

晋西黄土丘陵区不同土地利用类型对 土壤碳氮储量的影响

杨帆, 潘成忠, 鞠洪秀

(北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

摘要:通过对比晋西黄土区蔡家川流域人工刺槐林地、人工油松林地、退耕荒草地和农地土壤有机碳和总氮含量的差异性,探讨了土地利用变化对该流域土壤碳氮储量的影响。结果表明:(1) 4 种土地利用类型下,土壤有机碳和总氮均表现出表聚效应,且荒草地垂向降幅最大,各样地土壤有机碳和总氮均呈极显著线性正相关;(2) 油松林地 0—48 cm 土层有机碳含量高于其他样地,刺槐林地 0—48 cm 土层总氮含量显著高于其他样地,而 4 种土地利用类型在 48—96 cm 土层和 96—160 cm 土层中有机碳和总氮含量差异不显著;(3) 从蔡家川流域退耕土壤固碳和固氮效应整体而言,退耕林地具有显著的土壤碳氮固存效应,随着人工林地面积占比的增加,流域土壤总有机碳和总氮储量相应增加。

关键词:土地利用; 碳、氮储量; 黄土丘陵区

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0318-07

Effects of Different Land Use Types on Storage of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen in Western shanxi Hilly Loess Plateau Region

YANG Fan, PAN Chengzhong, JU Hongxiu

(College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The difference of soil organic carbon and total nitrogen contents for cropland, abandoned land, *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* woodlands in hilly loess region were analyzed to explore the effects of land use types on the storage of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN). The results showed that: (1) the contents of SOC and TN decreased with the increase of soil depth, the surface soils had higher contents of SOC and TN than the subsoils, especially for abandoned land. The highly significant correlation between SOC and TN contents was found in each land use type; (2) in the surface soil layer (0—48 cm), the SOC content in *Pinus tabulaeformis* stand is significant higher than others, and the TN content of *Robinia pseudoacacia* stand is significant higher than others, there are not significant different among them in superficial layer (48—96 cm) and deep layer (96—160 cm); (3) the results also show that at the regional scale, abandoned land, *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* stands have remarkable SOC and TN sequestration compared with cropland, and the artificial forest is the best. The increase of forestland area will enhance the storage of SOC and TN in this region.

Keywords: land use type; SOC and TN storage; hilly loess region

土壤是陆地生态系统中最为重要的碳库之一,是保证生态系统碳平衡的重要组成部分^[1]。合理的土地利用有助于增加土壤碳氮的储量,反之则会促使土壤碳氮的释放^[2-3]。土壤有机碳作为土壤的一个重要组成部分,在维持土壤物理、化学和生物特征中发挥着重要的作用,土壤总氮作为评价土壤质量的重要指标之一^[4],是保证植被生长的重要因子。土壤有机碳和总氮不仅是土壤生产

力的核心物质,也是全球碳氮的主要存储方式之一。二者的长期积累不仅影响整个生态系统的碳氮稳定性和持续性,而且对缓解全球温室效应有着深远影响^[5-6]。我国开展的退耕还林还草工程正是通过调整土地利用类型进而改善区域生态环境,其通过恢复植被来改善土壤内部结构以及土壤碳氮的流动状况,在减少水土流失量的同时提高土壤的碳氮固存能力^[7-10]。因此,明确退

耕区域不同土地利用类型下土壤碳氮的储量及其变化特征,对评价区域退耕工程的成效具有重要意义。

近年来研究者对黄土丘陵区不同流域不同土地利用类型下的土壤有机碳和总氮储量变化情况进行了研究^[9-16],结果表明,各流域在植被恢复过程中,土壤有机碳和总氮储量均会有一定的增加,但不同区域,不同土地利用类型下会因其植被生物量形成、积累与分解速率的不同,而使土壤有机碳和总氮产生不同的积累量^[12-17]。许明祥等对陕北黄土丘陵区安塞附近小流域的不同土地利用类型下有机碳储量情况进行研究,结果表明,从该区域表层(0—20 cm)土壤有机碳累计量来看,土壤有机碳储量表现为退耕林地>退耕撂荒地>退耕还草地^[7]。周汉华等对黄土高原燕沟流域的退耕草地、灌木林地、林地和农地在不同地形条件下的有机碳和总氮储量进行比较研究,结果显示,在坡地地形下,退耕草地、灌木林地和林地较农地总氮储量分别增加 32%,90%和 55%,有机碳储量增加 41%,119%和 60%,相比之下,该区灌木林地具有较高的碳氮储存能力^[18],诸如以上针对黄土高原小流域退耕土地土壤碳氮储量的变化研究已有一定的积累。综合来看,不同退耕地土壤碳氮储量都较非退耕地有明显增加,但不同退耕地土地利用类型在不同流域内发挥的碳氮储存能力却存在差异,因此,有必要对不同退耕流域内不同土地利用类型下土壤碳氮储存能力进行比较分析,以期从土壤碳氮储存能力方面为流域退耕土地利用类型的选择提供依据。

