

局部灌水下 6-BA 对玉米幼苗生长和内源化学信号的影响

王一博¹, 牛晓丽^{1*}, 代智光¹, 赵犇², 马天成¹, 王佳琛¹, 王治豪¹

(1.河南科技大学, 河南 洛阳 471003; 2.中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002)

摘要:【目的】明确局部灌水下 6-BA 对玉米幼苗生长和内源化学信号的影响。【方法】设置了无水胁迫对照处理(正常灌水, CK)、前期均匀供水后局部供水(局部亏水, PD)、前期均匀供水后局部供水+6-BA (PDT)、前期均匀水分胁迫后局部复水(局部复水, PR)、前期均匀水分胁迫后局部复水+6-BA (PRT) 共 5 个处理, 研究局部灌水下喷施 6-BA 对玉米生长指标和根系、茎部木质部汁液和叶片化学信号的影响。【结果】与 CK 相比, PD 处理显著提高了玉米幼苗供水侧根系干质量、地上部干质量和叶面积, 但不利于亏水侧根系干质量的生长, 同时提高了叶片、供水侧根系和木质部汁液玉米素(ZA)、硝态氮(NO_3^-)和可溶性蛋白(Cpr)量, 并降低了脱落酸(ABA)量; PR 处理显著降低了玉米幼苗两侧根系干质量、地上部干质量和叶面积, 另外降低了叶片、两侧根系和木质部汁液 ZA、 NO_3^- 、Cpr 量, 并提高了 ABA 量。与 PD、PR 处理相比, PDT、PRT 处理均提高了玉米幼苗两侧根系干质量、地上部干质量和叶面积以及不同生长部位 ZA、 NO_3^- 、Cpr 量, 并降低了不同部位 ABA 量, 有利于强化玉米整体的补偿生长。【结论】前期充分灌水后局部亏水处理更有利于刺激玉米的补偿生长, 在局部灌水基础上额外喷施 6-BA 能够强化玉米幼苗整体的补偿生长效果, 各化学信号对玉米生长发育调节作用不同。

关键词: 局部灌水; 6-BA; 生长指标; 化学信号; 补偿生长

中图分类号: S513

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022163

OSID:



王一博, 牛晓丽, 代智光, 等. 局部灌水下 6-BA 对玉米幼苗生长和内源化学信号的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 16-23.

WANG Yibo, NIU Xiaoli, DAI Zhiguang, et al. Effects of 6-BA on Growth and Endogenous Chemical Signals of Maize Seedlings under Partial Irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 16-23.

0 引言

【研究意义】玉米是我国主要的粮食作物, 在生长发育中对水分的需求较大^[1], 1980—2017 年我国玉米种植规模增加了 2 200 万 hm^2 , 需水量也随之增加了 816 亿 m^3 ^[2]。水资源是农业生产的关键要素, 但是我国水资源匮乏, 干旱和半干旱地区占国土总面积的 1/2, 水资源的不足严重制约着我国农业生产的发展^[3], 关于如何充分挖掘植物自身对干旱环境的适应潜力成了众多学者研究的热点^[4-6]。

【研究进展】植物在生长发育过程中不可避免地会受到各种非生物胁迫的影响, 其中水分胁迫是植物体生长过程中的主要胁迫因素之一, 植物处于水分胁迫下时会通过改变自身形态、代谢和生理性状从而减少资源消耗, 以应对干旱环境^[7]。近年来, 关于局部根区灌溉技术对作物生长发育、水分利用效率等的影

响效果受到学者们的广泛关注^[8-9], 局部根区灌水是指在作物生长阶段内只对一半根区进行正常灌溉, 同时维持另一半根区适度的水分胁迫, 从而刺激作物的补偿生长效应, 能够在维持作物正常生长的前提下节约灌溉用水^[10]。局部灌水条件下, 干燥侧的根系会产生水分胁迫信号(如 ABA), 可以调节叶片气孔开度以及蒸腾作用, 从而降低干旱损伤和蒸腾耗水^[11]。Djaman 等^[12]研究发现, 与正常灌水处理相比, 局部灌水处理能在不减少玉米产量的同时显著降低灌溉用水量, 也有研究^[13]表明, 在玉米幼苗期进行局部灌水时, 维持一侧根区 -0.2 MPa 水分胁迫程度能显著刺激玉米幼苗补偿生长。6-苜氨基腺嘌呤(6-BA)是通过人工合成的一种外源细胞分裂素, 可以调节作物的生长发育^[14], 通过对植物施加一定浓度的 6-BA 能使植物主干增粗, 促进植物的生长^[15-16], 另外有研究^[17]已证实, 对作物喷施 6-BA 可以缓解逆境胁迫对作物生长发育的不利影响。可见局部灌水处理和施加 6-BA 均能影响植物生长发育, 研究局部灌水处理下喷施 6-BA 对玉米补偿生长的影响是挖掘玉米自身生长潜力的重要技术途径。【切入点】目前对玉米补偿生长效应的研究多集中在水分或养分胁迫等因素上,

收稿日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709263); 河南省科技攻关项目(212102110035); 河南科技大学博士科研启动基金项目(13480023); 河南科技大学 SRTP 项目(2021074)

作者简介: 王一博(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事作物高效用水方面的研究。E-mail: 2065453559@qq.com

