

农田土壤压实表征指标及其检测方法研究进展

冉恩华^{1,2}, 彭伟¹, 郑月姮^{1,3}, 朱向明^{1*}

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 黑龙江哈尔滨 150081; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 黑龙江大学, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要: 土壤压实已成为威胁全球农业可持续发展的重要因素之一。国内外开展了大量关于农田土壤压实的研究, 但压实表征指标和检测方法缺少系统分类。本文从土壤压实与作物生长的关系出发, 总结了国内外已有的土壤压实表征指标及检测方法。主要结果如下: 1) 单一指标往往难以量化不同尺度的土壤压实程度, 对于田块尺度, 宜选择土壤穿透阻力和相对紧实度, 同时配合土壤含水量来表征其压实状况; 对于区域农田尺度, 宜采用先期固结压力来评估潜在压实风险; 2) 应依据在室内或田间具体情况选择相应的检测方法, 室内选择土壤结构检测法或先期固结压力检测法反映土壤压实敏感性, 田间选择穿透阻力检测法或地球物理检测法表征土壤压实程度。今后研究建议: 1) 更加深入研究土壤压实对作物根系形态、地上部光合产物的分配以及其他土壤质量指标的影响, 并加强作物对于土壤压实的反馈机制研究; 2) 结合研究尺度, 将土壤物理学指标与土壤力学指标结合起来, 构建一套系统评价土壤压实程度的指标体系; 3) 从方法上削弱土壤空间异质性带来的影响应是今后土壤压实田间检测方法的重要研究方向。

关键词: 农田土壤压实; 土壤压实指标; 土壤结构检测法; 先期固结压力检测法; 穿透阻力检测法; 参考容重; 土壤压实风险

Research advances on indicators and detecting methods of arable land compaction

RAN En-hua^{1,2}, PENG Wei¹, ZHENG Yue-heng^{1,3}, ZHU Xiang-ming^{1*}

(1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150081, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Heilongjiang University,
Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Soil compaction has become one of the most serious obstacles restraining the sustainable use of arable lands. Many studies were carried out on soil compaction at home and abroad, but the results were not comparable due to the limited research conditions. This paper reviewed the soil compaction indicators and the detecting methods reported at home and abroad. The main results are as follows: 1) A single compaction indicator is often hard to quantify soil compaction degree completely. At field scale, combining soil penetration resistance with water content could characterize the actual degree of soil compactness. At scale as large as a region, the precompression stress method should be considered to approach soil compaction limits and the potential risks of soil compaction. 2) All the reported detecting methods showed advantages and disadvantages, affected by indoor or field detecting condition. Soil structure method and precompression stress method are often recommended for indoor detection as they could reflect soil compaction sensitively. The penetration resistance method and geophysical method are usually used to determine soil compaction degree in field condition. More researches should be strengthened in the future: 1) The effects of soil compaction on crop root morphology, distribution of aboveground photosynthesis products, and the feedback mechanism of crops on soil compaction; 2) Systematic

收稿日期: 2023-11-14 接受日期: 2024-02-20

基金项目: 黑土地保护与利用科技创新工程专项 (XDA28010401); 中国科学院国际合作局国际伙伴计划项目 (131323KYSB20210004)。

联系方式: 冉恩华 E-mail: 876731032@qq.com; * 通信作者 朱向明 E-mail: zhuxm@iga.ac.cn

evaluation of soil compaction by combining the soil physical indicators with soil mechanical indexes in conjunction with research scales; 3) Elimination of the influence of the spatial heterogeneity on field compaction detection.

Key words: soil compaction; compaction indicator; precompression stress method; penetration resistance method; geophysical method; reference bulk density; soil compaction risk

土壤压实通常是指由于外在压力作用使得土壤孔隙度变小、容重增加的现象^[1]。一般认为, 过度的土壤压实将会导致土壤穿透阻力增加, 土壤颗粒排列紧密, 土壤通气和导水大孔隙度降低, 进而限制土壤气体交换、水分和养分的运移和再分配, 阻碍作物根系的延伸, 降低作物地上部生物量和产量^[2]。导致土壤压实的因素有很多, 既有天然的, 如降雨沉实、动物践踏等, 也有人为的, 如农田化学物质投入、有机肥料使用缺乏、机械耕作、人为踩踏、农机具行走碾压等。随着农业机械化持续发展, 现代农业得到极大促进, 然而农机具重量和使用频率逐步增加, 超过了维持土壤生态功能所能承受的范围, 使得农田土壤压实问题更加突出, 已成为威胁全球农业可持续发展的重要因素之一^[3]。我国的华北平原、关中平原、南方红壤区均发现不同程度的压实问题, 作为我国耕地中“大熊猫”的东北黑土区更是由于机械化程度高、土壤容重大、土壤水分通透性差, 压实风险十分严峻^[4-5]。

国外学者从 20 世纪 50 年代起就开始研究土壤压实, 开展了大量关于农田土壤压实诱因、特征、危害及消除的研究^[2, 4]。国内学者对这一问题的研究大致可以追溯到 20 世纪 60 年代中期^[5], 主要通过借鉴国外研究成果结合国内实际情况开展相关研究, 研究集中在压实对土壤其他物理性质^[6]、化学性质^[7]、生物性质^[8]、作物生长^[9]与作物产量^[10]的影响等方面。近年来, 压实越来越受到国内学者的关注, 压实影响因素、压实过程模拟、压实消减措施等机理研究越来越深入, 但有关压实表征仍主要围绕土壤容重和穿透阻力等少数几个指标开展, 究其原因在于对其发生机理、驱动因素认知不够全面和深刻, 危害性评价不够准确, 缺乏以作物生长为参比的表征指标。此外, 国内对于压实检测方法的研究尚处于起步阶段, 特别是对于大中尺度下农田土壤压实状况的检测方法尚十分缺乏。

目前有不少关于土壤压实研究的综述文献, 如张兴义等^[4]论述了土壤压实测定方法, 提到了压实指示参数及观测仪器, 王宪良等^[11]综述了土壤压实调查方法, 并分析了各方法的特点和性能, 但都仅仅进行了粗略的描述, 并没有将土壤压实表征指标和检

测方法系统总结并详细论述。

有鉴于此, 本文从土壤压实与作物生长的关系出发, 对国内外已有的土壤压实表征指标及检测方法进行了系统梳理, 比较了不同表征指标及检测方法优劣和适应条件, 并提出了今后压实评价研究应致力的方向, 以期为农田土壤压实的进一步研究提供参考。

1 土壤压实与作物生长的关系

土壤压实程度通常表征为土壤压实度或紧实度, 是反映农田土壤物理状态的重要指标, 其在一定程度上可以作为作物产量的预警指标^[12]。多数情况下, 土壤压实对作物生长弊大于利。就农业土壤而言, 压实对作物生长、土壤性状的危害是多方面的, 长期压实造成土壤压板^[13]。Atwell^[14]研究发现, 随土壤紧实度增加, 作物吸收养分的能力下降, 例如小麦播种 33 天后, 压实的砂壤土小麦地上部生长明显慢于未压实处理, 分蘖也更少, 压实处理地上部氮、钾含量较未压实处理低 12%~14%。Barzegar 等^[15]设计了容重分别为 1.4、1.65、1.8 g/cm³ 3 种压实水平的田间试验, 发现随着容重的增大, 小麦根系对磷与锌的累积量以及根系干物质量均降低。Zhao 等^[16]使用 11 t 重的拖拉机分别碾压地块 0、1、4、8 次, 模拟 4 种土壤压实程度, 发现碾压次数增加显著降低硒和提高砷在作物籽粒中的浓度。Soane 等^[17]发现, 紧实土壤中作物生长消耗的养分比在非紧实土壤中作物消耗的多, 这是因为紧实限制根系生长, 降低了养分的获取能力, 增加了养分流失量, 加剧了氮素反硝化作用。对于作物生理指标的研究, 李潮海等^[18]发现, 土壤紧实使作物叶面积下降和气孔导度降低, 加速了后期叶片衰老, 超氧化物歧化酶活性降低, 丙二醛含量增加。

