

# 秸秆还田条件下灌水模式对冬小麦产量和水肥利用效率的影响\*

党建友 裴雪霞 张 晶 王姣爱 曹 勇 张定一\*\*

(山西省农业科学院小麦研究所, 山西临汾 041000)

**摘 要** 于2008—2010年,在山西省临汾市尧都区半干旱、半湿润季风气候区,通过大田试验研究了玉米秸秆连续还田条件下灌水模式对冬小麦籽粒产量、干物质转移及水肥利用效率的影响.结果表明:浇越冬水可促进小麦分蘖;浇拔节水可提高分蘖成穗率,增加成穗数;浇孕穗水可促进穗部干物质积累,提高千粒重.浇2水时,推迟第2次浇水时期使叶片干物质转移量和穗粒数增加;浇2水比浇1水的肥料表观利用率高,可促进穗部干物质积累.越冬水灌水量和总灌水量对分蘖、穗部干物质积累的影响较小;拔节期或孕穗期增加灌水量则更有利于养分吸收及干物质积累与转移,提高籽粒水分利用效率,产量构成因素协调,增产效果明显.因此,确保越冬水可实现稳产,在越冬水基础上,拔节期增量灌水( $900\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )可满足冬小麦中后期生长发育的需要,提高籽粒水分利用效率,实现节水高产栽培.

**关键词** 灌水模式 冬小麦 产量 水肥利用效率 高产栽培

**文章编号** 1001-9332(2011)10-2511-06 **中图分类号** S152.7, S512.1 **文献标识码** A

**Effects of irrigation mode on winter wheat yield and water- and nutrient use efficiencies under maize straw returning to field.** DANG Jian-you, PEI Xue-xia, ZHANG Jing, WANG Jiao-ai, CAO Yong, ZHANG Ding-yi (*Wheat Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen 041000, Shanxi, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(10): 2511–2516.

**Abstract:** In 2008–2010, a field experiment was conducted to study the effects of different irrigation modes on the grain yield, dry matter translocation, water use efficiency (WUE), and nutrient use efficiency (NUE) of winter wheat under maize straw returning to the field in a semi-arid and semi-humid monsoon region of Linfen, Shanxi Province of Northwest China. Irrigation at wintering time promoted tillering, irrigation at jointing stage increased the total tiller number and the fertile spike rate per tiller, whereas irrigation at booting stage promoted the dry matter accumulation in spike and increased the 1000-kernel mass. When the irrigation was implemented at two growth stages and the second irrigation time was postponed, both the dry matter translocation to leaf and the kernels per spike increased. Irrigation twice throughout the whole growth season induced a higher NUE and higher dry matter accumulation in spike, as compared to irrigation once. The irrigation amount at wintering time and the total irrigation amount had lesser effects on the tillering and the dry matter accumulation in spike. Increasing irrigation amount at jointing stage or booting stage more benefited the nutrient uptake, dry matter accumulation and translocation, and grain WUE, which in turn made the yield-formation factors be more balance and the grain yield be higher. It was concluded that to guarantee the irrigation amount at wintering time could achieve stabilized yield, and the optimal irrigation mode was irrigation at wintering time plus an additional irrigation at jointing stage ( $900\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ), which could satisfy the water demand of winter wheat at its mid and later growth stage and increase the WUE of grain, and realize water-saving and high-yielding cultivation.

**Key words:** irrigation mode; winter wheat; yield; water- and nutrient use efficiency; high-yielding cultivation.

\* 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03)和国家公益性行业科研专项(200903010-07)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: zdyi888@163.com

2011-03-14 收稿, 2011-07-28 接受.

水资源短缺是制约黄淮海冬麦区农业生产的主要问题,而小麦灌溉用水占农业用水的 70%<sup>[1-2]</sup>. 该区域年降雨量为 500~700 mm,主要集中在夏季<sup>[3]</sup>,生育期降雨仅能满足其总耗水量的 25%~30%<sup>[4]</sup>,干旱、干热风等直接威胁着小麦高产稳产<sup>[3]</sup>. 因此,通过合理灌水,提高灌水利用率,是该地区小麦高产高效节水栽培急需解决的关键问题.

