

尹爱经, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水氮磷浓度对水稻生长及氮磷利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 768–776.

YIN Ai-jing, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, et al. Effects of the N and P concentrations in domestic wastewater on the growth, N and P uptakes of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 768–776.

生活污水氮磷浓度对水稻生长及氮磷利用的影响

尹爱经^{1,2}, 薛利红^{1*}, 杨林章^{1,3}, 段婧婧¹, 侯朋福¹

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.省部共建国家重点实验室培育基地—江苏省食品质量安全重点实验室, 南京 210014; 3.江苏滩涂生物农业协同创新中心, 江苏 盐城 224002)

摘 要:通过设置不同 N、P 浓度的生活污水进行水稻盆栽实验,研究了生活污水灌溉对水稻生长、产量以及氮磷吸收利用的影响。结果表明,在正常灌溉和不施肥条件下,污水灌溉明显降低了水稻施肥期的田面水氮磷浓度,水稻移栽后 70 d 左右田面水 N、P 浓度与不施肥处理田面水 N、P 浓度趋于一致;污水 TN、TP 浓度与水稻的生长指标和产量密切相关,生活污水灌溉提高了穗粒数、千粒重和结实率,但穗数明显减少,导致产量下降;当污水中总氮浓度达 20~25 mg·L⁻¹、总磷浓度达 1.0~1.5 mg·L⁻¹ 时,不施任何化肥条件下水稻产量即可达到常规化肥处理的 95%,差异不显著,此时污水灌溉中带入的氮仅为常规施肥处理氮用量的 64.1%和磷肥用量的 23.2%。与常规化肥处理相比,污水灌溉提高了水稻的 N、P 利用效率,水稻对 N、P 的吸收利用与污水中的 N、P 浓度成正相关,且污水中的 N、P 存在着正交互作用,即提高 P 浓度促进了 N 的吸收利用,提高 N 浓度促进了 P 的吸收利用。在应用生活污水进行稻田灌溉时,需在分蘖期配施一定的化肥从而保证水稻高产。

关键词:生活污水灌溉;氮磷;水稻;产量

中图分类号:S511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)04-0768-09 **doi:**10.11654/jaes.2016-1472

Effects of the N and P concentrations in domestic wastewater on the growth, N and P uptakes of rice

YIN Ai-jing^{1,2}, XUE Li-hong^{1*}, YANG Lin-zhang^{1,3}, DUAN Jing-jing¹, HOU Peng-fu¹

(1.Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.Key Lab of Food Quality and Safety of Jiangsu Province—State Key Laboratory Breeding Base, Nanjing 210014, China; 3.Jiangsu Synthetic Innovation Center for Coastal Bio-agriculture, Yancheng 224002, China)

Abstract: In this study, rice pot experiment irrigated with domestic wastewater in different N and P concentrations was carried out to investigate the effects on rice growth, yield and uptakes of N and P. Compared to common chemical fertilizer treatment, domestic wastewater irrigation significantly decreased the concentrations of N and P in the surface water, and the N and P concentrations decreased to the level of zero-N fertilizer treatment about 70 day after transplant. The growth status and yields of rice was closely related to the concentrations of N and P in domestic wastewater under normal irrigation without chemical fertilizer input condition. The spikelet number per panicle, 1000-grain weight, and filled spikelets rate were increased, but the panicle number was significantly decreased with domestic wastewater irrigation, therefore, the final yield showed a decrease. When the TN and TP concentration in domestic wastewater was 20~25 mg·L⁻¹ and 1.0~1.5 mg·L⁻¹, the rice yield could be 95% of that with normal chemical fertilizer and the difference was not significant, but the N and P inputs by domestic wastewater were only 64.1% and 23.2% of normal chemical fertilizer treatment. The N and P use efficiency of rice was enhanced

收稿日期: 2016-11-22

作者简介: 尹爱经(1986—),男,助理研究员,主要研究方向为生活污水农田回用和土壤磷循环。E-mail: huanxueseng@163.com

*通信作者: 薛利红 E-mail: njxuelihong@gmail.com

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503106);江苏省自主创新项目(CX(14)2050);江苏省博士后科研资助计划项目(1601109C)

Project supported: The Special Fund for Agro-scientific Research on Public Causes(201503106); The Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund(CX(14)2050); The Postdoctoral Research Funding Plan of Jiangsu Province(1601109C)

by domestic wastewater irrigation when compared to the normal chemical fertilizer treatment. The uptakes of N and P by rice were positively correlated with the concentrations of N and P in the domestic wastewater, and a positive interaction between N and P in domestic wastewater was observed. If paddy fields was irrigated with domestic wastewater, a certain amount of chemical fertilizer should be applied during tillering stage to ensure the high yield of rice.

