

王桂良, 张家宏, 王守红, 等. 沼液替代化肥氮对冬小麦产量、品质及生长发育的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 467-475.

WANG Gui-liang, ZHANG Jia-hong, WANG Shou-hong, et al. Effects of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry on yield, quality and growth characteristics of winter wheat[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5): 467-475.

沼液替代化肥氮对冬小麦产量、品质及生长发育的影响

王桂良¹, 张家宏^{1*}, 王守红¹, 寇祥明¹, 徐 荣², 韩光明¹, 唐鹤军², 朱凌宇¹, 毕建花², 吴雷明²

(1. 江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏 扬州 225007; 2. 江苏省生态农业工程技术研究中心, 江苏 扬州 225009)

摘 要:研究了沼液替代不同比例化肥氮对冬小麦产量、生长发育特征(生育进程、株高动态、群体动态和干物质积累动态)、品质和重金属含量的影响。结果表明:随着沼液施用量的增加,小麦产量显著增加($P<0.05$),以沼液替代50%化肥氮(50%Nbs)处理产量最高,为 $7.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,比全施化肥(Ncf)处理增产18.14%;以沼液替代100%化肥氮(100%Nbs)处理与Ncf处理产量差异不显著($P>0.05$);籽粒千粒重呈显著下降趋势($P<0.05$);穗粒数和收获指数呈先上升后下降趋势。随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦各生育期株高、分蘖数和干物质积累量都呈现逐渐增加的趋势;成熟期,100%Nbs处理地上部干物质积累量显著高于Ncf处理($P<0.05$);以沼液替代200%化肥氮(200%Nbs)处理的小麦株高、分蘖数和地上部干物质积累量都显著高于Ncf处理($P<0.05$)。施用沼液可改善小麦品质;提高小麦籽粒的Cu和Zn含量,显著降低Cd和Cr含量($P<0.05$),对Pb和As含量影响不显著($P>0.05$)。各处理籽粒重金属含量均低于相应的污染物限量标准。当沼液替代化肥氮比例达到50%以上,由于贪青晚熟,以及基部节间长度显著增长等原因可能导致倒伏、减产,施入大量沼液也可能导致二次污染风险。因此,本研究初步认为,在本试验条件下,麦田灌溉沼液替代化肥氮最佳比例为50%。

关键词:沼液;替代化肥;小麦;生长发育;品质;重金属

中图分类号:S14 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2018)05-0467-09 doi: 10.13254/j.jare.2018.0001

Effects of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry on yield, quality and growth characteristics of winter wheat

WANG Gui-liang¹, ZHANG Jia-hong^{1*}, WANG Shou-hong¹, KOU Xiang-ming¹, XU Rong², HAN Guang-ming¹, TANG He-jun², ZHU Ling-yu¹, BI Jian-hua², WU Lei-ming²

(1. Lixiahe District Agricultural Institute of Jiangsu, Yangzhou 225007, China; 2. Ecological Agricultural Engineering Technology Research Center of Jiangsu, Yangzhou 225009, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of different ratios of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry on yield, growth characteristics (development progress, plant height dynamic, population dynamic and dry matter accumulation dynamic), quality and heavy metal content of winter wheat. The results showed that winter wheat yield increased significantly ($P<0.05$), with the increase of the ratios of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry, and the yield of the treatment with 50% chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry (50%Nbs) was the highest, about $7.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 18.14% higher than the treatment with total chemical fertilizer nitrogen (Ncf). There were no significant differences between the yields of 100%Nbs and Ncf ($P>0.05$). The 1000-kernels weight presented a significant declining trend ($P<0.05$); the grains number per spike and harvest index increased at first and then decreased, with

收稿日期:2018-01-02 录用日期:2018-01-22

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(16)1003);江苏省农业三新工程项目(SXGC[2017]161, SXGC[2017]168);江苏省重点研发计划项目(社会发展)(BE2017688);江苏省农业标准化试点项目(苏质监标发[2017]46号);江苏省特色示范基地建设项目(KF(17)1022);扬州市重点研发计划项目(社会发展)(YZ2016071);扬州市粮食绿色增产“1120”工程项目

作者简介:王桂良(1983—),男,江苏兴化人,博士,助理研究员,从事农业有机废弃物处理与资源化利用研究。E-mail:wgl0520@126.com

*通信作者:张家宏 E-mail:yzhangjh@126.com

the increase of the ratios of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry. The plant height, tiller number and dry matter accumulation in different stages presented the gradual increment trend; in maturity, the above ground dry matter accumulation of 100%Nbs was significantly higher than that of Ncf($P<0.05$), The plant height, tiller number and dry matter accumulation of 200%Nbs were significantly higher than these of Ncf($P<0.05$). Biogas slurry could improve wheat quality, and increase grain Cu, Zn contents, decrease grain Cd, Cr contents, significantly($P<0.05$), and had no significant influences on grain Pb, As contents($P>0.05$). The contents of these grain heavy metal of each treatment were lower than the maximum levels of contaminants in foods. When the ratio of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry raised above 50%, because of the prolonged growth duration and the increased basal internode length could lead to lodge and yield reduction, and because of greater use of biogas slurry could lead to the risk of secondary pollution. Therefore, in our preliminary study, in this experiment, the optimal ratio of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry was 50%.

