

机械压实对农田土壤性质及土壤侵蚀的影响研究进展

付 娟, 马仁明^{*}, 贾燕锋, 范昊明, 郭成久, 张博翔,
李 爽, 李梦缘

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁省水土流失防控与生态修复重点实验室, 沈阳 110866)

摘 要: 土壤是耕地的重要组成部分, 也是农田生态系统的基础, 健康的农田土壤对抵抗自然营力如风力、水力、风力等导致的土壤侵蚀至关重要。但随着近些年来农业机械的普及发展, 农田土壤也遭受更严重的机械压实。机械作业过程中农田土壤遭受的压实对农田土壤理化性质及土壤生物产生不良影响, 机械压实也使农田土壤抵抗侵蚀的能力受到影响, 这种影响主要通过机械压实对土壤物理性质的影响间接实现。为明确农田机械压实的研究现状及压实对土壤侵蚀的影响机理, 该研究概述了农田土壤机械压实的起因, 阐述了机械压实对土壤性质的影响及其作用机理, 讨论了机械压实间接影响土壤侵蚀的因素。总结发现, 目前研究主要集中在机械压实对土壤性质的影响、土壤性质对土壤侵蚀的影响方面, 鲜有研究机械压实对土壤侵蚀的影响机制。最后针对目前机械压实研究的不足提出了未来研究的方向, 并探讨了农田土壤机械压实与土壤侵蚀之间的联系, 以期将现有机械压实研究理论更好应用到实践, 趋利避害, 为国内农田土壤侵蚀防治提供参考。

关键词: 农业机械; 土壤; 侵蚀; 压实作用

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.004

中图分类号: S152.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-Supp.-0027-10

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.004 http://www.tcsae.org

Fu Juan, Ma Renming, Jia Yanfeng, 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 (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 27-36. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.004 http://www.tcsae.org

0 引 言

20 世纪 50 年代以来, 农田机械开始普及发展, 中国及欧美多国至今已基本实现规模化农业机械的使用。农业机械的使用提高了农田作业效率, 也使农田土壤遭受更严重的机械碾压, 机械碾压使土壤颗粒之间接触更加紧密, 并往往使土壤向劣势方向发展, 即土壤压实问题。农业机械进行田间作业使农田土壤遭受碾压, 导致土壤容重增加、土壤更紧实的过程被称为农田机械压实^[1]。目前, 农田土壤压实问题已引起广泛关注。即使是单季作物, 经历耕、种、收及田间管理, 机械作业仍可达 8~15 次^[2], 压实面积占比高达 85%~90%, 其中 10%~80% 的面积更要遭受多次机械碾压^[3]。

农田机械作业过程中, 机械压实对农田土壤性质及作物产量也会造成不可避免的影响。少数情况下, 表层土壤轻微压实可能对某些土壤类型有益, 但多数情况下, 机械压实对农田土壤产生危害, 甚至造成土壤退化^[4]。机械压实使土壤理化特性及生物学特性改变^[5], 主要表现在

增加土壤容重、降低土壤孔隙度、降低土壤团聚体水稳性等, 机械压实使水分入渗减弱、土壤强度增加^[6]等, 对土壤生态功能产生不利影响。

欧美国家对农田机械压实研究较为成熟, 对农田土壤机械压实诱因、特征、危害及消除进行了大量研究。而中国在农田机械压实方面的研究起步较晚, 且研究主要通过借鉴欧美国家对农田土壤机械压实方面取得的研究成果结合国内实际情况进行拓展及深入, 研究集中在机械压实对于土壤物理、化学、生物以及作物生长的影响, 并探究了机械压实的作用机理。但受各区域土壤类型、耕作方式、机械参数等条件限制, 相关研究还不够全面深入。中国未来的研究应注重探索符合国内农田土壤机械压实情况的研究道路。本文就已有关于农田机械压实起因、压实对土壤的影响以及相关改善措施的研究进行总结概述, 提出今后进行农田土壤压实研究时应致力的方向, 并首次将农田土壤机械压实与土壤侵蚀联系起来, 以期将现有机械压实研究理论更好应用到实践, 趋利避害, 为国内农田机械作业推进提供参考。

1 机械压实起因

1.1 机械压实主要影响因素

20 世纪初到 20 世纪 60 年代, 欧美部分发达国家工业技术迅速发展, 在农业上也从传统的人力耕作转向机械化耕作^[7], 使用机械进行农田作业极大限度提高了农业生产效率。至今, 欧美部分发达国家农业机械化程度甚

收稿日期: 2022-08-30 修订日期: 2022-11-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500700)和辽宁省教育厅科学研究项目(LSNQN202023)资助。

作者简介: 付娟, 博士研究生, 研究方向为黑土农田机械压实。

Email: fujuan1219@stu.syau.edu.cn

*通信作者: 马仁明, 博士, 讲师, 研究方向为寒区复合侵蚀及其防治; 土壤微观结构及其环境效应。Email: marenming@syau.edu.cn

至达到 95%以上^[8],而在一些欠发达国家,农业机械化程度也逐渐增加。新中国成立之初农业机械化程度不到 1%,但至 2020 年,据全国农业机械化发展统计公报显示,中国农作物综合机械化率达 71.25%,已逐步实现耕地、播种、收获等全程机械化^[9]。农业机械化水平的提高,不但体现在机械化规模的扩大,也体现在机械向更大型、更高速高效低耗和联合作业方向的发展^[10]。农田机械的发展也引发了新的问题。研究发现,机械接地压力大于 50 kPa 就会发生土壤压实^[11],但进行农田机械作业时接地压力通常达到 70 kPa 以上^[12],即大部分的农田机械作业活动均使农田土壤遭受压实影响。

压实影响从土壤形变上有两种表现——压实土壤发生弹性形变或塑性形变^[13]。土壤本身具有一定的回弹特性,不同土壤条件回弹能力不同,这主要受土壤机械组成、土壤含水量、土壤有机质的影响,黏粒含量及含水量高的土壤遭受机械碾压时其回弹能力就弱,而有机质含量高的土壤其回弹能力较强^[14]。当机械压实程度低于土壤最大支撑力时,土壤发生弹性形变^[15];发生弹性形变的土壤能够通过自然条件下植物生长、干湿季节及冻融交替作用等逐渐恢复。而当土壤压实程度超过土壤最大支撑力时,土壤就发生不可逆的塑性形变^[13],发生塑性形变的土壤很难通过自然恢复,需要通过深松、轮作等人为措施干预恢复。

机械压实对不同深度土层的影响也不同。农田机械作业时首先与表层土壤接触,机械碾压使表层土壤容重增加、大孔隙数减小、结构破碎^[15],影响程度常与土壤含水量、机械轮胎压力、压实次数呈正相关^[16]。机械对表层土壤(0~30 cm)的压实效应是目前研究的主要内容,表层土壤压实随着作物生长、季节更替或者田间耕作恢复也较为容易;而深层土壤遭受机械碾压所形成的积累压实获得的关注往往较少(>30 cm)^[17],机械压实造成的损坏在深层土壤中逐渐累积,不但影响土壤中水气输送,也使土壤微生物生存环境被破坏,其影响使土壤生产力及功能长期丧失且难以恢复^[18]。

