

文章编号:1672-3317(2012)05-0007-05

HYPROP系统与快速离心法联合测定 土壤水分特征曲线*

彭紫贇, 黄爽, 杨金忠, 王晓蕾

(武汉大学水利水电学院/水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 针对3种供试土壤,利用HYPROP系统与快速离心法分别测定了土壤在低吸力(800 hPa以下)和高吸力($1 \times 10^3 \sim 15 \times 10^3$ hPa)范围内土壤吸力和含水率的关系,并联合2种方法的测定结果,采用van Genuchten(1980)-Mualem拟合得到了土壤水分特征曲线的经验参数。其中快速离心法中用对数函数拟合了转速与压缩量间的关系,并利用压缩量对不同转速下的土壤吸力进行了修正。研究表明,利用HYPROP系统与快速离心法联合测定土水特征曲线,克服了HYPROP系统不能测定高吸力范围土壤水分特征曲线以及快速离心法对低吸力范围测定精度较差的缺点,在较短时间内可以准确测定低吸力和高吸力范围内的土壤水分特征曲线。土壤质地及孔隙分布是影响土壤水分特征曲线的主要因素。

关键词: HYPROP; 离心法; 土壤水分特征曲线; 土壤质地

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

彭紫贇,黄爽,杨金忠,等. HYPROP系统与快速离心法联合测定土壤水分特征曲线[J]. 灌溉排水学报,2012,31(5):7-11.

0 引言

土壤水分特征曲线的测定方法有张力计法、悬挂水柱法、压力板法、离心法等。HYPROP系统为张力计法,其特点为系统可以连续自动地监测土壤吸力与土壤含水率,因此可得到大量的数据对低吸力范围的土壤水分特征曲线进行测定。其工作原理为Schindler^[1]提出的蒸发条件下垂直剖面上在时间和空间上含水率与负压近似符合线性分布。Peters和Durner^[2]对于HYPROP系统采用的这种方法测得的结果进行了误差分析,认为该系统在测量时间间隔较短、选用插值方式合适的条件下所得的结果是可靠的。高吸力范围普遍使用的方法有压力板法、离心法等,其测量范围较大,可得到 $0 \sim 15 \times 10^3$ hPa范围内实测数据。但压力板法耗时较长,温度对其影响较大,仪器容易损坏;离心法操作简单省时,使用较为广泛,但离心过程中密度变化、离心时间都对测量结果有一定影响^[3-4]。

目前,对于土壤水分特征曲线的研究,吕殿青等^[4]研究了离心过程中土壤压缩量与吸力间关系,提出了二者间的对数关系模型;尚煜廷等^[3]提出了离心法测量土水曲线的最佳离心时间,并对负压计算公式进行了修正;Mavroulidou^[5]等利用压力板法测定土壤水分特征曲线,从而分析土壤的持水特性,但都存在低压力段数据点较少,不能精确反映其特点的问题;Marco Bittelli等^[6]针对该问题,采用压力板法与露点法联合测定土壤水分特征曲线,取得了较好的结果,但压力板法的耗时在2周以上^[5-6]。而离心法测定土壤水分特征曲线时间为1~2 d,HYPROP测定时间粉、粘壤土为4~5 d,砂土为7~10 d。因此,针对已有测定土壤水分特征曲线方法各自的优缺点,探寻联合利用低吸力和高吸力方法实现准确高效地确定土壤水分特征曲线的可

* 收稿日期: 2012-01-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51109166); 环保公益性行业科研专项(201109009); 国家973计划项目(2010CB42880204)

