中国农业大学学报 2024,29(6):197-205
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

王相宜,黄红心,鞠鲤懋,汤耀中,朱秀妹,李季,乔玉辉. 不同肥料投入对有机菜田土壤质量的影响[J]. 中国农业大学学报,2024,29(06):197-205.
WANG Xiangyi, HUANG Hongxin, JU Limao, TANG Yaozhong, ZHU Xiumei, LI Ji, QIAO Yuhui. Effects of different fertilizer inputs on the soil quality in organic vegetable fields[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 197-205.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.20

不同肥料投入对有机菜田土壤质量的影响

王相宜[1,2,3] 黄红心[4] 鞠鲤懋[1,2,3] 汤耀中[2,5] 朱秀妹[2,5] 李 季[1,2,3] 乔玉辉[1,2,3*]

(1. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193;
2. 江苏省昆山市果蔬科技小院,江苏 苏州 215300;
3. 中国农业大学 有机循环研究院(苏州),江苏 苏州 215100;
4. 山东省青岛市即墨区农业农村局,山东 青岛 266200;
5. 昆山悦丰岛有机农副产品基地有限公司,江苏 苏州 215300)

摘 要 为探究不同肥料投入对有机菜田土壤质量的影响,以有机菜田为研究对象,设置商品有机肥(OF)、餐厨有机肥(KOF)、绿肥(G)和种植绿肥配施菌剂(MG)4个处理,以不施用肥料为对照(CK),测定不同肥料投入后有机菜田土壤的pH、有机质含量、阳离子交换量等15个指标,利用相关性分析、聚类分析以及主成分分析等方法建立有机菜田土壤质量评价最小数据集,并根据非线性参数方程及权重计算出不同肥料投入对土壤质量的综合影响指数。结果表明:与CK相比,施加OF和KOF均可以显著提高土壤pH、速效磷含量、电导率、钠离子含量($P<0.05$),施加KOF可使土壤有机质增加18.52%($P<0.05$)。相较于CK,施用有机肥和种植绿肥均可以提升土壤质量,但KOF的施用对土壤质量提升效果最为显著,综合土壤质量评价指数较CK升高30.23%。在筛选出的8个土壤评价最小数据集指标中,土壤有机质对土壤质量影响最大。综上,施加餐厨有机肥比商品有机肥和绿肥更有利于提升有机菜田的土壤质量。

关键词 有机肥;绿肥;土壤性质;最小数据集;土壤质量评价

中图分类号 S114 **文章编号** 1007-4333(2024)06-0197-09 **文献标志码** A

Effects of different fertilizer inputs on the soil quality in organic vegetable fields

WANG Xiangyi[1,2,3], HUANG Hongxin[4], JU Limao[1,2,3], TANG Yaozhong[2,5], ZHU Xiumei[2,5], LI Ji[1,2,3], QIAO Yuhui[1,2,3*]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Kunshan Fruit and Vegetable Technology Backyard, Kunshan City, Jiangsu Provence, Suzhou 215300, China;
3. Organic Recycling Research Institute (Suzhou) of China Agricultural University, Suzhou 215100, China;
4. Agriculture and Rural Bureau of Jimo District, Qingdao City, Shandong Provence, Qingdao 266200, China;
5. Kunshan Yuefeng Island Organic Agricultural Products Base Co., Ltd., Suzhou 215300, China)

Abstract To investigate the changes of soil quality under different fertilizer input scenarios, four treatments with the commercial organic fertilizer (OF), kitchen organic fertilizer (KOF), green manure (G) and planting green manure with microbial agent (MG) were set up and compared to the control without fertilizer application (CK) in the organic vegetable fields. The physical and chemical indicators such as the pH,

收稿日期:2023-12-13
基金项目:国家重点研发计划(2023YFE0104700);内蒙古自治区科技计划(2021GG0284)
第一作者:王相宜(ORCID:0009-0009-7388-3303),硕士研究生,E-mail: Wangxyi1998@163.com
通讯作者:乔玉辉(ORCID:0000-0001-8079-969X),教授,主要从事有机农业和生态农业研究,E-mail: qiaoyh@cau.edu.cn

organic matter content, and cation exchange capacity etc. of organic vegetable field soil were determined after different fertilizer inputs. Correlation analysis, cluster analysis and the principal component analysis were adopted to establish a minimum dataset to evaluate the soil quality in organic vegetable fields. The comprehensive impact index of the different fertilizer inputs on soil quality was calculated based on nonlinear parameter equations and weights. The results showed that: Compared with CK, the application of OF and KOF significantly increased soil pH, available phosphorus content, electrical conductivity, and sodium ion content ($P<0.05$). The application of KOF also significantly increased soil organic matter by 18.52% ($P<0.05$). Compared to CK, the application of organic fertilizer and planting green manure improved soil quality. The application of KOF displayed the most significant effect on improving soil quality, and its comprehensive soil quality evaluation index increased by 30.23% compared to that of CK. Among the eight indicators of the minimum dataset for soil quality evaluation, soil organic matter had the greatest influence on soil quality. In summary, kitchen organic fertilizer input is more beneficial in improving soil quality than the commercial organic fertilizer and green manure inputs.

