

DOI: 10.11766/trxb202303140101

洪华阳, 魏天齐, 周红梅, 任艳云, 马龙传, 苏彦华, 张焕朝. 修复连作大蒜土壤生产力衰退的有机质补偿方案与初步机理[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1386–1397.

HONG Huayang, WEI Tianqi, ZHOU Hongmei, REN Yanyun, MA Longchuan, SU Yanhua, ZHANG Huanchao. Organic Matter Compensation Scheme and Preliminary Mechanism for Remediation of Soil Productivity Decline in Continuous Cropping Garlic[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(5): 1386–1397.

修复连作大蒜土壤生产力衰退的有机质补偿方案与初步机理*

洪华阳¹, 魏天齐^{2, 3}, 周红梅⁴, 任艳云⁴, 马龙传⁵, 苏彦华², 张焕朝^{1†}

(1. 南京林业大学林学院, 南京 210037; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 山东济宁市农业科学研究院, 山东济宁 272100; 5. 山东省金乡县科技局(大蒜研究所), 山东济宁 272200)

摘要: 针对山东省金乡县品牌大蒜主产区长期连作大蒜田中土壤有机质亏缺和大蒜产量连年衰减的典型问题, 以不同比例的有机肥替代化肥作为有机质补偿方案, 研究了有机肥替代化肥对大蒜产量和土壤障碍的修复效果。试验选取了大于 25 年连作历史的代表性田块, 以未种植大蒜的麦田作为非连作田块对照, 设置常规化肥施肥 (CF)、以氮 (N) 为基准进行有机肥替代化肥 25% (M25)、50% (M50) 和 100% (M100) 四个处理。结果表明, 在长期大蒜连作土壤中, 有机替代处理对大蒜的产量衰退具有显著的当季修复效果, 增产幅度可达 20%, 同时改善了土壤中的氮素养分供应状态和土壤大于 2 mm 团聚体的比例; 其中 25% 有机替代率 (M25) 具有较佳的经济效益; 而在土壤有机质未出现亏缺的非连作土壤中, 有机替代处理并无直接的增产效果。综上, 本研究明确了增施有机肥仅在土壤有机质出现明显亏缺的连作大蒜土壤中可通过促进大颗粒土壤团聚体的形成和提升全生育期土壤有效态养分的固持能力, 进而对连作大蒜土壤生产力的退化具有显著的修复效果。该研究对缓解连作体系中的类似土壤退化问题和维持土壤生产力的可持续性, 具有有益的借鉴作用。

关键词: 有机质补偿; 有机替代; 大蒜产量; 土壤养分; 土壤结构

中图分类号: S158.2; S56 文献标志码: A

Organic Matter Compensation Scheme and Preliminary Mechanism for Remediation of Soil Productivity Decline in Continuous Cropping Garlic

HONG Huayang¹, WEI Tianqi^{2, 3}, ZHOU Hongmei⁴, REN Yanyun⁴, MA Longchuan⁵, SU Yanhua², ZHANG Huanchao^{1†}

(1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Shandong Jining Academy of Agricultural Sciences, Jining, Shandong 272100, China; 5. Science and Technology Bureau of Jinxiang County, Shandong Province (Garlic

* 2022 年度江苏省碳达峰碳中和科技创新项目 (BE2022805) 和中国科学院南京土壤研究所“十四五”创新项目 (ISSASIP2201) 共同资助 Supported by 2022 Carbon Peak Carbon Neutral Technology Innovation Project of Jiangsu Province, China (No. BE2022805) and the 14th Five-year Plan Innovation Program of the Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (No. ISSASIP2201)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hc Zhang@njfu.edu.cn

作者简介: 洪华阳 (1994—), 女, 安徽黄山人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: nanlinhong@163.com

收稿日期: 2023-03-14; 收到修改稿日期: 2023-06-12; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-08-16

Research Institute), Jining, Shandong 272200, China)

Abstract: 【 Objective 】 This study aimed to use different proportions of organic fertilizer instead of chemical fertilizer as organic matter compensation schemes to study their effects on garlic yield attenuation in long-term continuous cropping garlic fields in the main garlic-producing area of Jinxiang County, Shandong Province. 【 Method 】 The representative fields with more than 25 years of continuous cropping history were selected in this experiment. The wheat field without garlic planting was used as the non-continuous cropping field control. Four treatments were set up : conventional chemical fertilizer fertilization (CF) and organic fertilizer to replace chemical fertilizer with 25% (M25), 50% (M50) and 100% (M100) based on nitrogen (N). 【 Result 】 The results showed that in the long-term garlic continuous cropping soil, organic fertilizer instead of chemical fertilizer treatment had a significant effect on the increase(20%)of garlic yield in the current season. Also, the content of N in continuous cropping soil and the proportion of soil > 2 mm aggregates were increased, and the N nutrient supply status and soil aggregate structure in the soil were improved. Among the treatments, 25% organic fertilizer instead of chemical fertilizer treatment(N)had the best yield and economic benefit of garlic, and also had a better repair effect on the decline of soil productivity of continuously cropping garlic. However, in non-continuous cropping soil without organic matter deficit, organic substitution treatment did not have a direct effect on increasing production. 【 Conclusion 】 This study clarified that the application of organic fertilizer(partial organic fertilizer instead of chemical fertilizer treatment)based on chemical fertilizer application can only promote the formation of large-grained soil aggregates and enhance the holding capacity of soil available nutrients during the whole growth period in the continuous cropping garlic soil with obvious deficiency of soil organic matter. It also has a significant restoration effect on the degradation of continuously cropping garlic soil productivity. This study provides a useful reference for alleviating similar soil degradation problems and maintaining the sustainability of soil productivity in continuous cropping systems.

Key words: Organic matter compensation; Organic substitution; Garlic yield; Soil nutrients; Soil structure

大蒜是我国的特色经济作物，种植面积常年占世界总面积的 1/2，而生产了约占世界总产量 70% 的大蒜产品^[1]。因此我国的大蒜生产凸显了由化肥密集投入而获得高产的典型特征。由于我国大蒜主产区为了维持大蒜的品牌优势以及较高经济效益的导向下，大蒜种植在当地的耕地使用中占主导地位，使得轮作的空间很小，导致常年采用单一种植的连作方式。随着连作年限的延长，超过 25 年连作历史的大蒜田，出现了严重的大蒜产量逐年衰退的问题。例如在山东省金乡县地理标志大蒜主产区，25 年以上的长期连作大蒜田的蒜头产量普遍仅为初始时期（连作 10 年以内）的 1/2，而化肥投入成本却由最初的每公顷 4 500 元左右增加了一倍以上，扣除物价上涨因素，氮磷钾化肥的投入量增加 60%~70%（数据未发表）。上述特征是土壤连作障碍发生的典型体现之一。连作障碍的发生具有多方面的原因，主要包括连续单一种植、采收制度和常年相对统一的水肥管理措施所导致的土壤养分失衡、有机质损耗、土壤结构变差以及土壤微生物群落结构与多样性的恶化等诸多表现^[2-6]，最终使得作物产量和品质严重

