

## 密度调控对女贞人工林土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响

卢雯, 丁辉, 邱雷, 关庆伟\*

(南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** 以江苏省扬州市江都区女贞人工林为对象, 研究了密度调控对其土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响。结果表明, 3 种密度下土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量均是秋季和春季较高, 冬季最低。秋季时, 3 种密度下 N<sub>2</sub>O 排放通量大小比较为 4225 株·hm<sup>-2</sup> (9.985 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) > 1050 株·hm<sup>-2</sup> (8.195 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) > 2275 株·hm<sup>-2</sup> (6.971 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 但各密度间差异不显著 (P > 0.05)。冬季时, N<sub>2</sub>O 排放通量下降明显, 其中 4225 株·hm<sup>-2</sup> 密度 (-10.355 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 和 2275 株·hm<sup>-2</sup> 密度 (-2.716 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 均为负值, 且两者明显低于 1050 株·hm<sup>-2</sup> 密度下 N<sub>2</sub>O 排放通量 (2.629 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)。春季伴随着温度的回升, 各密度下 N<sub>2</sub>O 排放通量均显著增加, 并达到 4 个季度中的最高值, 其中 2275 株·hm<sup>-2</sup> 密度下排放通量最低 (7.513 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 且与 4225 株·hm<sup>-2</sup> (11.839 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 和 1050 株·hm<sup>-2</sup> (12.175 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 密度间差异达到极显著水平 (P < 0.01)。夏季时, 3 种密度下 N<sub>2</sub>O 排放通量分别为 4225 株·hm<sup>-2</sup> (3.201 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 2275 株·hm<sup>-2</sup> (7.658 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 和 1050 株·hm<sup>-2</sup> (6.804 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 各密度间差异并不显著 (P > 0.05)。土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土温呈极显著正相关 (P < 0.01), 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量间则呈极显著负相关 (P < 0.01)。土壤氮矿化速率与 N<sub>2</sub>O 排放通量也呈线性相关极显著 (P < 0.01), 说明密度调控作用于土壤因子, 并对 N<sub>2</sub>O 排放产生明显影响。

**关键词:** 密度调控; 女贞人工林; N<sub>2</sub>O 排放; 土壤因子

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2015)02-0186-06

### Effect of density-dependent regulation on N<sub>2</sub>O emission in *Ligustrum lucidum* plantation

LU Wen, DING Hui, QIU Lei, GUAN Qingwei

(College of Forest Resource and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

**Abstract:** The effect of density-dependent regulation on soil N<sub>2</sub>O flux in *Ligustrum lucidum* plantation in Jiangdu district of Yangzhou was studied. The results showed that the fluxes under the three densities had high values in autumn and spring and low values in winter. In autumn, the average of N<sub>2</sub>O flux showed: 4225 tree/hm<sup>2</sup> (9.985 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) > 1050 tree/hm<sup>2</sup> (8.195 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) > 2275 tree/hm<sup>2</sup> (6.971 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>). In winter, the N<sub>2</sub>O flux significantly decreased in which both 4225 tree/hm<sup>2</sup> (-10.355 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) and 2275 tree/hm<sup>2</sup> (-2.716 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) were significantly lower than 1050 tree/hm<sup>2</sup> (2.629 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>). The N<sub>2</sub>O flux in the plot with a density of 2275 tree/hm<sup>2</sup> (7.513 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) was lower than that in other two plots and the difference was highly significant (P < 0.01). In summer, the N<sub>2</sub>O fluxes in three plantation densities were as follows: 4225 tree/hm<sup>2</sup>, 3.201 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; 2275 tree/hm<sup>2</sup>, 7.658 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; and 1050 tree/hm<sup>2</sup>, 6.804 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>. The N<sub>2</sub>O flux had a significant positive relationship with soil temperature (P < 0.01), while it had an extremely negative correlation with NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content (P < 0.01). A highly significant correlation between N<sub>2</sub>O flux and soil nitrogen mineralization (P < 0.01) was also observed. It is suggested that density-dependent regulation would affect soil factors and have significant influence on N<sub>2</sub>O emission.