表 1 四种土地利用类型基本情况

土地利用类型	坡向	年限/a	坡度/(°)	海拔/m	盖度/%	主要植被
刺槐林地	阳坡	15	22	1169	89	刺槐
油松林地	阳坡	15	23	1171	76	油松
荒草地	阳坡	20	24	1094	69	芦苇、铁杆蒿、白羊草、紫花苜蓿
农地	阳坡	15	19	1087	53	玉米

1.2 样品采集

于 2014 年 7 月,对人工刺槐林地、人工油松林地、退耕荒草地、农地进行采样工作。坡面方向,4 个坡面坡长均在 40 米左右,各坡面自坡顶向坡角等间距设置 6 个采样点,各采样点由 3 个重复样混合而成;剖面方向,根据采样工具,设定每 16 cm 为一个垂直向采样单位,每个采样点共设置 10 个采样单位,4 个样地共计 240 个土壤样品。土壤样品自然风干,采用四分法挑选待测土样,将待测土样通过 0.25 mm 筛孔以供测定。退耕林地和退耕荒草地自退耕以来基本未受人为活动干扰。

1.3 测定项目及方法

土壤样品有机碳测定(稀释热—重铬酸钾容量法)

本文以晋西典型黄土丘陵沟壑区山西吉县蔡家川流域为研究区域,以坡向、坡度以及生长年限相近的人工刺槐林地、人工油松林地、退耕荒草地和农地为研究对象,对不同土层(0—160 cm)土壤有机碳和总氮含量进行对比研究,并根据 2001 年、2004 年和 2012 年该流域土地利用类型面积占比变化情况计算该流域土壤有机碳和总氮储量变化情况,进一步了解蔡家川流域不同退耕土地利用类型下土壤有机碳和总氮储量情况,以期为蔡家川流域退耕土地利用类型的选择和碳氮储量效果评价提供基础依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于山西省吉县蔡家川流域(35°53′10″—36°21′02″N,110°27′30″—111°07′20″E),属于黄河的三级支流,流域大体上呈由西向东走向,该流域面积为 39.33 km²,海拔高度在 904~1 592 m,属于典型黄土残塬沟壑区,多年平均降水量 571 mm,年蒸发量 1 729 mm,年平均气温 9.9℃,≥10℃的积温为 3 358℃,光照时数 2 563.8 h,无霜期 172 d。该区土壤为褐土,黄土母质,土壤普遍呈碱性。该区主要人工植被有刺槐、油松,农作物以玉米、小麦、谷子、豆类为主。通过对该地区林、草地进行调查,以典型性和代表性为原则,选择退耕年限、坡度、坡向相近的人工刺槐林、人工油松林、退耕荒草地和农地 4 种土地利用类型为研究对象,土地利用类型基本情况见表 1。

土壤样品总氮测定(半微量开氏定氮法)

采用环刀法测定土壤容重(测定 0—16 cm,16—32 cm,32—48 cm 土层土壤容重)。

1.4 数据处理

根据不同年份人工林地、荒草地和农地面积占比计算该年各土地利用类型的有机碳和总氮总储量^[19]。

土壤有机碳密度 SOC_i(kg/m²),计算公式为:

$$SOC_i = C_i \cdot D_i \cdot E_i \cdot (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中:C_i为土壤有机碳含量(g/kg);D_i为土壤容重(g/cm³);E_i为土层厚度(cm);G_i为粒径>2 mm 的石砾含量(%),研究区土壤无粒径>2 mm 石砾,所以 G_i取值为 0。

单位面积一定深度范围内土壤有机碳储量 SOC_t(t/hm²)计算公式为:

$$SOC_t=10\sum_{i=1}^kSOC_i \tag{2}$$

式中： K 为土层数，以同样的公式计算土壤总氮密度和总氮储量。

采用 SPSS 19.0 软件对不同土层、不同土地利用类型土壤有机碳和总氮含量和储量进行 LSD 差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳和总氮垂向变化

