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

植被恢复年限对塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳氮磷储量的影响

戴楠 王寅 王梓静 李天雪

Effects of vegetation recovery years on soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations in Saihanba, Hebei Province of northern China

Dai Nan, Wang Yin, Wang Zijing, Li Tianxue

引用本文:
戴楠, 王寅, 王梓静, 李天雪. 植被恢复年限对塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳氮磷储量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5):92–99. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240415
Dai Nan, Wang Yin, Wang Zijing, Li Tianxue. Effects of vegetation recovery years on soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of *Larix gmelinii* var. *principis–rupprechtii* plantations in Saihanba, Hebei Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5):92–99. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240415

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240415

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

塞罕坝华北落叶松纯林和混交林土壤肥力质量评价
Soil fertility quality evaluation of pure and mixed *Larix principis–rupprechtii* forests in Saihanba, Hebei Province of northern China
北京林业大学学报, 2021, 43(8): 50–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210189

华北落叶松不同代际人工林土壤养分及细菌群落变化特征
Changes in soil nutrients and bacterial communities of *Larix principis–rupprechtii* plantations of different generations
北京林业大学学报, 2020, 42(3): 36–45. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190256

不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响
Effects of different density regulation intensities on soil quality in *Larix principis–rupprechtii* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 50–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200322

塞罕坝华北落叶松人工林断面积预测模型
Prediction model for basal area of *Larix principis–rupprechtii* plantation in Saihanba of Hebei Province, northern China
北京林业大学学报, 2017, 39(7): 10–17. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170072

长白落叶松人工林林分碳储量生长模型系研究
Stand carbon stock growth model system for *Larix olgensis* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(11): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210040

华北落叶松人工林间伐后9～10年林下天然更新研究
Natural regeneration of *Larix principis–rupprechtii* plantations in 910 years after thinning
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 17–28. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200371

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240415

植被恢复年限对塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳氮磷储量的影响

戴 楠[1] 王 寅[2] 王梓静[2] 李天雪[2]
（1. 河北省塞罕坝机械林场，河北 承德 068450；2. 河北师范大学生命科学学院，河北省动物生理生化与分子生物学实验室，河北省生态环境协同创新中心，河北 石家庄 050024）

摘要:【目的】揭示植被恢复对塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳、氮、磷储量的影响机制，为人工林固碳、保肥功能精准提升提供科学依据。**【方法】**本研究以塞罕坝不同恢复年限（15、25、36、52 年）华北落叶松人工林为研究对象，以退化沙地为对照，通过测定 0～1 m 土层碳、氮、磷储量及相关环境因素，揭示植被恢复过程中土壤碳、氮、磷储量变化及其影响因素。**【结果】**（1）不同恢复年限华北落叶松人工林土壤碳、氮、磷储量平均值分别为（211.5 ± 46.1）、（16.0 ± 3.1）、（5.8 ± 0.8）t/hm^2。土壤碳、氮、磷储量随恢复年限增加显著增加（$P < 0.05$），土壤碳和磷储量于 36 年达最大值，而氮储量在 52 年时显著大于其他恢复年限（$P < 0.05$）。（2）方差分解结果显示，土壤和植被因素共同解释土壤碳、氮、磷储量 84.46%、82.73% 和 65.29% 的变异。其中，土壤黏粒含量单独解释率分别为 25.79%、28.08% 和 34.16%；植被地下生物量单独解释率分别为 58.67%、54.65% 和 31.13%。（3）结构方程结果表明，恢复年限对土壤碳、氮、磷储量仅具间接作用，恢复年限既可通过增加植被地下生物量间接提高土壤碳、氮、磷储量（占总效应的 58.6%、53.0% 和 35.3%），又可通过增加植被地下生物量和凋落物层现存量来改变土壤机械组成，从而提高土壤磷储量（占总效应的 38.3%）。**【结论】**植被恢复年限通过增加植被地下生物量和改善土壤机械组成有效提升土壤碳、氮、磷储量，故人工林管理实践需加强土壤机械组成改良与根系生物量维持，同时注重土壤固碳保肥功能的长期发挥。

关键词：植被恢复年限；土壤碳氮磷储量；华北落叶松人工林；塞罕坝
中图分类号：S791.229 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)05−0092−08
引文格式：戴楠，王寅，王梓静，等. 植被恢复年限对塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳氮磷储量的影响［J］. 北京林业大学学报，2025，47(5)：92−99. Dai Nan, Wang Yin, Wang Zijing, et al. Effects of vegetation recovery years on soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations in Saihanba, Hebei Province of northern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 92−99.

Effects of vegetation recovery years on soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations in Saihanba, Hebei Province of northern China

Dai Nan[1] Wang Yin[2] Wang Zijing[2] Li Tianxue[2]
(1. Hebei Saihanba Mechanized Forest Farm, Chengde 067000, Hebei, China;
2. Hebei Key Laboratory of Animal Physiology, Biochemistry and Molecular Biology, Hebei Collaborative Innovation Center for Eco-Environment, College of Life Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, Hebei, China)

Abstract: ［**Objective**］This study aimed to reveal the influence mechanisms of vegetation restoration on soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations in

收稿日期: 2024−12−04 **修回日期:** 2025−01−27
基金项目: 河北省自然科学基金青年项目（C2024205002），河北师范大学科研基金项目（L2024B18）。
第一作者: 戴楠。主要研究方向：森林防火。Email: 371516088@qq.com 地址：068450 河北省承德市围场满族蒙古族自治县河北省塞罕坝机械林场。
责任作者: 王寅，博士，讲师。主要研究方向：森林生态学。Email: wangyin@hebtu.edu.cn 地址：050024 河北省石家庄市南二环东路 20 号河北师范大学生命科学学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

