

# 规模化养猪场处理废水对水稻中微量及重金属元素含量的影响

高 威, 王远玲, 陶晓婷, 施金琦, 徐 杏, 陆建飞, 庄恒扬\*

(扬州大学农学院 江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点, 江苏 扬州 225009)

**摘 要:**以迟熟中粳“淮稻5号”和经过无害化处理的规模化养猪场处理废水为供试材料,在减施N肥和不施入P、K肥的条件下,研究施入不同量废水对常规粳稻植株及籽粒中5种重金属元素和6种主要中微量元素含量的影响。结果表明:Pb、As、Ca、Mg和Fe元素含量均以基肥施入处理废水 $90\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、穗期施入处理废水 $120\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施 $187.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  N肥处理为最高;Cd、Hg、Cr和Mn元素含量均以常规施肥处理为最高;Cu除籽粒外,以纯废水处理(基肥施入处理废水 $90\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、穗期施入处理废水 $120\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,不施入肥料)为最高;Zn除拔节期外,基肥施入处理废水 $90\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、穗期施入处理废水 $120\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施 $187.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理最高。As、Pb、Mg、Ca、Zn、Fe、Mn和Cu于各生育期在基肥处理废水量相同的情况下,均随着穗期处理废水施用量的增加而增加,但是Hg、Cd和Cr与此相反。各处理中水稻籽粒Pb、Cd、Cr、As和Hg的含量均低于相应的污染物限量标准,而水稻植株和籽粒中Zn、Fe、Mn、Ca和Mg营养得到提高,特别是Fe和Ca的含量得到了强化。因此,与常规施肥处理相比,处理废水替代化肥能够提高水稻籽粒中的有益元素含量,同时并未引起重金属元素含量的显著上升,且使Hg、Cd和Cr含量下降。

**关键词:**养猪废水;水稻;中微量元素;重金属元素

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)08-1639-09 doi:10.11654/jaes.2013.08.022

## Effects of Pig Slurry from Large-scale Pig Farm on Medium, Micro-and Heavy Elements Contents of Rice

GAO Wei, WANG Yuan-ling, TAO Xiao-ting, SHI Jin-qi, XU Xing, LU Jian-fei, ZHUANG Heng-yang\*

(Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, College of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** With the rapid development of China's large-scale pig farms, increasing pig slurry is causing serious environmental pollution that in turn threatens the sustainable development of large-scale pig farming. The utilization of pig slurry, a kind source of nutrients, combined by pig farming with cropping is one of the best solutions to this problem. As the utilization of pig slurry in farmlands lacked systematic research, a field experiment was conducted to study the effect of pig slurry on the contents of medium, micro elements and heavy metals elements in rice. The results of the study could provide the scientific basis for efficient rice production that supported large-scale pig farming. The pig slurry used in the experiment contained  $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  of total nitrogen,  $540\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  of available nitrogen and  $779\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . The water quality of pig slurry contains Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, As, Hg, and the content was  $0.246\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.577\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.041\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $<5.0\times10^{-4}\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.063\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.0283\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $<5\times10^{-4}\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  respectively. It conforms to standard for irrigation water quality. The late-maturing middle Japonica rice Huaidao No.5 and pig slurry were adopted in a field experiment to investigate the combined pig slurry and N fertilizers ( $187.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) on six medium, micro elements contents and five heavy elements. The results showed that the contents of Pb, As, Ca, Mg and Fe in rice reached the highest at every growth stage, when combined with the treatment of base fertilizer  $90\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$  pig slurry and panicle fertilizer  $120\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$  pig slurry plus  $187.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  urea. The levels of Cd, Hg, Cr and Mn reached the highest at every growth stage when using conventional fertilization (CK2). Cu reached the highest value at every growth stage except jointing stage when using pig slurry treatments (M). Zn reached the highest value at every growth stage except jointing stage, when combined with base fertilizer  $90\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ .

收稿日期:2013-03-04

基金项目:江苏省科技支撑计划资助项目(SBE2012342);江苏高校优势学科建设工程资助项目;江苏省大学生实践创新训练计划项目(2012JSSPTP1388)

作者简介:高 威(1986—),男,江苏昆山人,博士研究生,主要从事农业有机废弃物处理与资源化利用研究。

\*通信作者:庄恒扬 E-mail:zhy7979356@sina.com

pig slurry,  $120 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  N fertilizer. As, Pb, Mg, Zn, Fe, Mn and Cu increased with the increasement of pig slurry in heading stage on the basis of identical pig slurry as base fertilizer. Meanwhile, Hg, Cd and Cr reduced with the increasement of pig slurry. The contents of Pb, Cd, Cr, As and Hg in grains of every treatments were lower than the Maximum levels of contaminants in foods (GB 2762—2005). Meanwhile the pig slurry as basal, panicle fertilizer and compound fertilizer could not only enhance the contents of Zn, Fe, Mn, Ca, Na and Mg, but also reduce the contents of Hg, Cd, Cr. It is concluded that the substitute fertlitzer of pig slurry could partially improve the beneficial elements contents. Moreover, it could not lead to the elevation of heavy metals, whereas, it could reduce the levels of some heavy metals, such as Hg, Cd and Cr.

**Keywords:** pig slurry; rice; secondary and micro element; heavy metals

我国畜禽养殖业在保持高速、迅猛发展势头的同时,正在向规模化、集约化方向发展,但这也导致大量排泄物产生且未被利用而直接排放,既浪费了宝贵的有机物和养分资源又造成了严重的环境污染,已经成为限制经济发达区畜牧业发展的严重瓶颈。因此,如何有效地利用这些有机废弃物已成为急待解决的问题。畜禽粪便一方面污染环境,其中含有饲料添加剂的兽药和重金属残留,如砷、铅等;另一方面也是一种优良的生物质资源,其中含有大量的有机质和植物生长所需的氮磷钾及微量元素,如铜、锌、铁等,且具有强速效营养能力和高养分可利用率的特点<sup>[1-3]</sup>。

