北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

不同树种水土保持林对黑土区坡面土壤氮的保持作用

陈桂兰 卜庆雨 王秀伟 谷会岩

Conservation effects of different tree species of soil and water conservation forests on soil nitrogen on slopes in black soil region of northeastern China

Chen Guilan, Bu Qingyu, Wang Xiuwei, Gu Huiyan

引用本文:
陈桂兰, 卜庆雨, 王秀伟, 谷会岩. 不同树种水土保持林对黑土区坡面土壤氮的保持作用[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7):27–35. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230293
Chen Guilan, Bu Qingyu, Wang Xiuwei, Gu Huiyan. Conservation effects of different tree species of soil and water conservation forests on soil nitrogen on slopes in black soil region of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7):27–35. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230293

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230293

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

典型黑土区不同水土保持树种的非结构性碳水化合物特征及种间差异
Non–structural carbohydrate allocation and interspecific differences of different soil and water conservation tree species in typical black soil region
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 1–8. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210233

坡位对寒温带天然樟子松林土壤微生物生物量碳氮的影响
Effects of slope position on soil microbial biomass carbon and nitrogen in natural *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest in the cold temperature zone
北京林业大学学报, 2020, 42(2): 31–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190309

寒温带林区不同林型下土壤中氮矿化特征
Characteristics of nitrogen mineralization in soils under different forest types in cold–temperate forest region
北京林业大学学报, 2019, 41(9): 122–129. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180276

河北平泉油松林火烧迹地土壤氮变化特征
Characteristics of soil nitrogen change in the burned area of *Pinus tabuliformis* forest in Pingquan County, Hebei Province of northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220007

氮添加对高寒草甸土壤团聚体分布及其碳氮含量的影响
Effects of nitrogen addition on soil aggregate distribution and carbon and nitrogen contents in alpine meadow
北京林业大学学报, 2022, 44(12): 102–110. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210439

南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征
Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen stocks across the different typical vegetation types in Nangunhe National Nature Reserve, southwestern China

北京林业大学学报, 2019, 41(11): 104–115. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180319

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230293

不同树种水土保持林对黑土区坡面土壤氮的保持作用

陈桂兰　卜庆雨　王秀伟　谷会岩
（东北林业大学林学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】探究黑土区不同树种水土保持林对坡面土壤氮的保持作用，为黑土坡面养分流失防控措施选择提供参考。**【方法】**在黑龙江省西北部的克山农场内，选择坡度、坡向、坡长和林龄基本一致的杨树水土保持林、樟子松水土保持林和耕地坡面为试验区，在 3 个试验区内沿顺坡向从坡顶至坡底分别布设 1 条距离为 315、319 和 323 m 的样线，每条样线上以坡顶为起点，距离为 30 m 等间距设置 10 个样点。每个样点分别采集 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土壤样品，用于土壤物理特征、全氮、铵态氮、硝态氮和颗粒态有机氮的测定，以耕地为对照，分析不同树种水土保持林对黑土坡面土壤氮的保持作用。**【结果】**(1)水土保持林的土壤物理特征指标优于耕地。(2)杨树水土保持林土壤全氮含量(1.28 ~ 2.54 g/kg)高于樟子松水土保持林和耕地的全氮含量，樟子松水土保持林土壤全氮含量(1.04 ~ 1.92 g/kg)高于耕地含量(0.62 ~ 1.63 g/kg)；铵态氮、颗粒态有机氮在 3 个试验区土壤内分布情况和全氮一致，皆表现为杨树水土保持林含量最高，耕地含量最低。**【结论】**两种水土保持林 0 ~ 15 cm 土层土壤氮含量高于 15 ~ 30 cm 土层土壤氮含量，两种水土保持林的土壤氮含量高于耕地的氮含量，杨树水土保持林土壤氮含量高于樟子松水土保持林土壤氮含量，且杨树水土保持林对黑土区坡面土壤氮的保持作用优于樟子松水土保持林。从土壤氮保持角度来讲，在杨树和樟子松两种水土保持树种上应优先考虑杨树。

关键词：黑土区；水土保持林；土壤特征；氮含量；氮保持
中图分类号：S727；S157.9　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)07−0027−09
引文格式：陈桂兰，卜庆雨，王秀伟，等. 不同树种水土保持林对黑土区坡面土壤氮的保持作用［J］. 北京林业大学学报，2024，46(7)：27−35. Chen Guilan, Bu Qingyu, Wang Xiuwei, et al. Conservation effects of different tree species of soil and water conservation forests on soil nitrogen on slopes in black soil region of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 27−35.

Conservation effects of different tree species of soil and water conservation forests on soil nitrogen on slopes in black soil region of northeastern China

Chen Guilan　Bu Qingyu　Wang Xiuwei　Gu Huiyan
(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: ［**Objective**］This paper explores the conservation effects of different tree species of soil and water conservation forests on slope soil nitrogen in black soil region of northeastern China, so as to provide reference for the selection of prevention and control measures for nutrient loss on black soil slopes. ［**Method**］In the Keshan Farm, northwest of Heilongjiang Province of northeastern China, soil and water conservation forest of *Populus* spp. and water conservation forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and cultivated land with the similar slope, aspect, slope length, and forest age were selected as the research area. In the three sites, we set three lines of 315, 319, and 323 m along the downhill slope from top to bottom, respectively. Along the lines, 10 sample points were set at equal intervals with a distance of 30 m from the top of the slope. Soil samples of 0−15 cm and 15−30 cm were collected from each sample point for the measure of soil physical characteristics, total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and particulate