充足的底墒可促进冬小麦形成深根系,提高小麦产量和水分利用效率<sup>[5]</sup>;拔节期、开花期和灌浆期适当亏缺灌溉也可显著增强小麦抗逆能力,提高产量和水分利用效率<sup>[6-9]</sup>;严重干旱胁迫则导致叶片早衰,千粒重和产量下降<sup>[9-10]</sup>. 氮、磷、钾是植物生长发育必不可少的营养元素,影响其吸收利用的因素很多,但其中最重要的是土壤水分,充足的水分供应可促进植株对氮、磷、钾的吸收,提高养分利用率;干旱胁迫则可降低其吸收量<sup>[11-14]</sup>. 近年来,关于调亏和限量灌溉对小麦产量、水分利用效率影响的研究较多<sup>[7,9,15-16]</sup>,而关于玉米秸秆连续还田条件下,冬小麦前期限量灌水,后期增量灌水对产量、干物质转移及水肥利用效率的研究报道较少. 为此,本文通过大田试验研究了玉米秸秆连续还田条件下灌水模式对冬小麦籽粒产量、干物质转移及水肥利用效率的影响,以期对冬小麦高产节水栽培提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

山西省临汾市尧都区属于我国黄淮海冬麦区北片,地处半干旱、半湿润季风气候区,属温带大陆性气候,四季分明,雨热同期,年均气温 13℃,年平均降雨量 527.4 mm. 试验期间 2008 年 7 月—2009 年 6 月降雨量 347.5 mm,其中 7—9 月降雨量 164.3 mm,小麦生育期 2008 年 10 月—2009 年 6 月降雨量 183.2 mm;2009 年 7 月—2010 年 6 月降雨量 434.9 mm,其中 7—9 月降雨量 278.5 mm,小麦生育期 2009 年 10 月—2010 年 6 月降雨量 156.4 mm. 试验地点位于尧都区吴村镇洪堡村农场(36°13.228' N,111°33.711' E),连续 3 年采取小麦复种夏玉米的种植模式,玉米收获秸秆全部还田后播种小麦. 试验地土壤为石灰性褐土,耕作层土壤有机质 13.9 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 67.6 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 24.6 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 130.0 mg·kg<sup>-1</sup>.

试验采取裂区设计,主区为 5 种灌水模式,分别为:浇越冬水(11 月 25 日,W),浇拔节水(3 月 20 日,J),浇越冬水和拔节水(11 月 25 日和 3 月 20

日,W+J),浇越冬水和孕穗水(11 月 25 日和 4 月 20 日,W+B),不浇水对照(W<sub>0</sub>);副区为 3 种灌水量,分别为:450、750 和 900 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,分别用 I、II 和 III 表示;试验共设置 9 个处理组合,分别为:W<sub>0</sub>、WI、WII、JII、JIII、WI+JIII、WII+JII、WI+BIII、WII+BII. 大区安排,面积为 4 m×80 m=320 m<sup>2</sup>,每个大区均分成 4 个小畦,用水表控制灌水量. 播前施入基肥:纯 N 225 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 135 kg·hm<sup>-2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 105 kg·hm<sup>-2</sup>. 供试小麦品种为临 Y7287,两试验年份均于 10 月 10 日播种,6 月 15 日收获.

1.2 测定项目与方法

1.2.1 群体调查 在出苗后三叶期前,各处理选取 4 个 1.0 m<sup>2</sup> 调查样方,调查基本苗(进行间苗确保基本苗一致),越冬前、拔节期、孕穗期的茎蘖数,并计算单株茎蘖数.

1.2.2 干物质转移和积累 在调查样方外,各处理随机取 20 株植株装入密封塑料袋带回室内,将其中 10 株按照叶片、茎秆、穗部分开,在 105℃ 下杀青 30 min 后,在 80℃ 烘 24 h 至恒量. 其余 10 株烘干后粉碎测定全 N、P、K 含量,用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化法消化后,半微量凯氏定氮法测定全 N,钒钼黄比色法测定全 P,火焰光度计法测定全 K.

1.2.3 产量与产量构成因素 在调查样方内随机选取一行,拔取行长为 20 cm 的全部植株,去除穗粒数小于 5 粒的穗数后,计数有效成穗数,然后调查每穗粒数;各处理除收获 3 个未取样调查样方外,再随机收获 2 个 1.0 m<sup>2</sup> 样方,脱粒,风干后称量;取 500 个籽粒称量,换算成千粒重,2 次重复(间差≤0.5 g).

