

典型黄土区人工林土壤水分与养分的区域特征

马 驰, 莫保儒, 马全林, 薛 睿

(甘肃省林业科学研究院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: [目的] 分析黄土区不同人工林土壤水分和养分的变化规律, 全面评估植被恢复对生态系统结构和功能的影响, 为区域人工林可持续经营提供科学依据。[方法] 以甘肃省典型黄土区人工林样地为研究对象, 运用 2022 年 8—9 月各区域典型人工林地土壤水分和土壤养分数据, 分析黄土区不同人工林地土壤水分和养分的分布特征, 探讨不同区域人工林土壤水分和土壤养分的差异性。[结果] ① 各区域不同人工林土壤含水量随土层深度的增加而降低, 干燥化逐步加深, 但当人工林进入成熟或衰老阶段后, 土壤水分有所恢复。在空间上, 甘肃省黄土区人工林土壤含水量从北到南、从西向东呈增加趋势。② 各区域大部分土壤呈碱性, 有机质、全氮、全磷、全钾含量较低; 碱解氮含量陇西县最大, 镇原县最低; 速效磷含量合水县最大, 天水市最低; 速效钾含量合水县最大, 镇原县最低。[结论] 黄土区在植被恢复过程中, 应根据不同微地形的土壤水分与养分分布特征, 结合“适地适树”的种植原则, 合理配置乔、灌、草的营建模式, 改良土壤环境。

关键词: 人工林; 土壤水分; 土壤养分; 黄土区; 甘肃省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0086-14

中图分类号: S714.2

文献参数: 马驰, 莫保儒, 马全林, 等. 典型黄土区人工林土壤水分与养分的区域特征[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 86-99. Ma Chi, Mo Baoru, Ma Quanlin, et al. Regional characteristics of soil moisture and nutrients under artificial forests in typical loess regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 86-99.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.026

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.026

Regional characteristics of soil moisture and nutrients under artificial forests in typical loess regions

Ma Chi, Mo Baoru, Ma Quanlin, Xue Rui

(Gansu Academy of Forestry, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] The variation patterns of soil moisture and nutrients under different artificial forests in the Loess Plateau were analyzed, and the impact of vegetation restoration on ecosystem structure and function was comprehensively evaluated, in order to provide a scientific basis for the sustainable management of regional artificial forests. [Methods] Typical artificial forest plots in loess regions of Gansu Province were selected as research subjects. Using soil moisture data at a depth of 6 meters and soil nutrient data at a depth of 1 meter collected from various regions between August and September 2022, the distribution characteristics of soil moisture and nutrients under different artificial forests in loess regions were analyzed, and the differences in soil moisture and nutrients under artificial forests across different regions were explored. [Results] ① In different regions, soil moisture profiles under artificial forests gradually decreased with increasing soil depth, indicating a progressive drying process. However, when artificial forests reached maturity or aging stages, soil moisture partially recovered. Geographically, in loess regions of Gansu Province, the average soil moisture under artificial forests showed an increasing trend from north to south and from west to east. ② In terms of soil nutrients, most

收稿日期: 2025-08-25

修回日期: 2025-11-16

采用日期: 2025-11-19

资助项目: 国家自然科学基金委员会区域创新发展联合资助项目“黄土高原干旱缺水综合植被承载力的形成机制及时空变化”(U21A2005); 甘肃省林业和草原科技创新项目“陇中黄土高原退化林修复及功能提升关键技术研究”; 甘肃省省级生态文明建设重点研发专项“甘肃黄河‘几字弯’低质低效防护林修复与多功能协同提升技术与示范”(24YFFA040); 中央财政林业草原科技推广示范项目“‘三北’工程黄河‘几字弯’甘肃片区低质低效防护林修复技术示范推广”(甘[2025]ZYTG06号)

第一作者: 马驰(1991—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 硕士, 副研究员, 主要从事干旱区生态治理方面的研究。Email: 1559180956@qq.com。

通信作者: 莫保儒(1974—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 研究员, 主要从事干旱区生态治理方面的研究。Email: 444276802@qq.com。

soils in each region were alkaline, with low contents of organic matter, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium. Alkali-hydrolyzable nitrogen was highest in Longxi County and lowest in Zhenyuan County. Available phosphorus was highest in Heshui County and lowest in Tianshui County. Available potassium was highest in Heshui County and lowest in Zhenyuan County. [Conclusion] During vegetation restoration in the Loess Plateau, soil moisture and nutrient distribution characteristics of different microtopographies should be considered, and the planting principle of 'right tree in the right place' should be followed to reasonably configure tree, shrub, and grass planting patterns to improve the soil environment. This approach plays a positive role in ecological management in the Loess Plateau.

Keywords: artificial forest; soil moisture; soil nutrients; Loess Plateau; Gansu Province

土壤水分作为土壤-植被-大气连续体(SPAC)中的关键纽带,在地表水、土壤水和地下水的相互转化过程中发挥着重要作用^[1-2]。受植被类型、整地方式等多种因素的综合影响,土壤水分表现出显著的时空异质性^[3-4]。黄土高原作为典型的生态脆弱区和水土流失严重区域,自实施退耕还林还草工程以来取得了显著成效^[4-5]。2000—2020年,该区域土地利用格局发生明显变化,耕地面积减少12 918 km²,林地面积增加3 232 km²,灌木地面积增加555 km²,未利用地面积减少1 982 km²^[6]。然而,受限于干旱少雨的气候特征和强烈的蒸发作用,加之部分不合理的造林方式,导致土壤水分持续消耗^[7-8],林地土壤水分亏缺现象日益严重^[9-10],土壤干层向下延深。在此背景下,土壤水分已成为制约人工林生长和评价生态环境质量的关键因子。因此,深入研究土壤水分动态变化对于全面评估植被恢复对生态系统结构和功能的影响具有重要意义^[11]。土壤养分的空间分布格局受地形、土地利用等因素的调控,呈现出特定的分布规律。不同林分类型下土壤养分状况存在显著区域差异,这种差异性通过改变土壤温湿度条件影响微生物活性,进而调控凋落物分解、养分积累和矿化过程^[12]。研究表明,土壤有机质、全氮和全磷等养分含量随林分发育呈现递增趋势^[12]。此外,相关研究证实,合理的整地方式可促进凋落物和养分的快速周转,有效提升土壤生产力。相较于林分水平结构,油松和刺槐人工林的垂直结构与土壤养分含量具有更显著的相关性。不同林分类型通过调控光照、温度和水分等环境因子,改变林下微环境和土壤理化性质,从而影响土壤养分、水分的含量和空间分布^[13-14]。同时,通过优化林分结构可有效调节上述环境因子^[15],实现土壤养分、水分的良性循环^[16]。

本研究基于野外调查结果,综合运用传统统计学方法,系统分析土壤pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾等指标的变异特征及其与高程的响应关系,研究结果可为区域人工林的可持续经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省典型黄土高原区,平均海拔1 800 m左右。年平均气温9.5℃,平均无霜期160 d,年日照时数2 052 h。年均降水量450.0 mm,主要集中在7—9月,年干燥度3.2^[17]。研究区土质均一,土壤类型以黄绵土为主,有机质含量低。天然植被以多年生草本为主,主要植物种类有长芒草(*Stipa bungeana*)、赖草(*Leymus secalinus*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)等。人工植被以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、山杏(*Prunus sibirica*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、云杉(*Picea asperata*)等为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

以典型黄土区不同人工林为研究对象(图1),分别选取甘肃省庆阳市合水县的人工油松林、人工刺槐林;庆城县的人工油松山杏混交林、退化山杏林;镇原县的人工油松山杏混交林;平凉市泾川县的人工侧柏林、刺槐油松混交林;静宁县的人工油松林、刺槐山杏混交林;天水市清水县的人工油松林、麦积区的人工刺槐油松混交林;定西市陇西县的人工杨树云杉混交林;临夏市广河县的人工云杉林。人工林样地概况见表1。针对不同林分类型设置20 m×20 m的样地17个,并在每个样地内设置1 m×1 m的草本样方,进行植被调查,采集土样^[17]。

1.2.2 土壤数据测定方法

(1) 土壤水分测定。2022年8—9月,在每个样地中,采用土钻法进行土样采集,测定深度为600 cm,每20 cm土层取样1次,共30次。采用烘干称重法测定土壤含水量,将已称取湿重后的土壤样品,置于鼓风干燥箱,于105℃条件下连续烘干24 h至恒重后,称量干土质量^[18]。取每层土壤含水量平均值作为该层土壤含水量。土壤含水量计算公式为

