

DOI: 10.11766/trxb202004260196

刘成功, 贾小旭, 赵春雷, 邵明安. 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, SHAO Mingan. 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.

## 黄土区坡地和坝地土壤电阻率分布特征及应用\*

刘成功<sup>1, 2</sup>, 贾小旭<sup>1, 2</sup>, 赵春雷<sup>1</sup>, 邵明安<sup>1, 2</sup>

(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. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190)

**摘要:** 土壤水分的准确高效测定是土壤水文学研究的重要基础, 以土壤电学性质为基础的电阻率成像法 (ERT) 为土壤水分信息获取提供了新的技术手段。为探究 ERT 在黄土区土壤水文过程研究中的可行性, 利用高密度电法仪测定了陕北六道沟小流域典型坡地和坝地剖面土壤电阻率 ( $\rho$ ), 分析了不同土地利用方式下  $\rho$  二维分布特征, 探讨了 ERT 在黄土区土壤水分及地下水监测研究方面的应用。结果表明: 坡地土地利用方式和坡位对  $\rho$  具有显著影响, 剖面平均  $\rho$  由高到低依次为: 柠条灌木地 > 苜蓿草地 > 撂荒草地 > 农耕地, 坡顶  $\rho$  显著高于坡底, 这与土壤含水量高低有密切关系。坝地  $\rho$  具有明显的水平和垂直分异特征, 垂直方向呈高阻层—低阻层—高阻层分布, 低阻层上边界与浅层地下水位一致。在坝地尾部, 低阻层厚度增加并穿透浅层高阻层, 可能与尾部作物耗水较少有关。ERT 可用于黄土区不同土地利用方式下土壤干湿状况及坝地地下水动态监测研究。

**关键词:** 土壤电阻率; 土壤水分; 地下水; 土地利用; 黄土高原

**中图分类号:** S152.7      **文献标志码:** A

## Distribution and Application of Soil Electrical Resistivity in Slope Land and Dam Land in the Loess Region

LIU Chenggong<sup>1, 2</sup>, JIA Xiaoxu<sup>1, 2†</sup>, ZHAO Chunlei<sup>1</sup>, SHAO Mingan<sup>1, 2</sup>

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

**Abstract:** [Objective] Soil moisture is one of the most important factors for plant growth and solute transport in arid and semi-arid areas. An accurate and effective measurement of profile soil moisture is a critical issue of soil hydrology. The technology of electrical resistivity tomography (ERT) based on soil electrical properties provides a new geophysical method for measuring soil moisture content in the profile, which has been widely applied in the studies of soil water dynamics, groundwater recharge and root-water interactions in many regions in the world. However, little is known yet about the applicability of ERT to monitoring soil moisture or groundwater in the loess area, and the lack of information on profile soil resistivity ( $\rho$ ) as affected by

\* 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB40020305) 资助 Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No.XDB40020305)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jiaxx@igsnr.ac.cn

作者简介: 刘成功 (1996—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤物理与生态水文研究。E-mail: liucg.19b@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2020-04-26; 收到修改稿日期: 2020-06-24; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-10-13

land use inhibits progress of the research on hydro-geophysics. This study was conducted to (1) explore characteristics of profile  $\rho$ , as affected by land use and slope position, in slope land and dam land in the northern part of the Loess Plateau, (2) determine effects of slope position and land use type on  $\rho$  and (3) examine applicability of ERT to monitoring soil moisture and groundwater dynamics in the loess area. 【 Method 】 Profile  $\rho$  in slope lands and dam land, different in land use type (including cropland, natural grassland, artificial grassland and caragana shrubland) was measured with a high-density ERT (Advanced Geosciences, Inc.) in the Liudaogou catchment in the northern part of the Loess Plateau. Variation of profile  $\rho$  with land use type and slope position was analyzed with ANOVA. 【 Results 】 Results show that land use type and slope position had significant effects on  $\rho$  in slope land. In terms of mean profile  $\rho$ , lands different in land use type followed an order of caragana shrubland > artificial grassland > natural grassland > cropland. Furthermore, mean profile  $\rho$  was the lowest in the bottom of the slope, followed by the middle and top of the slope. These findings suggest that profile  $\rho$  was closely related to soil moisture condition. Profile  $\rho$  in the dam land exhibited obvious horizontal and vertical variation in distribution. Vertically,  $\rho$  displayed a curve of high - low - high from the top to the deep loess layer, and the upper boundary of the low-resistance zone was consistent with the table of shallow groundwater in the dam land, while horizontally, profile  $\rho$  was closely related to land use type and geological position. Compared with the head dam land, the tail dam land had a low-resistance zone significantly thicker and penetrating the high-resistance zone in the shallow soil layer, which may be ascribed to crops' lower water consumption. 【 Conclusion 】 Spatial distribution of profile  $\rho$  varies significantly with land use type and slope position in the loess area. The geophysical method of ERT is recommended for monitoring and studying spatial and temporal characteristics of dry and wet conditions of soil profiles different in land use type, as well as shallow groundwater dynamics in the loess area of China. It can also be used to study relationships between precipitation, vegetation, soil moisture and groundwater, particularly for areas thick in sediment deposits.

