

节水灌溉条件下稻田氮素径流与渗漏流失特征研究

姜萍¹, 袁永坤², 朱日恒¹, 戴耀文¹, 沈逸菲¹, 赵 峥¹, 岳玉波¹, 赵 琦¹, 曹林奎^{1*}

(1. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240; 2. 上海市青浦区水务局, 上海 201700)

摘要: 采用测坑定位试验的方法研究不同灌溉条件下稻田系统氮素流失特征。结果表明: 与常规淹灌(W1)处理相比, 间歇灌溉(W2)和湿润灌溉(W3)等节水灌溉处理可分别减少4.37%和8.88%的灌水量、35.74%和5.98%的径流排水量以及2.01%和17.28%的渗漏排水量; 整个水稻季, W1处理的总氮(TN)径流和渗漏流失负荷均为最高, 分别为11.69、3.40 kg N·hm⁻²; 与W1处理相比, 较低的排水量导致W2处理和W3处理分别减少了52.01%和38.24%的TN径流流失, 以及15.88%和42.06%的TN渗漏流失; W2处理和W3处理还分别提高了10.83%和5.46%的水稻籽粒产量。研究表明节水灌溉不仅能有效控制稻田氮素流失, 并能在一定程度上提高水稻产量。

关键词: 测坑; 间歇灌溉; 湿润灌溉; 氮素流失; 径流; 渗漏

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)08-1592-05 **doi:** 10.11654/jaes.2013.08.015

Study on the Nitrogen Loss from Paddy Fields on Different Water Management

JIANG Ping¹, YUAN Yong-kun², ZHU Ri-heng¹, DAI Yao-wen¹, SHEN Yi-fei¹, ZHAO Zheng¹, YUE Yu-bo¹, ZHAO Qi¹, CAO Lin-kui^{1*}

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Water Management Bureau of Qingpu District, Shanghai 201700, China)

Abstract: A lysimeter experiment was conducted to reveal the effect of different water management on nitrogen(N) loss in paddy fields. Three treatments were applied in this study: flooding irrigation(W1); intermittent irrigation(W2) and moistening irrigation(W3). Our results suggested that compared to W1 treatment, the irrigation water of W2 and W3 was reduced by 4.37% and 8.88%. Meanwhile, the surface runoff water of W2 and W3 was reduced by 35.74% and 5.98%, and leaching water by 2.01% and 17.28%. In W1 treatment, 11.69 kg N·hm⁻² and 3.40 kg N·hm⁻² nitrogen lost through runoff and leaching separately. However, because of the diminished runoff and leaching water, the nitrogen loss of W2 and W3 was reduced by 52.01% and 38.24% through runoff, and 15.88% and 42.06% through leaching; In addition, the grain yields of W2 and W3 was increased by 10.83% and 5.46% compared to that of W1.

Keywords: lysimeter; intermittent irrigation; moistening irrigation; nitrogen loss; runoff; leaching

我国是一个水资源十分缺乏且分布不均匀的国家, 人均水资源占有量约2340 m³, 仅为世界人均水资源占有量的1/4^[1]。水稻是我国主要的粮食作物之一, 也是耗水量最多的农作物。据统计, 我国农业用水量占总用水量的70%以上, 而其中水稻用水量约占65%^[2-3]。

在水稻生产中, 灌溉方式以传统的淹水灌溉为主。

南方水稻因为主要生育期与雨季同步, 降雨引起的地表排水和地下排水较其他作物及其他地区的水稻更为频繁, 排水量也更大^[4]。在河网密布的南方, 稻田径流排水和渗漏排水只需通过很短的距离就能进入地表水和地下水, 而随之流失的氮磷等营养元素将会对水体造成严重的污染, 这也是造成目前农业面源污染的主要原因之一^[5]。

近年来, 有关水稻节水栽培的研究一直受到人们的重视, 湿润灌溉、间歇灌溉以及水稻旱作等节水灌溉措施一直是研究的热点^[6-7]。许多研究表明, 适当的节水灌溉措施不仅不会降低水稻的产量, 反而有利于稻米品质的改善^[8-10]; 也有学者研究了不同水管理

