

高低畦种植模式下水氮耦合对冬小麦产量和水氮利用效率的影响

刘俊明^{1,2}, 司转运¹, 武利峰³, 李双⁴, 孙一鸣³, 王宁³, 高阳^{1*}, 段爱旺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, 新乡 453002; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081; 3. 山东省滨州市农业科学院, 滨州 256600; 4. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250000)

摘要: 高低畦种植是在生产实践中摸索出的一套节水增产的冬小麦种植模式, 尽管已被山东省列为农业主推技术, 但由于建立时间尚短, 其背后机理研究仍较薄弱, 很大程度上制约了该模式的完善与推广应用。为探索高低畦冬小麦最佳的水氮管理制度, 于 2020—2022 年开展田间试验, 设置 3 个灌水定额 (W1: 120 mm、W2: 90 mm、W3: 60 mm) 和 3 个施氮水平 (N1: 300 kg/hm²、N2: 240 kg/hm²、N3: 180 kg/hm²), 以水氮充足的平作种植为对照 (CK, 灌水定额 120 mm, 施氮量 300 kg/hm²), 测定了不同生育期土壤含水率、成熟期地上部生物量和产量, 并计算了麦田耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力和净利润等指标。结果表明: 1) 与平作种植相比, 高低畦种植的麦田耗水量无明显差异, 但冬小麦产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和净利润分别提高 14.8%~17.6%、15.9%~16.9%、14.8%~17.6% 和 58.9%~112.6%, 说明高低畦种植模式具有增产与节水有机统一的良好潜力。2) 灌水水平和施氮水平对高低畦种植麦田耗水量产生极显著影响 ($P<0.01$); 高低畦种植模式的产量、地上部生物量、水分利用效率、氮肥偏生产力和净利润的水氮耦合效应明显; W2N2 与 W1N1 产量差异不显著 ($P>0.05$), 而水分利用效率和氮肥偏生产力也显著增加 ($P<0.05$); 说明适量节水减氮不会显著降低产量, 且可获得较高的水分利用效率和氮肥偏生产力。二元二次回归分析得出, 当耗水量为 536.3~559.4 mm (灌水定额为 99.2~115.4 mm), 施氮量 246.5~299.4 kg/hm² 时, 可以使高低畦种植模式冬小麦产量、水分利用效率和净利润的综合效益最大化。研究为冬小麦高低畦种植模式下水氮优化管理策略的构建提供理论依据和技术支撑。

关键词: 灌溉; 氮肥; 冬小麦; 高低畦种植; 产量; 水分利用效率; 经济效益

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301125

中图分类号: S365; S274

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-08-0144-11

刘俊明, 司转运, 武利峰, 等. 高低畦种植模式下水氮耦合对冬小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 144-154. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301125 http://www.tcsae.org

LIU Junming, SI Zhuanyun, WU Lifeng, et al. Effects of water and nitrogen coupling on winter wheat yield and water or nitrogen use efficiency under high-low seedbed cultivation pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 144-154. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301125 http://www.tcsae.org

0 引言

黄淮海地区是中国最为重要的小麦产区^[1], 保障该区域的冬小麦生产稳定发展, 对于保证国家粮食安全, 特别是口粮安全意义重大^[2]。目前, 该区域冬小麦的灌溉方式仍以地面灌为主, 占到总灌溉面积的 85% 以上^[3]。虽然经过连续多年大规模的大型灌区节水改造及高标准农田建设, 农田灌溉系统得到很大的改善, 但地面灌田间配水系统的提升仍十分有限。例如, 井灌区单井出水量一般较低, 农民通常采用小畦田种植以便于灌水, 但畦埂占比较大导致土地利用效率较低、光热资源浪费, 限制了作物产量的提升; 渠灌区供水量相对充裕, 普遍采用大畦面、长畦进行灌溉, 灌水定额偏大, 经常出现严重

的地面径流和深层渗漏。针对井灌区土地利用效率低和渠灌区灌水定额高等问题, 滨州市农科院研发了小麦高低畦种植技术^[4], 该模式将田地整成高低相间的平面, 2 个畦面均种植小麦; 灌溉时低畦田作为水流通通道, 高畦田作为畦埂发挥作用。相较于传统的平作种植相比, 高低畦模式可使冬小麦产量 10.0%~22.6%、使水分利用效率提高 2.4%~9.8%^[5]。但由于这一栽培模式建立的时间尚短, 相关的基础研究十分薄弱, 尤其是水氮定额管理问题, 在很大程度上制约了这一模式完善与推广应用。水分和氮肥是影响作物产量的 2 个控制性因子^[6-9]。在农业生产中, 农民为获得最大的产量, 常倾向于过量供水和施氮, 从而导致经济效益和水氮利用效率降低^[10-12]。因此, 在保证产量的前提下, 亟需提出高低畦种植模式下水氮优化供应方案, 以期为该模式的应用推广以及水氮高效利用提供理论依据^[13-15]。

通过田间试验研究水氮耦合对作物产量、水/氮利用效率以及经济效益的影响是探索最佳灌水量和施氮量的重要途径。目前, 国内外学者在小麦或玉米水氮耦合方面已开展了诸多研究^[7,9,16-17]。SI 等^[11]在华北平原地区研

收稿日期: 2023-01-30 修订日期: 2023-02-28

基金项目: 国家小麦产业技术体系项目 (CARS-03-19); 河南省重大科技专项项目 (221100110700); 国家自然科学基金资助项目 (51879267)

作者简介: 刘俊明, 博士生, 研究方向为作物水分生理与高效用水。

Email: liujunming0225@163.com

*通信作者: 高阳, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为作物水分生理与高效用水。Email: gaoyang@caas.cn

究了水氮耦合对滴灌冬小麦生长发育的影响, 结果显示, 当灌水定额为 40 mm 和施氮量为 240 kg/hm² 时, 可以使滴灌冬小麦产量和水氮利用效率的综合效益最大化。ZOU 等^[12]在西北旱区开展滴灌春玉米田间试验, 运用二元二次回归和归一化处理相结合的方法, 得出当灌溉区间在 ET₀ 的 98%~108% 和 N-P₂O₅-K₂O 施肥量在 142-71-71~223-112-112 kg/hm² 时, 是作物产量、水分利用效率和经济效益达到 95% 最大值的水氮高效运筹方案。LU 等^[7]基于响应曲面法确定了关中平原滴灌水肥一体化冬小麦/夏玉米轮作系统兼具高产和高收益的水氮供应区间, 推荐冬小麦的耗水和施氮量区间分别为 434~496 mm 和 165~211 kg/hm², 夏玉米对应的耗水和施氮量区间分别为 458~500 mm 和 187~250 kg/hm²。以往关于水氮定额优化的相关研究主要集中于滴灌条件下的粮食作物。冬小麦高低畦条件下不同水氮供应对作物生长发育的影响以及适宜的水氮供应区间仍不明确, 需要开展系统的试验研究。因此, 为了探索高低畦冬小麦最佳的水氮管理制度, 本研究建立冬小麦高低畦种植条件下水氮供应与产量、地上部生物量、水分利用效率、氮肥偏生产力以及经济效益之间的关系, 确定这种种植模式条件下冬小麦高产和高水氮利用效率的水氮供应区间, 以期冬小麦高低畦种植模式的水氮优化管理策略的构建提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 10 月—2022 年 6 月在河南省新乡县七里营镇的中国农业科学院新乡综合试验基地(35.15°N, 113.80°E, 海拔 81 m) 进行。该地区属于温带半湿润易旱气候区, 年平均气温 14 °C, 多年平均降水量为 582 mm, 无霜期 210 d。试验区土壤以壤土为主, 0~100 cm 土层的平均容重为 1.51 g/cm³, 田间持水量为 31%。地下水埋深大于 5 m。该区域是黄淮海平原重要的冬小麦生产区, 作物种植模式以冬小麦-夏玉米一年两熟轮作为主。0~40 cm 土层有机质为 16.1 g/kg, 全氮为 1.05 mg/kg, 速效磷为 23.4 mg/kg, 速效钾为 229.5 mg/kg。2020—2021 年和 2021—2022 年冬小麦试验期间降雨量分别为 174.8 和 60.1 mm (图 1)。

