

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220418

陕北不同恢复年限中国沙棘人工林土壤 可溶性氮组分时空变化研究

赵满兴^{1,2*}, 马文全¹, 张霞¹, 马卓¹, 白二磊¹, 南国卫^{1,2}

(1. 延安大学生命科学学院, 陕西 延安 716000; 2. 陕西省红枣重点实验室, 陕西 延安 716000)

摘要: [目的] 探究陕北黄土丘陵区退耕还林后不同林龄中国沙棘林可溶性氮组分累积的季节变化和垂直分布规律, 为深入研究该区域不同恢复年限中国沙棘林的退耕效果评价和土壤氮库管理提供理论依据。[方法] 以志丹县金丁镇不同恢复年限 (5、15、20 a) 中国沙棘人工林为研究对象, 以荒草地为对照, 采集 0~10、10~20、20~30 cm 土壤样品, 分析土壤可溶性氮组分含量和比例的季节动态变化及土壤垂直分布的动态变化。[结果] 随着恢复年限的延长, 中国沙棘人工林均增加了土壤可溶性氮组分含量, 对于土壤硝态氮和可溶性有机氮 (SON) 而言, 20 a 与 5 a 中国沙棘人工林间差异显著, 荒草地与 5 a 中国沙棘林间无显著差异; 土壤铵态氮在不同恢复年限间差异不显著。不同恢复年限中国沙棘林土壤硝态氮和 SON 变化趋势一致, 均为 20 a 中国沙棘林 > 15 a 中国沙棘林 > 荒草地 > 5 a 中国沙棘林, 且均呈表聚现象。土壤铵态氮含量大小关系为 15 a 中国沙棘林 > 20 a 中国沙棘林 > 5 a 中国沙棘林 > 荒草地, 表层的铵态氮平均含量最低。土壤可溶性氮组分在不同土层间均差异不显著。土壤硝态氮表现为夏季最高, 冬季或秋季最低; 铵态氮表现为夏季或秋季最高, 冬季最低; SON 则为春冬季高于夏秋季。SON、硝态氮和铵态氮占可溶性总氮比例分别为 80.3%、10.2% 和 9.5%。不同年限中国沙棘林 SON 占可溶性总氮比例为春冬季高于夏秋季, 硝态氮和铵态氮大部分为夏秋季高于春冬季。[结论] 在陕北黄土丘陵区, 营造中国沙棘人工林可以有效提高土壤可溶性氮组分, 随着林龄增加, 土壤氮素累积效果越明显。

关键词: 中国沙棘林; 可溶性氮; 季节; 土壤

中图分类号: S793.6; S714

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2023)01-0146-08

土壤为植物生长提供必要的养分, 植物生长过程又改变了土壤理化性状^[1]。土壤中的可溶性氮素是土壤氮素中最活跃的组分, 其对生态系统的氮循环、生产力及可持续发展具有重要意义^[2]。硝态氮和铵态氮是植物氮素的主要来源, 是土壤的有效养分^[3]。可溶性氮素中的可溶性有机氮 (SON) 可以直接或间接转化为植物可吸收利用的养分^[4-5], 是土壤可溶性氮素的重要组分^[6-7]。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^[8-9], 人工林地的 SON 是土壤中不容忽视的氮素组成部分^[10]。

中国沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn. subsp. *sinensis* Rousi) 为胡颓子科沙棘属多年生落叶灌木或小乔木, 在黄土高原地区有着广泛的栽植^[11]。中国沙棘在改善土壤结构、增加土壤氮含量及有机质的含量方面具有极其重要的意义^[12]。关于中国沙棘的研究主要侧重于水文效应及水土保持功能^[13]、光合生理特性及环境适应性^[14]、碳通量变化特征^[15]、遗传分化研究^[16]及地形对中国沙棘人工

收稿日期: 2022-08-23 修回日期: 2022-10-18

基金项目: 国家自然科学基金 (41761068) 资助

* 通讯作者: 赵满兴, 博士, 教授, 主要从事土壤与植物营养研究。E-mail: zhaomanxing@163.com

林天然更新的影响^[17]等。张欣等^[18]研究发现, 人工大果沙棘林随着林龄的增加, 土壤改良效果越明显。DENG 等^[19]对黄土高原中南部地区的研究表明, 长期的自然植被恢复提高了土壤有机碳的积累且其积累有较大的差异。张恒宇等^[20]研究黄土高原典型植被不同密度条件下土壤水分、碳氮分布特征时指出, 土壤有机碳和全氮具有不同程度的表聚现象。王世军等^[21]研究表明, 土壤有机碳和全氮积累随植被恢复年限呈显著增加趋势。植被恢复可以显著提高土壤中全氮和可溶性氮组分含量, 但不同植被类型对土壤可溶性氮组分有较大影响^[22]。因此, 可以推测同一树种不同恢复年限对土壤可溶性氮组分有较大影响。可见, 研究不同恢复年限中国沙棘人工林土壤可溶性氮组分特征对了解恢复年限对土壤氮素供应机制具有重要意义^[23]。

