

DOI: 10.11766/trxb202004090091

张顺涛, 任涛, 周椽棋, 方娅婷, 廖世鹏, 丛日环, 鲁剑巍. 油/麦-稻轮作和施肥对土壤养分及团聚体碳氮分布的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 194–205.

ZHANG Shuntao, REN Tao, ZHOU Xiangqi, FANG Yating, LIAO Shipeng, CONG Rihuan, LU Jianwei. Effects of Rapeseed/Wheat-Rice Rotation and Fertilization on Soil Nutrients and Distribution of Aggregate Carbon and Nitrogen[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 194–205.

油/麦-稻轮作和施肥对土壤养分及团聚体碳氮分布的影响*

张顺涛, 任涛, 周椽棋, 方娅婷, 廖世鹏, 丛日环, 鲁剑巍[†]

(华中农业大学微量元素研究中心/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 通过田间定位试验探究油菜-水稻与小麦-水稻轮作在不同施肥措施下的土壤养分及团聚体碳氮分布差异, 为长江中游油菜交错区水旱轮作模式选择及培肥地力提供依据。利用湖北沙洋的定位试验, 选择油-稻和麦-稻轮作的不施肥 (CK)、施用化肥 (NPK)、化肥与秸秆还田相结合 (NPK+S) 3 个处理, 在试验布置的第 4 年于油菜和小麦收获后取 0~20 cm 土壤样品, 测定土壤有机质和氮磷钾养分含量、孔隙度、团聚体分布和稳定性、团聚体有机碳和全氮贡献率等指标。结果表明: (1) 与麦-稻轮作相比, 油-稻轮作土壤有机质和有效磷含量在各施肥处理中分别提高了 13.1%~19.2% 和 18.8%~59.5%, 土壤全氮含量在秸秆不还田时提高了 28.1% (CK 处理) 和 29.2% (NPK 处理); (2) 秸秆不还田时, 油-稻轮作土壤总孔隙度较麦-稻轮作显著提高了 8.1% (CK 处理) 和 10.3% (NPK 处理), 相应的毛管孔隙度分别提高了 11.7% 和 10.5%; (3) 与麦-稻轮作相比, 油-稻轮作土壤团聚体的平均重量直径 (MWD)、平均几何直径 (GMD) 和大团聚体含量 (WSMA) 在各施肥处理中均显著提高, 且提高了大团聚体有机碳和全氮贡献率; (4) 在相同轮作模式中, 土壤有机质和养分含量均表现为: CK<NPK<NPK+S, NPK 和 NPK+S 处理的土壤团聚体稳定性及大团聚体有机碳和全氮贡献率显著高于 CK 处理; (5) 在麦-稻轮作中, NPK+S 处理的土壤总孔隙度和毛管孔隙度显著高于 CK 和 NPK 处理, 油-稻轮作中不同施肥处理的土壤孔隙度无显著差异。上述结果显示, 油-稻轮作和化肥结合秸秆还田均可改善土壤养分含量及团聚体碳氮分布等理化性质, 是实现稻田可持续发展的重要措施。

关键词: 长江中游油菜交错区; 油-稻轮作; 麦-稻轮作; 秸秆还田; 施肥; 土壤理化特性

中图分类号: S158.3 **文献标志码:** A

Effects of Rapeseed/Wheat-Rice Rotation and Fertilization on Soil Nutrients and Distribution of Aggregate Carbon and Nitrogen

ZHANG Shuntao, REN Tao, ZHOU Xiangqi, FANG Yating, LIAO Shipeng, CONG Rihuan, LU Jianwei[†]

(Microelements Research Center of Huazhong Agricultural University/ Key Laboratory of Arable Land Conservation in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

* 国家油菜产业技术体系建设专项 (CARS-12) 资助 Supported by the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (No. CARS-12)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 张顺涛 (1995—), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: zhangst@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2020-04-09; 收到修改稿日期: 2020-07-23; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-10-20

Abstract: 【Objective】 In China, upland-paddy rotation systems are mainly distributed in the Yangtze River Basin, with rapeseed-rice (RR) and wheat-rice (WR) rotations being the main systems. It was noticed that rice productivity varied with the rotation system. Therefore, a long-term experiment, designed to have different treatments concerning rotation system and fertilization pattern, was carried out. The study aimed to explore differences in soil nutrients and distribution of aggregate carbon and nitrogen between RR and WR rotations and between different fertilization methods. It is hoped that the study may providing a scientific basis for optimizing the paddy-upland rotation systems and the fertilization methods as well in the rapeseed-wheat interlaced area of the middle reaches of the Yangtze River. 【Method】 The field experiment was designed to have two treatments in rotation system (i.e., RR and WR) and three treatments in fertilization, i.e., CK (no fertilization), NPK (chemical fertilization), and NPK+S (chemical fertilization combined with straw returning). Soil samples were collected from the 0-20cm soil layer of each treatment after harvest of the upland crops of the fourth year for analysis of physical and chemical properties, such as soil organic matter, nutrient content, porosity, distribution and stability of soil aggregates, and contribution rate of soil aggregate organic carbon and nitrogen to the soil total. 【Result】 Compared with WR, RR was 13.1%-19.2% and 18.8%-59.5% higher in content of soil organic matter and available phosphorus when fertilized. Treatment NPK+S was 28.1% than CK and 29.2% higher than Treatment NPK in content of soil total nitrogen. In the group of Treatment NPK, Treatment RR was significantly or 8.1% (in CK) and 10.3% (in Treatment NPK) higher and 11.7% and 10.5%, respectively, higher than Treatment WR in total porosity and capillary porosity. In the group of fertilization treatments (either NPK or NPK+S), Treatment WR was significantly higher than Treatment RR in mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the water-stable soil aggregates and content of water-stable macroaggregate (WSMA), and in contribution rate of large-sized soil aggregates to total organic carbon and total nitrogen as well. In terms of soil organic matter and nutrient contents the fertilization treatments displayed an order of CK < NPK < NPK+S, and Treatments NPK and NPK+S were significantly higher than CK in soil aggregate stability and contribution rate of large-sized aggregates to total organic carbon and total nitrogen, regardless of rotation patterns. In the group of Treatment WR, Treatment NPK + S was significantly higher than CK and NPK in soil total porosity and capillary porosity, while in the group of Treatment RR, no significant difference was observed in soil porosity between different fertilizer treatments. 【Conclusion】 All the findings show that under the rapeseed-rice rotation system, application of chemical fertilizer combined with straw returning can increase contents of soil organic matter and soil nutrients, improve bulk density and porosity of the soil, and stabilize soil aggregate structure. Hence, the combination of rapeseed-rice rotation and application of NPK coupled with straw returning could be deemed as an important measure to achieve sustainable development of rice fields.

