

DOI: 10.5846/stxb201506101175

白日军, 杨治平, 张强, 张训忠. 晋西北不同年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮矿化和硝化作用. 生态学报, 2016, 36(24): - .

Bai R J, Yang Z P, Zhang Q, Zhang X Z. Soil nitrogen mineralization and nitrification under *Caragana microphylla* shrubs of different ages in the northwestern Shanxi Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

晋西北不同年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮矿化和硝化作用

白日军¹, 杨治平^{2,3,*}, 张强^{2,3}, 张训忠⁴

1 山西省林业调查规划院, 太原 030012

2 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030031

3 土壤环境与养分资源山西省重点实验室, 太原 030031

4 美国弗吉尼亚理工大学作物土壤环境系, 美国 24061

摘要: 利用 PVC 管顶盖埋管法研究了晋西北黄土高原区小叶锦鸡儿人工灌丛不同定植年限(5, 10, 20, 30, 40 年)土壤氮矿化与硝化速率的动态和净矿化与硝化总量。结果表明, (1) 小叶锦鸡儿灌丛土壤无机氮主要以 NO_3^- -N 形式存在, 不同生长年限相同月份的土壤 NO_3^- -N 含量分别是铵态氮(NH_4^+ -N)含量的 1.5—15.4 倍; (2) 土壤氮素硝化速率和矿化速率随生长年限延长而加快, 30 年生时达到高峰, 数值达 $40.2, 44.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。从季节性变化看, 7—8 月是硝化速率和矿化速率快速增长期, 30 年生小叶锦鸡儿灌丛土壤硝化速率和矿化速率分别达到 $86.9, 93.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 显著高于其它生长年限($P < 0.05$); (3) 土壤氮素硝化与矿化总量同样随小叶锦鸡儿生长年限延长而增加, 30 年生时达到最高, 与 5 年生相比, 分别增加了 3.7 和 3.1 倍。 (4) 5—10 月小叶锦鸡儿生长期, 各年限土壤全氮量的 2.3% 被矿化成无机氮, 其中 87% 最终被转化成 NO_3^- -N 形式存在于土体中。

关键词: 小叶锦鸡儿; 土壤氮矿化与硝化; 晋西北黄土丘陵区

Soil nitrogen mineralization and nitrification under *Caragana microphylla* shrubs of different ages in the northwestern Shanxi Loess Plateau

BAI Rijun¹, YANG Zhiping^{2,3,*}, ZHANG Qiang^{2,3}, ZHANG Xunzhong⁴

1 Shanxi Academy of Forestry Survey, Planning and Design, Taiyuan 030012, China

2 Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China

3 Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi Province, Taiyuan 030031, China

4 Department of Crop and Soil Environmental Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA 24061

Abstract: Nitrogen (N) is a main limiting factor for plant growth and development in many regions. Soil organic N, accounting for up to 95% of the soil N pool, cannot be used by plants directly, but can be absorbed and utilized by plants after being mineralized into nitrate N (NO_3^- -N) and ammonium N (NH_4^+ -N). Therefore, soil net N nitrification (N_{nit}) and net N mineralization (N_{min}) rates have been considered two important indicators for evaluating the stability and function of an ecosystem. *Caragana microphylla*, a leguminous and sand-binding shrub, is a dominant species widely distributed in the Loess Plateau of northwestern Shanxi. Previous studies on soil N dynamics have mainly focused on forest, grassland, and farmland ecosystems to study the effect of environmental factors such as temperature and humidity on soil N mineralization and nitrification. However, few researchers have focused on soil N dynamic changes under shrub lands in arid and semiarid

基金项目: 山西省农业科学院博士基金项目(YBSJJ1309); 公益性行业(农业)科研专项经费(201103003); 山西省百人计划项目

收稿日期: 2015-06-10; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yzpsx0208@163.com

