



中稻单作模式下江汉平原潮土性水稻土结构功能年际变化趋势模拟研究

刘炜, 黄羽翔, 杨添雨, 杨显华, 董志强, 胡泽苏, 金慧芳

引用本文:

刘炜, 黄羽翔, 杨添雨, 等. 中稻单作模式下江汉平原潮土性水稻土结构功能年际变化趋势模拟研究[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 175–185.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0663>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

弃耕行为对亚热带农田土壤有机质时空变化作用机理研究

张童瑶, 胡月明, 任向宁, 陈飞香, 冯雪珂

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 805–817 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0480>

立式旋耕对小麦生长季土壤紧实度及产量的影响

聂胜委, 张浩光, 张巧萍, 许纪东, 张玉亭

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 36–42 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0103>

猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响

石纹磙, 刘世亮, 赵颖, 高焕平, 王洋洋, 李慧, 刘芳

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 431–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0070>

耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势

胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 夏旭, 韦本辉

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 95–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0242>

利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响

王超, 熊凡, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 494–501 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0262>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘炜, 黄羽翔, 杨添雨, 等. 中稻单作模式下江汉平原潮土性水稻土结构功能年际变化趋势模拟研究[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 175-185.

LIU W, HUANG Y X, YANG T Y, et al. Simulation study on interannual changes in structural and functional characteristics of tidal soil paddy soil in the Jianghan Plain under the monoculture mode of medium rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 175-185.



开放科学 OSID

中稻单作模式下江汉平原潮土性水稻土结构功能年际变化趋势模拟研究

刘炜¹, 黄羽翔¹, 杨添雨¹, 杨显华¹, 董志强², 胡泽苏², 金慧芳^{1*}

(1. 长江大学农学院, 湖北 荆州 434000; 2. 中铁上海工程局集团市政环保工程有限公司, 上海 201906)

摘要: 农业耕作是影响土壤通气透水、保肥供肥等结构功能的重要措施, 本研究旨在揭示长期中稻单作模式下耕层土壤结构变化趋势及其影响因素, 为优化耕层构型、促进耕层质量提升和耕地资源合理利用提供参考依据。本研究通过连续耕作的田间原位试验, 模拟江汉平原潮土性水稻土中稻单作(水耕-空闲)模式下, 土壤结构功能指标的年际变化规律。结果表明: 长期水耕会导致土壤容重逐年增大、土壤板结。随着水耕年限延长, 土壤容重较第1年增幅分别为3.6%(3年)、5.8%(6年)、6.9%(10年); 土壤总孔隙度呈降低趋势, 较第1年分别降低了3.8%(3年)、5.9%(6年)、7.2%(10年)。随着水耕年限增加, 粉粒和黏粒含量先增后减, 砂粒含量则表现出相反的变化特征, 与第1年比较, 土壤砂粒含量有所增加, 而黏粒含量则有所降低。土壤团聚程度和持水能力随耕作年限延长呈逐渐降低趋势, 其中田间持水量较第1年降幅分别为9.6%(3年)、11.1%(6年)、15.8%(10年)。连续水耕情况下土壤结构功能在第3、第6年和第10年有明显退化表征, 说明长期机械水耕对土壤结构有明显破坏作用, 水耕3~4年后宜水旱交替耕作(水旱轮作), 缓解长期水耕造成的土壤物理退化问题。研究表明, 长期水耕导致土壤耕层结构功能退化严重, 研究结果为江汉平原适宜耕作模式/种植制度选择、促进区域耕地资源可持续利用提供参数支持和理论依据。

关键词: 团聚体; 连续水耕; 结构功能; 模拟试验; 潮土性水稻土

doi: 10.13254/j.jare.2024.0663

Simulation study on interannual changes in structural and functional characteristics of tidal paddy soil in the Jianghan Plain under the monoculture mode of medium rice

LIU Wei¹, HUANG Yuxiang¹, YANG Tianyu¹, YANG Xianhua¹, DONG Zhiqiang², HU Zesu², JIN Hui Fang^{1*}

(1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434000, China; 2. China Railway Shanghai Engineering Bureau Group Municipal Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Shanghai 201906, China)

Abstract: Agricultural cultivation is an important measure that affects the structural functions of soil such as aeration, permeability, and nutrient retention and supply. This article aims to reveal the trend and influencing factors of soil structure changes in the plow layer under long-term monoculture mode of medium rice, and provide reference for optimizing plow layer configuration, promoting plow layer quality improvement, and rational utilization of arable land resources. By conducting field *in-situ* experiments with continuous cultivation, the interannual variation patterns of soil structure and functional indicators were simulated under the rice monoculture (water tillage-idle) mode in the tidal paddy soil of the Jianghan Plain. Long term hydroponics could lead to an increase in soil bulk density year by year and soil compaction. With the extension of water tillage years, the increase in soil bulk density compared with the first year was 3.6% (3 years), 5.8% (6 years), and 6.9% (10 years), respectively. The total porosity of the soil showed a decreasing trend, decreasing by 3.8% (3 years),

收稿日期: 2024-08-25 录用日期: 2024-12-26

作者简介: 刘炜(2000—), 女, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为退化土壤改良与农业水土资源高效利用。E-mail: weiliu0806@163.com

*通信作者: 金慧芳 E-mail: jinhui fang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107370); 长江大学大学生创新创业项目(Yz2022202)

5.9% (6 years), and 7.2% (10 years) respectively compared with the first year. As the years of water cultivation increase, the content of silt and clay particles first increased and then decreased, while the content of sand particles showed the opposite trend. Compared with the first year, the content of soil sand particles had increased, while the content of clay particles had decreased. The degree of soil aggregation and water holding capacity gradually decreased with the extension of cultivation years, with a decrease of 9.6% (3 years), 11.1% (6 years), and 15.8% (10 years) in field water holding capacity compared with the first year, respectively. Under continuous hydroponic conditions, there was a significant degradation of soil structure and function in the 3rd, 6th, and 10th years, indicating that long-term mechanical hydroponics had a significant destructive effect on soil structure. After 3–4 years of hydroponics, it was advisable to alternate between water and drought cultivation (water drought rotation) to alleviate the physical degradation of soil caused by long-term hydroponics. Long term water cultivation leads to severe degradation of soil tillage structure and function. The research results provide parameter support and theoretical basis for the selection of suitable tillage modes/planting systems in the Jiangnan Plain, and promote the sustainable utilization of regional arable land resources.

