

DOI:10.11686/cyxb2025019

http://cyxb.magtech.com.cn

洪自强, 张正珍, 苏明, 等. 西北旱区滴灌条件下玉米干物质积累、转运及籽粒产量对施钾量的响应. 草业学报, 2025, 34(12): 121-133.

HONG Zi-qiang, ZHANG Zheng-zhen, SU Ming, *et al.* Responses of maize dry matter accumulation, translocation and grain yield to potassium application rates under drip irrigation conditions in the arid areas of Northwest China. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(12): 121-133.

西北旱区滴灌条件下玉米干物质积累、 转运及籽粒产量对施钾量的响应

洪自强¹, 张正珍², 苏明¹, 李翻过¹, 周甜¹, 吴宏亮^{1*}, 康建宏^{1*}

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏回族自治区种子工作站, 宁夏 银川 750001)

摘要:探究滴灌条件下施钾量对玉米干物质积累、转运及产量形成的影响, 以期为宁夏旱区玉米高产高效栽培提供理论依据和技术支撑。于2022—2023年在宁夏银川平吉堡农场开展随机区组试验, 试验共设6个钾肥处理, 分别为0(K₀)、60(K₁)、120(K₂)、180(K₃)、240(K₄)和300 kg·hm⁻²(K₅)。合理增钾可显著提高玉米干物质积累量, 有效提高玉米花前、花后物质转运及对籽粒的贡献率, 最终为产量提高奠定基础。2年间K₃处理下干物质积累量均达到最大值分别为37826和36610 kg·hm⁻², 较其他处理分别显著提高6.53%~23.12%和3.62%~18.79%。2年间K₃处理下花前转运贡献率(DMRCG)最大, 较其他处理分别提高14.84%~81.87%和5.61%~25.84%。2年间K₃处理花后物质积累量最大, 较其他处理分别提高7.13%~17.44% ($P<0.05$)和1.48%~16.33%。与K₀相比, K₃处理干物质积累速率最大时的生长量(W_{max})2年分别显著增加20.63%和18.47%。2年间K₃处理最大干物质积累速率(V_{max})较其他处理分别显著提高4.42%~37.21%和1.52%~18.24%, K₃处理平均干物质积累速率(V_{mean})较其他处理分别提高6.60%~40.50%和4.25%~22.74%。2年间K₃处理平均群体生长速率(CGR)最大, 较其他处理分别提高4.75%~26.36%和2.93%~17.16%。随着施钾量的增加, 玉米产量表现为先增后降趋势, K₃处理玉米籽粒产量最大, 2年分别为15179和14944 kg·hm⁻², 较其他处理分别提高2.29%~18.07%和4.32%~28.24%。通径分析表明, 在高密度种植条件下, 要进一步提升产量, 首先要增加百粒重, 其次考虑增加穗数和穗粒数。对产量与施钾量进行二次方程拟合, 得到2022年经济最佳施钾量为167.25 kg·hm⁻², 2023年为170.66 kg·hm⁻²。综合分析得出, 在宁夏旱区推荐玉米最佳经济施钾量为167~180 kg·hm⁻², 从而达到高产高效栽培的目的。

关键词:旱区; 玉米; 钾肥; 干物质; 产量

Responses of maize dry matter accumulation, translocation and grain yield to potassium application rates under drip irrigation conditions in the arid areas of Northwest China

HONG Zi-qiang¹, ZHANG Zheng-zhen², SU Ming¹, LI Fan-guo¹, ZHOU Tian¹, WU Hong-liang^{1*}, KANG Jian-hong^{1*}

1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Seed Workstation of the Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China

Abstract: This research aimed to provide scientific and technical data to support high-yield and high-efficiency of

收稿日期: 2025-01-17; 改回日期: 2025-03-19

基金项目: 宁夏高质量发展与生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-3-02), 宁夏区重点研发项目(2019BBF02003)和宁夏粮食作物种质创制与生长调控科技创新团队(2022BSB03109)资助。

作者简介: 洪自强(2001—), 男, 安徽芜湖人, 在读硕士。E-mail: ziqianghong@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: nxuwu@163.com, kangjianhong@163.com

maize cultivation in the arid region of Ningxia and investigated the effects of potassium application rates on dry matter accumulation, transport, and yield formation of maize (*Zea mays*) under drip irrigation. A randomized block trial was conducted in 2022 and 2023 at Pingjipu Farm, Yinchuan, Ningxia, China. The trial included six potassium fertilizer treatments: 0 (K_0), 60 (K_1), 120 (K_2), 180 (K_3), 240 (K_4), and 300 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (K_5). Appropriate potassium supplementation significantly enhanced dry matter accumulation and improved both pre- and post-anthesis substrate translocation efficiency, thereby establishing the foundation for yield improvement. The K_3 treatment achieved maximum dry matter accumulation of 37826 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in 2022 and 36610 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in 2023. These values significantly exceeded those of other treatments by 6.53%–23.12% and 3.62%–18.79%, respectively. The pre-anthesis dry matter translocation contribution rate under the K_3 treatment was 14.84%–81.87% (2022) and 5.61%–25.84% (2023) higher than other treatments. Post-anthesis dry matter accumulation in K_3 increased by 7.13%–17.44% ($P<0.05$) and 1.48%–16.33% across the two years. Compared with K_0 , K_3 exhibited 20.63% (2022) and 18.47% (2023) higher biomass at maximum biomass accumulation. The maximum dry matter accumulation rate under K_3 surpassed other treatments by 4.42%–37.21% (2022) and 1.52%–18.24% (2023), while the mean accumulation rate increased by 6.60%–40.50% and 4.25%–22.74%, in 2022 and 2023, respectively. The K_3 treatment also achieved the highest mean crop growth rate (CGR), exceeding other treatments by 4.75%–26.36% and 2.93%–17.16% in 2022 and 2023, respectively. Maize yield initially increased then decreased with increasing potassium application rates, peaking under K_3 at 15179 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (2022) and 14944 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (2023), corresponding to average yield improvements of 2.29%–18.07% and 4.32%–28.24%, respectively, over other treatments. Path analysis revealed that under high-density planting conditions, prioritizing enhancement of 100-grain weight, followed by ear number and kernel number per ear could further boost yields. Quadratic regression analysis identified optimal economic potassium rates of 167.25 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (2022) and 170.66 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (2023). Integrated analysis therefore demonstrates that the recommended optimal economic potassium application rate for maize in arid regions of Ningxia ranges from 167 to 180 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, thereby achieving the dual objectives of high-yield and resource-efficient cultivation.