中国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^[12]。目前, 当地不同恢复年限中国沙棘人工林对土壤可溶性氮组分特征的研究及其对土壤氮库组分和有效性机理的深入探究较缺乏^[24]。因此, 本文以志丹县金丁镇不同种植年限的中国沙棘林为研究对象, 研究不同恢复年限中国沙棘林可溶性氮组分季节变化及垂直分布规律, 以期

为深入研究该区域不同恢复年限中国沙棘林的退耕效果评价和土壤氮库管理提供理论依据。

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 ℃, 年平均降水量 450~490 mm, 年平均无霜期 140 d, 平均海拔 1 300 m。土壤类型为黄绵土, 土壤质地为沙壤土^[23]。

2 研究方法

2.1 土样采集与分析

2018 年 3、6、9、11 月在志丹县金丁镇退耕还林区分别采集供试土样。选择不同种植年限 (5、15、20 a) 的中国沙棘林地, 以荒草地为对照样地, 样地基本情况见表 1。每个样地分别设置 3 个 10 m × 10 m 的样方。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 0~10、10~20、20~30 cm 土层取样。采集的土壤样品经自然风干, 过 2 mm 直径筛, 捡去杂质, 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。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of samples

植被类型 Vegetation	平均胸径 DBH/cm	平均树高 Height/m	坡度 Slope/(°)
5 a 中国沙棘 <i>H.rhamnoides</i> L. subsp. <i>sinensis</i>	3.08	1.7	25
15 a 中国沙棘 <i>H.rhamnoides</i> L. subsp. <i>sinensis</i>	5.43	1.9	30
20 a 中国沙棘 <i>H.rhamnoides</i> L. subsp. <i>sinensis</i>	10.03	2.2	25
荒草地 Grassland	/	0.3	30

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》^[25]测定。

2.2 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 $\alpha=0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 土壤硝态氮变化特征

表 2 表明: 0~30 cm 土层硝态氮含量的变化

范围为 0.81~16.38 mg·kg⁻¹, 土壤硝态氮含量大小关系为: 20 a 中国沙棘林 (11.41 mg·kg⁻¹) > 15 a 中国沙棘林 (7.07 mg·kg⁻¹) > 荒草地 (3.93 mg·kg⁻¹) > 5 a 中国沙棘林 (2.70 mg·kg⁻¹)。中国沙棘林土壤硝态氮含量随恢复年限的增加总体呈显著增加趋势 ($p < 0.05$), 20 a 和 15 a 中国沙棘林土壤硝态氮含量分别是 5 a 中国沙棘林的 4.23 和 2.62 倍; 5 a 中国沙棘林和荒草地之间差异不显著 ($p > 0.05$)。

土壤硝态氮含量在不同土层间差异不显著 ($p > 0.05$), 0~10、10~20、20~30 cm 土层硝态氮平均含量分别为 7.55、5.81、5.48 mg·kg⁻¹。

