

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.029

# 水肥耦合对鄂尔多斯高原玉米产量及水氮利用效率的协同调控机制研究

赵健军<sup>1,2</sup>, 李彬<sup>1,2,3,4</sup>, 卢雨平<sup>1,3</sup>, 降亚楠<sup>5</sup>, 贾浩南<sup>1,3</sup>, 周飞星<sup>6</sup>,  
狄彩霞<sup>1,2</sup>, 王保林<sup>1</sup>, 包珺玮<sup>1</sup>, 乌云塔娜<sup>6</sup>

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古 呼和浩特 010031;

2. 内蒙古自治区农牧业质量安全与检测研究所(内蒙古自治区农牧业科技成果转移转化中心), 内蒙古 呼和浩特 010031;

3. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

4. 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010018;

5. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

6. 内蒙古鄂托克旗农牧技术推广中心, 内蒙古 鄂尔多斯市 016000)

**摘要:** 针对鄂尔多斯高原干旱半干旱区水资源紧缺和水肥利用效率低的突出问题, 通过田间试验探究了水氮耦合对玉米生长、产量及资源利用效率的调控机制, 以确立适于当地的高效水肥管理模式。试验采用玉米品种 TK601, 设置 3 个灌水水平与 3 个施氮水平构成水氮互作处理, 并设高水无氮对照。结果表明: 中水高氮处理(W2N3)在干物质积累、籽粒产量、水分利用效率及氮肥农学效率上均表现最优。其中, 干物质积累量达 510.09 g/株, 产量达 14 223.64 kg/hm<sup>2</sup>, 较低水低氮处理提高 42.8%; 水分利用效率为 90.35 kg/(hm<sup>2</sup>·mm), 较高水高氮处理提升 29.2%。中水高氮处理下氮素积累量最高, 氮肥利用效率显著改善。表明在鄂尔多斯高原玉米生产中, 采用中水高氮的水肥一体化策略, 能够协同实现高产与资源高效利用。

**关键词:** 鄂尔多斯; 水肥一体化; 水氮管理模式; 绿色发展

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0209-08

## Mechanisms of Water-Nitrogen Interaction in Coordinating Maize Yield, Water and Nitrogen Use Efficiencies on the Ordos Plateau

ZHAO Jianjun<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>1,2,3,4</sup>, LU Yuping<sup>1,3</sup>, JIANG Yanan<sup>5</sup>, JIA Haonan<sup>1,3</sup>,  
ZHOU Feixing<sup>6</sup>, DI Caixia<sup>1,2</sup>, Wang Baolin<sup>1</sup>, BAO Junwei<sup>1</sup>, WUYUN Tana<sup>6</sup>

(1. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China;

2. Institute of Quality, Safety and Testing of Agriculture and Animal Husbandry of Inner Mongolia Autonomous Region (Inner Mongolia Autonomous Region Agricultural and Animal Husbandry Science and Technology Achievement

Transfer and Transformation Center), Inner Mongolia 010031, China;

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

4. Engineering Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region for Efficient Water-saving Technology and Equipment and Water and Soil Environmental Effects, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

5. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

6. Inner Mongolia Etuoke Banner Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Ordos, Inner Mongolia 016000, China)

**Abstract:** To address the critical issues of water scarcity and low water-fertilizer use efficiency in the arid and semi-arid

收稿日期: 2025-07-20

修稿日期: 2025-08-25

基金项目: 军民融合产业发展转移支付专项资金产业示范引导项目“基于高分北斗的农牧业可持续管理与防沙治沙应用”(JMRHYZ20240201)

作者简介: 赵健军(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤环境科学。E-mail: 1002636010@qq.com

通讯作者: 李彬(1982—), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉与土壤环境科学的研究工作。E-mail: libin\_kim@sina.com

id Ordos Plateau, this work investigated the regulatory mechanisms of water-nitrogen coupling on maize growth, yield, and resource use efficiency through a field experiment, aiming to establish an efficient water and nutrient management strategy for local production. Using maize cultivar TK601, the experiment included three irrigation levels and three nitrogen application levels in a factorial design, along with a high-irrigation and zero-nitrogen control. The results showed that the medium-water and high-nitrogen treatment (W2N3) performed optimally in terms of dry matter accumulation, grain yield, water use efficiency (WUE), and nitrogen agronomic efficiency. Specifically, it achieved a dry matter accumulation of 510.09 g per plant and a grain yield of 14 223.64 kg/hm<sup>2</sup>, which was 42.8% higher than the lowest-yielding treatment (W1N1). Its WUE reached 90.35 kg/(hm<sup>2</sup> · mm), representing a 29.2% increase over the high-water and high-nitrogen treatment (W3N3). Furthermore, this treatment also recorded the highest nitrogen accumulation and significantly improved nitrogen use efficiency. This study demonstrates that adopting an integrated water-nitrogen management strategy of "medium water with high nitrogen" (irrigation: 220 m<sup>3</sup>/667 m<sup>2</sup>; nitrogen application: 54 kg/667 m<sup>2</sup>) in maize production on the Ordos Plateau can synergistically achieve high yield and high resource-use efficiency, providing a key technological pathway for green and sustainable agricultural development in the region.

