

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

段国秀¹, 贾小旭^{1,3*}, 白晓², 刘成功^{1,3}, 魏孝荣^{2,3}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所/生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2.西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100190)

摘要: 【目的】反演黄土高原小流域典型坡地和坝地的土壤储水量(SWS), 为小流域水资源管理与生态建设提供科学依据。【方法】在陕北六道沟小流域选择典型坡地和坝地, 利用电阻率层析成像法(ERT)测定其土壤电阻率(ρ), 结合实测土壤体积含水率(θ_v), 构建 ρ 与 θ_v 的幂函数模型, 量化0~12.5 m土层剖面的SWS, 并对比分析坡地与坝地的SWS空间分布差异。【结果】对于黄土高原坡地和坝地2种典型地貌类型, ρ 与 θ_v 之间均具有显著的幂函数关系(坡地: $R^2=0.66$, $p<0.01$; 坝地: $R^2=0.64$, $p<0.01$); 坡地 ρ 分布受坡位影响显著, 沿坡顶至坡底逐渐降低, 坝地 ρ 在垂直方向上呈“高-低-高”的分布格局, 具有明显的饱和层和非饱和层, 而坡地剖面均为非饱和状态; 面积为 $1.8\times 10^4\text{ m}^2$ 的坝地0~6.5 m非饱和层的可储水量为 $1.49\times 10^4\text{ m}^3$, 6.5~12.5 m饱和层可储水量为 $5.10\times 10^4\text{ m}^3$; 而相近面积的坡地0~12.5 m非饱和层可储水量为 $2.59\times 10^4\text{ m}^3$ 。【结论】ERT可用于黄土区深层土壤水资源时空分布研究, 六道沟小流域坝地土壤储水量丰富, 是坡地土壤储水量的2.5倍, 对小流域的水循环和生态系统服务具有重要作用。

关键词: 黄土高原; 电阻率层析成像法; 土壤电阻率; 坡地; 坝地; 土壤含水率

中图分类号: P343.9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022274

OSID:



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 Guoxiu, JIA Xiaoxu, BAI Xiao, et al. Variation of Soil Water over Slopes and Retained Lands in Loess Region: Investigated Using Electrical Resistivity Tomography[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 104-111.

0 引言

【研究意义】黄土高原气候干旱, 降水分布不均, 水土流失严重, 是我国典型的生态脆弱区和气候敏感区^[1], 其生态建设是巩固北方生态屏障、促进西部经济社会可持续发展的重要保障。植被恢复和淤地坝建设分别是该地区水土流失治理的重要生物措施和工程措施^[2]。随着退耕还林(草)工程的大规模实施, 小流域坡地土地利用发生了显著改变, 植被覆盖度显著增加, 加剧了深层土壤水分的消耗^[3]。目前, 土壤水分供给不足已成为制约该区生态建设和植被恢复的主要因素^[4]。与坡地不同, 淤地坝内淤积而成的坝地水肥条件优越, 是该区建设基本农田的重要地理单元。当前, 黄土高原地区共有淤地坝约12万座, 淤成坝地约31万 hm^2 ^[5-6], 在提高农业生产力、防治水土流失和改善生态环境等方面发挥着

重要作用。量化小流域典型坡地和坝地的土壤储水量(SWS)及其空间分布格局, 对小流域水资源优化管理、生态恢复和可持续的农业生产具有重要科学意义^[1,7]。

【研究进展】当前, 关于土壤水分时空分布的研究大多采用烘干法、中子仪法、原位传感器等方法测定土壤含水率(θ)^[8-9], 但这些方法监测范围较小, 存在空间上的不连续性且费时、耗力等缺点, 限制了对深层土壤水分时空特征的探索。宇宙射线快中子法和遥感反演方法虽然能获取更大尺度的 θ 时空分布, 但获取深度和空间分辨率有限^[10]。发展大尺度和高空间分辨率的监测技术是解决这一问题的关键。探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)、核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance Imaging, NMR)、电阻率层析成像(Electrical Resistivity Tomography, ERT)等地球物理技术是将土壤剖面特征(如土壤结构、土壤水分)与地球物理信号相关联, 能实现多尺度高分辨率的土壤特征监测, 极大地促进了水文地理的发展^[7,11]。研究表明, ERT可实现多尺度土壤水文状况的原位连续监测,

收稿日期: 2022-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42022048)

作者简介: 段国秀(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤物理与水文生态研究。E-mail: duangx@nwfau.edu.cn

通信作者: 贾小旭(1985-), 男, 研究员, 主要从事土壤物理与农业生态研究。E-mail: jiaxx@igsnrr.ac.cn

在土壤水和地下水的空间格局研究中具有较高的应用潜力和价值^[12-14]。然而，在黄土高原地区利用 ERT 测量土壤剖面电阻率(ρ)，进而反演 SWS 的研究较少^[15-16]，缺乏小流域坡地和淤地坝不同水分条件的对比研究。岳宁等^[15]利用 ERT 和水分传感器测定 2 m 深度土壤剖面的 ρ 和 θ ，建立了陇中半干旱区农田 ρ 与 θ 之间的定量关系。Sun 等^[17]在黄土高原地区分别建立了多因素影响下的 ρ 和 θ 的关系模型，但模型受众多因素限制，无法大范围推广应用。Celano 等^[18]利用实测数据建立了 ρ 与 θ 的指数模型，较好地评估了果园土壤水分的季节变化。张世斌等^[19]利用室内模拟试验建立了黄土 ρ 与饱和度之间的关系式，重塑了黄土水分迁移特性。袁鸿猷等^[16]利用 ERT 测定了黄土高原坝地 ρ ，基于 ρ 和 θ 的关系模型估算了坝地浅层地下水储量。以往研究对利用 ERT 技术反演土壤水分或地下水储量进行了探索，但对于小流域坡地和坝地的对比研究尚属缺乏，对不同地类下的土壤储水特征认识不足，且 ρ 和 θ 的反演模型也存在较大差异，已有研究结果难以被广泛应用。因此，本研究利用 ERT 开展黄土区小流域典型坡地和淤地坝的 SWS 及时空分布的反演研究，对于小流域坡地植被建设和坝地农业生产管理具有重要的科学意义。

