

# 压实对农田土壤特性的影响及应对措施

赵月<sup>1,2</sup>, 鲍雪莲<sup>1</sup>, 梁超<sup>1</sup>, 王钢<sup>3</sup>, 解宏图<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国农业大学, 北京 100091)

**摘要:** 由于人口的高速增长和饮食结构改变所带来的粮食需求增加正引发日益严峻的全球粮食安全问题。在世界各地, 随着农业机械化程度的提高, 面临土壤压实和土壤肥力持续恶化的问题。虽然集约化的耕作模式和规模化种植制度提升了粮食产量, 在一定程度上缓解全球粮食安全, 但这种相对单一的耕作模式显著增加了土壤的压力。土壤压实通过增加土壤容重和土壤强度降低土壤孔隙度和土壤水分入渗及持水能力等, 对土壤物理特性, 特别是水分和养分的存储和供应产生不利影响, 严重危害土壤健康。因此土壤压实将逐渐成为限制粮食产量的关键因素之一。本文基于国内外有关土壤压实的研究, 综合分析了土壤压实对土壤物理、化学和生物特性的影响和潜在作用机制, 并剖析了影响土壤压实的关键因素以及有效解决土壤压实的潜在应对措施。由于影响因素众多且相互制约, 致使人们对土壤压实的发生机制尚不清楚。未来对土壤压实的研究仍需不断深入, 包括压实对微生物群落结构的影响以及田间试验和室内培养试验方法的优化等, 为更积极有效地预防土壤压实、防治土壤退化提供技术支持。

**关键词:** 土壤压实; 农业机械; 耕作模式; 保护性耕作; 植物根系

**中图分类号:** S152.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)06-1457-13

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022082304

赵月, 鲍雪莲, 梁超, 王钢, 解宏图. 压实对农田土壤特性的影响及应对措施 [J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1457-1469

ZHAO Yue, BAO Xue-lian, LIANG Chao, WANG Gang, XIE Hong-tu. Effects of Compaction on Farmland Soil Properties of Farms and Prevention Measures[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(6): 1457-1469

由于人口增长、气候变化、水资源短缺和粮食生产需求增加等问题, 全球粮食安全问题日益严峻, 尽管农业集约化提高了粮食的生产力, 但也加大了对自然资源的压力<sup>[1-2]</sup>。中国农业机械化水平在 2007 年首次突破 40%, 2014 年达到了 61%, “十三五”期间农作物耕种收综合机械化率达到 71.25%, 其中三大粮食作物, 小麦、玉米和水稻耕种收综合机械化率分别达到 97%、90% 和 84%, 预计到 2025 年, 全国农作物耕种收综合机械化率将达到 75%<sup>[3]</sup>。农作物的集约化耕作已经遍及世界各地, 随着作物种植周期的缩短、农业机械的加重, 土壤压实现象也越来越多<sup>[4]</sup>。土壤压实是指外部荷载对土壤颗粒进行压缩, 使得土壤基质致密化的过程<sup>[5]</sup>。土壤穿透阻力、容重和压实度是反映土壤压实程度的主要参数。土壤压实包括机械(车轮、轨道、压路机等)和牲畜所施加的压力, 超过土壤强度导致的土壤致密化和形变, 根据压力的强度和频率, 压实可以影响土壤深度达 30 cm<sup>[6]</sup>。土壤含水量和土地管理方式, 如不

同的耕作方式等, 在土壤压实中发挥了重要的作用<sup>[7]</sup>。英国在 2009 年将土壤压实、土壤侵蚀和有机质减少确定为农业土壤和环境生产力降低的三大主要威胁<sup>[8]</sup>。土壤压实会对土壤物理、化学性质和生物活动造成不利影响<sup>[9]</sup>(图 1)。土壤压实问题随着农业机械化程度的提高, 越来越受到人们的重视。压实土壤需要漫长的时间恢复原本的土壤结构, 甚至有些是无法恢复的。因此, 土壤压实逐渐成为限制粮食产能提升的突出问题。本文基于国内外土壤压实的相关研究, 综述了土壤压实对土壤结构性、生物特征和作物生长的影响, 以及土壤压实的成因和相应的应对措施。

## 1 土壤压实的影响

导致土壤压实的主要影响因素是土壤自身所能承受压力的大小, 当外界环境作用于土壤的压力大于一定强度时, 土壤发生不可逆的形变, 从而导致土壤压实<sup>[10-11]</sup>。

收稿日期: 2022-08-23; 修订日期: 2022-12-06

基金项目: 黑土地保护与利用科技创新工程专项资助(XDA28090100)和国家自然科学基金项目(41977048)资助

作者简介: 赵月(1994-), 女, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要研究领域为土壤微生物生态。E-mail: 2641713198@qq.com

\*通讯作者: E-mail: xieht@iae.ac.cn

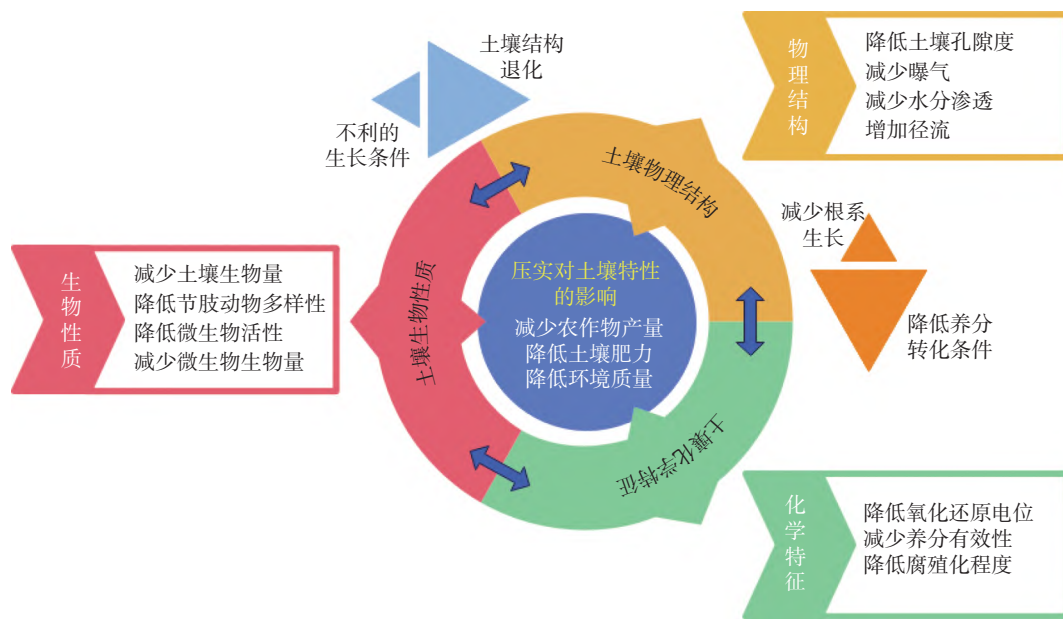


图 1 土壤压实对土壤物理、化学和生物特性的潜在影响<sup>[9]</sup>

Fig.1 Potential effects of soil compaction on soil physical, chemical and biological properties

在 20 世纪 90 年代初, 全球估计有  $6.8 \times 10^7 \text{ hm}^2$  土地因为农业机械而被压实, 其中土壤压实导致欧洲约  $3.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$  的土地退化<sup>[12]</sup>, 重型机械的使用是主要原因<sup>[13]</sup>。东欧 7 个国家  $5.4 \times 10^7 \text{ hm}^2$  的农业用地中有 37.5% 受到人为土壤压实的影响<sup>[14]</sup>。在澳大利亚, 土壤压实导致了 30% (约  $4 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ) 种植小麦的土地退化<sup>[15]</sup>。非洲南部由于土壤压实及土壤有机碳的流失, 造成的土地退化面积可能超过 52%<sup>[16]</sup>。在瑞典, 由于压实造成的耕地作物生产损失以达到数亿欧元<sup>[17]</sup>。中国黑龙江省的农业机械化率在全国处于较高水平, 农业机械重量和强度的提升, 导致黑龙江省农田土壤压实程度增加, 土壤生产力下降<sup>[18]</sup>。几乎每个大陆都报道了与土壤压实有关的类似问题。

