

土壤类型和容重对离心机法测定土壤水分特征曲线的影响^①

张鹏飞¹, 贾小旭^{2,3*}, 任利东^{2,3}, 赵春雷^{2,3}, 邵明安^{1,2,3}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院地理科学与资源研究所黄河三角洲现代农业工程实验室, 北京 100101;

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190)

摘 要: 本研究以杨凌塬土和嫩江黑土为研究对象, 分别设置了 4 个土壤容重处理(1.0、1.1、1.2、1.3 g/cm³), 利用离心机法测定土壤失水过程, 以压力膜仪法为标准, 对比不同吸力下的含水量实测值和 van Genuchten 模型参数的差异。结果表明, 随着土壤容重的增加, 离心机法测定土壤水分特征曲线准确度逐渐增加, 获取黑土和塬土的 van Genuchten 模型参数 α 的准确度增幅分别为 38.46%~83.08% 和 56.38%~95.75%。离心机法测定土壤水分特征曲线的准确度在不同吸力段表现不同, 近饱和段(0~10 kPa)离心机法测定值偏低, 而高吸力段(10~1 500 kPa)测定值偏高, 且高吸力段离心机法测定准确度较低, 与压力膜仪法测定值具有极显著差异($P<0.01$)。综上所述, 为了提高离心机法测定土壤水分特征曲线的准确度, 优先考虑应用于大容重和高有机质含量的土壤。

关键词: 土壤水分特征曲线; 土壤容重; 离心机法; 压力膜仪法

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Effects of Soil Type and Bulk Density on Determining Water Retention Curve by Centrifuge

ZHANG Pengfei¹, JIA Xiaoxu^{2,3*}, REN Lidong^{2,3}, ZHAO Chunlei^{2,3}, SHAO Ming'an^{1,2,3}

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Yellow River Delta Modern Agricultural Engineering Laboratory, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this study, Lou soil in Yangling and Mollisol in Nenjiang were selected, and four gradients of soil bulk density (1.0, 1.1, 1.2, 1.3 g/cm³) were set, centrifuge and pressure plate methods were used to determine soil water retention curve (SWRC), and the van Genuchten (VG) model was used to fit SWRC. The results showed that with the increase of bulk density, the accuracy of centrifuge method gradually increased, and the accuracy of obtained parameter α of van Genuchten model increased by 38.46%–83.08% in Mollisol and 56.38%–95.70% in Lou soil. Centrifuge method had different performances in different suction sections, the measured value was lower near saturation suction (0–10 kPa), but higher in the high suction (10–1 500 kPa) with low accuracy, which was significantly ($P<0.01$) different with pressure plate method. In conclusion, centrifuge method is recommended to determine SWRC for soils with large bulk density and high organic matter content.

Key words: Soil water retention curves; Soil bulk density; Centrifuge method; Pressure plate method

土壤水分特征曲线描述土壤吸力与含水量之间的数量关系, 反映了土壤的吸水 and 持水能力, 是研究土壤水力特性的重要指标^[1]。因此, 准确获取土壤水分特征曲线对土壤水力特性的研究至关重要。目前, 测定土壤水分特征曲线的方法众多, 例如张

力计法^[2]、离心机法^[3]、压力膜仪法^[4]、沙箱法^[5]和露点水势仪蒸发法^[6]等。其中离心机法和压力膜仪法由于其快速或准确性较高而被普遍采用^[7-8], 然而目前针对两种方法在不同土壤容重下的差异变化趋势尚无直接研究结果。离心机法测定土壤水分特征曲线

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42022048)和中国科学院战略性先导科技专项(XDB40020305)资助。

* 通讯作者(jiaxx@igsrr.ac.cn)

作者简介: 张鹏飞(1997—), 男, 河南项城人, 博士研究生, 主要从事土壤物理与水文生态研究。E-mail: pengfei.zhang@nwfau.edu.cn

