

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.02.036

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.02.036

周书仪,高晓东,马南方,等.基于电阻层析成像技术的黄土区多土地利用类型土壤水分反演[J].水土保持学报,2026,40(2):397-404.

ZHOU Shuyi, GAO Xiaodong, MA Nanfang, et al. Soil moisture retrieval under different land use types in the loess area using electrical resistivity tomography[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 397-404.

基于电阻层析成像技术的黄土区多土地利用类型土壤水分反演

周书仪^{1,2}, 高晓东^{1,3}, 马南方^{1,2}, 邵晓亚^{1,3}, 赵西宁^{1,3}

(1.西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,陕西杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100; 3.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),陕西杨凌 712100)

摘要: [目的] 为深入了解土壤电阻率与土壤水分的关系,以实现土壤水分非侵入、高分辨率、连续监测的需求。[方法] 以黄土丘陵区典型小流域的草地、玉米地和山地苹果园为研究对象,采用电阻层析成像技术(ERT),结合烘干法实测数据,构建不同土地利用类型下的电阻率-含水率反演模型,并评估其在不同土层和季节下的稳定性与适用性。[结果] 各类型样地土壤电阻率与含水量之间呈幂函数关系,模型均方根误差(RMSE)均低于5%,其中天然草地模型精度最高($R^2=0.735$, RMSE=1.70%)。2024年7—9月3期ERT数据表明,发生有效降雨后,浅层(0~1 m)土壤水分显著提高($p<0.01$),深层(1~4 m)土壤水分较为稳定。不同土地利用类型的土壤储水量差异显著($p<0.01$),坝地玉米地的蓄水能力显著优于山地苹果园和天然草地($p<0.01$)。[结论] ERT技术在黄土区复杂地形与多类型土地覆盖条件下具有良好的土壤水分反演能力,可为区域水分动态监测与土地管理提供技术支撑。

关键词: ERT; 土壤电阻率; 土壤水分; 土地利用类型; 黄土高原

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0397-08

Soil Moisture Retrieval Under Different Land Use Types in the Loess Area Using Electrical Resistivity Tomography

ZHOU Shuyi^{1,2}, GAO Xiaodong^{1,3}, MA Nanfang^{1,2}, SHAO Xiaoya^{1,3}, ZHAO Xining^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To gain deeper understanding of the relationship between soil resistivity and soil moisture, in order to meet the demand for non-invasive, high-resolution, and continuous monitoring of soil moisture. [Methods] This study targeted typical grassland, maize fields, and mountainous apple orchards in a small watershed within the loess hilly region. Using electrical resistivity tomography (ERT) combined with gravimetric soil water content measurements, we established resistivity-water content inversion models for different land use types and evaluated their stability and applicability across soil layers and seasons. [Results] The relationship between soil resistivity and water content followed either a power or exponential function, with all models achieving Root Mean Square Error (RMSE) below 5%. The natural grassland model exhibited the highest accuracy ($R^2=0.735$, RMSE=1.70%). Temperature correction significantly improved model performance, making them suitable for monthly-scale monitoring. Analysis of three ERT surveys from July to September 2024

收稿日期: 2025-10-14

修回日期: 2025-12-25

录用日期: 2025-12-30

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-14

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900700); 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-49)

第一作者: 周书仪(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 18392637326@163.com

通信作者: 高晓东(1985—), 男, 博士, 研究员, 主要从事旱区生态水文过程研究。E-mail: gao_xiaodong@nwafu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

indicated that shallow soil moisture (0–1 m) responded rapidly to rainfall, while deep soil moisture (1–4 m) showed lagged and damped responses. Significant differences in soil water storage were observed among land use types, with check-dam maize fields exhibiting superior water retention capacity compared to mountainous apple orchards and natural grassland. [Conclusion] ERT technology is effective for soil moisture inversion under complex terrain and diverse land cover conditions in the Loess Plateau, providing technical support for soil water monitoring and land management.

Keywords: electrical resistivity tomography; soil resistivity; soil moisture; land use type; Loess Plateau

Received: 2025-10-14

Revised: 2025-12-25

Accepted: 2025-12-30

Online(www.cnki.net): 2026-01-14

土壤水分是植物吸水的主要来源,也是干旱半干旱地区农业生产和生态恢复的关键限制因子^[1]。黄土高原地形破碎、气候多变、土地利用类型多样及人类活动频繁,导致区域土壤水分分布存在显著的空间异质性与时序变异性^[2-3],准确获取剖面土壤水分信息是保障该区水土资源高效利用的关键。土壤水分测定方法主要有烘干法、中子仪法、TDR法和卫星遥感法等^[4]。但上述方法主要适用于单点尺度或者区域尺度,难以捕捉田块尺度土壤水分在空间上的连续变化,存在一定的“信息盲区”。近年来,电阻层析成像技术(electrical resistivity tomography, ERT)因其非破坏性、高时空分辨率和可视化表达优势在土壤水分监测与反演研究中受到重视^[5]。

