

DOI: 10.11766/trxb202209220525

田园, 钟雪梅, 彭新华, 汪亚及, 高磊. 基于 ERT 技术反演红壤剖面水分入渗过程[J]. 土壤学报, 2024, 61 (3): 714–726.

TIAN Yuan, ZHONG Xuemei, PENG Xinhua, WANG Yaji, GAO Lei. Inversion of Water Infiltration Processes in the Profile of Red Soil Based on ERT Technology[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (3): 714–726.

基于 ERT 技术反演红壤剖面水分入渗过程*

田园^{1, 2}, 钟雪梅¹, 彭新华^{2, 3}, 汪亚及^{2, 3}, 高磊^{2†}

(1. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水分运动是土壤中物质和能量传输的主要驱动力, 但是水分在土壤中的运动轨迹复杂多变, 难以直接捕捉。本研究以第四纪红黏土发育的红壤为研究对象, 借助电阻率成像技术(ERT), 反演水分在林地和农地土壤中的入渗过程。研究发现, ERT 技术能够实现水分在红壤包气带入渗过程的可视化, ERT 测定的表观电阻率的变化量与烘干法测定的土壤水分之间呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 林地的决定系数为 0.72, 农地为 0.53。土地利用类型影响水分入渗的范围和方式, 在 2 cm 水头高度注水 100 L 的情况下, 林地的入渗深度大于 80 cm, 而农地约为 50 cm, 在此基础上, 继续注水 200 min, 林地和农地均出现明显的优先流现象。但是, 林地的优先流比农地更为发育, 林地是通过根系等大孔隙快速向下传输, 而农地则以“指流”的方式, 间断性向深层运动。在土壤层次复杂、背景含水量高、土壤黏重等不利因素的影响下, ERT 技术依然能捕捉优先流在红壤中发生和发育的过程。

关键词: 电阻率层析成像技术; 土地利用类型; 红黏土; 土壤水分; 优先流

中图分类号: P334⁺.2 **文献标志码:** A

Inversion of Water Infiltration Processes in the Profile of Red Soil Based on ERT Technology

TIAN Yuan^{1, 2}, ZHONG Xuemei¹, PENG Xinhua^{2, 3}, WANG Yaji^{2, 3}, GAO Lei^{2†}

(1. College of Geosciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. State Key Laboratory of Soil & Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: **【Objective】** Soil moisture movement is the main driving force of the material and energy transport in soil. However, the paths of soil moisture in soils are complex and difficult to comprehend. This is especially true in the red soil region with abundant rainfall and diverse land use types. **【Method】** With the help of an electrical resistivity tomography(ERT), soil moisture infiltration processes in the vadose zone were captured for the forest land and farmland of the red soil from Quaternary red clay.

* 国家自然科学基金项目(42077012, 41771263)和井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051261-1)资助; Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.42077012, 41771263); Jinggang Shan Agricultural Hi-tech District Project (No.20222-051261-1)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lgao@issas.ac.cn

作者简介: 田园(1999—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 土壤水文。E-mail: 3440999231@qq.com

收稿日期: 2022-09-22; 收到修改稿日期: 2023-02-20; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-08-30

【Result】 The results showed that in the red soil region, ERT could realize the visualization of the soil moisture infiltration process in the soil profile of the red soil. There was a highly significant correlation ($P < 0.01$) between the resistivity measured by ERT and the soil moisture measured by the oven drying method. The linear coefficients of determination between them were 0.72 for forest land and 0.53 for farmland. Land use types affected the mode and depth of soil moisture infiltration. With a 2 cm water head height and 100 L water injection volume, the infiltration depth of forest land was more than 80 cm, much deeper than that of farmland (50 cm). With the continued injection of water for 200 min, the infiltration depth of the two land uses exceeded 150 cm and a preferential flow phenomenon was observed during the infiltration process. However, the preferential flow of forest land was more developed than that of farmland. The preferential flow of forest land moves down rapidly through macropores formed by plant roots and soil animal activities while the preferential flow observed in farmland moved to the deep layer intermittently mostly in the way of the finger flow. In addition, the forest land was dominated by vertical infiltration with weak horizontal flow while the horizontal movement in farmland was stronger. 【Conclusion】 Under the influences of disadvantageous factors such as complex soil layers, high background water content and high soil clay content, ERT technology still could successfully capture the occurrence and development processes of preferential flow in red soil area.

Key words: Electrical resistivity tomography; Land use types; Red clay; Soil moisture; Preferential flow

土壤水分是一系列生态水文过程的关键状态变量^[1-3], 土壤水分的状态决定了雨水在产流和入渗, 太阳辐射在反射与土壤吸收中的分配比例^[4-5]。土壤水分入渗过程在很大程度上影响着水分的含量和状态, 作为土壤中物质和能量迁移转换的主要驱动力, 土壤水分的入渗过程对土壤侵蚀和污染物迁移起着决定性作用^[6]。因此, 明确土壤水分入渗过程是理解和解决众多生态环境问题的前提。

土壤水分运动过程受土体构型、土壤质地、植被根系、动物活动、地形地貌以及水文条件等众多因素的影响^[7]。这些因素的不同组合导致水分在土壤中的运动方式极为复杂多变, 水分在土壤中运动过程的获取主要有原位监测和模型模拟两种手段。原位监测是获得土壤水分入渗过程最直接和最可靠的方法, 但是传统的原位监测只能在一定条件下实现, 首先受限于研究尺度, 目前主要是在土柱或更小尺度可以直接监测水分入渗过程, 例如, 利用刻度尺测定透明材料内土壤中湿润峰的位置变化, 特别是利用高清相机在暗室拍摄流室内土壤的灰度变化来反演水分入渗过程^[8]。这些观测手段能够实现水分运动过程的实时获取。但是, 无论是用刻度尺测量还是用相机拍摄只能观测沿容器壁的水分运动情况, 无法穿透土壤观测水分在土体内部的运动, 而容器边缘往往受到界面效应的影响, 即使利用近年发展起来的中子辐射技术, 也只能有效穿透 5~10 mm 厚度的土壤^[9]。严格受限的观测厚度限制了

优先流的发育空间。此外, 为了制作符合要求的实验样品, 容器内的观测对象基本为回填土, 而非原状土, 这些限制因素导致监测的结果与野外复杂的实际情况相差甚远。虽然染色法能在更大尺度上研究原状土壤的水分运动, 比如在剖面甚至坡面尺度, 但是, 染色法的破坏性采样决定了该方法只能获得土壤水分在取样时刻的状态, 难以研究其动态过程^[10-11]。模型在研究土壤水分运动动态过程方面具有天然优势, 但是, 目前水文模型主要是针对土壤中水分数量的变化, 而对于优先流的发生位置和发育过程等方面的模拟难以实现。由于运算量等因素的限制, 目前模型在模拟土壤中水分运动动态过程方面仅在厘米数量级尺度甚至团聚体尺度上才能得以实现, 由于土壤孔隙系统的复杂性, 目前即使在小尺度模拟水分运动过程的精度也较低, 模拟的结果与实测值甚至不在同一数量级, 模拟结果的验证也存在很大难度^[12]。