**Key words:** Soil electrical resistivity; Soil moisture; Groundwater; Land use; The Loess Plateau

土壤水分是黄土高原植被生长及物质循环的重要影响因子, 准确获取剖面土壤水分信息对土壤水分管理、水文过程模拟及植被合理配置具有重要意义。多尺度土壤水分监测与研究也是土壤水文学的重要组成部分, 常用的土壤水分测定方法可分为点尺度、中尺度和大尺度三类<sup>[1]</sup>。点尺度土壤水分监测方法包括烘干法<sup>[2]</sup>、中子仪法<sup>[3]</sup>、时域反射仪法<sup>[4]</sup>和水分传感器法<sup>[5]</sup>等。这些方法均需在测量位置进行取土或者埋入测量管和传感器, 此过程将对土壤结构造成扰动且仅能测定样点附近土壤水分状况。中尺度方法如宇宙射线快中子法<sup>[6]</sup>, 可监测百米范围内样地的平均土壤水分状况, 但受原理限制, 其监测有效深度通常不超过 50 cm。随着计算机和遥感技术的不断发展, 利用遥感方法进行大尺度土壤水分监测与反演成为可能, 但其仅能获取表层土壤水分信息且空间分辨率有限<sup>[7]</sup>。

近年来, 随着地球物理监测和数据解析技术的提高, 以岩土介质导电性差异为基础, 通过人工建立和观测介质内稳定电流场分布情况, 从而在一维、二维或三维维度上对从厘米尺度到区域尺度的土壤电阻率进行检测的电阻率成像法 (Electrical Resistivity

Tomography, ERT) 得到了快速发展。在非饱和带中, 土壤水分及溶质浓度是引起土壤电阻率空间差异的主要因素, 该方法已被逐渐应用到土壤水文过程的监测与研究<sup>[8-15]</sup>, 例如根系吸水研究<sup>[14]</sup>、根系对树干茎流的分配过程可视化<sup>[13]</sup>以及林木对坡地土壤水文过程的影响研究<sup>[15]</sup>等。研究表明, ERT 可实现多尺度微扰动土壤水文状况连续监测, 在一定程度上弥补了传统土壤水分测定手段的缺陷, 具有较高的应用价值, 但目前该方法在国内应用较少<sup>[11-9]</sup>。因此, 利用 ERT 对黄土区土壤电阻率进行测定, 获取不同土地利用方式下土壤电阻率的空间分布信息, 探讨该方法在黄土区土壤水文过程研究中的可行性, 对利用地球物理技术研究深厚黄土区土壤水循环过程, 服务该区土壤水分管理及植被有效建造具有重要意义。

为此, 本研究利用高密度电法仪对黄土高原六道沟小流域典型坡地和坝地剖面土壤电阻率进行监测, 分析坡地不同土地利用方式和不同坡位土壤电阻率的空间分布特征及其差异, 揭示坝地剖面土壤电阻率与浅层地下水的关系, 探讨 ERT 在黄土高原土壤水文过程和地下水研究中的应用及可行性, 为基于地球物理技术研究土壤水文过程提供依据。

## 1 材料与方方法

### 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 (38°46'~38°51'N, 110°21'~110°23'E)。流域面积 6.89 km<sup>2</sup>, 海拔 1 081~1 274 m。小流域地处毛乌素沙地向南部黄土丘陵区的过渡地带, 是水蚀风蚀交错带的侵蚀中心, 属于典型半干旱区, 年均降水量 423 mm, 其中 6—9 月可占全年降水量的 75%。

研究样地如图 1 所示。不同土地利用方式坡地为远离侵蚀沟, 坡度为 12°的完整坡面, 土壤类型为沙黄土。2004 年, 在该坡面建立了四个规格为 5 m × 61 m 的径流观测场, 分别为农耕地、撂荒草地、苜蓿草地和柠条灌木地<sup>[16]</sup>。坝地位于所选坡地东侧的底部, 呈西北—东南走向, 总长度 550 m, 自坝尾至坝头 (西北至东南方向) 分布有农耕地、苜蓿草地、撂荒灌草地和柠条灌木地等多种土地利用类型。

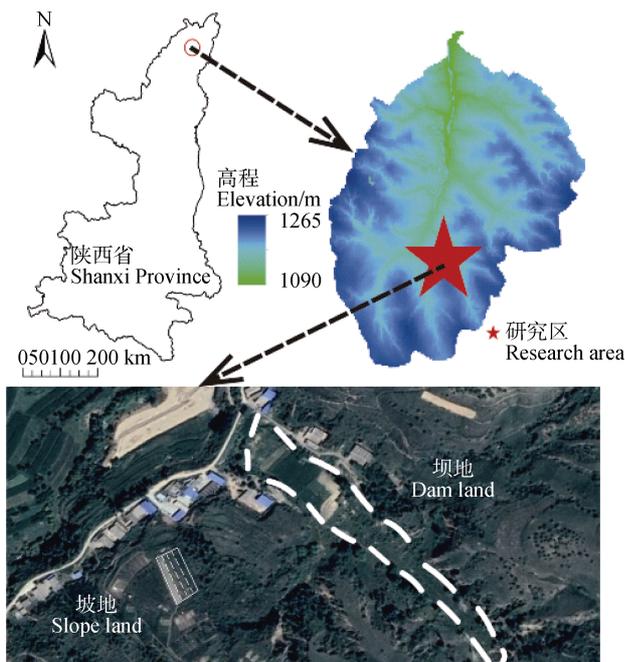


图 1 六道沟小流域和样地空间位置图

Fig. 1 Locations of the Liudaogou catchment in Shaanxi Province and the experimental fields in the small catchment