降低。根据本研究前期对约 100 个大蒜种植户的问卷走访，土传病害在连作大蒜土壤中的危害具有与当年种植季节的高温现象相关联的季节偶然性，在正常年份病原菌的危害并不是导致大蒜减产的主要原因，与果蔬类作物连作障碍减产有所不同。在山东金乡县大蒜主产区，自 20 世纪 90 年代以来，大蒜的种植、管理一直沿用国家和地方推行的标准化种植技术（DB37/T 335—2002、GB/T 22212—2008、T/JXDSZZ002—2020）。在这些标准化技术规程中，有机肥或有机物料的施用并未得到重视。长此以往，造成土壤中磷钾养分的过量积累和土壤有机质亏缺的现状。本文试验季节属于正常年份，从调查结果和连作障碍发生诱因分析，本文未关注病害的问题，对土壤生产力修复的主要关注点聚焦于土壤有机质的补偿。

土壤有机质对改善土壤的理化性质、增加养分固持以及从碳源角度为土壤微生物活动提供能量来源尤为重要^[7]。土壤团聚体结构的形成与土壤有机质含量密切相关，是衡量土壤肥力的重要指标^[8-10]。王钰皓等^[11]在农田试验发现，有机物料还田可提高土壤有机碳含量和土壤大于 0.25 mm 粒径百分

比,二者对玉米的产量有显著促进作用,平均提高14.6%。Agbede 和 Adekiya^[12]通过生物质炭还田提高土壤耕层团聚体的稳定性,改善土壤结构,使作物产量平均增加40%以上。司海丽等^[13]的研究表明通过增施适量的有机替代,可增加玉米穗重、穗长、穗粗、百粒重和行数从而增加玉米产量。有机肥对连作作物的增产作用是有限度的。对于土壤有机质本底值较高、结构良好的土壤而言,增施有机肥的增产效果通常并不明显,其作用在很大程度上体现在有机质增量对于土壤生产力可持续性的保证方面。如在黄淮海典型潮土上的长期定位试验结果表明,在不追求高产目标的前提下,相较于秸秆还田或有机无机配施,长期单纯施用氮磷钾(NPK)化肥也能维持较高的小麦产量,且土壤有机质、土壤物理结构、养分有效性以及土壤酶活等衡量土壤地力水平的指标亦有稳步提升^[14-15]。

本文针对山东省金乡长期连作大蒜土壤中出现的有机质亏缺和产量降低现象,探讨通过有机肥替代化肥进行有机质补偿,对大蒜产量降低的恢复效果;结合当地有机肥源不足的现状,确定经济有效的有机替代比例;并研究该有机质补偿措施对土壤理化性质的影响。同时选取未种植大蒜的田块作为

对照,在有机质和磷钾养分背景的巨大差异下,通过有机替代进行有机质补偿,甄别对大蒜产量增加的效果。本文研究结果可为解决当地长期连作大蒜土壤生产力降低、维系该种植模式的可持续性提供有益支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

本研究在前期农户调查基础上,分别选取山东省济宁市金乡县化雨镇刘堂村(35°01'N, 116°23'E)和卜集镇李堂村(35°10'N, 116°17'E)两个典型田块,面积均为约1500 m²。其中刘堂村试验地为连续种植大蒜约30年的田块,近年来大蒜蒜头产量较初期年份(约23 t·hm⁻²)降低约50%,在该县长期连作大蒜田中具有代表性。而李堂村田块从未种植过大蒜,常年小麦-玉米轮作,作为非连作大蒜田对照。该县处于黄淮海平原,地势平坦,全县无山,土壤类型为典型黄潮土,pH 7.9~8.2(土:水比为1:2.5),呈较为明显的偏碱性。供试两处田块土壤均为中壤质地。试验布置前采集耕层土壤(0~20 cm)进行理化性质分析,如表1所示。

表1 试验地土壤基本性质(0~20 cm)

Table 1 Basic soil properties of the test field (0-20 cm)

	有机碳	全氮	全磷	全钾	有效氮	有效磷	速效钾
	Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	Total N/ (g·kg ⁻¹)	Total P/ (g·kg ⁻¹)	Total K/ (g·kg ⁻¹)	Avail. N/ (mg·kg ⁻¹)	Avail. P/ (mg·kg ⁻¹)	Avail. K/ (mg·kg ⁻¹)
连作土壤 ^①	6.95±0.32**	0.71±0.04	1.06±0.05*	15.12±0.93	23.26±2.44**	37.86±1.97**	300.5±9.4**
非连作土壤 ^②	11.51±0.10	0.92±0.23	0.92±0.03	16.54±1.22	38.72±3.98	14.38±2.90	165.0±7.5

注:与非连作土壤相比,*表示在 $P < 0.05$ 置信区间差异显著;**表示在 $P < 0.01$ 置信区间差异显著。Note: Compared with non-continuous garlic cropping soil, * showed significant difference in $P < 0.05$ confidence interval, and ** indicated significant difference in $P < 0.01$ confidence interval. ① Continuous garlic cropping soil, ② Non-continuous garlic cropping soil.

供试大蒜品种为当地主栽品种:金蒜3号。试验用有机肥为鸡粪有机肥(含有机质394.6 g·kg⁻¹、N 17.3 g·kg⁻¹、P₂O₅ 25.7 g·kg⁻¹、K₂O 19.3 g·kg⁻¹),化肥类型为包膜长效尿素(控释期180 d)、磷酸二铵和硫酸钾,购自山东农大肥业。

试验于2019年10月—2020年5月进行,在连作大蒜田块和非连作田块均设置4个相同的处理。常规化肥施肥处理(CF):N 300 kg·hm⁻²、P₂O₅ 225 kg·hm⁻²、K₂O 300 kg·hm⁻²为对照。以CF处理

中的总N量为基准,以有机肥替代化肥25%(3.75 t·hm⁻², M25)、50%(5 t·hm⁻², M50)和100%(7.5 t·hm⁻², M100)作为有机质补偿方案。有机替代中不足的NPK养分以化肥补齐。所有的化肥和有机肥均在大蒜播种时一次性施入,后期不再追施氮肥。每处理小区面积为60 m²,重复3次,随机区组排列。不同处理间留出3 m缓冲带,并于小区四周设2 m保护行。本研究目的是探讨有机替代/有机质补偿方案相对于常规化肥施肥的实效性,故未设置不施肥的空白处

理。大蒜的种植、田间管理和采收采用当地通行的金乡大蒜种植标准 (T/JXDSZZ002—2020) [16]。

1.2 土样采集与制备

在大蒜成熟期, 采集 0~20 cm 土样, 每个小区按“S”型方法布点, 采集 5 点组成一个混合样, 土壤样品装在塑料盒内运回实验室。土样运回实验室后分为 2 份。一份土壤样品自然风干后研磨过 100 目和 10 目筛, 用于土壤全量养分和速效养分的测定, 一份在室内风干, 待土样完全风干后收集过 67 目筛, 用于土壤团聚体的测定。

1.3 分析方法

土壤样品经 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 1 h 浸提后分别用元素分析仪 (Smartchem 200, 西班牙) 和分光光度法测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量, 用于计算有效氮含量; 土壤样品经 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 (pH8.5) $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 30 min 浸提后, 钼锑抗比色法测定有效磷 (Olsen-P); 土壤样品经 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_4OAc $120 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 30 min 浸提用火焰光度计 (M410, 英国) 测定速效钾 [17]。