不同尺度下的水文过程具有不同特征和功能。包气带水分运动是连接地表水和地下水的纽带, 在水资源的形成转换过程中具有不可替代的作用。优先流是包气带土壤水运动中的一种常见形式, 是指水分从地表绕过部分土壤基质快速向下补给深层土壤水分或地下水的过程^[13-14]。优先流在水分和物质迁移中起到非常关键的作用, 在一些区域优先流甚至是水分渗漏和溶质运移的主导形式^[15], 少数几条大孔隙驱动的优先流甚至能贡献 90%以上的入渗

量^[16-17]。但是,目前无论是直接监测还是模型均难以捕捉优先流在自然状态下发生和发育的过程。

土壤电阻率是土壤基本的特性之一,受到土壤构型、土壤质地、土壤矿物成分等众多因素的影响,是土壤物理化学特性的综合反映^[18-19]。电阻率层析成像技术(ERT)常被用来解译土壤的分层现象,例如,李富和欧元超^[18]通过分析土壤电阻率的剖面分布特征,将地表到母质层的土壤剖面分为五个层次;张平松等^[19]利用电阻率测定将安徽省淮河河漫滩的土壤进行了更为精细的分层,区分了耕作层和犁底层。此外,ERT技术还可以用来研究土壤的厚度^[20]。更为重要的是,该技术可在中尺度上原位无损监测土壤水分运动的动态过程^[21-22]。土壤是由固相的颗粒,液相的溶液和气相的空气组成,不同相态的电阻率差异巨大,相比于土壤溶液,土壤空气的电阻率值可以认为无穷大,而土壤固相的电阻率随时间基本稳定,正是基于这一原理,通过测定土壤系统的表征电阻率的动态,ERT技术可以解译土壤水分的变化。相较于目前广泛使用的染色示踪技术^[23],ERT不需要通过破坏土体即可获得不同时段土壤水分的信息,实现原位无损动态监测,这也是该技术在研究土壤水分入渗过程中的最大优势所在。目前,ERT技术在探索土壤水分与电阻率的关系、监测土壤水分时空动态、捕捉土壤优先流发育方面均有所应用^[24-25]。但是,该技术反演土壤水分运动过程的精度很大程度上受制于土壤特性。因此,ERT技术的应用效果具有明显的区域性,目前ERT的应用多在干旱和半干旱地区^[24-28],因为,这些地区的土壤一般为较均质的砂质土壤,土壤水分的背景值低,以我国土层深厚且均质的黄土高原地区最具代表性。而在湿润多雨且土壤黏重地区的研究多集中在土层薄且下伏不透水层或弱透水层的喀斯特地区,由于层次分明,该地区的优先流更容易被精确观测^[29]。在同样湿润多雨土壤黏重的红壤地区,由于其包气带相较于喀斯特地区更为深厚,并且无明显的不透水层,ERT技术在该地区的适用性有待评价。

红壤是我国重要的地带性土壤资源,红壤区占我国陆地面积的12.3%,在我国农业及经济社会可持续发展中占有重要地位^[30]。红壤区雨水资源丰富,但季节分配极不均衡,有明显的干湿季之分,再加上红壤本身土壤物理性状不良,调蓄供水能力较弱,

容易引发水土流失和季节性干旱等生态环境问题^[31]。红壤区水热资源极为丰富,植被生物量大,这给优先流的发育创造了有利条件。但是,复杂的水文条件给监测带来了很大难度,迫切需要一种有效便捷的方法监测土壤水分的运动过程。因此,本研究拟探讨ERT技术在解译红壤包气带中水分入渗动态过程中的适用性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于典型红壤区的江西省鹰潭市。气候方面,该地区属于温暖湿润的亚热带季风气候,年均温为17.8℃,最大值出现在7月为29.2℃,最小值出现在1月为5.6℃,年平均降水量约为1800mm,其中超过50%的降水发生在4—6月,而7—9月的降水量往往不足年降水量的10%,时常发生季节性干旱。植被方面,该地区土地利用类型多样,主要有旱作农地、水田和林地。本研究选择了分布广泛的旱作农地和人工林地为研究对象,所选择的两种土地利用方式的开发年限均超过了30年。土壤方面,第四纪红黏土是红壤区典型的母质,本研究所选择的农地和林地均为第四纪红黏土发育的红壤,土壤质地为黏壤土和黏土。两种土地利用类型土壤的物理属性存在明显差异(图1),主要表现为林地的容重和黏粒含量高于农地,林地和农地在15cm左右均存在明显的压实层,尤其是农地,该压实层土壤容重最大。40~80cm土层,无论林地还是农地的土壤容重均较小。林地可能由于耗水较大,土壤质量含水量低于农地,特别是在深层,对于两种土地利用类型均表现为深层高浅层低的特点(图1)。

1.2 试验设计

注水方案:为了便于观测入渗动态过程,本研究采用人工注水的方法,在林地和农地各挖一条长为3.5m,宽度和深度均为5cm的注水槽。分两个阶段往准备好的注水槽注水,两个注水阶段的水头高度均保持2cm。第一阶段,保持相同的注水量,均为100L,入渗完成24h后,开始第二阶段注水,该阶段保持相同的注水时间,均为200min。

电极布设:电极间距的选择影响测量结果的分辨率。间距越大,测量深度越大,空间上的分辨率

越低。根据研究目的，不同的研究选择的电极间距也不同，电极间距多集中在 0.1~10 m 之间^[29-33]。本试验研究水分入渗的过程，并且该过程中存在优先流发育的可能性，考虑到优先流的发生具有瞬变

性，为了更准确地捕捉优先流发育过程，并避免因间距过小而导致电极之间相互影响，本研究将电极间距设置为 30 cm，以注水槽为中心等间距布设 36 根直径为 2 cm 的电极，测线总长度为 10.5 m。

