

猪场厌氧肥水灌溉对设施油麦菜产量及品质的影响

石亚楠^{1,2}, 刘鸣达¹, 张克强², 赵君怡², 王 风^{2*}

(1.沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要: 规模化畜禽养殖粪污已成为我国当前最为重要的污染源, 为有效控制畜禽养殖污染开展了猪场肥水设施灌溉田间试验, 研究了不同肥水稀释比例灌溉对油麦菜产量和品质的影响。结果表明: 试验用猪场肥水与清水进行 1:2 稀释灌溉(折算氮素投入量为 292 kg·hm⁻²)能够提高油麦菜存活率、叶片数和株高, 且产量比对照施肥处理增加 17.67%。与对照处理和其他稀释比例处理相比, 该优化模式生产的油麦菜能够维持较高的维生素 C 含量, 显著抑制叶片中的丙二醛(MDA)含量并削减蔬菜植株内硝酸盐含量, 油麦菜品质符合《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001), 且铜锌含量与对照相比不存在显著性差异, 但油麦菜可溶性糖含量略有降低。

关键词: 猪场肥水; 灌溉; 油麦菜; 硝酸盐; 产量

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)01-0190-06 doi:10.11654/jaes.2015.01.027

Yield and Quality of Leafy Lettuce Irrigated with Anaerobic Effluent from Swine Farms

SHI Ya-nan^{1,2}, LIU Ming-da¹, ZHANG Ke-qiang², ZHAO Jun-yi², WANG Feng^{2*}

(1.College of Land and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China; 2.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: The waste from livestock and poultry farms has become a major agricultural source of environmental pollution in China. In order to utilize farm waste, a vegetable irrigation experiment using anaerobic effluent from pig farms was carried out. The yield and quality of leafy lettuce irrigated with different dilution of anaerobic wastewater were evaluated. The optimal fresh weight and plant height of leafy lettuce were obtained under 1:2 of anaerobic wastewater to fresh water (T3), and the yield was increased by 17.67% in comparison with chemical fertilizer (CK). Irrigation with 100% wastewater decreased the survival rate of leafy lettuce to 78%. In the T3 treatment, leafy lettuce contained the highest content of ascorbic acid and relatively lower concentration of soluble sugar. Under T3 irrigation, MDA content was reduced, and nitrate concentration was lower than the limit of nitrate concentration of leafy vegetables. Copper and zinc concentrations of leafy lettuce under T3 irrigation did not differ from the control. Based on the present result, at least 4.34 hm² of leafy lettuce-planting area was needed to treat anaerobic effluent generated from 10 000 head pig farm.

Keywords: pig farm; anaerobic effluent; irrigation; leafy lettuce; nitrate; yield

随着我国集约化畜禽养殖业的迅速发展, 养殖场畜禽粪便和污水对周边环境的污染日益突出, 严重制约了畜牧业的快速发展。2009 年全国畜禽粪污产生 32.64 亿 t, 为同期工业固体废弃物产生总量的 1.6 倍^[1]; 2010 年全国畜禽养殖业排放的化学需氧量和氨

氮分别占全国排放总量的 45% 和 25%^[2]。养殖粪污中含有丰富的有机质和氮磷等营养物质, 如不经处理直接排放会造成水体的富营养化^[3]。目前, 国内外提出了一系列养殖粪污处理工艺技术, 包括厌氧发酵处理技术^[4-6]、氧化塘处理技术^[7-8]、人工湿地净化技术^[9-10]等, 其中厌氧发酵处理结合农田利用是现阶段经济可行的处理方法^[11]。已有研究表明, 养殖废水中大量有机态氮、磷, 经过固液分离、厌氧消化和灭菌处理后, COD 去除率可达 85%~90%, 经厌氧处理有利于有机态氮、磷转化为植物易吸收利用的 NH₄⁺ 和 PO₄³⁻^[12]。因

收稿日期: 2014-05-21

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD15B02); 天津市科技支撑计划重点项目(12ZCZDNC01800)

作者简介: 石亚楠(1989—), 女, 辽宁阜新人, 硕士研究生, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: shiyanan0925@126.com