1.2.4 土壤水分测定 播种和收获当天测定 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~150 cm 和 150~200 cm 土层含水量. 按下式计算土层贮水量:

$$W=0.1w\rho h$$

式中:W 为土层贮水量(mm);w 为土层含水量(%);ρ 为土壤容重(g·cm<sup>-3</sup>);h 为土层厚度(cm);0.1 为单位换算系数.

田间总耗水量(mm)=播种时土壤贮水量+生育期灌水量+有效降水量-收获期土壤贮水量;籽粒水分利用效率(kg·mm<sup>-1</sup>)=籽粒产量/田间总耗水量.

1.2.5 肥效计算 肥料表观利用率=(施肥区养分吸收量-不施肥区养分吸收量)/施肥量×100%;养分利用效率=籽粒产量/养分总吸收量.

1.3 数据处理

因 2 个年度试验结果趋势基本一致,本文以

2008—2009 年度数据进行分析. 采用 DPS 12.5 统计分析软件进行方差分析, 差异显著性检验用 LSD 法.

2 结果与分析

2.1 灌水模式对冬小麦总茎数和单株茎蘖数的影响

由表 1 可知,越冬前和拔节期,冬小麦总茎数和单株茎蘖数以浇越冬水处理高于不浇越冬水处理,两时期单株茎蘖数分别提高 0.39 ~ 0.49 个和 0.63 ~ 1.15 个,说明浇越冬水可促进冬前和早春分蘖. 灌水量对越冬前总茎数和单株茎蘖数基本无影响,这与足墒播种可满足冬小麦越冬前水分需要,浇越冬水主要是塌实土壤,克服秸秆还田后土壤悬松吊根有关;孕穗期总茎数和单株茎蘖数随浇水次数的增加而增加,差异达极显著水平;浇 2 水处理中 W+J>W+B,且以 W I +J III 处理最高;浇 1 水处理中 J>W,以 J III 处理较高,这与拔节期灌水减缓分蘖两极分化有关.

表 1 灌水模式对冬小麦总茎数和单株茎蘖数的影响  
Table 1 Effect of irrigation modes on total tillers and tillers per plant of winter wheat

处理 Treatment	基本苗 Basical seedlings (10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	越冬前 Before winter stage		拔节期 Jointing stage		孕穗期 Booting stage	
		总茎数	单株茎蘖数	总茎数	单株茎蘖数	总茎数	单株茎蘖数
		Total tillers (10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	Tillers per plant	Total tillers (10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	Tillers per plant	Total tillers (10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	Tillers per plant
W <sub>0</sub>	473±13aA	835±32bB	1.77±0.08bB	1338±22dD	2.83±0.03dD	518±79fD	1.09±0.03fD
W I	468±8aA	1060±35aA	2.26±0.09aA	1746±54bB	3.73±0.05cB	587±47eC	1.25±0.08eC
W II	468±18aA	1058±24aA	2.26±0.08aA	1854±73aA	3.97±0.01aA	597±44deC	1.28±0.05deC
J II	472±17aA	852±39bB	1.81±0.05bB	1462±86cC	3.10±0.07cC	626±35cdeBC	1.32±0.02cdeBC
J III	469±9aA	846±30bB	1.80±0.08bB	1406±85cC	2.99±0.12cC	647±104cdABC	1.38±0.20cdABC
W I +J III	470±17aA	1030±38aA	2.21±0.11aA	1762±55bB	3.79±0.02bB	702±84aA	1.51±0.13aA
W I +B III	475±10aA	1045±59aA	2.20±0.10aA	1773±102bB	3.73±0.13cB	667±38abcAB	1.41±0.05abcABC
W II +J II	469±12aA	1047±42aA	2.23±0.11aA	1870±131aA	3.98±0.18aA	679±47abAB	1.45±0.06abAB
W II +B II	469±13aA	1033±84aA	2.20±0.16Aa	1833±40aA	3.91±0.03aA	631±23cdeBC	1.35±0.01cdeBC

同列不同、大小写字母表示处理间差异分别达显著 ( $P<0.05$ ) 和极显著 ( $P<0.01$ ) 水平 Different and capital small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 and 0.01 levels, respectively. 下同 The same below.