相关研究指出,将畜禽粪便无害化处理后作为肥料农田回用,是国内外解决畜禽粪便利用的主要途径<sup>[4]</sup>。施用养殖废弃物对水稻籽粒重金属风险是否存在目前没有明确的定论<sup>[5-6]</sup>,大部分的研究认为猪粪对水稻没有毒害作用。张进、姜丽娜和唐微等研究表明,施用处理后的猪粪水可显著降低稻米中铅的含量,镉、汞、砷含量均无明显增加<sup>[7-9]</sup>;周利强等研究认为,猪粪能缓解重金属对水稻的毒害作用,猪粪处理的水稻籽粒较化肥处理增产 67.9%,且能降低糙米中 Cd 的浓度<sup>[10]</sup>;黄世文等<sup>[11]</sup>报道猪粪水结合少量的化肥可以使水稻生长后期转色好,产量提高 11.4%~20.5%,同时,以猪粪水作水稻基肥进行利用的研究结果表明,以其作基肥可强化稻米中铁、锌、锰、钙和镁的营养。国外也对水稻生长季消解养殖废水潜力及对水稻生产安全性影响进行了研究<sup>[12-15]</sup>。

目前,养殖废水对水稻产量和品质的研究较多,

对水稻籽粒中重金属元素含量亦有研究,但是,养猪废水与氮肥配施对水稻各主要生育期植株中重金属及主要中微量元素含量影响及其动态变化的研究鲜有报道。本研究通过田间试验研究了在基肥与穗肥时期施用不同量的处理后养猪废水对常规粳稻各主要生育期植株及籽粒中重金属和中微量元素的影响,试图从生态安全的角度探索出处理废水稻田利用的合理施用模式,旨在为规模化猪场-农田种植生态循环农业模式提供较为完整的理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验于 2012 年在江苏省大丰市某农场生产队进行( $N33^{\circ}21.736'$ ,  $E120^{\circ}32.012'$ ),该地区属北亚热带季风气候,年降水量 1042 mm,年平均气温  $14^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 213 d,日照 2 255.6 h。土壤类型为砂壤土,前茬作物为小麦,土壤基本理化性状见表 1。

### 1.2 试验材料

水稻:迟熟中粳“淮稻 5 号”。

处理废水:所用废水来自全封闭废水收集系统由管道泵入储存 6 个月进行自然厌氧发酵和无害化处理,处理后废水中相关元素含量为:Cu  $0.246 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Zn  $0.577 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Pb  $0.041 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Cd  $< 5.0 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Cr  $0.063 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、As  $0.028 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Hg  $< 5 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。符合国家标准《农田灌溉水质标准》(GB 5084—1992)。养分含量为全氮  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、速效氮  $540 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、速效磷  $779 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Some of the selected basic properties of the soil in study

| 项目 | 有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  | 碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | Ca/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | Mg/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | Na/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
|----|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 含量 | 20.40                                | 1.06                                 | 77.01                                 | 36.93                                 | 216.18                                | 13.22                                | 7.931                                | 0.6134                               |
| 项目 | Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | Cu/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | Fe/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  | Pb/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  | Zn/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  | As/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | Cr/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | Hg/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| 含量 | 0.1442                               | 2.493                                | 25.55                                 | 1.102                                 | 7.088                                 | 19.2                                 | 22.13                                | 0.15                                 |

### 1.3 试验设计

试验共设置 12 个处理(表 2),3 次重复,包括 1 个不施肥空白处理(CK1)、1 个当地常规施肥处理(CK2,尿素 600 kg·hm<sup>-2</sup>、过磷酸钙 450 kg·hm<sup>-2</sup>、氯化钾 150 kg·hm<sup>-2</sup>)、1 个纯废水处理(M)和 9 个处理废水与 N 肥配施处理(分别标记 T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8、T9),随机区组设计。基肥施入处理废水 45、67.5、90 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 穗期施入处理废水 60、90、120 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,分蘖肥均为施入尿素 187.5 kg·hm<sup>-2</sup>(具体试验处理见表 2)。试验小区面积为 32 m<sup>2</sup>,采用模拟机插秧栽植方式,行距 30 cm,株距 11.7 cm,每穴 4~5 苗,2012 年 6 月 23 日移栽,病虫害防治按当地习惯进行管理。

### 1.4 测定项目及方法

分别于拔节期(8 月 4 日)、抽穗期(8 月 29 日)和成熟期(10 月 24 日),在每个处理区取 4 穴作为 1 个样本,样本取回后用自来水和去离子水冲洗,自然晾干,放入烘箱中 105 ℃杀青 30 min 后烘干,80 ℃烘至恒重,粉碎后过 45 目筛备用,测定水稻地上部植株和籽粒中微量及重金属元素含量。样本采用 CEM 密闭微波系统进行消解,其消解条件为:取样品 0.480 0 g,以硝酸为消解体系,控制温度 100 ℃消解 5 min;控制温度 150 ℃消解 5 min;控制温度 180 ℃消解 15 min。Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、Fe、Ca、Mg 采用等离子原子发射光谱光度计测定<sup>[16]</sup>。分析所用试剂均为优级纯,水为超纯水。分析过程中加入空白样、平行样和国家标准样品控制试验数据的精度和准确度。Hg、As 和 Cd 采用 X-SERIES-7 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱)

测定。

### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行整理,采用 DPS 7.5 和 SPSS 11.5 统计分析软件对数据进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对水稻重金属元素含量的影响

由表 3 可知,水稻植株 Pb 含量随水稻生育期的推进从拔节期到抽穗期不断降低,而到成熟期又逐渐升高。不同配施处理对水稻各生育期 Pb 含量也有显著的影响。各生育期 CK1 处理的 Pb 含量均为最低,拔节期 Pb 含量以 M 处理为最高,抽穗期、成熟期植株和籽粒中 Pb 含量以 T9 处理为最高。各生育期 T9 处理中 Pb 含量较 CK1 处理分别提高了 86.68%、71.13%、35.08%和 20.42%;较 CK2 处理分别提高了 7.56%、63.67%、15.35%和 0.27%。而各处理间基肥施入等量的处理废水的情况下,Pb 含量随着穗期施用废水量的增加而增加,但各处理之间差异不显著。处理废水施用过程中,考虑水稻籽粒 Pb 含量时,也应该要注意控制处理废水的施用量。在本试验中发现,与常规化肥处理相比,除基肥和穗肥均施入低量废水的处理外,大部分处理的 Pb 含量高于常规化肥处理,尽管如此,在最大配施量时,水稻籽粒铅含量没有超过食品中污染物限量(GB 2762—2005)中 Pb 的限量标准(0.2 mg·kg<sup>-1</sup>),说明在处理废水配施设计量范围内时不会导致水稻籽粒 Pb 污染。

