应用生态学报 2017年3月 第28卷 第3期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Mar. 2017, **28**(3): 927-934 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201703.006

优化施肥对设施蔬菜地土壤线虫群落的影响

朱同彬[1,2] 陈小云[3] 张金波[2] 刘满强[3] 周可新[4] 蔡祖聪[2*]
([1]中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; [2]南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; [3]南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; [4]环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘 要 高强度利用下设施蔬菜地的施肥过量问题导致了土壤质量的严重退化,合理施肥是维持蔬菜地生产力和可持续发展的重要措施.本研究比较了常规施肥和优化施肥两种施肥方式下连续种植番茄和辣椒后土壤理化性质、线虫群落及蔬菜产量的差异.结果表明:优化施肥处理土壤 pH 显著高于常规施肥处理,且番茄和辣椒产量分别提高了 9.0%和 6.9%.与常规施肥相比,优化施肥提高了土壤线虫数量和食细菌线虫的相对多度,但降低了食真菌线虫和植食性线虫的相对多度.两季蔬菜种植过程中,不同施肥处理土壤寄生线虫成熟指数、多样性指数和丰富度指数无显著差异.优化施肥土壤线虫通路比值(0.67~0.84)显著高于常规施肥(0.39~0.64),前者土壤食物网的分解途径以细菌为主,而后者则为真菌控制.综合土壤理化性质、线虫数量和群落及蔬菜产量指标,优化施肥措施能够在促进蔬菜生长的同时,显著改善土壤生态环境.

关键词 施肥; 设施蔬菜; 线虫; 群落组成

Effects of optimized fertilization on nematode community in greenhouse soils. ZHU Tong-bin[1,2], CHEN Xiao-yun[3], ZHANG Jin-bo[2], LIU Man-qiang[3], ZHOU Ke-xin[4], CAI Zu-cong[2*] ([1]*Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin* 541004, *China*; [2]*College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing* 210046, *China*; [3]*College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*; [4]*Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing* 210042, *China*).

Abstract: Excessive fertilization easily leads to the degradation of greenhouse vegetable fields, therefore rational fertilizations are important to maintain the production and sustainable development of vegetable. In this study, two fertilization treatments (optimized fertilization and conventional fertilization, noted as OF and CF, respectively) under continuous tomato-pepper cropping were arranged to investigate soil physicochemical properties, abundance and trophic groups of nematode and vegetable yield. The results showed that OF could maintain soil pH at the relatively higher level and increase the yield of tomato and pepper by 9.0% and 6.9% compared to CF treatment. In contrast to CF, OF increased nematode quantity and the relative abundance of bacterivores, but decreased the relative abundance of fungivores and plant-parasites, more obviously in the growth season of tomato. No obvious differences in plant parasite index, diversity, and richness were observed between CF and OF treatments across all sampling stages of tomato and pepper. Nematode channel ratio ranged from 0.39 to 0.64 in CF treatment, which was significantly lower than that in OF treatment (0.67-0.84), suggesting that the decomposition of food network was dominated by fungi in CF treatment but by bacteria in OF treatment. Based on soil physicochemical properties, nematode groups and vegetable yield, we concluded that optimized fertilization could not only increase vegetable growth but also improve soil ecological environment.

Key words: fertilization; greenhouse vegetable; nematode; community composition.

本文由国家自然科学基金项目(41301313)和中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2015004)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41301313) and the Research Fund of Chinese Academy of Geological Sciences (2015004).
2016-06-15 Received, 2016-12-09 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zccai@njnu.edu.cn

设施蔬菜因具有受季节影响小、复种指数和经济效益高等优点,其种植面积在我国迅速扩大,2014年已达到386万 hm^2,约占蔬菜总产值的50%[1].为了促进蔬菜生长,设施蔬菜种植中普遍存在化肥过量或不平衡施用等现象,导致土壤严重退化,表现为酸化、盐渍化、硝态氮和硫酸根大量累积、连作障碍和土传病害不断爆发等[2-5].因此,合理施肥(如有机、无机肥配施等)是维持设施蔬菜地生产力和可持续发展的重要措施[6-7].

设施栽培条件下,有机肥和有机、无机肥配施等对土壤理化性质及微生物群落和活性的影响已有大量研究[6-9],但对于土壤动物,尤其是土壤线虫群落的调查相对较少[10-11].作为土壤动物区系中数量和种类最为丰富的后生动物,线虫占据了土壤食物网内的不同营养级,对有机物分解、养分循环及土壤肥力的保持均具有重要作用[12-13].由于土壤线虫群落对外部自然环境变化,特别是人为管理措施的敏感响应,土壤线虫被广泛用来指示土壤生态系统结构和功能状况,特别是土壤的健康状况[14].迄今,有关各种农业措施如施肥、耕作、灌溉、种植制度等对土壤线虫群落的影响已有大量报道[12,15-17],但在蔬菜种植过程中,人们多关注植物病原线虫的变化[18],而对于整个线虫群落在设施蔬菜种植过程中的变化和指示意义关注较少.

