

猪场废水灌溉对土壤-夏玉米系统氮素分布的影响

白丽静,王 风,张克强,黄治平,杨 军,李晓光,张金凤

(农业部环境保护科研监测所,天津 300191)

摘 要:通过田间小区试验,研究了猪场废水处理工艺中3个阶段出水(原水、厌氧水和仿生态塘水)与地下水1:5混水和厌氧水不同灌溉量对土壤中矿质氮含量、夏玉米产量以及植株吸氮量的影响。结果表明:厌氧水不同灌溉量对各土层硝态氮和铵态氮含量影响差异较显著,而不同阶段出水混水灌溉对各土层硝态氮和铵态氮含量影响差异不显著;厌氧水不同灌溉量处理下玉米产量呈现中量厌氧水>高量厌氧水>低量厌氧水的趋势,不同处理阶段出水混水灌溉时,原水与地下水1:5混水灌溉产量较其他处理高;仿生态塘混水灌溉玉米籽粒粗蛋白含量最高。建议适宜的猪场养殖废水厌氧出水灌水定额为500 m³/hm²,适宜的混水灌溉处理为仿生态塘水与地下水1:5的配水比例。

关键词:猪场废水;土壤;夏玉米;硝态氮;铵态氮;产量;植株吸氮量

中图分类号:S273.5; S513; S153.6⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7601(2010)01-0044-05

近年来,我国水资源十分匮乏,特别是北方地区,农业灌溉缺水日趋严重,因而废水灌溉得到越来越多的重视。废水灌溉一方面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^[1]。另一方面,废水中过量养分、有毒化学物质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^[2],危害环境和人类健康。目前关于工业或市政废水灌溉已有大量学者进行了研究,Lopez等^[3]应用生物处理的城市废水灌溉油橄榄树增产50%。杨培岭^[4]发现再生水灌溉比清水灌溉能促进草坪的生长,提高叶绿素及类胡萝卜素含量。F. Mapanda^[5]在测定用废水灌溉十年的菜园土壤中发现,存在重金属污染问题,而且预测灌溉50~60年后,土壤中累积的重金属可能会超出土壤的承载力。而新兴起的规模化猪场大都采用干清粪工艺,猪场废水重金属含量相当低,而且含有大量有机态氮、磷等植物必需的元素。猪场废水灌溉时不仅能满足作物对水分的需求,同时还是一种很好的肥源,因此有必要在这方面开展研究。

但是目前关于猪场废水灌溉对土壤-作物系统影响的研究还很少,本文用不同量厌氧水和3个不同处理阶段出水混水灌溉夏玉米,通过测定土壤中硝态氮、铵态氮含量和夏玉米产量、植株氮和籽粒粗蛋白含量,并对其结果进行分析讨论,从而提出适宜的猪场废水厌氧水灌溉量和混水灌溉类型。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

试验于2007年9月至2008年9月在天津市西青区杨柳青镇益利来养殖场内进行,作物种植制度为冬小麦-夏玉米轮作,2007年9月底至2008年6月中旬种植冬小麦,2008年6月中旬至2008年9月底种植夏玉米。该地区气候介于大陆性气候和海洋性气候之间,四季变化明显。年平均气温11.0℃~12.5℃,≥0℃积温生长季始于3月上旬,终于11月下旬,≥10℃活动积温4 000℃~4 300℃,≥10℃初日在4月上旬,终日在10月下旬,多年平均降水量577.8 mm,主要集中在7~8月份,10月份至翌年6月份冬小麦生长季节多年平均降水量107.7 mm^[6]。年平均日照时数在2 610~3 090 h之间,年太阳总辐射在125~135 kW/cm²之间,年无霜期约为180~190 d。供试土壤为潮土,耕层容重为1.39 g/cm³,田间持水量为40.8%,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为62.2%、29.5%和8.3%,土壤质地为砂壤土(美国制);耕层基础肥力全氮0.66 g/kg,铵态氮4.94 mg/kg,硝态氮21.27 mg/kg,全磷0.60 g/kg,速效磷41.05 mg/kg,有机质1.12%,土壤pH值为7.98。

试验小区面积50 m²(10 m×5 m),供试夏玉米品种为纪元1号,2008年6月18日播种,行距为50 cm,株距40 cm,2008年9月30日收获。除水、肥因子外,其他按照夏玉米常规生产方式进行管理。试

