

生物有机肥提高设施土壤生产力减缓黄瓜连作障碍的机制

曲成闯¹, 陈效民^{1*}, 张志龙¹, 闫婧妍¹, 嵇晨¹, 张俊²

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095; 2 如皋市农业科学研究所, 江苏如皋 226500)

摘要:【目的】针对土壤连作障碍问题, 探索高强度连作条件下生物有机肥在减缓土壤连作障碍发生、平衡土壤养分、调控土壤酶活性等方面的作用机制, 为生物有机肥在改良土壤、防控黄瓜连作障碍、促进农业可持续发展等方面的应用奠定基础。【方法】以如皋市农业科学研究所设施蔬菜种植基地为试验平台, 采用田间定位试验的方法, 设置 CK (空白对照)、B10 (生物有机肥施用量为 10 t/hm²)、B20 (生物有机肥施用量为 20 t/hm²) 3 个处理, 于第一季黄瓜种植前将生物有机肥一次性施入试验小区, 于 2016 年 12 月 5 日、2017 年 6 月 28 日和 2017 年 11 月 26 日, 连续三季, 在黄瓜成熟采集 0—20 cm 土壤样品。将土壤样品分成两份, 一份放于 4℃ 冰箱冷藏保存, 用于测定土壤生物学性质; 另一份风干后过筛处理, 以供土壤理化性状分析。同时, 调查黄瓜产量。【结果】随着黄瓜连续种植季数增加, CK 处理中土壤容重和电导率呈增加趋势, 土壤各肥力指标、酶活性、微生物量碳氮含量及黄瓜产量呈下降趋势; 在同一季黄瓜成熟期, 与 CK 相比, 施用生物有机肥可降低土壤容重和电导率, 增加土壤总孔隙度、pH、有机质、全氮、硝态氮和速效磷含量, 其中连续种植 3 季黄瓜过程中, 土壤有机质、速效磷和硝态氮含量分别增加了 39.3%~83.9%、5.98~14.2% 和 10.0~22.0%, 而土壤电导率降低了 8.57%~12.7%。同一季黄瓜成熟期, 不同处理中土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和磷酸酶活性由大到小排列均表现为 B20 > B10 > CK, 且连续种植 3 季黄瓜后 B10 和 B20 处理中 4 种土壤酶活性均高于第一季黄瓜成熟期 CK 处理; 连续种植 3 季黄瓜期间, 施用生物有机肥处理中土壤微生物量碳、氮含量均明显高于 CK, B10 和 B20 处理中微生物量碳、氮含量较 CK 分别增加了 4.26%~23.2% 和 21.8%~56.2%。与 CK 相比, 第一季、第二季、第三季 B10 处理黄瓜产量分别提高了 3.93%、9.73%、10.6%, B20 处理分别提高了 12.9%、18.8%、20.2%。黄瓜连作过程中, 土壤容重、有机质、硝态氮和速效磷与生物学指标和黄瓜产量相关显著, 且土壤 pH 和电导率与土壤过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、微生物量氮含量和黄瓜产量呈显著相关关系。【结论】生物有机肥可改善黄瓜连作过程中土壤耕性变差、养分失衡和酸化等理化性质变劣的现象, 缓解黄瓜连作土壤的次生盐渍化状况, 还能提高土壤酶活性、微生物量碳氮含量和黄瓜产量, 且黄瓜连作过程中土壤理化性质和生物学特性指标无明显变化, 从而减缓黄瓜连作障碍的发生。

关键词: 生物有机肥; 黄瓜; 连作障碍; 土壤理化性质; 土壤酶活性

Mechanism of bio-organic fertilizer on improving soil productivity for continuous cucumber in greenhouse

QU Cheng-chuang¹, CHEN Xiao-min^{1*}, ZHANG Zhi-long¹, LÜ Jing-yan¹, JI Chen¹, ZHANG Jun²

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2 Rugao Institute of Agricultural Sciences, Rugao, Jiangsu 226500, China)

Abstract: 【Objectives】The objective of this study was to explore the effects and mechanisms of bio-organic fertilizers on alleviating soil related problems in continuous cropping, balancing soil nutrients, and controlling soil enzyme activities under cucumber continuous cropping conditions. The results will lay a foundation for bio-organic fertilizers on improving soil fertility, improving continuous cropping obstacles, and promoting sustainable agricultural development. 【Methods】A three-season field trial was conducted at Rugao Agricultural Science

收稿日期: 2018-07-30 接受日期: 2018-10-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0200305) 资助。

联系方式: 曲成闯 E-mail: 2016103065@njau.edu.cn; * 通信作者 陈效民 E-mail: xmchen@njau.edu.cn

Research Institute using high-intensity continuous planting of cucumber. Applications of bio-organic fertilizers of 0, 10 and 20 t/ha were the treatments. The bio-fertilizer was once applied at the first cucumber season and cucumber was planted continuously for three seasons. Soil samples of 0–20 cm deep were collected at mature stages of each season, the soil physical and chemical properties, enzyme activities, microbial biomass carbon and nitrogen content as well as cucumber yield were measured. **【 Results 】** The soil bulk density and electrical conductivity increased with cucumber planting season, while soil fertility indexes, enzyme activity, microbial biomass carbon and nitrogen content and cucumber yield decreased in CK treatment; the application of biological organic fertilizer reduced soil bulk density and electrical conductivity, increased soil total porosity, pH, organic matter, total nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphorus content in the same cucumber mature period. Over the continuous planting time, the contents of soil organic matter, available phosphorus and nitrate nitrogen increased by 39.3%–83.9%, 5.98%–14.2% and 10.0%–22.0% respectively, compared to CK, while the soil electrical conductivity decreased by 8.57%–12.73%. At cucumber ripening stage, the activities of soil urease, catalase, sucrose and phosphatase in different treatments followed the order: B20 > B10 > CK, and the soil four enzymatic activities in B10 and B20 treatments after 3 seasons planting were higher than those in CK in the first season; Over time, the soil microbial biomass carbon and nitrogen contents in the bio-organic fertilizer treatment became significantly higher than that in CK, the content of soil microorganism biomass carbon and nitrogen in B10 and B20 treatments increased by 4.26%–23.17% and 21.81%–56.23% respectively, compared with CK. The cucumber yield in the first, second and third season of B10 treatment and B20 treatment increased by 3.93%, 9.73%, 10.65% and 12.92%, 18.83%, 20.21% respectively, compared to CK. The correlation between cucumber yield and soil bulk density, organic matter, nitrate nitrogen, available phosphorus and biological index was significant during the continuous cropping of cucumber, and soil pH and electrical conductivity were significantly correlated with soil catalase activity, invertase activity, microbial biomass nitrogen content and cucumber yield. **【 Conclusions 】** Bio-organic fertilizer can improve the soil physical and chemical properties in the continuous cucumber cropping system, alleviate the secondary salinization of cucumber continuous cropping, increase soil enzyme activity, microbial biomass carbon and nitrogen content as well as cucumber yield, but without significant change in soil physical and chemical properties and biological characteristics during continuous cropping, thereby alleviate soil related problems in continuous cucumber cropping.

