

不同微喷灌灌水量对冬小麦生长、产量和水分利用效率的影响

徐袁博,李援农,银敏华,任全茂,王星焱,陈紫薇

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:为研究微喷灌模式下不同灌水量对冬小麦生长、产量及水分利用效率的影响,于2015年10月开展了大田试验。以“小偃22号”为供试品种,研究高水W3(拔节期和开花期各灌水60 mm)、中水W2(拔节期和开花期各灌水40 mm)、低水W1(拔节期和开花期各灌水20 mm)和全生育期不灌水W0 4个处理下冬小麦的生长、产量及水分利用效率。结果表明:随着灌水量的增加,各处理的生长指标呈上升趋势,处理W1、W2、W3的籽粒产量分别较处理W0增产17.75%、35.78%和36.72%,但W2和W3处理间无显著差异;处理W2的水分利用效率和收获指数最高,较处理W3提高了 $0.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和0.01。综合对比冬小麦生长、产量和水分利用效率,得出拔节期和开花期各灌水40 mm为冬小麦最优灌水量。

关键词:冬小麦;微喷灌;灌水量;生长;产量;水分利用效率

中图分类号: S275.5; S512.1 **文献标志码:** A

Effect of micro-sprinkler irrigation on growth, yield and water use efficiency of winter wheat

XU Yuan-bo, LI Yuan-nong, YIN Min-hua, REN Quan-mao, WANG Xing-yao, CHEN Zi-wei

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the effects of different irrigation amounts on winter wheat growth, yields and water use efficiency, a field experiment was conducted from October, 2015 to June, 2016. The winter wheat “Xiaoyan No.22” was selected as the test material. Four irrigation treatments were performed in this study: W0 (no water through the whole crop growth period), low water treatment of W1 (20 mm water supply during both jointing and flowering stages), medium water treatment of W2 (40 mm) and high water treatment of W3 (60 mm). The results showed that wheat growth was improved with the increase of the irrigation amount. As compared to W0, grain yields of W1, W2 and W3 were increased by 17.75%, 35.78% and 36.72%, respectively, but it was not significant for that between W2 and W3. The water use efficiency and harvest index from the treatment W2 were the highest, which increased $0.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ and 0.01 when compared to W3. Overall, the treatment of W2 with 40 mm water supply during both the jointing and flowering stages was an optimal irrigation mode in terms of output and water input.

Keywords: winter wheat; micro-sprinkler irrigation; irrigation amount; growth; yield; water use efficiency

冬小麦是陕西关中地区主要的粮食作物,其产量的高低关系到当地的粮食安全与农民民生问题。陕西地处西北干旱半干旱地区,降雨量少且时空分布不均,土壤贫瘠且保水保肥性差,耕作粗放,水肥资源紧缺^[1]。据资料统计,我国因干旱所造成的小

麦产量损失约为其它自然灾害的总和^[2]。水资源日益短缺,已成为制约冬小麦生产和可持续发展的重要因素,而提高农田水分利用效率是解决冬小麦生产的根本途径^[3-4]。因此,在关中地区探索一种既可以节约水资源,又可以提高冬小麦产量的高效节

