

高肥料投入条件下不同污泥用量对油菜生长及品质的影响

李东洁^{1,2,3}, 刘树庆¹, 李 鹏^{2,3}, 赵同科^{3*}, 张成军³, 张丽光¹

(1.河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2.中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘 要:通过盆栽试验,研究高肥料投入条件下,不同污泥施用量对油菜生长及品质的影响。试验设计为不施肥空白对照(CK)、常规施肥(CF)、施用城市污泥减量替代磷肥(SL1)、施用城市污泥等量替代磷肥(SL2)、施用城市污泥高量替代磷肥(SL3)5个处理,重复4次。研究结果显示,适宜的污泥用量可以显著提高油菜产量和根重,并能降低植株体内硝酸盐含量,污泥处理较常规施肥处理产量增加10.12%~55.36%,地上部植株硝酸盐含量降低10.39%~20.57%。但在提高油菜还原型Vc、全氮、全钾含量方面效果不明显。

关键词:城市污泥;油菜;产量;品质

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)09-1752-06 doi:10.11654/jaes.2013.09.007

The Effects of Different Sewage Sludge Application on Rapeseed Growth and Quality Under High Fertilizer Input

LI Dong-jie^{1,2,3}, LIU Shu-qing¹, LI Peng^{2,3}, ZHAO Tong-ke^{3*}, ZHANG Cheng-jun³, ZHANG Li-guang¹

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2.Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3.Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Sewage sludge contains organic matter, nitrogen, phosphorus and other plant nutrient elements. As a result, it may modify the soil properties and improve plant growth. The objective of this study was to examine if different sewage sludge applications, each of which constitutes high fertilizer input, affects rapeseed growth, vitamin C, nitrate, total nitrogen, total phosphorous and total potassium. Pot experiments were conducted with five treatments, replicated 4 times. The treatments included control without fertilization (CK), conventional chemical fertilization (CF), sewage sludge amount with phosphate equivalent to 70, 100, and 130% of conventional chemical fertilizer application (SL1, SL2, SL3, respectively). Results indicated the substitution of chemical fertilizer with sewage sludge based on phosphorous contents increased the yield by 10% to 55%, decreased the nitrate content in plant by 10% to 21% and moderately increased root biomass, as compared with the conventional fertilization treatment. However, effects on rapeseed vitamin C, total nitrogen and potassium contents were not obvious. The results obtained from this study indicated that sewage sludge improved the yield and quality of rapeseed.

Keywords: urban sludge; rape; fresh weight; quality

我国人多地少,粮食增产压力很大,某些地区为提高农作物产量盲目过量施用化肥,再加上化肥利用率低,已引起作物产量品质降低、环境污染、甚至危害人体健康等一系列问题^[1-2]。蔬菜因其需肥量大、经济效

益高等特点最容易受到盲目过量施肥的影响,由此产生的菜田氮磷流失现象是主要的环境污染问题,且由于日常人体会摄入多种蔬菜,过量施肥造成的蔬菜体内硝酸盐累积^[3]等危害对人体健康就显得极为重要。

城市污泥是污水处理厂在废水处理过程中所产生的沉淀物质,是由有机残片、细菌菌体、无机颗粒及胶体等组成的极其复杂的非均质体^[4]。随着工业生产的发展和城市人口的迅速增加,工业废水与生活污水的排放量日益增多,污泥数量大幅增加,目前我国每年排放干污泥约为 5.00×10^6 t,且在不断增加^[5],有些

收稿日期:2013-01-16

基金项目:亚熔盐法氧化铝清洁生产/赤泥源头减污关键技术与应用集成系统(2011AA060701);农业面源污染动态监测全程阻控减排技术与示范(2012BAD15B01)

作者简介:李东洁(1987—),女,河北沧州人,在读硕士,主要从事土壤环境质量的研究。E-mail:lidongjie.happy@163.com

* 通信作者:赵同科 E-mail:tkzhao@126.com

含有较高的有机质和丰富的氮磷钾等矿质营养元素。污泥无害化处理后能够改善土壤物理性质、提高土壤肥力、增加土壤微生物多样性和提高酶活性,可以作为肥料或土壤的改良剂^[6-8],可见污泥也是一种很好的肥料资源,如不能很好利用则会造成资源浪费。同时,不可否认,污泥中含有大量的有害物质,如重金属、细菌、各种寄生虫卵、大量的病原微生物等,污泥闲置不仅占用大量土地,若处理不当还会造成二次环境污染。因此,如何妥善科学地处置污泥是全球共同关注的课题,当今的共识是将污泥视为一种资源加以有效利用,在治理污染的同时变废为宝,对实现农业的可持续发展具有重要意义。