**Keywords: Ordos Plateau; integrated water and fertilizer management; water-nitrogen management mode; green development**

水是农业生产和经济社会发展的基础性战略资源<sup>[1-3]</sup>。在全球水资源短缺背景下,提升农业用水效率是保障粮食安全的关键。我国农田灌溉水有效利用系数已提高至 0.57<sup>[4]</sup>,但在水肥一体化等技术的精细化应用方面,仍落后于以色列等节水技术领先国家<sup>[5]</sup>。水肥一体化技术通过水肥协同调控,被认为是突破资源约束、实现绿色增产的重要途径。

氮素是作物需求最大的必需营养元素,也是作物高产优质的重要物质基础<sup>[6-7]</sup>。传统“大水大肥”模式利用效率低且易引发环境风险。氮素作为蛋白质、叶绿素等关键组分的结构元素,直接影响叶片光合能力<sup>[8]</sup>、茎秆输导功能<sup>[9]</sup>及生殖器官发育<sup>[10-12]</sup>。适量施氮可显著提高作物产量与品质<sup>[13]</sup>,而氮缺乏会导致生长受阻、叶色褪绿及产质下降<sup>[14-16]</sup>。作物主要吸收铵态氮和硝态氮,土壤有效氮库有限,因此基于作物需求的精准氮素管理已成为现代农业的核心环节。

鄂尔多斯高原地处黄河“几字弯”南部,属典型温带干旱半干旱气候,光照充足但降水稀少、蒸发强烈,水资源时空分布不均<sup>[17]</sup>。该地区长期面临水资源紧缺、灌溉方式粗放、水肥效率低下等问题,发展适应当地生态条件的水肥一体化技术对区域农业可持续发展与生态保护具有重要意义。尽管该技术原理明确,但其优化效果高度依赖于气候-土壤-作物系统,在鄂尔多斯高原特殊生态条件下,何种水肥耦合模式可最优协调玉米生长、水分高效利用与产量形成,其内在生理生态机制尚需本地化研究予以明确。

为此,本研究在鄂尔多斯高原典型区域(鄂托克

旗)开展田间试验,采用无膜浅埋滴灌水肥一体化技术,以主栽玉米品种 TK601 为材料,通过设置不同水氮配比,系统研究其对玉米生长、产量、水分利用效率及氮肥偏生产力的影响,旨在明确适用于该地区的最优水肥管理参数,为鄂尔多斯高原玉米生产的节水增效与绿色转型提供理论依据与技术方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古鄂尔多斯市鄂托克旗,地处鄂尔多斯高原腹地的典型农牧交错带。该区属温带大陆性季风气候,干旱少雨,蒸发强烈,日照充足,昼夜温差大。年均气温 6.4℃,降水量约 250 mm(主要集中在 7—9 月),年蒸发量约 3 000 mm,年日照时数约 3 000 h,无霜期约 122 d。冬春季平均风速 3.1 m/s,风蚀与干旱胁迫频繁。土壤以棕钙土和灰漠土为主<sup>[18]</sup>,质地偏砂,土层浅薄,保水保肥能力弱,植被为草原化荒漠类型,生态系统脆弱。该气候与土壤条件决定了农业生产高度依赖灌溉,也为开展水肥一体化研究提供了典型区域背景。

### 1.2 试验区基本资料

#### 1.2.1 试验区气象和土壤资料

本研究利用美国 Onset 公司的 HOBO U30 小型自动气象站对试验区 2021 年玉米全生育期的气象要素进行持续监测。在玉米播种前,采用五点取样法采集试验区 0~100 cm 土层的土壤样品,按 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 分层取样并混合,风干、研磨后过筛,用于测定土壤基本理化性质。土壤物理性质测定结果见表 1,化

学性质测定结果见表2。

表1 土壤物理特性表

土层深度 /cm	土壤容重 /(g· cm <sup>-3</sup> )	黏粒 <0.002 mm	粉粒 0.002~ 0.05 mm	砂粒 0.05~ 2 mm	土壤质地
0~20	1.49	1.37	20.00	78.63	砂质壤土
20~40	1.47	2.23	26.01	71.76	砂质壤土
40~60	1.56	2.55	26.77	70.68	砂质壤土
60~80	1.46	4.17	32.49	63.34	砂质壤土
80~100	1.47	3.13	25.31	71.56	砂质壤土

表2 土壤化学特性表

土层深度 /cm	有机质 /(g· kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 /(mg· kg <sup>-1</sup> )	速效磷 /(mg· kg <sup>-1</sup> )	速效钾 /(mg· kg <sup>-1</sup> )	pH 值	全盐 /(g· kg <sup>-1</sup> )
0~20	8.01	14	0.41	125	9.40	0.73
20~40	6.56	21	0.54	103	9.12	0.72
40~60	11.70	12	0.80	71	9.20	0.58
60~80	9.87	16	0.57	67	9.30	0.63
80~100	10.46	15	0.68	54	9.20	0.61

