

灌水方式和施肥组合对冬小麦生长及肥料利用影响

陈海情^{1,2}, 黄超¹, 刘栩辰¹, 巩文军³, 孙蒙强³, 张雅娟³, 王兴鹏^{2*}, 刘战东^{1*}
(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业农村部作物需水与调控重点实验室, 河南 新乡 453002;
2. 塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300;
3. 河南省焦作市广利灌区管理局, 河南 沁阳 454550)

摘要:【目的】研究滴灌和畦灌2种灌水方式下不同施肥组合对冬小麦产量和肥料利用的影响, 探寻冬小麦最佳灌水和施肥组合。【方法】试验于2020—2021年在中国农业科学院新乡综合试验基地进行, 设置滴灌(D)与畦灌(Q)2个灌水方式和氮磷(NP)、氮钾(NK)、氮磷钾(NPK)、磷钾(PK)4种施肥组合, 共8个处理(处理简称分别为D-NP、D-NK、D-NPK、D-PK、Q-NP、Q-NK、Q-NPK、Q-PK), 分析不同灌水和施肥组合下冬小麦生长发育、产量和肥料利用等变化规律。【结果】滴灌和畦灌条件下, PK处理的冬小麦株高和叶面积指数较NPK处理均显著降低, 且冬小麦穗长、穗粒数和千粒质量均显著降低, 畦灌处理穗粒数高于滴灌处理, 而千粒质量低于滴灌处理; 滴灌条件下, 与NPK处理相比, PK处理产量降低25.0%, 而NP处理和NK处理产量差异不显著; 滴灌条件下氮肥、磷肥、钾肥利用率分别比畦灌高出49.48%、4.01%、18.07%, 且滴灌条件下氮肥、磷肥、钾肥偏生产力显著高于畦灌; 滴灌下冬小麦收获时土壤硝态氮残留量低于畦灌, 且Q-NK处理土壤硝态氮残留量较Q-NPK处理降低18.7%。【结论】综合分析, D-NK处理有利于提高冬小麦肥料利用和减少收获期土壤硝态氮的残留量, 因此该地区在冬小麦滴灌水一体化施肥时可适当降低磷肥的使用。

关键词: 冬小麦; 滴灌; 水肥一体化; 肥料利用率; 硝态氮残留

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022217

OSID:



陈海情, 黄超, 刘栩辰, 等. 灌水方式和施肥组合对冬小麦生长及肥料利用影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 31-38.

CHEN Haiqing, HUANG Chao, LIU Xuchen, et al. Combined Effects of Irrigation and Fertilization on Growth and Fertilizer Utilization of Winter Wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 31-38.

0 引言

【研究意义】华北平原是中国小麦的主产区, 其产量约占全国产量的50%^[1]。但华北平原也是中国资源性缺水地区之一, 同时, 由于不合理的灌水方式使农作物利用的水只占总灌溉水的1/4^[2]。目前灌溉和施肥是影响小麦养分吸收、产量和生长发育的主要农田管理措施^[3-4]。化肥对中国粮食单产增加贡献率达56%, 对总产提高贡献率约为30%^[5]。但是随着化肥用量的增多, 其负面影响也日益突出^[6], 因此, 采用合理的灌溉方式和提高肥料利用率对该地区粮食安全、生态安全以及经济效益都具有重要意义, 也是保证华北平原农业可持续发展的关键。

【研究进展】施肥是提高作物产量的主要手段,

不同肥料对作物各器官的影响也不尽相同, 但过量的施用化肥导致土壤环境问题突出。氮磷配施有利于提高小麦对养分的吸收, 氮磷钾配施有利于提升籽粒吸磷量和磷肥的利用率, 同时显著提高籽粒产量、地上干物质积累量和茎蘖数^[7-8]。张玉铭等^[9]研究表明, 在合理的灌溉情况下, 对小麦产量影响最大的因素是氮肥和磷肥, 氮肥和磷肥配施是关键, 氮肥影响作用大于磷肥。化肥在提高产量的同时也带来了环境问题, 大量施用氮肥会导致土壤富营养化和理化性质恶化, 磷肥过量会造成土壤重金属元素富集, 钾肥过量会使土壤板结和土壤氟污染^[10]。化肥污染和环境效率显著负相关, 化肥污染量每增加1%, 玉米、小麦和水稻的环境效率分别下降13.45%、10.38%和13.19%^[11], 这表明过量的化肥施用对作物环境可以产生显著的“环境惩罚”效应。合理施肥可以改良土壤结构和质地, 从而提高土壤的供水能力和保水能力^[12]。

畦灌是华北平原农民普遍采用灌溉方式, 但由于管理粗放和相关畦灌要素设置不合理等因素, 导致灌水质量和效率较低, 并且畦灌容易引起土壤板结和土壤盐碱化^[13-14]。滴灌是目前节水增效的最佳

收稿日期: 2022-04-19

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目(202300410553); 中国农业科学院科技创新工程(ASTIP); 新乡市重大科技专项(ZD2020009); 河南省水利厅科技攻关计划项目(2021039)

作者简介: 陈海情(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事作物生理与水分高效利用研究。E-mail: chqboss@163.com

通信作者: 刘战东(1981-), 男, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事作物生理与水分高效利用研究。E-mail: liuzhandong@caas.cn

王兴鹏(1978-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事作物高效利用水技术研究。E-mail: 13999068354@163.com