安徽省和县因其优越的气候因素和地理位置,已成为长江中下游地区"最大的菜园子",且有"中国蔬菜之乡"称号.在该区域开展"强还原方法"改良退化设施蔬菜地过程中发现[3,5],当地设施蔬菜种植存在两种典型的施肥模式,其中一种属于偏重化肥的常规施肥模式.当地农户多按照此模式种植蔬菜,稻田改种蔬菜地后仅能维持3~5年,其后土壤质量严重退化,蔬菜产量和品质大幅度下降;与之形成对比的是,当地一农户能够长时间(15年以上)保持设施蔬菜地土壤处于很高的生产力水平.该农户根据蔬菜生长特性和土壤肥力状况采用了一套行之有效的施肥模式,注重多种有机肥、化肥和多功能肥等的综合施用,这里将其称之为"优化施肥"(表1).目前对两种施肥方式下土壤理化性质和微生物性质已做过调查[5,19],但缺乏土壤线虫变化的信息.基于线虫在养分循环和生态系统中的重要意义,本研究通过布置田间试验,调查当地两种典型施肥模式(常规施肥和优化施肥)下连续种植设施番茄和辣椒后土壤理化性质、线虫和蔬菜产量的变化,着重分析了土壤线虫群落组成和营养类群对施肥方式的响应,综合评估两种施肥方式对设施蔬菜地土壤质量状况的影响.

1 材料与方法

1.1 试验地点和试验处理

试验地点位于安徽省和县乌江镇驻马村(31°70′ N, 118°37′ E).该村80%的土地已种植蔬菜,主要包括番茄(*Lycopersicon esculintum*)、黄瓜(*Cucumis sativus*)、甜瓜(*Cucumis melo*)、辣椒(*Capsicum annuum*)和四季豆(*Phaseolus vulgaris*)等.

依据当地设施蔬菜种植的施肥习惯,布置优化施肥(optimized fertilization, OF)和常规施肥(conventional fertilization, CF)的田间试验.两种施肥模式下肥料类型、施肥时间和用量见表1.选取3个相邻的钢管塑料大棚(5.5 m×52 m),均由种植了30年以上的水稻田改种而来.每个大棚内分隔两个长度为32 m和16 m的小区,分别用于常规施肥处理和优化施肥处理.大棚头尾各空置1.5 m,两小区之间空置1 m,作为缓冲带.土壤类型为普通简育水耕人为土,土壤基础理化性质:pH 5.92,电导率(EC) 0.16 $mS \cdot cm^{-1}$,有机碳(TOC) 17.3 g $C \cdot kg^{-1}$,全氮(TN) 2.03 g $N \cdot kg^{-1}$,铵态氮(NH_4^+-N) 4.96 mg $N \cdot kg^{-1}$,硝态氮(NO_3^--N) 14.8 mg $N \cdot kg^{-1}$,硫酸根(SO_4^{2-}) 198 mg $\cdot kg^{-1}$.

2012年7月20日开始布置试验,连续种植4茬蔬菜,种植时间和施肥情况见表1.两种施肥处理下各小区的田间水分管理及病虫害防治一致.分别在第3茬番茄盛花期(2013年5月30日)和收获期(2013年7月6日)及第4茬辣椒盛花期(2013年9月30日)和收获期(2014年2月10日)采集土壤,分离并鉴定线虫,分别于当季蔬菜收获后采集土样,分析pH、EC、NH_4^+-N、NO_3^--N和SO_4^{2-}含量,同时测定番茄和辣椒产量.

1.2 测定项目和方法

1.2.1 土壤基本理化性质 每个小区采集0~20 cm土层的土壤样品,去除植物根系和石块后,装入自封袋,放置于4 ℃冰箱保存.土壤理化性质按照鲁如坤《土壤农业化学分析方法》[20]测定:土壤pH值(水土质量比2.5∶1)采用DMP-2 pH计测定,EC(水土质量比5∶1)采用电导率仪测定,有机碳和全氮采用元素分析仪测定,SO_4^{2-}含量(水土质量比5∶1)采用离子色谱测定,NH_4^+-N和NO_3^--N含量采用Skalar^{plus} San流动分析仪测定.有机肥全氮、全磷和全钾含量测定参照《国家有机肥料标准》(NY 525—2012)[21].

