

基于电阻率成像技术的土层精细划分

张平松, 欧元超, 汪武, 李建宁

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南, 232001)

摘要: 土壤层次的精确划分关系到土壤学相关研究结果的精确程度。为对田间尺度上层状土壤进行无损精细分层, 采用电阻率成像技术, 同时结合电阻率曲线纵向上的变化特征精细划分土壤层次, 并将精细分层结果应用于层状土壤电阻率空间变异性研究。结果表明: 运用电阻率曲线法对反演电阻率数据进行精细划分后, 形成结果图能很好的满足研究过程中可视化呈现及精细化表达等需要; 根据温纳四极反演电阻率曲线法将研究区内的剖面浅层土壤划分为 5—13, 13—24, 24—50, 50—70 cm 4 个层次; 5—13 cm(耕作层)电阻率值的变异系数最高(0.28), 13—24 cm(犁底层)平均电阻率值最低(17.35 $\Omega \cdot m$)。研究成果可为土壤水文学和精准农业等相关研究提供技术支撑。

关键词: 电阻率成像; 层状土壤; 精细分层; 土壤结构; 空间变异

中图分类号: S152.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0352-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.053

Experimental Study on the Accurate Division of Soil Layers Based on Resistivity Imaging

ZHANG Pingsong, OU Yuanchao, WANG Wu, LI Jianning

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001)

Abstract: Layered soil medium is a commonly existed soil layer structure. The accurate division of soil layers determines the accuracy of related researches on soil science. Therefore, it is of practical significance to study the techniques of fine soil layering. In order to classify the upper soil non-destructively in the field scale, the resistivity imaging technology was used. Based on the changes of the resistivity curve longitudinally, the stratification results were adopted to study the spatial variability of the soil resistivity. Results showed that: After finely classifying resistivity data using resistivity curve method, the result map could meet the need of visualization and fine expression in the research process. Using the Wenner quadrupole inversion resistivity curve method, the shallow soil in the research area were divided into four layers, including 5—13, 13—24, 24—50 and 50—70 cm, the prediction value and actual value were closest. I was found that the coefficient of variation of 5—13 cm (plough layer) was the highest (0.28) and the average resistivity value at 13—24 cm (plow bottom layer) was the lowest (17.35 $\Omega \cdot m$). The results conformed to the actual soil conditions in the test area, through this method, the soil condition could be obtained accurately, quickly and even non-destructively. The findings attained in this research provided technical support for the research on accurate agriculture and preferential flow of soil fracture.

Keywords: electrical resistivity tomography; layered soil; fine stratification; soil structure; spatial variability

土壤是浅地表层中普遍存在的一种分层次结构体^[1], 快速、准确获取土壤层次及相关特性一直是农业、土壤、水文以及高压电接地等领域专家关注的问题^[2-3]。目前, 对于层状土壤的层次划分广泛采用分层取样^[4]及钻孔资料^[5], 其在实际操作时普遍耗时费力。另外, 许多学者则利用多种分析手段对不同层次土壤的物性差异进行划分判断。Shin 等^[6]通过实地分析

不同深度的土壤质地等物性差异, 将 0—200 cm 的土壤剖面划分为沙壤土、粉砂壤土、黏壤土 3 个层次; 张波等^[7]综合利用灰关联分析法和有序聚类法, 从蒸散耗水角度对黄土区刺槐林地土壤水分剖面进行垂直分层。地球物理学方法具有无损、高效且探测准确等优点, 已在地质勘查及找矿等领域应用多年, 近年来也被越来越多的研究者引入到土壤学相关研究中^[8-10]。杜翠等^[11]

收稿日期: 2018-01-02

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600900); 国家自然科学基金项目(41172137); 安徽省高校学科(专业)拔尖人才学术资助重点项目(gxhjZD2016048)

第一作者: 张平松(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地球物理探测技术教学与研究。E-mail: pszhang@sohu.com