影响农田土壤机械压实的因素包括土壤性质、机械本身及压实次数、行驶速度等。土壤性质对机械压实的影响主要包括土壤质地、土壤含水量、土壤有机质。研究发现,粉砂壤土比中等或较细质地的壤土和黏土更容易受压实影响,造成土壤密度的增加与变形^[15],压实结束恢复也更迅速,这是因为粉砂壤土中胶体含量较低,土壤结构分散;而中等或较细质地的壤土和黏土中胶体含量高,土壤颗粒之间连接紧密。土壤含水量是影响机械压实程度的主要因素。低含水量情况下,3 次以上的机械碾压对土壤产生影响^[19];而高含水量情况下,从首次碾压就会造成土壤压实^[20]。相比低含水量土壤,高含水量对土壤垂直方向的影响也更深^[21]。究其原因,高含水量情况下土壤所能承受的压力更小,因此机械施加压力在土壤上的压力传播就更深。当土壤含水量达到田间持水量,也是土壤压实塑性形变的极限^[16]。有机质对土壤机械压实也产生影响。有机质是具有一定弹性和膨胀性

能的多种大分子有机化合物组成的复合体^[13],在受到机械碾压时有机质含量较多的土壤能够阻止压力向更深层土壤的传播^[22],机械碾压结束后,有机质含量较多的土壤又能够使压实土壤有更大的回弹性能^[23]。

农田机械的升级,是诱发土壤压实恶化的主导因素。机械本身对压实的影响包括机械轮胎内压、轴载及发动机振动情况。机械轮胎内压影响 0~30 cm 的表层土壤,而轴载主要影响心土层土壤,深度甚至达到 70 cm^[24]。机械引擎的振动对土壤颗粒施加了比轴载和其他因素更高强度的冲击和压力。振动速度与强度越大,对土壤的压实程度也更显著。此外,土壤性质与压实机械又相互响应,土壤胶体含量越多、土壤含水量越大、土壤有机质含量越少,对机械轮胎内压与轴载的响应也越显著,两者之间呈正相关^[25]。压实次数及行驶速度也影响农田土壤机械压实程度,压实次数越多、行驶速度越慢,压实程度越严重^[26]。

国内对机械压实起因已经有了一些研究,但这些研究多是通过室内实验或者田间模拟进行,研究主要集中在机械压实对土壤质量的影响及减轻或避免土壤机械压实的危害等方面,多为定性研究,量化研究较少。现有研究一定程度上能够揭示机械压实对土壤相关性影响的作用机理,但这些研究往往是在高强度机械、极端土壤条件下进行,与实际农田土壤机械压实有一定区别。田间模拟机械压实很多时候都忽略了实际情况中机械压实的复杂程度。首先,实际农田土壤机械压实在时间上通常是不连续的,如在春季播种后隔一段时间进行春整地或秋收后过一段时间进行秋整地或其他机械作业活动,但现有研究常常认为压实在时间上是连续的;其次,实际作业中根据目的不同使用的机械型号、大小、次数也不尽相同,即农田土壤压实是多因素共同作用导致,但很多研究往往只设置单一因素,得出结果后进行叠加,这种试验条件与自然状态下农田机械压实有较大差距;研究结果也常常忽略因素之间存在的相互作用。试验过程中设定接近实际状况的机械压实条件,关注因素间相互作用对土壤压实的影响,将现有研究与自然条件下机械压实接轨,是进一步需要探究的问题。

1.2 农田机械作业土壤所受应力特征

机械压实对于土壤产生的应力影响可以分为 3 个阶段。首先,作业机械对土壤进行碾压,应力作用到土壤表面;随后,应力传递到土壤内部;最后,应力使土壤发生形变,造成农田土壤压实^[11]。这 3 个阶段往往同时发生且互相联系。

土壤所受应力与机械类型、行驶速度、压实次数、土壤质地等相关。如单轮拖拉机对土壤产生的应力显著大于双轮及履带式拖拉机^[27],履带拖拉机相比轮胎式拖拉机对土壤表层产生的垂直应力可减小 55%^[28],这是由于履带式拖拉机相比轮胎式拖拉机具有更大的接地面积,能够有效减小车辆对于土壤的垂直应力。也有学者通过研究轮式拖拉机与履带式拖拉机不同部位所受垂直应力,发现轮式拖拉机轮胎轨道中心线下垂直应力分布

是均匀的^[29]，而履带式拖拉机履带轨道边缘的垂直应力相比轨道中心线的垂直应力减少 75%左右，即土壤受履带式拖拉机碾压其垂直应力分布并不均匀^[11]。这可以通过机械与土壤接地时的负重点解释，轮胎式拖拉机与履带式拖拉机与土壤接地时负重点有差异，轮胎式拖拉机负重点在接地轮胎上，应力分布较为均匀，而履带式拖拉机的负重点则集中在各负重轮下方，应力分布也是负重轮下方最大，边缘较小。

行驶速度也对土壤所受应力产生影响，Horn 等^[30]发现，机械行驶速度增加，浅层土壤所受应力也增加，但 >0.35 m 深度的土壤所受应力减小，这是由于土壤表层土壤含水量较大，引起变形土壤孔隙内水压力也增加，而深层土壤由于行驶速度增加而减小了轮胎对土壤的作用时间，进而减小了对土壤的应力作用。但该研究忽略了雨季土壤表面水分的影响，国内学者在旱季时做了相似实验，发现无论是浅层土壤或是深层土壤，随着机械行驶速度的增加，土壤所受应力均减小^[31]。压实次数显著影响土壤所受应力，压实次数越多，土壤所受应力程度越大、范围越广^[32]。土壤深度也影响土应力，随着土壤深度的增加应力的传播也越弱，即表层土壤比心土层土壤所受应力更大^[27]。机械对土壤产生应力大小与土壤质地也有关，砂土中轴载对土壤的应力主要在垂直方向进行传播，而黏质土壤应力的传播则是多向的^[33]，这是因为砂土中大孔隙含量比黏土中大孔隙含量更多，且相比砂土，黏粒含量较多的土壤会限制应力在垂直方向的传播，因此对表层土壤造成更大的影响^[34]。此外，高含水量、低有机质的土壤环境使土壤承载力下降，应力在土层垂直方向上传播的也更深^[35]。