水灌溉方式就显得尤为重要。目前,关中地区小麦生产中多采用传统的畦灌,灌水量难以控制,往往造成灌水过多,水分利用效率较低^[5]。

喷灌是一种现代化的节水灌溉技术,众多学者已就喷灌条件下田间小气候变化、土壤水氮运移特征、冠层截留和水分再分配、作物生理特征变化、作物生长动态和耗水规律^[6]等开展了大量的研究工作,并提出了相应的灌溉制度。与传统畦灌相比,喷灌和滴灌灌水量降低 12.9% ~ 41.5%,产量和水分利用效率分别提高 11.3% ~ 30.0% 和 23.1% ~ 56.0%^[7-9]。微喷带灌溉是在喷灌和滴灌的基础上发展起来的一种新型灌溉方式,它利用微喷带^[10]将灌溉水在较低工作压力下均匀地喷洒在田间,所用设施相对简单、廉价,易于收放^[11-12]。有研究表明,与传统畦灌相比,微喷带灌溉定额减少 67.5 ~ 75.0 mm,0 ~ 30 cm 土层土壤容重降低 $0.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,可抑制土壤养分下渗和增加土壤通透性,具有节水和灌溉均匀等特点^[13-14]。因此,在微喷带灌溉模式下,探索出适合冬小麦的灌水量很重要。本试验研究了不同微喷灌灌水量下冬小麦的生长状况,以为当地冬小麦微喷带灌溉技术及灌水量提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 10 月—2016 年 6 月在陕西杨凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室试验站进行,该试验站地处北纬 $34^{\circ}17'38''$,东经 $108^{\circ}04'08''$,海拔 521 m,年平均气温为 13°C ,多年平均蒸发量 1 500 mm,年平均降水量 632 mm,且主要集中于 7—9 月,地下水埋深 80 m,属于半湿润易旱地区,试验土壤为壤土,体积质量 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水率为 24% (重量含水量),耕层土壤肥力均匀。气象资料由试验站内县级自动气象站提供。

1.2 试验设计

供试小麦品种为“小偃 22 号”,播种量 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距 20 cm;微喷带采用华为折径 32 mm (直径 20 mm)斜三孔微喷带,每个小区布置 3 条微喷带,微喷带间距 2 m。试验设 4 个灌水量水平(表 1):W0 ($0 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)全生育期不灌水,W1 ($400 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)拔节期和开花期分别灌水 20 mm,W2 ($800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)拔节期和开花期分别灌水 40 mm,W3 ($1\ 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)拔节期和开花期分别灌水 60 mm。试验小区面积为 16 m^2 ($4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$),每个处理重复三次,共 12 个小区,各小区间设 1 m 宽保护带。播种前深翻并平整田地,

纯 N $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,纯 P $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,纯 K $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作基肥于翻地前均匀撒施,人工进行播种。

表 1 试验方案

Table 1 Experimental design of water supply

处理 Treatment	拔节期灌水 Watering at jointing stage/mm	开花期灌水 Watering at flower stage/mm
W0	0	0
W1	20	20
W2	40	40
W3	60	60

1.3 测定项目与方法

从冬小麦返青期开始,每隔 10 天测土壤含水量一次,灌溉前后、播种前和收获后分别加测一次。每个小区随机取三个点,用土钻取 2 m 深的土样,每 10 cm 为一个取样区间,用烘干法测土壤含水量。分别于拔节期和成熟期随机选一行连续 10 cm 长的小麦植株,选取 3 株用卷尺测量株高,用长宽系数法测量叶面积,用烘干法测定地上部生物量。小麦成熟后,每个小区选取 1 m^2 ,经晒干、去皮、脱粒后进行测产。由于地下水埋深大于 5 m,生育期内降雨较少,所以不考虑地下水补给和地表径流作用,图 1 所示为全生育期降雨量分布。水分利用效率计算公式为:

$$WUEY = Y/ET \quad (1)$$

$$\text{其中: } ET = P + W_2 - W_1 + I \quad (2)$$

式中, $WUEY$ 为产量水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Y 为籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET 为全生育期总耗水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); P 为生育期的降雨量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); W_2 、 W_1 为播种前和收获后 200 cm 土层的储水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); I 为全生育期灌水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

