

稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响

房 焕^{1,2} 李 奕³ 周 虎¹ 颜晓元¹ 彭新华¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响, 依托常熟农业生态试验站 25 a 的长期定位试验, 研究秸秆还田对水稻土容重、团聚体分布及稳定性、团聚体有机碳分布和孔隙大小分布的影响。试验设不施肥 (CK)、单施化肥 (NPK)、化肥和半量秸秆还田 (NPKS1)、化肥和全量秸秆还田 (NPKS2) 等处理。采集各小区耕层水稻土, 通过湿筛的方法测定团聚体分布及稳定性, 通过 X 射线 CT 扫描和图像处理得到孔隙结构信息。结果显示, 与 CK 相比, 单施化肥 (NPK) 能显著提高土壤有机碳含量、降低土壤容重, 对团聚体分布及稳定性、大孔隙度 (大于 0.032 mm)、孔隙大小分布没有显著影响。与 NPK 处理相比, 秸秆还田 (NPKS1、NPKS2) 分别使土壤容重降低 14.0% 和 19.4%, 有机碳含量提高 10.0% 和 23.1%, 但是对团聚体分布及稳定性影响不显著; 化肥和半量秸秆还田 (NPKS1) 对大孔隙度和孔隙大小分布没有显著影响, 化肥和全量秸秆还田 (NPKS2) 的大孔隙度 (大于 0.032 mm) 提高了 110.6%, 各当量孔径范围的孔隙度也明显提高 (大于 1.5 mm 除外)。结果表明, 经过 25 a 的秸秆还田, 稻麦轮作区全量秸秆还田能够降低土壤容重, 增加土壤有机碳含量和各级团聚体中有机碳含量, 增大土壤总孔隙度和大孔隙度, 改善水稻土的物理结构; 而半量秸秆还田没有显著改善水稻土的孔隙结构。

关键词: 水稻土; 秸秆还田; 土壤团聚体; 土壤孔隙结构; 显微 CT

中图分类号: S152.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0297-06

Effects of Straw Incorporation on Paddy Soil Structure in Rice – Wheat Rotation System

FANG Huan^{1,2} LI Yi³ ZHOU Hu¹ YAN Xiaoyuan¹ PENG Xinhua¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. School of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The effects of straw incorporation on the structure of a paddy soil in a rice – wheat rotation system were studied. Undisturbed and bulk soil samples were collected from the top layer (0 ~ 10 cm) of a paddy soil in a 25-year long-term field experiment in Changshu Agro-ecological Experimental Station. There were four treatments: no fertilization (CK); balanced chemical fertilization (NPK); incorporation of harvested rice/wheat straw at a moderate rate of 2.25 t dry-weight per hectare per season plus balanced chemical fertilizers (NPKS1); incorporation of harvested rice/wheat straw at a high rate of 4.50 t dry-weight per hectare per season plus balanced chemical fertilizers (NPKS2). Soil aggregate size distribution and stability were determined by wet sieving method. Soil pore size distribution was measured by using X-ray computed tomography and image processing. Compared with the CK treatment, the NPK treatment increased soil organic carbon (SOC) content and decreased soil bulk density significantly, while no significant difference was found for the aggregate size distribution, macroporosity (greater than 0.032 mm) and pore size distribution. Compared with the NPK treatment, straw incorporation treatments, NPKS1 and NPKS2, increased SOC by 10.0% and 23.1%, respectively, and reduced soil bulk density by 14.0% and 19.4%, respectively. Soil aggregate size distribution and water stability was not affected by straw incorporation. The macroporosity (greater than 0.032 mm) and pore size

收稿日期: 2017-08-26 修回日期: 2017-11-14
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300906)、国家自然科学基金项目(41471183)和江苏省自然科学基金项目(BK20141512)
作者简介: 房焕(1989—), 女, 博士生, 主要从事土壤结构研究, E-mail: hfang@issas.ac.cn
通信作者: 彭新华(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤结构和水文过程研究, E-mail: xhpeng@issas.ac.cn

distribution of NPKS1 were not significantly different from the NPK treatment. However, the macroporosity (greater than 0.032 mm) of NPKS2 was 110.6% greater than that of the NPK treatment. In the rice – wheat rotation system, incorporation of total harvested rice/wheat straw plus balanced chemical fertilizers could improve soil physical structure by decreasing soil bulk density, increasing organic carbon content of bulk soil and each size fraction, increasing total porosity and macroporosity. While incorporation of total harvested rice/wheat straw plus balanced chemical fertilizers did not improve soil physical properties significantly.