经历了漫长而缓慢的发展历程。离心机法最初由 Briggs 和 McLane^[9]在 20 世纪初提出,但由于离心机法容易受到离心过程土样和环境条件变化的影响,其准确性受到质疑^[10]。此后, Russell 和 Richards^[11]将离心机法理论与数学方法相结合,通过离心机法的角速度和离心半径建立土壤水势的数学表达式,用于计算土壤离心样品所得含水量对应的水势。但由于当时离心机法的旋转速度难以达到永久萎蔫点对应的土壤吸力,这使得 Richards 和 Fireman^[4]提出压力膜仪方法测定土壤水分特征曲线后,离心机法逐渐被搁置。自 20 世纪 70 年代开始,由于离心转速的提高和冷冻离心机法的普及^[12],加之压力膜仪法测定过程缓慢^[13],离心机法重新被土壤科学家重视。邵明安^[14]对不同土壤类型下两种方法测量的土壤水分特征曲线差别和准确性进行了初步比较研究,发现压力膜仪法测定土壤水分特征曲线的形状与土壤固有的特征曲线大致相符,但离心机法测定过程中由于土壤容重会发生变化,对实验结果造成一定的影响。Khanzode 等^[15]和 Reatto 等^[16]的研究发现离心机法和压力膜仪法所得水分特征曲线的差异较小,离心机法能够很好地代替压力膜仪法,缩短测定周期。周卓丽等^[17]对离心机法和压力膜仪法测定黑土、黄绵土、红壤、紫色土和褐土水分特征曲线的差异进行了比较研究发现,土壤质地和孔隙分布是影响不同土壤类型测定差

异的主要原因。然而,与压力膜仪法获得的结果相比,由于离心机法的离心作用导致土壤样品发生收缩,许多研究人员仍然不确定离心机法测定结果的准确性变化。此外,以往的研究虽然对比分析了离心机法和压力膜仪法所得土壤水分特征曲线的差异,但针对不同土壤容重下离心机法和压力膜仪法测定土壤水分特征曲线差异的相关研究缺少。基于此,本研究选取两种不同类型土壤(黑土和壤土),分别设定 4 个不同初始填装土壤容重(1.0、1.1、1.2、1.3 g/cm³),通过离心机法和压力膜仪法测定不同处理的土壤水分特征曲线,以压力膜仪法测定结果为标准,对比离心机法和压力膜仪法所得不同土壤类型和容重间水分特征曲线及 van Genuchten 模型参数的差异,以揭示土壤类型和容重对离心机法测定土壤水分特征曲线准确度的影响。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

本研究选取陕西杨凌壤土和黑龙江嫩江黑土为供试土壤,两种土壤均采自 0~30 cm 土层,其中,壤土取自草地,黑土取自农田(玉米)。两种土壤经自然风干后过 2 mm 筛,利用吸管法测定土壤颗粒组成,土壤质地采用美国制划分标准。两种供试土壤基本性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of tested soils

土壤类型	有机质(g/kg)	砂粒(%)	粉粒(%)	黏粒(%)	土壤质地
黑土	48.80	22.72	44.33	32.95	黏壤土
壤土	5.36	15.10	59.90	25.00	粉砂壤土

1.2 研究方法

离心机法测定试验于 2020 年 12 月在中国科学院水利部水土保持研究所进行。首先将处理好的土样按照设定初始容重(1.0、1.1、1.2、1.3 g/cm³)填装在高 50 mm、半径 50.46 mm,体积约为 100 cm³的环刀中。为减小填装不均一性,对土样进行逐层填装,每层土样填装完成后对其表层进行人工打磨,以保证各层土壤之间自然衔接。然后利用高速冷冻离心机(日立 CR21G)测定土壤水分特征曲线,测定时保持离心机内部温度稳定在 20℃,测定不同吸力下(1、10、20、40、60、80、100、200、400、600 和 800 kPa)土壤样品相应的土壤含水量。每个吸力对应的离心机转速分别为 310、981、1 387、1 961、2 402、2 774、3 101、4 385、6 202、7 596 和 8 771 r/min,其测定时间分