Key words: bio-organic fertilizer; cucumber; continuous cropping obstacle; soil physicochemical properties; soil enzymatic activity

黄瓜作为日常必需蔬菜之一, 市场需求量和消耗量较大, 黄瓜种植也逐渐成为中国长江三角洲地区蔬菜种植业的主体。但由于耕地面积减少, 人地矛盾不断加剧, 加上种植户过度追求经济利益, 导致该地区出现在同一地块连续种植多季黄瓜的现象^[1]。连续在同一地块上栽培同种作物或近缘作物, 即使在正常的管理措施下, 也会引起作物产量降低、品质变劣和生育状况变差, 造成土壤发生连作障碍, 同时连作障碍会导致土壤出现养分不平衡、土壤次生盐渍化、土壤酸化和土壤酶活性紊乱等现象^[2-4], 土壤连作障碍严重时还会造成黄瓜生长发育不良、病虫害增多、产量下降甚至绝收^[5]。连作障碍

已成为制约蔬菜种植产业发展的一个重要因素。在全球人口增加、人地矛盾日益加深和市场需求量增加等社会背景下, 在同一地区高强度连续种植蔬菜和土壤发生连作障碍的状况不可避免^[6]。如何改善土壤理化特征、减缓土壤连作障碍发生已成为当前农业可持续发展需要解决的重要问题。

研究发现, 改变耕作方式、优化肥料配比比例和精准施肥等措施可在一定程度上缓解土壤连作障碍问题^[7]。生物有机肥主要由功能微生物与以动植物残体(如畜禽粪便、农作物秸秆等)为来源并经无害化处理、腐熟的有机物料复合而成, 兼具微生物肥料和有机肥的效应, 且生物有机肥具备养分全面平

衡、肥效持久和富含功能菌微生物等特点,已经用于培肥土壤、土壤污染修复以及土壤改良等方面^[8-9]。大量理论研究和实践表明,生物有机肥可改善土壤理化性质和微生物群落结构,提高土壤肥力水平^[10];可抑制土壤病原菌微生物活性,降低植株病害发生率,增加土壤微生物多样性^[11]。生物有机肥在改良土壤,改善土壤理化性质和优质农产品生产方面也发挥着积极的作用^[12]。然而,大多数研究仅单一探讨生物有机肥对土壤理化性质、生物学特性和作物品质的短期影响^[13-15],或者研究生物有机肥对已发生连作障碍土壤的修复和土传病害的控制作用^[16-17],且多数采用温室盆栽试验^[18-19],而有关高强度连作体系条件下生物有机肥对减缓土壤连作障碍发生、平衡土壤养分、调控土壤酶活性等的研究却鲜有报道,尤其是一次性施入生物有机肥对设施黄瓜连作土壤的影响及效果周期的研究还未发现。

本研究采用设施大棚田间小区试验,将生物有机肥于第一季黄瓜种植之前一次性施入,针对高强度连作体系下土壤板结、次生盐渍化、养分不平衡以及酶活性紊乱等现象,研究生物有机肥对连续种植3季黄瓜土壤理化性质、肥力特征和酶活性等的影响,探索高强度连作体系条件下生物有机肥对减缓土壤连作障碍发生、平衡土壤养分、调控土壤酶活性等的作用机制,为生物有机肥在改良土壤、促进农业可持续发展等方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2016年8月—2017年12月在江苏省南通市如皋市农业科学研究所(东经120°28'54.7",北纬32°22'02.7")设施大棚基地进行,并建立长期监测定点试验。试验区位于长江三角洲北翼,南临长江,属于典型的亚热带季风气候(属于东亚季风),夏季高温多雨,冬季温和少雨,年平均气温15.6℃,气温年变化较小,年降水总量721 mm,全年无霜期224天。试验期间设施大棚中每日温度控制在23℃~26℃。

试验开始之前,试验田所在区域为撂荒地,新开垦后于2016年建成设施蔬菜大棚。供试土壤类型为典型潮土,耕层土壤基本理化性如下:土壤容重为1.40 g/cm³,总孔隙度48.3%,pH值是7.0,电导率0.97 ds/m,有机质6.54 g/kg,全氮1.03 g/kg,硝态氮120 mg/kg,速效磷64.4 mg/kg。

1.2 供试生物有机肥

试验所用的生物有机肥由江阴市联业生物科技有限公司提供,由牛粪、小麦秸秆经过微生物腐熟过程制作而成,其中牛粪和小麦秸秆用量比例为4:1,活性功能菌微生物为有效活菌数 30.56×10^6 亿个/g,其化学性质如下:pH值是7.96,有机质含量387 g/kg,全氮22.2 g/kg,全磷22.2 g/kg、全钾9.68 g/kg、腐殖酸187 g/kg。

1.3 试验设计

试验共设计3个处理,重复3次,共计9个小区,每个小区面积21 m² (3 m × 7 m),采用拉丁方随机区组排列,处理分别为:CK(生物有机肥施用量为0 t/hm²),B10(生物有机肥施用量为10 t/hm²),B20(生物有机肥施用量为20 t/hm²),且小区周围设置保护行和田埂,保护行和田埂宽度分别是1 m和0.5 m。

