

doi: 10.12118/j.issn.1000-6060.2018.06.16

黄土丘陵沟壑区不同退耕年限刺槐林地 土壤氮素动态特征^①

邓娜¹, 王红雷¹, 胡澍¹, 吴多洋¹, 寇萌², 焦菊英^{1,2}

(1) 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

(2) 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 土壤无机氮的可利用性是影响植物生长发育和植被演替进程的关键因子之一, 尤其在生态系统十分脆弱的黄土丘陵沟壑区更为重要。因此, 采用时空代换法, 通过选取不同退耕年限(10 a、20 a、30 a、40 a)的刺槐林地及相邻对照草地为研究对象, 系统研究刺槐林在生长季(4~9月)土壤无机氮净转化速率的变化情况。结果表明: (1) 刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均含量约是对照草地的4.57倍, 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在两个样地之间没有显著差异。(2) 刺槐林地及对照草地土壤在7~8月以硝化作用为主, 在4~5月和8~9月以氨化过程为主, 且刺槐林地氮素净转化速率大于对对照样地。(3) 刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在前30 a处于积累状态, 随后呈现消耗趋势。总而言之, 退耕地刺槐林营造可以减少土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失, 提高 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率, 但刺槐林 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积状态在30 a后变为消耗状态。所以要采取应对30 a以上林龄的刺槐林采取间伐措施, 以促进刺槐林的健康发展。

关键词: 植被恢复; 刺槐; 无机氮; 净转化速率

中图分类号: S153 文献标识码: A 文章编号: 1000-6060(2018)06-1285-10(1285~1294)

氮素是植被恢复过程中关键的生态因子之一^[1], 在土壤中主要以有机氮形式存在, 但植物能够吸收利用的氮素以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等无机氮为主^[2]。土壤矿化、硝化过程为植物提供可直接利用的无机氮养分^[3], 对植物生长发育和植被演替进程有重要影响^[4]。黄土丘陵沟壑区由于人为破坏导致大面积水土流失, 已严重地威胁到当地人民的生命安全^[5]。1999年“退耕还林还草”工程的实施以来, 该地区脆弱的生态系统得到一定程度的恢复^[6]。而刺槐(*Robinia pseudoacacia*)因其自主固氮、生长速度快和耐旱等特点成为黄土丘陵沟壑区主要退耕还林树种之一, 仅在陕西省境内营造的刺槐林地面积已达70 000 hm^2 ^[7]。刺槐在生长过程中通过根系固土^[8]、增加土壤养分含量^[9]、改善土壤结构^[10]等有效地减少了水土流失^[11], 对改善区域

生态环境发挥了重要作用^[12]。因此, 认识黄土丘陵沟壑区刺槐林地土壤氮素转化过程及其影响因素, 可为刺槐林地土壤氮素养分恢复保育及可持续维持提供科学依据。

土壤氮素矿化和硝化过程由土壤微生物驱动进行^[13], 受到土壤理化性质^[14]和植被类型^[15]等因素的制约。研究表明: 水分和温度通过改变土壤微生物活性直接影响土壤氮素矿化和硝化速率^[16], 且土壤有机碳含量和C/N也会通过影响土壤微生物能力供给而间接影响无机氮转化速率^[17]。同时, 土壤养分特征^[18]和土壤生物学特征^[19]随植被类型变化也存在显著差异, 因而土壤氮素矿化和硝化过程是生态系统各组分交互作用的结果^[20]。而现阶段对不同年限刺槐林地的研究主要集中在改善土壤理化性质^[9]等方面, 在养分方面注重于全氮^[21]的研究,

① 收稿日期: 2018-07-21; 修订日期: 2018-10-15

基金项目: 陕西省自然科学基金(2017JQ4022)

作者简介: 邓娜(1993-), 女, 陕西渭南人, 研究生, 研究方向为土壤氮素循环。E-mail: ndeng2016@163.com

通讯作者: 王红雷, 助理研究员, 研究方向为植被恢复与土壤微生物生态。E-mail: wanghonglei@nwsuaf.edu.cn

焦菊英, 研究员, 博士生导师, 研究方向为流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价。
E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

有关不同退耕年限刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率及其生长季动态变化的研究相对缺乏。

本文以陕西省延安市安塞区纸坊沟流域不同退耕年限(10 a、20 a、30 a、40 a)人工刺槐林地研究对象,以相邻自然恢复草地为对照,通过测定人工刺槐林地和对照草地生长季内土壤无机氮含量,分析不同退耕年限刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的净转化速率及其在生长季(4~9月)的变化规律,旨在揭示不同退耕年限刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 供应能力,为人工刺槐林土壤氮素养分平衡管理策略的制定提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区,属于典型黄土丘陵沟壑区,以梁峁坡为主要地形。最低海拔 997 m,最高海拔 1 731 m。该地区主要受暖温带半干旱大陆性气候影响,年均气温 8.8°C ,年降雨量 540 mm 左右,主要集中在 6~9 月,占全年总降雨量的 72.9%^[22]。土壤主要为黄绵土粉砂质,土质疏松,抗冲抗蚀性差,水土流失严重^[23]。研究区属于森林草原带,植被类型主要分为人工林和自然恢复植被两种,人工林主要包括刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*);自然恢复植物有狼牙刺(*Sophora davidii*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和兴安胡枝子(*Lespedeza daurica*)等^[22]。

1.2 样品采集及处理

采用时空代换法,选取坡度、坡向相似的不同退耕年限(10 a、20 a、30 a、40 a)刺槐林地及相邻对照自然恢复草地(样地信息见表 1,2017 年 7 月植被调查),每个样地设 3 个重复。于 2016 年 4 月下旬、5 月下旬、7 月中旬、8 月下旬和 9 月下旬在每一个样地中随机选取 6 个点,通过土钻采集表层(0~20 cm)土壤,混合后代表该样地的土壤样品,装入自封袋带回实验室,用于养分测定,总计 120 个土壤样品。