Key words: Rapeseed-wheat interlaced area of the middle reaches of the Yangtze River; Rapeseed-rice rotation; Wheat-rice rotation; Straw returning; Fertilization; Soil physical and chemical properties

在光温条件允许的情况下，周年轮作是提高土地生产力和资源利用率的种植模式，并具有提高生态系统稳定性的作用^[1-2]。水旱轮作是中国、印度和巴基斯坦等亚洲人口大国主要的种植体系，我国水旱轮作模式主要分布于长江流域，以小麦-水稻和油菜-水稻轮作模式为主^[3-4]。其中麦-稻轮作主要分布于江苏、安徽等省的江淮流域，油-稻轮作主要分布在江西、湖南等江南地区，在四川、湖北等地和江苏、安徽的长江流域两种轮作模式并存^[5]。有研究表明，在小麦和油菜交错种植区，两种轮作模式的水稻产量有较大差异，前期朱芸^[6]通过大数据综合比较了长江流域油-稻与麦-稻轮作体系水稻生产力

的差异及两种轮作模式对氮肥的响应，结果表明油-稻轮作水稻产量显著高于麦-稻轮作且在获得同等水稻产量水平下，油-稻轮作表现出更好的节肥效果。马鹏等^[7]的田间试验结果表明油-稻轮作的水稻产量和氮肥利用效率均高于麦-稻轮作。水稻产量差异反映了两轮作模式土壤生产力的差异^[8]。土壤肥力是决定土壤质量的重要因素，直接影响着土壤生产力^[9]。通常将土壤有机质和养分含量等化学性质以及孔隙结构和团聚体稳定性等物理性质作为评价土壤肥力的指标^[10]。

在轮作中，施肥措施也能显著影响土壤理化性质，包耀贤等^[11]研究表明长期平衡施肥能够显著改

善土壤的理化性质。秸秆是重要的可再生资源, 因其含有丰富的矿质养分, 所以秸秆还田是常见的农业利用秸秆方式^[12]。武际等^[13]研究表明, 水旱轮作模式下秸秆还田可改善土壤容重并提高土壤养分含量。前人关于油-稻与麦-稻轮作比较的研究主要集中于水稻产量或经济效益的差异^[14], 而关于轮作间土壤理化特征差异的研究相对较少。为了系统地探究油-稻和麦-稻轮作在不同施肥措施下土壤养分含量及团聚体碳氮分布等物理和化学性质的差异, 本研究利用已经进行了3个轮作周期的不同轮作模式和不同施肥措施的定位试验开展相关研究, 为长江中游油麦交错区水旱轮作模式优化和合理施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

定位试验始于2015年9月, 试验地点为湖北省沙阳县曾集镇张池村(30°43'5"N, 112°18'25"E)。该地区为亚热带季风气候, 年均气温16℃, 年均降水量1100 mm, 无霜期240~270 d。供试土壤类型为黄壤发育的水稻土, 试验前耕层(0~20 cm)土壤理化性质为: pH 6.84, 有机质11.78 g·kg⁻¹, 全氮0.74 g·kg⁻¹, 有效磷5.15 mg·kg⁻¹, 速效钾212.0 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本研究为同田对比定位试验, 试验在一块地力均匀的田块进行。试验采用裂区试验设计, 主处理为不同轮作模式, 分别为油菜-水稻(RR, rapeseed-rice)和小麦-水稻(WR, wheat-rice)轮作。将一块试验田一分为二, 1/2为油-稻轮作, 另1/2为麦-稻轮作。副处理为不同的施肥措施, 分别为不施肥(CK)、施用化肥(NPK)、化肥与秸秆还田相结合(NPK+S)。NPK和NPK+S处理的油菜/小麦季和水稻季化学肥料用量均为N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 60 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²。肥料品种分别为尿素(含N 460 g·kg⁻¹)、过磷酸钙(含P₂O₅ 120 g·kg⁻¹)、氯化钾(含K₂O 600 g·kg⁻¹)。CK和NPK处理的作物秸秆齐地收割后全部移出田块, NPK+S处理的前季作物秸秆原地还田, 油菜/小麦季的秸秆(稻草)采用粉碎覆盖还田的方式, 水稻季的秸秆(油菜/小麦秸秆)采用粉碎翻压还田的方式, 还田量约5 000~6 000 kg·hm⁻²。每个副处理3次重复, 随机

区组排列, 小区面积为25 m²。

油菜采用移栽种植方式, 移栽密度为每公顷11.25万株, 每年10月中旬移栽, 来年5月上旬收获; 小麦采用条播的种植方式, 播种量为225 kg·hm⁻², 每年10月底播种, 来年5月下旬收获; 水稻采用移栽的种植方式, 移栽密度为每公顷21万株, 每年5月下旬移栽, 9月下旬收获。两季作物种植前进行翻耕整地, 试验中其他农事措施(包括病虫害的防治等)均按照推荐方法进行。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品的采集与预处理 在试验进行的第4年即2019年5月油菜和小麦收获后, 每个小区采用五点取样法采集0~20 cm土壤样品, 5个点的土样混合后带回实验室处理。将土样沿自然裂缝掰开并过10 mm筛^[15], 在避光处自然风干。风干后挑去细根和石块后用四分法分为两份, 其中一份研磨过20目和100目筛后用于土壤化学性质的测定, 另一份用于土壤团聚体的测定。

