电阻率法确定土壤水分特征曲线初探①

张志祥[1]，徐绍辉[1*]，崔峻岭[2]，时 青[2]

(1 青岛大学环境科学系，山东青岛 266071；2 青岛水文局，山东青岛 266071)

摘 要：以取自青岛市郊区的田间土样为研究对象，通过自制的室内土壤电阻率测量装置，测定了土壤的电阻率及对应的含水量，建立了电阻率–含水量关系模型。基于 Ku/pF 非饱和导水率测量系统测定的土壤水分特征曲线，借助含水量这一中间量，推求出了土壤电阻率–基质吸力关系模型，从而可以根据电阻率计算出对应的土壤基质吸力。耦合土壤电阻率–含水量关系模型与土壤电阻率-基质吸力关系模型，达到了预测土壤水分特征曲线的目的，为电阻率法在区域尺度空间和时间上预测土壤水分特征曲线提供了新的途径。

关键词：电阻率法；含水量；基质吸力；土壤水分特征曲线(SWRC)

中图分类号：S152.7

利用土壤水分特征曲线(soil water retention curve, SWRC)可以方便地获得非饱和导水率、水分扩散率、土壤水分状况和永久凋萎点等一系列重要的土壤物理参数，还可为预测土壤中的水分运动和化学物质的运移提供前提条件。

长期以来，通过实验获取土壤水分特征曲线耗时耗力，完成一条完整的土壤水分特征曲线测定一般需要较长时间，并且只限于实验室尺度上，难以在野外大尺度范围上实施。国内外大量学者对土壤水分特征曲线的测定方法及仪器设备进行了研究，但目前几乎所有的方法在测量水势范围和精度方面均存在某些不足。鉴于土壤水分特征曲线测定的复杂性，许多学者提出了利用间接方法预测土壤水分特征曲线。这些间接方法主要是根据土壤的基本理化性质，如粒径分布、有机质含量、体积质量(容重)、冻融特性等，通过某种经验或者半经验的公式来预测土壤水分特征曲线。这些方法包括建立在统计分析基础之上的土壤转换函数法[1–2]、利用土壤水分特征曲线和土壤颗粒累计分布曲线的相似性建立起来的分形模型方法[3–6]、根据土壤水势和土壤水分冰点降低的关系及土壤冻融特征曲线获得的土壤冻融法[7–8]等。但是，无论哪种间接方法，都不能够全面地反映土壤中不同水分含量与土壤固相颗粒之间的相互作用机制，而且有较大误差。因土壤水分特征曲线及水力传导率决定了水分和化学物质在土壤中的运移速度，其可靠性直接影响着模型的预测结果[9]。

总之，土壤水分特征曲线受多种环境和土壤因素的影响。对其直接进行测定耗时、费力、花费高；而间接估计需要大量的数据资料，并且在准确性和精度方面有一定的局限性。特别是，由于土壤在水平方向和垂直方向上的空间变异性，在流域尺度上对土壤水分特征曲线进行准确预测相当困难，目前相关研究还不多见。

土壤电阻率是土壤各物理特性的综合表征，能够反映土壤水分含量、孔隙度、饱和度、渗透系数及土壤基质吸力等情况[10–14]。对于性质相近的土壤(颗粒组成成分、空隙大小和分布、孔隙水成分等大致相同)，在同一温度下，其电阻率的大小取决于含水量[12]，而土壤含水量也决定着基质吸力的大小，因此，土壤电阻率的大小也能反映基质吸力的大小。若能通过实验获得土壤电阻率与基质吸力的函数关系，则可利用电阻率法来预测土壤基质吸力，再结合土壤电阻率与含水量的函数关系，即可利用电阻率法来预测土壤水分特征曲线。

电阻率法作为地球物理手段中常用的方法，能够以非扰动的形式，通过在土壤表面一次性布设电极，来获得区域尺度上、地下多孔介质的电阻率在空间上的分布，另外，还能达到长期监测的目的[14–22]。利用电阻率法可以方便有效地在区域尺度上获得较为准确的土壤水分特征曲线，同时也解决了土壤在水平

①基金项目：国家自然科学基金项目(41171183)和水利部公益性行业科研专项项目(201201024)资助。

* 通讯作者(shhxu@qdu.edu.cn)

