

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

刘玉林 朱广宇 邓 蕾* 陈 磊 上官周平

(西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘 要 土地利用方式变化能对土壤碳氮储量产生重要影响.为了探讨不同土地利用方式对土壤碳氮的影响,研究了黄土高原子午岭林区自退耕还林(草)工程实施以来(15年)自然恢复草地和人工油松林地0~100 cm土层土壤碳氮储量、碳氮比以及根系生物量的差异.结果表明:自然恢复草地和人工油松林地土壤有机碳均表现出表聚效应,自然恢复草地0~20 cm土层土壤有机碳储量显著低于人工油松林,而其他土层差异均不显著.人工油松林0~100 cm土层土壤总碳储量为 $117.94 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,比自然恢复草地增加28.4%.两种植被类型土壤全氮储量在各土层间差异均不显著,但自然恢复草地0~100 cm土层土壤全氮总储量为 $7.69 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,比人工油松林高17.7%.自然恢复草地和人工油松林土壤铵态氮储量在各土层间差异均显著,自然恢复草地铵态氮储量显著高于人工油松林,且随土层增加表现为先增后降的趋势.而自然恢复草地和人工油松林土壤硝态氮储量只在0~20 cm土层差异显著,且自然恢复草地高于人工油松林.自然恢复草地和人工油松林土壤碳氮比表现为0~20 cm土层差异不显著,随土层的加深表现为人工油松林碳氮比显著高于自然恢复草地,且差异逐渐增大.自然恢复草地和人工油松林土壤碳氮储量与根系生物量均呈显著正相关.因此,自然恢复草地土壤有利于氮储量的积累,人工油松林土壤有利于土壤碳储量的增加,且根系是影响土壤碳氮储量分布的重要因子.

关键词 自然恢复; 人工林; 土壤碳储量; 土壤氮储量; 碳氮比; 根系

Effects of natural vegetation restoration and afforestation on soil carbon and nitrogen storage in the Loess Plateau, China. LIU Yu-lin, ZHU Guang-yu, DENG Lei*, CHEN Lei, SHANG-GUAN Zhou-ping (State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Changes in land use can have important impacts on soil carbon and nitrogen storage. To explore the effects of different land use types on soil carbon and nitrogen storage, we examined the differences of soil carbon and nitrogen storage, ratio of carbon to nitrogen and root biomass in the 0-100 cm soil layer of the natural grassland and *Pinus tabulaeformis* plantation since the implementation of the project (15 years) of "Returning Farmland to Forest (Grassland)" in the Ziwuling forest region of the Loess Plateau, China. The results showed that soil organic carbon of both natural grassland and *P. tabulaeformis* plantation showed surface polymerization effect. Soil organic carbon storage in the 0-20 cm soil layer of natural grassland was significantly lower than that of *P. tabulaeformis* plantation, while the other soil layers showed no significant difference. The total soil carbon storage of *P. tabulaeformis* plantation in the 0-100 cm soil layer was $117.94 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 28.4% higher than that of natural grassland. There was no significant difference in total nitrogen storage in different soil layers of the two vegetation types. The soil total nitrogen storage of natural grassland was $7.69 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the 0-100 cm soil layer, which was 17.7% higher than *P. tabulaeformis* plantation. There was significant difference in ammonium storage among different soil layers

本文由国家自然科学基金项目(41730638, 41501094)和国家科技支撑计划项目(2015BAC01B03)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41730638, 41501094) and the Natural Science and Technology Support Program (2015BAC01B03).

2017-11-19 Received, 2018-03-20 Accepted.

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

in natural grassland and *P. tabuliformis* plantation. The ammonium storage in natural grassland was significantly higher than that in *P. tabuliformis* plantation, exhibited first increase and then decrease trend with the increases of soil depth. Only in the 0–20 cm soil layer, nitrate storage in natural grassland was significantly higher than the *P. tabuliformis* plantation. The ratio of carbon to nitrogen of natural grassland and *P. tabuliformis* plantation showed no significant difference in 0–20 cm soil layer. With the increases of soil layers, the ratio of carbon to nitrogen in *P. tabuliformis* plantation were higher than in the natural grassland, and the difference increased gradually. In addition, soil carbon and nitrogen storage showed significantly positive correlation with root biomass in natural grassland and *P. tabuliformis* plantation. Therefore, natural grassland was conducive to the accumulation of soil nitrogen storage, and *P. tabuliformis* plantation was beneficial to increase soil carbon storage. Root was an important factor affecting the distribution of soil carbon and nitrogen storage.

Key words: natural restoration; plantation; soil carbon storage; soil nitrogen storage; C/N; root.

自 20 世纪初以来,黄土高原地区由于人口的膨胀和土地的不合理开发与利用,加速了生态环境的退化^[1].为了减少水土流失,维持土地生产力,提高环境质量,自 1999 年,我国在黄土高原地区实施了退耕还林(草)等生态恢复工程^[2].自退耕还林(草)工程实施以来,黄土高原上的土地利用方式和植被类型发生了显著的改变,如坡耕地转变为自然恢复草地和人工林地等^[2].其中,土壤碳氮作为土壤重要的组成部分,其大小会随着土地利用方式的变化而发生改变^[3–4].土壤碳氮不仅是表示土壤质量的一个重要属性,也是评价植被恢复效果的重要指标^[3].因此,研究黄土高原地区不同土地利用方式对土壤碳氮的影响对我国西部植被恢复与重建工作具有重要意义.

土壤有机碳是森林生态系统中重要的碳库,与全氮同是衡量土壤肥力水平的重要指标^[5].植被覆盖变化等土地利用方式的改变,是土壤碳库和氮库发生变化的重要影响因素^[2,6–7],它能够改变生态系统植物组成、种群结构,并且通过改变凋落物、土壤微生物群落等过程影响土壤碳氮的储量.目前,关于黄土高原土壤碳氮的研究很多.例如,在土壤有机碳研究方面,Deng 等^[2]研究表明,耕地撂荒后,土壤碳储量表现为先下降,然后再上升的趋势;Zhao 等^[8]通过对森林、灌木、草地 0~200 cm 土层土壤有机碳的垂直变化研究发现,土壤有机碳的分布能够用指数模型来描述,并且不同的植被覆盖影响表层土壤有机碳的积累与分布.Tang 等^[7]研究了农田转换为人工植被后,地上地下生物量碳的储存和有机碳的储存机制,证实不同土地利用方式对人工草地生物量碳积累的影响不同.在土壤氮研究方面,主要集中在土壤氮素矿化、硝化等过程.邢肖毅等^[9]研究表明,人工刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林的土壤氮素

水平远低于自然恢复的乔灌草群落,甚至低于灌草群落.虽然不同退耕地土壤碳氮都有较明显地变化,但关于黄土高原退化土地植被恢复过程中不同植被类型对土壤碳氮储量动态的研究较少.