Keywords: biogas slurry; chemical fertilizer nitrogen substitution; wheat; growth; quality; heavy metal

沼液是沼气工程的副产物,其中氮、磷、钾等元素含量较高,无法满足直接排放的要求^[1-2]。随着近年来沼气工程的快速发展,沼液产生量越来越大,如何处理沼液的问题日益突出。以循环农业理念为指导,农田施用沼液,一方面可减少或避免沼液排放带来的环境风险;另一方面可利用沼液资源,减少化肥的施用^[3-5]。因此,研究沼液在农田上的应用效果,对促进农牧结合的生态循环农业模式的推广应用具有十分重要的意义。关于这方面内容,国内外已有不少报道^[6-8]。冯伟等^[6]研究认为在基施沼液的基础上追施化肥氮可提高小麦产量,在氮投入基追比为1:1条件下小麦高产和优质兼顾。黄红英等^[7]开展了连续2年不同沼液替代化肥比例的等氮田间试验,结果表明以50%沼液替代比例处理小麦产量最高,其产量比单施化肥处理提高7.8%。高威等^[4]认为沼液和化肥配施能促进小麦植株微量元素的提高并改善籽粒品质,整体而言,以越冬期灌入约90 m³·hm⁻²处理废水、穗期施用化肥氮90 kg·hm⁻²为宜。这类报道阐明了施用沼液对小麦产量及品质的影响,为麦田适宜的沼液施用量提供相关的参考依据。然而,关于施用沼液对小麦生长发育动态特征方面的研究鲜有报道,为更加系统深入地了解施用沼液如何影响小麦生长发育,从而影响产量,本试验设置沼液替代不同比例化肥氮处理,探讨施用沼液对小麦生育进程、株高动态、群体动态和干物质积累动态等方面的影响,以期为大面积麦田施用沼液技术的推广和应用提供一定的理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试品种

试验于2016—2017年在江苏省扬州市江都区郭村(32°26.57'N,119°48.93'E)进行,该地区属亚热带湿润气候区,平均海拔5 m,年平均气温14.9℃,平均降水量为978.7 mm,年均日照时数为2140 h,年无霜期为220 d。土壤类型为高沙土,前茬作物为水稻,土壤pH为7.25,有机质含量17.82 g·kg⁻¹,全氮1.23 g·kg⁻¹,碱解氮67.93 mg·kg⁻¹,速效磷34.71 mg·kg⁻¹,速效钾183.19 mg·kg⁻¹;重金属元素含量:Cu 3.17 mg·kg⁻¹, Zn 7.05 mg·kg⁻¹, Cd 0.15 mg·kg⁻¹, Cr 22.73 mg·kg⁻¹, Pb 1.57 mg·kg⁻¹, As 12.15 mg·kg⁻¹。

供试小麦品种为强筋小麦“扬麦23”;沼液来源于邻近麦田的年出栏约2万头猪场(扬州陵都养殖有限公司)的沼气工程,小麦全生育期共施用2次沼液,其主要理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验共设置6个处理(表2),包括1个全施化肥处理(Ncf, 180 kg N·hm⁻²、75 kg P₂O₅·hm⁻²、75 kg K₂O·hm⁻²)和5个沼液替代化肥氮处理(替代30%、50%、70%、100%和200%化肥氮,分别标记为30%Nbs、50%Nbs、70%Nbs、100%Nbs和200%Nbs),各处理间氮磷钾养分施用量相同。以Ncf处理氮磷钾养分施用量为参照,各施用沼液处理中氮磷钾养分不足的部分,分别用尿素、过磷酸钙和氯化钾补充。以Ncf处理氮肥施用量为参照,遵照氮肥用量一致的原则,依

表1 沼液主要理化性质(mg·kg⁻¹)

Table 1 Main physical and chemical properties of biogas slurry(mg·kg⁻¹)

次数	日期	全氮/mg·kg ⁻¹	全磷/mg·kg ⁻¹	全钾/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	As/mg·kg ⁻¹	pH
1	2016/11/25	506.16	12.37	252.34	0.156	0.230	0.002	0.016	0.093	0.032	7.3
2	2017/3/20	539.85	13.11	267.51	0.201	0.238	0.002	0.019	0.097	0.041	7.4

据替代比例及沼液氮含量确定沼液用量。各沼液替代化肥氮处理中,扣除基施及追施沼液带入的磷钾养分(参考基施沼液中磷钾养分含量),确定基施磷钾肥用量。施用化肥品种分别为尿素(N 46.4%)、过磷酸钙(P_2O_5 12%)和氯化钾(K_2O 60%)。各试验小区面积 18 m^2 (长 4.5 m ,宽 4 m),各处理随机区组排列,重复3次。2016年11月6日播种,播量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,病虫害防治按当地常规方法进行管理。

沼液分别于2016年11月28日(苗期)和2017年3月24日(拔节期)施用,施用比例分别为40%和60%。各处理沼液和化肥施用具体情况见表2。采用潜水泵和皮管从露天储存池中将沼液引流到试验小区田边,用15 L塑料桶定量后直接均匀撒施在麦田。为避免用量过大时沼液溢出田埂,一次施不完时分两次施,两次相隔3~5 d。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 分蘖动态

小麦出苗后10 d,每小区选择长势均匀的区域,围3个 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 的固定调查点,分别在分蘖、拔节、抽穗和成熟期调查各点分蘖数。

