

不同利用方式黑钙土有机碳组分割面分布特征

李春丽¹, 董 军², 王鸿斌¹, 王丽群¹, 赵兰坡¹

(1.吉林农业大学资源与环境学院,吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室,
长春 130118;2.吉林省土地整治中心,长春 130061)

摘要: 为研究土地利用方式对土壤碳库的影响,以东北黑钙土区的天然草地、人工林地和耕地为研究对象,采集 0—100 cm 土体中不同土层样品(A、AB、B_k、BC 和 C 层),测定不同利用方式土壤有机碳(SOC)、水溶性有机碳(WSOC)、轻组有机碳(LFOC)和重组有机碳(HFOC)含量。结果表明:3 种利用方式 SOC、LFOC 和 HFOC 主要分布在 A 层,但草地 WSOC 含量在 B_k层最多(0.27 g/kg)。由 A~C 层,3 种土地利用方式土壤有机碳及组分有机碳含量总体均呈减少趋势,但减少程度明显不同,天然草地缓慢减少,人工林地急剧减少,耕地逐渐减少。草地转换为林地和开垦为耕地后,均造成土壤有机碳及组分有机碳含量减少,WSOC 减少 34%和 48%,LFOC 减少 20%和 37%,HFOC 减少 7%和 5%,SOC 减少 10%和 16%。草地转换为林地和开垦为耕地后,WSOC/SOC、LFOC/SOC 显著降低,但 HFOC/SOC 却提高,说明草地被开垦后活性有机碳含量快速下降。土地利用方式和土层对 SOC、WSOC 和 LFOC 具有显著影响,且对 SOC 和 HFOC 叠加效应较强。同时,土壤理化性质也在一定程度上影响着 SOC、WSOC、LFOC 和 HFOC。应制定合理土地利用管理政策,保护自然草地免遭破坏,减少土壤有机碳流失,发挥草地生态系统碳固存的重要作用。

关键词: 土壤有机碳;有机碳组分;利用方式;黑钙土

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0304-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.037

Profile Distribution of Soil Organic Carbon Components in Chernozem Soils Under Different Land Use Types

LI Chunli¹, DONG Jun², WANG Hongbin¹, WANG Liqun¹, ZHAO Lanpo¹

(1.College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Key Laboratory of Soil Resource Sustainable Utilization for Jilin Province Commodity Grain Bases, Changchun 130118; 2.Jilin Province Land Consolidation Center, Changchun 130061)

Abstract: In order to assess the influence of land use on soil carbon pool, natural grassland, artificial woodland (directly converted from natural grassland) and cropland (reclaimed from natural grassland) in Chernozem region of Northeast China, were taken as research objects. A total of 45 soil samples were collected from these three land use types. Five soil pedogenic horizons (A, AB, B_k, BC and C) in 0—100 cm soil were collected. Soil organic carbon (SOC), water soluble organic carbon (WSOC), light fraction organic carbon (LFOC), and heavy fraction organic carbon (HFOC) contents were determined. The results showed that the contents of SOC, LFOC, and HFOC were mainly distributed in horizon A, but the content of WSOC was the highest in horizon B_k, which was 0.27 g/kg. From horizon A to horizon C, SOC and its components contents of the three land use types all showed a decreasing trend, but the decreasing degree was obviously different. The grassland decreased slowly, the woodland decreased sharply, and the cropland decreased gradually. The contents of WSOC, LFOC, HFOC, and SOC decreased by 34% and 48%, 20% and 37%, 7% and 5%, 10% and 16%, respectively, after the grassland were converted into woodland and cropland. After grassland was converted to woodland and cropland, WSOC/SOC and LFOC/SOC decreased significantly but

收稿日期:2021-08-31

资助项目:吉林省重大科技专项(20200503004SF)

第一作者:李春丽(1983—),女,在读博士研究生,主要从事土壤肥力与可持续发展研究。E-mail:lichunli@163.com

通信作者:王鸿斌(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤肥力调控和土壤改良研究。E-mail:asionwang@163.com

HFOC/SOC increased, indicating that the content of active organic carbon decreased rapidly. Land use types and soil horizons had significant effects on SOC, WSOC and LFOC, and had strong superposition effects on SOC and HFOC. At the same time, soil physical and chemical properties also affected SOC, WSOC, LFOC and HFOC to some extent. Rational land use management policies should be formulated to protect natural grassland from destruction, and play an important role in carbon sequestration of grassland ecosystem.

Keywords: soil organic carbon; soil organic carbon components; land use types; Chernozem

土地利用方式不同影响植被的物种多样性和生产力,使得进入土壤中的有机质数量和性质明显不同,有机质的分解速率及循环过程也发生显著变化,进而影响土壤固碳潜力^[1],并且能够改变土壤有机质各种保护机制的相对重要性^[2]。土壤有机碳(SOC)含量及组分的变化是不同土地利用方式下土壤质量演变的重要标志^[3]。

