

节水灌溉与有机肥配施对关中地区 夏玉米氮肥利用的影响

王鸣燕¹, 宿顺顺², 冯浩^{1,3}, 吴淑芳¹, 胡亚瑾¹, 陈霁菲¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院/西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 北京良乡蓝鑫水利工程设计有限公司, 北京 102488; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为寻求更适合关中地区夏玉米的灌溉施肥管理措施, 本研究通过田间试验, 采用充分灌溉(W1)与减少灌溉量 50% 的非充分灌溉(W2)两种灌溉方式, 设置 3 种不同的施肥处理, F1(化肥)、F2(24% 有机肥+76% 化肥)、F3(48% 有机肥+52% 化肥), 研究减少灌溉水量和配施有机肥对夏玉米产量及氮肥利用效率的影响。结果表明, 节水灌溉和有机无机肥配施可提高植株对氮素的吸收、累积和转运水平。有机无机肥配施与不同灌溉量的交互作用对作物 0~100 cm 土层硝态氮含量影响显著。节水灌溉和有机肥配施处理均提高了夏玉米的子粒产量以及氮肥利用效率, W2F2 处理的产量达到最高为 6 287.3 kg/hm²。综上, 节水灌溉(W2)和配施 24% 有机肥+76% 土肥(F2)相结合的处理对应的氮素利用效果最好。

关键词: 夏玉米; 灌水量; 有机肥; 产量; 氮肥利用效率

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Water-saving Irrigation and Combined Application of Organic Fertilizer on Nitrogen Utilization of Summer Maize in Guanzhong Area

WANG Ming-yan¹, SU Shun-shun², FENG Hao^{1,3}, WU Shu-fang¹, HU Ya-jin¹, CHEN Ji-fei¹

(1. College of Water Resource and Architectural, Northwest A&F University, Institute of Water Saving

Agriculture in Arid and Semiarid Areas of China, Yangling 712100;

2. Lanxin Water Conservancy Engineering Design Co., Ltd. of Liangxiang, Beijing 102488;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: For searching more suitable irrigation and fertilization management measures for summer maize in Guanzhong area, this study adopted two irrigation methods, full irrigation(W1) versus 50% less irrigation(W2), through field experiment. Three different fertilization treatments were set up: F1(chemical fertilizer), F2(24% organic fertilizer +76% chemical fertilizer) and F3(48% organic fertilizer +52% chemical fertilizer), We hope to find the effects of reducing irrigation amount and combining application of organic and inorganic fertilizers on summer maize yield and nitrogen use efficiency. The results showed that, water-saving irrigation and combined application of organic and inorganic fertilizer could improve the absorption, accumulation and transport of nitrogen. The interaction between organic and inorganic fertilizer application and different irrigation amount had a significant effect on the soil NO₃⁻-N content in 0-100 cm soil layer. Both water-saving irrigation and combined application of organic fertilizer improved the grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize, and the yield of W2F2 reached the highest of 6 287.3 kg/ha. In conclusion, the combined treatment of water-saving irrigation(W2) and 24% organic fertilizer (F2) had the best N use efficiency.

Key words: Summer maize; Irrigation amount; Organic fertilizer; Yield; Nitrogen use efficiency

录用日期: 2022-06-20

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目(2021YFD1900700)

作者简介: 王鸣燕(1998-), 女, 硕士, 主要从事有机无机肥配施对农田水肥高效利用研究。E-mail: 1300013112@qq.com

吴淑芳为本文通信作者。E-mail: wsfs@163.com

夏玉米作为关中平原的主要粮食作物之一,其产量关系到国家粮食安全。陕西关中平原属于干旱半干旱地区,正面临水资源短缺的问题,当地仍采用传统的充分灌溉方式,造成水资源严重浪费。同时,为获得高产,当地长期大量投入化肥,土壤有机质低下,土壤板结等问题日益突出^[1]。因此,寻求更适合关中地区夏玉米的灌溉施肥管理措施十分必要。