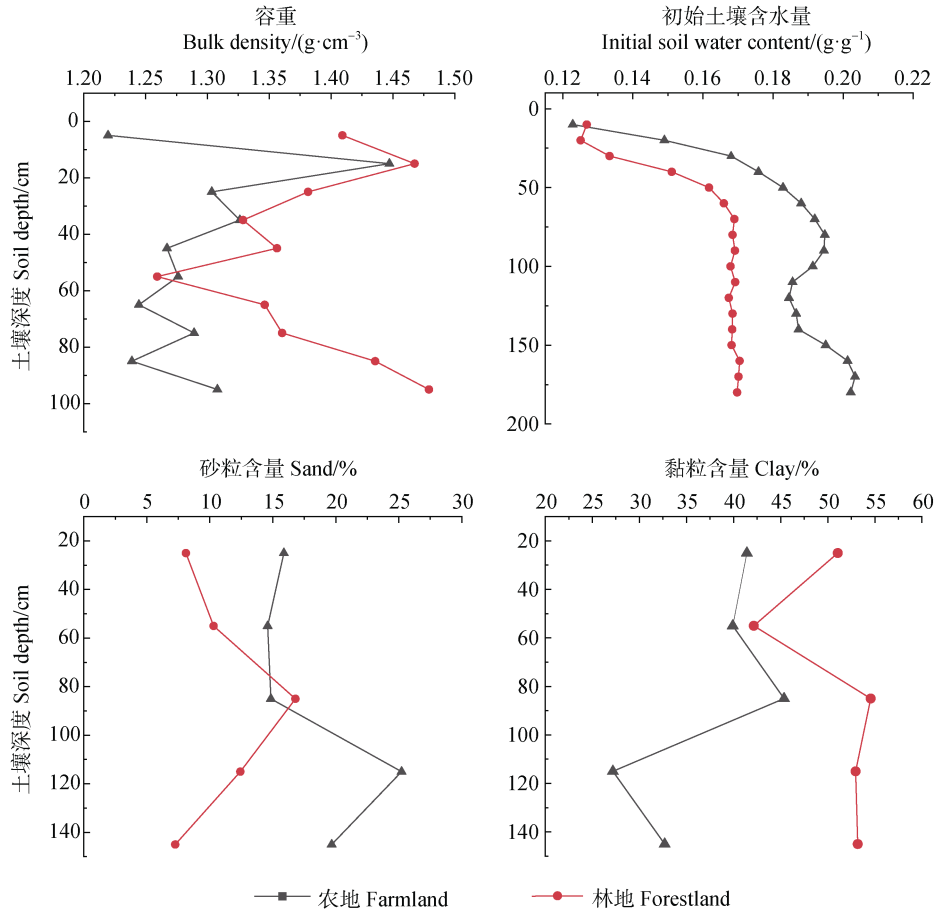


图 1 两种土地利用类型土壤的基本物理性质

Fig. 1 Summary statistics of soil physical properties for the two studied land uses

电阻率扫描：随着水分入渗，土壤中液相和气相的比例发生改变，导致表观电阻率发生变化，通过测定不同深度土壤表观电阻率的变化来达到监测水分运动和优先流发育过程的目的。本研究采用 ERT (Syscal Pro, 法国 IRIS 公司) 测定土壤的表观电阻率，测定深度为 171 cm，测量一次耗时 12.5 min。选择对电阻率垂向变化敏感的 Wenner 方法进行断面扫描，测定点位呈层状倒三角分布，共 11 层，深度分别为 16、31、47、62、78、93、109、125、140、156 和 171 cm (图 2)。在注水之前先对初始表观电阻率进行扫描测定，然后将水注入沟槽中，保持 2 cm 的水头高度，注水开始后进行第二次测定，记为 0 时刻。注水总量为 100 L 的第一个注水

阶段共测定 11 次，测定时间分别为注水前，注水开始后的第 0、15、40、60、90、120、160、200、260 和 320 分钟。在注水量 100 L 的情况下，两种土地利用类型用时存在明显差异，林地 15.5 min，农地 36.0 min。注水时长为 200 min 的注水阶段共扫描 14 次电阻率，同样将注水开始后的第一次测量记为 0 时刻，测量时间分别为注水开始前，注水开始后的第 0、15、30、45、60、80、100、130、150、200、240、300 和 320 分钟。

土壤样品采集：每个注水阶段试验结束后，在距离电极 10 cm 处的 9 个位置钻取 1.8 m 深土壤，采样间隔为 10 cm，利用烘干法测定土壤的质量含水量。在第二阶段注水试验结束后，沿着注水槽挖

深度为 1 m 的土壤剖面, 每隔 10 cm 分层采集原状土样品, 测定土壤容重, 用于计算土壤体积含水量。由于烘干法测定的是 10 cm 厚度土壤的平均含水量, 而 ERT 是测定的一个具体点的电阻率, 为了构建土壤含水量和表观电阻率的关系, 需要将两个指标在垂直方向上进行一一对应, 在建立两者关系时, 只保留既有烘干法测定的含水量又有表观电阻率值

的点位, 即 16 cm 处的电阻率对应 10~20 cm 深度的土壤含水量, 其他深度的对应依次为: 31 cm 对应 30~40 cm、47 cm 对应 40~50 cm、62 cm 对应 60~70 cm、78 cm 对应 70~80 cm、93 cm 对应 90~100 cm, 100 cm 以下的土层因为没有测定土壤容重, 无法获得土壤体积含水量, 因而未构建电阻率和含水量关系。

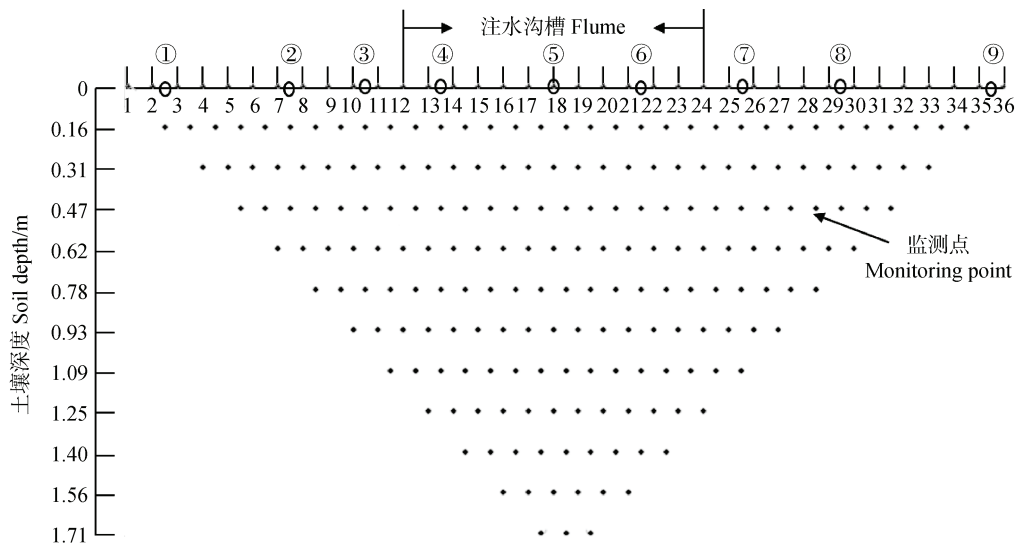


图 2 电阻率层析成像测量点位图

Fig. 2 Diagram of the measured positions of Electrical Resistivity Tomography (ERT)

1.3 采样分析与图像处理

为了更加直观地表示表观电阻率的变化, 也为了消除由两种土地利用类型的初始电阻率不同带来的不利影响, 本研究将不同时间测定的表观电阻率值减去初始值, 即使用表观电阻率的变化值来反演土壤水分动态, 该做法是目前 ERT 反演土壤水分中常用的处理方法^[15, 27]。将 ERT 测量得到的各时刻表观电阻率导入 Surfer 软件中使用克里金插值进行网格化, 经过白化后绘制表观电阻率变化率等值线图。将得到的表观电阻率变化率与对应位置的土壤体积含水量使用 Excel 软件进行拟合处理, 建立两者之间的回归模型。

2 结果与讨论

2.1 土壤表观电阻率的剖面分布特征

土壤剖面的初始表观电阻率在两种土地利用类型之间存在明显差异。由于母质、地形、海拔、水

文条件、土地利用方式等因素的差异, 土壤的表观电阻率在垂直方向上常发生分层现象^[34]。本研究选取的两种土地利用类型的土壤母质、地形地貌等方面相对一致, 两种土地利用类型电阻率测定点对应的土壤层次相同且在整个测量过程中不发生改变, 根据影响系数理论, 测定的表观电阻率的不同是由各土层介质的电阻率不同引起的^[35]。因此, 可以推测林地和农地表观电阻率的差异主要由于土地利用方式的不同所导致。

