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

黄土高原不同造林模式下土壤水分特征及影响因素

董亚潇 王冬梅 陈瑜佳 徐锟 杨娜

Soil moisture characteristics and influencing factors under different afforestation models on the Loess Plateau of northern China

Dong Yaxiao, Wang Dongmei, Chen Yujia, Xu Kun, Yang Na

引用本文:
董亚潇, 王冬梅, 陈瑜佳, 徐锟, 杨娜. 黄土高原不同造林模式下土壤水分特征及影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(8):40–52. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260045
Dong Yaxiao, Wang Dongmei, Chen Yujia, Xu Kun, Yang Na. Soil moisture characteristics and influencing factors under different afforestation models on the Loess Plateau of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8):40–52. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260045

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260045

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同降水梯度下黄土高原油松人工林蒸腾特征及其生物物理响应

Transpiration characteristics and biophysical response of *Pinus tabuliformis* plantations on the Loess Plateau of northern China under different precipitation gradients

北京林业大学学报, 2025, 47(10): 42–53. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250068

基于CASA模型的黄土高原植被生产力时空动态及其对气候因子的响应

Spatiotemporal dynamics of vegetation productivity and its response to climate factors in the Loess Plateau based on the CASA model

北京林业大学学报, 2026, 48(4): 13–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250428

黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析

Spatial and temporal variation and driving forces for the net primary productivity of vegetation on the Loess Plateau

北京林业大学学报, 2023, 45(8): 29–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220381

晋西黄土区典型人工林与天然林林下植被物种多样性差异及其影响因素

Differences and influencing factors of understory vegetation species diversity between typical plantations and natural forests in the loess area of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2025, 47(4): 103–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240228

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

坝上高原不同植被类型覆盖下土壤水分含量对降雨的动态响应

Dynamic response of soil moisture content to rainfall under different vegetation cover types on the Bashang Plateau, northwestern Hebei Province of northern China

北京林业大学学报, 2023, 45(5): 106–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220220

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260045

黄土高原不同造林模式下土壤水分特征及影响因素

董亚潇[1] 王冬梅[1] 陈瑜佳[1] 徐 锟[1] 杨 娜[2]
（1. 北京林业大学水土保持学院，国家林业和草原局水土保持与荒漠化防治重点实验室，教育部林业生态工程研究中心，北京 100083；2. 北京市怀柔区水务局，北京 101400）

摘要:【目的】黄土高原气候干旱，土壤水资源是制约区域植被建设的关键要素。不同造林模式下土壤水分分布与影响因素尚不明确，有待开展系统对比研究。探究黄土高原纯林与混交林土壤水分变化差异及影响因素，能够为黄土高原区域造林模式优化与土壤水资源可持续发展提供理论依据。**【方法】**从 1981—2024 年发表的 187 篇有关黄土高原纯林和混交林土壤水分变化的国内外期刊及学位论文中，收集了共 1 453 块样地数据，利用外包线法及地理探测器法分析主要因子对土壤含水量的影响。**【结果】**(1)纯林和混交林土壤含水量存在显著垂直分异特征，在 0～100 cm 土层，纯林的平均土壤含水量显著高于混交林；100～200 cm 两种造林模式土壤水分无显著差异；而在 200～500 cm 土层，混交林的平均土壤含水量显著高于纯林；(2)土壤含水量受多种因子的影响，纯林和混交林均随年均气温和海拔高度的增加呈现先增后减的趋势；而随年均降水量的增加，纯林的土壤含水量先增加后趋于稳定，而混交林则持续上升；纯林的土壤含水量随林龄增长呈现先减少后保持稳定的趋势，混交林则呈现先减少后增加的动态变化；(3)年均降水量均对纯林和混交林土壤含水量的贡献率最大(纯林 23.3%，混交林 39.4%)，任何 2 个因子交互作用的解释力均大于单一因子的解释力，其中年均降水量和海拔高度的交互作用增加效应最大(纯林 51.6%，混交林 59%)。**【结论】**黄土高原纯林与混交林土壤水分存在显著差异：0～100 cm 土层中，纯林具有更高的持水能力；100～200 cm 土层，造林模式间差异不明显；而在 200～500 cm 土层，混交林表现出更强的水分保持能力。年均降水量是纯林和混交林土壤水分的主要影响因素，其与海拔的交互作用解释力最大。因此在该区域造林时，应综合考虑降水和地形条件来优化造林模式，以促进土壤水资源的可持续利用。

关键词：黄土高原；造林模式；纯林；混交林；土壤含水量；影响因子
中图分类号：S714.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)08−0040−13
引文格式：董亚潇，王冬梅，陈瑜佳，等. 黄土高原不同造林模式下土壤水分特征及影响因素［J］. 北京林业大学学报，2026，48(8)：40−52. Dong Yaxiao, Wang Dongmei, Chen Yujia, et al. Soil moisture characteristics and influencing factors under different afforestation models on the Loess Plateau of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8): 40−52.

Soil moisture characteristics and influencing factors under different afforestation models on the Loess Plateau of northern China

Dong Yaxiao[1] Wang Dongmei[1] Chen Yujia[1] Xu Kun[1] Yang Na[2]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation of National Forestry and Grassland Administration, Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing 100083, China;
2. Beijing Huairou District Water Authority, Beijing 101400, China)

Abstract: [**Objective**] The Loess Plateau is characterized by an arid climate, and soil water resources serve as a critical limiting factor for regional vegetation construction. The distribution characteristics and

收稿日期: 2026−01−26 **修回日期:** 2026−04−29
基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF1300404)，矿区生态复绿技术调研及试验(KJ-2023-1-2-KZ-016)。
第一作者: 董亚潇。主要研究方向：林业生态工程。Email: dongyaxiao@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 王冬梅，教授，博士生导师。主要研究方向：水土保持、林业生态工程。Email: dmwang@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

nfluencing factors of soil water under different afforestation models remain unclear, requiring systematic comparative research. This study aims to investigate the differences in soil moisture dynamics between pure and mixed forests on the Loess Plateau of northern China and to identify their key influencing factors, thereby providing a theoretical basis for optimizing afforestation models and promoting the sustainable use of soil water resources. [**Method**] A total of 1 453 sampling plots were compiled from 187 publications, including peer-reviewed journal articles and academic dissertations published between 1981 and 2024, focusing on soil moisture changes in pure and mixed forests on the Loess Plateau. The effects of major factors on soil moisture content were analyzed using the upper boundary line method and the Geodetector method. [**Result**] (1) Soil moisture exhibited clear vertical differentiation between pure and mixed forests. In the 0−100 cm soil layer, pure forests had significantly higher soil moisture than mixed forests. No significant differences were observed in the 100−200 cm layer, whereas mixed forests showed significantly higher soil moisture in the 200−500 cm layer. (2) Soil moisture was influenced by multiple factors. In both afforestation models, soil moisture first increased and then decreased with increasing mean annual temperature and altitude. With increasing mean annual precipitation, soil moisture in pure forests increased initially and then stabilized, whereas it continuously increased in mixed forests. With increasing stand age, soil moisture in pure forests decreased initially and then remained stable, whereas in mixed forests, it exhibited a decreasing-increasing trend. (3) Mean annual precipitation contributed the most to soil moisture variation in both pure and mixed forests (pure forests of 23.3% and mixed forests of 39.4%). The explanatory power of interactions between any two factors was greater than individual factors, with the interaction between mean annual precipitation and altitude showing the strongest effect (pure forests of 51.6% and mixed forests of 59.0%). [**Conclusion**] Soil moisture differs significantly between pure and mixed forests on the Loess Plateau. Pure forests exhibit higher water-holding capacity in the 0−100 cm soil layer, whereas mixed forests show stronger water retention in deeper layers (200−500 cm), with no evident differences in the 100−200 cm layer. Mean annual precipitation is the dominant controlling factor, and its interaction with altitude provides the highest explanatory power. These findings suggest that both precipitation and topographic conditions should be jointly considered in afforestation planning to optimize forest structure and enhance the sustainable use of soil water resources.

