

黄土区不同退耕方式下土壤碳氮的差异及其影响因素

王志齐¹ 杜兰兰¹ 赵 慢² 郭胜利^{1,2,3*}

(¹西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌, 712100; ³中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘 要 研究植被恢复对土壤碳氮动态的影响, 对了解陆地生态系统碳氮循环, 应对全球温室效应具有重要意义。本研究以黄土丘陵区不同人工恢复植被为对象, 以农田为参照, 分析了不同人工植被恢复方式对 0~100 cm 剖面土壤有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 含量影响的差异及其影响因素。结果表明: 退耕还林还草显著提高了土壤的 SOC 和 TN 含量。退耕后, SOC 和 TN 含量均较农田明显提高。0~100 cm 土层 SOC 平均含量人工乔木林为农田的 1.43 倍, 增幅最大; 其次是人工灌木, 为 1.36 倍; 最后是人工草地, 为 1.21 倍。0~100 cm 土层 TN 平均含量人工乔木林增幅最大, 是农田的 1.30 倍; 其次是人工草地, 为 1.21 倍; 而人工灌木增幅最小, 为 1.13 倍。与农田相比, 人工恢复植被类型间 SOC 和 TN 含量及细根密度的差异在土壤剖面深度上表现出不同, 人工乔木和灌木最明显, 影响深度 >100 cm; 草地最小, 仅为 60 cm。恢复植被的细根密度、C:N 和凋落物量显著高于农作物, 细根密度与 SOC、TN 呈显著线性相关 ($P<0.01$)。细根的质和量以及凋落物量是不同人工恢复植被下 SOC 和 TN 含量差异的重要影响因素。

关键词 土壤全氮; 土壤有机碳; 细根; 凋落物; 植被类型

Differences in soil organic carbon and total nitrogen and their impact factors under different restoration patterns in the Loess Plateau. WANG Zhi-qi¹, DU Lan-lan¹, ZHAO Man², GUO Sheng-li^{1,2,3*} (¹*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China*; ²*College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China*; ³*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, Shaanxi, China*).

Abstract: Knowledge of the effect of different vegetation restoration measures on soil organic carbon (SOC) and total soil nitrogen (TN) is of importance to better understand carbon and nitrogen cycling in terrestrial ecosystems and deal with the global greenhouse effect. The differences in SOC and TN content in 0–100 cm soil profile between different restoration measures and their impact factors were investigated in the Loess Plateau. The results showed that artificial vegetation restoration led to a significant increase in both SOC and TN content in the 0–100 cm soil profile compared with that of cropland. The highest increase in average SOC content was observed in the artificial woodland (1.43 times that of the cropland), followed by the artificial shrubland (1.36 times) and artificial grassland (1.21 times); whereas the highest increase in average TN content was observed in the artificial woodland (1.30 times that of the cropland), followed by the artificial grassland (1.21 times) and artificial shrubland (1.13 times). Compared with the cropland, there was a significant difference in SOC and TN content and fine root density up to a maximum depth of >100 cm in the artificial woodland and shrubland, but about 60 cm in the artificial grassland. The fine root density, soil C:N ratio and aboveground litter production of artificial woodland, shrubland and grassland were significantly higher than that of cropland, and fine root density was significantly linearly corre-

本文由国家自然科学基金项目(41371279, 41071338)资助 This paper was supported by the National Nature Science Foundation of China (41371279, 41071338).

2015-09-06 Received, 2015-12-25 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

lated with SOC and TN ($P<0.01$). The quantity and quality of fine root and litter biomass might be the dominant factors contributing to the observed difference in SOC and TN contents between the different artificial vegetation types in the Loess Plateau.

Key words: total soil nitrogen; soil organic carbon; fine root; litter; vegetation types.