有机肥能促进土壤的物质和能量循环,为作物生长和发育成熟提供所需的大部分养分,缓解农业生产中的环境问题,改良土壤理化性质^[2,3]。有机物料存在养分低和肥效慢等缺点,与化肥相比,单施有机肥会降低粮食产量^[4]。有研究表明,有机肥与无机肥配施实现长期和短期的土壤养分供应,保证作物产量^[5]。施用等量氮磷钾时,有机无机肥混施可以促进土壤氮素的释放,使得土壤的调控能力以及作物的氮肥利用效率显著提高^[6,7]。有机肥占比在10%~20%时,成熟期营养器官氮素累积量、氮素回收效率等指标有显著提升^[8]。因此,寻求适宜有机无机肥混施比例是提高植株对氮素吸收利用的关键之一。

传统充分灌溉方式不仅造成水资源浪费问题,而且对作物生长及产量有一定影响^[9]。孟兆江等^[10,11]研究发现,在作物越冬期至返青期采取一定程度的水分亏缺,可以有效抑制营养生长,促进生殖生长。银敏华等^[12]在作物抽穗期给予一定程度的水分亏缺,发现其可以优化营养分配格局,提高子粒产

量。Gharaibeh等^[13]研究指出,合理的节水灌溉提高作物对营养元素的转运速率。节水灌溉非但不会造成产量的降低,反而促进了植株生长发育和产量的提高^[14]。由此可知,节水灌溉可能是一种既节约水资源又有利于植株发育且提高氮肥利用效率的措施^[15]。

目前,夏玉米的产量及氮肥利用效率对节水灌溉或者有机无机肥配施的响应已有一系列报道,有机无机肥配施在保证氮素水平相当情况下,减少化肥投入和灌溉量综合考虑基础上对作物氮素吸收转运、土壤氮素分布以及氮肥利用效率方面有待继续研究。因此,本试验选取不同有机无机肥配施比例,结合充分灌溉与减少50%灌水量的非充分灌溉两种灌溉处理方式,对关中地区夏玉米氮肥吸收利用、土层内硝态氮分布以及作物产量等方面开展全方位研究,为提高该地水肥利用率,更好地指导农业生产实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院内开展,试验地海拔524.7 m,土壤为中壤土,属于温带季风性气候。多年平均气温12.9℃,降水多集中在夏季,多年平均降水量为632 mm,多年平均蒸发量为1 500 mm,试验阶段的降雨量和日平均气温见图1。

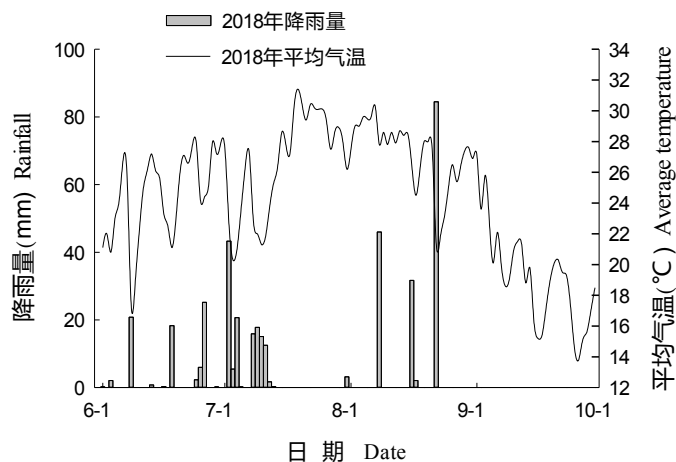


图1 试验阶段的降雨量和日平均气温

Fig.1 Rainfall and daily mean temperature during the test phase

1.2 试验材料

本试验采用的生物有机肥由多种材料粉碎混合后经过高温发酵熟化生成生物有机肥,制备有机肥的各材料质量占比,油渣45%,作物秸秆25%,食用

菌菌渣8%,中药渣5%,聚丙烯酰胺5%,钙镁磷肥或磷矿粉4%,活性炭或胶原蛋白4%,石灰或草木灰3%,解淀粉芽孢杆菌1%。有机肥中的有机质、N、P₂O₅、K₂O占比分别为79.2%,6.7%,2.3%和0.3%。

