

# 小麦/玉米垄沟套作条件下施肥部位 对土壤水氮分布的影响

田 英<sup>1</sup>, 赵西宁<sup>2,3</sup>, 陈小莉<sup>2</sup>, 王自奎<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 通过旱棚小车模拟小麦/玉米垄沟套作种植试验, 研究了 3 种不同垄沟部位(垄顶、垄底和沟中)施肥对小麦/玉米生长和产量及土壤水氮分布的影响。结果表明: 相同灌水条件下, 施肥部位对垄沟套作水分分布影响不显著, 但土壤硝态氮的分布差异较大; 垄顶施肥和垄底施肥处理下, 由于水肥异区, 其垄上小麦生长带的硝态氮主要分布在 0~30 cm 土层, 有效地减少了硝态氮向土壤深层淋溶, 而后期沟内玉米生长带的水氮处理相同, 因此其硝态氮分布差异较小; 在相同灌水条件下, 垄沟套作可以有效降低水分流失, 减少氮肥损失, 因此较传统平作更有利于作物生长, 提高小麦、玉米的产量, 且以垄顶施肥和垄底施肥效果最显著, 小麦产量较平作分别增加 11.47%、10.81%, 玉米产量较平作分别增加 18.87%、22.70%。

**关键词:** 垄沟灌溉; 小麦/玉米套作; 施肥部位; 硝态氮; 土壤含水量; 产量

**中图分类号:** S147.2 **文献标志码:** A

## The influences of fertilization positions on water and nitrate distribution under wheat/maize ridge and furrow intercropping

TIAN Ying<sup>1</sup>, ZHAO Xi-ning<sup>2,3</sup>, CHEN Xiao-li<sup>2</sup>, WANG Zi-kui<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. China Arid-area Water-saving Agricultural Institute, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Through the drought shed simulation wheat/maize ridge and furrow intercropping experiment, we investigated influences of three different positions (ridge top, ridge bottom and furrow) fertilizer on the growth, yield of wheat/maize and the effect of soil water and nitrogen distribution. The results showed that the influences of fertilizer position on the water distribution are not significant for the same irrigation, but the distribution of soil nitrate differed markedly. Fertilization on ridge top and ridge bottom showed different nitrate distribution at 0~30 cm soil layer, which can effectively affect soil nitrate leaching. No obvious difference in nitrate distribution was detected between the same water and nitrate treatments of the late maize growth zone. Furrow intercropping can effectively reduce moisture loss and nitrogen leaching than conventional flat intercropping, with enhancing effect on wheat/maize growth and consequently increased wheat yield by 11.47%~10.81% and maize yield by 18.87%~22.70%.

**Keywords:** ridge and furrow irrigation; wheat/maize intercropping; fertilization position; nitrate nitrogen; soil water content; yield

水分和氮素是影响旱地农业作物生产的重要因素<sup>[1-2]</sup>。近几年来,随着农田施氮量的不断增加,作物产量并未随水氮用量的增加而增加。张福锁等通过分析全国不同地区 2001—2005 年间的试验数据

发现,目前中国小麦和玉米的氮肥利用率分别为 28.2% 和 26.1%<sup>[3]</sup>,绝大部分氮素未得到利用。这不仅使肥料的利用率降低,而且导致严重的环境污染。因此,合理配置灌水和施肥,减少水氮损失,是

收稿日期: 2014-02-05

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAD29B09); 教育部、国家外国专家局/1110 计划(B12007)

作者简介: 田 英(1989—), 女, 陕西商洛人, 硕士研究生, 研究方向为农业水利工程。E-mail: tianying89@126.com。

通信作者: 赵西宁(1976—), 男, 陕西渭南人, 博士, 副研究员, 主要从事农业水土资源高效利用工作。E-mail: 1052428021@qq.com。