从分蘖期开始,在每个固定调查点中,选取长势均匀连续20~25株,对分蘖发生情况挂牌追踪。每个主茎和分蘖挂上标签,并注明分蘖的次级,每4 d挂牌1次。成熟期根据单株标记牌记录各次级分蘖数和成穗数。

1.3.2 株高及节间长度

小麦分蘖、拔节、抽穗和成熟期,在每个固定调查点附近,取约35个连续的长势均匀的茎蘖,测定植株株高,并在成熟期测定基部和穗下节间长度。

1.3.3 地上部干物质积累动态

测量样品株高和节间长度后,于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青30

min, $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重后称重,成熟期样品,分为籽粒和秸秆两部分,分别烘干称重。

1.3.4 产量及其构成因素

避开边行和取样区域,对每小区中央 7 m^2 ($3\text{ m}\times 2.5\text{ m}$)区域小麦进行实割、脱粒、晒干扬净后称重测产。成熟期取约35株样品,在分开籽粒和秸秆的同时,进行室内考种,测定穗粒数和千粒重。

1.3.5 小麦品质及重金属含量

采用瑞典Pertten公司生产的SKCS-4100型单粒谷物特性测定仪测定籽粒硬度,采用DA7200型品质分析仪测定籽粒和面粉品质(包括容重、稳定时间、湿面筋含量、沉降值、蛋白质含量)^[8]。籽粒的Cu、Zn、Cd、Cr、Pb、As含量用Agilent 7500a型电感耦合等离子体质谱(Inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS, 美国)测定^[9]。

1.4 数据处理与统计分析

收获指数=籽粒产量/地上部干物质积累量

抽穗后干物质同化贡献率=(成熟期干物质质量-抽穗期干物质质量)/籽粒产量 $\times 100\%$

干物质转运率=[抽穗期干物质质量-(成熟期干物质质量-籽粒产量)]/抽穗期干物质质量 $\times 100\%$

干物质转运贡献率=[抽穗期干物质质量-(成熟期干物质质量-籽粒产量)]/籽粒产量 $\times 100\%$

采用Microsoft Excel 2007软件进行数据处理并绘制图表,采用SPSS 19.0软件进行数据间多重比较(LSD法)和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 施用沼液对小麦产量及构成因素的影响

从表3可知,随着沼液替代化肥氮比例的增加,各处理小麦产量差异显著($P<0.05$),并呈现先增加后

表2 各处理不同生育期施肥情况

Table 2 Application of fertilizers in different stages for different treatments

处理	苗期			拔节期		沼液合计/ $t\cdot\text{hm}^{-2}$	
	沼液/ $t\cdot\text{hm}^{-2}$	化肥/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$			沼液/ $t\cdot\text{hm}^{-2}$		化肥/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
		N	P_2O_5	K_2O			N
Ncf	—	72.00	75.00	75.00	—	108.00	—
30%Nbs	42.67	50.40	71.98	42.56	60.02	75.60	102.69
50%Nbs	71.12	36.00	69.96	20.93	100.03	54.00	171.15
70%Nbs	99.57	21.60	67.95	—	140.04	32.40	239.61
100%Nbs	142.25	—	64.92	—	200.06	—	342.30
200%Nbs	284.50	—	54.85	—	400.11	—	684.61

注:“—”表示不施用沼液和化肥。

Note: “—” means without biogas slurry or chemical fertilizers.

下降的趋势,其中50%Nbs处理最高,为7.75 t·hm⁻²,比Ncf处理增加18.14%。100%Nbs处理产量与Ncf处理差异不显著($P>0.05$);有效穗数呈现逐渐上升的趋势,200%Nbs处理最高,为5.72×10⁶个·hm⁻²,比Ncf处理增加25.37%;穗粒数呈现先增加后下降的趋势,其中50%Nbs处理最高,为55.16个,比Ncf处理增加27.74%;Ncf处理千粒重最大,为41.71 g,施用沼液处理平均千粒重为37.68 g,其中200%Nbs处理显著低于其他各处理($P<0.05$),为32.54 g。

2.2 施用沼液对小麦生长发育的影响

由表4可知,30%Nbs、50%Nbs和70%Nbs处理全生育期天数与Ncf处理无显著差异,平均为202 d。与其他等氮处理相比较,100%Nbs处理,拔节期稍有提前,而抽穗和成熟期都有所延迟,全生育期天数为205 d,比Ncf处理延长3 d。200%Nbs处理小麦生长前期生育进程进一步提前,生长后期生育进程进一步

延迟,全生育期天数为207 d,比Ncf处理延长5 d。

成熟期小麦株高平均为74.10 cm,拔节期的小麦分蘖数最多,平均为1.04×10⁷个·hm⁻²,成熟期小麦地上部干物质积累量最大,平均为19.53 t·hm⁻²(图1)。分蘖期,各处理株高、分蘖数和地上部干物质积累量都无显著性差异。拔节期、抽穗期和成熟期,随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦株高、分蘖数和地上部干物质积累量呈现逐渐上升的趋势。成熟期,100%Nbs处理的株高和分蘖数与Ncf处理之间无显著性差异($P>0.05$),地上部干物质积累量显著高于Ncf处理($P<0.05$);200%Nbs处理的小麦株高、分蘖数和地上部干物质积累量都显著高于Ncf处理($P<0.05$),分别为77.62 cm、5.72×10⁶个·hm⁻²、22.65 t·hm⁻²,分别增加8.49%、25.37%和31.40%。