Keywords: domestic wastewater irrigation; nitrogen and phosphorus; rice; yield

在工业和城市污水得到控制之后,分散于广大农村和小城镇的生活污水成为水体污染的重要来源之一,如何从源头上有效减少生活污水对水体的污染是当前的研究热点之一。我国生活污水产生量大,N、P 营养元素浓度高,直接排入水体将污染水环境。然而氮磷对于农业生产系统来讲,是作物不可缺少的营养元素,通过生活污水的农田回用不仅能够减少污水对水环境的污染负荷,而且能够有效减少化肥的投入,对于面源污染的防控和农业的可持续发展有重要意义^[1]。WHO 对污水农业灌溉的指导^[2]指出,耕地每年灌溉 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生活污水时,能够提供农田 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮和 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷(以 P_2O_5 计)。在缺水地区,污水回用的主要目标在于解决或缓解区域水资源危机。以色列通过完善的生活污水处理和滴灌等水肥一体化技术,将 70% 的生活污水用于农业生产。合理利用生活污水灌溉,不仅可以节约水资源^[3],还能提高各类蔬菜^[4-6]和粮食作物的产量^[7-9]。

稻田作为一种特殊的人工湿地系统,对污水的消纳具有很大的潜力。污水灌溉必须在保证作物和土壤安全的前提下进行,长期的不当污灌会引起土壤中重金属的累积,并对农产品质量造成一定影响^[10-13]。而纯粹的生活污水中重金属等有毒有害物质较低,经过处理达标排放后除了氮磷含量略高外,其他指标基本能达到农田灌溉水质标准,对水稻生长发育及粮食安全没有明显的负面影响^[14]。现有稻田对生活污水利用的研究大多关注于稻田湿地对于生活污水中 N、P 的去除^[15]、稻田田面水氮磷的养分动态变化^[16-17]以及不同布水方式对水稻生长的影响等方面^[18]。生活污水的分次灌溉相当于水肥一体化,能够提高作物的水分利用率和肥料利用率,减少对化肥用量的需求。从环境保护的角度来说,不施肥条件下灌溉污水能够减少农田的 N、P 流失,并且增加稻田对污水的消纳量。然

而,生活污水水质受污水来源、当地气候、饮食以及污水处理工艺等因素影响,N、P 浓度差异较大^[19],亟需明确生活污水中 N、P 浓度对水稻生长和产量的影响。为此,本研究开展了不同 N、P 浓度生活污水灌溉水稻的盆栽模拟实验,研究生活污水对水稻的生长发育、产量构成以及 N、P 营养吸收利用的影响,以期为生活污水的稻田利用与合理施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 盆栽设置

供试土壤来自南京市高淳区东坝镇稻田,土壤类型为脱潜水稻土,土壤基本理化性质见表 1。实验地点位于江苏省农业科学院内温室大棚。盆栽采用聚乙烯塑料桶(直径 30 cm),填土厚度 30 cm。水稻品种为武运梗 23 号,育苗移栽,每盆 3 穴,每穴 3 株。于 2015 年 6 月 17 日移栽,10 月 13 日收获。

1.2 实验设计

实验共设置空白不施肥对照(N0P0)、常规施肥对照(NcPc)及 4 个不同氮磷浓度生活污水处理:低氮低磷 N2P2、高氮低磷 N4P2、低氮高磷 N2P4、高氮高磷 N4P4,每个处理设置 3 次重复。对照采用自来水灌溉,污水处理均不施肥,生活污水来自江苏省农科院家属区化粪池污水,原水水质见表 2,重金属含量均满足农田灌溉水质标准(GB 5084—2005)。通过对化粪池污水进行不同倍数的稀释获得不同 N、P 浓度的生活污水,具体见表 3。常规施肥处理氮磷钾的施用量分别为 $210(\text{N})$ 、 $70(\text{P}_2\text{O}_5)$ 、 $70(\text{K}_2\text{O}) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷钾肥全部作基肥,泡田时溶于水一次性施入;氮肥分 3 次施入,基肥、蘖肥、穗肥 TN 施用量均为 $70(\text{N}) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,且均为溶于水施入。

盆栽水稻整个生长期的用水量及通过污水灌溉带来的 N、P 含量见表 3。各处理设计的灌溉水量相

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical characteristics of the soil used in the experiment

pH	有机质 OM/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	全氮 TN/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	全磷 TP/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	全钾 K ₂ O/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	粘粒 Clay/%	粉砂 Silt/%	砂粒 Sand/%
5.98	22.1	1.52	0.776	39.8	30	34	36

表 2 实验用原污水水质(pH7.56)

Table 2 Water quality of original domestic wastewater in the experiment(pH7.56)

化学成分 Chemical composition	含量 Content	化学成分 Chemical composition	含量 Content
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	424.00	Cl/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	62.06
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	79.57	SO_4^{2-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	24.13
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	11.12	Cu/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	53.81
$\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.33	Zn/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	57.41
$\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	78.23	Pb/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	8.56
Na ⁺ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	76.24	As/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	2.22
K ⁺ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	51.60	Cr/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.03
Ca ²⁺ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	31.44	Cd/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.65
Mg ²⁺ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	5.68	Hg/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.05

同,并依照水稻生长实际需求灌溉。田面水自然下落至 2 cm 水深时进行灌溉,每次灌溉量为 2~4 L·pot⁻¹,保持水层深度在 2~6 cm。生长期共灌溉 14 次,基肥、蘖肥、穗肥期的灌溉次数分别为 3、3、8 次。除施肥组外,其他处理的灌溉量均为 45 L·pot⁻¹,由于施肥组水稻生长旺盛,为避免田面水落干,实际灌水量偏多。烤田前和收获前让田面水自然落干。污水灌溉处理带入的 N、P 分别介于 468~936 mg·pot⁻¹ 和 27.3~54.6 mg·pot⁻¹ 之间。以常规施肥为参照,相当于替代 32.1%~64.1%的 N 和 11.6%~23.2%的 P。

1.3 样品采集与分析

水稻整个生育期内每隔 7~10 d 采集田面水,使用荷兰 Skalar 流动分析仪测定田面水中的 TN、TP 浓度。由于不同处理间浓度差异太大,因此将田面水浓度变化图的纵坐标采用了对数转化坐标轴。