Key words: the Loess Plateau; afforestation models; pure forest; mixed forests; soil moisture content; influencing factors

土壤水是陆地水资源的重要组成部分，是影响森林植被生存、适应和生长的关键因子[1]。开展土壤水分动态评估对于合理实施造林措施具有重要指导意义[2]。黄土高原地区气候干旱，地下水埋藏较深，土壤水分主要来源于大气降水[3]，深厚的土层不仅对土壤储水和植被水分利用提供了基础条件，也对黄土高原地区水分循环产生了显著影响[4]。受气候、地形、植被及土壤等因素影响，干旱缺水与水土流失并存制约着该区域经济社会的可持续发展。因此，保持黄土高原土壤水分变得尤为重要[5]。20 世纪 80 年代以来，随着“三北”防护林工程、退耕还林还草工程等大规模生态修复工程的持续推进，不同类型乔木、灌木被应用于黄土高原流域综合治理，使该区域植被恢复得到显著效果[6−7]。

研究[8]表明，人工林的重建对土壤水分具有重要影响。相较于纯林，混交林因具有更强的土壤保持能力，在造林初期常被优先采用[9−10]。然而，混交林对黄土高原土壤水分的作用仍存在争议。部分研究指出，混交林能够有效提升区域植被的耐旱性及存活率，相较于纯林，其在雨水截留、土壤水分储存方面具有显著优势[11]，且能明显改善土壤水分状况[12−13]。但亦有研究[14]指出，纯林和混交林在土壤含水量上的差异并非绝对，其影响效应受林分结构、树种组成及区域环境条件等多种因素的共同作用。例如，刺槐（*Robinia pseudoacacia*）−沙棘（*Hippophae rhamnoides*）混交林虽具有较强的固碳能力，但会显著消耗深层土壤水分；而油松（*Pinus tabuliformis*）−沙棘混交林在降水减少的条件下会加剧浅层土壤水分的消耗，并转向深层水分吸收，从而导致浅层土壤含水量明显下降[15]。这些结果表明，不同造林模式下土壤含水量变化趋势各异。此外，土壤水分还受降水、气温、海拔和林龄等多因子协同驱动[16−20]。其

中，气候变化是土壤水分变化的核心驱动力，降水与气温通过调控水分入渗、蒸发散等过程直接影响土壤水分动态[21−22]；海拔则通过影响气温、降水空间格局及潜在蒸散，对土壤水分分布产生深刻影响[23]；林龄差异则反映在不同生长阶段林木的发育状况、凋落物积累、根系结构、林下植被及土壤物理性质等方面，进而导致土壤含水量随林龄变化呈现阶段性特征[24]。

然而，已有的研究多集中于样地尺度或特定植被类型，针对黄土高原区域尺度下纯林与混交林土壤水分差异的系统研究仍有待深入。因此，本文利用文献数据收集整合的方法，从 1981—2024 年发表的有关黄土高原纯林和混交林土壤水分变化的国内外期刊和学位论文中收集了 187 篇文献，1 453 块样地数据，构建黄土高原纯林和混交林土壤水分变化的数据库，对比分析纯林和混交林在不同林龄、降水、气温及海拔高度下土壤水分差异，为黄土高原土壤水分可持续利用和发展提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黄土高原（图 1）地处我国西北部，黄河流域中游，位于 33°43′～41°16′N、100°54′～114°33′E，总面积约 63.5 万 km^2，行政区划上包括山西、内蒙古、河南、陕西、甘肃、宁夏、青海共 7 省（自治区）[24]。黄土高原属典型的黄土丘陵沟壑区，土壤类型以黄绵土或褐土为主，土壤质地则主要为粉砂质壤土（基于美国农业部分类法，United States Department of Agriculture taxonomy）[25−26]。地貌类型以塬、梁、峁、沟为主，地表破碎，沟壑密度大。该地区属典型大陆性季风气候，区域海拔高度在 500～3 000 m 之间，年均气温在 3～14 ℃ 之间，年均降水量约为 400～550 mm，且 60% 以上集中于 7—9 月[27]，降水集中且强度大，是导致土壤侵蚀的主要动力。黄土高原是中国乃至全球水土流失最为严重的地区之一，生态环境脆弱，是水土流失治理和生态恢复区域发展的核心议题。

1.2 数据收集

本研究收集了 187 篇涉及黄土高原土壤水分研究的期刊和学位论文（附录），其中影响因子包括林龄、降雨、气温和海拔。本文收集文献时，以黄土高原、纯林、混交林、土壤水分等及其英文为关键词检索，逐一阅读检索到的文献，确保提取文献中含有林龄、年均气温、年均降水、海拔高度、土层深度及土壤含水量等信息。最终该数据库共涉及 4 个省或自治区，如表 1 所示。

1.3 数据处理与分析

从已发表论文的表格中收集或通过使用 Getdata Graph Digitizer 软件对这些论文的图件进行数字化，获得原始数据。文献的土壤含水量数据根据公式计算，统一为土壤质量含水量。

土壤含水量同时受多个因素影响，因此可用上外包线法在一定程度上排除其他因子影响后，确定受各单一因子影响的函数类型[28]。具体步骤是：（1）将土壤含水量的数据除以数据集内的最大值，得到土壤含水量相对值的数据集。将其与相关性绝对值最高的第一影响因子（自变量 x_1）的数据绘制成散点图，根据自变量变化范围将其分成若干区段，在每个区段内，选取比区段内数据平均值至少高出一倍标准

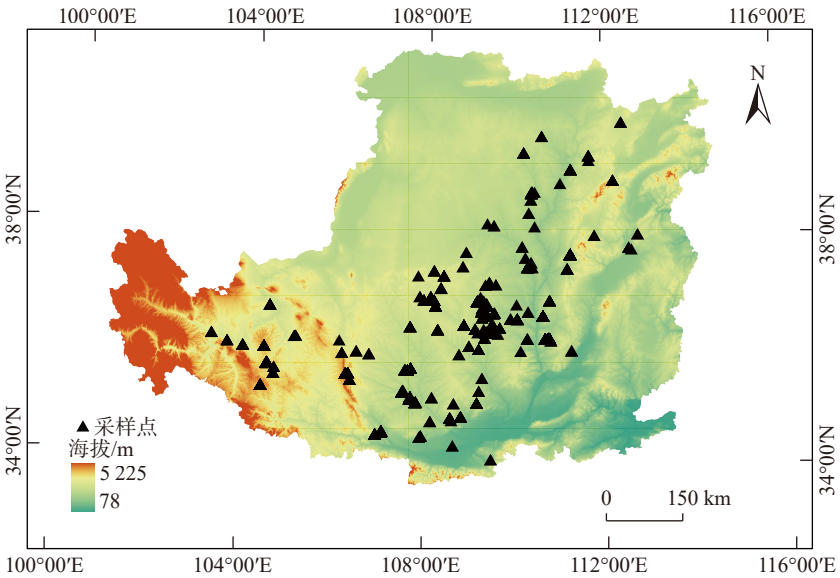


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig. 1 Overview of the study area and distribution of sampling points

表 1　文献中研究地点的样地基本情况

Tab. 1　Basic situation of sample plots in study area of literatures

研究地点	造林模式	林龄/a	年均降水量/mm	年均气温/℃	海拔/m
山西省					
方山县	纯林	30 ~ 33	545	10.7	1 194 ~ 1 269
离石区	纯林	8 ~ 17	475 ~ 545	8.9	1 083 ~ 1 108
河曲县	纯林、混交林	15 ~ 23	448	7.7 ~ 8.8	1 055 ~ 1 107
右玉县	纯林	13 ~ 30	420	3.6	1 438 ~ 1 453
吉县	纯林、混交林	4 ~ 30	576	10.0	1 015 ~ 1 371
偏关县	纯林	15 ~ 30	419 ~ 475	6.5 ~ 8.0	1 145 ~ 1 290
岚县	纯林	15	400	6.8	1 281
五寨县	纯林	30 ~ 55	525	5.0	1 403 ~ 1 454
石楼县	纯林	7	465	9.8	1 151
界沟流域	纯林	5 ~ 7	502	10.4	1 152
怀仁县	纯林	29 ~ 68	370	7.0	1 000 ~ 1 800
太原市	纯林	10 ~ 22	445	9.5	800
陕西省					
安塞县	纯林、混交林	5 ~ 48	493 ~ 549	8.6 ~ 10.4	550 ~ 1 446
延安市	纯林、混交林	3 ~ 42	450 ~ 612	7.0 ~ 11.9	850 ~ 1 659
绥德县	纯林	16 ~ 40	438 ~ 513	9.7 ~ 10.2	924 ~ 1 021
定边县	纯林	19 ~ 50	317 ~ 332	7.9 ~ 8.6	1 522 ~ 1 605
长武县	纯林、混交林	3 ~ 33	527 ~ 598	9.1 ~ 9.8	1 054 ~ 1 221
米脂县	纯林	15 ~ 22	404 ~ 451	8.4 ~ 9.2	969 ~ 1 081
耀州区	纯林	30	56 ~ 568	10.3 ~ 12.3	779 ~ 922
神木县	纯林	10 ~ 40	350 ~ 441	8.4 ~ 9.0	1 093 ~ 1 242
靖边县	纯林	10 ~ 20	395	7.8	1 473 ~ 1 573
千阳县	纯林	3 ~ 30	578 ~ 653	8.8 ~ 10.8	944 ~ 1 298
吴起县	纯林、混交林	5 ~ 50	450 ~ 578	7.8 ~ 9.2	1 086 ~ 1 659
榆阳区	纯林	8 ~ 40	407	7.9 ~ 8.3	1 102 ~ 1 142
彬县	纯林	30	572	11.8	1 098
子长县	纯林	5 ~ 40	450 ~ 515	8.2 ~ 9.1	1 354 ~ 1 363
黄陵县	纯林	20 ~ 35	612 ~ 677	9.2 ~ 9.4	1 200 ~ 1 265
扶风县	纯林	10 ~ 32	592 ~ 665	12.4 ~ 12.7	860 ~ 1 095
淳化县	纯林	6 ~ 23	577 ~ 601	9.8	920 ~ 1 220
永寿县	纯林	5 ~ 36	600 ~ 601	10.8	720 ~ 1 405
蓝田县	纯林	12 ~ 14	720	13.1	750
咸阳市	纯林、混交林	10 ~ 16	572 ~ 575	9.8 ~ 11.1	1 080 ~ 1 124
富县	纯林	5 ~ 150	550 ~ 598	7.4 ~ 9.1	1 081 ~ 1 400
甘肃省					
径川县	纯林	20 ~ 35	509 ~ 584	9.1 ~ 10.4	1 088 ~ 1 315
定西市	纯林、混交林	7 ~ 50	386 ~ 427	6.3 ~ 6.8	1 900 ~ 2 075
会宁县	混交林	8 ~ 9	270	6.4 ~ 7.0	1 650 ~ 1 800
彭阳县	混交林	18 ~ 20	457	8.0	1 584 ~ 1 674
西峰区	纯林	5 ~ 60	515 ~ 557	9.2 ~ 9.3	1 237 ~ 1 271
榆中县	纯林、混交林	4 ~ 20	330 ~ 413	6.6 ~ 9.3	1 696 ~ 2 243
庆阳市	纯林	5 ~ 60	515 ~ 557	9.2 ~ 9.3	1 237 ~ 1 271
徽县	纯林	4 ~ 13	211 ~ 312	7.0 ~ 9.8	1 651 ~ 1 786
内蒙古自治区					
准格尔旗	纯林	6 ~ 13	390 ~ 400	7.5 ~ 7.8	1 213
毛乌素沙地	纯林、混交林	10	370	7.5	1 450