然而, 并非所有的土壤压实都是有害的, 有时土壤压实是有益的, 例如, 在农业生产实际中, 适度的耙耱碾压不但能增加根系与土壤颗粒之间的接触面积, 促进养分和水分的吸收, 而且能使种子与土壤充分接触, 利于发芽和保墒, 满足其生长发育的需求。很多学者的研究也得出了类似的结果, 杨世琦等^[19]研究发现, 黏土压实对植物生长与存活负效

应较大,但在沙土和壤土上一定程度的压实则对植物生长有正效应。Beutler 等^[20]研究发现,适度压实的半干润氧化土可促进大豆生长发育,提高其产量。

此外,不同作物种类,甚至同一作物不同品种对土壤压实的响应也不尽相同。Reichert 等^[21]研究了亚热带地区不同土壤压实度对大豆、黑豆及小麦相对产量的影响,结果发现三种作物均随紧实度的增加呈现抛物线变化趋势,最高相对产量出现在相对紧实度(测试土壤容重与最大干容重的比值)80%~95%时(图1)。岳龙凯^[22]在东北黑土区的研究发现,大豆品种对于土壤压实的耐受性具有年代差异,育成年代较晚的品种具有更高的耐受土壤压实的能力,相同压实条件下,1940s~1960s 品种耐受压实的能力低于 1970s~2000s 品种,大豆主茎节数、植株干重、有效荚数等指标表现出明显的年代差异。

2 土壤压实程度表征指标

选择适宜的表征指标是评估土壤压实程度的基础。目前已有多种土壤压实度的表征指标,按压实所致土壤初级变化或次级变化可分为直接指标和间接指标^[23],按指标属性又可分为表征压实状况的土壤物理学指标和探求土壤极限压实与潜在压实风险的土质力学指标两大类。对于农田土壤而言,土壤压实可看作土壤物理学角度的土体压实^[24]与土质力学角度的土体压缩^[25]的结合,因此本文按指标属性进行归纳论述(表1)。

2.1 土壤物理学指标

2.1.1 容重 容重是指单位容积土壤的干重量,它是反映土壤结构状况最基本的参数。所有的土壤压

实都伴随着土壤结构的改变,因此容重可以被用来表征农田土壤压实程度^[26]。目前,容重是最常用也是最容易获取的土壤压实程度表征指标。总的来说,容重与土壤压实程度呈正相关关系。对于质地相近的农田土壤,容重越大,土壤压实程度越高,土壤越紧实;反之,容重越小,土壤压实程度越低,土壤越疏松。但是,土壤的结构、质地、紧实度和有机质以及作物根系类型等因素都会影响容重数值,故对于不同结构性和质地的土壤而言,土壤容重所反映的土壤压实程度会受到影响^[32]。

容重与作物生长特别是根系延伸密切相关。研究者一直尝试寻找限制作物生长的容重阈值。例如, Sato 等^[33]发现在巴西亚马逊氧化土区,水分保持在田间持水量条件下,对于砂壤土、粉壤土、壤黏土、黏土大豆根长密度减少 50% 的容重阈值分别为 1.82、1.75、1.51、1.45 g/cm³。可见,容重阈值受作物种类、土壤质地、含水量等多种因素的制约,其值的确定往往比较困难^[32]。对于同一种作物,容重阈值通常随土壤含水量的降低而降低,随黏粒含量的增加而降低^[34]。

2.1.2 土壤孔隙结构参数 土壤孔隙结构参数是反映土壤结构特征的核心指标,主要包括大孔隙度、孔径分布和连通性等。与容重反映的总孔隙度不同,孔隙结构参数侧重于土壤微观结构的定量描述,直观反映压实过程中土壤微观孔隙的变化。不同孔径的孔隙对作物生长的影响不同,目前尚无统一划分标准。研究表明,大孔隙(一般指的是大于检测设备分辨率的孔隙)主要影响土壤生态功能,即对植物生长和微生物活动的支持^[27]。农田土壤压实主要使土壤大孔隙度降低,孔径越大的孔隙减少幅度越明显^[35]。Lipiec 等^[36]在研究孔隙孔径分布随压实过程的变化中发现,孔径大于 100 μm 的大孔隙大幅减少,而孔径小于 6 μm 的孔隙百分比略有增加。Servadio 等^[37]则研究了大孔隙孔径分布在压实过程中的变化,他们将大孔隙按宽度分类,结果发现压实导致细长孔隙所占比例减少,特别是 300~500 μm 尺寸的孔隙完全消失,而细长孔隙有着减缓根系渗透以及保持水气存储和运输的作用,对植物生长有着直接的影响。此外,压实还会降低土壤孔隙连通性, Poehlitz 等^[38]研究发现孔隙连通性在 50~200 kPa 荷载范围内急剧下降,在 100 kPa 荷载时孔隙连通性变为临界值,达到 200 kPa 荷载后连通性系统发生崩溃。孔隙连通性下降的土壤将会变得致密且不易透水透气,导致根系生长不良、作物产量降低。土壤孔隙结构

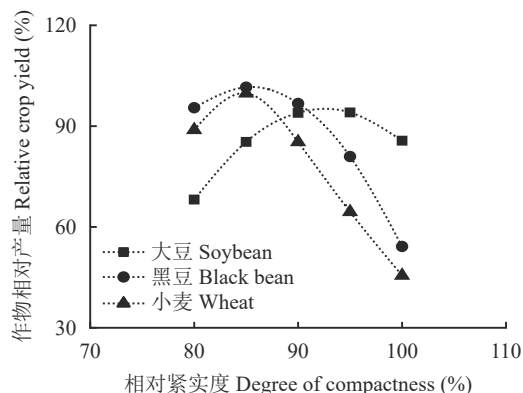


图1 不同作物相对产量与土壤相对紧实度关系
(修改自 Reichert 等^[21])

Fig. 1 Relationship between relative yield of different crops and degree of soil compactness
(modified from Reichert *et al.*^[21])

表 1 土壤压实程度表征指标基本特征
Table 1 Basic characteristics of soil compaction degree indicators

