

## 不同种植模式紫色土斥水性变化特征

熊麟,冯梦蝶,阿依萨娜姆·阿卜杜艾尼,徐绮雯,

李天阳,何丙辉,周永鹏

(西南大学资源环境学院,重庆400715)

**摘要:** [目的] 为探究紫色土不同种植模式土壤斥水性(soil water repellency, SWR)变化特征及其影响因素。[方法] 设置无作物(CK)、胡豆(A)、花椒(F)、胡豆+花椒(AF)4种植模式,分析不同种植模式及土层(0~10、10~20 cm)下紫色土斥水性及理化性质差异。[结果] 1) CK、A模式土壤属于亲水性土壤, F、AF模式土壤属于轻度斥水性土壤。AF模式土壤滴水穿透时间比CK、A、F模式显著高495%、432%、128% ( $p < 0.05$ )。2) 不同种植模式显著影响土壤理化性质,在0~10 cm土层, AF模式土壤有机碳、全氮、全磷、田间持水量较其他3种植模式显著增加 ( $p < 0.05$ )。3) SWR与体积质量呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ),与总孔隙度、田间持水量、碱解氮呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ),土壤有机碳与全氮、碱解氮之间存在极显著正相关 ( $p < 0.01$ );逐步回归分析结果显示, SWR与碱解氮呈线性显著正相关 ( $p < 0.01$ )。农林复合种植模式在提高土壤保水性能及土壤养分的同时,也增强土壤斥水性。[结论] 研究结果为紫色土区农林复合模式的优化提供科学依据。

**关键词:** 种植模式; 斥水性; 土壤水分; 土壤养分

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0150-09

## Variation Characteristics of Soil Water Repellency under Different Planting Patterns in Purple Soil

XIONG Lin, FENG Mengdie, ABUDUAINI·Ayisanamu, XU Qiwen,

LI Tianyang, HE Binghui, ZHOU Yongpeng

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the variation characteristics of soil water repellency (SWR) and its influencing factors under different planting patterns in purple soil. [Methods] Four planting patterns were established: no planting, CK; *Vicia faba* Linn, A; *Zanthoxylum armatum* var. *novemfolius*, F; and *Vicia faba* Linn + *Zanthoxylum armatum* var. *novemfolius*, AF. The differences in SWR and soil physicochemical properties under different planting patterns and soil layers (0-10, and 10-20 cm) were analyzed. [Results] 1) Soil under the CK and A patterns were hydrophilic, while soil under the F and AF patterns were slightly water-repellent. The water drop penetration time (WDPT) under the AF pattern was significantly higher than that in the CK, A, and F patterns by 495%, 432%, and 128%, respectively ( $p < 0.05$ ). 2) Different planting patterns significantly affected soil physicochemical properties. In the 0-10 cm soil layer, soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, and field water holding capacity under the AF pattern were significantly higher than those under the other three patterns ( $p < 0.05$ ). 3) SWR was significantly negatively correlated with bulk density ( $p < 0.05$ ), and significantly

收稿日期: 2025-10-29

修回日期: 2025-11-29

录用日期: 2025-12-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(U21A20187); 重庆市水利科技项目(CQSLK-2023023); 重庆市大学生创新创业项目(S20241063002); 西南大学大学生创新创业项目(X202410635698); 西南大学研究生科研创新项目(SWUS25114)

第一作者: 熊麟(2002—)女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: xionglin0306@163.com

通信作者: 何丙辉(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、森林培育与林业生态工程研究。E-mail: hebinghuiswu@163.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

positively correlated with total porosity, field water holding capacity, and alkaline hydrolyzable nitrogen ( $p < 0.05$ ). Soil organic carbon was significantly positively correlated with total nitrogen and alkaline hydrolyzable nitrogen ( $p < 0.01$ ). Stepwise regression analysis indicated that soil water repellency was linearly and significantly positively correlated with alkaline hydrolyzable nitrogen ( $p < 0.01$ ). The agroforestry pattern enhanced SWR while improving soil water retention capacity and soil nutrient levels. [Conclusion] The findings provide a scientific basis for the optimization of agroforestry planting patterns in purple soil regions.

**Keywords:** planting pattern; water repellency; soil moisture; soil nutrient

Received: 2025-10-29

Revised: 2025-11-29

Accepted: 2025-12-15

Online(www.cnki.net): 2026-01-27

土壤斥水性(soil water repellency, SWR)是限制土壤水分入渗的重要因子。强斥水性土壤不仅增加地表径流,加剧地表土壤流失,降低土地生产力<sup>[1-2]</sup>,还加快对农业化学物的淋洗,加剧地下水污染风险<sup>[3]</sup>。已有研究<sup>[4]</sup>表明,土壤斥水性受植被类型、土壤理化性质等显著影响;任长江等<sup>[5]</sup>研究北方土石山区流域植被土壤发现,植被冠层越高土壤斥水性越大,有林地和灌木林土壤多表现为强烈斥水,而草地和旱地则呈现亲水性;李凯等<sup>[6]</sup>对陕西农田研究发现,增大土壤含水量,使亲水性黑垆土土壤转变为轻度斥水性土壤;周永豪等<sup>[7]</sup>针对川西南山区森林火烧迹地研究发现,森林火烧增强土壤斥水性,并加深其与土壤团聚体稳定性间的关系;王维维等<sup>[8]</sup>在黄土高原草地发现土壤全氮和硝态氮含量是土壤斥水性的主要影响因素。尽管我国学者已对不同区域的土壤斥水性的影响因素开展了研究,但针对不同种植模式改变土壤环境进而影响斥水性的机制仍不清楚。

土壤微团聚体是土壤最基本的物质单元和养分的主要载体,在提高土地生产力和增强土壤抗侵蚀能力等方面有重要作用。不同粒级的微团聚体对土壤水分和养分保贮和释供能力不同,小粒径微团聚体吸收储存能力更强,而大粒径微团聚体释供缓冲能力更强<sup>[9]</sup>。通常可采用平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)来反映土壤团聚体稳定性。目前,已有研究<sup>[10]</sup>表明,土壤团聚体组成和稳定性与土壤理化性质密切相关,也受到成土母质、种植模式、耕作管理措施及土壤生物扰动等因素的综合影响。作为土壤结构稳定性的重要评价性指标,其与斥水性间的关系亟待进一步研究。