表2 土壤硝态氮含量

Table 2 Soil nitrate nitrogen of different vegetation restoration types

mg·kg⁻¹

土层 Soil layer/cm	植被类型 Vegetation	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	平均 Mean	
0~10	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i> L. subsp. <i>sinensis</i>	5 a	6.21 ± 2.8 Ab	3.68 ± 2.2 ABc	4.18 ± 1.3 Ac	2.76 ± 0.9 Bb	4.21
		15 a	8.93 ± 4.3 Aab	10.37 ± 2.5 Aab	8.35 ± 2.4 Ab	6.45 ± 2.1 Aab	8.53
		20 a	13.48 ± 4.0 Aa	16.38 ± 5.7 Aa	13.31 ± 2.1 Aa	11.04 ± 4.6 Aa	13.55
	荒草地 Grassland		4.77 ± 2.4 ABb	6.59 ± 0.6 Abc	2.39 ± 0.5 BCc	1.87 ± 0.8 Cb	3.90
	平均 Mean		8.35	9.25	7.06	5.53	7.55
10~20	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i> L. subsp. <i>sinensis</i>	5 a	3.33 ± 1.0 Ab	1.57 ± 0.4 Ab	1.45 ± 0.8 Ac	2.25 ± 1.9 Ab	2.15
		15 a	11.43 ± 9.8 Aa	12.04 ± 5.9 Aa	3.66 ± 0.4 Bb	2.24 ± 1.3 Bb	7.34
		20 a	9.18 ± 4.0 Aa	14.00 ± 8.1 Aa	5.83 ± 0.6 Ba	10.34 ± 5.8 Aa	9.84
	荒草地 Grassland		5.61 ± 2.3 Aa	5.95 ± 0.6 Aab	2.22 ± 0.3 Bc	1.78 ± 0.4 Bb	3.89
	平均 Mean		7.39	8.39	3.29	4.15	5.81
20~30	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i> L. subsp. <i>sinensis</i>	5 a	2.46 ± 0.4 Ab	2.47 ± 2.6 Ab	1.18 ± 5.4 Bc	0.81 ± 0.2 Bb	1.73
		15 a	4.60 ± 1.8 ABb	5.59 ± 1.8 ABb	9.97 ± 6.3 Aa	1.16 ± 0.4 Bb	5.33
		20 a	14.54 ± 8.3 Aa	15.37 ± 2.6 Aa	9.99 ± 4.8 ABa	3.45 ± 0.9 Ba	10.84
	荒草地 Grassland		3.62 ± 1.2 ABb	5.06 ± 0.6 Ab	5.82 ± 2.8 Ab	1.51 ± 0.8 Bb	4.00
	平均 Mean		6.31	7.12	6.74	1.73	5.48

注：表中数据为平均值 ± 标准差，不同小写字母表示相同季节不同植被类型间差异显著 ($P < 0.05$)，不同大写字母表示同一植被类型不同季节间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Notes: The data in the table are mean ± standard deviation. Different lowercase letters mean significant difference between different vegetation in the same season ($P < 0.05$), and different uppercase letters mean significant difference between different seasons of the same vegetation ($P < 0.05$). The same below.

硝态氮具有表聚现象，所有土样的表现规律均一致。

0~10 cm 土层 15 a 和 20 a 及 10~20 cm 土层 5 a 中国沙棘林土壤硝态氮含量在季节间均差异不显著 ($p > 0.05$)。0~10 cm 土层硝态氮平均含量大小次序为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季；10~20 cm 土层硝态氮平均含量大小次序为夏季 > 春季 > 冬季 > 秋季；20~30 cm 土层硝态氮平均含量大小次序为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。荒草地土壤硝态氮含量在季节间存在差异，0~10 cm 和 10~20 cm 土层夏春季高于秋冬季，20~30 cm 土层夏秋季高于春冬季。

同一季节不同年限中国沙棘林间土壤硝态氮含量存在差异，表现为 20 a 中国沙棘林土壤硝态氮含量显著高于 15 a (0~10 cm 土层春、夏、冬季和 10~20 cm 土层春、夏季及 20~30 cm 土层秋季除外) 和 5 a 中国沙棘林。除 10~20 cm 土层 20 a 中国沙棘林与荒草地在春夏季差异不显著外，20 a 中国沙棘林土壤硝态氮含量与荒草地在其它季节和土层间均差异显著。

3.2 土壤铵态氮变化特征

表3表明：0~30 cm 土层铵态氮含量的变化

范围为 0.65~14.72 mg·kg⁻¹，土壤铵态氮含量大小关系为：15 a 中国沙棘林 (6.67 mg·kg⁻¹) > 20 a 中国沙棘林 (5.88 mg·kg⁻¹) > 5 a 中国沙棘林 (5.41 mg·kg⁻¹) > 荒草地 (3.26 mg·kg⁻¹)，中国沙棘林土壤铵态氮含量在不同恢复年限间显著不差异。15 a 和 20 a 中国沙棘林土壤铵态氮含量分别是 5 a 中国沙棘林的 1.23 和 1.09 倍；5 a 中国沙棘林是荒草地的 1.66 倍，中国沙棘林与荒草地间差异不显著 ($p > 0.05$)。

土壤铵态氮含量在不同土层间差异不显著 ($p > 0.05$)。0~10、10~20、20~30 cm 土层铵态氮平均含量分别为 4.98、5.85、5.09 mg·kg⁻¹。

从 4 种植被类型平均值看，0~10 cm 土层铵态氮含量大小次序为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季；10~20 cm、20~30 cm 土层铵态氮含量大小次序为秋季 > 春季 > 夏季 > 冬季。荒草地土壤铵态氮含量在春夏秋季节间差异不显著，但春夏秋季均与冬季差异显著。