水稻植株 Cd 含量随着水稻生育期的推进基本

表 2 田间试验设计  
Table 2 Design of field experiment

| 编号 Number | 试验处理 Test treatments                                                                                        | 处理意义说明 Illustration |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| T1        | 基肥施入处理废水 45 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 60 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>                  | 基肥低量废水,穗肥低量废水       |
| T2        | 基肥施入处理废水 45 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 90 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>                  | 基肥低量废水,穗肥中量废水       |
| T3        | 基肥施入处理废水 45 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 120 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>                 | 基肥低量废水,穗肥高量废水       |
| T4        | 基肥施入处理废水 67.5 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 60 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>                | 基肥中量废水,穗肥低量废水       |
| T5        | 基肥施入处理废水 67.5 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 90 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>                | 基肥中量废水,穗肥中量废水       |
| T6        | 基肥施入处理废水 67.5 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 120 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>               | 基肥中量废水,穗肥高量废水       |
| T7        | 基肥施入处理废水 90 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 60 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>                  | 基肥高量废水,穗肥低量废水       |
| T8        | 基肥施入处理废水 90 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 90 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>                  | 基肥高量废水,穗肥中量废水       |
| T9        | 基肥施入处理废水 90 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 120 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>                 | 基肥高量废水,穗肥高量废水       |
| M         | 基肥施入处理废水 90 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ,穗期施入处理废水 120 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>                 | 纯废水处理,分蘖期不施尿素       |
| CK1       | 不施任何肥料                                                                                                      | 评价基础养分供应            |
| CK2       | 施尿素 600 kg·hm <sup>-2</sup> ,按基肥:分蘖肥:促花肥:保花肥=3:3:2.5:1.5 施;<br>施 450 kg·hm <sup>-2</sup> 过磷酸钙,基肥 60%,穗肥 40% | 大田生产养分管理模式          |

呈现先下降后上升的变化。不同配施处理对水稻各生育期 Pb 含量也有显著的影响。除拔节期外,各生育期 Cd 含量均以 CK2 处理最高,且显著高于大部分配施处理。各处理间基肥施入等量的处理废水的情况下, Cd 含量随着穗期施用废水量的增加而下降,但大部分处理间差异不显著。

由表 4 可知,水稻植株 Hg 含量随着水稻生育期的推进基本呈现先下降后上升的变化。不同配施处理对水稻各生育期 Hg 含量也有显著的影响,各时期 Hg 含量均以 CK2 处理最高,且与高量废水配施处理差异显著。各处理间基肥施入等量处理废水的情况下,

Hg 含量随着穗期施用废水量的增加而下降,但大部分处理间差异不显著。

水稻植株 Cr 含量随水稻生育期的推进呈现规律性变化,从拔节期到成熟期呈现不断下降的趋势。不同配施处理对水稻各生育期 Cr 含量也有显著的影响,各生育期以 CK2 为最高,CK1 次之。除拔节期外,各时期 M 处理的 Cr 含量最低。与 CK2 相比,M 处理 Cr 含量分别降低了 76.41%、10.98%、28.33% 和 31.76%。

由表 5 可知,水稻植株 As 含量随水稻生育期的推进从拔节期到抽穗期不断降低,而到成熟期又逐渐

表 3 不同处理对水稻 Pb 和 Cd 含量的影响( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 3 Pb and Cd contents in rice as affected by different fertilization treatments( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 处理<br>Treatment | 拔节期 Jointing stage |              | 抽穗期 Heading stage |            | 成熟期 Maturity stage |             | 籽粒 Grain |           |
|-----------------|--------------------|--------------|-------------------|------------|--------------------|-------------|----------|-----------|
|                 | Pb                 | Cd           | Pb                | Cd         | Pb                 | Cd          | Pb       | Cd        |
| T1              | 0.058 6bc          | 0.002 8abcd  | 0.088 9ab         | 0.002 8bc  | 0.137 0ab          | 0.004 5a    | 0.070 3b | 0.001 7ab |
| T2              | 0.076 3abc         | 0.002 7abcde | 0.095 9ab         | 0.002 7bc  | 0.130 1ab          | 0.004 3abc  | 0.073 0b | 0.001 3bc |
| T3              | 0.090 1abc         | 0.002 5cdef  | 0.103 7ab         | 0.002 3de  | 0.144 4ab          | 0.004 3abcd | 0.073 9b | 0.001 0cd |
| T4              | 0.075 5abc         | 0.002 8abc   | 0.089 1ab         | 0.002 8abc | 0.120 2ab          | 0.004 4ab   | 0.072 3b | 0.001 0cd |
| T5              | 0.082 6abc         | 0.002 4ef    | 0.100 4ab         | 0.002 3de  | 0.133 9ab          | 0.004 0de   | 0.073 4b | 0.001 0cd |
| T6              | 0.096 2ab          | 0.002 4f     | 0.106 6ab         | 0.002 0e   | 0.146 4ab          | 0.003 6f    | 0.074 1b | 0.000 8d  |
| T7              | 0.075 6abc         | 0.002 9a     | 0.089 4ab         | 0.002 6bcd | 0.124 1ab          | 0.003 8ef   | 0.072 5b | 0.000 9cd |
| T8              | 0.089 1abc         | 0.002 5def   | 0.103 5ab         | 0.002 6bcd | 0.141 5ab          | 0.003 7f    | 0.073 8b | 0.000 9cd |
| T9              | 0.096 7ab          | 0.002 4f     | 0.123 9a          | 0.002 5cd  | 0.154 8a           | 0.003 7f    | 0.074 3b | 0.000 8d  |
| M               | 0.106 3a           | 0.002 8abcd  | 0.102 8ab         | 0.002 8bc  | 0.147 9ab          | 0.004 2bcd  | 0.073 9b | 0.000 7d  |
| CK1             | 0.051 8c           | 0.002 6bcdef | 0.072 4b          | 0.002 9ab  | 0.114 6b           | 0.004 1cde  | 0.061 7c | 0.001 6ab |
| CK2             | 0.089 9abc         | 0.002 9ab    | 0.075 7b          | 0.003 2a   | 0.134 2ab          | 0.004 5a    | 0.074 1b | 0.001 9a  |