生物有机肥于2016年8月13日第一季黄瓜种植前施入各小区,且通过人工翻耕与小区0—20 cm表层土壤混匀。黄瓜种植基肥采用187.5 kg/hm²复合肥(N-P₂O₅-K₂O为17-17-17),于第一季黄瓜种植前一次性施入,提供黄瓜生命活动所需养分。黄瓜苗龄为30天时,将黄瓜幼苗从苗床统一移栽到试验小区,黄瓜株距和行距分别是25 cm和50 cm。试验期间不再追肥,定期人工除草,且采用滴灌方式适时适量灌水。试验期间采取同样的农作管理措施。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 土壤样品采集 每一季黄瓜成熟期(2016年12月5日、2017年6月28日、2017年11月26日),采用“之”字形多点混合采样法,每个小区选择10个采样点,采集不同处理试验小区0—20 cm土壤样品。将土壤样品分成两份,一份放于4℃冰箱冷藏保存,用于测定土壤生物学性质;另一份风干后过筛处理,以供土壤理化性状分析。

1.4.2 土壤样品测定 1) 土壤理化性质指标:土壤容重和总孔隙度采用环刀法测定;土壤pH测定采用电位法(其中土水比为1:5);土壤电导率采用电导率仪(DDS-320型)测定(其中土水质量比为1:5);采用重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机质含量;土壤全氮测定采用半微量开式法(采用0.01 mol/L 1/2H₂SO₄滴定);硝态氮采用1 mol/L KCl振荡浸提,滤液用TRACCS2000型连续流动分析仪测定;碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量。2) 土壤生物学指标:土壤脲酶采用靛酚蓝比

色法测定, 37℃ 恒温培养 24 h, 脲酶活性以单位土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 毫克数表示; 采用 KMnO_4 滴定法测定过氧化氢酶活性; 土壤蔗糖酶活性采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定, 其活性以 24 h 后 1 g 土壤产生 1 mg 还原糖表示; 采用磷酸苯二钠比色法测定碱性磷酸酶活性, 结果以酚含量 (37℃, 24 h) 表示; 采用氯仿熏蒸提取法测定土壤微生物量碳 (MBC) 和微生物量氮 (MBN) 含量, 其中土壤微生物量碳含量采用熏蒸提取—容量分析法测定, 土壤微生物量氮含量采用熏蒸提取后凯氏定氮法测定。

1.4.3 黄瓜产量统计 试验过程中, 在主要收获期对黄瓜果实进行分批采摘, 摘取成熟黄瓜果实进行称重, 直到黄瓜叶片严重衰落时期, 黄瓜产量无法计入有效产量为止, 且每个小区分批累计记产, 计算黄瓜产量。

1.5 数据统计与分析

利用 Excel 2010 软件和 SPSS20.0 软件对数据进行统计和分析, 同时采用 LSD 法进行多重比较, 其中显著性水平设为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 生物有机肥对黄瓜连作土壤容重和总孔隙度的影响

由图 1 可知, 从第一季到第三季黄瓜成熟期, CK 处理中土壤容重由 1.35 g/cm^3 增加到 1.40 g/cm^3 , 土壤总孔隙度由 49.0% 下降到 46.6%, 说明随着黄瓜连作季数增加, 土壤疏松程度和通气性均出现不同

程度变差的现象。连续种植 3 季黄瓜过程中, 施用生物有机肥 B10 和 B20 处理与 CK 相比, 土壤容重分别下降了 9.6%、13.0%、15.0% 和 19.3%、17.4%、20.7%, 且到第三季黄瓜成熟期, B10 和 B20 处理与 CK 相比, 差异明显 ($P < 0.05$)。从黄瓜种植第一季到第三季, CK 处理中土壤总孔隙度分别为 49.0%、47.8% 和 46.6%, 土壤总孔隙度随黄瓜连作季数增加而逐渐减少, 而与 CK 相比, 施用生物有机肥处理中土壤总孔隙度较大, 且连续种植 3 季黄瓜后土壤总孔隙度并无明显变化。

2.2 生物有机肥对黄瓜连作土壤化学性质的影响

为了探索黄瓜连作条件下生物有机肥对土壤化学性质的影响, 本试验研究了施用生物有机肥条件下连续种植 3 季黄瓜的土壤 pH、电导率、有机质、全氮、硝态氮、速效磷含量变化状况 (表 1)。从第一季到第三季黄瓜成熟期, CK 处理中土壤 pH、有机质、速效磷含量均出现下降趋势, 土壤电导率和全氮呈现增加趋势, 其中电导率和全氮分别增加了 6.8% 和 12.0%, 且到第三季黄瓜成熟期, 全氮与有机质、速效磷之间比例变大。与 CK 相比, 除土壤电导率外, 施用生物有机肥处理中其他土壤指标都有不同程度增加, 其中土壤有机质、速效磷和硝态氮含量分别增加了 39.3%~83.9%、6.0%~14.2% 和 10.0%~22.0%, 而土壤电导率降低了 8.6%~12.7%, 且每一季黄瓜成熟期施用生物有机肥处理中土壤有机质含量与 CK 相比, 差异均达到显著性水平 ($P < 0.05$)。连续种植 3 季黄瓜过程中, 施用生物有机肥处理的土壤各养分比例与 CK 相比, 变化幅度较

