

张海生, 翁白莎, 严登华, 等. 高海拔季节冻土区完全融化期土壤水分特征曲线适用性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 247-257, 360. ZHANG H S, WENG B S, YAN D H, et al. Applicability of soil water characteristic curves during complete melt period in high altitude seasonal frozen soil area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 247-257, 360. (in Chinese)

高海拔季节冻土区完全融化期 土壤水分特征曲线适用性

张海生^{1,2}, 翁白莎^{2,3}, 严登华^{2,3}, 栾清华¹, 李文文², 邓彬²

(1. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

3. 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 呼和浩特 010020)

摘要:以怒江源区那曲流域为例, 基于 4 个试验场完全融化期(6—9 月)的土壤体积含水量($0.15\sim 0.51\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)和土壤基质势数据($0\sim 200\text{ kPa}$)实测数据, 选择 Van Genuchten(VG)、Brooks-Corey(BC)和 Campbell 3 个模型进行拟合, 以均方根误差 E_{RMS} 和决定系数 R^2 为评价指标, 分析 3 个模型对高海拔季节冻土区不同土层和不同土壤质地的适用性。结果表明:从整体上看, VG 模型(平均 R^2 为 0.992, 平均 E_{RMS} 为 $0.006\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)的拟合效果优于 BC 模型(平均 R^2 为 0.972, 平均 E_{RMS} 为 $0.019\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)和 Campbell 模型(平均 R^2 为 0.984, 平均 E_{RMS} 为 $0.014\text{ cm}^3/\text{cm}^3$);但是在不同土层和不同土壤质地情况下模型的适用性有所区别, VG 模型更适用于壤土和壤质砂土(平均 R^2 为 0.987, 平均 E_{RMS} 为 $0.008\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)以及土壤深层($10\sim 35\text{ cm}$ 土层, 平均 R^2 为 0.990, 平均 E_{RMS} 为 $0.007\text{ cm}^3/\text{cm}^3$), Campbell 模型更适用于砂质壤土(平均 R^2 为 0.985, 平均 E_{RMS} 为 $0.009\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)以及土壤表层(5 cm 土层, 平均 R^2 为 0.993, 平均 E_{RMS} 为 $0.006\text{ cm}^3/\text{cm}^3$), BC 模型在不同条件下都不是最优模型;参数 θ , 取值大小会显著影响土壤水分特征曲线的形状。本研究可为深入研究高海拔季节冻土区的土壤水分运动特性以及中华水塔区的水源涵养作用提供支持。

关键词:土壤水分特征曲线;模型优选;土壤质地;Van Genuchten 模型;那曲流域

中图分类号: S152.7; P642.14 文献标志码: A DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2024.0026

土壤水分特征曲线是土壤含水量与土壤水吸力的关系曲线, 能反映土壤水分能量与数量的关系。确定土壤水分特征曲线的方法分为两大类:一类是直接测定法, 包括实验室测定^[1]和田间测定^[2];另一类是间接推求法, 包括土壤转换函数法^[3-4]、分形方法^[5-7]、土壤形态学方法^[8]、数值反演法^[9]和经验公式法。直接测定法有着耗时、耗力、花费高等特点^[10], 适用于点位或小尺度区域的土壤水分特征曲线的研究, 当区域较大或土壤的空间异质性较强时, 应选用间接推求法。相较于间接推求法中的其他方法, 经验公式法不需要难以获得的土壤水力性质的确切函数关系, 在研究土壤中水分和溶质的运移时可直接代入非饱和土壤水分的流动控制方程中。

土壤水分特征曲线常见的经验公式主要分为两类:一类是传统公式, 包括 Van Genuchten(VG)模型^[11]、Brooks-Corey(BC)模型^[12]和 Campbell 模型^[13]等。另一类则是通过传统公式发展演变得到的, 如 Webb 模型^[14]、Peters 模型^[15]和 Hutson-Cass 模型^[16]等。

不同土壤的土壤水分特征曲线可能会有显著差异, 由于每个模型特定曲线形状特征的限制, 其适用性各有不同。一个好的土壤水分特征曲线模型应该具有简单清晰的参数, 并且易于使用, 能尽可能地同时满足准确度、通用性和简洁性这 3 个特点^[17]。而相对于发展而来的模型, VG 模型^[18-21]、BC 模型^[22-24]和 Campbell 模型^[16]物理意义明确, 参

收稿日期: 2023-09-12 修回日期: 2024-02-07 网络出版时间: 2024-03-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240315.1702.010>

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(52022110; 52209049); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0207-02)

作者简介: 张海生(1999—), 男, 安徽合肥人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zhanghais06@163.com

通信作者: 翁白莎(1986—), 女, 福建泉州人, 正高级工程师, 主要从事极端水文及生态环境效应研究。E-mail: wengbs@iwahr.com

数相对较少。VG 模型几乎适用于所有土壤质地,且能够与 Mualem 模型结合得到土壤导水率函数。BC 模型根据孔隙介质的水力特性而提出,形式较简单,方便确定土壤水运动参数,适用于质地较粗的土壤。Campbell 模型形式简单,便于由土壤水分特征曲线函数推导出不饱和土壤导水率函数。

青藏高原高海拔季节冻土区具有独特而又脆弱的高寒生态系统,对任何环境或人为的扰动有更加显著的响应^[25]。近些年受到全球气候变化的影响,青藏高原生态系统的结构与功能发生了明显的变化^[26]。高海拔季节冻土区完全融化期对应植物生长期,冻土融化后土壤水分增加,土壤中养分得到释放,促进植物生长。研究融化期土壤水分特征可为深入识别青藏高原生态变化特征及其原因提供支持。位于青藏高原腹地的怒江源区那曲流域,由于其独特的气候、地理、海拔条件,土壤长期受到低温、高寒、冻土以及冻融循环过程的影响,形成独特的寒冻土壤^[27],土壤水分运动具有典型高原高海拔特征。由于受到气候和环境因素的影响,数据获取困难,针对青藏高原土壤水分特征曲线的研究较少。文晶等^[28]用 Gardner 模型拟合长江源北麓河地区退化草甸的土壤水分特征曲线,发现北麓河地区 20~30 cm 土层持水能力与供水性能都好,适合植被生长;Zeng 等^[29]同样使用 Gardner 模型拟合土壤水分特征曲线,发现随着高寒草甸退化程度的增加,植被覆盖和根系活动减少,土壤孔隙度中大孔隙的大量减少是导致土壤饱和和导水率显著降低的主要影响因素。

针对上述问题,本文以典型高海拔季节冻土区——怒江源区那曲流域为研究对象,选择 VG 模型、BC 模型、Campbell 模型对土壤水分特征曲线进行拟合,进而对比分析模型在高海拔季节冻土区的适用情况。主要包括两方面工作:评估上述模型在高海拔季节冻土区的适用性;分析不同土层不同土壤质地模型的误差来源。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

