

孙亚坤, 能昌信, 刘玉强, 等. 2011. 铬污染土壤电阻率特性及其影响因素研究[J]. 环境科学学报, 31(9): 1992-1998

Sun Y K, Nai C X, Liu Y Q, *et al.* 2011. Investigation on the electrical resistivity of chromium contaminated soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(9): 1992-1998

铬污染土壤电阻率特性及其影响因素研究

孙亚坤, 能昌信*, 刘玉强, 董路

中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所, 北京 100012

收稿日期: 2010-11-30 修回日期: 2011-02-22 录用日期: 2011-03-11

摘要: 为了研究电阻率法用于土壤环境监测的可行性, 本文采用 Soil Miller Box 法进行铬污染土壤的电阻率影响因素实验, 依据实验数据建立了污染土壤电阻率与三因素(铬污染物含量、含水率、土壤孔隙比)之间的关系模型, 并于模拟污染场地中利用电阻率层析成像法对其进行验证。结果表明, 根据三因素正交实验得到影响污染土壤电阻率变化的主次因素依次为: 铬污染物含量、土壤孔隙比、含水率。铬污染土壤的电阻率随铬污染物含量、含水率的升高而降低, 随土壤孔隙比的升高而升高。在模拟污染场地模型验证中, 层析成像的电阻率结果与电阻率模型结果吻合较好, 证实了电阻率法用于铬污染土壤监测的可行性。

关键词: 铬污染土壤; 电阻率法; 污染场地; 层析成像; 污染物浓度

文章编号: 0253-2468(2011)09-1992-07

中图分类号: X131.3

文献标识码: A

Investigation on the electrical resistivity of chromium contaminated soil

SUN Yakun, NAI Changxin*, LIU Yuqiang, DONG Lu

Research Institute of Solid Waste Management, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

Received 30 November 2010;

received in revised form 22 February 2011;

accepted 11 March 2011

Abstract: Soil Miller Box method is used to study the factors that influence the electrical resistivity of chromium-contaminated soil. According to orthogonal experiment, the three factors that influence the specific resistance changes of chromium-contaminated soil are ranked in the following order: chromium pollutant concentration, water content and void ratio. The electrical resistivity of chromium-contaminated soil decreases as the chromium pollutant concentration and water content increase, and increases as the void ratio increases. Based on the model of correlation of specific resistance of contaminated soil and the three factors according to experimental data, as well as demonstration in simulated contaminated field with resistivity tomography method, the results of resistivity tomography and specific resistance model agree well, confirming that the resistivity method is applicable to monitoring contaminated soil environment.

Keywords: chromium contaminated soil; electrical resistivity method; contaminated field; tomography; pollutants

1 引言(Introduction)

铬是大多数生物体所必需的微量元素, 但高浓度的铬会对生物体产生一定的毒害作用(李金枝等, 1997)。铬及其化合物是金属加工、颜料、制革等行业常用的基本原料, 在生产过程中会产生大量含铬的废气、废水和废渣, 从而导致严重的土壤环境污染问题(杨景辉, 1995; 张厚坚, 2010)。因此, 对铬污染场地的检测与修复成了亟待解决的问题, 而对铬渣污染场地的探测是对其进行修复的基础, 但传

统的化学取样结合实验室分析的检测方法周期长、实时性差, 不适合作为长期的检测手段(韩宝平等, 2004; Mark *et al.*, 2004)。应用地球物理方法解决实际工程与环境问题是近年来逐渐发展形成的前沿研究领域, 由于环境地球物理探测方法具有全面性、原位无损、速度快等特点, 引起了相关领域学者的广泛关注(Kim *et al.*, 2001; Vincent *et al.*, 2004; Alain *et al.*, 2000; 李金铭等, 1999)。目前, 在实际现场应用方面, 以及电阻率法在环境监测、地质勘查等方面已有一些成功的工程应用案例(董

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(No. 2009AA063101-2); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(No. 2009KYYW04)

Supported by the National High-tech Research and Development Program (No. 2009AA063101-2) and the Basic Scientific Project of Chinese Public Fund (No. 2009KYYW04)

作者简介: 孙亚坤(1987—), 男, E-mail: metalgod2008@yahoo.cn; * 通讯作者(责任作者), E-mail: naicx@craes.org.cn