作者简介：张志祥(1986—)，男，山东济宁人，硕士研究生，主要从事土壤水流和溶质运移方面研究。E-mail: zzxjerry@163.com

和垂直方向上的空间变异性对土壤水分特征曲线测定所带来的困难。

本文通过室内实验分别建立了土壤电阻率与含水量和土壤电阻率与基质吸力之间的定量关系，进而获得了土壤水分特征曲线，类似研究还未见报道。这为土壤水分特征曲线的确定提供了一种新的方法。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用的土样来自青岛市郊区田间土壤，取样点位于 36°24′13.31″E，120°11′53.65″N。为减少农作物根系及土壤中动物洞穴对土壤孔隙度的影响，取表层 10 cm 以下的新鲜壤土(美国制)。土壤的理化性质如表 1 所示。

表 1 土样的理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of soil tested

土壤质地	机械组成(g/kg)			体积质量 (g/cm^3)	孔隙度	有机质 (g/kg)	CEC (cmol/kg)
	黏粒(<2 μm)	粉粒(2 ~ 50 μm)	砂粒(>50 μm)				
壤土	138.7	374.5	486.8	1.65	0.378	14.98	15.48

1.2 实验方法

对土壤水分特征曲线的测定，使用“ Ku/pF 非饱和导水率测量系统”(图 1)。该测量系统属于自然蒸发法。用该系统自带的 10 个环刀在取样点取原状土，带回实验室内饱和；然后对所取环刀样在相应的位置钻孔，按要求插入上下张力计后放在对应的位置上进行测量。该系统是通过自动定时记录土样的张力计读数和对应的土样重量，计算得到土壤水吸力和体积含水量的值，完成土壤水分特征曲线的测定。

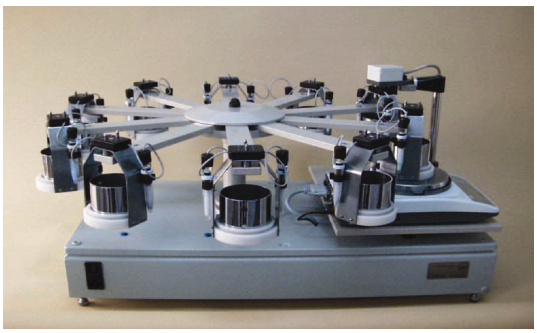


图 1 Ku/pF 非饱和导水率测量系统
Fig. 1 Ku/pF apparatus for measurement of unsaturated hydraulic conductivity

对土样电阻率的测定采用自制土样盒，测定装置如图 2 所示。土样盒由有机玻璃板粘合而成，内尺寸长、宽、高分别为 22 cm、4 cm、3 cm。两端电极是厚度为 0.5 mm 的铜片；中间两电极为长 4 cm、直径 2 mm 的铜导线，两电极间距为 12 cm。测量电源由 28 V 交流电适配器提供，测量数值由多功能数字万用表显示。测量方法采用四极法[23]，电阻率测量示意图见图 3。土样电阻率计算公式为：

$$\rho = \frac{\Delta U}{I}\cdot\frac{S}{L} = \frac{\Delta U}{I}\cdot\frac{0.03\times 0.04}{0.12} = \frac{\Delta U}{I}\times 10^{-2} \qquad (1)$$