1.2 试验设计

供试作物为冬小麦, 品种是周麦 22, 播种量均为 180 kg/hm², 分别于 2020 年 10 月 17 日和 2021 年 10 月 30 日播种, 并于 2021 年 6 月 3 日和 2022 年 6 月 6 日收获。高低畦种植模式使用专用成畦、施肥、播种、镇压一体的播种机械进行播种, 高低畦规格如下: 幅宽 150 cm, 高畦畦面宽约 50 cm, 低畦畦面宽约 90 cm, 高、低畦面高度差为 12 cm; 高畦播种 2 行小麦, 低畦播种 4 行小麦(图 2b)。平作种植使用常规播种机进行播种, 其规格如下: 幅宽 150 cm, 畦床宽为 120 cm, 畦埂宽为 30 cm, 种植 6 行小麦(图 2a); 冬小麦平均行距与高低畦种植模式相一致, 均为 25 cm。

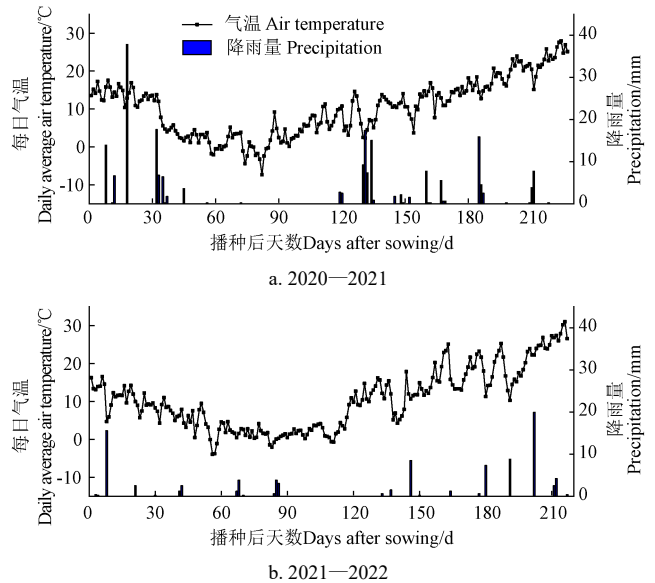


图 1 小麦生育期内降雨量和气温

Fig.1 Precipitation and air temperature during growth period of winter wheat

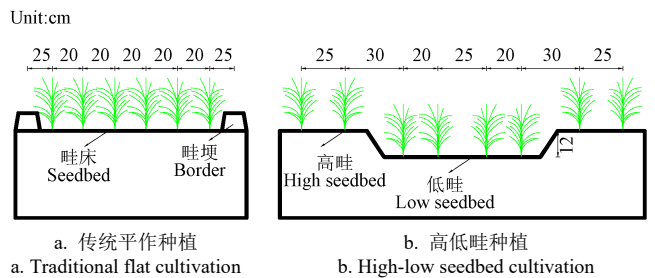


图 2 不同种植模式的示意图

Fig.2 Schematic diagram of different cultivation methods

为给高低畦种植模式提供科学的水氮管理依据, 充分借鉴当地农户对平作种植的水氮管理方案。试验为二因素裂区设计, 主区为氮素处理, 裂区为水分处理。具体的试验设置如下: 施氮量(以纯 N 计)设置 3 水平, 分别为高氮(N1: 300 kg/hm²)、中氮(N2: 240 kg/hm²)、低氮(N3: 180 kg/hm²); 灌水定额设置 3 水平, 分别为高水(W1: 120 mm)、中水(W2: 90 mm)、低水(W3: 60 mm), 以水氮充足(灌水定额 120 mm, 施氮量 300 kg/hm²)的平作种植为对照(CK), 共计 10 个处理。各处理 3 次重复, 共 30 个小区, 每个小区面积 15 m×9 m。磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)用量均为 120 kg/hm²; 在播种前作为基肥施入农田。尿素分 2 次施用, 小麦播种前施基肥, 返青期追施, 基追比为 1: 1。生育期内通过取土监测土壤含水率来进行灌溉, 当 CK 处理的 0~100 cm 土层土壤含水率低于田间持水量的 60% 时, 所有处理同时进行灌溉。2020—2021 生长季, 2 次灌溉时间分别为 2021 年 3 月 13 日和 5 月 2 日; 2021—2022 生长季, 2 次灌溉时间分别为 2022 年 3 月 6 日和 4 月 20 日。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水率

冬小麦播种前(2020 年 10 月 18 日和 2021 年 10 月 30 日)和收获后(2021 年 6 月 3 日和 2022 年 6 月 6 日)取土, 采用烘箱烘干法测土壤含水率。考虑到冬小麦在

整个生育期的根系吸水深度,土层测定总深度为 200 cm。取土样时,高低畦种植模式分别在高低畦田和矮畦田中心各设置 1 个点,取 2 点平均值使用;平作种植仅在畦床中心处设置 1 个点。

1.3.2 地上部生物量

在冬小麦成熟期,在高低畦种植模式的高低畦田和矮畦田 2 个位置以及平作种植各随机取代表性的 20 株冬小麦,将其分为茎、叶、穗 3 个部分,分别进行盛装,烘箱设置 105 ℃杀青 0.5 h,然后设置 75 ℃烘干至恒质量,最后称取这 3 个部分的干质量,结合群体密度计算单位面积的地上部生物量(kg/hm²)。

1.3.3 产量及产量构成要素

于冬小麦成熟期,在高低畦种植模式的高低畦田和矮畦田 2 个位置分别选取有代表性的 1 m²;平作种植选取有代表性的 1.5 m²。记录 1 m²或 1.5 m²的有效穗数,然后从中随机选取 20 穗,手工脱粒得到单粒穗数。人工脱粒后晒干并对每个处理的籽粒进行称质量,然后随机选出 1 000 粒小麦来获得千粒质量。同时提取部分样品放入烘箱测定烘干质量算出籽粒含水率,折算成含水率为 14%的产量和千粒质量。

1.3.4 其他指标计算方法

农田耗水量利用土壤水量平衡方程计算^[18]:

$$S_{ET}=P_r+U+I-D-R-\Delta W \quad (1)$$

式中 S_{ET} 为麦田耗水量, U 为地下水补给作物根层土壤的毛管上升量, P_r 为降水量, I 为灌溉量, D 为深层渗漏量, R 为地表径流量, ΔW 为生育期前后 200 cm 土层土壤贮水量变化量,单位均为 mm。由于试验区每个小区均筑有畦埂,未发生因降水或灌溉引起的地面径流现象,因此 $R=0$; 试验中最大灌水定额为 120 mm,相当于 0~120 cm 土层土壤含水率从田间持水量的 60%提升至田间持水量的 90%,灌溉水几乎不会入渗到 200 cm 土层以下,因此 $D=0$; 试验区域地下水埋深大于 5 m,没有地下水补给现象,因此 $U=0$ 。

水分利用效率(S_{WUE} , kg/m³) 计算式为^[19]

$$S_{WUE}=Y/S_{ET} \quad (2)$$

式中 Y 是小麦产量, kg/hm²。

氮肥偏生产力(S_{NPF} , kg/kg) 计算式为^[20]

$$S_{NPF}=Y/N \quad (3)$$

式中 N 是施氮量, kg/hm²。

经济效益计算式为^[21]

$$S_{NP}=T_I-T_O \quad (4)$$

式中 S_{NP} 为净利润,元/hm²; T_I 为冬小麦生产总投入,包括种子、肥料、灌溉和机械等,元/hm²; T_O 为冬小麦籽粒产量收入,元/hm²。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 25.0 进行数据分析,采用 ANOVA 和 LSD 法(least significant difference, $\alpha=0.05$) 对数据进行方差分析和多重检验。本研究以高低畦种植模式冬小麦高产高效和可持续发展为目标,以冬小麦耗水量和施氮量为自变量,选用产量、地上部生物量、 S_{WUE} 、 S_{NPF} 和 S_{NP} 为评价指标,运用 Origin 2016 软件

分析建立各指标与耗水量和施氮量的二元二次曲面方程。找到各指标 95%最大值的耗水量和施氮量区间范围,它们交集的区域即为最优水氮管理方案。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对水量平衡的影响

由表 1 可知,与平作种植(CK)相比,2020—2021 年和 2021—2022 年高低畦种植(W1N1)下麦田耗水量无显著差异($P>0.05$)。水氮互作对麦田耗水量的影响存在显著差异($P<0.05$)。与 N1 相比,N2 和 N3 的耗水量分别降低 5.3%~5.9%和 15.5%~21.7%($P<0.05$)。在相同灌水水平下,麦田耗水量随施氮水平的增加呈现逐渐增加的趋势。同理,与 W1 相比,W2 和 W3 的耗水量分别降低 6.5%~7.8%和 15.3%~19.1%。结果表明,相同施氮水平下,麦田耗水量随灌水水平的增加呈现增加的趋势。

