

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.003

SWCC 测定时吸力计算公式与最佳离心时间的探讨

尚燮廷^{1 2},冯 杰^{1 2},刘佩贵²,施 晔²

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098 ;
2.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要 :采用离心机法测定了南京市栖霞区东阳镇 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 3 层土壤的水分特征曲线(SWCC),分析了密度变化对吸力的影响、质量含水量与时间的关系、土壤吸力与质量含水量的关系。根据分析结果改进了传统的吸力求解公式,得出了离心机法测定粉砂壤土水分特征曲线时的最佳离心时间。改进公式克服了传统公式计算吸力时没有考虑土壤压缩的弊端,计算得到的土壤体积含水量可以随土壤干密度的变化而变化,土壤水分特征曲线更能合理地反映土壤水分的保持和运动规律。

关键词 :离心机法;水分特征曲线;离心时间;吸力

中图分类号 :S152.7 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)01-0012-04

土壤水分运动规律既关系到农作物灌溉制度的确定^[1],还与准确地计算地下水补给量有关,而土壤水分特征曲线(SWCC)是描述土壤含水量与吸力(基质势)之间关系的曲线,反映了土壤水能量与土壤含水量的函数关系^[2],也是表示土壤基本水力特性的重要指标。目前直接测定 SWCC 的方法有张力计法、离心机法、压力膜法、砂芯漏斗法、平衡水汽压法等,其中,离心机法具有操作简单^[3]、省时、可测定较宽的吸力范围等优点,被广泛应用于土壤水分动态模拟^[4]。但采用离心机法测定 SWCC 过程时,密度的变化、离心时间、温度、测量误差和吸力计算等因素,都对 SWCC 有一定的影响。

吕殿青等^[5-6]在土壤收缩特征模型^[7-8]的基础上提出了确定密度与吸力关系的三点法数学模型,并提出了土壤压实的幂函数模型。付晓莉等^[9]对土壤压实幂函数模型进行了改进,并研究了密度变化对 SWCC 参数的影响。吕殿青等^[5-6]都是用模型的方法来确定土壤吸力与密度变化关系的。为了避免模型方法的不确定性对实验结果的影响,本文以南京市栖霞区东阳镇土壤为例,对传统的吸力计算公式进行了改进,同时对实验过程中影响 SWCC 测定精度的离心时间进行了初步分析。

1 研究地区与实验方法

1.1 研究地区

实验所用的土壤取自南京市栖霞区东阳镇,取样土层分别为 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm,根据国际土壤学会对土壤粒级的划分标准,用吸管法^[10]测得土样的黏粒(< 0.002 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.020 mm)、砂粒(0.020 ~ 2 mm)的组成,并确定其土壤质地,每种土样做 2 次实验,取其平均值得到机械组成,结果如表 1 所示。实验所用离心机为日立 CR21 型高速冷冻离心机,转子编号为 60,所用环刀的内直径和高均为 5 cm。

表 1 实验土壤的机械组成					
Table 1 Mechanical composition of experimental soil					
取样土层	颗粒组成质量分数 / %			干密度 / (g · cm ⁻³)	土壤质地
	0.02 ~ 2 mm	0.002 ~ 0.020 mm	< 0.002 mm		
0 ~ 20 cm	15.25	63.24	21.51	1.21	粉砂壤土
20 ~ 40 cm	21.64	59.27	19.09	1.47	粉砂壤土
40 ~ 60 cm	23.77	58.82	17.41	1.55	粉砂壤土

由表 1 可知 3 层土壤的质地相同,但 0~20 cm 土层的干密度较其他 2 层明显偏小.造成这种现象的主要原因是 0~20 cm 土层为作物耕作层,土壤较松散.

1.2 实验方法

将经风干的土样过 2 mm 筛后,按其密度均匀装入环刀,土样厚度 h_0 ($h_0 = 2 h$, h 表示中心土柱高)为 4 cm,然后将其放入蒸馏水中浸泡 48 h,饱和过程中水面略低于土壤表面.待土壤饱和并称量后将盛有土样的环刀放入离心盒,在恒温 20℃下离心 150 min(分 3 次进行),每次离心后称重、测量并记录.根据设计压力设定离心机转速,本实验设定的转速 n 分别为 500 r/min,1 000 r/min,1 500 r/min,2 000 r/min,3 000 r/min,4 000 r/min,5 000 r/min 和 6 000 r/min.