子午岭林区位于黄土高原中心腹地,在坡耕地上进行自然恢复和人工造林是该区自退耕还林(草)工程实施以来主要的两种土地利用方式.因此,本文以子午岭林区自然恢复的草地和人工油松林为对象,研究不同土地利用方式下土壤碳氮储量的分布特征及根系生物量的变化,为黄土高原地区植被恢复的生态效益评价以及不同土地利用类型的优化配置提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省合水县连家砭林场(35°3′–36°7′ N, 108°10′–109°18′ E)的子午岭林区.该地区总面积 23 km²,丘陵和沟壑的海拔为 1211~1453 m,相对高度差约为 200 m,年平均气温 10 °C,极端最高气温 36.7 °C,极端最低气温–27.7 °C,年平均相对湿度 63%~68%,年均降雨量为 587 mm,主要集中在 7–9 月,≥10 °C 的活动积温为 2761 °C,无霜期为 112~140 d.土壤大部分是石灰性褐土,由原生或次生的黄土形成,厚度为 50~130 m.该区为温凉半干旱区黄土覆盖的森林草原地带,适于山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等落叶阔叶林和温性针叶林发育,灌木以绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、酸刺(*Hippophae rhamnoides*)为主,草本植物以白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、披针苔草(*Carex lanceolata*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、白蒿(*Artemisia sieversiana*)、野艾蒿(*Artemisia*

lavandulaefolia) 等为主. 由于相对高差不大, 植被的垂直分带并不明显. 子午岭林区是黄土高原中部面积最大, 保存最完整, 且最具代表性的天然次生林区. 林相整齐, 植物种类丰富, 林区郁闭度达 80%~95%. 自 2000 年实施退耕还林工程以来, 研究区域分布了许多人工油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林和自然恢复草地. 人工油松林位于阳坡的上坡位, 坡度为 20°左右, 最初移栽实生苗密度为 3300~1630 株·hm⁻², 成林后定植为 1650~1950 株·hm⁻², 林下植被有胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 和披针苔草. 草地位于半阳坡的坡顶, 坡度约为 5°, 优势植物为白羊草和白蒿. 经过 15 年的植被恢复, 人工油松林的林冠密度约为 85%, 自然恢复草地的覆盖率约为 75%.

1.2 试验设计与样品采集

2015 年 8 月, 选择人工油松林和自然恢复的草地为研究对象, 两种土地利用类型均是由农田退耕而来的, 退耕前来自同一块具有相同利用方式的土地, 退耕后一部分进行自然恢复, 一部分进行人工种植油松, 恢复时间为 15 年. 采用配对试验, 设置了 5 对 20 m×20 m 的样地, 在每个样地的中心和 4 个角落, 选择 5 个 1 m×1 m 样方. 在每个样方内, 开挖一个 100 cm 深的土壤剖面, 按 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5 个土层, 使用直径为 5 cm 的土钻, 沿每个样方的对角线方向自下而上进行取样, 共取 5 钻土. 同一土层的 5 钻土混合均匀后合并成一个土样, 然后过 2 mm 筛, 以除去植物残体、砾石等杂物, 在室温下风干后测定土壤理化指标. 在每个样方内, 将土壤表面的覆盖物清理干净, 采用直径为 9 cm 的根钻沿土壤剖面采集 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层内的根系生物量, 每个样方沿对角线方向取 3 钻, 混合后, 用干筛法获取根系.

用 100 cm³ 环刀在 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5 个土层, 采集未搅动的自然状态土样, 测土壤容重, 每个样地 5 个重复. 采用铝制饭盒采集原状土, 每个样地沿样方对角线方向采集 3 个重复, 带回实验室风干后进行团聚体颗粒分级.

1.3 测定项目与方法

土壤有机碳 (SOC) 采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 氧化法测定^[10]; 土壤全氮 (TN) 采用凯氏定氮法测定^[10]; 铵态氮 (AN) 和硝态氮 (NN) 采用连续流动注射分析法测定^[11]; 土壤 pH 采用 PHS-3G 数字 pH 计测定 (水土比 5:1); 电导率 (EC) 采用 DDS-307 模型电导率检测仪测定 (水土比 5:1); 采用激光粒度仪测定土壤机械组成; 土壤水分含量是以湿土和烘干干土的质量差计算的, 以百分比 (%) 表示^[12]. 土壤容重采用称量法进行测定^[13]. 采用改进的湿筛法^[14] 对土壤团聚体进行分级. 具体方法为称取 50 g 风干土平铺于孔径为 5 mm 的筛子上, 在室温下, 用蒸馏水浸没 5 min, 筛子上下振动, 频率为每分钟 25 次, 共振动 2 min, 震荡完毕后取出 5 mm 筛子用蒸馏水将团聚体洗到特定容器中, 按照此方法依次过 2、1、0.5、0.25 mm 筛, 将得到的 >5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5、<0.25 mm 粒级团聚体烘干, 称量, 测定各粒级所占的比重. 供试土壤基本理化性状见表 1.

1.4 数据处理

1) 土壤有机碳、全氮储量的计算^[15]:

$$C_s = \frac{SOC \times BD \times D}{10} \quad (1)$$

$$N_s = \frac{STN \times BD \times D}{10} \quad (2)$$

式中: C_s 为土壤有机碳储量 (Mg·hm⁻²); N_s 为土壤全氮储量 (Mg·hm⁻²); SOC 为土壤有机碳含量

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical property of soil

土地利用类型 Land use type	土层 Soil layer (cm)	土壤机械组成 Soil mechanical composition (%)			C/N	pH	土壤含水量 Soil water content (%)	土壤容重 Soil bulk density (g·cm ⁻³)
		黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand				
自然恢复草地 Natural restoration grassland	0~20	13.6±0.8	35.3±1.8	51.1±2.3	11.4±0.5	8.2±0.0	0.86±0.01	1.29±0.05
	20~40	13.1±0.7	34.9±0.8	52.0±1.4	9.5±0.8	8.8±0.0	0.89±0.01	1.25±0.02
	40~60	13.3±0.6	36.5±1.5	50.2±2.0	9.7±0.6	8.9±0.4	0.91±0.01	1.31±0.02
	60~80	13.6±1.6	36.4±1.1	50.0±2.4	9.0±0.3	8.9±0.0	0.90±0.01	1.27±0.02
	80~100	13.1±0.3	36.6±2.4	50.3±2.4	9.5±0.9	8.9±0.0	0.90±0.02	1.25±0.02
人工油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation	0~20	15.0±0.6	36.9±0.3	48.2±0.9	10.3±0.6	8.8±0.1	0.90±0.00	1.28±0.04
	20~40	13.5±0.2	37.7±2.6	48.8±2.7	11.1±0.2	8.9±0.0	0.88±0.02	1.28±0.04
	40~60	13.4±0.8	38.1±3.5	48.5±4.3	11.8±0.6	9.2±0.5	0.91±0.01	1.29±0.01
	60~80	13.6±0.3	39.5±1.5	46.9±1.8	11.1±0.7	8.9±0.1	0.92±0.01	1.31±0.05
	80~100	13.3±0.4	38.9±3.1	47.7±3.5	11.1±0.3	9.0±0.2	0.91±0.02	1.32±0.01

