

气候因子对辽宁省樟子松人工林土壤氮含量的影响

毛禹¹, 雷泽勇^{1,2*}, 李宏伟³, 周凤艳¹, 徐畅¹ (1. 辽宁工程技术大学环境学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学退化土地生态治理研究院, 辽宁阜新 123000; 3. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西西安 710000)

摘要 [目的]揭示气候对樟子松人工林土壤氮含量的影响。[方法]通过选择半干旱地区(辽宁省朝阳市、阜新市)和湿润地区(抚顺市、本溪市、大连市)生长的樟子松人工成熟林样地为研究对象(临近的原土地利用为对照),采集0~5、5~10、10~20、20~30、30~40 cm层的土壤样品,测定其氮、磷、有机碳、pH、含水率、土壤颗粒组成,研究土壤氮(全氮、碱解氮)随土层分布特征,并探讨土壤其他理化因子对土壤氮的影响。[结果]樟子松人工林地土壤氮含量随气候变化有显著不同,湿润地区土壤全氮增加,半干旱地区全氮含量降低;而土壤碱解氮含量在2类气候区均有所增加。土壤氮含量随土层分布方面,2类气候区的表层土壤氮变化高于其他土层。半干旱地区的5~10 cm土壤全氮、0~5 cm土壤碱解氮变化受土壤pH影响,5~10 cm土壤碱解氮变化受土壤速效磷影响;湿润地区的0~5、20~30 cm土壤全氮主要受土壤含水率的影响,而10~20 cm土壤全氮受土壤细颗粒影响。[结论]相比于辽宁省半干旱地区,湿润地区营建樟子松人工林更有利于土壤氮的积累,半干旱地区土壤氮素的积累则相对较慢。应该促进该地区林地枯落物的分解,以免樟子松的生长发育受到氮缺乏的限制,确保不同气候区的樟子松人工林的经营可持续化。

关键词 樟子松; 土壤全氮; 土壤pH; 土壤含水率

中图分类号 S718.5 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)22-0133-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.22.032



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Climate Factors on Soil Nitrogen Content of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation in Liaoning Province

MAO Yu¹, LEI Ze-yong^{1,2}, LI Hong-wei³ et al (1. School of Environment, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000; 2. Degenerate Land Ecological Governance Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000; 3. Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000)

Abstract [Objective] To reveal the effects of climate on soil nitrogen of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation. [Method] The mature plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* growing in semi-arid areas (Chaoyang City, Fuxin City, Liaoning Province) and humid areas (Fushun City, Benxi City, Dalian City) were selected as the research objects (the adjacent original land use was used as the control), and the soil samples of 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 cm layers were collected to determine the nitrogen, phosphorus, organic carbon, pH, water content, and soil particle composition. The distribution characteristics of soil nitrogen (total nitrogen, alkali hydrolyzable nitrogen) and its changes with soil layer were studied, and the effects of other soil physical and chemical factors on soil nitrogen were discussed. [Result] The results showed that the change of soil nitrogen content of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation was significantly different with climate change, the total nitrogen content of soil increased in humid areas, and decreased in semi-arid areas; the content of soil alkali hydrolyzable nitrogen increased in both types of climate areas. In terms of the distribution of soil nitrogen content with soil layers, the variation of surface soil nitrogen in the two climatic zones was significantly higher than that in other soil layers. In semi-arid area, the changes of total nitrogen and alkali hydrolyzable nitrogen in 5-10 cm soil and 0-5 cm soil were affected by soil pH, and the changes of alkali hydrolyzable nitrogen in 5-10 cm soil were affected by soil available phosphorus; in humid area, the changes of total nitrogen in 0-5 cm and 20-30 cm soil were mainly affected by soil moisture content, while the changes of total nitrogen in 10-20 cm soil were affected by soil fine particles. [Conclusion] Compared with the semi-arid areas of Liaoning Province, the construction of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in humid areas is more conducive to the accumulation of soil nitrogen, while the accumulation of soil nitrogen in semi-arid areas is relatively slow. It is necessary to promote the decomposition of forest litter in semi-arid areas, so as to avoid the limitation of nitrogen deficiency on the growth and development of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in different climatic regions, and ensure the sustainable development of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in different climatic regions.

