

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.003.

林晓燕, 王晶晶, 吴炳孙, 等. 施肥对热带砖红壤胶林土壤水分特征曲线的影响及模型优选[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1):105-116.

Lin Xiaoyan, Wang Jingjing, Wubing Sun, et al. Soil Water Characteristics Curves and Model Optimization of Tropical Latosol Rubber Planting Area Under Different Fertilization[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1):105-116.

施肥对热带砖红壤胶林土壤水分特征曲线的影响及模型优选

林晓燕^{1,3}, 王晶晶^{1,2}, 吴炳孙³, 宁松瑞⁴, 王紫璇¹, 邱偲雨¹, 吴耀华¹

(1.海南大学 热带农林学院, 海口 570228; 2.海南五指山森林生态系统国家定位观测研究站, 海南 五指山 572299;

3.中国热带农业科学院橡胶研究所, 海口 571101; 4.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要:[目的]探明热带橡胶林施肥措施对土壤持水能力及孔隙特征的影响,并优选描述砖红壤胶林土壤水分特征曲线的模拟模型。[方法]采用沙箱排水法结合压力膜仪法测定砖红壤橡胶林5种施肥处理(有机肥混施化肥(H)、施化肥(C)、种植绿肥(G)、施专用肥(S)及不施肥(CK))的全吸力段土壤水分特征曲线,应用 Brooks-Corey(BC)、van Genuchten(VG)、Gardner 和 Log-Normal Distribution(LND)4种经验模型拟合,分析了不同模型的适用性及拟合精度。[结果]0—5 cm 土层,在低吸力段($pF \leq 3.01$)C处理降幅最大($0.44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$);在高吸力阶段($3.01 < pF \leq 4.18$)的降幅整体偏小,H处理的降幅最大($0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。5—10 cm 土层,在低吸力段C处理的下降幅度最大($0.52 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$),高吸力段C处理的降幅最大($0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。在0—5 cm 土层中,CK处理的土壤有效含水率最大($0.19 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。在5—10 cm 土层中,C处理的土壤有效含水率最大($0.11 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。0—5 cm 土层,CK处理的土壤孔隙占比(5.2%)和大孔隙占比(0.8%)最小,中等孔隙占比(48.7%)最高。5—10 cm 土层中,C处理的土壤孔隙和大孔隙的占比均最小。BC, VG, Gardner 和 LND 4种模型均可用来拟合砖红壤胶林不同施肥处理的土壤水分特征曲线($R^2 \geq 0.84$),不同模型的拟合精度由大到小依次为:BC, VG, LND 和 Gardner 模型。[结论]0—5 cm 土层不同施肥处理中CK处理是最优施肥管理方式,5—10 cm 土层所有施肥处理中C处理是最优施肥管理方式。同时,BC模型是拟合研究区内不同施肥处理土壤水分特征曲线是最优模型。

关键词:土壤有效含水率; 吸湿水; 沙箱排水法; 比水容量; 土壤孔隙分布; 持水能力

中图分类号:S273

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2024)01-0105-12

Soil Water Characteristics Curves and Model Optimization of Tropical Latosol Rubber Planting Area Under Different Fertilization

Lin Xiaoyan^{1,3}, Wang Jingjing^{1,2}, Wubing Sun³, Ning Songrui⁴,

Wang Zixuan¹, Qiu Caiyu¹, Wu Yaohua¹

(1.Department of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China;

2.Wuzhishan National Forest Ecosystem Monitoring Research Station, Wuzhishan 572299, China; 3.Rubber Research

Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China; 4.State Key Laboratory

of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710043, China)

Abstract:[Objective] The purpose of this study is to investigate the effects of fertilization measures on soil water-holding capacity and pore characteristics in tropical rubber plantations and to optimize the simulation model for describing soil moisture characteristic curves of latosol rubber plantations. [Methods] of the soil water characteristics curves of five conventional fertilization treatments (organic fertilizer mixed with chemi-

收稿日期:2023-02-04

修回日期:2023-02-19

资助项目:海南省自然科学基金高层次人才项目(320RC486);国家自然科学基金地区项目(42167011);国家重点研发计划项目(2018YFD0201105)

第一作者:林晓燕(1998—),女,广东汕头市人,在读硕士研究生,主要从事土壤水分运移研究。E-mail:lxyl23td@163.com

通信作者:王晶晶(1984—),女,吉林省四平市人,讲师,博士生导师,主要从事土壤物理与水资源高效利用研究。E-mail:wangjj@hainanu.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

cal fertilizer (H), chemical fertilizer (C), planting green manure (G), special fertilizer (S) and no fertilization (CK)) in rubber plantations were determined in full suction section by using sandbox drainage method combining with pressure film instrument method. Four empirical models, Brooks-Corey (BC), van Genuchten (VG), Gardner and Log-Normal Distribution (LND) were used for fitting and the applicability, and fitting accuracies of different models were analyzed. [Results] In the low suction section ($pF \leq 3.01$), the change of soil water content in the 0—5 cm soil layer was the largest in the C treatment ($0.44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). In the high suction stage ($3.01 < pF \leq 4.18$), the soil moisture content in the 0—5 cm soil layer decreased slightly, and the decrease in H treatment was the largest ($0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). In the low suction section of 5—10 cm soil layer, C treatment had the largest decrease ($0.52 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). In the high suction section, the moisture content of the 5—10 cm soil layer has the largest decrease in C treatment ($0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). In the 0—5 cm soil layer, the available soil moisture content of the CK treatment was the largest ($0.19 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). In the 5—10 cm soil layer, the soil available water content of the C treatment was the largest ($0.11 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). In the 0—5 cm soil layer, the proportion of soil voids (5.2%) and macropores (0.8%) in the CK treatment was the smallest, the proportion of medium voids (48.7%) was the highest. In the 5—10 cm soil layer, it could be seen that the proportion of soil voids and macropores in the C treatment was the smallest among all treatments, and the soil pore type was relatively simple, and the soil water holding capacity was strong. (4) Four models of BC, VG, Gardner and LND could be used to fit the soil moisture characteristic curves of different fertilization treatments in latosol planting rubber gardens. The fitting accuracies of different models were BC, VG, LND and Gardner models in descending order. In addition, the VG model had high accuracy in fitting residual water content and saturated water content. [Conclusion] CK treatment was the optimal fertilization management method among all fertilization treatments in the 0—5 cm soil layer, and C treatment was the optimal fertilization management method among all the fertilization treatments in the 5—10 cm soil layer ($R^2 \geq 0.84$). These research results can provide the reference for the optimization of fertilization management measures in tropical latosol rubber plantations.

Keywords: soil water characteristics curves; fertilization treatments; rubber plantation; soil pore distribution; soil water-holding capacity

橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 是重要的热带经济林木^[1], 在我国主要分布在海南等地^[2], 截至 2020 年海南岛橡胶林种植面积约 51.92 万 hm^2 ^[3]。近年来, 社会经济发展对橡胶需求量持续增长, 橡胶林的种植面积逐年扩大; 橡胶林生长消耗了大量的土壤水分和养分, 造成部分植胶区地面径流和水井发生干涸现象^[4], 分析胶林不同施肥处理对土壤持水能力及孔隙分布特征的影响, 可为胶林管理提供参考。

土壤水分特征曲线反映了土壤水能量(基质势)与数量(含水率)之间关系^[5-6], 是研究土壤持水性能、土壤水分有效性和孔隙分布状况的重要指标之一^[6], 通常采用室内试验进行测定。吕殿青等采用操作简单、速度较快的离心法测定土壤水分特征曲线, 但测量结果受土壤压实、离心时间等影响^[7]; 王红兰等认为沙箱排水法测定土壤水分特征曲线的低吸力段数据较为真实准确, 但不适宜测定高吸力段^[8]; Cresswell 等认为压力膜仪法适宜测定高吸力段土壤水分