$$SMC = \frac{G_1 - G_2}{G_2 - G} \times 100\% \quad (1)$$

式中：SMC (soil moisture content) 为土壤含水量

(%)； G_1 为铝盒和湿土质量(g)； G_2 为铝盒与干土质量(g)； G 为空铝盒质量(g)。

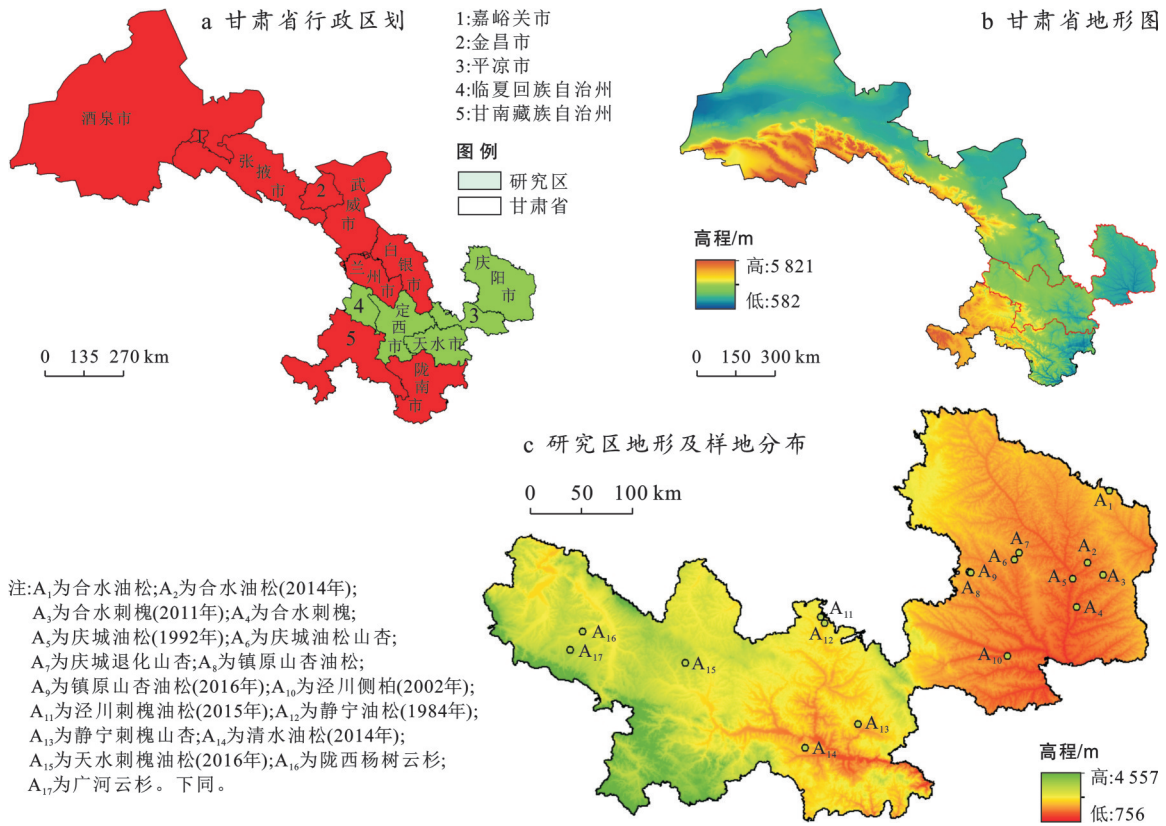


图 1 甘肃省地形及样地分布图

Fig.1 Location of Gansu Province and distribution of sample plots

表 1 黄土高原典型人工林样地信息

Table 1 Information of typical artificial forest demonstration plots on Loess Plateau

样地	海拔高度/m	坡位	坡度/(°)	整地方式	林分类型	林分组成	混交比例	郁闭度/%	林龄/年
A ₁	1 357~1 358	中	29~30	坡地	纯林	油松		95	40
A ₂	1 340~1 342	中	35~36	隔坡水平台	纯林	油松	7:3	20	25
A ₃	1 345~1 346	上	34~35	隔坡水平沟	纯林	刺槐		50	26
A ₄	1 090~1 091	中	45~46	隔坡水平沟	纯林	刺槐		70	42
A ₅	1 050~1 051	下	27~28	隔坡水平台	纯林	油松		98	40
A ₆	1 490~1 492	中	25~26	隔坡水平台	混交林	油松+山杏	7:3	75	23
A ₇	1 400~1 402	上	26~27	隔坡水平台	纯林	山杏		50	30
A ₈	1 530~1 531	上	27~28	隔坡水平阶	混交林	山杏+油松	3:7	85	50
A ₉	1 560~1 561	上	45~46	鱼鳞坑	混交林	山杏+油松	3:7	75	55
A ₁₀	1 320~1 322	上	26~28	鱼鳞坑	纯林	侧柏		40	23
A ₁₁	1 350~1 351	中	27~29	穴状整地	混交林	刺槐+油松	7:3	95	45
A ₁₂	1 850~1 851	下	45~47	隔坡反坡台	纯林	油松		90	40
A ₁₃	1 720~1 722	下	26~29	隔坡水平沟	混交林	刺槐+山杏	6:4	60	30
A ₁₄	1 620~1 621	上	27~30	梁峁顶	纯林	油松		50	25
A ₁₅	1 690~1 691	中	45~48	水平台	混交林	刺槐+油松		95	25
A ₁₆	2 390~2 391	上	26~30	水平沟	混交林	杨树+云杉	3:7	50	30
A ₁₇	2 340~2 341	上	27~31	自然坡	纯林	云杉		40	21

(2) 土壤养分测定方法。在 20 m×20 m 人工林样地内分别选取上坡位、中坡位和下坡位,利用土钻在不同坡位采集 20, 40, 60 cm 土层的土样。土壤有机质(%)、全氮(%)、全磷(%)、全钾(%)、碱解氮(mg/kg)、速效磷(mg/kg)、速效钾(mg/kg)含量测定参考土壤农化分析方法^[19];土壤 pH 值采用电位法测定。

1.3 数据统计分析

采用 Excel 2018 软件对试验数据进行整理;运用 Origin2018 软件对数据进行统计处理与分析。

2 结果与分析

2.1 不同区域深层土壤含水量的差异

由图 2 可知,泾川侧柏样地的土壤含水量为 5%,在所有样地中处于最低水平。泾川县年平均降水量为 550~650 mm,与清水县(550~650 mm)的降水量一致(表 2),而清水油松样地的土壤含水量(17%)远高于泾川侧柏样地。这表明深层土壤水分含量与区

域年降水量之间关系并不紧密。从区域分布看出,天水等地区的土壤水分含量明显优于黄土区其他样地。

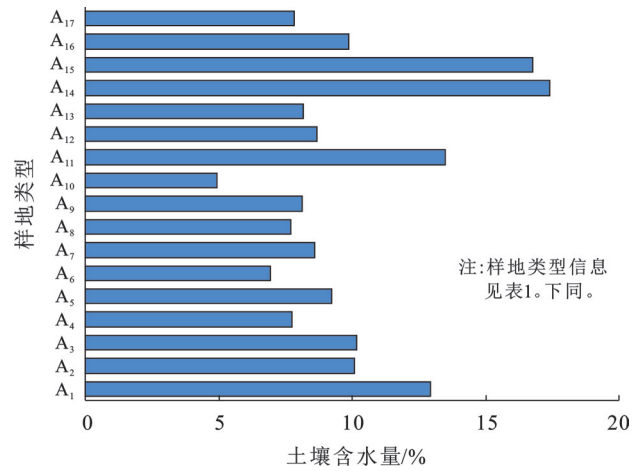


图 2 研究区各样地深层土壤水分分布
Fig.2 Average distribution of deep soil moisture across different sample plots in study area

表 2 各样地所属县域的年平均降水量

Table 2 Annual average rainfall amount of counties where different sample plots are located

地区	所属市(州)	年降水量/mm	气候类型与特点说明
合水县	庆阳市	550~650	暖温带半湿润气候;地处陇东地区,子午岭山区植被覆盖度高,对降水有积极作用,年降水量与泾川县、清水县相当
庆城县	庆阳市	500~580	暖温带半湿润气候;地处庆阳市中部,年降水量略低于其东部的合水县
镇原县	庆阳市	450~530	中温带半干旱半湿润气候;位于庆阳市西南部,地势较高,降水量较本市东北部县区有所减少
泾川县	平凉市	550~650	暖温带半湿润气候;位于陇东,靠近子午岭,降水条件较好,是陇东地区降雨中心之一
静宁县	平凉市	450~520	中温带半干旱半湿润气候;地处黄土高原丘陵沟壑区,是平凉市降水量相对较少的县
清水县	天水市	550~650	暖温带半湿润气候;位于天水市东北部,地处关山山区,地形对降水抬升作用明显,是天水市乃至甘肃省的降雨中心之一
天水市	天水市	500~580	暖温带半湿润气候,年降水量较为充沛;渭河谷地降水稍少于北部山区
陇西县	定西市	380~450	中温带半干旱气候;位于甘肃中部,是典型的黄土高原梁峁沟壑地貌,降水量偏少
广河县	临夏州	350~420	中温带半干旱气候;地处黄土高原与青藏高原过渡带,降水量少,干旱问题较为突出

注:数据来源于《甘肃省气象志》、各地气候公报及多年气候统计资料。

结合图 1 和图 2 的空间分布特征可以看出,各样地的土壤含水率基本维持在 9%~14% 的区间内,同时,甘肃省黄土区的土壤含水量呈现明显的空间梯度变化,表现为自北向南、从西向东呈逐渐递增的趋势。从林分结构类型来看,侧柏样地的水分含量显著偏低,而刺槐和油松样地的土壤水分在多数林分类型下均表现出协同增长的特征。由表 2 与图 2 对比分析可

知,不同区域降水量对于各样地内深层土壤水分影响不明显;不同混交林的土壤含水率存在显著差异,其中刺槐-油松混交林的土壤水分条件最好,而侧柏纯林的水分最为匮乏,不同整地类型中,水平沟整地的样地土壤水分条件普遍优于其他整地方式。此外,人工林林龄与土壤水分呈现负相关关系,即随着林龄的增长,林下土壤水分含量呈现递减趋势。

2.2 同一区域内不同林分土壤水分垂直分布特征

合水县各样地深层土壤水分变化呈现明显的“S”形特征(图 3a),其土层深度临界值约为 400 cm。从深层土壤水分的箱体图和正态分布趋势(图 3b)来看,各测点的含水量表现为:合水油松>合水油松(2014年)>合水刺槐(2011年)>合水刺槐。表 2 表明,不同人

