

# 砂姜黑土区小麦产量、品质及经济效益对黄腐酸施用量的响应

文新月<sup>1</sup> 武国寒<sup>1,2</sup> 柯丹丹<sup>2</sup> 王亚玲<sup>1</sup> 仇少君<sup>1</sup> 周卫<sup>1</sup> 王秀斌<sup>1\*</sup>

1 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室 / 中国农业科学院农业资源与  
农业区划研究所 北京 100081

2 安徽丰原集团有限公司 蚌埠 233010

**摘要:** 为明确砂姜黑土区小麦生产中秸秆源黄腐酸的适宜用量,于2023—2024年在安徽省蚌埠市小麦种植区开展田间试验,供试品种为“烟农999”。设置5个处理:不施肥(CK)、推荐施肥(RF)、推荐施肥+低量黄腐酸( $335 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , L-FA)、推荐施肥+中量黄腐酸( $670 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , M-FA)和推荐施肥+高量黄腐酸( $1005 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , H-FA),系统测定小麦地上部干物质积累量、养分吸收量、产量及品质等指标。结果表明,与CK和RF处理相比,增施黄腐酸各处理显著提升了全生育期小麦地上部干物质积累量及氮、磷、钾养分吸收量,其中M-FA和H-FA处理增幅均显著优于L-FA处理,且两者间无显著差异。小麦产量表现为H-FA>M-FA>L-FA>RF>CK,其中M-FA和H-FA差异不显著,处理较RF分别增产7.2%和7.9%;L-FA和RF差异不显著;各施肥处理与CK处理差异均显著。在品质提升方面,与CK和RF处理相比,M-FA和H-FA处理更利于提升湿面筋含量、粗蛋白含量、容重、沉淀指数和降落数值,但二者差异不显著;而籽粒硬度仅M-FA处理较CK和RF显著提高。经济效益分析表明,M-FA处理纯收益最高,较RF增加 $447.5 \text{ 元}/\text{hm}^2$ ,产投比为2.62。综上,在本研究条件下,推荐施肥配施中量黄腐酸为最佳施肥方案,可实现产量、品质与经济效益的协同提升,为砂姜黑土区小麦绿色高效生产提供科学依据。

**关键词:** 黄腐酸; 砂姜黑土; 小麦; 产量; 品质; 经济效益

**中图分类号:** TQ314.1, S512.1    **文章编号:** 1671-9212(2025)06-0054-11

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2025.06.005

Responses of Wheat Yield, Quality and Economic Benefits to Application Rates of Fulvic Acid in  
Lime Concretion Black Soil Region

Wen Xinyue<sup>1</sup>, Wu Guohan<sup>1,2</sup>, Ke Dandan<sup>2</sup>, Wang Yaling<sup>1</sup>, Qiu Shaojun<sup>1</sup>, Zhou Wei<sup>1</sup>, Wang Xiubin<sup>1\*</sup>

1 State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arable Land in China / Institute of Agricultural Resources and  
Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, 100081

2 Anhui Fengyuan Group Co. Ltd., Bengbu, 233010

**Abstract:** In order to determine the appropriate dosage of straw-derived fulvic acid (FA) in wheat production in the lime concretion black soil region, a field experiment was conducted in the wheat planting area of Bengbu City, Anhui Province, from 2023 to 2024, using the cultivar “Yannong 999”. Five treatments were set up as follows, no fertilization (CK), recommended fertilization (RF), recommended

[基金项目] 国家农业科技重大项目“农田智慧施肥”(项目编号20221805);企业委托项目“土壤—作物系统中不同类型黄腐酸作用机理与应用”(项目编号2023KF064)。

[收稿日期] 2025-07-16

[作者简介] 文新月,女,2001年生,硕士研究生,研究方向为养分资源高效利用,E-mail:wenxinyue0124@163.com;并列第一作者:武国寒,1998年生,硕士研究生,研究方向为养分资源高效利用,E-mail:wuguohan2024@163.com.\*通讯作者:王秀斌,男,研究员,E-mail:wangxiubin@caas.cn。



fertilization + low-dose fulvic acid ( $335 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , L-FA), recommended fertilization + medium-dose fulvic acid ( $670 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , M-FA), and recommended fertilization + high-dose fulvic acid ( $1005 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , H-FA). The aboveground dry matter accumulation, nutrient uptake, grain yield and quality indices of wheat were systematically measured. The results showed that, compared to the CK and RF treatments, all FA-added treatments increased significantly the aboveground dry matter accumulation and nitrogen, phosphorus and potassium uptake of wheat throughout the growth period. Among them, the increasing effects of the M-FA and H-FA treatments were significantly better than that of the L-FA treatment, with no significant difference between the M-FA and H-FA treatments. Wheat yield followed the order: H-FA>M-FA>L-FA>RF>CK. Compared to the RF treatment, the M-FA and H-FA treatments increased yield by 7.2% and 7.9% respectively, and no significant difference between the M-FA and H-FA treatments were observed. In terms of wheat yield increase, there was no significant difference between the L-FA and RF treatments, while all fertilization treatments showed significant differences from the CK treatment. In terms of quality improvement, compared to the CK and RF treatments, the M-FA and H-FA treatments were more beneficial for increasing wet gluten content, crude protein content, test weight, sedimentation value and falling number, but no significant difference existed between the M-FA and H-FA treatments. However, grain hardness was significantly increased only in the M-FA treatment compared with the CK and RF treatments. Economic benefits analysis showed that the M-FA treatment achieved the highest net profit, which was  $447.5 \text{ yuan}/\text{hm}^2$  higher than that of the RF treatment, with a benefit-cost ratio of 2.62. In conclusion, under the conditions used by this study, the optimal fertilization scheme was the combination of recommended fertilization and middle-rate FA. This scheme could realize the coordinated improvement of yield, quality, and economic benefits, and provide a scientific basis for the green and efficient wheat production in the lime concretion black soil region.