收稿日期: 2023−10−26　**修回日期:** 2023−12−24
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD150070506)，黑龙江省应用技术研究与开发计划项目(GA20B401)。
第一作者: 陈桂兰。主要研究方向：森林植物资源学。Email: 379692001@qq.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学林学院。
责任作者: 谷会岩，教授。主要研究方向：干扰生态学、植物资源学。Email: ghuiyan@nefu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

organic nitrogen. Cultivated land was analyzed as a control. [**Result**] (1) The soil physical characteristics of soil and water conservation forests were better than those of cultivated land. (2) The total nitrogen content of soil and water conservation forest of *Populus* spp. (1.28−2.54 g/kg) was higher than that of soil and water conservation forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and cultivated land. The soil total nitrogen content of soil and water conservation forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* (1.04−1.92 g/kg) was higher than that of cultivated land (0.62−1.63 g/kg). The distribution of ammonium nitrogen and particulate organic nitrogen in the soil of three sites was the same as that of total nitrogen, and the content of soil and water conservation forest of *Populus* spp. was the highest, while that of cultivated land was the lowest. [**Conclusion**] The soil nitrogen content of 0−15 cm in the two forests is higher than that of 15−30 cm, and the soil nitrogen content in the forests is higher than that in the cultivated land. Soil nitrogen content in the soil and water conservation forest of *Populus* spp. is higher than that in the forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, and the conservation effect of soil and water conservation forest of *Populus* spp. on the slope in black soil area is better than that of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. From the perspective of soil nitrogen conservation, *Populus* spp. should be given priority among the two kinds of soil and water conservation species.

Key words: black soil region; soil and water conservation forest; soil characteristics; nitrogen content; nitrogen conservation

黑土区坡耕地的土壤侵蚀会导致氮、磷等养分流失[1]，氮是植物生长中必不可少的营养元素[2]，主要以有机氮的形式存在[3]。土壤氮也是影响生态系统初级生产力的主要元素[4]。如何保持养分避免流失是国内外学者研究的重点，且有学者证实了种植植物可以减少坡面养分流失。许开平等[5]研究表明在浙江红壤坡地种植黑麦草(*Lolium perenne*)草篱对总氮的拦截率为 60.8%；李怀恩等[6]研究表明 10 m 宽的草地缓冲带对总氮的拦截率为 70%；田潇等[7]从物种配置植物篱的方面研究表明灰毛豆(*Tephrosia purpurea*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)两者配置植物篱对坡耕地氮的相对拦截率为 79.1%。很少有学者去关注不同树种水土保持林对于土壤氮的保持作用。

东北地区水土保持林应用的树种有杨树(*Populus* spp.)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)等，杨树在涵养水源、水土保持等方面发挥着不可替代的作用[8]。樟子松具有耐旱性强、适生范围广和生态位宽等特性，在防护林体系构建上发挥着巨大的生态效益[9−10]，也是我国北方重要的水土保持树种[11]。本研究以东北黑土区这两种典型树种营造的水土保持林为研究对象，以耕地作为对照，探讨不同树种水土保持林对土壤氮的保持作用，旨在从土壤氮保持角度为东北黑土区水土保持林树种选择提供一定的参考依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省齐齐哈尔市克山农场(48°10′～48°13′N，125°65′～125°67′E)。地貌类型属于漫川漫岗黑土区，温带大陆性季风气候，年均降水量 502.5 mm，主要集中在 6—8 月，无霜期约为 120 d。

1.2 采样点布设与土壤样品采集

2022 年 10 月，在克山农场范围内选择 3 块毗邻的样地，分别为坡向、坡度、坡长、林龄一致的杨树水土保持林、樟子松水土保持林以及与二者相邻条件接近的耕地(样地信息如表 1 所示)，耕地前茬作物为土豆。在选定的坡面上分别沿顺坡向从坡顶

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

样地类型 Sample plot type	长度 Length/m	宽度 Width/m	株行距 Intra-row Spacing	平均树高 Average height/m	平均胸径 Average DBH/cm	郁密度 Depression density	林龄或开垦年限/a Forest age or year of reclamation/year	土壤类型 Soil type
杨树水土保持林 Soil and water conservation forest of *Populus* spp.	315	15	1.5 m × 1.5 m	18	30.07	0.8	25	壤土 Loam
樟子松水土保持林 Soil and water conservation forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*	319	10	1.5 m × 2 m	16	21.68	0.8	26	壤土 Loam
耕地 Cultivated land	323	15					60	壤土 Loam

至坡底布设 1 条距离为 315、319 和 323 m 的样线，在每条样线上以坡顶为起点，30 m 为间隔距离等距取样，共 10 个取样点，设 3 个重复（图 1）。采用剖面法采样，每个取样点采集 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土壤样品，每份土样采集 2 kg 左右，其中 200 g 左右的鲜土置于冰盒中并迅速带回实验室放置在 4 ℃ 冰箱中保存，用于后续测定铵态氮和硝态氮。将剩余土样晒干后仔细剔除土样里的枯枝、砾石，并将其研磨过 2、0.149 mm 筛后用于颗粒态有机氮、全氮的测定。同时用直径为 5 cm 的环刀（100 cm^3）采集土样用于密度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度的测定，各指标测定均按照中国林科院森林土壤水分—物理性质测定标准中的环刀法测定[12]。