那曲流域位于青藏高原中部(30°54'N~32°43'N, 91°12'E~92°54'E),属于怒江源区,流域控制面积约为 1.68 万 km²(图 1),是典型的高海拔季节冻土区。流域平均海拔 4 500 m,高原丘陵为主要地形特征,地势呈缓坡状,西北部绝对海拔高而东南海拔较低,

多山但山势不陡,坡度较为平缓。冻土类型为季节冻土和多年冻土,其中,季节冻土面积约 1.52 万 km²,多年冻土面积约 0.16 万 km²。研究区属于亚寒带半湿润季风气候,多大风、冰雹,干燥寒冷,空气稀薄,基本没有无霜期。多年的平均气温约为-2℃,多年平均降雨量为 473.9 mm,雨季 5—9 月份降雨量占全年的 80% 左右。研究区土壤以草毡土、草甸土和沼泽土为主,其中草毡土分布最广,约占流域总面积的 75.29%;主要植被类型是高寒嵩草、高山稀疏植被、高寒矮嵩草、高山垫状植被。

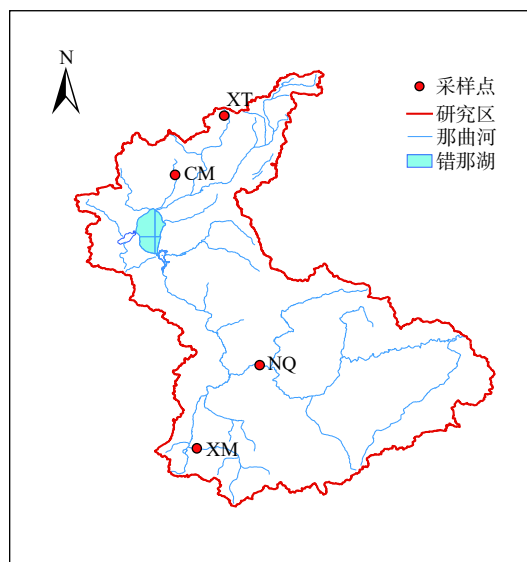


图 1 研究区和实验场情况

Fig. 1 Situation of the study area and experimental field

1.2 实验布设与数据采集

根据实际情况,综合考虑地形、环境、人类活动等条件后于 2018 年 8 月在研究区选取 4 个典型实验场,实验场分布情况见图 1,实验场基本情况见表 1。在每个实验场布设草甸植被生境条件较为一致的 4 个实验样方。于样方中挖出近 40 cm 的深坑,在 5、10、20、35 cm 土层处布设土壤湿度及水势传感器得到土壤含水量和土壤水势指标(土壤湿度传感器型号为 5TM,测量精度为 0.001 m³/m³,土壤水势传感器型号为 MPS-6,测量精度为 0.1 kPa),传感器每小时记录数据 1 次。用原始土壤将土坑埋住,保证土壤可以尽快恢复到原生状态。采用环刀法采集土样,每个实验样方在深为 35 cm 分 4 层重复取样 3 次,分别为 [0, 5]、(5, 10]、(15, 20]、(30, 35] cm,共计 64 组土样。得到 4 项土壤指标:容重、孔隙率、机械组成、土壤饱和和体积含水量。土壤容重依据 NY/T 1121.4—2006 土壤容重的测定标准执行,由烘干土样质量与环刀容积计算得到;土壤孔隙率依

据土壤密度-容重比值法测得,由土粒密度和容重计算得到;土壤机械组成依据筛分法测得。根据表1可知,CM站砂粒含量较低,土壤质地按美国农业部土壤质地划分方法为壤土;XT站砂粒含量较高,土

壤质地为壤质砂土;NQ站和XM站为砂质壤土。土壤残留体积含水量以土壤湿度传感器测得数据中正常合理的最小值为初始条件,作为模型参数在迭代过程中进行调参优化。

表1 实验场基本情况

Tab. 1 Basic information about the experimental site

采样点	东经/(°)	北纬/(°)	海拔/m	容重/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%	机械组成/%			土壤质地
						黏粒	粉粒	砂粒	
NQ	91.98	31.42	4 460	1.54	42.8	13.0	25.1	61.9	砂质壤土
XM	91.69	31.06	4 730	1.56	42.1	19.6	21.8	58.6	砂质壤土
CM	91.59	32.28	4 760	1.43	47.0	18.7	40.3	41.0	壤土
XT	91.82	32.55	5 050	1.50	44.5	7.6	8.9	83.5	壤质砂土

由于布设土壤传感器会破坏原始环境^[30],而青藏高原生态环境又较为敏感^[31-32],因此给予研究区植被3年修复时间,本文土壤水分特征曲线拟合数据选取自2021年6月至2021年9月传感器采集数据。

实测的土壤基质势和土壤体积含水量分布见图2。土壤基质势在0~200 kPa范围内,其中,0~30 kPa的土壤基质势占46.1%;测得的土壤体积含水量范围为0.15~0.51 cm³/cm³,其中0.2~0.3 cm³/cm³占56.2%。

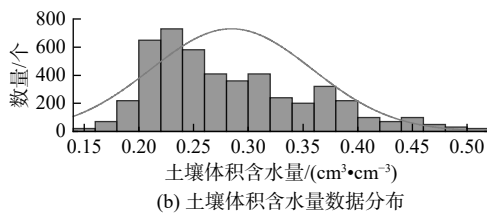
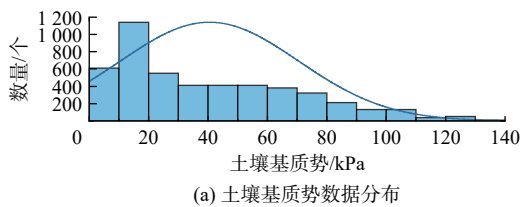


图2 实测数据分布

Fig. 2 Distribution of measured data

1.3 模型与评价指标

土壤水分特征曲线模型是研究土壤水运动机理的重要工具。众多学者借助此工具对不同情况的土壤水运动进行研究。常见的土壤水分特征曲线模型包括以下3种。

VG模型^[11]。此模型在1980年被提出,是为了与Mualem模型结合而提出的一种连续并具有连续斜率的土壤保水曲线方程,表达式为

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\Phi)^n]^{1-\frac{1}{n}}} \quad (1)$$

BC模型^[12]。此模型在1966年被提出,用于介质中形成流动通道的最大孔径有关的“气泡压力”,和与评估特定多孔介质中流动通道尺寸分布的分布指数这2个参数来描述饱和度、空气和水之间压差的关系,表达式为

$$\theta = \theta_s, \quad 0 \leq \Phi \leq \Phi_e$$

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(\Phi_e/\Phi)^{-\lambda}}, \quad \Phi > \Phi_e \quad (2)$$

