

引用格式: 王雅君, 张建军, 胡亚伟, 等. 晋西黄土区油松林分改造中造林措施对辽东栎苗木生长的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(X): 1-11. WANG Yajun, ZHANG Jianjun, HU Yawei, et al. Effects of afforestation measures on growth of *Quercus liaotungensis* seedlings in transformation of *Pinus tabulaeformis* stands in the loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2026, 43(X): 1-11.

晋西黄土区油松林分改造中造林措施 对辽东栎苗木生长的影响

王雅君¹, 张建军^{1,2}, 胡亚伟¹, 李 阳¹, 何苗苗¹, 吴金蛟¹, 艾子豪¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 吉县 042200)

摘要: 【目的】辽东栎 *Quercus liaotungensis* 是华北地区油松 *Pinus tabulaeformis* 人工林改造的优选混交树种。明确造林措施对油松人工林下辽东栎苗木生长的影响, 为低效油松林改造和松栎混交林构建提供依据。【方法】以山西省吉县蔡家川流域油松人工林为研究对象, 在林外、林缘、林内分别设置样地, 开展辽东栎栽植试验。试验共设置 15 种处理方式, 包括无处理 (ck)、浇水处理 (500、1 000、1 500、2 000 mL·株⁻¹)、覆盖处理 (覆盖地膜、覆盖凋落物 45、90、135、180 g·株⁻¹) 及保水剂处理 (10、20、30、40、50 g·株⁻¹)。定期监测存活率、苗高、地径、冠幅、叶片数量和单叶面积等指标, 探究不同造林措施的效果。【结果】①林外、林缘、林内所需的最优浇水量依次减少, 分别为 2 000、1 500 和 1 000 mL·株⁻¹; ②林外、林缘、林内所需的最优覆盖量逐渐递减, 分别为 135、90 和 45 g·株⁻¹; ③林外、林缘、林内栽植时保水剂最佳使用量逐渐递减, 分别为 40、20 和 10 g·株⁻¹; ④林缘栽植的辽东栎存活率和生长状况最好, 林内次之, 林外最差; ⑤熵权-TOPSIS 法综合评价表明: 林外使用保水剂 40 g·株⁻¹、林缘使用保水剂 20 g·株⁻¹ 和林内覆盖凋落物 45 g·株⁻¹ 时, 对辽东栎苗木生长效果的促进作用最佳。【结论】利用辽东栎对油松人工林进行更新改造时, 需根据生境特点选择适配性措施, 营造块状混交林时宜优先选用保水剂, 株间混交或行间混交时宜加强栽植穴的覆盖, 以提升苗木成活率与生长质量。图 3 表 8 参 38

关键词: 低效林改造; 油松; 辽东栎; 造林措施; 生长指标

中图分类号: S756 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)00-0001-11

Effects of afforestation measures on growth of *Quercus liaotungensis* seedlings in transformation of *Pinus tabulaeformis* stands in the loess region of western Shanxi Province

WANG Yajun¹, ZHANG Jianjun^{1,2}, HU Yawei¹, LI Yang¹, HE Miaomiao¹, WU Jinjiao¹, AI Zihao¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Beijing Forestry University, Jixian 042200, Shanxi, China)

Abstract: [Objective] *Quercus liaotungensis* is the preferred mixed tree species for *Pinus tabulaeformis* plantation reconstruction in North China. This study aims to clarify the effects of afforestation measures on growth of *Q. liaotungensis* seedlings under *P. tabulaeformis* plantation, so as to provide the basis for transformation of low-efficiency *P. tabulaeformis* forest and construction of pine-oak mixed forest. [Method] Taking *P. tabulaeformis* plantation in Caijiachuan watershed of Jixian County, Shanxi Province as the research

收稿日期: 2025-09-24; 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD2200504, 2022YFF130040103)

作者简介: 王雅君 (ORCID: 0009-0004-1117-9998), 从事低效林改造研究。E-mail: 2197545181@qq.com。通信作者: 张建军 (ORCID: 0000-0002-7135-9542), 教授, 博士, 从事森林水文、低效林改造研究。E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

object, sample plots were set up outside the forest, at the edge of forest, and inside the forest to conduct planting experiments of *Q. liaotungensis*. A total of 15 treatment methods were set up in the experiment, including no treatment (ck), watering treatments (500, 1 000, 1 500, 2 000 mL·plant⁻¹), covering treatments (covering with plastic film, covering with litter of 45, 90, 135, 180 g·plant⁻¹), and water retaining agent treatments (10, 20, 30, 40, 50 g·plant⁻¹). Regularly monitor growth indexes such as survival rate, seedling height, ground diameter, crown width, leaf quantity and leaf area to explore the effectiveness of different afforestation measures.

[**Result**] (1) The optimal amount of water needed outside the forest, at the edge of forest and inside the forest decreased in turn, which were 2 000, 1 500 and 1 000 mL·plant⁻¹, respectively. (2) The optimal coverage required outside the forest, at the edge of forest and inside the forest decreased gradually, which were 135, 90 and 45 g·plant⁻¹, respectively. (3) When *Q. liaotungensis* was planted outside the forest, at the edge of forest, and in the forest, the optimal amount of water retaining agent gradually decreased, which were 40, 20 and 10 g·plant⁻¹, respectively. (4) Survival rate and growth status of *Q. liaotungensis* planted at the edge of forest were the best, followed by that inside the forest, and the worst outside the forest. (5) The comprehensive evaluation of entropy weight TOPSIS method showed that 40 g·plant⁻¹ of water retaining agent was used outside the forest, 20 g·plant⁻¹ of water retaining agent was used at the edge of forest, and 45 g·plant⁻¹ of litter was covered inside the forest, which had the best promoting effect on growth of *Q. liaotungensis* seedlings. [**Conclusion**] When using *Q. liaotungensis* to renew and transform *P. tabulaeformis* plantations, adaptive measures should be selected according to the characteristics of habitat. When creating block mixed forests, water retaining agents should be prioritized, and when intercropping between plants or rows, it is advisable to strengthen the coverage of planting holes to improve the survival rate and growth quality of seedlings. [Ch, 3 fig. 8 tab. 38 ref.]

