

# 减氮节水对引黄灌区春小麦耗水特征 及水分利用效率的影响

马永鑫<sup>1,2</sup>, 谭军利<sup>1,3</sup>, 韦广源<sup>1</sup>, 王月梅<sup>4</sup>, 田海梅<sup>4</sup>, 王西娜<sup>4</sup>

(1.宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021; 2.海原县水务局,宁夏 中卫 755000;  
3.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心,宁夏 银川 750021; 4.宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021)

**摘要:**以‘宁春4号’春小麦为供试材料,于2021—2022年开展田间试验,采用二因素裂区设计,主区为灌溉定额包括常规灌溉(400 mm, WC)、节水20%灌溉(320 mm, W1)和节水40%灌溉(240 mm, W2),副区为施氮水平包括常规施氮(270 kg·hm<sup>-2</sup>, NC)、减施氮肥25%(202.5 kg·hm<sup>-2</sup>, NJ)和不施氮(N0),灌溉方式为微喷灌,研究减氮节水对土壤水分动态分布、春小麦产量及水分利用效率的影响。结果表明:NJW1处理促进了春小麦吸收20~40 cm土层的水分,土壤含水率变化多发生在60 cm以上土层,减少了水分下移。2 a试验中均以NJW1处理的春小麦籽粒产量最高,分别为8 092 kg·hm<sup>-2</sup>和5 516 kg·hm<sup>-2</sup>,较常规施氮常规灌溉处理分别提高7.01%和13.36%,并显著提高了春小麦穗粒数和千粒质量。在相同施氮量条件下,灌溉定额处理之间总耗水量存在显著差异,且随灌溉定额增加呈增加趋势,2 a试验中,NJW1处理春小麦全生育期耗水量较相同施氮下常规灌溉处理分别减少14.07%和18.37%。减施氮肥下W1处理2 a的春小麦水分利用效率分别可达1.62 kg·m<sup>-3</sup>和1.43 kg·m<sup>-3</sup>,较减施氮肥常规灌溉处理分别提高21.80%和31.19%。综上所述,在两种水文年型春小麦生育期间降雨量分别为67.5 mm(干旱年份)和34.5 mm(极端干旱年份),在减氮25%节水20%的水氮管理模式,春小麦可达到高产和水分利用效率高效的目标,可在宁夏引黄灌区进行推广。

**关键词:**春小麦;减施氮肥;产量;水分利用效率;宁夏引黄灌区

中图分类号:S512.12 文献标志码:A

## Effects of nitrogen reduction and water saving on water consumption characteristics and water use efficiency of spring wheat in Ningxia Yellow River irrigation area

MA Yongxin<sup>1,2</sup>, TAN Junli<sup>1,3</sup>, WEI Guangyuan<sup>1</sup>, WANG Yuemei<sup>4</sup>, TIAN Haimei<sup>4</sup>, WANG Xina<sup>4</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Haiyuan County

Water Bureau, Zhongwei, Ningxia 755000, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

4. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** A two-factor split-plot field experiment with three replications was conducted in 2021 and 2022 with Ningchun 4 as the test material. The primary treatments involved different irrigation quotas: conventional irrigation (WC) with 400 mm, W1 with a 20% water saving (320 mm), and W2 with a 40% water saving (240 mm). Secondary treatments included nitrogen application rates: NC (270 kg·hm<sup>-2</sup>), NJ (a 25% reduction in nitrogen fertilizer, 202.5 kg·hm<sup>-2</sup>), and N0 (no nitrogen application). The study aimed to investigate the effects of reduced nitrogen application and water-saving practices on soil water distribution, crop yield, and water use efficiency in spring wheat. The findings are intended to provide a theoretical basis for efficient water use under reduced nitrogen

收稿日期:2024-03-04

修回日期:2024-05-09

基金项目:宁夏回族自治区自然科学基金项目(2022AAC02013);国家自然科学基金项目(52369010);国家重点研发计划项目(2018YFD0200405);宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)项目(NXYLXK2021A03)

作者简介:马永鑫(1997-),男,宁夏吴忠人,助理工程师,主要从事水资源高效利用研究。E-mail:2419665187@qq.com

通信作者:谭军利(1979-),男,湖南茶陵人,教授,主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail:tanjli@nxu.edu.cn

fertilizer in the Ningxia Yellow River irrigation area. The results indicated that reducing nitrogen by 25% and saving 20% of water increased water uptake by spring wheat in the 20~40 cm soil layer. Most changes in soil water content occurred above 60 cm, which limited the downward movement of water. At the same time, the highest yield of spring wheat was achieved with the treatment 25% N reduction and 20% water saving, 8 092 kg · hm<sup>-2</sup> and 5 516 kg · hm<sup>-2</sup> in 2021 and 2022, increasing by 7.01% and 13.36% as compared with the conventional irrigation quota and N application. Meanwhile, the number of grains on the spike and the thousand grain quality of spring wheat were significantly raised with the treatment 25% N reduction and 20% water saving. Under the same N application, the total water consumption was significantly different between irrigation quota treatments and tended to increase with the increase of irrigation quota, and the water consumption of spring wheat under 25% N reduction and 20% water saving treatment decreased by 14.07% and 18.37% compared with that of conventional irrigation, respectively in 2021 and 2022. The water use efficiency of spring wheat with 20% water saving under N reduction were up to 1.62 kg · m<sup>-3</sup> and 1.43 kg · m<sup>-3</sup>, which were 21.80% and 31.19% higher than that of the conventional irrigation treatment. In conclusion, during a dry or extremely dry year with only 67.5 mm or 34.5 mm of rainfall during the spring wheat growth period, a 25% reduction in nitrogen (202.5 kg · hm<sup>-2</sup>) and a 20% reduction in water usage (320 mm) represent an optimal irrigation and nitrogen management strategy. This approach ensures high yield and efficient water use for spring wheat in the Yellow River irrigation area.

**Keywords:** spring wheat; reduction in nitrogen application; yield; water utilization efficiency; Ningxia Yellow River irrigation area

引黄灌区是宁夏春小麦主产区,农田水肥管理方式以大水漫灌和撒施肥料为主。过量施氮以及不合理的灌溉不仅造成水氮资源严重浪费,而且对当地的生态环境造成威胁<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着减肥减药等科技行动及相关政策的实施<sup>[4]</sup>,春小麦施肥水平尤其是施氮量有减少趋势;而灌水方式仍然采用大水漫灌方式,水分利用效率低,加剧了水资源短缺的矛盾<sup>[5]</sup>。如何在减氮条件下合理利用水资源,对提高春小麦产量和水分利用效率及引黄灌区粮食绿色高效生产具有重要意义。

目前,关于施氮量和灌溉量对小麦产量以及水氮利用效率的影响得到关注。合理的灌溉量和施氮量可显著提高小麦产量和水氮利用效率,二者在一定范围内对产量有明显正效应,超出适宜范围产量增加不显著甚至降低<sup>[6-9]</sup>。传统施肥灌溉方式的节水节肥潜力有限,有一部分学者采用水肥一体化技术,利用微喷灌的灌溉方式提高小麦光合速率和叶绿素含量,进而实现增产和水分高效利用<sup>[10-11]</sup>。与漫灌相比,微喷灌可改善小麦水分的供应量,有效减少灌溉量,当灌溉量减少 12.9%~41.5%时,小麦产量和水分利用效率可分别提高 11.3%~30.0%和 3.1%~56.0%<sup>[12-13]</sup>。微喷水肥一体化可将水肥集中供给根系主要分布区域,减少灌溉量的同时可促进根系下扎,提高小麦对深层土壤水肥的吸收和利用<sup>[14]</sup>。但关于在减氮背景下微喷灌灌溉定额对土壤水分动态变化、小麦耗水特性和水分利用效率