全球土壤碳库为 2500 Gt,是大气碳库(760 Gt)的 3.3 倍、生物碳库(560 Gt)的 4.5 倍,其微小的变化可能引起大气 CO_2 浓度的较大波动,进而影响温室效应和全球气候变化^[1].人工植被恢复是促进土壤碳氮恢复的重要措施.目前,有关退耕还林还草已有大量研究^[2-3],但系统的人工恢复研究相对较少.探讨不同人工植被类型对土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)含量影响的差异对选择合理的植被类型模式有重要参考意义.

退耕还林还草后 SOC 和 TN 含量一般都会显著提高,并受许多因素影响,如土地利用类型、管理方式、凋落物量、树种组成及细根的质和量等^[4-8].与农田相比,各人工植被类型无论是在管理方式、微气候环境(温度、湿度)^[5]、凋落物量,还是细根的质和量^[8]等方面都明显不同.因此,人工植被恢复类型对 SOC 和 TN 含量的影响会有显著差异.但人工乔木、灌木以及草地对土壤碳氮积累效率影响的优劣仍存在一定争议^[5,7,11-14].已有研究表明,退耕后植被恢复地区的土壤碳氮累积速率多表现为林地>灌木>草地^[10];苏静等^[11]则认为,退耕后草地比乔木和灌木更有利于 SOC 的恢复.Guo 等^[7]发现,农田转变为林地 SOC 增加了 18%,而转变为草地后增加了 19%,没有显著差异.因此,针对不同植被类型退耕方式的 SOC 和 TN 固存效应,尤其是对其固存效应的影响因素,有必要开展进一步研究.退耕还林还草后, SOC 和 TN 含量最终被 C 和 N 输入和输出的平衡所决定,而细根和凋落物是制约这个平衡的关键因素^[14].因此,植被细根的质和量深刻影响 SOC 和 TN 含量动态变化及剖面分布特征^[15].不同植被类型下,植被细根的生长速度、生命周期、周转速率、分解过程等存在较大差别.因此,不同植被恢复类型细根的质和量及剖面分布特征的差异可能是导致 SOC 和 TN 变化的主要驱动力^[15].

黄土高原丘陵区退耕还林还草可追溯到 20 世纪 50 年代初期,70 年代国家进行了大规模的治理,其效果除了体现在植物覆盖度提高以及社会、经济和生态效益外,土壤固碳氮效益也引起人们的重视.有关黄土高原退耕还林还草后植被恢复过程中土壤碳氮的研究已有大量报道^[16],但是退耕后不同植被

类型的细根质和量以及凋落物量对 SOC 和 TN 含量及剖面分布的影响还鲜见报道.本文研究了黄土高原植被恢复治理区退耕后不同人工植被类型 0~100 cm 土层 SOC、TN 含量的分布特征及其与细根和凋落物的关系,以期评价不同植被恢复类型下土壤碳氮固存潜力提供依据,为选择合理的退耕模式提供数据支持.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

燕沟流域(36°28′—36°32′N, 109°20′—109°35′E)位于陕西省延安市宝塔区,主沟长 8.6 km,呈东南-西北走向,总面积约 48 km²,海拔 986~1425 m,以梁峁地貌为主,沟壑密度为 4.8 km·km⁻²,属于典型黄土高原丘陵沟壑区.流域气候为暖温带半湿润向半干旱过渡的类型,年平均气温 9.8℃,多年平均降雨量约 558 mm.土壤为半熟化状态的黄绵土(占 90%以上),pH 为 7.92~8.13.治理前流域水土流失面积 42.55 km²,占总面积的 88.7%,属强度水土流失地区^[17].20 世纪 50 年代以来,该区作为黄土高原优先和重点水土流失治理区,进行了大规模的植被恢复建设,70 年代国家进行了退耕还林还草工程,坡度大于 25°的农田全部退耕,故该地区具有稳定的人工植被恢复序列.