**Key words:** fulvic acid; lime concretion black soil; wheat; yield; quality; economic benefits

小麦作为我国三大粮食作物之一，其产量与品质的协同提升对保障国家粮食安全、推动农业高质量发展具有重要战略意义<sup>[1, 2]</sup>。然而，当前农业生产中，为追求高产过量施用化肥不仅增加成本，还对生态环境造成压力，影响作物品质<sup>[3~5]</sup>。黄腐酸作为分子量小、生物活性较高的腐植酸类物质，在促进作物生长、提升养分利用率和改善品质方面表现出良好潜力<sup>[6~8]</sup>，其作用效果受来源、结构及土壤类型等多因素影响<sup>[9~11]</sup>。现有研究多集中于盐碱地和潮土等土壤类型<sup>[12, 13]</sup>，而砂姜黑土作为典型中低产田，具有黏粒含量高、有机质含量低、养分转化效率低等特殊理化性质<sup>[14]</sup>，黄腐酸在该类区域的适用量及应用效果尚不明确，针对其系统研究仍较缺乏。此外，研究还发现黄腐酸因其

来源、结构和生产工艺可分为矿物源黄腐酸、生物源黄腐酸，生物源黄腐酸中的秸秆源黄腐酸因含丰富的氮/氧官能团及化合物组成，分子量较小、芳香性较弱，活性更强，是矿物源黄腐酸的良好替代产品<sup>[15, 16]</sup>。秸秆源黄腐酸因其独特的理化性质，在砂姜黑土上的应用值得深入探究。

为此，本研究以砂姜黑土区小麦为研究对象，以秸秆源黄腐酸为供试材料，通过设置不同黄腐酸施用量处理，阐明该区域小麦产量、品质及经济效益对秸秆源黄腐酸施用量的响应规律，明确秸秆源黄腐酸在砂姜黑土区小麦生产中的适宜用量，最终实现小麦产量、品质与经济效益的协同提升，为砂姜黑土区小麦高产优质栽培及绿色施肥技术提供理论依据与实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间

2023年10月—2024年6月。

### 1.2 试验地概况

试验地位于安徽省蚌埠市固镇县仲兴镇孟庙

村（北纬 $33^{\circ} 23' 58''$ ，东经 $117^{\circ} 18' 10''$ ）小麦种植基地，该区域属亚热带与温带季风气候过渡带，四季分明，年均气温 $14.9^{\circ}\text{C}$ ，年均降水量871 mm，日照时数达到2170 h。土壤类型为砂姜黑土，试验前耕层（0~20 cm）土壤的基本理化性质详见表1。

表1 试验前土壤基本理化性质  
Tab.1 Basic physical and chemical properties of soil before the experiment

有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	硝态氮 (mg/kg)	铵态氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH
11.54	1.06	12.8	7.72	72.64	154.95	5.15

注：pH为水土比4:1浸提测定。

### 1.3 试验材料

供试作物：小麦，品种为“烟农999”，具有较强耐酸性，由山东省烟台市农业科学研究院培育。

供试肥料：秸秆源黄腐酸，黄腐酸含量23.5%，pH 5.8，分子量300~500 Da，C/N比12:1，由安徽丰原集团有限公司提供。复合肥（15-15-15）由安徽六国化工股份有限公司提供，尿素（N，46%）由安徽泉盛化工有限公司提供。

### 1.4 试验设计

采用随机区组设计，共设置5个处理：不施肥（CK）、推荐施肥（RF）、推荐施肥+低量黄腐酸（335 kg/hm<sup>2</sup>，L-FA）、推荐施肥+中量黄腐酸（670 kg/hm<sup>2</sup>，M-FA）和推荐施肥+高量黄腐酸（1005 kg/hm<sup>2</sup>，H-FA），每个处理3次重复，共15个小区，每个小区面积60 m<sup>2</sup>（3 m×20 m），各小区间距0.5 m。推荐施肥用量为：N 180 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 90 kg/hm<sup>2</sup>，所有施肥处理均基施复合肥（15-15-15）600 kg/hm<sup>2</sup>，拔节期追施尿素195 kg/hm<sup>2</sup>，氮肥基追比为1:1；黄腐酸按试验设计施用量一次性基施。

试验于2023年10月31日播种，播种深度为4 cm，每个小区播种16行，于2024年6月1日采收。田间管理措施严格按照当地农业生产实践进行。小麦生育期总降水量487 mm，其中拔节期（3月）降水28 mm，灌浆期（5月）降水85 mm，可以满

足小麦生长需求。

### 1.5 测定项目与方法

#### 1.5.1 植株地上部干物质量的测定

于小麦返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期和收获期，各小区随机选取长势相对一致的10株植株，取其地上部，于105 °C杀青30 min，再65 °C烘干至恒重，称重。

#### 1.5.2 植株地上部N、P和K含量的测定

植株地上部N、P和K含量通过测定全氮、全磷、全钾含量确定。将烘干的地上部植株样品（秸秆、穗/籽粒）经粉碎机充分粉碎后，采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法消煮，全氮和全磷含量采用流动分析仪（型号：SEAL AA3 Auto Analyzer 3，德国）测定，全钾含量采用原子吸收光谱仪（型号：PerkinElmer AAnalyst 400，美国）测定。

#### 1.5.3 收获期小麦养分吸收量的测定

单株某器官养分吸收量（g/株）=单株某器官干重（g/株）×该器官该养分含量（g/g），将各器官的养分吸收量相加，得到单株养分吸收量。

单位面积养分吸收量（kg/hm<sup>2</sup>）=单株养分吸收量（g/株）×单位面积株数（株/hm<sup>2</sup>）÷1000。

#### 1.5.4 小麦产量及其构成因素的测定

小麦成熟后，每个小区采集3个1 m<sup>2</sup>代表性样方，测定样方内有效穗数，随机选取30个麦穗，统计穗粒数。经晒干脱粒称重并测量其含水



量后, 产量测定严格按农业农村部田间测产要求, 用 LDS-5G 谷物水分测定仪测定籽粒含水量后, 折算为 11% 标准含水量产量, 取平均值; 随机取 1000 粒完整种子称重, 计算千粒重。

#### 1.5.5 小麦籽粒品质指标的测定

采用近红外光谱分析技术对小麦籽粒品质性状进行系统测定。小麦收获后, 各小区随机选取籽粒样品, 使用近红外分析仪 (型号: EXPEC 1370, 谱育科技发展有限公司) 测定籽粒湿面筋含量、粗蛋白含量、容重、硬度、沉淀指数和降落数值等品质指标。