工林类型对深层土壤含水率的影响存在显著差异,表现为:油松纯林>油松混交林>刺槐纯林。结合图 1 和图 2 的空间分布特征可以看出,合水县深层土壤含水率在不同样地间存在显著差异,表现为:合水油松>合水油松(2014年)>合水刺槐(2011年)>合水刺槐,且呈现出自东向西、由北向南逐渐降低的趋势。

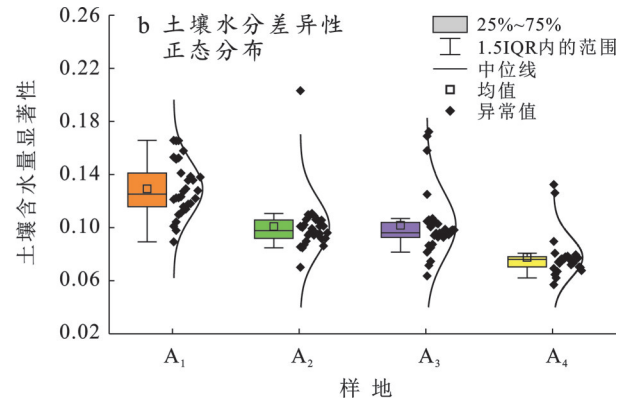
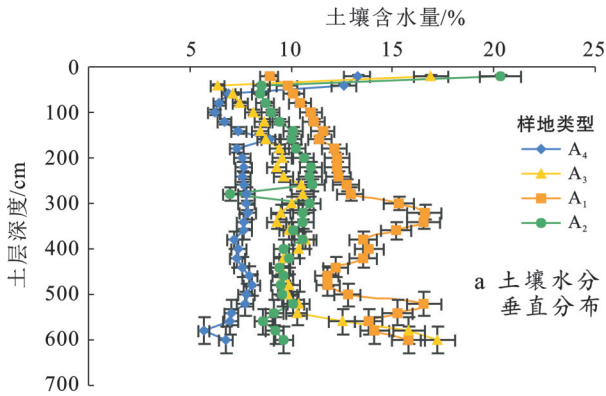


图 3 合水县深层土壤水分垂直分布与差异性正态分布趋势

Fig.3 Vertical distribution and differential normal distribution trends of deep soil moisture in Heshui County

庆城县深层土壤水分变化表现出明显的垂直分异特征(图 4),该区域土层深度的水分变化临界值约为 200 cm。土壤水分含量呈现庆城油松(1992年)>庆城退化山杏>庆城油松山杏的空间分异格局。由表 1 可知,不同人工林类型对深层土壤含水率的影响存在显著差异($p < 0.05$),其影响程度依次为:油松纯

林>退化油松-山杏混交林>油松-山杏混交林。综合分析图 1 和图 4 的空间分布特征发现,庆城县深层土壤含水率在不同采样点间存在显著差异($p < 0.05$),表现为:庆城油松(1992年)>庆城退化山杏>庆城油松山杏,且呈现出由东向西、自北向南逐渐递减的变化趋势。

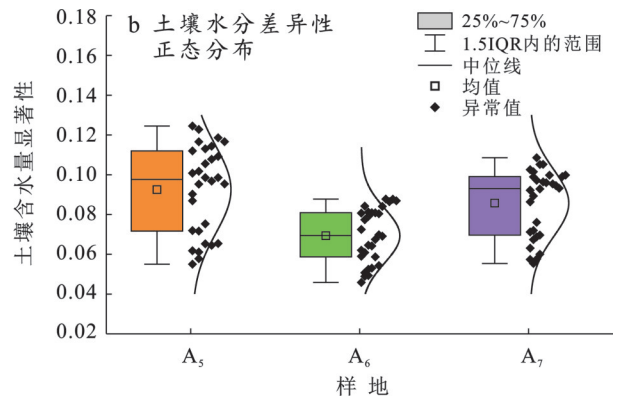
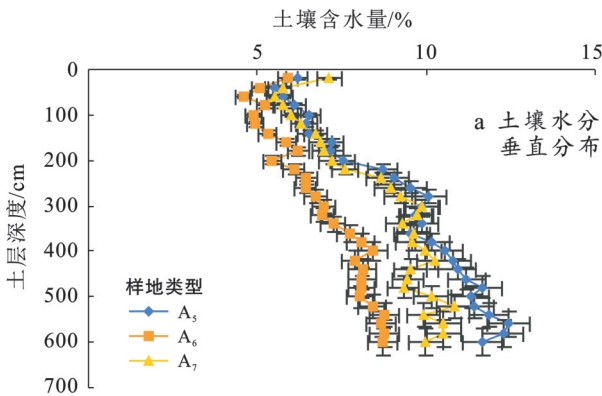


图 4 庆城县深层土壤水分垂直分布与差异性正态分布趋势

Fig.4 Vertical distribution and differential normal distribution trends of deep soil moisture in Qingcheng County

镇原县深层土壤水分变化呈现明显的垂直分异特征(图 5a),该区域土壤水分变化的临界深度约为 450 cm。通过深层土壤水分箱体图和正态分布趋势(图 5b)可以看出,土壤含水量表现为 $A_9 > A_8$,反映出研究区土壤水分整体呈现镇原山杏油松(2016年)>镇原山杏油松的空间分异格局。由表 1 可知,不同人工林类型对深层土壤含水率的影响存在显著差异($p < 0.05$),具体表现为:油松-山杏混交林(鱼鳞坑整

地)>油松-山杏混交林(隔坡水平台整地)。综合图 1 和图 5 的空间分布特征,镇原县深层土壤含水率在不同样地间存在显著差异($p < 0.05$),表现为镇原山杏油松(2016年)>镇原山杏油松的空间格局,且呈现出由北向南逐渐递减的变化趋势;同时,镇原县油松-山杏混交林的整地方式对土壤含水率具有显著影响,鱼鳞坑整地方式的保水效果明显优于隔坡水平台整地方式。

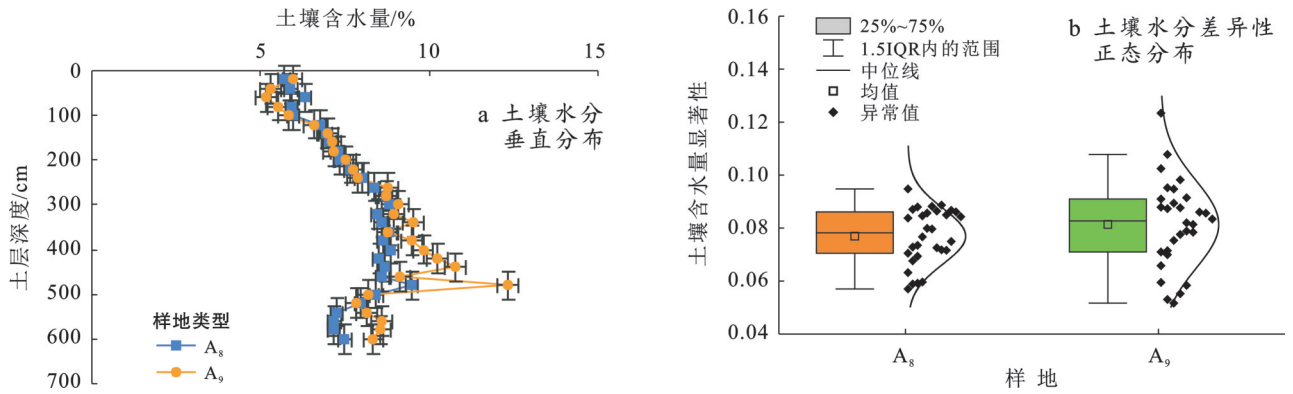


图5 镇原县深层土壤水分垂直分布与差异性正态分布趋势

Fig.5 Vertical distribution and differential normal distribution trends of deep soil moisture in Zhenyuan County

泾川县深层土壤水分变化呈现典型的“S”型垂直分布特征(图6a),该区域土壤水分变化的临界深度约为300 cm。由深层土壤水分的箱体图和正态分布趋势(图6b)可以看出,研究区土壤水分含量呈现泾川侧柏(2002年)>泾川刺槐油松(2015年)的空间分布特征。由表1可知,不同人工林类型对深层土壤含水率的影响存在显著差异($p < 0.05$),其影响程度

表现为侧柏林>油松-刺槐混交林。结合图1和图6的空间分布特征,泾川县深层土壤含水率在不同样地间存在显著差异($p < 0.05$),表现为泾川侧柏(2002年)>泾川刺槐油松(2015年)的空间格局,且呈现出由东向西、自北向南逐渐递减的变化趋势。这一空间分布模式与泾川县的地形特征和气候条件密切相关。

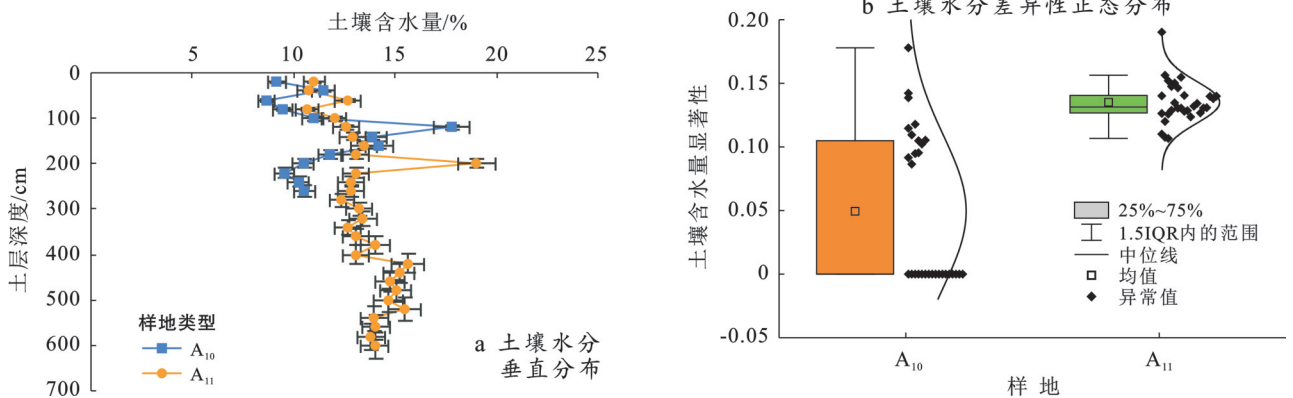


图6 泾川县深层土壤水分垂直分布与差异性正态分布趋势

Fig.6 Vertical distribution and differential normal distribution trends of deep soil moisture in Jingchuan County

