#### DOI: 10.5846/stxb201906131252

葛志强,赵姗宇,林贵刚,孙学凯,胡亚林.降水变化对科尔沁沙地樟子松人工林土壤氮矿化和淋溶的影响.生态学报,2020,40(18):6564-6572. Ge Z Q, Zhao S Y, Lin G G, Sun X K, Hu Y L.Effects of precipitation change on soil nitrogen mineralization and leaching under Mongolian pine plantation in the Horqin Sandy Lands.Acta Ecologica Sinica,2020,40(18):6564-6572.

# 降水变化对科尔沁沙地樟子松人工林土壤氮矿化和淋 溶的影响

葛志强1,赵姗宇<sup>2,3</sup>,林贵刚<sup>2</sup>,孙学凯<sup>2</sup>,胡亚林<sup>1,2,\*</sup>

1 福建农林大学林学院,福州 350002

2 中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地实验站,沈阳 110016

3 中国科学院大学,北京 100049

摘要:为研究降水量减少对沙地森林土壤氮循环过程的影响,以科尔沁沙地15年生樟子松人工林为研究对象,野外模拟不同降水量(自然降水、减少30%和50%)对沙地樟子松人工林土壤无机氮(SIN)含量、氮矿化速率和淋溶动态的影响。研究结果发现,沙地樟子松人工林SIN主要以硝态氮形态存在,模拟降水减少降低土壤硝态氮含量(P<0.05)和硝态氮/SIN值(P<0.001), 而增加土壤铵态氮含量(P<0.05)。与自然降水相比,降水减少降低土壤净硝化速率和净矿化速率(P=0.002),但不同降雨处 理的土壤净氨化速率差异不显著(P=0.86)。科尔沁沙地樟子松人工林土壤以硝态氮淋溶为主,不同降雨处理土壤硝态氮淋溶 量差异不显著(P=0.09),但模拟降水减少降低土壤铵态氮淋溶(P=0.04)。此外,沙地樟子松人工林SIN含量、净氮矿化速率 和淋溶量具有明显月动态特征,与降雨月动态规律基本一致。降水处理和采样时间对SIN含量和净氮矿化速率具有显著交互 作用,但土壤氮淋溶量的交互作用不显著。可见,降水变化能够显著影响科尔沁沙地樟子松人工林土壤氮有效性、氮矿化速率 和淋溶等过程,未来干旱加剧可能降低科尔沁沙地樟子松人工林土壤氮的可利用性。 关键词:科尔沁沙地;樟子松人工林;减少降水;土壤氮矿化;土壤氮淋溶

# Effects of precipitation change on soil nitrogen mineralization and leaching under Mongolian pine plantation in the Horqin Sandy Lands

GE Zhiqiang<sup>1</sup>, ZHAO Shanyu<sup>2,3</sup>, LIN Guigang<sup>2</sup>, SUN Xuekai<sup>2</sup>, HU Yalin<sup>1,2,\*</sup>

1 Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Daqinggou Ecological Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: To evaluate the effects of decreased precipitation on soil N cycle, we investigated monthly dynamics of soil inorganic nitrogen (SIN), nitrogen mineralization rate and leaching in three precipitation treatments (ambient, precipitation reduce by 30% and 50%) under Mongolian pine plantation in the Horqin Sandy Land. Our results showed that soil nitrate was main form of SIN pool in Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *Mongolica*) plantation, and stimulating precipitation reduce could lead to the declines of soil nitrate concentration (P < 0.05) and nitrate/SIN ratio (P < 0.001), but increase of soil ammonium concentration (P < 0.05). Soil net nitrification rate and net mineralization rate decreased in precipitation reduce treatments compared with ambient precipitation (P = 0.002), but there were no differences of soil net ammonification rate among three treatments (P = 0.86). Soil inorganic N was mainly leached through soil nitrate in

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41271318)

收稿日期:2019-06-13; 网络出版日期:2020-07-12

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: huyl@ iae.ac.cn

Mongolian pine plantation, and precipitation could significantly reduce soil ammonium leaching (P=0.04), but there was no difference of soil nitrate leaching (P=0.09). In addition, soil inorganic N concentration, net N mineralization rate and leaching had monthly dynamic characteristics, consistent with the monthly dynamic of precipitation in the Horqin Sandly Land. There were significant interactions between precipitation treatment and sampling time on SIN concentration and soil net nitrogen mineralization rate, but not for soil inorganic N leaching. Our study implies that the change of precipitation can alter soil N availability, mineralization rate and leaching, and in future precipitation reduce may decrease soil nitrogen availability under Mongolian pine plantation in the Horqin Sandy Land.

