

DOI: 10.11766/trxb201902250580

周星, 陈骋, 常海娜, 王东升, 郑勇, 焦加国, 胡锋, 刘满强. 蚓堆肥热干扰后对土壤质量和作物生长的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 142–152.

ZHOU Xing, CHEN Cheng, CHANG Haina, WANG Dongsheng, ZHENG Yong, JIAO Jianguo, HU Feng, LIU Manqiang. Effects of Thermal-Disturbed Vermicompost on Soil Quality and Crop Growth [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (1): 142–152.

## 蚓堆肥热干扰后对土壤质量和作物生长的影响\*

周 星<sup>1</sup>, 陈 骋<sup>1</sup>, 常海娜<sup>1</sup>, 王东升<sup>2</sup>, 郑 勇<sup>1</sup>, 焦加国<sup>1</sup>, 胡 锋<sup>1</sup>, 刘满强<sup>1†</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院土壤生态实验室, 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095; 2. 南京市蔬菜科学研究所, 南京 210042)

**摘 要:** 了解热干扰对蚓堆肥肥效的影响有助于指导其规模化加工和应用, 促进有机废弃物的高效循环利用。通过模拟不同热干扰梯度 (30、40、50、60 和 70℃) 研究蚓堆肥自身性质的变化, 将新鲜的蚓堆肥置于烘箱中加热 20 h, 并于温室中采用盆栽试验探究经过热干扰后的蚓堆肥对土壤性质及番茄生长的影响。结果表明, 随着热干扰温度的升高, 蚓堆肥的 pH、可溶性有机碳及铵态氮含量呈上升趋势且在最高温干扰处理下达到最高, 但硝态氮和速效钾含量呈下降趋势; 微生物生物量碳氮含量先上升后下降, 而其中参与碳氮循环的酶活性逐渐降低。经不同热干扰处理后的蚓堆肥施入土壤后, 相比 30℃的对照, 蚓堆肥经热干扰后番茄的地上部生物量提高了 2 倍左右, 根系生物量增加了 56%~115%; 伴随蚓堆肥热干扰温度的增加, 植物氮磷钾养分的吸收量逐渐提高, 蚓堆肥对土壤氮磷钾养分的供应量 (土壤速效养分与植物有效养分吸收量之和) 先升高后下降并在 50℃干扰处理后达到最高; 土壤 pH 及可溶性有机碳含量逐渐升高, 土壤微生物生物量碳氮含量呈先上升后下降的趋势且在 70℃干扰后降至最低, 而土壤中参与碳氮循环的酶活性变化趋势不一致, 但与对照相比总体呈上升趋势。总之, 热干扰导致蚓堆肥生物活性下降及养分有效性增加, 相应地, 热干扰后的蚓堆肥施入土壤后能明显促进作物氮磷钾养分的吸收, 有利于蚓堆肥发挥其肥效。因此, 蚓堆肥加热处理有利于其发挥短期培肥和植物促生功效, 而其长期效果有待今后在更大时空尺度上的研究。

**关键词:** 蚓堆肥; 热干扰; 废弃物利用; 番茄; 生态系统功能; 微生物生物量及活性

**中图分类号:** S154.1      **文献标志码:** A

## Effects of Thermal-Disturbed Vermicompost on Soil Quality and Crop Growth

ZHOU Xing<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>1</sup>, CHANG Haina<sup>1</sup>, WANG Dongsheng<sup>2</sup>, ZHENG Yong<sup>1</sup>, JIAO Jianguo<sup>1</sup>, HU Feng<sup>1</sup>, LIU Manqiang<sup>1†</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China; 2. Nanjing Institute of Vegetable Science, Nanjing 210042, China)

\* 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200305)、国家自然科学基金项目 (41771287, 41671255) 和中央高校业务费 (KYYJ201702) 共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0200305) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41771287 and 41671255) and the Central University Business Fees (No. KYYJ201702)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liumq@njau.edu.cn

作者简介: 周 星 (1992—), 女, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: zhouxingxuesheng@163.com

收稿日期: 2019-02-25; 收到修改稿日期: 2019-05-10; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-06-06

**Abstract:** 【Objective】 This study is oriented to explore effects of thermal-disturbed vermicompost on soil quality and crop growth in expectation that all the findings may help guide large-scale processing and application of the manure and promote high-efficient recycling and utilization of organic waste. 【Method】 Fresh vermicompost was placed into an incubator for 20 hrs of incubation under a set temperature (30, 40, 50, 60, and 70°C) separately, The incubated vermicomposts were sampled for analysis of changes in basic property, and then packed into pots separately for pot experiment in a well-lit greenhouse to explore effects of the incubated vermicompost on soil properties and tomato growth. 【Result】 Results show that with the temperature in incubation rising from 30°C to 70°C, pH, and the contents of dissolved organic carbon and ammonium in the vermicompost increased and reached the highest at 70°C, but the content of nitrate and available potassium declined and the activities of the enzymes involved in carbon and nitrogen recycling did, too, while microbial biomass carbon and nitrogen increased first (at 40°C) and then declined (at 70°C). Microcosm study shows that compared to CK (vermicompost incubated at room temperature (30°C)), the vermicomposts incubated at higher temperatures significantly increased shoot and root biomasses of the tomato in the pot experiment by about 200% and 56%~115%, respectively. With incubation temperature rising, the plant uptake of NPK increased steadily. NPK supply(the sum of soil available nutrients and effective nutrient uptake of the plant)of the vermicompost increased first and declining with the incubation temperature rising, and was the highest in Treatment 50 (where the vermicompost was incubated under 50°C). Soil pH and dissolved organic carbon in the vermicompost increased gradually with rising incubation temperature. Soil microbial biomass carbon and nitrogen increased first and then declined and was the lowest in Treatment 70. Activities of the soil enzymes involved in carbon and nitrogen recycling varied from treatment to treatment, but on the whole did exhibit a rising trend. 【Conclusion】 To sum up, thermal disturbance may cause vermicompost to decline in bio-activity, but increase in nutrient availability. So application of thermal disturbed vermicompost can significantly promote plant uptake of NPK. Obviously thermal disturbance may help vermicompost bring its nutrient availability into full play. It is, therefore, concluded that thermal disturbance of vermicompost is beneficial to building up of soil fertility in a short term and to plant growth as well. However, future studies should shift their focus on long-term effect of the application of thermal-disturbed vermicompost on larger spatial and temporal scales.

