

不同施肥模式下设施菜田土壤团聚体养分和微生物量特征

荣勤雷^{1,3}, 李若楠^{2†}, 黄绍文^{1*}, 周春火³, 唐继伟¹, 王丽英², 张彦才²

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081;

2 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051; 3 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045)

摘要:【目的】针对设施蔬菜生产中普遍存在的化肥施用严重超量、化肥与有机肥配施模式不合理等现象, 利用日光温室蔬菜有机肥/秸秆替代化肥模式定位试验, 研究了不同施肥模式对设施菜地土壤团聚体养分、微生物量碳氮含量的影响, 为设施蔬菜优质高效生产和减量施用化肥提供科学依据。【方法】将 25% 或 50% 的无机氮肥用玉米秸秆或猪粪中氮替代, 进行温室蔬菜田间定位试验。试验共设 5 个处理 (各处理等氮、等磷、等钾): 1) 全部施用化肥氮 (4/4CN); 2) 3/4 化肥氮 + 1/4 猪粪氮 (3/4CN + 1/4MN); 3) 2/4 化肥氮 + 2/4 猪粪氮 (2/4CN + 2/4MN); 4) 2/4 化肥氮 + 1/4 猪粪氮 + 1/4 秸秆氮 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN); 5) 2/4 化肥氮 + 2/4 秸秆氮 (2/4CN + 2/4SN)。在定位试验第 6 年冬春茬黄瓜季秧期采取耕层土壤样品, 分析土壤团聚体分布规律和稳定性, 并测定各粒级团聚体中土壤养分和微生物量碳、氮含量。【结果】设施菜地土壤团聚体以 250~1000 μm 团聚体和 >2000 μm 团聚体为主, 其含量分别平均为 32.0% 和 38.4%。较 4/4CN 模式, 有机肥/秸秆替代化肥模式提高了土壤大团聚体 (>250 μm) 比例。配施秸秆模式对土壤团聚体分布影响相对较大, 并显著提高土壤团聚体机械稳定性, 平均重量直径 (MWD) 和平均几何直径 (GMD) 分别提高 6.1% 和 11.2%。在 <250 μm 团聚体、250~1000 μm 团聚体、1000~2000 μm 团聚体和 >2000 μm 团聚体中, 不同有机肥化肥配施模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤有机碳含量较 4/4CN 模式分别增加 36.8%~89.6%、34.9%~100.3%、29.5%~69.2% 和 21.7%~72.1%, 分别平均增加 69.8%、76.6%、56.9% 和 49.2%。不同施肥模式对有机碳、全氮、硝态氮、速效磷的影响规律基本一致。土壤有机碳、全氮主要分布在 250~1000 μm 团聚体和 >2000 μm 团聚体中, 平均分别占土壤有机碳储量的 34.1%、35.2% 和土壤全氮储量的 34.0%、36.4%。土壤硝态氮在 250~1000 μm 团聚体与 1000~2000 μm 团聚体中含量较高, 土壤速效钾、微生物量碳氮含量表现为随土壤团聚体直径的增大而提高, 而速效磷则随土壤团聚体直径的增大而降低。【结论】设施菜田土壤团聚体优势粒级为 >2000 μm 团聚体和 250~1000 μm 团聚体, 配施秸秆模式显著提高土壤团聚体的机械稳定性。有机肥/秸秆替代化肥模式提高土壤各级团聚体有机碳、全氮、硝态氮和速效磷含量。设施菜地土壤有机碳氮主要分布在 250~1000 μm 团聚体和 >2000 μm 团聚体中, 而微生物量碳、氮含量随土壤团聚体直径的减小而呈增加的趋势。

关键词: 设施菜田; 土壤团聚体; 土壤微生物量碳氮; 化肥减施

Characteristics of nutrients and microbial biomass in soil aggregates under different fertilization modes in greenhouse vegetable production

RONG Qin-lei^{1,3}, LI Ruo-nan^{2†}, HUANG Shao-wen^{1*}, ZHOU Chun-huo³, TANG Ji-wei¹, WANG Li-ying², ZHANG Yan-cai²

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Institute of Agricultural

Resources and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China;

3 Land Resources and Environmental College, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

收稿日期: 2018-11-26 接受日期: 2019-04-12

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFD0201001); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-23-B02); 山东省重点研发计划项目 (2017CXGC0206)。

联系方式: 荣勤雷 E-mail: rongqinlei@163.com; †李若楠与第一作者同等贡献 E-mail: liruonan2004@163.com

* 通信作者 黄绍文 Tel: 010-82108662, E-mail: huangshaowen@caas.cn

Abstract: [Objectives] Excessive application of chemical fertilizers or unreasonable combined application of chemical and organic fertilizers is a common practice in greenhouse vegetable production. Therefore, a fixed-site greenhouse vegetable fertilization experiment was carried out to study effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments on nutrient and soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) distribution of soil aggregates in order to provide a scientific basis for high quality and efficient vegetable production in greenhouse and fertilizer reduction. **[Methods]** The greenhouse field experiment was started in 2009, with 25% or 50% nitrogen of inorganic fertilizer replaced by nitrogen of corn straw or pig manure. Soil samples were collected from each plot at 0–20 cm depth during the uprooting stage of the 11th growing season (winter-spring cucumber) in the sixth year. The distribution and stability of soil aggregates, nutrient and MBC and MBN contents of soil aggregates were determined. **[Results]** 1) The predominant size fractions in greenhouse vegetable soil were 250–1000 μm fractions and > 2000 μm fractions, which accounted for 32.0% and 38.4% on average by weight, respectively. Compared with 4/4CN treatment, organic amendments increased the proportion of >250 μm fractions. And soils amended with straw had a relatively large impact on the distribution of soil aggregates, following with a significantly improvement in soil aggregate stability. The MWD and GMD values in straw-treated soil were 6.1% and 11.2% higher than those in 4/4CN-treated soil, respectively. 2) The organic carbon content in organic-amended soil (3/4CN + 1/4MN, 2/4CN + 2/4MN, 2/4CN + 1/4MN + 1/4SN, 2/4CN + 2/4SN) was much higher than that in the 4/4CN treatment with the increasing ranges of 36.8%–89.6%, 34.9%–100.3%, 29.5%–69.2% and 21.7%–72.1% in < 250 μm fractions, 250–1000 μm fractions, 1000–2000 μm fractions and > 2000 μm fractions, respectively, which was respectively averagely increased by 69.8%, 76.6%, 56.9% and 49.2% compared with that of 4/4CN treatment. Actually, effects of the organic amendments on soil organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphorus were basically the same. 3) The organic carbon and total nitrogen in 250–1000 μm fractions and > 2000 μm fractions were the main sources of the organic carbon and nitrogen in the soil, which accounted for 34.1% and 35.2% of the total organic carbon stocks, and 34.0% and 36.4% of the total nitrogen stocks, respectively. 4) The content of soil nitrate nitrogen was higher in 250–1000 μm fractions and 1000–2000 μm fractions than that in other aggregate fractions. Soil readily available potassium, MBC and MBN contents increased with the increasing of soil aggregate-size, whereas soil available phosphorus decreased with the increasing of soil aggregate-size. **[Conclusions]** The predominant size fractions in greenhouse vegetable soil were 250–1000 μm fractions and > 2000 μm fractions. And soil aggregate stability was significantly improved by partial substitution of chemical fertilizer with straw. Partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments increased the content of organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphorus in soil aggregates. The organic carbon and total nitrogen were mainly stored in 250–1000 μm fractions and > 2000 μm fractions, while MBC and MBN contents increased with the decreasing of soil aggregate-size.

