

DOI: 10.5846/stxb201804120845

肖瑞晗, 满秀玲, 丁令智. 大兴安岭北部天然针叶林土壤氮矿化特征研究. 生态学报, 2019, 39(8): - .

Xiao R H, Man X L, Ding L Z. Soil nitrogen mineralization characteristics of the natural coniferous forest in Northern Daxing'an Mountains, Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): - .

大兴安岭北部天然针叶林土壤氮矿化特征研究

肖瑞晗, 满秀玲*, 丁令智

东北林业大学, 哈尔滨 150040

摘要: 采用顶盖埋管法对大兴安岭地区天然针叶林(樟子松林、樟子松-兴安落叶松混交林和兴安落叶松林)土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、净氮矿化速率进行研究,并探索土壤理化性质与氮矿化之间的相关性,为大兴安岭地区森林生态系统土壤养分管理及森林经营提供帮助。结果表明:观测期内(5—10月)3种林型土壤无机氮变化范围为31.51—70.42 mg/kg,以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在为主,占比达90%以上,且与纯林相比混交林土壤无机氮含量较高。3种林型土壤净氮矿化、净氨化、净硝化速率月变化趋势呈V型,7、8月表现为负值,其他月份为正值。净氮矿化速率变化范围樟子松林为-0.54—1.28 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 、樟子松-兴安落叶松混交林为-0.13—0.55 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 、兴安落叶松林为-0.80—1.05 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 。土壤净氨化过程在土壤氮矿化中占主要地位,占比达60%以上。3种林型土壤净氮矿化、净氨化及净硝化速率垂直差异显著,0—10 cm土层矿化作用明显高于10—20 cm土层($P < 0.05$)。土壤氮矿化速率与土壤含水量、土壤有机碳含量、土壤C/N、枯落物全氮含量和枯落物C/N均存在显著相关性。不同类型的森林土壤及枯落物的质量也存在差异,进而影响土壤氮矿化特征。

关键词: 樟子松林; 兴安落叶松林; 铵态氮; 硝态氮; 氮矿化速率

Soil nitrogen mineralization characteristics of the natural coniferous forest in Northern Daxing'an Mountains, Northeast China

XIAO Ruihan, MAN Xiuling*, DING Lingzhi

College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: The characteristics of the ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), and nitrogen mineralization rate were investigated using the method of in situ top-closed incubation in natural coniferous forests (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*-*Larix gmelinii* mixed forest, and *Larix gmelinii* forest) in Daxing'an Mountains. This study was aimed at comparing the characteristics of soil nitrogen mineralization in different forest types, and exploring the correlation between soil physical and chemical properties and nitrogen mineralization, which will help to improve soil nutrient and forest management in the Daxing'an Mountains. The results showed that the soil inorganic nitrogen in three forest types ranged from 31.51 to 70.42 mg kg^{-1} , of which > 90% was in the form of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ during the observation period (5—10 months). The soil inorganic nitrogen content in the mixed forest was higher than that in the pure forest. The net nitrogen mineralization, ammonization, and nitrification rates of the three forest types were all negative in July and August and positive in other months with a clear seasonal pattern of a V-type change. The range of net nitrogen mineralization rate of the three forest types was -0.54 to 1.28 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest), -0.13 to 0.55 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*-*Larix gmelinii* mixed forest), and -0.80 to 1.05 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ (*Larix gmelinii* forest), respectively. The soil net ammonization dominated in the process of the soil nitrogen mineralization, and accounted

基金项目: 国家自然科学基金(31770488)

收稿日期: 2018-04-12; 网络出版日期: 2018-00-00

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

for > 60% of the total amount of soil nitrogen mineralization. The vertical net nitrogen mineralization, net ammonization, and net nitrification rates were significantly different among the three forest types, with a significantly higher rate ($P < 0.05$) in the 0—10 cm soil layer than that in the 10—20 cm soil layer. Soil nitrogen mineralization rates were significantly correlated ($P < 0.05$) with soil moisture content, organic matter content, soil C/N, total nitrogen content, and C/N of the litter. We concluded that the characteristics of soil nitrogen mineralization were affected by the different quality of soils and litter in different forest types in the Daxing'an Mountains.

Key Words: *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest; *Larix gmelini* forest; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; nitrogen mineralization rate

在森林生态系统中,土壤氮是影响其生产力的重要指标^[1-2],但土壤中 95% 以上的氮以有机氮的形式存在不能被植物直接吸收^[3],必须经过微生物的矿化作用将其转化为无机氮才能被植物利用,土壤氮矿化过程也是决定森林生态系统结构与功能的关键过程之一。因此,研究森林土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的动态和氮矿化速率及其影响因素对于了解森林生态系统的生产力、营养循环和氮素的循环与转化具有重要的意义^[4]。

近年来,国际上对土壤氮矿化开展了广泛的研究^[5-7],其中包括森林土壤氮矿化速率变化特征^[8],水、热因素对土壤氮矿化影响^[9-11]和植物对土壤氮矿化影响等^[12]方面。虽然已取得了许多研究成果,但对土壤氮的动态认识依旧存在许多不确定性,在全球范围内没有一个统一的矿化模式。国内开展了许多模拟自然条件的室内控温、控湿实验,提出了相应的因子控制机理及理论矿化模型^[13-15]。在原位培养方面以温带草原、农田土壤、热带森林及亚热带温带森林研究^[16-21]较多,而对于森林土壤氮矿化的研究则以人工林为主,较少研究天然林的土壤氮矿化特征,且很少考虑林地土壤氮矿化的垂直空间异质性,因而难以全面的分析和评价自然条件下土壤氮矿化过程。