Keywords organic fertilizer; green manure; soil properties; minimum dataset; soil quality evaluation

有机农业凭借环境友好发展和产品安全的特点,已经逐渐成为农业绿色高质量发展的新趋势,土壤健康是有机农业发展的基石,保持优质土壤质量,是实现农业可持续发展之根本[1]。相较于常规农业,有机农业禁用化学合成肥料,需要投入不同类型的有机物料来补充作物养分需求[2]。已有研究发现,与常规种植比较,有机种植能够明显提高土壤中有机质和养分含量,改善土壤物理结构、增强土壤保肥保水能力,这主要得益于有机肥能够提高土壤中微生物碳氮含量,改善土壤的养分供给能力[3-5]。Wilson等[6]的研究显示,有机肥施用后,其有机底物被分解,微生物活性提高,由此引起团聚体稳定性的提高,翻压绿肥可使土壤容重在3年内下降1.71%~23.87%。因此,施用有机肥可以作为一种有效的土壤改良措施。Sullivan等[7]7年的田间试验结果表明,长时间使用餐厨垃圾有机肥能使土壤有机质含量增加18%,全氮含量增加33%。现有试验证明,绿肥可显著增加土壤中酶的活性,同时可以增加微生物数量,有利于土壤生物碳库的优化[8-9]。如何综合利用当地有机废弃物和绿肥资源,加强农田碳固持进而提升有机菜田土壤质量已经成为农业提质增效的重要科学问题。

土壤质量评价作为评估管理措施及土地利用变化等人类活动对土壤影响的有效手段,有助于及时掌握土壤质量的现状和变化动态[10]。如何合理筛选土壤指标,科学建立最小数据集是进行土壤质量评价的首要问题。李鑫等[11]通过统计415篇文献数据发现,常见的土壤质量评价指标包括25项物理指标、36项化学指标、35项微生物指标以及19项环境指标。Qi等[12]通过对22个土壤理化指标进行分析,建立了评价土壤质量的最小数据集,包括耕层厚度、障碍层的深度,有机质含量、全钾及有效铁,这些指标均能反映土壤的物理性质及养分状况。这些指标虽然是评价土壤养分状况的重要方法,但其准确性受取样地点、样品采集时间及采样环境影响很大[13]。虽然目前关于土壤质量评价的研究众多,但是大多是针对大尺度的地块土壤进行对比研究,文献数据较多;而针对样本数据较少的小尺度地块的对比评价的研究报道则相对较少。本研究从以有机菜田为研究对象,测定商品有机肥、餐厨有机肥和绿肥不同肥料投入后有机菜田土壤的各项理化指标,利用相关性分析、聚类分析以及主成分分析等方法建立有机菜田土壤质量评价最小数据集,针对有机体系下同一菜田不同肥料投入的地块土壤进行评价,旨在探究肥料投入对土壤质量的影响,以期为我国有机菜田的肥料施用模式提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况及试验设计

试验地点位于江苏省苏州市昆山悦丰岛有机农场(120°84′ N,31°41′ E),该地区属北亚热带南部季风气候区,年平均气温17.6 ℃;年平均降水量1 200.4 mm,年平均日照时间1 789.2 h,无霜期年平均233 d。悦丰岛有机农场成立于2009年,自建成以来一直以GB/T19630《有机产品 有机产品生产、加工、标识与管理体系要求》[14]进行有机操作并于2012年转换期满后获得有机证书。

农场以种植蔬菜为主,全年种植约70多种四季蔬

果，以当地当季的品种为主。农场从2019年开始采用不同的土壤改良措施，包括施用不同有机肥、种植绿肥、喷施菌剂等，望以此实现农场内部的养分循环以及进一步提高土壤质量。试验采用系统试验设计，共设置5个处理，分别为不施加肥料（CK）、施加商品有机肥（OF）、餐厨有机肥（KOF）、种植绿肥（G）以及种植绿肥配施菌剂（MG）。每个处理设置4次重复，共计20个小区，每个小区面积为45 m^2（9.0 m×5.0 m）。本试验周期为2021年4—2022年6月，试验地先后种植四茬作物小香薯（绿肥）-萝卜-休耕（绿肥）-鲜食玉米（表1）。

表1　试验地作物种植情况

Table 1　Crop planting in the test area

种植时间 Plant time	处理 Treatment				
	CK	OF	KOF	G	MG
2021-04—2021-07	小香薯	小香薯	小香薯	绿肥	绿肥
2021-07—2021-10	萝卜	萝卜	萝卜	萝卜	萝卜
2021-10—2022-03	休耕	休耕	休耕	绿肥	绿肥
2022-03—2022-06	鲜食玉米	鲜食玉米	鲜食玉米	鲜食玉米	鲜食玉米

注：CK，不施加肥料；OF，施加商品有机肥；KOF，施加餐厨有机肥；G，种植绿肥；MG，种植绿肥配施菌剂。下同。

Note: CK, no fertilizer; OF, commercial organic fertilizer; KOF, kitchen organic fertilizer; G, green manure; MG, green manure with microbial agents. The same below.

