

花岗岩残积土持水特性及强度特性研究

黄飞雪

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月29日

摘要

为探究花岗岩残积土的持水特性及抗剪强度随含水率的变化规律, 以重塑花岗岩残积土为研究对象, 采用滤纸法测定其土水特征曲线(SWCC), 并通过直剪试验研究不同含水率条件下土体的抗剪强度特性。试验结果表明: 花岗岩残积土的SWCC呈典型反“S”型, 基质吸力由100 kPa升至3000 kPa时, 体积含水率由40.0%降至25.0%, 表现出较强的持水能力和明显的阶段性脱水特征; 随着含水率从16.15%增加至23.93%, 土体的黏聚力由15.8 kPa降至10.15 kPa, 内摩擦角由34.2°减小至28.3°, 抗剪强度显著下降; 剪切曲线形态由应变软化型逐渐过渡为应变硬化型, 反映出土体由脆性破坏向塑性破坏的转变。研究表明, 含水率是影响花岗岩残积土抗剪强度的关键因素, 研究成果可为非饱和土边坡稳定性分析提供理论依据。

关键词

花岗岩残积土, 土水特征曲线, 抗剪强度, 基质吸力, 非饱和土

Study on the Water Retention and Strength Characteristics of Granite Residual Soil

Feixue Huang

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: March 13, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

To investigate the water retention characteristics and the variation in shear strength with moisture content of granite residual soil, remolded granite residual soil was used as the research subject. The soil-water characteristic curve (SWCC) was measured using the filter paper method, and the shear strength behavior of the soil under different moisture contents was studied through direct shear tests. The test results indicate that the SWCC of granite residual soil exhibits a typical inverse “S” shape. When the matrix suction increases from 100 kPa to 3000 kPa, the volumetric water content decreases from 40.0% to 25.0%, demonstrating strong water retention capacity and distinct staged

dehydration characteristics. As the moisture content increases from 16.15% to 23.93%, the cohesion of the soil decreases from 15.8 kPa to 10.15 kPa, and the internal friction angle decreases from 34.2° to 28.3°, indicating a significant reduction in shear strength. The shear stress-displacement curve transitions from strain-softening to strain-hardening behavior, reflecting a shift in the soil failure mode from brittle to plastic. The study shows that moisture content is a key factor affecting the shear strength of granite residual soil. These findings provide a theoretical basis for the stability analysis of unsaturated soil slopes.

Keywords

Granite Residual Soil, Soil-Water Characteristic Curve, Shear Strength, Matrix Suction, Unsaturated Soil

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土质边坡稳定分析是当今国内外岩土工程领域始终未能得到妥善、经济解决的技术难题[1][2], 其中一个主要的原因就是土体抗剪强度(简称强度)计算值不够准确。土体强度对气候变化特别敏感。在干燥气候条件下, 土体含水率较低, 饱和度较低, 抗剪强度较高; 在降水充足地区, 土体含水率较高, 饱和度较高, 抗剪强度较低[3]-[5]。因此, 有必要探究土体抗剪强度与饱和度之间的关系。

土水特征曲线是指土中的含水率与土中吸力的关系曲线, 能够反映土体的持水能力, 对研究非饱和土的水力与力学特性以及抗剪强度起着重要的作用[6]-[8]。关于非饱和土的吸力特性已经有较长时间的研究, 其吸力量测方向大致分为总吸力、基质吸力两类。在总吸力测定方面, 以蒸汽平衡法、滤纸法(间接接触)这类间接测定法为主, 在基质吸力量测方面, 以滤纸法(直接接触)和压力板法为主。白福青[7][9]描述了滤纸法测定总吸力吸湿曲线的原理, 测定出南阳非饱和膨胀土的总吸力土水特征曲线与基质吸力土水特征曲线。