Key words: greenhouse vegetable field; soil aggregate; microbial biomass carbon and nitrogen; chemical fertilizer reduction

近些年来我国设施蔬菜发展迅速,从1980年的面积不足0.7万 hm^2 ,目前已达386.8万 hm^2 ,产值占蔬菜总产值的50%以上,已成为许多地区的支柱产业,具有良好的社会效益^[1]。目前,设施蔬菜生产中普遍存在着化肥施用严重超量、化肥与有机肥配施模式不够合理等现象,由此导致了设施蔬菜土壤有机质降低、次生盐渍化等一系列问题,严重地威胁了设施蔬菜生产的可持续发展^[2-3]。土壤团

聚体是矿物质、有机质和生物质相互作用在特定条件下的组合,团聚体的复杂多相结构影响了土壤水分、养分保持及其供应的调控能力^[4],对维持土壤质量发挥着关键的作用。因此,深入了解不同土壤施肥措施下设施菜地土壤团聚体中养分和微生物量碳氮等分布规律就显得十分重要。

目前,国内外有关施肥措施对设施菜田土壤养分和微生物量碳氮影响的研究已有较多报道,但主

要以土体为研究对象。王文锋等^[5]研究有机肥和秸秆替代化肥模式对设施菜田土壤微生物量碳氮影响的结果表明, 配施秸秆模式土壤微生物量碳、氮含量相对较高, 较单施化肥模式平均分别增加 61.4%~86.9% 和 78.2%~109%; 在等氮钾养分投入下 5 年 8 茬的设施番茄-甜椒田间轮作试验结果显示, 不同沼肥和化肥配施各处理氮素盈余和 0—180 cm 土层土壤全氮含量随沼肥施用比例增加而差异不显著, 但磷素盈余随沼肥施用比例增加而显著增加^[6]; 研究减量施磷对温室菜地土壤磷素影响的结果指出, 当减量施磷较农民常规施磷量减少 61.1%, 3 年磷素盈余量减少 71.0%~77.3%, 0—20 cm 土层 Olsen-P 含量下降 18.6%~43.5%, 同时产量可以保持在中高水平且不降低^[7]。但由于不同粒级的团聚体在营养元素的供给转化等方面发挥着不同的作用^[8], 明确土壤养分在团聚体中的分布及储量十分必要。然而, 设施蔬菜栽培处于缺少雨水淋洗、温度高、湿度大、通气较差的特殊生态环境, 再加上长期相对较高的集约化程度、复种指数和肥料投入^[9-10], 使设施菜地土壤团聚体中的养分转化具有不同于其他种植模式的特点。但目前对设施菜地土壤团聚体中养分及微生物量碳氮的分布状况还缺乏较为全面的了解。因此, 本研究利用开始于 2009 年 8 月的日光温室定位试验, 在第 6 年冬春茬黄瓜季采取耕层土壤样品, 探究设施菜地有机肥/秸秆替代化肥模式对土壤团聚体分布, 团聚体中养分和微生物量碳、氮含量的影响。从而深入了解在设施栽培条件下有机肥/秸秆替代化肥对土壤团聚体结构稳定性和养分变化特征的影响, 为推动设施蔬菜优质高效生产和减量施用化肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本定位试验位于河北省农林科学院大河试验站, 供试日光温室建于 2009 年 5 月, 温室长为 48 m、宽为 8 m (含 0.5 m 通道)。供试土壤为石灰性褐土 (粘壤质)。定位试验起始时间为 2009 年 8 月, 栽培制度为冬春茬黄瓜-秋冬茬番茄轮作, 定位试验开始前, 0—20 cm 土壤容重 1.35 g/cm³、电导率 185.4 μ S/cm、pH 8.0、有机质 9.1 g/kg、硝态氮 18.3 mg/kg、速效磷 6.2 mg/kg、速效钾 98.2 mg/kg。供试黄瓜品种为博美 11 号 (*Cucumis sativus* L. cv. Bomei 11), 番茄品种为金鹏 11 号 (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Jinpeng 11)。

1.2 试验设计

定位试验共设 5 个处理, 根据施用氮肥的差异分为: 1) 全部施用化肥氮 (4/4CN); 2) 3/4 化肥氮 + 1/4 猪粪氮 (3/4CN + 1/4MN); 3) 2/4 化肥氮 + 2/4 猪粪氮 (2/4CN + 2/4MN); 4) 2/4 化肥氮 + 1/4 猪粪氮 + 1/4 秸秆氮 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN); 5) 2/4 化肥氮 + 2/4 秸秆氮 (2/4CN + 2/4SN)。冬春茬黄瓜施用的 N、P₂O₅ 和 K₂O 总量分别为 600、300 和 525 kg/hm², 秋冬茬番茄施用的 N、P₂O₅ 和 K₂O 总量分别为 450、225 和 600 kg/hm²。使用化肥补齐各处理所需氮磷钾投入量, 使所有处理等氮等磷等钾。试验为随机区组设计, 每个处理 3 次重复, 小区面积为 14.4 m² (宽 2.4 m × 长 6 m)。每小区种植黄瓜或番茄 4 行, 每行 20 株, 行距 0.60 m, 株距 0.30 m。小区间用 PVC 板间隔 (深度 105 cm, 其中 100 cm 地下, 5 cm 地上, 厚度 4 mm), 防止小区之间养分和水分的横向迁移。

在设施蔬菜定植前, 各处理全部猪粪、20% 化学氮肥、100% 化学磷肥、40% 化学钾肥均匀撒施后旋耕入土, 作物秸秆切碎后翻耕。在冬春茬黄瓜季, 余下 80% 氮肥和 60% 钾肥分成 10 次, 根据作物的养分需求规律随灌溉追施。在秋冬茬番茄季, 余下 80% 氮肥和 60% 钾肥分成 4 次分别在第 1~4 穗果膨大期 (直径达 3~4 cm) 随灌溉追施。

定位试验所施用氮肥为尿素 (含 N 46%), 磷肥为过磷酸钙 (含 P₂O₅ 16%), 钾肥为硫酸钾 (含 K₂O 51%)。所用商品猪粪含水量 (33.2 ± 4.5)%, N、P₂O₅、K₂O 和 C 含量分别为 (1.65 ± 0.13)%、(1.33 ± 0.12)%、(1.02 ± 0.12)% 和 (123.7 ± 6.8) g/kg (鲜基); 所用玉米秸秆含水量 (13.7 ± 1.6)%, N、P₂O₅、K₂O 和 C 含量分别为 (0.74 ± 0.08)%、(0.20 ± 0.03)%、(1.19 ± 0.22)% 和 (352.0 ± 12.3) g/kg (鲜基)。

1.3 土壤样品采集及测定方法

在定位试验第 6 年冬春茬黄瓜季拉秧期采取 0—20 cm 耕层土壤样品。土壤团聚体样品取样方法是每个小区行间挖取多个 0—20 cm 原状土柱 (5 cm × 10 cm × 20 cm), 用小刀削去土柱外部在挖取过程中因接触土铲扰动部分的土壤, 土柱分别储存在硬质塑料盒中, 以确保在运输过程中不受挤压、保持土壤原有结构。将盛有新鲜土样硬质塑料盒置于冰盒中迅速运至实验室处理。

土壤团聚体分级方法采用湿土壤干筛, 以减少对团聚体与微生物群落分布和活动之间原位连接的破坏^[11-12]。主要步骤为: 将经过剔除石砾、植物残根

等杂物预处理的新鲜土壤样品在低温下风干至 100 g/kg 的重量含水量, 混合均匀后, 将大块土壤掰开后过 5 mm 筛备用; 每次称取 100 g 低温下风干过筛的土壤样品, 置于套筛 (2 mm、1 mm、0.25 mm) 的最上层, 将套筛固定到土壤干筛仪上筛分 (DM185, 上海德码信息科技有限公司); 土壤干筛仪振幅 1.5 cm, 筛分时间 1 min, 频率 30 次/min。筛分后收集每级土壤筛上面的团聚体, 可以得到以下几个级别: < 250 μm (microaggregates and silt and clay fractions, MSC); 250~1000 μm (small macroaggregates, SA); 1000~2000 μm (macroaggregates, MA); > 2000 μm (large macroaggregates, LA)^[13]。将各筛上的团聚体分别收集至铝盒中在 60℃ 下烘干, 用于计算团聚体分布、平均重量直径 (MWD) 和平均几何直径 (GMD)。重复这一步骤多次, 以收集足够测试的土壤团聚体样品。将各级团聚体分取一部分风干, 用于测定土壤理化性质; 剩余的另一部分鲜样用于测定土壤团聚体中微生物量碳、氮 (MBC 和 MBN)。

土壤理化性质测定参考土壤农业化学分析的相关方法^[14], 具体方法为: 土壤各粒级团聚体中有机碳含量采用重铬酸钾-浓硫酸氧化 (外加加热法) 测定; 全氮采用凯氏法消煮半微量滴定法测定; 速效磷采用 NaHCO_3 (0.5 mol/L) 浸提—钼锑抗比色法测定; 速效钾采用 NH_4OAc (1 mol/L) 浸提—原子吸收分光光度计测定。土壤硝态氮采用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提—双波长紫外分光光度法测定^[15]。土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸—硫酸钾浸提方法测定^[16-17]。土壤未分组前 4/4CN、3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 处理土壤微生物量碳、氮分别为: 110.01 ± 14.04 、 26.20 ± 4.16 ; 116.53 ± 10.75 、 33.14 ± 3.42 ; 139.30 ± 13.90 、 38.59 ± 3.57 ; 192.16 ± 15.82 、 43.90 ± 2.64 ; 235.96 ± 15.86 、 55.41 ± 3.88 mg/kg。