土壤总有机质采用重铬酸钾氧化-比色法测定 [17]; 易氧化有机碳采用 $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 高锰酸钾氧化-分光光度法测定 [18]; 颗粒有机碳 (>0.05 mm) 采用六偏磷酸钠分散法将土壤样品进行分级后用重铬酸钾氧化-比色法测定 [19]。总球囊霉素相关土壤蛋白 (Total glomalin-related soil protein, T-GRSP) 和易提取球囊霉素相关土壤蛋白 (Easy extractable glomalin-related soil protein, EE-GRSP) 的提取和测定按照 Wright 和 Upadhyaya [20] 的方法, 考马斯亮蓝 G-250 染色, 于 595 nm 波长下比色测定。

土壤水稳性团聚体测定 [21] 采用湿筛法: 将 100 g 风干土壤样品在室温下放置于湿筛机的不锈钢筛上, 不锈钢筛孔径分别为 2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm, 从上到下依次重叠固定, 在蒸馏水中浸泡 5 min, 筛子上下振荡 3 min, 振动结束后, 分别收集筛子上的团聚体, 同时收集滤出液于最后一级团聚体悬液中, 为小于 0.053 mm 团聚体

1.4 数据处理

土壤团聚体稳定性采用平均重量直径 (MWD)、平均几何直径 (GMD)、大于 0.25 mm 团聚体含量 ($R_{0.25}$) 进行评价, 其计算公式 [21-22] 如下:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n (x_i w_i) \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{T>0.25}}{M_T} \quad (3)$$

式中, 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 i 粒级团聚体质量所占比例, m_i 为土壤不同粒级团聚体的质量, M_T 为团聚体总质量。

分形维数 (D) 的计算采用杨培岭等 [23] 推导的公式:

$$\frac{M(r < x_i)}{M_T} = \left\{ \frac{x_i}{x_{\max}} \right\}^{3-D} \quad (4)$$

对式 (4) 两边取对数可得

$$\lg \frac{M(r < x_i)}{M_T} = (3-D) \lg \left\{ \frac{x_i}{x_{\max}} \right\} \quad (5)$$

利用式 (4) 或式 (5), 通过数据拟合可求得 D 。其中, x_i 为某级团聚体平均直径, $M(r < x_i)$ 为粒径小于 x_i 的团聚体质量, x_{\max} 为团聚体的最大粒径。

可蚀性 K 的计算采用 Shirazi 和 Boersma [24] 提出仅需要考虑几何平均直径 (GMD) 来计算的公式:

$$K = 7.954 \cdot 7 \times \{0.001 \cdot 7 + 0.049 \cdot 4 \times \exp[-0.5 \times (1.675 + \log_{10} \text{GMD}/0.698 \cdot 6)^2]\} \quad (6)$$

本研究运用 SPSS 26 进行数据分析, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 比较处理间差异, 用邓肯 (Duncan's) 法检验差异显著性 ($P < 0.05$), 图表中数据为平均值 \pm 标准差, Excel 2021 和 GraphPad Prism 8 软件进行绘图。

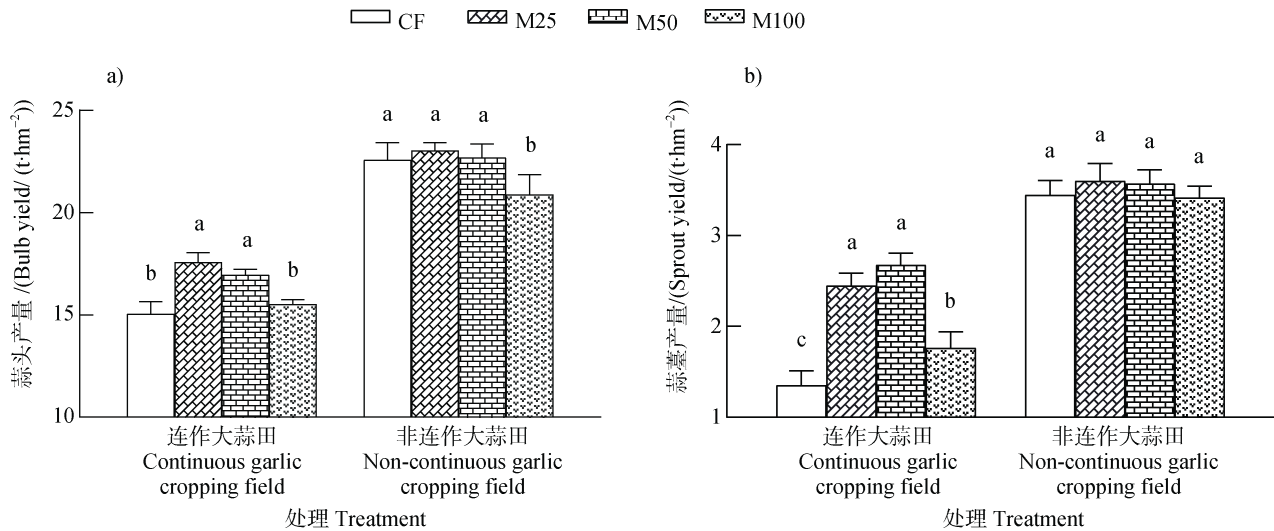
2 结 果

2.1 有机替代对连作和非连作田大蒜产量的影响

蒜头产量是该地大蒜经济产量的主要衡量指标。在常规沿用的化肥 (CF) 处理下, 可以明显看出连作大蒜田的蒜头产量仅为 $15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相比于非连作大蒜田中约 $23 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量, 降低了约 1/3 (图 1a)。这与农户调查中所了解到的长期连作大蒜

田中出现严重减产的事实十分吻合。在连作大蒜田中,有机替代处理 M25 和 M50 的蒜头产量分别较 CF 增加了约 20%和 16%,而全量有机替代处理 M100 则无明显增产效果(图 1a),说明适量的化肥施用仍为大蒜产量的必要保证。而在非连作大蒜田中,有机替代处理并无显著的增产效果,M100 处理反而有减产的趋势(图 1a)。年际水平变动较大的蒜薹产量,在连作大蒜田中,各有机替代处理均具有显著增产效果。M25、M50 和 M100 处理下,蒜薹产量分别较 CF 处理增加了 80%、100% 和 30%。

其中 M25 和 M50 的增产效果尤为显著,几乎达到倍增的效果(图 1b)。与此相反,在非连作田块中,有机替代对蒜薹产量无明显促进作用(图 1b)。有机替代的增产效应在很大程度上反映了其对长期连作大蒜田土壤有机质衰减(表 1)的补偿作用而带来的生产力修复效果。本试验也表明,在长期连作大蒜土壤中以有机肥替代 25%(M25)和 50%(M50)是具有当季增产效果的有机质补偿方案。而在土壤有机质含量衰减不是主要限制因素的非连作田块中,增施有机肥至少在当季,对大蒜产量并无明显促进效果。



注: CF, 单施化肥; M25, 有机肥替代化肥 N 25%; M50, 有机肥替代化肥 N 50%; M100, 有机肥替代化肥 N 100%。不同字母表示相同田块不同施肥处理间在 $P < 0.05$ 置信区间差异显著。下同。Note: CF, a single application of chemical fertilizer; M25, organic fertilizer substitution rated at 25% N; M50, organic fertilizer substitution rate at 50% N; M100, organic fertilizer substitution rate at 100% N. Different letters indicate significant difference between different fertilization treatments in the same field at $P < 0.05$. The same below.

