

温度对南方红壤和水稻土水分特征曲线影响差异性分析

罗丽澎, 王辉, 朱晋斌, 谭帅, 胡传旺, 陈潇岳, 叶磊

(湖南农业大学工学院, 长沙 410128)

摘要: 为了研究温度变化对土壤水分特征曲线的影响, 采用高速离心机法测定南方红壤和水稻土在 4, 12, 20, 28, 36 °C 温度条件下土体脱湿过程的水分特征曲线, 并运用 VG 模型进行参数提取, 探讨了温度对土壤当量孔径分布、非饱和导水率及水分扩散度等参数的影响。结果表明: 相同水势条件下红壤和水稻土的含水率随温度增加而显著减少 ($P < 0.05$), 表现出 $4\text{ °C} > 12\text{ °C} > 20\text{ °C} > 28\text{ °C} > 36\text{ °C}$ 的关系, 且同一温度下的红壤持水性能显著高于水稻土 ($P < 0.05$); 不同温度处理下红壤和水稻土的非饱和导水率以及水分扩散度均表现出 20 °C 最高、36 °C 最小的显著差异性 ($P < 0.05$), 这表明土壤在 20 °C 时的导水能力和入渗能力相对最佳, 且同一温度下红壤的非饱和导水率和水分扩散度均低于水稻土; 红壤和水稻土的饱和含水率 θ_s 、进气值相关参数 α 、形状系数 n 均随温度增加而缓慢减小, 拟合参数随温度变化而差异显著 ($P < 0.05$), 这说明土壤水分特征曲线参数对温度有一定的敏感性。研究结果可为进一步探讨温度对南方土壤持水性能和水分运移机制研究提供合理的参考依据。

关键词: 温度; 土壤水分特征曲线; VG 模型; 非饱和导水率; 水分扩散度

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0072-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.011

Difference Analysis of Temperature Effect on Water Characteristic Curves of Red Soil and Paddy Soil in South China

LUO Lipeng, WANG Hui, ZHU Jinbin, TAN Shuai, HU Chuanwang, CHEN Xiaoyue, YE Lei

(College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: In order to study the effect of temperature changes on soil water characteristic curve, the water characteristic curves of red soil and paddy soil in South China were measured by high-speed centrifuge at 4, 12, 20, 28 and 36 °C respectively. The parameters were extracted by VG model, and the effects of temperature on soil equivalent pore size distribution, unsaturated hydraulic conductivity and water diffusivity were discussed. The results showed that the water contents of red soil and paddy soil decreased significantly with the increase of temperature under the same water potential ($P < 0.05$), appearing as $4\text{ °C} > 12\text{ °C} > 20\text{ °C} > 28\text{ °C} > 36\text{ °C}$. The water holding capacity of red soil was significantly higher than that of paddy soil ($P < 0.05$) at the same temperature. Under different temperature treatments, unsaturated hydraulic conductivity and water diffusivity of red soil and paddy soil showed the significant difference that the highest value was observed at 20 °C and the smallest at 36 °C ($P < 0.05$), which indicated that the water conductivity and infiltration capacity of red soil were relatively optimal at 20 °C. The unsaturated hydraulic conductivity and water diffusivity of red soil were lower than those of paddy soil at the same temperature. The saturated moisture content θ_s of red soil and paddy soil, the relative parameters of air intake value α , and the shape coefficient n all decreased slowly with the increase of temperature, and the fitting parameters were significantly different with the changes of temperature ($P < 0.05$), which indicated that the parameters of soil water characteristic curve were sensitive to temperature. The results of this study could provide a reasonable reference for further exploring the effect of temperature on soil water holding capacity and water transport mechanism in southern China.

Keywords: temperature; soil water characteristic curve; VG model; unsaturated hydraulic conductivity; water diffusivity

收稿日期: 2018-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471185); 湖南省重点研发计划项目(2016JC2032); 湖南省教育厅科学研究重点项目(15A084)

第一作者: 罗丽澎(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土环境研究。E-mail: 1152322600@qq.com

通信作者: 王辉(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土与环境工程研究。E-mail: wanghuisb@126.com

土壤水分特征曲线是土壤水管理和研究最基本的资料,是非饱和土壤水分含量与土壤基质势之间的关系曲线,反映土壤能态和持水特征,是研究土壤水分入渗、土壤侵蚀及溶质运移过程的关键,对研究土壤水分运动具有重要意义^[1-2]。已有研究^[3-6]表明,土壤中的水分运动和保持受到诸如土壤理化性质、植被类型、土壤环境状况及气候条件等众多因素的综合影响。其中温度作为这些因素的重要影响因子之一,在自然条件下随昼夜更替和季节变换而发生不同程度的改变,从而对土壤水分运动产生影响,忽略温度影响将会给水分特征曲线的研究带来一定的局限性,因此,国内外学者针对温度变化对土壤水分运动的影响机理进行了大量研究。Harlan 等^[7]和 Miller^[8]先后开展在冻结作用下饱和、非饱和土的室内水分迁移试验,揭示了在温度作用下土体中水分发生迁移的一般规律;Cheng 等^[9]研究认为,土壤水分受到温度的影响,在结冰期的温度变化比融冰期更显著;Tong^[10]从理论上推导了考虑温度影响的土-水特征曲线模型;赵刚等^[11]通过开展冻融条件下原状粉质黏土和重塑粉质黏土的水分运动试验,得到了各因素影响下的水分迁移动态;王铁行等^[12]研究了温度对黄土土-水特性曲线的影响,并探究了冻结作用下液态水混合迁移规律。朱丽平等^[13]发现,贝壳砂土壤持蓄水分潜能不仅与土壤类型和粒径分布有关,还与温度变化有关,温度越高,持水潜能下降。众学者的研究多是以冻结冻融条件下的土体水分运动为主,但对不同土壤之间水分受中低高温影响的对比研究还不够深入。而目前国内研究多集中于气温变幅较大的黄土高原干旱半干旱地区,该区域气候变化大导致浅层土上下层温差大,温度引起的黄土基质势变化会影响其水分运动状况,容易在冬季时发生冻融,且土壤保水能力差,容易因降雨而受侵蚀,因而吸引了众多学者的关注与重视。对于土壤黏重、降雨丰富的南方地区,学者们的研究多集中在忽略温度下土壤中水分运动和再分布等方面的试验研究,即在特定温度下研究入渗水质^[14]、改良剂^[15]、土壤类型^[16]等对土壤水分运动的影响,但是关于温度变化对南方土壤的水分运动研究则较为薄弱。温度变化对南方土壤的影响不

