

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.02.009

紫色土水分特征曲线室内测定方法的对比

王红兰^{1,2}, 唐翔宇¹, 鲜青松¹, 刘琛¹, 关卓¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探寻全吸力范围内土壤水分特征曲线的可靠测定方法, 采用沙箱排水法、Hyprop 仪蒸发法、压力膜仪排水法和露点水势仪蒸发法分吸力段测定盐亭紫色土耕地表层 2~7 cm 和亚表层 7~12 cm 土壤的水分特征曲线, 对比测定结果的方法间差异, 并分析其原因。结果表明: 对于表层和亚表层土壤, 低吸力段($h > -100$ cm)水分特征曲线的沙箱法和 Hyprop 仪法的均方根误差 $E_{RMS}(\theta)$ 均较小, 在 0.026~0.082 cm^3/cm^3 范围内, 确定系数 R^2 均大于 0.962, 说明这两种方法测定结果之间差异不大。高吸力段($h < -330$ cm)的压力膜仪法与露点仪法测定结果之间的差异较大, $E_{RMS}(\theta)$ 为 0.062~0.097 cm^3/cm^3 , R^2 较低, 为 0.775~0.952。因此, 全吸力范围内水分特征曲线测定方法的选择与组合应考虑土壤孔径分布特征和研究目的。

关键词: 土壤水分特征曲线; 沙箱法; Hyprop 仪法; 压力膜仪法; 露点水势仪法; 滞后现象

中图分类号: P334 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2016)02-0240-09

土壤水分特征曲线, 也称土壤 pF 曲线, 主要用于表征土壤水的能量与数量之间的关系, 是描述及研究水在包气带和地下饱和蓄水层土壤中运移的关键资料^[1], 其准确性直接影响土壤水分运动和溶质运移的预测精度^[2-3]。该曲线是评价土壤持水特性、土壤水分有效性和土壤中孔隙大小分布状况的重要依据^[4]。

近几十年来, 国内外许多学者针对不同土壤与使用目的, 致力于多种土壤水分特征曲线测定方法的建立与测定设备的研制。目前, 实验室内测定土壤水分特征曲线的方法主要有沙箱法^[5]、张力计法^[6]、离心法^[7]、压力膜仪法^[8]和露点水势仪法^[9]等。沙箱法能较为真实、准确地测定低吸力段土壤含水量的变化情况, 其测定范围为 0~-100 cm。Hyprop 仪为张力计法的一种商业化产品, 其特点为系统可以连续自动地监测土壤吸力与含水量, 因此, 可得到大量数据对低吸力范围的水分特征曲线进行表征, 其水势测定范围宽于沙箱法, 为 0~-880 cm。离心法操作简单, 耗时少, 但是测量过程中土壤密度、离心时间、测量误差对其结果影响较大^[7]。压力膜仪法测量过程中不改变土壤容重, 测定结果较为符合田间排水实际, 但耗时较长^[8], 且难以准确测定低压力下(<0.01 MPa)土壤含水量的变化情况。露点水势仪(Dew-point potential meter)是目前测量土壤水势最快的仪器, 在 5 min 之后显示屏直接给出读数。它的水势测定范围为 0~300 MPa (pF 值为 6.5), 其中 0~5 MPa (pF 值为 4.7) 范围内的精度是 ± 0.05 MPa (pF 值为 2.7), 5~300 MPa 范围内的精度是 $\pm 1\%$ 。

这些方法有各自一定的适用范围和局限性。Cresswell 等^[10]在仅利用压力膜仪测定水分特征曲线时, 发现存在低压力段数据点较少、不能精确反映其持水特征的问题。王晓蕾等^[11]利用 Hyprop 系统测定土壤水分特征曲线, 获取了低吸力范围内的大量数据, 但不能测定高吸力段的水分特征曲线。针对这一问题, 彭紫赞等^[12]联合采用 Hyprop 系统与离心法测定全吸力范围内的水分特征曲线, 克服了 Hyprop 系统不能测定高吸力

收稿日期: 2015-09-30; 网络出版时间: 2016-03-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160314.2210.028.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21307152; 41471268)

作者简介: 王红兰(1987—), 女, 广西来宾人, 博士研究生, 主要从事土壤水力学参数研究。

E-mail: honglanwang2010@126.com

通信作者: 唐翔宇, E-mail: xytang@imde.ac.cn

范围土壤水分特征曲线以及离心机法低吸力范围内测定精度较差的缺点。本文在前期研究中联合采用沙箱和压力膜仪法测定全吸力段的土壤水分特征曲线,阐明了低吸力段数据对紫色土水分特征曲线及模型拟合结果产生的重要影响^[13]。Solone等^[14]对比采用了不同方法组合(沙箱法、压力膜仪法和露点水势仪法),发现所获得的水分特征曲线测定结果并不一致,因此,对水力学参数拟合估算和模型模拟的结果产生较大影响。