regions. The objective of this study was to explore the content of NO_3^- -N and NH_4^+ -N and the rate of soil net N nitrification and net N mineralization under *Caragana microphylla* shrubs as a function of plant age. We used a closed-top PVC tube *in situ* incubation method to detect the soil net N mineralization and net N nitrification in *Caragana microphylla* shrubs of different ages (5, 10, 20, 30, and 40 yrs) in the northwest Shanxi Loess Plateau. The results indicated that NO_3^- -N accounted for a larger proportion of mineral N in *Caragana microphylla* shrub soil. The NO_3^- -N concentration was 1.5—15.4 times higher than NH_4^+ -N in the same month of different years. Soil net N nitrification and net N mineralization rates increased as the *Caragana microphylla* shrubs' ages increased, with the greatest average rates from May to October (40.2 and 44.1 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$, respectively) being observed under 30-year-old shrubs. The net N nitrification and mineralization rate increased faster in July and August relative other months during the growing season. The net N nitrification and mineralization rates were 86.9 and 93.1 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$, respectively, at 30-year-old shrubs, which had the highest rates of all age classes ($P < 0.05$). The total net N nitrification and mineralization also increased with increased age of *Caragana microphylla*. The total net N nitrification and mineralization from May to October increased by 3.7- and 3.1-fold at 30-year-old shrubs, respectively, relative to 5-year-old shrubs. During the *Caragana microphylla* growing season from May to October, 2.3% of soil total N was mineralized into inorganic N, 87% of which was eventually transformed into NO_3^- -N. The results of this study provide great insight for guiding shrub utility and land management in the establishment and development of shrub ecosystems in the Loess plateau.

Key Words: *Caragana microphylla* shrubs, net N mineralization and nitrification, northwestern Shanxi Loess Plateau

氮素是植物生长发育所需的大量营养元素之一^[1],也是改善贫瘠土壤植物生长发育的主要因素^[2-3]。在许多森林、草地以及农田生态系统中,限制植物生长的首要因素是氮素。占土壤氮库 95% 的有机氮是不能被植物所利用的,只有在微生物作用下矿化为无机态氮,才能被植物吸收利用^[4]。因此土壤中无机氮(NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N)的含量水平以及有机态氮矿化或硝化为无机态氮的速率直接影响土壤的供氮能力^[5],因此有机氮矿化速率与硝化速率是表征土壤供氮能力的重要指标^[6]。对土壤氮矿化和硝化动态研究,在评价生态系统稳定性与生态系统功能性上意义重大^[7]。目前,国内外有关土壤氮动态的研究主要针对森林、草地和农田生态系统,研究环境因子如温度和湿度对土壤氮矿化和硝化影响^[8-9]、农田施肥措施如氮肥品种、氮肥施用对土壤、大气、河流等产生的环境污染影响等^[10-13]。而对于旱半干旱条件下灌木林地氮素动态变化的研究还不多见。

小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)是锦鸡儿属(*Caragana* Fabr.)植物的一个种,在晋西北有广泛分布,是黄土高原地区的主要旱生落叶灌木树种^[14]。小叶锦鸡儿根系发达,具有很强的适应性和抗逆性,是营造水土保持林、防风固沙的优良树种之一^[15]。目前小叶锦鸡儿灌丛对晋西北半干旱种植区土壤理化性质^[16]、土壤水分^[17]、土壤肥力^[18]、土壤空间变异^[19]、土壤碳储量^[20]等已有不少研究,但有关土壤氮素转化方面的研究还未见报道。本文采用顶盖埋管原位培育法对晋西北黄土丘陵区不同生长年限下小叶锦鸡儿灌丛的土壤氮素动态变化进行了研究,重点研究了氮素的矿化和硝化速率以及净矿化和硝化总量,对晋西北小叶锦鸡儿灌丛氮循环研究和灌丛的合理管理利用提供科学依据。

1 研究区概况

试验区设在山西省西北部的五寨县,地处黄土高原东部边缘,位于我国北方农牧交错带。该区黄土覆盖深厚,气候四季分明:春季干旱多风,夏秋雨量集中,冬季寒冷干燥,属温带大陆性气候。年降雨量 400mm 左右,蒸发量 1913mm,年均温 4.1℃—5.5℃,年内降水分布不均,6—8 月降水占全年降水量的 70% 以上,春季 3—5 月降水占 10%。该地区年均风速 2.8 m/s,常年出现大风天气,春天 ≥ 6 级的大风日数为 35.4 d,同时往往伴有扬沙天气,每年扬沙日数达 26.4 d。土壤类型以黄绵土和栗褐土为主。为防治水土流失,防风固沙,改

善生态环境,从 20 世纪 60 年代以来,小叶锦鸡儿灌丛在当地开始大量种植,累计面积已达到 $20 \times 10^4 \text{ hm}^2$,成为当地重要的人工植被。

