

化肥配施蚯蚓粪对韭菜生长和土壤理化性质的影响

徐博涵, 张卫杰, 庄秋丽, 梁路, 田开月, 尹坤, 莫海洋, 张东辉, 黄玉波

(周口市农业科学院 466001 河南周口)

摘要:为优化韭菜施肥方案,以不施肥(CK1)和单施复合肥(CK2)为对照,研究了复合肥配施有机肥(T1)、复合肥配施不同量蚯蚓粪(T2-T6)对韭菜生长指标、品质指标和土壤理化性质的影响。结果表明,与CK1和CK2相比,T1(750 kg·hm⁻²复合肥+15 000 kg·hm⁻²有机肥)土壤呼吸作用强度分别显著升高96.51%、48.75%,土壤中有有效磷含量分别显著增加589.24%、164.59%,土壤中速效钾含量分别显著增加37.51%、15.96%;T5(750 kg·hm⁻²复合肥+45 000 kg·hm⁻²蚯蚓粪)株幅分别显著增加26.86%、9.45%,茎粗分别显著增加20.59%、13.89%,单株质量分别显著增加64.71%、27.27%,可溶性糖含量分别显著增加64.71%、21.74%,硝酸盐含量分别显著降低45.96%、21.11%,脲酶活性分别显著升高13.48%、12.96%,土壤中有有效磷含量分别显著增加935.63%、297.56%,有机质含量分别显著增加24.28%、22.21%;T6(750 kg·hm⁻²复合肥+60 000 kg·hm⁻²蚯蚓粪)韭菜产量分别显著增加130.85%、41.45%,硝酸盐含量分别显著降低45.35%、20.22%,可溶性糖含量分别显著增加55.88%、15.22%,碱性磷酸酶活性分别显著升高9.74%、15.64%,有效磷含量分别显著增加1 105.11%、362.63%,有机质含量分别显著增加24.54%、22.46%。主成分分析和TOPSIS综合评价结果显示T6综合效果最优,T5和T1次之。建议750 kg·hm⁻²复合肥+45 000 kg·hm⁻²蚯蚓粪有效替代商品有机肥在韭菜生产中推广应用。

关键词:韭菜;化肥;蚯蚓粪;生长;土壤理化性质

中图分类号:S633.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)09-203-08

Effects of chemical fertilizer combined with vermicompost on the growth of Chinese chives and soil physicochemical property

Xu Bohan, Zhang Weijie, Zhuang Qiuli, Liang Lu, Tian Kaiyue, Yin Kun, Mo Haiyang, Zhang Donghui, Huang Yubo

(Zhoukou Academy of Agricultural Sciences, Zhoukou 466001, Henan, China)

Abstract: To optimize the fertilization scheme for Chinese chives, this study used no fertilizer (CK1) and compound fertilizer alone (CK2) as controls, and established treatments including compound fertilizer combined with organic fertilizer (T1, 750 kg·hm⁻² compound fertilizer + 15 000 kg·hm⁻² organic fertilizer) and compound fertilizer combined with different amounts of vermicompost (T2-T6, with a low-to-high gradient of vermicompost). Growth index, quality index of Chinese chives, and soil physical and chemical property were systematically measured. The results showed that compared with CK1 and CK2, treatment T1 significantly increased soil respiration content by 96.51% and 48.75%, significantly increased the available phosphorus content by 589.24% and 164.59%, and increased available potassium content by 37.51% and 15.96%. Under treatment T5 (750 kg·hm⁻² compound fertilizer + 45 000 kg·hm⁻² vermicompost), the plant spread of Chinese chives significantly increased by 26.86% and 9.45%, stem diameter increased by 20.59% and 13.89%, single-plant mass increased by 64.71% and 27.27%, soluble sugar content increased by 64.71% and 21.74%, nitrate content decreased by 45.96% and 21.11%, soil urease activity increased by 13.48% and 12.96%, soil available phosphorus content increased significantly by 935.63% and 297.56%, and soil organic matter content increased by 24.28% and 22.21%. Under treatment T6 (750 kg·hm⁻² compound fertilizer + 60 000 kg·hm⁻² vermicompost), the yield of Chinese chives significantly increased by 130.85% and 41.45%, nitrate content decreased by 45.35% and 20.22%, soluble sugar content increased by 55.88% and 15.22%, alkaline phosphatase activity increased by 9.74% and 15.64%, available phosphorus content increased by 1 105.11% and 362.63%, and organic matter content increased by 24.54% and 22.46%, respectively, compared with CK1 and CK2. Through comprehensive evaluation using principal component analysis combined with the

收稿日期:2026-05-14;修回日期:2026-08-18

基金项目:河南省科技研发计划联合基金(235101610071)

作者简介:徐博涵,女,助理研究员,主要从事植物营养和土壤肥料研究。E-mail:957976160@qq.com

通信作者:黄玉波,男,副研究员,主要从事植物营养与高效施肥研究。E-mail:286932434@qq.com

TOPSIS method, treatment T6 exhibited the best overall performance, followed by T5 and T1. Considering both fertilizer efficacy phenotypes and input costs, it is recommended that the combination of 750 kg·hm⁻² compound fertilizer with 45 000 kg·hm⁻² vermicompost (T5) was promoted and applied in Chinese chives production as an effective alternative to commercial organic fertilizer.

