

# 灌水量和灌水时期对小麦耗水特性和 氮素积累分配的影响

杨晓亚<sup>1</sup>, 于振文<sup>1,\*</sup>, 许振柱<sup>2</sup>

(1. 山东农业大学农业部小麦栽培生理与遗传改良重点开放实验室, 泰安 271018;

2. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

**摘要:**在田间试验条件下,以小麦品种济麦 20 为材料,研究了不同灌水处理对小麦的耗水特性和氮素积累分配的影响。试验设置 7 个处理:不浇水(W0);拔节期和开花期浇水,每次灌水量为 30mm(W1)、60mm(W2)、90mm(W3);拔节期、开花期和灌浆期浇水,每次灌水量为 30mm(W4)、60mm(W5)、90mm(W6)。研究表明:(1)随灌水量的增加,总耗水量逐渐增加,土壤耗水量和降水量占总耗水量的比例降低。产量和水分利用率最高的 W2 和 W4 处理总耗水量分别为 413.87、362.15mm;灌溉量、降水量、土壤耗水量分别占总耗水量的比例为 29%、36.34%、34.66%,24.85%、41.53%、33.62%;两个处理比较,W4 处理提高了对降水的利用比例,但降低了对灌溉水的利用比例。通过对全生育期 0~200cm 不同土层土壤耗水量的研究得出,W0 和 W1 处理的深层土壤耗水量较低,W3、W5、W6 处理的 0~200cm 每个土层土壤耗水量均较低,对 W2 和 W4 处理,小麦能够利用 120~200cm 的深层土壤水分,其土壤贮水消耗量显著增加。(2)W2 处理的籽粒氮素积累量较高,W1、W4 处理籽粒中的氮素分配比例显著高于其它处理,有灌浆水的处理,尤其是灌浆水高于 30mm 的处理,营养器官氮素转移率和贡献率显著降低;W4 处理的籽粒蛋白质含量较高,W2 和 W4 处理的籽粒蛋白质产量显著高于其它处理。(3)籽粒产量随着灌水量的增加先升高后降低,其中 W2 和 W4 处理显著高于其它处理;W4 处理的产量水分利用效率和蛋白质产量水分利用率显著高于其它处理。结果表明,W4 为本试验条件下高产节水的最佳灌水处理。

**关键词:**灌水量;小麦;耗水特性;氮素积累分配;产量

文章编号:1000-0933(2009)02-0846-08 中图分类号:Q142,S181,S314 文献标识码:A

## Effects of irrigation regimes on water consumption characteristics and nitrogen accumulation and allocation in wheat

YANG Xiao-Ya<sup>1</sup>, YU Zhen-Wen<sup>1,\*</sup>, XU Zhen-Zhu<sup>2</sup>

1 Key Laboratory of Wheat Physiology and Genetics Improvement, Ministry of Agriculture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2 Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 0846~0853.

**Abstract:** Agricultural water resource is greatly limited in the Huang-Huai-Hai plain of China, a continental monsoon region in warm temperate zone, especially during winter wheat growth period. No sufficient surface water resources are available for irrigation while the traditional and mostly current irrigation regimes are not well made so far leading to water waste to a certain extent. The experiment was conducted to elucidate the effects of different irrigation treatments on water consumption characteristics, and nitrogen accumulation and allocation in wheat plants. The results may be helpful to determine a best irrigation regime suited for this region.

The experiment was conducted in the field at the Agricultural Experiment Station (latitude 36°09'N, longitude 117°09' E) of Shandong Agricultural University (Taian, Shandong Province, China) during the winter wheat growing season

基金项目:农业部农业结构调整重大技术研究专项资助项目(06-03-04B);国家自然科学基金资助项目(30871478)

收稿日期:2007-09-20; 修订日期:2008-02-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuzw@sdau.edu.cn

(from the fall of 2005 to the summer of 2006), which is located in the central zone in the Huang Huai Hai Plain of China. The winter wheat cultivar was Jimai 20. The experiment had seven treatments; no irrigation during the whole growth season (represented as W0); irrigated at jointing and anthesis stages, and irrigation amount was 30mm(W1), 60mm(W2), 90mm(W3), respectively; irrigated at jointing, anthesis and filling stages, and irrigation amount also was 30mm(W4), 60mm(W5), 90mm(W6), respectively.

Each treatment had 3 replicates, with a plot of 1.5m 6m. We mounted the width of 1.5m isolation to put apart every plot. We used water meters to strictly control irrigation amount. Wheat seeds was sowed on October 10 in 2005, with plant density of 180 m<sup>-2</sup>.

