农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

非饱和紫色土的电阻率特性及参数间的相关性分析

王正成， 毛海涛， 程龙飞， 申纪伟， 邹建华， 唐鑫

引用本文:
王正成, 毛海涛, 程龙飞, 等. 非饱和紫色土的电阻率特性及参数间的相关性分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 152–159.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2019–0822

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外源镉在几种典型农耕土壤中的稳定化特征
李传飞, 李廷轩, 张锡洲, 余海英, 张路
农业环境科学学报. 2017, 36(1): 85–92 https://doi.org/10.11654/jaes.2016–1025

再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响
胡廷飞, 王辉, 谭帅
农业环境科学学报. 2020, 39(1): 143–151 https://doi.org/10.11654/jaes.2019–0955

再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响
胡廷飞, 王辉, 谭帅
农业环境科学学报. 2020, 39(1): 143–151 https://doi.org/10.11654/jaes.2019–0955

柠檬酸强化低浓度EDTA对成都平原农田土壤铅和镉的淋洗效率
姚苹, 郭欣, 王亚婷, 钟钦梅, 张世熔, 何玉亭
农业环境科学学报. 2018, 37(3): 448–455 https://doi.org/10.11654/jaes.2017–1086

生物质炭对紫色土耕地土壤中溶解性有机物含量和组成特征的影响
刘慧云, 鲜青松, 刘琛, 唐翔宇
农业环境科学学报. 2017, 36(4): 718–726 https://doi.org/10.11654/jaes.2016–1538

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王正成, 毛海涛, 程龙飞, 等. 非饱和紫色土的电阻率特性及参数间的相关性分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 152-159.
WANG Zheng-cheng, MAO Hai-tao, CHENG Long-fei, et al. Resistivity characteristics and correlation analysis among parameters of unsaturated purple soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 152-159.

非饱和紫色土的电阻率特性及参数间的相关性分析

王正成[1], 毛海涛[1,2*], 程龙飞[1*], 申纪伟[1], 邹建华[1], 唐　鑫[1]

(1.重庆三峡学院土木工程学院,重庆市三峡水库岸坡与工程结构灾变防控工程技术研究中心, 重庆 404100; 2.武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

摘　要:为了探明电流频率、干密度、含水率、金属离子含量等因素对电阻率的影响规律及对电阻率的敏感性,以广泛分布于三峡库区的非饱和紫色土为研究对象,借助二电极法开展电阻率测试试验,并借助SPSS进一步分析电阻率与影响参数间的相关关系。结果表明:紫色土的交流电阻率随电流频率、含水率、干密度、锌含量的增大而降低,且降低速度逐渐减缓,最后趋于稳定。紫色土的电阻率及其影响因素的数列都符合正态分布,即显著性均大于0.05。电流频率、锌含量与电阻率之间呈显著或极显著相关。干密度、含水率和电阻率之间呈显著负相关。研究成果能反映出各因素对电阻率的影响程度,从而提高电阻率的测定精度。

关键词:紫色土;电阻率;相关性分析

中图分类号:X833　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-2043(2020)01-0152-08　　doi:10.11654/jaes.2019-0822

Resistivity characteristics and correlation analysis among parameters of unsaturated purple soil

WANG Zheng-cheng[1], MAO Hai-tao[1,2*], CHENG Long-fei[1*], SHEN Ji-wei[1], ZOU Jian-hua[1], TANG Xin[1]

(1.College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing Engineering Research Center of Disaster Prevention & Control for Banks and Structures in Three Gorges Reservoir Area Chongqing, Chongqing 404100, China; 2.Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Resistivity is a basic parameter that can reflect the electrical conductivity of soil, such as the microstructure of the soil, water content, and heavy metal pollution. There are many factors affecting the determination of soil resistivity, such as current frequency, dry density, water content, and metal ion content. In order to determine the law of influence and sensibility of various factors on resistivity, a resistivity test was conducted based on the unsaturated purple soil widely distributed in the Three Gorges Reservoir area using the two-electrode method. In addition, the correlation between the resistivity and influencing parameters was further analyzed by SPSS. The results showed that the resistivity of purple soil decreased with the increase in the current frequency, dry density, and water and zinc content, and the speed gradually slowed, and finally tended to stable. The resistivity of purple soil and its influencing factors were in accordance with normal distribution, while the significance value was greater than 0.05. The negative correlations between the resistivity and current frequency and zinc content were significant or extremely significant. In addition, the correlations between the resistivity and dry density and water content were extremely significant. The present study reflected the influence of various factors on the resistivity in order to improve the accuracy of resistivity measurements.