通信作者: 欧元超(1993—), 男, 硕士, 主要从事地球物理探测技术的应用研究。E-mail: ycou623@163.com

研究表明探地雷达层析成像探测技术可以用于复垦土壤层次探测;郭在华等^[12]在三极法的基础上研制出了可同时测量不同深度电阻率的分层土壤电阻率在线监测系统;Hsu 等^[13]采用二维电阻率成像技术检测了台湾某河流沿岸的沉积物与基岩之间的接触面分布情况,研究结果表明电阻率图中两者界限清晰,该技术在景观演变,沉积物运移和沉积物预算研究中具有广阔的应用前景。虽然地球物理学方法已在土层厚度、土壤电阻率与含水量空间差异、土壤质量状况等方面开展了较多的研究^[14-16],但针对层状土壤高精度分层的报道较少,所以将其进一步用于土壤精细分层探究具有一定的实践意义。

土壤电阻率反映土壤的导电性能,是土壤的一种基本物理特性,其受土壤质地及含水量等多种因素共同影响^[17-19]。基于层状土壤不同层次间土壤质地及含水量的差异,本文研究运用电阻率成像技术对层状土壤的分层探测效果,对比分析了运用电阻率曲线法对温纳三极和温纳四极反演电阻率数据进行层次划分的精度高低,并以分层结果为依据进行层状土壤电阻率空间变异性研究,以期为土壤水文学和精准农业等相关研究提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 土地利用与土壤剖面特征

探查试验于 2016 年 5 月选择在安徽省淮南市北部的淮河河漫滩上进行,该区的农田以水旱轮作方式为主,该研究区地势平坦,由于自然沉积形成了分层明显的层状土壤,浅层地下水埋藏约 2 m,农田作物以水稻、小麦、油菜为主。为准确了解研究区土壤层次状况,考虑剖面存在的边界效应,依据电法勘探体积效应^[20],并结合本次测试有效勘探深度,在选择的典型农田内开挖出长 6.0 m×宽 0.7 m×高 1.6 m 的 4 组剖面。去除表层较松散且有团聚颗粒与植物根系的 5 cm 土壤,并对剖面的侧壁及上表面进行简单平整处理。剖面的颜色和手感质地 在 0—85 cm 范围内的垂直方向上存在明显的变异,通过对剖面不同层位内的土壤进行取样分析,确定了其质地类型,层次划分为 5—15 cm(暗灰色,砂质壤土),15—22 cm(黄棕色,壤质黏土),22—45 cm(棕白色,粉砂质壤土),45—70 cm(红棕色,砂质黏土)和 70—85 cm(黄棕色,砂质黏壤土)5 个层次。

1.2 电阻率成像技术的实地探测

本试验使用 NPEI—DHZI—1 型网络并行电法仪^[21-22](江苏靖江,东华测试)进行层状土壤电阻率数据采集。该仪器具有单点电源场(AM 法)与偶极子电源场(ABM 法)2 种数据工作方式,AM 法所采集的电位反映的是单点电源供电下的电场,即任一电极供电(A 极),其余电极作为 M 极同时进行电位测量,然

后自动顺次切换电极,直至所有电极完成供电,其中 B 极放置于无穷远处供电,公共电极 N 极置于测线附近作为测量电极电位的参照标准;ABM 法采集数据所反映的则是偶极子供电情况,与 AM 法不同的是有一对电流电极 AB 供电。与传统的高密度电法采集相比,并行电法为拟地震式数据采集方式及多次覆盖式叠加系统,可获得更为稳定的地电场信息^[22-23]。

电法测试系统布置示意图 1,其中空心箭头所指的为自制微型电极^[24],其为打磨处理后的紫铜棒(长 3 cm,直径 1 mm)。另外,电极与仪器之间的连接器转接头和电缆线由上海第一海洋地质工程有限公司专门设计研发。黑色箭头所指的方向为电极从 1# 至 64# 的布置方向。测试时将电极布设在剖面的中轴线上并插入地表 2 cm 深,其中两个电极间距离为 5 cm,每条测线布置 64 个电极,测线长为 3.15 m,测线距离剖面边界 0.35 m。为消除偶然因素给测试结果带来的误差,对研究区内的剖面均进行了数据采集。现场采集了剖面内层状土壤各点的视电阻率值,并采用 EarthImager 2D 软件中的阻尼最小二乘法反演出真实电阻率及其分布图像。

