

## 黄土丘陵区不同种植年限沙棘人工林土壤可溶性氮组分时空变化特征

赵满兴<sup>1,2</sup>, 王 俊<sup>1</sup>, 杨 帆<sup>1</sup>, 马文全<sup>1</sup>, 白二磊<sup>1</sup>

(1. 延安大学 生命科学学院, 陕西 延安 716000; 2. 陕西省区域生物资源保育与利用工程技术研究中心, 陕西 延安 716000)

**摘 要:**为探究黄土丘陵区不同种植年限沙棘人工林对土壤可溶性氮组分积累的季节和坡位动态变化的影响,以志丹县金丁镇不同时间种植沙棘人工林(20年生、15年生、5年生)为研究对象,以荒草地为对照,采集0~20 cm土壤样品,分析土壤可溶性氮组分含量和比例的季节和坡位动态变化。结果表明,沙棘人工林可显著增加土壤硝态氮、铵态氮和可溶性有机氮(soluble organic nitrogen, SON)含量,沙棘人工林种植年限越长,土壤可溶性氮养分增加越明显。沙棘人工林土壤硝态氮、铵态氮和 SON 分别比荒草地增加 109.72%、112.27%和 19.62%。土壤可溶性氮组分存在显著的季节性动态变化,土壤 SON 春冬季( $84.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较高,夏秋季( $37.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较低,硝态氮春夏季( $7.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较高,冬季( $6.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较低,铵态氮秋季( $6.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较高,其他季节变化不明显。土壤 SON 季节变化规律与硝态氮变化规律相反。土壤可溶性氮组分在坡位间的变化规律为坡下最高,坡上较低,坡下的硝态氮、铵态氮和 SON 分别比坡上高 28.7%、3.89%和 20.3%。土壤可溶性氮组分以土壤 SON 为主,占土壤 TSN 平均为 81.1%,其次是土壤硝态氮,平均为 10.0%,土壤铵态氮所占比例最低,平均为 8.9%。在陕北黄土丘陵区,营造沙棘林能有效提高土壤氮素,并且林龄越长,土壤可溶性氮素提升越明显。

**关键词:**黄土丘陵区;沙棘人工林;可溶性氮;季节动态;坡位

**中图分类号:**S793.601 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)06-0034-06

### Spatial Distribution Characteristics of Soil Soluble Nitrogen Component in *Hippophae rhamnoides* Plantations with Different Stand Ages in Loess Hilly Region

ZHAO Man-xing<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, MA Wen-quan<sup>1</sup>, BAI Er-lei<sup>1</sup>

(1. College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Engineering and Technological Research Center for Conservation and Utilization of Regional Biological Resources, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to investigate the spatial distribution characteristics of soil soluble nitrogen component in *Hippophae rhamnoides* plantations with different stand ages in loess hilly region, three 5-, 15- and 20-year-old *H. rhamnoides* stands were selected in Jinding Town of Zhidan County. The artificial grassland was used as the control. Soil samples were collected in 0—20 cm soil layers, and seasonal dynamic variations of the proportion of soil soluble nitrogen component were analyzed. The results showed that the measures of returning farmland to forest significantly increased the contents of soil nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and soluble organic nitrogen. There were significant differences in the above indexes among different soil layers and different aged stands and artificial grassland. The seasonal variation of soluble organic nitrogen content was opposite to that of nitrate nitrogen. The content of soluble organic nitrogen in spring and winter ( $84.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) was higher than that in summer and autumn ( $37.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The

收稿日期:2021-12-09 修回日期:2022-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41761068)。

第一作者:赵满兴,教授,硕士生导师。研究方向:土壤与植物营养调控。E-mail:zhaomanxing@163.com

nitrate nitrogen in spring and summer ( $7.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) were higher than that in autumn and winter ( $6.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The ammonium nitrogen was the highest in autumn ( $6.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), and the others were not significantly different. The soluble nitrogen content of lower slope was higher than that of upper and middle slopes. The soluble nitrogen was mainly soluble organic nitrogen, accounting for  $81.1\%$ , followed by nitrate nitrogen, accounted for  $10.0\%$ , and the proportion of ammonium nitrogen was the least, which was below  $8.9\%$ . In the all, the soluble nitrogen content increased differently in different aged stands, the content of soil soluble nitrogen in the 20-year-old stand was significantly higher than that in 15- and 5-year-old stands. *H. rhamnoides* plantation is a suitable afforestation model, which would help improve soil nitrogen.

