

纳帕海不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征

李璇, 马旭晨 (西南林业大学环境科学与工程学院, 云南昆明 650224)

摘要 [目的]探讨纳帕海区域土壤有机碳(SOC)在不同土地利用方式下的剖面分布特征及其与土壤含水量、容重的相关关系,为该区域合理高效利用土地资源提供科学依据。[方法]对猪拱地、农田、灌丛和森林4种土地利用类型的SOC分布特征进行研究。[结果]0~50 cm土层深度内,SOC含量由高到低依次为农田(26.43 g/kg)、猪拱地(20.95 g/kg)、灌丛(20.16 g/kg)、森林(17.25 g/kg);猪拱地、农田、灌丛和森林均为0~10 cm土层SOC含量最高,是主要的碳储层,分别占0~50 cm土层的37.42%、28.07%、49.81%和30.10%,随土壤深度的加深,SOC含量呈减少趋势;SOC密度与SOC储量呈基本一致的变化趋势;各样地表层SOC与土壤含水量呈显著正相关($R^2=0.50, P<0.05$),与土壤容重呈极显著负相关($R^2=0.60, P<0.01$)。[结论]不同土地利用类型其SOC含量在垂直方向上的分布不同,湿地的退化会不同程度地导致SOC流失,表层SOC含量很大程度上受土壤含水量和土壤容重的制约。

关键词 高原湿地;土壤有机碳;土地利用类型;纳帕海

中图分类号 S151;X171 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)07-0100-04

The Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon under Different Land Uses Patterns in Napahai

LI Xuan, MA Xu-chen (College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224)

Abstract [Objective] To study the profile distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) under different land use patterns and its correlation with soil water content and bulk density in Napahai plateau wetland in order to provide scientific basis for the rational and efficient use of land resource in the region. [Method] The pig arched meadow, farmland, shrub and forest were selected in this area and the study was carried out. [Result] In 0-50 cm soil depth, soil organic carbon content from high to low was farmland (26.43 g/kg), pig arched meadow (20.95 g/kg), shrub (20.16 g/kg), forest (17.25 g/kg) in Napahai plateau wetland area. SOC content was the highest at 0-10 cm soil layer and which was the main SOC reservoir accounted for 37.42%, 28.07%, 49.81% and 30.10% of 0-50 cm soil depth, and the SOC content decreased with soil depth enhance. The SOC density and SOC reserves showed a consistent trend. According to the regression equation, the soil water content was positively correlated with SOC ($R^2=0.50, P<0.05$) and the soil bulk density was negatively correlated with SOC ($R^2=0.60, P<0.01$), and they all reached a significant level in the soil surface layer ($P<0.05$). [Conclusion] Different land use patterns have different storage capacity for SOC in vertical direction, and the degradation of wetland will lead to the loss of SOC in varying degrees. The content of SOC in the surface is largely affected by soil water content and soil bulk density.

Key words Plateau wetland; Soil organic carbon; Land use types; Napahai

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库,据估算,全球1 m深度的土壤中贮存的有机碳量约为1 500 Gt,超过了植被与大气有机碳储量之和^[1],一方面为植被生长提供碳源,另一方面以CO₂等温室气体的形式向大气释放碳,其微小波动将在很大程度上减缓或加剧大气CO₂浓度升高,改变全球碳平衡格局^[2-3]。土地利用/覆被变化(LUCC)对土壤有机碳(SOC)的贮量、性质、动态和稳定性有重大影响,具有源汇双重性^[4],是影响土壤碳库变化的主要驱动力之一^[5],也是影响地球陆地生态系统土气交换的关键因素^[6]。

云南纳帕海地处青藏高原东南缘,横断山脉三江纵向岭谷区东部,属喀斯特型季节性高原沼泽湿地,高原湖泊湿地数量众多。与长江中下游湿地、北方平原湿地及若尔盖高原湿地不同,其面积较小,孤立分散,相互之间无水道相通,形成封闭或半封闭的湿地环境,具有敏感度高、空间转移能力强、稳定性差的特点^[7-8],是我国湿地的独特类型,其特殊的地理位置和独特的生态功能^[9],使其成为我国重要的生态功能区域及区域生态安全保障的关键区域。近年来,纳帕海高原湿地湖泊面积减小,景观格局变化明显,景观基质从沼泽或沼泽化草甸的湿地类型转化为以草甸景观为主导的非湿