当前提高水分和氮素利用率的关键。

间(套)作垄沟灌溉是指田间起垄,垄沟相间,垄上和沟内均种植作物,并采用沟内灌溉来满足垄上作物生产的一种新型种植技术,它有效地结合了传统间(套)作和垄沟灌溉技术。研究表明<sup>[4-6]</sup>,间(套)作能够促进植物根系对农田水分的充分利用,减小棵间蒸发抑制无效蒸腾,并且作物根系之间的相互作用有效促进了作物对氮素的吸收,减少土壤中氮素损失,优化作物系统的源库关系,创造出有利于植物生长发育的小气候,更好地使资源在时间和空间上得到集约利用。近年来,国内外针对垄沟灌溉下土壤水氮运移也做了大量研究<sup>[7-14]</sup>,研究表明垄沟灌溉能有效减少水分流失和硝态氮损失,从一定程度上提高了水分和养分利用效率,在增加产量的同时也达到了节水以及资源有效利用的效果。但是对于种植作物的条件下肥料(主要是氮肥)的不同空间分布对土壤水氮分布影响的研究比较少,尤其是对于间(套)作种植条件下的研究薄弱。本文以垄沟套作小麦/玉米为研究对象,研究不同施肥部位条件对垄沟套作小麦/玉米生长和产量的影响,并探讨小麦/玉米不同生育期内土壤水氮的分布特征,以期制定合理的垄沟套作施氮方案,提高氮肥利用率,减少氮肥对环境的污染提供一定理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本试验于2012年10月—2013年9月在地处渭河谷地头道塬的西北农林科技大学(108°04'E, 34°20'N)中国旱区节水农业研究院试验旱棚内进行,该研究区年蒸发量993.2 mm,多年平均降雨量650

mm。供试土壤为壤土,试验采用12个不锈钢自制土箱(长2 m×0.4 m×0.8 m)在种植作物情况下进行垄沟灌溉模拟试验。试验土壤前期容重为 $1.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,pH值为8.25,土壤全氮为 $1.29 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全磷为 $1.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

试验共设4个处理为:平作(CK,在土壤表层0~10 cm处施肥),垄顶施肥(T1,垄顶土壤表层0~10 cm处施肥),垄底施肥(T2,起垄前在土壤表层施肥)和沟内施肥(T3,起垄完成后在垄沟土壤0~10 cm土层施肥),各施肥位置如图1所示。每个处理均设三次重复。垄宽和沟宽均设为60 cm<sup>[15]</sup>,垄高15 cm,坡比为1:1,梯形垄,垄上种植小麦,沟内种植玉米。试验种植如图1所示。

小麦于2012年10月26日播种,6月1日收获,玉米于2013年4月24日播种,9月5日收获。种植时每个处理所施的基肥均为复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=20:15:5),施肥量为 $600 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验选用小麦、玉米品种分别为小偃22、郑单958,小麦种植行距为15 cm,玉米行距为50 cm。小麦全生育期灌水3次,分别为越冬水、起身水、抽穗扬花水;玉米全生育期灌水3次,分别在拔节期、抽雄期、灌浆期,各个处理灌水量相同,每次灌水量为150 mm;小麦起身期和抽穗扬花期各追肥1次,玉米抽雄期追肥1次,每次追施尿素 $75\sim 90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

### 1.2 试验取样与分析方法

1.2.1 小麦、玉米生育期的观察 播种后观测冬小麦和春玉米出苗时间、出苗率等;观察不同处理下作物生育期差异:以小区内60%植株表现出某生育期的特征作为进入该生育期的标准。主要观察小麦、玉米生长过程中出苗情况、整齐度以及均匀度。