表 1 不同水氮处理下冬小麦田水分平衡

Table 1 Water balance of winter wheat field under different irrigation and nitrogen treatments

处理 Treatment	2020—2021				2021—2022			
	P_r mm	I mm	ΔW mm	S_{ET} mm	P_r mm	I mm	ΔW mm	S_{ET} mm
W1N1	174.8	240	179.0d	593.8a	60.1	240	257.0cd	557.1a
W2 N1	174.8	180	194.9b	549.7c	60.1	180	278.4b	518.5c
W3 N1	174.8	120	211.6a	506.4e	60.1	120	307.4a	487.5e
W1N2	174.8	240	141.3g	556.1b	60.1	240	237.2c	537.3b
W2N2	174.8	180	171.5e	526.3d	60.1	180	254.7d	494.8d
W3N2	174.8	120	189.9c	484.7f	60.1	120	263.3c	443.4g
W1N3	174.8	240	90.8i	505.6e	60.1	240	167.7g	467.8f
W2N3	174.8	180	123.0h	477.8g	60.1	180	196.0f	436.1h
W3N3	174.8	120	150.3f	445.1h	60.1	120	200.7f	380.8i
CK	174.8	240	175.8de	590.6a	60.1	240	262.0c	562.1a
F 值 F value								
N	—	—	2 783.0**	2 783.0**	—	—	6 518.0**	6 518.0**
W	—	—	1 103.9**	2 674.0**	—	—	978.8**	5 068.2**
N×W	—	—	32.7**	32.7**	—	—	57.5**	57.5**

注: S_{ET} 为耗水量, P_r 为降水量, I 为灌溉量, ΔW 为生育期前后 200 cm 土层贮水量变化量。不同小写字母表示不同处理差异显著($P<0.05$)。N 是施氮水平, W 是灌水定额。**, $P<0.01$; *, $P<0.05$; NS, $P>0.05$ 。下同。

Note: S_{ET} , actual evapotranspiration; P_r , precipitation; I , irrigation; ΔW , the difference of soil water storage in 0-200 cm before and after growing stage. Values with different lowercase letters are significantly different among different treatments at the 0.05 level. N, fertilizer-N application level; W, irrigation quota. **, $P<0.01$; *, $P<0.05$; NS, $P>0.05$. Same as below.

冬小麦生育期麦田水分主要来源包括降雨、灌溉和土壤储水。由表 2 可知,平作种植和高低畦种植的耗水结构无差异;但水氮互作对耗水结构的影响存在显著差异($P<0.05$)。灌溉水占总耗水量的份额随灌水水平的增加呈现逐渐增加的趋势,W1 处理下比例最高,为 43.7%~46.4%;而灌溉水占总耗水量的份额随施氮水平的增加呈现逐渐降低的趋势,N1 处理下比例最低,为 32.4%~34.1%。同理,降雨+土壤储水消耗量占总耗水量的份额随着灌水水平的增加呈现降低的趋势,相同的施氮水平下均以 W3 处理最高。降雨+土壤储水消耗量占总耗水量的份额随着施氮水平的增加呈现增加的趋势,相同的灌水水平下均以 N1 处理最高。方差分析结果表明,灌水、施氮及其交互作用均对麦田耗水量存在极显著影响($P<0.01$)。

2.2 地上部生物量和产量

由表 3 可知，与平作种植相比，2020—2021 年和 2021—2022 年高低畦种植下冬小麦产量提高 14.8%~17.6% ($P<0.05$)，地上部生物量提高 11.1%~19.1% ($P<0.05$)。水氮互作对冬小麦地上部生物量和产量的影响显著 ($P<0.05$)。整体而言，随着灌水水平和施氮水平的增加，地上部生物量和产量均呈现增加趋势。不同灌水水平下的地上部生物量和产量均表现为 $W3<W2<W1$ 。与 $W1$ 相比， $W2$ 和 $W3$ 地上部生物量分别降低 6.0%和 28.5% ($P<0.05$)，产量分别降低 3.0%和 19.7% ($P<0.05$)。与 $N1$ 相比， $N2$ 和 $N3$ 地上部生物量分别降低 7.9%和 25.4% ($P<0.05$)，产量分别降低 3.5%和 28.1% ($P<0.05$)。水氮互作对 2021—2022 年冬小麦产量构成要素都有显著影响，而在 2020—2021 年水氮互作对冬小麦穗粒数没有显著影响。从产量构成要素来看，施氮水平相同时，在 2021—2022 年冬小麦的穗粒数、千粒质量和成穗数均表现为 $W1>W2>W3$ ($P<0.05$)，但在 $N1$ 和 $N2$ 处理中千粒质量无显著性差异；在 2020—2021 年施氮水平相同

时，千粒质量和成穗数表现为 $W1>W2>W3$ ($P<0.05$)，但是各处理间穗粒数未表现出显著性差异。此外，2020—2021 年冬小麦生长季的地上部生物量、成穗数、千粒质量和产量均相对高于 2021—2022 年，但是不同生长季节的穗粒数之间不存在显著性差异。

表 2 不同水氮处理下冬小麦耗水结构
Table 2 Composition of water consumption under different irrigation and nitrogen treatments for winter wheat

处理 Treatment	2020—2021			2021—2022		
	$P_r/\%$	$I/\%$	$\Delta W/\%$	$P_r/\%$	$I/\%$	$\Delta W/\%$
W1N1	29.44	40.41	30.15	10.79	43.08	46.14
W2N1	31.80	32.74	35.46	11.59	34.72	53.69
W3N1	34.52	23.70	41.79	12.33	24.62	63.05
W1N2	31.43	43.16	25.41	11.19	44.67	44.14
W2N2	33.21	34.20	32.59	12.15	36.38	51.47
W3N2	36.06	24.76	39.18	13.56	27.07	59.38
W1N3	34.57	47.47	17.96	12.85	51.30	35.85
W2N3	36.59	37.67	25.74	13.78	41.27	44.95
W3N3	39.27	26.96	33.76	15.78	31.52	52.70
CK	29.60	40.64	29.76	10.70	42.71	46.60

表 3 不同水氮处理下冬小麦产量和地上部生物量
Table 3 Yield and aboveground biomass of winter wheat under different irrigation and nitrogen treatments

处理 Treatment	2020—2021					2021—2022				
	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	千粒质量 1000-grain weight/g	穗粒数 Kernels per spike/粒	成穗数 Spike number/ (10 ⁴ hm ⁻²)	地上部生物量 Aboveground biomass/(kg·hm ⁻²)	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	千粒质量 1000-grain weight/g	穗粒数 Kernels per spike /粒	成穗数 Spike number/ (10 ⁴ hm ⁻²)	地上部生物量 Aboveground biomass/(kg·hm ⁻²)
W1N1	10 243.8a	51.7a	39.5a	739.1a	25 250.6a	9 797.1a	49.9a	41.1a	652.3a	23 228.2a
W2N1	10 087.0a	51.4a	40.0a	703.6b	25 110.8a	9 451.2a	49.8a	40.7ab	620.1b	23 081.5a
W3N1	9 086.5b	50.4b	38.7a	606.2d	21 252.3c	8 125.8bc	47.0d	35.5d	579.6d	18 428.4cd
W1N2	10 064.8a	51.5a	39.4a	715.6b	25 312.2a	9 600.6a	49.6a	39.9bc	626.1b	22 770.2a
W2N2	9 913.4a	51.6a	40.0a	706.7b	22 771.8b	9 530.8a	49.7a	38.8c	609.7bc	20 850.1b
W3N2	8 244.8cd	50.7b	37.8a	557.8ef	19 181.6d	7 523.1d	47.3d	36.0d	519.4g	15 553.0e
W1N3	7 982.2de	51.5a	38.4a	579.6c	20 692.3c	7 861.9cd	48.9b	35.3d	562.6e	19 094.6c
W2N3	7 513.3ef	50.8b	38.7a	539.1f	19 425.7d	7 438.5d	48.2bc	34.9d	539.6f	17 436.1d
W3N3	7 286.4f	50.6b	39.3a	485.3g	17 854.7e	6 244.4e	47.7cd	33.3c	496.7h	14 342.7f
CK	8 713.6bc	51.7a	40.4a	666.7c	22 731.1b	8 530.6b	50.0a	40.5ab	600.0c	19 506.0c
W1	9 522.8a	51.6a	39.1a	678.1a	23 751.7a	9 245.8a	49.5a	38.8a	613.7a	21 697.7a
W2	9 171.2b	51.3b	39.6a	649.8b	22 436.1b	8 806.8a	49.2a	38.1a	589.8b	20 455.9b
W3	8 205.9c	50.6c	38.6a	549.8c	19 429.5c	7 297.8b	47.3b	35.0b	531.9c	16 108.0c
N1	9 842.8a	51.1a	39.4a	683.0a	23 871.2a	9 195.1a	48.9a	39.1a	617.3a	21 579.4a
N2	9 463.2b	51.3a	39.1a	660.0b	22 421.8b	8 973.7a	48.9a	38.2b	585.1b	19 724.4b
N3	7 594.0c	51.0a	38.8a	534.7c	19 324.2c	7 181.6b	48.3b	34.5c	532.9c	16 957.8c
F 值 F value										
N	133.7**	3.0NS	0.6NS	281.7**	137.5**	97.4**	6.3**	128.3**	174.3**	184.0**
W	40.0**	44.0**	1.3NS	200.9**	125.1**	80.3**	68.4**	86.9**	169.9**	293.0**
N×W	4.7*	3.5*	1.1NS	8.8**	8.2**	1.4NS	6.2**	7.8**	7.1**	7.9**

