

雷达探测分析广西丘陵坡耕地整地措施对土壤水分的影响

倪晓庆^{1,2}, 陈晓冰^{1,2,3}, 张详曙^{1,2}, 义轩^{1,2}, 刘雍鑫^{1,3}, 杨婷^{1,3}, 许昊^{1,3}

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541006; 2. 桂林理工大学流域保护与绿色发展广西高校工程研究中心, 广西 桂林 541006; 3. 桂林理工大学广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541006)

摘要: [目的] 整地是丘陵山区农业生产中的关键措施, 明确整地后土壤属性的变化与田间土壤水分空间变异特征的响应关系, 对于提升农业生产效益具有重要意义。[方法] 以广西丘陵山区水平和反坡 2 种典型整地措施为研究对象, 将野外雷达探测试验与室内土壤分析试验相结合, 利用图像解析、统计分析等方法, 深入探讨整地措施对坡耕地田间土壤水分变异特征的作用。[结果] 在相同外部供水条件下, 水平整地后的土壤水分空间变化显著发生在 0~30 cm 土层, 反坡整地集中在 20~40 cm 土层, 坡耕地贯穿整个 0~50 cm 土层。水平整地的田间土壤水分空间分布变化程度最强(平均偏离程度 0.052), 反坡整地变化程度最弱。水平整地的田间土壤水分空间运动稳定(反射系数 0.33, 瞬时功率变化速率 8.41×10^{11} dB/ns)且相对均匀(雷达结构相似性指数 0.77), 而反坡整地与坡耕地的田间土壤水分运动程度均相对剧烈, 空间运动状态变化较大。坡耕地的土壤水分空间变异最大(综合指数 1.45), 其次为反坡整地(综合指数 1.53), 水平整地的土壤水分空间变异最小(综合指数 1.57), 土壤水分环境相对最稳定。相较于坡耕地, 整地后的土壤粉粒质量分数对土壤水分空间变异影响最大。[结论] 在相同外部供水环境下, 水平和反坡整地后田间土壤属性和土壤水分状况均相对坡耕地起到调控作用, 且水平整地下的田间土壤水分蓄存状况相对更好。

关键词: 水平整地; 反坡整地; 探地雷达; 土壤水分; 土壤属性

中图分类号: S152.5

文献标识码: A

Radar Detection Analysis of the Effects of Land Preparation Measures on Soil Moisture in Hilly Sloping Farmland in Guangxi

NI Xiaoqing^{1,2}, CHEN Xiaobing^{1,2,3}, ZHANG Xiangshu^{1,2}, YI Xuan^{1,2}, LIU Yongxin^{1,3}, YANG Ting^{1,3}, XU Hao^{1,3}

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 2. University Engineering Research Center of Watershed Protection and Green Development, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 3. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China)

Abstract: [Objective] Land preparation is a key measure in agricultural production in hilly and mountainous areas. It is of great significance to clarify the response relationship between the changes of soil properties after land preparation and the spatial variation characteristics of soil moisture in the field for improving the efficiency of agricultural production. [Methods] Two typical land preparation measures, i.e. horizontal and reverse slopes in hilly and mountainous areas of Guangxi, were taken as the research objects. Field radar detection experiment was combined with indoor soil analysis tests, and the effects of land preparation measures on the variation characteristics of soil moisture in sloping farmland were discussed in depth by means of image analysis and statistical analysis. [Results] Under the same external water supply conditions, the spatial variation of soil

收稿日期: 2025-01-03

修回日期: 2025-02-20

录用日期: 2025-02-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(41701248); 广西科技计划项目(AD25069074); 广西自然科学基金项目(2017GXNSFBA198102); 广西研究生教育创新计划项目(YCSW2022307); 桂林理工大学博士科研启动基金项目(GUTQDJJ2017001)

第一作者: 倪晓庆(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤水分研究。E-mail: nixiaoqing_1001@163.com

通信作者: 陈晓冰(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤水分运动与模拟研究。E-mail: jayvision_chen@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

moisture after horizontal land preparation significantly occurred in the 0—30 cm soil layer, that after reverse slope preparation was concentrated in the 20—40 cm soil layer, while sloping farmland exhibited moisture variation throughout the entire 0—50 cm soil layer. The spatial distribution of soil moisture in the field of horizontal land preparation was the strongest (average deviation degree 0.052), and the change degree of land preparation on the reverse slope was the weakest. The spatial movement of soil moisture in the field of horizontal land preparation was stable (reflection coefficient 0.33, instantaneous power change rate 8.41×10^{11} dB/ns) and relatively uniform (radar structure similarity index 0.77), while the degree of soil moisture movement in the field of reverse slope land preparation and sloping farmland was more intense, and the spatial movement state changed greatly. The spatial variation of soil moisture in sloping farmland was the largest (comprehensive index 1.45), followed by reverse slope preparation (comprehensive index 1.53), and the spatial variation of soil moisture in horizontal preparation was the smallest (comprehensive index 1.57), and the soil moisture environment was relatively stable. Compared with sloping farmland, the soil silt content after land preparation had the greatest influence on the spatial variation of soil moisture. [Conclusion] Under the same external water supply conditions, the soil moisture condition in the field after horizontal and reverse slope land preparation is better than that in sloping farmland, and the soil moisture storage condition in the field after horizontal land preparation is better.

Keywords: horizontal land preparation; reverse slope land preparation; ground penetrating radar; soil moisture; soil properties

Received: 2025-01-03

Revised: 2025-02-20

Accepted: 2025-02-28

坡耕地是丘陵山区农业生产的重要资源^[1],但在不良的气候条件和不合理的土地利用方式下,极易引发水土流失和面源污染等问题^[2],制约农业生产。广西丘陵山区坡耕地占全区耕地面积的 64%^[3]。近年来,短时暴雨、持续暖干等极端天气频发,加之过度连作、顺坡耕作等不合理的农业生产活动,严重影响当地丘陵山区坡耕地的农业发展。因此,如何进行丘陵山区坡耕地水土资源的优化利用已成为广西农业可持续发展中亟待解决的重要问题。

实施水平、反坡等农业整地措施,一定程度上可改善坡耕地水土生境^[4]。土壤水分状况作为反映田间水土生境的核心内容,将其进行量化及影响因素的分析对揭示坡耕地整地后产生的水土资源优化效应具有重要意义。坡耕地整地通过改变土壤理化状况,进而影响土壤的持水性、抗蚀性与抗旱性等特征,实现土壤环境的优化调控。例如,于洋等^[5]针对不同整地措施综合影响下的土壤水分特征研究发现,水平沟整地改变土壤机械组成,显著提高土壤水分体积分数;唐佐芯等^[6]研究发现,等高反坡整地后田间土壤的黏粒、粉粒质量分数显著增加的同时,土壤全氮、总磷质量分数也明显提升,土壤质量得到改善,坡耕地的持水能力显著增强。通过长期收集下垫面微地形土壤环境数据,冯天骄等^[7]、YU 等^[8]研究发现,鱼鳞坑和反坡台整地措施通过改善土壤结构稳定性,实现土壤饱和水分体积分数和有效水质量