通信作者: 牛晓丽(1985-), 女, 博士, 主要从事作物需水过程与调控研究。E-mail: niuxiaoli88@126.com

针对局部灌水条件下施加 6-BA 的耦合处理对玉米补偿生长的影响机制尚不明确。同时由于植物的生长发育和内源化学信号的调控作用密切相关，因此有必要结合局部灌水同时研究 6-BA 对玉米生长指标和内源化学信号的影响。【拟解决的关键问题】本研究选用玉米作为试验材料，在苗期采用控制条件下分根水培的方式并通过向叶片喷施 6-BA，研究 6-BA 在局部灌水条件下对玉米幼苗不同生长指标和化学信号的影响，以期为深入挖掘玉米生长潜力提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021 年在河南科技大学进行，使用旭田 PF-BN-4B 人工气候箱设置控制条件下分根水培试验。气候箱内温度设置为 25~28 °C，相对湿度为 30%~35%，光照开启时间为 06:00—20:00。试验所用玉米品种为浚单 20，所用营养液为 Hoagland 营养液，表 1 为营养液具体成分。本研究通过向营养液添加聚乙二醇（PEG 6000）来控制其水分胁迫程度为-0.2 MPa，所用 6-BA 质量浓度为 10 mg/L。

表 1 营养液成分

Table 1 Nutrient ingredients

名称	物质的量浓度/ (mmol L ⁻¹)	名称	物质的量浓度/ (mmol L ⁻¹)	名称	物质的量浓度/ (mmol L ⁻¹)
K ₂ SO ₄	0.75	Ca(NO ₃) ₂	4.0	H ₃ BO ₃	1.0×10 ⁻³
KH ₂ PO ₄	0.25	MgSO ₄	0.6	MnSO ₄	1.0×10 ⁻³
KCl	0.1	Fe-EDTA	0.1	ZnSO ₄	1.0×10 ⁻³
CuSO ₄	1.0×10 ⁻⁴	Na ₂ MoO ₄	3.5×10 ⁻⁴		

1.2 试验设计

挑选颗粒饱满的种子均匀播在沙盘中，放至气候箱中进行催芽，期间不开启光照，每天向沙盘适量喷水。玉米均匀发芽后开启光照继续培养，待其大部分长至 2 叶 1 心阶段时，挑选长势均匀的幼苗，剪掉种子根，将其余侧根均匀地分为 2 部分，并移栽至分根盒中，每个分根盒中放置 1 株幼苗，分根盒尺寸为 14.8 cm，宽为 7.7 cm，高为 11.4 cm，中间隔开，每部分盛 0.5 L 营养液。营养液的 pH 值通过使用 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L HCl 调至 5.6~6.0，用通气泵对营养液持续通气以维持其溶氧质量浓度为 7~10 mg/L，每 3 d 更换 1 次营养液。

移栽至分根盒中先进行为期 6 d 的均匀供水作为缓苗期，均匀供水为两侧根系均不添加 PEG 6000，保持无水分胁迫状态。缓苗结束后进入前期处理期，设置 5 组处理，前期处理期内两侧根系均匀供水 6 d 后进入采样期，采样阶段两侧根系均匀供水，不喷施 6-BA（正常灌水，CK）；PD 处理为前期均匀供水后局部供水处理，具体处理方法为前期处理期内两侧根系

均匀供水 6 d，然后进入采样期，采样期间维持局部供水，局部供水为一侧根系保持正常供水，另一侧根系维持-0.2 MPa 的水分胁迫；PDT 处理为在 PD 处理基础上每天 08:00 向叶片喷施 10 mg/L 的 6-BA（每株玉米单次喷施 2 mL 溶液）；PR 处理为前期均匀水分胁迫后局部复水处理，具体处理方法为前期处理期内两侧根系均匀水分胁迫 6 d，均匀水分胁迫为两侧根系均维持-0.2 MPa 水分胁迫，然后进入采样期，期间一侧根系恢复正常供水，另一侧根系维持-0.2 MPa 的水分胁迫；PRT 处理为在 PR 处理基础上每天 08:00 向叶片喷施 10 mg/L 的 6-BA，试验处理如表 2 所示。

表 2 试验设计

Table 2 Experiment design

处理	缓苗期 水分供应 方式	局部供（复） 水前期处理		采样期		
		无胁迫	均匀 胁迫	均匀 供水	局部 胁迫	喷施 6-BA
CK	均匀供水	是		是		
PD	均匀供水	是			是	
PDT	均匀供水	是			是	是
PR	均匀供水		是		是	
PRT	均匀供水		是		是	是

1.3 测定项目

各处理分别在采样阶段 0、1、3、6、9 d 取 3 株幼苗并在 12 d 取 6 株幼苗，使用叶面积测量仪测定其叶面积，之后从根基部剪掉两侧根系，使用烘干法分别测定玉米地上部和两侧根系干质量。在 12 d 另取 6 株玉米测定其两侧根系、茎部木质部汁液和叶片中 ZA、ABA、NO₃⁻、Cpr 量，其中茎部木质部汁液使用压力室法进行提取，首先将玉米植株从茎基部上方 5~10 cm 处剪断，装入压力室中，切开的茎留在外面，用吸水纸擦掉最初的几滴木质部汁液以避免污染，打开进气阀，缓慢加压至切口面出现液滴，待稳定后每次增压 0.2 MPa，共加压 3 次，通过移液枪收集于离心管中并放置在液氮中冷却，储存在-80 °C 冰箱中进行后续化学信号的测定。植物内源激素脱落酸（ABA，μg/g）和玉米素（ZA，μg/g）采用高效液相色谱法测定^[18]；NO₃⁻（mg/g）的测定采用离子色谱仪；可溶性蛋白（Cpr，mg/g）采用 BCA 法^[19]测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件初步计算数据，使用 SPSS 25 统计分析软件进行多重比较和方差分析；使用 OriginPro 2019b 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理玉米根系干质量动态变化