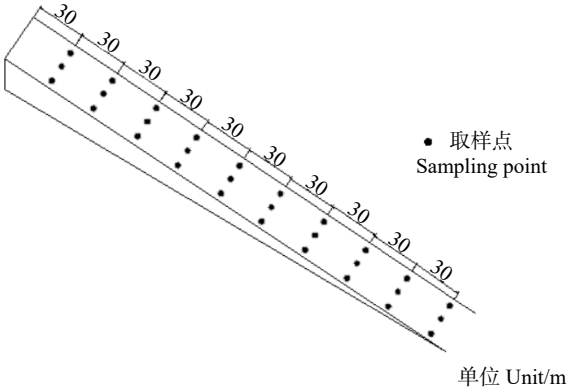


图 1　试验地取样示意图

Fig. 1　Schematic diagram of sampling at the experimental site

1.3　土壤指标测定

土壤密度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度的测定采用环刀法；pH 用 pH 计测定；全氮用凯氏定氮法；铵态氮用靛酚蓝比色法；硝态氮用酚二磺酸比色法；土壤颗粒态有机氮采用 Cambardella 等[13]的方法。

1.4　数据分析

用 Origin 2021 软件进行单因素方差分析、差异显著性检验，主成分分析各氮组分贡献率。用 CAD 2008 软件作图。

2　结果与分析

2.1　土壤物理特征

表 2 显示：耕地和水土保持林在土壤密度和 pH 值上均有差异。土壤密度在不同土层的变化规律均为耕地 > 樟子松水土保持林 > 杨树水土保持林，且杨树水土保持林的土壤密度值显著小于耕地以及樟子松水土保持林（$P < 0.05$）；毛管孔隙度和 pH 值均表现为杨树水土保持林含量显著高于樟子松水土保持林和耕地（$P < 0.05$）。土壤密度、非毛管孔隙度和毛管孔隙度在同一样地 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 两土层之间无显著差异（$P > 0.05$）。

2.2　不同树种水土保持林对土壤中氮的保持作用

2.2.1　不同树种水土保持林对土壤中全氮的保持作用

从坡顶到坡底，在 0 ~ 15 cm 土层（图 2a），杨树水土保持林的全氮含量范围在 1.28 ~ 2.54 g/kg，樟子松水土保持林的全氮含量范围在 1.04 ~ 1.92 g/kg，耕地的全氮含量范围在 0.62 ~ 1.63 g/kg。两种水土保持林全氮含量在离坡顶 30 和 60 m 处皆显著高于耕地，杨树水土保持林在离坡顶 60 和 150 m 处全氮含量显著高于樟子松水土保持林（$P < 0.05$）。在 15 ~ 30 cm 土层（图 2b），3 个样地之间全氮含量差异不显著（$P > 0.05$）。两种水土保持林的 0 ~ 15 cm 土层土壤全氮含量均高于 15 ~ 30 cm 土层，这可能是因为表层土壤能直接接收植物残体、凋落物和根系生长代谢输入的氮，因此该层全氮储量高于其他土层[14]。

2.2.2　不同树种水土保持林对土壤中氮各组分的保持作用

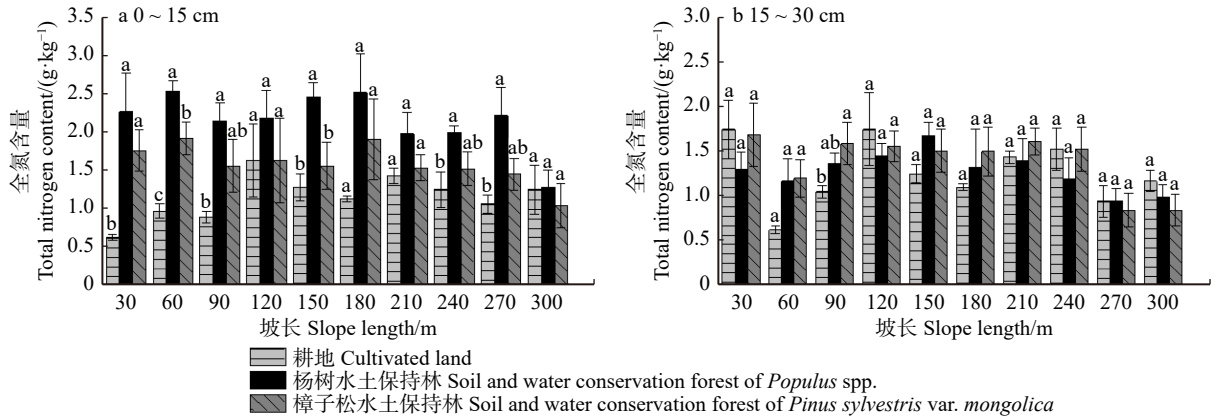
铵态氮和硝态氮是土壤氮的重要组成部分[15]。杨树水土保持林、樟子松水土保持林、耕地 0 ~ 15 cm 土层（图 3a）铵态氮含量范围分别为 6.57 ~ 19.62 mg/kg、2.70 ~ 14.70 mg/kg、0.71 ~ 4.78 mg/kg。两种水土保

表 2　研究地土壤物理特征

Tab. 2　Soil physical characteristics of the study sites

类型 Type	土壤深度 Soil depth/cm	土壤密度 Soil bulk density/（g·cm^{-3}）	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	pH值 pH value
耕地 Cultivated land	0 ~ 15	1.31 ± 0.03Aa	2.02 ± 1.30Aa	43.84 ± 3.05Ab	5.66 ± 0.07Bc
	15 ~ 30	1.34 ± 0.07Aa	1.51 ± 0.90Ab	45.24 ± 2.97Ab	5.76 ± 0.05Ac
杨树水土保持林 Soil and water conservation forest of *Populus* spp.	0 ~ 15	1.16 ± 0.07Ab	2.24 ± 0.79Aa	50.48 ± 4.47Aa	6.13 ± 0.06Ba
	15 ~ 30	1.15 ± 0.07Ac	3.11 ± 1.32Aa	52.25 ± 3.46Aa	6.21 ± 0.05Aa
樟子松水土保持林 Soil and water conservation forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*	0 ~ 15	1.26 ± 0.10Aa	1.43 ± 0.98Aa	44.27 ± 7.49Ab	6.02 ± 0.06Bb
	15 ~ 30	1.24 ± 0.09Ab	1.99 ± 1.86Aab	43.98 ± 9.86Ab	6.13 ± 0.07Ab

注：数据为平均值 ± 标准差。同列不同大写字母代表同一样地不同土层之间显著差异，同列不同小写字母代表同一土层不同样地间显著差异（$P < 0.05$）。Notes: values are mean ± standard deviation. Different uppercase letters in the same column represent significant differences between different soil layers in the same sample plot, and different lowercase letters in the same column represent significant differences among different sample plots in the same soil layer ($P < 0.05$).