式中：ΔU 为中间两电极间电压(V)；I 为通过土样的电流(A)；S 为土样的横截面积(m^2)；L 为中间两电极间距(m)。

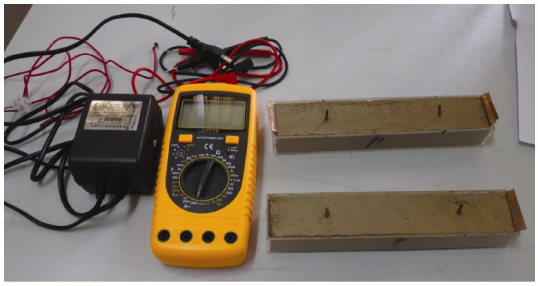


图 2 土样盒电阻率测量装置
Fig. 2 Measurement equipment of soil resistivity

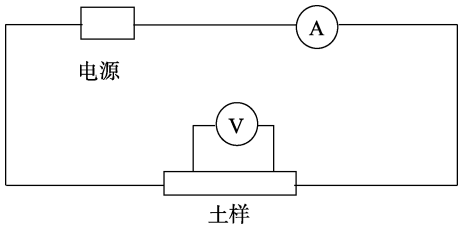


图 3 电阻率测量示意图
Fig. 3 Schematic diagram of experimental equipment

按照土样的体积质量和孔隙度，用去离子水配制接近饱和的土样填入土样盒，然后在各距两端 5 cm 处插入铜导线电极，使该电极间距为 12 cm。填土之前，先在土样盒两端放好铜片电极，填土过程中使土样与电极片紧密接触。制备 6 个平行样。土样电阻率对应的含水量用连续称重法得到。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分特征曲线的测定

由于测定仪器非常敏感，在测定过程中土样蒸发失水造成干裂，仅 1 号和 8 号环刀样数据能够表达较

准确的土壤水分特征曲线。其他的数据偏差较大，明显不可用。造成这种现象的原因有两点：①张力计与土样接触不好，实验过程中，张力计读数变化不大；②天气较干燥，加之白天实验室内人员流动大，导致室内空气流动较大，致使土样开裂较快，导致张力计部分暴露在空气中影响了测量结果。

由于土壤水分特征曲线的影响因素复杂，至今尚没有从理论上建立土壤含水量和土壤基质势之间的关系，通常用经验公式来描述。张力计一般测定的土壤水吸力范围在 0 ~ 80 kPa。为方便起见，选用形式较为简单的 Gardner 模型来表征测得的土壤水分特征曲线：

$$\theta = ah^b \tag{2}$$

式中，h 为土壤基质吸力(cm H_2O)；θ 是土壤体积含水量(cm^3/cm^3)；a、b 为参数。

对 1 号和 8 号环刀样的实验数据，采用 Gardner 模型进行拟合，拟合结果见表 2。

表 2　Gardner 模型参数拟合结果

Table 2　Fitted results of Gardner model

环刀号	a	b	R^2	$RMSE$
1	0.435	–0.041	0.896	0.005
8	0.414	–0.035	0.958	0.003

对拟合结果取其平均值，可得 a = 0.425，b = –0.038，从而得到土壤的水分特征曲线：

$$\theta = 0.425h^{-0.038} \tag{3}$$

对比拟合所得土壤水分特征曲线与实测值，见图 4，模拟值与实测值吻合较好，说明该模型能够表征实验土壤的水分特征曲线。

2.2　土壤电阻率和含水量相关性分析

为了描述电阻率和含水量之间的关系，选用阿尔奇经验公式[3]：

$$S_r = \left(\frac{\rho_S}{\rho}\right)^{1/n} \tag{4}$$

式中，S_r 是土壤水分饱和度(= θ/φ)；ρ_s 为土壤 100% 饱和时的电阻率；ρ 为实测土壤的电阻率；n 为经验常数，又称为饱和度指数，其取值随土壤类型的不同而不同，并且变化范围在 1.0 ~ 2.5 之间[10]。

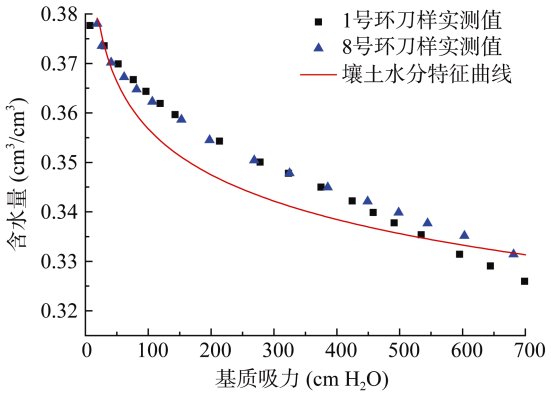


图 4　土壤水分特征曲线的实测值与模拟值

Fig. 4　Measured and simulated water retention curves of tested soil

采用土壤饱和时的电阻率与实测土壤电阻率的比值为参量，排除了孔隙水电阻率、孔隙大小和排列、固体颗粒组成等土壤性质对电阻率和含水量关系的影响，简化了常规考虑孔隙水电阻率的研究方法，更有利于电阻率法的研究和应用。该参量的引入为电阻率法估计土壤水分特征曲线提供了可靠和便捷的研究手段。