Key words: arid region; maize; potassium fertilizer; dry matter; yield

玉米(*Zea mays*)是世界重要饲料作物之一,也是中国第一大粮食作物,发展玉米对稳定国家粮食安全、提高农民收入、促进家畜生产与养殖业发展具有现实意义^[1-2]。干物质积累是籽粒产量形成的基础,干物质高效分配是获得高产的重要保障,明确其积累分配规律对玉米籽粒产量提升具有重要指导意义^[3]。玉米高产通常以生物量积累为前提,而养分吸收是其核心基础。钾作为玉米生长发育所需的关键营养元素,在土壤中主要以矿物态存在,仅有少量以交换态或水溶态存在^[4],因此化学钾肥成了农田钾素的主要补充形式^[5-6]。宁夏地区土壤曾富含钾素,导致农业生产中形成了重氮磷肥轻钾肥习惯,钾肥施用量严重不足甚至不施钾,致使土壤钾储备渐耗且得不到补充,作物增产遭遇瓶颈^[7]。全球变暖与水资源分布不均导致旱区农业用水矛盾尖锐,旱区农业作为粮食安全保障的关键部分,急需探索节水高产种植模式,滴灌因精准供水等优势被广泛应用^[8-9]。深入探究旱区滴灌条件下玉米干物质积累转运与钾肥用量关系,利于挖掘玉米产量潜能,对旱区农业的可持续发展与粮饲安全保障具有战略意义。

以往众多研究已对玉米生长与钾肥施用的关系进行了多方面探讨。如,孔丽丽等^[10]在东北水肥一体化条件下,当土壤速效钾含量为 109.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,密度为 75000 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,增施 K_2O 120 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,可提高玉米生育后期光合速率,促进玉米生育后期营养器官中有机物的合成,有利于光合产物向籽粒的运输与分配,进而提高玉米籽粒产量。洪自强等^[11]研究表明,在滴灌水肥一体化条件下,合理施钾可保证较高的叶绿素相对含量(relative chlorophyll content, SPAD)和光系统 II (photosystem II, PS II) 反应中心的活性,提高春玉米对光能的捕获、吸

收、转化及最大光化学效率,降低热耗散,促进春玉米光合作用,从而为物质转运和产量提高奠定坚实的基础。前人研究发现,通过合理施钾,钾与其他营养元素平衡时,作物根系的生长和细胞增殖更快,有利于提高作物水分利用效率及钾素农学利用效率,最终为高产奠定基础^[12]。宋杰等^[13]研究表明,适宜的施钾量可提高作物对氮、磷肥的利用效率,使玉米有较高的氮、磷、钾素积累优势;而钾肥施用过量或不足均会导致叶片叶绿素含量和光合性能下降,影响玉米对养分的吸收,阻碍植株正常生长。

综合前人研究,关于钾肥对玉米的钾素吸收利用效率、光合特性及植株抗性等研究较为丰富^[14-16],但针对西北旱区水肥一体化条件下玉米干物质积累、转运及籽粒产量对钾肥用量响应的报道相对匮乏,特别是在我国西北地区,缺钾和干旱 2 种逆境易存在叠加效应的情况下,深入探究滴灌条件下钾肥对玉米干物质积累、转运的变化规律更具意义。本试验旨在旱区滴灌条件下,通过测定不同施钾量下玉米干物质积累量与转运效率、群体生长速率、籽粒产量及构成因素,结合 Logistic 拟合分析,以期明确连续 2 年不同施钾量对玉米干物质积累动态过程的调控效应,进而阐明其对玉米籽粒产量形成的作用机制,为当地玉米高产高效栽培应对日趋严重的土壤钾素贫瘠提供有力支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 4 月至 2023 年 10 月在宁夏银川市平吉堡农场五队(38°24'N,106°01'E)进行。试验地属于旱区。年平均气温 8.5℃,年平均降水量 200 mm,蒸发量 2000 mm 以上,集中在 7—9 月降水。土壤类型为淡灰钙土,质地为轻壤土,近 3 年所种作物皆为玉米,一年一季,农户常规管理。前茬收获后进行了深翻灭茬。采用滴灌水肥一体化进行施肥灌溉。试验期间日平均温度和降水量如图 1 所示,耕层土壤(0~20 cm)基本理化性状见表 1。

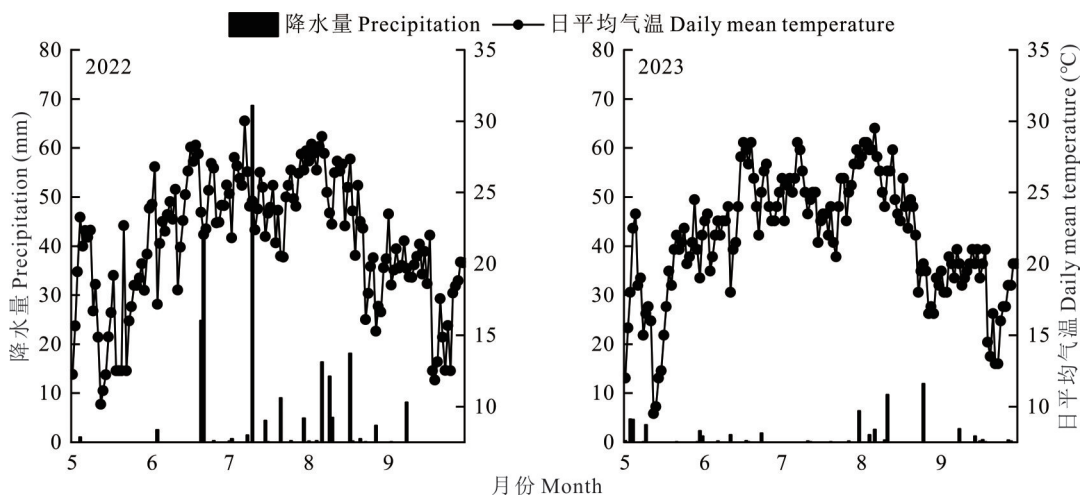


图 1 2022 和 2023 年春玉米生育期试验地日平均气温和降水量

Fig. 1 Daily mean temperature and precipitation at the test site during the spring maize growth period in 2022 and 2023

表 1 2022 和 2023 年试验地耕层土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of plough soil in experimental land from 2022 to 2023

年份 Year	pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)
2022	7.68	11.86	0.80	49.00	16.89	87.62
2023	7.71	12.56	0.63	41.00	16.43	81.31

1.2 试验设计

试验以当地主栽品种‘先玉1225’为材料,共设6个不同施钾(K_2O)水平:0、60、120、180、240和300 $kg \cdot hm^{-2}$,记为 K_0 、 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 和 K_5 。采用随机区组设计,3次重复,共18个小区。采取宽窄行种植,宽行70 cm,窄行40 cm,平均行距为55 cm,株距为20 cm,密度为90000株 $\cdot hm^{-2}$,各小区种植8行玉米,小区面积为88 m^2 ,区组之间设置1 m走道,每个小区均为独立的滴灌单元。每两行铺设一条滴灌带,滴灌带铺设于窄行内。

各处理氮、磷肥用量一致,N:300 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 P_2O_5 :138 $kg \cdot hm^{-2}$ 。其中,氮肥为尿素($N \geq 46\%$),磷肥为磷酸一铵($N-P_2O_5-K_2O$:12-61-0),钾肥为硫酸钾($K_2O \geq 52\%$),均为水溶性肥料。试验不施基肥,氮磷钾肥均通过滴灌随水施入。钾肥和磷肥的施肥比例为:苗期30%(一次性施入)、拔节期40%(分2次施入)和大喇叭口期30%(分2次施入)。氮肥的施肥比例为:苗期10%(一次性施入)、拔节期30%(分2次施入)、大喇叭口期30%(分2次施入)、抽雄吐丝期20%(一次性施入)、灌浆期10%(一次性施入)。2022和2023年玉米全生育期均滴灌水11次,滴灌水总量分别为3090和3210 $m^3 \cdot hm^{-2}$ (表2)。2022和2023年玉米种植日期分别为4月24日和4月25日,收获日期分别为10月3日和9月27日。