**Key words:** Vermicompost; Thermal disturbance; Waste management; Tomato; Ecosystem function; Microbial biomass and activities

高强度集约型农业以长期施用化肥为特征，在满足作物增产需求的同时，也会导致土壤肥力的退化以及各种生态环境问题<sup>[1]</sup>。相比之下，有机物料如畜禽粪便转化为堆肥的循环利用则是现阶段高效而双赢的途径。研究表明，堆肥施用不仅能够减少化肥用量及改良土壤质量，而且能够提高农业生态系统的稳定性，有利于土壤的可持续管理<sup>[2]</sup>。与传统堆肥相比，经过蚯蚓堆制过程后的蚓堆肥具有疏松的物理结构、较高的持水能力和微生物活性<sup>[3]</sup>，有助于提高作物的产量和品质<sup>[4]</sup>。然而，在蚯蚓堆制过程中为了保障蚯蚓的生物活性，温度通常控制在 40°C 以下，导致一些具有潜在危害的病原生物仍可能存活<sup>[5]</sup>。中温堆肥过程可能存在的生物污染风险成为一种安全隐患。为杀死堆肥中可能存在的沙门氏杆菌、大肠杆菌和寄生虫卵等，一种行之有效的措施是，额外增加高温（50~70°C）处理以杀死

蚓堆肥中的病原生物<sup>[6]</sup>。同时，伴随着绿色农业的发展，有机物料需求增加，规模化地利用蚓堆肥也逐渐成为趋势，而商品化蚓堆肥也需要加热鼓风去除水分，以利于蚓堆肥的保存并降低运输成本。因此，利用高温加热过程可达到杀灭病原物和烘干的双重目的。值得注意的是，关于蚓堆肥在农业生产上的功效及其作用机制已经积累了诸多研究，但是大部分研究通常为了保持生物活性而使用的是未经任何处理的蚓堆肥<sup>[7-8]</sup>。伴随着蚓堆肥高温处理逐渐普遍，一个值得关注的问题是：蚓堆肥的肥效和作用机理在加热后是否发生了变化？

蚓堆肥的理化和生物学性质直接决定了其对土壤质量和作物生长、养分吸收的影响效果。理论上，蚓堆肥经高温处理后不仅影响其微生物活性，而且其活性养分含量也会受到显著影响。高温处理在抑制微生物群落活性和功能的同时，也引起有机物大

分子热解和微生物死亡后内容物的释放, 活性有机碳和养分含量等均得以增加<sup>[9]</sup>。众所周知, 土壤微生物是生物地球化学循环的直接驱动者, 影响土壤内有机物的分解和养分矿化<sup>[10-11]</sup>。值得注意的是, 相比不经过高温处理的蚓堆肥, 高温加热直接降低了蚓堆肥中微生物的数量和活性, 可能不利于蚓堆肥施入土壤后的土壤生物群落发展、养分矿化和释放。此外, 土壤生物驱动的大部分生态服务功能均离不开酶的催化作用<sup>[12-13]</sup>。土壤酶活性的高低通常被用来表征碳氮循环状况<sup>[14]</sup>, 评价土壤的肥力水平<sup>[15]</sup>, 特别是酶底物专一性和功能多样性近来被认为可全面反映土壤生物群落的生态功能<sup>[16]</sup>。迄今为止, 尽管发挥重要功能作用的土壤酶对温度的变化也非常敏感, 但是少有研究结合堆肥的工业过程来探讨加热对土壤功能的影响。大量盆栽和田间的研究一般均基于蚓堆肥自身具有高生物活性的特点, 一般将蚓堆肥对土壤质量的改善功效不仅仅归因于对土壤理化性质的改善, 还部分归因于来自蚓堆肥内的生物群落和生物活性物质的作用<sup>[17]</sup>。因此, 无论从生物安全还是蚓堆肥商品化的角度, 经过加热处理后的蚓堆肥的生化性质变化, 特别是高温处理蚓堆肥施用于土壤后的功能, 即对土壤性质和作物生长的影响及机制, 均有待于深入的研究。

目前, 在农业生产中大力倡导化肥减施的背景下, 有机废弃物资源化并部分替代化肥已成为共识<sup>[18-19]</sup>。然而, 有机废弃物在农业上的循环利用并不是一劳永逸的问题, 堆肥尤其是蚓堆肥的潜在生物风险需要评估和预防<sup>[20]</sup>。如上所述, 蚓堆肥高温处理步骤在降低病原物危害中发挥重要作用, 但是对蚓堆肥进行热干扰所导致的微生物活性下降和养分有效性提高是否会降低蚓堆肥的功效及影响机制仍属于研究空白领域。基于此, 提出以下假说: (1) 随着热干扰程度的增加, 由于有机质的热解及微生物的死亡而使得养分被释放出来, 因此蚓堆肥中的活性养分会逐渐增加。(2) 随着热干扰程度的增加, 一方面蚓堆肥中生物活性下降, 在施入土壤后可能会减弱其包含的生物或者类生物活性物质对土壤及植物的功效; 另一方面随着蚓堆肥中养分释放量的增加, 在施入土壤后其非生物性质对土壤

和植物生长的贡献会增加。总之, 本研究通过设置蚓堆肥加热温度梯度 (30~70℃), 研究蚓堆肥在不同热干扰强度下自身性质的变化, 并进一步探究不同热干扰处理后蚓堆肥对作物生长和养分吸收的影响。研究结果有助于为蚓堆肥的生物安全和工业化制备等提供指导, 并揭示蚓堆肥对土壤和植物影响的机制。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 供试材料

供试蚓堆肥为赤子爱胜蚓吞食牛粪后的新鲜产物, 系 2017 年 5 月采自安徽省汇丰蚯蚓养殖基地的新鲜蚓堆肥, 含水量 850 g·kg<sup>-1</sup>, 有机碳含量为 300.1 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮 13.1 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷 7.65 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾 7.41 g·kg<sup>-1</sup>。蚓堆肥经不同热干扰后的主要性质见表 1。

供试土壤采自南京市蔬菜科学研究所 (118°46'12"E, 31°43'14"N) 蔬菜大棚连作后撂荒的设施菜地土壤 (0 ~ 20 cm), 已经连续 3 年以上不种植农作物和不施肥, 鲜土采集后过 5 mm 筛, 剔除大型土壤动物及根系等残体。土壤类型为淋溶土, 质地为黏壤土 (黏粒 226 g·kg<sup>-1</sup>, 粉粒 338 g·kg<sup>-1</sup>, 砂粒 436 g·kg<sup>-1</sup>), pH (水:土=2.5:1) 为 6.07, 土壤有机碳含量为 18.2 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮 1.22 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷 0.313 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾 0.192 g·kg<sup>-1</sup>, 矿质氮 (铵态氮和硝态氮之和) 80.5 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效磷 17.9 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 169.3 mg·kg<sup>-1</sup>。

