DOI：10.11766/trxb202507150348 **CSTR：32215.14.trxb202507150348**

王金强，程超凡，田正超，何阳波，林丽蓉，陈家宙. 红壤穿透阻力特征曲线及其影响因子[J]. 土壤学报，2026，63（6）：1923–1935.
WANG Jinqiang，CHENG Chaofan，TIAN Zhengchao，HE yangbo，LIN lirong，CHEN jiazhou. Penetration Resistance Characteristic Model of Red Soils and Influencing Factors[J]. Acta Pedologica Sinica，2026，63（6）：1923–1935.

红壤穿透阻力特征曲线及其影响因子*

王金强，程超凡，田正超，何阳波，林丽蓉，陈家宙†

（华中农业大学资源与环境学院，武汉 430070）

摘 要：土壤穿透阻力限制作物的生长，进而影响农业的可持续生产。以我国亚热带 4 种母质发育的红壤为研究对象，分析不同穿透阻力模型的适用性及其影响因子，并探究机械和生物耕作对红黏土红壤穿透阻力的改善效果，明确影响作物生长的红壤穿透阻力阈值。结果表明：饱和应力模型对于 4 种红壤的拟合效果最好，其次是土壤含水量模型、土壤含水量和容重模型以及土壤基质势模型。红壤穿透阻力均随含水量降低而增加，穿透阻力在含水量降低至临界值（约 0.32 $cm^3 \cdot cm^{-3}$）时急剧增大。低容重土壤（1.3 $g \cdot cm^{-3}$）的穿透阻力在低的含水量下发生骤增，而高容重（1.5 $g \cdot cm^{-3}$）土壤的穿透阻力在较高的土壤含水量时剧增。土壤质地（黏粒含量）也是影响不同母质红壤穿透阻力的主要因素，而有机质影响效果不明显。当土壤含水量为 0.25 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 时，与对照免耕相比，机械耕作（深耕，翻耕 30 cm）改善 0～40 cm 土层的穿透阻力（降低了 1 034 kPa），而生物耕作除此之外（减少了 785 kPa）还降低深层土壤的穿透阻力（减少了 1 500 kPa）。4 种红壤的穿透阻力阈值不低于 2 500 kPa，且黏质红壤的穿透阻力阈值均高于砂质红壤。饱和应力模型适用于我国南方的 4 种红壤。土壤含水量、容重和质地是影响不同母质红壤穿透阻力的主要因素。本研究为我国亚热带红壤区从土壤穿透阻力角度判断季节性干旱的发生及合理选择预防干旱的耕作措施提供科学依据。

关键词：亚热带红壤；穿透阻力模型；土壤物理性质；耕作措施；穿透阻力阈值

中图分类号：S152.9 **文献标志码：**A

Penetration Resistance Characteristic Model of Red Soils and Influencing Factors

WANG Jinqiang, CHENG Chaofan, TIAN Zhengchao, HE yangbo, LIN lirong, CHEN jiazhou†

(*College of Resources and Environment*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: 【Objective】High soil penetration resistance(PR)limits global crop growth and sustainable agricultural productivity. Heavy soil texture, low soil organic matter, and low topsoil water content during summer significantly increase PR under a subtropical monsoon climate in southern China. However, the specific mechanisms controlling these processes remain elusive.

* 国家重点研发计划项目（2021YFD1901201）、国家自然科学基金项目（41877013）和湖北省重点研发计划项目（2023BBB049）共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China（No.2021YFD1901201），National Natural Science Foundation of China（No.41877013），and the Key Research and Development Program of Hubei Province（No.2023BBB049）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：jzchen@mail.hzau.edu.cn

作者简介：王金强（1992—），男，山东寿光人，博士研究生，主要从事土壤水分运动与季节性干旱研究。E-mail：wangjin.qiang123@163.com

收稿日期：2025–07–15；收到修改稿日期：2025–12–02；网络首发日期（www.cnki.net）：2026–01–14

Thus, the objectives were to investigate the applicability of various penetration resistance characteristic models in red soils with different parent materials and identify key influencing factors, and assess the ameliorative effects of mechanical- and bio-tillage on PR in Ultisols.【Methods】This study investigated four red soils derived from different parent materials in China's humid subtropical climate, including granitic (GS), Quaternary red clayey(CS), argillaceous shale(AS), and red sandstone red soil(SS). Key parameters measured included soil PR, water content(SWC), bulk density(ρ), organic matter (SOM) and texture. We evaluated the performance of five PR models (soil water content model, soil matric potential model, soil water content and bulk density model, soil matric potential and bulk density model, and saturated stress model) and identified their influencing factors in red soils, assessed the ameliorative effects of mechanical- and bio-tillage on PR in Ultisols, and determined the PR threshold for four red soils using the least limiting water range.【Results】Among the five characteristic models of soil PR, the saturated stress model provided a better fit (lower SSE and higher R)for the four red soils, followed by the soil water content model, the soil water content and bulk density model, and the soil matric potential model. PR in red soils increased with decreasing water content, exhibiting a sharp increase once the water content fell below a critical value(～ 0.32 $cm^3 \cdot cm^{-3}$). The PR of low bulk density soils (1.3 g· cm^{-3}) experienced a sharp increase at low water contents, whereas that of high bulk density soils (1.5 $g \cdot cm^{-3}$) showed a dramatic increase at high water contents. Soil texture (clay content) was a primary factor influencing PR of different parent material red soils, while SOM had negligible effects. When the soil water content was 0.25 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, mechanical tillage (deep tillage with 30 cm ploughing depth) reduced PR by ～1 034 kPa in the 0～40 cm depth compared to control treatment (no-tillage), whereas bio-tillage achieved a reduction of ～785 kPa in the same depth and reduced PR (～1 500 kPa) in the subsoil. The critical PR thresholds of the four red soils exceeded 2 500 kPa, and thresholds for clayey red soils were higher than those for sandy red soils.【Conclusion】The saturated stress model proved highly effective for predicting red soil PR in of southern China. SWC, ρ and texture played the primary factors influencing PR across different parent material red soils, with clayey red soils (CS and AS) exhibiting higher PR thresholds than sandy red soils (GS and SS). This research provides a scientific basis for identifying the occurrence of seasonal drought and rationally selecting tillage practices for drought prevention in subtropical red soil regions of China through the lens of soil penetration resistance.

Key words: Subtropical red soils ; Penetration resistance model ; Soil physical properties ; Tillage practices ; Penetration resistance threshold

土壤穿透阻力较高是限制全球农业可持续发展的关键问题之一[1]。全球约 4%的土壤正经历较高的土壤穿透阻力胁迫[2]，进一步加剧了土壤退化的现象[3]。目前，我国东北黑土区和南方红壤区耕地土壤穿透阻力大的现象较为普遍，且呈现出逐年加重趋势[4-5]。而在我国亚热带红壤区，质地黏重、有机质含量低以及夏季耕层土壤含水量较低导致土壤穿透阻力大的问题日益突出。

土壤穿透阻力（又称土壤机械阻力）是衡量土壤基质抵抗外物楔入能力的物理指标，其大小与土壤硬度、紧实度等物理性质密切相关[6]，其受土壤含水量（基质势）[7]、容重[8]、质地和有机质[9]的影响。由于土壤穿透阻力对土壤物理性质的敏感程度不同，这使得不同类型土壤的穿透阻力所受影响因素有所差异[10]。有研究表明，砂质风沙土的穿透阻力在相同条件下低于壤质黄绵土[11]。而对于质地相同的土壤，土壤穿透阻力也随土壤容重增加而增加[12]。土壤水分状况也是影响穿透阻力的关键因素之一，穿透阻力随土壤含水量（基质势）降低而呈现逐步增大的趋势。研究发现，结构较差的热带土壤基质势从-6 kPa 降至-100 kPa 时，土壤穿透阻力会从 1 300 kPa 增加至 4 400 kPa[13]。即使在土壤容重较低时，含水量的减少仍会导致土壤穿透阻力增大，进而增加作物根系穿透土壤的难度。土壤有机质含量增加能直接增强土壤的持水性能[14]，降低粉质壤土的穿透阻力[15]。此外，土壤耕作是一种重要的耕作方式，它主要通过影响土壤水分和容重进一步改变土壤的穿透阻力[16]。耕作措施增加了黏质红壤的含水量，降低土壤穿透阻力，还能改善土壤空隙度和容重[17-18]。也有研究表明保护性耕作虽能起到水土保持作用，但也会导致土壤穿透阻力增加，短期土壤退化较为明显[19]。而深耕可以疏松土壤，