大兴安岭北部是我国唯一的高纬度寒温带地区,冬季漫长寒冷,夏季短暂湿热,昼夜温差较大,月平均气温在 0℃ 以下的月份长达 8 个月之久。本区地带性土壤是棕色针叶林土,土壤层较薄,多在 20—30 cm,石块较多,且有多年冻土存在。由于气候寒冷,生长季较短,土壤微生物活动和有机质分解受到限制,因此土壤养分供给水平是本区植物生长重要的影响因子。本研究以大兴安岭北部地区天然针叶林为研究对象,探讨森林土壤无机氮含量、氮矿化特征及其影响因素,旨在揭示该地区土壤氮素转化特征和供给水平,为大兴安岭地区森林生态系统土壤养分管理及森林经营提供帮助。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于大兴安岭地区漠河县境内黑龙江漠河森林生态系统国家定位观测研究站,地理坐标为 122°07'—122°27'E, 53°22'—53°30'N,该地区属寒温带大陆性气候,具有明显的山地气候特点,冬季由于受极地大陆气团控制,寒冷、干燥而漫长,夏季在副热带海洋气团的影响下,短暂湿热,年均温 -4.9℃,多年平均降水量 350—500 mm,多集中在 7 月份,全年无霜期 80—90 d。研究区地带性植被为兴安落叶松林,另外还有樟子松林、樟子松-落叶松混交林、白桦(*Betula platyphylla*)林、山杨(*Populus davidiana*)林等森林类型,林下植物以兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)和笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)为主。地带性土壤为棕色针叶林土,局部地段分布有沼泽土和草甸土,并有永冻层存在。

1.2 样地设置和研究方法

在前期踏查的基础上选择本区典型针叶林为研究对象,即樟子松林、兴安落叶松林和樟子松-兴安落叶松混交林,在每种林型中选择典型地段布设 3 块 20 m×20 m 的样地,对样地进行基本情况调查,详见表 1。每个样地每月选取 3 个培养点,采用顶盖埋管法^[4]估测氮素的矿化速率。在实验开始前准备好长 20 cm,内径

5 cm 的 PVC 管、塑料布、沙布和橡皮圈。每次取样时把 3 个 PVC 管垂直打入土中,然后小心取出装满土样的 PVC 管,再把 PVC 管顶部用塑料布封住,底部用纱布封住并用橡皮筋固定后放回原处;同时用另外的 3 个 PVC 管取原状土,将管内土壤分为 0—10 cm 和 10—20 cm 两层,分别装入袋中,带回实验室做室内分析。野外培养时间为 30 天,每次取样时先取出上次所埋管中的培养土,再用同样的方法埋管并取对应的原状土带回实验室。在每一样地的对角线上选 3 个 50 cm×50 cm 的样方,用钢板尺对枯落物的厚度测量并记录,同时用塑料袋收集样方内的枯落物及每个采样点(0—10 cm、10—20 cm)土壤,密封带回实验室分析。实验从 2017 年 5 月 5 日开始至 2017 年 10 月 5 日结束,共进行 5 个时段的培养。

表 1 3 种林型样地基本概况

Table 1 The basic situation of three forest types

林型 Forest type	海拔 Altitude/m	树种组成 Species composition	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	郁闭度 Canopy density	林下主要植物 Understory species composition
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	532	9 樟 1 落	樟 16.03 落 12.92	樟 21.03 落 13.23	0.6	1、2、3、4、5、11、12
混交林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> - <i>Larix gmelinii</i> forest	468	6 樟 4 落	樟 18.69 落 14.56	樟 25.37 落 19.91	0.8	1、2、3、4、6、10、11
兴安落叶松林 <i>Larix gmelini</i> forest	332	10 落	落 13.13	落 14.13	0.8	2、6、10、11

1. 兴安刺玫、2. 兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、3. 羽节蕨(*Gymnocarpium Jessoense*)、4. 北国红豆(*Vaccinium vitis-idaea*)、5. 矮生悬钩子(*Rubus clivicola*)、6. 笃斯越桔、7. 风毛菊(*Saussurea amurensis*)、8. 红花鹿蹄草(*Pyrola incarnata*)、9. 东方草莓(*Fragaria orientalis*)、10. 杜香(*Ledum palustre*)、11. 越桔(*V. vitis-idaea*)

室内土壤分析包括土壤水分含量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、土壤及枯落物有机碳、全氮含量、土壤常规理化性质的测定。土壤含水率采用烘干法(105℃, 24 h)测定。土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 测定采用 1 mol/L KCl 浸提法,滤液用连续流动分析仪(BRAN+LUEBBE-AA3, Germany)测定。土壤及枯落物有机碳、全氮采用 MultiC/N 3000 分析仪 HT1500SolidsModule 固体模块和半微量开氏定氮法测定。土壤 pH 采用玻璃电极法(土水比 1:2.5)测定。土壤容重、孔隙度等物理指标用环刀法测定,测定结果详见表 2。

表 2 3 种林型样地土壤性质

Table 2 Soil properties of three forest types

林型 Forest type	樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest		樟子松-落叶松混交林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> - <i>Larix gmelinii</i> forest		落叶松林 <i>Larch gmelini</i> forest	
	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm
容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	0.69	1.05	0.97	1.19	0.47	0.89
毛管孔隙度 Capillary porosity/%	37.63	23.96	45.24	38.36	60.76	53.40
总孔隙度 Soil total porosity/%	41.43	26.39	50.04	42.34	64.46	56.9
pH	5.22	5.35	5.39	5.52	5.22	5.46
有机碳 Organic carbon/(g/kg)	23.27	13.55	18.76	9.20	18.14	8.87
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	2.82	1.91	2.48	1.68	4.02	2.32

氮矿化速率计算公式为:

$$M = [(I_0' + I_1') - (I_0 + I_1)] / D \quad (1)$$

$$M_1 = [(I_0' - I_0)] / D \quad (2)$$

$$M_2 = [I_1' - I_1] / D \quad (3)$$

式中, M 为净氮矿化速率、 M_1 为净氨化速率、 M_2 为净硝化速率, $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$; I_0 和 I_0' 分别为培养前后铵态氮浓度, mgN/kg ; I_1 和 I_1' 为相对应的培养前后硝态氮浓度, mgN/kg ; D 为培养天数, d 。