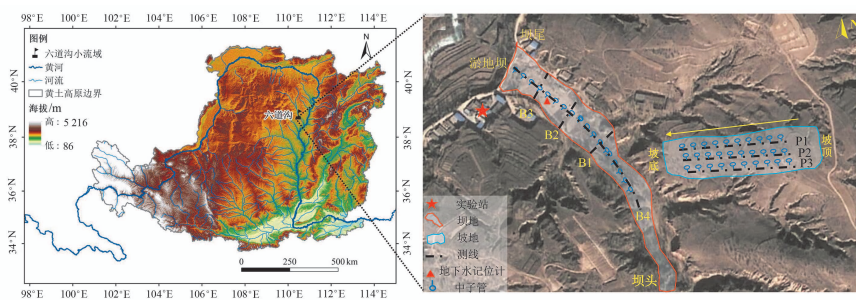
【切入点】以往研究大多关注黄土高原坡面土壤水分及区域尺度土壤水分的时空变异性，由于监测技术的限制，相关土壤水分时空分布及储水量估算的研究大多集中在 5 m 土层内^[8-9, 20-24]，仅有少数

研究关注深层 SWS^[24-27]。深层土壤水分是黄土区人工植被生长和应对极端干旱的重要水源，一旦耗尽将难以恢复^[1,3]，其信息的缺失限制了黄土高原深层土壤水的可持续管理。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究以陕北神木六道沟小流域土壤质地较为均匀的典型坡地和坝地为研究对象，利用 ERT 测定 ρ 的二维空间分布，基于实测剖面土壤体积含水量(θ_v)，建立 ρ 和 θ_v 的定量关系模型，探究 ERT 在反演坡地和坝地 SWS 方面的适用性，并估算深层 SWS，分析坡地和坝地深层土壤储水特征及空间分布格局，以期为黄土高原小流域不同地貌单元土壤水定量评估与管理提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木市以西 14 km 处的六道沟小流域(图 1(a))，海拔 1 080~1 275 m。该流域地处黄土高原与毛乌素沙地的过渡地带，是黄土高原水蚀、风蚀交错带强烈的侵蚀区。年平均气温为 8.4 °C，年平均降水量为 427 mm，属于典型的半干旱大陆性季风气候区。由于水蚀和风蚀的交替危害及人为滥砍滥伐和过度放牧，天然乔、灌丛植被几乎破坏殆尽。经人工植被恢复后，目前小流域主要有草地(44%)、灌木林地(26%)和农田(16%)3 种土地利用类型^[27]。草地包括以长芒草为主的天然草地和以苜蓿为主的人工草地，灌木地以柠条为主，农用地以 1 a 生农作物为主^[28]。



注 B 为坝地，P 为坡地；数字代表每个样地中监测电阻率时布置的测线编号。

图 1 六道沟小流域及试验样地的空间位置

Fig.1 Spatial position of the Liudaogou watershed and the selected experimental sites

本研究所选坡地为小流域内远离侵蚀沟的一个典型坡面(图 1(b))，坡长 350 m，海拔落差 42 m。坡上植被以人工植被为主，其中坡地上部 110 m 内是种植 32 a 的苜蓿地，坡中部是种植 16 a 的杏树林，坡底部为种植 16 a 的杏树林和零星分布的刺槐和铁杆蒿^[29]。坝地位于所选坡地底部的西北面，总长度为 550 m^[10]，面积约为 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。自坝头至坝尾分布有柠条灌木地、撂荒灌草地、苜蓿草地和玉米为主的农耕地，两侧零星分布有少许榆树和旱柳。沉

积泥沙主要为粉粒泥沙，质地较为均一^[30]。

1.2 数据获取

于 2019 年 7 月 7 日，利用美国 AGI (Advanced Geosciences, Inc.) 公司研制的 SuperSting-R8/IP 高密度电导仪，采用对电阻率垂向变异较为敏感的 Wenner 电极阵列，对坡地和坝地剖面土壤电阻率(ρ_m)进行了测定^[31-32]。对于坡地，沿坡面布设 3 条间隔 16.5 m 的平行测线(P1—P3)。对于坝地，从坝头至坝尾布设 1 条测线 B4，同时在垂直于 B4 测

线方向另外布设 3 条测线 (B1—B3)，测线具体信息和位置分别见表 1 和图 1。

表 1 坡地和坝地各样线基本情况

Table 1 Basic information of each survey line on

slope land and dam land				
测线名称	电极间距/m	电极总数/个	样线总长/m	最大测深/m
坡地 (P1—P3)	6.0	56	330.0	72.0
坝地 (B1—B3)	2.0	28	54.0	9.7
坝地 (B4)	6.0	56	330.0	62.0

测线 P1—P3 布设在距坡面原有的 3 列中子管 0.5 m 距离处，每列共有 28 根。测线 B4 沿原有的 22 根中子管布设，所有中子管测深均为 5.2 m。在测定土壤剖面 ρ_m 的同时，利用中子仪 (型号 CNC503DR) 测定相应位置 0~5 m 不同土层深度的 θ_v ，其中 0~1 m 土层间隔 10 cm，1~5 m 土层间隔 20 cm。此外，在坝地中部安装自记式水位计 (型号 ZYHC-300B) 以监测地下水位状况。利用环刀采集坡地和坝地剖面原状土壤样品，在室内测定饱和土壤含水率 (θ_s)。