表2 玉米各生育时期滴灌水次数与滴灌水量

Table 2 Irrigation frequency and amount for each growth period of maize under drip irrigation

生育时期 Growth period	2022			2023		
	灌水定额 Irrigation quota ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	灌水次数 Number of times of irrigation	灌水总量 Amount of irrigation ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	灌水定额 Irrigation quota ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	灌水次数 Number of times of irrigation	灌水总量 Amount of irrigation ($m^3 \cdot hm^{-2}$)
S	240	1	240	240	1	240
VE~V6	240	1	240	240	1	240
V6~V12	280	3	840	280	3	840
V12~VT	300	2	600	320	2	640
VT~R3	300/320/350	3	970	350	3	1050
R3~R6	200	1	200	200	1	200
合计 Total		11	3090		11	3210

S、VE、V6、V12、VT、R3、R6分别表示播种期、苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期、灌浆期、成熟期。下同。S, VE, V6, V12, VT, R3, and R6 indicate sowing stage, seedling stage, jointing stage, big bell mouth stage, tasseling and silking stage, filling stage, and maturation stage. The same below.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 玉米干物质积累与分配 于玉米拔节期(V6)、大喇叭口期(V12)、抽雄吐丝期(VT)、灌浆期(R3)和成熟期(R6),在各小区选取3株长势一致的植株,于105 $^{\circ}C$ 杀青30 min,80 $^{\circ}C$ 烘至恒重,测定各器官干物质重。并计算花前转运量(dry matter remobilization at pre-anthesis, DMR, $kg \cdot hm^{-2}$)、花前转运率(dry matter remobilization efficiency at pre-anthesis, DMRE, %)、花前转运贡献率(contribution of dry matter remobilization to grain at pre-anthesis, DMRCG, %)、花后积累量(dry matter accumulation at post anthesis, DMA, $kg \cdot hm^{-2}$)和花后积累贡献率(contribution of dry matter accumulation to grain at post anthesis, DMAC, %)^[17]:

$$DMR = NDM_F - NDM_M$$

$$DMRE = (NDM_F - NDM_M) / NDM_F \times 100\%$$

$$DMRCG = (NDM_F - NDM_M) / DM_G \times 100\%$$

$$DMA = DM_M - DM_F$$

$$DMAC = 1 - [(NDM_F - NDM_M) / DM_G \times 100\%]$$

式中: NDM_F 为开花期营养器官干物质积累量; NDM_M 为成熟期营养器官干物质积累量; DM_G 为籽粒干物质积累量; DM_F 为开花期干物质积累量, DM_M 为成熟期干物质积累量。

采用 Logistic 方程 $Y=A/(1+B \times e^{-KX})$ 拟合玉米地上干物质积累过程, X 为播种后天数, Y 为干物质积累量, A 为理论最大干物质积累量, B 为初始参数, K 为生长速率参数。并计算干物质积累速率最大时间 (time of maximum rate of dry matter accumulation, T_{max})、干物质积累速率最大时的生长量 (growth at maximum rate of dry matter accumulation, W_{max})、最大干物质积累速率 (maximum dry matter accumulation rate, V_{max}) 和平均干物质积累速率 (average dry matter accumulation rate, V_{mean})^[18]:

$$T_{max} = \ln B/K$$

$$W_{max} = A/2$$

$$V_{max} = K \times W_{max} \times (1 - W_{max}/A)$$

$$V_{mean} = W_1/t_1$$

式中: $t_1 = (\ln B + 4.595)/K$, 对应此时干物质积累量为 W_1 。

1.3.2 玉米群体生长速率 (crop growth rate, CGR)

$$CGR (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = (W_2 - W_1) / (T_2 - T_1)$$

式中: T_2, T_1 为 2 个测定时期; W_2, W_1 分别为 T_2, T_1 时期的干物质积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 玉米籽粒产量及构成因素

在玉米成熟期, 取每个试验小区中间两行在田间进行测产; 取 20 穗玉米风干后在室内考种, 测定穗粒数、穗数、百粒重等产量构成指标, 测定含水量后折合 14% 含水量计算单位面积产量。施钾量与产量关系可采用二次函数关系拟合, 同时参照苏明等^[19]方法, 计算玉米经济最佳施钾量 $X = (P_x/P_y - b)/2a$, 式中: P_x 为钾肥价格 ($11.2 \text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$), P_y 为玉米价格 ($2.5 \text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$), a, b 为二次函数的系数。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2016 进行数据统计、整理, SPSS 23.0、DPS 7.05 进行数据分析, LSD 法进行差异显著性检验, Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 施钾量对玉米干物质的影响

2.1.1 干物质积累

年份、施钾量和年份与施钾量交互效应均对玉米干物质积累量产生极显著影响 (图 2), 2 年间 K_3 处理下干物质积累量均达到最大值, 分别为 37826 和 36610 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中, 2022 年玉米干物质积累表现为 $K_3 > K_2 > K_4 > K_1 > K_5 > K_0$, K_3 处理干物质积累量较其他处理显著提高 6.53%~23.12%。2023 年玉米干物质积累表现为 $K_3 > K_4 > K_2 > K_5 > K_1 > K_0$, K_3 处理下玉米干物质积累量较其他处理显著提高 3.62%~18.79%。

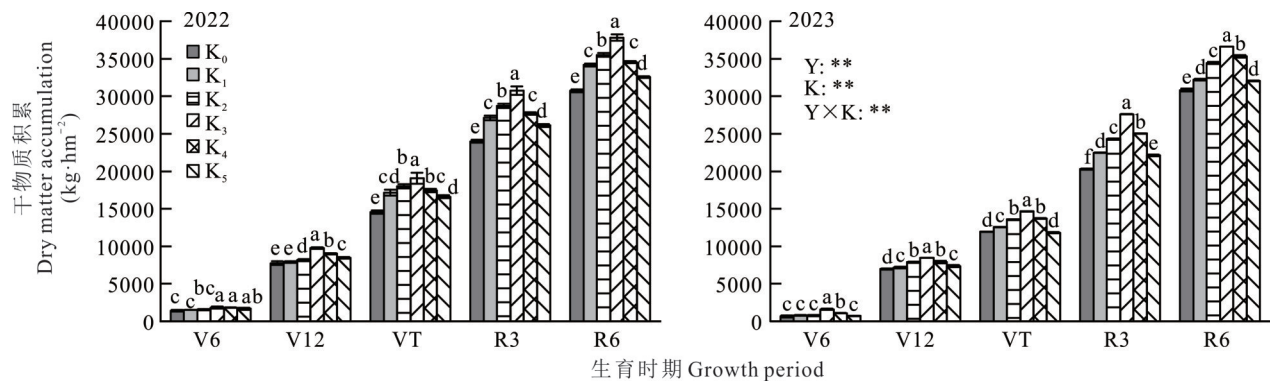


图 2 不同施钾量下玉米干物质积累的变化

Fig. 2 Changes in maize dry matter accumulation under different potassium applications

$K_0, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ 表示钾肥用量分别为 0、60、120、180、240、300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 不同小写字母表示同一时期各处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Y、K、Y×K 分别表示年份、施钾量、年份与施钾量的交互效应。**与*分别表示变量效应达到 0.01 和 0.05 显著水平, NS 表示效应不显著。下同。The potassium dosage in $K_0, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ treatments were 0, 60, 120, 180, 240, 300 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectively; Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the $P < 0.05$ level for the same period. Y, K, and Y×K denote the interaction effects of year, potassium application, and interactive effect of year and potassium application, respectively. ** and * indicate variable effect at 0.01 and 0.05 significant levels, NS indicates not significant. The same below.