地类型,包括旅游、放牧和农业开垦在内的众多人类活动使得区域生态环境面临巨大外界压力,造成土壤有机碳大量流失^[10-12]。

自20世纪90年代以来,土地利用/覆被变化研究成为地理学和相关学科研究的热点,其对土壤碳储量的影响备受关注^[13]。但由于气候、土壤、植被等自然因素和人为干扰的不同,LUCC对SOC的影响区域差异较大,而且较多的研究局限在单一生态系统^[14-16],对于农牧交错带这种景观高度破碎的敏感区却少有报道^[17],针对滇西北纳帕海高寒湿地区农牧交错带的研究更少。笔者针对纳帕海区域内受人类活动影响较大的4种土地利用类型,研究其土壤有机碳状况,以期为区域生态保护及生态安全构建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 纳帕海位于云南省香格里拉市境内(99°37'~99°43' E,27°49'~27°55' N),横断山脉三江纵谷区东部,海拔3 260 m。该区域属亚热带西南季风气候,年平均气温5.4℃,年平均降水量619 mm^[18]。区域内土壤为亚高山草甸土土属,根据土壤剖面性状、地表植被类型、水分状况等,可分为弃耕地-中生草甸土、中生草甸土、湿草甸土和沼泽土^[19]。

纳帕海三面环山,湖滨区分布大面积的沼泽化草甸,周围面山上生长着以高山松(*Pinus densata*)为优势的针叶林,在接近湖盆的面山基部区域,因人类活动等因素的干扰,形成众多斑块状分布的灌丛化群落,以高山柏(*Sabina squa-*

基金项目 国家自然科学基金项目(31360122);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目。

作者简介 李璇(1992—),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向:土壤生态学。

鸣谢 感谢纳帕海省级自然保护区管理所对该研究野外工作的支持!

收稿日期 2017-01-28

meta) 为优势。湖泊周边的草甸群落, 在家猪的啃食和践踏下, 形成表层被一定程度剥离的斑块状裸地(猪拱地), 土壤上翻裸露, 土壤结构遭受严重破坏, 而近村庄的区域多数被开垦为农田, 以种植青稞(*Hordeum vulgare* Linn. var. *nudum* Hook. f.) 为主。

1.2 研究方法 土壤样品的采集于 2014 年 7 月植被生长盛期进行。选取猪拱地、农田、高山灌丛和森林作为研究样地。在样地内, 根据典型性和代表性原则, 选取 3 个代表性的样方。在每个样地的 3 个小样方旁分别挖一个 50 cm 深的土壤剖面, 分层(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm) 采集样品。土壤容重用 100 cm³ 环刀采样测定, 土壤含水量采用烘干法测定, SOC 含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法^[20]测定。SOC 密度和单位面积一定深度下 SOC 储量按下式计算^[21]:

$$C_i = D_i \times W_c \times (1 - G_i) \quad (1)$$

$$T_c = \sum_{i=1}^n (C_i \times d_i) \times 0.1 \quad (2)$$

式中, C_i 为有机碳密度, kg/m³; D_i 为土壤容重, g/cm³; W_c 为 SOC 含量, g/kg; G_i 为大于 2 mm 砾石所占百分比; T_c 为单位面积 0~50 cm 深度 SOC 储量, kg/m²; d_i 为第 i 层厚度, cm; n 为层数, 该研究中 $n=5$ 。由于该研究区主要土壤类型为沼泽和沼泽化草甸泥炭土发展演化而来的草甸土, 土层分布较厚(一般都在 1 m 以下), 而该研究中所取样品深度为 50 cm(主要受保护区内管理等限制), 样品中基本无砾石或砾石含量极少。因此, 在计算 SOC 密度时不再考虑砾石

含量的比例。

1.3 数据分析 试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 22.0 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型 SOC 含量剖面分布特征 由表 1 可知, 纳帕海 SOC 含量在 8.87~50.21 g/kg。各样地 0~10 cm 土层有机碳含量最高, 30~40 和 40~50 cm 土层含量相对较低, 总体呈由地表向地下减少的特征, 这与张文菊等^[22]、曹生奎等^[23]的研究结果一致。从表层至地下 50 cm, 猪拱地、农田、灌丛和森林有机碳分别减少了 68.10%、56.09%、82.34% 和 42.84%。方差分析结果表明, 土壤层次间, 农田和灌丛均在表层 0~10 cm 与下层 30~40 cm、40~50 cm 呈显著差异($P < 0.05$), 猪拱地与森林在各层次间均无显著差异; 土地利用类型间, 仅灌丛和森林在 0~10 cm 土层有显著差异($P < 0.05$)。