1.3.2 土壤基础化学性质的测定 土壤有机质和全氮采用元素分析仪(Elementar, 德国)进行测定; 有效磷采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用1 mol·L⁻¹ NH₄OAc浸提-火焰光度法进行测定; 土壤pH采用水土比2.5:1, pH计测定^[16]。

1.3.3 土壤孔隙度的测定 同时使用环刀采集各小区5~10 cm土层原状土, 用来测定土壤孔隙度。土壤总孔隙度通过公式计算获得: 总孔隙度/%=(1-容重/比重)×100(土壤容重采用环刀法测定, 本研究中比重取2.65 g·cm⁻³^[17]); 毛管孔隙度采用毛管水的测定方法; 通气孔隙度通过公式计算获得: 通气孔隙度=总孔隙度-毛管孔隙度^[18-19]。

1.3.4 土壤团聚体筛分及有机碳、全氮含量的测定 取风干土壤样品通过孔径为2、0.25、0.053 mm的套筛, 分别称量计算出各级干筛团聚体占土壤总质量的百分率, 并按干筛比例配成50 g的风干土样^[20]。然后根据Elliott^[21]的土壤团聚体湿筛法测定团聚体组成: 将土样放置于自上而下为2、0.25、0.053 mm的套筛上, 先放入水桶中浸泡10 min, 然后在土壤团聚体分析仪上以30 min⁻¹的速度筛分10 min(振幅4 cm)。湿筛结束后将留在各级筛孔上的团聚体洗入铝盒中, 50℃烘干后称量, 计算水稳性团聚体组成。各级团聚体研磨过100目筛后利用元素分析

仪测定有机碳和全氮含量。

1.4 数据处理

土壤团聚体稳定性指标采用平均重量直径 (MWD)、平均几何直径 (GMD)、大团聚体含量 (WSMA) 和微团聚体含量 (WSMiA) 描述。MWD 和 GMD 的值表征了团聚体对水的稳定性, 其值越高团聚体稳定性越强; WSMA 是土壤团聚体结构体, 其数量与土壤肥力状况呈正相关^[22]。计算公式如下^[15, 20]:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n W_i \bar{X}_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i\right) \quad (2)$$

式中, \bar{X}_i 为某级团聚体平均直径 (本研究各级团聚体平均直径取值分别为 2 mm、1.125 mm、0.1515 mm 和 0.053 mm), W_i 为第 i 级团聚体干物质质量占总干物质质量的百分含量。

WSMA (>0.25 mm, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) = 大于 0.25 mm 团聚体的烘干重 (g) \div 50 g \times 10

WSMiA (<0.25 mm, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) = 小于 0.25 mm 团聚体的烘干重 (g) \div 50 g \times 10

某级团聚体有机碳 (全氮) 对土壤总有机碳 (全氮) 的贡献率/% = [该级团聚体中有机碳 (全氮) 含量 / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) \times 该级团聚体含量 / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) \div 1 000 \div 土壤总有机碳 (全氮) 含量 / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)] \times 100。利用该公式计算各级团聚体中有机碳 (全氮) 对土壤总有机碳 (全氮) 的贡献率。

采用 Excel 2016 软件进行数据处理, SPSS 20.0 软件进行统计分析, 利用最小显著性差异 (LSD) 法在 $P \leq 0.05$ 水平进行差异显著性检验, Origin 2017 软件绘图。

2 结果

2.1 不同轮作和施肥措施下土壤养分含量差异

轮作模式和施肥措施对土壤有机质、全氮、有效磷含量均有显著影响, 且两者对土壤全氮含量的影响存在显著交互作用 (表 1)。与麦-稻轮作相比, 油-稻轮作土壤有机质和有效磷含量在各施肥处理

中分别提高了 13.1%~19.2% 和 18.8%~59.5%, 土壤全氮含量在 CK 和 NPK 处理中提高了 28.1%~29.2%, 而 NPK+S 处理的土壤全氮含量两轮作间无显著差异; 轮作间土壤 pH、速效钾含量差异不显著。在相同轮作模式中, 土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量均表现为: CK < NPK < NPK+S, 油-稻轮作中 NPK+S 与 NPK 处理的土壤有机质、全氮和有效磷含量差异不显著; 各施肥处理间的土壤 pH 均无显著差异。

2.2 不同轮作和施肥措施下土壤孔隙度差异

由表 2 可以看出, 轮作模式对土壤总孔隙度和毛管孔隙度有显著影响, 施肥措施对土壤孔隙度无显著影响, 轮作模式和施肥措施对土壤孔隙度有显著的交互作用。与麦-稻轮作相比, 油-稻轮作在秸秆不还田时 (CK 和 NPK 处理) 土壤总孔隙度提高了 8.1%~10.3%, 其中毛管孔隙度提高了 10.5%~11.7%, 在 NPK+S 处理中两轮作模式的土壤孔隙度无显著差异。在麦-稻轮作中, NPK+S 处理的土壤总孔隙度和毛管孔隙度较 CK 和 NPK 处理显著提高; 油-稻轮作中不同施肥措施的土壤孔隙度无显著差异。

2.3 不同轮作和施肥措施下土壤水稳性团聚体分布特征

土壤水稳性团聚体组成结果显示, 供试土壤主要以大于 2 mm 粒径团聚体为主 (图 1)。与麦-稻轮作相比, 油-稻轮作显著提高了大于 2 mm 粒径团聚体的含量, 分别提高了 35.8% (CK 处理)、25.1% (NPK 处理) 和 13.7% (NPK+S 处理), 2~0.25 mm 粒径的团聚体含量则相应降低。NPK 和 NPK+S 处理大于 2 mm 粒径团聚体含量显著高于相同轮作模式中的 CK 处理, 2~0.25 mm 粒径的团聚体含量则相应降低; NPK+S 与 NPK 处理不同粒径团聚体含量在相同轮作模式中无显著差异。