2 材料与方法

2.1 试验设计

采样所在地位于五寨县西北方向的石咀头村,东经 $111^\circ 28'$ — $112^\circ 00'$,北纬 $38^\circ 44'$ — $39^\circ 17'$,海拔 1200—1400 m,坡度 0—4°。本试验选择同一坡面、地形因子相似、生长年限分别为 5、10、20、30、40 年的小叶锦鸡儿人工灌丛进行研究,种植密度为行距 2.5m,株距 1.0m。各年限土壤理化性状见表 1。

表 1 小叶锦鸡儿灌丛土壤理化性状

Table 1 Soil physical and chemical characteristics in different ages of *Caragana microphylla* shrubs

年限 Year	pH	EC/ (Ms/cm)	有机质 OM/ (g/kg)	全氮 TN/ (g/kg)	容重 BD/ (g/cm ³)	粘粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
5	8.23±0.01a	0.34±0.01b	3.93±0.12c	0.410±0.05c	1.47±0.03c	13.39±0.36b	8.51±1.16c	78.10±1.04a
10	8.20±0.03ab	0.35±0.01b	4.13±0.15c	0.440±0.04c	1.42±0.04c	13.80±1.33b	10.03±3.64c	77.16±4.41a
20	8.17±0.04b	0.35±0.02b	5.32±0.20b	0.557±0.01b	1.34±0.02b	13.48±0.83b	10.41±5.44c	76.10±6.05a
30	8.08±0.04c	0.42±0.01a	7.11±0.19a	0.647±0.02a	1.22±0.03a	14.13±1.32a	28.28±6.73a	57.59±7.76c
40	8.10±0.07c	0.43±0.01a	6.49±0.28a	0.643±0.01a	1.24±0.04a	13.87±1.17b	18.10±2.50b	68.03±1.37b

试验于 2010 年 5 月 7 日—10 月 7 日期间进行,采用 PVC 管顶盖埋管培育法研究土壤氮的矿化与硝化^[21]。具体方法为在不同年限的小叶锦鸡儿灌丛林区,分别选取 3 个大约 4m×4m 典型样方,在每个样方内,选择典型灌丛的冠幅边缘下区域埋管,用 GPS 定位并作标记。在 5 月 7 日试验第一次取样分析初始 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量的同时,将直径 5cm、长 30cm 的 PVC(聚氯乙烯)管筒垂直压进土体,管上端用透气薄膜覆盖,用橡皮筋扎住。每个样方埋设 3 个管,1 个月后将管从土壤中取出,将另一组新管插入与前一次管紧邻的土壤中进行下一轮培养。取样时将 3 个管的土样充分混匀并用四分法取约 1 kg 带回实验室分析土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量。3 个典型样方共重复 3 次。试验结束时,共取样 6 次。土壤 NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N 采用 2mol/L KCL 浸提—流动分析仪测定。

2.2 数据处理

某一时段氮素净矿化(或硝化)速率 $N_{\min}$ 等于管中土壤从时间 T_{i-1} 培育到时间 T_i 后 NH_4^+ -N + NO_3^- -N (或 NO_3^- -N) 含量之和的变化值^[22]。 $N_{\min}(\text{mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1})$ 通过下式计算^[7]:

$$N_{\min} = (N_{T_i} - N_{T_{i-1}}) / (T_i - T_{i-1})$$

式中, N_{T_i} 为 T_i 时管内土壤的无机氮(NH_4^+ -N + NO_3^- -N, 或 NO_3^- -N) 含量; $N_{T_{i-1}}$ 为 T_{i-1} 时管内土壤的无机氮含量。

得到每个培育时期单位土重氮矿化/硝化速率后($\text{mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)结合土壤容重,可计算出每个培育时期单位面积 0—30cm 层土壤氮矿化/硝化速率($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)和矿化/硝化量(mg / m^2)。几个培育时期的矿化、硝化量相加即可得到试验期总净矿化/硝化量。用总的净矿化/硝化量除以 0—30cm 土层全 N 量即可算出矿(硝)化 N 量占全 N 量的百分比。用硝化 N 量除以矿化 N 总量,可以算出净硝化作用占总净矿化量转化为 NO_3^- -N 的百分比。