灌水方式, 已有研究^[15-17]发现, 滴灌施肥可以精准地为根系提供水分和养分, 有效促进作物吸收, 精确把控灌水量和施肥量, 从而有效地提高了肥料利用率和水资源利用率, 同时可获得更高的产量, 而且, 滴灌作物根系总量大于畦灌, 并且集中于土壤润湿区域^[18], 为节水节肥提供了有利条件。Wang 等^[19]基于连续 3 a 不同灌溉方式对冬小麦生长和产量的影响研究发现, 滴灌比畦灌节水 14%~35%。Li 等^[20]基于 Meta 分析方法综述了滴灌施肥效果, 结果表明滴灌可以降低 11.3%作物蒸腾率, 提高 26.4%水分生产率, 小麦节水可达 22%。Sharmasarkar 等^[21]、Lyu 等^[22]研究表明, 滴灌较畦灌可有效降低氮素淋溶损失, 可减少 90%硝态氮深层淋失。赵经华等^[23]经过 2 a 小麦大田滴灌试验研究得出, 土壤硝态氮大多聚集在表层, 并随水分渗漏淋洗至深层土壤, 且施氮量越多淋溶越严重。【切入点】中国粮食产量日益增加, 化肥用量和用水量也越来越多, 目前节水灌溉技术研究中水肥一体化是关注的热点, 并且在大田、温室等得到广泛推广和应用, 但在大田中定量分析滴灌

水肥一体化节水增产增效的具体效果研究较少。【拟解决的关键问题】为此, 本研究通过大田试验, 明确滴灌和畦灌灌水方式下对冬小麦生长特性及肥料利用率的影响; 阐述滴灌条件下, 不同施肥组合对冬小麦产量和环境的影响情况, 得出最优施肥组合; 通过探讨冬小麦生长发育和肥料利用情况, 为华北平原水资源、肥料高效利用提供科学依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020—2021 年的冬小麦试验季, 在中国农业科学院新乡综合试验基地进行, 试验区位于华北平原河南省新乡市新乡县七里营镇 (35°19'N、113°53'E), 属于典型的温带湿润半干旱地区。试验区年平均气温 14.1 °C, 无霜期 210 d, 日照时间 2 398.8 h, 年平均降水量 582 mm, 多年平均蒸发量 2 000 mm, 地下水埋深大于 5 m, 在华北平原南部地区具有较好的代表性。试验地土壤基本参数和播前土壤养分状况见表 1, 冬小麦全生育期温度及降水状况见图 1。

表 1 试验地土壤基本参数

Table 1 Basic soil parameters of the test site

土壤质地	pH 值	土壤体积质量/(g cm ⁻³)	田间持水率/(cm ³ cm ⁻³)	速效磷量/(mg kg ⁻¹)	速效钾量/(mg kg ⁻¹)	有机质量/(g kg ⁻¹)	全氮量/(g kg ⁻¹)
粉砂壤土	8.8	1.51	0.31	16.0	135.7	1.92	1.51

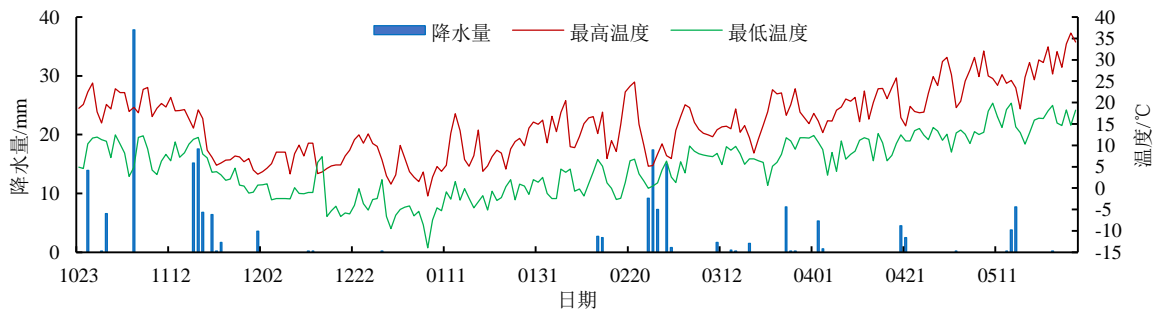


图 1 冬小麦全生育期温度及降水状况

Fig.1 Temperature and rainfall conditions of winter wheat during the whole reproductive period

1.2 试验设计

冬小麦试验品种为“周麦 22”。试验通过设置不同灌水和施肥组合来研究冬小麦在不同灌水、施肥组合下生长发育及肥料利用状况。其中包括 2 个灌水方式: 滴灌 (D)、畦灌 (Q), 4 个施肥组合: NPK、NP、NK 和 PK, 共计 8 个处理 (表 2), 每个处理设置 1 个小区, 每个小区面积为 170 m², 分 3 个子区作为重复。畦灌入畦流量为 40 m³/h, 改口成数 0.9, 灌水定额 60 mm; 滴灌毛管间距 0.6 m, 滴头间距 30 cm, 滴头流量 2.0 L/h, 灌水定额 30 mm (图 2)。灌水采用充分灌溉 (土壤含水率控制下限为田间持水率的 70%), 滴灌处理采用文丘里施肥器通过施肥桶进行施肥, 畦灌处理采用人工撒施, 各小区磷肥、钾肥在播种时一次性施入做底施, 施氮

处理基肥施量为总施氮量的 30%, 其余氮肥视苗情在返青、拔节、灌浆期进行追施, 施用肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾。试验其他管理措施同当地冬小麦一致。

表 2 水肥一体化试验设计

Table 2 Experimental design of water and fertilizer integration

处理	施肥/(kg hm ⁻²)			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
滴灌 (D)	PK	0	84	60
	NK	192	0	60
	NP	192	84	0
	NPK	192	84	60
畦灌 (Q)	PK	0	105	75
	NK	240	0	75
	NP	240	105	0
	NPK	240	105	75

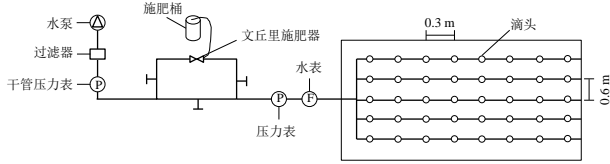


图2 滴灌平面布置图

Fig.2 Drip irrigation plan layout

1.3 测量项目与方法

土壤含水率：通过取土烘干法测量每个小区的土壤含水率，每 10 cm 为 1 个土层测量 0~100 cm 土层深度的土壤含水率，每 7 天测量 1 次，并根据土壤含水率数据指导灌水。