新鲜土样带回实验室在室内风干后过 1 mm 和 0.25 mm 筛,用于测定有机碳、全氮、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Site descriptions and dominant floral species in the sample sites

样地	年限 / 年	坡度 / °	乔木郁闭度 / %	草本盖度 / %	林下主要物种
刺槐	10	30~38	37~52	30~55	狗尾草、猪毛菜、小花鬼针草
	20	25~31	33~53	30~60	铁杆蒿、长芒草
	30	26~31	57~73	50~80	长芒草、青杞、臭草
	40	20~39	40~48	35~50	长芒草、艾蒿、铁杆蒿
对照草地	10	25~40	~	30~45	铁杆蒿、长芒草、糙隐子草
	20	27~46	~	35~50	铁杆蒿、中华隐子草、兴安胡枝子
	30	20~30	~	50~65	铁杆蒿、长芒草、兴安胡枝子
	40	26~41	~	65~73	铁杆蒿、兴安胡枝子

注:林下主要物种:狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、小花鬼针草(*Bidens parviflora*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、青杞(*Solanum septemlobum*)、臭草(*Melica scabrosa*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、中华隐子草(*Cleistogenes chinensis*)、兴安胡枝子(*Lespedeza daurica*)

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。有机碳通过重铬酸钾容量法测定(GB 9834~1988);全氮通过凯氏法测定(GB 7173~1987); $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用风干土样用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提,流动分析仪测定(AA3 全自动流动分析仪,德国)。

1.3 数据分析

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率和无机氮净转化速率的计算方法^[24]如下:

$$V_N = (\text{NO}_3^- - N_{i+1} - \text{NO}_3^- - N_i) / D \quad (1)$$

$$V_A = (\text{NH}_4^+ - N_{i+1} - \text{NH}_4^+ - N_i) / D \quad (2)$$

式中: V_N 指 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), $\text{NO}_3^- - N_{i+1}$ 表示较大月份的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), $\text{NO}_3^- - N_i$ 表示较小月份的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), D 为较大月份和较小月份的间隔天数; V_A 指 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),其它同 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

1.4 数据处理

采用 SPSS 21.0 和 Origin 2016 对数据进行统计分析和制图。以不同退耕年限为处理因子对刺槐林地和对照草地土壤有机碳、全氮、C/N、pH 和容重进行方差分析,探讨退耕年限对土壤理化指标的影响(表 2)。并以不同退耕年限和不同月份作为处理因

表 2 样地理化性质

Tab. 2 Physical and chemical properties in the sample sites

样地	年限 / a	有机碳 / $g \cdot kg^{-1}$	全氮 / $g \cdot kg^{-1}$	C / N	pH	容重 / $g \cdot cm^{-3}$
刺槐	10	5.94 ± 0.01d	0.56 ± 0.05b	10.71 ± 0.92b	8.49 ± 0.08a	1.07 ± 0.01b
	20	8.24 ± 0.06b	0.71 ± 0.02a	11.60 ± 0.37b	8.47 ± 0.02a	1.05 ± 0.05b
	30	9.06 ± 0.20a	0.59 ± 0.02ab	15.42 ± 0.12a	8.28 ± 0.04b	1.20 ± 0.01a
	40	7.35 ± 0.17c	0.61 ± 0.09ab	12.19 ± 1.49b	8.41 ± 0.06ab	1.15 ± 0.01a
对照草地	10	3.77 ± 0.12b	0.32 ± 0.03a	11.71 ± 0.58a	8.48 ± 0.11a	1.16 ± 0.01b
	20	3.23 ± 0.21c	0.30 ± 0.01a	10.70 ± 0.16a	8.57 ± 0.13a	1.25 ± 0.01a
	30	3.50 ± 0.02bc	0.35 ± 0.14a	9.81 ± 3.64a	8.57 ± 0.01a	1.19 ± 0.04b
	40	5.46 ± 0.02a	0.55 ± 0.15a	10.25 ± 2.86a	8.38 ± 0.01a	1.09 ± 0.02c

注: 表中的数据为均值 ± 标准差, 字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 字母相同表示差异不显著 ($P < 0.05$)

子分别对刺槐林地和对照草地土壤无机氮含量和净转化速率进行方差分析, 研究退耕年限和月份变化对土壤无机氮含量及净转化速率的影响。处理间的多重分析采用 LSD 法 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤无机氮含量随退耕年限和月份的变化

研究发现刺槐林地土壤 $NO_3^- - N$ 含量明显大于对照草地, 而 $NH_4^+ - N$ 在不同样地之间没有显著差异(图 1、图 2)。其中, 随林龄增加, 刺槐林地土壤 $NO_3^- - N$ 含量呈现先增加后减少趋势, 随月份变化具体表现为在 10 a 和 20 a 样地先增加后降低而在 30 a 和 40 a 样地先降低后增加, 平均值为 $9.82 mg \cdot kg^{-1}$, 在 20 a 样地于 7 月达到最大值 ($15 mg \cdot kg^{-1}$), 对照草地土壤 $NO_3^- - N$ 含量随退耕年限增加呈现先降低后增加趋势, 随月份变化呈现先增加后降低趋势, 平均值为 $2.15 mg \cdot kg^{-1}$, 于 7 月在 40 a 样地出现最大值 ($8.45 mg \cdot kg^{-1}$); 而退耕年限对刺槐林地和对照草地 $NH_4^+ - N$ 含量没有明显的

影响, 平均值分别为 6.63 和 $6.80 mg \cdot kg^{-1}$, 均在 10 a 样地于 5 月出现最大值, 分别为 12.34 、 $11.13 mg \cdot kg^{-1}$ 。同时, 退耕年限、月份变化及退耕年限和月份变化的交互作用对土壤 $NO_3^- - N$ 含量、 $NH_4^+ - N$ 含量都有极显著影响 ($P < 0.01$) (表 3)。