分数的显著提升,提高土壤的抗蚀与抗旱性。尽管现有研究揭示整地对坡耕地土壤水分的积极影响,但多数研究集中在阐释土壤水分基本属性方面,而反映土壤水分状况的分布、运动等空间变异特征还需深入探讨;同时,现有土壤水分研究多采用原位定点土壤监测^[9]、土壤挖掘^[10]或土壤水分数值模拟^[11]等技术手段,这些方法虽然能够实现土壤水分的量化研究,但无法较好地应对变尺度、非破坏性等复杂环境,以及数据高准确性等方面的需求。

探地雷达法作为一种集原位、无损、实时和可视化为一体的地球物理方法,在土壤水分研究中较传统方法具有非侵入、多尺度、高监测精度和空间分辨率的优点^[12]。LUNT 等^[13]使用探地雷达测量土壤中的电磁波反射以推算土壤水分体积分数,并与 TDR 数据进行对比,证实雷达探测技术能够有效估算土壤水分体积分数;WU 等^[14]利用探地雷达反演田间土壤水分状况发现,土壤湿度在不同地形特征下存在显著差异,尤其是在沟槽和丘陵区域的水分分布不均匀性更加明显;侯芳等^[15]和刘思佳等^[16]利用探地雷达在对林地和农地的土壤水分状况分析中揭示土壤水分的非均匀流动特征。同时,为进一步确定探地雷达的使用精度与准确性,曹棋等^[17]通过验证不同经验模型的反演精度,明确探地雷达在土壤水分测定中的有效反演深度和最优模型等相关参数;李鑫俐^[18]研究确定不同深度土壤水分体积分数的最佳

雷达天线距离,以利于提升探地雷达进行土壤水分反演的精度。当前,关于雷达探测在土壤水分研究中的应用更多侧重在不同地质环境、土地利用类型下的土壤水分体积分数反演、土壤含水率-介电常数模型参数的确定及经验模型的校正和验证方面,而利用探地雷达获取的相关参数与土壤水分之间的深入量化表征关系,即雷达探测技术在深入分析土壤水分空间分布与运动的应用鲜有涉及。

基于以上分析,本研究以广西丘陵山区坡耕地为研究对象,开展典型整地措施(水平和反坡)下的田间土壤水分空间变异分析,依托探地雷达法探究坡耕地整地措施对田间土壤水分分布与运动的影

响,揭示整地后的土壤属性状况与田间土壤水分空间变异特征的响应关系,为客观评价与优化整地措施在广西丘陵山区坡耕地农业可持续发展中的应用提供理论指导,一定程度上也为雷达探测技术在土壤水文学研究中的深入应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西桂林市临桂区两江镇丘陵山区的坡耕地农作物种植区内(25°17'N,110°01'E),属亚热带季风气候,年平均降水量 1 966.6 mm,年平均气温 19.7℃,无霜期 358 d。以丘陵地貌为主,土壤类型主要为红壤土。样地基本情况见表 1。

表 1 研究样地基本情况

Table 1 Basic information of the research sample plots

样地	土层深度/cm	体积质量/(g·cm ⁻³)	水分体积分数/%	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	饱和导水率/(mm·min ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(mg·g ⁻¹)	全磷/(mg·g ⁻¹)
SP	0~10	1.36±0.05Ba	16.00±1.68Ac	3.23±1.32Aa	89.97±2.85Aa	6.79±3.55Aa	0.94±0.03Ca	27.54±1.11Aa	0.18±0Aa	1.41±0.36Aa
	10~20	1.41±0.03Bb	17.58±0.01Abc	3.62±1.61Aa	86.65±4.53Aa	9.71±5.02ABa	0.55±0.14Bb	26.01±1.49Aa	0.16±0.01Aab	1.08±0.22Aab
	20~30	1.45±0.03Ba	18.64±0.89Aab	7.98±3.71Aa	85.55±2.84Aa	6.45±1.04ABa	1.00±0.16Ba	22.27±0.61Ab	0.14±0Abc	0.94±0.16Aab
	30~40	1.46±0.03Bbc	20.17±0.74Aa	6.32±2.22Aa	89.98±0.76Aa	3.69±2.39Ba	0.35±0.03Abc	20.98±1.74Ac	0.11±0.01Acd	0.86±0.13Ab
	40~50	1.47±0.02Bc	20.36±0.72Aa	8.84±2.08Aa	84.31±4.16Aa	6.84±5.27Aa	0.14±0.05Ac	14.65±0.69Ad	0.09±0.02Ad	0.66±0.04Ab
FP	0~10	1.32±0.05Aa	14.14±1.34Ab	3.69±1.83Ab	87.23±0.46ABa	9.07±2.16Aa	4.09±0.93Ba	20.12±1.08Ba	0.13±0Ba	0.80±0.02Ba
	10~20	1.40±0.13Aa	15.82±1.92Ab	4.36±1.89Ab	89.67±0.18Aa	5.95±2.02Bab	3.41±0.87ABa	20.28±2.58Aa	0.13±0ABab	0.76±0.02Aab
	20~30	1.42±0.09Aa	19.28±0.46Aa	6.71±0.61Aab	90.24±1.14Aa	3.03±1.69Bb	1.21±0.83Bb	14.61±3.91Bab	0.12±0Bab	0.67±0.05Ab
	30~40	1.44±0Aa	21.08±1.31Aa	5.06±1.94Aab	87.80±1.53Aa	7.12±0.64Bab	0.30±0.26Ab	13.13±2.96ABab	0.11±0.01Ab	0.70±0.05Aab
	40~50	1.45±0.04Aa	20.58±0.78Aa	9.16±3.00Aa	85.15±5.95Aa	5.68±3.05Aab	0.31±0.20Ab	11.39±4.41Ab	0.09±0.01Ac	0.68±0.06Ab
CK	0~10	1.34±0.01Ab	12.83±0.77Ad	2.15±0.07Ad	83.97±2.89Ba	13.87±2.95Aabc	7.50±0.39Aa	15.90±2.33Ca	0.12±0.01Ba	0.78±0.11Ba
	10~20	1.41±0.02Aa	15.22±0.53Ac	3.25±0.45Ac	79.33±1.99Ba	17.40±1.59Aa	5.27±2.63Aab	13.51±3.31Bab	0.10±0.02Bab	0.73±0.11Aa
	20~30	1.41±0.01Aa	18.78±0.72Ab	5.34±0.11Ab	84.62±2.97Aa	10.03±2.88Abc	4.03±1.72Aabc	10.18±1.30Bb	0.10±0Cab	0.70±0.10Aa
	30~40	1.41±0Aa	19.05±0.53Ab	5.15±0.16Ab	80.13±3.08Ba	14.71±3.20Aab	2.48±1.90Abc	11.35±3.14Bab	0.07±0Bb	0.65±0.09Aa
	40~50	1.43±0.03Aa	21.93±1.31Aa	7.14±0.30Aa	85.16±2.34Aa	7.68±2.64Ac	0.61±0.32Ac	8.49±0.49Ab	0.07±0.01Ab	0.59±0.12Aa

注:表中数据为平均值±标准差;SP为水平台,FP为反坡台,CK为坡耕地;表中不同大写字母表示相同土层深度不同样地之间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示不同土层深度相同样地之间差异显著($p<0.05$); $n=3$ 。下同。

