

沙地不同树种人工林土壤氮素矿化过程及其有效性

陈伏生^{1,2}, 曾德慧^{1*}, 范志平¹, 陈广生^{1,3}, Singh A. N.¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地生态实验站, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, AL 36830, USA)

摘要:土壤氮素(N)转化是生态系统重要的生态过程之一,可作为生态恢复评价的重要指标。以位于科尔沁沙地东南缘的章古台地区草地、30年生的樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、赤松(*P. densiflora*)和杨树(*Populus simonii*)人工林为对象,采用PVC顶盖埋管法和离子交换树脂袋法研究了土壤N矿化特征及其有效性。结果表明,生长季内土壤N净矿化量表现为草地(8.06 $\mu\text{g/g}$)和赤松林(9.06 $\mu\text{g/g}$)低于樟子松林(18.36 $\mu\text{g/g}$)和杨树林(17.88 $\mu\text{g/g}$) ($p < 0.05$);树脂吸附的无机N表现为草地(283.50 $\mu\text{g/g dry resin}$)和杨树林(297.00 $\mu\text{g/g dry resin}$)最低,樟子松林(440.10 $\mu\text{g/g dry resin}$)居中,而赤松林(835.65 $\mu\text{g/g dry resin}$)最高($p < 0.05$)。综合分析林地土壤理化特性、矿化特征和N有效性,表明樟子松、赤松和小叶杨均可作为固沙造林选择树种,其表现为赤松 > 樟子松 > 小叶杨。认为深入开展生态系统N平衡研究有利于更好地评价固沙林的功能。

关键词:固沙林;土壤氮素;矿化过程;顶盖埋管法;离子交换树脂袋法;科尔沁沙地

文章编号:1000-0933(2006)02-0341-08 中图分类号:Q143, Q948, S714 文献标识码:A

Comparative nitrogen mineralization and its availability in certain woody plantations in Keerqin Sand Lands, China

CHEN Fu-Sheng^{1,2}, ZENG De-Hui^{1*}, FAN Zhi-Ping¹, CHEN Guang-Sheng^{1,3}, Singh A. N.¹ (1. Daqinggou Ecological Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, AL 36830, USA). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 341 ~ 348.

Abstract: The sand-fixation plantations played an important role in cutting down desertification process in northern China. Soil nitrogen mineralization, which is a key ecological process in poor sandy ecosystems, can be used as a basic index to assess ecosystem function of tree plantations. In this study, soil nitrogen mineralization process and its availability were examined by the methods of *in situ* closed-top PVC tube incubation and ion exchange resin bags under plantations of pine and poplar, and their neighboring grasslands in the southeastern Keerqin region of China. Results indicated that the accumulative net mineralization in growing season (from April 15 to October 15, 2004) in the grassland (8.06 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) and *Pinus densiflora* (9.06 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) plantation was lower than that in both *Pinus sylvestris* var. *mongolica* (18.36 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) and *Populus simonii* (17.88 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) plantations ($p < 0.05$). The ratios of nitrification rate to net mineralization rate in grassland, *P. sylvestris* var. *mongolica*, *P. densiflora*, and *Populus simonii* plantations were 0.88, 0.91, 0.82, 0.87, respectively, which indicated that the soil nitrification rate in the study area is more intensive than soil net ammonification processes, and the NO_3^- -N was the major N form absorbed by plants in the study area, which might due to the higher soil pH values (> 6.6) and strong human disturbances in the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30471377);中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-418);中国科学院沈阳应用生态研究所领域前沿资助项目(SLYQY0409)

收稿日期:2004-12-10; **修订日期:**2005-04-20

作者简介:陈伏生(1973~),男,江西永丰人,博士,主要从事森林生态系统土壤养分循环和生态工程研究. E-mail: chenfush@yahoo.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zengdh@iae.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30471377), Knowledge Innovation Project of CAS (No. KZCX3-SW-418) and Institute of Applied Ecology, CAS (No. SLYQY0409)