施用沼液后小麦成熟期基部和穗下节间长度都有显著性提高($P<0.05$,表5)。随着沼液替代化肥氮

表3 施用沼液对小麦产量及构成因素的影响

Table 3 Effects of biogas slurry application on wheat yield and yield components

处理	有效穗数/10 ⁴ 个·hm ⁻²	穗粒数/个	千粒重/g	产量/t·hm ⁻²
Ncf	456.00±22.00c	43.18±2.07c	41.71±1.50a	6.56±0.28c
30%Nbs	456.50±24.37c	52.22±1.89ab	40.65±1.42a	6.68±0.31c
50%Nbs	471.33±25.93c	55.16±2.11a	40.00±1.07a	7.75±0.17a
70%Nbs	491.00±27.98bc	53.57±2.12a	39.07±2.01ab	7.40±0.25ab
100%Nbs	531.33±20.93ab	49.83±2.02b	36.14±1.99b	7.25±0.49ab
200%Nbs	571.67±24.78a	45.61±1.98c	32.54±1.72c	7.01±0.27bc

注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

表4 施用沼液对小麦生育进程的影响(年/月/日)

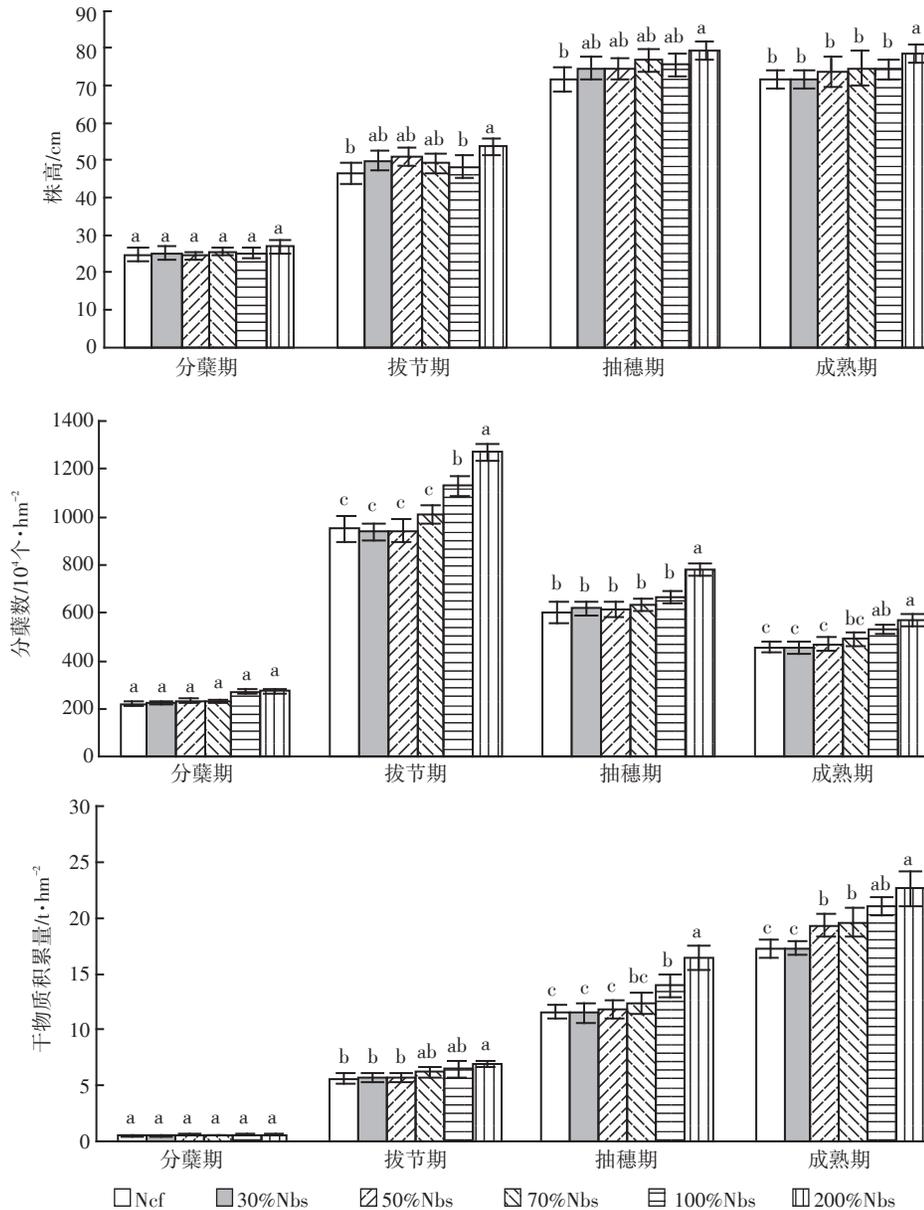
Table 4 Effects of biogas slurry application on wheat development progress (year/month/day)

处理	播种期	出苗期	拔节期	抽穗期	成熟期	全生育期时间/d
Ncf	2016/11/6	2016/11/14	2017/3/15	2017/4/18	2017/5/27	202
30%Nbs	2016/11/6	2016/11/14	2017/3/15	2017/4/18	2017/5/27	202
50%Nbs	2016/11/6	2016/11/14	2017/3/14	2017/4/17	2017/5/28	203
70%Nbs	2016/11/6	2016/11/14	2017/3/13	2017/4/17	2017/5/26	201
100%Nbs	2016/11/6	2016/11/14	2017/3/12	2017/4/19	2017/5/30	205
200%Nbs	2016/11/6	2016/11/14	2017/3/11	2017/4/20	2017/6/1	207

