

规模化猪场处理废水与化肥配施 对小麦氮素吸收利用的影响

陶晓婷¹, 朱正杰¹, 高 威¹, 缪翠云², 王远玲¹, 黄丽芬¹, 庄恒扬^{1*}, 陆建飞¹

(1.扬州大学农学院 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; 2.上海市上海农场, 江苏 大丰 224151)

摘 要:规模化猪场处理废水富含植物营养物质,应用于作物生产可实现减少化肥用量和保护环境的双赢。本研究通过田间试验,研究了越冬期不同用量养猪处理废水(30、60、90 m³·hm⁻²和 120 m³·hm⁻²)和穗期施氮水平(0、30、60 m³·hm⁻²和 90 m³·hm⁻²)对小麦氮素吸收利用的影响。结果表明,猪场处理废水对小麦具有较好的氮素养分供应作用,拔节期、抽穗期、成熟期叶片 SPAD 值、植株含氮率都随着污水施用量增加而提高。废水施用 60 m³·hm⁻²以上穗期配施氮 90 kg·hm⁻²的处理花后氮素转移效率、氮素收获指数、氮素籽粒生产效率明显下降。越冬期施用养猪场处理废水 60~120 m³·hm⁻²替代穗期施氮 30~60 kg·hm⁻²,可以满足不同时期小麦氮素营养的需求,并且有较高的氮素积累量和利用效率。

关键词:养猪场;处理废水;农田利用;小麦;氮素营养;吸收利用

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)03-0555-07 doi:10.11654/jaes.2014.03.023

Nitrogen Uptake and Utilization in Wheat as Influenced by Pig Slurry from Large-scale Pig Farm

TAO Xiao-ting¹, ZHU Zheng-jie¹, GAO Wei¹, MIAO Cui-yun², WANG Yuan-ling¹, Huang Li-feng¹, ZHUANG Heng-yang^{1*}, LU Jian-fei¹

(1.Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.Shanghai Farm of the Bright Food(Group)CO., LTD, Dafeng 224151, China)

Abstract: Pig slurry contains rich plant nutrients and can be applied in crop production, thus reducing uses of chemical fertilizers and protecting the environment. A field experiment was conducted in Dafeng, Jiangsu Province, to evaluate the effects of pig slurry applications combined with chemical fertilizer on nitrogen uptake and use efficiency in wheat. Zhengmai9023, a widely cultivated wheat variety in the south of Huaihe River, was employed. The pig slurry used in the experiment contained 1000 mg·L⁻¹ of total nitrogen, 540 mg·L⁻¹ of available nitrogen and 779 mg·L⁻¹ of extractable phosphorus. The concentration of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, As, and Hg in the pig slurry was 0.246 mg·L⁻¹, 0.577 mg·L⁻¹, 0.041 mg·L⁻¹, <5.0×10⁻⁴ mg·L⁻¹, 0.063 mg·L⁻¹, 0.028 3 mg·L⁻¹, and <5×10⁻⁴ mg·L⁻¹, respectively, conforming to standards for irrigation water quality. The leaf SPAD values, nitrogen contents, and nitrogen accumulation in wheat plants at jointing, heading and maturing stages were increased with rates of pig slurry. Applying pig slurry at 60~120 m³·hm⁻² during overwintering period instead of applying 30~60 kg N·hm⁻² of chemical fertilizer at panicle formation stage could meet nitrogen nutrition demand of wheat with higher nitrogen accumulation and utilization efficiency. However, application of pig slurry over 60 m³·hm⁻² followed by 90 kg·hm⁻² chemical fertilizer at panicle formation stage significantly reduced nitrogen use efficiency.

Keywords: pig slurry; wheat; nitrogen nutrition; uptake and utilization

随着我国规模化养猪场迅速发展,排放的粪尿废水不断增加,并导致严重的环境污染,这成为规模化养猪可持续发展亟待解决的问题^[1-2]。养猪场处理废水

含有较丰富的有机质和 N、P、K 等多种植物营养元素,可以作为肥料利用,若排放到环境中则会造成养分的巨大浪费和邻近水体的富营养化^[3-4]。以循环农业理论为指导,建立养猪场-农田作物生产复合系统,使养殖废水资源化利用和处理利用运行费用低廉化,实现农业两大产业的耦合发展和生态经济的双赢,是我国未来规模化养殖的发展方向,也是未来农业的发展方向^[1]。规模化养殖和农田种植实现耦合,需要进行统一的

收稿日期:2013-12-31

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目;江苏省科技支撑计划项目(BE2012433)