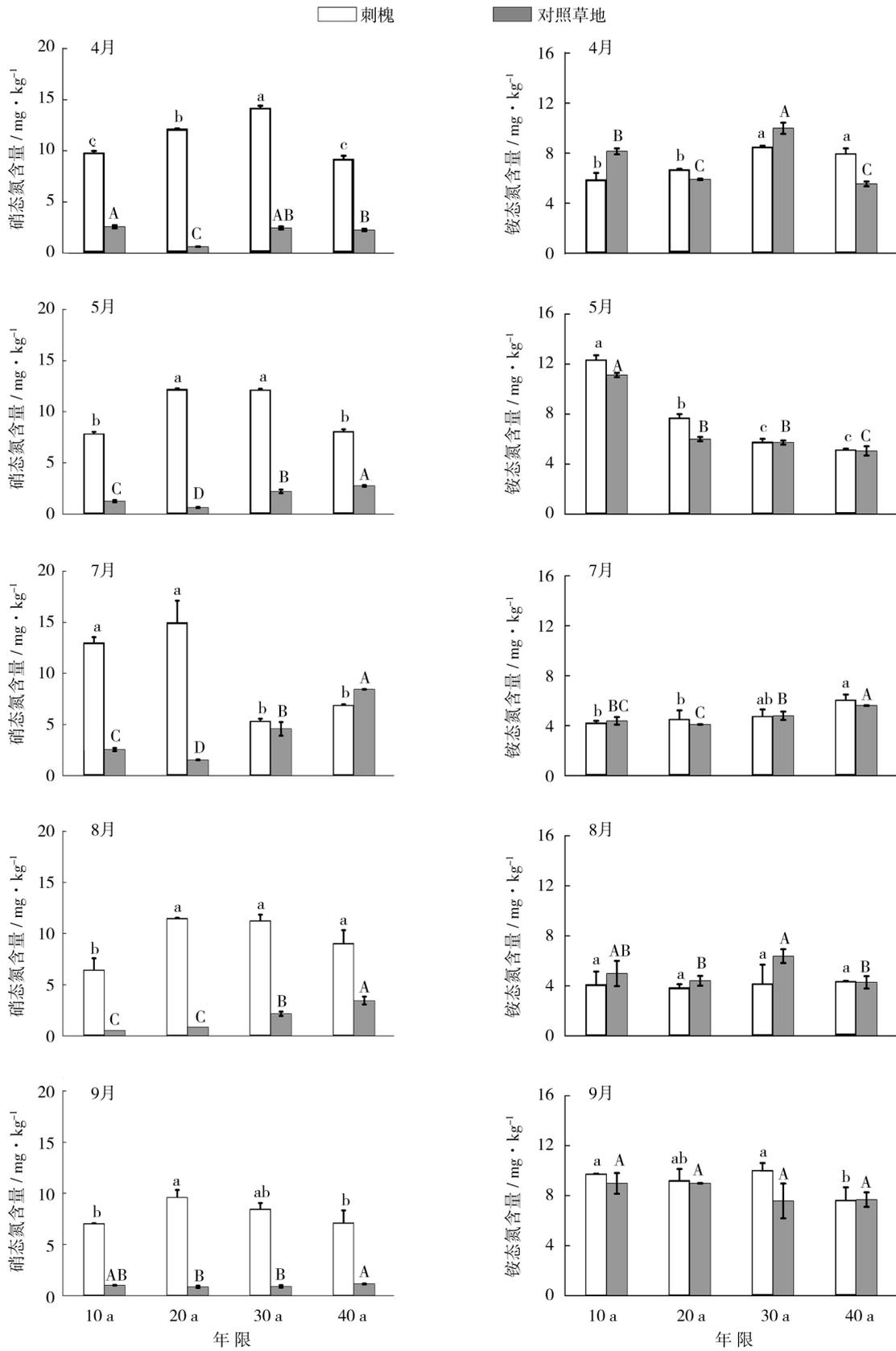
2.2 土壤无机氮净转化速率随退耕年限和月份的变化

随退耕年限和月份变化, 刺槐林地和对照草地土壤无机氮净转化速率有相似的变化规律, 且刺槐林地土壤无机氮净转化速率大于对照草地(图 3、图 4)。其中, 刺槐林地土壤 $NO_3^- - N$ 净转化速率的平均值为 $-0.029 mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$, $NO_3^- - N$ 消耗最大净转化速率于 7~8 月出现在 10 a 样地 ($-0.204 mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$), 最大累积净转化速率于 7~8 月在 30 a 样地 ($0.180 mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$); 对照草地土壤 $NO_3^- - N$ 净转化速率平均值为 $-0.019 mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$, 最大净转化速率均出现在 40 a 样地, 分别为 -0.133 (7~8 月) 和 0.216 (5~7 月) $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ 。而土壤铵态氮净转化速率在刺槐林地

表 3 刺槐林地和对照草地方差分析结果

Tab. 3 ANOVA results for *Robinia pseudoacacia* and grassland

指标		刺槐			对照草地		
		年限	月份	年限 × 月份	年限	月份	年限 × 月份
$NO_3^- - N$	F	58.85	20.73	22.81	347.83	318.72	76.48
	P	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
$NH_4^+ - N$	F	5.46	92.76	17.21	28.90	71.73	18.92
	P	0.006 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
$NO_3^- - N$ 净转化速率	F	1.10	5.77	33.55	23.35	378.66	83.09
	P	0.378 2	0.007 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
$NH_4^+ - N$ 净转化速率	F	9.74	117.17	19.22	7.76	60.24	13.51
	P	0.000 7	0.000 0	0.000 0	0.002 0	0.000 0	0.000 0



注: 图中小写字母表示刺槐林地不同林龄下无机氮含量之间的差异性, 大写字母表示对照草地在不同退耕年限下无机氮含量之间的差异, 不同字母表示样地间有显著差异 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 下同

图1 刺槐林地及对照草地土壤无机氮含量(年份)

Fig. 1 Content of soil inorganic nitrogen in *Robinia pseudoacacia* and grassland (years)