Key words: Chinese chives; Chemical fertilizer; Vermicompost; Growth; Soil physical and chemical property

韭菜 (*Allium tuberosum* Rottler ex Sprengle) 隶属于石蒜科葱属, 为多年生草本植物, 营养非常丰富, 不仅含有脂肪、蛋白质、碳水化合物、纤维素、胡萝卜素等营养物质, 还含有硫化物、黄酮类、皂苷类等有机成分, 具有解热散毒、固本调经、促进肠胃蠕动的功效^[1-2], 是具有食药兼用价值的蔬菜^[3]。我国韭菜种植历史悠久, 是一种重要的特色蔬菜作物, 为居民蔬菜消费的重要品类, 全国各地均有种植, 其中山东、河南、河北种植面积较大^[4-6]。韭菜的消费需求逐年增长, 消费者对韭菜的品质、口感以及安全性的要求也日益严格。但韭菜病虫害多样, 并且长期连作导致疫病、灰霉病、韭蛆等高发, 种植户为了追求高产高收益, 往往过量投入化肥农药, 导致韭菜农药残留超标、品质下降或肥料回报率降低^[7]。这与人们生活水平的提高以及对健康饮食的追求不相符, 再者化肥大量投放还会引起土壤养分失衡、盐碱化、农作物品质下降、生态环境恶化等问题。有机肥的施用能够提高韭菜的抗性^[8], 有利于减少病虫害发生, 长期施用有机肥可逐步提高土壤肥力, 减少化肥施用量, 改善土壤结构。因此, 在生产中优化和调整施肥结构, 是实现农业优质安全生产的有效途径。

蚯蚓粪也可称之为饲蚓固废, 是蚯蚓将有机物质消化后的排泄物, 不但富含氮、磷、钾, 有机物种类多达 65 种, 而且含有大量真菌、细菌等微生物和活性酶、氨基酸、细胞分裂素、生长素等活性成分^[9-11]。蚯蚓粪作为肥料具有疏松多孔、团粒结构均匀、表面积大、通气性好、保水性强等优良特点。我国蚯蚓养殖业自 20 世纪 80 年代兴起, 北京、山东、天津、河北等地都建有不同规模的蚯蚓养殖场, 年产量达几十万吨^[12]。吴东升等^[13]研究表明, 施用蚯蚓发酵液能促进枸杞营养生长, 提高产量, 改善品质。刘丽等^[14]研究表明, 蚯蚓粪和化肥不同比例配施能提高大豆产量和品质。李啸峰等^[15]研究发现, 蚯蚓粪有机肥与生物炭配施可降低 Cd 生物有效性、协同改善土壤环境以及优化微生物群落结构, 同步实现玉米安全生产与污染土壤修复。沈家乐等^[16]研究表明, 施用蚯蚓粪可改良盐碱稻田土壤性质并能促进水稻生长。黄玉波等^[17]研究表明,

施用 6% 蚯蚓粪能够促进小白菜生长并提高其品质、土壤肥力及微生物生物量。适宜的蚯蚓粪用量不仅可以促进作物生长, 提高产量, 改善品质, 增加经济效益, 同时, 蚯蚓粪含有的微生物、酶类等活性物质还能够抑制土壤的盐渍化和酸化。可见, 蚯蚓粪可作为优质肥料和土壤改良剂来提升地力、促进植物生长, 对农业高效持续性发展具有重要意义。

关于蚯蚓粪在韭菜方面的研究报道较少, 尤其是关于蚯蚓粪有机肥对土壤肥力与韭菜生长、品质的研究报道较少。为此, 本研究以韭菜为供试材料, 探讨化肥配施不同比例的蚯蚓粪对韭菜生长、产量及品质的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

供试韭菜品种为韭仙子, 由河南绿久农业科技有限公司提供。蚯蚓粪为蚯蚓吞食牛粪后的产物, 由河南悯农生物技术有限公司提供, 有机质含量 (w, 后同) 193.86 g·kg⁻¹, 全氮含量 8.66 g·kg⁻¹, 全磷含量 16.71 g·kg⁻¹, EC 1.22 mS·cm⁻¹, pH 7.58。复合肥由新洋丰农业科技股份有限公司生产, 具体含量: N-P₂O₅-K₂O=15-15-15; 有机肥由漯河双汇万中禽业发展有限公司生产, 具体成分为: (N+P₂O₅+K₂O) 含量≥5.0%, 有机质含量≥45.0%, 游离性腐植酸含量≥15.0%, 水溶性腐植酸含量≥15.0%, 生物菌 0.3 亿·g⁻¹。

1.2 试验设计

试验于 2024 年 7—10 月在周口市农业科学院进行, 采用随机区组设计, 共设 8 个处理, 每个处理 3 次重复, 每个重复 1 盆, 栽培用土来自田间 0~20 cm 耕层土壤, 自然风干后过 1 cm 筛子, 按照表 1 分别混入不同量的化肥、有机肥或蚯蚓粪, 每盆装物料 80 kg。其中, CK1 为不施肥、CK2 为单施复合肥、T1 为复合肥配施有机肥、T2~T6 为复合肥配施不同量蚯蚓粪, 所有处理田间管理措施相同 (表 1)。2024 年 7 月 14 日将定植 4 个月的春播韭菜从育苗田挖出, 保留 5 cm 左右的根长与 6 cm 左右的假茎, 移栽入塑料盆中, 塑料盆大小为 70 cm×40 cm×

