

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.01.004

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. 土壤, 2022, 54(1): 24–31.

地球物理方法在土壤水文过程研究中的应用与展望^①

刘成功^{1,2}, 贾小旭^{1,2*}, 邵明安^{1,2}

(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: 土壤水分的多尺度高效监测是土壤水文过程研究的基础。近些年以电阻率成像法、探地雷达法和电磁感应法为代表的地球物理方法, 凭借多尺度适用性和微扰动原位监测的优势被广泛用于土壤水文学研究。本文在介绍以上 3 种代表性地球物理技术工作原理的基础上, 初步总结了地球物理方法应用于水文学研究中的进展, 讨论了地球物理手段未来应用于土壤水文学研究中的机遇与挑战, 以期能够增进有关学者对地球物理手段的了解和认识, 更好地将地球物理手段应用于土壤水文学研究中。

关键词: 土壤水分; 电阻率成像法; 探地雷达法; 电磁感应法; 根系吸水

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Application and Prospect of Geophysical Methods in Study of Soil Hydrological Processes

LIU Chenggong^{1,2}, JIA Xiaoxu^{1,2*}, SHAO Ming'an^{1,2}

(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: Soil hydrological process is one of the most important parts of the water cycle. An accurate and effective measurement of soil moisture is the basis of the study of soil hydrological process. Compared with the traditional soil moisture monitoring methods (such as time domain reflectometry, cosmic-ray neutron sensing, remote sensing, etc.), the geophysical methods have the advantages of multi-scale and high precision monitoring without disturbing the soil. Therefore, the popularization of geophysical methods is of great significance to broaden the understanding of soil hydrological process and water cycle. Based on the introduction of the essential principles and characteristics of three commonly used geophysical methods (electrical resistivity tomography, ground penetrating radar, electromagnetic induction), this paper summarized the conversion methods between geophysical parameters and hydrological elements. In addition, this paper focused on enumerating the methods and related cases applied in the study of hydrological processes such as the monitoring of spatial distribution of soil moisture, water infiltration and redistribution and root water uptake. Then, in the last section, this paper discussed the opportunities and challenges faced by the application of geophysical methods in the research of soil hydrology in the future and pointed that the researchers should: 1) continuously clarify the relationship between geophysical elements and soil moisture characteristics to improve the accuracy of inversion; 2) comprehensively use a variety of geophysical methods for cross inversion; 3) couple geophysical models with hydrological process models to provide more reliable parameter estimation; 4) expand the application of geophysical methods in hydrological and ecosystem responses and biogeochemical cycles and other fields.

Key words: Soil moisture; Electrical resistivity tomography; Ground penetrating radar; Electromagnetic induction; Root water uptake

土壤水文过程主要包括水分进出土体以及在土壤内的再分布过程, 是陆地水循环过程中的重要组成部分, 在地球关键带物质循环和能量流动中起重要作用, 是旱区植被健康生长及生态系统可持续性的关

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42022048)资助。

* 通讯作者(jiaxx@igsrr.ac.cn)

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

键。水分是水文过程的主体,对土壤水分状况的准确高效监测是土壤水文过程研究的基础。传统的土壤水分监测方法可分为以烘干法和传感器法为代表的点尺度方法、以宇宙射线土壤水分观测系统为代表的中尺度方法^[1]和以遥感反演为代表的大尺度方法^[2]。以上研究方法的广泛应用推动了土壤水文学的发展,但也存在一些不足之处。例如,点尺度方法虽然准确,但仅能测定样点附近土壤水分状况且安装过程会对土壤结构造成扰动,大中尺度方法具有监测范围大且高效无扰动的优点,但其仅能获得土壤表层水分状况且易受外部环境的影响^[2]。

近几十年来,随着地球物理技术的不断发展和仪器仪表电子技术的不断进步,以电阻率成像法(electrical resistivity tomography, ERT)、探地雷达法(ground penetrating radar, GPR)和电磁感应法(electromagnetic induction, EMI)为代表的地球物理技术凭借可实现多尺度、高精度和微扰动监测的优势逐步应用于水文学研究中^[3-4]。在 Web of Science 核心合集中检索到 1990—2020 年利用以上 3 种地球物理方法进行土壤水文学研究的相关文献共计 1 998 篇,相关文献发表年份统计结果如图 1 所示。20 世纪 90 年代,尤其是进入 21 世纪之后,相关文献发表数量呈逐年增加趋势,这主要归因于地球物理探测理论和设备制造技术的进步以及“水文地球物理”概念的提出和普及,这也代表着地球物理方法应用于土壤水文学研究中的意义和价值得到认可。