Keywords: purple soil; resistivity; correlation analysis

收稿日期:2019-07-25　　**录用日期:**2019-10-24

作者简介:王正成(1991—),男,硕士,实验师,从事土体电阻率特性研究工作。E-mail:wangzhengcheng194@163.com

***通信作者:**毛海涛　E-mail:maohaitao1234@163.com;程龙飞　E-mail:chenglongfei@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41602367);重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2018jcyjA,cstc2019jcyj-msxm1330);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601017,KJQN201901209,KJQN201901209)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41602367); Chongqing Science & Technology Commission Basic and Frontier Research Projects(cstc2018jcyjA, cstc2019jcyj-msxm1330); Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission(KJ1601017,KJQN201901209,KJQN201901209)

紫色土广泛分布于三峡库区[1],其电阻率是表征土体导电性的基本参数[2],能在一定程度上反映其基本物理属性。电阻率试验已成为研究土体微观结构、物理力学性质、砂土液化以及土体污染特征等的重要方法,具有重要的理论意义与应用价值[3-4]。近年来,影响土体电阻率的因素及其各因素之间相关性成为研究热点,国内外学者主要针对土的微观结构形态、物理力学性质、土体污染等方面开展了大量的研究工作[5]。

Yoon等[6]研究表明土的电阻率与土体参数密切相关,如含盐量、黏粒含量、含水率、塑性指数、灵敏度、重度、抗剪强度和孔隙率等。王炳辉等[7]研究表明砂土饱和度对电阻率存在一定影响,饱和砂土电阻率与孔隙率间存在明显的幂函数关系。刘子文等[8]研究得出南京下蜀土与中砂混合土体的电阻率与导热系数均与土体饱和度及孔隙率等物理性质有关。查甫生等[9]分析了合肥膨胀土(非饱和黏性土)含水率、孔隙水电阻率、温度等对电阻率的影响,并建立了电阻率结构模型。周明园等[10]通过室内试验得出砂土电阻率与饱和度、孔隙率呈幂函数关系。边汉亮等[11]得出黏性土电阻率受到的影响由大至小依次为饱和度、含水率、含油率。Long等[12]认为土体电阻率受孔隙液体含盐量影响最为显著。章定文等[13]研究表明固化土电阻率随着固化剂掺入量和养护龄期的增加而增大。董晓强等[14]研究提出污水浸泡会降低水泥土的电阻率。潘玉英等[15]提出石油污染土电阻率的影响因素主次顺序为含水饱和度、含油饱和度、孔隙率。Friedman[16]提出土体的电阻率受到土体、土颗粒和环境等因素的影响。陈鹏等[17]研究表明煤体的破裂状态和孔隙结构的演化对电阻率存在一定影响。蔡国军等[18]针对江苏海相黏土进行了原位测试,孔隙液含盐量、黏粒含量和塑性指数是电阻率的主控因素。

综上所述,学者们主要以砂土、膨胀土、(海相)黏性土、土砂混合体、固化土、石油污染土、煤炭为研究对象,电阻率的影响因素包含:与土体结构有关的因素、表征土颗粒特征的要素、与土溶液有关的要素,以及各因素的影响程度。但尚存在一些问题有待于进一步研究,主要包括:(1)非饱和紫色土的电阻率特性;(2)紫色土电阻率与其影响因素间的相关性,各影响因素的影响程度。

因此,为探明电流频率、干密度、含水率、锌含量对紫色土电阻率的影响特性及对电阻率的敏感性,本文以三峡库区非饱和紫色土为研究对象,结合室内基本土工试验,并借助二电极法开展电阻率试验,以探讨三峡库区非饱和紫色土电阻率受电流频率、干密度、含水率、锌含量影响的规律,并进一步分析电阻率与影响因素间的相关关系。

1 材料与方法

1.1 土样采集与性质表征

试验材料为紫色土,均取自长江库岸边坡(图1)。具体取土方法:选择野外紫色泥岩边坡,部分紫色土近期从泥岩表层风化剥落,其颗粒尖锐有棱角,部分颗粒呈片状或细粉状,部分颗粒仍残留在边坡上,并未滚落至坡脚。泥岩边坡上并未见植被及耕作迹象,周边也无人居住及明显道路,无人为扰动。紫色土样本取自泥岩边坡,样本较洁净,且能确保所有土样初始性质一致。紫色土颜色呈紫色,具有遇水易崩解的特点。土样经筛分后,去掉粒径大于4.75 mm的土体粗颗粒,小于该粒径的紫色土颗粒为本文的研究对象。取1200 g紫色土开展颗分试验,过孔径为4.75、2.36、1.18、0.63、0.315、0.16 mm筛,筛余量分别为0、461.34、318.23、202.89、85.23、110.58 g,紫色土的颗粒级配曲线如图2所示。