容忽视,南方地区的冻融现象虽不如西北地区发生频繁,但由于气候变暖,极端干旱或极端冰雪气候,甚至冻雨也会在南方出现,冷热气温对土壤的理化性质、水分运动等机理都会产生影响,且土壤中水分和温度的迁移是一个相互牵制、相互促进、相互影响的过程,水热的良好结合可以促进土壤保水保肥,但这方面的相关研究鲜见报道,因此,开展不同温度条件下南方土壤的水分特征曲线测定工作,探讨温度对水分运移的影响规律就显得尤为重要。

由于南方红壤和水稻土的黏粒含量差异较大,在试验中为了更好探讨两者受温度影响的程度,本文以南方红壤和水稻土为研究对象,通过高速离心机法,测定在 4,12,20,28,36 ℃ 温度条件下土体脱湿过程的土壤水分特征曲线,采用 VG 模型进行参数提取,通过模型求导得到土壤当量孔径分布、非饱和导水率及水分扩散度,并分析它们随温度变化的特征,探究不同温度对南方红壤和水稻土水力特性的影响规律,以期可以更好为探讨温度变化对南方土壤持水性能和水分运移机制的研究提供一定参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 10 月在湖南农业大学灌溉排水工程实验室进行,试验所用离心机为日本 HITACHI 公司生产的 CR21N 高速恒温冷冻离心机。供试土样为红壤和水稻土,分别取自湖南长沙榔梨中学附近(113°16'46"E, 28°32'49"N)和湖南长沙春华基地(113°26'21"E, 28°28'42"N),属于南方较为常见的耕种土壤类型,土地利用方式主要是旱地和水田。取样时选取多个点,清除土层表面的杂物,挖取 0—20 cm 间的土壤,将不同取样点的土壤混合后运回实验室,去除土壤中植物根系、大块碎石等杂质,经自然风干、充分碾压,过 2 mm 筛孔后,均匀混合以备用,每种土壤取 2 个样品为 1 组,共 5 组试验条件。采用多功能离子计测定土壤 EC 和 pH;采用恒定水头法测定土壤饱和导水率;采用比重计法测定土壤颗粒组成。供试土样基本理化性质见表 1。

表 1 供试土样的基本理化性质

供试 土样	EC/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH	饱和导水率/ ($10^{-4} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	土壤机械组成/%			土壤质地
				2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	
红壤	46.67±3.25	5.01±0.06	1.116±0.207	12	32	56	黏土
水稻土	96.60±0.40	5.36±0.11	1.243±0.055	25	49	26	粉砂黏土

注:表中数据为平均值±标准差。

1.2 试验方法

由于红壤和水稻土的初始容重为 1.2 g/cm³,为了消除土壤容重对试验的影响,使之离心压缩较为明

显,将过 2 mm 标准筛孔的土样,按预设容重(1.4 g/cm³)称取一定质量 110 g,层与层打毛后装填到容积为 100 mL 的离心机专用环刀中,填装高度约为环

刀高度的 80% (即 4 cm); 环刀底部垫有 1 张滤纸以防土样散失。然后将装填好的土样放入清水中, 浸泡 24 h 直至饱和, 饱和过程中水面略低于土壤表面, 以减少土样在饱和时出现体积膨胀。在浸泡时待供试土样的表面出现一层薄薄的水膜后, 即认为达到充分饱和, 取出环刀, 用吸水纸擦干环刀表面的水分并称重, 之后将环刀置于离心槽中, 成对的 2 个环刀质量误差控制在 1 g 以内。因南方冬季平均气温一般在 0 °C 以上, 夏季一般在 40 °C 以下, 同时考虑到离心机设置温度最低是从 4 °C 起, 故设定 4, 12, 20, 28, 36 °C 5 种离心温度对土样进行脱湿处理, 离心转速依次设置为 500, 1 000, 2 500, 4 500, 6 500, 8 500 r/min, 离心时间均为 60 min。每次离心完后, 擦拭环刀其表面多余水分后称重, 并用游标卡尺测量样品压缩深度并记录数据以确定离心半径^[17]; 接着将环刀迅速放入离心槽中, 设定下一个转速, 重复上述步骤直至离心完最后一个转速。试验结束后, 将所测土样放入烘箱中, 采用烘干法 (105 °C, 24 h) 测定最终的土壤含水率。根据离心机转速、所测样品质量变化分别计算出对应的土壤吸力值和土壤含水率, 由此可得到不同温度下供试土样的水分特征曲线。每次离心前将样品置于离心槽平温 20 min 以上, 试验均设 2 个重复, 分析结果均为样本平均值。