当吸力与离心力达到平衡后,用游标卡尺测定土样表面到离心盒盒口(去盖后)的距离,进而计算离心结束时的土壤吸力,并确定土壤密度,然后取出土样并称量.待全过程完成后,将土样烘干称重,并计算各个转速下的土壤质量含水量,同时根据土壤体积含水量与质量含水量的关系计算土壤体积含水量.

2 实验结果分析

2.1 计算公式的影响

离心力场的基准水面势 Ψ_1 和任意高度的土壤水势 Ψ_0 的差,可用式(1)表示^[11].

$$\Psi_1 - \Psi_0 = \int_{r_0}^{r_1} r \omega^2 dr = \frac{1}{2} \omega^2 (r_1^2 - r_0^2) = h \omega^2 \left(r_1 - \frac{h}{2} \right) \tag{1}$$

式中: $h = r_1 - r_0$; r_1 ——基准水面旋转半径,即离心机转子中心到离心盒中土样最远处的距离; r_0 ——土样中心旋转半径; r ——旋转半径; ω ——角速度.如图 1 所示.

将离心力场的势能换算成重力场的毛管势 ρgh (设水的密度为 1 g/cm³)^[11]:

$$\rho gh' = \rho h \omega^2 \left(r_1 - \frac{h}{2} \right) \Rightarrow$$
$$H' = h \left(r_1 - \frac{h}{2} \right) \frac{\omega^2}{g} = h \left(r_1 - \frac{h}{2} \right) \frac{\left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2}{980} =$$
$$h \left(r_1 - \frac{h}{2} \right) \times 1.118 \times 10^{-5} n^2 \tag{2}$$

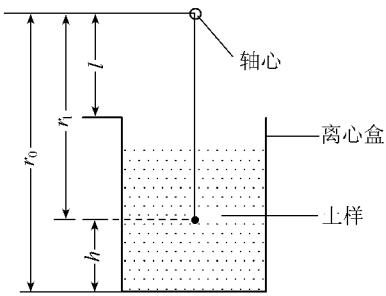


图 1 装土样的离心盒
Fig. 1 Centrifugal box for soil samples

通常情况下,计算时不考虑离心过程中中心土样高度 h 的变化(即不考虑土样的压缩,土样在离心过程中干密度不变),则旋转速度 n (r/min)、基准水面旋转半径 r_1 和预装入环刀的土样厚度 h_0 ($h_0 = 2 h$)已知时,就能求出吸力 H' .因为 $h < r_1$,由式(2)可知,在同一转速下,随着土样的压缩, h 逐渐减小,进而土壤吸力不断减小.

若要更准确地描述 SWCC,就必须考虑离心过程中土样高度 h 的变化对吸力的影响.设 l 为离心机转子中心到离心盒(去盖后)顶端的距离, h' 为离心盒(去盖后)顶端到土样表面的距离,则 $h = \frac{1}{2} [r_1 - (l + h')]$.将其代入式(2)可得

$$H = \frac{1}{2} [r_1 - (l + h')] \left[r_1 - \frac{r_1 - (l + h')}{4} \right] \times 1.118 \times 10^{-5} n^2 =$$
$$\frac{1}{8} (r_1 - l - h') (3r_1 + l + h') \times 1.118 \times 10^{-5} n^2 =$$
$$1.3975 \times 10^{-6} n^2 (r_1 - l - h') (3r_1 + l + h') \tag{3}$$

式中转速 n 为设定值,特定型号的离心机 r_1 和 l 均为常数,故在实际操作中只需用游标卡尺测定 h' 即可求出吸力 H 的值.本次实验所用离心机的 r_1 为 9.80 cm, l 为 4.32 cm,故式(3)可简化为

$$H = 1.3975 \times 10^{-6} n^2 (5.48 - h') (33.72 + h') \tag{4}$$

传统公式(2)与改进公式(3)对吸力计算结果的影响见表 2.其中,吸力 H' 是由式(2)计算所得结果,由于式(2)中的吸力是中心土样高度 h 和转速 n 的函数,并且中心土样高度 h 假定为定值,所以吸力 H' 与转速一

一对应,而与土层无关,吸力 H 是由式(3)计算所得结果; h' 取每个转速离心结束时的测量值.由表2可知:式(2)与式(3)吸力计算结果的差随转速的增大而显著增大,在6000 r/min时,最大差值高达1630.01 cm.

