

## 豫西山地不同类型人工植被恢复模式对土壤碳、氮的影响

刘沛松<sup>1,2</sup>, 寇利轩<sup>1,2</sup>, 胡 军<sup>1</sup>, 程立平<sup>1,2</sup>, 佟伟霜<sup>1,2</sup>, 刘志鹏<sup>1</sup>, 王鑫隆<sup>1</sup>

(1. 平顶山学院 化学与环境工程学院, 河南 平顶山 467000; 2. 河南省生态经济型木本植物种质创新与利用重点实验室, 河南 平顶山 467000)

**摘 要:**为探究豫西低山丘陵退化区不同植被恢复模式下土壤 C、N 含量分布特征,在长期未被扰动的自然荒草地地上设置 9 种不同植被类型试验小区,分别为紫花苜蓿(M)、速生杨(Y)、侧柏(B)、栓皮栎(L)、刺槐(H)、速生杨×紫花苜蓿(YM)、侧柏×紫花苜蓿(BM)、栓皮栎×紫花苜蓿(LM)、刺槐×紫花苜蓿(HM),以自然荒草地(CK)为对照。在植被恢复的第 9 年,测定不同植被模式小区下及区内不同坡度间的土壤 TC、TN 含量。结果表明,相较于 CK,林草复合模式 BM、LM、HM,及纯林模式 L 和 H 植被模式显著提高了土壤 TC、TN 含量。在 Y、B、L 各个植被模式各坡面不同坡位间的 TC、TN 含量均呈现显著性差异,而 YM、BM、LM 和 HM 模式各自坡位间基本都无显著性差异,说明林草复合模式可以减小坡面 C、N 含量的分布差异。因此,林草复合植被模式具有明显的增碳固氮作用。环境因子土壤 pH 和凋落物养分碳氮是影响土壤 C、N 含量的重要因素,表现为土壤 pH 与土壤 TC、TN 含量之间均呈极显著负相关关系,凋落物 N 与土壤 TC、TN 呈显著正相关,而凋落物 C/N 与土壤 TC、TN 呈显著负相关。

**关键词:**豫西低山丘陵区;人工植被;林草模式;土壤碳氮;环境因子

**中图分类号:**S718.55

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)06-0116-07

## Effects of Different Artificial Vegetation Restoration Patterns on Soil Carbon and Nitrogen in Low Hilly Area of Western Henan Province

LIU Pei-song<sup>1,2</sup>, KOU Li-xuan<sup>1,2</sup>, HU Jun<sup>1</sup>, CHENG Li-ping<sup>1,2</sup>, TONG Wei-shuang<sup>1,2</sup>,  
LIU Zhi-peng<sup>1</sup>, WANG Xin-long<sup>1</sup>

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, Henan, China;

2. Henan Key Laboratory of Germplasm Innovation and Utilization of Eco-economic Woody Plant, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, Henan, China)

**Abstract:** In order to study the distribution characteristics of soil total carbon and nitrogen content of different vegetation restoration patterns in the degraded areas of low hills in western Henan Province, 9 experimental plots with different vegetation restoration patterns were set, including *Medicago sativa* (M), *Populus* sp. (Y), *Platycladus orientalis* (B), *Quercus variabilis* (L), *Robinia pseudoacacia* (H), *Populus* sp. × *Medicago sativa* (YM), *P. orientalis* × *M. sativa* (BM), *Quercus variabilis* × *M. sativa* (LM), *R. pseudoacacia* × *M. sativa* (HM) and natural wasteland as the control (CK) were established on a natural wasteland slope without disturbance for a long time. In the ninth year of vegetation restoration, the soil total carbon and nitrogen of different vegetation types and slope positions were examined. The results indicated that the soil total carbon and nitrogen contents in the silvopastoral models of BM, LM, HM, and pure forest models of L and H were significantly higher than the CK. There were significant differences of soil total

收稿日期:2023-02-18 修回日期:2023-05-09

基金项目:河南省科技攻关项目(222102110336);平顶山学院国家级项目培育基金(PXY-PYJJ-202005);国家自然科学基金(41771036)。

第一作者:刘沛松,博士,副教授。研究方向:恢复生态学。E-mail:peisongliu@163.com

carbon and nitrogen content in the pure forest model of Y, B and L, while no differences in the silvopastoral patterns among the slope positions, indicating that the silvopastoral models of YM, BM, LM and HM could reduced the distribution difference of soil nutrients. Therefore, the silvopastoral pattern is considered to have better effects on carbon accumulation and nitrogen immobilization. Soil pH and litter nutrients were important factors affecting soil carbon and nitrogen content. Soil pH showed a highly significant negative correlation with both soil total carbon and total nitrogen contents, and the litter nitrogen was positively associated with both soil carbon and nitrogen, while the litter C/N was negatively correlated with both soil carbon and nitrogen.