图 1 有机替代对连作和非连作大蒜田蒜头 (a) 和蒜薹 (b) 产量的影响

Fig. 1 Effect of organic substitution on garlic bulb (a) and sprout (b) yields between continuous and non-continuous garlic cropping fields

2.2 有机替代对土壤总有机碳和活性有机碳的当季补偿效应

在连作大蒜田中,大蒜收获后土壤有机碳的测定数据表明,与表 1 中的初始值 ($6.95 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相比,CF 处理下土壤有机碳为 $6.81 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,略有降低,反映了 CF 处理在长期延续过程中,不利于土壤有机质的维持。这可能是造成长期连作大蒜土壤有机质降低的重要原因之一。而有机替代处理则显著增加了连作大蒜土壤的总有机碳含量,M25、M50 和 M100 处理下,分别为 7.83 、 8.09 和 $8.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;与 CF 相比,分别获得了 14.9%、18.8% 和 29.1% 的当季土壤有机碳收益(图 2a),反映有机替代可作

为补偿土壤有机质损耗的有效措施。在非连作土壤中有有机替代对土壤有机碳的增加也有促进的趋势,但仅在有机肥投入量较大时才有显著提高(图 2a)。进一步,连作大蒜田中,土壤活性有机碳含量也有显著增加,与 CF 相比,土壤易氧化有机碳(EOC)含量指标在 M25、M50 和 M100 处理下增幅较为一致,均介于 30%~40%。而在非连作土壤中,M25 处理并未显著增加 EOC 的含量,仅高比例替代处理 M50 和 M100 对 EOC 含量的增加具有显著效果,幅度可达 31%~39%(图 2b)。另一个活性有机碳指标,颗粒有机碳(POC)含量的变化趋势与 EOC 类似(图 2c)。上述数据反映了连作大蒜土壤中,因有机质

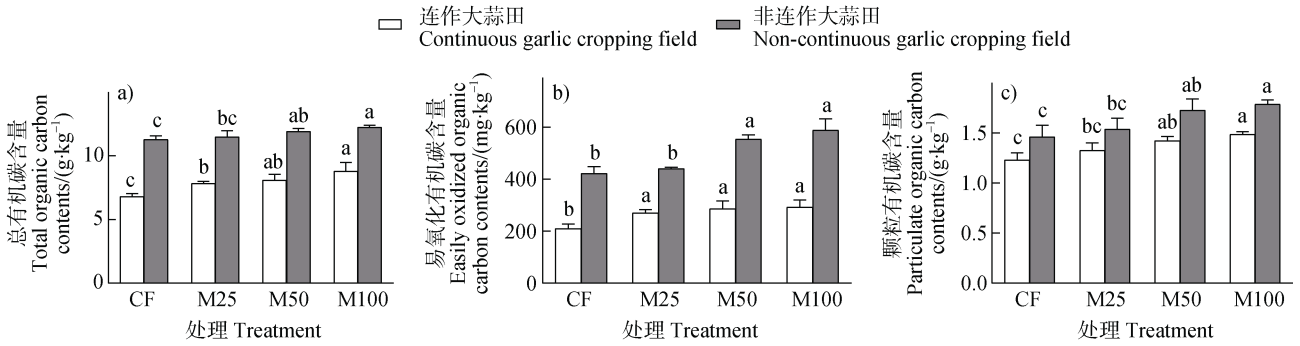


图 2 有机替代对连作和非连作大蒜土壤总有机碳 (a)、易氧化有机碳 (b) 和颗粒有机碳 (c) 的影响 (收获期)
Fig. 2 Effects of organic substitution on soil total organic carbon (a), easily oxidized organic carbon (b) and particulate organic carbon (c) in continuous and non-continuous garlic cropping fields (harvest stage)

总量降低而使得活性有机碳水平较低, 可能是影响土壤生物活性的潜在因素之一。连作土壤中的有机碳亏缺, 在 M25 处理下即可得到明显缓解。

2.3 有机替代对连作和非连作大蒜田土壤养分影响

在大蒜收获期的土壤养分测定数据表明, 与 CF 化肥处理相比, 在等氮量投入的基础上, 有机替代可进一步显著增加连作大蒜土壤有效氮的含量。M25、M50 和 M100 处理下有效氮含量为 35.33、42.21 和 38.37 mg·kg⁻¹, 较 CF 处理分别增加 21.5%、45.2% 和 32.0% (图 3a)。而在非连作大蒜田中, 大蒜收获期土壤有效氮的含量在 M25、M50 和 M100 处理下分别高达 54.31、63.66 和 58.81 mg·kg⁻¹。该指标较 CF 处理增加的幅度 (23.3%、44.6% 和 33.6%) 与连作大蒜田较为一致, 但 CF 处理下的土壤有效氮含量已可维持在与连作土壤中增施有机肥所能达到的较高水平 (44.03 mg·kg⁻¹)。土壤有效氮的变化规律说明, 在土壤有机质相对较为丰富的非连作土壤中, 增施有机肥虽然可以显著提高土壤有效氮的含量,

但其过高的水平可能超过了大蒜生长所需的适宜水平, 因此并未反映在大蒜产量的增产效应上 (对比图 1 的产量数据)。

土壤有效磷和速效钾的数据表明, 在连作土壤中, 包括 CF 在内, 各处理在大蒜收获期二者均维持在稍高于初始值 (表 1, AP 和 AK 分别为 37.86 和 300.5 mg·kg⁻¹) 的高水平, 并未出现明显耗竭现象 (图 3b 和图 3c), 且有机替代进一步提高了土壤有效磷、速效钾的水平 (增加幅度为 18%~38% 和 5%~10%), 说明该连作体系中, 由于常年连续大量施用 PK 化肥, 而导致其在土壤中的积累, 出现过量的现象。因此推测, 连作大蒜田中有机替代处理对土壤有效氮水平的提升和维持, 可能是其显著增产效果的重要原因之一。而有机替代对速效磷钾养分的增加作用, 可能由于其本底值已足够高而不能表现为相应的增产效应^[25]。

而在非连作大蒜土壤中, 单施化肥处理 CF 在收获期土壤有效磷、速效钾的含量分别为 16.03 和 184.8 mg·kg⁻¹, 也较表 1 中的初始值出现盈余现象,