Key words *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; Soil total nitrogen; Soil pH; Soil water content

土壤为陆地生态系统中养分存储提供了一个必要空间。土壤养分含量不仅能够反映林地土壤质量高低,同时也能反映地表植被格局的真实变化^[1]。氮作为陆地生态系统中植物体的基本组成元素^[2],对植物的生长发育和物质代谢等功能的发挥至关重要。其中,氮含量及其有效性能够限制植物体生长发育^[3]。植物通过根系吸收土壤中的养分元素,并通过叶片的光合作用生产有机物质,分配到植物体的各个器官,用以维持生命活动。这些有机物质在衰老后部分以凋落物的形式归还土壤,从而完成氮素在生态系统中的循环过程^[4]。而气候变化能够直接作用于生态系统,对土壤微生物、植物群落的初级生产力以及多样性造成影响,改变土壤理化性质而影响土壤生态环境^[5]。从干旱生态系统到半湿润生态系统,降水会制约植物的生产力和凋落物的分解^[6],温度变化也会影响土壤有机氮的矿化作用^[7],两者影响土壤氮的收支平衡,进而影响土壤氮贮存。因此,探究不同气候条件下土壤氮的变化及影响因子对生态系统氮循环具有重要意义。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)在远东地区的地理变种,具有耐干旱、耐瘠薄土壤的特性^[8]。自1955年在辽宁省章古台地区成功固沙造林以来,樟子松被陆续推广到辽宁省其他地区,改善了当地生态环境,丰富了当地物种多样性,并推动了辽宁省不同气候区森林后备资源的发展^[9]。目前国内外研究表明,樟子松的营建不仅能够改善沙地土壤氮的有效性^[10],还能够有效促

基金项目 国家自然科学基金面上项目(31570709)。

作者简介 毛禹(1994—),男,辽宁朝阳市人,硕士研究生,研究方向:林业生态工程。*通信作者,教授,硕士,从事林业生态工程、水土保持与荒漠化防治研究。

收稿日期 2021-03-17

进土壤氮的固定^[11],但樟子松人工林的生长始终受氮的限制^[12]。然而,以往的研究集中于半干旱地区,而有关于湿润地区营建樟子松人工林后土壤氮的变化及影响因子鲜见报道。为了揭示湿润地区造林后土壤氮的变化与半干旱地区相似性,以及影响土壤氮变化因子的是否相同,该研究以辽宁省半干旱区、湿润区营建的樟子松林成熟林为样地对象,研究2类气候区土壤氮(全氮、碱解氮)及其随土层分布的变化特征,并探讨了土壤其他理化因子对土壤氮的影响,以揭示不同气候地区樟子松人工林对土壤氮素的动态影响,为气候变化条件下樟子松人工林经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 试验样地选择在半干旱地区[阜新市(彰武县、阜蒙县)、朝阳市(建平县、凌源市)]和湿润地区[辽宁省本溪市(桓仁县)、抚顺市(清原县)、大连市(瓦房店市)](图1)。样地基本信息见表1。

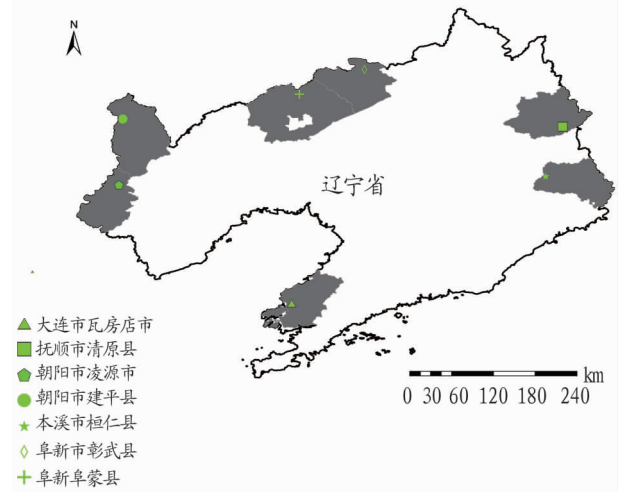


图1 辽宁省不同样地位置

Fig.1 Different location of Liaoning Province

表1 辽宁省各采集样点的环境因子信息

Table 1 Environmental factor information of each sampling site in Liaoning Province