注：研究样点数据整理自附录参考文献。

差的数据，或在一些数据密度较低的区段直接选择最高值数据[29]作为外包线数据点，用以拟合土壤含水量响应该因子的函数关系，能够在一定程度上表征因变量响应该单因子的函数关系，籍此确定第一因子的影响函数类型 $f(x_1)$。(2)为确定土壤含水量对第二因子的响应函数，需尽可能消除第一因子的影响，即使用第一步的土壤含水量相对值数据除以对应第一因子外包线的计算值，形成新的数据集，从而解耦上一因子，之后用前述方法将解耦后的因变量相对值与下一影响因子(自变量 x_2)作散点图，并确定其外包线及对应的响应函数类型 $f(x_2)$。(3)用同样方法，逐个消除前面各因子的影响，直到确定最后一个因子的影响函数 $f(x_n)$。

地理探测器是探测空间分异性，以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法。通过空间数据离散化确定空间分层异质性的最佳尺度是运用地理探测器的关键环节[30]。判断离散化分类效果可通过地理探测器的 q 统计量来评价，q 的值域为 [0,1]，值越大表明该驱动因子对因变量的解释力越强，反之则越弱[31]。

交互作用探测器通过比较单一因子的 q 值和双因子交互的 q 值来判断双变量间交互作用特点，该方法对于相互作用的假设不仅限于传统统计学方法，因此具有一定的优势，驱动因子的交互作用通过探测结果的 q 值来识别驱动因子之间的共同作用是否增加或减弱对分析变量的解释力[32]。

本文运用地理探测器方法对黄土高原纯林和混交林土壤含水量的变化进行多因子定量分析，探索各因子对土壤含水量的相对贡献率及交互作用。

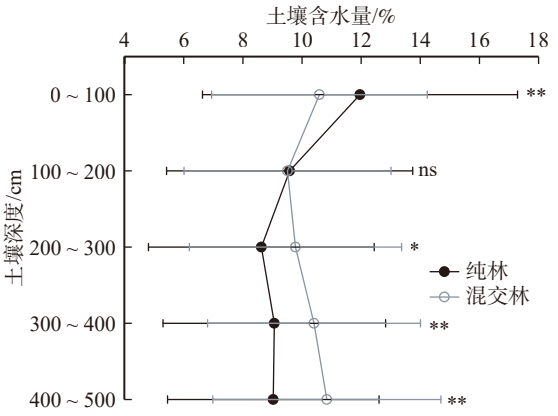
用 Excel 进行数据整理，用 SPSS 进行相关分析，用 GeoDetector_2015_Example 进行地理探测器分析各因子对土壤含水量的相对贡献率及交互作用，用 Origin2024 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同造林模式下土壤含水量垂直分布差异

本研究将土壤剖面划分为 0 ~ 100 cm、100 ~ 200 cm、200 ~ 300 cm、300 ~ 400 cm 和 400 ~ 500 cm 5 个层次进行分析(图 2)。结果表明，黄土高原纯林与混交林的土壤含水量沿剖面均表现为先降低后升高的趋势。在 0 ~ 100 cm 土层，纯林土壤含水量显著高于混交林($p < 0.01$)；在 200 ~ 500 cm 土层，纯林土壤含水量显著低于混交林($p_{200 \sim 300} < 0.05$，$p_{300 \sim 500} < 0.01$)。

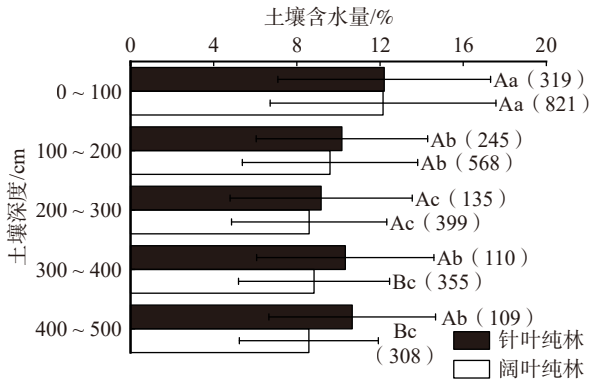
如图 3 所示，各土层中针叶纯林的土壤含水量均高于阔叶纯林，其中 300 ~ 500 cm 土层间差异显著($p < 0.05$)；图 4 显示，在 0 ~ 200 cm 土层中，刺槐林和油松林的土壤含水量均随土层加深显著降低；而 200 ~ 500 cm 土层中，侧柏(*Platycladus orientalis*)林土壤含水量随深度增加呈显著的上升趋势($p < 0.05$)，刺槐林和油松林无显著变化。



**表示不同造林模式差异极显著($p < 0.01$)，*表示不同造林模式差异显著($p < 0.05$)，ns 表示差异不显著($p > 0.05$)。下同。

图 2 纯林和混交林不同土壤深度土壤含水量对比

Fig. 2 Comparison of soil moisture contents at different soil depths between pure and mixed forests



不同小写字母表示不同土层间差异显著($p < 0.05$)，不同大写字母表示不同林分类型间差异显著($p < 0.05$)，括号内数字表示相应样本数。下同。

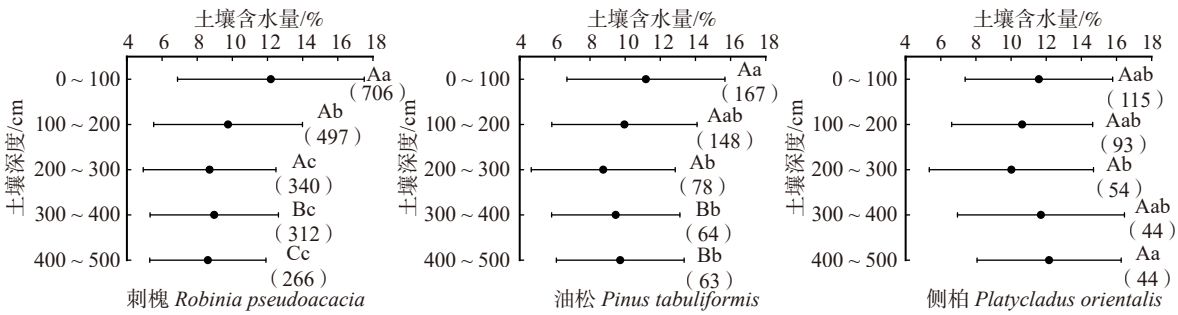
图 3 针叶纯林与阔叶纯林各土层深度的土壤含水量对比

Fig. 3 Comparison of soil moisture contents at different soil depths between pure coniferous forest and pure broadleaved forests