在水稻关键生育期(分蘖肥前、穗分化期、抽穗灌浆期)测定株高和分蘖。成熟期采集盆栽内全部水稻的籽粒和秸秆,进行测产并分析产量构成因素。籽粒和秸秆烘干后粉碎测定氮磷含量。植株 TN 和 TP 含量按农业行业标准方法测定,用浓硫酸与双氧水消解

样品,凯氏微量法测定植株全氮含量,磷钼蓝法测磷,并计算植株氮磷吸收^[20]。

水稻收获后,将盆栽土壤混匀后采集土壤样品,室温风干,过 2 mm 土筛,测定氮磷含量。土壤 TP 采用硫酸-高氯酸消解,磷钼蓝比色法测定^[21]。土壤 TN 按浓硫酸与双氧水消解后用凯氏定氮法测定。

以肥力差减法计算污水中 N、P 利用效率^[22-24],具体公式如下:

氮(磷)农学利用率(Agronomic efficiency, AEN/P, 单位 kg·kg⁻¹)=[施氮(磷)区作物产量-空白区作物产量]/施氮(磷)量

氮(磷)吸收利用率(Apparent recovery efficiency, REN/P, 单位%)=[施氮(磷)区作物吸氮(磷)量-空白区作物吸氮(磷)量]/施氮(磷)量

氮(磷)偏生产力(Partial factor productivity, PF-PN/P, 单位 kg·kg⁻¹)=水稻产量/施氮(磷)量

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 软件对数据进行统计;采用 SPSS 中 Duncan 法对数据进行多重比较的显著性分析($P<0.05$),采用 Sigmaplot 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理田面水 N、P 浓度的变化

不同处理下田面水 TN 浓度在整个水稻生长期的变化见图 1。不同处理间的田面水 TN 浓度变化较大,施肥处理在基肥后 2 d 内的浓度超过 100 mg·L⁻¹,蘖肥和穗肥后的 3 d 内 TN 浓度也均高于 10 mg·L⁻¹,并呈现迅速下降的趋势。空白对照田面水 TN 浓度变化较小,多数时间小于 2 mg·L⁻¹。污水灌溉处理的田面水 TN 含量呈现上下波动的变化,灌溉当日田面水浓度最高,此后逐渐下降,高 N 处理的田面水浓度均高于低 N 处理。生长前期,尤其是施肥后一周内,生活污水处理的田面水 TN 浓度显著小于施肥处理。在生

表 3 不同处理下水稻灌溉量及其污水带入的营养

Table 3 The loads of water and nutrients under different irrigation treatments in the rice pot experiment

处理 Treatment	污水量 Wastewater/L	自来水量 Clean water/L	污水 TN 浓度 Wastewater TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	污水 TP 浓度 Wastewater TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	输入 N N Loads/ $\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$	输入 P P Loads/ $\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$
N0P0	0	45	0	0	0	0
NcPc	0	52	0	0	1460	235.3
N2P2	39	6	10~15	0.5~0.8	468	27.3
N4P2	39	6	20~25	0.5~0.8	936	27.3
N2P4	39	6	10~15	1.0~1.5	468	54.6
N4P4	39	6	20~25	1.0~1.5	936	54.6

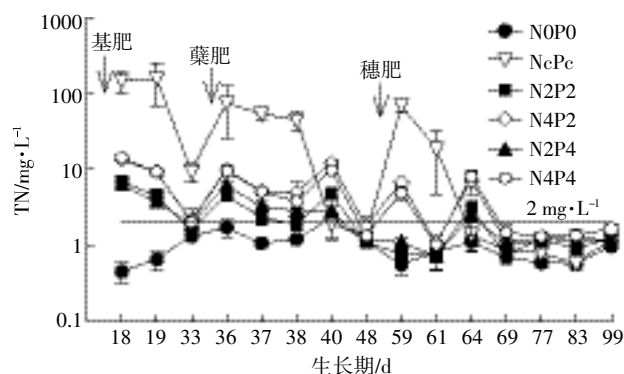


图 1 不同处理下水稻田面水 TN 浓度的变化

Figure 1 Changes of TN concentration in surface water under different treatments

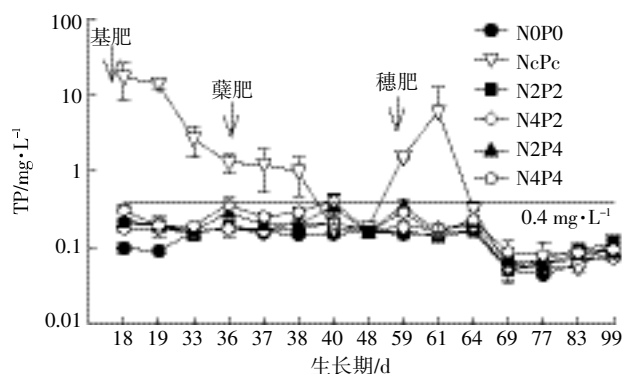


图 2 不同处理下水稻田面水 TP 浓度的变化

Figure 2 Changes of TP concentration in surface water under different treatments

长后期,所有处理的田面水 TN 浓度均小于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

不同处理下田面水的 TP 浓度在生长期的变化见图 2。不同处理间的田面水 TP 浓度变化较大,施肥处理在基肥后 2 d 内的浓度超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,之后逐渐下降,烤田覆水后又急剧增加,之后又逐渐下降。空白对照田面水 TP 浓度变化较小,多数时间小于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。污水灌溉处理的田面水 TP 含量几乎均在 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,低于地表水 V 类水标准,并且高 P 处理高于低 P 处理。生活污水处理的田面水 TP 浓度在生长前期尤其是肥期显著小于施肥处理。在生长后期,所有处理的田面水 TP 浓度均小于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.2 污水灌溉对水稻生长的影响