由图7a可知,静宁县各样地深层土壤水分表现出明显的垂直分异规律,该区域土壤水分变化的临界深度约为300 cm。深层土壤水分箱体图和正态分布趋势(图7b)分析表明,土壤水分呈现静宁油松(1984年)>静宁刺槐山杏的空间分异特征。由表1可知,不同人工林类型对深层土壤含水率的影响存在显著差异($p < 0.05$),表现为油松纯林>刺槐-山杏混交林。综合图1和图7的空间分布特征,发现静宁县深层土壤含水率在不同样地间存在显著差异($p < 0.05$),表现为:静宁油松(1984年)>静宁刺槐山杏的空间格局,且呈现出由东向西、自北向南逐渐递减的变化趋势。这一空间分布特征可能与区域地形、降水及植被类型等因素密切相关。

2.3 不同区域内土壤养分的差异

甘肃省黄土区不同区域的土壤养分特征呈现显著的空间异质性(图8)。从土壤理化性质来看,研究区整体呈碱性环境,大部分样地土壤pH值超过7。有机质含量差异较大,多数区域维持在相对稳定的水平。土壤养分中,全氮含量在各区域相对稳定,在0.15%左右;碱解氮含量呈现较大波动,其中陇西县最高,镇原县最低。土壤中全磷含量在各区域较为稳定,基本保持在0.1%左右;速效磷含量则以合水县最高,天水市最低。

由此可见,研究区内pH值、有机质、全氮、碱解氮、速效钾和速效磷等含量均表现出明显的空间分异特征。同时,全钾和全磷含量的空间分布格局较

为相似,而速效磷、速效钾含量和pH值的空间分布存在显著差异。这些特征共同反映出甘肃省黄土

区表层土壤基本化学性质和有机质在空间分布上具有显著的异质性。

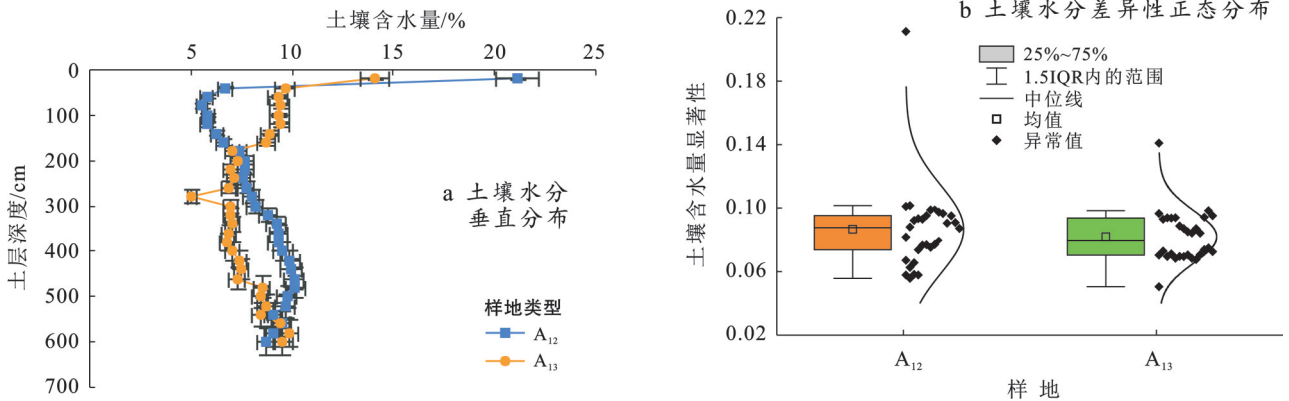


图 7 静宁县深层土壤水分垂直分布与差异性正态分布趋势

Fig.7 Vertical distribution and differential normal distribution trends of deep soil moisture in Jingning County

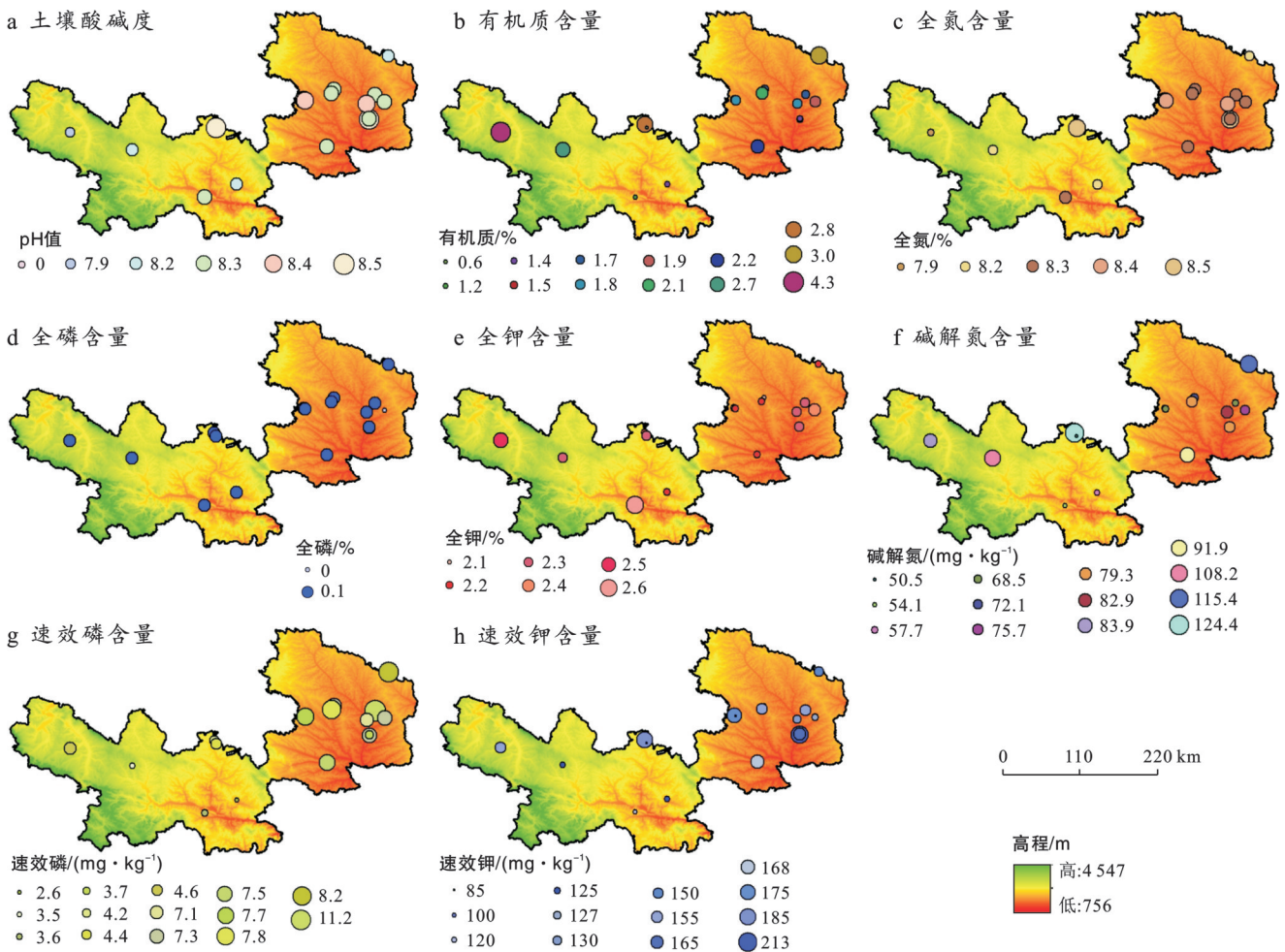


图 8 各区域样地土壤养分分布

Fig.8 Soil nutrient distribution of sample plots across different regions

2.4 不同区域内土壤养分差异显著性分析

由表 3 可知,研究区域内不同样地间土壤养分含量显著差异(p<0.05)。pH 值仅合水刺槐和镇原山杏油松(2016 年)样地呈酸性,其余样地均为碱性;除

静宁刺槐山杏外,其他样地间 pH 值均有显著差异;合水、庆城、镇原、泾川、静宁、清水、天水、陇西和广河等县域间 pH 值差异显著。庆城油松山杏、泾川侧柏(2002 年)、静宁油松(1984 年)、陇西杨树云杉和广

河云杉样地有机质含量差异显著;合水、庆城、陇西、广河等县域间差异显著。

土壤中各大量元素养分特征表现为全氮和全磷在全区域差异不显著;全钾在多数样地间差异显著;各县域间全钾含量差异显著,包括合水、庆城、镇原、泾川、静宁、天水、陇西等地。土壤中速效养分中,碱解氮含量在多数样地间差异显著;合水、庆城、镇原、泾川、静宁、清水、天水、陇西等县域间差异显著;合