表 2 土壤碳氮储量和含量以及碳氮比的影响因子方差分析

Table 2 Analysis of influencing factor variance of soil carbon and nitrogen storage and content and C/N

土地利用类型 Land use type	df	SOC		TN		C/N		C_s		N_s	
		均方	F	均方	F	均方	F	均方	F	均方	F
		Mean square		Mean square		Mean square		Mean square		Mean square	
	1	48.079	8.07**	0.097	14.17**	581.325	33.49**	336.985	9.91**	0.559	13.74**

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; C/N: 碳氮比 Carbon to nitrogen ratio; C_s : 土壤有机碳储量 Soil organic carbon storage; N_s : 土壤全氮储量 Soil total nitrogen storage. 下同 The same below.

($g \cdot kg^{-1}$); TN 为土壤全氮含量($g \cdot kg^{-1}$); BD 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); D 为土层厚度(cm).

2) 土壤团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)计算^[16]:

$$MWD = \frac{\sum \chi_i \omega_i}{\sum \omega_i} \quad (3)$$

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum \ln \chi_i \omega_i}{\sum \omega_i}\right) \quad (4)$$

式中: χ_i 为每个粒级下土壤团聚体平均直径(mm); ω_i 为每个粒级下土壤团聚体质量百分数.

3) 土壤碳氮比(C/N)的计算^[17]:

$$C/N = \frac{SOC}{TN} \quad (5)$$

采用 Excel 2003 和 SPSS 23.0 软件对数据进行统计分析.采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较相同土层不同土地利用类型间的差异($\alpha = 0.05$);采用 Pearson 相关分析对土壤碳氮及其影响因素之间的关系进行分析;采用线性回归分析研究土壤碳氮与根系生物量之间的关系;采用逐步回归分析研究土壤理化性质中影响土壤碳氮的主要影响因素.用 SigmaPlot 12.0 软件作图.图表中数据为平均值 \pm 标准差.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤有机碳的变化特征

土地利用方式显著影响土壤有机碳(表 2).由图 1 可以看出,人工油松林 0~20 cm 土层土壤有机碳储量和含量均显著高于自然恢复草地,分别高 28.4%和 35.6%,在其他土层差异不显著.在人工油松林 0~100 cm 土层土壤有机碳储量和含量均大于自然恢复草地,分别高 28.4%和 27.6%.人工油松林 0~100 cm 土层总有机碳储量和含量分别为 117.94 $Mg \cdot hm^{-2}$ 和 45.83 $g \cdot kg^{-1}$,自然恢复草地分别为 84.43 $Mg \cdot hm^{-2}$ 和 33.17 $g \cdot kg^{-1}$.

2.2 不同土地利用类型土壤氮的变化特征

土地利用方式对土壤氮影响显著(表 2).由图 2 可以看出,各土层自然恢复草地和人工油松林土壤

全氮储量和含量差异均不显著,但人工油松林土壤全氮储量和含量低于草地.在 0~100 cm 土层中,自然恢复草地土壤全氮总储量和总含量分别为 7.69 $Mg \cdot hm^{-2}$ 和 3.02 $g \cdot kg^{-1}$,人工油松林分别为 6.33 $Mg \cdot hm^{-2}$ 和 2.45 $g \cdot kg^{-1}$.在各土层中,自然恢复草地土壤硝态氮、铵态氮的含量和储量均高于人工油松林.其中,自然恢复草地和人工油松林的土壤硝态氮储量和含量在 0~20 和 60~80 cm 差异显著,其他土层差异不显著;自然恢复草地和人工油松林的土壤铵态氮储量和含量在各土层中差异均显著.

2.3 不同土地利用类型土壤碳氮比的变化特征

土地利用方式对土壤碳氮比有显著影响(表 2).由图 3 可以看出,自然恢复草地和人工油松林 0~20 cm 土层土壤碳氮比没有显著差异.两种土地利用类型在 20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层

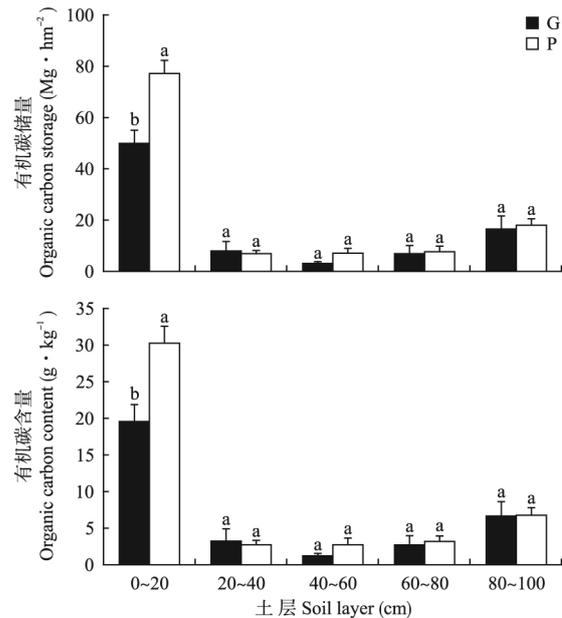


图 1 自然恢复草地和人工油松林土壤有机碳储量和含量
Fig.1 Soil organic C storage and content in natural restoration grassland and *Pinus tabulaeformis* plantation.

G: 自然恢复草地 Natural restoration grassland; P: 人工油松林 *Pinus tabulaeformis* plantation. 不同字母表示同一土层不同土地利用类型间差异显著($P < 0.05$) Different letters meant significant difference between different land use types in the same soil layer at 0.05 level. 下同 The same below.