在灌浆后期用卷尺测量冬小麦株高和整株冬小麦全部叶片的长度和最大宽度，每个子区测量 10 株，利用式（1）计算叶面积指数，并根据单位面积株数，计算单位面积穗数。

$$LAI = 0.75 \times (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (L_{ij} \times W_{ij}) / m) \times N / S, \quad (1)$$

式中： LAI 为叶面积指数； L_{ij} 和 W_{ij} 分别为第 i 株冬小麦的第 j 片叶长（cm）和叶宽（cm）； m 为测量的冬小麦株数； n 为每株冬小麦叶片数； N 测量小区冬小麦株数； S 为测量小区面积（ cm^2 ）。

在收获前分别收取 10 株植株茎秆、叶片和籽粒，分别测量茎秆、叶片、籽粒的质量及其全氮、全磷、全钾量，氮肥、磷肥、钾肥利用率计算式为：

$$RE = \frac{U_{NPK} - U}{F} \times 100\%, \quad (2)$$

式中： RE 为肥料利用率（%）； U_{NPK} 为氮磷钾区作物吸收的养分量； U 为不施该肥区作物吸收的养分量； F 为该肥料投入量。

氮肥、磷肥、钾肥偏生产力计算式为：

$$\text{氮（磷、钾）肥偏生产力（kg/kg）} = \text{施氮（磷、钾）区产量} / \text{氮（磷、钾）的投入量} \quad (3)$$

在冬小麦成熟后取植株样，每个子区收取 1 m^2 （1 $m \times 1 m$ ）冬小麦植株进行考种和测产。每个子区连续区 10 株有代表性的植株进行室内考种，统计穗长、有效小穗数、无效小穗数和穗粒数。收取区域内的所有植株测量 1 m^2 冬小麦生物量，计算生物量；并进行脱粒、晾晒，等籽粒自然风干后测量冬小麦产量，计算收获指数（式（4））与氮、磷、钾收获指数（式（5））。随机数取 1 000 粒测量冬小麦千粒质量。

$$\text{收获指数} = \text{籽粒产量} / \text{生物量} \times 100\%, \quad (4)$$

$$\text{氮（磷、钾）收获指数（\%）} = \text{籽粒中氮（磷、钾）的积累量} / \text{植株总吸氮（磷、钾）量} \quad (5)$$

收获期取 0~20 cm 土层土壤用于测定土壤硝态氮量。测定时取 10 g 土样，加 50 mL 的 2 mol/L 的 KCl 浸提液，振荡 30 min 后过滤，最后用 AA3 流动分析仪（Seal Analytical Inc. AA3-HR USA）测定土壤

硝态氮量。采用式（6）计算土壤硝态氮残留量。

$$\text{硝态氮残留量(kg/hm}^2\text{)} = \text{土层厚度(cm)} \times \text{土壤 NO}_3^- \text{N量(mg/kg)} \times \text{土壤体积质量(g/cm}^3\text{)} \quad (6)$$

1.4 数据分析

采用 Excel 2019（Microsoft, USA）、SPSS 19.0（IBM, 2010）和 Origin 2017（OriginLab, USA）进行数据处理、方差分析和作图。

2 结果与分析

2.1 不同灌水与施肥组合下冬小麦株高和叶面积指数

图 3 为冬小麦株高和 LAI ，图中不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。下同。由图 3 可知，Q-PK 处理的株高显著低于其他畦灌处理，滴灌与畦灌灌水方式下 PK 处理的叶面积指数（ LAI ）显著低于其他处理，D-PK 处理较 D-NPK 处理株高和 LAI 分别显著降低 7.9%、25.6%（ $P < 0.05$ ），Q-PK 处理较 Q-NPK 处理株高和 LAI 分别显著降低 6.1%、22.2%（ $P < 0.05$ ）；相同施肥组合下畦灌处理与滴灌处理株高、 LAI 没有显著性差异。

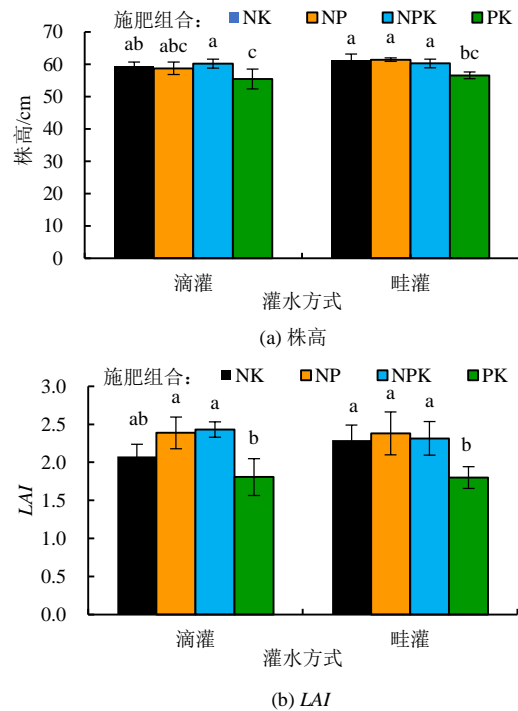


图3 冬小麦株高和 LAI

Fig.3 Plant height and LAI of winter wheat

2.2 不同处理冬小麦产量构成因素差异

由表 3 可知，畦灌处理冬小麦穗粒数高于滴灌处理，而千粒质量低于滴灌处理；滴灌灌水方式和畦灌灌水方式下 PK 处理的冬小麦穗长和穗粒数均显著低于其他施肥处理（Q-NK 处理除外）。滴灌处理下，D-PK 处理穗长、穗粒数和千粒质量较 D-NPK 处理分别降低 8.9%、10.2%和 6.8%；畦灌处理下，与 Q-NPK 处理相比，Q-NK 处理和 Q-PK 处理穗粒