作者简介:陶晓婷(1989—),女,江苏昆山人,硕士研究生,主要从事生态循环农业研究。E-mail: 1058973951@qq.com

* 通信作者:庄恒扬 E-mail: zhy7979356@sina.com

规划、建设和管理,这在一般农区土地分散经营的情况下很难实施。我国农场众多,人口密度小、相对偏僻、环境容纳量大,具有发展规模化养殖和建立种养循环系统的有利条件,有可能成为我国规模化种养结合的现代循环农业的先行区域。小麦、水稻是江苏省主要的大田作物,因此,研究养猪场处理废水(或沼水)在水稻、小麦田间的施用技术是实施该区域种养结合循环农业的基本需要。关于养殖场处理废水在小麦上的施用技术已有一些研究^[5-9],但是研究中采用的施用方法往往难以在农场规模化生产的条件下实施,再加上江苏沿海农场土壤及地下水含盐分较高,以灌溉的方式施用处理废水易导致土壤返盐,因而不宜采用。本研究以位于江苏沿海地区大丰市境内的上海农场为研究对象,以适宜该地区农场规模生产条件下的养猪场处理废水施用方法为前提,通过田间试验,研究养猪场不同用量处理废水和氮化肥用量的组合处理对小麦氮素吸收利用的影响,探讨实现小麦高产优质高效的处理废水施用技术,为规模化养猪-农田种植循环农业模式的推广应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2009—2010年度在上海农场第五生产队

条田中进行。试验土壤为轻壤土,土壤有机质含量 $18.98\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $75.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $26.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $217\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。处理废水为养猪场粪尿和冲洗水经过充分发酵的废水,含全氮 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、速效氮 $540\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、速效磷 $779\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由于农场处理废水数量大,施用时间长,施用的适合时间为小麦越冬期,因此试验设计处理废水在越冬期施用。越冬期施处理废水 30 、 60 、 90 、 $120\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 与穗期施氮 0 、 30 、 60 、 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 形成16个试验处理,再加上无追肥和常规施肥处理共18个处理,如表1。各处理在统一基施 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷酸一铵、 $187.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素(常规施肥下小麦基肥施用方案)基础上进行。小区长 5.5 m ,宽 3.4 m ,面积 18.7 m^2 。试验3次重复,随机区组设计。小麦品种为郑麦9023,播种量 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,行距 23.3 cm ,于2009年11月3日播种,2010年6月7日收获,处理废水在2010年1月12日人工浇施,穗肥分两次施用,第一次为拔节肥,在2010年3月20日施用,第二次为孕穗肥,在4月15日施用。

1.2 测定项目及方法

干物重测定:拔节期、抽穗期、成熟期各取一次,拔节期取样 50 cm 行长,抽穗期和成熟期取50个左右代表性茎穗。取样后,去根,分为植株、籽粒,放入烘箱中烘干。烘干后称其干物重,粉碎后作植株养分含量测定用。

表1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理 Treatments	越冬期废水用量 Slurry at overwintering stage/ $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$	穗期施化肥氮 Nitrogen application at panicle stage/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$			说明 Illustration
		总量	拔节肥	孕穗肥	
T(0 0 0)	0	0	0	0	基础评价
T(0 90 30)	0	120	90	30	大田对照
T(30 0 0)	30	0	0	0	低量处理废水施用,无化肥施用
T(30 0 30)	30	30	0	30	低量处理废水施用,低量化肥施用
T(30 30 30)	30	60	30	30	低量处理废水施用,中量化肥施用
T(30 60 30)	30	90	60	30	低量处理废水施用,高量化肥施用
T(60 0 0)	60	0	0	0	中量处理废水施用,无化肥施用
T(60 0 30)	60	30	0	30	中量处理废水施用,低量化肥施用
T(60 30 30)	60	60	30	30	中量处理废水施用,中量化肥施用
T(60 60 30)	60	90	60	30	中量处理废水施用,高量化肥施用
T(90 0 0)	90	0	0	0	较高量处理废水施用,无化肥施用
T(90 0 30)	90	30	0	30	较高量处理废水施用,低量化肥施用
T(90 30 30)	90	60	30	30	较高量处理废水施用,中量化肥施用
T(90 60 30)	90	90	60	30	较高量处理废水施用,高量化肥施用
T(120 0 0)	120	0	0	0	高量处理废水施用,无化肥施用
T(120 0 30)	120	30	0	30	高量处理废水施用,低量化肥施用
T(120 30 30)	120	60	30	30	高量处理废水施用,中量化肥施用
T(120 60 30)	120	90	60	30	高量处理废水施用,高量化肥施用

叶片 SPAD 值:用 SPAD-502 仪分别于拔节期、抽穗期和灌浆中期测定。拔节期测定展开叶中部,抽穗期和灌浆中期测定剑叶中部。每个小区测定 20 张叶片计算平均值。