### 1.2 数据采集

利用 AGI (Advanced Geosciences, Inc.) 高密度电法仪测定坡地和坝地剖面土壤电阻率。测定过程中, 不同的电极排列方式产生的稳定电场不同, 导致其对变异源的敏感性不同。常规电极排列包括

温纳排列、施伦贝格排列、偶极—偶极排列、单极—偶极排列和单极—单极排列五种<sup>[11]</sup>。为获得研究区高分辨率土壤电阻率分布数据, 本研究采用对垂直方向变异敏感的温纳排列和对水平方向变异敏感的偶极—偶极排列进行两次测量并将数据进行合并。以温纳法为例, 该仪器工作原理如图 2 所示, 每个工作单元包含四个工作电极 (图 2a), 其中两个为电流电极 (A、B 电极), 两个为测量电极 (M、N 电极)。工作过程中 (图 2b), 电流电极通电, 在下部介质中形成电流场, 测量此时两电极之间的电位差并储存, 一次测量结束后按照测量命令进行下一次测量, 如此往复循环直至任务命令完成。

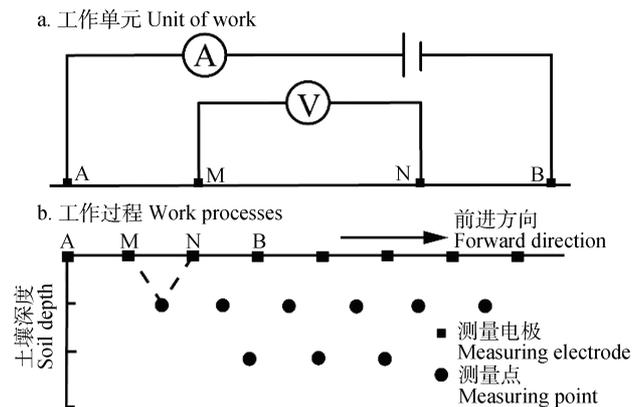


图 2 电阻率成像法监测原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of monitoring principle of the electrical resistivity tomography

测量电极所测得电位差可反映介质导电率情况, 其测点电阻率  $\rho$  可通过如下公式计算:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

式中,  $\Delta V$  为 MN 两电极电位差,  $I$  为 AB 两电极间电流,  $K$  为距离修正系数, 其值为:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (2)$$

式中, AM、AN、BM、BN 为响应工作电极间距。

ERT 最大测量深度和测量剖面数据点密度分别与测线总长度和电极间距呈正相关。

2019 年 7 月 6 日对坡地四种土地利用方式土壤电阻率依次进行测定。电极自坡底向坡顶每隔 1 m 进行布置, 总长度 54 m。2019 年 7 月 7 日和 7 月

18 日分别测定坝地剖面土壤电阻率,在距坝尾 50 m 处向坝头方向依次布设电极,电极间距 6 m,水平测定长度 330 m。

### 1.3 ERT 数据反演

受土壤性质空间异质性和测量手段的限制,利用高密度电法仪测得的土壤电阻率数据并不能直接表征土壤真实电阻率值,需要通过一系列的反演方法得到一个与测量值具有相同电阻率响应的数学模型,即真实电阻率情况<sup>[12]</sup>。本研究采用 AGI 研发的 EarthImager 2D 软件对所测得视电阻率数值进行反演和地形矫正。利用 SPSS 26.0 软件进行显著性检验,利用 Origin 9.0 进行图件绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同土地利用坡地土壤电阻率分布特征

不同土地利用类型坡顶、坡中和坡底土壤电阻率描述性统计如表 1 所示。方差分析结果表明:不同土

地利用类型 and 不同坡位土壤电阻率具有显著差异( $P < 0.05$ )。总体上,不同坡位剖面土壤电阻率平均值为坡底(69.33  $\Omega\text{m}$ ) < 坡中(70.24  $\Omega\text{m}$ ) < 坡顶(72.57  $\Omega\text{m}$ )。不同坡位土壤电阻率的分布特征与降水的再分配过程有关。作为土壤水分唯一的水分补充来源,降水在重力作用下以地表径流和壤中流的形式沿坡面向下运动并在坡底汇聚,导致坡底土壤含水量较高,因而土壤电阻率较低。此外,近坡顶位置受地形和太阳辐射等因素影响强烈,土壤蒸发强度大。不同土地利用中,农耕地、撂荒草地和苜蓿草地不同坡位土壤电阻率同样表现为随着坡位上升而增大。然而,柠条灌木地土壤电阻率具有不同的坡位分布特征,具体表现为坡中(82.14  $\Omega\text{m}$ )和坡顶(82.29  $\Omega\text{m}$ )无显著差异,而坡底(85.18  $\Omega\text{m}$ )显著高于坡中和坡顶。这主要是由于受地形影响,坡底位置更易获得较多土壤水分补给,植物长势较好,柠条作为高耗水植物,冠层覆盖度较大导致其蒸散耗水较其他三种植被类型更多,从而导致坡底土壤水含量低于坡中和坡顶<sup>[17]</sup>。