Campbell模型^[13]。此模型在1974年被提出,是一种直接求不饱和导水函数的方法,可直接用于描述土壤中不饱和水的方程中,表达式为

$$\theta = \theta_s (\Phi_e/\Phi)^{\lambda} \quad (3)$$

式(1)至(3)中: θ 为土壤体积含水量,%; θ_r 为土壤残留体积含水量,%; θ_s 为土壤饱和体积含水量,%; Φ 为土壤基质势,kPa; Φ_e 是空气进入时基质势,kPa; α 为尺度参数; λ 为尺寸分布函数; n 为土壤水分特征形状参数。

选用VG模型、BC模型和Campbell模型对不同土壤质地条件下不同深度的土壤水分特征曲线进行拟合,同一情况下重复3次来减小实验的偶然性误差,因此每个模型需拟合64条土壤水分特征曲线。

采用决定系数(R^2)和均方根误差(E_{RMS})来评估土壤水分特征曲线模型的适用性^[17],公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (y_i - x_i)^2}{m}} \quad (5)$$

式中: y_i 和 x_i 分别为第 i 个数据的模拟值和实测值; \bar{y} 为模拟值的平均值; m 为实测数据总数。

2 结果与分析

2.1 模型整体适用性评价

从各模型的拟合评价指标结果(表 2)可见: 在

砂质壤土区, Campbell 模型的 E_{RMS} 分别比 VG 和 BC 模型低 2.2% 和 51.6%, Campbell 模型的 R^2 均高于 VG 和 BC 模型 (平均分别提高 0.2% 和 5.4%); 在壤土区, VG 模型的 E_{RMS} 分别比 BC 低 41.0%, 比 Campbell 模型高 1.0%, VG 模型的 R^2 均高于 BC 和 Campbell 模型 (平均分别提高 3.4% 和 0.2%); 在壤质砂土区, VG 模型的 E_{RMS} 分别比 BC 和 Campbell 模型低 72.3% 和 40.6%。VG 模型的 R^2 均高于 BC 和 Campbell 模型 (平均分别提高 7.1% 和 0.8%)。

表 2 各模型评价指标结果

Tab. 2 Results of evaluation indicators for each model

土壤质地	采样点	深度	Van Genuchten		Brooks Corey		Campbell	
			$R^2/10^{-4}$	$E_{RMS}/(10^{-4} \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$R^2/10^{-4}$	$E_{RMS}/(10^{-4} \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$R^2/10^{-4}$	$E_{RMS}/(10^{-4} \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$
砂质壤土	NQ	5 cm	9 931	81	9 501	218	9 875	109
		10 cm	9 808	118	9 352	216	9 815	116
		20 cm	9 726	137	9 322	215	9 806	115
		35 cm	9 760	124	9 112	239	9 793	116
		NQ-average	9 806	115	9 322	222	9 822	114
	XM	5 cm	9 912	57	9 351	154	9 932	50
		10 cm	9 930	52	9 272	167	9 786	91
		20 cm	9 838	72	9 518	124	9 917	52
		35 cm	9 751	86	9 321	143	9 877	61
		XM-average	9 858	67	9 366	147	9 878	64
NQ&XM-average			9 832	91	9 344	184	9 850	89
壤土	CM	5 cm	9 886	92	9 486	195	9 944	64
		10 cm	9 778	136	9 210	255	9 852	110
		20 cm	9 762	113	9 752	115	9 637	139
		35 cm	9 866	80	9 546	148	9 782	103
		CM-average	9 823	105	9 499	178	9 804	104
壤质砂土	XT	5 cm	9 802	85	9 228	168	9 965	36
		10 cm	9 958	52	9 276	216	9 826	106
		20 cm	9 992	27	9 088	284	9 701	163
		35 cm	9 906	63	9 446	154	9 862	77
		XT-average	9 915	57	9 260	206	9 839	96

在整个那曲流域, VG 模型的 E_{RMS} 分别比 BC 和 Campbell 模型低 66.6% 和 56.9%。如表 2 所示, VG 模型的 R^2 均高于 BC 和 Campbell 模型 (平均分别提高 2.0% 和 0.9%)。一般来说,就 R^2 、 E_{RMS} 而言, VG 模型被认为是足够准确的 ($R^2 > 0.97$, $E_{RMS} \leq 0.011 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。VG 模型在那曲流域模拟土壤水分特征曲线的性能要优于另外两个模型。

2.2 不同土层和不同土壤质地下模型适用性评价

结果表明, 尽管 BC 模型是根据孔隙介质的水力特性提出的土壤水分特征曲线模型, 在大量土壤水分运动的研究中表现出了优秀的性能^[33-33], 但在高海拔季节冻土区的土壤水分特征曲线研究中, 为了描述连续的土壤水分特征曲线所建立的 VG 模型

和便于推导不饱和导水率的 Campbell 模型具有更强的适用性。然而,模型在模拟过程中仍然存在一定的误差。为分析模型可能的误差来源和影响因

素,分别绘制实测数据与模型模拟结果对比图(图 3)、3 个模型在不同土层模拟性能图(图 4)及 VG 模型和 Campbell 模型在不同土壤质地模拟性能图(图 5)。

