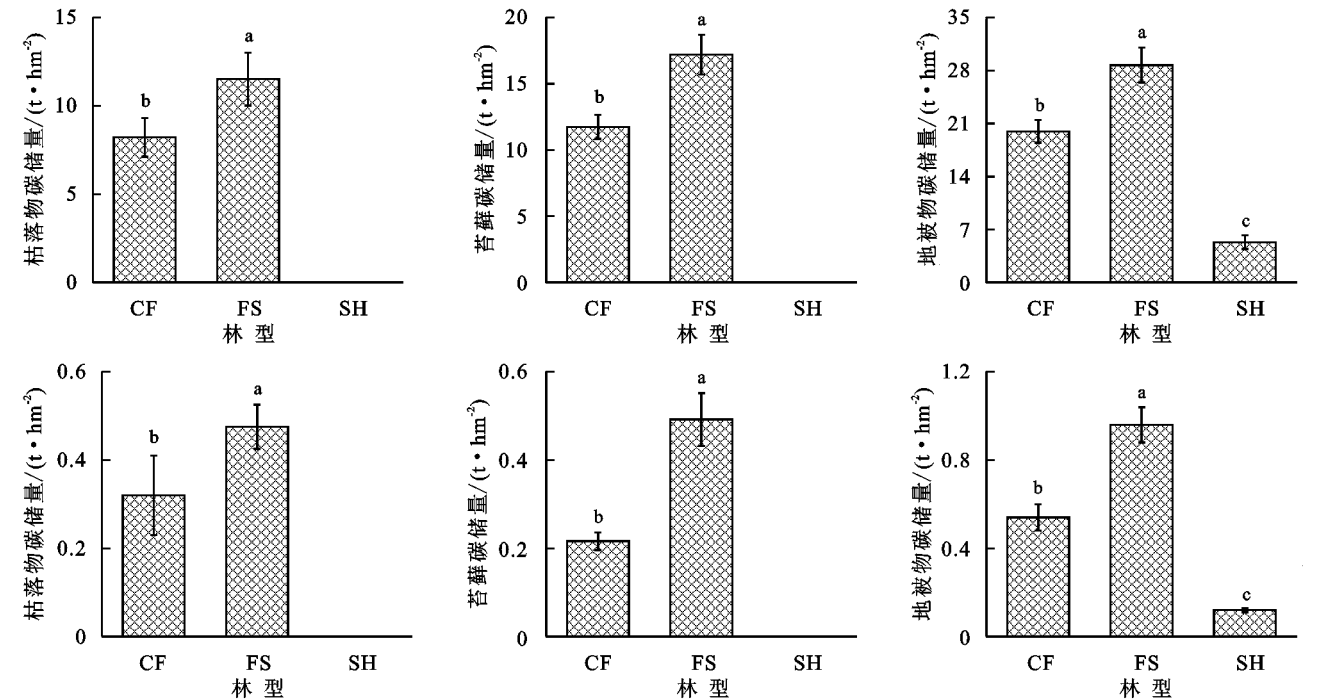
2.1 林型地被物有机碳、全氮储量

由图 1 可知,青藏高原东缘乔灌交错带不同林型地被物有机碳、全氮储量具有显著差异,3 个林型地被物有机碳储量大小顺序表现为乔灌($28.73 \text{ t}/\text{hm}^2$)>针叶林($19.96 \text{ t}/\text{hm}^2$)>灌丛($5.31 \text{ t}/\text{hm}^2$);全氮储量大小顺序也表现为乔灌($0.96 \text{ t}/\text{hm}^2$)>针叶林($0.54 \text{ t}/\text{hm}^2$)>灌丛($0.12 \text{ t}/\text{hm}^2$)。在灌丛林地,由于苔藓的盖度和厚度过低,没有进一步区分苔藓和枯落物。而在乔灌和针叶林中,苔藓有机碳储量分别为 $17.21, 11.75 \text{ t}/\text{hm}^2$,均大于枯落物碳储量。乔灌林地苔藓全氮储量与枯落物差异不显著,而针叶林苔藓全氮储量显著低于枯落物。