**Key words:** density-dependent regulation; *Ligustrum lucidum* plantation; N<sub>2</sub>O emission; soil factors

N<sub>2</sub>O 作为增温效应最强烈的温室气体<sup>[1]</sup>, 其排放对全球气候变化有着显著的影响, 并在整个生物

圈氮素循环过程中起着重要作用, 因而对 N<sub>2</sub>O 排放的研究已成为国际生态学领域探讨的热点问题之

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑项目 (2011BAD38B03-2) 和江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD) 共同资助。

作者简介: 卢雯, 硕士研究生。E-mail: lu881122@163.com

\* 通信作者: 关庆伟, 教授, 博士生导师。E-mail: guan-japan999@163.com

一。目前国内外学者就不同干扰类型对 N<sub>2</sub>O 的排放规律及影响因子进行了大量研究, 且多集中于农田和湿地生态系统。马晓菲等<sup>[2]</sup>研究发现, 随着有机肥施入量的增加, 土壤微生物量增加, 土壤的反硝化能力也在增强, 从而使 N<sub>2</sub>O 的排放通量增大。Liu 等<sup>[3]</sup>研究表明, 将森林开垦为农业用地(果园)后, N<sub>2</sub>O 排放通量从 (3.03±0.22) kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 增大为 (8.64 ±0.61) kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 说明毁林开荒会增加土壤 N<sub>2</sub>O 的排放。唐海明等<sup>[4]</sup>研究了冬季覆盖作物对 N<sub>2</sub>O 的影响, 结果显示, 不同冬季覆盖作物下 N<sub>2</sub>O 排放通量均显著高于未覆盖样地, 且翻耕移栽油菜处理的 N<sub>2</sub>O 综合温室效应最大。Korhonen 等<sup>[5]</sup>对欧洲寒带赤松林土壤氮平衡的研究表明, 该地区土壤约 3/4 的氮流失是以 N<sub>2</sub>O 的形态排放出去的, 全年土壤累计 N<sub>2</sub>O 排放量为 0.2 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 且 N<sub>2</sub>O 排放量约为 NO 气体的 20 倍。Guntars 等<sup>[6]</sup>研究表明, 适量的氮素补充 (50 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 会刺激微生物活动, 并使得土壤有机层面净硝化作用产生的 N<sub>2</sub>O 量增加, 从而促进了土壤氮释放。

森林是陆地上最大的生态系统, 并对温室气体的调控起到关键作用。目前对森林生态系统温室气

体方面的研究多集中于 CO<sub>2</sub> 气体, 而对 N<sub>2</sub>O 排放的研究并不多见。森林土壤作为重要的氮库, 如何减少 N<sub>2</sub>O 这一主要温室气体的排放是维持其氮平衡的关键所在。密度调控不仅是人工林培育的基本措施<sup>[7]</sup>, 也是一种重要的人为干扰类型。为此, 作者选取女贞这一常见的城市绿化树种, 研究密度调控对其土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响, 以期为健康经营城市森林, 缓解温室效应提供一定的科学依据。

## 1 研究区概况

试验地位于江苏省林科院苗木基地, 地处江苏省扬州市江都区横沟村。该基地占地 97.4 km<sup>2</sup>, 地理坐标为北纬 32°17'51" ~ 32°48'00", 东经 119°27'03" ~ 119°54'23"。气候属亚热带湿润气候区, 年平均气温 14.9℃, 降水量 978.7 mm, 四季分明, 无霜期较长。

该基地女贞 (*Ligustrum lucidum*) 面积超过 40 km<sup>2</sup>, 并大量种植杂交马褂木 (*Liriodendron chinense*)、枫香 (*Liquidambar formosana Hance*)、黄山栾树 (*Koelreuteria integrifoliola*)、北美红枫 (*Acer rubru*)、樟叶槭 (*Acer cinnamomifolium*) 等城市绿化树种。

表 1 密度调控前样地基本概况

Table 1 The basic overview of *Ligustrum lucidum* plantation before density-dependent regulation

密度/株·hm <sup>-2</sup> Density	树高/m Tree height			胸径/cm DBH			冠幅/m Crown diameter		
	Maximum	Mean	Minimum	Maximum	Mean	Minimum	Maximum	Mean	Minimum
4225	5.80	5.30	4.70	8.10	5.60	3.00	2.30	1.83	1.00