别为 10、26、36、45、51、55、58、68、77、83 和 87 min。

压力膜仪(美国 1500F2)法测定试验于 2021 年 3 月在西北农林科技大学资源环境学院土壤物理实验室进行,由于实验室仅有 100、300 和 500 kPa 3 种规格压力膜板,因此本试验设置最高土壤水吸力为 400 kPa。首先将处理好的土样按照设定容重填装在直径 53 mm、高 10 mm 的压力膜仪自带土壤样品环中,填装完成后将土样饱和 24 h,然后将土壤样品转移至压力膜板上,放入压力室,通过设定相应的土壤水吸力(10、20、50、80、100、200 和 400 kPa)进行测定,待连续 24 h 无水分排出即可认为试验达到平衡。每个吸力段测定结束后,将土壤样品称重,计算该吸力段对应土壤含水量。离心机法和压力膜仪法试验两种

土壤每个处理均设置 3 个重复。

1.3 土壤水分特征曲线拟合

采用 RETC 软件^[18]中的 van Genuchten(VG)模型^[19]对离心机法和压力膜仪法所得实测数据进行拟合, 获取土壤水分特征曲线 VG 模型参数。VG 模型表达式如下:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + (ah)^n\right]^m} \quad (1)$$

式中: θ 为体积含水量(cm^3/cm^3); θ_r 为残余含水量(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和含水量(cm^3/cm^3); h 为土壤吸力(cm); a 是土壤进气值的倒数; m 和 n 是土壤水分特征曲线形状参数, 参数 n 表征曲线坡度的陡缓情况, $m=1-1/n$ 。

为消除较高的有机质含量对土壤饱和含水量的影响, 利用经有机质含量修正后的土壤孔隙度计算公式, 得到土壤饱和含水量^[20]。其公式如下:

$$\rho_s = \rho_m X_m + \rho_{om} X_{om} \quad (2)$$

$$\varphi = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: ρ_s 为修正后的土壤固相密度(g/cm^3); ρ_m 为矿物密度($2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$); X_m 为矿物百分比(%); ρ_{om} 为有机质密度($1.25 \text{ g}/\text{cm}^3$); X_{om} 为有机质百分比(%); φ 为土壤总孔隙度(%); ρ_b 为土壤容重(g/cm^3)。

1.4 数据处理

利用 SPSS 25.0 对离心机法和压力膜仪法所得土壤含水量和 VG 模型参数(α 和 n)进行配对样本 t 检验。由于离心机法和压力膜仪法实测土壤吸力值不同, 本研究首先利用 VG 模型对实测值进行拟合, 然后计算对应土壤吸力值下的土壤含水量, 从而得到离心机法和压力膜仪法同一土壤吸力值对应的土壤含

水量。采用均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)评价指标比较离心机法和压力膜仪法所得土壤含水量之间的差异大小。其中, RMSE 定量描述数据之间的一致性, 其值越小, 表明离心机法和压力膜仪法所得体积含水量之间的差异越小; MAE 值反映离心机法和压力膜仪法所得体积含水量之间绝对误差的平均值大小, 其值越小, 离心机法和压力膜仪法所得体积含水量之间的绝对误差越小。RMSE 和 MAE 表达式分别为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \theta_y)^2} \quad (4)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta_i - \theta_y| \quad (5)$$

式中: θ_i 为不同吸力条件下离心机法所得土壤体积含水量值(cm^3/cm^3), θ_y 为对应吸力条件下压力膜仪法所得土壤体积含水量值(cm^3/cm^3), N 为试验样本个数。

2 结果

2.1 离心机法和压力膜仪法土壤水分特征曲线对比

两种类型土壤离心机法和压力膜仪法所得土壤含水量均随土壤吸力的增加呈下降趋势(图 1、图 2)。黑土容重 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ (图 1A)处理下, 全吸力段均表现为离心机法所得土壤含水量值偏低; 其他土壤容重处理则表现为: 在近饱和段离心机法所得土壤含水量值偏低, 而高吸力段则相反(图 1B ~ 1D)。壤土 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ (图 2C)和 $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ (图 2D)容重处理下全吸力段离心机法所得土壤含水量值偏高; 其他土壤容重处理在近饱和段离心机法所得土壤含水量值偏低, 而高吸力段则相反(图 2A、2B)。可见, 土壤类型和容重对离心机法测定土壤水分特征曲线的准确度存在影响。