土壤抵抗各种应力的能力被称为土壤强度，其值可以通过应力—应变测量量化^[15]。土壤强度的大小与土壤自身性质如容重、含水量、机械组成等相关。容重越大、含水量越低、黏粒成分越少，土壤强度越高，抵抗外部应力的能力越强。土壤强度与压实次数也相关，研究发现，在重复进行压实的土壤上，第二次压实发生在比第一次压实更坚硬的土壤表面，表层土壤强度也更大^[36]。农田土壤机械压实就是向土壤施加应力的过程，这种过程往往使土壤强度增加。土壤对应力的响应形式包括弹性形变与塑性形变。两者可以以内部土壤强度的值——土壤预压缩应力为界^[37]，农田机械向土壤施加的应力小于预压缩应力，土壤发生弹性形变，这种形变能够随着时间自然恢复，但施加应力超过预压缩应力，土壤发生塑性形变，其损害不可逆。土壤预压缩应力的值也随着外界环境及土壤自身的条件而变化。

目前，国内对于农业机械作业对土壤施加应力的研究有所局限。相关研究主要集中在轮式拖拉机对土壤施加应力的影响，而对履带式拖拉机研究较少；研究多集中在机械对土壤施加的垂直应力上，较少考虑机械对土壤压实其水平方向应力的研究。针对机械作业对土壤应力的影响研究也主要是定性研究，较少进行定量研究。不同类型农业机械向不同条件下土壤施加应力不同，但

目前研究对不同条件下土壤产生弹性或塑性形变时应施加的应力值并不明确，研究农业机械向土壤施加应力时土壤发生不同形变时的临界值，对于指导农田机械作业具有参考意义。

2 机械压实对农田土壤性质的影响

机械压实对农田土壤的影响可概括为对土壤理化性质、土壤生物、作物生长发育及产量品质 3 方面的影响，可由图 1 表示。从土壤理化性质上，压实使土壤颗粒重新排列、孔隙体积减少、容重增加，直接表现就是压实土壤更紧实，压实还使土壤通气状况减弱、减少土壤中氧化还原反应的发生，使土壤养分有效性减弱。从土壤生物上，压实缩减土壤生物生存空间，同时抑制土壤中有氧生物的生存，促进无氧生物的生存，破坏土壤生物的生存与平衡。压实对土壤理化性质及土壤生物的影响又综合影响农田作物的生长发育，抑制作物根系及作物地上部分的生长，最终导致作物产量及品质的下降。

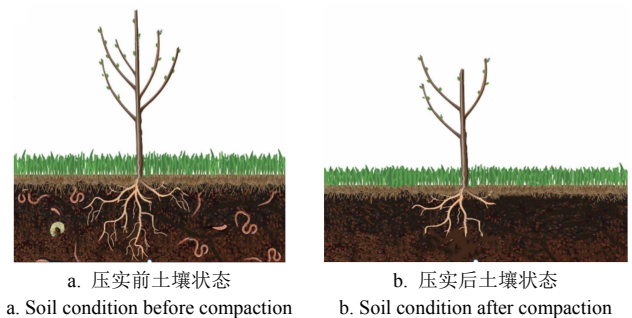


图 1 压实对土壤理化性质及土壤生物的影响

Fig.1 Effects of compaction on soil physicochemical properties and soil organisms

2.1 机械压实对土壤物理性质的影响

农田机械主要影响表层土壤（0~30 cm）物理性质，对深层土壤（ >30 cm）物理性质的影响主要通过积累压实实现。但其表现均为机械压实会增加土壤容重，减小土壤大孔隙数量、降低土壤持水能力与导水率，减弱土壤团聚体稳定性。

张兴义等^[38]指出，机械压实会打破农田土壤适宜作物生长的三相——固、液、气比 5:3:2 的状态。压实使土壤中充气大孔隙数量减小，即气相成分减少；土壤水分也受机械压实影响，一方面使土壤中孔隙水难以排出，另一方面又使地面径流难以入渗。王晓燕等^[39]在人工模拟降雨条件下观测拖拉机压实后径流小区土壤的入渗过程，发现压实后土壤产流时间及达到稳渗的时间显著减小，稳渗速率相比未压实土壤减小 6 倍以上，即压实显著削弱土壤的入渗过程。也有研究发现，随着压实程度的增加，不同深度土层含水量均呈下降趋势，且表层土壤比深层土壤水分下降更显著^[40]。压实使土壤中气体成分变化主要通过减小土壤中孔隙数量实现。李汝莘等^[41]研究发现，机械压实使土壤总孔隙减小 20%以上，土壤中充气大孔隙数量减小，即气相成分减少。此外，机械压实也影响土壤中固相物质状态。压实直接影响土壤团聚体颗粒，对于表层 0~10 cm 土壤影响更为显

著。王恩姮等^[42]通过对压实后黑土土壤团聚体的研究发现,干筛条件下,机械压实对团聚体组成特征的影响表现出均质的趋向,且随着压实次数的增加,比例减少的团聚体逐渐从<1 mm的小粒级逐渐过渡到>5 mm的大粒级;而在湿筛条件下,机械压实显著降低土壤中<0.25 mm的团聚体,且随着碾压次数增加,其影响也逐渐从>5 mm的大粒级过渡到<0.25 mm的小粒级。综合两者受机械压实的变化,认为少次压实促进土壤团聚体团聚作用,但多次积累压实使土壤水稳定性和机械稳定性减弱。土壤中固、液、气成分受压实影响变化,这些变化共同作用,又导致土壤透水性、通气性变差,土壤活力减弱,使适宜作物生长的土壤环境被破坏。

土壤压实的程度可能通过贯入阻力描述,贯入阻力越大土壤压实越严重,赵振家等^[37]通过离散元仿真软件模拟车轮对土壤压实过程,发现土壤未压实时贯入阻力随深度增加而增大的趋势比较缓慢,压实后贯入阻力随深度增加的趋势明显,并且深度越深,贯入阻力也越大。此外,压实对某些土壤结构起到优化作用,压实可以使结构松散的土壤更加紧密,程度较低的压实可能使土壤稳定性更强。

关于压实对于土壤物理性质影响的研究较多,但以秦岭淮河为界,相关研究多在北方进行,鲜有对南方机械压实的研究。南北方农田土壤机械压实状况由于气候、机械、土壤条件差异有所不同。南方地区气候湿润、降水量大,土壤含水量大,湿度高,多为水田耕作作业,因此土壤抵抗压实能力弱;区域内四季温度温差较小,因此耕作制度多为一年两熟或一年三熟^[43],机械压实次数较多;区域内农田面积小,又受多山、丘陵的地形限制,因此多使用小型农机具作业^[44]。而北方地区降水量较少、气候条件较干旱,土壤湿度较小^[45],旱地耕作农业较为普遍,土壤抵抗压实的能力更强;北方地区四季温差大,因此耕作制度多为一年一熟^[46],压实次数较少;区域内主要农田面积大、地块较为平坦,因此多以大规模机械作业为主。南北方机械压实情况不同,对土壤造成的影响也不同,研究由于南北方农田机械化差异对土壤造成不同影响的作用机制,对总结完善更符合中国机械压实状况的系统理论有重要意义。