The results of this experiment showed that, with the increase in irrigation water amount, the total water consumption were reduced. The total water consumption amounts of treatment W2 and W4, with the highest yield and water use efficiency were 413.87mm, 362.15mm respectively; the ratio of irrigation amount, precipitation, and soil water consumption amount to total water consumption amount were 29%, 36.34%, 34.66%, 24.85%, 41.53%, 33.62%, respectively. And these compositions of water consumption ratio promoted wheat production and water use efficiency. Compared with treatment W2 treatment W4 increased the ratio of precipitation to total water consumption amount and reduced the ratio of irrigation amount to total water consumption amount. Through measuring soil water consumption amount of 0 to 200cm different layers during the whole growth, we found that deep soil layer water consumption amounts of treatment W0 and W1 were less and each soil layer water consumption amount of treatment W3, W5, W6 from 0 to 200cm were lower. Treatments W2 and W4 would take advantage of 120 to 200cm soil layer moisture, because of great water demand by increasing soil water consumption amount. Through determining nitrogen concentration, the grain nitrogen accumulation amount of treatment W2 was the highest. The proportion of nitrogen accumulation of treatment W1 and W4 was significantly higher than other treatments. For the treatments irrigated at filling stage, especially with irrigation amount of more than 30mm, the nitrogen translocation efficiency and contribution proportion of vegetative organs were reduced significantly. The grain protein content of treatment W4 was the highest. With the irrigation amount increasing, the grain yield first increased, thereafter reduced. The grain protein yield and grain yield of treatment W2 and W4 were not significantly different. The water use efficiency and protein water use efficiency of treatment W4 was significantly higher relative to other treatments. In conclusion, treatment W4 had higher grain yield and water use efficiency, it was suggested that treatment W4 may be the best irrigation regime in irrigation management practices.

**Key Words:** irrigation amount; wheat; water consumption characteristics; nitrogen accumulation and allocation; yield

黄淮海地区水资源总量仅占全国水资源的 6.65%,而灌溉面积却占全国灌溉面积的 40%,水资源供需矛盾尖锐<sup>[1]</sup>;该区域大部分地区常年降雨量为 500~700mm,且主要集中在夏季,小麦生长期降水很少,不能满足小麦生长发育需要。目前,这一地区现行的灌溉制度灌水多,浪费大<sup>[2]</sup>。因此,发展节水农业是保持可持续发展和缓解水资源供需矛盾的根本措施,其中提高作物水分利用效率和灌溉水利用率已成为迫切需要解决的关键问题<sup>[3]</sup>。

如何合理地利用有限的农业水资源,提高水分利用效率,人们作了较多的研究工作。有研究表明,华北地区冬小麦最佳灌水方式是:丰水年不灌水;平水年灌 1 次水(拔节水);枯水年灌 2 次水(拔节水和抽穗水),每次灌水量 60~75mm<sup>[4]</sup>;在不同生育时期灌水量为 0~90mm 范围内,平均增产 13.0%~39.6%,水分利用效率提高 7.0%~18.0%<sup>[5]</sup>,拔节期的水分对于冬小麦产量和水分利用效率有重要的影响<sup>[6]</sup>,生育后期过多灌水或土壤严重缺水均显著影响冬小麦的土壤水分的利用效率<sup>[7,8]</sup>。前人的研究多注重于不同生育时期灌水对产量和水分利用效率的影响,对每次灌水量对籽粒产量和耗水特性的影响研究尚少。本文在前人的研究基础上,研究不同的灌水量和灌水时期相结合对冬小麦耗水特性和氮素积累分配的影响,旨在为冬小麦的节水

生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设计

试验于 2005 ~ 2006 年在山东省泰安市山东农业大学农场试验田进行。试验点位于东经 117°9', 北纬 36°9'。0 ~ 20cm 土层土壤有机质含量 1.8%, 全氮 0.13%, 碱解氮 77.4mg/kg, 速效磷 38.2mg/kg, 速效钾 80.0mg/kg。试验地播种前 0 ~ 20cm、20 ~ 40cm、40 ~ 60cm、60 ~ 80cm、80 ~ 100cm、100 ~ 120cm、120 ~ 140cm、140 ~ 160cm、160 ~ 180cm、180 ~ 200cm 土层的土壤含水量分别为: 16.58%、19.02%、19.67%、19.98%、20.28%、22.46%、25.52%、30.27%、26.72%、28.94%。小麦生育期间降水量为播种至冬前期 33 mm、冬前至拔节期 16.3mm、拔节至开花期 23.5mm、开花至灌浆期 60.3mm、灌浆至成熟期 17.3mm。