采样地点 Sample site	位置 Position	年均温度 Mean annual temperature ℃	年均降水量 Mean annual precipitation mm	年均蒸发量 Mean annual evaporation mm	海拔 Altitude m
凌源宋杖子林场 Lingyuan Songzhangzi Forest Farm	119°23'43"E, 41°13'46"N	8.7	479.4	1 143.2	437
建平黑水林场 Jianping Heishui Forest Farm	119°26'01"E, 42°04'25"N	7.6	480.0	1 632.0	519
彰武章古台林场 Zhangwu Zhanggutai Forest Farm	122°33'20"E, 42°42'49"N	5.7	500.0	1 600.0	234
阜蒙县旧庙林场 Fumeng County Jiumiao Forest Farm	121°43'26"E, 42°23'35"N	7.9	502.7	2 636.6	166
桓仁老秃顶子自然保护区 Huanren Laotudingzi Nature Reserve	124°41'13"E, 41°11'11"N	7.4	880.0	1 600.0	1 059
瓦房店仙浴湾镇 Wafangdian Xianyuwan Town	121°37'00"E, 39°41'52"N	9.3	750.0	400.8	7
清原湾甸子林场 Qingyuan Wandianzi Forest Farm	125°09'50"E, 41°53'08"N	5.3	806.5	1 275.0	559

半干旱地区样地土壤主要类型为风砂土和褐土,属华北、蒙古植物区系,代表性植物有小白蒿、中华委陵、黄柳、中华隐子草、大果榆、胡枝子和蒺藜梗等^[13]。

湿润地区样地土壤主要类型为山地棕色森林土^[14],属长白植物区系,代表性木本植物有红皮云杉、轮叶百合、单花鸢尾、长白茶、长白落叶松、大黄柳、东北山梅花、东北杏等。

1.2 试验地选择与土壤样品的采集 2018年7月,对上述研究区林地进行踏查,选择成熟的樟子松人工林(37~45 a)样地,样地大小为20 m×20 m,进行每木调查得到样地基本情况(表2)。依据调查选出标准木,距标准木1 m处挖掘100 cm×100 cm×40 cm的土壤剖面,用环刀(容积200 cm³)收集0~5、5~10、10~20、20~30、30~40 cm层的原状土,用于测定土壤容重和土壤孔隙度。同时,在每个样地内随机选取5个样点,按上述固定土层分别采样,同时每个试验样地就近选择对照样地(造林前的土地利用样地为对照),按上述步骤采样,所有样品带回实验室处理。在实验室,将相同土层的土壤样品充分混匀,用四分法留取500 g样品,除去植物根系和石块等杂物,室温风干处理后粉碎过筛,用于氮、磷、有机碳、pH、含水率、土壤颗粒组成的测定。

1.3 土壤理化因子测定方法 土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾容量法-外加热法,土壤全氮含量的测定采用半微

量开氏法,土壤碱解氮含量的测定采用碱解扩散法,土壤全磷含量的测定采用NaOH熔融-钼锑抗比色法,土壤速效磷含量的测定采用NaHCO₃法,土壤含水率的测定采用烘干法,土壤机械组成采用激光粒度分析仪测定,土壤pH的测定采用电位法^[15]。

表2 辽宁省不同气候区各样地基本情况

Table 2 Basic conditions of different climatic areas in Liaoning Province

区域 Region	样地 Sample plot	数量 Number 株	平均树高 Average tree height m	胸径 DBH cm
半干旱区 Semi-arid region	宋杖子林场	47	8.40	13.34
	黑水林场	14	12.16	25.13
	章古台林场	18	10.35	17.61
	旧庙林场	44	7.93	14.62
湿润区 Humid region	老秃顶子自然保护区	22	18.72	24.05
	仙浴湾镇1	25	3.79	10.25
	仙浴湾镇2	32	3.89	11.03
	湾甸子林场	10	21.08	28.72