供试植物为番茄, 品种为“世纪红冠”, 购自江苏省南京金盛达种子有限公司。

### 1.2 试验设计

本试验设计包括两部分: 实验室内加热和温室盆栽。实验室内加热实验: 将新鲜蚓堆肥 (相当于烘干重 500 g) 置于玻璃瓶中, 为防止在不同强度加热过程中水分散失而导致含水量差别, 加热前用锡箔纸将口密封 3 层并用皮筋扎紧后置于已设置好温度的烘箱中, 加热温度分别设置为 30℃、40℃、50℃、60℃、70℃加热 20 h, 取出冷却后立即测定蚓堆肥在各加热处理后的性质变化 (表 1)。

表 1 不同强度热干扰后的蚓堆肥性质

Table 1 Changes of properties of vermicompost treated with different intensities of thermal disturbances

| 温度<br>Temperature/<br>℃ | MC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | pH        | DOC/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | AP/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | AK/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------|------------------------------|-----------|--------------------------------|--|--|-------------------------------|-------------------------------|
| 30                      | 825±6a                       | 6.3±0.1d  | 17±2.5c                        | 55.8±6.2c  | 1 610±3.4c   | 1 376±314.1b                  | 1 392±12.6b                   |
| 40                      | 815±6a                       | 6.4±0.1cd | 20±2.5c                        | 116.7±27.7c  | 1 673±15.5b  | 2 094±474.7ab                 | 1 394±12.7b                   |
| 50                      | 818±5a                       | 6.5±0.1bc | 33.6±6.8c                      | 1 238±52.7b  | 1 745±11.5a  | 2 199±175.2ab                 | 1 411±14.7ab                  |
| 60                      | 805±5a                       | 6.6±0.1b  | 80.3±5.6b                      | 2 717±0.6a   | 1 614±9.2c   | 2 454±136.0a                  | 1 416±3.8ab                   |
| 70                      | 801±4a                       | 7.2±0.1a  | 134.2±24.1a                    | 2 735±1.8a   | 882.2±2.7d   | 1 807±229.4ab                 | 1 441±3.0a                    |

| 温度<br>Temperature/<br>℃ | MBC/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | MBN/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | AG/<br>(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | BG/<br>(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | CB/<br>(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | XYL/<br>(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | LAP/<br>(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | NAG/<br>(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|---|---|--|--|--|
| 30                      | 344.6±20.5c                    | 176.7±9.6b                     | 81.3±4.1a                                       | 169.4±7.4a                                      | 77.5±6.8a                                       | 60.4±3.5a  | 1 394±22.6a                                      | 219.4±8.7a                                       |
| 40                      | 580.2±82.2b                    | 229.5±0.8a                     | 58.3±2.3b                                       | 135.4±5.4b                                      | 41.1±3.6b                                       | 36.2±1.7b  | 1 219±23.0b                                      | 158.5±4.9b                                       |
| 50                      | 829.7±122.9a                   | 194.4±25.1ab                   | 35.5±0.8c                                       | 114.6±3.9c                                      | 24.6±3.6c                                       | 18.4±1.7d  | 997.6±31.4c                                      | 101.5±1.8c                                       |
| 60                      | 607.6±37.5b                    | 60.1±17.0c                     | 23.1±0.9d                                       | 76.5±2.4d                                       | 13.9±1.1cd                                      | 11.6±0.6e  | 701.5±34.5d                                      | 58.9±1.3d  |
| 70                      | 359.6±52.9c                    | 58.5±16.9c                     | 34.4±2.3c                                       | 56.4±1.9e                                       | 10.5±0.8d                                       | 25.7±0.7c  | 442.1±20.2e                                      | 34.6±0.6e  |

注: MC: 含水量, DOC: 可溶性有机碳, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 铵态氮, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: 硝态氮, AP: 有效磷, AK: 速效钾, MBC: 微生物生物量碳, MBN: 微生物生物量氮, AG:  $\alpha$ -葡萄糖苷酶, BG:  $\beta$ -葡萄糖苷酶, CB:  $\beta$ -纤维素酶, XYL: 木聚糖酶, LAP: 亮氨酸胺基肽酶, NAG:  $\beta$ -乙酰氨基葡萄糖苷酶。表中同列数据小写字母不同表示不同处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平。下同 Note: MC: Moisture content, DOC: Dissolved organic carbon, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: Ammonium nitrogen, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: Nitrate nitrogen, AP: Available phosphorus, AK: Available potassium, MBC: Microbial biomass carbon, MBN: Microbial biomass nitrogen, AG:  $\alpha$ -1, 4-glucosidase, BG:  $\beta$ -1, 4-glucosidase, CB:  $\beta$ -D-cellobiohydrolase, XYL:  $\beta$ -Xylosidase, LAP: L-Leucine aminopeptidase, NAG:  $\beta$ -1, 4-N-acetylglucosaminidase. Values followed by different lower case letters in the same row indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. The same below

温室内盆栽试验在南京市蔬菜科学研究所温室内进行(白天温度 25℃, 夜间温度 15℃左右, 光线充足)。每盆称取土 1.5 kg(干物质量), 各个温度干扰处理后的蚓堆肥 75 g(干物质量), 将蚓堆肥与采集的鲜土按 1:20(干物质量比)均匀混合装入盆钵中(18 cm×21 cm), 且盆钵中不施用其他化肥。之后将长势一致的番茄幼苗移入盆钵中, 试验共设置 5 个蚓堆肥热干扰后的处理, 每个处理重复 4 次, 共 20 个盆钵, 番茄按照田间种植方式进行管理, 盆钵随机排列, 每周更换两次位置, 直至番茄开花期前采样。

### 1.3 样品采集与测定

盆栽试验在两个月后进行采样, 将采集的植株样品带回实验室测定番茄植株的株高、茎叶及根系鲜物质量, 之后将植株样品置于干燥箱 105℃下杀

青 30 min, 80℃烘至恒重后称茎叶及根的干物质量, 用植株粉碎机磨细后测定植株氮、磷、钾养分含量。采集的土壤样品均匀分成两份, 一份土样置于 4℃冰箱内用于测定铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、可溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)及微生物生物量氮(MBN)、酶活性等; 另一份土样风干后过 20 目筛, 用于土壤 pH、有效磷(AP)、速效钾(AK)等的测定。

