

猪粪沼液连续定位施用对油菜产量及菜籽品质的影响

张璘玮, 伍 钧*, 杨 刚, 张乙涵, 冯丹妮, 王敏入

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘 要:在四川省邛崃市固驿镇黑石村,进行了3年连续定位施用不同量沼液种植油菜田间小区试验,研究了沼液长期定位施用对油菜产量及品质的影响,以确定沼液长期农用的可行性及最佳施用量。结果表明:单施化肥会导致油菜产量逐年下降;施用沼液可显著提高油菜产量,当沼液用量控制在101 250~132 500 kg·hm⁻²范围内,基肥、苗肥、薹肥施用百分比分别为37%左右,47%左右,16%左右时,油菜生长良好,产量较高,2010年、2011年和2012年各小区最高产量比清水对照分别提高157.54%、365.50%、254.10%,比常规化肥对照分别提高38.26%、55.50%、155.57%;在此沼液施用量范围内油菜籽蛋白质、含油率、油酸、芥酸、硫苷含量达到最佳,其中含油率超过1级水平,芥酸含量满足小于1%的国际标准;油菜籽矿质元素Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg含量维持较高水平,对Fe和Mn的调控作用和改善效果相对较大。

关键词:沼液;油菜;产量;品质;化肥

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)03-0562-07 doi:10.11654/jaes.2014.03.024

Effects of Continuous Applications of Digested Pig Biogas Slurry on *Brassica napus* Yields and Rapeseed Quality

ZHANG Lin-wei, WU Jun*, YANG Gang, ZHANG Yi-han, FENG Dan-ni, WANG Min-ru

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Applying biogas slurry, rich in nutrients, could promote crop growth and yields. However, there is little information available about its long-term effects on plants. A three-year experiment was designed to evaluate the effects of biogas slurry applications on yields and quality of rape (*Brassica napus*) at Guyi Town, Qionglai City, Sichuan Province. The results indicated that over years the rape yields decreased in the treatments with chemical fertilizer, but significantly increased with biogas slurry applications. The highest yields can be obtained in the treatments with biogas slurry rates of 101 250~132 500 kg·hm⁻², which was applied 37% for the base fertilizer, 47% for seed bed, and 16% for bolting stage. The rape yields were 157.54%, 365.50%, 254.10% higher in biogas slurry than in CK (only water application) treatments and 38.26%, 55.50%, 155.57% higher than in chemical fertilizer in 2010, 2011, and 2012, respectively. The contents of protein, oil, oleic acid, erucic acid and glucosinolate of the rapeseeds were at the best levels in biogas slurry treatments. The content of oil in the rapeseeds was higher than the national level I standard, while the content of erucic acid was less than <1%, meeting the international standard. Also, the applications of biogas slurry maintained the contents of mineral elements, such as Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, and Mg, at a higher level than other treatments.

Keywords: biogas slurry; rape; yield; quality; fertilizer

沼液是一种可再生资源,含有丰富的氮磷钾等营养元素,沼液农用可满足作物的营养需要,减少农业生产成本,增加经济效益。沼液农用是一条促进农业增效、改进生产条件、建立生态农业、发展绿色食品的有效途径^[1]。近年来,沼液利用已成为广大科技工作者

探讨的热点问题,国内有关沼液利用的研究也越来越多元化,从沼液原料发酵^[2]到成分分析^[3],从抗病虫害能力^[4-6]到重金属安全评价^[7-8],从影响作物产量^[9-10]到土壤环境效应^[11-12]等诸多方面;国外也有类似研究,如沼液发酵成分应用分析^[13-14],施用沼液对土壤环境的影响^[15-17],沼液对作物生产的影响^[18]等。但有关沼液长期施用对农作物产量、品质影响的研究却鲜有报道。本文通过田间小区实验,系统地研究了3年连续定位施用沼液,对油菜产量及菜籽品质的影响,以揭示沼液资源化利用取得最佳农作效益的适宜施用量,为沼液的有效处理和合理农用提供一定的参考依据。

收稿日期:2013-09-10

基金项目:国家科技支撑计划课题(2008BAD4B04);四川省环保厅重点实验室项目(2011HB011)

作者简介:张璘玮(1990—),男,汉族,贵州贵阳人,硕士研究生,主要研究方向为环境污染化学与生物修复。

E-mail: zhanglinwei_1@163.com

* 通信作者:伍 钧 E-mail: wuj1962@163.com

1 材料与方法

1.1 供试材料

油菜(*Brassica napus*)品种:四川省宜宾市农业科学院油料所选育的双低优质杂交油菜品种宜油 15。

沼液:四川省金利有限公司黑石养猪场正常产气 3 个月以上的沼气池中已发酵完全的沼液,各年沼液基本成分见表 1 所示。

1.2 试验地点

田间小区试验设在四川省邛崃市固驿镇黑石村三组某农户责任田,土壤类型为黄壤性水稻土,其基本理化性质见表 2。前茬作物为水稻,肥力中等,地势平坦向阳,排灌方便,紧接养殖场沼液池。