针对现有土壤水分特征曲线测定方法各自存在的优缺点和适用范围差异,本文采用沙箱、压力膜仪、Hyprop仪和露点水势仪,对盐亭紫色土耕地土壤水分特征曲线进行测定,比较不同方法组合(水力学排干法组合与热力学蒸发法组合)测定结果的差异并加以解释。同时,采用露点水势仪测定土壤的干化与湿化法水分特征曲线,查明滞后现象。此外,还考查了生物炭施用对于水分特征曲线的方法间差异可能产生的影响并分析其原因。本文针对紫色土孔隙的两极分布及大、中孔隙丰富的特点,推荐可靠、合适的测定方法及其组合,并对实验结果所反映田间物理意义给出科学解释。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡(105°27'E, 31°16'N),海拔400~600 m,属中丘-深丘地貌,林地植被为桉柏混交林和散生乔木为主,农作物以玉米、小麦、油菜和水稻为主。土壤以石灰性紫色土和水稻土为主,中亚热带气候,年均气温17.3℃,年均降雨量826 mm^[15]。

1.2 研究方法

1.2.1 试验材料

试验土样采自盐亭紫色土农业生态试验站内养分场3个未施用生物炭的对照耕地小区(NPK)和施用生物炭的3个耕地小区(NPK-BC),后者施炭量为16 t/hm²。小区布置采用随机区组设计,每一处理设置3个平行,小区面积为4 m×6 m=24 m²。试验小区均采用小麦-玉米轮作^[16]。

2014年6月,在每个试验小区内,先用小铲清理、平整地表,用环刀采样器(荷兰Eijkelpamp公司,型号07.53.SE)分2~7 cm和7~12 cm两个土层深度,每层取体积为100 cm³(高5 cm,内径5 cm)和250 cm³(高5 cm,内径8 cm)原状环刀土样各1个,共计24个样品带回实验室4℃冷藏待用。采用沙箱-压力膜仪(美国Soil moisture Equipment Corp公司)排干法测定100 cm³环刀土样的水分特征曲线,而250 cm³环刀土样则采用Hyprop仪(德国UMS公司)、露点水势仪(美国Decagon公司;型号WP4C)蒸发法测定其水分特征曲线。在环刀土样采样点附近,同时分层取适量分散土样带回实验室,自然风干,用于测定土壤基本理化性质,并采用露点水势仪测定土壤的干化和湿化水分特征曲线以考查滞后现象。

1.2.2 试验设备及方法

试验所需的设备主要有自制沙箱、压力膜仪、Hyprop仪和露点水势仪。沙箱的装置主要包括吸力校准架、带支架的供水瓶、滤布(140~150 μm)、不锈钢容器、粒径为30~73 μm的石英沙等。压力膜仪则由压力室、高进气陶土板、压力表和控制阀门组成。Hyprop仪包括3个Hyprop组件及1台电子天平。1个Hyprop组件包括1个传感器单元(测量土壤水势、温度)和1个土壤样品环。传感器单元通过tensionLINK串口线连接到计算机上以实现土壤水势数据的连续采集。间隔特定时间对每个带样品环刀的传感器进行称重,称重数据通过USB端口传输到计算机上。露点水势仪由主机、Peltier温度控制器、热电偶传感器、内置风扇和LED显示屏组成,采用冷镜露点技术来测量样品的水势。当样品与密封的气室顶部空间达到平衡时,样品室内空气的水势和样品的水势相同。冷镜的温度由Peltier精确控制,连接于镜子上的热电偶记录凝结发生时的温度,最后LED将显示样品的水势和温度。

沙箱和Hyprop仪通常用于测定低吸力段的水分特征曲线,而压力膜仪和露点水势仪则用于高吸力段水分特征曲线的测定,如图1所示。

(1) Hyprop 仪蒸发法

Hyprop 仪在自然蒸发条件下,利用插入环刀土样内 2 个不同深度(1.25 cm 和 3.75 cm)的微型张力计测得土样的水势,同时由天平测得土壤重量,进而采用 HYPROP 软件(德国 UMS 公司,2013)计算获得干化法土壤水分特征曲线及模型参数。假定土壤含水量及水势在垂向上呈线性分布^[17],因而取 2 个深度负压的算术平均值为土壤样品测定时的水势。其具体操作步骤为:

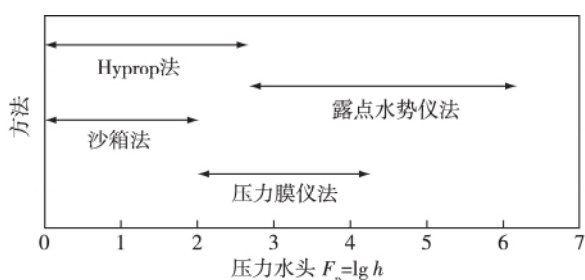


图1 实验室测定水分特征曲线的4种方法及其常用测定范围

Fig. 1 Four laboratory methods for determining water retention characteristics and their measurement ranges commonly used