1.3 经验模型

由于目前还未提出能够明确描述土壤水分特征曲线物理意义的公式或方法, 因此, 为了便于分析和应用, 通常使用实测结果来拟合经验关系。徐绍辉等^[18]和邢旭光等^[19]研究了多个模型对土壤水分特征曲线的适应性影响后发现, VG 模型可表征不同质地地下土壤水分特征曲线, 具有较高的模拟精度和普适性, 拟合效果优于其他几种模型。因此, 本文采用 US Salinity Laboratory (美国盐改中心) 开发的 RETC 软件中应用广泛、拟合性好的 VG 模型, 该模型提供了非常快捷的土壤转换函数功能, 可以根据拟合得出的 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 等水分特征曲线参数, 进一步推导出土壤非饱和导水率和水分扩散度, 且相关研究表明拟合值与试验实测值误差较小^[20-21], 因此, 用 VG 模型推导出的土壤水动力学参数还是比较可靠的。VG 模型为:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\theta(h)$ 为土壤体积含水率 (cm^3/cm^3); h 为压力水头 (cm); θ_s 为土壤饱和含水率 (cm^3/cm^3); θ_r 为土壤残余含水率 (cm^3/cm^3); α 为与进气值有关的参数 (cm^{-1}); m 、 n 为形状参数, 与土壤孔径分布有关, $m = 1 - 1/n$; α 、 m 、 n 是影响土壤水分特征曲线形态的经验参数。

非饱和导水率是指土壤单位势梯度作用下, 单位时间单位面积土壤通过的水量, 反映土壤孔隙的大小、分布状况以及土壤饱和水流的入渗快慢。通过 VG 模型可以导出土壤非饱和导水率 $K(\theta)$ 的解析表达式 (2), 即:

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

式中: $K(\theta)$ 为土壤非饱和导水率 (cm/h); K_s 为土壤饱和导水率 (cm/h)。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件进行函数计算并绘制图表; 利用 RETC 软件中的 VG 模型进行土壤水分特征曲线的参数拟合, 并采用残差平方和 SSQ 和决定系数 R^2 作为评价 VG 模型拟合效果的评价指标。

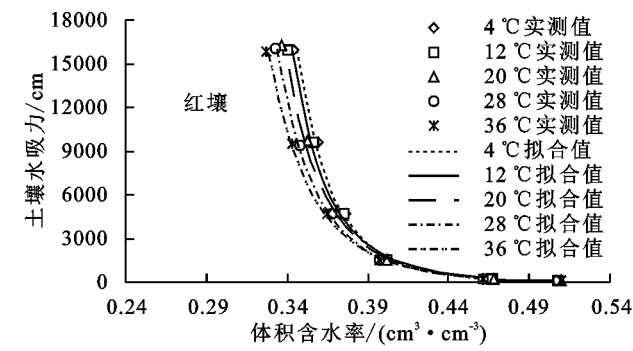
2 结果与分析

2.1 温度变化对土壤水分特征曲线的影响

由图 1 可知, 不同温度下红壤和水稻土的水分特征曲线形状类似, 但土壤水吸力变化引起的土壤含水率出现差异, 这可能是由于土壤类型和温度变化所导致的, 温度相同时土壤黏粒起主导作用, 而同一土壤类型下的水分运动主要受到温度变化所影响。当吸力较高时, 土体对水分的持水能力较强, 土壤含水率随吸力水头的增加变化不明显, 此时水分特征曲线呈“陡直状”, 水分由中小孔隙保持, 脱水较困难; 当吸力较低时, 土体对水分的持水能力较弱, 土壤含水率随吸力水头的减小变化明显, 此时水分特征曲线呈“平缓状”, 水分由大孔隙排出, 脱水较容易。在含水率相同情况下, 随着温度的升高, 土壤水吸力降低, 土壤持水性减弱, 土壤水势升高; 在同一吸力下, 供试土样含水率的大小整体表现为 4 °C > 12 °C > 20 °C > 28 °C > 36 °C, 土壤含水率随温度增加而显著减少 ($P < 0.05$), 36 °C 处理的含水率最低, 4 °C 处理的含水率最高。表明温度变化对土壤水分特征曲线影响较大, 在一定的土壤水势下, 温度越高, 持水性越小, 吸持水量越少, 反之温度越低, 持水性越高, 吸持水量越多。

在温度作用下, 由于不同类型土壤的自身性质各有差异, 造成土壤水分运动也有所区别。从图 1 可以看出, 在同一温度条件下, 红壤随土壤水吸力而变化的体积含水率高于水稻土, 其水分特征曲线明显右移, 这是因为土壤质地影响土壤水分特征曲线。由表 1 可知, 红壤属于黏土, 其黏粒比重最大, 具有极大的比表面积且带有表面负电荷, 两者结合会使黏粒对水分子产生极强的吸附性, 形成相对于粒径较厚的水层或水膜。黏粒间孔隙很细小, 极大可能被这些水膜充

满或堵塞,不利于水分的顺畅排出,因而红壤的含水率较高;而水稻土属于粉砂黏土,其大孔隙数量较多,且孔隙的孔径表现为活跃的毛管作用,因而水分子流动排出较为轻松,致使其土壤含水率低于红壤^[22]。对于不同土壤含水率及吸力阶段,温度对土壤水分特征曲线的影响也不尽相同。在低含水率(高吸力)阶段,温度对水分特征曲线的影响更为明显,但随着含水率的增加而趋于水平,进一步可以判断当土壤达到饱和状态时,温度改变对土壤持水性能影响不大,这