Key words: paddy soil; straw incorporation; soil aggregates; soil pore structure; micro-CT

0 引言

土壤结构控制着土壤中水、气运动和养分的释放与保持,对作物的生长具有重要作用^[1]。近年来,我国水稻种植区普遍进行秸秆还田。大量研究表明秸秆还田有助于改善土壤结构。YAO 等^[2]发现稻田秸秆还田能够增加耕层有机碳含量,并改善干湿交替过程中土壤的恢复力。武际等^[3]发现水旱轮作条件下秸秆还田能够降低表层土壤的容重,提高表层土壤的含水率、有机碳和养分含量。然而,也有一些研究表明秸秆还田在不同情况下对土壤结构的影响不同。例如安婉丽等^[4]报道秸秆还田对早稻田的团聚体分布及稳定性没有显著影响,但显著提高了晚稻田的团聚体稳定性及大团聚体的数量。张翰林等^[5]研究发现稻麦轮作制度下土壤结构与秸秆还田的年限有关,随着秸秆还田时间的增加,秸秆还田对土壤结构的影响才显现出来。总体而言,稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响尚不明确。

以往对土壤结构的研究主要集中在团聚体及其稳定性方面,而对土壤内部孔隙结构的直接研究较少^[6]。近年来 X 射线计算机断层扫描(CT)技术快速发展,可以通过 CT 扫描和图像处理技术快速分析土壤内部形态和三维孔隙结构^[7]。本研究基于长江中下游稻麦轮作区长期定位秸秆还田试验,利用 X 射线 CT 扫描等技术,研究稻麦轮作下秸秆还田对水稻土结构的影响,以期为该区域采取合理的秸秆还田措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

长期定位试验田位于中国科学院常熟生态试验站(31°32'93" N, 120°41'88" E)。土壤为黄土状母质发育的黄泥土,属潜育型水稻土。土壤砂粒、粉粒和粘粒比例分别为 29.8%、39.1% 和 31.1%。种植制度为小麦-水稻轮作。试验始于 1990 年,设置 4 个处理:①秸秆不还田不施肥(CK)。②秸秆不还田施氮磷钾肥(NPK)。③半量秸秆还田加氮磷钾肥

(NPKS1),秸秆施用量为每季干重 2 250 kg/hm²。④全量秸秆还田加氮磷钾肥(NPKS2),秸秆施用量为每季干重 4 500 kg/hm²。每个处理 3 个重复,随机区组排列。小区大小为 4 m × 5 m。氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。氮肥施用量为每季 180 kg/hm²,在水稻季,40% 作基肥,40% 分蘖期施用,20% 抽穗期施用;在小麦季,40% 作基肥,40% 拔节期施用,20% 抽穗期施用。磷肥和钾肥每季的施用量分别为 75 kg/hm² P₂O₅ 和 150 kg/hm² K₂O,均在小麦和水稻种植前作为基肥。

1.2 样品采集与处理

于 2015 年 7 月水稻分蘖期采集土壤样品。在每个小区内用 PVC 环刀(高 3 cm、直径 3 cm)随机采集 3 个表层(0 ~ 5 cm)原状土样,用保鲜膜包裹防止水分蒸发。并在原状土采集点附近采集混合土壤样品(0 ~ 10 cm),混合后放在铝盒中带回实验室。原状土置于压力膜仪中,保持 33 kPa,平衡后进行 CT 扫描。混合土壤样品在 20℃ 下风干,在含水率达到塑限含水率时,将土样掰成小于 10 mm 的团聚体。风干土样一部分用于土壤团聚体分析,一部分过筛用于土壤理化性质测定。