#### 1.5.6 经济效益分析

纯收益 = 总收入 - 总投入; 收益增加 = 各处理纯收益 - 传统处理 (推荐施肥) 纯收益。

产投比 = 总收入 / 总支出。

#### 1.6 数据处理

利用 Microsoft Office Excel 2021、IBM SPSS Statistics 27.0 (Duncan test,  $P=0.05$ ) 和 GraphPad prism 10 软件进行数据处理、统计分析和绘图, 图表数据均为平均值  $\pm$  标准误差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄腐酸对小麦地上部干物质积累量的影响

不同施肥处理小麦地上部干物质积累量随生育期的推进呈现持续升高趋势 (图 1)。随着黄腐酸用量的增加, 各生育期小麦地上部干物质积累量呈现先上升后平稳的变化规律。在同一生育期内, 与不施肥处理 (CK) 相比, 所有施肥处理在返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期和收获期地上部干物质积累量分别平均增加了 66.9%、58.7%、56.6%、54.0% 和 59.5% ( $P < 0.05$ ), 表明施肥对干物质积累的促进作用贯穿于全生育期。全生育期内推荐施肥 + 高量黄腐酸处理 (H-FA) 地上部干物质积累量最高, 与推荐施肥处理 (RF) 相比, 在返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期和收获期分别增加 35.7%、25.3%、19.7%、15.3% 和 20.2% ( $P < 0.05$ ), 但与推荐施肥 + 中量黄腐酸处理 (M-FA) 相比无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 说明中量黄腐酸已能实现干物质高效积累, 高量施用未表现出持续提升效果。

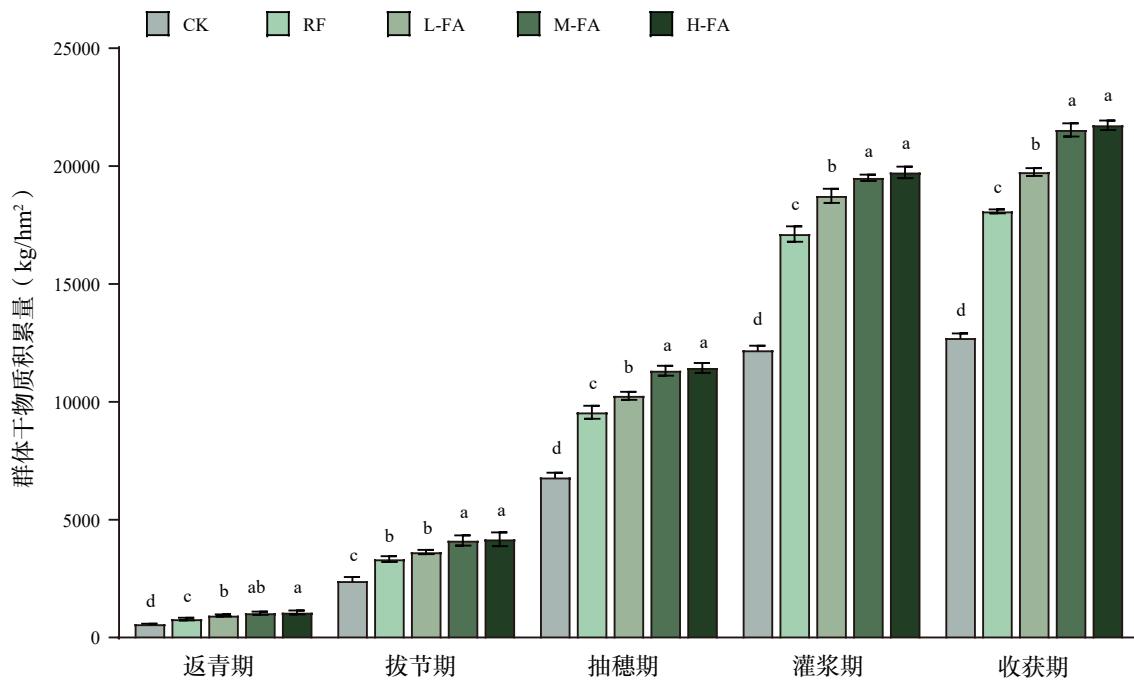


图 1 不同处理各生育期小麦地上部干物质积累量

Fig.1 Aboveground dry matter accumulation of wheat at different growth stages under different treatments

注: 不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 黄腐酸对小麦地上部养分含量的影响

黄腐酸用量对小麦各生育期地上部 N、P、K 含量的影响见表 2。随着生育期推进，各处理小麦秸秆中 N 含量及穗/籽粒中 K 含量呈降低趋势，穗/籽粒中 N、P 含量呈先降后升趋势，秸秆中 P 含量呈先升后降趋势，秸秆中 K 含量则呈先升高再降低最后再升高趋势。在同一生育期内，与 CK 相比，除收获期秸秆中 P 和抽穗期、灌浆期穗/籽粒中 P 外，施肥处理小麦秸秆和穗/籽粒中 N、P、K 含量均显著增加，其中小麦秸秆养分在灌浆期增幅最大，N、P、K 含量分别增加 120.5% ~ 133.5%、26.8% ~ 65.9%、44.2% ~ 58.4%；籽粒养分在收获期增幅最大，N、P、K 含量分别增加 30.5% ~ 33.9%、3.5% ~ 5.3%、2.5% ~ 4.5% ( $P < 0.05$ )。与 RF 处理相比，M-FA、H-FA 处理小麦秸秆中 N、P、K 含量在各生育期（抽穗期养分含量除外）均显著增加 ( $P < 0.05$ )，但 M-FA 和 H-FA 处理间总体无显著差异 ( $P > 0.05$ )，表明中量黄腐酸已能满足秸秆养分积累需求。与 RF 处理相比，穗/籽粒 N 含量在抽穗期仅 M-FA 处理显著增加（2.4%），在灌浆期和收获期 M-FA、H-FA 处理均显著增加，但 H-FA 与 M-FA 处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ )；穗/籽粒 P 含量在灌浆期配施黄腐酸的处理均显著增加，增

幅为 3.0% ~ 8.6%。穗/籽粒 K 含量在各施肥处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