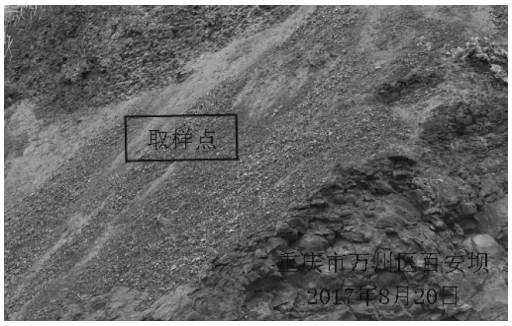

图1 原状紫色土

Figure 1 Undisturbed purple soil

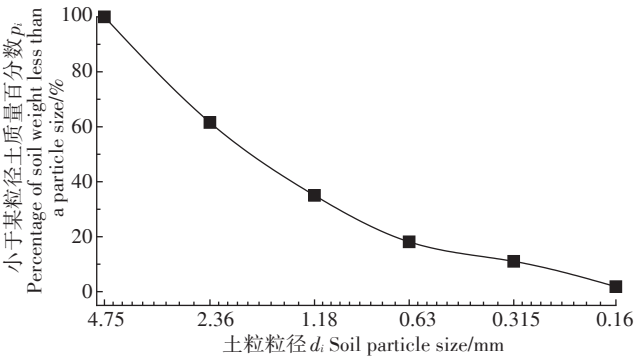

图2 试验用土的颗粒级配曲线

Figure 2 The grading curve of test soil

借助SYS数显液塑限测定仪测定土样的液塑限。土样质量含水率的测定方法：称取铝盒的质量为24.6 g，取20 g筛分后的土样，迅速装入铝盒内，打开铝盒盖子（盖子放在铝盒旁边），放在105 ℃的恒温烘箱内烘干6 h，盖好盖子，将铝盒置于干燥器内冷却30 min，称质量为38.96 g；再次打开铝盒盖子，放在105 ℃的恒温烘箱内烘干5 h，盖好盖子，置于干燥器内冷却30 min，称质量仍然为38.96 g，证明已达恒质量，土体质量含水率：

$$w=\frac{20-(38.96-20)}{38.96-20}\times100\%=5.5\%。$$

由于筛分后的紫色土体颗粒含水率仅为5.5%，土样干燥松散，因此，为便于用环刀法测土体密度，在土样中加入一定量水搅拌均匀，将环刀内壁涂一薄层凡士林，称其质量为43.55 g，测得环刀容积为100 cm^3（V），将刃口向下放在试样上；用切土刀将土样削成略大于直径的土柱，然后将环刀垂直下压，边压边削，至土样伸出环刀为止。将两端余土削去修平，擦净环刀外壁，称其质量为175.8 g，取剩余的代表性土样（m）测定含水率为18.6%。干密度：

$$\rho_d=\frac{\rho}{1+0.01w}=\frac{m}{V(1+0.01w)}=\frac{175.8-43.55}{100\times(1+0.01\times18.6\%)}=1.32\ g\cdot cm^{-3}。$$

用比重瓶法测土样的相对密度。将比重瓶（短颈100 mL）烘干，装入烘干土15 g（m_d），采用真空抽气法排除土中的空气。注入纯水至比重瓶的一半处，摇动比重瓶，将其放在砂浴上煮沸，煮沸时间为80 h，注意不要使土液溢出瓶外。将纯水注入比重瓶至接近满瓶，待瓶内悬液温度稳定及瓶上部悬液澄清后，塞好瓶塞，使多余水分自瓶塞毛细管中溢出，将瓶外水分擦干后，称瓶、水、土总质量（m_{bws}）和瓶内水温度；根据测得的温度，从已绘制的温度与瓶、水总质量（m_{bw}）关系中查得瓶、水总质量，此外查得对应温度下纯水或中性液的比重（G_{wT}）。相对密度：

$$G_s=\frac{m_d}{m_{bw}+m_d-m_{bws}}=G_{wT}=2.464。$$

采用土壤pH速测仪测定pH值；借助日立Z-5000，采用NaOH熔融法、原子吸收分光光度法测得土样全Zn含量为78 $mg\cdot kg^{-1}$。紫色土的基本性状见表1。

表1 紫色土的基本性状

Table 1 Basic properties of original purple soil

含水率w Water content/%	干密度ρ_d Dry density/ $g\cdot cm^{-3}$	相对密度G_s Relative density	pH	全Zn含量 Total soil Zn/ $mg\cdot kg^{-1}$
5.5	1.32	2.646	6.2	78