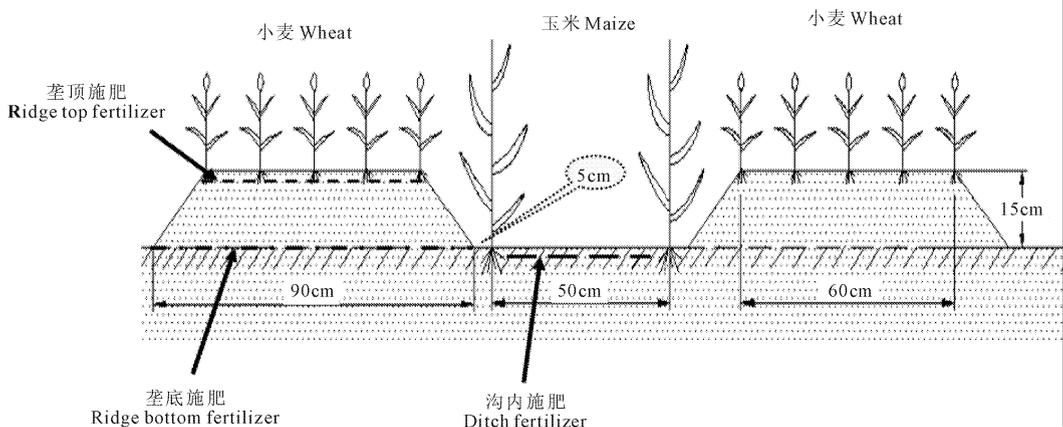


图1 小麦/玉米垄沟套作示意图

Fig. 1 Diagram of wheat/maize ridge and furrow intercropping



因<sup>[17]</sup>。

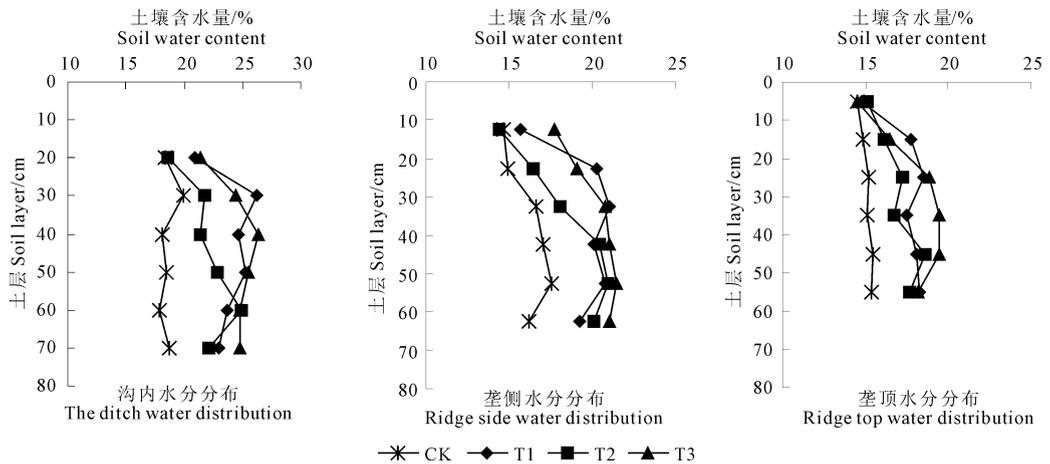


图 3 小麦抽穗期各处理不同部位土壤水分分布

Fig.3 Soil water distribution under different treatments at heading stage

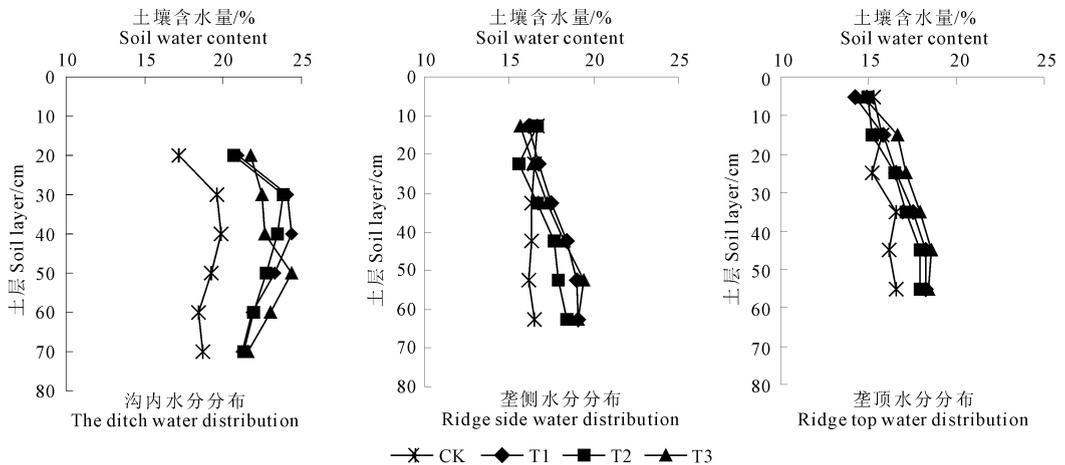


图 4 小麦/玉米共生期各处理不同部位土壤水分分布

Fig.4 Soil water distribution under different treatments during symbiotic period of wheat and maize

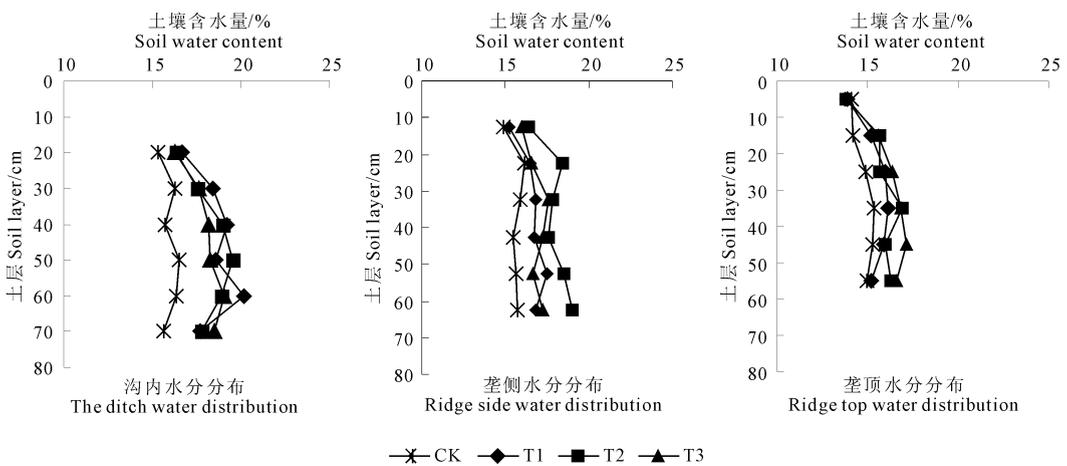


图 5 玉米抽雄期各处理不同部位土壤水分分布

Fig.5 Soil water distribution under different treatments at maize tasseling stage

图 6 为小麦/玉米共生期不同处理条件下土壤中硝态氮的分布状况,从图中可以看出,由于小麦、