注:同列不同小写字母表示  $P<0.05$  水平下差异显著。下同。

表 4 不同处理对水稻 Hg 和 Cr 含量的影响( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 4 Hg and Cr contents in rice as affected by different fertilization treatments( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 处理<br>Treatment | 拔节期 Jointing stage |            | 抽穗期 Heading stage |            | 成熟期 Maturity stage |             | 籽粒 Grain   |            |
|-----------------|--------------------|------------|-------------------|------------|--------------------|-------------|------------|------------|
|                 | Hg                 | Cr         | Hg                | Cr         | Hg                 | Cr          | Hg         | Cr         |
| T1              | 0.041 0ab          | 0.221 4ab  | 0.018 5ab         | 0.190 1a   | 0.048 6a           | 0.157 9abc  | 0.001 9bc  | 0.065 2ab  |
| T2              | 0.040 5ab          | 0.195 7bc  | 0.015 8d          | 0.187 5a   | 0.046 6a           | 0.155 1abcd | 0.001 8bcd | 0.058 2cde |
| T3              | 0.034 0d           | 0.177 5cd  | 0.013 7f          | 0.172 0abc | 0.043 6abc         | 0.151 2abcd | 0.001 3f   | 0.057 6cde |
| T4              | 0.040 8ab          | 0.162 8de  | 0.017 5bc         | 0.185 6a   | 0.046 9a           | 0.151 2abcd | 0.002 0b   | 0.065 1ab  |
| T5              | 0.039 8abc         | 0.157 5def | 0.015 1d          | 0.165 5abc | 0.043 6abc         | 0.144 5bcde | 0.001 7cd  | 0.061 9bc  |
| T6              | 0.035 8bcd         | 0.136 6ef  | 0.012 2g          | 0.148 1bc  | 0.034 5e           | 0.135 4de   | 0.001 4ef  | 0.053 5ef  |
| T7              | 0.036 5abcd        | 0.132 8f   | 0.017 1c          | 0.175 7ab  | 0.044 7ab          | 0.149 9abcd | 0.001 7cd  | 0.060 4bcd |
| T8              | 0.034 2cd          | 0.140 1ef  | 0.015 6d          | 0.166 5abc | 0.039 0cde         | 0.138 9cde  | 0.001 6de  | 0.055 4def |
| T9              | 0.031 6de          | 0.132 1f   | 0.011 2g          | 0.146 5c   | 0.036 6de          | 0.129 2e    | 0.001 2f   | 0.051 6f   |
| M               | 0.033 4d           | 0.131 4f   | 0.013 8ef         | 0.173 0abc | 0.041 0bcd         | 0.128 5e    | 0.001 9bcd | 0.051 0f   |
| CK1             | 0.026 4e           | 0.222 2ab  | 0.015 0de         | 0.191 6a   | 0.040 8bcd         | 0.162 4ab   | 0.001 4ef  | 0.067 0a   |
| CK2             | 0.041 6a           | 0.231 8a   | 0.019 0a          | 0.192 0a   | 0.048 4a           | 0.164 9a    | 0.002 4a   | 0.067 2a   |



升高。不同配施处理对水稻各生育期 As 含量也有显著的影响,各生育期 CK1 处理的 As 含量均为最低,拔节期、抽穗期、成熟期植株和籽粒中 As 含量以 T9 处理为最高。各时期 T9 处理中 As 含量较 CK1 处理分别显著提高了 27.09%、103%、38% 和 127%;较 CK2 处理分别提高了 15.6%、25.71%、24.51%和17.75%。除拔节期外,各处理间基肥施入等量处理废水的情况下,As 含量随着穗期施用废水量的增加而增加,抽穗期和成熟期植株中基肥等量的情况下差异不显著,但籽粒中差异显著。与常规化肥处理相比,除基肥和穗

肥均施入低量废水的处理外,大部分配施处理的 As 含量高于常规化肥处理。

2.2 不同处理对水稻中微量元素含量的影响

由表 6 可知,水稻植株 Ca 含量随水稻生育期的推进呈现从拔节期到成熟期先下降后上升的趋势。不同处理量废水与 N 肥配施对水稻 Ca 含量影响显著。各时期均以 T9 处理 Ca 含量为最高,且显著高于 CK1 处理,T9 处理籽粒中 Ca 含量显著高于 CK2 处理。各时期 T9 处理中 Ca 含量较 CK1 处理分别提高了 21.85%、22.71%、30.18%和 38.1%;较 CK2 处理分别提高了 6.96%、15.16%、9.93%和 37.44%。

对各生育期水稻 Mg 含量的分析表明,水稻植株 Mg 含量随水稻生育期的推进从拔节期到成熟期呈现先下降后上升的趋势。不同处理对小麦 Mg 含量有一定程度的影响,但各处理成熟期植株和籽粒中 Mg 含量均无显著差异。各时期水稻中 Mg 含量均以 T9 处理为最高,各时期 T9 处理中 Mg 含量较 CK1 处理分别提高了 16.53%、20%、10%和 3.22%;较 CK2 处理分别提高了 3.27%、6.19%、2.43%和 2.63%。

2.3 不同处理对水稻微量元素含量的影响

由表 7 可知,水稻植株 Cu 含量随水稻生育期的推进从拔节期到成熟期呈现逐渐下降的趋势,而各生育期不同处理的 Cu 含量存在显著的差异。各生育期 CK1 处理的 Cu 含量均为最低,除籽粒外,M 处理为最高,各个时期 M 处理中 Cu 含量与 CK1 相比分别提升了 29.8%、67.98%、87.83%和 46.81%;与 CK2 相比,分别提升了 12.04%、63.11%、60.92%和 8.15%。基

表 5 不同处理对水稻 As 含量的影响(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 5 As contents in rice as affected by different fertilization treatments(mg·kg<sup>-1</sup>)

| 处理<br>Treatment | 拔节期<br>Jointing stage | 抽穗期<br>Heading stage | 成熟期<br>Maturity stage | 籽粒<br>Grain |
|-----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| T1              | 3.853ab               | 2.765e               | 3.856d                | 0.069 2g    |
| T2              | 3.863ab               | 3.135cde             | 4.061cd               | 0.081 8ef   |
| T3              | 3.573b                | 3.322cd              | 4.231cd               | 0.082 8e    |
| T4              | 3.855ab               | 2.841de              | 4.021cd               | 0.073 7fg   |
| T5              | 3.623b                | 3.311cd              | 4.125cd               | 0.084 8de   |
| T6              | 4.035ab               | 3.509e               | 4.403bcd              | 0.099 9bc   |
| T7              | 4.207a                | 3.601bc              | 4.087cd               | 0.088 9de   |
| T8              | 4.177a                | 3.258cde             | 4.746abc              | 0.104 7bc   |
| T9              | 4.372a                | 4.317a               | 5.304a                | 0.108 8a    |
| M               | 4.228a                | 4.062ab              | 5.076ab               | 0.103 8ab   |
| CK1             | 3.440b                | 2.122f               | 3.824d                | 0.047 9h    |
| CK2             | 3.782ab               | 3.434c               | 4.260bcd              | 0.092 4cd   |