Received date: 2004-12-10; **Accepted date:** 2005-04-20

Biography: CHEN Fu-Sheng, Ph.D., mainly engaged in forest soil nutrient cycling and ecological engineer. E-mail: chenfush@yahoo.com; chenfush@hotmail.com

study area. The percentages of net mineralization amount to soil total N contents in grassland, *P. sylvestris* var. *mongolica*, *P. densiflora*, and *Populus simonii* plantations were 2.49%, 4.42%, 2.77%, 4.26%, respectively, implying that N turnover rates in grassland and *P. densiflora* plantation were very low, while those in *P. sylvestris* var. *mongolica* and *Populus simonii* were relatively higher. The accumulative mineral N absorbed by resin from May 15 to October 1 in both the grassland ($283.50 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ dry resin) and *Populus simonii* plantations ($297.00 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ dry resin) was the lowest, while that in *P. sylvestris* var. *mongolica* ($440.10 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ dry resin) was intermediate, and *P. densiflora* ($835.65 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ dry resin) was the highest ($p < 0.05$). Soil relative nitrification rate (which is expressed by the ratios of the soil NO_3^- -N to mineral N) in the grassland, *P. sylvestris* var. *mongolica*, *P. densiflora* and *Populus simonii* plantations were 0.88, 0.87, 0.92, and 0.90, respectively, which also implied that soil NO_3^- -N accounted for most of the soil mineral N. From this study, we conclude that the in situ closed-top PVC tube incubation method is more accurate than the ion exchange resin method in measuring seasonal soil N mineralization rate, while it is more convincing to use both methods in exploring both soil N availability and N absorption by plants. Based on the corresponding results, we concluded that the three tree species mentioned above were selective sand-fixation tree species in the study area, and the rank of suitability was *P. densiflora*, *P. sylvestris* var. *mongolica* and *Populus simonii*. However, to comprehensively assess the ecosystem functions in the study area, the knowledge of N balance in sand-fixation plantations is necessary.

Key words: sand-fixed forest; soil nitrogen; mineralization process; PVC tube closed-top *in situ* incubation method; ion exchange resin bag method; keerqin sandy land

固沙林是防护林体系的重要组成部分之一,发挥着重要的生态、经济和社会效益。到目前为止,尽管固沙林的树种选择、林分稳定性及其生态效益的评价开展了大量的工作,但绝大多数是从水分的角度进行分析,而从养分循环及其利用效率等角度进行报道的很少^[1]。最近的研究表明,干旱地区生态系统的生产力和稳定性受到水和 N 的共同制约,而不是像传统观点认为的只受到水的限制^[2, 3]。

氮(N)是植物生长和发育所需的大量营养元素之一。在许多生态系统中,土壤有效 N 通常是限制植物生长的主要因素^[4, 5]。沙地干旱缺水、土壤贫瘠(尤其缺 N),N 转化及其有效性的研究也日益受到林学、生态学和土壤学等方面学者的重视^[6]。然而,国内这方面的报道较少。土壤 N 转化与循环是生态系统中 N 循环最重要和最活跃的过程^[4]。土壤中的 N 通常超过生态系统总 N 的 90%^[7]。可供植物直接利用土壤有效 N 主要是以铵态 N 和硝态 N 形式存在的无机 N^[8]。无机 N 的组分及其数量反映土壤 N 的有效性,源于土壤 N 的矿化过程^[9]。N 可利用性限制着植物对土壤 N 养分利用效率,直接影响到陆地生态系统的生产力^[10],并且与水分利用、碳循环、植物多样性、群落演替、生态系统可持续性之间存在反馈关系^[11, 12]。为此,N 矿化及其有效性的研究不仅对于揭示森林生态系统功能和 N 生物地球化学循环过程的本质有重要意义,而且也是评价森林生态系统稳定性和生态系统服务的重要指标^[11, 13~15]。

鉴于沙地土壤 N 转化的重要性和章古台固沙人工林的典型性^[6, 16],本研究选择无林地(草地)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、赤松(*P. densiflora*)和杨树(*Populus simonii*)人工林为研究对象,采用 PVC 顶盖埋管法和离子交换树脂袋法相结合,开展土壤 N 矿化及其有效性的研究,揭示沙地不同人工林在干旱胁迫下土壤 N 的有效供给问题,阐明不同人工林对于旱胁迫环境的 N 利用的适应性机制,为沙地造林树种选择、植被恢复和重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地的东南部,辽宁省彰武县章古台镇($42^{\circ}43'N, 122^{\circ}22'E$),海拔 226.5m。属亚湿润干旱区气候类型,年均降雨量 450 mm,年蒸发量 1300~1800 mm,冬春两季风大而持续时间长,风速为 4.5~5.0 m/s,年均气温 6.2℃,相对空气湿度 58%~59%,10℃以上积温 2890℃,无霜期 150d,植物生长期(>5℃)为 180d。土壤类型主要为风沙土,养分元素 C、N、P 等均较低。植被类型以沙生植被为主,包括蓼科