时主要影响因素为水分子的黏滞度和表面张力。温度升高时,水分子热运动加剧,分子间平均距离增大而吸引力减小,从而导致水的黏滞度和表面张力下降。红壤的孔隙比水稻土细小,其水分子间的相互吸引力反而大于水稻土,因此黏滞度和表面张力下降程度较少,其中小孔隙可储存的水量多于水稻土,说明不同土壤类型的持水性能受温度影响的程度有明显差异($P<0.05$),其中温度对质地重的土壤影响较小,对质地轻的土壤反而影响较大。

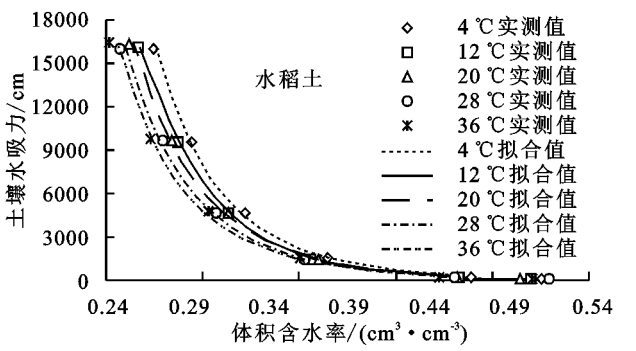


图 1 不同温度下供试土样的水分特征曲线

2.2 温度变化对土壤当量孔径分布的影响

假设土壤是一种无变形、各向同性的理想介质,其中的土壤孔隙随机分布且互相连通,基于毛管理论,可将土壤孔隙视为孔径大小不一的圆形毛管,可用公式(3)表示土壤水吸力 s 和当量孔径 d 的关系^[23]:

$$s=4\tau/d \tag{3}$$

式中: τ 为水的表面张力系数(N/cm),当吸力 s 的单位为 Pa 时,当量孔径 d 以 mm 表示。由于水的表面张力系数和温度变化密切相关,已有研究^[24] 给出了 0~100 °C 下与水的表面张力系数的公认值,采用内插法可得出本次试验在不同温度条件下水的表面张力系数。在得知水的表面张力系数 τ 和吸力 s ,可求出反映土壤孔隙大小分布情况的当量孔径 d 。若土壤含水率 θ_1 对应的当量孔径为 d_1 ,含水率 θ_2 对应的当量孔径为 d_2 ,则 d_2 与 d_1 间的孔隙所占体积与孔隙总体积之比为 $(\theta_1-\theta_2)/\theta_s$ (其中 $\theta_1>\theta_2$)。

土壤有效含水率是在土壤基质势吸力为 33~1 500 kPa 时,作物可以有效吸收并利用的水分;而在吸力为 1 500 kPa 时的土壤水分活动趋于零,作物开始发生凋萎,此时残留的含水率称为凋萎系数^[25]。不同的土壤基质势吸力区间对应不同的孔隙分布,在温度的影响下,水的表面张力系数发生改变,从而导致了土壤孔隙分布也发生变化。在土壤有效含水率即吸力为 33~1 500 kPa 时,孔隙对应的当量孔径区间称为有效孔隙,其中的水分能够被植物利用,促进其生长;土壤吸力小于 33 kPa 时,孔隙的当量孔径称为大孔隙,所含水分会在重力作用下迅速排出,不易

保持水分;土壤吸力大于 1 500 kPa 时,孔隙的当量孔径称为微小孔隙,植物难以利用其中水分,阻碍其生长。由图 2 可知,红壤和水稻土大孔隙和微小孔隙所占比例较大,而有效孔隙所占比例较小。随着温度的递增, τ 值逐渐降低,致使土壤当量孔径大小发生变化,其中土壤大孔隙的当量孔径随温度升高而缩小,微小孔隙受温度影响较为微弱,而有效孔隙的当量孔径范围则随之缩小,进一步说明了温度影响土壤的孔隙分布,从而影响土壤的持水性和水分有效性。温度增加时,同一种土壤的大孔隙和有效孔隙所占比例轻微增加,而微小孔隙所占比例在缓慢减少。以 4 °C 处理为基准,红壤在不同温度处理下的微小孔隙所占比例分别减少了 0.68%(12 °C),1.44%(20 °C),11.22%(28 °C),19.55%(36 °C),而水稻土分别减少 6.29%,6.34%,15.03%,11.26%,表明温度升高对不同土壤类型孔隙所占比例的影响有所差异,但均表现出温度升高土壤持水性减弱,水分有效性增强的特点。出现以上现象可能是温度升高时,土壤黏粒膨胀增大,同时一些分散的黏粒会引土壤孔隙的堵塞,导致土壤孔隙大小分配发生改变;也可能是水的流动性随温度的升高而加强,导致黏滞性下降。土壤微小孔隙含量的变化趋势与土壤的持水性能变化关系密切,微小孔隙含量增加,土壤持水性能增强;相反,微小孔隙含量减少,土壤持水性能则降低^[26]。从图 2 可以看出,同一温度处理下,红壤的微小孔隙所占比例明显高于水稻土,表明红壤的持水性能显著高于水稻土($P<0.05$),即红壤的水分特征曲线会稍微右移,这与水分特征曲线(图 1)表现出的结论一致。