水县不同林分类型(油松纯林、混交林、刺槐林)间碱解氮含量差异显著。土壤中速效磷含量在多数样地间差异显著,且合水、庆城、镇原、泾川、静宁、清水、天水等县域间差异显著;速效钾含量区域间差异不显著。这些结果表明,甘肃省黄土区不同县域及样地间的土壤养分特征存在明显的空间异质性,其中pH值、有机质、全钾、碱解氮和速效磷等指标的区域差异尤为显著。

表3 样地内人工林土壤养分含量

Table 3 Soil nutrient contents of artificial forests in sample plots

样地	pH值	有机质/%	全氮/%	全磷/%	全钾/%	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
A ₁	8.50±0.01 ^{ab}	1.30±0.35 ^b	0.10±0.01 ^b	0.10±0.01 ^a	2.23±0.06 ^{cdef}	51.70±7.49 ^{ab}	6.70±0.53 ^{ab}	144.33±64.51 ^a
A ₂	8.43±0.12 ^{ab}	1.20±0.44 ^b	0.07±0.06 ^b	0.10±0.02 ^a	2.30±0.03 ^{bcd}	50.50±15.69 ^{ab}	8.43±2.40 ^a	114.00±35.68 ^a
A ₃	8.37±0.06 ^{ab}	1.80±0.10 ^{ab}	0.10±0.02 ^b	0.07±0.06 ^a	2.33±0.06 ^{bcd}	58.90±20.47 ^{ab}	6.83±0.40 ^{ab}	100.67±22.94 ^a
A ₄	5.70±4.59 ^b	1.90±0.95 ^a	0.13±0.06 ^b	0.10±0.02 ^a	2.20±0 ^{def}	67.33±43.01 ^{ab}	7.03±1.04 ^{ab}	98.33±44.81 ^a
A ₅	8.47±0.06 ^{ab}	1.27±0.50 ^b	0.03±0.06	0.10±0.03 ^a	2.27±0.06 ^{cdef}	56.50±23.14 ^{ab}	6.80±0.36 ^{ab}	93.33±31.75 ^a
A ₆	8.43±0.12 ^{ab}	1.03±0.58 ^b	0.03±0.06 ^b	0.10±0.04 ^a	2.13±0.06 ^f	39.63±28.17 ^b	6.53±0.68 ^b	66.67±28.87 ^a
A ₇	8.40±0.10 ^{ab}	1.37±0.67 ^b	0.10±0.01 ^b	0.10±0.02 ^a	2.17±0.06 ^{ef}	55.30±23.42 ^{ab}	7.13±0.61 ^{ab}	101.67±46.46 ^a
A ₈	8.43±0.06 ^{ab}	1.17±0.55 ^b	0.07±0.06 ^b	0.10±0.03 ^a	2.20±0 ^{def}	45.70±12.64 ^{ab}	6.73±0.60 ^{ab}	101.67±63.71 ^a
A ₉	5.80±4.59 ^{ab}	1.10±0.61 ^b	0.07±0.06 ^b	0.10±0.02 ^a	2.27±0.06 ^{cdef}	50.50±18.00 ^{ab}	6.80±0.79 ^{ab}	70.00±13.23 ^a
A ₁₀	8.43±0.12 ^{ab}	1.43±0.67 ^{ab}	0.10±0.01 ^b	0.10±0.01 ^a	2.20±0.02 ^{cdef}	58.30±29.60 ^{ab}	6.87±0.71 ^{ab}	112.67±47.92 ^a
A ₁₁	8.37±0.06 ^{ab}	1.00±0.36 ^b	0.07±0.06 ^b	0.10±0.03 ^a	2.30±0.01 ^{bcd}	52.87±25.33 ^{ab}	2.60±0.95 ^d	111.67±46.46 ^a
A ₁₂	8.27±0.06 ^{ab}	1.67±1.06 ^{ab}	0.10±0.10 ^b	0.10±0.02 ^a	2.23±0.06 ^{cdef}	76.33±44.67 ^{ab}	2.87±1.22 ^{cd}	116.67±60.48 ^a
A ₁₃	8.87±0.40 ^a	0.93±0.29 ^b	0.40±0.52 ^a	0.10±0.01 ^a	2.37±0.21 ^{bc}	45.70±4.16 ^{ab}	4.37±0.06 ^e	73.33±10.41 ^a
A ₁₄	8.30±0.04 ^{ab}	1.10±0.10 ^b	0.10±0.03 ^b	0.10±0.04 ^a	2.60±0.01 ^a	54.10±3.60 ^{ab}	3.37±0.32 ^{cd}	105.00±13.23 ^a
A ₁₅	8.30±0.10 ^{ab}	1.13±0.23 ^b	0.10±0.02 ^b	0.10±0.03 ^a	2.33±0.12 ^{bcd}	39.07±16.16 ^b	3.03±0.45 ^{cd}	110.00±13.23 ^a
A ₁₆	8.27±0.06 ^{ab}	1.70±0.89 ^{ab}	0.13±0.06 ^b	0.10±0.04 ^a	2.23±0.06 ^{cdef}	69.73±33.51 ^{ab}	2.47±0.93 ^d	85.00±35.00 ^a
A ₁₇	8.07±0.15 ^{ab}	2.67±1.56 ^{ab}	0.17±0.06 ^b	0.03±0.06 ^b	2.43±0.12 ^b	95.27±37.37 ^a	5.97±1.19 ^b	121.67±30.55 ^a

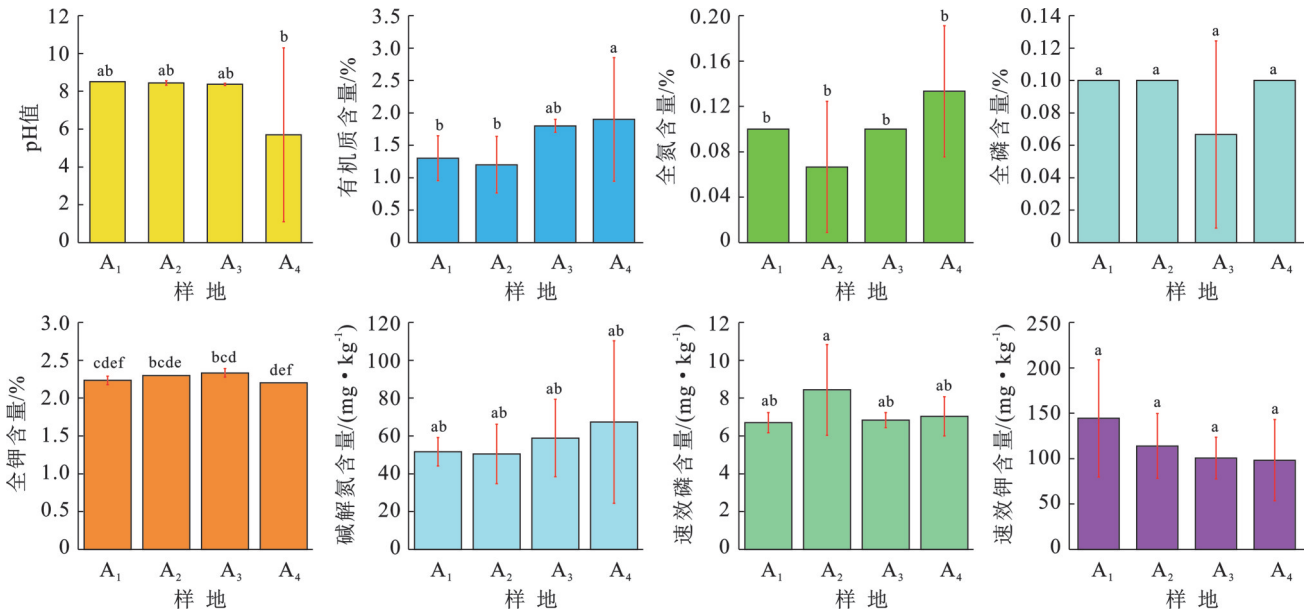
注:同行不同小写字母表示组间差异显著($p<0.05$)。

2.5 同一区域内不同林分土壤养分差异显著性

研究表明,合水县土壤pH值为5~8,其中合水油松、合水油松(2014年)、合水刺槐(2011年)为碱性土壤($pH>7$),合水刺槐为酸性土壤($pH=5$);合水油松、合水油松(2014年)与合水刺槐(2011年)土壤pH存在显著差异($p<0.05$)。由表1可知,不同林地类型间pH值差异显著,特别是油松纯林与油松混交林之间。油松混交林有机质含量差异显著($p<0.05$)。不同林地类型间全氮、全磷含量差异不显著,而全钾含量有显著差异($p<0.05$)。不同林分土壤速效养分含量存在显著差异,其中碱解氮在不同林地类型间差异显著;速效磷在油松纯林与刺槐林间差异显著;速效钾差异不显著。合水县不同林地类型的土壤养分特征存在明显差异,其中pH值、有机质、

全钾、碱解氮和速效磷含量等在不同林地类型间差异显著($p<0.05$),但全氮、全磷和速效钾等指标差异不显著($p>0.05$)(图9)。

庆城县各林地土壤均为碱性,其中庆城油松(1992年)、庆城油松山杏、庆城退化山杏土壤pH值存在显著差异($p<0.05$)。庆城县不同林地类型包括油松纯林、退化油松-山杏混交林和油松-山杏混交林的土壤pH值差异显著;土壤有机质、全氮和全磷含量差异不显著;全钾、碱解氮、速效磷含量在油松纯林与油松-山杏混交林间差异显著($p<0.05$);速效钾差异不显著(图10)。综合分析可知,庆城县同样地间土壤pH值存在显著差异,而庆城县不同林地类型的全钾、碱解氮和速效磷含量表现出明显差异性($p<0.05$)。