玉米生长吸收以及灌水量等因素影响,不同处理下硝态氮在 0~60 cm 土层的分布有明显差异,在沟内

玉米种植带,由于玉米生长处于苗期,各处理之间硝态氮分布差异不大,硝态氮含量都以 10~20 cm 土层处含量最高,而 T3 处理的 60~70 cm 土层较其他处理硝态氮含量高,达到  $28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,这是由于在沟内施肥后,肥料没有被垄上小麦有效利用,氮肥随着灌水向下层运移,在底层累积的缘故。在垄上小麦种植带,由于平作采用漫灌,小麦生长区的氮肥在一定程度上随着水分运移,而在灌水量较大的情况下向下运移,在小车底部累积,因此 CK 处理的硝态氮

主要分布在 0~20 cm 和 40 cm 以下,其中以 40 cm 以下累积量最多,最高达到  $24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,T1 和 T2 由于采用水肥异区处理,其氮素分布比较相似,T1 硝态氮主要在 0~20 cm 累积,T2 硝态氮主要在 15~35 cm 累积,主要分布于施肥部位,表明水肥异区可以有效减少硝态氮的深层渗漏。T3 处理小麦生长区氮素含量较低,而 10~20 cm 硝态氮达到了  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,主要是因为后期追肥,在小麦根部有少量积累。