特征曲线, 但存在低吸力段数据少且不精确等问题^[9]。结合沙箱排水法和压力膜仪法可克服单一测定方法的缺陷, 能完整且较为准确地获得全吸力段的土壤水分特征曲线。20 世纪 50 年代以来, 学者们建立了不同形式不同情况下的土壤水分特征曲线经验模型: Brooks 和 Corey 提出通过测定土壤水分特征参数(残余含水率、饱和含水率、进气值和土壤水吸力等)来预测土壤含水率的 Brooks 和 Corey (BC) 模型^[10]。Gardner 根据 BC 模型参数的内在联系, 通过考虑土壤持水能力和土壤水分特征曲线的形状来模拟土壤含水率, 建立 Gardner 模型^[11]。1980 年, van Genuchten 通过土壤水分特征参数和土壤水分特征曲线形状参数来推导土壤含水率, 构建 van Genuchten (VG) 模型^[12]。Kosugi 采用土壤水分特征参数及孔隙毛细管压力分布来模拟土壤含水率, 提出 Log-Normal Distribution (LND) 模型^[13]。

学者们研究了土壤容重、粒径分布和土壤质地等

土壤理化性质及施肥管理等措施对土壤水分特征曲线的影响^[14]。Seyedeh 等基于粒径分布和土壤容重等土壤性质来估算土壤水分特征曲线^[15]。兰志龙等发现有机肥与氮磷钾肥配施可提高土壤持水能力,降低土壤容重从而改变土壤水分特征曲线^[16]。部分学者对比了利用不同经验模型描述实测土壤水分特征曲线的精度^[17]。丁新原等^[18]采用 VG 模型和 Gardner 模型对沙漠公路防护林土壤水分特征曲线的拟合精度进行了比较,发现 VG 模型的拟合精度总体高于 Gardner 模型。王子龙等采用 VG,BC,Modified Gardner 和 LND 模型对黑土区土壤水分特征曲线进行模拟,发现 VG 模型和 Modified Gardner 模型的精度高^[19]。总体来看,当前研究主要集中在温带^[20]、暖温带^[21]、亚热带等^[22-25]气候区,土壤类型以黄壤、荒漠土、红壤^[26]及黄棕壤等为主,土地类型包括农田、沙漠、裸地等类型,研究对象多是生长周期较短的玉米、小麦和水稻等作物;此外,描述土壤水分特征曲线的相关模型的适用性和精确度也高度依赖土壤类型及田间管理措施等。

受气候(如多雨)和人类活动(施肥等)^[27]影响,浅表层(0—10 cm)土壤的持水能力及孔隙分布受到扰动,改变了根系层土壤的水源涵养功能^[28];尤其是在高温、高湿、多雨的热带砖红壤植胶区,橡胶林不同施肥处理对浅表层土壤的水分有效性、持水能力及孔隙特征的影响尚不清楚,而且针对热带砖红壤植胶区土壤水分特征曲线的模型的适用性和精确度仍不明确。为此,本文采用沙箱排水法结合压力膜仪法,测定砖红壤植胶区典型施肥处理下全吸力段土壤水分特征曲线,利用 BC,Gardner,VG 和 LND 经验模型模拟土壤水分特征曲线并评估其适用性及精度,揭示不同施肥处理对胶林土壤持水能力及孔隙分布的影响,为胶林土壤培肥提供参考。

表 1 不同处理的土壤容重合吸湿水含量测定结果

Table 1 Measurement results of soil bulk density and moisture absorption water content under different treatments							
土层 深度/cm	处理	容重/ (g·cm ⁻³)	吸湿水含量/ (cm ³ ·cm ⁻³)	土层 深度/cm	处理	容重/ (g·cm ⁻³)	吸湿水含量/ (cm ³ ·cm ⁻³)
0—5	H	1.49	0.01	5—10	H	1.39	0.02
	S	1.54	0.01		S	1.37	0.01
	C	1.44	0.02		C	1.44	0.01
	G	1.45	0.03		G	1.53	0.03
	CK	1.43	0.01		CK	1.40	0.02

1.2.2 土壤水分特征曲线模型 常用的 4 种代表性土壤水分特征曲线模型如下:

(1) Brooks-Corey 模型(BC 模型)

$$\theta=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)(1/ah)^{\lambda} \quad ah>1 \quad (1)$$

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验区位于海南省西北部琼中县的海胶集团乌石农场(19°1'7"N,109°57'36"E,海拔 127 m)。地处热带北缘,属于典型热带海岛型季风气候区,年平均气温 20.8~26.0℃,积温为 8 500~9 100℃,年光照为 1 750~2 650 h。研究区雨季为 5—10 月,旱季为 11 月到次年 4 月,年降雨量在 900~2 200 mm,年平均相对湿度为 83%。研究区土壤为砖红壤,土壤母质为花岗岩。

在橡胶林(株行距为 3.0×7.0 m)设置 5 种常规施肥处理:有机肥混施化肥(H)、施化肥(C)、种植绿肥(G)、施专用肥(S)以及不施肥(CK)。各处理每株橡胶树的年施肥量分别为:H 处理施有机肥(牛粪)20 kg、复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15)0.6 kg 和尿素 0.4 kg;C 处理施复合肥 0.6 kg、尿素 0.4 kg;S 处理施专用肥(N:P₂O₅:K₂O 为 14:7:9)2 kg。G 处理为橡胶树间种葛藤绿肥。CK 处理为对照组,不进行施肥处理。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集和处理 2020 年 11 月,在 5 个不同施肥处理的胶林样地内选取代表性采样点,以不施肥处理的胶林样地为对照。分层采集 0—5 cm 和 5—10 cm 土层的原状土样。每层取 3 个平行试样,共计 30 个土壤样品。用于测定土壤水分特征曲线和容重。为测定全吸力段的土壤水分特征曲线,应用沙箱排水法(08.01 型,荷兰,Eijkelkamp 公司)测定低吸力段(0,10,20,40,60,80 cm)的土壤水分特征曲线,结合压力膜仪(1500F2 型,美国,SEC 公司)测定高吸力段(510,1 020,3 060,5 100,15 300 cm)的土壤水分特征曲线。土壤容重采用烘干称重法测定,吸湿水含量采用烘干称重法测定。此外,在取样点周边分层采集 1.50 kg 扰动土样测定土壤容重和吸湿水含量,测定结果见表 1。

式中: θ 为土壤含水率(cm^3/cm^3); θ_r 为土壤残余含水率(cm^3/cm^3); θ_s 为土壤饱和含水率(cm^3/cm^3); α 为土壤进气值的倒数(cm^{-1}); h 为土壤基质吸力(cm); λ 为经验参数,能够反映土壤孔隙的分布特征。

(2) Gardner 模型

$$\theta = Ah^{-B} \quad (2)$$

式中: A 表示土壤持水能力, A 值越大, 土壤持水能力越强; $B(0 \leq B \leq 1)$ 表示曲线的走向, 当 A 值不变时, B 值越大, 表示土壤水分特征曲线越靠近水势轴^[25]。

(3) van Genuchten 模型 (VG 模型)

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 / (1 + \alpha |h|^n)]^{1-1/n} \quad (3)$$

式中: n 为形状参数, n 越大时曲线越缓。

(4) Log-Normal Distribution 模型 (LND 模型)

$$\theta = \theta_r + 1/2(\theta_s - \theta_r) \operatorname{erfc}[\ln(ah)/\sqrt{2} q] \quad (4)$$

式中: q 为模型参数; erfc 表示余误差函数。

1.2.3 当量孔径 根据土壤毛管理论, 土壤中的孔隙可概化为孔径不一的圆形毛管, 土壤基质吸力 h (cm) 和毛管直径 d (mm) 之间关系可表示为^[29]:

$$d = 3/h \quad (5)$$

式中: d 为当量孔径 (mm); h 为土壤基质吸力 (cm)。若土壤含水率分别为 θ_1 和 θ_2 , 对应的当量孔径分别为 d_1 和 d_2 , 则 d_1 和 d_2 之间的孔隙所占体积与孔隙总体积之比为 $\theta_1 - \theta_2$ (其中 $\theta_1 > \theta_2$)^[29]。Cameron 将土壤当量孔径分为极微孔隙 ($< 0.3 \mu\text{m}$)、微孔隙 ($\geq 0.3 \sim 5 \mu\text{m}$)、小孔隙 ($\geq 5 \sim 30 \mu\text{m}$)、中等孔隙 ($\geq 30 \sim 75 \mu\text{m}$)、大孔隙 ($\geq 75 \sim 100 \mu\text{m}$)、土壤空隙 ($\geq 100 \mu\text{m}$)^[23, 29]。