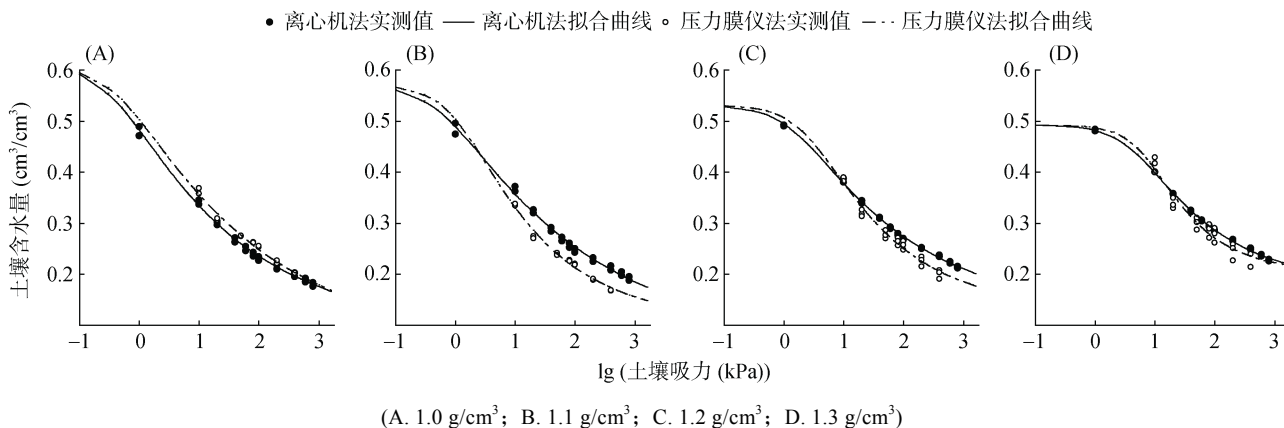


图 1 黑土不同容重下离心机法和压力膜仪法土壤水分特征曲线测定值和拟合值

Fig. 1 Measured and fitted soil water retention curves by centrifuge and pressure plate methods of Mollisol under different bulk densities

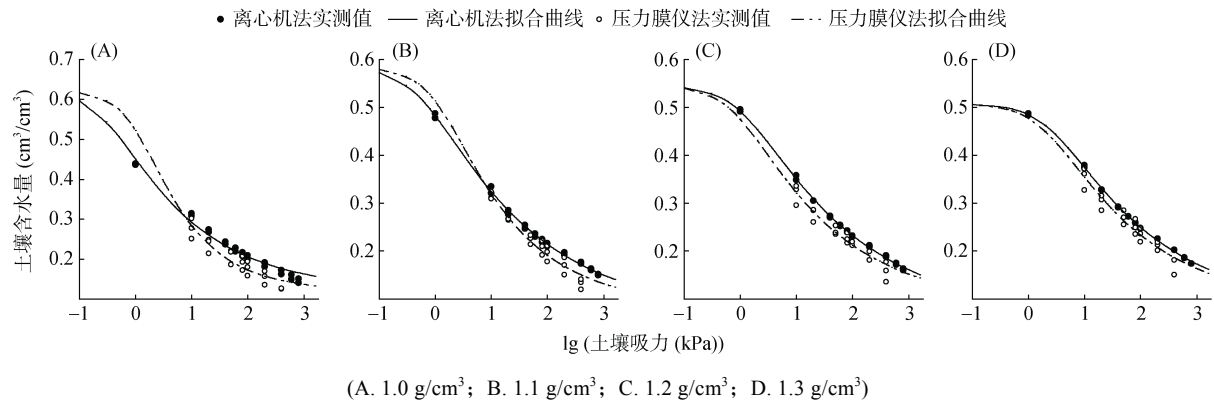


图 2 壤土不同容重下离心机法和压力膜仪法土壤水分特征曲线测定值和拟合值

Fig. 2 Measured and fitted soil water retention curves by centrifuge and pressure plate methods of Lou soil under different bulk densities