表5 施用沼液对成熟期小麦基部和穗下节间长度的影响

Table 5 Effects of biogas slurry application on length of basal internode and rachis internode of wheat in maturity

处理	基部节间长度/cm	基部节间长度占株高比例/%	穗下节间长度/cm	穗下节间长度占株高比例/%
Ncf	2.72±0.23b	3.80±0.31a	26.32±1.77b	36.79±3.11a
30%Nbs	2.71±0.20b	3.78±0.27a	26.34±1.78b	36.74±2.79a
50%Nbs	2.82±0.15b	3.83±0.37a	29.80±2.09a	40.40±4.25a
70%Nbs	2.97±0.21ab	3.98±0.28a	29.90±2.12a	40.11±4.17a
100%Nbs	2.99±0.27ab	4.01±0.31a	29.25±1.11ab	39.28±2.51a
200%Nbs	3.33±0.18a	4.24±0.29a	30.04±1.71a	38.70±3.75a



不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Different letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 施用沼液对各生育期小麦株高、分蘖数和干物质积累量的影响

Figure 1 Effects of biogas slurry application on wheat height, tiller number and dry matter accumulation in different stages

比例的增加,小麦基部节间长度呈现逐渐上升的趋势,其中,200%Nbs处理最高,为3.33 cm,比Ncf处理增加22.50%。100%Nbs与Ncf处理间差异不显著($P > 0.05$)。基部节间长度占株高比例同样以200%Nbs处理为最高。各处理中,Ncf处理小麦穗下节间长度最小,为26.32 cm,当沼液替代化肥氮比例增加到50%,小麦穗下节间长度显著增加至29.80 cm,之后不再有显著性变化。同样,穗下节间长度占株高比例也是50%Nbs处理最高,之后不再增加。

随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦一次分蘖数呈逐渐上升的趋势(表6),200%Nbs处理显著高于其他各处理,为7.17个·株⁻¹;一次分蘖成穗数在50%Nbs处理时较大,之后不再有显著性变化;一次分蘖成穗率呈现先上升后下降的趋势,50%Nbs处理最高,为48.46%;100%Nbs处理与Ncf处理差异不显著($P > 0.05$)。随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦二次分蘖数呈逐渐上升的趋势,而只有100%Nbs和200%Nbs处理有成穗数。随着沼液替代化肥氮比例

表6 施用沼液对小麦单株分蘖特征的影响

Table 6 Effects of biogas slurry application on tillering characteristic of single wheat plant

处理	一次分蘖			二次分蘖			单株分蘖		
	分蘖数	成穗数	成穗率/%	分蘖数	成穗数	成穗率/%	分蘖数	成穗数	成穗率/%
Ncf	5.50±0.29c	2.55±0.19b	46.36±4.52a	0.15±0.01e	0	0	5.65±0.30d	2.55±0.19c	45.13±4.32a
30%Nbs	5.52±0.27c	2.61±0.15b	47.24±4.50a	0.22±0.01d	0	0	5.74±0.28d	2.61±0.15c	45.45±4.27a
50%Nbs	6.19±0.37b	3.00±0.17a	48.46±4.21a	0.24±0.01d	0	0	6.43±0.38c	3.00±0.17b	46.67±4.12a
70%Nbs	6.62±0.21b	3.19±0.20a	48.20±3.72a	0.38±0.02c	0	0	7.00±0.23b	3.19±0.20ab	45.58±3.68a
100%Nbs	6.55±0.34b	3.05±0.19a	46.53±3.50a	0.50±0.05b	0.09	18.18	7.05±0.39b	3.14±0.19ab	44.52±3.32ab
200%Nbs	7.17±0.31a	3.09±0.21a	43.03±4.71a	0.65±0.05a	0.26	40.00	7.83±0.36a	3.35±0.22a	42.78±4.52b

的增加,单株分蘖数及成穗数都呈逐渐增加的趋势,而单株成穗率则呈现先上升后下降的趋势,50%Nbs处理最高,为46.67%;100%Nbs与Ncf处理间差异不显著($P>0.05$),200%Nbs处理则显著低于Ncf处理($P<0.05$)。

由表7可见,随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦收获指数呈现先增加后下降的趋势,50%Nbs处理最高,为0.51;100%Nbs与Ncf处理间差异不显著($P>0.05$),200%Nbs处理为0.35,显著小于其他各处理($P<0.05$)。分蘖期至拔节期、拔节期至抽穗期,随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦地上部干物质积累增加量呈现逐渐上升的趋势;抽穗期至成熟期,则呈现先增加后下降的趋势,50%Nbs处理显著高于其他各处理($P<0.05$),为 $7.51\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦抽穗后干物质同化贡献率显现逐渐上升趋势,100%Nbs和200%Nbs处理之间差异不显著($P>0.05$),平均为78.21%,并显著高于Ncf处理($P<0.05$);而干物质转运贡献率则呈现逐渐下降的趋势,100%Nbs和200%Nbs处理显著低于Ncf处理($P<0.05$)。随着沼液替代化肥氮比例的增加,干物质转运率呈现先上升后下降的趋势,50%Nbs处理显著高于其他各处理,为19.96%。

