

# 猪场沼液灌溉对冬小麦生长和品质的影响

杜臻杰<sup>1,2,3</sup>, 樊向阳<sup>1,3</sup>, 李中阳<sup>1,3</sup>, 齐学斌<sup>1,3\*</sup>

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453003; 2.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3.中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453003)

**摘要:**为制定合理的猪场沼液灌溉制度,保障作物安全,利用微生物厌氧发酵系统处理过的猪场沼液,通过田间小区试验,研究了不同灌溉量、不同灌溉次数的沼液与不同用量的氮肥配施对冬小麦生长、产量、水分利用效率以及籽粒品质的影响,并对冬小麦产量进行水肥耦合的回归分析。结果表明:施肥量相同时,猪场沼液高灌(灌水定额  $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )处理拔节期生长指标、产量及籽粒淀粉指标显著高于低灌( $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )处理,其中产量差值达 19.93%,淀粉差值达 9%;灌水量相同时,猪场沼液的高肥处理与低肥处理的产量无显著性差异。水分利用效率表现为低灌处理高于高灌处理。综合来看,灌水定额  $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  和施肥量  $30 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  为最优处理。

**关键词:**猪场沼液;水肥耦合;产量;水分利用效率;籽粒品质

中图分类号:S274 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)03-0547-08 doi:10.11654/jaes.2014.03.022

## Growth and Grain Quality of Winter Wheat Irrigated with Biogas Liquid from a Swine Farm

DU Zhen-jie<sup>1,2,3</sup>, FAN Xiang-yang<sup>1,3</sup>, LI Zhong-yang<sup>1,3</sup>, QI Xue-bin<sup>1,3\*</sup>

(1.Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China; 2.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3.Agriculture Water and Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang City of Henan Province of CAAS, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** Irrigation with industrial and domestic sewage has increasingly become popular in most areas of China where there is short of fresh water. Unlike fresh water, biogas liquid is rich in nitrogen and phosphorus but contains other contaminants too. Irrigation with such liquid will therefore arouse concerns over food and environmental safety. A field experiment was conducted to study the effects of irrigation rates and frequency of biogas liquid in combination of two rates of nitrogen fertilizer on growth, yield, grain quality, water use efficiency (WUE) of winter wheat. The growth index at shooting period, yield, grain starch of winter wheat were significantly higher under the sufficient irrigation (irrigation quota for  $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) than under less-sufficient irrigation (irrigation quota for  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ). The differences between two treatments were 19% and 9% for yield and starch content, respectively. No significant differences were observed between two nitrogen fertilizer levels under the same irrigation rates. However, the water use efficiency (WUE) was higher under less-sufficient irrigation than under sufficient irrigation. In conclusion, Irrigation of  $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  with  $30 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  would be optimum for winter wheat growth and grain quality.

**Keywords:** swine farm biogas liquid; water and fertilizer coupling; yield; WUE (water use efficiency); grain quality

收稿日期:2013-04-07

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51209209);国家高技术研究发展计划(863计划课题)(2012AA101404);国家自然科学基金青年基金(51209208);公益性行业(农业)科研专项(201203077)

作者简介:杜臻杰(1982—),男,河南新乡人,在职博士研究生,主要从事农业水资源与水环境方面的研究。E-mail:imdj11@163.com

\* 通信作者:齐学斌 E-mail:qxb6301@yahoo.com.cn

我国水资源比较匮乏,特别是在北方地区<sup>[1]</sup>,农业灌溉缺水日趋严重,不少农民只能通过利用污水甚至超采地下水来弥补<sup>[2-3]</sup>,污水灌溉备受关注<sup>[4-6]</sup>,但是不科学的污水灌溉将直接导致作物减产和食品安全问题。

规模化养殖场耗水量庞大,如果废水不经过处理直接排放,将对生态环境造成恶劣影响,同时浪费宝贵水源。经厌氧发酵处理的沼液具有悬浮物和氮磷营养物质浓度高<sup>[7]</sup>、污染物含量低、病菌等经处理可被杀死等特点,其安全利用研究成为解决我国水资源紧缺和村镇环境问题的热点之一。一方面,养殖沼液灌溉能为植物生长提供重要的养分,增加土壤有机质,从而提高土壤肥力和生产力水平<sup>[8]</sup>;另一方面,沼液中过量养分和病原体同时输入土壤-作物系统,会降低土壤和作物生产力或品质<sup>[9]</sup>,危害环境和人类健康。所以,有必要对养殖沼液的科学合理灌溉进行定量化研究。近年来,伴随规模化猪场的兴起,由于大都采用干清粪工艺,猪场沼液重金属含量相当低,而且含有较多有机态氮、磷等植物必需的元素,在满足作物对水分需求的同时也是一种很好的肥源。目前关于猪场沼液灌溉的文献已有不少<sup>[10-11]</sup>,针对猪场沼液灌溉条件下水肥耦合效应对冬小麦产量、水分利用效率影响的研究却鲜有报道。鉴于此,本文研究了氮肥不同用量水平与猪场沼液不同灌溉量、不同灌溉次数的配施对冬小麦生长、产量、水分利用效率和籽粒品质等安全参数的影响,以期为解决集约化养殖带来的严重的面源污染<sup>[12-15]</sup>、实现沼液的再生利用、保障作物和食品安全、保护村镇生态环境以及制定合理的猪场沼液灌溉制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验在河南省北部的新乡市大朱庄进行。该地区处北纬 35°19',东经 113°53',海拔 73.2 m,多年