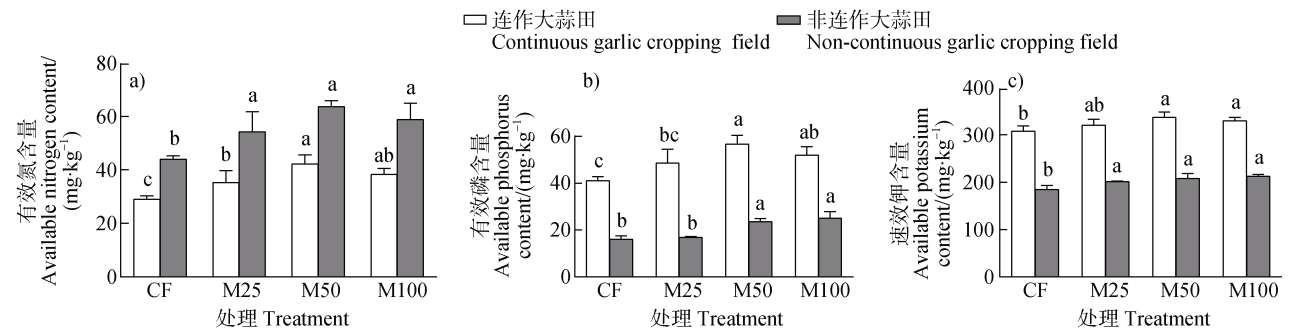


图 3 有机替代对连作和非连作大蒜田土壤有效氮 (a)、有效磷 (b) 和速效钾 (c) 的影响
Fig. 3 Effects of organic substitution on available nitrogen (a), available phosphorus (b) and available potassium (c) in continuous and non-continuous garlic cropping fields

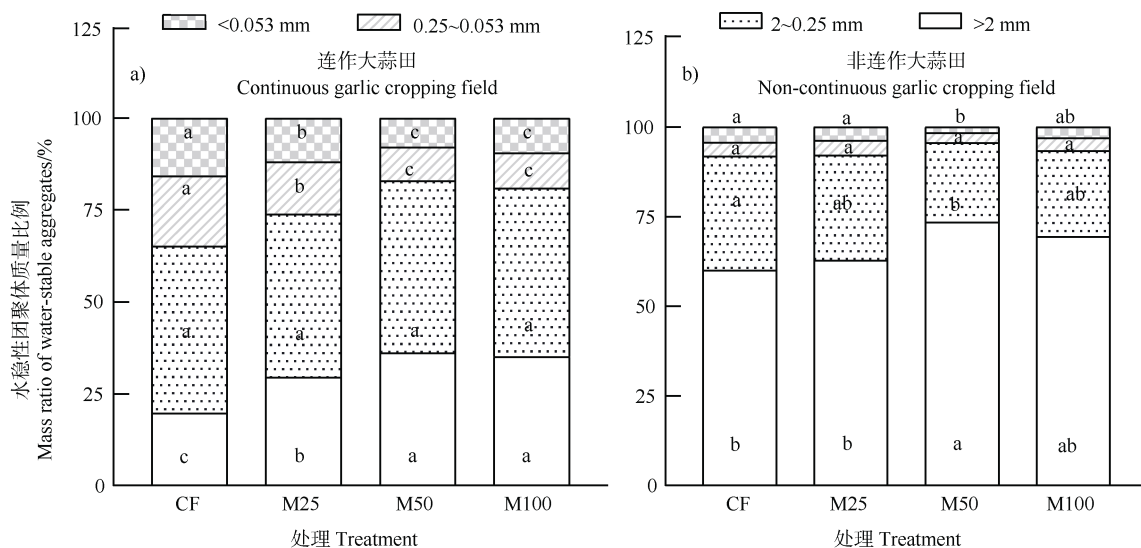
暗示在习惯的化肥施用配方中, P 和 K 的用量可能过高。这一 PK 配方的长期延续可能是导致土壤中 PK 盈余和积累的重要原因。与 CF 相比, M50 和 M100 处理进一步显著提升土壤有效磷的水平, 幅度高达 50% (图 3b)。M25、M50 和 M100 处理下土壤速效钾含量较 CF 分别增加 8.8%、12.8% 和 15.2% (图 3c)。

2.4 有机替代对连作和非连作大蒜田团聚体分布、稳定性及团聚体有机碳的影响

土壤水稳性团聚体的粒级分布规律可见, 在连作大蒜土壤中, 大于 2 mm 大团聚体所占比例 (常规 CF 处理下) 仅为 19.7%, 远远低于非连作土壤中的 60.1%, 这为长期连作大蒜土壤结构变差提供了直接的证据 (图 4a 和图 4b, CF 处理)。而在 M25、M50 和 M100 处理下, 连作土壤中大于 2 mm 大团聚体的占比分别提升至 29.5%、36.1% 和 35.1%, 较 CF 处理增幅分别为 49.7%、82.9% 和 77.6% (图 4a)。

可见有机替代对连作大蒜土壤结构具有明显改善效果。在非连作土壤中, 由于大于 2 mm 大团聚体占比的本底值已高达 60%, 仅在 M50 和 M100 下进一步有所增加 (图 4b)。连作大蒜土壤中, 2~0.25 mm 粒级团聚体的占比相对较为稳定, CF 和各有机替代处理下均为 44.4%~46.9% (图 4a)。该粒级团聚体在非连作土壤中的占比, 在 CF、M25、M50 和 M100 处理下分别为 31.8%、29.3%、22.1% 和 23.9% (图 4b)。0.25~0.053 mm 和小于 0.053 mm 粒级的微团聚体在连作大蒜土壤中占有相当高的比例, 二者之和在 CF 处理下高达 35%, 有机替代处理可将这些微团聚体的比例减少至 17%~26% (图 4a)。在非连作土壤中, 0.25 mm 以下粒级的微团聚体所占比例较小, 仅为 8% (图 4b)。

综上, 有机替代处理对连作大蒜土壤中大于 2 mm 大团聚体的占比具有较好的提升效果, 说明恶化的土壤结构得以改善。



注: 不同字母表示相同团聚体粒级不同施肥处理间在 $P < 0.05$ 置信区间差异显著。下同。Note: Different letters indicate that the difference between different fertilization treatments of the same aggregate size is significant in the $P < 0.05$ confidence interval. The same below.

图 4 有机替代对连作 (a) 和非连作 (b) 大蒜田土壤水稳性团聚体分布的影响

Fig. 4 Effects of organic substitution on the distribution of soil water-stable aggregates in continuous garlic cropping (a) and non-continuous garlic cropping (b) fields

由表 2 中可以看出, 与 CF 处理相比, 有机替代处理对连作大蒜土壤团聚体粒径稳定性指标有较为显著的影响。其中平均重量直径 (MWD)、水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 和几何平均直径 (GMD) 随着有机替代比例增加而呈先增后降的趋势。同时分形维数 (D) 和可蚀性 (K) 均较 CF 处理明显降低。说明土