团聚体对土壤碳氮的贡献率 = (该级团聚体中碳氮含量 $\times$ 该级团聚体的百分含量) / 全土中碳氮含量 $\times$ 100%^[18]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 对试验数据进行整理。方差分析采用 SAS 9.1 统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施蔬菜土壤团聚体分布和稳定性的影响

从图 1 可以看出, 有机肥/秸秆替代化肥模式影

响不同粒级团聚体的分布。有机肥/秸秆替代化肥模式 250~1000 μm 团聚体和 > 2000 μm 团聚体含量较高, 而 < 250 μm 团聚体和 1000~2000 μm 团聚体含量相对较低, 其中以配施秸秆模式变异相对较大, 差异显著 ($P < 0.05$)。设施菜田土壤主要以 > 2000 μm 团聚体为主, < 250 μm 团聚体比例最低。每 100 g 土壤中, < 250 μm 团聚体、250~1000 μm 团聚体、1000~2000 μm 团聚体和 > 2000 μm 团聚体的含量分别平均为 7.6、32.0、22.0 和 38.4 g, 不同粒径团聚体所占比例之间呈显著差异 ($P < 0.05$)。

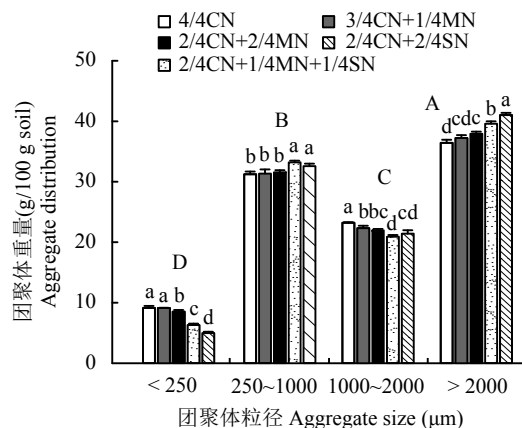


图 1 不同施肥模式下土壤中不同粒径团聚体的分布

Fig. 1 The distribution of soil aggregate-size fractions under different fertilization modes

[注 (Note): CN—化肥氮 Chemical fertilizer N; MN—猪粪氮 Pig manure N; SN—秸秆氮 Straw N; 柱上不同小写字母表示同一粒径团聚体下处理间差异显著, 不同大写字母表示不同粒径团聚体之间差异显著 Different lowercase letters indicate significant differences within an aggregate size class among treatments, whereas different capital letters indicate significant differences among the aggregate fractions ($P < 0.05$).]

较 4/4CN 模式, 有机肥/秸秆替代化肥模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 250~1000 μm 和 > 2000 μm 粒级团聚体分别平均增加 7.0% 和 3.0%; 与配施猪粪模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN) 相比, 配施秸秆模式 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 250~1000 μm 和 > 2000 μm 粒级团聚体分别平均增加 7.3% 和 4.6%。对于 < 250 μm 和 1000~2000 μm 粒级团聚体, 有机肥/秸秆替代化肥模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 较 4/4CN 模式, < 250 μm 和 1000~2000 μm 粒级团聚体分别平均降低 20.9% 和 6.7%; 与配施猪粪模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN +

2/4MN) 相比, 配施秸秆模式 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) < 250 μm 和 1000~2000 μm 粒级团聚体分别平均降低 36.0% 和 4.5%。

大团聚 (> 250 μm 的团聚体) 的比例可以用来评价土壤团聚体质量, 提高大团聚体比例有助于增加土壤团聚体的稳定性。图 1 表明, 有机肥/秸秆替代化肥模式提高大团聚体 (> 250 μm 团聚体) 的比例, 降低小团聚体 (< 250 μm 团聚体) 的比例。与 4/4CN 模式相比, 有机肥/秸秆替代化肥模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) < 250 μm 团聚体含量减少 0.3%~45.7%, 平均减少 20.9%。平均重量直径 (MWD) 和平均几何直径 (GMD) 是表征土壤团聚体分布状况的常用指标。如图 2 所示, 从土壤团聚体的 MWD 值和 GMD 值可以看出, 与 4/4CN 模式相比, 两种配施秸秆模式 (2/4CN+1/4MN+1/4SN、2/4CN+2/4SN) 团聚体的 MWD 值和 GMD 值均显著提高 ($P < 0.05$), 分别平均提高 6.1% 和 11.2%; 而两种配施猪粪模式 (3/4CN+1/4MN、2/4CN+2/4MN) 中仅 2/4CN+2/4MN 模式 MWD 值和 GMD 值显著增加 ($P < 0.05$), 较 4/4CN 模式平均增加 2.0% 和 2.6%。

2.2 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施蔬菜土壤团聚体中养分含量的影响

不同施肥模式显著影响土壤团聚体中养分的分布。有机肥/秸秆替代化肥模式提高土壤有机碳、全氮、硝态氮、速效磷含量, 但速效钾含量有所降

低。如表 1 所示, 在土壤各粒级团聚体中, 均以配施秸秆模式土壤有机碳、全氮、硝态氮、速效磷含量相对较高, 差异显著 ($P < 0.05$)。对于土壤有机碳在 < 250 μm 、250~1000 μm 、1000~2000 μm 和 > 2000 μm 团聚体中分布, 与 4/4CN 模式相比, 有机肥/秸秆替代化肥模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤有机碳含量分别增加 36.8%~89.6%、34.9%~100.3%、29.5%~69.2% 和 21.7%~72.1%, 分别平均增加 69.8%、76.6%、56.9% 和 49.2%; 与配施猪粪模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN) 相比, 配施秸秆模式 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤有机碳含量分别增加 13.9%~38.6%、8.1%~48.5%、4.1%~30.7% 和 15.2%~41.4%, 分别平均增加 25.1%、25.5%、15.9% 和 27.4%。不同施肥模式对有机碳、全氮、硝态氮、速效磷的影响规律基本一致。但有机肥/秸秆替代化肥模式显著降低土壤速效钾含量, 其中以配施秸秆模式土壤速效钾含量相对较低。在 < 250 μm 、250~1000 μm 、1000~2000 μm 和 > 2000 μm 团聚体中, 与 4/4CN 模式相比, 有机肥/秸秆替代化肥模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤速效钾含量分别降低 7.9%~35.2%、8.4%~34.6%、7.5%~31.0% 和 10.5%~37.9%, 分别平均降低 19.6%、21.9%、17.2% 和 21.0%。

土壤团聚体粒级大小显著影响团聚体中养分的

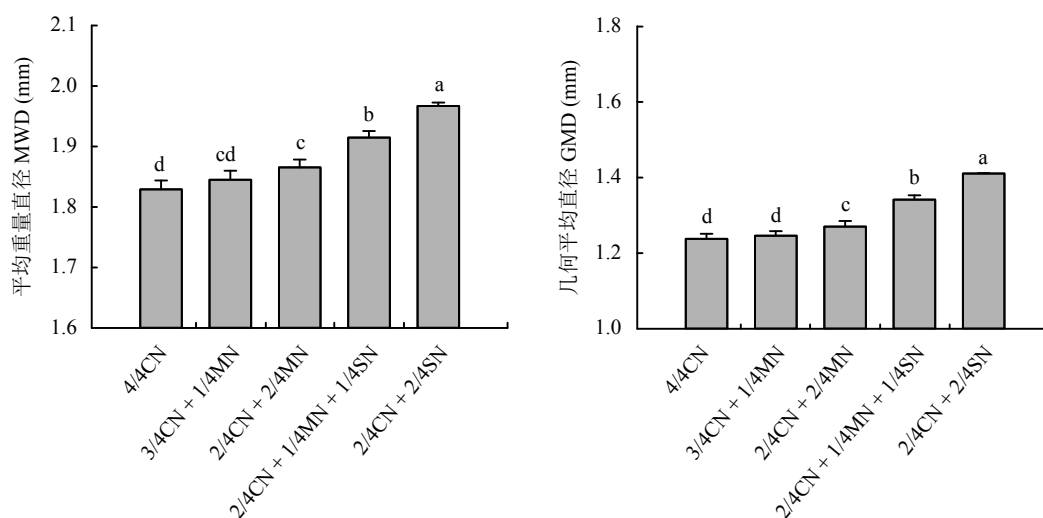


图 2 不同施肥模式下土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径

Fig. 2 Mean weight diameter(MWD) and geometric mean diameter(GMD) of the soil aggregates under different fertilization modes

[注 (Note): CN—化肥氮 Chemical fertilizer N; MN—猪粪氮 Pig manure N; SN—秸秆氮 Straw N; 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).]

