

# Study on the Causes of Pb Pollution in Inarticulate Water Dropwort Cultivated in Deep Water

Yuanyuan Dong<sup>1,2</sup>, Shuangqing Zhou<sup>3</sup>, Meidi Ji<sup>2</sup>, Jiakuan Xu<sup>2</sup>, Guoqin Zhan<sup>2</sup>, Jianguo Liu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou Jiangsu

<sup>2</sup>Changzhou Agricultural Committee, Changzhou Jiangsu

<sup>3</sup>Zhulin Station of Agricultural and Forestry Technology, Changzhou Jiangsu

Email: \*liujianguo@cczu.edu.cn

Received: Apr. 11<sup>th</sup>, 2016; accepted: Apr. 30<sup>th</sup>, 2016; published: May 3<sup>rd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In order to investigate Pb pollution causes in Jintan inarticulate water dropwort (*Oenanthe stolonifera*) and the control technologies, soils, irrigation water, fertilizers and water dropwort products were sampled to test Pb concentrations in the production areas. The results showed that Pb concentrations in all soil and fertilizer samples were below the maximum allowable concentrations (MAC, according to the Chinese Standards) for safe production, but Pb concentrations exceeded the MAC in 18.2% of the irrigation water samples. When Pb concentration in the irrigation water reached the MAC (0.05 mg/L, NY 5010-2002), Pb concentration of water dropwort was 0.263 mg/kg, which was 163% higher than the MAC for water dropwort (0.1 mg/kg, GB 2762-2012). Further analysis indicated that there was positive and highly significant ( $r = 0.7980$ ,  $P < 0.01$ ) correlation between irrigation water and Jintan inarticulate water dropwort in Pb concentrations. Therefore, the Pb pollution in irrigation water is the main cause for Pb accumulation in Jintan inarticulate water dropwort. The secondary cause for Pb pollution of Jintan inarticulate water dropwort is deep water cultivation. The results reveal that Pb concentration in the irrigation water, for safe production of Jintan inarticulate water dropwort, must be controlled below 0.03 mg/L.

## Keywords

Jintan Inarticulate Water Dropwort (*Oenanthe stolonifera*), Lead (Pb), Pollution Source, Deep Water Cultivation

---

\*通讯作者。

# 深水栽培无节水芹铅污染原因探究

董园园<sup>1,2</sup>, 周双庆<sup>3</sup>, 季美娣<sup>2</sup>, 徐加宽<sup>2</sup>, 詹国勤<sup>2</sup>, 刘建国<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>常州大学, 环境与安全工程学院, 江苏 常州

<sup>2</sup>常州市农业委员会, 江苏 常州

<sup>3</sup>常州市金坛区朱林镇农林站, 江苏 常州

Email: \*liujianguo@cczu.edu.cn

收稿日期: 2016年4月11日; 录用日期: 2016年4月30日; 发布日期: 2016年5月3日

## 摘要

为探索金坛无节水芹铅污染原因及控制技术, 对其主产区土壤、灌溉水、肥料和水芹产品进行了取样检测分析。结果表明, 主产区土壤样品铅含量均不超标, 肥料中铅含量也符合国家标准要求, 而灌溉水中铅浓度却有18.2%超标。当灌溉水中铅浓度达到无公害芹菜生产水环境质量标准中允许铅含量的上限时(0.05 mg/L, NY 5010-2002), 主栽品种扬州白芹茎中铅含量为0.263 mg/kg, 超过国家标准允许值(0.1 mg/kg, GB 2762-2012) 163%。相关分析表明, 灌溉水中铅浓度与成熟期扬州白芹茎中铅含量呈极显著正相关( $r = 0.7980, P < 0.01$ )。造成金坛无节水芹铅污染的原因, 主要是灌溉水铅含量超标, 其次是长期的深水灌溉的栽培方式。金坛无节水芹特殊的深水栽培方式决定了其灌溉水执行的标准要高于无公害蔬菜产地环境条件中规定的灌溉水质量指标要求, 即不是 $\leq 0.05$  mg/L, 而应 $\leq 0.03$  mg/L。