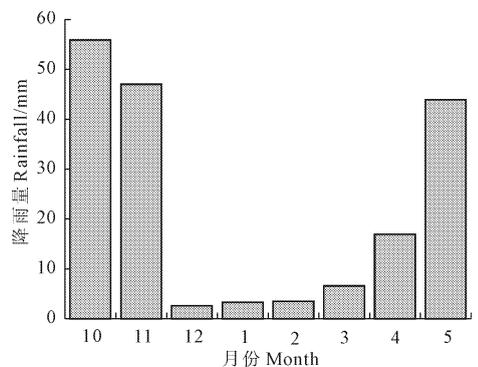


图 1 冬小麦全生育期降雨量

Fig. 1 Rainfall distribution during winter wheat growth period

1.4 数据处理与分析

用 Excel 2007 软件对试验数据进行处理,用

Spss 19.0 对数据进行分析,用 Origin 9.0 软件进行作图。

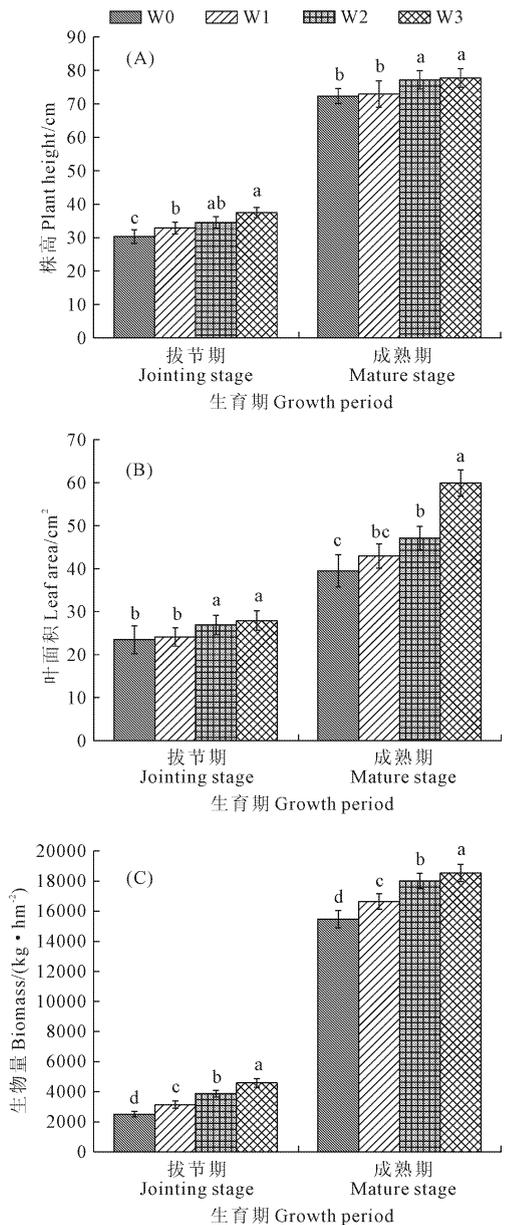
2 结果与分析

2.1 不同灌水量对冬小麦生长的影响

株高是反映作物生长状况的重要指标之一^[15-16]。微喷带灌溉下不同灌水量对冬小麦拔节期和成熟期株高的影响如图 2(A)所示。由图中可以看出,拔节期各处理冬小麦株高差异显著,并且随灌水量的增加,冬小麦的株高呈增加趋势,其中灌水处理 W1、W2、W3 分别较不灌水处理 W0 增加 2.57、4.20、7.23 cm。可见,冬小麦拔节期对水分响应明显,增加灌水量可以明显促进冬小麦株高的生长。冬小麦成熟期,中水(W2)和高水(W3)处理的株高明显优于不灌水处理(W0)和低水处理(W1),而 W0 和 W1、W2 和 W3 处理之间株高差异并不明显。这可能是由于:第一,微喷灌与常规的大水漫灌相比,每次灌水历时较长,且灌溉水不直接浇灌在地面上,而是长时间暴露在空气中容易造成较大的蒸发损失;第二,微喷灌灌水方式下,往往将灌溉用水喷洒在离地面较高处,喷洒的水柱极细,容易受到风的干扰,使得灌溉用水不能有效地喷洒于浇灌作物的区域,影响了灌溉用水的利用效率,所以在大田环境下进行微喷带灌溉时,灌水量不宜过小。

图 2(B)为不同灌水处理下的冬小麦叶面积变化特征。可以看出,各处理在拔节期和成熟期的叶面积大小均表现为:W3 > W2 > W1 > W0,并且在冬小麦生育后期各个处理间差异更加明显,高水处理 W3 的叶面积明显高于其它处理,其单株叶面积高达 59.93 cm²,较不灌水处理 W0 增加了 20.5 cm²。可见,在开花期适当增加灌水量可以使冬小麦叶面积明显增加,从而一定程度上增加冬小麦光合面积,增强光合作用,进而促进冬小麦灌浆。