平均气温 14.1℃,无霜期 210 d,日照时数 2 398.8 h,多年平均降水量 588.8 mm,多年平均蒸发量 2000 mm。试验所用养殖沼液取自附近养猪场,沼液收集池建有厌氧消化(即沼气发酵,通过厌氧水解菌和厌氧产甲烷菌的代谢活动,将沼液污染物中的大分子有机污染物水解为小分子的醇类和有机酸,最终转化为甲烷和二氧化碳)和生物滤膜处理系统,沼液经处理后符合《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),大肠杆菌未检出,蛔虫去除率达 98%。

试验作物为冬小麦(品种为豫麦 18,2008 年 10 月 10 日播种,2009 年 6 月 15 日收获),试验设计如表 1:①猪场沼液灌水定额设 2 个,即 900、600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,分别用高灌(H)、低灌(L)表示。②猪场沼液灌水次数(为精简试验处理,探寻最优组合,在 2007—2008 年度完全随机试验的基础上对 2008—2009 年度灌水次数进行了优化筛选):900 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>定额的处理设 2 个灌水次数(一是在越冬期、拔节期、抽穗期灌 3 次,二是在越冬期、拔节期、抽穗期、灌浆期灌 4 次);600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>定额的处理只设 1 个次数(在越冬期、拔节期、抽穗期、灌浆期灌 4 次)。③猪场沼液的高灌和低灌处理均配施 2 个肥量水平:尿素投入量折合纯氮分别为 60 kg N·hm<sup>-2</sup>、30 kg N·hm<sup>-2</sup>,分别用高肥(H)、低肥(L)表示;磷钾肥投入为磷酸二氢钾 150 kg·hm<sup>-2</sup>, (即 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 78 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 51 kg·hm<sup>-2</sup>),施用方式均为 50%作底肥,其余在返青-拔节期追施。④试验设 2 个清水对照处理,即在越冬、拔节、抽穗、灌浆 4 个时期设 900、600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> 2 个灌水定额,施肥参照当地农作水平,施 N 为 180 kg N·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 78 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 51 kg·hm<sup>-2</sup>,施用方式同上。

综上,本试验共 8 个处理,每个处理重复 3 次,共计 24 个小区(小区面积为 2 m×6 m)。试验处理编号如表 1(各编号第一个字母 H 表示高灌,L 表示低灌;

表 1 冬小麦试验设计  
Table 1 Experimental design of winter wheat

| 代号<br>Code | 处理<br>Explanation | 越冬期<br>Overwintering stage | 返青期<br>Regreening stage | 拔节期<br>Jointing stage | 抽穗灌浆期<br>Heading to milk stage | 氮投入总量/kg·hm <sup>-2</sup><br>Total nitrogen inputs |
|------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|
| HH3        | 高水高肥              | 猪场沼液                       | 猪场沼液                    | 猪场沼液                  | 清水                             | 243.6                                              |
| HL3        | 高水低肥              | 猪场沼液                       | 猪场沼液                    | 猪场沼液                  | 清水                             | 213.6                                              |
| HH4        | 高水高肥              | 猪场沼液                       | 猪场沼液                    | 猪场沼液                  | 猪场沼液                           | 304.8                                              |
| HL4        | 高水低肥              | 猪场沼液                       | 猪场沼液                    | 猪场沼液                  | 猪场沼液                           | 274.8                                              |
| LH4        | 低水高肥              | 猪场沼液                       | 猪场沼液                    | 猪场沼液                  | 猪场沼液                           | 223.2                                              |
| LL4        | 低水低肥              | 猪场沼液                       | 猪场沼液                    | 猪场沼液                  | 猪场沼液                           | 193.2                                              |
| CK1        | 高水对照              | 清水                         | 清水                      | 清水                    | 清水                             | 180                                                |
| CK2        | 低水对照              | 清水                         | 清水                      | 清水                    | 清水                             | 180                                                |

第二个字母 H 表示高肥,L 表示低肥;第三个数字 3 表示灌 3 次养殖沼液,4 表示 4 次。CK 为施高肥的清水对照处理,其中 1 表示高灌,2 表示低灌)。

1.2 试验方法

在冬小麦播种前和收获后,按五点混合法分别采集 0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层土样。测定指标包括硝态氮、铵态氮、全氮、全磷;在冬小麦播种后 50 d 左右开始监测生育指标(冬小麦叶面积、株高、分蘖数、群体密度、干物质质量等);冬小麦收获后,对籽粒粗蛋白和淀粉进行测定;灌水前,测定灌水水样指标(养殖沼液和清水的 COD、硝态氮、铵态氮、全氮、全磷)。