## 关键词

无节水芹, 铅, 污染源, 深水栽培

## 1. 引言

金坛深水栽培无节水芹(*Oenanthe stolonifera* D.C.)是一种水生宿根草本植物, 属伞形科水芹属, 是中国优良水芹品种之一[1] [2]。常州金坛区深水栽培无节水芹面积约 6000 余亩, 产量 2.5 万吨。目前, 金坛区已有 1000 亩深水栽培无节水芹基地和两个加工厂房通过了出口备案, 水芹成功出口韩国、香港等海外市场, 为国内第一个出口海外的水芹产品和第一个供港水芹产品[3] [4]。

金坛无节水芹以外感翠绿如玉、口感脆嫩爽口而闻名。其风味清香, 品质好, 产量高, 抗病性强, 主要在秋冬春季栽培。水芹的茎和叶柄富含多种维生素和无机盐, 其中以钙、磷、铁的含量较高, 具有一定的药用价值, 能起到清热解毒、宣肺利尿、降低血压等保健功能, 是一种新型的保健特色蔬菜, 在江浙一带深受消费者喜爱[5] [6]。水芹作为具有常州地方特色的名、特、优农产品, 已成为当地菜农增收致富的重要支柱。但近年来, 金坛无节水芹在无公害农产品抽检中, 出现了少数样品铅超标现象, 给无节水芹产业可持续发展带来了一定的影响。

铅是一种有害的重金属污染元素, 主要来源于采矿、冶炼、油漆、造纸等工业生产及交通运输和生活污水的排放[7] [8]。铅的毒性很强, 过量的铅对人体的中枢神经、红血球细胞、肾脏、心血管及男女的生殖系统等多种器官产生毒害作用, 造成男性精子数量减少、畸形精子比例上升、女性流产机会增加, 儿童对铅毒害的敏感性要高于成年人, 即使较低剂量的铅也会对儿童的中枢神经系统造成永久性的伤害[9] [10]。目前, 关于水芹铅污染原因及其控制措施已有研究报道[11]-[13], 但关于深水栽培方式的金坛

无节水芹铅污染原因还未见报道。

本研究的目的是探索无节水芹铅污染的主要原因和污染途径，为无节水芹铅污染控制技术措施的制定提供科学依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 环境评价

采集朱林镇水芹种植区域土样 22 个，按五点法采样，用木制工具每点采土深 20 cm 约 2 kg 的土，采挖的五点土样按四分法混合保留约 1 kg，风干后用木制工具粉碎，过 100 目(孔径 0.149 mm)筛保存。同时在每个采样点采集水样 1000 ml，芹菜样品 2 kg，各类肥料等投入品 1 kg。采样点分布见图 1。

### 2.2. 品种试验

供试水芹品种：地方无节水芹，扬州白芹。供试水芹用种量：每亩 900 kg/667m<sup>2</sup>，小区面积 34 m<sup>2</sup>，重复 4 次，折合每小区用种量 46 kg，两个品种分别备种 184 kg。小区试验肥料均按常规施肥方法和数量(施腐熟有机肥 2000 kg/667m<sup>2</sup>并耙匀，厚度为 20~25 cm，在下种芹前 15 天均匀施入田中，第一次追肥在匀苗前 3d，用尿素 10 kg/667m<sup>2</sup>，在搁田达标复水后再追施尿素和硫酸钾 1 次，每次用尿素 12 kg/667m<sup>2</sup>和硫酸钾 20 kg/667m<sup>2</sup>)。每次灌水前取各小区水样 1000 ml，成熟期取芹菜样品 2 kg 测定重金属铅含量。试验区土壤和灌溉水质量见表 1。

### 2.3. 池栽水培试验

分别用砖砌水泥砂浆粉刷成 1 m × 1 m × 1 m 芹池 6 只，用于池栽试验。供试品种扬州白芹，小区试验肥料均按常规施肥方法和数量，供试土壤铅含量为 25.92 mg/kg。另配氯化铅水溶液进行全生育期灌溉，设三个浓度处理，处理 I：清水对照 Pb 0.00 mg/L；处理 II：Pb 0.04 mg/L；处理 III：Pb 0.05 mg/L，重复 2 次，每小区面积 1 m<sup>2</sup>，合计 6 m<sup>2</sup>。



Figure 1. Distribution of sampling points

图 1. 采样点分布图

## 2.4. 样品分析

样品分析按无公害农产品生产基地环境评价标准和产品标准及投入品标准进行, 铅元素测定采用石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141-1997)。仪器为原子吸收光谱仪(Solaar S4 + Graphite Furnace System 97, Thermo Elemental, 美国)。