作者简介: 彭紫贇(1988-),男,江苏苏州人。硕士研究生,主要从事地下水与水环境方向的研究。E-mail: pengziyun@whu.edu.cn

通讯作者: 黄爽(1972-),女,讲师,博士,主要从事土壤中水分及溶质运移研究。E-mail: hsh5527@whu.edu.cn

行性。具体采用 HYPROP 系统结合快速离心法,对 3 种供试土壤的水分特征曲线进行了测定,并分析了土壤性质对土壤水分特征曲线的影响。

1 材料与方方法

1.1 试验材料

试验土壤取自江苏常州水稻研究所水稻试验田、江西南昌红壤性水稻土、山东寿光蔬菜大棚土(为行文简洁,后文中将以上 3 种土样分别简称为土壤 A、土壤 B、土壤 C),土样均取自 0~20 cm 耕层。土样自然风干后磨细过 2 mm 筛备用。供试土壤的理化性质见表 1。其中,pH 测定方法为土水比为 1:1,有机质测定方法为重铬酸钾容量法,土壤质地采用筛分法与密度计法联合测定。

表 1 供试土壤理化性质

土壤	$\theta_{\text{风干}}/\%$	pH	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	不同粒径土粒质量分数/%		
				>0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
土壤 A	3.03	5.7	22.41	7.7	67.6	24.7
土壤 B	2.1	5.78	30.33	11.8	72.4	15.8
土壤 C	3.3	7.32	17.24	50.1	40.4	9.5

1.2 试验方法

试验采用 HYPROP 系统(低吸力范围 0~850 hPa)以及 H-1400PF 离心机(高吸力下 1、2、3、4、5、10、15 $\times 10^3$ hPa)2 种方法结合对土壤脱水过程的持水特性进行测定。供试土壤均按密度 1.3 g/cm^3 回填入环刀内,回填采用分层回填的方式,层与层接触面打毛。将回填完成后的环刀样浸泡在水中,水面的高度略低于样品环下边缘 1 cm,浸泡 12~24 h,使样品逆向吸水饱和,每种土样做 2 个重复。使用离心机进行试验时,用游标卡尺对每个转速下土壤的压缩量进行测量并记录。

使用的 HYPROP 测量系统实质是一种简便的张力计法,而结合离心法测量土水特征曲线是为了弥补 HYPROP 测量系统测量范围较窄的缺陷。HYPROP 系统在自然蒸发条件下,通过环刀样中 2 个不同高度的张力计测得环刀内土样的负压值,利用天平测得土样质量,进一步转化为土壤含水率数据,假定在时间、空间上土壤含水率及负压值在垂向上符合线性分布^[1-2],进而插值得到不同时间上不同深度相应负压值及含水率数据。数据拟合采用 van Genuchten(1980)-Mualem 经验公式。

快速离心法测量土壤水分特征曲线的原理为在一定转速下将离心力场的势能换算成对应重力场的水势,将离心转速换算成对应土壤负压。环刀土样中心点处水面势作为土样水势,土样底部与中心点处的水势差即为对土壤施加的负压,将负压差换算成对应重力场的水势。尚煜延等^[3]利用离心机测定土水特征曲线时考虑了土壤压缩之后,离心力与负压之间的转化关系,若离心机轴心到离心盒盖顶端距离为 l ,土壤压缩高度为 h_1 ,每次旋转后用游标卡尺测量出压缩高度,改进后的转化公式为:

$$H = 1.398 \times 10^{-6} n^2 [r - (l + h_1)](3r + l + h_1) \quad (1)$$

式中: H 为一定转速下对应的土壤吸力值(m); n 为旋转速度(r/min); r 为离心机轴心到土样底部的旋转半径(m)。

2 结果与分析

2.1 离心法压缩量对负压的影响

试验过程中,利用 HYPROP 系统测定土壤 A、B、C 水分特征曲线的实验所需时间分别为 5、4、8 d;利用离心法测定所需时间均为 1 d。利用尚煜延等^[3]提出的负压与压缩量的修正关系公式(1)得到试验负压修正值(见表 2)。由表 2 给出的数据可以看出,整个脱水过程中,随着转速的加大,压缩量不断增大;3 种土壤压缩量之间的差异并不大,且将修正后的负压转化为 PF 值(土水势水柱厘米数的对数值)后可以看出,在 3 位有效位数下,3 种土壤修正后的 PF 值相同,即土壤压缩量虽然对土壤负压值有一定影响,但不同土壤间(本次试验土壤主要为砂壤土与粉壤土)的差异并不明显,特别是转化为 PF 值后差异可以忽略。这是因为,3 种土壤均按相同的密度回填,虽然土壤质地不同,但是由于人为扰动,原土壤大孔隙结构被破坏,中等孔隙增多,土壤压缩特性趋于一致,与吕殿青等^[4]研究结果相符,其研究结果表明土壤密度对土壤压缩特性的影响较大。