表 1 坡地土壤电阻率描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of soil resistivity in slope land

坡位	土地利用类型	最大值	最小值	平均值	标准偏差
Slope positions	Land use types	Max/ $\Omega\text{m}$	Min/ $\Omega\text{m}$	Mean/ $\Omega\text{m}$	SD.
坡底 Bottom of slope	农耕地	104.68	33.35	59.53Cd	15.49
	撂荒草地	104.65	44.96	62.42Cc	8.57
	苜蓿草地	144.26	44.43	70.19Cb	9.17
	柠条灌木地	279.69	35.03	85.18Aa	27.24
	总体情况	279.69	33.35	69.33C	19.58
坡中 Middle slope	农耕地	84.40	41.91	61.93Bd	7.63
	撂荒草地	79.44	49.48	64.68Bc	7.15
	苜蓿草地	95.41	51.57	72.23Bb	9.06
	柠条灌木地	152.89	51.88	82.14Ba	16.51
坡顶 Top slope	总体情况	152.89	41.91	70.24B	13.31
	农耕地	93.47	47.35	65.63Ad	8.23
	撂荒草地	92.16	53.62	68.25Ac	6.43
	苜蓿草地	117.01	55.11	74.09Ab	9.90
	柠条灌木地	139.84	57.18	82.29Ba	17.7
	总体情况	139.84	47.35	72.57A	13.07

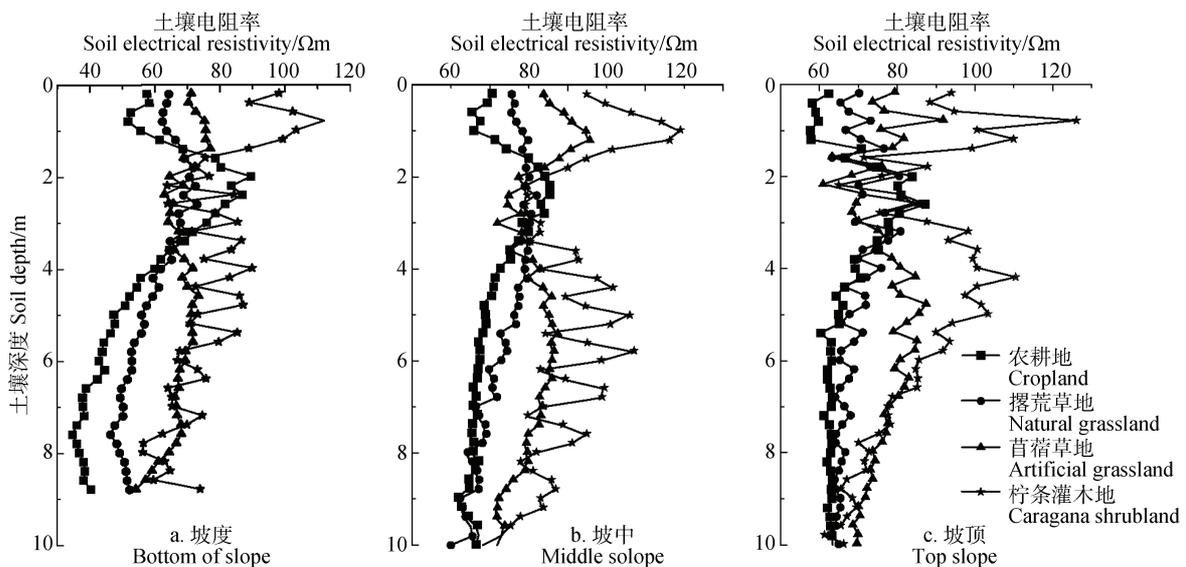
注:不同大写字母表示同一土地利用类型不同坡位电阻率差异显著( $P < 0.05$ ),不同小写字母表示同一坡位不同土地利用类型电阻率差异显著( $P < 0.05$ )。Note: Different capital letters represent significant differences between different slope positions the same in land use type ( $P < 0.05$ ) and different lowercase letters represent significant differences between different land use types the same in slope position ( $P < 0.05$ ).