表 2 灌水模式对冬小麦产量及产量构成因素的影响  
Table 2 Effect of irrigation modes on grain yield and yield components of winter wheat

处理 Treatment	成穗数 Spike number (10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Kernel number per spike	千粒重 1000-kernel mass (g)	籽粒产量 Grain yield (kg · hm <sup>-2</sup> )	增幅 Increasing extent (%)
W <sub>0</sub>	505±24dD	25.3±0.5eD	46.7±0.7bBC	5897±86hF	—
W I	580±46bcBC	26.8±1.1dC	46.7±0.5bBC	6644±80fDE	12.7
W II	589±16bBC	27.5±1.2abA	46.5±0.2bcCD	6727±34eD	14.1
J II	562±25cC	28.2±0.9bAB	46.5±1.0bcCD	6558±132gE	11.2
J III	603±20bB	28.5±1.2abA	46.4±0.6bcdCD	6719±44eD	13.9
W I +J III	646±57aA	28.3±0.6bAB	46.0±0.7cdCD	7830±121aA	32.8
W I +B III	599±41bB	29.1±0.4aA	47.5±1.0aA	7262±69cC	23.1
W II +J II	605±24bB	28.5±1.5abA	45.9±0.9dD	7690±107bB	30.4
W II +B II	586±33bcBC	28.8±0.8cBC	47.4±1.2aAB	7170±152dC	21.6

表 3 灌水模式对冬小麦干物质积累和转移的影响  
Table 3 Effect of irrigation modes on dry matter accumulation and translocation of winter wheat (g)

处理 Treatment	灌浆初期积累量 Accumulstion at early filling stage			成熟期积累量 Accumulation at maturity stage			转移量 Translocation amount		积累量 Accumulation
	叶片 Leaf	茎秆 Stem	穗部 Ear	叶片 Leaf	茎秆 Stem	穗部 Ear	叶片 Leaf	茎秆 Stem	穗部 Ear
	Leaf	Stem	Ear	Leaf	Stem	Ear	Leaf	Stem	Ear
W <sub>0</sub>	0. 249	0. 438	0. 526	0. 115	0. 416	1. 182	-0. 134	-0. 022	0. 656
W I	0. 239	0. 434	0. 593	0. 115	0. 415	1. 244	-0. 124	-0. 019	0. 651
W II	0. 248	0. 454	0. 613	0. 111	0. 413	1. 280	-0. 137	-0. 041	0. 667
J II	0. 261	0. 443	0. 645	0. 116	0. 419	1. 338	-0. 145	-0. 024	0. 693
J III	0. 274	0. 473	0. 684	0. 118	0. 428	1. 359	-0. 156	-0. 045	0. 675
W I +J III	0. 296	0. 500	0. 625	0. 135	0. 439	1. 322	-0. 161	-0. 061	0. 697
W I +B III	0. 315	0. 463	0. 623	0. 138	0. 441	1. 353	-0. 177	-0. 022	0. 730
W II +J II	0. 289	0. 486	0. 613	0. 123	0. 438	1. 316	-0. 166	-0. 048	0. 703
W II +B II	0. 308	0. 467	0. 616	0. 135	0. 443	1. 336	-0. 173	-0. 024	0. 720

2.3 灌水模式对冬小麦干物质积累和转移的影响

由表 3 可知,冬小麦灌浆期茎叶有干物质转移,穗部有干物质积累. 叶片干物质转移量随灌水次数的增加而增加;浇 2 水处理中 W+B>W+J,浇 1 水处理中 J>W;同一灌水时期,浇 2 水时,后期增量灌水可促进干物质转移,浇 1 水时,随灌水量增加干物质转移量增加. 茎秆干物质转移量以 W+J 处理较多,且拔节期增量灌水处理最多. 穗部干物质积累量随灌水次数的增加而提高,浇 2 水处理中 W+B>W+J,浇 1 水处理中 J>W;同一灌水模式下,总灌水量对干物质积累量的影响相对较小.

2.4 灌水模式对冬小麦土壤水分和籽粒水分利用效率的影响

播前试验田土壤贮水量为 441 mm、小麦生育期间有效降雨量均为 179 mm. 由表 4 可知,冬小麦生育期总耗水量随浇水次数的增加而提高,浇 2 水处理中 W+J>W+B,且后期增量灌水处理较低,浇 1 水处理中 J III>W II>J II>W I. 生育期浇水使籽粒水分利用效率降低,同一灌水模式下,灌水量多的处理籽粒水分利用效率相对较低;同一灌水量条件下,随灌水时期推迟籽粒水分利用效率降低. 灌水处理中

W I 的籽粒水分利用效率最高,达 1. 50 kg · mm<sup>-1</sup>, W I +J III 次之,W II +B II 最低. 可见,冬前限量灌水、拔节期增量灌水可提高冬小麦籽粒水分利用效率.