### 1.1 压实对土壤物理结构的影响

压实会破坏土壤结构<sup>[19]</sup>, 包括改变土壤团聚体及其稳定性<sup>[20]</sup>。降低土壤孔隙度, 同时降低土壤通气量和水分入渗, 增加地面径流<sup>[21-22]</sup>, 还影响土壤有机碳和氮的矿化<sup>[23]</sup>。土壤结构的破坏增加了根系穿透阻力, 降低养分供给能力, 影响了养分循环速率和气体交换量, 降低了土壤生物多样性<sup>[4,24]</sup>。但是随着土壤含水量的降低以及土壤密度的增加, 能够减缓压实导致的土壤容重的增加和饱和导水率的降低<sup>[25]</sup>。通过增加土壤容重并减少入渗, 压实增加了地表径流, 容易导致降水期间的内涝, 在极端降水时期, 可能会引发滑坡和洪水<sup>[26]</sup>。压实还降低了渗透系数, 增加了土壤裂缝的风险<sup>[4]</sup>。压实对土壤物理结构的影响主要

表现为降低土壤孔隙度、土壤水分入渗能力和通气性等, 进而影响土壤的物质循环、养分的有效性以及作物生长。

### 1.2 压实对土壤化学特征的影响

土壤作为一个复杂多层次的开放体系, 压实改变了土壤的物理结构, 进而影响土壤化学特征和生物性状, 最终影响作物吸收、利用土壤养分。压实影响了土壤中  $\text{CO}_2$  的含量以及有机碳、氮的矿化作用。压实土壤中的高含水量和低通气量增加了厌氧条件的风险, 改变了土壤生物地球化学循环、增加了温室气体排放 (如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ ) 并降低了土壤溶液中的氧化还原电位<sup>[27]</sup>。当土壤发生压实时, 土壤结构稳定性下降, 有机质含量减少, 团聚体之间的粘结性降低, 进而导致作为土壤结构胶结剂的土壤腐殖质含量也随之降低<sup>[28]</sup>。Arrieta 等<sup>[29]</sup>发现土壤压实改变了土壤的理化性状进而调控了土壤的养分供应能力。土壤压实会降低土壤速效氮、磷和钾的含量<sup>[30]</sup>, 抑制土壤碳矿化和氮硝化作用, 使土壤养分的有效性降低, 作物吸收受到限制<sup>[31]</sup>, 降低了作物的产量。随着土壤压实程度增加, 土壤硝态氮的含量也随之增加, 而铵态氮的含量未发生变化<sup>[32]</sup>。土壤压实导致的厌氧环境使得土壤腐殖化程度和氧化还原电位的降低, 增加了温室气体的排放并调控了土壤的养分供应能力。

### 1.3 压实对土壤生物性状的影响

土壤压实对土壤生物多样性的影响取决于土壤

本身的性质以及土壤的压实程度<sup>[33]</sup>。土壤压实影响土壤动物的生物量。压实降低土壤中蚯蚓的数量, 降低微小节肢动物的多样性<sup>[34]</sup>。Dittmer 等<sup>[35]</sup>在德国下萨克森州布伦瑞克农业研究区, 对土壤压实后的土壤生物进行定量分析, 结果发现弹尾目 (*Collembola*) 物种在耕作制度和压实等级方面表现出不同的偏好。Rüdiger 等<sup>[36]</sup>量化了机械胁迫土壤中家蚕科 (*Bombyx mori* L) 的丰度和垂直分布的情况, 土壤压实导致个体数量显著减少, 垂直分布受到干扰, 被机械压实的土壤, 家蚕科的丰度在 1 个年度周期内没有恢复, 但垂直分布恢复到正常水平。王正阳等<sup>[37]</sup>发现, 经过人类行走压实后的土壤, 体积较小的蚯蚓入土概率低于 50%, 而经推土机施压对土壤压实后, 即使是体型较小的蚯蚓也很难进入土壤。随着农业机械越来越重, 人们越来越关注其对土壤物理条件的直接影响及其对土壤生物群的间接影响。Bouwman 等<sup>[38]</sup>在非放牧草地上每年进行 1~4 次负载 (0、4.5、8.5 和 14.5 t), 为期 5 年, 结果表明线虫的总数不受土壤压实的影响, 但它们在取食类型中的分布发生了变化, 食草动物数量增加、食菌动物和杂食动物/捕食者数量减少, 线虫组合结构的这种变化与作物生长条件较差有关。对于大部分的土壤生物来说, 压实后它们的活动将受到较大的影响, 甚至在压实后无法生存, 土壤动物种群数量也反映着土壤养分含量。压实会影响土壤动物的生命活动, 从而间接影响作物的生长情况。

土壤压实显著降低了细菌总量的 22%~30%, 降低了硝化细菌的 38%~41%, 而真菌增加 55%~86%, 反硝化细菌增加 49%~53%; 由于深层土壤有机质含量和 pH 值与表层相比较低, 因此与 10~20 cm 土层相比, 0~10 cm 土层的微生物数量 (除了反硝化细菌) 均显著降低<sup>[39]</sup>。也有研究认为压实增加了土壤容重, 降低了土壤孔隙度, 导致微生物生物总量和活性降低<sup>[40]</sup>。有研究在秸秆覆盖和不覆盖土壤上分别设置不同压实处理, 结果表明与未压实处理相比, 强压实土壤中酶活性降低, 中等压实土壤中酶活性升高, 在所有压实水平下, 覆盖对土壤中的细菌总数和酶活性都有刺激作用, 压实和秸秆覆盖对所有分析的微生物参数都有显著影响<sup>[41]</sup>。适度的土壤压实增加了土壤的总有机碳、微生物生物量碳、葡萄糖苷酶的活性和微生物功能多样性, 但降低了可

溶性有机碳含量, 总体而言, 压实改变了土壤微生物境进而改变了土壤微生物的生长和活性及土壤微生物的功能多样性<sup>[42]</sup>。

#### 1.4 压实对土壤生态系统功能及作物生长的影响

土壤作为一个生态系统, 土壤的物理、化学和生物特性相互作用产生了土壤过程、发挥了土壤生态系统功能<sup>[43]</sup>。为了追求粮食的高产, 在集约化农业生产中, 农业机械化程度的提高导致土壤压实, 影响土壤物理结构、化学特征和生物性状, 土壤生态系统功能退化或丧失, 进而降低作物的生产功能 (图 2)。土壤压实导致的作物减产幅度在 2.5~15% 至 25~50% 之间, 是对土壤质量、功能和健康的主要威胁<sup>[7]</sup>, 因为压实的土壤短期内难以恢复, 底层土壤的压实甚至是永久性的<sup>[17]</sup>。压实显著影响农作物生长并阻碍作物根系生长, 在植株生长后期, 根系分泌物较少、活性降低, 作物代谢不平衡, 导致作物产量降低<sup>[44]</sup>。土壤压实度与耕地作物产量之间存在线性负相关关系<sup>[45]</sup>, 但因作物种类而异<sup>[46]</sup>。表层土壤的轻微压实可能对某些土壤是有利的<sup>[38]</sup>, 然而也有研究认为中等压实程度土壤作物生长更好, 中等压实程度增加了土壤与作物根系的接触, 从而提高了根系养分运输效率, 增加了水分运输量, 最终提升作物产量<sup>[47]</sup>。这表明了存在一个适合作物生长的压实水平, 即最佳压实水平。目前已经提出了支持最高作物产量的土壤压实最佳范围, 如春大麦、春小麦<sup>[48]</sup>、青贮玉米和大豆<sup>[49]</sup>。作物产量对土壤压实度的响应可能因天气和土壤质地而异, 这可能是土壤穿透阻力、根系结构和植物水分吸收之间相互作用的结果<sup>[50]</sup>。然而, 当土壤压实度超过一个临界值时, 如贯入阻力 > 2.0~3.5 MPa 时<sup>[51]</sup>, 无论气候如何, 植物生长和产量都会受到不利影响。