不同微喷带灌水处理下冬小麦生物量在拔节期与成熟期的变化趋势与株高和叶面积基本类似,如图 2(C)所示。拔节期是冬小麦整个生育期的需水关键期,适当的灌水可以刺激作物根系的吸水与生长,从而促进冬小麦拔节和生物量积累。该生育期高、中、低三个灌水处理的冬小麦生物量分别比全生育期不灌水处理增加了 83.4%、54.4% 和 25.5%。冬小麦成熟期,处理 W0、W1、W2 之间生物量积累的差异仍显著,其中处理 W3 与处理 W2 之间差异有所减少。可见,一定范围内继续提高灌水量对冬小麦生物量的累积效应有所减弱。



注:不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: different letters indicated significant difference at $P < 0.05$ level.

图 2 不同灌水量对冬小麦生长的影响

Fig.2 Effect of irrigation amount on winter wheat growth

2.2 不同灌水量对冬小麦产量的影响

不同灌水量下冬小麦的产量及其构成因素如表 2 所示。由表 2 可知,灌水与不灌水处理间冬小麦籽粒产量差异显著。3 个灌水处理与不灌水处理相比籽粒产量均有显著提高,并且随灌水量的增加,冬小麦籽粒产量总体呈上升趋势。说明在冬小麦开花灌浆期适当地增加灌水,可以促进冬小麦灌浆,使冬小麦籽粒获得更多的养分,提高有效穗数和穗粒数,从而达到增产的目的。其中处理 W1、W2、W3 分别较 W0 处理产量分别增加 17.75%、35.78%、36.72%,而处理 W2 和 W3 之间籽粒产量差异不显

著。图 3 为不同灌水量下冬小麦的籽粒产量,由拟合曲线可以看出籽粒产量增加的速率随着灌水量的增加而减小。分析原因可能有两点:其一,在生育后期冬小麦生长比较密集,植株相互遮挡,使得微喷带灌水均匀性受到影响,降低了水分的有效利用;其二,在冬小麦生育后期,降水量相对其它生育时期比较充足,已经基本可以满足冬小麦的耗水需求,此时进行补灌不再需要过多水量。可见,在冬小麦关键生育期进行适量的灌水,可以提高冬小麦产量。各处理千粒重的整体变化趋势与籽粒产量大致相同,处理 W1、W2、W3 的千粒重分别比处理 W0 增加了 0.96%、2.87%、3.98%。说明充分的灌水可以促进冬小麦的生殖生长,使得冬小麦籽粒更加饱满,进而提高冬小麦的产量。有效穗数和穗粒数的结果表

明,增加灌水量可以促进冬小麦孕穗抽穗,提高冬小麦的有效穗数和穗粒数。可见,在冬小麦关键生育期进行适量的灌水,可以有效改善冬小麦穗部性状,并提高经济产量。

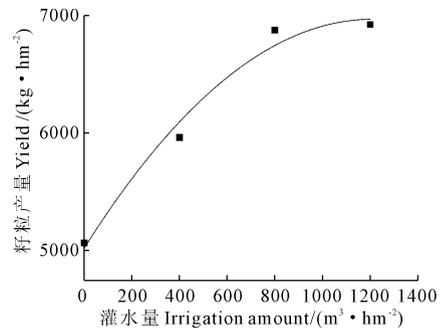


图 3 不同灌水量下冬小麦的籽粒产量

Fig. 3 Yield of winter wheat under different irrigation amount

表 2 不同灌水量对冬小麦产量及其构成因素的影响

Table 2 Effect of irrigation amount on yield and its components of winter wheat

处理 Treatment	有效穗数/ $(10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$ Panicle number	穗粒数/(粒·穗 $^{-1}$) Grain per spike	千粒重/g Thousand seed weight	籽粒产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ Grain yield
W0	466.27c	36.86c	44.71d	5068.23c
W1	504.25b	38.55b	45.14c	5967.50b
W2	575.52a	40.34a	45.99b	6881.46a
W3	583.13a	40.81a	46.48a	6929.16a

注:同列数据后标不同小写字母者差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: different letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level; the same below.