表 1　蔬菜种植制度和施肥情况

Table 1　The information of vegetable cultivation and fertilization

种植时间 Cultivated time	品种 Sample	处理 Treatment	施肥情况 Fertilization information
第 1 茬 First crop 2012-07-27—10-29	番茄 Tomato	CF	2012-07-27 基肥[复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=17∶17∶17)524 kg·hm^{-2},有机无机复混肥(N∶P_2O_5∶K_2O=10∶7∶13)612 kg·hm^{-2}];2012-08-18 追肥(多功能肥 21.0 kg·hm^{-2});2012-09-14 追肥[复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=13∶6∶21) 420 kg·hm^{-2}];2012-09-27 追肥[红钾王(N∶P_2O_5∶K_2O=16∶0∶20) 140 kg·hm^{-2}]
		OF	2012-07-27 基肥[谷糠灰(N∶P_2O_5∶K_2O=2.50∶0.45∶6.23)1600 kg·hm^{-2},菜籽饼(N∶P_2O_5∶K_2O=5.24∶1.73∶1.61)1560 kg·hm^{-2},红牛硫酸钾镁(K_2O∶MgO∶S=40∶5∶18)140 kg·hm^{-2},鸡粪(N∶P_2O_5∶K_2O=2.63∶2.34∶1.28)4330 kg·hm^{-2},过磷酸钙(P_2O_5=12%)700 kg· hm^{-2}];2012-08-18 追肥(诺普丰多功能肥 31.5 kg·hm^{-2});2012-09-14 追肥[鄂中复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=17∶17∶17)262 kg·hm^{-2}];2012-09-27 追肥[钾宝(N∶P_2O_5∶K_2O=12∶2∶44)105 kg·hm^{-2}]
第 2 茬 Second crop 2012-11-16—2013-03-20	莴苣 Lettuce	CF	2012-11-16 基肥[硫酸钾型复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=14∶16∶15)1312 kg·hm^{-2},尿素(N=46.3%)210 kg· hm^{-2}]
		OF	2012-11-16 基肥[硫酸钾型复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=14∶16∶15)840 kg·hm^{-2},菜籽饼(N∶P_2O_5∶K_2O=5.71∶1.87∶1.98)1415 kg·hm^{-2}]
第 3 茬 Third crop 2013-04-13—07-04	番茄 Tomato	CF	2013-04-13 基肥[硫酸钾型复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=16∶16∶16)1050 kg·hm^{-2},有机无机复混肥(N∶P_2O_5∶K_2O=10∶7∶13)1050 kg·hm^{-2}];2013-04-27 追肥(尿素(N=46.3%)59.5 kg·hm^{-2});2013-05-22 追肥[复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=21∶6∶13)262 kg·hm^{-2}];2013-06-02 追肥[复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=21∶6∶13)262 kg·hm^{-2});2013-06-14 追肥[红钾王复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=16∶0∶20)175 kg·hm^{-2}];2013-06-22 追肥[红钾王复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=16∶0∶20)139 kg·hm^{-2}]
		OF	2013-04-13 基肥[猪粪(N∶P_2O_5∶K_2O=1.5∶1.35∶0.87)2186 kg·hm^{-2},菜籽饼(N∶P_2O_5∶K_2O=6.43∶1.93∶1.83)1076 kg·hm^{-2},硫酸钾型复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=16∶16∶16)1050 kg ·hm^{-2},生物有机肥(N∶P_2O_5∶K_2O=1∶1.1∶1.2)1076 kg·hm^{-2},过磷酸钙(P_2O_5=12%)700 kg·hm^{-2},谷糠灰(N∶P_2O_5∶K_2O=2.44∶0.61∶6.11)1869 kg·hm^{-2}];2013-04-27 追肥[多功能肥 14.0 kg·hm^{-2},尿素(N=46.3%)45.5 kg· hm^{-2}];2013-05-22 追肥[复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=21∶6∶13)262 kg·hm^{-2}];2013-06-02 追肥[硝酸钾复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=13∶0∶46)105 kg·hm^{-2}];2013-06-14 追肥[硝酸钾复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=13∶0∶46) 87.5 kg·hm^{-2});2013-06-22 追肥(硝酸钾复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=13∶0∶46)87.5 kg·hm^{-2})
第 4 茬 Fourth crop 2013-08-06—2014-02-08	辣椒 Pepper	CF	2013-08-06 基肥[硫酸钾型复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=14∶16∶15)945 kg·hm^{-2}];2013-09-26 追肥[红钾王复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=16∶0∶20)175 kg·hm^{-2}];2013-10-10 追肥[红钾王复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=16∶0∶20)175 kg·hm^{-2}]
		OF	2013-08-06 基肥[硫酸钾型复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=14∶16∶15)525 kg·hm^{-2},鸡粪(N∶P_2O_5∶K_2O=3.5∶2.6∶1.41)2915 kg·hm^{-2}];2013-08-15 追肥[多功能肥 15.7 kg·hm^{-2}];2013-09-26 追肥[钾宝(N∶P_2O_5∶K_2O=12∶2∶44)105 kg·hm^{-2}];2013-10-10 追肥[钾宝(N∶P_2O_5∶K_2O=12∶2∶44)105 kg·hm^{-2}]

多功能肥 Multifunctional fertilizer (N 19%, P_2O_5 19%, K_2O 19%, 螯合态铁 EDTA-Fe 0.1%,螯合态锰 EDTA-Mn 0.1%,螯合态锌 EDTA-Zn 0.1%,螯合态铜 EDTA-Cu 0.1%,螯合态钼 EDTA-Mo 0.01%,螯合态硼 EDTA-B 0.1%). CF: 常规施肥 Conventional fertilization; OF: 优化施肥 Optimized fertilization.

1.2.2 土壤线虫鉴定和生态指数计算　称取相当于 100 g 干土的新鲜土样,采用浅盘法分离线虫,在解剖镜下计数线虫数量,并在光学显微镜下鉴定到属[15].土壤线虫的分类鉴定参照 Bongers 等[22]的分类图鉴进行.根据线虫的形态学特征,将其分为 4 个营养类群:食细菌线虫(bacterivores,BF)、食真菌线虫(fungivores,FF)、植食性线虫(plant-parasites,PP)和杂食/捕食性线虫(omnivores/predators,OM)[23].根据线虫食性和生活策略(r-对策和 k-对策)对线虫赋予其对应的 c-p 值,计算多种线虫生态指数[24-26].计算方法如下:

1)自由生活线虫成熟指数(maturity index,MI)和植食性线虫成熟指数(plant parasitic index,PPI)[24]可以用来评价人类干扰活动对土壤线虫群落的影响. $MI=\sum v(i)f(i)$ (仅包括自由生活线虫),$PPI=\sum v(i)f(i)$ (仅包括植物寄生线虫),其中:$v(i)$为赋予某一种类线虫的 c-p 值;$f(i)$是第 i 个属在线虫群落中所占的比例.