2.1.2 干物质分配 2年中,随着玉米生育时期的推进,玉米茎干物质积累占全株干物质积累总量的比例呈先升高后降低的趋势,在VT期所占比例最大(图3)。随着玉米灌浆的进行,穗部干物质逐渐增加。相较于不施钾肥,增施钾肥下穗部干物质积累较快。

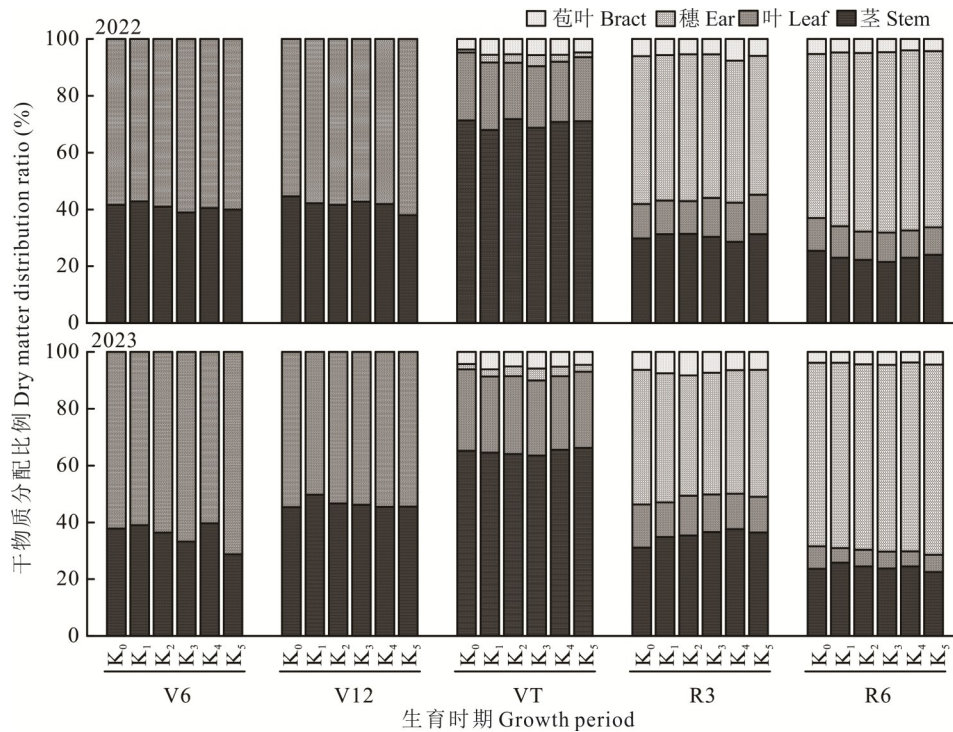


图3 不同施钾量下玉米干物质分配的变化

Fig. 3 Changes in maize dry matter distribution ratio under different potassium applications

2.1.3 干物质转运 年份、施钾量和年份与施钾量交互效应对玉米花前转运量(DMR)、花前转运率(DMRE)、花前转运贡献率(DMRCG)、花后积累量(DMA)和花后积累贡献率(DMAC)均产生极显著影响($P < 0.01$,表3)。2年中,合理施钾有效提高玉米花前、花后物质转运及对籽粒的贡献率。其中, K_2 、 K_3 和 K_4 间DMR、DMRE均无显著差异。 K_3 处理DMRCG最大,2022和2023年较其他处理分别提高14.84%~81.87%和5.61%~25.84%。 K_3 处理DMA均最大,2022和2023年较其他处理分别提高7.13%~17.44%($P < 0.05$)和1.48%~16.33%。

2.1.4 干物质积累 Logistic 方程回归分析 利用 Logistic 方程拟合不同施钾量下玉米干物质积累过程,进行相关计算得出相关参数。不同施钾处理回归方程决定系数 $R^2 \geq 0.98$,说明 Logistic 方程可以很好地模拟干物质增长动态变化过程。年份、施钾量、年份与施钾量的交互作用对玉米干物质积累速率最大时的生长量(W_{max})、最大干物质积累速率(V_{max})和平均干物质积累速率(V_{mean})均产生极显著影响(表4, $P < 0.01$)。

Logistic 方程拟合结果显示,2022年, K_2 处理 T_{max} 达到最大值,但与 K_1 和 K_3 处理无显著差异,2023年 K_3 处理 T_{max} 达到最大值。2年中, W_{max} 、 V_{max} 和 V_{mean} 均随施钾量的增加呈先增后降的趋势, K_3 处理均达最大值。其中,与 K_0 相比,2022和2023年 K_3 处理 W_{max} 分别显著增加20.63%和18.47%; K_3 处理 V_{max} 较其他处理分别显著提高4.42%~37.21%和1.52%~18.24%; K_3 处理 V_{mean} 较其他处理分别提高6.60%~40.50%和4.25%~22.74%。

2.2 施钾量对玉米群体生长速率(CGR)的影响

不同施钾量对CGR具有显著影响($P < 0.05$,表5)。2年中,随着玉米生育时期的推进,玉米CGR呈先增后降的趋势。随着施钾量的增加,CGR也表现为先增后降的趋势。2年中,除2023年拔节期~大喇叭口期, K_3 处理在各时期群体生长速率均达到最大值。其中,2022年与 K_0 相比, K_3 处理各时期中CGR显著提高25.26%、

表 3 不同施钾量下玉米干物质转运的变化及方差分析

Table 3 Changes in maize dry matter translocation and analysis of variance (ANOVA) under different potassium applications

年份 Year	处理 Treatment	花前转运量 DMR (kg·hm ⁻²)	花前转运率 DMRE (%)	花前转运贡献率 DMRCG (%)	花后积累量 DMA (kg·hm ⁻²)	花后积累贡献率 DMAC (%)
2022	K ₀	2496.20d	18.00c	14.89c	16178.22d	85.11a
	K ₁	4071.84c	25.88b	22.30b	17036.04c	77.98b
	K ₂	5060.46a	30.63a	23.58ab	17492.74b	74.91cd
	K ₃	5216.28a	30.23a	27.08a	18740.72a	74.06d
	K ₄	4801.65ab	29.86a	21.39b	17092.65c	74.72cd
	K ₅	4560.42b	29.34a	20.58b	15957.90d	76.44bc
2023	K ₀	1485.55b	13.26ab	8.82b	18878.95e	91.19a
	K ₁	1518.34b	13.21b	8.67b	19642.89d	91.34a
	K ₂	1841.25a	14.99ab	10.33ab	20861.20b	89.68ab
	K ₃	1998.07a	15.33ab	10.91a	21961.62a	89.09b
	K ₄	1881.24a	15.18ab	9.82ab	21641.23a	90.18ab
	K ₅	1708.10ab	15.71a	9.28ab	20230.82c	90.72ab
年份 Year (Y)		**	**	**	**	**
施钾量 Potassium application (K)		**	**	**	**	**
年份×施钾量 Y×K		**	**	**	**	**

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$), the same below. **: $P < 0.01$.