各样地之间, 0~10 cm SOC 以灌丛最高, 达 50.21 g/kg, 其次为猪拱地和农田, 分别为 39.20 和 37.09 g/kg, 最低的为森林, 仅为 25.96 g/kg。从不同土地利用类型平均值看, SOC 含量由大到小依次为农田、猪拱地、灌丛、森林。

根据碳储层(SOC 含量 > 30.00 g/kg 的层次)的定义, 农田土壤碳储层厚度为 20 cm, 灌丛为 10 cm, 森林 SOC 偏低, 其他土壤剖面 SOC 均低于 30.00 g/kg。从森林到灌丛, 0~10 cm 土层 SOC 含量显著增加。

表 1 不同土地利用类型 SOC 含量

Table 1 Soil organic carbon content under different land use types

土地利用类型 Land use type	土层 Soil layer//cm					平均 Mean
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	
猪拱地 Pig arched meadow	39.20 ± 16.29 aAB	20.67 ± 22.40 aA	19.57 ± 22.76 aAB	12.83 ± 13.02 aA	12.51 ± 10.75 aA	20.95
农田 Farmland	37.09 ± 7.40 aAB	31.85 ± 3.29 abA	27.41 ± 5.42 abcA	19.49 ± 12.89 bA	16.29 ± 5.62 bcA	26.43
灌丛 Shrub	50.21 ± 33.76 aA	21.15 ± 11.78 abA	11.18 ± 5.68 bABC	9.40 ± 5.27 bA	8.87 ± 6.28 bA	20.16
森林 Forest	25.96 ± 13.97 aBC	19.32 ± 7.13 aA	15.23 ± 9.62 aAB	10.89 ± 6.93 aA	14.84 ± 10.31 aA	17.25

注: 不同小写字母表示同一土地利用类型不同土层间差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一土层不同土地利用类型间差异显著($P < 0.05$)
Note: Different small letters indicate significant difference in different soil layers of the same land use type at 0.05 level, different capital letters indicate significant difference in different land use types in the same soil layer at 0.05 level

2.2 不同土地利用类型 SOC 密度及储量剖面分布特征 由图 1 可知, SOC 密度在各样地的垂向分布猪拱地、灌丛和森林表现为总体下降, 农田则表现为先升后降的趋势。前者最大值均分布在 0~10 cm 土层, 且其 SOC 密度显著高于其他土层, 30~40 cm 土层 SOC 密度处于较低水平, 最高值是最低值的 2~3 倍。后者最高值出现在 10~20 cm 土层, 30~40 cm 土层 SOC 密度最低。从 5 层土壤的平均值看, 其 SOC 密度表现为农田最大, 为 36.83 kg/m³; 其次为猪拱地, 为 36.07 kg/m³; 森林最小, 为 26.81 kg/m³。

SOC 密度随土层变化的幅度决定于 SOC 含量和土壤容重随土层变化的趋势。0~50 cm 土层内的 SOC 储量与 SOC 密度在各样地间的变化趋势基本一致, 表现为农田 > 猪拱地 > 灌丛 > 森林, 分别为 18.42、18.04、14.29 和 13.40 kg/m² (图 1)。