表 6 不同处理对水稻 Ca 和 Mg 含量的影响(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 6 Ca and Mg contents in rice as affected by different fertilization treatments(mg·kg<sup>-1</sup>)

| 处理<br>Treatment | 拔节期 Jointing stage |         | 抽穗期 Heading stage |        | 成熟期 Maturity stage |       | 籽粒 Grain |       |
|-----------------|--------------------|---------|-------------------|--------|--------------------|-------|----------|-------|
|                 | Ca                 | Mg      | Ca                | Mg     | Ca                 | Mg    | Ca       | Mg    |
| T1              | 2726abc            | 1755bc  | 2252bc            | 1404b  | 3367bc             | 3305a | 223bc    | 2617a |
| T2              | 2868abc            | 1809abc | 2354abc           | 1433ab | 3582abc            | 3438a | 242abc   | 2626a |
| T3              | 2987ab             | 1906abc | 2556abc           | 1553ab | 3718abc            | 3465a | 263ab    | 2633a |
| T4              | 2740abc            | 1776abc | 2308abc           | 1404b  | 3519abc            | 3332a | 240abc   | 2618a |
| T5              | 2973ab             | 1816abc | 2445abc           | 1543ab | 3627abc            | 3449a | 253abc   | 2628a |
| T6              | 3122a              | 1981ab  | 2650ab            | 1607ab | 3761ab             | 3499a | 272ab    | 2666a |
| T7              | 2845abc            | 1784abc | 2321abc           | 1406b  | 3539abc            | 3428a | 241abc   | 2620a |
| T8              | 3122a              | 1852abc | 2503abc           | 1547ab | 3703abc            | 3450a | 256abc   | 2632a |
| T9              | 3134a              | 2023a   | 2696a             | 1665a  | 4029a              | 3582a | 290a     | 2692a |
| M               | 2629bc             | 1977ab  | 2600abc           | 1663a  | 3601abc            | 3357a | 250abc   | 2654a |
| CK1             | 2572c              | 1736c   | 2197c             | 1388b  | 3095c              | 3257a | 210c     | 2608a |
| CK2             | 2930abc            | 1959abc | 2341abc           | 1568ab | 3665abc            | 3497a | 211c     | 2623a |

表 7 不同处理对水稻 Cu 和 Zn 含量的影响( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 7 Cu and Zn contents in rice as affected by different fertilization treatments( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 处理/时期<br>Treatment/Time | 拔节期 Jointing stage |           | 抽穗期 Heading stage |           | 成熟期 Maturity stage |           | 籽粒 Grain  |           |
|-------------------------|--------------------|-----------|-------------------|-----------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
|                         | Cu                 | Zn        | Cu                | Zn        | Cu                 | Zn        | Cu        | Zn        |
| T1                      | 0.820 1ab          | 3.590 1ab | 0.784 4abc        | 2.807 0b  | 0.551 3abc         | 3.056 9ab | 0.197 4cd | 1.230 3cd |
| T2                      | 0.878 2ab          | 3.770 4ab | 0.842 5abc        | 3.900 8ab | 0.611 4abc         | 3.411 1a  | 0.226 3bc | 1.324 9c  |
| T3                      | 1.010 5ab          | 3.986 2ab | 0.912 5a          | 4.428 2a  | 0.644 2abc         | 3.548 2a  | 0.228 3bc | 1.458 5bc |
| T4                      | 0.868 9ab          | 3.627 8ab | 0.801 1abc        | 3.622 1ab | 0.571 7abc         | 3.064 5ab | 0.226 7bc | 1.299 4c  |
| T5                      | 0.889 6ab          | 3.879 4ab | 0.866 8ab         | 4.079 5a  | 0.612 9abc         | 3.435 5a  | 0.236 7ab | 1.363 5c  |
| T6                      | 0.895 6ab          | 4.168 8ab | 0.957 9a          | 4.686 9a  | 0.677 5ab          | 3.578 7a  | 0.245 4ab | 1.661 8ab |
| T7                      | 0.883 8ab          | 3.733 7ab | 0.841 3abc        | 3.841 6ab | 0.601 8abc         | 3.183 6ab | 0.227 9bc | 1.320 6c  |
| T8                      | 1.023 8a           | 3.880 7ab | 0.881 8a          | 4.427 5a  | 0.618 5abc         | 3.541 1a  | 0.237 5ab | 1.441 5bc |
| T9                      | 1.025 4a           | 4.993 6ab | 1.040 3a          | 4.794 0a  | 0.752 8a           | 3.585 4a  | 0.267 7a  | 1.847 3a  |
| M                       | 1.026 2a           | 3.762 8ab | 0.966 4a          | 4.339 0a  | 0.743 6a           | 3.199 5ab | 0.257 5ab | 1.360 3c  |
| CK1                     | 0.790 6b           | 3.059 1ab | 0.575 3c          | 2.790 3b  | 0.395 9c           | 2.136 8b  | 0.175 4d  | 1.000 0d  |
| CK2                     | 0.915 9ab          | 4.452 8ab | 0.592 5bc         | 4.293 5a  | 0.462 1bc          | 2.659 8ab | 0.238 1ab | 1.321 5c  |

肥施入处理废水相同的情况下,各处理间 Cu 含量随着穗期施用废水量的增加而增加,但各处理之间差异不显著。随着生育期的推进,CK1 处理与高量配施处理差异显著,也说明猪粪水对水稻 Cu 的吸收和转运具有差异性,但是这种效应在高量配施的情况下更为明显。

各生育期不同处理水稻 Zn 含量差异显著,除拔节期外,各生育期水稻 Zn 含量最大的均为 T9 处理,且与 CK1 处理差异显著,除籽粒以外,其余各时期与 CK2 处理差异不显著。各生育期 T9 处理 Zn 含量较 CK1 分别提高了 63.24%、71.81%、67.79%和 80.83%;较 CK2 分别提高了 12.15%、11.66%、34.8% 和 37.79%。基肥施入处理废水相同的情况下,各处理间