Biography: SUN Yakun (1987—), male, E-mail: metalgod2008@yahoo.cn; * **Corresponding author**, E-mail: naicx@craes.org.cn

路等 2008; 冯锐等 1997; 郭庆华 2005)。

在早期的介质电学性质研究中, 针对岩石提出了 Archie 公式(Archie , 1942) , Rhoads 和 Mitchell 也相继提出了非饱和沙壤土的电阻率模型(Rhoades , 1989; Mitchell , 1993) 。对于土壤的电阻率特性, 研究人员针对土壤类型(Fukue *et al.* , 1999; 康辉平 , 2006; 饶平等 2007; 刘国华等 2004; 查甫生等 , 2007) 、温度(Keller *et al.* , 1966; Campbell *et al.* , 1948; 韩立华等 2007; 曹晓斌等 2007) 、含水率(韩立华 2006; 刘广明等 2001; 孙宇瑞 2000; 白兰等 , 2008; Pozdnyakova , 1999) 等因素做了相关研究, 并进行了复电阻率的影响因素和反演模型研究(刘豪睿等 2010) , 然而有关铬污染土壤的电阻率特性及电阻率法用于污染场地探测的研究还未见报道。因此, 本文对不同污染物含量、含水率、孔隙度等影响因素下的铬污染土壤电阻率变化特性进行研究, 并根据实验数据提出一个基于沙壤土的电阻率模型, 并对污染场地进行层析成像(ERT) 验证该模型的有效性, 以达到通过电阻率变化来推测土壤中铬污染物含量的目的, 并为电阻率法及层析成像技术用于污染场地污染范围圈定和快速分析研究提供参考。

2 材料与方 法(Materials and methods)

2.1 实验材料

本试验以土壤的电阻率为主要实验指标, 由于实际铬渣污染场地中的污染物质绝大部分为可溶性六价铬盐, 而三价铬在土壤中以沉淀及残渣态形式存在的居多, 且可溶性六价铬盐对土壤电阻率的影响远大于三价铬的影响(张厚坚 2010) 。因此, 本文利用加入优级纯 Na_2CrO_4 试剂的方法来模拟土壤中含有的铬污染物, 在中国环境科学研究院固体废物污染探测实验场地中选取未经铬污染的沙壤土进行实验研究, 从而减小其他离子因素的影响。在进行实验前, 对土壤进行粉碎、风干、过筛等预处理, 并采用浸出毒性分析法(GB5086. 1—1997) , 分别利用 Dionex ICS-1000 离子色谱仪和 Agilent 7500CS ICP-MS 来测量阴阳离子含量背景值, 结果如表 1、2 所示。

表 1 土壤样品的物理性质

Table 1 Physical properties of soil sample

pH	土壤组成			密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	有机质
	沙	沙土	黏土		
7. 61	23. 0%	63. 3%	13. 7%	1. 26	8. 42%

表 2 土壤浸出液元素背景值

Table 2 Components of CK soil sample $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Ba^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-
3. 24	0. 78	1. 23	5. 68	1. 02	2. 56	6. 01

在室内将土壤样品置于 Miller Soil Box 中, 测量土壤电阻率, 电路图如图 1 所示。在室外, 利用 AGI Supersting R8 高密度电法仪对模拟污染场地的电阻率进行测量, 并对其进行层析成像分析。

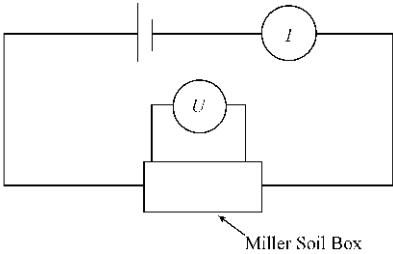


图 1 电阻率测试电路图
Fig. 1 Circuit diagram for resistivity test

2.2 土壤电阻率模型

土壤的电阻率由两部分组成: 孔隙水的电阻率和土壤颗粒的电阻率(查甫生等 2006) 。因此, 这两个方面的主要参数影响了土体导电性能的大小: 一是孔隙水的含盐量, 二是土壤颗粒表面的吸附特性与土壤颗粒之间的相互连结作用(刘松玉等 2006) 。