Key words: low-efficiency forest transformation; *Pinus tabulaeformis*; *Quercus liaotungensis*; afforestation measures; growth indexes

黄土高原生态环境脆弱, 是中国水土流失最严重的地区之一^[1-3]。油松 *Pinus tabulaeformis* 因其良好的水土保持作用, 是黄土高原栽植面积最广的树种之一^[4], 发挥着重要的生态效能。但造林初期为了尽早实现郁闭, 发挥防护效益, 存在种植密度过大、树种单一、后期管护粗放等问题, 导致黄土高原现有油松人工林多为纯林, 林下植被稀疏、多样性差, 低质低效林普遍存在^[5]。种间关系协调的混交林生态系统具有更优的生态与生产优势^[6-7]。辽东栎 *Quercus liaotungensi* 耐旱耐瘠薄, 生态适应性好, 与油松形成的松栎林广泛分布于黄土区, 具有较强的生态稳定性和适应能力^[8], 利用辽东栎对油松人工纯林进行改造符合“适地适树”的原则, 是优化林分结构、提高生态服务功能, 促进近自然演替的必然途径^[9]。

在相对干旱的黄土高原地区, 水分亏缺是限制林木存活与生长状态的关键^[10-11]。造林时常将浇水处理作为缓解水分胁迫、确保苗木存活的重要措施, 浇水量对苗木存活与生长的影响已成为研究热点^[12]。覆盖措施通过抑制水分蒸发、优化苗木生存环境而备受关注^[13]。保水剂作为能有效缓解间歇性水分胁迫的材料, 广泛用于干旱地区的植被恢复^[14]。但需要明确浇水、覆盖及保水剂用量, 才能提高苗木栽植成活率与生长质量, 实现油松人工林近自然改造及提质增效。油松人工林内部存在显著的空间异质性, 不同林分位置因其林冠郁闭度差异和森林边缘效应, 形成了具有典型环境梯度的微生境^[15], 其光照、水分等主要生态因子会对辽东栎苗木的存活与生长产生重要影响^[16]。林外虽光照充足, 但面临最严重的风蚀和土壤水分蒸发, 水分胁迫风险最高; 林缘则受强烈的边缘效应支配, 其光照、温湿度、风速及土壤水分呈现短距离剧变, 是环境胁迫与干扰的敏感区; 相比之下林内光照显著减弱, 但水分条件相对较好, 林外、林缘和林内代表了从强光-强旱到弱光-弱旱的连续环境梯度^[17-18]。为此, 在油松人工林林外、林缘和林内开展不同造林措施试验, 探究其对辽东栎苗木存活与生长的影响, 可为低质低效油松人工林改造中优化不同林分位置的造林措施提供科学支撑。

本研究以山西吉县蔡家川流域的油松人工林为研究对象, 在林外、林缘、林内, 分别设置浇水、覆

盖和保水剂 3 种典型造林措施的对比试验，探究其对辽东栎苗木存活与生长的影响，明确不同造林措施对辽东栎苗木生长发育的调节作用，确定最优造林措施，为低效油松人工林的近自然改造和功能提升提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站所在地蔡家川流域。蔡家川流域面积为 39.33 km²，地理位置为 110°39'45"E~110°47'45"E，36°14'27"N~36°18'23"N，海拔为 895~1 580 m，黄土母质；属于暖温带大陆性气候，年平均气温为 10 ℃，平均无霜期为 196 d，年平均降水量为 575.9 mm，多年平均蒸发量为 1 687 mm。20 世纪 90 年代为改善生态环境和防治水土流失，流域内营造了大面积油松、刺槐 *Robinia pseudoacacia*、侧柏 *Platycladus orientalis* 等水土保持林^[19]。

1.2 试验设计

于 2024 年 4 月，在研究区油松人工林林外、林缘、林内分别设置 1 个 20 m×20 m 的样地，林缘和林内的林分生长状况如表 1 所示。每个样地均设置 15 种处理：无处理 (ck)、浇水处理 (500、1 000、1 500、2 000 mL·株⁻¹)、覆盖处理 (覆盖地膜、覆盖凋落物 45、90、135、180 g·株⁻¹)、保水剂处理 (10、20、30、40、50 g·株⁻¹)。每种处理均栽植 20 株 (5 行×4 列) 规格相同的 1 年生容器苗，3 个样地共计 900 株。

1.3 测定方法

在 2024 年 4 月栽植前，分别在油松人工林林外、林缘和林内各挖 50 cm 深的土壤剖面，调查容重、孔隙状况等土壤物理性质 (表 2)。在 2024 年 9 月，调查苗木成活率，并使用钢卷尺和游标卡尺测量各处理下辽东栎苗木的存活株数、苗高、地径、冠幅、叶片数量及单叶面积。

表 1 油松人工林样地基本概况

位置	海拔/m	坡度/(°)	坡向	郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m
林缘	1 070	18	东南	0.57	8.24	11.70	3.68
林内	1 071	25	东南	0.89	8.72	10.39	3.33

表 2 油松人工林不同林分位置的土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties of *P. tabulaeformis* plantations in different stand positions

土层深度/cm	林外				林缘				林内			
	容重/(g·cm ⁻³)	含水率/%	最大持水量/%	毛管持水量%	容重/(g·cm ⁻³)	含水率/%	最大持水量/%	毛管持水量%	容重/(g·cm ⁻³)	含水率/%	最大持水量/%	毛管持水量%
0~10	1.12	7.97	49.18	42.32	1.04	8.17	54.64	47.73	1.05	8.29	54.13	45.31
10~20	1.13	7.99	48.11	41.74	1.08	8.28	51.04	42.58	1.01	8.40	54.88	49.02
20~30	1.16	7.99	46.42	42.81	1.18	8.37	45.26	41.47	1.10	8.92	47.80	43.98
30~40	1.16	8.18	45.79	42.17	1.14	8.70	46.27	43.28	1.18	9.64	42.75	39.97
40~50	1.19	8.20	44.86	41.63	1.19	8.99	43.80	40.46	1.20	9.85	41.54	39.17

1.4 数据分析方法

使用 Excel 2016 进行处理和计算，数据为平均值±标准误。使用 SPSS 26.0 进行统计分析，采用单因素方差分析和 Duncan 法对不同处理措施下辽东栎苗木的各项生长指标进行差异性分析和多重比较，在 $\alpha=0.05$ 水平上检验差异显著性。使用 Origin 2024 绘制图像。使用熵权-TOPSIS 法对不同措施的施用效果进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 浇水措施对辽东栎苗木生长的影响

不同林分位置的辽东栎苗木各浇水措施下存活率及各生长指标的均值，如表 3 所示。林缘的辽东栎苗木总体生长状况最佳，林内次之，林外最差。其中存活率、苗高增量、地径增量、叶片数量均在林缘处最大，分别为 80.00%、9.90 cm、3.90 mm、43.63 片。冠幅在林缘处最大为 27.48 cm，在林内处最小