1.3 数据处理与分析

土壤真实 ρ 由田间测定的 ρ_m 反演得到。数据反演前，需对 ρ_m 进行质量控制，即删除满足下列条件的 ρ_m 值：① ρ_m 高于 5 000 $\Omega \cdot m$ 的数值；② 重复测量误差大于 3% 的数值 [17,33-34]；③ 负值。使用 EarthImager 2D 软件，采用平滑模型对 ρ_m 进行反演，利用 ρ_m 值和模型反演的 ρ 值计算得到均方根误差 (RMSE)，对数据拟合程度进行评价，并通过 EarthImager 2D 软件中的拟合误差直方图，在考虑误差分布的基础上适当调整拟合阈值，去除误差高于 100% 的数据点再次反演 [17]。

一般来说，ERT 样线两端 ρ 的灵敏度和分辨率较低 [17]。因此，选择位于样线中部的中子管实测 θ_v 及其对应位置的 ρ 建立数据集，随机选取其中 80% 的数据进行建模，其余 20% 用于模型验证。利用决定系数 (R^2) 和 RMSE 对模型精度进行评价。

坝地土壤剖面包含非饱和层和饱和层。通过 ρ 和 θ_v 之间的关系模型计算各测点 i 的土壤含水率 θ_{vi} ，然后获得非饱和层的平均土壤含水率 $\bar{\theta}_{vi}$ ，利用式 (1) 计算非饱和层的 SWS。饱和层的 SWS 通过 θ_s 计算获得，计算方法见式 (2) [20]。饱和层的上下边界利用 ρ 的空间分布并结合地下水位观测数据进行判断。

$$SWS_1 = \bar{\theta}_{vi} \times V_s, \quad (1)$$

$$SWS_2 = \theta_s \times V_s, \quad (2)$$

式中： SWS_1 和 SWS_2 分别为非饱和层和饱和层的 SWS (m^3)； V_s 为土体积 (m^3)； $\bar{\theta}_{vi}$ 和 θ_s 分别为非饱和层土壤含水率 (%) 和饱和层土壤含水率 (%)。

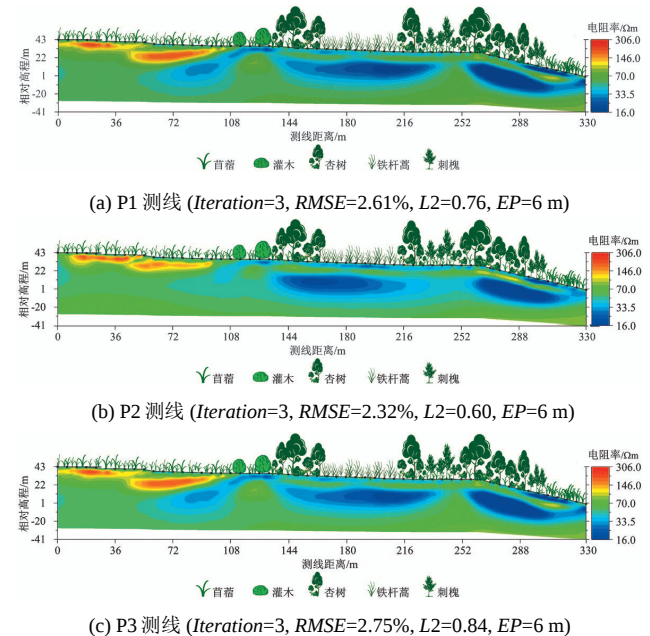
为了与坝地 SWS 进行对比分析，坡地 SWS 则是

在整个坡面选择与坝地面积相近、深度一致的土体进行反演和计算。根据 ρ 数据点相对位置在坡面建立矩形网格，计算每个矩形网格的 θ_v ，共有 1 710 个矩形单元网格。中心点坐标定义为 (X, Y, Z)， X 为 3 m，代表相邻两电极间距的 50% (电极间距 6 m)， Y 代表与当前电极所在样线相邻平行样线之间水平距离的 50%， Z 代表矩形网格中心点垂向深度 [15]。现场作业的命令文件在编写时根据测距、电极间距和最大测深将土壤剖面自动划分为 5 层，各层深度分别为 0.38、3.10、6.01、9.11 m 和 12.43 m。

2 结果与分析

2.1 坡地和坝地土壤电阻率空间分布特征

坡地剖面 ρ 的空间分布如图 2 所示。在沿坡面方向上， ρ 沿坡面由坡顶至坡底呈逐渐下降趋势，具体为坡顶 (0~100 m) > 坡中 (100~250 m) > 坡底 (250~330 m)。这种分布特征与坡面降水再分配有关，部分降水以径流的形式沿坡面向坡底汇聚，导致坡底剖面 θ_v 较高， ρ 较低。在垂直方向，地表至 20 m 深度内的土层相比更深土层的 ρ 值高，特别是在坡顶位置，这可能是由于坡顶降水补给量较小且深根系人工植被过度消耗土壤水分，导致土壤干燥化 [3,20]。



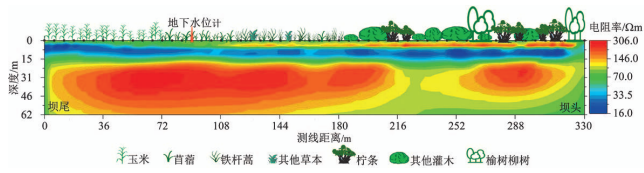
注 Iteration 表示迭代次数，RMSE 表示 ERT 实测视电阻率数据与软件反演时重建模型计算数据之间的均方根误差；L2 为视电阻率值加权误差的平方和；EP (Electrode Spacing) 为电极间距。

图 2 典型坡地土壤电阻率空间分布

Fig.2 Spatial distribution of electrical resistivity of the soil profiles along a typical slope

坝地剖面 ρ 在垂直方向上呈“高-低-高”的层状分布格局 (图 3)。浅层高阻区厚度自坝尾向坝头

方向逐渐增加,这主要是由于植被类型的不同。浅层高阻区以下至 15 m 深度范围为连续带状低阻区, ρ 值在 16~50 Ω m 范围内分布,这与地下水的观测结果基本一致,是坝地饱和含水层的分布区域,与袁鸿猷等^[16]研究结果相近。根据坝地剖面 ρ 分布规律和 ρ 值大小,选取该低阻区同一测点下 ρ 值变化差异最大的 2 个点,分别提取这 2 个点各自对应的深度,即为该测点处饱和含水层上、下边界的深度,取各测点的平均值作为坝地饱和含水层的上、下边界深度,分别为 6.5、12.5 m。饱和含水层上边界深度与坝地地下水观测的水位结果基本一致,观测当月地下水平均水位深度也为 6.5 m。另外,饱和含水层以下的高阻区可能是由基岩所致^[10]。