1.2.4 比水容量 比水容量 $C(h)$ 是衡量土壤水分对植物的有效性和反映土壤持水性能的重要指标^[23]。 $C(h)$ 可表示为:

$$C(h) = -d\theta/dh = (\theta_s - \theta_r) m n \alpha |ah|^{n-1} / [1 + |ah|^n]^{m+1} \quad (6)$$

式中: m 为经验拟合参数, $m = 1 - 1/n$ 。

1.2.5 模型评价 通过对比各处理的实测值与模型模拟值来评估模型的模拟精度, 评价指标包括均方根误差 (RMSE)、平均偏差 (AD) 和确定系数 (R^2)。RMSE 值越小, AD 越接近 0, R^2 值越接近 1, 表示模型拟合效果越好。

1.2.6 数据处理 采用 Retention Curve (RETC) 软件结合 Origin 2021 软件拟合土壤水分特征曲线并计算不同经验模型的拟合参数。数据统计分析及制图采用 Excel 2016, Origin 2021 软件。利用 IBM SPSS Statistics 25 进行 Spearman 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤容重和吸湿水含量的影响

如表 1 所示, 不同处理的土壤容重介于 $1.37 \sim 1.54 \text{ g/cm}^3$ 。0—5 cm 土层, 与 CK 处理的容重 (1.43 g/cm^3) 相比, H, S, C 和 G 处理的容重分别增加了 4.2%, 7.7%,

0.7% 和 1.4%。5—10 cm 土层, H 和 S 处理的容重分别比 CK 处理的容重 (1.40 g/cm^3) 减少了 0.7% 和 2.1%, C 和 G 处理的容重则分别比 CK 处理的容重增加 2.9% 和 9.3%。不同处理的土壤吸湿水含量介于 $0.01 \sim 0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; 0—5, 5—10 cm 土层中, G 处理的吸湿水含量均是最高, S 处理的吸湿水含量则是最低; G 处理比 CK 处理的土壤吸湿水含量增加了 2.1 倍, S 处理比 CK 处理的土壤吸湿含水量减少了 2.0 倍。

2.2 不同施肥处理的土壤水分特征曲线

根据土壤基质吸力的对数 (pF) 和土壤体积含水率绘制不同处理 0—5, 5—10 cm 土层实测的土壤水分特征曲线 (见图 1)。随着 pF 的增加, 土壤含水率在低吸力段 ($pF \leq 3.01$) 快速下降但在高吸力段 ($3.01 < pF \leq 4.18$) 的下降速度趋于平缓。不同处理在低吸力段的平均降幅为 $0.34 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 在高吸力段的平均降幅为 $0.07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 低吸力段的平均降幅是高吸力平均降幅的 5.7 倍。0—5 cm 土层的土壤含水率在低吸力段 ($pF \leq 3.01$), S 处理的降幅最小 ($0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), 说明该处理该层土壤中孔隙相对较多, 土壤的持水能力可能最强^[23], 但是考虑到 S 处理的土壤饱和含水率本身仅为 $0.39 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 是所有处理中饱和含水率最低, 在受到土壤基质吸力增加的作用下析出的水分也自然较少, 故应当结合其他指标才能判定 S 处理对土壤持水能力的影响。0—5 cm 土层的土壤含水率在低吸力段 ($pF \leq 3.01$), C 处理的降幅最大 ($0.44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), 是 S 处理降幅 ($0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 的 2.1 倍, 说明该处理该层土壤中较大孔隙可能较多。此外, 0—5 cm 土层的土壤含水率在高吸力阶段的降幅偏小, G 处理的降幅最小 ($0.00 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), H 处理的降幅最大 ($0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 且是 G 处理降幅的 27.0 倍。同理, 5—10 cm 土层, 低吸力段 H 处理的降幅最小 ($0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), C 处理的下降幅度最大 ($0.52 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 且是 H 处理降幅的 2.5 倍。此外, 5—10 cm 土层的含水率在高吸力段, G 处理的降幅最小 ($0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), C 处理的降幅最大 ($0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 且是 G 处理降幅的 4.3 倍。

2.3 不同施肥处理的土壤水分有效性

土壤有效含水率是指田间持水量和凋萎系数的差值, 有效含水率越高说明土壤持水能力越好。整体来说, 0—5 cm 土层各处理的平均有效含水率 ($0.11 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 是 5—10 cm 土层各处理的平均有效含水率 ($0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 的 1.3 倍, 说明各处理 0—5 cm 土层比 5—10 cm 土层的土壤持水能力强。在 0—5 cm 土层中, G 处理的有效含水率最小 ($0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$),

CK 处理的有效含水率最大($0.19\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)且是 G 处理的 3.4 倍。5—10 cm 中,H 处理的有效含水率最

小($0.07\text{ cm}^3/\text{cm}^3$),C 处理的有效含水率最大($0.11\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)且是 H 处理的 1.4 倍。

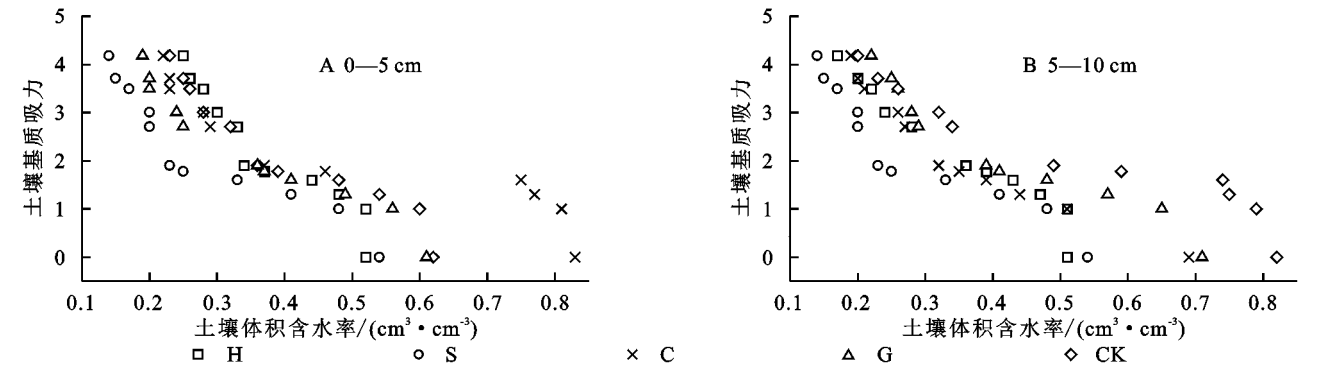


图 1 不同施肥处理 0—5,5—10 cm 土层实测的土壤水分特征曲线

Fig. 1 Soil moisture characteristic curves measured in soil layers of 0—5 and 5—10 cm under different fertilization treatments

土壤水分特征曲线的高低反映了土壤的持水能力^[26],土壤水分特征曲线越高说明土壤持水能力越强,反之,说明土壤持水能力越弱。在 0—5 cm 土层中,CK 处理在低吸力段($pF\leqslant3.01$)持水能力最强,C 处理在高吸力段($3.01<pF\leqslant4.18$)持水能力最强。而在 5—10 cm 土层中由于 C 处理和 H 处理土壤水分特征曲线之间发生交叉,可以看出在 $pF\leqslant1.90$ 时,C 处理的土壤水分特征曲线是最高的,土壤持水能力最强;而在 $1.90<pF\leqslant4.18$ 时,H 处理的土壤水分特征曲线是最高的,土壤持水能力最强。但同时不可忽略的是,5—10 cm 土层中 H 处理的饱和含水率是所有处理中含水率最低的,所以应该结合饱和含水率和残余含水率的差值来考虑不同处理对土壤持水能力的影响。