林地和农地的表观电阻率均表现为先快速增大后减小的趋势(图 3)。表层 0~30 cm 的表观电阻率最小, 这可能和表层土壤矿物质和养分丰富有关, 高离子含量有助于降低土壤的电阻值。随着土壤深度增加, 土壤的电阻率急剧增加, 具体而言, 林地在 0.8~1.2 m, 农地在 0.3~0.8 m 之间的表观电阻率显著高于其他土壤层次(图 3)。这一方面由于土壤中的离子含量有所降低, 另一方面可能与网纹层的位置有关, 这个层次的出现范围与观测到的网纹

层埋深有较高的重合度，特别是林地的重合度更高。 在 120 cm 以下，两种土地利用方式的电阻率均出现

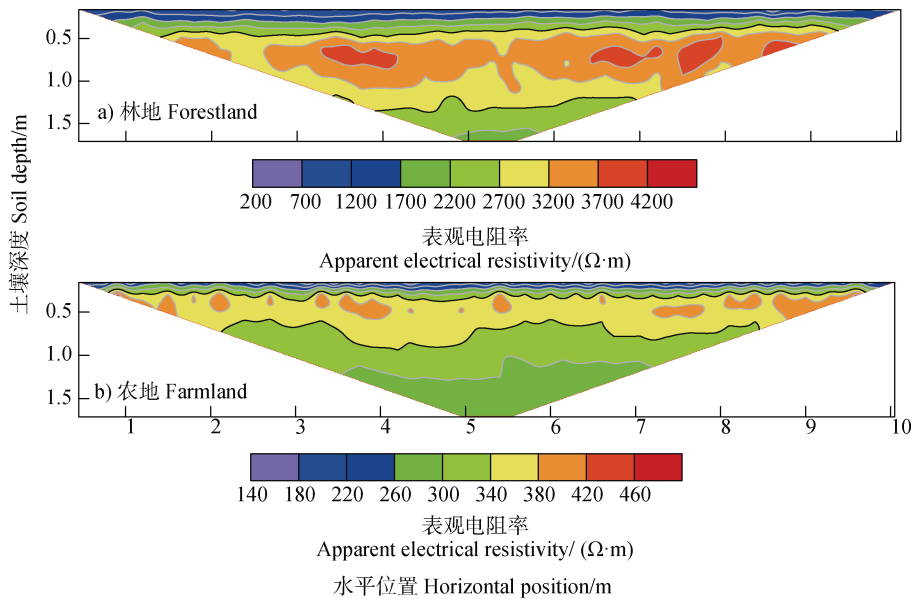


图 3 两种土地利用类型土壤表观电阻率初始值的剖面分布

Fig. 3 Profile distribution of initial apparent electrical resistivity for the two land use types

明显降低，其大小介于以上两个层次之间，这可能除了与网纹层消失有一定关系外，土壤含水量的升高也是电阻率降低的一个驱动因素。深层土壤的含水量长期保持在一个较高的水平，在相同的研究区，研究发现 1.8 m 深度农地的年均土壤水分含量接近田间持水量，有的时间段甚至接近饱和含水量^[36]。本试验的两个土地利用类型的土壤水分在 80 cm 以下开始增加，显著高于浅层（图 1）。可见，农地和林地土壤电阻率的分层现象可能是土壤中离子含量、网纹层埋深以及土壤水分含量等因素的综合表现。

虽然林地和农地的电阻率随深度的变化趋势类似，但是两者的绝对值却差异巨大，林地的电阻率是农地的近 10 倍。土地利用方式影响土壤孔隙结构和土壤水分，而这些因素对土壤的表观电阻率存在重要影响，考虑到初始土壤含水量林地略高于农地，显然土壤水分不是造成林地的电阻率高于农地这一现象的原因。这一差异可能和林地发达的根系有关，根系特别是腐烂后留下的根孔，导致土壤中出现较大的孔隙，大孔隙在通常情况下是充满空气的，而空气的电阻率和土壤固相物质或土壤溶液不在同一数量级。林地的土壤容重大于农地，但是其导水能力强于后者也从侧面暗示了林地土壤中有较大导水性孔隙的存在。考虑到两种土地利用类型的初始电阻率差异巨大，为了减少初始值的差异给土壤水分

反演带来的不利影响，在后续处理过程中，本研究采用表观电阻率的变化量代替电阻率的绝对值的方法减少初始值差异带来的影响。

2.2 基于表观电阻率变化的土壤水分入渗过程

林地和农地在注水第一阶段中（注水 100 L）的表现存在明显差异（图 4）。从入渗时间上，林地入渗完 100 L 水耗时不足农地的 1/2，分别为 15.5 min 和 36.0 min，这主要是林地根系发达，虽然林地的容重大于农地，但是少数大孔隙导致水分入渗更快，这和室内测定的林地入渗速率大于农地的结果相一致。从入渗范围上，林地在该阶段的入渗范围更广，无论在水平还是垂直方向上，林地出现表观电阻率变化的范围更大，除了 320 min 外，农地电阻率在水平方向的变化范围远小于林地，这与农地耕作层土壤疏松多孔、储水能力更强有关，在垂直方向入渗范围小的原因除了表层吸收了更多的水分外，农地压实层的存在是另一个重要因素。农地 20 cm 深度附近的土壤容重显著高于其他土层，虽然林地也存在该深度土壤容重较大的现象（图 1），但是由于导水性大孔隙的存在，水分并未在该层大量蓄积。农地在注水第一阶段的最大入渗深度约为 50 cm，而林地在注水 45 min 后，入渗深度就超过了该深度，最大入渗深度接近 80 cm。由于第一阶段总注入水量有限，大部分水分均用于补给表层土壤的水分亏

缺，并未观测到明显的优先流现象。为了观测更完整的入渗过程，在 100 L 注水量的基础上，间隔 24 h 后，又以相同的水头高度持续注水 200 min，第二次注水过程中，林地共消耗 315 L 水量，农地消耗水量为 360 L。可以看出，两种土地利用类型在第二阶段的平均入渗速率均较第一阶段显著下降，特别是林地下降的更为明显。在第一阶段，

林地的入渗速率为农地的 2 倍以上，而在第二阶段入渗速率已经低于农地。这可能是由于林地大孔隙及大孔隙周边的土壤已经被第一阶段的注水充满，导致对水分的接纳能力显著下降的缘故。由于前期水分条件好，第二次注水的入渗深度更大，在注水 100 min 后两种土地利用方式的入渗深度均超过 150 cm。