土样的孔隙度为 0.378，根据公式(4)可得到电阻率-含水量关系模型：

$$\theta = 0.378\times\left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{1/n} \tag{5}$$

对 1 ~ 6 号土样盒所得的电阻率及体积含水量的数据，用 1stOpt 软件，采用麦夸特法和通用全局优化法结合的算法进行拟合，拟合结果见表 3。

表 3　电阻率–含水量参数拟合结果与实测 ρ_s

Table 3　Resistivity-moisture model parameters of observed and fitted

土样盒编号	实测 ρ_s	拟合 ρ_s	n	R^2	$RMSE$
1	20.43	17.236	1.115	0.904	0.022
2	19.65	15.965	1.362	0.895	0.022
3	18.79	16.448	1.077	0.959	0.012
4	21.87	5.698	2.393	0.585	0.036
5	19.65	11.495	3.124	0.575	0.040
6	18.56	19.067	1.025	0.962	0.015

由表 3 可以看出，实测值均比计算值要大，这主要是因为在实际测量中，土样盒两端供电电极及测量电极与土样的接触所产生的接触电阻导致的，测量结果要大于真实值。拟合效果较好的为 1 号、3 号和 6 号。

取 1 号、3 号和 6 号拟合参数值，可得 ρ_s = (17.58 ± 1.487) Ωm，n = 1.07 ± 0.047 3，参数取平均值，得到土壤电阻率–含水量的模型：

$$\theta = 0.378 \times \left(\frac{17.58}{\rho} \right)^{1/1.07} \tag{6}$$

对比土样实测曲线与该模型曲线，如图 5 所示，该曲线能较好地表征电阻率和含水量的定量关系。土壤电阻率和含水量的关系曲线表明，土壤电阻率随含水量的减少而增大，且变化幅度越来越大。在高含水量区，土壤电阻率主要受土壤水分含量控制，土壤电阻率随含水量减少而增大；在低含水量区，自由水减少，土壤中主要以束缚水和膜状水为主，土壤电阻率受含水量和土壤固相的影响均较明显，较小的含水量变化都会引起土壤电阻率较大的变化。

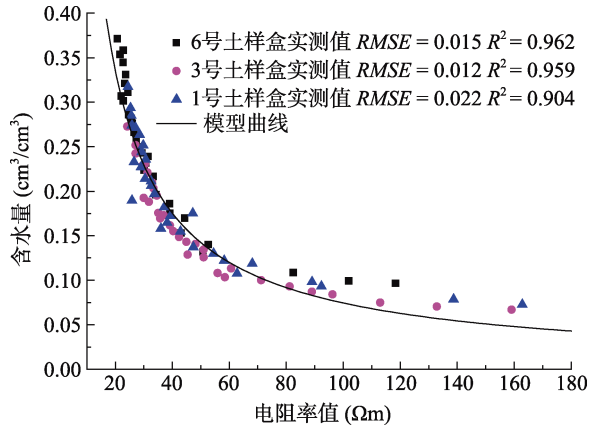


图 5 电阻率–含水量模型曲线与实测值
Fig. 5 Resistivity-moisture curve and observed data

3 电阻率法预测土壤水分特征曲线

3.1 土壤电阻率和土壤基质吸力相关性分析

利用土样盒电阻率–含水量实验所得数据，与“Ku/pF 非饱和导水率测量系统”所测得的土壤水分特征曲线相结合来探讨土壤电阻率和土壤基质吸力在数量上的关系。为了降低转换中的误差，将该测量系统所获得的含水量带入所得电阻率–含水量模型，从而获得与土壤基质吸力相对应的电阻率。根据 Gardner 公式和 Archie 经验公式(式(4))，可推出土壤电阻率-基质吸力模型：

$$h = \alpha \times \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{\beta} \tag{7}$$

式中，ρ_s 为土壤的饱和电阻率；α、β 为拟合参数。

通过对实验数据的拟合计算，确定了土壤电阻率和基质吸力的关系：

$$h = 57.81 \times \left(\frac{\rho}{17.58} \right)^{18.30} \tag{8}$$

利用通过含水量建立起来的土壤电阻率和其对应的基质吸力数据作图并拟合该曲线，结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出，土壤电阻率随基质吸力的增大而增大，且变化幅度越来越大，与电阻率随含水量减少而增加的趋势是一致的，这也说明了土壤电阻率和基质吸力有某种内在的联系。