数分别降低 10.6%和 9.4%，Q-NK、Q-NP 和 Q-PK 处理千粒质量分别降低 11.0%、10.1%和 16.6%，

表 3 冬小麦产量构成因素

Table 3 Yield components of winter wheat

处理	穗长/cm	有效小穗数	无效小穗数	穗粒数	千粒质量/g	穗数/($\times 10^6 \text{hm}^{-2}$)
D-NK	7.46 \pm 0.17bc	18.2 \pm 0.6bc	1.93 \pm 0.12a	40.9 \pm 1.49b	52.5 \pm 0.88a	5.23 \pm 0.35ab
D-NP	7.47 \pm 0.11bc	18.5 \pm 0.3abc	1.92 \pm 0.22a	40.0 \pm 1.66b	51.6 \pm 1.17ab	5.38 \pm 0.35a
D-NPK	7.64 \pm 0.10b	18.7 \pm 0.4abc	2.10 \pm 0.23a	42.0 \pm 0.53b	53.7 \pm 1.14a	5.21 \pm 0.24ab
D-PK	6.96 \pm 0.12d	18.0 \pm 0.7c	2.13 \pm 0.25a	37.7 \pm 1.29c	49.9 \pm 1.50bc	4.67 \pm 0.53bc
Q-NK	7.70 \pm 0.00ab	18.8 \pm 0.0abc	2.10 \pm 0.14a	40.9 \pm 1.20b	47.7 \pm 0.42d	4.97 \pm 0.38ab
Q-NP	7.90 \pm 0.00a	19.1 \pm 0.5ab	1.95 \pm 0.07a	44.6 \pm 0.99a	48.2 \pm 1.78cd	4.74 \pm 0.26ab
Q-NPK	7.90 \pm 0.00a	19.4 \pm 1.0a	1.85 \pm 0.21a	45.7 \pm 0.57a	53.6 \pm 0.30a	5.40 \pm 0.09a
Q-PK	7.25 \pm 0.35c	18.3 \pm 0.4bc	2.10 \pm 0.14a	41.4 \pm 0.28b	44.7 \pm 0.79e	4.06 \pm 0.30c

注 同列小写字母表示在 0.05 水平下差异显著，下同。

2.3 不同处理冬小麦生物量、籽粒产量及收获指数

由图 4 可知，相同施肥处理下，滴灌处理和畦灌处理冬小麦生物量基本相同，而 D-NPK 处理籽粒产量高于 Q-NPK 处理；滴灌灌水方式和畦灌灌水方式下 PK 处理的冬小麦穗生物量和籽粒产量均显著低于其他施肥处理，滴灌条件下，D-PK 处理生物量和籽

粒产量较 D-NPK 处理分别降低 18.7%和 25.0%；畦灌灌水方式下，与 Q-NPK 处理相比，Q-PK 处理生物量和籽粒产量分别降低 13.1%和 17.8%。滴灌处理收获指数高于畦灌处理；滴灌条件下，D-PK 处理收获指数显著低于其他处理；畦灌灌水方式下，各施肥处理收获指数均无显著差异（图 4）。

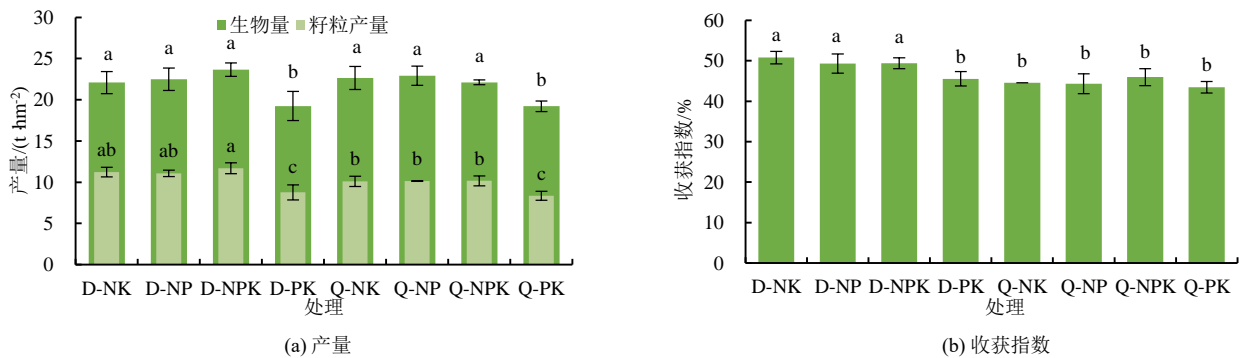


图 4 冬小麦生物量、籽粒产量及收获指数

Fig.4 Biomass, grain yield and harvest index of winter wheat

2.4 冬小麦氮肥、磷肥、钾肥利用率

表 4 为滴灌和畦灌下氮肥、磷肥、钾肥利用率状况，滴灌条件下氮肥、磷肥、钾肥利用率均高于畦灌，分别高出 49.48%、4.01%和 18.07%；同一灌水方式下，氮肥利用率最佳。从肥料偏生产力来看（表 5），相同肥料配施情况下，与畦灌灌水方式相比，滴灌灌水方式下各处理的氮肥、磷肥、钾肥偏生产力均显著提高，分别提高 36.31%~43.77%、31.21%~43.77%、31.21%~43.77%，并且 D-NPK 处理提高最多。不同处理间氮肥收获指数介于 50.14%~73.3%之间，磷肥收

获指数介于 49.40%~58.38%之间，钾肥收获指数介于 4.59%~5.98%之间，表明冬小麦吸收的氮肥、磷肥大部分用于形成籽粒，并且滴灌灌水方式下籽粒对氮肥的吸收显著高于畦灌。

表 4 不同灌水方式下冬小麦氮肥、磷肥、钾肥利用率

Table 4 Utilization rate of N, P and K fertilizers in winter wheat under different irrigation methods %			
灌水方式	氮肥利用率	磷肥利用率	钾肥利用率
滴灌	78.47	14.09	46.11
畦灌	28.99	10.08	28.04