收稿日期:2009-04-22

基金项目:“十一五”国家科技支撑项目(2006BAD17B02);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(农业部环境保护科研监测所)

作者简介:白丽静(1982—),女,河北唐山人,硕士研究生,从事废水灌溉研究。

通讯作者:张克强(1968—),男,博士,研究员,从事农业资源利用和微生物工程方向研究。E-mail: kqzhang68@126.com。

验处理见表 1, 设 8 个处理, 3 次重复。小区间用 1 m 深防水土工布隔离。因为夏玉米生长季节雨水较多, 所以整个生育期只在 2008 年 8 月 28 日灌水一次, 灌水方式为畦灌。灌溉用水分别为原水(猪圈舍干清粪后地下水冲洗直接流入预处理池的水)、厌氧

水(原水经塞流厌氧发酵工艺处理后, 停留周期为 5 d 的出水)、仿生态塘水(经曝气、人工净水草和植物吸收处理后的厌氧水)及地下水(试验地外 6 m 深井水), 用水时现取。

表 1 试验处理
Table 1 Experimental treatments

处理 Treatments	灌溉水 Irrigation water	灌水定额 Irrigation quota (m ³ /hm ²)	NH ₄ ⁺ - N Ammonia nitrogen (mg/L)	NO ₃ ⁻ - N Nitrate nitrogen (mg/L)	施肥量 Fertilization rate (g/50m ²)
T _{Hanac}	高量厌氧水 High quota of anaerobic water	830	740 ~ 810	1.81 ~ 3.21	—
T _{Manac}	中量厌氧水 Mid quota of anaerobic water	500	740 ~ 810	1.81 ~ 3.21	—
T _{Lanac}	低量厌氧水 Low quota of anaerobic water	160	740 ~ 810	1.81 ~ 3.21	—
T _{anac:gw 1:5}	厌氧水:地下水 = 1:5 Anaerobic water: groundwater = 1:5	830	123 ~ 135	0.30 ~ 0.54	—
T _{ecol:gw 1:5}	仿生态塘水:地下 = 1:5 Pool water: groundwater = 1:5	830	10 ~ 114	0.19 ~ 0.23	—
T _{ori:gw 1:5}	原水:地下水 = 1:5 Original water: groundwater = 1:5	830	137 ~ 150	0.33 ~ 0.51	—
T _{gw}	地下水 Groundwater	830	—	—	—
CK	地下水 Groundwater	830	—	—	基肥: 尿素 355.5 g/50m ² , 磷酸二铵 1115.5 g/50m ² . Base fertilizer: urea 355.5 g/50m ² , diammonium phosphate 1115.5 g/50m ² .

注: “—”表示不施肥, “—”表示地下水中氮含量低, 忽略不计。
Note: “—” means no fertilization, and “—” means low nitrogen content in groundwater and it could be ignored.

1.2 测定指标与方法

玉米产量测定 在玉米成熟期, 每小区取代表性植株 4 株, 待样品风干后测产。

土壤氮素的测定 在 2008 年 9 月 30 日(收获玉米后)在各小区内随机取 3 个点, 用土钻分层取 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土壤, 用于测定土壤 NO₃⁻ - N 和 NH₄⁺ - N 含量。土样采用 2 mol/L 氯化钾浸提后, NO₃⁻ - N 含量和 NH₄⁺ - N 含量分别采用紫外分光光度法和靛酚蓝比色法测定。

植物氮素含量测定 样品风干粉碎后, 秸秆全氮和籽粒粗蛋白含量均采用半微量凯氏定氮法测定, 粗蛋白换算系数取 6.25。

水质的测定 灌水当天采集水样带回实验室测定。硝酸盐氮采用 GB7480 - 87 酚二磺酸光度方法测定; 氨氮采用 GB 7479 - 87 纳氏试剂比色法测定。