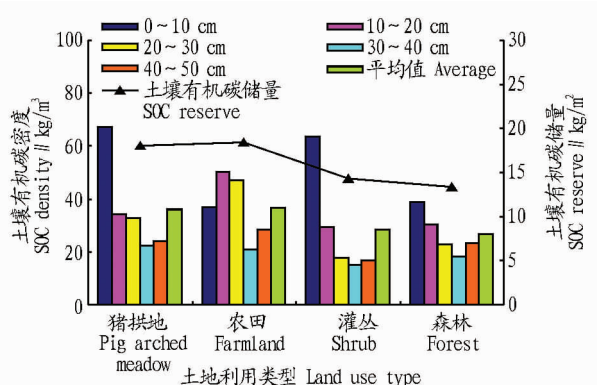


图 1 不同土地利用类型土壤有机碳密度及储量

Fig. 1 Soil organic carbon density and storage under different land use types

2.3 不同土地利用类型土壤含水量和土壤容重剖面分布特征 由表2可知,猪拱地土壤含水量随土层深度的增加呈阶梯下降,灌丛总体也呈下降趋势。农田土壤含水量在0~20 cm土层上升,随后下降,30~50 cm土层持续上升,森林土壤含水量在0~30 cm土层变化不大,总体呈上升趋势。猪拱地和灌丛土壤表层含水量最高,分别为35.41%和31.49%。农田和森林的最高土壤含水量在40~50 cm土层分别为19.63%和27.16%。从5层土壤的平均值看,以猪拱地最高,农田最低,分别为30.27%和16.45%。方差分析结果表明,0~10 cm土层农田土壤含水量与猪拱地、灌丛、森林呈显著差异($P < 0.05$);20~30 cm土层猪拱地土壤含水量

与农田呈显著差异($P < 0.05$)。

纳帕海区域内,4个样地各层次的土壤容重在1.42~1.94 g/cm³,变幅达0.52 g/cm³。在30~40 cm土层,土壤容重在4个样地间的变化幅度最小,在40~50 cm土层变化幅度最大,各样地土壤容重大致呈深层>浅层的特征。各样地之间,灌丛平均值最低,为1.55 g/cm³,其次为森林和农田,分别为1.59和1.68 g/cm³,猪拱地最高,达1.80 g/cm³。猪拱地土壤容重在0~10和10~20 cm土层与灌丛呈显著差异($P < 0.05$),在30~40 cm土层与森林呈显著差异($P < 0.05$),在40~50 cm土层与其他各样地呈显著差异($P < 0.05$)。

表2 不同土地利用类型土壤含水量和容重

Table 2 Soil water content and bulk density under different land use types

土地利用类型 Land use type	土壤含水量 Soil water content // %					平均 Mean // %
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	
猪拱地 Pig arched meadow	35.41 ± 17.75	31.80 ± 17.23	30.21 ± 17.03	27.41 ± 18.09	26.52 ± 17.66	30.27
农田 Farmland	14.90 ± 13.05	19.55 ± 13.30	13.28 ± 10.10	14.91 ± 10.20	19.63 ± 3.67	16.45
灌丛 Shrub	31.49 ± 24.44	27.08 ± 19.10	21.90 ± 15.58	23.16 ± 17.22	16.07 ± 14.15	23.94
森林 Forest	25.32 ± 18.00	25.03 ± 9.38	25.29 ± 9.32	22.22 ± 21.10	27.16 ± 2.57	25.00
土地利用类型 Land use type	土壤容重 Soil bulk density // g/cm ³					平均 Mean // g/cm ³
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	
猪拱地 Pig arched meadow	1.73 ± 0.07	1.79 ± 0.21	1.77 ± 0.16	1.78 ± 0.11	1.94 ± 0.03	1.80
农田 Farmland	1.68 ± 0.12	1.59 ± 0.07	1.70 ± 0.19	1.74 ± 0.07	1.72 ± 0.20	1.68
灌丛 Shrub	1.42 ± 0.35	1.47 ± 0.23	1.62 ± 0.10A	1.66 ± 0.15	1.57 ± 0.03	1.55
森林 Forest	1.55 ± 0.14	1.59 ± 0.19	1.51 ± 0.27	1.65 ± 0.24	1.64 ± 0.24	1.59

2.4 SOC与土壤含水量、土壤容重的相关性 由表3可知,0~10 cm土层土壤含水量与SOC呈显著相关关系($R^2 = 0.50, P < 0.05$)。SOC含量与土壤容重在不同土层的相关关系表现出与土壤含水量类似的结果。0~10 cm土层土壤容重与SOC达极显著相关($R^2 = 0.60, P < 0.01$)。从拟合回归方程的斜率看,土壤容重对SOC含量具有较明显的负效应。

表3 SOC与土壤含水量和容重的相关性

Table 3 Correlation analysis among soil organic carbon, soil water content and soil bulk density