指标 Indicator	内涵 Content	基本原理 Fundamental	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	
物理学指标 Physical indicator	容重 ^[26] Bulk density ^[26]	单位容积土壤的干重量 Dry weight of soil per unit volume	容重与压实程度呈正相关 Bulk density is positively correlated with the degree of compaction	比较直观、容易获取 Intuitive and easy to obtain	不同土壤之间无法直接比较，受土壤质地、有机质含量影响较大 Direct comparison between different soils is hard and soil bulk density is influenced by texture and organic matter content strongly
	孔隙结构参数 ^[27] Pore structure parameters ^[27]	描述土壤孔隙结构特征的指标，包括大孔隙度、孔径分布、连通性等 Indicators describing soil pore structure, including macroporosity, pore size distribution, connectivity, etc.	土壤孔隙结构的变化可以量化土壤对于作用应力的反应 Changes in soil pore structure can quantify the response of the soil to acting stresses	表征结果精确 Characterization results are precise	只能表征微观尺度压实程度，检测困难 The degree of compaction can only be characterized on a microscopic scale and pore structure parameters are difficult to detect
	水力学特征参数 ^[28] Hydraulic characteristics parameters ^[28]	描述土壤水分动力学参数的指标，包括导水率、S值、LLWR等 Indicators describing soil moisture dynamics parameters, including hydraulic conductivity, S-value, LLWR, etc.	在土壤压实作用下土壤水力特征参数会随之发生变化 Soil hydraulic characteristic parameters change under soil compaction	与作物生长密切相关，能间接表征土壤压实程度 It is closely related to crop growth and can indirectly characterize the degree of soil compaction	在高吸力范围内对于土壤压实程度反映不够敏感，局限性明显 It is not sensitive enough to reflect the degree of soil compaction in the high suction range, and have obvious limitations
土质力学指标 Mechanical indexes	圆锥指数 ^[29] Cone index ^[29]	锥体或柱体在土体运动过程中受到的土壤阻力 The resistance of the soil to the movement of a cone or column through the soil	圆锥指数与土壤机械阻力显著相关 Cone index is correlated with soil mechanical resistance significantly	1. 直观表征作物根系的延伸能力 2. 应用广泛、检测效率高 1. The extension capacity of crop root system can be characterized intuitively 2. Wide application and high detection efficiency	受含水量、质地影响较大，属于瞬态性指标 It is highly influenced by soil volumetric water content and soil texture and belongs to transient indicator
	参考容重 ^[30] Reference bulk density ^[30]	土壤颗粒物堆积极限容重 Pile-up limiting capacity of soil particulate matter	参考容重反映了土壤在不同含水量条件下对机械压实的敏感性 Reference bulk density reflects the sensitivity of the soil to mechanical compaction under different soil volumetric water content conditions	其衍生指标(相对紧实度)可用于不同土壤类型之间压实情况的比较 Its derived index (degree of soil compactness) can be used to compare compaction between different soil types	1. 表征效果有限 2. 通常只能通过重塑土样测定 1. Limited characterization. 2. Usually can only be determined by remodeling soil samples
	先期固结压力 ^[31] Precompression stress ^[31]	天然土层在其应力历史中所受过的最大有效应力 The maximum effective stress to which a natural soil layer has been subjected during its stress history	先期固结压力是衡量土壤承受外力后能否恢复原状的临界值 Precompression stress is a measure of the critical value of the soil's ability to return to its original state after being subjected to an external force	1. 反映土壤对机械压实的敏感性和恢复能力 2. 可选取测量方法较多 1. Reflect the sensitivity and recovery ability of soil to mechanical compaction 2. More measurement methods are available	1. 表征充分性不够 2. 常用测量方法准确性较低 1. Insufficient characterization adequacy 2. Lower accuracy of commonly used measurement methods

的变化可以量化土壤对于作用应力的反应,从而精确反映土壤压实程度,然而其只能反映微观尺度的土壤压实状况,这也限制了其在大中尺度土壤压实程度表征上的应用。

2.1.3 土壤水力学特征参数 土壤水力学特征参数是描述土壤水分运动的重要指标,包括土壤导水率、土壤物理质量参数(S 值)、最小限制水分范围(least limiting water range, LLWR)等。土壤水力学特征参数与作物生长密切相关,能间接表征土壤的压实程度。Alaoui 等^[28]从水力学角度综述了土壤水力学性质与土壤压实之间的关系,发现在压实土壤中,土壤饱和导水率显著降低,水分特征曲线明显发生改变。Naderi-Boldaji 等^[39]通过分析 12 组不同质地土壤的 S 值与相对紧实度间的关系,结果发现两者高度相关,并且建立了相对紧实度与 $1/S$ 的关系,可用于比较不同质地农田土壤之间的压实程度。de Lima 等^[40]发现连年耕作的甘蔗地,无论耕层还是犁底层土壤压实参数均与 LLWR 显著相关。王金满等^[41]系统梳理和总结了国内外学者在不同区域、不同土壤压实作用对土壤水力特性影响的相关研究,发现在土壤压实作用下,土壤的含水量、水分扩散率、导水率等指标参数在横向和纵向都发生着不同程度的空间变异。也有研究表明,水力学特征参数表征压实程度的效果可能与土壤质地类型有关,并非在所有土壤质地类型中两者都具有较好相关性^[42]。目前,土壤水力学特征参数与压实程度的定量关系仍显缺乏,影响机理的解释相对较少,参数获取精度也较低。

需要指出的是,土壤物理学指标之间是密切相关的,影响这些指标的因素基本一致。当某个因素变化影响到容重时,孔隙度和水力特征参数往往也会受到影响。土壤压实越严重,容重越大,土壤孔隙度也越小,同时土壤水分渗透性及饱和导水率通常也会减小。在一定条件下,不同土壤物理学指标之间可以相互转换,均可不同程度地反映土壤压实程度。

2.2 土质力学指标

2.2.1 圆锥指数 圆锥指数(cone index),即贯穿阻力或穿透阻力,是指锥体或柱体在穿入土体过程中所受到的土壤阻力。圆锥指数是反映土壤压实程度的重要土力学指标,决定着土壤机械阻力大小,在农田中能模拟植物根系穿插延伸遇到的机械阻力或难易程度。赵振家等^[29]对车轮压实后不同耕作深度土壤圆锥指数变化进行研究,表明压实次数不同,作

用深度不同,并且随着碾压次数增加,圆锥指数增加趋势也不尽相同。总的来说,圆锥指数的大小与土壤压实状况成正比。张立彬^[43]研究了土壤压实程度对圆锥指数的影响,结果表明随着压实程度增加,土壤最大圆锥指数也在增加,两者之间呈幂函数关系。圆锥指数在表征农田土壤压实方面存在一定优势,不仅应用广泛,而且检测效率高。洪添胜等^[44]就曾使用自动圆锥仪测量轮胎压实前后的土壤压实程度。焦彩强等^[45]对旋耕和深耕两种耕作措施与土壤圆锥指数的关系进行了研究,结果发现旋耕会增加土壤圆锥指数,从而证实了旋耕具有明显导致土壤亚表层以下被压实的问题。Oliveira 等^[46]研究发现圆锥指数与作物生长密切相关,且圆锥指数值可快速测定,因此可作为评价田块尺度压实程度的重要指标。但是圆锥指数作为表征农田土壤压实的指标同样存在一些问题,它并不是土壤压实状态的唯一函数,受制于颗粒之间胶结物的作用,其表征效果受土壤含水量影响较大,因此在评价土壤压实度时通常需配合土壤含水量数据进行解释^[47]。