ERT技术主要依据土壤电阻率变化反演土壤水分动态过程,土壤含水量与电阻率关系受降水、土壤性质及植被类型等因素影响^[6-11]。因此,ERT技术成功反演土壤水分的关键是厘清土壤电阻率-土壤含水量定量关系,即构建土壤水分反演模型,基于此实现二维平面上土壤含水量的定量化分析。已有研究^[12]通过ERT技术定量研究了黄土关键带不同立地条件下(土地利用方式、土壤质地等)土壤电阻率与土壤含水量的关系,构建土壤电阻率-土壤含水量最优模型,探讨ERT反演黄土关键带深层土壤水分的敏感性与不确定性;段国秀等^[13]使用ERT技术测定陕北六道沟小流域典型坡地和坝地的土壤电阻率及土壤体积含水量,构建土壤电阻率-土壤体积含水量的幂函数模型。在法国Peyne流域的研究^[14]中,ERT技术被成功用于半干旱地区土壤水分的时空监测和地下层区域划定,有效反映土壤水分的时空变异特征。当前,ERT技术反演土壤水分的难题是如何构建稳定可靠的土壤水分反演模型,进而将土壤电阻率数据科学地转换为真实的土壤含水量信息。土地利用类型通过改变地表入渗能力、蒸散作用与根系分布,显著影响土壤水分的蓄积、入渗及消耗过程,进而影响ERT反演模型的适用性与精度^[15-16]。因此,有必要针对不同土地利用类型分别构建土壤水分反演模型,以提升ERT在复杂地形区的可靠性与通用性。

本研究以陕北黄土丘陵区小流域内不同土地利用类型样地为研究对象,基于ERT获取不同土地利用类型和时期的土壤电阻率数据,结合实测土壤含水量、温度和土壤体积质量等关键参数,构建适用于黄土区的差异化、稳定性强的土壤水分反演模型,系统评估其反演精度与适用性,进而探讨ERT技术在黄土区复杂下垫面条件下的应用潜力与局限性,为黄土区高时空分辨率土壤水分监测提供理论基础与技术支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市子洲县南部裴家湾镇张家河村黄家沟小流域(37°37'N, 110°05'E)(图1)。小流域面积约0.77 km²,其中沟道占比为60.7%,沟壑密度为6.4 km/km²。该区地处陕北黄土高原腹地,海拔964~1 273 m,属于典型的黄土丘陵沟壑区。研究区气候类型为典型的半干旱大陆性季风气候,四季分明,年平均气温9.1℃。年平均降水量450 mm,70%以上的降雨多集中在7—9月,且多以暴雨形式出现。土壤类型主要为黄绵土,属粉质壤土,土质疏松,结构性差,抗侵蚀能力弱,极易发生水力侵蚀。

1.2 数据获取

在子洲黄家沟小流域淤地坝玉米地、山地苹果园和天然草地3种土地利用类型中选择5块典型样地测定土壤电阻率、土壤含水量和土壤体积质量等土壤物理性质数据。5块样地分别为淤地坝坝头玉米地(BT)和坝尾玉米地(BW)、半阳坡苹果园(YA)和半阴坡苹果园(YI)及天然草地(CD)(表1)。试验开展时间为2024年7—9月,该时期是研究区由干转湿的时期,也是土壤水分变化最剧烈的时期。具体测定时期分别为2024年7月15—20日、8月14—18日和9月23—27日。由图2可知,3次测量对应的前期累积降水量分别为157.2、351.8、414.0 mm,分别代表集中降雨发生之前的干旱期、集中降雨发生过程的湿润前期和集中降雨发生即将结束的湿润后期。文中将用干旱期、湿润前期和湿润后期分别代表3次土壤水分的测定时期。

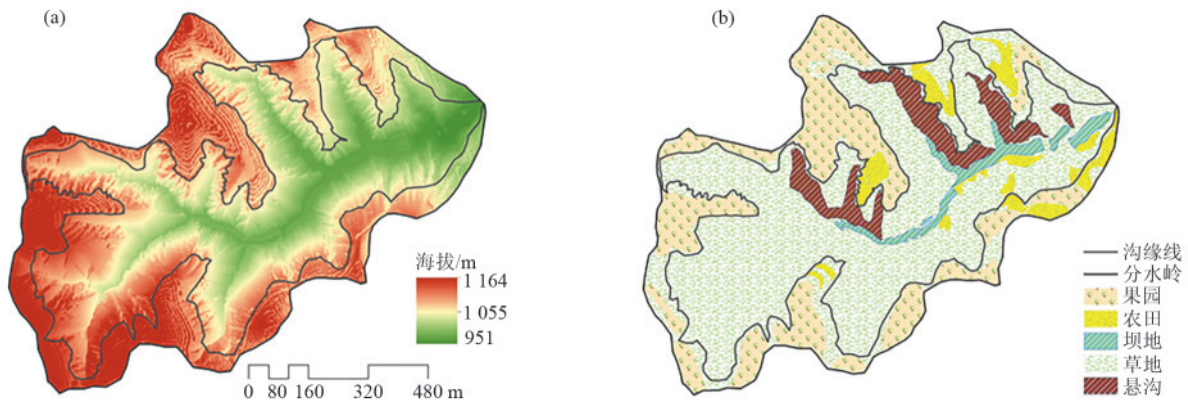


图 1 黄家沟小流域 DEM 及土地利用

Fig.1 DEM and land use map of Huangjiagou small watershed

表 1 试验区监测样地基本信息

Table 1 Information of the experimental places

样地	土地利用方式	地形	土壤质地	植被类型
CD	天然草地	平地	粉壤土	铁杆蒿
BT	农地	坝头	粉壤土	玉米
BW	农地	坝尾	粉壤土	玉米
YI	园地	半阴坡	粉壤土	苹果树(10 a)
YA	园地	半阳坡	粉壤土	苹果树(10 a)