表 2 不同处理的理化性质实测值

Table 2 Measured values of physical and chemical properties of different treatments					
土层 深度/cm	处理	$\theta_s/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_r/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_s - \theta_r/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏粒 含量/%
0—5	H	0.51	0.18	0.33	15.6
	S	0.39	0.12	0.27	12.5
	C	0.69	0.24	0.46	26.2
	G	0.68	0.20	0.47	19.0
	CK	0.76	0.19	0.57	15.2
5—10	H	0.53	0.27	0.26	23.4
	S	0.54	0.17	0.37	11.9
	C	0.79	0.22	0.58	23.3
	G	0.59	0.19	0.40	17.6
	CK	0.60	0.24	0.36	20.0

各土层不同处理的实测 θ_s 分布区间为 $0.39\sim0.79\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (表 2),变化幅度较大,其中 5—10 cm 土层 C 处理的 θ_s 最高($0.79\text{ cm}^3/\text{cm}^3$),0—5 cm 土层 S 处理的 θ_s 最低($0.39\text{ cm}^3/\text{cm}^3$);实测的 θ_r 分布区间为 $0.12\sim0.27\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,其中 5—10 cm 土层中 H 处理的 θ_r 最高($0.27\text{ cm}^3/\text{cm}^3$),0—5 cm 土层中的 S 处理的 θ_r 最低($0.12\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。饱和含水率和残余含水率的差值越大,说明

该质地类型的土壤持水性越强^[30]。在 0—5 cm 土层中 CK 处理的饱和含水率和残余含水率的差值最大,土壤持水能力最强。在 5—10 cm 土层中 C 处理的饱和含水率和残余含水率的差值最大,土壤持水能力最强。

结合土壤水分特征曲线的高低以及饱和含水率和残余含水率的差值,可以得出 0—5 cm 土层低吸力段,CK 处理土壤持水能力最强,如 $pF=1.90$ 时,H,S,C,G 和 CK 处理的土壤含水率分别为 $0.36,0.22,0.38,0.34,0.45\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,相比于 CK 处理,所有处理均未提高土壤持水能力;0—5 cm 土层高吸力段,CK 处理土壤持水能力最强,如 $pF=4.18$ 时,H,S,C,G 和 CK 处理的土壤含水率分别为 $0.18,0.12,0.24,0.20,0.19\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,相比于 CK 处理,C 和 G 处理的土壤含水率增加了 22.7%和 5.6%,C 和 G 处理均提高了土壤持水能力。在 5—10 cm 土层 $pF\leqslant1.90$ 中,C 处理土壤含水率均是最大的,如在 $pF=1.60$ 时,H,S,C,G 和 CK 处理的土壤含水率分别为 $0.44,0.33,0.74,0.40,0.47\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,相比 CK 处理,C 处理的土壤含水率增加 85.4%,说明 C 处理提高了土壤持水能力。在 5—10 cm 土层 $1.90<pF\leqslant4.18$ 中,H 处理土壤含水率均是最大的,如在 $pF=4.18$ 时,H,S,C,G 和 CK 处理的土壤含水率分别为 $0.27,0.17,0.22,0.19,0.24\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,相比 CK 处理,H 处理的土壤含水率增加 11.3%,说明 H 处理能提高土壤持水能力。

2.4.4 种经验模型拟合土壤水分特征曲线 图 2 为不同土层不同处理实测的土壤基质吸力及土壤体积含水率,并利用 4 种模型拟合绘制的土壤水分特征曲线。根据图 2 知,不同处理 0—5,5—10 cm 土层实测的土壤水分特征曲线数据点与 VG,BC,LND 和 Gardner 这 4 种经验模型中的拟合曲线总体较为相近,但 0—5 cm 土层的 G 和 CK 处理的模型拟合曲线与实测值相差较远,5—10 cm 土层的 H 和 CK 处理的模型拟合曲线与实测值相差较远。

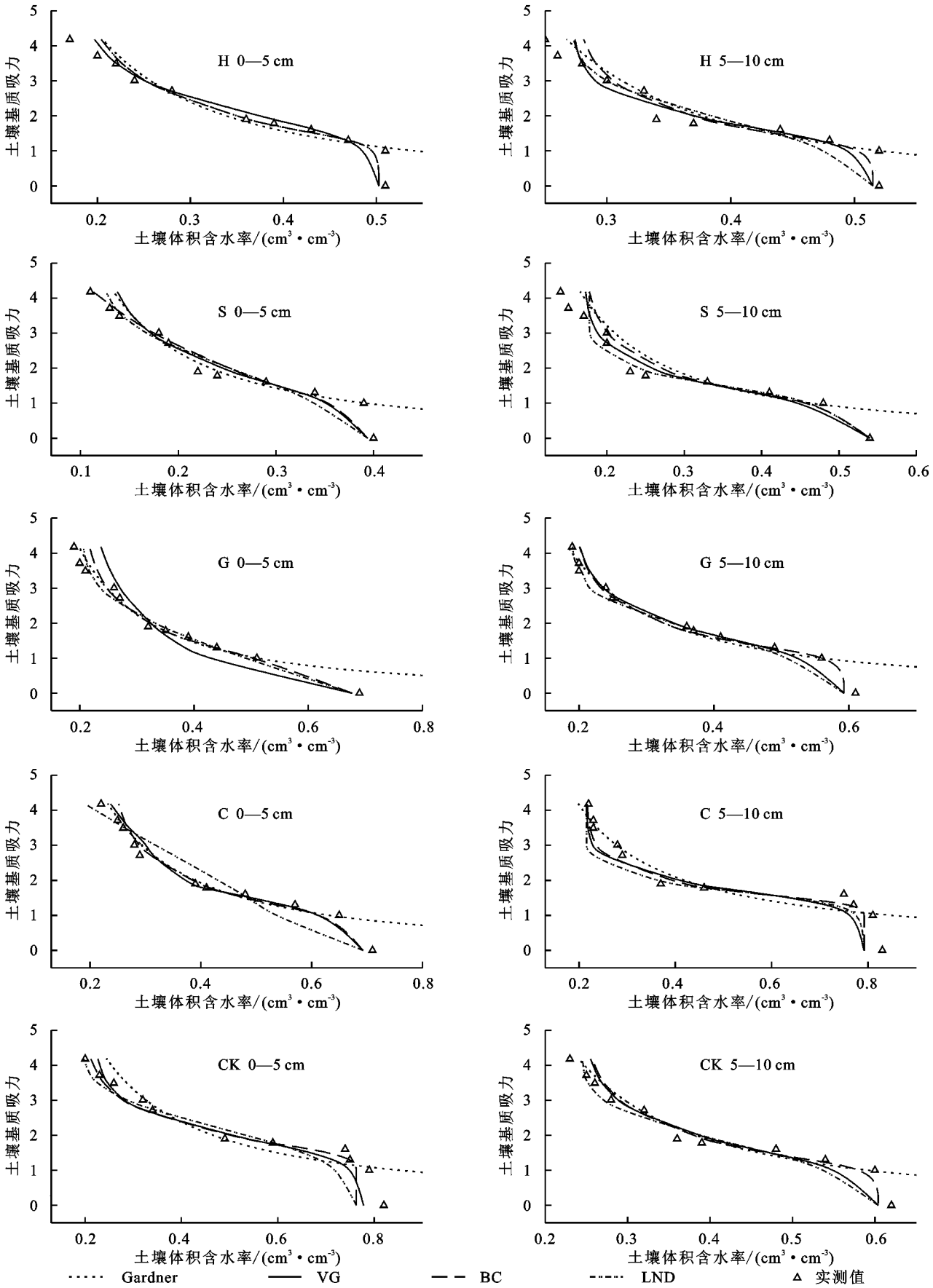


图 2 4 种经验模型拟合不同施肥处理 0—5 cm 和 5—10 cm 土层的土壤水分特征曲线

Fig. 2 Four empirical models fitting soil moisture characteristic curves of 0—5 cm and 5—10 cm soil layers under different fertilization treatments