在模拟实验场地中, 由于模拟场地大部分属沙壤土, 故采用阿尔奇公式来表示土壤的电阻率:

$$\rho_0 = k\varphi^{-m}S_r^{-n}\rho_w \tag{1}$$

式中, ρ_0 为土壤电阻率($\Omega\cdot\text{m}$) , k 、 m 、 n 均为与土壤性质相关的参数, φ 为土壤孔隙比, S_r 为饱和度, ρ_w 为土壤孔隙水电阻率($\Omega\cdot\text{m}$) 。

土壤孔隙水电阻率可以用土壤溶液摩尔电导率 Λ ($\text{m}^2\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$) 和铬污染物离子的物质的量浓度 n^0 ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 来表示:

$$\rho_w = 1/(\Lambda n^0) \tag{2}$$

再根据土壤孔隙比 φ 、饱和度 S_r 和体积含水率 θ_v 之间的关系:

$$S_r = \theta_v/\varphi \tag{3}$$

将式(2) 、(3) 代入式(1) 可得:

$$\rho_0 = k\varphi^{n-m}\theta_v^{-n}(\Lambda n^0)^{-1} \tag{4}$$

将铬污染物离子的物质的量浓度用污染物的质量浓度 λ 来表示:

$$n^0 = \frac{\lambda}{52 \times \theta_v} \tag{5}$$

将式(5) 代入式(4) , 得到基于阿尔奇公式的铬

污染土壤电阻率 ρ_0 与土壤孔隙比 φ 、质量含水率 θ_w 、体积含水率 θ_v 、铬污染物浓度 λ 之间的关系模型:

$$\rho_0 = k\varphi^{n-m}\theta_w\lambda^{-1}\theta_v^{-n} \quad (6)$$

2.3 实验内容

实验内容包括室内模拟实验和室外模型验证两个部分。①室内模拟实验: 根据上述电阻率模型, 确定环境因素对铬污染土壤的影响。本实验以铬污染土壤的电阻率为实验指标, 选取不同孔隙比、含水率和铬污染物含量的污染土样, 测试不同条件下土样的电阻率, 以总结污染土样电阻率与这些土壤基本理化性质之间的关系模型。②室外模型验证: 利用高密度电法仪对某已知铬污染物浓度的区域进行 ERT 分析, 验证该模型的准确性。

具体实验步骤如下: 选取未经污染的土样, 配制不同含水率 (8%、12%、16%、20%、24%)、孔隙比 (0.45、0.49、0.53)、铬污染物含量 (0、25、50、75、100、150、200、300、400、500、1000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 实验土样, 在容器内搅拌均匀, 配制后将土样静置 48 h, 待溶液与土壤充分混合后, 以备测量; 将装有土样的 Miller Soil Box 接入测量电路中, 读出电流表和电压表的读数, 利用伏安法测电阻的原理对各个土样电阻率进行计算。

3 结果(Results)

3.1 铬污染土壤电阻率影响因素分析

根据实验结果, 用各影响因素相应的水平编号 (-1、0、+1) 作为横坐标, 用各影响因素相应水平下的电阻率平均值作为纵坐标, 表示各影响因素与

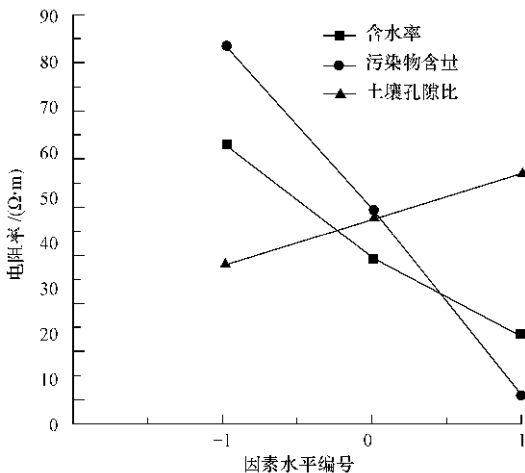


图2 各影响因素与电阻率的关系

Fig. 2 Relationships between factors and resistivity

电阻率的关系(图2), 其中, 各水平编号对应的参数值为: 含水率为 8%、16%、24%, 污染物含量为 0、100、1000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 孔隙比为 0.45、0.49、0.53。根据数据计算分析可以得到在这 3 个因素中, 每种因素达到下列变化量时: 含水率 2.63%、污染物含量 0.00137%、孔隙比 0.45%, 均会使电阻率变化 1 $\Omega\cdot\text{m}$ 。因此, 影响铬污染土壤电阻率各因素的主次顺序为: 污染物含量、土壤孔隙比、含水率。