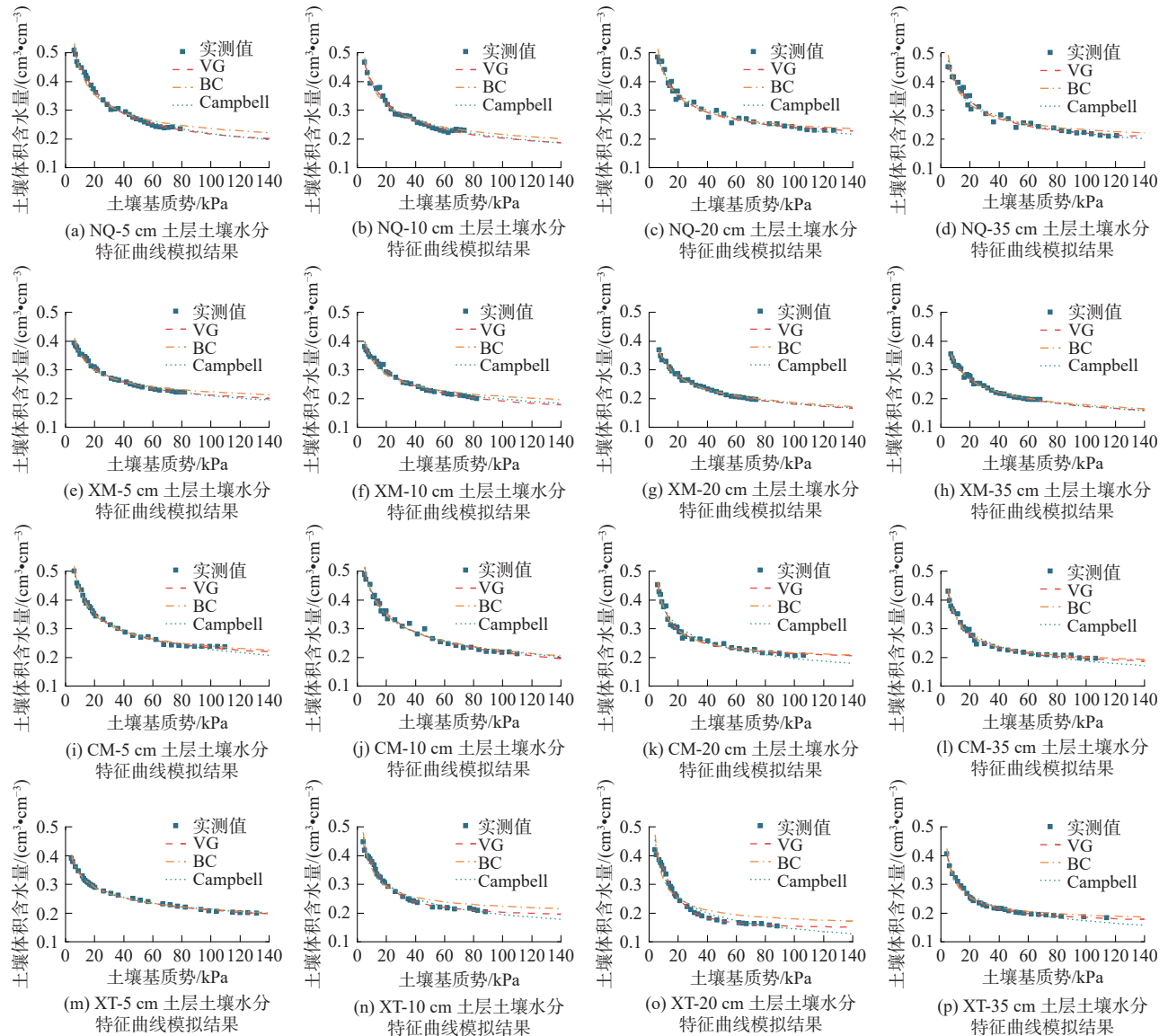


图 3 实测数据与模型模拟结果对比

Fig. 3 Comparison between measured data and model simulation results

从图 3 可以看出,土壤基质势的中段(10~50 kPa) 3 个模型都表现出误差波动较大的情况。这是因为土壤水分特征曲线受路径的影响,分为吸湿过程曲线和脱湿过程曲线,两者分离,表现出水分滞后现象^[34]。本文所使用的土壤基质势与土壤体积含水量数据皆为野外实际连续观测采集所得的点数据,数据分布在吸湿过程曲线和脱湿过程曲线之间。本文没有对土壤水分特征曲线由干到湿还是由湿到干的路径情况进行分析,这导致在土壤基质势中段的实测值本身波动较大。

VG 模型在那曲流域表现出优于 BC 模型和

Campbell 模型的拟合效果,见表 2、图 4。VG 模型不同土壤质地,不同深度条件下,在整个土壤基质势段的误差不超过 $\pm 2.5\%$,这与模型适用性评价的结果一致。这可能与土壤的机械组成有关,那曲流域土壤质地较粗,砂粒平均含量高达 64%。VG 模型和 BC 模型有 3 个参数,能更好地反映砂质土壤,这与 Amorim 等^[3]的研究保持一致。又因为 BC 模型受形状的约束,所以也无法很好地反映那曲流域的土壤水分特征曲线。VG 模型既能反映砂质土壤,又不受形状的约束,还能很好地避免实测波动带来的影响,在那曲流域的拟合效果最好。

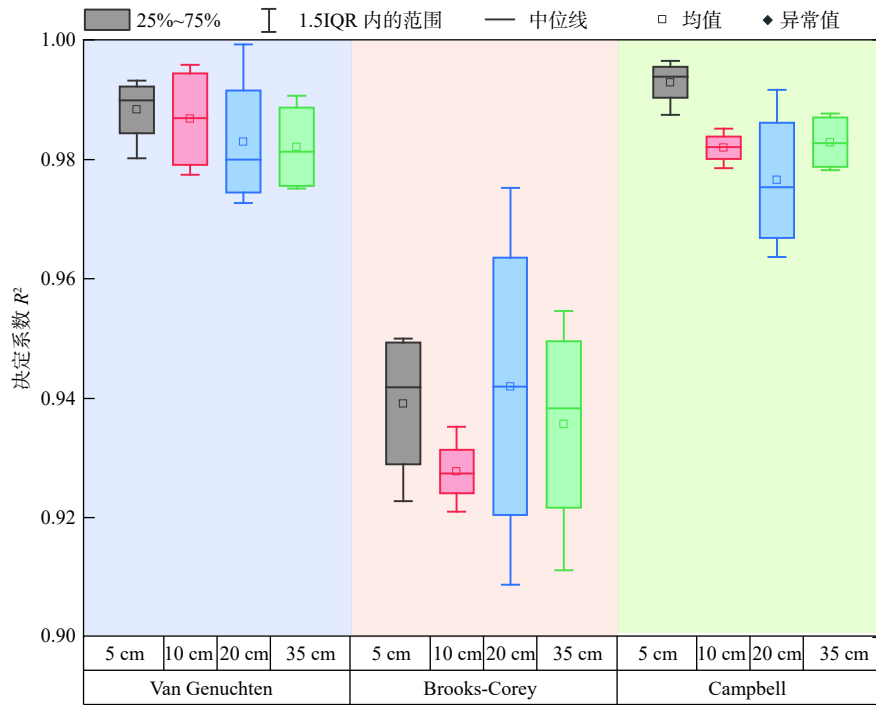


图 4 3 个模型在不同土层模拟性能

Fig. 4 Simulated performance of the three models in different soil layers

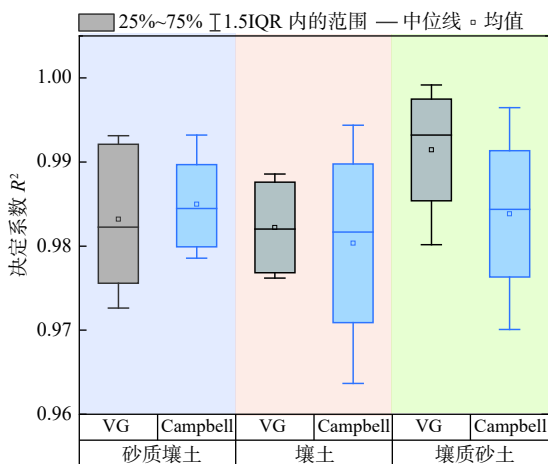


图 5 VG 模型和 Campbell 模型在不同土壤质地模拟性能

Fig. 5 Simulation performance of VG model and Campbell model in different soil textures