四种土地利用类型下，土壤有机碳和总氮含量均随土层深度的增加而减小(图 1)，且均在 64 cm 深度范围内降幅较大，而>96 cm 深度以下降幅不大。降幅大小顺序为荒草地(74.03%)>油松林地(72.56%)>刺槐林地(61.65%)>农地(47.21%)。总体来看，土

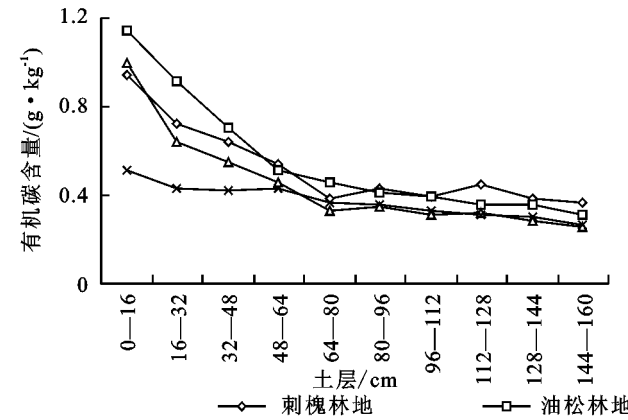


图 1 四种土地利用类型土壤有机碳和总氮垂向分布特征

表 2 四种土地利用类型垂向有机碳总氮拟合关系

土地利用类型	有机碳垂向拟合方程式	R^2	总氮垂向拟合方程	R^2
刺槐林地	$y=0.9493x^{-0.426}$	0.922	$y=0.6073x^{-1.098}$	0.927
油松林地	$y=1.235x^{-0.591}$	0.979	$y=0.651x^{-1.121}$	0.925
荒草地	$y=0.9802x^{-0.575}$	0.978	$y=0.4944x^{-1.002}$	0.944
农地	$y=0.5378x^{-0.254}$	0.896	$y=0.518x^{-1.008}$	0.943

见表 3，各土地利用类型下土壤有机碳和总氮之间均呈极显著线性正相关，这与其他研究结果相同^[22-23]，且油松林地相关性最好。在氮素条件相同的情况下，3 种退耕土地利用类型的有机碳和总氮含量均高于农地生态系统，说明退耕措施有利于土壤有机碳和总氮的积累。

表 3 四种土地利用类型土壤有机碳和总氮拟合关系式

土地利用类型	拟合方程式	R^2
刺槐林地	$y=1.3901x+0.3033$	0.9542**
油松林地	$y=1.9081x+0.2376$	0.9711**
荒草地	$y=1.9533x+0.1724$	0.9503**
农地	$y=0.5781x+0.2871$	0.8759**

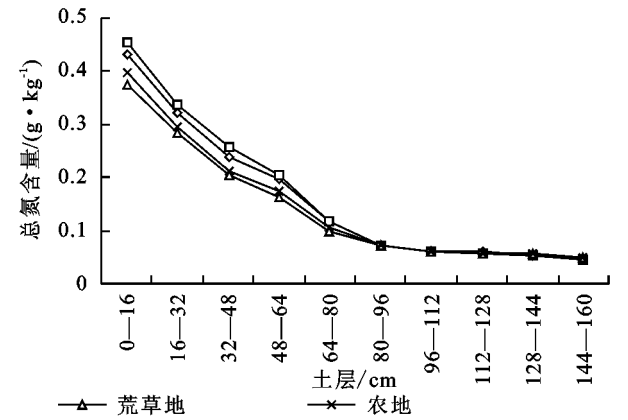
注：* * 表示在 0.01 水平上显著相关。

2.2 土地利用类型间土壤有机碳和总氮分层比较

为了进一步分析各坡地垂向间土壤有机碳和总

地利用对土壤有机碳和总氮含量的影响主要体现在 0—64 cm 土层，这可能与土壤地下生物量和微生物数量垂直分布有关。在 0—64 cm 土壤中，林地枯落物中含有较多难分解有机质(木质素、蜡纸等)，枯落物为土壤有机碳的主要来源，另一方面，林木根系发达，向下延伸范围广，富裕的地下生物量是土壤有机碳的重要来源，而土壤氮素含量在很大程度上取决于土壤有机碳的积累及其分解作用的相对强度^[20]，因此土壤总氮变化趋势与有机碳变化趋势相似^[21]。

另外，本研究结果显示，各土地利用类型下土壤有机碳和总氮含量随土层深度的变化均以幂函数拟合性最佳(表 2 所示)，此拟合关系式可为该地区 4 种土地利用类型下不同土层深度土壤碳氮储量的计算奠定基础。