植株含氮率:采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮-蒸馏法测定。

1.3 数据分析方法

植株累积吸氮量=某一生育期地上部植株含氮率 $\times$ 该时期地上部植株干物质积累量

花后营养器官氮素转移量=开花期地上部植株累积吸氮量—成熟期地上部植株(不包括籽粒)累积吸氮量

花后营养器官氮素转移率(%)=花后营养器官氮素转移量/开花期地上部植株累积吸氮量 $\times 100$

氮素收获指数=收获期籽粒积累的氮量/地上部植株(包括籽粒)氮素积累量

氮素籽粒生产效率=籽粒产量/收获期植株(包括籽粒)氮素积累量

所得结果以 SPSS 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对小麦叶片 SPAD 值的影响

叶片 SPAD 可以反映植株氮素营养状况。分别在拔节期(3 月 20 日)、抽穗期(5 月 4 日)和灌浆中期(5 月 18 日)测定剑叶 SPAD 值并进行差异显著性分析,结果见表 2。

拔节期穗肥尚未使用,叶片 SPAD 值仅受越冬期废水施用量影响。废水施用量 30、60、90、120 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的叶片 SPAD 值分别为 47.75、48.7、49.02、49.74(表 2),SPAD 值随废水施用量增加而增加;在抽穗期,没有追肥的处理 T(0 0 0)SPAD 值最小,显著低于其他处理。废水施用量为 120 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 穗期施氮 90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理 SPAD 值最大,但与常规施肥处理 T(0 90 30)无显著差异。在各个废水施用量的情况下,除了个别处理 T(90 0 30)外,穗期施氮 0、30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理 SPAD 均与 T(0 90 30)有显著差异,而穗期施氮 60、90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理则与 T(0 90 30)无显著差异,说明越冬期废水施用必须与一定量的穗期施氮相结合,越冬期施用废水代替穗期施氮 30~60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可以使小麦在抽穗期达到常规施肥的氮素营养状态;在灌浆中期,不同处理 SPAD 值表现与抽穗期有一定差异,除了废水施用量 30 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施氮 0、30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理以及废水施用 60 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 穗期不施氮处理

SPAD 与 T(0 90 30)有显著差异外,其他处理与 T(0 90 30)均没有显著差异。处理 T(30 0 30)、T(90 0 0)、T(120 0 0)、T(120 0 30)抽穗期与 T(0 90 30)差异显著,而在灌浆中期转变为与 T(0 90 30)不显著,显示废水处理氮素供应有较强的后劲。

表 2 不同处理对小麦叶片 SPAD 值的影响
Table 2 Effects of different treatments on SPAD values
in wheat leaves

处理 Treatments	拔节期 Jointing stage		抽穗期 Heading stage		灌浆中期 Middle filling stage	
	SPAD 值	差异 显著性	SPAD 值	差异 显著性	SPAD 值	差异 显著性
T(0 0 0)	47	cd	42.2	f	34.53	c
T(0 90 30)	47.03	cd	50.47	ab	46.17	ab
T(30 0 0)	46.93	cd	44.53	e	32.4	c
T(30 0 30)	48.9	abc	47.3	cd	40.43	b
T(30 30 30)	46.8	d	49.23	abc	44.27	ab
T(30 60 30)	48.37	bcd	49.9	ab	44.33	ab
T(60 0 0)	47.97	bcd	44.83	e	34.83	c
T(60 0 30)	48.53	abcd	48.27	bc	43.37	ab
T(60 30 30)	49.43	ab	48.8	abc	43.5	ab
T(60 60 30)	48.87	abc	50.4	ab	45.67	ab
T(90 0 0)	49.2	ab	45.9	de	42.27	ab
T(90 0 30)	48.9	abc	48.67	abc	45.07	ab
T(90 30 30)	48.97	abc	49.4	abc	45.53	ab
T(90 60 30)	49	abc	50.03	ab	45.6	ab
T(120 0 0)	49.93	ab	45.5	de	43.87	ab
T(120 0 30)	49.4	ab	47.2	cd	43.4	ab
T(120 30 30)	50.5	a	49.37	abc	46	ab
T(120 60 30)	49.13	ab	51.07	a	47.57	a

注:同列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

2.2 对小麦植株含氮率的影响

在拔节期,小麦植株的含氮率介于 18.23~29.05 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,由于穗期氮素化肥在拔节期尚未施用,小麦植株含氮率只受越冬期废水施用量影响。废水施用量 0、30、60、90、120 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理植株含氮率平均值分别为 21.02、22.17、25.09、27.01、26.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,植株含氮率随废水施用量增加而提高(表 3)。

在抽穗期,小麦植株的含氮率介于 8.82~17.47 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。在总体上表现出在相同废水施用量下,植株含氮率随穗期施氮量增加而提高;而在穗期施氮量相同的情况下,则随着越冬期废水施用量增加而增加。除个别处理[T(90 0 30)]外,在各个废水施用量情况下,穗期不施氮的处理植株含氮率都显著低于 T(0 90 30),表明穗期配施氮肥对满足后期营养是必要的。在废水施用量达到 60 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,穗期配施 60

kg·hm⁻² 氮素化肥, 可以使抽穗期植株含氮率不低于 T(0 90 30), 说明用废水可以替代穗期氮 60 kg·hm⁻²。进一步对废水施用量(X_1)、穗期施氮(X_2)与抽穗期小麦植株的含氮率(SLNC_H)进行多元回归分析, 结果可用以下方程表示:

$$SLNC_H=10.139+0.014X_1+0.045X_2 \quad (R^2=0.752)$$

在成熟期, 小麦茎叶的含氮率介于 2.89~6.96 g·kg⁻¹ 之间, 总体上在相同废水施用量下随着穗期施氮量的增加而增加, 但在相同穗期施氮量情况下, 随废水施用增加而变化的趋势不明显。废水施用量 60 m³·hm⁻² 穗期配施氮 90 kg·hm⁻² 处理、废水施用 120 m³·hm⁻² 穗期配施氮 60 或 90 kg·hm⁻² 显著高于常规施肥, 显示较高的废水施用量穗期配施较高的氮肥茎叶中氮素过量保持, 不利于正常成熟和提高氮素生产效率。对废水施用量(X_1)、穗期施氮(X_2)与成熟期小麦茎叶的含氮率(SLNC_M)进行多元回归分析, 结果可用以下方程表示:

$$SLNC_M=2.87+0.01X_1+0.02X_2 \quad (R^2=0.626)$$

小麦籽粒的含氮率介于 13.32~18.81 g·kg⁻¹ 之间, 总体上在相同废水施用量下随着穗期施氮量的增加而增加, 但在相同穗期施氮量情况下, 随废水施用增加而变化的趋势不明显。对废水施用量(X_1)、穗期

施氮(X_2)与抽穗期小麦籽粒的含氮率(GNC_M)进行多元回归分析, 结果可用以下方程表示:

$$GNC_M=14.125+0.005X_1+0.029X_2 \quad (R^2=0.502)$$

2.3 对小麦植株累积吸氮量的影响

在拔节期, 由于穗期施氮尚未发生, 小麦植株只受废水施用量影响。由图 1 可以看出, 累积吸氮量随废水施用量增加呈增加趋势, 废水施用量 60 m³·hm⁻² 及以上的处理累积吸氮量显著高于废水施用量 30 m³·hm⁻² 的处理, 而废水施用量 30 m³·hm⁻² 处理与不施废水处理没有显著差异。图 2 显示, 在抽穗期, 较低废水用量(30 或 60 m³·hm⁻²)处理累积吸氮量总体上呈随穗期施氮量增加而呈增加趋势, 而在较高废水用量(90 或 120 m³·hm⁻²), 累积吸氮量随施氮量增加而先增加后下降。废水施用 30 m³·hm⁻² 穗期配施氮 60 或废水施用 60 m³·hm⁻² 以上配施氮肥 30 kg·hm⁻² 的小麦累积吸氮量就可以达到或超过常规施肥水平。图 3 显示, 在相同废水施用量情况下, 成熟期茎叶累积吸氮量随穗期施氮量增加而增加, 在各种废水施用量下穗期施氮 60 kg·hm⁻² 处理累积吸氮量达到或超过

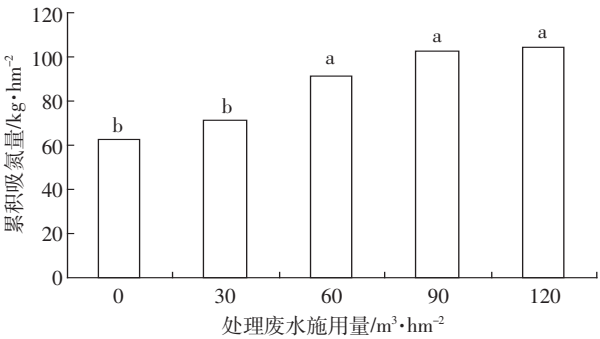


图 1 不同处理对拔节期累积吸氮量的影响
Figure 1 Nitrogen accumulation of wheat at jointing stage under different treatments

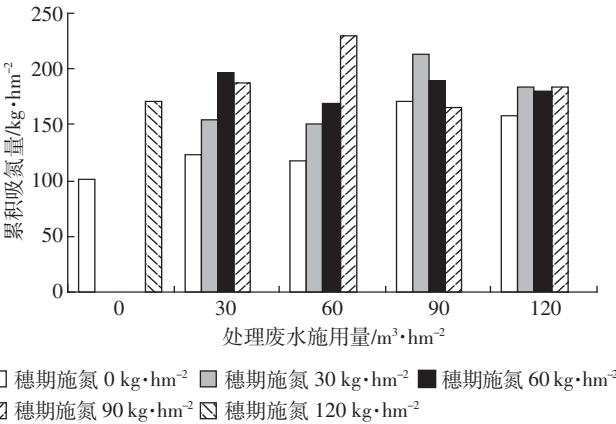


图 2 不同处理对小麦抽穗期累积吸氮量的影响
Figure 2 Nitrogen accumulation of wheat at heading stage under different treatments

表 3 不同处理小麦在不同时期的含氮率(g·kg⁻¹)