起到降低土壤穿透阻力的作用[20]。我国南方红壤因母质发育不同而导致土壤类型较多，且土壤容重和有机质含量差异较大，影响红壤穿透阻力的主要因子以及耕作措施的改善效果仍不清楚。

在土壤穿透阻力的研究中，传统方法常以田间持水量条件下的穿透阻力值作为衡量标准，但该方法忽略了土壤容重、质地和有机质等影响因子对穿透阻力的单一或综合影响，且在田间状态下不易获取阻力值。土壤含水量波动导致穿透阻力发生变化，土壤穿透阻力与含水量的特征曲线体现了土壤的阻力特性以及便于预测田间土壤穿透阻力值。根据包含土壤变量的数量将土壤穿透阻力的特征模型分为三类：（1）以土壤含水量（或基质势）为主的单变量幂函数模型[7, 21]；（2）以土壤含水量（或基质势）和土壤容重为主的双变量预测模型[22-23]；（3）以土壤水分性质（水分饱和度）和力学性质（有效应力，σ’）为主的多变量穿透阻力特征模型[24]。红壤具有铁氧化物富集、成土母质众多和有机质贫瘠等特性，当前关于土壤穿透阻力特征经验模型是否能够有效地应用于红壤地区及准确预测其穿透阻力值的相关研究仍鲜有报道。

土壤穿透阻力作为最小限制水分范围（LLWR，评价作物吸水的重要物理指标）下限的关键影响因子，可以通过 LLWR 逆向量化不同类型土壤穿透阻力的阈值范围和评价措施降低土壤穿透阻力的效果。2 000 kPa 的土壤穿透阻力会导致黏质红壤深层的 LLWR 消失[17]，当穿透阻力值达 3 000 kPa 时作物茎叶和根系仍能正常生长[17-18]，说明该土壤阻力值作为红壤的临界值过小。此外，有研究表明 2 000 kPa的穿透阻力不适合作为LLWR下限的临界值[25]。2 500 kPa 穿透阻力时更适合作为加拿大灰化土 LLWR 的极限值[26]，而穿透阻力阈值大于 3 000 kPa 时会限制根的生长[27]。因此，可通过观察当土壤穿透阻力值超过某一临界值时出现 LLWR，逆向推导该土壤的穿透阻力阈值。但亚热带地区红壤类型众多，穿透阻力因质地和有机质含量存在差异，不同母质红壤的穿透阻力影响作物生长的阈值尚未明确。因此，本研究通过分析不同母质红壤性质与穿透阻力的关系以及穿透阻力特征曲线在红壤上的适用性，研究影响不同母质红壤穿透阻力的主要因子，结合 LLWR 探究影响作物生长的穿透阻力合适阈值，为科学管理我国亚热带红壤和选择抵御干旱的耕作措施提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验 1 为 4 种不同母质发育红壤试验（4 种红壤试验）。供试土壤为亚热带 4 种典型母质发育的红壤，分别为长江中游的湖北省通城县花岗岩发育的红壤—GS（29°20'N，113°46'E）、咸宁市咸安区第四纪红黏土发育的红壤—CS（30°01'N，114°21'E）和通山县泥质页岩发育的红壤—AS（29°20'N，113°47'E）以及江西省鹰潭市余江区红砂岩发育的红壤—SS（28°17'N，116°56'E），按照五点采样法对整个旱坡地的农化分析土壤样品进行采集。

试验 2 为机械耕作与生物耕作田间试验（耕作试验）。于 2022-2023 年在湖北省咸宁市长江中游农业环境监测与保护教育部野外科学观测研究站（30°01'N，114°21'E）开展机械与生物耕作田间试验。试验区海拔高度为 44.3 m，年平均气温为 16.6 ℃，年均降雨量为 1 474 mm，年均潜在蒸发量为 1 497 mm。供试土壤为第四纪红黏土发育的红壤，具有质地黏重、土体紧实、导水性差和深层土壤含水量高等性质。土壤基础理化性质如下[28]：0～20 cm 和 20～80 cm 土层 pH 分别为 5.21 和 5.15，容重分别为 1.34 g·cm^{-3} 和 1.48 g·cm^{-3}，有机质含量分别为 10.39 g·kg^{-1} 和 3.73 g·kg^{-1}。

试验设传统耕作（CT，翻耕 15 cm）、深耕（DT，翻耕 30 cm）2 个机械耕作处理以及 Rape_C（普通油菜，*Brassica napus* L. cv. Huashuang 4）、MV（紫云英，*Astragalus sinicus* L. cv. Yijiangzi）、Luc_1Y（1 年生紫花苜蓿，*Medicago sativa* L. cv. Ladino）和 Vet_1Y（1 年生香根草，*Vetiveria zizanioides* L. cv. Wild）4 个生物耕作处理，免耕（CK）作为对照。于 2022 年 10 月种植冬季覆盖作物，次年 5 月收割并移除覆盖作物地上部，6 月种植夏玉米（*Zea mays* L. variety Zhengdan 958），9 月收割移除玉米秸秆。油菜作物（Rape_C）移栽至试验小区，种植密度为每个小区 70 株，相当于 1.17×10^5 株·hm^{-2}。紫云英（MV）和紫花苜蓿（Luc_1Y）播种量为每个小区 30.0 kg·hm^{-2}。香根草（Vet_1Y）移栽种植密度为每个小区 70 穴（3 株/穴）。每个小区种植 54 株夏玉米，即 9×10^4 株·hm^{-2}，试验所用玉米品种为郑单 958。

免耕小区在秋冬季节休耕，直到夏季玉米种植期。生物耕作处理每次种植前浅耕 5 cm，机械耕作处理玉米种植前进行耕作，其余时间不耕作，所用肥料全部作为基肥一次施入。夏季玉米播种时，所有处理的肥料施用量是常规用量的两倍，以防止土壤养分缺乏引起的差异。秋冬覆盖作物季肥料用量：尿素（N≥46%）150 kg·hm^{-2}、过磷酸钙（P_2O_5≥12%）580 kg·hm^{-2}、氯化钾（K_2O≥40%）88 kg·hm^{-2}；夏玉米季：肥料用量为尿素（N≥46%）650 kg·hm^{-2}、过磷酸钙（P_2O_5≥12%）1 166 kg·hm^{-2}、氯化钾（K_2O≥40%）325 kg·hm^{-2}。试验小区面积为 6 m^2（2 m×3 m），每个处理重复 3 次，随机区组排列。

1.2 土壤样品采集

采用离心机环刀（体积 100 cm^3，高 5.2 cm，直径 5.0 cm）在上述 4 种红壤（GS、CS、AS 和 SS）的 2 个土层深度（0～20 cm 和 20～40 cm）共计采集 24 个原状土样，取样完成后密封带回室内，先后测定土壤水分特征曲线和土壤容重，并在同一深度下取 1 kg 的农化分析土样进行土壤有机质和土壤质地的测定。

1.3 土壤物理性质测定

4 种红壤的农化分析土样风干过 2 mm 筛后，土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定，土壤质地采用吸管法测定，将 4 个土层（0～10 cm、10～20 cm、20～40 cm 和 40～60 cm）离心环刀土样在 105 ℃的烘箱中烘干至恒重测定土壤容重[29]。