2.2.2 参考容重 参考容重(reference bulk density),也被称为最大干容重,作为土质学特征是指土壤颗粒物堆积的极限容重,其值反映了该土壤在不同含水量条件下对机械压实的敏感性。参考容重通常由标准的 Proctor 击实试验获得^[30],Proctor 击实试验最初主要用于确定道路或地基土壤最大压实时的临界含水量,后被土壤学家借鉴用于评价土壤可压实的最大程度。通过干容重与质量含水量曲线拟合可获得参考容重,例如,取自黑龙江省海伦市胜利村东北典型黑土试样的 Proctor 击实曲线如图 2 所示,参考容重约为 1.65 g/cm^3 ,与参考容重对应的质量含水量称为临界含水量。Nhantumbo 等^[48]基于 Proctor 击实试验获得了参考容重,确定了土壤质地与参考容重及临界含水量之间的关系,评估了农业土壤对压实的敏感性。Braidia 等^[49]通过 Proctor 击实试验发现有机质的积累降低了土壤的参考容重,增加了临界含水量,增强了土壤抗压实的能力,并且证实了在土壤表面进行秸秆覆盖也能缓解部分土壤压实。Álvarez 等^[50]利用土壤传递函数估算了不同耕作制度下的 Proctor 击实试验参数,结果发现参考容重的变化与总有机质含量或土壤质地无关。Proctor 击实试验也存在一定的不足,比如许多土壤数据库不包含 Proctor 数据,因此, Wagner 等^[51]开发了预测方程,通过在 Proctor 击实试验中临界含水量与峰值密度点相交的两条线来估计 Proctor 击实曲线的形状。此

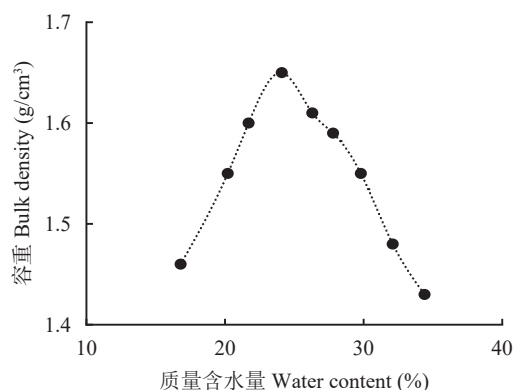


图2 东北典型黑土 Proctor 压实曲线

Fig. 2 Proctor compaction curve of typical black soil in northeast China

外, 标准的 Proctor 击实试验采用的土壤样品为异位扰动土, 与田间原位非扰动土壤相比存在一定差异。为了克服这一问题, Håkansson^[52]指出获取某一特定土壤参考容重也可采用 200 kPa 压力的单轴压缩试验代替。

参考容重会随孔隙度、结构等物理特性的不同而不同, 比较不同类型土壤时, 参考容重的测量值作为对土壤压实的表征指标, 其效果是有限的, 所以相对紧实度 (degree of soil compactness, DC) 应运而生。DC 是测试土壤容重与参考容重的比值, 它可以表征大孔隙度、饱和导水率以及穿透阻力等土壤物理特性在压实过程中的变化^[53], 不再依赖于土壤质地, 可以用于不同土壤类型之间压实状况的比较^[52]。Silva 等^[54]确定了不同耕作方式下一系列土壤容重和 DC, 并评估了土壤质地、有机物含量等对这些参数的相对重要性。尽管 DC 消除了包括土壤类型在内的众多影响因素, 对于同一土壤同一作物最优 DC 在年际间仍有变化, 研究发现这一年际间变化主要来自气候条件^[55]。

2.2.3 先期固结压力 先期固结压力 (precompression stress), 也被称作预固结压力, 指天然土层在其应力历史中所受过的最大有效应力。对于某一具体土壤而言, 当承受的外力不超过先期固结压力时, 撤去外力后土壤体积尚可恢复或恢复量较大, 而超过先期固结压力后, 即使撤去外力, 土壤体积也难以再恢复, 可见先期固结压力能够反映出土壤的抗压实能力^[31]。在耕地土壤压实风险评估研究中, 先期固结压力常被用作土壤强度的度量^[56]。很长一段时间里, 先期固结压力在欧洲都被视为评价土壤压实的最主要的指标。Faloye 等^[57]调查了土壤特性对有效应力的影响, 结果发现先期固结压力越高, 土壤有效应力

越高, 土壤抗压实能力越强。国内也有学者将先期固结压力用于农田土壤压实分析中。丁肇等^[58]进行了轮式和履带式车辆行走对农田土壤的压实作用分析, 结果发现与轮胎相比, 履带作用下土壤的先期固结压力及干容重间无显著区别。但也有学者认为土壤先期固结压力不能很好反应土壤压实的敏感性。Keller 等^[59]比较了不同压实试验中土壤应力-位移特性, 发现先期固结压力取决于压缩试验方法及其分析, 而且压缩试验可能不能充分代表现场的土壤特性。Arvidsson 等^[60]分析了在瑞典耕地上进行的一系列单轴压缩试验数据, 结果发现在研究中所得到的应力-应变关系与先期固结压力概念本身不符。

为了更好地表征土壤压实风险, 国外学者由先期固结压力衍生出了土壤压实指数 (soil compaction index, SCI) 和底土压实敏感性指数 (subsoil compaction susceptibility index, SCSI) 两个指标。SCI 为机械应力与预固结压力比值的对数^[61], 主要用于表征表层土壤压实风险。SCI<0 表示没有压实风险, 0<SCI<0.2 表示有中度压实风险, SCI>0.2 表示有严重压实风险。SCSI 为机械应力与底土 (通常采用 0.5 m 深度处) 预固结压力的比值^[62], SCSI>1 表示可能存在长期底土压实。与众所周知的表土压实影响不同, 底土压实很难逆转, 且可能在数年至数十年内都损害土壤功能^[27, 63]。将 SCI 和 SCSI 运用到农田中可针对农田土壤潜在压实风险提前采取相应措施。

3 土壤压实程度检测方法

土壤压实程度的检测是判定土壤压实状况的依据。由于土壤压实程度的表征指标多种多样, 因此土壤压实检测方法也有很多, 本文重点介绍穿透阻力检测法、土壤结构检测法、地球物理检测法、先期固结压力检测法等 4 种方法 (表 2)。

3.1 穿透阻力检测法

土壤穿透阻力, 也叫土壤紧实度或土壤硬度, 是衡量土壤抵抗外力压实和破碎的能力, 一般用金属柱塞或探针压入土壤时的阻力表示。穿透阻力检测法是土壤压实检测应用最为广泛的方法, 通过现场原位测定穿透阻力, 结合土壤含水量与非压实区土壤对比即可衡量土壤压实状况。李勇等^[64]基于土壤穿透阻力数据识别了旱作区农田土壤压实层的位置及厚度。测定穿透阻力的仪器中最常用的是野外土壤贯穿阻力仪, 其可快速测定一定深度范围土壤穿透阻力的垂直变化, 且数据采集密度高。Mouazen

表 2 不同土壤压实程度检测方法优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of detecting methods for soil compaction degree