3.2 铬污染物含量对电阻率的影响

对上述土样作相同孔隙比、不同铬污染物含量情况下的电阻率实验, 可以得到铬污染物含量与电

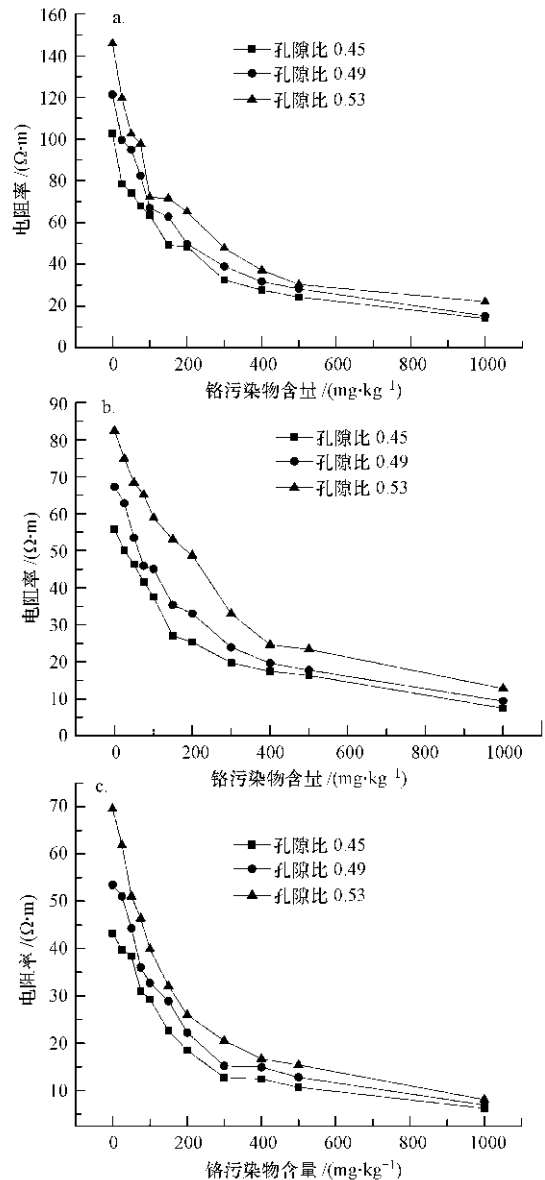


图3 不同含水率条件下铬污染物含量对电阻率的影响(a. 8% b. 16% c. 20%)

Fig. 3 Relationship between the pollution concentration and resistivity (a. 8% , b. 16% , c. 20%)

阻率的关系(图3).由图3可知,在孔隙比一定的情况下,随着污染物含量的增加,土壤样品电阻率有逐渐降低的趋势,特别是当污染物含量低于 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤样品中铬污染物含量的较小变化就能引起电阻率的显著变化;当污染物含量高于 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤样品电阻率受污染物含量的影响则有所减小,并在较高含量处趋于一个较为稳定的值.这是由于污染物含量的增加导致土壤孔隙水中带电离子的数量增加,提高了土壤样品的导电性,进而使其电阻率减小.

3.3 含水率对电阻率的影响

在无 污 染 土 壤 和 铬 污 染 物 含 量 为 $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤条件下,做不同含水率情况下的电阻率实验,得到含水率与电阻率的关系(图4).由图4可知,随着含水率的增加,土壤样品的电阻率有所降低.当含水率较小时(含水率小于12%),土壤样品处于干燥状态,电阻率很高,此时含水率的变化对电阻率影响很大,含水率每增加4%,电阻率减小 $30\sim 40\ \Omega\cdot\text{m}$;随着含水率的升高,当含水率大于16%时,含水率每增加4%,电阻率则减小 $5\sim 20\ \Omega\cdot\text{m}$.该变化规律与铬污染物含量对土壤样品电阻率的影响情况相类似.