结合图 2 和表 3 可知,0—5 cm 土层,H 处理 Gardner 模型的拟合精度($RMSE=0.11\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.10\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.99$)优于其他 3 个模型,VG 模型的拟合精度最差($RMSE=0.12\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.10\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.99$);S 处理 VG 模型的拟合精度($RMSE=0.09\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.08\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.96$)优于其他 3 个模型,LND 模型的拟合精度最差($RMSE=0.09\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.08\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.94$);C 处理 BC 模型的拟合精度($RMSE=0.15\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.13\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.99$)优于其他 3 个模型,LND 模型的拟合精度最差($RMSE=0.15\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.12\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.91$);G 处理 VG 模型的拟合精度($RMSE=0.14\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.11\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=1.00$)优于其他 3 个模型,

Gardner 模型的拟合精度最差($RMSE=0.06\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.04\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.97$);CK 处理 BC 模型的拟合精度($RMSE=0.23\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.21\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.98$)优于其他 3 个模型,Gardner 模型的拟合精度最差($RMSE=0.20\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $AD=0.20\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.94$)。

综合比较 4 种模型对土壤水分特征曲线拟合效果,发现 BC 模型的拟合曲线与实测值最为接近,同时 R^2 更接近于 1 且 RMSE 与 AD 均较小,说明 BC 模型的拟合精度最高,可作为描述砖红壤胶林不同施肥处理 0—5 cm 土壤水分特征曲线的最优模型。类似地,对 5—10 cm 土层,BC 模型的拟合精度最高,可作为刻画砖红壤胶林不同施肥处理下 5—10 cm 土壤水分特征曲线的最优模型。

表 3 4 种经验模型的拟合精度
Table 3 Fitting accuracy of four empirical models

0—5 cm 土层					5—10 cm 土层				
处理	模型	评价指标			处理	模型	评价指标		
		RMSE/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	AD/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	R^2			RMSE/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	AD/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	R^2
H	BC	0.12	0.10	0.99	H	BC	0.09	0.08	0.96
	VG	0.12	0.10	0.99		VG	0.09	0.08	0.94
	Gardner	0.11	0.10	0.99		Gardner	0.12	0.05	0.88
	LND	0.12	0.10	0.99		LND	0.09	0.08	0.91
S	BC	0.09	0.08	0.96	S	BC	0.12	0.10	0.97
	VG	0.09	0.08	0.96		VG	0.12	0.10	0.96
	Gardner	0.07	0.06	0.95		Gardner	0.08	0.07	0.84
	LND	0.09	0.08	0.94		LND	0.13	0.12	0.97
C	BC	0.15	0.13	0.99	C	BC	0.24	0.21	0.99
	VG	0.15	0.13	0.99		VG	0.23	0.21	0.99
	Gardner	0.11	0.10	0.93		Gardner	0.24	0.21	0.93
	LND	0.15	0.12	0.91		LND	0.24	0.21	0.99
G	BC	0.14	0.11	1.00	G	BC	0.14	0.12	0.99
	VG	0.14	0.11	1.00		VG	0.14	0.12	1.00
	Gardner	0.06	0.04	1.00		Gardner	0.10	0.09	0.97
	LND	0.14	0.11	1.00		LND	0.15	0.13	0.97
CK	BC	0.23	0.21	0.98	CK	BC	0.13	0.11	0.97
	VG	0.22	0.20	0.96		VG	0.13	0.11	0.96
	Gardner	0.20	0.20	0.94		Gardner	0.10	0.09	0.90
	LND	0.22	0.20	0.95		LND	0.13	0.11	0.93

0—5 cm 土层,VG,BC,LND 和 Gardner 模型拟合不同处理的参数 θ_s 和 θ_r 不同(表 4)。H 处理中,LND 模型拟合参数 θ_s 和 θ_r 均最大,分别为 0.50,0.20 cm^3/cm^3 ;Gardner 模型拟合参数 θ_r 最小,为 0.18 cm^3/cm^3 ;S 处理中,LND 模型拟合 θ_s 最大为 0.39 cm^3/cm^3 ,VG 模型拟合的参数 θ_r 最大为 0.14 cm^3/cm^3 ,BC 模型拟合 θ_s 和 θ_r 均最小,分别为 0.39,0.11

cm^3/cm^3 ;C 处理中,BC 模型拟合的参数 θ_s 和 θ_r 均最大,分别为 0.69,0.25 cm^3/cm^3 ,LND 模型拟合 θ_s 和 θ_r 均最小,分别为 0.69,0.19 cm^3/cm^3 ;G 处理中,VG 模型拟合 θ_s 和 θ_r 均最大,分别为 0.68,0.24 cm^3/cm^3 ,LND 模型拟合 θ_s 和 θ_r 均最小,分别为 0.68,0.21 cm^3/cm^3 ;CK 处理中,VG 模型拟合 θ_s 最大为 0.78 cm^3/cm^3 ,VG 模型拟合 θ_r 最大为 0.27 cm^3/cm^3 。

5—10 cm 土层,各处理实测的 θ_s 、 θ_r 均与 Gardner 模型拟合的 θ_s 和 θ_r 的值相差最大,而 VG,BC 和 LND 模型拟合的结果十分相近,拟合曲线比较聚集,S 和 C 处理还出现曲线重合的现象,这说明 VG,BC 和 LND 模型在 5—10 cm 土层中的拟合效果比较相近,Gardner 模型的拟合结果与实测值相差较大。如 C 处理中,实测 θ_r 为 $0.22\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,VG,BC 和 LND 模

型拟合的 θ_r 分为 $0.22,0.22,0.22\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,而 Gardner 模型拟合的 θ_r 为 $0.14\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。总的来说,VG 模型拟合结果与各处理实测的 θ_s 和 θ_r 的误差最小 ($\text{RMSE}=0.09\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $\text{AD}=0.07\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.97$),Gardner 模型拟合结果与各处理实测的参数 θ_s 和 θ_r 的误差最大 ($\text{RMSE}=0.05\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $\text{AD}=0.04\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $R^2=0.68$)。

表 4 4 种经验模型的参数拟合结果

Table 4 Parameter fitting results of four empirical models

模型	拟合参数	0—5 cm 土层					5—10 cm 土层				
		H	S	C	G	CK	H	S	C	G	CK
BC	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	0.50	0.39	0.69	0.68	0.75	0.53	0.48	0.79	0.60	0.57
	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	0.20	0.11	0.25	0.22	0.24	0.28	0.21	0.24	0.25	0.27
	$\alpha/(\text{cm}^{-1})$	0.09	0.09	0.09	0.36	0.03	0.08	0.04	0.03	0.14	0.04
	λ	2.78	2.72	2.54	1.62	3.20	2.60	2.89	3.02	2.28	3.04
	R^2	0.99	0.96	0.99	1.00	0.98	0.96	0.97	0.99	0.99	0.97
VG	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	0.50	0.39	0.69	0.68	0.78	0.52	0.48	0.79	0.59	0.60
	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	0.20	0.14	0.24	0.24	0.22	0.28	0.18	0.22	0.20	0.26
	$\alpha/(\text{cm}^{-1})$	0.05	0.06	0.07	0.29	0.02	0.05	0.06	0.02	0.08	0.04
	n	1.35	1.55	1.70	1.37	1.69	1.84	2.12	5.26	1.50	2.04
	R^2	0.99	0.96	0.99	1.00	0.96	0.94	0.96	0.99	1.00	0.96
LND	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	0.50	0.39	0.69	0.68	0.75	0.52	0.54	0.79	0.59	0.60
	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	0.20	0.13	0.19	0.21	0.27	0.27	0.21	0.22	0.19	0.25
	$\alpha/(\text{cm}^{-1})$	115.90	43.48	33.68	18.38	69.37	43.00	26.23	57.48	44.75	43.59
	q	2.07	1.02	1.28	2.49	0.39	0.82	0.96	0.34	1.76	0.85
	R^2	0.99	0.94	0.91	1.00	0.95	0.91	0.97	0.99	0.97	0.93
Gardner	A	0.52	1.28	0.60	1.43	0.73	0.71	0.65	0.75	0.59	0.81
	B	0.16	0.20	0.09	0.24	0.13	0.15	0.14	0.17	0.15	0.14
	R^2	0.99	0.95	0.93	0.97	0.94	0.88	0.84	0.93	0.97	0.90