2.2 离心机法和压力膜仪法差异统计分析

从图 1 和图 2 发现,离心机法和压力膜仪法所得土壤水分特征曲线差异在近饱和段(0 ~ 10 kPa)和高吸力段(10 ~ 1 500 kPa)有所不同。为进一步对比两种土壤不同吸力段离心机法和压力膜仪法所得水分特征曲线的差异,将土壤吸力分为近饱和段(0 ~ 10 kPa)和高吸力段(10 ~ 1 500 kPa),绘制 1 : 1 线对比离心机法和压力膜仪法所得土壤含水量的差异(图 3)。含水量较高时(近饱和段),离心机法和压力膜仪法所得含水量值都落在 1 : 1 线的上方,表明压力膜仪法所得含水量值高于离心机法,离心机法所得土壤含水量值偏低;高吸力段,离心机法和压力膜仪法所得含水量值都落在 1 : 1 线的下方,表明离心机法所得土壤含水量值偏高。土壤含水量值在 1 : 1 线的偏离程度表示离心机法和压力膜仪法测定的差异大小,离心机法和压力膜仪法所得黑土含水量值更接近 1 : 1 线,两种方法测定差异更小,黑土不同容重处理离心机法测定准确度较壤土高。

表 2 利用均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)定量分析不同土壤吸力段离心机法和压力膜仪法所得土壤体积含水量差异;表 3 为不同土壤吸力段离心机法和压力膜仪法所得体积含水量的配对样本 t 检验结果。同一容重处理两种土壤含水量的差异

评价指标 RMSE 和 MAE 均表现为:壤土>黑土,表明离心机法获取土壤含水量的准确度在有机质含量高的黑土中较高,这与上述(图 3)结果一致。可见,土壤类型对离心机法测定准确度存在影响。其中,黑土和壤土的含水量差异评价指标 RMSE 和 MAE 表现为:高吸力段(10 ~ 1 500 kPa)>近饱和段(0 ~ 10 kPa),离心机法和压力膜仪法所得高吸力段含水量具有极显著差异($P<0.01$),表明离心机法获取土壤含水量的准确度在高吸力段较低。

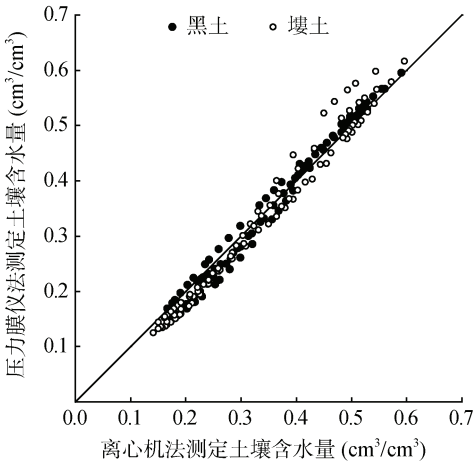


图 3 离心机法和压力膜仪法测定土壤含水量比较

Fig. 3 Comparison of soil water contents measured by centrifuge and pressure plate methods

表 2 离心机法和压力膜仪法土壤含水量差异统计分析

Table 2 Differences in water contents measured by centrifuge and pressure plate methods

土壤类型	初始容重 (g/cm ³)	0 ~ 10 kPa		10 ~ 1 500 kPa		0 ~ 1 500 kPa	
		RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE
黑土	1.0	0.019 6	0.018 7	0.012 3	0.010 6	0.016 5	0.014 9
	1.1	0.015 6	0.014 1	0.035 9	0.035 5	0.027 2	0.024 3
	1.2	0.009 0	0.007 8	0.022 9	0.022 3	0.017 1	0.014 7
	1.3	0.008 0	0.006 7	0.011 1	0.010 0	0.009 6	0.008 3
壤土	1.0	0.048 2	0.039 7	0.029 0	0.028 8	0.040 2	0.034 5
	1.1	0.019 8	0.016 7	0.046 9	0.020 3	0.035 5	0.018 4
	1.2	0.020 8	0.018 5	0.018 2	0.016 9	0.019 6	0.017 8
	1.3	0.013 1	0.010 8	0.014 9	0.014 4	0.014 0	0.012 5

表 3 离心机法和压力膜仪法所得土壤含水量的配对样本 t 检验
Table 3 Paired samples t test of soil water contents measured by centrifuge and pressure plate methods