Key Words: Horqin Sandy land; Mongolian pine plantation; precipitation reduce; soil nitrogen mineralization; soil nitrogen leaching

随着全球气温升高,导致全球降水格局发生显著变化,极端干旱事件发生频率日益增多<sup>[1-2]</sup>。例如,研究 发现我国北方半干旱地区降水呈现逐渐降低趋势,且长时间干旱的频率呈增加趋势<sup>[3-4]</sup>。降雨量或降雨频率 的降低,将直接引起土壤干旱加剧,影响植物和微生物群落结构和功能<sup>[5]</sup>,进而改变陆地生态系统水、碳、氮 循环过程<sup>[6]</sup>。因此,研究降水变化对陆地生态系统结构和过程的影响及对全球气候变化的反馈具有重要 意义。

土壤无机氮是陆地生态系统植物可利用氮的主要存在形态,决定植物的生长和生态系统生产力<sup>[7]</sup>。土 壤无机氮包括 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,其输入和输出动态平衡影响土壤无机氮含量和主要存在形式<sup>[8]</sup>。土壤无机 氮主要来自于土壤微生物参与的氨化作用、硝化作用将土壤有机态氮转化为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N<sup>[9]</sup>。因此,土壤 氮矿化速率是土壤氮有效性指标之一,决定了土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量及存在形式<sup>[10-11]</sup>。同时,一部分土 壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 能够被植物直接吸收和利用,另一部分能够被土壤微生物固持并重新同化为有机态氮。 此外,土壤氮淋溶和气态氮(N<sub>2</sub>、NO 和 N<sub>2</sub>O 等)损失等能够影响土壤氮的有效性。土壤无机氮有效性受到土 壤氮矿化速率、植物吸收和利用偏好、土壤微生物固持以及挥发和淋溶等过程的综合影响<sup>[12]</sup>。

降水变化能够显著改变陆地生态系统氮循环过程,一方面降水变化能够直接影响土壤水分、侵蚀和淋溶, 另一方面降水能够影响植物、微生物的氮吸收和转化,进而直接或间接地改变土壤氮循环过程<sup>[13]</sup>。 Homyak<sup>[14]</sup>报道了在相对干旱地区由于降水减少限制植物根系对土壤氮的吸收,进而增加土壤无机氮含量。 然而,在相对湿润地区,降水增加会导致土壤氮淋溶流失增加<sup>[13, 15]</sup>。同时,降水变化对土壤氮矿化速率的影 响亦存在不确定性,随着土壤水分增加,土壤氮矿化速率呈增加<sup>[16]</sup>、降低<sup>[17]</sup>或无显著差异<sup>[15]</sup>。

科尔沁沙地位于我国半干旱亚湿润地区,是我国三北防护林建设的重要区域,长期以来已营造大面积沙 地樟子松人工林。然而,自 20 世纪 90 年代开始,早期引种的樟子松人工林出现生产力降低等衰退现象<sup>[18]</sup>。 在干旱/半干旱地区,土壤水分是调控植物生长的关键因子。近年来,有研究表明在干旱/半干旱地区森林生 态系统生产力可能受土壤水和氮的共同限制,而并非单一水分因子限制<sup>[19-20]</sup>。基于自然降水梯度或年际降 水变化,有研究开展了降水变化对沙地樟子松人工林生长<sup>[21]</sup>、叶片水分利用效率<sup>[22]</sup>和N、P 养分含量及生态 化学计量比特征<sup>[23]</sup>的影响。然而,针对降水减少是否降低土壤氮养分有效性,进而导致沙地樟子松人工林生 产力衰退的问题依然不清楚。因此,开展降水减少对土壤氮有效性的影响研究十分必要,有助于更好辨识干 旱/半干旱地区森林生产力衰退的关键驱动机理<sup>[13]</sup>。本研究采用野外模拟降水减少控制试验,研究干旱加剧 对沙地樟子松人工林土壤无机氮含量以及土壤氮矿化速率和氮淋溶过程的影响,以期揭示沙地樟子松人工林 土壤氮养分有效性对干旱加剧的响应机制。