1.4 数据处理与分析 按下式计算土壤理化因子变化量:

$$\Delta X_i = X_i - X_0 \quad (1)$$

式中, ΔX_i 为草地造林某土壤理化因子 i 的变化量; X_i 为樟子松林地某土壤理化因子 i 的测定值; X_0 为相应对照样地某土壤理化因子 i 的测定值。

按下式计算土壤理化因子相对变化率:

$$P_i = \frac{\Delta X_i}{X_0} \quad (2)$$

式中, ΔX_i 为造林某土壤理化因子 i 的变化量; X_0 为相应对照样地某土壤理化因子 i 的测定值; P_i 为造林某土壤理化因子 i 的相对变化率。

将土壤氮(土壤全氮、碱解氮)相对变化率分别作为因变量,其他影响因子相对变化率作为自变量进行逐步回归分析,同时排除各影响因子间共线性关系,得出土壤氮相对变化率回归方程:

$$PN_i = \beta_0 + \beta_i P_i \quad (3)$$

式中, PN_i 为草地造林各土壤氮的相对变化率; β_0 为常数; P_i 为草地造林某土壤理化因子 i 的相对变化率; β_i 为草地造林某土壤理化因子 i 的回归系数。则土壤氮可以表示为

$$N_i = \frac{\beta_i N_0}{X_0} X_i + N_0 (1 + \beta_0 - \beta_i) \quad (4)$$

式中, N_i 为草地造林土壤氮测定值; N_0 为相应对照草地土壤氮的测定值。可见,土壤各氮相对变化率与其影响因子相对变化率的正负效应和土壤各养分因子与其相应的因子正负

效应相同,但系数大小存在差异。

1.5 统计分析 运用 SPSS 20.0 对上述计算的数据进行统计分析,对不同土层的土壤氮含量变化进行方差分析,判断土层对土壤氮含量变化的影响是否显著;运用最小二乘法(LSD)检验方法进行多重比较分析,判断不同气候区土壤氮在垂直分布的差异性,显著水平为 $\alpha = 0.05$ 。利用逐步回归分析建立土壤理化因子变化率对土壤氮变化率影响的模型。在同一气候区内,以土壤氮的相对变化率为因变量,选择与土壤氮变化可能相关的土壤理化因子土壤有机碳、土壤全磷、土壤速效磷、土壤含水率、粒径 >0.05 mm 的土壤细颗粒、粒径 $0.05 \sim 0.25$ mm 的土壤粗颗粒、土壤 pH 的相对变化率为自变量,运用逐步回归分析对自变量进行删选,满足允许水平 $P < 0.05$ 的变量进入模型。

2 结果与分析

2.1 不同气候地区樟子松林地土壤氮变化 由表 3 可知,营建樟子松人工林后,同一气候区内土壤全氮、土壤碱解氮的变化随土层增加无显著差异。与对照相比,营造樟子松人工林后,湿润区土壤全氮含量增加,且增量随土层深度增加而逐渐降低,而半干旱地区土壤全氮含量降低。土壤碱解氮在 2 个气候区比对照样地均有所增加,且半干旱地区碱解氮的增加量随土层深度增加而逐渐降低,但增量间差异不显著。

表 3 半干旱区、湿润区不同土层全氮和碱解氮的变化率差异性分析

Table 3 Difference analysis of change rate of total nitrogen and alkali hydrolyzed nitrogen in different soil layers in semi arid and humid areas

土层 Soil layer cm	半干旱区 Semi-arid region		湿润区 Humid region	
	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen
0~5 cm	-0.03±0.23 a	1.85±1.63 a	3.98±4.30 a	1.96±0.34 a
5~10 cm	-0.10±0.29 a	1.78±1.22 a	2.96±3.16 a	0.44±0.73 a
10~20 cm	-0.24±0.32 a	0.83±0.62 a	2.75±2.43 a	0.87±0.51 a
20~30 cm	-0.14±0.31 a	0.84±0.65 a	2.60±2.10 a	1.09±0.76 a
30~40 cm	-0.37±0.09 a	0.23±0.12 a	2.30±1.13 a	0.63±0.09 a