1.3 CT 扫描与图像处理

利用 X 射线显微 CT(型号为 NanotomS)扫描原状土样品,扫描参数设置和图像重建参照文献[8]方法。重建后生成 1 900 幅 2 283 × 2 284 体元的 8 位灰度图像,分辨率为 0.016 mm。为了避免采样过程对样品边缘的影响,仅选择中部的 900 × 900 × 900 体元作为感兴趣区域(Region of interest, ROI)。利用 Image J 软件进行图像预处理,包括增加对比度和中值滤波。由于后续图像分析过程中硬件软件等条件限制,利用 Image J 软件将 ROI 图像分辨率调整为 0.032 mm,最终 ROI 为 450 × 450 × 450 体元,实际大小为 14.4 mm × 14.4 mm × 14.4 mm。赵玥等^[9]的研究表明图像分割时阈值选择不理想易导致孔隙连通性失真,克里格法^[10]能够很好解决这个问题,得到更精确的二值图像。图像孔隙度为二值图像中孔隙所占的比例,孔隙大小分布利用数学形态学的开运算计算,通过 Quantim 软件完成^[11]。

1.4 土壤容重、团聚体分布、稳定性与有机碳含量

CT 扫描后的原状土在 105℃ 下干燥,计算土壤容重。团聚体稳定性采用湿筛法。将小于 10 mm 的团聚体在 40℃ 干燥箱中干燥,取 20 g 土样快速湿润 10 min 后,放置在套筛上(从上到下顺序为 2、1、0.5、0.25、0.05 mm),振荡 5 min。上下振幅 4 cm,频率为 30 r/min。然后将各级团聚体全部冲洗至已知质量的铝盒中,小于 0.05 mm 的团聚体则通过沉降获得。将收集到的各级团聚体在 40℃ 干燥箱中干燥,计算平均质量直径 (Mean weight diameter, MWD)

$$M = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} m_i \tag{1}$$

式中 n ——筛子的个数
 r_i ——第 i 个筛子孔径,mm
 m_i ——第 i 个筛子上的团聚体质量百分比
用来表示团聚体稳定性。每个处理 3 次重复。

使用碳氮分析仪 (Vario MAX 型,Elementar 公司,德国)测定收集的各级团聚体和混合土样的有机碳 (SOC) 含量。

1.5 统计分析

采用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析。方差分析采用 One – Way ANOVA,并用 LSD 法进行多重比较,显著性水平为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 秸秆还田对水稻土容重和有机碳 (SOC) 含量的影响

施用化肥和秸秆还田显著提高了有机碳含量 ($P < 0.05$) (表 1)。与 CK 相比,NPK 处理 SOC 含量提高了 19%;与 NPK 相比,半量 (NPKS1) 和全量 (NPKS2) 秸秆还田处理 SOC 含量分别提高了 9.5% 和 19.4%。结果表明,秸秆与氮磷钾配合施用更利于 SOC 含量的积累,秸秆还田量与有机质增加量呈正相关关系,大量相关研究也证实了这一点。YAO 等^[2]在对红壤性水稻土的研究中发现,在深耕和浅耕方式下,秸秆还田都能显著提高 SOC 含量,且全量秸秆还田较部分秸秆还田的提高效果更为显著。LIU 等^[12]研究也发现淹水、水旱轮作以及旱地等不同耕作制度下,秸秆还田均能显著提高 SOC 含量。秸秆本身是一个重要的碳源^[13],因此秸秆还田会直接导致 SOC 含量的增加。另一方面,农作物的秸秆中含有相当数量的植物必需的碳、氮、磷、钾等元素^[14],进而提高农作物的地上地下生物量,间接增加了土壤中碳的投入。有研究还表明,秸秆还田增加了土壤中酶的活性,刺激了土壤中微生物的生长

表 1 长期秸秆还田对土壤有机碳含量和容重的影响
Tab.1 Effect of long-term rice straw incorporation on soil organic carbon content and bulk density

处理	有机碳质量比/(g·kg ⁻¹)	容重/(g·cm ⁻³)
CK	(22.5 ± 0.04) ^d	(1.29 ± 0.03) ^a
NPK	(26.0 ± 0.03) ^c	(1.10 ± 0.02) ^b
NPKS1	(28.6 ± 0.05) ^b	(1.11 ± 0.02) ^b
NPKS2	(32.0 ± 0.06) ^a	(1.04 ± 0.02) ^c

注:同一列中不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$),数值采用均值 ± 标准误差表示,下同。