土壤 pH 采用电位法(水:土 = 2.5:1)测定<sup>[21]</sup>; 有效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提, 钼锑抗比色法测定; 速效钾采用 NH<sub>4</sub>Oac 浸提, 火焰光度计法测定; 铵态氮、硝态氮采用 2 mol·L<sup>-1</sup> KCl 提取后流动分析仪(Seal AA3, 德国)测定; 可溶性有机碳采用超纯水提取、总有机碳分析仪(Vario TOC cube, 德国)测定。土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸提

取—可溶性有机碳自动分析法测定<sup>[21]</sup>；微生物生物量氮 (MBN) 采用氯仿熏蒸提取后凯氏定氮法测定<sup>[21]</sup>。土壤酶活性采用微孔板荧光法测定<sup>[22]</sup>，利用荧光物质 4-羟甲基-7-香豆素 (MUB) 共轭物质作为测定底物，接种土壤悬液至 96 孔微孔板中，测定 4 种参与碳循环的酶 ( $\alpha$ -葡糖苷酶、 $\beta$ -葡糖苷酶、 $\beta$ -纤维素酶、木聚糖酶) 和 2 种参与氮循环的酶 (亮氨酸胺基肽酶、 $\beta$ -乙酰氨基葡萄糖苷酶)，用每小时每克样品的基质转化率表示酶活性 ( $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )。植株采用浓硫酸-双氧水消煮后，全氮、全磷和全钾含量分析分别用凯氏定氮法、钼钼黄比色法和火焰光度计法测定<sup>[21]</sup>。

#### 1.4 数据处理及分析

各器官养分吸收量 ( $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) = 各器官养分含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )  $\times$  各器官干物质含量；植株养分吸收量 ( $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) = 各器官养分吸收量总和

蚓堆肥对土壤速效养分的供应总量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) = (土壤速效养分含量  $\times$  土壤干物质质量 + 植株养分吸收量 - 土壤基本速效养分含量  $\times$  土壤干物质质量) / 施入蚓堆肥的干物质质量

采用 Statistica.7.1 软件对数据进行分析。分析前利用柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验 (Kolmogorov-Smirnov) 和 Levene 方法检验数据的正态分布及方差齐性，在必要时利用对数进行转化，采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 并用最小显著差异 (LSD) 法进行处理之间的差异显著性检验 ( $P < 0.05$ )，利用 R 3.3.3 做图。冗余分析 (RDA) 检测植物指标与热干扰后蚓堆肥初始性质的相关性，作图采用 Canoco 5.0 软件。

## 2 结 果

### 2.1 热干扰对蚓堆肥性质的影响

随蚓堆肥热干扰温度的提高，蚓堆肥的 pH、铵态氮和可溶性有机碳均呈上升趋势，与 30℃ 对照相比，在 70℃ 干扰温度下，pH 增加了 0.9 个单位，铵态氮含量提高了 48 倍，可溶性有机碳含量提高了 7 倍；但硝态氮含量在 70℃ 热干扰处理下降至最低，而有效磷和速效钾的含量先上升后下降且在热干扰 60℃ 时较高；微生物生物量碳氮的含量也呈先上升后下降的趋势，但酶活性随热干扰温度的升高逐渐

下降 (表 1)。

### 2.2 热干扰蚓堆肥对土壤速效养分及其供应总量的影响

与对照 30℃ 相比，土壤 pH 随蚓堆肥热干扰程度增加呈逐渐上升趋势，在 70℃ 热干扰下增加了 0.16 个单位；硝态氮含量在对照 30℃ 时含量最高，而后伴随热干扰温度增加而下降，在最高温 70℃ 干扰处理后下降了 28%；铵态氮含量的变化呈现随热干扰温度升高先降低后升高，且在 30℃ 干扰处理下达到最高；可溶性有机碳含量也随蚓堆肥热干扰温度增加而上升，在 70℃ 干扰下增加了 21%；有效磷和速效钾含量均在热干扰超过 50℃ 后显著下降，在 70℃ 干扰下分别下降了 49% 和 16% (图 1)。

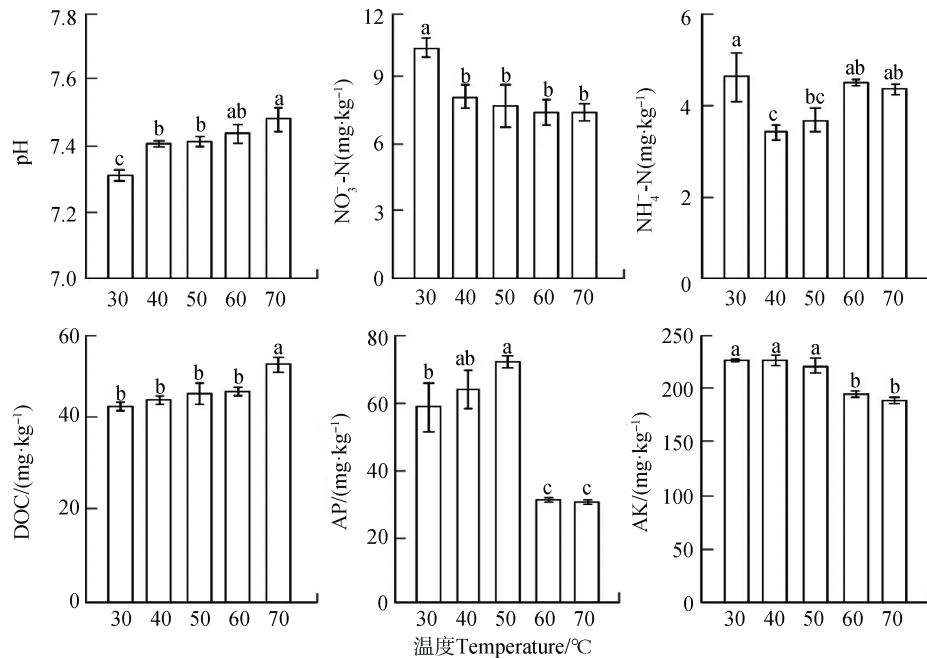
与对照 30℃ 相比较，基于盆钵内土壤养分的总供应量换算结果表明，伴随蚓堆肥热干扰温度的增加，蚓堆肥对土壤速效养分的总供应量先提高后降低，且蚓堆肥在 50℃ 干扰后提供给土壤的速效养分均达到最高 (图 2)。