* 通信作者: 王 风 E-mail: wangfeng_530@163.com

此,养殖废水经过简单处理后转变为水肥资源循环利用是资源循环利用和控制养殖污染的最佳途径^[13],不仅可以利用其丰富的营养物质,还可以替代农业对化肥资源的消耗。

目前,国内外已经开展了大量再生水灌溉作物的研究,但多集中在城市污水及工业废水再生^[14-16],也有将养殖污水厌氧消化后的液体用于水稻、玉米等大田作物和蔬菜作物的报道^[17],但绝大部分研究是针对户用沼气池的沼渣和沼液,将发酵液与沼渣一起作为肥料,以研究对作物生长发育、产量、品质及抗病性等影响为目的,因而对于适宜的猪场厌氧水灌溉浓度范围则知之甚少。本研究从油麦菜生长、产量及品质角度分析了猪场厌氧肥水设施油麦菜灌溉的可行性,提供一条猪场肥水油麦菜安全农田循环利用的技术模式,将对合理利用猪场厌氧水灌溉蔬菜提供重要的理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于天津市西青区杨柳青镇益利来养殖场塑料大棚内进行。该区地处华北平原东北部,地势低平,是华北平原典型农区,土壤类型为中壤质潮土,耕层基础肥力全氮 $0.66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,铵态氮 $4.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮 $21.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $41.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 pH 值为 7.98。供试品种为纯香油麦菜 (*Lactuca sativa* L.),2013 年 11 月 8 日定植,株距为 10~15 cm,行距为 20 cm,12 月 23 日收获,生长期共计 45 d。

天津益利来养殖有限公司常年猪出栏约 10 000 头,每天排放养殖废水 20~40 t。水处理工程于 2007 年建立,一直稳定运行。废水处理系统包括收集预处理组件、厌氧微生物发酵组件、深度处理系统等。猪场废水通过排污沟渠汇集到预处理池过滤和匀浆,在自控系统控制下提升至 100 m^3 高效塞流式厌氧反应器(滞留

期 5 d,温度 $25\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$),最后进入稳定贮存及深度净化系统(占地面积 360 m^2 ,由布水槽、砂滤池、鹅卵石表曝坡、高效菌藻塘组成),从而转化成蔬菜易于利用的水肥一体化的灌溉肥水。猪场肥水水质见表 1。

表 1 猪场肥水水质

Table 1 Water quality of anaerobic effluent from pig farm

TKN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4\text{-N}/$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3\text{-N}/$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Zn/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Cu/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
687.97	616.85	3.49	416.2	18.19	0.39	0.16	8.21

1.2 试验处理

试验采用框栽畦埂法,边框设计规格为长 1.2 m、宽 1 m、深 0.6 m,框材厚度 0.25 cm,材质为不锈钢。定植前施肥整地,0~20 cm 表层土壤均匀混施有机肥 $30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验设 6 个处理(表 2),每个处理重复 3 次,随机区组排列。灌溉方式为畦内漫灌,小区灌水定额为 150 L,分 6 次灌溉,每次灌水量根据各生育期需水量而定。6 个处理的灌水时间、灌溉频率、单次灌溉量均一致。

1.3 测定指标与方法

取每个小区具有代表性的 5 株植株,测定其鲜重、株高、叶片数。叶片洗净,剪碎混匀,储存于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中备用。植株茎叶中硝酸盐含量采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;维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定;可溶性糖采用蒽酮法测定;丙二醛含量采用硫代巴比妥酸比色法测定^[18]。

1.4 数据分析

数据采用 SPSS V17.0 进行差异显著性分析,用 Duncan 新复极差法在 0.05 水平上检测。

2 结果与分析

2.1 猪场肥水灌溉对设施油麦菜生长的影响

不同稀释比例猪场肥水灌溉对设施油麦菜生长的影响见表 3。结果表明,油麦菜鲜重和株高均呈现

表 2 试验处理

Table 2 Experimental design

处理	厌氧水稀释比例	小区施肥量及灌溉量	折算小区施氮量/g
CK	清水+正常施肥	纯 N $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 及 150 L 清水	36
T1(N100)	1:0	150 L 污水	103
T2(N50)	1:1	75 L 污水+75 L 清水	51
T3(N35)	1:2	50 L 污水+100 L 清水	35
T4(N25)	1:3	38 L 污水+112 L 清水	26
T5(N15)	1:5	25 L 污水+125 L 清水	17

