

# 滤纸法测定非饱和膨胀土土水特征曲线试验

黄志全, 岳康兴, 李 幻, 李 磊

(华北水利水电大学 资源与环境学院, 郑州 450011)

**摘要:** 针对现实中土体含水量任意变化的情况, 采用滤纸法测定非饱和膨胀土任意循环路径下对应的总吸力和基质吸力, 得到了任意含水率变化下的总吸力曲线和土水特征曲线。将曲线进行拟合, 利用毛细滞回内变量模型进行计算, 通过与试验结果对比, 验证了该模型对于膨胀土的适用性。结果表明: 滤纸法测得的土水特征曲线与传统方法测得的曲线大致相同。含水量任意变化下的曲线不与完整脱、吸湿曲线重合, 相同含水率下, 脱、吸湿开始点之间含水率差值越小, 脱湿后吸湿的曲线, 基质吸力越高; 吸湿后脱湿的曲线, 基质吸力越低。毛细滞回内变量模型适用于非饱和膨胀土, 计算结果与实际值能较好吻合。

**关键词:** 膨胀土; 基质吸力; 滤纸法; 土水特征曲线

中图分类号: TU411 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)03-0482-05

## Determination of soil-water characteristic curve of unsaturated expansive soils using filter paper method

HUANG Zhi quan, YUE Kang xing, LI Huan, LI Lei

(Institute of Resources and Environment, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** The water content of the soil varies randomly in reality. In this paper, the filter paper method was used to measure the total and matric suction of the unsaturated expansive soil under any cycle path, and the total suction curve and soil water characteristic curve (SWCC) under any moisture change were obtained. The curve was fitted, and the capillary hysteresis internal variable model was used to calculate and validate the model applicability for expansive soils through the comparison of test and observed results. Results showed that SWCC determined by the filter paper method is similar to that measured by the traditional methods, and the curve under any change in moisture content does not coincide with the full curve. Under the same moisture content, the smaller the difference between the moisture contents at the starting point of moisture elimination and absorption, the higher the matric suction which is from desorption to moisture, and the lower the matric suction which is from moisture to desorption. Capillary hysteresis internal variable model is suitable for the unsaturated expansive soil, which generates similar results with the actual values.

**Key words:** expansive soil; matric suction; filter paper method; SWCC

滑坡是自然界和工程中常见的地质灾害<sup>[1]</sup>。大量工程实例证明, 非饱和膨胀土强度的变化是导致滑坡产生的主要因素<sup>[2]</sup>, 而土水特征曲线是非饱和膨胀土强度研究的基础和重点。土水特征曲线(SWCC)是用于描述土体基质吸力与含水量之间函数关系的曲线<sup>[3]</sup>。Vanapalli 与 Fredlund 等<sup>[4,5]</sup>针对非饱和土强度及渗透系数与土水特征曲线的关系进行研究, 发现土水特征曲线可以反映非饱和土的工程力学性质: 通过土水特征曲线, 可以获得土的渗透系数, 抗剪强度等

指标<sup>[7]</sup>。建立土水特征曲线最重要的就是基质吸力的测量。测量方法有: 压力板法、滤纸法、轴平移技术法、张力计法、敏感传感器法、湿度计法等<sup>[8]</sup>。目前国内对滤纸法的研究成果不多, 大多数仅涉及国产“双圈”牌滤纸的吸力率定试验<sup>[9,11]</sup>。白福青等<sup>[12]</sup>用滤纸法测定南阳中膨胀土的土-水特征曲线, 给出了含水率介于16%~30%之间的土-水特征曲线。孙德安等<sup>[13]</sup>利用滤纸法对不同干密度膨胀土土水特征曲线进行了研究, 发现孔隙比对曲线有一定影响。吴珺华

收稿日期: 2014-09-22 修回日期: 2015-04-07 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1528.013.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目“考虑降雨及裂隙影响的非饱和膨胀土边坡稳定性分析”(41202246); 河南省科技创新人才计划“膨胀土边坡安全性研究”

作者简介: 黄志全(1970), 男, 河南人, 教授, 博士, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: huangzhiquan@ncwu.edu.cn