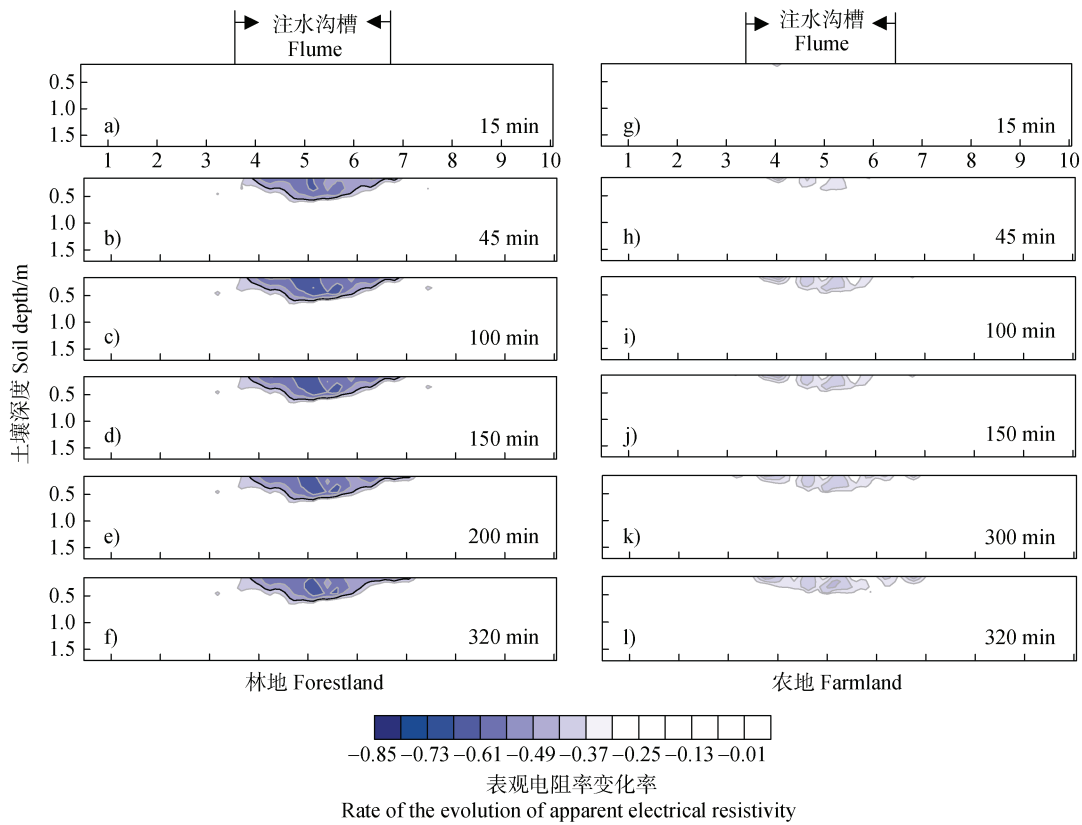


图 4 第一阶段（注水 100 L）土壤剖面表观电阻率变化率动态

Fig. 4 Dynamics of the change of apparent electrical resistivity across soil profiles at the first injection stage (100 L)

第二阶段的入渗过程伴随明显的优先流现象是区别于第一阶段的重要特征。林地表观电阻率变化图可以分为三个区域（图 5）。第一个区域是位于注水槽正下方且与表层土壤连接的区域（A 区域），表观电阻率变化从土壤表层开始呈层状向下逐步推移并伴随横向扩张，土壤水分在该区域以基质流为主，无明显优先流，该区域在注水 150 min 后达到最大深度，约为 80 cm。在随后继续注水的情况下，该区域的入渗深度不再发生变化，但是区域面积在水平方向有所扩大，这说明 80 cm 深度存在难透土层，这也与初始电阻率值在该深度突然增大相一致。第二个区域是位于注水槽左下方区域（B 区域），表观

电阻率在注水开始第 30 分钟出现变化，出现深度在 50 cm 处（图 5c），随着注水的继续，B 区域有所扩大，直至第 200 分钟注水结束，但是在注水结束后，表观电阻率并未出现回升，甚至表观电阻率降低的范围和程度还有所加强，这说明在注水结束后仍有少量水分继续补给 B 区域。而 B 区域在第 30 分钟出现，直至第 60 分钟时，才与 A 区域连接，并且连接程度逐步扩大，这说明，在 2D 尺度上，A 区域不是 B 区域水分的补给源。第三个区域是位于注水槽正下方区域（C 区域），该区域出现时间较 B 区域晚 30 min，面积也较 B 区域小，并且直至注水开始后的第 320 分钟也未与 A 区域相连。B 和 C 区

域是明显的优先流通道，其形成过程不是从上而下垂直均匀的运动，而很可能是通过林地发达的植物根系或动物洞穴从侧面汇流而来，因为该研究中 ERT 获得的是二维图像，无法观测到三维尺度上完整的优先流路径。

农地在第二阶段注水过程中表现出与林地不同的优先流发育特征（图 5）。农地优先流以垂直方向发育的“指流”为主要形式，比如，在前 45 分钟电阻率的变化主要集中在 0~60 cm，在第 45 分钟左侧出现一处凸起，在第 60 分钟凸起变大，在第 100 分钟，水分快速运动至 150 cm 以下，通道的宽度约 50 cm。此外，相对于林地，农地在第二次注水过程中水分的

横向运动也更加明显，这说明农地表层已经接近饱和，多余的水分在水平和垂直两个方向寻找能量更低的去处。层状结构是自然界中常见的一种土体结构，农地约在 60 cm 处，林地在 80 cm 处出现分层，由透水性相对较好的粉砂质黏壤土转为透水性较弱的黏土，在这种情况下，林地的水分通过树木的根系等优先通道运动至更深的位置，而农地由于缺乏大孔隙通道，会在某深度处出现比较明显的水分蓄积现象，直至水分蓄积到一定程度，在重力作用下，快速的向下运动。但是，林地的大孔隙在被水分占满后，土壤的入渗率表现出快速下降的现象，这也是林地第二阶段累计入渗量小于农地的原因。