2.5 不同施肥处理的土壤孔隙特征

土壤孔隙决定土壤的通透性和持水性^[23]。根据式(5)计算不同处理各土层的当量孔径。不同处理 0—5,5—10 cm 土层的孔径分布差异明显,累计当量孔径分布结果见图 3。0—5 cm 土层,CK 处理的土壤空隙占比(5.2%)和大孔隙占比(0.8%)最小,中等孔隙占比(48.7%)最高。同时有研究表明,土壤当量孔径类别单一且某一孔隙类别占比高则分选性好,分选性好的土壤持水能力较强^[22]。结合 CK 处理土壤空隙、大孔隙占比最小以及土壤当量孔径类别较为单一的情况,这就解释了 CK 处理在低吸力段下持水能力最强。由图 3 可以看出,0—5 cm 土层 C 处理与 G 处理的较小孔隙($\leq 30\text{ }\mu\text{m}$)占比相似,不考虑其他理化性质的情况下,这 2 个处理的土壤持水能力表现应该相似,但是结合土壤黏粒含量(表 2)来说,可以发现 C 处理的黏粒含量是所有处理中最高的。有研究

表明,土层的水分曲线特征曲线与其基本物理性质对应,粉黏粒含量较多的土层对应的持水性较强^[18]。结合土壤孔隙特征和土壤黏粒含量情况,就解释了 0—5 cm 土层 C 处理在高吸力段下持水能力最强。在 5—10 cm 土层中,可以看出 C 处理的土壤空隙和大孔隙的占比是所有处理中占比最小的,且土壤孔隙类型较为单一,其中中等孔隙($\geq 30\sim 75\text{ }\mu\text{m}$)占比甚至达到 63.6%,同理可得 C 处理在低吸力段下的土壤持水能力最强,以及也解释了 5—10 cm 土层中其余处理的饱和含水率和残余含水率之间差值变小,而 C 处理的饱和含水率和残余含水率差值变大,土壤持水能力增强的现象。虽然 H 处理土壤孔隙类型较为单一,但较大孔隙($\geq 30\text{ }\mu\text{m}$)整体占比较高,故 H 处理在低吸力段表现出的土壤持水能力不强。然而,结合土壤质地分析,可以知道 H 处理的黏粒含量是所有处理中含量最高的,这就解释了 H 处理在低吸力

段下土壤持水能力表现不佳,但在高吸力段情况下土壤持水能力表现最优。同时,除 G 处理外,H,S,C 和 CK 处理 5—10 cm 土层的较大孔隙($\geq 30\text{ }\mu\text{m}$,包括中等孔隙($\geq 30\sim 75\text{ }\mu\text{m}$)、大孔隙($\geq 75\sim 100\text{ }\mu\text{m}$)和土壤空隙($\geq 100\text{ }\mu\text{m}$))占比高于 0—5 cm 土层的较大孔隙占比($\geq 30\text{ }\mu\text{m}$),说明这 4 个处理的土壤持水能

力下降。虽然 G 处理 5—10 cm 土壤空隙占比(30.1%)比 0—5 cm 土壤的空隙占比(50.8%)低 20.7%,G 处理 5—10 cm 土壤中较小孔隙($\leq 30\text{ }\mu\text{m}$)的比例比 0—5 cm 土层的较小孔隙占比高 9.7%,但是可以看出,5—10 cm 土层中 G 处理各土壤孔径占比为均衡,土壤分选性较差,故土壤持水能力也较差。

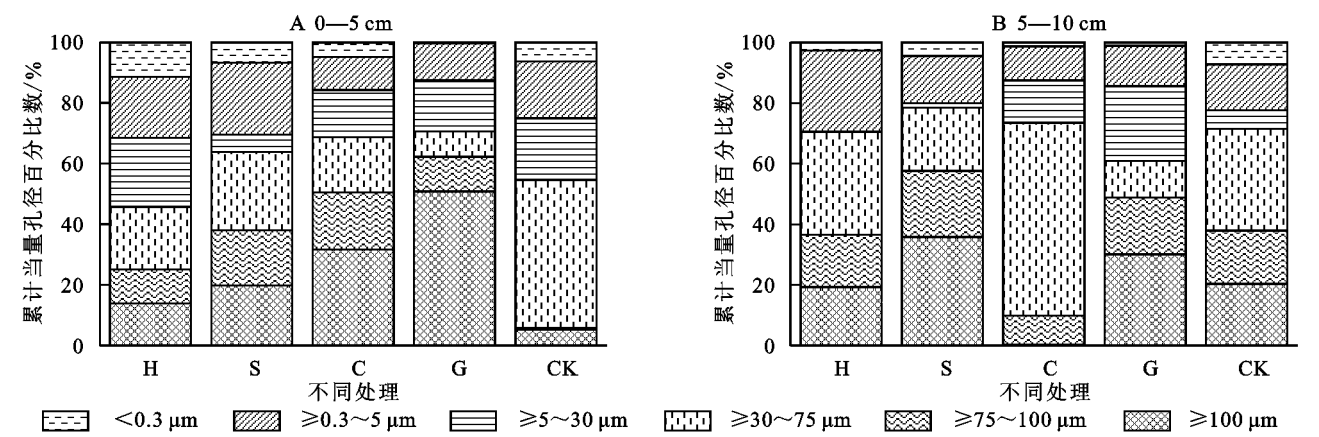


图 3 不同施肥处理 0—5,5—10 cm 土层的当量孔径分布

Fig. 3 Equivalent pore size distribution of 0—5, 5—10 cm soil layers under different fertilization treatments

2.6 不同施肥处理土壤持水能力的影响

土壤比水容量 $C(h)$ 反映土壤持水能力的情况,数值越大说明土壤持水能力越强^[31]。不同处理不同土层深度的 $C(h)$ 见表 5。可以看出,研究区不同施肥处理的 $C(h)$ 数值均偏小,整体持水能力较差,这可能是因为研究区土壤发育于花岗岩母质,在高温多雨的热带地区容易发生水土流失,土壤粉黏粒含量较低,土壤颗粒间大孔隙多,土壤易于失水,导致土壤持水能力较差。0—5 cm 土层中,各施肥处理土壤比水容量数值比较接近。5—10 cm 土层,S,C 和 G 处理的 $C(h)$ 数值分别是 CK 处理的 1.4,1.4,1.2 倍,说明 S,C 和 G 处

理均提高了土壤的持水能力。对比 0—5,5—10 cm 土层的土壤比水容量,发现 0—5 cm 土层的 H 和 S 处理 $C(h)$ 数值分别是 5—10 cm 土层 H 和 S 处理 $C(h)$ 数值的 0.77,0.5 倍,说明 H 和 S 处理的 0—5 cm 土层持水性比 5—10 cm 土层持水性差。而 0—5 cm 土层的 C,G 和 CK 处理 $C(h)$ 数值分别是 5—10 cm 土层 C,G 和 CK 处理 $C(h)$ 数值的 1.09,1.79,1.0 倍,说明 C,G 和 CK 处理在 0—5 cm 土层的持水性比 5—10 cm 土层的持水性好。整体来看,0—5 cm 土层的土壤比水容量比 5—10 cm 土层的土壤比水容量高,故 0—5 cm 土层土壤持水能力比 5—10 cm 土层强。