## 2.3 黄腐酸对收获期小麦养分吸收量的影响

由表 3 可知，与 CK 相比，所有施肥处理小麦秸秆、籽粒及整个植株的 N、P 和 K 养分吸收量均显著增加（籽粒中 K 吸收量除外）。与 RF 处理相比，M-FA 和 H-FA 处理小麦秸秆中 N、P、K 吸收量显著增加，平均分别增加 36.4%、51.4%、45.6%。籽粒中 N 吸收量 M-FA 处理达峰值，较 RF 处理提高 9.0%；K 吸收量 M-FA 和 H-FA 处理较 RF 处理平均提高 9.3%，且 H-FA 处理增幅高于 M-FA 处理；P 吸收量各施肥处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。在植株养分吸收量上，M-FA 和 H-FA 处理均显著高于 RF 处理 ( $P < 0.05$ )，除植株 N 吸收量外，M-FA 和 H-FA 处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。植株 N 吸收量 M-FA 处理最高、H-FA 处理次之，较 RF 处理平均分别提高 14.5% 和 13.1%，植株 P、K 吸收量则均以 H-FA 处理最高、M-FA 处理次之，P、K 吸收量较 RF 处理平均分别提高 19.5%、18.0% 和 40.8%、38.1%；此外，L-FA 处理植株 N、P、K 养分吸收量虽高于 RF 处理，但提升幅度低于 M-FA 和 H-FA 处理，且部分指标与 RF 处理无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 2 不同处理各生育期小麦地上部 N、P 和 K 含量

Tab.2 The contents of N, P and K in the aboveground parts of wheat at different growth stages under different treatments

生育期	处理	N				P		K		%
		秸秆	穗/籽粒	秸秆	穗/籽粒	秸秆	穗/籽粒	秸秆	穗/籽粒	
返青期	CK	3.65 ± 0.036d	—	0.51 ± 0.008e	—	3.02 ± 0.012d	—			
	RF	3.80 ± 0.033c	—	0.57 ± 0.003d	—	3.28 ± 0.030c	—			
	L-FA	3.95 ± 0.033b	—	0.60 ± 0.009c	—	3.55 ± 0.055b	—			
	M-FA	4.14 ± 0.023a	—	0.65 ± 0.010b	—	3.58 ± 0.028b	—			
	H-FA	4.19 ± 0.013a	—	0.67 ± 0.002a	—	3.67 ± 0.037a	—			
拔节期	CK	2.75 ± 0.048c	—	0.55 ± 0.015c	—	3.42 ± 0.066d	—			
	RF	2.93 ± 0.032b	—	0.60 ± 0.001b	—	3.67 ± 0.033c	—			
	L-FA	2.94 ± 0.029b	—	0.62 ± 0.002a	—	3.83 ± 0.056b	—			
	M-FA	3.13 ± 0.056a	—	0.63 ± 0.008a	—	4.07 ± 0.076a	—			
	H-FA	3.17 ± 0.033a	—	0.63 ± 0.011a	—	4.02 ± 0.032a	—			



表2 续

生育期	处理	N		P		K	
		秸秆	穗/籽粒	秸秆	穗/籽粒	秸秆	穗/籽粒
抽穗期	CK	1.22 ± 0.003c	1.77 ± 0.011c	0.29 ± 0.006d	0.39 ± 0.004a	2.29 ± 0.021c	1.30 ± 0.021b
	RF	2.11 ± 0.045b	2.04 ± 0.023b	0.37 ± 0.006c	0.39 ± 0.008a	2.81 ± 0.032a	1.39 ± 0.005a
	L-FA	2.17 ± 0.029a	2.07 ± 0.029ab	0.38 ± 0.006b	0.40 ± 0.005a	2.72 ± 0.045b	1.39 ± 0.005a
	M-FA	2.16 ± 0.015ab	2.10 ± 0.001a	0.39 ± 0.000a	0.40 ± 0.006a	2.73 ± 0.051b	1.39 ± 0.007a
	H-FA	2.19 ± 0.011a	2.09 ± 0.002ab	0.40 ± 0.005a	0.40 ± 0.003a	2.78 ± 0.009ab	1.39 ± 0.011a
灌浆期	CK	0.54 ± 0.012c	1.56 ± 0.030c	0.14 ± 0.007d	0.33 ± 0.004c	1.40 ± 0.004e	0.75 ± 0.001b
	RF	1.19 ± 0.010b	1.96 ± 0.006b	0.17 ± 0.005c	0.33 ± 0.005c	2.02 ± 0.006d	0.78 ± 0.003a
	L-FA	1.18 ± 0.021b	1.96 ± 0.002b	0.18 ± 0.004c	0.34 ± 0.002b	2.05 ± 0.011c	0.78 ± 0.004a
	M-FA	1.25 ± 0.006a	1.99 ± 0.005a	0.20 ± 0.006b	0.35 ± 0.003a	2.12 ± 0.016b	0.78 ± 0.004a
	H-FA	1.25 ± 0.006a	2.00 ± 0.003a	0.22 ± 0.001a	0.36 ± 0.006a	2.23 ± 0.006a	0.79 ± 0.013a
收获期	CK	0.24 ± 0.001c	1.77 ± 0.003c	0.08 ± 0.009b	0.38 ± 0.008b	1.91 ± 0.004c	0.67 ± 0.011b
	RF	0.28 ± 0.005b	2.31 ± 0.034b	0.09 ± 0.004b	0.39 ± 0.007a	2.47 ± 0.030b	0.68 ± 0.006a
	L-FA	0.36 ± 0.004b	2.36 ± 0.001a	0.09 ± 0.003ab	0.40 ± 0.005a	2.73 ± 0.059a	0.68 ± 0.007a
	M-FA	0.36 ± 0.007a	2.37 ± 0.029a	0.10 ± 0.004a	0.40 ± 0.002a	2.75 ± 0.049a	0.69 ± 0.009a
	H-FA	0.37 ± 0.005a	2.37 ± 0.020a	0.10 ± 0.003a	0.40 ± 0.002a	2.78 ± 0.051a	0.70 ± 0.008a

注：同列不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表3 不同处理小麦收获期地上部养分吸收  
Tab.3 Nutrient uptake of wheat aboveground at harvest stage at different treatments  $\text{kg}/\text{hm}^2$