2.2 机械压实对土壤化学性质的影响

机械压实对土壤化学性质的影响主要集中在对表层土壤的研究。机械压实减弱土壤通气状况、减少相关氧化还原过程减少及减弱土壤中养分有效性减弱^[47]。首先,压实后土壤中充气大孔隙减少,空气数量减少,紧实土壤中气体含量及扩散率也降低。这主要表现在压实土壤中 O_2 、 N_2O 、 CO_2 的变化。研究发现,相比未压实土壤,压实使0~20 cm深度土层的 O_2 含量从18%降低到10%^[48],而 N_2O 释放量增加;Teepe等^[49]研究发现压实后0~30 cm深度土壤的 N_2O 释放量相比未压实土壤增加40倍。Bhandral等^[50]也得出相似结论,压实使表层土壤 N_2O 释放量增加;压实土壤中 CO_2 的释放量与 N_2O 相反,Pengthamkeerati等^[34]通过野外土壤压实,发现压实使表

层土壤 CO_2 释放量下降达46%,这是由于压实后土壤中氮元素发生反硝化作用,氮元素以氮氧化物的形式排放到土壤表层, N_2O 释放量增加,但压实减弱土壤通气状况、使土壤表层含水量下降,这两个因素显著影响土壤 CO_2 释放量,此外,压实也使土壤表面凋落物减少,而凋落物的腐败又是土壤释放 CO_2 的重要来源。压实后土壤中 O_2 的减少又使土壤中氮、锰、硫等化学元素发生氧化还原反应^[51],从而被释放到土壤中,土壤中各元素的平衡状态被打破^[52]。此外,压实还使表层土壤中磷、钾、镁等营养元素的流失从而减弱土壤养分有效性。Nadian等^[48]研究发现压实后植物对磷元素吸收减弱,国内学者李晓磊^[53]通过测定拖拉机压实后0~30 cm土壤中各营养元素的含量,发现压实使土壤磷、钾、镁、钠、钙等元素流失,尤其钙元素流失量高达57.5%。这些元素又是植物生长过程中不可缺少的元素。机械压实还使土壤pH值及有机质含量增加^[54],使土壤中速效磷、速效钾含量降低。迟仁立等^[55]通过分析压实对有机质、全氮、全磷含量的影响,发现随着压实次数的增加,土壤养分呈递增趋势,即压实对土壤养分起到累加作用。

目前压实对土壤化学性质的研究主要包含土壤中气体成分含量、氧化还原反应与土壤养分含量及有效性4个方面。大部分研究认为,压实使农田通气性减弱、营养元素流失,使适宜作物生长的土壤化学环境被破坏。农田机械作业不可避免,减弱机械压实对土壤的影响或使机械压实对土壤的影响控制在合理水平,甚至使机械压实对普通土壤的危害应用到一些特定情况使不利的土壤环境得到改善,是值得思考的方向。目前关于机械压实对土壤化学性质的影响研究内容较为分散,研究因素之间往往相互独立,但实际情况中机械压实对土壤化学性质的影响因素往往相互影响、相互响应、有所关联,未来的研究更应注重研究内容的关联及影响因素间可能存在的相互作用。

2.3 机械压实对土壤生物的影响

机械压实对土壤生物的影响主要通过压实对土壤理化性质的影响间接实现。土壤中存在厌氧生物及好氧生物。农田机械压实限制土壤中 O_2 的扩散,积累 CO_2 ,这为厌氧微生物提供了良好的生存条件^[56],但抑制了好氧生物的生存,即压实使土壤中微生物平衡被打破。机械压实导致土壤的通气状况变差,土壤中真菌微生物种群减少,土壤微生物C-N比也持续降低^[57]。机械压实也对土壤微生物活性产生影响,土壤微生物活性反映土壤生物肥力^[58]。Shestak等^[59]研究发现,压实可以改变土壤生物的空间分布和有效性,降低土壤导水率和通气情况,从而减弱土壤中微生物活性^[60];压实使土壤中大孔隙的数量减小,但小孔隙数量增加,微生物生存空间也增加^[61],这对厌氧微生物活性有利,但需氧微生物活性减弱,微生物群落结构产生变化。压实也对土壤中较大型的生物如蚯蚓、蜈蚣等生物生存产生影响^[62],压实缩减了土壤中大型生物的生存空间,致使其生存环境破坏、数量减小、生命活力减弱。目前关于土壤机械压实对土

壤生物数量的影响研究较多,但鲜有对土壤生物的种类方面影响的研究,可以肯定的是,压实减少土壤生物的种类^[57]。土壤生物对于维持农田土壤的健康有重要作用,在进行农田机械压实时尽量减少对土壤生物的影响,或者在压实后使土壤生物能够迅速恢复,是亟需解决的问题。

压实对土壤理化性质及土壤生物产生影响,这三者之间也相互影响。压实使土壤容重增加、土壤孔隙减小^[41],这首先使土壤生物生存空间缩减、生存环境破坏,而土壤生物在土壤中的运动又可以减小土壤容重、增加土壤孔隙以改善土壤物理性质^[63]。土壤生物也影响土壤的化学性质,土壤生物通过分解有机物质并参与腐殖质的合成与分解^[64],土壤中营养元素被释放出来,参与碳、氮、硫、磷等元素的生物循环,土壤生物体内的酶也可以帮助完成土壤中一些化学元素的氧化还原反应并通过矿化作用、腐殖化作用和生物固氮作用等改变土壤的理化性状^[65]。土壤化学性质反作用于土壤生物,压实使土壤中氧气减少,首先减少了土壤中有氧生物的数量与种类,土壤中氧化还原反应的减弱使土壤中氮、锰、硫等化学元素被释放^[66],使土壤 pH 值增加,且营养元素的流失也导致土壤生物的生存环境被破坏。

目前,针对压实对土壤化学、物理性质的影响研究较为全面,但鲜有压实对土壤生物及压实对土壤理化性质与土壤生物交互作用的研究,在未来研究中注重各方面因素受压实影响的相互响应,更全面地了解压实机理,使压实过程各因素的相互响应向对土壤有利的方向发展,能更全面地指导中国农田机械作业。

3 机械压实对农田土壤侵蚀的影响

耕地资源是中国重要的国土资源,受自然营力影响,中国耕地土壤侵蚀主要受水力、风力、冻融等作用单因素主导的多营力复合侵蚀。机械压实主要通过影响表层土壤物理性质间接影响土壤侵蚀过程。对于机械压实研究目前主要集中在压实对土壤性质的影响,鲜有对农田机械压实对土壤侵蚀影响的直接研究。机械作业在现代农田作业中不可避免,研究机械压实对土壤侵蚀的影响对防治中国农田土壤侵蚀具有重要意义。