1.2 试验设计与数据分析

1.2.1 试验设计 在研究区内选择海拔(204 m)、坡向(西坡)和坡度(3°)均相同,且面积均为 400 m²(长 40 m、宽 10 m)的 3 块相邻坡耕地作为研究样地。对其中 2 块坡耕地进行不同整地处理,其中 1 块进行水平整地,即通过沿等高线方向平整坡耕地表面,使田间土壤形成水平台(SP)。第 2 块进行反坡整地,沿等高线自上而下进行里切外垫,形成外高内低、坡度为 3°的反坡台(FP),整地后持续多年进行农业生产。第 3 块坡耕地(CK)作为对照样地使用,不同坡耕地示意图 1。样地内均采用人工起垄种植方式,垄台宽与高分别为 70、15 cm,垄间距为 15 cm。种植作物为广西典型农作物辣椒,采用垄上单株单行定植,株距为 70 cm。种植期间底肥施用生物有机肥(有机质质量分数≥70%),用量为 300 kg/hm²;追肥采用复合肥(N 质量分数 15%,P₂O₅质量分数 15%,K₂O 质量分数 15%),用量为 380 kg/hm²。试验时间为整地后的第 5 a,即 2023 年 9 月。

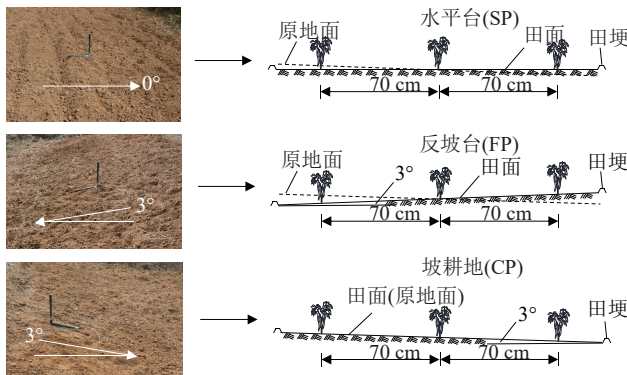


图 1 不同坡耕地整地示意

Fig. 1 Diagram of different sloping farmland preparation measures

1.2.2 雷达探测试验 在每个样地内,随机选取 3 条垄台作为雷达探测试验区,选取的每条垄台避免位于样地的边缘位置,且确保垄台之间间隔>2 m。随后清理垄台上的枯枝落叶,以垄台上株间连线为中心线随机设定 1 个沿垄向的 70 cm×70 cm 区域为雷达探测试验区。雷达测线在区域的核心区(60 cm×60 cm,四周 5 cm 宽度为缓冲区)平行于垄台宽度方向布置,并使用标尺固定起始位置以确保测线平直。将区域一端设定为 0 cm 位置,以 10 cm 水平宽度为间隔布置雷达测线。在雷达探测试验开始前,采用 TDR 测定 0~50 cm 各土层的土壤水分体积分数,随后使用美国 GSSI SIR-4000 探地雷达(900 MHz 天线)沿测线方向对田间土壤以 2 cm 间隔进行连续点测,时窗设置为 20 ns。雷达数据采集结束后,根据雷达测线布置情况及探测位置,将相同尺寸(60 cm×

60 cm×30 cm)的金属样方垂直砸入试验区域,深度达 20 cm,以防止供水试验时水分在垄台发生侧向入渗。使用恒流泵以 150 mL/min 的速度将 10 L 清水(当地 24 h 累计降雨量 25 mm 为计算标准获得)均匀喷洒在样方内,供水结束后在样方上覆盖塑料薄膜。24 h 后移除塑料薄膜和金属样方,并在试验区内再次使用 TDR 测定 0~50 cm 各土层的土壤水分体积分数,沿测线按未供水前的相同方式再次进行雷达数据的采集,以获得供水前后的雷达探测图像数据。雷达探测试验测线布置与辣椒栽植示意图 2。

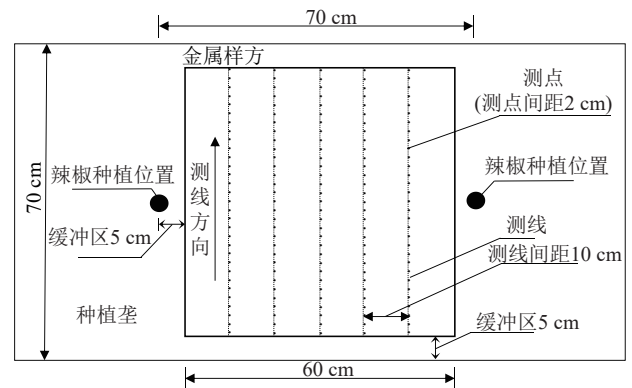


图 2 雷达探测试验测线布置与辣椒栽植示意

Fig. 2 Schematic diagram of the layout of radar detection test line and pepper planting

1.2.3 土壤基本属性测定 在 3 种样地内随机选取垄上区域,以 10 cm 为间隔(0~50 cm)垂直采集环刀与土壤样品(0.5 kg)。土壤样品采取“S”形进行取样,将所有混样点采集的土壤样品充分混匀,装入自封袋并附上标签。其中环刀土壤样品带回实验室,用于测定土壤饱和导水率和土壤体积质量。土壤样品带回实验室后自然风干,剔除土壤样品中的根系、杂草和石砾等杂物,过筛(孔径 2.00、0.15 mm)处理,进行土壤理化性质的测定。土壤饱和导水率采用恒定水头法测定,土壤体积质量采用环刀烘干法测定,土壤颗粒组成使用马尔文激光粒度仪(Mastersizer 3000)测定。土壤有机质采用重铬酸钾-水合热法测定,土壤全氮采用半微量凯氏法测定,土壤总磷采用碱熔-钼锑抗分光光度法测定。以上试验均进行 3 次重复以确保数据的可靠性。

1.2.4 数据处理与分析

1) 雷达探测图像数据处理

利用不同土层的 TDR 实测土壤水分体积分数计算土壤介电常数,对雷达探测图像进行信息解译。使用 RADAN 7 软件对雷达探测图像进行去除噪声、距离标定、增益处理和背景去除等预处理,再使用 MATLAB R2023a 软件对完成预处理的雷达探测图像进行单道波形图提取,在每张雷达探测图像上获

取10、20、30、40、50 cm土壤水平位置的单道波形图,进行后续雷达参数数据的分析。

①土壤介电常数

土壤介电常数反映土壤的介电性质,介电常数越大,表明电磁波传播速度越小。采用TOPP公式^[19]反演土壤介电常数。计算公式为:

$$\epsilon = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.7\theta_v^3 \quad (1)$$

式中: ϵ 为土壤相对介电常数; θ_v 为土壤体积含水率,%。

②电磁波幅值

电磁波幅值反映土壤水分分布情况对雷达信号的反射。电磁波幅值变化越大,表明土壤水分变化越大。

③单道波

单道波是雷达探测图像中电磁波幅值随土层深度变化形成的波动过程。以位置零点为基准点,单道波振幅值偏离程度越大,表明土壤水分空间分布变化程度越剧烈。

④反射系数

反射系数反映雷达信号波的衰减程度,与土壤水分运动变化程度相关。反射系数越大,表明土壤水分运动程度越剧烈。计算公式为:

$$R = \frac{A_r}{A_i} \quad (2)$$

式中: R 为反射系数; A_r 为反射波振幅值, mV/m^3 ; A_i 为入射波振幅值,雷达剖面图中第1个出现的强信号, mV/m^3 。

⑤瞬时功率变化速率

瞬时功率变化速率反映雷达信号单位时间产生的瞬时功率的变化程度。瞬时功率变化速率越大,表明土壤水分运动速度变化越快。计算公式为:

$$v = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: v 为瞬时功率变化速率, dB/ns ; ΔP 为单位时间产生的瞬时功率之差, dB ; Δt 为时间间隔, ns 。