Saihanba, Hebei Province of northern China, and to provide a basis for precise improvement of carbon sequestration and fertility maintenance function. [**Method**] In this study, *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations with different years of recovery (15, 25, 36, 52 years) were compared against the degraded sandy land used as controls in Saihanba. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks (0−1 m) and associated environmental factors were measured. Variation in soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and its influencing factors during vegetation restoration will be clarified. [**Result**] (1) Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations during different vegetation recovery years were (211.5 ± 46.1) t/ha, (16.0 ± 3.1) t/ha, (5.8 ± 0.8) t/ha. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks increased with increasing vegetation recovery years ($P < 0.05$). Soil carbon and phosphorus stocks reached maximum at the 36th year, while soil nitrogen stocks at the 52th year were significantly higher than other vegetation recovery years. (2) Soil and vegetation factors together explained 84.46%, 82.73% and 65.29% of the variation in soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks, respectively; and soil clay content individually explained 25.79%, 28.08% and 34.16% of the variation. Vegetation belowground biomass individually explained 58.67%, 54.65% and 31.13% of the variation in soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks. (3) Structural equation models demonstrated that vegetation recovery years had no significant direct effect on soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks. Vegetation recovery years indirectly increased soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks by increasing vegetation belowground biomass (58.6%, 53.0% and 35.3%), and indirectly increased soil phosphorus stocks through affecting soil texture by increasing vegetation belowground biomass and litter biomass (38.3% of total effect). [**Conclusion**] Vegetation recovery years increase soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks through indirect pathways mediated by soil texture and vegetation belowground biomass. Therefore, for practice and management of plantations, it is necessary to strengthen the management of soil texture and maintenance of vegetation belowground biomass as well as to focus on the long-term soil carbon sequestration and fertility maintenance function.

Key words: vegetation recovery years; soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks; *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation; Saihanba

植被恢复是防治土壤退化，改善生态环境的重要手段[1−3]。在植被恢复过程中，植物群落组成、凋落物和根系分泌物等发生改变，进而促进土壤养分循环和生态系统恢复[4−5]。土壤的碳氮磷储量在一定程度上反映其肥力和生产力高低，是评价植被恢复成效和表征养分循环的重要指标[6]。因此，系统研究植被恢复过程中驱动土壤碳氮磷储量变化的机制，不仅可为植被退化区域土壤固碳和保肥功能的维持与优化提供科学依据，还对“双碳”目标下植被恢复与重建工作具有重要的意义。

研究结果表明，植被恢复能够提高植被和土壤碳、氮储量[7−8]。如喀斯特地区植被恢复显著提高了土壤碳氮储量[8]。而 Zhu 等[9]发现中国北方温带草原退耕还林显著降低了土壤磷储量。虽然植被恢复后土壤碳、氮、磷储量均有明显变化，但植被恢复过程中恢复年限对土壤碳、氮、磷储量动态的具体影响尚未完全明确。植被恢复年限的变化会通过影响树木生长与生物量积累，进而影响养分元素在生态系统不同组分间(植物、凋落物、土壤)的分配[10−11]。随着恢复年限的增加，凋落物与根系生物量的数量及其分解的养分返还量不断增加，成为土壤养分的主要来源[12−14]。然而，现有研究尚未明确恢复年限通过凋落物或根系途径对土壤碳、氮、磷储量差异的调控机制，这在一定程度上限制了人们对植被恢复过程中土壤碳、氮、磷储量变化驱动机制的深入理解。

塞罕坝是高寒沙地植被恢复的成功案例，区域人工林起到阻沙源、保水源、固碳源的重要生态作用。但目前有关该区土壤碳、氮和磷储量的研究仅有不同区域人工林土壤碳库对比报道[15]，而缺乏植被恢复影响土壤碳、氮和磷储量的同步研究，这使得难以准确评估区域植被恢复的固碳和保肥作用。因此，本研究以塞罕坝不同恢复年限(15、25、36、52 年)华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)人工林为研究对象，以退化沙地为对照，通过测定 0～1 m 土层的碳、氮、磷储量以及相关环境因素，揭示植被恢复过程中土壤碳、氮和磷储量的变化规律及其影响因素。主要探究以下 2 个问题：(1)不同恢复年限土壤碳、氮、磷储量存在怎样的时

空动态格局?(2)植被恢复年限影响土壤碳、氮、磷储量的基本过程与机理是怎样的?