商品有机肥为南通尔康牌有机肥（N 1.28 g/100 g，P_2O_5 2.42 g/100 g，K_2O 2.82 g/100 g），餐厨有机肥为环太湖有机废弃物处理利用示范中心（临湖）生产的以厨余垃圾为原料堆制而成的有机肥（N 1.88 g/100 g，P_2O_5 1.14 g/100 g，K_2O 1.87 g/100 g），以上2种有机肥在每茬作物播种前施用，用量为每茬19 455 kg/hm^2，施用方式为均匀撒施在土壤表层，然后翻施到土壤中。绿肥的种植是采用混播的方式，品种按照农场生产经验而定，品种以蚕豆、毛豆、红豆、田菁、草木犀豆科植物为主，还有荞麦、黑麦草、波斯菊、向日葵等禾本科和菊科植物。种植绿肥的2个处理不施用有机肥，在盛花期时用旋耕机将绿肥粉碎并翻压到土壤中，投入绿肥生物量干重为8 100 kg/hm^2（N 1.88 g/100 g，P_2O_5 1.78 g/100 g，K_2O 3.97 g/100 g）。MG处理在绿肥还田之后随雨喷施菌剂，用量为87 g/hm^2。试验开始前土壤基础理化性质，见表2。

表2　试验开始前土壤基础理化性质

Table 2　Physical and chemical properties of soil foundation before the study

指标 Index	pH	有机质含量/（g/kg） Organic matter	容重/（g/cm^3） Bulk density	全氮含量/（g/kg） Total N	速效磷含量/（mg/kg） Available P	速效钾含量/（mg/kg） Available K
数值 Value	6.78±0.05	19.9±0.07	1.47±0.01	1.50±0.20	30.56±7.29	155.33±13.57

1.2　样品采集及分析

试验于2022年6月（鲜食玉米收获前1 d）进行土壤取样，采用五点取样法在每个地块采集5份土壤样品并混合均匀，最终保留1 kg混合土壤样品。土样取回后分为3份，1份样品保存于－80℃冰箱中，用于测定土壤微生物性质；1份样品保存于4 ℃冰箱中，用于测定鲜土指标；其余土壤样品风干后测定理化性质等指标。

土壤容重采用环刀法[15]进行测定。土壤pH和电导率采用蒸馏水浸提（水土质量比分别为2.5∶1.0及5.0∶1.0），使用pH计和电导率仪测定数值。铵态氮和硝态氮分别用KCl和$NaHCO_3$浸提并用流动分析仪测定[16-17]。速效钾的测定选用醋酸浸提-火焰光度计法[18]；速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法[19]测定。全碳和全氮使用元素分析仪测定[20]。采用乙酸钠-火焰光度法[21]进行阳离子交换

量测定。可溶性钠离子采用火焰光度法[22]进行测定;氯离子采用硝酸银滴定法[23]进行测定。采用湿筛法[24]测定土壤团聚体各粒级的占比,根据公式(1)计算土壤团聚体平均重量直径。微生物测序采用高通量测序法(测序工作委托北京百迈客生物科技有限公司)。

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n} w_i x_i \tag{1}$$

式中:n,粒径分组的组数;w_i,该组团聚体占所有粒径团聚体的质量分数;x_i,该组团聚体的平均直径,mm。

1.3 计算土壤质量指数

土壤质量指数可以从多角度综合评估,其可以通过数值的形式体现土壤质量的好坏,其结果比单个指标的选择更具有说服力和科学性,这种评级方法也在土壤质量评价中被广泛应用[25-27]。用于土壤质量综合评价的土壤指标包括土壤物理、化学及生物指标,最大数据集包括pH、电导率、有机质、速效钾、速效磷、钠离子、全氮、铵态氮、硝态氮、氯离子、阳离子交换量等11个化学指标和容重、团聚体平均重量直径、微生物量碳以及细菌香农指数等物理和生物指标。

计算方法首先采用非线性评分函数方法将数据转换为0~1(其中1代表指标的高水平,0代表指标的低水平),具体公式如下:

$$\mathrm{SNL}=\frac{1}{1+\left(X/X_m\right)^b} \tag{2}$$

式中:SNL,土壤指标的非线性分数;X,土壤指标的实测值;X_m,土壤指标的平均值;b,方程的斜率;"S型"曲线设为-2.5,"反S型"曲线设为2.5。

对土壤指标进行评分加权后,采用加权相加法计算土壤质量指数,具体计算公式如下:

$$\mathrm{SQI}=\sum_{i=1}^{n} W_i \times S_i \tag{3}$$

式中:SQI,土壤质量指数;S_i,指标得分;n,最小数据集内土壤指标的数量;W_i,土壤指标的权重值。

1.4 数据分析

本试验数据在Excel 2010中计算处理,并通过SPSS 25.0软件对土壤理化指标进行聚类分析、主成分分析、相关分析以及显著性差异分析等,图表均采用Origin 2022b制作。

2 结果与分析

2.1 不同肥料投入对有机菜田土壤化学性质的影响

由表3可知,不同肥料投入到有机菜田后,相比于不施肥处理(CK),施加商品有机肥(OF)和施加餐厨有机肥(KOF)处理的土壤pH均显著升高($P<0.05$),其中KOF增加幅度最大,而种植绿肥配施菌剂处理(MG)的pH则降低到6.46。不同肥料对土壤有机质的影响各不相同,KOF的有机质含量显著高于CK,增幅高达18.52%,OF和G的增幅相同,均为4.76%,而MG则有所下降。相较于试验前的土壤有机质含量19.9 g/kg,只有KOF在种植两季作物后,土壤有机质含量有所提升,其他处理均出现不同程度的下降,KOF显著高于其他处理($P<0.05$)。OF的阳离子交换量最高,为49.57 cmol/kg,比CK高4.89%,其余3个处理的阳离子交换量均低于CK,KOF最低,为45.14 cmol/kg。