**Key words:** low hilly area of western Henan; artificial vegetation restoration; silvopastoral pattern; soil total carbon and nitrogen; environmental factor

碳、氮是构成有机体的基础元素,也是作为衡量土壤肥力水平和评价植被恢复效果的重要指标<sup>[1]</sup>,其分布和循环与生态系统的稳定和发展密不可分<sup>[2]</sup>。土壤是陆地生态系统最大的碳库,储量约是大气碳库的2倍,植被碳库的3倍<sup>[3-4]</sup>。在全球气候变化的背景下,其较小的变化幅度就可能影响全球气候波动及陆地植被养分的供应,因此土壤碳库空间分布特征及碳循环已成为国内外学者研究的热点之一。N是植物生长过程中不可或缺的营养元素,是植物体内氨基酸、蛋白质以及光合作物的的重要组成部分,而土壤氮是植物获得氮素的直接来源,因此土壤中氮素分布和土壤固氮能力直接影响着植物的生长发育<sup>[5]</sup>。此外,土壤碳库与氮库之间联系紧密,土壤碳氮比(C/N)是土壤质量的一项敏感指标,其比率的变化,可影响土壤有机质分解和矿化速率<sup>[6]</sup>。因此,研究土壤C、N分布可有利于了解生态系统过程。

豫西低山丘陵区属于易受破坏的生态脆弱地区,土壤瘠薄、砾石含量多,水土流失严重,限制了林业生态建设。在人类活动及气候变化日益影响下,豫西低山丘陵区生态环境发生了进一步的严重退化。在退化的土地上,采用合理的植被重建和土地利用方式,有利于提高土壤肥力,例如增加土壤有机碳和全氮储量<sup>[7]</sup>,因此研究合理的植被恢复模式对于豫西低山丘陵生态环境的恢复具有重要的意义。人工植被恢复模式已经广泛应用于脆弱生态环境区建设<sup>[8-9]</sup>,其中,林草复合系统通过乔木和草本植物(豆科牧草)的有机结合,能够改善土壤理化性质,可使土壤中根系的数量增加提高土壤C、N含量,或者改善微气候环境等来提高系统生产力<sup>[10-11]</sup>,是恢复和重建退化生态系统的重要技术模式。复合植被恢复模式促进土壤质量的提高,并且显著优于纯林地<sup>[12]</sup>,土壤质量的提高反过来又有利于植被的重建。然而,目前大多林草复合植被模式的研究主要集中于农业、果园复合及牧场生态系统<sup>[11-13]</sup>,而在低

山丘陵地区进行植被恢复与土壤环境效应的长期定位监测研究还鲜有报道。

因此,本研究在豫西低山丘陵地区常见的自然荒草坡地上,采用4种当地典型人工造林树种速生杨(*Populus* sp.)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和多年生豆科牧草紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为材料,配置种植了9种不同植被类型。经过9a的生态恢复,探讨其土壤表层C、N特征及主要影响因素。研究结果可为该地区的生态恢复及重建提供理论基础和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为豫西山地,海拔200~1 000 m,地理坐标为112°14′—113°14′E, 33°34′—34°00′N,属于典型的暖温带和北亚热带气候过渡带,山体由沉积岩和石灰岩构成,植被生长环境脆弱。土壤类型以褐土、潮土、黄棕壤土为主。该区气候温和,光照充足,雨量适中,季节分明,无霜期为210 d。全年日照时数2 081 h,年均气温13~14℃,近30 a年均降水量810 mm,60%以上的降雨量集中在7—9月。海拔600 m以下的低山丘陵区,坡度大多在22°,生态环境退化,植被多样性减少,水土流失严重。目前常见植被为人工林和次生林,主要植被类型为栓皮栎(*Q. variabilis*)、锐齿栎(*Q. aliena*)、山合欢(*Albizia kalkora*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、羊胡子草(*Carex rigescens*)、香附子(*Cyperus rotundus*),常见的人工林树种为速生杨(*Populus* sp.)、刺槐(*R. pseudoacacia*)、侧柏(*P. orientalis*)、栎树(*Q. variabilis*)等<sup>[14]</sup>。

### 1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计 试验区始建于2011年3月,位于河南省平顶山市鲁山县董周乡和庄村五里岭(112°47′54″E, 33°44′47″N),是中国林科院、河南省

林业厅、平顶山学院三方共建的“低山丘陵区生态修复试验与示范基地”。试验区在多年未利用的自然荒草地上建造而成,面积 10 000 m<sup>2</sup>,试验前的土质、地貌、地上植被等环境背景均一致,坡向西南,坡度 22°,沿等高线水平设计了 10 个试验小区,每小区坡长 20 m×坡宽 15 m,小区间均预留 3 m 宽隔离带。小区包括:1 个紫花苜蓿草地(M);4 个林草复合小区—速生杨×紫花苜蓿(YM)、侧柏×紫花苜蓿(BM)、栓皮栎×紫花苜蓿(LM)、刺槐×紫花苜蓿(HM);4 个纯林小区——速生杨(Y)、侧柏(B)、栓皮栎(L)、刺槐(H),1 个自然荒草地小区,作为对照区(CK)。3 月 12 日植树节在每个小区按照以上小区名称种植对应类型的植被,树种均采用 5 年生,林分密度 1.5 m×2.0 m,沿坡长方向共种植 10 行,行

间距 2.0 m,各树坑位置呈品字形排列,以防止水土流失。为错过 6—9 月雨季大雨冲刷坡面正在生长的苜蓿,于当年 10 月上旬在林下播种紫花苜蓿,沿等高线方向人工挖沟横向条播,行间距 10 cm,播深 3~4 cm,亩播种量 1.5 kg。自然荒草地对照区(CK)保留试验前状态自然生长,不种树不种草。在每个试验小区内,沿坡宽方向再均分为 3 个重复亚区,每个重复亚区面积均为 100 m<sup>2</sup>(坡长 20 m×坡宽 5 m);再将各重复亚区沿坡长方向平均划分为 4 个坡段:上坡、坡中上、坡中下、下坡,每个坡位面积均为 25 m<sup>2</sup>(5 m×5 m)(图 1),每个坡位亚区作为本研究中土壤和凋落物样本的采集点和土壤水分监测点。