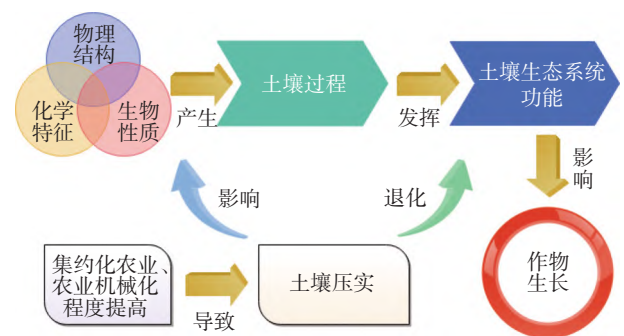


图 2 土壤压实对生态系统功能及作物生长的影响  
Fig.2 Effects of soil compaction on ecosystem function and crop growth



## 2 影响土壤压实的主要因素

### 2.1 土壤含水量

土壤含水量是影响压实过程的重要因素<sup>[52]</sup>。一般来说,含水量越低的土壤越不容易被压实<sup>[53]</sup>。在土壤含水量较低的情况下,即使是最大的载荷,未发生形变的土壤深度可达到2 cm,而土壤水分含量较高时允许的载荷明显降低<sup>[54]</sup>。土壤压实度随着土壤含水量的增加而增加,当土壤含水量达到一定水平时,称为临界含水量,水分含量进一步增加,土壤的可压缩性就会降低<sup>[55]</sup>。Ishaq等<sup>[56]</sup>使用容重作为判断砂质粘壤土压实程度的指标,表明土壤的压实程度随着土壤含水量的增加而增加,直至达到极限,然后随着土壤含水量的增加而降低,压实程度最大时的土壤含水量为120 g kg<sup>-1</sup>。这说明在不影响作物产量的情况下,允许车辆通行的最大地面压力,随着土壤含水量和容重的增加而降低。土壤含水量越接近田间持水量,机械对土壤造成的压实度越严重,因此如果要尽量减少土壤压实的影响,尽量避免在土壤含水量较高时进地作业,在适当的土壤湿度下耕作是很重要的。

### 2.2 土壤类型

土壤类型影响土壤的压实程度,土壤对压实的敏感性随不同的土壤质地而变化。Horn等<sup>[57]</sup>发现胶体含量低的粉砂壤土比含水量较低、细质地的壤土和粘土更容易受到压实的影响。粗质地土壤比细质地土壤或黏土具有更多的球形颗粒,球形颗粒的接触面积小,因此与板状颗粒相比黏性较小,因此,在一定的含水量下,达到相同压实程度粗质地土壤比细质地土壤需要更小的压缩应力。由于细质地土壤或粘土能够保持更多的水分,因此细质地土壤更容易被压实<sup>[58-59]</sup>。土壤类型不同,土壤压实对作物的影响也不一致,在壤质土中压实显著降低作物的生长和存活率,而在含砂粒和粉粒的土壤中,压实对作物生长存在一定的促进作用<sup>[60]</sup>。

### 2.3 不同耕作方式

不同的耕作方式会影响土壤压实程度。在质地较细的土壤中,常规耕作会增加土壤的压实度,破坏自然结构形成过程,并对土壤质量产生长期持久的影响<sup>[61-62]</sup>。除了自然沉降导致土壤物理特性变化外,不同的耕作方式是造成土壤压实的主要原因之一。通过研究德国粉砂壤土上不同耕作方式对土壤压实

程度的长期影响发现,在传统耕作的土壤中,农具的反复使用导致新形成的土壤团聚体被永久破坏,发生土壤压实;免耕和少耕可以提供较高的土壤强度,避免土壤压实<sup>[63]</sup>。在克罗地亚免耕与常规耕作相比,免耕倾向于增加表土和底土的容重,更能有效减少土壤侵蚀<sup>[64]</sup>,而且免耕与常规耕作的渗透阻力在0~2.5 cm和20~22.5 cm有显著差异<sup>[65]</sup>。而保护性耕作与常规耕作相比,保护性耕作具有更多的残留物覆盖、更少的压实度和更少的土壤干扰,可以显著减少径流和土壤侵蚀<sup>[66]</sup>。

不同耕作方式通过改变土壤压实度进而影响作物产量。在棕壤土中,深松与免耕相比降低了土壤容重,而土壤容重与花生地下部分的常量营养元素含量和花生产量呈显著负相关关系<sup>[67]</sup>。王宪良等<sup>[68]</sup>研究了免耕、免耕深松、免耕压实和免耕压实深松分别对土壤物理特性和作物生长的影响,发现免耕虽然会增加土壤容重,但短时期内并未影响作物生长。减少耕作、行播和不压实土壤的播种是降低生产成本和土壤资源压力,提高作物产量的有效方法。Mihretic等<sup>[69]</sup>评估了埃塞俄比亚西北部和中部农业生态区,不同耕作、播种和土壤压实措施对画眉草(*Eragrostis Pilosa* (Linn.) Beauv)生产率的影响,结果证明了这一观点。另外对于作物残留物的处理,虽然玉米秸秆打包(66%秸秆清除率)增加了土壤的压实度,降低了土壤剖面中的水分含量,但却增加了玉米产量<sup>[70]</sup>。

### 2.4 农业机械

土壤压实不是最近才出现的现象,早在农业机械化之前,以犁盘为农业工具就已经导致了土壤压实的发生。然而,目前集约化的农业加剧了土壤压实的风险。随着农业机械重量的增加,土壤压实度也随之增加<sup>[71]</sup>,而且与农业机械的通行次数紧密相关。轻型机械多次通过所造成的损害比重型机械少次通过对土壤造成的损害更严重<sup>[72]</sup>,而且会引起底土长期压实<sup>[73]</sup>。此外,农业机械和农机具如铧式犁、深松铲等均会对土壤产生碾压与挤压<sup>[74]</sup>。

农业机械的不同类型与通行次数均会对土壤压实产生不同的影响。在克罗地亚葡萄园使用轻型拖拉机,增加了0~10 cm和10~20 cm的土壤容重,但是对20~30 cm深度的土壤容重没有显著影响<sup>[75]</sup>。法国东南部温带的两种粉质土壤经过重型机械通行压实后,发现0~45 cm土层的土壤孔隙度降低了

49%~96%<sup>[76]</sup>。而机械压力对土壤的影响深度可以达到 60 cm, 增加机械载荷和通行次数均会影响深层土壤物理性状<sup>[71]</sup>。Botta 等<sup>[77]</sup>采用对地压力分别为 77.7 kN 和 98 kN 的两种拖拉机分析不同机械载荷对土壤的压实程度, 结果表明在 0~15 cm 土层, 对地压力小的拖拉机对土壤压实程度的影响更显著; 而在 15~60 cm 土层, 对地压力大的拖拉机造成的土壤压实程度更严重。在各种耕作模式下, 重型机械的使用非常普遍, 即使真正的免耕系统(1次通行作业)也是如此, 而且表层土的压实更为明显<sup>[78]</sup>, 而传统耕作条件下, 农业机械导致 100% 的农田地面被碾压<sup>[79]</sup>。土壤压实度随着农业机械通行次数的增加而增加, 拖拉机通行 25 次与 10 次的土壤物理性状相比, 土壤容重和穿透阻力分别增加 27% 和 46%、土壤孔隙度降低 11%<sup>[34]</sup>。中国东北黑土农田经过 3 次小四轮拖拉机通行后, 土壤呈现显著压实特征, 而且机械耕作阻力随机械通行次数的增加而加大<sup>[80]</sup>。

农业机械通过时对土壤的压实还受轮胎充气压力等因素的影响。不同充气压力(100 和 200 kPa)轮胎走过均增加土壤容重, 降低了土壤孔隙度, 但是最显著变化仅反映在 0~10 cm 深度<sup>[81]</sup>。而免耕农田种植的作物产量受车轮通行影响不大, 另外还发现在免耕农田作物收获后, 适度压实可以使冻融循环的影响得到缓解<sup>[49]</sup>。