Table 3 Nitrogen concentrations of above-ground parts of wheat under different treatments

处理 Treatments	拔节期植株 Jointing stage	抽穗期植株 Heading stage	成熟期 Maturity stage	
			茎叶 Stems and leaves	籽粒 Grains
T(0 0 0)	18.23e	8.82e	2.89g	13.32e
T(0 90 30)	23.8bcd	14.17bc	4.29def	15.62bcde
T(30 0 0)	18.54e	10.5de	3.6fg	13.79de
T(30 0 30)	25.3abcd	12.07cd	3.64fg	16.11bcd
T(30 30 30)	21.99de	14.09bc	5.1cde	17.64abc
T(30 60 30)	22.83cde	15.63ab	4.52def	17.29abc
T(60 0 0)	25.54abcd	10.73de	4.03efg	15.3bcde
T(60 0 30)	24.4abcd	11.75d	3.71fg	14.56de
T(60 30 30)	23.95bcd	13.85bc	4.62cdef	17.35abc
T(60 60 30)	26.46abcd	17.47a	6.96a	18.81a
T(90 0 0)	26.02abcd	12.27cd	3.65fg	15.44bcde
T(90 0 30)	29.05a	14.05bc	4.3def	14.52de
T(90 30 30)	25.46abcd	13.9bc	4.32def	15.21cde
T(90 60 30)	27.49abc	14.03bc	5.25cd	16.16bcd
T(120 0 0)	26.52abcd	11.69d	3.84fg	13.9de
T(120 0 30)	24.24abcd	12.6cd	3.75fg	14.27de
T(120 30 30)	26.42abcd	14.18bc	5.73bc	17.55abc
T(120 60 30)	28.16ab	14.88b	6.63ab	17.8ab

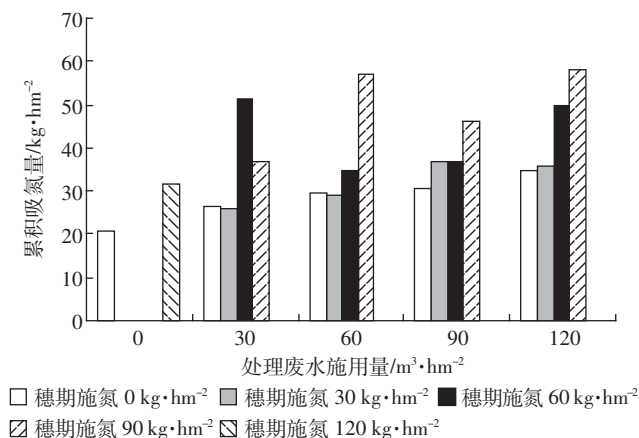


图3 不同处理对小麦成熟期茎叶累积吸氮量的影响

Figure 3 Nitrogen accumulation of stems and leaves of wheat at maturing stage under different treatments

常规施肥处理,其中施氮量 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理大大超过常规施肥处理,但在相同穗期施氮量情况下随废水施用量的变化趋势不明显。籽粒的累积吸氮量与茎叶表现出相近的趋势(图4)。

2.4 对小麦植株氮素转移与利用效率的影响

植株对吸收氮素的转移和利用效率可以通过花后氮素转移率、氮素收获指数、氮素籽粒生产效率等指标加以评价。结果表明(图5),花后氮素转移率在相同废水施用量下,总体上随着穗期施氮量的增加而下降,但穗期不施氮的处理转移效率不是最高,而是穗期配施 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理最高,表明越冬期施用废水穗期配施适量的氮有利促进花后氮素的转移。在废水施用 $60 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上配施氮 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理花后氮素转移效率明显降低。

不同处理的氮素收获指数结果如图6所示。总体上,废水施用 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 穗期配施氮 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以

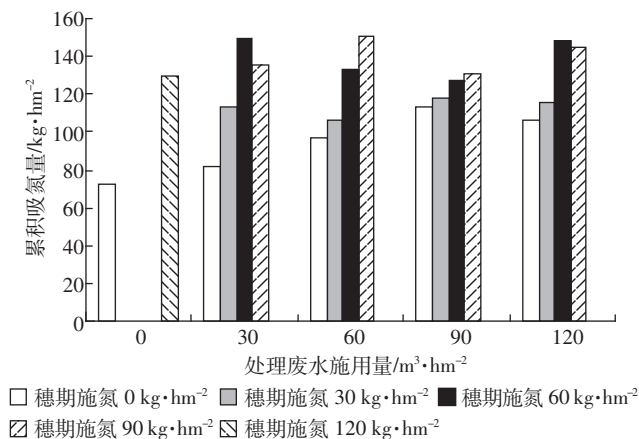


图4 不同处理对小麦成熟期籽粒累积吸氮量的影响

Figure 4 Nitrogen accumulation of wheat grains at maturing stage under different treatments

