

猪场肥水配制营养液对油菜苗期生长的影响

张月^{1,2}, 邱凌^{1,3*}, 赵君怡², 石亚楠², 张龙江⁴, 张克强², 王风^{2*}

(1.西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3.西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4.环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要:规模化畜禽养殖废水处理和利用是限制养殖业健康和可持续发展的重要因素,也是我国当前最为重要的污染源之一。为探讨猪场肥水设施蔬菜资源化利用模式可行性,利用工程处理的猪场肥水配制的营养液开展了油菜水培试验研究。结果表明:当猪场肥水稀释6~8倍时,油菜成活率最高;自由水/束缚水数值较高,油菜生长代谢旺盛;叶绿素含量显著高于标准营养液处理($P < 0.05$),且地上部鲜重与标准营养液处理无显著差异。稀释6倍和8倍的猪场肥水油菜硝酸盐含量比标准营养液处理分别降低了89.98%和90.27%。猪场肥水稀释6~8倍后较适宜油菜水培营养需求,这为猪场肥水的合理利用提供了一定的理论依据。

关键词:猪场肥水;营养液;水培;油菜;硝酸盐

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)01-0193-05 doi:10.11654/jaes.2014.01.025

Effect of Nutrient Solution Diluted from Swine Effluents on Rape Seedlings in Water Cultivation

ZHANG Yue^{1,2}, QIU Ling^{1,3*}, ZHAO Jun-yi², SHI Ya-nan², ZHANG Long-jiang⁴, ZHANG Ke-qiang², WANG Feng^{2*}

(1.College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Agro-environmental Protection, MOA, Tianjin 300191, China; 3.College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4.Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP, Nanjing 210042, China)

Abstract: In China, swine effluents not only cause agro-environmental pollution, but may also restrict healthy and sustainable development of livestock farming. A water cultivation experiment with rape seedlings was used to explore the feasibility of swine effluents as nutrient solution. The experiment included six different dilutions of swine effluents and one inorganic nutrient solution as a control. In the treatments with 6 times and 8 times diluted swine effluents, the survival rate and free water to bound water ratio of rape seedlings were highest, whereas the fresh weight of the aboveground parts had no significant difference from the control. Compared with the inorganic nutrient solution, the contents of chlorophyll increased by 51.08% and 63.16%, but nitrate content reduced by 89.98% and 90.27% in the treatments of 6 times and 8 times diluted effluents, respectively. It is concluded that 6 times or 8 times dilution of the swine effluents could be used for rape soilless cultivation.

Keywords: swine effluents; nutrient solution; water culture; rape; nitrate

我国畜禽养殖业发展迅速,畜禽养殖过程更加专业化、集约化和企业化。与此同时,规模化养殖业产生的大量畜禽粪污,处理和利用率极低,造成养殖场区周边水体和空气的污染,严重制约了养殖业的健康和持续发展。目前针对固体粪便的处理和利用工艺较

多,模式比较成熟,但规模化养殖废水产生量大、有机负荷高、并含有大量病原微生物^[1],直接排放势必对水体、大气造成严重污染,并且危害人畜健康;达标处理的模式虽然能够实现废水的无害化处理,但处理成本较高,微利的畜禽养殖业难以承受。养殖废水经过简单处理后转变为水肥资源循环利用是处理的最佳途径^[2]。国内外已经有很多应用养殖肥水进行大田作物灌溉试验的研究^[3-6],但是往往要求养殖场周边有较大面积的农田。结合我国规模化畜禽养殖业和农业生产的特征,应用营养液水培蔬菜生产方法是一种新兴工厂化途径,而利用养殖肥水经过厌氧消化和稀释等预处理后配制营养液水培设施蔬菜将有助于减少畜禽

收稿日期:2013-06-27

基金项目:国家科技支撑项目(2012BAD15B02);天津市科技支撑计划重点项目(12ZCZDNC01800);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项;公益性行业(农业)科研专项(201303101-04)

作者简介:张月(1988—),女,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为农业废弃物资源化利用。E-mail:zhangyue8805@163.com

