



何斌, 万泽华, 杨茜, 等. 外源油菜素内酯对干旱胁迫下芝麻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2026, 48(3): 680–689.

He B, Wan Z H, Yang X, et al. Influence of exogenously applied brassinosteroids on growth and physiological traits in sesame seedlings subjected to drought stress[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2026, 48(3): 680–689.

外源油菜素内酯对干旱胁迫下芝麻幼苗生长及生理特性的影响

何斌, 万泽华, 杨茜, 肖国洋, 康宇达, 董世华, 方圣*, 吴自明*

(江西农业大学 农学院/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要:【目的】探究油菜素内酯(BR)对干旱胁迫下芝麻幼苗生长发育及光合特性的影响。【方法】采用苗期盆栽试验,以鄱阳黑芝麻为供试材料,以正常水分管理且不喷施BR为对照组1(CK),干旱胁迫下喷施清水为对照组2(T0),分别喷施0.1、0.2、0.4、0.8 mg/L BR为试验组(T1、T2、T3、T4),共6个处理。连续喷施3 d后进行干旱处理,分别测定干旱处理后第0、7、14天芝麻的株高、茎粗、叶面积、生物量、SPAD、叶片气体交换参数、膜脂过氧化等相关指标。【结果】与对照组CK相比,干旱胁迫下芝麻幼苗的生长受到抑制,在干旱处理14 d时株高、茎粗、叶面积分别降低43.4%、26.6%、46%;地上部和地下部生物量累积分别降低了60.1%和56%;叶片相对电导率和丙二醛(MDA)含量显著上升,达137.6%和62.4%。同时,芝麻幼苗叶片的光合性能在干旱胁迫下受到显著抑制,SPAD、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)与CK相比均显著降低,胞间二氧化碳浓度(C_i)显著升高。喷施不同浓度的BR可以缓解干旱胁迫对芝麻幼苗生长的抑制作用,主要表现为通过提高叶片气体交换参数与植株的地上部、地下部生物量积累,降低芝麻幼苗叶片相对电导率和丙二醛含量,缓解膜脂过氧化对芝麻幼苗造成的损伤。与T0相比,T3处理在干旱14 d时叶片 P_n 、 G_s 和SPAD分别提升38.6%、64.6%和26%,MDA和相对电导率平均降低23.8%和45.1%。【结论】外源BR可以缓解干旱胁迫对芝麻生长的抑制作用,维持芝麻正常的生长发育及代谢,其中以0.4 mg/L BR的缓解效果最佳。

关键词: 芝麻;油菜素内酯;干旱胁迫;幼苗生长;光合;生理特性

中图分类号: S565.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2026)03-0680-10

CSTR: 32399.14.aauj.2026056



Influence of exogenously applied brassinosteroids on growth and physiological traits in sesame seedlings subjected to drought stress

He Bin, Wan Zehua, Yang Xi, Xiao Guoyang, Kang Yuda,
Dong Shihua, Fang Sheng*, Wu Ziming*

收稿日期: 2025-10-26 修回日期: 2025-11-28 接受日期: 2025-12-07

基金项目: 江西省油料产业技术体系项目(JXARS-03)和江西省重点研发计划项目(20243BBH81029)

Project supported by Jiangxi Oil Crop Industry Technology System (JXARS-03) and Jiangxi Provincial Key R&D Program (20243BBH81029)

作者简介: 何斌, 硕士生, orcid.org/0009-0004-3741-7050, 2861042518@qq.com; *通信作者: 方圣, 副教授, 博士, 主要从事作物栽培生理研究, orcid.org/0000-0002-5575-549X, mozhsheng@163.com; 吴自明, 教授, 博士, 主要从事作物栽培生理与遗传育种研究, orcid.org/0000-0002-8805-514X, wuzm@jxau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(College of Agriculture, Jiangxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] To explore the impact of brassinolide (BR) on the growth, development, and photosynthesis of sesame seedlings under drought stress conditions. [Method] A seedling-stage pot trial was carried out on Poyanghei, a brand of sesame in Jiangxi Province. Two controls were installed: CK (full irrigation, no BR) and T0 (drought, water spray). Drought-stressed plants were further supplied with 0.1, 0.2, 0.4 or 0.8 mg/L BR (giving treatments T1 to T4); After three consecutive days of foliar application, plant height, stem diameter, leaf area, biomass, SPAD value, leaf gas-exchange variables and membrane-lipid peroxidation markers were recorded on days 0, 7 and 14 of drought. [Result] The results indicated that, relative to the control group (CK), the growth of sesame seedlings under drought stress significantly increased, with reductions in plant height, stem diameter, leaf area, and above- and below-ground biomass by up to 43.4%, 26.6%, 46%, 60.1%, and 56%, respectively. Additionally, the relative electrical conductivity (REC) and malondialdehyde (MDA) content in the leaves increased significantly by 137.6% and 62.4%, respectively. Meanwhile, the photosynthetic performance of sesame seedling leaves was significantly inhibited under drought stress, with SPAD, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s) all significantly reduced compared to the control (CK); intercellular carbon dioxide concentration (C_i) significantly increased. Exogenous BR sprays of graded concentrations mitigated drought-induced growth suppression in sesame seedlings, primarily through improvements in leaf gas exchange parameters, enhanced dry matter accumulation in various organs during the seedling stage, and reductions in leaf relative electrical conductivity (REC) and malondialdehyde (MDA) content, thereby mitigating lipid peroxidation damage to the seedlings. Compared to T0, the T3 treatment significantly increased P_n , G_s , and SPAD values by up to 38.6%, 64.6%, and 26%, respectively, while reducing MDA and REC by up to 23.8% and 45.1%, respectively. [Conclusion] Exogenous application of BR can alleviate the inhibitory effects of drought stress on sesame seedlings, maintain normal growth, development, and metabolism, with the best alleviation achieved at a BR concentration of 0.4 mg/L.