表3 不同处理对油麦菜生长的影响

Table 3 Effects of different treatments on growth of leafy lettuce

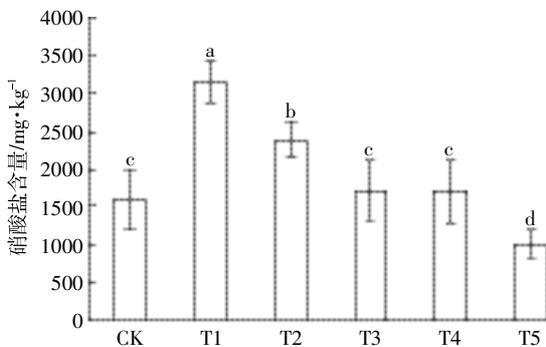
处理	指标			
	鲜重/g·株 ⁻¹	株高/cm	叶片数/片·株 ⁻¹	存活率/%
CK	317.22±29.36ab	40.00±4.06a	42±5b	96.67
T1	315.56±99.69ab	40.22±8.53a	45±5ab	78.33
T2	320.00±35.36ab	40.33±10.20a	42±3b	88.33
T3	373.33±80.05a	45.06±5.92a	49±4a	96.67
T4	293.33±91.49ab	41.00±6.82a	43±1b	95.00
T5	158.89±55.91b	34.22±5.05b	35±1c	81.67

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平。

T3、T2、T1、CK、T4>T5 的趋势。与 CK 相比, T3 处理株鲜重和株高分别增加了 17.67% 和 12.5%, 虽然 T3 与 CK 施氮量相当, 但猪场肥水氮磷存在形态更利于植物吸收, 从而使一体化的水肥耦合效应提高了养分的利用率^[17,19]。T1 处理导致油麦菜存活率仅为 78%。T5 处理可能因为养分投入严重缺乏^[20], 导致油麦菜鲜重、株高和叶片数均最小, 且株高和叶片数与其他处理相比差异均达到 5% 显著水平。

2.2 猪场肥水灌溉对设施油麦菜硝酸盐含量的影响

硝酸盐含量是评价蔬菜安全品质的重要指标之一, 蔬菜中硝酸盐含量较高时会对人体产生毒害作用, 直接影响人体健康^[21]。本试验中油麦菜硝酸盐含量呈现 T1>T2>T3、T4、CK>T5 的趋势(图 1), 表明随灌溉猪场肥水浓度增加导致输入的氮量增加, 由此引起油麦菜硝酸盐含量显著增加。T3 和 T4 处理和 CK 相比无显著差异, 其他各处理间均达到 5% 显著差异水平。T1 处理油麦菜硝酸盐含量高达 3 148.62 mg·kg⁻¹, 是 CK 处理硝酸盐含量的 1.71 倍, 高于《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001) 中对叶菜类蔬菜硝酸盐含量限值 3000 mg·kg⁻¹^[22], 其余处理均未超过该限值。



不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。下同

图 1 不同处理下油麦菜硝酸盐含量

Figure 1 Nitrate content of leafy lettuce in different treatments

2.3 猪场肥水灌溉对设施油麦菜维生素 C 含量的影响

维生素 C 是蔬菜营养品质的一个重要指标, 蔬菜维生素 C 含量的高低和人类健康有着极为密切的关系。猪场肥水灌溉油麦菜维生素 C 含量以 T2、T3 和 CK 处理较高(图 2), 均在 28 mg·100 g⁻¹ 左右, 且处理间差异不显著, 表明适当浓度的猪场肥水有利于维持较高的油麦菜维生素 C 含量。T1、T4、T5 处理与 CK 相比维生素 C 含量均显著降低, T1 处理与对照相比下降 55%, 表明过高浓度或过低浓度的猪场肥水灌溉可显著降低油麦菜维生素 C 含量。

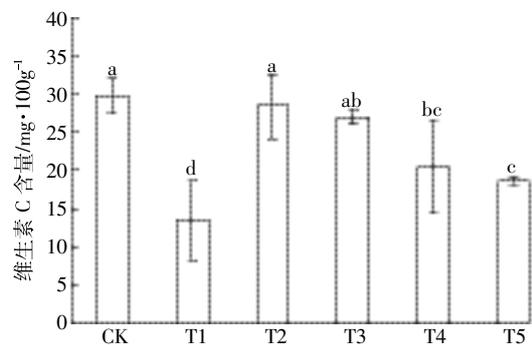


图 2 不同处理下油麦菜维生素 C 含量

Figure 2 Ascorbic acid content of leafy lettuce in different treatments

2.4 猪场肥水灌溉对设施油麦菜可溶性糖含量的影响

可溶性糖是植物光合的主要产物, 也是碳水化合物代谢和暂时贮藏的主要形式^[23]。由图 3 可知, 油麦菜可溶性糖含量随猪场肥水稀释比例的增加而降低, 呈现 CK、T1、T2>T3、T4、T5 的趋势。与 CK 处理相比, 除 T1 和 T2 处理可溶性糖含量无显著差异外, 其他处理均显著降低, T5 处理含量最小, 比 CK 处理降低了 36.36%, 说明较低浓度的猪场肥水灌溉不利于油麦菜可溶性糖的积累。这可能与 P、K 等元素的缺乏使糖