Zn 含量随着穗期施用废水量的增加而增加。这也说明处理后的猪粪水可以显著提高水稻对 Zn 的吸收、转移和积累。Zn 是水稻生长重要的必需元素,对水稻正常生长和代谢起到重要作用,但 Zn 过量同样会对作物产生一定的胁迫,所以必须要控制配施处理废水的施用量的,采用合理的配比模式。

由表 8 可知,水稻植株 Fe 含量随水稻生育期的推进从拔节期到成熟期呈现逐渐下降的趋势,不同处理对不同生育期水稻 Fe 含量有显著的影响。这说明处理废水对水稻植株及籽粒 Fe 的吸收、积累和转运有明显的影。各时期水稻 Fe 含量均以 T9 处理最高,其中籽粒中 Fe 含量显著高于 CK2 处理。各时期 Fe 含量较 CK2 处理分别提高了 11.2%、10.5%、

表 8 不同处理对水稻 Fe 和 Mn 含量的影响( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 8 Fe and Mn contents in rice as affected by different fertilization treatments( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 处理<br>Treatment | 拔节期 Jointing stage |           | 抽穗期 Heading stage |          | 成熟期 Maturity stage |           | 籽粒 Grain  |        |
|-----------------|--------------------|-----------|-------------------|----------|--------------------|-----------|-----------|--------|
|                 | Fe                 | Mn        | Fe                | Mn       | Fe                 | Mn        | Fe        | Mn     |
| T1              | 417.9b             | 217.0de   | 368.7ab           | 270.9de  | 275.0ab            | 353.1de   | 34.69d    | 22.7ab |
| T2              | 427.8b             | 235.0cde  | 417.8ab           | 305.8cd  | 285.8ab            | 395.6bcd  | 35.79bcd  | 23.1ab |
| T3              | 431.5b             | 230.6cde  | 444.5ab           | 336.3abc | 303.5ab            | 407.3bc   | 38.39abc  | 23.2ab |
| T4              | 417.3b             | 224.1cde  | 375.9ab           | 283.3de  | 275.8ab            | 380.1cde  | 35.19cd   | 23.0ab |
| T5              | 431.5b             | 247.8bcde | 436.9ab           | 328.4bc  | 289.4ab            | 397.8bcd  | 37.24abcd | 22.8ab |
| T6              | 448.6ab            | 280.0abcd | 448.7ab           | 340.1abc | 323.0a             | 413.4bc   | 39.60a    | 23.1ab |
| T7              | 426.4b             | 295.2abc  | 388.9ab           | 285.0de  | 285.6ab            | 389.1bcde | 35.24cd   | 22.4b  |
| T8              | 496.2ab            | 301.9abc  | 437.7ab           | 353.2ab  | 293.0ab            | 428.0bc   | 37.26abcd | 22.8ab |
| T9              | 574.8a             | 314.0ab   | 545.3a            | 357.8ab  | 331.2a             | 432.6ab   | 39.92a    | 23.4a  |
| M               | 441.0ab            | 241.8bcde | 467.4ab           | 306.1cd  | 307.0ab            | 408.6bc   | 38.92ab   | 23.1ab |
| CK1             | 377.6b             | 201.3e    | 342.6b            | 261.4e   | 234.4b             | 340.9e    | 30.27e    | 22.4b  |
| CK2             | 516.9ab            | 326.6a    | 493.5ab           | 369.6a   | 286.9ab            | 479.9a    | 35.66bcd  | 23.5a  |

15.44%和 11.95%。处理废水中含有较为丰富的微量元素,而在相同的化肥施用量的情况下,水稻中 Fe 含量随着处理废水施用量的增加而增加。这也说明合理的处理废水施用量可以帮助水稻对 Fe 元素的吸收。

水稻植株 Mn 含量随水稻生育期的推进从拔节期到成熟期呈现逐渐上升的趋势。不同处理对拔节期、抽穗期和成熟期水稻植株 Mn 含量有显著的影响,而籽粒中 Mn 含量差异不显著。各时期水稻 Mn 含量均以 CK2 处理最高,CK1 处理最低,配施处理中以 T9 处理 Mn 含量最高。CK2 处理各生育期 Mn 含量较 T9 处理分别提高了 4.01%、3.3%、10.93%和 0.43%;较 M 处理分别提高了 35.07%、20.74%、17.45%和 1.73%。

### 3 讨论

目前的研究表明,水稻生产中施用养殖废水与化肥配施,对其各生育期生物量、成熟期稻谷产量及稻米中重金属含量的影响明显不同<sup>[10,17-18]</sup>。从本研究的结果来看,也证明了猪粪水替代部分化肥与氮肥配施对于水稻各生育期植株及籽粒中主要的中微量元素及重金属元素均有不同程度的影响。As、Cr、Pb、Cd 和 Hg 均不是作物生长的必需元素,它们的过量暴露将导致作物的中毒<sup>[19]</sup>。本实验中 Pb、Cd、Hg 和 As 含量从拔节期到成熟期植株呈现先降低后升高的规律,而 Cr 的含量不断下降,这与罗连光等的研究结果不一致<sup>[20]</sup>,其原因可能与本实验中穗期再次施入处理废水有关。Hg、Cd 和 Cr 含量在各时期均随着废水施入量的增加而下降,与周利强等研究结果相一致,这可能是因为废水中的有机物质改善了作物根际土壤微环境,改良了土壤结构<sup>[21-22]</sup>,对 Hg、Cd 和 Cr 有一定的“固定”作用<sup>[23-24]</sup>。同时有研究指出,猪粪水等有机物料施入会增强土壤对重金属的吸附能力,使某些重金属生物有效性降低,从而缓解其对作物的毒害作用<sup>[10]</sup>。水稻的收获产品主要是籽粒,籽粒中重金属含量直接关系到稻米品质和食品安全。范中亮、刘侯俊等<sup>[25-26]</sup>研究表明,水稻地上部器官对 Cd、Pb、As 等重金属元素含量的富集作用均表现为茎鞘>叶片>大米。本实验中水稻各生育期的地上部植株重金属元素含量均显著高于籽粒中的含量,这与莫争等的研究结果一致<sup>[27]</sup>,与关共凑等的研究略有差异<sup>[28]</sup>。