不同小写字母代表不同样地在同一坡长处差异显著($P < 0.05$)。下同。 Different lowercase letters represent significant differences in the same slope length ($P < 0.05$). The same below.

图 2 各样地不同土层土壤全氮含量

Fig. 2 Soil total nitrogen contents in different soil layers of each sample site

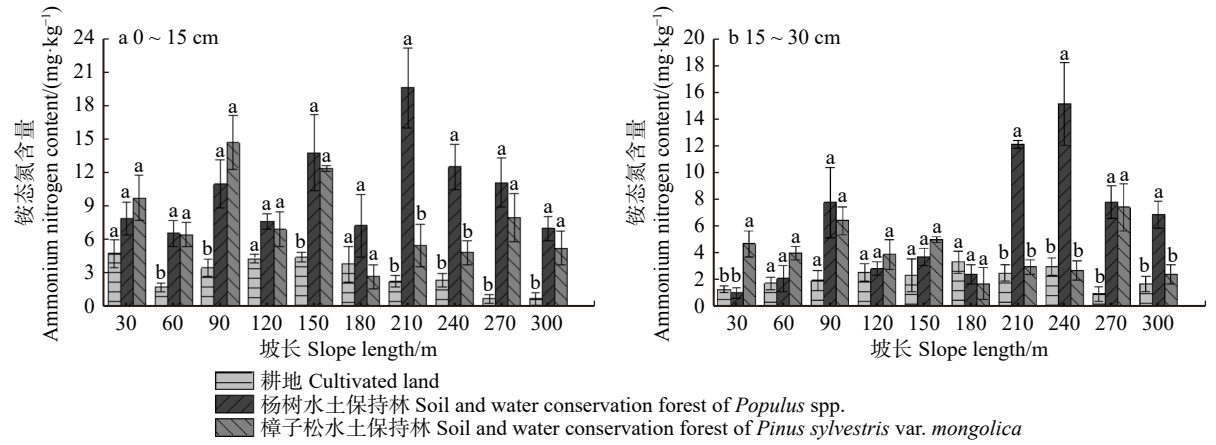


图 3 各样地不同土层土壤铵态氮含量

Fig. 3 Soil ammonium nitrogen contents in different soil layers of each sample site

持林铵态氮含量在离坡顶 60、90、150、270 和 300 m 处显著高于耕地，杨树水土保持林铵态氮含量在离坡顶 210 和 240 m 处显著高于樟子松水土保持林($P < 0.05$)。结果反映了杨树水土保持林对于铵态氮的保持作用高于樟子松水土保持林。在 15 ~ 30 cm 土层(图 3b)，两种水土保持林铵态氮含量在离坡顶 270 m 处显著高于耕地；杨树水土保持林铵态氮含量在离坡顶 210、240 和 300 m 处显著高于樟子松水土保持林($P < 0.05$)。从整体来看 0 ~ 15 cm 土层中水土保持林铵态氮含量高于耕地，且杨树水土保持林的铵态氮含量高于樟子松水土保持林。在 15 ~ 30 cm 土层中，两种水土保持林铵态氮含量高于耕地。3 个样地 0 ~ 15 cm 土层的铵态氮含量高于 15 ~ 30 cm 土层。

在 0 ~ 15 cm 土层(图 4a)，杨树水土保持林硝态氮含量范围为 2.03 ~ 8.28 mg/kg，樟子松水土保持林含量范围为 1.63 ~ 7.11 mg/kg，耕地的硝态氮含量范围为 5.05 ~ 13.55 mg/kg。耕地的硝态氮含量高于水土保持林。在 15 ~ 30 cm 土层(图 4b)，杨树水土保持林硝态氮含量范围为 1.04 ~ 7.18 mg/kg，樟子松水土保持林硝态氮含量范围为 0.58 ~ 6.11 mg/kg，耕地硝态氮含量范围为 3.73 ~ 9.91 mg/kg。在同一样地不同土层之间，0 ~ 15 cm 土层的硝态氮含量总体高于 15 ~ 30 cm 土层的含量。

从颗粒态有机氮看，在 0 ~ 15 cm 土层(图 5a)，两种水土保持林颗粒态有机氮含量在离坡顶 30 和 150 m 处显著高于耕地，而杨树水土保持林在离坡顶 90、150、180、210、270 和 300 m 处颗粒态有机氮含量显著高于樟子松水土保持林($P < 0.05$)。从整体来看，颗粒态有机氮含量表现为：杨树水土保持林 > 樟子松水土保持林 > 耕地。在 15 ~ 30 cm 土层(图 5b)，杨树水土保持林在离坡顶 150 m 处的颗粒态有机氮含量最高，樟子松水土保持林在离坡顶 240 m 处颗粒态有机氮含量最高，耕地在离坡顶 120 m 处颗粒态有机氮含量最高。樟子松水土保持林颗粒态有机氮含量在离坡顶 60 和 240 m 处显著高于耕地($P < 0.05$)。