影响的研究较少。因此,本文通过田间试验,采用微喷带水肥一体化技术,研究减氮条件下灌溉定额对土壤水分动态分布、春小麦耗水特性、产量及水分利用效率的影响,以期对宁夏引黄灌区春小麦绿色高效生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地点位于宁夏中部黄河冲积平原永宁县望洪镇宁夏大学试验农场(106°24'E,38°24'N),该地区年均气温 8.5℃,年降水量 180~200 mm,无霜期 140~160 d,属于温带干旱气候,供试土壤类型为灌淤土。耕层(0~20 cm)土壤容重 1.18 g · cm<sup>-3</sup>,有机质 16.30 g · kg<sup>-1</sup>,全氮 0.59 g · kg<sup>-1</sup>,矿质态氮 32.01 mg · kg<sup>-1</sup>,全磷 0.57 g · kg<sup>-1</sup>,速效磷 24.69 mg · kg<sup>-1</sup>,速效钾 143.01 mg · kg<sup>-1</sup>,pH 为 7.83。春小麦于 2021 年 3 月 5 日播种、7 月 15 日收获,2022 年 3 月 6 日播种、7 月 10 日收获。2021—2022 年月降水量、月平均气温和月平均湿度如图 1 所示,2021 年和 2022 年小麦全生育期降雨量分别为 67.5 mm 和 34.5 mm,均为干旱年。

### 1.2 试验设计

本试验采用二因素裂区设计,主区为灌溉定额,副区为施氮量,主区设置常规灌溉(400 mm, WC)、节水 20%(320 mm, W1)、节水 40%(240 mm, W2);施氮处理设置常规施氮(270 kg · hm<sup>-2</sup>, NC)、

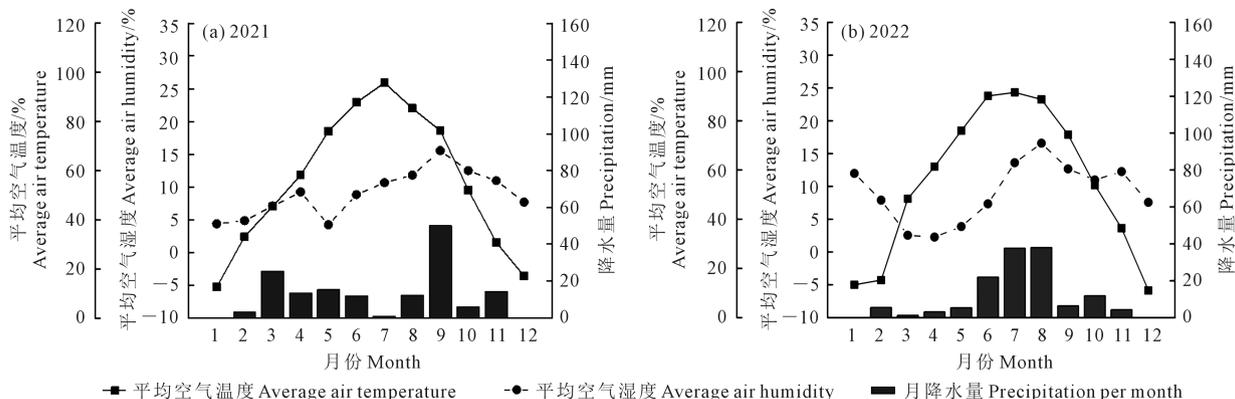


图 1 2021—2022 年永宁县月降水量、月平均气温和月平均湿度

Fig.1 Monthly precipitation, average temperature and average humidity at Yongning County in 2021 and 2022

减量施氮 25% (202.5 kg · hm<sup>-2</sup>, NJ) 和不施氮 (0 kg · hm<sup>-2</sup>, N0), 共 9 个处理 (表 1), 各处理设 3 次重复, 共设 27 个小区, 小区长 24 m、宽 3 m, 面积 72 m<sup>2</sup>。为避免水肥侧向运移, 在各主区之间埋深至 1 m 的塑料棚膜, 并起 0.4 m 宽、0.3 m 高的畦埂; 副区之间起 0.4 m 宽、0.2 m 高的畦埂。

供试品种为‘宁春 4 号’, 15 cm 等行距播种, 播种量为 337.5 kg · hm<sup>-2</sup>。水源为地下水, 灌溉方式为微喷带喷灌, 每个主区设置一个首部, 首部由旋翼式水表、13 L 压差式施肥罐、过滤器和球阀组成。微喷带平行于小麦种植方向布置, 放置于小区中间, 分别距小区畦埂 1.5 m 处。喷灌带规格为管径 32 mm、并列斜 7 孔、孔径 0.8 mm、喷射角度 80°。2021 年分别于 4 月 20 日、5 月 6 日、5 月 21 日、6 月 3 日、6 月 18 日等量灌水 5 次; 2022 年分别于 4 月 15 日、4 月 28 日、5 月 17 日、6 月 1 日、6 月 17 日进行等量灌水。灌水时间根据当地春小麦生产实际的灌水时间确定, 传统灌水定额根据当地地面灌溉灌水定额确定, 每次 80 mm, 节水 20% 和 40% 是以此灌水定额为标准相应减少灌水定额。2021 年因为疫情防控原因没有进行冬灌, 因此, 2022 年试验在没有进行冬灌的条件下开展。试验地全生育期统一按分配比例施入氮肥 (尿素), 氮肥 40% 播种前基施, 60% 追施 (追施加的氮肥按 40%、20%、20%、10%、10% 比例施入), 各处理磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg · hm<sup>-2</sup>) 和钾肥 (K<sub>2</sub>O 45 kg · hm<sup>-2</sup>) 施用量相同, 磷肥 (重过磷酸钙、磷酸二氢钾) 和钾肥 (磷酸二氢钾) 总量的 60% 在播前基施、40% 追施, 基施肥采用人工撒施方式, 追施肥料按分配比例实施微喷带水肥一体化随水一同施入, 其他管理措施与当地生产习惯一致。

表 1 田间试验设计

Table 1 Field experiment design

处理 Treatment		施氮量 Nitrogen application /(kg · hm <sup>-2</sup> )	灌水定额 Irrigation quota on each application/mm	灌溉定额 Irrigation quota /mm
施氮 N	灌溉 W			
NC	WC	270	80	400
	W1	270	64	320
	W2	270	48	240
NJ	WC	202.5	80	400
	W1	202.5	64	320
	W2	202.5	48	240
N0	WC	0	80	400
	W1	0	64	320
	W2	0	48	240

### 1.3 测定项目与计算方法

1.3.1 产量 每个小区实打实收, 称取籽粒重量, 取部分籽粒烘干测其含水量, 最后折算成单位面积籽粒产量。

1.3.2 土壤水分监测及作物耗水与水分利用效率

(1) 土壤水分: 每次灌溉前后利用 TDR 土壤水分测定系统测定 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层体积含水率。