如图 5 所示，不同林分类型的土壤含水量存在垂直差异特征：在 0 ~ 100 cm 土层中，土壤含水量表现为针阔混交林 > 针针混交林 > 阔阔混交林($p < 0.05$)；200 ~ 400 cm 土层中，针阔混交林的土壤含水量显著高于针针混交林和阔阔混交林($p < 0.05$)；400 ~ 500 cm 中三者则无显著差异。

2.2 不同环境梯度下土壤含水量垂直分布差异

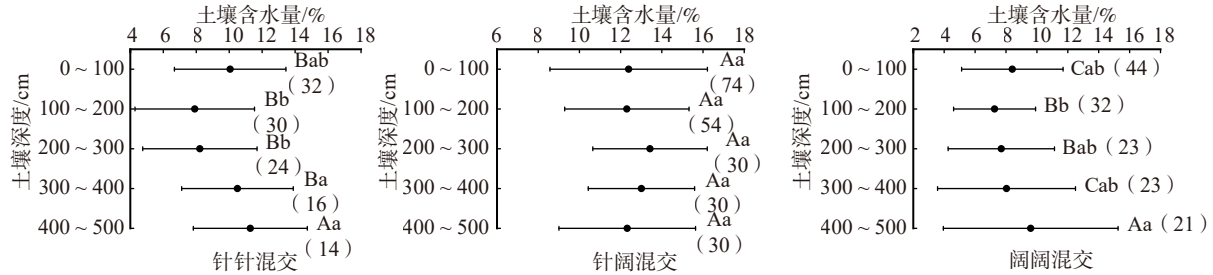
如图 6 所示，土壤含水量在纯林与混交林间的分布格局受环境因子影响显著，且呈现明显的垂直差异特征。当年均降水量(MAP) ≤ 450 mm 时，0 ~ 100 cm 土层中混交林的土壤含水量高于纯林，而随着土层加深，纯林的土壤含水量逐渐反超混交林；



不同小写字母表示不同土层间差异显著（$p < 0.05$），不同大写字母表示不同树种间差异显著（$p < 0.05$）。

图 4　典型树种各土层深度的土壤含水量对比

Fig. 4　Comparison of soil moisture contents at different soil depths in typical tree species



不同小写字母表示不同土层间差异显著（$p < 0.05$），不同大写字母表示不同林分类型间差异显著（$p < 0.05$）。

图 5　不同林分类型各土层深度的土壤含水量对比

Fig. 5　Comparison of soil moisture contents at different soil depths among varied stand types

当 MAP > 450 mm 时，0 ~ 200 cm 土层纯林含水量高于混交林，200 ~ 500 cm 土层则混交林更高。在年均气温（MAT）< 8 ℃ 时，各土层纯林含水量均高于混交林；MAT ≥ 8℃ 时，0 ~ 100 cm 土层纯林较高，100 ~ 500 cm 土层混交林较高。在林龄（AGE）< 15 a 和 AGE ≥ 30 a 时，0 ~ 100 cm 土层纯林较高，100 ~ 500 cm 土层混交林较高；15 a ≤ AGE < 30 a 时，0 ~ 200 cm 土层中纯林的土壤含水量高于混交林，200 ~ 500 cm 土层混交林更高。海拔（ALT）< 1 200 m 时，土壤含水量在 0~200 cm 土层纯林高于混交林，200 ~ 500 cm 土层混交林更高；1 200 m ≤ ALT < 1 400 m 时，0~100 cm 土层纯林的土壤含水量比混交林高，而 100 ~ 500 cm 混交林维持更高的水平；ALT ≥ 1 400 m 时，各土层中纯林的土壤含水量均高于混交林。

2.3　土壤含水量对各单一因子的响应特征

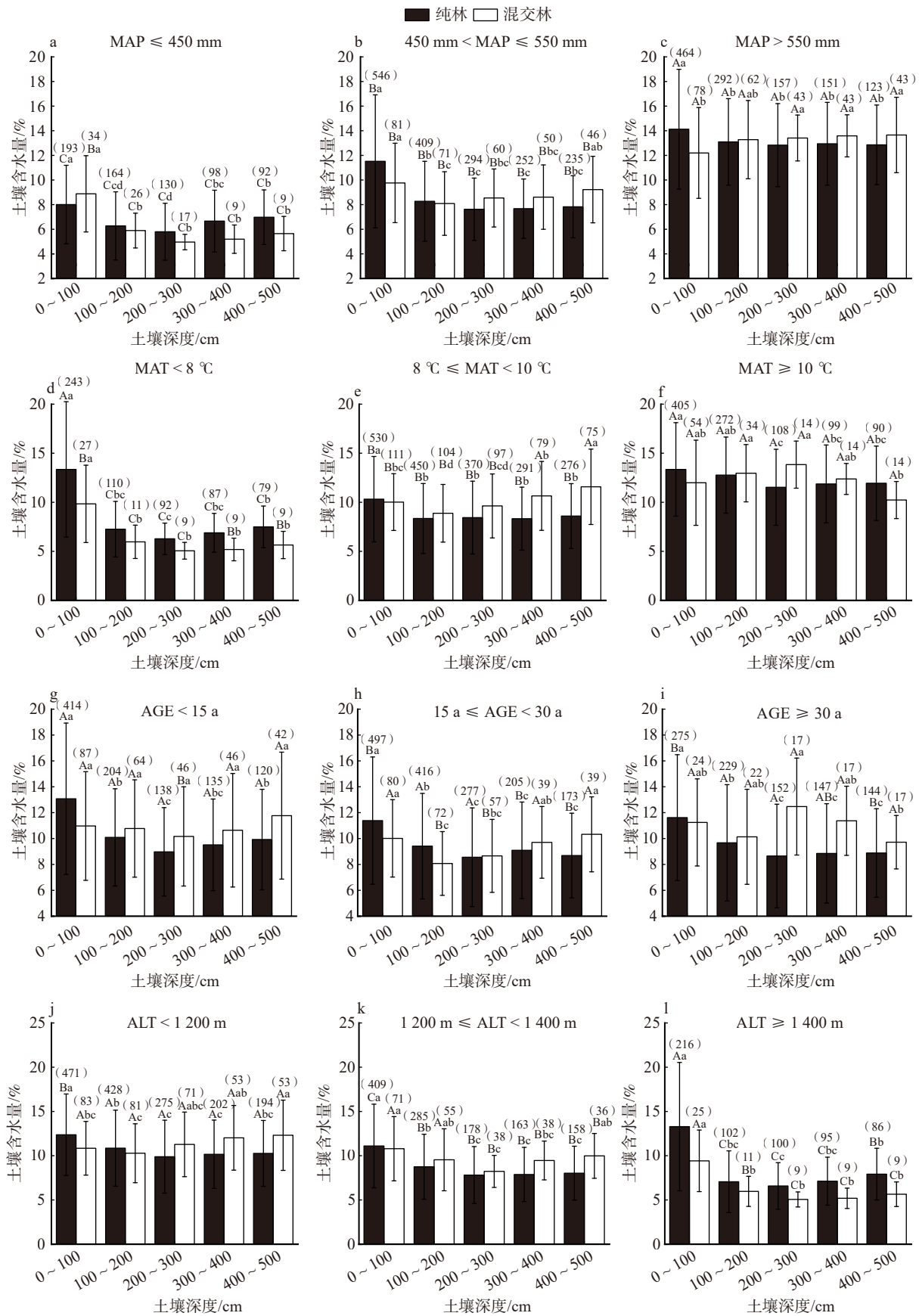
对影响纯林和混交林土壤含水量的主要因子进行相关分析（表 2、3），纯林中各因子相关系数依次为年均降水量（0.401**）> 林龄（−0.187**）> 海拔高度（0.129**）> 年均气温（−0.021）；混交林中各因子的相关系数依次为年均降水量（0.435**）> 年均气温（0.208**）> 林龄（−0.179*）> 海拔高度（−0.095）。按相关系数大小的顺序，依次分析纯林和混交林中土壤含水量受各单一因子的影响（图 7、8）。

纯林中，土壤含水量随年均降水量增加先迅速增大，在 550 mm 时达到临界值，之后增速渐趋平缓；随林龄的增加而逐渐降低，在林龄大于 40 a 后逐渐稳定；土壤含水量对海拔高度和年均气温的响应较为一致，即随二者的增加而呈现先增后减的变化趋势，最高值出现在海拔 1 600 m 左右和气温 8 ℃ 左右。

混交林中，土壤含水量随年均降水量增长而持续增加；随年均气温的增加呈现先增大后减小的变化趋势，最高值在 8.5 ℃ 左右；随林龄增长而表现为先减少后增加的趋势，在 30 ~ 40 a 间达到最低点；海拔在一定程度上也会影响土壤含水量的变化，其随海拔增加而先缓慢增加后急剧下降，在海拔 1 500 m 左右达到最大值。