表 2 密度调控前样地土壤基本理化性质

Table 2 The basic physical and chemical properties of soil before density-dependent regulation

土层/cm Soil layer	含水量/% Moisture	有机质/% Organic matter	全钾/% Total K	全氮/% Total N	全磷/% Total P
0~10	26.80	2.58	0.76	0.17	0.06
10~20	22.24	1.51	0.77	0.12	0.07
20~40	19.85	1.32	0.82	0.076	0.04

## 2 材料与分析

### 2.1 样地设置

选取 7 年生株行距 1.5 m×1.5 m (密度为 4225 株·hm<sup>-2</sup>) 的女贞纯林为研究对象, 于 2011 年 11 月, 结合生产单位培育大苗, 在原有株间距基础上分别进行隔行移植以及隔行和隔列移植, 将密度调控为株行距 1.5 m×3.0 m, 3.0 m×3.0 m, 并保留原密度为对照样地, 调控前的样地基本情况和土壤的基本理化性质见表 1 和表 2。调控后, 3 种密度分别为 4225 株·hm<sup>-2</sup> (高密度林分), 2275 株·hm<sup>-2</sup> (中密度林分), 1050 株·hm<sup>-2</sup> (低密度林分)。在 3 种不同密度的试

验地中分别随机设置 3 块 20 m×20 m 的样地, 共计 9 块标准地, 各样地间隔 30 m 以上。每块重复样地各布置一处采样点, 用静态箱法收集 N<sub>2</sub>O 气体, 共计 9 个静态箱。采样时间为密度调控 1 年后, 即 2012 年 10 月, 12 月以及 2013 年 3 月, 6 月 (即分秋季, 冬季, 春季, 夏季四季采样), 并分析调控后女贞林样地的概况和各样地土壤的基本理化性质。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 N<sub>2</sub>O 气体的采集** N<sub>2</sub>O 气体样品的采集利用静态箱法, 该装置为 50 cm×50 cm×40 cm 四面和顶部封闭的 PVC 材质采样箱, 箱顶内部装有小风扇和一个温度计。采气孔开在箱壁上, 箱底基座采用

PVC 材质槽架, 插入地下 15 cm, 以减少采样时对基座和周围环境的扰动。实验采用 3 个平行重复, 同时采集气样。每次采样时间集中在上午 9:00 至 10:00 左右。样品采集用 100 mL 注射器通过采气孔

收集, 在 30 min 内每隔 10 min 采集 1 次气体, 并转移至 100 mL 采气袋中带回实验室用气象色谱仪电子捕获器分析。在每次采样的同时, 利用温度表记录箱内温度, 土温计测定 0~10 cm 土层温度。

表 3 密度调控 1 年后女贞林各样地概况

密度/株·hm <sup>-2</sup> Density	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average tree height	平均冠幅/m Average crown diameter
4225	6.61	4.86	1.21
2275	6.92	5.69	1.36
1050	6.23	4.01	0.97

表 4 密度调控 1 年后女贞林各样地土壤基本理化性质

密度/株·hm <sup>-2</sup> Density	土层/cm Soil layer	有机质/% Organic matter	含水量/% Moisture	pH	全碳/g·kg <sup>-1</sup> Total C	全氮/g·kg <sup>-1</sup> Total N	C/N	速效氮/mg·kg <sup>-1</sup> Available N
4225	0~10	2.73	18.59	6.03	13.89	2.11	6.52	178.53
	10~25	1.56	17.79	6.70	6.79	1.33	5.07	94.20
	25~40	1.19	18.13	7.15	4.34	0.98	4.47	66.03
2275	0~10	2.98	11.23	5.65	13.76	1.91	7.20	186.75
	10~25	2.30	12.54	6.03	8.70	1.46	5.83	117.56
	25~40	1.15	13.50	7.04	6.80	1.25	5.39	99.79
1050	0~10	2.58	15.97	5.91	17.19	2.36	7.24	204.55
	10~25	1.66	16.63	6.27	9.98	1.57	6.28	139.33
	25~40	0.63	14.11	6.78	10.48	1.56	6.20	97.82