1.3 数据分析

数据处理和图表绘制在 Excel2003 下完成, 试验结果方差分析和 Duncan's 新复极差比较分析在 SAS 9.0 中进行。

2 结果与分析

2.1 猪场废水灌溉对土壤硝态氮含量的影响

猪场废水灌溉对土壤硝态氮含量的影响见图 1。厌氧水不同灌溉量条件下, 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层中硝态氮含量均呈现 T_{Hanac} > T_{Manac} > T_{Lanac} > CK 的趋势, 且 20 ~ 40 cm 土层含量高于 0 ~ 20 cm 土层, 这可能与硝态氮向下的淋溶作用有关。0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层硝态氮含量 T_{Hanac}、T_{Manac}、T_{Lanac} 分别比 CK 高 364.7%、200.8%、130.2% 和 724.7%、373.9%、228.7%, 且 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 两个土层中 T_{Hanac} 与 T_{Manac}, T_{Hanac} 与 T_{Lanac}, T_{Hanac}、T_{Manac} 与 CK 处理间硝态氮含量差异均达到显著水平 (P < 0.05)。不同处理阶段出水混水灌溉条件下, T_{ori:gw 1:5} 处理 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 中硝态氮含量都高于其它处理, 且 20 ~ 40 cm 土层高于 0 ~ 20 cm 土层, 这可能是由原水中有有机氮含量偏高, 而且表层土壤有机氮矿化而随水分向下迁移, 从而导致 20 ~ 40 cm 土层含量高于 0 ~ 20 cm 土层, 并高于其它处理。

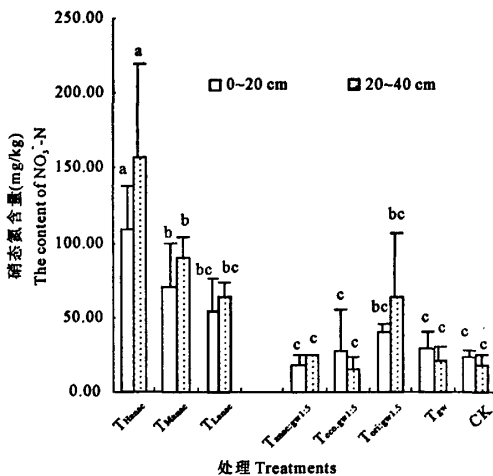


图 1 猪场废水灌溉对土壤硝态氮含量的影响

Fig.1 Effect of piggery waste water irrigation on content of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in soil

2.2 猪场废水灌溉对土壤铵态氮含量的影响

猪场废水灌溉对土壤铵态氮含量的影响见图 2。

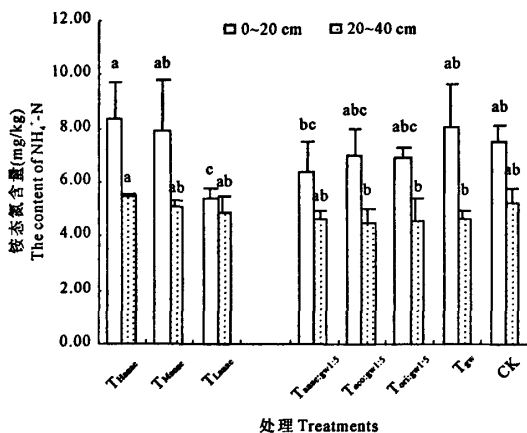


图 2 猪场废水灌溉对土壤铵态氮含量的影响

Fig.2 Effect of piggery waste water irrigation on content of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in soil

从图中可以看出,各处理 0~20 cm 土层铵态氮含量均高于 20~40 cm,这主要是因为土壤颗粒带负电,易吸附铵态氮^[7]。厌氧水不同灌溉量下,0~20 cm 土层整体呈现 $T_{\text{Hanac}} > T_{\text{Manac}} > \text{CK} > T_{\text{Lanac}}$ 的趋势,20~40 cm 土层整体呈现 $T_{\text{Hanac}} > \text{CK} > T_{\text{Manac}} > T_{\text{Lanac}}$ 的趋势,且 0~20 cm 土层中 T_{Hanac} 与 T_{Lanac} 、 T_{Manac} 与 T_{Lanac} 、 T_{Hanac} 与 T_{Manac} 与 CK 处理间铵态氮含量达到显著性差异水平 ($P < 0.05$),说明厌氧水灌溉量是决定土壤铵态氮含量的重要因素,且随灌溉量增加土壤铵态