目前,世界上大多数国家对污泥的处置普遍采用土地利用、陆地填埋、焚烧、投海、制造材料等方式,污泥的土地化利用因其良好的环境效益和经济效益成为污泥资源化利用的研究热点^[9]。1998 年美国城市污泥堆肥及利用占其污泥产量的 53%,2002 年美国约 60%的污泥用来改善土壤或者作为农作物的肥料。欧洲污泥农用更为广泛,40%以上用于农业土地,法国、西班牙、英国、丹麦和卢森堡的污泥农业利用率超过 50%^[10]。北美和欧洲的污泥农用率还在不断持续增加,而我国的污泥农用率不足 10%。针对当前污泥农用现状,国内许多学者对城市污泥的土地利用进行了研究,充分肯定了污泥的土地利用效果。蔡全英等^[11]采用盆栽试验的方式研究发现,水稻土、赤红壤、石灰性土和褐土上适量施用污泥盆栽作物,可以显著增加通菜的产量,改善萝卜品质。周东兴^[12]研究发现城市污泥混合堆肥对大麦生长有较大影响,施用城市污泥的处理增产 172%~272%,土壤肥力明显提高。徐欣等^[13]研究共消化污泥对贫瘠土壤性质和蔬菜品质的影响,研究表明共消化污泥施用可以显著提高土壤有机质、总氮、总磷含量,效果优于等养分的化肥施用,并能使营养元素在土壤中累积,促进蔬菜对氮、磷的吸收和利用。已有大量研究表明,在一些粮食作物、景

观绿化苗木、草皮种植过程中,施用城市污泥可以改善土壤的理化性状,提高土壤的肥力,但对于在高肥料投入条件下,不同污泥量施用对蔬菜品质、氮素利用率方面的研究比较少。因此,本文旨在应用盆栽试验的方法,研究在高肥料投入条件下,污泥部分替代化肥,对油菜产量和品质的影响,试图进一步寻求城市污泥的农业利用途径和方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽试验在北京市农林科学院日光温室内进行,供试土壤类型为采自北京市农林科学院院内的壤质土壤,其基本理化性质见表 1。供试作物为油菜,品种为绿冠 F1。供试盆钵为直径 30 cm,高 26 cm 的塑料盆钵。

所用新鲜污泥采自污泥堆置厂,属于脱水堆置污泥,污泥采回后在阴凉通风处风干,风干后的污泥含水率为 12.3%,具体的养分含量及重金属含量见表 2。供试肥料为尿素(N46%)、硫酸钾(K₂O 54%,用于污泥替代各处理)和磷酸二氢钾(P₂O₅ 52%,K₂O 35%,用于常规施普通化肥处理),各污泥处理均不使用磷肥。

1.2 试验方案

试验共设 5 个处理,4 次重复。处理为:①对照(CK),不施肥处理;②施普通化肥(CF),高肥料投入量常规处理;③施用城市污泥减量替代磷肥(SL1),按照 CF 施肥 NPK 比例,以施入普通化肥 P 素的 70%为基准,施入城市污泥完全替代 P 化肥,与 CF 施入化肥 N、K 量的 70%相差用量以施普通化肥补齐;④施用城市污泥等量替代磷肥(SL2),按施入普通化肥 P 素量施入城市污泥完全替代 P 化肥,与 CF 施入化肥 N、K 相差用量以施普通化肥补齐;⑤施用城市污泥高量替代磷肥(SL3),按施入普通化肥 P 素量的 130%施入城市污泥完全替代 P 化肥,与 CF 施入化肥 N、K 量的 130%相差用量以施普通化肥补齐。每个处

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basis physical and chemical properties of soil tested

有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	pH 值	电导率/μS·cm ⁻¹
13.62	0.62	0.83	25.88	56.40	7.85	451