1.3 数据分析

实验数据统计分析采用 SPSS 19.0 软件, 采用单因素方差分析法分析不同类型天然林及不同土层土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、氮净矿化速率间的差异性, 用 Tukey 检验进行及差异显著性检验 ($P < 0.05$), 采用 Pearson 相关系数法分析土壤氮矿化速率与土壤层和枯落物层的有机碳、全氮、碳氮比及土壤含水量、pH 值 and 无机氮等指标的关系, 以 $P < 0.05$ 差异显著。

2 结果与分析

2.1 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化特征

由图 1 可知, 5—10 月樟子松林和混交林的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化趋势相似, 均为单峰变化, 即在 5—7 月土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量变化不大, 8、9 月有显著上升, 10 月略有下降。樟子松林及混交林 0—10 cm 土层的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别在 8 月 (55.18 ± 7.88) mgN/kg 和 9 月 (66.55 ± 4.61) mgN/kg 达到峰值; 而 10—20 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均在 9 月达到峰值, 分别为 (53.91 ± 10.79) mgN/kg 和 (44.87 ± 2.68) mgN/kg 。观测期内, 兴安落叶松林 0—10 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈持续上升趋势, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量增长率为 89.38%, 10—20 cm 土层 5—10 月 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈波动式变化趋势。樟子松林 8 月 0—10 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于 10—20 cm 土层 ($P < 0.05$)。混交林在 8、9 月 0—10 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著高于 10—20 cm 土层 ($P < 0.01$), 10 月 0—10 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 高于 10—20 cm 土层 ($P < 0.05$)。兴安落叶松林土壤在 9 月 0—10 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于 10—20 cm 土层 ($P < 0.05$), 其他月份土层间差异不显著 ($P > 0.05$)。

由此可见, 在整个观测期内 3 种针叶林 0—10 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量明显高于 10—20 cm 土层 ($P < 0.05$), 但相同土层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在林型之间的差异并不显著 ($P > 0.05$)。

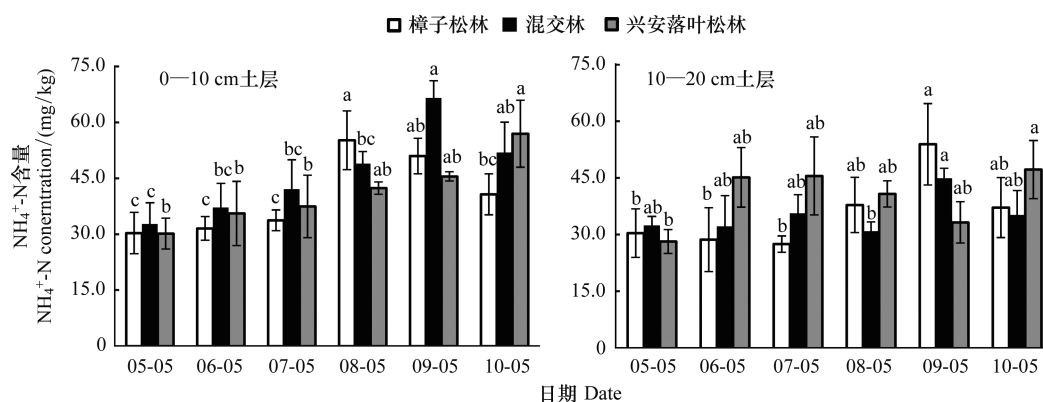


图 1 3 种林型 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 月变化动态

Fig.1 Monthly changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in the three forests

a、b、c 和 d 为林型内不同月份土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量多重比较结果 ($P < 0.05$)

2.2 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化特征

3 种林型土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化如图 2 所示, 可以看出, 5—10 月樟子松林 0—10 cm 及 10—20 cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈明显的单峰变化趋势, 峰值均出现在 9 月, 分别为 (5.79 ± 0.89) mgN/kg 和 (3.56 ± 0.71) mgN/kg ; 混交林 0—10 cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量也显现出明显的单峰变化趋势且在 9 月出现峰值 (5.86 ± 0.46) mgN/kg , 10—20 cm 土层则成双峰曲线变化, 在 7、9 月各出现一次峰值; 兴安落叶松林 0—10 cm 及 10—20 cm 土层

NO_3^- -N 含量呈波动式上升趋势。樟子松林在 6、8、9 和 10 月 0—10 cm 土层的 NO_3^- -N 含量明显高于 10—20 cm 土层 ($P<0.05$);混交林 9 月份 0—10 cm 土层 NO_3^- -N 含量显著高于 10—20 cm 土层 ($P<0.05$);兴安落叶松林土层间 NO_3^- -N 含量均无显著性差异 ($P>0.05$)。

综上所述,5—10 月樟子松林 0—10 cm 土层 NO_3^- -N 含量明显高于 10—20 cm 土层 ($P<0.05$),但混交林和兴安落叶松林土层间 NO_3^- -N 含量差异不显著 ($P>0.05$)。3 种林型同一土层土壤 NO_3^- -N 含量也没表现出显著差异 ($P>0.05$)。

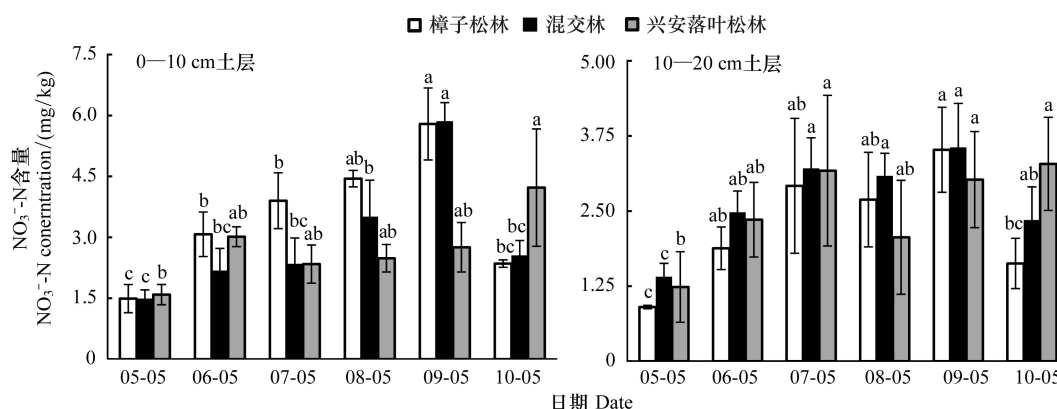


图 2 3 种林型 NO_3^- -N 变化动态

Fig.2 Monthly changes of NO_3^- -N concentration in the three forests

a、b、c 和 d 为林型内不同月份土壤 NO_3^- -N 多重比较结果 ($P<0.05$)