⑥雷达图像结构相似性指数

结构相似性反映水分入渗前后雷达图像的相似性程度。结构相似性数值为 $-1 \sim 1$,雷达结构相似性指数越接近1,表明供水前后土壤水分的空间结构相似度越高,土壤水分的空间运动状态越均匀或一致,计算公式为:

$$SS(x, y) = \frac{\sigma(A_x, A_y) + a}{\sigma_{A_x} \sigma_{A_y} + a} \quad (4)$$

式中: SS 为结构相似性; x, y 为2次数据采集时间; A 为电磁波振幅值, mV/m^3 ; $\sigma(A_x, A_y)$ 为 A_x 和 A_y 之

间的协方差; $\sigma_{A_x}, \sigma_{A_y}$ 为 A_x 和 A_y 之间的标准差; a 为最大电磁波振幅的10%。

2)综合指数评价分析

综合指数评价分析用于分析一个复杂系统的整体表现和发展趋势。本研究将不同整地措施下的土壤水分空间分布与土壤水分空间运动的各项指标进行土壤水分状况综合指数评价,以反映不同整地措施下土壤水分环境状况。将各项指标按其影响方向分为正向(高优)指标和负向(底优)指标。根据指标的分类,设定多个指标组别,采用组间相加、组内相乘的计算方式,得到最终的综合评价指数。综合评价指数值越大,土壤水分环境越优。

3)灰度关联分析

灰度关联分析是通过确定参考数据列与若干个比较数据列的相似程度,反映参考序列与比较序列之间的关联程度。本研究将反映土壤水分状况的综合指数作为参考序列,土壤基本属性的相关指标作为比较序列,分析不同整地措施下土壤基本属性与土壤水分状况的互作关系,关联度越大,说明2组数据之间的关联性越强,即某土壤基本属性指标对土壤水分状况的影响越大。

4)数据统计与分析

使用RADAN 7软件和MATLAB R2023a软件对雷达探测图像进行处理分析,使用Excel 2021软件对数据进行整理,使用SPSS 27.0软件对所得数据进行单因素方差差异性分析($p < 0.05$),使用AutoCAD 2022和Origin 2022软件对试验过程 and 数据分析结果进行作图,使用综合指数评价分析和灰色关联分析统计学方法对田间土壤基本属性与土壤水分状况进行关联程度分析。

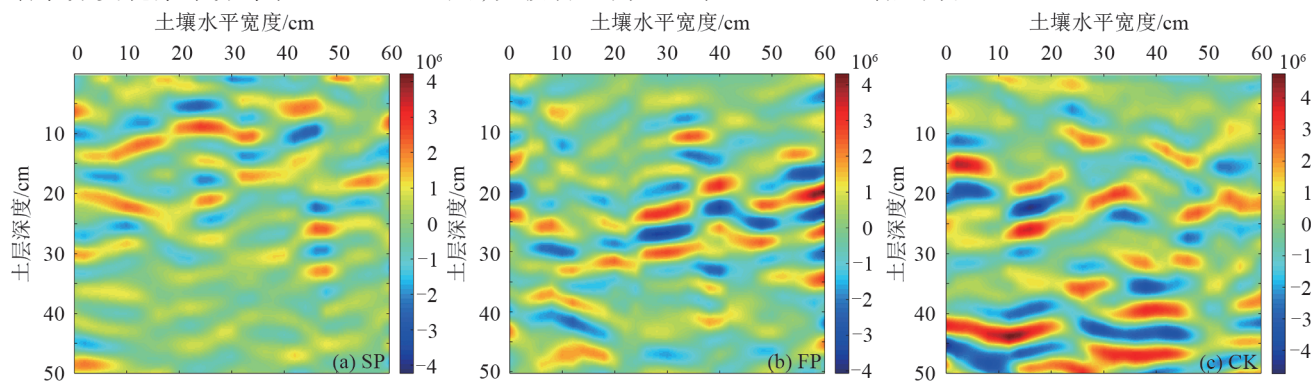
2 结果与分析

2.1 田间土壤水分空间分布特征

对3种样地供水试验后的田间土壤雷达探测图像进行土壤水分空间分布对比分析(图3)。由于雷达探测图像较多,每个试验区仅选取1张具有代表性的图像进行展示分析,但相关指标计算采用全部雷达探测图像。图像显示,水平台在0~30 cm土层,雷达图像竖向颜色变化相较深层土壤(30~50 cm)显著,说明水平台田间土壤水分在0~30 cm土层集中发生变化。而反坡台田间0~20 cm土层雷达图像颜色无明显变化,但随土层深度的增加(20~40 cm),颜色变化集中且多以横向带状分布形式为主,土壤水分相较水平台呈高联通性分布变化。随土层深度(40~50 cm)继续增加,颜色变化显著降低,土壤水分变化减弱。相较之下,坡耕地田间土壤水分在0~

10 cm 土层,雷达图像颜色无明显变化,但在 10~50 cm 土层水平方向出现更多横向带状颜色变化集中区域。总体而言,雷达图像反映出水平台田间土壤水分变化集中分布在 0~30 cm 土层,反坡台田间

土壤水分变化集中在 20~40 cm 土层,其区域相比水平台有所加深,坡耕地土壤水分变化范围最大,并且随土层深度的增加,土壤水分变化逐渐增大,贯穿整个 0~50 cm 土壤空间。



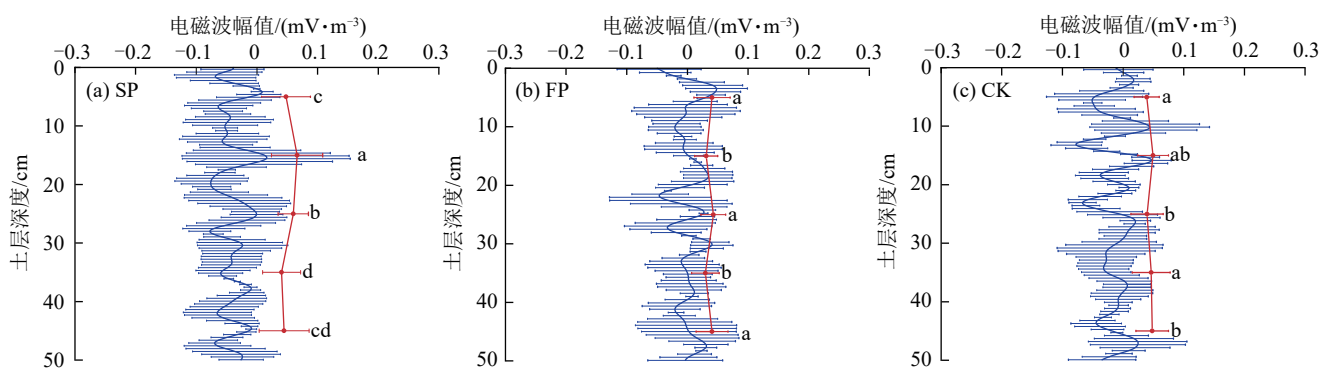
注:图中红色表示电磁波回波正相位,蓝色表示电磁波回波负相位。

图 3 不同坡耕地整地措施下田间土壤雷达图像

Fig. 3 Radar images of field soil under different sloping farmland preparation measures