紫色土是我国西南地区分布面积较广的土壤,结构松散、自然肥力高,受降雨影响,极易发生水土流失。单一的种植模式和土地的过度开垦,加剧了该区水土流失。而农林复合种植作为一种重要的生态恢复手段,在紫色土区广泛应用,其在提高土壤养分和防治土壤侵蚀方面具有突出的作用<sup>[11]</sup>。已有研究<sup>[12]</sup>发

现,农林复合模式能使土壤有机碳、全氮和碱解氮含量增加,土壤培肥效应明显提高。农林复合模式下土壤体积质量降低,田间持水量和土壤孔隙度增加,对浅层土壤结构的改善作用强于深层土壤<sup>[13]</sup>。土壤斥水性和微团聚体特征与植被类型及土壤理化性质密切相关。与单一种植模式相比,农林复合模式的地上及地下植被结构更加复杂,其土壤水分路径及理化性质变化显著。目前,土壤斥水性研究大多在单一的种植模式下开展,而不同种植模式下土壤斥水性的变化特征及其与微团聚体等理化性质的响应关系还不清楚。基于此,本研究在紫色土区设置无作物(CK)、胡豆(A)、花椒(F)、胡豆+花椒(AF)4种植植模式,分析不同种植模式土壤斥水性的变化特征,探究土壤斥水性与微团聚体、田间持水量等土壤理化性质的响应关系,以期为紫色土种植模式的优化及区域水土流失治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于重庆市江津区慈云镇(29°12'26"N, 106°22'18"E),属亚热带季风气候,年平均气温18.4℃,年平均日照时间1141h,年平均降水量1001.2mm,降雨量主要集中在5—10月。该区域土壤类型为紫色土。土壤基本理化性质:土壤体积质量(BD)为1.35g/cm<sup>3</sup>,有机碳(SOC)质量分数8.54g/kg,全氮质量分数(TN)0.74g/kg,全磷质量分数(TP)0.88g/kg。

### 1.2 试验设计与土壤样品采集

2021年10月,在试验区建立4种植植模式,采用完全随机区组设计,分别为不耕作系统(CK)、胡豆单作系统(A)、花椒单作系统(F)、胡豆+花椒农林复合系统(AF)。每种模式设置3个10m×10m重复小区,每个小区间隔1m,四周开挖50cm深排水沟。试验区原为花椒经济林,林下无其他作物,CK模式于试验开展前小心将花椒树移出并采用原土回填,A模式于试验开展前将花椒树移出后,参照当地农作管

理种植胡豆;F模式维持原有花椒经济林管理,AF模式于花椒树冠投影边界种植胡豆5~6株。在试验开始后,各处理水肥管理保持一致,未使用农药和除草剂。试验中的经济林树种为九叶青花椒(*Zanthoxylum armatum* var. *novemfolius*),于2018年种植,株行距3 m×3 m;农作物选用“成胡9号”胡豆(*Vicia faba* Linn)分别于2021年10月、2022年10月播种,2022年4月、2023年4月下旬收获。

于2023年5月上旬对各种种植模式小区土壤进行采集。采样时避开施肥点,按“S”形采样法布设采样点,在花椒单作系统(F)和农林复合系统(AF)中,采样点位于花椒树冠投影边界范围内。用土钻在各小区分别采集5个样点0~10、10~20 cm土层土壤,混合均匀后,去除砾石、草根等杂物,装入自封袋,共计24个样品(4种植植模式×3次重复×2个土层),用于测定土壤部分理化性质。同时,分别在各小区5个样点采集0~10、10~20 cm土层的环刀(100 cm<sup>3</sup>)和铝盒土壤样品,共120个样品,用于测定土壤体积质量、田间持水量等性质。

### 1.3 测定方法

土壤斥水性采用滴水穿透时间法(WDPT)测定。试验时,取60 g鲜土放入培养皿中(直径100 mm,深30 mm),用滴管分别将8滴蒸馏水(每滴约为0.05 mL)滴至土壤表面,测定水滴渗入土壤所需时间,滴水高度不超2 cm,取8次滴水入渗时间的平均值作为每份土样的SWR的平均值,再取每个样点5份土样的平均值作为该样点的SWR。根据水滴入渗时间,将斥水性分为5个等级,不斥水(WDPT<5 s)、轻微斥水(5 s≤WDPT<60 s)、强烈斥水(60 s≤WDPT<600 s)、严重斥水(600 s<WDPT<3 600 s)和极端斥水(WDPT>3 600 s)<sup>[14]</sup>。土壤体积质量、田间持水量(WHC)采用环刀法测定,土壤总孔隙度(TPS)由土壤体积质量结果来计算;土壤含水率(SMC)测定采用烘干法;采用吸管法测定土壤微团聚体含量,并将微团聚体分为<0.05、0.05~0.25、0.25~1 mm 3粒级,并计算微团聚体的平均质量直径、几何平均直径,具体方法参照《土壤理化分析》<sup>[15]</sup>。

采用TOC自动分析仪测定土壤有机碳质量分数,采用凯氏定氮法测定全氮;采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定全磷;采用碱解扩散法测定碱解氮(AN);土壤电导率(EC)按土:水=1:2.5比例采用电位计测定<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用SPSS 27、Excel 2019和Origin 2021软件进行数据整理分析、图表绘制。采用单因素方差分析

法(One-way ANOVA)对相同土层不同种植模式土壤理化性质进行方差分析,采用独立样本 $t$ 检验比较相同种植模式不同土层间土壤理化性质;采用Pearson相关分析探究土壤斥水性及土壤理化性质之间的相关性;采用多元线性逐步回归分析建立土壤理化性质与斥水性之间的回归方程。