轻组有机碳(LFOC)、水溶性有机碳(WSOC)等是表征活性有机碳的重要指标,可以通过改变土壤微生物活性来影响土壤碳库的周转^[4]。重组有机碳(HFOC)是惰性有机碳的主要部分,结构稳定复杂,抗干扰能力强^[5]。不同土地利用对土壤有机碳组分的影响不同,LFOC、WSOC对土地利用变化的响应比HFOC更加敏感^[6-8]。很多学者就不同土地利用对LFOC的影响研究发现,森林土壤LFOC含量高于耕地^[9],天然草地和林地转变为耕地后土壤LFOC含量显著降低^[10],而退耕还林还草能明显增加土壤LFOC的含量以及分配比例^[11]。土壤WSOC含量一般不超过200 mg/kg^[12],但不同利用方式差异较大。尽管WSOC占SOC的比例很小,但WSOC是土壤微生物可直接利用的有机碳源,参与土壤生物化学循环,影响土壤中有机、无机物质的转化、迁移和降解^[13]。

黑钙土是我国东北地区主要的土壤资源和重要的农牧业生产基地,近年在人为因素的干扰下,天然草地多被转换为人工林地或开垦为耕地,造成土壤有机质层变薄,土壤肥力下降,严重影响黑钙土资源的可持续利用和国家粮食安全。不同利用方式黑钙土有机质积累机制尚不清楚,缺乏对不同利用方式下黑钙土有机质组分变化的系统研究。以往对有机质及其组分的研究^[14]多是在耕层或土壤剖面的0—30 cm,并且采用机械分层方法(固定深度)取样,忽略了土壤成因对有机质在剖面分布中的影响,同时对不同利用方式下黑钙土1 m土体内各土壤发生层有机质组分的分布特征研究较少。本文通过研究黑钙土区天然草地、人工林地和耕地0—100 cm土体中各土壤发生层有机碳组分的含量及分布特征,有助于理解、估计和预测不同利用方式黑钙土有机碳组分数量变化特征和稳定机制,从而为改善土壤质量、提高土壤肥力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省西部黑钙土区(43°53′—44°54′N, 123°59′—124°59′E),属温带半干旱季风气候区,平均海拔约150~200 m,为波状起伏台地。多年平均降水量约370~470 mm,但蒸发强烈,年蒸发量约为年降水量的2~3倍。年平均气温4.6℃,冬季漫长,微生物活性低,制约了进入土壤中的有机质矿化和积累。母质以冲积、湖积物为主,多为黄土状堆积物。自然植被为草甸草原,一般植物株体比较矮小,具有耐旱、耐盐碱特性,主要有针茅、兔毛蒿草原和碱草草原两类。目前,黑钙土区自然植被已有相当部分被开垦为耕地或栽植为人工林。

1.2 样品采集与分析

经过野外实地踏勘,设立天然草地、人工林地和耕地3种不同土地利用方式。天然草地(Grassland),自然植被为羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel),无耕作,不施任何肥料,只在秋季割干草、秋冬放牧。人工林地(Woodland),属小叶杨(*Populus simonii* Carr.),20世纪60年代天然草地直接转换为人工林,或者在20世纪80年代左右作为“三北防护林”工程形成人工林地,不施肥,也不进行耕作,自然生长,林分结构单一,林分密度约为860株/hm²,株高平均约7.6 m。耕地(cropland),20世纪60年代由天然草地开垦而来,施用常规氮肥和磷肥,种植作物为玉米(*Zea mays* L.),一年一熟制,玉米秋季收获后根茬部分进行还田。

土样采集工作于2017年10—11月农作物收获后进行,设立了3个自然条件相近的采样点(吉林省前郭县孤杨村和大父屯,吉林省农安县万顺村),选择代表性地块采集以上各处理土壤剖面样品。3个采样点皆位于平原之上,地势平缓,相对高差5~15 m,土壤亚类皆为草甸黑钙土。采样时先清除表层凋落物,土壤剖面分为A(腐殖质层)、AB(过渡层)、B_k(淀积层)、BC(过渡层)和C(母质层)5个土层。每个采样地块再在中心区域以15~30 m间隔选取3个土壤剖面,3个剖面的土壤样品随后分别在5个土层中混合制成1个土样,共采集45份土样。3个采样点土

壤剖面层次发育略有差异,孤杨村 5 个土层对应的土壤深度分别为 0—30,30—55,55—76,76—90,90—100 cm,大父屯为 0—27,27—49,49—70,70—84,84—100 cm,万顺村为 0—20,20—45,45—72,72—84,84—100 cm。土样在实验室自然风干,过 2 mm 筛后备用。各样点基本情况见表 1。

土壤理化指标采用常规方法测定,全氮含量采用半微量凯氏法测定,碳酸钙含量采用酸碱中和滴定法测定,pH 采用电位法(水氯化钙比 2.5 : 1)测定,土壤机械组成采用吸管法^[15]测定。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定。土壤轻、重组有机碳的提取方法采用相对密度分组法^[15],重液为 1.8 g/cm³ 的 ZnBr₂,然后根据重铬酸钾氧化法测定土样重组有机碳(HFOC)含量,并用差减法测算轻组有机碳(LFOC)