处理 Treatment	复合肥用量 Compound fertilizer rate/(kg·pot ⁻¹)	复合肥用量 Compound fertilizer rate/(kg·hm ⁻²)	有机肥用量 Organic fertilizer rate/(kg·pot ⁻¹)	有机肥用量 Organic fertilizer rate/(kg·hm ⁻²)	蚯蚓粪用量 Vermicompost rate/(kg·pot ⁻¹)	蚯蚓粪用量 Vermicompost rate/(kg·hm ⁻²)
CK1	0	0	0	0	0	0
CK2	0.021	750	0	0	0	0
T1	0.021	750	0.42	15 000	0	0
T2	0.021	750	0	0	0.21	7 500
T3	0.021	750	0	0	0.42	15 000
T4	0.021	750	0	0	0.84	30 000
T5	0.021	750	0	0	1.26	45 000
T6	0.021	750	0	0	1.68	60 000

26 cm,每盆 2 行,每行 12 穴,行距 33 cm,株距 5 cm,土深 20 cm。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 生长指标测定 分别于 8 月 22 日、9 月 23 日、10 月 30 日共收割三茬韭菜,收割前每盆随机选择 10 穴韭菜,使用直尺测定株高(茎基部至伸直最高点)、叶长(假茎以上叶片长度)、假茎长,游标卡尺测定叶宽(叶片最大宽度)、茎粗(地上部 3 cm)、株幅,收割后测定单株质量和每盆产量^[18],使用 SPAD-502 Plus 手持便携式叶绿素仪测定叶片叶绿素相对含量(SPAD 值)^[19]。

1.3.2 生理指标测定 收割韭菜称鲜质量后用蒸馏水冲洗干净,擦干表面水分。3 次重复混合均匀后平均分为两份,一份冰箱冷藏,用于测定硝酸盐、维生素 C、可溶性糖含量;一份于 105 ℃杀青,75 ℃烘干,粉碎过 100 目筛,用于植株养分测定。采用水杨酸法测定硝酸盐含量^[20],采用 2,4-二硝基苯肼比色法测定维生素 C 含量^[21],采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[22]。采用 H₂SO₄ 消煮凯氏定氮法测定韭菜植株全氮含量,采用钼锑抗比色法测定全磷含量,采用火焰光度计法测定全钾含量^[23]。使用北京普析通用仪器有限公司生产的 T6 新世纪紫外可见分光光度计进行比色分析,使用上海傲普分析仪器有限公司生产的 FP640 火焰光度计测定钾含量。

1.3.3 土壤理化性质测定 韭菜收割后使用土壤取样器在两行间区域均匀设置 3 个采样点,取 0~10 cm 土壤,将同一处理的 3 次重复土样均匀混合后平均分成 2 份,进行土壤呼吸作用强度、土壤酶活性和土壤养分含量测定。采用苯酚钠比色法测定脲酶活性,采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性,采用磷酸苯二钠比色法测定碱性磷酸酶活性^[24],采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活

性^[25]。采用室内密闭培养法测定各处理的土壤呼吸作用强度,采用碱性扩散法测定土壤碱解氮含量,采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量,采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定土壤速效钾含量,采用重铬酸钾法测定土壤有机质含量^[23]。

1.4 数据处理与分析

各指标均为三茬韭菜的平均值,采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理与图表制作,采用 SPSS 25.0 进行方差分析、灰色关联度分析、相关性分析、主成分分析(principal component analysis, PCA)和 Topsis 综合评价。依据公式(1)计算特征值大于 1、累计贡献率超过 80%的前几个主成分的综合值,根据综合值评价各处理的综合效果。

$$y_{\text{综}} = \sum_{i=1}^n (\lambda_i/p) \times y_i \quad (1)$$

其中 λ_i 是第 i 个主成分的特征值, p 为变量数, y_i 是该施肥处理第 i 个主成分的得分, $y_{\text{综}}$ 表示该施肥处理的综合得分。

2 结果与分析

2.1 不同肥料对比对土壤理化性质影响

从表 2 可以看出,不同肥料配比处理下,土壤理化性质存在差异。脲酶活性变化幅度为 447.6~516.0 mg·g⁻¹·d⁻¹,其中 T5 处理脲酶活性最高,较 CK1 和 CK2 分别显著升高 13.48%和 12.96%。过氧化氢酶活性变化幅度为 0.77~0.88 mL·g⁻¹·h⁻¹,其中 CK1 过氧化氢酶活性最高,为 0.88 mL·g⁻¹·h⁻¹,显著高于其他处理,T6 处理过氧化氢酶活性最低,为 0.77 mL·g⁻¹·h⁻¹。蔗糖酶活性变化幅度为 174.56~210.01 mg·g⁻¹·d⁻¹,不同处理之间差异不显著。碱性磷酸酶活性变化幅度为 409.11~473.08 mg·g⁻¹·d⁻¹,T6 处理碱性磷酸酶活性最高,为 473.08 mg·g⁻¹·d⁻¹,

表 2 不同肥料配比对土壤理化性质影响
Table 2 Effects of different fertilizer ratios on the soil physicochemical properties