化肥选用尿素(N-46.4%)和磷酸二铵(N-12%、P₂O₅-61%)。

1.3 试验设计

本试验设置两个灌溉水平,W1(充分灌溉)、W2(节水灌溉,减少50%灌水量);设置3种不同的有机无机氮肥配比,F1(化肥)、F2(24%有机肥+76%化肥)、F3(48%有机肥+52%化肥),共计6个处理,每个处理3次重复(表1)。参照当地夏玉米种植中的化肥用量(N 225 kg/hm², P₂O₅ 150 kg/hm²),按照等氮和等磷的原则设计不同处理中化肥的用量,所有肥料播

种前一次性基施不再追肥。灌水定额依据作物需水量及当地降水量进行设计,充分灌溉定额为当地灌水量,节水灌溉为减少50%灌水量,分别在拔节期和灌浆期按照灌水定额灌水。

供试夏玉米品种为当地农民主栽的秦龙11。本试验夏玉米全生育期共110 d(2018年6月13日至10月1日)。各小区随机排列,小区面积18 m²(4.5 m×4 m),夏玉米播种时采用行距60 cm、穴距40 cm的人工穴播,种植密度为53 000株/hm²。

表1 各处理具体施肥量及灌水量
Table 1 Specific fertilizer application amount and irrigation amount of each treatment

灌 溉	施 肥	有机肥用量(t/hm ²)	来自有机肥 N	来自化肥 N(kg/hm ²)	有机肥占比(%)	灌水定额
Irrigation	Fertilization	Dosage of organic fertilizer	(kg/hm ²) N from organic fertilizers	N from inorganic fertilizers	Proportion of organic fertilizer	(mm) Irrigation quota
W1	F1	0	0.00	225.00	0	60
	F2	4	53.44	171.56	24	60
	F3	8	106.88	118.12	48	60
W2	F1	0	0.00	225.00	0	30
	F2	4	53.44	171.56	24	30
	F3	8	106.88	118.12	48	30

注:将表中的有机肥用量乘以有机氮占比(6.68%)得到有机肥含氮量,再按当季矿化率(20%)计算纯氮量得到来自有机肥的氮素含量。

Note: The nitrogen content of organic fertilizer was obtained by multiplying the amount of machine fertilizer in the table by the ratio of organic nitrogen(6.68%), and then the pure nitrogen content was calculated according to the mineralization rate of the season(20%), so as to obtain the nitrogen content from organic fertilizer.

1.4 测定方法

1.4.1 产量与氮肥利用效率的测定

收获期在各小区中间连续取10株,风干后测定总质量、穗长、穗粗、百粒重和产量。产量与施氮量之比即为氮肥利用效率。

1.4.2 植株氮素吸收量的测定

开花期和成熟期取地上部植株(包括茎、叶、穗)烘干粉碎、过筛,H₂SO₄-H₂O₂消煮法消煮,连续流动分析仪测定全氮含量。

1.4.3 土壤硝态氮的测定

拔节期、抽丝期和成熟期采用土钻取土,取样3次重复。土样自然风干、过筛,2 mol/L的KCL溶液浸提,流动分析仪测定硝态氮含量。

1.4.4 各指标的计算

植株氮素吸收量(kg/hm²)=植株氮素含量×干物质质量;

营养器官氮素转移量(kg/hm²)=开花期营养器官氮素吸收量—成熟期营养器官氮素吸收量;

开花期后氮素吸收量(kg/hm²)=成熟期氮素吸收

总量—开花期营养器官氮素吸收量;

营养器官氮素转移率=营养器官氮素转移量/开花期营养器官氮素吸收量×100%;

氮素吸收效率=植株氮素累积量/施氮量;

氮素利用效率=子粒产量/植株氮素累积量;

氮素收获指数=子粒氮素吸收量/植株氮素吸收量。

1.4.5 数据处理与分析

采用Excel 2013进行数据整理,采用SigmaPlot 12.0软件作图,采用SPSS 20.0软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 有机无机肥配施与不同灌溉用量的交互作用对夏玉米开花期后器官内氮素累积和转运的影响

由图2可见,相同灌水量下,F2和F3处理开花期营养器官氮素累积量较F1处理分别提高了19.7%~31.5%和14.0%~25.5%;相同施肥比例下,W2处理开花期氮素含量高于W1处理2.4%~12.8%,表明有机无机肥配施与节水灌溉处理均可