注:不同小写字母表示不同林分土壤养分含量差异显著($p < 0.05$),下同。

图9 合水县土壤养分差异显著性对比

Fig.9 Comparison of significant differences in soil nutrients in Heshui County

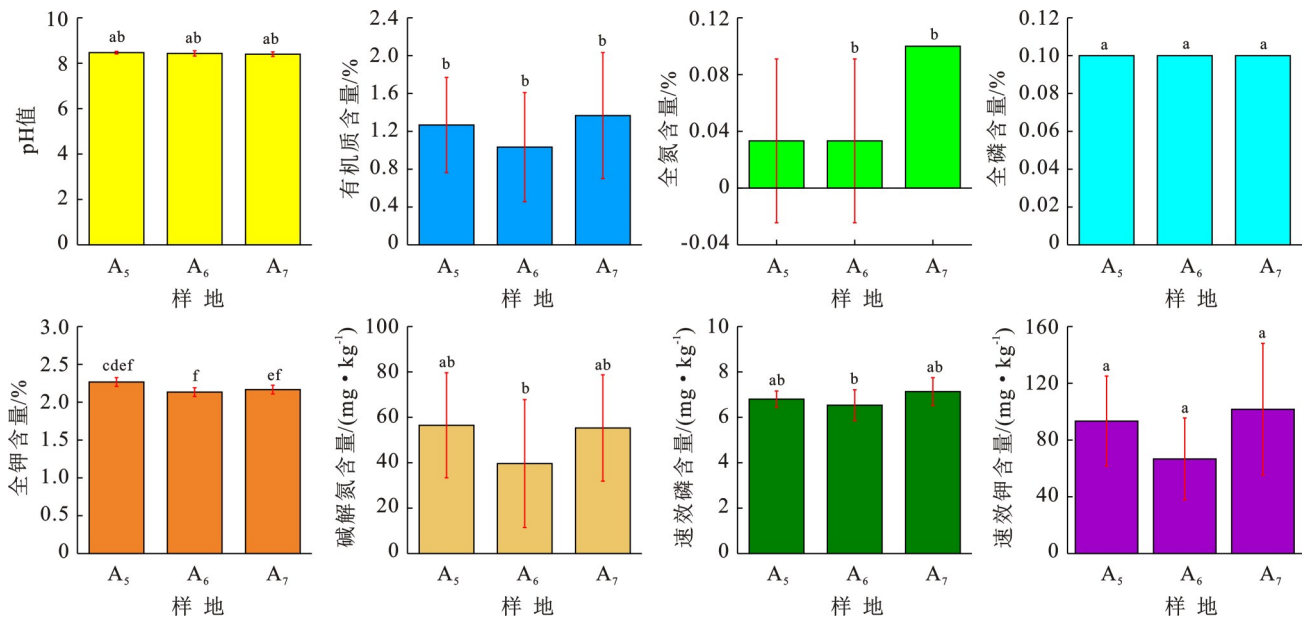


图 10 庆城县土壤养分差异显著性对比

Fig. 10 Comparison of significant differences in soil nutrients in Qingcheng County

由表 3 可知,镇原县油松-山杏混交(鱼鳞坑)样地属碱性土壤,油松-山杏混交(隔坡水平台)样地属酸性土壤,两者存在显著差异性($p < 0.05$),表明整地方式显著影响土壤的酸碱度。同时,土壤全钾、碱解氮及速效磷含量在不同整地方式间差异显著($p < 0.05$)。因此,镇原县采用鱼鳞坑和隔坡水平台整地方式的油松-山杏混交林中,土壤 pH 值、全钾、碱解氮和速效磷等指标均存在显著差异性($p < 0.05$) (图 11)。

研究结果(图 12)表明,泾川县侧柏林与油松-刺

槐混交林在土壤 pH 值、有机质、全钾、碱解氮和速效磷等含量均存在显著差异($p < 0.05$)。

静宁县油松林和刺槐山杏林样地均为碱性土壤,但油松林 pH 值差异性显著($p < 0.05$)。土壤有机质含量趋于稳定,其中油松林有机质及全氮含量存在显著差异($p < 0.05$)。在静宁县不同林地土壤的速效养分中,碱解氮在油松林与刺槐-山杏混交林间差异显著,速效磷在油松林内差异显著(图 13)。由此可知,静宁县油松林土壤 pH 值、有机质、全氮、碱解氮和速效磷含量差异显著($p < 0.05$)。

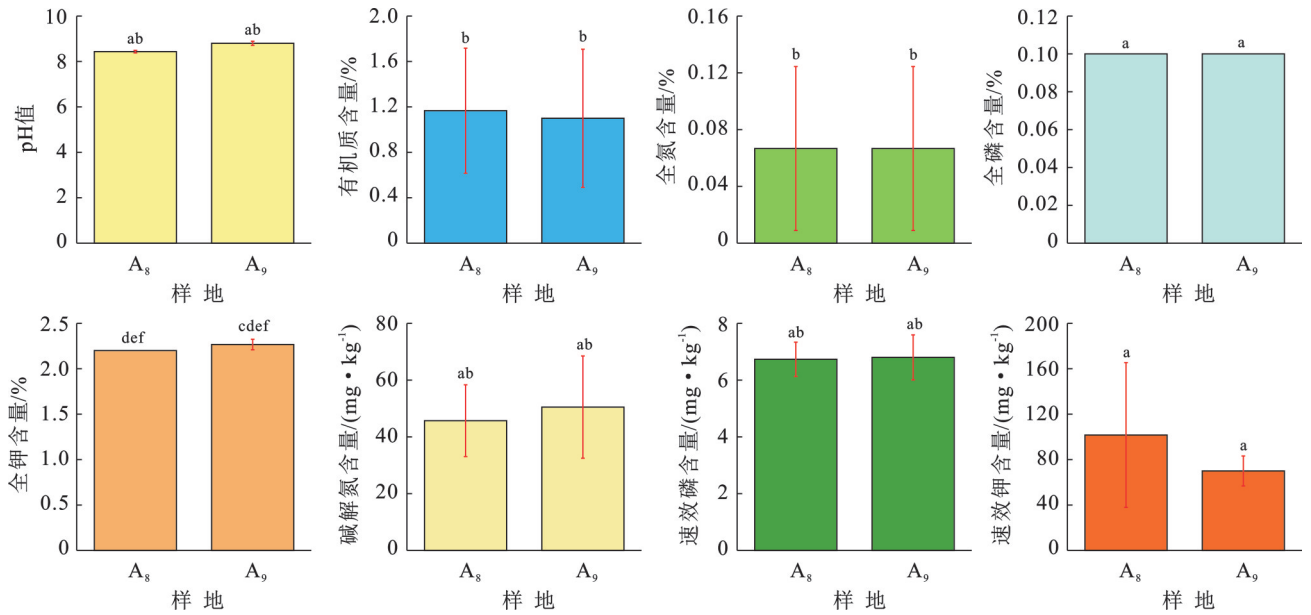


图 11 镇原县土壤养分差异显著性对比

Fig. 11 Comparison of significant differences in soil nutrients in Zhenyuan County

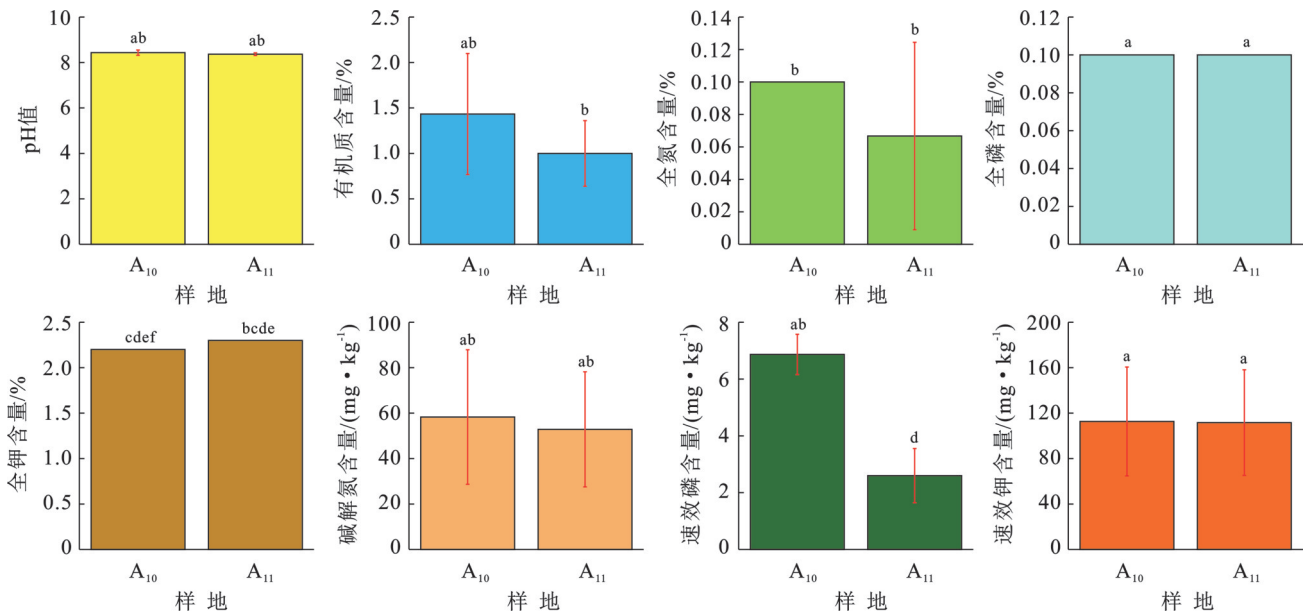


图 12 泾川县土壤养分差异显著性对比

Fig.12 Comparison of significant differences in soil nutrients in Jingchuan County