指标 Index	土层 Soil layer cm	回归方程 Regression equation	决定系数(R^2) Decision coefficient	P
土壤含水量 Soil water content	0~10	$y = 0.80x + 15.07$	0.50	<0.05
	10~20	$y = 0.40x + 12.80$	0.20	>0.05
	20~30	$y = 0.39x + 9.48$	0.16	>0.05
	30~40	$y = 0.27x + 7.26$	0.19	>0.05
	40~50	$y = 0.44x + 3.79$	0.38	>0.05
土壤容重 Soil bulk density	0~10	$y = -73.40x + 154.03$	0.60	<0.01
	10~20	$y = -35.31x + 80.07$	0.32	>0.05
	20~30	$y = -4.34x + 25.51$	0.00	>0.05
	30~40	$y = -4.41x + 18.74$	0.01	>0.05
	40~50	$y = -5.42x + 23.22$	0.02	>0.05

3 结论与讨论

在较大区域尺度上,SOC含量受气候、成土母质和水文条件等影响较大,该研究中农田在0~20 cm土层的SOC含量(34.47 g/kg)显著高于崇明岛(12.62 g/kg)^[24]。小区域范

围内的气候和母质基本一致,土层深度、植被类型、土壤含水量、土壤容重等因子会对SOC的积累造成很大影响^[25-26]。同时,SOC的垂直分布在很大程度上受地表凋落物、植物根系分泌物、植被根系埋藏深度及微生物根际活动的影响^[23,27-29]。SOC在不同土层和土地利用类型下的累积量不同,纳帕海高原湿地0~50 cm土层内,SOC含量由高到低依次为农田、猪拱地、灌丛、森林,0~10 cm土层SOC含量最为丰富,是主要的碳储层,占0~50 cm土壤剖面的28.07%~49.81%,且随土壤深度的加深SOC含量呈减少趋势。

湿地垦殖会减弱甚至阻止湿地土壤泥炭化和潜育化过程,改善通气性,加快有机质分解,降低微生物对碳源的利用效率,从而导致土壤碳损失,在沼泽湿地开垦初期SOC损失较快,随着开垦年限的增加而趋于平缓^[30-32]。该研究中,农田SOC含量仅为天然沼泽和沼泽化草甸的39.58%和15.58%^[33],但由于围封的关系,农田相较于猪拱地几乎不受牲畜和游客的干扰,加之耕作技术和科学管理,使得土壤结构改善,主要是降低了土壤容重,促进土壤有机质的形成,增加了SOC含量^[34-35]。猪拱地是靠近纳帕海水域的未围封草甸,因家猪频繁活动而形成了大面积的斑块状裸地。在此区域,由于草甸植被被啃食、生物量降低以及土壤被翻拱裸露,造成表层SOC大量散失在空气中,导致SOC相较于农田略低,且仅为天然沼泽和沼泽化草甸的31.53%和12.42%^[36],这主要是由于对草地的破坏使植被对地表土壤的保护弱化,加速了土壤的侵蚀和矿化作用,而植被退化使得输入到土壤

中的有机质减少^[37]。0~40 cm 土壤深度内,纳帕海沼泽地开垦为农田导致高达 60% 以上的 SOC 损失,猪拱地的形成造成 SOC 损失在 68% 以上。在气候和人类活动等多种因素的干扰下,森林逐渐演化形成斑块状分布的灌丛化群落。在 0~20 cm 土层,灌丛 SOC 含量较森林增加,尤其在表层,灌丛 SOC 含量几乎为森林的 2 倍。而在 20~50 cm 土层,灌丛 SOC 含量较森林有所下降,20~30、30~40 和 40~50 cm 土层,灌丛 SOC 分别减少了 4.05、1.49 和 5.97 g/kg。Berger 等^[38]研究发现,不同类型植被还会在表层形成特定的小气候,进而影响到 SOC 含量。该研究中,森林的 SOC 含量仅为 17.25 g/kg,除根系较深外,冠层的遮阴和较大的蒸腾速率,使得其土壤表层干燥且温度低,从而造成地表凋落物的分解速率较低。不同土地利用类型其 SOC 含量在垂直方向上的分布不同,湿地的退化会不同程度地导致 SOC 流失。