采用单因素方差分析法(ANOVA)进行方差分析和差异显著性检验($\alpha = 0.05$)。图表中数据为平均数±标准差。

3 结果与分析

3.1 小叶锦鸡儿灌丛不同生长年限及不同生长季节土壤无机氮动态变化

不同生长年限不同生长季节下土壤无机氮含量见表 2。从表看出,土壤 NO_3^- -N 是晋西北干旱半干旱条件

下土壤无机氮存在的主要形态,含量随小叶锦鸡儿年限的延长而增加,生长 30 年和 40 年时含量最高,显著高于其它年限 ($P < 0.05$)。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不是小叶锦鸡儿土壤无机氮存在的主要形态,各生长年限的铵态氮含量很低。不同生长年限相同月份的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别是铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 含量的 1.5—15.4 倍。对同一年限不同月份间土壤无机氮含量进行了多重比较 (表 3), 结果发现,土壤无机氮含量在 5 月和 6 月份含量较低,从 7 月份开始显著增加 ($P < 0.05$), 10 月份时达到高峰,但与 8 月和 9 月没有显著性差异。可以说 7 月和 8 月是小叶锦鸡儿灌丛土壤无机氮含量的显著变化季节。

表 2 小叶锦鸡儿灌丛土壤不同生长年限不同生长季节硝态氮和铵态氮含量
Table 2 Monthly dynamics of mineral nitrogen concentration in different ages

月份 Month	无机氮 Inorganic Nitrogen	5 年 5-yr	10 年 10-yr	20 年 20-yr	30 年 30-yr	40 年 40-yr
5	$\text{NO}_3^-\text{-N}/(\text{mg}/\text{kg})$	$1.97 \pm 0.10\text{d}$	$3.92 \pm 0.15\text{c}$	$6.95 \pm 0.17\text{b}$	$8.41 \pm 0.78\text{a}$	$9.65 \pm 0.83\text{a}$
6		$2.56 \pm 0.06\text{d}$	$5.12 \pm 1.18\text{c}$	$8.60 \pm 0.34\text{b}$	$10.31 \pm 0.67\text{a}$	$11.62 \pm 0.63\text{a}$
7		$3.34 \pm 0.13\text{d}$	$6.68 \pm 0.21\text{c}$	$12.40 \pm 0.36\text{b}$	$14.51 \pm 0.55\text{a}$	$15.73 \pm 1.04\text{a}$
8		$4.50 \pm 0.21\text{d}$	$9.00 \pm 0.11\text{c}$	$17.06 \pm 0.20\text{b}$	$21.63 \pm 0.73\text{a}$	$22.54 \pm 1.93\text{a}$
9		$5.08 \pm 0.16\text{d}$	$10.16 \pm 0.08\text{c}$	$18.50 \pm 0.70\text{b}$	$23.40 \pm 1.42\text{a}$	$24.14 \pm 1.16\text{a}$
10		$5.62 \pm 0.09\text{d}$	$11.44 \pm 0.45\text{c}$	$19.88 \pm 1.22\text{b}$	$24.90 \pm 1.05\text{a}$	$25.62 \pm 1.26\text{a}$
5	$\text{NH}_4^+\text{-N}/(\text{mg}/\text{kg})$	$1.35 \pm 0.63\text{a}$	$1.15 \pm 0.45\text{a}$	$0.45 \pm 0.25\text{a}$	$0.63 \pm 0.19\text{a}$	$0.67 \pm 0.33\text{a}$
6		$1.75 \pm 0.93\text{a}$	$1.51 \pm 0.89\text{a}$	$0.57 \pm 0.09\text{a}$	$0.73 \pm 0.14\text{a}$	$1.01 \pm 0.06\text{a}$
7		$2.29 \pm 0.40\text{a}$	$2.02 \pm 0.39\text{ab}$	$0.83 \pm 0.06\text{b}$	$0.99 \pm 0.22\text{b}$	$1.67 \pm 0.88\text{ab}$
8		$2.38 \pm 0.91\text{a}$	$2.09 \pm 0.87\text{a}$	$1.30 \pm 0.07\text{a}$	$1.50 \pm 0.33\text{a}$	$1.90 \pm 0.43\text{a}$
9		$2.45 \pm 0.20\text{a}$	$2.30 \pm 0.19\text{a}$	$1.62 \pm 0.78\text{a}$	$1.90 \pm 0.56\text{a}$	$2.23 \pm 0.55\text{a}$
10		$2.49 \pm 0.56\text{a}$	$2.37 \pm 0.64\text{a}$	$1.72 \pm 0.37\text{a}$	$2.25 \pm 0.98\text{a}$	$2.48 \pm 0.23\text{a}$

不同字母表示相同月份不同年限间差异显著 ($P < 0.05$)

表 3 小叶锦鸡儿灌丛不同生长年限不同季节土壤无机氮含量变化
Table 3 Soil N_{min} concentration in different incubation periods and different ages