土壤容重的测定采用环刀法;土壤含水量测定采用负压计和烘干法;土壤质地测定采用吸管法(国际单位制标准);土壤 pH 值的测定采用 pH 计电位法(PHBJ-260 型便携式 pH 计,上海雷磁,0.01 级);土壤可溶性盐测定采用电导法(DDBJ-350 型便携式电导率仪,上海雷磁,1.0 级);土壤有机质测定采用重铬酸钾外加热法;土壤全氮、全磷以及土壤硝态氮、铵态氮的测定均采用连续流动分析仪法(Auto Analyzer 3,德国 BRAN LUEBBE,灵敏度 0.001AUFS)。冬小麦叶面积用便携式叶面积仪(YMJ-B)测定、株高用卷尺测量、群体密度采用 1 米行计数、干物质质量用电子天平称重(上海良平 JA31002),籽粒粗蛋白和淀粉的测定分别参照 GB/T 14771—1993 和 NY/T 11—1985。土壤基本性质见表 2,灌水水质见表 3。

1.3 数据处理

所得数据用 Excel、SPSS 11.5 和 DPS 7.05 予以分

析处理。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对冬小麦主要生理指标的影响

2.1.1 对冬小麦株高的影响

对冬小麦各生育时期株高的监测结果表明(表 4),各处理冬小麦株高在越冬期-返青期增加较为平缓,这是由于冬小麦在出苗和三叶期幼苗所需营养主要来自于底肥和种子本身,水分控制又开始于返青后。由表 4 可知,返青期、拔节期高灌处理 HH4、HL4 相比对照处理 CK1 增幅分别达 22.59%、16.71%,较对照处理 CK2 增幅分别达 21.24%、15.42%。施肥水平一致的情况下,不同沼液灌水水平间比较,在返青期、拔节期高灌处理 HH4、HL4 较低灌处理 LH4 增幅分别达 16.16%、15.02%,较低灌处理 LL4 增幅分别达 14.88%、13.76%,说明返青-拔节期进行猪场沼液高灌处理更能促进小麦的生长。灌水条件相同情况下,不同施肥处理间进行比较,苗期至越冬期,猪场沼液高灌高肥处理 HH4 株高显著高于高灌低肥处理 HL4,而越冬期至拔节期二者无显著性差异。这是由于前者底肥施用较多,越冬前植株生长较好,拔节期后,后者已灌溉沼液两次,沼液中养分弥补了底肥施用的不足;高灌高肥处理 HH3 从苗期至拔节期株高均显著高于低肥处理 HL3,生育后期后者反高于前者,而低灌高肥处理 LH4 与低灌低肥处理 LL4 相比,规律基本一致。

2.1.2 对冬小麦叶面积指数的影响

对冬小麦各生育时期叶面积指数的监测结果表

表 2 试验前土壤基本性质  
Table 2 Physico-chemical characteristics of studied soil

| 层次/cm<br>Soil layer | pH 值 | 容重/g·cm <sup>-3</sup><br>Bulk density | 总孔隙度/%<br>Total porosity | 质地 Soil texture/% |         |         | 全氮/g·kg <sup>-1</sup><br>Total N | 全磷/g·kg <sup>-1</sup><br>Total P | 有机质/%<br>Organic matter |
|---------------------|------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------|---------|---------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
|                     |      |                                       |                          | 粘粒 Clay           | 粉粒 Silt | 砂粒 Sand |                                  |                                  |                         |
| 0~10                | 8.03 | 1.26                                  | 56.12                    | 15.13             | 48.21   | 36.66   | 0.96                             | 0.85                             | 1.30                    |
| 10~20               | 8.34 | 1.49                                  | 55.77                    | 15.77             | 47.62   | 35.98   | 0.98                             | 0.79                             | 0.95                    |
| 20~30               | 8.52 | 1.48                                  | 43.06                    | 16.43             | 47.86   | 35.02   | 0.96                             | 0.80                             | 0.62                    |
| 30~40               | 8.57 | 1.38                                  | 49.92                    | 16.87             | 40.28   | 42.25   | 1.03                             | 0.87                             | 0.51                    |
| 40~60               | 8.50 | 1.28                                  | 50.23                    | 18.63             | 34.31   | 46.92   | 0.74                             | 0.78                             | 0.43                    |
| 60~80               | 8.62 | 1.49                                  | 46.77                    | 19.16             | 46.68   | 39.62   | 0.58                             | 0.78                             | 0.45                    |
| 80~100              | 8.54 | 1.51                                  | 42.58                    | 36.06             | 47.48   | 16.46   | 0.52                             | 0.71                             | 0.36                    |

表 3 猪场沼液灌溉水质(mg·L<sup>-1</sup>)  
Table 3 Quality of biogas liquid used for experiment (mg·L<sup>-1</sup>)

| 水样深度 Depth of water | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | Total N    | Total P    | COD     |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|------------|---------|
| 0~50 cm             | 87.5~175.5                      | 0~1.54                          | 68.1~187.6 | 4.63~10.18 | 640~800 |