表 4 不同施钾量下玉米地上干物质积累的 Logistic 方程回归分析及方差分析

Table 4 Logistic equation regression analysis and analysis of variance (ANOVA) of aboveground dry matter accumulation of maize under different potassium applications

年份 Year	处理 Treatment	方程参数 Parameters of equation			R^2	干物质积累参数 Dry matter accumulation parameters			
		A	B	K		T_{\max} (d)	W_{\max} (g)	V_{\max} (g·plant ⁻¹ ·d ⁻¹)	V_{mean} (g·plant ⁻¹ ·d ⁻¹)
2022	K ₀	401.90	20.93	0.06	0.99	5.85bc	200.95f	6.02c	8.05c
	K ₁	438.78	24.57	0.07	0.98	5.92ab	219.39d	7.22b	9.70b
	K ₂	453.10	27.77	0.07	0.99	5.99a	226.55b	7.91a	10.61a
	K ₃	484.81	25.30	0.07	0.99	5.91ab	242.41a	8.26a	11.31a
	K ₄	445.82	21.28	0.06	0.99	5.81c	222.91c	7.10b	9.86b
	K ₅	418.89	21.65	0.07	0.99	5.82c	209.45e	6.76b	9.40b
2023	K ₀	421.96	15.24	0.05	0.99	5.75b	210.98e	5.10f	6.20e
	K ₁	440.51	15.27	0.05	0.99	5.75b	220.25d	5.35d	6.52d
	K ₂	468.68	15.17	0.05	0.99	5.73b	234.32c	5.76c	7.12c
	K ₃	499.88	14.14	0.05	0.99	5.68c	249.94a	6.03a	7.61a
	K ₄	481.81	15.46	0.05	0.99	5.75b	240.90b	5.94b	7.30b
	K ₅	442.17	15.54	0.05	0.99	5.79a	221.08d	5.26e	6.27e
年份 Year (Y)		—	—	—	—	**	**	**	**
施钾量 Potassium application (K)		—	—	—	—	*	**	**	**
年份×施钾量 Y×K		—	—	—	—	**	**	**	**

A、B和K分别表示理论最大干物质积累量、初始参数、生长速率参数。 T_{\max} 、 W_{\max} 、 V_{\max} 和 V_{mean} 分别表示干物质积累速率最大时间、干物质积累速率最大时的生长量、最大干物质积累速率和平均干物质积累速率。A, B, and K denote theoretical maximum dry matter accumulation, initial parameters, and growth rate parameters, respectively. T_{\max} , W_{\max} , V_{\max} , and V_{mean} represent the time of maximum dry matter accumulation rate, growth at maximum dry matter accumulation rate, maximum dry matter accumulation rate, and average dry matter accumulation rate, respectively.

37.34%、23.49%和5.07%，2023年提高8.34%、25.01%、20.21%和12.40%。K₃处理平均群体生长速率均达到最大，2022和2023年较其他处理分别平均提高4.75%~26.36%和2.93%~17.16%。可见，适当增施钾肥(K₃)有利于提高玉米群体生长速率，而增施钾肥过多反而抑制玉米群体生长。

2.3 施钾量对玉米产量的影响

2.3.1 籽粒产量 方差分析表明，施钾量对玉米籽粒产量的影响达到极显著水平($P < 0.01$)，而年份、年份与施钾量交互作用对玉米籽粒产量无显著影响(图4)。2年中，随着钾肥用量的增加，玉米籽粒产量均表现为先增后降趋势，K₃处理下最大，分别为15179和14944 kg·hm⁻²，较其他处理分别提高2.29%~18.07%和4.32%~28.24%。进一步研究发现，产量与施钾量之间呈二次函数关系(表6)，2022年玉米的经济最佳施钾量为167.25 kg·hm⁻²，对应的经济最高产量为14861 kg·hm⁻²，而2023年则分别为170.66 kg·hm⁻²(经济最佳施钾量)和14372 kg·hm⁻²(经济最高产量)。

2.3.2 产量构成因素 年份、施钾量、年份与施钾量的交互作用对玉米穗数具有极显著影响(表7)，年份、施钾量对穗粒数具有极显著影响，而年份与施钾量交互效应对穗粒数影响不显著，年份对百粒重无显著影响，施钾量、年份与施钾量交互作用对百粒重有极显著的影响。产量构成因素结果显示，2年中随着钾肥用量的增加，玉米穗数、穗粒数、百粒重均呈先增后减的变化趋势。施钾显著提高玉米的穗数、穗粒数和百粒重，其中K₃表现较好。与K₀相比，2022和2023年K₃处理玉米穗数分别显著增加5.66%和5.68%。2年中K₃、K₄间穗粒数无显著差异。2022和2023年百粒重表现为K₃ > K₂ > K₅ > K₄ > K₁ > K₀和K₄ > K₃ > K₅ > K₂ > K₁ > K₀。2022年，相较于其他处理，K₃处理下百粒重显著提升4.22%~19.24%，而2023年K₃、K₄和K₅间无显著差异。

2.3.3 玉米籽粒产量与其构成因素通径分析 通径系数的绝对值反映了各产量构成因素对玉米籽粒产量产生的直接影响程度。表8为不同施钾量下玉米籽粒产量与产量构成因素间的通径分析，产量构成因素与籽粒产

表5 不同施钾量下玉米群体生长速率的变化

Table 5 Changes in maize population growth rate under different potassium applications (kg·hm⁻²·d⁻¹)

年份 Year	处理 Treatment	V6~V12	V12~VT	VT~R3	R3~R6	平均 Mean
2022	K ₀	351.60d	485.34c	295.57e	192.00b	331.13
	K ₁	354.31d	660.12a	312.00d	201.49a	381.98
	K ₂	366.49cd	702.82a	334.88b	193.62b	399.45
	K ₃	440.41a	666.57a	365.00a	201.73a	418.43
	K ₄	399.00b	603.91b	320.30c	195.52b	379.68
	K ₅	376.45cd	582.07b	296.42e	184.93c	359.97
2023	K ₀	301.19d	354.32d	306.52e	223.26e	296.32
	K ₁	304.44d	385.42c	319.26d	232.05d	310.29
	K ₂	339.89a	405.14b	345.90b	241.39bc	333.08
	K ₃	326.30b	442.95a	368.46a	250.94a	347.16
	K ₄	323.77bc	414.16b	366.07a	245.07ab	337.27
	K ₅	316.03c	318.32e	332.62c	236.18cd	300.79

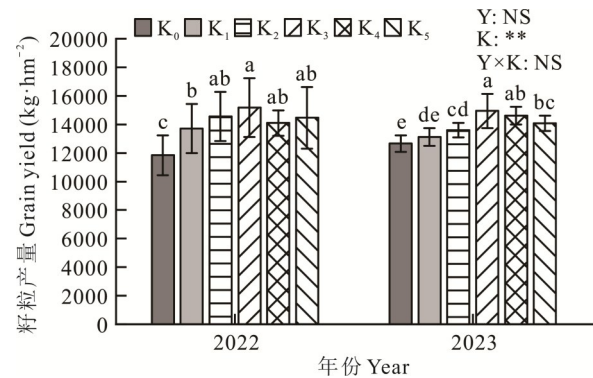


图4 不同施钾量下玉米籽粒产量的变化

Fig. 4 Changes in maize grain yield under different potassium applications

表6 2022和2023年不同施钾量与产量的二次方程关系

Table 6 Quadratic relationship between different potassium applications and yield in 2022 and 2023