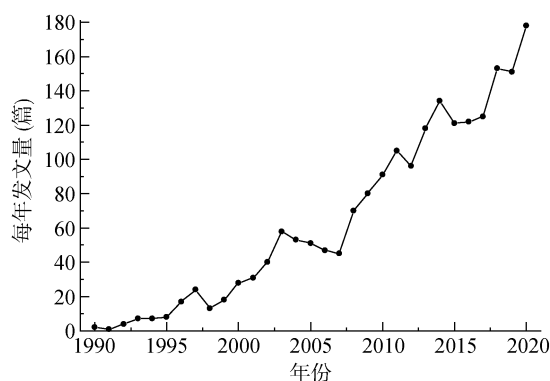


图 1 应用典型地球物理手段的土壤水文学研究发文数量图

Fig. 1 Number of publications on soil hydrology research using typical geophysical methods

本文将在介绍常用的地球物理方法及其原理的基础上,对近年来地球物理方法应用案例进行总结和梳理,并对未来地球物理方法应用于土壤水文学研究中所面临的问题和挑战进行讨论,以期对相关研究人员提供参考。

1 地球物理方法简介

1.1 电阻率成像法

电阻率成像法(ERT)以岩土介质导电性差异为基础,通过在地表或者钻井布设电极,人工建立和观测介质内稳定电流场分布情况,从而在一、二或三维上对从点尺度到流域尺度的土壤电阻率进行检测^[5]。其原理如图 2A 所示,每个工作单元包含 4 个工作电极,其中两个为电流电极(A, B),两个为测量电极(M, N)。工作过程中电流电极通电,在下部介质中形成电流场,测量电极则测量此时两电极之间的电位差并储存,其测点电阻率 ρ 可通过如下公式计算:

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

式中: ΔV 为 M、N 两电极电位差, I 为 A、B 两电极间电流, K 为与电极间距相关的距离矫正系数。电极排列方式会影响 ERT 的分辨率,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 5 种,不同排列方式所测得数据具有不同信噪比和分辨率特征,使用中可参照 Loke^[6]的研究进行选择。

ERT 直接测得的为表观电阻率(apparent resistivity),需通过对地下均匀电阻率分布模型进行迭代修正,以使模型响应值与观测数据值之间的差异最小,响应值为真实土壤电阻率。该反演方法主要来源于 Loke 和 Barker^[7]及 Loke 和 Dahlin^[8]的一系列研究成果。温度对电阻率影响较大,应用中需将其转化为标准温度(25℃)下的电阻率($\rho_{25^\circ\text{C}}$),应用较为广泛的模型为:

$$\rho_{25^\circ\text{C}} = \rho_T [1 + \delta(T - 25^\circ\text{C})] \quad (2)$$

式中: ρ_T 为测试温度 T 下的土壤电阻率; δ 为温度补偿系数,一般为 0.025^[9-10]。

1.2 探地雷达法

探地雷达法(GPR)以电磁波传播过程中遇到介电常数存在差异的界面会发生反射和散射为基础,通过探地雷达接收散射回波信号,根据回波时间、振幅和形状对介质的性质、结构和形状等因素进行推测反演下垫面介电常数特性^[11]。探地雷达包括发射天线和接收天线两部分,其工作原理如图 2B 所示。工作时,发射天线发射一定频率的电磁波,电磁波向下传递,遇到不同介电常数的界面会产生不同的反射波,接收天线接收反射波信号并计算反射波波速进而得到介质介电常数及其对应深度信息。介电常数计算方法如下:

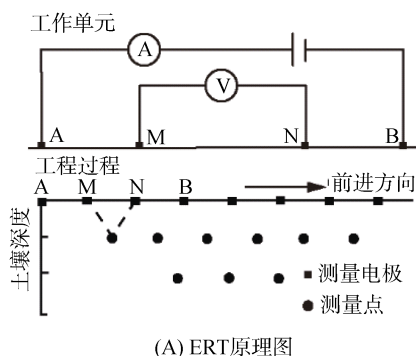
$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v} \right)^2 \quad (3)$$

式中: ε 为介质的介电常数, v 为电磁波在土壤中的波速, c 为真空中电磁波的传播速度(0.3 m/ns)。按照反射波传播类型, 目前用于土壤水分监测的方法可以分为反射波法、地波法、钻孔雷达法和反射系数法。