因此,对于不同土壤在同一密度条件下可以建立统一的简单模型来预测不同转速下土壤的压缩量,为修正不同离心转速下土壤负压值提供依据。吕殿青等^[4]采用对数函数拟合相对压缩量与负压的关系,为了更加简单直接地求得压缩量,用对数函数拟合了转速与压缩量间的关系,模型 $y=A\ln(x)+b$,拟合参数见表 3。3 种土壤的拟合参数 A 、 b 值差异不大,决定系数均达到了 0.96 以上,拟合效果较好。因此,可用三者压缩量的平均值拟合得到密度为 1.3 g/cm^3 时,转速与压缩量间的关系 $h_1=0.327\ln(n)-1.948$ 。

表 2 3 种供试土壤的压缩量及负压修正值

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	修正前负压值/ (10^3 hPa)	土壤压缩量/cm			修正后负压值/(10^3 hPa)			PF 值		
		土壤 A	土壤 B	土壤 C	土壤 A	土壤 B	土壤 C	土壤 A	土壤 B	土壤 C
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	—	—
1 000	0.2	0.28	0.31	0.39	0.19	0.19	0.19	2.30	2.30	2.30
1 700	0.6	0.50	0.47	0.49	0.53	0.54	0.54	2.76	2.76	2.76
2 200	1.0	0.62	0.52	0.59	0.88	0.89	0.88	2.98	2.98	2.98
3 100	2.0	0.67	0.71	0.66	1.72	1.71	1.73	3.28	3.28	3.28
3 800	3.0	0.72	0.71	0.70	2.57	2.57	2.57	3.46	3.46	3.46
4 400	4.0	0.77	0.77	0.79	3.41	3.41	3.39	3.59	3.59	3.59
4 900	5.0	0.83	0.88	0.83	4.18	4.13	4.18	3.68	3.68	3.68
7 000	10.0	1.01	0.87	0.96	8.21	8.46	8.30	3.99	3.99	3.99
8 500	15.0	1.06	1.02	1.08	11.98	12.09	11.93	4.16	4.16	4.16

2.2 土壤水分特征曲线及参数拟合

低吸力范围下(0~850 hPa)HYPROP 测量系统能给出很好的负压与含水量关系结果,但在土壤水分特征曲线后半段大吸力范围内没有实测点,后半段曲线不易控制。因此,结合离心机测量数据,给出若干个大吸力值下的观测点,可以有效的减少拟合误差。

表 3 转速与压缩量曲线拟合参数表

土样	A	b	R^2
土壤 A	0.348	-2.114	0.978
土壤 B	0.321	-1.915	0.961
土壤 C	0.312	-1.815	0.962
平均值	0.327	-1.948	0.988