表3 浇水措施对不同林分位置辽东栎苗木生长的影响

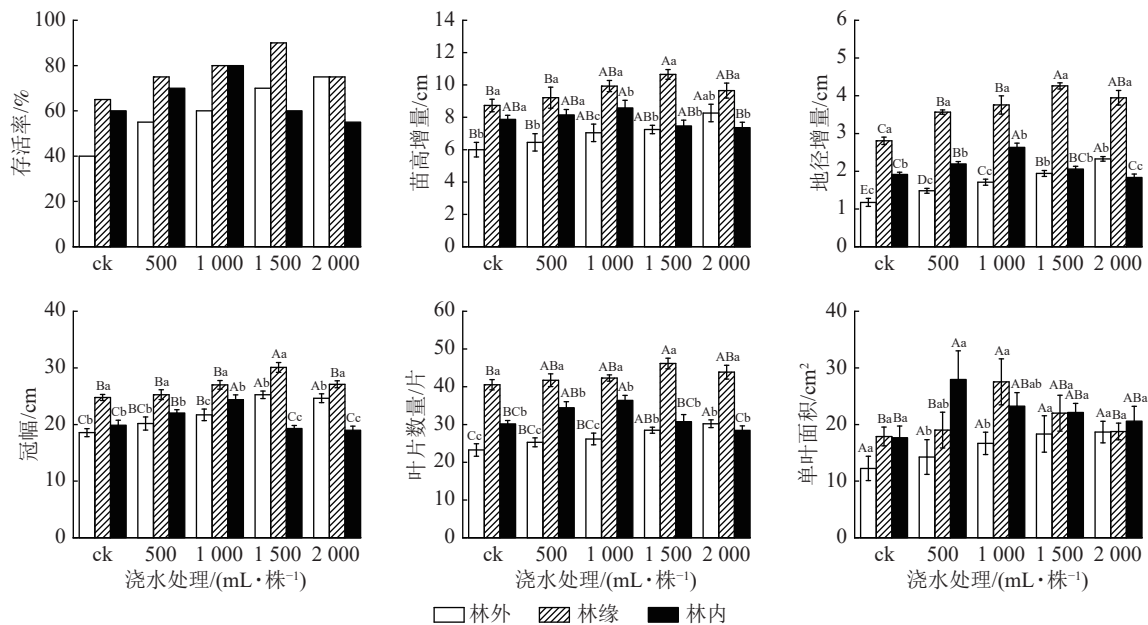
Table 3 Effects of watering measures on the growth of *Q. liaotungensis* seedlings in different stand positions

位置	存活率/%	苗高增量/cm	地径增量/mm	冠幅/cm	叶片数量/片	单叶面积/cm ²
林外	65.00%	7.33±0.25 b	1.90±0.06 c	23.18±0.52 b	27.77±0.62 c	16.89±1.37 b
林缘	80.00%	9.90±0.23 a	3.90±0.08 a	27.48±0.45 a	43.63±0.75 a	21.57±1.53 a
林内	66.25%	7.96±0.20 b	2.22±0.06 b	21.49±0.46 c	32.94±0.85 b	22.65±1.48 a

说明：不同小写字母表示同一指标不同生境间差异显著 ($P < 0.05$)。

为 21.49 cm，且 3 种生境下均差异显著 ($P < 0.05$)。单叶面积在林内处最大为 22.65 cm²，在林外处最小为 16.89 cm²，且与林缘和林内均差异显著 ($P < 0.05$)。

对不同浇水用量下辽东栎苗木存活率及生长指标进行统计，结果如图 1 所示。在林外条件下，辽东栎苗木的存活率、苗高增量、地径增量、叶片数量和单叶面积均随着浇水量的增加而增加，在浇水量为 2 000 mL·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 分别提高了 87.5%、37.8%、97.5%、29.9%、52.5%。冠幅则在浇水量为 1 500 mL·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 显著提高了 36.0% ($P < 0.05$)。可见在油松人工林林外栽植辽东栎苗木时，浇水对其存活与生长具有重要影响。



不同大写字母表示同一生境不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)；不同小写字母表示同一处理不同生境间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 不同浇水处理对辽东栎存活率和各生长指标的影响

Figure 1 Effects of different irrigation rates on the survival rate and growth indexes of *Q. liaotungensis* seedlings

在林缘条件下，辽东栎苗木的存活率和各生长指标均随着浇水量的增加呈现先增加后降低的趋势。单叶面积在浇水用量为 1 000 mL·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 显著提高了 53.9% ($P < 0.05$)。其余指标均在浇水用量为 1 500 mL·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 分别提高了 38.5%、22.0%、51.6%、21.4%、13.9%。在浇水用量为 2 000 mL·株⁻¹ 时，所有指标均出现不同程度的下降，可见在油松人工林林缘栽植辽东栎苗木时，适宜的浇水用量对其存活和生长有促进作用。

在林内条件下，辽东栎苗木的存活率和各生长指标均随着浇水量的增加呈现先增加后降低的趋势。单叶面积在浇水用量为 500 mL·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 显著提高了 58.1% ($P < 0.05$)。其余生长指标均在浇水用量为 1 000 mL·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 分别提高了 33.3%、8.9%、37.0%、22.6%、20.6%，且地径增量、冠幅和叶片数量与 ck 差异显著 ($P < 0.05$)。在浇水用量为 2 000 mL·株⁻¹ 时多数指标都低于 ck，可见在油松人工林林内栽植辽东栎苗木时，浇水用量过多会限制其存活和生长状况。

2.2 覆盖措施对辽东栎苗木生长的影响

不同林分位置的辽东栎苗木各覆盖措施下存活率及各生长指标的均值，如表 4 所示。林缘的辽东栎苗木总体生长状况最佳，林内次之，林外最差。辽东栎苗木的存活率、苗高增量、地径增量、叶片数量

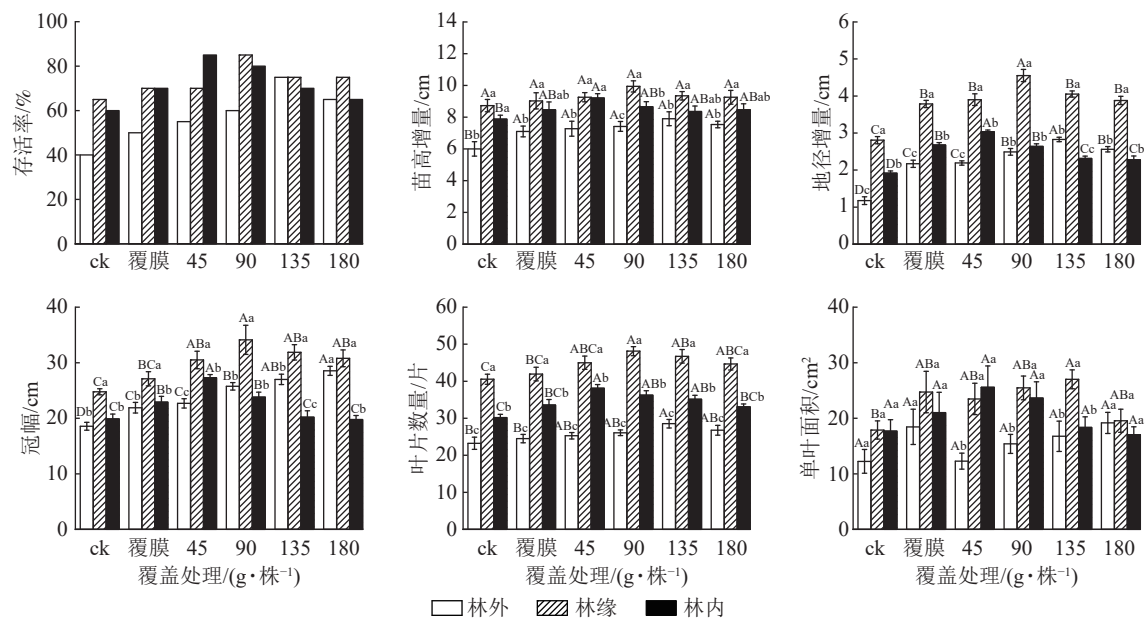
和单叶面积均在林缘处最大，分别为 75.00%、9.39 cm、4.05 mm、45.41 cm、24.03 cm²，在林外处最小。冠幅在林缘处最大为 31.02 cm，在林内处最小为 23.04 cm，且 3 种生境下均差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 覆盖措施对不同林分位置辽东栎苗木生长的影响