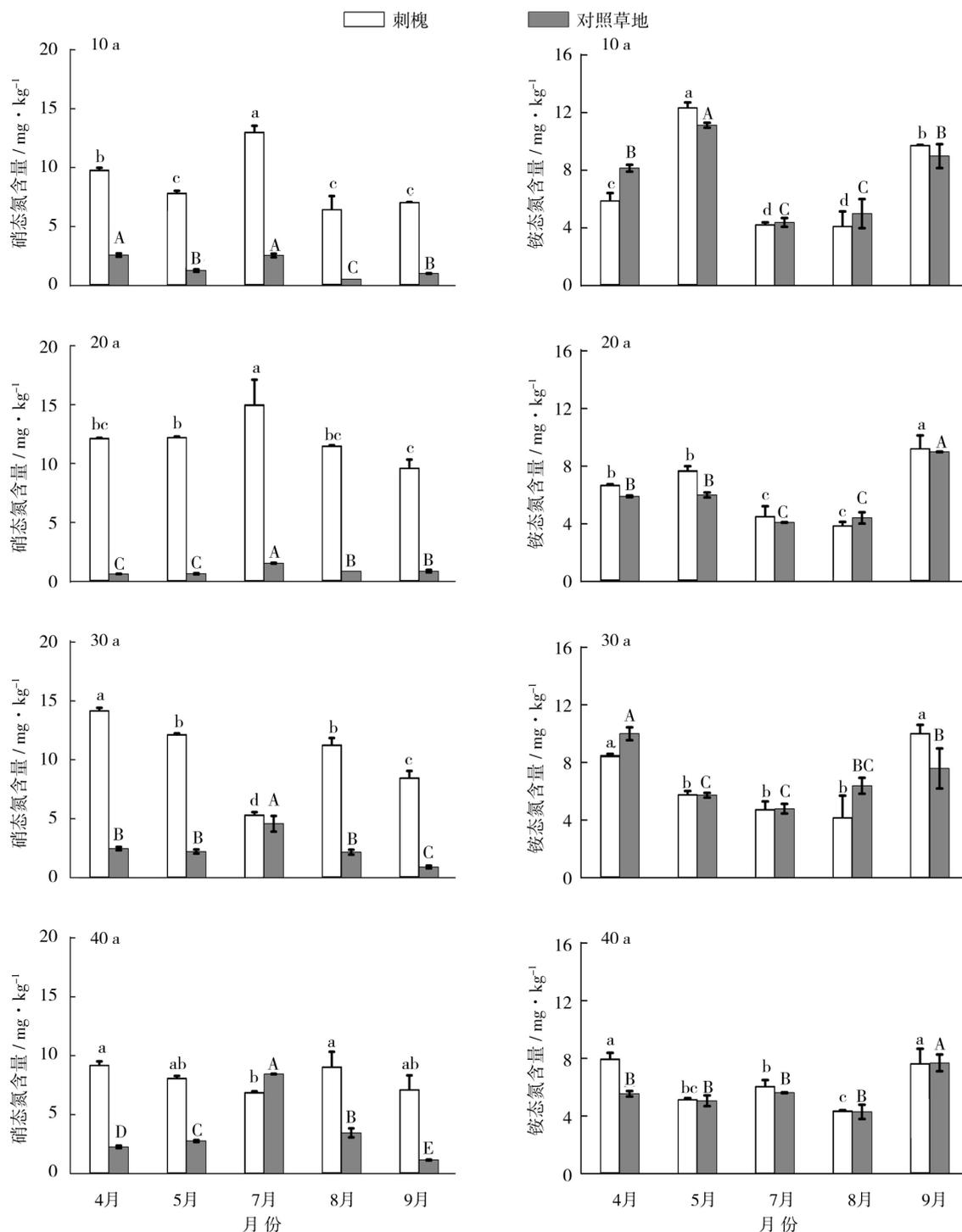
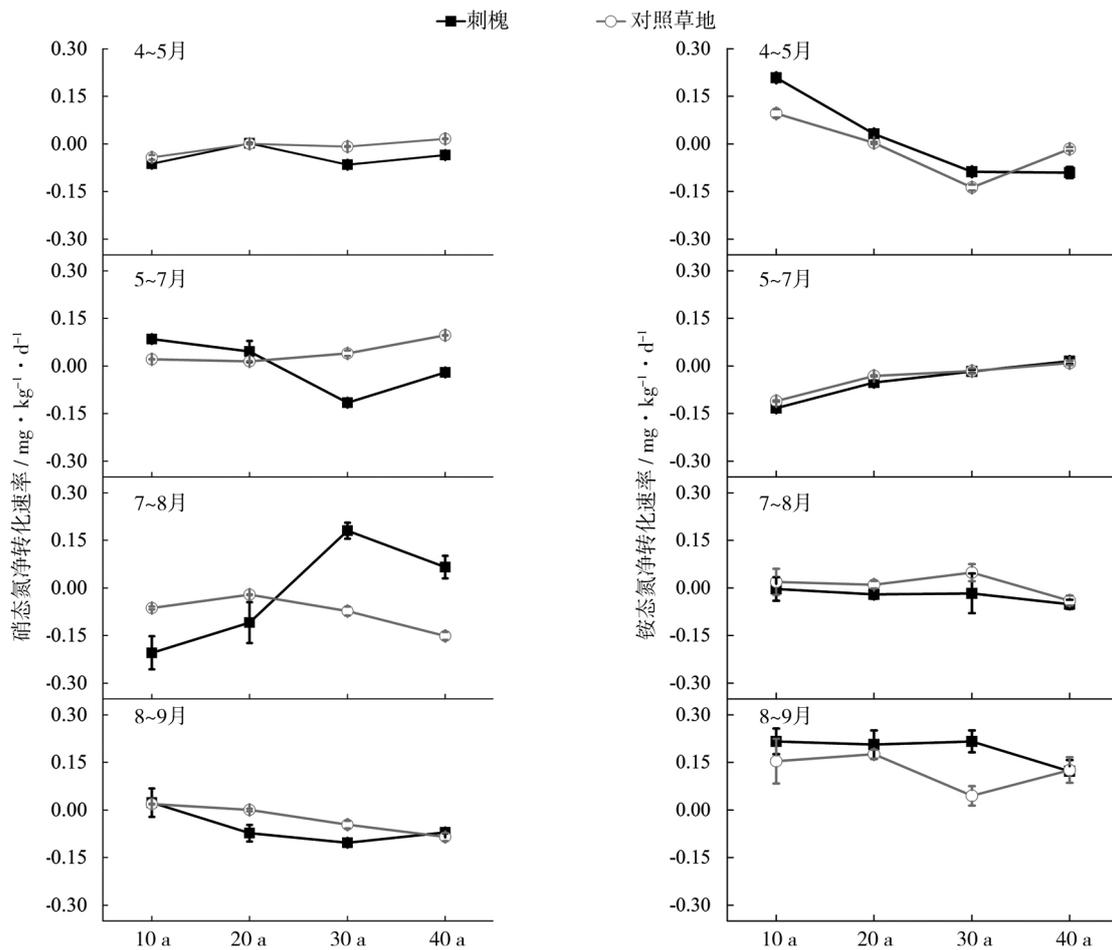