1.3 试验方案

试验设 12 个处理,3 次重复,随机区组排列。小区面积 20 m²(5 m×4 m),处理间间隔 40 cm,重复间

间隔 50 cm,四周设保护行。油菜种植按当地常规方法育苗,待苗龄 30 d 左右免耕按宽窄行移栽至大田,每小区定植 168 株,折合密度为 84 000 株·hm⁻²。移栽时记录苗龄、苗高和叶龄。试验包括 1 个清水对照、1 个常规化肥处理和 10 个纯沼液处理,沼液处理组施用量如表 3 所示。

1.4 样品采集及处理

油菜样品从各小区中梅花形采集 5 株测定相关指标,整株在 105 ℃杀青后测定干物质重^[19],油菜籽品质用近红外光谱仪(FOSS-5000)分析测定^[20],矿质元素含量用 HNO₃-HClO₄(4:1)浸泡过夜消解-原子吸收分光光度法测定^[19]。

1.5 数据处理

数据分析由 Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件完成,采用单因素方差分析法、LSD 法进行统计分析,用 Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 沼液施用对油菜产量和干物质重的影响

3 年连续施用沼液各处理油菜产量的变化如图 1 所示。2010 年当沼液施用量控制在 101 250 kg·hm⁻²(处理 8)时,油菜产量有最大值 3433 kg·hm⁻²,2011 年和 2012 年当沼液施用量控制在 132 500 kg·hm⁻²(处

表 1 各年施用沼液的基本成分

Table 1 Basic properties of biogas slurry applied in each year			
指标	2010 年	2011 年	2012 年
pH	7.026	7.064	7.127
TN/mg·L ⁻¹	903.4	1 063.2	876.23
NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	652.4	717.2	634.7
TP/mg·L ⁻¹	87.23	146.9	108.4
TK/mg·L ⁻¹	394.3	429.1	378.5
NO ₃ -N/mg·L ⁻¹	7.000	6.464	7.152
Na/mg·L ⁻¹	245.9	275.78	237.34
Ca/mg·L ⁻¹	1 685.1	2 063.52	1 467.39
Mg/mg·L ⁻¹	369.9	447.29	387.9
Fe/mg·L ⁻¹	704.1	763.73	721.3
Mn/mg·L ⁻¹	28.44	27.45	27.34
Cu/mg·L ⁻¹	55.33	49.77	48.73
Zn/mg·L ⁻¹	5.263	7.51	5.532
Cd/mg·L ⁻¹	0.045 56	0.024 8	0.037 6
Cr/mg·L ⁻¹	1.272	1.245	1.138
Pb/mg·L ⁻¹	0.475 4	0.896 8	0.554 9
Ni/mg·L ⁻¹	1.165	0.795 2	1.224
As/mg·L ⁻¹	4.993	9.29	7.84
Hg/mg·L ⁻¹	—	—	—
总残渣/g·L ⁻¹	12.84	18.78	21.14

表 2 土壤基本理化性质及重金属含量

Table 2 Physi-chemical properties and heavy metal contents of experimental soil			
指标	含量	指标	含量
pH	4.812	Pb/mg·kg ⁻¹	43.25
全氮/g·kg ⁻¹	2.108	Cd/mg·kg ⁻¹	0.479 8
碱解氮/mg·kg ⁻¹	173.4	Cr/mg·kg ⁻¹	38.52
速效磷/mg·kg ⁻¹	57.32	As/mg·kg ⁻¹	12.26
速效钾/mg·kg ⁻¹	31.48	Hg/mg·kg ⁻¹	0.180 2
有机质/g·kg ⁻¹	35.65	有效 Zn/mg·kg ⁻¹	20.72
CEC/cmole·kg ⁻¹	20.72	有效 Fe/mg·kg ⁻¹	676.8
Ca/mg·kg ⁻¹	119.6	有效 Mn/mg·kg ⁻¹	49.32
Mg/mg·kg ⁻¹	150.2	有效 Cu/mg·kg ⁻¹	14.74

表 3 各小区各年沼液定位施用试验设计(kg·hm⁻²)

Table 3 Amount of biogas slurry applied in treatment plots in three consecutive years(kg·hm ⁻²)													
处理编号	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	基肥/%	苗肥/%	薹肥/%
2010 年	22 500	45 000	67 500	78 750	90 000	101 250	112 500	135 000	157 500	180 000	23	51	26
2011 年	64 000	81 000	98 000	108 750	115 500	124 500	132 500	149 500	166 500	183 500	37	47	16
2012 年	64 000	81 000	98 000	110 250	115 500	124 250	132 500	149 500	166 500	183 500	31	32	37