位置	存活率/%	苗高增量/cm	地径增量/mm	冠幅/cm	叶片数量/片	单叶面积/cm ²
林外	61.00%	7.48±0.16 c	2.48±0.05 b	25.47±0.49 b	26.43±0.51 c	15.92±1.05 b
林缘	75.00%	9.39±0.17 a	4.05±0.07 a	31.02±0.84 a	45.41±0.76 a	24.03±1.21 a
林内	74.00%	8.66±0.16 b	2.61±0.04 b	23.04±0.51 c	35.41±0.54 b	21.21±1.35 a

说明：不同小写字母表示同一指标不同生境间差异显著 ($P < 0.05$)。

对不同覆盖措施及用量下辽东栎苗木存活率及生长指标进行统计，发现其存活率、苗高增量、地径增量、冠幅和叶片数量均随着凋落物用量的增加呈现先增后减的趋势 (图 2)。在林外条件下，辽东栎苗木的存活率、苗高增量、地径增量、冠幅和叶片数量均在覆盖量为 135 g·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 分别提高了 87.5%、31.67%、139.8%、45.4%、22.7%。单叶面积则在覆盖量为 180 g·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 提高了 56.6%。可见在油松人工林林外栽植辽东栎苗木时，凋落物覆盖量对其存活与生长具有重要影响。



不同大写字母表示同一生境不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)；不同小写字母表示同一处理不同生境间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同覆盖处理及覆盖量对辽东栎苗木存活率和各生长指标的影响

Figure 2 Effects of different mulching measures and amounts on the survival rate and growth indexes of *Q. liaotungensis*

在林缘条件下，辽东栎苗木的存活率、苗高增量、地径增量、冠幅和叶片数量均在覆盖量为 90 g·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 分别提高了 30.8%、13.9%、61.9%、37.7%、18.7%，且地径增量、冠幅和叶片数量与 ck 间差异显著 ($P < 0.05$)，但苗高增量在各处理间差异均不显著 ($P > 0.05$)。单叶面积则在覆盖量为 135 g·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 显著提高了 51.0% ($P < 0.05$)。可见在油松人工林林缘栽植辽东栎苗木时，适宜的凋落物覆盖量对其存活和生长有促进作用。

在林内条件下，辽东栎苗木的存活率和各生长指标均在覆盖量为 45 g·株⁻¹ 时达到最大，较 ck 分别提高了 41.7%、16.9%、58.3%、37.3%、26.4%、44.6%。当凋落物覆盖量超过 45 g·株⁻¹ 后，各生长指标均开始下降，且冠幅和单叶面积在 180 g·株⁻¹ 时低于 ck，可见在油松人工林林内栽植辽东栎苗木时，凋落物覆盖量过多会限制其冠幅和叶面积生长。

2.3 保水剂措施对辽东栎苗木生长的影响

不同林分位置的辽东栎苗木各保水剂措施下存活率及各生长指标的均值，如表 5 所示。林缘的辽东

栎苗木总体生长状况最佳, 林内次之, 林外最差。其中存活率和各生长指标均在林缘处最大, 分别为 80.00%、9.64 cm、3.88 mm、28.97 cm、48.05 片、21.26 cm²。存活率、苗高增量和冠幅均在林内处最小, 分别为 70.00%、8.06 cm、24.79 cm。地径增量、叶片数量和单叶面积均在林外处最小, 分别为 2.15 mm、29.84 片、16.78 cm², 且均与林缘差异显著 ($P < 0.05$)。

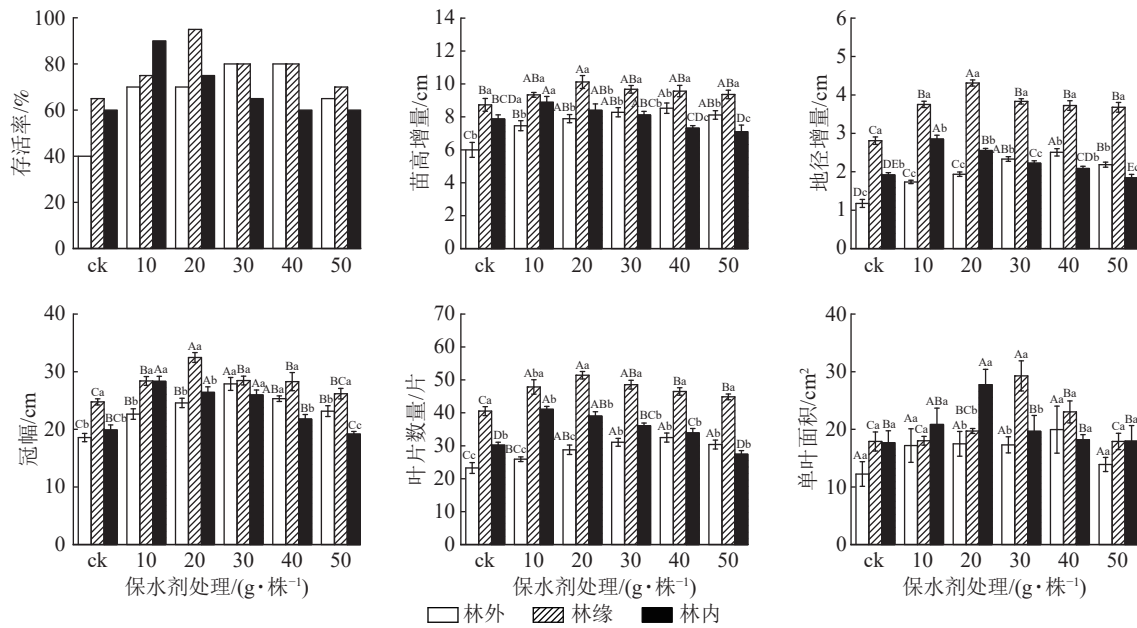
表 5 保水剂措施对不同林分位置辽东栎苗木生长的影响

Table 5 Effects of water retaining agent on the growth of *Q. liaotungensis* seedlings in different stand positions

位置	存活率/%	苗高增量/cm	地径增量/mm	冠幅/cm	叶片数量/片	单叶面积/cm ²
林外	73.00%	8.08±0.13 b	2.15±0.04 c	24.84±0.44 b	29.84±0.60 c	16.78±1.04 b
林缘	80.00%	9.64±0.14 a	3.88±0.05 a	28.97±0.50 a	48.05±0.66 a	21.26±1.05 a
林内	70.00%	8.06±0.17 b	2.37±0.06 b	24.79±0.54 b	36.13±0.74 b	21.10±1.28 a