注: 同列相同小写字母表示处理间差异不显著 ($P > 0.05$)

Note: The same lowercase letters in the same column indicate no significant difference between treatments ($P > 0.05$)

2.2 影响土壤氮变化的理化因子 由表 4、5 可知,半干旱地区营建樟子松人工林后,5~10 cm 土壤全氮、0~5 cm 土壤碱解氮变化与土壤 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$); 5~10 cm 土壤碱解氮变化与土壤速效磷呈显著负相关 ($P < 0.05$)。湿润区

营建樟子松人工林后,土壤含水率显著影响了 0~5 cm 土壤全氮含量的增加 ($P < 0.05$),极显著影响了 20~30 cm 土壤全氮的变化 ($P < 0.01$); 10~20 cm 土壤全氮与土壤细颗粒呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

表 4 半干旱区土壤全氮和碱解氮变化率影响因子的回归分析

Table 4 Regression analysis of influencing factors of soil total nitrogen and alkali hydrolyzable nitrogen change rate in semi arid area

土层 Soil layer cm	预测变量 Predictive variable		系统估计值 Estimates		标准误差 Standard error		P	R ²		
	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen		全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen	
0~5	—	pH	—	-8.799	—	2.280	—	0.046	—	0.910
5~10	—	速效磷	—	-0.959	—	0.194	—	0.039	—	0.924
5~10	pH	—	-6.953	—	1.461	—	0.041	—	0.919	—

3 讨论

3.1 气候变化对樟子松人工林地土壤氮变化的影响

营建樟子松人工林后,湿润地区土壤全氮含量增加,且增量随土层深度的增加而逐渐降低,而半干旱地区土壤全氮含量降

低。研究表明,土壤中的氮素来源于大气的干湿沉降^[16]、共生固氮、凋落物和土壤有机质的分解、岩石风化^[17]。樟子松林分建立后,氮沉降和地上凋落物降解对表层土壤的氮贡献显著^[18-20]。气候因子对氮库空间格局分布至关重要^[21],降水、温度等气候因子改变,影响着植被的生长^[22]及凋落物的分解。半干旱地区缺乏水分,土壤贫瘠,因而所产生的凋落物较少。而与半干旱地区相比,湿润地区土壤肥沃,水热条件良好,森林生态系统具有较高的生产力,对应凋落物产量较高,对土壤氮的输入量呈现正面反应^[23],土壤中全氮含量

也随之增加。另一方面,湿润地区引种的樟子松林,凋落物内部木质素含量较低,耐分解的化合物较少,易分解。土壤中酶和微生物活性^[24]相对较高,土壤微生物群落可以通过产生纤维素酶、木质素降解酶、蛋白酶直接参与凋落物的分解,提高了樟子松凋落物在土壤中的分解速率,从而加强土壤养分的周转^[25],也会使全氮含量增加。樟子松根系的分布随着土壤深度的增加而逐渐减少^[26],由此导致土壤全氮的分布随着土壤深度的增加而减少。

表5 湿润区土壤全氮变化率影响因子的回归分析

Table 5 Regression analysis of influencing factors of soil total nitrogen change rate in humid area

土层 Soil layer//cm	预测变量 Predictive variable	系统估计值 Estimates	标准误差 Standard error	P	R ²
0~5 cm	含水率	3.706	0.473	0.016	0.968
10~20 cm	细颗粒	8.895	2.050	0.024	0.952
20~30 cm	含水率	1.417	0.136	0.009	0.982

