金梁,魏丹,王文,等.有机肥配施化肥对设施土壤-作物系统内稳性特征的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(5):48-59.
Jin L, Wei D, Wang W, et al.Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on homeostatic characteristics in greenhouse soil-crop systems[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(5):48-59.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202408049

有机肥配施化肥对设施土壤-作物系统内稳性特征的影响

金梁[1],魏丹[1*],王文[1],王磊[1],殷大伟[2],申惠波[3],王宇先[3],李艳[4],王伟[4],梁丽娜[1],徐森[1],左强[1],徐魁峰[5],李大皓[6]

(1.北京市农林科学院 植物营养与资源环境研究所,北京 100097;2.黑龙江省农业科学院 齐齐哈尔分院,黑龙江 齐齐哈尔 161006;3.黑龙江八一农垦大学 农学院,黑龙江 大庆 163000;4.黑龙江黑土保护利用研究院,黑龙江,哈尔滨 102200;5.东北农业大学 资源环境学院,黑龙江 哈尔滨 1500306;6.齐齐哈尔市农业技术推广中心,黑龙江 齐齐哈尔 161000)

摘　要:[目的]有机无机配施比单施化肥更能改善作物生长环境。研究不同施肥策略对设施土壤—作物系统的化学计量比及稳定性指数的影响,对于可持续农业生产管理具有重要意义。[方法]2022—2023年在北京市房山区温室大棚进行番茄—黄瓜试验,设置5种施肥处理:T0(不施肥)、T1(单施化肥)、T2(有机肥)、T3(50%化肥+50%有机肥)和T4(50%化肥+50%有机肥+改良剂)。以设施蔬菜系统为研究对象,通过测定土壤物理性质及根际微生物群落结构等27个指标,基于化学计量学方法分析土壤—作物系统的内稳性特征。采用2种三角形模型(TR1和TR2)计算系统的可持续性指数,探究不同施肥模式对系统内稳性的影响。[结果]黄瓜植株内稳性受施肥影响较小,呈绝对稳态;土壤微生物量碳氮磷对施肥响应敏感,均为敏感态,即内稳态指数(H)<1.3。T3和T4处理使系统达到可持续生产水平(H≥1.3),T0和T1处理导致系统不可持续(H<1.3)。2种模型分析结果表明,有机无机配施显著提高系统可持续性,改良剂通过调控碳、氮、磷循环进一步增强稳定性。可持续性指数与有机碳、全氮及微生物指数呈极显著正相关(P<0.01)。[结论]微生物指数在TR2模型中解释度更高,能更精准地反映土壤生态系统功能的变化。本研究对设施农业可持续发展具有重要指导意义。

关键词:设施土壤; 轮作; 内稳性特征; 化学计量比; 可持续性指数
中图分类号:S345; S625　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)05-0048-12

Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on homeostatic characteristics in greenhouse soil-crop systems

Jin Liang[1], Wei Dan[1*], Wang Wen[1], Wang Lei[1], Yin Dawei[2], Shen Huibo[3], Wang Yuxian[3], Li Yan[4], Wang Wei[4], Liang Lina[1], Xu Sen[1], Zuo Qiang[1], Xu Kuifeng[5], Li Dahao[6]

(*1.Institute of Plant Nutrition and Resources Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2.Qiqihar Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar 161006, China; 3.College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163000, China; 4.Heilongjiang Institute of Black Soil Conservation and Utilization, Harbin 102200, China; 5.College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 1500306, China; 6.Changchun Management Station, Fourth Reserve Asset Management Bureau, Changchun 130021, China*)

Abstract:[Objective]Integrated organic-inorganic fertilization proves more effective than chemical fertilizer alone improving the crop growth environment. This study investigated the impact of different fertilization regimes on ecological stoichiometry and

收稿日期:2024-08-30　　**修回日期**:2025-05-07
基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1500200);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20240506,KJCX20230407)
作者简介:金梁(ORCID:0000-0002-4544-7645),研究员,博士,研究方向:土壤改良和水氮定量化,E-mail:jinliang19762003@aliyun.com
*通信作者:魏丹,研究员,博士,E-mail:wd2087@163.com

system stability in greenhouse soil-crop systems, which was crucial for guiding sustainable agricultural management. [Methods] A greenhouse experiment with tomato-cucumber rotation was conducted from 2022 to 2023 in Fangshan District, Beijing. Five fertilization treatments were established: T0 (no fertilizer), T1 (chemical fertilizer), T2 (organic fertilizer), T3 (50% chemical fertilizer+50% organic fertilizer), and T4 (50% chemical fertilizer+50% organic fertilizer+amendments). We analyzed 27 parameters, including soil physical properties and rhizosphere microbial community structure, to assess the homeostatic characteristics of the soil-crop system based on ecological stoichiometry. Two triangle models (TR1 and TR2) were employed to calculate system sustainability indices and evaluate the impacts of different fertilization practices on system homeostasis. [Results] Cucumber plants exhibited strong homeostasis with minimal influence from fertilization treatments. In contrast, soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus were sensitive to fertilization, showing a non-homeostatic state with H (Homeostasis Index)<1.3. System under T3 and T4 treatments achieved a sustainable production level ($H\geqslant1.3$), whereas T0 and T1 resulted in an unsustainable state ($H<1.3$). Model analysis confirmed that organic-inorganic fertilization significantly enhanced system sustainability. The amendment in T4 further improved stability by regulating carbon-nitrogen-phosphorus (C-N-P) cycling. The sustainability indices exhibited a significant positive correlations($P<0.01$)with soil organic carbon, total nitrogen, and microbial indices. [Conclusion] The microbial indices exhibited higher explanatory power in the TR2 model, proving to be a more precise indicator of soil ecosystem functional changes. Our findings provided important insights for advancing sustainability in facility agriculture.

Keywords: Facility soil, Rotation, Home characteristics, Stoichiometry, Sustainability index

长期的研究表明,合理的施肥方式不仅能够改善土壤物理、化学性质,还能促进微生物多样性的提升,从而实现农业生产的可持续发展[1]。新兴的可持续农业,旨在建立高效的土壤资源高效利用和可持续管理的现代农业体系,尤其是有机肥与无机肥复合使用的策略,受到了极大的关注和广泛的研究[2-3]。但在土壤—作物系统可持续性方面,设施土壤一直缺乏用于判断和评价施肥策略下系统可持续生产的指标。