同一季节不同年限中国沙棘林间土壤铵态氮含量大部分差异不显著 ($p > 0.05$)。0~10 cm 和 10~20 cm 土层，表现为 20 a 中国沙棘林高于 15

表 3 土壤铵态氮含量

Table 3 Soil ammonium nitrogen of different vegetation restoration types

土层 Soil layer/cm	植被类型 Vegetation	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	平均 Mean	
0~10	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5 a	4.72 ± 0.5 ABab	5.82 ± 1.0 Aa	2.12 ± 0.5 Cc	3.77 ± 1.0 Ba	4.11
	<i>L. subsp. sinensis</i>	15 a	5.47 ± 0.7 Aa	6.98 ± 4.1 Aa	4.75 ± 0.4 Ab	4.45 ± 1.7 Aa	5.41
		2 0 a	5.78 ± 0.8 Aa	7.73 ± 6.0 Aa	8.33 ± 2.2 Aa	4.88 ± 4.1 Aa	6.68
	荒草地 Grassland		3.18 ± 1.6 Ab	4.83 ± 1.6 Aa	5.23 ± 1.0 Ab	1.57 ± 1.4 Ba	3.70
	平均 Mean		4.79	6.34	5.11	3.67	4.98
10~20	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5 a	4.84 ± 0.3 Aa	4.19 ± 0.6 Aa	9.70 ± 7.2 Aab	4.71 ± 2.3 Aab	5.86
	<i>L. subsp. sinensis</i>	15 a	5.10 ± 1.8 Ba	4.59 ± 0.5 Ba	13.69 ± 2.2 Aa	6.48 ± 3.7 Ba	7.47
		20 a	6.47 ± 1.8 Ba	5.12 ± 3.6 Ba	14.72 ± 4.0 Aa	2.03 ± 0.8 Bb	7.09
	荒草地 Grassland		3.75 ± 1.6 Aa	3.68 ± 0.3 Aa	3.77 ± 0.3 Ab	0.65 ± 0.3 Bb	2.96
	平均 Mean		5.04	4.40	10.47	3.47	5.85
20~30	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5 a	5.72 ± 1.2 Ba	4.48 ± 0.5 BCa	11.79 ± 2.1 Aa	3.01 ± 0.3 Cab	6.25
	<i>L. subsp. sinensis</i>	15 a	5.89 ± 2.7 Ba	3.64 ± 0.6 Ba	12.77 ± 1.5 Aa	6.17 ± 4.1 Ba	7.12
		20 a	5.70 ± 0.7 Aa	4.30 ± 2.2 ABa	3.15 ± 0.4 ABb	2.36 ± 1.1 Bab	3.88
	荒草地 Grassland		2.41 ± 0.8 Bb	3.73 ± 0.3 ABa	4.65 ± 1.2 Ab	1.67 ± 1.2 Cb	3.12
	平均 Mean		4.93	4.04	8.09	3.31	5.09

a 中国沙棘林和 5 a 中国沙棘林 (10~20 cm 土层冬季除外); 20~30 cm 土层, 春夏秋冬 15 a 中国沙棘林土壤铵态氮含量最高, 夏季最低。

3.3 土壤可溶性有机氮 (SON) 变化特征

表 4 表明: 0~30 cm 土层 SON 含量的变化

范围为 10.61~175.37 mg·kg⁻¹, SON 含量大小关系为: 20 a 中国沙棘林 (84.49 mg·kg⁻¹) > 15 a 中国沙棘林 (56.07 mg·kg⁻¹) > 荒草地 (48.52 mg·kg⁻¹) > 5 a 中国沙棘林 (43.56 mg·kg⁻¹)。中国沙棘林土壤 SON 含量随恢复年限的增加而增