通讯作者: 岳康兴(1990), 男, 河南滑县人, 主要从事岩土体结构稳定性方面研究。E-mail: 108596900@qq.com

等<sup>[4]</sup>利用滤纸法测定了裂隙膨胀土的基质吸力,发现曲线形态与无裂隙膨胀土的基本相同。

而在以上滤纸法的研究成果中,土水特征曲线均为一条脱湿、一条吸湿曲线,但在实际自然环境中,可能是在脱湿(吸湿)过程中的某个点就开始进行吸湿(脱湿)。这时,对于任意含水量变化路径下总吸力和基质吸力的计算就显得格外重要,也更具有实际意义,而使用滤纸法针对这方面的研究还很少。韦昌富<sup>[9]</sup>针对任意循环路径下砂土的基质吸力问题提出了毛细滞回内变量模型,该模型是否可以就膨胀土问题进行计算尚未验证。本文利用滤纸法测定了任意含水量变化路径下的总吸力曲线及土水特征曲线,对其进行了拟合,然后借助试验数据及拟合边界,就毛细滞回内变量模型是否能应用到膨胀土,进行了对比验证。对后续含水量任意变化下膨胀土基质吸力的研究具有借鉴意义。

## 1 试验概况

### 1.1 试验原理

滤纸法主要分为直接接触和非接触两种,其原理主要遵循热力学平衡原理,直接接触是滤纸能够同土体在水分传递上达到平衡,非接触是滤纸不与土体直接接触,而同空气中的水分达到平衡,通过最终测定滤纸含水率,利用率定公式得出土体的吸力。理论上讲,直接接触法,测得的结果为土体基质吸力。非接触法,测得的结果为土体总吸力。具体原理图见图1。

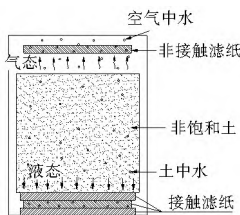


图1 滤纸法原理

Fig. 1 The principle of the filter paper method

### 1.2 试验土样及仪器

本次滤纸法试验所用土样为南水北调中线南阳段地区膨胀土土样,为重塑土,基本物理指标见表1。根据《膨胀土地区建筑技术规范》的分类,试验用土为弱膨胀性膨胀土。本次试验采用 Whatman No. 42 滤纸,率定关系如式(1)~式(4)。

总吸力

$$\lg \phi_1 = 8.778 - 0.222\omega_f \quad (\omega_f \geq 26) \quad (1)$$

$$\lg \phi_1 = 5.31 - 0.088\omega_f \quad (\omega_f \leq 26) \quad (2)$$

表2 干湿循环下试样含水量、总吸力及基质吸力

Tab. 2 Moisture content, total and matric suction of the soil samples under the wet and dry cycles

编号	完整脱湿			完整吸湿			脱湿过程中吸湿		
	试样含水量 (%)	总吸力 / kPa	基质吸力 / kPa	试样含水量 (%)	总吸力 / kPa	基质吸力 / kPa	试样含水量 (%)	总吸力 / kPa	基质吸力 / kPa
1	24.40	1 528.5	86.4	5.70	56 509.8	53 602.5	13.9	6 683.2	5 405.3
2	23.60	2 380.3	339.9	8.31	38 556.2	32 887.4	16.00	2 734.5	2 530.1
3	21.71	5 366.2	1 546.4	10.42	28 109.3	22 600.3	17.99	1 536.7	729.2
4	19.46	8 403.0	4 065.1	11.11	16 949.9	16 547.0	吸湿过程中脱湿		
5	17.90	12 109.1	6 079.2	14.08	6 542.8	4 929.1	16.90	10 573.6	2 097.6
6	15.27	16 858.2	10 674.9	16.00	2 722.7	1 527.5	12.92	24 365.7	8 360.0
7	13.79	19 720.3	14 431.9	17.94	1 429.4	824.2	8.24	43 566.7	32 932.4
8	11.82	31 585.6	21 629.5	18.51	1 250.4	706.3			
9	9.13	41 325.7	40 503.3	20.87	1 044.7	302.5			
10	6.41	55 091.8	54 013.7	23.00	871.0	65.2			