近年来,众多研究者从不同角度和尺度对土壤-作物系统的可持续性进行了深入研究,重点关注产量可持续性指数、肥力可持续性、可持续性评判指标以及生态化学计量指标等领域。自20世纪90年代起,沈宏等[4]基于长期定位试验,从土壤微生物量、土壤酶和土壤养分3个方面构建了计算指标体系。其研究结果表明,有机肥能够显著提升土壤碳、氮含量及生物管理指数,且不同施肥方式对土壤肥力可持续性指数的影响顺序为:有机肥、有机肥配施化肥>化肥>参比土壤>对照。在此排序基础上,吴科生等[5]以甘肃河西绿洲灌区的灌漠土为研究对象,发现长期有机无机配施措施可显著增加灌漠土中土壤有机质、全氮、全磷含量等指标,显著提高小麦/玉米间作体系的产量稳定性和可持续性,产量分别增加149%和139%,可持续性指数(SYI)达到0.61。然而单一的指数说服力略显单薄,如选用三角形指标法进行评估,则能通过三维指标体系直观反映系统各要素间的协同关系,可用于揭示土壤-作物-微生物多指标耦合作用对可持续性的影响。Kang等[6]在印度西北部旁遮普邦(热带草原气候区)的试验田中,针对水稻/玉米-小麦种植体系,采用三角形面积法(以土壤养分指数、微生物指数和作物指数为3个顶点),评估了不同肥料管理措施对土壤质量的影响。孙本华等[7]基于陕西杨凌长期肥料定位试验,通过计算土壤养分指数、微生物指数、作物指数及可持续性指数(三角形法),综合评价了不同施肥处理对农田土壤可持续性的影响。黄学芳等[8]在黄土丘陵区栗褐土农田开展了26年的长期肥料定位试验,测定了19项指标,依次获取作物指数、微生物指数、土壤养分指数,并利用三角形面积法推导出可持续性指数,研究揭示,在栗褐土区土壤-作物系统中,适量有机肥与无机氮配施是实现可持续生产的较佳施肥模式。另有研究以陕西安塞纸坊沟流域的坡耕地为研究对象,进行34年长期定位施肥试验,借助三角形面积法(基于土壤养分属性、生物属性和作物属性)评价不同施肥处理下系统的可持续性[9]。结果表明,有机肥与氮磷肥配施的可持续性指数较对照提高了352%,而长期施用化肥的农田系统则表现出不可持续性。此外,部分学者从有机碳库和养分稳定性角度开展了相关研究[10-12],也验证了有机配施无机更具有可持续性。综上所述,国内外学者在可持续性研究中最具代

表性的是2类应用三角形面积法(由3类不同指数构成的顶点)计算可持续性指数并推荐优化农田管理措施的研究:一类是基于养分指数、微生物指数和作物指数;另一类是基于物理指数、养分指数和作物指数。此外,还有学者应用产量可持续性指数来评价农业系统的可持续性,发现该指数与系统的可持续性呈显著正相关关系[10]。然而,该评价方法未涉及土壤属性指标,且单一指标难以全面评价施肥策略的合理性和科学性。目前,大多数研究聚焦于旱地农田生态系统,而在设施土壤—作物系统内的可持续性指标研究相对匮乏,尤其是针对北方温室大棚蔬菜种植体系下施肥策略的可持续性评估案例更是少见。

鉴于此,本研究以北京市房山区设施大棚的番茄-黄瓜轮作体系为研究对象,引入不同施肥策略(包括不施肥、单施化肥、单施有机肥、有机无机肥配施以及配施加改良剂)的实际案例,分析其对设施作物生长、土壤质量及微生物多样性的影响,并采用2种三角形指标法进行比较,结合生态化学计量学方法,对设施土壤-作物系统的可持续性进行综合评估。研究成果旨在为预测土壤承载能力、完善耕地质量指标体系以及为区域农业可持续发展提供科学决策依据,促进农业土壤质量评估技术体系形成。

1 材料和方法

1.1 试验区

试验区位于北京市房山区石楼镇襄驸马庄弘科农场B2温室大棚,北纬39°30′,东经115°25′,温带性季风气候,年均气温11.9 ℃,历史最高温43.5 ℃,最低温-26 ℃,年均降水量582.8 mm,历史最大降水量1322 mm,最小降水量277 mm,土壤类型为褐土,种植制度采取黄瓜—番茄轮作制度,秋冬茬为番茄,冬春茬为黄瓜。每小区长6 m、宽2.4 m,均分2垄定植,每垄种植番茄或黄瓜2行,每行16株,行距0.6 m,株距0.3 m。

1.2 试验设计

共设5个处理:T0:不施肥,T1:化肥,T2:商品有机肥,T3:化肥(50%N)+有机肥(50%N),T4:化肥(50%N)+有机肥(50%N)+改良剂(微生物菌肥:枯草芽孢杆菌)。每处理设3个重复,5个处理共15个小区,采用随机区组排列。秋冬茬番茄施用N 37 g/m^2、P_2O_5 15 g/m^{2}和K_2O 52 g/m^2;冬春茬黄瓜施用N 45 g/m^2、P_2O_5 22 g/m^{2}和K_2O 45 g/m^2。番茄或黄瓜定植前,将总氮(N)磷(P_2O_5)钾(K_2O)肥均按照20%、60%、40%比例基施,有机肥和改良剂全部基施,剩余化肥作追肥施用,其中,番茄分别在1穗果期、2穗果期、3穗果期追肥,共3次;黄瓜在开花至结果期追肥,共8次。

1.3 采样方法

秋冬茬番茄于2022年9月2日定植,于2023年2月24日收获。冬春茬黄瓜于2023年3月9日定植,于2023年7月10日收获。黄瓜收获后采集土壤,每个处理3次重复。收集土壤样品时采用四分法,将各小区0~20 cm土层所取土壤混合均匀后作为1个样品。分别使用环刀(用于测定土壤容重、含水量及总孔隙度)和铝制饭盒(用于测定团聚体组成及含量)采集样品。样品采集后立即送至实验室,去除根系、茎叶及砾石等杂质。另采集根际土壤样品,保存于-80 ℃超低温冰箱备用。分别采集黄瓜植株地上部的上、中、下3个部位,置于冰盒中迅速带回实验室进行处理。

1.4 土壤理化及生物学指标测定方法

土壤理化性质测定参考鲁如坤[13]的方法,采集新鲜样品后,铵态氮(NH_4^+-N)含量和硝态氮(NO_3^--N)含量采用流动分析仪测定(鲜样4 ℃保存,24 h内完成);风干样品(≤35 ℃,避光保存)经研磨过筛(全量分析100目,速效分析20目)后,全氮含量采用半微量凯氏定氮法(H_2SO_4-H_2O_2消解,Se-$CuSO_4$催化)测定,全磷含量和全钾含量分别通过H_2SO_4-$HClO_4$消煮-钼锑抗比色法、HF-$HClO_4$消煮-火焰光度法测定;速效钾含量采用中性乙酸铵提取-火焰光度法测定,有机碳含量采用重铬酸钾氧化-容量法测定。水稳性团聚体通过湿筛法(30次/min,振幅4 cm)表征,容重和总孔隙度采用环刀法测定,pH值(土水比1:2.5)与电导率(土水比1:5)分别以电位计法和电导仪法测定。生物学指标测定参考鲍士旦[14]的方法,土壤微生物量碳、氮含量通过氯仿熏蒸-K_2SO_4浸提-TOC分析仪(转换系数按生态系统类型选用0.45或0.38)测定,土壤微生物量磷含量采用氯仿熏蒸-$NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定。