2.4　各因子对土壤含水量的贡献率及交互作用

如图 9 所示，采用地理探测器模型分析年均降水、年均气温、海拔高度和林龄对土壤含水量的相对贡献率（%），其中对纯林土壤含水量的相对贡献率依次为年均降水量（23.3%）> 年均气温（20.6%）> 林龄（20%）> 海拔高度（10.9%），混交林土壤含水量的相对贡献率依次为年均降水量（39.4%）> 海拔高度（19.9%）> 年均气温（17.8%）> 林龄（15.7%）。地理探测器模型交互作用分析结果表明，任意 2 个因子的交互作用均大于单一因子的作用，纯林和混交林均为海拔高度与年均降水的交互作用对土壤含水量变化影响最大，其中纯林达到 51.6%，混交林达到 59%。



不同小写字母表示不同土层间差异显著（$p < 0.05$），不同大写字母表示不同造林模式间差异显著（$p < 0.05$）；MAP. 年均降水量；MAT. 年均气温；AGE. 林龄；ALT. 海拔高度。下同。

图 6 纯林和混交林不同土层土壤含水量随各因子的变化对比

Fig. 6 Comparison of soil moisture contents with influencing factors at different soil depths in pure and mixed forests

表 2　纯林中土壤含水量与各影响因子间的相关系数（N = 1 202）

Tab. 2　Correlation coefficients between soil moisture content and influencing factors in pure forests (N = 1 202)

	MAP	MAT	AGE	ALT
MAT	0.515**			
AGE	−0.070*	−0.003		
ALT	−0.405**	−0.743**	−0.119**	
SMC	0.401**	−0.021	−0.187**	0.129**

注：**表示p < 0.01，*表示p < 0.05，N表示样本数。下同。

表 3　混交林中土壤含水量与各影响因子间的相关系数（N = 184）

Tab. 3　Correlation coefficients between soil moisture content and influencing factors in mixed forests (N = 184)

	MAP	MAT	AGE	ALT
MAT	0.848**			
AGE	−0.092	−0.101		
ALT	−0.521**	−0.602**	−0.032	
SMC	0.435**	0.208**	−0.179*	−0.095

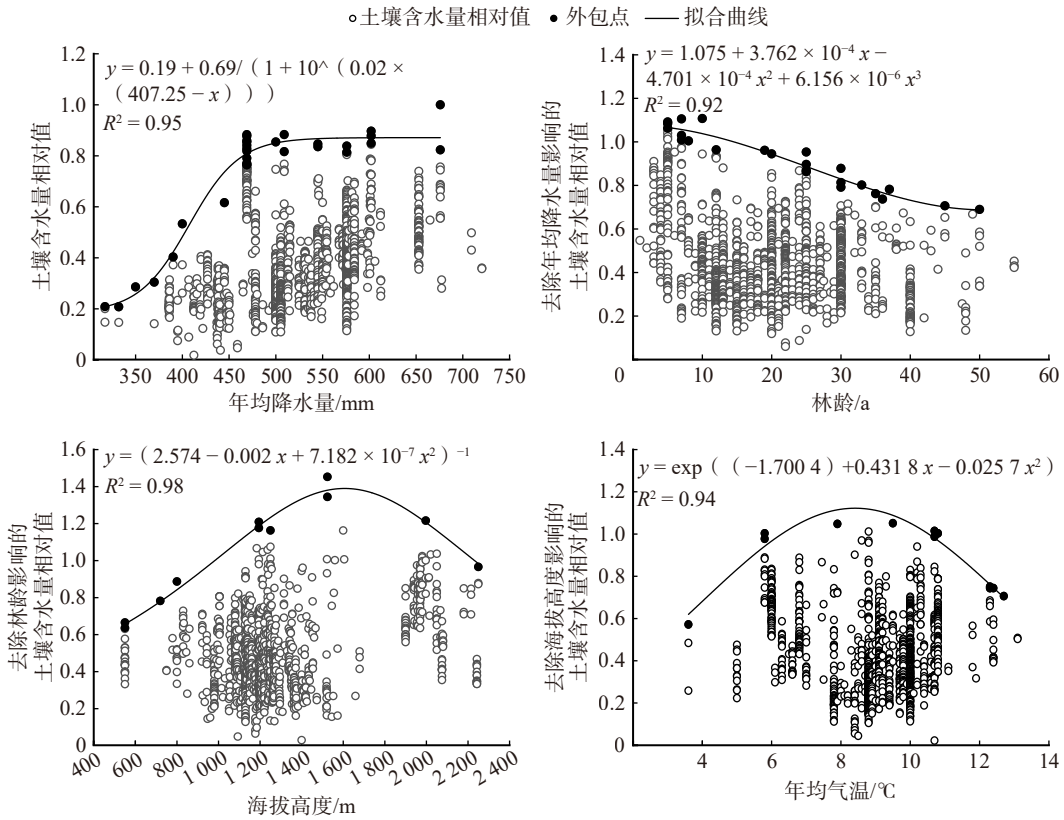


图 7　纯林土壤含水量相对值随各单一因子变化的外包线及响应函数

Fig. 7　Upper boundary line and response functions of relative soil moisture content in pure forests with each single factor

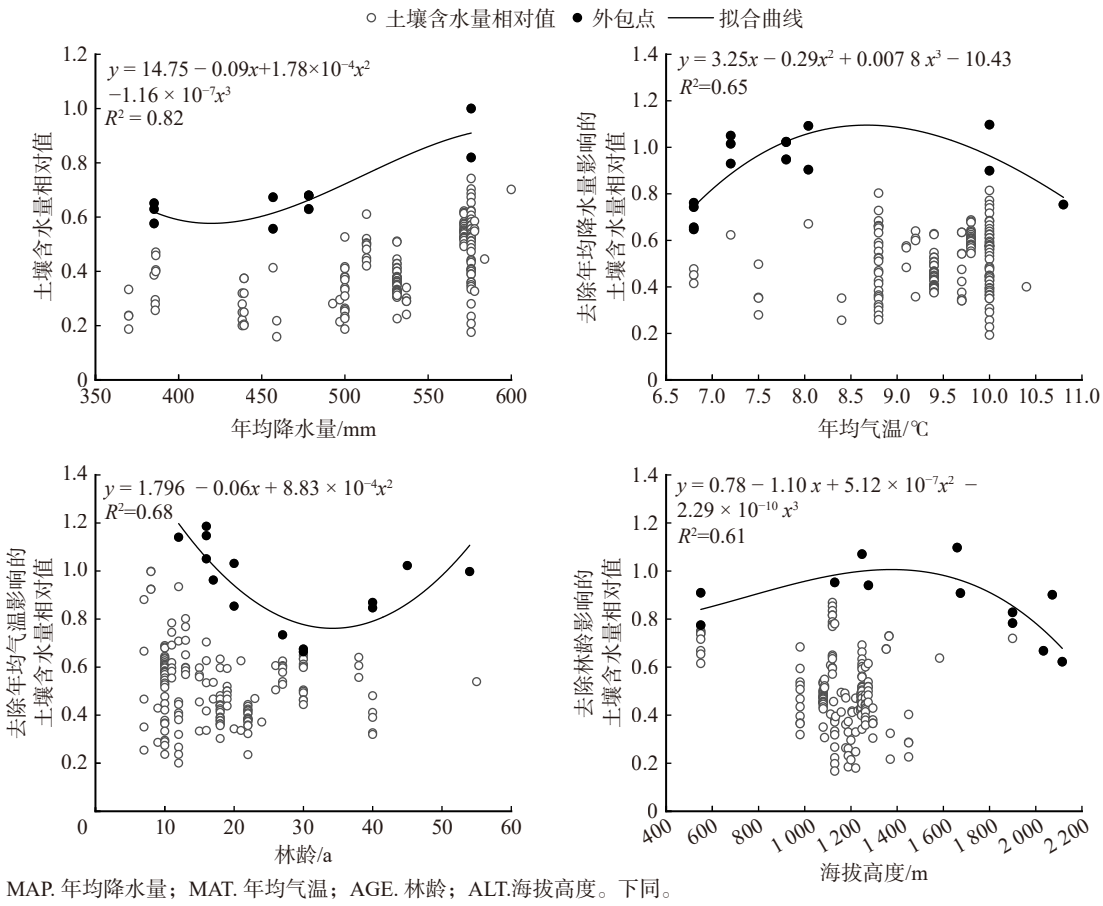
3　讨　　论

3.1　不同造林模式下土壤含水量差异

研究结果显示，纯林和混交林中土壤含水量均表现出“先减后增”的垂直分布特征，表层土壤含水量较高，主要得益于林下凋落物层较厚、土壤蒸发较弱，为表层土壤水分贮存创造了有利条件[33−34]；而深层土壤含水量相对回升，则可能由于该层受气候等外界环境影响较小，水分状态更趋稳定[35]。