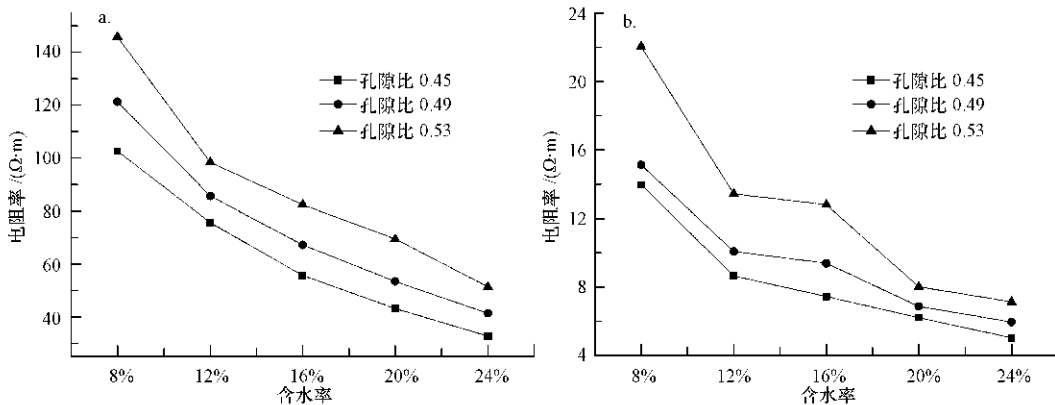


图4 不同铬污染物含量时含水率对电阻率的影响(a. $0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ b. $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig. 4 Relationship between the water content and resistivity (a. $0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ b. $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

3.4 孔隙比对电阻率的影响

分别在无 污 染 土 壤 和 污 染 物 含 量 为 $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤中,做不同孔隙比土壤样品的电阻率实验,得到孔隙比与土壤电阻率的变化关系

(图5).由图5可知,在含水率一定的情况下,电阻率随着孔隙比的增加而增大;土壤中含有污染物时,土壤样品电阻率随孔隙比增加而增大的趋势更为明显.

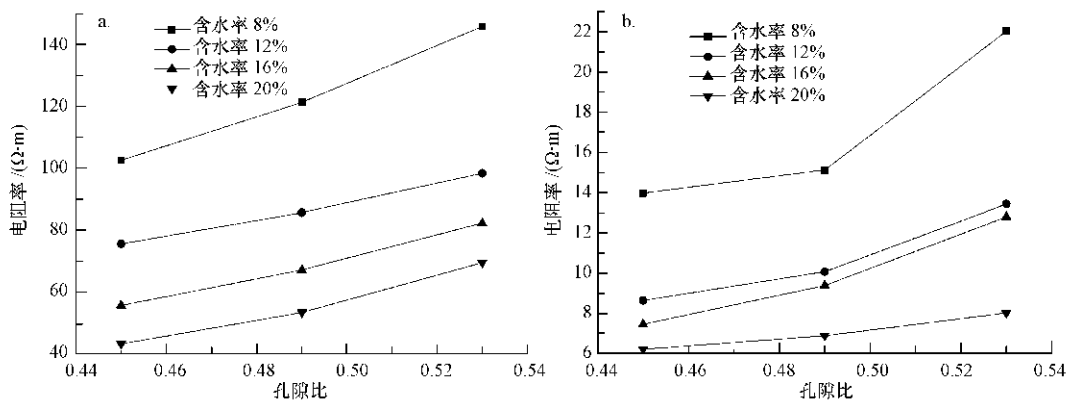


图5 不同铬污染物含量时孔隙比对电阻率的影响(a. $0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ b. $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig. 5 Relationship between the void ratio and resistivity(a. $0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ b. $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

3.5 铬污染土壤电阻率模型

基于上述分别考虑单因素(铬污染物含量、含水率、孔隙比)对土壤样品电阻率影响的分析,同时考虑到由于土壤含水率与孔隙比、容重及体积含水率之间存在一定的换算关系,因此,根据上述实验数据和公式(6)进行统计分析得到一个基于阿尔奇公式的沙壤土电阻率模型:

$$\rho_0 = 1.8 \times 10^6 \varphi^{1.762} \theta_w \lambda^{-1} \theta_v^{0.474} \tag{7}$$

式中, φ 为土壤孔隙比, θ_w 为质量含水率, θ_v 为体积含水率, λ 为铬污染物含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),并通过下面的模拟场地对实验室内实验结果进行了验证与分析.