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置

二电极法在测试土体电阻率方面得到广泛应用，具有操作简单、精度高等特点，因此本文采用该方法开展紫色土电阻率试验，测试装置如图3所示。

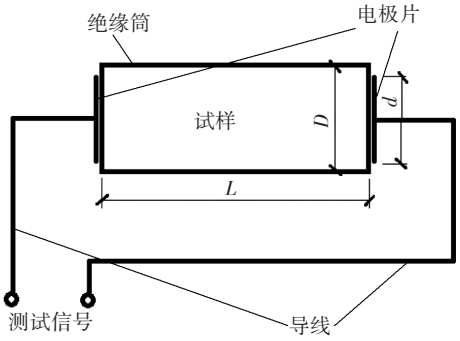

图3 紫色土交流电阻率测试装置图

Figure 3 Test device diagram of alternating current resistivity of purple soil

绝缘筒为聚氯乙烯材料，将紫色土置于筒内，筒两端各设置一片稍小于筒直径的圆形铜电极片，用于接触紫色土和传播电流；绝缘筒直径D=56.6 mm，长度L=113.2 mm；为避免筒壁形成溶液通路，铜电极片的直径d=50 mm；通过导线接入LCR数字电桥测试紫色土的阻抗值R[19]，计算得出交流电阻率ρ：

$$\rho=R\frac{A}{L} \quad (1)$$

式中：ρ为紫色土交流电阻率，Ω·m；A为铜电极片面积，m^2；L为电极片之间的距离，m。

1.2.2 材料制备

筛选出紫色土中未完全风化的块石及其他杂物，放入烘箱内105 ℃烘干24 h，将烘干处理后的紫色土装入袋中密封。全国第一次污染源普查公报显示，畜禽养殖业及水产养殖业为最大的锌来源，分别为4 756.94 t及105.63 t[20]。研究区域周边有畜牧和水产养殖基地，其养殖的粪便常用作农家肥，因此该区域土体易受到锌污染。本文以锌污染为例，旨在分析重金属污染对紫色土体电阻率的影响。试验过程中改变含水率、干密度、锌含量，以探究紫色土电阻率的变化特性。

基于紫色土液限w_L=32.7%，设置5种含水量，分别为8.5%、11.5%、14.5%、17.5%、20.5%。污染土壤的

制备:依据土壤环境质量标准[21],设置8种锌含量,分别为11、23、46、92、183、366、732、1464 mg·kg^{-1},其具体设置方法为:按一定的配合比,向紫色土中加入硫酸锌溶液及蒸馏水,搅拌均匀后装入密封袋,防止空气中水分的影响。设置5种干密度,绝缘筒体积(284.67 cm^3)一定,通过压实改变土体干密度,筒内分别装入干土330.22、352.99、375.76、398.54、421.31 g,对应的干密度分别为1.16、1.24、1.32、1.40、1.48 g·cm^{-3}。

1.2.3 试验步骤

(1)确定电流频率f。选取含水率14.5%、干密度1.32 g·cm^{-3}、锌含量11.44~1 464.32 mg·kg^{-1}的紫色土,装入绝缘筒,测得不同电流频率下的阻抗值R。

(2)不同含水率下的阻抗值。选取锌含量91.52 mg·kg^{-1}、干密度1.16~1.48 g·cm^{-3}的紫色土,改变含水率,测得阻抗值。

(3)不同干密度下的阻抗值。选取锌含量91.52 mg·kg^{-1}、含水率8.5%~20.5%的紫色土,改变干密度,测得阻抗值。

(4)不同锌含量下的阻抗值。选取干密度1.32 g·cm^{-3}、含水率8.5%~20.5%的紫色土,改变锌含量,测得阻抗值。

(5)选取干密度1.16~1.48 g·cm^{-3}、含水率14.5%的紫色土,改变锌含量,测得阻抗值。

(6)将阻抗值R代入式(1),计算得出紫色土的交流电阻率ρ。

2 结果与讨论

2.1 电流频率对交流电阻率的影响

借助交流电测试阻抗值,可有效避免电化学效应和电动现象的影响,在很大程度上减小试验误差。但电流频率对电阻率的测试存在较大的影响,已有研究成果尚未得出相应定论,因此电流频率对电阻率的影响规律值得探讨。试验中含水率和干密度保持恒定,分别为14.5%和1.32 g·cm^{-3},通过试验测得不同电流频率下交流电阻率的变化曲线如图4所示。

由图4可得,各曲线变化规律类似,交流电阻率随电流频率的增大而减小,初始降低速度较快,随后逐渐趋于稳定。水的电阻抗随着频率的增加而减小,因此土体的电阻抗也随电流频率的增加而减小,可见土体的电阻率必然随电流频率的增加而减小。以锌含量为11.44 mg·kg^{-1}的曲线为例,交流电阻率由66.28 Ω·m逐渐减小至53.26 Ω·m,降低19.64%;在低频段(f=0.1~10 kHz),电流频率降低18.11%,曲线的平均斜率为-1.21;在高频段(f=10~30 kHz),电流频率降低1.88%,曲线的平均斜率为-0.51;曲线在低频段的平均斜率明显高于高频段。由此可见,电阻率在低频段受到的交流频率影响较大,在高频段受到的影响相对较小。

为降低试验误差,提高紫色土交流电阻率的测定精度,在探究其他因素(含水率、干密度、锌含量)对交流电阻率的影响规律时,应在高频率段选取某一频率值,以减小电流频率对电阻率的影响。由图4可知,当电流频率为10 kHz时,各电阻率值基本稳定,因此本文选取10 kHz作为紫色土电阻率测试的基本频率。