## 2 结果与分析

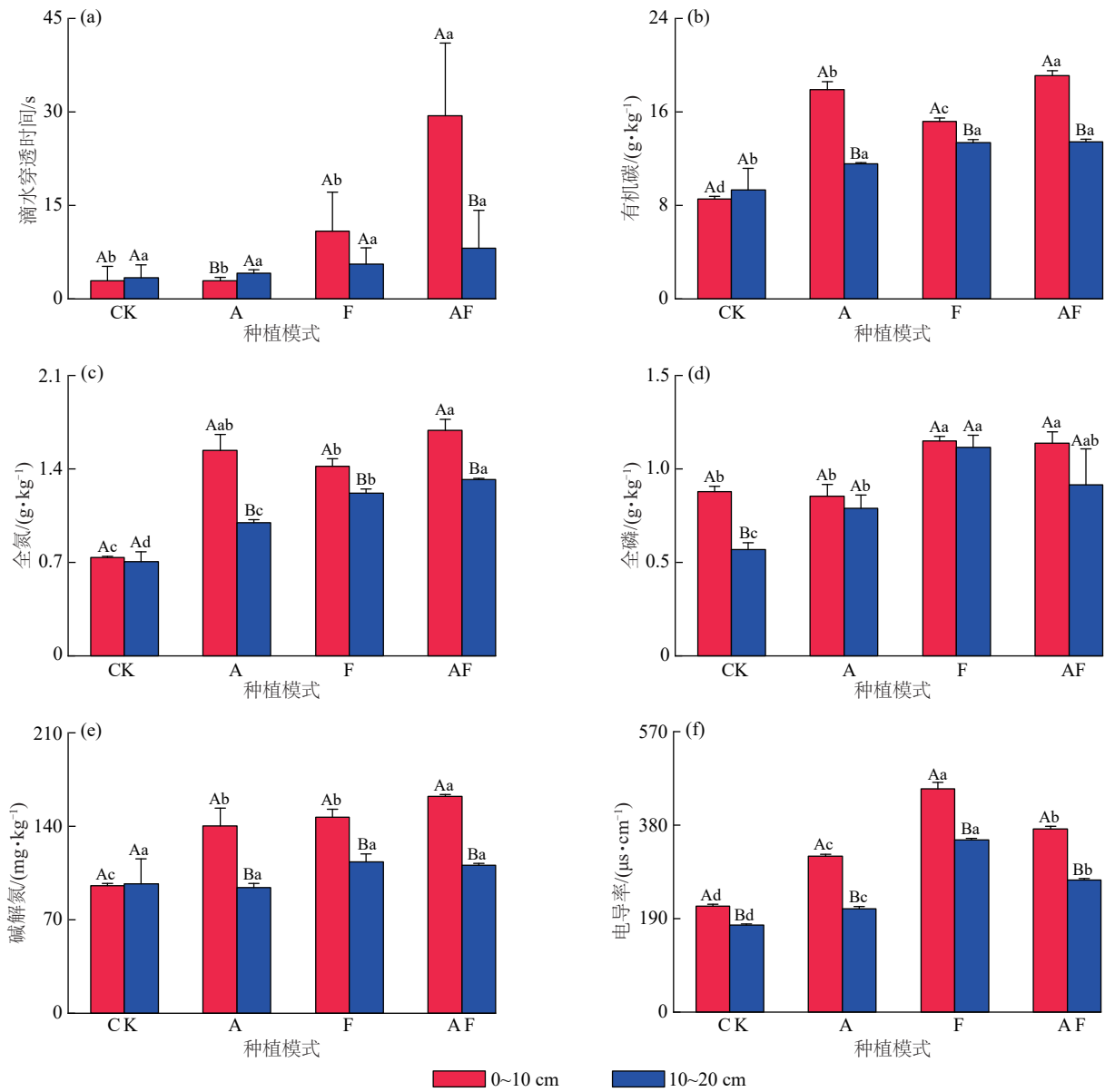
### 2.1 不同种植模式下土壤斥水性变化特征

由图1可知,CK、A模式土壤属于亲水性土壤,F、AF模式土壤属于轻度斥水性土壤。在0~10 cm土层,AF模式WDPT比CK、A和F模式显著高911%、916%和171%( $p<0.05$ )。在10~20 cm土层中,不同种植模式WDPT差异不显著( $p>0.05$ )。AF模式下0~10 cm土层WDPT显著高于10~20 cm土层262%( $p<0.05$ ),CK、F模式土层间斥水性差异不显著( $p>0.05$ )。

### 2.2 不同种植模式下土壤养分含量变化

由图1可知,在0~10 cm土层,AF模式土壤SOC、TN、AN含量显著高于CK、F和A模式( $p<0.05$ ),SOC、TN质量分数均表现为AF>A>F>CK;AF、F模式土壤TP质量分数显著高于A和CK( $p<0.05$ ),表现为F>AF>CK>A,各模式土壤EC差异显著,表现为F>AF>A>CK。在10~20 cm土层,AF、F、A模式土壤SOC、TN质量分数显著高于CK( $p<0.05$ ),表现为AF>F>A>CK;各模式间TP质量分数差异显著( $p<0.05$ ),表现为F>AF>A>CK;各模式间AN质量分数差异不显著( $p>0.05$ );EC与0~10 cm土层表现一致。除CK外,A、F、AF模式下土壤SOC、TN、TP、AN质量分数随土层加深降低;A、F、AF模式10~20 cm土层土壤SOC质量分数显著低于0~10 cm土层35.5%、11.9%、29.7%( $p<0.05$ ),10~20 cm土层土壤TN质量分数显著低于0~10 cm土层35.1%、14.1%、21.8%( $p<0.05$ )。