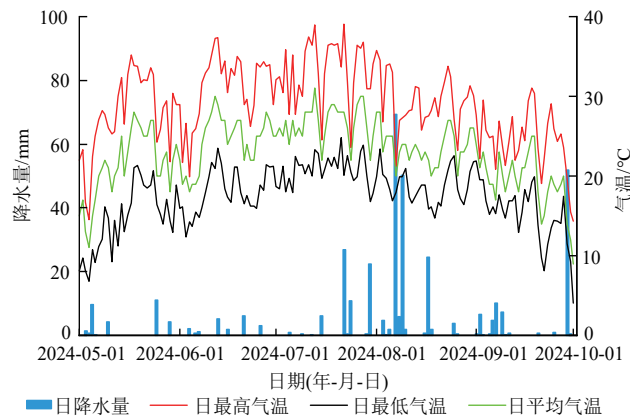


图 2 研究期降水量及温度

Fig.2 Rainfall and temperature during the research period

1.2.1 土壤电阻率数据获取 土壤电阻率数据采用多通道电阻率成像系统(Syscal Pro Switch 72, 法国 IRIS Instruments)获取。该系统集成具有 10 通道接收器及内部发射器的主机,72 根不锈钢电极和 4 条 90 m 长的多芯电缆。测量采用对垂直变化敏感的温纳 α (Wenner- α) 阵列,电极间距 0.5 m,共布设 72 根电极,测线总长度 35.5 m,测量深度约 4.0 m。5 块样地土壤电阻率测定时间分别为 2024 年 7 月、2024 年 8 月和 2024 年 9 月,共获得 15 个有效土壤电阻率剖面。

1.2.2 土壤含水量测定 土壤水分体积分数通过土钻-烘干法测定(土钻直径 40 mm)。土壤电阻率数据采集完成后,在测线上选择 9 个采样点,A1~A9 均匀分布在整条测线上,其中 A3、A5、A7 采样深度 400 cm,以 20 cm 为垂向取样间隔采集土壤样品,共

计 20 层。A1、A2、A4、A6、A8、A9 采样深度 200 cm,以 20 cm 为垂向取样间隔采集土壤样品,共计 10 层。
1.2.3 土壤温度及理化性质 0~2 m 土壤温度由埋设的土壤参数传感器 SoilNet-A 获得,50 cm 1 层;0~1 m 土壤体积重量通过环刀法测得,20 cm 1 层;0~4 m 土壤颗粒组成由激光粒度仪测得,20 cm 1 层。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 高密度电阻率数据预处理 在对数据进行反演前,进行数据格式转换、异常点剔除、地形校正等流程。对由仪器、人为错误、外界干扰或电极接地不良等产生的虚假或突变数据手动剔除,减小或消除其对反演结果的不利影响。在地形起伏地段(地形坡度 $> 15^\circ$ 时)可能导致测试点位置和测量值出现异常,因此,应对测量数据进行校正或做带地形的反演。本研究选取的天然草地、山地苹果园、坝地等地形平缓,无明显坡度,故不考虑地形对整体数据及后续反演的影响。

1.3.2 高密度电阻率数据反演 试验测定的土壤电阻率是对土壤复杂空间结构影响下的岩土体区域性的综合反映的视电阻率,需通过地球物理方法反演得到真实的地下岩土体电阻率分布。本研究使用 Res2dinv (3.54.44) 处理数据,该程序采用强制平滑(smoothness-constrained)最小二乘法(least squares inversion)反演。

1.3.3 土壤电阻率与体积含水量模型构建影响因素 本研究的目的是定量研究土壤电阻率和土壤体积分数的相互关系,构建不同土地利用类型下土壤电阻率-土壤体积分数最优模型。黄土电阻率的主要影响因素包括土壤水分体积分数、土壤温度、土壤种类和孔隙水电阻率等,在特定环境中,其往往受个别因素主导^[17]。黄土高原地区土层深厚且均质,土壤组分差异小且土壤水分背景低,在以往相关试验^[18]中表明,土壤孔隙水电导率相对稳定,其所导致的土壤电阻率变化与土壤水分体积分数导致的土壤电阻率变化相比可以被忽略。本研究也同其他类似试验保持一致,忽略其影响。

1.3.4 土壤电阻率温度校正 土壤温度的改变显著影响土壤电阻率的测量值,为消除土壤温度的影响,确定土壤电阻率和土壤体积含水量之间的单变量关系,土壤电阻率测量值需要在标准温度下校正,文中的土壤电阻率均为经过温度校正的土壤电阻率。 25°C 标准温度校正公式为^[19]:

$$\rho_{\text{ref}} = \rho_{\text{soil}} [1 + \alpha(T_{\text{soil}} - T_{\text{ref}})] \quad (1)$$

式中: ρ_{ref} 为参考温度 T_{ref} 下的修正电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; T_{ref} 通常取 25°C ; ρ_{soil} 为土壤温度 T_{soil} 下的反演电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; α 为校正因子,通常取0.025。

1.3.5 土壤储水量及变化量

$$\text{SWS} = \sum_{i=1}^n \text{GWC}_i \times \text{BD}_i \times H_i \times 0.1 \quad (2)$$

式中: GWC_i 为第 i 层土壤质量含水量,%; BD_i 为第 i 层的土壤体积质量, g/cm^3 ; H_i 为第 i 层的土层深度,cm; n 为分层数,一般按10 cm或20 cm等分层计算; 0.1为换算系数。

$$\Delta\text{SWS} = \text{SWS}_{t_2} - \text{SWS}_{t_1} \quad (3)$$

式中: SWS_{t_2} 为 t_2 时刻的土壤储水量补充单位,mm; SWS_{t_1} 为 t_1 时刻的土壤储水量,mm,且 t_2 晚于 t_1 。因此, $\Delta\text{SWS} > 0$ 说明土壤水分得到补给, $\Delta\text{SWS} < 0$ 说明土壤水分被消耗。