**2.2.2 土壤样品的采集与测定** 在每块样地静态箱周围随机重复 3~5 个样点, 每次取气样的同时, 用土钻取表层 0~10 cm 土壤带回实验室作各指标的测定。各指标测定方法如下: 土壤含水量为烘干法; pH 为电位法; 有机质为重铬酸钾外加热-容量法; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为氧化镁-扩散法; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为酚二磺酸比色法; C/N 为元素分析仪测定。

**2.2.3 土壤氮矿化速率的测定** 土壤氮矿化速率的测定采用顶盖埋管法, 在每块样地重复 3 个采样点, 分别将长 45 cm, 直径 5 cm 一端削尖的 PVC 管打入土中, 并用不透水的塑料膜迅速封口。同时在样点旁取同样深度的土样作为原状土带回实验室进行矿质氮的测定。待下次取样时, 将装满土的 PVC 管取出, 并按照同样方法埋管并取相应原状土带回实验室, 取样深度为表层 0~10 cm 土壤。取样时间段分别为 2012 年 10 月 15 日至 12 月 10 日, 2012 年 12 月 10 日至 2013 年 3 月 25 日, 2013 年 3 月 25 日至 6 月 7 日, 2013 年 6 月 7 日至 9 月 2 日。依次代表秋季、冬季、春季和夏季。

## 2.3 数据计算与处理

**2.3.1 N<sub>2</sub>O 气体排放通量的计算** N<sub>2</sub>O 气体排放通量的定义为单位时间、单位面积观测箱内排放的被测气体质量的变化, 可用下列公式表示:

$$F = p \cdot v / A \cdot \Delta c / \Delta t \cdot 273 / (273 + \theta) \times 60$$

式中:  $F$  为氧化亚氮排放通量( $\text{ng} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $p$  为标准状况下 N<sub>2</sub>O 气体的密度, 取  $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $v$  为静态箱体积( $\text{cm}^3$ );  $A$  为静态箱底面积( $\text{cm}^2$ );  $\Delta c / \Delta t$  为单位时间静态箱内的氧化亚氮气体浓度变化率( $10^{-9} \text{ ppbv} \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $\theta$  为测定时箱内的平均温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

**2.3.2 数据处理** 数据处理采用 Excel 2007 进行数据整理和表格的制作。数据统计分析用 spss19.0 软件, 并用 Sigmaplot10.0 软件作图。

## 3 结果与分析

### 3.1 3 种密度下女贞人工林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量季节动态变化

调控后女贞林样地的概况和各样地土壤的基本理化性质见表 3 和表 4。3 种密度下女贞人工林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量均呈现明显的季节变化, 具体见图 1。秋季时 N<sub>2</sub>O 排放通量较高, 到了冬季时, 随着温度的降低, N<sub>2</sub>O 排放通量呈现下降的趋势, 且高密度林分和中密度林分下土壤排放通量呈现负值, 这可能是由于此 2 种密度下土壤有机质含量较高, 且相对于低密度林分土壤处于干燥状态, 因而 N<sub>2</sub>O 可能被土壤基质中的粘土矿物所吸附<sup>[8]</sup>。春季时温度回升, 且随着大量积雪的融化, 土壤含水量增加, 透

气性降低,使得以厌氧呼吸为主的反硝化作用增强,促进了土壤 N<sub>2</sub>O 气体的排放,从而呈现了 N<sub>2</sub>O 排放通量的又一个峰值。随着气温的升高,土壤水分蒸发量大,土壤通透性好,氧气供应充足,更有利于土壤硝化作用生成硝酸盐。夏季时,高密度林分和低密度林分下土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量呈现下降的趋势,而中密度林分则变化不明显。