① 逆向饱和和原状环刀土样(250 cm³, 5 cm 高) 12 ~ 24 h。在饱和的环刀土样底部,利用配套工具挖出 2 个与张力计高度相匹配的孔洞,并注满水。

② 将张力计安装到传感器单元上,之后将饱和后的环刀土样放置于传感器单元上。

③ 将传感器单元及天平的数据线与计算机连接,开始监测环刀土样的负压及质量变化。实验过程中,土样

上表面自然裸露在空气中,在自然蒸发条件下进行测量(保持室内温度恒定,无外来风干扰)。

④ 实时观察土壤水势数据,当水势达到峰值(一般为-800 cm)并开始下降时,结束 Hyprop 仪蒸发法测定实验。完成该实验一般需要 8 ~ 12 d。

⑤ 取出环刀土样放置在烘箱内,在 105 °C 下烘干 8 ~ 12 h 至恒重,称重获得干土质量及容重。

(2) 沙箱排干法

沙箱法^[5]的原理是饱和环刀土样在由悬挂水柱产生的一系列低负压(-2.5 cm、-10 cm、-31.6 cm、-63.1 cm和-100 cm)条件下通过水力学排水使环刀土样含水量达到平衡后称重,测得低吸力段的干化法水分特征曲线。其具体操作步骤见文献[13]。

(3) 压力膜仪排干法

压力膜仪法是通过施加外来压力使水分从土壤中流出,从而获得不同压力下的土壤含水量。在沙箱内完成低吸力段的测定后,接着采用压力膜仪测定高吸力段(-330 cm、-500 cm、-1 000 cm、-5 000 cm 和-15 300 cm)的干化水分特征曲线。具体步骤见文献[13]。

联合沙箱和压力膜仪所测得的实验数据,即可获得全吸力段完整的土壤水分特征曲线。

(4) 露点水势仪法

露点水势仪采用冷镜露点技术,通过测量封闭样品室中空气的露点温度,然后根据内部函数计算样品水势,采用天平称量所得的样品重量,从而获取某个特定时刻的土壤水势和含水量的数据。

为获得干化法土壤水分特征曲线,取适量风干土(过 2 mm 筛,约 3 g)用水饱和后静置 4 ~ 5 h,转移至不锈钢样品杯(直径 4 cm,高 1 cm)中(均匀铺满杯底),并用不锈钢小勺子不断混合土壤,保证所有土壤均处于同一水分条件下。当土壤含水量经自然蒸发(室温 25 °C,无外来风干扰)接近预定值时,测量水势,并用天平称量样品在该水势时的质量。在相同时间间隔内多次测量,直至样品含水量极低(达到风干土状态,pF 值约为 6.0)时停止实验。每个土样设 3 次重复。

为获得湿化法土壤水分特征曲线,取等量风干土(过 2 mm 筛,约 3 g)置于不锈钢样品杯中,均匀铺满杯底。利用小型喷雾器将一定质量的去离子水喷洒于土壤中,并用小勺子不断混合土壤,得到特定的土壤含水量。采用露点水势仪和天平测量获得土壤水势和土壤质量,从而得到土壤湿化水分特征曲线。每个土样设 3 次重复。

试验结束后,将土样放置于烘箱内,在 105 °C 下烘干 6 ~ 8 h 至恒重,称重获得干土质量。取 Hyprop 仪蒸发法试验所用环刀土样的平均容重为其土壤容重,将土壤质量含水量转化为体积含水量。

1.3 数据处理与分析

本文应用 Origin 8.0 软件进行数据处理、图表绘制。采用均方根误差 (E_{RMS}) 和确定系数 (R^2) 比较沙箱和 Hyprop 仪、压力膜仪和露点水势仪在某一水势测点所测得的土壤含水量(通过对各种方法的实测值进行模型拟合,获得水分特征曲线方程,进而计算获得不同方法在各水势点的土壤含水量)的差异, E_{RMS} 值越小表示两种测定方法结果差异越小,而 R^2 值越小则表示两者差异越大。两指标的表达式分别为:

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_p - \theta_o)^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_p - \bar{\theta}_p) (\theta_o - \bar{\theta}_o)}{\sum_{i=1}^N (\theta_p - \bar{\theta}_p)^2 \sum_{i=1}^N (\theta_o - \bar{\theta}_o)^2} \right] \quad (2)$$

