

网络出版时间:2016-06-08 16:21

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.07.013

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160608.1621.026.html>

泾惠渠灌区不同水氮供应对冬小麦 氮素吸收运转的影响

杨 佩^{1a,1b}, 蔡焕杰^{1a,1b,1c}, 高振晓^{1a,1b,2}, 石小虎^{1a,1b}

(1 西北农林科技大学 a 旱区农业水土工程教育部重点实验室, b 水利与建筑工程学院,

c 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 2 白银市水电勘测设计院, 甘肃 白银 730900)

【摘要】【目的】研究泾惠渠灌区不同水氮供应对冬小麦植株氮素吸收运转的影响,为泾惠渠灌区提供合理的灌水施肥运筹方式。【方法】在泾惠渠灌区,通过田间小区试验研究不同灌水(W_{90} 和 W_{120} ,即灌水定额为90和120 mm)和施氮(底肥60和120 kg/hm²,追肥0,60和120 kg/hm²,即施氮的底追肥处理组合为 $N_{60/0}$, $N_{60/60}$, $N_{60/120}$; $N_{120/0}$, $N_{120/60}$, $N_{120/120}$)对冬小麦籽粒产量、各部位氮素积累量、氮素利用效率等的影响。【结果】除净积累量对籽粒氮的贡献率及氮素收获指数外,灌水和施氮对冬小麦籽粒产量、各器官氮素积累量、氮素转移量、氮素利用效率、氮肥农学利用效率均有显著影响。低水处理(W_{90})的籽粒产量、氮素积累量、氮肥农学利用效率显著高于高水处理(W_{120}),其中产量增幅为4.88%~7.44%,植株氮素积累量增幅为6.15%~18.66%,氮肥农学利用效率增幅为19.48%~35.94%。随施氮量的增加,冬小麦籽粒产量、氮素积累量均呈显著增长趋势,其中籽粒产量表现为 $N_{0/0}$ (5 653.68 kg/hm²)< $N_{60/0}$ (6 777.71 kg/hm²)< $N_{60/60}$, $N_{120/0}$ (7 165.63 kg/hm²)< $N_{60/120}$, $N_{120/60}$ (7 376.92 kg/hm²)< $N_{120/120}$ (7 659.88 kg/hm²);氮素积累量表现为 $N_{0/0}$ (188.97 kg/hm²)< $N_{60/0}$ (229.49 kg/hm²)< $N_{60/60}$, $N_{120/0}$ (275.23 kg/hm²)< $N_{60/120}$, $N_{120/60}$ (310.00 kg/hm²)< $N_{120/120}$ (327.40 kg/hm²);当施氮量过高时,继续增加施氮量对冬小麦籽粒产量和氮素积累量的调节作用不显著。总施氮量相同的条件下,适当提高追肥的施氮比例,有利于提高产量、各器官氮素积累量及各营养器官氮素转移量,其中 $N_{60/60}$ 与 $N_{120/0}$ 处理相比, W_{90} 和 W_{120} 灌水水平下籽粒产量分别提高3.92%和4.44%,各器官氮素积累量提高11.43%~27.99%,各营养器官转移量提高18.37%~71.81%; $N_{60/120}$ 与 $N_{120/60}$ 处理相比,各营养器官转移量提高15.06%~39.63%。【结论】综合考虑籽粒产量、氮肥农学利用效率和氮素利用效率等因素,灌水定额为90 mm、底肥施氮量60 kg/hm²、追肥施氮量120 kg/hm²,即 $W_{90}N_{60/120}$ 为本试验条件下泾惠渠灌区冬小麦的最佳水氮组合。

【关键词】 灌水量;施氮量;氮素积累量;氮素转移量;氮素利用效率

【中图分类号】 S152.7,S512.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)07-0087-08

Effects of water and nitrogen supply on nitrogen absorption and translocation of winter wheat in Jinghui canal irrigation region

YANG Pei^{1a,1b}, CAI Huanjie^{1a,1b,1c}, GAO Zhenxiao^{1a,1b,2}, SHI Xiaohu^{1a,1b}

(1a Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,

b College of Water Resources and Architectural Engineering, c Institute of Water Saving Agriculture in

Arid Regions of China (IWSA), Northwest A&F University Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Baiyin Reconnaissance and Design Institute of Water and Electricity, Baiyin, Gansu 730900, China)

【收稿日期】 2014-11-13

【基金项目】 国家自然科学基金项目“作物非充分灌溉健康生长需水量计算与生理节水潜力”(51179162);国家科技支撑计划项目“旱区节水型生态灌区关键技术研究与应用”(211BAD29B01)

【作者简介】 杨 佩(1990—),男,河北平山人,在读硕士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: yangpeisjz@163.com