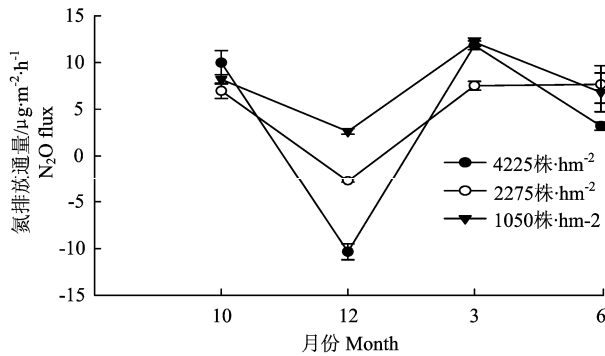


图 1 3 种密度下土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量季节动态变化

Figure 1 The seasonal dynamics of soil N<sub>2</sub>O flux under three densities

秋季时,3 种密度下 N<sub>2</sub>O 排放通量大小比较高密度林分 (9.985 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) > 低密度林分 (8.195 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) > 中密度林分 (6.971 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 但各密度间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。冬季时, N<sub>2</sub>O 排放通量下降明显,其中高密度林分土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量最低 (-10.355 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 其次为中密度林分 (-2.716 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 且两者明显低于低密度林分土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量 (2.629 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 并且 3 种密度间方差检验达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。春季伴随着温度的回升,各密度下 N<sub>2</sub>O 排放通量均显著增加,且达到 4 个季度中的最高值。其中中密度林分土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量最低 (7.513 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 且与高密度林分 (11.839 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 和低密度林分 (12.175 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 间差异达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。夏季时,3 种密度下土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量分别为高密度林分 (3.201 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 中密度林分 (7.658 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 低密度林分 (6.804 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)。各密度间差异并不显著 ( $P > 0.05$ )。

表 5 3 种密度下 0~10 cm 土层土壤氮矿化速率季节变化

Table 5 The seasonal dynamics of soil net nitrogen mineralization rate in the depth of 0-10 cm

项目 Item	密度/株·hm <sup>-2</sup> Density	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer
氨化速率 Ammoniation rate	4225	0.329±0.02 <sup>Ab</sup>	0.022±0.00 <sup>Db</sup>	0.263±0.02 <sup>Bb</sup>	0.064±0.01 <sup>Ca</sup>
	2275	0.398±0.04 <sup>Ab</sup>	0.037±0.01 <sup>Ca</sup>	0.356±0.02 <sup>Ba</sup>	-0.017±0.00 <sup>Db</sup>
	1050	0.468±0.11 <sup>Aa</sup>	0.024±0.00 <sup>Cb</sup>	0.335±0.02 <sup>Ba</sup>	-0.049±0.01 <sup>Dc</sup>
硝化速率 Nitrification rate	4225	0.295±0.03 <sup>Ba</sup>	-0.201±0.02 <sup>Cb</sup>	0.350±0.02 <sup>Ba</sup>	0.684±0.09 <sup>Aa</sup>
	2275	0.191±0.04 <sup>Bb</sup>	0.016±0.01 <sup>Ca</sup>	0.076±0.02 <sup>Cc</sup>	0.684±0.05 <sup>Aa</sup>
	1050	0.012±0.00 <sup>Cc</sup>	-0.186±0.02 <sup>Db</sup>	0.212±0.01 <sup>Bb</sup>	0.524±0.06 <sup>Ab</sup>
净氮矿化速率 Net nitrogen mineralization rate	4225	0.624±0.04 <sup>Ba</sup>	-0.179±0.02 <sup>Cb</sup>	0.611±0.04 <sup>Ba</sup>	0.747±0.10 <sup>Aa</sup>
	2275	0.589±0.01 <sup>Bab</sup>	0.053±0.02 <sup>Da</sup>	0.433±0.03 <sup>Cc</sup>	0.667±0.05 <sup>Aa</sup>
	1050	0.481±0.11 <sup>Ab</sup>	-0.162±0.02 <sup>Bb</sup>	0.547±0.02 <sup>Ab</sup>	0.475±0.07 <sup>Ab</sup>

注: 其中大写字母代表各密度下不同季节间差异,小写字母代表同一季节不同密度间差异。不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Uppercase letters mean the difference between different seasons under the same densities, and lowercase letters mean the difference between different densities under the same season. Different letters mean significant differences between them ( $p < 0.05$ ) .

表 6 土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量 (y) 与土壤净氮矿化速率相关分析 (P)

Table 6 The correlation analysis between nitrogen mineralization and factors in soil (P)

项目 Item	相关方程 Equation of correlation	R <sup>2</sup>	P
净氨化速率 Ammoniation rate	y=18.255x+1.9353	0.2760	0.525**
净硝化速率 Net nitrification rate	y=9.7752x+3.1598	0.1995	0.447**
净氮矿化速率 Net nitrogen mineralization rate	y=14.883x-0.7347	0.5287	0.727**

注: \*\*为 0.01 水平上的显著性差异。Note: “\*\*” refers to the different significance at the 0.01 level.