2.3 土壤净氮矿化速率变化特征

2.3.1 净氨化速率

由图 3 可知,3 种林型净氨化速率均呈 V 型变化趋势,且月变化显著 ($P<0.05$),7、8 月净氨化速率表现为负值,而其他月份则为正值。5—10 月樟子松林、混交林及兴安落叶松林的净氨化速率变化范围分别为 $-0.34—0.89 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、 $-0.15—0.32 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 和 $-0.51—0.60 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。3 种林型不同土层净氨化速率存在显著差异 ($P<0.05$),净氨化速率主要发生在 0—10 cm 土层,观测期内 3 种林型 0—10 cm 土层氨化作用占 0—20 cm 土层总氨化作用的 65.3%—85.8%、57.5%—67.8% 和 59.3%—69.3%,而 10—20 cm 土层占比分别为 14.2%—35.7%、33.2%—42.5% 和 30.7%—40.7%,其中樟子松林在 6、7、9 月 0—10 cm 土层净氨化率明显高于 10—20 cm 土层;混交林在 6 月 0—10 cm 土层净氨化率明显高于 10—20 cm 土层,而 8 月 10—20 cm 土层净氨化率明显高于 0—10 cm 土层 ($P<0.05$)。

由此可见,整个观测期内 3 种林型 0—10 cm 土层净氨化速率明显高于 10—20 cm 土层 ($P<0.05$),土壤的净氨化作用主要发生在 0—10 cm 土层,占整个 0—20 cm 土层的 60% 以上。

2.3.2 净硝化速率

樟子松林 10—20 cm 土层净硝化速率月变化差异显著 ($P<0.05$),其他均差异极显著 ($P<0.01$) (图 4)。3 种林型净硝化速率最大值出现在 6 月,但混交林在 9 月又出现一次明显上升。3 种林型净硝化速率在 5、6、9 和 10 月为正值,且 0—10 cm 土层净硝化速率大于 10—20 cm 土层 ($P<0.05$);7、8 月净硝化速率产生波动出现负值,且出现 10—20 cm 土层净硝化速率大于 0—10 cm 土层。3 种林型间土壤平均净硝化速率存在明显的差异 ($P<0.05$),0—10 cm 土层平均净硝化速率依次为:混交林 ($(0.026\pm0.010) \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$) > 兴安落叶松林 ($(0.017\pm0.0028) \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$) > 樟子松林 ($(0.0014\pm0.011) \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$);10—20 cm 土层平均净硝化速率大小依次为:樟子松林 ($(0.023\pm0.010) \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$) > 混交林 ($(0.013\pm0.0064) \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$) > 兴安落叶松林 ($(0.0090\pm0.011) \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)。3 种林型 0—20 cm 土层净硝化速率变化范围分别为: $-0.022—0.084 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (樟子松林)、 $-0.040—0.099 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (混交林)、 $-0.064—0.044 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (兴安落叶松林)。

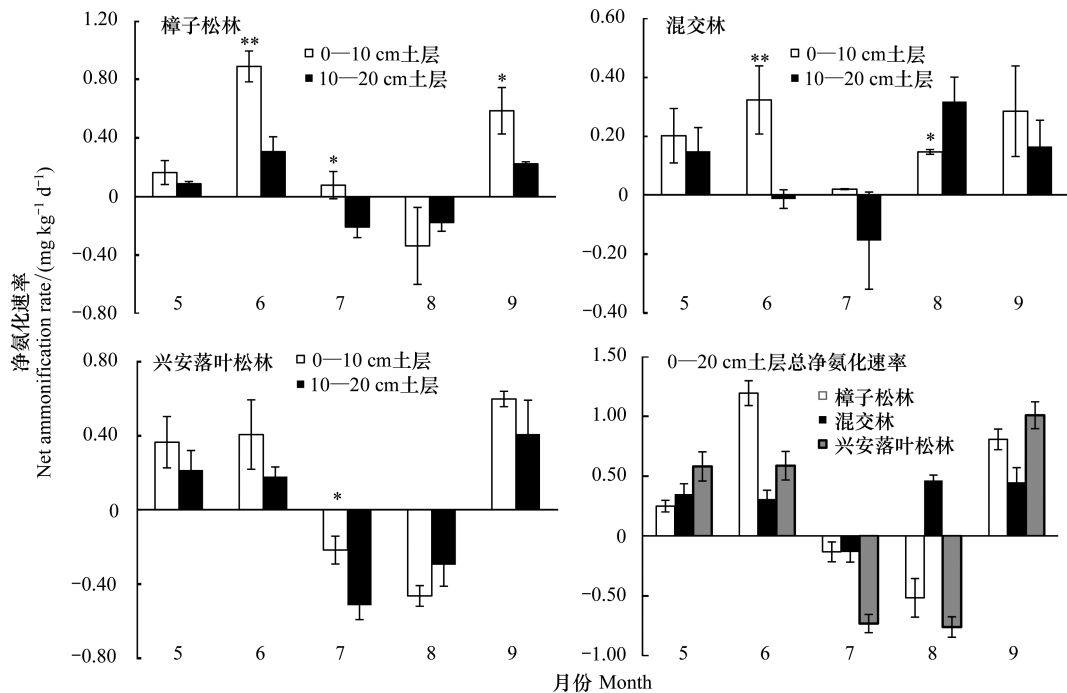


图3 3种林型净氨化速率月变化动态

Fig.3 Monthly changes of net ammonium rates in the three forests

图中 * 和 ** 分别表示 0—10 cm、10—20 cm 土层净氨化速率差异显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$)