说明: 不同小写字母表示同一指标不同生境间差异显著 ($P < 0.05$)。

对不同保水剂用量下辽东栎苗木存活率及生长指标进行统计, 发现其存活率和各生长指标均随着保水剂用量的增加呈现先增后减的趋势 (图 3)。在林外条件下, 辽东栎苗木的存活率在保水剂用量为 30 和 40 g·株⁻¹ 时达到最大, 较 ck 提高了 100%; 冠幅在保水剂用量为 30 g·株⁻¹ 时达到最大, 较 ck 显著提高了 50.2% ($P < 0.05$), 其余生长指标则在保水剂用量为 40 g·株⁻¹ 时达到最大, 较 ck 分别提高了 42.2%、112.7%、33.9%、63.0%, 可见在油松人工林林外栽植辽东栎苗木时, 保水剂用量对其存活与生长具有重要影响。



不同大写字母表示同一生境不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一处理不同生境间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同保水剂处理对辽东栎苗木存活率和各生长指标的影响

Figure 3 Effects of different dosage of water retaining agent on the survival rate and growth indexes of *Q. liaotungensis*

在林缘条件下, 辽东栎苗木处理组的存活率和各生长指标都优于 ck。单叶面积在保水剂用量为 30 g·株⁻¹ 时达到最大, 较 ck 显著提高了 63.6% ($P < 0.05$), 其余生长指标在保水剂用量为 20 g·株⁻¹ 时达到最大, 较 ck 分别提高了 46.2%、15.9%、53.4%、31.1%、26.9%。可见在油松人工林林缘栽植辽东栎苗木时, 适宜的保水剂用量对其存活和生长有促进作用。

在林内条件下, 辽东栎苗木的单叶面积在保水剂用量为 20 g·株⁻¹ 时达到最大, 较 ck 显著提高了 56.9% ($P < 0.05$), 其余生长指标均在保水剂用量为 10 g·株⁻¹ 时达到最大, 较 ck 分别提高了 50.0%、12.8%、48.4%、42.5%、36.1%。在保水剂用量为 50 g·株⁻¹ 时, 除存活率和单叶面积外其余生长指标均低于 ck, 可见在油松人工林林内栽植辽东栎苗木时, 保水剂用量过多会限制其生长状况。

2.4 辽东栎苗木各造林措施的综合评价

使用熵权-TOPSIS 法对不同措施的施用效果进行综合评价。熵权法赋权是依据不同生境下辽东栎苗木各项指标值的变异程度确定其权重值，变异程度越大，权重值也越大(表 6)。TOPSIS 法排序是找出评价方案中的最优和最劣方案，从而获得各评价对象与最优方案的相对贴适度 C ，以此作为评价优劣的依据^[20-21]。结果显示：林外、林缘、林内所需的最优浇水量依次减少，分别为 2 000、1 500 和 1 000 mL·株⁻¹；凋落物最优覆盖量逐渐递减，分别为 135、90 和 45 g·株⁻¹；保水剂最佳使用量逐渐递减，分别为 40、20 和 10 g·株⁻¹。在 15 种处理中，林外使用保水剂 40 g·株⁻¹、林缘使用保水剂 20 g·株⁻¹和林内覆盖凋落物 45 g·株⁻¹对辽东栎苗木生长效果的促进作用最佳(表 7)。各生境条件下，保水剂和覆盖处理的效果均优于浇水处理和 ck(表 8)。

3 讨论

3.1 浇水措施对辽东栎苗木生长的影响

在降水量低于潜在蒸发量的晋西黄土区，水分供应强度是决定造林成败的关键。本研究中，在相同浇水措施下，林缘生境的辽东栎幼苗展现出最优的综合生长趋势，其表现显著优于林外和林内。这表明林缘相对均衡的光照与湿度组合，有效平衡了林外开阔地过强的光照胁迫和水分蒸发竞争，又规避了林内可能存在的过度遮荫和光强限制^[22-23]，水分的供应则进一步强化了林缘生境在水分利用效率上的优势。

通过分析不同浇水用量对辽东栎苗木存活率和生长指标的影响，发现在林外生境中，除冠幅外其余生长指标及存活率均随浇水量增加呈现线性增长趋势。随着浇水用量增加，地径等生长指标均逐渐增大，这表明在林外极端干旱环境下，增加水分供给是直接缓解水分限制、促进苗木生长发育的有效手段^[24]。林缘生境在 1 500 mL·株⁻¹浇水量时，除单叶面积外其余生长指标均达到最优值，而 2 000 mL·株⁻¹时出现不同程度的下降，这表明确定林缘最适浇水量，既能促进辽东栎苗木地上部分的生长，又可避免水分过量造成的负面影响^[25]。林内生境在 1 000 mL·株⁻¹浇水量时，各项生长指标均达到最大值，而 2 000 mL·株⁻¹时除单叶面积外其余生长指标均低于 ck。这表明在此环境下，适宜的浇水量即可满足需求并有效促进苗木生长，水分过多不仅不利于苗木根部吸收，还会造成水资源浪费^[26]。

表 6 辽东栎苗木各指标权重值

Table 6 Weight values of each index of *Q. liaotungensis* seedlings

指标	权重			
	林外	林缘	林内	综合
存活率	0.20	0.16	0.17	0.11
苗高增量	0.19	0.17	0.22	0.07
地径增量	0.18	0.28	0.14	0.43
冠幅	0.17	0.16	0.10	0.08
叶片数量	0.12	0.17	0.23	0.19
单叶面积	0.15	0.06	0.14	0.12

表 7 TOPSIS 法对 15 种处理的综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of 15 treatment measures by TOPSIS method

处理	林外		林缘		林内	
	相对贴适度 C	排序	相对贴适度 C	排序	相对贴适度 C	排序
对照(ck)	0.00	15	0.00	15	0.22	13
浇水 500 mL	0.25	14	0.31	14	0.51	7
浇水 1 000 mL	0.42	12	0.46	11	0.66	5
浇水 1 500 mL	0.61	7	0.73	3	0.23	12
浇水 2 000 mL	0.77	4	0.47	10	0.13	14
覆膜	0.44	11	0.36	13	0.52	6
凋落物 45 g	0.41	13	0.47	8	0.85	1
凋落物 90 g	0.57	9	0.79	2	0.67	4
凋落物 135 g	0.77	3	0.57	4	0.46	9
凋落物 180 g	0.70	5	0.48	7	0.40	10
保水剂 10 g	0.53	10	0.47	9	0.79	2
保水剂 20 g	0.65	6	0.82	1	0.47	8
保水剂 30 g	0.82	2	0.56	5	0.71	3
保水剂 40 g	0.86	1	0.49	6	0.27	11
保水剂 50 g	0.59	8	0.37	12	0.06	15