Keywords: sesame; brassinolide; drought stress; seedling growth; photosynthetic; physiological characteristics

【研究意义】干旱是一种常见的非生物胁迫,也是限制作物生长发育及产量的主要因素^[1]。干旱胁迫下,植物细胞膨胀生长、叶片气体交换、光合作用等生理生化代谢过程受到阻碍;随干旱时间的延长,细胞失水状况加剧、细胞膜脂过氧化损伤加重、酶活性降低,造成作物生长发育迟缓,导致作物减产乃至绝产^[2]。芝麻(*Sesamum indicum* L.)是一种历史悠久、品质优良的油料作物^[3],拥有油中“皇后”的美称^[4],因其耐瘠薄、适应性较强的特性,在热带、亚热带、温带半干旱地区广泛栽培^[5]。但作为浅根系作物,芝麻极易受到干旱和渍涝等非生物胁迫的影响^[6]。苗期是芝麻生长发育的关键时期,苗期干旱导致芝麻生长速率降低、根系发育受阻、叶片数减少,最终导致成熟期蒴果数减少,产量显著下降^[7-8]。干旱胁迫通常导致芝麻减产 150~375 kg/hm²,严重干旱时,减产可达 50%~80%^[9-10]。因此,解决芝麻种植过程中面临的干旱问题对我国芝麻高产栽培具有重大意义。【前人研究进展】喷施外源植物生长调节剂可有效缓解逆境胁迫对作物造成的损害^[11]。油菜素内酯(BR)作为一种新型的植物激素,对改善逆境下植物体内的渗透调节具有重要作用^[12],能有效提高植物对干旱^[13]、低温^[14]、高温^[15]、盐^[16]、重金属^[17]等多种逆境胁迫的耐受性。李铭怡等^[18]研究表明,喷施 0.2 mg/L BR 能显著增加干旱胁迫下高羊茅的株高、生物量、光合气体相关参数,降低高羊茅叶片中的丙二醛(MDA)含量,加强其抗旱能力,且具有明显的浓度效应。孙石昂等^[19]研究表明,喷施 0.03 mg/L 28-HBR 可以促进干旱胁迫下玉米幼苗生物量的积累,提高光合效率与抗氧化能力,减轻膜脂过氧化对玉米幼苗的损伤。万绮雯等^[20]研究发现,干旱胁迫下叶面喷施 0.1 mg/L、0.3 mg/L EBR,可提高茶树光合速率(P_n)和气孔导度(G_s),降低叶片中的 MDA 含量,并提升抗氧化酶活性,从而缓解干旱对茶树的损伤。

【本研究切入点】油菜素内酯作为植物生长调节剂可以缓解干旱胁迫对多种作物造成的损伤,但关于其通过叶面喷施方式增强芝麻抗旱性的研究及应用尚未见相关报道。【拟解决的关键问题】本研究通过苗期盆栽干旱胁迫试验,结合相关性分析,探究不同浓度BR对干旱胁迫下芝麻幼苗生长及光合生理特性的影响,筛选出缓解芝麻干旱胁迫的BR最适浓度,以期对芝麻抗旱减灾生产提供理论研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

本试验于2024年9月在江西农业大学作物生理生态与遗传育种重点实验室进行。试验材料为地方芝麻品种“鄱阳黑”,挑选大小均匀且饱满的芝麻种子,消毒后催芽,将其播种于32孔育苗穴盘中,常规管理。待幼苗生长至二叶一心期,移栽至25 cm×12 cm的小花盆中,每盆定植一株。移栽后浇1次定植水,至四叶一心时,选取长势一致的芝麻幼苗进行BR喷施处理。处理分别为:正常供水组(CK);干旱组(T0);干旱+0.1 mg/L BR(T1);干旱+0.2 mg/L BR(T2);干旱+0.4 mg/L BR(T3);干旱+0.8 mg/L BR(T4),共6个处理,每个处理重复6次。连续3天傍晚向芝麻叶片正反两面喷施300 mL不同浓度的BR处理液,施用量均为50 mL/株,使芝麻充分吸收外源物质BR,以叶片表面湿润且无明显水珠滴下为标准。BR喷施完后,除CK组外,在第4天对其他处理组进行干旱胁迫。当土壤含水量降至(45±5)%时,计为干旱第0天,分别于干旱第0、7、14天时进行取样并测定各项指标。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 形态指标的测定

株高:从各处理组随机选3株芝麻幼苗,用直尺测其基部到顶端的株高,再算平均值。茎粗:测完株高后,用游标卡尺测定同一株芝麻幼苗子叶节处的茎粗,再取平均值。叶面积:利用比叶重法计算^[21]。

地上部与地下部干重:第7、14天采样后,选3株生长一致的植株,用电子秤称取地上及地下部鲜重;随后置于105℃烘箱杀青30 min,再调至75℃烘干至恒重,最后用电子天平测干重。

1.2.2 光合相关参数的测定

在天气晴朗并且无风时,采用CI-340便携式光合仪(美国思爱迪公司)测定植株叶片的相关光合参数^[22];用手持式叶绿素检测仪(SPAD-502),测量芝麻倒二叶SPAD值。

1.2.3 生理指标的测定

叶片相对含水量:取一定量的芝麻叶片,称取其鲜重后,将叶片浸泡于等离子水中8 h,取出后用滤纸擦干其叶片表面水分,称重后得到其饱和重量。最后将叶片置于70℃烘箱中烘干至恒重,并称其干重;相对含水量计算公式为:(鲜重-干重)/(饱和重-干重)×100%^[6]。相对电导率:洁净试管中加10 mL去离子水,测其空白电导率(E0)。取新鲜叶片0.1 g,剪成等长小段,放入10 mL去离子水中,避光放置12 h,测浸泡液电导率(E1);随后将样品置于沸水浴加热30 min,冷却至室温后测电导率(E2);叶片的相对电导率计算公式为:(E1-E0)/(E2-E0)×100%^[23]。MDA含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[24]测定。