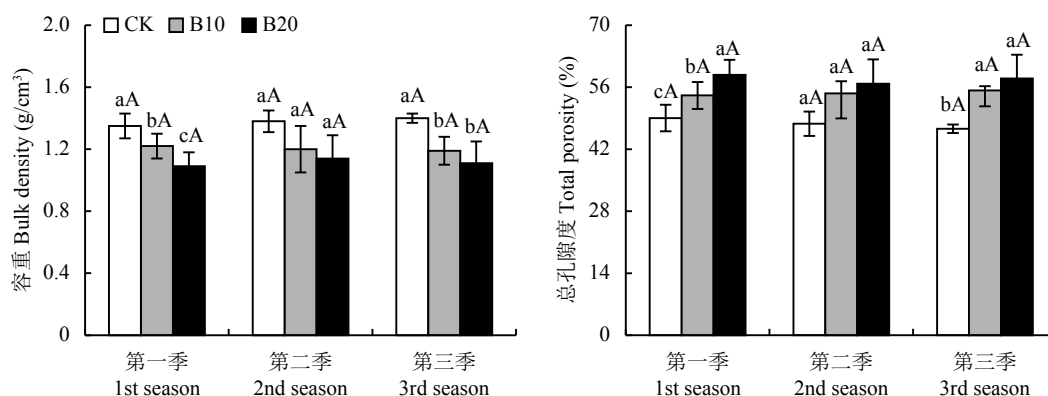


图 1 施用生物有机肥对黄瓜连作过程中土壤容重和总孔隙度的影响

Fig. 1 Soil bulk density and total porosity response to bio-organic fertilizer addition in cucumber continuous cropping seasons

注 (Note): 方柱上不同小写字母表示同一季的不同处理之间差异显著, 不同大写字母表示同一处理不同种植季之间差异显著 ($P < 0.05$)。Different small letters above the bars indicate significant difference among the treatments during the same season, and different capital letters indicate significant differences among the growing seasons for the same treatment at $P < 0.05$ level.

表 1 施用生物有机肥对黄瓜连作过程中土壤化学性质的影响

Table 1 Soil chemical indexes response to bio-organic fertilizer addition in cucumber continuous cropping system

指标 Index	处理 Treatment	第一季 1st season	第二季 2nd season	第三季 3rd season
pH	CK	6.99 ± 0.01 aA	6.98 ± 0.01 aA	6.86 ± 0.05 bB
	B10	7.02 ± 0.07 aA	7.04 ± 7.04 aA	7.02 ± 0.10 aA
	B20	7.03 ± 0.07 aA	7.03 ± 7.03 aA	7.03 ± 0.05 aA
电导率 EC (ds/m)	CK	1.03 ± 0.07 aA	1.05 ± 0.13 aA	1.10 ± 0.06 aA
	B10	0.94 ± 0.01 abA	0.96 ± 0.10 aA	1.00 ± 0.04 abA
	B20	0.93 ± 0.01 bA	0.93 ± 0.03 aA	0.96 ± 0.05 bA
有机质 OM (g/kg)	CK	6.59 ± 0.41 cA	6.40 ± 0.22 bA	6.24 ± 1.20 cA
	B10	9.18 ± 0.12 bA	9.93 ± 0.76 aA	9.28 ± 1.73 bA
	B20	10.66 ± 0.12 aA	11.77 ± 1.69 aA	11.01 ± 1.42 aA
全氮 Total N (g/kg)	CK	1.67 ± 0.02 aB	1.71 ± 0.03 bB	1.87 ± 0.07 aA
	B10	1.77 ± 0.05 aA	1.80 ± 0.02 aA	1.88 ± 0.21 aA
	B20	1.78 ± 0.09 aA	1.84 ± 0.03 aA	1.96 ± 0.29 aA
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	CK	176.20 ± 1.10 bC	189.56 ± 3.72 bA	182.83 ± 3.25 bB
	B10	207.06 ± 5.83 aAB	212.77 ± 2.68 aA	201.16 ± 6.39 aB
	B20	214.94 ± 1.93 aA	216.26 ± 6.87 aA	208.73 ± 3.60 aA
有效磷 Available P (mg/kg)	CK	85.35 ± 3.03 bA	85.15 ± 4.38 aA	78.93 ± 0.94 bB
	B10	90.45 ± 4.13 abA	91.65 ± 3.98 aA	88.70 ± 3.45 abA
	B20	94.55 ± 2.13 aA	92.49 ± 4.15 aA	90.14 ± 5.43 aA

注 (Note) : 同列数据后不同小写字母表示同一季不同处理间在 5% 水平上差异显著, 同行不同大写字母表示同一处理不同种植季间在 5% 水平上差异显著 Different lowercase letters in a column indicate significantly different among the treatments for the same season at the 5% level, different capital letters in a row indicate significantly different among the growing seasons for the same treatment at the 5% level.

小, 土壤各养分含量比较均衡。不同处理之间土壤 pH 差异不明显, 但施用生物有机肥的 B10 和 B20 处理中土壤 pH 高于 CK。由表 1 可知, 第三季黄瓜成熟期中 CK 处理的土壤 pH、全氮、硝态氮、铵态氮、速效磷含量与前两季黄瓜成熟期相比, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 而施用生物有机肥的 B20 处理中土壤各指标变化均不明显。

2.3 生物有机肥对黄瓜连作土壤酶活性的影响

土壤酶为土壤生态系统代谢提供了动力, 且其大部分来自于微生物, 探讨高强度连作设施黄瓜土壤酶活性的变化可在一定程度上反映微生物的活性。从第一季到第三季黄瓜成熟期, 不同处理中土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和磷酸酶活性 (表 2) 表明, 施用生物有机肥可增加土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和磷酸酶活性。同一黄瓜成熟期不同处理中土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和磷酸酶活性由大到小排列均表现为 B20 > B10 > CK。生物有机肥可明显影响第一季黄瓜土壤脲酶、过氧化氢酶、

蔗糖酶和磷酸酶活性, 其中与 CK 处理相比, 第一季黄瓜成熟期 B10 和 B20 处理中土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和磷酸酶活性分别提高了 47.0%、14.4%、9.1%、4.6% 和 62.1%、23.7%、16.6%、34.6%。

2.4 生物有机肥对黄瓜连作土壤微生物量碳氮含量的影响

土壤微生物量碳、氮含量均随生物有机肥施用量的增加而增加 (图 2)。施用生物有机肥处理中土壤微生物量碳、氮含量均明显高于 CK。连续种植 3 季黄瓜期间, B10 和 B20 处理中微生物量碳、氮含量与 CK 相比增幅范围分别为 43.0%~23.2% 和 21.8%~56.2%。第一季到第二季黄瓜成熟期各处理土壤微生物量碳、氮含量均呈增加趋势, 第二季到第三季黄瓜成熟期各处理土壤微生物量碳、氮含量均呈下降趋势。第一季到第三季黄瓜成熟期 B10 和 B20 处理中微生物量碳含量与 CK 相比, 分别增加了 20.6、28.3、7.5 mg/kg 和 40.5、42.2、18.0 mg/kg, 微生物