Keywords: aggregate; continuous hydroponics; structural function; simulation test; tidal paddy soil

近年来,农村劳动力大量向城市转移,导致农村老龄化严重,农村劳动力锐减。国务院和各级政府曾多次提出以推进农机化向全面高质高效农业发展为导向,为实施乡村振兴战略提供强有力机械化支撑。农业机械化率的大幅提升,促进了农业现代化的发展,而机械耕作、收获等农业活动也造成了土壤被压实、扰动等,使得土壤物理特征与结构功能等发生明显变化^[1-2]。土壤结构是维持土壤稳定和功能发挥的基础,良好的土壤结构是提升土壤肥力与基本功能的重要物质前提^[3-4]。土壤孔隙结构、团聚体、水分蓄持能力等是决定土壤结构好坏的关键。种植制度、耕作方式等对土壤结构产生直接影响,进而决定其功能的强弱程度。土壤团聚体是具有多孔结构的介质,良好的土壤孔隙结构不仅有助于土壤保水和养分储存,还为土壤微生物创造了优质的生存环境。土壤容重与根系穿透阻力、土壤含水量、土壤通气性、水肥利用以及外界环境交换过程等密切相关;土壤总孔隙度与土壤容重同样可以反映土体的紧实程度、透气性等。土壤机械组成是确定土壤质地和评价土壤结构的重要参数。这些重要参数综合反映了土壤物理性质,对促进农业可持续发展和粮食高产至关重要。Dexter^[5]最早提出土壤结构主要体现土壤在特定尺度上的不均匀性,即土壤孔隙和养分在土壤分布中的异质性。Amézketa^[6]认为土壤结构是土壤中的砂粒、粉粒、黏粒与有机质相互作用胶结为不同粒级团聚体,并在三维空间中进一步组织排列为一定的结构形式。彭新华等^[7]、赵其国^[8]从土壤功能角度出发,认为土壤结构直接影响着土壤通气、透水等性能,而土壤退化的核心主要表现为土壤结构退化。张瑞豪等^[9]提出随着土层加深,大颗粒水稳性团聚体含量下降,结构恶化。刘亚龙等^[10]从土壤团聚体的形成和稳定机制出发,认

为土壤团聚体在维持土壤生态功能中发挥重要作用。总之,研究土壤结构功能特征,对耕地土壤改良、合理利用和抑制土壤退化具有重要作用。

不合理耕作等是导致土壤结构破坏、作物减产的重要因素。姜军等^[11]发现黄棕壤性水稻土随着水耕年限延长,土壤质地发生明显变化,主要表现为砂粒含量增加、黏粒含量下降,这与水耕过程中黏粒淋淀,排水中黏粒和粉砂细颗粒的选择性流失等有关。章明奎等^[12]发现水耕土壤中耕作层和犁底层的黏粒含量随耕作年限增加呈下降趋势。许绣云等^[13]的研究表明连续水耕11年后土壤0.05~1 mm微团聚体含量增加,总孔隙度和通气孔隙度明显增大,破裂系数明显减小。郭月峰等^[14]和李婧阳等^[15]研究发现土壤有效孔隙随秸秆还田年限延长呈缓慢增加趋势,对增强耕层土壤持水能力有显著效果。总体看来,土壤结构功能变化是一个长期性的动态变化过程,受耕作方式、种植模式、耕作机械等多种因素的影响。目前对土壤结构功能变化的研究多集中在现状分析,缺乏对其变化过程的长期性、系统性监测,对其变化规律关注尚少。受气候、降水及劳动力转移等多种因素影响,江汉平原水稻种植模式逐渐由双季稻种植向中稻单作模式转变,水耕间隔周期变长,目前关于中稻单作和机械耕作交互作用下土壤结构变化趋势的研究尚少,探究长期机械水耕后中稻单作土壤结构功能变化规律对作物产量提升和促进农业可持续发展有重要指导作用。

水稻土是我国分布最广泛的土壤类型之一,约占全国耕地面积的1/5^[16],江汉平原是主要分布区域之一,该区域长期受长江、汉江等泥沙冲积、湖泊沉积和地下水运动等因素影响,以第四系河湖冲积物和湖相沉积物堆积而成的潮土母质发育典型且分布广泛,在

长期水稻连作和人为水耕熟化等作用下,逐渐形成潮土性水稻土这一独特水耕人为土壤^[17],也是江汉平原分布最广泛的土壤类型。本研究以江汉平原潮土性水稻土为研究对象,基于长期田间原位模拟机械耕作试验,分析了中稻单作(水耕-空闲)模式下的土壤团聚体、机械组成等反映土壤结构功能指标的年际变化趋势,研究结果可为江汉平原潮土性水稻土区域适宜耕作和种植模式筛选、退化耕层改良和耕地地力提升提供参数支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于长江中下游地区,属亚热带季风湿润气候区,具有四季分明、热量丰富、光照适宜、雨水充沛、雨热同季、无霜期长等特点,年辐射总量4 366.8~4 576.2 MJ·m²,年日照时数1 823~1 978 h,日照率为41%~44%。年均气温16.2~16.6℃,无霜期250~267 d,年降水量1 100~1 300 mm。潮土是区域内分布最广泛的土壤类型,有机质含量高,腐殖质与黏粒含量适中,质地黏重。稻-闲、稻-油、稻-麦等为该区域典型种植制度。

1.2 田间原位模拟耕作试验

试验地块布设在江汉平原潮土性水稻土分布典型的区域——湖北省仙桃市剅河镇吴场村(30°22' N, 113°27' E),田块平整,无水土流失。通过连续水耕试验模拟中稻单作(水稻-空闲)条件下土壤结构年际变化特征。试验时间为2020年6月—2023年3月,共采样10次。具体试验流程为:灌水(按水田季灌水标准对地块进行灌水,地表水层约10 cm)后机械水耕→放水→沉降约2周采样(第1次)表征中稻单作(水耕-空闲)第1年;采样1个月后,继续进行灌水后机械水耕→放水→沉降约2周采样(第2次)表征中稻单作(水耕-空闲)第2年;以此重复10次则表征中稻单作模式下10年水耕-空闲耕作方式对土壤结构的影响。试验期间未种植作物,主要模拟耕作措施对土

壤结构的影响。试验布设前采集该田块土壤背景值(CK,表1)即该地块前期为中稻单作制度的长期耕作水稻田,采样方法与1.3相同,该田块为稻-闲模式长期耕作水稻土。试验田块规格为50 m×50 m,耕作机械为当地常用农机LX904东方红,在地块内梅花状布设采样点,考虑农业机械在转弯时对土壤压实作用受力方向的变化,故距地块边界12.5 m范围内作为机械转移缓冲区。

1.3 样品采集

采用五点法分层采集0~10、10~20、20~30、30~40 cm层土壤散土样品用于测定和计算土壤相关指标。待测定和计算的土壤结构功能指标包括容重、总孔隙度、毛管孔隙度、机械组成、水稳定性团聚体含量和团聚体平均质量直径(MWD)、田间持水量(质量含水量)和饱和导水率等。分层采集环刀和铝盒样品重复取样3次,使用高5 cm、体积100 cm³的环刀在试验田采集剖面各土层原状样品,环刀取出后用修土刀削平、刮净多余土壤,并用自封袋将土壤样品密封保存,标明土样各项信息后带回实验室测定各项指标。