1.3 数据处理与分析

使用SPSS 26.0软件对数据进行单因素方差分析和主成分分析;利用Origin 2024软件进行图表绘制,并通过LSD多重比较检验(显著性水平设定为 $P<0.05$)来评估不同处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同浓度外源BR对干旱胁迫下芝麻幼苗生长发育的影响

2.1.1 对干旱胁迫下芝麻幼苗生长的影响

由表1可知,芝麻幼苗的生长在干旱胁迫下遭到明显抑制,且随胁迫时间的延长抑制效应不断加剧。T0处理在干旱胁迫0、7、14 d的株高较对照组(CK)分别降低6.9%、22.8%和43.4%;茎粗分别减少15.8%、18.9%和26.6%;叶面积分别减少32.3%、46.0%和44.3%。外源喷施BR能够有效减轻干旱胁迫对芝麻幼苗生长所造成的影响。相较于T0处理,T1、T2、T3和T4处理的茎粗分别提高了12.7%、16.5%、18.3%和3.5%。第7天,T1、T2、T3和T4处理的株高相较于T0分别提高23.5%、24.5%、28.5%和20.0%;叶面积分别提高9.35%、18.5%、30.0%和5.88%;除T4外,其他外源BR处理茎粗分别提高5.6%、8.36%、

11.2%;第 14 天,T2 和 T3 处理下株高恢复至 CK 水平;T1、T2、T3 的茎粗较 T0 处理组分别提高 3.5%、10.4%、12.9%;叶面积分别提高 10.5%、26.6%、31.4%。T1、T2、T3、T4 处理组与 T0 处理组均有显著性差异 ($P<0.05$)。

表 1 不同 BR 浓度处理对于旱胁迫下芝麻幼苗生长的影响

Tab.1 The impact of different BR concentration treatments on the growth of sesame seedlings under drought stress

干旱天数/d Drought days	处理 Treatment	株高/g Plant height	茎粗/mm Stem diameter	叶面积/cm ² Leaf area
0	CK	13.87±0.37 ^{ab}	5.68±0.10 ^a	44.93±5.00 ^a
	T0	12.90±0.22 ^b	4.47±0.24 ^c	30.39±1.19 ^b
	T1	12.87±0.25 ^b	5.04±0.12 ^b	37.07±8.11 ^{ab}
	T2	12.60±0.24 ^b	5.21±0.09 ^b	37.03±1.98 ^{ab}
	T3	13.10±0.54 ^{ab}	5.29±0.12 ^b	38.41±1.35 ^{ab}
	T4	14.33±1.24 ^a	4.63±0.06 ^c	36.68±1.77 ^{ab}
7	CK	19.45±0.05 ^a	6.34±0.08 ^a	70.88±0.58 ^a
	T0	15.00±0.90 ^b	5.14±0.07 ^b	38.27±1.32 ^c
	T1	18.53±2.87 ^b	5.43±0.64 ^b	41.85±5.81 ^{bc}
	T2	18.67±0.21 ^b	5.57±0.21 ^b	45.35±1.40 ^{bc}
	T3	19.27±1.60 ^b	5.72±0.21 ^{ab}	49.76±0.97 ^b
	T4	18.00±0.29 ^{ab}	5.13±0.19 ^b	39.04±1.36 ^c
14	CK	32.95±0.45 ^a	7.03±0.61 ^a	72.94±1.98 ^a
	T0	18.03±0.39 ^c	5.16±0.07 ^{bc}	39.93±1.53 ^c
	T1	24.37±0.40 ^d	5.34±0.10 ^{bc}	44.16±0.35 ^c
	T2	30.00±0.70 ^b	5.70±0.07 ^b	50.58±2.37 ^b
	T3	30.30±1.56 ^b	5.83±0.14 ^b	52.48±0.79 ^b
	T4	27.60±0.10 ^c	4.73±0.34 ^c	42.28±1.92 ^c

表中每列数据后的小写字母表示不同处理在 5% 概率水平差异显著。

The lowercase letters following each column of data in the chart above indicate significant differences between different treatments at the 5% probability level.

2.1.2 对于旱胁迫下芝麻幼苗生物量的影响

由表 2 可知,干旱胁迫导致芝麻幼苗生物量积累受到抑制。与对照组(CK)相比,T0 处理组在干旱 7 d 后,茎秆干重、叶干重、地上部分干重和地下部分干重分别降低了 28.5%、33.3%、60.1% 和 56%;干旱 14 d 后,茎秆干重、叶干重、地上部分干重和地下部分干重分别降低了 33.6%、34.1%、44.4% 和 44.9%。而外源 BR 处理能显著提高干旱胁迫下芝麻幼苗的生物量积累,其中 T3 处理的效果最为显著。与 T0 处理相比,T3 处理在第 7 天分别使茎秆干重、叶干重、地上部分干重和地下部分干重提高了 54.2%、27.9%、42.5% 和 45.4%;在第 14 天分别提高了 38.1%、30.8%、34% 和 45.8%。

2.2 不同浓度外源 BR 对于旱胁迫下芝麻幼苗叶片光合参数的影响

由图 1 可知,芝麻幼苗的叶片光合气体交换能力随干旱时间的延长受到明显抑制。与干旱组 T0 相比,外源施加 BR 处理可有效缓解干旱胁迫的抑制效应,且呈现“低浓度促进、高浓度抑制”剂量效应特征。T2 处理在胁迫初期(T0)表现出最佳的改善效果,除 C_i 外, P_n 、 T_r 、SPAD 等指标较 T0 分别提升了 25.6%、40.9% 和 10.4%。随着胁迫时间的延长,T3 处理逐渐展现出更显著的促进作用,在第 7 天和第 14 天时,其 P_n 、 G_s 、 T_r 和 SPAD 值分别较对照组提高了 36.9%、64.6%、29.9% 和 16.5%,以及 38.6%、37.2%、17.7% 和 26%;同时, C_i 较 T0 分别降低了 28.69% 和 7.64%。