表 1 有机肥/秸秆替代化肥模式对土壤各粒级团聚体中养分的影响

Table 1 Effects of different partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments on soil nutrients in the soil of different aggregate-size fractions

项目 Item	处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregate size				原土 Bulk soil
		>2000 μm	2000~1000 μm	1000~250 μm	<250 μm	
有机碳 (g/kg) SOC	4/4CN	7.04 $\pm$ 0.93 dB	7.88 $\pm$ 0.57 cA	7.19 $\pm$ 0.72 dAB	6.49 $\pm$ 0.7 dB	7.13 $\pm$ 0.49 D
	3/4CN + 1/4MN	8.56 $\pm$ 0.39 cC	10.20 $\pm$ 0.52 bA	9.71 $\pm$ 0.22 cAB	8.89 $\pm$ 0.53 cBC	9.07 $\pm$ 0.13 C
	2/4CN + 2/4MN	9.90 $\pm$ 0.54 bB	12.7 $\pm$ 0.46 aA	12.64 $\pm$ 0.43 bA	10.70 $\pm$ 0.59 bB	11.97 $\pm$ 0.32 B
	2/4CN + 1/4MN + 1/4SN	11.40 $\pm$ 0.84 aC	13.22 $\pm$ 0.93 aAB	13.87 $\pm$ 1.07 abA	12.31 $\pm$ 0.88 aBC	12.76 $\pm$ 0.79 AB
	2/4CN + 2/4SN	12.11 $\pm$ 0.28 aB	13.32 $\pm$ 1.01 aAB	14.41 $\pm$ 0.78 aA	12.19 $\pm$ 0.45 aB	13.09 $\pm$ 0.22 A
	平均 Mean	10.12 B	11.60 A	11.46 A	9.80 B	
全氮 (g/kg) Total N	4/4CN	0.87 $\pm$ 0.09 dA	0.90 $\pm$ 0.02 dA	0.88 $\pm$ 0.06 cA	0.85 $\pm$ 0.08 cA	0.88 $\pm$ 0.04 D
	3/4CN + 1/4MN	1.07 $\pm$ 0.02 cB	1.13 $\pm$ 0.02 cA	1.14 $\pm$ 0 bA	1.09 $\pm$ 0.05 bAB	1.09 $\pm$ 0.06 C
	2/4CN + 2/4MN	1.38 $\pm$ 0.07 aB	1.40 $\pm$ 0.04 aB	1.54 $\pm$ 0.11 aA	1.37 $\pm$ 0.07 aB	1.42 $\pm$ 0.09 A
	2/4CN + 1/4MN + 1/4SN	1.25 $\pm$ 0.10 abB	1.35 $\pm$ 0.10 abAB	1.47 $\pm$ 0.10 aA	1.35 $\pm$ 0.09 aAB	1.39 $\pm$ 0.10 AB
	2/4CN + 2/4SN	1.20 $\pm$ 0.10 bcB	1.31 $\pm$ 0.09 bB	1.49 $\pm$ 0.05 aA	1.31 $\pm$ 0.02 aB	1.32 $\pm$ 0.07 B
	平均 Mean	1.19 BC	1.30 A	1.22 B	1.15 C	0
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	4/4CN	106.65 $\pm$ 8.28 bA	108.36 $\pm$ 10.42 bA	104.66 $\pm$ 7.75 cA	92.4 $\pm$ 9.89 cB	105.09 $\pm$ 10.03 B
	3/4CN + 1/4MN	107.59 $\pm$ 12.43 bB	114.23 $\pm$ 13.52 bA	117.14 $\pm$ 14.31 bcA	101.75 $\pm$ 11.4 bcC	114.80 $\pm$ 15.61 B
	2/4CN + 2/4MN	109.39 $\pm$ 10.89 bB	114.00 $\pm$ 7.55 bAB	116.28 $\pm$ 7.65 bcA	102.12 $\pm$ 10.61 bcC	114.56 $\pm$ 22.66 B
	2/4CN + 1/4MN + 1/4SN	118.51 $\pm$ 9.83 abA	121.49 $\pm$ 15.95 bA	126.28 $\pm$ 17.65 bA	108.94 $\pm$ 11.14 bB	120.88 $\pm$ 10.69 B
	2/4CN + 2/4SN	127.29 $\pm$ 8.33 aB	139.86 $\pm$ 8.90 aA	145.49 $\pm$ 8.10 aA	125.26 $\pm$ 10.13 aB	139.95 $\pm$ 18.30 A
	平均 Mean	106.1 C	122.0 A	119.6 A	113.9 B	
速效磷 (mg/kg) Available P	4/4CN	32.43 $\pm$ 4.60 cC	37.82 $\pm$ 4.18 cC	45.4 $\pm$ 0.12 dB	69.91 $\pm$ 5.60 cA	41.53 $\pm$ 4.15 D
	3/4CN + 1/4MN	49.13 $\pm$ 3.91 bC	53.68 $\pm$ 5.44 abC	67.45 $\pm$ 4.19 bB	88.27 $\pm$ 7.34 abA	63.01 $\pm$ 1.56 B
	2/4CN + 2/4MN	60.82 $\pm$ 2.75 aC	61.48 $\pm$ 6.81 aC	77.04 $\pm$ 4.29 aB	100.24 $\pm$ 10.6 aA	79.19 $\pm$ 6.45 A
	2/4CN + 1/4MN + 1/4SN	46.02 $\pm$ 4.46 bC	49.22 $\pm$ 4.14 bC	61.41 $\pm$ 6.70 bcB	80.28 $\pm$ 3.83 bcA	60.71 $\pm$ 3.30 B
	2/4CN + 2/4SN	38.92 $\pm$ 1.60 cC	45.28 $\pm$ 6.13 bcC	54.53 $\pm$ 6.92 cB	76.88 $\pm$ 9.47 bcA	50.71 $\pm$ 2.94 C
	平均 Mean	83.1 A	61.2 B	49.5 C	45.5 C	
速效钾 (mg/kg) Available K	4/4CN	468.17 $\pm$ 35.15 aA	445.00 $\pm$ 14.66 aB	456.75 $\pm$ 23.67 aAB	424.17 $\pm$ 19.63 aC	453.92 $\pm$ 18.19 A
	3/4CN + 1/4MN	418.92 $\pm$ 11.95 bA	411.58 $\pm$ 25.27 abA	418.17 $\pm$ 9.14 bA	388.17 $\pm$ 25.33 bA	409.04 $\pm$ 13.84 B
	2/4CN + 2/4MN	387.75 $\pm$ 28.09 bA	388.00 $\pm$ 23.01 bcA	357.58 $\pm$ 12.91 cB	352.50 $\pm$ 18.01 cB	374.92 $\pm$ 25.32 C
	2/4CN + 1/4MN + 1/4SN	381.33 $\pm$ 12.57 bA	359.92 $\pm$ 13.18 cAB	358.92 $\pm$ 9.17 cAB	345.83 $\pm$ 7.42 cB	376.17 $\pm$ 8.25 C
	2/4CN + 2/4SN	290.75 $\pm$ 12.14 cAB	306.92 $\pm$ 22.81 dA	298.75 $\pm$ 8.60 dA	275.00 $\pm$ 5.88 dB	296.67 $\pm$ 5.99 D
	平均 Mean	357.6 B	376.6 A	383.8 A	389.4 A	

注 (Note): CN—化肥氮 Chemical fertilizer N; MN—猪粪氮 Pig manure N; SN—秸秆氮 Straw N; 同列数值后不同小写字母表示同一粒级团聚体中施肥处理之间显著差异, 同行不同大写字母表示该施肥模式不同粒级团聚体之间差异显著; 平均值后不同大写字母表示不同团聚体粒级、不同施肥模式之间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among the fertilization treatments and the capital letters in the same row indicate significant differences among soil fractions at the $P < 0.05$ level. The capital letters after the mean in the same row or column indicate significant differences among soil fraction or fertilization treatments at the $P < 0.05$ level.