2.4 不同轮作和施肥措施下土壤团聚体稳定性差异

不同处理对土壤水稳性团聚体稳定性的影响如表 3 所示。轮作模式和施肥措施对土壤团聚体稳定性均有显著影响, 但两者对团聚体稳定性的影响无显著交互作用。与麦-稻轮作相比, 油-稻轮作的 MWD、GMD 和 WSMA 在相同施肥措施下分别显著提高了 11.1%~13.0%、18.7%~24.3% 和 4.1%~4.8%, WSMiA 则相应降低。NPK 和 NPK+S 处理的 MWD、GMD 和 WSMA 均显著高于相同轮作模式中的 CK 处理, WSMiA 则相

应降低; NPK+S 与 NPK 处理土壤团聚体稳定性在相同轮作模式中无显著差异。

表 1 轮作和施肥措施对土壤养分含量的影响

Table 1 Effect of the crop rotation and fertilization patterns on soil nutrient contents

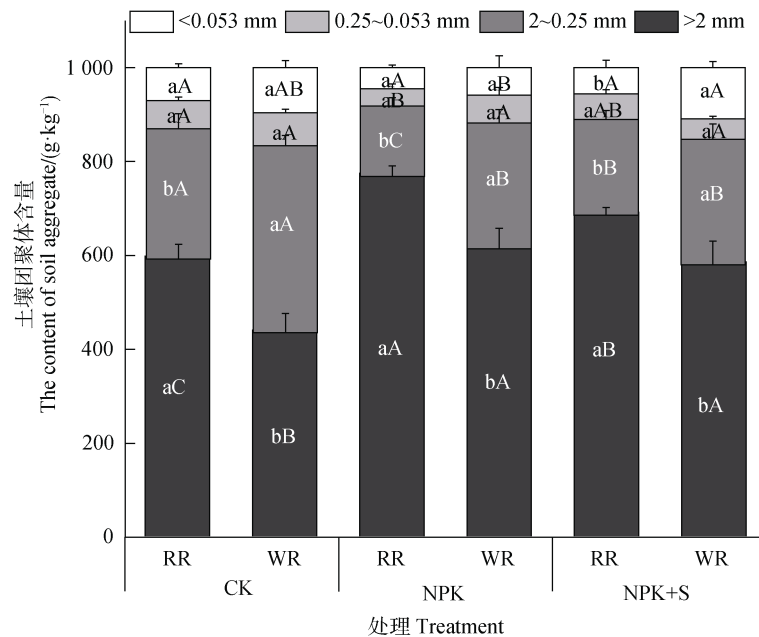
施肥 Fertilization	轮作 Rotation	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)
CK	RR	6.72 aA	16.44 aB	0.73 aB	4.50 aB	244.4 aA
	WR	6.78 aA	14.31 bC	0.57 bC	3.62 bC	236.7 aB
NPK	RR	6.69 aA	19.60 aA	0.84 aA	6.93 aA	224.8 aB
	WR	6.44 aA	16.44 bB	0.65 bB	5.45 bB	230.1 aB
NPK+S	RR	6.70 aA	21.09 aA	0.89 aA	7.23 aA	239.7 aA
	WR	6.70 aA	18.65 aA	0.87 aA	6.57 bA	259.9 aA
方差分析 ANOVA						
轮作 Rotation		ns	*	*	**	ns
施肥 Fertilization		ns	**	**	**	**
轮作×施肥 Rotation × Fertilization		ns	ns	**	ns	ns

注: RR: 油菜-水稻轮作; WR: 小麦-水稻轮作; CK: 不施肥; NPK: 施用化肥; NPK+S: 化肥与秸秆还田相结合。不同小写字母表示相同施肥措施下不同轮作模式间达到显著差异 ($P<0.05$), 不同大写字母表示同一轮作模式下不同施肥措施间达到显著差异 ($P<0.05$)。*和**分别表示处理间差异达到显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 水平, ns 表示差异不显著。下同。Note: RR: rapeseed-rice rotation; WR: wheat-rice rotation; CK: no fertilization; NPK: chemical fertilization; NPK+S: chemical fertilization combined with straw returning. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments different in cropping system, but the same in fertilization pattern ($P<0.05$), and different capital letters indicate significant differences between treatment different in fertilization pattern, but the same in cropping system ($P<0.05$). * And ** indicates that the difference between treatments is significant and extremely significant at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively, and ns indicates no significant difference. The same below.

表 2 轮作和施肥措施对土壤孔隙度的影响

Table 2 Effects of crop rotation and fertilization patterns on soil porosity

施肥 Fertilization	轮作 Rotation	总孔隙度 Total soil porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	通气孔隙度 Aeration porosity/%
CK	RR	54.9 aA	47.8 aA	7.0 aA
	WR	50.8 bB	42.8 bB	8.1 aA
NPK	RR	55.9 aA	48.4 aA	7.6 aA
	WR	50.7 bB	43.8 aB	6.8 aA
NPK+S	RR	55.3 aA	48.7 aA	6.6 aA
	WR	55.2 aA	47.9 aA	7.3 aA
方差分析 ANOVA				
轮作 Rotation		*	*	ns
施肥 Fertilization		ns	ns	ns
轮作×施肥 Rotation × Fertilization		*	*	ns



注：不同小写字母表示相同施肥措施下不同轮作模式间达到显著差异 ($P < 0.05$)，不同大写字母表示同一轮作模式下不同施肥措施间达到显著差异 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments different in cropping system, but the same in fertilization pattern ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant differences between treatments different in fertilization pattern, but the same in cropping system ($P < 0.05$). The same below.