注:1 号为清水对照,2 号为常规化肥对照(折合化肥用量为尿素 510 kg·hm⁻²、过磷酸钙 2250 kg·hm⁻²、氯化钾 255 kg·hm⁻²),未在表中列出。基肥各处理均每公顷施硼肥 8.4 kg。基肥、苗肥、薹肥百分比为占沼液总施用量的百分比。

理9)时油菜产量有最大值,分别为 $3589\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3371\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,比各自年份中清水对照分别提高157.54%、365.50%、254.10%,比常规化肥处理分别提高38.26%、55.50%、155.57%。各处理间油菜产量方差分析表明,2010年($F=155.356^{**}$)、2011年($F=246.837^{**}$)、2012年($F=121.462^{**}$)处理间差异极显著,说明沼液施用量对油菜产量有较大影响。

由图1可看出,清水对照组和常规化肥施用组油菜产量逐年下降,说明土壤本身肥力不能够满足作物正常生产的营养需求,单靠化肥施用仍然会降低作物产量。沼液施用组油菜产量随沼液施用量的增加呈现出先增加后降低的趋势,年际变化则呈现出低沼液量(处理3至处理5)处理中2010年产量高于其他年份,而高沼液量(处理11和处理12)处理中则是2012年产量高于其他年份,在处理7中(沼液施用量为 $90\ 000\sim 115\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)各年份产量最接近,说明该沼液施用量较为适宜油菜生产。在各小区沼液施用量相同时,即2011年与2012年产量相比较,油菜产量并未出现相同的产量,原因可能在于各施肥期沼液用量的不同,适量增加苗肥的施用量能促进有效分枝与角果数的增加,对比可知2011年的沼液施用方式最适合油菜的生产。本试验结果表明,沼液用量控制在 $101\ 250\sim 132\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围内可以达到油菜的高产,说明长期施用沼液有利于油菜的生产,同时控制基肥用量在37%左右可以有效促进油菜生长发育,苗肥用量在47%左右能增加油菜产量。

由图1可知,油菜产量与干物质重之间存在一定关系,经相关性分析表明,2010年($N=36, r=0.520^{**}$)、2011年($N=36, r=0.782^{**}$)、2012年($N=36, r=0.955^{**}$)油菜产量和干物质重之间均呈极显著相关。

随沼液施用量的增加,各年份油菜干物质重均呈

上升趋势,而且在高沼液量(处理10至处理12)处理条件下均出现一定的回落。3年中清水对照油菜干物质重均比其他处理低,而各年份中油菜干物质重最大值分别比当年清水对照高85.95%、115.56%、70.72%,说明沼液施用后能促进油菜根茎叶的发育,满足油菜的正常生长需求。常规化肥处理组油菜干物质重逐年下降,说明长期单施化肥不仅不能提高油菜产量,还不利于其正常生长。2012年沼液处理组油菜干物质重均高于前两年各小区平均值,原因可能在于基肥期施用沼液量百分比高于前两年,沼液过剩养分被油菜吸收用于营养生长,因此确定沼液在油菜各生长期的施用量有重要意义,即可使资源得到优化配置,提高沼液农用效益。

2.2 沼液定位施用对油菜籽营养品质的影响

3年连续施用沼液对油菜籽营养品质的影响如图2所示。3年中油菜籽蛋白质含量随着当年沼液施用量的增加而呈逐渐上升的趋势,2011年油菜籽蛋白质含量显著高于其他两年;随着沼液施用量的增加,除2012年芥酸含量外,油菜籽含油率、芥酸、硫苷含量呈逐渐下降的趋势;油菜籽油酸含量则呈现先上升后下降的趋势,在处理9达最大值。由表4方差分析结果可知,3年各小区油菜籽营养品质除2012年油菜籽蛋白质、含油率、硫苷含量为显著差异外,其余均为极显著差异,说明不同沼液施用量对油菜籽营养品质的影响很大。

由图2可知,各年份油菜籽蛋白质含量均在处理12达最大值,分别为22.42%、26.10%、22.98%,2011年油菜籽蛋白质平均含量高于其他年份,说明2011年的沼液施用方式可能有助于提高其含量。油菜籽含油率变化与蛋白质的变化不同,随沼液施用量的增加,油菜籽含油率有明显的下降趋势,并且其含油率

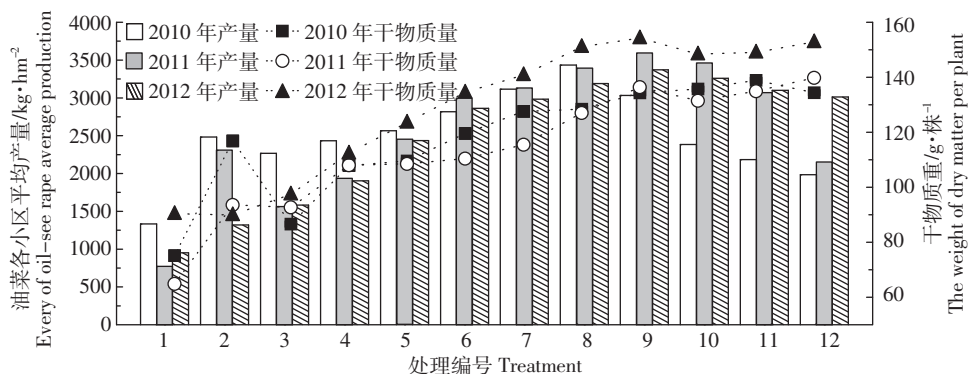


图1 各小区油菜平均产量和单株干物质重与沼液施用量的关系

Figure 1 Average yields and dry weight per plant in experimental plots with different amounts of biogas slurry