表 2 施用生物有机肥对黄瓜连作过程中土壤酶活性的影响

Table 2 Soil enzymatic activities response to bio-organic fertilizer addition in cucumber continuous cropping system				
酶活性 Enzymatic activity	处理 Treatment	第一季 1st season	第二季 2nd season	第三季 3rd season
脲酶 Urease [NH ₃ -N μg/(g·d)]	CK	52.30 ± 0.95 cA	52.26 ± 2.01 cA	50.47 ± 3.02 bB
	B10	76.89 ± 2.82 bA	76.62 ± 2.15 bA	63.80 ± 2.37 aB
	B20	84.77 ± 1.42 aA	83.57 ± 1.03 aA	68.77 ± 2.11 aB
过氧化氢酶 Catalase [mL/(g·20 min)]	CK	2.36 ± 0.10 cA	2.35 ± 0.17 bA	2.33 ± 0.17 bA
	B10	2.70 ± 0.03 bA	2.74 ± 0.03 aA	2.71 ± 0.06 abA
	B20	2.92 ± 0.07 aA	2.93 ± 0.05 aA	2.89 ± 0.18 aA
蔗糖酶 Sucrose [mg/(g·d)]	CK	183.81 ± 2.82 cA	186.50 ± 2.40 cA	180.43 ± 11.21 bB
	B10	200.54 ± 5.05 bAB	208.73 ± 1.80 bA	192.07 ± 3.18 abB
	B20	214.25 ± 3.23 aA	226.39 ± 1.53 aA	202.79 ± 13.83 aA
磷酸酶 Phosphatase [μmol/(g·d)]	CK	13.58 ± 0.84 bAB	14.31 ± 1.11 bA	12.39 ± 1.88 bB
	B10	14.21 ± 1.92 abAB	16.73 ± 0.48 bA	13.74 ± 1.29 abB
	B20	18.28 ± 1.77 aA	23.81 ± 1.28 aA	18.54 ± 2.15 aA

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一季不同处理间在 5% 水平上差异显著, 同行不同大写字母表示同一处理不同种植季间在 5% 水平上差异显著Different lowercase letters in a column indicate significantly different among the treatments for the same season at the 5% level, different capital letters in a row indicate significantly different among the growing seasons for the same treatment at the 5% level.

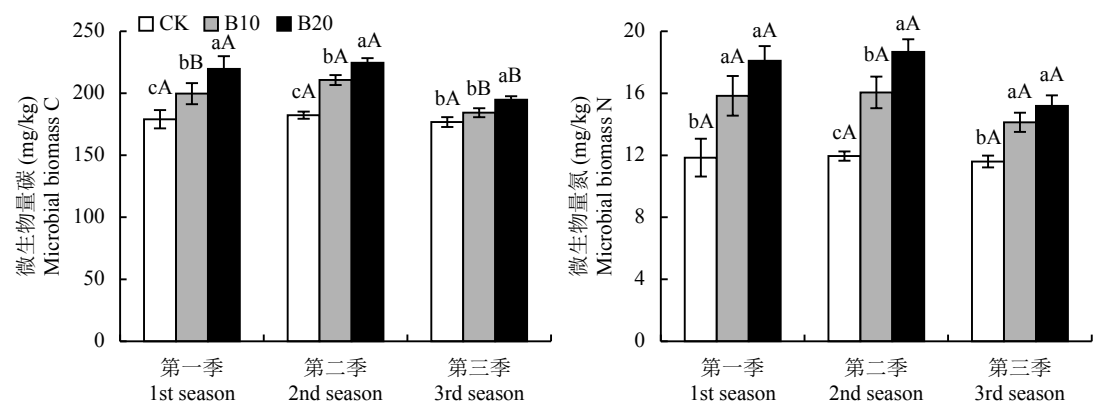


图 2 施用生物有机肥对黄瓜连作过程中土壤微生物量碳、氮含量的影响

Fig. 2 Soil microbial biomass carbon and nitrogen response to bio-organic fertilizer addition in cucumber continuous cropping seasons

注 (Note): 方柱上不同小写字母表示同一季的不同处理之间差异显著, 不同大写字母表示同一处理不同种植季之间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars indicate significant difference among the treatments during the same season, and different capital letters indicate significant differences among the growing seasons for the same treatment at $P < 0.05$ level.

量氮含量与 CK 相比, 分别增加了 4.0、4.1、2.5 mg/kg 和 6.3、6.7、3.6 mg/kg。第三季黄瓜成熟期不同处理之间土壤微生物量碳、氮含量的差异较小。

2.5 生物有机肥对连作黄瓜产量的影响

施用生物有机肥可提高黄瓜产量 (图 3)。随黄瓜连续种植季数增加, CK 处理中黄瓜产量呈下降趋势, 第二季到第三季黄瓜产量下降幅度为 9.4%, 且第三季黄瓜产量与第一和第二季相比, 差异均达显

著水平 ($P < 0.05$)。与 CK 相比, 第一季、第二季和第三季黄瓜生育期 B10 处理中黄瓜产量分别提高了 3.9%、9.7% 和 10.7%, B20 处理中黄瓜产量分别提高了 12.9%、18.8% 和 20.2%, B20 处理中黄瓜产量最高, 第一季、第二季和第三季黄瓜产量分别是 28.8、29.0 和 26.5 t/hm², 且连续种植 3 季黄瓜过程中 B10 和 B20 处理的黄瓜产量变化不明显。

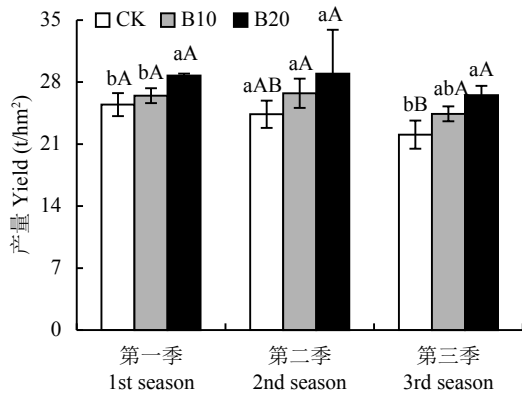


图 3 施用生物有机肥对连作黄瓜产量的影响

Fig. 3 Cucumber yield response to bio-organic fertilizer addition in continuous cropping seasons

注 (Note): 方柱上方不同小写字母表示同一季的不同处理之间差异显著, 不同大写字母表示同一处理不同种植季之间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars indicate significant difference among the treatments during the same season, and different capital letters indicate significant differences among the growing seasons for the same treatment at $P < 0.05$ level.