**Key words:** loess hilly region; *Hippophae rhamnoides* plantation; soluble nitrogen; seasonal dynamics; slope position

黄土高原因其特殊的黄土母质,土壤保水性能差,水土流失严重,生态系统脆弱<sup>[1-2]</sup>。为了改善黄土高原的生态环境现状,20 世纪 90 年代,国家在这一地区实施了退耕还林还草生态工程建设。大量人工林改善了当地土壤条件,促进了土壤肥力提升。

氮素对植物生长不可或缺,土壤氮素可分为无机氮和有机氮,有机氮占土壤氮素的 95% 以上<sup>[3-5]</sup>,可溶性有机氮(soluble organic nitrogen, SON)是可溶性总氮(total soluble nitrogen, TSN)的重要组成部分<sup>[6-7]</sup>。SON 是土壤养分的有效成分之一,可以直接或间接转化为植物可吸收利用的养分<sup>[8-9]</sup>。有研究发现,黄土高原人工林地土壤 SON 占可溶性总氮的比例超过 50%,SON 在土壤氮素循环过程中扮演重要的角色<sup>[10-11]</sup>,人工林地的 SON 是土壤中不容忽视的氮素组成部分<sup>[12-13]</sup>。

黄土高原地区坡地较多,可能会造成土壤可溶性氮素沿土壤剖面垂直分布及不同坡位分布存在差异<sup>[14-15]</sup>。沙棘是延安北部主要的退耕还林树种之一,有很强的固氮能力<sup>[16]</sup>。目前,沙棘种植年限对土壤可溶性氮库的影响及其时空变化规律尚不清楚。因此,以志丹县金丁镇不同退耕年限的沙棘林为研究对象,研究不同退耕年限沙棘林可溶性氮组分季节及不同坡位分布规律,以期为深入研究该区域不同年限沙棘林的退耕效果提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

延安市志丹县属半干旱气候区,年平均气温  $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量  $450\sim 490\text{ mm}$ ,年平均无霜期  $140\text{ d}$ ,平均海拔  $1\,300\text{ m}$ ,土壤类型为黄绵土,土壤质地为壤质土。自 1999 年西部大开发战略实施以来,该县通过人工造林和封山育林等方式加速恢复当地植被,取得明显的效果。

1.2 土样采集与分析

供试土样分别与 2018 年 3、6、9、11 月采集于志丹县金丁镇退耕还林区,选择不同恢复年限(5 年生、15 年生、20 年生)的沙棘林地,以荒草地作为对样地,盖度超过  $80\%$ 。样地基本情况见表 1。每个样地按照不同梁卯坡位(坡上和坡下)分别设置 3 个  $10\text{ m}\times 10\text{ m}$  的样方,共计 24 个样方<sup>[17]</sup>。在样方内随机选取 5 个取样点,采用分层多点混合法取土样。在每个取样点分  $0\sim 20\text{ cm}$  土层取样。采集的土壤样品经自然风干,用  $2\text{ mm}$  直径的筛子过筛,拣去杂质,将来自同一样方同一土层的土样混匀,用四分法取样,用于土壤理化性质指标的测定。

测定项目包括土壤可溶性总氮(TSN)、硝态氮、铵态氮和可溶性有机氮(SON),按照《土壤农化分析》<sup>[18]</sup>测定。

表 1 样地基本信息  
Table 1 Basic information of sample plots

样地类型	坡位	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	平均株径/cm	平均株高/m	海拔/m
5 年生沙棘	坡上	1 500	1.51	1.60	1 257
	坡下	1 500	1.51	1.60	1 249
15 年生沙棘	坡上	1 750	2.13	1.80	1 320
	坡下	1 750	2.13	1.80	1 312
20 年生沙棘	坡上	1 950	2.39	2.10	1 247
	坡下	1 950	2.39	2.10	1 239
荒草地	坡上	—	—	0.05	1 359
	坡下	—	—	0.05	1 329