2.3 水分利用效率和氮肥偏生产力

由表 4 可知，与平作种植相比，2020—2021 年和 2021—2022 年高低畦种植下水分利用效率提高 15.9%~16.9% ($P<0.05$)，氮肥偏生产力提高 14.8%~17.6% ($P<0.05$)。2020—2022 年两季冬小麦水分利用效率介于 1.57~1.93 kg/m³，其中 W2N2 处理最高，W2N3 或 W3N3 处理最低。在 2020—2021 年，灌水水平对水分利用效率无显著影响，但是施氮水平和灌水水平与施氮水平的交互作用对水分利用效率有显著影响；在 2021—2022 年，灌水水平和施氮水平对水分利用效率有显著影响，但是其交互作用对水分利用效率无显著影响。在相同灌水水

平下，水分利用效率随着施氮水平的增加呈现先增加后保持稳定的趋势。以 $W1$ 条件下为例，2020—2022 年不同施氮水平的水分利用效率呈现 $N2>N1>N3$ ，其中 $N1$ 和 $N2$ 无显著差异。在相同施氮水平条件下，水分利用效率随着灌水水平的增加呈现先增加后降低的趋势。

两季冬小麦氮肥偏生产力介于 27.09~44.35 kg/kg，其中 $W1N3$ 处理最高， $W3N1$ 处理最低。两季冬小麦灌水水平和施氮水平对氮肥偏生产力有显著影响，但是在 2021—2022 年灌水水平和施氮水平的交互作用并未构成显著影响。在相同灌水水平条件下，氮肥偏生产力随施氮水平的增加呈现逐渐降低的趋势，表现为 $N3>N2>N1$

($P<0.05$)。在相同施氮水平条件下, 2020-2021 年氮肥偏生产力随灌水水平的增加呈现逐渐增加的趋势, 而 2021-2022 年氮肥偏生产力随灌水水平的增加呈现先增加后保持稳定的趋势。结果表明, 适量水氮供应可以提升水氮利用效率, 过量供应则会产生抑制作用。

2.4 经济效益

不同水氮处理下冬小麦经济效益如表 5 所示。由表可知, 与平作种植相比, 高低畦种植下冬小麦总收入提高 17.6%~35.0%, 净利润提高 58.9%~112.6%。2020—2021 和 2021—2022 年高低畦种植下各处理的总收入分别介于 20 110.6~28 272.8 和 19 482.6~30 566.9 元/hm², 两季冬小麦最高与最低总收入处理相比分别为 140.6%和 156.9%。而两季冬小麦各处理的净利润分别介于 6 657.7~13 360.0 和 5 143.2~14 765.5 元/hm², 两季冬小麦最高与最低净利润处理相比分别为 200.7%和 287.1%。这说明不合理的水氮供应不但会影响冬小麦产出, 还可能增加水氮成本支出, 进而降低净利润。W1N1 处理的生产投入最高, 其生产总投入较 W2N2 高 1 010.8~1 026.3 元/hm², 但是 W2N2 的净利润较 W1N1 高 98.9~195.4 元/hm²。此外, W3N3 处理的生产投入最低, 其总投入较 W2N2 低 631.1~635.8 元/hm², 但是 W2N2 的净利润较 W3N3 高 6 614.5~9 622.3 元/hm²。总体来看, 两季冬小麦 W2N2 或 W2N1 处理的净利润最高, 以该 W2N2 或 W2N1 的水氮投入为拐点, 低于 W2N2 水氮投入的处理由于产量低进而导致净利润显著降低, 而高于 W2N2 水氮投入的处理由于总投入的增幅高于总收入的增幅进而导致经济效

益显著降低。因此, 适量水氮供应有利于带来可观的净利润, 过高或者过低的水氮供应均可能会降低净利润。

表 4 不同水氮处理下冬小麦水分利用效率和氮肥偏生产力
Table 4 Water use efficiency (S_{WUE}) and nitrogen partial factor productivity (S_{NPF}) of winter wheat under different irrigation and nitrogen treatments

处理 Treatment	2020—2021		2021—2022	
	$S_{WUE}/$ (kg·m ⁻³)	$S_{NPF}/$ (kg·kg ⁻¹)	$S_{WUE}/$ (kg·m ⁻³)	$S_{NPF}/$ (kg·kg ⁻¹)
W1N1	1.72bcd	34.15c	1.76bcd	32.66cd
W2N1	1.83a	33.62c	1.82ab	31.50d
W3N1	1.79abc	30.29d	1.67cd	27.09e
W1N2	1.81ab	41.94b	1.79bc	40.00b
W2N2	1.88a	41.31b	1.93a	39.71b
W3N2	1.70cd	34.35c	1.70bcd	31.35d
W1N3	1.58e	44.35a	1.68bcd	43.68a
W2N3	1.57ef	41.74b	1.71bcd	41.33ab
W3N3	1.64de	40.48b	1.64d	34.69c
CK	1.48f	29.05d	1.52e	28.44e
W1	1.71a	40.14a	1.74b	38.78a
W2	1.76a	38.89b	1.82a	37.51a
W3	1.71a	35.04c	1.67b	31.04b
N1	1.79a	32.68c	1.76ab	30.41c
N2	1.80a	39.20b	1.82a	37.02b
N3	1.60b	42.19a	1.68b	39.90a
<i>F</i> 值 <i>F</i> value				
N	33.2**	126.2**	6.6**	86.8**
W	2.7NS	37.7**	8.8**	63.3**
N×W	4.2*	4.2*	1.1NS	1.7NS

表 5 冬小麦经济效益分析

Table 5 Economic benefit analysis of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	生产投入 Cost for production/(元·hm ⁻²)							总收入 Gross benefit/ (元·hm ⁻²)	总收入/总投入 Benefit-cost ratio	净利润 Net benefit/ (元·hm ⁻²)
		种子 Seed	灌溉 Irrigation	肥料 Fertilizer	劳动力 Labor	农药 Farm chemical	机械 Mechanicals	总投入 Total cost			
2020—2021	W1N1	1 080.0	480.0	3 675.5	4 849.5	1 489.5	3 525.0	15 099.5	28 272.8	1.87	13 173.3
	W1N2	1 080.0	480.0	3 284.2	4 849.5	1 489.5	3 525.0	14 708.2	27 778.8	1.89	13 070.6
	W1N3	1 080.0	480.0	2 892.9	4 849.5	1 489.5	3 525.0	14 316.9	22 030.8	1.54	7 713.9
	W2N1	1 080.0	360.0	3 675.5	4 350.0	1 489.5	3 525.0	14 480.0	27 840.0	1.92	13 360.0
	W2N2	1 080.0	360.0	3 284.2	4 350.0	1 489.5	3 525.0	14 088.7	27 360.9	1.94	13 272.2
	W2N3	1 080.0	360.0	2 892.9	4 350.0	1 489.5	3 525.0	13 697.4	20 736.7	1.51	7 039.4
	W3N1	1 080.0	240.0	3 675.5	4 225.5	1 489.5	3 525.0	14 235.5	25 078.7	1.76	10 843.3
	W3N2	1 080.0	240.0	3 284.2	4 225.5	1 489.5	3 525.0	13 844.2	22 755.7	1.64	8 911.5
	W3N3	1 080.0	240.0	2 892.9	4 225.5	1 489.5	3 525.0	13 452.9	20 110.6	1.49	6 657.7
	CK	1 080.0	480.0	3 675.5	5 749.5	1 697.4	3 075.0	15 757.4	24 049.4	1.53	8 292.0
2021—2022	W1N1	1 260.0	480.0	3 751.8	5 168.0	1 549.5	3 787.5	15 996.8	30 566.9	1.91	14 570.1
	W1N2	1 260.0	480.0	3 373.5	5 168.0	1 549.5	3 787.5	15 618.5	29 953.9	1.92	14 335.4
	W1N3	1 260.0	480.0	2 995.3	5 168.0	1 549.5	3 787.5	15 240.3	24 529.3	1.61	9 289.0
	W2N1	1 260.0	360.0	3 751.8	4 640.0	1 549.5	3 787.5	15 348.8	29 487.8	1.92	14 139.0
	W2N2	1 260.0	360.0	3 373.5	4 640.0	1 549.5	3 787.5	14 970.5	29 736.0	1.99	14 765.5
	W2N3	1 260.0	360.0	2 995.3	4 640.0	1 549.5	3 787.5	14 592.3	23 208.3	1.59	8 616.0
	W3N1	1 260.0	240.0	3 751.8	4 507.2	1 549.5	3 787.5	15 096.0	25 352.5	1.68	10 256.5
	W3N2	1 260.0	240.0	3 373.5	4 507.2	1 549.5	3 787.5	14 717.7	23 472.0	1.59	8 754.3
	W3N3	1 260.0	240.0	2 995.3	4 507.2	1 549.5	3 787.5	14 339.5	19 482.6	1.36	5 143.2
	CK	1 260.0	480.0	3 751.8	6 132.8	1 766.7	3 300.0	16 691.3	23 544.3	1.41	6 853.0