含量。水溶性有机碳(WSOC)按照土水比 1 : 6 浸提,采用 TOC 分析仪(岛津 TOC-VCPH)测定有机碳量。草地、林地和耕地土壤理化性质见表 2。

表 1 土壤采样点基本情况

采样地点	经纬度	土地利用方式	种植年限/a
前郭县 孤杨村	44°51′36″N,124°31′42″E	草地	—
	44°51′40″N,124°33′21″E	林地	40~50
	44°51′32″N,124°33′16″E	耕地	>60
乾安县 大父屯	44°52′27″N,123°59′22″E	草地	—
	43°53′19″N,124°00′40″E	林地	>60
	44°52′14″N,124°00′00″E	耕地	>60
农安县 万顺村	44°31′21″N,124°59′24″E	草地	—
	44°31′48″N,124°57′11″E	林地	40~50
	44°31′44″N,124°57′21″E	耕地	>60

表 2 不同土地利用方式土壤理化性质

土地利用方式	土层	全氮/ (g · kg ⁻¹)	碳氮比	碳酸钙/%	pH	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
草地	A	1.62Aa	10.02Aa	4.33Ac	7.76Ad	17.03Bb	9.33Cc	73.63Aa
	AB	1.07ABb	9.58Aa	7.15Ab	7.94Ac	18.36Bb	9.47Bc	72.18Aa
	B _k	0.59Bc	9.90Aa	8.06Aa	8.15Ab	18.28Cb	11.47Ab	70.25Aa
	BC	0.39Ad	8.83Aab	6.73Ab	8.19Ab	21.78ABa	12.19ABa	66.02ABb
	C	0.35Ad	6.43Ab	4.67Ac	8.26Aa	22.19Aa	12.40Aa	65.41Ab
林地	A	1.66Aa	10.98Aa	3.79Bb	7.63Ba	18.51Bb	10.28Bc	71.21Aa
	AB	0.87Bb	9.73Aa	4.48Ba	7.63Ba	19.30Ab	9.55Bc	71.15Aa
	B _k	0.58Bc	6.58Cb	4.56Ca	7.66Ba	22.93Aa	11.96Ab	65.11Bb
	BC	0.35Ad	7.47ABb	3.49Bb	7.66Ba	23.25Aa	13.83Aa	62.92Bb
	C	0.32ABd	4.12Bc	3.50Bb	7.69Ba	23.32Aa	13.53Aa	63.15Ab
耕地	A	1.39Ba	7.65Bab	4.14Ab	7.55Cb	21.01Aa	11.49Aab	67.50Bb
	AB	1.18Aa	8.52Aa	4.64Bb	7.60Bab	17.65Bb	11.25Aab	71.11Aa
	B _k	0.65Ab	8.08Ba	6.73Ba	7.63Ba	20.32Bab	12.31Aa	67.38Bb
	BC	0.38Ac	6.40Bb	3.76Bc	7.64Ba	20.07Bab	10.88Bb	69.05Aab
	C	0.28Bc	5.27ABb	3.52Bc	7.64Ba	21.35Aa	12.89Aa	65.76Ab

注:同列不同大写字母表示同一土层不同利用方式间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一利用方式不同土层间差异显著($p<0.05$)。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2007 软件对数据进行分析处理及绘图。不同处理间数据的差异显著性采用 LSD 法(最小显著性法)进行比较,所有统计分析采用 SPSS 17.0 软件。

2 结果与分析

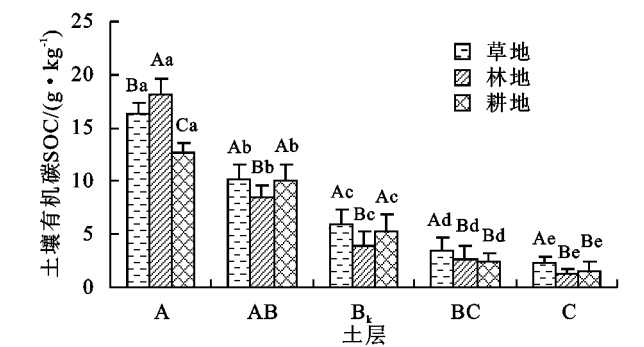
2.1 不同利用方式土壤有机碳含量的变化

由图 1 可知,土壤有机碳(SOC)含量为 1.31~18.20 g/kg,平均值为 6.96 g/kg,草地、林地、耕地 SOC 含量平均值分别为 7.62、6.89、6.38 g/kg。3 种利用方式黑钙土剖面有机碳分布既有共性,又有不同点。共性是:SOC 含量均为 A 层最高,SOC 分布由 A 至 C 层均呈减少趋势,均存在明显的 AB 和 BC 2

个过渡层,直至 C 层(母质层)仍有一定量的 SOC,林地和耕地剖面均保留草地 SOC 剖面分布特征。不同的是:(1)3 种利用方式 SOC 含量随剖面深度的增加减少程度显著不同。草地 SOC 从 A~C 层分别减少 37%,42%,41%和 36%,呈逐渐减少趋势。林地 SOC 含量从 A~C 层分别减少 53%,54%,32%和 50%,呈急剧减少趋势。耕地 SOC 含量从 A~C 层分别减少 20%,47%,54%和 39%,呈缓慢减少趋势;(2)腐殖质层(A) SOC 含量存在显著差异,分布规律为林地>草地>耕地。与草地相比,林地 A 层 SOC 增加 11.8%,耕地则减少 22.4%。其余土层(AB、B_k、BC、C)的 SOC 含量均呈草地>耕地>林地的趋势。