由于非饱和土中基质吸力的存在, 其强度特性较饱和土更为复杂。国内外学者围绕基质吸力对强度的影响规律开展了大量研究。Fredlund 等基于双应力状态变量理论, 阐明了吸力在非饱和土抗剪强度中的作用机制[10]。此后, 众多学者通过试验手段探讨了强度参数随吸力的变化特征。Vanapalli 等结合土水特征曲线, 分析了吸力变化对强度的控制作用[11]。近年来, 国内学者针对不同土类开展了系统性试验研究, 缪林昌等通过三轴试验揭示了吸力对抗剪强度的非线性增强规律, 明确了强度参数随吸力变化的主要特征[12]。

花岗岩残积土原状样往往具有显著的随机裂隙性和微观结构性, 导致实验数据离散性较大, 难以系统揭示含水率变化对土体强度的单一影响规律[13][14]。本文以花岗岩残积土重塑土样为研究对象, 将能够测量较大基质吸力的滤纸法和直剪试验方法相结合, 探讨重塑非饱和花岗岩残积土抗剪强度及强度参数随基质吸力的变化规律。

2. 试验概况

2.1. 试验材料

本试验所用土料为花岗岩残积土, 其基本物理指标如表 1 所示。图 1 为花岗岩残积土的颗粒级配曲线。

Table 1. Basic physical indices of granite residual soil
表 1. 花岗岩残积土的基本物理指标

颗粒比重 G_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_P
2.70	39.42	27.43	11.99

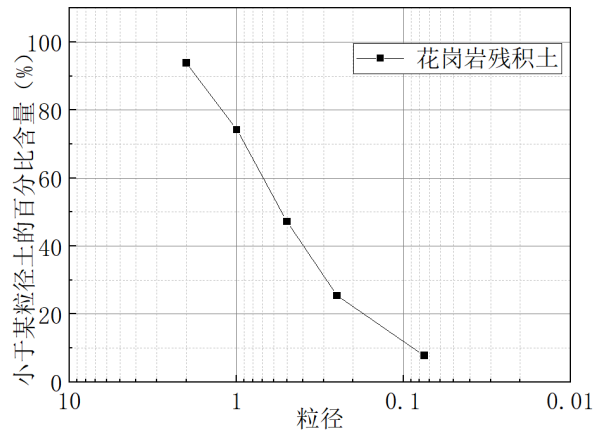


Figure 1. Grain size distribution curve of granite residual soil
图 1. 花岗岩残积土颗粒级配曲线

2.2. 试验仪器

采用滤纸法测量花岗岩残积土的土水特征曲线，所使用的设备包括密封性较好的乐扣盒、Whatman No.42 滤纸、精度为 0.0001 g 的天平及恒温箱等。

抗剪强度通过直剪试验来测量，实验仪器采用 TKA-DDS-4C 四联自动采集直剪仪。该仪器拥有四套荷重传感器，可以同时施加四个不同的竖向应力，配套数据采集仪和 windows 采集处理软件。

2.3. 试验方法

采用吸湿过程中的滤纸法试验测吸力。首先，在经过烘干的花岗岩残积土中加入适量的水，配置一定含水率的土样，将土样密封放置 24 h，待水分均匀后，取出土样制成 8 个直径 39.1 mm、高度 20 mm、孔隙比和含水率不同的环刀压实样。试样的具体参数如表 2 所示。

Table 2. Specimens with different moisture contents
表 2. 含水率不同的试样

试样编号	1	2	3	4	5	6	7	8
含水率/%	12.18	13.92	16.61	18.98	20.04	21.90	24.44	26.12
孔隙比	0.69	0.68	0.69	0.69	0.68	0.68	0.69	0.68

试验使用 Whatman No.42 滤纸，其率定曲线方程采用 Leong 等给出的双线性率定曲线方程[15]。基质吸力为：

$$\begin{cases} \log_{10} S = 2.909 - 0.0229w_f, w_f \geq 47 \\ \log_{10} S = 4.945 - 0.067w_f, w_f \leq 47 \end{cases} \quad (1)$$