氮含量增大。不同阶段出水混水灌溉时,0~20 cm 和 20~40 cm 土层各处理之间铵态氮含量均未达到显著性差异水平。

2.3 猪场废水灌溉对夏玉米产量的影响

猪场废水灌溉对夏玉米产量的影响见图 3。与 CK 相比,除 T_{Hanac} 、 T_{Manac} 和 $T_{\text{ori:gw 1:5}}$ 产量提高了 8.5%、9.3% 和 2.4% 外, T_{Lanac} 、 $T_{\text{anac:gw 1:5}}$ 、 $T_{\text{eco:gw 1:5}}$ 和 T_{gw} 产量分别降低了 1.0%、10.6%、11.5% 和 39.2%, T_{Hanac} 、 T_{Manac} 、 T_{Lanac} 、 $T_{\text{anac:gw 1:5}}$ 、 $T_{\text{ori:gw 1:5}}$ 、CK 与 T_{gw} 处理间差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。而查贵峰等^[8,9]在用北京高碑店污水处理厂出水对夏玉米灌溉试验得到不同的结论,污水灌溉和清水灌溉产量差异不显著,这可能是因为他们在实验中作了施肥处理,而且所用灌溉水源为生活污水,水源中的养分不能够成为作物生长的限制因素,而本实验中所用水源具有悬浮物和氮磷等营养元素含量高^[10]的特点而且未作施肥处理。同时由图 3 可以看出,厌氧水不同灌溉量时,厌氧水中量灌溉处理产量最高,这与黄冠华^[11]的研究结果是一致的。这是因为厌氧水高量灌溉时,土壤中残留 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度过高产生“铵毒”现象而抑制玉米生长,低量灌溉主要是因为养分的限制而不能满足玉米生长需要,单是处理间差异并未达到显著水平。另外, $T_{\text{ori:gw 1:5}}$ 灌溉处理比 $T_{\text{anac:gw 1:5}}$ 和 $T_{\text{eco:gw 1:5}}$ 产量高,可能是因为夏季水热条件好,土壤中残存的高量有机态氮经过矿化作用转化成作物易吸收利用的无机态氮^[12]。

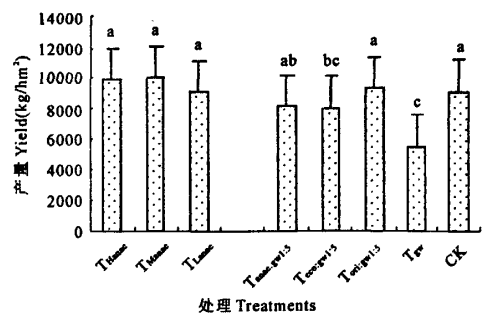


图 3 猪场废水灌溉对夏玉米产量的影响

Fig.3 The effect of piggery wastewater irrigation on the summer maize yield

2.4 猪场废水灌溉对夏玉米籽粒粗蛋白含量的影响

猪场废水灌溉对夏玉米籽粒粗蛋白含量的影响见图 4。由图 4 可以看出,厌氧水不同灌溉量时,籽粒中粗蛋白含量呈现 $T_{\text{Hanac}} > T_{\text{Manac}} > \text{CK} > T_{\text{Lanac}}$ 的趋势, T_{Hanac} 与 T_{Lanac} 处理之间籽粒中粗蛋白含量达到显著性差异水平 ($P < 0.05$)。 T_{Hanac} 和 T_{Manac} 籽粒中粗

蛋白含量高于 CK,是因为灌水量增加时,随灌溉水而进入土壤中的养分增多,这些养分促进了玉米对氮素的吸收利用,从而有利于粗蛋白含量的提高。同时也表明,灌溉水中氮浓度越高,玉米籽粒中粗蛋白质的含量越高。这与宁堂原^[13]增施氮肥可以提高夏玉米籽粒中蛋白质含量是一致的。与万亮婷等^[14,15]对冬小麦和旱地玉米的研究有所不同,这是由于夏玉米的生长季节与华北地区的降雨季节处在同一时期,水分不再是影响品质的重要因素;同时也是受猪场废水氮素丰富特点的影响。