1.3.6 数据分析 本研究的数据处理与分析均在Excel 2021和SPSS 27.0软件进行;使用Origin 2024和MATLAB R2023b软件进行数据拟合及图形绘制,采用Surfer 15软件绘制土壤电阻率及土壤含水量的空间分布格局图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤电阻率分布特征

从图3可以看出,干旱早期不同土地利用类型土壤电阻率具有显著差异($p < 0.05$)。同时,不同土地利用类型浅层(0~1 m)土壤电阻率与深层(1~4 m)土壤电阻率在垂直方向上存在明显分层。

干旱早期坝头玉米地(BT)0~1、1~4 m的平均土壤电阻率分别为113、49 $\Omega\cdot\text{m}$; 坝尾玉米地(BW)0~1、1~4 m的平均土壤电阻率分别为147、48 $\Omega\cdot\text{m}$; 阳坡苹果园(YA)0~1、1~4 m的平均土壤电阻率分别为218、144 $\Omega\cdot\text{m}$; 阴坡苹果园(YI)0~1、1~4 m的平均土壤电阻率分别为143、93 $\Omega\cdot\text{m}$; 天然草地(CD)0~1、1~4 m的平均土壤电阻率分别为174、136 $\Omega\cdot\text{m}$ 。不同土地利用土壤电阻率在垂直方向上均呈“高-低”的分布格局,浅层土壤出现高阻区。

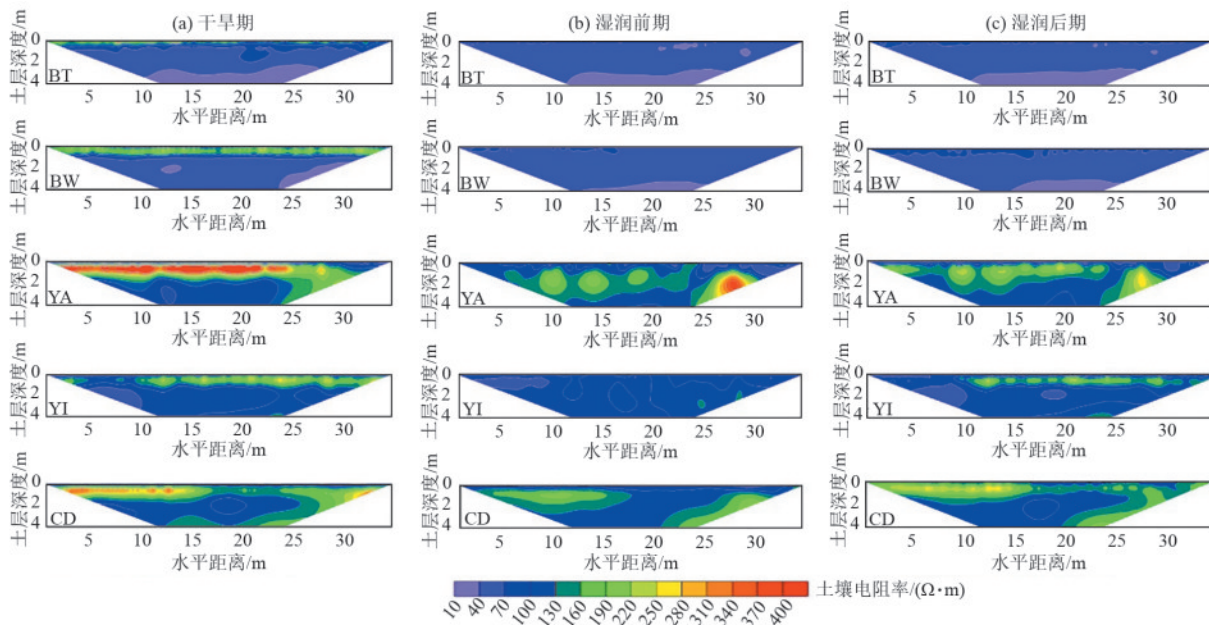


图3 不同时期不同土地利用类型土壤电阻率空间分布

Fig.3 The spatial distribution of soil electrical resistivity across different land use types and time periods

8月进入集中降雨期后,随着降雨事件增多,土壤水分得到补给,浅层土壤电阻率下降。但相较于淤地坝玉米地,山地苹果园和天然草地土壤电阻率下降主要集中在0~1 m,而深层土壤电阻率呈增大趋势,土壤水分对降雨的响应存在滞后效应。在9月下旬的湿润期后期,由于前期累积降雨量较大,土壤水分补给深度达到1 m以下,由于植物根系吸水、土壤蒸发使得浅层

土壤水分消耗,土壤电阻率升高。整个试验期,淤地坝玉米地1~4 m土壤电阻率均呈低电阻率分布格局。

2.2 土壤电阻率-土壤含水量定量关系模型构建

由图4可知,不同土地利用类型土壤电阻率-土壤含水量反演模型均表现出良好的预测精度及稳定性,决定系数(R^2)均在0.59以上,均方根误差RMSE整体 $< 5\%$ 。