年限 Year	无机氮含量 N_{min} Concentration $/(\text{mg}/\text{g})$					
	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
5	$3.32 \pm 0.10\text{c}$	$4.31 \pm 0.06\text{c}$	$5.63 \pm 0.13\text{b}$	$6.91 \pm 0.21\text{a}$	$7.53 \pm 0.16\text{a}$	$8.11 \pm 0.09\text{a}$
10	$5.07 \pm 0.15\text{c}$	$6.63 \pm 0.18\text{c}$	$8.69 \pm 0.21\text{b}$	$11.10 \pm 0.11\text{ca}$	$12.46 \pm 0.08\text{a}$	$13.81 \pm 0.25\text{a}$
20	$7.4 \pm 0.17\text{c}$	$9.17 \pm 0.34\text{c}$	$13.23 \pm 0.36\text{b}$	$18.36 \pm 0.20\text{a}$	$20.12 \pm 0.47\text{a}$	$21.6 \pm 0.24\text{a}$
30	$9.04 \pm 0.78\text{d}$	$11.04 \pm 0.50\text{d}$	$15.5 \pm 0.55\text{c}$	$23.13 \pm 0.73\text{b}$	$25.3 \pm 1.42\text{ab}$	$27.15 \pm 1.30\text{a}$
40	$10.32 \pm 0.83\text{c}$	$12.63 \pm 1.11\text{c}$	$17.4 \pm 1.04\text{b}$	$24.44 \pm 1.93\text{a}$	$26.37 \pm 1.77\text{a}$	$28.1 \pm 11.97\text{a}$

不同字母表示同一年限不同季节间差异显著 ($P < 0.05$)

3.2 不同生长年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮硝化和氮矿化速率

从小叶锦鸡儿灌丛各生长季土壤氮硝化和氮矿化动态结果 (图 1) 看, 5—6 月间 5 年生小叶锦鸡儿土壤硝化速率和矿化速率最低, 20 年, 30 年和 40 年生小叶锦鸡儿土壤硝化速率和矿化速率显著高于 5 年生 ($P < 0.05$)。7—8 月是硝化速率和矿化速率快速增长期, 30 年生小叶锦鸡儿土壤硝化速率和矿化速率分别达到 $86.9, 93.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 显著高于 5 年, 10 年和 20 年生 ($P < 0.05$); 从 9 月份开始, 土壤硝化速率和矿化速率开始下降, 回归到 5—6 月的水平。对整个生长季进行统计, 土壤硝化速率和矿化速率随小叶锦鸡儿生长年限延长而逐渐加快, 到 30 年达到高峰, 分别达 $40.2, 44.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3.3 不同生长年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮硝化和氮矿化累积动态

图 2 所示的是不同生长年限小叶锦鸡儿土壤在各月份可累积的氮硝化和氮矿化总量。累积趋势与土壤氮硝化速率和氮矿化速率趋势一致, 7—8 月是各生长年限小叶锦鸡儿土壤氮硝化和氮矿化量累积的高峰期, 在此期间, 30 年生土壤氮硝化与矿化累积量最高, 分别是 5 年生土壤氮硝化与矿化累积量的 5.09 倍和

5.06倍。

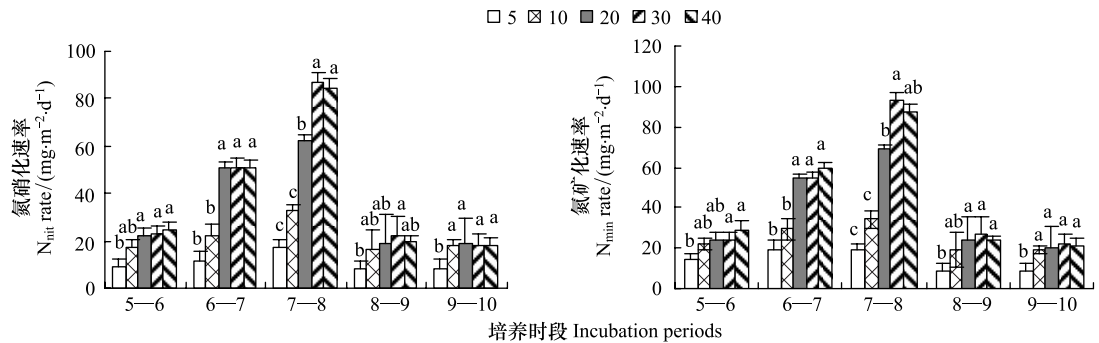


图1 不同生长年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮硝化与氮矿化速率

Fig.1 Soil net N nitrification rates (A) and net N mineralization (B) in different incubation periods