地上部	处理	N	P	K
秸秆	CK	18.70 ± 0.43d	6.52 ± 0.73d	151.10 ± 1.73d
	RF	36.83 ± 0.18c	9.17 ± 1.28c	256.41 ± 4.20c
	L-FA	43.80 ± 0.82b	11.27 ± 1.42b	322.76 ± 9.37b
	M-FA	49.87 ± 0.13a	13.80 ± 0.56a	369.49 ± 0.17a
	H-FA	50.62 ± 1.18a	13.97 ± 0.58a	377.01 ± 5.50a
籽粒	CK	86.08 ± 0.76e	18.36 ± 1.51b	32.42 ± 1.51b
	RF	174.64 ± 1.87d	29.84 ± 2.18a	51.58 ± 1.70b
	L-FA	181.98 ± 0.18c	30.48 ± 1.18a	52.37 ± 0.81b
	M-FA	192.34 ± 0.29a	32.25 ± 1.52a	55.99 ± 1.01a
	H-FA	188.66 ± 0.37b	32.66 ± 0.57a	56.74 ± 0.16a
植株	CK	104.79 ± 0.96e	24.87 ± 2.20c	183.52 ± 1.77d
	RF	211.47 ± 1.74d	39.01 ± 3.16b	307.99 ± 3.28c
	L-FA	225.78 ± 0.74c	41.74 ± 1.99b	375.13 ± 10.15b
	M-FA	242.21 ± 0.42a	46.04 ± 2.07a	425.48 ± 0.84a
	H-FA	239.27 ± 1.06b	46.62 ± 0.70a	433.75 ± 5.38a

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，下同。

## 2.4 黄腐酸对小麦产量及其构成因素的影响

黄腐酸施用量对小麦产量及其构成因素的影响见表4。各处理小麦产量表现为 H-FA > M-FA > L-FA > RF > CK，呈现随黄腐酸施用量增加呈增加趋势。其中，M-FA 和 H-FA 处理小麦产量较 RF 处理分别显著增产 7.2% 和 7.9%，较 CK 显著增加 66.8% 和 67.9%。L-FA 处理其产量与 RF 处理无显著差异 ( $P > 0.05$ )，表明，相比推荐施肥，黄腐酸施用量需达到中量水平才能显著提升产量。

随着黄腐酸用量增加，小麦有效穗数和穗粒数均呈递增趋势，而千粒重呈现先升高后降低的趋

势（表4）。与 CK 相比，施肥处理显著提高了小麦有效穗数、穗粒数和千粒重；M-FA 和 H-FA 处理小麦有效穗数较 RF 处理分别显著增加 4.6% 和 6.8%，较 CK 显著增加 23.7% 和 26.3%；L-FA、M-FA、H-FA 处理穗粒数较 RF 处理显著增加 10.4%、15.7% 和 20.5%，较 CK 显著增加 40.6%、47.3% 和 53.4%。穗粒数对黄腐酸的响应敏感度高于有效穗数，表明黄腐酸主要通过促进小花分化与结实率提升穗粒数。各施肥处理间千粒重无显著差异 ( $P > 0.05$ )。说明小麦产量提升主要依赖有效穗数和穗粒数的协同增加。

表4 不同处理小麦产量及其构成因素  
Tab.4 Wheat yield and its component factors under different treatments

处理	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	有效穗数 (×10 <sup>4</sup> 穗/hm <sup>2</sup> )	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)
CK	4864.42 ± 259.94c	399.00 ± 5.39d	30.03 ± 0.58e	45.73 ± 0.64b
RF	7567.20 ± 415.48b	472.00 ± 7.78c	38.24 ± 0.76d	46.59 ± 0.89a
L-FA	7717.18 ± 344.14b	478.11 ± 8.85c	42.21 ± 1.06c	47.06 ± 1.05a
M-FA	8112.09 ± 348.45a	493.56 ± 9.10b	44.23 ± 1.04b	47.19 ± 0.33a
H-FA	8165.76 ± 275.07a	503.89 ± 10.55a	46.08 ± 0.63a	47.04 ± 0.38a

## 2.5 黄腐酸对小麦籽粒品质的影响

由图2可知，施肥显著改善小麦品质，各施肥处理小麦湿面筋含量、粗蛋白含量、容重、籽粒硬度、沉淀指数和降落数值较 CK 均显著增加 ( $P < 0.05$ )，增幅分别为 41.1% ~ 44.8%、29.9% ~ 35.4%、1.5% ~ 2.1%、5.0% ~ 6.7%、107.4% ~ 119.2%、12.7% ~ 16.1%。

与 RF 处理相比，M-FA 和 H-FA 处理对小麦主要品质指标（湿面筋含量、粗蛋白含量、容重、沉淀指数和降落数值）的提升效果更为显著，而 L-FA 处理仅对粗蛋白含量改善显著。在粗蛋白含量方面，L-FA、M-FA 和 H-FA 处理较 RF 处理分别显著 ( $P < 0.05$ ) 提高了 3.2%、4.2% 和 4.3%，且三者间无显著差异 ( $P > 0.05$ )；在湿面筋含量方面，M-FA 和 H-FA 处理较 RF 处理分别显著提高了 2.7% 和 2.6%；在容重方面，M-FA 和 H-FA 处理较 RF 处理分别显著提高了 0.5% 和

0.6%；在沉淀指数方面，M-FA 和 H-FA 处理较 RF 处理分别显著提高了 5.0% 和 5.7%；在降落数值方面，M-FA 和 H-FA 处理较 RF 处理分别显著提高了 3.1% 和 3.1% ( $P < 0.05$ )；在籽粒硬度方面，与 RF 处理相比，仅 M-FA 处理显著提高了 1.6% ( $P < 0.05$ )，L-FA 和 H-FA 处理与 RF 处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

## 2.6 黄腐酸对小麦经济效益的影响

不同处理对小麦经济效益分析见表5。与 CK 相比，施肥处理小麦纯收益增幅为 5080.8 ~ 5748.8 元/hm<sup>2</sup>。随着黄腐酸用量的增加，生产总收入和总投入均呈上升趋势，但纯收益呈现先升后降趋势。与 RF 处理相比，M-FA 处理纯收益最高，增加了 447.5 元/hm<sup>2</sup>，产投比为 2.62 : 1；而 L-FA 和 H-FA 处理纯收益分别减少了 52.4 和 220.5 元/hm<sup>2</sup>，收益未增反降，表明黄腐酸用量存在边际效益。