图2 刺槐林地及对照草地土壤无机氮含量

Fig. 2 Content of soil inorganic nitrogen in *Robinia pseudoacacia* and grassland

和对照草地平均值分别为 0.034 和 $0.021 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 最大消耗净转化速率分别出现在 10 a ($5 \sim 7$ 月) 和 30 a ($4 \sim 5$ 月) 样地, 分别为 -0.133 和 $-0.138 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 而最大累积净转化速率均出现在 $8 \sim 9$ 月, 分别在 30 a ($0.216 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 和 20 a ($0.176 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 样地。同时,

退耕年限、月份变化及退耕年限和月份变化的交互作用对土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率都有极显著影响 ($P < 0.01$), 月份变化及退耕年限和月份变化的交互作用对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率都有极显著影响 ($P < 0.01$), 而退耕年限对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率无显著影响 ($P > 0.05$)。



注: 无机氮净转化速率为正值和负值分别表示土壤中无机氮含量增加和减少

图3 刺槐和对照草地土壤无机氮净转化速率

Fig. 3 Net N transformation rate in *Robinia pseudoacacia* and grassland

3 讨论

3.1 植被恢复对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率的影响

3.1.1 年际变化 本研究发现刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量和净转化速率均大于同时期的对照草地, 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 没有显著差异(图1、图3), 表明刺槐林营造显著改变了土壤中无机氮的主要存在形式。这是土壤无机氮自身特性和植被恢复共同作用的结果^[27]。刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在 20 a 或 30 a 样地达到最大值, 随后出现降低现象, 而对照草地呈现逐步增加趋势, 表明人工植被恢复在前 30 a 显著提高了土壤养分^[25], 随后刺槐林的自然退化使得土壤养分含量逐步下降, 而对照草地弃耕后自然植被恢复使得土壤养分含量不断增加。刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率由 10 a 样地的最大消耗速率转变为 30 a 样地的最大累积速率, 而对照草地土壤

在 40 a 样地出现最大 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积和消耗净转化速率, 这是由于植被恢复可以改善土壤结构^[10]、提高土壤质量^[26], 进而达到减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失的效果, 且刺槐林的营造会加快植被恢复的进程^[28]。而刺槐林地和对照草地铵态氮含量和净转化速率有相似的变化(图1、图3), 这是铵态氮在土壤中不易流失的结果。而刺槐林地土壤在 10 a 样地出现最大 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 消耗和累积净转化速率, 而对照草地则分别出现在 30 a 和 20 a 样地, 表明刺槐林营造可加速土壤微生态环境的恢复。此外, 有研究表明植物存在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 偏好利用现象^[29], 而植被恢复可显著增加地表植被恢复(表1)、改善土壤微生物群落^[4], 表明在植被恢复后期土壤微生态环境的改善可平缓土壤无机氮净转化速率, 更有利于植物生长。总而言之, 植被恢复可增加土壤养分、改善土壤微生态环境, 而人工植被恢复(刺槐林营造)可加速植被恢复进程, 但在刺槐生长 30 a 左右应加以间伐、施肥等