土壤碱解氮能反映土壤近期氮素供应情况,要保持在一一定的水平,用以保证植物生长和微生物的生长。当碱解氮浓度低时,会加速有机氮的矿化分解,导致全氮降低;而当碱解氮浓度升高,在雨水的作用下易流失,导致土壤酸化。2个气候区相比于对照样地,土壤碱解氮均有所增加,这与樟子松人工林营建有关。孔涛等^[27]对沙地樟子松的土壤养分研究及赵隽宇等^[28]对广西松树人工林土壤养分研究也得到了相似结论。在辽宁省半干旱区、湿润区各研究样地营林后,均能够提升土壤的吸水保水能力,林地覆被程度较高,人为扰动的的影响较少,相比于对照样地,樟子松林的营建使得地表枯落物堆积量及根系分泌物量增加^[29],供给量远大于植物自身消耗以及微生物的固定,从而导致各气候样地不同土层的碱解氮均有所增加。半干旱地区碱解氮的增加量随土层深度增加而逐渐降低,但增量间差异不显著。凋落物、植物根系及其分泌物在腐烂过程中形成养分元素,这些养分元素在表层土壤中进行聚集,随着土层深度的增加,土壤有养分含量逐渐减少,半干旱地区环境贫瘠,石漠化和水土流失严重^[30],土壤养分含量低,长期季节性土壤侵蚀和降雨淋溶现象,也会加剧不同土层中氮的不平衡分布^[20],从而导致土壤各土层增量差异不显著。

3.2 影响土壤氮变化的理化因子分析 在半干旱地区营建樟子松人工林后,5~10 cm 土壤全氮、0~5 cm 土壤碱解氮变化与土壤 pH 呈显著负相关,大多数土壤养分元素的有效性均会受到土壤 pH 的影响^[31],这与王晖等^[32]研究结果一致。土壤酸性条件下,微生物的种类和数量均较少,微生物活性低(固定氮的能力随之降低),有机质分解缓慢,有机氮的矿化作用降低,因此,有机质含量与氮素含量密切相关。pH 降低时,有机质含量升高,氮素含量也会随之增高^[33];反之 pH 升高,会增加土壤有机质的可溶性,会为土壤微生物提供充足的含碳、氮基团的物质,土壤有机氮的矿化得以促进^[34],从而导致氮素含量降低。5~10 cm 土壤碱解氮变化与土壤速效磷呈显著负相关,这与于东伟等^[11]的研究结果一致。

氮素和磷素在土壤中转化过程中相互影响、相互制约^[35],具有一定的耦合作用。氮和磷均是植物生长的重要元素,对樟子松的生长、发育极其重要。很多生态系统的生产力均会受到氮、磷限制或者氮磷的共同限制^[36-37]。随着土壤有效磷的增加,有效地促进了植物对有效氮的吸收,导致土壤中碱解氮的降低。赵欣然等^[38]研究发现,对樟子松人工林土壤添加单一氮时,土壤氮素与磷素呈负相关关系,表明添加氮可明显降低土壤速效磷含量。

在湿润地区营建樟子松人工林后,土壤含水率显著影响 0~5 cm 土壤全氮含量的增加,极显著影响 20~30 cm 土壤全氮的变化。降水是土壤水分输入的重要来源,大量研究结果表明,土壤水分与降水之间存在正相关关系^[39]。土壤氮素主要源自凋落物的分解,凋落物内部含水量与其分解有关,高水分含量会促进凋落物分解速率,降水量越大,凋落物储水越多,分解产生的氮素也会随之增多。其次,樟子松人工林的营建也能降低树林间的风速,加快土壤中的细颗粒沉积、土壤成土的进程,细颗粒沉积加速了土壤养分的增加,提高了林地的持水性能。10~20 cm 土壤全氮与土壤细颗粒呈显著正相关,这与颜安等^[40-41]的研究结果一致。在樟子松的生长过程中,根系凋落物及分泌物会在土壤中快速转化成腐殖质^[42-43],能够促进土壤中氮素的积累和土壤颗粒的细化。

4 结论

在辽宁各气候区样地营建樟子松人工林后,湿润地区土壤全氮含量增加,半干旱地区全氮含量降低;而土壤碱解氮含量在 2 类气候区均有所增加。土壤氮含量随土层分布方面,2 类气候区的表层土壤氮变化均高于其他土层。半干旱地区的 5~10 cm 土壤全氮、0~5 cm 土壤碱解氮变化受土壤 pH 的影响,5~10 cm 土壤碱解氮变化受土壤速效磷的影响;湿润地区的 0~5、20~30 cm 土壤全氮主要受土壤含水率的影响,而 10~20 cm 土壤全氮受土壤细颗粒的影响。