表 4 土壤可溶性有机氮含量

Table 4 Variation of SON in different vegetation restoration types

土层 Soil layer/cm	植被类型 Vegetation	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	平均 Mean	
0~10	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5 a	96.53 ± 14.8 Abc	41.11 ± 14.5 Bb	32.07 ± 8.3 Bb	44.97 ± 7.6 Bb	53.67
	<i>L. subsp. sinensis</i>	15 a	110.37 ± 11.7 Ab	53.76 ± 15.7 Bab	38.08 ± 9.4 Bab	50.07 ± 6.7 Bb	63.07
		2 0	175.37 ± 19.5 Aa	67.91 ± 7.2 Ba	51.29 ± 10.6 Ba	74.12 ± 13.2 Ba	92.17
	荒草地 Grassland		77.46 ± 6.4 Ac	38.57 ± 3.2 Bb	38.56 ± 9.1 Bab	69.92 ± 5.3 Aa	56.13
	平均 Mean		114.94	50.34	40.00	59.77	66.26
10~20	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5 a	77.17 ± 17.8 Ab	18.89 ± 10.7 Cb	22.02 ± 11.2 Cb	45.93 ± 5.1 Bc	41.00
	<i>L. subsp. sinensis</i>	15 a	88.44 ± 23.7 Ab	30.68 ± 14.3 Bab	37.93 ± 9.2 Bab	55.68 ± 10.2 Bbc	53.18
		20 a	161.43 ± 18.9 Aa	42.45 ± 8.7 Ca	43.47 ± 6.1 Ca	77.27 ± 9.6 Ba	81.15
	荒草地 Grassland		82.23 ± 4.0 Ab	25.17 ± 5.1 Cab	25.43 ± 7.9 Cb	69.88 ± 5.8 Bab	50.68
	平均 Mean		102.32	29.32	32.21	62.19	56.50
20~30	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5 a	51.32 ± 26.4 Ab	10.61 ± 5.1 Cb	36.57 ± 7.1 Ba	45.59 ± 3.0 ABb	36.02
	<i>L. subsp. sinensis</i>	15 a	78.87 ± 32.4 Ab	19.49 ± 8.3 Cab	41.61 ± 6.9 BCa	67.87 ± 14.1 ABb	51.96
		20 a	146.54 ± 22.9 Aa	31.19 ± 3.8 Ca	45.37 ± 9.0 Ca	97.55 ± 19.4 Ba	80.16
	荒草地 Grassland		43.57 ± 27.4 ABb	14.32 ± 4.7 Bb	26.77 ± 13.6 Ba	70.28 ± 9.1 Ab	38.74
	平均 Mean		80.08	18.90	37.58	70.32	51.72

加, 20 a 和 15 a 中国沙棘林土壤 SON 含量分别是 5 a 中国沙棘林的 1.94 和 1.29 倍。

土壤 SON 含量在不同土层间差异不显著 ($p > 0.05$), 0~10、10~20、20~30 cm 土层 SON 平均含量分别为 66.26、56.50、51.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。SON 具有表聚现象, 所有土样的表现规律均一致。

0~10、10~20 cm 土层, 不同年限中国沙棘林土壤 SON 含量在春季显著高于其它季节; 20~30 cm 土层, 春冬季高于夏秋季。0~10 cm 土层, 5、20 a 中国沙棘林土壤 SON 大小次序均为

春 > 冬 > 夏 > 秋, 15 a 中国沙棘林土壤 SON 大小次序为春 > 夏 > 冬 > 秋; 10~20、20~30 cm 土层, 中国沙棘林土壤 SON 大小次序均为春 > 冬 > 秋 > 夏。0~10、10~20 cm 土层, 荒草地土壤 SON 含量表现为春冬季显著高于夏秋季。

3.4 土壤可溶性氮组分占可溶性总氮比例

表 5 表明: 0~30 cm 土层, 土壤 SON、硝态氮和铵态氮占可溶性总氮比例的变化范围分别为 60.4%~96.6%、1.5%~30.2% 和 0.9%~29.3%, 其平均值分别为 80.3%、10.2% 和 9.5%。