表 5 氮肥、磷肥、钾肥偏生产力及收获指数

Table 5 N, P, K fertilizer partial productivity and harvest index

处理	肥料偏生产力/(kg kg ⁻¹)			收获指数/%			整株累计量/(mg g ⁻¹)		
	氮肥	磷肥	钾肥	氮肥	磷肥	钾肥	氮肥	磷肥	钾肥
D-NK	58.43a	/	186.97a	67.10 bc	58.33a	4.88 b	27.67c	5.20 a	59.77a
D-NP	57.66a	131.79a	/	66.01c	56.87 a	5.24ab	27.26c	5.55 a	56.89a
D-NPK	60.90a	139.20a	194.88a	65.25 c	53.33 a	5.06 ab	28.65bc	5.98 a	59.80a
D-PK	/	104.44b	146.22b	71.16 ab	58.38 a	5.98 a	18.91d	5.39 a	47.96b
Q-NK	42.07b	/	134.63b	59.46 d	54.46a	4.59 b	31.90ab	5.40 a	61.25a
Q-NP	42.30b	96.68b	/	50.14 e	50.80a	5.18ab	35.23a	5.63 a	58.40a
Q-NPK	42.36b	96.82b	135.55b	54.14 e	49.40a	4.76 b	34.00a	5.39 a	60.27a
Q-PK	/	79.60c	111.44c	73.30 a	56.37a	5.56 ab	19.65d	5.64 a	45.98b

2.5 冬小麦茎、叶、粒的全氮量、全磷量和全钾量

不同处理茎、叶、籽粒的全氮、全磷和全钾量存在差异 (图 5)。不同处理茎、叶、籽粒全氮量和全磷量均为粒>叶>茎, 茎和叶全钾量相近, 而籽粒全钾量较低。不同施肥处理下, 与 NPK 处理相比, PK 处理茎、叶、粒全氮量均降低, 且畦灌灌水方式

下不同施肥处理叶全氮量高于滴灌灌水方式, 茎和粒差异不明显; 与 NPK 处理相比, 各施肥处理茎、叶、粒全磷量均没有显著变化; PK 处理茎、叶全钾量显著低于 NPK 处理, 不同施肥组合下粒全钾量没有差异, 不同灌水方式茎、叶、粒全钾量均没有差异。

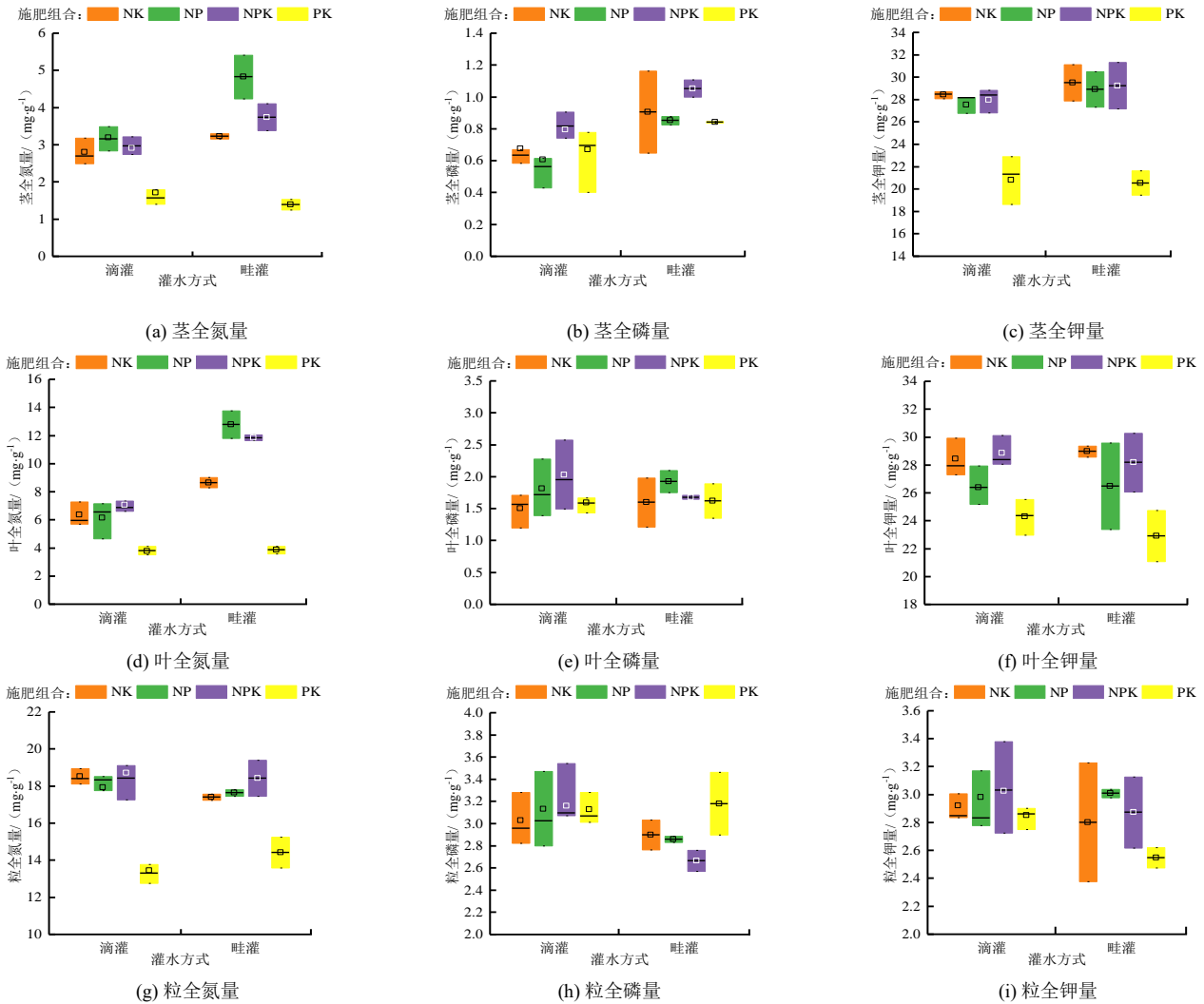


图 5 冬小麦茎、叶、粒的全氮、全磷和全钾含量

Fig.5 Total nitrogen, total phosphorus and total potassium contents in stems, leaves and grains of winter wheat