不同处理玉米根系干质量的变化如表 3 所示。0~1 d 内各处理两侧根系干质量差异不大，3~12 d 内

除 CK 外, 其余处理供水侧根系干质量均大于亏水侧根系干质量, 表明局部灌水处理 3 d 后显著刺激了供水侧根系的补偿生长。局部亏水方式下, 各处理亏水侧根系干质量在 6~12 d 内表现为 CK>PDT 处理>PD 处理, 表明局部亏水处理不利于亏水侧根系的生长, 导致亏水侧根系干质量显著小于 CK, 在局部亏水基础上喷施 6-BA 可以降低这种不利影响, 但仍不能恢

复到 CK 水平。3~12 d 内 PD 处理和 PDT 处理供水侧根系干质量均显著大于 CK 供水侧根系干质量, 同时 PDT 处理在 3~12 d 内供水侧根系干质量显著大于 PD 处理, 表明与 CK 相比, 局部亏水处理能显著刺激供水侧根系的补偿生长, 并能超过 CK, 在局部亏水基础上喷施 6-BA, 能进一步强化供水侧根系的补偿生长。

表 3 不同处理根系干质量的变化

处理	处理时间/d					
	0		1		3	
	供水侧	亏水侧	供水侧	亏水侧	供水侧	亏水侧
CK	0.011±0.001a	0.011±0.001a	0.014±0.002a	0.012±0.001a	0.019±0.003d	0.019±0.001a
PD	0.011±0.001a	0.011±0.001a	0.015±0.001a	0.015±0.001a	0.025±0.001b	0.018±0.002a
PDT	0.011±0.001a	0.011±0.002a	0.016±0.002a	0.014±0.003a	0.027±0.001a	0.019±0.002a
PR	0.008±0.004b	0.008±0.001b	0.014±0.002a	0.012±0.002a	0.019±0.003d	0.015±0.002b
PRT	0.008±0.004b	0.008±0.002b	0.015±0.001a	0.014±0.002a	0.021±0.002c	0.016±0.003b

处理	处理时间/d					
	6		9		12	
	供水侧	亏水侧	供水侧	亏水侧	供水侧	亏水侧
CK	0.026±0.004c	0.026±0.002a	0.051±0.003c	0.050±0.003a	0.085±0.003c	0.084±0.005a
PD	0.032±0.002b	0.023±0.002b	0.065±0.003b	0.043±0.002b	0.094±0.003b	0.061±0.002c
PDT	0.040±0.003a	0.024±0.002b	0.075±0.002a	0.044±0.002b	0.104±0.002a	0.069±0.004b
PR	0.030±0.003b	0.018±0.002d	0.039±0.003e	0.021±0.002d	0.059±0.003d	0.031±0.002e
PRT	0.037±0.001a	0.021±0.003c	0.049±0.002d	0.029±0.002c	0.064±0.004d	0.036±0.001d

注 同列不同字母表示各处理在同一时间差异显著 ($P<0.05$), 下同。

局部复水方式下, 0~1 d 内各处理复水侧与亏水侧根系干质量无显著差异, 3~12 d 内除 CK 外, PR、PRT 处理中复水侧根系干质量大于亏水侧根系干质量, 表明局部复水处理也可以刺激供水侧根系补偿生长。局部复水处理 12 d 时 PR、PRT 处理供水侧根系干质量差异不大, 说明局部复水下喷施 6-BA 对复水侧根系补偿生长强化效果不显著。与局部亏水不同的是, 在复水处理 6 d 后, CK 两侧根系干质量增长速率显著大于 PR、PRT 处理, 12 d 时 PR、PRT 处理两侧根系干质量显著小于 CK, 表明局部复水下根系补偿效果显著低于局部亏水, 即使喷施 6-BA, 两侧根系干质量均不能恢复到 CK 水平。

2.2 不同处理玉米地上部干质量动态变化

6-BA 供应处理中地上部干质量的变化如表 4 所示。

表 4 不同处理地上部干质量的变化

处理	处理时间/d					
	0	1	3	6	9	12
CK	0.159±0.003a	0.277±0.002a	0.420±0.003a	0.498±0.002c	0.818±0.001c	1.219±0.003c
PD	0.159±0.003a	0.227±0.003c	0.385±0.002b	0.508±0.004b	0.888±0.002b	1.231±0.001b
PDT	0.159±0.003a	0.247±0.003b	0.425±0.002a	0.523±0.003a	0.913±0.002a	1.261±0.004a
PR	0.140±0.002b	0.215±0.002d	0.358±0.001d	0.363±0.001e	0.659±0.003e	0.962±0.003e
PRT	0.140±0.002b	0.222±0.001c	0.365±0.001c	0.402±0.002d	0.721±0.002d	1.002±0.002d

2.3 不同处理玉米叶面积动态变化

表 5 为不同处理叶面积的变化, 处理后 1 d 时各

处理 1 d 时, 不同处理地上部干质量表现为 CK>PDT 处理>PD 处理>PRT 处理>PR 处理, 3 d 时 PDT 处理地上部干质量超过 CK, 其余处理仍低于 CK, 6~12 d 内均表现为 PDT 处理>PD 处理>CK>PRT 处理>PR 处理的趋势, 表明局部亏水处理地上部干质量可以达到并超过 CK, 在局部亏水基础上喷施 6-BA 处理, 能进一步促进地上部干质量增长。在局部复水下各处理地上部干质量变化不同, 1~12 d 内 CK 地上部干质量显著大于 PR、PRT 处理, 且 PRT 处理地上部干质量在 1~12 d 内显著大于 PR 处理, 说明与 CK 相比, 局部复水处理显著降低了地上部干质量, 在局部复水基础上额外喷施 6-BA 可以促进地上部干质量增长, 但仍显著低于 CK 水平。