土壤类型	初始容重(g/cm ³)	0 ~ 10 kPa		10 ~ 1 500 kPa		0 ~ 1 500 kPa	
		<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
黑土	1.0	-10.64	0.000	-5.56	0.000	-9.70	0.000
	1.1	-0.06	0.952	23.59	0.000	3.70	0.001
	1.2	-5.53	0.000	13.94	0.000	1.97	0.061
	1.3	-5.22	0.000	6.64	0.000	0.62	0.540
壤土	1.0	-4.18	0.002	26.81	0.000	-0.70	0.492
	1.1	-4.23	0.001	22.38	0.000	0.37	0.715
	1.2	6.43	0.000	8.10	0.000	10.02	0.000
	1.3	4.83	0.001	11.51	0.000	9.36	0.000

离心机法和压力膜仪法所得黑土和壤土含水量的差异评价指标 RMSE 和 MAE 均随着容重的增加逐渐减小,即随着容重增加离心机法和压力膜仪法的测定差异逐渐减小,离心机法测定准确度逐渐增加。可见,容重对离心机法测定准确度存在影响。

2.3 离心机法和压力膜仪法 VG 模型参数差异分析

表 4 和表 5 分别为离心机法和压力膜仪法所得土壤水分特征曲线 VG 模型参数 α 和 n 的差异统计分析。离心机法和压力膜仪法所得土壤水分特征曲线存在一定差异(图 1、图 2),进而导致离心机法和压力膜仪法所得土壤水分特征曲线 VG 模型参数存在差异^[21]。其中,同一容重处理两种土壤离心机法和压力膜仪法所得 VG 模型参数 α 和 n 的绝对差异表现为:壤土>黑土,表明离心机法获取 VG 模型参数 α 和 n 的准确度在有机质含量高的黑土中较高,这与相同土壤容重处理不同类型土壤间离心机法和压力膜仪法所得土壤水分特征曲线差异结果一致。相同土壤类型不同容重处理下离心机法和压力膜仪法所得土壤水分特征曲线 VG 模型参数存在规律性差异。容重由 1.0 g/cm³ 增加到 1.3 g/cm³ 过程中,离心机法和压力膜仪法所得 VG 模型参数 α 的差异逐渐减小,离

离心机法获取 VG 模型参数 α 的准确度逐渐增加,黑土测定准确度增幅为 38.46%~83.08%,壤土为 56.38%~95.75%。而 VG 模型参数 n 的差异随容重的变化在两种土壤间有所不同,其中,黑土 VG 模型参数 n 的差异逐渐增大,离心机法获取 VG 模型参数 n 的准确度逐渐减小,减幅为 36.70%~85.51%;而壤土 VG 模型参数 n 的差异随容重的增加逐渐减小,且均具有显著差异($P<0.05$),离心机法获取 VG 模型参数 n 的准确度逐渐增加,增幅为 41.67%~90.62%。可见,土壤类型和容重对离心机法获取 VG 模型参数 α 和 n 的准确度存在影响。

3 讨论

土壤吸力近饱和段压力膜仪法所得土壤含水量高于离心机法,而高吸力段则相反(图 1、图 2 和图 3),这与周卓丽等^[17]的研究结果一致。这是因为近饱和段,土壤含水量主要受大孔隙数量的控制,在离心力的作用下土壤发生收缩,大孔隙数量急剧减少^[22],土壤含水量快速下降,导致其含水量测定值低于压力膜仪法测定值。而在高吸力段,离心机法测定过程中,土壤收缩使得土壤小孔隙数量增加,提高了土壤的持

表 4 离心机法和压力膜仪法所得 VG 模型参数 α 差异的统计分析
Table 4 Differences in model parameters α obtained by centrifuge and pressure plate methods