2.2 林型土壤碳、氮储量

由图 2 和表 2 可知,青藏高原东缘乔灌交错带不同林型土壤有机碳、全氮含量差异显著,土壤有机碳含量大小顺序表现为乔灌>针叶林>灌丛,土壤全氮

含量大小顺序则表现为乔灌>灌丛>针叶林。3 个林型土壤有机碳和全氮含量均表现为随土层的加深而显著降低。林型与土层的交互作用对交错带土壤有机碳、全氮含量也有显著影响。



注:CF 为针叶林;FS 为乔灌;SH 为灌丛.不同小写字母表示不同林型间差异显著($p<0.05$),下同。

图 1 青藏高原东缘乔灌交错带 3 个林型地被物有机碳、全氮储量

青藏高原东缘乔灌交错带不同林型间 0—30 cm 土壤容重差异显著。灌丛土壤容重显著高于针叶林和乔灌,3 个林型土壤容重均随土层深度增加而显著增加(图 3 和表 2)。3 个林型 0—30 cm 土壤有机碳、全氮储量具有显著差异(图 4 和表 2)。其中,灌丛土壤有机碳储量(148.37 t/hm²)显著高于针叶林(118.19 t/hm²)和乔灌(114.93 t/hm²),而土壤全氮储量大小顺序则表现为灌丛(19.53 t/hm²)>乔灌(14.60 t/hm²)>针叶林(11.79 t/hm²)。土层对 3 个林型土壤有机碳、全氮

储量也有显著影响,10—20 cm 土壤有机碳、全氮储量显著高于 0—10 cm 和 20—30 cm 土壤。

表 2 双因素方差分析

因子	林型	土层	林型×土层
土壤容重	<0.01	<0.001	<0.001
土壤有机碳含量	<0.01	<0.001	<0.001
土壤全氮含量	<0.001	<0.001	<0.001
土壤有机碳储量	<0.001	0.027	0.065
土壤全氮储量	<0.001	0.015	0.057

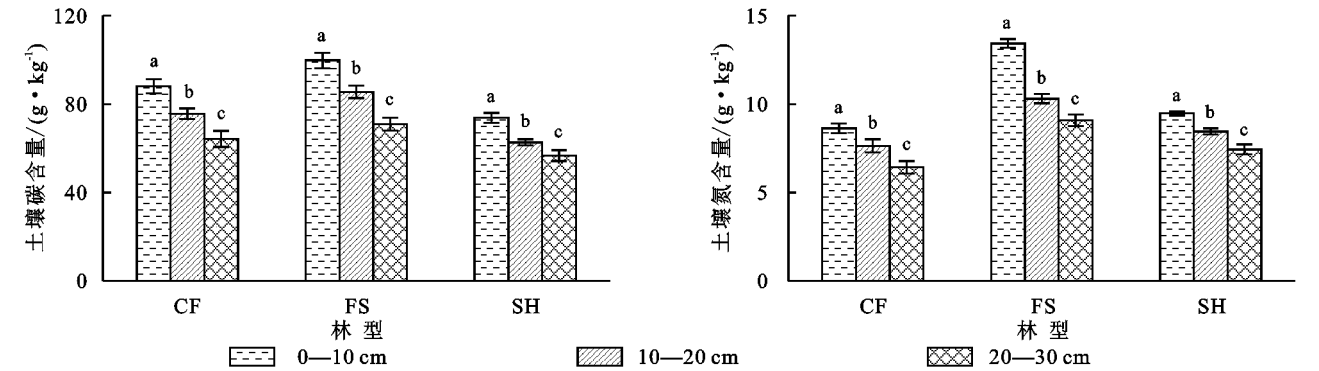


图 2 青藏高原东缘乔灌交错带 3 个林型 0—30 cm 土壤有机碳、全氮含量

2.3 林型地表有机碳、全氮储量与分配

由图 5 可知,综合地被物和土壤有机碳、全氮储量,青藏高原东缘乔灌交错带 3 个林型地表有机碳、全

氮储量在不同林型间差异显著,有机碳储量表现为灌丛(153.68 t/hm²)>乔灌(143.66 t/hm²)>针叶林(138.15 t/hm²),全氮储量也表现为灌丛(19.66 t/hm²)>乔灌

(15.56 t/hm²)>针叶林(12.33 t/hm²)。交错带不同林型地被物和土壤有机碳、全氮分配显著不同。其中,0—30 cm 土壤有机碳、全氮储量显著高于地被物,分别占总储量的 80.0%~96.5%和 93.8%~99.3%。