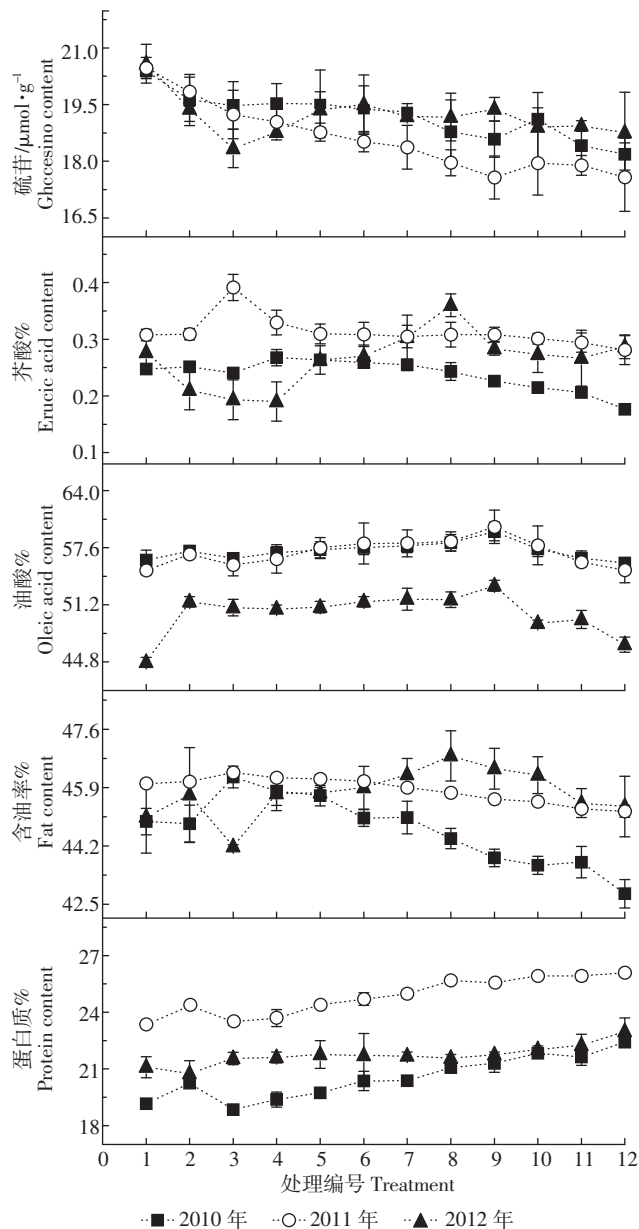


图2 不同处理油菜籽营养指标含量

Figure 2 Contents of nutrients in rapeseeds in different experimental treatments

均低于清水对照和常规化肥对照,3个年份的最小值均在处理12,分别为42.81%、45.21%、45.35%,表明如果要获得高含油率的油菜籽,沼液施用量应该控制在一定范围内。不同施肥处理间油菜籽油酸含量在处理9达到最大值,分别为59.42%、59.94%、53.35%,2012年各处理间油菜籽油酸平均含量较前两年有一定程度降低,因此控制沼液施用量在112 500~132 500 kg·hm⁻²范围内可使油酸含量达到最大值。3年中各小区油菜芥酸含量范围在0.176 3%~0.391 5%,变化范围相对较小,满足国际标准。油菜籽硫苷含量在处理12

有较低值,分别为18.19、17.58、18.76 μmol·g⁻¹。3年的油菜籽营养品质结果表明,沼液长期施用量需控制在112 500~132 500 kg·hm⁻²范围内可使油菜籽各营养品质达到最佳的状态,能够满足优质油菜的要求。

表4 油菜籽营养品质方差分析结果

Table 4 Analysis of variance results of nutrients in rapeseeds

项目	蛋白质/%	含油率/%	油酸/%	芥酸/%	硫苷/μmol·g ⁻¹
2010年 F 值	40.127**	21.365**	4.200**	26.234**	3.529**
2011年 F 值	60.743**	38.029**	10.272**	6.703**	4.855**
2012年 F 值	2.878*	2.972*	29.656**	4.463**	2.744*