(2) 农田耗水量: 利用实测的土壤含水量来计算, 作物耗水量用水量平衡法计算。

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P + K \quad (1)$$

式中,  $ET_{1-2}$  为阶段耗水量 (mm);  $i$  为土壤层次号数;  $n$  为土壤层次总数;  $\gamma$  为第  $i$  层土壤干密度 ( $g \cdot cm^{-3}$ );  $H_i$  为第  $i$  层土壤的厚度 (cm);  $W_{i1}$  和  $W_{i2}$  分别为第  $i$  层土壤在时段初、时段末的含水率 ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ );  $M$  为时段内的灌水量 (mm);  $P$  为时段内的降

水量(mm); $K$ 为时段内的地下水补给量(mm),试验地的地下水埋深大于2.5 m,因此地下水补给量视为0。

(3)水分利用效率和灌溉水利用效率分别采用式(2)、(3)计算。

$$\text{水分利用效率}(WUE, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = Y/ET \quad (2)$$

$$\text{灌溉水利用效率}(IWUE, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = Y/i \quad (3)$$

式中, $Y$ 为春小麦籽粒产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ); $ET$ 为春小麦生育期耗水量( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ); $i$ 为生育期灌溉定额( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

#### 1.4 数据处理

采用Excel 2013和SPSS 22.0软件对数据进行统计分析,并用Origin 2018进行作图。采用SPSS 22.0软件进行数据方差分析及多重比较(LSD法),表中数据均为3个重复的平均值 $\pm$ 标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 减氮节水对土壤含水率动态分布的影响

由图2可知,土壤含水率随生育期的推进整体呈递减趋势,生育后期土壤体积含水率低于生育前期。这主要是因为后期气温较高,降雨较少,并且处于小麦需水的高峰期。灌溉定额处理之间存在比较明显的差异,相同土层的土壤体积含水率大体趋势表现为 $WC > W1 > W2$ ,各深度土壤含水率与灌溉定额之间呈正相关关系。

0~20 cm土层土壤体积含水率变化情况如图2a所示。表层土壤体积含水率变化较大,波动幅度明显。生育期内土壤含水率5次峰值均出现在灌水后。不同施氮水平下表层土壤体积含水率动态变化趋势基本一致,常规施氮水平下灌溉定额处理的土壤体积含水率变化范围为15.92%~30.44%、减氮处理的为13.85%~29.14%、不施氮处理的为17.43%~31.16%。5月24日—6月2日期间,土壤体积含水率急剧下降,由于该时期气温持续升高,作物蒸发蒸腾增大;6月2日后,灌溉增加了土壤体积含水率,有利于小麦灌浆的进行。

与0~20 cm土层相比,20~40 cm土层土壤体积含水率变动幅度比较平缓(图2b)。灌溉后常规施氮水平土壤体积含水率变化范围为20.25%~31.08%、减氮处理的土壤体积含水率变化范围为21.24%~28.85%、不施氮处理的变化范围为22.40%~31.46%。春小麦生育前期施氮处理的土壤体积含水率低于不施氮处理,施氮处理促进了小麦营养生长,增加了20~40 cm土层水分的消耗,尤其减氮处理的土壤体积含水率最低。收获时,减施氮肥处理

下W1和W2的土壤体积含水率最低,分别为22.07%和22.00%。表明减施氮下节水处理促进了春小麦对土壤水分的利用。

40~60 cm土层土壤体积含水率变化情况如图2c所示,与常规施氮和不施氮相比,减氮处理降低了土壤体积含水率;在相同施氮量下,常规灌溉定额WC处理的土壤体积含水率高于节水20%和节水40%处理。60~80 cm和80~100 cm土层土壤体积含水率动态变化分别如图2d、e所示。土壤体积含水率明显降低,相同施氮量下土壤体积含水率仍表现为 $WC > W1 > W2$ 。表明增加灌溉定额促进了土壤水分向下层运移,而减氮节水处理促进了春小麦生长,增加了土壤水分的消耗,从而降低了土壤水分向下层土壤的运移量。

由于2022年没有进行冬灌,0~20 cm和20~40 cm土层土壤体积含水率明显低于2021年,而且整个生育期土壤体积含水率的最高值也明显低于2021年(图3)。0~40 cm土层土壤体积含水率随着灌水而发生明显波动,40 cm以下土层土壤体积含水率变化幅度较小,但均随着春小麦生育期的推进呈下降趋势,说明在春小麦生育后期吸收了深层土壤的水分。0~40 cm土层土壤体积含水率随着灌水定额增加而增加。从施氮水平来看,不施氮处理的土壤体积含水率高于常规施氮和减氮处理,这是因为不施氮处理小麦长势较差,消耗的水分减少。

### 2.2 减氮节水对春小麦耗水特性的影响

#### 2.2.1 水氮处理对春小麦生育期耗水量的影响

由表2可知,除2022年灌溉定额对成熟期耗水量无显著影响外,施氮量和灌溉定额对春小麦生育期各阶段耗水量和总耗水量均有极显著影响( $P < 0.01$ );2021年抽穗期和2022年成熟期,灌溉定额与施氮量之间的交互作用对春小麦耗水量有显著影响( $P < 0.05$ ),其余时期灌溉定额与施氮量交互作用对春小麦耗水量无显著影响,且对两年春小麦总耗水量亦无显著影响。

在相同施氮量下,除2022年成熟期外,春小麦各生育期耗水量随灌溉定额减少而降低。从播种到分蘖期,常规施氮和减施氮下WC处理的耗水量均显著高于W1和W2处理;2021年不施氮下灌溉定额处理之间耗水量无显著差异,但2022年不施氮下WC和W1处理的耗水量显著高于W2处理。在拔节期和抽穗期,常规施氮和减氮下,2021年WC和W1处理的耗水量均显著高于W2处理,2022年WC处理显著高于W1和W2处理。在灌浆期,2021年常规施氮和减施氮肥下WC处理的耗水量较W1、