1.4 指标获取

1.4.1 容重、含水量和孔隙度的测定

土壤含水量的测定采用烘干法,土壤容重的测定采用环刀法^[18],通过公式(2)计算出土壤样品的容重。土壤总孔隙度与容重成反比,可以通过公式(3)计算得出。

$$\text{土壤含水率} = \frac{(\text{湿土} + \text{铝盒}) - (\text{干土} + \text{铝盒})}{(\text{干土} + \text{铝盒}) - \text{铝盒}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{土壤容重} = \frac{\text{环刀内湿土质量}}{(1 + \text{含水率}) \times \text{环刀容积}} \quad (2)$$

$$\text{土壤孔隙度} = \left(1 - \frac{\text{土壤容重}}{\text{土壤比例}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

1.4.2 土壤颗粒组成的测定

室内风干后混匀称取自然风干土样,用干筛法和湿筛法(土壤团粒结构分析仪)测定,标准筛孔径从上而

表1 0~40 cm土层土壤物理性质

Table 1 Physical properties of soil in 0~40 cm soil layer

土层 Soil layer/cm	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	田间持水量(质量含水量) Soil field capacity/(g·cm ⁻³)	饱和含水量 Saturated water content/%
0~10	1.12	57.89	50.52	45.27	51.69
10~20	1.15	58.32	49.86	46.23	50.71
20~30	1.42	46.33	44.33	31.19	32.63
30~40	1.45	46.97	44.13	32.18	32.40

下分别为5、2、1、0.5、0.25 cm,用于计算直径>0.25 mm的土壤团聚体含量和平均质量直径^[19]。采用吸管法测定土壤机械组成^[20],其中分级标准为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和砂粒(0.02~2 mm)。

土壤大团聚体含量(WR_{0.25})计算公式为:

$$WR_{0.25} = \sum_{i=1}^n W_i \quad (4)$$

土壤水稳性团聚体平均质量直径(MWD)计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \times w_i \quad (5)$$

式中: \bar{x}_i 为土壤各粒径平均直径,mm; w_i 为土壤各粒径质量百分比,%。

1.4.3 土壤田间持水量与饱和导水率的测定

在实验室内采用环刀浸水法^[21]测定土壤的田间持水量,采用双环法测定土壤饱和导水率^[22]。

先计算初始含水率,将样品环刀放在滤筛上,加蒸馏水浸泡,分别记录2 h和6 h土样质量,使土壤含水量饱和。水分饱和后将环刀取出拿下上盖,在环刀上方密封连接另一只空环刀,将环刀下方放置好漏斗和烧杯,在空环刀内加入蒸馏水,使土层上方水层厚度为5 cm。加好水后在第一滴水滴落时开始记录时间,以后每隔2、3、5……60 min更换烧杯并测量渗水量M1、M2、M3……M_n,在更换烧杯的同时在环刀上方添加蒸馏水,保持水层厚度不变,直至渗水量趋于稳定,根据公式(6)计算得出饱和导水率。

$$\text{土壤饱和导水率} = \frac{Q_n}{T_n} \quad (6)$$

式中: Q_n 为稳定时渗出的水体积,mL; T_n 为稳定时所用的时间,min。

田间持水量=

$$\frac{(w_6-w_1) \times (1+w) - (w_2-w_1)}{w_2-w_1} \times 100\% \quad (7)$$

饱和含水量=

$$\frac{(w_7-w_1) \times (1+w) - (w_2-w_1)}{w_2-w_1} \times 100\% \quad (8)$$

式中: w 为土壤含水率,%; w_1 为环刀质量; w_2 为环刀+湿土质量,g; w_6 为环刀浸泡2 h后的质量,g; w_7 为环刀浸泡6 h后的质量,g。

1.5 数据处理

用Excel 2016进行数据处理,用SPSS 22.0软件进行数据统计分析。方差分析采用One-Way ANOVA,并用LSD法进行多重比较($P<0.05$)。采用Origin 20.0进行图表处理。

2 结果与分析

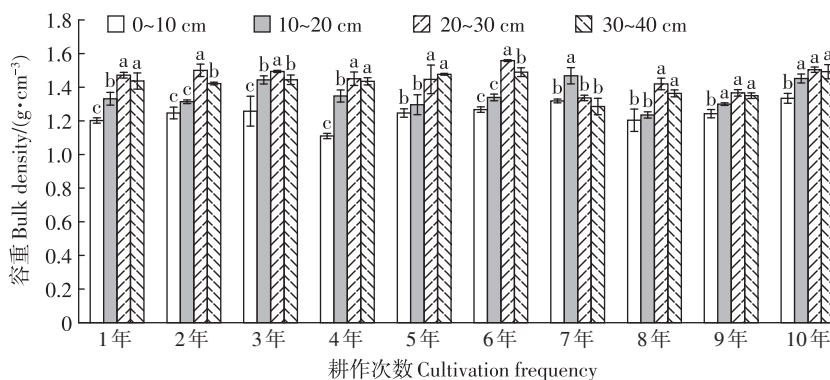
2.1 土壤物理结构变化

2.1.1 土壤容重

土壤容重主要表征土壤孔隙度和结构性优劣,可反映土壤透水、保水、透气、熟化程度等性能,是土壤基本物理参数之一。由图1可知,随水耕年限延长,土壤容重呈先缓慢增大后减小再增大的趋势,较第1年增幅分别为3.6%(3年)、5.8%(6年)、6.9%(10年),这说明长期水耕增加土壤体积质量,破坏土壤结构。土壤容重沿剖面向下表现为先缓慢减小后增大,0~10 cm层最小(1.11 g·cm⁻³),20~30 cm层最大(1.56 g·cm⁻³)。随着水耕年限增长,第10年各土层容重较第1年分别增长了11.0%、9.0%、2.2%、3.9%。随着耕作年限延长,土壤板结,导致容重增大,含水率下降,土壤结构性变差。

2.1.2 土壤孔隙

土壤孔隙是土壤颗粒或团聚体之间形成的内部



不同小写字母表示相同耕作年限不同土层差异显著($P<0.05$)。下同。

图1 不同水耕年限土壤容重变化

Figure 1 Changes in soil bulk density at different hydroponic years

孔洞,受土壤聚集、干湿交替等自然因素和土壤管理等人为因素影响^[23],其与土壤松实程度密切相关。由图2a可知,土壤总孔隙度随水耕年限延长而降低,与第1年相比,降幅分别为3.8%(3年)、5.9%(6年)、7.2%(10年),这说明长期机械耕作导致土壤被压实,耕作阻力加重,加上土壤长期渍水,土壤结构被破坏。从垂直剖面来看,土壤总孔隙度由上至下表现为先减后增的变化规律。0~10 cm层总孔隙度最大,占比27.4%,20~30 cm总孔隙度最小,占比23.3%。随着水耕年限延长,0~10 cm总孔隙度变化趋势为先减小后增大,30~40 cm层表现出相同变化规律,这可能是因为水淹土壤和土壤颗粒沉降等土壤颗粒运动引起的。10~20 cm层总体平稳,在第6年有减小趋势,20~30 cm层则表现为先减小后增大再减小的波动趋势,这可能与地下水位的季节性运移有关。总体来看,水耕10年后,从上至下各土层总孔隙度较第1年分别减小了9.1%、9.1%、2.8%、4.6%。这表明机械水耕年限对上层土壤孔隙度的影响明显高于下层土壤。