注:* 为显著差异, $P < 0.05$; ** 为极显著差异, $P < 0.01$ 。下同。

2.3 沼液定位施用对油菜籽矿质元素的影响

图3为3年连续施用沼液对油菜籽矿质元素的影响,随着沼液施用量的增加,除2011年油菜籽Cu含量外,Fe、Mn、Cu、Zn含量均呈逐渐上升的趋势;而油菜籽Ca、Mg含量则出现先上升后下降的趋势。由表5方差分析结果可知,不同沼液量处理间油菜籽Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg含量均存在极显著差异。

油菜籽6种矿质元素含量的变异系数中,Cu的3年年际变异系数变化较小,分别为6.84%、5.64%、6.72%;Fe和Mn的年际变异系数相对较大,分别为11.09%、12.80%、11.81%和10.25%、10.33%、10.54%;Zn和Ca的年际变异系数则是随着年际的增加而增加,分别为2.49%、6.68%、17.58%和2.78%、3.93%、13.71%;Mg的年际变异系数变化与Zn和Ca相似,但2011年略低于2010年。说明沼液施用对油菜籽Fe和Mn的调控作用和改善效果相对较大,而油菜籽Cu含量的稳定性则相对较好,Zn、Ca、Mg含量波动较大且不稳定。研究结果表明,长期施用沼液并不会导致矿质元素平均含量的剧烈变化,不断增加沼液的施用量能提高油菜籽Fe、Mn、Cu、Zn的含量,但油菜籽Ca和Mg的含量需控制在处理8的沼液施用量才能达到最优水平,因此长期施用沼液促进油菜籽矿质元素含量的最适沼液施用量应控制在101 250~132 500 kg·hm⁻²范围内。

3 讨论

连续沼液农用定位试验结果表明,与清水对照和常规化肥处理相比,适量的沼液施用能提供充足的营养元素供油菜生长发育需要,增加叶面光合作用^[21],从而有利于提高油菜产量。张媛等^[22]、熊飞等^[23]研究表明,随着沼液施用量的增加,能显著提高油菜的产量,应用经济价值好,环境效应高,促进了作物的无公害生产,

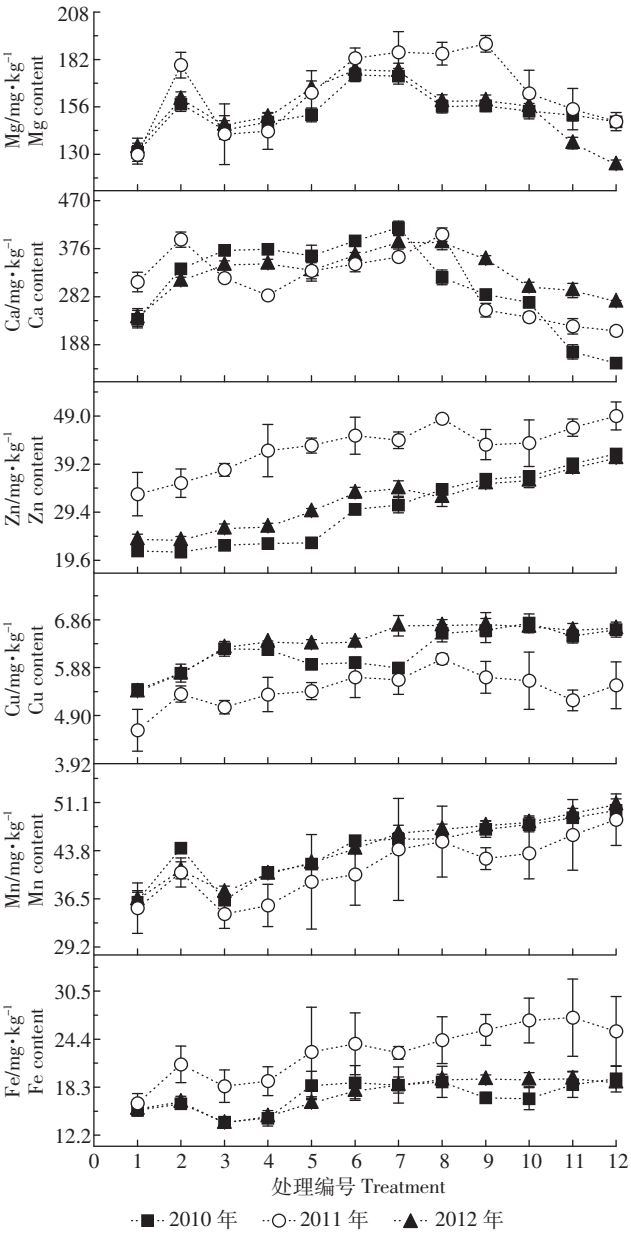


图 3 不同处理油菜籽矿质元素含量
Figure 3 Mineral contents of rapeseeds in each experimental treatment