在相同灌水量处理条件下,不同处理阶段出水混水灌溉也影响籽粒中粗蛋白含量, $T_{eco:gw 1:5}$ 与 $T_{anae:gw 1:5}$ 、 $T_{ori:gw 1:5}$ 、CK 处理间籽粒中粗蛋白含量达到显著性差异水平 ($P < 0.05$)。 $T_{eco:gw 1:5}$ 处理籽粒中粗蛋白含量最高,这是因为硝态氮对植物生长有利^[16],而经过仿生态塘的曝氧增氧和硝化反硝化作用,促使部分 $NH_4^+ - N$ 转化为 $NO_3^- - N$,从而提高了籽粒中粗蛋白的含量;还可能是因为灌溉时带入部分仿生态塘底泥所致。 $T_{ori:gw 1:5}$ 处理籽粒中粗蛋白含量低于 CK,可能是因为原水有机态氮浓度太高,抑制了根系对营养物质的吸收,另外有可能是原水中的毒害物质,如抗生素、重金属等物质对玉米吸收氮素和氮素的运移系统产生了毒害作用。

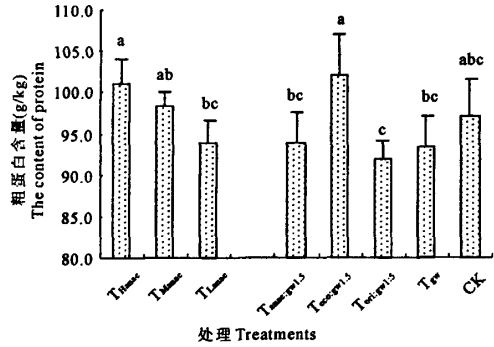


图 4 猪场废水灌溉对夏玉米籽粒中粗蛋白含量的影响
Fig.4 The content of protein in the summer maize with piggery wastewater irrigation

2.5 猪场废水灌溉对夏玉米秸秆中氮含量的影响

由图 5 可以看出,厌氧水不同量灌溉时秸秆全氮含量呈现 $T_{Hanae} > T_{Manae} > T_{Lane} > CK$ 的变化趋势,分别比 T_{gw} 处理秸秆全氮含量提高了 25.6%、20.7%、19.5%、6.1%,表明随厌氧水灌溉量的增加,秸秆含氮量增加,但差异很小。不同处理阶段猪场废水混水灌溉时,秸秆中全氮含量的变化趋势为: $T_{ori:gw 1:5} > T_{anae:gw 1:5} > CK$, $T_{eco:gw 1:5} > T_{gw}$ 。 $T_{ori:gw 1:5}$ 与

T_{gw} 相比使秸秆全氮含量提高了 15.0%,这是因为 $T_{ori:gw 1:5}$ 处理土壤中残存的有机氮经过一段时间后大部分矿化为无机氮,利于作物吸收利用。

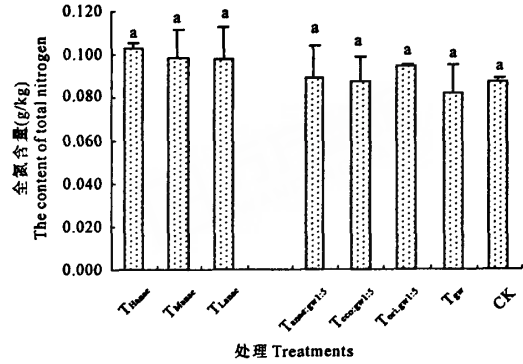


图 5 猪场废水灌溉条件下玉米秸秆中全氮含量
Fig.5 The content of nitrogen in the summer maize straw with piggery wastewater irrigation

3 结 论

1) 厌氧水不同量灌溉时,0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 两个土层中大量灌溉与中量灌溉、大量灌溉与低量灌溉、大量灌溉及低量灌溉与对照间硝态氮含量差异均达到显著水平;0 ~ 20 cm 土层中大量灌溉与低量灌溉、中量灌溉与低量灌溉、低量灌溉与对照间铵态氮含量达到显著性差异水平;大量灌溉、中量灌溉、低量灌溉、对照与地下水灌溉处理间产量达到显著性差异水平,但两两之间未达到显著性差异水平;大量灌溉与低量灌溉处理间籽粒中粗蛋白含量达到显著性差异水平;但对土壤中其它硝态氮和铵态氮含量、夏玉米产量和植株吸氮量的影响均未达到显著水平。结合产量指标,本文推荐厌氧水中量灌溉 ($500 m^3/hm^2$)。