为进一步量化分析 3 种样地田间土壤水分空间分布变化特征,对供水试验后的全部雷达探测图像进行单道波提取分析(图 4)。各样地的单道波均随土层深度呈动态交替波动变化。其中,水平台在 0~10 cm 土层平均电磁波幅值为 0.048 mV/m^3 , 10~20 cm 土层的平均电磁波幅值显著增大(0.066 mV/m^3),但随着土层深度的继续增加(20~50 cm),平均电磁波幅值减小(0.049 mV/m^3)。0~40 cm 土层单道波振幅值的波动程度差异显著($p < 0.05$),平均偏离程度为 0.054。反坡台在 0~10 cm 土层振幅值平均偏离程度达 0.041,随着土层深度的变化(10~20 cm),振幅值波动程度减小(平均偏离程度为 0.031),

而 20~40 cm 土层振幅值波动增大且差异显著($p < 0.05$),其振幅值平均偏离程度(0.036)是 10~20 cm 土层的 1.17 倍,说明该深度范围土壤水分分布变化程度增大。坡耕地在 0~50 cm 的整个土层电磁波平均偏离程度为 0.044,且各个土层偏离程度较为一致,反映出整个土壤空间的土壤水分分布变化程度相似。在整个土壤空间范围内,水平台(平均偏离程度 0.052)、反坡台(平均偏离程度 0.037)和坡耕地(平均偏离程度 0.044)振幅值差异显著($p < 0.05$),说明整地使土壤水分空间分布发生显著变化,一定程度上可以调控坡耕地土壤水分状况。



注:图中蓝色折线表示单道波形,红色点线表示平均波动偏离度。

图 4 不同坡耕地整地措施下的单道波形图及其波动偏离度变化

Fig. 4 The single-channel waveform diagram and its fluctuation deviation change under different sloping farmland preparation measures

2.2 田间土壤水分运动变化特征

对 3 种样地的电磁波反射系数分析以量化揭示田间土壤水分运动程度。由图 5 可知,3 种样地的反射系数整体均随着土层的增加而逐渐减小。坡耕地在整个土壤空间内平均反射系数为 0.52,反射系数值

较高。反坡台的平均电磁波反射系数相比坡耕地减少 0.17,水平台平均反射系数(0.33)最低,土壤水分运动程度最稳定。总体来看,在 0~50 cm 整个土壤空间内,水平台的土壤水分运动程度相对稳定,其次为反坡台,坡耕地土壤水分运动程度最剧烈。

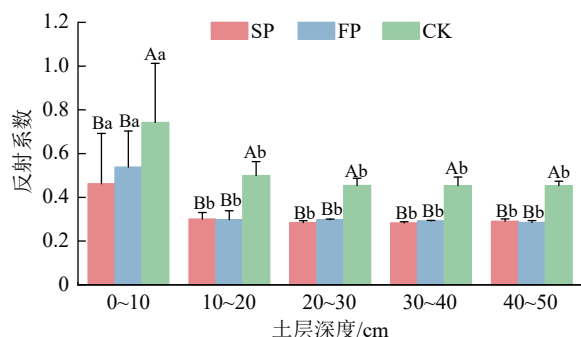


图5 不同坡耕地整地措施下田间土壤反射系数

Fig. 5 Field soil reflection coefficients under different sloping farmland preparation measures

通过分析3种样地的电磁波瞬时功率变化速率,以量化反映田间土壤水分运动速度变化程度。由图6可知,水平台整体随着土层深度的增加,电磁波瞬时功率变化速率逐渐减小。其中,水平台在0~10 cm土层的瞬时功率平均变化速率为 1.70×10^{12} dB/ns,随

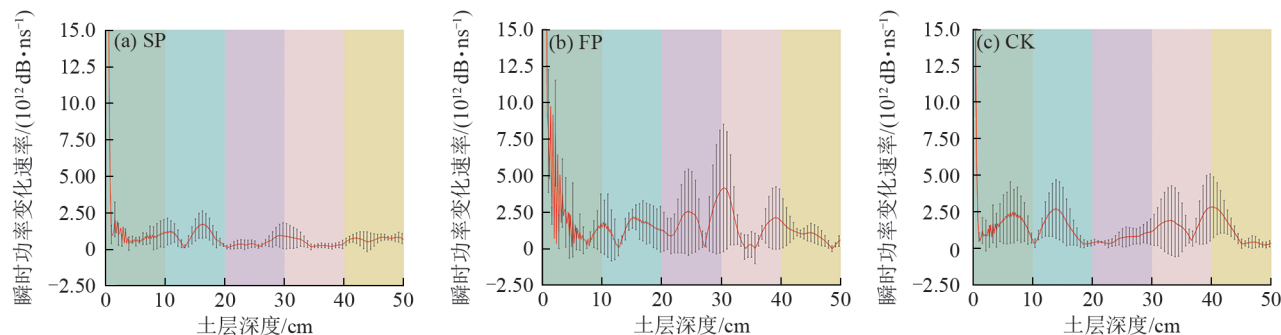


图6 不同坡耕地整地措施田间土壤瞬时功率变化速率

Fig. 6 The instantaneous power change rates of field soil under different sloping farmland preparation measures

通过分析供水试验前后雷达图像之间的结构相似性指数,进一步量化田间土壤水分空间运动状态特征。从图7可以看出,随着土层深度的增加,水平台的雷达图像结构相似性指数由0.62上升至0.83,其土壤水分空间运动状态逐渐趋于一致。反坡台的雷达图像结构相似性指数在0~30 cm土层从0.46升至0.78,在30~50 cm土层内均为0.78,表明反坡台田间土壤水分运动空间状态随着土层的增加逐渐均匀。坡耕地的雷达图像结构相似性指数随土层的增加逐渐增大,在10~50 cm各土层内的数值均低于水平台和反坡台,表明坡耕地土壤水分空间运动状态变化更大。综合分析表明,在整个土壤空间范围内,水平台田间土壤水分空间运动状态最为一致(雷达结构相似性指数为0.77),其次是坡耕地(0.74),而反坡台(0.71)田间土壤水分空间运动状态变化最大。

通过综合指数评价分析方法,将表征土壤水分的空间分布与运动变化特征的振幅值、反射系数、瞬时功率变化速率和雷达图像结构相似性指数进行田间土壤水分空间变异综合分析可知,水平台的综合指数为