表 5 土壤基质吸力与土壤比水容量对应关系

Table 5 Correspondence between soil matrix suction and soil specific water capacity										
土壤基质 吸力/cm	0—5 cm 土壤比水容量					5—10 cm 土壤比水容量				
	H	S	C	G	CK	H	S	C	G	CK
0	1.70×10^{-4}	1.21×10^{-3}	6.36×10^{-3}	1.75×10^{-2}	1.72×10^{-3}	2.68×10^{-3}	6.16×10^{-3}	1.10×10^{-5}	5.08×10^{-3}	1.93×10^{-3}
10	2.32×10^{-3}	2.70×10^{-3}	7.22×10^{-3}	1.20×10^{-2}	1.48×10^{-3}	2.50×10^{-3}	6.62×10^{-3}	2.74×10^{-3}	6.06×10^{-3}	3.67×10^{-3}
20	3.18×10^{-3}	3.35×10^{-3}	6.18×10^{-3}	4.64×10^{-3}	7.23×10^{-4}	2.28×10^{-3}	5.56×10^{-3}	6.28×10^{-3}	5.41×10^{-3}	4.28×10^{-3}
40	1.94×10^{-3}	2.46×10^{-3}	3.71×10^{-3}	2.33×10^{-3}	4.33×10^{-3}	2.79×10^{-3}	3.82×10^{-3}	6.96×10^{-3}	2.89×10^{-3}	3.69×10^{-3}
60	1.73×10^{-3}	1.76×10^{-3}	2.09×10^{-3}	9.75×10^{-4}	6.93×10^{-3}	2.35×10^{-3}	1.93×10^{-3}	5.66×10^{-3}	1.20×10^{-3}	3.02×10^{-3}
80	8.17×10^{-4}	5.75×10^{-4}	5.98×10^{-4}	1.02×10^{-4}	2.84×10^{-3}	6.64×10^{-4}	1.42×10^{-4}	2.35×10^{-3}	3.13×10^{-4}	9.43×10^{-4}
510	1.19×10^{-4}	3.61×10^{-5}	8.70×10^{-5}	1.06×10^{-4}	1.51×10^{-4}	1.93×10^{-5}	1.72×10^{-5}	1.09×10^{-4}	1.28×10^{-4}	5.20×10^{-5}
1020	3.53×10^{-5}	2.51×10^{-5}	1.32×10^{-5}	2.30×10^{-5}	3.21×10^{-5}	3.20×10^{-5}	1.78×10^{-5}	2.61×10^{-5}	2.10×10^{-5}	3.27×10^{-5}
3060	8.94×10^{-6}	1.15×10^{-5}	1.10×10^{-5}	9.21×10^{-6}	2.20×10^{-5}	1.04×10^{-5}	1.14×10^{-5}	1.20×10^{-5}	1.02×10^{-5}	6.67×10^{-6}
5100	5.79×10^{-6}	4.93×10^{-6}	3.83×10^{-6}	1.18×10^{-6}	7.66×10^{-6}	5.13×10^{-6}	5.14×10^{-6}	1.06×10^{-6}	1.06×10^{-6}	1.97×10^{-6}
15300	3.74×10^{-6}	1.80×10^{-6}	2.15×10^{-6}	8.61×10^{-7}	3.55×10^{-6}	6.65×10^{-7}	1.62×10^{-6}	7.63×10^{-7}	4.35×10^{-7}	2.59×10^{-6}

3 讨论

0—5 cm 土层不同处理的土壤当量孔径类别比较单一且占比高,说明 0—5 cm 土壤的分选性较好;5—10 cm 土层,土壤当量孔径类别比较多样且占比比较平衡,说明土壤的分选性较差,这与石浩楠等^[22]的研究结果相同,随土层深度由浅变深,土壤当量孔径类别复杂且占比不一,说明分选性差,失水效率大,土壤中可能存在优先流现象,导致土壤持水能力下降。

牛晓彤等^[32]的研究表明影响经验模型拟合参数 n 的主要因子由有机质和土壤颗粒组成。这与本研究的结果相同,本研究发现土壤性质相似的,如在同一个土层中,其经验模型拟合结果及精度更为相似。

对比 BC, VG, Gardner 和 LND 4 种经验模型拟合不同处理实测土壤水分特征曲线数据点的结果,拟合精度由大到小依次为:BC, VG, LND, Gardner 模型。这个结果与秦文静^[33]和王子龙等^[19]的研究结果一致,即偏砂性土壤实测土壤水分特征曲线采用 BC 模型拟合的结果最优。不同经验模型拟合各处理实测土壤水分特征曲线的结果也有差异,表现为不同模型对同一处理不同土壤基质吸力下实测数据的拟合精度也不同,特别是 CK 处理 0—5 cm 土层和 C 处理 5—10 cm 土层的拟合精度相比于其他处理较低,造成这些差异的可能原因主要有:(1)不同经验模型的函数形状影响模型的拟合精度^[34]。根据图 1 可知,不同处理实测的土壤水分特征曲线(脱湿曲线)总体呈现由急变缓(急—缓)的变化趋势,这与部分土壤质地类型的土壤水分特征曲线呈现急—缓—急的变化趋势有一定差异;VG 模型的拟合曲线总体呈现急—缓—急的“S”形拟合效果,故 VG 模型在本研究中的拟合精度不高。(2)不同经验模型的拟合参数个数不同。根据式(1),(3)和(4)可知,BC, VG 和 LND 模型均包含 4 个拟合参数,故其拟合的精度比较接近。根据式(2)可知, Gardner 模型包含 2 个参数(A 和 B),有学者发现 A 和 B 之间存在函数关系,所以 Gardner 模型实质上属于单一参数模型^[35]。通常来说在同等条件下,模型包含的拟合参数数量越多,其拟合的精度越高^[36];因此 Gardner 模型的拟合精度低于其他 3 个模型。

4 结论

(1) 相同土壤基质吸力下,橡胶林 0—5 cm 土层土壤持水能力强于 5—10 cm 土层。0—5 cm 土层各

处理的平均有效含水率是 5—10 cm 土层各处理的平均有效含水率的 1.3 倍;0—5 cm 土层的平均较大孔隙占比低于 5—10 cm 土层的较大孔隙占比;0—5 cm 土层的平均土壤比水容量比 5—10 cm 土层的土壤比水容量高。

橡胶林 0—5 cm 土层中,CK 处理的有效含水率最大,土壤空隙和大孔隙占比小,中等孔隙占比最高;5—10 cm 土层中,C 处理的有效水含率最大,土壤空隙和大孔隙占比最小,而中等孔隙占比最高达 63.5%。因此,不同施肥处理对不同土层深度土壤的持水能力影响不同。其中 0—5 cm 土层,不施肥处理的土壤持水能力最强;5—10 cm 土层,施化肥处理的土壤持水能力最强。

(2) 4 种模型拟合的土壤体积含水率与实测值基本相符,均可拟合砖红壤胶林的土壤水分特征曲线,模型拟合精度由高到低依次为:BC, VG, LND 和 Gardner 模型,因此推荐 BC 模型作为橡胶林土壤水分特征曲线的拟合模型。与 BC, LND 和 Gardner 模型相比, VG 模型对 θ_s 和 θ_r 的拟合精度最高。

参考文献:

- [1] 祁栋灵, 杨小波, 谢贵水, 等. 以橡胶为主的农林复合生态系统对调控资源利用和生态服务功能的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3844-3852.
Qi D L, Yang X B, Xie G S, et al. The influence of rubber-based agroforestry system on regulating resource use and ecological services[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3844-3852.
- [2] Gerhard L, Georg C, Konrad M, et al. Rubber intercropping: A viable concept for the 21st century[J]. Agroforestry Systems, 2017, 91(3): 577-596.
- [3] 海南省统计局. 海南省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
Hainan Provincial Bureau of Statistics. Hainan statistical yearbook[M]. Beijing, China Statistics Press, 2021.
- [4] Wu J E, Liu W J, Chen C F. How do plants share water sources in a rubber-tea agroforestry system during the pronounced dry season? [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 236: 69-77.
- [5] 陈印平, 夏江宝, 刘俊华. 不同农田防护林下盐碱地土壤水分特征曲线差异对比[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 18-24.
Chen Y P, Xia J B, Liu J H. Comparison of soil water characteristic curves of saline-alkali land under different farmland shelterbelts[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(5): 18-24.