耕地土壤 AB 和 B_k层 SOC 含量比林地呈现出略高的趋势,可能是耕地土壤中作物根系残体的贡献造成

的。林地和耕地 SOC 剖面分布虽保留着天然草地的某些特征(有 2 个明显的过渡层),但仍表现出明显差异。与草地相比,在 AB、B_k、BC 和 C 层中,林地和耕地 SOC 分别减少 17%,1%,35%,10%,24%,30%,43%,35%。



注:图柱上方不同大写字母表示同一土层不同利用方式间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一利用方式不同土层间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同利用方式土壤有机碳含量的剖面分布

2.2 不同利用方式土壤有机碳组分分布特征

3 种利用方式土壤水溶性有机碳 (WSOC) 含量为 84.22~271.80 mg/kg(图 2),平均值为 154.85 mg/kg,草地、林地、耕地 WSOC 含量平均值分别为 212.91,139.98,111.65 mg/kg。草地 WSOC 含量在剖面中的分布呈现先增加后减少趋势,在 B_k层达最大值;林地和耕地 WSOC 含量随着剖面深度增加呈持续减少趋势。草地、林地和耕地 WSOC 含量,从 A~C 层平均减少分别为 3%,21%和 9%。草地转换为林地和开垦为耕地后,WSOC 含量大幅减少,分别减少 34%,48%。尤其是 B_k及以下土层,林地和耕地 WSOC 含量显著低于草地($p<0.05$)。这可能与草地腐殖质层植物残体、凋落物数量较大,以及草地碳酸钙含量较高有关(尤其淀积层)。

土壤轻组有机碳(LFOC)含量为 0.05~3.48 g/kg(图 2),平均值为 1.12 g/kg,草地、林地、耕地 LFOC 含量平均值分别为 2.14,1.77,1.40 g/kg。从 A~C 层,3 种利用方式 LFOC 含量均呈逐渐降低趋势,但草地 LFOC 含量下降速度最慢。草地转换为林地和开垦为耕地对土壤剖面中的 LFOC 含量产生显著影响($p<0.05$)。在 A 层,草地与耕地 LFOC 含量差异显著($p<0.05$),表现为草地>林地>耕地,耕地 LFOC 含量最低,其 LFOC 含量比草地、林地分别低 31%和 30%。由于草地和林地地上生物量繁茂,凋落物丰富,以有机质形式输入到土壤中的植物残体数量较多,草地和林地土壤腐殖质层(A 层)的 LFOC 含量显著高于耕地。在 A 层以下的土壤,草地的 LFOC 含量显著高于林地和耕地,反映草地对土壤剖面中 LFOC 的积累具有积极作用。林地与草地相比,林地 LFOC 含量除 A 层略低于草地外,其余各层

均显著低于草地;但与耕地相比,林地 LFOC 含量除 A 层明显高于耕地,林地与耕地 LFOC 含量在 A 层以下土层无显著差异,这可能与林地特有的根系分布特征有关。

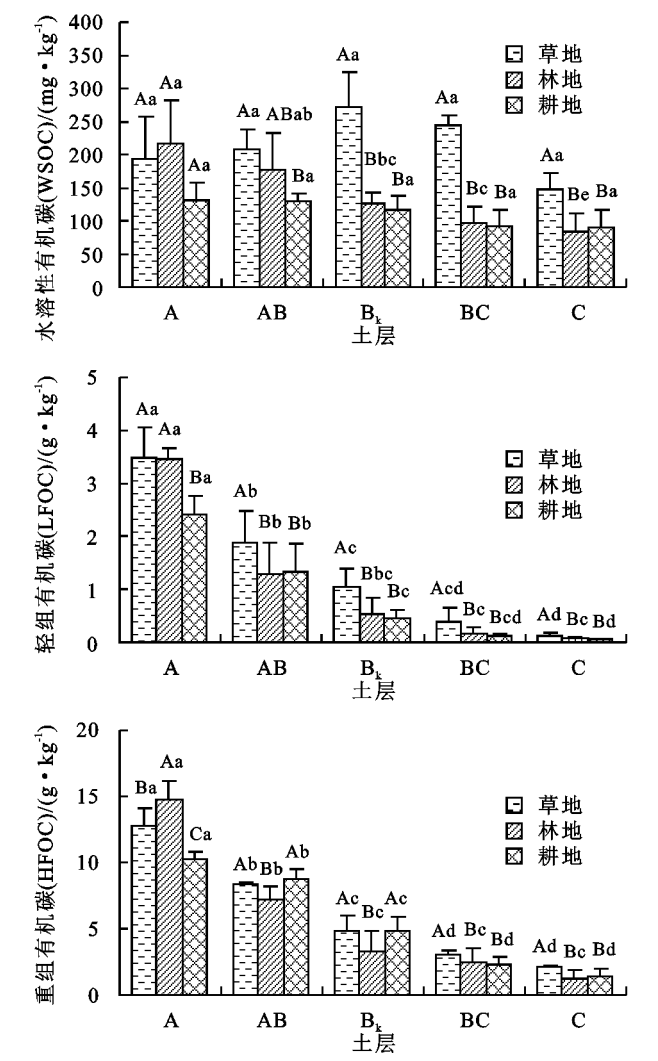


图 2 不同利用方式土壤剖面中有机碳组分的分布特征

土壤重组有机碳(HFOC)含量在 1.23~14.74 g/kg(图 2),平均值为 5.84 g/kg,草地、林地、耕地 HFOC 含量平均值分别为 6.23,5.78,5.50 g/kg。3 种利用方式 HFOC 剖面分布规律与 SOC 基本一致,均随剖面深度的增加而降低。总体上,草地 HFOC 含量高于林地和耕地。草地 HFOC 含量除 A 层低于林地,AB 层低于耕地外,其余土层的 HFOC 含量普遍高于林地和耕地,反映草地在土壤有机碳的周转过程中发挥着重要作用,植被丰富的草地被转换为其他土地利用方式后,不仅 LFOC 含量降低,而且不利于稳定性较高的 HFOC 的积累。