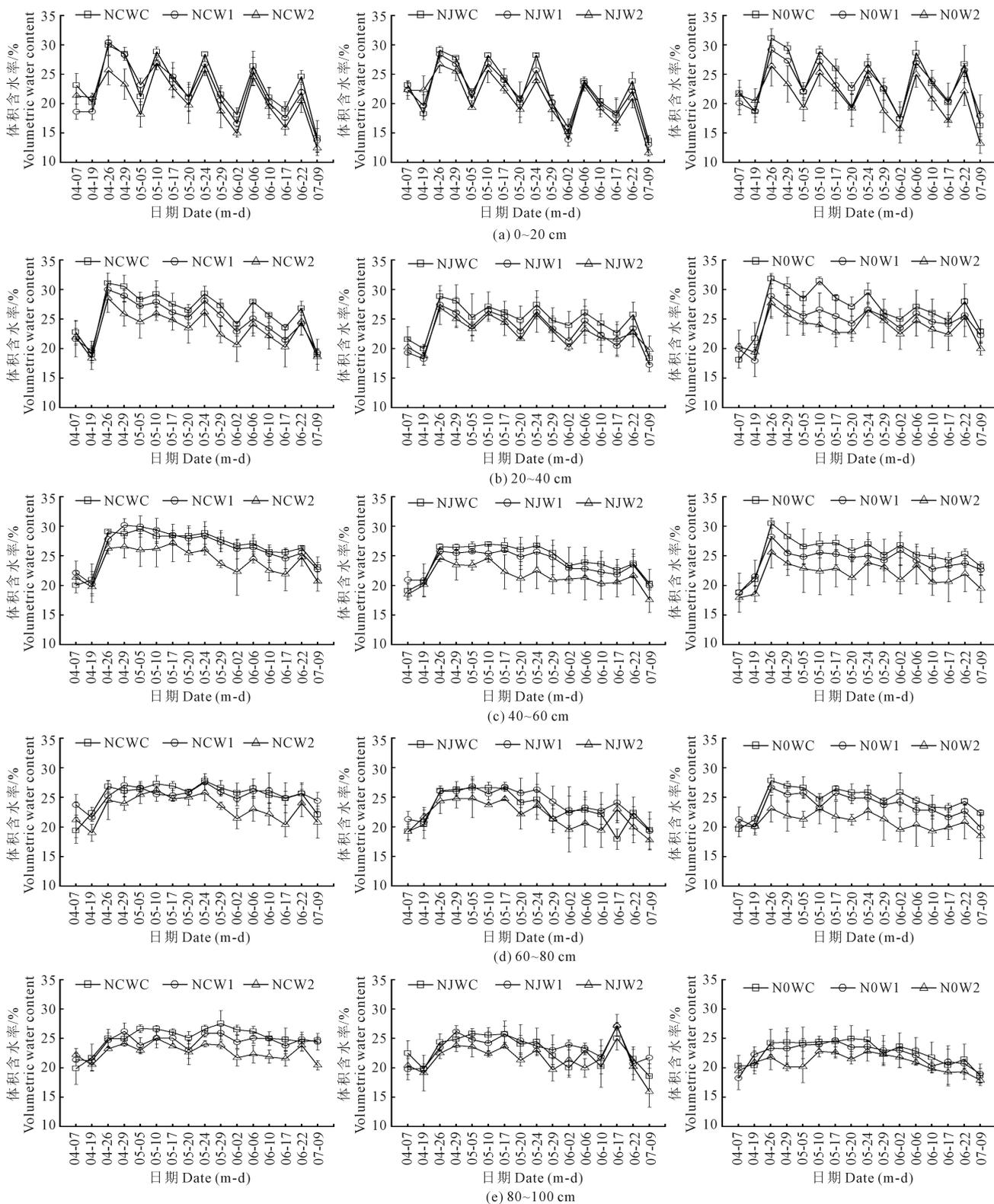


图 2 水氮处理对 2021 年春小麦生育期内土壤水分变化的影响

Fig.2 Effects of different water and nitrogen treatments on dynamic changes in soil moisture during the growth period of spring wheat in 2021

W2 处理分别显著增加 17.21%、37.16% 和 31.18%、72.41%；2022 年 WC 和 W1 处理的耗水量显著高于 W2 处理。在春小麦成熟期，常规施氮下 WC 处理的耗水量显著高于 W1 和 W2 处理。减施氮肥下

WC 处理的耗水量显著高于 W2 处理，但与 W1 处理无显著差异；2022 年常规施氮和减施氮肥下，灌溉定额处理之间无显著差异。

从春小麦全生育期耗水量来看，常规施氮和减

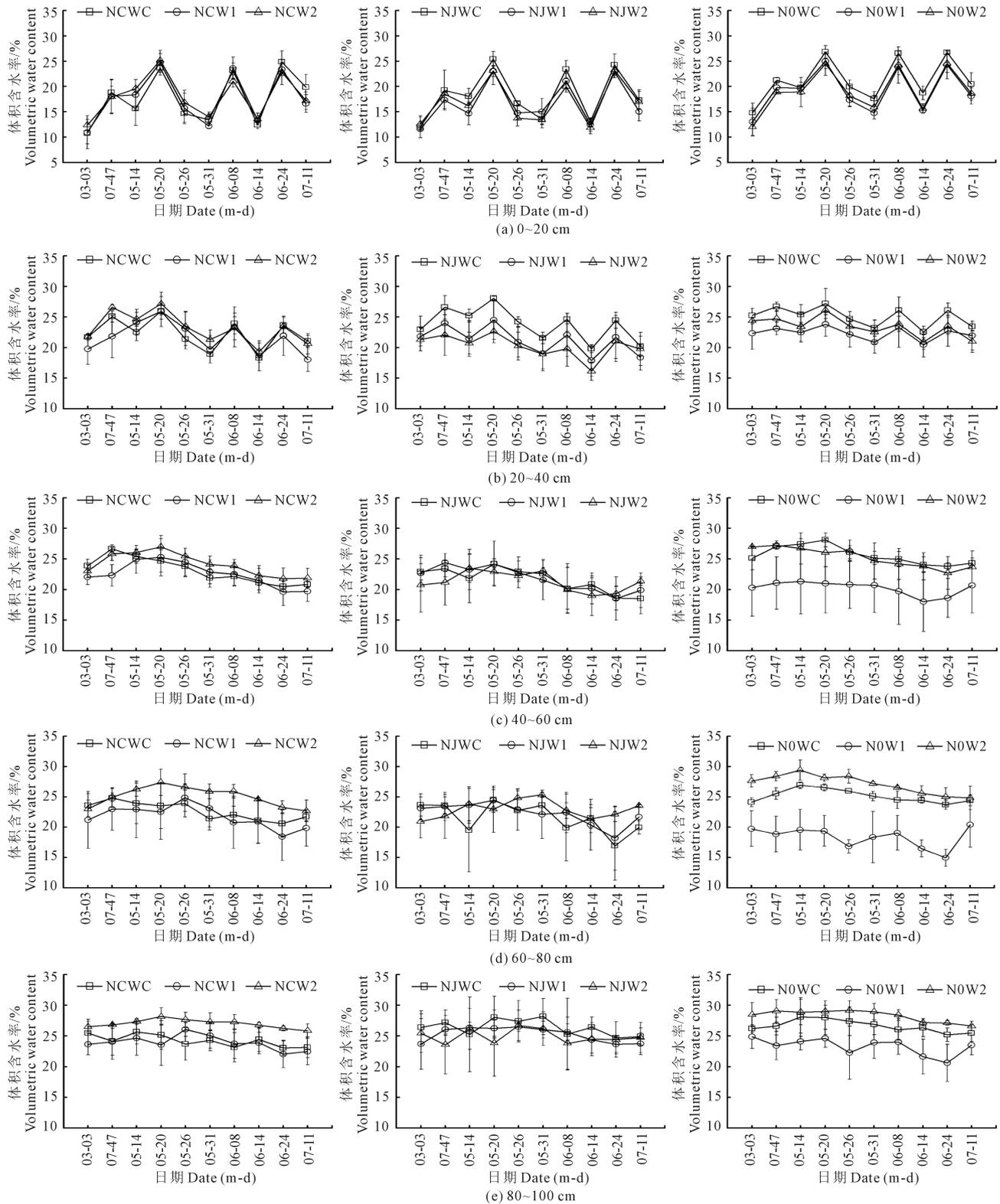


图 3 水氮处理对 2022 年春小麦生育期内土壤水分变化的影响

Fig.3 Effects of water and nitrogen treatments on dynamic changes in soil moisture during the growth period of spring wheat in 2022

施氮肥下,2021 年 W1 处理的耗水量较 WC 处理分别降低 12.97%和 14.07%,2022 年分别下降 16.50%和 18.37%。WC 和 W1 下,减氮处理的耗水量均显著高于常规施氮和不施氮处理,2021 年耗水量分别

增加了 25.25 mm、26.06 mm 和 15.59 mm、20.93 mm;2022 年耗水量分别增加了 19.71 mm、23.34 mm 和 7.60 mm、20.38 mm。这说明相同灌溉定额下,减施 25%的氮肥增加了春小麦的耗水量。

表 2 2021—2022 年不同水氮处理对春小麦各生育期耗水量的影响

Table 2 Effects of different water and nitrogen treatments on water consumption of spring wheat at various growth stages in 2021 and 2022