图 1 轮作和施肥措施对土壤水稳性团聚体组成分布的影响

Fig. 1 Effects of crop rotation and fertilization patterns on composition and distribution of soil water-stable aggregates

表 3 轮作和施肥措施对土壤团聚体平均重量直径、平均几何直径、大团聚体及微团聚体含量的影响

Table 3 Effects of crop rotation and fertilization patterns on MWD, GMD, WSMA and WSMiA of soil aggregates

施肥 Fertilization	轮作 Rotation	MWD/mm	GMD/mm	WSMA / (g·kg ⁻¹)	WSMiA / (g·kg ⁻¹)
CK	RR	1.51 aB	1.13 aB	869.7 aB	130.3 bA
	WR	1.34 bB	0.94 bB	833.8 bB	166.2 aA
NPK	RR	1.71 aA	1.42 aA	917.9 aA	82.1 bB
	WR	1.54 bA	1.19 bA	882.1 bA	117.9 aB
NPK+S	RR	1.61 aAB	1.26 aAB	889.5 aAB	110.5 bAB
	WR	1.44 bAB	1.02 bAB	847.8 bAB	152.2 aAB
方差分析 ANOVA					
	轮作 Rotation	**	**	**	**
	施肥 Fertilization	**	**	**	**
	轮作×施肥				
	Rotation × Fertilization	ns	ns	ns	ns

注：MWD：平均重量直径；GMD：平均几何直径；WSMA：大团聚体含量；WSMiA：微团聚体含量。Note: MWD: mean weight diameter; GMD: geometric mean diameter; WSMA: water-stable macroaggregate content; WSMiA: water-stable microaggregate content.

2.5 不同团聚体有机碳含量及贡献率

不同处理团聚体有机碳含量均表现为大于 2 mm 粒径团聚体最高, 粒径越小有机碳含量越低 (表 4)。轮作模式对相同粒径团聚体有机碳含量无显著影响, 不同施肥措施间相同粒径团聚体有机碳含量差异显著。NPK 和 NPK+S 处理大于 2 mm、2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 粒径团聚体有机碳含量显著高于相同轮作模式中的 CK 处理, 而小于 0.053 mm 粒径团聚体有机碳含量无显著差异; NPK 与 NPK+S 处理各粒径团聚体有机碳含量在相同轮作模式中差异不显著。

图 2 为土壤团聚体有机碳贡献率, 可以看出各处理均为大团聚体有机碳贡献率最高。与麦-稻轮作相比, 油-稻轮作大于 2 mm 粒径团聚体有机碳贡献率分别提高了 33.8% (CK 处理)、16.9% (NPK 处理) 和 18.8% (NPK+S 处理), 2~0.25 mm 粒径团聚体有机碳贡献率则相应降低。NPK 和 NPK+S 处理大于 2 mm 粒径团聚体有机碳贡献率显著高于相同轮作模式中的 CK 处理, 2~0.25 mm 粒径团聚体有机碳贡献率则相应降低; NPK 与 NPK+S 处理的各粒径团聚体有机碳贡献率在相同轮作模式中无显著差异。

2.6 不同团聚体全氮含量及贡献率

由表 5 可知, 不同粒径团聚体全氮含量与有机碳含量变化趋势相同, 均以大于 2 mm 粒径团聚体含量最高。轮作模式对各粒径团聚体全氮含量均产生显著影响, 施肥措施主要对大于 2 mm 和 2~0.25 mm 粒径团聚体全氮含量有显著影响, 两者间存在显著交互作用。与麦-稻轮作相比, 油-稻轮作 CK 和 NPK 处理各粒径团聚体全氮含量显著提高, NPK+S 处理各粒径团聚体全氮含量轮作间无显著差异。NPK 和 NPK+S 处理各级团聚体全氮含量均显著高于相同轮作模式中的 CK 处理; 麦-稻轮作中 NPK+S 处理各粒径团聚体全氮含量显著高于 NPK 处理, 油-稻轮作中两处理间无显著差异。

图 3 为土壤团聚体全氮贡献率, 可以看出各处理均为大团聚体全氮贡献率最高。与麦-稻轮作相比, 油-稻轮作不同施肥处理的大于 2 mm 粒径团聚体全氮贡献率提高了 11.0%~26.1%, 2~0.25 mm 粒径团聚体全氮贡献率则相应降低。NPK 和 NPK+S 处理大于 2 mm 粒径团聚体全氮贡献率显著高于相同轮作模式中的 CK 处理, 2~0.25 mm 粒径团聚体全氮贡献率则相应降低; NPK 与 NPK+S 处理的各粒径团聚体全氮贡献率在相同轮作模式中无显著差异。

表 4 轮作和施肥措施对团聚体有机碳含量的影响

Table 4 Effects of crop rotation and fertilization patterns on organic carbon content in aggregates

施肥 Fertilization	轮作 Rotation	有机碳含量 Organic carbon content/ (g·kg ⁻¹)			
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
CK	RR	10.76 aB ^A	9.30 aB ^B	8.26 aA ^C	7.47 aA ^D
	WR	10.30 aB ^A	9.13 aB ^A	8.29 aB ^B	7.19 aA ^B
NPK	RR	12.18 aA ^A	11.27 aA ^A	9.03 aA ^B	7.81 aA ^B
	WR	12.21 aA ^A	9.41 aAB ^B	8.33 aAB ^C	7.91 aA ^C
NPK+S	RR	12.51 aA ^A	10.44 aAB ^B	9.12 aA ^C	7.44 aA ^D
	WR	12.25 aA ^A	11.29 aA ^{AB}	9.95 aA ^{BC}	8.29 aA ^C
方差分析 ANOVA					
轮作 Rotation		ns	ns	ns	ns
施肥 Fertilization		**	*	*	ns
轮作×施肥 Rotation × Fertilization		ns	*	ns	ns

注: 不同上标大写字母表示同一处理不同粒径团聚体间达到显著差异 ($P < 0.05$)。下同。Note: Capital letters with different superscripts indicate significant differences between fractions of soil aggregates different in particle sizes in the same treatment ($P < 0.05$). The same below.