将离心机环刀土样饱和后，用砂箱法和离心机法测定 4 种红壤的土壤水分特征曲线[17]。（1）砂箱法（低吸力范围，0～50 kPa）：在 10 kPa、20 kPa 和 30 kPa 的压力下测量土壤含水量，当不再有水从排水管流出时（2～6 d），即为平衡完成。（2）离心法（高吸力范围，50～1 500 kPa）：使用高速离心机（GR21 G，HITACHI）进一步分析先前使用砂箱法测试的土壤样品，样品与离心机中心之间的距离为 5 cm，保持恒温（25 ℃），在 50 kPa（转速为 1 440 r·min^{-1}，时间为 60 min）、100 kPa（转速为 2 040 r·min^{-1}，时间为 200 min）、500 kPa（转速为 4 670 r·min^{-1}，时间为 550 min）和 1 500 kPa（转速为 8 640 r·min^{-1}，时间为 650 min）下测定土壤含水量。在 RETC 软件中采用 van Genuchten 模型对水分特征曲线测定值进行拟合[30]。

土壤充气孔隙度用土壤污泥三相仪（DIK-1130）进行测定，在 10、20、30、50、100、500 和 1 500 kPa 吸力下测定土壤固、液体所占的百分比，从而得到不同吸力条件下的土壤充气孔隙度[17]。

土壤穿透阻力采用 SC900 土壤紧实度仪测定，对 2 个试验 0～45 cm 土层的穿透阻力进行原位测量，每 2.5 cm 测量一个阻力值，4 种红壤和 7 个耕作处理均重复测定 9 次。4 种红壤试验选取 2 个土层（0～20 cm 和 20～40 cm）以及耕作试验选取 4 个土层（0～10 cm、10～20 cm、20～40 cm 和 40～60 cm）的平均阻力值作为该土层的阻力值。同时在穿透阻力测定点附近利用土钻采集 4 种红壤试验的 2 个土层和耕作试验的 4 个土层土壤样品，每个土壤样品重复 9 次，并用铝盒密封，采用烘干法测定各土层穿透阻力下的土壤含水量[17]。

1.4 土壤穿透阻力特征模型

土壤穿透阻力特征模型根据包含土壤变量的数量可划分为单变量穿透阻力模型（模型 1 和模型 2）、双变量穿透阻力模型（模型 3 和模型 4）和多变量穿透阻力模型（模型 5）。

影响穿透阻力大小的因子主要是含水量（或基质势），土壤穿透阻力（PR）与含水量（或基质势）呈幂函数关系[7, 21]：

$$\mathrm{PR} = a\theta^b \qquad (1)$$

$$\mathrm{PR} = c|\psi|^d - e|\psi| \qquad (2)$$

式中，PR 为土壤穿透阻力，kPa；θ 为土壤体积含水量，cm·cm^{-3}；Ψ 为基质势，-kPa；a、b、c、d 和 e 为方程拟合参数，由实际测定数据拟合获得。

由于土壤容重对穿透阻力影响较大，因此在模型中需要引入容重这个重要变量，穿透阻力特征模型为[22-23]：

$$\mathrm{PR} = f\theta^g\rho^h \qquad (3)$$

$$\log_{10}\mathrm{PR} = i\log_{10}|\psi S| + j\log_{10}\rho + k \qquad (4)$$

式中，θ 为土壤体积含水量，cm·cm^{-3}；ρ为土壤容重，g·cm^{-3}；Ψ 为基质势，-kPa；S 为土壤水分饱和度（土壤含水量/田间持水量）；f、g、h、i、j 和 k 为方程拟合参数，由实际测定数据拟合获得。

土壤物理性质（水分性质和力学性质）是影响土壤穿透阻力的主要因素，土壤水分特征曲线是土壤水力性质的综合反映，该曲线在拐点的斜率 S 可以指示土壤物理质量[31]，而土壤有效应力 σ'是土壤力学性质的综合反映[32]。基于此，Dexter 等[24]提出了一个用土壤水分饱和度（S）和有效应力（σ'）模拟穿透阻力特征曲线的模型：

$$\mathrm{PR}=l+o\frac{1}{S}+p\sigma' \quad (5)$$

式中，S 为土壤水分饱和度（土壤含水量/田间持水量）；σ'为有效应力（土壤水分饱和度 S 和基质吸力 Ψ 乘积的函数）；l、o 和 p 为方程拟合参数，由实际测定数据拟合获得。

1.5　最小限制水分范围测定

最小限制水分范围（LLWR）是土壤有效含水量、充气孔隙度大于 10%、土壤穿透阻力小于 2 000 kPa 三者决定的土壤含水量的交集，且随土壤容重变化[22]。根据试验数据，对土壤含水量与土壤基质势、穿透阻力、容重、充气孔隙度进行拟合。

土壤含水量和土壤水势模型如下[30]：

$$\theta=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)/[1+|\alpha\psi|^n]^m \quad (6)$$

式中，θ、θ_s 和 θ_r 分别为土壤体积含水量、土壤饱和含水量和土壤残余含水量，$\mathrm{cm^3\cdot cm^{-3}}$；$\Psi$ 为基质势，-kPa；　、n 和 m 为方程拟合参数，m=1-1/n，由实际测定数据拟合获得。

土壤含水量和土壤充气孔隙模型如下[17]：

$$\mathrm{AFP}=q\theta+r\rho+s \quad (7)$$

式中，AFP 为土壤充气孔隙度，%；θ 为土壤体积含水量，$\mathrm{cm^3\cdot cm^{-3}}$；$\rho$为土壤容重，$\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$；$q$、$r$ 和 s 为方程拟合参数，由实际测定数据拟合获得。

由式（1）、式（6）和式（7）可得 LLWR 涉及的 4 个含水量：

$$\theta_{\mathrm{FC}}=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)/[1+|-\alpha 33|^n]^m \quad (8)$$

$$\theta_{\mathrm{PWP}}=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)/[1+|-\alpha 1500|^n]^m \quad (9)$$

$$\theta_{\mathrm{PR}}=\left(\frac{PR}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (10)$$

$$\theta_{\mathrm{AFP}}=\frac{AFP-s-r\rho}{q} \quad (11)$$

LLWR 的上限为θ_{AFP}和θ_{FC}中的最小值，下限为θ_{PR}和θ_{PWP}中的最大值，上限和下限之差即为该层土壤的最小限制水分范围。其中θ_{FC}为基质势等于 –33 kPa 所对应的含水量，θ_{PWP}为基质势等于–1 500 kPa 所对应的含水量，θ_{PR}为穿透阻力等于 2 000 kPa 所对应的含水量，θ_{AFP}为充气孔隙度等于 10%所对应的含水量。

1.6　数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 计算试验数据平均值，用 SigmaPlot 12.5 和 Origin 2021 进行非线性曲线拟合以及作图，用 Origin 2021 对拟合方程及其参数进行了统计性检验。

2　结　果

2.1　红壤穿透阻力特征模型比较

用 5 个模型拟合了不同母质发育红壤的穿透阻力特征模型，统计检验了拟合效果如表 1 所示。由于具有较低的 SSE 值，模型 5 对 GS、CS、AS 和 SS 的拟合效果均好于其他 4 个模型，其次是模型 1、2 和 3，最后是模型 4。从 R^2 值来看，模型 5 对 4 种红壤的拟合效果优于其他 4 个模型，其次是模型 2、3 和 1 对 GS、CS 和 AS 表现出较好的拟合效果，而模型 3 和 2 对 SS 表现出较好的拟合效果，最后是模型 4。综合 P 值来看，5 个模型拟合效果在不同母质红壤和不同土层条件下存在差异，模型 5、1、2 和 3 适用于 4 种红壤，模型 2 适用于 GS 和 SS 红壤而不适用于 CS 和 AS，最后是模型 4 在 4 种红壤的拟合效果均不佳。

2.2　红壤物理性质对穿透阻力的影响

不同母质红壤的穿透阻力（PR）均随土壤含水量降低而逐渐增加，且表层土壤（0～20 cm）的 PR 低于 20～40 cm 土层（图 1a 和图 1b）。在土壤含水量较高时，不同母质红壤的 PR 均随含水量降低而缓慢增加，曲线较为平缓；但当土壤含水量降低至