供试品种为强筋小麦济麦 20, 以 J20 表示。试验设置 2 个浇水时期, 分别为拔节期 + 开花期, 拔节期 + 开花期 + 灌浆期; 在每个浇水时期内设置每次浇水 30mm、60mm、90mm 的 3 个灌水量处理, 由此构成 W0、W1、W2、W3、W4、W5、W6, 7 个处理 (表 1)。小区面积为 1.5m × 6m = 9m<sup>2</sup>, 随机区组排列, 3 次重复。小区之间, 留 1.5m 的隔离区。基肥用量为 N105kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 105kg/hm<sup>2</sup>; 拔节期追施 N105kg/hm<sup>2</sup>。所施肥料为尿素 (含 N 46.4%)、磷酸二铵 (含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%, N 18%)、硫酸钾 (含 K<sub>2</sub>O 52%)。2005 年 10 月 10 日播种, 基本苗 180 株/m<sup>2</sup>。灌水量用水表计量。

### 1.2 田间取样与测定方法

开花期挂牌标记同一日开花的单茎。从每个小区取 30 个单茎, 分成茎 + 叶鞘、叶、穗 3 部分, 置于 70℃ 烘至恒重后, 测定干物重; 成熟期于每个小区取 30 个单茎, 分成茎 + 叶鞘、叶、颖壳 + 穗轴、籽粒四部分分别测定干物质重。成熟期在田间调查穗数和每穗粒数, 收获计产, 测定千粒重。采用国标 GB2905-82 (半微量凯氏定氮法) 方法测定植株各器官的含氮量。用土钻取 0 ~ 200cm 土层土样, 每 20cm 一层, 称鲜重, 在 105℃ 下烘至恒重, 称干重。

### 1.3 计算方法

冬小麦氮素积累与转运的计算公式如下<sup>[9-10]</sup>:

各器官的氮素分配比例 (%) = 各器官的氮素积累量 / 单茎氮素积累量 × 100%

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

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%

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

水分利用效率的计算方法为<sup>[11]</sup>: 水分利用效率 (kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>) = 作物籽粒产量 / 作物生育期耗水量, 作物耗水量用农田水分平衡法<sup>[1]</sup>计算, 水分平衡方程式为:  $ET = \Delta S + I + P$ 。P 为降雨量, I 为灌溉量, 由水表测定;  $\Delta S$  为土壤贮存水变化量, 用水层厚度  $\Delta h$  表示:  $\Delta h (\text{mm}) = 10 \sum (\Delta \theta_i \times Z_i)$ ,  $i(1, m)$ 。 $\Delta \theta_i$  为土壤某一层在给定时段内体积含水量变化,  $Z_i$  为土壤层次厚度 (cm),  $i, m$  是从土壤第  $i$  层到第  $m$  层。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对总耗水量、总耗水量中不同来源水分及其占总耗水量的比例的影响

由表 2 可以看出, W0 处理的总耗水量显著低于灌水处理, 其土壤耗水量和降水量占总耗水量的比例显著高于灌水处理, 分别为 49.59% 和 50.41%; 表明在不灌水的条件下, 小麦生长主要消耗土壤水和降水。

表 1 水分处理方案

Table 1 The irrigation program of water treatment (mm)				
处理 Treatment	灌水时期 Irrigation stage			灌水总量 Total irrigation amount
	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	
W0	0	0	0	0
W1	30	30	0	60
W2	60	60	0	120
W3	90	90	0	180
W4	30	30	30	90
W5	60	60	60	180
W6	90	90	90	270

灌水处理之间相比较可以看出,灌水量在 60 ~ 120mm 之间的 W1、W2、W4 处理,总耗水量较少,土壤贮水消耗量较多,土壤耗水量和降水量占总耗水量的比例较高;其中 W2 和 W4 处理的总耗水量中土壤耗水所占比例无显著差异,灌水量和降水量所占比例差异显著,灌水量较少的 W4 处理降水量占总耗水量的比例显著大于 W2 处理。W3、W5、W6 处理灌水量较高,在 180 ~ 270mm 之间,总耗水量以及灌溉水占总耗水量的比例显著高于其它处理。

以上结果表明,增加灌水量显著促进了小麦对灌溉水的吸收利用,显著降低了小麦对土壤贮水和降水的吸收利用;其中土壤耗水量和灌水量占总耗水量的比例变化幅度较大,分别为 46.03% 和 45.22%,降水量占总耗水量的比例变化幅度为 16.61%,表明提高灌水和土壤贮水占总耗水量的比例是提高水分利用率的主要途径。

表 2 不同处理对不同来源水分消耗量占总耗水量的百分率的影响

Table 2 Effects of different treatment on the ratio of different water resource consumption amount to total water consumption amount