综上所述,3种林型土壤净硝化速率除7、8月外其余月份为正值且0—10 cm土层明显高于10—20 cm土层($P<0.05$),7、8月为负值且8月份10—20 cm土层高于0—10 cm土层($P<0.05$)。3种林型间土壤平均净硝化速率存在明显的差异($P<0.05$)。

2.3.3 净氮矿化速率

由图5可知,5—10月3种林型的净氮矿化速率变化趋势与净氨化速率趋势类似,即5、6月呈上升趋势,7、8月呈下降趋势且净氮矿化速率出现负值,9、10月又有所上升。樟子松林0—20 cm土层在6月净氮矿化速率出现最大值为 $(1.28\pm0.11)\text{ mg kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$,8月出现最小值为 $(-0.54\pm0.18)\text{ mg kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$;混交林和兴安落叶松林则在9月出现最大值,分别为 $(0.55\pm0.13)\text{ mg kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$ 和 $(1.05\pm0.12)\text{ mg kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$,在7月出现最小值分别为 $(-0.13\pm0.086)\text{ mg kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$ 和 $(-0.80\pm0.088)\text{ mg kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$ 。3种林型净氮矿化速率表现出显著的垂直差异性($P<0.05$),但与土壤净氨化速率和净硝化速率相比其垂直差异性相对减弱。3种林型间平均净氮矿化速率差异不显著($P>0.05$)。

由此可见,在观测期内3种林型土壤净氮矿化速率呈V型变化趋势且均表相出显著的垂直差异性($P<0.05$)。但3种林型间平均净氮矿化速率无显著性差异($P>0.05$)。

2.4 土壤和枯落物碳氮含量对土壤氮矿化速率的影响

由表3可以看出,不同土层净氮矿化速率影响因子有所不同,但总体而言土壤净氮矿化速率与土壤含水量呈二次相关关系,说明土壤水分含量的增加在一定程度上促进氮矿化的进程,但土壤水分含量超过一定阈值时会抑制土壤氮矿化的发生;土壤氮矿化速率与土壤有机碳含量呈显著正相关($P<0.05$),土壤有机碳含量增高氮矿化速率也逐渐增加;净氮矿化速率与枯落物全氮和C/N呈显著负相关($P<0.05$),说明枯落物中C/N高,氮素转化较慢,释放量少,进而影响氮的矿化速率。土壤净氮矿化速率与土壤pH值、土壤全氮和枯落物储量相关性不显著($P>0.05$)。另外,0—10 cm土层净氮矿化速率还与土壤C/N呈显著正相关($P<0.05$),与枯落物有机碳含量呈显著负相关($P<0.05$)。

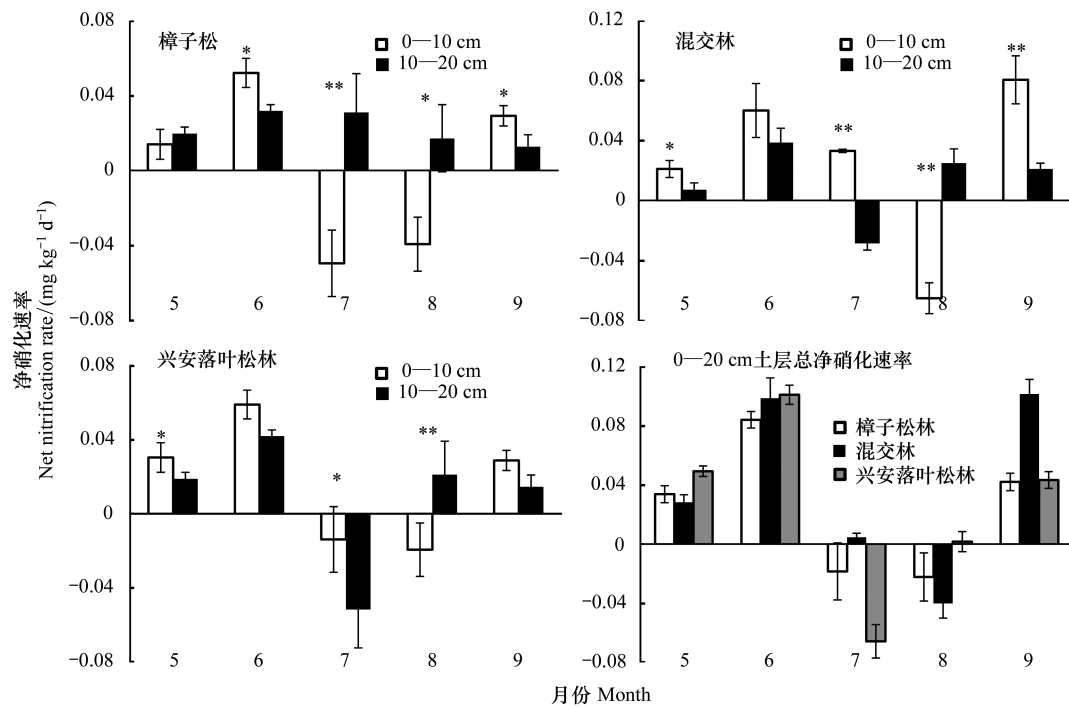


图4 3种林型净硝化速率月变化动态

Fig.4 Monthly changes of net nitrification rates in the three forests

图中 * 和 ** 分别表示 0—10 cm、10—20 cm 土层净硝化速率差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)