式中: θ_p 和 θ_o 分别为不同吸力条件下采用方法 p 和方法 o 所测得的土壤体积含水量, cm^3/cm^3 ; $\bar{\theta}_p$ 和 $\bar{\theta}_o$ 分别为某吸力范围内采用方法 p 和方法 o 所测得的平均土壤体积含水量, cm^3/cm^3 ; N 为土壤体积分含水量的测点个数。

2 结果与分析

2.1 环刀土壤样品的理化性质

耕地试验小区紫色土属于壤质新成土,其机械组成为砂粒(0.05~2 mm) (20 ± 1.3)%、粉粒(0.002~0.05 mm) (52 ± 6.2)%、黏粒(0.002~0.05 mm) (28 ± 6.6)%。表层 2~7 cm 土壤的有机质含量为 12.46~16.92 g/kg,亚表层 7~12 cm 土壤的有机质含量略低,为 9.77~12.33 g/kg^[16]。

两种体积(100 cm^3 和 250 cm^3) 的环刀样品的土壤容重、总孔隙度(根据土壤容重和颗粒密度计算得到)及经水饱和处理后测得的初始水饱和度如表 1 所示。两种体积供试土样的容重和总孔隙度差异很小,说明环刀取样尺寸大小对土壤孔隙结构的代表性影响不显著($P > 0.05$)。所有环刀土样的初始水饱和度均大于 81%,说明所有土样总体饱和度较高,尽管在测定开始时刻部分大孔隙中的水已因重力排空或土体内少量小孔隙(如死孔)内的气体在饱和过程中无法被水完全驱替,但土壤中的大部分孔隙均被水所充满。生物炭小区表层土壤的初始饱和度明显高于对照小区,说明生物炭的施用能改变孔隙结构,减少易排空的大孔隙重力水的含量。

表 1 沙箱排水法和 Hyprop 仪蒸发法所测环刀土样的容重、总孔隙度及经饱和处理后所达的初始水饱和度

Table 1 Bulk densities, total porosities and initial saturation degrees (after saturation treatment) of the ring soil samples used for soil water retention curve measurement using the sandbox and the Hyprop system

方法	土层/cm	小区	容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度	初始水饱和度/%
沙箱排水法 (100 cm^3)	2~7	NPK	1.15 ± 0.13	0.56 ± 0.05	92 ± 2
		NPK-BC	1.12 ± 0.04	0.58 ± 0.01	99 ± 1
	7~12	NPK	1.41 ± 0.07	0.47 ± 0.03	99 ± 1
		NPK-BC	1.38 ± 0.05	0.49 ± 0.06	98 ± 1
Hyprop 仪蒸发法 (250 cm^3)	2~7	NPK	1.15 ± 0.04	0.56 ± 0.01	81 ± 5
		NPK-BC	1.14 ± 0.08	0.57 ± 0.03	93 ± 4
	7~12	NPK	1.40 ± 0.11	0.48 ± 0.04	86 ± 7
		NPK-BC	1.34 ± 0.04	0.50 ± 0.02	96 ± 3

注: NPK 为对照小区土壤; NPK-BC 为生物炭小区土壤。

2.2 不同方法所测得的土壤水分特征曲线比较分析

图 2 给出了沙箱、压力膜仪、Hyprop 仪和露点水势仪等 4 种方法测得的土壤水分特征曲线。在全吸力范围

($0 \sim -3 \times 10^6$ cm) 内, 联用沙箱-压力膜仪测得的表层和亚表层土壤的水分特征曲线均位于 Hyprop 仪-露点水势仪联用所测得的曲线的上方(图 2(d) 除外), 说明在同一吸力条件下由水力学排干法(沙箱-压力膜仪联用)得到的土壤含水量值均大于热力学蒸发法(Hyprop 仪-露点水势仪联用)的测定值。有报道认为, 这种方法间的差异可能是因为土壤收缩导致土样与压力板间接接触不紧密^[9]或土壤胶体进入压力板中堵塞导水通道^[10], 无法形成有效的排水通道, 水分难以排出^[18]。Gee 等^[19]则研究发现, 当对土样施加 15 300 cm 外压力时, 即使水分已经停止出流 2 周, 土体内分散的“孤立”微区内孔隙压力也可能尚未达到 15 300 cm 压力。

这种差异的大小及其形成原因应与土壤本身的性质, 特别是机械组成、孔隙结构、孔径分布特征有关。最近的研究表明, 作为一种新成土, 紫色土岩性强, 孔径呈两极化分布: 一方面, 半径 $< 0.1 \mu\text{m}$ 的微孔丰富 ($> 0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$); 另一方面, 泥岩、砂岩在风化成土过程中形成的大孔隙非常丰富, 且空间分布的异质性强, 并成为土壤的主要导水孔隙(贡献率超过 87.9%)^[20]。