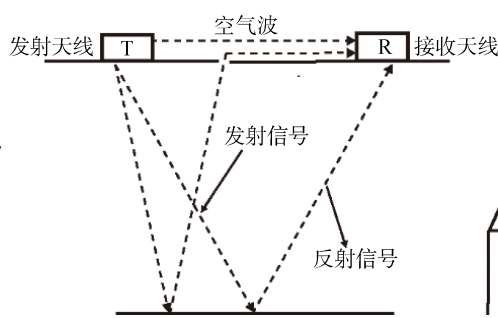
1.3 电磁感应法

电磁感应法(EMI)通过测量土壤中感应电流产生的磁场来对土壤介质的电学性质差异进行监测。其工作原理如图 2C 所示, 固定频率的交流电穿过发射线圈产生初级磁场(H_p), 变化的初级磁场在导电的地下感应产生二次磁场(H_s), 初级磁场和二次磁场被接收线圈接收^[12], 土壤表观电导率可由下式计算:

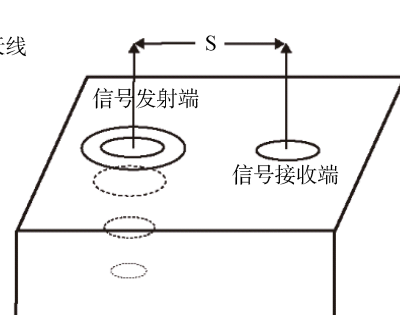
$$EC_a = 4 \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \omega \mu_0 S^2 \quad (4)$$



(A) ERT原理图



(B) GPR原理图



(C) EMI原理图

图 2 三种地球物理方法原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of common geophysical methods

1.4 不同地球物理方法的优势

ERT、GPR 和 EMI 三种方法理论上均可实现对点尺度到流域尺度地球物理特性的动态监测, 但由于监测设备原理不同而各有优势, 在使用中需综合考虑监测需求合理选择相应技术手段。

ERT 和 GPR 监测深度分别与一次布线首尾电极间距和雷达发射频率有关, 可进行较为灵活的调整, 从而实现从点尺度到坡面尺度厘米到十米深度范围的多维监测, 与 EMI 相比, 垂直分辨率较高。EMI 监测设备有效监测深度较浅且为深度范围内加权平均值, 如目前应用较为广泛的 EM38 和 EM31 有效监测深度分别为 0.75 ~ 1.5 m 和 3.0 ~ 6.0 m。ERT 监测需布设电极且测量过程耗时较多, 这一定程度上限制了该方法应用于较大尺度(如流域尺度)和水文过程中间状态的监测。GPR 和 EMI 不需与地面直接接触, 可搭载于探测车或飞机等快速移动设备上, 因而在大范围监测中更具优势。

式中: EC_a 为土壤表观电导率(mS/m); H_s 、 H_p 分别为次级磁场和初级磁场; $\omega = 2\pi f$, f 为发射频率(Hz); S 为发射端子与接收端子之间距(m); μ_0 为空间磁场传导系数。通过该方法所测得的土壤表观电阻率同样需进行温度校正^[13]。

EMI 测量深度及灵敏度取决于信号接收和发射端口的距离、方向以及测量频率。应用较为广泛的电磁感应设备(例如 EM31、EM38)大多是通过单一发射和接收端口对土壤表观电阻率进行测量的, 有效监测深度浅且测量结果为一定深度范围内土壤表观电阻率的加权平均值, 垂直分辨率低^[14]。近年来, 研究者通过搭载不同线圈间距和线圈方向的接收器^[15]或建立相关反演模型^[16]等方式来提高其结果垂向分辨率。

2 地球物理方法在土壤水文过程研究中的应用

ERT、GPR 和 EMI 等地球物理技术所监测的土壤电阻率、土壤介电常数和土壤电导率等土壤物理特性与土壤水分状况具有密切关系, 因而在土壤水分空间分布、水分入渗及再分布以及根系吸水等过程的研究中得到广泛应用。

2.1 土壤水分时空分布

基于地球物理方法获取的与土壤水分状况密切相关的地球物理参数大多受多种环境因子(如含水率、温度、孔隙度、质地等)影响^[14]。因此, 将地球物理参数(土壤电阻率、介电常数、表观电阻率)与土壤水文指标建立可靠的转换关系是利用地球物理方法进行土壤水文过程研究的重要步骤。

Archie^[16]利用砂质土体样品进行控制试验, 得到土壤含水率与土壤电阻率之间的经验关系式:

$$\rho = \phi^{-m} S^{-n} \rho_w, \quad \text{式中: } \phi \text{ 为土壤孔隙度; } S \text{ 为代表}$$