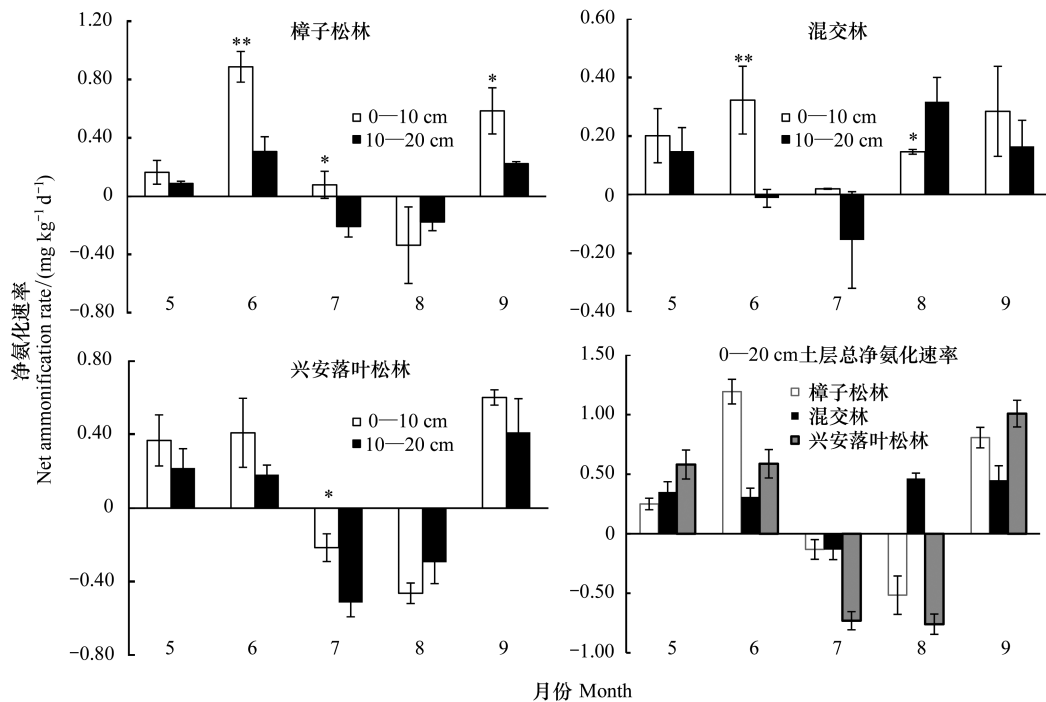


图5 3种林型净氨化速率月变化动态

Fig.5 Monthly changes of net mineralization rates in the three forests

图中 * 和 ** 分别表示 0—10 cm、10—20 cm 土层净硝化速率差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)

3 讨论

3.1 土壤无机氮变化特征

本研究 3 种林型无机氮含量变化范围为 31.51—70.42 mgN/kg, 这一变化范围较其他地区的变化范围较宽且含量较高^[22-24]。0—10 cm 土层无机氮含量显著高于 10—20 cm 土层, 是由于上层土壤不仅有机质含量高, 而且土壤温度也较高, 微生物活动也比较活跃, 因此土壤无机氮含量随土层加深而减少^[25]。无机氮以 NH_4^+ -N 形式存在为主, 各林型 NH_4^+ -N 含量占无机氮含量的 89.63%—96.21%, 这一结果与很多研究结果相同^[26-29]。有研究表明植物从土壤中吸取养分时会优先利用土壤中的 NO_3^- -N, 使得土壤中的 NO_3^- -N 的净剩余量有所减少^[30-33], 另外, 相较于带正电荷的 NH_4^+ -N, 带负电荷的 NO_3^- -N 更容易通过淋溶作用和反硝化作用而造成损失, 使得土壤中 NH_4^+ -N 浓度较高, 并通过 NH_4^+ -N 形式保持土壤中氮素的含量水平^[34]; 而与方运霆、Tan 等人^[35-36]认为森林土壤无机氮是以 NO_3^- -N 形式为主的研究结果相悖。 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 及总无机氮含量最大值均出现在 9、10 月, 这一结果与 Raghubanshi^[37]等学者的研究结果相同, 即土壤氮素含量与枯落物的氮归还有关。

表 3 净氮矿化速率与土壤基质和枯落物相关性分析

Table 3 Relationships of soil nitrogen mineralization rate with soil matrix and litter

	土壤层次 Soil layer	土壤含水量 Soil water content	pH	土壤有机碳 Soil organic carbon	土壤全氮 Soil total nitrogen	土壤 C/N Soil C/N	枯落物有机碳 Litter organic carbon	枯落物全氮 Litter total nitrogen	枯落物 C/N Litter C/N	枯落物数量 Litter size
净氮矿化速率	0—10 cm	0.679 *	-0.298	0.733 **	0.381	0.555 *	-0.613 *	-0.812 *	-0.697 **	0.245
Net nitrogen mineralization rate	10—20 cm	0.626 *	-0.231	0.565 *	0.420	0.390	-0.142	-0.753 *	-0.641 *	0.202

表中 * 和 ** 分别表示相关性水平显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)

无机氮含量标志着土壤中可供植物吸收利用的氮素水平, 是评价土壤供氮能力的一项重要指标^[26,38], 是土壤直接供给植物吸收的养分, 其含量显著影响着森林土壤的生产力。研究区土壤无机氮平均含量高于其他地区平均水平, 说明该地区土壤具有较强的供氮能力。不同林型间无机氮含量及组成存在一定差异, 这表明不同森林类型和生态环境氮素有效性有所差异^[23]。土壤氮素供应取决于土壤有机质的积累与分解状况, 与地上植被类型及其根系、凋落物输入与分解相关; 与此同时, 不同森林类型的土壤容重和土壤孔隙度等物理性质也影响土壤无机氮含量及其组成特征。大兴安岭地区由于其特殊的地理位置及气候特点使得该地区的生长季较短, 较高的无机氮水平保证了土壤对植物有效的氮素供应, 提高了这一地区森林土壤的生产力, 能够为森林生态系统的持续经营提供养分保障。

3.2 土壤净氮矿化速率

3 种林型土壤氮矿化过程存在明显的月际差异 ($P < 0.05$), 且 0—10 cm 土层的氮矿化作用明显强于 10—20 cm 土层 ($P < 0.05$)。一般来说, 土壤净氮矿化速率与土壤微生物活性有关, 土壤微生物活性高有助于提高土壤净氮矿化速率, 而微生物活性与土壤有机质和全氮含量有关^[9-41], 3 种林型 0—10 cm 土层具有较高的有机质和全氮含量, 为微生物的活动提供了保障, 从而为土壤净氮矿化创造了良好的条件^[24]。3 种林型观测期内土壤净氮矿化速率均值变化范围樟子松林为 -0.54—1.28 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 、樟子松-兴安落叶松混交林为 -0.13—0.55 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 、兴安落叶松林为 -0.80—1.05 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 。可以看出, 混交林矿化速率变化幅度较小, 这与混交林土壤无机氮含量较高有关, 土壤矿质氮含量升高能抑制土壤氮素矿化^[39]。3 种林型 5、6 月土壤矿化速率较高, 为矿化的活跃期^[24]。而 7、8 月份土壤氮矿化速率为负值, 其原因可能与土壤中养分含量变化及土壤水分含量有关。当土壤中养分充足时, 土壤氮素矿化作用弱于微生物对氮的固持作用, 土壤中无机氮含量转为消耗性为主。反之, 在其他月份土壤中养分缺乏, 土壤氮素矿化作用明显高于微生物对氮的固持作用, 土壤表