处理 Treatment	总耗水量 Total water consumption amount (mm)	灌水量 Irrigation amount (mm)	灌溉量占 总耗水量比例 RRT (%)	降水量 Precipitation (mm)	降水量占 总耗水量比例 RPT (%)	土壤贮水消耗量 Soil water consumption amount (mm)	土壤耗水量占 总耗水量比例 RST (%)
W0	298.40e	0	0	150.40	50.41a	148.00a	49.59a
W1	358.99d	60	16.72f	150.40	41.90b	148.59a	41.38b
W2	413.87c	120	29.00d	150.40	36.34c	143.47a	34.66c
W3	428.37b	180	42.02b	150.40	35.11d	97.96c	22.86e
W4	362.15d	90	24.85e	150.40	41.53b	121.74b	33.62c
W5	445.04a	180	40.45c	150.40	33.80e	114.63b	25.75d
W6	435.93ab	270	61.94a	150.40	34.50de	15.53d	3.56f

同一列数字无相同字母间差异达 5% 的显著水平;下同 Values without the same letters in the same column are significant at 5% level, the same as below; RRT: the ratio of irrigation amount to total water consumption amount; RPT: the ratio of precipitation to total water consumption amount; RST: the ratio of soil water consumption amount to total water consumption amount

## 2.2 不同处理对 0 ~ 200cm 各个土层土壤耗水量的影响

由图 1 可以看出,小麦可以利用 0 ~ 200cm 土层的土壤水分。W0 处理 20 ~ 80cm 各土层土壤耗水量显著高于其它处理,80cm 以下各土层土壤耗水量显著减少。各灌水处理相比较,20 ~ 100cm 各土层的土壤耗水量 W1 > W2 > W4 > W3, W5、W6 显著降低;W1 处理 100cm 以下各土层土壤耗水量显著减少;W2、W4、W5 处理 140cm 以下各土层土壤耗水量显著高于其它处理,其它处理之间无显著差异。W2、W4 处理 0 ~ 200cm 各土层的土壤耗水量均较高。W6 处理各土层土壤的耗水量均在 6.44mm 以下,表明灌水过多显著抑制了冬小麦对土壤水分的利用。

## 2.3 不同处理对不同生育时期耗水强度的影响

由图 2 可以看出,耗水强度最大的时期是开花至灌浆期,最小的时期是冬前至拔节期。各个生育时期的耗水强度先降低后增加,到灌浆至成熟期又呈降低趋势。从拔节到灌浆期,各个处理随灌水量的增加耗水强度呈增加趋势,处理之间差异显著。灌浆至成熟期,浇灌浆水的 W4、W5、W6 处理,日耗水量均显著大于每次灌水量相同的不浇灌浆水的处理;W5 处理的日耗水量显著高于其它处理;此时期 W3 和 W6 处理日耗水量较小,

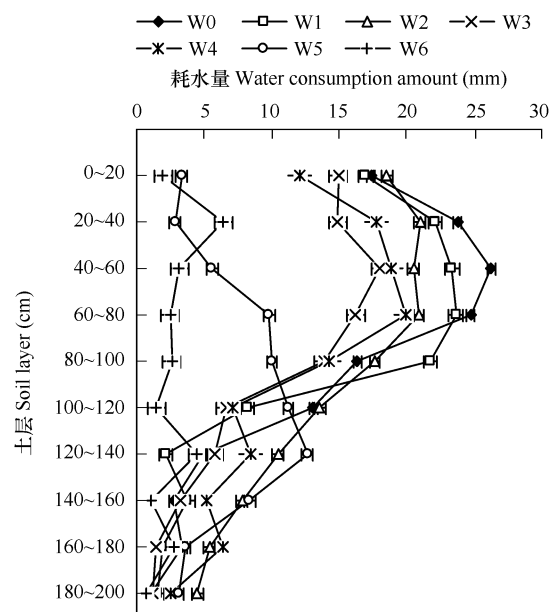


图 1 不同处理对不同土层土壤耗水量的影响

Fig. 1 Effect of different treatments on water consumption amount of different soil layer

主要是因为这两个处理的土壤贮水消耗量显著低于其它处理。

## 2.4 不同处理对成熟期小麦不同器官氮素积累与分配的影响

由表 3 可以看出,成熟期各器官中氮素积累量以籽粒中最多,叶中的最少,茎+叶鞘和颖壳+穗轴居中。W0 处理籽粒中的氮素积累量显著低于其它处理,W6、W2、W3 处理显著高于其它处理。单茎氮素积累量的变化规律与此相同,表明土壤干旱不利于植株积累较多的氮素,亦影响到籽粒中氮素的积累;增加灌水量有利于提高植株中的氮素积累量,也提高了籽粒中的氮素积累量。W1、W4 处理籽粒中的氮素积累比例显著高于其它处理,表明每次灌水量高于 30mm 不利于营养器官中的氮素向籽粒中的转运;W3、W5、W6 处理的营养器官的氮素积累量和积累比例显著高于其它处理,表明过高的灌水量处理氮素均滞留在营养器官中,向籽粒中的转运比例降低。