不同坡位和不同土地利用方式下剖面土壤电阻率分布如图 3 所示。0~2 m 深度范围内, 撂荒草地、苜蓿草地及柠条灌木地土壤电阻率具有相似的变化趋势, 即随土层深度的增加而增大, 且在 1 m 深度附近达到最大值, 之后随深度增加逐渐减小。农耕地在 0~1 m 土层范围内, 电阻率随深度增加呈先减小后增大的变化趋势。这主要是由于柠条和苜蓿根系相比于农地对 0~1 m 剖面土壤水分消耗量更高。马婧怡等<sup>[18]</sup>研究发现, 柠条和苜蓿根系量的 90% 以上分布在 0~1 m 土层。此外, 本研究区柠条和苜蓿草地植被盖度均高于农耕地, 冠层的截留量较大, 降水对土壤水分补给相对较少, 导致 0~1 m 土层电阻率较高。2 m 深度以下, 柠条灌木地土壤电阻率逐渐增加, 并在 4~5 m 左右深度达到最大值; 而苜蓿草地变化不大, 但处于较高水平。撂荒草地剖面土壤电阻率在 0~1.5 m 土层高于农耕地, 而低于柠条灌木地和苜蓿草地; 1.5 m 以下深度, 土壤电阻率较为稳定。柠条和苜蓿为多年生植物, 根系较深, 强烈的植被耗水特性导致较深层次土壤含水量下降, 导致较高的土壤电阻率。农耕地与撂荒草地均为一年生草本植物, 根系深度往往不超过 4 m, 因此对 4 m 以下土壤水分影响较小, 其土壤电阻率值较低。在 6 m 以下土层, 柠条和苜蓿根系对土壤水分的影响逐渐减小, 土壤电阻率随深度增加逐渐降

低。电阻率成像法所测视电阻率经 EarthImager 2D 软件反演并进行空间插值得到坡地土壤电阻率分布图 (图 4)。由图可见, 不同土地利用坡面二维土壤剖面均有部分高电阻区域 (>80  $\Omega\text{m}$ ), 其面积大小为柠条灌木地>苜蓿草地>农耕地>撂荒草地。在高电阻率分布位置, 苜蓿草地和柠条灌木地 0~2 m 范围内有近似连续的高电阻带, 该深度范围内柠条灌木地平均电阻率值 (84.69  $\Omega\text{m}$ ) 显著高于苜蓿草地 (72.66  $\Omega\text{m}$ )、撂荒草地 (65.32  $\Omega\text{m}$ ) 和农耕地 (62.37  $\Omega\text{m}$ )。在黄土高原, 柠条和苜蓿等人工植被维持生长发育所需要的水分远大于农作物和天然草本植物<sup>[17, 19]</sup>, 因此, 人工植被坡面高电阻区范围较大且柠条灌木地 4 m 深度以下存在连接度较高, 平均厚度约为 4 m 的高电阻带。值得注意的是, 该高电阻区厚度与张晨成等<sup>[20]</sup>在同一研究区测得的柠条林土壤干层厚度相近。因此, ERT 可用于研究黄土区人工植被下伏土壤干层厚度及空间分布状况。

## 2.2 坝地剖面土壤电阻率空间分布特征

坝地剖面土壤电阻率二维空间分布如图 5 所示。总体上, 坝地土壤电阻率空间分布具有明显的垂直和水平分异特征。在垂直方向, 土壤表层为高电阻率区域, 其厚度自坝尾至坝头由 1 m 增至 6 m 左右, 这主要是由于坝地土地利用类型自起点位置依次为农耕地、苜蓿草地、撂荒灌草地和柠条灌木



注: 坡底数据受测量方法限制深度仅为 0~8.8 m。Note: Measurement of the bottom slope is limited by the method in depth within the range of 0~8.8 m.

图 3 坡地不同土地利用方式和不同坡位土壤电阻率剖面分布图

Fig. 3 Profile distribution of soil resistivity in the slope land relative to land use and slope position