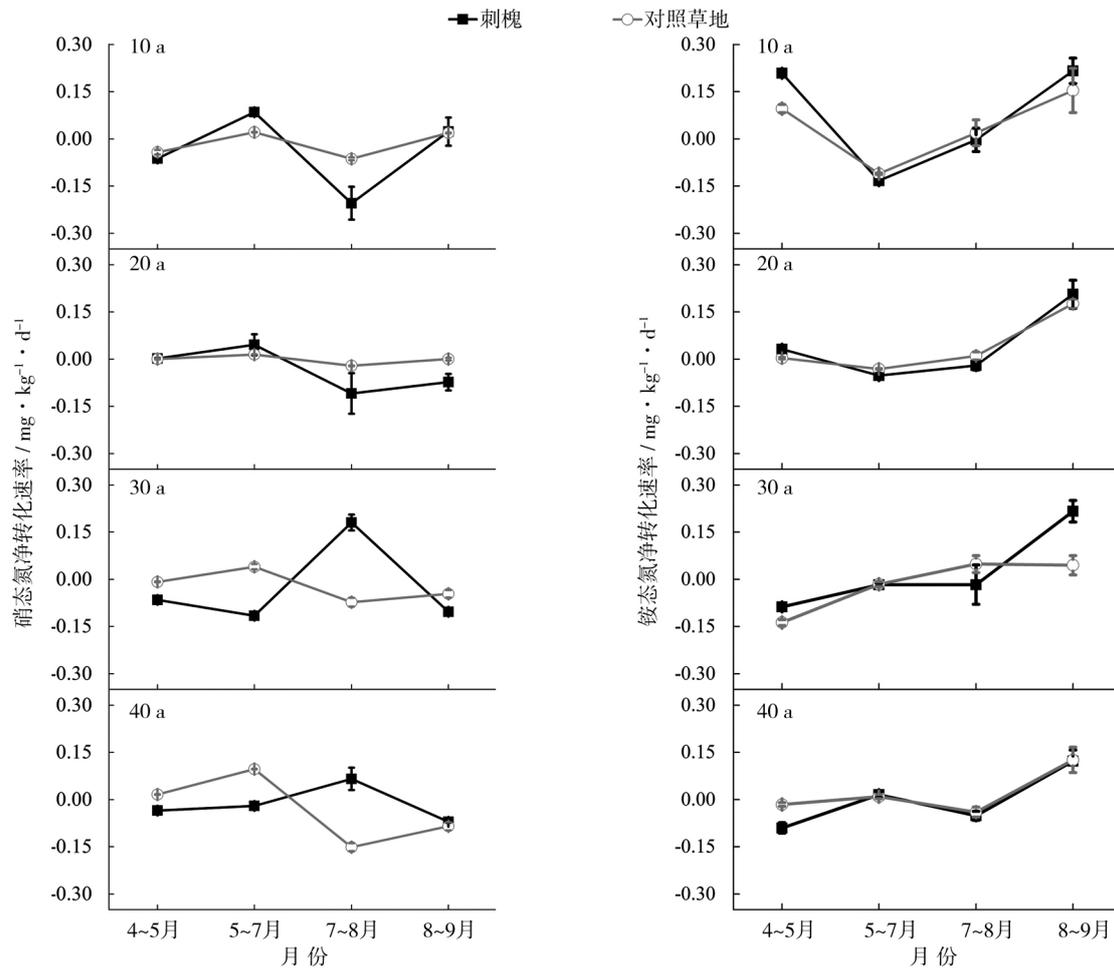


图4 刺槐和对照草地土壤无机氮净转化速率

Fig. 4 Net N transformation rate in *Robinia pseudoacacia* and grassland

管理,促进刺槐林的健康发展。

3.1.2 月份变化 刺槐样地和对照草地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率随月份变化有相似的变化趋势(图2、图4)。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率在5~8月大于4~5月和8~9月,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率在5~8月小于4~5月和8~9月,说明 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率主要受到水分和温度的影响,这与 CHEN^[30] 等的研究结果相似。土壤氮循环过程由土壤微生物驱动完成,而水分和温度是影响土壤微生物活性的主要因子之一^[13]。因此,水分和温度的变化对土壤无机氮净转化速率有极大的影响。4~5月土壤温度逐步上升,土壤微生物活性得到提高,土壤氮素净转化速率加快,使得 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率大于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率,这可能是由于氨化过程先于硝化过程,且氨化过程形成的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是硝化过程的底物,使得 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率受到限制^[27]。5~8月,降雨集中,温度较高,

有利于植物和微生物的生长, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在前期的大量积累为后期硝化作用提供了充足的底物,且硝化微生物活性随温度增加变幅大于氨化微生物^[31],虽然植物和微生物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 存在偏好利用现象^[16],但此时植物生长所需的养分可通过根系分泌物或微生物代谢提供,这使得5~8月 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率降低而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率增加。8~9月水分减少、温度逐步降低,土壤微生物活性降低,硝化微生物的活性降低速度大于氨化微生物^[31],使得 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净转化速率低于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净转化速率。总而言之,净转化速率随月份变化的现象表明水分和温度是影响土壤微生物的主要因子且会间接影响到无机氮养分转化过程^[32]。

3.2 植被恢复对刺槐林地土壤无机氮累积与消耗的影响

本研究发现刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在20~30 a达到最大值,随后出现下降趋势,而对照草

地主要表现为先降低后增加趋势(20 a 样地出现最小值),表明在刺槐林生长过程中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在前 30 a 处于积累状态,随后呈现消耗趋势,对照草地则随着植被生长 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在不断积累。这与 KOU 等^[33]的植被特征变化趋势相一致,说明在植被恢复过程中植被与土壤性质同步演替。刺槐林的营造可加速植被恢复过程,但难以完成自我演替,形成稳定的生态环境^[9,28]。故应在刺槐生长 30 a 左右加以人工管理,促进刺槐林的健康发展。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量在刺槐林地和对照草地均随退耕年限增加主要体现为减少趋势,表明在植被恢复过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量一直处于消耗状态。这主要有两个原因:一是刺槐林地和对照草地都曾用于农业生产,被大量施用肥料(氮肥),使得土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量较高,退耕后没有了人工施肥, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量逐渐下降;二是植物生长过程中偏好利用 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ^[29],而植被恢复过程中植物群落生物量和多样性增加,增加了对土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的利用。因此,人工植被恢复可加快土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的积累,但对土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 没有显著的影响。

4 结论

本文通过对黄土丘陵沟壑区不同年限刺槐林地及对照草地土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的研究,有以下结论:(1) 刺槐林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均含量是对照草地的 4.57 倍,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在两个样地之间没有显著差异,表明刺槐林营造可以减少土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的流失。(2) 与退耕年限和样地类型相比,月份变化对土壤无机氮净转化速率的影响更大,表现为在 7~8 月以硝化过程为主,在 4~5 月和 8~9 月以氨化过程为主,且刺槐林地无机氮净转化速率大于对照草地,推测水分和温度是影响土壤无机氮净转化速率的主要环境因子。(3) 相比于对照草地,刺槐林营造可加速土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的积累,减少土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的流失,但在 30 a 后出现消耗 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 现象,因此应在 30 a 左右采取间伐、施肥等措施以促进刺槐林的健康发展。

参考文献(References)

[1] 毛超,漆良华.森林土壤氮转化与循环研究进展[J].世界林业研究 2015,28(2):8-13. [MAO Chao, QI Lianghua. Research advances on nitrogen transformation and cycling in forest soil[J].