【通信作者】 蔡焕杰(1962—),男,河北藁城人,教授,博士,博士生导师,主要从事农业节水与水资源高效利用研究。

E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

Abstract: 【Objective】 The paper investigated the effects of water and nitrogen supply on nitrogen absorption and translocation of winter wheat to provide suitable irrigation and fertilization method in Jinghui canal irrigation area. **【Method】** The treatment was conducted in Jinghui canal irrigation region with field plot experiments conducted to investigate the effects of different irrigation levels (W_{90} , 90 mm; W_{120} , 120 mm) and fertilization levels (basal dressing fertilizer: 60 kg/hm², 120 kg/hm²; top dressing fertilizer: 0 kg/hm², 60 kg/hm², 120 kg/hm², i. e. $N_{60/0}$, $N_{60/60}$, $N_{60/120}$; $N_{120/0}$, $N_{120/60}$ and $N_{120/120}$) on yield, nitrogen accumulation of different parts and nitrogen use efficiency of winter wheat. **【Result】** Except for the nitrogen absorption contribution rate and nitrogen harvest index, both irrigation and nitrogen fertilization had significant effect on yield, nitrogen accumulation, nitrogen transfer amount, nitrogen use efficiency and agronomic nitrogen efficiency. Compared with irrigation treatment of 120 mm, yield and nitrogen accumulation and agronomic nitrogen efficiency of 90 mm treatment under the same nitrogen fertilizer level were increased significantly by 4.88%—7.44%, 6.15%—18.66% and 19.48%—35.94%, respectively. With the increase of nitrogen supply, yield and nitrogen accumulation increased significantly. Relationships between yields were $N_{0/0}$ (5 653.68 kg/hm²) < $N_{60/0}$ (6 777.71 kg/hm²) < $N_{60/60}$, $N_{120/0}$ (7 165.63 kg/hm²) < $N_{60/120}$, $N_{120/60}$ (7 376.92 kg/hm²) < $N_{120/120}$ (7 659.88 kg/hm²), while between nitrogen accumulation were $N_{0/0}$ (188.97 kg/hm²) < $N_{60/0}$ (229.49 kg/hm²) < $N_{60/60}$, $N_{120/0}$ (275.23 kg/hm²) < $N_{60/120}$, $N_{120/60}$ (310.00 kg/hm²) < $N_{120/120}$ (327.40 kg/hm²). With a high level of nitrogen supply, increasing nitrogen supply had no significant effects on nitrogen accumulation and yield. Increasing the proportion of top dressing fertilizer appropriately without changing total amount was conducive to increase yield, nitrogen accumulation and nitrogen transfer amount of different organs. Compared with $N_{120/0}$, the yields of $N_{60/60}$ increased by 3.92% (W_{90}) and 4.44% (W_{120}), nitrogen accumulation of different vegetative organs of $N_{60/60}$ increased by 11.43%—27.99%, and nitrogen transfer amount of different vegetative organs of $N_{60/60}$ increased by 18.37%—71.81%; Compared with $N_{120/60}$, nitrogen transfer amount of different vegetative organs of $N_{60/120}$ increased by 15.06%—39.63%. **【Conclusion】** Considering yield, agronomic nitrogen use efficiency, and nitrogen use efficiency, the treatment with irrigation of 90 mm, basal dressing fertilizer of 60 kg/hm² and top dressing fertilizer of 120 kg/hm² ($W_{90}N_{60/120}$) were the optimal choice for Jinghui canal irrigation region.

Key words: irrigation amount; nitrogen fertilizer rate; nitrogen accumulation; nitrogen transfer amount; nitrogen use efficiency

水和氮是冬小麦生长必不可少的两个因素,但是水肥的不合理利用会造成水肥的浪费和环境污染。据统计,中国化肥年消耗量约占世界化肥生产总量的 27.35%^[1],过量施肥不仅降低了氮肥的利用效率,还会使硝态氮大量淋失造成环境污染,而造成硝态氮大量淋失的最主要原因是过高的灌水定额将硝态氮淋洗到 2 m 以下土层,导致其难以被作物再利用,进而继续淋洗至更深土层中而对地下水造成污染^[2]。泾惠渠灌区位于我国西北干旱半干旱农业区,土壤肥力低,水资源匮乏,当地农民多采用传统灌溉施肥模式,导致农业生产发展受到严重制约。据统计,关中地区冬小麦氮肥施用量合理的农户仅占 36.1%^[3],大部分农户施氮量普遍较高,造成氮肥的极大浪费。有研究发现为获得小麦较高的氮素吸收、转运及累积量和较高的产量与氮肥利用效率,

氮肥用量应控制在 150~225 kg/hm²^[4-8]。翟丙年^[9]研究发现,供水量较低时,在一定范围内产量随施氮量的增加而增加,但超出一定用量时则随施氮量的增加而迅速减小;供水量较高时,产量随施氮量的增加而明显增加,高水高氮时产量最大,表现出明显的正交互作用。当前在针对大田小麦水肥管理研究中,多以某一地域为例来评价不同灌水量及施氮量对小麦生产的影响,虽然关于水肥一体化条件下的研究报道很多,但是由于小麦品种、地域、土壤、气候等多种因素的影响,导致各自的研究结论各有不同。而且在实际生产中,由于泾惠渠灌区多采用 150~240 m 的长畦田进行耕作,灌水定额达到 90~120 mm(远高于 60 mm 的合理灌溉定额),造成灌水量较大,而各研究的灌水定额一般较低,对于高水低氮这类实际生产条件下的植株体内氮素运移研究

较少。为此,本研究通过在泾惠渠灌区较高灌水定额条件下,进行不同底肥追肥施用量的试验,以期分析有限灌溉条件下合理施氮对冬小麦籽粒产量及氮素吸收运转的影响,进而为该灌区合理水肥管理模式的确定提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验概况和试验设计