现为无机氮素积累过程,土壤氮矿化速率增大^[42]。

3 种林型土壤净氮矿化速率在不同月份变化较大,且 7、8 月份矿化速率为负值,与其他地区土壤氮矿化速率变化趋势有所不同,而 7、8 月份为该地区降水比较集中的时期,说明在不同地区气候因素和环境因素大不相同,对氮矿化的影响也不同。森林土壤存在很大的垂直空间异质性,表层土壤氮矿化作用更强,这也说明土壤氮矿化速率是气候因子、林分组成、枯落物质量及土壤基质等多种影响因子综合作用的结果。

3.3 土壤净氮矿化的控制因子

影响土壤净氮矿化速率的因素很多也很复杂,周才平等对长白山两种林型下土壤氮矿化进行研究,发现与温度和湿度关系密切^[13]。在本研究中,土壤净氮矿化速率与土壤水分间存在二次相关关系,即在较低土壤水分范围内,随水分增加,土壤净氮矿化能力增强,但当水分超过一定阈值后反而会抑制土壤净氮矿化过程^[13-14,43]。土壤净氮矿化速率与土壤温度相关性不显著($P>0.05$),这可能与大兴安岭地区寒冷的气候条件有关。土壤有机质含量和土壤 C/N 的提高会增强土壤净氨化、净硝化及净氮矿化速率^[41,44]。土壤净氮矿化速率与枯落物全氮含量及 C/N 呈极显著负相关,C/N 越大越难被矿化,说明枯落物通过影响土壤中的碳氮含量间接的影响土壤氮矿化速率^[45]。而土壤氮矿化速率与枯落物储量却无显著相关性,这说明枯落物对土壤矿化的影响主要表现为质量控制,而非数量上的控制^[41,46-47]。通过对 0—10 cm 及 10—20 cm 土层土壤氮矿化速率影响因子相关分析发现,0—10 cm 土层氮矿化速率受土壤及枯落物碳氮含量及 C/N 影响较大,其原因可能是由于上层土壤养分较高,且其土壤容重较小,透气及透水能力较强有助于土壤氮矿化的发生。

4 结论

(1)大兴安岭北部针叶林土壤无机氮变化范围为 31.51—70.42 mg/kg,且以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在为主;针叶混交林土壤无机氮含量高于纯林;观测期内樟子松林及混交林无机氮含量呈单峰曲线变化趋势,而兴安落叶松林则呈现波动式上升趋势。

(2)3 种林型生长季土壤净氮矿化、净氨化、净硝化速率均呈 V 型变化趋势,最小值在 7、8 月,且为负值。土壤净氨化过程是土壤氮矿化过程的主要形式,占比在 60% 以上。

(3)土壤氮矿化过程受多种因素的共同影响。土壤水分含量、土壤有机质含量、枯落物全氮含量及碳氮比在土壤氮矿化过程中起主要作用;而土壤温度、土壤 pH、土壤全氮和枯落物数量及有机碳含量对氮矿化速率影响较小。森林生态系统土壤及枯落物的质量影响土壤氮矿化特征及植物对氮素的吸收利用。

致谢:东北林业大学黑龙江漠河森林生态系统国家定位观测研究站提供野外基础支持。

参考文献 (References):

- [1] Aber J D. Nitrogen cycling and nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 1992, 7(7): 220-224.
- [2] 刘顺, 罗达, 刘千里, 张利, 杨洪国, 史作民. 川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局. *生态学报*, 2017, 37(4): 1074-1083.
- [3] Bremer E, Kuikman P. Influence of competition for nitrogen in soil on net mineralization of nitrogen. *Plant and Soil*, 1997, 190(1): 119-126.
- [4] 孟盈, 薛敬意, 沙丽清, 唐建维. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 99-104.
- [5] Zhou Z H, Wang C K. Reviews and syntheses: soil resources and climate jointly drive variations in microbial biomass carbon and nitrogen in China's forest ecosystems. *Biogeosciences*, 2015, 12(22): 6751-6760.
- [6] 王光军, 田大伦, 朱凡, 闫文德, 李树战. 湖南省 4 种森林群落土壤氮的矿化作用. *生态学报*, 2009, 29(3): 1607-1615.
- [7] Zak D R, Groffman P M, Pregitzer K S, Christensen S, Tiedje J M. The vernal dam: plant-microbe competition for nitrogen in northern hardwood forests. *Ecology*, 1990, 71(2): 651-656.
- [8] Weintraub M N, Schimel J P. Interactions between carbon and nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in arctic tundra soils. *Ecosystems*, 2003, 6(2): 129-143.
- [9] 罗达, 史作民, 王卫霞, 刘世荣, 卢立华, 明安刚, 于浩龙. 南亚热带格木、马尾松幼龄人工纯林及其混交林生态系统碳氮储量. *生态学报*, 2015, 35(18): 6051-6059.
- [10] Bonito G M, Coleman D C, Haines B L, Cabrera M L. Can nitrogen budgets explain differences in soil nitrogen mineralization rates of forest stands