收稿日期: 2013-04-20

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAD15B03); 2010年度上海交大理工交叉基金

作者简介: 姜萍(1991—), 女, 上海金山人, 主要研究方向为资源环境科学。E-mail: jiangping28691337@163.com

* 通信作者: 曹林奎 E-mail: clk@sjtu.edu.cn

模式下稻田氮素渗漏损失,结果表明节水灌溉不仅可以较大幅度节约稻田灌溉用水,同时还能有效减少稻田氮磷等营养元素的流失^[11-12]。近年来,这些节水灌溉技术已在全国很多省市得到了推广应用^[13-15]。在不久的将来,水稻节水灌溉方式有望逐渐替代传统的淹水灌溉。

然而,由于试验条件的限制,目前有关水稻节水减排的试验多集中于大田或室内试验。大田试验对于稻田水分的精确管理控制较为困难,而室内试验的条件与实际情况又相距甚远。本研究基于测坑定位试验装置,结合了二者的优势,系统研究不同节水灌溉条件下稻田氮素的流失特征,以期为稻田节水减排控制农业面源污染提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验时间为 2012 年 6—11 月。采用野外测坑定位试验,试验地位于上海市青浦区农田水利技术推广站测坑试验区。该地区气候类型为亚热带潮湿型季风气候,年平均气温为 15.6℃,年平均降雨量为 1 178.2 mm,2012 年的降雨量为 1 145.2 mm。测坑建于 1998 年,面积为 6 m²,长、宽、高分别为 3、2、3 m。建造时采用原状土回填,土壤为脱潜型水稻土,属重壤土,测坑内土壤深度为 2.5 m。各测坑之间以水泥埂隔开,防止肥水串流,水泥埂高度参照大田田埂高度,高出土壤表面 20 cm。坑内埋有径流管和渗漏管,用于径流水和渗漏水的采集。测坑设有底座,底部建有控制室,用于样品的采集与水量的自动记录。测坑如图 1 所示;坑内土壤理化性质本底值如表 1 所示。

1.2 试验设计

试验共设 3 种处理,分别为传统的淹水灌溉

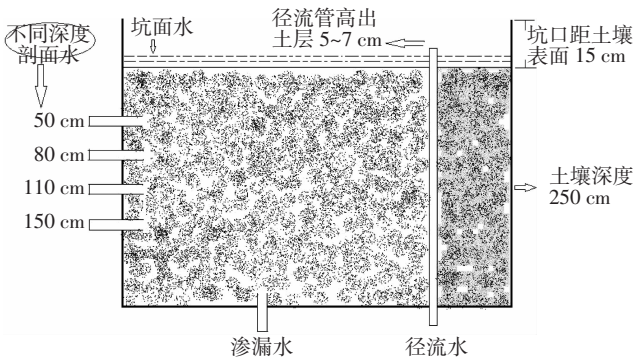


图 1 测坑装置示意图

Figure 1 Schematics view of lysimeter

表 1 测坑土壤物理化学性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of soil in the lysimeter

处理方式	TN/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	有效钾/ mg·kg ⁻¹	有机质/ g·kg ⁻¹	pH	容重/ g·cm ⁻³
W1	1.23	25.85	51.32	23.72	7.17	1.32
W2	1.17	26.32	55.81	23.24	7.21	1.33
W3	1.12	23.24	53.70	21.15	7.33	1.32

(W1)处理以及间歇灌溉(W2)、湿润灌溉(W3)两种节水灌溉处理,每种处理 3 次重复,随机区组设计,水分的具体管理方式如表 2 所示。W1 处理为对照处理,按本地区习惯,除幼苗期保持 10~20 mm 水层,分蘖后期落干烤田外,其他生育阶段一般保持 20~40 mm 水层,收割前 20 d 断水;W2 处理幼苗期及落干烤田同 W1 处理,其他生育阶段充分利用雨水或灌足 50 mm 以下水层,落干后歇一天再灌一次,以减少灌溉量和灌水次数;W3 处理幼苗、孕穗抽穗期田面保持 10 mm 左右水层,落干烤田同 W1 处理和 W2 处理,其余生育阶段进行干湿交替,灌溉上限为土壤饱和含水量,下限为田间持水量,充分利用雨水减少灌水。施肥方式参照当地的施肥习惯,为 20%有机肥(含氮量 1.53%)+80%化肥(尿素),施肥水平参照上海市推荐施肥量,3 种处理统一控制在 300 kg N·hm⁻²。试验过程中的关键农事操作如下:6 月 25 日施基肥,6 月 27 日移栽水稻,8 月 2 日—8 月 13 日为烤田期,8 月 14 日复水并追肥,11 月 8 日水稻成熟收割。