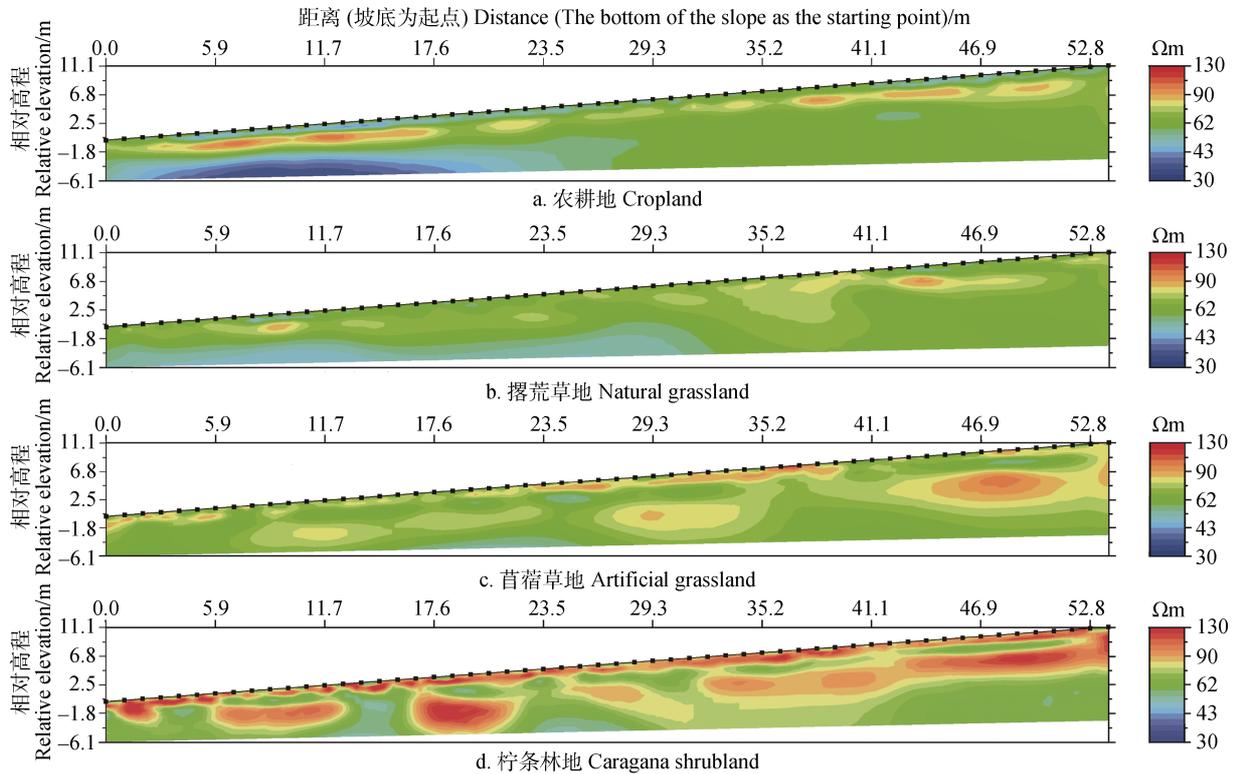


图4 坡地不同土地利用类型土壤电阻率空间分布图

Fig. 4 Spatial patterns of soil resistivity in slope land relative to land use

地, 植被生长耗水量依次增加所导致的。表层高电阻率带以下至 15 m 深度范围内为连续带状低阻区, 该区域平均电阻率为 39.74  $\Omega\text{m}$ , 最小值为 15  $\Omega\text{m}$ 。根据坝地地下水水位计监测数据, 该日坝地地下水水位为 5.9 m, 与低阻区起始深度基本一致, 因此, ERT 可用于研究区地下水水位时空分布监测研究。15 m 以下电阻率陡增, 形成底部超出测量范围的高阻区域。中心位置电阻率超过 300  $\Omega\text{m}$ , 根据试验区地质资料推测该位置为基岩。高阻区域于 240~260 m 位置中断, 中断区平均土壤电阻率为 87.65  $\Omega\text{m}$ , 远小于同等深度高阻区域, 推测该现象是由于基岩出现断层, 介质质地变化和上部浅层地下水入渗补给引起的。

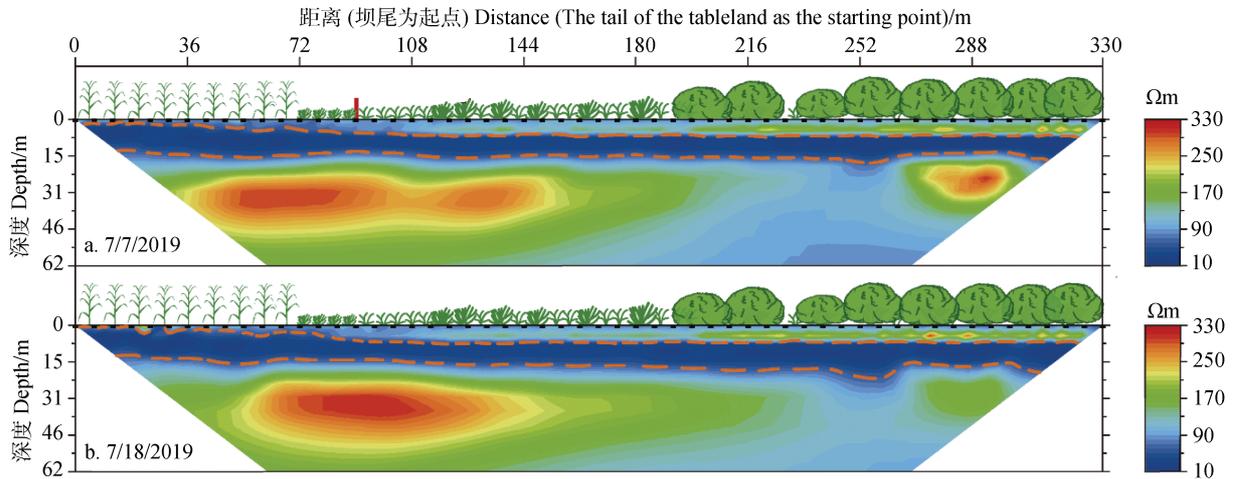
图 5b 为 2019 年 7 月 18 日测定的坝地土壤电阻率二维空间分布。通过与图 5a 对比发现, 0~192 m 位置处农地、苜蓿草地及撂荒灌草地表层高阻带电阻率无显著变化; 而 192~330 m 处柠条灌木地, 尤其是 272~294 m 位置处 3~5 m 深度土壤电阻率增加。该位置处柠条植株较大且植被盖度较高, 观测期间根系耗水量较大, 导致 3~5 m 深度土壤含水量降低和电阻率增加。2019 年 7 月 15 日, 研究区降