### 1.3 数据处理与统计分析

使用 SPSS 软件对数据进行单因素方差分析,多重比较采用最小显著差法,显著性检验水平  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤硝态氮变化特征

如表 2 所示,不同年限、季节和坡位间的土壤硝态氮含量均有显著差异。土壤硝态氮含量的变化范围为  $1.43 \sim 18.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 20 年生沙棘硝态氮含量 ( $13.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 和 15 年生沙棘硝态氮含量 ( $7.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 分别比 5 年生沙棘显著增加了 293.94% 和 130.27%; 5 年生沙棘硝态氮含量 ( $3.36$

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 略低于荒草地 ( $3.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 两者之间没有显著差异水平。

在整个采样期间,土壤硝态氮含量随季节变化波动显著 ( $P < 0.05$ )。对于坡上而言,所有样品均表现为夏季最高,冬春季较低。对于坡下而言,不同年限沙棘土壤硝态氮含量季节变化规律不一致,5 年生沙棘和 15 年生沙棘春季最高,20 年生沙棘和草地夏季最高,各季节平均大小关系为:夏秋季 ( $7.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 秋冬季 ( $6.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

除了 20 年生沙棘外,其余样地硝态氮含量均为坡下 > 坡上,坡下平均增幅  $16.04\% \sim 22.24\%$ ; 20 年生沙棘硝态氮含量呈现坡上 > 坡下的规律,坡下平均降幅  $1.92\%$ 。

表 2 不同人工沙棘林土壤硝态氮

Table 2 Soil nitrate nitrogen of different vegetation restoration types

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

样地类型	坡位	春季	夏季	秋季	冬季	均值
5 年生沙棘	坡上	$3.59 \pm 0.41\text{Bb}$	$3.87 \pm 0.17\text{Ac}$	$2.13 \pm 0.45\text{Cc}$	$1.43 \pm 0.05\text{Dc}$	2.75
15 年生沙棘		$4.11 \pm 0.22\text{Cb}$	$11.95 \pm 0.25\text{Ab}$	$5.12 \pm 0.85\text{Bb}$	$5.53 \pm 0.36\text{Bb}$	6.67
20 年生沙棘		$11.80 \pm 0.89\text{Ba}$	$18.95 \pm 0.25\text{Aa}$	$10.12 \pm 2.93\text{Aa}$	$13.16 \pm 1.36\text{Aa}$	13.51
荒草地		$3.57 \pm 0.29\text{Bb}$	$5.65 \pm 0.24\text{Ac}$	$2.14 \pm 0.09\text{Cc}$	$1.44 \pm 0.40\text{Dc}$	3.20
5 年生沙棘	坡下	$6.83 \pm 3.90\text{Ac}$	$1.55 \pm 0.06\text{Cd}$	$3.58 \pm 0.92\text{Bb}$	$3.95 \pm 0.17\text{Bb}$	3.98
15 年生沙棘		$15.91 \pm 0.85\text{Aa}$	$8.77 \pm 0.20\text{Bb}$	$5.66 \pm 0.58\text{Cb}$	$4.94 \pm 3.52\text{Cb}$	8.82
20 年生沙棘		$11.37 \pm 1.08\text{Ab}$	$18.64 \pm 3.48\text{Aa}$	$10.36 \pm 0.97\text{Ba}$	$11.60 \pm 0.39\text{Ba}$	12.99
荒草地		$6.31 \pm 0.18\text{Ac}$	$6.75 \pm 0.36\text{Ac}$	$2.65 \pm 0.15\text{Bc}$	$2.47 \pm 0.16\text{Bc}$	4.55

注:表中数据为平均值±标准差,不同小写字母表示同一季节不同植被间差异性显著 ( $P < 0.05$ ),大写字母表示同一植被不同季节间差异性显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 土壤铵态氮变化特征