3.1 机械压实对水力侵蚀的影响

农田机械压实通过影响土壤抗冲性与土壤抗蚀性间接影响土壤水力侵蚀。压实使农田土壤颗粒间连接更紧密、粘结力也更强,土壤结构越稳定,土壤抗蚀性也越强。土壤分散率可以表征土壤抗蚀性^[67],而农田机械压实通过对土壤施加的应力影响土壤中水稳性团粒数量影响土壤分散率。王恩娟等^[42]研究发现,13次以内的压实显著增加土壤中 $>0.25\text{ mm}$ 的水稳性团粒数量,而 $>0.25\text{ mm}$ 的水稳性团粒增加使土壤分散率减小,即一定程度的压实对土壤抗蚀性产生有利影响^[68]。压实影响土壤抗冲性通过影响土壤结构与土壤入渗产流来实现。压实使土壤紧实度及容重增加,土壤抗冲性也随之增强;压实还使土壤表面分布的孔隙数量减小^[69],从而提高了

土壤抵抗流水外力破坏的能力。此外,压实还显著增大土壤中 $>0.25\text{ mm}$ 的水稳性团聚体含量, $>0.25\text{ mm}$ 的水稳性团聚体含量越高,土壤水稳性就越强^[42],土壤抗冲能力就越强。在土壤结构方面,压实对土壤抗冲性起到正向作用。压实也影响降雨过程中土壤的入渗产流,未压实土壤结构疏松,土壤的入渗性能强,达到稳定入渗的时间也越长,土壤容纳径流的能力就强,土壤表层产生的径流量就少,产生径流的时间也长;而对于压实土壤,土壤结构更紧密,土壤入渗能力减弱,稳定入渗的时间就短,土壤容纳径流的能力也弱,即土壤产生径流的径流量越大、产生径流的时间也越短^[70],对于大暴雨来说,压实土壤在短时间内更容易形成集中径流,造成土壤侵蚀。因此,压实使土壤入渗减小、产流增强,即对土壤侵蚀有促进作用。

3.2 机械压实对风力侵蚀的影响

农田机械压实通过对土壤施加应力改变土壤表层物理性质影响农田风蚀状况,影响因素包括土壤颗粒组成、团聚体水稳性及土壤含水量。研究发现,土壤中不同粒径的水稳性团聚体含量影响土壤风蚀度。在中国东北黑土区使用重型机械对农田土壤进行碾压,发现不同压实次数对不同粒径的土壤团聚体组成影响不同,但均使农田土壤向均质的方向发展,即土壤中 $0.25\sim 5\text{ mm}$ 粒径的水稳性团聚体含量随碾压次数的增加而增加。此外,压实使黑土农田土壤 $\geq 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体增加,而使 $<0.25\text{ mm}$ 的土壤水稳性团聚体降低^[42]。这种水稳性团聚体粒径的变化在Chepil的研究中被认为与土壤抗风蚀能力负相关^[71],但在国内学者李小雁等^[72]的研究中这种压实对土壤水稳性团聚体粒径组成产生的影响对土壤风蚀是产生促进或者抑制作用并不明晰,还需要更多的试验进行验证。压实也通过影响土壤含水量影响风蚀,在含水量较大、土壤湿润的状态下,水分子与表层土壤颗粒之间的张力增大,颗粒间的粘聚力也增大,土壤启动风速也随之增大^[73],虽然目前关于压实对土壤含水量的影响虽然较多,但是对于压实使土壤含水量增加还是减少并没有定论,因此也只能确定压实通过影响土壤含水量影响风蚀,但是造成正向还是负向的影响并不明晰。

3.3 机械压实对冻融侵蚀的影响

中国耕地发生冻融侵蚀多在冬春交替阶段。农田土壤在冬季冻结,体积增大,土壤间裂隙扩大,土体碎裂,而后春季温度升高,土壤解冻,使土壤结构也更加疏松,土壤抗蚀力变弱,受重力影响土壤颗粒发生位移造成侵蚀。此外,积雪水消融产生的径流也使农田土壤受到更严重的侵蚀^[74]。影响冻融侵蚀的土壤性质包括土壤质地与土壤含水量。土壤中水分含量越大,冻结过程中水分相变对土体的破坏作用越大,融化过程也会加快坡面径流对土壤的搬运^[75]。而机械压实对农田土壤含水量产生影响,但是使土壤含水量增加或是减少目前尚无统一结论,一些学者认为,机械压实使农田土壤含水量降低^[76],但也有研究人员试验发现,压实使 $0\sim 60\text{ cm}$ 深度的土壤含水量增加^[77]。虽然压实对含水量的影响没有定论,但

压实使土壤含水量产生变化是确定的,即压实通过影响土壤含水量影响土壤冻融侵蚀过程。

目前关于压实对土壤结构的影响的研究较多,但鲜有研究将压实土壤结构与土壤侵蚀联系起来。对于农田水蚀来说,压实对影响水蚀过程的土壤结构产生积极影响,而对土壤在降雨过程中的入渗产流起到不良作用,辩证看待两者的关系,农田机械压实保持在适度范围内,以对农田土壤侵蚀尽量起到抑制作用而减小促进作用;对于冬春交替季节发生的冻融侵蚀,压实通过主要影响土壤含水量影响冻融侵蚀过程;对于风蚀强烈的地区来说,压实对土壤颗粒粒径的组成、团聚体稳定性、含水量等产生影响,这些性质的改变对农田土壤风蚀来说是起到抑制或者促进的作用,还需要进行更多的试验明晰。值得注意的是,农田区域并不单独受风力、水力、冻融等外营力作用,而是在时空分布、能量供给、物质来源等方面相互耦合,形成了与单一水蚀或风蚀完全不同的复合侵蚀^[78]。以中国东北黑土区与黄土高原为例,东北黑土区受水力、风力和冻融等侵蚀营力在时间上交替或同步、空间上交错或重叠影响,东北黑土区农田土壤多发生水力、风力、冻融等侵蚀类型并存的复合侵蚀^[79]。而黄土高原地区水土流失虽然主要是由水力侵蚀造成,但同时也受到风力、重力等外营力影响,形成以水蚀为主其他侵蚀类型为辅的复合侵蚀^[80]。中国农田土壤侵蚀类型复杂,在进行机械压实对土壤侵蚀的研究时更关注压实对于土壤复合侵蚀的影响。

4 结论和展望

农田作业机械通过碾压土壤对土壤施加应力从而改变土壤性质,使土壤容重增加、孔隙数量减小、土壤持水能力与导水率降低、土壤团聚体稳定性减弱;使土壤中气体含量变化、土壤通气状况变差、土壤中有效养分如氮、磷、钾等营养元素流失;也使土壤生物有氧、无氧生物比例变化,使土壤中大型生物数量减少、活性减弱。多数情况下,压实使土壤物理性质恶化,但少数情况下压实对土壤有利,如一定程度的压实可以改善砂土分散无结构的状态,使黏土中大块团粒分散为小团粒,改善土壤结构。压实后土壤理化性质、土壤生物之间也互相影响。