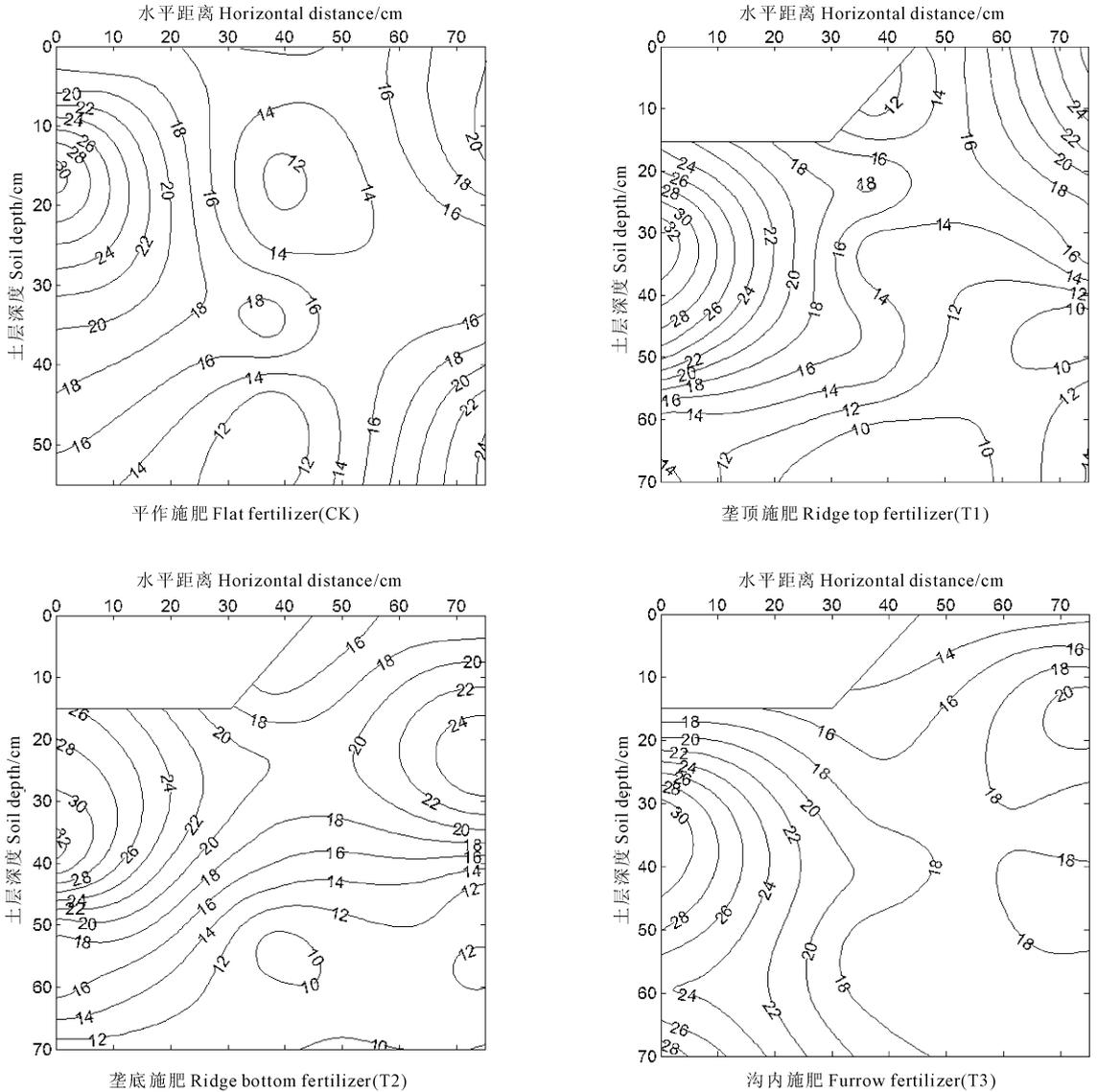


图 6 小麦玉米共生期各处理下硝态氮的分布/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$

Fig.6 The distribution of nitrate under different treatments during symbiotic period of wheat and maize