明,各处理冬小麦叶面积指数在越冬-返青期增加较为平缓,返青-拔节期迅速增加,生育末期反而下降,因为末期冬小麦由营养生长转向了生殖生长。统计分析表明(表5),HH4较清水对照处理CK1增幅达35.59%,HL4较清水对照处理CK1增幅达17.24% ( $P<0.05$ )。生育末期本为冬小麦生殖生长的关键时期,但低灌高肥处理LH4、CK2冬小麦叶面积指数仍维持在比较高的水平,分别为4.22、4.51,表明低灌高肥处理使冬小麦在灌浆期贪青,不利于冬小麦的生殖生长。相同施肥处理水平下,沼液高灌处理冬小麦叶面积指数较低灌处理显著增加,HH4较LH4增幅达44.04%、HL4较LL4增幅达41.72%;相同灌水水平条件下,高灌高肥处理HH4叶面积指数显著高于高灌低肥处理HL4,这与株高生长规律有所不同;除了生长后期,低灌高肥处理LH4均显著高于低灌低肥处理LL4。

### 2.1.3 对冬小麦有效分蘖数的影响

分蘖对小麦群体发展尤为重要<sup>[16]</sup>。由试验结果可知(表6),各处理冬小麦的有效分蘖数在返青期为23~34,拔节期为33~49,其中猪场沼液的高水高肥处理HH4最大,分别为34和49,其他猪场沼液高灌处

理有效分蘖数也较多;而猪场沼液低灌处理和清水对照处理有效分蘖数较少,CK2仅分别为23和33。经统计分析,猪场沼液高灌处理的有效分蘖数均高于两对照处理,说明猪场沼液中的有机质和氮素等养分(表6)能显著提高冬小麦生长前期的有效分蘖数,促进小麦对营养物质的吸收和积累。

## 2.2 不同水肥处理下冬小麦产量及籽粒品质的比较

### 2.2.1 对冬小麦产量及水分利用效率的影响

图1为不同处理冬小麦产量及水分利用效率对比。猪场沼液高灌处理HH4高出对照CK1 7.17%,HL4高出对照CK1 18.52%。施肥条件一致时,高灌处理冬小麦产量高于低灌处理( $P<0.05$ ):高灌处理HH4高出低灌处理LH4 14.88%,HL4高出低灌处理LL4 19.93%;沼液不同灌水平次数处理HL4高于HL3,增幅达11.62%,HH4与HH3差异并不显著。灌水条件一致时,高肥处理HH3、LH4冬小麦产量与相应低肥处理HL3、LL4差异不显著,高灌低肥处理HL4产量甚至略高于高肥处理HH4,表明高水平的氮肥( $60\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )与猪场沼液高灌处理配施使氮素含量过高,冬小麦产量未能进一步提高,不仅浪费肥料,还可能

表4 不同处理冬小麦株高的比较(cm)  
Table 4 Plant heights in different treatments(cm)

| 处理  | 50 d        | 165 d        | 179 d        | 192 d        | 210 d       | 221 d       |
|-----|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| HH4 | 10.06a±0.06 | 20.12a±0.38  | 66.32a±0.26  | 72.40a±0.30  | 76.15a±2.03 | 75.25a±0.70 |
| HL4 | 9.87b±0.04  | 19.75ab±0.42 | 65.10ab±0.18 | 70.37c±0.15  | 72.61b±1.99 | 75.03a±2.05 |
| HH3 | 9.95b±0.06  | 19.86a±0.16  | 65.80a±0.29  | 69.33d±1.04  | 69.99c±1.93 | 72.22b±2.22 |
| HL3 | 9.69c±0.02  | 19.38b±0.37  | 63.90b±0.30  | 69.40d±0.96  | 70.40c±1.82 | 75.92a±0.88 |
| CK1 | 8.21f±0.10  | 16.41e±0.36  | 54.70e±0.25  | 68.50e±0.21  | 73.00b±3.23 | 74.58a±0.32 |
| LH4 | 8.75d±0.03  | 17.49c±0.20  | 58.30c±0.36  | 71.80ab±0.03 | 72.01b±2.29 | 71.52b±2.79 |
| LL4 | 8.50e±0.08  | 17.00d±0.87  | 56.67d±2.89  | 71.70b±0.36  | 72.01b±2.82 | 75.43a±2.60 |
| CK2 | 8.46e±0.02  | 16.92d±0.35  | 56.40d±1.15  | 65.50f±0.20  | 72.29b±1.35 | 74.95a±0.99 |

注:同列中各数值后小写字母不同表示处理间有显著性差异( $P<0.05$ )。表5同。

Note: Values followed by different letters in the same column are significant among treatments at the 5% level, the same as table 5.