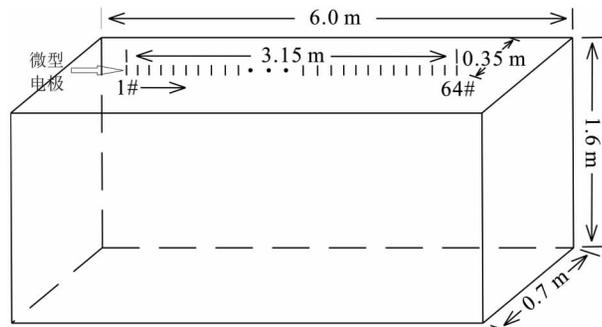


图 1 电法测试系统布置示意

1.3 土壤精细分层方法及电阻率剖面图精细处理流程

自然沉积作用使得土壤不同层次间质地、含水量等物理参数存在差异^[25-28],导致保水性、入渗性及蒸发性等水力学参数各异,这些差异共同影响层状土壤的导电性特征^[29],故电阻率在土壤分层处会有明显反映。

依据反演电阻率剖面图,选取其同一深度处的若干数据点相加取平均值即得到该装置类型下随深度变化的电阻率曲线。观察曲线的变化趋势及拐点位置等相关信息,对剖面进行精细分层^[30],分别得到多组层位预测结果。为了选取最接近实地观察获取的实测层位的预测结果,于是比较了不同装置类型预测层位与实测层位的相对误差及均方根误差,得到精细分层方法中最接近实测层位的分层方法,依据该方法的分层结果确定其电阻率标定值,进而有针对性的对其剖面图进行色标标定,最终得到精细分层后的层状土壤电阻率剖面图。基于此,将电阻率曲线方法^[30]应用于层状土壤精细分层研究,以期提高分层结果的精度。

2 结果与分析

2.1 不同装置类型下层状土壤分层效果对比

选择 5 种不同装置型数据进行反演电阻率成图处理,并从有效探测深度、土壤纵向层次分辨率、数据信号强度等方面综合对比分析各装置型数据的结果图对层状土壤的分层探测效果。由表 1 可知,对于田间尺度上的层状土壤分层探测而言,不同装置类型的探测效果存在很大差别。其中,从装置的探测深度比较得出温纳三极、偶极—偶极探测最深,而温纳四极探测深度最浅;对各装置的纵向分辨率比较发现温纳四极的效果最好,而偶极—偶极、单极—偶极的效果最差,故在土壤层次的精细划分中,温纳四极具有一定的优势;另外,信号的强度也同样影响着不同测量装置探测的灵敏度和准确性,比较各装置发现温纳四极的信号强度较高,施伦贝尔、温纳三极次之,偶极—偶极、单极—偶极较弱;在各测量装置纵向测深的适宜性方面,温纳四极、施伦贝尔较佳,温纳三极次之,偶极—偶极、单极—偶极较差;但在横向剖面适宜性方面,各测量装置的效果除了施伦贝尔最差外,其余效果均一般。通过对探测深度、纵向分辨率、信号强度等方面综合分析,认为应用于土层划分的各装置中温纳四极表现最佳,紧接着是温纳三极、施伦贝尔、偶极—偶极,单极—偶极效果最差。

表 1 应用于土层划分中的常用电阻率测量装置效果

| 参数 | 温纳四极 | 施伦贝尔 | 偶极—偶极 | 温纳三极 | 单极—偶极 |
|---------|------|------|-------|------|-------|
| 探测深度 | L | M | H | H | M |
| 纵向分辨率 | H | M | L | M | L |
| 信号强度 | H | M | L | M | L |
| 纵向测深适宜性 | H | H | L | M | L |
| 横向剖面适宜性 | M | L | M | M | M |

注:用 H、M、L 分别代表高、中、低的装置特征显示效果。

2.2 层状土壤精细分层

若仅以分层效果最优的电法装置类型及简单的

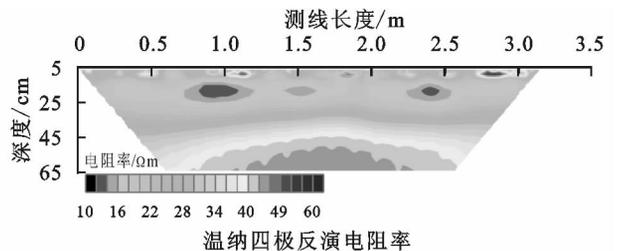
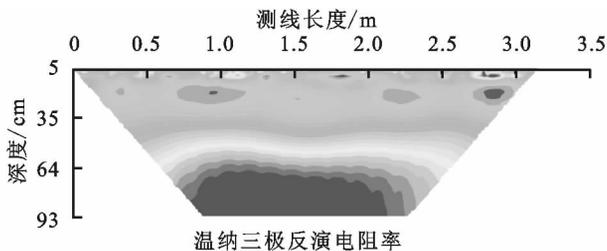