### 2.3 不同施肥部位处理对小麦、玉米生长的影响

表 1 为不同施肥部位处理条件下小麦、玉米开花期的生长指标。对各生长指标进行显著性分析,结果表明,在灌水量相同时,垄作处理小麦与玉米的生长较 CK 平作要好,而垄作条件下,不同施肥部位

对小麦、玉米的生长也有一定的影响。其中 T1、T2、T3 处理的小麦株高、茎粗和叶面积较 CK 增加,而 T2 的株高较 CK 显著增加,增加幅度为 7.8%,T1 和 T3 的株高较 CK 增加幅度依次为 5.26%、2.04%。各个处理间玉米的株高、茎粗和叶面积之间的差异

较显著, T1、T2 和 T3 的株高较 CK 增幅依次为 5.81%、10.57% 和 3.33%; 茎粗增幅依次为 3.13%、11.90% 和 5.1%; 叶面积增幅依次为 5.85%、13.96% 和 8.02%。因此, 垄作处理中, T1、T2 处理的小麦生长要比 T3 好, 这说明水肥异区减少了硝态

氮向深层淋溶, 使氮肥能够被作物有效吸收, 并促进作物生长发育。T2 的玉米生长最好, 这是因为垄底施肥处理的确态氮主要集中于 15~35 cm 土层, 在小麦收获后, 玉米根系在横向生长过程中能够将该部位残留的一部分氮素吸收利用。

表 1 不同施肥部位处理下小麦、玉米开花期的生长指标

Table 1 Growth parameters at flowering stage of wheat and maize under different fertilization treatments

处理 Treatments	小麦 Wheat			玉米 Maize		
	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter	叶面积/cm <sup>2</sup> Leaf area	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter	叶面积/cm <sup>2</sup> Leaf area
CK	68.57b	0.295a	19.62a	161.38c	24.28b	196.98b
T1	72.18ab	0.335a	22.46a	170.75ab	25.04ab	208.5ab
T2	73.93a	0.320a	21.77a	178.44a	27.17a	224.48a
T3	69.97ab	0.323a	19.68a	166.75bc	25.53ab	212.78ab

注: 处理间不同字母表示差异达到  $P < 0.05$  (Duncan) 显著水平, 下同。

Note: Letters indicate the differences between treatments reached  $P < 0.05$  (Duncan) significant level, the same as follow.

## 2.4 不同施肥部位处理对小麦、玉米产量及其构成因素的影响

氮肥在作物生长中起着至关重要的作用, 是影响作物产量的主要因素之一。从表 2 中可以看出, T1、T2、T3 处理下小麦的千粒重和产量较 CK 显著增加 ( $P < 0.05$ ), 其中, 千粒重分别增加了 7.6%、10.5% 和 5.5%, 而小麦产量增幅依次为 11.47%、10.81% 和 10.22%, 穗粒数也依次增加了 8.7%、5.2% 和 6.1%。垄作条件下的三个处理之间以 T1 处理的小麦产量最高, T2 次之, T3 最低。说明水肥异区能够有效减少氮肥损失, 且垄顶施肥在一定程

度上较垄底施肥更有利于小麦生长。在玉米产量及其构成因素中, T1、T2 和 T3 处理下百粒重和产量较 CK 显著增加, 其百粒重分别增加了 11.4%、10.87% 和 10.2%, 产量分别增加了 18.87%、22.70% 和 13.76%。T1 和 T2 的穗粒数较 CK 显著增加, 分别增加了 16.5% 和 22.3%, 而 T3 处理的穗粒数与 T1、T2 和 CK 之间的差异均不显著。垄作条件下的三个处理之中以 T2 的产量最高, T1 次之, T3 最低。由此可见, 在灌水相同条件下, 施肥位置对氮的吸收利用有很大的影响, 而氮肥对作物生长和作物产量起着至关重要的作用。