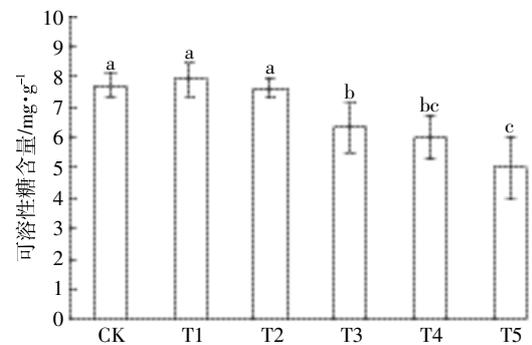


图 3 不同处理下油麦菜可溶性糖含量

Figure 3 Soluble sugar content of leafy lettuce in different treatments

分在体内的运输和转化受阻有关^[24],其机理还有待进一步研究。

2.5 猪场肥水灌溉对设施油麦菜丙二醛含量的影响

从图4看出,猪场肥水灌溉的油麦菜,叶片中MDA含量与空白对照相比均呈现降低趋势,降幅在27.06%~38.38%范围内,且肥水稀释灌溉处理(T2~T5)显著低于CK,但肥水稀释灌溉处理间不存在显著性差异;未稀释肥水灌溉(T1)与CK相比有所降低,但差异不显著,表明适宜浓度猪场肥水能有效降低油麦菜叶片MDA含量,抑制膜脂过氧化作用,从而保护蔬菜体免受氧自由基的侵害。

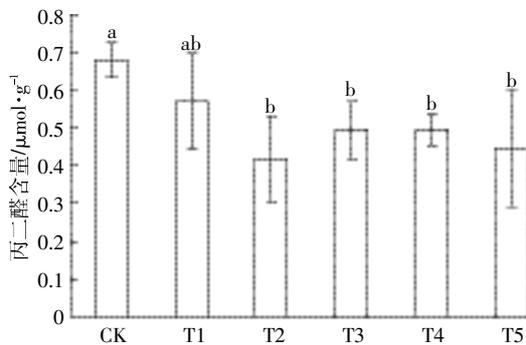


图4 不同处理下油麦菜丙二醛含量

Figure 4 Content of MDA in leafy lettuce in different treatments

2.6 猪场肥水灌溉对设施油麦菜风险指标的影响

铜锌是养殖饲料主要添加剂,有助于畜禽生长,但大部分重金属元素会随着动物粪便排出^[25],所以铜锌成为养殖肥水灌溉研究的重要测定指标^[13,26]。猪场肥水灌溉对油麦菜铜锌含量的影响如图5,结果表明不同处理下油麦菜铜的含量不存在显著性差异,说明猪场肥水灌溉对油麦菜铜含量影响不大。和CK相比,T1、T2、T3和T4灌溉处理下油麦菜锌含量略有降