表 2 供试污泥的养分及重金属含量

Table 2 The nutrient and heavy metal contents of the sludge tested

有机质/%	全氮/%	全磷/%	全钾/%	pH 值	电导率/mS·cm ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	As/mg·kg ⁻¹
31.6	2.42	1.69	1.23	7.05	5.46	82.4	80.075	13 254.55	31.4	135.15	41.0

理设4个重复,高肥料投入常规处理控制纯氮在 $0.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,纯磷在 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,纯钾在 $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,依据污泥养分含量施入要求量污泥,用量不足的氮钾营养元素以尿素、硫酸钾补足用量,具体施肥方案见表3。

土壤取回后,风干过2 mm尼龙筛,城市污泥风干研磨过20目尼龙网筛,每盆装土10 kg,过筛土与污泥混合均匀装盆,对需补施化肥处理,将化肥均匀洒至表层,施入1.5 L自来水(相当于保持土壤田间持水量的60%),平衡时间为5 d。2011年8月29日播种,2011年9月16日定苗,每盆留苗4株,试验过程中,没有施用任何化学肥料和杀虫剂,收获时小心进行,以不损伤油菜的茎叶和根系。实验于10月9号结束。

表3 盆栽施肥处理方案

Table 3 Potted fertilization treatment schemes

处理	施肥量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$			
	污泥	尿素	硫酸钾	磷酸二氢钾
CK	0	0	0	0
CF	0	11.00	0	8.8
SL1	83	3.66	1.64	0
SL2	118	5.23	2.34	0
SL3	154	6.79	3.04	0

1.3 试验测定项目与方法

油菜收获当天采下的植株立即装入封口袋密封,带回实验室后用自来水冲去表面泥土,迅速用吸水纸吸干,以盆为单位称量计产。植株鲜样取回后分成2份,一份测定还原型Vc含量、硝酸盐含量,另外一份置于烘箱 105°C 杀青后于 65°C 烘干,测定全氮、全磷、全钾含量。植株全氮、磷、钾采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}_2$ 消化法处理样品,凯氏定氮法测定氮,比色法测定磷,火焰光度法测定钾;Vc含量采用2,6-二氯酚酚滴定法;硝酸盐含量采用紫外分光光度法^[14]。

1.4 统计分析

采用Excel软件处理试验数据及作图,SAS8.0软件进行统计分析,置信水平为95%($P < 0.05$)。

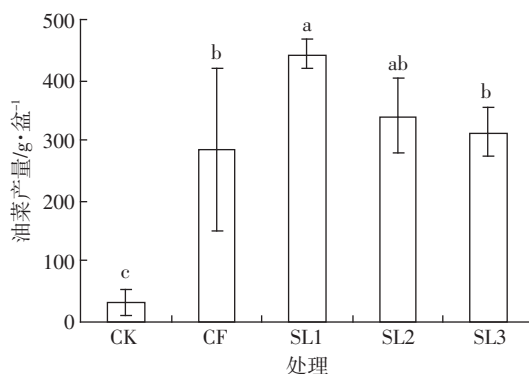
2 结果与讨论

2.1 污泥施用对油菜生长发育的影响

2.1.1 污泥施用对油菜产量的影响

不同污泥处理下油菜的产量见图1。各施肥处理的油菜产量均高于对照CK处理,且差异达到显著水平,与常规施肥CF处理相比,SL1、SL2、SL3处理油菜分别增产55.36%、19.61%和10.12%,其中SL1处理

增产显著,可见污泥减量替代部分化肥可以显著提高油菜的生物产量,主要可能是因为污泥中含有钾、钙、铁、硫、镁等大量元素营养成分和锌、铜、硼、钼等微量元素营养成分,比单一的化肥营养成分多,有利于提高土壤的养分含量,并且污泥中含有较高的有机质,一方面改善了土壤结构,提高了土壤肥力,另一方面适宜的有机质含量提高了土壤微生物和土壤酶活性,这些都有助于改善土壤养分供应,提高作物产量。但在本实验条件下,污泥处理在高量替代部分化肥的情况下与常规施肥产量接近,这表明污泥施用只有在适宜范围内才可以提高油菜的产量,并不是施入越多效果越好。随着污泥用量的增加油菜产量出现下降趋势,这是因为过量的污泥施用有可能破坏土壤结构,甚至带来一些土壤有害物质,前人研究结果表明这可能与污泥中含有的重金属(如铜、锌等)及有机污染物(如多环芳香烃、邻苯二甲酸酯类等)抑制了作物的发芽和生长有关^[15-16]。