由表 3 可知,土壤铵态氮含量的变化范围为  $0.68 \sim 13.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 20 年生沙棘铵态氮含量 ( $7.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 和 15 年生沙棘铵态氮含量 ( $6.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 分别比 5 年生沙棘显著增加了 69.27% 和 39.67%; 15 年生沙棘铵态氮含量 ( $6.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 增加了 39.67%; 沙棘林铵态氮含量均显著高于荒草地 ( $2.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 平均增幅在  $55.72\% \sim 163.59\%$ 。

在整个采样期间,土壤铵态氮含量随季节变化

波动显著 ( $P < 0.05$ )。对于坡上而言,所有样品均表现为夏秋季最高,冬春季较低。对于坡下而言,不同年限沙棘土壤铵态氮含量季节变化规律不一致,5 年生沙棘夏季最高,15 年生沙棘、20 年生沙棘和草地均为秋季最高,各季节平均大小关系为夏秋季 ( $6.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 秋冬季 ( $4.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

5 年生沙棘草地铵态氮含量随坡位变化呈现坡下 > 坡上的规律,坡下平均增幅分别为  $17.65\%$  和  $19.93\%$ ; 15 年生和 20 年生沙棘铵态氮含量呈现坡上 > 坡下的规律,坡下平均降幅  $2.43\%$  和  $19.63\%$ 。

表 3 土层不同人工沙棘林土壤铵态氮

Table 3 Soil ammonium nitrogen of different vegetation restoration types

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

样地类型	坡位	春季	夏季	秋季	冬季	均值
5 年生沙棘	坡上	$4.74 \pm 1.36\text{Ba}$	$6.07 \pm 0.06\text{Ac}$	$3.09 \pm 0.27\text{Cc}$	$3.25 \pm 0.29\text{Ca}$	4.28
15 年生沙棘		$6.14 \pm 0.85\text{Ba}$	$8.21 \pm 0.03\text{Ab}$	$9.22 \pm 0.36\text{Ab}$	$2.80 \pm 0.08\text{Ca}$	6.59
20 年生沙棘		$7.32 \pm 0.78\text{Ba}$	$11.97 \pm 1.38\text{Aa}$	$13.20 \pm 0.85\text{Aa}$	$2.52 \pm 0.43\text{Ca}$	8.75
荒草地		$2.38 \pm 0.31\text{Cb}$	$3.55 \pm 0.32\text{Bd}$	$4.06 \pm 0.12\text{Ab}$	$0.90 \pm 0.37\text{Db}$	2.72
5 年生沙棘	坡下	$4.59 \pm 0.22\text{Bb}$	$4.84 \pm 0.03\text{Ba}$	$4.61 \pm 0.40\text{Bb}$	$6.13 \pm 0.4\text{Ab}$	5.04
15 年生沙棘		$5.45 \pm 0.72\text{Ba}$	$3.90 \pm 0.15\text{Cb}$	$8.17 \pm 0.40\text{Ab}$	$8.21 \pm 0.71\text{Aa}$	6.43
20 年生沙棘		$6.02 \pm 0.75\text{Ba}$	$3.14 \pm 0.05\text{Cc}$	$12.73 \pm 2.11\text{Aa}$	$6.24 \pm 0.42\text{Bb}$	7.03
荒草地		$3.80 \pm 0.36\text{Bc}$	$4.15 \pm 0.08\text{Ab}$	$4.44 \pm 0.14\text{Ab}$	$0.68 \pm 0.01\text{Cc}$	3.27

2.3 土壤 SON 变化特征

由表 4 可知,土壤 SON 含量的变化范围为 21.47~180.70 mg·kg<sup>-1</sup>。20 年生沙棘 SON 含量(87.36 mg·kg<sup>-1</sup>)和 15 年生沙棘 SON 含量(57.63 mg·kg<sup>-1</sup>)分别比 5 年生沙棘显著增加了 88.31%和 24.22%;5 年生沙棘 SON 含量(46.39 mg·kg<sup>-1</sup>)略低于荒草地(53.33 mg·kg<sup>-1</sup>),两者之间没有显著差异水平。