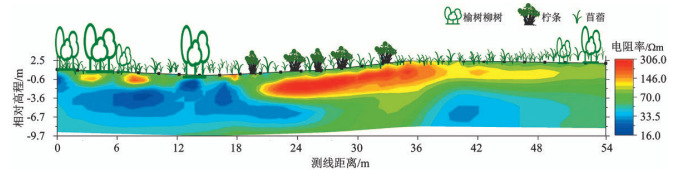
注 Iteration=4, RMSE=2.83%, L2=0.89, EP=6 m。

图 3 坝地纵向(坝尾-坝头)剖面土壤电阻率空间分布

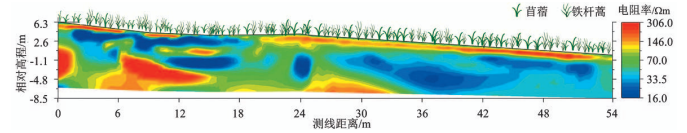
Fig.3 Spatial distribution of soil resistivity in the profile of the dam land

与坝地纵向(即坝尾—坝头方向)不同,坝地横向(即与坝尾—坝头的垂直方向)剖面 ρ 空间分布较为复杂,横向剖面 B1、B2 和 B3 分别位于坝头、坝中和坝尾,各测线 ρ 空间变异较大,特别是 B1 和 B2 这 2 条测线(图 4)。土壤浅层高电阻区由坝尾至坝头由 1 m (B3) 增至 7 m (B1),这可能是由于水流挟沙能力和重力等多因素影响,使粗颗粒在坝头先沉积,坝头土壤砂粒量较高,使得剖面 ρ 较高^[16,30]。同时,坝头至坝尾地势逐渐降低,部分降水在坝尾汇集,浅层地下水埋深逐渐变浅,高阻区厚度随之减小,如图 4 (c) 中位于坝尾的 B3 剖面地势最低,具有较为连续的饱和带分布特征。此外,3 条样线地表植被类型有显著差异,根系耗水量不同也会导致剖面 ρ 的差异。如图 4 (a) 位于坝头的 B1 中部是以高耗水柠条为主的灌木林地,而两侧零星分布有榆树、旱柳等乔木和少许撂荒草本。以柠条为主的人工灌木林地根系耗水深度可达 21 m^[27]。B2 测线为以苜蓿、铁杆蒿为主的撂荒草地,样线剖面分布的高阻区也是由于苜蓿根系过度耗水导致 θ_v 降低所致。此外, B2 测线四周分布有小的洼地,可能存在测量时相应的电极与地面接触不良,且为人工苜蓿地和撂荒草地复合区域,植被类型和微地形均较为复杂,其 RMSE 和迭代次数比其余剖面均较大^[17](图 4 (b))。而 B3 测线则是以玉米为主的农耕地,作物根系主要分布在 1 m 土层内,对深层

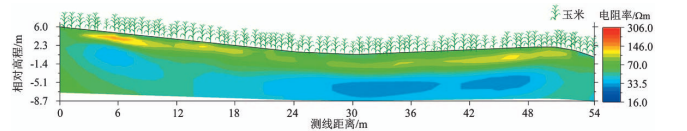
θ_v 影响很小,故 B3 测线剖面 ρ 分布较为均匀^[27]。



(a) B1 测线 (Iteration=3, RMSE=1.85%, L2=0.38, EP=2 m)



(b) B2 测线 (Iteration=8, RMSE=4.24%, L2=1.98, EP=2 m)



(c) B3 测线 (Iteration=2, RMSE=2.29%, L2=0.63, EP=2 m)

图 4 坝地横向(与坝尾-坝头垂直方向)

剖面土壤电阻率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil resistivity in the transverse section of the dam land

2.2 土壤含水率与电阻率的关系模型

坡地和坝地剖面 ρ 变异系数 (CV) 分别为 40% 和 26%, θ_v 的 CV 分别为 30% 和 56%, 均具有较高的变异性。坝地 ρ 的中值和平均值 (46.26、46.20 Ω m) 较坡地 (79.1、74.61 Ω m) 低,而 θ_v 的中值和平均值 (19.40%、18.53%) 比坡地 (14.45%、11.43%) 高。袁水龙等^[23]研究发现,坝地土壤水分呈层状分布特征,0~0.4 m 和 1.4 m 以下坝地的 θ_v 明显高于坡地,而 0.4~1.4 m 坡地 θ_v 高于坝地,这与坝地植被根系耗水有关。

利用在坝地和坡地获得的 ρ 与 θ_v 数据集,分别建立适于坡地和坝地的 ρ 与 θ_v 定量关系模型,并验证其准确性,结果如图 5 和图 6 所示。坡地和坝地 θ_v 实测值与模拟值之间均具有显著的相关关系 ($p<0.01$), R^2 分别为 0.61 和 0.75, RMSE 分别为 3.66 和 3.15,表明建立的 ρ - θ_v 关系模型可以较准确地反演坡地和坝地土壤水分状况。Celano 等^[18]在 2 种管理措施(耕作和覆盖)的橄榄园地也建立了 θ_v 与 ρ 显著相关的指数函数模型,用于评价 2 种果园秋春期 θ_v 的变化,通过高分辨率的土壤结构二维分布与水分运移过程的图像,研究剖面 θ_v 分布的动态差异,评估深层土壤 (>1.0 m) 的 θ_v ,发现覆盖具有显著的土壤储水性能。岳宁等^[15]在陇中半干旱区玉米田对降雨前后土壤二维剖面进行监测,建立了 θ_v 与 ρ 的线性关系 ($R^2=0.65$, $n=96$),探究了不同条件下土壤含水率变化的可能原因。