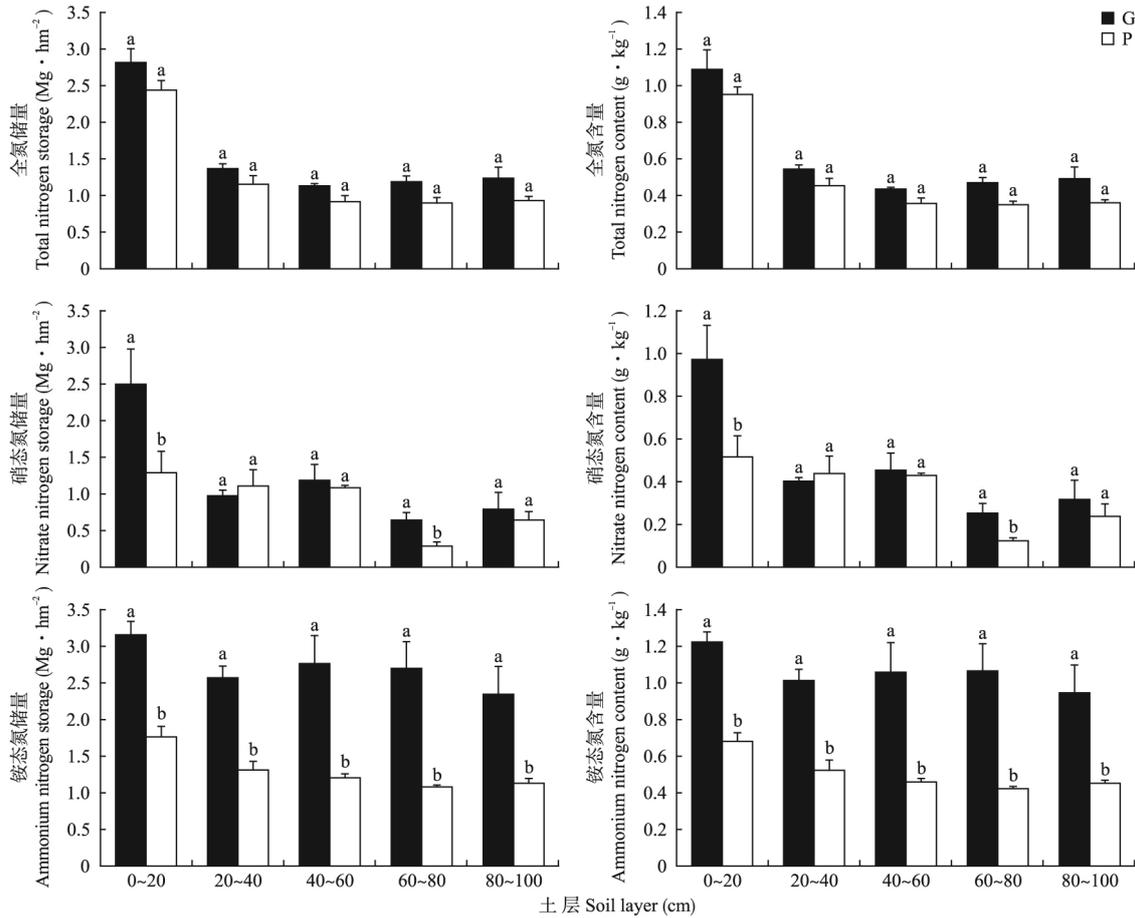


图 2 自然恢复草地和人工油松林土壤氮储量和含量

Fig.2 Soil N storage and content in natural restoration grassland and *Pinus tabulaeformis* plantation.

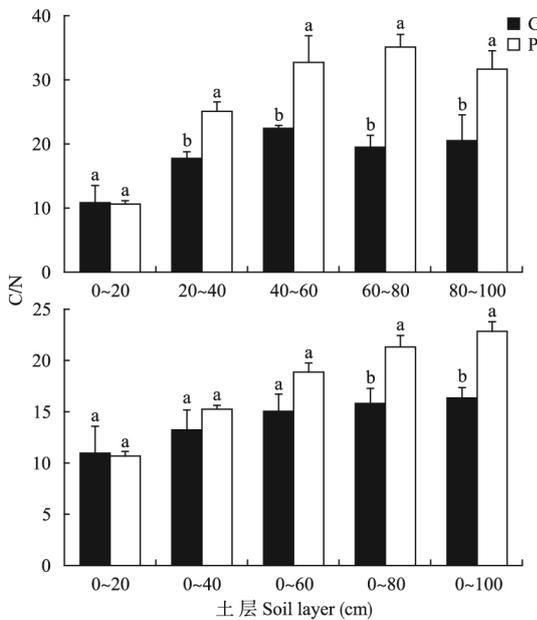


图 3 不同土层自然恢复草地和人工油松林的土壤碳氮比

Fig.3 Soil carbon nitrogen ratio in natural restoration grassland and *Pinus tabulaeformis* plantation in different layers.

土壤碳氮比差异均显著,在这 4 个土层中自然恢复草地比人工油松林的土壤碳氮比分别小 29.1%、31.2%、44.6%、35.1%; 随土壤深度的增加,两种土地利用类型的碳氮比差异呈现先上升后下降的趋势。在 0~40、0~60、0~80、0~100 cm 土层中,自然恢复草地的碳氮比比人工油松林分别小 14.2%、20.2%、26.3%、28.5%; 随土壤深度的增加,两者碳氮比差异呈现逐渐增大的趋势。

2.4 不同土地利用类型土壤碳氮与土壤理化性质的相关关系

由表 3 可知,自然恢复草地的土壤有机碳和全氮含量、储量与粒径为 >5、2~5、1~2 mm 的团聚体所占的比例呈显著正相关,与其他粒径均呈负相关,与电导率、pH、土壤水分含量均呈显著负相关; 碳氮比除与 0.5~1、<0.25 mm 粒径的团聚体无显著相关外,与其他粒径均呈显著相关,还与 EC、pH、SWC 显著相关。全氮含量、储量与 MWD 呈显著正相关。人工油松林土壤有机碳和全氮含量、储量与粒径为 >5、2~5 mm 的团聚体所占的比例呈显著正相关,与 1~

表 3 自然恢复草地和人工油松林土壤有机碳和全氮与土壤理化性质的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of soil organic carbon and total nitrogen with soil physical and chemical property in natural restoration grassland and *Pinus tabuliformis* plantation