处理叶面积较处理后 0 d 均有不同程度增长, 1~12 d 内不同处理叶面积均表现为 PDT 处理>PD 处

理>CK>PRT 处理>PR 处理，且在处理后 12 d 时 PDT 处理叶面积显著大于 CK 和 PD 处理，同时 CK 叶面积显著大于 PR、PRT 处理，表明局部亏水处理有利于叶面积的增长，并能超过 CK，在局部亏水基础上

额外喷施 6-BA 能进一步刺激叶面积的增长；局部复水处理叶面积显著低于 CK，在局部复水基础上喷施 6-BA 虽然促进了叶面积的增长，但仍显著低于 CK。

表 5 不同处理叶面积的变化

Table 5 Changes of leaf area in different treatments

cm²

处理	处理时间/d					
	0	1	3	6	9	12
CK	82.74±0.313a	100.82±0.342b	113.91±0.472c	127.41±0.358c	148.28±0.247c	178.46±0.262c
PD	82.74±0.313a	101.87±0.373b	119.73±0.352b	137.64±0.382b	154.06±0.326b	191.05±0.294b
PDT	82.74±0.313a	121.00±0.283a	157.73±0.315a	188.73±0.217a	223.97±0.283a	234.83±0.427a
PR	63.17±0.251b	75.59±0.325c	81.95±0.284d	92.59±0.248e	110.07±0.252e	126.32±0.283e
PRT	63.17±0.251b	77.64±0.237c	110.85±0.326c	115.36±0.182d	128.29±0.371d	142.00±0.343d

2.4 不同处理对玉米叶片化学信号的影响

表 6 为各处理叶片化学信号。灌水方式、喷施 6-BA 显著影响叶片 ZA、ABA、NO₃⁻和 Cpr 量，灌水方式和喷施 6-BA 交互作用显著影响叶片 ZA、ABA 和 NO₃⁻量。总体来说，同一喷施水平下，PD 处理中叶片 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量显著高于 CK，ABA 显著低于 CK；PR 处理中叶片 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量显著低于 CK，ABA 量显著高于 CK。同一灌水方式下，PDT

处理叶片中 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量显著高于 PD 处理，ABA 量显著低于 PD 处理；PRT 处理叶片中 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量显著高于 PR 处理，ABA 显著低于 PR 处理。表明与 CK 相比，局部亏水处理能提高叶片中 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量，并降低叶片 ABA 量；局部复水处理降低了叶片中 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量，并提高叶片 ABA 量，2 种灌水方式下喷施 6-BA 均能进一步提高叶片 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量，并降低 ABA 量。

表 6 各处理叶片化学信号量

Table 6 Chemical signal content of leaves in each treatment

处理	ZA/(μg·g ⁻¹)	ABA/(μg·g ⁻¹)	NO ₃ ⁻ /(mg·g ⁻¹)	Cpr/(mg·g ⁻¹)
CK	0.467±0.003c	1.137±0.002c	97.407±0.546c	27.370±0.374c
PD	0.482±0.002b	1.001±0.004d	131.258±0.731b	44.867±0.450b
PDT	0.546±0.002a	0.983±0.003e	171.610±0.682a	49.016±0.341a
PR	0.452±0.001d	1.251±0.003a	65.405±0.625e	22.545±0.235d
PRT	0.463±0.003c	1.168±0.002b	71.147±0.531d	27.686±0.274c
W	189.844*	709.201*	1112.002*	188.680*
F T	166.507*	75.752*	154.763*	16.182*
W×T	84.270*	30.720*	117.875*	0.184

注 不同字母表示处理间有显著差异 (P<0.05)，*表示 P<0.05 显著水平，下同。

2.5 不同处理对茎部木质部汁液化学信号的影响

各处理茎部木质部汁液化学信号量如表 7 所示。灌水方式、喷施 6-BA 显著影响茎部木质部汁液 ZA、ABA、NO₃⁻、Cpr 量，灌水方式和喷施 6-BA 交互作用显著影响茎部木质部汁液 ABA、NO₃⁻量。同一 6-BA 喷施水平下，PD 处理茎部木质部汁液中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量均显著高于 CK，ABA 量显著低于 CK；PR 处理茎部木质部汁液中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量显著低于 CK，ABA 量显著高于 CK。同一灌水方式下，PDT、PRT

处理茎部木质部汁液中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量均显著高于 PD、PR 处理，ABA 量均分别显著低于 PD、PR 处理。表明与 CK 相比，局部亏水处理能提高茎部木质部汁液中 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量，并降低茎部木质部汁液 ABA 量；局部复水处理降低了茎部木质部汁液中 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量，并提高茎部木质部汁液 ABA 量，2 种灌水方式下喷施 6-BA 能进一步提高茎部木质部汁液 ZA、NO₃⁻、Cpr 量，并降低 ABA 量。

表 7 各处理茎部木质部汁液化学信号量

Table 7 Chemical signal content in xylem sap of stems in each treatment

处理	ZA/(μg·g ⁻¹)	ABA/(μg·g ⁻¹)	NO ₃ ⁻ /(mg·g ⁻¹)	Cpr/(mg·g ⁻¹)
CK	0.459±0.001c	0.739±0.002b	81.153±0.471c	22.089±0.264c
PD	0.477±0.004b	0.728±0.002c	99.678±0.562b	27.568±0.310b
PDT	0.503±0.002a	0.713±0.003d	117.117±0.631a	30.613±0.268a
PR	0.432±0.003d	0.829±0.004a	67.905±0.556e	19.120±0.183d
PRT	0.453±0.002c	0.724±0.002c	75.831±0.636d	21.045±0.203c
W	136.185*	97.706*	217.128*	123.291*
F T	66.270*	169.454*	57.926*	18.526*
W×T	0.750	94.395*	6.039*	0.941