水稻的主要生长指标见表 4。不施肥处理的株高最低,常规施肥处理最高,污水处理各组居中,并且不同浓度下株高没有显著差异。除了收获期 N2P2 组株高 (79.5 cm) 显著高于空白对照 (73.0 cm) 外,污水组株高在整个生长期与空白对照组没有显著差异。穗肥前期及收获时,各污水组株高与施肥组没有显著差异,但分蘖后期施肥组株高显著高于污水组,说明

穗肥对水稻生长具有促进作用。常规施肥处理分蘖数显著高于污水处理组和空白对照,污水处理组与空白对照则差异不显著,污水处理间表现为高氮高磷处理最多。

不同处理下水稻的干物质量及产量构成见表 5。不同处理间秸秆重没有显著性差异, N2P4 组与施肥组最高。总籽粒重施肥处理最高,空白最低,污水组居中,为 $70.84 \sim 86.09 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$,其中 N4P4 处理最高,与施肥处理最为接近 ($90.98 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$)。除 N2P2 外,其他污水组的总籽粒重与施肥处理没有显著差异。各处理间收获指数没有显著差异 ($50.3\% \sim 55.3\%$),但高 N 处理组收获指数高于低 N 处理。在 P 浓度相同条件下,高 N 处理提高了籽粒重和产量;在 N 浓度相同条件下,高 P 也提高了籽粒重和产量。说明氮磷存在着正交互作用。与常规化肥对照相比,污水灌溉提高了千粒重、穗粒数和结实率,但差异不显著,而穗数显著降低。污水处理中,千粒重以 N4P4 组最高,达到 28.19 g ,穗粒数则以 N4P2 最高 (128.8)。最终产量常规施肥对照组最高,空白对照最低 ($8.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),污水灌溉处理除了

表 4 不同处理下水稻株高与分蘖的变化

Table 4 The heights and tillers of rice in different stages under different treatments

处理 Treatment	株高 Height/cm			分蘖数 Tiller		
	穗肥前 Before tillering fertilizer	晒田前 Before field drying	收获期 Maturity stage	穗肥前 Before tillering fertilizer	晒田前 Before field drying	收获期 Maturity stage
N0P0	44.3b	60.3b	73.0b	25.0b	25.3b	23.3b
NcPc	49.4a	67.1a	79.1a	32.0a	40.3a	31.7a
N2P2	46.4ab	62.9b	79.5a	25.0b	27.3b	21.7b
N4P2	47.4ab	62.1b	78.3ab	25.0b	28.0b	23.0b
N2P4	47.8ab	62.3b	75.9ab	24.3b	28.5b	24.5b
N4P4	46.8ab	61.6b	78.2ab	23.3b	30.7ab	25.7b

注:同列不同字母代表多重比较差异性显著 ($P < 0.05$),采用方法为 Duncan's。下同。

Notes: Different letters for the same index mean significant difference between treatments at $P < 0.05$ by Duncan's. The same below.

表 5 不同处理下水稻的地上部生物量及产量构成

Table 5 Differences of above-ground biomass and yield component of rice under different treatments

处理 Treatment	秸秆 Straw/g·pot ⁻¹	籽粒 Grain/g·pot ⁻¹	收获指数 Harvest index/%	穗数 Panicle number	千粒重 1000-grain weight/g	穗粒数 Spikelet number/panicle	结实率 Filled spikelets/%	产量 Yield/t·hm ⁻²
N0P0	60.1a	60.84d	50.3a	23.3b	26.80a	97.9b	98.5a	8.61d
NcPc	75.5a	90.98a	54.8a	31.7a	26.41a	110.2ab	97.5a	12.89a
N2P2	63.9a	70.84bcd	52.7a	21.7b	27.83a	117.5a	98.2a	10.03bcd
N4P2	68.0a	81.59abc	54.6a	23.0b	27.54a	128.8a	98.9a	11.55abc
N2P4	74.0a	80.09abc	52.1a	24.5b	26.84a	121.4a	99.0a	11.34abc
N4P4	69.6a	86.09ab	55.3a	25.7b	28.19a	119.7a	98.6a	12.19ab

N2P2 处理外,其余均显著高于空白对照,与常规施肥对照则差异不显著,尤其是 N4P4 处理,达到 12.19 t·hm⁻²,基本与常规化肥对照持平(12.89 t·hm⁻²)。

2.3 污水灌溉下水稻对 N、P 的吸收利用

施肥处理籽粒的 TN 浓度最高,达到 16.1 g·kg⁻¹,显著高于空白组和 N4P4 组,污水组间籽粒 TN 浓度没有显著差异,介于 14.7~16.0 g·kg⁻¹ 之间(表 6)。籽粒 N 积累量介于 0.89~1.47 g·pot⁻¹,施肥处理最高,空白对照最低,不同污水处理间没有显著差异。污水 P 浓度相同下,高 N 污水处理的籽粒 N 积累量略高于低 N 处理;在低 N 污水投入下,污水中 P 浓度的提高略提高了籽粒中 N 的积累,但在高 N 浓度下,P 浓度的增加并未增加籽粒 N 的积累。所有处理的秸秆 N 浓度和秸秆 N 吸收差异均不显著。水稻 TN 积累量介于 1.39~2.14 g·pot⁻¹,N 收获指数介于 64.0%~73.1%,处理间均没有显著差异,但高氮高磷浓度污水处理下水稻的 N 收获指数最高。