和繁殖,能够提高土壤中活性碳的含量^[15]。

施用化肥和秸秆还田显著降低了土壤容重 ($P < 0.05$) (表 1)。与 CK 相比,NPK 处理显著降低了土壤容重 ($P < 0.05$)。与 NPK 相比,NPKS2 显著降低了土壤容重 ($P < 0.05$),而 NPKS1 对容重的影响不显著 ($P > 0.05$)。结果表明秸秆还田的量是影响土壤容重的一个重要因素。ZHOU 等^[8]利用 CT 扫描方法证实了有机物料的添加能够增加团聚体内部以及团聚体之间的孔隙,从而降低容重。秸秆还田后,秸秆分解会形成孔隙;此外,秸秆还田会增加地下根系和土壤生物的活动,都会促进孔隙的形成,增加土壤孔隙度,降低土壤容重^[16]。

2.2 秸秆还田对水稻土水稳性团聚体的影响

不同处理各级水稳性团聚体含量如表 2 所示。与 CK 相比,NPK 处理 0.25 ~ 2 mm 团聚体含量提高了 20.6%;而与 NPK 处理相比,NPKS2 处理大于 2 mm 团聚体含量提高了 45.1%,但是不同处理各级团聚体含量均未达到显著性差异 ($P > 0.05$)。CK、NPK、NPKS1 和 NPKS2 处理的 MWD 分别为 0.82、0.83、0.80、1.02 mm,虽然 NPKS2 处理 MWD 较其他处理有所提高,但没有达到显著性水平。结果表明,稻麦轮作区秸秆还田对团聚体分布和水稳性没有产生显著影响。许多研究表明秸秆还田能够提高团聚体的水稳性^[2,17-18],与本研究结果不一致。ZHANG 等^[18]的研究表明秸秆还田量是影响土壤结构的一个重要因素,本研究中半量秸秆还田同化肥处理团聚体水稳性没有差异,而全量秸秆还田下团聚体水稳性则有所提高,表明秸秆还田量是影响团聚体稳定性效果的重要因素。另外,土壤结构是动态变化的,安婉丽等^[4]研究发现秸秆还田对早稻田团聚体稳定性没有显著影响,但显著提高了晚稻田团聚体稳定性。本研究中仅在水稻分蘖期采集了一次样品,为了更准确地评价秸秆还田对土壤结构的影响,今后需要开展团聚体水稳性的动态研究。

2.3 秸秆还田对水稻土团聚体有机碳分布的影响

经过 25 a 秸秆还田后,不同处理的团聚体 SOC

表 2 长期秸秆还田对各级水稳性团聚体比例的影响

处理	团聚体大小				平均质量直径/mm
	> 2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.05 ~ 0.25 mm	0 ~ 0.05 mm	
CK	(0.15 ± 0.04) ^a	(0.38 ± 0.03) ^a	(0.10 ± 0.02) ^a	(0.36 ± 0.01) ^a	(0.82 ± 0.19) ^a
NPK	(0.14 ± 0.02) ^a	(0.46 ± 0.04) ^a	(0.11 ± 0.02) ^a	(0.29 ± 0.05) ^a	(0.83 ± 0.14) ^a
NPKS1	(0.13 ± 0.02) ^a	(0.45 ± 0.02) ^a	(0.13 ± 0.02) ^a	(0.29 ± 0.01) ^a	(0.80 ± 0.13) ^a
NPKS2	(0.21 ± 0.04) ^a	(0.38 ± 0.01) ^a	(0.08 ± 0.01) ^a	(0.33 ± 0.07) ^a	(1.02 ± 0.29) ^a

含量呈现相同的趋势,由大到小为 NPKS2、NPKS1、NPK、CK(图 1)。与 CK 相比,NPK 处理大于 2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 两个级别的团聚体 SOC 含量分别提高了 16.6% 和 15.8%,而小于 0.25 mm 的 2 个粒级则没有显著变化 ($P > 0.05$)。与 NPK 处理相比,NPKS1 处理 0.05 ~ 0.25 mm 团聚体 SOC 含量提高了 15.8%,其他粒级没有显著变化 ($P > 0.05$);NPKS2 处理 0.25 ~ 2 mm 级别的团聚体的有机碳含量提高 20.2%,增加幅度最大。结果表明,秸秆还田措施下,增加的有机碳在大团聚体中积聚得最多。这可能是由于在团聚体周转的过程中,微团聚体(小于 0.25 mm)结构相对稳定,有机碳含量变化较小,而在添加的秸秆作用下形成的大团聚体对有机质形成物理保护,容易固持 SOC。整体来看,不同处理各粒级团聚体中 SOC 含量与土壤总 SOC 含量呈相同的趋势(表 1)。秸秆还田能够有效提高土壤 SOC 含量和各级团聚体 SOC 含量^[19],而大团聚体 SOC 含量增加幅度又高于微团聚体。陈晓芬等^[20]在对红壤性水稻土的研究中也发现了同样的规律,提出水稳性大团聚体是有机碳的主要载体。JASTROW 等^[21]利用¹³C 示踪法也证实了大团聚体比微团聚体含有更多的有机碳。