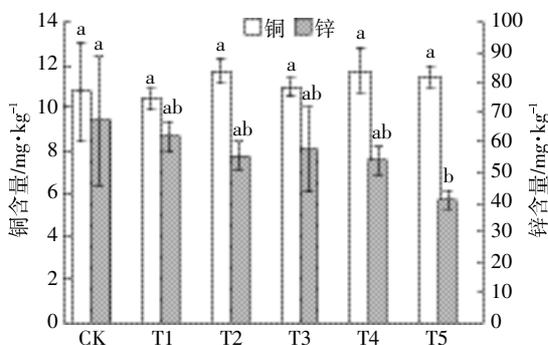


图5 不同处理下油麦菜铜锌含量

Figure 5 Content of Cu and Zn in leafy lettuce in different treatments

低,但没有达到显著性差异,T5处理油麦菜锌含量显著下降,比CK处理降低7.83%。说明猪场肥水灌溉不会对油麦菜的铜锌含量造成显著的影响。

3 讨论

猪场肥水中含有丰富的氮磷等元素,且经过厌氧处理后,大多以有效态形式存在,有利于植物的吸收。本研究结果显示,与CK处理相比,T3处理植株鲜重和株高分别增加了17.67%和12.5%,说明适宜浓度的养殖肥水灌溉会提高油麦菜产量,但是较低浓度猪场肥水因养分含量较少而不利于油麦菜生长,过高浓度肥水也会产生抑制作用,甚至降低存活率。这可能是因为高浓度的猪场肥水灌溉造成土壤溶液浓度过高,影响根系内外的水势,不利于营养元素扩散,根系不能充分吸收,从而影响养分向地上部运输,影响植株的生长发育^[27]。此外,肥水带入的高浓度氨可能会引起膜脂过氧化而形成毒害作用^[28]。

养殖肥水中的氮素含量很高,虽然经过厌氧处理,且以铵态氮为主要形态存在,但灌溉后进入土壤的氮素,在适宜条件下仍需1~2周才完全硝化^[29],所以肥水灌溉所引起的蔬菜硝酸盐累积风险仍需要重点关注。本研究中油麦菜硝酸盐含量随着灌溉肥水量的增加而增加,肥水量越大施入的氮量越多,T1处理油麦菜硝酸盐含量高达3148.62 mg·kg⁻¹,是CK处理硝酸盐含量的1.71倍。这主要是因为植物积累硝酸盐的根本在于其吸收量超过还原同化的量。随着灌溉肥水量的增加,蔬菜从土壤中吸收的硝态氮也增加,而硝态氮还原的速度赶不上吸收的速度,从而造成硝酸盐的大量积累^[30]。马英等^[26]研究了猪场厌氧水灌溉对番茄的影响,结果表明污水灌溉和混水灌溉条件下番茄的硝酸盐、亚硝酸盐含量均有增加趋势,但都低于蔬菜硝酸盐、亚硝酸盐含量标准值,与本研究结果相似。但长期养殖肥水灌溉下土壤硝酸盐积累以及硝酸盐淋溶情况还有待于进一步研究。

本研究表明适宜浓度的猪场肥水(T3)灌溉油麦菜有利于维持较高的维生素C含量,章明奎等^[13]利用养殖污水灌溉蔬菜时也发现能够显著增加维生素C含量。孙广辉^[31]也发现厌氧养殖肥水比单施化肥更有助于提高甘蓝维生素C含量,但厌氧肥水灌溉量增大到一定程度反而对甘蓝维生素C含量有降低作用。T3处理下油麦菜可溶性糖含量与对照处理相比下降了18.3%,而T1、T2处理下可溶性糖含量较高,因为与正常施肥对照相比,T3处理虽氮量施入相当,

但磷钾的施入量不足。有研究表明钾肥在提高作物可溶性糖含量的效果要大于氮磷肥^[32],所以如果将适当浓度肥水灌溉应用于生产实践,应配施一定量的磷钾肥,才可以确保获得更优的蔬菜品质。植物器官在逆境下遭受伤害会发生膜脂过氧化作用,MDA 是膜脂过氧化的最终分解产物,常被用来表征植物在逆境时生物膜是否受到伤害以及受伤害的程度^[33]。MDA 的积累可能对膜和细胞造成一定的伤害,并且可与蛋白质、核酸和氨基酸等活性物质交联,形成不溶性的化合物,从而干扰细胞的正常生命活动。本试验中适宜浓度的养殖肥水灌溉能有效抑制油麦菜 MDA 水平,有人在水培小白菜和萝卜的试验中发现了相同的结论,可能因为再生肥水激活了植物体内抗氧化因子,提高植物清除体内自由基的能力,进而促进其生长^[34]。

4 结论

(1)适宜浓度的猪场肥水灌溉有利于促进油麦菜生长、提高鲜重,维持较高的维生素 C 含量,显著抑制油麦菜叶片中的 MDA 含量,但同等浓度下油麦菜可溶性糖含量较低,建议使用猪场肥水灌溉时应配施一定量的磷钾肥。猪场肥水灌溉不会显著影响油麦菜的铜锌含量。

(2)油麦菜硝酸盐含量随着灌溉厌氧水氮浓度的增加而增加,稀释灌溉都未超出《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)中对叶菜类蔬菜硝酸盐含量限值,说明适宜浓度猪场厌氧水灌溉不会存在硝酸盐积累的风险,但是本试验开展时间较短,对于长期灌溉的影响还有待进一步研究。