相较于CK,4种处理的全氮、铵态氮和硝态氮含量均有升高,但并无显著性差异。在鲜食玉米生长季后,MG的全氮含量达到最高,为2.50 g/kg,KOF的铵态氮含量达到最高,为5.22 mg/kg,G的硝态氮含量达到最高,为6.18 mg/kg(表3)。

从速效养分的角度来看,相较于CK,OF的速效磷含量的增加幅度(70.76%)远高于KOF的增幅(34.82%),而G和MG的速效磷含量则低于CK,MG最低,为25.22 mg/kg;与速效磷含量类似,OF的速效钾含量为5个处理中最高,且显著高于G($P<0.05$),2个处理间速效钾含量差为65.75 mg/kg(表3)。

不同肥料投入下各个处理电导率之间出现显著差异($P<0.05$),且OF的电导率(133.03 μS/cm)显著高于其他处理。其中,Na^+的含量在不同的处理间出现显著差异($P<0.05$)。OF与KOF的Na^+含量远高于其他3个处理,分别为61.25和48.13 mg/kg,是CK的4.45和3.50倍。各处理的Cl^-含量差异不显著,但相较于CK均有不同幅度的提升,其中KOF的Cl^-含量相较于CK高出47.27%,达到6.20 mg/kg(表3)

2.2 不同肥料投入对有机菜田土壤物理及生物性质的影响

由表4可知,KOF、G以及MG的土壤容重相较

表 3　不同肥料投入下有机菜田土壤养分水平

Table 3　Soil nutrient levels of organic vegetable field soil under different fertilizers

处理 Treatment	pH	有机质含量/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total N	铵态氮含量/(mg/kg) Ammonium nitrogen	硝态氮/(mg/kg) Nitrate nitrogen	有效磷/(mg/kg) Available P
CK	6.62±0.13 b	18.9±1.1 b	2.10±0.26 a	4.11±1.51 a	5.28±0.40 a	34.55±9.81 c
OF	6.87±0.24 a	19.2±0.3 b	2.30±0.13 a	4.14±2.81 a	5.73±0.74 a	59.00±7.34 a
KOF	6.96±0.07 a	22.4±0.5 a	2.40±0.29 a	5.22±2.60 a	5.35±1.70 a	46.58±11.12 b
G	6.62±0.09 b	19.2±1.5 b	2.20±0.26 a	5.10±0.96 a	6.18±1.56 a	31.44±3.48 c
MG	6.46±0.08 b	18.3±0.7 b	2.50±0.69 a	4.28±2.65 a	5.50±0.78 a	25.22±5.01 c

处理 Treatment	速效钾/(mg/kg) Available K	电导率/(μS/cm) Electrical conductivity	Na^+/(mg/kg)	阳离子交换量/(cmol/kg) CEC	Cl^-/(mg/kg)
CK	155.00±6.38 ab	74.85±2.40 c	13.75±4.79 b	47.26±2.86 a	4.21±1.14 a
OF	191.00±32.35 a	133.03±29.56 a	61.25±14.36 a	49.57±6.11 a	5.99±1.74 a
KOF	157.25±46.39 ab	109.65±10.25 b	48.13±9.87 a	45.14±0.31 a	6.20±1.78 a
G	125.25±33.67 b	80.90±8.36 c	22.50±7.36 b	45.66±1.86 a	4.88±1.01 a
MG	170.00±17.57 ab	75.63±7.49 c	22.50±6.77 b	46.32±5.20 a	4.99±1.31 a

注：不同字母表示处理间差异显著性($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in the figure indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

于CK均有所降低，降低幅度分别为3.54%、6.38%以及0.71%，而OF的土壤容重则有所上升，上升幅度为2.84%，可以看出，G处理的容重变化幅度最大，但各个处理间无显著差异。OF、G以及MG的土壤团聚体平均重量直径相较于CK处理均有所升高，MG升高的幅度最大，为8.63%，平均重量直径达到5.41 mm，KOF则有所降低，降为4.58 mm，MG和KOF间土壤团聚体平均重量直径的差异达到显著水平($P<0.05$)。

对于土壤生物性质，MG的土壤微生物量碳含量显著高于CK($P<0.05$)，增幅高达43.42%，OF、KOF和G的土壤微生物量碳含量均高于CK，但无显著差异，这3个处理的增幅在24%～38%。KOF的土壤细菌香农指数为9.74，为最高；其次是G和MG，在9.60以上，OF的土壤细菌香农指数为9.53，而CK则未超过9.50(表4)。

表 4　不同肥料投入下有机菜田土壤物理和生物指标比较

Table 4　Soil physical and biological properties of organic vegetable field soil under different fertilizers

处理 Treatment	容重/(g/cm^3) Unit weight	土壤团聚体平均重量直径/mm Average weight diameter of soil aggregates	微生物量碳/(mg/kg) Microbial biomass carbon	细菌香农指数 Bacterial Shannon index
CK	1.41±0.13 a	4.98±0.45 ab	84.71±6.52 b	9.43±0.25 a
OF	1.45±0.07 a	5.00±0.27 ab	85.51±13.12 b	9.53±0.21 a
KOF	1.36±0.09 a	4.58±0.42 b	129.25±6.85 ab	9.74±0.07 a
G	1.32±0.17 a	5.18±0.54 ab	111.60±14.62 b	9.65±0.14 a
MG	1.40±0.13 a	5.41±0.26 a	121.49±7.22 a	9.61±0.09 a