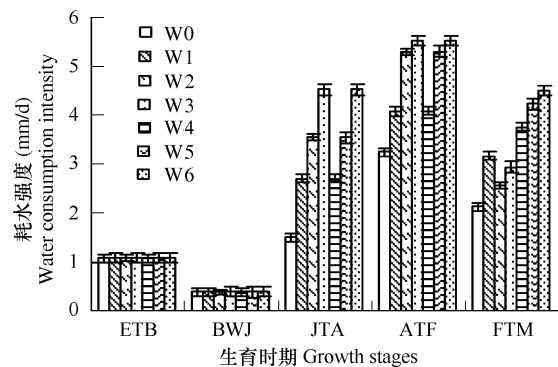


图 2 不同处理对冬小麦不同生育时期耗水强度的影响

Fig. 2 Effect of different treatments on water consumption intensity of different growth stages

ETB: 出苗至冬前 Emerging to before winter; BWJ: 冬前至拔节 Before winter to jointing; JTA: 拔节至开花 Jointing to anthesis; ATF: 开花至灌浆 Anthesis to filling; FTM: 灌浆至成熟 Filling to maturity

表 3 成熟期氮素在小麦单茎中不同器官的分配

Table 3 Distribution of nitrogen in different organs of wheat stem at maturity stage

处理 Treatments	籽粒 Grains		叶 Leaves		茎+叶鞘 Stems and sheaths		穗轴+颖壳 Spike axis and kernel husk		单茎氮素积累量 TNA (mg)
	积累量 NAA (mg·stem <sup>-1</sup> )	积累比例 PNA(%)	积累量 NAA (mg·stem <sup>-1</sup> )	积累比例 PNA(%)	积累量 NAA (mg·stem <sup>-1</sup> )	积累比例 PNA(%)	积累量 NAA (mg·stem <sup>-1</sup> )	积累比例 PNA(%)	
W0	21.00d	74.65d	1.71e	6.07b	2.42de	8.61cd	2.99b	10.66a	28.11d
W1	23.13c	77.99ab	1.98c	6.67a	2.41e	8.12d	2.14e	7.22d	29.65c
W2	26.07ab	75.19d	2.02c	5.82bc	3.11b	8.98bc	3.47a	10.01b	34.68a
W3	25.93ab	75.86cd	2.24a	6.58a	3.46a	10.12a	2.54d	7.43d	34.17a
W4	23.30c	78.56a	1.82d	6.13b	2.59d	8.75c	1.95f	6.56e	29.66c
W5	24.76b	77.10bc	1.77de	5.52c	2.84c	8.86bc	2.73c	8.52c	32.11b
W6	26.25a	74.74d	2.15b	6.12b	3.30a	9.41b	3.41a	9.72b	35.12a

NAA, PNA and TNA stand for nitrogen accumulation amount, proportion of nitrogen accumulation, and total nitrogen amount, respectively

## 2.5 不同处理对开花后营养器官氮素向籽粒中转移的影响

由表 4 可以看出,W0 处理开花期和成熟期营养器官氮素积累量、营养器官氮素向籽粒中的转移量、转移率和贡献率均显著低于灌水处理,表明严重土壤干旱显著抑制了开花期氮素积累量和营养器官氮素向籽粒中的转运。

开花期灌溉处理的植株氮素积累量随着灌水量的增加而增加,W1 和 W2 处理差异不显著,表明增加灌水量有利于开花期植株的氮素积累。灌溉处理的氮素转移量无显著差异,转移率以 W1 和 W2 处理显著高于其它处理,表明适量灌溉、适度土壤干旱有利于营养器官氮素向籽粒中的分配,高灌水量抑制了营养器官氮素向籽粒中的转运。灌水处理的贡献率随着灌水量的增加依次降低。有灌浆水的 W4、W5、W6 处理转移率和贡献率均显著低于相同单次灌水量无灌浆水的 W1、W2、W3 处理,灌浆水不利于氮素向籽粒中转运。

## 2.6 不同处理对籽粒产量、蛋白质产量和水分利用率的影响

由表 5 可以看出,W0 处理的籽粒产量显著低于灌水处理,表明全生育期不灌水显著抑制了冬小麦产量形成;产量水分利用效率显著低于 W2、W4 处理。灌水处理相比较,W2、W4 处理的籽粒产量显著高于其它处理,W2 处理的籽粒产量最高,表明灌水量过低或过高均使小麦产量显著降低;W4 处理的产量水分利用效率

显著高于其它处理,在总灌水量 90 ~ 270mm 之间,随着灌水量的增加产量水分利用效率依次降低,不同的灌水量处理之间差异显著;灌溉水的利用效率随着灌水量的增加依次降低,W4 处理显著高于 W2 处理,W3、W5、W6 处理显著降低。