(3)综合考虑油麦菜产量、品质指标,猪场厌氧肥水与清水 1:2 稀释灌溉模式较好,按照该模式进行油麦菜连茬种植,万头猪场年产生的肥水需要配套 4.34 hm² 油麦菜设施大棚才能够完全消纳。但猪场肥水长期灌溉土壤营养元素均衡问题、土壤质量和地下水污染风险问题还需要进一步考虑。

参考文献:

- [1] 张田,卜美东,耿维,等. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1241-1249.
ZHANG Tian, BU Mei-dong, GENG Wei, et al. Chinese pollution situation of animal manure and biogas production potential[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1241-1249.
- [2] 张秋蕾. 全国畜禽养殖污染防治“十二五”规划发布[J]. 农业知识, 2013, 9: 21.

- ZHANG Qiu-lei. The "Twelfth Five-Year" plan national livestock and poultry breeding pollution control released[J]. *Agricultural Knowledge*, 2013, 9: 21.
- [3] Im J, Gil K. Effect of anaerobic digestion on the high rate of nitrification, treating piggery wastewater[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(11): 1787-1793.
- [4] 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.
- [5] Quiroga G, Castrillon L, Fernandez-nava Y, et al. Effect of ultrasound pre-treatment in the anaerobic co-digestion of cattle manure with food waste and sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 154: 74-79.
- [6] Gopalan P, Jensen P D, Batstone D J. Anaerobic digestion of swine effluent: Impact of production stages[J]. *Biomass Bioenergy*, 2013, 48: 121-129.
- [7] 李瑜,白璐,姚慧敏. 谈氧化塘法处理集约化畜禽养殖场污水[J]. 现代农业科技, 2009(5): 248.
LI Yu, BAI Lu, YAO Hui-min. Talk about the oxidation pond process, intensive livestock and poultry farm wastewater[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2009(5): 248.
- [8] Bame I B, Hughes J C, Titshalla L W, et al. The effect of irrigation with anaerobic baffled reactor effluent on nutrient availability, soil properties and maize growth[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 134: 50-59.
- [9] Poach M E, Hunt P G, Reddy G B, et al. Effect of intermittent drainage on swine wastewater treatment by marsh-pond-marsh constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(1): 43-50.
- [10] Zhu D L, Sun C, Zhang H H, et al. Roles of vegetation, flow type and filled depth on livestock wastewater treatment through multi-level mineralized refuse-based constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 39: 7-15.
- [11] 贾晗,吴若菁,黄婧,等. 生物法处理畜禽养殖污水的研究现状与展望[J]. 水处理技术, 2008, 34(7): 7-11.
JA Han, WU Ruo-jing, HUANG Jing, et al. The research status and prospect of biological treatment on livestock wastewater[J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(7): 7-11.
- [12] 王风,张克强,黄治平. 废水灌溉农田研究进展与展望[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1485-1488.
WANG Feng, ZHANG Ke-qiang, HUANG Zhi-ping. Development and expectation of research on wastewater irrigation in farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6): 1485-1488.
- [13] 章明奎,刘丽君,黄超. 养殖污水灌溉对蔬菜地土壤质量和蔬菜品质的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 87-91.
ZHANG Ming-kui, LIU Li-jun, HUANG Chao. Effects of long-term irrigation of livestock farm wastewater on soil quality and vegetable quality in vegetable soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 87-90.
- [14] Al-lahham O, Assi N M, Fayyad M. Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 61(1): 51-62.
- [15] Hassanli A M, Ebrahimizadeh M A, Beecham S. The effects of irriga-