2.3 不同利用方式土壤有机碳组分分配比例

3 种利用方式土壤 WSOC/SOC 值为 1.03%~6.49%(表 3),从 A~C 层 WSOC/SOC 均呈升高趋势,总体上表现为草地>林地>耕地。在 A 层,草地土壤 WSOC/SOC 比林地、耕地高,可能与草地土壤腐殖质层

(A 层)植物残体数量较大有关。在 B_k、C 层,草地土壤 WSOC/SOC 比林地、耕地高,因为草地土壤该层 WSOC 含量较高而 SOC 含量减少,导致 WSOC 比例较高。

3 种利用方式土壤 LFOC/SOC 值为 3.58%~21.33%,从 A~C 层 LFOC/SOC 呈逐渐降低趋势。3 种利用方式土壤 HFOC/SOC 值为 78.67%~96.42%,HFOC 是 SOC 的主要组成部分,随剖面深度的增加 HFOC/SOC 值增大。虽然 A 层林地和草地土壤 LFOC 含量相差不大,但林地 SOC 含量显著高于草地,致使 LFOC/SOC 低于草地(HFOC 比例呈现与 LFOC 比例相反趋势)。在 C 层,母质环境趋于一致,3 种利用方式 WSOC/SOC、LFOC/SOC 和 HFOC/SOC 均无显著差异。

2.4 土壤有机碳及组分含量影响因素

从表 4 可以看出,土地利用方式和土壤发生层对 SOC 及各组分含量的显著影响($p<0.05$),但土地利用方式对 HFOC 的影响并不显著。同时,土地利用方式和土壤发生层对 SOC 和 HFOC 含量的影响具有叠加效应($p<0.01$),然而对 WSOC 和 LFOC 的叠加效应微弱。

由表 5 可知,SOC 及 SOC 各组分与土壤全氮、碳氮比呈显著正相关。WSOC 与碳酸钙、pH 呈显著正相关,而与土壤颗粒组成相关性不显著。SOC、LFOC、HFOC 与 CaCO₃、pH 相关性不显著,与土壤黏粒和粉粒呈显著负相关,与土壤砂粒呈显著正相关。

表 5 土壤理化性质与有机碳及各组分含量的关系

土壤有机碳组分	全氮	碳氮比	碳酸钙	pH	黏粒	粉粒	砂粒
SOC	0.966**	0.616**	-0.002	-0.275	-0.412**	-0.434**	0.436**
WSOC	0.342*	0.408**	0.372*	0.512**	-0.188	-0.283	0.234
LFOC	0.909**	0.555**	-0.081	-0.247	-0.383**	-0.357*	0.386**
HFOC	0.954**	0.607**	-0.001	-0.277	-0.419**	-0.436**	0.441**

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

3 讨论

3.1 不同利用方式对土壤有机碳剖面分布的影响

土地利用方式对土壤有机碳的固存具有重要影响^[1,16]。特别是从草地转换为其他用地,或从其他用地转换为草地,这些将促进土壤有机碳含量的显著变化^[17],本研究结果也说明了这一点。在研究区,耕地土壤有机碳含量减少较多,其比例达到 16%。林地由于林分结构单一且缺乏外源养分补充,土壤有机碳含量比草地减少约 10%。一般来说,根系、根系分泌物和溶解的有机质被认为是深层土壤有机碳的主要来源^[18]。草地植被具有较发达的深层根系,1 m 土层内根量干重达 5.7 kg/m²^[19],根系生物量从表层到深层的减少速度比林地和耕地慢,深层土壤有机碳含

表 3 不同利用方式土壤剖面中有机碳组分的分配比例

		单位: %		
土地利用方式	土层	WSOC/SOC	LFOC/SOC	HFOC/SOC
草地	A	1.24a	21.33a	78.67a
	AB	2.05a	18.24a	81.82a
	B _k	4.54a	18.25a	81.75b
	BC	7.12a	11.39a	88.61b
	C	6.49a	5.74a	94.26a
林地	A	1.19a	17.92a	82.08a
	AB	2.10a	15.93a	84.07a
	B _k	3.60ab	16.04a	83.96b
	BC	3.95b	5.82b	94.18a
	C	6.41a	5.43a	94.57a
耕地	A	1.03b	20.02a	79.95a
	AB	1.30b	13.18a	86.82a
	B _k	2.27b	7.05b	91.36a
	BC	4.16b	6.10b	93.90a
	C	6.39a	3.58a	96.42a