# 1 研究材料与方法

# 1.1 研究区概况

研究地区位于科尔沁沙地东南缘中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地生态实验站(42°58′N,

40 卷

122°21′E,海拔 260 m),该地区属于半干旱亚湿润型气候,年降水量 450 mm 左右,降雨主要集中在 7—8 月 份,年均蒸发量 1780 mm,年均气温  $6.4^{\circ}$ ,最高月平均气温  $23.8^{\circ}$ ,最低月平均气温  $-12.5^{\circ}$ ,年均总辐射 5035 MJ/m<sup>2</sup>,10°C以上积温 2890°C,无霜期 150 d(1960—2016 年气象站数据均值)。土壤类型为风沙土,沙粒含量 91%,粉粒含量 5%,粘粒含量 4%,土壤容重约 1.4 g/cm<sup>3</sup>,土壤有机碳含量 4.04 g/kg,土壤全 N 含量 0.22 g/kg,土壤全磷含量 74 mg/kg。林下植被主要为狗尾草(Setaria viridis)、猪毛蒿(Artemisia scoparia)、芦苇(Phragmites communis)、兴安胡枝子(Lespedeza davurica)和细叶胡枝子(Lespedeza hedysaroides)等。

1.2 模拟干旱梯度试验

2017年4月份,选择1块15年生沙地樟子松人工 林,林分密度1333株/hm<sup>2</sup>,平均树高7.8m,平均胸径 12.79 cm,本研究共设置3个试验处理:自然降雨 (CK)、减少30%降水(D30)和减少50%降水(D50),每 个处理设置3块重复样方,随机分布于9块15m× 15 m的样方。在林冠下布设V字型透明PVC板截留 降水,通过PVC板面积进行减少降水30%和50%试验 处理。为避免PVC截水板对林下光照、气温等微气候 的影响,在CK处理布设呈倒V型透明PVC板。同时, 在研究样地附近安装1套全自动雨量记录仪,测定样地 降水量和气温(图1)。





1.3 样品采样与分析

2017年5—10月份,在沙地樟子松人工林生长季 节每月进行样品采集。在每月中旬,用土钻(直径4 cm)采集土壤样品,每个样地随机采集0—10 cm 和10— 20 cm 土层土壤样品,立即带回实验室用于土壤水分含量、土壤铵态氮(NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N)和硝态氮(NO<sup>3</sup><sub>3</sub>-N)含量测定。

土壤净氨化速率、净硝化速率和土壤无机氮淋溶量采用离子交换树脂芯法测定<sup>[19,24]</sup>。首先,在每个样方中随机选取5个采样点,将PVC管(内径4 cm,高20 cm)砸入土中;然后,将PVC管小心取出,去掉管子底端1 cm 土壤,随后依次放上滤纸(直径4 cm)、阳离子和阴离子交换树脂(4 g 阳离子交换树脂,钠型,强酸性,732#树脂;6 g 阴离子交换树脂,氯型,强碱性,717#树脂)和无色透明盖(SANA 高级亚克力板,中心留有数个直径0.5 mm 圆孔,确保降雨能够顺利排出);最后,将PVC管重新放回土壤野外培养1个月后取回,取出离子交换树脂,并将土壤分层为0—10 cm 和10—20 cm,用于测定土壤和离子交换树脂 NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>3</sup>-N 含量。

土壤样品带回实验室后,立即过 2 mm 土壤筛,随后用 2 mol/L KCI 溶液按照 1:2.5(±:水,w/v)浸提土壤 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N,利用连续流动注射分析仪(Brand+Luebbe,德国)测定浸提液中 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N 含量。同 样,用 2 mol/L KCI 溶液按照 1:5(树脂:水,w/v)浸提树脂吸附的 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N,利用连续流动注射分析仪 测定浸提液中 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N 含量。土壤含水量采用烘干法测定。