由图2b可知,土壤毛细管孔隙度随水耕年限的增加整体呈下降趋势,与第1年相比,降幅分别为11.5%(3年)、9.3%(6年)、6.6%(10年)。土壤毛细管孔隙度沿

垂直剖面向下表现为先趋于平稳后缓慢减小的变化特征,其中10~20 cm层毛细管孔隙度最大,占比为26.2%,20~30 cm毛细管孔隙度最小,占比为23.7%。从年际尺度来看,0~10 cm层毛细管孔隙度变化趋势为逐年减小。10~20 cm层毛细管孔隙度变化趋势为先增大后减小,30~40 cm层与之变化规律相反。20~30 cm层毛细管孔隙度表现为减小后稳定。总体看来,水耕10年后,0~10、10~20、20~30、30~40 cm土层毛细管孔隙度较第1年分别减小7.2%、20.9%、6.8%、6.3%。这说明机械水耕对上层土壤的扰动作用明显大于下层土壤,但是土体长期淹水对土壤结构和孔隙有一定的破坏作用。

2.2 土壤颗粒组成变化

2.2.1 机械组成

土壤颗粒组成普遍且独立存在于土壤结构中,是土壤质地划分的主要依据。由图3可见,区域内土壤机械组成以粉粒为主,含量在57.3%~75.5%之间,砂粒次之,含量为15.3%~33.6%,黏粒最少,其含量变化范围为9.1%~11.0%。随着耕作年限的增加,粉粒和黏粒含量先增后减,砂粒先减后增,与第1年相比,土壤砂粒含量增加,黏粒含量减少,这可能与土壤理化

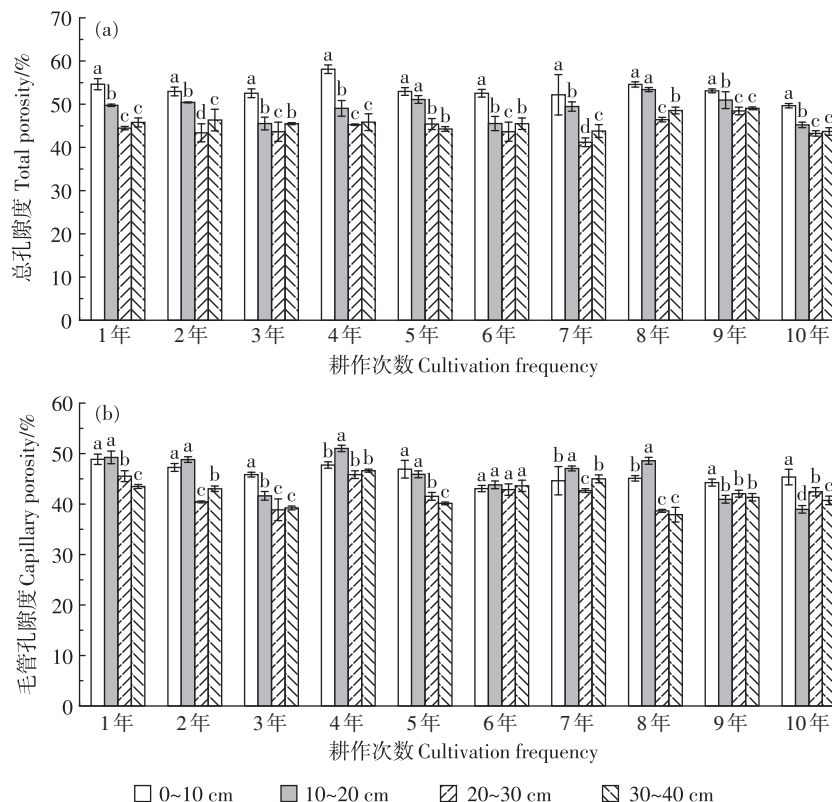


图2 不同水耕年限土壤总孔隙度和毛细管孔隙度的变化

Figure 2 Changes of soil total porosity and capillary porosity at different hydroponic years

性质与成土因素有关。

由图3a可知,随着水耕年限增长,黏粒含量逐渐减少,砂粒含量先减少后增加,与第1年相比,0~10 cm层黏粒含量减少,砂粒含量增加,粉粒含量趋于稳定。由图3b可知,与第1年相比,10~20 cm层砂粒含量增加,粉粒和黏粒含量逐渐减少。由图3c可知,与第1年相比,20~30 cm层砂粒含量增加,粉粒和黏粒含量减少。由图3d可知,与第1年相比,30~40 cm层砂粒含量先减少后增加,粉粒和黏粒含量呈先增后减的趋势。与第1年相比,水耕10年后,潮土性水稻土0~10 cm层砂粒含量增加28.6%,粉粒含量减少1.8%,黏粒含量减少46.7%;10~20 cm层砂粒含量增加41.2%,粉粒含量减少1.4%,黏粒含量减少46.2%;20~30 cm层砂粒含量增加44.4%,粉粒和黏粒含量分别减少21.2%和41.7%;30~40 cm层砂粒含量增加27.3%,粉粒含量减少22.0%,黏粒含量减少16.7%。这表明长期水耕植稻会导致耕作层土壤砂化,即砂粒含量上升而黏粒含量减少。这一现象的产生,除了水耕过程中黏粒的淋淀作用外,排水中黏粒和粉砂细颗粒的选择性流失也是重要的因素。可见,机械水耕对

土壤颗粒组成的影响在砂粒和黏粒之间,在后期生产实践中,可通过增施有机肥、土壤改良剂等方式,提高土壤黏结能力。

2.2.2 土壤团聚体变化

团聚体是土壤环境中能够发挥肥力效力的最小结构单元,其数量反映了土壤供储养分能力和肥力水平的高低^[24],其结构稳定程度在土壤中发挥着调节“水、肥、气、热”,改善生物活性和疏松土层的重要作用^[25]。MWD高则土壤结构性好;反之,则土壤结构性差,易造成土壤退化^[26]。土壤小团聚体(<0.25 mm)是表征土壤生态效应的重要指标,其含量越低,土壤团聚体结构越稳定^[27],土壤大团聚体由于其较大的体积和更强的黏结力,在维持土壤结构稳定性方面尤为重要。由表2可知,与第1年相比,随着水耕年限增加,土壤干筛MWD值表现为下降趋势,降幅分别为5.5%(3年)、12.3%(6年)、8.3%(10年);湿筛MWD值表现为下降趋势,降幅分别为49.1%(3年)、19.2%(6年)、79.5%(10年)。与第1年相比,土壤大团聚体含量呈下降趋势,降幅分别为7.2%(3年)、15.7%(6年)、10.7%(10年)。土壤水稳性大团聚体也呈下降趋势,