3.6 模拟场地实验及模型验证

在中国环境科学研究院固体废物污染探测实验场地中,利用加入优级纯 Na_2CrO_4 试剂的方法来模拟土壤中含有的铬盐污染物,置于模拟污染场地中待模拟污染物进行充分扩散转移后,利用 AGI Supersting R8 高密度电法仪对该铬污染土壤区域进行测试,每隔 0.4 m 距离设置 1 个测量电极,主要测量深度为 0.3、0.6、0.9 m,最大测量深度可达到 0.9 m. 通过比较层析成像所得的电阻率数值与式(7)所得结果,检验沙壤土电阻率模型的合理性. 电阻率层析成像如图 6 所示.

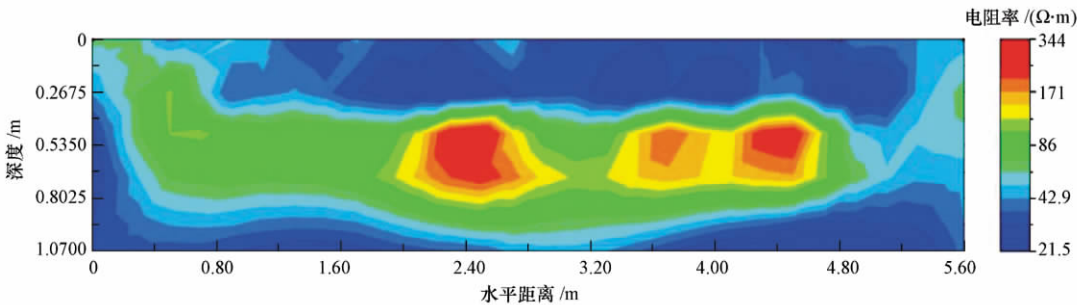


图 6 铬污染土壤电阻率层析成像图
Fig. 6 Electrical resistivity tomography for chrome contaminated soil

在深度为 0.6 m,水平位置分别为 0.8、1.4、2.2、3.2 和 4.0 m 处取土样进行室内化验分析,得起孔隙比为 45.6%,含水率为 12%,Cr(VI)含量的测定根据二苯碳酰二肼分光光度法(GB 15555.4—1995)来进行.5 个采样点的 Cr(VI)含量、实测电阻率及根据式(7)的计算电阻率如表 3 所示.其中,Cr(VI)含量为对所采土样进行化验分析所得到的 Cr(VI)含量,计算电阻率表示根据土样中已知 Cr(VI)含量、孔隙比、含水率及电阻率模型所得到的电阻率模型计算值,实测电阻率表示利用 AGI 高密度电法仪对土壤电阻率的实测值.结果表明,层析成像电阻率与根据式(7)计算结果吻合较好.

但该模型的局限性在于仅适用于绝大多数污染物为可溶性六价铬盐的情况,在区分其他金属元素、地形校正及精确度方面还有待进一步研究和改进.

4 结论(Conclusions)

实验结果表明,影响铬污染土壤电阻率的主要因素有:污染物含量、含水率和孔隙比,其中,含水率和污染物含量的影响较大,孔隙比的影响较小.在此基础上,结合阿尔奇公式建立了土壤电阻率与铬污染物含量的数值关系模型: $\rho_0 = 1.8 \times 10^6 \varphi^{1.762} \theta_w \lambda^{-1} \theta_v^{0.474}$.通过模拟场地验证,电阻率模型的计算值与层析成像结果较为一致;电阻率法在精确度方面仍有所不足,但以其快速无损的特点,亦可为化学方法监测提供一定的参考和辅助指导作用.

责任作者简介: 能昌信(1965—),男,副研究员,博士,主要从事环境检测与垃圾填埋场防渗层完整性检测相关工作. E-mail: naicx@craes.org.cn.