1.5 植物指标测定方法

株高与茎粗分别采用米尺(精度1 mm)和数

显游标卡尺(精度0.01 mm)于植株生长盛期测定;叶片叶绿素相对含量(SPAD值)使用SPAD-502叶绿素仪在晴朗日上午9:00-11:00测定同一叶位功能叶。植物样品经105 ℃杀青30 min终止酶活后,65 ℃烘干至恒重(±0.1 g连续2次称量差异<1%),粉碎过100目筛(粒径≤0.15 mm)用于测定植物养分。有机碳含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法(180 ℃油浴消解5 min)测定,全氮含量通过H_2O_2辅助凯氏定氮法(H_2SO_4消解-全自动定氮仪蒸馏滴定)测定,全磷含量经钼锑抗比色法(722型分光光度计700 nm波长)测定。黄瓜品质指标中,可溶性糖含量用H_2SO_4-蒽酮比色法(沸水浴显色10 min)测定,可滴定酸含量用0.1 mol/L NaOH滴定法(以柠檬酸当量计)测定。产量统计以黄瓜成熟期单株果实为对象,按小区实收计产(剔除病虫害及机械损伤果)[15]。

1.6　数据处理

土壤、植物和土壤微生物生物量的碳氮磷的化学计量比均采用元素计量比进行计算[16],内稳态指数计算公式如下:

$$y=cx^{1/H} \tag{1}$$

式中,H代表内稳态指数,因变量y为叶片或微生物碳、氮、磷含量或计量比,自变量x为对应的土壤碳、氮、磷含量或计量比,c为常数。按照Persson等[17]的分类,当方程拟合显著时,将$H>4$、$2<H<4$、$1.3<H<2$、$H<1.3$分别划为稳态、弱稳态、弱敏感态和敏感态,但当方程拟合不显著时认为是绝对稳态。

参照李强等[18]和孙本华等[7]的方法(以下简称方法1和方法2),采用三角形面积法计算土壤可持续性指数,本研究选取了22项评价指标(4项土壤物理指标,6项土壤养分指标,3项土壤微生物指标和9项植物指标)建立最小数据集评价有机无机配施条件下设施番茄-黄瓜轮作系统的可持续性。

$$I_{ij}=A_{ij}/Th_{ij} \tag{2}$$

式中,I_{ij}为第i个处理第j个指标的指数数值,A_{ij}为第i个处理第j个指标的实测值,Th_{ij}为第i个处理第j个指标的临界值。综合前人的试验方法以及结果,从试验本身出发所有指标均采用各施肥处理(不包括CK处理)数值的算术平均值[7-8,17]。

土壤物理指数(PI_{ij})、土壤养分指数(NI_{ij})、作物指数(CI_{ij})以及土壤微生物指数(MI_{ij})计算公式如下:

$$PI_{ij}=1/4\sum_{j=1}^{4}I_{ij} \tag{3}$$

$$NI_{ij}=1/6\sum_{j=1}^{6}I_{ij} \tag{4}$$

$$MI_{ij}=1/3\sum_{j=1}^{3}I_{ij} \tag{5}$$

$$CI_{ij}=1/7\sum_{j=1}^{7}I_{ij} \tag{6}$$

式中,PI_{ij}是土壤物理指标的指数值,NI_{ij}是土壤养分指标的指数值,MI_{ij}是土壤微生物指标的指数值,CI_{ij}是作物指标的指数值。

$$\begin{aligned}TR1&=S_{\Delta ABC}=S_{\Delta AOB}+S_{\Delta BOC}+S_{\Delta COA}\\&=1/2ab\sin120^\circ+1/2bc\sin120^\circ+1/2ca\sin120^\circ\\&=\sqrt{3}/4(ab+bc+ca)\end{aligned} \tag{7}$$

式中,TR1为方法1所得可持续性指数;a、b、c是从点O出发的3条不同长度的线段,分别代表PI_{ij}、NI_{ij}和CI_{ij},然后连接3条线段的另一端点组成三角形。

$$\begin{aligned}TR2&=S_{\Delta BCD}=S_{\Delta BOC}+S_{\Delta COD}+S_{\Delta DOB}\\&=1/2bc\sin120^\circ+1/2cd\sin120^\circ+1/2bd\sin120^\circ\\&=\sqrt{3}/4(bc+cd+bd)\end{aligned} \tag{8}$$

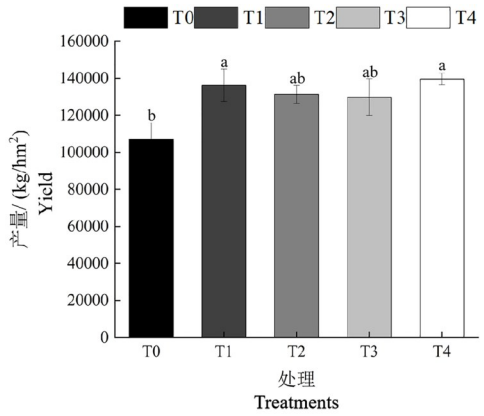
式中,TR1为方法1所得可持续性指数;b、c、d是从点O出发的3条不同长度的线段,分别代表NI_{ij}、MI_{ij}和CI_{ij},连接3条线段的另一端点组成三角形。

根据计算所得可持续性指数确定该系统的可持续性及其可持续程度,可持续性指数$H\geq1.3$(当a、b、c、d均为1时)视为本系统可持续,可持续性指数越大表示系统的可持续性越强。

2　结果与分析

2.1　施肥策略对设施黄瓜产量的影响

有机无机肥配施下设施黄瓜产量如图1所示,各施肥处理对黄瓜产量影响显著($F=8.32$,$P<0.01$)。与T0相比,T1和T4分别显著增产



T0为不施肥,T1为化肥,T2为有机肥,T3为50%化肥+50%有机肥,T4为50%化肥+50%有机肥+改良剂;不同小写字母表示各施肥处理间差异显著($P<0.05$),图2~图4同

T0: no fertilizer, T1: chemical fertilizer, T2: organic fertilizer, T3: 50% chemical fertilizer+50% organic fertilizer, T4: 50% chemical fertilizer+50% organic fertilizer+amendment. Different lowercase letters signify statistically significant differences among the treatments ($P<0.05$). The same as in Fig. 2~Fig. 4

图1 不同施肥处理下黄瓜产量

Fig.1 Yield of cucumber under different fertilization treatments

27.05%和21.09%($P<0.05$),而T3处理虽然有所增加但差异未达显著水平($P=0.083$)。值得注意的是,T1与T4理下的黄瓜产量无显著差异。