2.5 灌水模式对冬小麦肥料表观利用率和养分利用效率的影响

由表 5 可知,N、P、K 吸收量和表观利用率随灌

表 4 灌水模式对冬小麦土壤水分和籽粒水分利用效率的影响  
Table 4 Effect of irrigation modes on soil water and water use efficiency of grain of winter wheat

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount (mm)	收获期土壤贮水量 Soil water storage at maturity stage (mm)	田间总耗水量 Total water consumption (mm)	籽粒水分利用效率 Water use efficiency of grain (kg · mm <sup>-1</sup> )
W <sub>0</sub>	0	360	260	1. 56
W I	45	370	295	1. 50
W II	75	376	319	1. 40
J II	75	379	316	1. 38
J III	90	380	330	1. 36
W I +J III	135	392	363	1. 44
W I +B III	135	416	339	1. 43
W II +J II	150	399	372	1. 38
W II +B II	150	408	362	1. 32

表 5 灌水模式对冬小麦肥料利用率的影响  
Table 5 Effect of irrigation modes on fertilizer use efficiency of winter wheat

处理 Treatment	籽粒吸收量 Grain uptake (kg · hm <sup>-2</sup> )			总吸收量 Total uptake (kg · hm <sup>-2</sup> )			表观利用率 Apparent use efficiency (%)			养分利用效率 Nutrient use efficiency		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
W <sub>0</sub>	136. 4	18. 3	40. 6	159. 0	30. 9	141. 5	25. 5	11. 0	26. 7	37. 1	190. 8	41. 7
W I	142. 8	20. 5	42. 6	167. 4	33. 5	148. 3	29. 2	13. 0	33. 1	39. 7	198. 3	44. 8
W II	143. 4	20. 9	43. 6	167. 3	34. 0	152. 2	29. 2	13. 4	36. 8	40. 2	197. 9	44. 2
J II	146. 8	20. 1	42. 6	169. 5	33. 0	149. 0	30. 1	12. 6	33. 8	38. 7	198. 7	44. 0
J III	153. 4	21. 0	44. 4	176. 9	34. 2	153. 6	33. 4	13. 5	38. 1	38. 0	196. 5	43. 7
W I +J III	163. 6	23. 2	48. 0	187. 9	37. 6	161. 9	38. 3	16. 0	46. 1	41. 7	208. 2	48. 4
W I +B III	155. 3	22. 2	45. 9	179. 8	37. 1	160. 4	34. 7	15. 6	44. 6	40. 4	195. 7	45. 3
W II +J II	159. 8	22. 7	46. 9	183. 4	36. 5	161. 2	36. 3	15. 2	45. 4	41. 9	210. 7	47. 7
W II +B II	152. 6	21. 9	44. 4	176. 6	36. 1	160. 0	33. 3	14. 9	44. 2	40. 6	198. 6	44. 8

不施肥对照区 N、P、K 吸收量为:N 101. 68 kg · hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15. 98 kg · hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 113. 55 kg · hm<sup>-2</sup> Total nutrient uptake of the control was: N 101. 68 kg · hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15. 98 kg · hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 113. 55 kg · hm<sup>-2</sup>, respectively.



水次数和灌水量的增加而提高。浇 1 水处理中  $J > W$ , 浇 2 水处理中  $W + J > W + B$ , 以  $W I + J III$  处理最高, 其 N、P、K 表观利用率分别达 38.3%、16.0% 和 46.1%, 分别比  $W_0$  处理提高 12.9%、5.0% 和 19.4%, 比浇 1 水处理提高 4.9% ~ 9.2%、2.5% ~ 3.4% 和 8.0% ~ 13.0%。N、P、K 利用效率随灌水次数的增加而提高; 浇 1 水处理中  $W > J$ , 浇 2 水处理中  $W + J > W + B$ ; 同一灌水模式下, 除拔节水外, N、P、K 利用效率随灌水量的增加而提高。