- World Forestry Research 2015 28(2):8-13.]
- [2] 邹亚丽,牛得草,杨益,等.氮素添加对黄土高原典型草原土壤氮矿化的影响[J].草地学报,2014,22(3):461-468. [ZOU Yali, NIU Decao, YANG Yi, et al. The effects of nitrogen addition on soil nitrogen mineralization in the semi-arid typical grassland of Loess Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(3): 461-468.]
- [3] 余砾,高明,慈恩,等.不同耕作方式下土壤氮素矿化和硝化特征研究[J].生态环境学报,2010,19(3):733-738. [YU Li, GAO Ming, CI En, et al. Study on the characteristics of mineralization and nitrification in different cultivation modes [J]. Ecology and Environmental Sciences 2010, 19(3): 733-738.]
- [4] WANG H L, DENG N, WU D Y, et al. Long-term net transformation and quantitative molecular mechanisms of soil nitrogen during natural vegetation recovery of abandoned farmland on the Loess Plateau of China [J]. Science of the Total Environment 2017, 607-608: 152.
- [5] 王力,李裕元,李秧秧.黄土高原生态环境的恶化及其对策[J].自然资源学报,2004,19(2):263-271. [WANG Li, LI Yuyuan, LI Yangyang. The eco-environment deterioration and its countermeasures in the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources 2004, 19(2): 263-271.]
- [6] 上官周平.黄土高原地区水土保持与生态建设的若干思考[J].中国水土保持科学,2006,4(1):1-4. [SHANGGUAN Zhouping. Considerations on soil and water conservation and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation 2006 4(1): 1-4.]
- [7] 申家朋,张文辉.黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律[J].生态学报,2014,34(10):2746-2754. [SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui. Characteristics of carbon storage and sequestration of *Pobinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the hilly Loess Plateau Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2746-2754.]
- [8] 杨维西,赵廷宁,李生智,等.人工刺槐林和油松林的根系固土作用初探[J].水土保持学报,1988,(4):38-44. [YANG Weixi, ZHAO Yanning, LI Shengzhi, et al. Study on root reinforcement of two species in Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, (4): 38-44.]
- [9] 邓磊,张文辉.黄土沟壑区刺槐人工林的天然发育规律[J].林业科学,2010,46(12):15-22. [DENG Lei, ZHANG Wenhui. Natural development pattern of *Robinia pseudoacacia* plantations in Loess Hilly Region [J]. Scientia Silvae Sinicae 2010, 46(12): 15-22.]
- [10] 张超,刘国彬,薛蓬,等.黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤抗蚀性演变特征[J].中国水土保持科学,2010,8(2):1-7. [ZHANG Chao, LIU Guobin, XUE Sha, et al. Evolution of soil anti-erodibility of *Robinia pseudoacacia* plantation at different ages in hilly-gully region of Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation 2010, 8(2): 1-7.]
- [11] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19. [LIU Guobin,