在整个采样期间,土壤 SON 含量随季节变化波动显著( $P<0.05$ )。对于坡上而言,所有样品均

表现为春季(95.77 mg·kg<sup>-1</sup>)最高,夏季(30.73 mg·kg<sup>-1</sup>)最低。对于坡下而言,同样表现为春季(114.87 mg·kg<sup>-1</sup>)最高,秋季(34.18 mg·kg<sup>-1</sup>)最低。各季节平均大小关系为:春冬季(84.46 mg·kg<sup>-1</sup>)>夏秋季(37.89 mg·kg<sup>-1</sup>)。

5 年生沙棘、15 年生沙棘和 20 年生沙棘 SON 含量随坡位变化呈现坡下>坡上的规律,坡下平均增幅分别为 37.42%、29.88%和 17.09%;草地 SON 含量呈现坡上>坡下的规律,坡下平均降幅 3.15%。

表 4 不同人工沙棘林土壤 SON

Table 4 Variation of SON in different vegetation restoration types							mg·kg <sup>-1</sup>
样地类型	坡位	春季	夏季	秋季	冬季	均值	
5 年生沙棘	坡上	69.60±3.28Ac	21.47±0.74Cc	24.64±0.34Cc	40.62±0.55Bc	39.08	
15 年生沙棘		85.10±1.92Ab	26.94±2.83Db	34.86±1.77Cc	53.65±0.86Bb	50.14	
20 年生沙棘		148.35±6.26Aa	47.31±2.19Ca	53.04±2.42Ca	73.22±1.80Ba	80.48	
荒草地		80.03±0.66Ac	27.20±1.07Dc	41.74±2.37Cb	67.78±0.05Ba	54.18	
5 年生沙棘	坡下	92.24±0.67Ac	43.37±1.48Bc	26.58±0.55Cc	52.63±2.88Bc	53.70	
15 年生沙棘		104.85±3.88Ab	56.92±0.86Bb	38.94±4.70Cb	59.76±6.09Bc	65.12	
20 年生沙棘		180.70±3.59Aa	63.21±1.10Ba	44.98±1.17Ca	88.06±3.60Ba	94.24	
荒草地		81.67±0.96Ad	28.87±0.76Bd	26.24±0.24Bc	73.12±0.16Ab	52.48	

2.4 土壤可溶性氮组分占可溶性总氮比例

由表 5 可知,土壤 SON 占 TSN 比例在 57.2%~95.9%,荒草地(86.0%)最高,恢复年限越长,SON/TSN 越低。沙棘林 SON 占 TSN 比例在 77.0%~83.3%。硝态氮占 TSN 的比例在 2.1%~25.4%,平均含量大小关系为:20 年生沙棘林(14.1%)>15 年生沙棘林(11.5%)>荒草地(7.7%)>5 年生沙棘林(6.7%)。铵态氮占 TSN 的比例在 0.9%~19.3%,15 年生沙棘林(10.5%)最高,其次为 5 年生沙棘林(10.0%),20 年生沙棘林(8.9%)和荒草地(6.4%)较低。可见,随着沙棘

林恢复年限的增加,SON 和铵态氮占 TSN 的比例在降低,而硝态氮占 TSN 的比例在增加。

SON 占 TSN 的比例随季节变化呈现出“V”形的趋势。最小比例为夏季(72.1%),最大比例为春季(89.1%),春冬季高于夏秋季。硝态氮占 TSN 的比例夏季(16.5%)最高,春季最低(6.5%),铵态氮占 TSN 的比例秋季(14.4%)最高,春季(4.4%)最低。除了夏季外,SON 占 TSN 的比例在其他季节均表现为坡上>坡下,硝态氮占 TSN 的比例在春秋表现为坡下>坡上,铵态氮占 TSN 的比例在秋冬季表现为坡下>坡上。