分布。从表 1 可以看出, 250~1000 μm 、1000~2000 μm 团聚体中有机碳、全氮、硝态氮含量显著高于 < 250 μm 和 > 2000 μm 团聚体 ($P < 0.05$)。不同施肥模式土壤各粒级团聚体中速效磷含量均表现为随土壤团聚体直径的增大而降低。< 250 μm 和 250~1000 μm 团聚体中速效磷的含量显著高于 1000~2000 μm 和 > 2000 μm 团聚体 ($P < 0.05$)。土壤速效钾含量均表现为随土壤团聚体直径的增大而提高, 并且 250~1000 μm 、1000~2000 μm 和 > 2000 μm 团聚体中土壤速效钾含量显著高于 < 250 μm 团聚体 ($P < 0.05$)。

土壤团聚体是有机碳最主要的储存场所, 从图 3 可以看出, 土壤有机碳、全氮主要分布在 250~1000 μm 团聚体和 > 2000 μm 团聚体中, 平均分别贡献了土壤有机碳的 34.1%、34.0% 和全氮的 35.2%、36.4%, 并显著高于其它粒级团聚体 ($P < 0.05$)。土壤不同粒级团聚体对土壤总有机碳和全氮储量的贡献由大到小顺序依次为 > 2000 μm 、250~1000 μm 、1000~2000 μm 团聚体和 < 250 μm 团聚体, 这与土壤不同粒级团聚体的分布规律相一致。

2.3 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施蔬菜土壤团聚体微生物量碳氮的影响

不同施肥模式显著影响土壤团聚体中微生物量碳的分布。从图 4 可以看出, 在各粒级团聚体中, 有机肥/秸秆替代化肥模式均显著提高土壤微生物量碳含量, 其中以配施秸秆模式土壤微生物量碳含量相对较高。较 4/4CN 模式和配施猪粪模式 (3/4CN +

1/4MN、2/4CN + 2/4MN), 配施秸秆模式 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 在各粒级团聚体中微生物量碳含量均显著增加 ($P < 0.05$) (除 > 2000 μm 团聚体)。在 < 250 μm 、250~1000 μm 、1000~2000 μm 和 > 2000 μm 团聚体中, 与 4/4CN 模式相比, 有机肥/秸秆替代化肥模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤微生物量碳含量分别增加 9.6%~117.7%、4.8%~141.4%、10.8%~143.0% 和 10.1%~62.3%, 分别平均增加 63.6%、67.5%、69.0% 和 35.9%; 与配施猪粪模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN) 相比, 配施秸秆模式 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤微生物量碳含量分别增加 70.2%~98.6%、50.8%~130.4%、44.0%~119.3% 和 6.9%~47.4%, 分别平均增加 83.7%、86.5%、78.4% 和 25.4%。

土壤团聚体直径大小对团聚体中微生物量碳的分布有显著影响 (图 4), 不同施肥模式土壤微生物量碳含量均表现为随土壤团聚体直径的增大而降低。在 < 250 μm 、250~1000 μm 、1000~2000 μm 和 > 2000 μm 团聚体中, 土壤微生物量碳的含量分别平均为 196.9、171.6、159.3 和 128.7 mg/kg。从整体上看, 土壤不同粒级团聚体之间微生物量碳含量差异显著 ($P < 0.05$)。不同施肥模式土壤微生物量碳含量在团聚体中的分布有所差异 (图 4)。4/4CN 模式和配施猪粪模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN) 土壤微生物量碳含量最高出现在 < 250 μm 团聚体中, 并

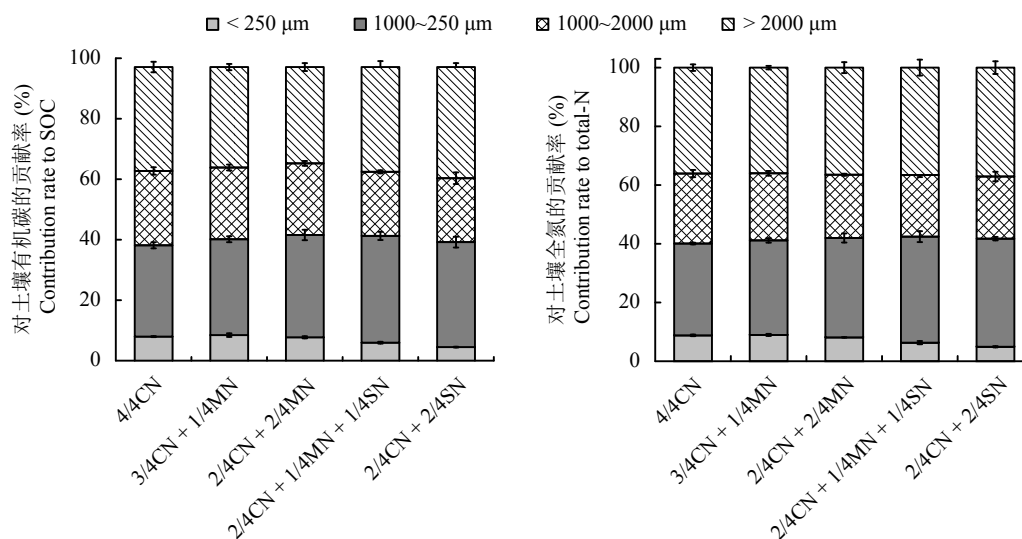


图 3 不同施肥模式下各粒级团聚体对土壤总有机碳和全氮储量的贡献

Fig. 3 Contributing rates of different soil aggregates to SOC and TN of soil under different fertilization modes

[注 (Note): CN—化肥氮 Chemical fertilizer N; MN—猪粪氮 Pig manure N; SN—秸秆氮 Straw N.]

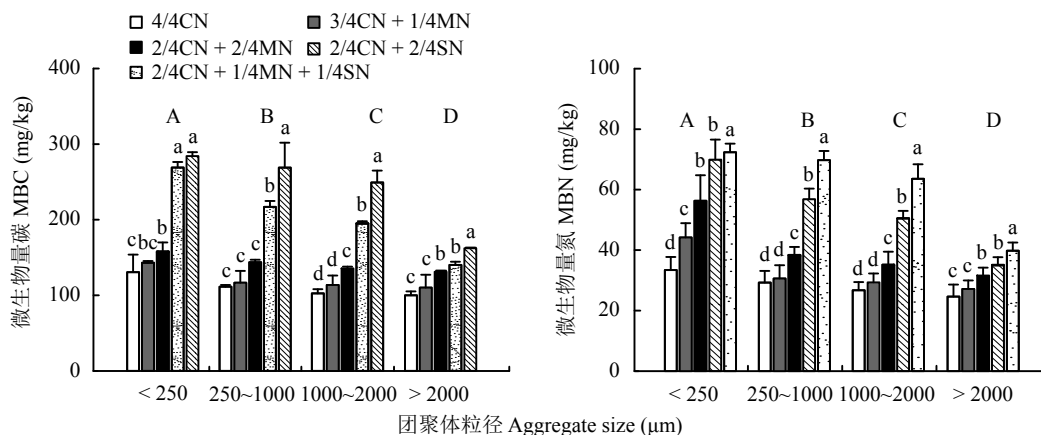


图 4 不同施肥模式对土壤不同粒级团聚体中微生物量碳、氮含量的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization modes on microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) in different soil aggregate-size fractions

[注 (Note): CN—化肥氮 Chemical fertilizer N; MN—猪粪氮 Pig manure N; SN—秸秆氮 Straw N; 柱上不同小写字母表示同一粒级团聚体不同处理间差异显著, 不同大写字母表示不同粒级团聚体间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among the fertilization treatments and different capital letters indicate significant differences among the aggregate-size fractions ($P < 0.05$).]