本试验于 2013 年 10 月至 2014 年 6 月在陕西省咸阳市泾阳县桥底镇进行,试验区地处关中平原腹地,位于 E 108°42′48″,N 34°35′44″,海拔 423.8 m。冬小麦全生育期气象资料见图 1。

灌溉水为泾惠渠渠水,试验区土壤类型为塋土,0~30 cm 土壤有机质平均含量为 14.5 g/kg,全氮 1.25 g/kg,速效磷(P₂O₅)、速效钾(K₂O)分别为 16.7 和 159.8 mg/kg。供试小麦品种为西农 979。试验小区为 21.6 m×3.5 m 的畦田,坡降为 1:750。试验过程中,底肥采用西洋复合肥与尿素配施,追肥施用尿素。

试验采用两因素完全组合设计。

(1)灌水水平。参考泾惠渠灌区 160 及 240 m 典型畦长的灌水定额,灌水定额设 90 mm(W₉₀)和 120 mm(W₁₂₀)2 个水平,分别于苗期、越冬期、返青

期、灌浆期各灌 1 次(参照当地习惯灌水时期及灌水次数确定)。

(2)施氮水平。基底氮设 60 和 120 kg/hm² 2 个水平,追施氮设 0,60 和 120 kg/hm² 3 个水平,最终的施氮组合处理为 N_{60/0},N_{60/60},N_{60/120},N_{120/0},N_{120/60},N_{120/120}。底肥于播种期施入,追肥时期为返青期(参照当地习惯施肥时期及施肥方式确定)。

(3)试验设 2 个对照处理,分别为 W₉₀N_{0/0} 和 W₁₂₀N_{0/0}。各处理均重复 3 次。

本试验的灌水施肥组合方案如表 1 所示。

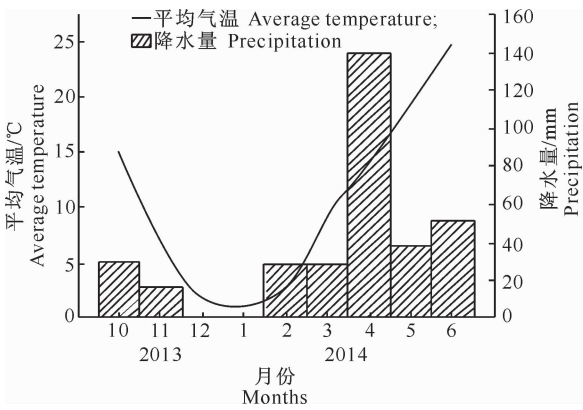


图 1 冬小麦生育期泾惠渠灌区平均降水及平均气温的变化
Fig. 1 Average precipitation and temperature in Jinghui canal irrigation region during the growth period of winter wheat

表 1 不同水氮供应对冬小麦氮素吸收运转影响的试验设计方案

Table 1 Experiment design for effects of water and nitrogen supply on nitrogen absorption and translocation of winter wheat

处理 Treatment	灌水定额/mm Irrigation application rate	底肥施氮量/(kg·hm ⁻²) Basal dressing fertilizer	追肥施氮量/(kg·hm ⁻²) Top dressing fertilizer	处理 Treatment	灌水定额/mm Irrigation application rate	底肥施氮量/(kg·hm ⁻²) Basal dressing fertilizer	追肥施氮量/(kg·hm ⁻²) Top dressing fertilizer
W ₉₀ N _{0/0}	90	0	0	W ₁₂₀ N _{0/0}	120	0	0
W ₉₀ N _{60/0}	90	60	0	W ₁₂₀ N _{60/0}	120	60	0
W ₉₀ N _{120/0}	90	120	0	W ₁₂₀ N _{120/0}	120	120	0
W ₉₀ N _{60/60}	90	60	60	W ₁₂₀ N _{60/60}	120	60	60
W ₉₀ N _{120/60}	90	120	60	W ₁₂₀ N _{120/60}	120	120	60
W ₉₀ N _{60/120}	90	60	120	W ₁₂₀ N _{60/120}	120	60	120
W ₉₀ N _{120/120}	90	120	120	W ₁₂₀ N _{120/120}	120	120	120

1.2 样品采集及测定指标

在冬小麦抽穗开花期和成熟期取整株小麦样品,开花期植株取样分为叶片、茎秆+叶鞘和颖壳+穗轴 3 部分,成熟期植株取样分为籽粒、叶片、茎秆+叶鞘和颖壳+穗轴 4 部分。所有样品于 105℃杀青,75℃烘至恒质量(精度 0.01 g),测定干物质质量;采用 H₂O₂ 催化,浓硫酸消煮,用 AA3 型连续流动分析仪测定植物样品全氮含量。采用下列公式计算氮素转移、利用、分配等参数。

营养器官氮素转移量=开花期营养器官氮素积

累量-成熟期营养器官氮素积累量^[9];

营养器官氮素转移率=营养器官氮素转移量/开花期营养器官氮素积累量×100%^[9];

营养器官氮素贡献率=营养器官氮素转移量/成熟期籽粒氮素积累量×100%^[9];

氮素利用效率=产量/植株氮素积累量^[9];

氮肥农学利用效率=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量^[10];