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地点位于河北省承德市围场县塞罕坝机械林场。该区为温带大陆性季风气候，海拔范围1 000～1 940 m，年平均气温−1.4 ℃，年降水量405～503 mm，年潜在蒸散量1 230 mm。主要土壤类型为灰色森林土、棕壤土和风沙土。依据林场造林历史资料，塞罕坝林地面积为7.5万 hm^2；华北落叶松是塞罕坝乡土树种和主要造林树种之一，占人工林总面积的76.2%。

1.2 调查点与采样方法

参考《主要树种龄级与龄组划分》(LY/T 2908—2017)，华北落叶松人工林的龄组划分为幼龄林(≤ 20 a)、中龄林(21～30 a)、近熟林(31～40 a)、成熟林(41～60 a)。选取无经营措施且立地条件相似的不同恢复年限人工林进行研究，包括15、25、36、52年4个恢复年限的人工林。同时，以退化沙地(未恢复)为对照(表1)。

在各调查点布设5个20 m × 30 m样方，记录样方地理坐标、地形特征和海拔。依据方精云等[16]调查规范开展群落调查，对样方中胸径 > 3 cm的乔木记录物种名、株数，并测定胸径、树高等指标。在两个对角选择面积为10 m × 10 m的灌木小样方，对全部灌木分种计数，并测量基径、高度和冠幅。在样方四角和中心共布设5个1 m × 1 m的草本小样方，记录草本植物的种名、多度和盖度，采用“全株收获法”将样方内草本全部收获。沿对角线设置3个1 m × 1 m的凋落物样方，采集凋落物样品，在实验室烘干测定凋落物层现存量。

在各样方中，随机选取8～10个采样点，用土钻采集0～100 cm土壤样品(分0～15 cm、15～30 cm、30～60 cm、60～100 cm 4层)，将各层土样混匀后保存于4 ℃保温盒，用于测定土壤化学性质；同时用环刀采集土样(3次重复)，用于测定土壤物理性质。环刀法测定土壤容重(BD，g/cm^3)，烘干法测定土壤水分含量(SM，%)；重铬酸钾法测定土壤有机碳(SOC，g/kg)，凯氏定氮法测定土壤全氮(STN，g/kg)，钼蓝比色法测定土壤全磷(STP，g/kg)。采用pH计测量土壤pH(1∶5土水比)。采用激光粒度分析仪测定土壤粒度组成，包括砂粒(Sand，%)、粉粒(Silt，%)和黏粒含量(Clay，%)。采用2 mm土壤筛测定大于2 mm砾石含量(C，%)。

各层土壤有机碳、全氮和全磷储量计算公式如下[15]。

$$S = \sum_{i=1}^{n} N_i B_i D_i (1 - C_i) \quad (1)$$

式中：S为土壤有机碳、全氮或全磷储量，N_i为土层i有机碳含量(g/kg)、全氮含量(g/kg)或全磷含量(g/kg)，B_i为第i层土壤容重(g/cm^3)，D_i为第i层土层深度(cm)，C_i为第i层大于2mm的砾石含量，n为土层数量。

因木本植物生物量研究多采用直接收获法，破坏性较大。本研究采用生物量模型法估算木本植物地上、地下生物量[17−19]，乔木生物量根据实测胸径和树高数据计算，灌木生物量根据实测基径、冠幅、高度数据计算。样地调查收获的草本生物量样品分割为地上、地下两部分，带回实验室烘干至恒质量获得草本地上、地下生物量。乔灌草生物量求和获得植被地上和地下生物量。

1.3 数据分析

采用单因素(one-way ANOVA)和Duncan法对不同恢复年限的土壤碳氮磷储量进行方差分析和多重比较。对部分土壤碳氮磷储量和环境数据进行对数转换处理，以确保数据呈正态分布。运用一元线性回归或多项式回归分析探究植被恢复年限、环境因素(土壤和植被)与土壤碳氮磷储量的关系，同时利用赤池信息量准则(Akaike information criterion,

表1 塞罕坝华北落叶松人工林样地概况

Tab. 1 General situation of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation plots in Saihanba

恢复年限/a	类型	坡度/(°)	经度	纬度	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度/(株·hm^{-2})	郁闭度	主要物种	
									乔木层	灌木层
0	沙地	7.0	117°00′E	42°26′ N					榆	小叶锦鸡儿、冷蒿、黑沙蒿
15	幼龄林	6.7	117°24′ E	42°27′ N	11.6	6.3	1 603	0.75	华北落叶松	忍冬
25	中龄林	8.6	117.34° E	42°27′ N	17.0	8.7	1 307	0.63	华北落叶松、白桦	忍冬
36	近熟林	8.0	117.46° E	42°27′ N	22.1	14.1	1 137	0.49	华北落叶松、白桦	忍冬、山刺玫、花楸树
52	成熟林	8.1	117.37° E	42°27′ N	25.7	15.0	923	0.47	华北落叶松、白桦	稠李、山荆子、金露梅

注：榆. *Ulmus pumila*；小叶锦鸡儿. *Caragana microphylla*；冷蒿. *Artemisia frigida*；黑沙蒿. *Artemisia ordosica*；忍冬. *Lonicera japonica*；山刺玫. *Rosa davurica*；花楸树. *Sorbus pohuashanensis*；稠李. *Prunus padus*；山荆子. *Malus baccata*；金露梅. *Dasiphora fruticosa*。

AIC)来确定线性回归与多项式回归模型的适合度。基于 AICc 的判定方法,利用模型选择和多模型推断(model selection and multimodel inference, MuMIn)探讨土壤碳氮磷储量的最优影响因素组合(植被恢复年限、土壤理化性质、郁闭度、林分密度、林下植被多样性、凋落物层现存量、植被地上生物量、植被地下生物量)[20−22]。采用以下 4 个步骤完成最优模型选择。(1)根据相关性分析结果,剔除与土壤碳氮磷储量均不显著相关的指标,将与土壤碳氮磷储量存在非线性关系的环境因素的二次项部分放入模型中以解决两者间的非线性关系;(2)根据方差膨胀因子(ariance inflation factor, VIF)去除共线性较高的变量;(3)利用剩余因素构建全模型,使用 MuMIn 包的 dredge()函数生成可能的模型集合;(4)基于 AICc 值(ΔAICc < 2)选择最优的变量集合。当模型中保留多个变量时,通过 hierarchical 分解分析确定所有保留变量的单独解释率[23]。最后,采用偏最小二乘法结构方程(PLS-SEM)分析植被恢复年限、土壤因素、凋落物层现存量、植被地上生物量、植被地下生物量对土壤碳氮磷储量的直接与间接作用。其中,土壤因素包括土壤水分含量、砂粒、粉粒和黏粒含量。采用拟合优度(goodness of fit, GOF)指数来评估模型,利用 Bootstrapping 法检验路径的显著性[24−25]。