基质吸力

$$\lg \phi_2 = 2.909 - 0.0229\omega_f \quad (\omega_f \geq 47) \quad (3)$$

$$\lg \phi_2 = 4.945 - 0.0673\omega_f \quad (\omega_f \leq 47) \quad (4)$$

式中:  $\phi_1$  为总吸力;  $\phi_2$  为基质吸力;  $\omega_f$  为滤纸含水率。密封装置采用的是具有很好密封性的盒子,放置环境选择的是恒温干燥箱(0℃~100℃)、测量仪器为精度为0.0001g的天平。

表1 土样基本物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical indexes of soil samples

指标	液限 $W_L$ (%)	塑限 $W_P$ (%)	塑性指数 $I_P$	最大干密度 $\rho_d$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	最优含水率 $\omega$ (%)	自由膨胀率 (%)
指标值	43	22	21	1.69	21	50

### 1.3 试验方法

本次滤纸法试验共包含两方面,一方面各取10个直剪样进行完整脱湿、吸湿试验,含水率变化范围为24%~6%,然后用滤纸法测定其不同含水率下的总吸力和基质吸力,用以绘制土水特征曲线;另一方面,在脱湿、吸湿过程中任选一点进行吸湿、脱湿试验,这里分别选择12.5%和20%两点,各取3个不同含水率试样进行滤纸法试验,用以观测任意变化的含水量路径下所对应的土水特征关系。

首先将所用土样烘干碾碎过2mm筛,配成含水率为25%的湿土,放入密封袋内闷土24h以便土水混合均匀,采用静压制样,将配好的土压成直径9.1cm,高4cm,干密度为1.6g/cm<sup>3</sup>土饼,从中取得直径6.18cm,高2cm直剪样并称重。取密度相近的试样(密度差值不大于0.1g/cm<sup>3</sup>)用于滤纸法试验。将制好的试样放入室内恒温15℃环境中,利用风扇模拟脱湿,使用喷壶洒水模拟吸湿。在脱湿和吸湿过程中,不定时测量含水量,并取不同含水率的试样按照图1所示进行装样,在土样上方放入纱网用以保证上方滤纸与土样不直接接触。将装好的试样放入恒温保湿箱,保持15℃恒温,根据以往试验经验以及滤纸使用说明,将试样放置10d左右,保证取出时滤纸与试样水分交换达到平衡。由于滤纸与外界大气接触时,水分极易发生变化,所以取出试样后在30s内完成滤纸重量的测量,进而求得其含水率。然后根据率定曲线,求得总吸力和基质吸力。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 土水特征曲线

由试验测得的滤纸含水率,根据式(1)~式(4)计算出不同含水率对应的总吸力和基质吸力见表2。

从表 2 可以得出试样任意含水量变化路径下的土-水特征曲线(图 2)。从图 2 中可以看出,在滤纸法测得的土-水特征曲线中,试样的基质吸力随含水率的增加而减少。脱湿过程和吸湿过程得到的曲线并不完全重合,较低含水率下(6%左右)二者基质吸力基本相同,当含水率相同时,脱湿过程对应的基质吸力比吸湿过程要大,基质吸力相同时,脱湿过程对应含水率比吸湿要大,具有明显滞回效应。图 3 为压力板测得的土水特征曲线,可以看出,滤纸法与压力板测得土水特征曲线规律基本一致。

对于任意含水量变化路径下,不论是脱湿过程中进行吸湿、还是吸湿过程中脱湿,其曲线与完整脱湿、吸湿曲线均不重合或平行。但均在完整脱湿、吸湿曲线范围内,脱湿过程中吸湿的曲线对应的基质吸力比完整吸湿曲线要高,吸湿过程中脱湿的曲线对应的基质吸力比完整脱湿曲线要低,这与含水率差值有关。相对于完整脱湿、吸湿曲线,在相同含水率下,脱湿、吸湿开始点之间含水率差值越小,脱湿后吸湿曲线的基质吸力越高,吸湿后脱湿曲线的基质吸力越低。说明要完全模拟自然界干湿循环,仅利用脱湿吸湿两条土水特征曲线来预测土体基质吸力或其他物理力学参数,具有很大局限性,通过借助其他数学模型,来得出任意含水量变化路径下的土水特征关系是很有必要的,具有较大的工程实际意义。