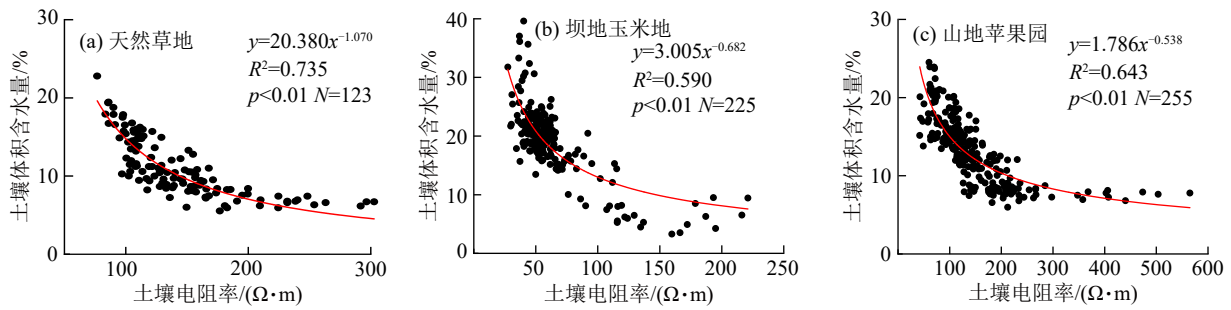


图 4 不同土地利用类型土壤电阻率-土壤体积含水量定量关系

Fig.4 Quantitative relationship between soil electrical resistivity and soil water content across different land use types

2.3 不同土地利用类型土壤体积含水量动态变化

基于建立的不同土地利用类型土壤电阻率-土壤含水量函数关系反演模型,将2024年干早期、湿润前

期及湿润后期3个时期15条测线的数据进行反演处理,获得0~4 m土层深度范围内土壤水分体积分数的二维剖面动态变化(图5)。

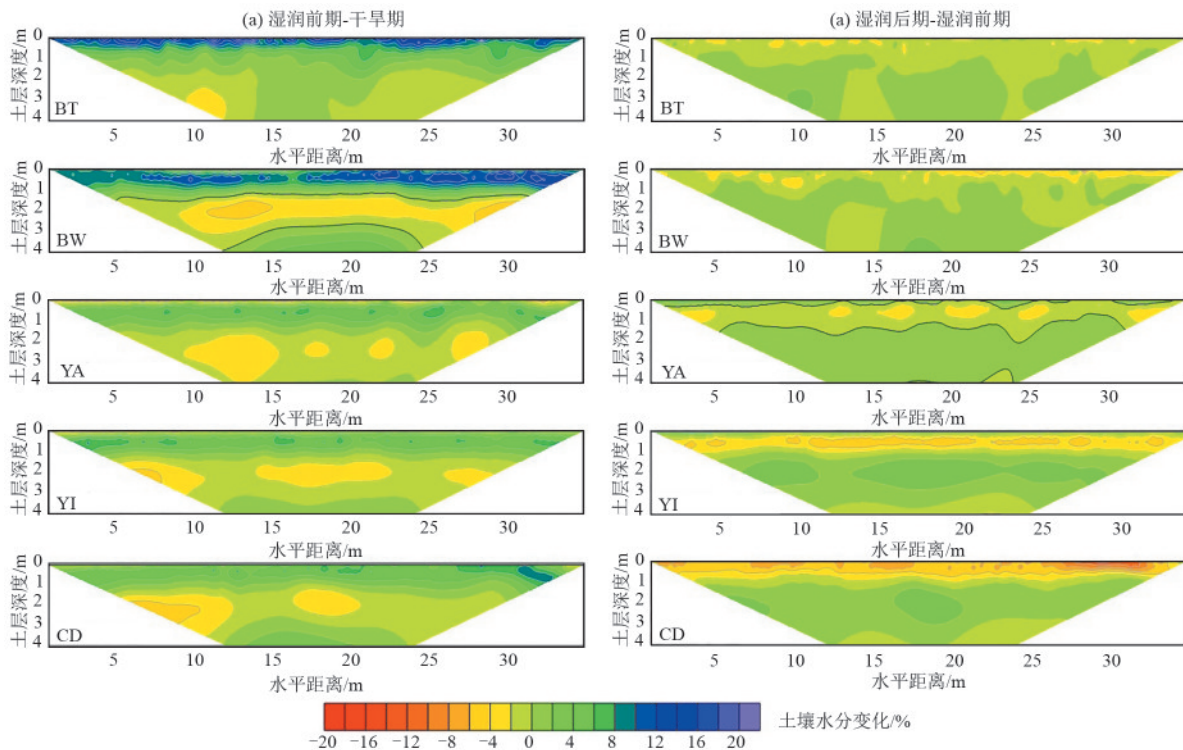


图 5 不同土地利用类型土壤水分体积分数的时空变化

Fig.5 Spatiotemporal dynamics of soil volumetric water content across land use types

不同土地利用类型二维剖面土壤水分体积分数的平均变化率的描述性统计见表2。干早期样地BT、BW、YA、YI、CD 0~1 m土壤储水量分别为108.70、107.25、115.00、131.41、98.44 mm;1~4 m土壤储水量分别为606.48、702.99、350.01、480.12、373.59 mm;湿润前期样地BT、BW、YA、YI、CD 0~1 m土壤储水量分别为191.78、194.63、134.96、162.41、141.04 mm;1~4 m土壤储水量分别为615.18、687.09、333.99、456.45、354.30 mm。结果表明,从干早期到湿润前期,随着降水事件增加,不同土地利用类型0~1 m土层土壤水分均得到较大补给,土壤水分体积分数量增加量在4.00%以上,其中坝尾位置增量最大,达到8.74%。该时期除坝头玉米地外,其余样地