土地利用类型 Land use type	土壤性质 Soil property	团聚体粒径大小 Particle size of aggregates (mm)						EC	pH	SWC	BD	MWD	GMD
		>5	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25						
自然恢复草地 Natural restoration grassland	SOC	0.867**	0.624*	0.576*	-0.732**	-0.863**	-0.763**	0.785**	-0.898**	-0.837**	-0.019	0.453	-0.709**
	TN	0.931**	0.760**	0.564*	-0.729**	-0.905**	-0.872**	0.730**	-0.938**	-0.885**	0.020	0.618*	-0.833**
	C/N	0.938**	0.727**	0.603*	-0.488	-0.849**	-0.162	0.730**	-0.938**	-0.885**	0.020	0.618*	-0.833**
	C _s	0.873**	0.632*	0.380	-0.740**	-0.872**	-0.769**	0.796**	-0.906**	-0.841**	0.009	0.532*	-0.714**
人工油松林 <i>Pinus tabuliformis</i> plantation	N _s	0.941**	0.770**	0.561*	-0.745**	-0.921**	-0.879**	0.746**	-0.951**	-0.884**	0.082	0.674**	-0.836**
	SOC	0.918**	0.540*	-0.567*	-0.867**	-0.784**	-0.820**	0.374	-0.304	-0.061	-0.212	-0.052	-0.578*
	TN	0.962**	0.653**	-0.523*	-0.867**	-0.835**	-0.894**	0.183	-0.422	-0.264	-0.224	0.072	-0.669**
	C/N	0.963**	0.669**	-0.521*	-0.851**	-0.799**	-0.910**	0.183	-0.422	-0.264	-0.224	0.072	-0.669**
	C _s	0.917**	0.537*	-0.569*	-0.864**	-0.782**	-0.819**	0.329	-0.475	-0.058	-0.189	-0.207	-0.588*
	N _s	0.954**	0.647**	-0.526*	-0.855**	-0.824**	-0.887**	0.211	-0.398	-0.245	-0.171	-0.139	-0.551*

EC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity; SWC: 土壤含水量 Soil water content; BD: 土壤容重 Soil bulk density; MWD: 土壤团聚体的平均质量直径 Mean mass diameter of soil aggregates; GMD: 土壤团聚体的几何平均直径 Geometric mean diameter of soil aggregates. 下同 The same below.

2 mm 的团聚体所占的比例呈显著负相关, 与其他粒径均呈负相关, 与电导率、pH、土壤水分含量的相关性不显著, 与 MWD 的相关性不显著. 土壤碳氮比与各粒径均呈显著相关, 与 EC、pH、SWC 无显著相关关系.

2.5 不同土地利用类型土壤碳氮与根系的关系

由图 4 可知, 自然恢复草地和人工油松林的根系生物量在 0~20 cm 土层差异显著, 人工油松林比自然恢复草地少 29.1%, 在其他土层两者差异不显著. 由图 5 可知, 根系生物量与自然恢复草地和人工油松林碳氮含量和储量均呈显著线性相关.

2.6 不同土地利用类型土壤碳氮与土壤理化性质的关系

表 4 表明, 影响自然恢复草地土壤有机碳含量和储量的主要因素有 pH、BD 和粒径为 2~5 mm 的团聚体所占的比例; 土壤全氮含量和储量的主要影响因素有 GMD, 以及粒径为 0.25~0.5、2~5 mm 团

聚体所占的比例. 而影响人工油松林土壤有机碳含量和储量的主要因素有粒径为 <0.25、0.5~1、2~5 mm 的团聚体所占的比例和 GMD; 影响土壤全氮含量和储量主要因素为粒径 <0.25 mm 的团聚体所占的比例.

表 4 自然恢复草地和人工油松林土壤有机碳和全氮含量与土壤理化性质的逐步回归分析

Table 4 Stepwise regression analysis of soil organic carbon and total nitrogen contents with soil physical and chemical properties in natural restoration grassland and *Pinus tabuliformis* plantation

土地利用类型 Land use type	土壤性质 Soil property	方程式 Equation	R ²
自然恢复草地 Natural restoration grassland	SOC	$SOC = -1.47pH - 0.215BD - 0.62X_1 + 430.914$	0.94*
	TN	$TN = -1.354GMD - 0.692X_4 - 1.084X_1 + 5.281$	0.93*
	C _s	$C_s = -1.464pH - 0.188BD - 0.609X_1 + 1074.969$	0.94*
	N _s	$N_s = -1.216GMD - 0.722X_4 - 0.963X_1 + 12.496$	0.94*
人工油松林 <i>Pinus tabuliformis</i> plantation	SOC	$SOC = -0.932X_5 - 0.268X_3 - 0.474X_1 + 0.245SWC + 0.228GMD - 88.124$	0.98*
	TN	$TN = -0.607X_5 - 0.702X_3 + 0.248BD + 0.304GMD - 1.976$	0.91*
	C _s	$C_s = -1.509X_5 - 0.674X_3 - 0.535X_1 + 0.191BD + 0.321GMD - 117.23$	0.97*
	N _s	$N_s = 0.84X_5 - 0.383X_2 + 4.116$	0.96*

X₁: 粒径为 2~5 mm 团聚体所占的比例 Proportion of aggregate with particle size of 2~5 mm; X₂: 粒径为 1~2 mm 团聚体所占的比例 Proportion of aggregate with particle size of 1~2 mm; X₃: 粒径为 0.5~1 mm 团聚体所占的比例 Proportion of aggregate with particle size of 0.5~1 mm; X₄: 粒径为 0.25~0.5 mm 团聚体所占的比例 Proportion of aggregate with particle size of 0.25~0.5 mm; X₅: 粒径 <0.25 mm 团聚体所占的比例 Proportion of aggregate with particle size of <0.25 mm.

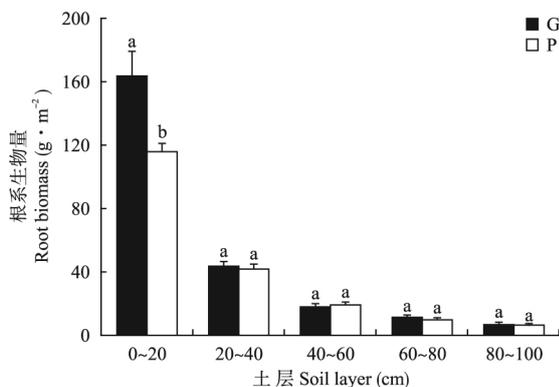


图 4 不同土层自然恢复草地和人工油松林的根系生物量
Fig.4 Root biomass in natural restoration grassland and *Pinus tabuliformis* plantation in different soil layers.