1.4 数据计算与统计分析

土壤净氨化速率(mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)=(培养后的铵态氮量(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)+树脂吸收铵态氮量(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)-培养前的铵态氮量(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N))/培养时间

土壤净硝化速率(mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)=(培养后土壤硝态氮量(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N)+树脂吸收硝态氮量(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N)-培养前的 硝态氮量(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N))/培养时间

土壤净氮矿化速率(mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)=(培养后的无机氮量(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N+ NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)+树脂吸收的无机氮量(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N))-培养前的无机氮量(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N+ NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N))/培养时间

土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 或 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶量=树脂吸收 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 或 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 量/土干重

首先,采用一般线性模型(GLM)分析降水处理、土层和采样时间对各指标的效应及其交互性作用,并用

Tukey HSD 进行降水处理均值的多重比较,统计显著水平为 P<0.05。数据统计分析与绘图分别采用 R 3.5.1 和 SigmaPlot 10.0 软件进行。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 降水变化对土壤含水量的影响

降水变化、土层和采样时间均能够显著影响土壤含水量,且存在显著的土层×时间的交互性效应(表1)。 在不同月份,土壤含水量与降水量变化趋势基本一致,土壤含水量随着降水量增加而增加(图2)。与 CK 处 理相比,D30和 D50处理土壤含水量分别降低 14.6%和 31.8%,其中 CK 与 D50处理差异达显著性水平(P= 0.005)。此外,沙地樟子松人工林 10—20 cm 土层含水量显著高于 0—10 cm 土层(P=0.01)。



图 2 降水变化对 0-10 cm 和 10-20 cm 土层土壤含水量的影响 Fig.2 Effects of precipitation change on soil water content at 0-10 cm and 10-20 cm depth

#### 表 1 不同处理因子(降水变化、土层和采样时间)对樟子松人工林土壤含水量和土壤无机 N 含量及形态影响的方差分析

Table 1Three-ways ANOVA of soil water content, soil inorganic N concentration and forms among precipitation change, soil depth, samplingtime and their interactions in the Mongolian pine plantation

	df	含水量 Water content	铵态氮 Ammonium	硝态氮 Nitrate	总无机 N Total inorganic N	硝态氮/SIN Nitrate/SIN
降水处理 Precipitation(P)	2	23.26 ***	4.73 *	4.13 *	2.61	7.80 ***
土层深度 Soil depth(D)	1	6.45 *	27.37 ***	1.44	5.15 *	2.57
取样时间 Sampling time(T)	4	71.95 ***	201.04 ***	39.94 ***	81.99 ***	12.73 ***
P×D	2	1.22	0.48	0.45	0.48	1.36
P×T	8	1.29	0.78	3.40 **	2.82 *	1.66
D×T	4	3.20*	2.29	1.18	1.67	1.09
P×D×T	8	0.42	0.48	0.05	0.03	0.33

表中数值为统计分析 F值; \*,\*\*和\*\*\*分别表示差异显著性水平 P<0.05, P<0.01和 P<0.001; SIN: 土壤无机氮 Soil inorganic nitrogen

# 2.2 降水对土壤无机 N 含量及形态的影响

降水变化能够显著改变沙地樟子松人工林土壤 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 含量(表 1)。减少降水能够增加土壤 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 含量,CK、D30 和 D50 处理土壤 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 含量均值分别为 0.89 mg/kg、0.87 mg/kg 和 1.07 mg/kg(图 3)。 然而,减少降水导致土壤 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 含量降低,CK、D30 和 D50 处理土壤 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 含量分别为 2.36 mg/kg、1.87 mg/kg 和 1.43 mg/kg。此外,减水处理和时间对土壤 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 和 SIN 含量的影响具有显著的交互性。沙地樟子松 人工林土壤无机氮均以 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 形式为主,但随着降水量减少,土壤 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 占 SIN 的比例逐渐降低,D50 土壤 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 所占比例显著低于 CK(P=0.01)和 D30(P=0.04)。