由图2可知,在0~10 cm土层,各模式C:N差异不显著( $p>0.05$ ),比值为12.54~13.65;不同种植模式间C:P、N:P显著差异( $p<0.05$ ),C:P比值大小为A>AF>F>CK,为25.18~54.40;N:P比值大小为A>AF>F>CK,为1.83~4.02。在10~20 cm土层,不同种植模式间C:N差异显著( $p<0.05$ ),其中比值大小为CK>A>F>AF,为11.85~15.29;各种种植模式间的C:P、N:P差异不显著( $p>0.05$ ),C:P比值为31.03~42.90,N:P比值为2.42~3.28。各模式C:N、N:P在土层间差异不显著( $p>0.05$ ),C:P在A、AF模式下0~10 cm土层显著高于10~20 cm土层( $p<0.05$ )。



注:图柱上方不同大写字母表示不同土层在独立样本 *t* 检验在 0.05 水平差异显著;不同小写字母表示不同种植模式在 Duncan 多重比较在 0.05 水平差异显著。下同。

图 1 不同种植模式及土层土壤 WDPT、SOC、TN、TP、AN、EC 变化

Fig. 1 Variations in soil WDPT, SOC, TN, TP, AN, EC under different planting patterns and soil layers

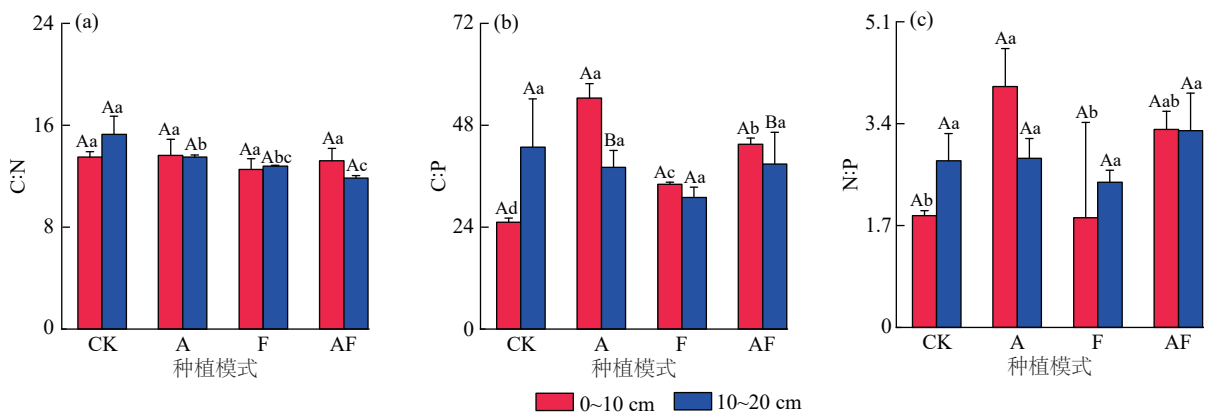


图 2 不同种植模式及土层土壤 C、N、P 化学计量特征变化

Fig. 2 Variations in C, N, and P stoichiometric characteristics under different planting patterns and soil layers

### 2.3 不同种植模式下土壤微团聚体组分差异

由图3可知,不同土层下各模式都以0.05~0.25 mm微团聚体为主。不同土层下0.05~0.25、0.25~1 mm的团聚体在各种种植模式变化基本相似,0.25~1 mm大粒径微团聚体在A模式中的占比显著高于其他模式( $p < 0.05$ ),AF、F模式相较于A模式0.05~0.25 mm微团聚体占比都有所增加。在0~10 cm土层,其他3种种植模式<0.05 mm的微团聚体占比相较于CK模式显著增加( $p < 0.05$ ),而10~20 cm土层中各种植

模式<0.05 mm的微团聚体占比无显著性差异( $p > 0.05$ )。

由图4可知,在0~10 cm土层中,A模式下的土壤团聚体GMD及MWD显著高于AF模式( $p < 0.05$ );在10~20 cm土层中,CK、A模式土壤团聚体MWD显著高于F、AF模式,A模式土壤团聚体GMD显著高于CK、F、AF模式( $p < 0.05$ )。F模式土层间土壤团聚体MWD、GMD均显著差异( $p < 0.05$ ),在其余模式土层间差异不显著( $p > 0.05$ )。