2.3 施用沼液对小麦品质的影响

与Ncf处理相比,施用沼液处理的小麦面团稳定时间、湿面筋含量、沉降值、蛋白质含量等品质指标都有所增加(表8),并且,随着沼液替代化肥氮比例的增加,都呈现逐渐上升的趋势,200%Nbs处理最高,分别为12.27 min、32.92%、48.29 mL和14.90%。各处理

表7 施用沼液对小麦地上部干物质同化及转运的影响

Table 7 Effects of biogas slurry application on dry matter accumulation and transportation of wheat

处理	收获指数	地上部干物质积累增加量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$			抽穗后干物质同化贡献率/%	干物质转运率/%	干物质转运贡献率/%
		分蘖期至拔节期	拔节期至抽穗期	抽穗期至成熟期			
Ncf	0.44±0.01c	5.12±0.37c	5.99±0.51c	5.63±0.39a	73.92±4.11a	17.11±1.27b	26.08±2.21a
30%Nbs	0.45±0.03bc	5.20±0.35bc	5.78±0.49c	5.80±0.45a	73.94±5.28a	17.77±1.01b	26.06±2.19a
50%Nbs	0.51±0.01a	5.12±0.43c	6.07±0.52c	7.51±0.53a	76.11±6.01a	19.96±1.31a	23.89±1.99ab
70%Nbs	0.48±0.03ab	5.62±0.38abc	6.20±0.50c	7.19±0.49a	76.07±5.93a	18.23±1.41ab	23.93±2.07ab
100%Nbs	0.43±0.01c	5.86±0.41ab	7.47±0.47b	7.08±0.32a	77.68±6.30a	14.57±1.12c	22.32±2.09b
200%Nbs	0.35±0.02d	6.29±0.45a	9.55±0.49a	6.20±0.41a	78.73±7.15a	10.19±0.72d	21.27±1.87b

表8 施用沼液对小麦品质的影响

Table 8 Effects of biogas slurry application on winter wheat quality

处理	籽粒硬度	籽粒容重/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	面团稳定时间/min	面粉湿面筋含量/%	面粉沉降值/mL	籽粒蛋白质含量/%
Ncf	60.21±5.52a	775.27±50.15a	10.01±0.82b	28.53±2.08b	41.17±2.55b	13.09±0.99b
30%Nbs	60.43±5.21a	778.38±52.81a	10.25±0.79b	28.83±2.11b	44.69±3.47ab	13.25±0.83ab
50%Nbs	60.57±4.87a	773.24±49.99a	10.03±0.77b	28.51±1.99b	44.98±3.58ab	13.75±1.04ab
70%Nbs	60.91±5.01a	769.25±47.25a	10.93±0.80ab	29.99±2.03ab	46.00±3.06ab	13.52±0.97ab
100%Nbs	61.52±5.12a	762.25±53.16a	11.70±0.74a	30.42±1.89ab	46.51±2.99ab	13.84±0.93ab
200%Nbs	62.70±4.98a	765.82±50.22a	12.27±0.73a	32.92±2.13a	48.29±4.18a	14.90±0.95a

间籽粒硬度无显著性差异。随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦籽粒容重有下降的趋势,各处理平均为 $770.70 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 施用沼液对小麦籽粒重金属含量的影响

由表9可见,小麦籽粒Cu和Zn含量随着沼液替代化肥氮比例的增加,呈现逐渐上升的趋势,100%Nbs处理显著高于Ncf处理($P < 0.05$),各处理中200%Nbs处理含量最高,分别为 $5.896 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20.916 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随着沼液替代化肥氮比例的增加,Pb和As含量有所增加,各处理间差异不显著($P > 0.05$);小麦籽粒Cd和Cr含量随着沼液替代化肥氮比例的增加,则呈现逐渐下降的趋势,100%Nbs和200%Nbs处理差异不显著,但都显著低于其他各处理($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 施用沼液对小麦生长发育的影响

本研究表明,随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦产量呈现先增加后下降趋势,其中以沼液替代50%化肥氮处理最高,这与黄红英等^[7]的研究结果相似。目前,有关有机肥与化肥配施的研究很多,一般认为,固体有机肥替代30%化肥氮比较适宜^[10-12],这明显低于本研究结果。其主要原因是,沼液一方面可提供大量的速效养分,另一方面可促进土壤有机氮的分解^[1,7],其在养分供应上具有缓急相济的作用,沼液与化肥配施能满足当季作物的养分需求;而固体有机肥的养分释放缓慢,当季只能替代少部分化肥。

沼液替代化肥氮比例超过50%时,虽然干物质积累量有所增加(图1),但抽穗期至成熟期地上部干物质积累增加量呈现下降的趋势(表7)。沼液替代化肥氮比例超过一定量之后,小麦无效分蘖增多;后期贪青晚熟,影响干物质向籽粒转运,严重影响穗粒数和千粒重,导致收获指数和产量下降。另外,随着沼液用量的增加,小麦基部节间长度显著增加,易在不良气候条件下出现倒伏减产。