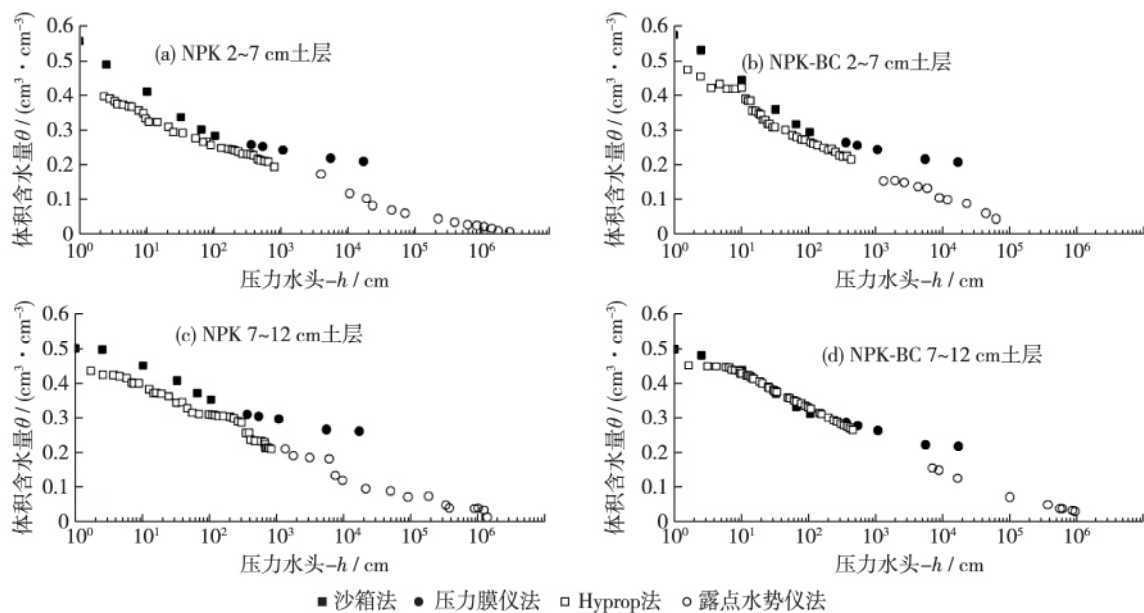


图 2 不同方法测得的不同处理与深度土壤水分特征(干化)曲线的比较

Fig. 2 Comparison of drying water retention curves of soils at different depths per plot determined by different laboratory methods

本研究采用均方根误差 $E_{\text{RMS}}(\theta)$ 和确定系数 R^2 来衡量不同方法所测得的土壤含水量值的差异(表 2)。由沙箱排干法和 Hyprop 仪蒸发法测得的表层和亚表层土壤的水分特征曲线的 $E_{\text{RMS}}(\theta)$ 较小, 为 $0.026 \sim 0.082 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 且 R^2 值较大, 超过 0.962, 说明此两种方法在低吸力段($h > -100$ cm)的测定结果差异较小。值得一提的是, 沙箱法比 Hyprop 仪在方法上更准确地测定低吸力近饱和段($h > -10$ cm)大孔隙的持水特征。对于压力膜仪排干法与露点水势仪蒸发法而言, 表层和亚表层土壤水分特征曲线的 $E_{\text{RMS}}(\theta)$ 较大, 在 $0.062 \sim 0.097 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 范围内, 且 R^2 值较低, 为 $0.775 \sim 0.952$ 。由此可见, 这两种方法在高吸力段的测定结果差异较大。究其原因可能是: 土壤大孔隙中的水主要为重力水, 在低吸力条件下($h > -100$ cm), 这部分重力水可能在饱和处理完成后把环刀土样从水中取出的瞬间就因重力作用而从大孔隙中排出^[21], 而且, 大部分大、中孔隙中的水分在吸力达 -100 cm 时能全部排空。故而沙箱和 Hyprop 仪测得的土壤含水量的差异总体较小, 水力学排水是低吸力段土壤主要的失水方式, 与蒸发法测得的结果较接近。对于高吸力段($h > -330$ cm, 田间持水量), 吸力 -330 cm 和 -500 cm 下达到平衡(指压力膜仪中的土样不再出流排水)所需时间约为 5 d, 吸力 $-1\,000$ cm 和 $-5\,000$ cm 则需 10 d, 吸力 $-15\,300$ cm 所需时间最长, 为 15 ~ 20 d。即使该土样已经平衡很长时间(15 ~ 25 d), 由于连接相邻基质微区的大、中孔隙多已排空, 使相当大体积的水“孤立地”滞留在微区基质的小、微孔隙中, 即使施加再大的压力, 水分也难以从中排出。这种排水方式