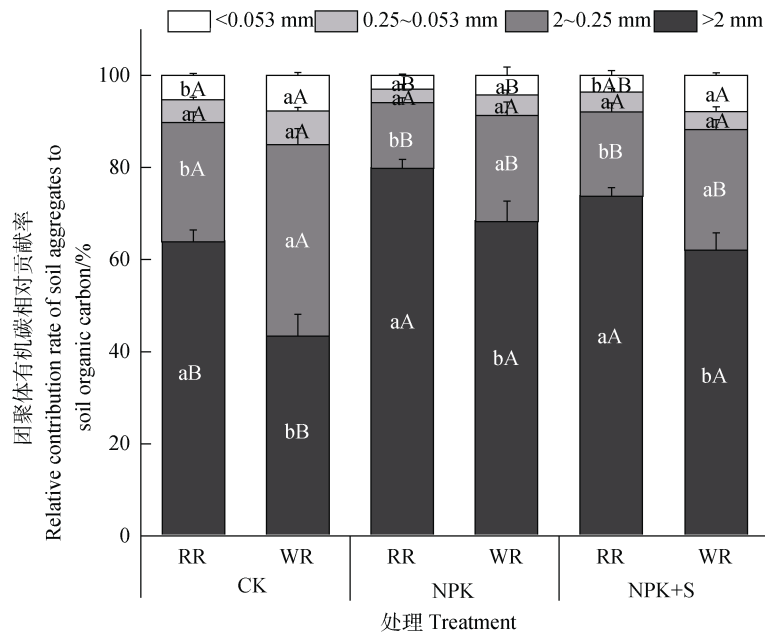


图 2 轮作和施肥措施对团聚体有机碳贡献率的影响

Fig. 2 Effects of crop rotation and fertilization patterns on contribution rate of aggregates to total organic carbon

表 5 轮作和施肥措施对团聚体全氮含量的影响

Table 5 Effects of crop rotation and fertilization patterns on total nitrogen content of aggregates

施肥 Fertilization	轮作 Rotation	全氮含量 Total nitrogen content/ (g·kg ⁻¹)			
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
CK	RR	0.77 aB ^A	0.75 aB ^A	0.73 aB ^A	0.73 aAB ^A
	WR	0.65 aB ^A	0.56 bB ^{AB}	0.55 bA ^{AB}	0.51 bB ^B
NPK	RR	0.98 aA ^A	0.92 aA ^A	0.92 aA ^A	0.80 aA ^A
	WR	0.72 bB ^A	0.59 bB ^B	0.59 bA ^B	0.53 bB ^B
NPK+S	RR	0.88 aAB ^A	0.83 aAB ^{AB}	0.73 aB ^B	0.69 aB ^B
	WR	0.90 aA ^A	0.74 aA ^B	0.67 aA ^B	0.64 aA ^B
方差分析 ANOVA					
	轮作 Rotation	**	**	**	**
	施肥 Fertilization	**	*	ns	ns
	轮作×施肥 Rotation × Fertilization	*	*	*	*

3 讨论

选择在水稻种植前取样可更好地反映油菜或小麦种植及施肥措施对土壤理化性质的影响。结果表明，轮作方式和施肥措施对土壤的理化特性均产生显著影响，本研究结果对于指导油麦交错区优化油

菜作为旱季轮作作物以达到促进粮油稳产兼丰、加强科学施肥、实现秸秆还田保障产量和培肥地力的目标具有重要意义，为国家正在实施的轮作休耕行动提供理论依据。

3.1 油-稻轮作可提高土壤有机质含量

土壤有机质是土壤肥力的重要指标，可影响土壤养分含量和生产力，改善土壤物理结构等^[23]。本

研究结果表明,油-稻轮作的土壤有机质和全氮含量显著高于麦-稻轮作(表1),这可能是由于油菜与小麦相比在生育后期会有大量的落叶归还至土壤中,提高了土壤有机质和全氮含量。前人研究表明,在田间生长过程中油菜落叶能够额外带入碳约 745 kg·hm⁻²和氮 27.1 kg·hm⁻²至土壤中^[24-25],而小麦落叶仅能带入碳约 92.0 kg·hm⁻²和氮 8.0 kg·hm⁻²^[26-27]。此外,本研究发现油-稻轮作中大团聚体中的有机碳和全氮贡献率显著高于麦-稻轮作(图2),由于大团聚体对土壤碳和氮可形成物理保护、减少矿化^[28],因此这也可能是油-稻轮作有机质和全氮含量增加的原因。在 NPK 处理中,油-稻轮作的土壤有机质较麦-稻轮作提高 19.2%,高于 CK 处理(提高 14.9%),这可能是由于施肥后油菜的生物量更高^[29]。而在 NPK+S 处理中,油-稻轮作土壤有机质较

麦-稻轮作提高 13.1%,增幅低于 NPK 处理,这可能是由于秸秆还田可提高土壤有机质^[30],因此轮作对土壤有机质的影响降低。

通过有机质与物理性质指标的相关性分析发现(表6),有机质含量与土壤总孔隙度和毛管孔隙度显著相关,即有机质含量增加有利于土壤中毛管孔隙度的形成,进而提高土壤中的总孔隙度^[31]。此外,有机质含量与 MWD 和 GMD 显著相关,说明有机质含量增加时土壤团聚体的稳定性提高,原因是土壤有机质是团聚体的重要胶结物,土壤有机质含量越高,形成的团聚体数量越多,其稳定性就越强^[32]。本研究结果表明,与麦-稻轮作相比,油-稻轮作显著提高了土壤毛管孔隙度、总孔隙度、大团聚体含量及团聚体稳定性(表2和图1),这可能与土壤有机质含量提高有关,具体机制仍需更深入的研究。

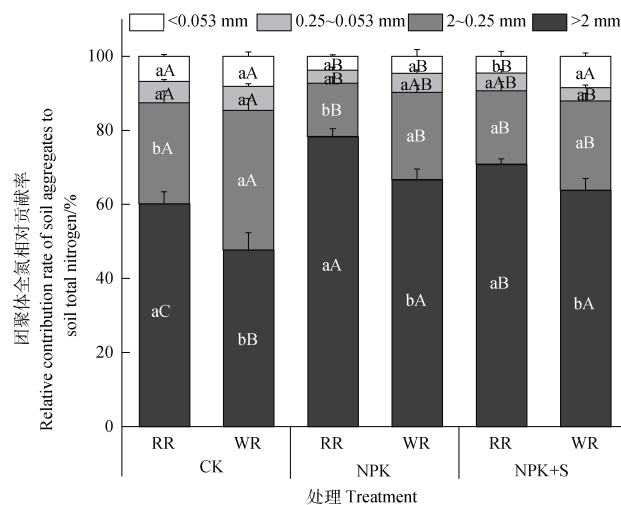


图3 轮作和施肥措施对团聚体全氮贡献率的影响

Fig. 3 Effects of crop rotation and fertilization patterns on contribution rate of aggregates to soil total nitrogen