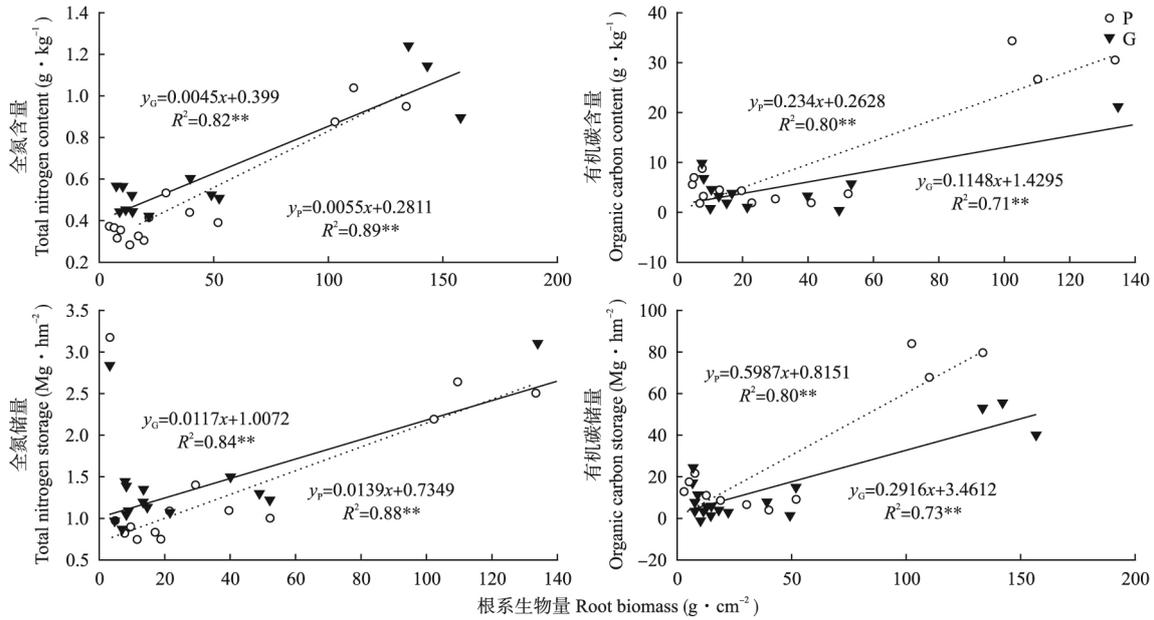


图 5 土壤碳氮与根系生物量的关系

Fig.5 Relationships of soil carbon and nitrogen with root biomass.

** $P < 0.01$.

3 讨 论

3.1 自然恢复草地和人工油松林对土壤有机碳的影响

本研究中,自然恢复草地和人工油松林的土壤有机碳储量和含量在垂直于坡面方向总体呈现下降趋势。有研究表明,土壤表层有机碳含量受地表覆盖度、凋落物累积与分解程度、土壤微生物分解作用和人为干扰程度等因素的影响比下层土壤大^[18-19]。与人工油松林相比,自然恢复草地土壤表层凋落物覆盖和地上生物量较少,分解后输入到土壤中的养分含量较少,而且受人为扰动大(偷牧等),其土壤有机碳转化为CO₂的程度高,因此有机碳含量较低。虽然自然恢复草地的根系多于人工油松林,但是表层土壤碳储量和含量却不及人工油松林地,这可能与枯落物的输入有关,枯落物积累量的增加与土壤有机碳的提高是一致的^[20]。草地在自然恢复过程中,一方面由于当地偷牧时牲畜对地上生物量的取食,另一方面黄土高原冬季气候干燥、风较大,使地表凋落物保存较少,因而其表层土壤的有机碳输入少于油松林。另外,自然恢复草地的表层根系丰富使得微生物对有机碳的分解利用快于人工油松林地,进而造成草地表层土壤有机碳的储存较少,这与郭胜利等^[20]研究结果一致。土壤碳固定还受土壤颗粒组成的影响^[19]。自然恢复草地和人工油松林的土壤组成

中均为砂粒(>0.02 mm)占比较大,其中,自然恢复草地在各土层的砂粒占比均大于人工油松林,粉粒(0.002~0.02 mm)在人工油松林各土层中占比大于自然恢复草地。砂粒颗粒较粗大,主要成分为石英,吸持性较弱,通透性较好;而粉粒比表面较砂粒大,吸持能力比砂粒强,养分含量比砂粒高,具有一定的粘着性^[21-22],所以自然恢复草地的粒间孔隙度比人工油松林大。植物残体的分解速率较快,碳固持能力较弱。本研究表明,人工油松林土壤具有较高的总有机碳储量,其原因在于人工油松林植被覆盖度大,有机碳来源广,且在秋冬季节被大量枯落物覆盖,土壤处于被保护状态,进而减少了碳的损失。另外,两种土地利用方式下土壤有机碳储量和含量的差异还受电导率、土壤水分等的影响。下渗的水分可以将地上的可溶性物质带入地下,供植物吸收,从而促进有机碳的增加;电导率对有机碳的影响主要通过影响土壤中吸附交换离子的能力^[23],进而影响有机碳的固定。此外,土壤的酸碱性对土壤有机碳的分解也有很大影响,自然恢复草地土壤有机碳含量与pH呈负相关,这说明自然恢复草地的土壤pH不适宜微生物活动,能够抑制有机碳的分解;而且,自然恢复草地土壤的团聚性稳定性低于人工油松林,这些因素都会使自然恢复草地的碳储量较低。因此,人工油松林在增强土壤抗侵蚀能力的同时,也为林地土壤碳的固存提供了重要保障。

3.2 自然恢复草地和人工油松林对土壤氮的影响

土壤氮素的输入量主要取决于植物残体的归还及生物固氮^[24]. 本研究中, 自然恢复草地具有较高的硝态氮和铵态氮储量和含量. 草本植物每年有大量根系死亡, 使土壤中氮的来源增多, 且草地群落中豆科植物通过生物固氮作用参与土壤氮循环^[25], 进而造成土壤氮含量较高; 同时, 也表明人工油松林的氮矿化速率较低, 氮素在微生物作用下迅速矿化后被吸收利用, 且经过矿化作用释放出的铵离子 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 较少^[26], 进而易被油松吸收的有效氮减少, 且松针较硬, 不易分解也是油松林土壤含氮量较低的原因. 铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$) 是根系吸收有效氮的主要形式. 有研究表明, 土壤溶液中酸碱度会影响植物对养分离子形态的吸收和土壤中养分的有效性^[27]. 在各土层, 两种土地利用类型的土壤 pH 值均大于 8.0, 且人工油松林的 pH 值高于自然恢复草地, 所以人工油松林对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收要大于自然恢复草地, 这与在酸性条件下植物吸收阴离子多于阳离子, 在碱性条件下植物吸收阳离子多于阴离子, pH 值越高, 吸收阳离子越多的结果一致^[27]. 自然恢复草地和人工油松林的硝态氮和铵态氮除了供应植物生长外, 还有可能从土壤中流失. 硝态氮带负电, 易于从阴离子交换差的土壤中淋溶流失^[28]. 油松出现在土壤比较贫瘠的地方, 是森林演替中的先锋树种, 对营养需求量较低^[29]. 有关针叶林的研究表明, 营养需求量低的针叶树种通常喜好铵态氮^[30]. 这可能是人工油松林铵态氮含量比自然恢复草地低的原因之一. 本研究发现, 自然恢复草地和人工油松林土壤的全氮含量和储量在各土层间虽然没有显著差异, 但土地利用类型却对土壤氮含量和储量影响显著, 人工种植过程对土壤扰动较大, 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, 不同粒径的团聚体空间排列方式及数量分布决定着土壤的空隙大小, 进而影响土壤的水力性质, 影响土壤微生物活动^[31], 从而影响土壤氮素的分解.