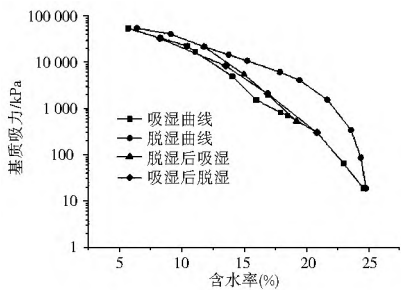


图 2 滤纸法测得的土水特征曲线

Fig. 2 SWCC determined by the filter paper method

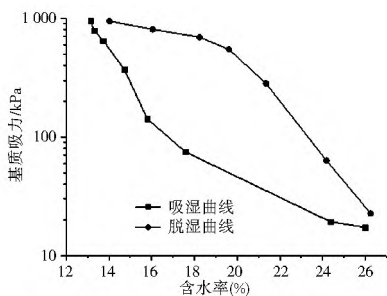


图 3 压力板测得的土水特征曲线

Fig. 3 SWCC measured by pressure plate

图 4 为总吸力随含水率的变化曲线。结合图 2 可以看出,总吸力与基质吸力曲线相似,均随含水率增加而减小,对于吸湿、脱湿路径,呈现出滞回现象,相同含水率时,脱湿过程对应的基质吸力比吸湿过程要大,在含水率为 6% 时脱湿、吸湿基质吸力基本相同。相同基质吸力时,脱湿过程对应含水率比吸湿要大。从数据上可以看出,当膨胀土干燥时,由于干燥后土体内渗透吸力不断降低,直至接近于 0,故基质吸力与总吸力基本相等。饱和时,总吸力和基质吸力差值很大,约 10 倍以上,这是由于水分增多,渗透吸力不断增大,基

质吸力不断减小,此时总吸力与渗透吸力基本相等。

而对于任意变化路径下的总吸力曲线,脱湿(吸湿)过程中吸湿(脱湿)的总吸力值与完整脱(吸)湿总吸力边界值近似重合,土体经过任意干湿循环路径时,总吸力在相同含水率处基本不受干湿循环的影响,其值大致保持不变。

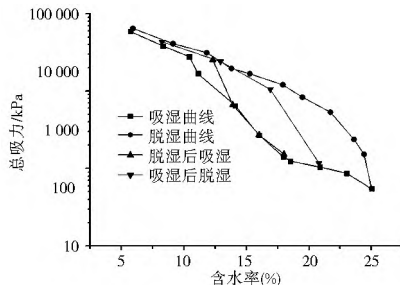


图 4 南阳膨胀土总吸力曲线

Fig. 4 Total suction curve of expansive soil in Nanyang

## 2.2 土水特征曲线拟合

为了验证毛细滞回内变量模型,首先需要确定土水特征曲线边界公式,任何边界模型都可以作为该模型的边界,这里采用 Fredlund 提出的拟合公式<sup>[9]</sup>,来对所测定的膨胀土土水特征曲线进行拟合。

该公式为

$$\theta = \frac{\theta_{sat} + \theta_{rr} (P_c/b)^d}{1 + (P_c/b)^d} \quad (5)$$

式中: $b$  和  $d$  为模型参数,可通过对试验数据的拟合来确定。 $\theta_{sat}$  为饱和含水量, $\theta_{rr}$  为残余含水量。

采用 Origin 软件对于脱湿、吸湿曲线进行拟合。其中,为了得到更好的拟合效果, $\theta_{sat}$ 、 $\theta_{rr}$  没有采用饱和含水量和残余含水量,这就使得拟合的结果  $\theta_{sat}$  大于试样的饱和含水量, $\theta_{rr}$  小于试样的残余含水量。

脱湿曲线拟合结果为

$$b = 1.25E12, d = 0.144, \theta_{sat} = 33.7\%; \theta_{rr} = -307.2\%;$$

吸湿曲线拟合结果为

$$b = 37995.195, d = 0.695, \theta_{sat} = 24.8\%, \theta_{rr} = -7.249\%$$

拟合图见图 5,从图中可以看出,拟合结果能较好地反映土水特征曲线规律,拟合曲线几乎过所有试验数据点,该拟合参数和结果可用。

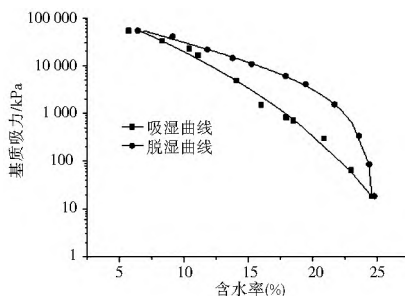


图 5 土水特征曲线拟合

Fig. 5 Fitting curve of SWCC

## 2.3 毛细滞回内变量模型介绍及计算

针对任意含水量变化路径下的土水特征关系,韦昌富提出了毛细滞回内变量模型<sup>[15]</sup>,该模型在确定了主边界线的情况下,利用一个参数  $C$ ,就可以计算曲线内任意含水量变