年份 Years	二次函数拟合方程 Quadratic function fitting	R ²	经济最佳施钾量 Economic optimal potassium application (kg·hm ⁻²)	经济最高产量 Economic maximum yield (kg·hm ⁻²)
2022	$y = -0.0756x^2 + 29.768x + 11998$	0.8892	167.25	14861
2023	$y = -0.0408x^2 + 18.406x + 12420$	0.8298	170.66	14372

量的相关系数表现为百粒重>穗数>穗粒数,其中穗数和百粒重与产量呈极显著正相关关系($P<0.01$),穗粒数与产量呈显著正相关关系($P<0.05$)。直接影响表现为百粒重(0.646)>穗数(0.211)>穗粒数(0.140),因此,在高密度种植条件下,要进一步提升产量,首先要增加百粒重,其次考虑增加穗数和穗粒数。

3 讨论

3.1 施钾量对玉米干物质积累的影响

干物质作为作物光合作用的最终产物,与作物的最终产量之间存在着极为紧密且直接的关联^[20]。合理施钾可以提高玉米对氮磷钾养分的吸收量和转移效率,养分的转移量和转移效率是营养器官养分向籽粒转移输出的重要指标,为玉米增产奠定坚实的基础^[21-22]。本研究中,合理增钾有利于提高玉米叶片、茎秆、苞叶和籽粒的干物质,钾肥主要通过增强光合作用提升干物质生产能力^[11],促进光合产物向籽粒运输与分配,同时优化茎秆、苞叶与籽粒的干物质积累,最终有利于提高玉米产量。本研究中,玉米干物质积累前期增长较快,后期增长缓慢,通过 Logistic 方程拟

表 7 不同施钾量下玉米产量构成因素的变化及方差分析

Table 7 Changes in maize yield components and analysis of variance (ANOVA) under different potassium applications

年份 Year	处理 Treatment	SN (ear·hm ⁻²)	KNE (grain·ear ⁻¹)	HGW (g)
2022	K ₀	59038.33d	623.40c	35.67c
	K ₁	59785.67c	628.80bc	36.74c
	K ₂	59414.00cd	625.40c	40.82ab
	K ₃	62380.00a	698.60ab	42.54a
	K ₄	61386.00b	716.40a	37.06c
	K ₅	60914.00b	706.20a	38.74bc
2023	K ₀	61265.33e	509.60b	37.91b
	K ₁	62453.67d	522.40b	37.96b
	K ₂	62826.67c	551.00b	38.08b
	K ₃	64746.67a	620.20a	39.88ab
	K ₄	63232.67b	609.20a	41.18a
	K ₅	62384.33d	544.60b	39.74ab
Y		**	**	NS
K		**	**	**
Y×K		**	NS	**

SN: 穗数 Spike number; KNE: 穗粒数 Kernel number per ear; HGW: 百粒重 100-grain weight; 下同 The same below.

表 8 不同施钾量下玉米籽粒产量与其构成因素的通径分析

Table 8 Path analysis between maize grain yield and yield components under different potassium applications

变量 Variable	作用因子 Effect of factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficients	间接通径系数 Indirect path coefficients			
				合计 Total	穗数 SN	穗粒数 KNE	百粒重 HGW
产量 Yield	穗数 SN	0.907**	0.211	0.377		0.190	0.187
	穗粒数 KNE	0.838*	0.140	0.236	0.126		0.110
	百粒重 HGW	0.942**	0.646	1.079	0.571	0.508	

合,决定系数 $R^2\geq 0.98$,结果具有代表性,印证了干物质增长符合 S 型的增长趋势。有研究发现,在玉米种植密度为 70000 株·hm⁻²时,增施钾肥进一步提高了干物质最大积累速率和积累总量,且干物质快速积累起始时期和最大积累速率出现时间均有所提前^[12]。本研究中种植密度为 90000 株·hm⁻²,增施钾肥均有相似效果,有利于增加干物质积累速率最大时间、提高干物质积累速率最大时的生长量、提高最大干物质积累速率和平均干物质积累速率,这主要是因为适宜的钾肥用量保证了玉米生育前期的快速增长,有利于茎秆的壮实,同时增加对其他元素(N、P 等)的吸收,提高了叶绿素含量,使植物生育后期叶片光合功能期延长^[11],延缓叶片衰老^[23],同时钾可以直接影响光合作用,从而增加作物地上部分干物质积累速率。另外,在西北旱区,干旱和高温逆境条件下,钾离子可保持细胞的膨压,防止叶片萎蔫,从而保证光合等生理过程的正常进行,减少因干旱等逆境导致的干物质损失;施钾可以增强玉米植株的抗氧化防御系统,逆境条件下,植物体内会产生大量的活性氧(如超氧阴离子、过氧化氢等),这些活性氧会对细胞造成氧化损伤。钾离子可以调节抗氧化酶(如超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶)的活性,提高植物的抗氧化能力,使植株能够在逆境中维持正常的生长和干物质积累^[24-26]。

3.2 施钾量对玉米干物质转运和群体生长速率的影响

玉米的高产潜力受花前营养器官构建与花后干物质高效累积的双重影响。在农业生产中,优化管理策略以确保花后阶段干物质充分积累,并同时增强花前干物质对产量的贡献,是提升玉米产量、挖掘其增产潜能的关键所在^[27-28]。前人研究指出,作物生育后期物质积累对籽粒的贡献率远高于花前,与产量呈显著正相关关系^[29-30]。本试验下钾肥按照生育时期补施,钾素能够满足玉米生育后期的供应,因此有利于玉米叶片充分进行光合作用,进而获得较高产物。保持花后充足的光合产能,有利于获得最高产量,与前人肥料试验研究结果保持一致^[17,31]。但施钾后,花前干物质转运对籽粒的贡献率提高了。一方面可能是因为钾是作物体内多种酶的激活剂,参与植物体内多个代谢过程,可促进作物光合作用,调节气孔开闭,增加玉米抗逆性,减少干物质损耗,促进物质转运,进而提高花前干物质转运对籽粒的贡献率;另一方面,钾与氮的代谢密切相关^[32],施钾可以促进植株对氮素的吸收和同化,适宜的氮素营养与钾素相互配合,能够促进花前植株蛋白质的合成和叶片的生长。本研究发现,2022年玉米花前物质转运量较高,而2023年玉米花前物质转运量较低,可能是2023年玉米生育前期气温较高,导致玉米物质快速增长,进而物质转运较低。此外,2年中玉米群体生长速率呈先增后降的趋势,且在V12~VT期群体生长速率达峰值,主要原因是玉米前期对钾肥需求较高,钾肥有利于促进叶片生长和茎秆壮实,在短时间内营养器官生长较为旺盛,而在宁夏地区玉米生育后期时间较长,玉米灌浆持续时间延长。同时,玉米生育后期营养器官主要负责物质转运,几乎停止生长,导致玉米生育后期整体生长速率较慢。因此,合理控制钾肥用量可促进玉米物质积累、协调物质转运、增加籽粒产量,进而实现玉米高产高效可持续发展的目标。