着土层深度的增加(10~40 cm),其值逐渐减小到最低值(4.11×10^{11} dB/ns)。在40~50 cm土层,电磁波瞬时功率变化速率增大至 6.88×10^{11} dB/ns。反坡台在0~20 cm土层的瞬时功率变化速率逐渐减小,而20~40 cm土层电磁波瞬时功率变化速率出现峰值(2.83×10^{12} dB/ns),且电磁波瞬时功率变化速率较快,在40~50 cm土层电磁波瞬时功率变化速率减小(9.70×10^{11} dB/ns),表明土壤水分在20~40 cm土层运动速度变化较快。坡耕地瞬时功率变化速率在0~50 cm土层出现周期性往复变化,且各个土层均存在显著性差异($p < 0.05$),表明土壤水分在整个空间内的运动速度变化差异较大。整体而言,水平台、反坡台和坡耕地在0~50 cm土层电磁波瞬时功率变化速率分别为 8.41×10^{11} 、 2.38×10^{12} 、 1.36×10^{12} dB/ns,水平台整体土壤水分运动速度变化最平稳。

1.57,反坡台为1.53,坡耕地的综合指数最大(1.45)。综合评价指标值越大,说明样地的土壤水分空间变异越小,即坡耕地土壤水分空间变异最大,而水平台的田间土壤水分空间变异最小,水分环境相对较好。

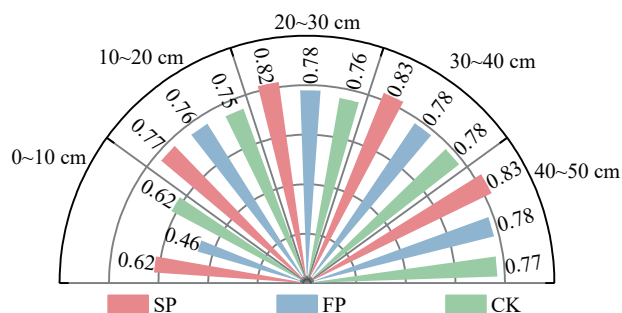


图7 不同坡耕地整地措施下供水试验前后雷达图像结构相似性指数

Fig. 7 The similarity index of radar image structure before and after water supply test under different sloping farmland preparation measures

2.3 田间土壤基本属性与土壤水分状况的互作关系

结合以往整地措施下的土壤基本属性相关研究,选取主要表征土壤基本属性状况的土壤体积分

量、土壤质地、土壤饱和导水率、有机质质量分数、土壤全氮和总磷质量分数作为比较序列,并以土壤水分空间变异状况的综合指数作为参考序列进行灰色关联分析,旨在探讨3种样地形成的土壤基本属性与土壤水分空间变异之间的互作关系。由图8可知,水平台和反坡台土壤粉粒质量分数对土壤水分空间变异影响最大,关联度分别为0.94和0.98,其次是土壤体积质量(关联程度分别为0.94和0.96)。坡耕地土壤体积质量对土壤水分空间变异影响最大(关联程度0.98),其次是土壤粉粒质量分数(关联程度0.96)。同

时,土壤砂粒质量分数(关联程度0.75)对水平台土壤水分空间变异影响仅次于土壤粉粒质量分数和土壤体积质量,而土壤总磷质量分数(关联程度0.91)和土壤全氮质量分数(关联程度0.86)对反坡台的土壤水分空间变异影响仅次于土壤粉粒质量分数和土壤体积质量。坡耕地的土壤总磷质量分数(关联程度0.87)和土壤有机质质量分数(关联程度0.73)也对土壤水分空间变异产生一定程度的影响。表明3种样地形成的田间土壤物理状况对土壤水分空间变异的影响最大,但土壤水分空间变异对土壤养分状况也产生影响。

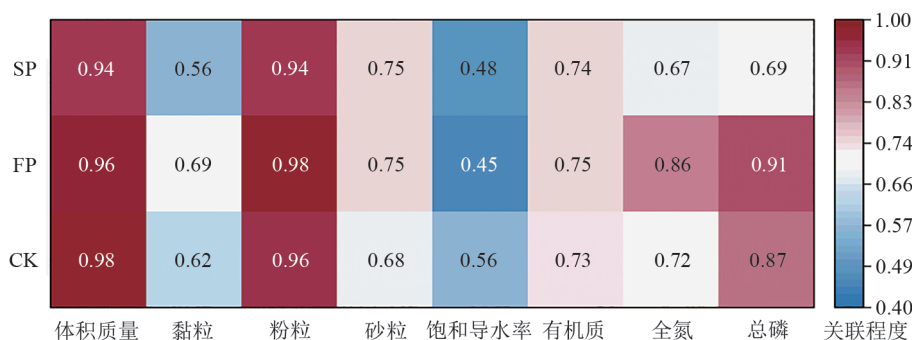


图8 不同坡耕地整地措施下土壤属性与土壤水分状况综合指数关联程度

Fig. 8 The correlation degrees between soil properties and comprehensive index of soil moisture status under different sloping farmland preparation measures

3 讨论

3.1 整地措施对田间土壤水分空间分布的影响

农业整地显著改变土壤水分的空间分布状况(图3)。在相同供水条件下,水平台、反坡台的土壤水分分布范围小于坡耕地,且分布变化集中在0~40 cm土层,表明整地后坡耕地土壤浅层水分储存能力得到增强。研究^[20]发现,整地过程翻松、重塑田间地形的同时,调控土壤物理性质。CHUN等^[21]研究发现,土壤粉粒质量分数的增加促进土壤小孔隙的形成,增大土壤毛细管吸力,影响土壤水分竖向渗透能力,并降低土壤饱和导水率,提升土壤的保水能力。本研究表明,水平和反坡整地后,田间土壤黏粒和粉粒质量分数显著增加,且体积质量均高于坡耕地(表1)。因此,整地能够增加水分在浅层土壤中的分布及其保持能力。同时,整地改变土壤机械组成,使土壤粉粒、黏粒质量分数增大,土壤孔隙呈更加均匀的分布状态,增加土壤非毛管孔隙数量,相较未整地的土壤水分呈较大波动状态。研究^[22]发现,农作物根系普遍分布在0~30 cm土层,与水平整地后的土壤水分变化区域相接近,进一步说明水平整地有利于作物根系对水分的利用。相比之下,反坡整地在20~40 cm土层的雷达图像呈明显的横向带状分布,即该区域的土壤水分横向连通程度较高,形成局部横向蓄积形式,相较水平整地,土壤水分变化范围更深。

虽然一定程度限制作物根系对土壤水分的有效利用,但对于持续干旱时期的深层补给浅层土壤水分起到积极作用,有助于缓解干旱时期田间农作物的水分胁迫,提高其抗旱能力。本研究未进行整地的坡耕地土壤体积质量较低,且饱和导水率较高,导致土壤水分的空间流动性较强,水分更容易以优先流的形式渗透到土壤深层^[23],加剧土壤水肥的流失。总体而言,农业整地改变土壤水分的分布状况,相较原状坡耕地可提升土壤的持水和保水能力,对调控田间作物的水分利用具有积极作用。