2.2 施肥策略对设施黄瓜土壤、植株、微生物生物量的碳氮磷化学计量比特征的影响

由图2可见,与T0以及T1相比,T2、T3、T4均可以使土壤C:N显著提高。各处理间的轮作土壤C:N大小顺序为T2>T4>T3>T0>T1,其中,T1与T0、T3与T4差异不也显著;T2~T4与T0(9.59)相比,增幅分别为55.78%、19.80%、20.07%。各施肥处理下设施轮作土壤C:P的变化趋势与土壤C:N相似,即T2最高。与T0相比,T1降低了轮作黄瓜土壤C:P,二者之间有差异但不显著;而T2、T3、T4均可显著提高设施轮作黄瓜土壤C:P,与T0(6.18)相比增幅分别为61.05%、14.50%和23.78%。各处间的轮作黄瓜茬土壤N:P从大到小为T2>T4>T0>T3>T1,与T0(0.64)相比,T2和T4增幅为18.71%和3.30%,其它处理均下降;与T1相比,T2、T4可显著提高设施轮作黄瓜土壤N:P,T3也有提高但差异不显著。

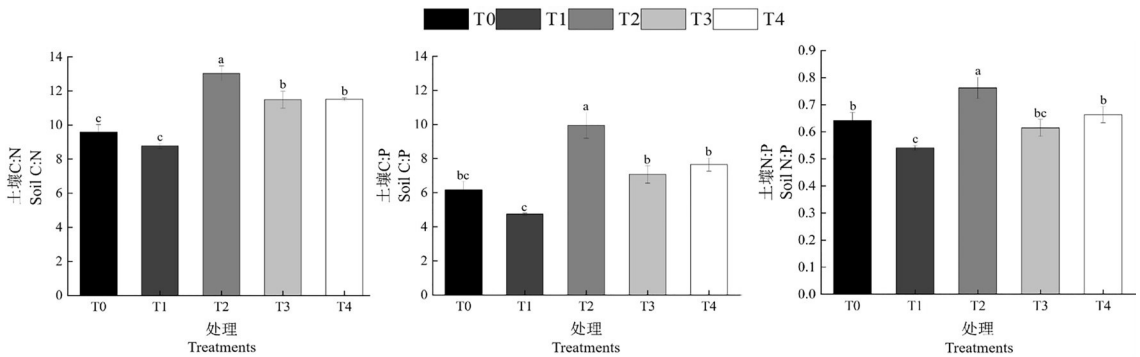


图2 不同施肥处理下黄瓜土壤碳氮磷的化学计量比

Fig.2 Stoichiometric ratios of C, N, and P in cucumber soil under different fertilization treatments

如图3所示,与T0(10.04)相比,T1、T2、T4的黄瓜植株C:N均增加,增幅分别为0.74%、6.74%和7.04%;与T1以及T3相比,T4可显著提高黄瓜植株的C:N。各处理下黄瓜植株C:P大小顺序为T1>T2>T0>T4>T3,与T0(150.24)相比,T1、T2的增幅分别为3.01%、6.01%,其余2个处理均不同程度降低。各施肥处理对黄瓜植株N:P影响较小,各处理均与T0差异不显著。

长期不同施肥处理对土壤微生物的养分供给产生了不同程度的影响,进而影响土壤微生物量碳氮磷的化学计量比(图4)。土壤微生物量C:N在不同施肥处理间呈显著差异。相较于T0、T1和T2,T3和T4显著提高了土壤微生物量C:N($P<0.05$);其中,添加改良剂处理的提升效果更为显著,T4较T0提高106.31%,较T1和T2分别提高82.07%和69.56%。土壤微生物量C:P方面,T3和T4较T0和T1显著提高,T1较T0显著降低,T2、T3和T4之间无显著差异。

与T0(19.65)相比,仅T1处理的土壤微生物量C:P有所降低,T2~T4则增加,增幅分别为

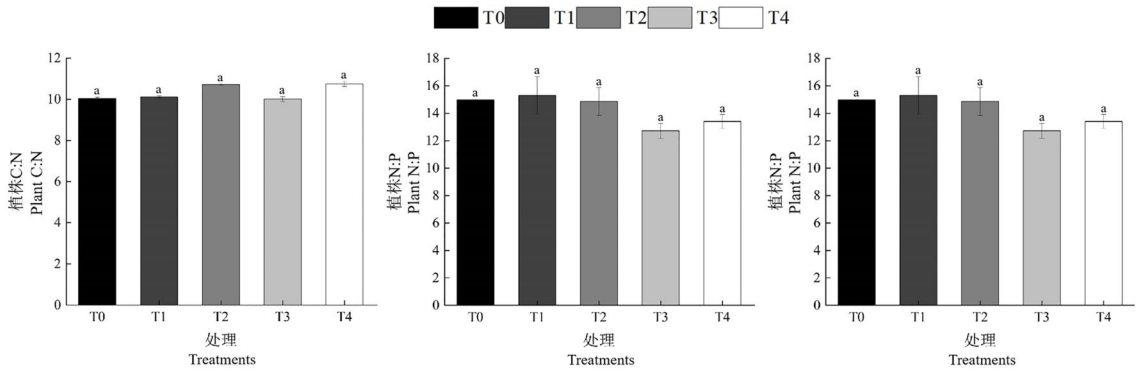


图3　各施肥策略下黄瓜植株化学计量比

Fig.3　Stoichiometric ratios of cucumber plants under different fertilization treatments

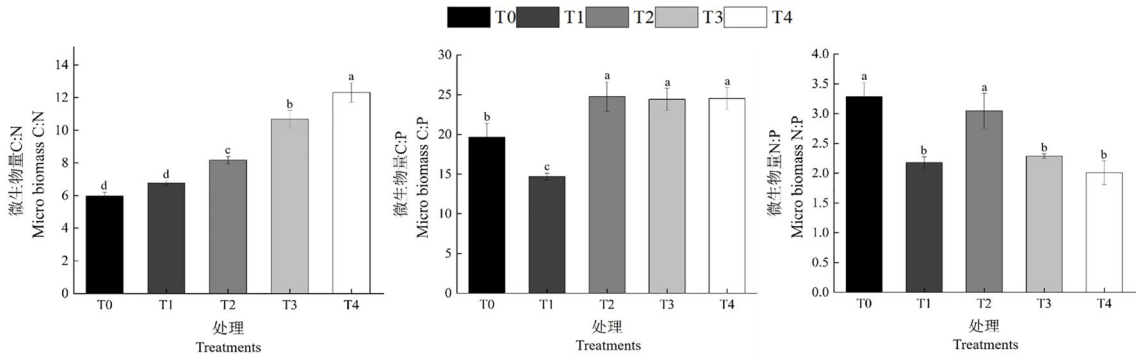


图4　不同施肥处理下黄瓜土壤微生物量化学计量比

Fig.4　Stoichiometric ratio of soil microbial biomass of cucumber under different fertilization treatments

25.96%、24.24%和24.82%。与T0和T2相比，T1、T3和T4显著降低了土壤微生物量N:P比值，且这三者之间无显著差异。与T0(3.29)相比，T2～T4的土壤微生物量N:P比值降幅分别为33.72%、7.32%、30.45%和38.86%。