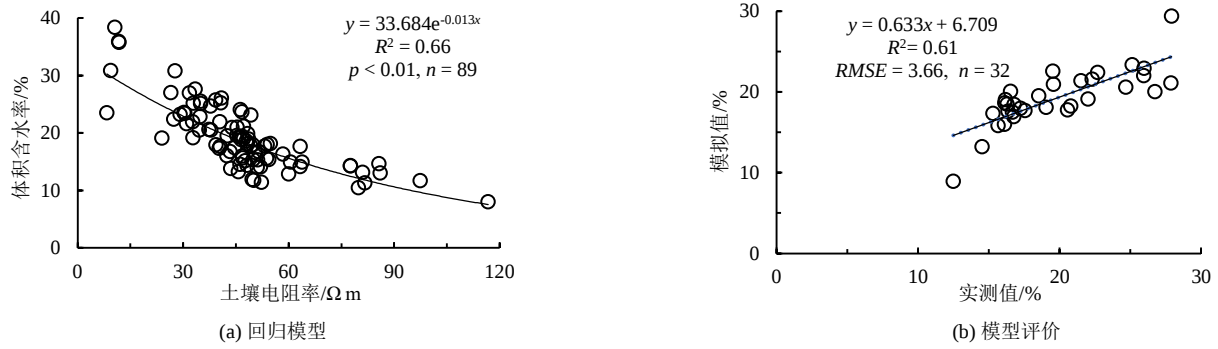


图5 坡地土壤电阻率与土壤含水率的回归模型与模型评价

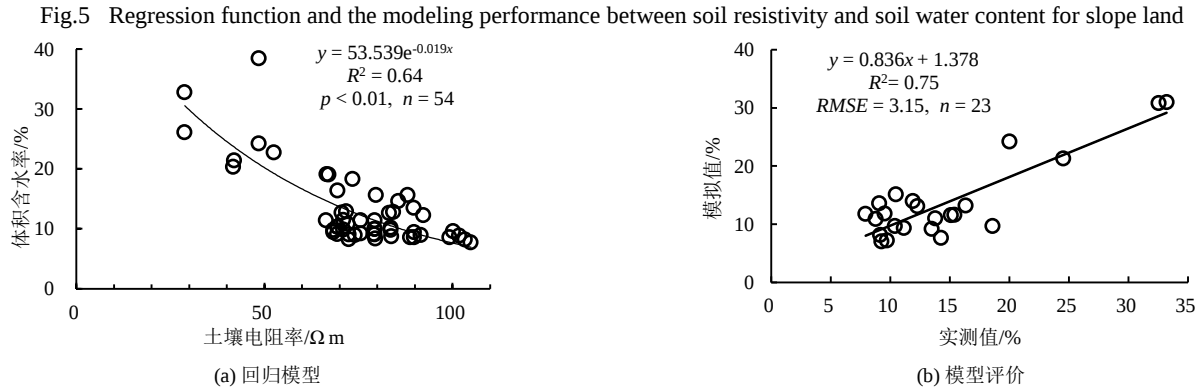


图6 坝地土壤电阻率与土壤含水率的回归模型与模型评价

Fig.6 Regression function and the modeling performance between soil resistivity and soil water content for dam land

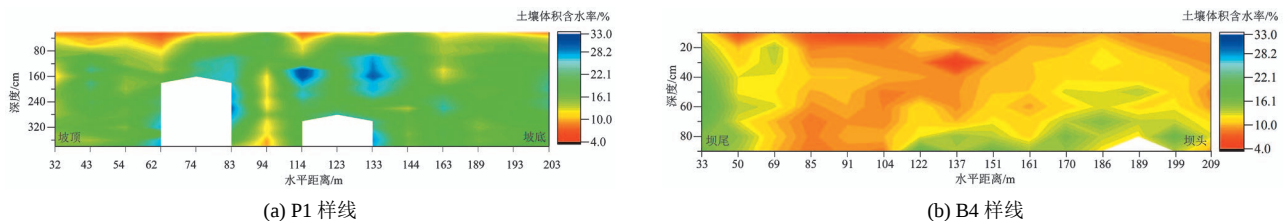
2.3 坡地和坝地土壤储水量估算

小流域坝地 SWS 的估算分为土壤水饱和带和非饱和带 2 部分。其中, 土壤水饱和带上、下边界深度平均值分别为 6.5、12.5 m。依据式 (2) 估算获得面积为 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、厚度为 6.0 m 的坝地土壤饱和含水层的 SWS 为 $5.10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。利用坝地 ρ - θ_v 定量关系模型获得非饱和层的 θ_v , 其中 0~1.44、1.44~3.03 m 和 3.03~6.50 m 土层的 θ_v 分别为 10.58%、13.76% 和 13.89%。在 0~6.5 m 非饱和层, 随土层深度的增加, 基于 ρ 反演获取的 θ_v 逐渐增加。依据式 (1) 估算获得面积为 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、厚度为 6.5 m 的坝地非饱和层 SWS 为 $1.49 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。与坝地不同, 所选坡地 0~12.5 m 均为非饱和状态。因此, 利用坡地 ρ - θ_v 定量关系模型计算获得坡地剖面 θ_v , 依据式 (1) 估算获得面积 $1.75 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、厚度为 12.5 m 的坡地剖面 SWS 为 $2.59 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。坝地单位面积 0~12.5 m 剖面的 SWS 达到 3.66 m^3 , 而相同深度的坡地单位面积剖面的 SWS 为 1.48 m^3 , 坝地 SWS 约为坡地的 2.5 倍,