### 3.2 密度调控下女贞人工林土壤氮动态对 N<sub>2</sub>O 排放的影响

3.2.1 密度调控下女贞人工林土壤氮矿化速率季节动态变化 3 种密度下 0~10 cm 土层土壤氮矿化速率季节变化见表 5。从表 5 可以看出,净氨化速率均

是在秋季达到最大值,且显著高于冬季和夏季 ( $P < 0.01$ )。秋季时,低密度林分土壤净氨化速率最高,且显著高于高密度林分 ( $P < 0.05$ )。冬季与春季时则是中密度林分土壤净氨化速率最高。夏季时,中密度林分与低密度林分下土壤净氨化速率均为负值。

各密度下净硝化速率和净氮矿化速率变化规律相似,均是在夏季最高,冬季最低,且2种季节间差异达到极显著水平( $P < 0.01$ )。秋季和春季时,高密度林分土壤净硝化速率显著高于另外2种密度( $P < 0.01$ )。冬季时,除中密度林分外,其他2种密度的土壤净硝化速率和净氮矿化速率均为负值。

### 3.2.2 土壤氮动态与 $N_2O$ 排放通量相关分析 氮矿

化是土壤氮素转化的重要的环节,其为硝化过程提供了反应底物。由表6可以看出,土壤  $N_2O$  排放通量与土壤净氮化速率,净硝化速率和净氮矿化速率间均存在极显著正相关( $P < 0.01$ )。这与吴世义<sup>[9]</sup>研究东北温带森林  $N_2O$  排放特征的结果相一致,说明土壤氮矿化速率的高低与  $N_2O$  排放通量大小间有着紧密联系。

表7 3种密度下0~10 cm 土层土壤因子含量季节变化

Table 7 The seasonal dynamics of soil physical and chemical properties in the depth of 0-10 cm

项目 Item	秋 Autumn			冬 Winter			春 Spring			夏 Summer		
	4225	2275	1050	4225	2275	1050	4225	2275	1050	4225	2275	1050
土温/°C Soil temperature	18.4	19.9	19.4	1.9	2.2	3	9.7	10.9	12.6	21.4	23.1	22.4
含水量/% Moisture	16.89	11.94	17.18	26.72	26.04	28.29	29.61	25.92	30.7	25.73	23.47	26.4
有机质/% Organic matter	2.73	2.98	2.58	2.92	2.82	2.19	2.56	2.96	2.62	2.63	2.55	2.34
pH	7	5.7	5.9	6.9	7.1	6.9	7.1	7.2	7.1	7.1	6.2	7
C/N	6.52	7.20	7.24	7.44	7.33	6.98	7.49	7.19	5.99	7.28	7.11	6.75
$NH_4^+-N/g \cdot kg^{-1}$	16.32	25.76	18.54	20.44	22.49	18.08	9.64	11.81	8.26	13.55	17.47	16.15
$NO_3^- -N/g \cdot kg^{-1}$	20.8	8.79	14.47	31.49	6.26	23.8	6.68	3.79	5.21	14.28	14.38	15.4

表8  $N_2O$  排放通量与0~10 cm 土层土壤因子相关分析(P)

Table 8 The correlation analyze of  $N_2O$  flux and soil factors in the depth of 0-10 cm (P)

项目 Item	土温 Soil temperature	含水量 Moisture	有机质 Organic matter	pH	C/N	$NH_4^+-N$	$NO_3^- -N$
$N_2O$ 排放通量 $N_2O$ flux	0.568**	-0.097	-0.173	-0.107	-0.285	-0.498**	-0.546**

注: \*\*为0.01水平上的显著性差异。Note: “\*\*” refers to the different significance in 0.01 levels, respectively.