提高开花期氮素累积量。成熟期所有处理穗部的氮素含量均表现为W2处理高于W1处理,其中,W1F2处理、W2F2处理下的穗部氮素含量分别高于其他处理7.8%~25.8%、7.0%~28.4%;W2F2处理中穗部的氮素累积量达到最大,为143.1 kg/hm²,较W2其他处理平均增加17.7%。节水灌溉配合24%有机肥+76%化肥的施肥处理更符合夏玉米在氮素累积方面的水分和养分需求。

由表2可知,开花期后植株氮素吸收量以及转运量基本表现为W2处理>W1处理、F3处理>F2处

理>F1处理的趋势。F2处理的开花期后氮素吸收量最大,较其他施肥处理增加了5.1%~44.2%和13.1%~60.2%。在相同灌溉量下,F2、F3处理之间的氮素转运效率差异较小,F2和F3处理较F1处理的氮素转运效率分别提高21.2%~32.8%和20.1%~24.3%。适宜的灌水量和有机肥配施能够促进氮素在开花期后从营养器官向子粒中转移,以促进子粒中氮素的积累。节水灌溉条件下,24%有机肥与76%化肥混施的玉米开花期后氮素累积及转运效率有明显提高。

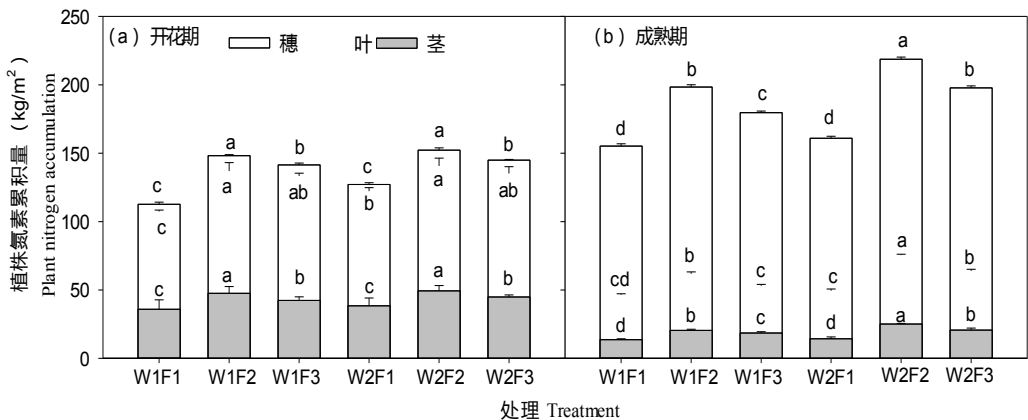


图2 各处理对夏玉米开花期和成熟期各器官氮素累积量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on nitrogen accumulation in different organs of summer maize at flowering and maturity stage

表2 各处理对开花期后植株氮素吸收、累积及转运的影响

Table 2 Effects of different treatments on nitrogen uptake, accumulation and translocation of plants after flowering

灌 溉	施 肥	开花期营养器官含氮量	开花期后氮素吸收量	营养器官氮素转运量	氮素转运效率(%)
Irrigation	Fertilization	Vegetative N content at anthesis	Post anthesis N Uptake	Vegetative N remobilization	Remobilization efficiency
W1	F1	130.6 b	37.1 e	55.5 d	42.3 c
	F2	144.9 a	53.5 c	78.3 a	56.2 a
	F3	141.5 a	50.9 c	73.4 b	52.6 ab
W2	F1	123.8 d	42.5 d	60.7 c	46.3 b
	F2	129.6 c	68.1 a	80.3 a	56.1 a
	F3	126.6 c	60.2 b	75.2 b	55.6 a

2.2 有机无机肥配施与不同灌溉用量的交互作用对夏玉米氮素吸收利用的影响

如表3所示,灌溉对成熟期玉米氮素含量、氮素吸收率有极显著影响;施肥对成熟期氮素含量、氮素吸收率、氮素利用率和氮肥利用效率均有极显著性影响,有机无机肥配施与不同灌溉用量的交互作用对成熟期氮素含量、氮素吸收率有极显著性影响。W2处理较W1处理植株成熟期氮素累积量增加了3.6%~10.2%,所有处理中氮素吸收利用情况大致