### 1.2.2 试验品种和试验设计

试验选用当地主推玉米品种 TK601,该品种适应性强、株型紧凑,适宜机械化作业。试验采用双因素完全随机区组设计,设置3个灌水水平:W1(173 m<sup>3</sup>/亩)、W2(220 m<sup>3</sup>/亩,当地常规定额)、W3(264 m<sup>3</sup>/亩);以及3个施氮(以纯氮计)水平:N1(36 kg/亩)、N2(45 kg/亩,当地常规用量)、N3(54 kg/亩)。两因素完全交叉,共9个水氮耦合处理(W1N1—W3N3),并增设高水无氮处理(W3N0)作为对照,共计10个处理,重复3次。

灌水根据土壤水势(张力计监测,阈值-35 kPa)控制,全生育期共灌水10次(苗期1次,拔节、抽雄、灌浆期各3次),每次灌水量按处理定额均分。氮肥通过水肥一体化方式随灌溉同步施用,遵循“少量多次、肥随水走”原则。磷、钾肥及微量元素作基肥一次性施入。

试验于2022年5月16日播种,9月23日收获。采用宽窄行(90 cm/30 cm)种植,配套无膜浅埋滴灌系统。滴灌带布设于窄行,滴头间距30 cm,埋深2 cm~4 cm,流量1.3 L/h,压力0.1 MPa。小区面积151.2 m<sup>2</sup>(24 m×6.3 m),区间设2 m保护行。

### 1.3 测量项目与方法

#### 1.3.1 植株取样与干物质积累测定

在玉米拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期,每小区选取5株代表性植株,自茎基部剪取地上部。样

品按器官分离后,经105℃杀青30 min、80℃烘干至恒重,称量并计算单株干物质积累量。烘干样品粉碎过0.5 mm筛后保存,用于全氮测定。

#### 1.3.2 植株全氮含量测定

植株全氮含量采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮法<sup>[19]</sup>测定。消煮液使用连续流动分析仪(AA3,德国SEAL公司)进行氮浓度分析。根据各器官干物质重与全氮含量,计算植株氮素积累量。

#### 1.3.3 产量测定

成熟期采用“对角线三点取样法”进行实测测定。在每小区沿对角线均匀选取3个样点,每个样点连续收获5 m双行内的全部果穗。统计果穗数,称量总穗鲜重,计算平均单穗鲜重。从每个样点果穗中,随机选取10穗具有代表性的果穗(其总重量与“平均穗鲜重×10”的误差控制在±0.05 kg以内),人工脱粒后测定籽粒鲜重。使用便携式水分测定仪(PM-8188,日本Kett公司)测定籽粒含水率,最终产量统一折算为含水量14.0%的标准籽粒产量,并计算单位面积产量。

### 1.4 数据处理

水分利用效率(WUE, kg/m<sup>3</sup>)公式如下:

$$WUE = Y/ET \quad (1)$$

式中:Y为籽粒产量,kg/hm<sup>2</sup>;ET为作物全生育期耗水量,mm,采用水量平衡法计算。

试验数据采用Microsoft Excel 2010进行整理与初步计算。采用DPS数据处理系统(v7.05)进行双因素方差分析,不同处理间的差异显著性采用最小显著差数法(LSD)进行多重比较(P<0.05)。图表使用Origin 2021软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水肥供应对地上部干物质积累的影响

#### 2.1.1 水肥一体化对玉米干物质积累的影响

干物质积累是产量形成的物质基础,水分和养分的协同供应是调控该过程的核心<sup>[20-23]</sup>。方差分析表明,灌水量、施氮量及其互作对玉米各生育期干物质积累量均有显著影响(P<0.05),其中抽雄期的水肥耦合效应尤为突出,不同处理下对玉米干物质积累量的影响如图1所示。

(1)施氮量的效应:干物质积累量随施氮量增加而显著增加(N3>N2>N1>N0)。在W2条件下,抽雄期N3处理的积累量较N0、N1和N2分别提高131.6%、44.1%和17.5%。

(2)灌水量的效应:适宜灌水(W2)最有利于干

物质积累,其抽雄至成熟期的积累量较 W1 平均提高 22.0%,过量灌水(W3)无进一步促进效果。

(3)最优水肥组合:W2N3 处理的干物质积累能力在全生育期均最高。在抽雄期,其积累量较 W1N3、W3N3、W2N1、W2N2 和 W3N2 分别提高 31.3%、15.2%、47.2%、12.3% 和 39.1%;至成熟期仍显著高于其他处理。

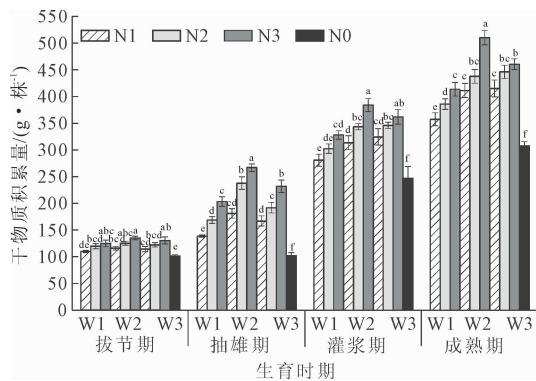


图 1 不同处理下对玉米干物质积累量的影响

### 2.1.2 水肥一体化对玉米干物质分配的影响

干物质在器官间的分配动态直接影响产量形成。随着生育进程推进,营养器官(叶、茎)的分配比例逐步下降,而穗部比例自抽雄期后显著上升,不同处理对各生育时期玉米干物质分配的影响如图 2 所示。