2　结果与分析

2.1　恢复年限对人工林土壤碳氮磷储量的影响

沙地土壤碳、氮、磷储量分别为(115.9 ± 17.6)、(9.9 ± 1.2)、(4.5 ± 0.6)t/hm^2,华北落叶松人工林土壤碳、氮、磷储量分别为(211.5 ± 46.1)、(16.0 ± 3.1)、(5.8 ± 0.8)t/hm^2。随着恢复年限的增加,土壤碳、氮和磷储量整体上呈不断升高的变化趋势,土壤碳和磷储量在 36 年时达最大值,而土壤氮储量在 52 年时显著大于其他恢复年限($P < 0.05$)。与对照沙地土壤相比,不同恢复年限的华北落叶松人工林土壤碳、氮储量均显著增加($P < 0.05$)。对于土壤磷储量,15 年人工林与对照无显著差异($P > 0.05$),而其他恢复年限的人工林均显著大于对照($P < 0.05$,图 1)。

2.2　不同环境因素与土壤碳氮磷储量的关系

土壤碳、氮和磷储量均与土壤 pH、土壤砂粒含量呈显著的负相关关系($P < 0.01$),与土壤粉粒、黏粒含量、土壤水分含量、林下植被多样性、凋落物层现存量、植被地上、地下生物量、植被恢复年限呈显著的正相关关系($P < 0.001$),与林分密度、郁闭度呈先增后减的二次曲线关系($P < 0.001$,表 2)。

2.3　土壤与植被因素对土壤碳氮磷储量的相对影响

多元回归模型结果表明,最优因子组合分别解释土壤碳、氮、磷储量变化的 84.46%、82.73% 和 65.29%(图 2)。其中土壤黏粒含量对土壤碳、氮、磷储量的解释贡献率分别为 25.79%、28.08% 和 34.16%;植被地下生物量对土壤碳、氮、磷储量的解释贡献率分别为 58.67%、54.65% 和 31.13%。

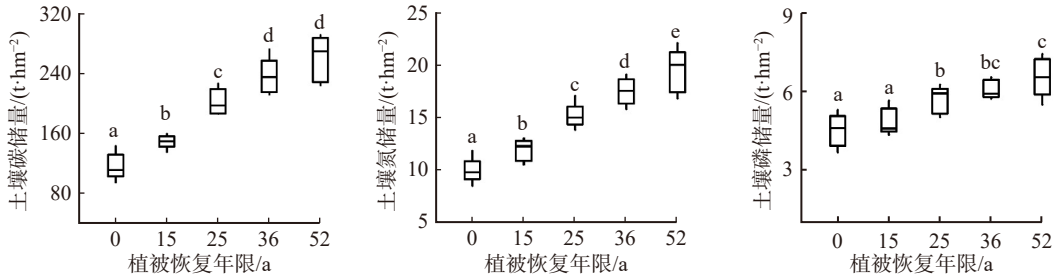
2.4　土壤碳、氮和磷储量的结构方程模型

结构方程模型结果表明(图 3),植被恢复年限、土壤因素、植被生物量与凋落物层现存量对土壤碳、氮、磷储量的累计方差解释率为 85.0%、83.6% 和 65.8%。植被恢复年限对土壤碳、氮和磷储量均无直接作用($P > 0.05$)。植被恢复年限对土壤碳、氮和磷储量的间接作用主要有 3 种路径(表 3)。首先,植被恢复年限通过增加植被地下生物量间接提高土壤碳、氮和磷储量(占总效应的 58.6%、53.0% 和 35.3%);其次,植被恢复年限通过增加植被地下生物量间接改变土壤因素,进而提高土壤碳、氮和磷储量(占总效应的 14.9%、17.2% 和 21.4%);再者,植被恢复年限通过增加植被地上生物量增加凋落物层现存量,进而改变土壤因素,从而提高土壤碳、氮和磷储量(占总效应的 11.8%、13.6% 和 16.9%)。

3　讨　　论

3.1　人工林土壤碳氮磷储量的主导因素

研究表明,长期植被恢复对土壤结构和质量的影响具有改善和累积作用[26−27]。塞罕坝华北落叶松



不同小写字母表示不同组差异显著($P < 0.05$)。

图 1　塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳氮磷储量

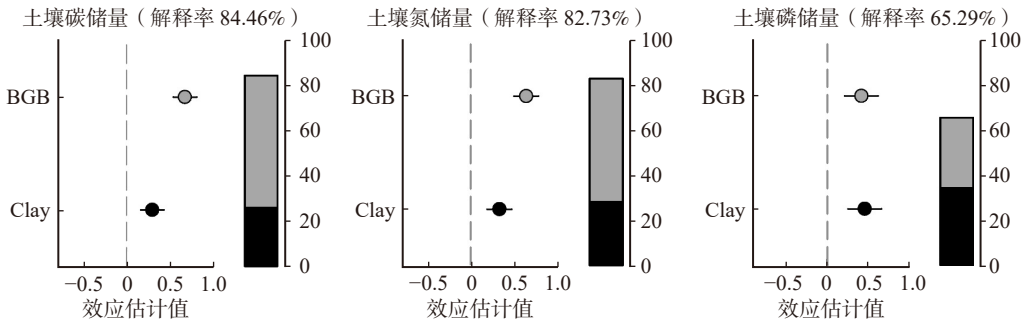
Fig. 1　Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations in Saihanba