类似于野外亚表层土壤的水力学排水,而受蒸发的影响较小。露点水势仪却能测定水力学联系被隔断的“孤立”微区通过自然蒸发与毛细管作用而发生的进一步失水干化过程,这与表层土壤在田间干旱条件下的自然蒸发干化过程相似。因此,对于孔隙大小分布高度两极化的紫色土,压力膜仪法与露点水势仪法获得的结果差异较大。

表2 不同方法测得的土壤含水量差异统计分析
Table 2 Statistical analysis of differences in measured volumetric water content by different methods

方法	土层/ cm	$E_{RMS}/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$		R^2	
		NPK	NPK-BC	NPK	NPK-BC
沙箱-Hyprop 仪	2~7	0.082	0.059	0.986	0.962
	7~12	0.063	0.026	0.989	0.986
压力膜仪-露点水势仪	2~7	0.062	0.077	0.928	0.952
	7~12	0.097	0.067	0.832	0.775

2.3 土壤水分特征曲线的滞后现象

许多实验证明,土壤通过湿化和干化处理所测得的水分特征曲线并不重合,而是形成一个滞后圈^[22]。表3给出了本研究对照小区和生物炭小区土壤采用露点水势仪法测得的干化与湿化曲线之间的均方根误差 $E_{RMS}(\theta)$ 。表层土壤的 $E_{RMS}(\theta)$ 均小于亚表层土壤,且当吸力介于-100~-800 cm 时滞后现象的土层间差异最为明显(图3(c)),说明亚表层土壤在干化过程中能持留更多的植物有效水。而表层土壤水分滞后现象不明显,有效水的保持量不大^[21]。但需要指出的是,露点水势仪法所测定的样品为过2 mm 筛的土壤,无大、中团聚体,仅有小、微团聚体,因此,该法所能测定的持水孔隙主要是基质性小、微孔隙,而对结构性大、中孔隙(特别是半径大于15 μm 的孔隙)未能加以测定。

表3 露点法土壤水分特征曲线滞后现象的统计分析

Table 3 Statistical analysis of hysteresis phenomenon in soil water retention curve measured by the dewpoint potential meter

土壤水分特征	土层	吸力/cm	$E_{RMS}/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	
			NPK	NPK-BC
干化-湿化	表层(2~7 cm)	-100~-800	0.011	-0.015
		-800~-15 300	0.016	-0.012
		<-15 300	0.022	-0.020
		总和	0.049	-0.047
干化-湿化	亚表层(7~12 cm)	-100~-800	0.038	-0.063
		-800~-15300	0.024	0.014
		<-15 300	0.018	0.018
		总和	0.080	0.095

在田间灌溉或自然降雨条件下,土壤湿化过程的历时往往较短,干化过程历时却相对较长,而且在估算溶质或污染物垂向淋失作用时,通常更关心渗漏排水或退水过程。因此,对于大孔隙发育且对垂向饱和和渗漏量起主要贡献的土壤(如本研究中的紫色土),在计算亚表层土壤中的渗漏量时,应采用干化曲线为宜。

2.4 施用生物炭对不同方法所测得的水分特征曲线的影响

施用生物炭能增加土壤有效水含量,更好地满足植物生长的水分需求^[6]。由表2可见,沙箱和Hyprop仪测得的施用1%生物炭的耕地小区(NPK-BC)表层和亚表层土壤的低吸力段(特别是 $h > -10\text{cm}$ 的近饱和段)土壤水分特征曲线的均方根误差 $E_{RMS}(\theta)$ 比对照耕地小区(NPK)分别减少 $0.023 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 和 $0.037 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,说明施用生物炭导致土壤中结构性大、中孔隙减少,从而降低沙箱和Hyprop仪测定结果之间的差异。