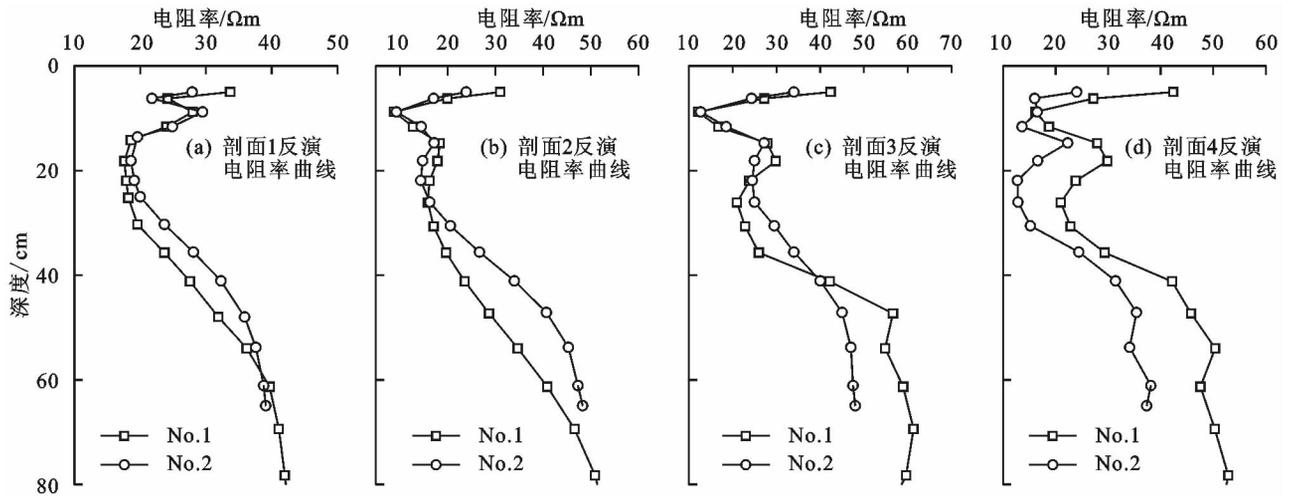
图 2 反演电阻率剖面图对比

表 2 为不同分层方法的预测层位与实测层位表(有效探测深度达不到 70 cm 的以 70 cm 为该处分层位置),表中包含了不同精细分层方法的土壤层次预测结果与实测结果的相对误差(RE)和均方根误差(RMSE)大小等信息。可以看到,运用电阻率曲线处理方法对层状土壤层次进行预测,厘米尺度上的精度

人为色标标定等划分层状土壤层次,可能会降低分层精度,故此引入电阻率曲线法来辅助提高分层精度。由于不同温纳装置类型采集到的数据效果存在差异,故本次研究仅选取对剖面土壤分层效果较好的温纳三极和温纳四极反演电阻率数据进行对比分析。