2.2 含水率对交流电阻率的影响

选定电流频率10 kHz、锌含量91.52 mg·kg^{-1},测得不同干密度和含水率下的电阻率,其变化曲线如图5所示。

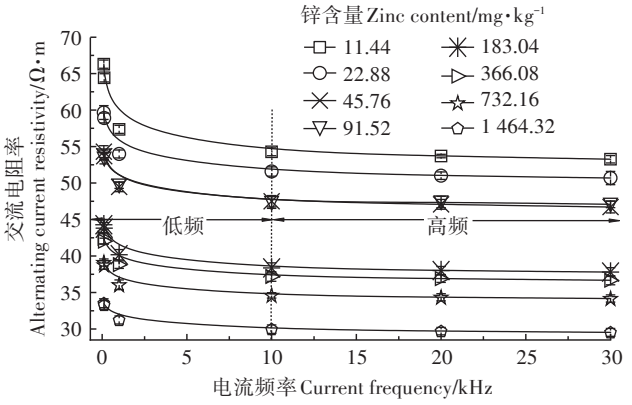

图4 电阻率随电流频率的变化曲线

Figure 4 Change curves of alternating current resistivity with current frequency

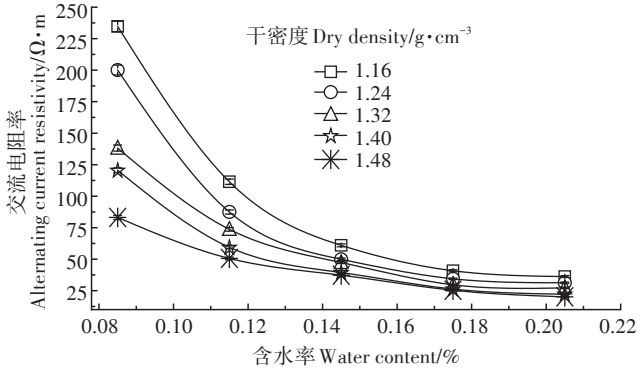

图5 电阻率随含水率的变化曲线

Figure 5 Change curves of alternating current resistivity with water content

由图5可得，各曲线变化规律类似，交流电阻率随含水率的增大逐渐减小，且初始降低速度较快，随后逐渐趋于稳定。以干密度为1.16 g·cm^{-3}的曲线为例，当含水率由8.5%增大至20.5%时，交流电阻率由234.7 Ω·m减小至36.24 Ω·m，降低84.56%；该曲线可近似看作4段直线，且直线的斜率逐渐减小。当含水率由8.5%增大至20.5%，干密度为1.24、1.32、1.40、1.48 g·cm^{-3}时的交流电阻率分别降低84.35%、80.30%、81.54%、75.76%。出现上述现象的原因在于，含水率越大，土体孔隙中的水分含量越高，进入紫色土体中的水体离子越多，且导电截面越大，从而增强了土体的导电能力；反之，低的含水率对应离子含量较小的土体，其导电截面小，导致土体导电能力较低。

基于交流电阻率随电流频率和含水率的变化规律，进一步分析干密度对交流电阻率的变化特征。

2.3 干密度对交流电阻率的影响

分析干密度对交流电阻率的影响时，电流频率10 kHz、锌含量91.52 mg·kg^{-1}，测得不同含水率和干密度下的交流电阻率，其变化曲线如图6所示。

由图6可得，各曲线的变化规律类似，交流电阻率随干密度的增大先逐渐降低，随后逐渐趋于稳定。当干密度由1.16 g·cm^{-3}增大至1.48 g·cm^{-3}时，含水率为8.5%、11.5%、14.5%、17.5%、20.5%时的电阻率分别降低65.01%、54.6%、38.9%、37.92%、44.41%，可见含水率8.5%对应的曲线降低最显著。其原因在于：(1)紫色土的干密度越大，土体颗粒间的接触越紧密，孔隙间原本分散的“水团”易形成连续的“水流”，利于导电，交流电阻率则越低；反之，干密度越小，交流电阻率越高。(2)在2.2部分已经分析得出，高含水率对应低的交流电阻率，利于导电，此时增大土体颗粒间的接触程度，仅能较小幅度地增强导电性，因而含水率(14.5%、17.5%、20.5%)高的交流电阻率曲线变化平缓。