*通信作者:邱凌 E-mail:ql2871@126.com

王风 E-mail:wangfeng-530@163.com

养殖污染、节约水肥投入成本。已有研究表明,有机液肥替代标准营养液是可行的^[7],且能够更好地促进蔬菜的生长,提高产量和品质^[8]。虽然国内外已经开展了大量生活污水及工业废水灌溉蔬菜的试验研究^[9-12],但应用养殖肥水进行蔬菜水培的研究较少,特别是养殖肥水含有更高的氮素浓度。确定养殖肥水最适宜的稀释倍数,并且保证较高的产量和品质,将为合理利用猪场肥水水培蔬菜提供重要的理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2013年4月10日至2013年5月21日在农业部环境保护科研监测所日光温室(北纬39°40',东经117°06')内进行,生长期共计40 d。温室内最高气温32.9℃,最低气温12.2℃。用于试验的猪场肥水取自天津市益利来养殖有限公司厌氧消化池。水处理工艺过程:固液分离-过滤和匀浆-厌氧消化3个处理。废水在厌氧消化处理过程中,在厌氧微生物的作用下,辅以双效增温(太阳能日光温室和循环管道增温)来进行厌氧消化,在去除绝大部分COD的同时产生少量的沼气。厌氧消化池为改良塞流式厌氧池,容积100 m³,日处理猪场肥水20 m³,水力停留期为5 d。猪场肥水水质见表1。

1.2 试验装置

应用培养槽开展水培试验,培养槽尺寸:长20 cm、宽20 cm、高35 cm,PVC材质,液面上放置一块均匀钻出4个直径3 cm、间距10 cm孔的聚乙烯板,该板长20 cm、宽20 cm、厚0.3 cm。每个培养槽加入营养液11 L。用氧气泵给各培养槽串联打氧。定植时期,用蒸馏水洗净油菜根部后插入孔内,使根部完全浸于营养液中,并用海绵加以固定(图1)。

1.3 试验设计

试验设置7个处理,T1,猪场肥水原水;T2,猪场肥水稀释2倍;T3,猪场肥水稀释4倍;T4,猪场肥水稀释6倍;T5,猪场肥水稀释8倍;T6,猪场肥水稀释10倍;CK,标准营养液按照斯泰纳通用配方配制(其中大量元素浓度如下:氮浓度为168 mg·L⁻¹,磷浓度为31 mg·L⁻¹,钾浓度为156 mg·L⁻¹^[13]。每个处理3个

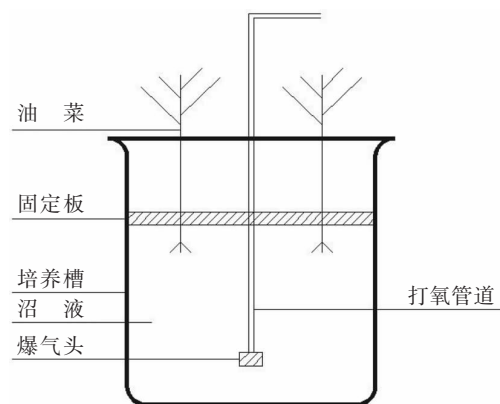


图1 猪场肥水水培营养槽

Figure 1 Device for water culture using swine effluents

重复,每个水培槽定植4株油菜。每隔2 d用蒸馏水补充因蒸散发造成的水分损失。

1.4 取样与测定方法

成活率为每个处理3个重复中成活的油菜数与油菜植株总数的比值;地上部鲜重是将油菜植株从根部切断后,用滤纸吸净表面水分后置于千分之一天平上测量获得;植物总含水量在105℃下烘0.5 h,70~80℃烘12 h后称量测定;自由水含量采用蔗糖溶液浸泡培养6 h后用手持糖度仪测定^[14];叶绿素含量使用SPAD-502 Plus便携式叶绿素仪测定;硝酸盐含量用蒸馏水沸水浴浸提30 min并用水杨酸-硫酸溶液显色后用紫外分光光度法测定^[14]。

数据采用SAS v9.0进行差异显著性分析,采用Duncan新复极差法在0.05水平上检测;图表处理采用Excel 2003和Origin 8完成。

2 结果与讨论

2.1 猪场肥水配制营养液对油菜成活率和鲜重的影响

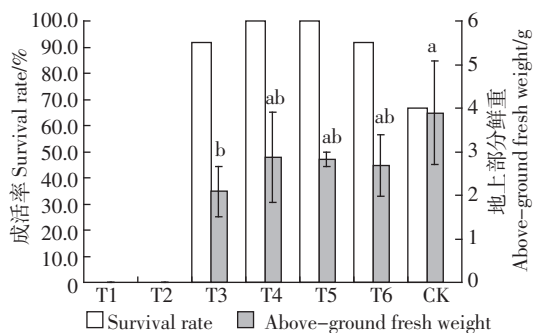
猪场肥水配制营养液水培油菜成活率和地上鲜重见图2。油菜的成活率呈现T4、T5>CK、T3、T6>T1、T2的趋势,表明过高浓度的猪场肥水会导致油菜死亡,适宜浓度的猪场肥水比标准营养液更利于幼苗的存活。这与前人在菠萝蜜的扦插过程中施用有机营养液的研究结果相同^[15]。本试验条件下相对适宜的猪场肥水稀释倍数为6~8倍。