表 2 土壤碳氮磷储量和土壤、植被因素的相关性

Tab. 2 Correlations between soil, vegetation factors and soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks

因素	土壤碳储量		土壤氮储量		土壤磷储量	
	R^2	P	R^2	P	R^2	P
土壤pH值	0.43（−）	< 0.001	0.41（−）	< 0.01	0.29（−）	< 0.01
土壤砂粒含量	0.78（−）	< 0.001	0.78（−）	< 0.001	0.63（−）	< 0.001
土壤粉粒含量	0.70（+）	< 0.001	0.70（+）	< 0.001	0.62（+）	< 0.001
土壤黏粒含量	0.80（+）	< 0.001	0.80（+）	< 0.001	0.60（+）	< 0.001
土壤水分含量	0.45（+）	< 0.001	0.46（+）	< 0.001	0.41（+）	< 0.01
林分密度	0.70（HS）	< 0.001	0.71（HS）	< 0.001	0.60（HS）	< 0.001
郁闭度	0.78（HS）	< 0.001	0.76（HS）	< 0.001	0.58（HS）	< 0.001
林下植被多样性	0.86（+）	< 0.001	0.87（+）	< 0.001	0.64（+）	< 0.001
凋落物层现存量	0.69（+）	< 0.001	0.70（+）	< 0.001	0.55（+）	< 0.001
植被地上生物量	0.85（+）	< 0.001	0.83（+）	< 0.001	0.64（+）	< 0.001
植被地下生物量	0.83（+）	< 0.001	0.80（+）	< 0.001	0.61（+）	< 0.001
植被恢复年限	0.86（+）	< 0.001	0.86（+）	< 0.001	0.67（+）	< 0.001

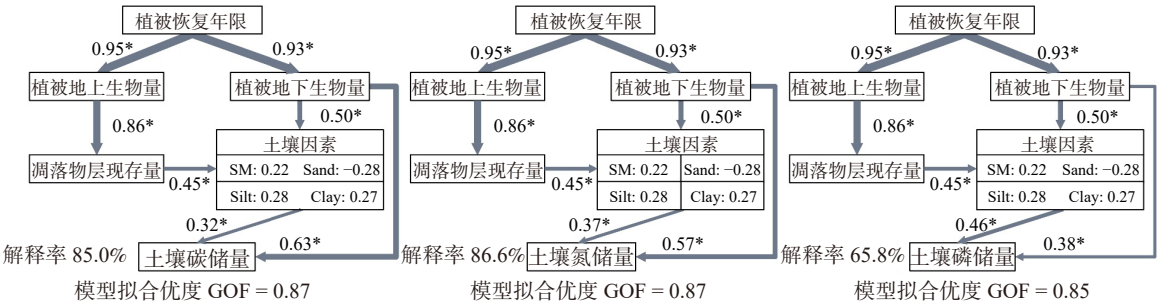
注：HS表示先增后减的二次曲线关系。−表示单调递减；+表示单调递增。



柱状图为各环境因素对土壤碳氮磷储量的相对贡献量(%)。左侧图为各因素的效应估计值与 95% 置信区间。BGB 为植被地下生物量；Clay 为土壤黏粒含量。

图 2 土壤和植被因素对土壤碳、氮和磷储量的解释

Fig. 2 Relative contribution of soil and vegetation factors to soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks



图中出现的箭头均代表相连指标间存在显著影响($P < 0.05$)。箭头数据表示路径系数。实线表示正效应。SM 为土壤水分含量；Sand 为土壤砂粒含量；Silt 为土壤粉粒含量；Clay 为土壤黏粒含量。*，$P < 0.05$。

图 3 土壤碳、氮和磷储量的 PLS-SEM 分析

Fig. 3 PLS-SEM analysis of soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks

人工林土壤属性与此结果一致。土壤容重、砂粒含量随恢复年限增加显著降低，而土壤粉粒、黏粒含量则显著上升($P < 0.05$)。在植被恢复过程中，林下植被多样性、凋落物层现存量、植被地上和地下生物量随恢复年限不断升高，而郁闭度与林分密度呈先增加后降低的变化趋势($P < 0.05$)。从土壤碳、氮、磷储量与上述环境因素的回归分析结果可知，土壤碳、氮、磷储量均与土壤砂粒含量呈显著的负相关关系，与土壤粉粒、黏粒含量、林下植被多样性、凋落物层现存量、植被地上和地下生物量呈显著的正相关关系，与郁闭度、林分密度呈先增后减的二次曲线关系($P < 0.05$，表 2)。因此，塞罕坝华北落叶松人工林土

表 3　植被恢复年限对土壤碳、氮和磷储量的间接作用路径

Tab. 3　Indirect effect pathway of vegetation recovery years on soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks

储量	路径	间接作用/%
土壤碳储量	植被恢复年限→植被地下生物量→土壤碳储量	58.6
	植被恢复年限→植被地下生物量→土壤因素→土壤碳储量	14.9
	植被恢复年限→植被地上生物量→凋落物层现存量→土壤因素→土壤碳储量	11.8
土壤氮储量	植被恢复年限→植被地下生物量→土壤氮储量	53.0
	植被恢复年限→植被地下生物量→土壤因素→土壤氮储量	17.2
	植被恢复年限→植被地上生物量→凋落物层现存量→土壤因素→土壤氮储量	13.6
土壤磷储量	植被恢复年限→植被地下生物量→土壤磷储量	35.3
	植被恢复年限→植被地下生物量→土壤因素→土壤磷储量	21.4
	植被恢复年限→植被地上生物量→凋落物层现存量→土壤因素→土壤磷储量	16.9

壤碳、氮和磷储量随恢复年限的变化可能和植被、土壤因素密切相关。

尽管如此，土壤碳、氮和磷储量具体由哪一类环境因素控制尚存在争议[28–30]。本研究方差分解结果显示，土壤与植被因素综合解释土壤碳、氮、磷储量 84.46%、82.73% 和 65.29% 的变异，土壤黏粒含量和植被地下生物量均存在显著的单独解释率(图 2)。植被地下生物量是土壤碳和氮储量的主要影响因素，而土壤磷储量受到植被地下生物量和土壤黏粒含量的共同影响。前期研究表明，凋落物及其分解产物是森林土壤有机质及全氮最重要的来源，决定土壤碳和氮储量的大小[31]。本文研究结果与此不同，可能是因为华北落叶松属针叶树种，其针叶凋落物不易分解，并且会导致土壤 pH 下降，抑制土壤微生物活性，影响养分归还[32]。相反，华北落叶松根系发达，大量根系分泌物和死根的腐解促进土壤有机质和全氮的积累；加之庞大根系的穿插和伸展作用产生大量孔隙，降低土壤容重，从而提高土壤碳和氮储量。对于土壤磷储量，一方面，由于砂粒颗粒较粗大，通透性好但吸持性弱，而黏粒比表面较砂粒更大，吸持能力更强，养分含量更高，具有黏着性[6,33–34]；另一方面，随植被恢复，植被地下生物量增加，释放更多分泌物，有助于土壤磷积累[35]。因此，植被地下生物量决定着塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳和氮储量的变化，而土壤磷储量的变化由土壤黏粒含量和植被地下生物量共同决定。

3.2　植被恢复年限对人工林土壤碳氮磷储量的影响

本研究中，不同恢复年限华北落叶松人工林土壤碳、氮、磷储量平均值分别为(211.5 ± 46.1)、(16.0 ± 3.1)、(5.8 ± 0.8)t/hm^2。土壤碳储量接近于暖温带森林碳储量(226.7 t/hm^2)，显著高于全国平均值(114.5 ± 21.1)t/hm^2[36]；土壤氮储量高于中国森林氮储量(13.6 ± 8.4)t/hm^2 和暖温带森林氮储量(10.8 ± 7.2)t/hm^2[37]；而土壤磷储量略高于中国森林磷储量(4.9 ± 6.5) t/hm^2[38]。在一定程度上反映出塞罕坝人工林土壤具有较高的肥力。与沙地相比，恢复 15、25、36、52 年人工林 0 ~ 1 m 土层土壤碳、氮、磷储量的增幅分别为 28.3% ~ 124.4%、19.8% ~ 96.1% 和 7.1% ~ 45.0%。土壤碳储量增幅分别是氮和磷储量增幅的 1.29 ~ 1.43 倍和 2.76 ~ 4.01 倍，表明塞罕坝人工林土壤固碳能力高于土壤氮磷固持能力。

大量研究表明，植被恢复能够促进土壤碳、氮和磷储量的增加[7–8]。本研究结果与其基本一致，随恢复年限增加，华北落叶松人工林土壤碳、氮和磷储量整体呈现不断升高的变化趋势，本研究中土壤碳和磷储量在 36 年时达最大值，而土壤氮储量在 52 年时显著大于其他恢复年限(图 1)。土壤碳和氮储量的变化可能是由于恢复前期幼龄林植株处于快速生长阶段，凋落物和根系分泌物会随恢复年限增加而增加，为林地释放更多的养分；待人工林进入成熟期，由于土壤养分供应受限(沙地造林)、林木衰老等原因，植被养分输入发生改变，加之成熟林土壤养分消耗量增加，使得土壤碳存储减缓。而土壤碳储量先于土壤氮储量达到最大值可能与人工林更高的固碳能力有关。对于土壤磷储量，15 年人工林与对照无显著差异($P > 0.05$)，但随恢复年限缓慢增加，这可能是由于恢复初期土壤磷含量低，植被生物量快速增长，对磷的需求增加，导致土壤磷积累缓慢；而植被恢复后期，林下植物组成丰富，多样化的凋落物和根系输入改善土壤微生物和磷酸酶活性，从而影响土壤磷循环过程和磷储量[39–40]。

3.3　植被恢复年限影响土壤碳氮磷储量的具体路径

结构方程模型结果表明，植被地下生物量是对土壤碳和氮储量直接作用最强的因子，而植被地下生物量和土壤黏粒含量均对土壤磷储量有显著的直接作用(图 3)。植被恢复年限对植被地下生物量具有直接正作用(路径系数 = 0.93)。植被恢复年限通过提高植被地下生物量间接影响土壤碳、氮和磷储