3 讨论

3.1 林型地被物有机碳、全氮储量特征

群落交错带往往具有较高的物种多样性,对光照、空间等资源的利用率较高,群落生产力也较高,其地被物的厚度和储量也显著高于其他样带,因而蕴含

着较高的地表碳、氮库^[13]。

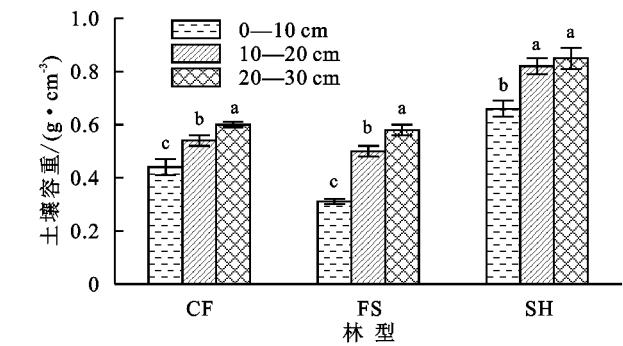


图3 青藏高原东缘乔灌交错带3个林型0—30 cm土壤容重

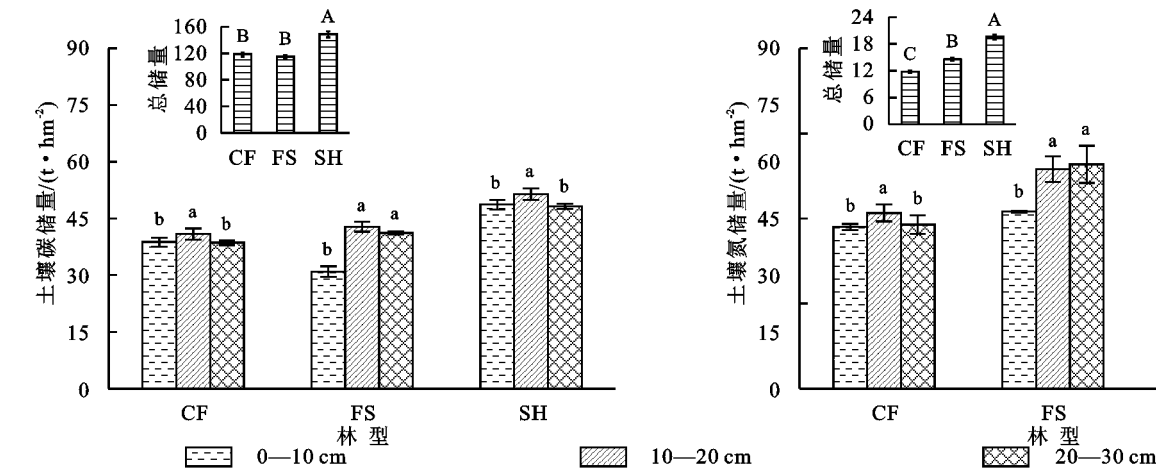


图4 青藏高原东缘乔灌交错带3个林型0—30 cm土壤有机碳、全氮储量

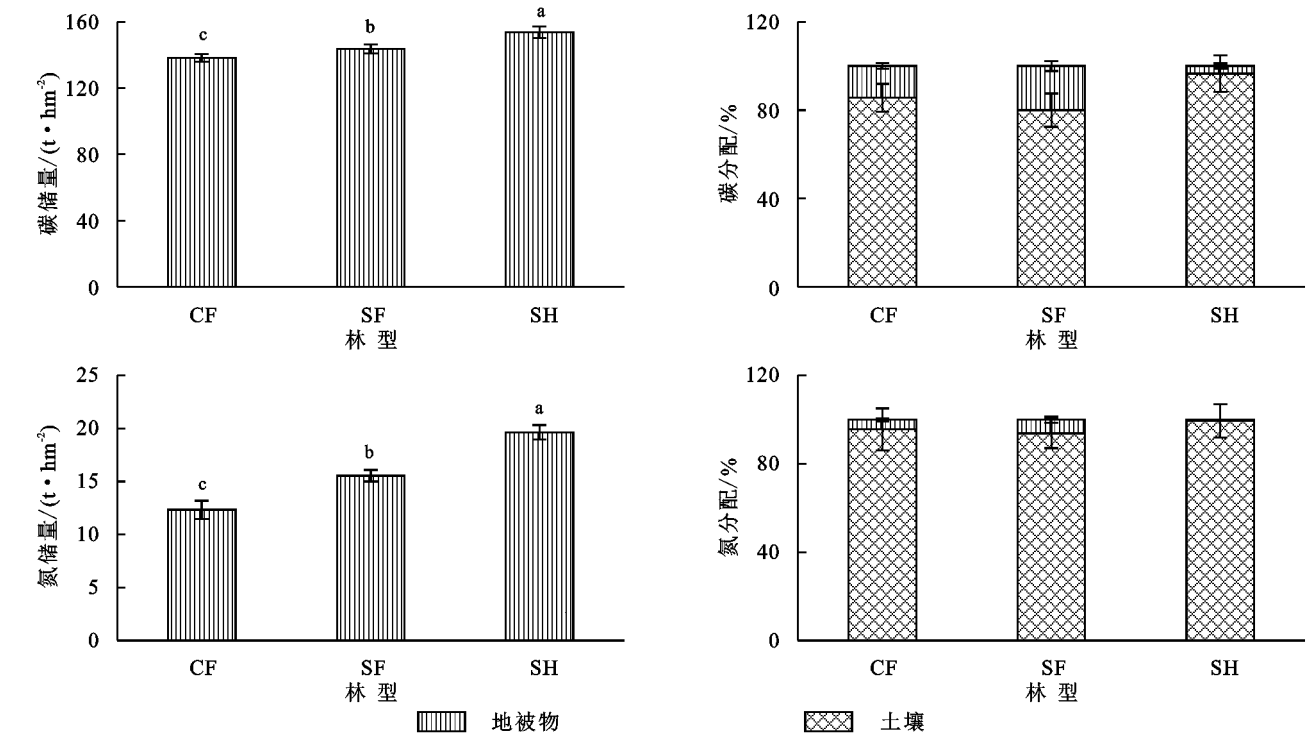


图5 青藏高原东缘乔灌交错带3个林型地表有机碳、全氮储量及分配

本研究中,青藏高原东缘乔灌交错带3个林型地被物有机碳和全氮储量具有显著差异,其中乔灌地被物有机碳和全氮储量最大,针叶林次之,而灌丛最小(图1),与灌丛—草地交错带的研究结果相似^[14]。这