油菜地上部鲜重呈现CK、T4、T5、T6>T3的趋势,CK与T4、T5、T6之间差异不显著,CK与T3间差异

表1 猪场肥水水质

Table 1 Quality of swine effluents tested

TKN/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	K/mg·L ⁻¹	Ca/mg·L ⁻¹	Mg/mg·L ⁻¹	pH	As/mg·L ⁻¹	Zn/mg·L ⁻¹	Cu/mg·L ⁻¹
634.82	616.85	3.49	416.2	14.35	462	116	63	8.21	0.2	5.46	2.58



bar 表示标准偏差。下同
Bars indicate standard deviation. Columns with different letters designate significant difference at $P<0.05$. The same below

图2 猪场肥水配制营养液水培条件下油菜成活率和地上部分鲜重

Figure 2 Survival rate and above-ground fresh weight of rape in different treatments

达到显著水平,表明过高浓度养分含量会抑制蔬菜生长,特别是在高铵态氮含量条件下,可能会引起膜脂过氧化而形成毒害作用,前人在大豆、烟草等植物中均得到了相似的结论^[16-17]。猪场肥水经稀释氮素浓度可能较适宜幼苗生长需求,但氮素形态及比例可能不是油菜最适宜的,油菜属于喜硝蔬菜,搭配适量的铵态氮更有利于其生长,但铵态氮比例超过 50%时,会显著抑制其生长^[18],此外 P、K 等营养元素含量也有可能不足^[19]。

2.2 猪场肥水配制营养液对油菜含水率的影响

猪场肥水配制营养液水培油菜叶片含水率见图 3。油菜叶片含水率呈现 $T6>CK>T5$ 、 $T4>T3$ 的趋势, $T4$ 与 $T5$ 处理间差异不显著,其他各处理之间差异均达到显著水平($P<0.05$),表明油菜幼苗的含水率随猪场肥水稀释倍数的增大而升高。

自由水/束缚水是反应植物组织代谢和抗逆性强弱的重要指标,当自由水/束缚水值较高时,植物组织或器官的代谢活动旺盛,生长也较快,但抗逆性较弱;

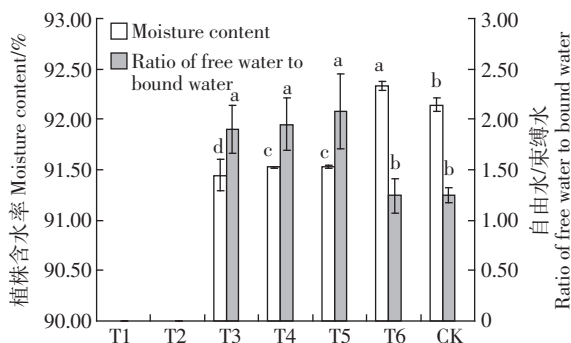


图3 猪场肥水配制营养液水培条件下油菜含水率

Figure 3 Moisture contents of rape seedlings in different treatments

反之,则生长较缓慢,但抗逆性较强^[20]。在本试验中,油菜植株的自由水/束缚水呈现 $T5>T4>T3>CK>T6$ 的趋势,且 $T5$ 、 $T4$ 与 CK 、 $T6$ 之间差异均达到显著水平($P<0.05$)。 $T5$ 、 $T4$ 处理植株生长代谢较旺盛,适宜油菜幼苗的生长; $T3$ 处理营养液中养分含量偏高,油菜幼苗可能遭受轻微铵毒害; $T6$ 处理导致营养元素不足,生长代谢较慢。