- along an elevation gradient? Forest Ecology and Management, 2003, 176(1/3): 563-574.
- [11] Zaman M, Chang S X. Substrate type, temperature, and moisture content affect gross and net N mineralization and nitrification rates in agroforestry systems. Biology and Fertility of Soils, 2004, 39(4): 269-279.
- [12] Raison R J, Connell M J, Khanna P K. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(5): 521-530.
- [13] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度对长白山两种林型下土壤氮矿化的影响. 应用生态学报, 2001, 12(4): 505-508.
- [14] 周才平, 欧阳华, 裴志永, 徐兴良. 中国森林生态系统的土壤净氮矿化研究(英文). 植物生态学报, 2003, 27(2): 170-176.
- [15] 刘玉槐, 严员英, 张艳杰, 严月, 赵玉皓, 徐燕, 陈伏生, 葛伟达, 鲁顺保. 不同温度条件下亚热带森林土壤碳矿化对氮磷添加的响应. 生态学报, 2017, 37(23): 7994-8004.
- [16] 王雪, 郭雪莲, 郑荣波, 王山峰, 刘双圆, 田伟. 放牧对滇西北高原纳帕海沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响. 生态学报, 2018, 38(7): 2308-2314.
- [17] 刘杏认, 董云社, 齐玉春, Domroes M. 温带典型草地土壤净氮矿化作用研究. 环境科学, 2007, 28(3): 633-639.
- [18] 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.
- [19] 聂二旗, 张心昱, 郑国砥, 杨洋, 王辉民, 陈伏生, 孙晓敏. 氮磷添加对杉木林土壤碳氮矿化速率及酶动力学特征的影响. 生态学报, 2018, 38(2): 615-623.
- [20] 张珊, 李玉, 车克钧, 车宗玺, 王立, 刘贤德. 祁连山东段青海云杉林区土壤氮矿化与土壤因子的相关性. 水土保持学报, 2016, 30(5): 218-223.
- [21] Lang M, Cai Z C, Mary B, Hao X Y, Chang S X. Land-use type and temperature affect gross nitrogen transformation rates in Chinese and Canadian soils. Plant and Soil, 2010, 334(1/2): 377-389.
- [22] 莫江明, 郁梦德, 孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究. 植物生态学报, 1997, 21(4): 335-341.
- [23] 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.
- [24] 黄容, 潘开文, 王进闯, 李伟. 岷江上游半干旱河谷区 3 种林型土壤氮素的比较. 生态学报, 2010, 30(5): 1210-1216.
- [25] Jones D L, Healey J R, Willett V B, Farrar J F, Hodge A. Dissolved organic nitrogen uptake by plants—an important N uptake pathway? Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(3): 413-423.
- [26] 张俊俊. 秦岭山地森林和草甸生态系统土壤碳氮动态特征及其对气候变化的响应[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- [27] 李检舟, 沙丽清, 王君, 冯文婷, 陈建会, 李江林. 云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤氮矿化季节变化. 山地学报, 2006, 24(2): 186-192.
- [28] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉. 哀牢山木果柯林及其退化植被下土壤无机氮库的干季动态特征. 植物生态学报, 2001, 25(2): 210-217.
- [29] 沙丽清, 孟盈, 冯志立, 郑征, 曹敏, 刘宏茂. 西双版纳不同热带森林土壤氮矿化和硝化作用研究. 植物生态学报, 2000, 24(2): 152-156.
- [30] 秦彧. 不同土地利用方式对玛曲高寒草地土壤养分与植被的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [31] 单玉梅. 放牧强度和草地利用方式对内蒙古典型草原土壤氮矿化和凋落物分解的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [32] 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.
- [33] 高英志, 汪诗平, 韩兴国, 陈全胜, 王艳芬, 周志勇, 张淑敏, 杨晶. 退化草地恢复过程中土壤氮素状况以及与植被地上绿色生物量形成关系的研究. 植物生态学报, 2004, 28(3): 285-293.
- [34] 李铭, 朱利川, 张全发, 程晓莉. 不同土地利用类型对丹江口库区土壤氮矿化的影响. 植物生态学报, 2012, 36(6): 530-538.
- [35] 方运霆, 莫江明, Gundersen P, 周国逸, 李德军. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [36] Tan B, Wu F Z, Yang W Q, Yu S, Liu L, Wang A. The dynamics pattern of soil carbon and nutrients as soil thawing proceeded in the alpine/subalpine forest. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2011, 61(7): 670-679.
- [37] Raghubanshi A S. Effect of topography on selected soil properties and nitrogen mineralization in a dry tropical forest. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(2): 145-150.
- [38] 莫盘玉, 买良欢, 鞠勤南. 无菌条件下小麦氨基酸态氮及铵态氮营养效应研究. 应用生态学报, 2003, 14(2): 184-186.
- [39] Sánchez L F, García-miragaya J, Chacón N. Nitrogen mineralization in soils under grasses and under trees in a protected Venezuelan savanna. Acta Oecologica, 1997, 18(1): 27-37.
- [40] Berendse F. Organic matter accumulation and nitrogen mineralization during secondary succession in heathland ecosystems. Journal of Ecology, 1990, 78(2): 413-427.
- [41] Kitayama K. Soil nitrogen dynamics along a gradient of long-term soil development in a Hawaiian wet montane rainforest. Plant and Soil, 1996, 183(2): 253-262.
- [42] 田红灯. 喀斯特城市不同森林类型土壤氮矿化特征[D]. 株洲: 中南林业科技大学, 2013.
- [43] 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.
- [44] 于一, 郭华峰, 周志勇. 油松林氮矿化随土壤有机物质量的变化特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2017, 41(1): 69-74.
- [45] 陈印平, 潘开文, 吴宁, 罗鹏, 王进闯, 鲜纪绅. 凋落物质量和分解对中亚热带栲木荷林土壤氮矿化的影响. 应用与环境生物学报, 2005, 11(2): 146-151.
- [46] Kader M A, Sleutel S, Begum S A, Moslehuddin A Z M, De Neve S. Nitrogen mineralization in sub-tropical paddy soils in relation to soil

mineralogy, management, pH, carbon, nitrogen and iron contents. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(1): 47-57.

[47] 解成杰, 郭雪莲, 余磊朝, 许静. 滇西北高原纳帕海湿地土壤氮矿化特征. *生态学报*, 2013, 33(24): 7782-7787.