中量元素 Ca、Mg 和微量元素 Cu、Fe、Zn、Mn 这些元素是一切植物生长不可缺少的物质,也是人类所需的重要营养物质,是维持人体健康所必须的条件。

中微量元素的吸收转移受到很多因素的影响,如作物品种、土壤类型、施肥等<sup>[29]</sup>。本实验水稻生育进程中 Ca、Mg 和 Zn 的含量均先下降后上升,Fe 和 Cu 的含量不断地下降,Mn 的含量却不断上升。在所有配施处理中这些中微量元素在基肥施入等量的处理废水的情况下随着穗期施入处理废水量的增加而上升。这表明,水稻中微量元素含量的增加可能与施用处理废水有关,也表明了处理废水作基肥,并在穗期追施能强化水稻植株和籽粒中 Zn、Fe、Mn、Ca 和 Mg 营养,特别是 Fe 和 Ca 的含量,也与张进等研究结果较为相似<sup>[7]</sup>。本试验所测定的这些中微量元素含量变幅差异较大,可能与这些元素在水稻体内的再分配及运输等因素有关。有些元素主要分布在作物根和茎中,而向籽粒转移较少。有些元素在土壤中生物有效性较高而易被作物吸收,且在水稻体内很容易从茎叶转移到籽粒中<sup>[30]</sup>。参照食品中污染物限量(GB 2762—2005),各处理中水稻籽粒 Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 的含量均低于相应的污染物限量标准。因此,本研究认为,以水稻籽粒重金属含量为控制指标的角度考虑,水稻生育期总施入处理废水量达  $210 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  配施少量 N 肥时,种植出来的水稻其重金属含量符合食品安全范围,且强化了籽粒的营养品质。

如今,农业生产的主要措施之一就是大量施用化肥来满足作物生长的需求,因此作物体的各种元素的检测分析也已成为判断作物营养水平和检测环境污染的主要指标之一。但由于目前大部分生猪养殖中都会使用添加剂,而其中的许多重金属元素和部分激素并未被猪吸收利用而随粪便排出体外,形成养殖污水潜在的污染源<sup>[31-32]</sup>。从已报道的研究来看,存在畜禽养殖废水灌溉农田是否会引起农田土壤养分和重金属的积累以及土壤-植物系统引入重金属污染的环境问题的讨论。一方面有的认为虽然会提高作物的重金属含量但还是显著低于国标,也有的认为处理后的废水可以降低重金属含量;另一方面,从长期来看认为可能会增加土壤中重金属的积累。因此,还应考虑其可能带来的环境负效益。但是,养殖处理废弃物资源化还田利用具有显著的社会效益。以江苏省为例,稻麦两熟是江苏省主体种植模式,年种植面积稳定在 130 万  $\text{hm}^2$  左右。高投入高产出是江苏稻麦两熟制农田的基本特点,年均施氮量达  $550 \sim 650 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,远超全国平均水平  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2011 年江苏规模养殖占畜禽生产的比例:生猪 76%、肉禽 95%、蛋禽 94%、奶牛 94%,畜禽粪便排泄量达 5300 万 t,利用率不到



60%, N、P、K 养分浪费量分别达到了14.3万 t、9.1万 t 和 12 万 t。因此,深入研究稻麦两熟农田吸纳养殖废弃物量,提出规模养殖与配套农田间的耦合技术,为养殖废水的科学处理和规模化养猪场-农田种植生态循环农业模式的发展具有重要意义。

## 4 结论

本实验中, Hg、As、Cd、Pb、Cr、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn 和 Mn 在水稻各生育期表现出不同的规律性。Hg、As、Cd、Pb 和 Zn 随着生育期的推进先下降后上升, Cr、Fe 和 Cu 则不断下降, Mn 随着生育期的推进不断上升。Pb、As、Ca、Mg 和 Fe 元素含量均以 T9 处理为最高; Cd、Hg、Cr 和 Mn 元素含量均以 CK2 处理为最高; Cu 除籽粒外, 以 M 处理为最高; Zn 除拔节期外, 以 T9 处理最高。各处理中水稻籽粒 Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 的含量均低于相应的污染物限量标准, 而水稻植株和籽粒中 Zn、Fe、Mn、Ca 和 Mg 营养, 特别是 Fe 和 Ca 的含量得到了强化。

## 参考文献:

- [1] 唐 华, 郭彦军, 李智燕. 沼液灌溉对黑麦草生长及土壤性质的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(6): 939-942.  
TANG Hua, GUO Yan-jun, LI Zhi-yan. Effects of slurry application on ryegrass growth and soil properties[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(6): 939-942.
- [2] M Tani M, N Sakamoto, T Kishimoto, et al. Utilization of anaerobically digested dairy slurry combined with other wastes following application to agricultural land[J]. *International Congress Series*, 2006, 1293: 331-334.
- [3] Marcato C E, Pinelli E, Pouech P, et al. Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 2340-2348.
- [4] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 291-296.  
JIN Hong-mei, CHAN Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 291-296.
- [5] 黄治平, 徐 斌, 张克强, 等. 连续四年施用规模化猪场猪粪温室土壤重金属积累研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 239-244.  
HUANG Zhi-ping, XU Bin, ZHANG Ke-qiang, et al. Accumulation of heavy metals in the four years' continual swine manure-applied greenhouse soils[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 239-244.
- [6] 戴 婷, 章明奎. 长期畜禽养殖污水灌溉对土壤养分和重金属积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 36-39.  
DAI Ting, ZHANG Ming-kui. Effects of long-term irrigation of livestock farm wastewater on nutrients and heavy metals in agricultural soils[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1): 36-39.
- [7] 张 进, 张妙仙, 单胜道, 等. 沼液对水稻生长产量及其重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2005-2009.  
ZHANG Jin, ZHANG Miao-xian, SHAN Sheng-dao, et al. Growth status, grain yield and heavy metals content of rice (*Oryza sativa* L.) as affected by biogas slurry application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2005-2009.
- [8] 姜丽娜, 王 强, 陈丁江, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1328-1336.  
JIANG Li-na, WANG Qiang, CHEN Ding-jiang, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1328-1336.
- [9] 唐 微, 伍 钧, 孙百晔, 等. 沼液不同施用量对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2268-2273.  
TANG Wei, WU Jun, SUN Bai-ye, et al. Effects of application amounts of biogas slurry on yield and quality of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2268-2273.
- [10] 周利强, 吴龙华, 骆永明, 等. 有机物料对污染土壤上水稻生长和重金属吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 383-388.  
ZHOU Li-qiang, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Effects of organic amendments on the growth and heavy metal uptake of rice on a contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 383-388.
- [11] 黄世文, 廖西元. 沼肥用于水稻的现状与展望[J]. 中国沼气, 2005, 23(2): 23-26.  
HUANG Shi-wen, LIAO Xi-yuan. Progress and prospect of biogas fermentation residues (MFR) application on rice planting[J]. *China Biogas*, 2005, 23(2): 23-26.
- [12] Garg R N, Phak H, Das D K, et al. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 107: 1-9.
- [13] 曾 悦, 洪华生, 陈伟琪, 等. 畜禽养殖区磷流失对水环境的影响及其防治措施[J]. 农村生态环境, 2004, 20(3): 77-80.  
ZENG Yue, HONG Hua-sheng, CHEN Wei-qi, et al. Impact of phosphorus loss on water environment in intensive livestock rearing areas and the countermeasures[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(3): 77-80.
- [14] Kim J G, Lee K B, Lee D B, et al. Influence of liquid pig manure on rice growth and nutrient movement in paddy soil under different drainage conditions[J]. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 2004, 37(2): 97-103.
- [15] Gnanamani A, Kasturi Bai R. Influence of biodigested slurry on rice-gram cultivation[J]. *Bioresource Technology*, 1992, 41(3): 217-221.
- [16] 陈洋尔, 王 丽, 翁 周. ICP-AES 和 AAS 法在苔藓植物重金属含量测定中的应用[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2007, 44(1): 195-198.  
CHEN Yang-er, WANG Li, WENG Zhou. Application of ICP-AES and AAS in measuring the contents of heavy metal in bryophytes[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2007, 44(1): 195-198.
- [17] 姜丽娜, 王 强, 李艾芬, 等. 休闲稻田消解沼液生态效应及其对水