壤团聚体的稳定性在有机替代处理下得到提高, 以 M50 处理为最佳。

相比较而言, 在非连作土壤中, 团聚体稳定性指标变化不明显, 仅在 M50 处理下有改善的趋势。

由图 5 可知, 不同有机肥替代化肥比例下, 连作和非连作大蒜田土壤团聚体各粒级有机碳含量变

表 2 不同有机替代下连作和非连作土壤团聚体粒径稳定性

田块	处理	平均重量直径 ^①	水稳性团聚体 ^②	几何平均直径 ^③	分形维数 ^④	可蚀性 <i>K</i> 值 ^⑤
Field	Treatment	MWD/mm	R _{0.25} /mm	GMD/mm	<i>D</i>	
连作田块	CF	0.943±0.036c	65.122±1.336c	0.531±0.026c	2.508±0.012a	0.066±0.003a
Continuous	M25	1.117±0.021b	73.883±1.473b	0.697±0.032b	2.433±0.030b	0.051±0.002b
garlic cropping	M50	1.266±0.029a	82.878±2.130a	0.905±0.043a	2.309±0.035c	0.039±0.002c
field	M100	1.236±0.020a	80.887±2.416a	0.850±0.034a	2.359±0.043c	0.042±0.002c
非连作田块	CF	1.567±0.034b	91.878±1.678b	1.293±0.072b	2.149±0.082a	0.029±0.001a
Non-continuous	M25	1.595±0.064b	92.143±0.368b	1.328±0.067b	2.133±0.007a	0.028±0.001a
garlic cropping	M50	1.724±0.050a	95.634±0.784a	1.549±0.079a	1.910±0.098b	0.025±0.001b
field	M100	1.664±0.069ab	93.341±2.413ab	1.424±0.110ab	2.093±0.034a	0.026±0.002ab

注：同一列中不同小写字母表示同一田块不同施肥处理间在 $P < 0.05$ 置信区间差异显著。Note: Different lowercase letters in the same column represent significant difference between different fertilization treatments in the same field at $P < 0.05$. ① Mean weight diameter, ② > 0.25 mm water-stable aggregates, ③ Geometric mean diameter, ④ Fractal dimension, ⑤ Erodibility *K* value.

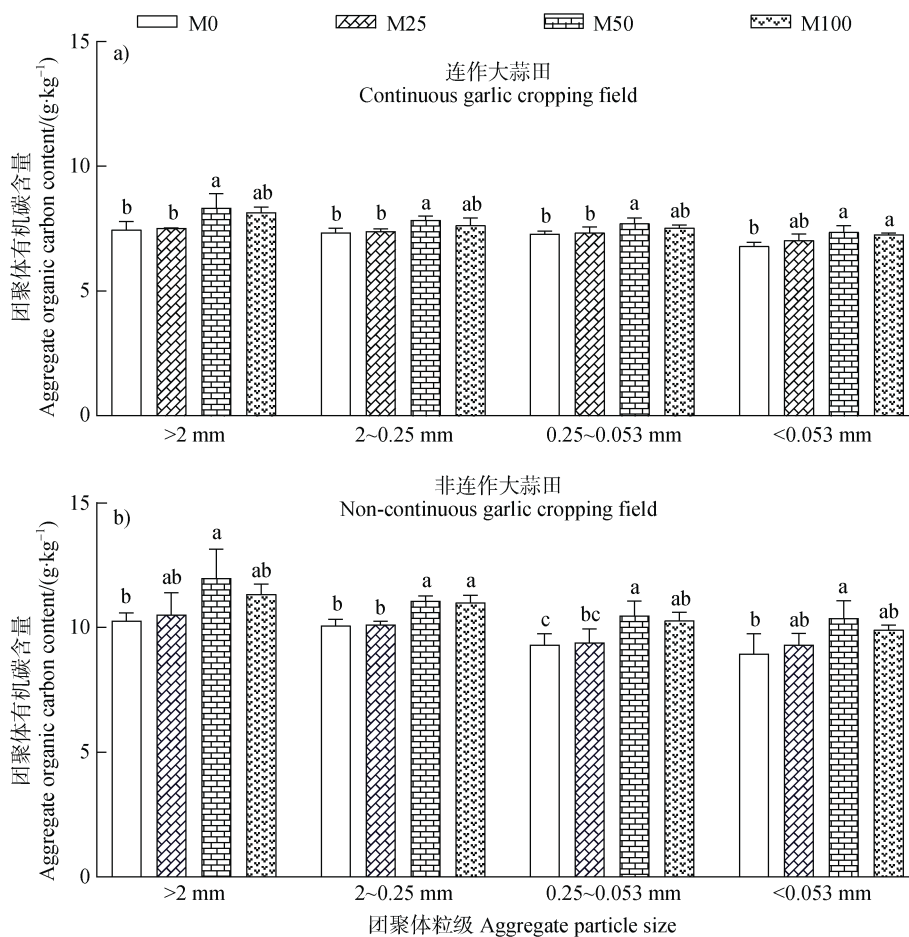


图 5 有机替代下连作 (a) 和非连作 (b) 大蒜田土壤团聚体各粒级有机碳含量的变化

Fig. 5 Changes of organic carbon content in soil aggregates of different grain sizes in continuous (a) and non-continuous garlic cropping (b) fields under organic substitution

化一致,均为先升高后降低。与 CF 相比, M50 处理下土壤团聚体各粒级有机碳含量提升效果最佳。总体而言,连作大蒜田土壤各粒级团聚体有机碳含量均较非连作土壤中的数据低 30%~40%,这也从另一个角度反映了连作大蒜土壤中有机质的总体亏缺。

2.5 有机替代对连作和非连作大蒜田土壤球囊霉素相关土壤蛋白的影响

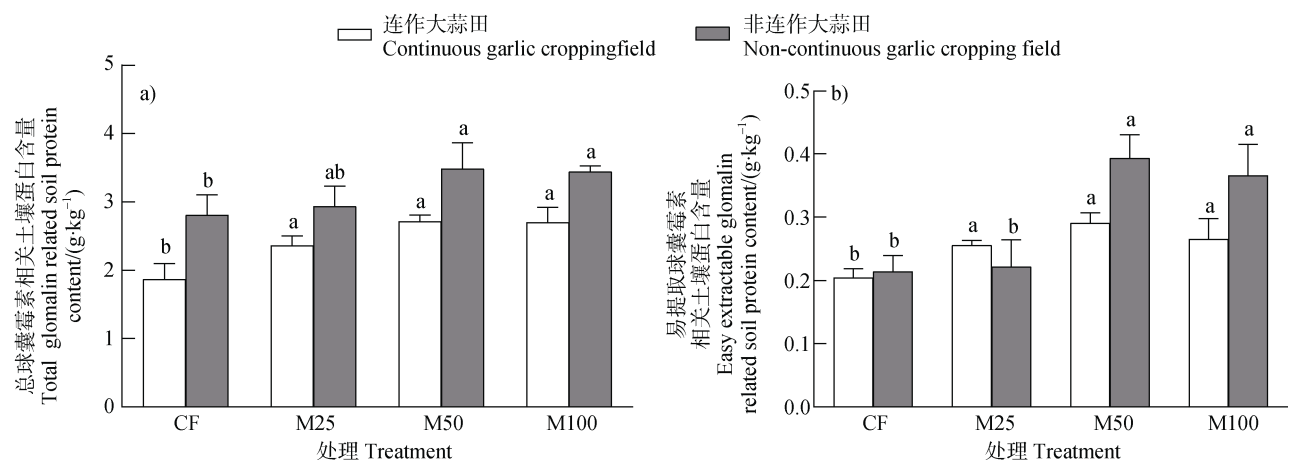
在土壤有机质含量较低的连作大蒜土壤中, M25、M50 和 M100 有机替代处理对土壤 GRSP 的总量 (T-GRSP) 具有显著促进效果,与 CF 相比,分别提高了 26.2%、45.0% 和 44.2% (图 6a);相应地,土壤中易提取态 GRSP (EE-GRSP) 的含量也随之增加。连作土壤中 GRSP 活性的变化暗示了有机质补偿对土壤团粒结构的改善。连作大蒜田中,土壤 T-GRSP 和 EE-GRSP 的含量也有类似的变化趋势,而在低有机替代率 M25 处理下增加幅度并不明显 (图 6b)。