目前国内关于压实对土壤物理、化学性质的影响研究较多,但压实对土壤生物及压实对土壤理化性质与土壤生物之间相互作用的研究较少;现有相关研究多为定性研究,定量研究较少,研究过程也往往忽略实际情况下机械作业的不连续性及影响压实的多因素之间的互相作用,将已有研究与实际接轨,用定量研究佐证定性研究,是今后研究中需要考虑的。

压实对土壤侵蚀也产生影响,对于农田水蚀来说,压实使土壤抵抗侵蚀的能力增强,但使土壤入渗量减少、产流时间缩短,促进了土壤侵蚀。对于农田风蚀来说,压实对土壤颗粒粒径的组成、团聚体稳定性等产生影响,但这些性质的改变对农田土壤风蚀来说是起到抑制或者促进的作用,还需要进行更多的试验验证;对于冬春交

替阶段的冻融侵蚀,压实主要通过影响土壤含水量从而影响土壤冻融程度。目前,国内鲜有关于机械压实对农田土壤侵蚀的影响研究,分析机械压实对土壤侵蚀产生的影响对指导农田作业有重要意义,这也是未来研究值得这也是目前土壤压实研究空缺的方面。

[参 考 文 献]

- [1] Arshad M A, Franzluebbers A J, Azooz R H. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53(1): 41-47.
- [2] 周艳丽. 农田土壤机械压实修复研究[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(1): 141-144.
Zhou Yanli. Study on restore to the original state for mechanical soil compaction[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(1): 141-144. (in Chinese with English abstract)
- [3] 孙忠英, 李宝筏. 农业机器行走装置对土壤压实作用的研究[J]. *农业机械学报*, 1998, 29(3): 172-174.
Sun Zhongying, Li Baofa. Study on soil compaction by agricultural mechanical walking device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1998, 29(3): 172-174. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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 Xianliang, Wang Qingjie, Li Hongwen, et al. Current research status of soil compaction by agricultural machinery[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2015, 35(6): 72-76. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王小明, 覃逸明, 廖政达, 等. 糖料蔗生产中土壤劣变原因、机制与治理对策综述[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(21): 6-11.
- [6] Shah A N, Tanveer M, Shahzad B, et al. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: An overview[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2017, 24(11): 10056-10067.
- [7] 刘敏. 浅析国外农业机械化的发展[J]. *中国新技术新产品*, 2010(12): 231.
- [8] 梅加勇. 农业机械化发展的现状及对策分析[J]. *南方农机*, 2022, 1(53): 53-55.
- [9] 农业农村部农业机械化推广司. 2020 年全国农业机械化发展统计公报[J]. *农业工程*, 2021, 11(10): 4.
- [10] 张勋. 从机械化秋整地作业看黑龙江省耕作机械的现状与发展[J]. *农机化研究*, 1998, 1(1): 11-16.
- [11] Keller T, Lamandé M. Challenges in the development of analytical soil compaction models[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 111(1): 54-64.
- [12] 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 Chunlin, Ding Qishuo, Chen Qingchun. Measurement and analysis of precompression stress of soil in rice field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(8): 141-144. (in Chinese with English abstract)
- [13] 肖质秋, 虞娜, 安晶, 等. 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 Zhiqiu, Yu Na, An Jing, et al. 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. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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.
- [15] Horn R, Domżzał H, Słowińska-Jurkiewicz Anna, 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): 23-36.
- [16] Anderson W K, Hamza M A. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 82(2): 121-145.
- [17] Keller T, Sandin M, Colombi T, 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] Sonderegger T, Pfister S, Hellweg S. Assessing impacts on the natural resource soil in life cycle assessment: Methods for compaction and water erosion[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 54(11): 6496-6507.
- [19] 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.
- [20] Dejonghughes J, Moncrief J F, Voorhees W B, et al. Soil Compaction: Causes, Effects and Control[M]. St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service, 2001.
- [21] 王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟. 前期含水量对机械压实后黑土团聚体特征的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 241-247. Wang Enheng, Zhao Yusen, Chen Xiangwei. Effect of antecedent moisture content on aggregate size distribution and characteristics of black soil compacted mechanically[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 241-247. (in Chinese with English abstract)
- [22] De Andrade Bonetti J, Anghinoni I, De Moraes M T, et al. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 174: 104-112.
- [23] Obour P B, Lamandé M, Edwards G, et al. Predicting soil workability and fragmentation in tillage: A review[J]. Soil Use and Management, 2017, 33(2): 288-298.
- [24] 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 Xingyi, Sui Yueyu. 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. (in Chinese with English abstract)
- [25] Nawaz M F, Bourrié G, Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review[Z]. 2012, 33: 291-309.
- [26] Raghavan G S V, Mckyes E, Chassé M. Effect of wheel slip on soil compaction[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1977, 22(1): 79-83.
- [27] Wiermann C, Way T R, Horn R, et al. Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam[J]. Soil and Tillage Research, 1999, 50(2): 127-135.
- [28] Lamandé M, Greve M H, Schjønning P. Risk assessment of soil compaction in Europe-Rubber tracks or wheels on machinery[J]. Catena, 2018, 167: 353-362.
- [29] Marsili A, Servadio P, Pagliai M, et al. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber and metal-tracked tractors[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 49(3): 185-199.
- [30] Horn R, Blackwell P S, White R. The effect of speed of wheeling on soil stresses, rut depth and soil physical properties in an ameliorated transitional red-brown earth[J]. Soil and Tillage Research, 1989, 13(4): 353-364.
- [31] 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 Zhao, Li Yaoming, Tang Zhong. Compaction effects of wheeled vehicles and tracked on farmland soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 10-18. (in Chinese with English abstract)
- [32] Mojtaba N B, Ali K, Abbas H, et al. Changes in soil stress during repeated wheeling: A comparison of measured and simulated values[J]. Soil Research, 2017, 56(2): 204-214.
- [33] Ellies S, Achim, Smith R, et al. Effect of moisture and transit frequency on stress distribution on different soils[J]. Agro Sur (Chile), 2000, 28(2): 60-68.
- [34] Pengthamkeerati P, Motavalli P P, Kremer R J, et al. Soil carbon dioxide efflux from a claypan soil affected by surface compaction and applications of poultry litter[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 109(1-2): 75-86.
- [35] Gysi M, Ott A, Flühler H. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil[J]. Soil and Tillage Research, 1999, 52(3-4): 141-151.
- [36] 刘举华, 吴起亚, 项祖训. 高花窄胎体轮胎的齿高对牵引性能的影响[J]. 农业机械学报, 1998, 29(3): 25-33. Liu Juhua, Wu Qiya, Xiang Zuxun. Effect of the lug height of pneumatic tire with high lug and narrow carcass on the teactive pepeormance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1988, 29(3): 25-33. (in Chinese with English abstract)
- [37] 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(S1): 311-313. Zhao Zhenjia, Zou Meng, Xue Long, et al. Compaction of soil stress on the distribution of the simulation analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(S1): 311-313. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张兴义, 隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 161-164. Zhang Xingyi, Sui Yueyu. Summarization on the effect of soil compaction on crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 161-164. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王晓燕, 高焕文, 李玉霞, 等. 拖拉机轮胎压实对土壤水分入渗与地表径流的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 57-60. Wang Xiaoyan, Gao Huanwen, Li Yuxia, et al. Effect of tractor wheel compaction on runoff and infiltration[J]. Agricultural Research in the Arid Area, 2000, 18(4): 57-60. (in Chinese with English abstract)