方法 Method	基本原理 Fundamental	主要步骤 Main step	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
穿透阻力法 ^[64] Penetration resistance method ^[64]	原位测定穿透阻力，与非压 实区土壤对比获得土壤压实 状况 The degree of soil compaction can be obtained by measuring the penetration resistance <i>in situ</i> and comparing it with the penetration resistance obtained through the soil in the non-compacted area	1. 原位测定穿透阻力 2. 结合土壤含水量比较分析数据 1. Measure the penetration resistance in-situ 2. Compare and analysis data in combination with soil volumetric water content	应用广泛、检测效率高，可 以获得一定土层厚度内压实 程度的垂直变异性；能够较 为精准地反映根系生长状况 It is widely used and highly efficient; it can obtain the vertical variability of the degree of compaction within a certain soil thickness; it also can reflect the root growth condition accurately	土壤含水量、探头进入土壤 的速度等影响结果稳定性， 只适合原位检测 Soil volumetric water content and the speed at which the probe enters the soil affect the stability of the results and the method is only suitable for <i>in-situ</i> testing
土壤结构法 ^[65] Soil structure method ^[65]	采用CT断层扫描技术定量 获取土壤结构信息，观察土 壤孔隙结构特征 CT tomography can be used to quantitatively obtain soil structure information and observe soil pore structure characteristics	1. 制备或采集原状土样 2. 采用CT技术观察土壤结构及 孔隙状况 3. 判断土壤压实程度 1. Prepare or collect in-situ soil samples 2. Use CT technology to observe the soil structure and pore condition 3. Judge the degree of soil compaction	数据结果可信，状态清晰 直观 The data results are credible and the soil structure is clear and intuitive	应用尺度较小，研究土壤状 态特征的方法框架不完善 Application scale is small and the methodological framework for studying soil state characteristics is not well developed
地球物理法 ^[66] Geophysical method ^[66]	采用物探技术测定土壤理化 性质，从而判断土壤断面上 压实程度 Physical exploration techniques can be used to determine the physical and chemical properties of the soil and thus the degree of compaction on the soil section	1. 选择探地雷达、大地电导率仪 和电阻率层析成像仪中的其中 一种物探技术进行测定 2. 解析数据 1. Select one of the physical exploration techniques of ground penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography for the measurement 2. Analyze the data	成本较低、应用广泛，适合 大面积农田快速检测 It has lower cost and wide application, and it is suitable for rapid testing in large agricultural fields	数据解析难度大、有限，只 适合原位检测 Data parsing is difficult, limited, and the method is only suitable for <i>in-situ</i> detection
先期固结 压力法 ^[67] Precompression stress method ^[67]	通过确定土壤压实表征指标 中的先期固结压力来检测土 壤压实 The degree of soil compaction is detected by determining the precompression stress in soil compaction indicators	1. 制备土样 2. 实施合适的先期固结压力确定 试验 3. 处理数据分析结果 1. Prepare soil samples 2. Implement suitable precompression stress determination tests 3. Process data and analyze results	可选取的参数确定方法较 多，可准确评估区域尺度 机械压实风险。 Many parameterization options are available to accurately assess the risk of mechanical compaction at the regional scale	部分方法易出现人为误差， 适用区域范围小 Some parameterization options are prone to human error and have a small regional scope of application

等^[68]利用农机携带穿透阻力仪测定了特定深度内土壤穿透阻力，同时附带土壤含水量传感器测定了土壤水分含量，最后通过二者与土壤深度数据建立了预测土壤容重模型，并发现基于该模型预测的土壤容重与传统方法测定的数值具有高度一致性。总的来说，穿透阻力仪的使用极大地提高了检测效率，但探头进入土壤的速度等会对探测结果稳定性有一定影响^[69]，该方法更适合农田土壤的现场原位检测，能够较为精准地反映根系生长状况。

3.2 土壤结构检测法

土壤结构是指土壤颗粒的排列与组合形式，定量获取土壤结构信息，有利于研究土壤压实情况。获取土壤结构信息的方法有很多，有的学者通过土壤容重建土壤压实预测模型，有的学者通过水分特征曲线法、压汞法、切片法、氮气吸附法等得到孔隙度和孔径分布。丁启朔等^[65]通过推导出土壤压实容重预测模型来定量预测机械压实危害程度，广泛适用于集约化生产条件下稻田土壤机械压实预测。

CT 技术全称 X 射线计算机断层扫描技术, 由于能够对土壤结构体进行三维重建, 完成可视化处理, 并由此进一步观察土壤孔隙结构特征, 因而逐渐被应用于土壤压实的研究中。然而, 土壤孔隙大小分布范围很广, 仅采用一种 CT 技术难以全面研究土壤孔隙。周虎等^[70]指出为了获得较全面的土壤孔隙特征, 可以分析不同尺度土壤结构特征。但由于试验条件限制, 国内过去主要利用医用 CT 和工业 CT 对大尺度土壤结构开展了一些研究。比如姜宇等^[71]研究了冻融条件下黑土大孔隙结构特征; 敖家坤等^[72]研究发现一定容重范围内的大孔隙特征参数与饱和导水率均呈显著正相关; 段扬^[73]研究发现, 对于因孔隙水压力降低、有效应力增加而导致的土壤压实过程, 是与大孔隙面积的显著降低息息相关的; 冯宇^[74]研究发现, 大孔隙数量呈现随土壤压实程度增加而减小的趋势, 这说明土壤压实是破坏大孔隙连通性的主要原因, 同时也说明土壤大孔隙对土壤压实作用的响应更加敏感; Wang 等^[75]利用 CT 技术从微观尺度更好地解释了土壤压实所引起的土壤性质变化。CT 技术也存在不足之处, 张丽娜等^[76]通过总结发现当前 CT 技术分析土壤孔隙时精度不够, 研究土壤特性的方法框架不完善。此外, 由于 CT 技术主要在微观层面研究土壤结构, 目前难以应用于宏观尺度农田压实状况的检测。

3.3 地球物理检测法

地球物理检测法主要是利用物探技术测定土壤的理化性质, 再通过理化性质反推土壤压实程度的一系列方法。该检测法虽然存在数据解析难度较大的缺点, 但其检测的空间尺度大、成本较低, 因此应用也较为广泛。目前最常用的方法有: 探地雷达法 (ground penetrating radar, GPR)、大地电导率仪法 (electromagnetic induction, EMI) 和电阻率层析成像仪法 (electrical resistivity tomography, ERT)。GPR 主要通过雷达波在土壤中的传播情况来反演土壤压实状况, 由于压实土层与未压实土层的含水量不同, 而含水量通过影响土壤介电常数进而影响雷达波传播速度, 因此当雷达波通过压实土层时将产生一个明显的反射^[66]。王萍^[77]利用 GPR 进行了土壤压实度的探测, 建立了雷达波速度和土壤压实度的数学模型。郭淑丽^[78]通过 GPR 的雷达天线对不同地区、不同土壤类型的土壤压实状况和演变规律进行了研究。EMI 主要通过测量一定体积土体的电导率实现对土体压实特性的反演, 由于土壤压实提高了土壤容重, 使得单位体积内土壤粘性物质含量与土

壤非饱和状态水分增加, 因此在其它参数变化较小的情况下土壤表观电导率可以反演土壤压实度。与 EMI 测试原理相类似, ERT 主要根据土体的电阻率推算出土体的物理性质。在检测土壤压实问题上, 两种方法都以 Archie 定律为依据, 即土壤表观电导率或者电阻率与土壤粘粒含量、土壤含水量和含盐量呈正相关^[79]。地球物理检测法适合大面积农田土壤压实状况的快速检测, 可为精准农业提供决策, 目前已在欧美国家广泛应用, 但在国内尚处于起步阶段^[80]。