2.4 锌含量对紫色土电阻率的影响

为了探明不同含水率下锌含量对交流电阻率的影响，取电流频率10 kHz、干密度1.32 g·cm^{-3}，交流电阻率的变化曲线如图7所示。由图7可得，各曲线变化规律类似，交流电阻率随着锌含量的增加先逐渐降低，随后逐渐趋于稳定。以含水率为8.5%的曲线为例，锌含量由11.44 mg·kg^{-1}增大至1 464.32 mg·kg^{-1}时，交流电阻率由164.16 Ω·m减小至90.04 Ω·m，降低45.15%；含水率为11.5%、14.5%、17.5%、20.5%时的电阻率分别降低48.21%、44.76%、59.22%、53.86%。其原因在于，锌含量增大后，水中导电离子含量增大，利于导电，致使电阻率降低。此外，在锌含量较低(0~200 mg·kg^{-1})时，交流电阻率降低较显著。

进一步分析交流电阻率随干密度和锌含量的变化规律，取电流频率10 kHz、含水率14.5%，交流电阻率的变化曲线如图8所示。分析图8可得，各曲线的变化规律类似，交流电阻率随着锌含量的增加而降低。当干密度为1.16 g·cm^{-3}，锌含量由11.44 mg·kg^{-1}增大至1 464.32 mg·kg^{-1}时，交流电阻率由84 Ω·m减小至40.95 Ω·m，降低51.25%；干密度为1.24、1.32、1.40、1.48 g·cm^{-3}时的电阻率分别降低44.04%、44.76%、45.56%、43.91%。其原因在于，干密度越大，紫色土颗粒间接触程度越大，利于土体颗粒间导电；此外，锌污染物易溶于土体颗粒间的水体，增大导电性，因此交流电阻率降低。

综上所述，紫色土的交流电阻率随电流频率、含水率、干密度、锌含量的增大而减小。

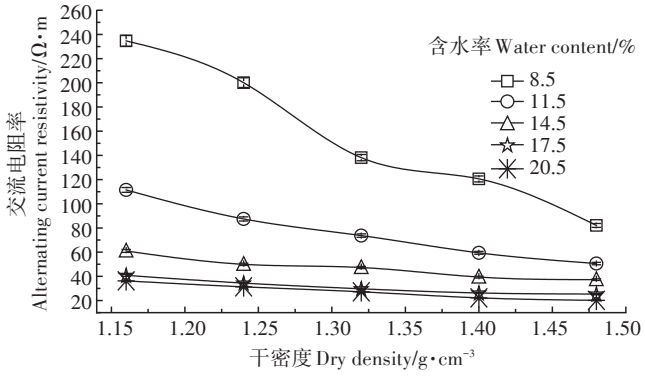

图6 电阻率随干密度的变化曲线

Figure 6 Change curves of alternating current resistivity with dry density

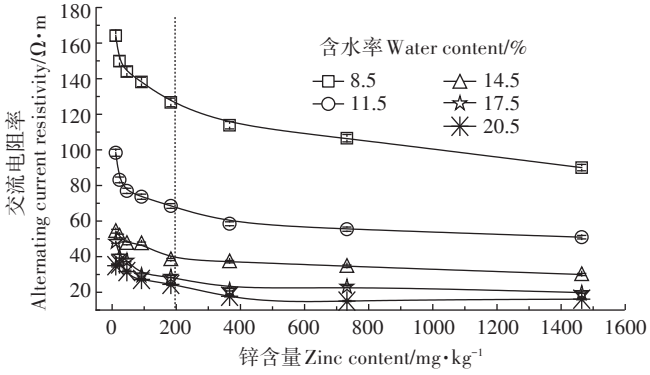

图7 电阻率随含水率和锌含量的变化曲线

Figure 7 Change curves of alternating current resistivity with current frequency and zinc content

2.5 相关性分析

基于SPSS检验电流频率、含水率、干密度、锌含量、交流电阻率是否符合正态分布,显著性值列入表2。各参数的显著性值sig=0.103~0.2,均>0.05,满足正态分布,可采用Pearson开展相关性分析。

借助SPSS分析电流频率和交流电阻率间的相关性,其显著性水平P和相关性系数R列入表3。电流频率和交流电阻率间的显著性水平P=0.042~0.049,均<0.05,说明两参数总体相关;进一步分析参数间的相关性系数,R=−0.776~−0.820,说明电流频率和交流电阻率之间显著或极显著负相关。

含水率和交流电阻率间的相关性分析结果如表4所示。含水率和交流电阻率间的显著性水平和相关性系数分别为0.013~0.048、−0.877~−0.950,P<0.005、$|R|$ > 0.8,可见两参数总体相关,且极显著负相关。

干密度和交流电阻率间的相关性分析结果如表5所示。干密度和交流电阻率间的显著性水平P=0.001~0.007,均<0.01,说明两参数总体显著相关;参数间相关性系数R=−0.933~0.988,$|R|$>0.8,说明紫色土干密度和交流电阻率之间极显著负相关。

基于上述参数间的相关性,进一步探讨锌含量和交流电阻率间的相关性,具体见表6和表7。

分析表6可得,当电流频率10 kHz、干密度1.32 g·cm^{-3}时,两参数间的显著性水平P=0.003~0.044,两参数总体相关;相关性系数R=−0.721~−0.889,说明锌含量和交流电阻率之间显著或极显著负相关。