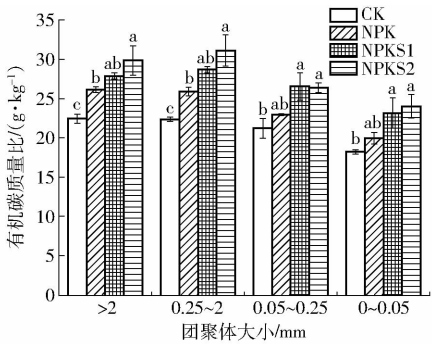


图 1 长期秸秆还田对各粒级团聚体中有机碳分布的影响

Fig.1 Effect of long-term rice straw incorporation on SOC of different aggregate classes

2.4 秸秆还田对水稻土孔隙结构的影响

图 2 为不同处理的二维灰度图像 (14.4 mm × 14.4 mm)、二值图像 (14.4 mm × 14.4 mm) 和三维孔隙结构图像 (14.4 mm × 14.4 mm × 14.4 mm)。其

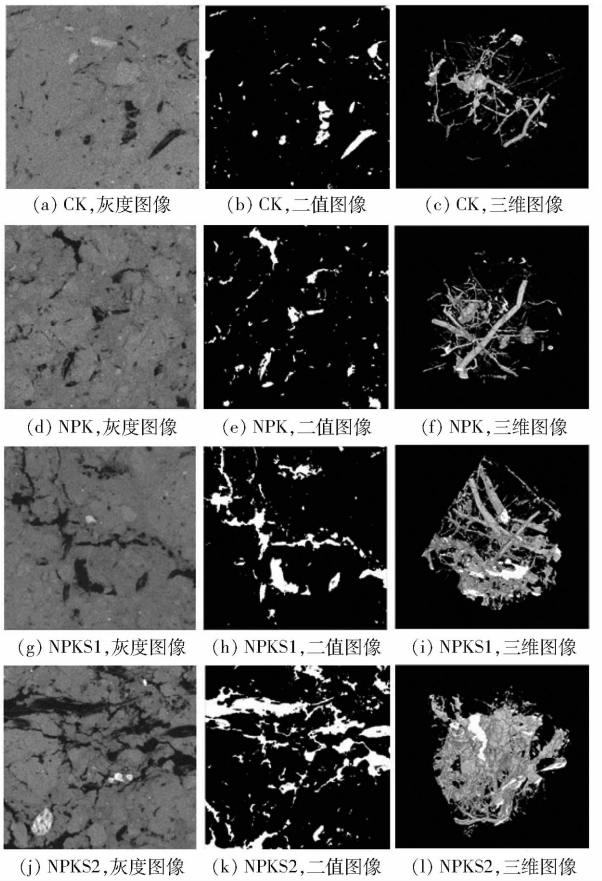


图 2 长期秸秆还田对水稻土二维和三维结构的影响
Fig.2 Effect of long-term rice straw incorporation on 2D and 3D structures of paddy soil

中,灰度图中浅色部分为土壤基质,深色部分为孔隙;二值图像中白色代表孔隙,黑色代表土壤基质。由于分辨率的限制(0.032 mm),本研究中的图像中获取的孔隙均为大于图像分辨率的孔隙。从二维图像可以观察到 CK 和 NPK 处理的孔隙数量少,且孔隙较小。NPKS1 处理的孔隙数量相对增多,孔隙的大小有一定增加。NPKS2 处理的孔隙度则是显著提高,且孔隙的联通性较好,较大孔隙的比例也大幅度提升。从三维图像来看,CK 处理的内部孔隙较少,且多为细长的孔隙;与 CK 处理相比,NPK 的孔隙度有所提高,且孔隙直径有所增大;NPKS1 处理可明显看到内部秸秆残留产生的大孔隙以及生物孔隙,NPKS2 的孔隙则更多更复杂。由此可见,秸秆还田显著影响了土壤的孔