氮含量的差异性，现根据土壤剖面有机碳和总氮的变异系数，将土壤剖面划分为 0—48 cm 土层，48—96 cm 土层和 96—160 cm 土层。

由表 4 看出，各土地利用类型下土壤有机碳和总氮含量在剖面中的分布具有明显的层次性，且 0—48 cm 深度含量最高。刺槐林地、油松林地和荒草地 0—48 cm 深度与 96—160 cm 深度有机碳和总氮含量差异显著，而农地各深度间有机碳和总氮含量差异不显著。说明较农地而言，刺槐林地、油松林地和荒草地土壤有机碳和总氮的表聚效应显著。从各土地利用类型下不同深度土层的变异系数来看，油松林地各深度土层有机碳变异系数最大，刺槐林地深度土层总氮变异系数最大，土壤剖面有机碳和总氮变异系数的大小间接反映了地下碳氮的流动性，变异系数大流动性强，由此看出油松林地有机碳流动性强，刺槐林地总氮流动性强。

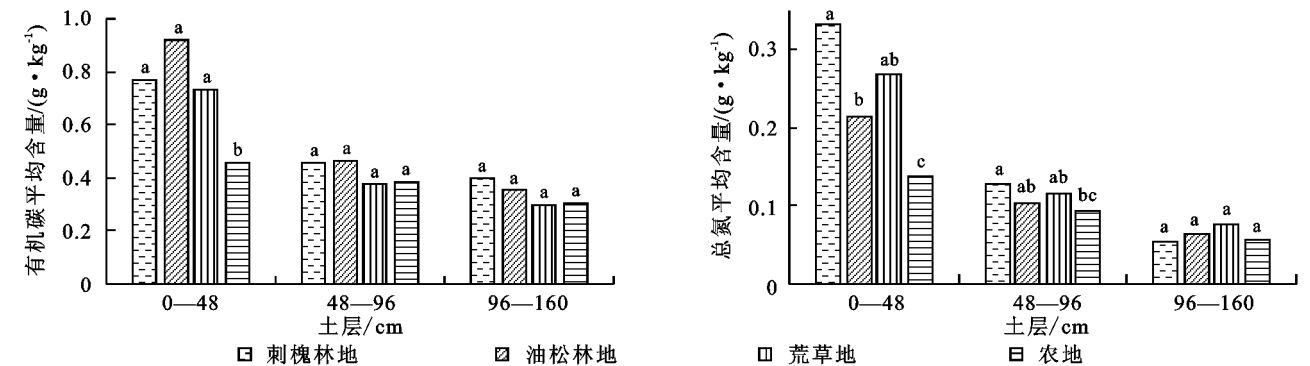
表 4 不同土地利用类型土层间土壤有机碳和总氮比较

土地利用类型	土层/cm	有机碳/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%	总氮/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%
刺槐林地	0—48	0.771±0.24a	17.9	0.3±0.013a	24.11
	48—96	0.452±0.18b	11.39	0.1±0.007b	19.51
	96—160	0.394±0.18b	4.9	0.05±0.001b	10.76
油松林地	0—48	0.922±0.38a	31.83	0.21±0.006a	24.05
	48—96	0.464±0.14b	25.99	0.1±0.002ab	18.87
	96—160	0.354±0.12b	20.65	0.06±0.001b	15.33
荒草地	0—48	0.731±0.44a	28.45	0.27±0.014a	18.76
	48—96	0.377±0.18b	15.79	0.12±0.001b	15.98
	96—160	0.296±0.12b	8.59	0.08±0.002b	11.16
农地	0—48	0.452±0.23a	11.76	0.14±0.003a	21.94
	48—96	0.383±0.19a	7.89	0.09±0.003a	15.91
	96—160	0.302±0.09a	3.95	0.06±0.002a	5.75

注:不同小写字母表示在相同土地利用类型下不同土层间土壤有机质和总氮含量差异显著($p<0.05$)。

比较不同深度土层 4 种土地利用类型间有机碳和总氮含量的差异情况(图 2),在有机碳含量方面,油松林地 0—48 cm 土壤有机碳含量最高,刺槐林地和荒草地次之,三者间差异不显著,而农地含量显著低于林草地;在 48—96 cm 和 96—160 cm 深度土层,两种林地土壤有机碳含量相当,且均略高于荒草地和农地含量,4 者间差异不显著。在总氮含量方面,刺