参考文献

[1] 刘曼霞,马建祖.甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应

- [J].应用生态学报,2012,23(12):3295-3300.
- [2] KLINEROVÁ T, DOSTÁL P. Nutrient-demanding species face less negative competition and plant-soil feedback effects in a nutrient-rich environment [J]. *New phytologist*, 2020, 225(3): 1343-1354.
- [3] DU E Z, TERRER C, PELLEGRINI A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation [J]. *Nature geoscience*, 2020, 13(3): 221-226.
- [4] CHOMEL M, GUITTONNY-LARCHEVÉQUE M, FERNANDEZ C, et al. Plant secondary metabolites: A key driver of litter decomposition and soil nutrient cycling [J]. *Journal of ecology*, 2016, 104(6): 1527-1541
- [5] BARDGETT R D, FREEMAN C, OSTLE N J. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks [J]. *The ISME Journal*, 2008, 2(8): 805-814.
- [6] 周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1867-1874.
- [7] NOVEM AUYEUNG D S, SUSEELA V, DUKES J S. Warming and drought reduce temperature sensitivity of nitrogen transformations [J]. *Global change biology*, 2013, 19(2): 662-676.
- [8] 方杰, 魏雅芬, 刘帅, 等. 科尔沁沙地丘间低地樟子松人工林水分利用来源的稳定同位素解析 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 1894-1900.
- [9] 张楠楠, 关文彬, 谢静, 等. 科尔沁沙地东南缘大青沟自然保护区土壤水分的时空分布特征 [J]. *生态学报*, 2007, 27(9): 3860-3873.
- [10] 孔涛, 张莹, 雷泽勇, 等. 沙地樟子松人工林土壤氮矿化特征 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 296-306.
- [11] 于东伟, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林的生长对土壤氮变化的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(6): 179-186.
- [12] 淑敏, 王东丽, 王凯, 等. 不同林龄樟子松人工林针叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 174-179.
- [13] 朱教君, 康宏樟, 许美玲. 科尔沁沙地南缘樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 人工林天然更新障碍 [J]. *生态学报*, 2007, 27(10): 4086-4095.
- [14] 高俊波, 卢正茂, 吴耀先, 等. 樟子松人工林在辽东山区的生长评价 [J]. *吉林林业科技*, 2007, 36(1): 31-33.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 25-114.
- [16] GAO X L, LI X G, ZHAO L, et al. Regulation of soil phosphorus cycling in grasslands by shrubs [J]. *Soil biology and biochemistry*, 2019, 133: 1-11
- [17] HOULTON B Z, MORFORD S L, DAHLGREN R A. Convergent evidence for widespread rock nitrogen sources in Earth's surface environment [J]. *Science*, 2018, 360(6384): 58-62.
- [18] MANZONI S, JACKSON R B, TROFYMOW J A, et al. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization [J]. *Science*, 2008, 321(5889): 684-686.
- [19] ZHOU Y, BOUTTON T W, WU X B. Soil phosphorus does not keep pace with soil carbon and nitrogen accumulation following woody encroachment [J]. *Global change biology*, 2018, 24(5): 1992-2007.
- [20] QIAO Y, WANG J, LIU H M, et al. Depth-dependent soil C-N-P stoichiometry in a mature subtropical broadleaf forest [J/OL]. *Geoderma*, 2020, 370[2020-11-05]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114357>.
- [21] YANG Y H, MOHAMMAT A, FENG J M, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 84(2): 131-141.
- [22] 谭一波, 田红灯, 郑威, 等. 广西猫儿山森林群落土壤物理性质空间变
- 异及其环境影响因素 [J]. *广西林业科学*, 2017, 46(2): 123-129.
- [23] KNAPP A K, SMITH M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production [J]. *Science*, 2001, 291(5503): 481-484.
- [24] LISKI J, NISSINEN A, ERHARD M, et al. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest [J]. *Global change biology*, 2003, 9(4): 575-584.
- [25] GONZÁLEZ G, SEASTEDT R. Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forests [J]. *Ecology*, 2001, 82(4): 955-964.
- [26] 孟鹏, 张柏宇, 王曼. 科尔沁沙地赤松和樟子松根系生物量分配与构型特征 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 2935-2941.
- [27] 孔涛, 吴丹, 沈海鸥, 等. 沙地樟子松人工林根系及土壤养分分布特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(4): 84-93.
- [28] 赵隽宇, 覃祚玉, 石媛媛, 等. 25 年长期经营下广西松树人工林土壤养分特征与质量评价 [J]. *南方林业科学*, 2020, 48(2): 18-22, 27.
- [29] ADKINS J, JASTROW J D, MORRIS G P, et al. Effects of switchgrass cultivars and intraspecific differences in root structure on soil carbon inputs and accumulation [J]. *Geoderma*, 2016, 262: 147-154.
- [30] 罗东辉, 夏婧, 袁婧薇, 等. 我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 611-618.
- [31] KHATTAK R A, HUSSAIN Z. Evaluation of soil fertility status and nutrition of orchards [J]. *Soil & environment*, 2007, 26(1): 22-32.
- [32] 王晖, 邢小军, 许自成. 攀西烟区紫色土 pH 值与土壤养分的相关分析 [J]. *中国土壤与肥料*, 2007(6): 19-22, 49.
- [33] 何毓蓉. 中国紫色土 (下篇) [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [34] CURTIN D, CAMPBELL C A, JALIL A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils [J]. *Soil biology and biochemistry*, 1998, 30(1): 57-64.
- [35] 刘兴宇, 赵琼, 曾德慧, 等. 樟子松针叶磷组分浓度与土壤有效磷浓度的关系 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 494-498.
- [36] ELSER J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecology letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [37] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. *Ecological applications*, 2010, 20(1): 5-15.
- [38] 赵欣然, 赵琼, 王巍巍, 等. 氮添加及凋落物管理对樟子松人工林土壤理化性质的影响 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2699-2706.
- [39] 常清青, 何洪林, 牛忠恩, 等. 中国典型森林生态系统土壤水分时空分异及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 490-502.
- [40] 颜安, 李周晶, 武红旗, 等. 不同耕作年限对耕地土壤质地和有机碳垂直分布的影响 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 291-295.
- [41] 佟小刚, 韩新辉, 李娇, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤颗粒结合态碳库分异特征 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 170-176.
- [42] FISHER M J, RAO I M, AYARZA M A, et al. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas [J]. *Nature*, 1994, 371(6494): 236-238.
- [43] NEPSTAD D C, DE CARVALHO C R, DAVIDSON E A, et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures [J]. *Nature*, 1994, 372(6507): 666-669.