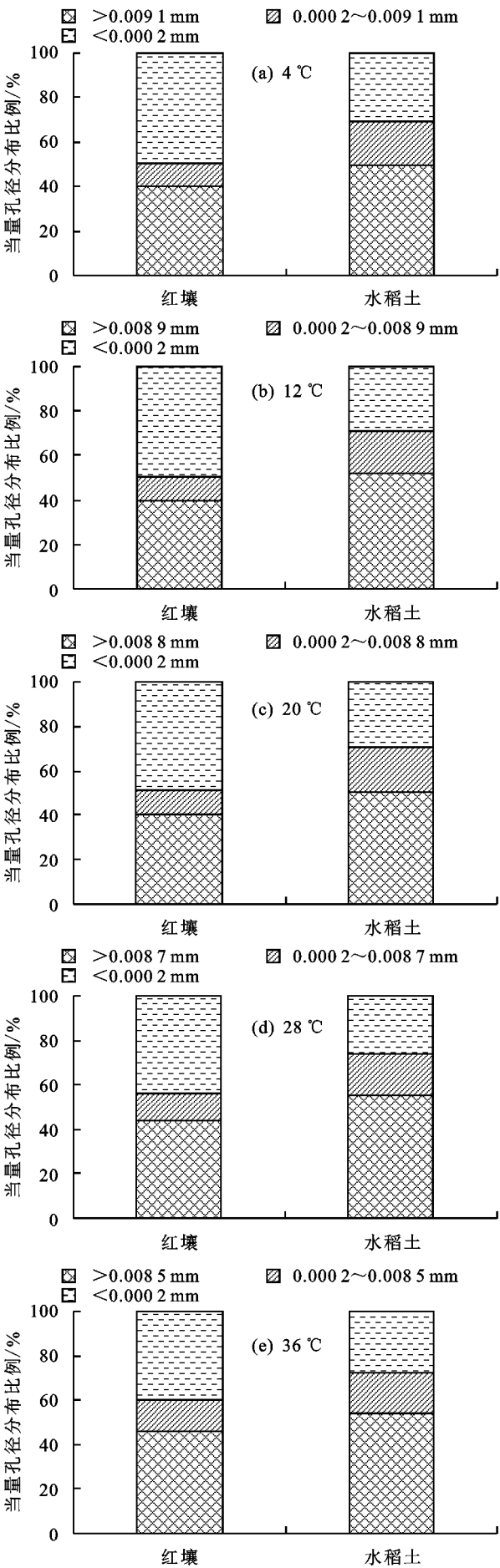


图 2 不同温度下供试土样的当量孔径分布比例

2.3 温度变化对土壤非饱和导水率的影响

非饱和导水率是土壤含水率和土壤基质势的非线性函数,温度变化会对其产生一定程度的影响,图 3 为 RETC 软件模型拟合所导出的。从图 3 可以看出,2 种供试土样的非饱和导水率变化趋势略显一致,均显示出一个突变段,呈现先平缓后陡直的形态。在同一含水率的情况下,随着温度的升高,红壤和水稻土的非饱和导水率均表现出 20 °C 最高,36 °C 最小的显著差异性($P<0.05$),即土壤在 20 °C 时水流入渗最快,在 36 °C 时水流入渗最慢;且在相同含水率情况下红壤的非饱和导水率要比水稻土低得多,说明土壤非饱和导水率的变化与温度和土壤类型有密切关系,这在朱丽平等^[13]关于温度对贝壳砂土壤水分的影响研究中得到了验证,即土壤持蓄水分潜能不仅与土壤类型有关,还与温度变化有关。温度变化主要影响土壤水分性质的变化,包括对土壤水的表面张力和黏滞度的影响。温度升高,水分子热运动活跃,表面张力和黏滞度均下降,使得水分运动的阻力减小,因而导水率会随着温度增加而升高;但随温度的进一步增加($\geq 28\text{ }^{\circ}\text{C}$),非饱和导水率反而低于 4 °C 时的非饱和导水率,说明较高温度可能使得土壤粒径级配参数发生变化^[27],从而改变土壤饱和度,造成土壤水分基质势能的改变,土壤非饱和导水率由此发生改变。而水稻土的非饱和导水率之所以大于红壤,可能是土壤质地有差异造成,水稻土为粉砂黏土,其粗颗粒含量较多,导致大孔隙数量也不少,由于土壤中的水分总是往土水势降低的方向移动,在吸力作用下土壤水分总是从较小的孔隙流向大孔隙,通过大孔隙流走,不必经过毛管力、摩擦力较大的细小孔隙而逐步从土壤基质中排出,所以在相同含水率的情况下其导水率大于红壤^[28]。

2.4 温度变化对土壤水分扩散度的影响

土壤水分扩散度是在单位含水率梯度下土壤水的通量,与土壤非饱和导水率及土壤比水容重共同构成模拟土壤水分运动的基本参数,它反映了土壤的孔隙度、空隙大小分布以及导水性能,并影响着土壤中水分运动的状况。图 4 是由 RETC 软件模型拟合所导出的供试土样在不同温度下的土壤水分扩散度变化曲线。从图 4 可以看出,土壤水分扩散度受温度的影响较为明显,当土壤含水率相同时,随温度的升高,供试土壤的水分扩散度都在不断增大且有所差异,其中 20 °C 情况下的水分扩散度增长最快,其次是 12,4,28 °C,而 36 °C 则增长幅度最小,表现出了显著差异性($P<0.05$)。当温度逐渐升高时,土体中水分运动加强,表面张力和黏滞度均下降,水分扩散运动表现较为活跃;而温度上升到较高时,可能破坏了土体结构,因而水分扩散度反而下降。同一土体含水率较低时,温度对土壤液相

水分扩散率的影响并不明显,该阶段土壤水分扩散主要以水汽运动为主,随土壤含水率的升高而缓慢增加,此时水分主要在小孔隙中运动,土壤溶液的黏滞性对水分扩散度的影响较弱,故在不同温度下,土壤水分扩散度随含水率缓慢增加而产生微小的变化;而