表5 不同处理冬小麦叶面积指数的比较  
Table 5 Leaf area index(LAI) of winter wheat in different treatments

| 处理  | 50 d        | 165 d       | 179 d      | 192 d      | 210 d        | 221 d        |
|-----|-------------|-------------|------------|------------|--------------|--------------|
| HH4 | 1.43a±0.03  | 2.87a±0.05  | 4.78a±0.16 | 4.89a±0.09 | 5.20a±0.14   | 3.38c±0.20   |
| HL4 | 1.25b±0.02  | 2.59b±0.02  | 4.29b±0.08 | 4.46b±0.11 | 4.92bc±0.12  | 2.95d±0.15   |
| HH3 | 1.38a±0.04  | 2.58b±0.03  | 4.28b±0.02 | 4.49b±0.16 | 4.96ab±0.15  | 2.72de±0.04  |
| HL3 | 1.08c±0.01  | 2.60b±0.04  | 4.31b±0.02 | 4.39b±0.22 | 4.79bcd±0.18 | 3.74abc±0.21 |
| CK1 | 1.03cd±0.03 | 2.13cd±0.05 | 3.55c±0.02 | 3.68c±0.09 | 5.15a±0.12   | 2.46e±0.14   |
| LH4 | 1.28b±0.04  | 2.08d±0.04  | 3.48c±0.09 | 3.47d±0.04 | 4.59d±0.18   | 3.90ab±0.29  |
| LL4 | 1.01de±0.05 | 1.82e±0.02  | 3.03d±0.04 | 3.17e±0.06 | 4.73bcd±0.25 | 3.55bc±0.26  |
| CK2 | 0.96e±0.03  | 2.20c±0.05  | 3.56c±0.09 | 3.71c±0.21 | 4.93ab±0.15  | 4.06a±0.19   |

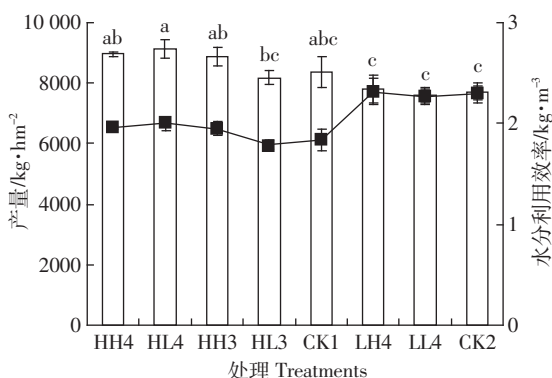
表 6 不同处理冬小麦的有效分蘖数

Table 6 Effective tiller number of winter wheat in different treatments

| 处理 Treatment         | HH4 | HH3 | HL4 | HL3 | LH4 | LL4  | CK1  | CK2 |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|
| 返青期 Regreening stage | 34a | 34a | 31b | 31b | 26c | 25cd | 25cd | 23d |
| 拔节期 Jointing stage   | 49a | 48a | 43b | 41b | 36c | 35cd | 36c  | 33d |

注:同行数值后不同小写字母表示处理间有显著差异( $P<0.05$ ),表 7 同。

Note: Values followed by different letters in the same line are significant among treatments at the 5% level, the same as table 7.



产量见柱状图,水分利用效率见折线图。产量上图标小写字母不同表示有显著差异( $P<0.05$ )

Histogram is for yield, and line for water use efficiency (WUE). Values followed by different letters are significant among treatments at the 5% level

图 1 不同处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响

Figure 1 Yield and water use efficiency of winter wheat in different treatments

造成农业面源污染。

水分利用效率反映了产量与田间耗水量之间的关系,小麦水分利用效率随不同处理下产量的变化而变化。统计分析表明,低灌处理 LH4、LL4 和 CK2 的水分利用效率要显著高于其他 5 个高灌处理(SPSS 11.5;  $P<0.05$ ),高灌处理中 HL4 的水分利用效率最高。赵炳梓等<sup>[17]</sup>研究认为低水平灌溉条件下,水分利用效率随着施 N 量增加而上升;高水平灌溉条件下,水分利用效率随着 N 肥用量的增加呈先上升后下降的趋势。本研究表明,灌水条件一致时,高肥处理( $60 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ )与低肥处理( $30 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ )的水分利用效率差异并不大。

## 2.2.2 不同水肥耦合冬小麦产量回归解析

不同水肥配比显著影响小麦的产量构成,水肥对产量在一定范围内有明显正效应。二者存在显著耦合效应,只有在适宜的土壤水分与养分条件下才能获得较高的产量<sup>[18-21]</sup>。以产量为因变量  $y$ ,不同处理的灌水总额  $x_1$  (即该处理全生育期沼液水与清水的灌溉总额)及总氮投入量  $x_2$  (即全生育期化肥投入氮量及沼