3.4 先期固结压力检测法

先期固结压力作为表征土壤压实的土质力学指标, 其数值确定方法能很好的运用于农田极限土壤压实的检测中^[67]。确定土壤先期固结压力的方法较多, 国际上普遍采用的有卡萨格兰德法 (Casagrande method)^[81]、帕切科-席尔瓦法 (Pacheco Silva method)^[81]、贡珀次模型拟合法 (Gompertz model fit method)^[82]等, 国内有“f”法、图解法、密度法等^[83]。卡萨格兰德法主要通过拟合土壤压缩曲线确定先期固结压力, 应用最为广泛, 但也存在最大曲率点不易确定, 人为误差大等缺陷。Silva 等^[81]比较发现卡萨格兰德法和帕切科-席尔瓦法之间具有较强的相关性, 后者可被视为卡萨格兰德法的替代方法。而 de Pue 等^[82]对这些方法做了功能评估, 结果却表明卡萨格兰德法最不适合计算先期固结压力。分析模型法也常被用于预测土壤先期固结压力, 该方法的关键在于选择合适的集中系数, 集中系数是关于土壤-轮胎接触面当量半径、加载点与正下方应力预测点间的距离以及土壤表面应力与土壤表面加载点正下方某点处应力的比值这 3 个参数的函数, 主要用于更精确描述应力在土壤中的分布。在已有的研究中集中系数取值混乱, 导致该模型使用时存在很大争议, 其原因在于对该参数随土壤环境的变化缺乏规律性认识。贺亭峰等^[84]通过对集中系数表达式的进一步推导, 提出了能够代表土壤环境对集中系数影响的应力传递系数。此外, 国内外学者也在不断研究新的先期固结压力的确定方法。蔡清池等^[85]提出了改进的先期固结压力数值计算方法, 对于中高压固结的试验数据能够获得更加接近实际的先期固结压力。姜安龙等^[86]依据理论研究和试验分析, 提出了一种新的先期固结压力确定方法: 数学模型法, 并证明了此法的可行性。Rücknagel 等^[87]提出了一个回归模型, 根据土壤干容重和固相密度这两个参数估计先期固结压力, 总的来说, 先期固结压力与两参数的比值呈负相关

关系,即“固相密度/干容重”的比值越大,先期固结压力越低。除了以上提到的计算方法外,确定先期固结压力还可以利用土壤传递函数^[88]。土壤传递函数通常是土壤质地、容重和含水量的函数^[89],通过土壤传递函数即可从易获取的土壤特性中预测先期固结压力值。尽管先期固结压力与土壤压实特征之间的关系仍有待进一步挖掘^[90],但该方法仍是目前评估区域尺度机械压实风险最有效的方法^[62]。

4 展望

明确土壤压实与作物生长的关系对农业生产具有重要意义,现有研究多集中在土壤压实对作物生长的不利影响方面,针对耕作层土壤压实的危害做了大量的研究,很少有研究能考虑到土壤压实对作物的有益影响,这导致对量化土壤压实的认识还不够全面。土壤压实对作物生长的影响有利有弊,未来应更加深入地用量化的表征指标与检测方法,研究土壤压实程度对作物根系形态、地上部光合产物的分配以及土壤质量的影响,并加强作物对于土壤压实的反馈机制、信息感应与传递等研究。

现有关于土壤压实程度表征的研究主要基于土壤物理学指标,土壤力学指标相对较少,且选取指标过于单一,缺乏系统性,难以全面反映土壤压实程度的变化过程,揭示压实机理。不同土壤压实表征指标反映压实程度的本质是一致的,各有侧重,又紧密相关,甚至可以相互转换。对于田块尺度,宜选择穿透阻力和相对紧实度,同时配合土壤含水量来表征土壤压实状况;对于区域农田尺度,宜采用先期固结压力来评估机械压实的风险。在未来的研究中,应结合研究尺度,将土壤物理学指标与土壤力学指标结合起来,构建一套系统评价土壤压实程度的指标体系,为减少压实提供依据。

田间土壤压实状况的检测不仅是农田基本属性的重要普查内容,同时也是当前精准农业发展和高标准农田建设的迫切需要。目前田间土壤压实状况的检测研究主要集中在新技术和新方法的探索上,对过去已经存在的技术方法提出改进较少,然而这些新方法目前尚不成熟。如何从方法上削弱或者排除空间异质性带来的影响,应是今后土壤压实田间检测重要的研究方向。

参考文献:

[1] 王恩娟, 赵雨森, 陈祥伟. 前期含水量对机械压实土壤结构特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 159–163.

Wang E H, Zhao Y S, Chen X W. Effect of antecedent moisture content on soil structure compacted by machinery[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 159–163.

[2] Nawaz M F, Bourrie G, Trolard F. Soil compaction impact and modelling: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(2): 291–309.

[3] Keller T, Lamandé M, Peth S, *et al.* An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 128: 61–80.

[4] 张兴义, 隋跃宇. 农田土壤机械压实研究进展[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(6): 122–125.

Zhang X Y, Sui Y Y. International research trends of soil compaction induced by moving machine during field operations[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(6): 122–125.

[5] 赵诚斋. 水稻土的物理机械性质与机械化耕作的关系[J]. *土壤学报*, 1963, 11(1): 55–64.

Zhao C Z. The nature of soil mechanics of paddy soils and its relations to tillage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, 11(1): 55–64.

[6] 周艳丽, 卢秉福. 农田机械压实对土壤物理特性的影响[J]. *中国农业机化学报*, 2018, 39(9): 66–70.

Zhou Y L, Lu B F. Influence on soil physical properties for farmland mechanical compaction[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(9): 66–70.

[7] 付娟, 马仁明, 贾燕锋, 等. 机械压实对农田土壤性质及土壤侵蚀的影响研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(增刊): 27–36.

Fu J, Ma R M, Jia Y F, *et al.* Research progress in the effects of mechanical compaction on soil properties and soil erosion in farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(S): 27–36.

[8] 杨晓娟, 李春俭. 机械压实对土壤质量、作物生长、土壤生物及环境的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(7): 2008–2015.

Yang X J, Li C J. Impacts of mechanical compaction on soil properties, growth of crops, soil-borne organisms and environment[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(7): 2008–2015.

[9] 周艳丽, 刘娜, 於丽华, 等. 土壤机械压实及其对作物生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(28): 83–88.

Zhou Y L, Liu N, Yu L H, *et al.* Soil mechanical compaction and its effect on crop growth[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(28): 83–88.

[10] 张萍萍. 基于Stacking集成学习的土壤压实对大豆产量影响研究[D]. 黑龙江哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2022.

Zhang P P. Effect of soil compaction on soybean yield based on Stacking ensemble learning[D]. Harbin, Heilongjiang: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2022.

[11] 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 农业机械土壤压实研究方法现状[J]. *热带农业科学*, 2015, 35(6): 72–76.

Wang X L, Wang Q J, Li H W, *et al.* Current research status of soil compaction by agricultural machinery[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2015, 35(6): 72–76.

[12] 李勇, 赵云泽, 勾宇轩, 等. 黄淮海旱作区农田耕层土壤结构特征与其影响因素[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(3): 321–330.