表 1 五种穿透阻力特征模型在 4 种不同母质红壤的模拟效果

Table 1 Simulation effect of five penetration resistance models in red soil with four different parent materials

土壤类型 Soil type	模型 Model	土壤深度 Soil depth/cm	模拟效果 Simulation effect			
			残差平方和 SSE	决定系数 R^2	样本数 N	显著水平 P
花岗岩红壤	1	0～20	498 591	0.78	9	0.00
Granitic soil（GS）		20～40	1 302 477	0.84	9	0.00
	2	0～20	446 211	0.81	9	0.00
		20～40	1 224 220	0.85	9	0.00
	3	0～20	458 060	0.80	9	0.00
		20～40	1 298 720	0.84	9	0.00
	4	0～20	567 484	0.76	9	0.01
		20～40	3 922 779	0.51	9	0.12
	5	0～20	495 291	0.79	9	0.01
		20～40	654 515	0.92	9	0.00
第四纪红黏土红壤	1	0～20	709 737	0.82	9	0.00
Quaternary red clayey soil		20～40	582 669	0.81	9	0.00
（CS）	2	0～20	231 064	0.94	9	0.00
		20～40	447 771	0.86	9	0.00
	3	0～20	540 895	0.87	9	0.00
		20～40	568 898	0.82	9	0.00
	4	0～20	2 152 730	0.47	9	0.15
		20～40	1 236 734	0.60	9	0.06
	5	0～20	340 650	0.92	9	0.00
		20～40	554 672	0.82	9	0.01
泥质页岩红壤	1	0～20	1 294 407	0.76	9	0.00
Argillaceous shale soil		20～40	2 934 358	0.72	9	0.00
（AS）	2	0～20	1 214 143	0.77	9	0.00
		20～40	2 574 534	0.75	9	0.00
	3	0～20	1 217 721	0.77	9	0.00
		20～40	2 569 346	0.75	9	0.00
	4	0～20	1 181 590	0.78	9	0.00
		20～40	7 339 375	0.29	9	0.36
	5	0～20	1 231 043	0.77	9	0.01
		20～40	1 936 625	0.81	9	0.01
红砂岩红壤	1	0～20	1 815 634	0.77	9	0.00
Red sandstone red soil		20～40	1 874 945	0.78	9	0.00
（SS）	2	0～20	2 101 694	0.73	9	0.00
		20～40	1 403 383	0.84	9	0.00
	3	0～20	1 412 052	0.82	9	0.00

续表

土壤类型	模型	土壤深度	模拟效果 Simulation effect			
Soil type	Model	Soil depth/cm	残差平方和 SSE	决定系数 R^2	样本数 N	显著水平 P
红砂岩红壤		20～40	1 414 402	0.83	9	0.00
Red sandstone red soil	4	0～20	3 055 042	0.61	9	0.06
（SS）		20～40	1 858 335	0.78	9	0.01
	5	0～20	1 779 010	0.77	9	0.01
		20～40	1 875 904	0.78	9	0.01

注：模型 1、2、3、4 和 5 分别为土壤含水量、土壤基质势、土壤含水量和容重、土壤基质势和容重以及饱和应力的曲线模型。
Note: Models 1, 2, 3, 4, and 5 are the curve models for soil water content, matric potential, water content and bulk density, matric potential and bulk density, and saturated stress, respectively.

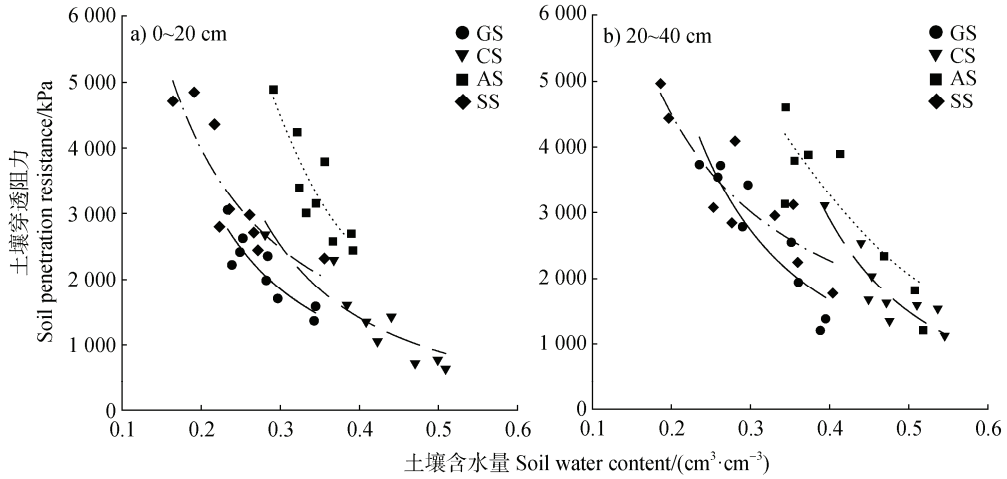


图 1　不同母质红壤穿透阻力与土壤含水量的关系

Fig. 1　Relationship between penetration resistance and water content of red soil with different parent materials

某临界值时，红壤 PR 开始急剧增大，且 AS 随含水量降低而增加的幅度高于其他 3 种红壤。这个临界含水量在表土层（0～20 cm）约为 0.30 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，而在 20～40 cm 土层约为 0.35 $cm^3 \cdot cm^{-3}$。4 种不同母质红壤的临界含水量略有差异，其大小规律为 AS>CS>SS=GS。

由式（3）得不同土壤容重对不同母质红壤 PR 的影响，如图 2 所示。土壤容重对不同母质红壤 PR 与含水量的关系影响较为显著。在相同的土壤含水量下，4 种红壤均呈现 PR 随土壤容重的增加而增加，高容重土壤的 PR 特征曲线始终在低容重土壤的上方。这些不同容重的不同母质红壤 PR 特征曲线与图 1 中的曲线类似，也存在转折含水量的现象，即土壤含水量在低于某临界含水量后土壤 PR 快速增加，曲线表现出拐点。在同一红壤中，较小的容重（1.3 $g \cdot cm^{-3}$）在更低的含水量下（0.30 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 以下）PR 发生转折，较大的容重（1.5 $g \cdot cm^{-3}$）在相对较高的含水量下（约 0.35 $cm^3 \cdot cm^{-3}$）穿透阻力发生转折，尽管在部分红壤和土层存在差异，而 20～40 cm 土层的转折点高于表层土壤（0～20 cm）。对于不同红壤而言，土壤含水量转折点大小规律为 AS=CS>SS=GS。

由式（1）得对不同土壤质地和有机质含量对红壤 PR 的影响，如图 3 所示。土壤质地显著影响土壤 PR（图 3a），红壤 PR 随着黏粒含量增加而增大。在土壤含水量较低（<0.25 $cm^3 \cdot cm^{-3}$）时，黏粒含量高的红壤（AS 和 CS）的 PR 显著高于黏粒含量低的红壤（GS 和 SS）。而当土壤含水量较高（>0.29 $cm^3 \cdot cm^{-3}$）时，红壤 PR 的大小规律为 AS> CS=SS> GS。总体而言，AS 的 PR 高于 CS、SS 和 GS 等 3 种红壤。这说明质地越黏重红壤的 PR 对土壤含水量的敏感度较高，也意味着在干旱过程中 PR