1.2 样地选择

在该流域选取地形近似、历史背景相同(林龄相似及植被恢复前为坡耕地)且生态平衡稳定的典型治理坡段,各点以人工乔木、灌木、草地群落为对象,并在就近区域选取微坡度农田, GPS 定位,对其进行生物群落典型样方调查,每种处理设置 3 个样地,共 12 个,每个样地设置 3 个样方.草地采用 1 m×1 m 样方,调查草丛盖度、高度、种类等;灌木林和乔木林样地采用 10 m×10 m 样方,主要调查林木种类、郁闭度、胸径、密度生长状况等;林下群落同样采用 1 m×1 m 样方,调查方法同草地.各植被类型自然状况见表 1.

1.3 样品采集与分析

土样的采集:用直径为 3 cm 的土钻在每个样方内选取 3 个点,采集 0~5、5~10、10~15、15~20、20~

表 1 样地概况
Table 1 Characteristics of study sites

植被类型 Vegetation type	经纬度 Longitude and latitude	坡度 Gradient (°)	海拔 Altitude (m)	坡向 Aspect	林龄 Age (a)	先前 土地利用 Prior land use	冠层均高 Mean canopy height (m)	树干均高 Mean plant height (m)	平均胸径 Mean DBH (cm)	冠层 覆盖度 Canopy coverage (%)	凋落物量 Litter biomass (Mg·hm ⁻²)	主要 优势种 Dominant plant species
I	109°31'50.0" E 36°31'13.0" N	20~35	1256	阳坡	30	农田	5	3.8	15	45	16A	刺槐、山杨
II	109°32'14.0"E 36°27'29.0"N	20~35	1250	阳坡	30	农田	2	1.5	7	45	6.3B	柠条、沙棘、杠柳
III	109°31'23.6"E 36°27'31.1"N	20~35	1238	阳坡	20	农田		0.2		48	0.2C	紫花苜蓿
IV	109°32'57.3"E 36°27'15.3"N	5~15	1230	阳坡								小麦、小米、玉米

I: 人工乔木 Artificial woodland; II: 人工灌木 Artificial shrubland; III: 人工草地 Artificial grassland; IV: 农田 Cropland. 下同 The same below. 不同大写字母表示植被凋落物间差异显著 ($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference among different vegetation litters at 0.05 level.

40、40~60、60~80、80~100 cm 土壤样品,相同土层土样混合为一个样本.采集普通样品的同时,采用环刀法按同样土层划分采集土样测定土壤容重.采回的新鲜土样部分风干,磨细过 0.15 mm 筛后,测定土壤有机碳($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法)^[18]和土壤全氮(凯氏定氮法)^[19].部分装入铝盒在鼓风干燥箱中以(105±2)℃烘干 8~10 h 至恒量,用于测定土壤水分含量,使用质量百分比表示.

根样的采集:用直径为 9 cm 的根钻在每个样方内选取 3 个点,采集 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层样品,相同土层土样混合为一个样本,装入塑料袋收集.从土壤中挑出所有根系,按处理和重复编号后放于塑封袋中,用水清洗干净后,按直径≤2 mm(细根)和>2 mm(粗根)分为两级.将直径<2 mm 的根系用小纸袋装好,置于鼓风干燥箱中以 70~80℃烘干至恒量,再分别称量和记录,研磨过 0.15 mm 筛后,测定其碳($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法)和氮含量(凯氏定氮法).

1.4 数据处理

利用 SigmaPlot 软件制作相关的基础图件.采用 SAS 9.1 软件中非均衡数据方差分析(Proc GLM 程序包)分别进行 SOC、TN、凋落物量和细根密度及其 C:N 的方差分析,用以比较不同处理、不同土层间 SOC、TN、凋落物量和细根密度及其 C:N 差异.