3.3 自然恢复草地和人工油松林对土壤碳氮比的影响

土壤碳氮比的高低既反映土壤微生物的群落结构特征^[32], 又在一定程度上反映凋落物对土壤有机碳氮的积累量^[33], 土壤碳氮比的增加对土壤微生物分解碳氮能力产生一定的抑制作用, 一般来说, 土壤碳氮比与土壤微生物活性呈反比^[32]. 张春华等^[34]研究表明, 不同土地利用类型下, 碳氮比的差异随土壤

深度的增加而增加, 这与本研究结果一致. 这可能与微生物的群落结构有关, 即各土地利用类型不同土层之间的土壤碳氮比可能与土层内微生物数量、群落结构、微生物活性的差异有关^[35]. 微生物分解有机质最适宜的碳氮比为 25 : 1^[33]. 本研究中, 自然恢复草地各土层的碳氮比为 10.9~22.5, 小于 25; 而人工油松林各土层的碳氮比为 10.7~35.0, 除 0~20 cm 土层外, 其他土层碳氮比均高于 25. 人工油松林的土壤碳氮比过大, 表明油松林土壤中氮含量不足, 氮含量无法满足微生物的需求, 此时氮不但不会积累, 而且腐败菌类会迅速繁殖, 加速有机质的分解^[36]. 另一方面, 也说明人工油松林碳的积累速度高于氮素. 有研究表明, 土壤有机碳和全氮的积累并非同步, 有机碳的积累速率快于全氮^[37]. Rahman 等^[38]研究表明, 在土壤养分条件较为匮乏的土地上造林后, 较低的土壤分解速率可能使有机矿物质不易被分解破坏, 进而导致土壤碳素的累积增加. 另一方面, pH 值影响土壤氧化还原电位, 从而影响土壤微生物的活动, 使土壤中的氮素循环受到影响, 进而影响土壤氮素的水平^[39]. 有研究表明, 林地由于大量植物凋落物的输入, 会增加土壤有机碳含量, 但会减少土壤总氮含量, 进而导致土壤碳氮比升高^[2, 40], 这与本研究结果一致. 此外, 团聚体的大小也影响微生物对碳氮的分解程度, 自然恢复草地土壤团聚体分散, 团聚体的稳定性较低, 储存的有机碳也随之减少, 从而造成碳氮比的降低; 而人工油松林由于初始造林时的干扰, 破坏了土壤结构稳定性, 加快了氮素的损失, 使碳氮比增加.

4 结 论

自然恢复草地和人工油松林在土壤结构及理化性质等方面的差异, 会影响土壤有机碳、氮库的固定过程. 人工油松林和自然恢复草地土壤有机碳储量和含量只在土壤表层 (0~20 cm) 差异显著, 且人工油松林的土壤有机碳储量和含量都要显著高于草地, 而两种土地利用类型之间的土壤氮储量和含量差异不明显, 但自然恢复草地的土壤全氮储量和含量要高于人工油松林, 表明自然恢复草地在一定程度上有自我恢复的能力; 自然恢复草地和人工油松林的土壤碳氮比在 0~20 cm 表层差异不显著, 随着土壤深度的增加, 人工油松林土壤的碳氮比显著高于自然恢复草地, 这与微生物的群落结构组成、土壤 pH、凋落物输入以及土壤团聚体组成有关. 另外, 根系生物量与自然恢复草地和人工油松林碳氮储量均

有显著线性关系. 因此, 本研究表明, 在黄土高原子午岭林区, 自然恢复草地土壤有利于氮储量的积累, 人工油松林土壤有利于土壤碳储量的增加, 且根系是影响土壤碳氮储量分布的重要因子.