处理 Treat- ment	脲酶活性 Urease activity/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	过氧化氢酶 活性 Catalase activity/ (mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	蔗糖酶活性 Sucrase activity/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	碱性磷酸酶 活性 Alkaline phos- phatase activity/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	土壤呼吸 作用强度 Soil respira- tion intensity/ (mL·kg ⁻¹)	w(碱解氮) Alkaline hydroly- zable nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phos- phorus content/ (mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Fast acting potassium content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有机质) Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)
CK1	454.7 bc	0.88 a	174.56 a	431.08 bc	60.71 c	67.07 c	5.67 d	168.71 d	7.66 d
CK2	456.8 bc	0.82 b	185.60 a	409.11 c	80.20 bc	73.07 abc	14.77 cd	200.06 bc	7.79 cd
T1	505.6 ab	0.81 bc	196.40 a	440.45 b	119.30 a	78.28 a	39.08 b	231.99 a	8.16 c
T2	474.6 abc	0.82 b	210.01 a	438.98 b	78.16 bc	69.79 bc	18.32 cd	179.83 cd	8.03 cd
T3	461.4 bc	0.81 bc	202.09 a	442.67 ab	83.79 abc	76.92 ab	24.65 c	183.77 bcd	8.17 c
T4	447.6 c	0.81 bc	202.83 a	447.01 ab	87.48 abc	75.34 ab	41.18 b	197.51 bc	8.92 b
T5	516.0 a	0.80 bc	183.33 a	446.84 ab	90.75 abc	79.19 a	58.72 a	205.17 b	9.52 a
T6	456.9 bc	0.77 c	187.81 a	473.08 a	110.00 ab	77.60 ab	68.33 a	193.89 bc	9.54 a

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column represent significant difference at 0.05 level. The same below .

较 CK1 和 CK2 分别显著升高 9.74%和 15.64%。土壤呼吸作用强度变化幅度为 60.71~119.30 mL·kg⁻¹, T1 处理土壤呼吸作用强度最强,为 119.30 mL·kg⁻¹, 较 CK1 和 CK2 分别显著增加 96.51%和 48.75%。土壤中碱解氮含量变化幅度为 67.07~79.19 mg·kg⁻¹, T5 处理土壤中碱解氮含量最高,为 79.19 mg·kg⁻¹, 较 CK1 显著增加 18.07%。土壤中有效磷含量变化幅度为 5.67~68.33 mg·kg⁻¹,其中 T6 处理有效磷含量最高,为 68.33 mg·kg⁻¹,较 CK1 和 CK2 分别显著增加 1 105.11%和 362.63%。土壤中速效钾含量变化幅度为 168.71~231.99 mg·kg⁻¹,其中 T1 处理含量最高,为 231.99 mg·kg⁻¹,较 CK1 和 CK2 分别显著增加 37.51%和 15.96%。有机质含量变化幅度为 7.66~9.54 g·kg⁻¹,其中 T6 处理土壤中有机质含量最高,为 9.54 g·kg⁻¹,较 CK1 和 CK2 分别显著增加 24.54%和 22.46%。

2.2 不同肥料配比对韭菜生长指标的影响

不同肥料配比对韭菜生长指标的影响不同(表

3)。株高变化幅度 23.4~29.8 cm,其中 T5 株高最高,为 29.8 cm,较 CK1 和 CK2 增加 27.35%和 5.30%,CK1 株高最低,为 23.4 cm,显著地低于其他处理,CK2、T1~T6 等不同处理之间株高差异不显著。株幅变化幅度 28.3~35.9 cm,其中 T5 处理株幅最大,为 35.9 cm,较 CK1 和 CK2 分别显著增加 26.86%和 9.45%,所有施肥处理株幅都显著高于 CK1,T1~T6 不同处理之间株幅差异不显著。假茎长变化幅度 4.2~5.4 cm,其中 CK2 假茎长最长,为 5.4 cm,显著高于 CK1,CK2、T1~T6 不同处理之间假茎长差异不显著。茎粗变化幅度为 3.4~4.1 mm,其中 T5 处理茎粗最大,为 4.1 mm,较 CK1 和 CK2 显著增加 20.59%和 13.89%。叶长变化幅度 20.4~25.1 cm,其中 T6 和 T1 叶长最长,均为 25.1 cm,较 CK1 显著增加 23.04%。叶宽变化幅度 4.2~5.1 mm, T6 和 T2 分别较 CK1 显著增加 21.43%和 19.05%,其他处理之间叶宽差异不显著。单株质量变化幅度为 1.7~2.8 g,T5 处理单株质量最大,为 2.8 g,较

表 3 不同肥料配比对韭菜生长指标的影响
Table 3 Effects of different fertilizer ratios on growth traits of Chinese chives

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	株幅 Plant width/cm	假茎长 Pseudostem length/cm	茎粗 Stem diameter/mm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/mm	单株质量 Mass per plant/g	SPAD 值 SPAD value	产量 Yield/g
CK1	23.4 b	28.3 c	4.2 b	3.4 c	20.4 b	4.2 b	1.7 c	51.9 b	139.4 c
CK2	28.3 a	32.8 b	5.4 a	3.6 bc	23.2 a	4.6 ab	2.2 bc	58.6 a	227.5 b
T1	29.1 a	34.8 ab	5.0 ab	3.9 ab	25.1 a	4.6 ab	2.5 ab	59.8 a	309.7 a
T2	27.4 a	33.8 ab	4.8 ab	4.0 a	23.6 a	5.0 a	2.7 ab	58.1 a	261.8 ab
T3	28.2 a	33.9 ab	4.4 ab	3.9 ab	22.9 ab	4.7 ab	2.6 ab	59.8 a	261.1 ab
T4	28.8 a	33.5 ab	4.9 ab	3.9 ab	23.9 a	4.9 ab	2.7 ab	60.7 a	266.3 ab
T5	29.8 a	35.9 a	5.2 ab	4.1 a	24.1 a	4.8 ab	2.8 a	62.1 a	266.5 ab
T6	28.9 a	34.5 ab	4.9 ab	4.0 a	25.1 a	5.1 a	2.7 ab	62.0 a	321.8 a