表 2 不同施肥部位处理下小麦、玉米的产量及其构成因素

Table 2 The yield and yield components of wheat and maize under different fertilization treatments

处理 Treatments	小麦 Wheat			玉米 Maize		
	千粒重/g 1000-grain weight	穗粒数/粒 Number of grain per ear	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Yield	百粒重/g 100-grain weight	穗粒数/粒 Number of grain per ear	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Yield
CK	31.39b	28.75a	3568.08b	26.32b	295.33b	5614.12b
T1	33.76a	31.25a	3977.17a	29.31a	344a	6673.74a
T2	34.69a	30.25a	3953.7a	29.18a	361.33a	6888.36a
T3	33.13a	29.50a	3932.6a	29.01a	322.67ab	6386.62a

## 3 结 论

水分是硝态氮运移的载体, 土壤中硝态氮的运移与土壤水分保持一致。通过本次试验研究可以得出: 相同灌水条件下, 施肥部位对垄沟套作水分分布影响不显著, 但相同土层深度垄沟套作比平作的土壤含水量要显著增加; 而不同处理之间土壤硝态氮分布差异较为显著, 以垄顶施肥和垄底施肥的小麦

生长带较为突出, 由于采用了水肥异区的方法, 与传统平作和沟内施肥相比, 其土壤硝态氮主要分布于 0~30 cm 土层, 有效减少硝态氮随水分向土壤深层运移。玉米生长带的硝态氮由于后期施肥一致, 灌水一致, 因此各处理之间土壤中的硝态氮分布差异较小。由于垄沟套作能有效减少水分流失和氮肥损失, 因此较传统平作更能促进作物对水分和氮肥的吸收利用, 有利于小麦、玉米生长, 提高作物产量。

通过本试验的研究,再次论证了垄沟灌溉能够有效地提高水分利用率,且试验表明灌水与施肥位置在一定程度上对氮肥的利用以及作物的生长有着密切的关系,这可为垄沟灌溉模式下制定合理的灌水施肥方案提供一定理论依据,进一步提高水分和氮素的有效利用率。由于本试验采用旱棚小车模拟试验,并未考虑降雨、地下水等因素,与大田试验相比有一定的局限性,因此,应结合大田试验对此进行进一步论证,另外,本试验只考虑了施氮部位这一因素,而不同施肥水平或灌溉水平下间(套)作垄沟灌溉土壤水氮分布有待进一步研究,以探求更好的垄沟灌溉施肥制度。

#### 参考文献:

- [1] Dang T, Cai G, Guo S, et al. Effect of nitrogen management on yield and water use efficiency of rainfed wheat and maize in Northwest China [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4):495-504.
- [2] Dordas C A, Sioulas C. Safflower yield, chlorophyll content, photosynthesis, and water use efficiency response to nitrogen fertilization under rainfed conditions [J]. *Industrial Crops and Products*, 2008, 27(1):75-85.
- [3] 张福锁,崔振岭,王激清,等.中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J].*植物学通报*,2007,24(6):687-694.
- [4] 叶优良,肖焱波,黄玉芳,等.小麦/玉米和蚕豆/玉米间作对水分利用的影响[J].*中国农学通报*,2008,24(3):445-449.
- [5] 张风云,吴普特,赵西宁,等.间(套)作提高农田水分利用效率

的节水机理[J].*应用生态学报*,2012,23(5):1400-1406.