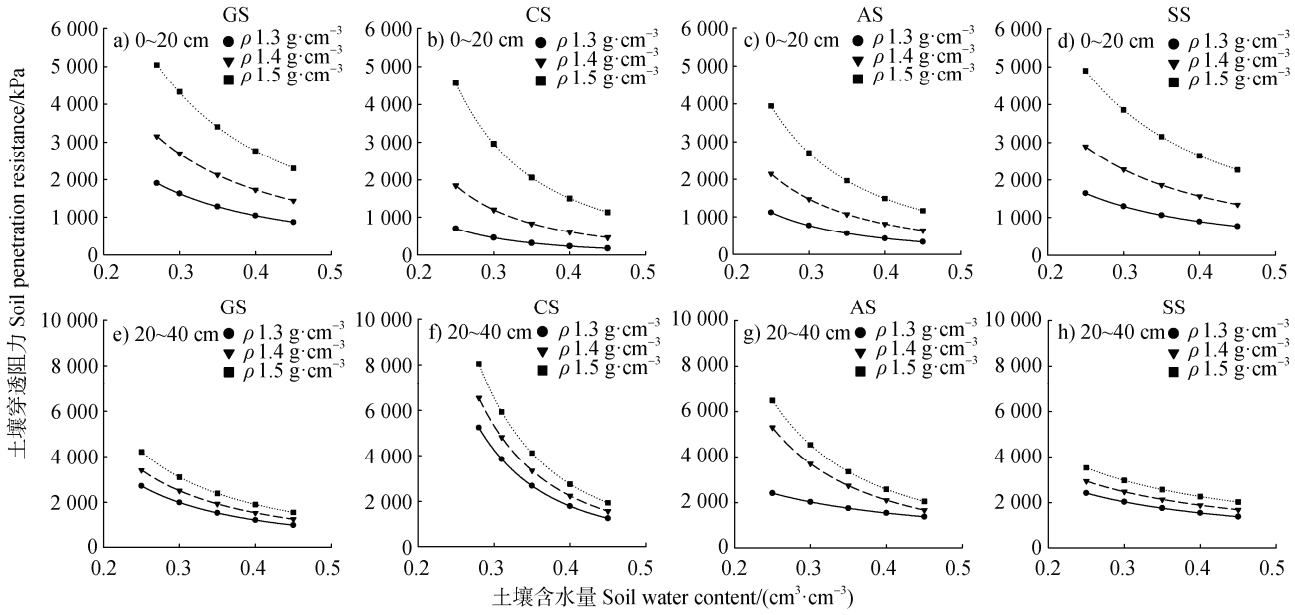
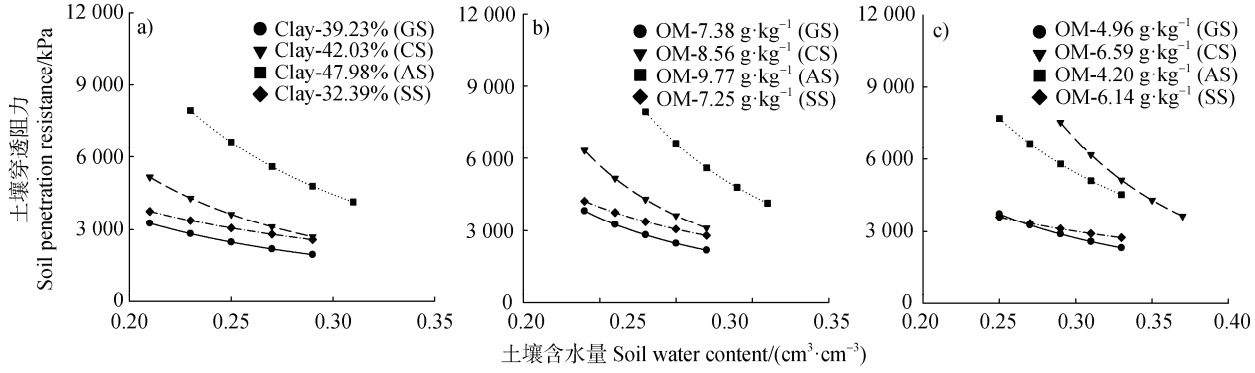


图 2 不同母质红壤穿透阻力与容重的关系

Fig. 2 Relationship between penetration resistance and bulk density of red soil with different parent materials



注：a 和 b 为 0～20 cm 土壤深度。c 为 20～40 cm 土壤深度。Clay 和 OM 分别为黏粒和有机质。Note：a and b are the soil depths of 0～20 cm，and c is the soil depth of 20～40 cm. Clay and OM are clay and organic matter，respectively.

图 3 不同母质红壤穿透阻力与土壤颗粒组成和有机质的关系

Fig. 3 The relationship between penetration resistance and soil particle composition and organic matter of red soil with different parent materials

增加更快。在不同含水量下，4 种有机质含量不同的红壤 PR 差异显著（图 3b 和图 3c）。在 0～20 cm 土层中，低有机质含量红壤（GS 和 SS）的 PR 低于高有机质含量红壤（AS 和 CS）的 PR。而在 20～40 cm 土层中，高有机质含量砂质红壤（GS 和 SS）的 PR 高于低有机质含量黏质红壤（AS 和 CS）的 PR。这说明有机质含量可能不是影响黏质红壤和砂质红壤 PR 的主要因素。

2.3 不同耕作措施对土壤穿透阻力的影响

由式（1）得不同耕作措施对黏质红壤 PR 的影响，如图 4 所示。与 CK 相比，机械耕作与生物耕作均可以降低 PR，且随土壤含水量的增加而降低。整体而言，机械耕作改善耕层（0～20 cm）土壤 PR 的效果略好于生物耕作，而生物耕作降低深层（40 cm 以下）土壤 PR 的效果较好。当土壤含水量为 0.25 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 时，机械耕作与生物耕作降低 0～10 cm 土层 PR 的绝对幅度分别约为 723 kPa 和 687 kPa。在 10～20 cm 土层中，机械耕作降低 PR 的绝对幅度可达 843 kPa，而生物耕作处理的为 998 kPa。在 20～40 cm 土层中，机械耕作 DT 和生

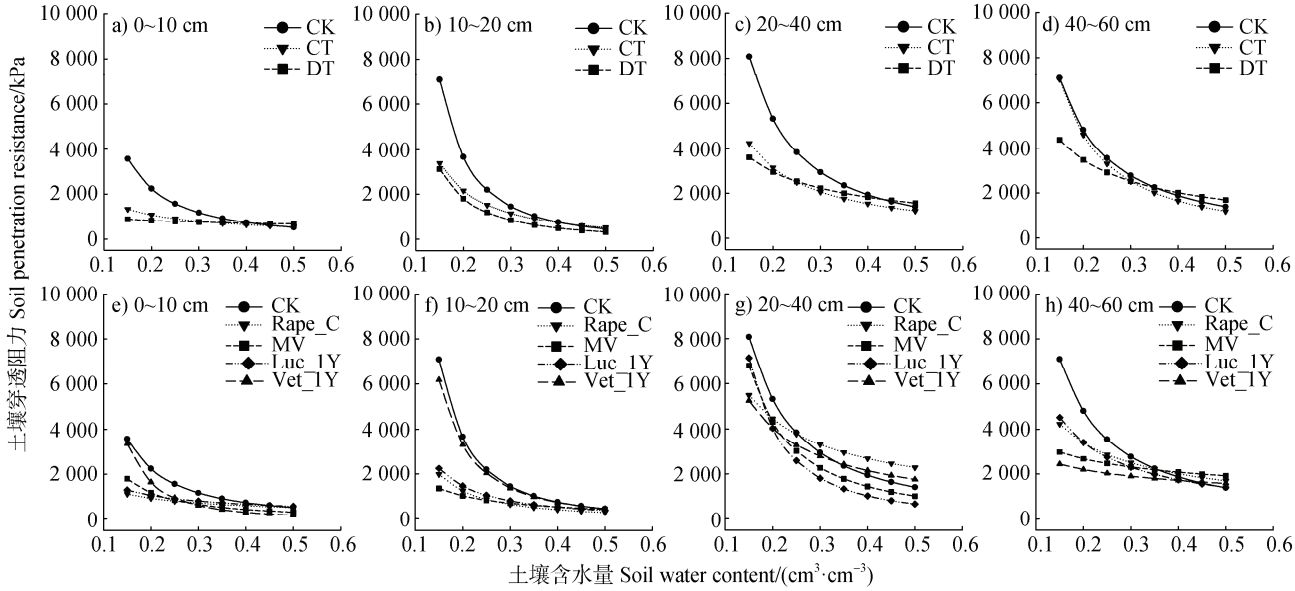
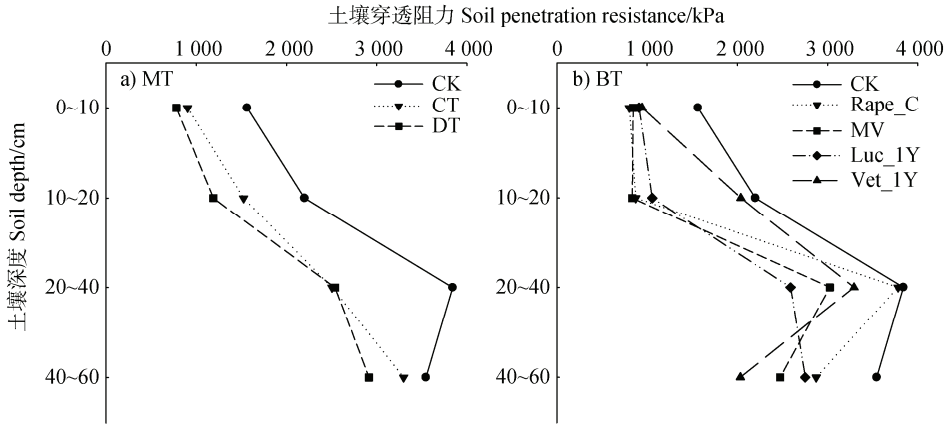