N、NO3-N、SIN 含量和 NO3-N:SIN 比例存在明显的月动态特征。土壤 NH4-N、NO3-N、SIN 含量在 7 月份显著 高于其他月份,但土壤 NO<sub>3</sub>-N:SIN 比值在 9 月份达到最大,且显著高于其他月份(图 3)。



图 3 降水变化对土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 SIN 含量及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:SIN 比例的影响

Fig.3 The impacts of precipitation change on soil NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and total inorganic N concentrations, and the ratio of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N to total inorganic N

2.3 降水变化对土壤净氨化、净硝化和净氮矿化速率的影响

除9—10月份 D50 处理土壤净氨化速率显著低于 CK(P=0.01),不同降水处理土壤净氨化速率差异不显 著(图4)。然而,土壤净硝化速率和净氮矿化在不同降水处理间差异显著(图4)。在 6—7月份,D30(P= 0.02)和 D50(P=0.003)处理土壤净硝化速率显著低于 CK 处理;然而,7—8月份,减少降水处理增加土壤净 硝化速率,其中 D50 处理土壤净硝化速率显著高于 CK(P=0.04)。同样,在 6—7月和 7—8月份,不同降水处 理土壤净氮矿化速率差异显著。降水处理和时间对土壤净氨化、净硝化和净氮矿化速率均存在显著交互性 作用。

土壤净氨化、净硝化和净氮矿化速率具有一致的月动态特征。土壤净氨化速率在 7—8 月份显著低于其他月份,表现为铵态氮固持。然而,在 6—7 月份土壤净硝化、净氮矿化速率达到最大值,且显著高于其他月份。此外,在 8—9 月份土壤净氮矿化速率显著高于 7—8 月份(P<0.001)和 9—10 月份(P<0.001)土壤净氮矿化速率。



图 4 降水变化对土壤净氨化速率、净硝化速率和净氮矿化速率的影响

Fig.4 The impacts of precipitation change on soil net ammonification rate, net nitrification rate and N mineralization rate

#### 2.4 降水对土壤 NH<sup>+</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N 淋溶量的影响

在不同降水处理樟子松人工林土壤 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N 淋溶量月动态规律基本一致,且主要以 NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N 形式 淋溶,土壤 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 淋溶流失较少(图 5)。降水量变化显著影响土壤 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 淋溶量(图 5, P=0.04),但不同降 水处理间土壤 NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N 淋溶量差异并未达到显著性水平(图 5, P=0.09)。

不同月份土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶量存在显著差异性。在 7—8 月份,土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶量均 达最大值,且土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋溶量在 5—6 月份和 7—8 月份显著高于 6—7 月份和 8—9 月份,在 9—10 月份不 同降水处理均未发现土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋溶。同样,土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶量在 7—8 月份显著高于其他月份,且土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶量在 5—6 月份显著高于 6—7 月份(*P*=0.02)和 8—9 月份(*P*=0.009)。