- [6] 叶优良,孙建好,李隆,等.小麦/玉米间作根系相互作用对氮素吸收和土壤硝态氮含量的影响[J].*农业工程学报*,2005,21(11):41-45.
- [7] 王自奎,吴普特,赵西宁,等.模拟垄沟灌溉土壤水分入渗特性试验研究[J].*干旱地区农业研究*,2011,29(3):24-28.
- [8] Fahong W, Xuqing W, Sayre K. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China [J]. *Field Crops Research*, 2004, 87(1):35-42.
- [9] 张勇勇,吴普特,赵西宁,等.垄沟灌溉施氮土壤水氮分布特征试验研究[J].*排灌机械工程学报*,2013,31(5):440-448.
- [10] 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.
- [11] 王贺贺,吴普特,赵西宁,等.不同施肥方式对垄沟灌溉水氮分布的影响[J].*干旱地区农业研究*,2013,31(2):157-163.
- [12] 赵允格,邵明安.不同整地方式下施肥对夏玉米产量及水氮利用效率的影响[J].*农业工程学报*,2004,20(4):40-44.
- [13] 杨启良,张富仓,刘小刚,等.沟灌方式和水氮对玉米产量与水分传导的影响[J].*农业工程学报*,2011,27(1):15-21.
- [14] Siyal A A, Bristow K L, šimůnek J. Minimizing nitrogen leaching from furrow irrigation through novel fertilizer placement and soil surface management strategies [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 115(0):242-251.
- [15] 张婷,吴普特,赵西宁,等.垄沟种植模式对玉米生长及产量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2013,31(1):27-30.
- [16] 李亚贞,焦念元,尹飞,等.垄沟种植对土壤水分变化及夏玉米生育的影响[J].*中国农学通报*,2010,26(13):140-143.
- [17] 王西娜,王朝辉,李生秀.施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响[J].*生态学报*,2007,27(1):197-204.

(上接第 36 页)

- [14] 陈毓荃.生物化学实验方法和技术[M].北京:科学出版社,2006:113-114.
- [15] 孙洪强,庞占荣,蒋春光.水分胁迫对果树形态和生理生化指标的影响[J].*北方果树*,2008,(1):1-3.
- [16] 滕元文,周湘红.果树气孔反应及其对叶水势的调控[J].*干旱地区农业研究*,1993,11(4):61-64.
- [17] Eans J R. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat [J]. *Plant Physiol*, 1983, 72:297-302.
- [18] 房玉林,耿万刚,孙伟,等.赤霞珠葡萄休眠及萌发过程中的氮素代谢[J].*中国农业科学*,2011,44(24):5041-5049.
- [19] 王昊翔,赵德英,马怀宇,等.甜樱桃花芽分化过程中叶片氮代谢初步研究[J].*华北农学报*,2009,24(增刊):201-204.
- [20] Schulze E D. Soil water deficits and atmospheric humidity as environmental signal [J]. *Griffiths Water Deficits*, 1993:129-145.
- [21] 李予霞,崔百明,董新平,等.水分胁迫下葡萄叶片脯氨酸和可溶性总糖积累与叶龄的关系[J].*果树学报*,2004,21(2):170-172.

- [22] 郭修武,王丛丛,周兴本.水分胁迫下肥料配比对葡萄生长发育的影响[J].*华北农学报*,2012,27(2):140-145.
- [23] 王征宏,吕淑萍,张雅冰.盐胁迫下外源 NO 对玉米叶片氮代谢产物的影响[J].*安徽农业科学*,2007,35(17):5055-5056.
- [24] 杨阳,钟晓敏,闫志刚,等.氮素形态对巨峰葡萄果实品质的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2010,16(4):1037-1040.
- [25] 余让才,李明启,范燕萍.高等植物硝酸还原酶的光调控[J].*植物生理学通讯*,1997,33(1):61-65.
- [26] 高祖明,张耀栋,张道勇,等.氮磷钾对叶菜硝酸盐积累和硝酸还原酶、过氧化物酶活性的影响[J].*园艺学报*,1989,16(4):293-297.
- [27] 张智猛,万书波,宁堂原,等.氮素水平对花生氮素代谢及相关酶活性的影响[J].*植物生态学报*,2008,32(6):1407-1416.
- [28] 侯大斌,舒光明,任正隆.氮磷钾施用对附子几种氮代谢酶活性的影响[J].*西南农业学报*,2006,19(5):857-862.
- [29] 莫良玉,吴良欢,陶勤南.高温胁迫下水稻氨基酸态氮与铵态氮营养效应研究[J].*植物营养与肥料学报*,2002,8(2):57-66.