槐林地 0—48 cm 土层土壤总氮含量最高,荒草地次之,而农地含量显著低于其他 3 者,刺槐林地 48—96 cm 土层土壤总氮含量与农地 48—96 cm 土层土壤总氮含量差异显著,而此土层其他各坡地间差异不显著,各坡地 96—160 cm 土层土壤总氮含量相当,差异均不显著。综合来看,土地利用类型对坡面各层有机碳和总氮含量有一定的影响,但影响程度存在差异。



注:图中不同小写字母表示不同土地利用类型在同一深度土层土壤有机质和总氮含量的差异显著($p<0.05$)。

图 2 不同土地利用类型下土壤有机碳和总氮含量比较

2.3 各土地利用类型 0—48 cm 土层土壤有机碳和总氮储量变化

土壤有机碳和总氮储量是由有机碳密度和总氮密度计算而得,而土壤有机碳密度和总氮密度主要由各层土壤容重、有机碳含量、总氮含量决定。根据各土地利用类型 0—16,16—32,32—48 cm 土壤容重(表 5)、有机碳和总氮含量的测算得 0—48 cm 土层土壤有机碳密度和总氮密度,进而求得各土地利用类型单位面积(1 hm²)表层(0—48 cm)土壤的有机碳和总氮储量(图 3)。

由图 3 看出,4 种土地利用类型 0—48 cm 土层土壤有机碳储量大小为油松林地(4.89 t/hm²)>荒草地(4.38 t/hm²)>刺槐林地(4.04 t/hm²)>农地(2.69 t/hm²),其中,农地显著低于其他 3 种土地利用类型($p<0.05$);表层土壤总氮储量大小为刺槐林

地(1.65 t/hm²)>荒草地(1.58 t/hm²)>油松林地(1.13 t/hm²)>农地(0.82 t/hm²),刺槐林地和荒草地 0—48 cm 土层土壤氮储量显著高于农地($p<0.05$)。

表 5 各土地利用类型不同土层土壤容重值

深度/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)			
	刺槐林地	油松林地	荒草地	农地
0—16	0.89	0.97	1.13	1.14
16—32	1.13	1.18	1.33	1.23
32—48	1.19	1.24	1.38	1.35

不同土地利用类型下 0—48 cm 土层土壤碳氮储量的差异主要与地表枯落物和地下生物量的分布有关。就本研究流域,农地表层枯落物平均为 1.7 cm 的厚度,而林地表层枯落物覆盖厚度能达到 4 cm,调查显示,蔡家川流域油松林地枯落物能够达到 16.45 t/hm²,刺槐林地枯落物能够达到 12.88 t/hm²[24]。

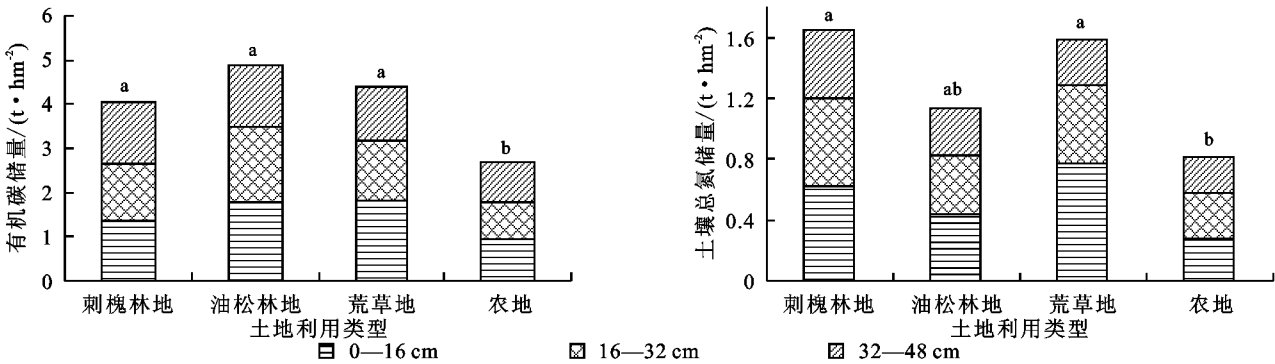


图 3 种土地利用类型 0—48 cm 土层内有机碳和总氮储量比较

另一方面,土壤内部有机碳和总氮储量还受根系的生长发育和分布以及微生物的活动影响,退耕地随着生长年限的延长,在庞大根系的作用下土壤理化性质逐步改善,进而有利于枯落物的分解,增加碳氮储量。