图 4　机械耕作与生物耕作对土壤穿透阻力的影响

Fig. 4　Effects of mechanical tillage and biological tillage on soil penetration resistance

物耕作 Luc_1Y 处理的 PR 降低幅度相差不多（绝对降幅约为 1 300 kPa）。在 40 cm 以下土层中，机械耕作降低 PR 的能力较弱（DT 处理的绝对降幅约为 633 kPa），而生物耕作 Vet_1Y 处理可以显著降低 PR，绝对降幅可达 1 512 kPa。由此可以看出，机械耕作能降低 0～40 cm 土层的 PR，而生物耕作除此之外还可以降低深层土壤的 PR。

红壤 PR 在土壤剖面上呈现随深度增加先增加后减少的单峰型分布模式，CK 处理在 20～40 cm 深度达到峰值（图 5）。与 CK 相比，机械耕作和生物耕作均能不同程度地降低 PR 峰值的深度位置和大小，例如 DT 处理能将峰值深度降低至 40 cm 以下土层，而生物耕作不仅将峰值位置降低至 40 cm 以下土层且峰值低于机械耕作。



注：a）和 b）分别为机械耕作和生物耕作。Note：a）and b）are mechanical tillage and biological tillage，respectively.

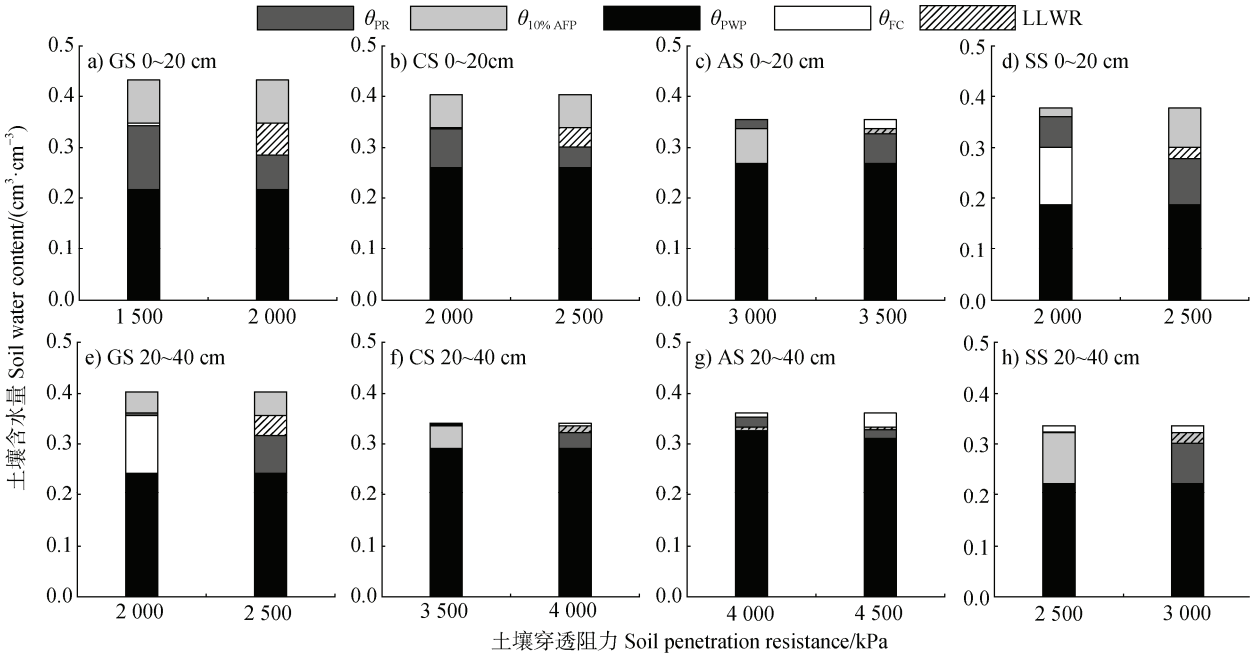
图 5　机械耕作与生物耕作下土壤穿透阻力的剖面分布

Fig. 5　Profile distribution of soil penetration resistance under mechanical tillage and biological tillage

2.4　穿透阻力对最小限制水分范围的影响

图 6 所示，不同母质发育红壤的最适 PR 阈值范围存在差异。在 0～20 cm 土层中，不同母质红壤存在最小水分限制范围时的 PR 大小为 AS（3 500 kPa）>CS（2 500 kPa）=SS（2 500 kPa）>GS（2 000 kPa）。而此时 GS 的最小水分限制范围最大

为 0.06 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，其次是 CS（0.04 $cm^3 \cdot cm^{-3}$）和 SS（0.02 $cm^3 \cdot cm^{-3}$），最后是 AS 为 0.01 $cm^3 \cdot cm^{-3}$。在 20～40 cm 土层中，不同母质红壤存在最小水分限制范围时的 PR 大小规律为 AS（4 500 kPa）>CS（4 000 kPa）>SS（3 000 kPa）>GS（2 500 kPa）。由此可以看出，GS 最适的 PR 阈值范围不低于 2 000 kPa，CS 的超过 2 500 kPa，AS 的超过 3 500 kPa，SS 的不低于 2 500 kPa。



注：θ_{PR}、$\theta_{10\%\,AFP}$、θ_{PWP} 和 θ_{FC} 分别为穿透阻力的土壤含水量、充气孔隙为 10%时的土壤含水量、萎蔫点含水量和田间持水量。Note：GS，CS，AS and SS are red soil developed from granite，red soil developed from Quaternary red clay，red soil developed from argillaceous shale and red soil developed from red sandstone，respectively. θ_{PR}，$\theta_{10\%\,AFP}$，θ_{PWP}，and θ_{FC} are soil water content with penetration resistance，soil water content with aerated porosity of 10%，wilting point，and field capacity，respectively.