2.3 猪场肥水配制营养液对油菜叶绿素含量的影响

猪场肥水配制营养液水培油菜叶绿素含量见图 4。油菜幼苗的叶绿素含量呈 $T5>T4>T3>T6>CK$ 的趋势,且除 $T5$ 、 $T4$ 、 $T3$ 间和 $T4$ 、 $T3$ 、 $T6$ 间差异不显著外,其余处理间差异均达到显著水平($P<0.05$),表明施经过适当稀释的猪场肥水可以显著提高油菜叶片中叶绿素的含量。洪坚平等^[21]在研究中也发现,施用沼肥与施用无机化肥有利于促进油菜叶绿素的合成,在小麦作物中也得到类似的结论^[22],认为施用发酵液肥促进叶绿素的合成,但施用量增加到一定程度后叶绿素含量开始降低。此外,叶绿素的合成还需要有微量元素的参与,例如锰是维持叶绿体结构所必需的元素^[23],猪场肥水不仅能够提供大量营养元素,也补充了微量元素,且通过微生物活动提高了其有效性,会对叶绿素合成起到积极的作用^[24]。

2.4 猪场肥水配制营养液对油菜硝酸盐含量的影响

猪场肥水配制营养液水培油菜硝酸盐含量见图 5。不同猪场肥水水培油菜植株硝酸盐含量呈现 $CK>T3$ 、 $T4$ 、 $T6$ 、 $T5$ 的趋势。猪场肥水水培处理显著降低了油菜硝酸盐含量($P<0.05$),比标准营养液处理硝酸盐含量降低了 89.94%~92.75%,猪场肥水处理间没有显著差异。

硝酸盐含量是评价蔬菜安全性的重要指标之一,因为过量的硝酸盐摄入量会引发人体高铁血红蛋白症、形成强致癌物亚硝胺。蔬菜的硝酸盐含量与施肥

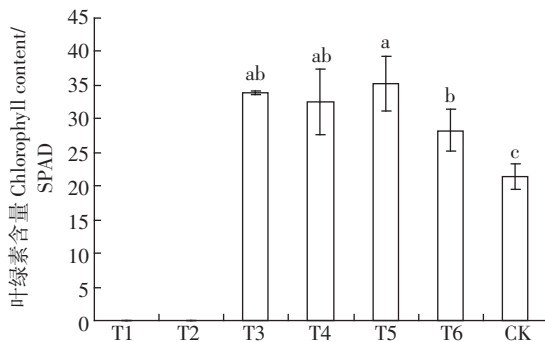


图4 猪场肥水配制营养液水培条件下油菜叶绿素含量
Figure 4 Chlorophyll contents in the leaves of rape in different treatments

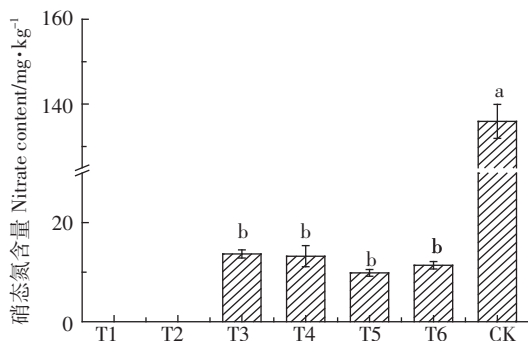


图5 猪场肥水配制营养液水培条件下油菜硝态氮含量
Figure 5 Nitrate contents in the leaves of rape in different treatments

模式密切相关^[25],而人体摄入的硝酸盐有81.2%来自蔬菜^[26]。大量研究表明有机液肥可显著降低油菜等叶类蔬菜中硝酸盐含量,降幅在7.95%~87.61%之间^[27-29]。本研究中猪场肥水处理油菜硝酸盐含量远远低于标准营养液对照处理,且低于《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)对叶类蔬菜硝酸盐含量限值(3000 mg·kg⁻¹)^[30],表明应用养殖肥水显著提高了蔬菜的安全性。标准培养液中氮素以硝态氮形式存在,硝态氮被植物吸收后首先转化成铵态氮,进而形成氨基酸被植物利用,过量的硝态氮投入将造成硝酸盐在植物体内的积累^[31]。而经过厌氧消化的猪场肥水,氮素主要以铵态氮的形式存在,可以直接被吸收并转化为氨基酸,无需经过硝态氮吸收和转化成铵态氮的过程^[32]。同时,植物对铵态氮的吸收将抑制其对硝态氮的吸收,由此共同导致猪场肥水水培油菜植株硝酸盐含量很低^[33-34]。

3 结论

(1)稀释6~8倍的猪场肥水水培油菜有利于提高成活率,稀释6~10倍的猪场肥水水培油菜能够获得与对照处理相当的鲜重。

(2)适宜浓度的猪场肥水水培油菜其自由水/束缚水的比值较高,表明生长代谢旺盛。猪场肥水水培的油菜提高了品质,硝酸盐含量降低尤其显著,叶绿素含量也显著提高。

(3)建议经过8倍稀释的猪场肥水比较适宜进行油菜水培。此外,建议调整肥水中氮素形态的配比,并补充相对缺乏的营养元素,促进猪场肥水的资源化利用和蔬菜品质的提高。

参考文献:

[1] Lansing S L, Martin J F. Use of an ecological treatment system(ETS) for

removal of nutrients from dairy wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(3):235-245.