量，可能是由于随着恢复年限增加，植被地下生物量快速增加，促进根系的分泌和死根的腐解，进而促进土壤有机质、全氮和全磷的积累[31,35]。同时，植被恢复年限对植被地下生物量的直接正作用和对凋落物层现存量的间接正作用均会影响土壤因素。随着恢复年限增加，植被地下生物量和凋落物层现存量大量增加，促进土壤机械组成改善，土壤黏粒和粉粒含量增加、砂粒含量降低。土壤机械组成改善，吸持能力提高，可促进土壤磷储量增加，这与 Shi 等[33]和 Yang 等[34]研究结果一致。因此，植被恢复年限可通过增加植被地下生物量和凋落物层现存量改善土壤机械组成，从而提高土壤磷储量。

4 结　　论

（1）塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳、氮、磷储量均显著大于对照沙地土壤。随恢复年限增加，人工林土壤碳、氮、磷储量显著增加，且土壤碳和磷储量先于氮储量达最大值，土壤磷储量变化滞后于碳和氮储量。

（2）植被地下生物量是决定华北落叶松人工林土壤碳和氮储量的关键因素，而土壤磷储量由土壤黏粒含量和植被地下生物量共同决定。

（3）植被恢复年限对华北落叶松人工林土壤碳、氮、磷储量均无显著的直接作用。植被恢复年限既可通过增加植被地下生物量间接提高土壤碳、氮和磷储量，又可通过增加凋落物和根系输入改变土壤机械组成，从而提高土壤磷储量。

参 考 文 献

[1] Yang W, Zhang D, Cai X, et al. Natural revegetation over 160 years alters carbon and nitrogen sequestration and stabilization in soil organic matter on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2023, 220: 106647.

[2] Zhang Q, Hu Y, Shao M, et al. Revegetation re-carbonizes soil: patterns, mechanisms, and challenges[J/OL]. Fundamental Research, 2024[2024−06−22]. https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.06.004.

[3] Guo Z, Zhang S, Zheng L, et al. A meta-analysis reveals increases in soil organic carbon following the restoration and recovery of croplands in Southwest China[J]. Ecological Applications, 2024, 34(3): e2944.

[4] Wang A, Zha T, Zhang Z. Variations in soil organic carbon storage and stability with vegetation restoration stages on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2023, 228: 107142.

[5] Yue C, Xu M, Ciais P, et al. Contributions of ecological restoration policies to China's land carbon balance[J]. Nature Communications, 2023, 15: 9708.

[6] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 等. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2163−2172.
Liu Y L, Zhu G Y, Deng L, et al. Effects of natural vegetation restoration and afforestation on soil carbon and nitrogen storage in the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2163−2172.

[7] Li D, Niu S, Luo Y. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis[J]. New Phytologist, 2012, 195(1): 172−181.

[8] 张跃进, 李沁谊, 王好才, 等. 中国西南喀斯特地区植被自然恢复演替典型群落土壤碳氮储量特征 [J]. 林业科学, 2023, 59(7): 45−53.
Zhang Y J, Li Q Y, Wang H C, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen storage in typical communities of natural restoration and succession of vegetation in karst areas of Southwest China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(7): 45−53.

[9] Zhu N, Yan Y, Bai K, et al. Conversion of croplands to shrublands does not improve soil organic carbon and nitrogen but reduces soil phosphorus in a temperate grassland of Northern China[J]. Geoderma, 2023, 432: 116407.

[10] Chen X, Taylor A R, Reich P B, et al. Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual[J]. Nature, 2023, 618: 94−101.

[11] Satdichanh M, Dossa G G O, Yan K, et al. Drivers of soil organic carbon stock during tropical forest succession[J]. Journal of Ecology, 2023, 111(8): 1722−1734.

[12] 沈会涛, 张韬, 马文才, 等. 太行山东坡不同林龄杏树林碳储量及其分配特征 [J]. 生态学报, 2018, 38(18): 722.
Shen H T, Zhang T, Ma W C, et al. Carbon storage and its allocation pattern in *Armeniaca vulgaris* plantations at different ages on the eastern slope of Taihang Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 722.

[13] 王邵军. “植物−土壤”相互反馈的关键生态学问题: 格局, 过程与机制 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(2): 1−9.
Wang S J. Key ecological issues in plant-soil feedback: pattern, process and mechanism[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(2): 1−9.

[14] Craig M E, Geyer K M, Beidler K V, et al. Fast-decaying plant litter enhances soil carbon intemperate forests but not through microbial physiological traits[J]. Nature Communications, 2022, 13: 1229.

[15] 尹海龙, 张乃暄, 许中旗. 冀北坝上及坝下地区华北落叶松林土壤碳储量的比较 [J]. 林业与生态科学, 2022, 37(2): 164−168.
Yin H L, Zhang N X, Xu Z Q. Comparison of soil carbon storage of *Larix principis-rupprechtii* forest in Bashang and Baxia areas of northern Hebei Province[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2022, 37(2): 164−168.

[16] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533−548.
Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533−548.

[17] 王志杰, 房子怡, 张菲, 等. 塞罕坝地区典型人工林生物碳贮量的比较 [J]. 林业与生态科学, 2022, 37(2): 174−179.
Wang Z J, Fang Z Y, Zhang F, et al. Comparison of biocarbon storage of typical plantation in Saihanba area[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2022, 37(2): 174−179.