Li Y, Zhao Y Z, Gou Y X, *et al.* Characteristics and influencing factors of topsoil structure of farmland in dry farming region

- of Huang-Huai-Hai[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(3): 321–330.
- [13] 余冬立, 邵明安. 成垄压实耕作条件下土壤水分分布的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 110–113.
- She D L, Shao M A. Experimental study on soil water distribution under locally compacted ridge-furrow cultivation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 110–113.
- [14] Atwell B J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering[J]. *New Phytologist*, 1990, 115(1): 29–35.
- [15] Barzegar A R, Nadian H, Heidari F, *et al.* Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87(2): 155–162.
- [16] Zhao F J, Lopez-Bellido F J, Gray C W, *et al.* Effects of soil compaction and irrigation on the concentrations of selenium and arsenic in wheat grains[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 372(2/3): 433–439.
- [17] Soane B D, van Ouwerkerk C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 1995, 35(1/2): 5–22.
- [18] 李潮海, 王群, 郝四平. 土壤物理性质对土壤生物活性及作物生长的影响研究进展[J]. *河南农业大学学报*, 2002, 36(1): 32–37.
- Li C H, Wang Q, Hao S P. Advances of studies on the effect of soil physical properties on soil biological activity and crop growth[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2002, 36(1): 32–37.
- [19] 杨世琦, 吴会军, 韩瑞芸, 杨正礼. 农田土壤紧实度研究进展[J]. *土壤通报*, 2016, 47(1): 226–232.
- Yang S Q, Wu H J, Han R Y, Yang Z L. Soil compaction in farmland: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 226–232.
- [20] Beutler A N, Centurion J F, Silva A P, *et al.* Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield[J]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2008, 43(11): 1591–1600.
- [21] Reichert J M, Suzuki L E A S, Reinert D J, *et al.* Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(2): 242–254.
- [22] 岳龙凯. 作物类型和品种对黑土压实响应差异的研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2019.
- Yue L K. Study on the response of crop species and varieties to mollisol compaction[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [23] Batey T. Soil compaction and soil management: A review[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25(4): 335–345.
- [24] 高晨, 李晓鹏, 张红霞, 等. 初始含水量和容重对黑土压缩特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 102–111.
- Gao C, Li X P, Zhang H X, *et al.* Effects of initial moisture and bulk density on the soil compression characteristics of black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(9): 102–111.
- [25] 刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- Liu S Y. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [26] Raper R L. Agricultural traffic impacts on soil[J]. *Journal of Terramechanics*, 2005, 42(3/4): 259–280.
- [27] Berisso F E, Schjønning P, Keller T, *et al.* Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 122: 42–51.
- [28] Alaoui A, Lipiec J, Gerke H H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115/116: 1–15.
- [29] 赵振家, 邹猛, 薛龙, 等. 压实对土壤应力分布的影响仿真分析[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 311–313.
- Zhao Z J, Zou M, Xue L, *et al.* Simulation analysis of effect of compaction on soil stress distribution[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(S): 311–313.
- [30] Hirebelaguly Shivaprakash S, Sridharan A. Correlation of compaction characteristics of standard and reduced Proctor tests[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2021, 174(2): 170–180.
- [31] 肖质秋, 虞娜, 安晶, 张玉龙. 土壤压实及有机质对其影响的研究进展[J]. *土壤通报*, 2019, 50(5): 1253–1260.
- Xiao Z Q, Yu N, An J, Zhang Y L. Soil compaction and the role of soil organic matter in soil compressibility and resilience: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(5): 1253–1260.
- [32] Arthur E, Schjønning P, Moldrup P, *et al.* Density and permeability of a loess soil: Long-term organic matter effect and the response to compressive stress[J]. *Geoderma*, 2013, 193: 236–245.
- [33] Sato M K, de Lima H V, de Oliveira P D, Rodrigues S. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols[J]. *International Agrophysics*, 2015, 29(4): 441–447.
- [34] Pabin J, Lipiec J, Wlodek S, *et al.* Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 46(3/4): 203–208.
- [35] Matthews G P, Laudone G M, Gregory A S, *et al.* Measurement and simulation of the effect of compaction on the pore structure and saturated hydraulic conductivity of grassland and arable soil[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(5): W05501.
- [36] Lipiec J, Horn R, Pietrusiewicz J, Siczek A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 121: 74–81.
- [37] Servadio P, Marsili A, Pagliai M, *et al.* Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61(3/4): 143–155.
- [38] Poehlitz J, Ruecknagel J, Schlueter S, *et al.* Estimation of critical stress ranges to preserve soil functions for differently textured soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200: 104637.
- [39] Naderi-Boldaji M, Keller T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 159: 41–46.
- [40] de Lima R P, Rolim M M, Dantas D C, *et al.* Compressive properties and least limiting water range of plough layer and plough pan in sugarcane fields[J]. *Soil Use and Management*, 2021, 37(3): 533–544.
- [41] 王金满, 荆肇睿, 宋杨睿. 压实对土壤水力特性影响的研究进展[J]. *江西农业大学学报*, 2018, 40(3): 618–628.

- Wang J M, Jing Z R, Song Y R. Effects of compaction on soil hydraulic properties: A review[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2018, 40(3): 618–628.
- [42] Schroeder R, Fleige H, Hoffmann C, *et al.* Mechanical soil database—Part I: Impact of bulk density and organic matter on precompression stress and consequences for saturated hydraulic conductivity[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 793625.
- [43] 张立彬. 土壤含水量和土壤紧实度对土壤圆锥指数影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 1993, 9(2): 41–44.
- Zhang L B. Test on effect of soil moisture and density on soil cone indexes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1993, 9(2): 41–44.
- [44] 洪添胜, Bilot J F, Marionneau A. 应用自动圆锥仪对土壤压实的试验研究[J]. *华南农业大学学报*, 1996, 17(3): 10–14.
- Hong T S, Bilot J F, Marionneau A. Experiments and studies on soil compaction with an automatic penetrometer[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1996, 17(3): 10–14.
- [45] 焦彩强, 王益权, 刘军, 等. 关中地区耕作方法与土壤紧实度时空变异及其效应分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(3): 7–12.
- Jiao C Q, Wang Y Q, Liu J, *et al.* Spatial-temporal variability of soil hardness and effect of soil hardness on other soil properties in rotary tillage in Guan-zhong farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 7–12.
- [46] Oliveira P D D, Sato M K, Lima H V, *et al.* Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179(1): 78–87.
- [47] Spagnoli G, Shimobe S. An overview on the compaction characteristics of soils by laboratory tests[J]. *Engineering Geology*, 2020, 278: 105830.
- [48] Nhantumbo A B J C, Cambule A H. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87(2): 231–239.
- [49] Braidia J A, Reichert J M, Veiga M, Reinert D J. Mulch and soil organic carbon content and their relationship with the maximum soil density obtained in the Proctor test[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2006, 30(4): 605–614.
- [50] Álvarez C R, Micucci F G, Bustingorri C, Taboada M A. Pedotransfer functions to estimate Proctor test parameters under different tillage systems[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2010, 34(6): 1787–1793.
- [51] Wagner L E, Ambe N M, Ding D. Estimating a Proctor density curve from intrinsic soil properties[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(4): 1121–1125.
- [52] Håkansson I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer[J]. *Soil and Tillage Research*, 1990, 16(1/2): 105–120.
- [53] Silva G J, Maia J C S, Bianchini A. Shoot growth of plants under subsurface irrigation and four degrees of soil compaction[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2006, 30(1): 31–40.
- [54] da Silva A P, Kay B D, Perfect E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction[J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 44(1/2): 81–93.
- [55] Håkansson I, Lipiec J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 53(2): 71–85.
- [56] Schjønning P, van den Akker J J H, Keller T, *et al.* Driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction—a European perspective[J]. *Advances in Agronomy*, 2015, 133: 183–237.
- [57] Faloye O T, Ajayi A E, Zink A, *et al.* Effective stress and pore water dynamics in unsaturated soils: Influence of soil compaction history and soil properties[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 211: 104997.
- [58] 丁肇, 李耀明, 唐忠. 轮式和履带式车辆行走对农田土壤的压实作用分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 10–18.
- Ding Z, Li Y M, Tang Z. Compaction effects of wheeled vehicles and tracked on farmland soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(5): 10–18.
- [59] Keller T, Arvidsson J, Dawidowski J B, Koolen A J. Soil precompression stress: II. A comparison of different compaction tests and stress–displacement behaviour of the soil during wheeling[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77(1): 97–108.
- [60] Arvidsson J, Keller T. Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77(1): 85–95.
- [61] Ren L D, D’Hose T, Ruyschaert G, *et al.* Effects of soil wetness and tyre pressure on soil physical quality and maize growth by a slurry spreader system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104344.
- [62] Keller T, Or D. Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(21): e2117699119.
- [63] 魏彬萌, 王益权. 渭北果园土壤物理退化特征及其机理研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 694–701.
- Wang B M, Wang Y Q. Physical degradation characteristics and mechanism of orchard soil in Weibei Region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3): 694–701.
- [64] 李勇, 赵云泽, 勾宇轩, 黄元仿. 黄淮海旱作区土壤压实度空间分布特征及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 83–91.
- Li Y, Zhao Y Z, Gou Y X, Huang Y F. Spatial distribution characteristics and influence factors of degree of compaction in dry-farming Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(13): 83–91.
- [65] 丁启朔, 孙浩田, 李毅念, 等. 集约化生产条件下稻田土壤机械压实预测模型构建与验证[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(3): 42–51.
- Ding Q S, Sun H T, Li Y N, *et al.* Establishment and verification of soil mechanical compaction prediction model in paddy field under intensive production conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(3): 42–51.
- [66] Romero-Ruiz A, Linde N, Keller T, Or D. A review of geophysical methods for soil structure characterization[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(4): 672–697.
- [67] Gregory A S, Whalley W R, Watts C W, *et al.* Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 89(1): 45–57.