(1)施氮量的效应:施氮量显著调控器官分配比例。拔节期叶比例以 N3 最高,较 N1、N2 分别高 9.4% 和 2.9%。抽雄期叶比例随施氮量增加而降低,茎比例则以 N3 最高。N3 处理在抽雄至灌浆期穗比例增幅最大(118.9%),且灌浆期与成熟期穗比例均显著高于 N1、N2。

(2)灌水量的效应:W2 条件下茎、叶比例与 W1、W3 差异不显著,但其在抽雄与灌浆期的茎比例显著高于 W3。成熟期 W2 的穗比例较 W1 显著提高 21.1%,表明适度灌水有利于干物质后期向穗部转移。

(3)水肥耦合效应:氮胁迫(W3N0)导致抽雄期叶比例偏高,而同期的 W2N2 处理在灌浆期叶比例显著较低,显示适宜水氮配比可促进同化物向穗部转运。

综上,W2N3 处理表现出较优的时空分配模式:前期叶比例较高利于光合,中期茎比例占优支撑转运,成熟期穗比例最高,最终实现同化物向籽粒的高效分配。

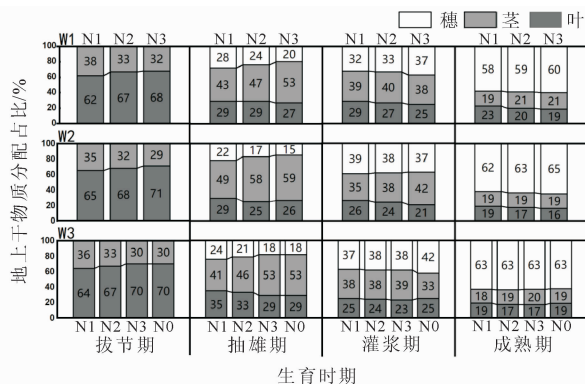


图 2 不同处理对各生育时期玉米干物质分配的影响

### 2.1.3 水肥一体化对玉米籽粒产量的影响

水肥一体化通过优化水氮互作提升产量与资源效率<sup>[24-25]</sup>。方差分析表明,灌水量、施氮量及其互作对产量影响均显著( $P < 0.05$ ),不同处理对各生育时期玉米产量的影响如图 3 所示。

(1)灌水量效应:产量随灌水量增加呈上升趋势( $W3 > W2 > W1$ )。在各施氮水平内,不同灌水处理间产量差异显著。

(2)施氮量效应:产量随施氮量增加显著提高( $N3 > N2 > N1 > N0$ )。N3 处理的平均产量较 N0、N1、N2 分别高 53.3%、24.3% 和 13.5%;缺氮处理(N0)产量最低。

(3)水肥耦合与最优组合:W2N3 与 W3N3 产量最高,分别为 14 166.67 kg/hm<sup>2</sup> 和 13 750.00 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于其他处理。W2N3 处理较 W1N3、W3N3、W2N1 和 W2N2 分别增产 12.7%、3.1%、16.9% 和 3.1%。对照 W3N0 产量最低,表明在足量供水下,氮素是产量的关键限制因子。

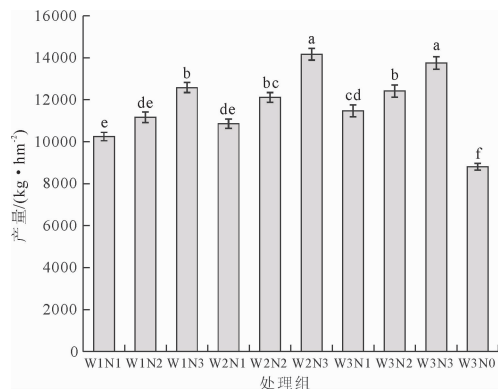


图 3 不同处理对各生育时期玉米产量的影响

## 2.2 不同水肥供应对玉米氮素积累及分配的影响

### 2.2.1 水肥一体化对植株氮素积累的影响

氮素是作物高产优质的关键<sup>[26-27]</sup>,外源施氮对

弥补土壤供应不足至关重要。不同处理下玉米氮素积累动态如图 4 所示。施氮量、灌水量及其交互作用对各生育期氮素积累均有显著影响 ( $P < 0.05$ )。

(1) 施氮量效应: 氮素积累量随施氮水平提高显著增加 ( $N3 > N2 > N1 > N0$ )。抽雄期  $N3$  处理积累量较  $N0$ 、 $N1$ 、 $N2$  分别高 203.2%、38.0% 和 15.1%, 成熟期仍保持显著优势。