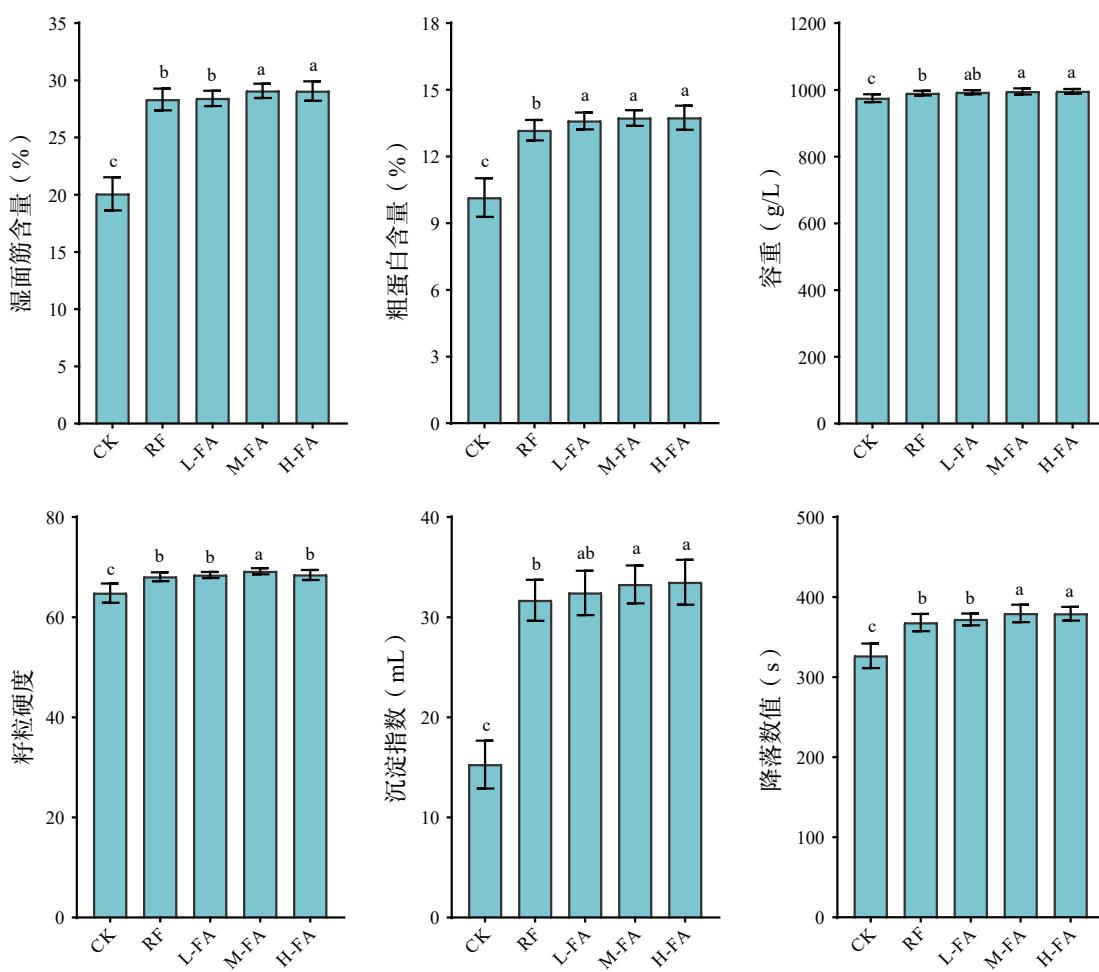


图 2 不同处理小麦籽粒品质

Fig.2 Wheat grain quality under different treatments

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表 5 不同处理经济效益分析

Tab.5 Analysis of economic benefits under different treatments

元/ $\text{hm}^2$ 

处理	收入			投入						产投比	纯收益	比 RF 收益增加
	籽粒	秸秆	总收入	化肥	黄腐酸	种子	机械	病虫 草害 防控	总投入			
CK	11674.6	2197.4	13872.0	0.0	0.0	1875.0	3000.0	375	5250.0	2.64	8622.0	—
RF	18161.3	2944.2	21105.5	1932.2	0.0	1875.0	3000.0	375	7182.2	2.94	13923.3	—
L-FA	18521.2	3369.4	21890.6	1932.2	837.5	1875.0	3000.0	375	8019.7	2.73	13870.9	-52.4
M-FA	19469.0	3759.0	23228.0	1932.2	1675.0	1875.0	3000.0	375	8857.2	2.62	14370.8	447.5
H-FA	19597.8	3799.7	23397.5	1932.2	2512.5	1875.0	3000.0	375	9694.7	2.41	13702.8	-220.5

注: 根据 2024 年安徽省农业农村厅公告公布的数据显示: 小麦价格 2400 元/t, 种子 1875 元/ $\text{hm}^2$ , 秸秆 280 元/t, 复合肥价格 2480 元/t, 尿素 2278 元/t, 黄腐酸 2500 元/t, 机械费用 3000 元/ $\text{hm}^2$  计算, 其中机械费用包含土地旋耕、播种、无人机撒肥打药、收割、运输及灌水等费用。

### 3 讨论

本研究证实,在有机质匮乏、养分转化效率低的砂姜黑土区,配施黄腐酸可显著提升小麦全生育期地上部干物质积累量,并存在显著剂量效应。推荐施肥配施中量(M-FA)和高量(H-FA)黄腐酸处理的效果显著优于低量(L-FA)黄腐酸处理,且两者间无显著差异,表明中量黄腐酸已能实现干物质高效积累,过量无增效。其机制在于,中、高量黄腐酸可提供较多的羧基、酚羟基等活性基团,这些基团既能螯合土壤中难溶性N、P、K等养分,提升养分有效性以促进小麦根系吸收利用<sup>[17, 18]</sup>,又能增强光合酶与硝酸还原酶等关键酶的活性,提升光合作用效率与氮素同化能力,同时调节植株内源激素平衡以增强抗逆性<sup>[19]</sup>,进而能够增强根际微生物活性,改善土壤微环境,并促进光合产物向地上部转运,从而推动干物质高效积累<sup>[20]</sup>,而低量黄腐酸受制于活性基团数量有限,促进效果较弱。可见,在砂姜黑土区确立适宜黄腐酸用量对实现小麦高产与资源高效利用的重要性。