表 3 不同位置的电阻率对比关系
Table 3 Correlation of electrical resistivity at different positions

水平距离/m	Cr(VI) 含量 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	实测电阻率 /($\Omega \cdot \text{m}$)	计算电阻率 /($\Omega \cdot \text{m}$)
0.8	210.56	86 ~ 104	94.24
1.4	180.84	86 ~ 104	109.72
2.2	153.78	128 ~ 145	129.04
3.2	142.39	128 ~ 145	139.36
4.0	149.08	104 ~ 128	133.10

参考文献(References):

- Alain T, Michael D, Albert H. 2000. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horization[J]. *Geoderma*, 97: 393-404
- Archie G E. 1942. The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 146: 54-62
- 白兰, 周仲华, 张虎元, 等. 2008. 污染土的电阻率特性分析[J]. *环境工程* 26(2): 66-69
- Bai L, Zhou Z H, Zhang H Y, et al. 2008. Analysis the resistivity characteristics of contaminated soil[J]. *Environmental Engineering*, 26(2): 66-69(in Chinese)
- Campbell R B, Bower C A, Richard L A. 1948. Change in electrical conductivity with temperature and the relation with osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts [J]. *Soil Science Society of America*, 13: 33-69
- 曹晓斌, 吴广宁, 付龙海, 等. 2007. 温度对土壤电阻率影响的研究[J]. *电工技术学报* 22(9): 1-6
- Cao X B, Wu G N, Fu L H, et al. 2007. Study of the temperature impact on soil resistivity[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 22(9): 1-6(in Chinese)
- 董路, 叶腾飞, 能昌信, 等. 2008. ERT 技术在无机酸污染场地调查中的应用[J]. *环境科学研究* 21(6): 67-71
- Dong L, Ye T F, Nai C X, et al. 2008. Application of ERT technology to investigate inorganic polluted site[J]. *Research of Environmental Sciences*, 21(6): 67-71(in Chinese)
- 冯锐, 李晓芹, 陶裕录. 1997. 电阻率层析成像用于水文地质勘探[J]. *地震学报* 19(6): 655-663
- Feng R, Li X Q, Tao Y L. 1997. Resistivity tomography method in hydrogeological exploration[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 19(6): 655-663(in Chinese)
- Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. 1999. The micro-structures of clay given by resistivity measurement[J]. *Engineering Geology*, 54: 43-53
- 郭庆华. 2005. 高密度电阻率法在堤坝除险加固效果检测中的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. 17-32
- Guo Q H. 2005. Measuring research about soil summary cement soil prevention of seepage wall by utilizing high density resistivity method [D]. Qingdao: Chinese Marine University. 17-32(in Chinese)
- 韩宝平, 王小英, 朱雪强. 2004. 某市岩溶地下四氯化碳污染特征研究[J]. *环境科学学报* 24(6): 982-988
- Han B P, Wang X Y, Zhu X Q. 2004. Groundwater contamination by carbon tetrachloride in Karstic area in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 24(6): 982-988(in Chinese)
- 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 2007. 温度对污染土电阻率影响的试验研究[J]. *岩土力学* 28(6): 1151-1155
- Han L H, Liu S Y, Du Y J. 2007. Experiment study on effect of temperature on electrical resistivity of contaminated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 28(6): 1151-1155(in Chinese)
- 韩立华. 2006. 电阻率法在污染土评价与处理中的应用研究[D]. 南京: 东南大学. 20-22
- Han L H. 2006. Study on the application of electrical resistivity method in evaluation and reinforcement for contaminated soils[D]. Nanjing: Southeast University. 20-22(in Chinese)
- 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 2006. 一种检测污染土的新方法——电阻率法[J]. *岩土工程学报* 28(8): 1028-1032
- Han L H, Liu S Y, Du Y J. 2006. New method for testing contaminated soil: electrical resistivity method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 28(8): 1028-1032(in Chinese)
- 康辉平. 2006. 土的电阻率与土工参数相关性实验研究[J]. *水利科技* 4: 40-43
- Kang H P. 2006. Experiment research on the relationship between soil electrical resistivity and geotechnical parameters [J]. *Hydraulic Science and Technology*, 4: 40-43(in Chinese)
- Keller G, Frischknecht F. 1966. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting* [M]. New York: Pergamon Press. 5-12
- Kim J S, Han S H, Ryang W H. 2001. On the use of statistical methods to interpret electrical resistivity data from the Eumsung basin [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 48: 199-217
- 李金铭, 张春贺, 肖顺. 1999. 水污染的导电性和激电性与污染浓度变化关系的几个实验结果[J]. *地球物理学报* 42(3): 428-434
- Li J M, Zhang C H, Xiao S. 1999. Some experiment results of conduction and induced polarization characteristics for polluted water with the variation of the pollution concentration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(3): 428-434(in Chinese)
- 李金枝, 朱建华. 1997. 铬与健康[J]. *广东微量元素科学* 4(8): 8-10
- Li J Z, Zhu J H. 1997. Chromium and health [J]. *Trace Elements Science*, 4(8): 8-10(in Chinese)
- 刘广明, 杨劲松. 2001. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. *土壤通报* 32: 85-87
- Liu G M, Yang J S. 2001. Study on the correlation of soil salt content with electric conductivity and soil water content [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 32: 85-87(in Chinese)
- 刘国华, 王振宇, 黄建平. 2004. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. *岩土工程学报* 26(1): 83-87
- Liu G H, Wang Z Y, Huang J P. 2004. Research on electrical resistivity feature of soil and it's application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 26(1): 83-87(in Chinese)
- 刘豪睿, 能昌信, 刘玉强. 2010. 铬污染土壤复电阻率数学模型参数反演[J]. *环境科学研究* 23(4): 480-484
- Liu H R, Nai C X, Liu Y Q. 2010. Parametric inversion on complex resistivity mathematic model of chrome-contaminated soil [J]. *Research of Environmental Sciences*, 23(4): 480-484(in Chinese)
- 刘豪睿, 孙亚坤, 能昌信. 2010. 铬污染土壤复电阻率频散特性[J]. *物探与化探* 34(3): 372-375
- Liu H R, Sun Y K, Nai C X. 2010. The complex dispersion properties of the chrome-contaminated soil [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(3): 372-375(in Chinese)
- 刘松玉, 查甫生, 于小军. 2006. 土的电阻率室内测试技术研究[J]. *工程地质学报* 14(2): 216-222
- Liu S Y, Zha F S, Yu X J. 2006. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils [J]. *Journal of Engineering Geology*,