表 4 开化后营养器官氮素向籽粒中的转移

Table 4 Nitrogen translation from vegetative organs to grain after anthesis

处理 Treatments	营养器官氮素积累量 NAA of vegetative organs		成熟期籽粒 氮素积累量 NAA of grain at maturity (mg·stem <sup>-1</sup> )	转移量 Nitrogen accumulation amount (mg·stem <sup>-1</sup> )	转移率 Translocation efficiency(%)	贡献率 Contribution proportion(%)
	开花期 Anthesis (mg·stem <sup>-1</sup> )	成熟期 Maturity (mg·stem <sup>-1</sup> )				
W0	22.66c	7.12c	21.00d	15.54c	68.59d	74.01d
W1	26.97b	6.53d	23.13c	20.45ab	75.82a	88.42a
W2	28.51ab	6.36d	26.07ab	22.15a	77.68a	84.95b
W3	29.47a	8.60a	25.93ab	20.87ab	70.81c	80.48c
W4	26.97b	7.35c	23.30c	19.63b	72.78b	84.24b
W5	28.51ab	8.24b	24.76b	20.27ab	71.08c	81.85c
W6	29.47a	8.86a	26.25a	20.61ab	69.94cd	78.5cd

NAA: nitrogen accumulation amount

表 5 不同处理对冬小麦的产量、水分利用率、蛋白质产量的影响

Table 5 Effect of different treatments on yield, water-use efficiency and grain protein yield of wheat

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	产量水分利用效率 WUE (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	灌溉水利用效率 Irrigation water-use efficiency (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	蛋白质含量 Content of protein(%)	籽粒蛋白质产量 Grain protein yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	蛋白质产量 水分利用效率 PWUE (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )
W0	4024.25d	15.54b	—	12.17d	489.81d	1.81bc
W1	4919.04c	15.45bc	98.32a	13.31c	654.80c	1.84bc
W2	6370.13a	17.26ab	63.54c	13.17c	839.11ab	2.17ab
W3	5884ab	14.40bc	37.21d	13.31c	753.14ab	1.82bc
W4	6280.46a	19.42a	82.41b	13.98ab	878.08a	2.55a
W5	5343.55bc	14.44bc	38.48d	13.49bc	684.50c	1.64c
W6	5046.98c	11.69c	24.42e	14.39a	726.22c	1.73bc

WUE and PWUE stand for water-use efficiency and protein water-use efficiency respectively

W0 处理的籽粒蛋白质含量显著低于其它处理,W4、W5、W6 处理的籽粒蛋白质含量显著高于 W1、W2、W3 处理。W4、W2 处理的籽粒蛋白质产量显著高于其它处理,W4 处理最高。虽然 W6 处理的籽粒蛋白质含量较高,但是籽粒产量显著低于 W2、W4 处理,所以其籽粒蛋白质产量显著降低。W4 处理的蛋白质产量水分利用效率显著高于其它处理,W2 次之。

### 3 讨论

随着灌水次数的增加,灌水量的增多,灌溉水的利用效率逐渐减小<sup>[1,12]</sup>。同时随灌溉量的减少,总耗水量降低,增加了对土壤水的利用量,主要是增加了对土壤深层贮水的利用<sup>[13]</sup>。随灌溉量和降雨量的增加,冬小麦利用土壤底墒水层次逐渐变浅,对土壤中下层(60 ~ 120cm)利用能力下降<sup>[1]</sup>。李运生等<sup>[14]</sup>通过不同深度灌水、同一深度保持不同田间持水量的研究表明,在生长后期,60cm 以下根系吸水对小麦灌浆具有重要作用。土壤深层储水具有很高的生物有效性,开发利用的潜力很大<sup>[15]</sup>。Adda 研究结果表明,水分胁迫显著影响根的性状和根毛层细胞的大小,严重水分胁迫显著降低了根的长度<sup>[16]</sup>。本试验对总耗水量中 3 个不同来源水分利用比例的研究表明,随着灌水量的增加,灌水量占总耗水量的比例逐渐增加,土壤耗水量和降水量所占比例逐渐降低;7 个处理间相比较,灌水量和土壤耗水量占总耗水量的比例变化幅度较大。通过对 0 ~ 200cm 各个土层土壤贮水消耗量的研究表明,严重水分胁迫的 W0 处理显著抑制了小麦对 80cm 以下土壤水的吸收利

用,灌水量较高的 W6 处理各个土层的耗水量均显著低于其它处理或无显著差异;W2 和 W4 处理能够利用到 200cm 的土壤水分,其各个土层的耗水量均较高,产量和水分利用率均显著高于其它灌水处理,表明 W2 和 W4 的灌水方案有利于根系的发育,在小麦生育期轻度水分亏缺的状况下可以利用深层土壤水分,提高水分利用率。