2 结果与分析

2.1 不同植被类型对土壤有机碳含量的影响

由图 1 可知,0~100 cm 土层农田 SOC 平均含量仅为 3.15 g·kg⁻¹,人工草地(3.82 g·kg⁻¹)、人工灌木(4.28 g·kg⁻¹)和人工乔木(4.51 g·kg⁻¹)分别较农田提高了 21.2%、35.9%和 43.4%.与农田相比,不同植被类型 SOC 提高的幅度在土层深度上存在

差异(图 1),尤以表层差异较大.乔木林较农田影响 SOC 剖面深度≥100 cm 土层,0~5 cm 土层 SOC 含量相对提高量最大,为 95.3%.灌木林影响深度≥100 cm 土层,20~40 cm 土层相对提高量最大,为 57.6%.草地剖面影响深度最小,为 80 cm,0~5 cm 土层 SOC 含量相对提高量最大,为 40.9%.

2.2 不同植被类型对土壤全氮含量的影响

由图 1 可知,0~100 cm 土层农田 TN 平均含量为 0.4 g·kg⁻¹,草地(0.49 g·kg⁻¹)、灌木(0.46 g·kg⁻¹)和乔木(0.52 g·kg⁻¹)分别提高 20.6%、13.3%和 29.1%.与农田相比,不同植被类型提高的幅度在土层深度上存在差异(图1),尤以表层差异

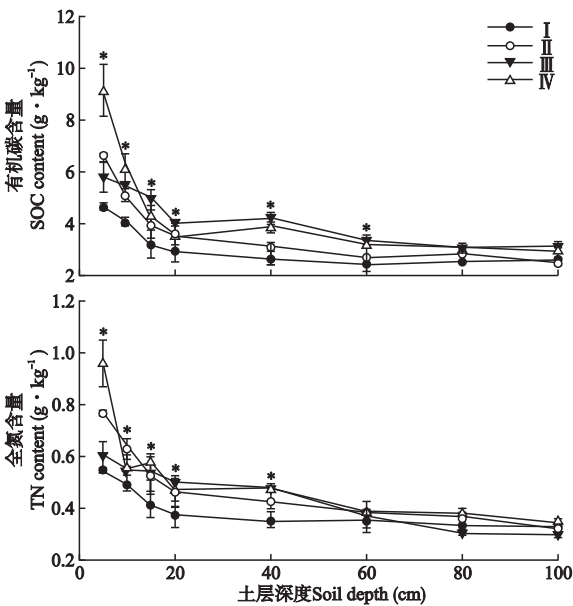


图 1 平均土壤有机碳和全氮含量剖面分布
Fig.1 Profile distribution of mean SOC and TN contents.
I: 人工乔木 Artificial woodland; II: 人工灌木 Artificial shrubland; III: 人工草地 Artificial grassland; IV: 农田 Cropland. * 不同植被在同一土层平均土壤有机碳含量差异显著 ($P<0.05$) Significant difference among different vegetations in the same soil layer at 0.05 level. 下同 The same below.

较大.乔木林剖面影响深度达 100 cm 土层,0~5 cm 土层 SOC 含量相对提高量最大,为 74.5%.灌木林剖面影响深度达到 60 cm 土层,20~40 cm 土层相对提高量最大,为 33.3%.草地剖面影响深度达 60 cm 土层,0~5 cm 土层 SOC 含量相对提高量最大,为 40.1%.

2.3 不同植被类型和农作物细根密度及凋落物量的特征

0~100 cm 土层农作物的平均细根密度为 0.14 mg · cm⁻¹,草地 (0.22 mg · cm⁻¹)、灌木 (0.24 mg · cm⁻¹) 和乔木 (0.38 mg · cm⁻¹) 分别提高 53.4%、71.8%和 169.0%(图 2).不同植被类型细根密度因剖面深度表现出差异,尤以表层差异较大.乔木与农作物细根密度在剖面深度差异 ≥100 cm 土层,80~100 cm 土层相对提高量最大,为 1300%.灌木与农作物细根密度在剖面深度差异 ≥100 cm 土层,80~100 cm 土层相对提高量最大,为 600%.草地剖面深度影响达到 80 cm 土层,60~80 cm 土层相对提高量最大,为 120%.