隙结构,秸秆还田量越多,孔隙度增大越显著,孔隙结构越复杂。

定量分析结果同定性观察趋势相一致,CK、NPK、NPKS1 和 NPKS2 处理大孔隙度分别为 3.3%、3.7%、4.4% 和 7.9%。与 CK 相比,NPK 处理没有显著提高土壤的大孔隙度。与单施化肥相比,NPKS1 没有显著提高土壤的大孔隙度,NPKS2 处理的大孔隙度则提高了 113.5%。土壤孔隙大小分布如图 3 所示,随着当量孔隙直径的增大,4 个处理的孔隙度的变化趋势大体一致,均在当量孔径为 0.1~0.2 mm 时达到峰值,60% 以上的孔隙分布在 0.032~0.5 mm 之间。对于当量孔径小于 1.50 mm 的各粒级的孔隙度,NPK 处理与 CK 相比没有表现出显著差异;与 NPK 处理相比,NPKS1 没有表现显著差异,而 NPKS2 处理的孔隙度在各当量孔径范围都有显著提高。当当量孔径大于 1.50 mm 时,孔隙度从大到小表现为 NPKS1、NPKS2、CK、NPK。总体来说,与 CK 相比,NPK 不能提高土壤各粒级孔隙的孔隙度;与 NPK 相比,NPKS1 处理各孔径范围的孔隙度虽然也有所增加,但并没有达到显著水平,而全量 NPKS2 显著提高了各个孔径范围的孔隙度。全量秸秆还田显著提高了有机碳含量,促进微生物和真菌活动,同时也促进了根系生长,使土壤大孔隙度显著提高^[22]。结果表明秸秆还田能够改善土壤的大孔隙结构,但是需要秸秆还田达到一定量时才有显著效果,研究结果与相关研究基本一致^[23-24]。

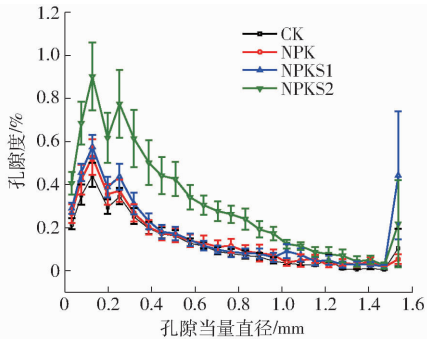


图 3 长期秸秆还田对孔隙大小分布的影响

Fig. 3 Effect of long-term rice straw incorporation on soil pore size distribution

3 结束语

基于 25 a 的长期定位试验,分析了稻麦轮作模式下秸秆还田对土壤结构的影响。结果表明,稻麦轮作区秸秆还田能够显著提高土壤有机碳含量,降低土壤容重,增大土壤总孔隙度。秸秆还田增加大团聚体含量和水稳定性,但是未达到显著水平。不过,秸秆还田显著提高了各级团聚体中有机碳的含量,尤其是大团聚体中有机碳含量。全量秸秆还田显著增大了土壤的大孔隙度,改善了土壤的孔隙结构,而半量秸秆还田对孔隙结构的影响则不显著,说明秸秆还田量是影响水稻土孔隙结构的一个重要因素,秸秆还田量与孔隙结构之间的定量关系还有待进一步研究。研究结果对农业生产中采取合理的秸秆还田措施具有一定的参考价值。

参 考 文 献

1 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3):415-421.
WANG Q K, WANG S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influence factors [J]. Chinese Journal of Soil Science,2005, 36(3):415-421. (in Chinese)

2 YAO S H, TENG X L, ZHANG B. Effects of rice straw incorporation and tillage depth on soil puddle ability and mechanical properties during rice growth period [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 125-132.