(Polygonaceae)、藜科 (Chenopodiaceae)、蔷薇科 (Rosaceae)、豆科 (Fabaceae)、菊科 (Compositae)、禾本科 (Gramineae)、莎草科 (Cyperaceae)等。目前,章古台地区已营造了樟子松固沙林 10000 hm²,其中发生严重、中度和轻度衰退现象面积的分别占 6.1%、12.5%和 46.1%,而油松、赤松和杨树林还没有出现明显整片死亡的现象^[1]。由于人口和生存的压力以及当地的传统习惯,自由放牧和针叶收集仍是两种很普遍的人为行为,初步估计,有 30%~70%本可归还给生态系统的地上生物量被带出人工林生态系统^[6]。

1.2 研究样地

在辽宁省固沙造林研究所试验林场三家子工区选择无林地(草地)、樟子松、赤松和小叶杨林地各一块,样地面积为 30 m×20 m,林分年龄一致、管理措施相似,密度、平均胸径和树高等林分特征见表 1,样地土壤容重、pH 值及各种养分元素的状况及其差异性见表 2。

表 1 研究林地林分特征
Table 1 Characteristics of the experimental stands

林地 Sites	林龄 Age (a)	密度 Density (trees/hm ²)	平均胸径 Diameter(cm)	平均树高 Height(m)	经营措施 Management practices
草地 Grassland	—	—	—	—	放牧 Grazing
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	30	825	14.15±0.63a*	7.93±0.13a	禁牧 Non-grazing
赤松 <i>P. densiflora</i>	30	950	13.80±0.88a	8.26±0.31a	禁牧 Non-grazing
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	30	1050	19.41±1.28b	19.13±1.15b	禁牧 Non-grazing

* 平均值±1 标准误, n>30;同一栏中的不同字母表差异显著, p<0.05 Values are means ±1 standard error (n>30), values suffixed with different letters in each column is significantly different with each other at p<0.05 significance level

1.3 试验设计和分析方法

本研究采用 PVC 顶盖埋管法和离子交换树脂袋法来测定土壤 N 矿化及其有效性。

顶盖埋管法从 20 世纪 50 年代开始应用,最初是用金属易拉罐为原料,在 20 世纪 80 年代才开始改用 PVC 塑料管代替。此法能精确地反映实际的氨化、硝化和净矿化速率,目前应用最为广泛^[8]。实验开始前调查林分特征,把 30 m×20 m 样地分成 6 块 10 m×10 m 小样方,并准备好若干长 15cm、内径 4cm 的 PVC 管。第一次取样(2004 年 4 月 16 日)在每个小样方内随机选择两点,在每个点把 2 个 PVC 管打入土中,然后小心取出 1 个装满土样的 PVC 管带回实验室,过 20 目筛,立即用 2 mol/L KCl 浸提,利用比色法分别测定其铵态 N 和硝态 N^[17],同时用 105℃ 烘干法测定土壤含水量。1 个月,于 2004 年 5 月 16 日,把培养后的 PVC 管取出,同时重复第 1 次操作。此后,每隔 1 个月重复 1 次,直到生长季结束(2004 年 10 月 16 日)。所有的数据均换算成以烘干土重来计:

氨化速率(μg/(g·30d))=30×(培养后铵态 N-培养前铵态 N)/天数

硝化速率(μg/(g·30d))=30×(培养后硝态 N-培养前硝态 N)/天数

净矿化速率(μg/(g·30d))=30×[(培养后铵态 N+硝态 N)-(培养前铵态 N+硝态 N)]/天数

离子交换树脂袋法最初应用于 P 的测定,20 世纪 80 年代后应用到 N 矿化过程的研究。它是通过测定树脂吸附土壤铵态 N 和硝态 N 的量,进而估测 N 转化速率,是一种既简便而又较准确的方法^[18, 19]。近期得到了广泛的应用^[8, 19, 20-23]。树脂袋法不但可以测量土壤有效 N 的供应量,同时也提供了测量土壤有效 N 供应的时间和空间变化规律的机会^[21]。在实验开始时,准备大量离子交换尼龙树脂袋(大小 4 cm×4 cm)。每袋放约 10 g (Amberlite, 1:1.5 mixture of types IR-120 and IRA-400 resins)树脂,然后装订好,同时取样测定其含水量和 KCl 清洗后吸附的铵态 N 和硝态 N 量。在 2004 年 5 月 16 日,对 30 m×20 m 样地分成 6 块 10 m×10 m 小样方。在每个小样方内随机选择 2 点,埋下装有树脂的尼龙袋。一个袋埋在深度为 4 cm 处(作为 0~7.5cm 层的铵态 N 和硝态 N),另一个袋埋在 11cm 处(代表 7.5~15cm)。每个样地共计 12 个。这些树脂袋于 2004 年 7 月 1 日取出,去除附在袋上的根和土壤,带回实验室立即放入冰箱内(4℃),分析时用 2 mol/L KCl 浸提,利用比色法分别测定铵态 N 和硝态 N 含量^[17]。2004 年 7 月 1 日到 2004 年 8 月 15 日、2004 年 8 月 15 日到 2004 年 10 月 1 日重复以上试验。土壤铵态 N 是指单位干重树脂(IR-120)单位时间从土壤中所吸附的铵态 N 量,单位