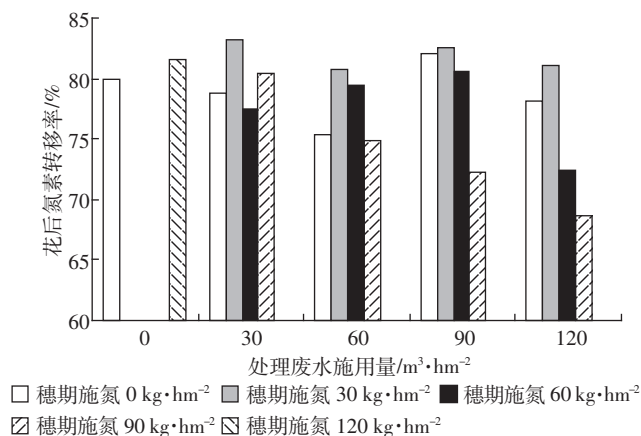


图5 不同处理小麦花后氮素转移率

Figure 5 Translocation ratios of nitrogen in vegetable parts of wheat after anthesis under different treatments

上、施用废水 $60 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 穗期配施氮 30 或 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、废水施用 $90 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 穗期施氮不超过 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可以达到与常规施肥相近的氮素收获指数。废水施用量 $60 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上穗期配施氮 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮素收获指数明显下降。

不同处理的氮素籽粒生产效率结果见图7。总体上,在相同废水施用量下,氮素籽粒生产效率随穗期施氮量增加而下降。在各个废水施用量下穗期施氮 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时氮素籽粒生产效率与常规施肥相近。

3 讨论

规模化养猪场处理废水含有较高的氮、磷、钾等植物必需的矿质元素,其供应作物养分的作用已被许多研究证实^[5-13]。从已有的关于养猪场处理废水麦田利用的研究来看,大部分的研究致力于对小麦产量、品质和麦田土壤理化性状的影响上^[14-15],对小麦养分

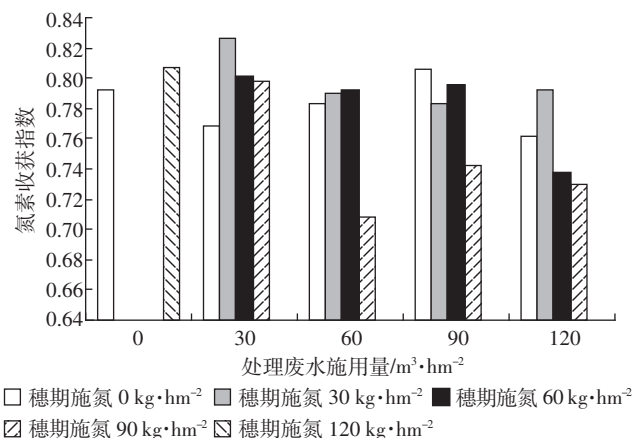


图6 不同处理小麦氮素收获指数

Figure 6 Nitrogen harvest index in wheat under different treatments

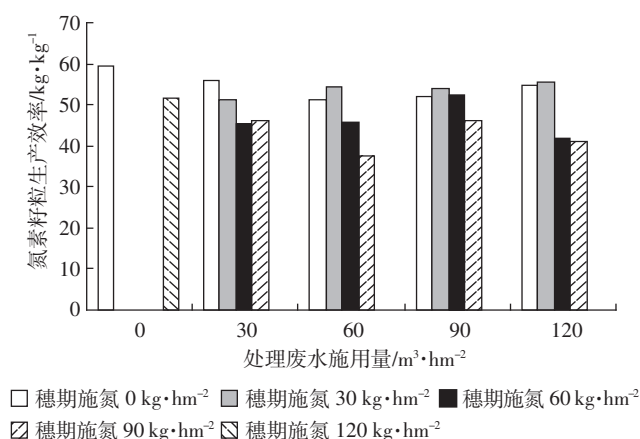


图7 不同处理小麦氮素籽粒生产效率

Figure 7 Nitrogen grain production efficiency in wheat under different treatments

吸收影响的研究较少。从对水稻的研究来看,有机废弃物施用增加了氮素利用率,从而有利于减少氮素损失带来的环境负荷^[16-17]。本试验结果表明,施用废水后,与氮素供应水平密切相关的叶片 SAPD 值、植株含氮率等指标都随着废水施用量的增加而提高,表明废水施用显著促进了小麦的氮素吸收。本试验中的常规施肥模式,是当地经过多年总结的单纯以化肥为肥料的高产施肥模式。本项目研究表明,在基肥肥料与常规施肥模式相同的情况下,越冬期施用废水 60~120 m³·hm⁻² 穗期配施氮 30~60 kg·hm⁻² 植株氮素营养状态与产量水平与常规施肥相近,这可能是处理废水中有机物质容易被微生物利用,处理废水与氮肥配施后营养更为协调,避免了生长前期过多的无机氮存在于土壤中而遭到挥发损失。当小麦需肥量增加时,土壤中没有更多的物质来维系微生物的生命活动,造成微生物的大量死亡,因而被固持在这些微生物体内的氮素释放出来供小麦吸收利用^[18]。但越冬期施用较低量废水(30~60 m³·hm⁻²)穗期配施较高量氮(60~90 kg·hm⁻²)小麦籽粒蛋白质含量高于越冬期施用较高量废水(60~90 m³·hm⁻²)穗期配施较低量氮(30~60 kg·hm⁻²)^[19],这与小麦籽粒蛋白质含量随后期施氮水平而提高的规律一致^[20-21]。因此,在保证产量的前提下,可以根据专用小麦品质要求选择两者的组合。