表2 传统公式与改进公式计算所得吸力的对比

$n/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	吸力 H'/cm	0~20 cm 土层		20~40 cm 土层		40~60 cm 土层	
		吸力 H/cm	$(H'-H)/\text{cm}$	吸力 H/cm	$(H'-H)/\text{cm}$	吸力 H/cm	$(H'-H)/\text{cm}$
500	49.19	48.97	0.22	51.44	-2.25	51.19	-2.00
1000	196.77	184.89	11.88	196.90	-0.13	197.60	-0.83
1500	442.73	399.15	43.58	430.42	12.31	430.81	11.92
2000	787.07	686.57	100.50	742.41	44.66	742.23	44.84
3000	1770.91	1469.52	301.39	1608.31	162.60	1602.26	168.65
4000	3148.29	2533.26	615.03	2792.43	355.86	2788.83	359.46
5000	4919.20	3893.71	1025.49	4297.81	621.39	4330.52	588.68
6000	7083.65	5453.64	1630.01	6144.92	938.73	6172.59	911.06

采用离心机法测定 SWCC 时,转速的最大值一般都要达到6000 r/min,采用不考虑离心过程中土样压缩的传统公式计算吸力会造成较大的误差,而改进公式(3)能消除离心过程中土样压缩导致的密度变化对吸力的影响,故采用改进的吸力计算公式能更加准确地反映土壤吸力的性质.

2.2 离心时间的影响

用离心法测 SWCC 达到平衡所需要的时间,因土壤种类(持水性的大小)、试样厚度、吸力大小不同而不同.黏粒质量分数越多,土壤中的细小孔隙越发育,越易于持水,离心达到平衡所需要的时间越长;砂粒质量分数越多,土壤越易失水,离心达到平衡的时间越短.由于离心盒长度的限制,一般情况下土样厚度不大于5 cm.从实验精度上来讲,土样越薄,实验过程中测定的相对误差就会越大,故一般情况下土壤厚度不小于2 cm.本文研究了土样厚度为4 cm的粉砂壤土离心时达到平衡所需要的时间.

由于土壤质量含水量与土壤密度的变化无关,研究离心时间对 SWCC 的影响时,曲线用吸力与土壤质量含水量的关系来表示.不同离心时间下吸力与土壤质量含水量的关系如表3所示,其中 θ_{g1} 、 θ_{g2} 、 θ_{g3} 分别表示离心50 min、100 min、150 min后的土壤质量含水量.离心后不同层土样的质量含水量变化过程如图2所示.

表3 不同离心时间下土壤质量含水量与吸力的关系

Table 3 Relationship between mass soil water content and suction under different centrifugal time							
取样 土层	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	$\theta_{g1}/$ %	$\theta_{g2}/$ %	$\theta_{g3}/$ %	$(\theta_{g1}-\theta_{g2})/$ %	$(\theta_{g2}-\theta_{g3})/$ %	吸力/ cm
0~20 cm	500	33.34	33.27	33.16	0.07	0.11	49.19
	1000	28.37	27.91	27.67	0.47	0.24	196.77
	1500	24.83	24.28	24.00	0.55	0.28	442.73
	2000	22.36	21.82	21.51	0.54	0.31	787.07
	3000	19.73	19.09	18.78	0.64	0.31	1770.91
	4000	17.62	17.14	16.84	0.48	0.30	3148.29
	5000	16.13	15.69	15.40	0.44	0.28	4919.20
	6000	14.76	14.50	14.26	0.26	0.24	7083.65
	500	33.37	32.91	32.66	0.46	0.25	49.19
	1000	28.78	28.45	28.26	0.33	0.19	196.77
20~40 cm	1500	25.91	25.43	25.13	0.48	0.30	442.73
	2000	23.58	23.14	22.87	0.44	0.27	787.07
	3000	20.90	20.28	19.94	0.62	0.34	1770.91
	4000	18.82	18.32	18.00	0.50	0.32	3148.29
	5000	17.27	16.88	16.62	0.39	0.26	4919.20
	6000	16.15	15.83	15.60	0.32	0.23	7083.65
	500	31.89	31.45	31.10	0.44	0.35	49.19
	1000	27.86	27.36	27.28	0.50	0.08	196.77
	1500	25.10	24.66	24.43	0.44	0.23	442.73
	2000	22.97	22.49	22.30	0.48	0.19	787.07
40~60 cm	3000	20.55	19.93	19.62	0.62	0.31	1770.91
	4000	18.59	18.19	17.86	0.40	0.33	3148.29
	5000	17.21	16.82	16.55	0.39	0.27	4919.20
	6000	16.18	15.87	15.66	0.31	0.21	7083.65

采用离心机法测定 SWCC,若离心时间太短,则在相同吸力下得到的土壤含水量偏大,表现为得到的 SWCC 偏右;但若离心时间太长,在过多消耗人力、物力和时间的同时,精度提高非常小.本文对南京市栖霞区东