化路径下的基质吸力。但该模型是针对砂土提出的,对于非饱和膨胀土没有提及,本文利用该模型就膨胀土问题进行计算,将结果与试验结果进行对比,验证了该模型对于膨胀土的适用性。该模型示意图见图6。模型公式<sup>[15]</sup>为

$$\dot{P}_c = -K_p(\theta, P_c, \hat{n})\dot{\theta} \quad (6)$$

式中: $\dot{\theta}$ 为含水率的变化值; $\hat{n}$ 为含水率的变化路径,当脱湿时 $\hat{n}=1$ ,吸湿时 $\hat{n}=-1$ 。

$K_p$ 为边界线内部任意循环曲线在P点的斜率,由下式得到:

$$K_p(\theta, P_c, \hat{n}) = \bar{K}_p(\theta, \hat{n}) + \frac{C}{r - \varphi} \quad (7)$$

脱湿路径时,

$$\bar{K}_p(\theta) = -\frac{dk_D(\theta)}{d\theta} \quad (8)$$

吸湿路径时,

$$\bar{K}_p(\theta) = -\frac{dk_W(\theta)}{d\theta} \quad (9)$$

式中: $\bar{K}_p(\theta, \hat{n})$ 为边界曲线AB、DE上含水率为 $\theta$ 点斜率的负值;C为材料常数; $\varphi$ 为图中的HP,即含水率为 $\theta$ 的点对应的边界吸力与任意循环路径FG对应吸力的绝对差;r为HJ,即含水率为 $\theta$ 的点对应的脱湿、吸湿边界吸力差。

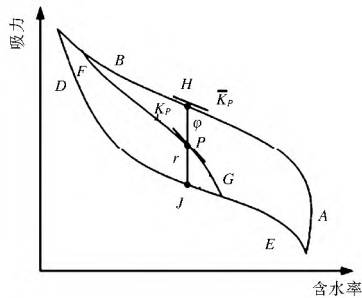


图6 毛细滞回内变量模型示意图

Fig. 6 Schematic of capillary hysteresis internal variable model

首先根据拟合公式,得出边界面曲线方程,对其求导可得出 $\bar{K}_p$ ,再根据两条边界面曲线方程和曲线内试验测得的任意点,得出参数C,通过隐式算法,利用迭代法进行数值积分,求解上述模型。计算结果与实测试验数据对比见图7。

图中, $B_0-B_3$ 为实测的二次脱湿试验点,从位于吸湿边界线上的 $B_0$ 点开始进入脱湿路径,至脱湿边界线上的 $B_3$ 点结束; $A_0-A_3$ 为实测的二次吸湿试验点,从位于脱湿边界线上的 $A_0$ 点开始进入吸湿路径,至吸湿边界线上的 $A_3$ 点结束。 $CD$ 曲线为采用毛细滞回内变量模型对由 $B_0$ 点出发的脱湿扫描线的计算结果。 $A_0E$ 为由 $A_0$ 点出发的吸湿扫描线的计算结果。

由图可见,计算所得的脱湿扫描线和吸湿扫描线与实测结果相符较好。可见,毛细滞回内变量模型不仅适用于砂土,对于非饱和膨胀土也是适用的,利用该模型可以对土水特征曲线的任意循环滞回变化进行模拟计算,计算结果比较准确。