主要是因为乔灌内植被覆盖度较高,大量的高山柳、峨眉蔷薇等阔叶灌丛混入云杉针叶林内,林下草本植物和苔藓发育完全^[15],乔—灌—草空间分布格局使乔灌林地对光照、空间等资源利用率最高,因而乔

灌地被物有机碳和全氮储量最高。云杉针叶林草本层植物多样性与覆盖度虽然较低,但是森林地表积累了大量低质量的针叶凋落物和枯枝,且常年低温的林内环境条件不利于枯落物的分解,而且阴湿的环境条件适宜苔藓的生长,因而有利于地被物的积累和有机碳、氮的固存。本研究还发现,乔灌枯落物和苔藓有机碳和全氮储量显著高于针叶林。这表明灌丛混入针叶林可能会提高生态系统枯落物和苔藓碳、氮固存能力。而灌丛林地草本层物种多样性较低,同时受到不同程度的放牧和人类活动的干扰,植被覆盖度不如乔灌和针叶林^[16],导致其枯落物储量最低。而且灌丛林地内的环境条件也不适宜于苔藓的发育,其地被物有机碳、全氮储量显著低于乔灌和针叶林。加之灌丛林地海拔最低,土壤温度和空气温度较高,而阔叶灌丛和草本层枯落物的基质质量较高,这均有利于枯落物分解^[17]。因此,灌丛林地地被物有机碳、全氮储量最低。