2.2.3 氮主成分分析

通过主成分分析(表 3)对 4 个含氮指标进行主

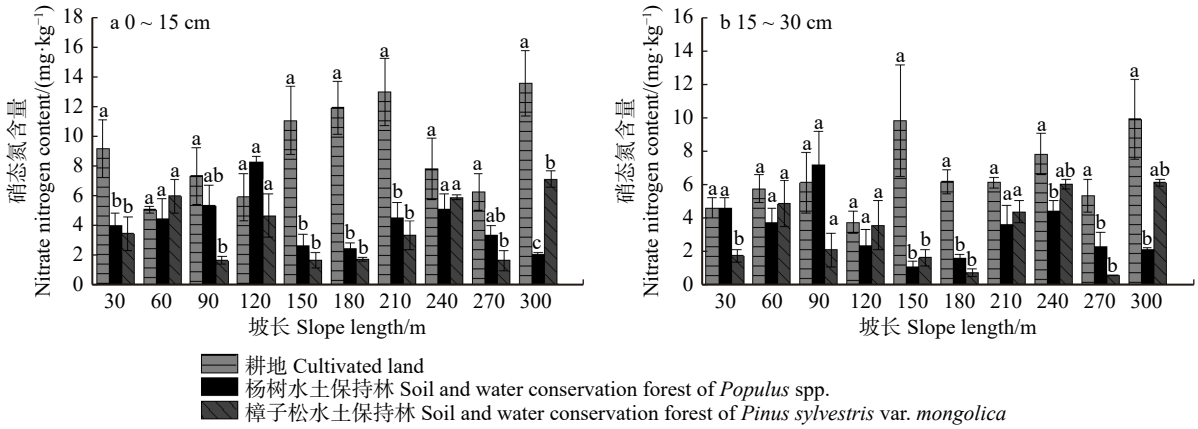


图 4　各样地不同土层土壤硝态氮含量

Fig. 4　Soil nitrate nitrogen contents in different soil layers of each sample site

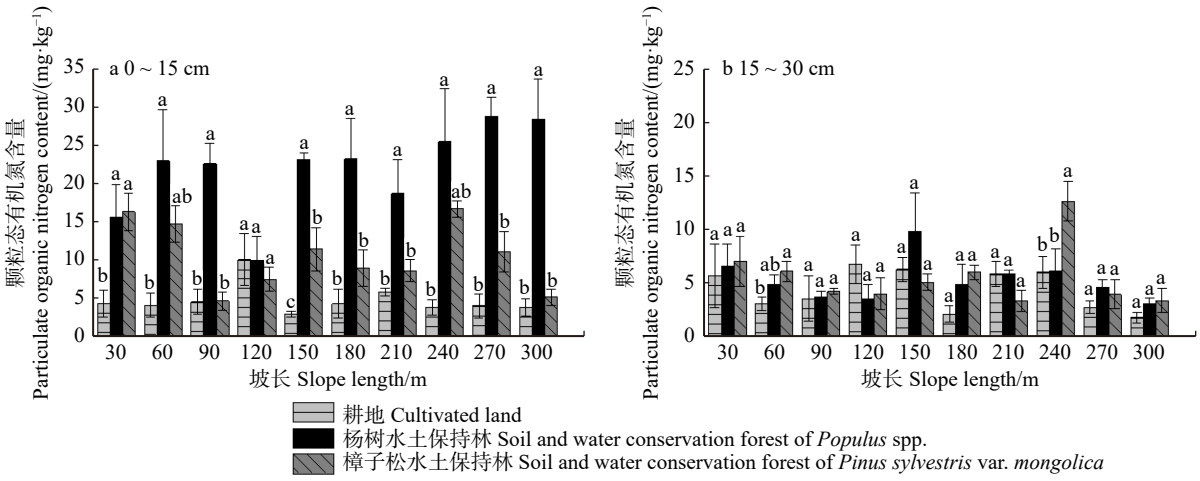


图 5　各样地不同土层土壤颗粒态有机氮含量

Fig. 5　Soil particulate organic nitrogen contents in different soil layers of each sample site

表 3　土壤氮组分的主成分分析

Tab. 3　Principal component analysis of soil nitrogen components

指标 Index	载荷值 Load value				初始特征值 Initial eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	颗粒态有机氮 Particulate organic nitrogen	全氮 Total nitrogen			
主成分1 Principal compontent 1	0.507	−0.320	0.580	0.551	2.306	57.657	57.657
主成分2 Principal compontent 2	0.007	0.927	0.208	0.312	0.865	21.632	79.289
主成分3 Principal compontent 3	0.853	0.190	−0.238	−0.424	0.554	13.844	93.133

成分提取，主成分 1 的初始特征值 > 1，累积方差贡献率为 93.133%，说明这 3 个主成分基本能反映不同林地特征的有效信息，仅有 6.867% 的信息损失。在主成分 1 中，铵态氮、颗粒态有机氮、全氮载荷值的绝对值较大，均大于 0.50。在主成分 2 中，硝态氮载荷值的绝对值最大，且为正值。主成分 3 中，铵态氮的绝对值较大。比较 3 个主成分所有指标载荷值的绝对值，> 0.5 的指标依次为硝态氮（0.927）、铵态氮（0.853）、颗粒态有机氮（0.580）和全氮（0.551），说明这 4 个氮相关指标中，硝态氮、铵态氮、颗粒态有机氮能较好地表征氮组分情况。