3.2 整地措施对田间土壤水分空间运动的影响

整地对土壤水分运动有显著影响。其中,水平整地后土壤水分运动程度最稳定,水分环境最优,土壤水分空间变异最弱。许昊^[24]研究发现,坡耕地优先流运动过程最剧烈,其次是反坡台,水平台水流的运动程度最弱,与本研究的土壤水分运动状况相似;张涛等^[25]研究发现,坡度越大,湿润锋的运移速度越大,运移速率越快。本研究中整地改变坡耕地原始坡度,使土壤水分的流动状况得到有效控制。整地后的水平台和反坡台土壤水分渗透速率相较坡耕地显著减小,水肥流失量减少,提高土壤对水分的蓄存和养分固定能力,从而增强农作物对水分和肥料的吸收。已有研究^[26]发现,反坡整地能够有效减少地表径流,使土壤水分能够更好地进行蓄存。反坡整

地在20~40 cm土层的水分呈明显的横向集中分布,对不同土层之间的水分交换产生影响。该土层的横向水分交换能够在一定程度上避免水分过快下渗,为作物提供更稳定的水分来源。相比之下,坡耕地未经破坏且联通的土壤孔隙结构使水分能够快速向深层运动,速度变化较快且水分运动程度更剧烈,空间变异相对更大。整地后土壤结构发生变化,伴随着水文路径的重塑,土壤水分由原有的快速运动变为平缓运动,水分运动产生的侵蚀能力减弱,其运动不再具备足够的动能来有效搬运较大的土壤颗粒,有助于土壤及其养分物质以较为稳定地形式蓄存在土壤中,为作物生长提供养分供应^[27]。张彦军等^[28]对不同整地措施下的土壤营养质量分数分析发现,整地后的土壤有机碳和全氮质量分数明显提升,与本研究结果相似,而坡耕地土壤水分空间运动较快,造成土壤养分的快速流失,土壤养分显著降低(表1)。

3.3 整地措施对田间土壤属性与水分状况的综合影响

颜科宇等^[29]对坡耕地进行不同耕作处理下的土壤基本属性研究发现,坡面垄耕作地形可有效抑制土壤养分流失,增强土壤固碳、固氮能力;陆淑宁等^[30]分析不同坡度坡耕地垄作条件下土壤的氮、磷养分流失情况表明,坡度越小,越能减少径流与泥沙中氮磷养分的流失。已有研究^[31]表明,土壤体积质量增大会减少土壤中的大孔隙数量,引起饱和导水率的降低。本研究中,水平和反坡整地后田间土壤体积质量显著增大,土壤结构较为紧实,土壤养分质量分数显著提升,从而减少土壤养分的流失。宿婷婷等^[32]研究发现,水平沟整地措施可以拦蓄坡面径流,增加土壤水分,改善土壤水分平衡状况。本研究发现,整地调整坡耕地原始坡度,土壤水分环境得以改善,综合评价分析得出水平台土壤水分环境最好,其次是反坡台,坡耕地土壤水分环境较差。未进行整地的坡耕地,土壤水分在原状通道中迅速运动,影响土壤水分调节和养分迁移。本研究发现,整地后土壤体积质量(关联度为0.96)和土壤粉粒质量分数(关联度为0.96)对土壤水分空间变异影响最大。反坡台和坡耕地的土壤氮、磷质量分数也与土壤水分空间变异状况关联显著。整地改变土壤水分分布及运动形式,使水平台和反坡台的土壤水分环境优越程度高于坡耕地,而未进行整地的坡耕地土壤水分更易携带氮磷养分向土壤深层迁移,降低浅层土壤肥力。因此,进行适宜农业整地一定程度上可以改善坡耕地的土壤水肥状况,提高土壤水分和养分的利用效率,促进丘陵山区坡耕地农业的稳步发展。

与传统土壤水分观测分析方法相比,本研究通过分析雷达探测所获得的相关参数,从土壤水分的分布和运动2个方面综合反映其空间变异状况。结果表明,雷达结构相似性指数与土壤介电常数关系紧密,能够更好地反映土壤水分状况。因此,在雷达探测研究土壤水分状况中可着重分析雷达结构相似性指数。本研究探讨雷达探测技术在土壤水分空间分布与运动分析中的应用潜力,但雷达反射信号易受地下介质的介电性质差异影响。应根据具体研究条件选择适宜的雷达设备,以及数据采集和处理方式,通过有效区分不同介质所反射的雷达信号,进一步提升雷达探测技术在土壤水分监测领域的应用效果。同时,还需配合野外实地水分动态监测,进一步开展整地措施对丘陵山区坡耕地水土资源影响效应的深入研究。

4 结论

1)水平、反坡整地显著优化丘陵山区坡耕地的土壤水分分布与运动状况。在相同外部供水条件下,水平整地主要影响0~30 cm土层,反坡整地影响20~40 cm土层,而坡耕地影响整个0~50 cm土层。水平整地更有利于土壤水分在土壤中的蓄存。

2)水平、反坡整地在一定程度上降低土壤水分与养分的流失。整地后,水平台和反坡台的土壤粉粒、黏粒质量分数显著增加,土壤有机碳、全氮和总磷质量分数均显著提升,砂粒质量分数显著下降,形成较为优越的土壤环境,显著降低土壤养分的流失。同时,整地后水平台田间土壤属性优于反坡台,水平整地措施更有利于改善土壤环境。

3)在相同外部供水条件下,水平台土壤水分环境最优,其次是反坡台,坡耕地土壤水分环境相对较差。土壤体积质量(关联度0.96)和土壤粉粒质量分数(关联度0.96)是影响坡耕地整地后田间土壤水分空间变异的主要因素。

参考文献:

- [1] LIANG X Y, JIN X B, YANG X H, et al. Exploring cultivated land evolution in mountainous areas of Southwest China, an empirical study of developments since the 1980s [J]. *Land Degradation and Development*, 2021, 32(2):546-558.
- [2] HOU G, ZHENG J, CUI X, et al. Suitable coverage and slope guided by soil and water conservation can prevent non-point source pollution diffusion: A case study of grassland [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 241:e113804.
- [3] 贺斐,刘灿,肖自强.生态文明视角下喀斯特石漠化山区