表 5 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

土层 Soil layer/cm	植被类型 Vegetation	春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn			冬季 Winter			
		SON	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	SON	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	SON	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	SON	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	
0~10	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5 a	89.8	5.8	4.4	81.2	7.3	11.5	83.6	10.9	5.5	87.3	5.4	7.3
	<i>H. rhamnoides</i>	15 a	88.5	7.2	4.4	75.6	14.6	9.8	74.4	16.3	9.3	82.1	10.6	7.3
	<i>L. subsp. sinensis</i>	20 a	90.1	6.9	3.0	73.8	17.8	8.4	70.3	18.3	11.4	82.3	12.3	5.4
	荒草地 Grassland		90.7	5.6	3.7	77.2	13.2	9.7	83.5	5.2	11.3	95.3	2.6	2.1
	平均 Mean		89.8	6.4	3.9	76.9	13.2	9.8	78.0	12.7	9.4	86.8	7.7	5.5
10~20	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5 a	90.4	3.9	5.7	75.4	6.3	18.3	66.4	4.4	29.3	86.8	4.3	8.9
	<i>H. rhamnoides</i>	15 a	84.3	10.9	4.9	65.4	25.7	8.9	68.6	6.6	24.8	86.5	3.5	10.1
	<i>L. subsp. sinensis</i>	20 a	91.2	5.2	3.7	68.9	22.7	8.3	67.9	9.1	23.0	86.2	11.5	2.3
	荒草地 Grassland		89.8	6.1	4.1	72.3	17.1	10.6	81.0	7.1	12.0	96.6	2.5	0.9
	平均 Mean		88.9	6.5	4.6	70.5	17.9	11.5	71.0	6.8	22.2	89.0	5.4	5.5
20~30	中国沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	5 a	86.2	4.1	9.6	60.4	14.1	25.5	62.5	17.4	20.1	92.3	1.6	6.1
	<i>H. rhamnoides</i>	15 a	88.3	5.2	6.6	67.9	19.5	12.7	64.7	15.5	19.8	90.3	1.5	8.2
	<i>L. subsp. sinensis</i>	20 a	87.9	8.7	3.4	61.3	30.2	8.5	77.5	17.1	5.4	94.4	3.3	2.3
	荒草地 Grassland		87.8	7.3	4.9	61.9	21.9	16.2	71.9	15.6	12.5	95.7	2.1	2.3
	平均 Mean		87.5	6.3	6.1	62.9	21.4	15.7	69.1	16.4	14.5	93.1	2.1	4.7

土壤 SON 占可溶性总氮比例大小关系为: 荒草地 (83.6%) > 5 a 中国沙棘林 (80.2%) > 20 a 中国沙棘林 (79.3%) > 15 a 中国沙棘林 (78.1%); 土壤硝态氮占可溶性总氮比例大小关系为: 20 a 中国沙棘林 (13.6%) > 15 a 中国沙棘林 (11.4%) > 荒草地 (8.9%) > 5 a 中国沙棘林 (7.1%); 土壤铵态氮占可溶性总氮比例大小关系为: 5 a 中国沙棘林 (12.7%) > 15 a 中国沙棘林 (10.6%) > 荒草地 (7.5%) > 20 a 中国沙棘林 (7.1%)。

不同土层间土壤 SON 占可溶性总氮比例关系为: 0~10 cm > 10~20 cm > 20~30 cm; 土壤硝态氮占可溶性总氮比例大小关系为: 20~30 cm > 0~10 cm > 10~20 cm; 土壤铵态氮占可溶性总氮比例大小关系为: 10~20 cm > 20~30 cm > 0~10 cm。

0~10、10~20、20~30 cm 土层, 不同年限中国沙棘林土壤 SON 占可溶性总氮比例均为春冬季高于夏秋季; 土壤硝态氮占可溶性总氮比例为夏秋季高于春冬季 (10~20 cm 土层 15 a 和 20 a 中

国沙棘林除外), 土壤铵态氮占可溶性总氮比例为夏秋季高于春冬季(0~10 cm 土层 5 a 中国沙棘林及 10~20 cm 土层中国沙棘林除外)。

3.5 土壤可溶性氮组分与恢复年限的关系分析

通过土壤可溶性氮素组分与恢复年限间的关系分析可知: 土壤硝态氮和铵态氮之间差异不显著($p>0.05$), 而硝态氮和铵态氮均与 SON 呈显著差异($p<0.05$)。土壤硝态氮平均值在不同种植年限间差异显著($p<0.05$), 土壤铵态氮在不同种植年限间差异不显著($p>0.05$)。15 a 中国沙棘林土壤 SON 与 5、20 a 中国沙棘林均显著不差异, 20 a 中国沙棘林土壤 SON 与 5 a 中国沙棘林间差异显著; 可溶性氮组分在土层间差异不显著($p>0.05$)。

4 讨论

本研究表明, 中国沙棘林恢复年限影响土壤可溶性氮组分含量和垂直分布状况, 中国沙棘林恢复年限越长, 土壤氮组分含量提高越明显。5 a 中国沙棘林和荒草地土壤可溶性氮组分含量无显著差异, 可能是随着植被恢复, 改变了土壤微环境条件, 植物生长需要的光照、水分等发生了改变, 影响了养分转化^[26]。本研究中, 20 a 中国沙棘林土壤硝态氮和 SON 含量高于 15 a 和 5 a 中国沙棘林, 15 a 中国沙棘林土壤铵态氮含量高于 20 a 和 5 a 中国沙棘林。植被恢复导致土壤表层枯枝落叶增加, 增加了土壤有机质来源, 影响了不同恢复年限土壤可溶性氮组分含量, 不同年限间的差异与凋落物组成和分解速率的差异有关^[27]。本研究表明, 固氮能力较强的中国沙棘林在增加土壤氮素可利用性方面优于荒草地, 这与大多数研究结果一致^[21, 28-29]。这是因为土壤表层水热通气状况较好, 表层凋落物分解快, 微生物活性强, 促进了土壤养分的积累, 随着土层加深, 微生物活性逐渐下降, 养分含量也逐渐下降^[30]。土壤硝态氮和 SON 含量随土层加深而降低, 这与高培鑫等^[31]研究结果较一致, 10~20 cm 土层土壤铵态氮含量高于 0~10、20~30 cm 土层土壤铵态氮含量, 具体原因有待进一步分析。