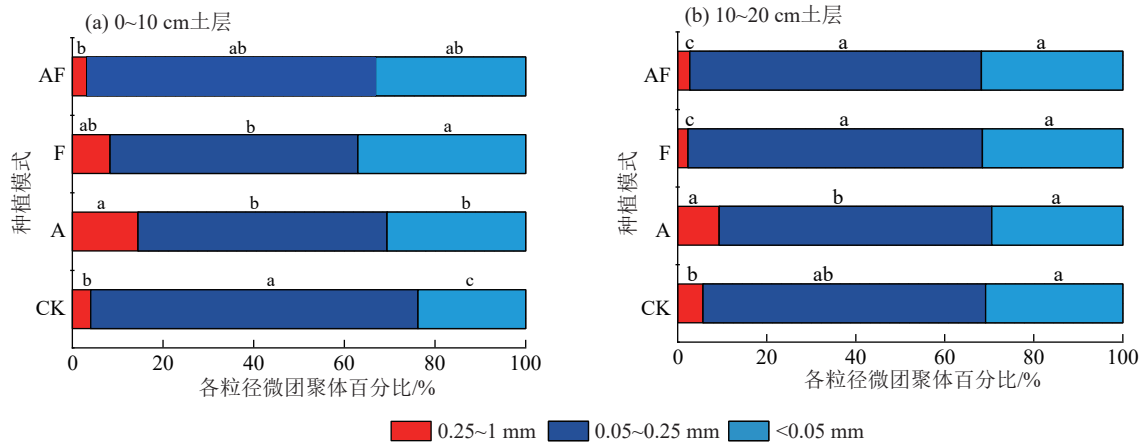


图3 不同种植模式土壤微团聚体占比

Fig. 3 Soil micro-aggregate content under different planting patterns

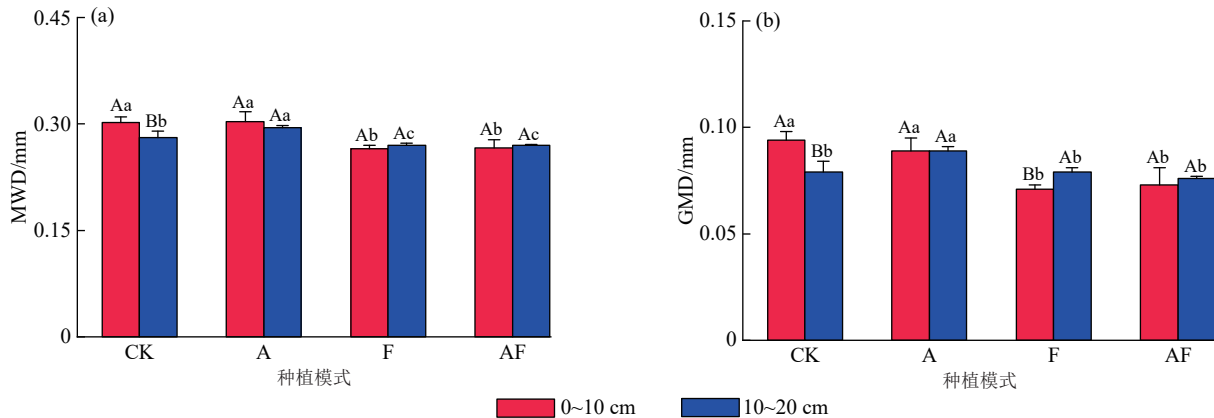


图4 不同种植模式及土层土壤MWD、GMD变化

Fig. 4 Variations in MWD and GMD under different planting patterns and soil layers

### 2.4 不同种植模式下其他土壤物理性质差异

由图5可知,在0~10 cm土层中,AF模式BD显著低于CK模式14.4%,AF模式TPS显著高于CK模式14.9%,AF模式土壤WHC、SMC相比其他3种模式显著增高( $p < 0.05$ );在10~20 cm土层中,各模式间BD、WHC、TPS均不显著( $p > 0.05$ ),而AF模式土壤SMC相比其他3种模式仍显著增高。CK、A、F模式土层间土壤BD、TPS差异不显著,各模式土壤BD随土层加深增大,土壤TPS随土层加深减小,AF模式下10~20 cm土层土壤BD显著高于0~

10 cm土层18.2% ( $p < 0.05$ ),AF模式下10~20 cm土层土壤TPS显著低于0~10 cm土层14.0%;除CK外其他模式,土层间土壤WHC、SMC差异不显著( $p > 0.05$ )。

### 2.5 土壤斥水性及其理化性质相关性分析

由图6可知,土壤WDPT与BD呈显著负相关( $p < 0.05$ ),与TPS、WHC、AN呈显著正相关( $p < 0.05$ );BD与TPS、WHC、SOC、AN呈显著负相关( $p < 0.05$ );SOC与TN呈显著正相关( $p < 0.01$ );为消除土壤变量间的多重共线性并确定WDPT的主要影响

因素,研究采用逐步回归分析,最终建立的回归方程  $WDPT=0.231 \times AN - 19.381 (R^2=0.394, F=12.977, p<0.002)$ , AN 是方程中唯一保留的变量,且与土壤 WDPT 呈正相关。此结果可能是因为碱解氮作为速

效氮形态,通过增强微生物活性来促进有机物质的分解,从而增加了疏水性有机化合物的生成。其他变量虽与 WDPT 相关,但因与 AN 存在共线性而被剔除,这并不否定其对斥水性的间接影响。

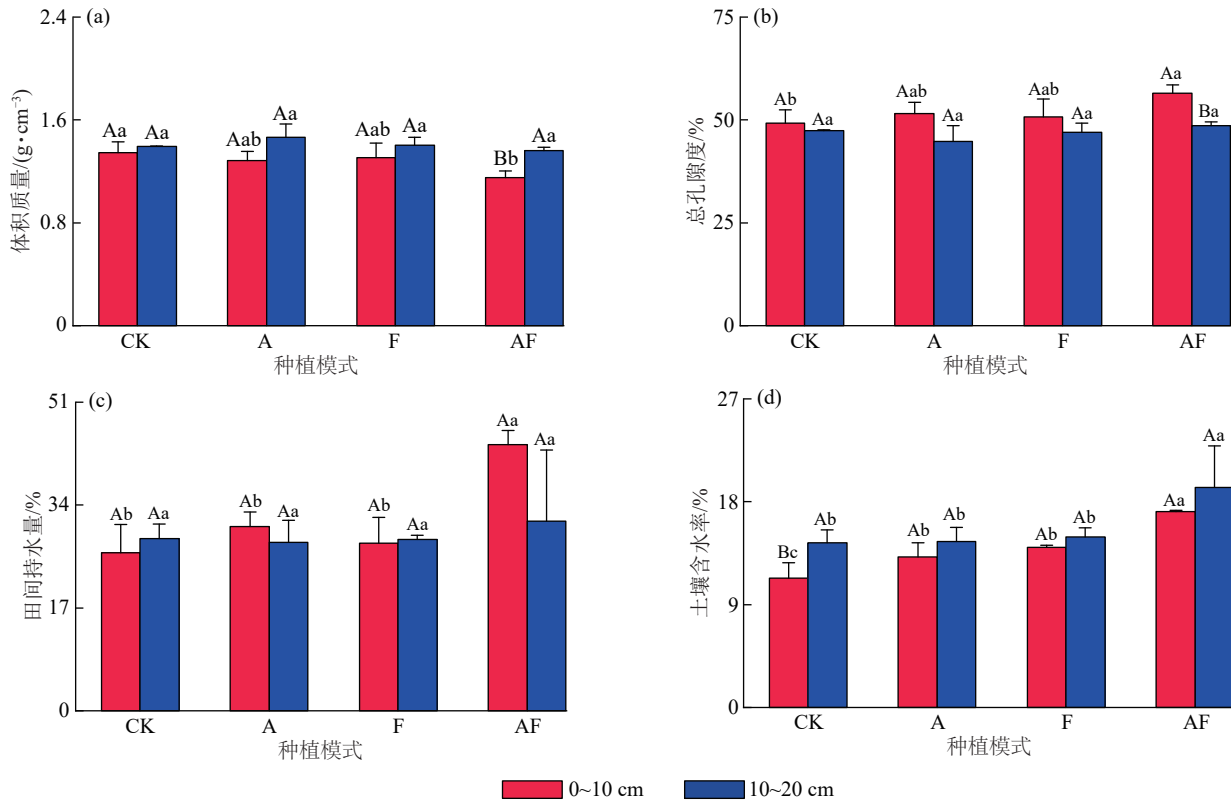
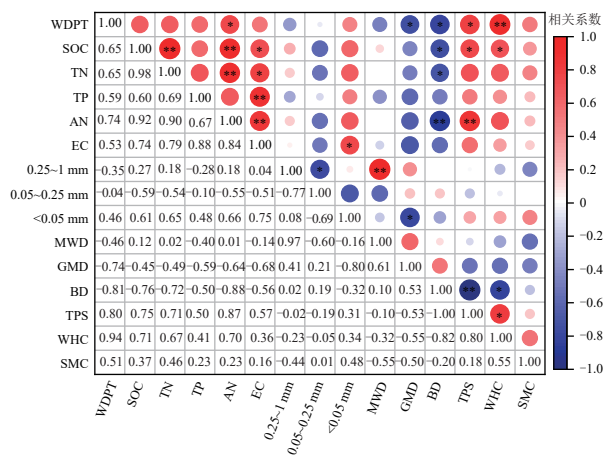