### 2.3 热干扰蚓堆肥对土壤微生物生物量碳氮及酶活性的影响

与对照 30℃ 相比，蚓堆肥热干扰温度的升高导致土壤微生物生物量碳氮 (MBC、MBN) 先增加后降低，尤其是 MBC 在 70℃ 干扰蚓堆肥的处理下为对照的 19% (图 3)。与 30℃ 相比较，在其他热干扰的蚓堆肥施用后，土壤酶活性增加；除木糖苷酶 (XYL) 和  $\beta$ -乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 外，土壤碳氮酶活性在 40~70℃ 干扰处理下无显著差异 (图 4)。

### 2.4 热干扰蚓堆肥对番茄生长及有效养分吸收量的影响

与 30℃ 对照相比，蚓堆肥热干扰再施用后促进了番茄的株高及地上、地下部的生长，但 50℃ 干扰蚓堆肥的处理下根系的长势稍差；且随热干扰温度的升高，氮磷钾吸收量总体呈增加趋势，且蚓堆肥在较高温度 (>50℃) 的干扰下对植物的氮磷钾吸收量影响不显著 (图 5)。冗余分析表明，植物的生长和养分吸收量与热干扰后蚓堆肥中的活性养分呈正相关，而与蚓堆肥中的酶活性呈负相关 (图 6)。



注：柱形图上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同 Note: Different lower case letters above the bars mean significant differences between treatments at the 0.05 level. The same below

图 1 不同热干扰的蚓堆肥处理下土壤 pH 和养分资源有效性

Fig. 1 Effects of application of thermal disturbed vermicompost on soil pH and nutrient availability relative to treatment

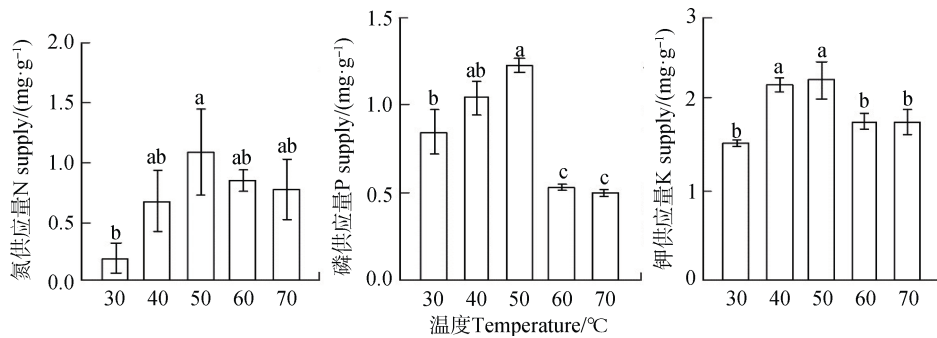


图 2 不同热干扰的蚓堆肥处理下土壤矿质氮、有效磷、速效钾供应总量

Fig. 2 Effects of application of thermal disturbed vermicompost on total supply of mineral nitrogen, available phosphorus, available potassium in the soil relative to treatment

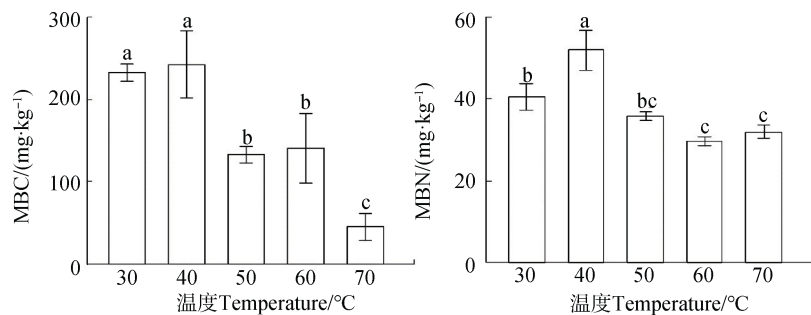


图 3 不同热干扰的蚓堆肥处理下土壤微生物量碳 (MBC) 和微生物生物量氮 (MBN) 变化

Fig. 3 Effects of application of thermal disturbed vermicompost on soil microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN) relative to treatment

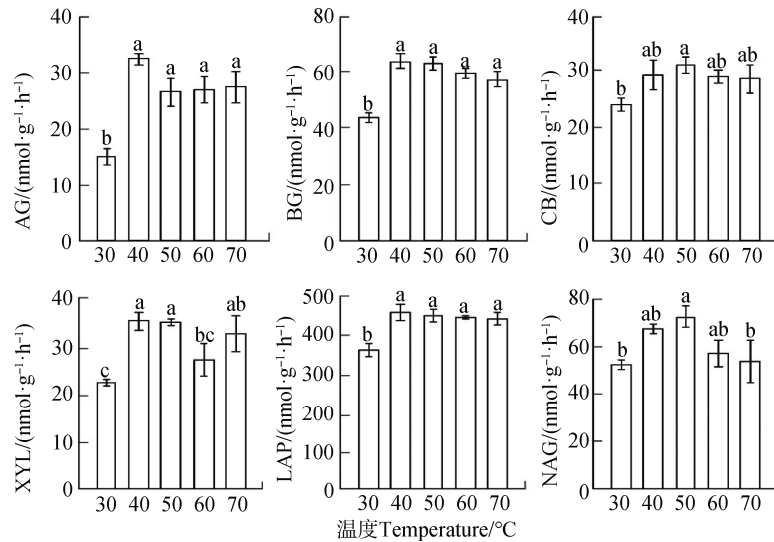
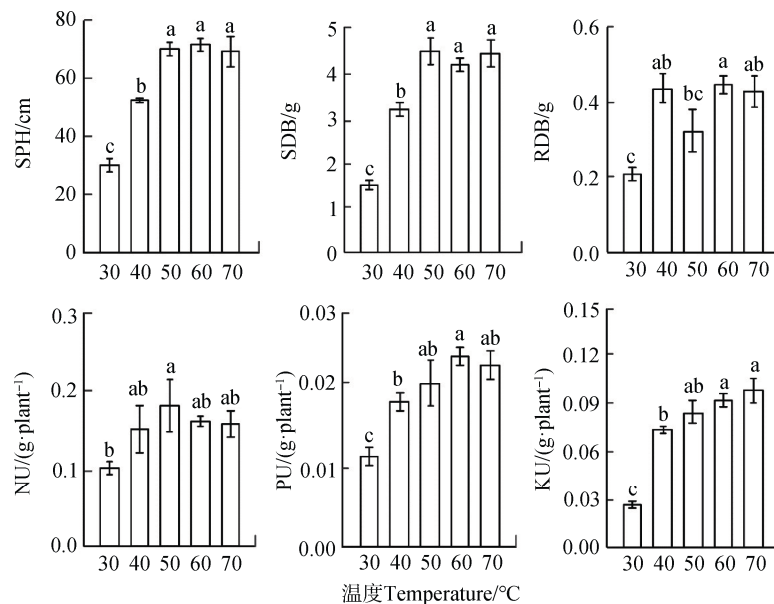