2.3　有机菜田不同肥料投入下土壤质量综合评价

由表5可知，通过聚类分析和相关性分析，已将有机质、速效磷、阳离子交换量、电导率、微生物量碳以及速效钾选入最小数据集，但在第1类指标中，

还存在指标冗余的问题，因此采用主成分分析的方法对第1类指标进行分析。为保证累积贡献率，本次研究选择特征值≥0.7的主成分，并将结果分为3个主成分，三者累积贡献率达67.21%，主成分1特征值的贡献率为25.13%，其中具有高载荷的指标有3个，分别为有机质、平均重量直径和pH。主成分2和3中分别仅有1个指标载荷>0.7，故直接将这2个指标选入最小数据集。通过上述分析，最终从15个土壤理化指标中筛选出有机质、容重、铵态氮、速效磷、阳离子交换量、速效钾、微生物量碳以及电导率8个指标，作为本研究中评价有机菜田土壤质量的最小数据集。最小数据集中各指标的熵值范围为0.783～0.965，其中，土壤电导率熵值最大为0.965，差异最小，对土壤肥力质量评价结果影响性最小；土壤有机质的熵值最小为0.783，差异最大，对土壤肥力质量评价结果影响性最大。权重系数从大到小为：有机质>微生物量碳>速效磷>铵态氮>容重>阳离子交换量>速效钾>电导率（表5）。

表5 不同肥料投入下土壤质量评价最小数据集指标熵值及权重系数

Table 5 Entropy value and weight coefficient of minimum dataset indicators for soil quality evaluation under different fertilizer inputs

指标 Index	熵值 Entropy	权重系数 Weight coefficient
有机质 Organic matter	0.783	0.32
速效钾 Available K	0.960	0.06
速效磷 Available P	0.920	0.12
铵态氮 Ammonium N	0.934	0.10
阳离子交换量 CEC	0.942	0.09
微生物量碳 MBC	0.886	0.17
电导率 EC	0.965	0.05
容重 BD	0.934	0.10

由图1可知，土壤质量指数由高到低依次为：KOF（0.56）>OF（0.52）>G（0.50）>MG（0.48）>CK（0.43）。肥料投入后对有机菜田的土壤质量都有所改善，施加餐厨有机肥相比于商品有机肥，土壤质量指数更高；种植绿肥相比于种植绿肥配施菌剂，土壤质量指数更高。综合来看，施加有机肥后的土壤质量指数大于种植绿肥的处理。

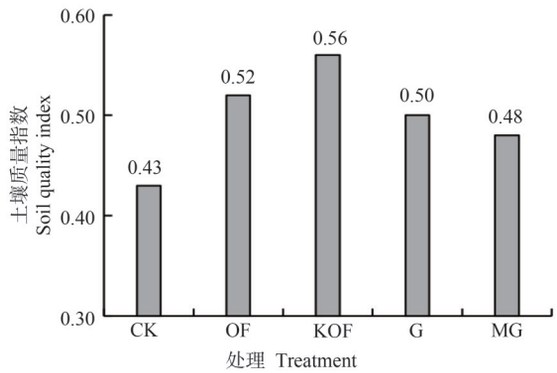

图1 不同肥料投入下各处理土壤质量指数

Fig. 1 Soil quality index of each treatment under different fertilizers

3 讨 论

土壤pH影响着绝大部分土壤养分的有效性，在一定的pH范围内土壤酶和微生物才具有活性[28]。本研究中，施用有机肥会增加土壤pH，而种植绿肥会降低pH。刘国顺等[29]对绿肥翻压后的土壤进行测定发现，翻压的绿肥在分解过程中会产生较多的小分子有机酸，并可降低土壤的pH，这与本研究的结果一致。蔡泽江等[30]在湖南祁阳典型红壤上进行长期不同施肥定位试验18年后也发现，有机肥可以通过相关反应进而提升土壤pH，这也与本研究测定的结果相同。

土壤有机质与土壤碳储存能力直接相关[31]。本研究中，肥料投入对土壤有机质的影响效果依次为，餐厨有机肥（KOF）>商品有机肥（OF）>种植绿肥（G）>种植绿肥配施菌剂（MG）。Gerzabek等[32]运用^{13}C自然丰度方法研究施用有机肥对有机质动态的影响发现，长期施用有机肥可以有效提高土壤有机质含量，而不同种类的有机肥对提高土壤有机质含量的效果存在差异，由高到低为泥炭>淤泥>粪肥>绿肥，有机肥中稳定性碳占比高有利于提升土壤有机质含量，与本研究结果基本一致。

土壤速效养分是指植物可以直接吸收利用的养分，磷和钾均是土壤中重要的养分元素[33-34]。本研究中，施用商品和餐厨有机肥处理均可使土壤速效磷的含量得到显著提升，并且商品有机肥中的磷含量高于餐厨有机肥和绿肥。而绿肥的还田量只

有有机肥的41.6%，因此对土壤有效磷的提升效果低于有机肥。尽管绿肥中铵态氮和有效钾的含量较高，但由于绿肥还田的生物量较低，最终导致绿肥与2种有机肥处理无显著差异。林治安等[35]以山东禹城连续22年的长期施肥定位试验为依据，对历年土壤养分结果进行系统总结时发现，有机肥具有持续提高土壤速效养分含量的作用；张丽琼等[36]的研究也表明，施用有机肥可以提升土壤速效钾含量，可以达到一级水平；未施用有机肥的土壤速效钾含量较低，为二级或三级水平。