1~4 m深层土壤水分均出现一定程度下降。湿润后期样地BT、BW、YA、YI、CD 0~1 m土壤储水量分别为180.67、179.32、129.32、148.40、94.77 mm;1~4 m土壤储水量分别为626.94、698.61、347.61、488.70、378.87 mm,表明进入湿润后期,由于降水事件逐步减少,不同土地利用类型浅层土壤水分由于地表蒸发外加植物生长耗水而发生消耗,但水分持续向下运移使1~4 m土壤水分得到明显补充。在整个研究期间,不同土地利用类型样地在不同时期土壤含水量剖面均保持一致的增长或减少趋势,浅层土壤水分随降水事件增加或减少的变化率显著大于深层土壤水分,且随土层深度的增加呈下降趋势。

表2 不同土地利用类型土壤水分体积分数平均变化率
Table 2 Mean rate of change in soil water content across land use types and temporal scales

测定时期	土层深度/m	土壤水分体积分数平均变化率/%				
		BT	BW	YA	YI	CD
干早期-	0~1	+8.31	+8.74	+4.05	+4.70	+4.66
湿润前期	1~4	+0.29	-0.53	-0.53	-0.79	-0.62
湿润前期-	0~1	-1.11	-1.53	-0.56	-1.42	-4.63
湿润后期	1~4	+0.39	+0.38	+0.45	+1.07	+0.82

3 讨论

土壤电阻率-土壤水分体积分数定量关系,即土壤水分反演模型的构建是将黄土区地电场转换为水分场的关键^[20],基于此可以实现对黄土区二维平面上土壤水分体积分数的定量化分析。天然草地、坝地玉米地和山地苹果园等土壤电阻率和土壤水分体积分数均呈显著反比关系,基于此所建立的土壤电阻率-土壤水分体积分数定量关系模型中,以幂函数形式表现出良好的拟合关系,表明幂函数可以较好地描述土壤电阻率和土壤水分体积分数的关系^[21],与众多学者^[22-23]的研究结果类似,提升了复杂地貌下的反演精度。天然草地、坝地玉米地与山地苹果园3种典型的土地利用类型反演模型的模型决定系数和反演精度存在显著差异,具体来看,天然草地土壤电阻率-土壤水分体积分数反演模型呈现幂函数形式,其中 R^2 为0.735, RMSE为1.70%,其估算精度较高是由于地表覆盖少且受到的外界扰动较小,土壤电学特性变化较小,土壤电阻率的主要影响因素即为土壤含水量。段旭等^[24]在云雾山草坡的试验发现,固原云雾山土壤水分体积分数和土壤电阻率存在一定的反比关系,并建立二者的定量关系。淤地坝玉米地土壤电阻率-土壤水分体积分数反演模型呈现幂函数形式,其中, R^2 为0.590, RMSE为3.92%,其拟合决定系数(R^2)及均方根误差(RMSE)相较于天然草地有所下降,可能是剧烈的人为干扰包括翻地带来的土壤结构改变、作物耕种收获和有机、无机肥的施加等因素的综合作用在一定程度上影响土壤电阻率-土壤含水量的单因素变量关系所致。本研究中淤地坝玉米地建立的土壤电阻率-土壤含水量反演模型函数形式为幂函数,而岳宁等^[25]研究发现,陇中半干旱区玉米地土壤电阻率-土壤水分体积分数存在反比关系,并基于此建立陇中半干旱区土壤电阻率和水体积分数的线性相关关系。同时大量研究^[14,23]针对林地也建立了土壤电阻率-土壤水分体积分数定量关系。虽然大多试验中土壤电阻率和土壤水分体积分数呈显著的反比关系,但不同研究往往选择不同的函数关系表达式,其中最常用的包括幂函数^[26]、

线性函数^[27]和指数函数^[14],当变量的范围有限时,3种定量关系模型在统计上的差异并不显著。因此,对于影响因子众多的土壤电阻率来说,建立小流域乃至更大尺度的普适性的土壤电阻率-土壤水分体积分数关系模型是ERT广泛应用的难点之一^[28]。

土壤水分受降雨^[29]、植被类型^[30]、土壤性质^[31]、地形^[32]和人类活动^[33]等多种因素共同影响。黄土高原地区降水集中、地形破碎、土地利用类型复杂及人类活动干扰剧烈导致该区土壤水分体积分数、分布和动态变化表现出高度的空间异质性和时序变异性^[34]。土地利用通过调节植被覆盖度、根系分布及土壤结构,长期影响水分的入渗与保持能力。本研究结果表明,从干早期到湿润前期,浅层土壤水分在不同土地利用类型下均得到显著补给,而1~4 m土层则出现一定程度的消耗。从湿润前期到湿润后期,随着降水事件减少,浅层土壤水分受蒸发与植被耗水影响显著下降,而1~4 m土层则因土壤水分下渗得到补充,但可以明显发现,不同土地利用类型土壤水分补给程度存在较大差异,坝尾玉米地土壤水分补充程度远高于阳坡梯田果园,表明土壤水分的时间变异主要受降水过程控制,而空间差异则更多由土地利用类型决定^[35],与袁鸿猷等^[36]在陕北六道沟小流域淤地坝上得到的研究结果相似。不同的土地利用类型会导致水文过程的显著差异^[37],ERT技术精准反映不同土地利用类型下土壤水分的空间分布与动态变化特征,对理解地表水文响应与农业水资源配置具有重要意义。ERT技术可清晰呈现降雨对土壤水分的补给效应并捕捉深层土壤水分动态,加快对黄土区降水-土壤水-植被耗水耦合关系的进一步研究,为流域水资源管理和干旱管理提供科学支撑。