[2] Mohammad M J, Mazahreh N. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34(9-10):1281-1294.

[3] 郭海刚, 杜会英, 张克强, 等. 规模化牛场废水灌溉对冬小麦土壤速效氮迁移的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(4):21-25.

GUO H G, DU H Y, ZHANG K Q, et al. Effects of dairy wastewater irrigation on migration of soil available nitrogen[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(4):21-25.

[4] Barkle G F, Stenger R, Singleton P L, et al. Effect of regular irrigation with dairy farm effluent on soil organic matter and soil microbial biomass[J]. *Soil Research*, 2000, 38(6):1087-1097.

[5] Ali I, Morin S, Barrington S, et al. Surface irrigation of dairy farm effluent: Part I nutrient and bacterial load[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 95(4):547-556.

[6] Fugere R, Mameri N, Gallot J E, et al. Treatment of pig farm effluents by ultrafiltration[J]. *Journal of Membrane Science*, 2005, 255(1):225-231.

[7] 张杰, 孙钦平, 魏宗强, 等. 沼渣和沼液对油菜生长及氮素利用率的影响[J]. *北方园艺*, 2009(11):26-29.

ZHANG J, SUN Q P, WEI Z Q, et al. Effect of biogas residue and biogas slurry fertilization on the yield, quality and nitrogen use efficiency of the rape[J]. *Northern Horticulture*, 2009(11):26-29.

[8] Akpan-Idiok A U, Udo I A, Braide E I. The use of human urine as an organic fertilizer in the production of okra (*Abelmoschus esculentus*) in South Eastern Nigeria[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 62:14-20.

[9] Kiziloglu F M, Turan M, Sahin U, et al. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6):716-724.

[10] Mohammad Rusan M J, Hinnawi S, Rousan L. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters[J]. *Desalination*, 2007, 215(1):143-152.

[11] Lubello C, Gori R, Nicese F P, et al. Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation[J]. *Water Research*, 2004, 38(12):2939-2947.

[12] 齐志明, 冯绍元, 黄冠华, 等. 清、污水灌溉对夏玉米生长影响的田间试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2):36-38.

QI Z M, FENG S Y, HUANG G H, et al. Experimental study on effect of irrigation water quality on plant growth of summer corn[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(2):36-38.

[13] 岳胜兵. 沼液作为水培生菜营养液的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2008.

YUE S B. Study on hydroponics with biogas slurry as nutrient solution [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.

[14] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术(面向21世纪课程教材)[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.