- 的耕保探索:以广西为例[J].中国土地,2020(3):52-54.
- HE F, LIU C, XIAO Z Q. Exploration of farming and conservation in karst rocky desertification mountainous areas from the perspective of ecological civilization: Taking Guangxi as an example[J].China Land,2020(3):52-54.
- [4] 鲁连欣,王克勤,李珠宇,等.等高反坡台阶整地对不同耕作系统根土微生态的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):326-338.
- LU L X, WANG K Q, LI Z Y, et al. Effects of contour reverse-slope terrace on the microecology of rhizosphere in different farming systems[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):326-338.
- [5] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J].生态学报,2016,36(11):3441-3449.
- YU Y, WEI W, CHEN L D, et al. Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid Loess Hilly Region[J].Acta Ecologica Sinica,2016,36(11):3441-3449.
- [6] 唐佐芯,王克勤,李秋芳,等.等高反坡阶对坡耕地产流产沙和氮磷迁移的作用研究[J].水土保持研究,2013,20(1):1-8.
- TANG Z X, WANG K Q, LI Q F, et al. Study on contour reverse-slope terrace controlling soil and water loss and nitrogen and phosphorus transfer in the sloping farmland[J].Research of Soil and Water Conservation,2013,20(1):1-8.
- [7] 冯天骄,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性[J].环境科学,2017,38(9):3860-3870.
- FENG T J, WEI W, CHEN L D, et al. Comparison of soil hydraulic characteristics under the conditions of long-term land preparation and natural slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region[J].Environmental Science,2017,38(9):3860-3870.
- [8] YU Y, WEI W, CHEN L D, et al. Land preparation and vegetation type jointly determine soil conditions after long-term land stabilization measures in a typical hilly catchment, Loess Plateau of China[J].Journal of Soils and Sediments,2017,17(1):144-156.
- [9] 吴勇,钟永红,杜森,等.FDR土壤水分传感器田间性能测试分析[J].节水灌溉,2021(2):41-46.
- WU Y, ZHONG Y H, DU S, et al. Field performance test and analysis of FDR soil moisture sensor[J].Water Saving Irrigation,2021(2):41-46.
- [10] 刘目兴,宋兴敏,卢世国,等.三峡库区不同植被覆盖坡地的土壤优先流运动特征研究[J].土壤学报,2022,59(5):1321-1335.
- LIU M X, SONG X M, LU S G, et al. Research on the characteristics of preferential flow movement along varied hillslopes covered with different vegetation in the Three Gorges Reservoir area[J].Acta Pedologica Sinica,2022,59(5):1321-1335.
- [11] 龙晓峰,贺勇,张召,等.普朗铜矿区土壤水分运移动态监测与数值模拟研究[J].矿产勘查,2024,15(8):1500-1507.
- LONG X F, HE Y, ZHANG Z, et al. Dynamic monitoring and numerical simulation of soil moisture transport in the Pulang Copper Mine area[J].Mineral Exploration,2024,15(8):1500-1507.
- [12] 李光辉,马嘉辉,王哲旭,等.基于深度神经网络的探地雷达杂波抑制和根参数预测方法[J].农业工程学报,2023,39(16):171-180.
- LI G H, MA J H, WANG Z X, et al. Suppressing ground penetrating radar clutter to predict root parameters using deep neural networks[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(16):171-180.
- [13] LUNT I, HUBBARD S, RUBIN Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data[J].Journal of Hydrology,2004,307(1):254-269.
- [14] WU K J, DESESQUELLES H, COCKENPOT R, et al. Ground-penetrating radar full-wave inversion for soil moisture mapping in trench-hill potato fields for precise irrigation[J].Remote Sensing,2022,14(23):e6046.
- [15] 侯芳,程金花,王通簿.基于探地雷达的滨河带藤本和次生乔木林土壤优先流特征[J].生态学报,2022,42(5):1766-1776.
- HOU F, CHENG J H, WANG T B. Characteristics of preferential flow of liana and secondary arbor forests along riverside based on ground penetrating radar[J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(5):1766-1776.
- [16] 刘思佳,陈晓冰,刘俊杰,等.雷达探测分析下的广西蔗田土壤优先流空间分布[J].生态学杂志,2023,42(5):1273-1280.
- LIU S J, CHEN X B, LIU J J, et al. Spatial distribution of preferential flow in sugarcane field in Guangxi under radar detection[J].Chinese Journal of Ecology,2023,42(5):1273-1280.
- [17] 曹棋,宋效东,吴华勇,等.探地雷达地波法测定红壤区土壤水分的参数律定研究[J].土壤通报,2020,51(2):332-342.
- CAO Q, SONG X D, WU H Y, et al. Determination of basic parameters of soil moisture by using ground-penetrating radar ground wave method in red soil region of South China[J].Chinese Journal of Soil Science,2020,51(2):332-342.
- [18] 李鑫俐.探地雷达土壤水分监测的最佳天线间距确定方法研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2023.
- LI X L. Study on the determination method of optimal antenna spacing for soil moisture monitoring by ground penetrating radar[D].Harbin: Northeast Agricultural University,2023.

- [19] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(3): 574-582.
- [20] MÄKITALO K, ALENIOUS V, HEISKANEN J, et al. Effect of soil physical properties on the long-term performance of planted Scots pine in Finnish Lapland[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(3): 451-465.
- [21] CHUNS, KIM T, YEB, et al. Capillary pressure and saturation of pore-controlled granules for powder bed binder jetting[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 515: e145979.
- [22] 邢福, 周景英, 金永君, 等. 我国草田轮作的历史、理论与实践概览[J]. *草业学报*, 2011, 20(3): 245-255.
XING F, ZHOU J Y, JIN Y J, et al. History, theory and practice of pasture-crop rotation in China: A review[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(3): 245-255.
- [23] 陈晓冰, 严磊, 陈廷速, 等. 西南岩溶区粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 58-66.
CHEN X B, YAN L, CHEN T S, et al. The characteristics of preferential flow in sugarcane field with smash-ridging and no-tillage in the karst area of southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 58-66.
- [24] 许昊. 不同整地措施影响下的桂北坡耕地土壤优先流空间异质性研究[D]. 广西 桂林: 桂林理工大学, 2024.
XU H. Study on the spatial heterogeneity of soil preferential flow in sloping farmland in northern Guangxi under the influence of different land preparation measures [D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology, 2024.
- [25] 张涛, 张建新, 范文波, 等. 不同坡面条件下土壤水分运移规律和保蓄能力研究[J]. *节水灌溉*, 2023(8): 44-51.
ZHANG T, ZHANG J X, FAN W B, et al. Study on soil water transport and storage capacity under different slope conditions[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(8): 44-51.
- [26] 王帅兵, 王克勤, 宋娅丽, 等. 不同时间尺度反坡台阶红壤坡耕地土壤水分动态变化规律[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 195-205.
WANG S B, WANG K Q, SONG Y L, et al. Dynamic variation of soil moisture at different temporal scales in red soil sloping farmland under reverse-slope terrace[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8): 195-205.
- [27] FENG T J, WEI W, CHEN L D, et al. Effects of land preparation and plantings of vegetation on soil moisture in a hilly loess catchment in China[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(5): 1427-1441.
- [28] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等. 水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(18): 5777-5785.
ZHANG Y J, GUO S L, NAN Y F, et al. Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(18): 5777-5785.
- [29] 颜科宇, 李靖, 陈正发, 等. 耕作措施对红壤坡耕地土壤CO₂排放的影响[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2): 140-149.
YAN K Y, LI J, CHEN Z F, et al. Effects of tillage practices on soil CO₂ emissions in red soil sloping farmland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2): 140-149.
- [30] 陆淑宁, 李荣融, 姚冲, 等. 横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J]. *土壤学报*, 2024, 61(5): 1271-1283.
LU S N, LI R R, YAO C, et al. Study on the effects of counter tillage on runoff and sediment yield and process of nitrogen and phosphorus nutrient loss on sloping farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(5): 1271-1283.
- [31] 王佳坤, 郭月峰, 祁伟, 等. 内蒙古砒砂岩土壤水平入渗特性及适用模型研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(5): 46-52.
WANG J K, GUO Y F, QI W, et al. Horizontal infiltration characteristics and applicable models of pisha sandstone soil in Inner Mongolia[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 42(5): 46-52.
- [32] 宿婷婷, 韩丙芳, 马红彬, 等. 水平沟整地措施对黄土丘陵区草原土壤水分动态平衡的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 125-134.
SU T T, HAN B F, MA H B, et al. Effects of contour trenches engineering measures on soil moisture dynamics and balance of typical steppe in Loess Hilly Region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21): 125-134.