3　讨　　论

3.1　不同树种水土保持林对氮的保持作用

坡耕地氮的流失具有随机性、广泛性、时空性、滞后性和复杂性[16]，植被措施可以起到较好的水土保持作用，不同的植被格局水土保持作用效果不同[17]。水土保持林和耕地的研究结果显示水土保持林下的氮含量（硝态氮除外）皆高于耕地土壤下的氮含量。这是因为本研究取样时间是在该地区集中雨季期

后，坡地土壤中的氮在降雨量或者降雨强度[18]的影响下容易发生流失，杨树水土保持林和樟子松水土保持林均可以通过自身根系对降雨的拦截作用来减少氮的流失；其次水土保持林相较于耕地，地表植被覆盖度远大于耕地，其枯落物积累量高于耕地，随着枯落物回归土壤，参与土壤物质循环，植物残体能够补充土壤养分的损失，土壤养分含量得到提高[19]。而耕地硝态氮含量高于林地的可能原因是耕地施加了氮肥，硝态氮是土壤中最为活跃的氮素形态，存在明显的时空变化，且受施氮量的影响显著[20]，随着施氮量的增加，没有被作物充分利用的大量氮肥以硝态氮的形式残留在土壤中[21]，各土层硝态氮的含量随之增加。

全氮在土壤表面富集，容易随着表层土壤的迁移而流失[19]。本研究得到杨树水土保持林对氮的保持作用优于樟子松水土保持林，原因可以概括为以下几个方面。(1)与杨树的根系有关。杨树属于深根系，根系生产和周转发生在整个土壤层，而樟子松属于浅根系[22]。并且有关研究表明土壤养分中的全氮主要来源于植物根系的固氮作用[23]，而杨树属于非结瘤固氮树种，其根系含有固氮菌，若具高固氮活性菌株的杨树在适宜的固氮条件下则具有较高的联合固氮效率[24]。(2)可能和针叶阔叶有关，不同优势树种可以通过改变地表凋落物的量来影响生态系统中土壤养分的分布及循环[25]，针叶林的凋落物以针叶为主，属粗糙死地被物，不利于养分的归还，且有研究表明，阔叶林由于其凋落物储量大、分解速度快，比针叶林具有更好的养分归还条件和养分积蓄能力[26]，凋落物的矿化也有利于养分的归还。铵态氮与全氮的变化特征一致，可能和铵态氮的含量主要与凋落物中全氮的矿化有关[27]。

3.2 土壤物理特征和土层厚度对氮的影响

0 ~ 15 cm 土层氮含量显著高于其他土层，且随着土层深度的增加，氮含量逐渐下降，其他学者的研究结果也与此相似[28−30]。造成这种现象的原因一方面可能是植被通过凋落物归还给土壤的养分随着土层深度的增加在时间上有一定的滞后性，对于深层土壤而言，枯落物、根系分泌物及其脱落物的分解是养分补充的途径，这些分解产物在降水淋溶作用下会向下移动，但对深层土壤有效养分的反馈并不充分[31]，故呈现积聚在表层的现象；另一方面表层土壤含有的植物根系和分泌物较多，微生物活跃，利于枯落物及其他代谢产物分解转化和腐殖质的形成[32]，也有研究表明土壤养分主要分布在根际土里，导致表层土壤富集[33]；植物根系固氮作用随着土层的加深而下降[34]，所以土壤氮主要分布在土壤表层，即便是在坡面氮迁移的过程中，表层氮的含量依然是高于下层土壤的，这也和有关学者的研究结果一致[35−36]。铵态氮和硝态氮含量也随着土层加深而减少，这与李聪等[37]的研究结果一样。

植被类型可以直接影响土壤物理环境及养分环境[14]。樟子松个体生长吸收的养分高于草本植物，使得土壤中的养分含量明显降低[38]，土壤密度升高。但随着其林龄增加，林地地表枯落物积累量逐渐增加，通过枯落物分解、细根脱落和根系分泌物等途径产生的养分归还于土壤[31]。养分的增加使得土壤生物活动增强，土壤结构得到改善，土壤密度降低[39]。因此，土壤中的养分含量影响着土壤密度。枯落物分解会增加孔隙度，且随着土层厚度的增加，影响逐渐减弱[40]，同时在分解过程中也提高了土壤氮含量。也有研究表明土壤孔隙度越大，土壤密度和土壤贯入阻力降低，有利于根系下扎[41−42]和氮的积累。

4 结　　论

两种水土保持林对于黑土坡面氮均有保持作用，杨树水土保持林对氮的保持作用优于樟子松水土保持林。3 个试验区 0 ~ 15 cm 土层的硝态氮、铵态氮、颗粒态有机氮的含量高于 15 ~ 30 cm 土层。从氮保持的角度建议在杨树和樟子松两种水土保持树种中优先考虑杨树。

参 考 文 献

[1] Lex B, Kees K G, Klaas W V D H, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900−2050 period[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(52): 20882−20887.

[2] Zhang C C, Wang Y Q, Jia X X, et al. Estimates and determinants of soil organic carbon and total nitrogen stocks up to 5 m depth across a long transect on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(2): 748−765.

[3] 陈书信, 王国兵, 阮宏华, 等. 苏北沿海不同土地利用方式土壤氮矿化季节变化特征 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 276−282.
Chen S X, Wang G B, Ruan H H, et al. Seasonal variations of soil nitrogen mineralization under different land-use types in a coastal area in northern Jiangsu, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(2): 276−282.

[4] 刘婕, 勾晓华, 刘建国, 等. 甘南黄河流域 4 种典型林分土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5627−5637.
Liu J, Gou X H, Liu J G, et al. The stoichiometric characteristics of soil C, N and P in four typical forest stands in the Yellow River Basin in Gannan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5627−5637.