为每克干树脂每天吸附铵态 N 的量($\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$,以下同);土壤硝态 N 单位干重树脂(IRA-400)单位时间从土壤中所吸附的硝态 N 量;无机氮($\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$) = 铵态 N + 硝态 N。

土壤理化特性及林分调查均采用常规方法。

1.4 数据处理

所有数据用 SPSS(11.0)处理。除特别说明外,差异显著性, $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤理化特性

同无林地相比,造林 30a 后,林地表层土壤特性存在一定的差异。具体表现为樟子松林土壤全 N 较高,而 C:N 较低;赤松林土壤容重、有机碳和 C:N 均较高;杨树林土壤容重和 C:N 较低,而全 N 较高。樟子松、赤松和杨树林地间进行比较时,发现土壤容重、有机碳、全 N、C:N 均有差异(表 2)。说明沙地造林后会改变土壤的理化特性,而且不同林种间差异明显。影响差异的原因可能包括树种特性、放牧和凋落物收集等人类活动的影响,例如赤松针叶较高的 C:N,导致土壤 C:N 最高;而杨树林内禁止放牧时间较长,导致土壤容重较低。

表 2 林地表层(0~15cm)土壤基本特性

Table 2 Characteristics of surface soil (0~15cm) in study sites

林地 Sites	容重 Density(g/cm^3)	pH 值 pH	有机碳 Organic carbon(g/kg)	全氮 Total nitrogen(g/kg)	全磷 Total phosphorus(g/kg)	C:N
草地 Grassland	1.64 ± 0.01a	6.79 ± 0.06a	3.72 ± 0.12a	0.328 ± 0.070a	0.086 ± 0.011a	11.34 ± 3.21a
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	1.65 ± 0.01a	6.67 ± 0.05a	3.97 ± 0.08a	0.415 ± 0.006b	0.111 ± 0.002a	9.57 ± 2.17b
赤松 <i>P. densiflora</i>	1.68 ± 0.02b	6.62 ± 0.08a	4.73 ± 0.57b	0.327 ± 0.004a	0.082 ± 0.005a	14.46 ± 4.87c
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	1.60 ± 0.01c	6.93 ± 0.07a	4.03 ± 0.53ab	0.420 ± 0.009b	0.121 ± 0.009a	9.60 ± 2.16b

* 平均值 ± 1 标准误, $n = 6$;同一栏中的不同字母表差异显著, $p < 0.05$ Values are means ± 1 standard error ($n = 6$), values suffixed with different letters in each column is significantly different with each other at $p < 0.05$ significance level

2.2 土壤氮素矿化特征

PVC 顶盖埋管法测定土壤 N 矿化过程发现,无林地、樟子松、赤松和杨树林土壤氨化、硝化和净矿化速率均表现为明显地季节性单峰波动,但又不完全一致,6、7 月和 8 月份较高(表 3,图 1)。说明与该地区温度等气候因子的变化规律基本吻合,同时受到其它因素的影响。各个月份林地间土壤氨化、硝化和净矿化速率比较分析,不存在完全一致的规律。总的来说,土壤氨化速率表现为无林地最低、樟子松和赤松林居中,而杨树林最高;硝化和净矿化速率表现为无林地和赤松林较低,樟子松和杨树林较高(表 4)。无林地、樟子松、赤松和杨树林土壤硝化与净矿化速率比值依次为 0.88、0.91、0.82 和 0.87,说明该地区硝化过程异常激烈,供植物吸收主要是土壤硝态 N,其中樟子松林尤其突出,与研究区较高的土壤 pH 值(> 6.6)和较强的人类活动有关。无林地、樟子松、赤松和杨树林土壤生长季的净矿化速率占全 N 的比例分别为 2.49%、4.42%、2.77%、4.26%,可见无林地和赤松林土壤 N 周转较慢,而樟子松和杨树林较快。