土壤水分状况的土壤水饱和度； m 、 n 分别为反映土壤颗粒间的胶结程度和土壤孔隙尺寸特性的常数； ρ_w 为土壤溶液电阻率。该经验模型为利用 ERT 进行多尺度土壤水分监测提供了理论基础，但由于其所需参数较多，增大了野外试验的难度^[17]。为解决这一问题，部分研究者利用同步测定特定位置土壤含水率^[10]或利用土壤测试盒^[18]来直接建立土壤电阻率与土壤含水率的线性^[19]、指数^[20]或者幂函数^[21-22]方程来实现土壤电阻率与土壤含水率之间的转换。例如，高君亮等^[22]利用 ERT 测定人工梭梭林不同位置土壤剖面(测线长 11.5 m，最大测深 2 m)电阻率，结果显示剖面土壤电阻率与土壤含水率具有极显著的幂函数关系($y=81.09x^{-0.65}$ ， $R^2=0.72$ ， $P<0.01$)，证明 ERT 应用于沙地土壤剖面水分状况监测具有可行性。近来，Sun 等^[10]利用 227.5 m 测线在更大尺度上获取了不同土地利用类型下土壤剖面电阻率数据(最大测深为 75 m)，并建立了不同条件下土壤电阻率和土壤含水率的回归模型，为 ERT 在多尺度土壤水分监测中的应用提供了重要参考。

在 20℃ 下，水的介电常数(80)远高于土、砂和石头等材料(3~30)，使利用 GPR 进行土壤水文过程研究成为可能。Topp 等^[23]于 1980 年利用时域反射仪(time-domain reflectometer, TDR)测量了不同含水率和质地的矿质土壤样品的介电常数与土壤含水率，并建立了土壤含水率(θ)与介电常数(ϵ)的多项式经验模型(Topp 模型)： $\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3$ 。随后，Roth 等^[24]于 1990 年提出了考虑土壤内不同状态组分介电常数差异的混合介质模型(Roth 模型)，而次年 Herkelrath 等^[25]将 Roth 混合介质模型简化为仅包含修正参数 a 、 b 以及可通过 TDR 测量的介电常数 ϵ 的 Herkelrath 模型： $\theta = a\sqrt{\epsilon} - b$ 。以上模型提出后得到了众多研究者的验证和改进。Robinson 等^[26]研究发现在高频域(500 ~ 1 000 MHz)轻质地土壤中，Topp 模型准确性更高；而 Anbazhagan 等^[27]在 4 种不同质地土壤上对比不同反演模型后发现，Roth 模型对除砂土以外的其他土壤均可较为准确地估计土壤含水率，但在低频域(<350 MHz)或者黏粒含量高的土壤中，由于土壤散射作用较强，需进行参数的修正^[28]。Grote 等^[29]利用 900 和 450 MHz 探地雷达和 Herkelrath 模型对葡萄园表层土壤含水率进行了估算，其结果与烘干法和时域反射仪法所测得的土壤含水率相比均方根误差在 0.01 量级。此外，针对不同的需求，近些年有一些新的数据处理方法被开发和应用。例如，Schmelzbach 等^[30]提出了

一种基于反射振幅的反演方法，利用该方法对两个在浅沉积含水层上采集的二维 100 MHz 探地雷达剖面数据进行处理，得到了浅饱和带(3~7 m 深)分米尺度的土壤含水率空间分布图像。

EMI 测得的表观电阻率是一定深度范围内土壤水分、质地和溶质浓度的综合反映，因此，研究中大多直接通过将土壤表观电阻率与所测得的一定深度内的土壤水分状况建立关系模型来实现两者之间的转换^[31]。例如，Misra 等^[32]对棉田田间尺度不同季节土壤表观电阻率进行监测并建立表观电阻率-含水率关系，发现各季节 EC_a 值随特定深度内累积土壤水分值的增加呈非线性增长，且具有较高的可信度，浅层和深层土壤水分随时间变化规律基本相同。

总体而言，ERT、GPR 以及 EMI 三种地球物理方法监测所得的地球物理参数受多种因素影响，但已有研究已经探索出较为可靠的地球物理参数与土壤含水率之间的转化模型，并不断得到验证和改进，为地球物理方法在多尺度土壤水分空间分布状况的监测奠定了基础。