2) Shannon 多样性指数(Shannon diversity index,H)与Margalef丰富度指数(richness,SR)[26]相

表 2 不同品种蔬菜收获期的土壤理化性质

Table 2 Soil properties at different vegetable samples in harvest period

品种 Sample	处理 Treatment	pH	EC (mS · cm^{-1})	SO_4^{2-} (mg · kg^{-1})	NH_4^+-N (mg N · kg^{-1})	NO_3^--N (mg N · kg^{-1})
番茄	CF	4.76±0.14b	0.51±0.15a	576±168b	10.8±4.22a	150±47.3a
Tomato	OF	5.49±0.09a	0.69±0.08a	1410±682a	15.1±1.90a	202±15.3a
辣椒	CF	5.01±0.04b	0.32±0.02a	946±187b	12.1±2.20a	168±22.0b
Pepper	OF	5.66±0.18a	0.37±0.05a	2170±733a	8.80±0.95a	255±65.8a

同列不同字母表示同一采样期两种施肥处理间差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column indicated significant difference among different fertilization treatments at 0.05 level at the same sampling stage. 下同 The same below.

结合,研究土壤线虫群落的多样性.$H=-\sum P_i \ln P_i$, $SR=(S-1)/\ln N$.其中:P_i为第 i 个分类单元中个体占线虫总个体数量的比例;N 为土壤线虫群落中全部类群的总个体数;S 为所鉴定属的总数.

3)通道指数(nematode channel ratio, NCR)[13]用于评价土壤腐屑食物网有机质的分解途径[10].$NCR=BF/(BF+FF)$.式中:BF、FF 分别为食细菌线虫和食真菌线虫占线虫总数的相对多度.

1.3 数据处理

采用 SPSS 13.0 软件进行两因素方差分析,同时采用配对 t 检验比较同一采样期不同施肥处理土壤基本理化性质、线虫数量和蔬菜产量的差异($\alpha=0.05$).

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

与初始土壤相比,种植番茄和辣椒后土壤 pH 降低,而 EC 值、SO_4^{2-} 和 NO_3^--N 含量显著升高,NH_4^+-N 含量提高幅度不大(表 2).番茄和辣椒季 OF 处理土壤 pH、EC、SO_4^{2-} 和 NO_3^--N 含量均高于 CF 处理,NH_4^+-N 含量无显著差异.与番茄相比,辣椒收获后土壤 pH、SO_4^{2-} 和 NO_3^--N 含量均有一定程度升高,而 EC 值下降,两种施肥处理表现出相同趋势.相关分析表明,SO_4^{2-} 和 NO_3^--N 含量呈显著正相关($R^2=0.98$, $P<0.01$).

2.2 土壤线虫和各营养类群数量

施肥方式和采样时间及其两者交互作用均显著影响土壤线虫数量(表 3).从图 1 可以看出,在各采样时间,OF 处理土壤线虫数量显著高于 CF 处理,而种植番茄土壤线虫数量(OF 和 CF 分别为 4451~7182 和 659~662 ind · 100 g^{-1}干土)显著高于种植辣椒(OF 和 CF 分别为 754~877 和 174~319 ind · 100 g^{-1}干土).种植番茄时 OF 处理土壤食细菌线虫、食真菌线虫和植食性线虫数量均大于 CF 处理,捕杂食线虫数量很少;与番茄相比,种植辣椒时捕杂食线虫数量提高,但两种施肥处理无显著差异.方差分析表明,土壤食细菌线虫数量受施肥方式和采样时间及其两者交互作用的显著影响,食真菌线虫

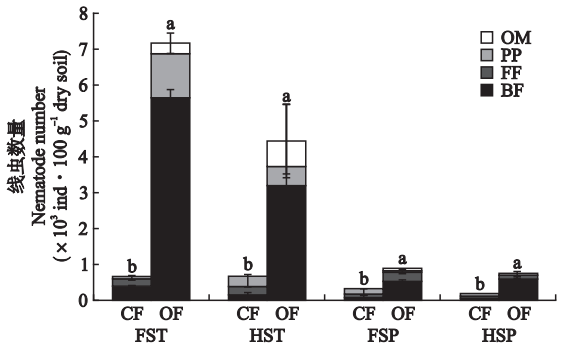


图 1 不同施肥处理的线虫数量

Fig.1 Nematode quantity in different fertilization treatments.

BF: 食细菌线虫 Bacterivores; FF: 食真菌线虫 Fungivores; PP: 植食性线虫 Plant-parasites; OM: 杂食/捕食性线虫 Omnivores / predators. CF: 常规施肥 Conventional fertilization; OF: 优化施肥 Optimized fertilization. FST: 番茄盛花期 Flowering stage of tomato; HST: 番茄收获期 Harvesting stage of tomato; FSP: 辣椒盛花期 Flowering stage of pepper; HSP: 辣椒收获期 Harvesting stage of pepper.下同 The same below. 不同字母表示同一采样时期不同施肥处理之间差异显著($P<0.05$) Different small letters meant significant difference between two fertilization treatments at the same sampling stage at 0.05 level.