参考文献

- [1] Fu B-J (傅伯杰), Zhang L-W (张立伟). Land use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress. *Progress of Geographical Science (地理科学进展)*, 2014, **33**(4): 441-446 (in Chinese)
- [2] Deng L, Shanguan ZP, Sweeney S. 'Grain for Green' driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 7039
- [3] Deng L, Shanguan ZP. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China. *Land Degradation & Development*, 2017, **28**: 151-165
- [4] Deng L, Han QS, Zhang C, et al. Above-ground and below-ground biomass accumulation and carbon sequestration with *Caragana korshinskii* Kom plantation development. *Land Degradation & Development*, 2017, **28**: 906-917
- [5] Yu Y (于洋), Wang H-Y (王海燕), Lei X-D (雷相东). Soil organic carbon in over-logged forest stands of *Quercus mongolica* northeastern China. *Journal of Northwest Forestry University (西北林学院报)*, 2011, **26**(2): 57-62 (in Chinese)
- [6] Liao H-K (廖洪凯), Long J (龙健), Li J (李娟), et al. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen under different vegetation types in Karst dry hot valley of Southwest China. *Soils (土壤)*, 2012, **44**(3): 421-428 (in Chinese)
- [7] Tang L, Dang XH, Liu GB, et al. Response of artificial grassland carbon stock to management in mountain region of southern Ningxia, China. *Chinese Geographical Science*, 2014, **24**: 436-443
- [8] Zhao W, Zhang R, Huang CQ, et al. Effect of different vegetation cover on the vertical distribution of soil organic and inorganic carbon in the Zhifanggou watershed on the Loess Plateau. *Catena*, 2016, **139**: 191-198
- [9] 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)
- [10] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2004 (in Chinese)
- [11] Chen Z (陈智), Yin H-J (尹华军), Wei Y-Y (卫云燕), et al. Short-term effects of night warming and nitrogen addition on soil available nitrogen and microbial properties in subalpine coniferous forests, Western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2010, **34**(11): 1254-1264 (in Chinese)
- [12] Wei XR, Shao MA, William J, et al. Dynamics of aggregate associated organic carbon following conversion of forest to cropland. *Soil Biochemistry*, 2013, **57**: 876-883
- [13] Huang C-Y (黄昌勇), Xu J-M (徐建明). Soil Science. Beijing: China Agriculture Press, 2012 (in Chinese)
- [14] Han X-S (韩新生), Ma F (马璠), Guo Y-Z (郭永忠), et al. Effects of land use on water stable aggregates in surface soil. *Journal of Arid Land Resources and Environment (干旱区资源与环境)*, 2018, **32**(2): 114-120 (in Chinese)
- [15] Luo D (罗达), Shi Z-M (史作民), Wang W-X (王卫霞), et al. The subtropical pine carbon and nitrogen storage in *Erythrophleum fordii* and *Pinus massoniana* artificial pure forest and mixed forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2015, **35**(18): 6051-6059 (in Chinese)
- [16] Zhu Q-L (朱秋丽), Wang C (王纯), Yan J-H (严锦华), et al. Effect of straw and waste on the soil aggregates and carbon, nitrogen and phosphorus contents of Jasmine garden. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 2017, **31**(4): 192-197 (in Chinese)
- [17] Zhang C-H (张春华), Wang Z-M (王宗明), Ju W-M (居为民), et al. Temporal and spatial variability of soil carbon to nitrogen ratio in maize belt of Songnen Plain. *Environmental Science (环境科学)*, 2011, **32**(5): 528-533 (in Chinese)
- [18] Ding F-J (丁访军), Pan Z-S (潘忠松), Zhou F-J (周凤娇), et al. Organic carbon contents and vertical distribution characteristics of the soil in three forest types of the Karst regions in central Guizhou Province. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 2012, **26**(1): 161-169 (in Chinese)
- [19] Sauer TJ, Cambardella CA, Brandtler JR. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt. *Agroforestry Systems*, 2007, **71**: 1555-1563
- [20] Guo S-L (郭胜利), Ma Y-H (马玉红), Che S-G (车升国), et al. Effects of plantation and natural vegetation on litter volume and soil organic carbon changes in the Loess Region. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 2009, **45**(10): 14-18 (in Chinese)
- [21] Shi K (史锷), Chen Z (陈卓). Effects of soil mechanical composition on organic carbon content in livable mountainous area. *Chinese Agricultural Science Bulletin (中国农学通报)*, 2008, **24**(8): 274-278 (in Chinese)
- [22] Tian J-Q (田佳倩), Zhou Z-Y (周志勇), Bao B (包彬), et al. Changes of soil particle fractions and their effects on soil carbon and nitrogen contents in the ecotone between agriculture and pasture. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2008, **32**(3): 601-610 (in Chinese)
- [23] Jing Y-Y (敬芸仪), Deng L-J (邓良基), Zhang S-R (张世熔). Study on the main factors of purple soil EC characteristics and its influence. *Chinese Journal of Soil*

- Science* (土壤通报), 2006, **37**(3): 617–619 (in Chinese)
- [24] Zheng M-H (郑棉海), Chen H (陈浩), Zhu X-M (朱晓敏), *et al.* Effects of mineral nutrient input on biological nitrogen fixation in forest. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(24): 7941–7954 (in Chinese)
- [25] Battle-Aguilar J, Brovelli A, Luster J, *et al.* Analysis of carbon and nitrogen dynamics in riparian soils: Model validation and sensitivity to environmental controls. *Science of the Total Environment*, 2012, **429**: 246–256
- [26] Gao Y-Z (高英志), Wang S-P (汪诗平), Han X-G (韩兴国), *et al.* Soil nitrogen regime and the relationship between aboveground green phytobiomass and soil nitrogen fractions at different stocking rates in the Xilin River Basin. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(3): 285–294 (in Chinese)
- [27] Zhu Z-L (朱兆良). Study on soil nitrogen in China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(5): 778–783 (in Chinese)
- [28] Zhao HW, Yan FM, Sheng XL. Wheat responses to ammonium and nitrate N applied at different sown and input times. *Field Crops Research*, 2016, **199**: 10–20
- [29] Deng J (邓娟), Shangguan Z-P (上官周平). Ziwuling forest of artificial and natural *Pinus tabuliformis* forest nutrient and carbon pools. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(6): 3231–3240 (in Chinese)
- [30] Wang B (王彬), Wang H (王辉), Yang J-L (杨军珑), *et al.* Study on gap regeneration characteristics of *Pinus tabuliformis* forest in Ziwuling Mountain. *Forestry Resources Management* (林业资源管理), 2007, **4**(2): 60–65 (in Chinese)
- [31] Wu J-G (吴建国), Zhang X-Q (张小全), Xu D-Y (徐德应). Changes in soil labile organic carbon under different land use in the Liupan Mountain forest zone. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(5): 657–664 (in Chinese)
- [32] Zhang X-B (张希彪), Shangguan Z-P (上官周平). Effect of human disturbance on soil physical properties of *Pinus tabuliformis* plantation in Ziwuling, Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(11): 3685–3695 (in Chinese)
- [33] Bengtsson G, Bengtson P, Mansson KF. Gross nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, **35**: 143–154
- [34] Zhang C-H (张春华), Wang Z-M (王宗明), Ju W-M (居为民), *et al.* Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen plain maize belt. *Environmental Science* (环境科学), 2011, **32**(5): 1407–1414 (in Chinese)
- [35] Chen W-F (陈为峰), Shi Y-X (史衍玺), Tian S-F (田素锋), *et al.* Distribution characteristics of soil nitrogen and phosphorus in new wetland of Yellow River Estuary. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(1): 69–73 (in Chinese)
- [36] Lv G-H (吕国红), Zhou L (周莉), Zhao X-L (赵先丽), *et al.* Vertical distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen in *Phragmites australis* wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(3): 384–389 (in Chinese)
- [37] Fu XL, Shao MA, Wei XR, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in northern Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2010, **155**: 31–35
- [38] Rahman MM, Barcena TG, Vesterdal L. Tree species and time since afforestation drive soil C and N mineralization on former cropland. *Geoderma*, 2017, **305**: 153–161
- [39] Pietri JCA, Brookes PC. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**: 1396–1405
- [40] Deng Q, Cheng XL, Yang YH, *et al.* Carbon nitrogen interactions during afforestation in central China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **69**: 119–122

作者简介 刘玉林,女,1993年生,硕士研究生.主要从事植被恢复与土壤碳氮过程研究. E-mail: liuyulin191@163.com

责任编辑 孙菊

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.应用生态学报,2018,**29**(7): 2163–2172

Liu Y-L, Zhu G-Y, Deng L, *et al.* Effects of natural vegetation restoration and afforestation on soil carbon and nitrogen storage in the Loess Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2163–2172 (in Chinese)