Campbell 模型在砂质壤土区以及土壤表层有较强的拟合能力(图 4、图 5)。这是因为相较于 VG 模型, Campbell 模型少了参数 θ_r , 对土壤基质势中段实测值本身波动的处理能力相对较弱, 但同时也规避了 θ_r 对曲线的影响^[35]。在砂质壤土区, 土壤容重和土壤孔隙的取值跨度大, 土壤结构复杂多样, 导致 θ_r 取值波动变大^[36], VG 模型拟合性能降低, 而 Campbell 模型不受 θ_r 的影响, 拟合效果较好。在土壤表层拟合能力较好, 是因为在表层土壤受蒸发、草甸根系吸水以及向下层土壤排水等的影响, 土壤

含水量和土壤基质势保持在干燥路径附近, 实测值本身波动较弱, 因此 Campbell 模型在土壤表层的拟合效果较好。

BC 模型在土壤基质势的中段常常低于实际值, 而在高土壤基质势的情况下又会高于实际值(图 3)。这与 Pan 等^[37] 的结论不符, 因为土壤水分特征曲线形状受土壤进气压力的控制(土壤进气压力是饱和土壤开始排水和空气将水置换到空隙空间的阈值)^[38]。模型的形状取决于模型的设定, VG 模型和 Campbell 模型都是光滑连续的曲线, 而 BC 模型是一个分段函数, 形状由进气时土壤基质势值控制^[39], 在进气时土壤吸力值附近常常高估了土壤含水量。Pan 等^[37] 的土壤水分特征曲线是在实验室利用压力板测得的土壤基质势, 吸力范围从 1~1 500 kPa。相比之下, 本文的土壤基质势是由土壤水势传感器在野外长时间监测得到的土壤水势实际变化, 土壤基质势范围在 0~200 kPa, 低吸力端在进气时土壤基质势值附近。模型在拟合过程中为了平衡这部分误差, 会使曲线向下平移, 弯曲程度加大, 导致中吸力段低于实测而高吸力段高于实测的情况出现。

2.3 参数对模型拟合效果的影响

为了解模型拟合误差来源, 进一步分析模型参数变化对土壤水分特征曲线的影响(图 6), 图中所有参数取值的绝对值以尾数为 1 最小, 2 次之, 3 最大。本文对不同土壤质地条件下的不同深度的土

壤水分特征曲线进行拟合,同一情况下重复3次获得4组数据,即同一情况下每个参数得到4个不同的值。以VG模型参数 n 为例,某一情况下存在4个不同的 n 值,从小到大排序分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 。其中, n_1 、 n_4 作为参数取值的变化范围,分别用 n_2 、 n_3 对应数据组研究参数取值对模拟性能的影响。选择 n_2 对应数据组,以参数变化范围为横坐标,以决定系数 R^2 来表示模型模拟效果作为纵坐标,其中,横坐标-100代表参数取最小值即 n_1 ,100代表参数取最大值即 n_4 ,0代表模型模拟结果最优时参数的取值即 n_2 。在 n_1 和 n_2 之间平均划分四等分,其1/4、

1/2、3/4节点从小到大分别对应横坐标中的-75、-50、-25。同理在 n_2 和 n_4 之间划分四等分,节点从小到大分别对应横坐标中的20、50、75。由此可绘制一条参数 n 取值对模拟性能影响曲线,见图7(c)。图6中VG模型模拟性能随参数 n 变化曲线则是由4个实验场、4个不同土层、每个土层2组数据,共32组数据、288个点数据绘制而成。根据图7,模型性能随参数变化曲线,将参数取值范围内绝对系数变化 ≥ 0.3 的确定为敏感参数,变化小于0.3大于0.1的确定为较为敏感参数,变化 ≤ 0.1 的确定为稳定参数。结合图6和图7得出以下结果。