土壤类型	初始容重(g/cm ³)	离心机法	压力膜仪法	绝对差异
黑土	1.0	0.116 1 ± 0.001 5 a	0.064 1 ± 0.022 4 b	0.052 0
	1.1	0.127 4 ± 0.007 2 a	0.037 3 ± 0.002 8 b	0.090 1
	1.2	0.060 0 ± 0.000 4 a	0.030 0 ± 0.014 3 b	0.030 0
	1.3	0.037 6 ± 0.001 2 a	0.022 8 ± 0.012 5 a	0.008 8
壤土	1.0	0.348 8 ± 0.011 0 a	0.099 3 ± 0.081 0 b	0.249 5
	1.1	0.145 7 ± 0.005 7 a	0.050 1 ± 0.019 1 b	0.095 6
	1.2	0.143 3 ± 0.004 9 a	0.119 0 ± 0.096 4 a	0.024 3
	1.3	0.096 2 ± 0.000 1 a	0.085 6 ± 0.031 3 a	0.010 6

注:同行数据小写字母不同表示离心机法和压力膜仪法间差异显著($P<0.05$),下表同。

表 5 离心机法和压力膜仪法所得 VG 模型参数 n 差异的统计分析
Table 5 Differences in model parameters n obtained by centrifuge and pressure plate methods

土壤类型	初始容重(g/cm ³)	离心机法	压力膜仪法	绝对差异
黑土	1.0	1.237 8 ± 0.009 8 a	1.207 1 ± 0.061 6 a	0.030 7
	1.1	1.489 1 ± 0.022 8 a	1.349 3 ± 0.097 7 a	0.139 8
	1.2	1.256 5 ± 0.000 1 b	1.345 0 ± 0.004 4 a	0.088 5
	1.3	1.313 4 ± 0.014 2 a	1.525 2 ± 0.186 3 a	0.211 8
壤土	1.0	1.360 3 ± 0.003 2 a	1.169 5 ± 0.018 1 b	0.190 8
	1.1	1.297 4 ± 0.000 8 a	1.186 1 ± 0.023 9 b	0.111 3
	1.2	1.214 4 ± 0.012 3 a	1.175 7 ± 0.048 2 a	0.038 7
	1.3	1.179 5 ± 0.004 9 a	1.161 6 ± 0.020 7 a	0.017 9

水能力^[23]，导致其含水量测定值高于压力膜仪法。离心机法和压力膜仪法所得黑土和壤土含水量差异在高吸力段较近饱和段更大，这主要是由于离心力较高时土壤发生严重收缩导致。Schlüter 等^[24]利用 X 射线计算机断层成像技术分析离心机法测定过程中离心力引起的土壤形状变化发现，当离心力低于 50 kPa 时，土壤发生轻微形变，而当离心力高于 50 kPa 后，土壤逐渐发生严重形变。因此，在高吸力段，土壤压缩程度较近饱和段大，导致离心机法和压力膜仪法所得黑土和壤土含水量差异在高吸力段较大。

土壤类型对离心机法获取土壤水分特征曲线及 VG 模型参数的准确度存在影响。同一容重处理离心机法所得土壤水分特征曲线及 VG 模型参数 α 和 n 的准确度均表现为：黑土>壤土。这是因为两种土壤颗粒组成较为接近，主要差异是土壤有机质含量。有机质含量较高的黑土具有较高的抗压缩能力和恢复能力^[25]。因此，相同容重下离心机法测定过程中黑土容重变化较小，从而离心机法和压力膜仪法测定的差异减小，所以离心机法测定有机质含量高的黑土准确度较高。同样，容重对离心机法获取土壤水分特征曲线及 VG 模型参数的准确度也存在影响。其中，离心机法所得黑土和壤土水分特征曲线及 VG 模型参数 α 的准确度随土壤容重的增加逐渐增加。这是由于土壤收缩程度主要受土壤中大孔隙的数量控制，随着土壤容重的增加，土壤大孔隙数量逐渐减少^[26]，土壤受离心力发生收缩的程度逐渐减小，从而离心机法和压力膜仪法所得土壤水分特征曲线及其 VG 模型参数 α 的差异逐渐减小。此外，本研究发现，尽管压力膜与土壤样品之间用滤纸分割，但在压力膜仪法测定过程中仍然存在少量土壤泄露问题。土壤泄露可能会使压力膜导水孔隙堵塞，阻碍土壤水分排出，对压力膜仪法所得土壤水分特征曲线产生影响，进一步增大离心机法和压力膜仪法所得土壤水分特征曲线及