收获后水稻籽粒 TP 浓度介于 2.95~3.32 g·kg⁻¹,施肥处理组浓度最高,显著高于 N2P4 处理,与空白

处理及其他污水处理没有显著差异;秸秆 P 浓度介于 1.29~1.54 g·kg⁻¹,各处理间没有显著差异,但施肥组浓度最低。各污水处理中,同样 P 浓度下,籽粒 TP 含量随着污水中 N 浓度的增加而有所增加,但受污水中 P 的浓度影响不明显。

水稻籽粒和秸秆 P 积累量分别介于 0.20~0.30 g·pot⁻¹ 和 0.09~0.10 g·pot⁻¹ 之间。籽粒 P 积累量以施肥处理最高,显著高于空白对照和低氮处理。在污水 P 浓度一致条件下,高 N 浓度污水处理的 P 积累量显著高于低 N 浓度处理。污水中 P 浓度的增加没有显著增加籽粒 P 的积累量。秸秆 P 积累量明显低于籽粒,且各处理间差异均不显著。水稻 TP 积累量介于 0.29~0.40 g·pot⁻¹,与籽粒磷积累量的变化一致,高 N 污水处理与常规施肥处理差异不显著,显著高于空白对照,低 N 污水处理显著低于常规施肥处理,略高于空白对照。P 收获指数介于 69.3%~75.9%,各处理间差异均不显著。

2.4 污水灌溉的 N、P 利用率

各处理下水稻对 N、P 的利用效率参数见表 7。污

表 6 不同处理下水稻籽粒和秸秆中氮磷的含量

Table 6 Nitrogen and phosphorus contents in straw and grain of rice under different treatments

项目 Item	N0P0	NcPc	N2P2	N4P2	N2P4	N4P4
籽粒 TN 含量 Grain TN content/g·kg ⁻¹	14.6c	16.1a	16.0ab	15.9abc	15.1abc	14.7bc
籽粒 N 积累 Grain N uptake/g·pot ⁻¹	0.89c	1.47a	1.13bc	1.30ab	1.21ab	1.27ab
秸秆 TN 含量 Straw TN content/g·kg ⁻¹	8.53a	9.06a	8.70a	7.74a	7.34a	6.79a
秸秆 N 积累 Straw N uptake/g·pot ⁻¹	0.50a	0.67a	0.56a	0.52a	0.56a	0.47a
TN 积累 TN uptake/g·pot ⁻¹	1.39a	2.14a	1.69a	1.82a	1.77a	1.74a
N 收获指数 N harvest index/%	64.0a	68.9a	67.5a	71.3a	69.4a	73.1a
籽粒 TP 含量 Grain TP content/g·kg ⁻¹	3.31a	3.32a	3.01ab	3.29ab	2.95b	3.29ab
籽粒 P 积累 Grain P uptake/g·pot ⁻¹	0.20c	0.30a	0.21c	0.27ab	0.23bc	0.28a
秸秆 TP 含量 Straw TP content/g·kg ⁻¹	1.47a	1.29a	1.35a	1.54a	1.37a	1.31a
秸秆 P 积累 Straw P uptake/g·pot ⁻¹	0.09a	0.10a	0.09a	0.10a	0.10a	0.09a
TP 积累 TP uptake/g·pot ⁻¹	0.29c	0.40a	0.30c	0.37ab	0.33bc	0.38ab
P 收获指数 P harvest index/%	69.3a	75.9a	71.2a	72.0a	70.2a	75.6a

水处理下 N 农学利用率为 21.1~30.5 kg·kg⁻¹,与施肥对照没有显著性差异。在污水 N 浓度相同情况下,高 P 浓度处理的 N 农学利用率均高于低 P 浓度处理;污水在低 N 浓度下,P 浓度的增加使 N 的农学利用率从 21.1 kg·kg⁻¹ 增加到 30.5 kg·kg⁻¹。污水灌溉下 N 吸收利用率 N4P4 最低(36.2%),N2P4 最高(84.6%),与施肥处理差异不显著。同样,污水在低 N 浓度下,高 P 浓度处理的 N 吸收利用率高于低 P 浓度处理。污水灌溉的 N 偏生产力介于 85.5~169.2 kg·kg⁻¹,低 N 浓度污水处理显著高于施肥对照处理(64.8 kg·kg⁻¹);在同样氮素投入下,高 P 浓度污水处理的 N 偏生产力也略高于低 P 浓度污水处理。

由于污水中带入的 P 很低,而水稻对 P 的吸收又较少,污水灌溉处理下 P 的吸收利用率显著高于施肥对照处理,表现为随着污水 N 浓度的增加而显著增加,随着污水 P 浓度的增加而明显下降。农学利用率、吸收利用率及偏生产力三个指标规律一致。

2.5 收获后土壤养分状况

本实验污水带入 N、P 的量较少,水稻生长所需营养很大部分是由土壤提供的,收获后土壤 TN 和 TP 含量均低于种植前土壤,表现出一定的下降趋势。常规施肥处理土壤 TN 和 TP 含量也出现了下降趋势,污水处理与常规化肥处理之间差异并不显著。与常规施肥处理相比,除 N4P2 处理的土壤 TN 浓度略高于常规化肥处理外,其余污水灌溉处理的土壤 N、P 浓度都略低,土壤库损失有所升高,其中 N2P4 处理损失的 N 素最多,达到 3.85 g·pot⁻¹,N2P2 损失的 P 素最高,达到 1.19 g·pot⁻¹(表 8),但与施肥组没有显著差异。