2.6 不同处理对根系化学信号的影响

表 8 为各处理根系化学信号量。灌水方式、喷施 6-BA 显著影响无胁迫根系 ZA、ABA、NO₃⁻、Cpr 量。同一 6-BA 喷施水平下, PD 处理无胁迫根系中 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量显著高于 CK, ABA 量显著低于 CK; PR 处理无胁迫根系中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量均显著低于 CK, ABA 量显著高于 CK。同一灌水方式下, PDT 处理无胁迫根系中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量显著高于 PD 处

理, ABA 量显著低于 PD 处理; PRT 处理无胁迫根系中 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量显著高于 PR 处理, ABA 量显著低于 PR 处理。表明与 CK 相比, 局部亏水处理能提高无胁迫根系中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量, 并降低 ABA 量, 局部复水处理降低了无胁迫根系中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量, 并提高了无胁迫根系 ABA 量; 2 种灌水方式下喷施 6-BA 能进一步提高无胁迫根系 ZA、NO₃⁻、Cpr 量, 并降低 ABA 量。

表 8 各处理根系化学信号量

Table 8 Chemical signal content in root system of each treatment

处理	无胁迫根系			
	ZA/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	ABA/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	NO ₃ ⁻ /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Cpr/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
CK	0.514±0.003c	0.758±0.002b	52.745±0.426c	14.374±0.242c
PD	0.533±0.004b	0.731±0.003c	68.068±0.335b	16.270±0.272b
PDT	0.546±0.002a	0.710±0.002d	82.737±0.460a	18.972±0.283a
PR	0.485±0.001d	0.790±0.004a	33.270±0.253e	9.104±0.114e
PRT	0.506±0.002c	0.771±0.002b	46.944±0.373d	12.234±0.231d
W	117.160*	84.473*	468.242*	75.341*
F T	34.680*	18.750*	150.624*	25.509*
W×T	1.920	0.047	0.186	0.137
处理	胁迫根系			
	ZA/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	ABA/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	NO ₃ ⁻ /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Cpr/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
CK	0.503±0.003a	0.710±0.004e	50.847±0.417a	15.262±0.219a
PD	0.468±0.002c	0.767±0.001c	37.526±0.342c	8.768±0.104c
PDT	0.485±0.002b	0.740±0.003d	43.293±0.371b	11.124±0.230b
PR	0.454±0.004d	0.863±0.004a	24.205±0.483d	5.280±0.106e
PRT	0.465±0.003c	0.801±0.002b	34.169±0.257c	6.517±0.162d
W	87.900*	316.693*	147.044*	92.438*
F T	23.520*	92.824*	46.400*	9.682*
W×T	1.080	14.355*	3.303	0.939

灌水方式、喷施 6-BA 显著影响胁迫根系 ZA、ABA、NO₃⁻和 Cpr 量, 灌水方式和喷施 6-BA 交互作用显著影响胁迫根系 ABA 量。同一 6-BA 喷施水平下, PD 处理和 PR 处理胁迫根系中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量均显著低于 CK, ABA 均显著高于 CK。同一灌水方式下, PDT、PRT 处理胁迫根系 ZA、NO₃⁻、Cpr 量均分别显著高于 PD、PR 处理, ABA 量均分别显著低于 PD、PR 处理。表明与 CK 相比, 2 种局部灌水处理均降低了胁迫根系中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量, 并提高了胁迫根系 ABA 量; 在 2 种局部灌水方式下喷施 6-BA 能提高胁迫根系 ZA、NO₃⁻、Cpr 量, 并降低 ABA 量。

2.7 生长指标与化学信号相关性

玉米幼苗生长指标与化学信号的相关性分析结果如表 9 所示。两侧根系干质量与两侧根系中 ZA、NO₃⁻和 Cpr 量显著正相关, 并与 ABA 量显著负相关; 叶面积与叶片中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量显著正相关, 与 ABA 量显著负相关; 茎部木质部汁液中化学信号与

地上部干质量无显著相关性。表明根叶内 ZA、NO₃⁻、Cpr 量升高能促进根叶生长, 而 ABA 量过高会抑制根叶的生长效果。

表 9 玉米幼苗生长指标与化学信号相关关系

Table 9 Correlation between growth index and chemical signals of maize seedling

生长指标	化学信号			
	ZA	ABA	NO ₃ ⁻	Cpr
供水侧根系干质量	0.959**	-0.968**	0.956*	0.972**
亏水侧根系干质量	0.934*	-0.954*	0.949*	0.968**
地上部干质量	0.844	-0.675	0.829	0.829
叶面积	0.918*	-0.926*	0.980**	0.900*

注 *和**分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平。

3 讨论

当植物处于不利生长环境中时会产生一定的适应能力, 并会出现补偿生长效应, 补偿生长主要表现

在外在形态和生理代谢方面^[20]。本研究发现不同灌水方式下玉米补偿作用存在差异，PD、PR 处理供水侧根系干质量在 3~12 d 内均高于亏水侧根系干质量，这可能是因为局部水分胁迫下玉米幼苗亏水侧根系会产生相关根源信号，从而刺激供水侧根系的生长和吸收能力，以维持玉米生长过程中对水分、养分的需求^[13]。试验结束时 PD 处理中玉米幼苗供水侧根系干质量、地上部干质量和叶面积均能达到甚至超过 CK，而 PR 处理中玉米幼苗两侧根系干质量、地上部干质量和叶面积均不能恢复到 CK 水平，说明局部灌水前期不同水分供应状况会影响玉米幼苗的补偿生长效果，PR 处理玉米的补偿效果显著低于 PD 处理。发现 6-BA 能促进植物生长发育^[21-22]，本研究在局部灌水下喷施 6-BA，与 PD、PR 处理相比，PDT、PRT 处理玉米幼苗根干质量、叶面积等生长指标均出现了不同程度的增长，进一步证实了喷施 6-BA 对植物生长发育存在一定的促进作用。