### 3 讨 论

研究表明, 灌水量相同时, 灌水分配方式将影响小麦产量和水分利用效率<sup>[1,16]</sup>, 苗期灌水主要增加分蘖提高穗数, 拔节期灌水增加可育小穗数<sup>[17]</sup>, 孕穗期至灌浆期灌水可防叶片早衰和光合能力下降, 使灌浆期延长, 千粒重提高从而增产<sup>[18-20]</sup>。也有研究表明, 小麦产量与灌水量呈抛物线型关系<sup>[21]</sup>, 适度限量灌溉可提高小麦产量和水分利用效率<sup>[22-23]</sup>。本研究表明, 玉米秸秆还田后足墒播种, 浇越冬水促进了冬前及早春分蘖; 浇拔节水可提高成穗率使成穗数增加; 灌水次数增加和灌水时期推迟使穗粒数增加; 浇孕穗水有利于提高千粒重。越冬水灌水量对冬前和早春分蘖数的影响较小, 拔节期增加灌水量有利于改善产量构成因素。小麦产量随灌水次数的增加而提高, 浇 1 水时, 以浇越冬水产量较高; 浇 2 水时, 以  $W + J$  处理产量较高, 并以冬前限量灌水、拔节期增量灌水的  $W I + J III$  处理产量最高。

冬小麦籽粒产量的 70% ~ 80% 来自抽穗后绿色器官的光合产物和干物质转移, 其中穗部和旗叶约占 60% 以上<sup>[18,24]</sup>。研究表明, 土壤含水量影响小麦干物质和氮素的运转及花后光合产物向籽粒的输入量, 拔节期和成熟期灌水有利于干物质从茎叶向籽粒转移, 干旱和渍水均能降低旗叶光合速率和叶绿素含量, 加速叶片衰老, 影响干物质积累和转移, 降低产量<sup>[1,12,20]</sup>。本研究表明, 灌水次数增加和灌水时期推迟均促进了叶片中干物质转移, 使穗部干物质积累量增加, 浇 1 水处理中  $J > W$ , 浇 2 水处理中  $W + B > W + J$ , 且后期增量灌水更有利于干物质转移, 灌水量对穗部干物质积累的影响相对较小。

研究表明, 底墒充足可促进冬小麦根系下扎<sup>[5]</sup>, 浇拔节水和开花水可促进根系对 N、P、K 养分的吸收, 提高冬小麦产量和水肥利用效率<sup>[1,3,11-12,14,19]</sup>。灌水量与氮素吸收、分配、转运存在调控和互补效应, 以灌水起主导作用<sup>[24]</sup>。本研究表

明, 灌水量相同时, 灌水时期推迟使籽粒水分利用效率降低, 灌水处理中采取限量浇越冬水、后期增量灌水有利于提高籽粒水分利用效率。随灌水次数和灌水量增加, 籽粒中 N、P、K 吸收量和表观利用率提高; 浇 1 水中以  $W > J$ , 浇 2 水中以  $W + J > W + B$ , 并以  $W I + J III$  处理最高。因此, 在本试验条件下, 连续秸秆还田后, 土壤有机质含量提高, 保肥保水蓄水能力增强, 而旋耕播种使土壤悬虚, 影响小麦次生根和分蘖发生, 针对这种情况, 采取限量浇灌越冬水, 塌实土壤, 满足分蘖对水分的需求, 并在拔节期增量灌水, 满足冬小麦后期生长发育对水分的需求, 可提高氮、磷、钾肥的吸收、表观利用率和籽粒水分利用效率, 实现增产。但有关该灌水模式和灌水量对小麦光合特性及生理特性的影响还有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] Deng J (邓洁), Chen J (陈静), He K-N (贺康宁). Effect of irrigation amount and stage on water consumption characteristics and physiological characteristics of winter wheat. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2009, **16**(2): 191-194 (in Chinese)
- [2] Lü L-H (吕丽华), Hu Y-K (胡玉昆), Li Y-M (李雁鸣), et al. Effect of irrigating treatments on water use efficiency and yield of different wheat cultivars. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2007, **27**(1): 88-92 (in Chinese)
- [3] Zheng C-Y (郑成岩), Yu Z-W (于振文), Zhang Y-L (张永丽), et al. Effects of irrigation amount on water use characteristics and grain yield of wheat under different nitrogen application rates. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2799-2805 (in Chinese)
- [4] Ju L (巨龙), Wang Q-J (王全九), Wang L-F (王琳芳), et al. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2007, **23**(1): 86-90 (in Chinese)
- [5] Li FM, Yan X, Li FR, et al. Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 2001, **47**: 25-35
- [6] Li Q, Dong B, Qiao Y, et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 1676-1682
- [7] Hu M-Y (胡梦芸), Zhang Z-B (张正斌), Xu P (徐萍), et al. Relationship of water use efficiency with photoassimilate accumulation and transport in wheat under deficit irrigation. *Acta Agronomica Sinica* (作物学