### 3 结论

(1) 利用滤纸法测得了非饱和膨胀土土水特征曲线和总吸力曲线,并与其他方法得到的曲线相对比,发现曲线变化

规律基本相同,具有明显滞回现象。

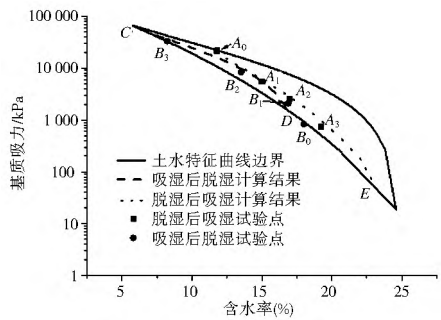


图7 毛细滞回内变量模型模拟结果

Fig. 7 The simulation results of the capillary hysteresis internal variable model

(2) 使用滤纸法就任意含水量变化下的总吸力和基质吸力进行研究,得出任意循环路径下土水特征曲线及总吸力曲线。结果发现,含水量任意变化下的曲线不与完整脱、吸湿曲线重合,在二者组成的环形范围内变化,相对于土水特征曲线中完整脱、吸湿曲线,在相同含水率下,脱湿、吸湿开始点之间含水率差值越小,脱湿后吸湿的曲线,基质吸力越高;吸湿后脱湿的曲线,基质吸力越低。而脱湿(吸湿)后吸湿(脱湿)的总吸力值与边界值基本相同,变化的仅仅是基质吸力和渗透吸力。

(3) 通过对比,验证了毛细滞回内变量模型对于膨胀土的适用性,证明该模型适用于膨胀土。可以用Fredlund提出的拟合公式来拟合边界方程,通过边界方程和参数C,可以计算任意吸湿、脱湿循环路径下的基质吸力,计算结果与试验数据一致。对于后续任意循环路径下非饱和膨胀土基质吸力的研究,具有指导和借鉴意义。

### 参考文献(References):

[1] 黄志全,吴林峰,王安明,等.基于原位剪切试验的膨胀土边坡稳定性研究[J].岩土力学,2008,29(7):1764-1768.(HUANG Zhiquan, WU Lirong, WANG Anming, et al. Stability analysis of expansive soil slope based on in situ shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1764-1768. (in Chinese))

[2] 黄志全,陈贤挺,姜彤,等.小浪底水库1#滑坡体非饱和土强度特性试验研究[J].岩土力学,2009,30(3):640-644.(HUANG Zhiquan, CHEN Xianting, JIANG Tong, et al. Experimental study of strength characteristics of unsaturated soil of landslide # 1 in Xiaolangdi Reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 640-644. (in Chinese))

[3] Fredlund D, Rahardjo H. 非饱和土土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1997:256-278.(Fredlund D, Rahardjo H. Unsaturated soil mechanics soil[M]. Beijing: Publication of Chinese construction industry, 1997: 256-278. (in Chinese))

[4] Vanapalli S, Fredlund DG, Pufahl DE. The relationship between the soil water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till[J]. Geotechnical Testing Journal, 1996(19): 259-268.

[5] Fredlund DG, Xing A, Fredlund MD. The relationship of the unsaturated soil shear to the soil water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440-448.

- [6] Fredlund D, Xing A, Huang S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 533-546.
- [7] 卞祚麻, 白云, 叶为民. 非饱和土的土水特征曲线[J]. 岩土工程界, 2004, 7(1): 168-171. (BIAN Zuoxiu, BAI Yun, YE Weimin. Soil water characteristic curve of unsaturated soils[J]. Geotechnical Engineering World, 2004, 7(1): 168-171. (in Chinese))
- [8] 张兴胜, 林先俊. 非饱和土基质吸力量测试研究与探讨[J]. 路基工程, 2011(2): 17-19. (ZHANG Xingsheng, LIN Xianjun. Study and discussion on measurement test of unsaturated soil matrix suction[J]. Roadbed project, 2011(2): 17-19. (in Chinese))
- [9] 沈珍瑶, 程金茹. 滤纸吸力率定的初步研究[J]. 工程勘察, 2001(4): 9-10. (SHEN Zhenyao, CHENG Jinru. Preliminary research of suction filter calibration[J]. Geotechnical survey, 2001(4): 9-10. (in Chinese))
- [10] 程金茹, 李满喜. 滤纸吸力率定曲线的研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 800-802. (CHENG Jinru, LI Manxi. Suction calibration for filter paper[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 800-802. (in Chinese))
- [11] 王钊, 杨金鑫, 况娟娟. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 405-408. (WANG Zhao, YANG Jinxin, KUANG Juanjuan. Application of filter paper method in field measurement of matric suction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 405-408. (in Chinese))
- [12] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 928-933. (BAI Fuqing, LIU Sihong, YUAN Jiao. Measurement of SWCC of Nanyang expansive soil using the filter paper method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 928-933. (in Chinese))
- [13] 孙德安, 张俊然, 吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土水特征曲线[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1685-1690. (SUN De'an, ZHANG Juran, Lv Haibo. Soil water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1685-1690. (in Chinese))
- [14] 吴珺华, 袁俊平, 杨松. 基于滤纸法的裂隙膨胀土土水特征曲线试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 61-64. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song. Experimental study on SWCC of expansive soil with cracks using filter paper method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 61-64. (in Chinese))
- [15] Wei C, Dewoolkar MM. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. Water Resources Research, 2006, 42(7): 1-10.
- [16] FENG M, FREDLUND D G. Hysteretic influence associated with thermal conductivity sensor measurements[C]//Proceedings of the 52nd Canadian Geotechnical Conference. Sask: [s. n.], 1999: 651-657.