但是在高沼液施用量处理条件下油菜产量都存在一定程度的降低,本研究也印证了此结论。通过连续 3 年沼液施用,在高沼液施用量条件下油菜产量确有下降,但将沼液施用量维持在一定水平,可保持油菜高产,因此确定沼液长期施用量对农业生产有积极意义。李志玉等^[24]研究表明,在油菜生长期充分供给磷、钾、硼肥的条件下,施氮肥能促进苗期生长,增加干物质积累,最有利于生育后期的产量构建。本试验中沼液处理 8 和处理 9 的油菜不仅产量最大,而且干物质重也有较大值,说明适宜的沼液施用量既可以提高油

表 5 油菜籽矿质元素含量的变异统计

Table 5 Coefficients of variation of mineral contents in rapeseeds

元素	年份	变幅/mg·kg ⁻¹	变异系数 CV/%	F 值
Fe	2010	13.85~19.36	11.09	4.945**
	2011	16.25~27.14	12.80	3.359**
	2012	13.55~20.45	11.81	22.375**
Mn	2010	36.23~49.91	10.25	85.109**
	2011	34.2~48.5	10.33	2.986**
	2012	35.26~51.45	10.54	84.612**
Cu	2010	5.43~6.79	6.84	23.889**
	2011	4.60~6.06	5.64	3.533**
	2012	5.39~6.76	6.72	37.053**
Zn	2010	21.28~41.28	2.49	390.217**
	2011	33.09~49.02	6.68	7.160**
	2012	22.61~41.09	17.58	83.424**
Ca	2010	151.8~416.9	2.78	155.495**
	2011	215.0~403.6	3.93	75.738**
	2012	241.5~388.4	13.71	43.538**
Mg	2010	131.1~173.5	7.58	4.945**
	2011	129.7~190.6	5.48	13.573**
	2012	124.4~176.4	10.45	52.593**

菜干物质重,也可以增加油菜籽产量。刘晓伟等^[25]研究表明,适量的肥料供给对冬油菜的产量有直接影响,保证高产的前提是油菜花期前充足的养分供给,这都说明油菜各生长期对外源营养物质的需求量不同。通过本试验沼液施用方式与产量之间的结果可知,分期施用不同量的沼液可直接影响油菜产量。本田间试验表明,当沼液施用量控制在 101 250~132 500 kg·hm⁻²(处理 8 和处理 9)范围时,基肥施用百分比为 37%左右,苗肥施用百分比为 47%左右,基肥施用百分比为 16%左右,最适宜油菜生长发育,其产量达到最大值,长期施用沼液的农业生产效益高,从而可促进沼液资源最优使用。

油菜籽粒营养品质的优劣直接关系到油菜本身的经济价值,因此选择优良油菜品质,成为了广大科技工作者研究的重点。本研究油菜籽蛋白质含量在沼液施用量为 180 000~183 500 kg·hm⁻²(处理 12)时出现最大值,而含油率则与蛋白质含量变化相反。根据日本学者杉本“底物竞争”假说,油菜籽中的蛋白质、油脂之间存在着底物竞争,即油菜籽粒蛋白质含量与含油率呈显著负相关^[26-28],本研究结果与其一致。含油率是评价油菜籽质量优劣的重要指标之一,含油率≥42.0%的油菜籽被评为 1 级(最高等级),3 年沼液施用的油菜籽含油率均满足 1 级标准要求。油酸含量在

沼液施用量为 112 500~132 500 kg·hm⁻²(处理 9)时有最大值。芥酸不容易被人体消化吸收,因此宜选择低芥酸油菜作食用,各处理油菜籽芥酸含量满足小于 1%的国际标准。硫苷的水解产物如硫氰酸酯、异硫氰酸酯等毒性高,为避免人畜食用中毒,选择低硫苷含量的油菜更具有经济价值,本研究硫苷含量在处理 12 时最小。由于沼液对油菜各营养品质指标的影响不同,综合考虑认为,当沼液施用量控制在 112 500~132 500 kg·hm⁻²(处理 9)范围内,基肥、苗肥、薹肥施用百分比分别为 37%、47%、16%左右时,油菜的营养品质最佳,这与孙可刚等^[29]和邹娟等^[30]研究肥料配比施用对提高油菜籽品质的影响结果相似。

矿质元素与人体健康息息相关,是满足动植物正常生长的必需营养元素,油菜经过加工所获得的油是人类的主要食用油,通过研究不同施肥方式来提高油菜籽粒的矿质元素含量具有重要的意义。与清水对照和常规化肥对照相比,沼液施用有利于油菜籽粒矿质元素 Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg 含量的增加,这与沈金雄等^[31]研究结果相似,即施用磷肥能较大幅度地提高甘蓝型油菜籽粒 Fe、Cu 和 Zn 等矿质元素的含量。沼液处理油菜籽 Cu 含量 3 年变异系数较小,较为稳定;而 Fe 和 Mn 含量变异系数偏大,有较大的波动;Zn、Ca、Mg 含量 3 年变异系数有逐渐增大的趋势,说明施用沼液能改善油菜对 Zn、Ca、Mg 元素的吸收;但在高沼液施用量处理条件下会导致 Ca 和 Mg 含量降低,因此控制沼液施用量在 101 250~132 500 kg·hm⁻² 范围时,油菜的矿质元素含量能维持较高水平,使沼液长期施用有利于保持农业可持续发展。