### 3 土壤压实的应对措施

#### 3.1 合理的耕作措施

通过合理的耕作措施可以改善土壤压实, 大量研究发现免耕和深松提高了土壤含水量、改善了土壤物理结构<sup>[82]</sup>。利用 Meta 分析发现, 免耕覆盖相对于传统耕作提升土壤有机质的速率更显著, 年变化率达 36.1%<sup>[83]</sup>。表层 0~5 cm, 免耕土壤有机碳含量显著高于传统耕作, 在经过 4~11 年的持续免耕后, 压实土壤团聚体稳定性逐渐恢复, 表现出初步恢复状态<sup>[84]</sup>。机械化农业提高了土壤的压实度, 而深松促进水和根系达到下层土壤, 是缓解土壤压实的一项重要措施<sup>[85-86]</sup>。犁耕地导致土壤压实, 大豆出现浅根系状态, 深松促进了大豆根系生长从而提升大豆产量<sup>[87]</sup>。深松可以消除压实的土层, 根除植物生长迟缓的疾病<sup>[88]</sup>, 只有 6%~13% 的根系存在于压实的土层, 深松可以将底层土壤强度减少 1.2 MPa, 使根可以穿透底层土壤<sup>[89]</sup>, 同时增加了根系密度<sup>[90]</sup>。在山西省旱

地小麦农业站的试验研究发现, 深松是长期免耕或少耕措施下减轻土壤压实风险的重要管理措施<sup>[91]</sup>。然而通过 Meta 分析发现, 与免耕相比, 深松提高了作物产量, 暂时降低了表层土壤有机质的含量, 仅通过深松不足以解决犁底层的压实问题, 要结合秸秆还田、栽培深根作物、施肥等方法同时进行<sup>[92]</sup>。

压实土壤的物理结构恢复需要较长时间, 而耕作措施需要投入大量的机械和能源, 大量的机械作业会使土壤再次压实<sup>[93]</sup>。不合理的耕作加快了土壤有机质的分解, 破坏了土壤的物理结构<sup>[94]</sup>。传统耕作对土壤的扰动过度, 破坏土壤团粒结构, 机械作业后会造成更加严重的土壤压实<sup>[77]</sup>。而保护性耕作通过减少机械作业, 增加地表覆盖, 阻止地表形成硬壳, 降低了土壤压实的风险。

#### 3.2 增加土壤有机质含量

在诸多因素中, 有机质的数量和质量是土壤的物质基础, 而且土壤有机质对于压实的特性影响显著。增加有机质可以稳定土壤结构, 降低土壤容重<sup>[95]</sup>。有机质中的腐殖质和多糖可通过范德华力、氢键和功能基团等以胶膜形式包被在矿质土粒表面, 对土壤团聚体的形成和稳定性有显著作用<sup>[96]</sup>。Leinweber 等<sup>[97]</sup>认为腐殖质具有疏水性, 能够对颗粒形成包被, 因此有机质腐殖化程度越低, 土壤团聚体孔隙度越大。有机质通过结合土壤矿物颗粒、降低聚合物湿润度、影响土壤团聚体的机械强度, 进而影响土壤的结构和压实程度。有机质的类型也非常重要, 容易氧化的土壤有机质更能决定土壤的机械行为<sup>[98]</sup>。由于有机物料的容重比土壤低, 且孔隙度更大, 因此将有机物料与土壤混合可以降低土壤的容重、增加土壤孔隙度<sup>[99]</sup>, 进而缓解土壤压实。施用有机物料虽然增加土壤的矿化作用, 但总体来说土壤有机碳的积累量更大, 显著增加了土壤有机质含量<sup>[100]</sup>。施用有机肥或掺入植物残体均能显著改善表层土壤的有机质含量。向土壤中施用 50~100 t hm<sup>-2</sup> 的有机肥, 可以修复 48.5 kW 拖拉机 1~2 次对土壤的碾压<sup>[76]</sup>。Défossez 等<sup>[101]</sup>在黏壤土中添加质量比为 3.4% 的作物残茬后, 土壤容重降低了 0.3 g cm<sup>-3</sup>。在干旱的环境下, 表层土壤有机质含量下降, 向底土注入有机质是解决土壤压实问题的选择之一, 而留茬处理可能是更好的选择。而无机肥和有机肥配施也可以在一定程度上抵消载荷的影响以及水分对表土容重和土壤强度的影响。在高产环境中, 施用绿肥在改善



压实土壤的物理性质方面是一种有益的做法。

增加土壤有机质含量能够改善土壤物理结构,减少土壤压实的风险。通过施加作物残体、有机肥、无机肥、绿肥或采用留茬处理等,均能够提高土壤有机质含量和土壤抗压实性。

### 3.3 植物根系

压实通过影响土壤结构间接影响根系生长。穿透阻力是植物根系穿透土壤能力的一种指标,穿透阻力随着土壤压实程度的增加而增加。压实增加了土壤的机械阻力,限制了作物根系的数量,改变了根系形状和生长方向<sup>[102-103]</sup>。根系对土壤结构的影响取决于植物种类、土壤组成和环境因素,还受到与植物根系相关的土壤微生物区系的影响<sup>[104-105]</sup>。在压实土壤中生长的植物,无论土壤含水量高低,其侧根数量和干物质量均会减少<sup>[34]</sup>。

与传统耕作相比,利用粮食作物—覆盖作物轮作,实现生物耕作,可以降低大型机具压实土壤风险等。生物耕作是指利用具有发达深根系的覆盖作物,通过其根系生长,穿透紧实土壤层,然后在根系腐解后形成大量生物孔隙(根孔),进而改善土壤结构以及土壤的导水导气性,并为后茬作物的根系生长提供优先通道,达到促进作物生长的目的<sup>[106]</sup>。Hamza等<sup>[107]</sup>利用计算机辅助断层扫描技术,发现萝卜(*Raphanus sativus* L)和羽扇豆根(*Lupinus micranthus* Guss)的直径在日间会发生大小的变化,这使土壤变得不稳定,并会使压实的土壤变得松散。不同作物品种的根,在穿透坚硬土层的能力上有很大不同,它的响应与根系克服压实土壤强度限制的能力有关<sup>[108]</sup>。另有研究发现豆科植物比非豆科植物更能有效地稳定土壤结构<sup>[109]</sup>。通过在轮作中加入土壤穿透能力强的植物,尽量减少底土压实的风险<sup>[110-111]</sup>。植物的根系分泌物通过改善土壤物理结构,来缓解土壤压实问题<sup>[112]</sup>。此外,根系分泌物刺激微生物的群落活性,加快土壤有机质的周转<sup>[113]</sup>,增加土壤团聚体并改善土壤物理性质<sup>[114]</sup>,使根能够在压实土壤中优先生长<sup>[115]</sup>,同时根系分泌物对土壤结构的形成、土壤养分转化、植物养分吸收、土壤微生物分布、环境胁迫缓解等方面均具有重要的作用。Jabro等<sup>[116]</sup>发现覆盖作物根系通过土壤压实层产生根通道和生物空隙,有效地降低土壤压实度,然而随着时间的推移,腐烂的覆盖作物根系可能会增加土壤压实度。

### 3.4 控制农业机械通行

固定道耕作系统将土壤压实限制在机耕道上,提供一个坚实的机械通行车道和一个松散的生根区,进而有助于维持一个更有利于植物生长的区域<sup>[117]</sup>。控制农业机械的通行可以避免机械引起的土壤压实,并且可以优化作物的土壤条件<sup>[118]</sup>。固定道耕作系统可以减少土壤压实,改善作物生长区土壤结构,提高作物产量;减少机械耕作阻力,降低能耗,有利于精密化农业的发展<sup>[119]</sup>。在控制机械通行、免耕制度下,土壤水分的入渗速度与未耕土壤相似,这说明控制农业机械通行结合保护性耕作,可以缓解土壤压实、增强种植的可持续性、改善水分的渗透并减少径流引起的土壤侵蚀<sup>[120]</sup>。