试验前土壤养分背景值见表 1。

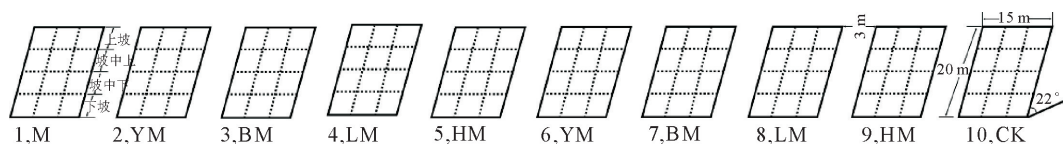


图 1 不同植被恢复模式试验区设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment design showing the plots of different vegetation types

表 1 试验前自然荒草地土壤养分指标背景值

Table 1 The background value of soil nutrients in the natural wasteland before the experiment

g · kg<sup>-1</sup>

有机质	全氮	铵态氮	硝态氮	全磷	速效磷	全钾	速效钾
7.72	0.36	17.61	5.19	0.1	1.15	18.81	38.49

1.2.2 样品采集 2019 年 10 月下旬对各个试验区每个亚区的每个坡位采集 0~20 cm 土层的土样,共 120 个,带回实验室,剔除动植物残体、石块等杂质,自然阴干,过 100 目(0.149 mm)筛,备用。用 100 cm<sup>3</sup> 环刀采集各亚区 0~20 cm 土层原状土,测定土壤容重。

1.2.3 测定指标 采用德国进口的 CHNOS Elemental Analyzer 元素分析仪(型号 Vario Macro Cube)测定土壤 TC、TN 含量;环刀法测定土壤容重;烘干法测定 0~20 cm 土壤含水率(105 °C, 10 h);用酸度计测定土壤 pH(2.5:1 水土比);用直角地温计测定各坡位 0~20 cm 土壤温度。

### 1.3 数据分析

在 Microsoft Excel 2016 中进行数据整理和作图。采用 SPSS 25.0 统计分析软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA)和多重比较(LSD),Pearson 相关分析法进行影响因子分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被类型对土壤 TC、TN 与 C/N 的影响

#### 2.1.1 土壤 TC 不同类型植被对土壤 TC 含量有

显著影响。由表 2 可知,不同植被土壤 TC 含量依次为 HM>BM>H>LM>L>Y>M>B>YM>CK,可见,9 种类型植被模式的 0~20 cm 土壤全碳含量均高于对照荒草地(CK)。HM、BM、H、LM、L 植被模式均能显著提高荒草地(CK)土壤 TC 含量。其中,HM、BM、LM 林草复合模式土壤 C、N 恢复效果最好,相对于对照荒草地,土壤 TC 含量分别增加了 88.77%、82.95%、58.94%,相对于 H、B、L 纯林模式,土壤 TC 含量分别增加了 11.55%、60.88%、5.96%,而 Y、M、B、YM 4 种模式与对照荒草地无显著差异。

2.1.2 土壤 TN 在不同类型植被模式中,土壤 TN 含量顺序为 HM>BM>H>LM>L>Y>M>YM>B>CK,TN 含量大小顺序与 TC 含量基本保持一致。HM、BM、H、LM、L 5 种类型植被模式均与 CK 之间土壤 TN 含量存在显著性差异,显著提高土壤 TN 含量。HM、BM、LM 较对照 TN 增加了 78.30%、66.04%、50.94%,较纯林模式(H、B、L)增加了 10.52%、45.45%、2.56%。而 Y、M、B、YM 4 种模式与对照荒草地也无显著差异。

#### 2.1.3 土壤 C/N 不同类型植被的土壤 C/N 值也

存在差异。其顺序依次为 BM>HM>LM>H>L>M>CK>YM>B>Y, 平均值在 8.57~9.9, 总体上 C/N 之间差异不大, 仅有 BM 与除 HM、LM

之外的其他模式之间存在显著性差异 ( $P<0.05$ ), HM、LM 模式与 YM、B、Y 模式之间的 C/N 差异性显著 ( $P<0.05$ )。

表 2 不同植被类型土层 (0~20 cm) TC、TN 与 C/N 值

Table 2 The soil total carbon, nitrogen and C/N ratio of soil layer 0—20 cm of different plant types