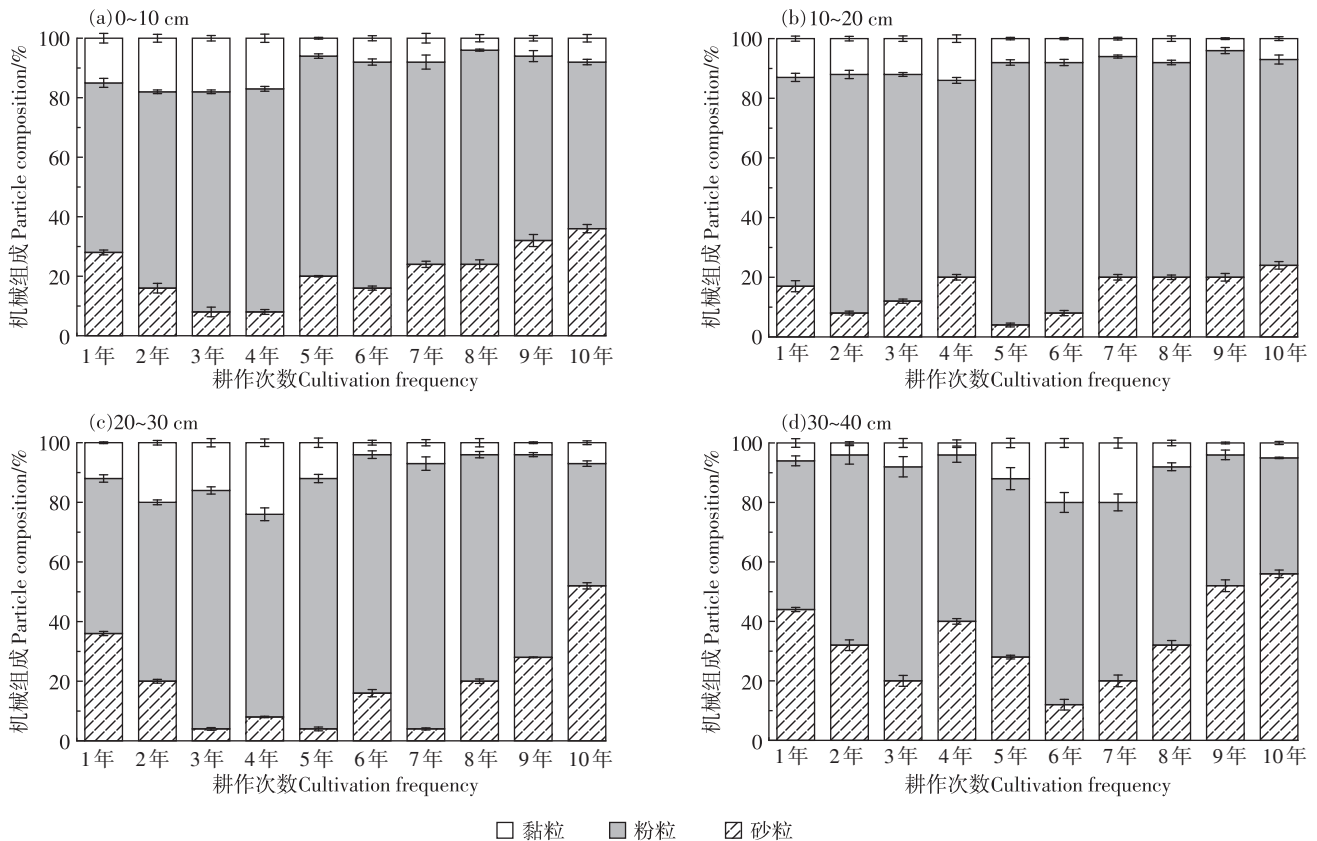


图3 不同水耕年限颗粒组成变化

Figure 3 Changes in particle composition at different hydroponic years

表2 不同耕作年限下土壤大团聚体含量及平均质量直径变化

Table 2 Changes in soil macroaggregate content and average mass diameter under different tillage years

耕作次数 Cultivation frequency	土壤层次 Soil layer/cm	平均质量直径 Mean mass diameter/mm		大团聚体质量百分比 Macro-aggregates/%	
		干筛 Dry sieve	湿筛 Wet sieve	干筛 Dry sieve	湿筛 Wet sieve
1年	0~10	9.07±0.08Ac	2.35±0.11Aa	90.73±0.08Aa	70.84±0.28Ab
	10~20	10.94±0.47Aa	2.97±0.05Aa	89.38±0.48Ab	81.58±0.89Aa
	20~30	9.29±0.39Cc	1.45±0.06Bb	62.87±0.77Dc	46.64±0.76Bc
	30~40	9.87±0.18Cb	0.66±0.04Cc	58.70±0.18Dd	44.22±0.37Bc
2年	0~10	7.68±0.16Cd	2.29±0.33Aa	76.71±0.22Cb	51.54±0.23Cb
	10~20	9.98±0.79Bc	1.63±0.05Bb	79.83±0.25Ca	59.06±0.10Ba
	20~30	10.83±0.68Aa	0.75±0.08Cc	78.35±0.14Ca	35.62±0.09Cd
	30~40	10.08±0.85Bb	0.50±0.03Dc	60.84±0.88Dc	45.36±0.71Bc
3年	0~10	6.16±0.22Dd	1.56±0.16Ba	61.62±0.54Dc	42.14±0.23Db
	10~20	9.50±0.39Bc	0.80±0.14Cb	74.97±1.14Ca	61.56±0.42Ba
	20~30	10.48±1.10Bb	0.95±0.06Cb	74.85±0.85Ca	59.56±0.27Ba
	30~40	10.87±0.25Ba	0.47±0.05Dc	68.66±0.39Cb	23.24±0.42Dc
4年	0~10	8.18±0.02Bc	1.92±0.18Bb	81.79±0.76Ba	71.34±0.12Aa
	10~20	10.23±0.35Ab	1.50±0.08Bc	82.30±0.77Aa	61.44±0.79Bb
	20~30	10.86±0.87Aa	2.64±0.38Aa	78.58±0.16Bb	73.04±1.31Aa
	30~40	11.96±0.70Aa	0.34±0.06Dd	79.64±0.99Ab	21.12±0.84Dc
5年	0~10	8.93±0.20Bc	0.96±0.05Cb	89.26±0.08Aa	75.98±0.59Aa
	10~20	8.76±0.50Cc	2.10±0.18Aa	67.63±0.39Dc	65.68±0.40Bb
	20~30	11.76±0.26Aa	2.05±0.06Aa	87.59±0.02Ab	46.48±0.89Bc
	30~40	10.21±0.88Bb	0.33±0.10Dc	62.06±0.98Cd	32.04±0.99Cd
6年	0~10	8.45±0.45Bc	2.39±0.24Aa	84.52±0.44Ba	63.78±0.26Ba
	10~20	9.12±0.13Bb	1.47±0.12Bb	71.17±0.80Cb	35.64±0.85Cc
	20~30	9.02±0.21Bb	0.72±0.11Cc	60.16±0.70Dc	44.28±0.05Bb
	30~40	9.58±0.70Ca	0.59±0.04Dc	55.85±0.74Dd	24.64±0.84Dd
7年	0~10	7.74±0.67Cd	1.65±0.08Bb	77.36±0.68Cb	62.76±0.26Ba
	10~20	9.06±0.57Bc	1.17±0.07Bc	70.55±0.48Cd	57.18±0.72Bb
	20~30	10.96±0.65Ab	0.93±0.06Cd	79.61±0.25Ba	45.90±0.43Bc
	30~40	11.36±0.58Aa	2.30±0.05Aa	73.56±0.65Ac	30.28±0.86Cd
8年	0~10	7.32±0.51Cc	1.18±0.11Ba	73.20±0.25Cb	47.86±0.27Db
	10~20	9.36±0.31Bb	0.54±0.05Dc	73.64±0.85Cb	34.50±0.49Cc
	20~30	10.95±0.27Aa	0.74±0.05Cb	79.46±0.49Ba	30.38±0.81Cd
	30~40	9.32±0.40Cb	0.43±0.07Dc	53.18±0.44Dc	72.10±0.79Aa
9年	0~10	6.10±0.20Dc	0.39±0.03Db	60.99±0.16Dc	24.88±0.51Db
	10~20	8.68±0.42Cb	0.70±0.03Ca	66.78±0.89Db	26.28±0.80Da
	20~30	10.59±0.84Ba	0.25±0.07Dc	75.87±0.67Ba	21.86±0.51Cb
	30~40	10.72±0.14Ba	0.24±0.05Dc	67.18±0.62Bb	15.90±0.71Dc
10年	0~10	6.81±0.54Dd	0.31±0.11Db	68.07±0.26Da	20.64±0.76Db
	10~20	8.48±0.66Cc	0.54±0.16Da	64.81±0.88Dc	25.94±0.58Da
	20~30	9.86±0.75Bb	0.15±0.02Db	68.65±0.39Ca	9.16±1.17Dc
	30~40	10.72±0.43Ba	0.24±0.04Db	67.20±0.20Bb	10.50±0.43Dc