2.3　不同施肥处理对设施黄瓜和土壤微生物生物量的内稳性特征

将所得数据代入公式$y=cx^{1/H}$中可计算得到其化学计量内稳性指数H，如表1所示，不同施肥处理对黄瓜植株叶片的有机碳、全氮、全磷含量及其比例的影响较小，表现出绝对稳态或稳态特征。相比之下，土壤微生物量指标对施肥处理更为敏感。在黄瓜系统中，土壤微生物量碳、氮、磷含量均表现出敏感态特征，而其化学计量比中，土壤微生物量C:N和N:P表现为敏感态，土壤微生物量C:P则表现为弱敏态。

2.4　各处理下黄瓜土壤－作物系统物生物量碳氮磷及其化学计量比的相关性

如图5所示，土壤有机碳、全磷含量及微生物量碳、氮、磷含量之间均呈显著正相关关系($P<0.05$)，表明这些指标之间存在密切的相互作用。此外，土壤有机碳、全磷含量及微生物量碳、磷含量之间均为极显著正相关关系($P<0.01$)，也意味着这些指标在土壤肥力方面存在协同作用。然而，植物全氮含量与其它指标呈负相关关系，这可能与植物对氮素的吸收和利用效率有关。在化学计量比方面，土壤C:N与土壤C:P、微生物量C:P之间分别存在显著正相关($P<0.05$)和极显著正相关关系($P<0.01$)。此外，土壤C:P与土壤N:P之间存在显著正相关关系($P<0.05$)，而植物C:P与植物N:P之间也呈显著正相关关系($P<0.05$)。

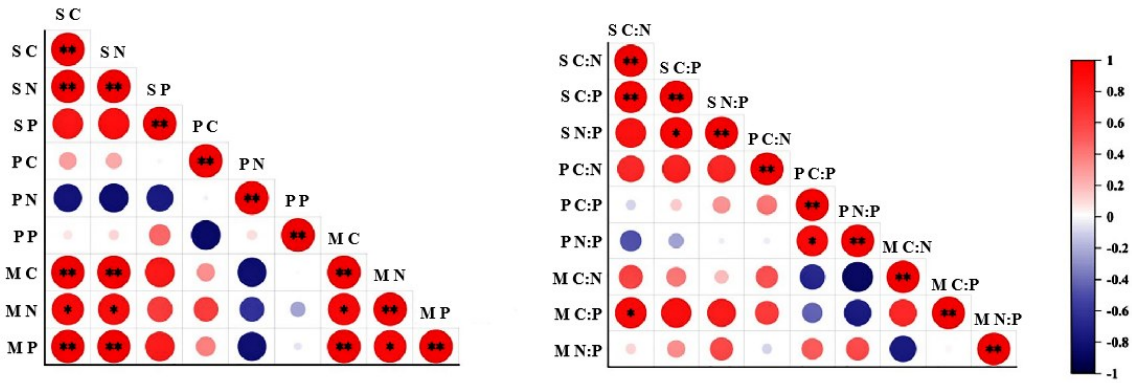
2.5　不同施肥处理对设施黄瓜土壤可持续性指数的影响

将土壤物理、养分和作物的相关指标代入李强等[18]提出的内稳性模型进行计算，结果如表2所示。土壤物理指数、土壤养分指数和作物指数分别介于0.96～1.01、0.56～1.15和0.91～1.01之间。与T0相比，T2、T3和T4的可持续性指数分别提高了32%、24%和30%。这些结果表明，有机肥与化肥混合施用，以及添加改良剂的处理，能够

表1 有机无机配施下设施黄瓜土壤微生物生物量的内稳性特征

Table 1 Homeostatic characteristics of soil microbial biomass in greenhouse cucumber systems under combined organic—inorganic fertilization

项目 Items	变量 Variables		H	R^2	等级 Ranks
	x	y			
植物 Plant	土壤有机碳含量	植物有机碳含量	18.87	0.02	绝对稳态
	土壤全氮含量	植物全氮含量	−7.69	0.41	绝对稳态
	土壤P	植物全磷含量	−20.92	0.02	绝对稳态
	土壤C:N	植物C:N	6.59	0.45	稳态
	土壤C:P	植物C:P	161.29	0.01	绝对稳态
	土壤N:P	植物N:P	−27.03	0.01	绝对稳态
微生物 Microorganism	土壤有机碳含量	土壤微生物量碳含量	0.46	0.98	敏感态
	土壤全氮含量	土壤微生物量氮含量	0.38	0.37	敏感态
	土壤全磷含量	土壤微生物量磷含量	0.37	0.99	敏感态
	土壤C:N	土壤微生物量C:N	0.84	0.30	敏感态
	土壤C:P	土壤微生物量C:P	1.35	0.74	弱敏态
	土壤N:P	土壤微生物量N:P	1.14	0.26	敏感态



SC为土壤有机碳含量,SN为土壤全氮含量,SP为土壤全磷含量,PC为植物有机碳含量,PN为植物全氮含量,PP为植物全磷含量,MC为微生物量碳含量,MN为微生物量氮含量,MP为微生物量磷含量,S C:N为土壤C:N,S C:P为土壤C:P,S N:P为土壤N:P,P C:N为植物C:N,P C:P为植物C:P,P N:P为植物N:P,M C:N为微生物量C:N,M C:P为微生物量C:P,M N:P为微生物量N:P。*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)

SC is soil organic carbon content, SN is soil total nitrogen content, SP is soil total phosphorus content, PC is plant organic carbon content, PN is plant total nitrogen content, PP is plant total phosphorus content, MC is microbial biomass carbon content, MN is microbial biomass nitrogen content, MP is microbial biomass phosphorus content, S C:N is soil C:N, S C:P is soil C:P, S N:P is soil N:P, P C:N is plant C:N, P C:P is plant C:P, P N:P is plant N:P, M C:N is microbial biomass C:N, M C:P is microbial biomass C:P, M N:P is microbial biomass N:P. * indicated significant correlation ($P<0.05$), ** indicated highly significant correlation ($P<0.01$)

图5 不同施肥处理下土壤、植物、微生物生物量的(a)碳氮磷含量及其(b)化学计量比的相关性

Fig.5 Correlation between (a) C-N-P content and (b) stoichiometric ratios across soil, crop, microbial biomass under different fertilization treatments

显著提升设施土壤系统的可持续性。改良剂的加入可进一步增强系统的稳定性和养分利用效率。

如表3所示,孙本华等[7]在李强等[18]的基础上对三角形面积法进行了改进,将土壤物理指标替换为土壤微生物指标,并应用于设施黄瓜-土壤系统的可持续性评估。结果显示,设施黄瓜-土壤系统中,土壤养分指数、作物指数和土壤微生物指数分别介于0.55~1.15、0.91~1.01和0.28~1.08之间。与T0相比,T2、T3和T4的可持续性指数分别提高了173%、128%和113%。2种方法的结果存在差异,这主要是由于它们在指标选择上侧重点不同,方法1侧重于土壤物理性质,而方法2则更注重土壤微生物的作用,结果表明,综合考虑土壤微生物指标的方法能够更全面地反映设施土

表2　方法1所得可持续性指数

Table 2　Sustainability index of cucumber—soil system calculated by method 1 under different fertilization treatments