［5］ 许开平, 吴家森, 黄程鹏, 等. 不同植物篱在减少雷竹林氮磷渗漏流失中的作用 [J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 980−987.
Xu K P, Wu J S, Huang C P, et al. Effect of hedgerows reducing of nitrogen and phosphorus leaching loss from *Phyllostachys praecox* stands[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 980−987.

［6］ 李怀恩, 邓娜, 杨寅群, 等. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 81−86.
Li H E, Deng N, Yang Y Q, et al. Clarification efficiency of vegetative filter strips to several pollutants in surface runoff[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(7): 81−86.

［7］ 田潇, 周运超, 刘晓芸, 等. 物种配置植物篱对坡耕地营养元素拦截效应 [J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 89−93.
Tian X, Zhou Y C, Liu X Y, et al. Effects of hedgerow of species configuration on the interception of nutrition elements in the sloping cultivated lands[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 89−93.

［8］ 梁青兰, 韩友吉, 乔艳辉, 等. 干旱胁迫对黑杨派无性系生长及生理特性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 81−89.
Liang Q L, Han Y J, Qiao Y H, et al. Effects of drought stress on the growth and physiological characteristics of Sect. *Aigeiros* clones[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 81−89.

［9］ 马成忠, 邓继峰, 丁国栋, 等. 不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 230−235.
Ma C Z, Deng J F, Ding G D, et al. Effects of different planting densities of Mongolian pine on the soil particle size characteristics in southern Mu Us Desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 230−235.

［10］ 韩辉, 袁春良, 张学利, 等. 基于林分生长量的沙地樟子松初植造林密度确定 [J]. 辽宁林业科技, 2020(6): 1−9, 58.
Han H, Yuan C L, Zhang X L, et al. Confirmation of initial planting density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in sandy land based on stand growth[J]. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology, 2020(6): 1−9, 58.

［11］ 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.
Zhang N N, Guan W B, Xie J, et al. Temporal and spatial distribution of soil moisture of Daqinggou Nature Reserve in the southeastern margin of Horqin Sandy Land, Inner Mongolia, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3860−3873.

［12］ 中国林业科学研究院林业所森林土壤研究室. 森林土壤水分—物理性质的测定: LY/T 1215—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
Forest Soil Research Laboratory, Forestry Research Institute, Chinese Academy of Forestry Sciences. Determination of forest soil water-physical properties: LY/T 1215−1999[S]. Beijing: China Standard Press, 1999.

［13］ Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777−783.

［14］ 任玉连, 陆梅, 曹乾斌, 等. 南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 104−115.
Ren Y L, Lu M, Cao Q B, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen stocks across the different typical vegetation types in Nangunhe National Nature Reserve, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(11): 104−115.

［15］ 刘冠宏, 李炳怡, 宫大鹏, 等. 林火对北京平谷区油松林土壤化学性质的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 29−40.
Liu G H, Li B Y, Gong D P, et al. Effects of forest fire on soil chemical properties of *Pinus tabuliformis* forest in Pinggu District of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(2): 29−40.

［16］ 许书军, 魏世强, 谢德体. 非点源污染影响因素及区域差异 [J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(4): 389−393.
Xu S J, Wei S Q, Xie D T. Analysis of non-point source pollution influence factors and their discrepancy[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(4): 389−393.

［17］ 王恒星, 张建军, 孙若修, 等. 晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 85−95.
Wang H X, Zhang J J, Sun R X, et al. Effects of different vegetation slope patterns on infiltration and characteristics of runoff and sediment production in the loess area of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(3): 85−95.

［18］ 林超文, 庞良玉, 罗春燕, 等. 平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5552−5560.
Lin C W, Pang L Y, Luo C Y, et al. Effect of balanced fertilization and rain intensity on nutrient losses from a purple soil in Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5552−5560.

［19］ 郭二辉, 方晓, 马丽, 等. 河岸带农田不同恢复年限对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响——以温榆河为例 [J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3785−3794.
Guo E H, Fang X, Ma L, et al. Effects of different recovery years on the ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in riparian farmland: a case study of Wenyu River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3785−3794.

［20］ 李晓欣, 胡春胜, 程一松. 不同施肥处理对作物产量及土壤中硝态氮累积的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 38−42.
Li X X, Hu C S, Cheng Y S. Effect of different fertilizers on crop yield and nitrate accumulation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3): 38−42.

［21］ 冯波, 孔令安, 张宾, 等. 施氮量对垄作小麦氮肥利用率和土壤

硝态氮含量的影响 [J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1107−1114.
Feng B, Kong L A, Zhang B, et al. Effect of nitrogen application level on nitrogen use efficiency in wheat and soil nitrate-N content under bed planting condition[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(6): 1107−1114.

[22] 鲁艺, 牟长城, 高旭, 等. 林型和林龄对嫩江沙地人工林生态系统碳储量影响规律研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 16−27.
Lu Y, Mu C C, Gao X, et al. Effects of forest type and stand age on ecosystem carbon storage of plantations in Nenjiang Sandy Land of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 16−27.

[23] 曾晓敏, 高金涛, 范跃新, 等. 中亚热带森林转换对土壤磷积累的影响 [J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4879−4887.
Zeng X M, Gao J T, Fan Y X, et al. Effect of soil factors after forest conversion on the accumulation of phosphorus species in mid-subtropical forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4879−4887.

[24] 赵秀云, 韩素芬. 杨树根际固氮菌的分离、筛选和鉴定 [J]. 南京林业大学学报, 2000, 24(3): 17−20.
Zhao X Y, Han S F. Isolation ,selection and identification of nitrogen fixing bacteria in poplar rhizosphere[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2000, 24(3): 17−20.