(上接第 470 页)

- [4] 许文武, 孟菁, 胡威, 等. 5 种酚类化合物对 3 种水生生物的毒性作用[J]. 环境化学, 2011, 30(10): 1751-1757. (XU Weiwu, MENG Jing, HU Wei, et al. The toxic effects of five phenol compounds to three different aquatic organisms[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(10): 1751-1757. (in Chinese))
- [5] 宋志慧, 杨鲁娜. 三氯酚对小椎实螺急性毒性作用和过氧化物酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(20): 10439-10441. (SONG Zhihui, YANG LUNA. Effect of 2, 3, 5-TCP and 2, 3, 6-TCP on acute toxicity and POD activity of galba perversa[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(20): 10439-10441. (in Chinese))
- [6] 陈勇生, 闫姝, 孙启俊, 等. 酚类化合物的生物吸附特征与其结构关系[J]. 中国环境科学, 1998, 18(3): 248-251. (CHEN Yongsheng, YAN Shu, SUN Qijun, et al. The relationship between biosorption characteristics and structure of phenolic compounds[J]. China Environmental Science, 1998, 18(3): 248-251. (in Chinese))
- [7] 刘连成, 牟林, 杨湘奎. 松花江水系有机物污染的现状分析[J]. 黑龙江水专学报, 2007, 34(3): 108-110. (LIU Liangcheng, MU Lin, YANG Xiangkui. Status analysis of organic pollution of Songhua River system[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2007, 34(3): 108-110. (in Chinese))
- [8] 张玲松, 刘廷良, 孟凡生, 等. 松花江水质的多元统计分析[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(9): 28-34. (ZHANG Lingsong, LIU Tingliang, MENG Fansheng, et al. Multivariate statistical analysis of Songhua River water quality[J]. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(9): 28-34. (in Chinese))
- [9] 赵元慧, 杨绍贵. 松花江中取代苯酚和苯胺类的生物降解性及 QSBR 研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(1): 45-50. (ZHAO Yuanhui, YANG Shaogui. Quantitative relationships between the structure and biodegradability of substituted benzenes in the Songhua River[J]. ACT Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(1): 45-50. (in Chinese))
- [10] 杨绍贵, 赵元慧, 路光华, 等. 松花江水中酚类化合物生物降解性的测定及 QSBR 研究[J]. 环境化学, 2001, 20(4): 326-332. (YANG Shaogui, ZHAO Yuanhui, LU Guanghua, et al. Determination and QSBR Degradation of phenolic compounds in the Songhua River water organisms[J]. Environmental Chemistry, 2001, 20(4): 326-332. (in Chinese))
- [11] 高鹏. 松花江水体中酚类污染物时空分布及迁移转化过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. (GAO Peng. Spatiotemporal distribution and transformation/transportation processes for phenolic pollutants in the Songhua River[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese))
- [12] 王东辉, 王禹, 林志华. 松花江水环境污染特征及防治措施[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 67-69. (WANG Donghui, WANG Yu, LIN Zhihua. The control and damage of organic pollutant in Songhua River[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(6): 67-69. (in Chinese))