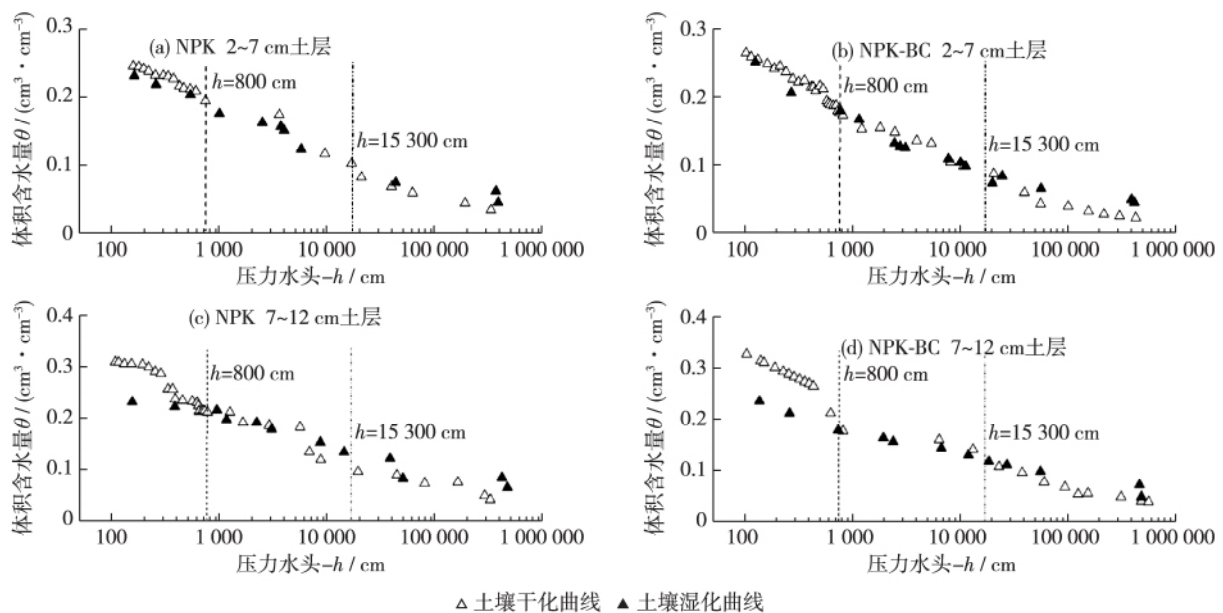


图3 露点水势仪测得的不同处理和深度土壤的干化与湿化水分特征曲线

Fig. 3 Measured drying and wetting curves of water retention of soils at different depths per plot by a dewpoint potential meter

这种方法间差异的来源可能是: 沙箱法对大孔隙排空失水的测定结果受孔隙水力连通性(特别是孔隙“瓶颈”)的影响较大, 而 Hyprop 仪所测定大孔隙蒸发失水曲线受水力连通性的影响较小。表层土壤在施加生物炭后, 压力膜仪和露点水势仪测得高吸力段水分特征曲线的均方根误差 $E_{\text{RMS}}(\theta)$ 有所增加。可能是因为施用生物炭后, 基质性小孔隙显著增加, 贮存更多的植物有效水^[16]。

3 结 论

(1) 由压力膜仪排水法在高吸力段测得的表层和亚表层土壤的含水量值均显著高于 Hyprop 仪-露点水势仪联用蒸发法所得结果。全吸力范围内水分特征曲线测定方法的选择与组合应考虑土壤孔径分布特征和研究目的。紫色土孔隙大小呈两极化分布, 大、中孔隙丰富且空间分布高度不均一, 其表层土壤通过田间自然蒸发作用失水往往较为强烈, 建议采用 Hyprop 仪和露点蒸发法测定高吸力段 ($h < -330$ cm) 的水分特征曲线。而对于亚表层土壤, 因其主要通过水力学渗漏方式失水, 建议采用压力膜仪排水法测定。

(2) 露点水势仪加湿法与蒸发法测得的亚表层土壤水分特征曲线之间的滞后现象 ($-100 \sim -800$ cm) 比表层土壤明显, 说明在干化过程中, 亚表层土壤能持留更多的植物有效水。

参考文献:

- [1] STRUDLEY M W, GREEN T R, ASCOUGH J C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99: 4-48.
- [2] 郭向红, 孙西欢, 马娟娟. 基于混合遗传算法估计 van Genuchten 方程参数 [J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 677-682. (GUO X H, SUN X H, MA J J. Parametric estimation of the van Genuchten's equation based on hybrid genetic algorithm [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 677-682. (in Chinese))
- [3] ANDREAS S, GEMOT B, PETER S, et al. Temporal dynamics of soil hydraulic properties and the water-conducting porosity under different tillage [J]. Soil and Tillage Research, 2011, 113: 89-98.
- [4] SCHELLE H, IDEN S, DUMER C W. Combined transient method for determining soil hydraulic properties in a wide pressure head