表 2 不同灌溉方式各生育期田面水层深度设计(mm)

Table 2 Different treatments of water managements(mm)

处理 方式	幼苗期	分蘖期	分蘖 后期	拔节 孕穗	抽穗 扬花	灌浆 乳熟	黄熟
W1	10~20	20~40	20~40	20~40	20~40	20~40	落干
W2	10~20	30~0	50~0	50~0	50~0	50~0	落干
W3	10~20	0~20	0	0~10	0~10	0	落干

1.3 样品的采集与测定

水稻种植前采集 0~20 cm 耕层土壤样品,用于土壤理化性质的测定;降雨产生径流时采集径流水样品;渗漏水样品的采集为施肥后第 1、2、3、5、7、10、15、20、25、30 d,其他时间每两周采集一次渗漏水;水稻成熟收割后采集水稻样品用于产量分析。

土壤理化性质测定指标:全 N(TN)、速效磷、有效钾、有机质、pH 及容重;水样测定指标:TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N。TN 的测定采用 Multi N/C 3000 TOC/TN 分

析仪 (Analytik Jena, 德国) 进行, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的测定采用 SmartChem 200 全自动间断化学分析仪 (Alliance, 法国) 进行。

1.4 数据分析

数据的处理分析及图表的绘制采用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 进行。

2 结果与讨论

2.1 不同灌溉条件下稻田系统水平衡分析

不同灌溉条件下稻田系统水分的输入输出量如表 3 所示。从稻田系统水分的总输入来看, 3 种灌溉方式为 $\text{W1} > \text{W2} > \text{W3}$, 分别为 1 325.0、1 287.1、1 248.0 mm; 而从稻田系统水分的总输出来看, 则是 $\text{W1} > \text{W3} > \text{W2}$, 分别为 1 225.4、1 147.5、1 119.6 mm。稻田系统的径流排水和渗漏排水是导致氮素随水流失的主要驱动力, 由表 3 可知, 2012 水稻试验过程中 W1 处理产生的径流水和渗漏水均高于其他两种处理, 而产生径流水最少的是 W2 处理, 产生渗漏水最少的则为 W3 处理。

表 3 稻田系统水平衡分析 (mm)

Table 3 Water balance analysis in paddy fields (mm)

处理方式	水分输入		水分输出		
	灌溉水量	降雨量	径流量	渗漏水	蒸腾蒸发量
W1	867.0	458.0	153.9	318.9	752.6
W2	829.1	458.0	98.9	312.5	708.2
W3	790.0	458.0	144.7	263.8	739.0

水稻是需水量高的作物, 不同的水分管理方式对稻田系统水分的输入和输出均有显著影响。试验结果表明, W1 处理的灌水量、径流量及渗漏量均为 3 种处理中最高, 两种节水灌溉处理在节约灌水量的同时还降低了稻田系统的径流量与渗漏量。相对于 W1 处理, W2 处理和 W3 处理分别节约灌水量 4.37% 和 8.88%, 降低径流量 35.74% 和 5.98%, 降低了渗漏量 2.01% 和 17.28%。在施肥方式相同的条件下, 稻田系统径流量与渗漏量的降低是减少稻田氮素流失的重要条件。

2.2 不同灌溉条件下稻田氮素径流流失特征

降雨产生的径流排水是稻田系统 N 流失到水体环境的主要途径之一, 在施肥之后短期内产生的径流将导致大量的 N 流失进入地表水。在 2012 年水稻试验过程中共产生了 7 次径流, 如图 2 所示。3 种处理的径流流失负荷均为第一次径流最高, 且显著高于其他各次径流。第一次径流产生的时间为施基肥后第