在养殖废水农田利用过程中,除了废水和氮肥的配施量外,施肥时期也值得探讨。研究表明,小麦不同生产水平下,氮肥运筹模式也不同。高产小麦栽培普遍采用“V”型施肥法,即重视基肥和拔节孕穗肥,无效分蘖期至拔节前不施氮肥^[18-9]。本试验考虑到农场生产条件下在小麦越冬期洒施养猪场废水可操作性较

强,因而设置了在越冬期施废水与穗期配施氮肥处理,结果是分蘖数随废水用量而显著增加,部分高量废水与穗期配施较高氮肥处理后期出现倒伏,增加了生产的风险。但是在基肥不足,冬前生长较差的情况下,越冬期施肥则有利于增加产量^[22]。因此,养猪场处理废水适合的施用时期可能与生产水平有关,在小麦的哪个生育期施用效果最好又切实可行有待于进一步研究。

4 结论

(1)拔节期叶片 SPAD 值与植株含氮率随着废水施用量增加而增加;在抽穗期,各个废水施用量下,不施氮和施氮 30 kg·hm⁻² 的处理 SPAD 显著低于常规施肥处理,穗期不施氮的处理植株含氮率显著低于常规施肥处理,而穗期施氮 30~60 kg·hm⁻² 处理则与常规施肥没有显著差异。表明越冬期施用处理废水对小麦氮素供应作用明显,但在处理废水不超过 120 m³·hm⁻² 的条件下,穗期不配施氮肥,难以满足小麦后期的氮素营养需要,越冬期施处理废水 60~120 m³·hm⁻² 替代穗期施氮 30~60 kg·hm⁻² 可以满足小麦氮素营养的需求。

(2)拔节期小麦植株累积吸氮量随废水施用量增加呈增加趋势,抽穗期在较低废水用量(30 或 60 m³·hm⁻²)时累积吸氮量总体上随穗期施氮量增加而增加,而在较高废水用量时(90 或 120 m³·hm⁻²),累积吸氮量随施氮量增加先增加后减少,表明废水与穗期氮肥合理配施才能使干物质积累量和植株含氮率处于协调状态,从而获得较高的氮素积累量,为小麦高产优质提供物质基础。

(3)花后氮素转移率在相同废水施用量下与穗期施氮量呈抛物线关系,在各个废水施用量下以穗期配施氮 30 kg·hm⁻² 的处理最高。废水施用 60 m³·hm⁻² 以上穗期配施氮 90 kg·hm⁻² 的处理花后氮素转移效率、氮素收获指数、氮素籽粒生产效率明显下降。越冬期施用较高用量处理废水穗期配施适量的氮肥,可以保持较高的氮素利用效率,但穗期施氮不宜超过 60 kg·hm⁻²。

参考文献:

- [1] 郑建初,陈留根,甄若宏,等.江苏省现代循环农业发展研究[J].江苏农业学报,2010,26(1):5-8.
ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, ZHEN Ruo-hong, et al. Study on modern circular agriculture development in Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 26(1):5-8.