4 结论

通过 3 年定位施用沼液与清水对照和常规施用化肥种植油菜对照相比,施用沼液可显著提高油菜产量和品质,但沼液施用量需控制在一定范围内并且合理分期施用才有利于油菜可持续生产。长期单施化肥种植油菜会导致产量逐年下降,品质不高,油菜生长较差,不利于可持续农业生产。过高的沼液施用会使油菜籽粒产量下降,含油率降低,影响油菜的经济价值,降低沼液利用效益。当沼液施用量控制在 101 250~132 500 kg·hm⁻² 范围内,基肥施用量占总施用量的百分比为 37%左右,苗肥施用量为 47%左右,薹肥施用量为 16%左右时,油菜生长良好,产量相对较高,油菜品质最佳,经济效益较高,有利于沼液的长期农作。

参考文献:

- [1] 郭月玲,张磊,曹金留.沼液在农业生产中的应用研究现状及前景[J].江西农业学报,2011,23(5):154-156.
GUO Yue-ling, ZHANG Lei, CAO Jin-liu. Research actuality and prospect of biogas slurry application in agricultural yield[J]. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2011, 23(5):154-156.
- [2] 李炜雯,曲英华,徐奕琳,等.不同发酵原料沼液的养分含量及变化[J].中国沼气,2012,30(3):17-21.
LI Wei-wen, QU Ying-hua, XU Yi-lin, et al. Change of nutrition contents of biogas slurry with different fermentation raw materials[J]. *China Biogas*, 2012, 30(3):17-21.
- [3] 韩晓莉,李博文,王小敏,等.沼液配方肥肥效特点及其对油菜硝酸盐含量的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):265-269.
HAN Xiao-li, LI Bo-wen, WANG Xiao-min, et al. Effects of applying biogas slurry-based fertilizer on fertilization and nitrate content in rape[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3):265-269.
- [4] 张全国,周雪花,李鹏鹏,等.沼液复合型杀虫剂的有效期和生态环保性能[J].农业工程学报,2008,28(8):219-222.
ZHANG Quan-guo, ZHOU Xue-hua, LI Peng-peng, et al. Periods of validity and eco-friendly characteristics of compound pesticide composed by the anaerobic fermentation slurry and additives[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 28(8):219-222.
- [5] 马艳,李海,常志州,等.沼液对植物病害的防治效果及机理研究 I:对植物病原真菌的抑制效果及抑菌机理初探[J].农业环境科学学报,2011,30(2):366-374.
MA Yan, LI Hai, CHANG Zhi-zhou, et al. Biocontrol effect and mechanism of biogas slurry on plant disease I: Primary study of growth inhibition effects and mechanism on phytopathogen fungi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):366-374.
- [6] 陶秀萍,董红敏,尚斌,等.新鲜猪沼液和牛沼液对农作物病原真菌抑制作用的比较研究[J].农业环境科学学报,2011,30(7):1443-1449.
TAO Xiu-ping, DONG Hong-min, SHANG Bin, et al. Comparison of inhibiting effects between fresh effluents of anaerobically digested piggery waste and anaerobically digested dairy waste on plant pathogenic fungi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7):1443-1449.
- [7] 钟攀,李泽碧,李清荣,等.重庆沼气肥养分物质和重金属状况研究[J].农业环境科学学报,2007,26(增刊):165-171.
ZHONG Pan, LI Ze-bi, LI Qing-rong, et al. Contents of selected nutrients and heavy metals in biogas slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl):165-171.
- [8] 王琳,吴珊,李春林.粪便沼液沼渣中重金属检测及安全性分析[J].内蒙古农业科技,2010(6):56-57.
WANG Lin, WU Shan, LI Chun-lin. Safety analysis of heavy metal detection on excrement, biogas slurry and biogas dregs[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2010(6):56-57.
- [9] 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 yield, soil quality and environmental safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7):