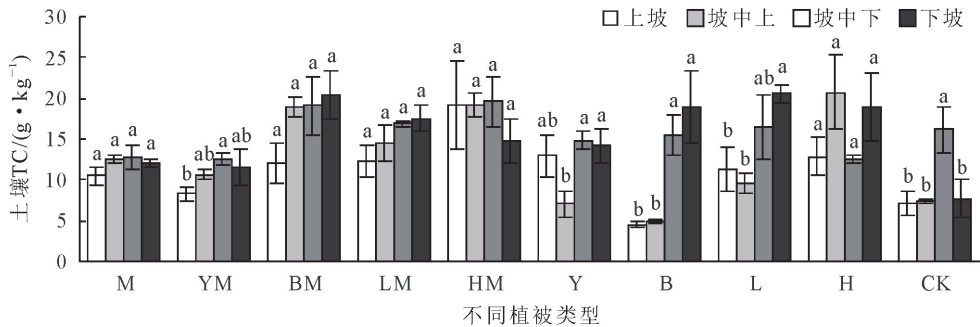
植被模式	TC/(g·kg <sup>-1</sup> )	TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	C/N 值
M	12.00±1.78cde	1.33±1.23cde	8.94±0.75bc
YM	10.77±2.51de	1.22±1.07de	8.75±0.52c
BM	17.60±5.24a*	1.76±1.49ab*	9.90±0.81a*
LM	15.29±3.35abc*	1.60±1.4abc*	9.53±0.51ab
HM	18.16±5.59a*	1.89±1.63a*	9.54±1.56ab
Y	12.27±4.28bcde	1.42±1.13bcde	8.57±0.69c
B	10.94±7.63de	1.21±0.75de	8.62±0.96c
L	14.43±5.85abcd*	1.56±1.19abcd*	9.23±0.51abc
H	16.28±6.18ab*	1.71±1.4ab*	9.31±0.75abc
CK	9.62±4.88e	1.06±0.81e	8.86±1.61bc

注:同一列中不同小写字母表示不同植被类型之间土壤 TC、TN 含量和 C/N 之间差异性达显著水平 ( $P<0.05$ ); \* 表示不同植被类型相对于荒草对照区(CK)的差异达显著性水平 ( $P<0.05$ ), N=120。

2.2 不同坡位土壤 TC、TN 分布与 C/N 特征

2.2.1 不同坡位土壤 TC 分布特征 种植紫花苜蓿可以降低不同植被类型坡面不同坡位之间土壤 TC 的差异性。由图 2 可知,有紫花苜蓿参与下,林草复合植被(BM、LM、HM)和紫花苜蓿草地(M)的

不同坡位之间的土壤 TC 含量无显著性差异。而在没有紫花苜蓿参与的纯林(Y、B 和 L)和对照荒草地 CK 上,其坡面不同坡位土壤 TC 含量之间均表现出显著性差异,基本上表现为下坡和坡中下大于坡中上和上坡的特征。L 模式的不同坡位之间无差异。



不同小写字母表示在同一类型植被土壤不同坡位差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

图 2 不同植被类型各坡位土壤 TC 分布特征

Fig. 2 Soil total carbon distribution characteristics of slope positions of different vegetation types

2.2.2 不同坡位土壤 TN 分布特征 样地 M 和林草复合植被模式(YM、BM、HM、LM)的不同坡位 TN 含量均无显著差异(图 3)。Y、B、L 植被的下坡

位均高于上坡位的土壤 TN 含量, H 坡位间无显著性差异。CK 坡中下的土壤 TC 含量最高。

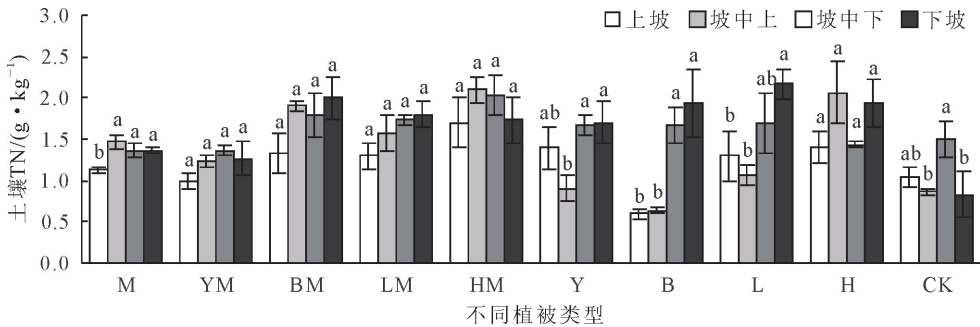


图 3 不同植被类型各坡位土壤 TN 分布特征

Fig. 3 Soil total nitrogen distribution characteristics of slope positions of different vegetation types



2.2.3 不同坡位土壤 C/N 特征 紫花苜蓿草地 M 不同坡位之间土壤 C/N 无显著性差异。林草复合模式 LM 和 HM 植被类型的各个坡位之间土壤 C/N 无显著差异。YM 和 BM 的上坡 C/N 显著小于坡中下,而其他坡位之间无显著性差异。在无紫

花苜蓿的植被类型中,仅 H 的各个坡位之间无显著性差异。B、L、CK 植被坡面的土壤 C/N 均表现为下坡和坡中下小于坡中上和上坡,其中,坡中下最高,上坡最低,且二者之间差异性显著;Y 的坡中上最低,与上坡之间差异性显著,沿坡面方向无变化规律。

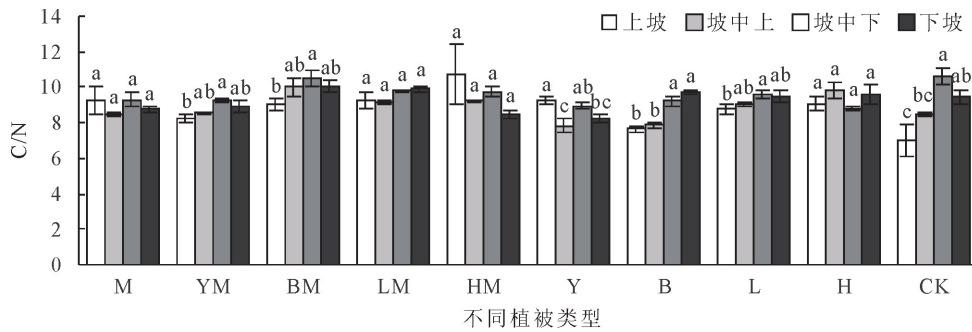


图 4 不同植被类型各坡位土壤 C/N 分布特征

Fig. 4 Soil C/N ratio distribution characteristics of slope positions of different vegetation types