2.2 水分入渗与再分布过程

入渗是水分进入土壤的重要过程，是降水、地表水、土壤水和地下水相互转化的重要环节，对入渗过程的量化及其影响因素的研究对增加土壤入渗、减少水土流失等具有重要意义。传统水分入渗研究大多采用侵入式的监测方法^[33]或采用示踪剂染色法^[34]在较小尺度上对相关问题进行研究，该方法可以实现入渗结果的可视化但无法对入渗过程进行描述且费时费力，而地球物理方法的应用可实现相关过程多空间和时间尺度的过程可视化^[35]。

地球物理方法进行水分入渗与再分布研究的基本方法为利用所建立的土壤物理特性与土壤含水率转换方程，将在不同阶段水文过程测定的土壤物理参数转换为土壤含水率即可实现土壤水文过程的动态监测。例如，Dietrich 等^[36]利用 11 m ERT 测线对 192 h 内土壤剖面电阻率进行多次监测，利用室内试验得到的经验公式将测得的土壤电阻率转换为土壤含水率，发现土壤钙积层的存在阻碍土壤水分的垂直入渗，促进了低入渗区域上部的横向基质流。Yu 等^[37]则利用钻孔和地表 GPR 对 21 m²不同用水处理的土壤深层和表层位置介电常数进行动态监测，并利用 Roth 模型进行土壤水分反演计算，实现了土壤水分时空演变的可视化，土壤含水率数值上与时域反射仪测量结果具有较好的一致性，而且由于 GPR 测量的空间代表性较高，利用 GPR 数据计算所得土壤储水

量变化更接近入渗试验耗水量。

如前文所述,地球物理特性受诸多因素的影响,建立适用于较大范围内的土壤物理特性与土壤含水率的转换模型存在一定困难,但短时间内同一位置土壤质地、孔隙度等因素相对于土壤水分状况更稳定,即可认为土壤水分是引起土壤物理特性变化的唯一因素,因此可采用地球物理特性的变化作为土壤水分变化的响应,从而对水文过程进行定性和定量描述^[4]。例如, Carey 等^[18]利用 ERT 对模拟不同降水强度区域的土壤电阻率进行监测,并根据室内土壤测试盒测定结果将电阻率变化大于 10% 的位置确定为入渗位置,由此可根据电阻率空间变化得到水分入渗范围。此外,该研究还利用 GPR 测得的地下结构进一步解释了入渗路径产生的原因。Peskett 等^[38]利用 ERT 进行坡面尺度的监测,根据电阻率变化情况判断该位置土壤水分变化,发现坡中林带对于加速降水对土壤水的补充作用有限。而 Robinson 等^[39]利用 EMI 对面积约为 4 hm² 的流域土壤表观电阻率进行监测,并用湿润与干燥土壤表观电阻率之差对降水事件以及不同季节间土壤润湿模式和湿度动态变化进行了分析,证实了 EMI 在流域尺度土壤水分变化监测中的可行性。最近, Zhao 等^[40]对定水头入渗剖面过程进行 10 次电阻率监测,将所得电阻率相对变化量与剖面土壤水分变化进行对比,发现黄土高原水分入渗在前期主要为单一优先流和基质流过程,但随后优先流在土壤深层转化为基质流并继续向深层入渗,而此时表层基质流湿润锋基本停滞在较浅位置。该研究结果较为完整地反映了土壤水分的入渗过程,为黄土区土壤水分入渗局限于浅层提供了新的证据,并强调了近地表优先流路径对于黄土层较深位置处水分补给的作用。

优先流是指在多种环境条件下发生非平衡流动的过程,是一种常见的水分运动形式,具有大孔隙流、管流、指流等形式,其成因和分布特征是土壤水文过程研究的重要内容之一。Kung 等^[41]于 1991 年首次利用 GPR 观测因深层土壤不连续引起的优先流现象,证明了 GPR 在优先流研究中的可行性。Allroggen 等^[42]利用 GPR 监测模拟降水区域 3 个土壤剖面介电常数状况,获得水分入渗引起的剖面土壤水分变化,进一步证明了时域 GPR 可以无创探测水分流动路径,但其时间和空间分辨率均有待提高,应进一步补充不同尺度的示踪试验信息。为提高 GPR 在小尺度上识别优先流路径和范围的能力,实现入渗和优先流路径的准确监测, Di Prima 等^[43]利用 900 MHz 天线

间隔 20 cm 布设测线,对体积约为 1 m³ 的土体水分入渗前后土壤介电常数进行监测,监测数据经插值、过滤和提取得到介电常数发生实质性变化位置的三维视图,经与亮蓝染色剂标记位置进行比对后发现,该方法可清楚划分土体内部湿润区尺寸和形状,充分体现了地球物理手段三维成像在入渗路径研究中的优势^[43]。