表明陕北六道沟小流域坝地储水量丰富, 是小流域水资源重要的存储场所。

3 讨论

ρ 受土壤温度、质地、溶质浓度等多种因素影响, 而在特定环境中, 往往受个别因素主导^[35]。例如坡地 P1 测线因其 θ_v 受坡位和植被影响, 导致 P1 测线 ρ 受坡位和植被影响显著: 坡顶植被以人工苜蓿植被为主, 植被耗水量大, 加之受风速、太阳辐射等强烈影响, 蒸散量大, 降水补给到深层土壤中的水分更少, 导致剖面土壤 ρ 较高^[20]。与 P1 测线对应的 0~4 m 剖面 θ_v 也具有相似的空间分布特征, 即坡顶高阻区对应的 0~80 m 距离范围内低 θ_v 区域比坡中和坡底面积更大, 且深度更深 (图 7 (a))。可见, 虽然人工高耗水植被分布于整个坡面, 但高阻区主要集中在坡顶位置, 坡地 ρ 分布特征受植被和坡位的共同影响^[20]。



注 图中空白为数据缺失值; 样线 P1 和 B4 的横坐标分别与图 2 (a) P1 样线和图 4 B4 样线横坐标一致。

图7 基于中子仪实测的土壤体积含水率空间分布

Fig.7 Spatial distribution of volumetric soil water content measured by neutron probe

然而，由于坝地大部分中子管进水导致 θ_v 测定深度较浅，仅为 0~80 cm，图 3 坝地 B4 测线对应的剖面 θ_v 难以与剖面 ρ 进行对比分析（图 7（b））。但图 3 水平方向自坝尾至坝头，浅层 ρ 值逐渐增大，植被类型依次为农耕地、苜蓿草地、撂荒灌草地和柠条灌木地，表明其分布特征可能与植被耗水量增加有关，这与刘成功等^[10]的研究结果一致。垂直方向坝地 ρ 呈明显的“高-低-高”分层分布格局，袁水龙等^[23]长期监测、分析了黄土高原一坝地土壤水分时空分布特征，结果也表明，坝地土壤水分具有明显的分层现象，表层变化剧烈，随着深度的增加变化程度减弱，且坝尾各层（0.6~1.4 m） θ 均明显高于坝中和坝头。此外，坝地中层呈现连续带状低阻区，表明坝地中部存在土壤水饱和层。张翔等^[36]利用同位素示踪技术分析陕北绥德韭园沟流域一坝地土壤水的来源及分布，发现其土壤水垂直方向赋存规律从“较为平均分布的地表径流为主”逐渐向“地下水为主、地表径流为辅”转变，这也表明部分坝地中层存在土壤水饱和层。此外，邹俊亮等^[37]在本研究的坝地采集坝淤土时，在 5.3 m 深度已见水，可见多年来该坝地中部保持有较多的土壤水，这些研究结果也表明坝地 θ_v 存在分层分布规律，具有一定的蓄水潜能。目前现有观测方法难以监测确定坝地地下水位下边界^[38-40]，而 ERT 可用于估计土壤水饱和带上下边界深度进而估算地下水资源储量。

由于输入参数的数量和种类在理论和实践上都影响模型的精度，而输入参数 θ 具有高度的空间异质性和尺度依赖性^[10]，且 ρ 受多种因素的共同影响，很难建立高精度、多因子模型。考虑到特定环境中， ρ 往往受个别因素主导^[31]，以及本研究结果在田间尺度上的应用性，本文选取土壤质地较为均一的地区开展 ρ 监测^[10, 41]，降低了其余因素对 ρ 的影响，故认为 θ_v 是影响该区 ρ 的主要因子。本研究建立的特定环境下 ρ - θ_v 定量关系模型也具有较高的模拟精度，可用于黄土区坡地和坝地深层 SWS 的估算。然而，本研究尚未探讨 ρ 与土壤不同理化性质之间的作用机制，在未来研究中应考虑气象、地形、环境等因子对 ρ 的影响，室内外试验相结合，并加强土壤影响因子与 ρ 之间作用机理的研究，建立多因子、高精度、普适性的物理耦合模型。

坝地在防止水土流失、粮食增产、改善区域生态环境等方面发挥着显著的经济、社会和生态效益^[4]。研究表明，淤地坝建设在小流域系统中表现为土壤的碳和氮汇^[42]，也有研究发现坝地是增加小流域地下水资源量的重要来源^[38]，这部分水资源是黄土高原小流域不可忽视的宝贵水源，对生态系统功能的

持续发挥具有重要作用。然而，赋存于不同坝地的水资源形式和储量较为复杂，受诸如植被、气候、土壤、排水等多种因素的影响，对于坝地水资源赋存特征和具体数量的研究还处在探索阶段。未来应加强坝地水资源形成过程、赋存特征、转化机制、储量及经济、生态效益等方面的研究，更深入了解小流域坡地和坝地系统水循环过程，以评价小流域水量平衡。本研究基于 ρ - θ_v 定量关系模型估算的坝地 SWS 也存在着一定的不确定性。例如，由于水流挟沙能力和重力等多因素的影响，沉积颗粒的分选过程使坝地在淤积形成过程中粗颗粒在坝头先沉积，垂直方向其土壤质地也存在分层现象，而本研究并未考虑土壤质地存在分层现象，而本研究并未考虑土壤质地存在分层现象，而本研究并未考虑土壤质地存在分层现象。尽管如此，土壤电学特性较其他土壤性质更易测得，ERT 技术仍是高效获取深层 SWS 的有效方法，在多尺度土壤水文过程和土壤电学性质的无损监测中具有较好的潜力。

4 结论

1) 小流域典型坡地剖面土壤 ρ 沿坡顶至坡底逐渐降低，主要受坡位和植被的影响；而坝地土壤 ρ 空间分布较为复杂，具有明显的水平和垂直分异特征，垂直方向呈“高-低-高”的分布格局，水平方向浅层土壤 ρ 受植被类型影响显著。坝地具有明显的土壤水非饱和层和饱和层，而坡地剖面均为非饱和层。

2) 小流域典型坡地和坝地土壤 ρ 与 θ_v 之间均具有显著的幂函数关系，利用 ERT 可较为准确地反演深层 θ_v 并获得饱和和含水层厚度，可用于黄土区不同地貌单元土壤水非饱和层和饱和层储水量及空间分布研究。