在区域尺度上，纯林的土壤含水量在 0 ~ 100 cm 土层中大于混交林，在 200 ~ 500 cm 土层中小于混交林，这一差异可能与根系分布及水分利用策略有关，有研究[36]表明，混交林浅层土壤中根系生物量、根长密度、根表面积密度均高于纯林，且不同树种对水分的截留与竞争导致其对表层土壤水分的吸收强度更大，因而浅层耗水较多[37]；在深层土壤中，混交林具备更好的林分结构、生物多样性及土壤改良效应，能够有效改善土壤孔隙结构，有助于促进水分的下渗与贮存，进而提升深层土壤含水量水平[38−39]。

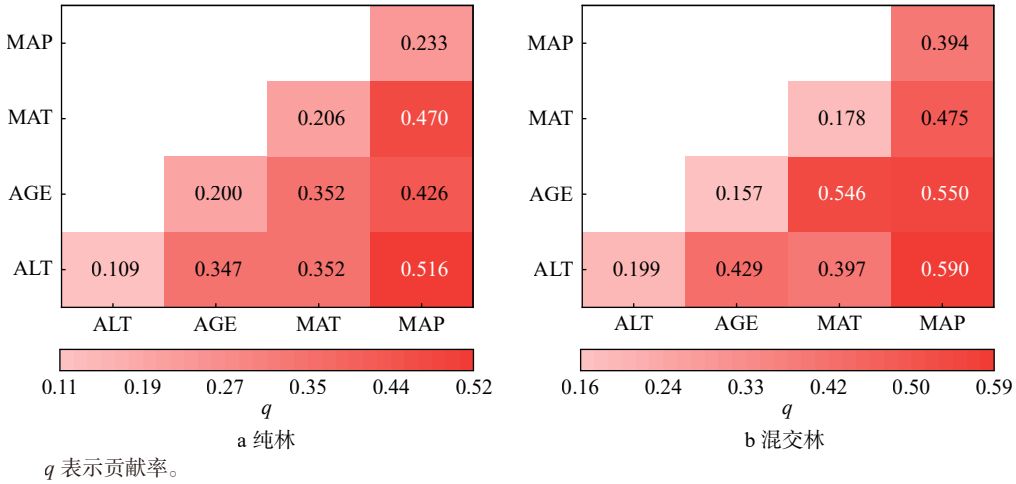
在区域尺度上，不论是纯林还是混交林，针叶林的土壤含水量均高于阔叶林，这一差异主要与枯落物特征及根系分布有关：针叶林下枯落物层较厚且分解缓慢，有利于拦蓄降水并维持较高土壤水分[40]；而阔叶林枯落物蓄积量少、分解快，林下植被覆盖度低，土壤结构及持水能力相对较弱[41]。此外，阔叶林根系更为发达，且多分布于深层土壤，其较强的蒸腾



MAP. 年均降水量；MAT. 年均气温；AGE. 林龄；ALT.海拔高度。下同。

图 8 混交林土壤含水量相对值随各单一因子变化的外包线及响应函数

Fig. 8 Upper boundary line and response functions of relative soil moisture content in mixed forests with each single factor



q 表示贡献率。

图 9 各因子对土壤含水量的贡献率及交互作用

Fig. 9 Contribution rate and interaction of each factor to soil moisture contents

耗水进一步加剧了土壤水分的下降[35]。针阔混交林由于地表枯落物层厚度更大，持水能力更强，可以有效减少土壤水分蒸发、延缓地表径流，进而提升土壤水分入渗与贮存，因此土壤含水量普遍高于其他乔木林类型[42]。

刺槐、油松与侧柏是黄土高原地区典型造林树种，其土壤含水量特征存在明显差异。研究[43]表明，刺槐深层土壤含水量较低，这主要归因于其深根性特性与较强的耗水能力，易导致深层土壤水分亏缺[43]。相比之下，油松与侧柏的深层土壤含水量呈回升趋势。油松由于蒸腾速率高、根系吸水能力强，土壤水分消耗较快，整体含水量较低；而侧柏生长缓慢、水分利用效率高，具备较强的土壤水分维持能力，因此其土壤含水量较高，深层水分回升也更为明显[44]。

3.2 气候特征影响

在 MAP ≤ 450 mm 时，0 ~ 100 cm 土层纯林的

土壤含水量低于混交林，而在 100 ~ 500 cm 土层则相反；在 MAP > 450 mm 时，0 ~ 200 cm 土层纯林土壤含水量高于混交林，200 ~ 500 cm 土层混交林土壤含水量更高。这可能与混交林的水分利用策略有关：在干旱条件下，混交林可以通过提升各土层水分利用效率，将主要耗水向深层土壤转移，以此来适应水分胁迫；而随着降水量增加，混交林转而加强对浅层土壤水分的利用，以此来维持土壤水分平衡和群落稳定性[45−46]。此外，本研究还发现，0 ~ 500 cm 土层纯林土壤含水量随降水量增加呈先增后稳的趋势，而混交林则持续增长，进一步表明混交林在土壤水分调控与利用效率方面优于纯林。

从年平均气温（MAT）来看，纯林与混交林 0 ~ 500 cm 土层的土壤含水量均随气温升高呈先增后减的趋势。这可能是因为温度较低时土壤水分易冻结，随温度回升冻融水分释放，含水量上升；但温度持续升高则会加剧植被蒸腾与土壤蒸发，导致含水量下降[47]。当 MAT < 8 ℃ 时，各土层纯林的土壤含水量均高于混交林；而当 MAT ⩾ 8 ℃ 时，0 ~ 100 cm 纯林的土壤含水量较高，而 100 ~ 500 cm 则相反。这一差异可能与 2 类造林模式的林分结构和根系特性有关：纯林根系分布集中、冠层单一、枯落物层较薄，低温下根系活性弱、耗水少；混交林则具有更复杂的冠层结构、较厚的枯落物层及差异化的根系分布，部分根系在低温下仍保持活性，持续吸收水分，导致其含水量较低[48−49]；随着温度升高，植物根系恢复活性，形成表层纯林土壤含水量高而深层混交林高的分布格局。

3.3　林龄特征影响

土壤含水量随林龄的变化在纯林与混交林之间呈现明显差异：二者在幼龄阶段均呈下降趋势，但随后纯林持续下降并渐趋平缓，而混交林则在发育后期出现回升。这主要因为随着林木生长，林分密度达到峰值，种群对有限水分的竞争加剧，导致土壤含水量减少[17]；在纯林中，树木老化伴随根系功能衰退，水分需求降低，加之群落演替过程中形成一定的蓄水能力，因而后期土壤含水量趋于稳定[50]；而混交林土壤含水量在后期回升，则得益于其多样化的根系结构随林龄增长形成的生态位互补，优化了不同土层水分的时空利用格局，从而提升了群落整体水分利用效率[51]。

3.4　立地特征影响

纯林与混交林的土壤含水量随海拔升高均呈现先增后减的变化趋势[52]。海拔主要通过影响降水格局作用于土壤水分：随着海拔升高，降水量增加，土壤湿度相应提升；然而，在高海拔区域，降水易形成坡面径流向低处汇流，导致该处土壤含水量降低[53]。当海拔高于 1 400 m 时，纯林在各土层的土壤含水量均高于混交林。这可能归因于高海拔地区气温较低、蒸发较弱，且纯林（尤其针叶纯林）叶片结构有助于减少蒸腾，整体耗水量较低，有利于水分保存[54−56]。此外，针叶纯林凋落物分解缓慢，形成的厚层腐殖质可提升土壤有机质含量、改善结构，从而增强土壤持水能力[57]。

3.5　各因子对土壤含水量的交互作用

土壤含水量变化是多因子协同作用的结果。本研究基于地理探测器的分析表明，任意两个影响因子的交互作用均强于单一因子的独立效应。其中，年均降水量是贡献率最大的单一因子，进一步印证了在黄土高原地区降水对土壤含水量具有主导影响。这主要与研究区气候干旱、地下水埋藏较深与土壤水分补给高度依赖大气降水等密切相关[3,58−60]。另外在所有的两因子交互作用分析中，年均降水与海拔高度交互作用的增加效应最大，这表明二者均是协调影响土壤含水量的重要因子。海拔可以通过调节气温、降水空间再分配及潜在蒸散，深刻影响土壤水分动态。通常高海拔地区降水相对充足、气温较低，更有利于土壤水分的保持与蓄积，该效应在植被生长季表现尤为突出[61−63]。

本研究基于文献整合分析，受土壤水分时空异质性影响，存在一定局限性。未来可进一步考虑土壤质地、类型等因素，在完善数据的基础上深入探究不同造林模式下多因子对土壤水分的调控机制，为黄土高原造林模式优化提供更可靠的理论支撑。