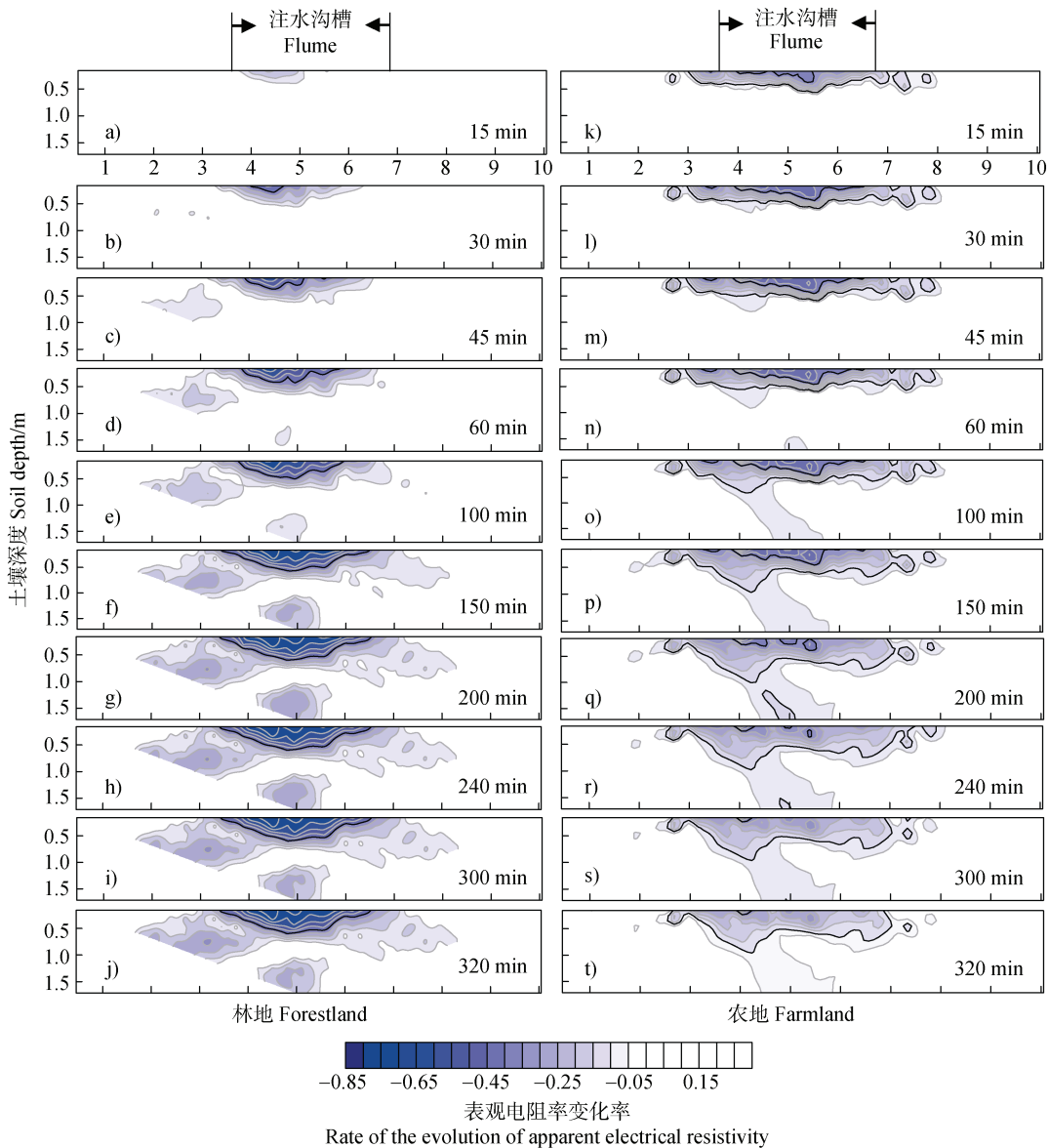


图 5 第二阶段（注水 200 min）土壤剖面表观电阻率变化率动态

Fig. 5 Dynamics of the change of apparent electrical resistivity across soil profiles at the second injection stage (200 min)

2.3 表观电阻率与土壤水分的关系

林地注水前后表观电阻率的变化和实测的土壤

质量含水量的变化基本吻合(图6)。在深度上,注水第一阶段后(100 L),林地的表观电阻率变化和

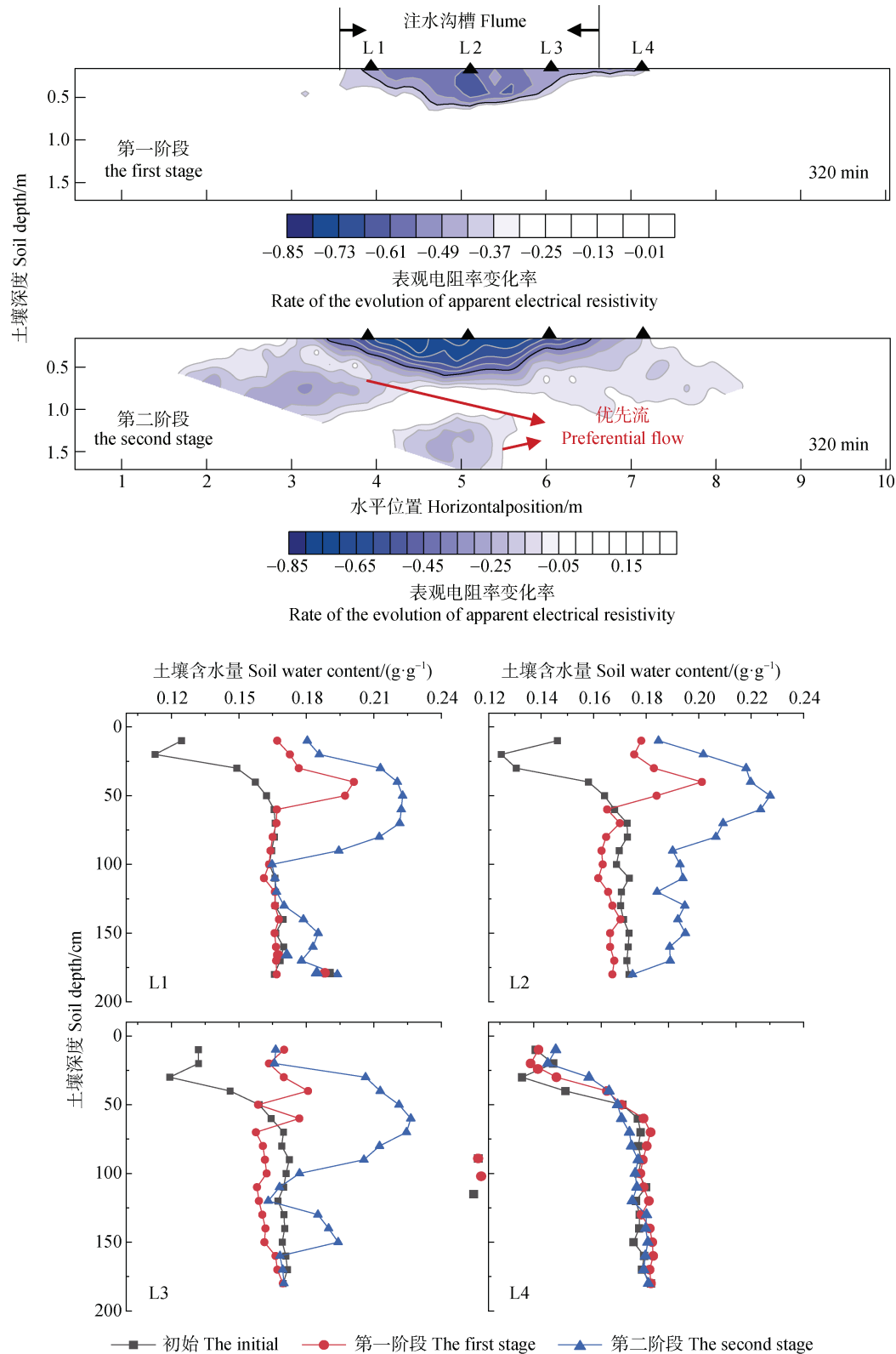


图6 林地不同阶段表观电阻率和土壤水分的剖面分布

Fig. 6 Profile distribution of apparent electrical resistivity and soil moisture at different stages for forest land

土壤含水量发生变化的最大深度均在 60 cm 左右，在水平位置上，1、2 和 3 号观测点位于注水沟槽范围内，土壤质量含水量变化明显，而 4 号点位于注水槽范围外，含水量基本没有变化，这与对应位置的表观电阻率变化完全吻合。在注水第二阶段（200 min）的过程中，表观电阻率的变化深度增加至 150 cm 以下，这也与 1、2 和 3 号点位的土壤质量含水量在 0~150 cm 范围均有明显变化相一致。农地的情况和林地类似，就不再赘述。