土壤可溶性氮组分之间比较, SON 含量最高, 其次是硝态氮, 铵态氮含量较低; SON 占可溶性总氮的比例达 80% 以上, 这与相关研究 SON 占可溶性总氮含量的 5.1%~96% 的结果一

致^[32]; 硝态氮占可溶性总氮的比例高于铵态氮, 主要是因为植被对土壤可溶性氮组分吸收存在差异^[23]。在本研究中, 不同可溶性氮组分平均含量间季节变化不完全相同, 土壤硝态氮平均含量表现为夏季最高, 冬季或秋季最低; 铵态氮平均含量表现为夏季或秋季最高, 冬季最低; SON 平均含量为春冬季高于夏秋季。春季气温回暖, 降雨量的增加使土壤氮素的矿化作用加强, 而植物又处于非生长期, 从而土壤硝态氮的含量得到积累; 夏季尽管植物生长对氮素需求增加, 但夏季土壤矿化作用较强, 因此, 夏季土壤硝态氮也维持较高水平^[33-34]。

5 结论

随着种植年限的增加, 中国沙棘林均增加了土壤可溶性氮组分, 不同年限中国沙棘林土壤硝态氮和 SON 变化趋势一致, 均为 20 a 中国沙棘林 > 15 a 中国沙棘林 > 荒草地 > 5 a 中国沙棘林, 且均呈表聚现象; 不同恢复年限土壤铵态氮含量大小关系为 15 a 中国沙棘林 > 20 a 中国沙棘林 > 5 a 中国沙棘林 > 荒草地, 且表层含量最低。土壤硝态氮表现为夏季最高, 冬季或秋季最低; 铵态氮表现为夏季或秋季最高, 冬季最低; SON 则为春冬季高于夏秋季。SON、硝态氮和铵态氮占可溶性总氮比例分别为 80.3%、10.2% 和 9.5%。不同年限中国沙棘林土壤 SON 占可溶性总氮比例均为春冬季高于夏秋季, 土壤硝态氮占可溶性总氮比例为夏秋季高于春冬季(10~20 cm 土层 15 a 和 20 a 中国沙棘林除外), 土壤铵态氮占可溶性总氮比例为夏秋季高于春冬季(0~10 cm 土层 5 a 中国沙棘林及 10~20 cm 土层中国沙棘林除外)。在陕北黄土丘陵区, 营造中国沙棘人工林可以有效提高土壤可溶性氮组分, 随着林龄增加, 土壤氮素累积效果越明显。

参考文献:

- [1] 张兆彤, 王金满, 张佳瑞. 矿区复垦土壤与植被交互影响的研究进展[J]. 土壤, 2018, 50(2): 239-247.
- [2] 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.
- [3] YANG K, ZHU J J, YAN Q L, et al. Soil enzyme activities as potential indicators of soluble organic nitrogen pools in forest ecosystems of Northeast China[J]. Annals of Forest Science, 2012, 69(7): 795-803.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [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.
- [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] 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.
- [9] 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(1): 58-64.
- [10] 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.
- [11] 郭学斌. 陕西省中国沙棘天然种群优树表型变异研究[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(4): 111-119.
- [12] 张明明. 陕西沙棘林地土壤和根瘤的细菌多样性及与土壤养分的关系[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [13] 韩恩贤, 韩 刚, 薄颖生. 黄土高原沟壑区油松侧柏与沙棘混交的人工林的水文影响[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(6): 761-766.
- [14] 吴 旭, 唐亚坤, 陈 晨, 等. 黄土丘陵区沙棘、油松和刺槐光合生理特性及其环境适应性[J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 8111-8125.
- [15] 贾 畅. 黄土丘陵区沙棘人工林生态系统碳通量的观测与模拟[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [16] 王天翼, 徐 悦, 王罗云, 等. 中国沙棘和云南沙棘的遗传分化及遗传多样性[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(4): 13-21.
- [17] 张怡吟, 朱清科, 任正龔, 等. 地形对陕北黄土高原衰退沙棘人工林天然更新的影响[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 300-306.
- [18] 张 欣, 赵雨森, 辛 颖, 等. 大果沙棘人工林土壤改良效益时空变异研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 162-166.
- [19] DENG L, WANG K B, ZHU G Y, *et al.* Changes of soil carbon in five land use stages following 10 years of vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018, 171(1): 185-192.
- [20] 张恒宇, 孙树臣, 吴元芝, 等. 黄土高原不同植被密度条件下土壤水、碳、氮分布特征[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(5): 875-884.
- [21] 王世军, 杨 磊, 段兴武, 等. 黄土高原小流域植被恢复的土壤水分和养分权衡效应研究[J]. *土壤通报*, 2022, 53(2): 356-365.
- [22] 袁星明, 朱宁华, 郭 耆, 等. 南亚热带不同人工林对土壤理化性质的影响及土壤质量评价[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(3): 112-122.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 李 华, 蔡建军, 巫翠华, 等. 紫柏山国家级自然保护区不同植被类型土壤碳氮分布特征及其影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(3): 485-493.
- [27] 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等. 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化[J]. *生态学报*, 2013, 33(22): 7181-7189.
- [28] 苗恒录, 张瑞强, 王 健, 等. 沙棘的水土保持作用机制与效益[J]. *中国水土保持*, 2020, 459(6): 34-36.
- [29] 周文洁, 魏天兴, 刘广全, 等. 陕北典型退耕地沙棘群落与土壤因子的耦合关系[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(2): 1-9.
- [30] 杜佳囡, 李 广, 马维伟, 等. 黄土丘陵区4种典型植被土壤可溶性氮组分特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 251-257.
- [31] 高培鑫, 聂立水, 吴记贵, 等. 北京松山自然保护区天然油松林土壤养分与坡位关系的研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(10): 68-72.
- [32] 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.
- [33] 孙双红, 陈立新, 李少博, 等. 阔叶红松林不同演替阶段土壤酶活性与养分特征及其相关性[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(2): 20-28.
- [34] 舒媛媛, 黄俊胜, 赵高卷, 等. 青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(2): 394-402.

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

ZHAO Man-xing^{1,2}, MA Wen-quan¹, ZHANG Xia¹, MA Zhuo¹, BAI Er-lei¹, NAN Guo-wei^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Chinese Jujube, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] To investigate the spatial distribution characteristics of soil soluble nitrogen component in *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi plantation with different stand ages in loess hilly region. [Methods] Based on the *Hippophae rhamnoides* plantation with three different stand ages of 5-year-old, 15-year-old and 20-year-old were selected in Jinding Town of Zhidan County, soil samples were collected in 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm soil layers, and seasonal dynamic variation of the proportion of soil soluble nitrogen component were analyzed. The grassland was treated as control. [Results] With the extension of the recovery years, the content of soil soluble nitrogen components in the *Hippophae rhamnoides* plantations increased. For soil nitrate nitrogen and soluble organic nitrogen (SON), there were significant differences between *Hippophae rhamnoides* plantations in 20 years and 5 years, while there was no significant difference between grassland and *Hippophae rhamnoides* forests in 5 years. There was no significant difference in soil ammonium nitrogen among different restoration years. The soil nitrate nitrogen and SON showed the same trend, with 20-year-old>15-year-old> grassland>5-year-old. For the ammonium nitrogen, soluble organic nitrogen in forests with 15-year-old was the largest, followed by 20-year-old, 5-year-old, and grassland, and the average content of ammonium nitrogen in the surface layer was the lowest. There was no significant difference in soil soluble nitrogen components among different soil layers. Soil nitrate nitrogen was the highest in summer and the lowest in winter or autumn. Ammonium nitrogen was the highest in summer or autumn, and the lowest in winter. SON was higher in spring and winter than in summer and autumn. The proportion of SON, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in total soluble nitrogen was 80.3%, 10.2% and 9.5% respectively. The proportion of SON in total soluble nitrogen of *Hippophae rhamnoides* forests with different years was higher in spring and winter than in summer and autumn, and most of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were higher in summer and autumn than in spring and winter. [Conclusion] In the loess hilly area of northern Shaanxi, *Hippophae rhamnoides* plantations can effectively improve soil soluble nitrogen components. With the increase of forest age, the soil nitrogen accumulation increases.

Keywords: *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi plantation; Soluble nitrogen; Seasonal; Soil

(责任编辑: 徐玉秀)