## 4 讨论

密度调控对女贞人工林土壤  $N_2O$  的排放有着显著影响。林分密度的调整改变着林内光照强度、温度和土壤含水量等环境因子<sup>[10]</sup>,并作用于土壤微生物,对土壤氮素的转化与循环产生显著影响。

随着林分密度的减小,林下太阳辐射增强,使得土温有所升高,并促进了土壤微生物活性,有机质含量也随之增加。但当林分密度过低时,群落稳定性及生产力会受到影响,土壤养分含量也会有所降低。土壤有机质本身不仅为微生物活动提供能源,其矿化产物也是硝化过程所必需的反应底物<sup>[11]</sup>。实验结果显示秋季和春季时,中密度林分土壤有机质含量和  $NH_4^+-N$  含量最高,而  $N_2O$  排放通量则是3种密度下最低的。这是因为高有机质含量的土壤中,微生物对氮的竞争性激烈,从而对  $NH_4^+-N$  的固持作用也增强,所以限制了硝化作用,使得  $N_2O$  排放通量降低<sup>[12]</sup>。此外,当C/N较低时,反硝化细菌会因外界碳源不足而利用自身碳源反应,使得反硝化不彻底而导致  $N_2O$  的积累<sup>[13]</sup>。Park等<sup>[14]</sup>同样证明了低C/N更容易出现  $N_2O$  的积累与排放。本实验结果也显示土壤  $N_2O$  排放通量与C/N间呈负相关性。

春季时,随着大量积雪的融化和降雨量的增多,高密度林分因为高郁闭度容易使土壤水分达到高饱和状态<sup>[15]</sup>,从而形成了有利于反硝化作用的土壤厌氧环境,因此此密度下土壤  $N_2O$  排放通量呈现明显的升高趋势。而较为稀疏的低密度林分同样保持着土壤高含水量,  $N_2O$  排放通量显著高于中密度林分。实验结果显示女贞人工林土壤  $N_2O$  排放通量与土壤温度呈显著正相关关系,这是因为冬季时,林地温度普遍较低,土壤微生物活性下降,硝化与反硝化作用减弱,使得  $N_2O$  排放通量呈现下降的趋势。高密度林分和中密度林分林地郁闭度较高,太阳辐射小,土壤持续处于低温状态,而低密度林分因太阳直射强度大,土温较高,因此土壤  $N_2O$  排放通量显著高于另外2种林分密度。这与徐慧<sup>[16]</sup>对长白山阔叶红松林温室气体的研究结果相一致。夏季时植被进入生长高峰,高密度林分下植株株间竞争大,土壤养分及水分被大量吸收,因此高密度林分土壤矿质氮含量处于较低浓度,使得  $N_2O$  反应底物大量减少,从而不利于  $N_2O$  的产生与排放。

土壤氮矿化速率与氮素可利用性存在紧密联系,其矿化结果产生的铵态氮和硝态氮是土壤  $N_2O$  排放必不可少的反应底物。孙志高等<sup>[17]</sup>研究表明,

硝态氮浓度与 N<sub>2</sub>O 排放呈线性相关极显著 ( $P < 0.01$ ), 而本实验结果则显示土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与 NO<sub>3</sub>-N 间呈负相关, 且相关性达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。这与王颖等<sup>[18]</sup>对东北典型森林土壤 N<sub>2</sub>O 排放影响因子的研究结论相一致, 这可能是因为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 作为电子受体, 随着反硝化过程的进行其含量也逐渐下降, 同时伴随着更多 N<sub>2</sub>O 的生成<sup>[19]</sup>。通过试验结果可以看出, 当冬季氮矿化速率降低时, 土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量也呈现下降趋势。这可能是由于冬季植被对矿质氮吸收量减少, 同时生物固持作用占主导地位<sup>[20]</sup>, 使得土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 大量积累, 而硝化与反硝化作用减弱, 不利于 N<sub>2</sub>O 的产生。随着春季的到来, 土壤温度和湿度条件适宜, 氮素周转加快, 土壤硝化与反硝化作用能共充分进行, 也增加了 N<sub>2</sub>O 的排放量。研究表明, 水的可利用性是微生物活动的主要限制因子之一<sup>[21]</sup>, 因而夏季短期内降水的增加使得铵态氮的固化大于硝化, 降低了土壤净氮矿化量, 从而影响氮通量<sup>[22]</sup>, 使得 N<sub>2</sub>O 排放量也相应减少。但是 N<sub>2</sub>O 排放通量的大小并不是由氮矿化速率的高低直接决定的, 尤其是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 这一主要反应底物易发生淋溶而流失, 所以氮矿化水平只能在一定程度上对 N<sub>2</sub>O 排放通量的大小做出解释。因此在之后的研究中, 应设立更多的温度及含水量等环境因子梯度, 以探寻交互作用对 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响。