- [6] 来剑斌,王全九.土壤水分特征曲线模型比较分析[J].水土保持学报,2003,17(1):137-140.
Lai J B, Wang Q J. Comparison of soil water retention curve model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,17(1):137-140.
- [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):209-212,216.
Lv 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):209-212,216.
- [8] 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.
Wang H L, Tang X Y, Xian Q S, et al. Comparison of laboratory methods for determining water retention curves in purple soil[J]. Advances in Water Science, 2016,27(2):240-248.
- [9] Cresswell H P, Green T W, Mckenzie N J. The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008,72:41-49.
- [10] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media[J]. International Series of Numerical Mathematics, 1964,114:37-50.
- [11] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post-irrigation movement of soil water: 1. redistribution[J]. Water Resources Research, 1970,6(3):851-861.
- [12] 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.
- [13] Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties [J]. Water Resources Research, 1996,32(9):2697-2703.
- [14] Tian Z C, Gao W D, Ren T S, et al. Approaches for estimating soil water retention curves at various bulk densities with the extended van genuchten model[J]. Water Resources Research, 2018,54(8):719-731.
- [15] Seyedeh Z M, Ebrahim P, Fariborz A, et al. Estimation of soil water retention curve using fractal dimension[J]. Environmental Management, 2018,22(2): 173-178.
- [16] 兰志龙, Muhammad N K, Tanveer A S,等.25年长期定位不同施肥措施对关中壤土水力学性质的影响[J].农业工程学报,2018,34(24):100-106.
Lan Z L, Muhammad N K, Tanveer A S, et al. Effects of 25-yr located different fertilization measures on soil hydraulic properties of loess soil in Guanzhong area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(24):100-106.
- [17] Lu S G, Yu X L, Zong Y T. Nano-microscale porosity and pore size distribution in aggregates of paddy soil as affected by long-term mineral and organic fertilization under rice-wheat cropping system[J]. Soil & Tillage Research, 2019(186):191-199.
- [18] 丁新原,周智彬,雷加强,等.塔里木沙漠公路防护林土壤水分特征曲线模型分析与比较[J].干旱区地理, 2015,38(5):985-993.
Ding X Y, Zhou Z B, Lei J Q, et al. Analysis and comparison of models for soil water characteristic curves of Tarim Desert Highway Shelterbelt[J]. Arid Land Geography, 2015,38(5):985-993.
- [19] 王子龙,常广义,姜秋香,等.黑土区土壤水分特征曲线模拟及模型优选[J].东北农业大学学报,2018,49(9): 36-43.
Wang Z L, Chang G Y, Jiang Q X, et al. Simulation and models optimization of soil water characteristic curve in black soil region[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018,49(9):36-43,60.
- [20] 张强,孙向阳,黄利江,等.毛乌素沙地土壤水分特征曲线和入渗性能的研究[J].林业科学研究,2004(S1):9-14.
Zhang Q, Sun X Y, Huang L J, et al. Studies on soil water characteristic curves and infiltration capability of maowusu sandy soil[J]. Forest Research, 2004(S1):9-14.
- [21] 郑博文,胡顺军,周智彬,等.古尔班通古特沙漠南缘风沙土土壤水分特征与毛管水最大上升高度[J].干旱区地理,2020,43(4):1059-1066.
Zheng B W, Hu S J, Zhou Z B, et al. maximum height of capillary rising water and characteristic of soil moisture in the southern edge of Gurbantunggut Desert[J]. Arid Land Geography, 2020,43(4):1059-1066.
- [22] 石浩楠,陈植华,胡成,等.江汉平原北部黏土层土壤水分特征曲线的测定与模拟[J].安全与环境工程,2019, 26(5):25-32.
Shi H N, Chen Z H, Hu C, et al. Measurement and simulation of soil water characteristic curve of clay layer in the northern jiangnan plain[J]. Safety and Environment Engineering, 2019,26(5):25-32.
- [23] 廖海.基于孔隙结构的盐渍化土壤水分特征曲线模型 [D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
Liao H. Characteristic curve model of salinized soil based on pore structure [D]. Yang Ling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [24] 鲁建荣,张奇,李云良,等.鄱阳湖典型洲滩湿地植物根

- 系对水分垂向通量的影响[J].中国环境科学,2020,40(5):2180-2189.
- Lu J R, Zhang Q, Li Y L, et al. Impact of typical plant roots on vertical soil water movement in Poyang Lake Wetland: a numerical study[J]. China Environmental Science, 2020,40(5):2180-2189.
- [25] 夏天,田军仓.基于黏粒量的土壤水分特征曲线预测模型[J].灌溉排水学报,2021,40(3):9-14.
- Xia T, Tian J C. Using clay content to estimate soil water characteristic curve[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021,40(3):9-14.
- [26] 罗丽澎,王辉,朱晋斌,等.温度对南方红壤和水稻土水分特征曲线影响差异性分析[J].水土保持学报,2019,33(5):72-78,84.
- Luo L P, Wang H, Zhu J B, et al. Difference analysis of temperature effect on water characteristic curves red soil and paddy soil in south china[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(5):72-78,84.
- [27] 张强,谢君毅,牛芸,等.不同施肥处理对杉木林土壤水源涵养功能的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(2):112-122.
- Zhang Q, Xie J Y, Niu Y, et al. Effects of different fertilization treatments on soil's water conservation function of Chinese fir plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021,41(2):112-122.
- [28] 黎丽娜.长期不同施肥及施肥措施改变后红壤性水稻土孔隙变化特征[D].长沙:湖南农业大学,2020.
- Li L N. Pore variation of red paddy soil after long-term different fertilization and revised fertilization measures [D]. Hunan Agricultural University, 2020.
- [29] Cameron K C, Buchan G D. Porosity and pore size distribution [M]. Florida: Chemical Rubber Company, 2006:1350-1353..
- [30] 雷志栋,杨诗华,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:18-24.
- Lei Z D, Yang S H, Xie S H. Soil hydrodynamics[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 1988:18-24.
- [31] 冯天骄,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性[J].环境科学,2017,38(9):3860-3870.
- Feng T J, Wei W, Chen L D, et al. Comparison of soil hydraulic characteristics under the conditions of long-term land preparation and natural slope in longtan catchment of the loess hilly region[J]. Environmental Science, 2017,38(9):3860-3870.
- [32] 牛晓彤,刘目兴,易军,等.三峡山地土壤水分特征曲线及模型拟合[J].灌溉排水学报,2017,36(9):75-80.
- Niu X T, Liu M X, Yi J, et al. Water release curves and their fitting for soils in the hills of the three gorges reservoir[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(9):75-80.
- [33] 秦文静,樊贵盛.原状黄土土壤水分特征曲线预测模型优选[J].节水灌溉,2020(3):17-20.
- Qin W J, Fan G S. Comparison and selection of prediction models for soil water characteristic curves of undisturbed loess[J]. Water Saving Irrigation, 2020 (3):17-20.
- [34] 王愿斌,王佳铭,樊媛媛,等.土壤水分特征曲线模型模拟性能评价[J].冰川冻土,2019,41(6):1448-1455.
- Wang Y B, Wang J M, Fan Y Y, et al. Performance evaluation of 12 models describing the soil water retention characteristic[J]. Journal of Claciology and Geocryology, 2019,41(6):1448-1455.
- [35] 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等.土壤水分特征曲线单一参数模型的建立及应用[J].农业工程学报,2008,24(12):12-15.
- Song X Y, Li Y J, Li H Y, et al. Establishment and application of one-parameter model of soil water characteristic curve[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(12):12-15.
- [36] Ning S R, Chen C, Zhou B B, et al. Evaluation of normalized root length density distribution models [J]. Field Crops Research, 2019,242:107604.