- 14(2): 216-222(in Chinese)
- Mark L K. 2004. Complex NAPL site characterization using fluorescence Part1: selection of excitation wave length based on NAPL composition [J]. *Soil and Sediment Contamination* ,3: 103-118
- Mitchell J K. 1993. *Fundamentals of Soil Behavior* [M]. New York: Wiley & Sons. 23-29
- Pozdnyakova L A. 1999. Electrical properties of soils [D]. Laramie: University of Wyoming. 40-49
- 饶平平, 陈小亮, 欧刚. 2007. 膨胀土与红粘土电阻率室内试验比较 [J]. *山西建筑* ,33(31): 125-126
- Rao P P, Chen X L, Ou G. 2007. Comparison of laboratory test of resistivity between swelling clay and red clay [J]. *Shanxi Architecture* ,33(31): 125-126(in Chinese)
- Rhoades J J. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations [J]. *Soil Science Society of America* , 53: 433-439
- 孙宇瑞. 2000. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响 [J]. *中国农业大学学报* ,5(4): 39-41
- Sun Y R. 2000. Experimental survey for the effects of soil water content and soil salinity on soil electrical conductivity [J]. *Journal of China Agricultural University* ,5(4): 39-41(in Chinese)
- Vincent C, Christian W, Pierre C. 2004. Combining geophysical methods to estimate the spatial distribution of soils affected by water saturation [J]. *Geoscience* ,336: 553-560
- 杨景辉. 1995. *土壤污染防治* [M]. 北京: 科学出版社. 103-107
- Yang J H. 1995. *Soil Pollution and Prevention* [M]. Beijing: Science Press. 103-107(in Chinese)
- 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 2007. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究 [J]. *岩土力学* ,28(8): 1671-1676
- Zha F S, Liu S Y, Du Y J, et al. 2007. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey Soil [J]. *Rock and Soil Mechanics* ,28(8): 1671-1676(in Chinese)
- 查甫生, 刘松玉. 2006. 土的电阻率理论及其应用探讨 [J]. *工程勘察* ,5: 10-15
- Zha F S, Liu S Y. 2006. Study on the theory of soil electrical resistivity and its application [J]. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying* ,5: 10-15(in Chinese)
- 张厚坚, 王兴润, 陈春云. 2010. 高原地区铬渣污染场地污染特性研究 [J]. *环境工程学报* ,4(4): 915-918
- Zhang H J, Wang X R, Chen C Y. 2010. Study on the polluting property of chrome residue contaminated sites in plateau section [J]. *Chinese Journal of Environment Engineering* ,4(4): 915-918(in Chinese)