2.5 基于产量、地上部生物量、水氮利用效率和经济收益的最佳水氮区间的确定

本研究以冬小麦高低畦种植下节水、高产和高效

为目标, 选取产量、地上部生物量、水分利用效率、氮肥偏生产力和净利润为目标变量, 分析不同水氮应对 5 个目标变量的影响。基于最小二乘法原理, 分

别建立了 5 个目标变量与冬小麦耗水量和施氮量的二元二次回归方程（表 6）。由表可知，所有二元二次回归方程均达显著水平， R^2 均在 0.85 以上，说明这些拟

合方程能够预测水氮交互下对各指标的影响。由建立的回归方程可以计算出各指标最大值下的相应耗水量和施氮量值。

表 6 耗水量与施氮量和冬小麦产量、地上部生物量、水分利用效率、氮肥偏生产力和净利润的回归方程

Table 6 Regression equations of crop water consumption and nitrogen fertilizer application amount with yield, biomass, water use efficiency, nitrogen partial factor productivity and net income of winter wheat

年份 Year	输出变量 Response variable (y)	回归方程 Regression equation	R^2	输出变量最大时对应 F 和 W 值 F and W for maximal response variable		
				最大值 Max	$F/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$W/$ mm
2020—2021	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$y = -25.13 - 0.02x_1 + 0.12x_2 - 4.45 \times 10^{-4}x_1^2 - 1.21 \times 10^{-4}x_2^2 + 9.6 \times 10^{-5}x_1x_2$	0.93**	10.54	300	593.8
	地上部生物量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$y = -69.41 - 0.10x_1 + 0.34x_2 - 1.75 \times 10^{-4}x_1^2 - 3.55 \times 10^{-4}x_2^2 + 3.54 \times 10^{-4}x_1x_2$	0.94**	26.07	300	593.8
	水分利用效率/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$y = -3.12 - 0.002x_1 + 0.02x_2 - 1.0 \times 10^{-5}x_1^2 - 2.19 \times 10^{-5}x_2^2 + 1.61 \times 10^{-5}x_1x_2$	0.86**	1.83	300	545.8
	氮肥偏生产力/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y = -74.68 - 0.14x_1 + 0.49x_2 - 3.1 \times 10^{-4}x_1^2 - 4.78 \times 10^{-4}x_2^2 + 3.16 \times 10^{-4}x_1x_2$	0.86**	46.80	180	572.6
	净利润/(元· hm^{-2})	$y = -91\ 864.8 - 128.5x_1 + 409.2x_2 - 0.16x_1^2 - 0.46x_2^2 + 0.43x_1x_2$	0.95**	14\ 052.2	300	586.5
2021—2022	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$y = -11.48 - 0.04x_1 + 0.08x_2 - 1.06 \times 10^{-4}x_1^2 - 1.04 \times 10^{-4}x_2^2 + 1.8 \times 10^{-5}x_1x_2$	0.95**	10.05	294	557.4
	地上部生物量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$y = -22.97 - 0.24x_1 + 0.24x_2 - 3.56 \times 10^{-4}x_1^2 - 3.89 \times 10^{-4}x_2^2 + 8.35 \times 10^{-4}x_1x_2$	0.92**	24.40	300	557.37
	水分利用效率/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$y = -1.07 - 0.007x_1 + 0.01x_2 - 2.45 \times 10^{-5}x_1^2 - 2.38 \times 10^{-5}x_2^2 + 3.89 \times 10^{-5}x_1x_2$	0.90**	1.81	269	528.5
	氮肥偏生产力/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y = -60.20 - 0.44x_1 + 0.61x_2 - 6.60 \times 10^{-4}x_1^2 - 8.55 \times 10^{-4}x_2^2 + 0.001 \times 10^{-4}x_1x_2$	0.94**	44.30	180	488.8
	净利润/(元· hm^{-2})	$y = -50\ 538.2 - 109.9x_1 + 256.6x_2 - 0.29x_1^2 - 0.33x_2^2 + 0.51x_1x_2$	0.96**	15\ 434.4	300	557.37

注： x_1 和 x_2 分别代表施氮量和耗水量。**表示回归方程 $P < 0.01$ 。

Note: x_1 and x_2 represent the nitrogen rate and water consumption, respectively. ** means $P < 0.01$.

由表 6 可知，各指标不可能同时在一个耗水量和施氮水平上取得最大值，因而将各项指标最大值的 95%~100%等值线投影后求其耗水量和施氮量的交集。为便于进一步分析，将各二元二次曲面方程转化为耗水量与施氮量对各指标二维投影图（图 3）。可见，各指标 95%~100%最大值的情况下也很难满足同时在同一耗水施氮水平上，所以在小麦生产实践种植中必将有所取舍。以节水高产高效为原则，且地上部生物量与产量的相关性较好，因此以产量、水分利用效率和净利润这 3 个指标寻找耗水量和施氮量的最优组合。由图 4 可知，2020—2021 年高低畦作冬小麦同时具有节水高产高效的耗水量和施氮量区间分别为 536.3~594.3 mm 和 246.5~299.4 kg/hm^2 ；2021—2022 年高低畦作冬小麦同时具有节水高产高效的耗水量和施氮量区间分别为 527.2~559.4 mm 和 221.0~303.1 kg/hm^2 。同时，笔者建立了灌水定额 W 与耗水量 E_T 的线性相关关系 ($E_T = 1.43W + 394.4$, $R^2 = 0.75$, $P < 0.01$)，以便于将耗水量转化为灌水定额。综合来看，当耗水量为 536.3~559.4 mm（灌水定额为 99.2~115.4 mm），施氮量为 246.5~299.4 kg/hm^2 ，此时产量、水分利用效率和净利润可同时达到最大值的 95%以上。

3 讨 论

3.1 种植模式和水氮供应对麦田耗水量的影响

高低畦种植技术是畦灌和沟灌技术的有机结合，无需再像常规畦灌一样另行构筑畦埂，土地利用效率明显提高，有利于实现高产目标；同时水流主要沿着低畦推进，起了局部灌溉效果，有利于提升灌溉效率，减少用水浪费^[4-5]。本研究中，高低畦种植和平作种植的麦田耗水量

无明显差异；但前人研究表明，栽培方式对耗水量有显著性差异^[5,22]，这种差异主要归因于蒸散结构的优化。高低畦种植灌溉时仅在低畦田灌水，这相当于在高畦田营造不透水屏障，有效抑制了土壤蒸发引起的无效水分损失；同时随着生育进程的推进，高低畦种植的叶面积指数明显高于平作种植，这也在很大程度上降低了无效水分损失，转而增加具有生理意义的植株蒸腾。此外，本研究表明高低畦种植模式下水氮互作对麦田耗水量的影响存在显著差异 ($P < 0.01$)，这与 ZOU 等^[12]研究结果类似。充足的水氮供应有利于小麦群体发育，增加叶面积指数和地上部生物量，从而增加麦田耗水量^[6,23]。不同处理对麦田土壤储水量的利用存在差异，即土壤储水消耗量占总耗水量的份额随着施氮水平的增加呈现增加的趋势，而随着灌水水平的增加呈现递减的趋势，这一结果与 ZHONG 等^[24]研究结果相一致。适当的水氮供应可以有效地调节作物根系对土壤储水的吸收利用，同时保证产量，达到节水稳产的效果。