(2) 灌水量效应: 氮素积累量整体表现为  $W2 > W1 > W3$ 。 $W2$  处理在各生育期的积累量较  $W3$  显著提高 9.7%~22.5%, 表明过量灌水 ( $W3$ ) 不利于氮素高效吸收。

(3) 水肥耦合效应: 成熟期  $W2N3$  处理的氮素积累量最高, 显著优于其他处理。灌浆期  $W1N3$  处理的积累量也较高。表明适宜水肥 ( $W2N3$ ) 或高氮配适度控水 ( $W1N3$ ) 可增强植株中后期氮素吸收同化能力。

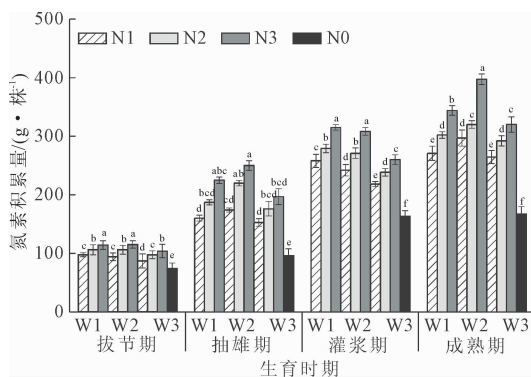


图 4 不同处理下对玉米地上部氮素积累量的影响

### 2.2.2 水肥一体化对氮素器官分配的影响

氮素在器官间的分配反映其转运与利用效率。不同处理对玉米植株器官的氮素含量如图 5 所示。随生育进程推进, 氮素分配呈现从营养器官向生殖器官转移的规律: 茎、叶比例逐渐下降, 穗比例持续上升。

(1) 施氮量效应: 施氮量显著影响分配比例。拔节期茎比例以  $N3$  最高; 叶比例整体表现为  $N1 > N2 > N3 > N0$ , 其中抽雄期  $N1$  处理较  $N0$ 、 $N2$ 、 $N3$  分别高 16.8%、28.3% 和 22.9%。成熟期叶比例较前期显著下降, 穗比例则较抽雄期和灌浆期分别提高 112.1% 和 55.1%, 表明后期氮素集中向籽粒转移。

(2) 灌水量效应:  $W2$  条件下茎、叶比例与  $W1$ 、 $W3$  无显著差异。抽雄和灌浆期,  $W2$  处理茎比例显著高于  $W3$ ; 叶比例在  $W3$  条件下偏高, 表明过量灌水可能延缓氮素向穗部转运。成熟期  $W2$  处理穗比例较  $W1$  显著提高 6.8%。

(3) 水肥耦合效应:  $W2N3$  处理在成熟期穗氮素分配比例最高, 说明中水高肥组合最有利于促进氮素在生殖器官积累, 为高产优质提供物质基础。

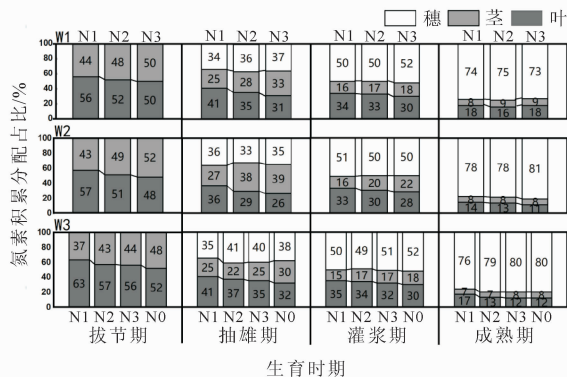


图 5 不同处理对玉米植株器官的氮素含量

### 2.2.3 水肥一体化对氮素利用效率的影响

氮素利用效率是评估水肥管理效果的关键。不同处理对氮素偏生产力 ( $NPFP$ )、农学效率 ( $NAE$ ) 及利用效率 ( $NUE$ ) 影响显著 (见表 3)。

(1) 施氮量效应:  $NPFP$  随施氮量增加而下降,  $N1$  处理较  $N2$ 、 $N3$  分别高 14.1% 和 20.7%; 而  $NAE$  与  $NUE$  则以  $N3$  处理最高, 表明在优化水肥 ( $W2$ ) 下, 较高施氮量 ( $N3$ ) 能更有效转化为产量。

(2) 灌水量效应:  $W3$  处理的  $NPFP$  与  $NAE$  最高, 但  $W2$  处理的  $NUE$  最优, 较  $W1$ 、 $W3$  分别高 22.0% 和 34.8%。  $W1$  处理的各项效率均最低。

(3) 水肥耦合效应:  $W3N1$  处理的  $NPFP$  最高, 而  $W2N3$  处理的  $NAE$  与  $NUE$  最优, 较其他处理显著提高。表明在当地生态条件下, “中水高肥” ( $W2N3$ ) 组合能在高产的同时实现氮素资源的经济高效利用。