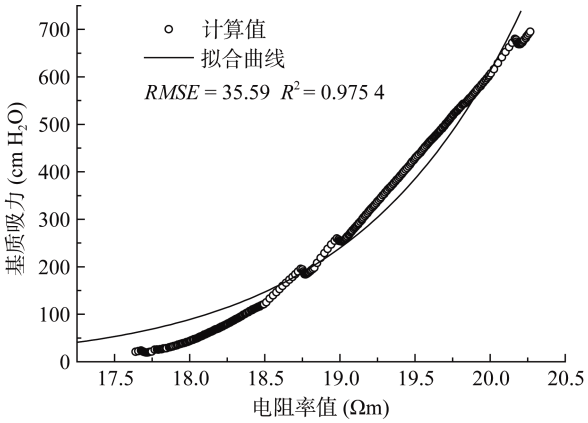


图 6 电阻率-基质吸力拟合曲线与计算值
Fig. 6 Resistivity-matric suction curve and calculated data

3.2 电阻率法预测土壤水分特征曲线

结合土壤电阻率-含水量模型——式(6)和土壤电阻率-基质吸力模型——式(8)，可以计算出同一电阻率下对应的土壤基质吸力和含水量的值，见图 7。

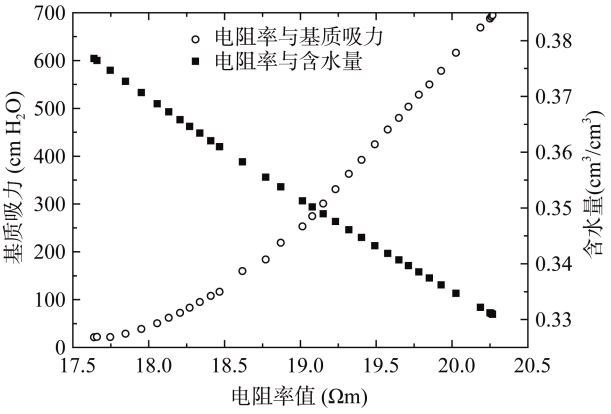


图 7 同一土壤电阻率下对应的含水量和基质吸力
Fig. 7 Moisture and matric suction under same soil resistivity

对一系列的同一电阻率下对应的土壤基质吸力与含水量进行分析，即可得到土壤水分特征曲线。对比预测的与实测的土壤水分特征曲线(图 8)，两条曲线几乎一致，这表明利用土壤电阻率来估计水分特征曲线是可行的。

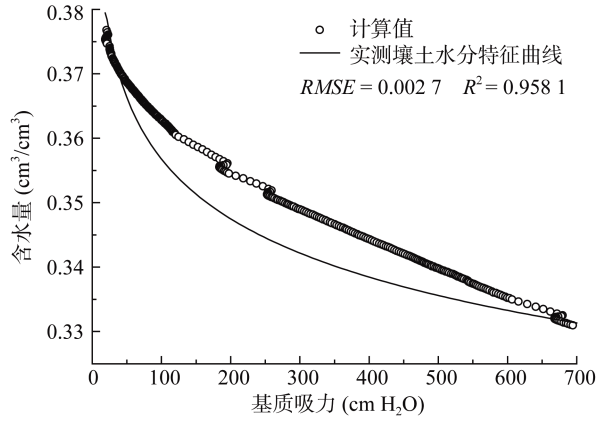


图 8　预测曲线与实测曲线对比

Fig. 8　Comparison of fitted and observed soil water retention curves

4　结论

本文通过室内试验分别得到了土壤的电阻率-含水量关系模型与土壤水分特征曲线，通过含水量这一与土壤电阻率和基质吸力均相关的土壤特性参数确立了土壤电阻率–基质吸力关系模型。通过土壤电阻率–含水量关系模型与土壤电阻率–基质吸力关系模型结合的方式，能够方便获得土壤水分特征曲线，为电阻率法在区域尺度上的空间和时间上对土壤水分特征曲线进行较为准确的测定提供了方法和理论依据。需要说明的是，本文在推求土壤电阻率-基质吸力关系模型的过程中，由于目前在实验室内对土壤的电阻率和基质吸力同步测量较为复杂，使用了实测的土壤水分特征曲线。