对于土壤 N 库来说,在污水灌溉中 P 浓度一致的情况下,污水中 N 浓度越高,收获后土壤 N 浓度也越高,土壤库损失的 N 也越少。当污水 N 浓度一定时,收获后土壤 N 浓度随污水中 P 浓度的升高而下降,即污水 P 浓度越高,土壤 N 库损失也越多。对于

表 8 不同处理下收获后土壤养分含量

Table 8 Nutrient contents of soil after harvest under different treatments

处理 Treatment	养分浓度 Concentration of TN,TP in soil/ mg·g ⁻¹		土壤库损失量 Changes of soil N,P pool/ g·pot ⁻¹	
	TN	TP	TN	TP
供试土壤 Original soil	1.52	0.587	—	—
N0P0	1.41a	0.548a	2.03a	0.79a
NcPc	1.44a	0.550a	1.53a	0.74a
N2P2	1.37a	0.528a	3.07a	1.19a
N4P2	1.45a	0.532a	1.27a	1.11a
N2P4	1.33a	0.533a	3.85a	1.09a
N4P4	1.35a	0.545a	3.21a	0.85a

土壤 P 库来说,收获后土壤 P 浓度随污水中 P 浓度的增加而增加,随污水中 N 浓度的提高而升高,即污水中 N、P 浓度越高,土壤 P 库损失越少。

3 讨论

生活污水中含有 N、P 等营养元素,而 N、P 对于水稻的生长发育必不可少。在施肥条件下,污水回用并未减少水稻的产量^[25],在不施肥条件下,高负荷污水回用情况下水稻产量也无显著降低^[26],说明生活污水中 N、P 能够被水稻吸收利用,对水稻产量的保持起重要作用。本研究结果表明,不施化肥条件下污水 N、P 浓度对于水稻生长和产量有显著的影响。污水灌溉处理在生育前期的株高明显低于化肥处理,但对水稻成熟期的株高影响并不显著;污水灌溉处理的分蘖数及穗数显著低于化肥对照,和前人研究得出的污水灌溉减少了分蘖一致^[27]。这主要是因为污水灌溉 N、P 带量仅为施肥对照处理投入氮肥的 32.1%~64.1%,磷肥的 11.6%~23.2%。水稻分蘖期是第一个需肥高峰期,化肥对照处理中氮肥的施入为水稻分蘖提供了养分来源,促进了水稻分蘖的发生,而生活污水灌溉下 N 浓度较低(图 1),不能满足分蘖期大量的养分需

表 7 不同处理间水稻的 N、P 利用效率

Table 7 Comparison of N and P use efficiency between different treatments

处理 Treatment	N 农学利用率 AEN/kg·kg ⁻¹	N 吸收利用率 REN/%	N 偏生产力 PFPN/kg·kg ⁻¹	P 农学利用率 AEP/kg·kg ⁻¹	P 吸收利用率 REP/%	P 偏生产力 PFPP/kg·kg ⁻¹
NcPc	26.6a	72.2a	64.8b	69.7c	71.7b	170.0c
N2P2	21.1a	62.6a	149.7a	157.4bc	127.3b	1 114.1a
N4P2	21.8a	45.0a	85.5b	326.4a	403.2a	1 283.1a
N2P4	30.5a	84.6a	169.2a	107.3bc	124.2b	596.7b
N4P4	26.5a	36.2a	90.3b	188.1b	198.0b	641.3b

求,从而导致分蘖和最终穗数显著低于化肥对照处理,仅为化肥对照处理的68.5%~81.1%。污水灌溉处理下,后期持续的养分输入,使得分蘖成穗率较高,而且干物质转运率高,因此污水灌溉处理的粒重、穗粒数和成穗率均高于化肥对照组,从而略微抵消了穗数的不足,使得污水灌溉处理最终的产量并没有显著低于化肥对照处理。这也说明,污水灌溉要保证水稻高产,在肥料运筹方面,必须补施一定的分蘖肥,保证前期高产架子的形成。薛利红等^[18]和马资厚等^[28]的研究结果也表明,污水灌溉下在分蘖期配施少量的化肥,可以保证水稻高产。污水灌溉处理后后期肥料较多(穗肥到收获期污水带入总养分的64%),也与施氮或低氮投入下肥料后移能够增加产量的相关研究结论较为相符^[29]。可见,合理的减量施肥配合污水回用能够保证产量不减少,但不同污水浓度下适宜的化肥用量还需进一步实验研究。

与施肥处理相比,污水灌溉均提高了水稻对N、P的利用效率。相对于施肥处理,污水投入的N、P含量较少,不能完全满足作物生长需求,促进了作物对污水及土壤中N、P的吸收利用。此外,污水灌溉下田面水N、P浓度显著低于常规施肥处理,相应的氨挥发、径流等损失也相对较少,因此利用率要高于化肥处理^[30]。污水灌溉有点类似于水肥一体化,由于养分分散持续投入,与常规化肥处理相比,稻田田面水和土壤中N含量不会出现明显的峰值,从而可有效降低氨挥发等损失^[28,31],提高肥料利用率。另外,水稻土因为长期处于淹水环境,土壤氧化还原电位的降低能够导致 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,使Fe结合态磷释放到土壤溶液中,所以P肥有效性较高^[32-34]。生活污水带入的溶解有机质在矿化时可能进一步降低土壤的氧化还原电位,从而使P的活性进一步增强。由于P肥在高浓度容易形成沉淀,而低浓度下大多以吸附态存在,生物有效性较高^[35]。本研究也证明高氮高磷处理籽粒产量与常规化肥没有显著差异。所以,生活污水灌溉下水稻磷肥的投入也可适当降低。此外,生活污水中溶解有机质的投入,对土壤微生物功能和群落有改善的作用,能够有效增加土壤微生物多样性^[36],也能够促进土壤对水稻N、P的供应。收获后土壤中TN、TP均有小幅下降,主要是因为本研究投入的TN、TP远小于常规施肥处理。但本研究也发现,常规化肥处理收获后土壤TN、TP浓度同样有所下降,污水灌溉处理与常规化肥处理之间差异并不显著。这也验证了前人得出的太湖流域水稻仅靠化肥投入难以维持稻田土壤肥