CK1 和 CK2 显著增加 64.71%和 27.27%,CK1 单株质量最低,为 1.7 g,显著低于 T1~T6 处理。SPAD 值变化幅度为 51.9~62.1,T5 处理 SPAD 值最高,为 62.1,CK1 处理 SPAD 值最低,为 51.9,CK2、T1~T6 不同处理之间 SPAD 值差异不显著,但都显著高于 CK1。产量变化幅度为 139.4~321.8 g,其中 T6 产量最高,为 321.8 g,较 CK1 和 CK2 显著增加 130.85%和 41.45%,T1~T6 之间产量差异不显著,但都显著高于 CK1。

2.3 不同肥料配比对韭菜品质指标的影响

从表 4 可以看出,不同施肥处理下,韭菜品质指标存在差异。硝酸盐含量变化幅度为 513.2~949.6 mg·kg⁻¹,其中 CK1 最高,为 949.6 mg·kg⁻¹,

T5 处理硝酸盐含量最低,为 513.2 mg·kg⁻¹。维生素 C 含量变化幅度为 776.0~938.0 mg·kg⁻¹,不同处理之间差异不显著,其中 T1 处理维生素 C 含量最高,为 938.0 mg·kg⁻¹,CK1 含量最低,为 776.0 mg·kg⁻¹。可溶性糖含量变化幅度为 3.4~5.6 mg·g⁻¹,其中 T5 处理含量最高,为 5.6 mg·g⁻¹,CK1 含量最低,为 3.4 mg·g⁻¹。植株全氮含量变化幅度为 32.0~35.7 g·kg⁻¹,T6 处理最高,较 CK1 显著增加 11.56%,其他处理之间全氮含量差异不显著。全磷含量变化幅度为 0.53~0.61 g·kg⁻¹,不同处理之间差异不显著。植株全钾含量变化幅度为 4.4~4.9 g·kg⁻¹,其中 T1 和 T4 全钾含量最高,均为 4.9 g·kg⁻¹,均较 CK1 显著增加 11.36%,其

表 4 不同肥料配比对韭菜品质指标的影响
Table 4 Effects of different fertilizer ratios on quality indicators of Chinese chives

处理 Treatment	w(硝酸盐) Nitrate content/(mg·kg ⁻¹)	w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·kg ⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/(mg·g ⁻¹)	w(全氮) Total nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	w(全磷) Total phosphorus content/(g·kg ⁻¹)	w(全钾) Total potassium content/(g·kg ⁻¹)
CK1	949.6 a	776.0 a	3.4 d	32.0 b	0.61 a	4.4 b
CK2	650.5 cd	914.7 a	4.6 bc	32.6 ab	0.58 a	4.6 ab
T1	720.0 bc	938.0 a	5.3 a	33.3 ab	0.57 a	4.9 a
T2	560.8 de	933.8 a	4.1 c	34.2 ab	0.54 a	4.7 ab
T3	633.3 cd	827.0 a	5.0 ab	34.1 ab	0.54 a	4.8 ab
T4	781.9 b	846.1 a	4.4 bc	34.0 ab	0.53 a	4.9 a
T5	513.2 e	930.8 a	5.6 a	33.7 ab	0.53 a	4.8 ab
T6	519.0 e	919.2 a	5.3 a	35.7 a	0.53 a	4.8 ab

他处理之间差异不显著。

2.4 主成分分析

由表 5 可知,经主成分分析得到特征值大于 1、累计贡献率达到 90.184 2 的主成分有 4 个,包含了韭菜生长指标、品质指标和土壤理化性质的大部分信息。

主成分分析综合值表明(表 6),8 个肥料配比处理中综合效果最好的是 T6,其次是 T5 和 T1,其先后顺序依次为 T6>T5>T1>T4>T3>T2>CK2>

CK1。说明 750 kg·hm⁻²复合肥配施 60 000 kg·hm⁻²蚯蚓粪对韭菜总体效果最好,其次是 750 kg·hm⁻²复合肥配施 45 000 kg·hm⁻²蚯蚓粪,750 kg·hm⁻²复合肥配施 15 000 kg·hm⁻²有机肥位居第 3。

2.5 TOPSIS 综合评价

以硝酸盐含量为优劣指标,采用 TOPSIS 法对 8 个处理进行综合评价,从表 7 可知,与正理想距离较近的处理是 T6 和 T5,与负理想距离较远的处理是 T6 和 T5,综合得分顺序依次为 T6>T5>T1>T4>T3>T2>CK2>CK1,说明 750 kg·hm⁻²复合肥配施 60 000 kg·hm⁻²蚯蚓粪对韭菜总体效果最好,其次是 750 kg·hm⁻²复合肥配施 45 000 kg·hm⁻²蚯蚓粪,750 kg·hm⁻²复合肥配施 15 000 kg·hm⁻²有机肥位居第 3,与主成分分析结果一致。

2.6 灰色关联度分析和相关性分析

以韭菜产量为母序列,令 Δ_{min}=0,分辨系数 0.1,均值化转换后进行灰色关联度分析,研究韭菜生长指标、品质指标和土壤理化性质与韭菜产量的关

表 5 主成分分析特征值和贡献率
Table 5 Principal component eigenvalue and contribution rate

项目 Item	PC1	PC2	PC3	PC4
特征值 Eigenvalue	16.028 5	3.427 2	1.794 7	1.286 6
贡献率 Contribution rate/%	64.113 8	13.708 9	7.178 9	5.146 6
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	64.113 8	77.822 7	85.001 6	90.148 2