- [40] 周艳丽, 卢秉福. 农田机械压实对土壤物理特性的影响[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9): 66-70.
Zhou Yanli, Lu Bingfu. Influence on soil physical properties for farmland mechanical compaction[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 66-70. (in Chinese with English abstract)
- [41] 李汝莘, 林成厚, 高焕文, 等. 小四轮拖拉机土壤压实的研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 126-129.
Li Ruxin, Lin Chenghou, Gao Huanwen, et al. Research on soil compaction of small four-wheel tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 126-129. (in Chinese with English abstract)
- [42] 王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟, 等. 机械压实对黑土区耕作土壤团聚体特征的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 756-760.
Wang Enheng, Zhao Yusen, Chen Xiangwei, et al. Effect of heavy machinery operation on soil aggregates character in phaeozem region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 756-760. (in Chinese with English abstract)
- [43] 黄国勤. 我国南方可持续发展的新型耕作制度体系探讨[J]. 中国农业资源与区划, 1995(4): 18-23.
- [44] 丁启朔, 丁为民, 杨伟, 等. 耕地细碎化条件的机械化特征——小型收割机的田间作业行为调查[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(6): 1397-1403.
Ding Qishuo, Ding Weimin, Yang Wei, et al. Mechanical characteristics of land fragmentation: an investigation on the field operation behavior of small-type harvesters[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(6): 1397-1403. (in Chinese with English abstract)
- [45] 郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征的研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 66-72.
Guo Zhimei, Miao Qilong, Liu Xiong. Variation characteristics of temperature over northern China in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 66-72. (in Chinese with English abstract)
- [46] 孙占祥, 米铁红. 我国北方旱农地区耕作制度的现状与发展[J]. 辽宁农业科学, 1998(4): 26-29.
- [47] Atwell B J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering[J]. New Phytologist, 1990, 115(1): 37-41.
- [48] Nadian H, Smith S E, Alston A M, et al. The effect of soil compaction on growth and P uptake by Trifolium subterraneum: interactions with mycorrhizal colonization[J]. Plant and Soil, 1996, 128(1): 39-49.
- [49] Teepe R, Brumme R, Beese F, et al. Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(2): 605-611.
- [50] Bhandral R, Saggar S, Bolan N, et al. Transformation of nitrogen and nitrous oxide emission from grassland soils as affected by compaction[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2): 482-492.
- [51] Dobbie K E, Smith K A. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: The impact of soil water-filled pore space and other controlling variables[J]. Global Change Biology, 2010, 9(2): 204-218.
- [52] Lipiec J, Szustak A, Tarkiewicz S. Soil compaction: Responses of soil physical properties and crop growth[J]. Journal of Phytology, 1992, 398(1): 113-117.
- [53] 李晓磊. 拖拉机集材对林地土壤的影响[J]. 森林工程, 1999, 15(4): 12-13.
- [54] 何章飞, 黄炎, 梁和, 等. 机械收割对宿根蔗生理生化指标及产量和蔗糖分的影响[J]. 南方农业学报, 2012, 43(4): 439-442.
He Zhanfei, Huang Yan, Liang He, et al. Effects of mechanical harvesting on physiological indices, yield and sucrose content in ratoon cane[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2012, 43(4): 439-442. (in Chinese with English abstract)
- [55] 迟仁立, 左淑珍, 夏平, 等. 不同程度压实对土壤理化性状及作物生育产量的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 39-43.
Chi Renli, Zuo Shuzhen, Xia Ping, et al. Effects of different level compaction on the physicochemical characteristics of soil and crop growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(6): 39-43. (in Chinese with English abstract)
- [56] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(6): 1267-1272.
- [57] Eaton R J, Barbercheck M, Buford M, et al. Effects of organic matter removal, soil compaction, and vegetation control on Collembolan populations[J]. Pedobiologia, 2004, 48(2): 121-128.
- [58] 李典鹏, 王辉, 孙涛, 等. 机械压实对新疆绿洲农田土壤微生物活性及碳排放的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 124-131.
Li Dianpeng, Wang Hui, Sun Tao, et al. Effects of mechanical compaction on soil microbial activities and carbon emission of oasis agricultural soils in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(20): 124-131. (in Chinese with English abstract)
- [59] Shestak C J, Busse M D. Compaction alters physical but not biological indices of soil health[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(1): 236-246.
- [60] Li Q C, Allen H L, Wilson C A. Nitrogen mineralization dynamics following the establishment of a loblolly pine plantation[J]. Canadian journal of forest research, 2003, 33(2): 364-374.
- [61] Hassink J, Bouwman L A, Zwart K B, et al. Relationships between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(1): 47-55.
- [62] Kim C, Her Y, Kim Y, et al. Evaluating the effectiveness of HOCl application on odor reduction and earthworm population growth during vermicomposting of food waste employing Eisenia fetida[J]. PloS one, 2019, 14(12): 226-229.
- [63] Lamande M, Labouriau R, Holmstrup M, et al. Density of macropores as related to soil and earthworm community parameters in cultivated grasslands[J]. Geoderma, 2011, 162(3-4): 319-326.
- [64] Cortez J, Bouche M. Decomposition of mediterranean leaf litters by Nicodrilus meridionalis (Lumbricidae) in laboratory