[15] 陆玉英, 阮经宙, 苏伟强, 等. 菠萝蜜“一叶一芽”绿枝扦插技术研究

- [J]. 中国南方果树, 2010, 39(4):42-44.
- LU Y Y, RUAN J Z, SU W Q, et al. The research of cuttage technology in jackfruit[J]. *South China Fruits*, 2010, 39(4):42-44.
- [16] 陈磊, 朱月林, 杨立飞, 等. 氮素不同形态配比对菜用大豆生长、种子抗氧化酶活性及活性氧代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3):768-772.
- CHEN L, ZHU Y L, YANG L F, et al. Effects of nitrogen forms and ratios on plant growth, seed anti-oxidation enzyme activities and reactive oxygen metabolism of vegetable soybean[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3):768-772.
- [17] 朱祝军, 喻景权. 氮素形态和光照强度对烟草生长和 H_2O_2 清除酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(4):379-385.
- ZHU Z J, YU J Q. Effect of light intensity and nitrogen form on growth and activities of H_2O_2 -scavenging enzymes in tobacco[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(4):379-385.
- [18] 张树杰, 张春雷, 李玲, 等. 氮素形态对冬油菜幼苗生长的影响[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(6):567-573.
- ZHANG S J, ZHANG C L, LI L, et al. Effects of nitrogen forms on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) seedling growth[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2011, 33(6):567-573.
- [19] 洪坚平, 谢英荷, 孟会生, 等. 水培油菜营养液养分动态变化研究[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1):330-334.
- HONG J P, XIE Y H, MENG H S, et al. Nutrition dynamics in change of culture solution in hydroponic culture rape[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1):330-334.
- [20] Singh V, Pallaghy C K, Singh D. Phosphorus nutrition and tolerance of cotton to water stress; II. Water relations, free and bound water and leaf expansion rate[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96(2):199-206.
- [21] 任济星, 刘文涌, 张媛, 等. 沼渣对油菜产量及品质影响的研究[J]. 现代农业科学, 2009(4):94-96.
- REN J X, LIU W Y, ZHANG Y, et al. The effect of biogas residue on the yield and quality of rape[J]. *Modern Agricultural Sciences*, 2009(4):94-96.
- [22] 孔德杰, 杨改河, 任广鑫, 等. 沼肥不同用量对小麦光合特性和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2008, 17(2):64-69.
- KONG D J, YANG G H, REN G X, et al. Effects of different amount of applied biogas fermentation residues on photosynthesis characteristic and grain yield of winter wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, 17(2):64-69.
- [23] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1994.
- Soil and Fertilizer Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences. Chinese fertilizer[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994.
- [24] 谢佰承, 张春霞, 薛绪掌. 土壤中微量元素的环境化学特性[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊1):132-135.
- XIE B C, ZHANG C X, XUE X Z, et al. Characteristics of environmental chemistry for trace elements in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl1):132-135.
- [25] 高红莉. 施用沼肥对青菜产量品质及土壤质量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊1):43-47.
- GAO H L. Effects of biogas fertilizer on output and quality of *Brassica chinensis* L. and soil quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl1):43-47.
- [26] 魏宗强, 李吉进, 张杰, 等. 沼肥对大白菜产量和品质的影响及其环境效应[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6):168-172.
- WEI Z Q, LI J J, ZHANG J, et al. Effect of biogas fertilizer on the Chinese cabbage yield, quality and environment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(6):168-172.
- [27] 赵凤莲, 孙钦平, 李吉进, 等. 不同沼肥对油菜产量、品质及氮素利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3):127-130.
- ZHAO F L, SUN Q P, LI J J, et al. Effect of different biogas fertilizers on yield, quality and nitrogen use efficiency of rape[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3):127-130.
- [28] 王远远, 沈飞, 刘荣厚, 等. 沼肥对小白菜产量及品质的影响[J]. 可再生能源, 2007, 25(5):40-43, 48.
- WANG Y Y, SHEN F, LIU R H, et al. Effects of anaerobic fermentation residue on the yield and quality of Chinese cabbage[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(5):40-43, 48.
- [29] 苏有勇, 卢怡, 施卫省. 沼肥对无土栽培生菜产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008, 1:60-62.
- SU Y Y, LU Y, SHI W S. Effect of biogas fertilizer on yield and quality of lettuce in soilless culture[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2008, 1:60-62.
- [30] 马伯禄, 吴惠敏, 刘昱, 等. GB18406.1—2001农产品安全质量无公害蔬菜安全要求[S]. 北京:中国标准出版社, 2001:1-7.
- MA B L, WU H M, LIU Y, et al. GB18406.1—2001 Safety qualification for agricultural product: Safety requirements for non-environmental pollution vegetable[S]. Beijing: China Standard Press, 2001:1-7.
- [31] Hamblin A, Tennant D, Perry M W. The cost of stress: Dry matter partitioning changes with seasonal supply of water and nitrogen to dryland wheat[J]. *Plant and Soil*, 1990, 122(1):47-58.
- [32] Kramer P J. Water deficit and plant growth[M]. New York: Academic Press, 1983:342.
- [33] 田霄鸿, 李生秀. 几种蔬菜对硝态氮、铵态氮的相对吸收能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2):194-201.
- TIAN X H, LI S X. Uptake capacity of several vegetable crops to nitrate and ammonium[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(2):194-201.
- [34] 陈巍, 罗金葵, 姜慧梅, 等. 不同形态氮素比例对不同小白菜品种生物量和硝酸盐含量的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(3):420-425.
- CHEN W, LUO J K, JIANG H M, et al. Effects of different NO_3^- - N/NH_4^+-N ratio on the biomass and nitrate content of different cultivars of Chinese cabbage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(3):420-425.