雨 20.8 mm, 与 7 月 7 日结果对比发现, 降雨对 7 月 18 日测定的剖面土壤电阻率并未产生较大差异, 可能是因为坝地植被覆盖度高, 冠层截流量大, 加之该季节植被蒸散耗水强烈, 导致剖面土壤水分并未发生明显变化。因此, 在应用 ERT 进行土壤电阻率监测试验中可进一步通过减小电极间距和增大监测频度来获取高精度时域土壤电阻率数据, 进而对降水—土壤水—地下水关系问题展开深入研究。

此外, 36~144 m 位置深层高阻区核心区域长度减小而厚度略有增加, 270~300 m 位置核心区域电阻率降低, 这是由于深层高阻体表面湿润导致的反演伪影<sup>[13, 21-22]</sup>。反演伪影广泛存在于时域电阻率数据分析结果中, 表现为测区深层电阻率数据出现明显异常区域。研究发现在试验过程中可以根据监测区域实际情况选择合适的电极排列方式<sup>[20]</sup>或根据水分湿润锋位置对 ERT 监测数据进行深层数据分离<sup>[21]</sup>来减少异常位置的存在。

### 2.3 土壤电阻率法在土壤水文学中的应用

介质电阻率由其导电性决定, 所以可以引起土壤导电能力变化的地球物理性质和过程, 一定程度



注：图 a、b 中虚线为 40  $\Omega\text{m}$  等电阻率线。Note: The dotted line in the Figures a and b is the 40  $\Omega\text{m}$  constant resistivity line.

图 5 坝地土壤电阻率空间分布图

Fig. 5 Spatial pattern of soil resistivity in the check dam

上可通过土壤电阻率分布和变化来反映。研究者可通过电阻率成像法获得研究区域内土壤电阻率空间分布状况，进而反映其下垫面某些性质的空间分布特征，分析其主要影响因子。本研究通过对比分析坡地不同坡位和不同土地利用方式以及坝地剖面土壤电阻率的二维空间分布，发现坡地土壤电阻率受坡位和土地利用方式的显著影响，坝地 6~15 m 深度范围为条带状水分饱和带（浅层地下水）。

高君亮等<sup>[1]</sup>、Alamry 等<sup>[12]</sup>建立了土壤电阻率与土壤含水量经验关系式，据此利用土壤电阻率空间分布数据反演得到土壤水分信息。该方法可直观反映研究区土壤水分空间分布状况，被研究者广泛使用。野外试验条件下，地表下垫面复杂，导致土壤电阻率空间变异因素众多。例如，本研究中农耕地 2 m 深度处存在由料姜石引起的高阻区域，这导致在一些研究区内较难建立适合于整个区域的土壤电阻率与土壤含水量的普适关系模型，或由于在多次反演中的误差累积导致预测精度降低。因此，试验前期对研究区域进行地质资料收集，分析研究区内影响土壤电阻率的主要因素，可减少应用 ERT 方法监测研究土壤水文过程产生的不确定性。在非饱和带中，土壤含水量和溶质浓度的差异是影响土壤电阻率异质性的主要因素<sup>[10]</sup>。一些学者利用 ERT 微扰动监测的优势，对同一研究区进行长期原位动态监测，通过对比分析数次测量间土壤电阻率的差异，

实现对土壤水文过程的动态分析<sup>[12-15]</sup>。在一定监测时期内，土壤质地、孔隙度等影响土壤导电性的因素基本不变，引起土壤电阻率变化的唯一因素就是土壤含水量。本研究对坝地土壤电阻率进行了两次测定，发现两次测量间柠条灌木地较其他土地利用类型土壤电阻率存在明显增加，表明柠条根系较其他植被具有更好的土壤水分消耗量。因此，ERT 也可用于研究植物根系的耗水过程。通过 ERT 原位动态观测土壤电阻率，结合研究区土壤含水量—土壤电阻率经验关系式，可实现一定精度范围内土壤水文过程时空特征研究。然而，影响土壤电阻率的因子众多，如何建立具有普适性的土壤电阻率与土壤含水量关系模型仍是限制 ERT 方法广泛应用的难题之一。

### 3 结论

本文利用电阻率成像法对黄土高原北部典型小流域不同土地利用类型坡地和坝地土壤电阻率及其空间分布进行了测定与分析，主要结论如下：（1）坡地土壤电阻率空间分布受土地利用类型和坡位的显著影响。总体上，土壤电阻率为柠条灌木地>苜蓿草地>撂荒草地>农耕地，这与不同土地利用方式下土壤水分状况有关。对农耕地、撂荒草地和苜蓿草地而言，坡底土壤电阻率低于坡中和坡顶，而柠条