当土壤含水率越来越大时,温度对水分扩散度的影响逐渐显著,土壤含水率的增高将导致土壤中水分扩散曲折率变小,将促进水分扩散运动,土壤水分扩散度也随之增大,此时水分主要在大孔隙中运动,土壤溶液的黏滞性对水分扩散度的影响起主导作用。

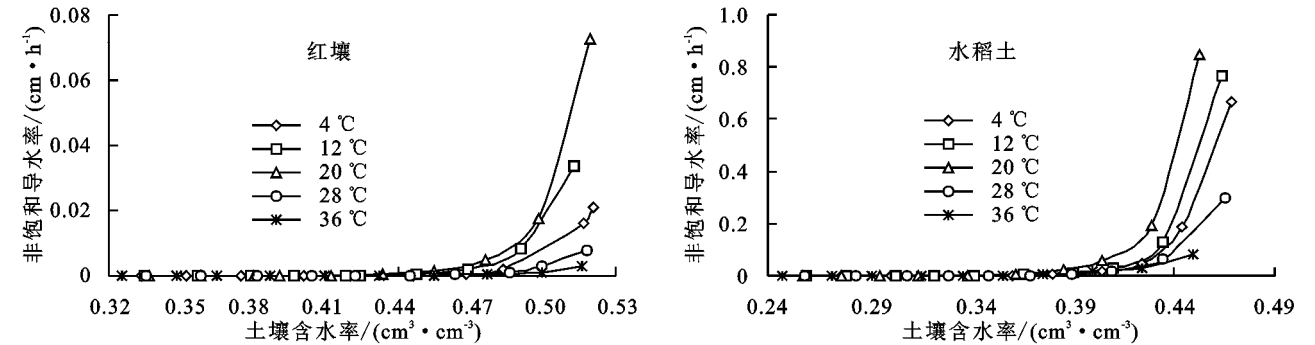


图3 不同温度下供试土样的非饱和导水率变化曲线

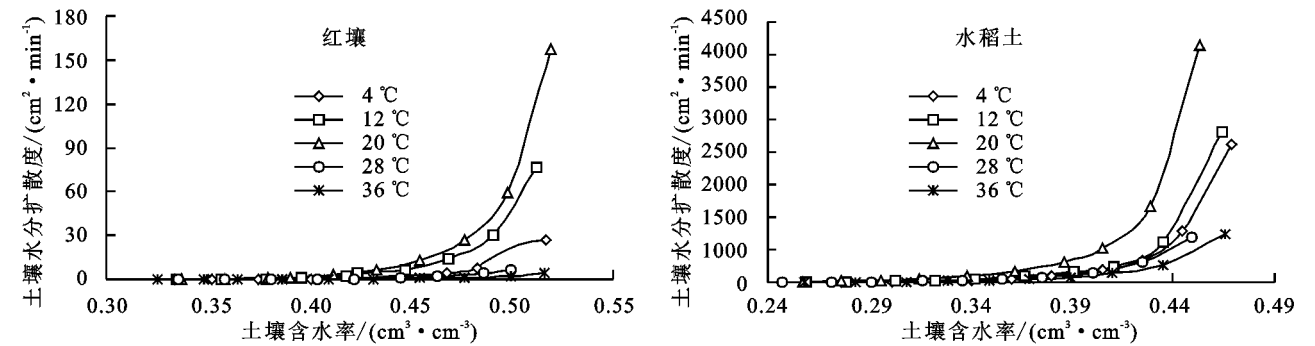


图4 不同温度下供试土样的水分扩散度变化曲线

2.5 温度对土壤水分特征曲线参数影响

本文基于 RETC 软件中的 VG 模型,进行不同温度下水分特征曲线参数的计算拟合,用于了解温度变化对

土壤水分特征参数的影响程度。将实测数据输入软件中,得出各个温度处理下的拟合参数(表 2)。

表 2 不同处理土壤水分特征曲线 VG 模型的拟合参数

土壤类型	温度处理/℃	残余含水率 θ_r / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 θ_s / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	进气值相关参数 α/cm^{-1}	形状系数 n	残差平方和 SSQ	决定系数 R^2	$m=1-1/n$
红壤	4	0.1876a	0.5544a	0.0313a	1.1547a	0.00002	0.9991	0.1340
	12	0.1866b	0.5413b	0.0186b	1.1479b	0.00002	0.9988	0.1265
	20	0.1802c	0.5406c	0.0153c	1.1464c	0.00002	0.9993	0.1277
	28	0.1169d	0.5333d	0.0378d	1.1127d	0.00001	0.9995	0.1013
	36	0.0222e	0.5323e	0.0299e	1.0879e	0.00001	0.9996	0.0808
水稻土	4	0a	0.4838a	0.0072a	1.1361a	0.00001	0.9997	0.1198
	12	0a	0.4787b	0.0071a	1.1329b	0.00005	0.9987	0.1173
	20	0a	0.4671c	0.0060b	1.1284c	0.00001	0.9996	0.1216
	28	0a	0.4658d	0.0051c	1.1234d	0.00002	0.9995	0.1098
	36	0a	0.4540e	0.0042d	1.1152e	0.00005	0.9986	0.1033

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

从表 2 可以看出,温度变化在一定程度上影响着土壤水分特征曲线的 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 、SSQ、 R^2 等参数。 θ_r 是土壤水分特征曲线导数为零时的土壤含水率,随着温度的升高, θ_r 呈减小趋势,说明随着温度的增加,水分特征曲线的导数逐渐减小。这可能是温度变化直接影响到水分子活性,升高温度时水分子热运动越剧烈,能量越大,从最外层向内有更多的水分子脱离