有机肥中的盐分含量较高，本研究中电导率、钠离子及氯离子含量在有机肥处理中的含量均远高于绿肥处理，商品和餐厨有机肥施用2年后土壤电导率均达到100 μS/cm以上，但土壤尚未达到轻度盐渍化（电导率＞500 μS/cm）。李尚科等[37]通过盆栽试验系统研究了不同有机肥用量及秸秆用量对设施栽培次生盐渍化土壤的修复效果及对油菜生物量的影响发现，不同有机肥处理后土壤盐分呈先下降后上升的趋势。由此可见，有机肥中的盐分是影响土壤盐渍化程度的重要因素之一，因此，在有机生产体系中应特别注意有机肥的用量和质量。

本研究根据熵权法确定最小数据集中8个指标的权重，得到有机质是影响有机菜田土壤质量的关键因素。这与李鑫等[11]通过对415篇文献统计发现土壤有机质是土壤质量评价中最为核心的指标的结论一致。Xue等[38]在用Meta分析与AHP法结合方法以及主成分分析方法中，同样将有机质作为影响土壤健康评价重要度最高的指标。土壤有机质含量会随环境条件及农业措施的改变而发生显著变化[39]。其中，施加有机肥对土壤有机质含量的影响主要有两方面：一是给作物提供更多养分，进而提高作物生物量，增加土壤中作物的残茬和根的输入；二是给微生物提供养分，提升土壤微生物活性，进而促进有机质降解[40]。

本研究得到的最小数据集，是通过文献查阅、实地试验和多项统计分析相结合所得到的，包含土壤物理、化学及生物性质，可表征土壤的物理特性、养分供应状况和微生物量。因此，最小数据集能够较为全面地代替全体数据集对研究地块土壤质量进行评价，可操作性强，可以有效应用在小尺度有机生产的菜地中，避免指标测定可行性低、指标冗杂等问题。在后续的研究中，还应继续加强最小数据集的应用，进一步扩大数据库，代入多个有机菜田土壤数据，继续优化评价体系。

4　结　论

施用有机肥对土壤性质影响程度大于种植绿肥。施用有机肥对土壤pH、速效磷含量、电导率、钠离子含量以及土壤有机质含量均有显著提升效果；与对照（CK）相比，种植绿肥（G）的各项土壤指标无显著差异。相比于种植绿肥，施加有机肥更有利于提升土壤质量。对筛选出的8个土壤评价最小数据集指标进行熵权对比发现，有机质含量对土壤质量评价结果的影响最大。综上，施加餐厨有机肥（KOF）比商品有机肥（OF）和绿肥（G）更有利于提升有机菜田的土壤质量。

参考文献　Reference

[1] 《腐殖酸》本编辑部. 关注土壤健康，珍视腐植酸贡献：写在“第八届全国土肥和谐大会”召开之际[J]. 腐植酸, 2023(5): 82-83
Humic Acid editorial department. Pay attention to soil health and cherish the contribution of phytic acid - written on the occasion of the "8th National Soil and Fertilizer Coordination Conference" [J]. *Humic Acid*. 2023(5): 82-83 (in Chinese)

[2] Oelofse M, Hogh-Jensen H, Abreu L S, Almeida G F, El-Araby A, Hui Q Y, De Neergaard A. A comparative study of farm nutrient budgets and nutrient flows of certified organic and non-organic farms in China, Brazil and Egypt [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 87(3): 455-470

[3] Martinez-Garcia L B, Korthals G, t Brussaard L, Jorgensen H B, de Deyn G B. Organic management and cover crop species steer soil microbial community structure and functionality along with soil organic matter properties [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 263: 7-17

[4] Crittenden S J, de Goede R G M. Integrating soil physical and biological properties in contrasting tillage systems in organic and conventional farming[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 77: 26-33

[5] 李思萌, 于军, 周正立, 王宏燕, 孙岩, 王玲, 高敬尧. 有机种植对土壤主要理化性质及重金属含量的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 253-257
Li S M, Yu J, Zhou Z L, Wang H Y, Sun Y, Wang L, Gao J Y. Effects of organic planting on the main physical and chemical properties and heavy metal content of soil [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(2): 253-257 (in Chinese)

[6] Wilson C, Zebarth B J, Burton D L, Goyer C, Moreau G, Dixon T. Effect of diverse compost products on potato yield and nutrient availability [J]. *American Journal of Potato Research*, 2019, 96(3): 272-284

[7] Sullivan D M, Bary A I, Nartea T J, Myrhe E A, Cogger C G, Fransen S C. Nitrogen availability seven years after a high-rate food waste compost application[J]. *Compost Science & Utilization*, 2003, 11(3): 265-275

[8] 李正, 刘国顺, 敬海霞, 解昌盛, 向永光, 杨超, 郑文冉, 叶协锋. 翻压绿

肥对植烟土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 225-232
Li Z, Liu G S, Jing H X, Xie C S, Xiang Y G, Yang C, Zheng W R, Ye X F. Effects of green manure application on the microbial biomass C and N contents and of the enzyme activity of tobacco-planting soil[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(3): 225-232 (in Chinese)

[9] 宋莉, 廖万有, 王烨军, 苏有健, 张永利, 罗毅, 孙力. 套种绿肥对茶园土壤理化性状的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 675-679
Song L, Liao W Y, Wang Y J, Su Y J, Zhang Y L, Luo Y, Sun L Effects of interplanting green manure on soil physico-chemical characters in tea plantation[J]. *Soils*, 2016, 48(4): 675-679(in Chinese)