作为土壤-植物-大气连续体的一个关键因子,土壤含水量对土壤特性和植物生长具有重要作用,甚至对植物分布和小气候变化也有着间接的影响^[39]。土壤容重则是土壤紧实度的敏感性指标,也是表征土壤质量的重要参数^[40]。湿地土壤水分含量的增加和土壤容重的降低有助于土壤有机质的积累,有机质增加又会进一步改善土壤结构,提高土壤的持水性能,二者相辅相成,对湿地土壤发挥碳“汇”和蓄持水功能具有重要作用^[41]。土壤含水量在 0~50 cm 土层更易受外界环境的影响,为土壤水分活跃层^[42]。该研究中,土壤含水量及土壤容重在土壤表层(0~10 cm)与 SOC 表现出显著或极显著相关关系,这与大多数研究结果一致。而赵慧等^[43]对藏北盐化沼泽湿地进行研究,结果发现,SOC 储量为无积水区>季节性积水区>常年积水区,说明水分在一定条件下又有可能变成 SOC 积累的限制性因素。另外,根据王元峰等^[44]和蔡倩倩等^[45]对尕斯海和若尔盖地区的相关研究可知,SOC 在高原湿地区域分布远不止 50 cm,因此,针对该类地区土壤含水量和土壤容重对不同土层深度、不同植被覆盖类型的 SOC 影响机制还需进一步研究。该研究结果表明,纳帕海区域表层 SOC 含量很大程度上受土壤含水量和土壤容重的制约。

参考文献

- [1] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world[J]. *European journal of soil science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [2] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105.
- [3] 陈朝,吕昌河,范兰,等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [4] 杜紫贤. 城市沿江湿地土地覆被变化对土壤有机碳和土壤呼吸的影响[D]. 福州:福建师范大学, 2008.
- [5] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [6] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(5): 282-289.
- [7] 田昆,李宇云,杨宇明. 高原湿地生态结构特征与湿地保护区功能分区探讨[J]. *湿地科学与管理*, 2005(1): 22-26.
- [8] 董瑜,田昆,郭绪虎,等. 不同区域气候条件影响下的纳帕海湿地植物叶绿素荧光特性[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 588-594.
- [9] 胡金明,袁寒,李杰,等. 滇西北纳帕海湿地区域土壤速效氮组分的分异及指示意义[J]. *山地学报*, 2011, 29(3): 269-275.
- [10] 李杰,胡金明,董云霞,等. 1994~2006 年滇西北纳帕海流域及其湿地

- 景观变化研究[J]. *山地学报*, 2010, 28(2): 247-256.
- [11] 李宇云,田昆,杨宇明,等. 滇西北纳帕海湿地景观变化及其评价研究[J]. *西部林业科学*, 2012, 41(2): 27-32.
- [12] 喻庆国,董跃宇,李昊民,等. 1955~2011 年滇西北纳帕海时空演变规律及驱动因素分析[J]. *西部林业科学*, 2013, 42(6): 1-9.
- [13] 刘成武,李秀彬. 1980 年以来中国农地利用变化的区域差异[J]. *地理学报*, 2006, 61(2): 139-145.
- [14] 韩冰,王效科,逯非,等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 612-619.
- [15] HOUGHTON R A, SKOLE D L, NOBRE C A, et al. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon[J]. *Nature*, 2000, 403: 301-304.
- [16] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [17] GE Q S, DAI J H, HE F N, et al. Land use changes and their relation with carbon cycles over the past 300 a in China[J]. *Science in China (Series D Earth Science)*, 2008, 51(6): 871-884.
- [18] 唐明艳,杨永兴. 不同人为干扰下纳帕海湖滨湿地植被及土壤退化特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6681-6693.
- [19] 胡金明,董云霞,袁寒,等. 纳帕海湿地不同退化状态下土壤氮素的分异特征[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 691-695.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- [21] 石福臣,李瑞利,王绍强,等. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1425-1431.
- [22] 张文菊,彭佩钦,童成立,等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J]. *环境科学*, 2005, 26(3): 56-60.
- [23] 曹生奎,曹广超,陈克龙,等. 青海湖高寒湿地土壤有机碳含量变化特征分析[J]. *土壤*, 2013, 45(3): 392-398.
- [24] 张容娟,布乃顺,崔军,等. 土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 6698-6706.
- [25] 赵锐锋,张丽华,赵海莉,等. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *地理科学*, 2013, 33(3): 363-370.
- [26] 刘刚,沈守云,闫文德,等. 洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(24): 7625-7631.
- [27] 王发刚,王启基,王文颖,等. 土壤有机碳研究进展[J]. *草业科学*, 2008, 25(2): 48-54.
- [28] WU C S, ZHANG Y P, XU X L, et al. Influence of interactions between litter decomposition and rhizosphere activity on soil respiration and on the temperature sensitivity in a subtropical montane forest in SW China[J]. *Plant and soil*, 2014, 381(1/2): 215-224.
- [29] MAZZILLI S R, KEMANIAN A R, ERNST O R, et al. Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops[J]. *Soil biology and biochemistry*, 2015, 85: 22-30.
- [30] BOWMAN R A, VIGIL M F, NIELSEN D C, et al. Soil organic matter changes in intensively cropped dryland systems[J]. *Soil science of American journal*, 1999, 63: 186-191.
- [31] 田昆,常凤来,陆梅,等. 人为活动对云南纳帕海湿地土壤碳氮变化的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 681-686.
- [32] 张金波,宋长春,杨文燕. 三江平原沼泽湿地开垦对表土有机碳组分的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(5): 857-859.
- [33] 赖建东,田昆,郭雪莲,等. 纳帕海湿地土壤有机碳和微生物量碳研究[J]. *湿地科学*, 2014, 12(1): 49-54.
- [34] 林而达,李玉娥,郭李萍,等. 中国农业土壤固碳潜力与气候变化[M]. 北京:科学出版社, 2005: 102-113.
- [35] 王燕,王小彬,刘爽,等. 保护性耕作及其对土壤有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 766-771.
- [36] 范桥发,肖德荣,田昆,等. 不同放牧对滇西北高原典型湿地土壤碳、氮空间分布的异质影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(5): 1151-1156.
- [37] 李月梅,曹广民,王跃思. 开垦对海北高寒草甸土壤有机碳的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(8): 911-915.
- [38] BERGER T W, NEUBAUER C, GLATZEL G. Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria [J]. *Forest ecology and management*, 2002, 159(1/2): 3-14.
- [39] 余雷,张一平,沙丽清,等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤含水量变化规律及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 332-336.