3 讨论

不同退耕还林植被类型的土壤含水量存在显著空间异质性^[20]。研究表明,合水刺槐和合水油松林土壤含水量随林龄增加呈下降趋势。这主要是由于随林龄增长,林木个体增大,根系扩展加深,林分郁闭度提高,导致蒸腾耗水量显著增加。不同退耕还林植被类型的土壤水分垂直分布特征显示,随着土层深度增加,土壤干燥化程度逐步增大。这表明人工林密度仅在群落发育初期对土壤水分影响较

大,由于植被强烈的水分耗散作用,土壤含水量迅速降低^[21-22]。然而,当人工林进入成熟或衰老阶段后,密度的影响逐渐减弱,土壤水分有所恢复,此时仅与灌木林、乔木林的生理生态特征密切相关^[23]。因此,在黄土高原植被恢复过程中,需综合考虑降水特征、植被类型及土壤条件,遵循适地适树(草)原则,依据土壤水分承载力合理选择植被类型和种植密度,实现土壤、水资源的可持续利用^[24]。

不同区域内不同人工林土壤水分含量随土层深度的增加而减小,人工林植被强烈的水分耗散,使土

壤含水量迅速减少,但当人工林进入成熟或衰老阶段后,人工林密度的影响逐步减弱^[25],土壤水分有所恢复,因此不同林分结构对林下土壤水分的作用影响也较大。

在0—400 cm 土层范围内,土壤水分的垂直变化可划分为3个层次:活跃层、次活跃层和相对稳定层。其中,水平阶整地前后及不同植被类型样地的土壤水分分层特征存在差异。例如,自然坡面刺槐林地的水分活跃层较深,而水平阶整地的刺槐林地活跃层主要

集中在0—20 cm 土层,次活跃层为20—80 cm 土层。整体而言,人工林植被类型下的土壤含水量呈现由表层向深层递减的趋势,其中0—200 cm 土层水分变化较为活跃,200 cm 以下土层含水量趋于稳定。因此,可采用200 cm 以下土层的平均含水量作为不同样地土壤水分的代表性指标。因此在黄土高原生态建设中,应基于土壤水分垂直分异特征,重点监测200 cm 以下土层的湿度变化,将其作为植被恢复可持续性的关键指标。

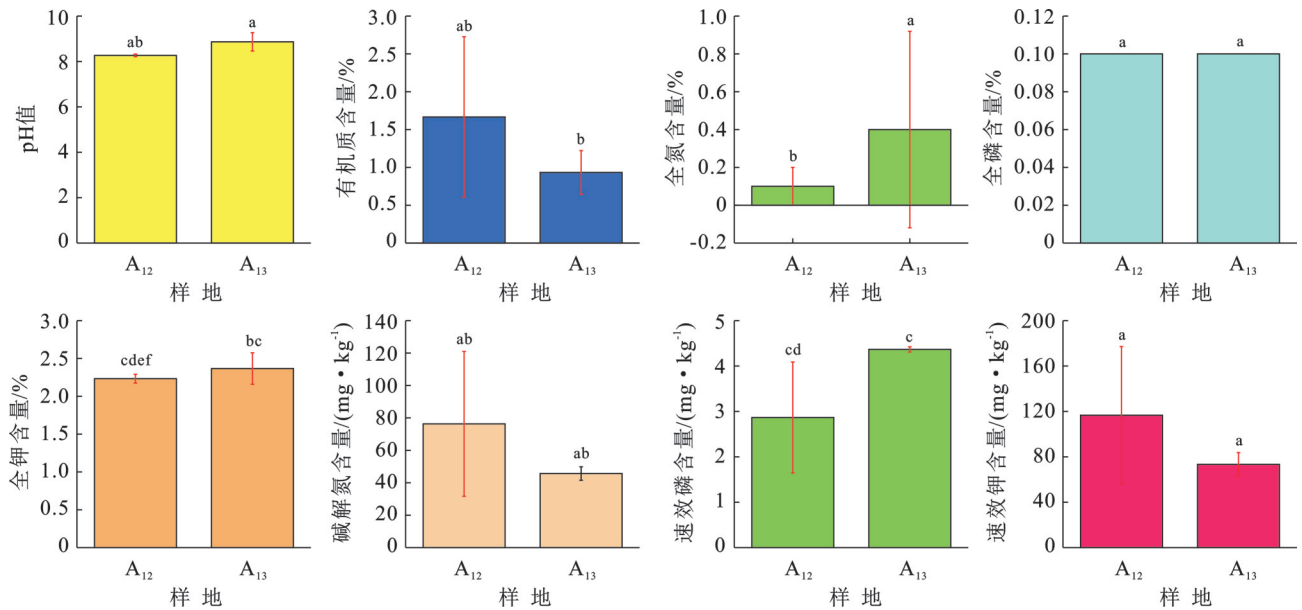


图 13 静宁县土壤养分差异显著性对比图

Fig.13 Comparison of significant differences in soil nutrients in Jingning County

本研究立足于黄土高原生态恢复的迫切需求,通过系统分析不同人工林样地的土壤养分空间变异特征,旨在揭示自然和人为因素对土壤肥力的影响机制,为区域林业可持续管理和生态修复提供科学依据。研究表明,研究区域内土壤pH值、有机质、全氮、碱解氮、速效钾和速效磷含量等指标均呈现显著的空间异质性^[26]。其中,全钾和全磷含量的空间分布格局较为相似,而速效磷、速效钾含量和pH值的空间分布则存在明显差异,表明甘肃省黄土高原地区表层土壤的化学性质和有机质含量在空间尺度上具有显著的变异性。因此,在生态恢复实践中,应建立基于养分空间异质性的差异化施肥制度,重点调控土壤pH值、有机质和速效磷等空间变异性较大的关键指标;对于混交林(如山杏-油松)能显著提升特定养分(如碱解氮)的情况,可考虑推广混交模式以改善土壤质量;在有机质和速效磷差异显著的地区(如合水、陇西)实施针对性施肥措施,而对空间分布较均一的全磷、全钾等养分则可采取统一管理

策略。研究同时发现,施肥、间伐等人为干预措施可能导致速效养分(如碱解氮、速效磷)在局部区域(如庆城、泾川等地)产生显著差异。未来研究可结合长期定位观测和微生物作用机制,深入解析黄土高原地区土壤养分循环的驱动过程,为生态恢复提供更全面的理论支撑。

甘肃黄土高原的成土母质以风积黄土为主,主要土壤类型包括黄绵土(原生黄土)和黑垆土(古耕作土),整体肥力较低且抗侵蚀能力弱,是黄土高原生态恢复与治理的重点。研究表明,不同地区的母岩类型显著影响土壤全钾、全磷等基础养分含量。二者在空间尺度上变异较小,分布相对均匀。相比之下,全钾含量在合水、庆城、镇原、泾川、静宁、天水、陇西等地具有一定差异。此外,速效磷、速效钾和pH的空间分布差异较大,表明甘肃省黄土高原表层土壤的化学性质及有机质含量在空间上存在显著变异性。值得注意的是,尽管该区域水土流失严重,可能导致养分再分配,但速效钾含量维持在较高水

平,空间差异不显著,可能与土壤养分的迁移和均匀化过程有关。

研究结果表明,不同区域人工林土壤养分状况既遵循基本的生物地球化学循环规律(相似性),又表现出显著的区域分异特征(独特性)。这种空间异质性可能源于多种因素的共同作用,包括区域自然地理条件差异、造林树种选择与配置方式、经营历史与管理措施、植被恢复阶段以及微生境特征等。因此,在生态恢复实践中,需要结合具体植被恢复目标优化林分结构,以提高土壤养分利用效率^[27]。

结合研究结果可以看出,各区域之间的林地土壤水分含量表现为:合水油松>合水油松(2014年)>合水刺槐(2011年)>合水刺槐,且呈现出自东向西、由北向南逐渐降低的趋势;庆城县油松纯林>退化油松-山杏混交林>油松-山杏混交林;镇原县油松-山杏混交林(鱼鳞坑整地)>油松-山杏混交林(隔坡水平整地);泾川县侧柏林>油松-刺槐混交林;静宁县油松纯林>刺槐-山杏混交林。因此在甘肃省典型黄土高原区域,侧柏和油松是水土保持的优良树种,而且混交林的效果更为稳定。“十四五”期间,国家先后实施了退耕还林(草)及三北防护林等重大生态工程,通过种植刺槐、油松、山杏等人工林来增强土壤保持能力并提升土地生产力。研究结果表明,不同样地间土壤养分存在显著的空间异质性。部分样地间养分指标差异不显著(如合水刺槐与合水油松样地的多数养分指标 p 值 ≥ 0.05),而镇原山杏-油松混交林与其他样地在部分养分指标上表现出显著差异($p < 0.05$),表明不同区域人工林土壤养分状况既存在共性特征,又具有区域特异性。同时,不同林分类型对土壤养分的影响存在显著差异。具体而言,油松纯林与油松混交林的土壤pH值差异显著($p < 0.05$),而有机质含量在油松混交林间差异显著;全氮和全磷含量差异不显著;土壤全钾含量在油松纯林、油松混交林和刺槐林间差异显著($p < 0.05$);碱解氮含量在不同林型间同样存在显著差异($p < 0.05$);速效磷含量则在油松纯林与刺槐林间差异显著($p < 0.05$)。另外,纯林(如合水刺槐)与混交林(如镇原山杏-油松)表现出不同的养分循环模式,混交林可通过树种间的互补效应提升土壤肥力。因此黄土高原区在固水保土方面应优先采用油松-刺槐、油松-山杏、侧柏、油松乔灌营造方式,建造对区域林地生态环境友好的植物群落。