2.6 连作条件下土壤理化性状与生物学特征、黄瓜产量的相关性分析

由表 3 可知, 除土壤 pH 和电导率外, 其它土壤理化指标均与土壤生物学指标 (脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、磷酸酶、微生物量碳和微生物量氮) 呈显著相关关系 ($P < 0.05$), 且与土壤有机质含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与土壤容重呈显著负相关关系。土壤肥力指标 (有机质、全氮、硝态氮速效磷) 与土壤生物学指标呈显著相关, 说明土壤肥力水平与土壤微生物生命活动关系密切, 尤其是土壤有机质含量与生物学指标呈极显著相关性, 表明黄瓜连作过程中有机质含量与土壤微生物生命活动存在较

高相关关系。土壤理化指标与生物学指标之间相关分析表明, 土壤理化指标与各生物学指标均具有一定相关性, 说明连作条件下土壤理化性质变化会直接或间接影响土壤生物学特征变化。黄瓜连作过程中, 除土壤全氮外, 其他土壤理化指标均与黄瓜产量呈明显相关性, 其中电导率、速效磷和有机质含量与黄瓜产量相关性达极显著水平。

3 讨论

同一地块连续种植同种或近缘作物, 即使采用正常管理措施, 作物也会出现产量降低、品质变坏等情况, 且土壤会发生耕性变差、养分失衡、土壤酸化以及次生盐渍化等现象^[5]。本研究发现, 施用生物有机肥处理后高强度连续种植 3 季黄瓜, 同一季黄瓜成熟期施用生物有机肥处理与对照相比, 土壤容重降低, 土壤总孔隙度增加, 原因是生物有机肥中含有丰富有机质, 添加生物有机肥对土壤有一定的稀释作用, 另一方面生物有机肥中含有多种微量元素, 可提高土壤中土著微生物生命活动过程中所需要的养分和能量, 促进微生物种群增加, 土壤中以微生物为食物的动物活性增加^[20], 其活动过程中同样可以疏松土壤, 增加土壤通气性, 从而降低土壤容重, 增加了土壤总孔隙度, 连作土壤通气性得到改善。连续种植 3 季黄瓜过程中, 施用生物有机肥处理中土壤 pH 高于对照, 原因可能是生物有机肥中的 Ca、Mg、K 等盐基离子在土壤中以碳酸盐和氧化物形式存在, 溶于水后呈碱性从而中和土壤活性酸和潜性酸, 导致土壤 pH 值升高, 减缓黄瓜连作过程中土壤酸化问题。本研究发现, 同一季黄瓜成熟期施用生物有机肥处理与对照处理相比, 土壤电导率

表 3 土壤理化性状与生物学特征指标的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil physical and chemical properties and biological characteristics

指标 Index	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Sucrase	磷酸酶 Phosphatase	MBC	MBN	产量 Yield
容重 Bulk density	-0.85**	-0.98**	-0.83**	-0.71*	-0.78*	-0.89**	-0.81*
总孔隙度 Total porosity	0.85**	0.98**	0.82**	0.69*	0.77*	0.88**	0.81*
pH	0.75*	0.74*	0.68*	0.55	0.63	0.69*	0.80*
电导率 EC	-0.62	-0.79*	-0.73*	-0.56	-0.71*	-0.78*	-0.92**
有机质 OM	0.86**	0.99**	0.92**	0.83**	0.85**	0.93**	0.83**
全氮 Total N	0.87**	0.93**	0.90**	0.76*	0.90**	0.95**	0.60
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0.85**	0.94**	0.91**	0.74*	0.89**	0.94**	0.78*
速效磷 Available P	0.93**	0.89**	0.87**	0.70*	0.86**	0.90**	0.92**

注 (Note): MBC—微生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN—微生物量氮 Microbial biomass nitrogen. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$;

均出现下降趋势, 这是因为生物有机肥疏松了土壤, 土壤盐分会因淋溶作用而减少, 从而也降低了土壤电导率。Kumar 等^[21]研究表明, 生物有机肥可增加土壤肥力水平, 改善土壤养分缺失的状况。Habashy 等在瘠薄地土壤中施入生物有机肥后发现, 经过生物有机肥处理后土壤磷素缺失现象得到有效解决, 土壤硝态氮、铵态氮、有机质等含量与原始土壤相比均明显增加^[22]。本文研究与 Kumar 等和 Habashy 等研究结果基本一致, 生物有机肥施用量越大, 黄瓜连作土壤中各肥力指标含量越高, 且连作过程中土壤养分含量变化幅度较小, 各养分含量比较均衡。生物有机肥本身含有丰富的养分、有机质和微量元素, 提高了土壤各肥力指标, 且生物有机肥中功能性微生物可以活化土壤中矿物固定的养分^[23], 从而增加土壤有效养分含量。