式中， S 为吸力，单位为 kPa； w_f 为滤纸的含水率，以百分数计(%)。

试验步骤如下：使用精度为 0.0001 g 的高精度电子秤测量初始测试干滤纸的质量并做好记录，将直径为 55 mm 的测试滤纸(Whatman No.42 型滤纸)夹在两张直径为 70 mm 的保护滤纸中，防止测试滤纸沾上土颗粒产生试验误差；一并将滤纸放置在两个环刀中间，并将上下土样用绝缘胶带黏紧，保证上下两个土样紧密接触。将制作好的非饱和试样放入密封罐中并做好标签，置于恒温恒湿箱(温度：20℃)中养护 10 天，使水分在土样与滤纸之间充分反映以达到平衡。养护完毕后，用镊子夹取测试滤纸并迅速用高精度电子秤测量平衡后的滤纸质量，以防止滤纸与大气中的水分接触过久导致试验误差；并挖取少量测试土样于铝盒中，放入烘干箱中，测量平衡后土样质量，以计算平衡后土样质量含水率。

对不同含水率的重塑花岗岩残积土进行快剪试验。室内直剪试验采用 TKA-DDS-4C 四联自动采集直剪仪(应变控制式)，施加的垂直荷载为 100 kPa，200 kPa，300 kPa，400 kPa。剪切速率为 0.8 mm/min。按照土工试验方法标准的规定进行剪切，剪切时，剪应力与剪切变形的曲线出现峰值，认为试样已经剪坏，峰值点为该试样的抗剪强度；若无峰值，取剪切位移 $\Delta L = 4$ mm 对应的剪应力为抗剪强度。

3. 试验结果分析

3.1. 持水特性

图 2 为花岗岩残积土在脱水过程中的土水特征曲线(SWCC)，试验数据涵盖基质吸力从 100 kPa 至 10,000 kPa 范围，对应体积含水率由 40.0% 下降至 20.0%。曲线整体呈典型反“S”型，反映出该类土在宽吸力范围内的持水与脱水行为。随着基质吸力由 100 kPa 升至 3000 kPa，体积含水率由 40.0% 降至约 25.0%，降幅达 15 个百分点，曲线斜率较大。该阶段对应土体中孔隙水从中、小孔隙中逐步排出的过程，反映出土体孔径分布较为集中，孔隙结构以细孔隙为主。当吸力超过 3000 kPa 后，含水率下降明显减缓，由 25.0% 缓慢降至 20.0%，曲线趋于平缓。表明土体已接近残余含水状态，孔隙水主要以结合水或封闭孔隙水形式存在，进一步增加吸力难以显著降低含水率。与现有的滤纸法测量花岗岩土水特征曲线趋势一致[16]。

许多学者根据经验方法以及土水特征曲线的形状，建立了不同类型的土水特征曲线方程模型，具有代表性的土水特征曲线方程模型包括：Gardner 模型[16]、Van Genuchten 模型[17]和 Fredlund & Xing 模型[18]，其中 Van Genuchten 模型各参数物理意义较为明确，拟合效果良好，应用也最为广泛。本文采用 Van Genuchten 模型对土水特征曲线进行模拟，拟合参数结果如表 3 所示。模型如下：

$$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (a\psi)^b} \right]^n \quad (2)$$

θ_w ——体积含水率；

a ——拟合参数，与进气值联系(kPa^{-1})；

b ——当超过土的进气值时，土中流出率函数的土性参数；

θ_s ——饱和含水率；

θ_r ——残余含水率；

n ——与残余含水率有关的参数， $n = 1 - 1/b$ 。

Table 3. The fitting parameters of the Van Genuchten (VG) model

表 3. VG 模型拟合参数结果

模型名称	饱和含水率	残余含水率	a	b	n	R^2
V-G 模型	40.62%	14.63%	0.00078	2.03834	0.503	0.95594

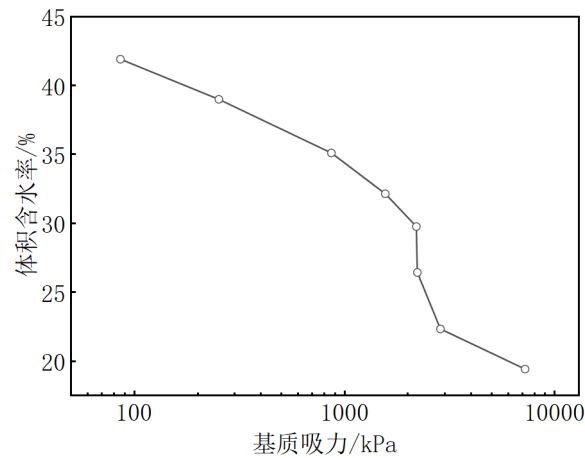


Figure 2. Soil-water characteristic curve of granite residual soil
图 2. 花岗岩残积土的土水特征曲线