4 结论

(1) 各地区不同人工林土壤水分随土层深度的

增加干燥化逐步加深,人工林植被强烈的水分耗散,使土壤含水量迅速减少。当人工林进入成熟或衰老阶段后,人工林密度的影响逐步减弱,土壤水分有所恢复。从区域来看,从北到南,从西向东土壤含水量依次增加。

(2) 区域内不同林分土壤含水量表现为:侧柏>油松纯林>油松混交>刺槐纯林;鱼鳞坑整地土壤含水量高于隔坡水平整地。不同植被类型随林龄增加,土壤含水量总体上由表层向深层呈降低趋势,其中0—200 cm土壤水分变化活跃,土壤水分消耗量呈增加趋势。

(3) 各区域土壤pH值、有机质、全氮、全磷、全钾含量基本一致,碱解氮含量陇西最高,镇原最低;速效磷含量合水最高,天水最低;合水速效钾含量最大,镇原最低。整个区域内pH值、有机质、全钾、速效磷含量差异显著($p < 0.05$),全氮、全磷、速效钾含量差异不显著。油松纯林、油松混交林土壤pH值存在显著差异,油松混交林有机质含量差异显著($p < 0.05$),全氮、全磷含量差异不显著;油松纯林、油松混交林、刺槐林全钾含量和碱解氮含量存在明显的差异性($p < 0.05$),油松纯林、刺槐林速效磷含量存在显著差异($p < 0.05$)。

参考文献(References)

- [1] 陈明玉,邵明安,李同川,等.黄土高原典型切沟土壤水分时空分布特征及其影响因素[J].土壤学报,2021,58(2):381-390.
Chen Mingyu, Shao Ming'an, Li Tongchuan, et al. Characteristics and influencing factors of spatiotemporal distribution of soil moisture in typical gully of the Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2): 381-390.
- [2] 杨威,彭旭东,戴全厚,等.石漠化山区露石岩面流对岩-土界面土壤氮磷淋溶与输入作用的研究[J].土壤学报,2024,61(1):86-97.
Yang Wei, Peng Xudong, Dai Quanhou, et al. Leaching and input effects of exposed rock surface flow on soil nitrogen and phosphorus at rock-soil interface in rocky desertification mountainous area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 86-97.
- [3] 杨磊,卫伟,莫保儒,等.半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J].生态学报,2011,31(11):3060-3068.
Yang Lei, Wei Wei, Mo Baoru, et al. Soilwater deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3060-3068.
- [4] 莫保儒,王子婷,蔡国军,等.半干旱黄土区成熟柠条林

- 地剖面土壤水分环境及影响因子研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6):1207-1215.
- Mo Baoru, Wang Ziting, Cai Guojun, et al. Soil water environment in different soil layers and influence factors of mature forest of *Caragana korshinskii* in semiarid loess area [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6):1207-1215.
- [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.
- [6] 朱洪盛, 赵炯昌, 池金铭, 等. 晋西黄土区典型造林整地措施对土壤水分动态的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(5):996-1004.
- Zhu Hongsheng, Zhao Jiongchang, Chi Jinming, et al. Soil moisture characteristics under level bench and vegetation in loess area of western Shanxi Province [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2024, 41(5):996-1004.
- [7] 王彦辉, 于澎涛, 田奥, 等. 黄土高原和六盘山区的林水协调多功能管理[J]. 林业科学, 2023, 59(4):1-17.
- Wang Yanhui, Yu Pengtao, Tian Ao, et al. Forest-water coordinated and multifunctional management of forests in the Liupan mountainous area and Loess Plateau region of China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(4):1-17.
- [8] 夏春华, 方斌, 张志成, 等. 土壤养分空间分异对农地利用及其景观格局的响应: 以淮海经济区徐州市铜山区为例[J]. 生态学报, 2024, 44(19):8469-8487.
- Xia Chunhua, Fang Bin, Zhang Zhicheng, et al. Response of soil nutrient spatial differentiation to agricultural land use and landscape pattern: Taking Tongshan District, Xuzhou City, Huaihai economic zone as an example [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(19):8469-8487.
- [9] 翟俊瑞, 谢云, 李晶, 等. 不同侵蚀强度黑土的土壤水分特征曲线模拟[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4):116-122.
- Zhai Junrui, Xie Yun, Li Jing, et al. Simulation of soil-water characteristic curve for black soils with different erosion intensity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4):116-122.
- [10] 黄德良, 费良军, 曾健, 等. 基于灰色关联法土壤水分垂直入渗影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(32):95-101.
- Huang Deliang, Fei Liangjun, Zeng Jian, et al. Influencing factors of soil water vertical infiltration characteristics based on the grey correlation method [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(32):95-101.
- [11] 王月玲, 王思成, 蔡进军, 等. 宁南半干旱黄土丘陵区土壤水分的演变特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3):40-49.
- Wang Y L, Wang S C, Cai J J, et al. Evolution characteristics of the soil moisture in semi-arid loess hilly region of south Ningxia [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3):40-49.
- [12] 尹鑫卫, 王琦, 李晓玲, 等. 半干旱区垄沟集雨系统点尺度土壤水分动态随机模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(1):320-332.
- Yin Xinwei, Wang Qi, Li Xiaoling, et al. Stochastic simulation of soil moisture dynamics at a point scale in a ridge-furrow rainwater harvesting system in a semiarid area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1):320-332.
- [13] 朱绪超, 邵明安, 朱军涛, 等. 高寒草甸生态系统表层土壤水分时间稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8):212-218.
- Zhu Xuchao, Shao Ming'an, Zhu Juntao, et al. Temporal stability of surface soil moisture in alpine meadow ecosystem on northern Tibetan Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8):212-218.
- [14] 黄河流域水土保持公报[N]. 水利部黄河水利委员会, 2023.
- Soil and water conservation bulletin in yellow river basin [N]. Yellow river conservancy commission of MWR, 2023.
- [15] 贾小旭, 邵明安, 张晨成, 等. 黄土高原南北样带不同土层土壤水分变异与模拟[J]. 水科学进展, 2016, 27(4):520-528.
- Jia Xiaoxu, Shao Ming'an, Zhang Chencheng, et al. Variation and simulation of soil water content within different soil depths along the south-north transect of the Loess Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4):520-528.
- [16] 袁水龙, 李占斌, 张扬, 等. 黄土高原小流域坝地水分时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3):29-34.
- Yuan Shuilong, Li Zhanbin, Zhang Yang, et al. Impact of layered deposition on temporal and spatial distribution characteristic of soil moisture of check dam land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3):29-34.
- [17] 安文明, 韩晓阳, 李宗善, 等. 黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(13):4852-4860.
- An Wenming, Han Xiaoyang, Li Zongshan, et al. Effects of different vegetation restoration types on the

- slope difference of soil water content in the Loess Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 4852-4860.
- [18] 刘赛可,郭满才,郭忠升,等.黄土高原半干旱区人工林地土壤水分变化模型[J].湖北农业科学,2015,54(22):5551-5555.
- Liu Saike, Guo Mancai, Guo Zhongsheng, et al. A variation model of soil water in plantation of the semi-arid area of Loess Plateau [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(22):5551-5555.
- [19] 朱炜歆,牛俊杰,刘庚,等.植被类型对生长季黄土区土壤含水量的影响[J].干旱区资源与环境,2016,30(1):152-156.
- Zhu Weixin, Niu Junjie, Liu Geng, et al. The influence of vegetation types on the soil moistures during growing season in Loess area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(1):152-156.
- [20] 安淳淳.基于风散射计数据的华北平原土壤水分及灌溉特征分析[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),2016.
- An Chunchun. Soil moisture and irrigation analysis in the north China plain using wind scatterometer data [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [21] 王得楷,张满银,叶伟林,等.黄土地质灾害相关科学研究问题探讨[J].冰川冻土,2018,40(1):197-204.
- Wang Dekai, Zhang Manyin, Ye Weilin, et al. Discussion on the scientific research relevant to loess geological hazards [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1):197-204.
- [22] 陶佳,雷泽勇,王国晨,等.沙地樟子松人工林叶凋落物的分解与养分释放[J].干旱区资源与环境,2023,37(12):131-139.
- Tao Jia, Lei Zeyong, Wang Guochen, et al. Decomposition and nutrient release of leaf litter in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(12):131-139.
- [23] 刘相荣,孙启武,厚凌宇,等.松辽平原杨树人工林土壤微生物群落结构及其功能多样性的林龄差异[J].林业科学,2024,60(11):25-36.
- Liu Xiangrong, Sun Qiwu, Hou Lingyu, et al. The differences in soil microbial community structure and functional diversity among poplar plantations at different ages in the Songliao Plain [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, 60(11):25-36.
- [24] He Libing, Sun Xiangyang, Li Suyan, et al. The vertical distribution and control factor of microbial biomass and bacterial community at macroecological scales [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 869:161754.
- [25] 任悦,高广磊,丁国栋,等.沙地樟子松人工林叶片-枯落物-土壤氮磷化学计量特征[J].应用生态学报,2019,30(3):743-750.
- Ren Yue, Gao Guanglei, Ding Guodong, et al. Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3):743-750.
- [26] 谢奎忠,孙小花,罗‘爱花,等.基施锌肥对长期连作马铃薯抗病性相关酶活性、土传病害和产量的影响[J].作物杂志,2022(4):154-159.
- Xie Kuizhong, Sun Xiaohua, Luo Aihua, et al. Effects of basal zinc fertilizer on activities of disease resistance-related enzymes, soil borne diseases and yield of potato under long-term continuous cropping [J]. *Crops*, 2022 (4):154-159.
- [27] Li Mingyue, Zhang Jiachao, Yang Xiao, et al. Responses of ammonia-oxidizing microorganisms to biochar and compost amendments of heavy metals-polluted soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 102: 263-272.