2) 不同阶段出水混水灌溉时,厌氧水与地下水 1:5 混水灌溉、原水与地下水 1:5 混水灌溉、对照与地下水灌溉之间产量达到显著性差异水平;仿生态塘水与地下水 1:5 混水灌溉与厌氧水与地下水 1:5 混水灌溉、原水与地下水 1:5 混水灌溉、对照处理间籽粒中粗蛋白含量达到显著性差异水平;对土壤中硝态氮和铵态氮含量、夏玉米产量和植株吸氮量的影响均未达到显著水平。结合籽粒中粗蛋白含量,本文推荐仿生态塘水与地下水 1:5 混水灌溉。

参 考 文 献:

[1] 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.
- [2] 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.
- [3] Lopez A, Pollice A, Lonigro A, et al. Agricultural wastewater reuse in southern Italy[J]. *Desalination*, 2006, 187(1~3):323—334.
- [4] 彭致功, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对草坪草生长速率、叶绿素及类胡萝卜素的影响特征[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(10):105—108.
- [5] 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.
- [6] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. *水利学报*, 2004, (2):77—87.
- [7] 高海鹰, 黄丽江, 张 奇, 等. 不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4):1346—1352.
- [8] 查贵锋, 黄冠华, 冯绍元, 等. 夏玉米污水灌溉时水分与氮素利用效率的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(3):63—67.
- [9] 马福生, 刘洪禄, 吴文勇, 等. 再生水灌溉对冬小麦根冠发育及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2):57—63.
- [10] 许振成, 谌建宇, 曾雁湘, 等. 集约化猪场废水强化生化处理工艺试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(10):204—209.
- [11] 黄冠华, 查贵锋, 冯绍元, 等. 冬小麦再生水灌溉时水分与氮素利用效率的研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1):65—68.
- [12] 姬景红, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方法对保护地土壤有机质及氮素影响的研究[J]. *土壤通报*, 2007, 38(6):1105—1109.
- [13] 宁堂原, 焦念元, 李增嘉, 等. 施氮水平对不同种植制度下玉米氮利用及产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12):2332—2336.
- [14] 万亮婷, 齐学斌. 污水灌溉对冬小麦产量及其品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5):99—103.
- [15] 宋尚有, 王 勇, 樊廷录, 等. 氮素营养对黄土高原旱地玉米产量、品质及水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3):387—392.
- [16] 李学俊, 文建雷, 韩书成, 等. 氮素形态对玉米幼苗生物机制及生物量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(3):192—196.

Effects of irrigation with piggery waste water on the nitrogen distribution in the soil-summer maize system

BAI Li-jing, WANG Feng, ZHANG Ke-qiang, HUANG Zhi-ping, YANG Jun, LI Xiao-guang, ZHANG Jin-feng
(Institute of Agro-environmental Protection, Ministry of Agriculture of China, Tianjin 300191, China)

Abstract: Piggery waste water is one of the main waste water resources for agricultural irrigation. A field experiment was conducted to investigate the effects of irrigation using different quotas of anaerobic waste water, as well as different mixed solutions at the ratio of 1:5 with piggery waste water at the treatment stages in waste water treatment technology at the piggery and underground water on the content of nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in the soil, yield and plant nitrogen uptake of summer maize. The results showed that 1) The quota of anaerobic waste water had significant effect on the content of nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in the soil, while different treatment stages of piggery waste water irrigation have little effect on the content of nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in the soil; 2) the yield under different quota of anaerobic waste water irrigation followed by: medium quota > high quota > low quota, and the yield under $T_{ori:gw1:5}$ treatment is higher compared with other treatment stages of piggery waste water irrigation; 3) the content of protein in the grain is the highest under the $T_{eco:gw1:5}$ treatment. Therefore, it was suggested that appropriate irrigation quota of anaerobic waste water was $500\text{ m}^3/\text{hm}^2$, appropriate mixed waste water for irrigation was eco-pond: groundwater 1:5.

Keywords: piggery waste water; soil; summer maize; $\text{NO}_3^- - \text{N}$; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$; yield; plant nitrogen uptake