3) 神木六道沟小流域面积 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的坝地和坡地 0~12.5 m 的 SWS 分别为 6.59×10^4 和 $2.59 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，表明坝地比坡地储存了更多的水资源，水储量是坡地的 2.5 倍，对小流域水循环与生态系统服务功能具有重要作用。

参考文献：

- [1] JIA Xiaoxu, SHAO Mingan, WEI Xiaorong, et al. Policy development for sustainable soil water use on China's Loess Plateau[J]. Science Bulletin (Beijing), 2020, 65(24): 2 053-2 056.
- [2] 刘晓燕, 高云飞, 马三保, 等. 黄土高原淤地坝的减沙作用及其时效性[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 145-155.
- [3] LIU Xiaoyan, GAO Yunfei, MA Sanbao, et al. Sediment reduction of warping dams and its timeliness in the Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 145-155.
- [4] SHAO Mingan, WANG Yunqiang, XIA Yongqiu, et al. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: A review[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-8.
- [5] 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 Mingan, 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.
- [5] 艾开开. 黄土高原淤地坝发展变迁研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- AI Kaikai, Study on development and change of warping dams on Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [6] 王云强, 张兴昌, 韩凤朋. 黄土高原淤地坝土壤性质剖面变化规律及其功能探讨[J]. *环境科学*, 2008, 29(4): 1 020-1 026.
- WANG Yunqiang, ZHANG Xingchang, HAN Fengpeng. Profile variability of soil properties in Check Dam on the Loess Plateau and Its Functions[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(4): 1 020-1 026.
- [7] LIU Wenzhao, ZHANG Xunchang, DANG Tinghui, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1 133-1 138.
- [8] 孟婷婷, 王欢元, 刘金宝, 等. 黄土丘陵区退耕还林草对深层土壤水分动态的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(12): 78-84.
- MENG Tingting, WANG Huanyuan, LIU Jinbao, et al. Changes in subsoil water content after withdrawing crop production in the hilly loess in Northwestern China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(12): 78-84.
- [9] 孟秦倩, 王健, 吴发启. 延安丘陵沟壑区坡面果园土壤水库特征[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(1): 93-95, 99.
- MENG Qinqian, WANG Jian, WU Faqi. Characteristics of slope-orchard soil reservoir in Yan'an loess hilly region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(1): 93-95, 99.
- [10] 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 Chenggong, JIA Xiaoxu, ZHAO Chunlei, 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.
- [11] 段国秀, 贾小旭, 白晓, 等. 电阻率层析成像法在土壤水文学中的应用: 基于 CiteSpace 的计量分析[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1 447-1 459.
- DUAN Guoxiu, JIA Xiaoxu, BAI Xiao, et al. Application and progress of electrical resistivity tomography in pedohydrology: Citespace-based quantitative analysis[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(6): 1 447-1 459.
- [12] BEFF Laure, GÜNTHER Thomas, VANDORNE Bertrand, et al. Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(7): 595-609.
- [13] BRUNET Pascal, CLÉMENT Rémi, BOUVIER Christophe. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT): A case study in the Cevennes area, France[J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2010, 380(1-2): 146-153.
- [14] MICHOT Didier, BENDERITTER Yves, DORIGNY Abel, et al. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(5): 1 138.
- [15] 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): 1 417-1 427.
- YUE Ning, DONG Jun, LI Ling, 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): 1 417-1 427.
- [16] 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 Hongyou, FAN Jun, JIN Mu, et al. Spatiotemporal distribution of soil water and shallow groundwater in check dams in the loess plateau of China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(10): 50-56.
- [17] SUN Hui, WANG Yunqiang, ZHAO Yali, 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: 125-132.
- [18] CELANO Giuseppe, PALESE Assunta Maria, 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.
- [19] 张世斌, 朱才辉, 袁继国. 降雨条件下重塑黄土中水分迁移模型试验研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(5): 621-630.
- ZHANG Shibin, ZHU Caihui, YUAN Jiguo. Laboratory model tests on moisture migration in remolded loess under rainfall conditions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(5): 621-630.
- [20] MEI Xuemei, MA Lan, ZHU Qingke, et al. The variability in soil water storage on the loess hillslopes in China and its estimation[J]. *Catena*, 2019, 172: 807-818.
- [21] 白晓, 贾小旭, 邵明安, 等. 黄土高原北部土地利用变化对长期土壤水分平衡影响模拟[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 109-119.
- BAI Xiao, JIA Xiaoxu, SHAO Mingan, et al. Simulating long-term soil water balance in response to land use change in the Northern China's Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 109-119.
- [22] LIU Yu, MIAO Haitao, HUANG Ze, et al. Soil water depletion patterns of artificial forest species and ages on the Loess Plateau (China)[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018(417): 137-143.
- [23] 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.
- [24] 刘中奇, 朱清科, 秦伟, 等. 半干旱黄土区典型林地土壤水分消耗与补给动态研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(3): 36-40.
- LIU Zhongqi, ZHU Qingke, QIN Wei, et al. Soil water consumption and supply of typical forest lands in the Semiarid Loess Region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(3): 36-40.
- [25] JIA Xiaoxu, SHAO Mingan, WEI Xiaorong, et al. Hillslope scale temporal stability of soil water storage in diverse soil layers[J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2013, 498: 254-264.
- [26] HU Wei, SHAO Mingan, REICHARDT Klaus. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 762-773.
- [27] WANG Yunqiang, HU Wei, ZHU Yuanjun, et al. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 543-554.
- [28] 刘丙霞. 黄土区典型灌草植被土壤水分时空分布及其植被承载力研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- LIU Bingxia. Experimental study of soil water spatial-temporal distribution and soil water carrying capacity for vegetation of typical shrub and grass on the Northern Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [29] 白一茹, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用方式坡面土壤水分特性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 122-129.
- BAI Yiru, SHAO Mingan. Soil water properties in a slope of different land use in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 122-129.
- [30] 张玮, 杨明义, 张凤宝, 等. 黄丘区小流域坝地沉积泥沙粒径剖面分布特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 17-21.
- ZHANG Wei, YANG Mingyi, ZHANG Fengbao, et al. Profile Distribution of Particle Size of Sediment at a Check Dam in a Small Watershed of the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(2): 17-21.
- [31] 马东豪, 张佳宝, 吴忠东, 等. 电阻率成像法在土壤水文学研究中的应用及进展[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 439-447.
- MA Donghao, ZHANG Jiabao, WU Zhongdong, et al. Application of electrical resistivity tomography to study on soil hydrology and its advance[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 439-447.
- [32] LOKE M H. Electrical Imaging Surveys for Environmental and