年份 Year	施氮量 Nitrogen	灌溉定额 Irrigation quota	分蘖期 Tiller /mm	拔节期 Tapering /mm	抽穗期 Tasseling /mm	灌浆期 Grouting /mm	成熟期 Maturity /mm	全生育期 Whole stage /mm
2021	NC	WC	143.12±4.58aB	111.70±9.38aA	91.97±6.05aB	98.63±2.25aAB	110.18±13.8aA	555.64±12.33aB
		W1	129.70±0.92bB	100.96±10.63aA	84.63±9.32aB	84.15±9.86bA	84.11±10.70bB	483.56±6.05bB
		W2	128.02±6.45bB	71.31±8.11bA	78.93±5.81bA	71.91±6.49bA	62.42±11.19bB	412.59±18.86cA
	NJ	WC	156.96±4.11aA	113.66±10.41aA	106.88±5.46aA	80.74±10.69aB	122.79±13.27aB	580.89±14.19aA
		W1	145.46±2.79bA	93.71±11.91abA	93.64±7.12aA	61.55±7.59bB	104.79±10.52abA	499.15±6.57bA
		W2	139.99±6.15bA	88.32±14.00bA	63.91±8.18bB	46.83±4.95bB	84.13±12.87bA	423.18±4.24cA
	N0	WC	151.58±9.42aAB	104.71±9.97aA	95.81±7.06aAB	103.51±5.52aA	99.22±9.32aAB	554.83±9.63aB
		W1	147.08±1.40aA	96.30±8.73aA	69.85±7.06bAB	82.98±7.43bA	82.01±15.24abB	478.22±9.79bB
		W2	145.97±12.63aA	73.97±8.12bA	66.18±12.47bB	62.27±10.83cA	68.70±8.32bB	417.10±8.84cA
	N		*	*	*	*	*	*
	W		*	*	*	*	*	*
	W×N		ns	ns	*	ns	ns	ns
2022	NC	WC	50.19±11.31aA	101.53±4.85aA	162.65±5.49aA	101.43±9.26aB	38.65±6.57aA	454.44±11.31aB
		W1	39.72±8.04aA	63.35±6.63bB	135.97±5.704bA	102.03±3.32aA	45.09±15.39aA	379.48±16.0bA
		W2	14.61±8.49bB	50.17±14.57bA	107.56±9.11cA	74.08±7.06bA	47.12±3.45aA	293.55±7.40cB
	NJ	WC	54.70±5.53aA	111.15±25.08aA	156.75±5.41aB	108.18±21.84aA	43.37±13.58aA	474.15±23.67aA
		W1	38.11±13.36bA	84.14±8.94abA	128.84±2.10abB	97.02±9.21aA	38.96±11.67aA	387.08±15.76bA
		W2	37.40±10.80bA	46.13±12.77bA	111.49±20.84bA	55.95±5.89bB	33.22±4.69aB	284.20±9.21cB
	N0	WC	55.85±9.19aA	85.00±11.24aA	164.46±4.66aA	103.22±6.64aAB	42.27±7.99aA	450.81±9.87aB
		W1	53.76±24.38aA	68.36±7.58abAB	126.65±5.99bB	102.38±17.24aA	15.55±5.85bA	366.70±12.0bB
		W2	30.62±5.19bAB	56.77±7.45bA	101.59±12.39cB	75.40±10.49bA	44.11±2.10aA	308.79±19.50cA
	N		*	*	*	*	*	*
	W		*	*	*	*	ns	*
	W×N		ns	ns	ns	ns	*	ns

注:不同小写字母表示相同生育期同一施肥水平下不同灌溉定额处理间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示相同生育期同一灌溉水平下不同施肥处理间差异显著;\*和\*\*分别代表影响显著( $P<0.05$ )和影响极显著( $P<0.01$ ),ns代表未达到显著水平( $P>0.05$ )。N为施氮量;W为灌溉定额。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different irrigation quota treatments at the same fertilization level at same growing stage ( $P<0.05$ ); Different capital letters indicate significant differences among different fertilization treatments at the same irrigation level at same growing stage. \* and \*\* indicate significant effect ( $P<0.05$ ) and extremely significant effect ( $P<0.01$ ), respectively, and ns indicates insignificant effect ( $P>0.05$ ). N is the nitrogen application rate; W is the irrigation quota. The same below.

2.2.2 水氮处理对春小麦生育期耗水强度的影响 小麦耗水强度可表征小麦群体在单位时间内的耗水量。春小麦各阶段耗水强度和耗水量的规律基本一致,相同施氮量下,春小麦耗水强度随灌溉定额减少呈降低趋势,不同灌溉定额处理之间亦有显著差异(表3),且随生育期的推进,春小麦的耗水强度呈先增加后降低的趋势。2021年拔节期到抽穗期是春小麦耗水强度最大时期,2022年则为抽穗期到灌浆期耗水强度最大。其中2021年以NJWC处理下的春小麦在抽穗期耗水强度最大( $7.63\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ),2022年,灌浆期NJWC处理的耗水强度最大( $6.76\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )。除2022年成熟期灌溉定额对春小麦耗水强度无显著影响外,其余阶段灌水定额和施氮量均对春小麦耗水强度有极显著影响( $P<0.01$ )。

### 2.3 减氮节水对春小麦产量及其构成因素和水分利用效率的影响

2021年,常规施氮和减施氮肥下W1处理的春小麦籽粒产量较W2处理分别显著提高12.42%和19.26%;2022年,常规施氮和减施氮肥下W1处理的春小麦籽粒产量较W2处理分别显著增加27.68%和64.68%,且两年W1处理与WC处理的产量无显著差异(表4)。减施氮肥下W1处理的小麦籽粒产量在2021年和2022年各处理中均为最高,分别为 $8\ 092\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $5\ 516\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,比NCWC处理分别提高7.01%和13.36%。表明减氮25%结合节水20%处理的产量高于常规施氮常规灌水处理。

通过分析各处理穗粒数发现,2021年常规施氮和减施氮肥下WC处理的穗粒数与W1处理无显著差异,2022年常规施氮下W1处理的穗粒数显著高

于 WC 处理,而减施氮肥下 W1 和 WC 处理之间无显著差异。NJW1 处理的穗粒数在两年各处理中均为最多,分别为 42.87 粒·穗<sup>-1</sup>和 38.84 粒·穗<sup>-1</sup>。方差分析表明,灌溉定额对两年春小麦穗粒数均有极显著影响,在 2021 年,施氮量对穗粒数有极显著影响,在 2022 年则无显著影响。

常规施氮下,2021 年 W1 处理的千粒质量与 WC 处理无显著差异,但 2022 年 W1 处理的千粒质量显著高于 WC 处理;在减施氮肥条件下,2021 年 W1 处理下的春小麦千粒质量较 WC 和 W2 处理分别显著提高 8.32%和 12.29%;2022 年小麦千粒质量表现为随着灌溉定额增加而增加。2 a 试验方差分析均表明,灌溉定额对春小麦千粒质量有极显著影响,施氮量对其无显著影响。

在相同施氮量条件下,灌溉水利用效率随灌溉定额减少呈现增加趋势。常规施氮和减施氮肥下不同灌溉定额之间灌溉水利用效率均存在显著差异。2021 年常规施氮下 W1 和 W2 处理的水分利用效率较 WC 处理分别提高 18.38%和 23.53%,2022 年相应地分别提高 17.76%和 18.69%。2 a 试验结果均表明,减施氮肥下均为 W1 处理下水分利用效率最高,2021 年和 2022 年分别为 1.62 kg·m<sup>-3</sup>和