控制农业机械的通行形成的车道可能会占20%的土地,但这一损失可以通过更高的产量得到补偿<sup>[119]</sup>,作物产量增长预计将超过10%<sup>[121]</sup>。控制机械通行可以使根系生长的更好,并且可以降低水分渗透阻力<sup>[122-123]</sup>。控制机械通行虽然能大大降低土壤的压实度,但不能完全消除土壤的压实度,而且轻微程度的土壤压实对某些土壤类型是有益的<sup>[38]</sup>。防止土壤压实最有效的方法是使用同时进行多项操作的机械,这将显著减少车轮通过的次数<sup>[124]</sup>。

机械载荷、轮胎类型和充气压力可使土壤容重增加,在土壤压实中起着重要作用<sup>[125]</sup>。Ridge等<sup>[126]</sup>研究发现,在机械化生产甘蔗的地方,通过控制机械的重量、使用高浮力轮胎或履带可减少收割期间的土壤压实。几乎所有轮胎都显著增加了车轮轨道上的土壤压实度,部分轮胎增加了轨道附近的土壤压实度,而在离车轮轨道较远的地方,土壤压实度普遍降低,尤其是底层土壤<sup>[127]</sup>。有研究认为使用低压轮胎可以显著降低土壤压实度,增加作物产量<sup>[124]</sup>。为了减少地面接触压力,在农业机具上安装履带或更大的轮胎,从而降低压实的风险<sup>[128]</sup>。

### 3.5 土壤压实模型预测评估

农业土壤压实的机械过程量化可以有效地估计和预测土壤物理变化,使得土壤生产潜力受到最小的损害。传统上依赖于地质技术工程实践的应力—应变关系被用于研究农业土壤的压实。然而,这些方法未能解决土壤结构动力学的关键特征,因为它们不足以预测土壤结构变化<sup>[129]</sup>,它们是基于平衡状态的应力—应变关系,而农业土壤的变形往往是一个很少达到平衡的动态过程,特别是考虑到农

业机械的瞬态快速加载时。此外, 虽然这些方法可以描述体积的变化, 但它们无法预测孔隙尺度的变化, 而孔隙尺度对流动和运输过程至关重要<sup>[130]</sup>。目前根据土壤压实过程, 将压实评估体系分为 3 个部分, 轮胎—土壤接触土壤表面应力分布模型、应力在土壤内部的传递模型、土壤在受力过程中的应力模型。通过这 3 部分模型, 完成对土壤压实研究的分解和量化。土壤压实模型是控制农业机械通行引起土壤压实的重要工具, 基于 SoilFlex 模型, 通过轮胎参数对接触区域中的应力分布进行真实的预测, 并且可以模拟多台机械通行的应力变化<sup>[131]</sup>; 基于 FRIDA 模型的轮胎—土壤接触特性研究, 为减少农业机械在田间作业时引起的土壤压实风险, 合理选择拖拉机胎压及配套的农机具提供了理论依据<sup>[132]</sup>。Wang 等<sup>[133]</sup> 为了验证土壤压实度预测模型的实用性, 在河北省涿州市进行了田间试验, 分别使用了两种不同的压实设备, 将处理设置为压实 1、3、5、7 和 9 次, 结果表明土壤容重预测值与实测值的拟合系数 ( $R^2$ ) 大于 0.641, 方程的斜率 ( $k$ ) 大于 0.782, 说明基于农业机械和土壤参数的土壤容重预测模型具有良好的预测效果; 土壤压实预测模型可以进一步了解土壤压实机理, 从而制定合理的土壤压实缓解措施。贺亭峰等<sup>[134]</sup> 基于传感器技术进行了田间原位土壤平板下陷实验, 利用模型分析了土壤应力传递等压实过程, 相对准确地预测了田间指定加载环境

和土壤环境中由于连续加载而发生变化的土壤应力, 为科学控制机械压实提供了可视化的数据。

### 4 总结与展望

轻微或中等程度的压实对于某些土壤和植物是有利的, 适当的压实程度增加了土壤与作物根系的接触, 从而提高了根系养分运输效率, 增加了水分运输量, 最终提升作物产量。但大多数土壤压实通过增加土壤容重、降低孔隙度、增加土壤强度、降低土壤持水能力和水分入渗, 对土壤物理肥力, 特别是水分和养分的存储和供应产生不利影响。如降低了肥料效率和作物产量, 增加了内涝、径流、土壤侵蚀以及环境污染等。然而目前很难提出一种单一的管理措施来解决土壤压实问题。土壤压实的应对措施包括 (图 3): ①最少 (或免耕) 耕作; ②控制农业机械通行、使用同一台机械同时进行多个农业操作以减少通行次数, 使用载荷低的机械和表面接触面积大的轮胎来减少地面压力; ③保持植被土壤覆盖, 种植深根作物, 能够穿透相对紧实的土壤; ④通过留茬增加土壤有机质含量, 施用绿肥或添加来自外界的植物或动物残体等有机物对降低土壤压实程度也很重要, 可以起到缓冲作用, 防止或减少外部荷载于表土的压实作用传递到底土; ⑤农业田间作业最好在作业所需的最低可接受土壤含水量条件下进行。

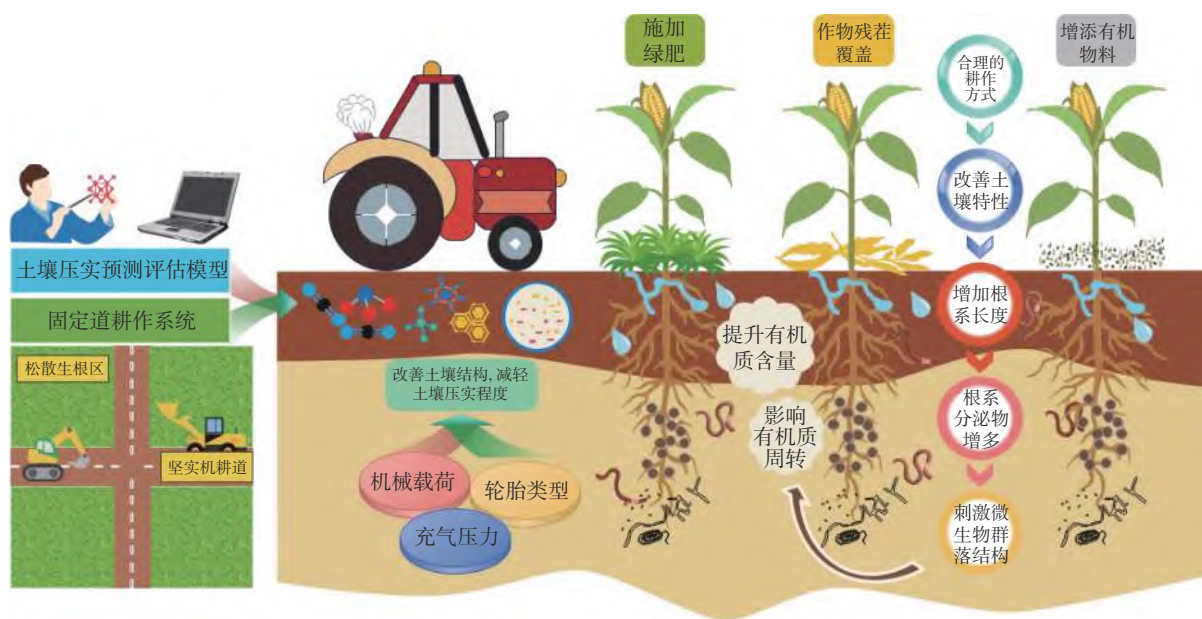


图 3 土壤压实的应对措施  
Fig.3 Countermeasures for soil compaction

如今现代化农业发展进程加快、机械化水平逐步提升, 需要加强压实对土壤物理性质、化学特征和生物特性影响的研究, 尤其是对生物特性影响的研究。目前的研究多针对土壤动物, 如压实对蚯蚓、线虫生物量、种类多样性的影响等, 而对微生物的群落结构、多样性以及功能等研究仍较少。土壤含水量、质地、容重、孔隙度等, 均会影响土壤压实程度, 众多因素相互影响、制约, 然而这些因素对土壤压实的交互影响机制尚不清楚。由于土壤类型间质地、有机质和水分含量差异较大, 致使不同类型的土壤间很难用某一表征土壤压实的指标进行比较, 为此未来应探讨使用某一指标比较不同类型土壤间对压实的响应程度。另外对土壤压实的研究方法仍需加强, 田间试验和室内试验各有其优缺点, 田间试验的土壤空间异质性大, 采样工作量较大, 而室内模拟压实试验, 土壤样品经过人为扰动与田间试验的差别较大, 因此今后需不断完善研究方法, 积极地为预防土壤压实、防治土壤退化提供技术支持。