且显著高于其他粒级土壤团聚体 ($P < 0.05$)。配施秸秆模式 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤微生物量碳含量在 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体中最低。

图 4 显示, 不同施肥模式显著影响土壤团聚体中微生物量氮的分布。在各粒级团聚体中, 有机肥/秸秆模式均显著提高土壤微生物量氮含量, 其中以配施秸秆模式土壤微生物量氮含量相对较高。在 $< 250 \mu\text{m}$ 、 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 、 $1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ 和 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体中, 与 4/4CN 模式相比, 有机肥/秸秆替代化肥模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤微生物量氮含量分别增加 32.2%~116.5%、4.6%~138.3%、9.8%~37.9% 和 10.2%~61.5%, 分别平均增加 75.6%、67.1%、67.1% 和 35.7%; 与配施猪粪模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN) 相比, 配施秸秆模式 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤微生物量氮含量分别增加 10.0%~63.8%、47.9%~127.7%、43.5%~116.6% 和 11.2%~46.6%, 分别平均增加 33.6%、83.3%、76.8% 和 27.6%。在各级团聚体中, 2/4CN + 2/4MN、2/4CN + 1/4MN + 1/4SN 和 2/4CN + 2/4SN 模式土壤微生物量氮含量较 4/4CN 模式均显著增加 ($P < 0.05$)。在 $> 1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ 和 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 团聚体中, 配施秸秆模式 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 土壤微生物量氮含量均显著高于配施猪粪模式 (3/4CN + 1/4MN、2/4CN + 2/4MN) ($P < 0.05$)。

土壤团聚体粒径大小对团聚体中微生物量氮的

分布有显著影响 (图 4), 不同施肥模式土壤微生物量氮含量随土壤团聚体直径的增大而降低, 土壤不同粒级团聚体之间微生物量氮含量差异显著 ($P < 0.05$)。在 $< 250 \mu\text{m}$ 、 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 、 $1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ 和 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体中, 土壤微生物量氮的含量分别平均为 53.6、45.0、41.1 和 31.7 mg/kg。所有施肥模式中均以 $< 250 \mu\text{m}$ 团聚体中微生物量氮含量最高, 并且大都显著高于其它级别团聚体中微生物量氮含量, 特别是 $1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ 团聚体和 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体。

不同粒级土壤团聚体微生物量碳氮比 (MBC/MBN) 的变化见图 5。MBC/MBN 随土壤团聚体直径增大而增大, 不同粒级团聚体之间 MBC/MBN 差异显著 ($P < 0.05$)。较 $< 250 \mu\text{m}$ 团聚体, $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 、 $1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ 和 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体中 MBC/MBN 分别增加 7.20%、9.10% 和 14.82%, 但 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 团聚体和 $1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ 团聚体之间 MBC/MBN 没有显著差异。

3 讨论

3.1 土壤团聚体分布和稳定性

土壤团聚体被认为是评价土壤健康的重要指标之一, 其大小和数量能够影响土壤的水、肥、气和热等状况, 并与土壤生态功能有密切相关^[18-19]。有机质是土壤团聚体的重要胶结剂^[20], 因而有机质的数量和性质是影响土壤团聚体形成和稳定性的重要因素^[21-22]。研究表明, 长期施用有机肥能够提高土壤有机质含

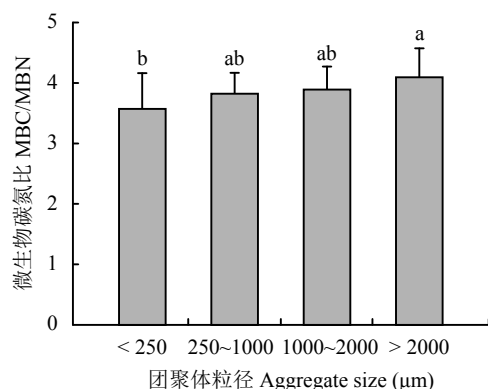


图5 不同粒级团聚体中微生物量碳氮比的变化

Fig. 5 Variation of soil microbial biomass carbon (MBC) to soil microbial biomass nitrogen (MBN) ratios across aggregate size

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences at $P < 0.05$ level among the aggregate fractions.]

量, 促进土壤团聚体形成、改善土壤结构^[23-26]。

本试验研究结果表明, 有机肥/秸秆替代化肥模式提高土壤大团聚体比例, 特别是 250~1000 μm 团聚体和 > 2000 μm 团聚体, 而且配施秸秆模式 (2/4CN + 1/4MN + 1/4SN、2/4CN + 2/4SN) 对团聚体分布影响较大。这是因为相对于猪粪, 秸秆富含大量的木质素、半纤维素、纤维素, 并且有机碳含量明显高于猪粪^[27]。秸秆施入土壤后所产生的大量有机胶结质, 如秸秆分解产生多糖、蛋白质等有机质以及由于微生物活动所形成的腐殖质等, 均会对大团聚体的形成及稳定性产生较大影响^[28]。配施秸秆可形成更多 > 250 μm 团聚体, 有助于增加土壤团聚体机械稳定性和水稳定性^[29]。徐国鑫等^[30]研究油菜-玉米种植模式下秸秆和生物炭还田效果表明, 秸秆还田对于促进土壤团聚作用效果更优。研究稻麦轮作不同秸秆还田年限条件下土壤团聚体稳定性以及有机碳组分的变化特征时显示, 秸秆还田条件下指示土壤团聚体稳定性的大团聚体数量 $R_{0.25}$ 、平均重量直径 (MWD) 和平均几何直径 (GMD) 均显著提升, 分形维数 D 则显著降低, 并且配施秸秆年限越长趋势越明显^[31]。

本研究中, 低量有机肥模式 (3/4CN + 1/4MN) 并没有显著提高大团聚体比例和团聚体的稳定性。因为设施蔬菜生产具有相对较高的集约化程度和复种指数, 并处于高温、高湿环境, 需要经常补充足够数量的有机物料, 才能保持良好的土壤条件^[32]。因此, 为维持设施蔬菜持续稳产高产, 一定数量的有

机物料投入是必需的。本研究中设施菜田土壤团聚体分布主要以 > 2000 μm 团聚体和 250~1000 μm 团聚体为主, 所占比例平均分别为 38.4% 和 32.0% (图 1)。已有采用湿土干筛法的研究表明, 对长期不同施肥处理玉米连作的棕壤进行团聚体分级, 结果显示棕壤团聚体以 250~1000 μm 为优势粒级, 而 < 250 μm 团聚体含量最少^[33]。用湿筛法研究紫云英、秸秆和商品有机肥等有机物料连续 5 年还田的稻田土壤团聚体分布特征显示, 土壤团聚体主要分布在 250~2000 μm 与 53~250 μm 两个粒级^[34]。对比不同研究结果可以发现土壤团聚体分布情况并不完全一致, 这主要是受土壤团聚体分级方法和土壤质地差异较大的影响^[35]。另外, 农田管理措施 (施肥和耕作等) 也会影响土壤团聚结构^[36-37]。

3.2 土壤团聚体中养分变化

研究表明表层土壤中 90% 左右的有机碳都存在于团聚体中^[38]。根据土壤团聚体层次模型理论, 土壤团聚形成过程中会产生土壤有机质组分的分异^[21]。本试验结果表明, 有机肥/秸秆替代化肥模式提高土壤各级团聚体有机碳和全氮的含量。秸秆还田显著提高各土壤团聚体粒级的有机碳含量, 研究连续 7 年秸秆投入对 > 2000 μm、250~2000 μm、53~250 μm 和 < 53 μm 团聚体中 SOC 含量的影响发现, 团聚体中 SOC 的变化和累计 C 输入之间存在显著的线性关系 ($R^2 = 0.99$, $P < 0.05$)^[39]。本研究结果也显示, 250~1000 μm 和 > 2000 μm 团聚体具有较高的有机碳氮的贡献率, 而团聚体分布也主要以 250~1000 μm 和 > 2000 μm 团聚体为主。两粒级团聚体总计分别贡献了土壤有机碳、全氮总量的 69.3% 和 70.4%。这主要是因为有机物料投入土壤后, 会促进土壤大团聚体的形成, 大团聚体有机碳含量相对较多, 并且有机碳增加主要表现在大团聚体中^[22, 33]。

整体看来, 有机肥/秸秆替代化肥模式均显著提高土壤速效磷含量, 但配施猪粪模式速效磷高于配施秸秆模式。这是因为猪粪含磷较高, 而秸秆中全磷含量比较低^[40], 配施秸秆模式需要更多化学磷肥投入以保持各处理等量氮磷钾, 而磷肥在土壤容易被土壤固持, 降低了土壤中速效磷的含量^[41]。另外, 研究发现秸秆具有较高的 C/P 比, 秸秆还田后可能会出现有效磷的固定现象^[27, 42]。Rubk 等^[43]利用 ^{31}P 核磁共振 (^{31}P -NMR) 技术研究磷在团聚体中的分布, 表明总磷含量随团聚体直径降低而增加; 文倩等^[44]采用干筛法研究获得土壤不同粒级团聚体中速效磷分

布, 结果显示在小团聚体中土壤速效磷含量较高; 用干筛法研究植茶年限对土壤团聚体氮、磷、钾含量的影响也发现, 有效磷含量集中在 $< 250 \mu\text{m}$ 团聚体中^[45]。这与本研究的结果基本一致, 不同施肥模式土壤各粒级团聚体中速效磷含量均表现为随土壤团聚体直径的减小而提高, $< 250 \mu\text{m}$ 和 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 团聚体中速效磷含量显著高于 $1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ 和 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体。造成这个结果的原因可能与土壤磷在土壤中的吸附与解吸、沉淀与溶解及生物固定等转化过程密切相关。