图 2 为应用精细分层方法前的两种装置反演电阻率剖面。在电阻率剖面图中选择标定点,选取其相同深度的两边若干数据点相加取平均值即得到该电极排列方式下随深度变化的电阻率曲线图。图 3 为层状土壤精细分层,分析 4 幅曲线图发现,除表层受到人类耕作活动影响而造成电阻率数据波动无规则外,其他各层次内的土壤由于具有相似的物性参数,故其电阻率数据有着相同的变化趋势;另外,需结合各剖面的反演电阻率图进而对反演电阻率曲线进行分层。以剖面 1 为例进行说明,图 2 即为剖面 1 的反演电阻率剖面图,从 2 幅反演电阻率剖面图中均可见土壤表层的电阻率值比较杂乱,对应分析剖面 1 的反演电阻率曲线亦可发现上部数据波动无规律,这也符合研究区的表层土壤受到耕作扰动影响,故可将 NO.1 曲线 5—14 cm 范围、NO.2 曲线 5—13 cm 范围划定定为耕作层;接着观察反演电阻率图可见存在电阻率值整体较低且数据稳定的一个层次范围,对应 NO.1 曲线 14—29 cm 范围、NO.2 曲线 13—24 cm 范围的数据稳定在一个较小电阻率范围内,这也符合耕作层下部犁底层电性特点,故可进行对应分层;图 2 中 2 幅反演电阻率剖面图下部的电阻率色标值为迅速增大后保持稳定,对照曲线图可见 NO.1 曲线 29—59 cm 范围、NO.2 曲线 24—50 cm 范围内的数据持续增大后,NO.1 曲线 59—77 cm 范围、NO.2 曲线 50—70 cm 范围内的数据基本保持稳定。故通过对反演电阻率剖面图以及对应的电阻率曲线进行综合分析后,可更为准确划定出对应的层次分界点。

均较高($2.12 \leq RMSE \leq 8.55$),初步验证了其应用于层状土壤层次划分的可适用性。但 A 和 B(分别为温纳三极与四级反演电阻率曲线法)之间的精度存在差别,综合分析比较 A 和 B 的平均相对误差及均方根误差,认为 B 的预测层位相对而言准确度更高,即该精细分层方法的预测结果与实际测量结果最为接近。



注:No. 1、No. 2 分别代表温纳三极反演电阻率、温纳四极反演电阻率。

图 3 层状土壤精细分层

表 2 层状土壤不同分层方法的预测层位与实测层位

| 剖面号 | 实测层位 | 预测层位/cm | | | | | |
|-----|------|---------|--------|----------|------|--------|----------|
| | | 温纳三极 | | | 温纳四极 | | |
| | | A | 相对误差/% | 均方根误差/cm | B | 相对误差/% | 均方根误差/cm |
| 1 | 15 | 14 | -0.07 | 6.46 | 13 | -0.13 | 3.57 |
| | 22 | 29 | 0.32 | | 24 | 0.09 | |
| | 45 | 59 | 0.31 | | 50 | 0.11 | |
| | 70 | 77 | 0.10 | | 70 | 0 | |
| 2 | 15 | 16 | 0.07 | 8.55 | 15 | 0 | 2.42 |
| | 22 | 31 | 0.41 | | 26 | 0.18 | |
| | 45 | 50 | 0.11 | | 48 | 0.07 | |
| 3 | 15 | 19 | 0.27 | 7.17 | 15 | 0 | 2.12 |
| | 22 | 36 | 0.64 | | 26 | 0.18 | |
| | 45 | 46 | 0.02 | | 46 | 0.02 | |
| | 70 | 80 | 0.14 | | 70 | 0 | |
| 4 | 15 | 18 | 0.20 | 7.60 | 14 | -0.07 | 5.24 |
| | 22 | 32 | 0.45 | | 31 | 0.41 | |
| | 45 | 42 | -0.07 | | 47 | 0.04 | |
| | 70 | 80 | 0.14 | | 70 | 0 | |

注:A 和 B 分别代表温纳三极反演电阻率曲线法及温纳四极反演电阻率曲线法。

本文以剖面 1 为例进行精细电阻率成图并针对该剖面进行层状土壤电阻率空间变异特征研究。根据温纳四极电阻率曲线法对剖面 1 的土层划分(5—13,13—24,24—50,50—70 cm)情况,将其划分深度对应于图 3a 中 No. 2 曲线上的电阻率值。首先,深度为 13 cm 处对应的横坐标上电阻率值为 $20 \Omega \cdot m$,确定出 $20 \Omega \cdot m$ 为划分该位置的电阻率特征值,其次,深度为 24 cm 对应的横坐标上的电阻率值也为 $20 \Omega \cdot m$,故 $20 \Omega \cdot m$ 同样为该深度的电阻率特征值,深度为 50 cm 对应横坐标上的电阻率值为 $37 \Omega \cdot m$,故其为该位置处的电阻率特征值。最终,根据得到的层状土壤分层电阻率特征值($20, 37 \Omega \cdot m$),有针对性的对其色标进行精确标定。