图中不同小写字母表示差异达到显著水平($P < 5\%$)

以下图表中字母意义相同

图1 不同污泥处理下油菜的产量

Figure 1 The rape yields of different sludge treatments

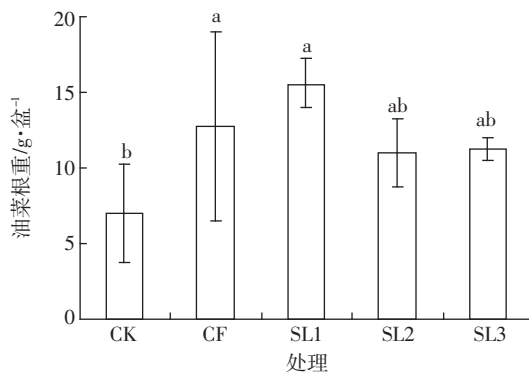


图2 不同污泥处理下油菜的根重

Figure 2 The root weight of rape of different sludge treatments

2.1.2 污泥施用对油菜根重的影响

由图 2 可以看出,与对照处理 CK 相比,所有施肥处理油菜的根重均有所增加,其中 CF、SL1 差异显著,分别提高 80.84%和 120.90%。与常规施肥 CF 处理相比,SL1 处理增加了 22.16%,但未达到显著水平,说明污泥减量替代部分化肥对于油菜根系的发育具有一些积极意义^[17]。而 SL2 和 SL3 与之相比,根重略有降低,但是差异不显著,可能是污泥施用过多,污泥中重金属及其配合物对根系抑制作用逐步体现,降低污泥对根系发育的促进作用,影响到油菜的生长。

2.1.3 污泥施用对油菜根冠比指标的影响

根冠比是作物生长的一个重要指标,是指植物地下部分与地上部分的鲜重或干重的比值,其大小在一定程度上既能反映植株的生长状况,也能反映土壤的营养供应关系。通过对不同污泥处理下的油菜根冠比进行比较(图 3),对照 CK 处理的油菜根冠比最高,表明不施肥的空白对照处理表现出营养亏缺,这与前人的研究结果一致,即适宜的根冠比可以保证植株地上部分良好生长,但在土壤营养缺乏条件下植株易于形成较大的根冠比,这是植物根系的一种适应性反应^[18]。油菜为了满足生存的需要被迫对营养缺乏的环境积极适应,这是 CK 处理根冠比较大的主要原因。与 CK 处理相比,污泥施用后的油菜根冠比均减少,且差异显著($P<0.05$),但油菜根冠比并不随着污泥用量的增加而增加,各个污泥用量处理间差异不显著,与常规施肥 CF 处理相比,各个污泥处理与之相差不大,差异不显著。这说明,污泥的用量在提高油菜根冠比方面与普通化肥效果差不多,一定范围的污泥施入对于根系的生长发育影响不是很大。

2.2 污泥施用对油菜品质的影响

由不同污泥处理对油菜品质的影响测定结果(表 4)可以看出,对照 CK 处理,还原型 Vc 含量显著高于其他处理,原因可能由于 CK 处理地上部分鲜重显著小于其他各处理,导致浓缩效应^[19],使得产量越高,油菜 Vc 含量反而越低的现象出现。CF、SL1、SL2、SL3

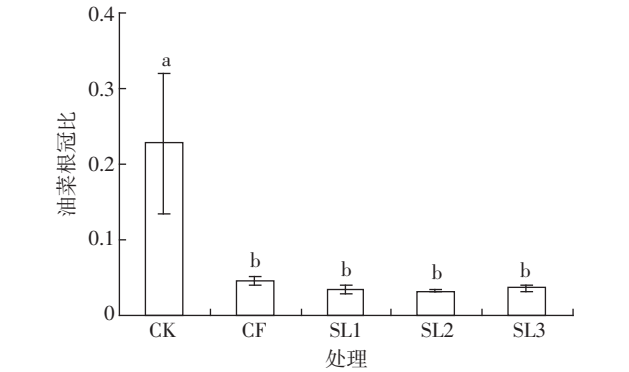


图 3 不同污泥处理下油菜的根冠比
Figure 3 The root–shoot ratio of rape of different sludge treatments