## 2.5. 质量控制

为保证分析方法的准确性, 采用国家标准物 GSS-27 江苏省长江沉积物土壤(GBW07456)、GSB-26 芹菜(GBW10048)和 GBW(E)080399 模拟天然水铅溶液标准物质进行铅元素测定质量控制。

## 3. 结果分析

### 3.1. 种植区土壤铅含量

为了解水芹种植区的土壤铅污染状况, 对种植区土壤铅含量进行检测分析, 共取土壤样本 22 份进行了铅含量检测, 检测结果汇总列于表 2。

将检测结果与 NY 5010-2002 中规定的土壤环境质量指标(铅: pH < 6.5 时,  $\leq 50$  mg/kg; pH 6.5~7.5 时,  $\leq 50$  mg/kg)进行对照分析。22 份土壤样本中, 铅含量最高值 30.2 mg/kg、最低值为 15.7 mg/kg, 平均值为 24.7 mg/kg, 均低于限量指标, 符合无公害芹菜生产的土壤环境质量要求。

### 3.2. 种植区灌溉水铅含量

对种植区灌溉水中铅含量进行检测分析, 共取水样样本 22 份, 将检测结果与 NY 5010-2002 中规定的灌溉水质量指标(铅 $\leq 0.05$  mg/L)进行对照分析。由表 2 可见, 22 份水样中, 铅含量超标的有 4 个, 占 18.2%, 铅含量分别为 0.09 mg/L、0.07 mg/L、0.06 mg/L 和 0.06 mg/L。其余水样铅含量在 0~0.04 mg/L

Table 1. Soil and irrigation water qualities in testing area

表 1. 试验区土壤和灌溉水质量(单位: mg/kg; mg/L)

样品	pH	Pb	Hg	As	Cd	Cr
土壤	6.5 ± 0.2	30.02 ± 2.67	0.05 ± 0.01	4.20 ± 0.33	0.21 ± 0.02	30.07 ± 1.98
无公害标准	6.5~7.5	50	0.5	30	0.3	200
灌溉水	6.6 ± 0.1	0.00 ± 0.00	0.000 ± 0.000	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.00
无公害标准	5.5~8.5	0.05	0.001	0.05	0.01	0.10

Table 2. Pb concentrations of soil and irrigation water samples in water dropwort production area (unit: mg/kg; mg/L)

表 2. 水芹种植区土壤和灌溉水中铅污染状况(单位: mg/kg; mg/L)

样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
土壤	铅含量	23.3 ± 2.6	20.8 ± 1.6	15.7 ± 1.1	30.2 ± 1.9	25.7 ± 1.2	23.4 ± 1.5	26.3 ± 1.0	26.4 ± 0.9	27.5 ± 2.1	24.2 ± 0.8	26.1 ± 1.8
	样品号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	铅含量	25.4 ± 2.2	26.3 ± 2.0	26.1 ± 1.9	24.5 ± 1.1	25.1 ± 0.7	24.3 ± 1.2	25.3 ± 1.5	23.5 ± 0.9	24.3 ± 1.2	25.7 ± 1.4	23.1 ± 2.1
灌溉水	样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	铅含量	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.04 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.00
	样品号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	铅含量	0.09 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.06 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.06 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.00

范围内, 有 8 个样品铅未检出。

综上所述, 从环境评价看, 金坛无节水芹主要种植区域土壤铅含量符合无公害芹菜生产的土壤环境质量要求, 而灌溉水却有 18.2% 的样品中铅含量超标。

### 3.3. 肥料等投入品铅含量

由表 3 可见, 所施肥料和生石灰铅含量在 0.00~1.10 mg/kg 之间, 符合无公害芹菜生产的投入品质量要求。再考虑到肥料占全田土壤的比重极小, 因此可以认为施用的肥料对铅污染问题没有较大的影响。

### 3.4. 不同品种试验

由表 4 可见, 金坛无节水芹主产区主要栽培品种为地方传统老品种和扬州白芹二个品种, 在土壤铅含量 27.5 mg/kg、灌溉水铅含量为 0.00 mg/kg, 按常规施肥方法进行栽培管理, 成熟期测定水芹中铅含量, 地方无节水芹平均铅含量为 0.032 mg/kg, 扬州白芹平均铅含量为 0.034 mg/kg, 均不超过 GB 2762-2012 食品安全国家标准 水芹中污染物铅限量标准上限( $\leq 0.1$  mg/kg), 品种间差异不显著。说明在土壤和灌溉水铅含量较低条件下, 按常规生产栽培方式种植的二个主要水芹栽培品种, 其铅含量均符合国家标准。