图 4 不同热干扰的蚓堆肥处理下参与碳氮循环的土壤酶活性变化

Fig. 4 Effects of application of thermal disturbed vermicompost on activities of the soil enzymes involved in C and N recycling relative to treatment



注: SPH: 单个株高, SDB: 地上部干重, RDB: 根干重, NU: 氮吸收量, PU: 磷吸收量, KU: 钾吸收量。下同。Note: SPH: single plant height, SDB: shoot dry biomass, RDB: root dry biomass, NU: nitrogen uptake, PU: phosphorus uptake, KU: potassium uptake. The same below.

图 5 不同热干扰的蚓堆肥处理下的番茄生长及氮、磷、钾养分吸收量

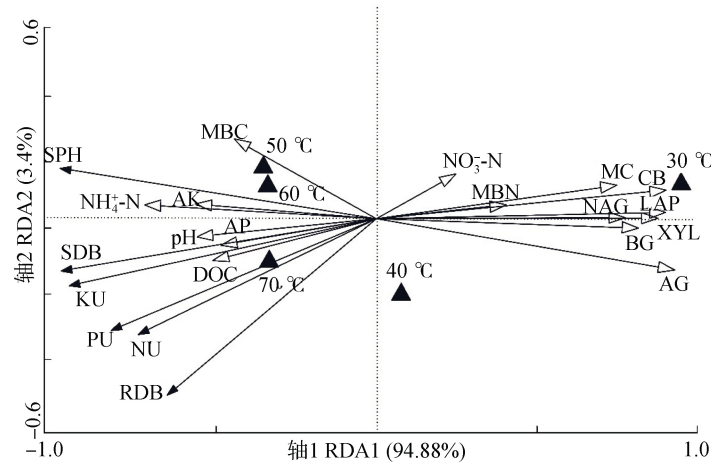
Fig. 5 Effects of application of thermal disturbed vermicompost on tomato growth and plant uptake of nitrogen, phosphorus and potassium relative to treatment

### 3 讨论

#### 3.1 不同强度的热干扰对蚓堆肥性质的影响

随热干扰强度的提高, 蚓堆肥中的养分含量呈

逐渐上升趋势, 而微生物活性则下降。蚓堆肥本身的可溶性有机碳、速效氮磷钾含量一般均在 60°C 时达到最高 (表 1); 活性资源伴随热干扰温度的升高而增加, 主要归因于蚓堆肥中的有机物大分子在高温下热解为小分子化合物; 而微生物死亡导致细胞



注：实心箭头表示植物性状，空心箭头表示不同热干扰后蚓堆肥的初始性质，图中蚓堆肥性质和植物性状的代号参见本文的表 1 和图 5 Note: solid arrows indicate plant traits and hollow arrows indicate basic properties of the vermicompost relative to treatment; please refer to Table 1 and Fig. 5 for codes of vermicompost properties and plant traits in the figure

图 6 植物性状与不同热干扰下蚓堆肥初始性质的冗余分析 (RDA) 排序图

Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) ordination of relationships between plant traits and basic properties of thermal disturbed vermicompost relative to treatment

内容物的释放，从而共同导致活性有机碳和养分的增加<sup>[23]</sup>。随加热温度的升高，蚓堆肥中铵态氮上升而硝态氮下降（表 1），与先前的报道<sup>[24]</sup>一致。这是由于大分子有机含氮化合物可热解为简单的含氮化合物及铵态氮，而高温会抑制有机肥中微生物尤其是硝化细菌的活性<sup>[25]</sup>；此外，铵态氮的累积会导致 pH 升高<sup>[26]</sup>，硝化作用也会受到抑制。蚓堆肥中参与碳氮循环的酶活性在热干扰下降低（表 1），与过去的研究结论一致，即酶活性的适宜温度范围一般均较窄<sup>[27]</sup>。总之，虽然加热引起蚓堆肥中微生物活性下降，但同时也促进了其中活性养分的释放。

### 3.2 蚓堆肥经热干扰后对土壤质量的影响

随蚓堆肥热干扰温度的增加，蚓堆肥内养分的增加也促进了植物可吸收的养分供应量。而土壤中速效养分（矿质氮和速效钾）含量在 30℃ 以上的蚓堆肥热干扰处理中逐渐下降（图 1），结合植物的生物量和养分状况，主要是植物对养分的吸收量增加所致，这与以往的研究结果<sup>[28]</sup>相似。土壤的有效磷含量及其供应量均在高于 50℃ 干扰蚓堆肥的处理下明显降低（图 1），这与蚓堆肥本身的有效磷含量变化有关。由于施入土壤中的磷肥逐年增加并超出了植物生长所需，而植物对磷素的利用率较低导致磷素在土壤中大量积累<sup>[29]</sup>，所以经高温（>50℃）干扰后的蚓堆肥施入土壤后磷富集的现象不如氮素明显。土壤的 pH 和可溶性有机碳含量呈上升趋势且

与蚓堆肥本身的变化趋势相一致（表 1）。土壤 pH 能够影响土壤生物群落数量、结构和多样性及植物生长等各个方面的性质，在土壤生态的各个过程中发挥着重要作用。由于加热后蚓堆肥 pH 增加，相应土壤的 pH 也提高，我国农田土壤的酸化问题非常严重<sup>[30]</sup>，因此加热后的蚓堆肥对土壤酸化的改良作用应受到重视。

土壤微生物生物量碳氮在高于 50℃ 干扰蚓堆肥作用下降低，与可溶性有机碳含量的变化趋势相反（图 1 和图 3）。一般可溶性有机碳含量越高，微生物量和活性也越高<sup>[31]</sup>。而有研究表明，有机肥在高温处理后会形成一些微生物难降解的芳香族化合物及大分子有机物等<sup>[32]</sup>，推测蚓堆肥经较高温度的热干扰后会生成难降解性物质，将其施入土壤后可能会导致微生物难以利用而降低其活性；也有一些研究发现植物和微生物在土壤养分尤其是氮素上存在竞争<sup>[33]</sup>，从矿质氮含量及根系生物量的结果来看，有可能随着根系对氮素的吸收而抑制了微生物活性。土壤酶活性与 30℃ 对照相比呈现增加的趋势，这与加热后蚓堆肥的初始（即施入土壤之前）酶活性的变化趋势相反（图 4 和表 1）。土壤酶活性的增加一方面可能是土壤中微生物在受养分胁迫时会增加相应酶的分泌来满足自身对养分的需求<sup>[34]</sup>；另一方面可能是热干扰后的蚓堆肥虽然导致本身生物活性下降，但由于可溶性有机碳的释放，在施入土