3 讨论

降水变化能够影响植物 N 吸收、土壤微生物数量和活性以及土壤 N 淋溶等过程,直接或间接地影响土壤





无机氮的 NH<sup>+</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N 含量及存在形态<sup>[13]</sup>。本研究发现,降水量减少显著提高土壤 NH<sup>+</sup><sub>4</sub>-N 含量。该研 究结果与 Homyak 等<sup>[14]</sup>的研究结果相一致,其原因可能是由于土壤水分含量降低限制了植物对 NH<sub>4</sub>-N 的吸 收,且减少降水处理具有较低的土壤硝化速率。同样, Cregger 等<sup>[13]</sup> 在美国新墨西哥半干旱地区杜松-矮松 (Pinus edulis-Juniperus monosperma)林地开展降水控制试验研究发现减少降水能够增加土壤 NH<sup>+</sup><sub>4</sub>-N 含量。然 而,任艳林<sup>[15]</sup>在我国塞罕坝开展樟子松人工林降水量变化研究发现减少 30%降水量对土壤 NH<sup>+</sup><sub>4</sub>-N 含量影响 不显著。本研究发现,CK(0.89 mg/kg)和D30(0.87 mg/kg)处理土壤 NH₄-N 含量差异不显著,但与 CK 相比 土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在 D50(1.07 mg/kg)处理增加 20%。此外,本研究发现减少降水导致沙地樟子松人工林土 壤 NO<sub>3</sub>-N 含量降低,其原因可能与减水处理降低土壤硝化速率有关(图 4)。该结果与以往研究结果不一致, Cregger 等<sup>[13]</sup>发现减少降水可能降低植物对土壤无机氮吸收和 NO<sub>3</sub>-N 淋溶流失,进而增加土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量。 任艳林<sup>[15]</sup>研究发现,增加降水导致土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量降低,但减少 30%降水处理对土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量影响不显 著。可见,降水量变化对土壤 NO<sub>5</sub>-N 含量的影响依然存在不一致性,可能受植被组成、土壤类型、气候条件以 及季节等因素影响,有待进一步深入研究。此外,本研究发现科尔沁沙地樟子松人工林土壤无机氮主要以 NO<sub>3</sub>-N 为主,这与陈伏生等<sup>[19]</sup>的研究结果一致,该地区土壤类型为沙质土,土壤通气条件良好且酸碱度适中, 有利于硝化细菌的活动,从而导致大量 NH<sub>4</sub>-N 通过硝化作用转变为 NO<sub>5</sub>-N。由于减少降水导致樟子松人工 林土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N 含量变化呈相反的趋势,土壤总无机氮含量在不同降水处理差异不显著,但随着降水 减少土壤 NO<sub>4</sub>-N 含量占总无机氮比例呈逐渐降低趋势,表明降水减少能够显著改变土壤无机氮存在形式。

通常,无机氮主要来自于土壤微生物参与的氨化作用和硝化作用将土壤有机态氮转变为 NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N 和 NO<sub>3</sub>-N<sup>[25]</sup>,土壤氮矿化速率往往能够指示土壤氮有效性<sup>[7,19]</sup>。目前,有关降水变化对土壤氮矿化作用的影响结论 并不一致。例如,有研究发现减少降水能够显著降低土壤硝化速率<sup>[26-27]</sup>。然而,Zhang 等<sup>[28]</sup>发现随着湿度指 数增加土壤总氮矿化速率和硝化速率均呈下降趋势。任艳林<sup>[15]</sup>研究发现增加和减少降水均能够提高土壤净 硝化速率。本研究发现,不同降水处理和时间对土壤净氨化速率、净硝化速率和净矿化速率均存在显著的交 互性作用。在 9—10 月份,D50 处理土壤净氨化速率显著低于 CK 处理,而其他月份不同降水处理差异并不 显著。同样,减少降水处理对土壤净硝化速率的影响亦不同;在 6—7 月份,减少降水导致土壤净硝化速率降 低,而在 7—8 月份,减少降水反而增加土壤净硝化速率。可见,减少降水对土壤氨化作用和硝化作用的影响 与取样时间有关,可能受到当月降水量大小的影响;在降水量较小的月份,进一步减少降水能降低土壤氨化作 用和硝化作用;然而,在降水量比较充足的月份,减少降水反而有利于提高土壤净硝化作用。同样,Zhang 等<sup>[28]</sup>研究发现,在不同降水量地区降水变化对土壤氮转化速率的影响不同。有研究表明,土壤氮矿化速率存 在临界土壤水分含量,低于临界值时土壤硝化速率随土壤含水量增加而增加,当土壤水分含量高于临界值时 土壤硝化速率会随着土壤含水量的降低而增加<sup>[29-30]</sup>。降水能够影响土壤孔隙中氧气含量、土壤养分扩散等 过程,进而直接或间接地改变参与土壤氨化作用和硝化作用微生物的数量和活性,从而改变土壤氮转化 速率<sup>[31-32]</sup>。