准确、快速获取区域内土壤水分信息对于土壤水分管理、水文过程模拟和经济、生态效益协同发展具有重要意义^[38]。传统的点位观测方法难以捕捉到微尺度到中尺度的连续变化,无法全面反映土壤水分的真实分布格局,ERT技术获得的二维剖面土壤水分空间分布及变化图相较于点尺度土壤水分捕捉到更多的地下土壤水文过程信息,综合反映土壤水分浅层的快速响应与深层的缓释特性,整体上较能代表研究区土壤水分的综合状态。尽管本研究建立不同土地利用类型土壤电阻率-土壤水分体积分数关系模型,但未充分覆盖不同土壤类型和地形条件,且土壤水分变化时间跨度较小,模型的区域适用性仍需要进一步验证。未来的研究应考虑年尺度上土壤电阻率-土壤含水量关系模型的建立及不同土壤类型对模型精度的影响,以提升模型在更大空间尺度及长期监测中的应用价值。

4 结论

1)不同土地利用类型土壤电阻率具有显著差异($p < 0.05$)。不同土地利用类型浅层(0~1 m)土壤电阻率与深层(1~4 m)土壤电阻率在垂直方向上存在明显分层。不同土地利用类型土壤电阻率-土壤水分体积分数反演模型均表现出良好的预测精度及稳定性,决定系数(R^2)均在0.59以上,均方根误差(RMSE)整体 $< 5\%$,土壤水分体积分数的估计精度较高。

2)研究期间先后经历干旱期和集中降雨引起的湿润前期和湿润后期,不同土地利用类型浅层土壤水分呈现先增加后减少的趋势,该时期浅层土壤水分变化主要受降雨因素驱动。1~4 m为土壤水分稳定层,该层土壤水分短期内波动较小,降雨对其影响具有滞后性。

参考文献:

- [1] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J].*Nature Climate Change*, 2016, 6(11):1019-1022.
- [2] 韩晓阳,刘文兆,程立平.黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J].*应用生态学报*, 2017, 28(2):430-438.
- HAN X Y, LIU W Z, CHENG L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, northwest China [J].*Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2):430-438.
- [3] LI X Z, SHAO M G, JIA X X, et al. Landscape-scale temporal stability of soil water storage within profiles on the semiarid Loess Plateau of China [J].*Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4):949-961.
- [4] 冯博,贾小旭,于冬雪,等.黄土高原北部草地土壤水分空间变异研究[J].2019(5):1123-1130.
- FENG B, JIA X X, YU D X, et al. Spatial variability of soil moisture in grasslands of the northern Loess Plateau [J].*Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(5):1123-1130.
- [5] BINLEY A, HUBBARD S S, HUISMAN J A, et al. The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales [J].*Water Resources Research*, 2015, 51(6):3837-3866.
- [6] CARRIÈRE S D, RUFFAULT J, PIMONT F, et al. Impact of local soil and subsoil conditions on inter-individual variations in tree responses to drought: Insights from electrical resistivity tomography [J].*Science of the Total Environment*, 2020, 698:e134247.
- [7] DE JONG S M, HEIJENK R A, NIJLAND W, et al. Monitoring soil moisture dynamics using electrical resistivity tomography under homogeneous field conditions [J].*Sensors*, 2020, 20:e5313.
- [8] JAYAWICKREME D H, VAN DAM R L, HYNDMAN D W. Hydrological consequences of land-cover change: Quantifying the influence of plants on soil moisture with time-lapse electrical resistivity [J].*Geophysics*, 2010, 75(4):43-50.
- [9] URSINO N, CASSIANI G, DEIANA R, et al. Measuring and modeling water-related soil-vegetation feedbacks in a fallow plot [J].*Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(3):1105-1118.
- [10] MULYONO A, ARISBAYA I, SUDRAJAT Y, et al. Determining of soil resistivity by electrical resistivity tomography in agroforestry land system [J].*IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 393(1):e012063.
- [11] ATTIA AL HAGREY S. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity Purchased [J].*Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(4):839-854.
- [12] SUN H, WANG Y Q, ZHAO Y L, et al. Assessing the value of electrical resistivity derived soil water content: Insights from a case study in the critical zone of the Chinese Loess Plateau [J].*Journal of Hydrology*, 2020, 589:e125132.
- [13] 段国秀,贾小旭,白晓,等.基于ERT的黄土高原小流域典型坡地和坝地土壤储水量反演[J].*灌溉排水学报*, 2023, 42(3):104-111.
- DUAN G X, JIA X X, BAI X, et al. Soil water storage inversion of typical slope land and dam land in small watershed of Loess Plateau based on ERT [J].*Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2023, 42(3):104-111.
- [14] ALAMRY A S, VAN DER MEIJDE M, NOOMEN M, et al. Spatial and temporal monitoring of soil moisture using surface electrical resistivity tomography in Mediterranean soils [J].*Catena*, 2017, 157:388-396.
- [15] 马婧怡,贾宁凤,程曼.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J].*生态学报*, 2018, 38(10):3471-3481.
- MA J Y, JIA N F, CHENG M. Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region [J].*Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10):3471-3481.
- [16] 王锐,刘文兆,李丽霞.土地利用类型对黄土塬区深层土壤含水量的影响:以长武塬区为例[J].2014(11):127-132.
- WANG R, LIU W Z, LI L X. Effects of land use types on deep soil water content in the loess tableland region: A case study of the Changwu tableland [J].*Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(11):127-132.
- [17] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau [J].*Geoderma*, 2013, 193:300-310.
- [18] BRUNET P, CLÉMENT R, BOUVIER C. Monitoring soil water content and deficit using electrical resistivity tomography (ERT): A case study in the Cevennes area, France [J].*Journal of Hydrology*, 2010, 380(1/2):146-153.
- [19] FAN J L, SCHEUERMANN A, GUYOT A, et al. Quantifying spatiotemporal dynamics of root-zone soil water in a mixed forest on subtropical coastal sand dune using surface ERT and spatial TDR [J].*Journal of Hydrology*, 2015, 523:475-488.