- range [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75: 1681-1693.
- [5] MORET D, ARRUE J L. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96: 103-113.
- [6] PETERS A, DUMER W. Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356(1/2): 147-162.
- [7] 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): 209-214. (LYU D Q, WANG H, WANG L. Soil shrinking change during measuring retention characteristics by centrifugal method [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 209-214. (in Chinese))
- [8] 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. (HUANG G H, ZHAN W H. Modeling soil water retention curve with fractal theory [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(1): 55-60. (in Chinese))
- [9] BITTELLI M, FLURY M. Errors in water retention curves determined with pressure plates [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73: 1453-1460.
- [10] CRESSWELL H P, GREEN T W, MCKENZIE N. The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72: 41-49.
- [11] 王晓蕾,黄爽,黄介生,等. 利用 HYPROP 系统测定土壤水分参数的优缺点及改进[J]. *中国农村水利水电*, 2012(6): 4-7. (WANG X L, HUANG S, HUANG J S, et al. Using HYPROP system to measure hydraulic conductivity and soil water characteristic curve [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(6): 4-7. (in Chinese))
- [12] 彭紫燮,黄爽,杨金忠,等. HYPROP 系统与快速离心机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. (PENG Z Y, HUANG S, YANG J Z, et al. Using HYPROP system and centrifugal method to measure soil water characteristic curve [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(5): 7-11. (in Chinese))
- [13] 王红兰,唐翔宇,宋松柏. 土壤水分特征曲线测定中低吸力段数据的影响分析[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(6): 56-59. (WANG H L, TANG X Y, SONG S B. Analysis of the influence of data obtained at low suctions on soil water retention curve [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(6): 56-59. (in Chinese))
- [14] SOLONE R, BITTELLI M, TOMEI F, et al. Errors in water retention curves determined with pressure plates: effects on the soil water balance [J]. *Journal of Hydrology*, 2012(470/471): 65-74.
- [15] ZHAO P, TANG X Y, ZHAO P, et al. Tracing water flow from sloping farmland to streams using oxygen-18 isotope to study a small agricultural catchment in southwest China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 134: 180-194.
- [16] 王红兰,唐翔宇,张维,等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 107-112. (WANG H L, TANG X Y, ZHANG W, et al. Effects of biochar application on tillage soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 107-112. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] SCHELLE H, HEISE H, JANICKE K, et al. Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: a comparison of laboratory methods [J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64: 814-821.
- [19] GEE G W, WARD A L, ZHANG Z F, et al. The influence of hydraulic non-equilibrium on pressure plate data [J]. *Vadose Zone Journal*, 2002, 1(1): 172-178.
- [20] WANG H L, TANG X Y, ZHANG W, et al. Within year changes in hydraulic properties of a shallow entisol in farmland and forestland [J]. *Vadose Zone Journal*, 2015, 14(7): 1-15.
- [21] DIAMANTOPOULOS E, DUMER W, RESZKOWSKA A, et al. Effect of soil water repellency on soil hydraulic properties estimated under dynamic conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 175-186.
- [22] 袁剑舫. 土壤水分特征曲线和土壤水分的滞后现象[J]. *土壤通报*, 1986(1): 43-47. (YUAN J F. Soil water retention curve and soil water hysteresis [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1986(1): 43-47. (in Chinese))

Comparison of laboratory methods for determining water retention curves in purple soil*

WANG Honglan^{1,2}, TANG Xiangyu¹, XIAN Qingsong¹, LIU Chen¹, GUAN Zhuo¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Four laboratory methods, namely, the sand box, the HYPROP system, pressure plates and the dewpoint potential meter, were used to determine soil water retention curves (SWRC) for samples of farmland purple soil. SWRC were determined over the whole entire moisture range for samples obtained from two horizons (i. e., 2—7 cm, 7—12cm). Measured data was compared to identify the most reliable method. The root-mean-square errors of the soil water content ($E_{RMS}(\theta)$), established under low suctions ($h > -100$ cm), the sand box and HYPROP system were small (0.026—0.082 cm³/cm³) with the coefficient of determination (R^2) between measured water retention curves by the two methods being greater than 0.962. Contrastingly, the $E_{RMS}(\theta)$ of soil water content, established under high suctions ($h < -330$ cm), using pressure plates and the dewpoint potential meter were larger (0.062—0.097 cm³/cm³), with lower R^2 values (0.775—0.952). In conclusion, the selection and combined use of appropriate methods for SWRC determination, over the entire soil moisture range, should be decided upon according to the soil's pore size distribution and the application objective.

Key words: soil water retention curve; sand box; Hyprop system; pressure plate; dewpoint potential meter; hysteresis

欢迎订阅《水科学进展》

《水科学进展》是以水为论述主题的学术期刊，主要反映国内外在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境等领域中的科学技术的最新成果、重要进展、当代水平和发展趋势，报道关于水圈研究的新事实、新概念、新理论和新方法，交流新的科研成果、技术经验和科技动态。她涉及与水有关的所有学科，包括水文科学、大气科学、海洋科学、地质科学、地理科学、环境科学、水利科学和水力学、冰川学、水生态学以及法学、经济学和管理科学中与水有关的内容。本刊为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、RSSCE 中国权威学术期刊，多次被评为“中国精品科技期刊”、“华东地区优秀期刊”、“江苏省优秀期刊”等，同时被 Ei 和 CA 等国际权威文献检索系统固定收录。

《水科学进展》为双月刊，大 16 开本，逢单月 30 日出版，每期定价 30.00 元，全年定价 180.00 元。国际标准连续出版物号：ISSN 1001-6791；国内统一连续出版物号：CN 32-4309/P；国内发行代号：28-446，欢迎广大读者向当地邮局(所)办理订阅手续。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21307152; No. 41471268).