表现出W2处理>W1处理,这与玉米成熟期植株器官氮素含量表现一致。氮肥利用率随着有机肥比例的增加呈上升趋势,在两种灌溉量下,F2处理的氮素吸收效率和氮素利用效率均为各灌溉处理中的最大值,表明此配施比例下玉米从土壤中吸收氮素量达到较高水平,从而较好地自身提供生长发育的养分,以提高子粒产量达到增产的目的。W1F3处理与W2F2处理中的玉米氮收获指数达到0.69~0.70,植株中超过2/3的氮素储存在子粒中。

表3 不同处理下的植株氮素吸收利用情况

Table 3 Nitrogen absorption and utilization of plants under different treatments

灌 溉	施 肥	成熟期氮素累积量	氮素吸收效率	氮素利用效率	氮肥利用率	氮收获指数
Irrigation	Fertilization	(kg/hm ²)	(kg /kg)	(kg /kg)	(kg /kg)	(%)
		N content at maturity	N uptake efficiency	N use efficiency	N productive efficiency	N harvest index
W1	F1	155.2 e	69.0% e	35.7 c	29.5 b	64.3 b
	F2	198.4 b	88.2% b	42.8 ab	31.4 b	68.8 ab
	F3	179.6 c	79.8% c	40.8 b	35.7 a	70.5 a
W2	F1	160.9 d	71.5% d	35.8 c	30.6 b	65.3 b
	F2	218.7 a	94.2% a	44.8 a	34.8 a	69.4 a
	F3	197.8 b	87.9% b	40.6 b	37.6 a	67.6 ab
显著性检验(<i>F</i> 值)						
灌 溉		113.9**	115.5**	2.6	1.9	2.3
施 肥		38.6**	207.8**	48.8**	9.6**	3.1*
灌溉×施肥		6.7**	1.9	0.4	1.2	2.9*

注:*表示差异显著,**表示差异极显著。下表同。

Note: * meant significant difference, **meant much significant difference. The same below.