束缚而转变成自由水,且彼此间的黏滞度削弱,土壤颗粒与分子间的相互吸附能力降低,因此温度越高水量排出越多, θ_r 就越低。 θ_s 是土壤吸力接近于零时的含水率,由表 2 可知,红壤和水稻土的饱和含水率 θ_s 也随温度的升高而逐渐减小,表明土壤孔隙状况随着温度的升高发生变化,即温度升高时的土壤总孔隙度在减小。各个温度处理下的 α 值均随温度升高而减

小,表明土壤进气吸力在增大,相同条件下土壤持水能力减小,土壤水势升高,此现象可能是由于温度升高使土壤内流动的水溶解或释放出更多气体,从而改变气相容积影响到土壤含水率,导致 α 值发生变化^[29]。各个温度处理下的 n 值随温度的升高而逐渐减小,与图 1 的水分特征曲线变化趋势一致。SSQ 接近 0, R^2 均高于 0.998,表明 VG 模型对土壤水分特征参数适用性良好,具有拟合效果佳、精度高的优点。以上拟合参数 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 等普遍表现出随温度升高而减小的趋势,并且在不同温度处理下拟合参数的变化差异显著($P < 0.05$),说明水分特征曲线参数对温度变化有一定的敏感性,这与陈宸等^[30]、任荣等^[31]的研究结果相符。

3 结论

(1)高吸力阶段红壤和水稻土的水分特征曲线呈“陡直状”,反之低吸力阶段则呈“平缓状”,在一定的土壤水势下,温度越高持水性越小,两者的含水率均随温度增加而显著减少($P < 0.05$),整体表现为 $4\text{ }^\circ\text{C} > 12\text{ }^\circ\text{C} > 20\text{ }^\circ\text{C} > 28\text{ }^\circ\text{C} > 36\text{ }^\circ\text{C}$,且在同一温度下,红壤的微小孔隙所占比例明显高于水稻土,表明红壤持水性能显著高于水稻土($P < 0.05$);

(2)在不同温度处理下,红壤和水稻土的非饱和导水率以及水分扩散度均表现出 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 最高, $36\text{ }^\circ\text{C}$ 最小的显著差异性($P < 0.05$),表明土壤在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的导水能力和入渗能力相对最佳;且在同一温度下,红壤的非饱和导水率和水分扩散度均低于水稻土,2 个参数在温度作用下均随土壤含水率的增大而变化明显,说明土壤水分运动参数的变化与温度和土壤类型有密切关系;

(3)红壤和水稻土的 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 总体表现出随温度的增加而缓慢减小的趋势,拟合参数随温度变化而差异显著($P < 0.05$),说明水分特征曲线参数对温度变化有一定的敏感性;SSQ 均小于 0.000 05, R^2 均大于 0.998,表明 VG 模型拟合效果佳精度高。

本文所得结论是在室内试验基础上,把土壤水分的能量状况简化来研究温度对土壤水分运动的影响;但在实际中,田间的土壤并非均温体,更非恒温体,土温的时季变化非常大,因此田间试验能更好表征土壤水分运动受温度影响的程度,能更好地解决田间水分运动的方向性和有效性问题,这也是未来研究土壤水分运动的一个方向。

参考文献:

- [1] 程冬兵,蔡崇法.室内基于土壤水分再分布过程推求紫色土导水参数[J].农业工程学报,2008,24(7):7-12.
- [2] Hwang S I, Powers S E. Estimating unique soil hydroau-

- lic parameters for sandy media from multi-step outflow experiments [J]. *Advances in Water Resources*, 2003, 26 (4): 445-456.
- [3] 陈安强,雷宝坤,胡万里,等.洱海近岸菜地包气带土壤水分特征曲线参数变化及其影响因素[J].灌溉排水学报,2018,37(10):48-54.
- [4] 李航,严方晨,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J].生态学报,2018,38(11): 3889-3898.
- [5] 刘小宁,蔡立群,黄益宗,等.生物质炭对旱作农田土壤持水特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):112-117.
- [6] 赵兴凯,李增尧,朱清科.基于 SPI 和 SPEI 陕北黄土区土壤水分对气候特征的响应[J].农业机械学报,2016,47 (8):155-163.
- [7] Harlan R L, Nixon J F. Ground thermal regime, geotechnical engineering for cold regions [J]. *Geotechnique*, 1979, 15 (2):103-108.
- [8] Miller R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils [J]. *Highway Research Record*, 1972, 393 (1): 1-11.
- [9] Cheng H Y, Wang G X, Hu H C, et al. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the headwater region of the Yellow River, China [J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(8):1755-1762.
- [10] Tong F G. Numerical modeling of coupled thermo-Hydro-Mechanical processes of geological porous media [D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2010.
- [11] 赵刚,陶夏新,刘兵.原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(12):1952-1957.
- [12] 王铁行,罗少锋,刘小军.考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J].岩土力学,2010,31(8): 2378-2382.
- [13] 朱丽平,夏江宝,赵自国,等.温度和粒径分布对贝壳砂土壤水分的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):268-272,288.
- [14] 龚恩磊,王辉,胡传旺,等.酸性溶液对红壤水分入渗特征影响及其模拟研究[J].水土保持学报,2015,29(1): 48-51,61.
- [15] 杜衍红,蒋恩臣,刘传平,等.生物质炭对华南典型红壤水分渗透及持水性的影响[J].生态环境学报,2019,28 (2):276-282.
- [16] 胡传旺,王辉,刘常,等.南方典型土壤水力特征差异性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):97-102.
- [17] 尚曼廷,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.
- [18] 徐绍辉,张佳宝,刘建立,等.表征土壤水分持留曲线的几种模型的适应性研究[J].土壤学报,2002,39(4): 498-504.