不同字母表示同一月份不同年限间差异显著 ($P < 0.05$)

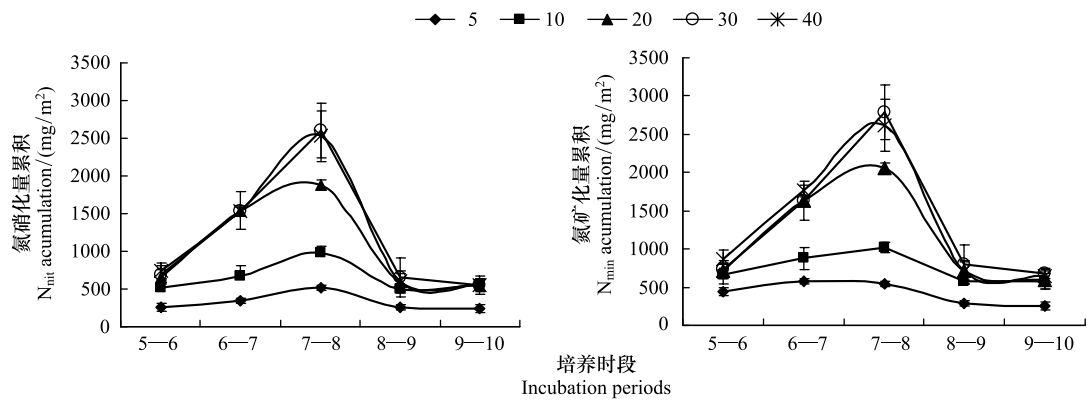


图2 不同生长年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮硝化和氮矿化累积量

Fig.2 Soil accumulated mineral N (A) and $\text{NO}_3\text{-N}$ (B) in different sampling date

对小叶锦鸡儿灌丛各年限土壤全氮储量、氮硝化与矿化总量数据进行统计(表4),土壤全氮含量和储量均随着小叶锦鸡儿灌丛年限的延长而增加,到30年时达到高峰。与土壤全氮储量变化趋势相同,土壤氮硝化和矿化总量均随小叶锦鸡儿生长年限延长而增加,到30年生时,土壤氮硝化与矿化总量达到最高,与5年生相比,分别增加了3.7和3.1倍。从氮矿化和硝化总量占全氮的比值分析,对各年限土壤净矿化总量占全氮的比值平均,得出土壤全氮量的2.3%被矿化成无机氮,其中87%最终被转化成 $\text{NO}_3\text{-N}$ 形式存在于土体中。

表4 不同生长年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮硝化与矿化总量

年限 Year	全氮(T_N)		总净矿化(N_{min})		总净硝化(N_{nit})		
	Total Nitrogen		Net Nitrogen mineralization		Net Nitrogen nitrification		
	含量	储量	净矿化总量	占全氮比	净硝化量	占全氮比	占矿化氮比
	Concentration/ (g/kg)	Storage/ (g/m ²)	Amount of N_{min} / (mg/m ²)	$N_{min}/T_N/\%$	Amount of N_{nit} / (mg/m ²)	$N_{nit}/T_N/\%$	$N_{nit}/N_{min}/\%$
5-yr	0.410±0.05	180.8	2112	1.17	1610	0.89	76.2
10-yr	0.440±0.04	187.4	3721	1.99	3204	1.71	86.1
20-yr	0.557±0.01	223.9	5709	2.55	5198	2.32	91.1
30-yr	0.647±0.02	236.8	6628	2.80	6035	2.55	91.1
40-yr	0.643±0.01	239.2	6614	2.77	5941	2.48	89.8

4 讨论

有关土壤氮矿化与硝化研究主要集中于草地、森林、沙地和农田。在草地和森林土壤氮矿化和硝化研究中,认为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是主要的有效氮存在形态^[23-24],在沙地土壤研究中,李玉强在对科尔沁沙地各种生境的研究得出 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是科尔沁沙地土壤有效氮的主要存在形态^[7]。本试验研究中,不同年限小叶锦鸡儿灌丛土壤表现出 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,显示 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是晋西北土壤有效氮存在的主要形式。土壤中有效态氮究竟以何种形态存在取决于有机氮矿化过程中的影响因子诸如土壤的 pH、温度、湿度等。pH 在 8 左右且好气条件下时有利于硝化细菌的活动,使无机氮矿化出的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在生成的初始就被氧化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。本试验地处于半干旱的晋西北地区,从表 1 中得知 pH 在 8.08—8.23 之间,非常有利于土壤硝化细菌的活动,促进 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的形成。