注:不同大写字母表示同一垂直层次不同机械水耕年限差异显著,不同小写字母表示相同耕作年限不同土层差异显著($P<0.05$)。

降幅分别为23.4%(3年)、25.8%(6年)、66.2%(10年)。土壤在连续水耕情况下土壤结构在第3年、第6年和第10年有明显退化表征,这表明长期机械水耕对土壤结构稳定性有明显破坏作用,水耕3~4年后宜进行水旱交替耕作,以缓解长期水耕造成的土壤板结问题。

2.3 土壤水分蓄持能力变化

土壤水分蓄持能力对作物生长发育、水分运移等有重要作用。由图4a可知,与第1年相比,土壤田间持水量随耕作年限延长而减小,降幅分别为9.6%(3年)、11.1%(6年)、15.8%(10年)。0~10 cm至30~40 cm田间持水量随时间延长呈逐渐减小趋势。由图4b可知,长期耕作使得土壤持水能力严重降低,土壤的饱和导水率随耕作年限的延长而减少,各土层饱和导水率皆呈先缓慢增大后减小的趋势。饱和导水率最大的是0~10 cm土层,为0.29 mm·min⁻¹,饱和导水率最小的是10~20 cm土层,为0.11 mm·min⁻¹。土壤容重、质地和孔隙分布特征变化导致土壤饱和导水率整体变化趋势为先增大后减小。在第6~9年间,由于大型农机具的广泛应用,耕地土壤遭受了持续碾压,使得耕作层和犁底层之间的状态失

衡,人为加剧了两层土壤导水能力的差异。这种层状土壤水分运动明显区别于均质土壤,主要表现为土壤分层界面处存在毛管障碍,当犁底层渗透能力较弱时,耕地整体土层的渗透率会大幅下降,这不仅减少了水分下渗,还促进了上层水分的储存,进而增大了地表径流。

3 讨论

3.1 长期水耕对土壤物理结构的影响

土壤容重、含水率、孔隙度、水稳性团聚体、黏粒含量等共同体现了土壤的物理结构性能。通常情况下,土壤容重随土层深度增加呈逐渐增大趋势,这是由于土壤容重受到上层土壤的压实作用,随着上层覆土厚度、质量增加土壤颗粒间的间隙越来越小而接触面积增大,使得土壤容重逐渐增大。机械作业时的压实作用会增大土壤容重,加上作物根系对土壤团粒结构的形成和土壤含水量有一定的作用,会形成紧密的结构,导致土层容重增大,本研究发现连续水耕10年后,各土层容重均呈缓慢增大趋势,耕层土壤容重总体在1.11~1.56 g·cm⁻³之间变化,略高于大多数作物生长适宜容重(1.0~1.3 g·cm⁻³)^[28],主要是因为长期水

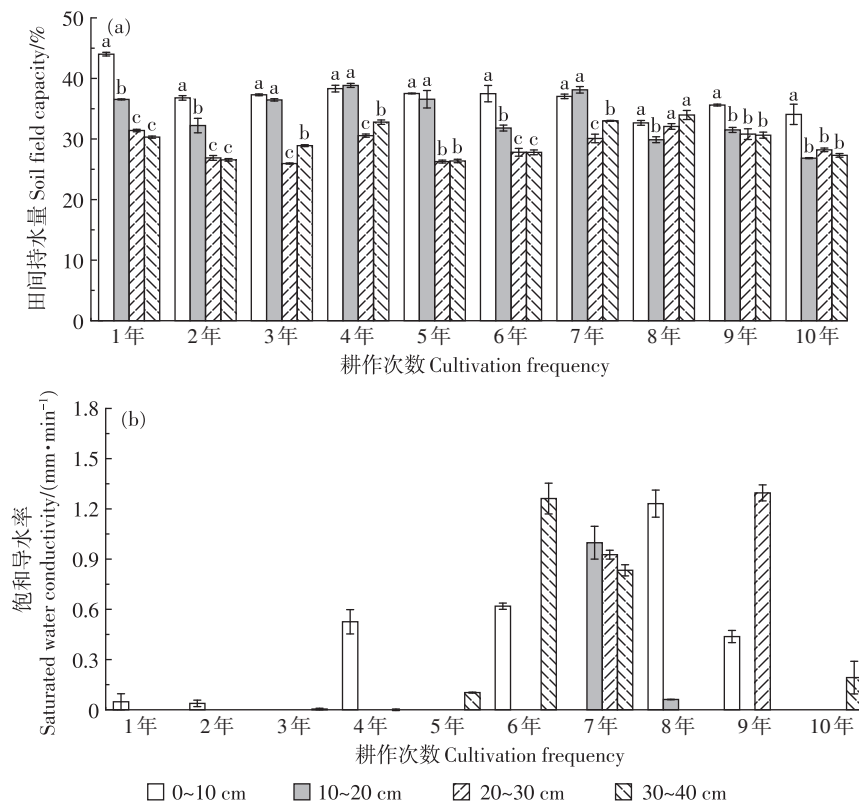


图4 不同水耕年限土壤田间持水量和饱和导水率变化

Figure 4 Changes of soil water holding capacity and saturated water conductivity in different hydroponic years