1.43 kg·m<sup>-3</sup>,较 WC 处理的水分利用效率分别提高 21.80%和 31.19%。不施氮条件下各灌溉定额处理之间水分利用效率不存在显著差异。相同灌溉定额下,常规施氮和减施氮肥处理的灌溉水利用效率和水分利用效率均显著高于不施氮处理,但二者无显著差异。

### 3 讨论

#### 3.1 减氮节水对土壤水分动态分布的影响

土壤水分动态变化主要受降雨、灌溉、蒸发及作物根系吸收等因素的影响<sup>[15-16]</sup>,其中灌溉量是影响土壤水分分布的主要因素<sup>[17]</sup>。孟维伟等<sup>[18]</sup>和谢忠奎等<sup>[19]</sup>研究发现,灌溉和降雨对土壤 60 cm 以上土层含水量影响较大,不灌溉处理对 60 cm 以下土层的含水量影响较小。本研究中,土壤水分动态变化亦多发生在 60 cm 以上土层,并且各土层的土壤含水率随灌溉定额的增加而增加,60 cm 以下土壤含水量变化较小,但增加灌溉定额促进了土壤水分向深层运移。崔政军等<sup>[20]</sup>指出灌溉和施氮提高了各土层的土壤含水量,其中高水高氮处理的土壤含水量最高,这与本研究结果相似。减氮节水可以促进春小麦根系对水分的吸收,降低土壤含水量。张昊

表 3 2021—2022 年不同水氮处理对春小麦各阶段耗水强度的影响

Table 3 Effects of different water and nitrogen treatments on water consumption intensity of spring wheat at various growth stages in 2021 and 2022

年份 Year	施氮量 Nitrogen	灌溉定额 Irrigation quota	分蘖期 Tiller /(mm·d <sup>-1</sup> )	拔节期 Tapering /(mm·d <sup>-1</sup> )	抽穗期 Tasseling /(mm·d <sup>-1</sup> )	灌浆期 Grouting /(mm·d <sup>-1</sup> )	成熟期 Maturity /(mm·d <sup>-1</sup> )
2021	NC	WC	2.04±0.07aB	6.98±0.59aA	6.57±0.43aB	6.16±0.14aAB	4.79±0.60aA
		W1	1.85±0.01bB	6.31±0.66aA	6.05±0.67aB	5.26±0.62bA	3.66±0.47bB
		W2	1.83±0.09bB	4.46±0.51bA	5.64±0.42bA	4.49±0.41bA	2.71±0.49bB
	NJ	WC	2.24±0.06aA	7.10±0.65aA	7.63±0.39aA	5.05±0.67aB	5.33±0.58aB
		W1	2.08±0.04bA	5.86±0.74abA	6.69±0.51aA	3.85±0.47bB	4.56±0.46abA
		W2	2.00±0.09bA	5.52±0.88bA	4.56±0.58bB	2.93±0.31bB	3.66±0.56bA
	NO	WC	2.17±0.13aAB	6.54±0.62aA	6.84±0.50aAB	6.47±0.35aA	4.31±0.41aB
		W1	2.10±0.18aA	6.02±0.55aA	4.99±0.50bAB	5.19±0.46bA	3.57±0.66abB
		W2	2.09±0.18aA	4.62±0.51bA	4.73±0.89bB	3.89±0.68cA	2.99±0.36bA
		N	**	**	**	**	**
		W	**	**	**	**	**
		W×N	ns	ns	*	ns	ns
2022	NC	WC	0.91±0.21aA	5.97±0.29aA	4.65±0.16aA	6.34±0.58aA	2.27±0.39aB
		W1	0.72±0.15aA	3.73±0.39bB	3.88±0.16bA	6.38±0.21aA	2.65±0.91aA
		W2	0.27±0.05bB	2.95±0.86bA	3.07±0.26cA	4.63±0.44bA	2.77±0.20aB
	NJ	WC	0.99±0.10aA	6.54±1.48aA	4.48±0.15aB	6.76±1.37aA	2.55±0.80aA
		W1	0.69±0.24bA	4.95±0.53abA	3.68±0.06abB	6.06±0.58aA	2.29±0.69aA
		W2	0.68±0.20bA	2.71±0.75bA	3.19±0.60bA	3.50±0.37bB	1.95±0.28aB
	NO	WC	1.02±0.17aA	5.00±0.66aA	4.70±0.13aA	6.45±0.42aA	2.49±0.47aB
		W1	0.98±0.44aA	4.02±0.45abAB	3.62±0.17bB	6.40±1.11aA	0.91±0.34bB
		W2	0.56±0.09bAB	3.34±0.44bA	2.91±0.35cB	4.71±0.66bA	2.59±0.12aA
		N	**	**	**	**	**
		W	**	**	**	**	ns
		W×N	ns	ns	ns	ns	*

表 4 2021—2022 年不同水氮处理对春小麦产量、产量构成因素及水分利用效率的影响

Table 4 Effects of different water and nitrogen treatments on yield and its composition and water use efficiency of spring wheat in 2021 and 2022

年份 Year	施氮量 Nitrogen	灌溉定额 Irrigation quota	穗粒数 Number of grain per spike /(粒·穗 <sup>-1</sup> )	千粒质量 Thousand grain weight/g	产量 Grain yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency /(kg·m <sup>-3</sup> )	水分利用效率 Water use efficiency /(kg·m <sup>-3</sup> )
2021	NC	WC	39.27±2.10aA	51.16±1.49abA	7562.60±389.03abA	1.89±0.10cA	1.36±0.10bA
		W1	38.07±1.11abB	53.67±1.68aAB	7785.29±375.10aA	1.43±0.12bA	1.61±0.09aA
		W2	35.53±1.70bA	49.75±2.36bA	6925.19±332.53bA	2.89±0.14aA	1.68±0.10aA
	NJ	WC	39.50±2.36abA	50.11±2.62bA	7714.24±434.85aA	1.93±0.11cA	1.33±0.07bA
		W1	42.87±2.25aA	54.28±1.52aA	8092.52±319.36aA	2.53±0.10bA	1.62±0.08aA
		W2	36.37±1.56bA	48.34±1.70bA	6785.78±192.80bA	2.83±0.08aA	1.60±0.06aA
	N0	WC	31.37±1.79aB	51.03±1.68aA	6229.01±255.03aB	1.56±0.06bB	1.12±0.05aB
		W1	32.97±1.51aC	50.60±1.96aB	5949.04±483.10abB	1.86±0.15abB	1.25±0.13aB
		W2	25.53±2.46bB	49.98±1.85aA	5106.80±515.41bB	2.13±0.21aB	1.23±0.13aB
		N	**	ns	**	**	**
		W	**	**	**	**	**
		W×N	ns	ns	ns	ns	ns
2022	NC	WC	35.40±1.09bA	35.43±0.82abAB	4866.67±239.21aAB	1.22±0.06bAB	1.07±0.03bAB
		W1	36.71±2.52aA	36.17±0.83aA	4766.67±286.74aA	1.49±0.09bA	1.26±0.08aAB
		W2	35.42±4.03bA	34.73±1.28bA	3733.33±143.37bA	1.56±0.06aA	1.27±0.07aA
	NJ	WC	37.47±1.90abA	38.97±1.79aA	5166.67±329.98aA	1.29±0.17bA	1.09±0.03bA
		W1	38.84±1.37aA	36.33±2.01bA	5516.67±424.92aA	1.72±0.13aA	1.43±0.13aA
		W2	35.22±1.21bA	34.23±1.70cA	3350.01±374.17bAB	1.40±0.16abAB	1.18±0.10abAB
	N0	WC	38.20±2.71aA	32.43±1.55aB	4416.67±224.85aB	1.10±0.06aB	0.98±0.06aB
		W1	34.69±4.64bB	31.70±1.77abB	3766.67±478.42bB	1.18±0.15aB	1.02±0.11aB
		W2	31.27±5.51cB	30.27±2.90bB	2916.67±224.85cB	1.22±0.09aB	0.95±0.12aB
		N	ns	ns	*	**	**
		W	**	**	**	**	*
		W×N	ns	ns	ns	ns	ns