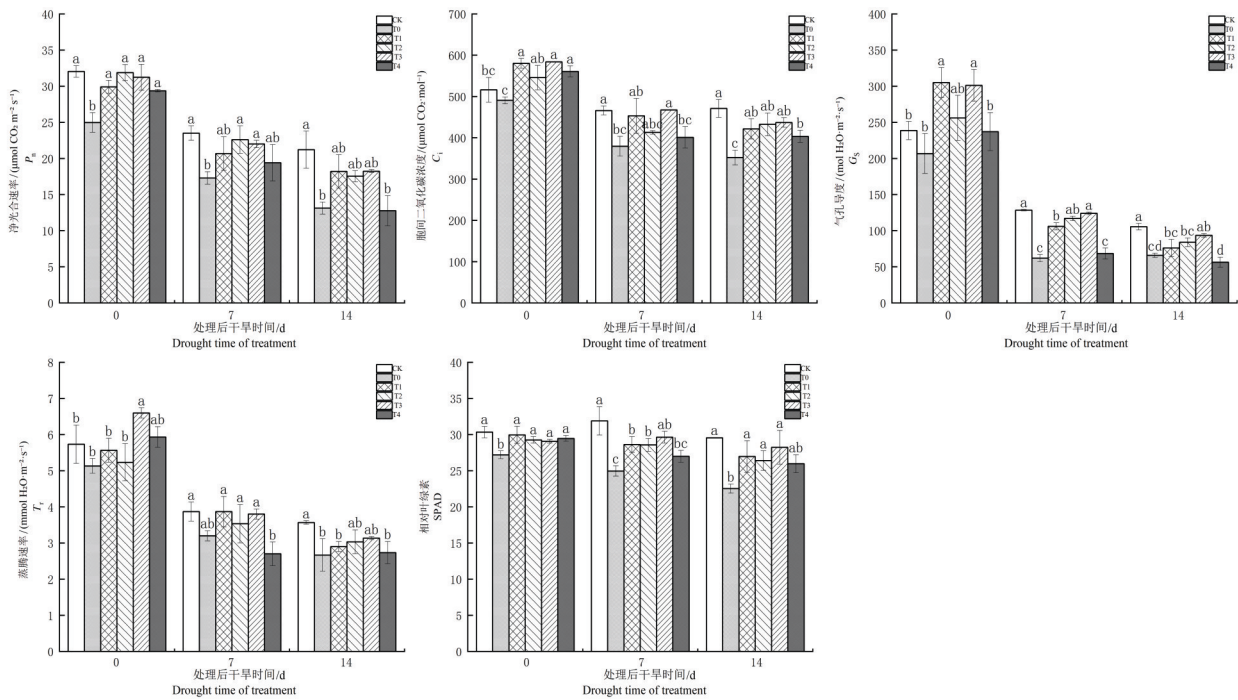
表2 不同BR浓度处理对干旱胁迫下芝麻幼苗生物量的影响

Tab.2 The impact of different BR concentration treatments on the biomass of sesame seedlings under drought stress

干旱天数/d	处理	茎秆干重/g	叶干重/g	地上部干重/g	地下部干重/g
Drought days	Treatment	Dry weight of stem	Dry weight of leaf	Dry Weight of Shoot	Dry Weight of root
7	CK	0.56±0.04 ^a	0.92±0.14 ^a	1.48±0.11 ^a	0.75±0.10 ^a
	T0	0.35±0.05 ^b	0.68±0.03 ^b	1.01±0.05 ^b	0.33±0.02 ^c
	T1	0.48±0.02 ^{ab}	0.80±0.15 ^a	1.22±0.16 ^{ab}	0.38±0.03 ^{bc}
	T2	0.49±0.04 ^{ab}	0.82±0.12 ^a	1.31±0.08 ^{ab}	0.40±0.02 ^{bc}
	T3	0.54±0.06 ^{ab}	0.87±0.07 ^a	1.44±0.11 ^a	0.48±0.02 ^b
	T4	0.48±0.05 ^{ab}	0.80±0.07 ^a	1.29±0.10 ^{ab}	0.39±0.07 ^{bc}
14	CK	0.95±0.05 ^a	1.16±0.03 ^a	2.11±0.08 ^a	0.89±0.08 ^a
	T0	0.63±0.03 ^c	0.81±0.08 ^c	1.44±0.09 ^c	0.48±0.01 ^d
	T1	0.80±0.08 ^{bc}	0.93±0.07 ^{bc}	1.67±0.06 ^{bc}	0.54±0.02 ^{cd}
	T2	0.80±0 ^{abc}	0.95±0.02 ^{bc}	1.76±0.03 ^{bc}	0.63±0.06 ^{bc}
	T3	0.87±0.11 ^{ab}	1.06±0.06 ^{ab}	1.93±0.17 ^{ab}	0.70±0.02 ^b
	T4	0.75±0.08 ^{bc}	0.92±0.14 ^{bc}	1.67±0.21 ^{bc}	0.54±0.04 ^{cd}

表中每列数据后的小写字母表示不同处理在5% 概率水平差异显著。

The lowercase letters following each column of data in the chart above indicate significant differences between different treatments at the 5% probability level.



每个图柱上的不同小写字母表示在5% 概率水平差异显著。

The different lowercase letters on each bar in the chart above indicate significant differences at the 5% probability level .

图1 不同浓度BR处理对干旱胁迫下芝麻幼苗叶片光合性能的影响

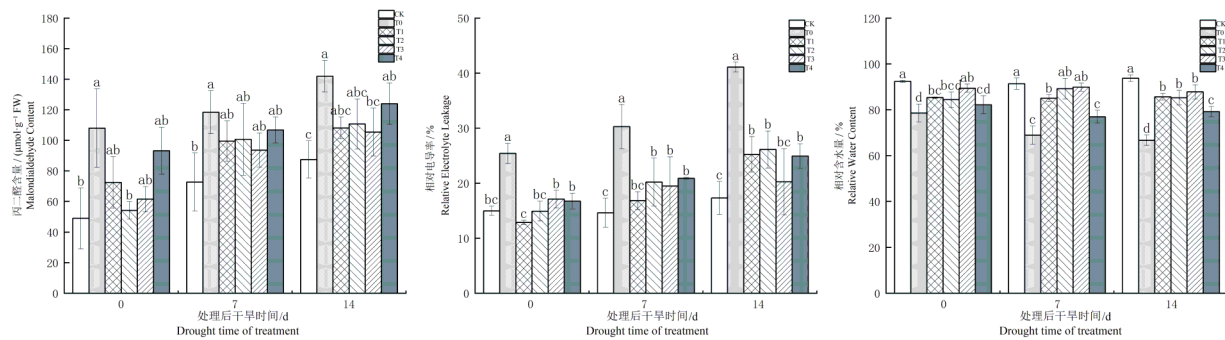
Fig.1 Effects of different concentrations of BR treatment on photosynthetic performance of sesame seedling leaves under drought stress.