4　结　　论

（1）研究表明，纯林与混交林的土壤含水量存在垂直分异特征：在 0 ~ 100 cm 土层，纯林的平均土壤含水量显著高于混交林；100 ~ 200 cm 土层两种造林模式土壤水分无显著差异；而在 200 ~ 500 cm 土层，混交林的平均土壤含水量显著高于纯林。不同林分类型间土壤含水量差异显著：300 ~ 500 cm 土层中，针叶纯林显著高于阔叶纯林；0 ~ 400 cm 土层中，针阔混交林土壤含水量则显著高于针针混交林和阔阔混交林。

（2）纯林与混交林的土壤含水量受降水、气温、林龄及海拔的影响，并呈现出不同变化规律，二者均随年均气温和海拔升高呈先增后减趋势；而在年均降水量增加时，纯林土壤含水量先上升后趋于平稳，混交林则持续增长；随着林龄增加，纯林土壤含水量先下降后渐趋稳定，混交林则呈现先降后升的趋势。

（3）在纯林中，土壤含水量影响因素的解释力

从大到小依次为：年均降水量 > 年均气温 > 林龄 > 海拔高度；而在混交林中，则为年均降水量 > 海拔高度 > 年均气温 > 林龄。年均降水量的贡献率最为显著，其与海拔高度的交互作用具有最强的增强效应；各因子间交互作用的解释力均高于单一因子的解释力。

附录详见 https://j.bjfu.edu.cn/article/exportSupplementary?id=2bacf776-93b2-425d-b40f-08a19d279d4b&pageType=cn。

参 考 文 献

[1] 周欧, 古丽米热·依力哈木, 祝维, 等. 不同密度和水分管理下毛白杨林分土壤水分特征 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1): 55−67.
Zhou O, Yilihamu Gulimire1, Zhu W, et al. Soil water characteristics of *Populus tomentosa* stands under different densities and water treatments [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 55−67.

[2] Liu M J, Chang L, Chen Q W, et al. Soil water consumption along the profile in response to soil water content variations in a black locust plantation with a rainfall exclusion in Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2024, 640: 131721.

[3] Yang L, Zhang H, Chen L. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(3): 292−301.

[4] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区 [J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊 (土壤分水与土壤肥力研究专集), 1985(2): 1−17.
Li Y S, Han S F, Wang Z H. Soil moisture characteristics and regionalization on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1985(2): 1−17.

[5] 孙长忠, 黄宝龙, 陈海滨, 等. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究 [J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(3): 10−17.
Sun C Z, Huang B L, Chen H B, et al. Interaction between soil water conditions and different kinds of artificial plant cover in the Loess Plateau [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(3): 10−17.

[6] 汪雯雯, 张宇飞, 杨文府, 等. 晋北地区植被覆盖度时空格局及驱动因素研究 [J/OL]. 应用基础与工程科学学报, 1−16[2026−04−08]. https://link.cnki.net/urlid/11.3242.TB.20260319.1919.002.
Wang W W, Zhang Y F, Yang W F, et al. Study on the spatial-temporal pattern and driving factors of vegetation coverage in northern Shanxi[J/OL]. Journal of Basic Science and Engineering, 1−16[2026−04−08]. https://link.cnki.net/urlid/11.3242.TB.20260319.1919.002.

[7] 王丽平, 赵炯昌, 朱洪盛, 等. 黄土残塬小流域不同土地利用类型土壤水分特征 [J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(4): 784−792.
Wang L P, Zhao J C, Zhu H S, et al. Soil moisture characteristics of different land use types in small watersheds of gully regions on the Loess Plateau [J]. Journal of Zhejiang A& F University, 2025, 42(4): 784−792.

[8] Zhang Y, Deng L, Yan W, et al. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2016, 137: 52−60.

[9] Montagnini F, Ugalde L, Navarro C. Growth characteristics of some native tree species used in silvopastoral systems in the humid lowlands of Costa Rica [J]. Agroforestry Systems, 2003, 59(2): 163−170.

[10] Monique C, Lander B, Etienne B, et al. Ecosystem services of mixed species forest stands and monocultures: comparing practitioners' and scientists' perceptions with formal scientific knowledge [J]. Forestry, 2014, 87(5): 639−653.

[11] Zhang B, Xu Q, Gao D, et al. Higher soil capacity of intercepting heavy rainfall in mixed stands than in pure stands in riparian forests [J]. Science of the Total Environment, 2018, 658: 1514−1522.

[12] Dai J, Li Y, Wang L. Mixed-species plantations alleviate deep soil water depletion and facilitate hydrological niche partitioning compared to pure plantations [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 539: 121017.

[13] Xuedong C, Ming T, Xinlu Z, et al. Why does oriental arborvitae grow better when mixed with black locust: insight on nutrient cycling? [J]. Ecology and Evolution, 2018, 8(1): 744−754.

[14] Gao X, Li H, Zhao X, et al. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration [J]. Geoderma, 2018, 319: 61−69.

[15] Tang Y, Wu X, Chen Y, et al. Water use strategies for two dominant tree species in pure and mixed plantations of the semiarid Chinese Loess Plateau [J]. Ecohydrology, 2018, 11(4): e1943.

[16] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 等. 晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 181−187.
Zhao D Y, Bi H X, Hou G R, et al. Soil moisture dynamics of typical plantation in loess region of West Shanxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 181−187.

[17] Jia X, Shao M, Zhu Y, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113−122.

[18] 张秀芝, 司剑华. 西宁市南山典型林地土壤水分变化特征 [J]. 节水灌溉, 2025(4): 38−43.
Zhang X Z, Si J H. Characteristics of soil moisture changes in typical forest land in Nanshan Mountain, Xining City, China [J]. Water Saving Irrigation, 2025(4): 38−43.

[19] Zhao Y, Wang Y, Wang L, et al. Exploring the role of land restoration in the spatial patterns of deep soil water at watershed scales [J]. Catena, 2019, 172: 387−396.

[20] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 74−81.
Hu W, Shao M A, Wang Q J. Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 74−81.

[21] 金明娟. 黄土塬区降水补给土壤水分的过程及其有效性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
Jin M J. Study on the process and effectiveness of soil water recharge by precipitation in the Loess Plateau tableland[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025.

[22] 蔡进军. 宁夏黄土丘陵区人工林草植被生态水文过程与功能研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.

Cai J J. Study on the ecological hydrological process and function of the artificial forest and grass vegetation in the loess hilly region of Ningxia[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.

[23] 丁文斌, 王飞. 植被建设对黄土高原土壤水分的影响 [J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5531−5542.
Ding W B, Wang F. The impact of vegetation construction on soil moisture in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5531−5542.

[24] 费洪岩, 童倩, 万传宇, 等. 黄土高原不同林龄刺槐林土壤水分亏缺程度 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 240−246.
Fei H Y, Tong Q, Wan C Y, et al. Degree of soil moisture deficit of *Robinia pseudoacacia* plantations at different ages on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 240−246.

[25] 李琳琳, 王照利, 郭涛, 等. 2000—2020 年黄土高原生态系统服务价值的时空变化及驱动因素 [J]. 西北林学院学报, 2025, 40(5): 11−23.
Li L L, Wang Z L, Guo T, et al. Spatial and temporal changes in the value of ecosystem services and driving forces on the Loess Plateau, 2000−2020 [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2025, 40(5): 11−23.

[26] Zhao C, Shao M, Jia X, et al. Particle size distribution of soils (0-500 cm) in the Loess Plateau, China [J]. Geoderma Regional, 2016, 7(3): 251−258.

[27] 周红娟, 王彪, 王子涵, 等. 北京山区典型人工林乔木和灌木水分利用及水分生态位特征 [J]. 生态学报, 2025, 45(21): 10732−10747.
Zhou H J, Wang B, Wang Z H, et al. Water utilization and hydrological niche differentiation of plantation trees and understory shrubs in Beijing's mountainous region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(21): 10732−10747.

[28] Matsushita M, Takata K, Hitsuma G, et al. A novel growth model evaluating age–size effect on long-term trends in tree growth [J]. Functional Ecology, 2015, 29(10): 1250−1259.

[29] Ahmad B, Wang Y, Hao J, et al. Optimizing stand structure for trade-offs between overstory timber production and understory plant diversity: a case-study of a larch plantation in northwest China [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(9): 2998−3008.

[30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116−134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116−134.

[31] 张舒瑾, 余珮珩, 白少云, 等. 面向国土空间规划的流域景观时空分异特征及驱动因子研究 [J]. 生态经济, 2020, 36(10): 219−227.
Zhang S J, Yu P H, Bai S Y, et al. Study on the spatio-temporal stratified heterogeneity and driving factors of watershed landscape for national spatial planning [J]. Ecological Economy, 2020, 36(10): 219−227.