表 6 主成分分析综合值
Table 6 Comprehensive value of principal component analysis

处理 Treatment	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	综合值分 Comprehensive value	排名 Rank
CK1	-9.213 3	-0.461 9	1.426 3	-0.264 2	-5.881 5	8
CK2	-2.179 5	2.240 3	-0.962 3	-0.417 7	-1.180 8	7
T1	2.145 5	3.083 5	0.310 9	1.711 6	1.908 7	3
T2	-0.042 1	-1.009 9	-2.785 4	-0.834 8	-0.408 4	6
T3	0.055 4	-1.075 1	-0.541 0	0.440 6	-0.128 0	5
T4	1.209 2	-2.302 1	0.055 5	1.739 7	0.553 2	4
T5	3.610 3	1.357 8	0.991 6	-1.623 9	2.488 5	2
T6	4.414 6	-1.832 5	1.504 5	-0.751 3	2.648 5	1

表 7 TOPSIS 综合评价
Table 7 Comprehensive evaluation of TOPSIS

处理 Treatment	D^+	D^-	CI	名次 Rank
CK1	0.772 0	0.039 3	0.048 5	8
CK2	0.561 1	0.282 0	0.334 5	7
T1	0.309 2	0.534 2	0.633 4	3
T2	0.517 7	0.355 1	0.406 9	6
T3	0.461 0	0.366 6	0.443 0	5
T4	0.354 1	0.453 4	0.561 5	4
T5	0.179 7	0.645 1	0.782 1	2
T6	0.113 6	0.735 3	0.866 2	1

联关系,按关联系数高低排序(表 8)。与韭菜产量关联度位于前 10 位的性状依次为叶长>土壤呼吸作用强度>叶宽>株幅>全钾含量>碱解氮含

表 8 产量与其他性状的灰色关联系数和相关系数
Table 8 Grey correlation coefficient and correlation coefficient between yield and other characters

序号 No.	因子 Factor	灰色关联系数 Grey correlation coefficient	相关系数 Correlation coefficient
1	叶长 Leaf length	0.756 8	0.970**
2	土壤呼吸作用强度 Soil respiration intensity	0.634 1	0.895**
3	叶宽 Leaf width	0.627 4	0.784*
4	株幅 Plant width	0.622 1	0.889**
5	全钾含量 Total potassium content	0.613 1	0.887**
6	碱解氮含量 Alkaline hydrolyzable nitrogen content	0.571 5	0.799*
7	SPAD 值 SPAD value	0.560 9	0.886**
8	株高 Plant height	0.550 1	0.864**
9	茎粗 Stem diameter	0.546 9	0.838**
10	碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity	0.535 4	0.612

注:*表示在 0.05 水平显著相关,**表示在 0.01 水平极显著相关。
Note: * indicates significant correlation at 0.05 level, ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level.

量>SPAD 值>株高>茎粗>碱性磷酸酶活性。为深入了解韭菜产量与叶长、土壤呼吸作用强度、叶宽、株幅、全钾含量、碱解氮含量、SPAD 值、株高、茎粗和碱性磷酸酶活性之间的关系,进一步进行相关性分析,结果表明,韭菜产量与叶长($R=0.970$)、土壤呼吸作用强度($R=0.895$)、株幅($R=0.889$)、全钾含量($R=0.887$)、SPAD 值($R=0.886$)、株高($R=0.864$)和茎粗($R=0.838$)均呈极显著正相关,与叶宽($R=0.784$)和碱解氮含量($R=0.799$)均呈显著正相关。

3 讨论与结论

近年来,针对种植业的发展现状,我国大力倡导科学施肥,减少化肥用量。已有研究表明,合理配施可以实现作物优质高产^[26-29]。本研究结果表明,商品有机肥和蚯蚓粪均能促进韭菜生长、提高品质,同时优化土壤环境、增加土壤肥力。这与马红艳等^[26]、黄娜等^[30]的研究结果一致,不同种类的有机肥均能改善土壤环境、促进韭菜生长,实现产量和品质的提高。刘家玮等^[31]的研究表明,微生物菌肥与化肥配合施用还可以抑制韭菜迟眼蕈蚊的发生。

前人研究表明,蚯蚓粪、鸡粪等有机肥能改善土壤理化性质、丰富微生物菌群和提高土壤酶活性^[32-33]。郑世英等^[12]、黄玉波等^[17]研究表明,施用蚯蚓粪能够提高土壤肥力,提高土壤酶活性,进而提高作物产量和品质。本研究结论与之一致,推测是蚯蚓粪营养丰富,含有大量的生长激素、各种酶等活性物质,为微生物提供了丰富的物质基础,促进微生物自身合成和代谢。同时,蚯蚓粪具有较好的团粒结构,表面积大、质地疏松,能够减小容重、增加土壤孔隙度,利于微生物种群扩展和繁衍^[34]。微生物量的增加促进了有机物质分解、矿化和各种土壤酶的产出,为作物根系从土壤中吸收养分创造良好条件,