处理 Treatments	土壤物理指数 Physical index	土壤养分指数 Nutrient index	作物指数 Crop index	可持续性指数 Sustainability Index
T0	1.00	0.56	0.91	0.86
T1	0.96	0.74	1.01	1.05
T2	1.06	1.15	0.98	1.36
T3	0.97	1.02	1.01	1.31
T4	1.01	1.10	1.00	1.39

表3　方法2所得可持续性指数

Table 3　Sustainability indices of cucumber—soil system calculated by method 2 under different fertilization treatments

处理 Treatments	土壤养分指数 Nutrient index	土壤微生物指数 Microbial index	作物指数 Crop index	可持续性指数 Sustainability index
T0	0.55	0.47	0.91	0.52
T1	0.74	0.28	1.01	0.53
T2	1.15	0.78	0.98	1.13
T3	1.02	0.86	1.01	1.21
T4	1.10	1.08	1.00	1.45

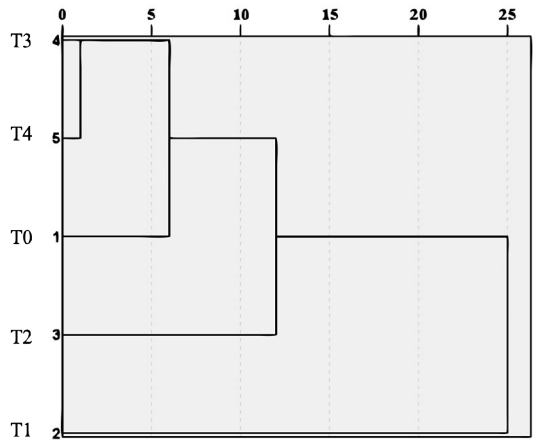
壤系统的可持续性特征。

2.6　轮作条件下不同施肥处理的聚类分析

由图6可见,聚类分析将设施黄瓜条件下不同施肥处理划分为4类,CK和化肥各为一类,说明无施肥处理的土壤微环境与施肥处理存在本质区别;有机肥为一类,反映其速效养分释放模式显著区别于其它处理;50%化肥+50%有机肥和50%化肥+50%有机肥+改良剂为一类,表明有机无机配施体系已形成稳定的养分组合结构,改良剂的加入未显著改变其基础养分供给模式。这种分类体系验证了施肥结构改变对作物生长微环境的塑造作用,特别是揭示了有机无机配施处理在维持系统稳定性方面的优势。

2.7　不同施肥处理下设施土壤理化、土壤微生物和作物指标的相关性

如图7所示,在轮作黄瓜系统中,土壤容重与植物全氮含量呈显著正相关($P<0.05$),而与土壤总孔隙度呈极显著负相关($P<0.01$),反映了土壤



T0为不施肥,T1为化肥,T2为有机肥,T3为50%化肥+50%有机肥,T4为50%化肥+50%有机肥+改良剂

T0: no fertilizer, T1: chemical fertilizer, T2: organic fertilizer, T3: 50% chemical fertilizer+50% organic fertilizer, T4: 50% chemical fertilizer+50% organic fertilizer+amendment

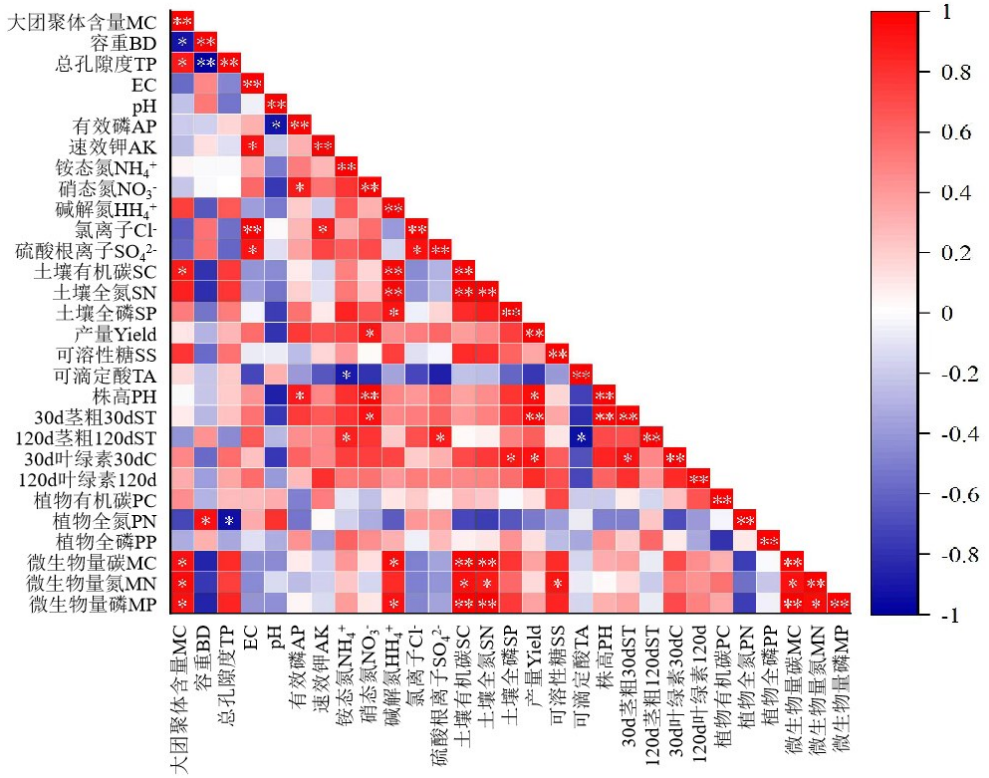
图6　轮作条件下不同施肥处理间聚类分析树状图

Fig.6　Cluster analysis of cucumber under different fertilization treatments

物理性质对植物生长有明显影响。土壤的电导率与硫酸根离子和速效钾离子呈显著正相关($P<0.05$),而碱解氮含量与全磷含量以及微生物量碳、磷含量之间也呈显著正相关($P<0.05$)。此外,碱解氮含量与有机碳和全氮含量呈显著正相关($P<0.05$),表明土壤肥力指标之间互相影响。

土壤的pH与有效磷含量呈显著负相关($P<0.05$),这可能与土壤酸碱度对养分有效性的影响有关。土壤物理指数与大团聚体含量之间呈显著正相关($P<0.05$),土壤养分指数与土壤全磷含量之间也呈现显著正相关($P<0.05$)。土壤微生物指数与土壤有机碳、全氮含量及微生物量碳、氮、磷含量之间呈极显著正相关($P<0.01$),表明微生物活性与土壤肥力密切相关。

在可持续性评估中,TR1与土壤碱解氮、有机碳、全氮含量及微生物量碳和磷含量之间呈显著正相关($P<0.05$)。TR2与土壤大团聚体含量、碱解氮含量、养分指数和TR1呈显著正相关($P<0.05$),而与土壤有机碳含量、全氮含量、微生物量碳与磷含量和微生物指数呈极显著正相关($P<0.01$)。这些结果表明,TR2综合考虑了土壤物理、化学和生物指标,能够更全面地反映系统的可持续性。



*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)