表 5 不同人工沙棘林土壤可溶性氮组分占可溶性总氮比例

Table 5 Variation of SON/TSN in different vegetation restoration types														%
样地类型	坡位	春季			夏季			秋季			冬季			
		SON	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	SON	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	SON	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	SON	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	
5 年生沙棘	坡上	89.3	4.6	6.1	68.4	12.3	19.3	82.5	7.1	10.3	89.7	3.1	7.2	
15 年生沙棘		89.3	4.3	6.4	57.2	25.4	17.4	70.9	10.4	18.7	86.6	8.9	4.5	
20 年生沙棘		88.6	7.0	4.4	60.5	24.2	15.3	69.5	13.3	17.3	82.4	14.8	2.8	
荒草地		93.1	4.1	2.8	74.7	15.5	9.8	87.1	4.5	8.5	96.7	2.1	1.3	
5 年生沙棘	坡下	89.0	6.6	4.4	87.2	3.1	9.7	76.5	10.3	13.2	83.9	6.3	9.8	
15 年生沙棘		83.1	12.6	4.3	81.8	12.6	5.6	73.8	10.7	15.5	82.0	6.8	11.3	
20 年生沙棘		91.2	5.7	3.0	74.4	21.9	3.7	66.1	15.2	18.7	83.2	11.0	5.9	
荒草地		89.0	6.9	4.1	72.6	17.0	10.4	78.7	8.0	13.3	95.9	3.2	0.9	

3 讨论

3.1 土壤可溶性无机氮组分动态变化

不同土壤可溶性氮组分含量差异显著,其中 20

年生沙棘、15 年生沙棘和 5 年生沙棘 0~30 cm 土壤硝态氮含量分别为荒草地的 3.42、2.00、0.87 倍,土壤铵态氮含量分别为荒草地的 2.64、2.17、1.56 倍。这是因为沙棘属于固氮树种<sup>[19]</sup>,增加土壤氮素



优于荒草地,随着退耕还林时间的推进,沙棘林凋落物数量增加,凋落物分解后,增加了土壤可溶性无机氮的来源<sup>[20]</sup>。

本研究表明,土壤矿质氮以硝态氮为主,其最大值出现在春夏季,冬季最低。随着春季气温上升,微生物活动增强,提高了土壤矿化能力,而此时植物的生长需求还不太大,从而导致土壤硝态氮的含量得到了积累<sup>[17]</sup>;夏季植物生长旺盛,土壤矿化作用较强,土壤硝态氮含量较高。土壤铵态氮最大值出现在夏秋季,冬季最低。造成土壤可溶性氮组分时空差异的原因,主要在于植被对土壤可溶性氮组分吸收存在季节性差异<sup>[21-22]</sup>。土壤不同坡位对土壤硝态氮的含量有显著影响( $P < 0.05$ ),坡下硝态氮含量高于坡上硝态氮含量,这与林雪青等<sup>[15]</sup>研究结果一致。坡位对土壤铵态氮的影响基本呈现坡上>坡下的规律。这与硝态氮和铵态氮在土壤中的迁移和吸附特性差异性有关<sup>[23]</sup>。

### 3.2 土壤可溶性有机氮动态变化

土壤可溶性有机氮是土壤活性氮库的主要成分,本研究表明,种植年限对土壤 SON 有显著影响,随着种植年限越长,土壤 SON 含量越高,且沙棘林土壤 SON 含量显著高于荒草地。可能是因为沙棘林产生大量的枯枝落叶以及具有很强的固氮作用,促进了土壤氮素增加。供试土壤 SON 占 TSN 比例达到 78%,这与 Lu 等<sup>[24]</sup>的研究结果相似。可见,当地土壤 SON 含量不容忽视。本研究表明,坡下土壤 SON 含量大于坡上,这与宋依璇等<sup>[25]</sup>研究结果一致,这反映了土壤 SON 在当地土壤条件下易于迁移,其在土壤中的吸附特性值得后续研究。

本研究发现,春季土壤 SON 含量较高,可能原因是春季气温回升,土壤微生物活动增强,促使土壤动植物残体分解,加之春季植物吸收利用氮素较少,增加土壤氮的可溶性<sup>[26]</sup>。土壤 SON 含量在秋季呈现增加趋势,与秋季大量的新近枯落物归还土壤有关<sup>[27]</sup>。夏季土壤可溶性有机氮呈现下降趋势,这与赵路红等<sup>[21]</sup>的研究结果相反,具体原因有待进一步研究。土壤可溶性有机氮与硝态氮含量动态变化趋势相反,此消彼长,丰富了土壤活性氮库,是对外界环境变化的一种响应<sup>[28]</sup>。