[10] 袁勇, 李小英. 森林类型自然保护区土壤养分综述[J]. 中国农学通报, 2016, 32(5): 75-82
Yuan Y, Li X Y. Summary of soil nutrients in forest type nature reserves [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(5): 75-82 (in Chinese)

[11] 李鑫, 张文菊, 邹磊, 任意, 张骏达, 徐明岗. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043-3056
Li X, Zhang W J, Wu L, Ren Y, Zhang J D, Xu M G. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14): 3043-3056 (in Chinese)

[12] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, Zhao Y C, Sun W X, Gu Z Q. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3-4): 325-334

[13] 陈仕高, 李红梅, 谢雪梅, 李克阳. 一年生作物旱地土壤取样方法研究[J]. 农业研究与应用, 2022, 35(3): 53-58
Chen S G, Li H M, Xie X M, Li K Y. Study on soil sampling techniques in annual crop dryland[J]. *Agricultural Research and Application*, 2022, 35(3): 53-58 (in Chinese)

[14] GB/T 19630-2005 有机产品[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检疫检验总局, 国家标准化管理委员会, 2005.
GB/T 19630-2005 Organic Products [S]. Beijing, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration Committee. 2005 (in Chinese)

[15] NY/T 1 21.4—2006 土壤检测. 第4部分: 土壤容量的测定[S]. 北京:中国农业出版社,2006
NY/T 1 21.4—2006 Soil testing. Part 4: Determination of soil capacity [S]. Beijing:China Agricultural Publish,2006 (in Chinese)

[16] 朱继荣, 祝鹏飞, 束良佐. 连续流动分析法测定土壤硝态氮实验综述报告[J]. 科技视界, 2019, (13): 77-78
Zhu J R, Zhu P F, Shu L Z. Overview of a comprehensive experiment of determining soil nitrate nitrogen by continuous flow analysis[J]. *Science & Technology Vision*, 2019(13): 77-78 (in Chinese)

[17] GT/B42487—2023 土壤质量 土壤硝态氮、亚硝态氮和铵态氮的测定 氯化钾溶液浸提流动分析法[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会,2023
GT/B42487—2023 Soil quality - determination of nitrate nitrogen, nitrite nitrogen and ammonium nitrogen - potassium chloride solution extraction flow analysis method [S]. Beijing: State Administration of market supervision and administration, National Standardization Administration Committee,2023 (in Chinese)

[18] 阳雄宇, 金菲英, 章超, 李坤坪, 闵相云, 杨辉. 火焰光度法测定土壤中速效钾、缓效钾[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(4): 33-35
Yang X Y, Jin F Y, Zhang C, Li K P, Min X Y, Yang H. Determination of available potassium and slow- release potassium in soil by flame photometer[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2023, 38(4): 33-35 (in Chinese)

[19] 陈敏, 潘义宾. 碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定酸性土壤中的速效磷[J]. 农技服务, 2014, 31(9): 63, 75
Chen M, Pan Y B. Determination of available phosphorus in acidic soil by sodium bicarbonate extraction-molybdenum antimony anti-spectrophotometryl [J]. *Agricultural Technology Service*, 2014,31(9): 63, 75 (in Chinese)

[20] 王巧环, 任玉芬, 孟龄, 李虹, 傅慧敏, 王华锋. 元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳[J]. 分析试验室, 2013, 32(10): 41-45
Wang Q H, Ren Y F, Meng L, Li H, Fu H M, Wang H F. Simultaneous determination of total nitrogen and organic carbon in soil with an elemental analyzer[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2013, 32(10): 41-45 (in Chinese)

[21] DB14T1606-2018 土壤阳离子交换量乙酸钠-火焰光度快速测定方法[S]. 太原:山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 2018
DB14T1606-2018 Rapid determination of soil cation exchange capacity sodium acetate flame photometric method [S]. Taiyuan: Institute of agricultural environment and resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, 2018 (in Chinese)

[22] 张月娴, 魏志雄, 王昆鹏. 火焰光度法测定氯化钠注射液中钠的含量[J]. 科技创新导报, 2019, 16(28): 58-59, 64
Zhang Y X, Wei Z X, Wang K P. Determination of sodium in sodium chloride injection by flame spectrophotometry [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2019, 16(28): 58-59, 64 (in Chinese)

[23] 张宁, 郭德立. 硝酸银滴定法测定水中氯离子含量的方法[J]. 山东交通科技, 2016 (6): 93-94, 98
Zhang N, Guo D L. Introduction to silver nitrate titration for chloride ion content determination in water [J]. *Shandong Communications Technology*, 2016(6): 93-94, 98 (in Chinese)

[24] 刘孝义. 土壤物理及土壤改良研究法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982
Liu X Y. *Research Method of Soil Physics and Soil Improvement Research Method* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1982 (in Chinese)

[25] 袁野, 王浩, 罗洋, 隋鹏祥, 李瑞平, 郑洪兵, 朴锦, 刘武仁, 郑金玉. 基于最小数据集评价耕作方式对黑土农田土壤质量的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(4): 148-57
Yuan Y, Wang H, Luo Y, Sui P X, Li R P, Zheng H B, Pu J, Liu W R, Zheng J Y. Evaluate the impact of Tillage Methods on black soil farmland soil quality based on the minimum data set[J]. *Journal of Maize Science*, 2023, 31(4): 148-57 (in Chinese)