应用层状土壤精细分层方法前后效果对比如图 4 所示,其中图 4b 上标出的虚线为划分出的层状土壤分界面位置(即电阻率特征值为 $20, 37 \Omega \cdot m$ 的位

置)。通过对比图 4 中精细分层前后的效果图可以看出精细分层后的土壤层次位置更加精细、清晰,电阻率剖面图中的颜色区分效果更加明显。该精细分层方法提高了对土壤层次划分的精确度,改变了以往运用电阻率成像技术对土壤层次进行简单、粗犷划分的老办法,这对于解决田间尺度上的土壤相关研究中存在的误差问题具有一定的推动作用。

2.3 农田层状土壤电阻率空间变异特征

通过分析土壤电阻率所反映的土壤异质性以及土壤内部结构的差异,进而可研究与剖面土壤相关的特性参数及之间的关系。

选取剖面 1 为研究对象,以上述分层研究结果为依据,对图 4b 中不同层次内的数据点进行统计分析,其结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,5—13 cm 处土层变异系数最高(0.28),电阻率值相差最大,结合实际情况及分层结果图分析认为是长期的农事活动

导致,该层为耕作层;13—24 cm 处土层变异系数较低(0.13),电阻率最大值与最小值相差仅为 $11.33 \Omega \cdot \text{m}$,且平均电阻率值为 $17.35 \Omega \cdot \text{m}$,这主要由于耕作活动使该层长期受到压实以及黏粒淀积所致,该层土壤密实度大、含水率高,为耕作层下方较为紧实的土层,推断为犁底层;24—50 cm 处变异系数较高(0.23),电阻率最大与最小值差异达 $25.39 \Omega \cdot \text{m}$,可能是由于作物根系的吸水作用以及下部土体的水分和盐分在土壤毛细管力的驱使下聚集到了该层上部,又因犁底层的存在阻碍了其继续向上,且由于表层作物根系空间分布不均导致该层水分、盐分等分布不均,从而造成该层电阻率值差异较大且变异系数较高;50—70

cm 处变异系数在各层中最低但平均电阻率值最大,主要因为上部土壤蒸发较为强烈,作物生长必然要汲取下部的养分和水分,致使该层更多的是向上补给,然而地下潜水位深度达 2 m,很难对该层的水分进行有效的补给,从而导致电阻率值整体较高。这与张建兵等^[31]应用电导率法测定的田间不同深度范围内土壤特性一致,其认为表层受到耕作影响强烈,垂直方向上的土壤盐分主要集中在犁底层。但他们的研究并没有划分出各个层次的准确位置,而是人为的以 20 cm 范围为一个层次。本文运用电阻率曲线法对剖面电性数据进行精细划分,进而对各层位内的参数进行统计分析,得到的数据分析结果具有更高的准确性。

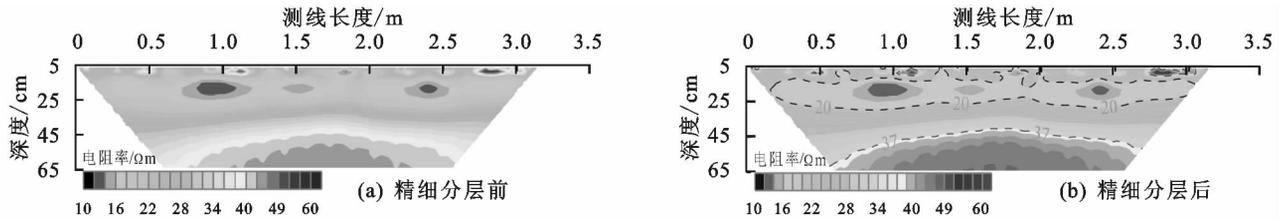


图 4 应用层状土壤精细分层方法前后效果对比

表 3 剖面 1 层状土壤各层电阻率统计特征参数

| 土层 深度/cm | 数据 点数 | 电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$ | | | | 变异 系数 | 偏度 | 峰度 | 分布 类型 |
|-------------|----------|------------------------------|-------|-------|------|----------|-------|-------|----------|
| | | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | | | | |
| 5—13 | 512 | 13.10 | 66.70 | 26.88 | 7.60 | 0.28 | 1.49 | 3.42 | 正态 |
| 13—24 | 384 | 12.48 | 23.81 | 17.35 | 2.17 | 0.13 | 0.20 | -0.02 | 正态 |
| 24—50 | 640 | 16.59 | 41.98 | 28.02 | 6.31 | 0.23 | 0.25 | -0.78 | 正态 |
| 50—70 | 384 | 30.38 | 45.47 | 39.36 | 4.44 | 0.11 | -0.40 | -1.19 | 正态 |