表 3 不同处理对玉米氮素吸收和利用的影响

水量	氮素施加量	氮素偏生产力 $NPFP$ /( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	氮素农学效率 $NAE$ /( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	氮素利用率 $NUE$ /( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
W1	N1	41.26 ± 2.11b	5.81 ± 0.65d	41.69 ± 2.12de
	N2	35.96 ± 3.26d	7.60 ± 0.35d	43.45 ± 2.54d
	N3	33.77 ± 1.26e	10.14 ± 0.77bc	47.43 ± 2.66c
W2	N1	43.72 ± 2.03ab	8.28 ± 0.63c	52.14 ± 3.13b
	N2	39.01 ± 1.65c	10.65 ± 0.85b	48.98 ± 2.45c
	N3	38.02 ± 1.14cd	14.39 ± 0.75a	61.62 ± 3.32a
W3	N1	46.18 ± 2.56a	10.74 ± 1.02b	38.95 ± 2.03f
	N2	39.99 ± 2.32c	11.63 ± 1.31b	40.02 ± 2.23ef
	N3	36.90 ± 2.09cd	13.27 ± 1.13a	41.03e ± 2.06f
	N0	—	—	—

### 2.3 水肥一体化对土壤水分及水分利用效率的影响

水肥管理显著影响土壤水分平衡与利用效率,不同处理下玉米的耗水量和水分利用效率的变化见表 4。在灌水效应上,W2 处理显著增加了播前与收获期土壤贮水量,但 W1 处理的水分利用效率 ( $WUE$ ) 最高,较 W2、W3 分别高 3.1% 和 49.2%。在施氮效应上,N3 处理的各项水分指标及  $WUE$  均

最高,其  $WUE$  较 N0、N1、N2 分别提高 14.8%、21.7% 和 133.4%;而 N0 处理的耗水量显著最高,较施氮处理平均多消耗 49.3%。水肥耦合效应显著,W2N3 处理在节水与高效利用上表现最优:其耗水量较 W3N0、W3N1 和 W2N2 显著降低 23.8%~54.0%; $WUE$  仅次于 W1N3,但较其余处理高 3.3%~147.9%。表明“中水高肥”模式在本地可实现节水增产的协同提升。

表 4 不同处理下玉米的耗水量和水分利用效率的变化

灌水量	施氮量	播前贮水量 /mm	收获贮水量 /mm	耗水量 /mm	水分利用效率 $WUE$ /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
W1	N1	95.36 ± 2.51f	121.39 ± 4.50e	146.97 ± 2.00e	69.77 ± 3.21c
	N2	79.42 ± 3.21e	102.73 ± 4.04f	149.69 ± 3.78e	74.64 ± 2.38b
	N3	152.48 ± 3.05b	180.55 ± 2.51b	144.93 ± 3.05e	86.87 ± 3.05a
W2	N1	181.94 ± 3.60a	266.03 ± 4.16a	135.91 ± 2.51e	79.95 ± 1.35b
	N2	131.29 ± 3.51c	155.16 ± 4.04d	196.13 ± 1.52c	61.78 ± 3.60c
	N3	118.12 ± 4.16d	166.71 ± 2.00c	171.41 ± 3.13c	82.69 ± 2.62a
W3	N1	120.73 ± 4.16d	171.56 ± 2.51c	213.17 ± 3.60b	53.84 ± 5.60d
	N2	112.91 ± 2.85d	153.17 ± 3.60d	223.73 ± 5.11b	55.52 ± 4.61d
	N3	132.35 ± 3.15c	181.46 ± 3.14b	214.89 ± 4.16b	64.02 ± 3.82c
	N0	112.12 ± 2.43d	125.38 ± 2.85e	250.74 ± 3.82a	35.13 ± 1.61e

### 2.4 产量与氮素、水分利用指标的相关性分析

为明确产量形成的关键驱动因子,对产量、水分及氮素利用指标进行了相关性分析(见图 6)。结果显示,氮素相关指标与产量呈极显著正相关,其中以氮肥农学效率  $NAE$  的相关性最高( $r = 0.94$ ,  $P < 0.001$ ),其次为净氮积累速率  $NAR$  ( $r = 0.88$ ,  $P < 0.05$ )和氮素积累量  $NA$  ( $r = 0.79$ ,  $P < 0.01$ )。这说明,在本试验条件下,氮素在植株体内的高效积累与转化是产量提升的主要生理基础。相比之下,灌水量与产量的直接相关性较弱( $r = 0.43$ ),但与水分利用效率 ( $WUE$ ) 呈极显著负相关( $r = -0.87$ ,  $P < 0.01$ ),表明单纯增加灌水不仅难以持续增产,反而会导致单位水分的产出效率下降。 $WUE$  与其他氮素指标之间相关性较弱且不显著,说明水分高效利用与氮素高效运转在本系统中是相对独立的过程。此外,氮肥偏生产力 ( $NPP$ ) 与产量相关性较弱 ( $r = 0.40$ ),但与氮素积累量高度正相关 ( $r = 0.81$ ,  $P < 0.01$ ),表明其增产作用主要通过促进氮素吸收而间接实现。 $NAE$  与  $NA$ 、 $NAR$  之间呈中等正相关,体现了氮素“吸收-利用-转化”各环节的协同性。