氮素收获指数=籽粒氮积累量/植株氮积累量^[10]。

1.3 数据的统计与分析

数据差异显著性检验采用 DPS 统计分析软件进行,绘图采用 OriginPro 软件。

2 结果与分析

2.1 不同水氮供应对冬小麦籽粒产量的影响

不同水氮供应对冬小麦籽粒产量的影响见图 2。

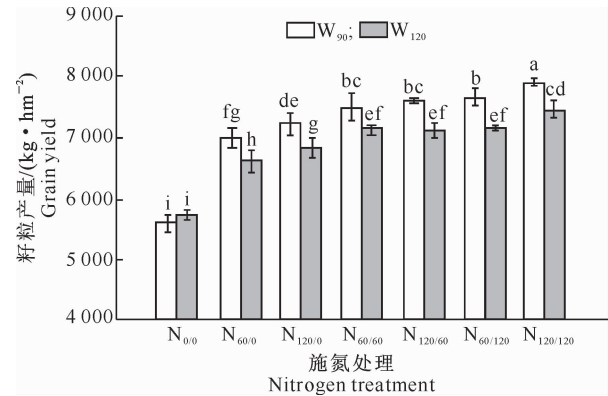


图 2 不同水氮供应对冬小麦籽粒产量的影响
相同颜色柱体上不同小写字母表示同一灌水定额下
不同施氮处理间差异显著($P<0.05$)

Fig. 2 Effects of water and nitrogen supply on
yield of winter wheat
Different lower case letters on each column indicate
significant different ($P<0.05$)

由图 2 可以看出, $W_{90}N_{0/0}$ 和 $W_{120}N_{0/0}$ 处理的籽粒产量显著低于其他施氮处理, 分别为 5 592.10 和 5 715.25 kg/hm^2 。除 $N_{0/0}$ 处理外, W_{90} 灌水条件下各施氮处理的籽粒产量均显著高于 W_{120} 条件下对应施氮处理的籽粒产量, 增幅达 4.88%~7.44%。小麦籽粒产量随施氮量的增加呈增长趋势, $N_{120/120}$ 处理的籽粒产量显著高于相同灌水处理条

件下的其他处理, 分别为 7 906.09 kg/hm^2 (W_{90}) 和 7 538.55 kg/hm^2 (W_{120})。 $N_{120/60}$ 、 $N_{60/120}$ 处理的籽粒产量差异不显著, 表明在灌水定额为 90 或 120 mm 条件下, 这 2 种施氮方式对籽粒产量无显著调节作用, 原因是过高的灌水定额造成氮肥的大量淋失, 使得土壤中可以利用的氮素含量减低, 从而导致这 2 种施氮处理的籽粒产量差异不显著。在施氮总量为 120 kg/hm^2 条件下, $N_{60/60}$ 处理的籽粒产量显著高于底肥一次性施入 ($N_{120/0}$) 处理。

2.2 不同水氮供应对花后小麦营养器官氮素转移量的影响

由图 3 可以看出, 除 $N_{0/0}$ 、 $N_{60/0}$ 2 个处理外, W_{90} 处理小麦茎秆+叶鞘的花后氮素转移量均显著高于 W_{120} 处理中相应的供氮处理, 氮素转移量增加了 1.29~19.25 kg/hm^2 , 表明施氮量较高的条件下, 过高的水分供应会导致花后茎秆+叶鞘的氮素转移量减少。花后茎秆+叶鞘的氮素转移量随施氮量的增加呈增加趋势, 施氮量的增加有利于花后茎秆+叶鞘的氮素转移。 $N_{60/120}$ 、 $N_{120/120}$ 2 个处理小麦茎秆+叶鞘的花后氮素转移量差异不显著, 但均显著高于同一灌水量下的其他处理, 可能是过高的灌水造成氮素淋失, 从而减小了 2 个处理之间的差异。 $N_{60/60}$ 处理小麦花后茎秆+叶鞘的氮素转移量显著大于 $N_{120/0}$ 处理, $N_{60/120}$ 处理显著大于 $N_{120/60}$ 处理, 表明相同施氮总量的条件下, 适当的调整施氮方式有利于花后茎秆+叶鞘的氮素转移。