## 5 结论

女贞人工林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量有着明显的季节变化, 3 种密度下土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量均是在秋季和春季时较高。冬季随着温度的降低, 各密度均呈现下降的趋势, 且 4225 和 2275 株·hm<sup>-2</sup> 密度达到吸收峰。密度调控对女贞人工林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量影响显著, 秋季与春季时, 均是 2275 株·hm<sup>-2</sup> 密度下 N<sub>2</sub>O 排放通量最低, 且在春季时显著低于另外 2 种密度。冬季与夏季时则是 4225 株·hm<sup>-2</sup> 密度下为最低值。密度调控使土壤环境因子发生改变, 并对土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量产生显著影响。

## 参考文献:

[1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. Science, 1990, 248: 1217-1219.  
 [2] 马晓菲, 谢文霞, 赵全升. 外源氮输入对土壤 N<sub>2</sub>O 释放的影响研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 454-456.  
 [3] Liu H, Zhao P, Lu P. Greenhouse gas fluxes from soils of

different land-use types in a hilly area of South China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 124: 125-135.

- [4] 唐海明, 汤文光, 帅细强, 等. 不同冬季覆盖作物对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3191-3199.  
 [5] Korhonen J F J, Pihlatie M, Pumpanen J, et al. Nitrogen balance of a boreal Scots pine forest[J]. Biogeosciences, 2013, 10: 1083-1095.  
 [6] Guntars O, Martinson, Marife D, et al. Responses of nitrous oxide fluxes and soil nitrogen cycling to nutrient additions in montane forests along an elevation gradient in southern Ecuador[J]. Biogeochemistry, 2013, 112: 625-636.  
 [7] 王达明, 杨正华, 邹丽, 等. 西南桦人工林的林分密度研究[J]. 西部林业科学, 2013, 42(1): 14-19.  
 [8] Stegeman D, Cammenga H K. Investigation on absorption and diffusion of nitrous oxide in soil matrices[J]. Mitt DBG, 1990, 60: 73-82.  
 [9] 吴世义. 采伐对东北温带森林土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.  
 [10] Gundale M J, Deluca T H, Fiedler C E, et al. Restoration treatments in a Montana ponderosa pine forest: effects on soil physical, chemical, and biological properties[J]. Forest Ecological and Management, 2005, 213: 25-38.  
 [11] 齐玉春, 董云社. 土壤氧化亚氮产生、排放及其影响因素[J]. 地理学报, 1999, 54(6): 535-540.  
 [12] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. 土壤学进展, 1995, 23(6): 35-40.  
 [13] 孙英杰, 吴昊, 王亚楠. 硝化反硝化过程中 N<sub>2</sub>O 释放影响因素[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 384-388.  
 [14] Park K Y, Inamori Y, Mizuochi M, et al. Emission and control of nitrous oxide from a biological wastewater treatment system with intermittent aeration[J]. J Biosci Bioeng, 2000, 90(3): 247-252.  
 [15] Nagele W, Conrad R. Influence of pH on the release of NO and N<sub>2</sub>O from fertilized and unfertilized soil[J]. Biol Fert Soil, 1990, 10(1): 49-58.  
 [16] 徐慧. 长白山森林生态系统土壤-大气之间 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 气体交换的研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 358-373.  
 [17] 孙志高, 刘景双. 三江平原典型小叶章湿地土壤氮素净矿化与硝化作用[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1771-1777.  
 [18] 王颖, 王传宽, 傅民杰. 四种温带森林土壤氧化亚氮通量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1007-1012.  
 [19] Scheer C, Wassmann R, Kienzler K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40: 290-301.  
 [20] 刘杏仁, 董云社, 齐玉春. 温带典型草地土壤净氮矿化作用研究[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 633-639.  
 [21] Jamieson N, Monaghan R and Barraclough D. Seasonal trends of N mineralization in a Natural calcareous grassland[J]. Global Change Biology, 1999, 5(4): 425-431.  
 [22] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1188-1193.