2.3 有机无机肥配施与不同灌水量对土壤硝态氮分布和积累的影响

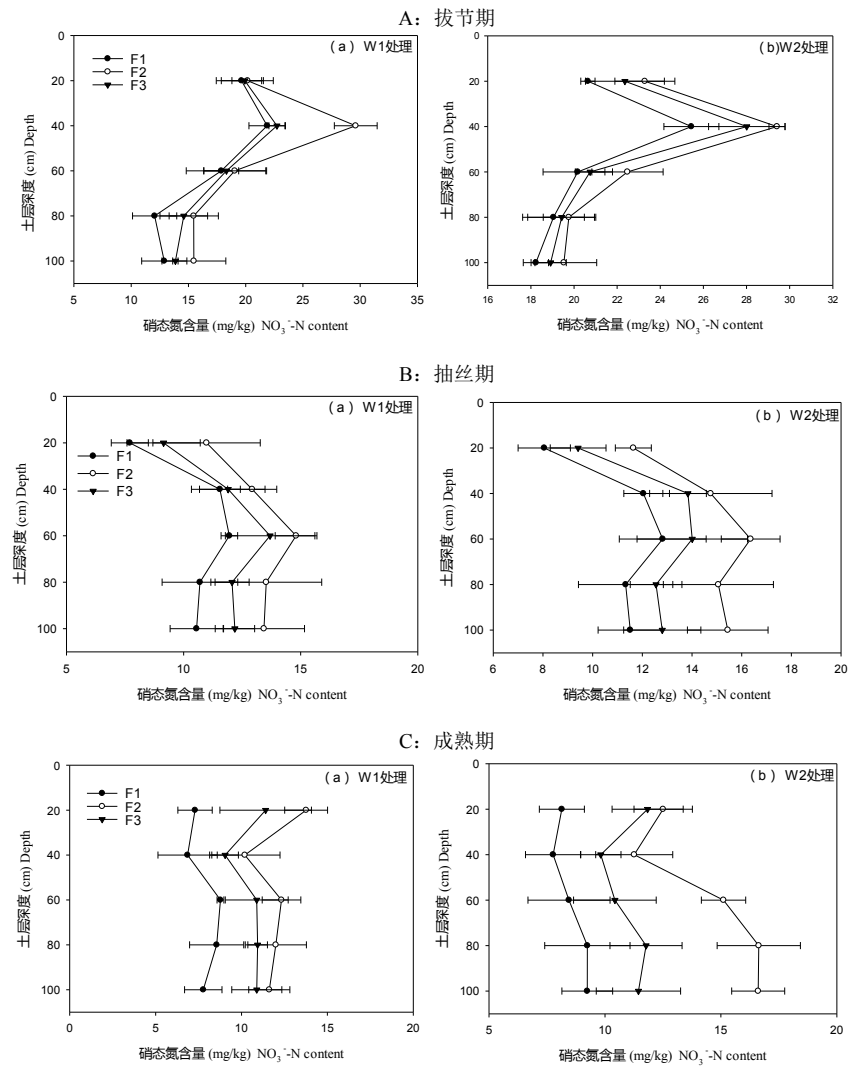


图3 不同处理下的植株各生育期土壤硝态氮分布情况

Fig.3 Distribution of soil nitrate nitrogen in different growth stages of plants under different treatments

由图3可知,抽丝期土壤硝态氮含量整体明显低于拔节期,特别是在20~40 cm土层深度处,这主要是由于在这一时期当地降雨次数增多引起土壤养分淋失以及玉米植株从土壤中吸收大量的养分维持玉米快速生长发育所需造成的。成熟期土壤硝态氮含量略低于抽丝期,其中40~100 cm土层硝态氮下降幅度较大。拔节期,同一有机肥配施比例下,W2处理较W1处理土壤硝态氮含量增加了14.7%~22.8%。抽丝期,在0~60 cm土层深度处的W1处理土壤平均硝态氮含量较W2处理降低5.2%~9.6%。成熟期,W1处理下F1、F2、F3处理对应的0~100 cm土层硝态氮含量分别低于W2处理2.7%、17.5%、2.0%,F2处理下的土壤硝态氮含量分别高于F1、F3处理52.8%~68.4%和12.6%~30.6%。

综上分析,有机无机肥配施与不同灌溉水量对土壤硝态氮含量的影响具体表现为W2处理>W1处理、F2处理>F3处理>F1处理。在节水灌溉条件下,F2处理的夏玉米各生育期土壤硝态氮含量在所有处理中最高。在相同有机肥替代比例下,节水灌溉对增加土壤硝态氮特别是0~40 cm土层深度处硝

态氮、降低土壤中氮素向下层流失具有重要意义。

2.4 有机无机肥配施与不同灌溉用量的交互作用对夏玉米氮肥利用效率的影响

由表4可知,节水灌溉条件下夏玉米的子粒产量以及氮肥利用效率均高于充分灌溉条件。W2F2处理的产量达到最高,为6 287.3 kg/hm²,其相比W2处理中其他施肥处理的产量高出0.5%~2.3%,较W1处理中的最高产量高出7.2%。W1和W2处理中F3处理玉米产量较F2处理分别减少了1.4%和0.5%;W1处理下F2和F3处理的玉米产量较F1处理分别增加了6.3%和4.8%。相同有机肥配施比例下W2处理的玉米产量及构成要素较W1处理有明显增加,W1处理中F2和F3处理的子粒产量以及氮肥利用效率差异不显著。W1处理的百粒重较W2处理增加了4.6%~5.8%,差异不显著;F2和F3处理百粒重分别较F1处理增加了10.8%~11.8%和2.4%~2.5%。以上结果表明,有机肥替代部分化肥与减少灌水量的交互作用可以显著提高夏玉米氮肥利用效率。

表4 各处理夏玉米产量及氮肥利用效率的情况
Table 4 Yield and nitrogen use efficiency of summer maize under different treatments