表 3 施肥和采样期对土壤线虫数量和群落结构影响的方差分析结果

Table 3 Analysis of variance results of nematode quantity and community for fertilization and sampling stage

因子 Factor	施肥 Fertilization	采样时间 Stage	施肥×采样时间 Fertilization ×stage
自由度 df	1	3	3
线虫数量 Nematode quantity	***	*	**
食细菌线虫数量 BF quantity	***	*	***
食真菌线虫数量 FF quantity	***	ns	***
植物寄生线虫数量 PP quantity	ns	ns	ns
杂食/捕食性线虫 OM quantity	ns	ns	ns
自由生活线虫成熟指数 MI	***	***	ns
Shannon 指数 H	ns	***	ns
丰富度指数 SR	ns	***	ns
线虫通路比值 NCR	***	*	ns

BF: 食细菌线虫 Bacterivores; FF: 食真菌线虫 Fungivores; PP: 植食性线虫 Plant-parasites; OM: 杂食/捕食性线虫 Omnivores/predators. *$P<0.05$; **$P<0.01$; ***$P<0.001$; ns: $P>0.05$.

数量主要受施肥方式的显著影响，采样时间对其影响较小，而施肥方式和采样时间及其交互作用并没有显著影响植食性线虫和杂食/捕食性线虫数量（表 3）.

2.3　土壤线虫群落组成

从表 4 可以看出，两种施肥处理下番茄和辣椒两季蔬菜土壤总共鉴定出线虫 8～15 属.土壤线虫的优势属因施肥方式和采样时间而有较大差异.番茄生长季 OF 处理线虫优势属有：中杆属（15.1%）、原杆属（36.0%）、钩唇属（13.5%）和真滑刃属（13.7%），CF 处理为原杆属（22.6%）、头叶属（20.2%）和真滑刃属（18.2%）；番茄收获后 OF 处理线虫优势属变为原杆属（54.0%）、真滑刃属（11.0%）和根结属（16.5%），而 CF 处理变为头叶属（12.0%）、真滑刃属（14.9%）、丝尾垫刃属（12.5%）和根结属（43.0%）.辣椒生长季 OF 处理线虫优势属有：原杆属（15.5%）、真头叶属（23.7%）和真滑刃属（20.4%），CF 为拟丽突属（13.7%）、真滑刃属（14.6%）、丝尾垫刃属（11.1%）和根结属（31.0%）；辣椒收获期 OF 处理线虫优势属为中杆属（10.4%）和原杆属（54.6%），CF 为真滑刃属（15.2%）、拟丽突属（16.3%）和原杆属（33.0%）.番茄收获后种植辣椒，土壤线虫中的头叶属相对多度明显降低，而拟丽突属、孔咽属和真矛线属相对多度升高；与 CF 相比，OF 处理土壤线虫中的中杆属和原杆属相对多度提高，而头叶属、丝尾垫刃属和根结属相对多度降低，后者主要出现在番茄收获期和辣椒生长期.

比较线虫各营养类群比例可以发现（表 4），4 次采样时期 OF 处理土壤食细菌线虫比例达到 60.7%～78.7%，远高于同期的 CF 处理（23.0%～59.7%）.土壤食真菌线虫比例呈现相反趋势，OF 处理（12.0%～30.7%）低于 CF 处理（34.0%～51.8%）.番茄收获期两种施肥处理土壤植食线虫比例显著提高，以 CF 处理最大（43.0%），且远高于 OF 处理（16.5%），番茄生长期和辣椒收获期两种施肥处理无显著差异.与番茄（0%～1.4%）相比，种植辣椒后土壤捕杂食线虫比例显著提高，在 2.0%～7.7%.

2.4　土壤线虫生态指数

在整个采样期，两种施肥处理土壤植食性线虫全部为根结属，故 4 次采样期 CF 和 OF 处理 PPI 值均为 3（表 5）.4 次采样期 OF 处理土壤线虫成熟指数 MI 均显著低于 CF 处理，而 PPI/MI 值呈现出相反趋势，且在番茄和辣椒收获期达到显著性差异.两种施肥处理多样性指数（H）和丰富度指数（SR）在 4 次采样期均无显著差异.OF处理土壤线虫通路比值

表 4　不同采样期土壤线虫属及其相对多度

Table 4　Relative abundance and genus of nematodes in vegetable soils at different sampling stages

营养类群 Trophic group	属 Genus	*cp* 值 *cp* value	相对多度 Relative abundance（%）							
			FST		HST		FSP		HSP	
			CF	OF	CF	OF	CF	OF	CF	OF
食细菌线虫			59.7	78.7	23.0	71.6	27.8	60.7	38.2	75.8
Bacterivores	小杆属 *Rhabditis*	1	0	0.6	0	1.0	0	0.5	0	0
	中杆属 *Mesorhabditis*	1	7.5*	15.1**	0.6	1.8	7.0*	9.4*	2.0	10.4**
	原杆属 *Protorhaditis*	1	22.6**	36.0**	6.9*	54.0**	0.7	15.5**	15.2**	54.6**
	板唇属 *Cervidellus*	2	0.6	0	0	0	0	0	0	0
	头叶属 *Cephalobus*	2	20.2**	8.7*	12.0**	7.2*	0	2.3	0	0
	真头叶属 *Eucephalobus*	2	4.5	4.8	1.3	7.2*	6.4*	23.7**	4.8	8.8*
	钩唇属 *Diploscapter*	1	3.6	13.5**	0	0	0	1.3	0	0
	拟丽突属 *Acrobeloides*	2	0.8	0	2.3	0.4	13.7**	8.1*	16.3**	2.0
食真菌线虫			34.0	16.9	34.0	12.0	33.6	30.7	51.8	13.8
Fungivores	茎属 *Ditylenchus*	2	5.8*	0	3.4	0	5.1*	1.0	0	0
	滑刃属 *Aphelenchoides*	2	0.6	2.9	3.2	0.6	2.8	1.0	9.8*	0
	真滑刃属 *Aphelenchus*	2	18.2**	13.7**	14.9**	11.0**	14.6**	20.4**	33.0**	9.9*
	丝尾垫刃属 *Filenchus*	2	9.4*	0.3	12.5**	0.3	11.1**	8.4*	8.9*	4.0
植食性线虫			4.9	4.4	43.0	16.5	31.0	2.9	8.1	8.0
Plant-parasites	根结属 *Meloidogyne*	3	4.9	4.4	43.0**	16.5**	31.0**	2.9	8.1*	8.0*
捕食/杂食线虫			1.4	0	0	0	7.7	5.7	2.0	2.4
Predators /	中矛线属 *Mesodorylaimus*	4	0.8	0	0	0	0	1.6	0	0
Omnivores	孔咽属 *Aporcelaimus*	5	0	0	0	0	2.9	1.3	0.9	2.4
	真矛线属 *Eudorylaimus*	4	0.6	0	0	0	4.8	2.8	1.1	0