注: 同列不同小写字母不同表示同一土层不同利用方式间差异显著($p<0.05$)。

表 4 土壤有机碳及各组分含量在土地利用方式和土壤发生层之间的统计差异

因子	SOC	WSOC	LFOC	HFOC
土地利用方式	0.012*	0**	0.014*	0.099
土层	0**	0.041*	0**	0**
土地利用方式×土层	0**	0.155	0.372	0**

注: * 表示在 95%置信区间内显著; ** 表示在 99%置信区间内显著。

量的减少速度也比林地和耕地慢。因此,在降水量为 370~470 mm 的半干旱区,草地可能是土壤固碳的较好选择。

自然土壤中,有机碳含量反映植物枯枝落叶、根系等有机物质的输入量与有机质分解而产生的输出量之间的动态平衡。自然土壤一旦被开垦为耕地以后,这种动态平衡关系即被破坏。本研究结果表明,草地开垦为耕地,使得 A 层土壤有机碳含量减少最多(22%),这一发现与前人^[19-20]的研究结果一致。草地开垦为耕地后 A 层土壤有机碳含量的减少可能与农业活动有关,虽然作物秸秆和根茬总量与草地地下根量相差不大,但耕作结束后大部分地上生物量作为收获物被取走,土壤中只余作物根茬及根系分泌物,

有机质输入数量减少。同时耕作过程中使下层土壤被翻到表层,有机质与空气充分接触,温湿度条件适宜的情况下,在微生物和土壤酶的作用下,有机碳的分解速度加快。耕作还可引起土壤侵蚀和土壤团聚体的破坏,从而冲走土壤有机质^[21],这些都造成耕地土壤有机碳的大幅减少。此外,从 $B_k \sim C$ 层,草地开垦为耕地后土壤有机碳含量也有所减少(图1),说明农业措施也影响深层土壤有机碳含量。草地转换为林地,A层土壤有机碳积累12%,但其他土层土壤有机碳大量流失。已有研究^[22]表明,林地土壤有机碳含量显著高于草地,仅在土壤表层存在。因此,草地向林地的转换导致土壤有机碳平均减少0.73 g/kg。对于碳的固存,林地并不适合所有情况,因为在沙地和低丘应建立更多的草地,而不是林地^[23]。

3.2 不同利用方式对土壤有机碳组分割面分布的影响

本研究表明,土地利用方式对水溶性有机碳的影响在整个剖面中都存在,其含量整体上表现为草地>林地>耕地,但A层为林地>草地>耕地。以往研究^[24-25]证实,耕地土壤水溶性有机碳含量一般低于草地、林地等自然生态系统,A层耕地土壤水溶性有机碳含量普遍低于林地和草地,因为耕地地上凋落物和植物残体的数量显著低于林地和草地。自然生态系统转变为其他利用方式后,往往伴随着土壤有机碳、水溶性有机碳等含量的减少。研究区耕地土壤水溶性有机碳含量为3种利用方式中最低,比草地和林地分别减少48%和20%,应考虑有机无机肥料配施,提高耕地土壤水溶性有机碳含量,进而改善立地条件和养分循环,促进作物产量提高。

由A~C层,研究区草地、林地和耕地土壤水溶性有机碳含量总体呈下降趋势,但草地呈现与林地和耕地不同的特征。可能与草地植被根系分布特征及土壤性质有关,与张丽华等^[26]的研究结果一致。本研究采样时间处于草地草本植物生长末期,植物群落产生大量细根,为土壤水溶性有机碳提供重要来源,使得土壤水溶性有机碳由A~ B_k 层呈现增加趋势,在 B_k 层以下缓慢下降。

3种利用方式土壤由A~C层轻组有机碳和重组有机碳含量不断减少的趋势一致,但其下降幅度存在明显差异。由A~C层,林地土壤轻组有机碳和重组有机碳含量随土层加深急剧下降,而耕地呈逐渐下降趋势。同时,轻组有机碳的变化比总有机碳,尤其是比重组有机碳的变化更为强烈。由A~C层,形成轻组的植物残体(根系)和微生物数量逐渐减少^[24],土地利用变化对深层土壤轻组有机碳的影响程度也逐渐减小。研究

区 B_k 层以下土层轻组有机碳含量渐趋稳定,土地利用变化对轻组有机碳的影响变弱,这与以往大部分研究^[27-28]结果一致。

林地与耕地土壤轻组有机碳含量差异主要发生在A层,因为林地在地表每年产生大量凋落物,而A层以下无显著差异,与二者根系分布状况有着密切关系。林地轻组有机碳60%以上积聚在土壤A层,表聚现象明显。与草地相比,林地和耕地A层以下轻组有机碳含量均处于显著低水平,主要原因是黑钙土自然植被为草甸草原,雨热同季,地上和地下生物量均丰富^[16],而研究区林地树种为杨树,属于浅根系树种,根系主要分布在土壤表层(20—40 cm),耕地种植作物为玉米,其根系也仅达0~35 cm,林地和耕地的有机物质返回土壤的数量明显低于草地,因此导致林地和耕地土壤A层以下轻组有机碳含量明显低于草地。

土壤活性有机碳的分配比例能够反映不同利用方式对土壤有机碳的影响^[29]。由A~C层,3种利用方式水溶性有机碳占比均表现出增加的特征,而轻组有机碳占比呈减少趋势,可能是因为水溶性有机碳活性较高,具有一定的移动性和溶解性,易发生溶解与迁移^[30]。