257.16 t/hm²,说明高强度的间伐降低了红松人工林的碳汇能力。在红松人工林内,乔木层是最重要的碳汇,占整个红松人工林碳贮量的50%以上,其次是土壤层的碳贮量,再次是凋落物层,最后是林下草本层。草本层的碳贮量相对较少,所占比重较低,这与红松人工林下植被较少的情况相符合。

表6 不同间伐区红松人工林碳贮量分配格局

Table 6 Distribution pattern of carbon storage of *Pinus koraiensis* plantation in different cutting area t/hm²

样区 Sample area	碳贮量 Carbon storage				合计 Total
	乔木层 Tree layer	草本层 Vegetation layer	凋落物层 Litter layer	土壤层 Soil layer	
极强间伐区 Very strong cutting area	142.30	1.45	1.52	111.89	257.16
强度间伐区 Strength cutting area	163.61	0.89	1.54	91.18	257.22
中度间伐区 Moderate cutting area	197.10	0.61	1.78	151.93	351.42
弱度间伐区 Weak degrees cutting area	197.52	0.56	1.49	79.54	279.11
对照区 Control area	184.75	0.23	1.47	147.18	333.63

3 结论与讨论

面对大气CO₂浓度提高、温度升高所带来的日益恶化生态环境,营造红松人工林成为人们提高森林碳汇、降低大气CO₂浓度的重要措施,而不同的森林经营措施会影响其碳吸存的结果。如何经营管理才能达到红松人工林增汇效果是近期生态和林业管理工作研究的热点问题^[10-11]。笔者细致分析了不同间伐强度对红松林碳汇功能的长期影响,揭示了不同间伐强度人工红松林碳贮量的动态变化规律,以及间伐对乔木层、草本层、凋落物层、土壤层碳贮量的影响,并分析了红松林碳贮量的空间格局。该研究结果为科学评估我国森林碳贮量提供了基础资料,为红松人工林生态系统的科学管理及合理经营提供了参考和依据。

与闫平等^[12]对凉水地区原始阔叶红松林碳贮量的研究结果相比,该研究中草河口解放林的人工红松林的乔木层碳贮量要高于凉水地区原始阔叶松林,这可能是由于人工林林龄较长,加之管理有效以及地区间气候地理条件的差异引起的。但该研究中人工红松林的土壤有机碳贮量却低于凉水原始阔叶红松林。王彦梅等^[13]研究表明,天然林转化为人工林会降低土壤有机碳的含量。由于红松在生长过程中需