这 4 个处理之间,Vc 含量没有显著性差异。各个污泥处理与常规施肥 CF 相比,略有降低,降幅在 1.76%~25.47%之间。

硝酸盐含量是衡量油菜品质的一个重要指标,过量的硝酸盐会给人类健康带来威胁^[20]。蔬菜是人体摄入硝酸盐的主要来源,它是一种天然易富集硝酸盐的植物食品。研究发现施氮处理提高了油菜植株硝酸盐含量,孙志梅等^[21]研究施用氮肥可使油菜的硝酸盐含量比空白对照提高了近 2 倍。在高肥料投入条件下,氮素吸收过多,造成硝酸盐在油菜体内的累积越多。

由表 4 的数据还可以看出:施肥处理硝酸盐含量显著高于 CK 处理,原因可能是养分的大量投入促进了根系生长发育,使得除 CK 处理外的其他处理吸收大量氮素,导致 CK 处理植株硝酸盐含量极低。而与常规施肥 CF 相比,不同污泥处理都不同程度地降低了油菜体内硝酸盐的累积,比常规施肥降低了 10.39%~20.57%,随着污泥施入量的减少硝酸盐含量的降低程度越来越明显,其中 SL1 处理降低显著。这一方面说明少量的污泥施入在一定程度上对硝酸盐的累积具有一定的抑制作用;另一方面,植株硝酸盐含量与氮肥的施用量的高低密切相关,氮素吸收过多,提高了油菜植株硝酸盐的含量,所以降低氮的投入量,也会相应地降低油菜植株中硝酸盐的累积。而

表 4 不同污泥处理下收获期油菜植株还原型 Vc 和硝酸盐含量				
Table 4 The vitamin C and nitrate content in rape of different sewage sludge treatments in harvest time				
处理	还原型 Vc 含量/mg·100 g ⁻¹ FW	比 CF 提高(+)或降低(-)/%	硝酸盐含量/mg·kg ⁻¹	比 CF 提高(+)或降低(-)/%
CK	92.00±0a	96.48	9.97±1.28c	-99.39
CF	46.83±9.10b	—	1 638.76±320.63a	—
SL1	34.90±0c	-25.47	1 301.63±49.61b	-20.57
SL2	46.00±1.85b	-1.76	1 468.56±99.58ab	-10.39
SL3	46.00±1.85b	-1.76	1 414.74±156.02ab	-13.67

表 5 不同污泥处理下油菜植株全氮、全磷、全钾的含量

Table 5 Effects of total N, total P and total K content in rape treated with different sludge treatments

处理	全氮含量/%	比 CF 提高(+)或降低(-)/%	全磷含量/%	比 CF 提高(+)或降低(-)/%	全钾含量/%	比 CF 提高(+)或降低(-)/%
CK	1.78±0.25c	-61.26	0.46±0.04a	14.76	3.08±0.17c	-46.74
CF	4.60±1.00a	—	0.40±0.08a	—	5.78±0.95a	—
SL1	4.04±0.24ab	-12.00	0.48±0.11a	19.67	4.24±0.54bc	-26.71
SL2	3.73±0.99ab	-18.83	0.44±0.07a	10.41	4.82±0.71ab	-16.73
SL3	3.44±0.68b	-25.06	0.47±0.05a	15.86	5.39±1.33ab	-6.74

SL3 处理虽然投入氮素总量高于 CF 处理,而油菜植株硝酸盐含量却存在低于 CF 处理的趋势,这可能与肥料中氮素的形态有关,其原因尚待进一步研究。

综上所述,与常规施肥相比,不同污泥施用处理在提高油菜植株还原型 Vc 含量的效果上并不是很明显,而少量的污泥施入显著降低了硝酸盐的含量,改善了蔬菜的品质。

2.3 不同处理油菜植株吸收氮磷钾养分含量的影响

表 5 表明污泥的施入改变了油菜植株中氮、磷、钾的含量。从油菜植株全氮含量来看,污泥处理的油菜植株全氮含量比对照 CK 处理均有所增加,随着污泥用量的增加呈降低趋势,但各水平污泥处理间差异不显著,这一规律与油菜的产量基本保持一致。可能是由于在高肥料投入条件下,施入污泥越高反而降低了油菜全氮的含量,但高于对照,可见污泥在一定用量范围内施用可以提高油菜氮素含量,用量过高时促进作用降低^[22]。