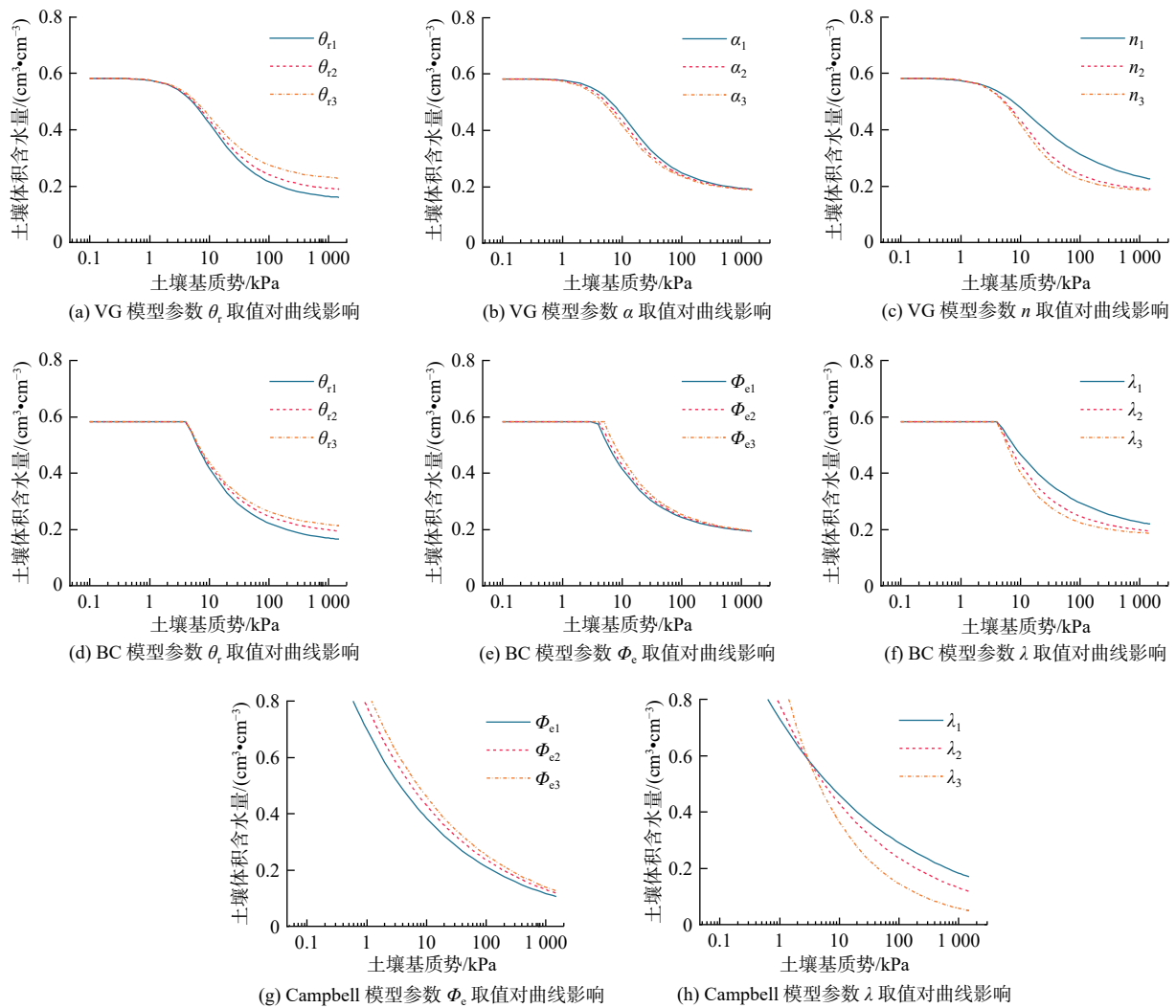


图6 模型参数变化对土壤水分特征曲线形状影响

Fig. 6 The effect of model parameter changes on the shape of the soil water characteristic curve

VG模型的参数 θ_r 为敏感参数,对土壤水分特征曲线的形状有显著影响。当参数 θ_r 的值较小时,曲线呈现出较为陡峭的趋势;而当参数 θ_r 的值较大时,曲线变得平缓。这表明参数 θ_r 控制了水分传导速率的变化。VG模型的参数 α 和参数 n 为稳定参

数,对土壤水分特征曲线的形状影响较小。参数 α 对水分特征曲线的中段产生了影响。较小的参数 α 值使曲线向右上方平移,而较大的参数 α 值则使曲线向左下方平移。参数 n 对水分特征曲线的曲率起到了关键作用。较小的参数 n 值导致曲线呈现平滑

凹状,而较大的参数 λ 值使曲线凹状加剧。

BC 模型的参数 θ_r 也为敏感参数,对土壤水分特征曲线的形状有显著影响,而参数 Φ_e 和参数 λ 为较为敏感参数,对土壤水分特征曲线的形状有较大影响。BC 模型的参数 θ_r 、参数 Φ_e 和参数 λ 对土壤水分特征曲线的影响对应 VG 模型的参数 θ_r 、参数

α 和参数 n 。此外,由于 BC 模型是个分段函数,BC 模型的参数 Φ_e 在对土壤水分特征曲线的中段产生影响的同时,会影响土壤水分特征曲线的分段点从哪开始。较小的参数 Φ_e 值使分段点向左平移,而较大的参数 Φ_e 值则使分段点向右平移。

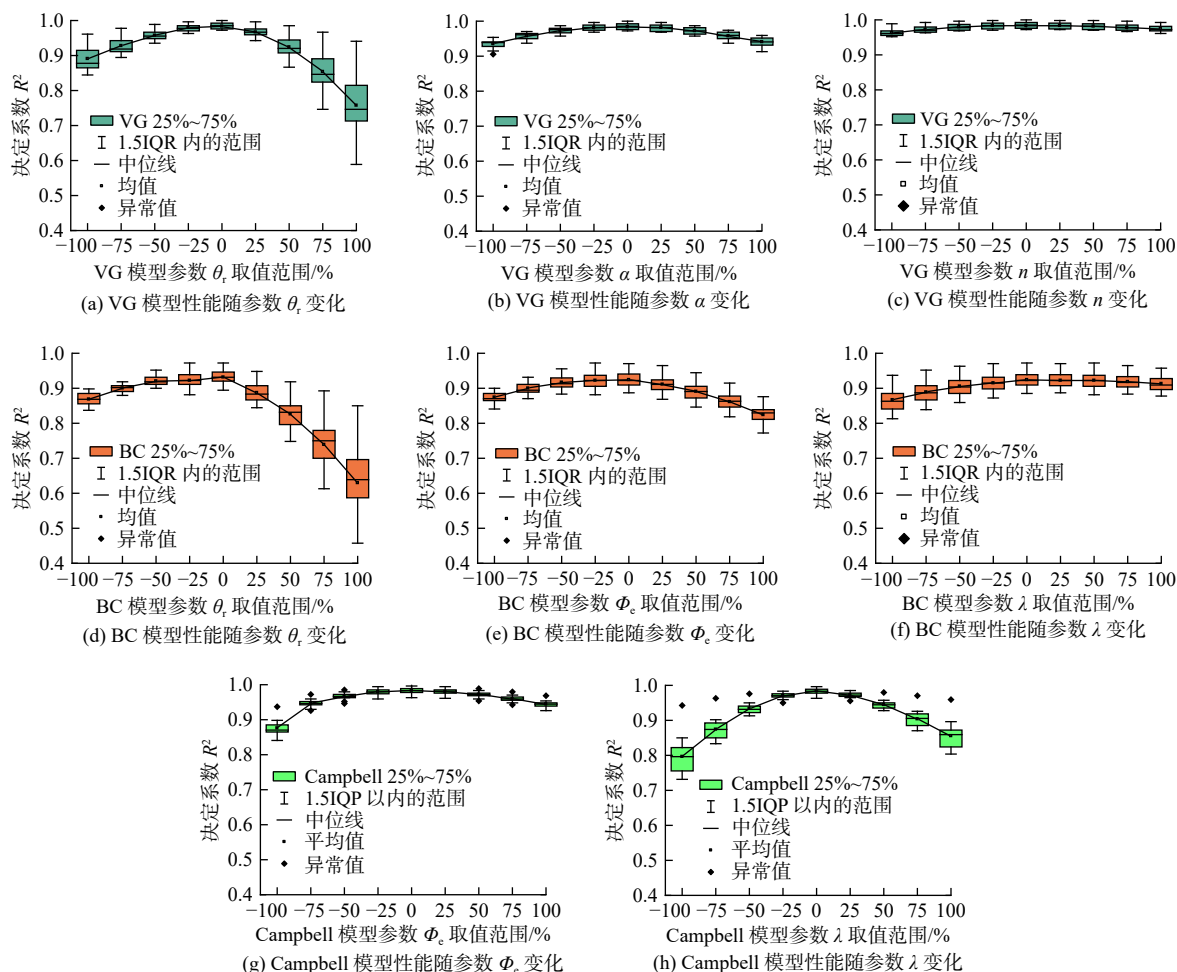


图 7 模型性能随参数变化曲线

Fig. 7 Variation curve of model performance with parameters

Campbell 模型的参数 Φ_e 和参数 λ 为较为敏感参数,对土壤水分特征曲线的形状有较大影响。Campbell 模型的参数 Φ_e 对水分特征曲线的整体位置产生了显著影响。较小的参数 Φ_e 值使曲线向左下方平移,而较大的参数 Φ_e 值则使曲线向右上方平移。Campbell 模型的参数 λ 对水分特征曲线的斜率有较大影响。较小的参数 λ 值导致曲线较为平缓,而较大的参数 λ 值则使曲线变陡。