等<sup>[21]</sup>研究表明,灌溉定额越大则土壤含水量越大,土壤水分分布主要在 60 cm 以上土层,尤其 0~20 cm 土层水分对灌溉响应最明显,这与本试验微喷灌条件下土壤水分分布的研究结果相似。灌溉定额和施氮均会影响土壤水分状况,适宜的水分条件可以增加作物对水分和养分的吸收。

2021 年没有进行冬灌,导致 2022 年播前至分蘖期 0~100 cm 土层尤其是 0~60 cm 土层的土壤含水率明显低于 2021 年。播前墒情不好极大地影响小麦生长和产量。2022 年浅层土壤含水率对灌溉事件的响应也不如 2021 年,这可能是因为 2022 年土壤含水率低,灌溉补充的水分一方面被春小麦快速吸收利用;另一方面,2022 年自然降水明显小于 2021 年,且降水主要集中于春小麦生育后期。

另外,连续两年持续节水 20% 和节水 40% 必然会导致土壤水分因作物消耗而不能得到有效补充,造成作物受到干旱胁迫。因此,在引黄灌区春小麦种植过程中适量冬灌是补充土壤水分的重要途径,也是保证小麦高产稳产的重要水分管理措施。

### 3.2 减氮节水对春小麦耗水特性、产量及水分利用效率的影响

减少灌溉定额、降低生育期内耗水量是提高土壤水分利用效率的有效方法<sup>[22-24]</sup>。黄玲等<sup>[25]</sup>研究表明,灌溉和施氮均提高了小麦总耗水量。本研究中,相同施氮量下,春小麦的耗水量随灌溉定额增加而显著增加,施氮对春小麦耗水量的影响相对较小,这与张昊等<sup>[21]</sup>和马兴华等<sup>[26]</sup>研究结果一致。冯福学等<sup>[27]</sup>研究表明,随着生育时期的推进,燕麦阶段耗水量及阶段耗水强度均逐渐增大,但阶段耗水强度呈先增加后减少趋势。本研究中,播前到分蘖期耗水量最大,这可能与此阶段时间长有关,随生育期推进呈先增加后减少趋势。

施氮量是影响作物产量的重要因素,本试验中,春小麦产量随施氮量增加呈先增加后降低趋势;另一方面,在一定范围内小麦籽粒产量随灌溉量增加而显著提高,但灌溉量过多又会显著降低籽粒产量<sup>[28-29]</sup>。本研究中,施氮量和灌溉定额均对小麦产量有极显著影响。相同施氮下节水 20% 同常规灌溉处理的产量及其构成要素无显著差异,但显著高于节水 40% 处理。表明与常规施氮量和灌溉

定额相比,减氮 25%和节水 20%处理没有降低春小麦产量。分析两年春小麦产量及其构成可以发现,2021 年处理的籽粒产量明显高于 2022 年,而穗粒数差异不大,但是 2022 年小麦籽粒的千粒质量明显小于 2021 年,同时收获穗数也明显小于 2021 年。分析认为,生育前期土壤含水率较低,影响了小麦分蘖以及有效穗数的形成;后期较低的土壤含水率影响小麦灌浆过程,导致千粒质量降低,最终导致 2022 年小麦减产。

适度节水有利于提高小麦产量和水分利用效率<sup>[30]</sup>。本研究中,相同施氮量下灌溉水利用效率随灌水定额增加而降低,同时节水处理显著提高了水分利用效率。所有水氮处理中,减氮 25%节水 20%处理春小麦产量和水分利用效率最高。栗丽等<sup>[31]</sup>发现当灌溉水平较低时,施氮量可显著提高水分利用效率。冯福学等<sup>[27]</sup>研究表明,同一施氮水平下,燕麦水分利用效率随灌溉量增加逐渐降低。王峰等<sup>[32]</sup>研究表明,全生育期灌溉量减量 20%后,灌溉水利用率提高了 13%。在本研究中,2021 年和 2022 年春小麦产量和水分利用效率均存在较大差异。其原因有二:一方面两年的气候存在较大差异,2021 年小麦生育期间降水量较多且都在小麦生育前期;2022 年降水量少且在小麦生育后期,对产量形成的贡献小;另一方面,2021 年没有进行冬灌导致 2022 年底墒不足,严重影响小麦的生长和分蘖,这从生育期间的耗水量有较大幅度降低可以得到印证。然而从同一年份不同水氮处理水分利用效率来看,减氮 25%节水 20%处理的水分利用效率最高,这充分说明减氮节水处理提高了春小麦水分利用效率。后期还需进一步研究在不同降水类型条件下,引黄灌区春小麦水分和氮素变动管理的问题,进一步提高该地区农业生产的水氮利用效率。

## 4 结 论

1)微喷带水肥一体化下,减氮节水增加了 20~40 cm 土层水分的消耗,水分变化多发生在 60 cm 以上土层,抑制了水分下移。

2)减氮 25%节水 20%处理显著提高了春小麦产量,与常规灌溉常规施氮无显著差异,同时提高了春小麦穗粒数和千粒质量。

3)2021 年和 2022 年中,减氮 25%节水 20%处理春小麦生育期耗水量较相同施氮量下常规灌溉分别降低 14.07%和 18.37%;相同灌溉定额下,减施氮肥 25%增加了春小麦耗水量;减氮 25%节水 20%处理的水分利用效率较常规灌溉处理分别提高 21.80%和 31.19%。