- 稻安全生产影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2483-2490.
- JIANG Li-na, WANG Qiang, LI Ai-fen, et al. The ecological effects of fallow paddy field disposal biogas slurry and its impact on the following rice safety production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2483-2490.
- [18] 高 威, 陆冬梅, 缪翠云, 等. 规模化养猪场处理废水对水稻产量形成和稻米品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2256-2264.
- GAO Wei, LU Dong-mei, MIAO Cui-yun, et al. Effects of pig slurry from large-scale pig farm on rice yield formation and quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2256-2264.
- [19] 黄益宗, 胡 莹, 刘云霞. Cr 和 As 复合污染对水稻幼苗吸收积累 Fe, P, As 和 Cr 的影响[J]. 中国科学:生命科学, 2010, 40(2):175-182.
- HUANG Yi-zong, HU Ying, LIU Yun-xia. Combined effects of chromium and arsenic on rice seedlings (*Oryza sativa* L.) growth in solution culture supplied with or without P fertilizer [J]. *Sci China Life Sci*, 2010, 40(2):175-182.
- [20] 罗连光, 崔新卫, 杨 勇, 等. 有机无机肥配施对超级杂交稻产量构成及植株重金属含量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1):67-71.
- LUO Lian-guang, CUI Xin-wei, YANG Yong, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on yield composition and heavy metal content of super hybrid rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(1):67-71.
- [21] 姚丽贤, 周修冲. 有机肥对环境的影响及预防研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2):113-115.
- YAO Li-xian, ZHOU Xiu-chong. Impact of organic manure on the environment and its corresponding preventive researches[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(2):113-115.
- [22] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):97-100.
- WANG Bo-ren, XU Ming-gang, WEN Shi-lin. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):97-100.
- [23] 刘浩荣, 宋海星, 荣湘民, 等. 钝化剂对好氧高温堆肥处理猪粪重金属含量及形态的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3):74-80.
- LIU Hao-rong, SONG Hai-xing, RONG Xiang-min, et al. Effect of heavy metal passivator on concentrations and forms of heavy metals in pig manure composted aerobically under high temperature[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(3):74-80.
- [24] 李艾芬, 章明奎. 规模化养殖场鸡粪营养物质和污染元素的组成特点[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(2):64-67.
- LI Ai-fen, ZHANG Ming-kui. Nutrient substances and pollutant elements in chicken manure from intensive poultry farms[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(2):64-67.
- [25] 范中亮, 季 辉, 杨 菲, 等. 不同土壤类型下杂交水稻地上部器官对重金属镉和铅的富集特征[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(2):183-188.
- FAN Zhong-liang, JI Hui, YANG Fei, et al. Accumulation characteristics of cadmium and lead in aboveground organs of indica hybrid rice as affected by different soil types[J]. *Chin J Rice Sci*, 2010, 24(2):183-188.
- [26] 刘侯俊, 梁吉哲, 韩晓日, 等. 东北地区不同水稻品种对 Cd 的累积特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):220-227.
- LIU Hou-jun, LIANG Ji-zhe, HAN Xiao-ri, et al. Accumulation and distribution of cadmium in different rice cultivars of Northeastern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):220-227.
- [27] 莫 争, 王春霞, 陈 琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, 21(2):110-116.
- MO Zheng, WANG Chun-xia, CHEN Qin, et al. Distribution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in paddy plant[J]. *Environ Chem*, 2002, 21(2):110-116.
- [28] 关共凑, 徐 颂, 黄金国. 重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. 生态环境, 2006, 15(2):315-318.
- GUAN Gong-cou, XU song, HUANG Jin-guo. The regularity of distribution, change and migration of heavy metals in soil-rice plant system [J]. *Ecol Environ*, 2006, 15(2):315-318.
- [29] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):129-135.
- LI Ben-yin, HUANG Shao-min, ZHANG Yu-ting, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):129-135.
- [30] 吴启堂, 陈 卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1):104-107.
- WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou. Difference on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):104-107.
- [31] 吴德峰. 动物性食品药物残留负面效应与监测措施[J]. 福建畜牧兽医, 2004, 26:40-43.
- WU De-feng. Negative effects and monitoring measures of animal food residues[J]. *Fujian Journal of Animal Husbandry and Veterinary*, 2004, 26:40-43.
- [32] 陈杖榴, 杨桂香, 孙永学. 兽药和饲料添加剂残留的毒性与生态毒理研究进展[J]. 广东饲料, 2001, 10(1):24-26.
- CHEN Zhang-liu, YANG Gui-xiang, SUN Yong-xue. Toxicities and ecotoxicology of veterinary drugs and feed additives residues[J]. *Guangdong Feed*, 2001, 10(1):24-26.