液含氮量之和)为自变量,通过 DPS 回归和系数检验,得到方程。

$$y = 7384.17 - 0.098x_1 - 5.32x_2 + 0.0034x_1x_2$$

该回归方程通过了显著性检验( $n=8$ ;  $r=0.9122^*$ ,  $F$  值为  $13.85 > F_{0.05}=6.56$ ),能为田间水肥试验结果的建模提供依据。方程中常数项为 7384.17,表明该试验地的生产力处于较高水平。灌水总额和施氮量的系数均为负值,不过灌水总额的系数比较小,说明单纯的灌水不会对试验地生产水平有大的影响;如果单纯的施肥而不配合灌水,就会因为缺水干旱、烧苗而迅速导致产量下降;第二项为交互项,且系数为正,说明总灌水量和施肥量之间的协调非常重要,必须注重二者的耦合效应,合理配比,才能获得较高的产量。而本试验证明,施肥  $30 \sim 80 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、灌水  $600 \sim 1000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  是适合生产的肥水合理范围,考虑到节水灌溉和减少化肥的使用,本试验的 HL4 小区即灌水定额为  $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,施肥量为  $30 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  为最优处理。

## 2.2.3 不同水肥耦合冬小麦籽粒淀粉、粗蛋白质的比较

研究表明<sup>[22-24]</sup>,水肥耦合显著影响小麦籽粒蛋白质质量和淀粉组分,进而影响籽粒品质。本试验不同处理冬小麦籽粒中淀粉、粗蛋白质的试验结果见表 7。

试验表明,清水对照的高灌处理 CK1 小麦籽粒中淀粉含量显著高于相应低灌处理 CK2,沼液高灌处理的小麦籽粒淀粉含量也显著高于相应的清水对照处理 CK2;灌水条件相同时,高灌处理 HH4 与 HL4 籽粒中淀粉含量分别达到 54.68% 和 55.69%,显著大于相应的低灌处理;所有处理中,只有 HH4 小麦籽粒中粗蛋白含量(达到 18.58%)显著高于 CK1,其他处理间无差异。这与小麦籽粒中淀粉含量的结果不大一致,可能是因为增加清水的灌水量对籽粒中的蛋白质有一定的稀释效应,而对淀粉的合成与积累起到了促进作用,致使清水的高灌处理蛋白质的积累相对较低。

冬小麦籽粒淀粉含量与产量的回归方程为

$$y = -2E - 06x^2 + 0.065x - 396.6 (r=0.8827^{**}, n=8)$$

表 7 不同处理冬小麦籽粒中淀粉、粗蛋白质含量(%)

Table 7 Contents of starch and crude protein in winter wheat grain under different treatments(%)

| 处理                 | CK1    | CK2     | HH3     | HL3     | HH4     | HL4     | LH4     | LL4     |
|--------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 淀粉 Starch          | 52.98c | 50.56d  | 53.46b  | 53.08bc | 54.68ab | 55.69a  | 52.76c  | 50.88cd |
| 粗蛋白质 Crude protein | 16.89b | 17.26ab | 17.36ab | 17.34ab | 18.58a  | 17.42ab | 17.32ab | 17.28ab |

粗蛋白质的含量与产量的回归方程为:

$y=3E-09x^2+0.000\ 1x+15.182(r=0.806\ 8^{**},n=8)$

可见,冬小麦籽粒淀粉及粗蛋白质的含量与产量之间存在着极显著的相关性,表明本试验条件下,猪场沼液灌溉的不同处理对冬小麦产量和品质指标特别是淀粉含量的影响趋势是一致的。

3 讨论

齐学斌等<sup>[25]</sup>通过再生水灌溉冬小麦的试验发现再生水灌溉对冬小麦生长发育有一定促进作用,尤其是对产量和叶面积影响最为明显。本文通过猪场沼液水安全灌溉农田的试验,发现在返青-拔节期、抽穗灌浆期进行猪场沼液灌溉更能促进小麦的生长。施肥量相同时,猪场沼液(处理后含  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  88~350  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )高灌处理各项指标均显著高于低灌处理,但水分利用效率并不及低灌处理。梁银丽等<sup>[26]</sup>研究认为,小麦总生物量和籽粒产量与总灌水量之间存在明显正相关。本研究表明:猪场沼液灌溉条件时,在本试验处理的灌水水平内(600~900  $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ),增加灌水量和灌水次数都能够促进产量的提高,这不仅与总灌水量的提高有关,还与沼液水中所携带的大量氮素有关,但也并非氮素投入量越大越好。本试验中猪场沼液高灌配以高水平氮肥处理 HH4 氮素施入量为各处理最高,达到 304.8  $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,而其产量和淀粉指标反而没有相应的低肥处理 HL4 高(该处理总氮投入量为 274.8  $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。王志勇等<sup>[27]</sup>在不同氮素营养水平条件下对冬小麦产量及生物学性状影响的研究中发现,施氮量在 60~300  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  范围内,氮素营养能够促进冬小麦株高的增加,提高冬小麦的分蘖数、叶面积指数和最终收获穗数,而低于或者超过该水平范围反而不利于小麦生产。付雪丽等<sup>[28]</sup>也提出不施氮肥或氮肥施用超过 270  $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$  均会影响籽粒蛋白质、淀粉的积累和产量下降。由此可见,土壤中氮素含量的增加促进了植株中氮素的积累,随着氮素等营养条件的改善,植株的光合能力增强,促进了小麦灌浆、籽粒增重和品质改善,但是施入氮素的量超过了一定的限度反而会引起产量、品质的下降。本试验的氮素投入峰值宜