3 讨论

3.1 长期连作对大蒜土壤生产力的影响

大蒜本身具有杀菌效果和化感作用,属较耐连作的作物。然而,在长期连作模式下,由于种植、采收和养分管理均采用相对固定的方式和氮磷钾养分配方,在追求连续高产目标的同时忽略了对土壤

有机质的回补。土壤有机质出现连年亏缺现象,使得土壤团聚体结构遭到破坏,对养分,尤其是氮素的固持能力下降,不足以维持后期的氮素养分需求。因此,长期连作大蒜土壤中出现了磷钾养分积累、有机质降低 (表 1) 等现象,导致土壤板结和大蒜产量降低等连作障碍问题^[4-5, 26]。与果蔬类等作物中出现的以典型土传病害为代表的连作障碍问题^[10, 12]相比,连作大蒜土壤中出现的障碍问题,与中国中央电视台报道的“化肥喂瘦了俺的田”有极大的相似性,连续高产诉求、忽视补充有机肥导致一系列土壤物理、化学障碍,主要体现在土壤有机质降低、结构变差、土壤磷钾养分过量积累和后期氮素固持不足等方面。本研究也发现,相较于非连作田块土壤,连作大蒜田土壤中磷钾养分显著积累,而大蒜生育后期土壤有效氮供应不足 (图 3),可能是造成减产的重要原因,这与 Wei 等^[25]的研究一致,在连作土壤中,大蒜产量与有效氮含量密切相关。而后期供氮不足的现象,则与当地的全程地膜覆盖标准化种植模式有关。由于该县土壤呈较强的碱性,大蒜来年返青后随水追施氮肥在地膜密封的土壤环境中,会因氨挥发而在根层积累大量的氨,导致烧苗现象。故生产习惯上一般不在后期补充氮肥,而在播种时一次性足量施入长效控释氮肥。土壤有机质水平下降而导致的后期土壤氮素养分不足,是该地连作大蒜生产力退化的一个重要原因。



注:不同字母表示相同田块不同施肥处理间在 $P < 0.05$ 置信区间差异显著。Note: Different letters indicate significant difference between different fertilization treatments in the same field at $P < 0.05$.

图 6 有机替代对连作和非连作大蒜田总球囊霉素相关土壤蛋白 (a) 和易提取球囊霉素相关土壤蛋白 (b) 含量的影响
Fig. 6 Effects of organic substitution on total glomalin related soil protein (a) and easy extractable glomalin related soil protein (b) in continuous and non-continuous garlic cropping fields

3.2 有机替代对连作大蒜土壤养分、土壤结构和产量的影响

众多研究表明，施用有机肥或有机无机配施，具有提高土壤养分有效性、改善土壤结构和优化土壤微生物群落结构^[12]等多方面的效果。本文有机替代处理下，土壤速效养分含量显著增加（图 3），也验证了该效果^[27]。考虑到在长期连作大蒜田中，土壤磷、钾养分处于盈余和积累状态，通过有机替代进一步提高其有效性对大蒜产量无相应的促进效果，而生育后期氮素在土壤中的残留本底值较低，因此氮素营养是制约大蒜产量的关键养分要素。有机替代增加了土壤有效氮的含量，使得土壤氮素的供应可维持至后期的蒜头膨大期，在整个大蒜生长期均维持较为适宜的水平（图 3），这可能是其增产效果的重要原因。也有研究证明，适量的有机替代对作物产量提升效果最好，过量有机替代处理作物产量低于化肥处理^[11-13]，本研究结果与之相一致，即在连作大蒜田中，25%和 50%有机替代处理下蒜头产量较 CF 处理增产最为显著，100%有机替代连作大蒜增产无明显效果（图 1）。在大蒜病害并非减产主要原因的情况下，100%有机替代处理虽提高了土壤有效氮的供应缓冲性，但是其在生育前期如返青期大量需氮时，氮素的即时供应容量可能达不到作物需求，导致并无显著增产效果，甚至减产^[13]，故适宜的化肥氮仍是作物高产所必需的，也是全有机农业作物产量较低的重要原因。而在非连作土壤中，由于其有机质本底值较高，对氮素等养分有足够的固持和缓冲能力，故有机替代并无明显的大蒜增产效果。该结果与在典型潮土上的长期定位试验中观察到的单施 NPK 化肥可持续维持小麦产量的报道^[14-15]相一致。氮素的固持—缓冲供应与土壤有机质亏缺以及土壤团粒结构恶化之间的矛盾，极有可能是本研究区域的土壤碱性属性和长期施肥习惯所导致的一个特例。因此，本文的有机质补偿修复具有较为鲜明的区域/土壤类型/模式针对性。

本研究中发现，与非连作土壤相比，长期连作大蒜土壤中另一个重要缺陷是土壤结构的恶化，主要表现在大于 2 mm 大颗粒团聚体占比低了将近一倍（图 4），因此，土壤颗粒对养分和水分的固持、土壤通气性的改善和缓冲作用极大弱化，而对大蒜产量造成不利影响。究其原因，与连作大蒜土壤中有机质的亏缺具有密切的关联。土壤团聚体是土壤

有机碳的重要载体和维持土壤有机质稳定性的物质基础，稳定的团聚体可为有机物提供物理保护^[28]，同时，较高的土壤有机质水平也可促进土壤大团聚体的形成^[29]。另一方面，由于土壤中球囊霉素相关蛋白（GRSP）在土壤团粒结构的形成过程中起重要的黏合作用，可维持土壤团粒结构和团聚体有机碳的稳定性^[30-31]。连作大蒜土壤中有机替代处理对土壤 GRSP 的含量也有显著的促进作用（图 6），因此有助于土壤结构的改善。

4 结 论

本文针对长期连作大蒜土壤中有机质亏缺的典型障碍，以有机肥替代化肥方式进行有机质补偿，可通过改善土壤团聚体结构，促进土壤速效养分尤其是氮的固持和平衡供应能力，进而对连作大蒜减产表现出较为显著的当季修复效果，体现了“边生产边修复”的实际需求。值得提出的是，在土壤有机质未出现亏缺现象的非连作大蒜田中，增施有机肥并无明显的当季增产效益。

参考文献 (References)