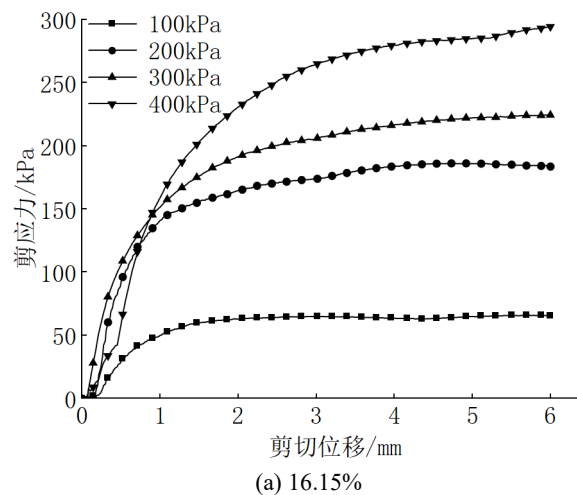
3.2. 强度特性

室内直剪试验采用 TKA-DDS-4C 四联自动采集直剪仪(应变控制式), 试验采用三组重塑花岗岩残积土试样, 其含水率及对应的抗剪强度指标(由直剪试验拟合得到)如表 4 所示。随着含水率从 16.15% 增加至 23.93%, 黏聚力由 15.8 kPa 降至 10.15 kPa, 内摩擦角由 34.2°减小至 28.3°, 表明含水率对残积土强度具有明显的弱化作用。该试验结果与已有研究的结果一致, 含水率的增加会减弱花岗岩残积土抗剪强度[19]。

Table 4. Shear strength parameters

表 4. 抗剪强度指标

试样编号	含水率/%	抗剪强度指标	
		黏聚力/kPa	内摩擦角/°
1	16.15	15.8	34.2
2	21.87	15.35	29.4
3	23.93	10.15	28.3



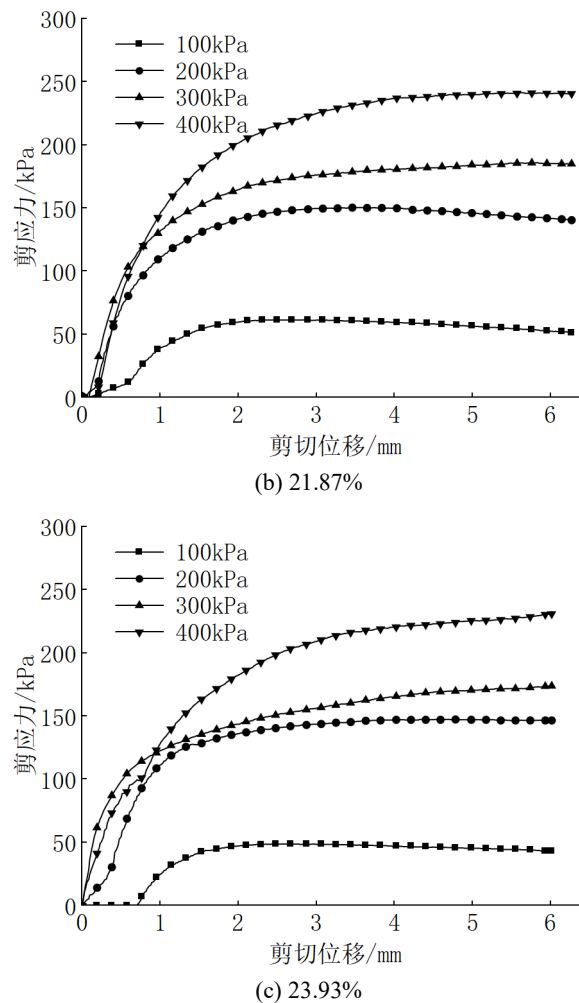


Figure 3. Stress-strain curve of remolded granite residual soil
图 3. 重塑花岗岩残积土应力 - 应变曲线