灌 溉	施 肥	地上生物量	百粒重(g)	穗 长	穗 粗	子粒产量	氮肥利用效率
Irrigation	Fertilization	(kg/hm ²)	100-grain	(cm)	(mm)	(kg/hm ²)	Nitrogen use effi-
		Aboveground biomass	weight	Panicle length	Ear roughness	Grain yield	ciency
W1	F1	12 528.2 c	29.6 b	17.1 bc	46.1 cd	5 510.4 c	24.5 c
	F2	14 652.5 a	32.8 a	18.4 a	50.4 ab	5 860.2 bc	26.0 bc
	F3	13 199.9 bc	30.3 ab	17.4 bc	46.6 cd	5 773.3 bc	25.7 bc
W2	F1	14 281.8 ab	28.0 b	17.0 c	45.0 d	6 144.1 b	27.3 b
	F2	15 371.9 a	31.3 ab	17.8 ab	51.8 a	6 287.3 a	27.9 a
	F3	14 403.1 ab	28.7 b	17.4 bc	48.1 bc	6 253.5 a	27.8 a
显著性检验(F值)							
灌 溉		297.5**	1.6	1.9	1.6	3.3*	4.2*
施 肥		2.1	2.9*	17.0**	180.5**	162.7**	44.7**
灌溉×施肥		5.8**	0.5	0.6	4.6**	1.7	1.2

3 结论与讨论

目前已有较多试验证明,有机肥替代部分无机肥可在一定程度上提高氮肥利用效率,并通过试验得出不同环境条件下的最佳有机无机肥配比。徐明岗等^[16]研究结果发现,在土壤基础养分相同的条件下,不同施肥比例处理的氮肥利用效率表现出50%有机肥处理>100%化肥处理>100%有机肥处理。本试验表明,有机肥配施处理可以促进植株对氮肥

的利用,提高作物的产量,24%的有机肥配施76%化肥对于玉米的氮素利用效果最佳。一定比例的有机肥处理能够使植株器官氮素含量得到较大的提升,显著提高植株的氮素利用效率^[17]。

有研究表示,在玉米苗期实行节水灌溉,虽然能够提高玉米水分利用效率,但会导致少量减产^[18]。蔡焕杰等^[19]研究表明,在作物生长初期控制土壤水分在原来的45%~50%范围内,并不会造成作物产量降低。关中地区7~10月份降雨量增加,在这一

时期减少灌溉量,不会显著影响作物的生长发育^[20]。因此本研究中采取了对夏玉米实施50%节水灌溉的处理,结果表明,50%水分亏缺较传统灌溉产量提高了12.0%~16.6%,而且提高了作物生长发育及土壤性质的各项指标^[21]。

相同施肥条件下,W2处理干物质积累效果较好。相同灌溉条件下,F2和F3处理夏玉米氮素吸收利用以及产量的效果优于F1处理。因此节水灌溉与有机肥配施措施一定程度上能提高夏玉米氮肥利用效率,其中,W2F2处理的开花期后营养器官氮素向子粒的转运量最大,氮素利用效率最高,产量显著提升。此外,W2F2处理还可以显著提高表层土壤硝态氮含量,减少硝态氮向土壤深层淋失。因此,在220 kg/hm²施氮量下,本试验所有处理中,节水灌溉与24%有机肥配施76%化肥是陕西关中地区夏玉米高效生产、节水以及保护环境的最佳处理。

参考文献:

- [1] 同延安, Emteryd Ove, 张树兰, 等. 陕西省氮肥过量施用现状评价[J]. 中国农业科学, 2004(8): 1239-1244.
TONG Y A, EMTERYD O, ZHANG S L, et al. Evolution of over-application of nitrogen fertilizer in China's Shaanxi province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004(8): 1239-1244. (in Chinese)
- [2] 徐祖祥. 有机无机肥配施对土壤物理性状的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 11-13, 21.
XU Z X. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on the physical characters of soils[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(2): 11-13, 21. (in Chinese)
- [3] 梁元振, 全利朋, 吴德亮, 等. 有机无机肥配施对土壤硝态氮、玉米产量和氮素利用率的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(4): 111-116.
LIANG Y Z, TONG L P, WU D L, et al. Effects of organic manure combined with inorganic fertilizer on soil nitrate, maize yield and N use efficiency[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(4): 111-116. (in Chinese)
- [4] THORUP-KRISTENSEN K, CORTASA M S, LOGES R. Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses?[J]. *Plant and Soil*, 2009, 322(1-2): 101-114.
- [5] 王志勇, 白由路, 杨俐苹, 等. 低土壤肥力下施钾和秸秆还田对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 900-906.
WANG Z Y, BAI Y L, YANG L P, et al. Effects of application of potassium fertilizer and straw returning on crop yields and soil potassium balance in low-yielding fields[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4): 900-906. (in Chinese)
- [6] 熊波, 王琛, 张莉, 等. 有机肥替代对京郊夏播青贮玉米土壤养分动态与平衡的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(6): 131-137.
XIONG B, WANG C, ZHANG L, et al. Effects of organic fertilizer substitution on soil nutrient dynamics and balance in summer silage maize in Beijing suburbs [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(6): 131-137. (in Chinese)
- [7] 罗佳, 蒋小芳, 孟琳, 等. 不同堆肥原料的有机无机复合肥对油菜生长及土壤供氮特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 97-106.
LUO J, JIANG X F, MENG L, et al. Effects of chemical fertilizer and different composts on growth of oilseed rape and soil nitrogen supply [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 97-106. (in Chinese)
- [8] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 290-296.
MENG L, ZHANG X L, JIANG X F, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and its proper substitution rate[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 290-296. (in Chinese)
- [9] 闫亚霞, 李玲玲, 谢军红, 等. 施肥措施对黄土高原旱作玉米资源利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(1): 144-151.
YAN Y X, LI L L, XIE J H, et al. Effects of soil amendments on the resources use efficiency of maize in the Semiarid Loess Plateau [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(1): 144-151. (in Chinese)
- [10] 孟兆江, 段爱旺, 高阳, 等. 调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 203-212.
MENG Z J, DUAN A W, GAO Y, et al. Effect of regulated deficit irrigation on uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium for winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 203-212. (in Chinese)
- [11] 孟兆江, 段爱旺, 王晓森, 等. 调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 99-104.
MENG Z J, DUAN A W, WANG X S, et al. Effect of regulated deficit irrigation on growth relation of root and shoot in cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 99-104. (in Chinese)
- [12] 银敏华, 李援农, 周昌明, 等. 调亏灌水和分蘖干扰对冬小麦生长的补偿效应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3011-3019.
YIN M H, LI Y N, ZHOU C M, et al. Compensation effects of regulated deficit irrigation and tillering interference to winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3011-3019. (in Chinese)
- [13] GHARAIBEH M A, MARSCHNER B, HEINZE S. Metal uptake of tomato and alfalfa plants as affected by water source, salinity, and Cd and Zn levels under greenhouse conditions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(23): 18894-18905.
- [14] GEERTS S, RAES D, GARCIA M, et al. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd)[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(3): 427-436.
- [15] 丁蓓蓓, 张雪靓, 赵振庭, 等. 华北平原限水灌溉条件下冬小麦产量及水分利用效率变化的Meta分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 7-17.
DING B B, ZHANG X L, ZHAO Z T, et al. Change in winter wheat yield and its water use efficiency as affected by limited irrigation in north China plain: a meta-analysis[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(12): 7-17. (in Chinese)
- [16] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008(10): 3133-3139.

- XU M G, LI D C, LI J M, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008 (10): 3133–3139. (in Chinese)
- [17] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 234–240.
- ZHOU J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 234–240. (in Chinese)
- [18] 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 等. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 1998(4): 88–93.
- KANG S Z, SHI W J, HU X T, et al. Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1998(4): 88–93. (in Chinese)
- [19] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. *农业工程学报*, 2000(3): 24–27.
- CAI H J, KANG S Z, ZHANG Z H, et al. Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000(3): 24–27. (in Chinese)
- [20] 曹红霞, 栗晓玲, 康绍忠, 等. 关中地区气候变化对主要作物需水量影响的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008(4): 6–9.
- CAO H X, SU X L, KANG S Z, et al. Effect of climate change on main crop water requirements in Guanzhong region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008(4): 6–9. (in Chinese)
- [21] 朱庆森, 邱泽森, 姜长鉴, 等. 水稻各生育期不同土壤水势对产量的影响[J]. *中国农业科学*, 1994(6): 15–22.
- ZHU Q S, QIU Z S, JIANG C J, et al. Effect of low soil water potential on rice yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994(6): 15–22. (in Chinese)
- (责任编辑: 栾天宇)