利用计算得到的刺槐林地、油松林地、荒草地和农地 0—48 cm 土层单位面积(1 hm²)有机碳和全氮储量(图 3)和不同年份蔡家川流域各土地利用类型面积的占比情况,求得该流域不同年份土壤有机碳和总氮储量随土地利用的变化情况。

表 6 为蔡家川流域现有年份不同土地利用类型面积占比情况,以人工刺槐林地和人工油松林地单位面积(1 hm²)表层(0—48 cm)有机碳和总氮储量的平均值为该流域人工林地表层有机碳和总氮储量值,计算得到各统计年份下不同土地利用类型有机碳和

总氮储量的变化情况(表 7)。可知,2004 年和 2012 年蔡家川流域人工林地面积占比较 2001 年分别增加 11.39%和 11.96%,有机碳和总氮储量增幅均在 60%以上;2004 年和 2012 年该流域荒草地面积占比较 2001 年分别减小 6.74%和 6.51%,有机碳和总氮储量降幅均在 33%;2004 年和 2012 年该流域农地面积占比较 2001 年分别减小 1.03%和 0.9%,有机碳和总氮储量降幅均在 13%。蔡家川流域 2004 年和 2012 年 3 种土地利用类型总面积占比较 2001 年分别增加 10.21%和 10.17%,2004 年和 2012 年 3 种土地利用类型总有机碳储量增幅均在 12%以上,总氮储量增幅在 9.1%以上,由此说明,自 2001—2012 年退耕还林面积的增加对该流域土壤有机碳和总氮储量的积累具有积极作用。

表 6 蔡家川流域不同年份土地利用类型面积占比情况^[25-28]

年份	人工林地		荒草地		农地		总面积/ hm ²
	面积/hm ²	百分比/%	面积/hm ²	百分比/%	面积/hm ²	百分比/%	
2001	768.92	19.58	751.65	19.12	265.62	6.76	1786.19
2004	1242.27	30.97	496.47	12.38	229.99	5.73	1968.73
2012	1241.00	31.54	496.00	12.61	231.00	5.86	1968.00

表 7 蔡家川流域有机碳和总氮储量变化

年份	人工林地		荒草地		农地		年有机碳 总储量/t	年总氮 储量/t
	有机碳储量/t	总氮储量/t	有机碳储量/t	总氮储量/t	有机碳储量/t	总氮储量/t		
2001	3434.8	1071.7	3293.0	1189.5	715.8	216.8	7443.6	2478.0
2004	5549.4	1731.4	2175.0	785.6	619.8	187.7	8344.2	2704.8
2012	5543.7	1729.6	2173.0	784.9	622.5	188.6	8339.2	2703.1

3 讨论

本研究中,各土地利用类型土壤有机碳和总氮含量在垂直于坡面方向均呈现下降趋势,且变化趋势符合幂函数关系。垂向土壤有机碳含量的变化主要受外源输入过程与内部分解过程的约束,各土地利用类型土壤上层植物枯落物多,有机碳来源广,且植物根系大多分布在上层,因此土壤上层外源输入和内部分解过程均较发达,土壤有机碳和总氮含量呈现出随土层深度的增加而递减的趋势,这与前人大部分研究结

果相一致^[29]。本研究指出林地土壤具有较高的有机碳和总氮储量,其原因在于林地植被盖度较大,枯落物来源丰富,使得其土壤有机碳和总氮含量普遍较高,又由于林地在秋冬季节被大量枯落物覆被,其土壤处于被保护状态,进而减少了碳氮的散失;另外,树木具有发达的根系,能够在深层次土壤中积累和固存有机碳,根系是下层土壤有机碳周转的重要驱动力,也是将光合产物直接输入到地下的重要途径,因此林地根系在增强林地土壤抵抗侵蚀能力的同时也为林地土壤碳氮

的固存提供重要保障。

天然荒草地同样有着较大的枯落物来源,且大量枯落物覆盖于地表可作为土壤的保护层。但相对于林地来说,草地枯落物成分相对单一,且其地下生物量分布范围较小,在改良土壤结构和促进生物活动方面不及林地。本研究所选取的荒草地为连续多年生的草地,由于长时间在相似的自然条件下生长,其物种和产出方式等都较为单一,使其对有机碳和总氮储存能力低于林地。