土壤 NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N 的淋溶是土壤氮输出生态系统的主要途径之一,能够影响土壤有效性氮含量<sup>[33]</sup>。 本研究发现,不同降水处理土壤无机氮淋溶均以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶为主,其原因是土壤 NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N 往往易吸附于土壤中 矿物质或带负电荷的有机物质表面<sup>[9]</sup>。虽然,减少降水提高了土壤 NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N 含量,但土壤 NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N 淋溶量却显 著低于对照,其原因可能是由于土壤水分降低导致土壤 NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N 更易于被土壤固持。然而,本研究发现在降水 量较高的月份(7—8 月份)随着减水处理土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N 含量降低,减少降水处理土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶量呈一定程度 的降低。

同时,本研究发现土壤无机氮含量、氮矿化速率和淋溶氮有效性存在显著的月动态特征,且存在显著的降水处理×时间交互性作用。在8月份,降水量和土壤含水量均达到最大值,但土壤 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 含量却在7月份达到最大值。有研究认为温度可能比降水量对土壤微生物的影响更加明显,进而显著改变土壤氮周转过程<sup>[13,34]</sup>。在本研究,土壤无机氮含量在7月份达到最大值的原因可能包括2个方面:一方面,科尔沁沙地降水和气温在7月份更加适宜,土壤氨化速率和硝化速率在6—7月份达到最大值,而8月份过多的降水可能引起土壤孔隙中氧气较低而形成厌氧条件,进而限制土壤中参与土壤氨化作用和硝化作用微生物的数量和活性;另一方面,在7—8月份较高的降水可能导致土壤中 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 被较多淋溶流失。

#### 4 结论

综上研究表明,降水是驱动科尔沁沙地樟子松人工林土壤氮周转过程的重要环境因子,减少降水能够提高土壤 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 含量,但降低土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量,且土壤无机氮存在形态随降水量减少而发生改变。在不同月份,土壤净氨化速率和净硝化速率对降水减少的响应不同,表明土壤氮矿化速率对降水变化的响应受自然降水条件的影响。在降水量较低月份,进一步减少降水能够抑制土壤氮矿化,而在降水量较大月份,适当的减少降水处理反而能够提高沙地樟子松人工林土壤氮矿化速率。此外,在科尔沁沙地樟子松人工林,降水减少能够降低土壤 N 淋溶流失。本研究采用野外模拟降水变化的控制试验,为深入了解未来降水减少对科尔沁沙地樟子松人工林土壤氮循环影响提供理论依据。然而,本文未考虑植物氮吸收、土壤气态 N 排放等土壤氮周转过程,今后需进一步开展相关方面的研究。

#### 参考文献(References):

- [1] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, Changnon S A, Karl T R, Mearns L O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. Science, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [2] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO<sub>2</sub> flux in a Sonoran Desert ecosystem. Global Change Biology, 2007, 13(2): 426-436.
- [3] Gong D Y, Shi P J, Wang J A. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China. Journal of Arid Environments, 2004, 59 (4): 771-784.
- [4] 陆咏晴,严岩,丁丁,赵春黎,宋扬,赵景柱.我国极端干旱天气变化趋势及其对城市水资源压力的影响.生态学报,2018,38(4): 1470-1477.
- [5] McHugh T A, Schwartz E. A watering manipulation in a semiarid grassland induced changes in fungal but not bacterial community composition. Pedobiologia, 2016, 59(3): 121-127.
- [6] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Williams D G, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Shaw M R, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. BioScience, 2003, 53(10): 941-952.
- [7] Binkley D, Hart S C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils//Stewart B A, ed. Advances in Soil Science. New York: Springer, 1989: 57-112.
- [8] Das A K, Boral L, Tripathi R S, Pandey H N. Nitrogen mineralization and microbial biomass-N in a subtropical humid forest of Meghalaya, India.

Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(9/10): 1609-1612.