参考 HL4 处理的 274.8  $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$  左右,与付雪丽等的研究结果更为接近。

不过值得注意的是,按照上述规律,氮素投入在一定水平范围内(如 60~300  $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),猪场沼液低灌水平的高肥处理 LH4 应该比相应的低肥处理 LL4(总氮投入分别为 223.2  $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$  和 193.2  $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,远未达到峰值)的产量高,而本试验结果并非如此,二者产量差异不显著。这就要考虑到猪场沼液本身不仅含有大量氮素,而且含有大量有机质和微生物,它们可能会改善土壤团粒结构,甚至激发土壤中有有机氮的矿化,致使在低氮投入条件下,仍然能够保证产量。当然,这有待于日后进一步深入的研究证实。

另外,本试验为大田试验,灌水易受降水的影响,应在防雨棚或盆栽中进一步试验以验证结果。猪场沼液水质会随季节、水体深度甚至猪场工作人员操作发生变化,本试验过程中,由于猪场猪粪被管理员使用大量清水冲洗入池,厌氧发酵、生物滤膜处理后猪场沼液浓度较低(处理后  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度为 88~350  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),高浓度的猪场沼液则不宜直接浇灌,否则会引起烧苗,可考虑通过清污轮灌、清污混灌或沼液稀释等方式进行灌溉。

4 结论

(1)猪场沼液高灌处理(900  $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ )生长生产指标均显著高于清水对照处理,施肥量相同时,也显著高于相应的低灌处理(600  $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ );灌水条件相同时,猪场沼液的高肥处理小麦产量(60  $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )与低肥处理(30  $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )差异不显著。清水对照高灌处理小麦主要生长生产指标 CK1 普遍高于低灌处理 CK2。

(2)猪场沼液的高灌处理小麦籽粒淀粉含量显著高于低灌处理及清水对照处理。清水对照的高灌处理 CK1 小麦籽粒中淀粉含量也显著高于相应低灌处理 CK2。小麦籽粒粗蛋白含量表现为猪场沼液高灌处理 HH4 显著高于清水对照处理 CK2,其他处理间均无差异。

(3)本试验中,HL4(即在越冬、返青、拔节、抽穗

灌浆期灌入猪场沼液定额为  $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、配以  $30 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  的施肥)处理是保证产量、品质及节约肥料的最优处理。

#### 参考文献:

- [1] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.  
LIU Chang-ming, CHEN Zhi-kai. Reports collection on water resources stratagem for sustainable development in China[M]. Beijing: China's Hydrology and Electric Press, 2001.
- [2] 王海艺, 韩烈保, 黄明勇. 干旱条件下水肥耦合作用机理和效应[J]. 中国农学通报, 2006, 122(6): 124-128.  
WANG Hai-yi, HAN Lie-bao, HUANG Ming-yong. Mechanism and effect of water and fertilizer coupling under drought stresses[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 122(6): 124-128.
- [3] 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 Rong-kai, WANG Kang, ZHANG Yu-fang, et al. Field test and study on yield, water use and N uptake under varied irrigation and fertilizer in crops[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(5): 35-38.
- [4] 刘凌, 陆桂华. 含氮污水灌溉实验研究及污染风险分析[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 313-320.  
LIU Ling, LU Gui-hua. Nitrogen wastewater irrigation study and its contamination risk analysis[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(3): 313-320.
- [5] Lopez A, Pollice A, Lonigro A, et al. Agricultural wastewater reuse in Southern Italy[J]. *Desalination*, 2006, 187(1-3): 323-334.
- [6] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, et al. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 107: 151-165.
- [7] 许振成, 湛建宇, 曾雁湘, 等. 集约化猪场沼液强化生化处理工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 204-209.  
XU Zhen-cheng, ZHEN Jian-yu, ZENG Yan-xiang, et al. Experimental research on piggery farm wastewater treatment by enhanced biological process[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(10): 204-209.
- [8] Munir J Mohammad Rusan, Sami Hinnawi, Laith Rousan. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters[J]. *Desalination*, 2007, 215(1/3): 143-152.
- [9] Vazquezmontiel O, Horan N J, Mara D D. Management of domestic wastewater for reuse in irrigation[J]. *Water Sci Technol*, 1996, 33(10-11): 355-362.
- [10] 何艺, 谢志成, 朱琳. 不同类型水浇灌对已污染土壤酶及微生物量碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2227-2232.  
HE Yi, XIE Zhi-cheng, ZHU Lin. Effects of reclaimed water irrigation on soil enzyme and soil microbial biomass carbon in paddy soil of wastewater irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2227-2232.
- [11] 杨军, 张蕾, 张克强, 等. 猪场沼液灌溉对潮土硝态氮含量变化的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 35-39.  
YANG Jun, ZHANG Lei, ZHANG Ke-qiang, et al. Effects of irrigation with piggery wastewater on nitrate nitrogen dynamics in fluvio-aquatic soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(5): 35-39.
- [12] 胡开明, 逢勇, 王华. 太湖湖体总氮平衡及水质可控目标[J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 555-562.  
HU Kai-ming, PANG Yong, WANG Hua. On the total nitrogen balance and water quality controllable target in Taihu Lake[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4): 555-562.
- [13] 吴建强. 不同坡度缓冲带滞缓径流及污染物去除定量化[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 112-117.  
WU Jian-qiang. Quantitative study of the damping effect of buffer strips with different slopes on runoff and pollutant removal efficiency[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(1): 112-117.
- [14] Singh B, Singh G. Effects of controlled irrigation on water potential nitrogen uptake and biomass production in *Dalbergia sissoo* seedlings[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 55: 209-219.
- [15] 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.
- [16] 徐大胜, 彭素琼. 小麦分蘖成穗对产量的影响研究[J]. 西南农业学报, 2010, 23(4): 1055-1060.  
XU Da-sheng, PENG Su-qiong. Research on yield impact of wheat spike from tillers[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(4): 1055-1060.
- [17] 赵炳桢, 徐富安, 周刘宗, 等. 水肥(N)双因素下的小麦产量及水分利用率[J]. 土壤, 2003(2): 122-125.  
ZHAO Bing-zhi, XU Fu-an, ZHOU Liu-zong, et al. Wheat yield and water-use efficiency as influenced by different combinations of irrigation water and nitrogen fertilizer[J]. *Soils*, 2003(2): 122-125.
- [18] 张凤翔, 周明耀, 徐华平, 等. 水肥耦合对冬小麦生长和产量的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3(2): 22-24.  
ZHANG Feng-xiang, ZHOU Ming-yao, XU Hua-ping, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growing and yield of winter wheat[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2005, 3(2): 22-24.
- [19] 崔远来, 李远华, 吕国安, 等. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 280-284.  
CUI Yuan-lai, LI Yuan-hua, LÜ Guo-an, et al. Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(3): 280-284.
- [20] 沈玉芳, 李世清, 邵明安. 水肥空间组合对冬小麦生物学性状及生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1822-1829.  
SHEN Yu-fang, LI Shi-qing, SHAO Ming-an. Effects of water and fertilizer spatial coupling on biological characteristics and biomass of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8): 1822-1829.
- [21] 许卫霞, 于振文. 水磷耦合对小麦耗水特性和子粒产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 821-828.