农地属于掠夺式开发利用土壤,其植被盖度较小,枯落物回归量较少,且农作物根系普遍分布较浅,地下生物量少,因此造成农地土壤碳氮收支不平衡。另外,农地收割后,土地基本处于裸露状态,土壤受外界因素的影响程度增大,进而会造成表层土壤淋失、微生物活性降低、土壤质地粗化、土壤团聚性降低等,这些因素都会降低土壤碳氮的存储。农地土壤有机碳和总氮含量普遍低于林地和草地含量,究其原因在于:一般农地使用的无机肥会过度激发土壤微生物的活性以及土壤养分的可利用性,进而加速土壤有机质的降解,不利于土壤碳的固存;另外,人工种植过程对土壤扰动较大,灌溉和耕种会使土壤干湿交替频繁,进而会破坏土壤团聚性,加速土壤氮的分解、释放与淋失。

通过计算可以看出,自2001年以来,蔡家川流域退耕林地面积增加迅速,加之该区域林地土壤储存碳氮的能力较强,因而退耕林地在该流域的碳氮固存方面发挥着重要作用。因此,在不影响当地农业生产的前提下,进行退耕还林、封山育林等土地利用的转变可促进流域土壤碳氮储量。

4 结论

(1) 4种土地利用类型下,土壤有机碳和总氮含量均随土层深度的增加而减小,土壤有机碳和总氮含量随土层深度的变化均以幂函数拟合性最佳。荒草地降幅最大(74.03%),油松林地和刺槐林地次之(72.56%,61.65%),农地最小(47.21%),土壤有机碳和总氮呈极显著线性相关性($p < 0.01$)。

(2) 将垂向土层划归为0—48 cm深度土层、48—96 cm深度土层和96—160 cm深度土层,根据垂线变异系数分析,油松林地有机碳流动性强,刺槐林地总氮流动性强。油松林地0—48 cm土层有机碳含量最高,刺槐林地0—48 cm土层总氮含量最高,且与其他3种土地利用类型间差异显著($p < 0.05$),各土地利用类型间48—96 cm土层和96—160 cm土层土壤的有机碳和总氮含量存在差异,但差异不显著。

(3) 油松林地0—48 cm土层土壤有机碳储量最大,刺槐林地0—48 cm土层土壤总氮储量最大。蔡家川流域2004年和2012年较2001年人工林地面积

占比增加,总面积占比分别增加10.21%和10.17%,同期流域总有机碳储量增幅在12%以上,总氮储量增幅在9.1%以上,由此说明,人工退耕还林的实施对流域土壤有机碳和总氮储量的积累具有积极作用。

参考文献:

- [1] 郑淑霞,上官周平. 陆生植物稳定碳同位素组成与全球变化[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 733-739.
- [2] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2279-2287.
- [3] Yan W D, Chen X Y, Tian D L, et al. Impacts of changed litter inputs on soil CO₂ efflux in three forest types in central south China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(7): 750-757.
- [4] 袁海伟,苏以荣,郑华,等. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用类型土壤有机碳和氮素分布特征[J]. 生态学报, 2007, 26(10): 1579-1584.
- [5] Zhang L H, Xie Z K, Zhao R F, et al. The impact of land use change on soil organic carbon and labile organic carbon stocks in the Longzhong region of Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(3): 241-250.
- [6] Liu W J, Su Y Z, Yang R, et al. Land use effects on soil organic carbon, nitrogen and salinity in saline-alkaline wetland[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2010, 2(3): 263-270.
- [7] 许明祥,王征,张金,等. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5405-5415.
- [8] Wang B, Xue S, Liu G B, et al. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China[J]. Catena, 2012, 92: 186-195.
- [9] Turner M G. Landscape ecology: the effect of pattern on process[J]. Annual review of ecology and systematics, 1989, 20: 171-197.
- [10] Gong W G. A study on the relation between soil and needle content of nutrient elements in the Korean pine plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1992, 3(1): 95-100.
- [11] 赵明月,赵文武,钟莉娜. 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应: 以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1105-1113.
- [12] 杜峰,梁宗锁,徐学选,等. 陕北黄土丘陵区撂荒地群落生物量及植被土壤养分效应[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1673-1683.
- [13] 张帅,许明祥,张亚锋,等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 661-668.
- [14] Chan K Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management[J]. Soil Use and Management, 2001, 17(4): 217-221.
- [15] Liu X, Li F M, Liu D Q, et al. Soil organic carbon, car-