2.3 不同灌水量对冬小麦水分利用效率的影响

表 3 为各处理冬小麦整个生育期的耗水量、水分利用效率和收获指数,地下深度 2 m 处土壤含水量在播种前和收获后无明显变化。由表 3 可以看出, W0、W1、W2、W3 四个处理间各相邻处理的耗水增加量分别为:392.76、466.04 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 535.27 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,且处理 W1、W2 和 W3 的耗水量分别较处理 W0 增加了 13.42%、29.33% 和 47.60%。即随着灌水量的增加,对应的耗水量也随之增加。各处理水分利用效率由高到低依次为 W2 > W1 > W0 > W3。在 W2 处理(即拔节期和开花期各灌水 40 mm)下,冬小麦具有最高的水分利用效率,相比 W0 处理和 W3 处理分别增加了 0.09 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 0.22 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,并且显著高于 W3 处理,但是与 W1 处理之间的差异并不显著。此外,处理 W3 的水分利用效率相比对照 W0 处理降低了 0.13 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这可能是由于过度的水分亏缺造成冬小麦产生一定的胁迫效应,使得冬小麦通过自身调节有效利用有限的土壤水分,实现水分的高效利用。这与黄玲^[17]所得出的一定程度干旱胁迫引起水分利用效率增加,在拔节期和灌浆期灌水反而会降低水分利用效率的结论一致。

不同灌水量下冬小麦收获指数表现为 W2 > W3 > W1 > W0,即随着灌水量的增加,收获指数先升高后降低。可见,为了获得较高的收获指数,灌水量并不是越多越好。

表 3 不同灌水量下冬小麦耗水量、水分利用效率和收获指数

Table 3 Water consumption, water use efficiency and harvest index of winter wheat under different irrigation amount

处理 Treatment	耗水量 Water consumption $/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	水分利用效率 Water use efficiency $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	收获指数 Harvest index
W0	2929.26d	1.73b	0.33c
W1	3322.02c	1.79a	0.36b
W2	3788.06b	1.82a	0.38a
W3	4323.33a	1.60c	0.37ab

3 讨论

灌水量对冬小麦的生长、产量以及水分利用效率均有明显影响。严重的水分胁迫会抑制作物的生长,其生长速率和干物质积累量均显著低于一直处于较好供水条件下的作物^[18-19]。冬小麦的供水量与总耗水量呈线性正相关,回归斜率为 0.67 ~

0.71^[20]。灌水量越大,冬小麦耗水量及生物量越高,但最高产量却是在适度缺水的情况下获得的^[21],这与本研究结果一致。

作物产量和水分利用效率与耗水量密切相关。但由于地区环境及小麦品种等因素的差异,研究结果不尽一致。Zhang等^[22]研究发现,小麦产量随耗水量增加呈线性增大。Kang等^[21]则认为,冬小麦产量和水分利用效率与耗水量之间呈二次函数关系,且当耗水量为350~490 mm时,冬小麦产量和水分利用效率较优。本研究结果表明,随着微喷灌水量的增加,冬小麦籽粒产量的增加速率减小;水分利用效率先增加后减少;且当微喷灌水量在80~120 mm(耗水量为378.8~432.3 mm)时冬小麦取得较好的籽粒产量和水分利用效率,这与上述研究结论基本一致。关于籽粒产量最高时对应的灌水量、不同灌水处理下的耗水量和水分利用效率以及该模式下的水肥耦合效应及其对冬小麦生长的影响还有待进一步研究。

4 结 论

通过研究微喷带灌溉下不同灌水量对冬小麦生长、产量及水分利用效率的影响,得出以下结论:

1) 冬小麦株高、单株叶面积和地上部生物量均随灌水量的增加呈上升趋势。在灌水量为120 mm时,冬小麦有着最大株高、单株叶面积和生物量。在80 mm和160 mm灌水量下,冬小麦株高和生物量的差异有所减少,说明一定范围内继续提高灌水量对冬小麦株高和生物量的累积效应有所减弱。