表6 有机质含量与物理性质相关性

Table 6 Correlation analysis of organic matter content with physical properties

总孔隙度 Total soil porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	通气孔隙度 Aeration porosity	MWD	GMD	WSMA
0.782*	0.838**	-0.508	0.742*	0.680*	0.646

3.2 施肥措施对土壤养分含量及团聚体稳定性的影响

与 CK 相比, NPK 和 NPK+S 处理能够提高土壤有机质、全氮、有效磷含量(表1);由于有机质含量的提高,土壤孔隙度、大团聚体数量及稳定性

提高(表2和表3)。与 NPK 相比, NPK+S 处理可提高土壤有机质和养分含量(表1),这与前人研究结果^[33]相似。然而,不同轮作模式中秸秆还田的土壤培肥效果不同,其中油-稻轮作 NPK+S 较 NPK 处理土壤有机质提高了 7.6%,而麦-稻轮作提高了

13.5%，这是由于油-稻轮作中 NPK 处理的土壤有机质含量较高 ($19.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，而秸秆还田是在一定范围内可显著提升土壤有机质含量^[34]。因此，在实际生产中油-稻轮作秸秆还田的同时可适当减少化肥施用量，以提高资源利用效率。一般认为秸秆还田能够增加土壤中有胶结物质的数量，进而改善土壤团聚体结构^[35]。但在本研究中，两轮作模式中 NPK+S 较 NPK 处理土壤团聚体的分布及稳定性均无显著差异（图 1，表 3）。其原因可能为：第一，秸秆还田年限较短，张翰林等^[36]的研究表明，秸秆短期还田（5 年以内）对土壤团聚体稳定性无显著影响；第二，秸秆还田方式的影响，高洪军等^[37]的研究表明，秸秆覆盖还田与翻压还田相比不利于大团聚体的形成及团聚体稳定性的提高。

“油菜是养地作物”是农民在长期生产实践中总结出来的规律，但尚无系统的理论依据和数据支撑。相对于小麦，由于油菜种植的机械化程度较低且用工成本较大，油麦交错区的农民更倾向于种植小麦，但该区域受气候等因素影响小麦赤霉病发生的风险较高，同时油-稻轮作的稻谷产量普遍高于麦-稻轮作，且该区域还存在弃耕现象而有大量的冬闲田出现，如果能从土壤角度阐明油菜种植对土壤肥力的作用，在实际生产上可为国家耕地质量提升计划的实施提供技术支撑。将油菜轮作纳入相关技术措施，能保障油源供给、培肥耕地地力、减少土壤退化和提高轮作体系生产力。本研究仅是初步的结果，两种轮作模式的周年土壤过程、土壤肥力各要素受轮作影响的程度及其量化指标、油菜轮作提高地力的机制以及与其他条件（如施肥措施、气候因素等）的关系均为亟待深入研究的内容。

4 结 论

经过三周年的轮作种植后，不同处理间土壤的物理和化学性质均表现出明显的差异。与麦-稻轮作相比，油-稻轮作在相同施肥处理中土壤养分含量显著提高，土壤孔隙结构得到改善，土壤团聚体的稳定性增加，大团聚体有机碳和全氮贡献率提高，秸秆不还田时油-稻轮作对土壤理化性质的影响更为显著。相同轮作模式中，施用化肥（NPK）和化肥与秸秆还田相结合（NPK+S）处理的土壤养分含量、

团聚体稳定性均显著高于不施肥（CK）处理；在麦-稻轮作中，NPK+S 处理的土壤养分含量和土壤孔隙度均显著高于 NPK 处理。综上所述，油-稻轮作和化肥配合秸秆还田均可显著改善土壤养分含量及团聚体碳氮分布等理化性质，是长江流域油麦交错区培肥地力的有效措施。

参考文献 (References)

- [1] Tiemann L K, Grandy A S, Atkinson E E, et al. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem[J]. *Ecology Letters*, 2015, 18 (8): 761—771.
- [2] McDaniel M D, Tiemann L K, Grandy A S. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis[J]. *Ecological Applications*, 2014, 24 (3): 560—570.
- [3] Timsina J, Connor D J. Productivity and management of rice-wheat cropping systems: Issues and challenges[J]. *Field Crops Research*, 2001, 69 (2): 93—132.
- [4] Shi X J. Characteristics of nutrient cycling in the rice-wheat rotation system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. [石孝均. 水旱轮作体系中的养分循环特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.]
- [5] National Bureau of Statistics of China, China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistical Press, 2018. [国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.]
- [6] Zhu Y. Study on rice yield differences and nutrient mechanism between rapeseed-rice and wheat-rice rotation systems[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. [朱芸. 油-稻与麦-稻轮作体系水稻产量差异及其养分机制初探[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.]
- [7] Ma P, Yang Z Y, Li Y, et al. Effects of nitrogen reduction in wheat / rape season and nitrogen fertilizer management in rice season on crop yield and nitrogen uptake in crop rotation system[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31 (11): 1769—1778. [马鹏, 杨志远, 李郁, 等. 轮作体系下麦/油减量施氮与水稻氮肥运筹对作物产量和氮素吸收的影响[J]. *浙江农业学报*, 2019, 31 (11): 1769—1778.]
- [8] Zhang Z G, Xu Q, Blevins R L. Influences of long-term mulched no-tillage treatment on some soil physical and chemical properties and corn yields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 384—391. [张治国, 徐琪, Blevins R L. 长期秸秆覆盖免耕对土壤某些理化性质及玉米产量的影响[J]. *土壤学报*, 1998, 35 (3): 384—391.]
- [9] Xie J, Fang L F, Xu C L, et al. Evaluation and comparison of integrated purple soil fertility under different fertilizations in Southwest China[J]. *Journal of*

- Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24 (6): 1500—1507. [谢军, 方林发, 徐春丽, 等. 西南紫色土不同施肥措施下土壤综合肥力评价与比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (6): 1500—1507.]
- [10] Lu S, Lepo J E, Song H X, et al. Increased rice yield in long-term crop rotation regimes through improved soil structure, rhizosphere microbial communities, and nutrient bioavailability in paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54 (8): 909—923.
- [11] Bao Y X, Huang Q H, Xu M G, et al. Assessment and effects of integrated soil fertility in red paddy soil under different long-term fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2013, 19 (1): 74—81. [包耀贤, 黄庆海, 徐明岗, 等. 长期不同施肥下红壤性水稻土综合肥力评价及其效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (1): 74—81.]
- [12] Zhang W L, Dai Z G, Ren T, et al. Effects of nitrogen fertilization managements with residues incorporation on crops yield and nutrients uptake under different paddy-upland rotation systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (7): 1254—1266. [张维乐, 戴志刚, 任涛, 等. 不同水旱轮作体系秸秆还田与氮肥运筹对作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49 (7): 1254—1266.]
- [13] 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]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18 (3): 69—76. [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 (0): 69—76.]
- [14] Meng Y H, Jin W J, Dong Z R, et al. Comparison of resource utilization efficiency and economic benefit of different paddy-upland rotation systems in Jianghuai region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38 (11): 3357—3365. [孟宇辉, 金文俊, 董召荣, 等. 江淮地区不同水旱轮作模式的资源利用效率与经济效益比较[J]. 生态学杂志, 2019, 38 (11): 3357—3365.]
- [15] Wang F H, Huang R, Gao M, et al. Effect of combined application of biochar and straw on organic carbon content in purple soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (4): 929—939. [王富华, 黄容, 高明, 等. 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56 (4): 929—939.]
- [16] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [17] Liu Z P, Xu J N, She D L, et al. Effects of biochar addition on thermal properties of loamy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (4): 933—944. [刘志鹏, 徐杰男, 余冬立, 等. 添加生物质炭对土壤热性质影响机理研究[J]. 土壤学报, 2018, 55 (4): 933—944.]
- [18] Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analysis of soil physics and chemistry [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983: 62—126. [中国科学院南京土壤研究所, 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 62—126.]
- [19] Liu D S. Discussion on the determination of soil porosity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35 (2): 152—153. [刘多森. 关于土壤孔隙度测定的商榷[J]. 土壤通报, 2004, 35 (2): 152—153.]
- [20] Liu W, Effect of continuous straw incorporation on soil structure, nutrient and organic carbon fraction[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. [刘威. 连续秸秆还田对土壤结构性、养分和有机碳组分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.]
- [21] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 (3): 627—633.
- [22] Eynard A, Schumacher T, Lindstrom M J, et al. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota Prairie Ustolls and Usterts[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (4): 1360—1365.
- [23] Yang J C, Han X G, Huang J H, et al. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (4): 787—796. [杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. 生态学报, 2003, 23 (4): 787—796.]
- [24] Haeefe S M, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121 (3): 430—440.
- [25] Liu X W, Lu J W, Li X K, et al. Study on characteristics of dry matter and nutrient accumulation and transportation in leaves of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (4): 956—963. [刘晓伟, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 冬油菜叶片的物质及养分积累与转移特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (4): 956—963.]
- [26] Wang L F, Wang D X, Shangguan Z P. Structural characters and nutrient contents of leaves as well as nitrogen distribution among different organs of big-headed wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (17): 5219—5227. [王丽芳, 王德轩, 上官周平. 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征[J]. 生态学报, 2013, 33 (17): 5219—5227.]
- [27] Zhu G, Midmore D J, Yule D, et al. Effect of timing of defoliation on wheat (*Triticum aestivum*) in central Queensland; 2. N uptake and relative N use efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96 (1): 160—167.
- [28] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and

- soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79 (1): 7—31.
- [29] Wang Y, Li Y Y, Lu J W, et al. Effects of cultivation pattern on growth, seed yield, nutrient uptake and utilization of direct-sowing oilseed rape(*Brassica napus* L.) [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19 (3): 597—607. [王寅, 李雅颖, 鲁剑巍, 等. 栽培模式对直播油菜生长、产量和养分吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (3): 597—607.]
- [30] Liu W, Huang L, Lu J W, et al. Effects of conservation tillages on soil nutrients, structure and crop yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(2): 170—177. [刘威, 黄丽, 鲁剑巍, 等. 两种保护性耕作对土壤养分、结构和产量的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46 (2): 170—177.]
- [31] Deng Y S, Ding S W, Cai C F, et al. Spatial distribution of the collapsing alluvial soil physical properties in southeastern Hubei[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (24): 4850—4857. [邓羽松, 丁树文, 蔡崇法, 等. 鄂东南崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征[J]. *中国农业科学*, 2014, 47 (24): 4850—4857.]
- [32] Jiang C Y, Liu P, Liu M, et al. Dynamics of aggregates composition and C, N distribution in rhizosphere of rice plants in red paddy soils different in soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 138—149. [江春玉, 刘萍, 刘明, 等. 不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (1): 138—149.]
- [33] Ma C, Zhou J, Liu M Q, et al. Effects of incorporation of pre-treated straws into field on soil nutrients and labile organic carbon in Shajiang black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5): 915—921. [马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响. *土壤学报*, 2013, 50 (5): 915—921.]
- [34] 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. [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.]
- [35] Zhan Q H, Yuan C L, Zhang X P. Ameliorative effect and mechanism of organic materials on Vertisol[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (0): 420—425. [詹其厚, 袁朝良, 张效朴. 有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制[J]. *土壤学报*, 2003, 40 (3): 420—425.]
- [36] 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-wheat rotation systems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (4): 216—220. [张翰林, 郑宪清, 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.]
- [37] Gao H J, Peng C, Zhang X Z, et al. Effects of different straw returning modes on characteristics of soil aggregates Chernozem soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (1): 75—79. [高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33 (1): 75—79.]

(责任编辑: 陈荣府)