* indicated significant correlation ($P<0.05$), ** indicated highly significant correlation ($P<0.01$)

图7 不同施肥处理下土壤理化、土壤微生物及作物指标的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of soil, crop and microbial biomass under different fertilization treatments

3 讨论

在设施番茄和黄瓜轮作系统中,有机肥单独施用(T2)虽然对产量有一定贡献,但效果相对较弱。化肥单独施用(T1)和化肥与有机肥配施+改良剂(T4)对作物产量的提升效果显著,且改良剂的加入在一定程度上优化了施肥效果,尤其是在黄瓜轮作中作物产量增幅更高。叶片C:N:P变化能够反映植物从土壤中获取营养元素的循环过程[19]。各处理黄瓜叶片的C:N和N:P无显著性差异,从植株碳、氮、磷含量来看,各处理下植株养分均分布较为稳定,这也与其他学者在设施土壤上的研究结果一致,即有机肥施用后植株养分与产量变化规律并不完全相似[20]。

土壤化学计量应用于研究不同施肥对土壤碳、氮、磷循环有重要意义[21]。本研究中,与化肥单独施用相比,化肥与有机肥配施(T3)以及化肥与有机肥配施+改良剂使土壤C:N和C:P显著增加,表明有机肥的加入有效促进了土壤碳、氮、磷的循环效率。然而,与不施肥(T0)、化肥单独施用和有机肥单独施用相比,化肥与有机肥配施、化肥与有机肥配施+改良剂显著提高了土壤微生物量C:N;与化肥与有机肥配施相比,化肥与有机肥配施+改良剂使土壤微生物量C:N显著增加。这表明外源有机物料的输入,尤其是改良剂(枯草芽孢杆菌)的加入,对土壤化学计量指标和微生物计量指标产生了明显影响。此外,本研究发现土壤有机碳含量与土壤微生物量碳、氮、磷含量之间存在显著正相关关系($P<0.05$)。有机肥的施入为土壤提供了丰富的碳和氮等养分,为微生物的生长和繁殖提供了良好条件,从而显著提高了土壤微生物活性及其对氮、磷的固持能力。这一结果与前人研究结论一致,即有机肥的大量施入增加了土壤微生物量碳、氮、磷的含量,还对与碳、氮、磷生物地球化学过程相关的微生物群落特征产生了显著影响[22]。然而,黄瓜茬土壤微生物量碳、氮、磷含量对施肥的响应更为敏感[23],这表明设施土壤微生物群落的结构和功能对外源输入的依赖性较强。此外,本研究还发现设施黄瓜植株的内稳

性特征受施肥影响较小,表现出绝对稳态,这与前人研究结果相似,即甘薯植株器官化学计量比在整个生育期内均表现为严格的稳态[24]。这一现象可能与设施栽培条件下植物对养分吸收的适应性有关,但也提示在评估土壤—植物系统可持续性时,需综合考虑土壤微生物活性和植物养分利用效率的动态变化。

本研究采用2种三角形计算方法(方法1[7]和方法2[18])评估不同施肥策略下设施黄瓜系统的可持续性。结果显示,有机肥单独施用、化肥与有机肥配施、化肥与有机肥配施+改良剂均表现出良好的可持续性,而不施肥和化肥单独施用则表现出不可持续性。尽管在方法2中,化肥与有机肥配施未达到可持续生产的指标界限值,但其可持续性指数已显著高于不施肥和化肥单独施用。此外,方法1所得结果显示番茄—黄瓜轮作系统在上述施肥策略下表现出可持续性。这些结果表明,有机肥与化肥混合施用,能够显著提升设施轮作条件下番茄和黄瓜的可持续性,且改良剂的加入进一步增强了这一效应。改良后的设施土壤各项指标相关分析表明,容重与总孔隙度之间呈极显著负相关($P<0.01$)。TR1与土壤碱解氮、有机碳、全氮含量及微生物量碳和磷含量呈显著正相关($P<0.05$),而TR2与大团聚体含量、碱解氮含量、养分指数和TR1呈显著正相关($P<0.05$)。这表明方法2通过综合考虑更多指标,能够更全面地反映系统的可持续性。

目前,与其它可持续性指数相比[25],本研究中的2种三角形面积法通过图形化展示数据,使得可持续性指标和综合指数的比较更为直观易懂。三角形面积法不仅关注单一指标,而是综合考虑多个维度,从而更全面地评估系统的可持续性。然而,三角形面积法也存在局限性。构建全面且准确的可持续发展指标体系还需要大量数据支持,而这些数据的收集可能存在困难,尤其是土壤生物多样性方面的指标。此外,生态化学计量特征(如植物体内的N:P)在不同生长阶段和季节会有所变化,例如番茄在生长季对氮的需求较高,而在成熟期对钾的需求增加[26]。轮作系统可以通过调整作物对养分的吸收模式,优化土壤养分循环,从而影响作物的生态化学计量特征。本研究主要针对设施黄瓜进行了分析,设施番茄的相关数据将在后续研究中进一步探讨。

在实际应用中,可持续性指数的构建和评估仍面临挑战。例如,一些研究基于特定生态系统自定义临界值,如煤矿废弃地复垦耕地[27],但这种自定义方法可能导致指标权重分配的争议。此外,某些指标(如电导率、容重)的数值并非越大越好,因此在实际生产中需要综合考虑指标的合理范围。随着大数据和云计算技术的发展,未来研究可以更高效地集成和共享数据,提高数据收集的准确性和可持续性指数的代表性。利用人工智能技术(如机器学习和模式识别)可以提高评估过程的自动化和智能化水平,减少人为因素的干扰。还可建立长期的监测和评估机制,持续跟踪和分析土壤-作物系统的可持续性进展和问题。未来,系统可持续指标研究还需要跨学科的方法与创新,以推动可持续农业的实践和发展。

4　结论

本研究在设施番茄-黄瓜轮作系统中发现,有机无机肥复合施用,尤其是添加改良剂,显著提升了土壤-作物系统的可持续性指数,增强了作物生长和土壤微生物量碳、氮、磷含量的稳定性,表现出更好的适应能力和系统稳定性。有机物料持续输入使设施轮作番茄和黄瓜生产表现出较高的可持续性,而不施肥和化肥处理则不可持续。2种三角形计算法均可用于评估设施作物-土壤系统的可持续性指数,但方法2综合考虑土壤养分指标、土壤微生物指标和作物指标,是评估设施土壤-作物系统可持续性的更优方法,可为构建可持续发展指标体系提供理论支持。

参　考　文　献

[1]Zaid M, Zubair M, Aryan M, et al. A review on challenges and opportunities of fertilizer use efficiency and their role in sustainable agriculture with future prospects and recommendations [J]. Current Research in Agriculture and Farming, 2023, 4(4): 1-14.

[2]张甘霖,吴华勇. 从问题到解决方案:土壤与可持续发展目标的实现[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):124-134.
Zhang G L, Wu H Y. From "problems" to "solutions": soil functions for realization of sustainable development goals[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 124-134.