### 3.5. 盆栽水培试验

由表 5 可见, 不同灌溉水质量对水芹铅含量的影响达极显著水平, 随着灌溉水中铅浓度的增加, 水芹菜中铅含量极显著地提高。在供试土壤铅含量为 25.92 mg/kg (符合无公害芹菜生产的土壤环境质量铅  $\leq 50$  mg/kg 的要求)、清水中铅浓度为 0.00 mg/L 时, 成熟期水芹中铅含量仍为 0.023 mg/kg, 说明仍有一定量的铅通过根系吸收并向地上部茎中运转。而当灌溉水中铅浓度增加到 0.04 mg/L 时, 成熟采收时水芹中铅含量为 0.202 mg/kg, 超过了 GB 2762-2012 食品安全国家标准中水芹铅限量的上限( $\leq 0.1$  mg/kg), 比对照清水栽培水芹中铅含量增加 778.3%, 多重比较差异达极显著水平, 通过灌溉水富集到水芹中的铅达

Table 3. Pb concentrations of the fertilizers

表 3. 肥料中铅含量

处理编号	肥料	铅含量(mg/kg)
1	48%复合肥	0.00 ± 0.00
2	过磷酸钙	0.08 ± 0.02
3	尿素	0.00 ± 0.00
4	硅肥	0.02 ± 0.00
5	有机肥	1.10 ± 0.27
6	生石灰	0.00 ± 0.00

Table 4. Pb concentrations in different cultivars of water dropwort (unit: mg/kg)

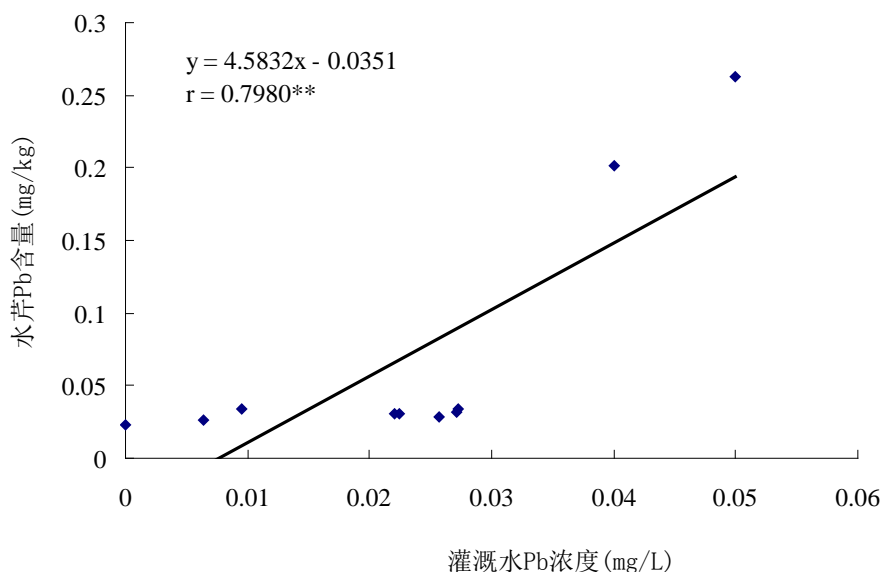
表 4. 不同水芹品种铅含量的差异(单位: mg/kg)

处理编号	地方无节水芹	扬州白芹
1	0.030 ± 0.004	0.033 ± 0.005
2	0.030 ± 0.005	0.030 ± 0.002
3	0.031 ± 0.003	0.034 ± 0.004
4	0.035 ± 0.006	0.038 ± 0.007
均值	0.032	0.034

**Table 5.** Effects of irrigation water on Pb concentrations of water dropwort (unit: mg/L)  
**表 5.** 不同灌溉水质对水芹菜铅含量的影响(单位: mg/L)

Pb 处理	I	II	均值	±%
0.04 mg/L	0.189 ± 0.021	0.214 ± 0.030	0.202	778.3**
0.05 mg/L	0.256 ± 0.019	0.269 ± 0.018	0.263	1043.5**
清水对照	0.022 ± 0.003	0.024 ± 0.002	0.023	