养分吸收方面,本研究所有配施黄腐酸的处理均能促进小麦地上部N、P、K养分吸收量,这与前人的研究结果较吻合<sup>[18, 21]</sup>。且M-FA和H-FA处理的小麦秸秆及籽粒中N、P、K含量显著高于RF和L-FA处理(表2、表3),仅两者之间除返青期秸秆P、K含量和灌浆期秸秆K含量外,其余均无显著差异,这与砂姜黑土养分转化效率低的特性高度一致。中、高量黄腐酸可通过优化小麦根系形态、提升根系活力,增强对土壤缓效态养分的吸收能力并减少养分流失<sup>[18]</sup>。值得注意的是,籽粒N吸收量在M-FA处理达峰值,而H-FA处理略有下降,印证了黄腐酸作用存在“适宜剂量”<sup>[20]</sup>,过高浓度黄腐酸在根表面形成聚合物堵塞细胞壁孔隙,产生轻微生理胁迫<sup>[22, 23]</sup>,提示砂姜黑土区黄腐酸宜施用中量,过高用量易产生负效应。

产量提升方面,由于砂姜黑土质地黏重、通气透水性较差且养分释放缓慢,易限制小麦分蘖与成穗<sup>[24]</sup>,而合理施用秸秆源黄腐酸(M-FA和H-FA)可显著提升砂姜黑土区小麦产量、有效穗

数和穗粒数,产量提升主要依赖有效穗数和穗粒数的协同增加,这与前人的研究结果较吻合<sup>[25~27]</sup>,其作用机制与黄腐酸促进小麦分蘖期养分供应、提高成穗率,以及灌浆期促进小花分化与结实率一致。相较于有效穗数,穗粒数对黄腐酸的响应更敏感,反映出黄腐酸有效弥补了该类型土壤在作物生长期的养分亏缺,这一调控特征与潮土区“以有效穗数主导产量”的机制存在差异<sup>[28]</sup>,凸显了其在砂姜黑土区小麦产量构成中的独特作用。此外,低量处理(L-FA)增产不显著,进一步说明黄腐酸需达到中量以上才能激活作物生理潜力。

品质改善方面,尹丽华等<sup>[29]</sup>研究表明,在化肥等量施用下增施秸秆源黄腐酸肥料可有效提升大棚蔬菜西红柿、辣椒、西葫芦的品质(如外观、可溶性糖含量、Vc含量等)。本研究发现,配施黄腐酸显著提升了砂姜黑土区小麦籽粒湿面筋含量、粗蛋白含量及沉淀指数等关键品质指标,且改善效果呈现明显剂量效应,中高量处理(M-FA、H-FA)在多数品质指标上显著优于低量处理(L-FA),这与籽粒氮吸收量增加直接相关<sup>[5, 29]</sup>。黄腐酸可能通过增强植株氮素同化能力(如提高硝酸还原酶活性),促进蛋白质合成与积累<sup>[30]</sup>。而L-FA处理对品质的提升效果较弱,可能因其活性官能团数量有限,难以充分激活碳氮代谢通路<sup>[31]</sup>; H-FA处理虽能提升部分指标,但可能因为高浓度下氨基酸外渗流失以及过量黄腐酸干扰作物碳氮代谢平衡,影响籽粒中淀粉与蛋白质组分的正常积累与配比<sup>[32]</sup>。因此,为实现小麦品质的协同提升,中量黄腐酸在砂姜黑土区展现出更优的应用潜力。

经济效益方面,小麦种植的纯收益随黄腐酸用量呈“倒U型”曲线,M-FA处理纯收益最高(较RF增加447.5元/hm<sup>2</sup>),而H-FA处理一方面因黄腐酸投入成本增加,另一方面过高浓度的黄腐酸可能对作物产生轻微的生理胁迫,或与其他养分产生拮抗作用,导致纯收益反而低于M-FA处理(表5)。这一结果体现了随黄腐酸用量增加呈现边际效益递减规律。

本研究的局限性:仅进行了一年一点试验,后续需通过长期、多点试验验证黄腐酸适宜用量的区



域适用性。未来应结合土壤理化性质、微生物群落及植株生理指标动态监测,深入揭示黄腐酸在砂姜黑土区的作用机理。

#### 4 结论

在砂姜黑土区小麦生产中,中量( $670 \text{ kg}/\text{hm}^2$ )和高量( $1005 \text{ kg}/\text{hm}^2$ )黄腐酸处理显著提高了小麦产量,与RF处理(推荐施肥)相比增幅分别为7.2%和7.9%。中量黄腐酸处理显著提升湿面筋、粗蛋白等关键品质指标。综合投入产出,中量黄腐酸处理经济效益最高,较RF处理纯收益增加447.5元/ $\text{hm}^2$ ,产投比为2.62。因此,在本试验条件下,推荐配施 $670 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 秸秆源黄腐酸为最优管理策略。该研究为砂姜黑土区小麦科学施肥提供重要技术参考,同时为区域小麦绿色高效施肥实践提供可靠依据。