- bon fractions and nutrients as affected by land use in semi-arid region of Loess Plateau of China[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(2):146-152.
- [16] Fang X, Xue Z, Li B, et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2012, 88(1):6-13.
- [17] Chen L, Gong J, Fu B, et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, loess plateau of China[J]. *Ecological Research*, 2007, 22(4):641-648.
- [18] Zhu H, Wu J, Guo S, et al. Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2014, 120:64-72.
- [19] 王俊明, 张兴昌. 退耕草地演替过程中的碳储量变化[J]. *草业学报*, 2009, 18(1):1-8.
- [20] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, et al. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2):191-213.
- [21] Morrison I K, Foster N W. Fifteen-year change in forest floor organic and element content and cycling at the Turkey Lakes Watershed[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(6):545-554.
- [22] 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1):68-76.
- [23] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. *草业学报*, 2014, 23(2):9-19.
- [24] 朱继鹏. 晋西黄土区水源涵养林优化配置研究[D]. 北京:北京林业大学, 2006.
- [25] 武思宏. 晋西黄土区嵌套流域生态水文过程模拟研究[D]. 北京:北京林业大学, 2007.
- [26] 张瑞. GIS支持下的晋西黄土区水土保持林生态效益评价[D]. 北京:北京林业大学, 2010.
- [27] 张志, 朱金兆, 朱清科, 等. 蔡家川流域景观自然度研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(5):128-131.
- [28] 李慧敏. 晋西黄土区小流域地形特征分析及植被对径流的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2012.
- [29] 李明峰, 董云社, 耿元波, 齐玉春. 草原土壤的碳氮分布与 CO₂ 排放通量的相关性分析. *环境科学*, 2004, 25(2):7-11.



(上接第 317 页)

参考文献:

- [1] 杨家军, 吐尔逊·哈斯木, 阿迪力·吐尔干, 阿不力提甫·吾甫尔, 等. 近 50 年来塔里木河流域水域环境现状及其驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1):76-81.
- [2] 吐尔逊·哈斯木, 瓦哈瓦哈甫·哈力克, 艾力克木·哈德尔, 等. 塔里木河下游生态输水前后生态与环境的动态变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(4):42-47.
- [3] 阿依先木·司马义, 吐尔逊·哈斯木, 祖木拉提·伊布拉音, 马木提江·卡日, 曼尼萨汗·吐尔隼. 人类活动对土地沙漠化的影响研究:以塔里木河下游为例[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1):56-60.
- [4] 郭英杰, 许英勤, 马彦华. 新疆塔里木河下游应急输水的生态效益[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(3):237-240.
- [5] 李卫红, 陈亚鹏, 张宏峰, 等. 塔里木河下游断流河道应急输水与地表植被响应[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3):301-305.
- [6] 高前兆, 屈建军, 王润, 等. 塔里木河下游绿色走廊生态输水对沙漠化逆转的影响[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1):52-58.
- [7] 陈亚宁, 张小雷, 祝向民, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析[J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(5):475-482.
- [8] 徐海量, 叶茂, 李吉玫. 塔里木河下游输水后地下水动态变化及天然植被的生态响应[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(4):460-470.
- [9] 孙卫, 侯平, 李霞. 胡杨枝直径生长对塔里木河下游应急输水的响应[J]. *生态学报*, 2006, 26(9):2913-2917.
- [10] 哈力克·玉米提, 柴政, 罗淑政, 等. 新疆塔里木河下游胡杨树高生长量及其空间分布研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(5):187-191.
- [11] 徐海量, 宋郁东, 王强. 胡杨生理指标对塔里木河下游生态输水的响应[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(4):24-27.
- [12] 张余庆, 陈昌春, 姚鑫, 等. 江西省信江流域极端降水时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4):189-194.
- [13] 张余庆, 项瑛, 陈昌春, 等. 赣江流域旱涝时空变化特征研究[J]. *气象科学*, 2015, 35(3):346-352.
- [14] 王增如, 徐海量, 尹林克, 等. 塔里木河下游荒漠化过程土壤种子库特征[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(5):885-890.
- [15] 傅彦仪, 徐海量, 赵新风, 等. 漫溢干扰对塔里木河河岸退化植被的影响[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(1):60-66.
- [16] 龚君君, 叶茂, 禹朴家, 等. 生态输水对塔里木河下游胡杨主干径向生长量影响研究:以依干不及麻断面为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(2):162-166.
- [17] 李霞, 侯平, 杨鹏年. 塔里木河下游胡杨对水分条件变化的响应[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(1):26-31.
- [18] 安红燕, 徐海量, 叶茂, 等. 塔里木河下游生态输水后胡杨径向生长量的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1):29-34.