土壤酶活性可以直接反映土壤微生物活性、土壤生物化学反应的方向和强度等信息, 而土壤微生物量碳氮是土壤中易利用的养分库及有机物分解和氮矿化的动力, 其与土壤各养分循环均有密切的关系^[24], 且土壤微生物量碳氮可作为土壤微生物量大小的指标。研究生物有机肥对黄瓜连作土壤中酶活性和微生物量碳氮的影响以及对黄瓜连作土壤生态环境的改善, 对探讨连作土壤中微生物活性状况具有非常重要意义。Brockett 等^[25]研究发现农田管理措施、土壤理化性状以及土壤肥力水平等因素对土壤生物学性质均有较大影响。本试验发现, 连续种植 3 季黄瓜过程中, 施用生物有机肥处理与对照相比, 土壤酶活性 (脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、磷酸酶) 和微生物量碳氮含量均有不同程度的提高, 这与王兴龙等^[26]研究的土壤酶活性和微生物量的变化结果基本一致。生物有机肥含有的功能菌微生物利用土壤中养分进行生命活动, 同时生物有机肥中含有的丰富有机质和营养元素为土壤土著微生物和功能菌微生物活动提供了能量和动力, 可改善土壤微生物群落结构, 增加微生物种群丰度, 而且其还含有较高的氮、磷、钾以及微量元素, 也为微生物提供了生命过程中所需要的养分和能量, 土壤微生物生物量增加, 使微生物量碳、氮含量提高, 微生物在新陈代谢过程中分泌的酶含量增多, 使土壤中酶活性增强, 从而减缓因连作造成土壤生物学性质变差。土壤腐殖质对微生物活动的稳定性起着重要的作用^[27], 生物有机肥是一种由功能菌微生物和腐熟有机物料复合而成的肥料, 其含有丰富有机物质和腐殖酸类物质, 不仅促进了土壤酶活性的提高, 还能长期保

持酶活性处于较高水平, 减缓因黄瓜连作造成的酶活性紊乱, 增强了土壤生态系统稳定性。

连续种植 3 季黄瓜过程中, 对照处理中黄瓜产量呈逐渐降低趋势, 而同一季黄瓜生育期施用生物有机肥处理中黄瓜产量均高于对照处理, 且各处理第三季黄瓜产量均明显下降。黄瓜属于极易发生连作障碍的蔬菜, 高强度连续种植多季黄瓜, 黄瓜次生代谢过程中根部分泌自毒物质, 自毒物质在土壤中逐渐积累^[28], 加上黄瓜整个生育期对养分的选择性吸收, 土壤中个别元素逐渐缺乏^[29], 导致黄瓜连作年限越长, 产量越低^[30]。施用生物有机肥可增加连作黄瓜产量, 这是因为生物有机肥补充了土壤因连续种植黄瓜缺失的有机质和多种养分元素^[31], 同时生物有机肥中功能菌微生物和土壤中土著微生物因获得足够养分, 加快对黄瓜连作过程中自毒物质的部分再分解和重新合成, 降低了自毒物质含量和毒性^[32]。由于高强度连续种植黄瓜, 土壤中养分失衡, 自毒物质积累, 且生物有机肥效作用随时间延长逐渐减小, 从而造成各处理中第三季黄瓜产量均出现明显下降。

相关性分析表明, 土壤各生物学指标 (脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、磷酸酶、微生物量碳和微生物量氮) 均与土壤容重、孔隙度和土壤肥力指标均呈显著相关关系, 且与土壤有机质含量均呈极显著正相关关系, 说明黄瓜连作过程中土壤理化性质变化会与土壤微生物的生命活动密切相关。黄瓜连作过程中理化性质优良的土壤为微生物提供了适宜的隐蔽场所、食物来源和环境梯度等条件, 自养型微生物因获得足够的代谢能量, 繁殖加快, 数量和种群逐渐增多, 丰富了土壤生物多样性, 异养型微生物也因获得充足食物, 生物活性也变得逐渐增强。另外, 黄瓜连作过程中土壤理化性质变化也会影响黄瓜产量, 这是因为黄瓜连作过程中土壤逐渐发生耕性变差、次生盐渍化和养分失衡等现象, 黄瓜连作土壤电导率过高、有机质和磷素缺失都会影响了黄瓜产量。

4 结论

生物有机肥可改善黄瓜连作土壤理化性质, 降低土壤容重和电导率, 提高土壤总孔隙度、pH、养分含量、黄瓜产量和土壤生物学指标 (土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和磷酸酶和土壤微生物量碳、氮含量), 减缓黄瓜连作过程中土壤耕性变差、养分失衡和次生盐渍化的发生, 且土壤理化性质和生物学

特征指标均明显得到改善,生物有机肥可在一定程度上减缓黄瓜连作障碍发生。黄瓜连作过程中土壤理化指标与微生物活动关系密切,通过改善连作土壤理化性质可调控土壤生物学特征。

参 考 文 献:

- [1] 张金锦, 段增强, 李汛. 基于黄瓜种植的设施菜地土壤硝酸盐型次生盐渍化的分级研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 673–680.
Zhang J J, Duan Z Z, Li X. The classification study on NO_3^- -soil secondary salinization in cucumber-based greenhouse[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 673–680.
- [2] 胡伟, 赵兰凤, 张亮, 等. 不同种植模式配施生物有机肥对香蕉枯萎病的防治效果研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 742–748.
Hu W, Zhao L F, Zhang L, et al. Effects of combining bioorganic fertilizer with different cropping systems on controlling *Fusarium* wilt disease of banana[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(3): 742–748.
- [3] Aparicio V, Costa J L. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 96(1): 155–165.
- [4] 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(增刊 2): 184–188.
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(Suppl. 2): 184–188.
- [5] Zhao Q, Dong C, Yang X, et al. Biocontrol of *Fusarium* wilt disease for *Cucumis melo*, melon using bio-organic fertilizer[J]. Applied Soil Ecology, 2011, 47(1): 67–75.
- [6] Wu X, Zhao Q, Zhao J, et al. Different continuous cropping spans significantly affect microbial community membership and structure in a vanilla-grown soil as revealed by deep pyrosequencing[J]. Microbial Ecology, 2015, 70(1): 209.
- [7] Machado S, Petrie S, Rhinhart K, et al. Long-term continuous cropping in the Pacific Northwest: tillage and fertilizer effects on winter wheat, spring wheat, and spring barley production[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(2): 473–481.
- [8] 孙薇, 钱勋, 付青霞, 等. 生物有机肥对秦巴山区核桃园土壤微生物群落和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1224–1233.
Sun W, Qian X, Fu Q X, et al. Effects of bio-organic fertilizer on soil microbial community and enzymes activities in walnut orchards of the Qinling-Bashan Region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1224–1233.
- [9] 孔文杰. 有机无机肥配施对蔬菜轮作系统重金属污染和产品质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 977–984.
Kong W J. Risk of heavy metal pollution and product quality in tomato-radish-green grocery cropping system under applications of commercial organic manure and chemical fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(4): 977–984.
- [10] 孙家骏, 付青霞, 谷洁, 等. 生物有机肥对猕猴桃土壤酶活性和微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 829–837.
Sun J J, Fu Q X, Gu J, et al. Effects of bio-organic fertilizer on soil enzyme activities and microbial community in kiwifruit orchard[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 829–837.
- [11] Lang J, Hu J, Ran W, et al. Control of cotton *Verticillium* wilt and fungal diversity of rhizosphere soils by bio-organic fertilizer[J]. Biology & Fertility of Soils, 2012, 48(2): 191–203.
- [12] Ansari R A, Mahmood I. Optimization of organic and bio-organic fertilizers on soil properties and growth of pigeon pea[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 226: 1–9.
- [13] Deka B C. Productivity, quality and soil health as influenced by organic, inorganic and bio-fertilizer on field pea in eastern Himalaya[J]. Journal of Plant Nutrition, 2015, 38(13): 2006–2027.
- [14] 王鸿磊, 王红艳, 崔丛光. 黄瓜专用生物有机肥对设施黄瓜生长及品质的影响[J]. 北方园艺, 2013, (1): 29–31.
Wang H L, Wang H Y, Cui C G. Effect of the special bio-organic fertilizer for cucumber on growth and quality of cucumber in greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2013, (1): 29–31.
- [15] Jia L, Wei R, Jiang H, et al. Application of bio-organic fertilizer significantly affected fungal diversity of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6): 2039.
- [16] 刘星, 张书乐, 刘国锋, 等. 土壤熏蒸-微生物有机肥联用对连作马铃薯生长和土壤生化性质的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 122–133.
Liu X, Zhang S L, Liu G F, et al. Soil fumigation and bio-organic fertilizer application promotes potato growth and affects soil biochemical properties in a continuous cropping system[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(3): 122–133.
- [17] 袁玉娟, 胡江, 凌宁, 等. 施用不同生物有机肥对连作黄瓜枯萎病防治效果及其机理初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, (2): 372–379.
Yuan Y J, Hu J, Ling N, et al. Effects and mechanisms of application with different bio-organic fertilizers in controlling *Fusarium* wilt of cucumber[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, (2): 372–379.
- [18] Yuan J, Ruan Y, Wang B, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria strain *Bacillus amyloliquefaciens* NJN-6-enriched bio-organic fertilizer suppressed *Fusarium* wilt and promoted the growth of banana plants[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(16): 3774–3780.
- [19] 胡可, 李华兴, 卢维盛, 等. 生物有机肥对土壤微生物活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 303–306.
Hu K, Li H X, Lu W S, et al. Effect of microbial organic fertilizer application on soil microbial activity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 303–306.
- [20] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 等. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6614–6625.
Shao Y H, Zhang W X, Liu S J, et al. Diversity and function of soil fauna[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6614–6625.
- [21] Kumar S, Baudh K, Barman S C, et al. Amendments of microbial bio-fertilizers and organic substances reduces requirement of urea and DAP with enhanced nutrient availability and productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Ecological Engineering, 2014, 71: 432–437.
- [22] Habashy N R, Abou A W, Zaki R N. Effect of Organic and bio-fertilizers on phosphorus and some micronutrients availability in a

- calcareous soil[J]. Research Journal of Agriculture & Biological Sciences, 2008, : 545–552.
- [23] Scharfy D, Venterink H O. Invasion of *Solid agogigantea* in contrasting experimental plant communities: effects on soil microbes, nutrients and plant-soil feedbacks[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98(6): 1379–1388.
- [24] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(6): 1301–1310.
- [25] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven bio-geoclimatic zones in western Canada[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 44(1): 9–20.
- [26] 王兴龙, 朱敏, 杨帆, 等. 配施有机肥减氮对川中丘区土壤微生物量与酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 271–276.
- Wang X L, Zhu M, Yang F, *et al.* Effects of reducing nitrogen and applying organic fertilizers on soil microbial biomass carbon and enzyme activity in the hilly area of Central Sichuan Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 271–276.
- [27] 胡诚, 陈云峰, 乔艳, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 59–66.
- Hu C, Chen Y F, Qiao Y, *et al.* Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil melioration in low-yielding yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 59–66.
- [28] Rangelcastro J I, Killham K, Ostle N, *et al.* Stable isotope probing analysis of the influence of liming on root exudate utilization by soil microorganisms[J]. *Environmental Microbiology*, 2010, 7(6): 828–838.
- [29] Wiebold W J, Fritsch F B. Long-term tillage and crop rotation determines the mineral nutrient distributions of some elements in a Vertic Epiaqualf [J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(1): 27–35.
- [30] 张雪艳, 曹云娥, 田蕾, 等. 不同栽培方式对温室连作黄瓜土壤微生物量碳氮和作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, (3): 562–569.
- Zhang X Y, Cao Y E, Tian L, *et al.* Effect of different cultivation systems on the soil microbial carbon and nitrogen amount and the yield of cucumber in greenhouse[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, (3): 562–569.
- [31] Chen L, Yang X, Raza W, *et al.* Solid-state fermentation of agro-industrial wastes to produce bioorganic fertilizer for the bio-control of Fusarium wilt of cucumber in continuously cropped soil[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(4): 3900–3910.
- [32] 孙艳艳, 蒋桂英, 刘建国, 等. 加工番茄连作对农田土壤酶活性及微生物区系的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(13): 3599–3607.
- Sun Y Y, Jiang G Y, Liu J G, *et al.* Effects of continuous cropping tomato for processing on soil enzyme activities and microbial flora[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3599–3607.