从油菜植株全磷含量来看,不同污泥施入增加了油菜体内磷素含量,SL1、SL2、SL3 与常规施肥 CF 处理相比,全磷含量分别增加了 19.67%、10.41% 和 15.86%,各处理间没有显著差异。但是随着污泥用量的增加,植株全磷出现先降低后增加的趋势,在少量污泥施用时达到最高,可见磷肥施用也不是越多越好。因此,少量的污泥施入有促进油菜对磷素吸收的作用。

就植株全钾而言,与对照 CK 处理相比,随着污泥用量的增加,油菜植株中全钾含量呈现增加趋势,但不同污泥水平处理间差异不显著。污泥处理的油菜全钾含量明显高于 CK 处理,但与 CF 处理相比略有降低。可能是土壤中过量的磷抑制了钙、镁、钾和微量元素锌、锰、铁的吸收,使蔬菜植株体内正常的生理代谢发生紊乱,使蔬菜的品质下降^[23]。

3 结论

(1)在高肥料投入条件下,施用城市污泥 70%减

量替代处理可以显著增加油菜产量,较普通化肥高投入处理增产 55.36%,同时增加了油菜的根重。

(2)污泥施入具有降低地上部油菜硝酸盐含量的趋势,高肥料投入条件下,施用城市污泥 70%减量替代处理地上部硝酸盐含量较普通化肥高投入量处理显著降低,降低幅度达到 20.57%,污泥减量替代化肥施用对油菜的硝酸盐积累有一定减缓作用。

(3)污泥的使用也影响着油菜对氮磷钾等元素的吸收,适宜的用量可以促进上述元素的吸收,但是当用量过大时,就会抑制其吸收。

参考文献:

- [1] 孙先良. 盲目过量施肥的危害及新型肥料的开发 [J]. 中氮肥, 2005 (6): 1-4.
SUN Xian-liang. Harm of blind and excessive applying fertilizer and development of new type of fertilizer[J]. *M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress*, 2005 (6): 1-4.
- [2] 周淑清, 刘丽霞, 付时丰, 等. 化肥与农产品质量及过量施肥问题的探讨[J]. 中国农村小康科技, 2006, 3: 14-16.
ZHOU Shu-qing, LIU Li-xia, FU Shi-feng, et al. Discussion on chemical fertilizer, agricultural products quality and questions of excess fertilization[J]. *Chinese Countryside Well-off Technology*, 2006, 3: 14-16.
- [3] 聂云. 过量施用氮肥和磷肥对环境的危害 [J]. 耕作与栽培, 2000 (4): 43.
NIE Yun. Harm of excessive applying nitrogen and phosphate fertilizer to the environment[J]. *Tillage and Cultivation*, 2000 (4): 43.
- [4] 李琼, 华璐, 徐兴华, 等. 城市污泥农用的环境效应及控制标准的发展现状[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 468-476.
LI Qiong, HUA Luo, XU Xing-hua, et al. A review on environmental effects and control criteria of biosolid agricultural application[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 468-476.
- [5] 马娜, 陈玲, 熊飞. 我国城市污泥的处置与利用[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 92-95.
MA Na, CHEN Ling, XIONG Fei. Disposal and reuse of city sludge in China[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 92-95.
- [6] Richards B K, Steenhuis T S, Peverly J H, et al. Effect of sludge-processing mode, soil texture and soil pH on metal mobility in undisturbed soil columns under accelerated loading[J]. *Environmental Pollution*,