#### 参考文献:

- [1] Palmer R C, Smith R P. Soil structural degradation in SW England and its impact on surface water runoff generation[J]. *Soil Use & Management*, 2013, 29(4): 567 – 575.
- [2] Acevedo M F, Harvey D R, Ndengu G, et al. Food security and the environment: Interdisciplinary research to increase productivity while exercising environmental conservation[J]. *Global Food Security*, 2018, (16): 127 – 136.
- [3] 农业农村部办公厅. “十四五”全国农业机械化发展规划[J]. *畜牧产业*, 2022, 5: 5 – 18.
- [4] Schjonning P, 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.
- [5] Greenwood K L, McKenzie B M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2001, 41(8): 1231 – 1250.
- [6] Abdallah A, Etienne D. Mapping soil compaction-A review[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 5: 60 – 66.
- [7] Holland J M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence[J]. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 2004, 103(1): 1 – 25.
- [8] DEFRA. Environmental standards for farming-consultation on proposed changes to standards in cross compliance Good Agricultural and Environmental Condition and related measures in England[D]. Department for Environment Food & Rural Affairs, London. 2009
- [9] Rakkar M K, Blanco-Canqui H. Grazing of crop residues: Impacts on soils and crop production[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 254: 71 – 90.
- [10] Keller T J, Arvidsson P, Schjonning M, et al. In situ subsoil stress-strain behavior in relation to soil precompression stress[J]. *Soil Science*, 2012, 177(8): 490 – 497.
- [11] Horn R, Fleige H. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 102(2): 201 – 208.
- [12] Akker J J H, Canarache A. Two European concerted actions on subsoil compaction[J]. *Landnutz*, 2001, 42: 15 – 22.
- [13] Oldeman L R. The global extent of soil degradation//Greenland D J, Szabolcs, I. *Soil Resilience and Sustainable Land Use*[C]. UK: CAB International, Wallingford, Oxon, 1994: 99-118.
- [14] Birkás M, Jolánkai M. Environmentally-sound adaptable tillage-solutions from Hungary//Hrubá, M. *Process of reviewed science papers*[C]. Slovakia: University of agriculture, 2008: 191-194.
- [15] Carder D J. A framework for regional soil conservation treatments in the medium and low rainfall districts[J]. Department of Agriculture, Western Australia, Research Report, 1986, 1: 120.
- [16] Tamene L, Sileshi G W, Ndengu G, et al. Soil structural degradation and nutrient limitations across land use categories and climatic zones in Southern Africa[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(11): 1288 – 1299.
- [17] Tkab C, Ms A, Tc A, et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104293.
- [18] 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, 2019.
- [19] Alaoui A, Rogger M, Peth S, et al. Does soil compaction increase floods? A review[J]. *Journal of hydrology*, 2018, 557: 631 – 642.
- [20] Défossez P, Richard G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 67(1): 41 – 64.
- [21] Batey T T. Soil compaction and soil management-a review[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 25(4): 335 – 345.
- [22] Ferreira C S S, Ferreira A J D, Pato R L, et al. Rainfall-runoff-erosion relationships study for different land uses, in a sub-urban area[J]. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 2012, 56(3): 5 – 20.
- [23] De Neve S, Hofman G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(5-6): 544 – 549.
- [24] Yin R, Kardol P, Thakur M P, et al. Soil functional biodiversity and biological quality under threat: Intensive land use outweighs climate change[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 147:



- 107847.
- [ 25 ] 东泽源. 模拟农业机械对土壤压实的试验研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(21): 117 – 119.
- [ 26 ] FAO. World Fertilizer Trends and Outlook to 2018[EB/OL]. 2015. Available online at:<http://www.fao.org/3/a-i4324e>.
- [ 27 ] Conlin T S S, Driessche R. Response of soil CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> concentrations to forest soil compaction at the Long-term Soil Productivity sites in central British Columbia[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2000, 80(4): 625 – 632.
- [ 28 ] 王加旭. 关中农田土壤物理质量退化特征[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2016.
- [ 29 ] Arrieta C, Busey P, Daroub S H. Goosegrass and Bermudagrass Competition under Compaction[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(1): 11 – 16.
- [ 30 ] Ahmad N, Hassan F U, Belford R K. Effect of soil compaction in the sub-humid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum estivum*) I. Compaction[J]. *Field Crops Research*, 2009, 110: 54 – 60.
- [ 31 ] Rasiah V. Nitrogen immobilization/remineralization in legume-amended soils as influenced by texture and compaction[J]. *Communication In Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30(5-6): 829 – 841.
- [ 32 ] Siczek A, Lipiec J. Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 114(1): 50 – 56.
- [ 33 ] 罗友进, 王 武, 余 端, 等. 土壤压实对土壤生化循环和生态效应的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(2): 317 – 319.
- [ 34 ] Cambi M, Hoshika Y, Mariotti B, et al. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field[J]. *Forest Ecology & Management*, 2017, 384: 406 – 414.
- [ 35 ] Dittmer S, Schrader S. Longterm effects of soil compaction and tillage on *Collembola* and straw decomposition in arable soil[J]. *Pedobiologia*, 2000, 44(3-4): 527 – 538.
- [ 36 ] Rüdiger R, Langmaack M, Schrader S, et al. Tillage systems and soil compaction-their impact on abundance and vertical distribution of *Enchytraeidae*[J]. *Soil & Tillage Research*, 1998, 46(1-2): 117 – 127.
- [ 37 ] 王正阳, Ayman Abunimer, 张秀美, 等. 蚯蚓种群爆发及土壤压实对蚯蚓行为的影响[J]. *资源开发与市场*, 2018, 34(9): 1271 – 1275.
- [ 38 ] Bouwman L A, Arts W B M. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 14(3): 213 – 222.
- [ 39 ] Pupin B, Freddi O D S, Nahas E. Microbial alterations of the soil influenced by induced compaction Alteraes microbianas do solo influenciadas por compactao induzida[J]. *Revista Brasileira de Ciéncia do Solo*, 2009, 33: 1207 – 1213.
- [ 40 ] Canbolat M Y, Bilen S, Akmak R, et al. Effect of plant growth-promoting bacteria and soil compaction on barley seedling growth, nutrient uptake, soil properties and rhizosphere microflora[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2006, 42(4): 350 – 357.
- [ 41 ] Siczek A, Frac M. Soil microbial activity as influenced by compaction and straw mulching[J]. *International Agrophysics*, 2012, 26(1): 65 – 69.
- [ 42 ] Pengthamkeerati P, Motavalli P P, Kremer R J. Soil microbial activity and functional diversity changed by compaction, poultry litter and cropping in a claypan soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 48(1): 71 – 80.
- [ 43 ] 李奕赞, 张江周, 贾吉玉, 等. 农田土壤生态系统多功能性研究进展[J/OL]. *土壤学报*, 2022, 1 – 15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220121.0822.002.html>.
- [ 44 ] 李孟霞, 王国松, 李永忠. 作物对土壤压实胁迫响应研究进展[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(1): 154 – 160, 167.
- [ 45 ] Marins A D, Reichert J M, Secco D, et al. Crambe grain yield and oil content affected by spatial variability in soil physical properties[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81(1): 464 – 472.
- [ 46 ] Arvidsson J, Hakansson I. Response of different crops to soil compaction-Short-term effects in Swedish field experiments[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 138: 56 – 63.
- [ 47 ] Arvidsson J. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction[J]. *Plant & Soil*, 1999, 208(1): 9 – 19.
- [ 48 ] Carter MR. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1990, 70(3): 425 – 433.
- [ 49 ] Sivarajan S, Mharlooei M, Bajwa S, et al. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 234 – 243.
- [ 50 ] Colombi T, Torres L C, Walter A, et al. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth-A vicious circle[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1026 – 1035.
- [ 51 ] Lima C, Miola E, Timm L C, et al. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 190 – 195.
- [ 52 ] Soane B D, Ouwkerk C V. Soil compaction in crop production[J]. *Soil Compaction in Crop Production*, 1994, 37: 201 – 207.
- [ 53 ] Gysi M, Ott A, Flüher H. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 52(3-4): 141 – 151.
- [ 54 ] Medvedev V V, Cybulko W G. Soil criteria for assessing the maximum permissible ground pressure of agricultural vehicles on Chernozem soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 1995, 36(3-4): 153 – 164.