要大量吸收土壤养分,而红松凋落物分解缓慢,加之在红松经营管理过程中会修枝等的影响,因此导致红松人工林的碳贮量要低于原始阔叶红松林。同时,可能同样是基于上述原因造成了红松人工林系统中乔木层碳贮量略高于土壤碳贮量,使得红松人工林碳贮量的空间格局与原始阔叶红松林^[12]、马尾松林^[14]和楠木林^[15]不同。

密度对红松人工林的碳贮量及其空间格局有较大影响。张国庆等^[14]研究表明,马尾松人工碳贮量随密度的增加而增大,这与笔者的研究结果有差别。在中长期时间尺度上,间伐会不同程度地减少红松的碳汇功能,但这种减少与间伐强度不是简单的正比例关系,选择适宜的间伐密度可有效减少间伐对碳汇的影响。由于在实际生产中考虑到红松大径材培育和结实量等因素,不间伐是不可能的,因此应科学选择间伐强度,既保证木材质量和结实量,又可以实现较高的碳汇功能。

参考文献

- [1] JANDL R, LINDNER M, VESTERDAL L, et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? [J]. *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 253-268.
- [2] 徐金良, 毛玉明, 成向荣, 等. 间伐对杉木人工林碳储量的长期影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1898-1904.
- [3] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 等. 凉水自然保护区不同皮型红松径向生长对气候的响应[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(9): 2511-2520.
- [4] JOHN C, GIORGIO A, JONATHAN M, et al. Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada [J]. *Forest ecology and management*, 2009, 257(2): 453-463.
- [5] 刘振花, 陈立新, 王琳琳. 红松阔叶混交林不同演替阶段土壤活性有机碳的研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1098-1103.
- [6] 许丽娟. 间伐强度对长白山西坡红松过伐林土壤碳汇的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [7] 丁壮, 张彦东. 红松人工林生态系统土壤碳库结构与碳密度研究[J]. *林业研究: 英文版*, 2010, 21(2): 177-182, 257.
- [8] 李杨, 孔令春, 单忠臣. 长白山红松云冷杉林碳库研究[J]. *吉林林业科技*, 2002, 31(3): 7-9, 12.
- [9] 徐蕾, 傅民杰, 孙宇贺. 东北红松阔叶林土壤有机碳空间分布异质性研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 100-104.
- [10] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统C、N贮量[J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3146-3154.
- [11] 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[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [12] 闫平, 冯晓川. 原始阔叶红松林碳素储量及空间分布[J]. *东北林业大学学报*, 2006, 34(5): 23-25.
- [13] 王彦梅, 王朋, 于立志. 辽东山区天然次生林转化为人工林对土壤有机碳的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(12): 54-57.
- [14] 张国庆, 黄从德, 郭恒, 等. 不同密度马尾松人工林生态系统碳储量空间分布格局[J]. *浙江林业科技*, 2007, 27(6): 10-13.
- [15] 马明东, 江洪, 刘跃建. 楠木人工林生态系统生物量、碳含量、碳贮量及其分布[J]. *林业科学*, 2008, 44(3): 34-39.

(上接第103页)

- [40] 王莉, 张强, 牛西午, 等. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4): 53-56.
- [41] 张昆, 吕宪国, 田昆. 纳帕海高原湿地土壤有机质对水分梯度变化的响应[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(4): 424-427.
- [42] 邓天宏, 付祥军, 申双和, 等. 0~50 cm与0~100 cm土层土壤湿度的转换关系研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(4): 64-68.

- [43] 赵慧, 刘伟龙, 王小丹, 等. 不同水分条件下藏北盐化沼泽湿地土壤碳氮的分布[J]. *山地学报*, 2014, 32(4): 431-437.
- [44] 王元峰, 王辉, 马维伟, 等. 沼海湿地泥炭土土壤理化性质[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 118-122.
- [45] 蔡倩倩, 郭志华, 胡启鹏, 等. 若尔盖高寒草甸湿地不同水分条件下土壤有机碳的垂直分布[J]. *林业科学*, 2013, 49(3): 9-16.