壤后会促进微生物繁殖, 继而也刺激了酶活性<sup>[35]</sup>, 酶活性提高后有利于提高土壤碳氮等养分的有效性<sup>[36]</sup>, 进而促进了植物的养分吸收和生长。

### 3.3 蚓堆肥经热干扰后对作物生长的影响

相比 30℃ 对照处理, 蚓堆肥加热后再施入土壤中促进了植物(番茄)的生长, 植物的养分吸收量在高温干扰蚓堆肥的处理中更高(图 5), 这与预期相符。从冗余分析也可看出, 养分有效性是影响植物生长的最重要因素(图 6)。基于蚓堆肥在 40~50℃ 干扰下性质的变化, 可以将对植物生长的促进作用归因于蚓堆肥本身速效养分的释放。在 60~70℃ 干扰蚓堆肥的处理下, 土壤的速效磷钾含量明显下降(图 1), 而植物的磷钾吸收量达到最高(图 5), 推测其原因是土壤磷钾素的底值含量较高, 即使蚓堆肥对土壤磷钾的供应量有所降低, 植物的养分吸收并未受到不利影响。

蚓堆肥促进植物生长的途径还可能包括其他生物和非生物因素作用。先前的研究发现, 蚓堆肥经高温处理后会产生产类腐殖酸物质<sup>[37]</sup>, 将其施入土壤后可能会通过增加微生物的多样性和改善微生物群落结构, 进而刺激植物的生长<sup>[38]</sup>。但是, 本研究中蚓堆肥经热干扰后对植物生长的影响主要取决于蚓堆肥中的养分含量, 而蚓堆肥内原来的生物及生物活性物质对土壤和植物性质的贡献不大。有报道表明, 高温处理使蚓堆肥中有益与有害微生物同时失活从而消除了蚓堆肥中微生物对植物生长的影响<sup>[39]</sup>, 今后应该进一步分析蚓堆肥和土壤中的微生物群落结构的动态变化以更全面地了解干扰对蚓堆肥功效的影响机制。除此之外, 本研究表现的是盆栽种植的短期效应, 今后应在更大的时空尺度上加强研究, 以期系统地评价蚓堆肥的效果及其内在的生物调控机制。

## 4 结 论

蚓堆肥中的微生物生物量和活性虽然在短期加热后下降, 但同时也促进了蚓堆肥中速效养分的释放。热干扰后的蚓堆肥施入土壤后, 虽然土壤微生物生物量因蚓堆肥经历加热环节后显著下降, 但土壤养分供应量和土壤酶活性却升高。从植物生长角度, 伴随蚓堆肥前期加热程度的增强, 植物生长和

氮磷钾吸收量明显提高, 受热干扰后蚓堆肥虽然本身微生物活性较低, 但在施入土壤后反而促进了作物生长和养分吸收。蚓堆肥受热干扰后会更有利于发挥其促进效果, 说明蚓堆肥促进作物生长的肥效可能与其自身的微生物生物量和总体活性关联不明显。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002, 418 ( 6898 ): 671—677.
- [ 2 ] Diacono M, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30 ( 2 ): 401—422.
- [ 3 ] Lim S L, Wu T Y, Lim P N, et al. The use of vermicompost in organic farming: Overview, effects on soil and economics. *Journal of the Science of Food Agriculture*, 2015, 95 ( 6 ): 1143—1156.
- [ 4 ] Arancon N Q, Edwards C A, Bierman P. Influences of vermicomposts on field strawberries: Part 2. Effects on soil microbiological and chemical properties. *Bioresource Technology*, 2006, 97 ( 6 ): 831—840.
- [ 5 ] Lazcano C, Gómez-Brandón M, Domínguez J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere*, 2008, 72 ( 7 ): 1013—1019.
- [ 6 ] Song X C. Changes of agricultural waste during vermicompost and their effects on soil properties and crop production. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. [宋修超. 蚯蚓堆肥性质的变化及其对土壤性质与作物生长的影响. 南京: 南京农业大学, 2015.]
- [ 7 ] Li Y P, Shao M A, Wang J. Effects of earthworm cast mulch on soil evaporation. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 3 ): 633—640. [李彦霏, 邵明安, 王娇. 蚯蚓粪覆盖对土壤水分蒸发过程的影响. *土壤学报*, 2018, 55 ( 3 ): 633—640.]
- [ 8 ] Wang D, Shi Q, Wang X, et al. Influence of cow manure vermicompost on the growth, metabolite contents, and antioxidant activities of Chinese cabbage (*Brassica campestris* ssp. *chinensis*). *Biology & Fertility of Soils*, 2010, 46 ( 7 ): 689—696.
- [ 9 ] Chantigny M H, Curtin D, Beare M H, et al. Influence of temperature on water-extractable organic matter and ammonium production in mineral soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 ( 2 ): 517—524.
- [ 10 ] Wang Q, Wang S, He T, et al. Response of organic carbon mineralization and microbial community to leaf litter and nutrient additions in subtropical forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 71 ( 3 ): 13—20.