- [ 55 ] Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 82(2): 121 – 145.
- [ 56 ] Ishaq M, Hassan A, Saeed M, et al. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan I. Soil physical properties and crop yield[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 59(1-2): 57 – 65.
- [ 57 ] Horn R, Domzzal H, Slowinska A, et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 1995, 35(1-2): 23 – 36.
- [ 58 ] Sch A E, Smith R R, Dorner F J. Effect of moisture and transit frequency on stress distribution on different soils[J]. *Agro Sur*, 2000, 2: 60 – 68.
- [ 59 ] Peng X H, Horn R, Zhang B, et al. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompactd Ultisols[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 76(2): 125 – 137.
- [ 60 ] Ampoorter E, Frenne P D, Hermy M, et al. Effects of soil compaction on growth and survival of tree saplings: A meta-analysis [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2011, 12(5): 394-402.
- [ 61 ] Shukla M K, Lal R, Ebinger M. Tillage effects on physical and hydrological properties of a Typic Argiaquoll in central Ohio[J]. *Soil Science*, 2003, 168(11): 802 – 811.
- [ 62 ] Derpsch R, Friedrich T, Kassam A, et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2010, 3: 1 – 25.
- [ 63 ] Wiermann C, Werner D, Horn R, et al. Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 53(2): 117 – 128.
- [ 64 ] Bogunovic I, Pereira P, Kiscic I, et al. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia)[J]. *Catena*, 2018, 160: 376 – 384.
- [ 65 ] Herrera J L, Tejedor T H, Saa-Requejo A, et al. Effects of tillage on variability in soil penetration resistance in an olive orchard[J]. *Soil Research*, 2016, 54(2): 134 – 143.
- [ 66 ] Wang X, Gao H, Tullberg J N, et al. Traffic and tillage effects on runoff and soil loss on the Loess Plateau of northern China[J]. *Australian Journal of Research*, 2008, 46(8): 667 – 675.
- [ 67 ] Shen P, Wang C, Wu Z, et al. Peanut macronutrient absorptions characteristics in response to soil compaction stress in typical brown soils under various tillage systems[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 65(2): 1 – 11.
- [ 68 ] 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 168 – 175.
- [ 69 ] Mihretie F A, Tsunekawa A, Haregeweyn N, et al. Agro-Economic Evaluation of Alternative Crop Management Options for Teff Production in Midland Agro-ecology, Ethiopia[J]. *Agriculture*, 2021, 11(4): 298.
- [ 70 ] Ruis S J, Burr C, Blanco-Canqui H, et al. Corn Residue Baling and Grazing Impacts on Corn Yield under Irrigated Conservation Tillage Systems[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(3): 2387 – 2397.
- [ 71 ] Seehusen T, Riggert R, Fleige H, et al. Soil compaction and stress propagation after different wheeling intensities on a silt soil in South-East Norway[J]. *Soil & Plant Science*, 2019, 69(4): 343 – 355.
- [ 72 ] Reintam E, Trükmann K, Kuht J, et al. Soil compaction effects on soil bulk density and penetration resistance and growth of spring barley (*Hordeum vulgare* L. ) [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2009, 59(3): 265 – 272.
- [ 73 ] Balbuena R H, Terminiello A M, Claverie J A, et al. Soil compaction by forestry harvester operation, Evolution of physical properties[J]. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola Ambiental*, 2000, 4: 453 – 459.
- [ 74 ] 王宪良, 王庆杰, 张祥彩, 等. 田间土壤压实研究现状[J]. *农机化研究*, 2016, 38(9): 264 – 268.
- [ 75 ] Bogunovic I, Pereira I, Kiscic P, et al. The spatiotemporal variation of soil compaction by tractor traffic passes in a Croatian vineyard[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21: 1921 – 1932.
- [ 76 ] Bottinelli N, Hallaire V, Goutal N, et al. Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery[J]. *Geoderma*, 2014, 217: 10 – 17.
- [ 77 ] Botta G F, Tolon-Becerra A, Tourn M, et al. Agricultural traffic: Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 120: 92 – 98.
- [ 78 ] Mosaddeghi M R, Hajabbasi M A, Hemmat A, et al. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 55(1-2): 87 – 97.
- [ 79 ] Soane B D, Dickson J W, Campbell D J. Compaction by agricultural vehicles: a review III. incidence and control of compaction in crop production[J]. *Soil & Tillage Research*, 1982, 2: 3 – 36.
- [ 80 ] 张兴义, 孟 凯, 隋跃宇. 黑土区机械对玉米和大豆地压实作用的研究[J]. *耕作与栽培*, 2001, 5: 13 – 14.
- [ 81 ] Imekova J, Polcar A, Hammerová A, et al. Changes to the physical properties of the soil after the passage of an agricultural tractor[J]. *International Agrophysics*, 2021, 35(1): 97 – 105.
- [ 82 ] Guan D, Zhang Y, Alkai M M, et al. Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the North China Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 146: 286 – 295.
- [ 83 ] 董 丽, 史学正, 徐胜祥, 等. 基于Meta分析研究不同管理措施对中国农田土壤剖面有机碳的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(6): 1290 – 1298.
- [ 84 ] Micucci F G, Taboada M A. Soil physical properties and soybean