## 4 结论

黄土丘陵区沙棘林土壤硝态氮、铵态氮、SON 及 TSN 含量相比荒草地均显著提升,沙棘种植年限越长,土壤可溶性氮养分增加越明显。沙棘林土壤硝态氮、铵态氮和 SON 分别比荒草地增加 109.72%、112.27%和 19.62%。土壤可溶性氮组

分存在显著的季节性动态变化,土壤 SON 春夏季( $84.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较高,夏秋季( $37.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较低,硝态氮春夏季( $7.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较高,冬季( $6.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较低,铵态氮秋季( $6.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )较高,其他季节变化不明显。土壤 SON 季节变化规律与硝态氮变化规律相反。

土壤可溶性氮组分在坡位间的变化规律为坡下高于坡上,坡下的硝态氮、铵态氮和 SON 分别比坡上高 28.7%、3.89%和 20.3%。土壤可溶性氮组分以土壤 SON 为主,占土壤 TSN 的 57.2%~95.9%,平均为 81.1%,其次是土壤硝态氮,平均为 10.0%,土壤铵态氮所占比例最低,平均为 8.9%。在陕北黄土丘陵区,营造沙棘林可以有效提高土壤氮素,随着林龄增加,效果越明显。

### 参考文献:

- [1] 孙艺杰,任志远,郝梦雅,等.黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例[J].生态学报,2019,39(10):3443-3454.  
SUN Y J, REN Z Y, HAO M Y, *et al.* Spatial and temporal changes in the synergy and trade-off between ecosystem services and its influencing factors in Yan'an Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(10): 3443-3454. (in Chinese)
- [2] WANG Z Q. Preliminary discussion on ecological environment construction in the gullied rolling loess region in North Shaanxi [J]. *Soil Water Conservation*, 2000, 20(2): 26-28.
- [3] 候孟阳,姚顺波,邓元杰,等.格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景[J].自然资源学报,2019,34(3):539-552.  
HOU M Y, YAO S B, DENG Y J, *et al.* Spatial-temporal evolution pattern and differentiation of ecological service value in Yan'an city at the grid scale based on sloping land conversion program [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 539-552. (in Chinese)
- [4] 章宪,范跃新,罗茜,等.凋落物和根系处理对杉木人工林土壤氮素的影响[J].亚热带资源与环境学报,2014,9(2):39-44.  
ZHANG X, FAN Y X, LUO X, *et al.* Effects of litter and root treatments on soil nitrogen content of Chinese fir plantation [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2014, 9(2): 39-44. (in Chinese)
- [5] 吴晞,赵雨森,辛颖.大兴安岭火烧迹地植被恢复过程中土壤氮素特征[J].森林工程,2022,38(2):8-13,104.
- [6] 韩新辉,杨改河,佟小刚,等.黄土丘陵区几种退耕还林地土壤固存碳氮效应[J].农业环境科学学报,2012,31(6):1172-1179.  
HAN X H, YANG G H, TONG X G, *et al.* Soil carbon and nitrogen sequestration under several different forest lands converted by farmland in Loess Hilly Area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6): 1172-1179. (in Chinese)
- [7] KALBITZ K, SOLINGER S, PARK J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils—a review [J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [8] WANG L Y, ZHENG X L, TIAN F F, *et al.* Soluble organic