3 讨论

为对比分析土壤电阻率与含水量、孔隙度等土壤物理特性间的变化关系,分别在深度 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 cm 处采集现场土样,测取了土壤体积含水量、孔隙度等土壤物理特性。其中,为了保证测量的准确性,每层均取 3 个土样。由图 5 可知,各物理特性随深度的增加均有一定的变化规律。对比图 3 的土壤电阻率曲线图能够发现,随着土层深度的增加,土壤体积含水量先增大后逐渐减小,而电阻率则是先减小后逐渐增大,认为土壤中含水量高时电阻率相对会低,反之则相反;另外,深度 10 cm 处与 20 cm 处的含水量差异大,从 30 cm 到 50 cm 处范围的含水量较一致,60, 70 cm 处的含水量较一致,从该变化规律能够发现不同层位内的土壤体积含水量存在较为明显的差异。比较土壤孔隙度与电阻率之间的变化规律发现,深度 10 cm 处孔隙度最大,这是由于农事活动而导致的耕作层内部土壤松散,而深度 20 cm 处的孔隙度最小,符合犁底层密实度大、孔隙度小且含水量高等物理性质,分析认为当孔隙度大时,电阻率相对会大,反之则相反。根据不同土层内质地、含水量、孔隙度等的差异,采用电阻率成像技术对田间尺度上的土壤进行探查研究,并利用电阻率曲线纵向上的变化特征可精细划分土壤层次。有效、精确地掌握土壤层次结构,对于土壤水文学和

环境工程科学研究中参数间相关性分析及解释具有一定的推动作用。电阻率成像技术具有的优势为:微扰动原位稳定监测、多尺度同步实时监测、可重复长期自动监测及对地可视化精细监测。

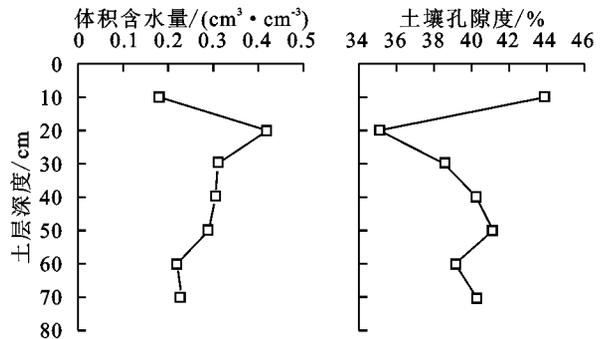


图 5 不同土层深度的土壤物理特性变化

4 结论

(1)电阻率成像技术在层状土壤层次划分中具有较好的适用性,运用电阻率曲线法对数据进行处理后可有效的提高分层的精细程度。其中,温纳四极反演电阻率曲线法对本研究区内层状土壤层次划分效果最好。另外,电阻率能反映土壤结构特性及水盐状态等信息,结合土壤电阻率与土壤特性间的岩土物理学关系,电阻率成像法可实现对土壤特性或状态的多尺度无损连续监测,这为通过土壤电阻率测定预测其他