进而促进作物生长发育,提高产量,改善品质。

蚯蚓粪含有丰富的营养物质和微生物,可以改善作物的农艺性状^[35]。路迎奇等^[36]、王恩煜等^[37]研究表明,蚯蚓粪能够促进作物生长、提高产量和商品性。李婉茹等^[38]研究表明,蚯蚓粪能够显著增加薄皮甜瓜根蔓鲜质量及干质量、茎粗、果形指数、单瓜质量和产量。本研究结果与前述研究一致,化肥配施蚯蚓粪能够改善韭菜的农艺性状,韭菜的株高、茎粗、叶长、叶宽等生长指标均有提高。推测这与蚯蚓粪施用提高韭菜叶绿素含量密不可分。蚯蚓粪富含有机质、活性物质、各种微量元素,为韭菜生长、合成转化各种酶类提供物质基础,提高酶促反应效率,促进叶绿素合成。叶绿素含量增加促进了光合作用,增加物质积累,提高韭菜品质和产量。

蔬菜中硝酸盐、维生素 C、可溶性糖等物质含量是品质评价的重要指标,其中维生素 C、可溶性糖等物质含量越高,品质越好,硝酸盐含量越低对人体越有益^[39-40]。赵永鑫等^[41]研究表明,蚯蚓粪显著提高了小白菜可溶性糖、维生素 C 含量,显著降低硝酸盐含量。冯腾腾等^[42]研究结果表明,与不添加蚯蚓粪相比,蚯蚓粪显著提高了连作黄瓜可溶性固形物、可溶性蛋白、可溶性糖、维生素 C 和有机酸含量。由上述研究结果可知,蚯蚓粪对多数经济作物在产量和品质方面均有促进作用。本研究得到了类似的结果,施用蚯蚓粪可以提高韭菜中维生素 C 和可溶性糖含量,降低硝酸盐含量。维生素 C 和可溶性糖含量可能与蚯蚓粪能够提高韭菜叶绿素含量相关,叶绿素是植物进行光合作用的关键因子,优良的光合性能是合成维生素 C 和可溶性糖的基石。蚯蚓粪可以降低韭菜的硝酸盐含量,推测与蚯蚓粪中富含多种微量元素有关,被植物吸收后合成充足的相关酶类,有利于将 N 元素转化为氨基酸和蛋白质,从而降低硝酸盐含量。磷是植物生长发育必需的大量矿质元素,参与植物体内能量代谢、物质合成与信号转导过程,是 ATP、NADPH、核酸、磷脂等物质的重要组分。本研究结果表明,在土壤有效磷含量匮乏条件下,植株中全磷含量反而高。考虑可能是土壤低磷胁迫下,植株为了更好生存,大量吸收磷的缘故,针对这种情况有待于开展进一步研究。

主成分分析是通过降维的方法把多个指标化为几个综合因子的统计分析方法。TOPSIS 是基于归一化的原始数据矩阵,找出最优方案,计算各处理与最优方案的接近程度,以此作为评价各处理效

果的依据。本研究结果表明,两种分析方法所得结论一致,8 种肥料配比处理中综合效果最好的均是 T6,其次是 T5,其中施用效果优于化肥配施商品有机肥(T1)的蚯蚓粪用量最低的处理为 T5。本研究明确了蚯蚓粪在韭菜种植中的应用效果,但仍存在一定的局限性。未来研究可以增加蚯蚓粪施用量,进一步探究其施用效果,同时研究蚯蚓粪大量施用是否会增加土壤盐分。另外,本研究是以盆栽的方式进行,下一步将把试验结果在大田中进行验证,为韭菜生产提供更加有力的依据。

与不施肥、单施化肥相比,化肥与不同比例蚯蚓粪配施能够不同程度地改善韭菜的农艺性状、品质指标和土壤理化性质,其中 $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥+ $60\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 蚯蚓粪综合效果最好, $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥+ $45\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 蚯蚓粪综合效果次之,并且这 2 种施肥方案的综合效果优于 $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥+ $15\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥。综合考虑施肥效果和蚯蚓粪用量最小化, $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥+ $45\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 蚯蚓粪可有效替代商品有机肥在生产中推广应用。

参考文献

- [1] 蔡红明,王仁杰,王俊英,等.寿光设施蔬菜施肥及土壤养分现状分析[J].中国果菜,2022,42(6):80-84.
- [2] 张明,吕爱琴,陈中府,等.我国韭菜资源研究现状和种质创新研究建议[J].植物遗传资源学报,2016,17(3):503-506.
- [3] 洪军,李倩,张开放,等.韭菜叶绿素铜、锌钠盐的制备及稳定性研究[J].中国调味品,2022,47(5):93-97.
- [4] 张华敏,陈建华,尹守恒,等.韭菜无融合生殖种子形成机制研究进展[J].河南农业科学,2020,49(6):1-7.
- [5] 王承香,刘建平,刘振龙,等.韭菜设施和露地栽培中韭蛆的发生和防治对策[J].北方园艺,2014(22):113-117.
- [6] 罗俊霞,乔慧芳,路丽莎,等.韭菜产业高质量发展全产业链标准体系构建[J].中国瓜菜,2024,37(11):192-201.
- [7] 王志刚.大棚韭菜连作障碍机理及养分调控研究[D].兰州:甘肃农业大学,2006.
- [8] 朱琴佳.韭菜高产栽培及主要病虫害防治技术措施[J].耕作与栽培,2026,46(2):153-156.
- [9] 陈宝书,陈本建,张惠霞,等.蚯蚓粪营养成分的研究[J].四川草原,1998(3):22-24.
- [10] Edwards C A, Arancon N Q. Biology and ecology of earthworms[M]. Cham: Springer US, 2022.
- [11] Zhao H T, Li T P, Zhang Y, et al. Effects of vermicompost amendment as a basal fertilizer on soil properties and cucumber yield and quality under continuous cropping conditions in a greenhouse[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(12): 2718-2730.
- [12] 郑世英,郑建峰,王宝泉,等.蚯蚓粪对草莓土壤肥力及产量和品质的影响[J].北方园艺,2017(10):16-20.
- [13] 吴东升,张燕,孔浩,等.蚯蚓发酵液对“宁杞 7 号”生长发育的