综上,地球物理方法微干扰的监测特点和延时监测的方法为水分入渗和运动过程的研究提供大量多尺度时间序列数据,可以有效实现过程的可视化,增进研究者对于相关过程的认识和理解,具有较大的应用潜力。

2.3 根系吸水过程

土壤水分条件是植物生长发育的重要影响因素,地球物理方法对于土壤水分的监测优势使其可以在植物与土壤水分相互作用研究中发挥巨大作用。植物根系吸水是土壤水分消耗的重要途径,对土壤水分空间分布具有显著影响^[44],研究植物根系空间分布及吸水位置对于合理配置植被和作物种类、实现土壤水分的高效可持续利用具有重要科学意义。地球物理手段可以通过连续监测根系及其周围土壤电磁学性质差异,实现根区土壤水分的动态监测。例如, Rao 等^[45]利用 ERT 在不同物种配置的草地上布设水平和竖直探井电极进行多次测量,利用所获得的高空间分辨率土壤剖面电阻率信息对不同物种干旱胁迫下根系吸水位置和植物耗水量进行了评价,发现鸡尾草和黑麦草的吸水位置较浅,鸡尾草耗水量显著高于其他物种。对于存在主根的植物,单一土壤剖面监测不易全面反映根系吸水位置。Vanella 等^[46]使用三维 ERT 对不同灌溉方式下柑桔树的根区(体积约为 7 m³)土壤电阻率进行监测,发现浅根和深根活跃程度由水分的有效性决定。刘成功等^[47]利用二维 ERT 分析了黄土高原坡面尺度不同植被类型下土壤电阻率空间分布状况,量化了由于根系过度耗水导致的土壤干层的空间分布特征。相对于 ERT, GPR 对具有电学性质不同的边界更加敏感,所以常用于根系分布及生物量的监测。例如, Liu 等^[48]对 GPR 图像中的粗根反射进行识别,获得不同位置的反射波速和土壤含水率,并利用反向距离加权插值方法重建了不同深度土壤水分的水平分布,并经三维重建获得三维根系与土壤水分的空间分布特征,均方根误差约为 0.017。以上研究充分证明了地球物理方法在植物-土壤水分相互作用研究中的独特优势,即可以在植被空间格局分布、植物对于水分条件的响应以及农田水资源管理等

方面研究中提供各尺度的高密度空间监测数据。

3 机遇与挑战

地球物理技术作为一种原位、微扰动的监测手段已被广泛应用于土壤水分时空分布、水分入渗与再分布以及根系吸水等土壤水文学研究中,为多尺度土壤水文过程的监测与模拟提供了新方法,推动了土壤水文学的发展。然而,地球物理方法在土壤水文学研究和应用过程中仍存在一些亟待解决和需要进一步研究的科学问题。

1)地球物理参数与土壤水分定量关系仍需探究。地球物理方法估算土壤含水率的不确定性不仅来自于电阻率模型的不确定性,也来自于研究假定准确无误的地球物理参数与土壤水文学参数的本构关系^[4]。地球物理参数与土壤水文要素之间的关系多为非线性的,模型的精度取决于输入参数的数量和种类,而输入参数具有高度的空间异质性和尺度依赖性^[10]。因此,如何利用先验数据与基于“大数据”分析或机器学习的参数预测等新兴数据分析方法,建立具有较好预测能力的近似线性的转换模型是目前值得探索的问题。例如,Brillante 等^[49]采用不同的机器学习方法来增强土壤水平衡模型和电阻率数据之间的拟合度,而 Hedley 等^[50]发现随机森林法在建立的土壤表观电阻率与土壤含水率关系上较多元线性回归模型具有更高的精度。

2)综合利用多种地球物理方法进行交叉反演。地球物理方法可实现野外多尺度土壤性质空间变异的定性描述,然而实现定量描述则需要结合额外的(先验的)信息来构建较为精确的地下模型。土壤水分先验数据可由烘干法或传感器法等点尺度方法获得^[51],但点尺度数据量较小且变异性较大,尺度转换存在问题。而地球物理方法各具优势,不同灵敏度和分辨率方法的综合利用将有利于克服单一方法的局限性^[52]。例如,GPR 具有较高的垂向空间分辨率,可用于介质差异明显界面的圈定,而 ERT 由于低频电流的物理性质,很难得到清晰的岩性边界图像,两者结合将有利于提高整体空间分辨率^[53]。EMI 可快速和有效确定较大尺度土壤表观电导率的空间分布,该方法与 ERT 相结合可以得到水平与垂直方向土壤剖面电阻率分布的综合模型^[54]。Fan 等^[52]总结了 ERT、GPR 和 EMI 三种地球物理方法在入渗机制与地球关键带结构研究中的综合使用方法,为综合利用地球物理方法研究水文过程提供了参考。