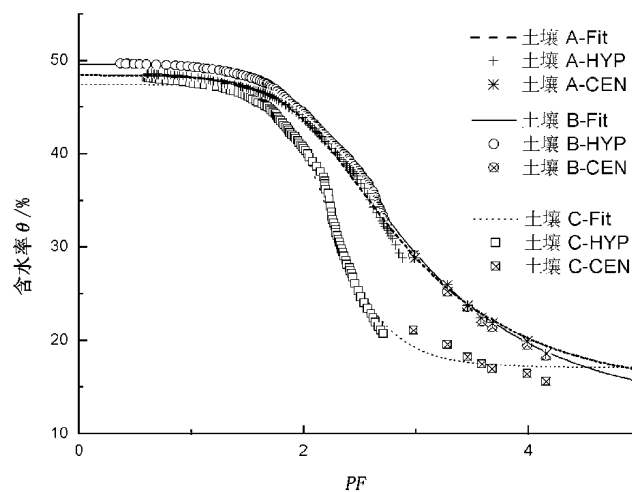


图 1 HYPROP 系统与快速离心法联合测定的 3 种土壤的水分特征曲线

图 1 中 3 种土壤的土壤水分特征曲线为利用 HYPROP 系统(低吸力范围 0~850 hPa)以及 H-1400PF 离心机(高吸力范围)的实测数据,采用 van Genuchten (1980)-Mualem 模型对土壤水分特征曲线进行拟合。图 1 中 Fit 代表拟合值,HYP 代表 HYPROP 测量数据,CEN 代表离心法测量数据。2 种仪器测得的数据在 200、600 hPa 有重叠,测得数据相对误差不超过 6%,可以认为 2 种仪器数据吻合较好,因此,利用 2 种方法联合测定土水特征曲线是可行的(拟合时 200、600 hPa 测量值采用 HYPROP 系统测得值),测得结果能够很好的反应出土壤在整个脱水过程中含水率与负压间的关系。

利用 HYPROP_V2.0.75 参数拟合软件,将离心法所得高吸力范围实测数据加入进行拟合,得到的拟合参数见表 4。拟合效果采用 REMS(均方根误差)来衡量,3 种土壤含水率拟合结果 REMS 均小于 10^{-2} ,说明拟合效果较好。

表4 土壤水分特征曲线的参数拟合值

土样	van Genuchten(1980)-Mualem 模型参数				RMSE(θ)
	参数 α	参数 n	残余含水量 θ_r	饱和含水量 θ_s	
土壤 A	0.007 5	1.419	0.147	0.485	0.004
土壤 B	0.007 6	1.380	0.126	0.496	0.004
土壤 C	0.007 8	2.288	0.171	0.474	0.009

2.3 土壤性质对土壤水分特征曲线的影响

由表1中土壤粒径分布,根据美国土壤质地三角图,可知土壤A、B属于粉壤土,土壤C属于砂壤土。从图1可以发现如下现象:

1)土壤含水率:图1中土壤A、B的土壤水分特征曲线总体在土壤C之上,说明在同一负压条件下,土壤A、B的保水能力强于土壤C。

2)土壤水分特征曲线形状:3种土壤的水分特征曲线整体都呈现“S”型,土壤A、B对应曲线的2个拐点较土壤C出现的晚,且在近饱和段出现拐点后,土壤C的水分特征曲线斜率明显大于土壤A、B,且含水率迅速下降;当 $PF > 3$ 之后,土壤C对应曲线的斜率接近为0;而土壤A、B含水率仍在下降。

现有研究表明^[7]土壤机械组成、土壤结构、有机质等对土壤水分特征曲线有影响,根据以上试验现象,针对土壤理化性质对土壤水分特征曲线的影响分析如下:

1)土壤机械组对土壤水分特征曲线影响显著。3种土壤中,土壤A、B中小颗粒较多,细小颗粒存在使得土壤内部细小孔隙增多,在低吸力值时孔隙较小,气体进入难度增大,体现在土壤水分特征曲线上即为其曲线的斜率变化较缓慢,拐点出现较晚;由于土壤C平均孔隙较大,孔隙对水的吸持力较小,在中间段释水速度较快,曲线斜率变化快,曲线拐点出现的早。由于小颗粒质量分数大,整个失水过程中相同吸力下土壤A、B的含水率比土壤C大。

2)土壤结构对土壤水分特征曲线的影响主要体现在土壤内部孔隙大小及分布规律。由于试验中土样均为回填土,孔隙分布较为均匀,结构性孔隙可以忽略,因此不同土样的孔隙特征主要取决于其不同颗粒组成的孔隙特征。在非饱和土水系统中,土壤水吸力主要是由毛管力作用的结果,土壤中毛细管的孔径大小可以认为是土壤吸力的一种表示,由实测所得土水特征曲线,可将相应负压值转化为毛管实效孔径。转化关系为:

$$D = 3/F \quad (2)$$

式中: D 为实效孔径(mm); F 为负压值(hPa);具体推导过程可参见文献[1]。由此关系式,可得到相应吸力下的实效孔径。当吸力变化 ΔF 时,含水率相应改变 $\Delta\theta$,则吸力变化范围 $F_1 \sim F_2$ 对应的实效孔径 $D_1 \sim D_2$ 所对应的容积即为含水率相应改变量 $\Delta\theta$,由此可得到土壤实效孔径分布如表5,表5中的 n 为孔隙度。