- [1] FAOSTAT. Crops and livestock products[OL]. [2023-3-14]. <http://faostat.fao.org/>
- [2] Gao J X, Pei H X, Xie H. Synergistic effects of organic fertilizer and corn straw on microorganisms of pepper continuous cropping soil in China[J]. *Bioengineered*, 2020, 11 (1): 1258—1268.
- [3] Zhang X Y, Zhang Y P, Xu F, et al. Comparison of soil nematodes community structure and diversity in cucumber greenhouses with different cultivation years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (3): 696—703. [张雪艳, 张亚萍, 许帆, 等. 不同种植年限黄瓜温室土壤线虫群落结构及多样性的比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (3): 696—703.]
- [4] Liu C H, He H, He X G, et al. Effects of different years of continuous-cropping of pineapple on soil physiochemical properties and microbial community abundance of pineapple[J]. *Soils*, 2021, 53 (6): 1244—1249. [刘传和, 贺涵, 何秀古, 等. 菠萝不同连作年限对土壤理化性状和微生物群落丰度的影响[J]. *土壤*, 2021, 53 (6): 1244—1249.]
- [5] Li Y L, Wang B Y, Chang Y F, et al. Effects of reductive soil disinfestation on obstacles and growth of replant seedlings in Sanqi ginseng mono-cropped soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 703—715. [李云龙, 王宝英, 常亚锋, 等. 土壤强还原处理对三七连作障碍

- 因子及再植三七生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56 (3): 703—715.]
- [6] Sun G W, Chen R Y, Liu H C. Causes and control measures for continuous cropping obstacles in protected vegetable cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (14): 184—188. [孙光闻, 陈日远, 刘厚诚. 设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J]. 农业工程学报, 2005, 21 (14): 184—188.]
- [7] Wang D C, Wu J G. Effects of organic manure on soil nutrients and aggregate composition in soil under mono-cropping of soybean[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (4): 825—834. [王笃超, 吴景贵. 不同有机物料对连作大豆土壤养分及团聚体组成的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55 (4): 825—834.]
- [8] Yang W J, Hui C, Chen Y X, et al. Stability and fractal features of soil aggregate in irrigated farmland under biochar application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36 (6): 323—329. [杨卫君, 惠超, 陈雨欣, 等. 生物质炭施用下灌溉农田土壤团聚体稳定性及分型特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (6): 323—329.]
- [9] Xie L H, Liao C L, Lin Q M, et al. Characteristics of soil aggregate organic carbon (SAOC) in paddy soil after increasing or reducing input of organic fertilizer[J]. Soils, 2019, 51 (6): 1106—1113. [谢丽华, 廖超林, 林清美, 等. 有机肥增减施后红壤水稻土团聚体有机碳的变化特征[J]. 土壤, 2019, 51 (6): 1106—1113.]
- [10] Han Z Q, Chen X M, Qu C C, et al. Sustained effects of biochar application on physico-chemical properties, enzyme activities and quality of soil with continuous planting of cucumber[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2018, 24 (5): 1227—1236. [韩召强, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭对黄瓜连作土壤理化性状、酶活性及土壤质量的持续效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (5): 1227—1236.]
- [11] Wang Y H, Pang J W, Wei T, et al. Coupled effects of film mulching and straw-derived carbon inputs on soil aggregate characteristics and crop yields in semiarid areas[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (1): 272—284. [王钰皓, 庞津雯, 卫婷, 等. 旱作农田覆膜和秸秆碳投入对土壤团聚特性及作物产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61 (1): 272—284.]
- [12] Agbede T M, Adekiya A O. Influence of biochar on soil physicochemical properties, erosion potential, and maize (*Zea mays* L.) grain yield under sandy soil condition[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51 (20): 2559—2568.
- [13] Si H L, Ji L D, Liu J L, et al. Effects of organic fertilizer application rate on maize yield, soil nutrients and biological activity[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35 (4): 740—747. [司海丽, 纪立东, 刘菊莲, 等. 有机肥施用量对玉米产量、土壤养分及生物活性的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35 (4): 740—747.]
- [14] Hu J L, Lin X G, Wang J H, et al. Microbial functional diversity, metabolic quotient, and invertase activity of a sandy loam soil as affected by long-term application of organic amendment and mineral fertilizer[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11: 271—280.
- [15] Wu Q C, Zhang C Z, Zhang J B, et al. Effects of different fertilization and straw returning on soil organic matter and its components in fluvo-aquic soil[J]. Soils, 2015, 47 (6): 1034—1039. [吴其聪, 张丛志, 张佳宝, 等. 不同施肥及秸秆还田对潮土有机质及其组分的影响[J]. 土壤, 2015, 47 (6): 1034—1039.]
- [16] Garlic Growers Association of Jinxiang County. Technical regulation of Jinxiang garlic cultivation: T/JXDSZZ002-2020[S], 2020. [金乡县大蒜种植协会, 金乡大蒜种植技术规程: T/JXDSZZ002-2020 [S], 2020.]
- [17] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [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, 2000.]
- [18] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 991—999.
- [19] Zhou P, Zhang X H, Pan G X. Effect of long-term fertilization on content of total and particulate organic carbon and their depth distribution of a paddy soil: An example of huangnitu from the Tai Lake region, China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12 (6): 765—771. [周萍, 张旭辉, 潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (6): 765—771.]
- [20] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Plant and Soil, 1998, 198 (1): 97—107.
- [21] van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14: 20—23.
- [22] Mazurak A P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates[J]. Soil Science, 1950, 69 (2): 135—148.
- [23] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38 (20): 1896—1899. [杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896—1899.]
- [24] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis

- of soil texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48 (1): 142—147.
- [25] Wei T Q, Hong H Y, Zhou H M, et al. Optimization of the fertilizer performances in long-term garlic cropping soils[J]. *Pedosphere*, 2024, 34 (3): 577—589.
- [26] Yu J Y, Liu Y H, Wang Z Y, et al. The cropping obstacle of garlic was associated with changes in soil physicochemical properties, enzymatic activities and bacterial and fungal communities[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 828196.
- [27] Liang L, Ma C, Zhang R, et al. Improvement of soil nutrient availability and enzyme activities in rainfed wheat field by combined application of organic and inorganic fertilizers [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25 (4): 544—554. [梁路, 马臣, 张然, 等. 有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (4): 544—554.]
- [28] Liu M Y, Zhang K M, Mao W, et al. Effects of long-term substitution of inorganic fertilizers with organic fertilizers on rice and wheat yields and soil fertility[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36 (3): 133—141. [刘明月, 张凯鸣, 毛伟, 等. 有机肥长期等氮替代无机肥对稻麦产量及土壤肥力的影响[J]. *华北农学报*, 2021, 36 (3): 133—141.]
- [29] Shao H Y, Li Z Y, Liu D, et al. Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability [J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (10): 4691—4699. [邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40 (10): 4691—4699.]
- [30] Yang Z Y, Que H, Zhu X Z, et al. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on glomalin content in soils contaminated with phenanthrene[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 (7): 1338—1343. [杨振亚, 阙弘, 朱雪竹, 等. 几种丛枝菌根真菌对非污染土壤中球囊霉素含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35 (7): 1338—1343.]
- [31] Xia Z T, Zhao J X, Li Y M, et al. Effect of annual rotation and fallow pattern on the soil glomalin and aggregate stability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41 (1): 99—106. [夏梓泰, 赵吉霞, 李永梅, 等. 周年轮作休耕模式对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41 (1): 99—106.]

(责任编辑：陈荣府)