- 影响[J].福建林业科技,2017,44(4):56-62.
- [14] 刘丽,张微,徐洪岩,等.蚯蚓粪和化肥不同比例配施对大豆产量和品质的影响[J].华北农学报,2025,40(增刊1):190-196.
- [15] 李啸峰,苗潇扬,贺强,等.蚯蚓粪有机肥与生物炭配施对土壤镉生物有效性及玉米产量和品质的影响[J/OL].农业环境科学学报,(2026-03-05)[2026-05-05].<https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20260304.1705.006>.
- [16] 沈家乐,郝泽群,李云龙,等.施用蚯蚓粪对盐碱稻田土壤性质及水稻生长的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2026,47(1):111-118.
- [17] 黄玉波,徐博涵,庄秋丽,等.饲喂固废对设施小白菜生长及土壤微生物特性的影响[J].土壤,2025,57(4):771-776.
- [18] 翟莹,周福君,尹桂敏,等.不同基质对韭菜产量和品质的影响[J].吉林农业大学学报,2019,41(6):660-669.
- [19] 乔润雨,刘文锋,刘泽群,等.绿色蔬菜叶片叶绿素含量与SPAD值相关性研究[J].国土与自然资源研究,2018(1):80-82.
- [20] 郝再彬,苍晶,徐仲.植物生理实验技术[M].哈尔滨:哈尔滨出版社,2002.
- [21] 薛刚,刘文红,黄海涛,等.2,4-二硝基苯胍比色法测定婴幼儿配方食品和乳粉及其制品中总抗坏血酸(VC)的含量[J].食品研究与开发,2000(3):48-49.
- [22] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [23] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [24] 关松荫.土壤酶分析方法[M].北京:农业出版社,1986.
- [25] 周礼恺,张志明.土壤酶活性的测定方法[J].土壤通报,1980(5):37-38.
- [26] 马红艳,何志学,颀建明,等.石灰氮处理土壤及缓释肥配施生物有机肥对韭菜生长和产量的影响[J].中国蔬菜,2021(8):73-79.
- [27] 王军伟,黄科,董月霞,等.氮钾互作对番茄叶片碳氮代谢及产量和品质的影响[J].中国蔬菜,2020(9):41-49.
- [28] 朴晟源,管庆林,袁华恩,等.等氮水平下不同磷钾比例对雪茄烟叶碳氮代谢及产质量的影响[J].江苏农业科学,2023,51(20):107-114.
- [29] 韩珑,王婷,高俊杰,等.磷钾配施对基质栽培韭菜产量、品质及碳氮代谢的影响[J].中国农业科技导报(中英文),(2025-11-18)[2026-05-10].<https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2025.0175>.
- [30] 黄娜,柳建良,马路凯,等.鱼蛋白多肽水溶肥对韭菜品质和土壤微生物的影响[J].江苏农业科学,2024,52(8):209-218.
- [31] 刘家玮,郑长英,迟秀丽,等.微生物菌肥与化肥配施对韭菜生产及韭菜迟眼蕈蚊发生量的影响[J].广东农业科学,2023,50(6):92-100.
- [32] 甘泉峰,黄婷,李媛,等.有机无机肥配施对滨海脱盐土栽培芦芋及其养分吸收的影响[J].土壤,2023,55(2):262-271.
- [33] 卢云,秦天扬,陈玮峰,等.施用蚓粪对滨海盐碱地土壤有机碳库及其稳定性的影响[J].土壤,2024,56(4):817-825.
- [34] 文都日乐,李刚,张静妮,等.呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究[J].草业学报,2010,19(5):94-102.
- [35] Zaller J G. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties[J]. Scientia Horticulturae, 2007,112(2):191-199.
- [36] 路迎奇,杨丽娟,史津玮,等.蚓粪用量对温室番茄生长发育与产量和品质的调节[J].北方园艺,2019(6):77-82.
- [37] 王恩煜,郇森,李婉茹,等.优化施肥配施蚯蚓粪有机肥对嫁接西瓜产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2021,34(5):30-35.
- [38] 李婉茹,郭延亮,王恩煜,等.优化施肥配施蚯蚓粪有机肥对薄皮甜瓜产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2021,34(10):67-73.
- [39] 王朝辉,宗志强,李生秀,等.蔬菜的硝态氮累积及菜地土壤的硝态氮残留[J].环境科学,2002,23(3):79-83.
- [40] 卢凤刚,陈贵林,吕桂云,等.不同供氮水平对韭菜产量和品质的影响[J].园艺学报,2005,32(1):113-133.
- [41] 赵永鑫,赵吉霞,范茂攀,等.不同比例蚯蚓粪替代化肥对土壤化学性状及小白菜产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2022,35(6):62-68.
- [42] 冯腾腾,黄怀成,陈飞,等.不同蚯蚓粪施用量对连作黄瓜农艺性状、产量和品质的影响[J].南方农业学报,2018,49(8):1575-1580.