图 5 不同种植模式及土层土壤 BD、TPS、WHC、SMC 变化

Fig. 5 Variations in soil BD, TPS, WHC, and SMC under different planting patterns and soil layers



注: \*表示  $p \leq 0.05$ ; \*\*表示  $p \leq 0.01$ 。

图 6 土壤斥水性与土壤理化性质相关性

Fig. 6 Correlation between soil water repellency and soil physicochemical properties

### 3 讨论

#### 3.1 不同种植模式土壤理化性质的差异

不同种植模式土壤养分差异显著。农林复合种植模式(AF)相较单作种植模式对土壤有机碳、氮磷

含量有一定提高效果,农林复合系统主要是利用系统中物种之间的互补性来提高资源利用效率,农林复合系统中的树木可吸收作物未利用的易流失养分,减少养分淋溶。这些原本会流失的养分被整合到树木生物量中,并通过树木凋落物部分回归土壤,从而提高土地生产力<sup>[17]</sup>。农林复合种植模式(AF)下土壤 AN 含量高于不耕作和单作种植模式,是由于农林复合系统多层次的根系与丰富的微生物群体将土壤 N 更多地转化为植物与微生物自身可吸收利用的形态,使得土壤速效养分提高<sup>[18]</sup>。不同种植模式土壤养分含量随土层深度增加而逐渐降低,一方面是植被凋落物优先在表层分解并积累,有效增加表层土壤 C、N、P 含量,资源输入存在垂直差异;另一方面,根系在土壤中穿插缠绕,改变了土壤结构,使得表层土壤通气性和养分循环效率较高,活跃的微生物群落能更高效地分解有机物,促进养分释放与积累,微生物活性的梯度变化及土壤物理生物过程的综合作用,导致土壤养分表聚效应明显<sup>[19]</sup>。

生态化学计量学是探究生态系统内多重化学元

素的平衡关系,判断限制性元素和生态系统稳定性的重要方法,土壤 C:N 比值越低表明有机质分解速率快。本研究区土壤 C:N 平均值(13.3)高于中国土壤 C:N 平均值(11.9)<sup>[20]</sup>,表明紫色土有机质分解速率相对较慢,4 种植模式中农林复合模式(AF)土壤 C:N 比值较低,说明 AF 模式的有机质分解能力更强。土壤 C:P 比是衡量土壤有机质矿化释放磷或吸收固持磷潜力的重要指标,本研究中的土壤 C:P 平均值(38.5)远低于中国土壤 C:P 的平均值(61.0),这表明研究区域在有机质矿化分解过程中能更多地释放 P。N:P 常用于土壤养分限制因子的诊断和养分限制阈值的确定,本研究中的土壤 N:P 平均值(2.8)低于中国土壤 N:P 的平均水平(5.2),可能是紫色土磷素背景值高,氮素较为缺乏<sup>[21]</sup>。

土壤团聚体中小粒级微团聚体(<0.05 mm)较大粒级微团聚体(0.05~0.25 mm)能够储存较多的氮磷含量,小粒级微团聚体与大粒级微团聚体在养分供应方面有着不同的作用,小粒级微团聚体有较大的供应潜能,大粒级微团聚体能提供可被植物直接利用的养分<sup>[22]</sup>。本研究中不同种植模式土壤微团聚体都以 0.05~0.25 mm 为主。农林复合种植模式相比单作模式提高 0.05~0.25 mm 微团聚体含量,能为植物提供更多能被直接利用的养分含量。MWD 及 GMD 的值越大,团聚体结构越稳定。A 模式下各土层土壤 MWD 及 GMD 均高于其他模式,豆科植物可以通过根系分泌物胶结土壤促进土壤团聚体的形成,提高土壤团聚体稳定性<sup>[23]</sup>,而 F、AF 种植模式微团聚体稳定性相比 CK 变弱,可能是花椒根系生长破坏土壤结构。种植模式对表层土壤的 BD、TPS 影响显著,这可能是花椒和胡豆都属于浅根系植物,表层土壤根密度较高,改善土壤孔隙度,降低体积质量,提高土壤透气性。农林复合种植模式(AF)显著提高土壤田间持水量和含水率,这表明农林复合种植模式能够提高土壤持水保水能力。

### 3.2 不同种植模式斥水性变化特征及影响因素

本研究中不耕作(CK)和胡豆单作(A)种植模式下土壤滴水穿透时间都<5 s,土壤呈亲水性,而花椒单作(F)和胡豆+花椒农林复合(AF)种植模式下土壤表现为轻度斥水,可能与花椒树体内富含的疏水性化合物通过凋落物输入土壤有关。对中国竹叶花椒的多项研究表明,其不同部位均含有多种疏水性的萜烯及酮类物质。例如,其叶片精油以桉树脑(29.65%)和 d-柠檬烯(10.7%)为主要成分;其嫩枝精油中则以反式茴香脑(20.5%)、1,8-桉树脑(14.0%)、2-十三酮(12.5%)和柠檬烯(9.0%)等为主