由表 1 可知,各植被类型间凋落物量存在显著差异,表现为人工乔木>人工灌木>人工草地>农田.

2.4 不同人工恢复植被和农作物的细根 C : N

不同人工恢复植被细根的碳均大于农田,而氮小于农田,恢复植被细根的 C : N 均显著大于农田 (表 2, $P<0.05$).

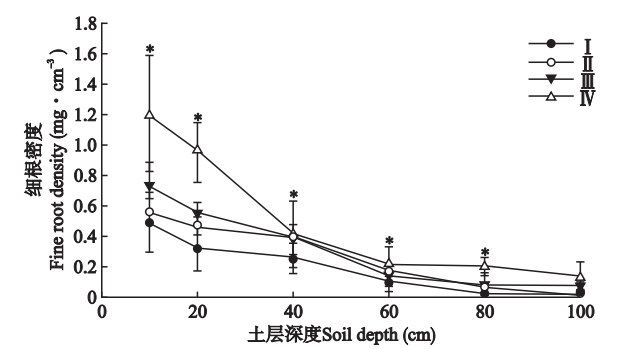


图2 平均细根密度剖面分布
Fig.2 Profile distribution of mean fine root density.

表 2 不同植被类型和农作物细根的碳、氮及其比值
Table 2 Contents of C, N and their ratio of fine root in crop and different artificial vegetation

植被类型 Vegetation type	C (g · kg ⁻¹)	N (g · kg ⁻¹)	C : N
I	433.0±32.7	19.5±0.4	22.2B
II	459.9±2.8	11.0±0.4	41.7A
III	458.5±7.4	20.2±0.8	22.7B
IV	350.9±7.4	26.1±0.7	13.4C

不同大写字母表示各植被间差异显著 ($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference among different vegetations at 0.05 level.

2.5 不同植被类型和农田土壤碳、氮与细根密度的关系

人工乔木、人工灌木、人工草地和农田 SOC 和 TN 含量均与细根密度呈显著的线性关系 ($P<0.01$) (图 3), R^2 分别为 0.73 和 0.80.并且不同植被恢复类型下 SOC 和 TN 差值与其细根密度差值之间存在显著的线性相关 ($P<0.01$, 图 4), 相关系数 R^2 分别为 0.73 和 0.65.

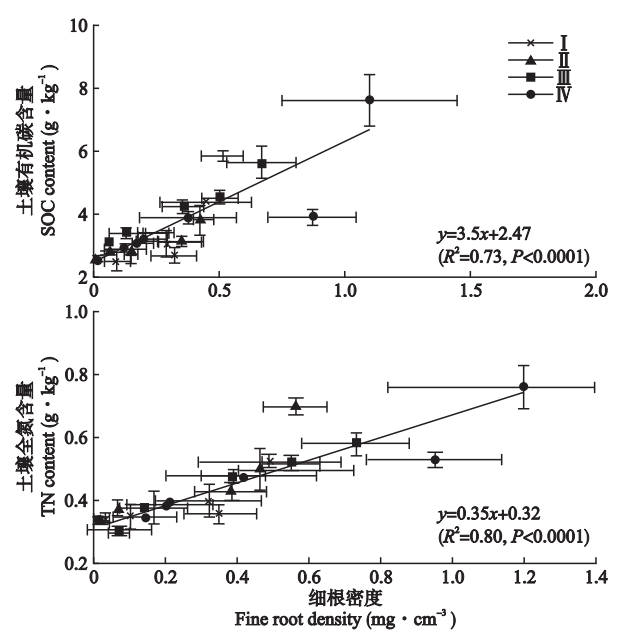


图3 土壤碳、氮与其细根密度的关系
Fig.3 Relationships between SOC and TN contents and fine root density.