- [9] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Berlin: Springer, 2011.
- [10] Reich P B, Grigal D F, Aber J D, Gower S T. Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. Ecology, 1997, 78(2): 335-347.
- [11] 李志杰,杨万勤,岳楷,贺若阳,杨开军,庄丽燕,谭波,徐振锋.温度对川西亚高山3种森林土壤氮矿化的影响.生态学报,2017,37 (12):4045-4052.
- [12] 李巍, 刘兰英, 陈丽华, 林碧娇, 李玥仁. 武夷山常绿阔叶林土壤氮素矿化过程的研究. 福建农业学报, 2015, 30(6): 594-598.
- [13] Cregger M A, McDowell N G, Pangle R E, Pockman W T, Classen A T. The impact of precipitation change on nitrogen cycling in a semi-arid ecosystem. Functional Ecology, 2015, 28(6): 1534-1544.
- [14] Homyak P M, Allison S D, Huxman T E, Goulden M L, Treseder K K. Effects of drought manipulation on soil nitrogen cycling: a meta-analysis. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(12): 3260-3272.
- [15] 任艳林. 降水变化对樟子松人工林土壤无机氮和净氮矿化速率的影响. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(6): 925-932.
- [16] Tracy B F, Frank D A. Herbivore influence on soil microbial biomass and nitrogen mineralization in a northern grassland ecosystem: Yellowstone National Park. Oecologia, 1998, 114(4): 556-562.
- [17] Aranibar J N, Otter L, Macko S A, Feral C J W, Epstein H E, Dowty P R, Eckardt F, Shugart H H, Swap R J. Nitrogen cycling in the soil-plant system along a precipitation gradient in the Kalahari sands. Global Change Biology, 2004, 10(3): 359-373.
- [18] 朱教君, 曾德慧, 吴祥云, 范志平. 沙地樟子松人工林衰退机制. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [19] 陈伏生,曾德慧,范志平,陈广生,Singh A N. 沙地不同树种人工林土壤氮素矿化过程及其有效性. 生态学报, 2006, 26(2): 341-348.
- [20] 宋立宁,朱教君,郑晓. 基于沙地樟子松人工林衰退机制的营林方案. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3249-3256.
- [21] 焦树人. 干旱对章古台沙地樟子松人工林生长的影响. 林业科技, 1986, 22(4): 419-425.
- [22] 宋立宁,朱教君,李明财, 闫涛, 张金鑫. 不同降水条件下科尔沁沙地南缘疏林草地樟子松针叶 δ<sup>13</sup>C 和叶性状特征. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1435-1440.
- [23] 赵姗宇,黎锦涛,孙学凯,曾德慧,胡亚林.樟子松人工林原产地与不同自然降水梯度引种地土壤和植物叶片生态化学计量特征.生态 学报,2018,38(20):7189-7197.
- [24] 杨小红, 董云社, 齐玉春, 耿元波, 刘立新. 内蒙古羊草草原土壤净氮矿化研究. 地理科学进展, 2005, 24(2): 30-37.
- [25] Kolberg R L, Rouppet B, Westfall D G, 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.
- [26] Stark J M, Firestone M K. Mechanisms for soil moisture effects on activity of nitrifying bacteria. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61 (1): 218-221.
- [27] Hartmann A A, Barnard R L, Marhan S, Niklaus P A. Effects of drought and N-fertilization on N cycling in two grassland soils. Oecologia, 2013, 171(3): 705-717.
- [28] Zhang J B, Wang L, Zhao W, Hu H F, Feng X J, Müller C, Cai Z C. Soil gross nitrogen transformations along the Northeast China Transect (NECT) and their response to simulated rainfall events. Scientific Reports, 2016, 6: 22830.
- [29] Guntiñas M E, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, Gil-Sotres F. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study. European Journal of Soil Biology, 2012, 48: 73-80.
- [30] 刘巧辉. 应用 BaPS 系统研究旱地土壤硝化一反硝化过程和呼吸作用[D]. 南京:南京农业大学, 2005.
- [31] Gu C H, Riley W J. Combined effects of short term rainfall patterns and soil texture on soil nitrogen cycling a modeling analysis. Journal of Contaminant Hydrology, 2010, 112(1/4): 141-154.
- [32] 马芬,马红亮,邱泓,杨红玉.水分状况与不同形态氮添加对亚热带森林土壤氮素净转化速率及 N<sub>2</sub>O 排放的影响.应用生态学报,2015, 26(2):379-387.
- [33] 高海鹰,黄丽江,张奇,徐力刚.不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证.农业环境科学学报,2008,27(4): 1346-1352.
- [34] Allison S D, Treseder K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. Global Change Biology, 2008, 14(12): 2898-2909.