- [ 11 ] Zhong W, Gu T, Wang W, et al. The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity. *Plant & Soil*, 2010, 326( 1/2): 511—522.
- [ 12 ] Kotroczó Z, Veres Z, Fekete I, et al. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 70( 2): 237—243.
- [ 13 ] Tian S Y, Wang M W, Cheng Y H, et al. Long-term effects of chemical and organic amendments on red soil enzyme activities. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37( 15): 4963—4972. [田善义, 王明伟, 成艳红, 等. 化肥和有机肥长期施用对红壤酶活性的影响. *生态学报*, 2017, 37( 15): 4963—4972.]
- [ 14 ] Liu J G, Li X G, Wang X X. Effects of successive application of organic fertilizers on rhizosphere microbial populations and enzyme activities of monoculture peanut. *Soils*, 2018, 50( 2): 305—311. [刘金光, 李孝刚, 王兴祥. 连续施用有机肥对连作花生根际微生物种群和酶活性的影响. *土壤*, 2018, 50( 2): 305—311.]
- [ 15 ] Wang L D, Wang F L, Guo C X, et al. Review: Progress of soil enzymology. *Soils*, 2016, 48( 1): 12—21. [王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展. *土壤*, 2016, 48( 1): 12—21.]
- [ 16 ] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31( 11): 1471—1479.
- [ 17 ] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42( 9): 1363—1371.
- [ 18 ] Li H L, Zhang W F, Zhang F S, et al. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2010, 16( 5): 1136—1143. [李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16( 5): 1136—1143.]
- [ 19 ] Sun Y M, Li G X, Zhang F D, et al. Status quo and developmental strategy of agricultural residues resources in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21( 8): 181—185. [孙永明, 李国学, 张夫道, 等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略. *农业工程学报*, 2005, 21( 8): 181—185.]
- [ 20 ] Udikovickolic N, Wichmann F, Broderick N A, et al. Bloom of resident antibiotic-resistant bacteria in soil following manure fertilization. *Proceedings of the National Academic of Sciences of the United States of America*, 2014, 111( 42): 15202—15207.
- [ 21 ] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [ 22 ] Bell C W, Fricks B E, Rocca J D, et al. High-throughput fluorometric measurement of potential soil extracellular enzyme activities. *Journal of Visualized Experiments Jove*, 2013( 81): e50961.
- [ 23 ] Cao Y, Huang H Y, Wu H S, et al. Physico-chemical properties of hyperthermophilic composting from livestock manures and its effects on growth of Chinese cabbage. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34( 12): 251—257. [曹云, 黄红英, 吴华山, 等. 畜禽粪便超高温堆肥产物理化性质及其对小白菜生长的影响. *农业工程学报*, 2018, 34( 12): 251—257.]
- [ 24 ] Yu Z X, Yang J J, Wang Y Y, et al. Physical and chemical maturity indexes and Fourier transform infrared ( FTIR ) spectroscopy of animal manures during composting. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27( 6): 2015—2023. [于子旋, 杨静静, 王语嫣, 等. 畜禽粪便堆肥的理化腐熟指标及其红外光谱. *应用生态学报*, 2016, 27( 6): 2015—2023.]
- [ 25 ] Yang O, Norton J M, Stark J M. Ammonium availability and temperature control contributions of ammonia oxidizing bacteria and archaea to nitrification in an agricultural soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 113: 161—172.
- [ 26 ] Cao Y, Huang H Y, Qian Y T, et al. Hyperthermophilic pretreatment device and its application on improving decomposition effect for chicken manure and rice straw aerobic composting. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33( 13): 243—250. [曹云, 黄红英, 钱玉婷, 等. 超高温预处理装置及其促进鸡粪稻秸好氧堆肥腐熟效果. *农业工程学报*, 2017, 33( 13): 243—250.]
- [ 27 ] Razavi B S, Liu S, Kuzyakov Y. Hot experience for cold-adapted microorganisms: Temperature sensitivity of soil enzymes. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 105: 236—243.
- [ 28 ] Chen G, Zhang H M, Shen Y Q, et al. Application effects of swine and cow manures on rice yield, nutrient uptakes and use efficiencies and soil fertility. *Soils*, 2018, 50( 1): 59—65. [陈贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响. *土壤*, 2018, 50( 1): 59—65.]
- [ 29 ] Wang Y Z, Chen X, Shi Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24( 1): 260—268. [王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. *应用生态学报*, 2013, 24( 1): 260—268.]
- [ 30 ] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327( 5968): 1008—1010.
- [ 31 ] Diana M L, Mariela N, María del M, et al. Long-term management systems under semiarid conditions: Influence on labile organic matter,  $\beta$ -glucosidase activity and microbial efficiency. *Applied Soil Ecology*, 2015,

- 96: 296—305.
- [ 32 ] Huang G F, Zhong L J, Zhang Z D, et al. Physicochemical changes and maturity evaluation of solid organic waste compost. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 ( 5 ): 813—818. [黄国锋, 钟流举, 张振铤, 等. 有机固体废弃物堆肥的物质变化及腐熟度评价. *应用生态学报*, 2003, 14 ( 5 ): 813—818.]
- [ 33 ] Zhao C S, Hu C X, Huang W. Study on nitrogen mineralization of two typical vegetable soils in Central China. *Soils*, 2013, 45 ( 1 ): 41—45. [赵长盛, 胡承孝, 黄魏. 华中地区两种典型菜地土壤中氮素的矿化特征研究. *土壤*, 2013, 45 ( 1 ): 41—45.]
- [ 34 ] Stone M M, Deforest J L, Plante A F. Changes in extracellular enzyme activity and microbial community structure with soil depth at the Luquillo Critical Zone Observatory. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 75: 237—247.
- [ 35 ] Huang S S, Cheng Y H, Zhong Y J, et al. Effects of soil and water conservation measures on soil labile organic carbon and soil enzyme activity in gentle slope land of red soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 2 ): 468—476. [黄尚书, 成艳红, 钟义军, 等. 水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响. *土壤学报*, 2016, 53 ( 2 ): 468—476.]
- [ 36 ] Wang J H, Hu J L, Lin X G, et al. Effects of long-term balanced fertilization on microbial activity and nutrient uptake of maize in a fluvo-aquic soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 ( 4 ): 766—772. [王俊华, 胡君利, 林先贵, 等. 长期平衡施肥对潮土微生物活性和玉米养分吸收的影响. *土壤学报*, 2011, 48 ( 4 ): 766—772.]
- [ 37 ] Marhuenda-Egea F C, Martínez-Sabater E, Jordá J, et al. Dissolved organic matter fractions formed during composting of winery and distillery residues: Evaluation of the process by fluorescence excitation-emission matrix. *Chemosphere*, 2007, 68 ( 2 ): 301—309.
- [ 38 ] Maji D, Misra P, Singh S, et al. Humic acid rich vermicompost promotes plant growth by improving microbial community structure of soil as well as root nodulation and mycorrhizal colonization in the roots of *Pisum sativum*. *Applied Soil Ecology*, 2016, 110: 97—108.
- [ 39 ] Zhao H T, Che L, Jiang W, et al. Effect of high-temperature sterilization and materials addition of vermicompost-formulated substrate on capsicum seedling development. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 ( 2 ): 380—388. [赵海涛, 车玲, 姜薇, 等. 高温处理与添加物料对蚓粪基质培育辣椒壮苗的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 ( 2 ): 380—388.]

(责任编辑: 陈荣府)