[25] 刘晓彤, 李海奎, 曹磊, 等. 广东省森林土壤养分异质性析因 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 90−101.
Liu X T, Li H K, Cao L, et al. Analysis on the heterogeneity of forest soil nutrients in Guangdong Province of southern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 90−101.

[26] 方晰, 田大伦, 秦国宣, 等. 杉木林采伐迹地连栽和撂荒对林地土壤养分与酶活性的影响 [J]. 林业科学, 2009, 45(12): 65−71.
Fang X, Tian D L, Qin G X, et al. Nutrient contents and enzyme activities in the soil of *Cunninghamia lanceolata* forests of successive rotation and natural restoration with follow after clear-cutting[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(12): 65−71.

[27] 冯燕辉, 梁文俊, 魏曦, 等. 关帝山不同海拔梯度华北落叶松林土壤养分特征分析 [J]. 西部林业科学, 2020, 49(4): 68−73, 98.
Feng Y H, Liang W J, Wei X, et al. Analysis of soil nutrient characteristics of *Larix principis-rupprechtii* forests with different altitude gradients in Guandi Mountain[J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(4): 68−73, 98.

[28] 王凯, 赵成姣, 张日升, 等. 不同密度樟子松人工林土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 741−748.
Wang K, Zhao C J, Zhang R S, et al. Soil carbon nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different densities[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 741−748.

[29] 王凯, 雷虹, 石亮, 等. 沙地樟子松带状混交林土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 2883−2891.
Wang K, Lei H, Shi L, et al. Soil carbon nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* belt-mixed forests[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 2883−2891.

[30] 赵文东, 李凯, 沈健, 等. 坡位和坡度对黑木相思人工林土壤养分空间分布的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(9): 78−84, 104.
Zhao W D, Li K, Shen J, et al. Effects of slope position and gradient on spatial distribution of soil nutrient in *Acacia melanoxylon* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(9): 78−84, 104.

[31] 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.
Yu D W, Lei Z Y, Zhang Y S, et al. Plantation on soil nitrogen change in sandy land[J]. Journal of Arid Resources and Environment, 2020, 34(6): 179−186.

[32] 祁金虎. 辽东山区天然次生栎林土壤有机碳含量及其与理化性质的关系 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 135−140, 171.
Qi J H. Content of soil organic carbon and its relations with physicochemical properties of secondary natural oak forests in eastern mountain area of Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 135−140, 171.

[33] 胡芳, 杜虎, 曾馥平, 等. 典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响 [J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2170−2179.
Hu F, Du H, Zeng F P, et al. Dynamics of soil nutrient content and microbial diversity following vegetation restoration in a typical karst peak-cluster depression landscape[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2170−2179.

[34] 王宪伟, 孙丽, 杜宇, 等. 大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤性质与微生物呼吸活性研究 [J]. 湿地科学, 2021, 19(6): 682−690.
Wang X W, Sun L, Du Y, et al. Soil property and microbial respiration activity of peatland in permafrost region in Greater Hinggan Mountains[J]. Wetland Science, 2021, 19(6): 682−690.

[35] 段成伟, 李希来, 柴瑜, 等. 不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响 [J]. 生态学报, 2022, 42(18): 7652−7662.
Duan C W, Li X L, Chai Y, et al. Effects of different rehabilitation measures on plant community and soil nutrient of degraded alpine meadow in the Yellow River Source[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7652−7662.

[36] 李程程, 曾全超, 贾培龙, 等. 黄土高原土壤团聚体稳定性及抗蚀性能力经度变化特征 [J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2039−2048.
Li C C, Zeng Q C, Jia P L, et al. Characteristics of soil aggregate stability and corrosion resistance longitude change in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 2039−2048.

[37] 李聪, 陆梅, 任玉连, 等. 文山典型亚热带森林土壤氮组分的海拔分布及其影响因子 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(12): 63−73.
Li C, Lu M, Ren Y L, et al. Distribution of soil nitrogen

components of Wenshan typical subtropical forests along an altitude gradient and its influencing factors in Yunnan Province of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(12): 63−73.

［38］刘云霞, 胡亚林, 曾德慧, 等. 科尔沁沙地草地营造樟子松人工林对土壤化学和生物学性状的影响 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 814−820.
Liu Y X, Hu Y L, Zeng D H, et al. Effects of grassland afforestation with Mongolian pine on soil chemical and biological properties in Keerqin Sandy Land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 814−820.

［39］张岩松, 雷泽勇, 于东伟, 等. 沙质草地营造樟子松林后土壤容重的变化及其影响因子 [J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7144−7152.
Zhang Y S, Lei Z Y, Yu D W, et al. Changes in soil bulk density and its influencing factors after sandy grassland afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7144−7152.

［40］李鹏, 陈璇, 杨章旗, 等. 不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 368−377.
Li P, Chen X, Yang Z Q, et al. Effects of litter input on soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* plantations with different densities[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 368−377.

［41］胡树平, 包海柱, 孟天天, 等. 深松对土壤物理性质及油用向日葵产量性状的影响 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2020, 41(3): 4−9.
Hu S P, Bao H Z, Meng T T, et al. Effect of sub-soiling on soil characteristics and yield characters of oil sunflower[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 41(3): 4−9.

［42］杜满聪, 李江涛, 李淑玲, 等. 不同耕作方式对华南坡耕地土壤孔隙结构和抗穿透强度影响 [J]. 广州大学学报 (自然科学版), 2018, 17(6): 74−80.
Du M C, Li J T, Li S L, et al. Effects of different tillage methods on soil pore structure and penetration resistance of slope farmland in south China[J]. Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition), 2018, 17(6): 74−80.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　余新晓）