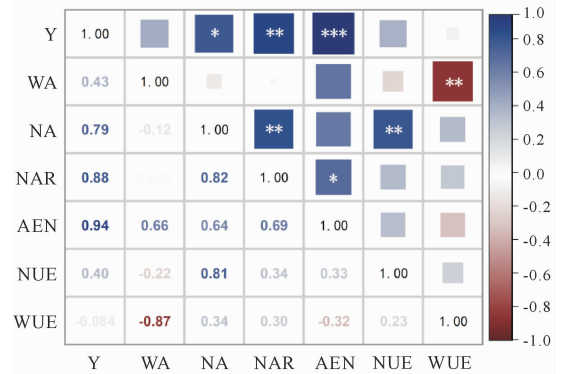


图 6 玉米产量与氮效率、水分利用效率之间的相关性分析

## 3 讨论

### 3.1 水肥耦合对玉米干物质积累与产量的影响

干物质积累是玉米产量形成的物质基础,其积累量与分配比例直接决定了最终籽粒产量<sup>[27]</sup>。本研究表明,适量增施氮肥与优化灌水可协同促进干物质积累。在相同灌水条件下,干物质积累量随施氮量增加而显著提升(N3 较 N0、N1、N2 分别提高 53.3%、24.3% 和 13.5%),这主要是由于氮素作为蛋白质与叶绿素的关键组分,直接增强了叶片光合能力与同化物合成<sup>[28]</sup>。然而,灌水的影响并非线

性,中水(W2)处理下的干物质积累普遍优于低水(W1)与高水(W3)处理。水分不足会直接限制植株生长,而过量灌水则可能通过降低根区氧气浓度或稀释养分有效性,从而抑制干物质生产<sup>[15]</sup>。最优水肥组合W2N3在成熟期的干物质积累量达510.09 g/株,其对应产量也最高(14 223.64 kg/hm<sup>2</sup>),这与其在灌浆至成熟期较强的穗部干物质分配优势密切相关<sup>[21]</sup>。这说明,在鄂尔多斯高原干旱条件下,通过“中水高肥”的耦合模式,既可保障营养生长阶段的物质生产,又能促进生殖生长阶段同化物向籽粒的高效转运,从而奠定高产基础。

### 3.2 水肥耦合对玉米耗水与水分利用效率的调控

在干旱半干旱区,水分是限制作物生产的主要因子。本研究发现,灌水量主导了耗水总量,W3处理(高水)的耗水量显著高于W2与W1处理。然而,高灌水量并未带来产量的线性增加,反而导致水分利用效率(WUE)显著下降。例如,W3N3处理的WUE(64.02 kg/(hm<sup>2</sup>·mm))显著低于W2N3和W1N3处理,这与康海等<sup>[29]</sup>的研究结论一致,即过量灌溉会因深层渗漏与非生产性蒸发增加而造成水分浪费。施氮则通过促进根系发育与叶面积扩展,间接增强了作物的水分利用能力。在适宜灌水(W2)基础上增施氮肥(N3),可显著提高WUE,这得益于氮素对光合效率的促进及由此带来的单位耗水产出增加<sup>[30]</sup>。因此,水分高效利用并非依赖于单一因子的最大化,而在于水肥协同。本试验中W2N3组合实现了耗水与产出的最优平衡,说明“以水定产、以肥调水”的管理策略在该地区具有重要应用价值。

### 3.3 水肥耦合对玉米氮素吸收与利用效率的协同效应

氮素高效利用是农业绿色发展的核心。本研究显示,氮素积累量随施氮量增加而增加,但氮肥偏生产力(NPFP)随施氮量增加而递减,表明存在报酬递减现象。灌水显著调控了氮素的有效性及作物吸收过程:适量灌水(W2)可维持适宜的土壤水势与溶质迁移,促进氮素向根表运移与吸收;而水分胁迫(W1)会限制氮素质流与扩散,过量灌水(W3)则可能增加氮素淋失风险,均会导致氮肥利用效率(NUE)下降。水肥交互作用显著,W2N3处理在实现最高氮素积累量(397.44 kg/hm<sup>2</sup>)的同时,也获得了较高的氮肥农学效率(NAE)与氮肥利用率,这与

该处理下作物生长旺盛、根系吸收能力强、氮素向籽粒分配比例高密切相关。相关性分析进一步证实,产量与NAE呈极显著正相关( $r=0.94$ ),说明氮肥的高效农学转化是获得高产的关键生理机制。因此,在该地区推行“中水高肥”的水肥一体化模式,不仅能提高氮素吸收总量,更能优化其利用效率,实现增产与资源高效的双重目标。

## 4 结论

(1) 在鄂尔多斯高原干旱半干旱区,基于无膜浅埋滴灌的水肥一体化技术可显著调控玉米生长、产量及资源利用效率。中水(W2,220 m<sup>3</sup>/亩)与高氮(N3,54 kg/亩)组合(W2N3)表现出最优的综合效益:其地上干物质积累量最高(510.09 g/株),产量达14 223.64 kg/hm<sup>2</sup>,较低水低氮处理(W1N1)增产42.8%。