要成分<sup>[24]</sup>。这些化合物如单萜烯(d-柠檬烯)具有较强的疏水性与挥发性,可能通过根系分泌物或凋落物分解进入土壤,覆盖在土壤颗粒表面,从而增强土壤斥水性<sup>[25]</sup>。此外,胡豆+花椒农林复合种植模式(AF)土壤斥水性显著高于花椒单作(F)模式,可能是花椒与胡豆根系的协同作用增加根系分泌物和凋落物有机物的输入多样性,促进土壤斥水性的增强<sup>[26]</sup>。不同种植模式土层斥水性变化存在差异。CK 模式土层斥水性无明显差异,花椒单作(F)和胡豆+花椒农林复合(AF)种植模式斥水性随土层加深降低,可能是 2 种植模式土壤中疏水性物质主要来自花椒树地上部分<sup>[27]</sup>。而胡豆单作(A)模式土壤斥水性随土层加深增强,可能是豆科植物活跃的根系生命活动,促使根系分泌更多疏水性有机物。

土壤水分是影响斥水性的重要因素之一,而田间持水量是衡量区域持水能力的关键。有研究<sup>[28]</sup>表明,土壤的持水能力越强,表现出斥水性的含水率范围越小,本研究中土壤斥水性与含水率(SMC)无显著相关性,与田间持水量(WHC)呈显著正相关,可能原因是含水率未能达到影响土壤斥水性产生的关键阈值,而田间持水量作为长期稳定的水分状态指标,能较好地反映影响土壤斥水性产生的土壤水分状态。本研究中土壤斥水性与 BD 呈负相关,与 TPS 呈正相关,低 BD 意味着土壤孔隙度较高,有利于微生物活动,促进疏水性有机化合物的积累。同时,土壤斥水性与平均几何直径(GMD)呈负相关,土壤团聚体越细小,其比表面积就越大,与水分接触的“斥水界面”也越大,从而表现出更强的整体斥水性<sup>[29]</sup>。本研究进一步发现,土壤斥水性与 AN 含量呈正相关,且在本研究区域中仅通过 AN 即可较好预测斥水性,与王海等<sup>[30]</sup>研究结果相似,表明 AN 能反映其他土壤理化性质的变化。本研究还发现,土壤 AN 与 TPS 呈极显著正相关,SOC 与 TN、AN 呈现正相关。综合来看,农林复合模式相较于其他模式,一方面通过凋落物分解增加进入土壤的有机质;另一方面,农林复合模式通过改善土壤透气性和保水情况,提高土壤微生物的活性,加速氮的矿化作用。AN 含量的增加表征土壤有机质输入增加、结构改善及微生物活动旺盛的整体状态,共同促进疏水性物质的合成与积累,最终引起土壤斥水性的增强。

研究区域土壤 N:P 低于中国土壤 N:P 的平均水平,表明氮素相对缺乏已成为限制生产力的因素。从农业生产角度,适量补充氮肥是提升地力、保障作物生长的重要措施。值得注意的是,氮肥的过量施入可能促使土壤斥水性增强,阻碍水分入渗,增加土

壤侵蚀和养分淋溶风险,进而影响作物生长。因此,在通过合理施氮以缓解养分限制的同时,也需加强对土壤斥水性的监测。管理实践中可优先选用缓释氮肥,结合等高种植等水土保持措施,在提升氮素利用效率的同时,实现生产效益与生态安全的协同提升。

## 4 结论

不耕作及种植作物的模式下土壤呈亲水性,而种植林木的模式下土壤呈轻度斥水性。胡豆+花椒农林复合(AF)种植模式下土壤斥水性显著高于其他模式,农林复合种植模式一定程度上提高土壤斥水性。不同种植模式土壤理化性质差异显著,农林复合种植模式土壤SOC、TN、AN、WHC显著增加。土壤斥水性与BD显著负相关,土壤斥水性与TPS、WHC、AN呈显著正相关,且本研究区域土壤斥水性的主要影响因素为土壤AN含量。研究结果表明,农林复合系统提高土壤肥力及土壤持水能力,但也可能因表层有机质积累而增强土壤斥水性,其影响呈现较为明显的垂直分异特征。