图 6 土壤穿透阻力对不同母质红壤 LLWR（斜线部分）的影响

Fig. 6 Effects of soil penetration resistance on LLWR（the part with slashes）of red soil with different parent materials

3 讨 论

3.1 红壤穿透阻力特征模型及其影响因子

土壤穿透阻力特征模型因变量不同存在多种形式，针对特定的土壤可以筛选出预测效果较优的模型。土壤穿透阻力（PR）主要受土壤水分和力学性质的影响，土壤水分特征曲线的拐点斜率 S 是土壤水分性质的综合反映[31]，而土壤有效应力 σ'是土壤力学性质的综合反映[32]。本研究表明，模型 5（饱和应力）对于 4 种不同母质发育红壤的拟合效果最好，这与 Dexter 等[24]研究结果一致，即在不同母质发育成的冰碛土、黄土和冲积土均得到了较好的拟合效果。此外，模型 1（含水量）和模型 2（土壤基质势）对 GS 和 SS 的拟合预测较好，而模型 3（含水量容重）对黏质红壤（CS 和 AS）的拟合预测优于模型 1（表 1 和表 2）。这是由于土壤穿透阻力在容重较低土壤中主要受到土壤水分的影响；而在容重较高的土壤中，容重则取代土壤含水量成为限制 PR 的主要因子。

土壤穿透阻力受多种土壤自身性质的影响，这些性质不仅独立影响土壤穿透阻力而且也会产生共同的影响[33]。毛细管水张力在土壤含水量降低过程中会显著增加，进而导致土壤穿透阻力随之增加[34, 17]。本研究也发现 4 种红壤的 PR 均随含水量降低而逐渐增加（图 1）。此外，本研究还发现 4 种不同母质红壤的临界含水量的大小为 AS>CS>SS=GS，且 PR 在土壤含水量低至临界值时开始急剧增加。当土壤含水量较高时，土壤穿透阻力由于土壤可塑性的增加对土壤容重的敏感度增大；而当土壤含水量较低时，土壤穿透阻力则同时受到土壤容重和内部摩擦

的双重影响[35]。本研究发现，在土壤含水量较高时，PR 随着容重的增大而变化幅度较低，随着土壤含水量的降低，高容重土壤的 PR 显著高于低容重土壤。这表明低容重土壤的穿透阻力受与土壤含水量密切相关，而高容重土壤因土壤颗粒形变空间受限导致其阻力显著增加。Leão 等[36]研究也表明，土壤容重增加导致土壤穿透阻力的变大可能归因于土壤基质压实导致的颗粒间摩擦力增加。

土壤质地是较为稳定物理性质，也是决定土壤穿透阻力的基本性质。不同质地的土壤颗粒形态和颗粒间的胶结效果存在差异，从而影响土壤结构和容重等，这些因子均直接影响穿透阻力。本研究发现黏粒含量较高（AS 和 CS）的 PR 高于含量较低的 SS 和 GS。这与 Groenevelt 等[10]的研究结果相类似，土壤耕作层的黏粒含量对阻力的影响显著。这说明质地越黏重红壤的穿透阻力对土壤含水量的敏感度较高。在相同质地土壤中，当土壤有机质含量较高时，土壤穿透阻力对土壤水分变化的敏感程度相对较弱[15]。本研究发现，低有机质含量砂质红壤在 0～20 cm 的 PR 低于高有机质黏质红壤，而在 20～40 cm 土层，高有机质含量砂质红壤的 PR 高于低有机质含量黏质红壤。这说明有机质含量较低的红壤中，土壤有机质可能不是影响亚热带地区红壤穿透阻力的主要因素，而土壤质地在影响土壤穿透阻力方面起到关键作用。

3.2　耕作措施对红壤穿透阻力的影响

耕作措施通过影响土壤水分和容重进而改善土壤穿透阻力[37, 16]。降低穿透阻力对于促进根系生长至关重要，因为超过 2 000 kPa 的土壤穿透阻力会严重限制根系生长和土壤水分运移。本研究表明，机械耕作可以改善 0～40 cm 土层的 PR，而生物耕作除此之外还降低深层土壤 PR。这与 Lin 等[38]和 Pariz 等[39]的研究结果相类似，即深耕可以显著降低黏质红壤的穿透阻力，而生物耕作通过根系生长和下扎降低土壤穿透阻力。这是由于翻耕将破碎后的亚表层紧实土壤与表层土壤充分混合，通过增加土壤孔隙度来缓解土壤压实状况并降低土壤容重[40-41]。而覆盖作物根系不能直接占据大孔隙，必须创造新的根系孔道，特别是在其腐烂后，细根增加了通气孔隙（但小于生物孔）和根-土接触界面[42]，也减少土壤压实和降低容重[43-44]。此外，机械耕作能将穿透阻力峰值深度降低到 40 cm 以下土层，而生物耕作不仅将峰值位置降低到 40 cm 以下土层且峰值低于机械耕作（图 4）。这也进一步表明生物耕作较机械耕作更能降低深层土壤的穿透阻力。

3.3　红壤穿透阻力阈值范围

在亚热带季风气候区，土壤穿透阻力严重影响作物根系生长，通过最小限制水分范围反推土壤穿透阻力的阈值范围[45, 38]。在众多文献中发现 2 000 kPa 可以作为影响根部生长的穿透阻力临界值[46-47]。然而也研究发现 2 000 kPa 的穿透阻力不适合作为影响黏质红壤作物生长的穿透阻力阈值，黏质红壤由于含有较多的黏粒和容重较大导致穿透阻力会高于该值，但不一定会限制根系生长[17]。研究发现，2 500 kPa 的穿透阻力适合作为加拿大灰化土 LLWR 的下限临界值[26]。本研究发现，除 GS 在 0～20 cm 的 PR 阈值为 2 000 kPa 之外，其余三种不同母质发育红壤的穿透阻力阈值均超 2 500 kPa，甚至 AS 的穿透阻力阈值不低于 4 500 kPa。这与 Gubiani 等[25]的研究相类似，即 2 000 kPa 的穿透阻力阈值不适合作为 LLWR 下限的临界值。这说明需要提高亚热带红壤地区的穿透阻力阈值，不同母质红壤的穿透阻力阈值要分别确定，也能进一步评价穿透阻力对作物根系生长的影响。此外，还发现黏质红壤（AS 和 CS）在所有土层的 PR 阈值均高于砂质红壤（GS 和 SS）。这是由于黏质红壤较砂质红壤含有较多的黏粒，从而导致其穿透阻力阈值高于砂质红壤，这也进一步印证了黏粒含量高的红壤的穿透阻力显著高于黏粒含量低的红壤（图 3a）。

本文研究的 5 种土壤穿透阻力特征模型能够有效地适用于我国南方 4 种不同母质发育的红壤，可以准确预测其土壤穿透阻力，也能进一步分析不同红壤穿透阻力的影响因子及其阈值。然而，当前研究范围仍局限于试验区的 4 种典型红壤，未来需进一步研究更多母质发育的红壤，考虑不同耕作制度、农艺措施和土地利用方式对红壤性质的影响，进一步验证土壤穿透阻力特征模型在我国南方红壤区的应用。

4　结　论

本研究分析穿透阻力特征模型在不同母质红壤上的适用性，明确了影响不同母质红壤穿透阻力的

主要因子和土壤穿透阻力阈值，以及不同耕作措施降低穿透阻力的效果，得到以下主要结论：（1）5个模型对不同母质红壤拟合效果存在差异，饱和应力模型对于4种红壤的拟合效果最好，土壤含水量和容重模型与土壤基质势模型对砂质红壤的拟合预测较好，而土壤含水量（土壤基质势）模型与土壤含水量和容重模型对黏质红壤（CS和AS）的拟合效果较好；（2）土壤含水量是影响红壤穿透阻力的重要因素，土壤容重和质地（黏粒含量）是影响不同母质红壤穿透阻力的主要因素，而有机质影响效果不明显；（3）机械耕作可以改善0–40 cm土层的穿透阻力，而生物耕作除此之外还降低深层土壤穿透阻力；（4）不同母质发育红壤的PR阈值不低于2 500 kPa，且黏质红壤（AS和CS）的PR阈值高于砂质红壤（GS和SS）。

参考文献（References）

[1] Zhang F B, Hou Y X, Ao Y Y, et al. Root-soil interaction under soil compaction[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(3): 531—543. [张方博, 侯玉雪, 敖园园, 等. 土壤紧实胁迫下根系–土壤的相互作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 531—543.]

[2] FAO and ITPS. Status of the world's soil resources (SWSR)—Main report[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015.

[3] Batey T. Soil compaction and soil management–A review[J]. Soil Use and Management, 2009, 25(4): 335—345.