灌木地坡底高于坡中和坡顶,这与不同坡位植被生长及根系耗水状况有关。(2)坝地土壤电阻率存在明显的水平和垂直分异特征。垂直方向表层高阻层厚度为柠条灌木地>撂荒灌草地>苜蓿草地>农耕地,高阻层以下为条带状低阻区,其上边界与坝地浅层地下水位一致。(3)电阻率成像法可用于监测黄土高原小流域坝地、坡地及不同土地利用方式下土壤干湿状况及地下水时空分布,对研究降水—土壤水—地下水关系具有一定的可行性和应用价值。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Gao J L, Luo F M, Ma Y B, et al. Monitoring of soil water content in *Haloxylon ammodendron* plantation using electrical resistivity tomography[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 ( 22 ): 92—101. [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.]
- [ 2 ] Feng B, Jia X X, Yu D X, et al. Spatial variability of soil moisture in northern grassland of the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50 ( 5 ): 1123—1130. [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]. 土壤通报, 2019, 50 ( 5 ): 1123—1130.]
- [ 3 ] Wang Y P, Wang L, Han X, et al. Dynamics of soil moisture depletion and replenishment in different land use types of the Loess Tableland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 ( 22 ): 7571—7579. [王艳萍, 王力, 韩雪, 等. 黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35 ( 22 ): 7571—7579.]
- [ 4 ] Zhang M, Liu S, Liu Y, et al. Soil moisture variation characteristics of different land use types in the moderate slope sandy area of loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33 ( 3 ): 115—120, 128. [张敏, 刘爽, 刘勇, 等. 黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33 ( 3 ): 115—120, 128.]
- [ 5 ] Tang M, Zhao X N, Gao X D, et al. Characteristics of soil moisture variation in different land use types in the hilly region of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29 ( 3 ): 765—774. [唐敏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29 ( 3 ): 765—774.]
- [ 6 ] Zhu X C, Shao M A, Jia X X, et al. Application of temporal stability analysis in depth-scaling estimated soil water content by cosmic-ray neutron probe on the northern Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 299—308.
- [ 7 ] Pan N, Wang S, Liu Y X, et al. Advances in soil moisture retrieval from remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 ( 13 ): 4615—4626. [潘宁, 王帅, 刘焱序, 等. 土壤水分遥感反演研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39 ( 13 ): 4615—4626.]
- [ 8 ] Tso C H M, Kuras O, Binley A. On the field estimation of moisture content using electrical geophysics: The impact of petrophysical model uncertainty[J]. Water Resources Research, 2019, 55 ( 8 ): 7196—7211.
- [ 9 ] 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. [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.]
- [ 10 ] Ma D H, Zhang J B, Wu Z D, et al. Application of electrical resistivity tomography to study on soil hydrology and its advance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 ( 3 ): 439—447. [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.]
- [ 11 ] Samouelian A, Cousin I, Tabbagh A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 83 ( 2 ): 173—193.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Guo L, Mount G J, Hudson S A, et al. Pairing geophysical techniques improves understanding of the near-surface Critical Zone: Visualization of preferential routing of stemflow along coarse roots[J]. Geoderma, 2020, 357: 113953.
- [ 14 ] Vanella D, Cassiani G, Busato L, et al. Use of small scale electrical resistivity tomography to identify soil-root interactions during deficit irrigation[J]. Journal of Hydrology, 2018, 556: 310—324.
- [ 15 ] Peskett L, MacDonald A, Heal K, et al. The impact of across-slope forest strips on hillslope subsurface hydrological dynamics[J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124427.
- [ 16 ] Jia Y H. Spatio-temporal variability of soil water content on a loessial slope[D]. Yangling, Shanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, 2013. [贾玉华. 坡面土壤水分时空变异的试验研究[D]. 陕西杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.]
- [ 17 ] Yao X L, Fu B J, Lu Y H. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 ( 16 ): 4961—4968. [姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. 生态学报, 2012, 32 ( 16 ):

- 4961—4968.]
- [ 18 ] 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.[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.]
- [ 19 ] Zhu L T, Jiao F, Liu Y X, et al. Spatio-temporal variation characteristics of soil moisture under different land uses in the loess hilly region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18 ( 6 ): 115—118. [朱乐天, 焦峰, 刘源鑫, 等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分时空变异特征[J]. *水土保持研究*, 2011, 18 ( 6 ): 115—118.]
- [ 20 ] Zhang C C, Shao M A, Wang Y Q. Spatial distribution of dried soil layers under different vegetation types at slope scale in loess region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 ( 17 ): 102—108. [张晨成, 邵明安, 王云强. 黄土区坡面尺度不同植被类型下土壤干层的空间分布[J]. *农业工程学报*, 2012, 28 ( 17 ): 102—108.]
- [ 21 ] Carey A M, Paige G B, Carr B J, et al. Forward modeling to investigate inversion artifacts resulting from time-lapse electrical resistivity tomography during rainfall simulations[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 145: 39—49.
- [ 22 ] Clément R, Descloîtres M, Gunther T, et al. Comparison of three arrays in time-lapse ERT: Simulation of a leachate injection experiment[J]. *ArchéoSciences*, 2009, 33: 275—278.

(责任编辑: 檀满枝)