进一步将实测的表观电阻率变化值和对应位置的土壤体积含水量进行拟合分析，发现两者之间呈极显著的正相关，林地的决定系数 (R^2) 为 0.72，农地为 0.53 (表 1)。两者的相关性虽然达到了可接受的范围，但是相关性不是太强，这可能有两个方面的原因：一方面，为了保证不影响第二阶段注水实验，打钻取土点选择了距离电极 10 cm 的位置，没有与测线剖面完全重合，特别是在有优先流发生的情况下，空间位置上的轻微不一致可能导致电阻率和土壤水分信息的较大差别，这会降低水分和电阻率的相关性；另一方面，目前缺乏专门针对黏重土壤用于拟合土壤电阻率和土壤水分的经验模型，文献资料中通常选择的 Archie 经验公式^[37-41]主要适用于砂质土壤，而在近地表和黏粒含量高的土层中，表观电阻率和含水量的关系未必很好地遵循该公式，这也是目前 ERT 技术在黄土高原地区应用效果较好的原因之一。此外，从图 1 可以看出，除表层土壤外，林地和农地的初始含水量均较高，在土壤高初始含水量的背景下，电阻率对含水量变化的敏感度降低除了与土壤含水量、液相含盐量和土壤矿物质种类等因素有关外，土壤本身的物理化学性质也会对测定的表观电阻率产生影响，比如 pH、土壤有机质等，特别是土壤初始含水量较高，土壤酸化严重的红壤地区，情况更为复杂。由于红壤在垂直

方向上的较强异质性，再加上含水量背景值高和土壤黏重等上述问题，在红壤以及具有类似土壤和水文条件的地区利用 ERT 技术开展土壤水文相关的研究，尤其需要考虑分辨率的问题，选择适宜的电极布设间距以及布设方式对于反演效果尤为重要。因此，在建立表观电阻率和土壤含水量之间的关系时，需要根据研究区的特点考虑增加必要的土壤参数来提高预测精度^[16]，根据研究目标选择更加适宜的电极布点方式。目前常用的电极布置方式有 Wenner 方法、Dipole-dipole 方法和 Schlumberger 方法，Wenner 方法兼顾二维测量剖面中垂直和水平两个方向数据的采集，且具有较高的垂直分辨率和信噪比，在目前有关土壤水分空间监测的研究中应用较多^[42-43]；Schlumberger 方法均衡了垂直和水平方向上的分辨率，Dipole-dipole 方法对水平方向变化最敏感，在该方向上分辨率较高^[26, 44-47]；除了目前应用较多的 2D 扫描，3D 和伪 3D 技术也逐渐得到了应用^[48-50]，3D 技术在研究优先流方面具有优势。电极间距的选择影响测定电阻率的分辨率，电极的合理间距需要根据研究目的而定，并不是电极布设的越密集越好，在进行土壤剖面构型研究中通常会将电极调整为大间距来获得更大尺度上的信息，而在进行土壤水分运动方面的研究时往往需要调整为小间距，比如 10~150 cm，来获得更高的空间分辨率数据和缩短扫描所需时间以提高数据的时间分辨率^[50]。在高含水量背景下，如果自然降水无法获得理想的结果，采用人为注水的方式可以提高观测效果，在土壤初始含水量较低的旱季更适合开展类似试验。此外，开展非线性布点，实现 3D 动态监测，对于红壤及类似有优先流发育的地区具有重要的应用前景。

表 1 表观电阻率和土壤体积含水量的回归模型

Table 1 Regression models between apparent electrical resistivity using ERT and measured volumetric soil water content

土地利用 Land use	数据对数 The number of data	回归模型 Regression models	R^2	RMSE
林地 Forest land	38	$y=0.52x^{-0.14}$	0.72	0.07
农地 Farmland	41	$y=0.53e^{-0.002x}$	0.53	0.06

3 结 论

由于监测难度大,包气带土壤水分入渗过程,特别是优先流发育过程,是目前土壤水文学研究的难点。本研究在红壤区利用 ERT 技术再现了两种典型土地利用类型下水分入渗的动态过程。研究发现,ERT 技术能够在土壤黏重的红壤地区将水分在包气带中的运动过程可视化,ERT 测定的表观电阻率的变化率与实测的土壤水分之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。通过表观电阻率的变化,本研究成功在红壤区捕捉了优先流在农地和林地土壤中的发生和发育过程。优先流的发育程度和过程与土地利用类型密切相关,林地在开始阶段入渗速率显著高于农地,但是随着入渗时间的推移,林地入渗速率的下降较农地更为明显。与农地相比,动植物活动强烈的林地优先流更为发育,且多通过根系等大孔隙快速向下运动,而农地的土壤水分多以“指流”的形式间断性向下运动。

参考文献 (References)

- [1] Scheliga B, Tetzlaff D, Nuetzmann G, et al. Groundwater dynamics at the hillslope-riparian interface in a year with extreme winter rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 509—528.
- [2] Green J K, Seneviratne S I, Berg A M, et al. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake[J]. *Nature*, 2019, 565 (7740): 476—479.
- [3] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Spatial variability of soil water for the entire profile in the critical zone of the Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28 (4): 515—522. [乔江波, 朱元骏, 贾小旭, 等. 黄土高原关键带全剖面土壤水分空间变异性[J]. *水科学进展*, 2017, 28 (4): 515—522.]
- [4] Pachepsky Y, Radcliffe D E, Selim H M E. *Scaling methods in soil physics*[M]. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2003
- [5] Vereecken H, Kamai T, Harter T, et al. Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture: A stochastic unsaturated flow perspective[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34 (22): L22402.
- [6] Cao D N, Di H Y, Guo Z L, et al. Characteristics and influencing factors of soil preferential flow in different succession gradients[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28 (2): 99—107. [曹丹妮, 邸涵悦, 郭忠录, 等. 演替梯度下土壤优先流特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2021, 28 (2): 99—107.]
- [7] Gao H B, Shao M A. Effect of temperature on soil moisture parameters[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22 (4): 484—494. [高红贝, 邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. *水科学进展*, 2011, 22 (4): 484—494.]
- [8] Liu Z P, Ogunmokin F A, Wallach R. Does biochar affect soil wettability and flow pattern?[J]. *Geoderma*, 2022, 417: 115826.
- [9] Esser H G, Carminati A, Vontobel P, et al. Neutron radiography and tomography of water distribution in the root zone[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173 (5): 757—764.
- [10] Wang P P, Su X M, Zhou Z C, et al. Characteristics and influencing factors of soil preferential flow on slope of typical vegetation communities in loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35 (5): 16—23. [王佩佩, 苏雪萌, 周正朝, 等. 黄土丘陵区典型植被群落坡面土壤优先流特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2021, 35 (5): 16—23.]
- [11] Wang K, Zhang R D, Wang F Q, et al. Characterizing scale-dependent heterogeneity of soil water movement through dyeing infiltration experiments[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18 (2): 158—163. [王康, 张仁铎, 王富庆, 等. 土壤水分运动空间变异性尺度效应的染色示踪入渗试验研究[J]. *水科学进展*, 2007, 18 (2): 158—163.]
- [12] Gackiewicz B, Lamorski K, Kochiiuru M, et al. Hybrid modelling of saturated water flow in percolating and non-percolating macroporous soil media[J]. *Geoderma*, 2022, 406: 115467.
- [13] Liu S J, Chen X B, Liu J J, et al. Spatial distribution of preferential flow in sugarcane field under radar detection and analysis in Guangxi. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42 (5): 1273—1280. [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. *生态学杂志*, 2023, 42 (5): 1273—1280.]
- [14] 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. [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.]
- [15] Sheng F, Wen D, Xiong Y W, et al. *In-situ* monitoring of preferential soil water flow with electrical resistivity tomography technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (8): 117—124. [盛丰, 文鼎, 熊祎玮, 等. 基于电阻率层析成像技术的农田土壤优先流原位动态监测[J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (8): 117—124.]
- [16] Zhang Z B, Lin L, Wang Y, et al. Temporal change in soil macropores measured using tension infiltrometer under different land uses and slope positions in subtropical