- Engineering Studies, a practical guide to 2-D and 3-D surveys[J/OL]. Heritage Geophysics, 2000. <http://www.terrajp.co.jp/lokenote.pdf>.
- [33] JOHONSON Timothy C, SLATER Lee, NTARLAGIANNIS Dimitrios, et al. Monitoring groundwater-surface water interaction using time-series and time-frequency analysis of transient three-dimensional electrical resistivity changes[J]. Water Resources Research, 2012, 48(7): 506.
- [34] BRILLANTE Luca, BOIS Benjamin, MATHIEU Olivier, et al. Monitoring soil volume wetness in heterogeneous soils by electrical resistivity. A field-based pedotransfer function[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2014, 516: 56-66.
- [35] WANG Yunqiang, SHAO Mingan, LIU Zhipeng, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors[J]. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(2): 265-281.
- [36] 张翔, 李占斌, 李鹏. 淤地坝土壤水来源与分布研究[J]. 西安理工大学学报, 2013(1): 1-7.
- ZHANG Xiang, LI Zhanbin, LI Peng. The study of soil water source and its distribution in soil-saving dam[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013(1): 1-7.
- [37] 邹俊亮, 邵明安, 龚时慧. 不同植被和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 12-17.
- ZOU Junliang, SHAO Mingan, GONG Shihui. Effects of different vegetation and soil types on profile variability of soil moisture[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 12-17.
- [38] LUO Zhanbin, YONG Chenxu, FAN Jun, et al. Precipitation recharges the shallow groundwater of check dams in the loessial hilly and gully region of China[J]. Science of The Total Environment, 2020, 742: 140 625.
- [39] 白乐, 殷会娟, 李昭悦, 等. 黄土丘陵区淤地坝作用下地下水水位动态演化特征[J]. 人民黄河, 2021, 43(3): 74-77.
- BAI Le, YIN Huijuan, LI Zhaoyue, et al. Dynamic evolution characteristics of groundwater level under the action of warping dam in loess hilly area[J]. Yellow River, 2021, 43(3): 74-77.
- [40] 周立花, 延军平, 徐小玲, 等. 黄土高原淤地坝对土壤水分及地表径流的影响: 以绥德县辛店沟为例[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 112-115.
- ZHOU Lihua, YAN Junping, XU Xiaoling, et al. Effect of soil saving dams on soil water content and runoff in loess plateau: Case study on Xindian watershed in Suide Country[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3): 112-115.
- [41] 赵培培. 黄土高原小流域典型坝地土壤水分和泥沙空间分布特征[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010.
- ZHAO Peipei. Spatial distribution of soil water content and sediment in the dam farmlands in a small catchment of the Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [42] LIU Chun, LI Zhongwu, DONG Yuting, et al. Do land use change and check-dam construction affect a real estimate of soil carbon and nitrogen stocks on the Loess Plateau of China[J]. Ecological Engineering, 2017, 101: 220-226.

Variation of Soil Water over Slopes and Retained Lands in Loess Region: Investigated Using Electrical Resistivity Tomography

DUAN Guoxiu¹, JIA Xiaoxu^{1,3*}, BAI Xiao², LIU Chenggong^{1,3}, WEI Xiaorong^{2,3}

(1. Key laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China; 2. Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: 【Objective】 Crop growth and ecological functions in arid and semi-arid loess regions in northwestern China are limited not only by topsoil water directly available to crop but by deep soil water which functions as a reservoir. Slopes and lands formed by artificial retaining are two typical geographical units in small watersheds in the loess plateau. This paper presents a method to estimate soil water distribution in them up to 12.5 m deep.

【Method】 The method was based on electrical resistivity tomography (ERT). We measured electrical resistivity of the soil in typical slope and retained land in the small Liudaogou watershed in northern Shaanxi province. Using the measured soil volumetric water content, a power function relating the resistivity to soil water content was established, from which we calculated water distribution and water storage in the 0~12.5 m profile in both the slope and the retained land. **【Result】** The distribution of electrical resistivity over the slope was significantly affected by slope position, with the resistivity decreasing gradually from the slope top to the slope toe. Such changes were associated with vegetation consumption of the topsoil water and redistribution of the infiltrated precipitation over the slope. The vertical distribution of the resistivity in the retained land showed a high-low-high variation; this was also related to root water uptake from the topsoil and precipitation recharge to the subsoil. ERT inversion showed co-existence of a saturated zone and an unsaturated zone in the retained land, while the slope was partly saturated. In a $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ of retained land, there was $1.49 \times 10^4 \text{ m}^3$ of water in the 0~6.5 m unsaturated layer, and $5.10 \times 10^4 \text{ m}^3$ of water in the saturated layer. In a same area but on the slope, there was only $2.59 \times 10^4 \text{ m}^3$ of water in the 0~12.5 m soil layer. **【Conclusion】** Retained land contains more water than slope, and the deep soil in it functions as a reservoir banking infiltration water in wet seasons. ERT is suitable for measuring spatiotemporal variation in soil moisture in both slopes and flatten plains in the loess plateau.

Key words: loess plateau; electrical resistivity tomography (ERT); soil resistivity; slope land; dam land; soil water content

责任编辑: 韩 洋