3 结论

本研究用 VG、BC 和 Campbell 这 3 个模型拟合青藏高原那曲流域不同土壤质地下的土壤水分

特征曲线,并分析了这些模型的适用性、模型拟合误差的来源,得到以下结论:

从整体上看,VG 模型(平均 R^2 为 0.992,平均 E_{RMS} 为 $0.006 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)在拟合高海拔季节冻土区的土壤水分特征曲线方面有较好的拟合效果,而 BC 模型(平均 R^2 为 0.972,平均 E_{RMS} 为 $0.019 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)和 Campbell 模型(平均 R^2 为 0.984,平均 E_{RMS} 为 $0.014 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)的拟合效果整体较差。

不同模型对不同土层、不同土质的适用性不同。例如:VG 模型更适用于土壤深层即 10、20 和 35 cm 土层处,而 Campbell 模型更适用于土壤表层即 5 cm 土层处;VG 模型在壤土和壤质砂土条件下

适用性更好,而 Campbell 模型在壤质砂土条件下有较强的适用性。至于 BC 模型,则始终不是最优模型。

VG 模型的参数 θ_r 是影响模型模拟性能的关键参数,其取值大小显著影响着土壤水分特征曲线的形状的变化。

虽然 VG 模型在研究那曲流域土壤水分特征曲线上表现出了较好的性能,但仍需要进一步的工作来证明它对其他高寒地区的适用性。目前在青藏高原土壤水分特征曲线的研究上仍然较少,参考资料稀缺,实地实验存在较多的困难,因此在数据采集上选择原位观测实验获取长序列的土壤体积含水量和土壤基质势数据,然而土壤水分特征曲线受到干湿路径的影响而存在一定误差。所以在后续研究中需对采集的数据进行路径分析,加以实验室进行验证试验,对模型进行改进和创新,提高模型的模拟精度,使其在青藏高原有更强的适用性。

参考文献:

- [1] 郑娟,赵丽娅,刘保健. 非饱和黄土的土水特征曲线试验研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 1138-1142. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdk.2015.06.025](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdk.2015.06.025).
- [2] YU S, XU Q, CHENG X, et al. In-situ determination of soil water retention curves in heterogeneous soil profiles with a novel dielectric tube sensor for measuring soil matric potential and water content[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126829. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.126829](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126829).
- [3] AMORIM R S S, ALBUQUERQUE J A, COUTO E G, et al. Water retention and availability in Brazilian Cerrado (neotropical savanna) soils under agricultural use: Pedotransfer functions and decision trees[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 224: 105485. DOI: [10.1016/j.still.2022.105485](https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105485).
- [4] 李奇,陈文娟,石文豪,等. 基于单一和集合土壤转换函数模型对土壤含水量的模拟性能分析[J]. *土壤*, 2023, 55(3): 658-670. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2023.03.024](https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2023.03.024).
- [5] CHEN K, LIANG F, WANG C. A fractal hydraulic model for water retention and hydraulic conductivity considering adsorption and capillarity[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126763. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.126763](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126763).
- [6] 孟敏强,王磊,蒋翔,等. 基于尺寸效应的粗粒土单颗粒破碎试验及数值模拟[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 2953-2962. DOI: [10.16285/j.rsm.2019.2000](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.2000).
- [7] CHENG H, WANG F, YANG G, et al. Prediction of relative permeability from capillary pressure based on the fractal capillary bundle model[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 239: 122093. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2023.122093](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122093).
- [8] 戴磊,王贵玲,何雨江. 基于分形理论研究土壤结构及其水分特征关系[J]. *地球科学*, 2021, 46(9): 3410-3420. DOI: [10.3799/dqkx.2020.345](https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.345).
- [9] LIU C, LI B, TONG F, et al. Determination of soil-water retention curve from a transient air-water two-phase outflow experiment[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79: 2109-2118. DOI: [10.1007/s10064-019-01662-4](https://doi.org/10.1007/s10064-019-01662-4).
- [10] 徐绍辉,刘建立. 土壤水力性质确定方法研究进展[J]. *水科学进展*, 2003(4): 394-401. DOI: [10.3321/j.issn:1001-6791.2003.04.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-6791.2003.04.020).
- [11] FANG Q, REN X, ZHANG B, et al. A flexible soil-water characteristic curve model considering physical constraints of parameters[J]. *Engineering Geology*, 2022, 305: 106717. DOI: [10.1016/j.enggeo.2022.106717](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106717).
- [12] 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(01): 105-116. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.003](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.003).
- [13] DIMITROV D D, LAFLEUR P M. Revisiting water retention curves for simple hydrological modelling of peat[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2021, 66(2): 252-267. DOI: [10.1080/02626667.2020.1853132](https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1853132).
- [14] YE Y, ZOU W, HAN Z, et al. Predicting the entire soil-water characteristic curve using measurements within low suction range[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(5): 1198-1214. DOI: [10.1007/s11629-018-5233-6](https://doi.org/10.1007/s11629-018-5233-6).
- [15] PETERS A. Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(10): 6765-6780. DOI: [10.1002/wrcr.20548](https://doi.org/10.1002/wrcr.20548).
- [16] ABKENAR F Z, RASOULZADEH A, ASGHARI A. Performance evaluation of different soil water retention functions for modeling of water flow under transient condition[J]. *Bragantia*, 2019, 78(1): 119-130. DOI: [10.1590/1678-4499.2017406](https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017406).