3.3 土壤有机碳及组分含量影响因素

(1)土地利用方式和土层。不同利用方式和土层对土壤有机碳及其组分的影响前文已展开论述,这里不再赘述。总体上,土层对土壤有机碳及其组分的影响程度比土地利用方式更加强烈,二者对活性有机碳(水溶性有机碳、轻组有机碳)的叠加效应较弱,可能与土壤性质有一定关系。

(2)土壤理化性质。土壤全氮与有机碳变化规律基本一致,土壤有机碳及其组分与土壤全氮、碳氮比呈显著正相关,与徐广平等^[31]的研究结果一致。土壤颗粒组成与有机碳及其组分也存在一定关系,土壤黏粒和粉粒与有机碳、轻组有机碳和重组有机碳呈显著负相关,砂粒则与有机碳、轻组有机碳和重组有机碳呈显著正相关,黏粒、粉粒和砂粒与水溶性有机碳关系均较差。同时,土壤有机碳及其组分与颗粒组成相关性显著,但与碳酸钙和pH相关性不显著,说明土壤颗粒组成与碳酸钙、pH对土壤有机碳及其组分的影响不同。可能是因为土壤颗粒与有机碳及其组分直接形成不同稳定性的有机-无机复合体,而土壤碳酸钙含量影响pH,pH通过影响微生物和酶的活性来影响有机碳的分解速率^[32],但这仍需进一步研究。

4 结论

(1)黑钙土区天然草地、人工林地和耕地剖面土

壤有机碳含量存在显著差异。林地土壤有机碳主要聚集在表层(A 层),草地土壤有机碳在深层仍较丰富,A 层以下土壤有机碳含量呈草地>耕地>林地趋势。3 种利用方式土壤剖面中各组分有机碳含量均表现为从 A~C 层逐渐减少,但草地土壤减少趋势比林地和耕地更加缓慢。

(2)草地转换为林地和开垦为耕地后,水溶性有机碳减少 34% 和 48%,轻组有机碳减少 20% 和 37%,重组有机碳含量减少 7% 和 5%,土地利用变化对土壤活性有机碳的影响远大于惰性有机碳。草地转换为林地和开垦为耕地后,水溶性有机碳和轻组有机碳占比显著降低,但重组有机碳占比却提高,意味着草地被开垦后活性有机碳含量快速下降。

(3)土地利用方式和土层对土壤有机碳及其组分(土壤水溶性有机碳、轻组有机碳和重组有机碳)具有显著影响,对土壤有机碳和重组有机碳叠加效应较强。

参考文献:

- [1] Meng T T, Liu J B. Distribution characteristics of surface soil organic carbon in different land types in the loess hilly region [C]//IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science, 2021, 804:e022109.
- [2] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use[J].Geoderma, 2005, 128(1/2):63-79.
- [3] Liu M Y, Li P, Liu M M, et al. The trend of soil organic carbon fractions related to the successions of different vegetation types on the tableland of the Loess Plateau of China[J].Journal of Soils and Sediments, 2021,21:203-214.
- [4] 展鹏飞,刘振亚,郭玉静,等.不同放牧方式下高寒草甸土壤碳组分的对比研究[J].土壤,2018,50(3):543-551.
- [5] 张文敏,吴明,王蒙,等.杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征[J].土壤学报,2014,51(6):1351-1360.
- [6] 李文娟,朱凯,冉义国,等.土地利用与反季节水位波动影响下土壤活性有机碳的组分特征[J].水土保持学报,2021,35(2):178-183,192.
- [7] Del Galdo I, Six J, Peressotti A, et al. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes[J].Global Change Biology,2003,9(8):1204-1213.
- [8] 曾宏达,杜紫贤,杨玉盛,等.城市沿江土地覆被变化对土壤有机碳和轻组有机碳的影响[J].应用生态学报,2010,21(3):701-706.
- [9] Tan Z, Lal R, Owens L, et al. Distribution of light and

heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice[J].Soil and Tillage Research, 2007,92(1):53-59.

- [10] 吴建国,艾丽.土壤颗粒组分中氮含量及其与海拔和植被的关系[J].林业科学,2008,44(6):10-19.
- [11] Shang S Y, Jiang P K, Scott X, et al. Soil organic carbon in particle size and density fractionations under four forest vegetation-land use types in subtropical China forests[J].Forest,2014,5(6):1391-1408.
- [12] 刘骞,汤洁.盐碱芦苇湿地土壤活性有机碳组分垂直分布及相关性分析[J].科学技术与工程,2020,20(5):1760-1766.
- [13] 陈源泉,隋鹏,严玲玲,等.有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响[J].农业工程学报,2016,32(增刊 2):94-102.
- [14] Poeplau C, Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe[J].Geoderma,2013,192:189-201.
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [16] Li Y W, Xia Y J, Lei Y B, et al. Estimating changes in soil organic carbon storage due to land use changes using a modified calculation method[J]. I Forest-Bio-geosciences and Forestry,2015,8(1):45-52.
- [17] Grange I, Rawson A. Soil carbon variability of a grassy woodland ecosystem in south-eastern Australia: Implications for sampling[C]//World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World,2010:82-85.
- [18] Bronick C J, Lal R. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in Northeastern Ohio, USA[J].Soil and Tillage Research,2005,81:239-252.
- [19] 吉林省土壤肥料总站.吉林土壤[M].北京:中国农业出版社,1998.
- [20] Dong S K, Wen L, Li Y Y, et al. Soil-quality effects of grassland degradation and restoration on the Qinghai-Tibetan Plateau[J].Soil Science Society of America Journal,2012,76:2256-2264.
- [21] Wang Q, Zhang L, Li L, et al. Changes in carbon and nitrogen of Chernozem soil along a cultivation chronosequence in a semi-arid grassland[J].European Journal of Soil Science,2009,60:916-923.
- [22] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J].Plant and Soil,2011,338:143-158.
- [23] Wang X Y, Li Y Q, Chen Y P, et al. Spatial pattern of soil organic carbon and total nitrogen, and analysis of related factors in an agro-pastoral zone in Northern China[J].PLoS One,2018,13:e0197451.