3.3 施钾量对玉米产量及产量构成因素的影响

宁夏位于中国西北地区,降水量稀缺与水资源严重匮乏,致使干旱成为该地区最为频发的自然灾害之一,对当地农业生产造成了极大影响^[33]。合理的水肥管理和高效的钾肥供应不仅可以节水节本、提高作物的水分利用效率,对于提升作物的产量与品质也有关键性作用,还可以显著增强作物对生物胁迫及非生物胁迫的抵抗能力^[34-35]。前人研究表明,当土壤受水分胁迫时,适量施用钾肥,能够有效调节作物水分运输和提高作物水分利用效率,从而保证较高的玉米产量^[36-37]。谭杰等^[38]在川中丘陵旱地研究中表明,随着施钾量的增加,玉米干物质积累量和籽粒产量表现为先增后减的变化趋势。慕瑞瑞^[39]在滴灌水肥一体化条件下研究钾素对玉米产量效应时表明,钾肥施用量在0~180 kg·hm⁻²时,随着施钾量的增加,玉米产量也随之增加,当施钾量达到240 kg·hm⁻²时,玉米产量减少。本试验条件下,随着施钾量的增加,玉米籽粒产量呈先升后降的“抛物线”型趋势,当钾肥施用超过一定阈值时(180 kg·hm⁻²),籽粒产量下降的原因可能是钾肥施用过多,玉米对钾产生“奢侈吸收”的现象^[12],即玉米对钾素的大量吸收会打破土壤中氮、磷、钾等营养元素的平衡,导致其他元素相对缺乏,影响玉米的正常生长发育。另外,在滴灌系统中,过量施用钾肥会导致根系周围钾离子浓度过高,引发渗透胁迫,进而对玉米根系造成损伤,影响养分运输和地上部的生长发育,最终减产。前人研究表明,土壤速效钾含量较低(92 mg·kg⁻¹)时,玉米产量构成对钾肥施用有积极响应,适当施用钾肥有利于玉米穗数、穗粒数和千粒重的增加^[40]。本研究结果表明,随着钾肥用量的增加,玉米穗数、穗粒数、百粒重均呈先增后减的变化趋势,表明合理施钾有利于提高玉米的穗数、穗粒数和百粒重。同时,过量施用钾肥会显著提升土壤中交换性钾离子(K⁺)的浓度,进而可能引发土壤中K⁺与钙离子(Ca²⁺)及镁离子(Mg²⁺)比例失衡。此失衡现象会干扰作物对K⁺、Ca²⁺及Mg²⁺的正常吸收,最终导致作物营养吸收失衡,对作物的籽粒产量产生不利影响^[41]。

在宁夏银川干旱区农业高质量发展背景下,基于滴灌节水优势与国家“双减”战略需求,未来研究可聚焦“减施钾肥+功能性肥料协同”技术路径创新:如利用有机肥、秸秆炭化还田等补充缓释性钾源,结合微生物菌剂活化土壤难溶性钾,构建有机无机协同的钾素补给体系,降低化学钾肥依赖。在此基础上,需系统评估减钾模式下土壤钾素平衡、微生物群落功能及作物生理响应机制的长期变化,在保障粮食产能的同时,推动干旱区农业向资源节约、环境友好的可持续方向转型,为黄河流域生态保护和高质量发展提供科技支撑。

4 结论

在宁夏干旱地区,滴灌水肥一体化模式下,当玉米种植密度达到 $90000 \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$,施钾量为 $180 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可显著提高生育期内玉米干物质积累速率最大时的生长量、最大干物质积累速率和平均干物质积累速率,能够提高玉米平均群体生长速率,最终通过增加百粒重提高籽粒产量。而从2年产量角度出发,得出玉米经济最佳施钾量分别为 167.25 和 $170.66 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。故在宁夏干旱地区玉米最佳施钾量为 $167\sim 180 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 能够达到高产高效栽培的目的。

参考文献 References:

- [1] Guo J J, Fan J L, Xiang Y Z, *et al.* Synchronizing nitrogen supply and uptake by rainfed maize using mixed urea and slow-release nitrogen fertilizer. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2022, 122(2): 157–171.
- [2] Jiang C Z, You Y L, Lai X F, *et al.* Maximizing food equivalent unit yield for forage maize production without notably compromising dry matter yield and feed quality in a semi-arid region. *Industrial Crops and Products*, 2024, 218(1): 118942.
- [3] Dordas C. Variation in dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in barley as affected by fertilization, cultivar, and source-sink relations. *European Journal of Agronomy*, 2012, 37(1): 31–42.
- [4] Srivastava A K, Shankar A, Chandran A K N, *et al.* Emerging concepts of potassium homeostasis in plants. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(2): 608–619.
- [5] Li J F, Lu J W, Ren T, *et al.* Crop straw can optimize potassium fertilization strategies in rice cropping system. *Better Crops with Plant Food*, 2014, 98(3): 13–15.
- [6] Wang Y, Wu W H. Potassium transport and signaling in higher plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2013, 64(1): 451–476.
- [7] Zhang Z Z, Mu R R, Wang J, *et al.* Effect of potassium application rate on absorption, transport and yield of maize potassium. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(8): 47–56.
张正珍,慕瑞瑞,王佳,等. 施钾量对玉米钾素吸收、转运及产量的影响. *中国农学通报*, 2024, 40(8): 47–56.
- [8] Yang X, Zhang L, Liu X F. Optimizing water-fertilizer integration with drip irrigation management to improve crop yield, water, and nitrogen use efficiency: A Meta-analysis study. *Scientia Horticulturae*, 2024, 338: 113653.
- [9] Xiao D P, Liu D L, Feng P Y, *et al.* Future climate change impacts on grain yield and groundwater use under different cropping systems in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2021, 246: 106685.
- [10] Kong L L, Hou Y P, Yin C X, *et al.* Optimal plant density and potassium application rate for spring maize under drip-fertigation in Northeast China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(10): 1755–1769.
孔丽丽,侯云鹏,尹彩侠,等. 东北春玉米滴灌施肥的适宜种植密度和施钾量研究. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(10): 1755–1769.
- [11] Hong Z Q, Zhang Z Z, Zhou T, *et al.* Optimal potassium dosage for high fluorescence parameters and target yield of spring maize under drip fertigation. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(8): 1461–1476.
洪自强,张正珍,周甜,等. 水肥一体化下钾肥用量对春玉米光合荧光参数的影响. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(8): 1461–1476.
- [12] Gómez R C, Iniguez P C, Báez W L, *et al.* Effect of the application of potassium on the yield of corn (*Zea mays* L.) in La Frailesca, Chiapas Mexico. *Brazilian Journal of Development*, 2022, 8(4): 29335–29343.
- [13] Song J, Wang S X, Li L, *et al.* Effects of potassium application rate on NPK uptake and utilization and grain yield in summer maize (*Zea mays* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(2): 539–551.
宋杰,王少祥,李亮,等. 施钾量对夏玉米氮、磷、钾吸收利用和籽粒产量的影响. *作物学报*, 2023, 49(2): 539–551.
- [14] Pettigrew W T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133(4): 670–681.
- [15] Szulc P, Bocianowski J, Nowosad K, *et al.* Assessment of the influence of fertilisation and environmental conditions on maize health. *Plant Protection Science*, 2018, 54(3): 174–182.
- [16] Qiu S J, Xi J G, Zhao S C, *et al.* Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China. *Field Crops Research*, 2014, 163: 1–9.
- [17] Wang F E, Guo Y, Li P, *et al.* Compensation mechanism of increased maize density on yield with water and nitrogen reduction