图 3(a)为试样 1 在不同法向应力下的剪切位移 - 剪应力关系曲线。从图中可以看出：各曲线均呈应变软化型，剪应力随位移增加先迅速上升至峰值，之后略有下降并趋于稳定。随着法向应力增大，峰值剪应力显著提高。

试样 2 的曲线(图 3(b))仍表现出应变软化特征，但软化程度较试样 1 减弱。峰值强度低于同法向应力下的试样 1。曲线在达到峰值后下降幅度较小，部分曲线接近理想塑性状态。这可能是由于含水率增加使颗粒间胶结减弱，土体脆性降低。

试样 3 的曲线(图 3(c))呈现明显的应变硬化或弱软化特征。在 100~400 kPa 法向应力下，剪应力随位移增加缓慢上升，峰值不明显，最终趋于稳定值。曲线形态表明，高含水率下土体塑性增强，颗粒间摩擦和咬合作用减弱，强度主要来源于摩擦分量。

图 4 为不同含水率花岗岩残积土抗剪强度 - 法向应力曲线。含水率从 16.15%增至 21.87%时，黏聚力基本保持不变(仅下降 0.45 kPa)，而内摩擦角减小约 4.8°。说明在此区间内，含水率主要影响颗粒间的摩擦咬合作用。含水率进一步增至 23.93%时，黏聚力显著下降(降幅 34%)，内摩擦角继续减小 1.1°。表明高含水率下，颗粒表面水膜增厚，胶结物质溶解或软化，导致黏聚力大幅丧失，同时摩擦角进一步降低。

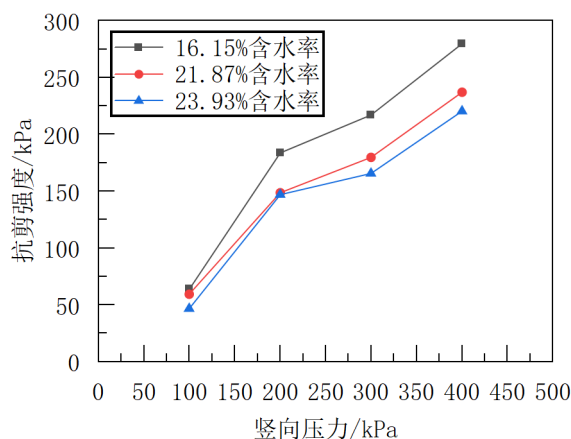


Figure 4. Shear strength-normal stress curves of granite residual soil with different moisture contents

图 4. 不同含水率花岗岩残积土抗剪强度 - 法向应力曲线

3.3. 强度参数与基质吸力的关系

非饱和花岗岩残积土基质吸力与黏聚力及内摩擦角的关系如图 5 所示。由图 5 可以看出，黏聚力与内摩擦角随着基质吸力的增加而变大，但两者的变化规律不同。黏聚力随基质吸力的增大呈非线性增大的趋势，逐渐趋于稳定；内摩擦角随基质吸力的增加呈线性增大，但数值变化不大。