2.3 土壤 TC、TN 关系及其影响因子分析

由表 3 可知,通过将所有植被类型的土壤 TC、TN 与环境因子(土壤含水率、土壤 pH、土壤容重)进行 Pearson 相关性分析,结果显示,土壤 TC(X)、TN 含量(Y)之间呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。土

壤 TC、TN 与土壤 pH 的关系呈显著负相关( $P < 0.05$ ),而与土壤水分、土壤容重、土壤温度之间无显著相关性。另外,土壤 TC、TN 含量与凋落物 C 含量无显著相关性,而与凋落物 N 含量呈显著正相关,与凋落物 C/N 呈显著的负相关。

表 3 全碳、全氮与环境因子之间相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil total carbon and nitrogen with environmental factors

	TC	TN	土壤容重	土壤含水率	土壤 pH	土壤温度	凋落物 C	凋落物 N	凋落物 C/N
TC	1								
TN	0.988 **	1							
土壤容重	0.245	0.338	1						
土壤含水率	-0.09	-0.02	0.394	1					
土壤 pH	-0.517 *	-0.450 *	0.272	0.218	1				
土壤温度	0.228	0.194	-0.1	-0.01	-0.34	1			
凋落物 C	-0.23	-0.26	-0.3	-0.22	-0.08	-0.265	1		
凋落物 N	0.526 *	0.469 *	-0.09	-0.14	-0.682 **	-0.025	0.399	1	
凋落物 C/N	-0.722 **	-0.678 **	-0.12	-0	0.668 **	-0.171	0.309	-0.748 **	1

注: \* 和 \*\* 分别表示在 0.05 水平(双尾)和 0.01 水平(双尾)上显著相关。

3 结论与讨论

3.1 结论

豫西低山丘陵地区不同类型植被恢复模式对 0~20 cm 层土壤 TC、TN 的恢复效应具有显著性的差异,侧柏×紫花苜蓿(BM)、栓皮栎×紫花苜蓿(LM)、刺槐×紫花苜蓿(HM)、栓皮栎(L)、刺槐(H)植被模式比自然荒地可显著提高土壤 TC、TN 含量,也高于对应的纯林模式,并且也减缓了养分在坡面分布的差异,说明林草复合系统具有明显的增碳固氮作用。土壤 pH 和凋落物养分含量是影响土壤 TC、TN 含量及在坡面分布的主要因素,土壤 TC、TN 含量均与土壤 pH 呈显著负相关,凋落物 N 与土壤 C、N 含量呈正相关,凋落物 C/N 与土壤 C、

N 呈负相关关系。

3.2 讨论

3.2.1 不同类型植被对土壤 C、N 分布的影响 不同类型植被恢复模式影响土壤表层 TC、TN 含量分布和 C/N 大小,类似的结果也见于其他研究中<sup>[14-15]</sup>。本试验中,林草复合模式和纯林模式的土壤 TC、TN 含量均高于荒草地对照区,说明不同植被模式均能够增加土壤 C、N 含量,尤其 HM、BM、LM、H、L 这 5 种植被类型更能显著增加土壤 C、N 含量。林草复合模式中,HM、BM、LM 比 YM 恢复效果更好,其原因可能是速生杨生长期间需要消耗大量土壤水分和养分<sup>[16]</sup>,因此速生杨不宜作为林草复合模式中的首选树种。相对于纯林模式,林草复合模式的土壤 TC、TN 恢复效果较好,说明紫花苜

藓有增强土壤改善的作用;其中,LM、HM 相对于 H、L 纯林模式,土壤 C、N 恢复量偏低,可能是林分郁闭度过大,影响了紫花苜蓿的生长<sup>[17]</sup>,降低了生物固氮功能和坡面水土保持作用。因此可以考虑在人工造林初期林分郁闭度低的情况下引入多年生豆科牧草紫花苜蓿,能有效改善土壤环境,降低土壤养分流失。

林草复合模式(HM、LM、YM)与纯林模式(H、L、Y)土壤 C/N 值无显著差异,而 BM 中土壤 C/N 值显著大于纯林 B,主要原因可能是柏树林为主的次生林土壤有机碳含量最丰富,生态系统中的 C 元素以枯枝、落叶等凋落物以及植物死根等形式大量回归土壤,苜蓿的存在有利于柏树凋落物保存,因此可能造成增加 C 的幅度要大于固氮的幅度。土壤 C/N 值与微生物活动有一定关系,Prescott 等<sup>[18]</sup>认为,当土壤 C/N<25/1 时,土壤中的氮素会出现净矿化,是微生物分解的最佳值<sup>[18]</sup>,而本研究中 C/N 均低于此值,说明试验区微生物活性可能比较强,其机制有待于进一步试验研究。