sium and crop yields on the North China Plains [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(6):1607-1617.

[9] 刘强,穆兴民,王新民,等.长期不同施肥方式对旱地轮作土壤养分和作物产量的影响[J].干旱地区农业研究, 2021, 39(3):122-128.

[10] 贾良良,韩宝文,刘孟朝,等.河北省潮土长期定位施钾和秸秆还田对农田土壤钾素状况的影响[J].华北农学报, 2014, 29(5):207-212.

[11] 陈轩敬,赵亚南,柴冠群,等.长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J].农业工程学报, 2016, 32(增刊 1):139-144.

[12] 张婉晴,王秀茹,周杨.滴灌条件下秸秆覆盖与施肥对夏玉米水肥利用效率的影响[J].水土保持学报, 2016, 30(6):139-146.

[13] 张亚丽,吕家珑,金继运,等.施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J].植物营养与肥料学报, 2012, 18(2):307-314.

[14] Meng X P, Guo Z Y, Yang X N, et al. Straw incorporation helps inhibit nitrogen leaching in maize season to increase yield and efficiency in the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 211:e105006.

[15] 黄明,吴金芝,李友军,等.耕作方式和秸秆覆盖对旱地麦豆轮作下小麦籽粒产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J].草业学报, 2018, 27(9):34-44.

[16] 李亚鑫,张娟霞,刘伟刚,等.玉米秸秆还田配施氮肥对冬小麦产量和土壤硝态氮的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7):38-44.

[17] 黄明,王朝辉,罗来超,等.膜侧施肥对旱地小麦产量、籽粒蛋白质含量和水分利用效率的影响[J].作物学报, 2017, 43(6):899-911.

[18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社, 2000.

[19] 张建军,党翼,赵刚,等.控释氮肥全量基施对旱地玉米产量形成和水肥利用效率的影响[J].水土保持学报, 2021, 35(2):170-177.

[20] 孙星,刘勤,王德建,等.长期秸秆还田对剖面土壤肥力质量的影响[J].中国生态农业学报, 2008, 16(3):587-592.

[21] 房静静,丁维婷,武雪萍,等.长期秸秆配施化肥对土壤养分及小麦产量、品质的影响[J].中国土壤与肥料, 2020(5):141-146.

[22] 张丽华,徐晨,于江,等.半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J].水土保持学报, 2021, 35(4):299-306.

[23] 陈素英,张喜英,孙宏勇,等.华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析[J].中国生态农业学报, 2013, 21(5):519-525.

[24] Zhou J Y, Gu B J, Schlesinger W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):e25088.

[25] 王淑英,樊廷录,丁宁平,等.长期施肥下黄土旱塬黑垆土供氮能力的变化[J].植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1487-1495.

(上接第 310 页)

[24] Sheng H, Zhou P, Zhang Y Z, et al. Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88:148-157.

[25] 季波,何建龙,吴旭东,等.宁夏典型天然草地土壤有机碳及其活性组分变化特征[J].草业学报, 2021, 30(1):24-35.

[26] 张丽华,崔东,杨海军,等.海拔对伊犁河谷草原苦豆子种群土壤活性有机碳特征的影响[J].草地学报, 2020, 28(1):200-206.

[27] 殷有,刘源跃,井艳丽,等.辽东山区 3 种典型林型土壤有机碳及其组分含量[J].生态学杂志, 2018, 37(7):2100-2106.

[28] 王文颖,王启基,鲁子豫.高寒草甸土壤组分碳氮含量及草甸退化对组分碳氮的影响[J].中国科学 D 辑:地球科学, 2009, 39(5):647-654.

[29] 闫丽娟,李广,吴江琪,等.黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J].生态学报, 2019, 39(15):1-9.

[30] 白义鑫,盛茂银,肖海龙,等.典型石漠化治理措施对土壤有机碳、氮及组分的影响[J].水土保持学报, 2020, 34(1):170-177.

[31] 徐广平,李艳琼,沈育伊,等.桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J].环境科学, 2019, 40(3):1491-1503.

[32] 李涛,于蕾,万广华,等.近 30 年山东省耕地土壤 pH 时空变化特征及影响因素[J].土壤学报, 2021, 58(1):180-190.