小麦花后叶片、颖壳+穗轴的花后氮素转移量及营养器官的总转移量, 随水肥供应条件的变化规律与小麦茎秆+叶鞘的转移量相似, 故不再赘述。

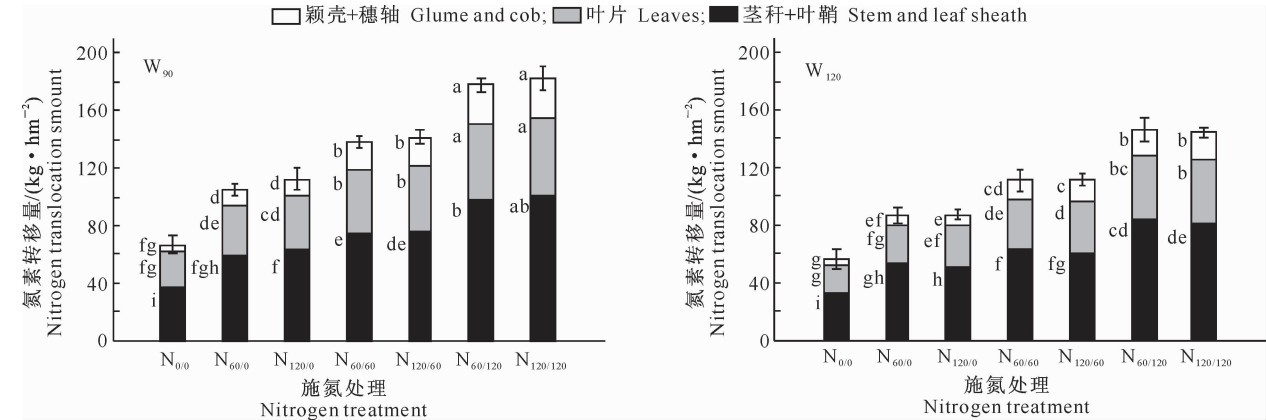


图 3 不同水氮供应对花后冬小麦营养器官氮素转移量的影响
相同颜色柱体旁不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Fig. 3 Effects of water and nitrogen supply on nitrogen transfer of winter wheat vegetative organs
Different lowercase letters beside each column indicate significant difference ($P<0.05$). The same below

2.3 不同水氮供应对成熟期小麦各器官中氮素积累量的影响

由图 4 可以看出,除 $N_{0/0}$ 处理外, W_{90} 处理小麦籽粒的氮素积累量均显著高于 W_{120} 处理中相应的供氮处理,且各施氮处理小麦籽粒的氮素积累量随施氮量的增加呈增长趋势。 W_{90} 处理中, $N_{60/60}$ 处理的籽粒氮素积累量显著高于 $N_{120/0}$ 处理, $N_{60/120}$ 处理的籽粒积累量显著高于 $N_{120/60}$,表明同一施氮总量条件下,适当的施氮方式有利于籽粒中氮素的积累。

小麦茎秆+叶鞘、叶片、颖壳+穗轴的成熟期氮素积累量及其地上部分的总积累量随水肥供应条件

的变化规律与籽粒氮素积累量规律相似。

2 种灌水处理之间相比, W_{90} 处理中的籽粒氮素积累量及其在小麦地上部分植株氮素积累总量中所占的比例均显著高于 W_{120} 中对应的氮肥处理; W_{90} 处理小麦茎秆+叶鞘、叶片、颖壳+穗轴 3 部分的氮素积累量及其所占比例基本均显著低于 W_{120} 处理。这表明过高的灌水量不利于氮素向籽粒分配,但会提高营养器官对氮素的吸收,提高成熟期营养器官的氮素积累量在小麦地上部分植株氮素积累总量中所占的比例。

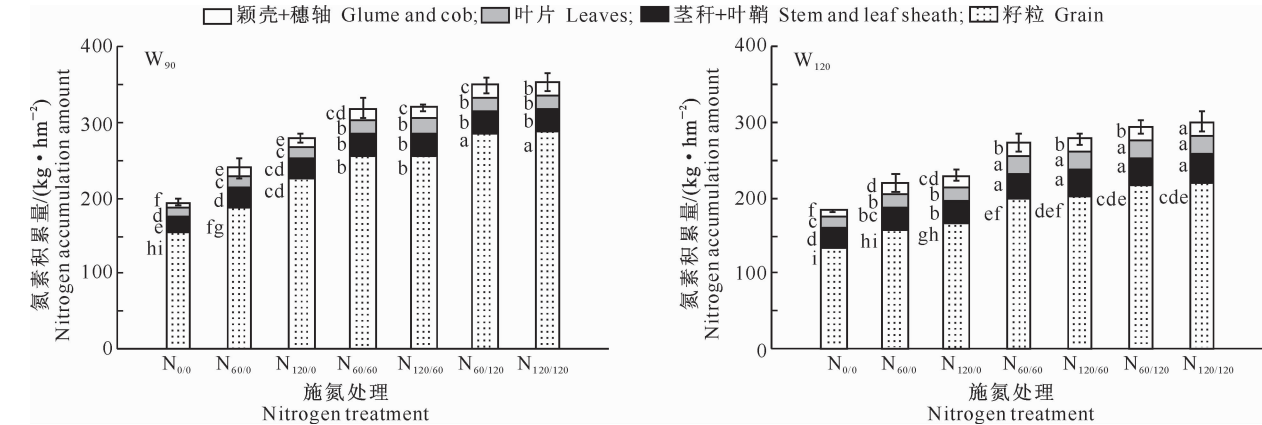


图 4 不同水氮供应对冬小麦氮素积累量的影响

Fig. 4 Effects of water and nitrogen supply on nitrogen accumulation of winter wheat

2.4 不同水氮供应对小麦花后氮素净积累量及其对籽粒氮贡献率的影响

由表 2 可以看出, W_{90} 灌水定额下,除 $N_{0/0}$ 及 $N_{60/0}$ 处理外,其他各施氮处理的花后氮素净积累量均显著高于 W_{120} 灌水定额下的对应施氮处理,增加

量为 8.93~36.08 kg/hm²。2 个灌水水平中,氮素净积累量对籽粒氮的贡献率差异不显著;同一灌水水平下,氮素净积累量对籽粒氮的贡献率均随施氮量的增加呈降低趋势。

表 2 不同水氮供应对冬小麦花后氮素净积累量及其对籽粒氮贡献率的影响

Table 2 Effects of water and nitrogen supply on nitrogen absorption after anthesis and nitrogen absorption contribution rate of winter wheat