### 3.2.2 不同类型植被和坡位对土壤 C、N 的影响

本试验中的林草复合模式和纯紫花苜蓿草地的不同坡位间土壤 C、N 含量分布无明显差异,而纯林地和荒草地对照区的坡面不同坡位的土壤 C、N 含量差异性显著,说明植被类型和坡位都是影响土壤 C、N 分布的重要因素,类似研究在黄土高原也有报道<sup>[19]</sup>。本研究中纯林植被中土壤 TC、TN 含量有沿坡面从上向下迁移累积的趋势,主要原因可能是降雨冲刷产生径流,造成土壤 C、N 随重力向下迁移,引起下坡位的土壤 C、N 含量增加<sup>[20]</sup>。而林草复合植被模式下,坡位间的养分总体上无明显差异,说明紫花苜蓿(M)具有抑制坡面土壤表层的全碳由坡上向坡下迁移流失的作用,同时也就均衡了有紫花苜蓿参与的植被类型中不同坡段的 C/N。值得注意的是,刺槐植物的不同坡段之间无差异,其原因可能是刺槐也属于豆科植物有关,其豆科类凋落物可以减缓土壤养分流失。

3.2.3 环境因子对土壤 C、N 的影响 本研究林草复合模式 TC、TN 与 pH 呈负相关,与孙佳等<sup>[21]</sup>的研究一致,其原因可能是豆科植物紫花苜蓿的引入导致了 pH 的变化,进而影响了土壤 C、N 循环过程中的土壤 C、N 微生物活性。杨恒山等<sup>[22-23]</sup>的研究表明随着种植紫花苜蓿年限的增加,pH 降低,并且微生物的活性也增强。另外,低 pH 又有利于提高土壤渗透性和孔隙度,促进团聚体形成,对土壤 N 积累和维持有积极作用<sup>[24]</sup>。因此土壤 pH 的降低很大程度上影响着土壤微生物生物量和土壤酶活

性<sup>[25]</sup>,进而提高了土壤养分含量。

凋落物是养分在植物与土壤之间迁移转化的基本载体,其动态变化可以实现并维持土壤养分和植物生长所需养分比率之间的平衡<sup>[26]</sup>。本研究中,土壤 C、N 含量与凋落叶 C/N 呈显著负相关,与其他研究一致<sup>[27]</sup>。这可能是由于凋落物分解过程中,C/N 是影响凋落物分解速率的重要因素之一,C/N 越低,凋落物分解越快<sup>[28]</sup>,促进了凋落物养分到土壤养分的释放。有研究报道,土壤 C、N 与凋落养分并不显著<sup>[29-30]</sup>,而本研究中凋落物 N 与土壤 C、N 呈显著正相关,可能是恢复近 10 a 的长期效应,凋落物 N 含量的增加可以促进微生物活性增加<sup>[31]</sup>,提高凋落物分解和养分释放的速率,是促进土壤碳氮积累以及维持其稳定性的主要机制。

大多数研究者认为,尽管林草间作模式可增加地表覆盖度,但也加剧了土壤水分的消耗<sup>[32]</sup>。例如,杨树间作紫花苜蓿较纯杨树林土壤含水量降低<sup>[33]</sup>。也有研究表明,林地、草地以及林草混交地的土壤含水量、变异系数差别均不大<sup>[34]</sup>,说明林草复合中水分的变化差异较大。此外,林草复合系统夏季可以提高林内湿度,降低温度,减轻或阻止草本植物的日灼现象<sup>[10,35]</sup>。本研究中土壤温度和水分含量与土壤 C、N 都表现无显著的相关性,可能是因为一般情况下水分和温度变化并不明显<sup>[36]</sup>,并且它们的变化相对于对于养分的变化的差异较小,因而产生较小的关联性,具体相关关系的作用机制有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] DENG L, SHANGGUAN Z P. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 151-165.
- [2] ELISABETH K, LEE H, DADI Z, et al. Greenhouse Gas Emissions, Asia and the Pacific: Moving Ahead[C]. In *Greenhouse Gas Emissions: Mitigation Strategies in Asia and the Pacific*. Ambio; Springer, 1996: 219-219.
- [3] SCHLESINGER W. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils[J]. *Nature*, 1990, 348: 232-234.
- [4] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10-21.
- [5] 肖英, 任希. 不同森林覆盖下长沙土壤氮的垂直变化及氮储量[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(6): 104-107.  
XIAO Y, REN X. Vertical variation and storage of soil total nitrogen under different forest cover[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(6): 104-107. (in Chinese)
- [6] LANE D R, BASSIRI RAD H. Diminishing spatial heterogeneity in soil organic matter across a prairie restoration chronose-