[32] 李琛, 吴映梅, 高彬嫔, 等. 高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测——以环洱海地区为例 [J]. 经济地理, 2022, 42(4): 220−229.
Li C, Wu Y M, Gao B B, et al. Spatial differentiation and driving factors of rural settlement in Plateau Lake: a case study of the area around the Erhai [J]. Economic Geography, 2022, 42(4): 220−229.

[33] 魏强, 凌雷, 柴春山, 等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质 [J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4700−4713.
Wei Q, Ling L, Chai C S, et al. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4700−4713.

[34] 方伟东, 亢新刚, 赵浩彦, 等. 长白山地区不同林型土壤特性及水源涵养功能 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(4): 40−47.
Fang W D, Kang X G, Zhao H Y, et al. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Changbai Mountain [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(4): 40−47.

[35] 陈曦. 桥山林区南峪口流域不同林分的土壤水分过程与植被承载力研究 [D]. 西安：西安理工大学, 2023.
Chen X. The study of soil moisture process and vegetation carrying capacity of different forest stands in the Nanyukou Watershed of the Qiaoshan forest region[D]. Xi'an：Xi'an University of Technology, 2023.

[36] 白文娟. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤质量的影响与植物生理生态适应性 [D]. 北京：中国科学院研究生院 (教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
Bai W J. Effects of vegetation restoration on soil quality and plant physio-ecological adaptability in water-wind erosion region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010.

[37] 胡静霞, 杨新兵. 清水河流域典型林分类型土壤水分特征研究 [J]. 西南农业学报, 2018, 31(1): 118−125.
Hu J X, Yang X B. Study on soil water characteristics of typical forest types in Qingshui River Basin [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(1): 118−125.

[38] 许丽, 刘永刚, 李得禄. 民勤绿洲人工灌木林混交与纯林配置模式的生长特性及生态效益评估 [J]. 防护林科技, 2025(6): 1−9, 17.
Xu L, Liu Y G, Li D L. Growth characteristics and ecological benefit evaluation of mixed and pure stand configuration modes of artificial shrub forests in Minqin Oasis [J]. Protection Forest Science and Technology, 2025(6): 1−9, 17.

[39] 王娜娜. 基于稳定同位素的宁夏河东沙区大气−土壤系统水分运移过程研究 [D]. 银川：宁夏大学, 2024.
Wang N N. Study on water transport process of atmosphere-soil system in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia based on stable isotopes[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024.

[40] 王军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响 [J]. 地理学报, 2000,55(1): 84−91.
Wang J, Fu B J. The impact of land use on spatial and temporal distribution of soil moisture on the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(1): 84−91.

[41] 朱悦. 晋西黄土区土壤水分特性研究 [D]. 北京：北京林业大学, 2012.
Zhu Y. Study on Soil moisture characteristics in Loess Area of West Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

[42] 张梅, 马菊. 不同人工林地土壤水分特征 [J]. 陕西林业科技, 2025, 53(4): 50−55.
Zhang M, Ma J. Soil moisture characteristics of different artificial forest lands [J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2025,

53(4): 50−55.

[43] 康赛, 毕华兴, 管凝, 等. 黄土高原典型小流域不同人工林地土壤碳水权衡关系 [J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 197−204.
Kang S, Bi H X, Guan N, et al. Soil carbon-water trade-offs in different artificial forestlands of typical small watersheds on Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 197−204.

[44] Binbin L, Wantao Z, Shujie L, et al. Severe depletion of available deep soil water induced by revegetation on the arid and semiarid Loess Plateau [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 491: 119156.

[45] 张雪, 田丽慧, 杨宗雨, 等. 西宁市不同配置模式人工林地树木水分利用特征 [J]. 生态学报, 2025, 45(13): 6390−6405.
Zhang X, Tian L H, Yang Z Y, et al. Characteristics of water uses of trees in plantations with different configuration patterns in Xining City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): 6390−6405.

[46] 赵影. 黄土高原半干旱区植物水分利用策略及机制 [D].北京：中国科学院大学 (中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2022.
Zhao Y. Plant water use strategies and mechanisms in the semi-arid region of the Loess Plateau[D].Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.

[47] Jia H, Tian B, Song X, et al. Post-conversion vegetation restoration: PRE and VPD dominated the NDVI changes on the Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 394: 127434.

[48] Guo Q, Rewald B, Sandén H, et al. Above- and below-ground phenology of four tree species in mixed forests and monospecific stands [J]. Functional Ecology, 2025, 39(12): 3751−3765.

[49] Wu X, Yan X, Liu X, et al. A comparison of water use strategies between pure and mixed forests on the Chinese Loess Plateau [J]. Functional Ecology, 2026, 40: 256−279.

[50] Jia X, Wang Y, Shao M, et al. Estimating regional losses of soil water due to the conversion of agricultural land to forest in China's Loess Plateau [J]. Ecohydrology, 2017, 10(6): e1851.

[51] Forrester I D. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: from pattern to process [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 312: 282−292.

[52] 马剑, 刘贤德, 李广, 等. 祁连山北麓中段青海云杉林土壤水热时空变化特征 [J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1033−1040.
Ma J, Liu X D, Li G, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture and temperature of *Picea crassifolia* forest in north piedmont of central Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1033−1040.

[53] 谢正丰, 王冬梅, 张鹏, 等. 黄土高寒区小流域土壤水分空间变异与环境影响因子 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 196−203.
Xie Z F, Wang D M, Zhang P, et al. Spatial variation of soil moisture and its environmental influencing factors in a small watershed in the loess alpine region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 196−203.

[54] 于博威, 刘高焕, 崔保山. 晋西黄土丘陵区人工刺槐林土壤干燥化效应 [J]. 环境生态学, 2020, 2(Z1): 51−58.
Yu B W, Liu G H, Cui B S. Soil desiccation effects under *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess hilly region of Western Shanxi Province [J]. Environmental Ecology, 2020, 2(Z1): 51−58.

[55] 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 马尾松, 红锥纯林及其混交林土壤化学计量特征 [J]. 广西林业科学, 2021, 50(3): 514−521.
Shu W W, Lu L H, Li H, et al. Soil stoichiometric characteristics of pure and mixed plantations of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* [J]. Guangxi Forestry Science, 2021, 50(3): 514−521.

[56] de Lucia E H, Berlyn G P. The effect of increasing elevation on leaf cuticle thickness and cuticular transpiration in balsam fir [J]. Canadian Journal of Botany, 1984, 62(11): 2423−2431.

[57] 崔悦, 闫冰, 李治学, 等. 坝上地区典型防护林水源涵养功能对林分结构的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9): 77−86.
Cui Y, Yan B, Li Z X, et al. Response of water conservation function of typical protective forests in Bashang area of northern China to stand structure [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9): 77−86.

[58] 赵建文, 李金麟, 王圣杰. 祁连山土壤水分时空变化特征及主要驱动因素分析 [J]. 干旱区地理, 2025, 48(8): 1480−1491.
Zhao J W, Li J L, Wang S J. Characteristics of spatial and temporal variation of soil moisture and analysis of main driving factors in the Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2025, 48(8): 1480−1491.

[59] 杨雪梅, 王让会. 基于地理探测器的柯柯牙工程区土壤水分变化特征及驱动力分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(26): 11148−11157.
Yang X M, Wang R H. Analysis of soil moisture variation characteristics and driving force in Kekeya area based on geographic detector [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(26): 11148−11157.

[60] 杨秋琳, 米丽娜, 刘玉忠, 等. 2003—2022 年宁夏不同生态分区土壤水分时空变化及其影响机制 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 102−113.
Yang Q L, Mi L N, Liu Y Z, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture in different ecological regions of Ningxia and their influencing mechanisms from 2003 to 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 102−113.

[61] 刘磊, 李小雁, 蒋志云, 等. 青海湖流域不同海拔高度土壤水分时空变化特征 [J]. 资源科学, 2017, 39(2): 263−275.
Liu L, Li X Y, Jiang Z Y, et al. Variation in soil water content along different altitude gradients in the Qinghai Lake Watershed [J]. Resources Science, 2017, 39(2): 263−275.

[62] 陈硕, 赵文武. 中国干旱半干旱区 1990-2020 年土壤水蚀时空变化及动态驱动力 [J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 10−20.
Chen S, Zhao W W. Spatial and temporal changes and dynamic driving forces of soil water erosion in arid and semi-arid regions of China from 1990 to 2020 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 10−20.

[63] 李泓儒, 李超凡. 天山北坡土壤水分时空变化及驱动力分析 [J]. 水土保持学报, 2025, 39(3): 135−146，153.
Li H R, Li C F. Analysis of temporal and spatial changes of soil moisture and its driving forces on the northern slope of the Tianshan Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3): 135−146 , 153.

（责任编辑 李 契
责任编委 赵秀海）