耕之后土壤的通气性能变差,孔隙度减少^[29],各土层的田间持水量均明显降低,这与张金波等^[30]的研究结果一致。水耕10年后,土壤总孔隙度随土层加深不断变小,总孔隙度均降低,这可能与水淹土壤和土壤颗粒沉降等土壤颗粒运动有关^[31],相关研究发现,免耕可以在一定范围内影响土壤总孔隙度,深松耕作可以显著提高土壤总孔隙度,增加土壤通透性,合理的耕作方式可以改善土壤孔隙情况,使土壤孔隙度在作物生长期保持相对稳定,以便土壤内部的水和气循环系统稳定运转,合理调节土壤蓄持能力^[32-33];0~10、10~20、20~30、30~40 cm土层的毛管孔隙度分别减小7.2%、20.9%、6.8%、6.3%。各土壤耕层毛管孔隙度均减少是因为随着种植年限增加耕层土壤越来越质密,其他土层变化不同可能是受地下水系和取样位置等因素的影响^[34]。各土层土壤饱和和导水率随着耕作年限增加呈下降趋势,任冬雪^[35]对辽河三角洲不同耕作年限水耕土壤研究发现,土壤饱和和导水率整体上随着耕作年限增加呈下降趋势,与本研究结果相同,可能是因为土壤饱和和导水率变化受土壤机械组成、水层覆盖周期等多重因素的影响^[36]。

3.2 长期水耕对土壤颗粒组成的影响

土壤结构是指异质性的土壤颗粒、土壤孔隙的空间排列组合^[37],团聚体在空间的大小分布、排列组合可影响土壤孔隙结构的形成,孔隙度大、连通性好、不规则程度高的孔隙结构可以促进土壤导水导气。土壤团聚体的稳定性和土壤孔隙的稳定性共同促进了土壤结构稳定性的提高。水耕10年后土壤容重、含水量、砂粒含量随土层深度的增加而逐渐增加,黏粒含量随耕作年限的增加逐渐减少,砂粒含量随着耕作年限的增加而增加。各土层颗粒组成均为砂粒含量增加,粉粒和黏粒含量减少,这与机械水耕条件下土壤团聚体分解、随地下水位变化而导致细颗粒运移有关,而潮土性水稻土土壤特性和水稻根系生长发育也有一定影响。MWD越大,表示团聚体的团聚程度越高^[38],反映了土壤团聚体拥有更好的稳定性^[39]。本研究中,随着水耕年限的增加土壤干筛MWD值表现为下降趋势,平均质量直径减小,土壤严重退化。长期水耕的水稻土土壤退化受容重增大,孔隙度、田间持水量、饱和导水率及团聚体含量降低,土壤砂粒含量增加、粉粒含量减少等因素的影响。考虑连续耕作模拟试验和实际种植模式存在一定差异,选择不同种植年限地块实际土壤结构功能变化参数进行验证可作为后期研究的重点。

4 结论

(1)随着耕作年限延长,土壤容重呈逐渐增大趋势,较第1年增幅分别为3.6%(3年)、5.8%(6年)、6.9%(10年)。第10年0~10、10~20、20~30、30~40 cm各土层增幅依次为11.0%、9.0%、2.2%、3.9%。土壤总孔隙度均减低,较第1年降幅分别为3.8%(3年)、5.9%(6年)、7.2%(10年),第10年0~10、10~20、20~30、30~40 cm各土层分别减小9.1%、9.1%、2.8%、4.6%,总孔隙度均减少,说明长期水耕造成砂粒下沉,耕作层有板结趋势。

(2)水耕年限增加对土壤机械组成影响显著,整体来看,较第1年土壤黏粒含量减少含砂量增大,土壤粒径含量基本上表现为粉粒>砂粒>黏粒。土壤结构整体呈退化趋势,具体表现为土壤水稳性团聚体含量下降,较第1年降幅分别为23.4%(3年)、25.8%(6年)、66.2%(10年),说明耕作过程中受到机械压实和翻耕的作用,对土壤结构扰动明显,导致团聚体破碎率变高、土壤结构被破坏。

(3)长期水耕使得土壤物理与水力性质严重退化。土壤质地、容重和孔隙分布特征变化导致土壤蓄持能力随耕作年限增加而降低,土壤田间持水量呈下降趋势,较第1年降幅分别为9.6%(3年)、11.1%(6年)、15.8%(10年),适度深松是合理调节土壤蓄持能力、抵抗季节性干旱的有效措施之一。

(4)总体看来,在连续水耕情况下土壤结构功能在第3年、第6年和第10年有明显退化表征,这表明长期水耕对土壤结构稳定性有明显破坏作用,水耕3~4年后宜进行水旱交替耕作,以缓解长期水耕造成的土壤板结等物理退化问题。

参考文献:

- [1] 任利东,王丽,林琳,等.农田土壤机械压实研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):610-626. REN L D, WANG L, LIN L, et al. The progress and prospect of soil compaction by agricultural machinery in arable land: a review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 610-626.
- [2] 卢秉福,周艳丽,耿贵.土壤机械压实与甜菜生长研究进展[J].中国农学通报,2014,30(21):35-39. LU B F, ZHOU Y L, GENG G. Research evolvement on mechanized soil compaction and sugar beet growth[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(21): 35-39.
- [3] DORAN J W, SAFLEY M, PANKHURST C, et al. Defining and assessing soil health and sustainable productivity[M]//PANKHURST C. Biological indicators of soil health walling ford: CAB International, 1997:1-28.