(2) 中水高氮处理实现了水分与氮素的高效协同,水分利用效率(90.35 kg/(hm<sup>2</sup>·mm))与氮肥农学效率均处于最高水平。

(3) 过量灌水(W3)增加了耗水量,但导致水分利用效率下降29.2%,未能实现增产增效。

(4) 氮素的高效吸收与利用依赖于适宜的水分供应,中水条件通过稳定根际环境,显著促进了氮素向籽粒的转运与同化。

(5) 在本区域玉米生产中,推荐采用“中水高氮”(W2N3)的水肥一体化管理模式,可在保障高产的同时,显著提升水分与氮肥的利用效率。

### 参考文献:

- [1] 曹永强,李维佳,袁立婷.基于文献计量学的我国水资源优化配置研究现状分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(5):63-69.
- [2] 贾学秀,严岩,朱春雁,等.区域水资源压力分析评价方法综述[J].自然资源学报,2016,31(10):1783-1791.
- [3] 高凌智.鄂尔多斯高原区紫花苜蓿地理式滴灌布设方式及高效用水研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [4] 水利部发布2018年度《中国水资源公报》[J].中国水利,2019(14):5.
- [5] 黄金廷,王文科,候光才,等.鄂尔多斯高原近48a降水及蒸发特征分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(9):145-148.
- [6] 白由路.植物营养与肥料研究的回顾与展望[J].中国

- 农业科学,2015,48(17):3477-3492.
- [7] 郑文生. 氮肥运筹对地下滴灌玉米产量的影响[J]. 节水灌溉,2018(3):23-26.
- [8] 谭 贺. 不同氮肥运筹对春玉米干物质积累及氮吸收分配的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013.
- [9] 顾桂栋. 风沙土玉米滴灌水肥一体化氮肥施肥制度试验研究[D]. 扬州:扬州大学,2022.
- [10] 王鼎新. 风沙土玉米滴灌水肥一体化灌溉制度优化研究[D]. 扬州:扬州大学,2021.
- [11] 任中生. 河套灌区玉米滴灌水肥一体化水氮互作效应与生长模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [12] 张 华. 基于土壤-作物系统叶绿素氮诊断的优化水氮模式研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [13] 张立勤,车宗贤,崔云玲,等. 不同水肥条件对滴灌制种玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉,2018(12):29-32.
- [14] 邓兰生,陈卓森,郭彦彪,等. 滴灌施肥次数对甜玉米生长及养分淋洗损失的影响[J]. 西南农业学报,2015,28(5):2142-2147.
- [15] 严富来,张富仓,范兴科,等. 水氮互作对宁夏沙土春玉米产量与氮素吸收利用的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(7):283-293.
- [16] 侯云鹏,杨 建,尹彩侠,等. 氮肥后移对春玉米产量、氮素吸收利用及土壤氮素供应的影响[J]. 玉米科学,2019,27(2):146-154.
- [17] 高凌智. 鄂尔多斯高原区紫花苜蓿地理式滴灌布设方式及高效用水研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [18] 贾浩南,李 彬,降亚楠,等. 鄂尔多斯高原玉米土壤温度变化规律研究——以鄂托克旗为例[J]. 水利科学与寒区工程,2022,5(9):36-42.
- [19] 鲁如坤,时正元,赖 涛. 氮肥穴施对提高磷肥肥效的作用[J]. 土壤,1996(4):220.
- [20] 陈东峰. 汾河灌区春玉米膜下滴灌水肥耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [21] 曹议丹,钱麟君,霍俊豪,等. 优化管理对小麦-玉米轮作系统植株干物质积累、转运与产量的影响[J]. 山东农业科学,2024,56(5):59-68.
- [22] 高振宏. 夏玉米简化高效施肥技术[J]. 现代农村科技,2014(13):45-46.
- [23] 赵建华,孙建好,陈亮之,等. 玉/豆间作产量优势中补偿效应和选择效应的角色[J]. 作物学报,2022,48(10):2588-2596.
- [24] 严富来. 滴灌施肥条件下宁夏扬黄灌区春玉米水肥耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [25] 杨先林. 水肥一体化施肥技术在玉米栽培中的应用效果[J]. 种子科技,2024,42(24):52-54.
- [26] 刘 帅,徐学欣,孟繁港,等. 滴灌水肥一体化下施氮量和追氮时期对夏玉米籽粒品质及淀粉糊化特性的影响[J]. 西北农业学报,2024,33(3):426-434.
- [27] 马尚宇,王艳艳,刘雅男,等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(3):375-385.
- [28] 刘 颖,顾昀怿,张伟杨,等. 水分与氮素及其互作调控小麦产量和水氮利用效率研究进展[J]. 作物杂志,2023,39(4):7-15.
- [29] 康 海. 水氮耦合技术在经济作物栽培中的应用[J]. 农业工程,2022,12(7):84-87.
- [30] 张馨月,王 寅,陈 健,等. 水分和氮素对玉米苗期生长、根系形态及分布的影响[J]. 中国农业科学,2019,52(1):34-44.