- 持学报,2017,31(1):230-235.
- [18] 安慧,王俊波,安钰.灌丛密度对毛乌素沙地南缘沙柳生长及土壤水分动态的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):197-203.
- [19] 安慧,安钰.毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分及水量平衡[J].应用生态学报,2011,22(9):2247-2252.
- [20] 刘凯,王磊,宋乃平,等.毛乌素沙地南缘不同林龄人工柠条林土壤渗透性研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):89-94.
- [21] 王占军,蒋齐,潘占兵,等.宁夏毛乌素沙地不同密度柠条林对土壤结构及植物群落特征的影响[J].水土保持研究,2005,12(6):31-32,35.
- [22] 赵世伟,周印东,吴金水.子午岭次生植被下土壤蓄水性能及有效性研究[J].西北植物学报,2003,23(8):1389-1392.
- [23] 伍永秋,张健枫,杜世松,等.毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化[J].中国沙漠,2015,35(6):1612-1619.
- [24] 姚毓菲.黄土高原坡面植被恢复中植物冠幅及细根对土壤理化性质的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [25] 郝振纯,吕美霞,吕美朝,等.坡度作用下土壤水分时空异质性研究[J].水文,2012,32(2):5-10,48.
- [26] 赵磊磊,朱清科,聂立水,等.陕北黄土区陡坡土壤水分变异规律研究[J].地球环境学报,2012,21(2):253-259.
- [27] 符超峰,赵景波.毛乌素沙地东南缘不同类型沙丘土壤水分分布特征[J].干旱区研究,2011,28(3):377-383.
- [28] 王志,王蕾,刘连友,等.毛乌素沙地南缘沙丘水分的时空分布特征[J].干旱区研究,2007,24(1):61-65.
- [29] 张健,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区植被次生演替灌木初期土壤物理性质特征[J].水土保持研究,2008,15(4):101-109.
- [30] 王军,傅伯杰.黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J].地理学报,2000,55(1):84-91.
- [31] 张国盛,王林,董智,等.毛乌素沙地几种植物蒸腾速率的季节变化特征[J].内蒙古林学院学报(自然科学版),1998,20(1):7-12.
- [32] 景观阳,邸利,王安民,等.甘肃泾川不同林龄人工刺槐林的土壤水分一物理特性及渗透性研究[J].四川农业大学学报,2017,35(2):193-198.
- [33] 白一茹,邵明安.黄土高原雨养区坡面土壤蓄水量时间稳定性[J].农业工程学报,2011,27(7):45-50.
- [34] 吴江琪,马维伟,李广,等.黄土高原 4 种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J].水土保持学报,2017,32(4):133-138.
- [35] 何恺文,黄炎和,蒋芳市,等.2 种草本植物根系对长汀县崩岗洪积扇土壤水分状况的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(4):25-34.
- [36] 王正安,邸利,王彦辉,等.六盘山北侧华北落叶松林土壤水文调节功能的坡位差异[J].四川农业大学学报,2017,3(4):509-515.
- [37] 张帅普,邵明安,李丹凤.绿洲—荒漠过渡带土壤蓄水量的空间分布及其时间稳定性[J].应用生态学报,2017,28(8):2509-2516.
- [38] 王鸣远,关三和,王义.毛乌素沙地过渡地带土壤水分特征及其植物利用[J].干旱区资源与环境,2002,16(2):37-43.

(上接第 78 页)

- [19] 邢旭光,赵文刚,马孝义,等.土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J].水利学报,2015,46(10):1181-1188.
- [20] 王薇,孟杰,虎胆·吐马尔白.RETC 推求土壤水动力学参数的室内试验研究[J].河北农业大学学报,2008,31(1):99-102,106.
- [21] 魏义长,刘作新,康玲玲.辽西淋溶褐土土壤水动力学参数的推导及验证[J].水利学报,2004,35(3):81-86.
- [22] 陈俊英,刘畅,张林,等.斥水程度对脱水土壤水分特征曲线的影响[J].农业工程学报,2017,33(21):188-193.
- [23] 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.
- [24] 葛松华,唐亚明.大学物理实验教程[M].北京:电子工业出版社,2004:3.
- [25] Chaudhari S K, Somawanshi R B. Effect of water quality on moisture retention characteristics of different texture soils[J]. Journal of Maharashtra Agricultural Universities,2000,25(2):128-133.
- [26] 高红贝,邵明安.温度对土壤水分运动基本参数的影响[J].水科学进展,2011,22(4):484-494.
- [27] 杨芳,段惠敏,段建军,等.温度对黑色石灰土原土及不同粒径土壤颗粒有机碳矿化的影响[J].河南农业科学,2019,48(2):68-76.
- [28] 尚慢廷,张建云,刘九夫,等.大孔隙对土壤比水容重及非饱和导水率影响的实验研究[J].灌溉排水学报,2012,31(2):1-5.
- [29] 郭全恩,王益权,车宗贤,等.温度及矿化度对土壤持水性能的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(6):52-55.
- [30] 陈宸,张沅,张华,等.温度效应对粉砂土壤水分特征曲线的影响研究[J].中国农村水利水电,2016(6):173-176,181.
- [31] 任荣,马娟娟,郑利剑,等.蓄水坑灌水土温度变化对土壤水分再分布规律的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(4):39-46.