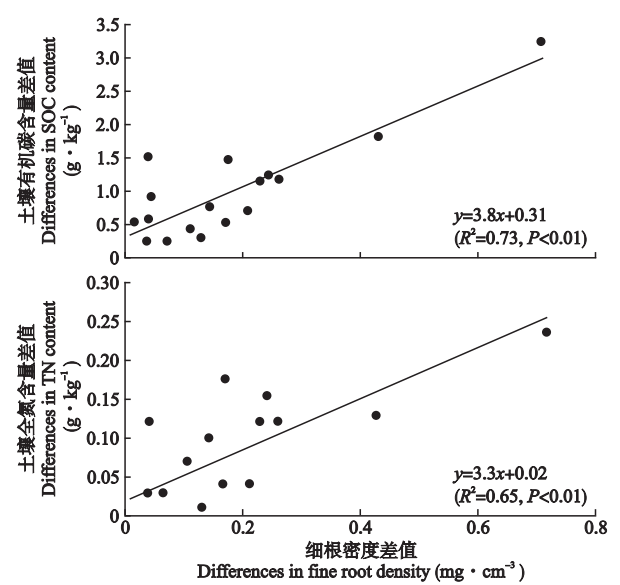


图4 土壤碳氮差值与其细根密度差值的关系
Fig.4 Relationships between the differences of SOC and TN contents and differences of fine root density.

3 讨 论

3.1 不同植被类型对土壤有机碳含量及分布的影响

本研究结果显示,与农田相比,各人工植被类型能够显著提高 SOC 含量,这与前人的研究结果相一致^[10].但由于乔木林群落物种丰富,根系、枝叶凋落物等有机物输入量大(表 1),其对 SOC 含量的提高量明显高于灌木和草地.梁爱华等^[10]在黄土高原纸坊沟流域也得到类似结果,在退耕后 0~20 cm 土层 SOC 含量为乔木林(5.21 g·kg⁻¹)>灌木林(5.12 g·kg⁻¹)>草地(4.24 g·kg⁻¹).而本研究 0~20 cm 各植被类型下 SOC 含量高于上述结果.这可能是因为纸坊沟流域位于黄土高原的北部,土壤肥力相对较差所致.

此外,不同植被类型对 SOC 剖面分布的影响也存在差异(图 1).乔木林、灌木林、草地各土层 SOC 分布比例各不相同.Han 等^[20]研究发现,SOC 含量在 10 cm 以上土层表现为农田>人工草地>人工乔木>人工灌木,10~20 cm 土层为人工草地>农田>人工灌木>人工乔木.Li 等^[21]指出,60 cm 以上土层人工乔木、人工灌木、人工草地的 SOC 含量有着显著差异,60 cm 以下土层则变化较小,推测可能与植被根系的分布有关.

3.2 植被恢复对土壤全氮含量及分布的影响

与农田相比,植被恢复能够显著提高 TN 含量,且乔木>灌木>草地(图 1).已有大量相似的报道.邢肖毅等^[22]在安塞县南部楼坪乡洞子沟流域研究发现,0~10 cm 土层人工乔木(0.90 g·kg⁻¹)>人工灌木(0.90 g·kg⁻¹)>人工草地(0.35 g·kg⁻¹).本研究中,各植被类型下 0~10 cm 土层 TN 含量基本与其一致.此外,不同植被对 TN 剖面分布也存在明显差异(图 1).乔木林、灌木林、草地各土层 TN 分布比例各不相同.已有类似研究发现,TN 储量在 0~60 cm 土层表现为菜地>果园>农田>林地>草地,而在 60~80 cm 土层为果园>菜地>农田>草地>林地^[23].