- [20] 商佳涛. 基于高密度电阻率成像法的黄土台塬区降雨入渗规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
SHANG J T. Study on rainfall infiltration laws in loess tableland area based on high-density electrical resistivity tomography[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [21] 崔新盛, 金钊, 彭建兵, 等. 电阻率成像法在董志塬固沟保源水分场监测中的应用[J]. 2019(6): 610-621.
CUI X S, JIN Z, PENG J B, et al. Application of electrical resistivity tomography (ERT) in water field monitoring of gully consolidation and highland protection in the Dongzhi tableland[J]. Journal of Earth Environment, 2019, 10(6): 610-621.
- [22] CELANO G, PALESE A M, CIUCCI A, et al. Evaluation of soil water content in tilled and cover-cropped olive orchards by the geoelectrical technique [J]. Geoderma, 2011, 163(3/4): 163-170.
- [23] 高君亮, 罗凤敏, 马迎宾, 等. 电阻率成像法监测人工梭梭林土壤水分[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 92-101.
GAO J L, LUO F M, MA Y B, et al. Monitoring soil moisture of artificial *Haloxylon ammodendron* forest using electrical resistivity tomography [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 92-101.
- [24] 段旭, 李根前, 李莲芳, 等. 云雾山和叠叠沟草坡土壤电阻率和含水率空间差异[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 97-103.
DUAN X, LI G Q, LI L F, et al. Spatial differences of soil electrical resistivity and water content in grass slopes of Yunwu Mountain and Diediegou[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 97-103.
- [25] 岳宁, 董军, 李玲, 等. 基于高密度电阻率成像法的陇中半干旱区土壤含水量监测研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1417-1427.
YUE N, DONG J, LI L, et al. A soil water content monitoring in Longzhong semi-arid region by high-density electrical resistivity tomography [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(10): 1417-1427.
- [26] 蔺铭益. 顾屯治沟造地流域水文连通机理及氮素污染物迁移机制[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院地球环境研究所), 2023.
Lin M Y. Hydrological connectivity mechanism and migration mechanism of nitrogen pollutants in the Gutun gully reclamation watershed [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Earth Environment, CAS), 2023.
- [27] 翟星, 宋琨. 基于实时监测的滑坡土体电导率与体积含水率关系研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 116-120.
ZHAI X, SONG K. Study on the relationship between electrical conductivity and volumetric water content of landslide soil based on real-time monitoring[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2023, 45(5): 116-120.
- [28] 刘成功, 贾小旭, 赵春雷, 等. 黄土区坡地和坝地土壤电阻率分布特征及应用[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 139-147.
LIU C G, JIA X X, ZHAO C L, et al. Distribution and application of soil electrical resistivity in slope land and dam land in the loess region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 139-147.
- [29] YANG L, ZHANG H D, CHEN L D. 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.
- [30] JIA X X, SHAO M G, YU D X, et al. Spatial variations in soil-water carrying capacity of three typical revegetation species on the Loess Plateau, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 273: 25-35.
- [31] WANG Y Q, SHAO M A, ZHU Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.
- [32] GAN M, JIA Y H, SHAO M A, et al. Permanent gully increases the heterogeneity of soil water retention capacity across a slope-gully system [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 272: 206-217.
- [33] ZHAO Y L, WANG Y Q, SUN H, et al. Intensive land restoration profoundly alters the spatial and seasonal patterns of deep soil water storage at watershed scales [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 280: 129-141.
- [34] 王云强, 邵明安, 胡伟, 等. 黄土高原关键带土壤水分空间分异特征[J]. 地球与环境, 2016, 44(4): 391-397.
WANG Y Q, SHAO M A, HU W, et al. Spatial variation characteristics of soil moisture in the critical zone of the Loess Plateau [J]. Earth and Environment, 2016, 44(4): 391-397.
- [35] GAO X, WU P, ZHAO X, et al. Effects of land use on soil moisture variations in a semi-arid catchment: Implications for land and agricultural water management [J]. Land Degradation and Development, 2014, 25(2): 163-172.
- [36] 袁鸿猷, 樊军, 金沐, 等. 黄土高原淤地坝土壤水分和浅层地下水时空分布特征解析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 50-56.
YUAN H Y, FAN J, JIN M, et al. Spatiotemporal distribution of soil water and shallow ground water in check dams in the Loess Plateau of China [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 50-56.
- [37] WANG Y Q, SHAO M A, SUN H, et al. Response of deep soil drought to precipitation, land use and topography across a semiarid watershed [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 282: e107866.
- [38] 刘成功, 贾小旭, 邵明安. 地球物理方法在土壤水文过程研究中的应用与展望[J]. 土壤, 2022, 54(1): 24-31.
LIU C G, JIA X X, SHAO M A. Application and prospect of geophysical methods in study of soil hydrological processes [J]. Soils, 2022, 54(1): 24-31.