关于不同灌水量对小麦籽粒氮素积累和转运的影响,前人已有较多研究。李世娟等<sup>[17]</sup>研究认为,在返青、拔节、开花、灌浆期各灌溉 75mm 的水使氮素在小麦营养器官中的分配比例提高,在拔节、开花期各灌溉 75mm 的水更有利于氮素向籽粒转运。Xu 等在遮雨棚条件下利用<sup>15</sup>N 标记的硫酸铵肥料研究了水分亏缺对鲁麦 21 和济南 17 品种营养器官氮素转移的影响,结果表明,灌水量过高或者过低氮的转移量和转移率均降低<sup>[18]</sup>,适当水分亏缺有利于提高营养器官对籽粒的贡献率<sup>[19]</sup>。干旱提高了籽粒蛋白质含量,而渍水使其降低<sup>[20,21]</sup>。本试验结果指出,严重干旱时籽粒蛋白质含量显著降低,营养器官氮素向籽粒中的转移量、转移率均显著降低;灌水量增多时蛋白质含量增高,营养器官氮素对籽粒的贡献率随着灌水量的增加依次降低,单次灌水量相同时灌浆水使氮素转移率和贡献率显著降低。与产量结果相结合,籽粒蛋白质产量随着灌水量的增高先增加后降低,以 W4 处理最高,表明在拔节、开花和灌浆期灌水,每次灌水 30mm 最有利于籽粒蛋白质产量的提高。

有研究表明籽粒产量与灌水量之间呈抛物线关系,适度水分亏缺有益于提高作物产量<sup>[14,22]</sup>和水分利用率<sup>[9]</sup>。当全生育期土壤含水量占田间持水量的 70% 时,冬小麦生物产量最高,但是其籽粒产量和水分利用率不是最高<sup>[23]</sup>;生育后期过多灌水或土壤严重缺水均显著影响冬小麦对土壤水分的利用效率<sup>[7,24]</sup>。随着灌水总量的增加,水分利用效率先于产量达到最大值<sup>[22]</sup>。本试验通过对不同的灌水量和灌水时期相结合对产量和水分利用率的研究表明,总灌水量为 90mm 和 120mm 的 W4 和 W2 处理产量和水分利用率最高,低于或者高于这个灌水量范围的处理产量和水分利用率均显著降低。在拔节期和开花期灌水,每次灌水量为 60mm 的处理(W2)籽粒产量最高;于拔节期、开花期和灌浆期灌水,每次灌水量为 30mm 的处理(W4)水分利用效率最高。上述这两个处理之间的籽粒产量无显著差异,水分利用效率差异显著,表明在本试验条件下,W4 处理是兼顾高产和节水的最佳灌水处理。小麦耗水特性受灌水、降水及土壤水分含量的影响,深入研究不同降水年型条件下的麦田耗水特性,为小麦节水栽培提供理论依据,是进一步研究的内容。

## References:

- [ 1 ] Fang Q X, Chen Y H. Study on the regularity water consumption of winter wheat and its ecological basis under water-saving irrigation conditions. *Acta Agriculturae Boreali-sinice*, 2003, 18(3): 18–22.
- [ 2 ] Wang Z M, Wang P, Lan L W, *et al.* A water-saving and high-yielding cultivation system for bread wheat in Huang-Huai-Hai area of China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2003, 19(4): 22–25.
- [ 3 ] Kang S Z, Zhang J H, Liang Z S, *et al.* The concept of controlled RDI of crops root and its research progress. In: Kang S Z, Cai H J eds. *The theory and practice of alternative irrigation and RDI of crops root*. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 3–12.
- [ 4 ] Wang S F, Zhang X Y, Pei D. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 27–32.
- [ 5 ] Kong X X, Yang Z P, Wu J C, *et al.* The effects of limited irrigation on winter wheat production and water utility. *Acta Agriculturae Boreali-Sinice*, 2005, 20(5): 64–66.
- [ 6 ] Sun H Y, Liu C M, Zhang Y Q, *et al.* Effects of water stress in different growth stage on water consumption and yield in winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(2): 13–16.
- [ 7 ] Xu Z Z, Yu Z W. The effects of limited irrigation on water utility of winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(1): 6–10.
- [ 8 ] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, *et al.* Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1–2): 211–218.
- [ 9 ] Zhao J Y, Y Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(4): 484–490.
- [ 10 ] Zhao M X, Zhou J B, Yang R. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland. *Plant Nutrition*