- tion methods with effluent and irrigation scheduling on water use efficiency and corn yields in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(1):93-99.
- [16] Aiello R, Cirelli G L, Consoli S. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy)[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93(1-2):65-72.
- [17] 邓兰生, 涂攀峰, 齐庆振, 等. 滴施液体肥对马铃薯产量、养分吸收积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(6):65-68.
DENG Lan-sheng, TU Pan-feng, QI Qing-zhen, et al. Effects of drip fertigation on yield and plant nutrient accumulation of potato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(6):65-68.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI He-sheng. The principle and technology of plant physiology and biochemistry experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [19] Munir J, Mohammad S Z. Enhancement of yield and nitrogen and water use efficiencies by nitrogen drip-fertigation of garlic[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, 26(9):1749-1766.
- [20] Min J, Zhang H L, Shi W M. Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 111:53-59.
- [21] Du L F, Zhao T K, Zhang C J, et al. Investigations on nitrate pollution of soil, groundwater and vegetable from three typical farmlands in Beijing region, China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(3):423-430.
- [22] 马伯禄, 吴惠敏, 刘昱, 等. GB 18406.1—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 Bo-lu, WU Hui-min, LIU Yu, et al. GB 18406.1—2001 Safety qualification for agricultural product—safety requirements for non-environmental pollution vegetable[S]. Beijing: China Standard Press, 2001:1-7.
- [23] 姜东, 于振文, 李永庚, 等. 冬小麦叶茎粒可溶性糖含量变化及其与籽粒淀粉积累的关系[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(3):38-41.
JIANG Dong, YU Zhen-wen, LI Yong-geng, et al. Changes of soluble sugar contents in leaf, stem and grain in winter wheat and its relationship with grain starch accumulation[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(3):38-41.
- [24] 姜财勇, 刘厚诚, 孙光闻, 等. 不同营养液配方对红葱生长及品质影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2007, 28(3):168-170.
JIANG Cai-yong, LIU Hou-cheng, SUN Guang-wen, et al. Effects of different nutritional solutions on growth and quality of bunch onion[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2007, 28(3):168-170.
- [25] 李晓光, 周其文, 张蕾, 等. 规模化猪场废水灌溉农田土壤重金属污染的模糊综合评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):502-507.
LI Xiao-guang, ZHOU Qi-wen, ZHANG Lei, et al. Application of fuzzy comprehensive assessment to heavy metals pollution in farmland soils irrigated with swine wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Sci-*
ence, 2009, 28(3):502-507.
- [26] 马英, 董红敏, 王殿武. 猪场厌氧污水灌溉对番茄产量和品质影响的研究初报[C]//北京: 2008中国农村生物质能源国际研讨会暨东盟与中日韩生物质能源论坛论文集. 2008:378-382.
MA Ying, DONG Hong-min, WANG Dian-wu. Effect of irrigation on tomato quality by using anaerobic effluent from swine farms[C]//Beijing: Proceedings of International Seminar on Rural Biomass Energy & ASEAN Plus Three (China, Japan and Korea) Forum on Biomass Energy. 2008:378-382.
- [27] 潘丽娜, 陈劫. 沼肥与其他肥料用于草莓生产的试验对比[J]. 中国沼气, 2004, 22(2):34-37.
PAN Li-na, CHEN Jie. Marsh fertilizer compared with other fertilizer for strawberry production test[J]. *China Biogas*, 2004, 22(2):34-37.
- [28] 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 Lei, ZHU Yue-lin, YANG Li-fei, et al. Effects of nitrogen forms and ratios plant growth, seed antioxidant enzyme activities and reactive oxygen metabolism of vegetable soybean[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3):768-772.
- [29] 余薇薇, 张智, 罗苏蓉, 等. 沼液灌溉对紫色土菜地土壤特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16):178-184.
YU Wei-wei, ZHANG Zhi, LUO Su-rong, et al. Characteristics of purple vegetable soil under biogas slurry irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16):178-184.
- [30] 闵炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1):151-157.
MIN Ju, SHI Wei-ming. Effects of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality of vegetables cultivated in plastic greenhouse in Tai Lake region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1):151-157.
- [31] 孙广辉. 沼液灌溉对蔬菜产量和品质以及土壤质量影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学环境与资源学院, 2006.
SUN Guang-hui. Studies on the effects of vegetable yield and qualities and soil qualities after application of biogas slurry[D]. Hangzhou: Zhejiang University Environment and Resource Institute, 2006.
- [32] 赵佐平, 同延安, 高义民, 等. 不同肥料配比对富士苹果产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5):1130-1135.
ZHAO Zuo-ping, TONG Yan-an, GAO Yi-min, et al. Effect of different fertilization on yield and quality of Fuji apple[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5):1130-1135.
- [33] Becana M, Matamoros M, Saiz A, et al. Antioxidants and reactive oxygen/nitrogen species in legume root nodules[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2012, 53(1):199.
- [34] 魏益华. 再生水灌溉对蔬菜品质和土壤特性的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
WEI Yi-hua. Effects of irrigation with reclaimed water on the vegetables qualities and soil properties[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2009.