- and field experiments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15): 2023-2035.
- [65] 李庆逵. 我国土壤科学发展与展望[J]. *土壤学报*, 1989, 26(3): 207-216.
- Li Qingkui. Development and prospect of soil science in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26(3): 207-216. (in Chinese with English abstract)
- [66] Sheehan C, Kirwan L, Connolly J, et al. The effects of earthworm functional diversity on microbial biomass and the microbial community level physiological profile of soils[J]. *European Journal Of Soil Biology*, 2008, 44(1): 65-70.
- [67] 黄义端, 田积莹, 雍绍萍. 土壤内在性质对侵蚀影响的研究[J]. *水土保持学报*, 1989, 3(3): 9-14.
- Huang Yiduan, Tian Jiying, Yong Shaoping. The interior soil properties affecting soil erosion in loess plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, 3(3): 9-14. (in Chinese with English abstract)
- [68] 杨玉盛, 何宗明, 林光耀, 等. 不同治理措施对闽东南沿海侵蚀性赤红壤肥力影响的研究[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(3): 90-92.
- Yang Yusheng, He Zongming, Lin Guangyao, et al. Effects of different harness measures on lateritic red soil fertility in southeast coast of Fujian[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1998, 22(3): 90-92. (in Chinese with English abstract)
- [69] Dörner J, Bravo S, Stoorvogel M, et al. Short-term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an Andisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 221: 105396.
- [70] 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, 4(16): 73-77.
- Li Hongwen, Gao Huanwen, Chen Junda, et al. Study on controlled traffic with conservative tillage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2000, 4(16): 73-77. (in Chinese with English abstract)
- [71] Chepil W S. Properties of soil which influence wind erosion: IV. State and dry aggregate structure[J]. *Soil Science*, 1951, 72(6): 465-478.
- [72] 李小雁, 李福兴, 刘连友. 土壤风蚀中有关土壤性质因子的研究历史与动向[J]. *中国沙漠*, 1998, 18(1): 93-97.
- Li Xiaoyan, Li Fuxing, Liu Lianyou. Research history and trend on soil property factors concerning wind erosion[J]. *Journal Of Desert Research*, 1998, 18(1): 93-97. (in Chinese with English abstract)
- [73] 董治宝, 钱广强. 关于土壤水分对风蚀起动风速影响研究的现状与问题[J]. *土壤学报*, 2007, 44(5): 934-942.
- Dong Zhibao, Qian Guangqiang. A review on effect of soil moisture on wind erosion threshold velocity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 934-942. (in Chinese with English abstract)
- [74] 张科利, 刘宏远. 东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(1): 17-24.
- Zhang Keli, Liu Hongyuan. Research progresses and prospects on freeze-thaw erosion in the black soil region of Northeast China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(1): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [75] 史展, 陶和平, 刘淑珍, 等. 基于 GIS 的三江源区冻融侵蚀评价与分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 214-221.
- Shi Zhan, Tao Heping, Liu Shuzhen, et al. Research of freeze-thaw erosion in the Three-River-Source area based on GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(19): 214-221. (in Chinese with English abstract)
- [76] 陈溢, 樊高琼, 乔善宝, 等. 小四轮田间行走对四川丘陵旱地土壤特性及冬小麦幼苗生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 194-198.
- Chen Yi, Fan Gaoqiong, Qiao Shanbao, et al. Effects of small wheeled tractor traffic on soil properties and seedling growth of winter wheat in Sichuan hilly areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 194-198. (in Chinese with English abstract)
- [77] 乔金友, 霍东旭, 张险峰, 等. 中型拖拉机压实对测试截面土壤坚实度和含水率的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52(6): 87-96.
- Qiao Jinyou, Huo Dongxu, Zhang Xianfeng, et al. Effects of medium tractor compaction on soil penetration resistance and moisture content of testing cross section[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2021, 52(6): 87-96. (in Chinese with English abstract)
- [78] 张攀, 姚文艺, 刘国彬, 等. 土壤复合侵蚀研究进展与展望[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 154-161.
- Zhang Pan, Yao Wenyi, Liu Guobin, et al. Research progress and prospects of complex soil erosion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(24): 154-161. (in Chinese with English abstract)
- [79] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 1-12.
- Zhang Guanghui, Yang Yang, Liu Yingna, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [80] 周佩华, 刘炳武, 王占礼, 等. 黄土高原土壤侵蚀特点与植被对土壤侵蚀影响的研究[J]. *水土保持通报*, 1991, 11(5): 26-31.
- Zhou Peihua, Liu Bingwu, Wang Zhanli, et al. Behaviors of soil erosion and effects of vegetation cover upon soil erosion on the loess plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1991, 11(5): 26-31. (in Chinese with English abstract)

Research progress in the effects of mechanical compaction on soil properties and soil erosion in farmland

Fu Juan, Ma Renming^{*}, Jia Yanfeng, Fan Haoming, Guo Chengjiu, Zhang Boxiang,
Li Shuang, Li Mengyuan

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Key Laboratory of Soil Erosion Control and Ecological Restoration in Liaoning Province, Shenyang 110866, China)

Abstract: Soil provides the foundation of farmland ecosystems and is an important component of arable land. As well as providing a platform for plant growth, soil helps retain water, nutrients, and organic matter. Soil is also home to a variety of microorganisms and living organisms that play a key role in maintaining soil fertility. Healthy and active farmland soil play an important role in resisting soil erosion by rainfall runoff, wind, and snowmelt runoff. However, with the development of agricultural machinery to large, high-speed, low-consumption, joint operation direction, and the increase of the scale of agricultural mechanization in recent years, farmland soil has suffered from more serious mechanical compaction, which has become a global issue. In the process of agricultural operations, farmland soil is subjected to mechanical compaction, which has an impact on the soil's physical properties, chemical properties, and soil biology. Mechanical compaction often makes farmland soil unsuitable for crop growth and reduces resist the ability to external erosion. Most studies found that mechanical compaction could increase soil bulk density, reduce soil porosity, weaken the stability of soil aggregates, reduce soil infiltration capacity, release soil nutrients, inhibit the ability of soil gas exchange, and break soil biological balance. It is worth paying attention to that the ability of farmland soil to resist erosion is also affected by the mechanical compaction of farmland operation. The influence of compaction on soil erosion resistance is mainly realized indirectly through the physical properties of compacted soil. This paper outlined the cause of mechanical compaction of farmland soil through describing the development of agricultural machinery and mechanical stresses on the soil, elaborated the effect of mechanical compaction on soil properties and their mechanism, and discussed the indirect effects of mechanical compaction on soil erosion. There are many researches on the effects of compaction on soil physical and chemical properties, but few studies on the effects of compaction on soil biology and the interaction between soil physical and chemical properties and soil biology. It is concluded that current researches mainly focus on the effects of mechanical compaction on soil properties and soil properties on soil erosion, but there are few studies on the mechanism of mechanical compaction on soil erosion. Finally, in view of the deficiencies of the current mechanical compaction researches, the future development direction of related researches in China is proposed. The most important is that current qualitative researches on mechanical compaction have been perfected and comprehensive. In the future, researches should pay attention to quantitative researches on the transformation process of soil to a special state by agricultural mechanical compaction under the unified standard. It should be considered that when designing experimental conditions are similar to the actual compaction conditions of agricultural machinery. When studying the effect of compaction on soil erosion, we should pay attention to the effect of compound erosion. The purpose of the above work is to better apply the existing researches theory of mechanical compaction to practice, seek advantages and avoid disadvantages, and also hope to provide a reference for the prevention and control of soil erosion in domestic farmland operations.

Keywords: agricultural machinery; soil; erosion; compaction