3 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等. 水旱轮作制下连续秸秆覆盖对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 587-594.
WU J, GUO X S, LU J W, et al. Effects of continuous straw mulching on soil physical and chemical properties and crop yields in paddy-upland rotation system [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2012, 18(3): 587-594. (in Chinese)

4 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. (in Chinese)

5 张翰林,郑尧清,何七勇,等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4):216-220.
ZHANG H L, ZHENG X Q, HE Q Y, et al. Effect of years of straw returning on soil aggregates and organic carbon in rice-straw rotation systems [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016, 30(4): 216-220. (in Chinese)

6 李文昭,周虎,陈效民,等. 基于同步辐射显微 CT 研究不同施肥措施下水稻土团聚体微结构特征[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 67-74.
LI W Z, ZHOU H, CHEN X M, et al. Characterization of aggregate microstructures of paddy soils under different patterns of fertilization with synchrotron radiation micro-CT [J]. Acta Pedologica Sinica,2014, 51(1): 67-74. (in Chinese)

7 周虎,李文昭,张中彬,等. 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构[J]. 土壤学报, 2013, 50(6):1226-1230.

- ZHOU H, LI W Z, ZHANG Z B, et al. Characterization of multi-scale soil structure with X-ray computed tomography [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6): 1226 – 1230. (in Chinese)
- 8 ZHOU H, FANG H, MOONEY S J, et al. Effects of long-term inorganic and organic fertilizations on the soil micro and macro structures of rice paddies [J]. *Geoderma*, 2016, 266: 66 – 74.
- 9 赵玥, 韩巧玲, 赵燕东. 基于 CT 扫描技术的土壤孔隙定量表达优化 [J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 252 – 259. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171031&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.031.
- ZHAO Y, HAN Q L, ZHAO Y D. Optimization of soil pore quantitative expression based on computed tomography scanning technology [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 252 – 259. (in Chinese)
- 10 OH W, LINDQUIST B. Image thresholding by indicator kriging [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(7): 590 – 602.
- 11 SCHLUTER S, WELLERU, VOGEL H J. Soil-structure development including seasonal dynamics in a long-term fertilization experiment [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(3): 395 – 403.
- 12 LIU S L, HUANG D Y, CHEN A L, et al. Differential responses of crop yields and soil organic carbon stock to fertilization and rice straw incorporation in three cropping systems in the subtropics [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 184: 51 – 58.
- 13 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 526 – 535.
- PAN J L, DAI W A, SHANG Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 526 – 535. (in Chinese)
- 14 SAOTHONGNOI V, AMKHA S, INUBUSHI K, et al. Effect of rice straw incorporation on soil properties and rice yield [J]. *Thai Journal of Agricultural Science*, 2014, 47(1): 7 – 12.
- 15 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量, 酶活性及产量的短期效应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 371 – 377.
- HU N J, HAN X Z, YANG M F, et al. Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 371 – 377. (in Chinese)
- 16 MOHAMMED N, MOLDRUP P, VOGEL H, et al. Impact of long-term fertilization practice on soil structure evolution [J]. *Geoderma*, 2014, 217: 181 – 189.
- 17 ZHANG J, BO G, ZHANG Z, et al. Effects of straw incorporation on soil nutrients, enzymes, and aggregate stability in tobacco fields of China [J]. *Sustainability*, 2016, 8(8): 710.
- 18 ZHANG P, WEI T, JIA Z K, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China [J]. *Geoderma*, 2014, 230: 41 – 49.
- 19 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 48 – 51.
- LIU S P, NIE X T, ZHANG H C, et al. Effects of tillage and straw returning on soil fertility and grain yield in a wheat-rice double cropping system [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 48 – 51. (in Chinese)
- 20 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳, 氮分布和微生物生物量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 950 – 960.
- CHEN X F, LI Z P, LIU M, et al. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5): 950 – 960. (in Chinese)
- 21 JASTROW J, MILLER R, BOUTTON T. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(3): 801 – 807.
- 22 HAYNES R J, NAIDU R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(2): 123 – 137.
- 23 丁奠元, 冯浩, 赵英, 等. 氨化秸秆还田对土壤孔隙结构的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 650 – 658.
- DING D Y, FENG H, ZHAO Y, et al. Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 650 – 658. (in Chinese)
- 24 李凤博, 牛永志, 高文玲, 等. 耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤理化性质及其产量的影响 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(3): 549 – 552.
- LI F B, NIU Y Z, GAO W L, et al. Effects of tillage styles and straw return on soil properties and crop yields in direct seeding rice [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 549 – 552. (in Chinese)