- nitrogen cycling in soils after application of chemical/organic amendments and groundwater pollution implications[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2018, 217(8): 43-51.
- [9] XING S H, ZHOU B Q, ZHANG L M, *et al.* Evaluating the mechanisms of the impacts of key factors on soil soluble organic nitrogen concentrations in subtropical mountain ecosystems [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 651(2): 2187-2196.
- [10] 谢怡凡, 姚顺波, 邓元杰, 等. 延安市退耕还林(草)工程对生境质量时空格局的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(4): 575-586.
- XIE Y F, YAO S B, DENG Y J, *et al.* Impact of the 'Grain for Green' project on the spatial and temporal pattern of habitat quality in Yan'an city, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 575-586. (in Chinese)
- [11] NIE S A, ZHAO L X, LEI X M, *et al.* Dissolved organic nitrogen distribution in differently fertilized paddy soil profiles: Implication for its potential loss[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 262: 58-64.
- [12] 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[J]. 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[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2163-2172. (in Chinese)
- [13] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30 a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 287-293.
- [14] DENG L, SHANGGUAN Z P. Afforestation drivers soil carbon and nitrogen changes in China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28: 151-165.
- [15] 林雪青, 李志, 向伟, 等. 黄土高原沟壑区不同坡位和植被下的土壤硝态氮特征研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2360-2367.
- LIN X Q, LI Z, XIANG W, *et al.* Characteristics of nitrate nitrogen under different slope positions and vegetation in the tableland-gully region of the Loess Plateau[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(6): 2360-2367. (in Chinese)
- [16] 王金成, 井明博, 周天林, 等. 黄土高原沟壑区人工沙棘林生长年限对土壤微生物组成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 253-260.
- WANG J C, JING M B, ZHOU T L, *et al.* Effects of different aged artificial seabuckthorn forests on soil microbial-composition in the gully region loess plateau, China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(2): 253-260. (in Chinese)
- [17] 白二磊. 黄土丘陵区沙棘林恢复过程中土壤可溶性有机氮含量变化及其吸附特性研究[D]. 延安: 延安大学, 2020.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-38.
- [19] 张明明, 张情, 樊梦颖, 等. 2 种立地条件下沙棘林地土壤中细菌多样性比较[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 32-39.
- ZAHNG M M, ZHANG Q, FAN M Y, *et al.* Comparison of bacterial diversity in forest soils of *Hippophae rhamnoides* growing in two different sites[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 32-39. (in Chinese)
- [20] 王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等. 黄土区 6 种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 7092-7100.
- WANG C Y, ZHOU J B, DONG Y J, *et al.* Effects of plant residues and nitrogen forms on microbial biomass and mineral nitrogen of soil in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 7092-7100. (in Chinese)
- [21] 赵路红, 李昌珍, 康迪, 等. 黄土丘陵区植被恢复对土壤可溶性氮组分的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3533-3542.
- ZHAO L H, LI C Z, KANG D, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil soluble nitrogen in the Loess Hilly Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): 3533-3542. (in Chinese)
- [22] 赵满兴, 白二磊, 刘慧, 等. 黄土丘陵区人工林土壤可溶性氮组分季节变化[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 258-263.
- ZHAO M X, BAI E L, LIU H, *et al.* Seasonal variation of soil soluble nitrogen fractions in plantation in Loess Hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 258-263. (in Chinese)
- [23] 赵路红, 李昌珍, 康迪, 等. 黄土丘陵区退耕地土壤可溶性氮组分季节变化与水热关系[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 689-697.
- ZHAO L H, LI C Z, KANG D, *et al.* Dynamic change in soil soluble nitrogen under farmland converted to forest in the Loess Hilly Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 689-697. (in Chinese)
- [24] LU S B, CHEN C R, ZHOU X Q, *et al.* Responses of soil dissolved organic matter to long-term plantations of three coniferous tree species[J]. Geoderma, 2012, 170(3): 136-143.
- [25] 宋依璇, 邓继峰, 李景浩, 等. 辽西北典型人工林地不同坡位土壤养分特征及与林木生长性状的关系[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3): 18-24.
- SONG Y X, DENG J F, LI J H, *et al.* Soil chemical properties and their relations with sand growth of typical afforestation tree species in Northwest Liaoning Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(3): 18-24. (in Chinese)
- [26] Kiikkilä O, Kitunen V, Smolander A. Chemical and biological characterization of dissolved organic matter derived from Norway spruce litter divided into fractions according to molecular size[J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 50(1): 109-111.
- [27] 段高辉, 赵鹏祥, 周远博, 等. 黄龙山林区油松人工林立地质量评价研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 161-166.
- [28] 寇萌, 焦菊英, 尹秋龙, 等. 黄土丘陵沟壑区主要草种枯落物的持水能力与养分潜在归还能力[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1337-1349.
- KOU M, JIAO J Y, YIN Q L, *et al.* Water holding capacity and potential nutrient return capacity of main herb species litter in the Hilly-Gully Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1337-1349. (in Chinese)