** 优势属 Dominant genera（>10%）；* 常见属 Common genera（>5%）. FST：番茄盛花期 Flowering stage of tomato；HST：番茄收获期 Harvesting stage of tomato；FSP：辣椒盛花期 Flowering stage of pepper；HSP：辣椒收获期 Harvesting stage of pepper. 下同 The same below.

表 5 不同采样期土壤线虫生态指数

Table 5 Ecological indices of soil nematodes community at different sampling stages

线虫生态指数 Nematodes ecological index	处理 Treatment	采样期 Sampling stage			
		FST	HST	FSP	HSP
植物寄生线虫成熟指数	CF	3±0a	3±0a	3±0a	3±0a
PPI	OF	3±0a	3±0a	3±0a	3±0a
自由生活线虫成熟指数	CF	1.66±0.24a	1.88±0.13a	2.20±0.16a	1.86±0.14a
MI	OF	1.32±0.01b	1.30±0.13b	1.86±0.07b	1.37±0.01b
PPI/MI	CF	0.64±0.03a	0.61±0.02b	0.58±0.02a	0.62±0.02b
	OF	0.69±0.01a	0.70±0.02a	0.62±0.02a	0.69±0.01a
多样性指数	CF	1.98±0.14a	1.65±0.19a	1.55±0.35a	1.76±0.09a
H	OF	1.79±0.05a	1.26±0.08a	1.98±0.14a	1.33±0.43a
Margalef 丰富度指数	CF	1.80±0.08a	1.71±0.11a	1.71±0.12a	1.91±0.14a
SR	OF	1.62±0.20a	1.31±0.38a	2.08±0.42a	1.65±0.18a
线虫通路比值	CF	0.64±0.06b	0.39±0.09b	0.48±0.09b	0.43±0.02b
NCR	OF	0.82±0.00a	0.86±0.02a	0.67±0.07a	0.84±0.11a

对于同一线虫群落指数,同列不同字母表示同一采样期不同施肥处理之间差异显著($P<0.05$) Different small letters in same column mean significant difference of soil nematodes community between two fertilization treatments at the same sampling stage at 0.05 level.

NCR(0.67~0.84)显著高于同一采样期的 CF 处理(0.39~0.64).方差分析表明,MI 和 NCR 受施肥处理和采样时间的显著影响,但不受两种交互作用影响,(*H*)和(SR)仅受采样时间的显著影响(表 3).

2.5 番茄和辣椒产量

从图 2 可以看出,与 CF 处理(75.4 和 94.1 $t \cdot hm^{-2}$)相比,OF 处理显著提高了番茄(82.1 $t \cdot hm^{-2}$)和辣椒产量(101 $t \cdot hm^{-2}$),分别提高了 9.0%和 6.9%.

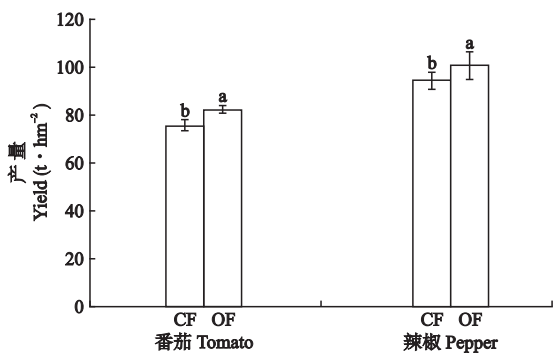


图 2 不同施肥处理的番茄和辣椒产量

Fig. 2 Yields of tomato and pepper in different fertilization treatments.

不同字母表示不同施肥处理间差异显著($P<0.05$) Different lower case letters mean significant difference in different fertilization treatments at 0.05 level.

3 讨 论

土壤线虫数量受施肥方式和蔬菜类型的显著影响(表 3),无论种植番茄还是辣椒,优化施肥处理的线虫数量显著高于常规施肥(图 1),但增加机制番茄和辣椒而有较大差异:种植番茄时主要归于食细菌线虫、食真菌线虫和植物寄生线虫数量同时提高;种植辣椒时主要在于土壤食细菌线虫和食真菌线虫数量的提高.先前研究发现,施用有机肥能够刺激土壤细菌和真菌生长[27],有利于其取食者食微线虫(食细菌线虫和食真菌线虫)数量的提高[10,15].番茄种植过程中,优化施肥能够全面提供养分,促进番茄根系生长,但根系寄生线虫的取食几率也增大,其数量也会显著提高.辣椒为浅根蔬菜,根系不发达,植物寄生线虫的取食点相对较少,两种施肥处理下植物寄生线虫的数量相对较低而且无显著差异.