2.3 不同浓度外源BR对干旱胁迫下芝麻幼苗叶片MDA、相对电导率及相对含水量的影响

MDA和相对电导率作为细胞膜透性的重要评价指标,可用于衡量植物在逆境胁迫下的膜损伤程度及抗逆能力。研究表明,芝麻叶片MDA含量随干旱胁迫时间的延长而逐渐增加,并在胁迫第14天时达到最高值,较CK组增加62.4%。不同浓度的BR处理均显著降低了MDA含量,其中T3处理效果最佳,

较 T0 处理降低了 23.8%。相对电导率的变化趋势与 MDA 类似,第 14 天,相对电导率较 CK 组增加 137.6%。T3 处理使相对电导率降低了 45.1%,显著缓解了干旱胁迫引起的电解质外渗和膜结构损伤。

此外,叶片相对含水量在干旱胁迫下呈逐渐下降的趋势,第 14 天,T0 处理较 CK 降低了 28.8%。不同浓度的 BR 处理均提高了叶片相对含水量,其中 T3 处理效果最为显著,较 T0 处理提高了 22.3%。



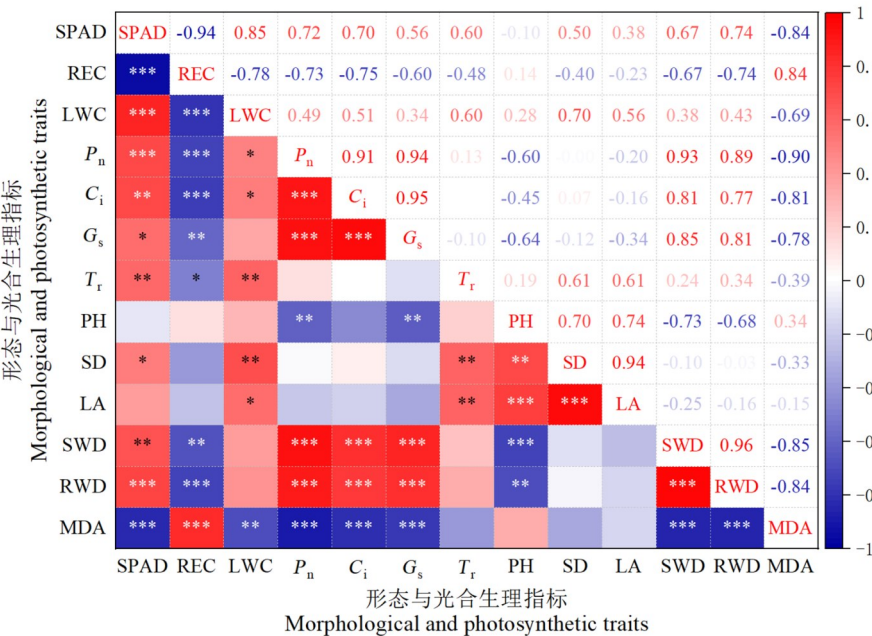
每个图柱上的不同小写字母表示在 5% 概率水平差异显著。
The different lowercase letters on each bar in the chart above indicate significant differences at the 5% probability level.

图 2 不同浓度 BR 处理对干旱胁迫下芝麻幼苗 MDA、相对电导率及相对含水量的影响

Fig.2 The effect of different concentrations of BR treatment on MDA ,relative electrical conductivity and relative water content in sesame seedling leaves under drought stress.

2.4 芝麻幼苗生理指标相关性分析

对处理后芝麻幼苗的 13 个生理指标进行相关性分析(图 3)。结果表明,SPAD 值与 RWC、 P_n 呈极显著正相关($P<0.001$),与 REC 和 MDA 含量呈极显著负相关($P<0.001$)。RDW 与 SDW、LA、SD、PH 呈极显著正相关($P<0.001$)。此外,MDA 含量与 REC 呈极显著正相关($P<0.001$);与 RWC、 P_n 、 G_s 、 T_r 显著负相关($P<0.001$)。



0.05 ** $P\leq 0.01$ *** $P\leq 0.001$
*表示相关性显著($P<0.05$);**表示相关性非常显著($P<0.01$);***表示相关性极显著($P<0.001$)。 P_n :净光合速率; T_r :蒸腾速率; G_s :气孔导度; C_i :胞间 CO_2 浓度;PH:株高;SD:茎粗;LA:叶面积;SDW:地上部干重;RDW:地下部干重;MDA:丙二醛;REC:相对电导率;RWC:相对含水量。
* significant at $P<0.05$; ** significant at $P<0.01$. *** Significant at $P<0.001$. P_n : Net photosynthetic rate; T_r : Transpiration rate; G_s : Stomatal conductance; C_i : Intercellular CO_2 concentration; PH: Plant height; SD: Stem diameter; LA: Leaf area; SDW: Aboveground dry weight; RDW: Belowground dry weight; MDA: Malondialdehyde; REC: Relative electrical conductivity; RWC: Relative water content.