表5 3种土壤实效孔径特征及分布

实效孔径/(10^{-2} mm)		>1.5	1.5~0.5	0.5~0.1	0.1~0.02	<0.02
土壤 A	$\Delta\theta/C$ (%占土体总体积)	9.72	6.52	8.27	4.98	19.01
	$(\Delta\theta/n)/C$ (%占孔隙总体积)	20.04	13.44	17.05	10.27	39.20
土壤 B	$\Delta\theta/C$ (%占土体总体积)	10.41	6.88	8.73	5.25	18.33
	$(\Delta\theta/n)/C$ (%占孔隙总体积)	20.99	13.87	17.60	10.58	36.96
土壤 C	$\Delta\theta/C$ (%占土体总体积)	17.69	6.50	4.96	2.63	15.62
	$(\Delta\theta/n)/C$ (%占孔隙总体积)	37.32	13.71	10.46	5.55	32.95

由表5可以直观的看出土壤A、B的小孔隙明显比土壤C要多,后者大于0.015 mm的孔隙较多。这也从另一方面证实土壤颗粒分布决定土壤中孔隙分布,而土壤孔隙分布特征又是决定土壤水分特征曲线特征的机理所在。

3)有机质对水分蒸发的影响。土壤有机质质量分数越大,土壤结构越疏松。研究的3种土壤土壤有机质土壤B>土壤A>土壤C,而土壤C相比土壤A、B大孔隙较多。说明有机质并非影响土壤水分特征曲线的主要因子,影响土壤水分特征曲线的主要因子为土壤质地。

3 结 论

1) HYPROP系统与离心法结合测量土水特征曲线可实现土壤水分曲线的高效准确测定。

2) 在离心法测量土水曲线时,压缩量与转速符合对数关系,可根据其对一定转速下的土壤吸力值进行修正。

3) 土壤水分特征曲线的主要影响因素为土壤机械组成及土壤孔隙分布,有机质的影响不大。

参考文献:

- [1] Schindler U, Mueller L. Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil, 2006, 169(5): 623-629.
- [2] Peters A, Durner W. Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties[J]. Journal of Hydrology, 2008, 356(1/2): 47-162.
- [3] 尚煜廷,冯杰,刘佩贵,等. SWCC 测定时吸力计算公式与最佳离心时间的探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 12-15.
- [4] 吕殿青,王宏,王玲. 离心机法测定持水特征中的土壤收缩变化研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 209-212.
- [5] Mavroulidou M, Zhang X, Cabarcapa Z, et al. A study of the laboratory measurement of the soil water retention curve[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Science and Technology Chania. Crete: Greece, 2009.
- [6] Marco B, Flury M. Errors in water retention curves determined with pressureplates[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(5): 1 453-1 460.
- [7] 李卓. 土壤机械组成及容重对水分特征参数影响模拟试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.

Using HYPROP System and Centrifugal Method to Measure Soil Water Characteristic Curve

PENG Zi-yun, HUANG Shuang, YANG Jin-zhong, WANG Xiao-lei

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,
School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The combination of HYPROP system and centrifugal method were used to measure soil water characteristic curve (SWCC), the parameters of SWCC were evaluated using van Genuchten-Mualem model, a logarithmic function was used to describe the relation between the speed of centrifuge and compressibility of soil, and compressibility of soil was used to amend the relation between the speed of centrifuge and the soil suction. The results showed that ①it was effective and accurate to measure soil water characteristic curve using HYPROP system and centrifugal method jointly; ②soil texture and the pore size distribution were the main factors to determine the SWCC.

Key words: HYPROP; centrifugal method; soil water characteristic curve; soil texture