- (Glycine max, Merrill) root abundance in conventionally-and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 86(2): 152-162.
- [ 85 ] Hamza M A, Anderson W K, Anderson W K, et al. Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2003, 54(3): 273 – 282.
- [ 86 ] Bateman J C, Chanasyk D S. Effects of deep ripping and organic matter amendments on Ap horizons of soil reconstructed after coal strip-mining[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, 81(1): 113 – 120.
- [ 87 ] Sartori G M S, Marchesan E, David R D, et al. Growth and development of soybean roots according to planting management systems and irrigation in lowland areas[J]. *Ciencia Rural*, 2016, 46(9): 1572 – 1578.
- [ 88 ] Laker M C. Soil compaction: effects and amelioration[C]. Proceedings of the 75th Annual Congress of the South African Sugar Technologists' Association, Durban, South Africa, 2001, 125-128.
- [ 89 ] Montagu K D, Conroy J P, Francis G S. Root and shoot response of field-grown lettuce and broccoli to a compact subsoil[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1997, 49(1): 89 – 97.
- [ 90 ] Schmidt C, Belford R, Tennant D. Effect of different direct drilling and conventional sowing techniques on soil strength, root growth and grain yield of wheat on sandplain soils in Western Australia[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1994, 45(3): 547 – 564.
- [ 91 ] Xue L, Khan S, Sun M, et al. Effects of tillage practices on water consumption and grain yield of dryland winter wheat under different precipitation distribution in the loess plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 66-74.
- [ 92 ] Ning T Y, Liu Z, Hu H Y, et al. Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 223: 105490.
- [ 93 ] Busscher W J, Bauer P J, Frederick J R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 68(1): 49 – 57.
- [ 94 ] Brady N C, Weil R R. *Soil Water: Characteristics and Behavior*[J]. *Soil and Hydrologic Cycle*, 2008, 6: 243 – 249.
- [ 95 ] Carter M R. Soil quality for sustainable land management[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 38 – 47.
- [ 96 ] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability-A literature analysis[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(1): 1 – 12.
- [ 97 ] Leinweber P, Jandl G, Baum C, et al. Stability and composition of soil organic matter control respiration and soil enzyme activities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(6): 1496 – 1505.
- [ 98 ] Ball B C, Campbell D J, Hunter E A. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 57(1-2): 83 – 91.
- [ 99 ] Martin P J, Stephens W. The potential for biomass production on restored landfill caps[J]. *Aspects of Applied Biology*, 2001, 65: 337 – 344.
- [ 100 ] 杨 苏, 刘耀斌, 王 静, 等. 不同有机物料投入下黄河故道土壤有机碳积累特征的研究[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 361 – 367.
- [ 101 ] Défossez P, Richard G, Keller T, et al. Modelling the impact of declining soil organic carbon on soil compaction: Application to a cultivated Eutric Cambisol with massive straw exportation for energy production in Northern France[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 141: 44 – 54.
- [ 102 ] Alameda D, Villar R. Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. seedlings under soil compaction conditions[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2012, 79: 49 – 57.
- [ 103 ] Clark L J, Price A H, Steele K A, et al. Evidence from near-isogenic lines that root penetration increases with root diameter and bending stiffness in rice[J]. *Functional Plant Biology*, 2008, 35(11): 1163 – 1171.
- [ 104 ] Monroe C D, Kladvik E J. Aggregate stability of a silt loam soil as affected by roots of corn, soybeans and wheat[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, 18(10): 1077 – 1087.
- [ 105 ] Tracy S R, Black C R, Roberts J A, et al. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography[J]. *Annals of Botany*, 2012, 110(2): 511 – 519.
- [ 106 ] Zhang Z B, Peng X H. Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 206: 104844.
- [ 107 ] Hamza M A, Anderson S H, Aylmore L, et al. Studies of soil water drawdowns by single radish roots at decreasing soil water content using computer-assisted tomography[J]. *Soil Research*, 2001, 39(6): 1387 – 1396.
- [ 108 ] Singh B P, Sainju U M. Soil physical and morphological properties and root growth[J]. *Hort Science*, 1998, 33(6): 966 – 971.
- [ 109 ] Rosolem C A, Takahashi M. Soil compaction and soybean root growth[J]. *Developments in Plant and Soil Sciences*, 1998, 82: 295 – 304.
- [ 110 ] Ishaq M, Ibrahim M, Hassan A, et al. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 60(3-4): 153 – 161.
- [ 111 ] Jayawardane N, Chan K. The management of soil physical properties limiting crop production in Australian sodic soils-a review[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32(1): 13 –



- 44.
- [ 112 ] Oleghe E, Naveed M, Baggs E M, et al. Plant exudates improve the mechanical conditions for root penetration through compacted soils[J]. *Plant and Soil*, 2017, 421(1-2): 19 – 30.
- [ 113 ] Huo C, Luo Y, Cheng W. Rhizosphere priming effect: A meta-analysis[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 111: 78 – 84.
- [ 114 ] Bengough A G, Mckenzie B M, Hallett P D, et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1): 59 – 68.
- [ 115 ] Moran M S, Hamerlynck E P, Scott R L, et al. Hydrologic response to precipitation pulses under and between shrubs in the Chihuahuan Desert, Arizona[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: 5613 – 5618.
- [ 116 ] Jabro J D, Allen B L, Rand T, et al. Effect of Previous Crop Roots on Soil Compaction in 2 Yr Rotations under a No-Tillage System[J]. *Land*, 2021, 10(2): 1 – 10.
- [ 117 ] Braunack M V, Mcphee J E, Reid D J. Controlled traffic to increase productivity of irrigated row crops in the semi-arid tropics[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1995, 35(4): 503 – 513.
- [ 118 ] Taylor J H. Reduction of traffic-induced soil compaction-special issue[J]. *Soil & Tillage Research*, 1992, 24(4): 301 – 302.
- [ 119 ] 李洪文, 高焕文, 陈君达, 等. 固定道保护性耕作的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(4): 73 – 77.
- [ 120 ] Li Y X, Tullberg J N, Freebairn D M. Traffic and residue cover effects on infiltration[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39(2): 239 – 247.
- [ 121 ] Marinello F, Pezzuolo A, Cillis D, et al. Traffic effects on soil compaction and sugar beet (*Beta vulgaris* L. ) taproot quality parameters[J]. *Spanish Journal of Agriculture Research*, 2017, 15(1): e0201.
- [ 122 ] Raper R L, Reeves D W, Burt E C. Using in-row subsoiling to minimize soil compaction caused by traffic[J]. *Journal of Cotton Science*, 1998, 2: 130 – 135.
- [ 123 ] Panayiotopoulos K P, Papadopoulou C P, Hatjioannidou A. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings[J]. *Soil and Tillage Research*, 1994, 31(4): 323 – 337.
- [ 124 ] Aliev K. Current problems with regard to mechanization and greening of farming in Azerbaijan[J]. *Mezhdunarodnyi Selsko khozyaistvennyi Zhurnal*, 2001, 5: 57 – 61.
- [ 125 ] Horn R, Way T, Rostek J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils-ScienceDirect[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 73: 101 – 106.
- [ 126 ] Ridge R. Trends in sugar cane mechanization[J]. *International Sugar Journal*, 2003, 105(1252): 150 – 154.
- [ 127 ] Blaszkiewicz Z. Study on the distribution of penetration resistance of the light soil affected by agricultural tractor tyres[J]. *Problemy Inzynierii Rolniczej*, 1998, 6: 5 – 14.
- [ 128 ] Hetz E J. Soil compaction potential of tractors and other heavy agricultural machines used in Chile[J]. *Agricultural Mechanization in Asia*, 2001, 32: 38 – 42.
- [ 129 ] Hillel D. *Environmental Soil Physics*[M]. America: Academic Press, 1998.
- [ 130 ] Or D, Leij F J, Snyder V, et al. Stochastic model for posttillage soil pore space evolution[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(7): 1641 – 1652.
- [ 131 ] Keller T, Défossez P, Weisskopf P, et al. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93(2): 391 – 411.
- [ 132 ] 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 基于FRIDA模型的轮胎—土壤接触特性研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(09): 121 – 127.
- [ 133 ] Wang X, Zhang X, Lin X, et al. Quantification of traffic-induced compaction based on soil and agricultural implement parameters[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(5): 134 – 140.
- [ 134 ] 贺亭峰, 丁启朔, 张伟, 等. 基于应力传递系数的分析模型优化与土壤压实应力预测[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 292 – 298.

## Effects of Compaction on Farmland Soil Properties of Farms and Prevention Measures

ZHAO Yue<sup>1,2</sup>, BAO Xue-lian<sup>1</sup>, LIANG Chao<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>3</sup>, XIE Hong-tu<sup>1\*</sup>

(1. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *China Agricultural University, Beijing 100091, China*)

**Abstract:** The increased food consumption is producing an increasingly critical global food security issue as a result of the rapid population rise and dietary changes. Soil compaction and soil fertility have been steadily declining due to the growing mechanization of agriculture worldwide. However, the soil pressure has been significantly increased by this relatively isolated agricultural technique. Intensive farming models and large-scale planting systems have enhanced food output and somewhat reduced global food security. Soil compaction reduces soil porosity, soil water infiltration and water holding capacity by increasing soil bulk density and soil strength. At the same time, soil compaction has adverse effects on soil physical properties, especially the storage and supply of water and nutrients, and seriously endangers soil health. Therefore, soil compaction will progressively become a major issue limiting grain productivity. Based on research on soil compaction both domestically and abroad, this study thoroughly examined the impact of soil compaction on soil physical, chemical and biological properties as well as any potential mechanisms of action. It also examined the major contributing factors to soil compaction as well as potential solutions to the problem. However, it is still unclear how these elements interact to cause soil compaction. The research on soil compaction still needs to be improved in the future, including the impact of compaction on microbial community structure and the optimization of field test and indoor cultivation test methods, to provide technical support for more active and effective prevention of soil compaction and soil degradation.

**Key words:** Soil compaction; Agricultural machinery; Tillage pattern; Conservational tillage; Plant root

[ 责任编辑: 高晓丹 ]