- [17] MATLAN S J, TAHA M R, MUKHLISIN M. Assessment of model consistency for determination of soil-water characteristic curves[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2016, 41(4): 1233-1240. DOI: [10.1007/s13369-015-1888-2](https://doi.org/10.1007/s13369-015-1888-2).
- [18] GARG A, XING X, BORDOLOI S. Water retention models for soils mixed with waste residues: application of the modified Van Genuchten and Brooks-Corey models[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 12(11): 5059-5066. DOI: [10.1007/s13399-020-00957-x](https://doi.org/10.1007/s13399-020-00957-x).
- [19] NAKHAEI M, TAFRESHI A M, TAFRESHI G M. A new approach in comparison and evaluation of the overall accuracy of six soil-water retention models using statistical benchmarks and fuzzy method[J]. *Eurasian Soil Science*, 2021, 54(5): 716-728. DOI: [10.21203/rs.3.rs-318569/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-318569/v1).
- [20] 赵晓龙, 邱秀梅, 卞汉兵, 等. 一种非饱和土相对渗透系数的试验数值联合估计法[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 1114-1117, 1150. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.06.020](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.06.020).
- [21] HEYDARI L, BAYAT H, SARMADIAN F. Spatial relationships between the Van Genuchten soil-water retention curve parameters and photosynthetic gas exchange variables in a wheat field[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 234: 105850. DOI: [10.1016/j.still.2023.105850](https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105850).
- [22] NASTA P, VRUGT J A, ROMANO N. Prediction of the saturated hydraulic conductivity from Brooks and Corey's water retention parameters[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(5): 2918-2925. DOI: [10.1002/wrcr.20269](https://doi.org/10.1002/wrcr.20269).
- [23] 阮晓晗, 白一茹, 王幼奇, 等. 不同种植年限压砂地土壤水分吸渗特征与水力学参数[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(5): 146-154. DOI: [10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.05.016](https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.05.016).
- [24] WU S, MA D, LIU Z, et al. An approximate solution to one-dimensional upward infiltration in soils for a rapid estimation of soil hydraulic properties[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128188. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2022.128188](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128188).
- [25] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 等. 青藏高原生态变化[J]. *科学通报*, 2015, 60(32): 3048-3056.
- [26] 白雁翎, 王芳, 刘扬. 大通河上游径流演变及驱动因素定量分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 103-110, 167. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0010](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0010).
- [27] 周炜, 翁白莎, 严登华, 等. 怒江源区季节冻土短时冻融事件评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 1027-1040. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0102](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0102).
- [28] 文晶, 王一博, 高泽永, 等. 北麓河流域多年冻土区退化草甸的土壤水文特征分析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(4): 929-937.
- [29] ZENG C, ZHANG F, WANG Q, et al. Impact of alpine meadow degradation on soil hydraulic properties over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 478: 148-156. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2012.11.058](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.058).
- [30] JOSLIN J D, WOLFE M H. Disturbances during minirhizotron installation can affect root observation data[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(1): 218-221. DOI: [10.2136/sssaj1999.03615995006300010031x](https://doi.org/10.2136/sssaj1999.03615995006300010031x).
- [31] LI H, SONG W. Spatiotemporal distribution and influencing factors of ecosystem vulnerability on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(12): 6508. DOI: [10.3390/ijerph18126508](https://doi.org/10.3390/ijerph18126508).
- [32] XIA M, JIA K, ZHAO W, et al. Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107274. DOI: [10.1016/j.ecolind.2020.107274](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107274).
- [33] MILLY P C D. Estimation of Brooks - Corey parameters from water retention data[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(6): 1085-1089. DOI: [10.1029/WR023i006p01085](https://doi.org/10.1029/WR023i006p01085).
- [34] KRISTO C, RAHARDJO H, SATYANAGA A. Effect of hysteresis on the stability of residual soil slope[J]. *International Soil And Water Conservation Research*, 2019, 7(3): 226-238. DOI: [10.1016/j.iswcr.2019.05.003](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.003).
- [35] OMUTO C T. Biexponential model for water retention characteristics[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3-4): 235-242. DOI: [10.1016/j.geoderma.2008.12.001](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.001).
- [36] EBRAHIMI E, BAYAT H, NEYSHABURI M R, et al. Prediction capability of different soil water retention curve models using artificial neural networks[J].

- Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(6): 859-879. DOI: 10.1080/03650340.2013.837219.
- [37] PAN T, HOU S, LIU Y, et al. Comparison of three models fitting the soil water retention curves in a degraded alpine meadow region[J]. *Scientific Reports*, 2019,9(1):18407.DOI:10.1038/s41598-019-54449-8.
- [38] TAO G, WU Z, LI W, et al. Simplified relation model of soil saturation permeability coefficient and air-entry value and its application[J]. *Fractal and Fractional*, 2021, 5(4): 180. DOI: 10.3390/fractalfract5040180.
- [39] MA D H, SHAO M A, ZHANG J B, et al. Validation of an analytical method for determining soil hydraulic properties of stony soils using experimental data[J]. *Geoderma*, 2010, 159(3-4): 262-269. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.08.001.

Applicability of soil water characteristic curves during complete melt period in high altitude seasonal frozen soil area

ZHANG Haisheng^{1,2}, WENG Baisha^{2,3}, YAN Denghua^{2,3}, LUAN Qinghua¹, LI Wenwen², DENG Bin²

(1. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Yinshanbeilu National Field Research Station of Steppe Eco-hydrological System, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China)

Abstract: Determining the soil water characteristic curve in the high altitude seasonal frozen zone is crucial to understand its soil water movement characteristics. However, today's research on modeling soil water characteristic curves in the high altitude seasonal frozen zones focuses more on the effects of permafrost, vegetation degradation, and other factors on the change of soil moisture content, and lacks the analysis of the applicability of soil water characteristic curves.

The volumetric soil water content and soil matrix potential were measured by in-situ observation experiment, selected three models, Van Genuchten (VG), Brooks-Corey (BC), and Campbell for fitting, and analyzed the applicability of the soil water characteristic curve model in the Naqu watershed of the Nujiang River source area using the root-mean-square error and the coefficient of determination as the evaluation indexes.

The results showed that: (1) The E_{RMS} of the VG model was 66.6% and 56.9% lower than that of the BC and Campbell models, respectively, and the R^2 of the VG model was higher than that of the BC and Campbell models (on average, 2.0% and 0.9% higher, respectively), and the VG model was considered sufficiently accurate as far as the R^2 and the E_{RMS} were concerned ($R^2 > 0.97$, $E_{RMS} \leq 0.011\text{cm}^3/\text{cm}^3$). While the BC model had an overall poor fitting effect, with an average R^2 of 0.97 and an E_{RMS} of $0.018\text{cm}^3/\text{cm}^3$, the Campbell model had strong applicability in the soil surface layer, with an average R^2 of 0.99 and an E_{RMS} of $0.006\text{cm}^3/\text{cm}^3$; (2) The parameter θ_r of the VG model plays a key role in the simulation performance of the VG model and its value. The parameter α and the parameter n of the VG model are stable parameters, which have less influence on the shape of the soil water characteristic curve. The parameter θ_r of the BC model is also a sensitive parameter, which has a significant influence on the shape of the soil water characteristic curve, while the parameter Φ_e of the BC model controls where the segmentation point of the BC model starts. The parameter Φ_e and the parameter λ of the Campbell model together control the shape of the soil water characteristic curve simulated by the Campbell model; (3) The error analysis of the model shows that the VG model has a better simulation performance under different soil texture and depth conditions, and the error of the measured 4-150 kPa soil matrix suction segment is limited to $\pm 2.5\%$. The Campbell model has a strong fitting ability in the sandy loam area and the soil surface layer, while the BC model, due to its shape setting, often appears to be lower than the actual value in the middle section of the soil matrix potential and higher than the actual value in the high soil matrix potential section during the fitting process.

(下转第 358 页)