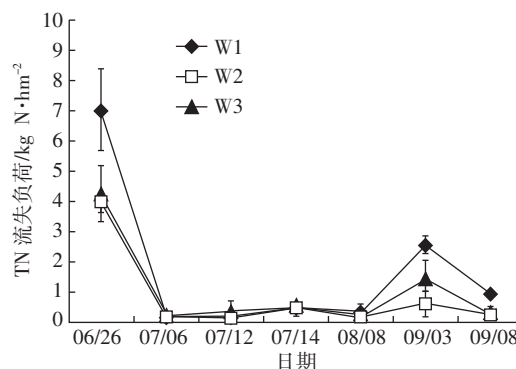


图 2 不同灌溉条件下稻田 TN 径流流失特征

Figure 2 Nitrogen loss variations through runoff in different water managements

1 d, 当时上海地区处于台风天气, 较高的降雨量导致了较高的 N 径流流失负荷。此后的各次径流 N 径流流失负荷均较低, 在追肥之后的第 1 次径流略有回升。氮肥的施用和径流排水量是影响稻田 N 径流流失负荷的两个主要因素, 在本试验中, 由于 3 种处理施肥方式相同, 不同灌溉条件下径流排水量的差别是导致 N 径流流失特征不同的主要原因。

不同灌溉条件下稻田系统各形态 N 的径流流失负荷如表 4 所示。试验结果表明, 整个水稻季 W1 处理的 TN 径流流失负荷最高, 且显著高于其他两种处理, W3 处理次之, W2 处理最低。相对于 W1 处理, 整个水稻季 W2 处理和 W3 处理分别能减少 52.01% 和 38.24% 的 TN 径流流失。3 种处理水稻季的 TN 径流流失负荷在总施氮量中所占的比例为 1.87%~3.90%, 均低于 5%。此外, 稻田 N 径流流失中 N 形态以铵态氮为主, 3 种处理铵态氮流失负荷所占 TN 流失负荷的比例为 48.34%~55.08%。

2.3 不同灌溉条件下稻田氮素渗漏流失特征

稻田长期处于淹水状态, 施肥投入的 N 在渗漏水的作用下将流失进入地下水。3 种不同灌溉条件下稻田 N 的渗漏流失变化如图 3 所示。在水稻整个生产过程中共出现了 1 次 N 渗漏流失的峰值, 时间为追肥之后, 其他时间 N 的渗漏流失负荷均维持在较

表 4 不同灌溉条件下稻田各形态氮径流流失负荷

Table 4 Nitrogen loading in runoff in different water managements

处理方式	$\text{NO}_3^--\text{N}/$ $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/$ $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$	TN/ $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$	TN 流失负荷 占施氮比/%
W1	0.55	5.95	11.69	3.90
W2	0.25	3.09	5.61	1.87
W3	0.61	3.49	7.22	2.41

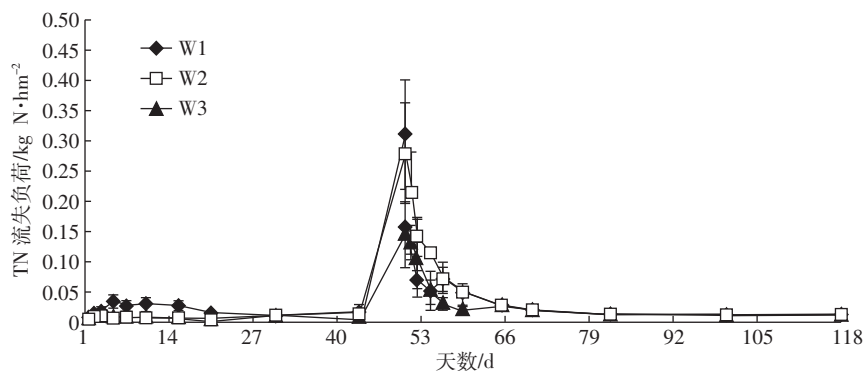


图 3 不同灌溉条件下稻田 TN 渗漏流失特征

Figure 3 Nitrogen loss variations through leaching in different water managements

低水平。其中 W1 处理的峰值最高, W2 处理次之, W3 处理最低。在水稻基肥施用后并没有 N 渗漏流失峰值的出现, 主要原因是由于在基肥施后的第一天就由于降雨产生了较大的径流, 导致大量的 N 随径流水流失, 稻田田面水中 N 浓度降低, 因此, 只有少量的氮素下渗进入地下水。