- and Fertilizer Science, 2006,12(2):143—149.
- [11] Jiang X D, Li Z J, Hou L T. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil  $\text{NO}_3^-$ -N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation. Transactions of the CSAE, 2005,21(7):20—24.
- [12] Zhang Z X, Yu G R. Effects of irrigation scheduling on development and water use efficiency in winter wheat. Journal of Irrigation and Drainage, 2003,22(2):1—4.
- [13] Ju H, Lan X, Li J M, *et al.* Effects of different irrigation systems on winter-wheat yield and water consumption. Journal of China Agricultural University, 2000,5(5):23—29.
- [14] Li Y S, Wang L, Liu S P, *et al.* The Influence of different amounts of water supplied at different depths in soil-root interface on root distribution and yield of winter wheat. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(10):1680—1687.
- [15] Hamlin A. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. Adv. Agron., 1985,38:95—158.
- [16] Adda A, Sahnoun M, Meriem K H, *et al.* Impact of water deficit intensity on durum wheat seminal roots. Comptes Rendus Biologies,2005,328(10-11):918—927.
- [17] Li S J, Zhou D X, Zhu Y P, *et al.* Effects of water and nitrogen application on nitrogen uptake and distribution in wheat. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2002,17(1):69—75.
- [18] Xu Z Z, Yu Z W, Wang D. Nitrogen translocation in wheat plants under soil water deficit. Plant and Soil,2005,00:1—14.
- [19] Xu Z Z, Yu Z W, Wang D, *et al.* Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes. J. Agronomy & Crop Science,2005,191:439—449.
- [20] Ozturk A, Aydin F. Effects of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. Journal of Agronomy & Crop Science,2004,190:93—99.
- [21] Dai T B, Zhao H, Jing Q, *et al.* Effects of high temperature and water stress during grain filling on grain protein and starch formation in winter wheat. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(11):3670—3676.
- [22] Zhang Q Y, Li F D, Zhang Y Z, *et al.* Effect of water supply on the yield and water-use efficiency in winter wheat. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science), 2005,27(6):809—812.
- [23] 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 Loess Plateau of China. Agricultural Water Management, 2002,3(28):203—216.
- [24] Wang J R, Gong Y H, Zhai B N, *et al.* The effects of drought on the yield and physiological characteristics of winter wheat during later growth stage. Chinese Journal of Soil Science,2005,36(6):908—912.

#### 参考文献:

- [1] 房全孝,陈雨海.节水灌溉条件下冬小麦耗水规律及其生态基础研究.华北农学报,2003,18(3):18~22.
- [2] 王志敏,王璞,兰林旺,等.黄淮海地区优质小麦节水高产栽培研究.中国农学通报,2003,19(4):22~25.
- [3] 康绍忠,张建华,梁宗锁,等.控制性作物根系分区交替灌溉的概念及其研究进展.见:康绍忠,蔡焕杰主编.作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践.北京:中国农业出版社,2000.3~12.
- [4] 王淑芬,张喜英,裴冬.不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响.农业工程学报,2006,22(2):27~32.
- [5] 孔祥旋,杨占平,武继承,等.限量灌溉对冬小麦产量和水分利用的影响.华北农学报,2005,20(5):64~66.
- [6] 孙宏勇,刘昌明,张永强,等.不同时期干旱对冬小麦产量效应和耗水特性研究.灌溉排水学报,2003,22(2):13~16.
- [7] 许振柱,于振文.限量灌溉对冬小麦水分利用的影响.干旱地区农业研究,2003,21(1):6~10.
- [9] 赵俊晔,于振文.高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响.作物学报,2006,32(4):484~490.
- [10] 赵满兴,周建斌,杨绒,等.不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响.植物营养与肥料学报,2006,12(2):143~149.
- [11] 江晓东,李增嘉,侯连涛,等.少免耕对灌溉农田冬小麦夏玉米作物水、肥利用的影响.农业工程学报,2005,21(7):20~24.
- [12] 张忠学,于贵瑞.不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响.灌溉排水学报,2003,22(2):1~4.
- [13] 居辉,兰霞,李建民,等.不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究.中国农业大学学报,2000,5(5):23~29.
- [14] 李运生,王菱,刘士平,等.土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响.生态学报,2002,22(10):1680~1687.
- [17] 李世娟,周殿玺,诸叶平,等.水分和氮肥运筹对小麦氮素吸收分配的影响.华北农学报,2002,17(1):69~75.
- [21] 戴延波,赵辉,荆奇,等.灌浆期高温和水分逆境对冬小麦籽粒蛋白质和淀粉含量的影响.生态学报,2006,26(11):3670~3676.
- [22] 张秋英,李发东,张依章,等.水分对冬小麦产量及水分利用效率的影响.西南农业大学学报(自然科学版),2005,27(6):809~812.
- [24] 王俊儒,龚月桦,翟丙年,等.生育后期干旱对冬小麦产量和生理特性的影响.土壤通报,2005,36(6):908~912.