土壤矿化过程和硝化过程是在微生物作用下进行的,微生物种群的大小和活性影响着土壤矿化作用和硝化作用的强度^[25]。而微生物的活动受土壤温度和湿度等环境因素的影响较大,这就形成了土壤矿化速率和硝化速率的明显季节性变化^[26]。本试验条件下,在雨热同季的 7 月和 8 月,降水和温度均比较高,土壤含水量高^[17],微生物活性增强,各年限小叶锦鸡儿灌丛土壤硝化和矿化速率最高,生长季节其它月份则较低。土壤有机碳和全氮含量也是影响土壤氮矿化和硝化速率的重要因素^[27]。较高的有机碳和全氮使土壤中微生物具有高的生物活性,从而使土壤氮保持高的矿化和硝化速率^[28]。小叶锦鸡儿是一种豆科灌木,具有固氮培肥土壤的功能。杨治平等^[19]对半干旱条件下 5 年到 40 年生小叶锦鸡儿土壤肥力演变的研究证明,随着生长年限的延长,小叶锦鸡儿灌丛生物量加大,枯枝落叶增多,土壤有机质和全氮含量逐渐提高,30 年生时达到最大值,此时土壤氮的矿化和硝化速率最强。土壤氮矿化作用越强, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量越高,硝化作用越强, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量越高。本试验半干旱条件下,产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 大部分被氧化成了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,因此,随年限延长,小叶锦鸡儿灌丛土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量是逐年增加,到 30 年时含量基本达到高峰。有研究指出,高的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量可能会造成森林和草地土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失与 N_2O 的排放损失^[29]。本试验中 40 年生小叶锦鸡儿灌丛开始出现衰退问题,植株对土壤有效氮的利用减弱,可能也有 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失造成氮损失问题,需要进一步研究证明。此外,本文只对半干旱条件下晋西北黄土高原区小叶锦鸡儿灌丛土壤氮矿化和硝化速率和总量进行了量化,对氮矿化和硝化过程中机理研究还不够深入,对转化过程中微生物氮的变化、土壤温度和湿度的变化还缺乏足够的数量化,需要加强此方面的研究。

国内外有关林地土壤年度净氮矿化量的研究结果为 2300—8700 mg/m^2 , $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占矿化氮的比例为 63%—100%^[30]。本试验半干旱灌丛土壤条件下小叶锦鸡儿不同生长年限土壤净氮矿化量在 2112—6628 mg/m^2 , $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占矿化氮的比例为 76.2%—91.1%,说明灌丛土壤年氮矿化量在林地土壤年氮矿化量范围内。土壤氮的净矿化和硝化作用可指示土壤氮的有效性,净矿化量高说明土壤氮的有效性高。比较小叶锦鸡儿灌丛不同年限间土壤氮净矿化和硝化量,得知随年限延长,土壤净矿化和硝化量逐渐增加,说明随年限延长,土壤向小叶锦鸡儿灌丛供给氮的能力逐渐增强。此外,苏波等^[31]的研究中,林地净矿化氮总量占全氮总量的比例为 0.69%—2.13%,李玉强等^[7]的研究中,沙地净矿化氮总量占全氮总量的比例为 1.04%—5.65%,本研究中灌木丛土壤净矿化氮总量占全氮总量的比例为 1.17%—2.80%,这说明半干旱灌木丛土壤氮的可利用性介于林地和沙地之间。

参考文献 (References):

- [1] Ingsted T. Plant growth in relation to nitrogen supply // Clark F E, Rossval T. Terrestrial Nitrogen Cycles. Stockholm: Ecol. Bull., 1981, 33 (303): 268-271.
- [2] 上官周平,李世清. 旱地作物氮素营养生理生态. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 陈龙池,廖利平,汪思龙,黄志群,高洪. 酚类物质对杉木幼苗¹⁵N 养分吸收、分配的影响. 植物生态学报, 2002, 26(5): 525-532.
- [4] Koblger R L, Rouppet B, Westfall D G, Westfall, Peterson G A. Evaluation of an in situ net soil nitrogen mineralization method in dryland

- agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(2): 504-508.
- [5] Mazzarino M J, Oliva L, Buffa E, Nuñez A, Nuñez G. Nitrogen mineralization and soil fertility in the dry Chaco ecosystem (Argentina). *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 55(2): 515-522.
- [6] 李玉中, 祝廷成, Redmann R E. 三种利用类型羊草草地氮总矿化、硝化和无机氮消耗速率的比较研究. *生态学报*, 2002, 22(5): 668-673.
- [7] 李玉强, 赵哈林, 李玉霖, 崔建垣, 左小安. 科尔沁沙地不同生境土壤氮矿化/硝化作用研究. *中国沙漠*, 2009, 29(3): 438-444.
- [8] Sierra J. Temperature and soil moisture dependence of N mineralization in intact soil cores. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(9/10): 1557-1563.
- [9] Bremer E, Kuikman P. Influence of competition for nitrogen in soil on net mineralization of nitrogen. *Plant and Soil*, 1997, 190(1): 119-126.
- [10] 巨晓棠. 冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤肥料氮的转化及去向. 北京: 中国农业大学, 2000: 55-78.
- [11] 朱兆良. 农田生态系统中化肥氮的去向和氮素管理 // 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 213-249.
- [12] Liu X J, Ju X T, Zhang Y, He C E, Kopsch J, Zhang F S. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 113(1/4): 370-377.
- [13] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, Christie P. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 117-125.
- [14] 牛西午, 丁玉川, 张强, 徐强. 柠条根系发育特征及有关生理特性研究. *西北植物学报*, 2003, 23(5): 860-865.
- [15] 牛西午, 张强, 杨治平, 程滨, 史清亮, 刘平, 李磊. 柠条人工林对晋西北土壤理化性质变化的影响研究. *西北植物学报*, 2003, 23(4): 628-632.
- [16] 王莉, 张强, 牛西午, 杨治平, 张建杰. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4): 53-56.
- [17] 杨治平, 张强, 王永亮, 张建杰, 冀瑞瑞. 晋西北黄土丘陵区小叶锦鸡儿人工灌丛土壤水分动态研究. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2): 352-355.
- [18] 冀瑞瑞, 张强, 杨治平, 张建杰, 王莉. 晋西北黄土高原丘陵区小叶锦鸡儿人工灌丛不同生育阶段土壤肥力特征研究. *山西农业科学*, 2007, 35(3): 5154.
- [19] Yang Z P, Zhang Q, Wang Y L, Zhang J J, Chen M C. Spatial and temporal variability of soil properties under *Caragana microphylla* shrubs in the northwestern Shanxi Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(6): 538-544.
- [20] 董云中, 王永亮, 张建杰, 张强, 杨治平. 晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 955-960.
- [21] Raison R J, Connell M J, Khanna P K. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19(5): 521-530.
- [22] 王斌, 陈亚明, 周志宇. 贺兰山西坡不同海拔梯度上土壤氮素矿化作用的研究. *中国沙漠*, 2007, 27(3): 483-490.
- [23] Li Y S, Redmann R E. Nitrogen budget of *Agropyron dasystachyum* in Canadian mixed prairie. *The American Midland Naturalist*, 1992, 128(1): 61-71.
- [24] Robinson J B. Nitrification in a New Zealand grass land soil. *Plant and Soil*, 1963, 19(2): 173-183.
- [25] Pérez C A, Hedin L O, Armesto J J. Original articles: Nitrogen mineralization in two unpolluted old-growth forests of contrasting biodiversity and dynamics. *Ecosystems*, 1998, 1(4): 361-373.
- [26] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 温度和湿度对我国内蒙古羊草草原土壤净氮矿化的影响. *生态学报*, 2004, 24(11): 2472-2476.
- [27] Vitousek P M, Sanford R L Jr. Nutrient cycling in moist tropical forests. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1986, 17(1): 137-167.
- [28] 傅民杰, 王传宽, 王颖, 刘实. 四种温带森林土壤氮矿化与硝化时空格局. *生态学报*, 2009, 29(7): 3747-3758.
- [29] 牟晓杰, 孙志高, 刘兴土. 黄河口典型潮滩湿地土壤净氮矿化与硝化作用. *中国环境科学*, 2015, 35(5): 1466-1473.
- [30] Gower S T, Son Y. Differences in soil and leaf litter fall nitrogen dynamics for five forest plantations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1959-1966.
- [31] 苏波, 韩兴国, 渠春梅, 黄建辉. 东灵山油松纯林和油松-辽东栎针阔混交林土壤氮素矿化/硝化作用研究. *植物生态学报*, 2001, 25(2): 195-203.