除线虫数量外,线虫的各营养类群相对多度也发生显著变化.本研究不同处理中发现 8~15 属线虫,这一数值范围远低于其他农业生态系统(如小麦、玉米和水稻等)[12,15-17].其原因可能在于温室蔬菜高强度种植和频繁施用农药抑制了土壤线虫类群的发展[28-29].与优化施肥相比,常规施肥减少了土壤食细菌线虫相对多度(主要是原杆属),而食真菌线虫相对多度(主要是茎属和丝尾垫刃属)显著提高.两种施肥处理下食细菌线虫和食真菌线虫多度的差异主要反映了土壤微生物群落结构的变化[30].虽然笔者没有直接测定土壤微生物群落结构,但常规施肥的土壤低 pH(表 2)环境可能利于某些真菌的增多(如病原真菌)而减少细菌数量[31],进而改变土壤食真菌线虫与食细菌线虫的比例.番茄收获期和辣椒生长期常规施肥处理的土壤植食性线虫相对多度显著高于优化施肥处理,并且植食性线虫全为根结属,表明蔬菜根系受到根结线虫侵染几率、生长受阻和产量降低风险增大.番茄和辣椒的产量低于优化施肥处理(图 2)也证实了这一点.

线虫生态指数可以反映不同管理措施条件下土壤线虫多样性和群落结构的差异[24-26,32].两种施肥处理土壤线虫的 H 和 SR 并没有显著差异(表 3 和表 4),表明线虫群落多样性对施肥方式响应不显著,可能与试验处理时间较短有关.随试验时间的推移,这些指标可能会发生明显变化[33].江春等[16]调查种植 8 年玉米的红壤发现,长期施用有机肥会增加土壤线虫的群落多样性.线虫通道指数(NCR)的结果(表 5)表明,优化施肥处理土壤食物网以细菌主导的分解途径为主,随蔬菜种植持续进行,常规施肥处理 NCR 降至 0.5 以下,表明土壤食物网降解途径转为真菌主导.这一结果与娄翼来等[11]在设施蔬菜上的研究结果一致.传统观念认为,有机肥能够提高线虫群落的成熟度,降低土壤环境受干扰程度[10,15-16].但在本研究中,优化施肥处理土壤 MI 反而低于常规施肥(表 5),短时间内单用 MI 并不能有效表征生态系统的稳定性及受干扰程度[34].由于本研究检测的土壤植食性线虫全部为根结属,两个施肥处理 4 个采样期的 PPI 指数均为 3,表明采用 PPI 指数难以反映土壤健康对施肥模式的响应情况.但就两季蔬菜不同生长季和线虫群落组成来看,番茄收获后两种施肥措施下土壤植食性线虫根结属比例达到最大,辣椒种植后其值降低(表 4),表明蔬菜轮作有利于降低根结线虫的发生.

值得注意的是,两季蔬菜作物种植过程中优化施肥处理土壤 SO_4^{2-} 和 NO_3^--N 含量显著高于常规施肥处理(表 2),可能在于优化施肥模式投入的氮肥及外带硫酸根已超过蔬菜吸收量.土壤 SO_4^{2-} 和 NO_3^--N 是土壤盐渍化发生的重要因素[2,5],其含量累积会消极影响土壤线虫数量和群落多样性.由此可见,按照当地农户多年种植经验形成的“优化施肥模式”亦超过蔬菜生长需求,在此基础上也需降低肥料投入量.

4　结　　论

土壤线虫数量和群落结构受施肥和蔬菜类型的显著影响.与常规施肥相比,优化施肥能够提高土壤线虫数量,两季蔬菜均表现相同趋势,以番茄生长季最明显,且对食细菌线虫促进尤为明显,而对食真菌和植物植食性线虫起到一定抑制作用.结合土壤理化性质、线虫群落分析及蔬菜产量,设施蔬菜种植过程中合理施肥和蔬菜轮作对于缓解土壤退化具有重要作用.

参考文献

[1] National Bureau of Statistics of China (国家统计局). China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistic Press, 2014 (in Chinese)

[2] Shi WM, Yao J, Yan F. Vegetable plantation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, **83**: 73-84

[3] Zhu T-B (朱同彬), Sun P-P (孙盼盼), Dang Q (党琦), *et al*. Improvement of degraded greenhouse vegetable soil by flooding and/or amending organic materials. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2014, **51**(2): 335-341 (in Chinese)

[4] Zhu TB, Zhang JB, Cai ZC. Effects of organic material amendment and soil water content on NO, N_2O and N_2 emissions in a nitrate accumulated vegetable soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, **49**: 153-163

[5] Zhu TB, Dang Q, Zhang JB, *et al*. Reductive soil disinfestation (RSD) alters gross N transformation rates and reduces NO and N_2O emissions in degraded vegetable soils. *Plant and Soil*, 2014, **382**: 269-280

[6] Xie K-Z (解开治), Xu P-Z (徐培智), Li K-H (李康活), *et al*. Effects of three different cropping system on diversity of soil bacterial community. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(5): 1107-1113 (in Chinese)