- [4] HERNANZ J L, LÓPEZ R, NAVARRETE L, et al. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 66(2):129-141.
- [5] DEXTER A R. Compression of soil around roots[J]. *Plant and Soil*, 1987, 97(3):401-406.
- [6] AMÉZKETA E. Soil aggregate stability: a review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999, 14(2/3):83-151.
- [7] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4):618-623. PENG X H, ZHANG B, ZHAO Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4):618-623.
- [8] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002:41-61. ZHAO Q G. Temporal and spatial changes, mechanisms, and regulation of soil degradation in the red soil region of eastern China[M]. Beijing: Science Press, 2002:41-61.
- [9] 张瑞豪, 肖洋, 徐金忠, 等. 坡耕地黑土侵蚀沟演变对土壤结构及抗蚀性的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5):69-75. ZHANG R H, XIAO Y, XU J Z, et al. Effect of black soil erosion gully evolution on soil structural features and anti-erodibility in sloping farmland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5):69-75.
- [10] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3):627-643. LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3):627-643.
- [11] 姜军, 赵安珍, 杨聪, 等. 水耕年限对黄棕壤发育的水稻土的表面化学性质的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(6):987-992. JIANG J, ZHAO A Z, YANG C, et al. Effects of cultivation periods on surface chemical properties of paddy soils derived from yellow brown soil[J]. *Soils*, 2011, 43(6):987-992.
- [12] 章明奎, 邱志腾, 毛霞丽. 长期水耕植稻对水稻土耕层质地的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6):249-253. ZHANG M K, QIU Z T, MAO X L. Effect of long-term rice plantation on texture of tillage layer in paddy soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6):249-253.
- [13] 许绣云, 姚贤良, 刘克樱, 等. 长期施用有机物料对红壤性水稻土的物理性质的影响[J]. *土壤*, 1996, 28(2):57-61. XU X Y, YAO X L, LIU K Y, et al. The effect of long-term application of organic materials on the physical properties of red paddy soil[J]. *Soils*, 1996, 28(2):57-61.
- [14] 郭月峰, 祁伟, 姚云峰, 等. 小流域梯田土壤有机碳与土壤物理性质的关系研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4):748-756. GUO Y F, QI W, YAO Y F, et al. Soil organic carbon in small watershed terraces and association with physical properties[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4):748-756.
- [15] 李婧阳, 刘鑫, 王秋菊, 等. 豆麦轮作下连续施肥和麦秸还田对大豆产量及土壤物理性质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(15):151-154. LI J Y, LIU X, WANG Q J, et al. Effect of continuous fertilization and wheat straw returning on soybean yield and soil physical properties under soybean wheat rotation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(15):151-154.
- [16] 李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992:3-7. LI Q K. Paddy soils of China[M]. Beijing: Science Press, 1992:3-7.
- [17] GUO N J, SHI X Z, ZHAO Y C, et al. Environmental and anthropogenic factors driving changes in paddy soil organic matter: a case study in the middle and Lower Yangtze River Plain of China[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(5):926-937.
- [18] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(7):3388-3396. LI Q Q, XU C Y, GENG Z C, et al. Impact of biochar on soil bulk density and aggregates of Lou soil[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7):3388-3396.
- [19] 梁尧, 蔡红光, 杨丽, 等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(1):133-140. LIANG Y, CAI H G, YANG L, et al. Effects of maize stovers returning by mulching or deep tillage on soil organic carbon sequestration in Mollisol[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(1):133-140.
- [20] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2006:19-25. DU S, GAO X Z. Technical specifications for soil analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006:19-25.
- [21] 颜永毫, 郑纪勇, 张兴昌, 等. 生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4):120-124. YAN Y H, ZHENG J Y, ZHANG X C, et al. Impact of biochar addition into typical soils on field capacity in Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):120-124.
- [22] 杨华. 石油烃污染对土壤斥水性、饱和导水率及持水特征的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021:10-13. YANG H. Effects of petroleum hydrocarbon pollution on soil water repellency, saturated water conductivity and water retention characteristics[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021:10-13.
- [23] YU X, FU Y, LU S. Characterization of the pore structure and cementing substances of soil aggregates by a combination of synchrotron radiation X-ray micro-computed tomography and scanning electron microscopy[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(1):66-79.
- [24] 张海林, 秦耀东, 朱文珊. 耕作措施对土壤物理性状的影响[J]. *土壤*, 2003, 35(2):140-144. ZHANG H L, QIN Y D, ZHU W S. Effects of tillage on soil physical properties[J]. *Soils*, 2003, 35(2):140-144.
- [25] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1):340-347. QI Y C, WANG Y Q, LIU J, et al. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1):340-347.
- [26] 陈山, 杨峰, 林杉, 等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5):211-216. CHEN S, YANG F, LIN S, et al. Impact of land use patterns on stability of soil aggregates in red soil region of south China[J]. *Journal of Soil and Water*

- Conservation*, 2012, 26(5):211-216.
- [27] 安婉丽,高灯州,潘婷,等.水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J].环境科学学报,2016,36(5):1833-1840. AN W L, GAO D Z, PAN T, et al. Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5):1833-1840.
- [28] 张喜亭.黑土容重及耕层深度对大豆生长和产量影响的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2017:10-20. ZHANG X T. Effects of black soil bulk density and topsoil depth on growth and yield of soybean[D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2017:10-20.
- [29] 王秋菊,焦峰,刘峰,等.三江平原草甸白浆土种稻后土壤理化性质变化[J].应用生态学报,2018,29(12):4056-4062. WANG Q J, JIAO F, LIU F, et al. Changes of soil physical and chemical properties of albic soil in the meadow of Sanjiang Plain after rice planting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12):4056-4062.
- [30] 张金波,宋长春.三江平原不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].土壤通报,2004,35(3):371-373. ZHANG J B, SONG C C. Effects of different land-use on soil physical-chemical properties in the Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3):371-373.
- [31] 崔月峰,孙国才,郭奥楠,等.秸秆和生物炭还田对冷凉稻区土壤物理性质及pH值的影响[J].江苏农业科学,2020,48(21):255-260. CUI Y F, SUN G C, GUO A N, et al. Effects of straw and biochar on soil physical properties and pH value in cold waterlogged paddy soils[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(21):255-260.
- [32] 马晓明,李丹,雷佳,等.不同降水年型下耕作方式结合覆盖对旱地土壤物理性质和马铃薯产量的影响[J].应用生态学报,2024,35(2):447-456. MA X M, LI D, LEI J, et al. Influence of tillage methods combined with mulching on soil physical properties and potato yield in dry farming area under different precipitation years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(2):447-456.
- [33] 李荣,鄢慧芳,张龙,等.不同耕作措施对宁南地区土壤物理性质及作物产量的影响[J].中国农业科学,2023,56(18):3543-3555. LI R, YAN H F, ZHANG L, et al. Effects of different tillage practices on soil physical properties and crop yield in the region of southern Ningxia[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(18):3543-3555.
- [34] 黎丽娜.长期不同施肥及施肥措施改变后红壤性水稻土孔隙变化特征[D].长沙:湖南农业大学,2020:36-47. LI L N. Pore variation of red paddy soil after long-term different fertilization and revised fertilization measures[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020:36-47.
- [35] 任冬雪.辽河三角洲不同耕作年限水稻田土壤水源涵养差异研究[D].葫芦岛:辽宁工程技术大学,2021:27-32. REN D X. Study on differences of soil water conservation in paddy fields with different cultivation years in Liaohe delta[D]. Huludao: Liaoning Technical University, 2021:27-32.
- [36] 张君,刘日兴,易军,等.不同植稻年限土壤剖面基本性质与水-氮分布的关系[J].土壤,2019,51(6):1188-1195. ZHANG J, LIU M X, YI J, et al. Profile characteristics of soil properties and water/nitrogen distribution in paddy fields with different cultivation years[J]. *Soils*, 2019, 51(6):1188-1195.
- [37] 张斌,许玉芝,李娜,等.土壤团聚结构变化的关键控制过程研究进展[J].土壤与作物,2014,3(2):41-49. ZHANG B, XU Y Z, LI N, et al. Recent development in controlling factors for aggregated soil structure[J]. *Soil and Crop*, 2014, 3(2):41-49.
- [38] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979. ZHOU H, LÜ Y Z, YANG Z C, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9):1973-1979.
- [39] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):129-135. LIU W L, WU J G, FU M J, et al. Effect of different cultivation years on composition and stability of soil aggregate fractions in orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):129-135.