3.2 水氮供应对冬小麦产量和地上部生物量的影响

前人对棉花^[25]、玉米^[26]、水稻^[27]、小麦^[7]等作物的水氮耦合研究结果表明，在一定的水氮供应范围内，作物产量和地上部生物量随水氮供应量的增加而增加，但超过水氮阈值后产量呈现下降趋势^[7,11]。在本研究中，高低畦冬小麦地上部生物量和产量随水氮投入的增加而增加，但其增幅随水氮供应的增加呈现先快后慢的趋势；两年均在 W1N1 处理取得最大值，较其他处理提高 1.6%~56.9%和 0.6%~62.0%。与 W1N1 相比，W2N2 冬小麦产量仅降低 2.8%~3.3%。刘洋等^[28]研究表明作物产量随施氮量增加呈现增加的趋势，但当施氮量增

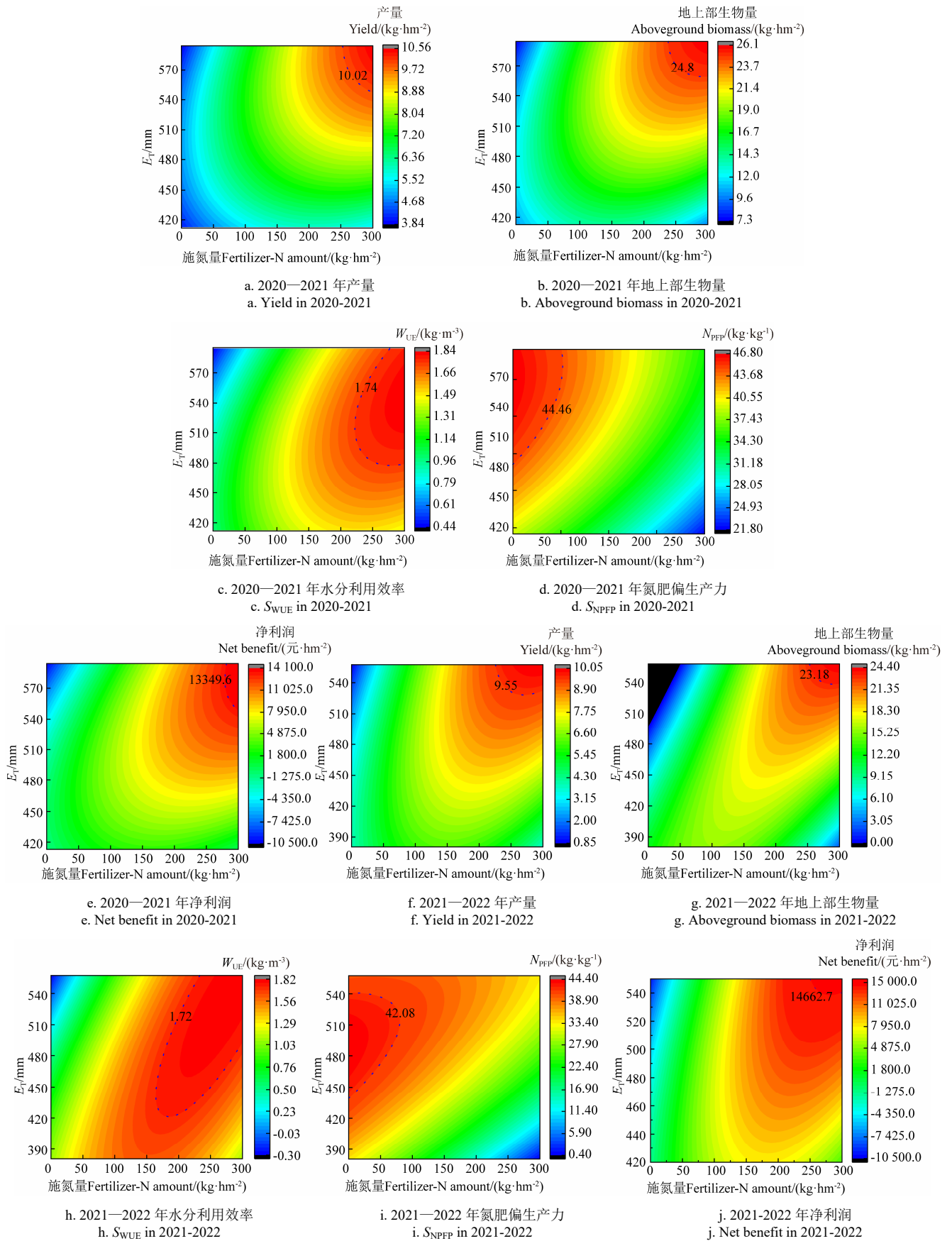


图 3 耗水量与施氮量和冬小麦产量、地上部生物量、水分利用效率、氮肥偏生产力和净收益的关系

Fig.3 Relationships between crop water consumption (E_T) and fertilizer-N application amount with yield, biomass, water use efficiency (S_{WUE}), nitrogen partial factor productivity (S_{NPPF}), and net income of winter wheat

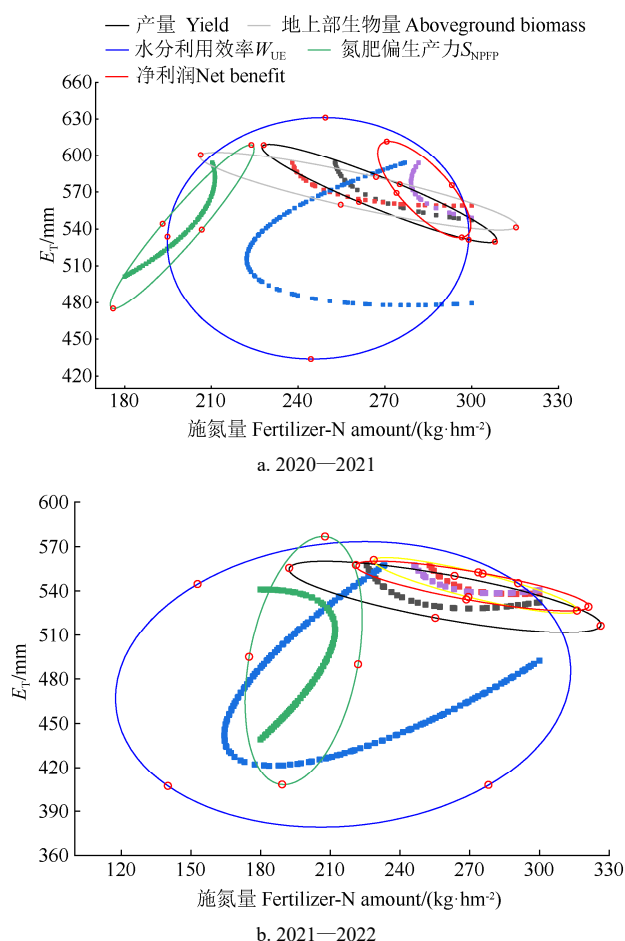


图 4 2020—2021 和 2021—2022 年不同水氮下冬小麦产量、地上部生物量、水分利用效率、氮肥偏生产力和净利润的综合评价

Fig.4 Comprehensive evaluation of yield, biomass, water use efficiency, nitrogen partial factor productivity and net income of winter wheat under crop water consumption and nitrogen fertilizer application amount in 2020—2021 and 2021—2022

加至一定范围时，产量差异并不显著，本研究结果与之类似。在本研究中，两季冬小麦的产量和地上部生物量均在 W1 取得最大值，例如，与 W1 相比，W2 和 W3 地上部生物量平均降低了 6.0% 和 28.5%；从施氮量对产量的影响来看，两季冬小麦的产量和地上部生物量均在 N1 取得最大值，例如，与 N1 相比，N2 和 N3 地上部生物量平均降低了 7.9% 和 25.4%；说明高低畦模式下作物产量和地上部生物量对水分和氮素同样敏感，这与 SI 等^[11]研究结果类似。但是李仙岳等^[29]通过在河套灌区盐渍化农田下水氮耦合试验中发现，灌水的增产作用大于施氮。产生差异的原因主要有：1) 农业生产环境的差异；2) 本试验采用高低畦种植且仅在低畦田进行灌溉，形成的局部灌溉造成作物对水氮需求不同所导致的。