2.6 冬小麦土壤硝态氮残留量

图 6 为冬小麦收获期 0~20 cm 土层土壤硝态氮残留量。相同施肥组合下, 滴灌处理土壤硝态氮残留量均低于畦灌处理, 其中 D-NPK 处理显著低于 Q-NPK 处理, 而 D-NK 处理显著低于 Q-NK 处理。滴灌条件下, D-PK 处理和 D-NK 处理土壤硝态氮残留量分别为 13.71、13.43 kg/hm², 显著低于 D-NP 处理和 D-NPK 处理; 与 D-NPK 处理相比, D-PK 处理和 D-NK 处理土壤硝态氮残留量分别降低 20.4%和 18.7% ($P<0.05$)。显然, 在滴灌条件下, 氮肥和钾肥配施有助于减少收获期土壤硝态氮的残留量, 进而降低硝态氮淋失而污染地下水的风险。

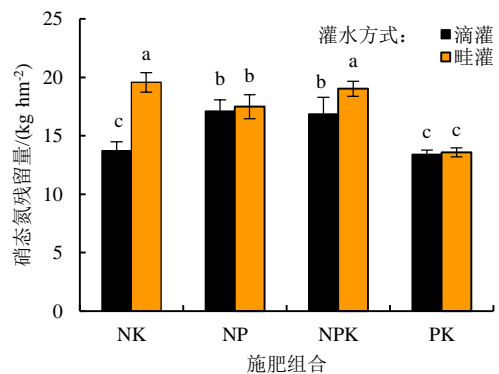


图 6 冬小麦收获期 0~20 cm 土壤硝态氮残留量

Fig.6 Soil Nitrate-N residues in 0~20 cm of winter wheat at harvest

3 讨论

干物质是产量形成的基础,滴灌可以延长叶面积指数降低的时间,有利于干物质的积累^[24]。本试验表明,与畦灌相比,滴灌处理产量更高,这与王丹等^[25]研究结果一致。一方面,滴灌可以精准的控制灌溉时间、灌水量和灌水区域,具有较好的均匀性,有利于根系吸收土壤中的水分和养分,从而提高产量^[26];另一方面,畦灌深层渗漏较严重,导致养分流失,植物生长后期养分不足。从产量构成上看,滴灌比畦灌穗粒数减少 8.10%~10.39%,但千粒质量增加 7.20%~11.60%,说明该试验条件下千粒质量是影响不同灌水方式下冬小麦产量差异的主要原因,这与陈贵菊等^[27]研究中的产量三要素中千粒质量与产量相关系数最大结论相似,所以提高产量的关键是提高千粒质量。本研究表明,滴灌有助减少硝态氮的残留量。硝态氮不易吸附于土壤中的胶体,易随水的运动而迁移^[28]。畦灌因灌水量较多,硝态氮随水运动至较深土层,但因湿润面积也较大,土壤表层蒸发强烈,造成底层硝态氮随水迁移至表层,而滴灌恰恰相反,因此表聚程度较低^[29]。同时本研究表明,与 Q-NPK 处理相比, D-PK 处理和 D-NK 处理的硝态氮残留量时分别降低 20.4%和 18.7%,说明氮钾肥配施有助于减少土壤硝态氮的残留量,此外,滴灌减少了水分深层渗漏,避免了硝态氮因深层渗漏而污染地下水^[28]。

冬小麦生产过程中,为了获得高产就需要投入大量的水分和养分,大量的肥料对环境造成了负面影响^[30],因此,提高肥料利用效率才是解决问题的关键。本研究表明,相同灌水方式下,不施氮肥处理冬小麦氮肥、钾肥整株累积量显著低于氮磷钾均施处理,不施磷肥和不施钾肥处理氮肥、钾肥整株累积量均与氮磷钾均施处理无显著差异,说明作物对氮肥的响应明显,而对磷肥、钾肥不敏感,这与张经廷等^[16]研究结果相似,但与谭和芳等^[31]不施磷钾肥会降低氮磷钾肥吸收量的结论不一致,主要原因是本试验地土壤磷钾本底值较高(表 1),进而影响养分循环,同时造成土壤氮磷钾总量增加,提高了速效养分的供给。不同灌溉和施肥处理下作物茎、叶和籽粒在养分分配上存在差异,研究表明^[32-33],植株含氮量和累积量开花期以叶片最高,成熟期以籽粒最高,籽粒吸钾量小于茎秆,而吸氮量和吸磷量大于茎秆,这与本研究结果一致,且本试验还发现滴灌处理冬小麦籽粒含氮量、含磷量和含钾量均高于畦灌处理,说明冬小麦植株中氮、磷养分主要集中在籽粒中,而钾主要集中在茎秆中,滴灌更有利于

养分的吸收。同时,滴灌下氮磷钾肥配施(D-NPK处理)产量最高(11.69 t/hm²),缺氮降低了籽粒对氮的吸收,进而影响产量,所以氮肥的施用是冬小麦获得高产的关键。

4 结论

1) 相同施肥方式时,滴灌处理氮肥、磷肥、钾肥偏生产力显著高于畦灌处理;氮肥、磷肥收获指数较高,说明籽粒对氮肥、磷肥的吸收较多,并且滴灌更有利于氮素的吸收。

2) 滴灌氮肥、磷肥、钾肥利用率分别比畦灌处理高49.48%、4.01%、18.07%;滴灌处理氮素利用率最高, D-NP、D-NK、D-NPK处理氮肥偏生产力没有显著差异,综合产量和土壤硝态氮的残留量, D-NK处理增加少量磷肥具有较大的效益,该地区在实际生产中应重视氮肥、钾肥的施用,加强磷肥的节肥增效管理。

参考文献:

- [1] DU T S, KANG S Z, SUN J S, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(1): 66-74.
- [2] 金千瑜, 欧阳由男, 禹盛苗, 等. 中国农业可持续发展中的水危机及其对策[J]. *农业现代化研究*, 2003, 24(1): 21-23.
JIN Qianyu, OUYANG Younan, YU Shengmiao, et al. Water crisis in agricultural sustainable development and its countermeasures in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2003, 24(1): 21-23.
- [3] 贾国燊, 骆洪义, 褚屿, 等. 不同灌溉方式下水肥一体化对玉米养分吸收规律的影响[J]. *节水灌溉*, 2022(2): 40-47.
JIA Guoyu, LUO Hongyi, CHU Yu, et al. Effects of water and fertilizer integration on nutrient absorption of maize under different irrigation modes[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(2): 40-47.
- [4] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 施肥方式对不同基因型小麦年际间产量及其构成的影响[J]. *河南农业科学*, 2014, 43(2): 51-57.
NIE Shengwei, HUANG Shaomin, ZHANG Shuiqing, et al. Effects of fertilization methods on yield and its components of different wheat genotypes between years[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(2): 51-57.
- [5] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 养分资源综合管理与中国粮食安全[J]. *资源科学*, 2008, 30(3): 415-422.
WANG Jiqing, MA Wenqi, JIANG Rongfeng, et al. Integrated soil nutrients management and China's food security[J]. *Resources Science*, 2008, 30(3): 415-422.
- [6] 谭德水, 刘兆辉, 江丽华. 中国冬小麦施肥历史演变及阶段特征研究进展[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(12): 13-19.
TAN Deshui, LIU Zhaohui, JIANG Lihua. Fertilization history evolution and stage characteristics of winter wheat in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(12): 13-19.
- [7] 张少民, 郝明德, 陈磊. 黄土高原长期施肥对小麦产量及土壤肥力的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(6): 85-89.
ZHANG Shaomin, HAO Mingde, CHEN Lei. Effects of long-term fertilization on yield of wheat and soil fertility in dry-land of Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(6): 85-89.
- [8] 冯进军, 周丽萍. 临夏州高寒湿润区氮磷钾肥配比对冬小麦产量和效

- 益的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(7): 1 016-1 021.
- FENG Jinjun, ZHOU Liping. Effect of different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium application on yield and economic benefit of winter wheat in cold damp areas of Linxia autonomous prefecture[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(7): 1 016-1 021.
- [9] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 水肥耦合对华北高产农区小麦-玉米产量和土壤硝态氮淋失风险的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 532-539.
- ZHANG Yuming, ZHANG Jiabao, HU Chunsheng, et al. Effect of fertilization and irrigation on wheat-maize yield and soil nitrate nitrogen leaching in high agricultural yield region in North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 532-539.
- [10] 李东坡, 武志杰, 梁成华. 土壤环境污染与农产品质量[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 172-177.
- LI Dongpo, WU Zhijie, LIANG Chenghua. Soil environmental pollution and agricultural product quality[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(4): 172-177.
- [11] 陆文聪, 刘聪. 化肥污染对粮食作物生产的环境惩罚效应[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1 988-1 994.
- LU Wencong, LIU Cong. The "environmental punishment" effect of fertilizer pollution in grain crop production[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1 988-1 994.
- [12] 张富仓, 康绍忠, 李志军, 等. 施肥对旱地土壤供水特征的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(S1): 408-410.
- ZHANG Fucang, KANG Shaozhong, LI Zhijun, et al. Effects of fertilization on the properties of soil water supply in dryland[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(S1): 408-410.
- [13] 龚一丹, 王卫华, 管能翰, 等. 灌溉对番茄生长发育、产量和品质影响的研究进展[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(7): 7-13.
- GONG Yidan, WANG Weihua, GUAN Nenghan, et al. Research progress on the effect of irrigation on tomato growth, yield and quality[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2020, 33(7): 7-13.
- [14] 史源, 白美健, 李益农, 等. 基于 SISM 模型和畦灌技术的冬小麦最小灌水定额研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 278-286.
- SHI Yuan, BAI Meijian, LI Yinong, et al. Minimum irrigation quota of winter wheat based on SISM model and border irrigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 278-286.
- [15] 华瑞, 李俊华, 王立坤, 等. 不同滴灌施肥策略对玉米产量、养分吸收及效益的影响[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(1): 68-76.
- HUA Rui, LI Junhua, WANG Likun, et al. Effects of different fertigation strategies on maize yield, nutrient uptake, and economic benefit[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(1): 68-76.
- [16] 张经廷, 吕丽华, 张丽华, 等. 不同肥料滴灌配施夏玉米产量与氮磷钾吸收利用特性[J]. 玉米科学, 2017, 25(2): 123-129.
- ZHANG Jingting, LYU Lihua, ZHANG Lihua, et al. Yield and NPK uptake and utilization characteristics of summer maize under drip fertigation[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(2): 123-129.
- [17] 宜丽宏, 王丽, 张孟妮, 等. 不同灌溉方式对冬小麦生长发育及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 14-19.
- YI Lihong, WANG Li, ZHANG Mengni, et al. Effect of irrigation methods on growth and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(10): 14-19.
- [18] 肖艳, 陈清, 王敬国, 等. 滴灌施肥对土壤铁、磷有效性及番茄生长的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(9): 1 322-1 327.
- XIAO Yan, CHEN Qing, WANG Jingguo, et al. Citrate on mobilization of Fe and P in calcareous soil and its impact on growth of drip-irrigated tomato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(9): 1 322-1 327.
- [19] WANG J D, GONG S H, XU D, et al. Impact of drip and level-basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain[J]. Irrigation Science, 2013, 31(5): 1 025-1 037.
- [20] LI H R, MEI X R, WANG J D, et al. Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106 534.
- [21] SHARMASARKAR F C, SHARMASARKAR S, MILLER S D, et al. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets[J]. Agricultural Water Management, 2001, 46(3): 241-251.
- [22] LYU H F, LIN S, WANG Y F, et al. Drip fertigation significantly reduces nitrogen leaching in solar greenhouse vegetable production system[J]. Environmental Pollution, 2019, 245: 694-701.
- [23] 赵经华, 杨庭瑞, 胡文军, 等. 水氮互作对滴灌小麦土壤硝态氮转移、氮平衡及水氮利用效率的影响[J]. 中国农村水利水电, 2021(4): 141-149.
- ZHAO Jinghua, YANG Tingrui, HU Wenjun, et al. Effects of water and nitrogen interaction on nitrate transport, nitrogen balance and water and nitrogen use efficiency in drip irrigation wheat soil[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(4): 141-149.
- [24] 李小利, 李昊儒, 郝卫平, 等. 滴灌施肥对华北小麦-玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 18-28.
- LI Xiaoli, LI Haoru, HAO Weiping, et al. Impact of drip fertigation on yields and water use efficiency of wheat-maize rotation in North China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(4): 18-28.
- [25] 王丹, 韩聪颖, 黄兴法, 等. 宁夏引黄灌区不同群体密度下滴灌春小麦耗水规律和产量初探[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S2): 155-158.
- WANG Dan, HAN Congying, HUANG Xingfa, et al. Study on the water use and yield of spring wheat with various population densities under drip irrigation in ningxia Yellow River irrigation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S2): 155-158.
- [26] PANIGRAHI P, SRIVASTAVA A K. Water and nutrient management effects on water use and yield of drip irrigated citrus in vertisol under a sub-humid region[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(5): 1 184-1 194.
- [27] 陈贵菊, 闫璐, 王福玉, 等. 近 10 年黄淮冬麦区北片水地区试品种产量及主要农艺性状分析[J]. 山东农业科学, 2021, 53(5): 142-148.
- CHEN Guiju, YAN Lu, WANG Fuyu, et al. Analysis on yield and main agronomic traits of winter wheat varieties in the north Huanghe-Huaihe region test in recent 10 years[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(5): 142-148.
- [28] 韦彦, 孙丽萍, 王树忠, 等. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分配及硝态氮运移的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 67-72.
- WEI Yan, SUN Liping, WANG Shuzhong, et al. Effects of different irrigation methods on water distribution and nitrate nitrogen transport of cucumber in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 67-72.
- [29] 范庆锋, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式下设施土壤硝态氮的积累特征及其环境影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2 281-2 286.
- FAN Qingfeng, ZHANG Yulong, ZHANG Yuling, et al. Soil nitrate accumulation and its environmental effects under various irrigation modes in protected field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(11): 2 281-2 286.
- [30] 邱冠男, 吴跃进, 王永国, 等. 新型高效控失型复合肥对黄淮海地区小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(18): 186-191.
- QIU Guannan, WU Yuejin, WANG Yongguo, et al. Impact of a new and high efficient loss-control fertilizer on wheat yield in Huang-Huai-Hai area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(18): 186-191.
- [31] 谭和芳, 谢金学, 汪吉东, 等. 氮磷钾不同配比对小麦产量及肥料利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(3): 279-283.
- TAN Hefang, XIE Jinxue, WANG Jidong, et al. Effect of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on wheat yield and nutrient use efficiency[J]. Jiangsu Journal of Agricultural