植物生长发育与各种激素的协同作用密切相关，植物激素量较少且结构简单，但是对植物具有十分重要的调控作用^[23]。脱落酸（ABA）是植物干旱信号，玉米对干旱胁迫响应的机理之一为叶片积累 ABA，并关闭气孔，从而降低蒸腾耗水以避免受到干旱损伤^[24]，ZA 是玉米内源细胞分裂素，可以促进细胞分裂、根系伸长，另外 ZA 在调节气孔开度方面发挥关键作用^[18]。Yan 等^[25]发现局部灌水下干旱根系 ABA 量显著升高，ZA 量则显著降低，本研究中 PD 处理和 PR 处理中胁迫根系 ABA 和 ZA 量变化趋势与之相同，其原因可能是 ABA 量升高使得细胞分裂素氧化酶基因表达量升高，从而导致 ZA 量降低^[26]。NO₃⁻ 是植物生长发育所需的重要营养元素，与 ZA 共同调控植物生长代谢^[27-29]。Kamada-Nobusada 等^[30]研究发现 NO₃⁻ 浓度较高时，相应器官细胞分裂素合成酶基因的表达式增加，进而提升内源细胞分裂素量，同时 Patterson 等^[31]研究发现 NO₃⁻ 吸收量减少，内源细胞分裂素量随之降低。本研究中各处理玉米幼苗同一生长部位 NO₃⁻ 和 ZA 量变化规律相同，这与 Kamada-Nobusada 等^[30]、Patterson 等^[31]研究结果一致。可溶性蛋白（Cpr）量代表了植物的代谢水平，本研究发现 PD、PR 处理中胁迫根系可溶性蛋白含量均显著降低，这是因为当玉米根系受到干旱胁迫时，会减少根系可溶性蛋白量，降低根系活力，以适应干旱生长环境^[32-33]。除此之外本研究还发现 PD 处理提高了叶片、茎部木质部汁液和供水侧根系 ZA、NO₃⁻、Cpr 量并降低了 ABA 量，而 PR 处理则降低了相应生长部位 ZA、NO₃⁻、Cpr 量并提高了 ABA 量，说明局部供水之前水分供应状况会对玉米幼苗相关内源化学

信号产生影响。与 PD、PR 处理相比，PDT、PRT 处理均不同程度地提高了各生长部位 ZA、NO₃⁻、Cpr 量并降低 ABA 量，说明在 2 种局部灌水方式下喷施 10 mg/L 的 6-BA 均能提高玉米幼苗整体 ZA、NO₃⁻、Cpr 量并降低 ABA 量。

根叶内 ZA、NO₃⁻、Cpr 量与根干质量、叶面积均显著正相关，而 ABA 量与根干质量、叶面积显著负相关，表明玉米的补偿生长与内源化学信号的调控作用有关，各化学信号对植物生长发育具有不同的调控作用，根叶内 ZA、NO₃⁻、Cpr 量提高对植物生长发育具有促进作用，而 ABA 量过高则会抑制植物生长效果。茎部木质部汁液化学信号量与地上部干质量无显著相关性，这可能是因为玉米地上部化学信号量除了茎部木质部汁液部位还包括叶片等部位。本文仅研究了局部灌水下喷施 10 mg/L 6-BA 对玉米补偿生长的影响，其他 6-BA 喷施水平对局部灌水下玉米生长的调控作用是否更佳有待进一步研究，同时由于水培条件的限制，试验周期较短，后期应增加试验周期以对局部灌水下玉米最终产量等指标进行综合评价。

4 结论

1) 与 CK 相比，局部亏水处理更有利于刺激玉米幼苗的补偿生长，其叶面积、地上部干质量和供水侧根系干质量均能超过 CK 水平，但亏水侧根系干质量不能恢复到 CK 水平，而局部复水处理叶面积、地上部干质量和两侧根系干质量均不能恢复到正常灌水水平；在局部灌水基础上喷施 6-BA 能进一步强化玉米幼苗补偿生长。

2) 局部亏水处理中叶片、茎部木质部汁液和供水侧根系中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量均高于 CK，ABA 量均低于 CK，亏水侧根系中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量均低于 CK，ABA 量高于 CK，而局部复水处理中叶片、茎部木质部汁液和两侧根系中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量均低于 CK，ABA 量均高于 CK；在局部灌水基础上喷施 6-BA 能提高各生长部位 ZA、NO₃⁻、Cpr 量，并进一步降低 ABA 量。

3) 玉米补偿生长是多种化学信号共同作用的结果。根据生长指标与相应生长部位化学信号相关性分析，各化学信号对玉米生长发育的影响不同，根叶中 ZA、NO₃⁻、Cpr 量提高对玉米幼苗补偿生长具有促进作用，ABA 量过高会抑制玉米幼苗根叶生长效果。

参考文献：

- [1] 张雷, 王杰, 王树鹏, 等. 鲜食甜玉米需水规律及节水灌溉制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 22-29, 37.