- 1328-1336.
- [10] 王卫平, 陆新苗, 魏章焕, 等. 施用沼液对柑桔产量和品质以及土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2300-2305.
WANG Wei-ping, LU Xin-miao, WEI Zhang-huan, et al. Influence of applying biogas slurry on yield and quality of citrus and soil environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2300-2305.
- [11] 王宗寿. 利用沼液种植黑麦草对土壤环境质量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 172-175.
WANG Zong-shou. Effects of fertilization with biogas slurry on soil planting tetragold-ryegrass[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl): 172-175.
- [12] 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.
- [13] Bauer A, Mayr H, Hopfner-Sixt K, et al. Detailed monitoring of two biogas plants and mechanical solid-liquid separation of fermentation residues[J]. *Journal of Biotechnology*, 2009, 142(1): 56-63.
- [14] Möller K, Müller T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2012, 12(3): 242-257.
- [15] Huang H Y, Cao J L, Wu H S, et al. Elevated methane emissions from a paddy field in southeast China occur after applying anaerobic digestion slurry[J]. *GCB Bioenergy*, 2013, doi: 10. 1111/gcbb. 12088.
- [16] Abubaker J, Cederlund H, Arthurson V, et al. Bacterial community structure and microbial activity in different soils amended with biogas residues and cattle slurry[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013(72): 171-180.
- [17] Jia Y, Sun G X, Huang H, et al. Biogas slurry application elevated arsenic accumulation in rice plant through increased arsenic release and methylation in paddy soil[J]. *Plant Soil*, 2013, 365: 387-396.
- [18] Xu C M, Tian Y, Sun Y X, et al. Effects of biogas slurry irrigation on growth, photosynthesis and nutrient status of *Perilla frutescens* seedlings[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(2): 3381-3390.
- [19] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Soil Science Society of China. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [20] 张锦芳, 蒲晓斌, 李浩杰, 等. 近红外光谱仪测试四川生态区甘蓝型油菜籽粒品质的研究[J]. 西南农业学报, 2008, 21(1): 238-240.
ZHANG Jin-fang, PU Xiao-bin, LI Hao-jie, et al. Analysis of *Brassica napus* seed quality in Sichuan ecological region by near-infrared spectroscopy[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21(1): 238-240.
- [21] 赵曙光, 任广鑫, 杨改河, 等. 线辣椒叶面喷施沼液的效应[J]. 西北农业学报, 2007, 16(3): 128-131.
ZHAO Shu-guang, REN Guang-xin, YANG Gai-he, et al. Effect of spraying biogas slurry on capsicum[J]. *Acta Agriculture Boreali-Occi-*
- dentalis Sinica*, 2007, 16(3): 128-131.
- [22] 张 媛, 洪坚平, 任济星, 等. 沼液对油菜产量及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2007, 35(5): 54-57.
ZHANG Yuan, HONG Jian-ping, REN Ji-xing, et al. Research on biogas slurry impact on the output and quality of oilseed rapes[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2007, 35(5): 54-57.
- [23] 熊 飞, 孙钦平, 李吉进, 等. 沼肥施用对油菜产量、品质和环境效应的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(24): 152-156.
XIONG Fei, SUN Qin-ping, LI Ji-jin, et al. Study on effect of biogas fertilizer on rape yield, quality and environment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(24): 152-156.
- [24] 李志玉, 郭庆元, 廖 星, 等. 不同氮水平对双低油菜中双9号产量和品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(2): 78-82.
LI Zhi-yu, GUO Qing-yuan, LIAO Xing, et al. Effects of different amount of nitrogen on yield, quality and economics of Zhongshuang No. 9[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2007, 29(2): 78-82.
- [25] 刘晓伟, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 直播冬油菜干物质积累及氮磷钾养分的吸收利用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23): 4823-4832.
LIU Xiao-wei, LU Jian-wei, LI Xiao-kun, et al. Dry matter accumulation and N, P, K absorption and utilization in direct seeding winter oilseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(23): 4823-4832.
- [26] Rathke G W, Christen O, Diepenbrock W. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations[J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(2-3): 103-113.
- [27] Brennan R F, Mason M G, Walton G H. Effect of nitrogen fertilizer on the concentrations of oil and protein in canola (*Brassica napus*) seed[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(3): 339-348.
- [28] 张子龙, 王 瑞, 李加纳, 等. 密度和氮素与甘蓝型黄籽油菜主要品质的关系[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(3): 50-53.
ZHANG Zi-long, WANG Rui, LI Jia-na, et al. Effects of planting density and N fertilization on seed colour and related quality characters of yellow-seeded rapeseed[J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science)*, 2006, 28(3): 50-53.
- [29] 孙可刚, 王亚莉, 鹿智江, 等. 油菜氮磷钾元素的需肥规律和施肥研究[J]. 土壤肥料, 2002(4): 35-37.
SUN Ke-gang, WANG Ya-li, LU Zhi-jiang, et al. Study on nutritional character of rape and potassium fertilizer application effect[J]. *Soils and fertilizers*, 2002(4): 35-37.
- [30] 邹 娟, 鲁剑巍, 李银水, 等. 氮、磷、钾、硼肥对甘蓝型油菜籽品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 961-968.
ZOU Juan, LU Jian-wei, LI Yin-shui, et al. Effects of N, P, K and B fertilization on quality of *Brassica napus* [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 961-968.
- [31] 沈金雄, 李志玉, 廖 星, 等. 磷对甘蓝型油菜产量及矿质营养吸收与积累的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(8): 1231-1235.
SHEN Jin-xiong, LI Zhi-yu, LIAO Xing, et al. Effect of phosphorus on yield and mineral nutrient absorption and accumulation in rape seed (*Brassica napus* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(8): 1231-1235.