## 参 考 文 献:

- [1] 吕家珑,张一平,王旭东,等.长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J].应用生态学报,2001,12(4):569-572.  
LV J L, ZHANG Y P, WANG X D, et al. Effect of long-term single application of chemical fertilizer on soil properties and crop yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 569-572.
- [2] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.  
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273.
- [3] GU B J, JU X T, CHANG J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(28): 8792-8797.
- [4] 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. 中华人民共和国农业部公报,2015,(3):19-27.  
Notice of the ministry of agriculture on issuing the action plan for zero growth in fertilizer use by 2020 and the action plan for zero growth in pesticide use by 2020[EB/OL]. Gazette of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2015, (3): 19-27.
- [5] 潘家荣,巨晓棠,刘学军,等.水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中化肥氮的去向[J].核农学报,2009,23(2):334-340,307.  
PAN J R, JU X T, LIU X J, et al. Fate of fertilizer nitrogen for winter wheat/summer maize rotation in North China Plain under optimization of irrigation and fertilization[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(2): 334-340, 307.
- [6] 周昌明,李援农,蒋耿民,等.不同水氮处理对冬小麦生长及土壤硝态氮含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(5):52-58.  
ZHOU C M, LI Y N, JIANG G M, et al. Effects of different water and nitrogen treatments on growth of winter wheat and soil nitrate content [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(5): 52-58.
- [7] 张经廷,陈青云,吕丽华,等.冬小麦-夏玉米轮作产量与氮素利用最佳水氮配置[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):886-896.  
ZHANG J T, CHEN Q Y, LV L H, et al. Optimum combination of irrigation and nitrogen for high yield and nitrogen use efficiency in winter wheat and summer maize rotation system [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22(4): 886-896.
- [8] 张凤翔,周明耀,徐华平,等.水肥耦合对冬小麦生长和产量的影响[J].水利与建筑工程学报,2005,3(2):22-24.  
ZHANG F X, ZHOU M Y, XU H P, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growing and yield of winter wheat [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2005, 3(2): 22-24.
- [9] XUE Q W, ZHU Z X, MUSICK J T, et al. Physiological mechanisms contributing to the increased water-use efficiency in winter wheat under deficit irrigation [J]. Journal of Plant Physiology, 2006, 163(2): 154-164.
- [10] LI J P, WANG Y Q, ZHANG M, et al. Optimized micro-sprinkling irrigation scheduling improves grain yield by increasing the uptake and utilization of water and nitrogen during grain filling in winter wheat [J]. Agricultural Water Management, 2019, 211: 59-69.
- [11] 杨晓光,陈阜,宫飞,等.灌溉条件下冬小麦生理特性及生态环境特点的试验研究[J].农业工程学报,2000,16(3):35-37.  
YANG X G, CHEN F, GONG F, et al. Physiological and ecological

- characteristics of winter wheat on the condition of sprinkle irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(3): 35-37.
- [12] LIU H J, YU L P, LUO Y, et al. Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(4): 483-492.
- [13] 姚素梅, 康跃虎, 吕国华, 等. 喷灌与地面灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆过程特性分析 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 13-17.  
YAO S M, KANG Y H, LV G H, et al. Analysis on grain filling characteristics of winter wheat under sprinkler irrigation and surface irrigation conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 13-17.
- [14] LI J P, XU X X, LIN G, et al. Micro-irrigation improves grain yield and resource use efficiency by co-locating the roots and N-fertilizer distribution of winter wheat in the North China Plain [J]. Science of the Total Environment, 2018, 643: 367-377.
- [15] 陈延昭, 张正, 韩国君, 等. 水氮耦合对黑河中游绿洲制种玉米光合特性的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2014, (2): 72-76.  
CHEN Y Z, ZHANG Z, HAN G J, et al. Effect of water and nitrogen coupling on photosynthetic characteristic of seed maize in the oasis of middle reach of Heihe River Basin [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2014, (2): 72-76.
- [16] 权丽双, 郑旭荣, 王振华, 等. 水氮耦合对滴灌复播油葵光合特性和土壤水分利用的影响 [J]. 核农学报, 2016, 30(5): 1021-1029.  
QUAN L S, ZHENG X R, WANG Z H, et al. Effect of water-nitrogen coupling on photosynthesis and soil water use of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(5): 1021-1029.
- [17] 魏雅芬, 张春满, 王颖, 等. 不同灌溉方式下果园土壤水分分布规律及合理灌溉研究 [J]. 北方园艺, 2017, (3): 178-181.  
WEI Y F, ZHANG C M, WANG Y, et al. Effects of irrigation methods on soil water distribution and optimum irrigation schedule in apple orchard [J]. Northern Horticulture, 2017, (3): 178-181.
- [18] 孟维伟, 张微, 张永丽, 等. 灌水对不同小麦品种耗水特性和土壤硝态氮迁移的影响 [J]. 麦类作物学报, 2011, 31(6): 1123-1129.  
MENG W W, ZHANG W, ZHANG Y L, et al. Effects of irrigation on water consumption characteristics and soil  $\text{NO}_3^-$ -N transport of different wheat cultivars [J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(6): 1123-1129.
- [19] 谢忠奎, 王亚军, 兰念军, 等. 黑河地区土壤及小麦体内水分动态观测分析 [J]. 高原气象, 2000, 19(3): 385-390.  
XIE Z K, WANG Y J, LAN N J, et al. Observation and analysis of water dynamics for soil and spring wheat in Heihe areas [J]. Plateau Meteorology, 2000, 19(3): 385-390.
- [20] 崔政军, 高玉红, 剡斌, 等. 水氮耦合对土壤水分时空分布与胡麻耗水特性及产量的影响 [J]. 核农学报, 2019, 33(2): 398-411.  
CUI Z J, GAO Y H, SHAN B, et al. Effect of water and nitrogen coupling on spatial and temporal distribution of soil water and water consumption characteristic and grain yield of oil flax [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(2): 398-411.
- [21] 张昊, 郝春雷, 孟繁盛, 等. 膜下滴灌条件下不同灌水量对玉米产量及土壤水分的影响 [J]. 作物杂志, 2016, (1): 105-109.  
ZHANG H, HAO C L, MENG F S, et al. Effects of different irrigation quota on yield and soil moisture of maize with drip irrigation under film mulch [J]. Crops, 2016, (1): 105-109.
- [22] 杜太生, 康绍忠, 夏桂敏, 等. 滴灌条件下不同根区交替湿润对葡萄生长和水分利用的影响 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 43-48.  
DU T S, KANG S Z, XIA G M, et al. Response of grapevine growth and water use to different partial root-zone drying patterns under drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(11): 43-48.
- [23] 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.
- [24] GEERTS S, RAES D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(9): 1275-1284.
- [25] 黄玲, 杨文平, 胡喜巧, 等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 168-174.  
HUANG L, YANG W P, HU X Q, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water consumption characteristics and nitrogen utilization of winter wheat [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 168-174.
- [26] 马兴华, 王东, 于振文, 等. 不同施氮量下灌水量对小麦耗水特性和氮素分配的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(8): 1955-1965.  
MA X H, WANG D, YU Z W, et al. Effect of irrigation regimes on water consumption characteristics and nitrogen distribution in wheat at different nitrogen applications [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8): 1955-1965.
- [27] 冯福学, 慕平, 赵桂琴, 等. 西北绿洲灌区水氮耦合对燕麦品种陇燕 3 号耗水特性及产量的影响 [J]. 作物学报, 2017, 43(9): 1370-1380.  
FENG F X, MU P, ZHAO G Q, et al. Interaction of irrigation and nitrogen on water consumption characteristics and yield in oat variety 'longyan 3' in northwest oasis irrigation area [J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(9): 1370-1380.
- [28] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat [J]. Irrigation Science, 2008, 27(1): 1-10.
- [29] 孙婷, 张迪, 王冀川, 等. 滴灌水氮运筹对南疆春小麦根系生长及产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 10-20.  
SUN T, ZHANG D, WANG J C, et al. Effects of drip irrigation and nitrogen application on root growth and yield of spring wheat in Southern Xinjiang [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 10-20.
- [30] KANG S Z, ZHANG L, LIANG Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Losses Plateau of China [J]. Agricultural Water Management, 2002, 55: 203-216.
- [31] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮处理对冬小麦生长、产量和水氮利用效率的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1367-1373.  
LI L, HONG J P, WANG H T, et al. Effects of watering and nitrogen fertilization on the growth, grain yield, and water- and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1367-1373.
- [32] 王峰, 杜太生, 邱让建, 等. 亏缺灌溉对温室番茄产量与水分利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 46-52.  
WANG F, DU T S, QIU R J, et al. Effects of deficit irrigation on yield and water use efficiency of tomato in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 46-52.