- 2000, 109(2):327-346.
- [7] Magesan G N, Wang H L. Application of municipal and industrial residuals in New Zealand forests: An overview[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41:557-569.
- [8] Gonzalez M, Mingorance M D, Sanchez L, et al. Pesticide adsorption on a calcareous soil modified with sewage sludge and quaternary alkyl-ammonium cationic surfactants[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2008, 15(1):8-14.
- [9] Johansson M, Stenberg B, Torstensson L. Microbiological and chemical changes in two arable soils after long-term sludge amendments[J]. *Biol Fertil Soils*, 1999, 30(1-2):160-167.
- [10] National Research Council. Biosolids applied to land: Advancing standards and practices[R]. Washington, D C: National Academy Press, 2002.
- [11] 蔡全英, 莫测辉, 吴启堂. 城市污泥及其堆肥对盆栽通菜和萝卜产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1):52-55.
CAI Quan-ying, MO Ce-hui, WU Qi-tang. Effects of municipal sludge before and after composting on yields of *Ipomoea aquatic* and *Brassica campestris* L. [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(1):52-55.
- [12] 周东兴. 城市污泥对大麦生长发育和土壤肥力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(4):37-41.
ZHOU Dong-xing. Effects of municipal sludge on barley growth and soil fertility[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2009, 40(4):37-41.
- [13] 徐 欣, 张盼月, 张光明, 等. 共消化污泥施用对贫瘠土壤性质和蔬菜品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9):1842-1847.
XU Xin, ZHANG Pan-yue, ZHANG Guang-ming, et al. Effects of co-digested sludge application on infertile soil and vegetable quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9):1842-1847.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000:264-270, 359-363.
BAO Shi-dan. Soil and agriculture chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000:264-270, 359-363.
- [15] 莫测辉, 吴启堂, 周友平, 等. 城市污泥对作物种子发芽及幼苗生长影响的初步研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(6):645-649.
MO Ce-hui, WU Qi-tang, Zhou You-ping, et al. A preliminary study on the effect of municipal sludge on crop seed germination and seedling growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(6):645-649.
- [16] 莫测辉, 吴启堂, 蔡全英, 等. 论城市污泥农用资源化与可持续发展[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1):157-160.
MO Ce-hui, WU Qi-tang, CAI Quan-ying, et al. Utilization of municipal sludge in agriculture and sustainable development[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1):157-160.
- [17] 宋敬阳. 城市污水污泥的农田施用[J]. 国外环境科学技术, 1993(3):29-32.
SONG Jing-yang. Farmland application of urban sewage sludge[J]. *Foreign Environmental Science and Technology*, 1993(3):29-32.
- [18] 张福锁, 曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. 土壤学报, 1992(3):239-250.
ZHANG Fu-suo, CAO Yi-ping. Rhizosphere dynamics and plant nutrition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992(3):239-250.
- [19] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 添加硝化抑制剂双氰胺对油菜生长及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):870-874.
CHUAN Li-min, ZHAO Tong-ke, AN Zhi-zhuang, et al. Effects of adding a nitrification inhibitor dicyandiamide(DCD) on the growth and quality of rape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):870-874.
- [20] 黄大鹏, 谢琪凤, 彭辉照, 等. 活性有机肥对小白菜产量和品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2008(5):74-75.
HUANG Da-peng, XIE Qi-feng, PENG Hui-zhao, et al. Effects of active organic fertilizer on the yield and quality of pakchoi[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2008(5):74-75.
- [21] 孙志梅, 张 阔, 刘建涛, 等. 氮肥调控剂对潮褐土中不同氮源氮素转化及油菜生长的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9):2497-2503.
SUN Zhi-mei, ZHANG Kuo, LIU Jian-tao, et al. Effects of nitrogen regulators on fertilizer nitrogen transformation in meadow cinnamon soil and on pakchoi growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9):2497-2503.
- [22] 康少杰, 刘善江, 李文庆, 等. 污泥肥对油菜品质性状及其重金属累积特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1):92-95.
KANG Shao-jie, LIU Shan-jiang, LI Wen-qing, et al. Effects of sludge fertilizer on rape quality and accumulation of heavy metals[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1):92-95.
- [23] 赵晓新. 浅谈化肥施用与农作物的产量与品质 [J]. 科技创新导报, 2008(30):248.
ZHAO Xiao-xin. Preliminary discussion on fertilizer application and the yield and quality of crop[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2008(30):248.