表 8 TOPSIS 法对 3 种造林措施的综合评价

Table 8 Comprehensive evaluation of 3 afforestation measures by TOPSIS method

环境-造林措施	相对贴适度 C	综合排序	环境-造林措施	相对贴适度 C	综合排序	环境-造林措施	相对贴适度 C	综合排序
林缘-覆盖	0.97	1	林内-覆盖	0.51	5	林外-保水剂	0.35	9
林缘-保水剂	0.93	2	林内-保水剂	0.44	6	林内-ck	0.27	10
林缘-浇水	0.92	3	林外-覆盖	0.43	7	林外-浇水	0.26	11
林缘-ck	0.58	4	林内-浇水	0.39	8	林外-ck	0	12

3.2 覆盖措施对辽东栎苗木生长的影响

在降水量低于潜在蒸发量的晋西黄土区,水分高效利用是造林成功的关键。凋落物由生物组分产生并归还到林地表面,是森林生态系统的重要组成部分,对森林天然更新早期阶段有重要影响^[27]。本研究发现:在相同的覆盖措施下林缘生境的辽东栎苗木生长状况最优,且单叶面积在覆盖措施下的优势较浇水措施更为突出。这表明林缘相对均衡的光热和水分环境天然削弱了地表蒸发耗水^[28],而凋落物可以阻隔土壤水分蒸发和减缓地温剧烈波动,进一步强化了林缘的水分保存能力^[29],从而显著促进了对水分敏感的叶面积扩增。

在探究不同覆盖措施及用量对辽东栎苗木生长的影响中,发现各生境中多数生长指标随着凋落物用量的增加呈现先增后减的趋势。在林外生境中,当凋落物覆盖量达到 $135 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,除单叶面积外其余生长指标和存活率达到最大值,这一最优覆盖量有效缓解了林外过度蒸发导致的水分亏缺。然而,当覆盖量超过 $135 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,大多数生长指标开始出现不同程度的下降。这可能是因为凋落物自身吸持水分或阻碍降水入渗,反而不利于土壤水分补给,导致苗木生长指标下降^[30]。在林缘生境中,当凋落物覆盖量达到 $90 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,除单叶面积外其余生长指标和存活率达到最大值,这种情况的出现可能与林缘的光照条件有关,较林外减弱的光照强度降低了地表蒸发,使得较薄覆盖层即可维持土壤湿度平衡^[31]。在林内生境中,当凋落物覆盖量达到 $45 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,所有生长指标均达到最大值,这说明薄层覆盖有助于维持浅层土壤湿度,从而保障辽东栎苗木在林内弱光环境下光合作用的持续进行。但是当覆盖量达到 $180 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,冠幅和单叶面积低于 ck,这可能是因为林内高郁闭环境下,过厚的油松凋落物层严重阻碍了土壤与大气间的气体交换,并显著降低了地表及浅层土壤温度,共同抑制了辽东栎苗木地上部分的冠幅扩张和叶片发育^[32]。

3.3 保水剂措施对辽东栎苗木生长的影响

在降水量低于潜在蒸发量的晋西黄土区,水分亏缺是制约造林成功的关键。保水剂是一种吸水能力特别强的功能高分子材料,且具有反复吸水的功能,可以减少水分的深层渗漏和土壤养分流失,提高水分利用率^[33]。本研究中,林缘在相同的保水剂措施下表现最优,说明林缘相对均衡的光热和水分条件,有效缓解了水分快速散失,其本身水分利用效率较高。保水剂则进一步强化了该位置的保水能力,将有限的水资源更高效地转化为苗木可利用的有效水,从而极大促进了辽东栎苗木的生长发育^[34]。

在不同保水剂措施下,发现各生境中所有生长指标均随着保水剂用量的增加呈现先增后减的趋势。在林外极端干旱的条件下,保水剂用量达到 $40 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,除冠幅外其余生长指标均达到最大值,表明适量的保水剂能够有效缓解土壤水分的剧烈波动与过度蒸散,为苗木根系提供稳定的水分供应,从而促进苗木生长^[35-36]。在林缘生境中,保水剂用量为 $20 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,除单叶面积外其余生长指标达到最大值,这可能是因为林缘本身较林外显著降低的蒸发量和相对稳定的水分环境,使得中等剂量的保水剂足以维持苗木根部水分的稳定与充足^[37]。在林内生境中,保水剂用量为 $10 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,除单叶面积外其余生长指标达到最大值,当用量为 $50 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,苗高增量、地径增量、冠幅和叶片数量均低于 ck。这表明极低的保水剂用量就可以促进辽东栎苗木的生长发育,一旦用量过高其极强的持水性在蒸发微弱的环境下会加剧土壤孔隙水饱和和状态,且吸水膨胀的凝胶颗粒会显著降低土壤孔隙度,增加土壤容重,最终抑制辽东栎苗木的生长发育^[38]。

综合浇水、覆盖和保水剂 3 种措施分析,各生境条件下保水剂和覆盖处理的效果均优于浇水处理和 ck,其中林缘环境对辽东栎苗木生长表现出显著的促进作用,最大程度地满足了幼苗生长和扩冠的需求。后续研究可进一步探索多措施联合应用在不同环境中的协同效应,为区域生态修复提供更精准的技术方案。

4 结论

3 种环境条件下林缘生长的辽东栎苗木存活率及各项生长指标均表现最优;各生境条件下,保水剂和覆盖处理的效果均优于浇水处理和 ck;在干旱胁迫区应优先选用保水剂改善水分胁迫,在过渡带需结合覆盖措施优化土壤微环境,而在郁闭林内则应强化覆盖措施的水分保存功能。因此在黄土区利用辽东栎对油松人工林进行更新改造时,需根据生境特点选择适配性措施,在营造块状混交林时,宜优先选用保水剂,株间混交或行间混交时宜加强栽植穴的覆盖,以提升苗木成活率。