[3]Syed S, Wang X X, Prasad T N V K V, et al. Bio-organic mineral fertilizer for sustainable agriculture: current trends and future perspectives[J]. Minerals, 2021, 11(12): 1336.

[4]沈宏,曹志洪. 不同农田土壤养分可持续性指数的研究[J]. 农村生态环境,1998(3):35-39.
Shen H, Cao Z H. Study on sustainability indices of soil nutrients under different agroecosystems [J]. Rural Eco-Environment,1998(3):35-39.

[5]吴科生,车宗贤,包兴国,等. 灌漠土长期有机配施土壤肥力特征和作物产量可持续性分析[J]. 水土保持学报,2021,35(3):333-340.
Wu K S, Che Z X, Bao X G, et al. Analysis on soil fertility characteristics and crop yield sustainability of irrigated desert soil with long-term organic fertilization application[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(3):333-340.

[6]Kang G S, Beri V, Sidhu B S, et al. A new index to assess soil quality and sustainability of wheat-based cropping systems[J]. Biology and Fertility of Soils,2005,41(6):389-398.

[7]孙本华,孙瑞,郭芸,等. 塿土区长期施肥农田土壤的可持续性评价[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(6):1403-1412.
Sun B H, Sun R, Guo Y, et al. Evaluation on the sustainability of cropland under different long-term fertilization in Eum-Orthic Anthrosols area[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015,21(6):1403-1412.

[8]黄学芳,王娟玲,黄明镜,等. 长期施肥对栗褐土区土壤-作物系统可持续性的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(8):1107-1116.
Huang X F, Wang J L, Huang M J, et al. Sustainability of soil-crop systems under different long-term fertilizations in Chestnut Cinnamon soil areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018,26(8):1107-1116.

[9]马露洋. 黄土丘陵区长期施肥对坡耕地土壤质量及农田系统可持续性的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
Ma L Y. Effects of long-term fertilization on soil quality and farmland system sustainability on sloping farmland in loess hilly region[D]. Yangling:Northwest A & F University,2018.

[10]王晓娇,齐鹏,蔡立群,等. 培肥措施对旱地农田产量可持续性及土壤有机碳库稳定性的影响[J]. 草业学报,2020,29(10):58-69.
Wang X J, Qi P, Cai L Q, et al. Effects of alternative fertilization practices on components of the soil organic carbon pool and yield stability in rain-fed maize production on the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(10): 58-69.

[11]李忠芳,徐明岗,张会民,等. 长期不同施肥模式对我国玉米产量可持续性的影响[J]. 玉米科学,2009,17(6):82-87.
Li Z F, Xu M G, Zhang H M, et al. Effects of different long-term fertilizations on sustainability of maize yield in China[J]. Journal of Maize Sciences,2009,17(6):82-87.

[12]王婷,丁宁平,李利利,等. 化肥与有机肥或秸秆配施提高陇东旱塬黑垆土上作物产量的稳定性和可持续性[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(11):1817-1826.
Wang T, Ding N P, Li L L, et al. Combining chemical fertilizer with organic manure or straw increase the yield stability and sustainability of maize and wheat in Loess Plateau of east Gansu Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2019,25(11):1817-1826.

[13]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: 100-166
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 100-166

[14]鲍士旦. 土壤农化分析 3版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39-61.
Bao S D. Soil agrochemical analysis 3rd[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 39-61.

[15]张以顺,黄霞,陈云凤. 植物生理学实验教程[M]. 北京:高等教育出版社,2009: 77-78.
Zhang Y S, Huang X, Chen Y F.. Laboratory manual for plant physiology[M]. Beijing:Higher Education Press, 2009: 77-78.

[16]蔡怡俊,李雅静,刘金良,等. 不同径级侧柏古树根系、土壤和微生物生物量生态化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 80-88,97.
Cai Y J, Li Y J, Liu J L, et al. Ecological stoichiometric characteristics of roots, soil and microbial biomass of different diameter classes of ancient Platycladus orientalis[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(4): 80-88,97.

[17]Persson J, Fink P, Goto A, et al. To be or not to be what you eat: regulation of stoichiometric homeostasis among autotrophs and heterotrophs[J]. Oikos,2010,119(5):741-751.

[18]李强,许明祥,刘国彬,等. 基于几何方法评价长期施用化肥坡耕地作物轮作系统可持续性[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(4):884-892.
Li Q, Xu M X, Liu G B, et al. Evaluation of crop rotation system sustainability in slope land under long-term chemical fertilization based on geometry method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2012,18(4):884-892.

[19]王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2008,28(8):3937-3947.
Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(8):3937-3947.

[20]李亚麒,陈林,唐军荣,等. 施肥对云南松苗木-土壤氮、磷、钾化学计量比的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 40-50.
Li Y Q, Chen L, Tang J R, et al. Effect of Effect of fertilization on stoichiometric ratio of nitrogen, phosphorus and potassium in *Pinus yunnanensis* seedling and soil[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2024, 52(3): 40-50.

[21]胡美美,于世欣,付乃鑫,等. 日光温室番茄产量与土壤养分、植株养分的关系[J]. 土壤与作物,2018,7(1):13-21.
Hu M M, Yu S X, Fu N X, et al. Tomato yields in relation to soil nutrient and plant nutrient in solar greenhouse[J]. Soils and Crops,2018,7(1):13-21.

[22]Luo G W, Xue C, Jiang Q H, et al. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus cycling microbial populations and their resistance to global change depend on soil C: N: P stoichiometry[J].

mSystems,2020,5(3):e00162-20.

[23]Zhao H,Sun J,Xu X L,et al. Stoichiometry of soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in China's temperate and alpine grasslands[J]. European Journal of Soil Biology,2017,83:1-8.

[24]李绍兴,宋稳锋,周玉玲,等. 秸秆与紫云英覆盖对土壤-微生物-甘薯植株生态化学计量特征的影响[J]. 草业学报,2025,34(3):56-70.
Li S X,Song W F,Zhou Y L,et al. Effects of straw and milk vetch mulching on the ecological stoichiometric characteristics of soil-microbe-sweet potato plants[J]. Acta Prataculturae Sinica,2025,34(3):56-70.

[25]Wanjari R H,Singh M V,Ghosh P K. Sustainable yield index: an approach to evaluate the sustainability of long-term intensive cropping systems in India[J]. Journal of Sustainable Agriculture,2004,24(4):39-56.

[26]何世朋,梁斌,武德军,等. 设施菜地番茄的养分需求规律[J]. 华北农学报,2020,35(S1):282-288.
He S P,Liang B,Wu D J,et al. Nutrient demand of tomato in the facility vegetable field[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2020,35(S1):282-288.

[27]丁翠,马守臣,李明秋,等. 煤矿废弃地复垦耕地生态系统的可持续性评价[J]. 浙江农业学报,2017,29(12):2097-2103.
Ding C,Ma S C,Li M Q,et al. Sustainability evaluation of reclaimed cultivated land ecosystem in coal mine wasteland[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2017,29(12):2097-2103.

(编辑:郭玥微)