[26] 王淑琴, 罗珠珠, 牛伊宁, 蔡立群, 刘家鹤, 李林芝. 基于最小数据集的黄土高原半干旱区苜蓿地土壤质量评价[J]. 中国草地学报, 2023, 45(7): 81-90
Wang S Q, Luo Z Z, Niu Y N, Cai L Q, Liu J H, Li L Z. Soil quality evaluation of alfalfa field in semi-arid area of Loess Plateau Based on minimum data set[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(7): 81-90 (in Chinese)

[27] 宋洪炳, 郭伟玲. 基于最小数据集的江淮丘陵区土壤质量综合评价[J]. 农业与技术, 2023, 43(12): 93-98
Song H B, Guo W L. Comprehensive evaluation of soil quality in Jianghuai hilly area based on minimum data set [J]. *Agriculture and Technology*,2023, 43(12): 93-98(in Chinese)

[28] 王响玲, 夏浩, 李宇轩, 王吉元, 夏晓阳, 张凤华, 姜存仓. 施用生物炭对2种典型土壤养分有效性及肥力特征的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 158-167

Wang X L, Xia H, Li Y X, Wang J Y, Xia X Y, Zhang F H, Jiang C C. Effects of biochar application on nutrient availability and fertility characteristics of two typical soils[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(5): 158-167 (in Chinese)

[29] 刘国顺，罗贞宝，王岩，李洪亮，王国锋，马京民．绿肥翻压对烟田土壤理化性状及土壤微生物量的影响[J]．水土保持学报，2006，20(1)，95-98
Liu G S, Luo Z B, Wang Y, Li H L, Wang G F, Ma J M. Effect of green manure application on soil properties and soil microbial biomass in tobacco field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 95-98 (in Chinese)

[30] 蔡泽江，孙楠，王伯仁，徐明岗，黄晶，张会民．长期施肥对红壤pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]．植物营养与肥料学报，2011，17(1)：71-78
Cai Z J, Sun N, Wang B R, Xu M G, Huang J, Zhang H M. Effects of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorous and potassium[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(1): 71-78 (in Chinese)

[31] 程海富．土壤碳储存与农业生态系统[J]．当代农机，2023 (7)：10-12
Cheng H F. Soil carbon storage and agro-ecosystem[J]. *Contemporary Farm Machinery*, 2023 (7): 10-12 (in Chinese)

[32] Gerzabek M H, Haberhauer G, Kirchmann H. Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(2): 352-358

[33] Ma G Z, Cheng S H, He W L, Dong Y X, Qi S W, Tu N M, Tao W X. Effects of organic and inorganic fertilizers on soil nutrient conditions in rice fields with varying soil fertility[J/OL]. *Land*, (2023-05-07). DOI: doi.org/10.3390/land12051026

[34] 张泽洲，王冬梅，李梦寻．干湿交替程度对土壤速效养分的影响[J]．水土保持学报，2021，35(2)：265-270
Zhang Z Z, Wang D M, Li M X. Effect of drying-rewetting intensity on soil nutrient availability [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 265-270 (in Chinese)

[35] 林治安，赵秉强，袁亮，Hwat Bing-So. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]．中国农业科学，2009，42(8)：2809-2819
Lin Z A, Zhao B Q, Yuan L, BingSo H. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2809-2819 (in Chinese)

[36] 张丽琼．长期轮作与施肥对土壤肥力的影响及其综合评价[D]．杨凌：西北农林科技大学，2016
Zhang L Q. The Effect of long-term rotation and fertilization to soil fertility and its comprehensive evaluation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016 (in Chinese)

[37] 李尚科，沈根祥，郭春霞，钱晓雍，顾海蓉．有机肥及秸秆对设施菜田次生盐渍化土壤修复效果研究[J]．广东农业科学，2012，39(2)：60-62，73
Li S K, Shen G X, Guo C X, Qian X Y, Gu H R. Effect of manure and straw on secondary salinity soil of greenhouse [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39(2): 60-62, 73 (in Chinese)

[38] Xue R, Wang C, Liu M L, Zhang D, Li K L, Li N. A new method for soil health assessment based on analytic hierarchy process and meta-analysis[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2771-2777

[39] 武天云，J. Schoenau J，李凤民，钱佩源，张树清，S. Malhi S，王方．土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]．应用生态学报，2004，4：717-722
Wu T Y, J. Schoenau J, Li F M, Qian P Y, Zhang S Q, S. Malhi S, Wang F. Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 717-722 (in Chinese)

[40] Six J, Feller C, Denef K, Ogle S M, de Moraes J C M, Albrecht A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: Effects of no-tillage[J]. *Agronomie*, 2002, 22(7-8): 755-775

责任编辑：吕晓梅

第一作者简介：王相宜，硕士研究生，就读于中国农业大学资源与环境学院资源利用与植物保护专业。参与国家重点研发计划(2023YFE0104700)，获得中国农业大学校级硕士一等学业奖学金。

通讯作者简介：乔玉辉，博士生导师，中国农业大学资源与环境学院教授，主要从事有机和生态农业方面的教学和科研工作，系统评估我国有机农业的环境和社会经济效益，连续多年主持编写《中国有机产品认证与有机产业发展》报告，参与制订或者修订国家及行业有机产品和生态农场标准。