VG 模型参数的差异。

4 结论

离心机法测定土壤水分特征曲线及 VG 模型参数的准确度受土壤类型和容重的影响，这种影响主要体现在高吸力段，较大的离心力使得土壤发生压缩，导致土壤含水量测定值偏高；随着土壤容重的增加，离心机法获取土壤水分特征曲线和 van Genuchten 模型参数 α 的准确度逐渐增加；而同一土壤容重处理，离心机法测定土壤水分特征曲线的准确度在有机质含量高的黑土中较大。因此，为提高土壤水分特征曲线测定的准确性，离心机法优先考虑应用于大容重和高有机质含量的土壤。

参考文献：

[1] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[2] Hamdany A H, Shen Y J, Satyanaga A, et al. Field instrumentation for real-time measurement of soil-water characteristic curve[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022, 10(4): 586–596.

[3] 柳金昊, 信忠保, 沈晗悦, 等. 河北坝上地区不同植被类型土壤持水性能研究[J]. 土壤, 2021, 53(4): 833–840.

[4] Richards L A, Fireman M. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils[J]. Soil Science, 1943, 56(6): 395–404.

[5] Asghari S, Zeinalzadeh K, Kheirfam H, et al. The impact of cyanobacteria inoculation on soil hydraulic properties at the lab-scale experiment[J]. Agricultural Water Management, 2022, 272: 107865.

[6] 王红兰, 唐翔宇, 鲜青松, 等. 紫色土水分特征曲线室内测定方法的对比[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 240–248.

[7] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 611–620.

[8] 伍海兵, 方海兰, 李爱平. 几种常用绿地改良材料对土壤水分特征的影响[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1229–1236.

- [9] Briggs L J, McLane J W. Moisture equivalent determinations and their application[J]. *Agronomy Journal*, 1910, 2(1): 138–147.
- [10] Thomas M D, Harris K. The moisture equivalent of soils[J]. *Soil Science*, 1926, 21(6): 411–424.
- [11] Russell M B, Richards L A. The determination of soil moisture energy relations by centrifugation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1939, 3: 65–69.
- [12] Francis C W, Tamura T. An evaluation of zonal centrifugation as a research tool in soil science: II. characterization of soil clays[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36(2): 372–376.
- [13] 高鹏飞, 冉卓灵, 韩珍, 等. 含岩屑紫色土水力特性及饱和导水率传递函数研究[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 128–139.
- [14] 邵明安. 不同方法测定土壤基质势的差别及准确性的初步研究[J]. *土壤通报*, 1985, 16(5): 222–225.
- [15] Khanzode R M, Vanapalli S K, Fredlund D G. Measurement of soil-water characteristic curves for fine-grained soils using a small-scale centrifuge[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(5): 1209–1217.
- [16] Reatto A, da Silva E M, Bruand A, et al. Validity of the centrifuge method for determining the water retention properties of tropical soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1547–1553.
- [17] 周卓丽, 张卓栋, 高晓飞, 等. 离心机与压力板仪测定土壤水分特征曲线比较[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(4): 101–108.
- [18] Schaap M G, Leij F J, van Genuchten M T. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 251(3/4): 163–176.
- [19] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892–898.
- [20] Hassink J, Whitmore A P, Kubát J. Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter[J]. *European Journal of Agronomy*, 1997, 7(1/2/3): 189–199.
- [21] Lu D Q, Shao M G, Horton R, et al. Effect of changing bulk density during water desorption measurement on soil hydraulic properties[J]. *Soil Science*, 2004, 169(5): 319–329.
- [22] 张鹏飞, 贾小旭, 赵春雷, 等. 初始容重对土壤水分特征曲线的影响[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1174–1180.
- [23] Alaoui A, Lipiec J, Gerke H H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115/116: 1–15.
- [24] Schlüter S, Leuther F, Vogler S, et al. X-ray microtomography analysis of soil structure deformation caused by centrifugation[J]. *Solid Earth*, 2016, 7(1): 129–140.
- [25] 任利东, 王丽, 林琳, 等. 农田土壤机械压实研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 610–626.
- [26] Nawaz M F, Bourrié G, Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(2): 291–309.