林种与季节对土壤氨化、硝化和净矿化速率交互作用综合分析表明,林种和时期单因素对土壤 N 矿化过

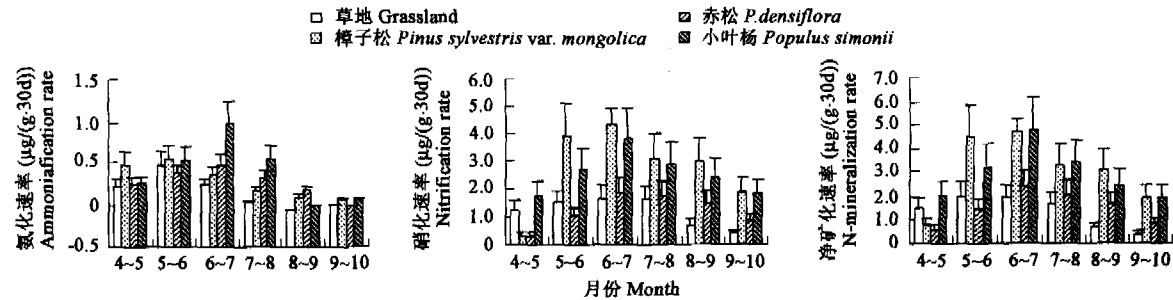


图 1 不同林地土壤氨化、硝化和净矿化速率动态

Fig.1 Dynamics of soil ammonification, nitrification and net mineralization rate in different sandy sites

程的作用均达到显著,而交互作用表明氨化速率差异不显著,硝化和净矿化速率显著(表3)。这说明氨化速率还受到其它因素的影响。

2.3 土壤铵态 N、硝态 N 和无机 N 动态

综合分析不同林种、监测时期、土壤层次对离子交换树脂袋法吸附土壤铵态 N、硝态 N 和无机 N 影响表明,林种和时期及其交互对土壤有效 N 的影响差异非常显著($p < 0.01$);除土壤层次、时期和林种对土壤铵态 N 的交互作用差异显著外($p < 0.05$),其余与土壤层次相关的作用均表现为差异不显著(表5)。为此,以下分析不再讨论两层土壤(0~7.5 cm 和 7.5~15 cm)之间的差异,而取两层的平均值。

表 3 林种和时间对土壤氨化、硝化和净矿化速率的影响

矿化特征 Characteristics	林种 Specie		时期 Period		林种×时期 Specie × period	
	F	显著性 P	F	显著性 P	F	显著性 P
氨化速率 Ammonification rate	3.76	0.011	10.82	0.000	1.64	0.064
硝化速率 Nitrification rate	32.39	0.000	16.86	0.000	2.83	0.000
净矿化速率 N-mineralization rate	31.45	0.000	19.37	0.000	2.48	0.002

表 4 林地土壤氨化、硝化、净矿化速率的基本状况(μg/(g·30d))

样地 Sites	氨化速率 Ammonification rate	硝化速率 Nitrification rate	净矿化速率 N-mineralization rate
草地 Grassland	0.16 ± 0.08a*	1.20 ± 0.21a	1.36 ± 0.27a
樟子松 Pinus sylvestris var. mongolica	0.29 ± 0.09b	2.77 ± 0.60b	3.06 ± 0.61b
赤松 P. densiflora	0.27 ± 0.09b	1.24 ± 0.24a	1.51 ± 0.28a
小叶杨 Populus simonii	0.40 ± 0.09c	2.58 ± 0.31b	2.98 ± 0.44b

* 平均值 ± 1 标准误, $n = 72$; 同一栏中的不同字母表差异显著, $p < 0.05$ Values are means ± 1 standard error ($n = 72$), values suffixed with different letters in each column is significantly different with each other at $p < 0.05$ significance level

表 5 林种、时期、土壤层次对铵态 N、硝态 N 和无机 N 的影响

Table 5 Effects of specie, period and soil depth on soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N, Inorganic N in different sites							
影响因素 Influencing factors	自由度 <i>df</i>	铵态 N	NH_4^+ -N	硝态 N	NO_3^- -N	无机 N	Inorganic N
		<i>F</i>	显著性 <i>P</i>	<i>F</i>	显著性 <i>P</i>	<i>F</i>	显著性 <i>P</i>
主效应 Main effects							
林种 Specie (S)	3	4.51	0.005	19.33	0.000	18.16	0.000
时期 Period (P)	2	14.85	0.000	6.40	0.002	7.94	0.001
土壤层次 Soil depth (D)	1	0.00	0.949	0.05	0.820	0.05	0.829
交互效应 Interaction effects							
林种 × 时期 S × P	6	3.44	0.004	3.65	0.002	3.09	0.008
林种 × 土壤层次 S × D	3	0.79	0.503	0.07	0.974	0.10	0.961
时期 × 土壤层次 P × D	2	0.01	0.992	0.00	0.999	0.00	0.998
林种 × 时期 × 土壤层次 S × P × D	6	2.57	0.022	0.12	0.994	0.21	0.974