[4] He Y B, Dong J Q, Zeng H, et al. Simulation of lucerne and vetiver hydroponic root exudates to alleviate clayey red soil penetration resistance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(5): 1224—1235. [何阳波, 董俊琦, 曾蕙, 等. 香根草和紫花苜蓿水培根系分泌物缓解黏质红壤机械阻力模拟研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1224—1235.]

[5] Huang Y T, Chen J X, Gao Y H, et al. Effects of long-term tillage on hydraulic properties of typical black soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 998—1008. [黄怡婷, 陈俊熹, 高钰淏, 等. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 998—1008.]

[6] Yang S Q, Wu H J, Han R Y, et al. A review of soil compaction in farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 226—232. [杨世琦, 吴会军, 韩瑞芸, 等. 农田土壤紧实度研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 226—232.]

[7] Busscher W J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(2): 519—524.

[8] Mirreh H F, Ketcheson J W. Influence of soil bulk density and matric pressure on soil resistance to penetration[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1972, 52(3): 477—483.

[9] Spivey L D, Busscher W J, Campbell R B. The effect of texture on strength of southeastern coastal plain soils[J]. Soil and Tillage Research, 1986, 6(4): 351—363.

[10] Groenevelt P H, Grant C D, Semetsa S. A new procedure to determine soil water availability[J]. Soil Research, 2001, 39(3): 577—598.

[11] Wang G P, Xiao B, Li S L, et al. Characteristics of penetration resistance of moss-dominated biocrusts on aeolian and loessal soils and its influencing factors on Chinese Loess Plateau[J]. Soils, 2021, 53(1): 173—182. [王国鹏, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原藓结皮覆盖土壤的穿透阻力特征及其影响因素[J]. 土壤, 2021, 53(1): 173—182.]

[12] Watts C W, Clark L J, Poulton P R, et al. The role of clay, organic carbon and long-term management on mouldboard plough draught measured on the Broadbalk wheat experiment at Rothamsted[J]. Soil Use and Management, 2006, 22(4): 334—341.

[13] Ley G J, Mullins C E, Lal R. The potential restriction to root growth in structurally weak tropical soils[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 33(2): 133—142.

[14] Whalley W R, Clark L J, Gowing D J G, et al. Does soil strength play a role in wheat yield losses caused by soil drying [J]. Plant and Soil, 2006, 280(1): 279—290.

[15] Gao W, Watts C W, Ren T, et al. The effects of compaction and soil drying on penetrometer resistance[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 125: 14—22.

[16] de Moraes M T, Olbermann F J R, de Andrade Bonetti J, et al. The impacts of cover crop mixes on the penetration resistance model of an Oxisol under no-tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 242: 106138.

[17] Wang J Q, Gao R K, Long Q, et al. Effect of bio-tillage on the least limiting water range of clayey red soil[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 246: 106337.

[18] Luo M, Deng C F, Chen J Z, et al. Temporal and spatial response of red soil penetration resistance in south Hubei[J]. Soils, 2016, 48(5): 1055—1061. [罗敏, 邓才富, 陈家宙, 等. 鄂南红壤穿透阻力的时空变化研究[J]. 土壤, 2016, 48(5): 1055—1061.]

[19] Peng X H, Horn R. Time-dependent, anisotropic pore structure and soil strength in a 10-year period after intensive tractor wheeling under conservation and conventional tillage[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(6): 936—944.

[20] He Y B, Lin L R, Chen J Z. Maize root morphology responses to soil penetration resistance related to tillage

and drought in a clayey soil[J]. The Journal of Agricultural Science，2017，155（7）：1137—1149.
[21] Whalley W R，To J，Kay B D，et al. Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters[J]. Geoderma，2007，137（3/4）：370—377.
[22] da Silva A P，Kay B D，Perfect E. Characterization of the least limiting water range of soils[J]. Soil Science Society of America Journal，1994，58（6）：1775—1781.
[23] Whalley W R，Leeds-Harrison P B，Clark L J，et al. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils[J]. Soil and Tillage Research，2005，84（1）：18—27.
[24] Dexter A R，Czyż E A，Gąte O P. A method for prediction of soil penetration resistance[J]. Soil and Tillage Research，2007，93（2）：412—419.
[25] Gubiani P I，Goulart R Z，Reichert J M，et al. Corn growth and yield associated with the least limiting water range[J]. Revista Brasileira De Ciencia Do Solo，2013，37（6）：1502—1511.
[26] Lapen D R，Topp G C，Gregorich E G，et al. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production，eastern Ontario，Canada[J]. Soil and Tillage Research，2004，78（2）：151—170.
[27] Horn R，Baumgartl T. Handbook of Soil Science[M]. Florida：Chemical Rubber Company Press，2000.
[28] Chen J Z，Wu Z L，Zhao T M，et al. Rotation crop root performance and its effect on soil hydraulic properties in a clayey Utisol[J]. Soil and Tillage Research，2021，213：105136.
[29] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing：China Agriculture Press，2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京：中国农业出版社，2000.]
[30] van Genuchten M T，Leij F J，Yates S R，et al. The retc code for quantifying hydraulic functions of unsaturated soils. America[R]：U.S. Environmental Protection Agency，1991.
[31] Dexter A R. Soil physical quality - part i. Theory，effects of soil texture， density，and organic matter，and effects on root growth[J]. Geoderma，2004，120（3/4）：201—214.
[32] Khalili N，Geiser F，Blight G E. Effective stress in unsaturated soils：Review with new evidence[J]. International Journal of Geomechanics，2004，4（2）：115—126.
[33] Vaz C M P，Manieri J M，de Maria I C，et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content[J]. Geoderma，2011，166（1）：92—101.
[34] Bengough A G. Modelling rooting depth and soil strength in a drying soil profile[J]. Journal of Theoretical Biology，1997，186（3）：327—338.
[35] Mulqueen J，Stafford J V，Tanner D W. Evaluation of penetrometers for measuring soil strength[J]. Journal of Terramechanics，1977，14（3）：137—151.
[36] Leão T P，da Silva A P，Macedo M C M，et al. Least limiting water range：A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture[J]. Soil and Tillage Research，2006，88（1/2）：279—285.
[37] Bescansa P，Imaz M J，Virto I，et al. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain[J]. Soil and Tillage Research，2006，87（1）：19—27.
[38] Lin L R，He Y B，Chen J Z. The influence of soil drying-and tillage-induced penetration resistance on maize root growth in a clayey soil[J]. Journal of Integrative Agriculture，2016，15（5）：1112—1120.
[39] Pariz C M，Costa C，Crusciol C A C，et al. Production，nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems，2017，108（1）：35—54.
[40] Bogunovic I，Pereira P，Kisic I，et al. Tillage management impacts on soil compaction，erosion and crop yield in Stagnosols（Croatia）[J]. Catena，2018，160：376—384.
[41] Schneider F，Don A，Hennings I，et al. The effect of deep tillage on crop yield–What do we really know [J]. Soil and Tillage Research，2017，174：193—204.
[42] Çerçioğlu M，Anderson S H，Udawatta R P，et al. Effect of cover crop management on soil hydraulic properties[J]. Geoderma，2019，343：247—253.
[43] Chen J Z，He Y B，Li P. Effects of tillage alteration on soil water content，maize crop water potential and grain yield under subtropical humid climate conditions[J]. International Agrophysics，2021，35（1）：131668.
[44] Ng C W W，Ni J J，Leung A K. Effects of plant growth and spacing on soil hydrological changes：A field study[J]. Géotechnique，2020，70（10）：867—881.
[45] Ferreira C J B，Zotarelli L，Tormena C A，et al. Effects of water table management on least limiting water range and potato root growth[J]. Agricultural Water Management，2017，186：1—11.
[46] Bengough A G，Bransby M F，Hans J，et al. Root responses to soil physical conditions；growth dynamics from field to cell[J]. Journal of Experimental Botany，2006，57（2）：437—447.
[47] Safadoust A，Feizee P，Mahboubi A A，et al. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system[J]. Agricultural Water Management，2014，136：34—41.

（**责任编辑**：檀满枝）