- XU Wei-xia, YU Zhen-wen. Effects of irrigation and phosphorus fertilizer application on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 821-828.
- [22] 兰涛, 姜东, 谢祝捷, 等. 花后土壤干旱和渍水对不同专用小麦子粒品质的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 193-196.
- LAN Tao, JIANG Dong, XIE Zhu-jie, et al. Effects of post anthesis drought and water logging on grain quality traits in different specialty wheat varieties[J]. *J Soil Water Conserv*, 2004, 18(1): 193-196.
- [23] 王立秋, 靳占忠, 曹敬山, 等. 水肥因子对小麦子粒及面包烘烤品质的影响[J]. 中国农业科学, 1997, 30(3): 67-73.
- WANG Li-qiu, JIN Zhan-zhong, CAO Jing-shan, et al. Effects of irrigation fertilization on wheat grain and breakmaking quality[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(3): 67-73.
- [24] 王小燕, 于振文. 不同冬小麦品种氮素吸收运转特性及其与子粒蛋白质含量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 301-306.
- WANG Xiao-yan, YU Zhen-wen. The absorption and translocation of nitrogen and their relationship to grain protein content in different winter wheat cultivars[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3): 301-306.
- [25] 齐学斌, 钱炬炬, 樊向阳, 等. 污水灌溉国内外研究现状与进展[J]. 中国农村水利水电, 2006(1): 13-15.
- QI Xue-bin, QIAN Ju-ju, FAN Xiang-yang, et al. The progress and status research of sewage irrigation at home and abroad[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2006(1): 13-15.
- [26] 梁银丽, 康绍忠. 节水灌溉对冬小麦光合速率和产量的影响[J]. 西北农业大学学报(自然科学版), 1998, 26(4): 16-19.
- LIANG Yin-li, KANG Shao-zhong. Effects of water saving irrigation on photosynthesis and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 1998, 26(4): 16-19.
- [27] 王志勇, 白由路, 王磊, 等. 氮素营养水平对冬小麦产量及生物学性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(4): 22-25.
- WANG Zhi-yong, BAI You-lu, WANG Lei, et al. Effects of nitrogen rates on grain yield and biological characteristics of winter wheat[J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2011(4): 22-25.
- [28] 付雪丽, 王晨阳, 郭天财, 等. 水氮互作对小麦籽粒蛋白质、淀粉含量及其组分的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 317-322.
- FU Xue-li, WANG Chen-yang, GUO Tian-cai, et al. Effects of water nitrogen interaction on the contents and components of protein and starch in wheat grains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 317-322.