无林地、樟子松和杨树林土壤铵态 N、硝态 N 和无机 N 均存在明显的季节性差异,表现为春季(5月15日~7月1日)和秋季(7月1日~8月15日)较高,夏秋(8月15日~10月1日)较低。而赤松林土壤硝态 N 和无机 N 季节性差异不明显,铵态 N 表现为春>秋>夏。各个时期不同林地间存在差异,但其规律不够明显。总的来看,土壤铵态 N 表现为无林地和杨树林较低,而樟子松和赤松林较高;土壤硝态 N 和无机 N 均表现为无林地和杨树林较低,樟子松居中,赤松较高。

土壤相对硝化速率可以用土壤硝态 N 与无机 N 的比例来表示^[24]。为此,可以得出无林地、樟子松、赤松和杨树林土壤相对硝化速率依次为 0.88、0.87、0.92、0.90,说明土壤硝态 N 占绝对优势,硝化过程强烈。这与

PVC 顶盖埋管法测定结果类似。

表 6 土壤铵态 N、硝态 N 和无机 N 的基本状况 ($\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$)

Table 6 Soil NH_4^+-N , NO_3^--N , inorganic N in different sites

林地 Sites	铵态 N NH_4^+-N	硝态 N NO_3^--N	无机 N Inorganic N
草地 Grassland	$0.25 \pm 0.07\text{a}$	$1.85 \pm 0.57\text{a}$	$2.10 \pm 0.53\text{a}$
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	$0.40 \pm 0.14\text{b}$	$2.85 \pm 0.79\text{b}$	$3.26 \pm 0.42\text{b}$
赤松 <i>P. densiflora</i>	$0.48 \pm 0.15\text{b}$	$5.71 \pm 0.02\text{c}$	$6.19 \pm 0.13\text{c}$
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	$0.21 \pm 0.06\text{a}$	$1.99 \pm 0.82\text{a}$	$2.20 \pm 0.83\text{a}$

* 平均值 ± 1 标准误, $n = 36$; 同一栏中的不同字母表差异显著, $p < 0.05$ Values are means ± 1 standard error ($n = 36$), values suffixed with different letters in each column is significantly different with each other at < 0.05 significance level

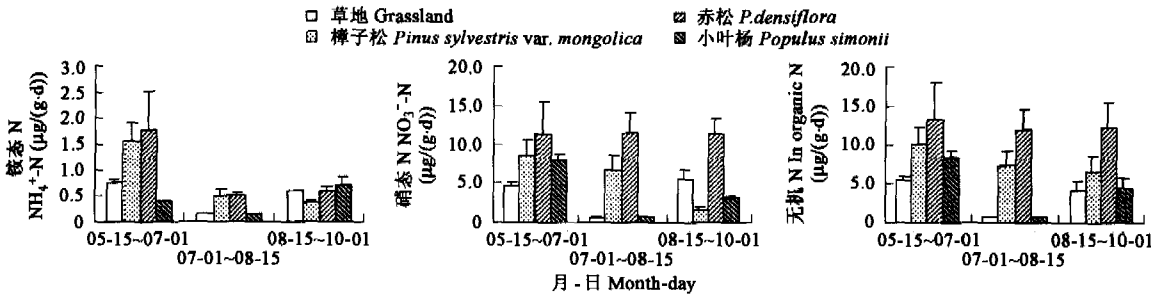


图 2 不同林地土壤铵态 N、硝态 N 和无机态 N 动态

Fig. 2 Dynamics of soil NH_4^+-N , NO_3^--N , inorganic N in different sandy sites

3 讨论

3.1 PVC 顶盖埋管法与离子交换树脂袋法

顶盖埋管法和离子交换树脂袋法是目前研究土壤 N 矿化过程应用较为广泛的两种方法,在不同类型的土壤和环境条件下,可以选择不同的方法^[8]。

本项研究表明,PVC 顶盖埋管法与离子交换树脂袋法测定土壤 N 矿化特征存在密切相关性,具体表现:

(1)两者的测定结果均表明该地区硝化作用异常强烈,顶盖埋管法测定硝化速率与净矿化速率的比值大于 0.8,离子交换树脂袋法测定的相对硝化速率也大于 0.8;

(2)两种方法均表明无林地矿化速率最低。说明两者方法均可以比较客观反映土壤 N 矿化特征。同时,本项研究也表明两种方法存在差异,具体表现为(1)矿化过程的季节性动态规律不一致,顶盖埋管法测定结果表明矿化速率为低-高-低,而离子交换树脂袋法表现为高-低-高或无明显变化;