力的结果^[37],也表明在污水灌溉条件下,需要配合施用一定量的化肥,甚至有机肥来保持土壤肥力。

大量研究表明,N、P肥配施对于作物增产具有重要作用^[38],即在合理的施肥条件下,一种肥料含量较低的情况下,另一种肥料的增加能够促进产量^[39]。同样,污水灌溉中污水的N、P投入也存在明显的交互作用。本研究下,N、P浓度增加提高了粒重,尽管并未显著增加籽粒中N、P浓度,但籽粒N、P积累量有所增加。在P浓度相同条件下,高N处理提高了籽粒重和产量;在N浓度相同条件下,高P也提高了籽粒重和产量。说明N、P存在着正交互作用。水稻对污水中N的吸收利用与污水中的N、P浓度密切相关,P浓度的增加不同程度地促进了N农学利用率、吸收利用率和偏生产力。另外,污水中的K浓度很高,整个生长期生活污水带入的K相当于施K肥(以 K_2O 计) $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,因此污水灌溉带入的K对水稻生长的作用也不容忽视^[40-41]。

污水中N、P的浓度对于收获后土壤N、P浓度也有一定的影响。首先,根据实验结果,在污水提供的P素一定的条件下,污水带入越多的N,收获后土壤N浓度越高,土壤提供的N就相对减少;在污水提供N素一定的条件下,污水带入越多的P,收获后土壤P浓度也越高,土壤提供的P也相对减少。对于同一元素,生活污水和土壤共同供给植物,污水中N、P的浓度越高,或者说供给量越大,收获后土壤N、P的浓度下降越少,这才能保证土壤肥力在不施肥的情况下能够保持平衡和可持续利用。其次,在污水P浓度一致的条件,下,N浓度越高,收获后土壤P浓度没有显著减小,即N的增加并未促进土壤P的供给;在污水中N浓度一定的条件下,污水中P浓度越高,收获后土壤N浓度越小,即土壤为作物提供更多的N。这表明污水灌溉条件也要通过P肥来保证P的供给,促进水稻对N的吸收利用。

4 结论

在正常灌溉与不施化肥条件下,污水TN、TP浓度与水稻的生长指标和产量密切相关,污水灌溉处理可明显提高穗粒数、千粒重、结实率和分蘖成穗率,但由于分蘖期供肥不足,分蘖数和最终成穗数显著低于常规化肥处理,最终导致产量低于常规化肥处理。当污水中TN浓度达 $20\sim 25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP浓度达 $1.0\sim 1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,不施任何化肥条件下水稻产量即可达到常规化肥处理的95%,两者差异不显著,此时污水灌溉

中带入的N仅为常规施肥处理N用量的64.1%和P肥用量的23.2%。

污水灌溉提高了水稻的N、P利用效率。水稻对污水中N的吸收利用与污水中的N、P浓度密切相关,P浓度的增加促进了N的农学利用率、吸收利用率和偏生产力的提高。

污水灌溉明显降低了水稻施肥期的田面水N、P浓度,减少了径流损失的风险。但不施肥条件下会造成水稻分蘖不足,从而影响产量。因此,在实践应用时应在分蘖期补施一定的化肥或者在分蘖期采用更高N、P浓度的污水进行灌溉。稻田生活污水灌溉下保证高产可持续的N、P肥适宜运筹仍有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.
- [2] WHO. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2: Wastewater use in agriculture[R]. 2006.
- [3] Agrafioti E, Diamadopoulos E. A plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 105: 57-64.
- [4] 李中阳, 樊向阳, 齐学斌, 等. 再生水灌溉对不同土壤磷形态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 232-235, 258.
- [5] Vergine P, Lonigro A, Rubino P, et al. Sustaining irrigated agriculture in Mediterranean countries with treated municipal wastewater: A case study[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 89: 773-779.
- [6] Alrajhi A, Beecham S, Bolan N S, et al. Evaluation of soil chemical properties irrigated with recycled wastewater under partial root-zone drying irrigation for sustainable tomato production[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 161: 127-135.
- [7] 孟春香, 郭建华, 韩宝文. 污水灌溉对作物产量及土壤质量的影响[J]. 河北农业科学, 1999, 3(2): 15-17.
- [8] 黄占斌, 苗战霞, 侯利伟, 等. 再生水灌溉时期和方式对作物生长及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2257-2261.
- [9] 焦志华, 黄占斌, 李勇, 等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 319-323.
- [10] 姜勇, 梁文举, 张玉革, 等. 污灌对土壤重金属环境容量及水稻生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 124-127.
- [11] 辛术贞, 李花粉, 苏德纯. 我国污灌污水中重金属含量特征及年代变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2271-2278.
- [12] 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.
- [13] 陈红燕, 袁旭音, 李天元, 等. 不同污染源对水稻土及水稻籽粒的重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 684-690.
- [14] Kang M S, Kim S M, Park S W, et al. Assessment of reclaimed wastewater irrigation impacts on water quality, soil, and rice cultivation in paddy fields[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2007, 42(4): 439-445.
- [15] 李松, 梁新强, 王飞儿, 等. 稻田湿地处理农村生活污水除磷试验研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 75-79.
- [16] 袁俊吉, 马永玉, 周鑫斌, 等. 稻田生态系统对污水中无机态氮的消纳[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(9): 7-14.
- [17] 袁俊吉, 马永玉, 蒋先军, 等. 模拟稻田生态系统对农村污水中磷的消纳[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 28-32, 67.
- [18] 薛利红, 杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果[J]. 环境科学研究, 2015, 28(1): 117-124.