由表7可得,当电流频率10 kHz、含水率14.5%时,锌含量和交流电阻率间的显著性水平P=0.009~0.042,均<0.05,两参数总体相关;相关性系数R=−0.725~−0.843,锌含量和交流电阻率之间显著或极显著负相关。

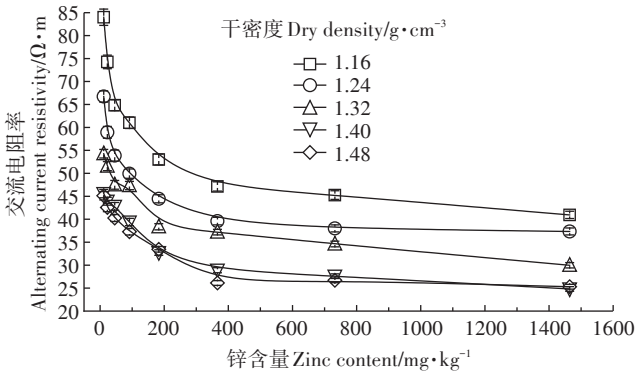

图8 电阻率随干密度和锌含量的变化曲线

Figure 8 Change curves of alternating current resistivity with dry density and zinc content

3 结论

(1)紫色土的导电路径由固体土颗粒和水体两部分组成。干密度越大,土体颗粒间接触越紧密;含水率的增大会增强孔隙水体连通性,锌含量增大会提高水体中导电离子含量,土体导电性能也越好,土体电阻率越低;且紫色土导电性对含水率和锌含量的敏感性初期最高,随后逐渐降低。

(2)紫色土的交流电阻率与4因子之间显著或极显著负相关,因此为获得精确的土壤电阻率,必须确保土壤的含水率、干密度、金属离子浓度及电流频率的一致性。

(3)在电极片附近易产生极化作用,对电阻率的测定影响较大,应将被测定土样制成长条状,减小极化作用对电阻率测定带来的误差。

表2 参数的显著性值

Table 2 Significance values of parameters

参数 Parameter	电流频率 Current frequency	含水率 Water content	干密度 Dry density	锌含量 Zinc content	电阻率 Resistivity
显著性值sig	0.196	0.2	0.2	0.103	0.2

表3 电流频率和交流电阻率的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between current frequency and alternating current resistivity

	锌含量Zinc content/mg·kg⁻¹							
	11.44	22.88	45.76	91.52	183.04	366.08	732.16	1 464.32
显著性水平Level of significance	0.049	0.046	0.047	0.042	0.048	0.047	0.046	0.046
相关性系数Correlation coefficient	−0.776g	−0.799c	−0.798d	−0.789f	−0.796e	−0.798d	−0.801b	−0.820a

注:根据不同锌含量紫色土相关性系数绝对值的大小,依次排序为a~g。下同。

Note: The order is a to g, according to the absolute value of correlation coefficient of purple soil with different zinc content. The same below.

表4 含水率和交流电阻率的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between water content and alternating current resistivity

	干密度 Dry density/g·cm^{-3}				
	1.16	1.24	1.32	1.4	1.48
显著性水平 *P* Level of significance	0.040	0.048	0.028	0.035	0.013
相关性系数 *R* Correlation coefficient	−0.895d	−0.877e	−0.917b	−0.905c	−0.950a

表5 干密度和交流电阻率的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between dry density and alternating current resistivity

	含水率 Water content/%				
	8.5	11.5	14.5	17.5	20.5
显著性水平 *P* Level of significance	0.002	0.002	0.006	0.007	0.001
相关性系数 *R* Correlation coefficient	−0.988a	−0.985b	−0.970c	−0.967d	−0.933e

表6 锌含量和交流电阻率的相关性分析(ρ_d=1.32 g·cm^{-3})

Table 6 Correlation analysis between zinc content and alternating current resistivity(ρ_d=1.32 g·cm^{-3})

	含水率 Water content/%				
	8.5	11.5	14.5	17.5	20.5
显著性水平 *P* Level of significance	0.003	0.022	0.009	0.044	0.022
相关性系数 *R* Correlation coefficient	−0.889a	−0.782c	−0.843b	−0.721d	−0.780e

表7 锌含量和交流电阻率的相关性分析(w=14.5%)

Table 7 Correlation analysis between zinc content and alternating current resistivity(w=14.5%)

	干密度 Dry density/g·cm^{-3}				
	1.16	1.24	1.32	1.4	1.48
显著性水平 *P* Level of significance	0.030	0.042	0.009	0.011	0.021
相关性系数 *r* Correlation coefficient	−0.755d	−0.725e	−0.843a	−0.827b	−0.783c

参考文献：

[1] 胡正峰, 高　明, 谢德体, 等. 三峡库区紫色土不同成土母质Cu, Zn污染评价[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(3):112-119.
HU Zheng-feng, GAO Ming, XIE De-ti, et al. On contents of Cu and Zn in different parent materials of purple soil and pollution assessment in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Southwest China Normal University*(*Natural Science Edition*), 2015, 40(3):112-119.