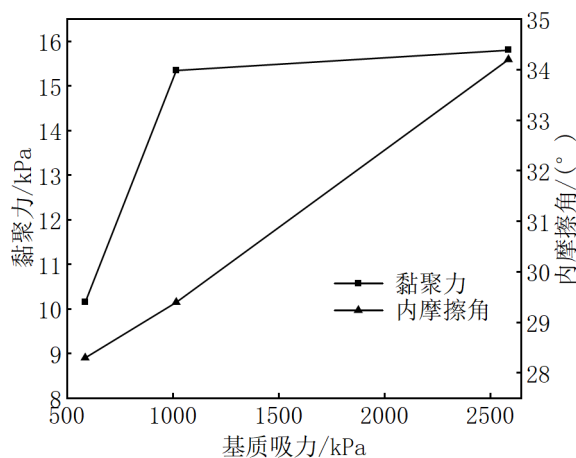


Figure 5. Relationship between strength parameters and matric suction

图 5. 强度参数与基质吸力关系

4. 结论

(1) 该花岗岩残积土具有较强的持水能力和较高的进气值，其 SWCC 表现出明显的阶段性特征，孔隙结构以中小孔隙为主。

(2) 三种含水率花岗岩残积土的直剪试验表明，抗剪强度随法向应力增大而线性增加。

(3) 含水率对强度参数影响显著：含水率从 16.15% 升至 23.93%，黏聚力由 15.8 kPa 降至 10.15 kPa，内摩擦角由 34.2° 降至 28.3°。

(4) 剪切曲线形态从应变软化型渐变为应变硬化型，反映出土体由脆性向塑性破坏的过渡，与含水率

升高导致的胶结减弱和颗粒润滑有关。

上述基于重塑土样得到的规律,反映了花岗岩残积土在水分变化下的基本水力-力学行为。然而,在实际工程中,花岗岩残积土具有较强的结构性和原生裂隙,其原状结构对持水特性和强度特性具有显著的影响。在实际工程中,考虑到重塑土样可能低估了原状土的抗剪强度,尤其在低含水率条件下,建议后续研究结合现场原状样进行对比验证,以量化结构性对抗剪强度参数的影响。

参考文献

- [1] 姚晓琴,张豪杰,阙云,等.水-气耦合下的土质边坡稳定系数场分析[J].福州大学学报(自然科学版),2024,52(3):337-344.
- [2] 顾鑫,仇文岗,欧强,等.基于Chebyshev-Galerkin-KL展开的土质边坡稳定可靠度分析[J].岩土工程学报,2023,45(12):2472-2480.
- [3] 申春妮,方祥位,王和文,等.吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J].岩土力学,2009,30(5):1347-1351.
- [4] 许冲,代克滨,薛智文,等.中国月尺度降雨型滑坡发生概率研究[J].地质力学学报,2025,31(5):960-971.
- [5] 黄雨,毛无卫,郭桢,等.气候变化背景下东南沿海降雨型复合链生滑坡灾害防控挑战及应对[J].中国科学基金,2025,39(6):1006-1015.
- [6] Fredlund, D.G. (2006) Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**, 286-321. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2006\)132:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:3(286))
- [7] 白福青,刘斯宏,袁骄.滤纸总吸力吸湿曲线的率定试验[J].岩土力学,2011,32(8):2336-2340.
- [8] 任佳,简文星,陈小龙,等.树坪滑坡非饱和土的土-水特征曲线试验研究[J].安全与环境工程,2016,23(4):14-19.
- [9] 白福青,刘斯宏,袁骄.滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(6):928-933.
- [10] Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A. (1978) The Shear Strength of Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **15**, 313-321. <https://doi.org/10.1139/t78-029>
- [11] Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. and Clifton, A.W. (1996) Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction. *Canadian Geotechnical Journal*, **33**, 379-392. <https://doi.org/10.1139/t96-060>
- [12] 缪林昌,殷宗泽.非饱和土的剪切强度[J].岩土力学,1999,20(3):1-6.
- [13] 周小文,罗兴财.全风化花岗岩与花岗岩残积土的判别及物理力学性质对比[J].长江科学院院报,2022,39(4):1-7.
- [14] 王港,张先伟,刘新宇,等.厦门花岗岩残积土的压缩变形特性及其微观机制[J].岩土力学,2021,42(12):3291-3300,3314.
- [15] Leong, E., He, L. and Rahardjo, H. (2002) Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction Measurements. *Geotechnical Testing Journal*, **25**, 322-333. <https://doi.org/10.1520/gtj11094j>
- [16] 刘小文,陈嘉帅,刘星志.花岗岩残积土的全吸力土-水特征曲线试验及模型研究[J].工程勘察,2020,48(6):1-8.
- [17] Gardner, W.R. (1958) Some Steady-State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table. *Soil Science*, **85**, 228-232. <https://doi.org/10.1097/00010694-195804000-00006>
- [18] van Genuchten, M.T. (1980) A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- [19] Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994) Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, 521-532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>