(3)顶盖埋管法测定结果表明赤松林土壤 N 矿化速率较低,而离子交换树脂袋法测定结果表明赤松林最高。季节间土壤 N 矿化速率动态变化主要受温度和水分的影响,顶盖埋管法测定结果与此有较好的相关性,说明顶盖埋管法能够较好地反映土壤 N 的实际矿化速率。而离子交换树脂袋法由于受植物根系对 N 的吸收影响较大,所以在植物旺盛生长期,其测定值较低;此外,离子交换树脂袋法可能还受土壤水分影响较大,通常在春和秋季易发生 N 移动,而易被树脂吸附,从而导致测定值偏高,趋向于反映土壤有效 N 与植物吸收 N 的差值。

仅从测定土壤 N 矿化速率的准确性来说,顶盖埋管法优于离子交换树脂袋法。但从评价土壤 N 有效性以及植物利用来说,两者的结合会更加有说服力。

3.2 土壤 N 矿化及其有效性与造林树种评价

土壤 N 转化是生态系统最重要的生态过程之一,可作为生态系统稳定性的评价指标^[13, 14]。研究表明^[1],沙地造林后随着林龄的增大出现了大量的林分衰退的现象,而林分衰退与养分失衡之间存在很好的相关性。其中 N 的缺乏是林分衰退的重要因素之一^[1, 25, 26]。

本研究表明,沙地造林后有利于提高土壤 N 矿化速率,土壤有效 N 有一定程度的提高。不同林种土壤 N 矿化过程和树木消耗 N 量均存在差异。为了分析的方便,定义林地土壤 N 的相对剩余系数为单位时间单位重量树脂吸收的有效 N 与其矿化速率的比值。可以得出,无林地土壤铵态 N、硝态 N 和无机 N 的相对剩余系数依次为 1.56、1.54、1.54;樟子松林依次为 1.37、1.03、1.07;赤松林依次为 1.78、4.60、4.10;杨树林依次为 0.53、0.77、0.74。以无林地为参考,综合分析表明,樟子松林尽管有较高的矿化速率,但相对剩余系数较低,说明 N 的供应还是相对不足;赤松林虽然矿化速率较低,但相对剩余系数最高,尤其是硝态 N,说明赤松林 N 的供应相对充足;杨树林土壤矿化速率较高,而相对剩余系数最低,说明杨树林 N 供应仍然不足。不过,以上分析的准确性还与植物根系吸收和树脂吸附的竞争能力有关。

从土壤 N 矿化及其有效性对造林树种进行评价,本项研究的结果认为赤松优于樟子松,而樟子松优于杨树。当然,造林树种的选择还与其它因素有关,并且本研究从林龄和管理措施的代表性来说存在明显的局限性,有待完善。因此,继续深入开展生态系统 N 平衡及其预算研究将有助于更好的评价人工林的稳定性及其生态功能^[27]。

4 结论

(1)30 年生的樟子松、赤松、杨树林和无林地之间,表层土壤特性存在差异。产生这种差异的原因包括树种特性、放牧和凋落物收集等人类活动。

(2)顶盖埋管法与离子交换树脂袋法测定土壤矿化过程既有较好的相关性,又存在差异。从反映氨化、硝化和净矿化速率精确性来看,PVC 顶盖埋管法优于离子交换树脂袋法。从评价土壤 N 有效性以及植物利用来说,两者的结合使用效果更佳。

(3)无林地、樟子松、赤松和杨树林生长季内(4 月 15 日 ~ 10 月 15 日)土壤 N 净矿化量分别为 8.06、18.36、9.06、17.88 $\mu\text{g/g}$;而 5 月 15 日 ~ 10 月 1 日间树脂吸附的无机 N 分别为 283.50、440.10、835.65、297.00 $\mu\text{g/g dry resin}$ 。

(4)初步结果表明樟子松、赤松和杨树均可作为固沙造林的可选树种,从土壤 N 矿化速率及其有效性综合评价来看,赤松优于樟子松,樟子松优于杨树。

References:

- [1] Jiang F Q, Cao C Y, Zeng D H, *et al.* Degradation and Restoration of Ecosystems on Keerqin Sandy Land. Beijing: China Forestry Press, 2002. 217 ~ 248.
- [2] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham GL, *et al.* Biological feedbacks in global desertification. Science, 1990, 247: 1043 ~ 1048.
- [3] Hooper D U, Johnson L. Nitrogen limitation in dryland ecosystems: responses to geographical and temporal variation in precipitation. Biogeochemistry, 1999, 46: 247 ~ 293.
- [4] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur?. Biogeochemistry, 1991, 13: 87 ~ 115.
- [5] Attiwill P M, Adams M A. Nutrient cycling in forests (Tansley Review No. 50). New Phytologist, 1993, 124: 561 ~ 582.
- [6] Chen F S, Zeng D H, Fan Z P, *et al.* Available nitrogen in forest soil of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Zhanggutai sandy land. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(3): 6 ~ 11.
- [7] Kaye J P, Binkley D, Rhoades C. Stable soil nitrogen accumulation and flexible organic matter stoichiometry during primary floodplain succession. Biogeochemistry, 2003, 63: 1 ~ 22.
- [8] Binkley D, Hart S C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils. Advances in Soil Science, 1989, 10: 57 ~ 111.
- [9] Fisher R F, Binkley D. Ecology and Management of Forest Soils. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [10] Reich P B, Grigal D F, Aber J D, *et al.* Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. Ecology, 1997, 78: 335 ~ 347.
- [11] Schlesinger W H. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change (2nd edition). San Diego: Academic Press, 1997.
- [12] Han X G, Lin L H, Huang J F. An Introduction to Biogeochemistry. Beijing: Chinese Higher Education Press, 1999. 197 ~ 244.
- [13] Larsen J B. Ecological stability of forests and sustainable silviculture. Forest Ecology and Management, 1995, 73: 85 ~ 96.
- [14] Morris S J, Boerner R E J. Interactive influences of silvicultural management and soil chemistry upon soil microbial abundance and nitrogen mineralization.

Forest Ecology and Management, 1998, 103: 129 ~ 139.

- [15] Chen F S, Zeng D H, He X Y. Soil nitrogen transformation and cycling in forest ecosystems. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23 (5), 126 ~ 133.
- [16] Zeng D H, Jang F Q, Fan Z P, et al. Stability of Mongolian pine plantations on sandy land. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7 (4): 337 ~ 343.
- [17] Liu G S, Jiang N H, Zhang L D, et al. Soil Physical, Chemical Analysis and Description of Soil Profiles. Beijing: Standards Press of China, 1996. 33 ~ 37.
- [18] Binkley D, Matson P. Ion exchange resin bag method for assessing forest soil nitrogen availability. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47: 1050 ~ 1052.
- [19] Mo J M, Brown S, Peng S L, et al. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China. Forest Ecology and Management, 2003, 175: 573 ~ 583.
- [20] Binkley D, Aber J, Pastor J, et al. Nitrogen availability in some Wisconsin forests: comparisons of resin bags and on-site incubations. Biology and Fertility of Soils, 1986, 2: 77 ~ 82.
- [21] Gibson D J. Spatial and temporal heterogeneity in soil nutrient supply measured using in situation-exchange resin bags. Plant and Soil, 1986, 96: 445 ~ 450.
- [22] Krause H H, Ramsal D. In situ nutrient extraction by resin from forested clear-cut and site-prepared soil. Canadian Journal of Soil Sciences, 1987, 67: 943 ~ 952.
- [23] Kjønaas O J. In situ efficiency of ion exchange resins in studies of nitrogen transformation. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63: 399 ~ 409.
- [24] Schimel D, Stillwell M A, Woodmanse R G. Biogeochemistry of C, N, and P in a soil catena of the shortgrass steppe. Ecology, 1985, 66: 276 ~ 282.
- [25] Jiao S R. The Ecosystem Structure and Function of Sand-fixed Forests in Zhanggutai. Shenyang. Liaoning Science and Technology Press, 1989. 1 ~ 47.
- [26] Chen F S, Chen G S, Zeng D H, et al. The effects of peat and weathered coal on the growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings on aeolian sandy soil. Journal of Forestry Research, 2002, 13(4): 251 ~ 254.
- [27] Loreau M. Material cycling and the stability of ecosystems. The American Naturalist, 1994, 143: 508 ~ 513.

参考文献:

- [1] 姜凤岐, 曹成有, 曾德慧, 等. 科尔沁沙地生态系统退化与恢复. 北京: 中国林业出版社, 2002. 17 ~ 248.
- [6] 陈伏生, 曾德慧, 范志平, 等. 章古台沙地樟子松人工林土壤有效氮的研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(3): 6 ~ 11.
- [12] 韩兴国, 李凌浩, 黄建辉. 生物地球化学概论. 北京: 高等教育出版社, 1999. 197 ~ 244.
- [15] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素转化与循环. 生态学杂志, 2004, 23(5): 126 ~ 133.
- [16] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 等. 沙地樟子松人工林稳定性的研究. 应用生态学报, 1996, 7(4): 337 ~ 343.
- [17] 刘光崧, 蒋能惠, 张连第, 等. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. 33 ~ 37.
- [25] 焦树仁, 章古台. 固沙林生态系统的结构与功能. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1989. 1 ~ 47.