图 3 不同 BR 处理下各项指标的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of each index arundinacea under different treatments

3 讨 论

干旱胁迫是限制作物生长发育与产量的关键非生物逆境。前人研究表明,苗期遭遇干旱胁迫会显著降低芝麻植株的株高增长率,具体表现为叶片发育受阻、株型矮化及生物量积累受限^[25]。郝威名等^[26]研究发现,中度水分胁迫抑制了水稻的生长,而喷施0.1 $\mu\text{mol/L}$ BR可以显著提高水稻的株高、地上部干质量累积、每穗粒数及结实率,显著提升水分胁迫抑制下的水稻产量。张伟等^[27]的研究发现,西瓜幼苗的生长受到干旱胁迫抑制后,经0.01 mg/L (EBR)处理的西瓜幼苗株高、根系发育和生物量积累亦得到显著改善。本研究表明,干旱胁迫导致芝麻株高、茎粗、叶面积、生物量累积均显著降低。BR处理后,芝麻的株高、茎粗、叶面积、生物量累积较T0处理均有所提升,并且随BR浓度的提升呈现先促进后抑制的趋势。0.4 mg/L BR处理对其生长促进效果最佳,株高增幅达到28.5%,茎粗增幅达到18.5%,叶面积增幅达到31.4%,地上、下部生物量增幅分别达到42.5%和45.4%。结果表明,喷施适宜浓度的BR能够有效减轻干旱胁迫对芝麻植株形态和生物量积累的抑制作用;这可能是因为干旱胁迫下BR通过调控芝麻细胞的分裂与伸长,优化其资源分配,将有限的养分协调分配给地上与地下部,维持细胞结构稳定,满足芝麻进行正常的生理代谢活动,从而减缓干旱胁迫对其生长造成的抑制作用。

干旱胁迫会引发气孔限制效应,表现为气孔导度(G_s)下降导致 CO_2 同化受阻,同时蒸腾速率(T_r)降低加剧水分代谢失衡,最终造成净光合速率(P_n)和叶绿素含量(SPAD)的协同下降^[28]。杜杰等^[29]的研究表明,在谷子穗分化期施用0.05 mg/L BR可使 P_n 、 G_s 、 T_r 分别提升32.6%、41.8%和28.3%,BR可通过多途径改善逆境光合效率。马野等^[30]的研究表明,玉米幼苗在干旱胁迫下经0.1 $\mu\text{mol/L}$ BR处理后,其光合作用效率得到显著增强,光系统II最大光化学效率(F_v/F_m)提升19.4%。本研究发现,干旱胁迫下芝麻幼苗的SPAD、 T_r 、 P_n 和 G_s 均显著下降,这可能是因为干旱条件下,植物可通过降低 G_s 来减少 T_r ,气孔开度减小限制了光合作用原料 CO_2 的供应,从而导致 P_n 下降,并进一步引起叶片SPAD值的降低。而外源施用适宜浓度BR(0.2~0.4 mg/L)可以显著提高芝麻的 G_s 和 T_r ,进而提高芝麻的 P_n 与叶绿素SPAD。这与王丽君等^[31]在烤烟上的研究结果一致,表明适宜浓度的BR能够通过减轻植物体内叶绿素的降解程度,调节气孔开闭程度,增加 CO_2 摄入,减少叶片水分散失,从而提高水分利用效率,增强芝麻在干旱胁迫下的光合效率,进而提高其抗旱性。

前人研究发现,干旱胁迫会导致RWC下降,自由基代谢平衡遭到破坏,从而诱发膜脂过氧化反应,加剧细胞膜损伤,增加质膜透性,使得电解质大量外渗,导致电导率和MDA含量升高^[32]。本研究也发现,干旱胁迫显著降低芝麻叶片的RWC,同时使得芝麻叶片的相对电导率和MDA含量显著增加。而外源喷施BR后,芝麻叶片RWC的下降幅度明显减缓,相对电导率和MDA含量较T0处理显著降低,这与钱旭林等^[33]在垂丝海棠上的研究结果一致,进一步说明在干旱胁迫条件下,外源喷施BR溶液能够提高芝麻叶片的保水能力,减轻细胞膜系统损伤,从而提升芝麻幼苗的抗旱能力。

植物的抗旱性受到多种生理因素的影响,缓解植物干旱胁迫也需要多种生理因素共同作用^[34]。本研究对BR处理后芝麻幼苗的13个生理指标相关性分析结果表明,共有25项指标间的相关性达到极显著水平($P<0.001$),12项指标间相关性达到显著水平($P<0.01$)。其中SPAD值与RWC、 P_n 极显著正相关,与REC和MDA含量极显著负相关,说明外源BR可以通过缓解干旱胁迫下芝麻叶片叶绿素含量的分解,从而提高叶片的光合能力,减少芝麻叶片细胞膜结构损伤和电解质外渗,维持芝麻的正常生理活动。RDW与SDW、LA、SD、PH极显著正相关,这可能是外源BR促进了芝麻在根系积累更多的生物量,以增强在胁迫环境下的养分吸收能力,维持地上部的正常生长。

综上所述,外源BR能通过改善光合性能、增强膜稳定性及促进根系及生物量分配等多重途径,有效缓解苗期干旱对芝麻生长的抑制,显示出良好的农艺减灾应用价值,但是在实际生产中,还需结合芝麻品种、胁迫程度及环境条件来优化BR使用浓度及时期,以期实现稳定有效的抗旱保产效果。

4 结 论

干旱胁迫下,喷施适宜浓度的BR可以提高芝麻幼苗地上及地下部生物量累积,缓解干旱胁迫引起的叶面积减少与叶绿素分解;此外,外源BR处理可以调节芝麻叶片的气孔导度、改善芝麻幼苗的光合效

率,显著降低芝麻幼苗叶片的相对电导率和MDA累积,减轻膜脂过氧化对叶片的损伤,维持芝麻正常的生理代谢。研究表明,芝麻幼苗喷施0.4 mg/L BR缓解干旱胁迫效果最佳。

参考文献 References:

- [1] 张圆雷,张宏图,徐子寅,等.干旱模式下木薯气孔密度及生理指标的比较分析[J].热带生物学报,2025,16(2):163-171.
Zhang Y L, Zhang H T, Xu Z Y, et al. Comparative analysis of stomatal density and physiological indexes of cassava under drought stress[J]. Journal of Tropical Biology, 2025, 16(2): 163-171.
- [2] 张铜津.干旱胁迫下烤烟钾素的吸收特征及水肥一体化的调控应用研究[D].郑州:河南农业大学,2023:5.
Zhang T J. Study on potassium absorption characteristics of flue-cured tobacco under drought stress and application of integration of water and fertilizer regulation[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023: 5.
- [3] Eskandari H, Zehtab-Salmasi S, Ghassemi-Golezani K, et al. Effects of water limitation on grain and oil yields of sesame cultivars[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2009, 7(2): 339-342.
- [4] 吕伟,韩俊梅,任果香,等.山西芝麻种质资源SSR遗传多样性及群体结构分析[J].核农学报,2021,35(7):1495-1506.
Lü W, Han J, Wen F, et al. Genetic diversity analysis of sesame germplasm resources in Shanxi with SSR markers[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(7): 1495-1506.
- [5] 吕伟,韩俊梅,文飞,等.西北地区芝麻单株产量与农艺性状的相关性与通径分析[J].种子,2020,39(4):91-94.
Lü W, Han J M, Wen F, et al. Correlation and path analysis of yield per plant and agronomic traits of sesame in northwest China[J]. Seed, 2020, 39(4): 91-94.
- [6] 张梓然,郑德益,涂子豪,等.钾营养对花期干旱胁迫芝麻生长及叶片氮代谢的影响[J].核农学报,2024,38(9):1782-1789.
Zhang Z R, Zheng D Y, Tu Z H, et al. Effects of potassium on growth and leaf nitrogen metabolism of sesame under drought stress at flowering stage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(9): 1782-1789.
- [7] 刘文萍,刘霞霞,韩俊梅,等.芝麻苗期干旱生理生化指标响应特征及其基因表达分析[J].干旱地区农业研究,2024,42(1):152-158.
Liu W P, Liu X X, Han J M, et al. Response characteristics of physiological and biochemical indices and gene expression analysis of sesame during seedling stage under drought[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 152-158.
- [8] 黎冬华,刘文萍,张艳欣,等.芝麻耐旱性的鉴定方法及关联分析[J].作物学报,2013,39(8):1425-1433.
Li D H, Liu W P, Zhang Y X, et al. Identification method of drought tolerance and association mapping for sesame (*Sesamum indicum* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8): 1425-1433.
- [9] 孙建,颜小文,乐美旺,等.芝麻不同抗旱基因型对花期干旱胁迫的生理响应机理[J].中国农业科学,2019,52(7):1215-1226.
Sun J, Yan X W, Le M W, et al. Physiological response mechanism of drought stress in different drought-tolerance genotypes of sesame during flowering period[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(7): 1215-1226.
- [10] 苏如奇,黎冬华,吴自明,等.芝麻非生物胁迫抗性研究进展[J].中国油料作物学报,2025,47(2):260-272.
Su R Q, Li D H, Wu Z M, et al. Research progress on abiotic stress resistance in sesame[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2025, 47(2): 260-272.
- [11] 贺琰.外源油菜素内酯处理对高温胁迫下‘赤霞珠’葡萄光合特性及果实品质的影响[D].银川:宁夏大学,2022:1.
He Y. Effects of exogenous brassinolide treatment on photosynthetic characteristics and fruit quality of grape under heat stress[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022: 1.
- [12] 丁芳,吕树立,田壮博,等.外源喷施2,4-表芸苔素内酯对盛花期渍害胁迫下芝麻耐渍性的影响[J].山西农业科学,2025,53(1):64-72.
Ding F, Lü S L, Tian Z B. Effects of exogenous spraying brassinolide on waterlogging tolerance of sesame under waterlogging stress at flowering stage[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1): 64-72.
- [13] 郭婧华,王富豪,郝培培,等.3种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗生长的缓解效应[J].江苏农业科学,2024,52(15):105-111.
Guo J H, Wang F H, Hao P P, et al. Mitigating effects of three exogenous substances on growth of oil seed rape seedlings under drought stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(15): 105-111.
- [14] 陈奕可,代星苗,田义,等.低温胁迫下外源油菜素内酯对核桃抗寒性的影响[J].北方园艺,2025(6):72-81.