[7] Li S-Y (李淑仪), Deng X-W (邓许文), Chen F (陈发), *et al*. Effects of the quantity and proportion of organic and mineral fertilizers on vegetable yield and quality and soil heavy metal contents. *Ecology and Environment* (生态环境), 2007, **16**(4): 1125-1134 (in Chinese)

[8] Evanylo G, Sherony C, Spargo J, *et al*. Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, **127**: 50-58

[9] Mäder P, Fließbach A, Dubois D, *et al*. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 2002, **296**: 1694-1697

[10] Li Q, Jiang Y, Liang WJ, *et al*. Long-term effect of fertility management on the soil nematode community in vegetable production under greenhouse conditions. *Applied Soil Ecology*, 2010, **46**: 111-118

[11] Lou Y-L (娄翼来), Li H (李　慧), Jiang Y (姜勇), *et al*. Impacts of long-term fertilizer application on soil nematode diversity in a greenhouse vegetable system. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2013, **44**(1): 106-109 (in Chinese)

[12] Freckman DW, Ettema CH. Assessing nematode communities in agroecosystems of varying human intervention. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1993, **45**: 239-261

[13] Yeates GW, Newton PCD, Ross DJ. Significant changes in soil microfauna in grazed pasture under elevated carbon dioxide. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, **38**: 319-326

[14] Ritz K, Trudgill DL. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of functional state of soils: Perspectives and challenges. *Plant and Soil*,

1999, **212**: 1-11
[15] Liang WJ, Lou YL, Li Q, *et al*. Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic manure in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 883-890
[16] Jiang C (江 春), Huang Q-H (黄菁华), Li X-Q (李修强), *et al*. Responses of soil nematode community to long-term application of organic manure in upland red soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2011, **48** (6): 1235-1241 (in Chinese)
[17] Liu MQ, Chen XY, Qin JT, *et al*. A sequential extraction procedure reveals that water management affects soil nematode communities in paddy fields. *Applied Soil Ecology*, 2008, **40**: 250-259
[18] Abawi GS, Widmer TL. Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. *Applied Soil Ecology*, 2000, **15**: 37-47
[19] Zhu T-B (朱同彬), Zhang J-B (张金波), Cai Z-C (蔡祖聪). Effects of organic material amendment on vegetable soil nitrate content and nitrogenous gases emission under flooding condition. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(1): 109-114 (in Chinese)
[20] Lu R-K (鲁如坤). Soil and Agrochemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
[21] Ministry of Agriculture of China (国家农业部). Agricultural Standard of the People's Republic of China: Organic fertilizer (NY 525-2012). Beijing: China Standards Press, 2012 (in Chinese)
[22] Bongers T, De Nematoden, van Nederland. Pirola. Schoorl, the Netherlands: KNNV Bibliotheekuitgave, 1988: 23-331
[23] Yeates GW, Bongers T, de Goede RGM, *et al*. Feeding habits in soil nematode families and genera: An outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 1993, **25**: 315-331
[24] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, **83**: 14-19
[25] Ferris H, Bongers T, de Goede RGM. A framework for soil food web diagnostics: Extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology*, 2001, **18**: 13-29
[26] Yeates GW. Nematodes as soil indicators: Functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, **37**: 199-210
[27] Miransari M. Soil microbes and plant fertilization. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **92**: 875-885
[28] Zhou J-H (周际海), Tao J (陶 军), Chen X-Y (陈小云), *et al*. Soil nematode density inside and outside a pesticide factory in Anhui. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2008, **16**(6): 613-617 (in Chinese)
[29] Griffiths BS, Daniell TJ, Donn S, *et al*. Bioindication potential of using molecular characterization of the nematode community: Response to soil tillage. *European Journal of Soil Biology*, 2012, **49**: 92-97
[30] Christensen S, Dam M, Vestergard M, *et al*. Specific antibiotics and nematode trophic groups agree in assessing fungal: Bacterial activity in agricultural soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, **55**: 17-19
[31] Yin R (尹 睿), Zhang H-Y (张华勇), Huang J-F (黄锦法), *et al*. Comparison of microbiological properties between soils of rice-wheat rotation and vegetable cultivation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2004, **10**(1): 57-62 (in Chinese)
[32] Xue H-Y (薛会英), Luo D-Q (罗大庆), Yu B-Z (于宝政). Community characteristics of soil nematode in *Abies georgei* var. *smithii* forest in Sejila Mountain of Tibet, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(12): 3402-3408 (in Chinese)
[33] Bazot S, Mikola J, Nguyen C. Defoliation-induced changes in carbon allocation and root soluble carbon concentration in field-grown *Lolium perenne* plants: Do they affect carbon availability, microbes and animal trophic groups in soil? *Functional Ecology*, 2005, **19**: 886-896
[34] Liu Y-D (刘雨迪), Chen X-Y (陈小云), Liu M-Q (刘满强), *et al*. Changes in soil microbial properties and nematode assemblage over time during rice cultivation. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2013, **21** (3): 334-342 (in Chinese)

作者简介 朱同彬,男,1983 年生,副研究员.主要从事退化土壤改良研究. E-mail: zhutongbin@gmail.com

责任编辑 肖 红

朱同彬, 陈小云, 张金波, 等. 优化施肥对设施蔬菜地土壤线虫群落的影响.应用生态学报, 2017, **28**(3): 927-934
Zhu T-B, Chen X-Y, Zhang J-B, *et al*. Effects of optimized fertilization on nematode community in greenhouse soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(3): 927-934 (in Chinese)