- 报), 2007, **33**(11): 1884–1891 (in Chinese)
- [8] Shan C-J (单长卷). Effect of different drought soil on water physiology and biomass of winter wheat. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2006, **26**(2): 127–129 (in Chinese)
- [9] Kang S, Zhang L, Liang Y, *et al.* Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2002, **55**: 203–216
- [10] Fan X-M (范雪梅), Jiang D (姜 东), Dai T-B (戴廷波), *et al.* Effects of nitrogen supply on flag leaf photosynthesis and grain starch accumulation of wheat from its anthesis to maturity under drought or water logging. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(10): 1883–1888 (in Chinese)
- [11] Zhao B-Z (赵炳梓), Xu F-A (徐富安). N, P, K uptake by winter wheat and maize as influence by different combinations of irrigation water and nitrogen fertilizer. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2000, **6**(3): 260–266 (in Chinese)
- [12] Wang X-Y (王小燕), Zheng C-Y (郑成岩), Yu Z-W (于振文), *et al.* Effects of water-nitrogen interaction on soil water utilization by wheat and fructan content in wheat stem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(8): 1876–1882 (in Chinese)
- [13] Li S-Q (李世清), Tian X-H (田霄鸿), Li S-X (李生秀). Physiological compensation effects of nutrient on winter wheat in dryland. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2000, **20**(1): 22–28 (in Chinese)
- [14] Wang Z-H (王朝辉), Wang B (王 兵), Li S-X (李生秀). Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(8): 1339–1343 (in Chinese)
- [15] Wang D-M (王德梅), Yu Z-W (于振文). Effects of irrigation amount and stage on water consumption characteristics and grain yield of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(9): 1965–1970 (in Chinese)
- [16] Meng Z-J (孟兆江), Sun J-S (孙景生), Duan A-W (段爱旺), *et al.* Grain filling characteristics of winter wheat with regulated deficit irrigation and its simulation models. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(1): 18–23 (in Chinese)
- [17] Xiao J-F (肖俊夫), Liu Z-J (刘战军), Duan A-W (段爱旺), *et al.* Studies on effects of irrigation systems on the grain yield constituents and water use efficiency of winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2006, **25**(2): 20–23 (in Chinese)
- [18] Han H-F (韩惠芳), Li Q-Q (李全起), Dong B-D (董宝娣), *et al.* Effects of irrigation frequency and stages on grain yield and quality characteristics of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(6): 1548–1555 (in Chinese)
- [19] Wang X-Y (王小燕), Yu Z-W (于振文). Effect of irrigation rate on absorption and translocation of nitrogen under different nitrogen fertilizer rate in wheat. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(10): 3015–3024 (in Chinese)
- [20] Li Q-Q, Chen YH, Liu MY, *et al.* Effect of irrigation to winter wheat on the soil moisture, evapotranspiration, and water use efficiency of summer maize in North China. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007, **50**: 2073–2079
- [21] Zhang Z-X (张忠学), Yu G-R (于贵瑞). Effects of irrigation scheduling on development and water use efficiency in winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2003, **22**(2): 1–4 (in Chinese)
- [22] Ma R-K (马瑞昆), Jia X-L (贾秀领), Zhang Q-G (张全国), *et al.* Physiological characteristics of water in wheat cultivar SX733: The effect of water-saving irrigation. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(9): 1446–1451 (in Chinese)
- [23] Sun HY, Liu CM, Zhang XY, *et al.* Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2006, **85**: 211–218
- [24] Wang D-M (王德梅), Yu Z-W (于振文), Zhang Y-L (张永丽), *et al.* Changes in nitrogen accumulation, distribution, translocation and nitrogen use efficiency in different wheat cultivars under different irrigation conditions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(5): 1041–1048 (in Chinese)

---

作者简介 党建友,男,1972年生,副研究员.主要从事小麦水肥高效栽培研究,发表论文16篇. E-mail: dangjiyou8605@sina.com

责任编辑 张凤丽

---