本研究中较单施化肥模式, 有机肥/秸秆替代化肥模式降低了土壤速效钾含量, 其中以配施秸秆模式土壤速效钾含量相对较低。造成这个结果的原因主要是配施秸秆模式有更高的生物量产出, 作物从土壤中吸收更多的钾, 另外还与本研究中施肥管理措施有关, 单施化肥模式和配施猪粪模式, 在后续追肥中有更高的化肥钾投入, 钾肥的投入会提高土壤速效钾的含量。研究表明, 秸秆中一般含有较多的钾素, 而且这些钾素具有较高的有效性, 小麦秸秆、玉米秸秆中速效钾约占全钾的 70%^[46]。当秸秆作为基肥施入土壤后, 明显提高土壤速效钾的水平^[27], 但随时间推移和田间水分的变化部分速效钾在与土壤接触过程中被土壤粘粒或晶格吸附转化成缓效钾, 因而在后期出现速效钾含量降低现象。本研究中土壤速效钾含量均表现为随土壤团聚体直径的减小而呈降低趋势, $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 、 $1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ 和 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体中速效钾含量显著高于 $< 250 \mu\text{m}$ 团聚体。王双磊等^[47]研究棉花秸秆还田对土壤团聚体有机碳及氮磷钾含量的影响也显示, 同一土层中, 大团聚体 ($> 250 \mu\text{m}$ 团聚体) 之间速效钾含量差异较小; 但 $< 250 \mu\text{m}$ 团聚体粒级微团聚体速效钾含量极显著低于其它粒级团聚体。王晟强等^[45]的研究结果表明, 土壤团聚体中速效钾含量随团聚体直径的减小先升高后降低, 大团聚体中有较高的速效钾含量。但也有研究认为, 土壤团聚体速效钾含量在不同粒级团聚体间没有显著差异^[48]。不同粒级团聚体对速效钾的影响程度的差异有待多年多点试验进一步研究。

3.3 土壤团聚体中微生物量碳氮变化及影响因素

尽管土壤微生物生物量占总土壤有机质 (SOM) 的比例几乎可以忽略不计 (1%~3%), 但它对于调节能量流和养分循环发挥着至关重要的作用^[49]。土壤微生物量对土地利用方式和农田管理措施等的响应非常敏感, 是反映农业生态系统稳定性和养分变化的重要指标^[50]。土壤团聚体中微生物量碳和微生物量氮

的分布特征可以在一定程度上表征土壤质量的变化。

本研究结果显示, 微生物量碳、氮表现出相似的趋势, 有机肥/秸秆替代化肥模式提高土壤微生物量碳、氮含量。有机管理 (如施用粪肥, 堆肥和秸秆等) 措施可以提高土壤微生物量含量^[51-52]。这主要是因为有机肥为土壤微生物提供了丰富碳源、氮源和其它的养分, 促进了微生物的生长^[53], 并且通过影响团聚体含量分布、土壤孔隙结构等改善了微生物的生境条件^[54-55]。本研究中, 配施秸秆模式土壤微生物量碳、氮含量高于配施猪粪模式。一般而言, 土壤微生物量碳、氮主要取决于输入有机物质的数量和质量。在一定条件下, 有机物质输入越多, 土壤微生物量就越高。猪粪所含氮素较多, 碳氮比例较小, 土壤有机碳投入不足; 而秸秆具有较高的碳氮比, 配施秸秆可以明显提高土壤有机碳含量 (表 1)。有研究表明, 土壤微生物量碳含量与土壤有机碳呈正相关关系^[56]。

本研究中, 土壤微生物量碳、氮含量均表现为随土壤团聚体直径的增大而降低。不同施肥模式均以 $< 250 \mu\text{m}$ 团聚体微生物量碳、氮含量最高, 并且大都显著高于其它级别团聚体微生物量氮含量, 特别是 $1000 \sim 2000 \mu\text{m}$ 团聚体和 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体。而用湿土干筛法研究生长在第四纪老冲积物发育而成的黄壤茶园土壤团聚体中养分和微生物量分布, 结果显示微生物量碳在大团聚体中处于最高水平^[57]。但同时也有研究结果表明用湿土干筛法得出微生物量在微团聚体较高^[13, 58]。这表明, 造成微生物量碳、氮在团聚体分布结果差异的原因既有团聚体分级方法差异, 也和土壤类型、土地利用方式和农田管理措施等密切相关。MBC/MBN 可以反映土壤微生物种类和区系, 一般认为, 细菌的 MBC/MBN 范围在 3~6, 而放线菌和真菌具有更高的 MBC/MBN^[59]。本试验结果中不同粒级团聚体 MBC/MBN 在 4 左右, 说明该土壤以细菌为主。

4 结论

1) 设施菜地土壤团聚体优势粒级为 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体和 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 团聚体, 有机肥/秸秆替代化肥模式提高土壤大团聚体比例, 特别是 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 团聚体和 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体。配施秸秆模式对土壤团聚体不同粒级分布影响较大, 并显著提高土壤团聚体稳定性。

2) $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 和 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体中有机碳、全氮储量是土壤有机碳氮的主要来源。土壤硝

态氮在 250~1000 μm 与 1000~2000 μm 团聚体含量较高, 土壤速效钾表现为随土壤团聚体直径的增大而提高, 而速效磷则随土壤团聚体直径的增大而降低。有机肥/秸秆替代化肥模式提高土壤各级团聚体有机碳、全氮、硝态氮和速效磷含量。

3) 有机肥/秸秆替代化肥模式提高了土壤微生物量碳、氮含量, 其中以配施秸秆模式土壤微生物量碳、氮含量较高。土壤微生物量碳、氮含量呈现出随土壤团聚体直径的减小而增大的趋势。

参 考 文 献:

- [1] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1480–1493.
Huang S W, Tang J W, Li C H, *et al.* Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1480–1493.
- [2] 雷宝坤, 陈清, 范明生, 等. 寿光设施菜田碳、氮演变及其对土壤性质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, (5): 914–922.
Lei B K, Chen Q, Fan M S, *et al.* Changes of soil carbon and nitrogen in Shouguang intensive vegetable production fields and their impacts on soil properties[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, (5): 914–922.
- [3] 黄绍文, 高伟, 唐继伟, 等. 我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, (4): 965–977.
Huang S W, Gao W, Tang J W, *et al.* Total salt content and ion composition in tillage layer of soils in the main vegetable production regions of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, (4): 965–977.
- [4] 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, (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, (2): 41–49.
- [5] 王文锋, 李春花, 黄绍文, 等. 不同施肥模式对设施菜田土壤微生物量碳、氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1286–1297.
Wang W F, Li C H, Huang S W, *et al.* Effects of different fertilization patterns on microbial biomass carbon and nitrogen in greenhouse vegetable soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(5): 1286–1297.
- [6] 高杰云, 康凌云, 严正娟, 等. 沼肥替代化肥对设施蔬菜产量和土壤养分及重金属累积的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 200–207.
Gao J Y, Kang L Y, Yan Z J, *et al.* Effects of biogas manure replacing chemical fertilizer on accumulation of nutrient and heavy metal in greenhouse vegetable soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(17): 200–207.
- [7] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 等. 减量施磷对温室菜地土壤磷素积累、迁移与利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3944–3952.
Li R N, Wu X P, Zhang Y C, *et al.* Effects of reduced phosphorus fertilization on soil phosphorus accumulation, leaching and utilization in greenhouse vegetable production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3944–3952.
- [8] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 49–53.
Chen E F, Guan L Z, Wang J K, *et al.* Compositional proportion of soil characteristic microaggregates and soil fertility evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 49–53.
- [9] Hu W, Zhang Y, Huang B, *et al.* Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: Current status and management strategies[J]. *Chemosphere*, 2017, 170: 183–195.
- [10] Zhu T, Zhang J, Cai Z. The contribution of nitrogen transformation processes to total N_2O emissions from soils used for intensive vegetable cultivation[J]. *Plant and Soil*, 2011, 343(1–2): 313–327.
- [11] Schutter, M E, Dick R P. Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover-cropped soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(1): 142–153.
- [12] Gartzia-Bengoetxea N, González-Arias A, Merino A, *et al.* Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(8): 1674–1683.
- [13] Zhang S, Li Q, Lü Y, *et al.* Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 147–156.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Soil and agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [15] Norman R J, Edberg J C, Stucki J W. Determination of nitrate in soil extracts by dual-wavelength ultraviolet spectrophotometry[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(5): 1182–1185.
- [16] 李振高. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Li Z G. Soil and environmental microbiology research[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [17] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. Soil microbial biomass methods and application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [18] 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.
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.
- [19] Whalen J, Chang C. Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(5): 1637–1647.
- [20] 张艺, 戴齐, 尹力初, 等. 后续施肥措施改变对水稻土团聚体有机碳分布及其周转的影响[J]. *土壤*, 2017, (5): 969–976.
Zhang Y, Dai Q, Yin L C, *et al.* Effects of following-up fertilization reforming on distribution and turnover of aggregate-associated organic carbon in paddy soils[J]. *Soils*, 2017, (5): 969–976.