- [68] Mouazen A M, Dumont K, Maertens K, Ramon H. Two-dimensional prediction of spatial variation in topsoil compaction of a sandy loam field-based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 74(1): 91–102.
- [69] Aubertot J N, Dürr C, Richard G, *et al.* Are penetrometer measurements useful in predicting emergence of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) seedlings through a crust?[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 177–186.
- [70] 周虎, 李文昭, 张中彬, 彭新华. 利用X射线CT研究多尺度土壤结构[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1226–1230.
Zhou H, Li W Z, Zhang Z B, Peng X H. Characterization of multi-scale soil structure with X-ray computed tomography[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6): 1226–1230.
- [71] 姜宇, 刘博, 范昊明, 马仁明. 冻融条件下黑土大孔隙结构特征研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(2): 340–349.
Jiang Y, Liu B, Fan H M, Ma R M. Macropore structure characteristics of black soil under freeze-thaw condition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(2): 340–349.
- [72] 敖家坤, 牛健植, 谢宝元, 等. 土壤大孔隙结构对饱和导水率的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(2): 102–112.
Ao J K, Niu J Z, Xie B Y, *et al.* Influence of soil macropore structure on saturated hydraulic conductivity[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(2): 102–112.
- [73] 段扬. 增压过程中土体孔隙变形的CT扫描实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2017.
Duan Y. The micro-CT experimental research on the deformation of the soil pore in pressurization process[D]. Beijing: PhD Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [74] 冯宇. 大型露天煤矿区排土场机械压实对土壤大孔隙结构及水力特性的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2019.
Feng Y. Effects of large machinery compaction on soil macropore structure and hydraulic characteristics of dumping site in an opencast coal mine area[D]. Beijing: PhD Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [75] Wang J M, Guo L L, Bai Z K, Yang L L. Using computed tomography (CT) images and multi-fractal theory to quantify the pore distribution of reconstructed soils during ecological restoration in opencast coal-mine[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 92: 148–157.
- [76] 张丽娜, 王金满, 荆肇睿. 应用CT技术分析土壤特性的研究进展[J]. *土壤通报*, 2018, 49(6): 1497–1504.
Zhang L N, Wang J M, Jing Z R. Application of CT technology in studying soil properties: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(6): 1497–1504.
- [77] 王萍. 探地雷达检测土壤紧实性的实验研究和信号反演[D]. 北京: 中国矿业大学(北京)博士学位论文, 2010.
Wang P. The experimental study and signal inversion of ground penetrating radar for soil compaction detection[D]. Beijing: PhD Dissertation of China University of Mining & Technology, 2010.
- [78] 郭淑丽. 基于GPR的复垦土壤压实探测模型研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2013.
Guo S L. The soil compaction detection model based on ground penetrating radar in reclamation area[D]. Tai'an, Shandong: MS Thesis of Shandong Agricultural University, 2013.
- [79] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. *Transactions of the AIME*, 1942, 146(1): 54–62.
- [80] Ren L D, D'Hose T, Borra-Serrano I, *et al.* Detecting spatial variability of soil compaction using soil apparent electrical conductivity and maize traits[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(4): 1749–1760.
- [81] Silva A R, Lima R P. Comparison of methods for determining precompression stress based on computational simulation[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2016, 40: e0150164.
- [82] de Pue J, di Emidio G, Bezuijen A, Cornelis W M. Functional evaluation of the various calculation methods for precompression stress[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(3): 459–469.
- [83] 李春林, 丁启朔, 陈青春. 水稻土的先期固结压力测定与分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 141–144.
Li C L, Ding Q S, Chen Q C. Measurement and analysis of precompression stress of soil in rice field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 141–144.
- [84] 贺亭峰, 丛文杰, Belal E A, 等. 基于压实分析模型的土壤应力传递系数研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 59–65.
He T F, Cong W J, Belal E A, *et al.* Soil stress transmission coefficient based on compaction analytical model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 59–65.
- [85] 蔡清池, 谢汉康. 一种确定先期固结压力的数值计算方法[J]. *工业建筑*, 2021, 51(5): 164–167.
Cai Q C, Xie H K. A numerical method for determining pre-consolidation pressure[J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(5): 164–167.
- [86] 姜安龙, 赵春风, 高大钊. 确定先期固结压力的数学模型法[J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 292–295.
Jiang A L, Zhao C F, Gao D Z. Mathematical model method of determining pre-consolidation pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 292–295.
- [87] Rücknagel J, Hofmann B, Paul R, *et al.* Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92(1): 213–220.
- [88] van den Akker J J H, Hoogland T. Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in the Netherlands[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 114(2): 146–154.
- [89] Schjønning P, Lamandé M. Models for prediction of soil precompression stress from readily available soil properties[J]. *Geoderma*, 2018, 320: 115–125.
- [90] Keller T, Lamandé M, Schjønning P, Dexter A R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests[J]. *Geoderma*, 2011, 163(1/2): 13–23.