3.2 施用沼液对小麦品质及重金属含量的影响

一定范围内,增加施氮量能提高小麦籽粒蛋白质含量,提升面团和面粉等多项品质指标^[13]。本研究表明,在等氮量条件下,随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦品质同样有所改善。其主要原因是,沼液中养分有效性较高,并且促进土壤有机养分矿化分解,虽然总氮投入量没有增加,但是作物对养分的吸收利用效率得以提高。李春喜等^[14]研究表明在等氮量条件下,施用沼液可以促进作物对氮素的吸收利用,最终提高氮的利用效率。小麦籽粒蛋白质含量影响小麦加工品质^[15],本研究发现小麦籽粒硬度、面团稳定时间、面粉的湿面筋含量、沉降值与籽粒蛋白质含量之间存在显著正相关性,这与王月福等^[16]的研究结果相似。施用沼液提高籽粒蛋白质含量是改善小麦加工品质的主要原因之一。

随着沼液施用量的增加,小麦籽粒Cu、Zn、Pb和As含量都有所增加,而Cd和Cr含量则有下降趋势,这与前人的研究结果^[14,17-18]相似。各处理中小麦籽粒重金属含量均低于相应的污染物限量标准(GB 2762—2005)^[19]。然而,长期施用沼液是否会导致小麦重金属超标,需要通过长期定位试验来进一步研究。另外,为保证施用沼液的安全性,有关施用沼液对土壤重金属的固定或活化机理有待进一步研究。

3.3 麦田消纳沼液适宜量

通过农田系统消纳沼液被认为是目前最简单有效的处理沼液方法^[20-22]。与沼液作为肥料利用不同,以处理沼液为目的的农田消纳沼液是要在作物耐受范围内尽可能多地消纳沼液。本研究表明,与50%Nbs处理相比,麦田继续增加沼液施用量(70%Nbs、100%Nbs、200%Nbs)可以消纳更多沼液,同时产量依然高于Ncf处理。但是,由于贪青晚熟,以及基部节间长度显著增长等原因可能导致倒伏、减产;另外,由于大量施入沼液,更多氮素会以硝态氮和温室气体形式排放到环境中,导致二次污染风险增

表9 施用沼液对小麦籽粒重金属含量的影响($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 9 Effects of biogas slurry application on the contents of heavy metal in wheat grain($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

处理	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	As
Ncf	4.998±0.453b	14.795±1.154c	0.028±0.001a	0.803±0.074a	0.079±0.004a	0.013±0.001a
30%Nbs	5.115±0.512ab	14.958±1.208c	0.025±0.001b	0.752±0.053ab	0.081±0.003a	0.014±0.001a
50%Nbs	5.258±0.421ab	16.723±1.211bc	0.025±0.001b	0.768±0.051a	0.083±0.002a	0.014±0.001a
70%Nbs	5.228±0.372ab	15.223±1.138c	0.024±0.001b	0.743±0.071ab	0.083±0.002a	0.014±0.001a
100%Nbs	5.820±0.479a	18.198±1.245b	0.020±0.001c	0.653±0.032b	0.084±0.003a	0.015±0.001a
200%Nbs	5.896±0.464a	20.916±1.312a	0.019±0.001c	0.661±0.057b	0.084±0.003a	0.015±0.001a

加^[22-23]。因此,麦田施用沼液替代化肥氮比例达到50%以上是否能够兼顾稳产及环境安全有待进一步研究。

综合沼液灌溉对小麦生长发育特征、产量、安全品质监测结果,本试验初步认为,麦田灌溉沼液替代化肥氮比例为50%时产量最高,同时品质有所改善。邻近试验麦田的养殖场,年均出栏约2.5万头肉猪,产生约5万t沼液,大约需要配置292.14 hm²麦田用于消纳沼液。

4 结论

随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦产量显著增加($P<0.05$),50%Nbs处理最高,为7.75 t·hm⁻²,比Ncf处理增产18.14%;100%Nbs与Ncf处理产量差异不显著($P>0.05$);籽粒千粒重呈显著下降趋势($P<0.05$);穗粒数和收获指数呈先上升后下降趋势。随着沼液替代化肥氮比例的增加,小麦各生育期株高、分蘖数和干物质积累量都呈现逐渐增加的趋势;成熟期,100%Nbs处理地上部干物质积累量显著高于Ncf处理($P<0.05$);200%Nbs处理的小麦株高、分蘖数和地上部干物质积累量都显著高于Ncf处理($P<0.05$)。施用沼液可改善小麦品质,提高小麦籽粒的Cu和Zn含量,显著降低Cd和Cr含量($P<0.05$),对Pb和As含量影响不显著($P>0.05$)。各处理籽粒重金属含量均低于相应的污染物限量标准。

当沼液替代化肥氮比例达到50%以上,由于贪青晚熟,以及基部节间长度显著增长等原因可能导致倒伏、减产,施入大量沼液也可能导致二次污染风险增加。因此,本研究初步认为,在本试验条件下,麦田灌溉沼液替代化肥氮最佳比例为50%。

参考文献:

- [1] 冯伟,管涛,王晓宇,等.沼液与化肥配施对冬小麦根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):1007-1012.
FENG Wei, GUAN Tao, WANG Xiao-yu, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on winter wheat rhizosphere soil microorganisms and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 1007-1012.
- [2] 王子臣,管永祥,盛婧,等.水稻分蘖期沼液施灌对农田水体氮素的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(12):1544-1551.
WANG Zi-chen, GUAN Yong-xiang, SHENG Jing, et al. Effects of biogas slurry application on paddy field water nitrogen content at tillering stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(12): 1544-1551.
- [3] 陶晓婷,朱正杰,高威,等.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[J].农业环境科学学报,2014,33(3):555-561.
TAO Xiao-ting, ZHU Zheng-jie, GAO Wei, et al. Nitrogen uptake and utilization in wheat as influenced by pig slurry from large-scale pig farm[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 555-561.
- [4] 高威,陶晓婷,王远玲,等.养猪场养殖废水与化肥配施对小麦中微量元素含量和品质的影响[J].应用生态学报,2014,25(2):433-440.
GAO Wei, TAO Xiao-ting, WANG Yuan-ling, et al. Effects of combined applications of pig farm slurry and chemical fertilizer on medium- and micro-element contents and quality of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 433-440.
- [5] Chen G, Zhao G H, Zhang H M, et al. Biogas slurry use as N fertilizer for two-season *Zizania aquatica* Turcz. in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107(3): 303-320.
- [6] 冯伟,侯翠翠,刘东洋,等.沼液与氮肥配施对小麦产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2013,33(3):520-525.
FENG Wei, HOU Cui-cui, LIU Dong-yang, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on grain quality characters and yield of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(3): 520-525.
- [7] 黄红英,曹金留,常志州,等.猪粪沼液施用对稻-麦产量和氮磷吸收的影响[J].土壤,2013,45(3):412-418.
HUANG Hong-ying, CAO Jin-liu, CHANG Zhi-zhou, et al. Effects of digested pig slurry application on yields, nitrogen and phosphorous uptakes by rice and wheat[J]. *Soils*, 2013, 45(3): 412-418.
- [8] 夏清,杨珍平,刘俊峰,等.33个小麦品种资源的籽粒品质与面团质构特性[J].麦类作物学报,2015,35(3):420-426.
XIA Qing, YANG Zhen-ping, LIU Jun-feng, et al. Study on grain quality and dough texture of 33 wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(3): 420-426.
- [9] 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, SUN 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.
- [10] 李玲玲.有机肥氮素有效性和替代化肥氮比例研究[D].北京:中国农业科学院,2011.
LI Ling-ling. Manure nitrogen availability and its substitution ratio for chemical fertilizer nitrogen[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [11] 邢鹏飞,高圣超,马鸣超,等.有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J].中国土壤与肥料,2016(3):98-104.
XING Peng-fei, GAO Sheng-chao, MA Ming-chao, et al. Impact of organic manure supplement chemical fertilizer partially on soil nutrition, enzyme activity and crop yield in the North China Plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(3): 98-104.
- [12] 唐海明,程爱武,徐一兰,等.长期有机无机肥配施对双季稻区水

- 稻干物质积累及产量的影响[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(6): 1091-1098.
- TANG Hai-ming, CHEN Ai-wu, XU Yi-lan, et al. Effects of long-term mixed application of organic and inorganic fertilizers on dry matter accumulation and yield of rice in double cropping rice fields[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, 36(6): 1091-1098.
- [13] 李燕青, 林治安, 温延臣, 等. 不同类型有机肥与化肥配施对小麦品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1513-1522.
- LI Yan-qing, LIN Zhi-an, WEN Yan-chen, et al. Effects of combined application of chemical fertilizers with different sources of organic manure on the grain quality of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(6): 1513-1522.
- [14] 李春喜, 张令令, 马守臣, 等. 有机物料还田对麦田土壤碳氮含量、小麦产量及经济效益的影响[J]. 作物杂志, 2017(2): 145-150.
- LI Chun-xi, ZHANG Ling-ling, MA Shou-chen, et al. Effects of organic materials returning on soil carbon and nitrogen contents, yield and economic benefit in wheat[J]. *Crops*, 2017(2): 145-150.
- [15] 张定一, 张永清. 施钾量对强筋小麦产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 32-37.
- ZHANG Ding-yi, ZHANG Yong-qing. Effect of application of potassium on grain yield and quality of strong gluten wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3): 32-37.
- [16] 王月福, 于振文, 李尚霞. 施氮量对小麦籽粒蛋白质组分含量及加工品质的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1071-1078.
- WANG Yue-fu, YU Zhen-wen, LI Shang-xia. Effects of nitrogen application amount on content of protein components and processing quality of wheat grain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1071-1078.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品中污染物限量 GB 2762—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Maximum levels of contaminants in foods GB 2762—2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2005.
- [20] 岑汤校, 张 硕, 胡宇峰. 单季稻不同用量沼液的肥效试验[J]. 中国土壤与肥料, 2012(2): 83-86.
- CEN Tang-xiao, ZHANG Shuo, HU Yu-feng. Efficiency of biogas slurry fertilizer in different amount on single cropping rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2012(2): 83-86.
- [21] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 沼液替代化肥对麦季 CH₄、N₂O 排放及温室效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1654-1661.
- SUN Guo-feng, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of chemical fertilizers substitution by biogas slurry on CH₄ and N₂O emissions and their greenhouse effects in wheat field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8): 1654-1661.
- [22] 陈永杏. 猪场沼液农用生态环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- CHEN Yong-xing. Study on the ecological and environmental impacts of liquid digestate from swine farm applied on cropland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [23] 黄红英, 曹金留, 靳红梅, 等. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2353-2361.
- HUANG Hong-ying, CAO Jin-liu, JIN Hong-mei, et al. Influence of application of digested pig slurry on nitrous oxide emission under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2353-2361.