3.2 林型土壤有机碳、全氮储量特征

森林土壤有机碳、氮库在调节陆地生态系统生物地球化学循环和缓解全球气候变化中起着十分重要作用^[18]。深入了解青藏高原东缘乔灌交错带表层土壤有机碳、全氮储量特征有助于认识青藏高原高寒区域土壤碳、氮循环过程。本研究中,林型和土层显著影响乔灌交错带 3 个林型土壤有机碳和全氮含量。其中,乔灌土壤有机碳、全氮含量均最高(图 2),这主要是因为乔灌林内枯落物储量最大,地表枯落物通过淋溶、矿化分解等过程向土壤中输入大量有机质,是森林土壤有机质的主要来源^[19]。乔灌表层土壤中存在大量的阔叶灌丛根系,其死亡与周转向土壤中输入大量的有机质。而针叶林和灌丛的有机碳含量与全氮含量特征不一致则说明了不同植被类型对土壤碳和氮素的利用率不同,也可能是不同植被类型影响了土壤有机碳、氮的转化过程^[20]。3 个林型土壤有机碳、全氮含量均表现为随土层深度增加而显著降低(图 2),王艳丽等^[21]在青海省不同森林生态系统中也发现了类似的现象。这主要是因为枯落物矿化分解中有机质淋溶过程随土层深度增加而降低^[22],因而枯落物对土壤有机碳、氮含量的影响程度随土层深度增加而显著降低。以上结果说明,青藏高原东缘乔灌交错带不同林型土壤有机质输入存在很大差异,森林群落结构转换将可能显著影响地表碳、氮过程。

土壤有机碳、全氮储量受土壤有机碳含量和土壤容重的综合影响^[23]。本研究中,灌丛土壤有机碳储量显著高于针叶林和乔灌,而土壤全氮储量表现为灌丛>乔灌>针叶林(图 4)。虽然针叶林和乔灌林地 0—30 cm 土

壤有机碳、全氮含量较高,但是其土壤容重明显低于灌丛林地,因此针叶林和乔灌土壤有机碳、全氮储量不如灌丛林地高,这说明在交错带生态系统土壤容重是影响土壤有机碳、全氮储量的主要因素。虽然针叶林地地被物储量较高,但是林内低温环境条件限制了其分解和周转,导致其向土壤输入的有机质数量不如乔灌和灌丛林地。本研究还发现,土层对交错带 3 个林型土壤有机碳、全氮储量也存在显著影响(图 4),10—20 cm 土壤有机碳、全氮储量显著高于 0—10 cm 和 20—30 cm 土壤。虽然 0—10 cm 土壤有机碳和全氮含量最高,但是由于其土壤容重较小,土壤有机碳和氮素易受淋溶作用的影响而向下层土壤迁移;而 10—20 cm 土壤容重较大,有利于土壤有机碳和氮素的驻留^[24]。

3.3 林型地表有机碳、全氮储量分配特征

乔灌交错带 3 个林型地表有机碳、全氮储量均表现为灌丛>乔灌>针叶林。0—30 cm 土壤有机碳、全氮储量显著高于地被物(图 5),这说明土壤层是交错带地表有机碳、全氮存储的优势层,这与刘顺等^[7]在川西亚高山不同森林生态系统中的研究结果相似。植被层物种组成对地表枯落物储量和苔藓的发育起着决定作用,同时对表层土壤碳、氮过程具有重要影响,因而交错带不同林型地表有机碳和全氮储量差异显著。青藏高原高寒灌丛植物群落扩张可能通过提高地被物和表层土壤有机碳、全氮储量进而影响生态系统地表碳、氮循环过程。

4 结论

青藏高原东缘乔灌交错带内地被物有机碳、全氮储量大小顺序表现为乔灌>针叶林>灌丛。受土壤容重和土壤有机碳、全氮含量的共同影响,灌丛土壤有机碳储量显著高于针叶林和乔灌,而土壤全氮储量大小顺序则表现为灌丛>乔灌>针叶林。交错带 3 个林型 10—20 cm 土壤有机碳、全氮储量也显著高于 0—10 cm 和 20—30 cm 土壤。综合地被物和土壤有机碳、全氮储量,交错带地表有机碳、全氮储量大小顺序均表现为灌丛>乔灌>针叶林,0—30 cm 土壤有机碳、全氮储量显著高于地被物,是地表碳、氮存储的优势层。

以上研究结果表明,受森林植物群落结构和物种组成改变的影响,青藏高原东缘乔灌交错带地被物和土壤有机碳和全氮储量将发生明显的变化。灌丛向针叶林方向扩张将显著增加地被物和土壤有机碳、全氮储量,提高该区域生态系统地表有机碳和全氮的固存能力。以上研究结果可为深入认识青藏高原东缘乔灌交错带生态系统碳汇过程提供基础依据。

参考文献:

- [1] Wu S N, Li J Q, Zhou W M, et al. A statistical analysis of spatiotemporal variations and determinant factors of forest carbon storage under China's Natural Forest Protection Program [J]. *Journal of Forestry Research*, 2018,29:415-424.
- [2] Li H, Shen H H, Zhou L H, et al. Shrub encroachment increases soil carbon and nitrogen stocks in temperate grasslands in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2019,30(7):756-767.
- [3] Vukicevich E, Lowery D T, Úrbez-Torres J R, et al. Groundcover management changes grapevine root fungal communities and plant-soil feedback[J]. *Plant and Soil*, 2018,424:419-433.
- [4] Wu J, Stephen Y, Cai L Q, et al. Effects of different tillage and straw retention practices on soil aggregates and carbon and nitrogen sequestration in soils of the northwestern China [J]. *Journal of Arid Land*, 2019,11:567-578.
- [5] Thomas A D, Elliott D R, Dougill A J, et al. The influence of trees, shrubs, and grasses on microclimate, soil carbon, nitrogen, and CO₂ efflux: Potential implications of shrub encroachment for Kalahari rangelands[J]. *Land Degradation & Development*, 2018,29(5):1306-1316.
- [6] 刘玉林,朱广宇,邓蕾,等.黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响[J].*应用生态学报*,2018,29(7):2163-2172.
- [7] 刘顺,罗达,刘千里,等.川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局[J].*生态学报*,2017,37(4):1074-1083.
- [8] 张诗羽,张毅,王昌全,等.岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性[J].*水土保持通报*,2018,38(1):69-75.
- [9] Liu W, Chen S, Qin X, et al. Storage, patterns, and control of soil organic carbon and nitrogen in the north-eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Environmental Research Letters*, 2012,7:035401.
- [10] Miehe G, Schleuss M P, Seeber E, et al. The *Kobresia pygmaea* ecosystem of the Tibetan highlands-Origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,648:754-771.
- [11] 张贺全.岷江源区植物群落物种多样性分析[J].*水土保持研究*,2013,20(5):135-140.
- [12] Winsome T, Silva L C R, Scow K M, et al. Plant-microbe interactions regulate carbon and nitrogen accumulation in forest soils[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017,384:415-423.
- [13] Ratcliffe J L, Creevy A, Andersen R, et al. Ecological and environmental transition across the forested-to-open bog ecotone in a west Siberian peatland[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,607:816-828.
- [14] Moreno-de las Heras M, Sierra R D, Turnbull L, et al. Assessing vegetation structure and ANPP dynamics in a grassland-shrubland Chihuahuan ecotone using NDVI-rainfall relationships[J]. *Biogeosciences*, 2015,12(1):2907-2925.
- [15] Wang H W, Qi Y, Huang C L, et al. Analysis of vegetation changes and dominant factors on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2019,11(2):62-70.
- [16] Wang X, Michalet R, Liu Z, et al. Stature of dependent forbs is more related to the direct and indirect above-and below-ground effects of a subalpine shrub than are foliage traits[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2019,30(3):403-412.
- [17] Santos F M, Balieiro F D C, Fontes M A, et al. Understanding the enhanced litter decomposition of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia mangium*[J]. *Plant and Soil*, 2018,423:141-155.
- [18] Mushinski R M, Boutton T W, Scott D A. Decadal-scale changes in forest soil carbon and nitrogen storage are influenced by organic matter removal during timber harvest[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017,122:846-862.
- [19] Tuo D F, Gao G Y, Chang R Y, et al. Effects of revegetation and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen variations in deep profiles on the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,626:399-411.
- [20] Nwaogu C, Okeke O J, Fashae O, et al. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by different land use in an Ultisol in Imo Watershed, southern Nigeria[J]. *Chemistry and Ecology*, 2018,34(9):854-870.
- [21] 王艳丽,字洪标,程瑞希,等.青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J].*生态学报*,2019,39(11):4096-4105.
- [22] Lee M H, Park J H, Matzner E. Sustained production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest floors during continuous leaching[J]. *Geoderma*, 2018,310:163-169.
- [23] Nie X Q, Peng Y F, Li F, et al. Distribution and controlling factors of soil organic carbon storage in the northeast Tibetan shrublands[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,19:322-331.
- [24] Stergiadi M, van der Perk M, de Nijs A C M, et al. Effects of climate change and land management on soil organic carbon, dynamics and carbon leaching in northwestern Europe [J]. *Biogeosciences*, 2016,13(5):1519-1536.