随着土壤电阻率理论和测试技术的不断完善，电阻率法在土壤科学领域，尤其是求取土壤物理参数方面必将有着广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 朱安宁, 张佳宝, 程竹华. 轻质土壤水分特征曲线估计的简便方法[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 253–258

[2] van Genuchten MT, Schaap MG, Leij FJ. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(4): 847–855

[3] 徐绍辉, 刘建立. 估计不同质地土壤水分特征曲线的分形方法[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 78–82

[4] 黄冠华, 詹卫华. 土壤水分特性曲线的分形模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 55–60

[5] 刘建国, 聂永丰. 非饱和土壤水力参数预测的分形模型[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 99–106

[6] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1994, 22(1): 1–10

[7] Koopmans RWR, Miller R. Soil freezing and soil water characteristic curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30(6): 680–685

[8] Bittelli M, Flury M, Campbell GS. A thermodielectric analyzer to measure the freezing and moisture characteristic of porous media[J]. Water Resources Research, 2003, 39(2): SBH11: 1–10

[9] 刘建立, 徐绍辉, 刘慧. 估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展[J]. 水利学报, 2004(2): 68–76

[10] 孙建国. 阿尔奇 (Archie) 公式: 提出背景与早期争论[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 472–486

[11] Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, Bruand A, Richard G. Electrical resistivity survey in soil science: a review[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 83(2): 173–193

[12] 查甫生, 刘松玉. 土的电阻率理论及其应用探讨[J]. 工程勘察, 2006(5): 10–15

[13] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 崔可锐. 基于电阻率的非饱和土基质吸力预测[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 1 003–1 008

[14] Banton O, Seguin M, Cimon M. Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(4): 1 010–1 017

[15] Binley A, Cassiani G., Middleton R, Winship P. Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging[J]. Journal of Hydrology, 2002, 267(3/4): 147–159

[16] Binley A, Winship P, West LJ, Pokar M, Middleton R. Seasonal variation of moisture content in unsaturated sandstone inferred from borehole radar and resistivity profiles[J]. Journal of Hydrology, 2002, 267(3): 160–172

[17] Ramirez AL, Daily WD, Binley AM. Electrical resistance tomography[J]. The Leading Edge, 2004, 23(5): 438–442

[18] Frohlich RK, Parke CD. The electrical resistivity of the vadose zone—field survey[J]. Ground Water, 1989, 27(4): 524–530

[19] Zhou QY, 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

[20] 郭秀军, 黄潇雨. 含油污水污染地下介质的电性异常模拟及实例分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(1): 128–131

[21] 姜振蛟, 卞建民, 查恩爽, 林年丰, 田沃野. 高密度电阻率成像法在水文地质领域中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 21–26

[22] 喻永祥, 吴吉春. 利用 ERT 数据推求非均质多孔介质渗透系数初探[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(2): 41–44

[23] 周蜜, 王建国, 黄松波, 豆朋, 张丽锷, 姚伟. 土壤电阻率测量影响因素的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3 269–3 275

Preliminary Exploration on Resistivity Method for Determining Soil Water Retention Curve

ZHANG Zhi-xiang[1], XU Shao-hui[1*], CUI Jun-ling[2], SHI Qing[2]

(1 *Department of Environmental Science*, *Qingdao University*, *Qingdao*, *Shandong* 266071, *China*;
2 *Qingdao Hydrologic Bureau*, *Qingdao*, *Shandong* 266071, *China*)

Abstract: This paper surveyed the soil resistivity and corresponding moisture content of the soil from a field of Qingdao City by using self-made equipments, and then established the parameters of resistivity-moisture model. Based Soil Water Retention Curve (SWRC) obtained from the "Ku/pF apparatus", the relationship between resistivity and matric suction was constructed through moisture content, and the resistivity-matric suction model was proposed which would be an alternative method to predict the soil matric suction. Then, combined resistivity-matric suction model and resistivity-moisture model, the purpose of obtaining SWRC was achieved, which made it possible to predict SWRC on the regional scale spatially and temporally via the resistivity method.

Key words: Resistivity method, Moisture content, Matric suction, Soil water retention curve