2) 4个处理(高水120 mm、中水80 mm、低水40 mm和不灌水0 mm)之间的千粒重和籽粒产量均为高水>中水>低水>不灌水。冬小麦在高水处理下获得最大产量,但与中水处理相比,增产幅度不明显,因此本试验中灌水量以80 mm为宜。

3) 随着灌水量的增加,各处理冬小麦的耗水量明显增加,而水分利用效率和收获指数却是先增加后减少,并且在灌水量80 mm处理下达到最大。这不仅与作物自身有关,也与灌水方式有一定的关系。

综合分析不同灌水量对冬小麦生长指标、产量和水分利用效率的影响,可以得出在采用微喷带灌溉时,灌水量80 mm有利于冬小麦的生长,且可以获得较高的产量和水分利用效率,从而实现节水增产的目标。

参 考 文 献:

[1] 郭天财,姚战军,王晨阳,等.水肥运筹对小麦旗叶光合特性及

产量的影响[J].西北植物学报,2004,24(10):1786-1791.

- [2] 黄彩霞,柴守玺,赵德明,等.不同水分处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J].草业学报,2010,19(5):196-203.
- [3] Zhang Y Q, Eloise K, Yu Q, et al. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 64: 107-122.
- [4] 康绍忠,胡笑涛,蔡焕杰,等.现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J].水利学报,2004,35(12):1-7.
- [5] 满建国,王东,于振文,等.不同带长微喷带灌溉对土壤水分分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J].应用生态学报,2013, 24, (8):2186-2196.
- [6] 于立鹏,黄冠华,刘海军,等.喷灌灌水量对冬小麦生长、耗水与水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2010,21(8):2031-2037.
- [7] 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.
- [8] 王建东,龚时宏,高占义,等.滴灌模式对农田土壤水氮空间分布及冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2009,25(11):68-73.
- [9] Ibragimov N, Evett S R, Esanbekov Y, et al. Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90: 112-120.
- [10] 中华人民共和国农业部. NY/T 1361-2007. 农业灌溉设备,微喷带[S].北京:中国农业出版社,2007.
- [11] 关红杰,李久生,栗岩峰.干旱区滴灌均匀系数和灌水量对土壤水氮分布的影响[J].农业工程学报,2012,28(24):121-128.
- [12] 周斌,封俊,张学军,等.微喷带单孔喷水量分布的基本特征研究[J].农业工程学报,2003,19(4):101-103.
- [13] 史宏志,高卫锴,常思敏,等.微喷灌水定额对烟田土壤物理性状和养分运移的影响[J].河南农业大学学报,2009,43(5):485-490.
- [14] Home P G, Panda R K, Kar S. Effect of method and scheduling of irrigation on water and nitrogen use efficiencies of Okra (*Abelmoschus esculentus*) [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 55: 159-170.
- [15] 周荣,杨荣泉,陈海军.水、氮耦合效应对冬小麦生长、产量及土壤NO₃-N分布的影响[J].北京水利,1994,(3):75-78.
- [16] 李莎,李援农.种植模式和灌溉对冬小麦生长、产量及品质的影响[J].节水灌溉,2010,(3):6-9.
- [17] 黄玲,高阳,邱新强,等.灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响[J].农业工程学报,2013,29(14):99-108.
- [18] 刘晓英,罗远培,石元春.水分胁迫后复水对冬小麦叶面积的激发作用[J].中国农业科学,2001,34(4):422-428.
- [19] 陈晓远,罗远培.土壤水分变动对冬小麦生长动态的影响[J].中国农业科学,2001,34(4):403-409.
- [20] 马瑞崑,贾秀领.冬小麦水分关系与节水高产[M].北京:中国农业科学技术出版社,2004:10-14.
- [21] 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[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 55: 203-216.
- [22] Zhang H P, Wang X, You M, et al. Water-yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. *Irrigation Science*, 1999, 19(1):37-45.