- [19] Qin C, Liu H Z, Liu L, et al. Bioavailability and characterization of dissolved organic nitrogen and dissolved organic phosphorus in wastewater effluents[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 47–53.
- [20] 中华人民共和国农业部. NY/T 2017—2011 植物中氮、磷、钾的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Ministry of Agriculture of PRC. NY/T 2017—2011 Determination of nitrogen, phosphorus and potassium in plants[S]. Beijing: China Standards Press, 2011.
- [21] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 74–83.
LU Ru-kun. Agro-chemical analysis of soils[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 74–83.
- [22] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74(3): 562–564.
- [23] Mosier A, Syers J K, Freney J R. Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment[M]. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2004.
- [24] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻麦轮作系统不同氮肥管理模式对麦季氮素利用与流失的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2475–2482.
YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Nitrogen use efficiency and loss from runoff and leaching in wheat season with rice-wheat rotation system under different nitrogen management methods in Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2475–2482.
- [25] Lal K, Minhas S, Yadav R K. Long-term impact of wastewater irrigation and nutrient rates; II. Nutrient balance, nitrate leaching and soil properties under peri-urban cropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 156: 110–117.
- [26] 坎塔瓦尼奇库尔 S, 邱训平(编译). 生活污水用于人工湿地的水稻种植实验[J]. 水利水电快报, 2013, 34(7): 27–29.
KANTAWANIKUR S, QIU Xun-ping. Constructed wetland experiments for rice cultivation with domestic sewage[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2013, 34(7): 27–29.
- [27] 黄俊友, 胡晓东, 俞青荣. 污水灌溉对水稻生长影响的实验研究[J]. 农机化研究, 2006, 28(1): 177–179.
HUANG Jun-you, HU Xiao-dong, YU Qing-rong. Effects of sewage irrigation on growth of paddy[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, 28(1): 177–179.
- [28] 马资厚, 薛利红, 潘复燕, 等. 太湖流域稻田对 3 种低污染水氮的消纳利用及化肥减量效果[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 570–576.
MA Zi-hou, XUE Li-hong, PAN Fu-yan, et al. Utilization of nitrogen in wastewater low in pollution degree in paddy fields and its effect on reducing fertilizer application in Tai Lake region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(4): 570–576.
- [29] 薛利红, 李刚华, 侯朋福, 等. 太湖地区稻田持续高产的减量施氮技术体系研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 729–736.
XUE Li-hong, LI Gang-hua, HOU Peng-fu, et al. Nitrogen reduction technique system for sustaining high yield of paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 729–736.
- [30] 朱兆良. 农田中氮肥的损失和对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1–6.
ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1–6.
- [31] 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 等. 生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3963–3970.
XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, et al. Effect of straw incorporation and domestic sewage irrigation on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10): 3963–3970.
- [32] Willett I. Causes and prediction of changes in extractable phosphorus during flooding[J]. *Soil Research*, 1989, 27(1): 45–54.
- [33] de Mello J W V, Barrón V, Torrent J. Phosphorus and iron mobilization in flooded soils from Brazil[J]. *Soil Science*, 1998, 163(2): 122–132.
- [34] 曹宁, 曲东. 水稻土中铁还原与无机磷有效性的关系[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 504–507.
CAO Ning, QU Dong. The relationship between iron oxides reduction and inorganic phosphorus availability in four paddy soils of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3): 504–507.
- [35] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 磷在土壤中有有效性的衰减[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 323–329.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan, QIAN Cheng-liang. Decline of phosphorus availability with time in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 323–329.
- [36] 马资厚. 环境中氮对稻田化肥的替代效应及其生态环境影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
MA Zi-hou. Chemical fertilizer substitution effect of the nitrogen in environment and its ecological and environmental impact study[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [37] Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(11): 115010.
- [38] Tan S, Anh T N, Van Luat N, et al. Yield trends of a long-term NPK experiment for intensive rice monoculture in the Mekong River Delta of VietNam[J]. *Field Crops Research*, 1995, 42(2): 101–109.
- [39] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 645–653.
WANG Wei-ni, LU Jian-wei, HE Yu-qing, et al. Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(6): 645–653.
- [40] 陈进红, 郭恒德, 毛国娟, 等. 杂交粳稻超高产群体干物质生产及养分吸收利用特点[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4): 271–275.
CHEN Jin-hong, GUO Heng-de, MAO Guo-juan, et al. Characteristics of dry matter production and nutrient uptake and utilization of super high yielding japonica hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 15(4): 271–275.
- [41] Witt C, Dobermann A, Abdulrachman S, et al. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63(2): 113–138.