处理 Treatment	氮素净积累量/ (kg·hm ⁻²) Nitrogen absorption	净积累量对籽粒 氮的贡献率/% Nitrogen absorption contribution rate	处理 Treatment	氮素净积累量/ (kg·hm ⁻²) Nitrogen absorption	净积累量对籽粒 氮的贡献率/% Nitrogen absorption contribution rate
$W_{90} N_{0/0}$	87.79 bcd	56.32 a	$W_{120} N_{0/0}$	78.86 d	58.29 a
$W_{90} N_{60/0}$	83.24 cd	44.20 bc	$W_{120} N_{60/0}$	71.59 d	45.35 bc
$W_{90} N_{120/0}$	112.30 a	49.98 b	$W_{120} N_{120/0}$	78.48 d	47.34 bc
$W_{90} N_{60/60}$	116.73 a	45.76 bc	$W_{120} N_{60/60}$	87.38 bcd	43.93 c
$W_{90} N_{120/60}$	114.55 a	44.69 bc	$W_{120} N_{120/60}$	89.67 bc	44.73 bc
$W_{90} N_{60/120}$	106.44 ab	37.11 d	$W_{120} N_{60/120}$	70.35 d	32.49 de
$W_{90} N_{120/120}$	104.25 abc	36.16 de	$W_{120} N_{120/120}$	76.67 d	34.61 de

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters in each column indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.5 不同水氮供应对氮素利用效率、氮肥农学利用效率及氮素收获系数的影响

由表 3 可以看出,除 $N_{60/120}$ 外, W_{90} 处理的氮肥

农学利用效率均显著高于 W_{120} 处理对应的施肥水平,表明过高的灌水量会降低氮肥的农学利用效率。在 W_{90} 和 W_{120} 处理中,均以 $N_{0/0}$ 和 $N_{60/0}$ 处理氮素利

用效率显著高于该灌水量下的其他施氮处理。氮肥农学利用效率随施氮量的增加呈下降趋势, $N_{120/0}$ 处理的氮肥农学利用效率均低于 $N_{60/60}$ 处理, 表明同一施氮总量水平下, 提高追肥所占比例有利于提高氮肥的农学利用效率。 W_{90} 条件下各施氮处理的氮素收获指数显著高于 W_{120} 条件下对应的施肥处理; 相同灌水条件下各施氮处理的氮素收获指数差异大多不显著。由表 4 可以看出, 灌水与花后氮素净积累

量、氮素利用效率、氮肥农学利用效率及氮素收获指数均呈极显著相关关系; 施氮与花后氮素净积累量呈显著相关关系, 与净积累量对籽粒氮的贡献率、氮素利用效率及氮肥农学利用效率呈极显著相关关系; 水氮互作效应仅与氮肥农学利用效率呈显著相关关系, 与花后氮素净积累量、净积累量对籽粒氮的贡献率、氮素利用效率及氮素收获指数相关关系不显著。

表 3 不同水氮供应对氮素利用效率、氮肥农学利用效率及氮素收获系数的影响

处理 Treatment	氮素利用效率/% Nitrogen use efficiency	氮肥农学利用效率/% Nitrogen agronomic efficiency	氮素收获指数 Nitrogen harvest index
$W_{90} N_{0/0}$	28.93 a	—	0.79 ab
$W_{90} N_{60/0}$	29.00 a	22.77 a	0.78 b
$W_{90} N_{120/0}$	25.83 b	13.52 c	0.80 ab
$W_{90} N_{60/60}$	23.53 bcd	15.88 b	0.80 ab
$W_{90} N_{120/60}$	23.82 bcd	11.17 de	0.80 ab
$W_{90} N_{60/120}$	22.12 de	11.53 cde	0.81 a
$W_{90} N_{120/120}$	22.39 cde	9.57 ef	0.81 a
$W_{120} N_{0/0}$	31.20 a	—	0.74 c
$W_{120} N_{60/0}$	30.12 a	16.75 b	0.72 c
$W_{120} N_{120/0}$	29.82 b	10.26 ef	0.72 c
$W_{120} N_{60/60}$	26.09 b	12.79 cd	0.73 c
$W_{120} N_{120/60}$	25.94 b	8.90 fg	0.72 c
$W_{120} N_{60/120}$	24.97 bc	9.65 ef	0.74 c
$W_{120} N_{120/120}$	24.49 bcd	7.39 gh	0.73 c

表 4 水氮与冬小麦氮素转运各指标的相关性分析(F 值)

项目 Item	花后氮素净积累量 Nitrogen absorption after anthesis	净积累量对 籽粒氮的贡献率 Nitrogen absorption contribution rate	氮素利用率 Nitrogen use efficiency	氮肥农学利用效率 Nitrogen agronomic efficiency	氮素收获指数 Nitrogen harvest index
灌水 Irrigation	47.91 * *	1.88	29.69 * *	57.05 * *	556.34 * *
施氮 Nitrogen	2.92 *	33.56 * *	19.05 * *	84.64 * *	2.78
灌水×施氮 Irrigation×nitrogen	0.92	0.64	0.41	2.83 *	0.71

注: * 表示显著相关($P<0.05$), * * 表示极显著相关($P<0.01$)。
Note: * means significant correlation ($P<0.05$), while * * means extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨 论