3.3 水氮供应对水分利用效率和氮肥偏生产力的影响

农业水氮管理的目的是最大程度地提高单位水、氮用量下作物的产量，通过制定有效的水氮供给制度来实现是行之有效的。诸多学者研究表明，在一定的水氮供应范围内，作物水分利用效率随水氮供应增加呈现先升

高后降低的趋势^[30-31]。本研究得出类似的结论，以 2021—2022 年为例，相同灌水水平或者施氮水平条件下，随灌水水平（或施氮水平）增加水分利用效率先增加后减小。两季冬小麦均在 W2N2 处理取得最高水分利用效率，分别为 1.88 和 1.93 kg/m³。严富来等^[32]研究发现，氮肥偏生产力随灌水水平的增加呈现先升高后降低趋势，而随施氮水平的增加呈现逐渐降低的趋势，诸多学者得到相似的研究结果^[30,33]。本研究得出不同结论，相同灌水水平条件下，随着施氮水平升高氮肥偏生产力呈现降低的趋势；相同施氮水平条件下，随着灌水水平升高氮肥偏生产力呈现增加的趋势。这可能是由于灌溉方式的不同，造成水氮分布的差异，进而形成作物水氮吸收利用的差异^[5]。两季冬小麦均在 W1N3 处理取得最大氮肥偏生产力，分别为 44.35 和 43.68 kg/kg。但是由于 W1N3 处理产量和水分利用效率较低，不作为推荐。W2N2 处理的产量和 W1N1 最大值处理无显著性差异，水分利用效率处于最高水平，且较 W1N3 的氮肥偏生产力仅低 7.4%~9.9%，可作为生产实践中较为合适的高低畦模式的灌水施氮组合。

3.4 最佳水氮区间的确定

在农业生产实践中，经济效益始终是农业生产者所关注的最终目标。诸多研究表明，作物经济效益与灌水和施肥呈二次关系^[7,12,34]，本研究结果与之不完全类似。本研究中经济效益随着灌水水平（或施氮水平）的增加而增加的趋势，其中 W1 和 W2（N1 和 N2）之间无显著性差异；说明高水高氮投入不一定会显著增加农业生产的投入，相反还会导致水氮资源的浪费，诸多研究得到类似结论^[7-8]。以往许多研究通过多元回归与空间分析结合的方法，建立了水氮投入与产量、水氮利用效率和经济效益的关系^[7,12,16]。有研究表明，过高的水氮供应并不能使各个目标变量均达到最大值，相反还可能会产生负效应。在优化水氮管理制度时，不同降雨年型之间降雨量的差异导致农田水分投入的不同，因此建立耗水量和施氮量与各个目标变量的关系。此外，由于 5 个目标变量的 95% 最大值对应的耗水量和施氮量无重叠区域，以节水高产高效为原则，本研究在优化高低畦模式的水氮管理方案时，不考虑地上部生物量和净利润。考虑产量、水分利用效率和氮肥偏生产力三者的 95% 最大值的可接受区域，当耗水量为 536.3~559.4 mm（灌水定额为 99.2~115.4 mm），施氮量为 246.5~299.4 kg/hm² 时，产量、水分利用效率和氮肥偏生产力可同时达到最大值的 95% 以上。

4 结 论

为探索高低畦冬小麦最佳的水氮管理制度，于 2020—2022 年开展田间试验，结果表明：

1) 水氮互作对高低畦冬小麦耗水量以及耗水结构均存在显著影响。耗水量随灌水/施氮水平的增加而增加；降雨+土壤储水消耗量占总耗水量的份额随着灌水水平的增加呈现降低的趋势，随着施氮水平的增加呈现逐渐增加的趋势；适量的水氮供应有助于优化麦田耗水量及

耗水结构。

2) 高低畦冬小麦地上部生物量和产量随灌水/施氮水平的增加呈现逐渐增加的趋势; 水分利用效率随灌水/施氮水平的增加呈现先增加后减小的趋势; 氮肥偏生产力随着灌水的增加呈现逐渐增加的趋势, 随着施氮水平的增加呈现逐渐降低的趋势; 经济效益随着灌水/施氮水平的增加呈现先增加后减小的趋势。

3) 多元二次回归分析结果表明, 当耗水量为 536.3~559.4 mm (灌水定额为 99.2~115.4 mm), 施氮量为 246.5~299.4 kg/hm², 可以使高低畦冬小麦产量、水分利用效率和经济效益的综合效益最大化。然而, 本研究只设置了不同灌水量和施氮量水平处理, 对于灌水量和氮磷钾的施用比例对作物生长的影响还没有深入研究, 今后的研究需要进一步量化灌水施肥比例, 为高低畦冬小麦提供更为科学合理的灌水施肥制度。

参 考 文 献

- [1] 李正鹏, 宋明丹, 冯浩. 水氮耦合下冬小麦 LAI 与株高的动态特征及其与产量的关系[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 195-202.
LI Zhengpeng, SONG Mingdan, FENG Hao. Dynamic characteristics of leaf area index and plant height of winter wheat influenced by irrigation and nitrogen coupling and their relationships with yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(4): 195-202. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郭贯成, 韩小二. 考虑粮食安全和耕地质量的县域基本农田空间布局优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 252-260.
GUO Guancheng, HAN Xiao'er. Spatial layout optimization of basic farmland considering food security and cultivated land quality at county scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 252-260. (in Chinese with English abstract)
- [3] 谷少委, 高剑民, 邓忠, 等. 畦灌与施肥时机对土壤硝态氮分布和冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 134-142.
GU Shaowei, GAO Jianmin, DENG Zhong, et al. Effects of border irrigation and fertilization timing on soil nitrate nitrogen distribution and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(9): 134-142. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘俊明, 高阳, 司转运, 等. 栽培方式对冬小麦耗水量、产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 210-216.
LIU Junming, GAO Yang, SI Zhuanyun, et al. Effects of cultivation methods on water consumption yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 210-216. (in Chinese with English abstract)
- [5] 司转运. 不同栽培方式对冬小麦生长及水氮利用效率的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
SI Zhuanyun. Effects of Different Cultivation Methods On Growth And Water-Nitrogen Use Efficiency Of Winter Wheat[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈世超, 刘文丰, 杜太生. 基于水氮管理与种植结构优化的作物丰产高效管理策略[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 144-152.
CHEN Shichao, LIU Wenfeng, DU Taisheng. Achieving high-yield and high-efficient management strategy based on optimized irrigation and nitrogen fertilization management and planting structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(16): 144-152. (in Chinese with English abstract)
- [7] LU JS, GENG CM, CUI XL, et al. Response of drip fertigated wheat-maize rotation system on grain yield, water productivity and economic benefits using different water and nitrogen amounts[J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107220.
- [8] YAN FL ZHANG FC, FAN XK, et al. Determining irrigation amount and fertilization rate to simultaneously optimize grain yield, grain nitrogen accumulation and economic benefit of drip-fertigated spring maize in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106440.
- [9] HAMANI AKM, ABUBAKAR SA, SI ZY, et al. Suitable split nitrogen application increases grain yield and photosynthetic capacity in drip-irrigated winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under different water regimes in the North China Plain[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1105006.
- [10] 张经廷, 吕丽华, 张丽华, 等. 作物水肥耦合类型量化方法在华北冬小麦水氮配置中的应用[J]. 中国农业科学, 2019, 52(17): 2997-3007.
ZHANG Jingting, Lü Lihua, ZHANG Lihua, et al. A novel method for quantitating water and fertilizer coupling types and its application in optimizing water and nitrogen combination in winter wheat in the North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(17): 2997-3007. (in Chinese with English abstract)
- [11] SI ZY, ZAIN M, MEHMOOD F, et al. Effects of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 106002.
- [12] ZOU HY, FAN JL, ZHANG FC, et al. Optimization of drip irrigation and fertilization regimes for high grain yield, crop water productivity and economic benefits of spring maize in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 230: 105986.
- [13] WU Y, SI W, YAN SC, et al. Water consumption, soil nitrate-nitrogen residue and fruit yield of drip-irrigated greenhouse tomato under various irrigation levels and fertilization practices[J]. Agricultural Water Management, 2023, 277: 108092.
- [14] HU S Y, QIAO B W, YANG Y H, et al. Optimizing nitrogen rates for synergistically achieving high yield and high nitrogen use efficiency with low environmental risks in wheat production – Evidences from a long-term experiment in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2023,