ZHANG Lei, WANG Jie, WANG Shupeng, et al. Water consumption of

- sweet corn and its water-saving irrigation strategies[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(1): 22-29, 37.
- [2] 张雅芳. 全球主要农业生产国作物需水及缺水程度研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2020.
ZHANG Yafang. Study on global crop water demand and water shortage in major agricultural production countries[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2020.
- [3] 吴丹, 向筱茜, 冀晨辉. 中国水资源研究热点及演化的可视化分析[J]. *科技和产业*, 2021, 21(10): 43-48.
WU Dan, XIANG Xiaoqian, JI Chenhui. Visual analysis on the research focus and evolution of water resources in China[J]. *Science Technology and Industry*, 2021, 21(10): 43-48.
- [4] 杜兵杰, 曹红霞, 裴书瑶, 等. 亏缺灌溉下温室番茄生长生理指标对生物炭的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(10): 43-51.
DU Bingjie, CAO Hongxia, PEI Shuyao, et al. The effects of deficit irrigation combined with biochar amendment on growth and physiological traits of greenhouse tomato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(10): 43-51.
- [5] 胡田田, 张美玲, 康绍忠. 局部灌水施肥条件下玉米根区土壤水分动态变化特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(1): 1-6, 21.
HU Tiantian, ZHANG Meiling, KANG Shaozhong. The dynamic change of soil water content in root zones of maize under localized supplies of water and nitrogen fertilizer[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1): 1-6, 21.
- [6] 杨胜举, 佟玲, 吴宜毅, 等. 玉米冠层辐射分布和产量对种植密度和水分的响应研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(8): 19-26, 34.
YANG Shengju, TONG Ling, WU Xuanyi, et al. Changes in radiation in canopy and the yield of maize in response to planting density and irrigation amounts[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(8): 19-26, 34.
- [7] 毛梦雪, 朱峰. 根系分泌物介导植物抗逆性研究进展与展望[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(10): 1 649-1 657.
MAO Mengxue, ZHU Feng. Progress and perspective in research on plant resistance mediated by root exudates[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(10): 1 649-1 657.
- [8] KANG Shaozhong, ZHANG Jianhua. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(407): 2 437-2 446.
- [9] MINGO Darren M, THEOBALD Julian C, BACON Mark A, et al. Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown under partial rootzone drying: enhancement of root growth[J]. *Functional Plant Biology*, 2004, 31(10): 971-978.
- [10] 傅丰贝, 陆文娟, 李伏生. 不同控水时段根区局部灌溉对玉米生理和水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1 378-1 386.
FU Fengbei, LU Wenjuan, LI Fusheng. Effects of partial root-zone irrigation at different water-control duration on physiology and water use efficiency of maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1 378-1 386.
- [11] VANDELEUR Rebecca K, SULLIVAN Wendy, ATHMAN Asmini, et al. Rapid shoot-to-root signalling regulates root hydraulic conductance via aquaporins[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2014, 37(2): 520-538.
- [12] DJAMAN Koffi, O' NEILL Michael, OWEN Curtis K, et al. Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate[J]. *Water*, 2018, 10(4): 405.
- [13] NIU Xiaoli, HU Tiantian, ZHANG Fucang, et al. Severity and duration of osmotic stress on partial root system: effects on root hydraulic conductance and root growth[J]. *Plant Growth Regulation*, 2016, 79(2): 177-186.
- [14] 朱玉玲. 6-苜氨基腺嘌呤对淹水后夏玉米生理特性和产量的调控研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
ZHU Yuling. Effect of 6-Benzylaminopurine on the physiological characteristics and yield of summer maize after waterlogging[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2015.
- [15] 晏宇杭, 饶梓静, 魏担, 等. 细胞分裂素对川牛膝幼苗根生长发育影响的研究[J]. *中药与临床*, 2021, 12(3): 4-9.
YAN Yuhang, RAO Huajing, WEI Dan, et al. Study on the effects of cytokinin on the growth and development in the seedling root of *Cyathula officinalis kuan*[J]. *Pharmacy and Clinics of Chinese Materia Medica*, 2021, 12(3): 4-9.
- [16] 马玮超, 刘文静, 孙玉镯. 外源细胞分裂素对香菇生长和品质的影响[J]. *北方园艺*, 2021(17): 131-134.
MA Weichao, LIU Wenjing, SUN Yuzhuo. Effects of exogenous cytokinin on the growth and quality of *Lentinus edodes*[J]. *Northern Horticulture*, 2021(17): 131-134.
- [17] 韩学涛. 喷施水杨酸和 6-苜氨基腺嘌呤对夏玉米高温胁迫的缓解作用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
HAN Xuetao. Alleviating effect of spraying salicylic acid and 6-Benzylamino adenine on high temperature stress of summer maize[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021.
- [18] BEIS Alexandros, PATAKAS Angelos. Differential physiological and biochemical responses to drought in grapevines subjected to partial root drying and deficit irrigation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 62: 90-97.
- [19] CAMPION Eva M, LOUGHRAN Sin'ad T, WALLS Dermot. Protein quantitation and analysis of purity[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2011, 681: 229-258.
- [20] FAYCAL Boughalleb, RAOUHHA Abdellaoui, NABIL Ben-Brahim, et al. Anatomical adaptations of *Astragalus gombiformis* pomel. Under drought stress[J]. *Central European Journal of Biology*, 2014, 9(12): 1 215-1 225.
- [21] 严毅, 张夸云, 铁筱睿, 等. 外源 6-BA 对油橄榄生殖生长期光合特性的影响[J]. *经济林研究*, 2020, 38(2): 177-182.
YAN Yi, ZHANG Kuayun, TIE Xiaorui, et al. Effects of exogenous 6-BA on photosynthetic characteristics in *Olea europaea* during reproductive stage[J]. *Non-wood Forest Research*, 2020, 38(2): 177-182.
- [22] 宋佳琦, 王玉祥, 张博. 外源 6-BA 对紫花苜蓿盛花期叶片光合、生理特性及结荚率的影响[J]. *草业科学*, 2019, 36(3): 720-728.
SONG Jiaqi, WANG Yuxiang, ZHANG Bo. Effects of exogenous 6-BA on photosynthesis, physiological characteristics of alfalfa leaves at flowering stage and rate of podding[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(3): 720-728.
- [23] 魏晓琼, 贾文飞, 马靖恒, 等. 植物生长调节剂对植株生长发育的影响概述[J]. *北方园艺*, 2022(4): 118-125.
WEI Xiaoqiong, JIA Wenfei, MA Jingheng, et al. Review on the effects of plant growth regulators on plant growth and development[J]. *Northern Horticulture*, 2022(4): 118-125.
- [24] 杨娟, 姜阳明, 周芳, 等. PEG 模拟干旱胁迫对不同抗旱性玉米品种苗期形态与生理特性的影响[J]. *作物杂志*, 2021(1): 82-89.
YANG Juan, JIANG Yangming, ZHOU Fang, et al. Effects of PEG simulated drought stress on seedling morphology and physiological characteristics of different drought-resistance maize varieties[J]. *Crops*, 2021(1): 82-89.
- [25] YAN Hui, CUI Ningbo, ZHOU Hanmi. Hormonal regulation and redox reaction of maize under partial root drying irrigation[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2019, 41(7): 1-11.
- [26] ZHANG Fengqin, WANG Youshao, LOU Zhiping, et al. Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and