本文通过泾惠渠灌区的田间小区试验, 研究了不同水氮供应对冬小麦各器官中氮素分配运移以及冬小麦产量和氮利用效率的影响。对最优灌水量的研究表明, 过高的灌水量不利于籽粒的氮素积累, 反而会降低籽粒氮素所占比例, 提高营养器官的氮素积累分配比例, 这是因为充足的土壤水分有利于矿质元素的吸收, 促进光合作用等生化反应, 从而促进营养器官的生长, 进而提高小麦的产量, 但是过量的灌水量会导致矿物质元素的淋失, 减少小麦对矿物质的吸收, 从而降低产量, 降低氮肥的农学利用效率及氮素收获系数等, 这与前人研究结果相

似^[10-13]。本试验条件下, 除 $N_{0/0}$ 处理外, W_{90} 处理小麦籽粒的产量和氮素积累量均显著高于 W_{120} 处理, W_{120} 处理营养器官的氮素积累量显著高于 W_{90} 处理; 除 $N_{60/120}$ 处理外, W_{90} 处理氮肥的农学利用效率显著高于 W_{120} 处理; W_{90} 处理的氮素收获指数显著高于 W_{120} 处理, 这表明 W_{90} 与 W_{120} 相比, 灌水定额为 90 mm 为较好的灌水处理。

在施氮总量的研究中, 本试验结果发现, 随着施氮量的增加, 小麦各部分的氮素积累量呈增长趋势, 但是过高的施氮量在增加小麦植株吸氮量的同时, 会导致开花后营养器官氮素向籽粒中的转移率降低, 使得过多的氮素滞留在营养器官中; 小麦籽粒产量随施氮量的增加而增加, 而氮素利用率及氮肥的

农学利用效率均随施氮量的增加呈下降趋势,但在施氮量较高的条件下,继续提高施氮量对籽粒产量的提高作用不显著,这是因为过量增施氮肥虽然增加了营养器官氮素向籽粒的转移量,但是过多的氮素贮存于营养器官中,容易引起贪青晚熟,从而导致籽粒产量下降或者增幅降低,同时造成氮素利用率及氮素收获指数降低,这与前人的研究结果相似^[14-15]。综合各指标随施肥总量的变化认为,施氮量为 180 kg/hm² 是本试验条件下较合理的施氮总量水平。

在施氮方式的研究中,本试验结果发现,适当调节氮肥的施用比例,即调节基肥、追肥施用量有利于提高小麦生育后期氮素吸收强度,使得开花前贮存物质转运量和开花后氮素同化能力同步提高。在总施氮相同的条件下,适当提高追肥施用量,有利于提高营养器官的氮素转运量和开花后的氮素同化量;另外,在小麦生育期内基肥+追肥均施与小麦播种时一次性施入相比在一定程度上可以提高小麦的产量,合理的氮肥施用方式可以实现小麦的高产高效,这与前人的研究结果^[12-13,16-19]相似。本试验中,W₉₀灌水条件下 N_{60/120} 处理的籽粒氮素积累量显著高于 N_{120/60} 处理;N_{60/120} 处理的氮素利用率及氮肥农学利用效率均与 N_{120/60} 处理差异不显著;表明在施氮总量为 180 kg/hm² 条件下,N_{60/120} 处理的施肥方式为较合理的施肥方式。

本试验条件下,灌水和施氮对花后氮素净积累量以及氮素利用效率等的交互效应不显著,一方面可能是由于试验处理各重复之间的误差大于处理之间的误差所导致,另一方面可能是由于水氮耦合效应是随着增加水量和氮质量浓度来提高其耦合效应的,前人研究水氮耦合时,灌水量低于本研究,氮施用量高于本研究,因此在本试验条件下,高水低肥导致氮质量浓度降低,从而导致其水氮耦合效应不显著^[20-24]。

4 结 论

1) 与灌水定额 120 mm 相比,灌水定额为 90 mm 时,有利于提高冬小麦的籽粒产量,增加籽粒中的氮素净积累量,促进营养器官中氮素向籽粒中转移,同时提高氮肥的农学利用效率。

2) 适当增加氮肥施用量有利于提高冬小麦的籽粒产量,增加籽粒中的氮素积累量,同时促进营养器官的氮素向籽粒转移。

3) 适当调整基肥、追肥施用量,可以在对氮肥农

学利用效率影响不显著的条件下,提高冬小麦的籽粒产量,增加各部分的氮素净积累量,并促进营养器官的氮素向籽粒转移。

综合考虑籽粒产量、氮肥农学利用效率、氮素利用效率、氮素收获指数等因素,本试验条件下冬小麦以灌水定额 90 mm,底肥施氮量 60 kg/hm²,追肥施氮量 120 kg/hm² (W₉₀N_{60/120}) 最为适宜,是泾惠渠灌区冬小麦适宜的水肥管理模式。

[参考文献]