土壤特性提供了一种可行的途径。

(2)依据剖面1各层电阻率值,其可划分为5—13 cm(耕作层),该层电阻率范围最大,变异系数最高,为人类农事活动造成;13—24 cm(犁底层),该层电阻率平均值最小,变异系数较低,是因为含水量高且土体密实;24—50 cm处电阻率最大与最小值相差较大,变异系数较高,是由于该层含水量低且水分分布不均;50—70 cm处平均电阻率值最大,变异系数最低,是由于含水量低且水分分布均匀造成的。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 甘永德,贾仰文,仇亚琴,等.降雨条件下分层土壤入渗特性[J].水土保持学报,2012,26(5):217-219.
- [3] Coulouma G, Samyn B, Grandjean G, et al. Combining seismic and electric methods for predicting bedrock depth along a Mediterranean soil toposequence [J]. Geoderma, 2012, 170(15): 39-47.
- [4] Lookingbill T, Urban D. An empirical approach towards improved spatial estimates of soil moisture for vegetation analysis [J]. Landscape Ecology, 2004, 19(4): 417-433.
- [5] Morse M, Lu N, Godt J, et al. Comparison of soil thickness in a zero-order basin in the Oregon coast range using a soil probe and electrical resistivity tomography [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(12): 1470-1482.
- [6] Shin Y, Mohanty B P, Ines A V M. Soil hydraulic properties in one-dimensional layered soil profile using layer-specific soil moisture assimilation scheme [J]. Water Resources Research, 2012, 48(48): 116-120.
- [7] 张波,张建军,李轶涛,等.黄土区刺槐林地土壤水分剖面的垂直分层[J].中国水土保持科学,2010,8(4):39-44.
- [8] 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.
- [9] 解迎革,李霞,张风宝,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.
- [10] Coulouma G, Lagacherie P, Samyn K, et al. Comparisons of dry ERT, diachronic ERT and the spectral analysis of surface waves for estimating bedrock depth in various Mediterranean landscapes [J]. Geoderma, 2013, 199(5): 128-134.
- [11] 杜翠,杨峰,彭猛,等.雷达层析成像对复垦土壤分层结构的探测[J].计算机仿真,2013,30(9):217-220.
- [12] 郭在华,朱泽伟,邢天放,等.分层土壤电阻率在线监测系统研制[J].仪器仪表学报,2014,35(6):1306-1314.
- [13] Hsu H L, Yanites B J, Chen C C, et al. Bedrock detection using 2D electrical resistivity imaging along the Peikang River, central Taiwan [J]. Geomorphology, 2010, 114(3): 406-414.
- [14] 杨磊,周启友,雷鸣,等.基于自然电位方法的土壤水分入渗过程监测[J].水文地质工程地质,2012,39(3):1-5.
- [15] Brunet P, Clement R, Bouvier C. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT): A case study in the Cevennes area, France [J]. Journal of Hydrology, 2010, 380: 146-153.
- [16] 赵国平,史社强,李军保,等.毛乌素沙地采煤塌陷区土壤水分空间变异研究[J].水土保持学报,2017,31(6):90-93,219.
- [17] 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.
- [18] 谷裕,王金满,刘慧娟,等.干旱半干旱煤矿区土壤含水率研究进展[J].灌溉排水学报,2016,35(4):81-86.
- [19] Mojid M A, Cbo H. Wetting solution and electrical double layer contributions to bulk electrical conductivity of sand-clay mixtures [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(3): 972-980.
- [20] 汤洪志,邓居智.电法勘探原理[M].南昌:地质出版社,2013.
- [21] 张平松,凡净,吴荣新,等.大倾角煤层工作面底板岩层富水异常区探查方法研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(4):639-643.
- [22] 刘盛东,张平松.分布式并行智能电极电位差信号采集方法和系统.中国:ZL200410014020.0[P].2005-05-18.
- [23] 欧元超,张平松,李建宁,等.基于并行电法的重阳木根系空间分布探测试验研究[J].科学技术与工程,2017,17(10):131-135.
- [24] 肖宏跃,武骄阳,雷宛,等.实验室高密度电法微测系统的模型研究[J].地球物理学进展,2011,26(4):1464-1472.
- [25] Chu X, Marino M A. Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2005, 313(3): 195-207.
- [26] 李仕华,王超凡.不同种植作物对梯田土壤水分的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(5):89-92.
- [27] Rilling M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure [J]. New Phytologist, 2006, 171(1): 41-53.
- [28] Samouelian 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.
- [29] Wright A L, Hons F M. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences [J]. Biology and fertility of soils, 2005, 41(2): 95-100.
- [30] 陈小芳.视电阻率及其差分曲线在岩土分层中的应用[J].地球物理学进展,2004,19(2):455-459.
- [31] 张建兵,杨劲松,姚荣江,等.田块尺度下的苏北滩涂新垦农田土壤盐分空间变异性分析[J].灌溉排水学报,2013,32(1):39-42.