3)耦合水文过程模型需进一步探索。地球物理手

段可以实现包气带土壤水分时空分布和运动过程的监测,进而对剖面水力参数进行预测,但该方法所包含的多过程反演会造成误差的传递和累积^[55]。对此,部分学者提出将地球物理参数反演模型与土壤水文模型相耦合的反演方法,在地球物理要素反演过程中增加水文过程机制的约束。例如,Rossi 等^[56]将 GPR 和 ERT 监测数据同化到水文模型 CATHY 中进行试验的数值模拟,试验结果与简单非耦合的水文地球物理方法相比,耦合模型提供了更可靠的参数估计和入渗过程的可视化。总体而言,耦合水文过程和地球物理监测的模型取得了一定进展,但未来需要更多的工作来提供不依赖于先验知识的解决方案。

4)基于地球物理方法的多尺度生态水文过程研究内容的拓展。地球物理方法在点到流域尺度及更大尺度的准确高效监测能力随着基础理论和设备制造技术的发展得到提升,应用范围不断拓宽。除文中所介绍的研究内容外,部分研究者近来将地球物理方法应用于土壤水文与生物地球化学循环^[57]、农田生态系统水盐要素的监测与管理^[58]、水文与生态系统之间的响应^[45]等研究中,成功地实现了多尺度的过程监测。此外,地球物理方法在深层土壤水分运动、地下水补给等方面的潜力仍值得进一步挖掘。未来相关研究者应及时关注地球物理方法的发展,将地球物理前沿理论和方法引入土壤水文学研究中以提升对土壤水文过程及其生态效应的理解和认识。

参考文献:

- [1] Zhu X C, Cao R X, Shao M G, et al. Footprint radius of a cosmic-ray neutron probe for measuring soil-water content and its spatiotemporal variability in an alpine meadow ecosystem[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 1–8.
- [2] 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.
- [3] Babaeian E, Sadeghi M, Jones S B, et al. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 530–616.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Loke M H. Electrical Imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2D and 3D surveys [R/OL]. <https://pages.mtu.edu/~ctyoung/LOKENOTE.PDF>. [2021-09-27].

- [7] Loke M H, Barker R D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method[J]. *Geophysical Prospecting*, 1996, 44(1): 131–152.
- [8] Loke M H, Dahlin T. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 49(3): 149–162.
- [9] Campbell R B, Bower C A, Richards L A. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1949, 13(C): 66–69.
- [10] 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.
- [11] Neal A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress[J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 66(3/4): 261–330.
- [12] von Hebel C, Rudolph S, Mester A, et al. Three-dimensional imaging of subsurface structural patterns using quantitative large-scale multiconfiguration electromagnetic induction data[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(3): 2732–2748.
- [13] Reedy R C, Scanlon B R. Soil water content monitoring using electromagnetic induction[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(11): 1028–1039.
- [14] Friedman S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1/2/3): 45–70.
- [15] Saey T, de Smedt P, de Clercq W, et al. Identifying soil patterns at different spatial scales with a multi-receiver EMI sensor[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(2): 382–390.
- [16] 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.
- [17] Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(2): 273–285.
- [18] Carey A M, Paige G B, Carr B J, et al. Characterizing hydrological processes in a semi-arid rangeland watershed: A hydrogeophysical approach[J]. *Hydrological Processes*, 2018: hyp.13361.
- [19] 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.
- [20] 段旭, 王彦辉, 程积民. 宁夏固原云雾山天然草坡土壤电阻率和含水率的关系及其空间变异[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 130–137.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(3): 574–582.
- [24] Roth K, Schulin R, Flühler H, et al. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(10): 2267–2273.
- [25] Herkelrath W N, Hamburg S P, Murphy F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry[J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(5): 857–864.
- [26] Robinson D A, Jones S B, Wraith J M, et al. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry[J]. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2(4): 444–475.
- [27] Anbazhagan P, Bittelli M, Palapati R R, et al. Comparison of soil water content estimation equations using ground penetrating radar[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588: 125039.
- [28] 朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 等. 基于探地雷达的土壤水分测定方法研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(5): 1039–1044.
- [29] Grote K, Hubbard S, Rubin Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(11): 1321.
- [30] Schmelzbach C, Tronicke J, Dietrich P. High-resolution water content estimation from surface-based ground-penetrating radar reflection data by impedance inversion[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(8): W08505.
- [31] Calamita G, Perrone A, Brocca L, et al. Field test of a multi-frequency electromagnetic induction sensor for soil moisture monitoring in southern Italy test sites[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 316–329.
- [32] Misra R K, Padhi J. Assessing field-scale soil water distribution with electromagnetic induction method[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 516: 200–209.
- [33] Stewart R D, Najm M R A, Rupp D E, et al. Nondestructive quantification of macropore volume using shear-thinning fluid[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(2): 445–453.
- [34] Luo Z, Niu J, Xie B, et al. Influence of root distribution on preferential flow in deciduous and coniferous forest soils[J]. *Forests*, 2019, 10(11).
- [35] Robinson D A, Binley A, Crook N, et al. Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: A vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(18): 3604–3635.