#### 参考文献

- [1] 孙娜,马林,邹辉,等.氮磷钾配施对冬小麦产量和品质的影响及其肥效分析[J].新疆农业科学,2025,62(1):1~12.
- [2] Rehim A, Khan M, Imran M, et al. Integrated use of farm manure and synthetic nitrogen fertilizer improves nitrogen use efficiency, yield and grain quality in wheat[J]. Italian Journal of Agronomy, 2020, 15(1): 29 ~ 34.
- [3] Xu Y, Xu X B, Li J, et al. Excessive synthetic fertilizers elevate greenhouse gas emissions of smallholder-scale staple grain production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 430: 139720.
- [4] Zhang Y J, Ye C, Su Y W, et al. Soil acidification caused by excessive application of nitrogen fertilizer aggravates soil-borne diseases: evidence from literature review and field trials[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2022, 340: 108176.
- [5] 王海泽,刘志萍,巴图,等.氮肥供应对麦类作物产量和品质的影响[J].内蒙古民族大学学报(自然科学版),2021,36(3):248~252.
- [6] Sootahar M K, Soothar M K, Zeng X B, et al. Short-term impact of plant and liquid derived fulvic acids on the physiological characteristics, plant growth and nutrient uptake of maize-wheat production[J]. Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: B. Life and Environmental Sciences, 2022, 59(1): 37 ~ 47.
- [7] 刘雯悦,曾明志,莫俊飞,等.黄腐酸钾中微量元素复配肥对小麦生长和土壤理化特性及微生物的影响[J].腐植酸,2025(1):25~33.
- [8] 韦娜.叶面喷施黄腐酸对粮饲兼用型燕麦产量、品质及饲用价值的影响[D].黑龙江八一农垦大学硕士学位论文,2023.
- [9] 朱启明,王亚男,郑重,等.不同黄腐酸结构组成及其对小麦生长的影响[J].土壤通报,2024,55(1):102~112.
- [10] Sarir M S, Sharif M, Zeb A. Influence of different levels of humic acid application by various methods on the yield and yield components of maize[J]. Sarhad Journal of Agriculture, 2005, 21(1): 75 ~ 81.
- [11] 陈宝成,周华敏,梁海,等.黄腐酸复合肥对盐碱地小麦生长、产量、效益及土壤理化性质的影响[J].腐植酸,2019(3):19~24.
- [12] 余冠奇,宋玉凤,王平,等.木醋液-黄腐酸调节剂对滨海盐碱地盐度及小麦产量的影响研究[J].环境生态学,2025,7(5):61~66.
- [13] 梁媛媛.潮土冬小麦施用不同分子量黄腐酸效应研究[D].河南农业大学硕士学位论文,2021.
- [14] 赵占辉,张丛志,蔡太义,等.不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(10):1228~1235.
- [15] 武国寒,文新月,王亚玲,等.不同类型黄腐酸的性质表征[J].中国土壤与肥料,2025(3):223~232.
- [16] 刘增,朱飘,潘文涛,等.秸秆源人工腐植酸的结构特征及其对玉米种子萌发的影响[J].农业环境科学学报,2025,44(7):1893~1901.
- [17] 刘小媛,杨劲松,姚荣江.化肥减量配施黄腐酸降低盐渍农田NaCl含量提高氮磷养分有效性的协同效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(8):1339~1350.
- [18] 王建恩.夏玉米/冬小麦矿源黄腐酸钾和腐植酸钾施

- 用效应研究 [D]. 河南农业大学硕士学位论文, 2024.
- [19] 刘佳欢, 王倩, 罗人杰, 等. 黄腐酸肥料对小麦根际土壤微生物多样性和酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (10) : 1808 ~ 1816.
- [20] 邓红梅, 蔡晓洋, 李文静, 等. 基施黄腐酸对麦冬生长、营养元素吸收及品质的影响 [J]. 中药与临床, 2024, 15 (2) : 13 ~ 19.
- [21] Liu X Y, Yang J S, Tao J Y, et al. Integrated application of inorganic fertilizer with fulvic acid for improving soil nutrient supply and nutrient use efficiency of winter wheat in a salt-affected soil[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 170: 104255.
- [22] Asli S, Neumann P M. Rhizosphere humic acid interacts with root cell walls to reduce hydraulic conductivity and plant development[J]. Plant and Soil, 2010, 336(1 ~ 2): 313 ~ 322.
- [23] Olaetxea M, Mora V, Bacaicoa E, et al. Abscisic acid regulation of root hydraulic conductivity and aquaporin gene expression is crucial to the plant shoot growth enhancement caused by rhizosphere humic acids[J]. Plant Physiology, 2015, 169(4): 2587 ~ 2596.
- [24] 乔冀良, 黄杰, 张振永, 等. 施氮肥对砂姜黑土地小麦生育特性及产量的影响 [J]. 农业科学, 2018, 8 (6) : 627 ~ 634.
- [25] 李泽丽, 刘之广, 张民, 等. 控释尿素配施黄腐酸对小麦产量及土壤养分供应的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (4) : 959 ~ 968.
- [26] 祁士军, 祁明星, 崔心燕, 等. 黄腐酸肥料对冬小麦产量和品质的影响 [J]. 农业科技通讯, 2022 (6) : 69 ~ 71, 82.
- [27] 马晓晶, 张洪江, 刘光海, 等. 黄腐酸复合肥对水稻生长和产量的影响 [J]. 腐植酸, 2021 (4) : 43 ~ 49.
- [28] 谢迎新, 刘宇娟, 张伟纳, 等. 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (14) : 115 ~ 123.
- [29] 尹丽华, 周恒民, 李洪岭, 等. 稻秆源黄腐酸应用效果研究 [J]. 腐植酸, 2018 (4) : 22 ~ 26, 41.
- [30] 丁怡梦, 陈慕琪, 丁文锐, 等. 谷类作物碳氮代谢互作机制的研究进展 [J]. 植物生理学报, 2024, 60 (5) : 753 ~ 761.
- [31] Che R Q, Ding K, Huang L, et al. Enhancing biomass and oil accumulation of *Monoraphidium* sp. FXY-10 by combined fulvic acid and two-step cultivation[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, 67: 161 ~ 165.
- [32] 王艳丹, 高欣, 彭金剑, 等. 棉花早、中熟品种营养器官碳氮含量变化的差异及与干物质积累的相关性 [J]. 作物杂志, 2023 (2) : 106 ~ 114.

## 新研究: 黄腐酸提升石灰性土壤锰的有效性

伊朗德黑兰大学土壤科学系 Zohreh Barzgar 团队系统探究了腐植酸 (HA) 和黄腐酸 (FA) 在 6 种石灰性土壤中对铁、锰、锌、铜 4 种微量元素有效性的提升效应, 重点分析了其分子特性、施用剂量及与土壤的相互作用机理。该研究成果以《腐植酸和黄腐酸提高石灰性土壤微量养分有效性的分子决定因素: Fe、Mn、Zn 和 Cu 的动态比较研究》(Molecular determinants of humic and fulvic acids in enhancing micronutrient availability in calcareous soils: a comparative study on Fe, Mn, Zn, and Cu dynamics) 为题, 发表在 2025 年第 1 期《科学报告》(Scientific Reports) 杂志上, 主要结果如下:

- (1) 高用量 FA 可显著提升锰的有效性, 最高达 3061%。结构分析首次从机理层面揭示了 FA 的增效作用主要源于疏水性木质素衍生结构域 (烷基 / 氧烷基比率 > 1.1), 而非传统认为酸性官能团含量。(2) HA 处理会降低铜的有效性, 降幅最高达 35.5%, 这可能与形成稳定的 Cu-HA 络合物有关。(3) 高用量 FA 可精准施用于缺锰的石灰性土壤, 特别是在砂质、高碳酸盐含量的土壤系统中效果更为有效。

(2025 年 10 月 22 日中腐协秘书处 供稿)