- quence[J]. *Restoration Ecology*, 2005, 13(2): 403-412.
- [7] 杨昆, 管东生, 周春华. 潭江流域森林碳储量及其动态变化[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1579-1582.
- YANG K, GUAN D S, ZHOU C H. Forest biomass carbon storage and its dynamics in Tanjiang river basin[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1579-1582. (in Chinese)
- [8] 聂斌斌, 蔡强国, 张卓文, 等. 植被恢复过程中土壤有机质和全氮的变化特征及区域差异[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 363-371.
- NIE B B, CAI Q G, ZHANG Z W, LI G Q, *et al.* Change characteristics and regional differences in organic matter and total nitrogen contents in topsoil under restored vegetation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 363-371. (in Chinese)
- [9] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(14): 3947-3952.
- WANG Z, LIU G B, XU M X. Effect of revegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3947-3952. (in Chinese)
- [10] 曾艳琼, 卢欣石. 林草复合生态系统的研究现状及效益分析[J]. *草业科学*, 2008, 25(3): 33-36.
- ZENG Y Q, LU X S. Current advance and benefits of tree-grass complex system research[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(3): 33-36. (in Chinese)
- [11] 张雷一, 张静茹, 刘方, 等. 林草复合系统的生态效益[J]. *草业科学*, 2014, 31(9): 1789-1797.
- ZHANG L Y, ZHANG J R, LIU F, *et al.* A review of ecological benefits of silvopasture systems[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(9): 1789-1797. (in Chinese)
- [12] CHI Y, XIONG K, HUA X, *et al.* Study on the relationship between disposition models of forest and grass and soil properties in karst rocky desertification areas of Southwest China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2020, 29(7): 5424-5431.
- [13] 孟林, 毛培春, 郑明利, 等. 浅析林草复合种植模式下的草地生态功能[J]. *草学*, 2021, (4): 1-5.
- MENG L, MAO P C, ZHENG M L, *et al.* Review of grassland ecological function under the compound planting pattern of forest and grass[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2021, (4): 1-5. (in Chinese)
- [14] 刘沛松, 王健胜, 楚纯洁, 等. 豫西低山丘陵区不同土地利用方式对陡坡地土壤理化性状的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(1): 208-212, 229.
- LIU P S, WANG J S, CHU C J, *et al.* Effect of different land use types on soil properties of steep slope in low hilly areas of Western Henan[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(1): 208-212, 229. (in Chinese)
- [15] 程淑兰, 欧阳华, 牛海山, 等. 荒漠化重建地区土壤有机碳时空动态特征——以陕西省榆林市为例[J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 505-513.
- CHENG S L, OUYANG H, NIU H S, *et al.* Temporal-spatial dynamic analysis of soil organic carbon in inversed desertification area: a case study in Yulin county, Shaanxi Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 505-513. (in Chinese)
- [16] 赵雪梅, 孙向阳, 王海燕, 等. 不同密度三倍体毛白杨试验林土壤养分的动态变化[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(6): 732-738.
- ZHAO X M, SUN X Y, WANG H Y, *et al.* Changes of soil nutrients contents in the triploid populus tomentosa plantations with five stand spacings[J]. *Forest Research*, 2012, 25(6): 732-738. (in Chinese)
- [17] 胡相明, 程积民, 万惠娥. 黄土丘陵区人工林下草本层植物的结构特征[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(3): 41-45.
- HU X M, CHENG J M, WAN H E. Structure characteristics of herbages under five types of artificial forest plantations in loess hilly region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(3): 41-45. (in Chinese)
- [18] PRESCOTT C E, CHAPPELL H N, VESTERDAL L. Nitrogen turnover in forest floors of coastal douglas-fir at sites differing in soil nitrogen capital[J]. *Ecology*, 2000, 81(7): 1878-1886.
- [19] GE J, WANG S, FAN J, *et al.* Soil nutrients of different land-use types and topographic positions in the water-wind erosion crisscross region of China's Loess Plateau[J]. *Catena*, 2020, 184: 104243.
- [20] 程立平, 赵玉明, 刘沛松. 豫西低山丘陵区不同植被修复模式下土壤养分评价[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(10): 423-426.
- CHENG L P, ZHAO Y M, LIU P S. Soil nutrient assessment of artificial vegetation restoration pattern on carbon and nitrogen in low hilly area of Western Henan Province[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(10): 423-425. (in Chinese)
- [21] 孙佳, 夏江宝, 苏丽. 黄河三角洲盐碱地不同植被模式的土壤改良效应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1323-1332.
- SUN J, XIA J B, SU L. Soil amelioration of different vegetation types in saline-alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4): 1323-1332. (in Chinese)
- [22] 杨恒山, 张庆国, 邵继承, 等. 种植年限对紫花苜蓿地土壤 pH 值和磷酸酶活性的影响[J]. *中国草地学报*, 2009, 31(1): 32-35, 44.
- YANG H S, ZHANG Q G, TAI J C, *et al.* Effects of growth years on soil pH and phosphatase activities in alfalfa fields[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2009, 31(1): 32-35, 44. (in Chinese)
- [23] 杨恒山, 张庆国, 刘晶, 等. 不同生长年限紫花苜蓿根系及其土壤微生物的分布[J]. *草业科学*, 2007, 24(11): 38-41.
- YANG H S, ZHANG Q G, LIU J, *et al.* Distribution of root and rhizosphere microorganism in alfalfa with different ages[J]. *Pratacultural Science*, 2007, 24(11): 38-41. (in Chinese)
- [24] BIENES R, MARQUES M J, SASTRE B, *et al.* Eleven years after shrub revegetation in semiarid eroded soils influence in soil properties[J]. *Geoderma*, 2016, 273: 106-114.
- [25] YANG B, QI K, BHUSAL D R, *et al.* Soil microbial community and enzymatic activity in soil particle-size fractions of spruce plantation and secondary birch forest[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2020, 99: 103196.
- [26] HESSEN D O, ÅGREN G I, ANDERSON T R, *et al.* Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry[J]. *Ecology*, 2004, 85(5): 1179-1192.