(上接第 124 页)

- [6] 郝飞, 张华, 汤德元, 等. 我国规模化猪场主要病毒性疫病的综合防控对策 [J]. *畜牧与兽医*, 2012, 44(10): 86-89.
- [7] 赵坤, 李培庆, 李敬玺, 等. 猪免疫抑制综合症的发生与防控 [J]. *安徽农业科学*, 2005, 33(11): 2074-2075, 2081.
- [8] 王天奇. 猪场不可忽视猪瘟带毒母猪综合征 [J]. *乡村科技*, 2015(9): 10.
- [9] 韦显凯, 郑列丰, 郑敏, 等. 规模猪场猪瘟免疫抗体监测和效果分析 [J]. *中国兽医杂志*, 2012, 48(9): 43-45.
- [10] 潘孝成, 赵瑞宏, 沈学怀, 等. 安徽种猪场仔猪猪瘟免疫效果分析 [J]. *养猪*, 2017(4): 102-104.
- [11] 刘建, 汤德元, 李春燕, 等. 我国猪瘟流行新趋势与防控措施 [J]. *中国猪业*, 2013, 8(2): 37-39.
- [12] 王娟萍, 姚敬明, 吴忻, 等. 规模化种猪场猪瘟免疫情况调研 [J]. *中国畜牧兽医*, 2012, 39(1): 184-187.
- [13] 赵永前, 孙华伟, 张敬峰, 等. 县域范围内猪瘟疫苗免疫效果的监测与研究 [J]. *江西农业学报*, 2017, 29(3): 120-123.