- SHANGGUAN Zhouping ,YAO Wenyi ,et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences 2017 ,32(1) : 11 - 19.]
- [12] 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. [XING Xiaoyi ,HUANG Yimei ,AN Shaoshan ,et al. Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region [J]. Acta Ecologica Sinica 2013 ,33(22) : 7181 - 7189.]
- [13] 贺纪正 ,张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制 [J]. 微生物学通报 ,2013 ,40(1) : 98 - 108. [HE Jizheng ,ZHANG Limei. Key processes and microbial mechanisms of soil nitrogen transformation [J]. Microbiology China 2013 ,40(1) : 98 - 108.]
- [14] 曾凯 ,刘琳 ,蔡义民 等. 地下生态系统中氮素的循环及影响因素 [J]. 草业科学 ,2017 ,34(3) : 502 - 514. [ZENG Kai ,LIU Lin ,CAI Yimin ,et al. The nitrogen cycle and factors affecting it in the belowground ecosystem [J]. Pratacultural Science ,2017 ,34(3) : 502 - 514.]
- [15] 刘欣 ,黄运湘 ,袁红 等. 植被类型与坡位对喀斯特土壤氮转化速率的影响 [J]. 生态学报 ,2016 ,36(9) : 2578 - 2587. [LIU Xin ,HUANG Yunxiang ,YUAN Hong ,et al. Effects of vegetation type and slope position on soil nitrogen transformation rate in Karst regions [J]. Acta Ecologica Sinica 2016 ,36(9) : 2578 - 2587.]
- [16] ZHU W X ,CARREIRO M M. Temporal and spatial variations in nitrogen transformations in deciduous forest ecosystems along an urban-rural gradient [J]. Soil Biology & Biochemistry ,2004 ,36(2) : 267 - 278.
- [17] BURGER M ,JACKSON L E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems [J]. Soil Biology and Biochemistry 2003 ,35(1) : 29 - 36.
- [18] 曾全超 ,李鑫 ,董扬红 等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征 [J]. 自然资源学报 ,2016 ,31(11) : 1881 - 1891. [ZENG Quanchao ,LI Xin ,DONG Yanghong. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe Watershed in the Loess Plateau: The influence of different vegetation zones [J]. Journal of Natural Resources 2016 ,31(11) : 1881 - 1891.]
- [19] 张笑培 ,杨改河 ,王得祥 等. 黄土高原沟壑区不同植被恢复模式对土壤生物学特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版) ,2008 ,36(5) : 149 - 154. [ZHANG Xiaopei ,YANG Gaihe ,WANG Dexiang ,et al. Effect of different vegetation restoration models on soil microbial characters in the gully region of Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A & F University(Nat Sci Ed) , 2008 ,36(5) : 149 - 154.]
- [20] 王艳杰 ,邹国元 ,付桦 等. 土壤氮素矿化研究进展 [J]. 中国农学通报 ,2005 ,21(10) : 203 - 208. [WANG Yanjie ,ZOU Guoyuan ,FU Hua ,et al. Development and advance of soil nitrogen mineralization [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin 2005 ,21(10) : 203 - 208.]
- [21] 艾泽民 ,陈云明 ,曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局 [J]. 应用生态学报 ,2014 ,25(2) : 333 - 341. [AI Zemin ,CHEN Yunming ,CAO Yang. Storage and allocation of carbon and nitrogen in *Robinia pseudoacacia* plantation at different ages in the Loess Hilly Region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology 2014 ,25(2) : 333 - 341.]
- [22] 吴多洋 ,焦菊英 ,于卫洁 等. 陕北刺槐林木生长及林下植被与土壤水分对种植密度的响应特征 [J]. 西北植物学报 ,2017 ,37(2) : 346 - 355. [WU Duoyang ,JIAO Juying ,YU Weijie ,et al. Response characteristics of locust growth understory vegetation and soil moisture on planting density in northern Shaanxi [J]. Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica 2017 ,37(2) : 346 - 355.]
- [23] 韩鲁艳 ,郝乾坤 ,焦菊英. 黄土丘陵沟壑区人工林地的土壤抗蚀性评价 [J]. 水土保持通报 ,2009 ,23(3) : 159 - 164. [HAN Luyan ,HAO Qiankun ,JIAO Juying. Soil anti-erodibility of artificial woodlands in the hilly-gullied region of the Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2009 ,23(3) : 159 - 164.]
- [24] WEI X R ,SHAO M ,FU X ,et al. The effects of land use on soil N mineralization during the growing season on the northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma 2011 ,160(3 - 4) : 590 - 598.
- [25] 彭文英 ,张科利 ,杨勤科. 黄土坡面土壤性质随退耕时间的动态变化研究 [J]. 干旱区资源与环境 ,2006 ,20(5) : 153 - 158. [PENG Wenyang ,ZHANG Keli ,YANG Qinke. Research on soil property dynamics in retired farmland in the loess sloping land [J]. Journal of Arid Land Resources and Environmen ,2006 ,20(5) : 153 - 158.]
- [26] 赵娜 ,孟平 ,张劲松 等. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价 [J]. 应用生态学报 ,2014 ,25(2) : 351 - 358. [ZHAO Na ,MENG Ping ,ZHANG Jinsong ,et al. Soil quality assessment of *Robinia pseudoacacia* plantations with various ages in the Grain-for-Green Program in hilly area of north China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology 2014 ,25(2) : 351 - 358.]
- [27] 程谊. 若干因素对土壤氮初级转化速率的影响研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 ,2012. [CHENG Yi. Studies on the influence of several factors on soil gross nitrogen transformation rates [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences 2012.]
- [28] 刘中奇 ,朱清科 ,秦伟 等. 半干旱黄土区自然恢复与人工造林恢复植被群落对比研究 [J]. 生态环境学报 ,2010 ,19(4) : 857 - 863. [LIU Zhongqi ,ZHU Qingke ,QIN Wei ,et al. Comparison of vegetation community between natural recovery and artificial restoration in semiarid loess area [J]. Ecology and Environmental Sciences 2010 ,19(4) : 857 - 863.]
- [29] RECOUS S ,MACHET J M ,MARY B. The partitioning of fertilizer-N between soil and crop: Comparison of ammonium and nitrate applications [J]. Plant & Soil ,1992 ,144(1) : 101 - 111.
- [30] CHEN Y T ,BORKEN W ,STANGE C F ,et al. Effects of decreasing water potential on gross ammonification and nitrification in an acid coniferous forest soil [J]. Soil Biology & Biochemistry ,2011 ,43(2) : 333 - 338.
- [31] HOYLE F C ,MURPHY D V ,FILLERY I R P. Temperature and stubble management influence microbial CO₂-C evolution and gross N transformation rates [J]. Soil Biology & Biochemistry ,2006 ,38(1) : 71 - 80.

- [32] FU B J, ZHANG Q, CHEN L, et al. Temporal change in land use and its relationship to slope degree and soil type in a small catchment on the Loess Plateau of China [J]. *Catena* 2006, 65(1): 41–48.
- [33] KOU M, GARCIA-FAYOS P, HU S, et al. The effect of *Robinia pseudoacacia* afforestation on soil and vegetation properties in the Loess Plateau (China): A chronosequence approach [J]. *Forest Ecology & Management* 2016, 375: 146–158.

Soil nitrogen dynamics of *Robinia pseudoacacia* within artificial revegetation process in Loess Plateau

DENG Na¹, WANG Hong-lei¹, HU Shu¹, WU Duo-yang¹, KOU Meng², JIAO Ju-ying^{1,2}

(1) Institute of Soil and Water Conservation Northwest A & F University State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, Shaanxi, China;

(2) Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Inorganic nitrogen is one of the major nutrients in plant growth, especially in artificial revegetation. *Robinia pseudoacacia* plantation were considered one of the primary and promising trees of artificial revegetation in the Loess Plateau due to its fast growth and ability of fixing atmospheric nitrogen. However, the main form, net transformation rates and dynamics of inorganic nitrogen of *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau were still unknown. In this study, we aimed to expose the capability of offering nitrogen through inorganic nitrogen. A chronosequence from 10 ~ 40 year-old plantations and adjacent contrasting grasslands in natural control with similar age were selected. The result showed as follows: (1) the average content of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ was the 4.57 times in *Robinia pseudoacacia* plantation than that in the contrasting grasslands, but no influence on $\text{NH}_4^+ - \text{N}$. (2) compared with lands and abandoned years, the soil moisture and temperature were the major effects on net transformation rates, showing nitrification was the prominent nitrogen transformation processes on July–August, while ammonization was the key nitrogen transformation processes on April–May and August–September, and *Robinia pseudoacacia* plantations had faster net nitrogen transformation rates than the contrasting grasslands. (3) *Robinia pseudoacacia* plantations can accelerate the accumulation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ compared with the grasslands, but a consumption was occurred exceeding 30 year-old. Overall, *Robinia pseudoacacia* plantation can reduce $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching, but no influence on $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, and *Robinia pseudoacacia* plantation had a consumption trend of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ after 30 years. So, some management, such as thinning, should be taken to accelerate the healthy development of *Robinia pseudoacacia* plantation in the Loess Plateau.

Key words: vegetation restoration; *Robinia pseudoacacia*; inorganic nitrogen; net transformation rate