- [21] Tisdall J, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163.
- [22] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [23] Zhao J, Chen S, Hu R, *et al.* Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 73–79.
- [24] Wang W, Chen W C, Wang K R, *et al.* Effects of long-term fertilization on the distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in water-stable aggregates in paddy soil[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(12): 1932–1940.
- [25] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 1–12.
- [26] 杜立宇, 李天来, 梁成华, 等. 长期不同施肥处理对设施土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1): 38–41.
Du L Y, Li T L, Liang C H, *et al.* Effects of long-term different fertilizations on composition and stability of soil aggregates in a greenhouse soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(1): 38–41.
- [27] 邹晓霞, 陕红, 陈磊, 等. 秸秆和猪粪施用对樱桃萝卜的效果比较及对土壤性状的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(5): 165–172.
Zou X X, Shan H, Chen L, *et al.* Effects of pig manure and wheat straw application on plant growth and nutrient uptake of cherry radish (*raphanus sativus*) and characteristics of soil fertility[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(5): 165–172.
- [28] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(2): 412–418.
- [29] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, (3): 759–768.
Wang L, Li J, Li J, *et al.* Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei Highland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, (3): 759–768.
- [30] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. *环境科学*, 2018, (1): 355–362.
Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. *Environmental Science*, 2018, (1): 355–362.
- [31] 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.
Zhang H L, Zheng X Q, He Q Y. 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.
- [32] 宋述尧. 玉米秸秆还田对塑料大棚蔬菜连作土壤改良效果研究(初报)[J]. *农业工程学报*, 1997, (1): 141–145.
Song S Y. Effects of uncomposed corn straw on improvement of soil with contineous cropping in plastic-house[J]. *Tarnsactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1997, (1): 141–145.
- [33] 邢旭明, 王红梅, 安婷婷, 等. 长期施肥对棕壤团聚体组成及其主要养分赋存的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, (2): 267–273.
Xing X M, Wang H M, An T T, *et al.* Effects of long-term fertilization on distribution of aggregate size and main nutrient accumulation in brown earth[J]. *Journal of Soil and Water Consevation*, 2015, (2): 267–273.
- [34] 俞巧钢, 杨艳, 邹平, 等. 有机物料对稻田土壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, (6): 170–175.
Yu Q G, Yang Y, Zou P, *et al.* Effect of organic materials application on soil aggregate and soil organic carbon in rice fields[J]. *Journal of Soil and Water Consevation*, 2017, (6): 170–175.
- [35] Sainju U M. Carbon and nitrogen pools in soil aggregates separated by dry and wet sieving methods[J]. *Soil Science*, 2006, 171(12): 937–949.
- [36] Garcia-Franco N, Martínez-Mena M, Goberna M, *et al.* Changes in soil aggregation and microbial community structure control carbon sequestration after afforestation of semiarid shrublands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 87: 110–121.
- [37] Hontoria C, Gómez-Paccard C, Mariscal-Sancho I, *et al.* Aggregate size distribution and associated organic C and N under different tillage systems and Ca-amendment in a degraded Ultisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 42–52.
- [38] Imbue A U, Patti A F, Burrow D, *et al.* Effects of potassium humate on aggregate stability of two soils from Victoria, Australia[J]. *Geoderma*, 2005, 125(3–4): 321–330.
- [39] Zhao H, Shar A G, Li S, *et al.* Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178–186.
- [40] Vuorinen A H, Saharinen M H. Cattle and pig manure and peat cocomposting in a drum composting system: microbiological and chemical parameters[J]. *Compost Science & Utilization*, 1999, 7(3): 54–65.
- [41] Shao J Z. Crop production on acidic soils: overcoming aluminium toxicity and phosphorus deficiency[J]. *Annals of Botany*, 2010, 106(1): 183–184.
- [42] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. *土壤通报*, 2001, 32(5): 209–213.
Jiang Y H, Yu Z R, Ma Y L. The effect of stubble return on agro-ecological system and crop growth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(5): 209–213.
- [43] Rubæk G H, Guggenberger G, Zech W, *et al.* Organic phosphorus in soil size separates characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance and resin extraction[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1123–1132.
- [44] 文倩, 赵小蓉, 张书美, 等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量磷的分布特征[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(2): 327–332.
Wen Q, Zhao X R, Zhang S M, *et al.* Distribution characteristics of microbial biomass phosphorus in different soil aggregates in semi-arid area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(2): 327–332.
- [45] 王晟强, 郑子成, 李廷轩. 植茶年限对土壤团聚体氮、磷、钾含量变化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, (6): 1393–1402.

- Wang S Q, Zheng Z C, Li T X. Effects of ages of tea plantations on changes of nitrogen, phosphorus and potassium contents in soil aggregates[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, (6): 1393–1402.
- [46] 周晓芬, 张彦才, 李巧云, 等. 厩肥、秸秆和绿肥的含钾状况及其对土壤和作物钾素的供应能力[J]. *华北农学报*, 1999, (4): 83–87.
- Zhou X F, Zhang Y C, Li Q Y, *et al.* Potassium status in barnyard manure, crop residue and green manure and their capability of supplying potassium to soil and crop[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1999, (4): 83–87.
- [47] 王双磊, 刘艳慧, 宋宪亮, 等. 棉花秸秆还田对土壤团聚体有机碳及氮磷钾含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, (12): 3944–3952.
- Wang S L, Liu Y H, Song X L, *et al.* Effects of cotton straw returning on soil organic carbon, nitrogen, phosphorus and potassium contents in soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, (12): 3944–3952.
- [48] 区晓琳, 陈志彪, 姜超, 等. 植被恢复对亚热带侵蚀红壤团聚体养分分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, (6): 230–238.
- Ou X L, Chen Z B, Jiang C, *et al.* Effect of vegetation restoration on nutrient distribution within aggregate of subtropical eroded red soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, (6): 230–238.
- [49] Jiang X, Shi X, Wright A L. Seasonal variability of microbial biomass associated with aggregates in a rice-based ecosystem[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 56: 84–88.
- [50] Galvez A, Sinicco T, Cayuela M L, *et al.* Short term effects of bioenergy by-products on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 160(10): 3–14.
- [51] Kallenbach C, Grandy A S. Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: A meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 241–252.
- [52] 代红翠, 陈源泉, 赵影星, 等. 不同有机物料还田对华北农田土壤固碳的影响及原因分析[J]. *农业工程学报*, 2016, (S2): 103–110.
- Dai H C, Chen Y Q, Zhao Y X, *et al.* Effects and causes of different organic materials amendment on soil organic carbon in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, (S2): 103–110.
- [53] Gougoulas C, Clark J M, Shaw L J. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2014, 94(12): 2362–2371.
- [54] Briar S S, Fonte S J, Park I, *et al.* The distribution of nematodes and soil microbial communities across soil aggregate fractions and farm management systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 905–914.
- [55] Xiao S, Zhang W, Ye Y, *et al.* Soil aggregate mediates the impacts of land uses on organic carbon, total nitrogen, and microbial activity in a Karst ecosystem[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41402.
- [56] 龙攀, 隋鹏, 高旺盛, 等. 不同有机物料还田对农田土壤有机碳以及微生物量碳的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2015, (3): 153–160.
- Long P, Sui P, Gao W S, *et al.* Effects of agricultural organic wastes incorporation on soil organic carbon and microbial carbon[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, (3): 153–160.
- [57] Wang S, Li T, Zheng Z. Distribution of microbial biomass and activity within soil aggregates as affected by tea plantation age[J]. *Catena*, 2017, 153: 1–8.
- [58] Zhang S, Li Q, Zhang X, *et al.* Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 196–202.
- [59] 马想, 黄晶, 赵惠丽, 等. 秸秆与氮肥不同配比对红壤微生物量碳氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1574–1580.
- Ma X, Huang J, Zhao H L, *et al.* Straw and nitrogen fertilizer ratios influence microbial biomass carbon and nitrogen in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1574–1580.