- China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 854—863.
- [17] Pires L F, Roque W L, Rosa J A, et al. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 197—206.
- [18] Li F, Ou Y C. Visualization of soil layers based on resistivity imaging technology[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(6): 122—125. [李富, 欧元超. 基于电阻率成像技术的土壤层次可视化表达[J]. *西部探矿工程*, 2021, 33(6): 122—125.]
- [19] Zhang P S, Ou Y C, Wang W, et al. Experimental study on the accurate division of soil layers based on resistivity imaging [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 352—357. [张平松, 欧元超, 汪武, 等. 基于电阻率成像技术的土层精细划分[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 352—357.]
- [20] Xie Y G, Li X, Zhang F B, et al. Detection of soil thickness in forest land based on electrical resistivity tomographic scanning technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 212—216. [解迎春, 李霞, 张凤宝, 等. 基于电阻率断层扫描技术探测林地土层厚度[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 212—216.]
- [21] Ma D H, Zhang J B, Wu Z D, et al. Application and progress of resistivity imaging method in soil hydrology research[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 439—447. [马帝豪, 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.]
- [22] Lin Q, Xu S H. Study of the water infiltration processes using ERT and TDR in layered soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(2): 390—398. [林青, 徐绍辉. ERT 与 TDR 联合反演层状土壤水分运动过程[J]. *土壤学报*, 2023, 60(2): 390—398.]
- [23] Hu Q, Li X Y, Shi H B, et al. Soil preferential flow characteristics of agricultural film residual farmland based on dye tracing method[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 142—149. [胡琦, 李仙岳, 史海滨, 等. 基于染色示踪的农膜残留农田土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 142—149.]
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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: 125132.
- [27] Vargas J A, Gil P M, Meza F J, et al. Soil electrical resistivity monitoring as a practical tool for evaluating irrigation systems efficiency at the orchard scale: A case study in a vineyard in Central Chile[J]. *Irrigation Science*, 2021, 39(1): 123—143.
- [28] 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.]
- [29] Tao M, Chen X, Cheng Q B, et al. Evaluating the joint use of GPR and ERT on mapping shallow subsurface features of Karst critical zone in southwest China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2022, 21(1): e20172.
- [30] Huang G Q, Zhao Q G. Initial exploration of red soil ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5173—5181. [黄国勤, 赵其国. 红壤生态学[J]. *生态学报*, 2014, 34(18): 5173—5181.]
- [31] Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7615—7622. [赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7615—7622.]
- [32] Panda K P, Sharma S P, Jha M K. Mapping lithological variations in a river basin of West Bengal, India using electrical resistivity survey: Implications for artificial recharge[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(17): 626.
- [33] Brindt N, Rahav M, Wallach R. ERT and salinity—A method to determine whether ERT-detected preferential pathways in brackish water-irrigated soils are water-induced or an artifact of salinity[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 35—45.
- [34] Song Y L, Liu S X, Ma Y, et al. Determination of key factors of soil stratification—Taking Xinxiang experimental farmland as an example[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(11): 2125—2134. [宋亚路, 刘苏峡, 马英, 等. 土壤分层关键因子确定——以新乡实验农地为例[J]. *地理研究*, 2014, 33(11): 2125—2134.]
- [35] Mao X J, Duan W, Yang L Y, et al. Proof of universality of an important characteristic of resistivity influence coefficient of layered uniform structure[J]. *Journal of Seismological Research*, 2021, 44(1): 129—132. [毛先进, 段炜, 杨玲英, 等. 分层均匀结构地电阻率影响系数一个重要特性普适性的证明[J]. *地震研究*, 2021,

- 44 (1): 129—132.]
- [36] Wang Y J, Gao L, Huang S S, et al. Combined effects of rainfall types and antecedent soil moisture on runoff generation at a hillslope of red soil region[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73 (4): e13274.
- [37] Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83 (2): 173—193.
- [38] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. *Transactions of the AIME*, 1942, 146 (1): 54—62.
- [39] Xu X Q, Cai B, Qu X, et al. Review of soil resistivity model[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37 (5): 2205—2217. [徐兴倩, 蔡波, 屈新, 等. 土体电阻率模型研究现状综述[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37 (5): 2205—2217.]
- [40] Schwartz B F, Schreiber M E, Yan T T. Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 362 (3/4): 234—246.
- [41] Michot D, Benderitter Y, Dorigny A, 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): 1138.
- [42] Zhao K Y, Xu Q, Liu F Z, et al. Field monitoring of preferential infiltration in loess using time-lapse electrical resistivity tomography[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125278.
- [43] Zuo F L, Li X Y, Yang X F, et al. Linking root traits and soil moisture redistribution under *Achnatherum splendens* using electrical resistivity tomography and dye experiments[J]. *Geoderma*, 2021, 386: 114908.
- [44] Guo L, Mount G J, Hudson S, 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.
- [45] Leopold M, Gupanis-Broadway C, Baker A, et al. Time lapse electric resistivity tomography to portray infiltration and hydrologic flow paths from surface to cave[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125810.
- [46] de Jong S M, Heijnen R A, Nijland W, et al. Monitoring soil moisture dynamics using electrical resistivity tomography under homogeneous field conditions[J]. *Sensors: Basel, Switzerland*, 2020, 20 (18): 5313.
- [47] Feng R, Li Z M, Li Z W, et al. Resistivity tomography [J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 20 (1): 13—30. [冯锐, 李智明, 李志武, 等. 电阻率层析成像技术[J]. *中国地震*, 2004, 20 (1): 13—30.]
- [48] Nielson T, Bradford J, Pierce J, et al. Soil structure and soil moisture dynamics inferred from time-lapse electrical resistivity tomography[J]. *Catena*, 2021, 207: 105553.
- [49] 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.
- [50] Rupesh T P, Tiwari P, Sharma S P. High-resolution quasi-3D electric resistivity tomography for deciphering groundwater potential zones in lateritic terrain[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30 (5): 3339—3353.

(责任编辑: 檀满枝)