- 142: 126681.
- [15] 李如楠, 李玉娥, 王斌, 等. 双季稻减排增收的水氮优化管理模式筛选[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 105-113. LI Runan, LI Yu'e, WANG Bin, et al. Pattern selection of water and nitrogen practices to reduce greenhouse gas emission and increase profit in a double rice system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 105-113. (in Chinese with English abstract)
- [16] YAN FL, LIU XQ, BAI WQ, et al. Multi-objective optimization of water and nitrogen regimes for drip-fertigated sugar beet in a desert climate[J]. Field Crops Research, 2022, 288: 108703.
- [17] ZHANG C, DONG ZY, GUO Q, et al. Ridge-furrow rainwater harvesting combined with supplementary irrigation: Water-saving and yield-maintaining mode for winter wheat in a semiarid region based on 8-year in-situ experiment[J]. Agricultural Water Management, 2022, 259: 107239.
- [18] GAO Y, YANG LL, SHEN XJ, et al. Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2014, 146: 1-10.
- [19] FERNÁNDEZ J E, ALCON F, DIAZ-ESPEJO A, et al. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard[J]. Agricultural Water Management, 2020, 237: 106074.
- [20] JIA DY, DAI XL, XIE YL, et al. Alternate furrow irrigation improves grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106606.
- [21] DU XB, HE WC, GAO SQ, et al. Raised bed planting increases economic efficiency and energy use efficiency while reducing the environmental footprint for wheat after rice production[J]. Energy, 2022, 245: 123256.
- [22] ZHANG XD, KAMRAN M, XUE XK, et al. Ridge-furrow mulching system drives the efficient utilization of key production resources and the improvement of maize productivity in the Loess Plateau of China[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 190: 10-21.
- [23] LAI ZL, FAN JL, YANG R, et al. Interactive effects of plant density and nitrogen rate on grain yield, economic benefit, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-fertigated maize in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 263: 107453.
- [24] ZHONG YQW, ZHOUPING SG. Water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat under long-term nitrogen fertilization regimes in Northwest China[J]. Plos One, 2014, 9(6): e98850.
- [25] 翟中民, 史文娟, 张艳超, 等. 水氮盐调控对膜下滴灌棉花产量的影响及耦合模型[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(7): 721-728. ZHAI Zhongmin, SHI Wenjuan, ZHANG Yanchao, et al. Effects of water, nitrogen and salt regulation on cotton yield under mulch film drip irrigation and its coupled model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(7): 721-728. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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[J]. 中国农业科学, 2019, 52(3): 428-444. WEI Tingbang, CHAI Qiang, WANG Weimin, 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[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(3): 428-444. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张宇杰, 王志强, 马鹏, 等. 麦秆还田下水氮耦合对水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(4): 388-398. ZHANG Yujie, WANG Zhiqiang, MA Peng, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake, utilization and yield of rice under wheat straw returning[J]. Chinese Journal OF Rice Science, 2022, 36(4): 388-398.. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘洋, 栗岩峰, 李久生. 东北黑土区膜下滴灌施氮管理对玉米生长和产量的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 529-536. LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng. Effects of nitrogen management on the growth and yield of mulched and drip-irrigated maize in Northeast Black Soil Regions[J]. Journal of Hydrology Engineering, 2014, 45(5): 529-536. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李仙岳, 丁宗江, 闫建文, 等. 沙区降解膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 261-270. LI Xian Yue, DING Zongjiang, YAN Jianwen, et al. Interaction effect and model of water and nitrogen under degradable film mulching in drip irrigated sandy farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 261-270. (in Chinese with English abstract)
- [30] 丛鑫, 张立志, 徐征和, 等. 水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 315-324. CONG Xin, ZHANG Lizhi, XU Zhenghe, et al. Effects of Irrigation and nitrogen interaction on water and fertilizer use efficiency and economic benefits of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 315-324. (in Chinese with English abstract)
- [31] YAO H, ZHANG Y, YI X, et al. Plant density alters nitrogen partitioning among photosynthetic components, leaf photosynthetic capacity and photosynthetic nitrogen use efficiency in field-grown cotton[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 39-49.
- [32] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 基于空间分析的宁夏沙土春玉米滴灌水氮管理模式研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 219-228. YAN Fulai, ZHANG Fucang, FAN Xingke, et al. Optimal irrigation and nitrogen management model under drip fertigation system based on spatial analysis of spring maize in sandy soil area in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese

- Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 219-228. (in Chinese with English abstract)
- [33] ZHANG X, KAMRAN M, LI F, et al. Optimizing fertilization under ridge-furrow rainfall harvesting system to improve foxtail millet yield and water use in a semiarid region, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 227: 105852.
- [34] 杨慧, 曹红霞, 李红峥, 等. 基于空间分析法研究温室番茄优质高产的水氮模式[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(5): 896-905.
- YANG Hui, CAO Hongxia, LI Hongzheng, et al. An investigation on optimal irrigation and nitrogen rates of greenhouse tomato based on spatial analysis for high yield and quality[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(5): 896-905. (in Chinese with English abstract)

Effects of water and nitrogen coupling on winter wheat yield and water or nitrogen use efficiency under high-low seedbed cultivation pattern

LIU Junming^{1,2}, SI Zhuanyun¹, WU Lifeng³, LI Shuang⁴, SUN Yiming³, WANG Ning³, GAO Yang^{1*}, DUAN Aiwan¹

(1. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Binzhou Academy of Agricultural Sciences, Binzhou 256600, China; 4. Shandong Academy of Agricultural Machinery Science, Jinan 250000, China)

Abstract: High and low seedbed cultivation has been widely used to combine ridge and flat planning patterns during wheat production in Shandong Province of the North China Plain (NCP). Land utilization rate and crop productivity can be better improved with the higher efficiency of water-nitrogen use for sustainable production, compared with flat cultivation. The winter wheat is planted on both alternate high and low beds on the flat land under cultivation. However, it is still lacking on the underlying mechanism of this cultivation pattern for better improvement and popularization. This study aims to clarify the effects of different water and nitrogen rate on grain yield, water consumption, aboveground biomass, water use efficiency, nitrogen partial fertilizer productivity, and net benefits. A field experiment was also carried out during the 2020-2021 and 2021-2022 growing seasons using a split zone design. The main area was divided into three levels of nitrogen rates (N1: 300, N2: 240, and N3: 180 kg/hm²). The subplot was set as the three levels of irrigation quotas (W1: 120, W2: 90, and W3: 60 mm). The flat cultivation with 120 mm irrigation amount and 300 kg/hm² nitrogen amount was set as the control (CK) group. A systematic evaluation was implemented to determine the effects of water and nitrogen management on crop productivity, as well as water and nitrogen use efficiency under high and low seedbed cultivation. The results showed that the high and low seedbed cultivation significantly improved the crop grain yield by 14.8%-17.6%, water use efficiency by 15.9%-16.9%, nitrogen partial fertilizer productivity by 14.8%-17.6%, and net benefits by 23.9%-32.7%, compared with the flat cultivation. Consequently, high and low seedbed cultivation was a reliable agronomic practice for higher water or nitrogen use efficiencies and crop productivity, although there was no significant difference in the water consumption between high and low seedbed cultivation and flat cultivation. The coupling of water and nitrogen posed significant effects on water consumption, grain yield, aboveground biomass, water use efficiency, nitrogen partial fertilizer productivity, and net benefits ($P < 0.01$). Specifically, the W2F2 decreased the crop yield by 2.8%-3.3% ($P > 0.05$), whereas, the water use efficiency increased ($P < 0.05$), compared with the W1F1. The optimal water and nitrogen rate was obtained in the higher water use efficiency, nitrogen partial fertilizer productivity, and net profits. The regression and spatial analysis demonstrated that the grain yield, water use efficiency, and net profits reached 95%-100% of the maximum simultaneously, when the water consumption was 536.3-594.3 mm, and the nitrogen application was 246.5-299.4 kg/hm² in 2020-2021, while the water consumption was 527.2-559.4 mm, and the nitrogen application was 221.0-303.1 kg/hm² in 2021-2022. An optimal combination was achieved in the water consumption of 536.3-559.4 mm (irrigation quota of 99.2-115.4 mm), and the nitrogen application of 246.5-299.4 kg/hm², in order to maximize the grain yield, water use efficiency, and net profits. Therefore, a reasonable technical and theoretical reference can be offered for the multi-objective management of the water and nitrogen of winter wheat under high and low seedbed cultivation in areas with similar climate conditions to the NCP. Further study can be focused on the management of water and fertilizer (nitrogen, phosphorus, and potassium) rate of winter wheat under high and low seedbed cultivation with the various varieties and the soil type.

Keywords: irrigation; nitrogen; winter wheat; high-low seedbed cultivation; yield; water use efficiency; net profits