- Sciences, 2008, 24(3): 279-283.
- [32] 姜丽娜, 刘佩, 齐冰玉, 等. 不同施氮量及种植密度对小麦开花期氮素积累转运的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 131-141.
JIANG Lina, LIU Pei, QI Bingyu, et al. Effects of different nitrogen application amounts and seedling densities on nitrogen accumulation and transport in winter wheat at anthesis stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(2): 131-141.
- [33] 郭世乾, 崔增团, 师伟杰, 等. 氮、磷、钾及其配施对制种玉米养分吸收利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 221-226.
GUO Shiqian, CUI Zengtuan, SHI Weijie, et al. Effects of nitrogen, phosphorus, potassium and their combined application on nutrient absorption and utilization of seed maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 221-226.

Combined Effects of Irrigation and Fertilization on Growth and Fertilizer Utilization of Winter Wheat

CHEN Haiqing^{1,2}, HUANG Chao¹, LIU Xuchen¹, GONG Wenjun³,
SUN Mengqiang³, ZHANG Yajuan³, WANG Xingpeng^{2*}, LIU Zhandong^{1*}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Xinxiang 453002, China; 2. College of Water Resource and Architecture Engineering, Tarim University, Alar 843300, China; 3. Henan Jiaozuo Guangli Irrigation District Administration Bureau, Qinyang 454550, China)

Abstract: **【Objective】** Water and nutrients are interactive in their uptakes by crops. The purpose of this paper is to investigate how fertilization and irrigation combine to modulate winter wheat yield and fertilizer utilization. **【Method】** The experiment was conducted from 2020 to 2021 at a winter wheat field in the Xinxiang Comprehensive Experimental Base of the Chinese Academy of Agricultural Sciences. It consisted of a drip irrigation (D) and a border irrigation (Q); each irrigation had four fertilization treatments: nitrogen and phosphorus (NP), nitrogen and potassium (NK), nitrogen, phosphorus and potassium (NPK), and phosphorus and potassium (PK). In each treatment, we measured growth, yield and fertilizer utilization of the crop. **【Result】** Regardless of the irrigation methods, PM increased plant height and leaf area index while reducing spike length, spike grain number and thousand-grain weight significantly, compared to NPK. The grain number per spike in border irrigation was higher than that in drip irrigation, while the thousand-grain weight in border irrigation was lower than that in drip irrigation. Under drip irrigation, the yield of PK was 25.0% lower than that of NPK, while the difference in yield between NP and NK was not significant. Drip irrigation increased utilization of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers by 49.48%, 4.01% and 18.07%, respectively, compared to border irrigation, and it also increased the productivity of nitrogen, phosphorus and potassium. Soil nitrate residuals at harvest under drip irrigation were lower than those under border irrigation, and soil nitrate residues in Q+NK were 18.7% lower than that in Q+NPK. **【Conclusion】** Comprehensive analysis shows D+NK is optimal to improve fertilizer utilization and reduce residual soil nitrate at harvest. It also promotes the use of indigenous phosphorus by the crop thereby improving phosphorus use efficiency.

Key words: winter wheat; drip irrigation; water-fertilizer integration; fertilizer use efficiency; nitrate-N residues

责任编辑: 白芳芳