[2] 吴　沟, 李成保, 孙慧珍. 原位条件下土壤电阻率变化的初步观测[J]. 土壤通报, 1985, 16(2):84-90.
WU Jun, LI Cheng-bao, SUN Hui-zhen. Preliminary observation of soil resistivity change under in situ condition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1985, 16(2):84-90.

[3] Mitchell J K, Arulanandan K. Closure of "Electrical Dispersion in Relation to Soil Structure"[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 1968, 94(2):447-471.

[4] Smith S S, Arulanandan K. Relationship of electrical dispersion to soil properties[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, *ASCE*, 1981, 107(5):591-604.

[5] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The microstructure of clay given by resistivity measurements[J]. *Engineering Geology*, 1999, 54(1/2):43-53.

[6] Yoon G-L, O M, Park J. Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer[J]. *Environmental Geology*, 2002, 43(1):18-28.

[7] 王炳辉, 王志华, 姜朋明, 等. 饱和砂土不同孔隙率的电阻率特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9):1739-1745.
WANG Bing-hui, WANG Zhi-hua, JIANG Peng-ming, et al. Electrical resistivity characteristics of saturated sand with varied porosities[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(9):1739-1745.

[8] 刘子文, 张　丹, 程　健. 土体电阻率与导热系数的相关性实验研究[J]. 高校地质学报, 2018, 24(2):251-256.
LIU Zi-wen, ZHANG Dan, CHENG Jian. Experimental study on correlation between soil resistivity and thermal conductivity[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2018, 24(2):251-256.

[9] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8):1671-1676.

ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(8):1671-1676.

[10] 周明园, 王炳辉, 吴 迪, 等. 砂土电阻率特性的室内试验研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(1):134-138.
ZHOU Ming-yuan, WANG Bing-hui, WU Di, et al. Experimental study on sand resistivity characteristics of sand soil[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology*(*Natural Science Edition*), 2018, 32(1):134-138.

[11] 边汉亮, 刘松玉, 蔡国军, 等. 柴油污染粉质黏土的电阻率特性及影响因素[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(8):1177-1182.
BIAN Han-liang, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. Electrical resistivity characteristic and influence factors of diesel contaminated silty clay[J]. *Journal of Northeastern University*(*Natural Science*), 2017, 38(8):1177-1182.

[12] Long M, Donohue S, L′ Heureux J S, et al. Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(10):1158-1168.

[13] 章定文, 曹智国, 刘松玉. 固化土电阻率变化规律与经验模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2):4139- 4144.
ZHANG Ding-wen, CAO Zhi-guo, LIU Song-yu. Characteristics and an experiential model of electrical resistivity of stabilized soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Suppl 2):4139-4144.

[14] 董晓强, 苏楠楠, 黄新恩, 等. 污水浸泡对水泥土强度和电阻率特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7):1855-1862, 1870.
DONG Xiao-qiang, SU Nan-nan, HUANG Xin-en, et al. Effect of sewage on electrical resistivity and strength of cemented soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7):1855-1862, 1870.

[15] 潘玉英, 贾永刚, 许中硕, 等. 不同影响因素下石油污染土电阻率特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3):880-889.
PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, XU Zhong-shuo, et al. The study on resistivity characteristics of oil contaminated soil in different influencing factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(3):880-889.

[16] Friedman S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1):45-70.

[17] 陈 鹏, 王恩元, 朱亚飞. 受载煤体电阻率变化规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4):548-553.
CHEN Peng, WANG En-yuan, ZHU Ya-fei. Experimental study on resistivity variation regularities of loading coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(4):548-553.

[18] 蔡国军, 张 涛, 刘松玉, 等. 江苏海相黏土电阻率与岩土特性参数间相关性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8):1470-1477.
CAI Guo-jun, ZHANG Tao, LIU Song-yu, et al. Relationship between electrical resistivity and geotechnical characteristic parameters for Jiangsu marine clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8):1470-1477.

[19] Dong X Q, Woo H, Park H, et al. Application of a newly developed column test device to analyze seawater transport in sandy soils[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(5):2397-2404.

[20] 中华人民共和国环境保护部, 国家统计局, 农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 2010.
Ministry of Environmental Protection, State Statistical Bureau and Ministry of Agriculture of the People′s Republic of China. Bulletin of the first national pollution source census[R]. 2010.

[21] 中华人民共和国环境保护局. 土壤环境质量标准GB 15618—2008[S]. 2008.
The People′s Republic of China Environmental Protection Bureau. The quality standard of soil environmen GB 15618—2008[S]. 2008.