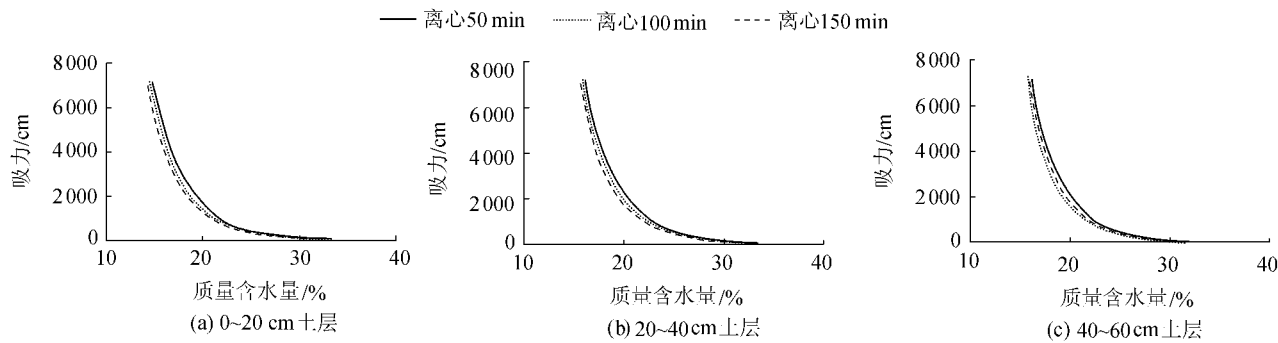


图 2 不同离心时间下的 SWCC

Fig. 2 Soil water characteristic curves under different centrifugal time

阳镇土壤的分析结果表明,采用离心机法测定粉砂壤土的水分特征曲线时,离心100 min即可。

3 结 论

- a. 以采用离心机法测定南京市栖霞区东阳镇土壤水分特征曲线为例,指出了更为合适的离心时间,即离心 100 min.
- b. 用实验方法消除了离心机法测定 SWCC 时密度变化对吸力的影响,即对计算土壤吸力的传统公式进行了改进,克服了传统公式计算吸力时没有考虑土壤压缩的弊端,提出了可考虑离心过程土壤干密度变化的吸力计算公式,由此计算得到的土壤体积含水量可以随土壤干密度的变化而变化,土壤水分特征曲线更能合理地反映土壤水分的保持和运动规律.

参考文献：

[1] 王建伟,周凌云.土壤水分变化对金银花叶片生理生态特征的影响[J].土壤,2007,39(3):479-482.
[2] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:18-24.
[3] 冯杰,郝振纯,刘方贵.大孔隙对土壤水分特征曲线的影响[J].灌溉排水,2002,21(3):4-7.
[4] 邵明安,黄明斌.土根水动力学[M].西安:陕西科学技术出版社,2000.
[5] 吕殿青,邵明安,王全九.土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J].水利学报,2003,34(3):110-114.
[6] 吕殿青.变容重土壤的水分动力学研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2003.
[7] MITCHELL A R, van GENUCHTEN M T. Shrinkage of bare and cultivated soil[J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56: 1036-1042.
[8] CRESCIMANNO G, PROVENZANO G. Soil shrinkage characteristic curve in clay soil: measurement and prediction[J]. Soil Sci Soc Am J, 1999, 63: 25-32.
[9] 付晓莉,邵明安.一种改进的土壤压实模型及试验研究[J].农业工程学报,2007,23(4):1-5.
[10] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
[11] 日本土壤物理性测定委员会.土壤物理性测定法[M].翁德衡,译.重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1979:187-221.

On formulas for soil suction and optimum centrifugal time by use of SWCC

SHANG Man-ting^{1,2}, FENG Jie^{1,2}, LIU Pei-gui², SHI Ye²
(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The soil water characteristic curves for 3 soil strata (0 ~ 20 cm, 20 ~ 40 cm and 40 ~ 60 cm) of Dongyang town of Qixia district of Nanjing City were measured by use of the centrifugal method. The effect of dry density change on suction and the relationship between mass water content and time as well the relationship between soil suction and mass water content were analyzed. Based on analytic results, the traditional formula for computing the soil water suction was modified, and the optimum centrifugal time was obtained to determine the SWCC by means of the centrifugal method. The modified formula overcomes the shortcoming of the traditional one, that is, no consideration of compressibility of soil. The volumetric water content of soil calculated by the proposed method changes with its dry density, and the SWCC can reflect the conservation and motion laws of soil water more reasonably.

Key words : centrifugal method ; SWCC ; centrifugal time ; suction