- [36] Dietrich S, Weinzettel P A, Varni M. Infiltration and drainage analysis in a heterogeneous soil by electrical resistivity tomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(4): 1153–1167.
- [37] Yu Y, Klotzsche A, Weihermüller L, et al. Measuring vertical soil water content profiles by combining horizontal borehole and dispersive surface ground penetrating radar data[J]. *Near Surface Geophysics*, 2020, 18(3): 275–294.
- [38] 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.
- [39] Robinson D A, Lebron I, Kocar B, et al. Time-lapse geophysical imaging of soil moisture dynamics in tropical deltaic soils: An aid to interpreting hydrological and geochemical processes[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(4): W00D32.
- [40] 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.
- [41] Kung K J S, Donohue S V. Improved solute-sampling protocol in a sandy vadose zone using ground-penetrating radar[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(6): 1543–1545.
- [42] Allroggen N, van Schaik N L M B, Tronicke J. 4D ground-penetrating radar during a plot scale dye tracer experiment[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 118: 139–144.
- [43] Di Prima S, Winiarski T, Angulo-Jaramillo R, et al. Detecting infiltrated water and preferential flow pathways through time-lapse ground-penetrating radar surveys[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138511.
- [44] Vereecken H, Huisman J A, Boga H, et al. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(4): W00D06.
- [45] Rao S, Lesparre N, Flores-Orozco A, et al. Imaging plant responses to water deficit using electrical resistivity tomography[J]. *Plant and Soil*, 2020, 454(1/2): 261–281.
- [46] 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.
- [47] 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/OL]. *土壤学报*:1–8[2021-10-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20201013.0945.002.html>.
- [48] Liu X, Chen J, Butnor J R, et al. Noninvasive 2D and 3D mapping of root zone soil moisture through the detection of coarse roots with ground-penetrating radar[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(5): e2019wr026930.
- [49] Brillante L, Bois B, Mathieu O, et al. Electrical imaging of soil water availability to grapevine: A benchmark experiment of several machine-learning techniques[J]. *Precision Agriculture*, 2016, 17(6): 637–658.
- [50] Hedley C B, Roudier P, Yule I J, et al. Soil water status and water table depth modelling using electromagnetic surveys for precision irrigation scheduling[J]. *Geoderma*, 2013, 199: 22–29.
- [51] Cimpoiu M O, Kuras O, Pridmore T, et al. Potential of geoelectrical methods to monitor root zone processes and structure: A review[J]. *Geoderma*, 2020, 365: 114232.
- [52] Fan B H, Liu X B, Zhu Q, et al. Exploring the interplay between infiltration dynamics and Critical Zone structures with multiscale geophysical imaging: A review[J]. *Geoderma*, 2020, 374: 114431.
- [53] 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.
- [54] van der Kruk J, Gueting N, Klotzsche A, et al. Quantitative multi-layer electromagnetic induction inversion and full-waveform inversion of crosshole ground penetrating radar data[J]. *Journal of Earth Science*, 2015, 26(6): 844–850.
- [55] 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.
- [56] Rossi M, Manoli G, Pasetto D, et al. Coupled inverse modeling of a controlled irrigation experiment using multiple hydro-geophysical data[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 82: 150–165.
- [57] Wainwright H M, Chen J S, Sassen D S, et al. Bayesian hierarchical approach and geophysical data sets for estimation of reactive facies over plume scales[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 4564–4584.
- [58] Paz M C, Farzamian M, Paz A M, et al. Assessing soil salinity dynamics using time-lapse electromagnetic conductivity imaging[J]. *SOIL*, 2020, 6(2): 499–511.