[18] 谢宗强, 王杨, 唐志尧, 等. 中国常见灌木生物量模型手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Xie Z Q, Wang Y, Tang Z Y, et al. Handbook of biomass models for common shrubs in China[M]. Beijing: Science Press, 2018.
[19] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利, 等. 中国森林生态系统碳储量—生物量方程 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Zhou G Y, Yin G C, Tang X L, et al. Carbon storage in China's forest ecosystems-biomass equations[M]. Beijing: Science Press, 2018.
[20] Le Bagousse-Pinguet Y, Soliveres S, Gross N, et al. Phylogenetic, functional, and taxonomic richness have both positive and negative effects on ecosystem multifunctionality[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(17): 8419−8424.
[21] Haddix M L, Gregorich E G, Helgason B L, et al. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil[J]. Geoderma, 2020, 363: 114160.
[22] Zhang D, Peng Y, Li F, et al. Trait identity and functional diversity co-drive response of ecosystem productivity to nitrogen enrichment[J]. Journal of Ecology, 2019, 107(5): 2402−2414.
[23] Legendre P. Interpreting the replacement and richness difference components of beta diversity[J]. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23: 1324−1334.
[24] Richter N F, Cepeda G, Roldan J L, et al. European management research using partial least squares structural equation modeling (pls-sem)[J]. European Management Journal, 2015, 33(1): 1−3.
[25] Hair J, Sarstedt F M, Hopkins L, et al. Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM): an emerging tool in business research[J]. European Business Review, 2014, 26(2): 106−121.
[26] 马文芳. 黄土丘陵区植被恢复对土壤碳、氮储量及团聚体分布的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Ma W F. Effects of vegetation restoration on distribution of soil carbon nitrogen, and aggregates in the loess hilly region[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
[27] 张泽凡, 张学珍. 黄土高原植被恢复对土壤物理参数的影响—基于已发表数据的荟萃分析 [J]. 地理科学进展, 2021, 40(6): 1012−1025.
Zhang Z F, Zhang X Z. Effects of vegetation restoration on soil physical parameters on the Loess Plateau: a meta-analysis based on published data[J]. Progress in Geography, 2021, 40(6): 1012−1025.
[28] Liu X, Yang T, Wang Q, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: a meta-analysis[J]. Science of The Total Environment, 2018, 618: 1658−1664.
[29] 杨阳, 刘良旭, 童永平, 等. 黄土高原植被恢复过程中土壤碳储量及影响因素研究进展 [J]. 地球环境学报, 2023, 14(6): 649−662.
Yang Y, Liu L X, Tong Y P, et al. Advances and driving factors in soil organic carbon storage during vegetation restoration in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Earth Environment, 2023, 14(6): 649−662.
[30] Li J, Wu B, Zhang D, et al. Elevational variation in soil phosphorus pools and controlling factors in alpine areas of Southwest China[J]. Geoderma, 2023, 431: 116361.
[31] 高菲. 小兴安岭阔叶红松林转换驱动的土壤有机碳氮库变化及机制 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
Gao F. Changes and mechanisms in soil organic carbon and nitrogen pool driven by mixed broadleaved-Kroean pine forest conversion in Xiao Xing'an Mountain[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.
[32] 向云西, 潘萍, 陈胜魁, 等. 天然马尾松林土壤碳氮磷特征及其与凋落物质量的关系 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 95−103.
Xiang Y X, Pan P, Chen S K, et al. Characteristics of soil C, N, P and their relationship with litter quality in natural *Pinus massoniana* forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(11): 95−103.
[33] Shi K, Liao J, Zou X, et al. Forest development induces soil aggregate formation and stabilization: implications for sequestration of soil carbon and nitrogen[J]. Catena, 2024, 246: 108363.
[34] Yang R, Yang S, Chen L, et al. Effect of vegetation restoration on soil erosion control and soil carbon and nitrogen dynamics: a meta-analysis[J]. Soil & Tillage Research, 2023, 230: 105705.
[35] 陈婵, 朱小叶, 陈金磊, 等. 亚热带不同植被恢复阶段生态系统 N、P 储量的垂直分配格局 [J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1393−1409.
Chen C, Zhu X Y, Chen J L, et al. Vertical distribution pattern of N and P storage of ecosystem at different vegetation restoration periods in the subtropical region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1393−1409.
[36] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s-2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化 [J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2150−2167.
Xu L, Yu G R, He N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 73(11): 2150−2167.
[37] 徐丽, 何念鹏. 中国森林生态系统氮储量分配特征及其影响因素 [J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(10): 1374−1385.
Xu L, He N P. Nitrogen storage and allocation in China's forest ecosystems[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2020, 50(10): 1374−1385.
[38] Zhang Y, Guo Y, Tang Z, et al. Patterns of nitrogen and phosphorus pools in terrestrial ecosystems in China[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(11): 5337−5351.
[39] Ai L, Wu F, Fan X, et al. Different effects of litter and root inputs on soil enzyme activities in terrestrial ecosystems[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 183: 104764.
[40] 刘家齐, 梁燕, 肖凡, 等. 西南喀斯特区域不同植被恢复阶段土壤磷主要来源及其季节变化 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3313−3321.
Liu J Q, Liang Y, Xiao F, et al. Main sources of soil phosphorus and their seasonal changes across different vegetation restoration stages in karst region of southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12): 3313−3321.

（责任编辑　孟　瑶　李　契
责任编委　孟　平）