- Bruguiera gymnorhiza)[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(1): 44-50.
- [27] SCHALLER G Eric, STREET Ian H, KIEBER Joseph J. Cytokinin and the cell cycle[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2014, 21: 7-15.
- [28] 于鹏. 局部高浓度硝酸盐诱导玉米侧根发生的生理与分子机制及根系生长与氮效率的关系[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- YU Peng. Physiological and molecular mechanisms of maize lateral root initiation induced by local high nitrate and the relationship between root growth and nitrogen use efficiency[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [29] 刘海光, 罗振, 董合忠. 植物硝态氮吸收和转运的调控研究进展[J]. *生物技术通报*, 2021, 37(6): 192-201.
- LIU Haiguang, LUO Zhen, DONG Hezhong. Research progress on the regulation of NO₃⁻ uptake and transport in plant[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2021, 37(6): 192-201.
- [30] KAMADA-NOBUSADA Tomoe, MAKITA Nobue, KOJIMA Makita, et al. Nitrogen-dependent regulation of de novo cytokinin biosynthesis in rice: the role of glutamine metabolism as an additional signal[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2013, 54(11): 1 881-1 893.
- [31] PATTERSON Kurt, WALTERS Laura A, COOPER Andrew M, et al. Nitrate-regulated glutaredoxins control arabidopsis primary root growth[J]. *Plant Physiology*, 2016, 170(2): 989-999.
- [32] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 持续干旱及复水对玉米幼苗生理生化指标的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(3): 59-61.
- ZHAO Liying, DENG Xiping, SHAN Lun. Effects of progressive drying and rewating on physiological and biochemical indicators in maize seedlings[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3): 59-61.
- [33] 葛体达, 隋方功, 白莉萍, 等. 长期水分胁迫对夏玉米根叶保护酶活性及膜脂过氧化作用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3): 18-23, 32.
- GE Tida, SUI Fanggong, BAI Liping, et al. Effects of long-term water stress on protective enzyme activities and lipid peroxidation in summer maize roots and leaves[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(3): 18-23, 32.

Effects of 6-BA on Growth and Endogenous Chemical Signals of Maize Seedlings under Partial Irrigation

WANG Yibo¹, NIU Xiaoli^{1*}, DAI Zhiguang¹, ZHAO Ben², MA Tiancheng¹, WANG Jiachen¹, WANG Zhihao¹

(1. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: 【Objective】 The synthetic cytokinin 6-benzyladenine (6-BA) is an exogenous regulator to promote plant growth, and the purpose of this paper is to study the effect of 6-BA on growth of maize seedlings watered by different irrigations. 【Method】 We compared two irrigation treatments each having two 6-BA treatments (with and without adding 6-BA): partial water deficit irrigation following a uniform sufficient irrigation (PD for without 6-BA, and PDT for with 6-BA), and partial sufficient irrigation after a uniform deficit irrigation (PR for without 6-BA, PRT for with 6-BA). Sufficient irrigation without 6-BA addition was taken as the control (CK). In all treatments, the concentration of 6-BA was 10 mg/L. For each treatment, we measured the physiological traits of the crop. 【Result】 Compared with CK, PD significantly increased dry root weight on the irrigated side, dry weight of the above-ground parts and the leaf area, but it did not have a noticeable impact on dry root weight on the not-irrigated side; it increased the contents of zeatin (ZA), nitrate nitrogen (NO₃⁻) and soluble protein (Cpr) in the leaves, xylem sap and roots on the irrigated side, but reduced the content of abscisic acid (ABA). PR significantly reduced the weight of dry roots on both sides, weight of dry aboveground parts and leaf area, as well as the contents of ZA, NO₃⁻ and Cpr in leaves, xylem sap and roots on both sides, but it increased the content of ABA. Compared with PD and PR, PDT and PRT increased dry weight of the roots on both sides, dry weight of shoots and the leaf areas, as well as the contents of ZA, NO₃⁻ and Cpr in the plant, but reduced ABA thereby facilitating compensatory growth of the crop. 【Conclusion】 Partial water deficit irrigation followed a sufficient uniform irrigation is optimal for maize seedling growth, and combined with praying 6-BA, it can further boost compensatory growth of the crop.

Key words: partial irrigation; 6-BA; growth index; chemical signal; compensatory growth

责任编辑：白芳芳