不同灌溉条件下稻田系统各形态 N 的渗漏流失负荷如表 5 所示。试验结果表明, 整个水稻季 W1 处理的 TN 渗漏流失负荷最高, 且显著高于其他两种处理, W2 处理次之, W3 处理最低。相对于 W1 处理, 整个水稻季 W2 处理和 W3 处理分别能减少 15.88% 和 42.06% 的 TN 渗漏流失。3 种处理水稻季的 TN 渗漏流失负荷在总施氮量中所占的比例为 0.66%~1.13%, 均低于 5%, 且低于 TN 径流流失在总施氮量中所占的比例。此外, 稻田 N 渗漏流失中 N 形态则以硝态氮为主, 且几乎没有铵态氮的下渗, 3 种处理硝态氮流失负荷所占 TN 流失负荷的比例为 35.31%~64.47%。

2.4 不同灌溉条件下水稻产量分析

在考察不同灌溉方式对稻田 N 流失影响的同时, 试验还考察了灌溉方式对水稻产量的影响。3 种不同灌溉条件下水稻籽粒的产量如图 4 所示。W1、W2 和 W3 3 种处理分别为 7 569.99、8 389.85、7 983.23 kg·hm⁻²。试验结果表明, 相对于常规的淹水灌溉, 两种节水灌溉方式不仅没有导致产量下降, 反而还有一定的增产效果, 在 2012 年水稻试验过程中 W2 处理和 W3 处理比 W1 处理分别增产 10.83% 和 5.46%。主要原因可能是节水灌溉方式更加符合水稻在生长过程中的需水规律, 常规的淹水灌溉并不一定是水稻最佳的水分管理模式。

表 5 不同灌溉条件下稻田各形态氮渗漏流失负荷

Table 5 Nitrogen loading in leaching in different water managements

处理方式	NO ₃ -N/ kg N·hm ⁻²	NH ₄ -N/ kg N·hm ⁻²	TN/ kg N·hm ⁻²	TN 流失负荷 占施氮比/%
W1	1.46	0.08	3.40	1.13
W2	1.01	0.13	2.86	0.95
W3	1.27	0.19	1.97	0.66

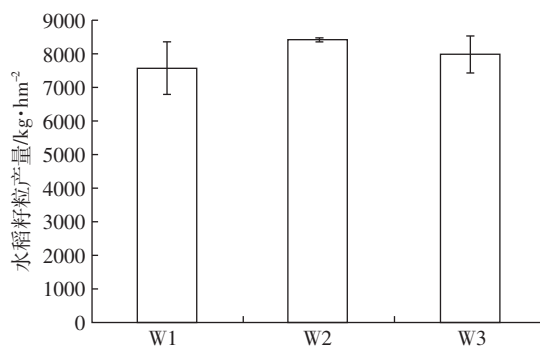


图 4 不同灌溉条件下水稻产量

Figure 4 Grain yields in different water managements

3 结论

本研究开展的水稻节水灌溉试验表明, 不同水分管理模式会显著影响稻田系统水分的输入与输出, 而稻田水分的输出则是氮素从稻田系统流失的主要驱动力。在本试验中, 相对于常规淹水灌溉的 W1 处理, 节水灌溉的 W2 处理和 W3 处理分别减少了 35.74% 和 5.98% 的径流排水量及 2.01% 和 17.28% 的渗漏排水量, 从而减少了 52.01% 和 38.24% 的 TN 径流流失负荷及 15.88% 和 42.06% 的 TN 渗漏流失负荷。此外, 节水灌溉的 W2 处理和 W3 处理在减少稻田 N 流失

的同时,对水稻的产量也有一定的增产效果。本次节水灌溉测坑定位试验与很多之前的研究结果相符^[16-18],证明节水灌溉不仅能在一定程度上节约水资源,同时还能有效控制氮磷等营养元素的流失,并对作物的生长和品质也有一定的影响。但目前有关节水灌溉方面的研究结果多为短期试验条件下获得,节水灌溉对稻田氮素流失的减排效果还需进一步的长期定位试验进行验证。

参考文献:

- [1] 张寿全, 黄巍. 中国水资源的可持续利用研究[J]. 中国人口·资源与环境, 1999, 9(2): 21-25.
ZHANG Shou-quan, HUANG Wei. Some issues on model of sustainable utilization of water resources in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 1999, 9(2): 21-25.
- [2] Tuong T P, Bouman B A M, Mortimer M. More rice, less water—integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice-based systems in Asia[J]. *Plant Production Science*, 2005, 8: 231-241.
- [3] 王一凡, 华泽田, 周毓珩. 节水稻作研究与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
WANG Yi-fan, HUA Ze-tian, ZHOU Yu-heng. Research and application of water-saving rice[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002.
- [4] 于金凤, 洪林, 江洪珊. 南方典型灌区节水灌溉的减污效应[J]. 节水灌溉, 2011, 8: 1-4.
YU Jin-feng, HONG Lin, JIANG Hong-shan. Effects of water-saving irrigation on pollution control in typical irrigation district in Southern China[J]. *Water Saving Irrigation*, 2011, 8: 1-4.
- [5] Olarewaju O E, Adetunji M T, Adeofun C O, et al. Nitrate and phosphorus loss from agricultural land: Implications for nonpoint pollution[J]. *Nutrient Cycling in Agro-Ecosystems*, 2009, 85: 79-85.
- [6] 潘圣刚, 黄胜奇, 汪金平, 等. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻生物学特性及水分利用效率的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 161-166.
PAN Sheng-gang, HUANG Sheng-qi, WANG Jin-ping, et al. Effects of nitrogenous fertilizer application on biological properties and water use efficiency of rice under different water regimes[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(1): 161-166.
- [7] Belder P, Bouman B A M, Cabangon R, et al. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 65: 193-210.
- [8] 潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻氮素利用效率、产量及其品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 283-289.
PAN Sheng-gang, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency, grain yields and qualities of rice under different water regimes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 283-289.
- [9] 张耗, 剧成欣, 陈婷婷, 等. 节水灌溉对节水抗旱水稻品种产量的影响及生理基础[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4782-4793.
ZHANG Hao, JU Cheng-xin, CHEN Ting-ting, et al. Effect of water-saving irrigation on the grain yield of water-saving and drought-resistance rice and its physiological bases[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4782-4793.
- [10] 邓环, 曹凑贵, 程建平, 等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 602-606.
DENG Huan, CAO Cou-gui, CHENG Jian-ping, et al. Impact of different irrigation methods on biological characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 602-606.
- [11] Wesstrom I, Messing I. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops [J]. *Agricultural Water Management*, 2007(87): 229-240.
- [12] 高焕芝, 彭世彰, 茆智, 等. 不同灌排模式稻田排水中氮磷流失规律[J]. 节水灌溉, 2009, 9: 1-3.
GAO Huan-zhi, PENG Shi-zhang, MAO Zhi, et al. N and P losses in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes[J]. *Water Saving Irrigation*, 2009, 9: 1-3.
- [13] 李艳华. 浅析水稻节水灌溉技术在阜新地区的推广试验[J]. 农业与技术, 2011, 31(3): 35-37.
LI Yan-hua. Extend study on the rice water-saving irrigation technology in Fuxin[J]. *Agriculture & Technology*, 2011, 31(3): 35-37.
- [14] 赵秀君. 水稻综合节水灌溉技术模式在盘锦灌区的应用[J]. 东北水利水电, 2008, 26(6): 63-64.
ZHAO Xiu-jun. Application of water-saving irrigation technology on rice in Panjin irrigation district[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2008, 26(6): 63-64.
- [15] 罗健恩. 水稻节水灌溉技术与示范推广效果研究[J]. 宁夏农林科技, 2008, 5: 32-33.
LUO Jian-en. Rice water-saving irrigation technology research and demonstration effect[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2008, 5: 32-33.
- [16] 洪林, 李瑞鸿. 南方典型灌区农田地表径流氮磷流失特性[J]. 地理研究, 2011, 30(1): 115-124.
HONG Lin, LI Rui-hong. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in surface runoff from farmland in a typical irrigation district in Southern China[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(1): 115-124.
- [17] Romeo J, Cabangon R J, To Phuc Tuong, et al. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China[J]. *Paddy Water Environment*, 2004, 2: 195-206.
- [18] 石丽红, 纪雄辉, 李洪顺, 等. 湖南双季稻田不同氮磷施用量的径流损失[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 551-557.
SHI Li-hong, JI Xiong-hui, LI Hong-shun, et al. Nitrogen and phosphorus losses from surface runoff under different application in the double cropping rice fields in Hunan[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(4): 551-557.