3.3 植被恢复下细根和凋落物对剖面土壤碳、氮分布的影响

根系和凋落物是影响土壤有机物输入的主要因素^[24].细根周转是土壤碳氮的重要来源,而细根周转受植被细根的质和量的影响较大^[25].本研究中,各植被类型下 SOC 和 TN 含量大小取决于细根密度和凋落物量的变化(表 1、图 3 和图 4).人工乔木凋落物量(16 Mg·hm⁻²)>人工灌木(6.3 Mg·hm⁻²)

>人工草地(0.2 Mg·hm⁻²).0~100 cm 土层,乔木平均细根密度(0.38 mg·cm⁻³)>灌木(0.24 mg·cm⁻³)>草地(0.22 mg·cm⁻³)(图 2),可能是由于乔木群落经过长期的演替过程,物种丰富,林分结构较为完整^[26],而人工草地(紫花苜蓿)每年要被收割 2~3 次,致使乔木群落中凋落物量和细根密度显著高于灌木和草地^[27].其次,细根密度也会影响 SOC 和 TN 含量的剖面分布^[20,28].Chang 等^[28]发现,林地条件下,55%的细根分布在表层 20 cm 土层,且有机碳分布与细根分布存在很好的对应.与灌木和草地群落相比,乔木群落深层土壤细根密度和 SOC 含量均有优势(图 1、图 2),先前已有研究也有类似发现^[29],表明深层土壤乔木群落细根的密集分布可能是 SOC 积累的主要原因.植被恢复后土壤碳、氮的变化亦受到细根质的调控.植被细根的分解和周转受其 C:N、木质素和纤维素的影响^[30].本研究各恢复植被细根的 C:N 显著大于农作物细根.

不同植被类型下 SOC 和 TN 含量与细根密度呈现显著的线性关系($P<0.01$)(图 3),这表明在 0~100 cm 土层,植被恢复后 SOC 和 TN 含量的变化受细根密度的影响.不同植被类型条件下 SOC 差值和 TN 差值与其细根生物量差值之间存在显著的线性相关($P<0.01$)(图 4),表明细根密度的差值是不同人工恢复植被下 SOC 和 TN 含量差异的主要因素.

事实上,SOC 受根系残体及分泌物、凋落物和退耕年限等因子的影响,本文仅对细根和凋落物进行了详细的分析,其他影响因子也应该被考虑.

4 结 论

退耕还林还草显著提高了土壤碳氮储量.与农田相比,人工植被恢复能够显著提高土壤碳氮固存能力,且呈现乔木林>灌木林>草地.

恢复植被细根的 C:N 和凋落物量均显著大于农田($P<0.05$).不同植被类型下土壤碳氮含量及其细根密度分布与农田的差异表现在不同剖面土层的深度上,人工乔木和灌木影响深度>100 cm 土层;而草地仅表现在 60 cm 土壤.

退耕后,细根和凋落物是影响不同植被类型土壤碳氮含量差异的重要因素.