- supply in oasis irrigation areas. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(6): 1616–1627.
- 王菲儿, 郭瑶, 李盼, 等. 绿洲灌区增密对水氮减量玉米产量的补偿机制. *作物学报*, 2024, 50(6): 1616–1627.
- [18] Yang L D, Ren J B, Peng X Y, *et al.* Crop growth characteristics and its effects on yield formation through nitrogen application and interspecific distance in soybean/maize strip relay intercropping. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(1): 251–264.
- 杨立达, 任俊波, 彭新月, 等. 施氮与种间距离下大豆/玉米带状套作作物生长特性及其对产量形成的影响. *作物学报*, 2024, 50(1): 251–264.
- [19] Su M, Liu Q J, Hong Z Q, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on photosynthetic characteristics and yield formation of potato in semi-arid region of northwest China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(10): 1919–1933.
- 苏明, 柳强娟, 洪自强, 等. 西北半干旱区不同施氮量对马铃薯光合特性及产量形成的影响. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(10): 1919–1933.
- [20] Wei T B, Chai Q, Wang W M, *et al.* Effects of coupling of irrigation and nitrogen application as well as planting density on photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of maize in oasis irrigated areas. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(3): 428–444.
- 魏廷邦, 柴强, 王伟民, 等. 水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应. *中国农业科学*, 2019, 52(3): 428–444.
- [21] Xie J G, Hou Y P, Yin C X, *et al.* Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1110–1118.
- 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1110–1118.
- [22] Yin C X, Li Q, Kong L L, *et al.* The effects of potassium management on maize yield, potassium absorption and utilization under mulched drip irrigation. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(3): 35–40.
- 尹彩侠, 李前, 孔丽丽, 等. 覆膜滴灌施肥条件下钾肥运筹对玉米产量及钾素吸收利用的影响. *东北农业科学*, 2020, 45(3): 35–40.
- [23] Pottosin I, Dobrovinskaya O. Non-selective cation channels in plasma and vacuolar membranes and their contribution to K⁺ transport. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(9): 732–742.
- [24] Guo B, Chen B, Wu D Z, *et al.* Effects of potassium ion on adventitious bud induction of *Amygdalus pedunculata*. *Plant Physiology Journal*, 2013, 49(12): 1355–1358.
- 郭斌, 陈邦, 吴道长, 等. 钾离子对长柄扁桃不定芽诱导的影响. *植物生理学报*, 2013, 49(12): 1355–1358.
- [25] Chen Y H, Zhang S Y, Du S F, *et al.* Effects of exogenous potassium (K⁺) application on the antioxidant enzymes activities in leaves of *Tamarix ramosissima* under NaCl stress. *Genes*, 2022, 13(9): 1507.
- [26] Du Q, Zhao X H, Xia L, *et al.* Effects of potassium deficiency on photosynthesis, chloroplast ultrastructure, ROS, and antioxidant activities in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(2): 395–406.
- [27] Latifmanesh H, Deng A X, Nawaz M M, *et al.* Integrative impacts of rotational tillage on wheat yield and dry matter accumulation under corn-wheat cropping system. *Soil & Tillage Research*, 2018, 184: 100–108.
- [28] Wang P F, Yu A Z, Wang Y L, *et al.* Effects of returning green manure to field combined with reducing nitrogen application on the dry matter accumulation, distribution and yield of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(7): 1283–1294.
- 王鹏飞, 于爱忠, 王玉珑, 等. 绿肥还田结合减量施氮对玉米干物质积累分配及产量的影响. *中国农业科学*, 2023, 56(7): 1283–1294.
- [29] Hou Y P, Kong L L, Yin C X, *et al.* Interaction between nitrogen fertilizer and plant density on nutrient absorption, translocation and yield of spring maize under drip irrigation in Northeast China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(1): 54–65.
- 侯云鹏, 孔丽丽, 尹彩侠, 等. 覆膜滴灌下氮肥与种植密度互作对东北春玉米产量、群体养分吸收与转运的调控效应. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(1): 54–65.
- [30] Li C S, Tang Y L, Wu C, *et al.* Effect of N rate on growth and grain filling of wheat in Sichuan Basin. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 873–883.
- 李朝苏, 汤永禄, 吴春, 等. 施氮量对四川盆地小麦生长及灌浆的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 873–883.
- [31] Li S. Effects of nitrogen-density interaction on dry matter accumulation, nutrient use and yield of maize. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017.

- 李帅. 施氮量和密度互作对玉米干物质累积、养分吸收利用及产量的影响. 郑州: 河南农业大学, 2017.
- [32] Li Y F. Effects of potassium nutrition on photosynthesis and carbon and nitrogen metabolism of foxtail millet. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2022.
- 李艳芬. 钾素营养对谷子光合作用和碳氮代谢的影响. 太原: 山西农业大学, 2022.
- [33] Yang P, Zhai X Y, Huang H Q, *et al.* Association and driving factors of meteorological drought and agricultural drought in Ningxia, Northwest China. *Atmospheric Research*, 2023, 289: 106753.
- [34] Zorb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture—Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(9): 656—669.
- [35] Zhang M L, Hu Y Y, Han W, *et al.* Potassium nutrition of maize: Uptake, transport, utilization, and role in stress tolerance. *The Crop Journal*, 2023, 11(4): 1048—1058.
- [36] Frei J, Wiesenberger G L B, Hirte J. The impact of climate and potassium nutrition on crop yields: Insights from a 30-year Swiss long-term fertilization experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2024, 372: 109100.
- [37] Zhao X H, Yu H Q, Wen J, *et al.* Response of root morphology, physiology and endogenous hormones in maize (*Zea mays* L.) to potassium deficiency. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(4): 785—794.
- [38] Tan J, Kong F L, Zeng H, *et al.* The suitable potassium fertilizer rate in spring maize in hilly area of central Sichuan Basin, China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(3): 838—846.
- 谭杰, 孔凡磊, 曾晖, 等. 川中丘陵春玉米适宜钾肥用量研究. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 838—846.
- [39] Mu R R. Effects of different potassium rates on yield and starch formation of spring maize integrated with drip irrigation. Yinchuan: Ningxia University, 2019.
- 慕瑞瑞. 不同施钾量对滴灌水肥一体化春玉米产量和淀粉形成的影响. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [40] Khan A A, Khan M N, Inamuallah, *et al.* Effect of potash application on growth, yield and yield components of spring maize hybrids. *Pure and Applied Biology*, 2015, 4(2): 195—203.
- [41] Liao Y L. Studies on evolution of potassium in reddish paddy soil under long-term fertilizer and rice straws application. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010.
- 廖育林. 长期施用化肥和稻草下红壤性水稻土钾素肥力演变规律的研究. 长沙: 湖南农业大学, 2010.