- ZANG Z Y, SHAO M M, QI S L. Study on five varieties and sex ratio of the population of the white wax insect (*Ericerus pela* Chavannes)[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1990(1):46-52. (in Chinese)
- [20] 张子有, 齐胜利, 张良玉. 白蜡虫生活在不同生态环境下繁殖力观察研究[J]. 昆虫知识, 1993(5):297-299.
- [21] 吴次彬, 钟远辉. 白蜡虫生物学特性的研究(一)[J]. 四川大学学报:自然科学版, 1983(3):91-99.
- WU C B, ZHONG Y H. Study on the bionomics of white-wax scale *Ericerus pela* Chavannes part I[J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 1983(3):91-99. (in Chinese)
- [22] 赵杰军, 王自力, 王绍云, 等. 昆明地区白蜡虫天敌寄生蜂种群结构与动态研究[J]. 林业科学研究, 2004(6):746-750.
- ZHAO J J, WANG Z L, WANG S Y, *et al.* Studies on the population structure and dynamic of parasite wasps on *Ericerus pela* in Kunming area [J]. Forest Research, 2004(6):746-750. (in Chinese)
- [23] 吴次彬. 施肥对白蜡增产效应的初步研究[J]. 四川林业科技, 1981(1):25-28.
- [24] 陈晓鸣. 白蜡虫自然种群生态学[M]. 北京:科学出版社, 2011:14-17.
- CHEN X M. Natural population ecology of *Ericerus pela* [M]. Beijing: Science Press, 2011:14-17. (in Chinese)
- [25] 王志明, 许晓明. 长春市一新外来入侵物种——白蜡虫的生物学特性与种群控制研究[J]. 吉林农业大学学报, 2006(2):152-154.
- WANG Z M, XU X M. Biological observation and chemical control of the white wax scale, an invasive alien species in Changchun city[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2006(2):152-154. (in Chinese)
- [26] 张子有, 邵孟明, 齐胜利, 等. 中国白蜡虫(*Ericerus pela* Chavannes)泌蜡量研究[J]. 动物学研究, 1988, 9(1):93-97.
- [27] 张子有, 邵孟明, 齐胜利, 等. 白蜡虫质量检验研究[J]. 昆虫知识, 1990(5):304-305.
- [28] 王问学, 罗定一, 钱焕美. 白蜡虫几种寄生蜂的生物学和综合防治研究[J]. 森林病虫通讯, 1984(3):5-7.
- (上接第 122 页)
- [27] 郑兴蕊, 宋娅丽, 王克勤, 等. 滇中常绿阔叶林凋落物养分释放及生态化学计量特征对模拟 N 沉降的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1):23-30.
- ZHENG X R, SONG Y L, WANG K Q, *et al.* Response of nutrient release and ecological stoichiometry of litter to simulated nitrogen deposition in evergreen broad-leaved forest in central Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1):23-30. (in Chinese)
- [28] XU X, HIRATA E. Decomposition patterns of leaf litter of seven common canopy species in a subtropical forest: N and P dynamics[J]. Plant and Soil, 2005, 273(1):279-289.
- [29] 薛飞, 龙翠玲, 廖全兰, 等. 喀斯特森林不同地形凋落物现存量及养分特征[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5):28-35.
- XUE F, LONG C L, LIAO Q L, *et al.* Characteristics of litter stock and nutrients in different land forms in Karst forest[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 36(5):28-35. (in Chinese)
- [30] 廖良宁, 卢姿瑾, 李远发, 等. 桂西北细叶云南松天然林凋落物及土壤养分特征[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1):31-38.
- LIAO L N, LU Z J, LI Y F, *et al.* Litter and soil nutrient characteristics of *Pinus yunnanensis* var. *tenuifolia* Natural forest in Northwest Guangxi[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 34(1):31-38. (in Chinese)
- [31] 赵畅, 龙健, 李娟, 等. 茂兰喀斯特原生林不同坡向及分解层的凋落物现存量和养分特征[J]. 生态学报, 2018, 37(2):295-303.
- ZHAO C, LONG J, LI J, *et al.* Litter stock and nutrient characteristics of decomposing litter layers in Maolan Karst primary forest in different slope directions[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(2):295-303. (in Chinese)
- [32] GAUTAM M K, MEAD D J, FRAMPTON C M, *et al.* Pinus radiata in a sub-humid temperate silvopastoral system: modeling of seasonal root growth[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 182(1):303-313.
- [33] 张久海, 安树青, 李国旗, 等. 林牧复合生态系统研究述评[J]. 中国草地, 1999, (4):52-60.
- [34] 云雷, 毕华兴, 田晓玲, 等. 晋西黄土区林草复合界面雨后土壤水分空间变异规律研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):938-944.
- YUN L, BI H X, TIAN X L, *et al.* Research on spatial heterogeneity of soil moisture after raining at forest-grassland boundary in the Loess region of West Shanxi[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4):938-944. (in Chinese)
- [35] 赵粉侠, 李根前. 林草复合系统研究现状[J]. 西北林学院学报, 1996, 11(4):83-88.
- ZHAO F X, LI G Q. Current advance of tree-grass complex system researches[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1996, 11(4):81-86. (in Chinese)
- [36] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山林草复合流域土壤温湿度时空变化特征[J]. 土壤, 2018, 50(4):795-802.
- ZHAO W J, LIU X D, JIN M, *et al.* Spatio-temporal change characteristics of soil temperatures and moistures in forest and grass complex basin in Qilian Mountains[J]. Soil, 2018, 50(4):795-802. (in Chinese)