- [2] 涂远璐,白云峰,严少华,等.基于养分循环的种养生态平衡匹配方法[J].江苏农业科学,2012,40(2):247-249.
TU Yuan-lu, BAI Yun-feng, YAN Shao-hua, et al. Planting and breeding ecological balance matching method based on nutrient cycling[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(2):247-249.
- [3] 常维娜,周慧平,高燕.种养平衡:农业污染减排模式探讨[J].农业环境科学学报,2013,32(11):2118-2124.
CHANG Wei-na, ZHOU Hui-ping, GAO Yan. Balance between crop-planting and livestock-raising: Perspective of agricultural pollution reduction[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11):2118-2124.
- [4] Alvarenga P, Palma A P, Goncalves R M, et al. Evaluation of chemical and ecotoxicological characteristics of biodegradable organic residues for application to agricultural land[J]. *Environment International*, 2007, 33:505-513.
- [5] 郭海刚,杜会英,王风,等.规模化牛场废水灌溉对土壤水分和冬小麦产量品质的影响[J].生态环境学报,2012,21(8):1498-1502.
GUO Hai-gang, DU Hui-ying, WANG Feng, et al. Effects of dairy wastewater irrigation on soil water and the yield and quality of winter wheat[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(8):1498-1502.
- [6] 王风,张克强,黄治平,等.猪场废水灌溉对冬小麦光合特性和产量的影响[J].灌溉排水学报,2009,28(3):16-19.
WANG Feng, ZHANG Ke-qiang, HUANG Zhi-ping, et al. Photosynthetic characteristics and yields of wheat with swine wastewater irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(3):16-19.
- [7] 乔冬梅,齐学斌,樊向阳,等.养猪废水灌溉对冬小麦作物-土壤系统影响研究[J].灌溉排水学报,2010,29(1):32-35.
QIAO Dong-mei, QI Xue-bin, FAN Xiang-yang, et al. The influence of livestock wastewater irrigation on winter wheat crop-soil system[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1):32-35.
- [8] 孙国峰,周炜,何加骏,等.猪粪沼液施用后土壤理化性状及小麦产量的变化[J].江苏农业学报,2012,28(5):1054-1060.
SUN Guo-feng, ZHOU Wei, HE Jia-jun, et al. Changes of soil physical and chemical properties and wheat yield after swine manure or slurry application[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(5):1054-1060.
- [9] Jiang L G, Dai T B, Jiang D, et al. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars[J]. *Field Crops Research*, 2004, 88:239-250.
- [10] 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 of Soil Science and Fertilizer*, 2004, 37:97-103.
- [11] Sorensen P, Amato M. Remineralisation and residual effects of N after application of pig slurry to soil[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 16:81-95.
- [12] Vallejo A, Skiba U M, Garcia-Torres L, et al. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38:2782-2793.
- [13] Yagüe M R, Quilez D. Response of maize yield, nitrate leaching, and soil nitrogen to pig slurry combined with mineral nitrogen[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39:686-696.
- [14] 冯伟,管涛,王晓宇,等.沼液追施量对小麦叶绿素荧光动力学参数及产量的影响[J].华北农学报,2011,26(2):157-162.
FENG Wei, GUAN Tao, WANG Xiao-yu, et al. Effect of top dressing amount of biogas slurry on fluorescence parameters and yield of winter wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(2):157-162.
- [15] 吕汶霖.沼液农用对小麦产量、品质及土壤质量的影响研究[D].雅安:四川农业大学,2011.
LÜ Wen-lin. Effect of the agricultural usage of biogas slurry on wheat yield, quality and environmental quality of soil[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2011.
- [16] 徐明岗,邹长明,秦道珠,等.有机无机肥配合施用下的稻田氮素转化与利用[J].土壤学报,2002,39(增刊):147-156.
XU Ming-gang, ZOU Chang-ming, QIN Dao-zhu, et al. Transformation and utilization on nitrogen in paddy soil under combining application of chemical and organic fertilizer[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(Suppl):147-156.
- [17] 宇万太,马强,周桦,等.不同施肥模式对下辽河平原水稻生态系统生产力及养分收支的影响[J].生态学杂志,2007,26(9):1350-1354.
YU Wan-tai, MA Qiang, ZHOU Hua, et al. Productivity and nutrient budget of rice ecosystem in lower reaches of Liaohe River plain under effects of different fertilization patterns[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9):1350-1354.
- [18] Thomsen I K, Kjellerup V, Jensen B. Crop uptake and leaching of ^{15}N applied in ruminant a slurry with selectively labeled feces and urine fractions[J]. *Plant and Soil*, 1997, 97:233-239.
- [19] 朱正杰,高威,庄恒扬.规模化养猪场处理污水施用对小麦产量和品质的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(4):427-432.
ZHU Zheng-jie, GAO Wei, ZHUANG Heng-yang. Effect of large-scale pig farm waste water on wheat yield and quality[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4):427-432.
- [20] 石祖梁,顾克军,杨四军.氮肥运筹对稻茬小麦干物质、氮素转运及氮素平衡的影响[J].麦类作物学报,2012,32(6):1128-1133.
SHI Zu-liang, GU Ke-jun, YANG Si-jun. Effect of nitrogen application on translocation of dry matter and nitrogen and nitrogen balance in winter wheat under rice-wheat rotation[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(6):1128-1133.
- [21] 沈建辉,戴廷波,荆奇,等.施氮时期对专用小麦干物质和氮素积累、运转及产量和蛋白质含量的影响[J].麦类作物学报,2004,24(1):55-58.
SHEN Jian-hui, DAI Ting-bo, JING Qi, et al. Effect of nitrogen top-dressing time on the accumulation and transfer of nitrogen, yield and protein content in specialty wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2004, 24(1):55-58.
- [22] 丁锦峰,杨佳凤,王云翠,等.稻茬小麦公顷产量9000 kg群体氮素积累、分配与利用特性[J].植物营养与肥料学报,2013,19(3):543-551.
DING Jin-feng, YANG Jia-feng, WANG Yun-cui, et al. Nitrogen accumulation, distribution and utilization characteristics of wheat at yield level of 9000 kg·hm⁻² in rice-wheat rotation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3):543-551.