5 参考文献

- [1] SUN Ruoxiu, MA Li, ZHANG Shouhong, *et al.* Study on landscape patches influencing hillslope erosion processes and flow hydrodynamics in the Loess Plateau of western Shanxi Province, China[J]. *Water*, 2020, **12**(11): 3201. DOI: [10.3390/w12113201](https://doi.org/10.3390/w12113201).
- [2] CUI Yanhong, BI Huaxing, LIU Shuqin, *et al.* Developing additive systems of biomass equations for *Robinia pseudoacacia* L. in the region of Loess Plateau of western Shanxi Province, China[J]. *Forests*, 2020, **11**(12): 1332. DOI: [10.3390/f11121332](https://doi.org/10.3390/f11121332).
- [3] MU Xingmin, ZHANG Xiuqin, SHAO Hongbo, *et al.* Dynamic changes of sediment discharge and the influencing factors in the Yellow River, China, for the recent 90 years[J]. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 2012, **40**(3): 303-309. DOI: [10.1002/clen.201000319](https://doi.org/10.1002/clen.201000319).
- [4] YANG Hang, SONG Yahui, PANG Yue, *et al.* Driving factors of Chinese pine population distribution in the ridge habitats of the southern slope of the mid-Qinling Mountains, China[J]. *Forests*, 2023, **14**(11): 2252. DOI: [10.3390/f14112252](https://doi.org/10.3390/f14112252).
- [5] 贾亚捷, 杨建英, 张建军, 等. 晋西黄土区林分密度对油松人工林生物量及土壤理化性质的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(6): 1211-1221. JIA Yajie, YANG Jianying, ZHANG Jianjun, *et al.* Effects of stand density on biomass and soil physico-chemical properties of *Pinus tabulaeformis* forest in the loess area of western Shanxi[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(6): 1211-1221. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20240571](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20240571).
- [6] 毛军, 王立平, 高永龙, 等. 北京八达岭林场人工林生态服务功能评估[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2024, **60**(2): 224-232. MAO Jun, WANG Liping, GAO Yonglong, *et al.* Evaluating plantation ecosystem services at Beijing Badaling National Forest Farm[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2024, **60**(2): 224-232. DOI: [10.12202/j.0476-0301.2023064](https://doi.org/10.12202/j.0476-0301.2023064).
- [7] 余明, 王卓敏, 薛立. 杉木林土壤化学性质对林分改造及不同坡位的响应[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, **39**(6): 38-44. YU Ming, WANG Zhuomin, XUE Li. Effects of stand improvement and slope position on soil chemical properties in *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, **39**(6): 38-44. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.06.006](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.06.006).
- [8] 陈天成, 李新平, 郝向春, 等. 山西省辽东栎单株木生长模型研究[J]. *林业建设*, 2022, **40**(2): 36-43. CHEN Tiancheng, LI Xinping, HAO Xiangchun, *et al.* Growth model of individual *Quercus wutaishansea* Mary in Shanxi Province[J]. *Forestry Construction*, 2022, **40**(2): 36-43.
- [9] 朱松林. 吕梁山油松和辽东栎人工混交造林技术[J]. *山西林业科技*, 2016, **45**(3): 44-45. ZHU Songlin. Artificial mixed afforestation technology of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus liaotungensis* in Luliang Mountain[J]. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2016, **45**(3): 44-45. DOI: [10.3969/j.issn.1007-726X.2016.03.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-726X.2016.03.015).
- [10] 孙恒, 张燕平, 吴疆翀, 等. 干旱胁迫和遮光对印楝幼苗生长及碳氮代谢的影响[J]. *西北植物学报*, 2020, **40**(3): 463-470. SUN Heng, ZHANG Yanping, WU Jiangchong, *et al.* Effect of drought stress and shading on growth and carbon-nitrogen metabolism of *Azadirachta indica* seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(3): 463-470. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2020.03.0463](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2020.03.0463).
- [11] CHEN Lixin, ZHANG Zhiqiang, ZHA Tonggang, *et al.* Soil water affects transpiration response to rainfall and vapor pressure deficit in poplar plantation[J]. *New Forests*, 2014, **45**(2): 235-250. DOI: [10.1007/s11056-014-9405-0](https://doi.org/10.1007/s11056-014-9405-0).
- [12] 韩志平, 张海霞, 张巽, 等. 水分胁迫对黍子幼苗生长和生理特性的影响[J]. *中国农业气象*, 2019, **40**(8): 502-511. HAN Zhiping, ZHANG Haixia, ZHANG Xun, *et al.* Effects of water stress on growth and physiological properties of millet seedlings[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, **40**(8): 502-511. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6362.2019.08.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6362.2019.08.003).
- [13] 孔凯凯, 师戈里, 韩炜, 等. 不同地表覆盖方式对胡杨幼苗光合特性的影响及评价[J]. *东北林业大学学报*, 2020, **48**(3): 35-40. KONG Kaikai, SHI Geli, HAN Wei, *et al.* Effects of different land cover on photosynthetic characteristics of *Populus euphratica* seedlings and evaluation[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, **48**(3): 35-40. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2020.03.007](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2020.03.007).
- [14] 李紫帅, 张喜年, 柳文杰, 等. 保水剂对砂生槐幼苗生长及生理的影响[J]. *北方园艺*, 2023(5): 53-60. LI Zishuai, ZHANG Xinian, LIU Wenjie, *et al.* Effects of water retainer on the growth and physiology of *Sophora moorcroftiana*[J]. *Northern Horticulture*, 2023(5): 53-60. DOI: [10.11937/bfy.20222520](https://doi.org/10.11937/bfy.20222520).

- [15] 李晖, 杨华, 谢榕. 长白山云冷杉林林隙冠层特征及与幼苗幼树的关系[J]. *北京林业大学学报*, 2021, **43**(7): 54–62. LI Hui, YANG Hua, XIE Rong. Canopy characteristics in gaps and its relationship with seedlings and saplings in a spruce-fir forest in the Changbai Mountain area of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, **43**(7): 54–62. DOI: [10.12171/j.1000-1522.20200131](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200131).
- [16] 刘亚栋, 王晓霞, 和璐璐, 等. 北京地区油松人工林不同演替类型空间结构对林下植被及土壤的影响[J]. *生态学报*, 2023, **43**(5): 1959–1970. LIU Yadong, WANG Xiaoxia, HE Lulu, *et al.* Effects of spatial structure on understory vegetation and soil properties in *Pinus tabulaeformis* plantation of different succession types in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(5): 1959–1970. DOI: [10.5846/stxb202112143542](https://doi.org/10.5846/stxb202112143542).
- [17] BANBURY MORGAN R, JUCKER T. A unifying framework for understanding how edge effects reshape the structure, composition and function of forests[J]. *New Phytologist*, 2025, **248**(2): 529–541. DOI: [10.1111/nph.70457](https://doi.org/10.1111/nph.70457).
- [18] MEEUSSEN C, GOVAERT S, VANNESTE T, *et al.* Microclimatic edge-to-interior gradients of European deciduous forests[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, **311**: 108699. DOI: [10.1016/j.agrformet.2021.108699](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108699).
- [19] 胡亚伟, 施政乐, 刘畅, 等. 晋西黄土区刺槐林密度对林下植物多样性及土壤理化性质的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(9): 2072–2080. HU Yawei, SHI Zhengle, LIU Chang, *et al.* Effects of stand densities on understory vegetation diversity and soil physicochemical properties of *Robinia pseudoacacia* forest in loess region of western Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(9): 2072–2080. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202309.014](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202309.014).
- [20] 冷仙, 曾源, 周键, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的西南自然保护区景观保护成效评价[J]. *生态学报*, 2023, **43**(3): 1040–1053. LENG Xian, ZENG Yuan, ZHOU Jian, *et al.* Landscape conservation effectiveness assessment of nature reserves based on entropy weight-TOPSIS in Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(3): 1040–1053. DOI: [10.5846/stxb202110112860](https://doi.org/10.5846/stxb202110112860).
- [21] 雷勋平, 邱广华. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 314–323. LEI Xunping, QIU Guanghua. Empirical study about the carrying capacity evaluation of regional resources and environment based on entropy-weight TOPSIS model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(1): 314–323. DOI: [10.13671/j.hjkxxb.2015.0580](https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2015.0580).
- [22] 高贤明, 杜晓军, 王中磊. 北京东灵山区两种生境条件下辽东栎幼苗补充与建立的比较[J]. *植物生态学报*, 2003, **27**(3): 404–411. GAO Xianming, DU Xiaojun, WANG Zhonglei. Comparison of seedling recruitment and establishment of *Quercus wutaishanica* in two habitats in Dongling mountainous area, Beijing[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**(3): 404–411.
- [23] 李罡, 张文辉, 于世川, 等. 辽东栎林内不同小生境下幼树植冠构型分析[J]. *西北植物学报*, 2016, **36**(3): 588–595. LI Gang, ZHANG Wenhui, YU Shichuan, *et al.* Architectural analysis of crown geometry of saplings of *Quercus liaotungensis* forest in different habitats[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, **36**(3): 588–595. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2016.03.0588](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2016.03.0588).
- [24] 闫兴富, 邓晓娟, 王静, 等. 种子大小和干旱胁迫对辽东栎幼苗生长和生理特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(10): 3331–3339. YAN Xingfu, DENG Xiaojuan, WANG Jing, *et al.* Effects of seed size and drought stress on the growth and physiological characteristics of *Quercus wutaishanica* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(10): 3331–3339. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202010.006](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202010.006).
- [25] BYAMBADORJ S O, PARK B B, HERNANDEZ J O, *et al.* Optimal irrigation regime for woody species potentially suitable for effective and sustainable afforestation in the desert region of Mongolia[J]. *Land*, 2021, **10**(2): 212. DOI: [10.3390/land10020212](https://doi.org/10.3390/land10020212).
- [26] 王晓荣, 胡兴宜, 唐万鹏, 等. 模拟长江滩地水淹胁迫对 3 种树种幼苗生理生态特征的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2015, **43**(1): 45–49. WANG Xiaorong, HU Xingyi, TANG Wanpeng, *et al.* Effects of waterlogging stress on ecophysiological characteristics of tree seedlings of three species in flooding land of Yangtze River[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, **43**(1): 45–49. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.20141226.020](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.20141226.020).
- [27] 姚佳峰, 郭钰, 董媛, 等. 枯落物厚度对华北落叶松人工林天然更新的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, **35**(4): 1025–1032. YAO Jiafeng, GUO Yu, DONG Yuan, *et al.* Effects of litter thickness on natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, **35**(4): 1025–1032. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202404.004](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202404.004).
- [28] ÖZTÜRK M, BOLAT İ, ŞENSOY H, *et al.* Comparison of canopy-vegetation parameters from interior parts to edge of