- [1] 沈荣开,王 康,张瑜芳,等. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究 [J]. 农业工程学报,2001,17(5):35-38.
Shen R K, Wang K, Zhang Y F, et al. Field test and study on yield, water use and N uptake under varied irrigation and fertilizer in crops [J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 35-38.
- [2] 冯 峰,张福锁,杨新泉. 植物营养研究 [M]. 北京:中国农业大学出版社,2007.
Feng F, Zhang F S, Yang X Q. Research of plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007.
- [3] 段 敏. 陕西关中地区小麦玉米养分资源管理及其高产探索研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
Duan M. Study on nutrients management and high yield of wheat and maize in Guanzhong area of Shaanxi province [D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [4] 王荣辉. 磷钾对冬小麦产量形成和水分养分利用的影响 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
Wang R H. Formation of grain yield and utilization of water and nutrients for winter wheat affected by nitrogen and phosphorus [D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A&F University, 2007.
- [5] 张 明. 陕西关中冬小麦/夏玉米轮作体系下合理施肥技术研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
Zhang M. Research of reasonable fertilizer application technology of winter wheat/summer maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi [D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A&F University, 2011.
- [6] 尹晓芳. 关中农田氮肥利用及 NO₃-N 淋移特点 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
Yin X F. Characteristics of nitrogen fertilizer utilization and nitrate-N leaching in the Guanzhong area [D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [7] 张 鹏,刘 瑞,王天泰,等. 周至县冬小麦氮磷钾肥肥效及适宜用量 [J]. 西北农业学报,2010,19(8):121-125.
Zhang P, Liu R, Wang T T, et al. Effects optimum application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yields of winter wheat in Zhouzhi County [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(8): 121-125.
- [8] 冯梦龙,翟丙年,金忠宇,等. 冬小麦产量及土壤肥力的水氮调

- 控效应 [J]. 麦类作物学报, 2014, 34(1): 108-113.
- Feng M L, Zhai B N, Jin Z Y, et al. Effects of nitrogen level and water regulation on the winter wheat yield and soil fertility [J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(1): 108-113.
- [9] 翟丙年. 供水条件下施氮对作物产量及生理特性的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- Zhai B N. Effects of nitrogen fertilizer on crop and physiological characteristics of water conditions [D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A&F University, 2001.
- [10] 张永丽, 于振文. 灌水量对小麦氮素吸收、分配、利用及产量与品质的影响 [J]. 作物学报, 2008, 34(5): 870-878.
- Zhang Y L, Yu Z W. Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use, and grain yield and quality in wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(5): 870-878.
- [11] Sinclair T R, Pinter P J, Kimball B A, et al. Leaf nitrogen concentration of wheat subjected to elevated $[CO_2]$ and either water or N deficits [J]. Agric Ecosyst Environ, 2000, 79: 53-60.
- [12] Palta J A, Kobata T, Turner N C, et al. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits [J]. Crop Sci, 1994, 24: 118-124.
- [13] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 土壤肥力和施氮量对小麦氮素吸收运转及产量和蛋白质含量的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1868-1872.
- Wang Y F, Yu Z W, Li S X, et al. Effects of soil fertility and nitrogen application rate on nitrogen absorption and translocation, grain yield, and grain protein content of wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1868-1872.
- [14] 石 玉, 于振文, 王 东, 等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响 [J]. 作物学报, 2006, 32(12): 1860-1866.
- Shi Y, Yu Z W, Wang D, et al. Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake, translocation of nitrogen and yield in wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(12): 1860-1866.
- [15] 王月福, 姜 东, 于振文, 等. 高低土壤肥力下小麦基施和追施氮肥的利用效率和增产效应 [J]. 作物学报, 2003, 29(4): 491-495.
- Wang Y F, Jiang D, Yu Z W, et al. Nitrogen use efficiency and yield of wheat with basal and top-dressed nitrogen fertilizers in soils with different fertility [J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(4): 491-495.
- [16] Jiang L G, Dai T B, Jiang D, et al. Characterizing physiological N_2 use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars [J]. Field Crops Research, 2004, 88: 239-250.
- [17] 霍中洋, 葛 鑫, 张洪程, 等. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响 [J]. 作物学报, 2004, 30(5): 449-454.
- Huo Z Y, Ge X, Zhang H C, et al. Effect of different nitrogen application types on N-absorption and N-utilization rate of specific use cultivars of wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(5): 449-454.
- [18] Ayoub M, Guertin S, Fregeau R J, et al. Nitrogen fertilizer effect on breading quality of hard red spring wheat in eastern [J]. Can Crop Sci Soc Am, 1994, 34(5): 1346-1352.
- [19] 朱新开, 郭文善, 周君良, 等. 氮素对不同类型专用小麦营养和加工品质调控效应 [J]. 中国农业科学, 2003, 36(6): 640-645.
- Zhu X K, Guo W S, Zhou J L, et al. Effects of nitrogen on grain yield, nutritional quality and processing quality of wheat for different end uses [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(6): 640-645.
- [20] Singandhupe R B, Rao G G S N, Patil N G, et al. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.) [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 327-340.
- [21] Cabello M J, Castellanos M T, Romojaro F, et al. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96: 866-874.
- [22] 宋 翔. 黄土旱塬冬小麦产量与水氮耦合关系模型的研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- Song X. Study on the relation between winter wheat yield and water-nitrogen and its interaction model on the Loess Dryland [D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [23] 王晓英, 贺明荣, 刘永怀, 等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(2): 685-694.
- Wang X Y, He M R, Liu Y H, et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 685-694.
- [24] 刘小刚, 张富仓, 田育丰, 等. 水氮处理对玉米根区水氮迁移和利用的影响 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 19-24.
- Liu X G, Zhang F C, Tian Y F, et al. Effects of irrigation and fertilization treatments on transfer and utilization of water and nitrogen in maize root zone [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 19-24.