参考文献

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, **304**: 1623–1627

- [2] Liu B-Y (刘冰燕), Chen Y-M (陈云明), Cao Y (曹扬), *et al.* Storage and allocation of carbon and nitrogen in *Pinus tabulaeformis* plantations on the south slope of the East Qinling Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(3): 643–652 (in Chinese)
- [3] Sun W-Y (孙文义), Guo S-L (郭胜利). Effects of secondary and manmade forests on soil organic C and N in subsurface soil in hilly region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(10): 2611–2620 (in Chinese)
- [4] Li L (李 龙), Yao Y-F (姚云峰), Qin F-C (秦富仓), *et al.* Spatial distribution pattern of soil nitrogen in Huanghuadianzi watershed and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(5): 140–148 (in Chinese)
- [5] Finér L, Helmisaari HS, Lõhmus K, *et al.* Variation in fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.), and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Plant Biosystems*, 2007, **141**: 394–405
- [6] Guo LB, Wang M, Gifford RM. The change of soil carbon stocks and fine root dynamics after land use change from a native pasture to a pine plantation. *Plant and Soil*, 2007, **299**: 251–262
- [7] Guo LB, Gifford RM. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 345–360
- [8] Vesterdal L, Ritter E, Gunderson P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management*, 2002, **169**: 137–147
- [9] Laganière J, Angers DA, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 439–453
- [10] Liang A-H (梁爱华), Han X-H (韩新辉), Zhang Y (张 扬), *et al.* Spatio-temporal response of soil carbon and nitrogen relation to the process of vegetation restoration in the gully region of Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2013, **21**(5): 842–849 (in Chinese)
- [11] Su J (苏 静), Zhao S-W (赵世伟), Ma J-D (马继东), *et al.* Influence of man-made vegetation on carbon pool in southern Ningxia region in Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2005, **12**(3): 50–52 (in Chinese)
- [12] Gong J, Chen L, Fu B, *et al.* Effect of land use on soil nutrients in the loess hilly area of the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 2006, **17**: 453–465
- [13] Li S-Y (李裕元), Shao M-A (邵明安), Zheng J-Y (郑纪勇), *et al.* Impact of grassland recovery and reconstruction on soil organic carbon in the north Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(6): 2279–2287 (in Chinese)
- [14] Upson MA, Burgess PJ. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system. *Plant and Soil*, 2013, **373**: 43–58
- [15] Olson KR, Al-Kaisi MM. The importance of soil sampling depth for accurate account of soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss. *Catena*, 2015, **125**: 33–37
- [16] Dong Y-Z (董云中), Wang Y-L (王永亮), Zhang J-J (张建杰), *et al.* Soil carbon and nitrogen of different land use types in northwestern Shanxi Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(4): 995–960 (in Chinese)
- [17] Zhu HH, Wu JS, Guo SL, *et al.* Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau. *Catena*, 2014, **120**: 64–72
- [18] Sparks DL, Page AL, Helmke PA, *et al.* Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America Inc, Madison, WI, 1996
- [19] Liu G-S (刘光崧). Observation and Standard Analysis Method of Chinese Ecosystem Research Network: Physiochemical Analysis and Profile Description of Soil Beijing: China Standards Press, 1996 (in Chinese)
- [20] Han FP, Hu W, Zheng JY, *et al.* Estimating soil organic carbon storage and distribution in a catchment of Loess Plateau, China. *Geoderma*, 2010, **154**: 261–266
- [21] Li MM, Zhang XC, Pang GW, *et al.* The estimation of soil organic carbon distribution and storage in a small catchment area of the Loess Plateau. *Catena*, 2013, **101**: 11–16
- [22] Xing X-Y (邢肖毅), Huang Y-M (黄懿梅), An S-S (安韶山), *et al.* Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(22): 7181–7189 (in Chinese)
- [23] Zhang C, Liu GB, Xue S, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **54**: 16–24
- [24] Sariyildiz T, Anderson JM and Kucuk M. Effects of tree species and topography on soil chemistry, litter quality, and decomposition in northeast Turkey. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**: 1695–1706
- [25] Guo LB, Wang MB, Gifford RM. The change of soil carbon stocks and fine root dynamics after land use change

from a native pasture to a pine plantation. *Plant and Soil*, 2007, **299**: 251–262

[26] Hertel D, Hartevelde MA, Leuschner C. Conversion of a tropical forest into agroforest alters the fine root-related carbon flux to the soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 481–490

[27] Zhou ZY, Zhang ZQ, Zha TG, *et al.* Predicting soil respiration using carbon stock in roots, litter and soil organic matter in forests of Loess Plateau in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **57**: 135–143

[28] Chang RY, Fu BJ, Liu GH, *et al.* The effects of afforestation on soil organic and inorganic carbon: A case study of the Loess Plateau of China. *Catena*, 2012, **95**: 145–152

[29] Fang X, Xue ZJ, Li BC, *et al.* Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2012, **88**: 6–13

[30] Vivanco L, Austin AT. Intrinsic effects of species on leaf litter and root decomposition: A comparison of temperate grasses from North and South America. *Oecologia*, 2006, **150**: 97–107

作者简介 王志齐,男,1987 年生,博士. 主要从事土壤侵蚀与碳循环研究. E-mail: wangzhiqi2010@163.com

责任编辑 张凤丽