- multi-story grove forest patch and meadow field within rural landscape for soil temperature and moisture[J]. *Forests*, 2025, **16**(6): 904. DOI: [10.3390/f16060904](https://doi.org/10.3390/f16060904).
- [29] HAN Zhen, LI Kaifeng, FANG Qian, *et al.* Rainfall interception by leaf litters: what happens with fallen leaves of different types and mixing degrees under simulated rainfall?[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, **637**: 131390. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2024.131390](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131390).
- [30] CUI Yongsheng, PAN Chengzhong. Hydrological responses to litter density on runoff-infiltration patterns and water conservation in *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, **619**: 129293. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2023.129293](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129293).
- [31] 杨文海, 杨志莲, 王彦辉, 等. 六盘山区华北落叶松人工林小气候特征[J]. *陆地生态系统与保护学报*, 2024, **4**(2): 32–41. YANG Wenhai, YANG Zhilian, WANG Yanhui, *et al.* Microclimate features of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations in the Liupan Mountains of northwestern China[J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2024, **4**(2): 32–41. DOI: [10.12356/j.2096-8884.2024-0026](https://doi.org/10.12356/j.2096-8884.2024-0026).
- [32] 朱静, 刘金福, 邢聪, 等. 种子散布位置对格氏栲幼苗根系形态及生长特征的影响[J]. *生态学报*, 2022, **42**(10): 4065–4075. ZHU Jing, LIU Jinfu, XING Cong, *et al.* Effect of seeds dispersal position on the root morphology and growth characteristics of *Castanopsis kawakamii* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(10): 4065–4075. DOI: [10.5846/stxb202102060385](https://doi.org/10.5846/stxb202102060385).
- [33] 吴琳杰, 张志铭, 赵勇, 等. 土壤水分条件及保水剂用量对侧柏、栓皮栎种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *西部林业科学*, 2016, **45**(1): 112–116,130. WU Linjie, ZHANG Zhiming, ZHAO Yong, *et al.* Impacts of soil moisture and water-retaining agent on germination and seeding growth of *Platycladus orientalis* and *Quercus variabilis*[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2016, **45**(1): 112–116,130. DOI: [10.16473/j.cnki.xblykx1972.2016.01.019](https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx1972.2016.01.019).
- [34] 张富仓, 李继成, 雷艳, 等. 保水剂对土壤保水持肥特性的影响研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, **18**(1): 120–128. ZHANG Fucang, LI Jicheng, LEI Yan, *et al.* Effects of super absorbent polymer on retention properties of soil water and nutrient[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, **18**(1): 120–128. DOI: [10.3969/j.issn.1005-0930.2010.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-0930.2010.01.014).
- [35] 侯利园, 何祥, 张生武, 等. 保水剂对风沙土保水特性的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, **22**(5): 133–140. HOU Liyuan, HE Xiang, ZHANG Shengwu, *et al.* Influences of super absorbent polymers on the water retention characteristics of aeolian sandy soil[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, **22**(5): 133–140. DOI: [10.16843/j.sswc.2024008](https://doi.org/10.16843/j.sswc.2024008).
- [36] 王荣莲, 莫彦, 王富贵, 等. 保水剂主要特性及对土壤和作物影响的研究进展[J]. *节水灌溉*, 2021(12): 75–80. WANG Ronglian, MO Yan, WANG Fugui, *et al.* Research progress on main characteristics of super absorbent polymers and its effects on soil and crops[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(12): 75–80. DOI: [10.3969/j.issn.1007-4929.2021.12.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4929.2021.12.013).
- [37] 黄一鑫, 程艳霞. 森林光环境对 4 种乔木幼树光合和光谱反射特性的影响[J]. *生态学报*, 2022, **42**(22): 9121–9129. HUANG Yixin, CHENG Yanxia. Photosynthetic characteristics and spectral reflectance characteristics of four natural tree saplings under forest light environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(22): 9121–9129. DOI: [10.5846/stxb202105171289](https://doi.org/10.5846/stxb202105171289).
- [38] 司徒艳结, 卫尤明, 杨俊颖, 等. 保水剂对作物生长的不利影响及发生机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, **28**(7): 1318–1328. SITU Yanjie, WEI Youming, YANG Junying, *et al.* Adverse effects of superabsorbent polymers on crop growth and the underlying mechanisms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, **28**(7): 1318–1328. DOI: [10.11674/zwyf.2021586](https://doi.org/10.11674/zwyf.2021586).