### 参考文献:

- [1] 陈俊英,张智韬,汪志农,等.土壤斥水性影响因素及改良措施的研究进展[J].农业机械学报,2010,41(7):84-89.  
CHEN J Y, ZHANG Z T, WANG Z N, et al. Influencing factors and amelioration of soil water repellency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 84-89.
- [2] MAO J, NIEROP K G J, DEKKER S C, et al. Understanding the mechanisms of soil water repellency from nanoscale to ecosystem scale: A review [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 171-185.
- [3] 王秋玲,施凡欣,刘志鹏,等.土壤斥水性影响土壤水分运动研究进展[J].农业工程学报,2017,33(24):96-103.  
WANG Q L, SHI F X, LIU Z P, et al. Review on soil water movement affected by soil water repellency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 96-103.
- [4] 吴小雨,涂安国,李国辉,等.土壤斥水性影响因素及管理措施研究综述[J].中国水土保持,2023(1):27-30.  
WU X Y, TU A G, LI G H, et al. Review on the influencing factors and management measures of soil water repellency [J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(1): 27-30.
- [5] 任长江,赵勇,龚家国,等.妫水河流域土壤斥水性分布与影响因素研究[J].农业机械学报,2017,48(10):237-244.  
REN C J, ZHAO Y, GONG J G, et al. Spatial distribution and effect factors of soil water repellency in Guishui River basin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 237-244.
- [6] 李凯,帕力夏提·格明,王维维,等.陕西省长武县黑垆土斥水性的影响因素[J].水土保持通报,2021,41(3):62-68.  
LI K, PALIXIATI G M, WANG W W, et al. Factors influencing water repellency of heilu soil in Changwu County, Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 62-68.
- [7] 周永豪,胡卸文,金涛,等.火烧迹地土壤团聚体稳定性原位快速测定方法[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(6):97-104.  
ZHOU Y H, HU X W, JIN T, et al. An in-situ method for assessing soil aggregate stability in burned landscapes [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 97-104.
- [8] 王维维,柴晓虹,帕力夏提·格明,等.宁夏云雾山封育草地的土壤斥水性及影响因素研究[J].草地学报,2023,31(7):2068-2076.  
WANG W W, CHAI X H, PALIXIATI G M, et al. Soil water repellency and its influencing factors in the enclosed grasslands in Yunwu Mountain in Ningxia [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(7): 2068-2076.
- [9] 马群,白炜,牟国旭,等.增温对高寒沼泽草甸土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J].草地学报,2025,33(2):547-555.  
MA Q, BAI W, MOU G X, et al. Effects of warming on soil aggregate stability and contents of carbon and nitrogen in alpine swamp meadow [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 547-555.
- [10] 李春越,常顺,钟凡心,等.种植模式和施肥对黄土旱塬农田土壤团聚体及其碳分布的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):191-200.  
LI C Y, CHANG S, ZHONG F X, et al. Effects of fertilization and planting patterns on soil aggregate and carbon distribution in farmland of the Loess Plateau, northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 191-200.
- [11] THAPA M, LI T Y, HE B H, et al. Soil C, N, and P stoichiometry in response to different land uses in an agroforestry hillslope of southwest China [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 68(5): 615-629.
- [12] 赵昌平,王景燕,龚伟,等.四川盆北地震重灾区农林复合模式的土壤培肥改土效果[J].中国农业科学,2016,49(15):2999-3009.  
ZHAO C P, WANG J Y, GONG W, et al. Soil amendment and enrichment efficiency of agro-forestry models in serious earthquake region of northern Sichuan basin [J].

- Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(15):2999-3009.
- [13] 王来, 高鹏翔, 刘滨, 等. 农田向农林复合系统转变过程中土壤物理性质的变化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1):96-104.
- WANG L, GAO P X, LIU B, et al. Changes of soil physical properties during the conversion of cropland to agroforestry system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1):96-104.
- [14] DEKKER L W, RITSEMA C J. How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency[J]. Water Resources Research, 1994, 30(9):2507-2517.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983:62-126.
- Chinese Academy of Sciences, Nanjing Soil Research Institute. Soil physics and chemistry analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983:62-126.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:25-49.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:25-49.
- [17] BEULE L, VAUPEL A, MORAN-RODAS V E. Abundance, diversity, and function of soil microorganisms in temperate alley-cropping agroforestry systems: A review[J]. Microorganisms, 2022, 10(3):e616.
- [18] 曾成城, 秦芳, 苏利荣, 等. 核桃不同套种模式对土壤养分、微生物数量及酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(2):258-263.
- ZENG C C, QIN F, SU L R, et al. Effects of different walnut intercropping patterns on soils nutrients, microorganisms and enzymatic activity[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(2):258-263.
- [19] BEULE L, GUERRA V, LEHTSAAR E, et al. Digging deeper: Microbial communities in subsoil are strongly promoted by trees in temperate agroforestry systems[J]. Plant and Soil, 2022, 480(1/2):423-437.
- [20] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1):394-402.
- DU Y N, LI T Y, HE B H, et al. Stoichiometric characteristics of purple sloping cropland under long-term fertilization and cultivation[J]. Environmental Science, 2020, 41(1):394-402.
- [21] 张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 等. 平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(9):5135-5144.
- ZHANG G N, XU Q W, HE B H, et al. Effects of balanced fertilization and straw mulching on soil nutrients and stoichiometry in purple soil slope[J]. Environmental Science, 2023, 44(9):5135-5144.
- [22] 袁晓良, 李俊雅, 葛乐, 等. 不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其导水率的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4):67-71.
- YUAN X L, LI J Y, GE L, et al. Effects of different land use patterns on soil aggregate stability and saturated hydraulic conductivity[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4):67-71.
- [23] LIU W H, WEI Y X, LI R C, et al. Improving soil aggregates stability and soil organic carbon sequestration by no-till and legume-based crop rotations in the north China plain[J]. Science of The Total Environment, 2022, 847:e157518.
- [24] VAN N T H, BACH P C, THUONG V T, et al. Chemical composition and pesticidal activities against three vector mosquito species of *Zanthoxylum armatum* DC. Essential oils[J]. Chemistry and Biodiversity, 2025:e202500648.
- [25] DOERR S H, SHAKESBY R A, WALSH R P D. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 51(1/4):33-65.
- [26] MAO J F, NIEROP K G J, RIETKERK M, et al. The influence of vegetation on soil water repellency-markers and soil hydrophobicity[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566:608-620.
- [27] WANG J, REN X, WU Q, et al. Linking fungal diversity with soil water repellency through grassland enclosure in loess hilly region[J]. Catena, 2025, 250:e08723.
- [28] 彭家顺, 雷开敏, 兰龙焱, 等. 不同类型人工林下土壤斥水性的变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(3):136-142.
- PENG J S, LEI K M, LAN L Y, et al. Variation characteristics of soil water repellency under different types of artificial forests[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2022, 42(3):136-142.
- [29] FENG M D, LI T Y, HE B H, et al. Soil water repellency and micro-aggregate fractions in response to crop growth periods in a sloping cropland subjecting to long-term fertilization management[J]. Science of The Total Environment, 2022, 838(3):e156350.
- [30] 王海, 高永飞, 刘洪林, 等. 草原土壤斥水性与土壤理化因子的相关性分析[J]. 中国草地学报, 2019, 41(1):68-74.
- WANG H, GAO Y F, LIU H L, et al. Correlation analysis of soil water repellency and soil physical-chemical properties in grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(1):68-74.