- Chen Y K, Dai X M, Tian Y, et al. Effects of exogenous brassinolide on cold resistance of walnut under low-temperature stress[J]. Northern Horticulture, 2025(6): 72-81.
- [15] Wu J Q, Li P X, Li M, et al. Heat stress impairs floral meristem termination and fruit development via affecting BR-SICRCa cascade in tomato[J]. Plant Communications, 2024, 5(4): 100790.
- [16] Zhang Z, Ma X, Tang D, et al. Effects of brassinosteroid on the physiological changes on two varieties of tea plants under salt stress[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(24): 13445.
- [17] Emamverdian A, Khalofah A, Pehlivan N, et al. Exogenous application of jasmonates and brassinosteroids alleviates lead toxicity in bamboo by altering biochemical and physiological attributes[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 31: 7008-7026.
- [18] 李铭怡, 贾濠基, 董文豪, 等. 油菜素内酯对干旱胁迫下护坡植物高羊茅生理特性的调控效应[J]. 草业科学, 2025, 42(1): 140-151.
- Li M Y, Jia H J, Dong W H, et al. Regulatory effects of brassinolide on the physiological characteristics of *Festuca arundinacea*, a slope protection plant, under drought stress[J]. Pratacultural Science, 2025, 42(1): 140-151.
- [19] 孙石昂, 何发林, 姚向峰, 等. 芸苔素内酯可提高玉米幼苗的抗旱性[J]. 植物生理学报, 2019, 55(6): 829-836.
- Sun S A, He F L, Yao X F, et al. Brassinolide improves the drought resistance of maize seedlings[J]. Plant Physiology Journal, 2019, 55(6): 829-836.
- [20] 万绮雯. 外源24-表油菜素内酯对盐和干旱胁迫下茶树光合特性影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021: 1.
- Wan Q W. Study on the effects of exogenous 24-epibrassinolide on photosynthetic characteristics of tea plants under salt and drought stresses[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021: 1.
- [21] 刘镭源, 王纪华, 杨贵军, 等. 冬小麦叶面积指数地面测量方法的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 220-224.
- Liu R Y, Wang J H, Yang G J, et al. Comparison of ground-based LAI measuring methods on winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 220-224.
- [22] 汤英, 徐利岗, 何新林, 等. 宁夏引黄灌区不同带距及水肥处理对玉米大豆间作系统光合特性和产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2024(10): 240-247.
- Tang Y, Xu L G, He X L, et al. Effect of varied strip spacings and water-fertilizer treatments on the photosynthetic dynamics and yield of maize-soybean intercropping systems in yellow river irrigation area of Ningxia[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024, (10): 240-247.
- [23] 张子怡, 王学虎, 苑莹, 等. 外源物质复配对低温胁迫下小白菜生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1): 73-79.
- Zhang Z Y, Wang X H, Yuan Y, et al. Effect of exogenous compound pairing on physiological characteristics of pakchoi under low temperature stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1): 73-79.
- [24] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(3): 207-210.
- Zhao S J, Xu C C, Zou Q, et al. Improvement of method for measurement malondialdehyde in plant tissues[J]. Plant Physiology Communications, 1994, 30(3): 207-210.
- [25] 孙建, 饶月亮, 乐美旺, 等. 干旱胁迫对芝麻生长与产量性状的影响及其抗旱性综合评价[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(4): 525-533.
- Sun J, Rao Y L, Le M W, et al. Effects of drought stress on sesame growth and yield characteristics and comprehensive evaluation of drought tolerance[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 32(4): 525-533.
- [26] 郝威名, 李浩晶, 李雨阳, 等. 外源油菜素内酯与不同水分处理对水稻生长生理、产量及氮素利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 54-64.
- Hao W M, Li H J, Li Y Y, et al. Effects of exogenous brassinolide and different water treatments on growth physiology, yield, and nitrogen use of rice[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 54-64.
- [27] 张伟, 杨国慧, 于辉. 2,4-表油菜素内酯对干旱胁迫下西瓜幼苗生长及相关基因表达的影响[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(3): 615-622.
- Zhang W, Yang G H, Yu H. Effects of 2,4-epibrassinolide on growth and related genes expression of watermelon seedlings under drought stress[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(3): 615-622.
- [28] 何苗, 姜元昊, 轩正英, 等. 芜菁幼苗叶片光合特性和解剖结构对干旱胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2024, 44(10): 1530-1538.
- He M, Jiang Y H, Xuan Z Y, et al. Response of leaf photosynthetic characteristics and anatomical structure of *Brassica rapa*

- seedlings to drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(10): 1530-1538.
- [29] 杜杰, 冯宇, 夏清, 等. 外源油菜素内酯缓解谷子穗分化期干旱胁迫的机理研究[J]. *作物杂志*, 2024(4): 144-151.
- Du J, Feng Y, Xia Q, et al. Mechanism of exogenous brassinolide in alleviating drought stress injury at panicle differentiation stage in foxtail millet[J]. *Crops*, 2024(4): 144-151.
- [30] 马野, 原换换, 裴新涌, 等. 干旱胁迫下外源油菜素内酯对玉米幼苗光合作用和D1蛋白的调控效应[J]. *华北农学报*, 2017, 32(3): 118-124.
- Ma Y, Yuan H H, Pei X Y, et al. Exogenous BR alleviates drought stress by regulating photosynthesis and D1 protein in maize seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(3): 118-124.
- [31] 王丽君, 李冬, 申洪涛, 等. 油菜素内酯对干旱胁迫下烤烟幼苗生长生理及光合特性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(11): 33-41.
- Wang L J, Li D, Shen H T, et al. Effects of brassinolide on growth, physiology and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco seedlings under drought stress[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(11): 33-41.
- [32] 许向阳, 陈小玉, 赵婷婷, 等. 外源ABA喷施提高番茄幼苗抗旱性研究[J]. *东北农业大学学报*, 2018, 49(9): 1-8.
- Xu X Y, Chen X Y, Zhao T T, et al. Study on exogenous ABA on improving drought resistance of tomato seedling[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2018, 49(9): 1-8.
- [33] 绿旭林, 张德, 张仲兴, 等. 2,4-表油菜素内酯对干旱胁迫下垂丝海棠生理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3): 37-45.
- Xian X L, Zhang D, Zhang Z X, et al. Effects of 2,4-Epibrassinolide on physiological characteristics of *Malus halliana* under drought stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 37-45.
- [34] 崔凯东, 张雪, 顾开元, 等. 干旱胁迫下外源褪黑素对旺长期烤烟生理特性的影响[J]. *烟草科技*, 2024, 57(4): 42-52.
- Cui K D, Zhang X, Gu K Y, et al. Effects of exogenous melatonin on physiological characteristics of drought-stressed, flue-cured tobacco at fast-growing stage[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2024, 57(4): 42-52.

(责任编辑:熊淑琪)



第一作者简介:何斌,硕士生,研究方向为芝麻高产栽培。在研究生期间学业优异,连续2年获得学业奖学金,获得2025学年国家奖学金。在科研方面发表了2篇中文核心论文,1篇摘要,获得了1个软件著作权,具有扎实的专业实践能力。



通信作者简介:吴自明,教授,博士,博士生导师,主要从事作物栽培生理、育种及分子生物学等方面的教学科研与技术推广工作。先后主持和承担国家自然科学基金,国家重点研发计划子课题,国家“十二五”科技支撑计划子课题,教育部博士点基金,江西省重点研发计划,江西省科技支撑计划,江西省自然科学基金等项目20余项。获全国优秀百篇博士论文提名及江苏省优秀博士论文奖,江西省科技进步二等奖1项,江西省农科教突出贡献奖2项,江西省教学成果二等奖1项等,在国内外重要学术期刊发表学术论文80余篇。