注: 供试土壤铅含量为 25.92 mg/kg。



**Figure 2.** Correlation between irrigation water and water dropwort in Pb concentrations  
**图 2.** 灌溉水中铅浓度与水芹中铅含量的关系

88.6%; 当灌溉水中铅浓度增加到 0.05 mg/L 时(无公害芹菜生产的水环境质量标准铅 $\leq$ 0.05 mg/L), 成熟采收时水芹中铅含量已达 0.263 mg/kg, 比 GB 2762-2012 食品安全国家标准中水芹铅限量标准上限( $\leq$ 0.1 mg/kg)高 163%, 比对照清水栽培水芹中铅含量增加 1043.5%, 多重比较差异达极显著水平, 通过灌溉水富集到水芹中的铅达 91.3%。

进一步分析成熟期扬州白芹茎中铅含量(y) 与灌溉水中铅浓度(x)的关系, 由图 2 可见, 随着灌溉水中铅浓度的增加, 成熟期扬州白芹茎中铅含量极显著增加, 相关系数为 0.798, 达极显著水平。由线性回归方程  $Y = 4.5832X - 0.0351$  可推出: 当  $Y = 0.1$  mg/kg 时,  $X = 0.0295$  mg/L, 即当灌溉水中铅浓度达到 0.03 mg/L 时, 成熟期扬州白芹茎中铅含量已达 GB 2762-2012 食品安全国家标准中水芹铅限量标准的上限( $\leq$ 0.1 mg/kg)。

由此可见, 水芹长期处于深水栽培环境中, 除根系吸收铅并向地上部茎中运转外, 其茎也可以直接从水中吸收铅, 并且茎中积累的铅主要为茎直接从水中吸收富集的。而当灌溉水中铅浓度达到无公害芹菜生产的水环境质量标准铅 0.05 mg/L 时, 水芹中铅含量已严重超标。

#### 4. 小结

影响无节水芹铅含量的因素主要有环境因子、品种特性、栽培方式和农艺措施等几个方面。

本研究结果表明, 无节水芹种植区 22 份土壤样本中, 铅含量最高值 30.2 mg/kg, 最低值为 15.7 mg/kg, 平均值为 24.7 mg/kg, 均低于 NY 5010-2002 标准规定的 50 mg/kg 限量指标, 符合无公害芹菜生产的土壤

环境质量要求。检测的 22 份水样, 对照 NY 5010-2002 中规定的灌溉水质量指标( $Pb \leq 0.05 \text{ mg/L}$ ), 铅含量超标的有 4 个, 占 18.2%。从供试的二个当前主栽品种对铅积累能力看, 扬州白芹茎中铅含量略高于地方品种无节水芹, 但在合格的环境条件下生长, 铅含量均不超标。从肥料使用等农艺措施看, 所施肥料铅含量很低, 符合无公害芹菜生产的投入品质量要求。从栽培方式看, 盆栽水培试验结果表明, 长期的深水灌溉, 扬州白芹不但根系吸收铅并向地上部茎中运转, 而且其茎也能直接从灌溉水中吸收铅, 并且占茎中积累铅的绝大部分, 当灌溉水中铅浓度达到无公害芹菜生产的水环境质量标准铅  $0.05 \text{ mg/L}$  上限时, 主栽品种扬州白芹茎中铅含量已严重超标, 含量达  $0.263 \text{ mg/kg}$ , 比 GB 2762-2012 食品安全国家标准中水芹铅限量标准上限( $\leq 0.1 \text{ mg/kg}$ )高 163%, 其中通过灌溉水富集到水芹中的铅达 91.3%。进一步分析表明, 成熟期扬州白芹茎中铅含量(Y)与灌溉水中铅浓度(X)呈极显著正相关关系, 当灌溉水中铅浓度达到  $0.03 \text{ mg/L}$  时, 成熟期扬州白芹茎中铅含量已达 GB 2762-2012 食品安全国家标准中水芹铅限量标准上限( $\leq 0.1 \text{ mg/kg}$ )。

综上所述, 造成金坛无节水芹铅污染的原因, 主要是灌溉水铅含量超标, 其次是长期的深水灌溉的栽培方式。金坛无节水芹特殊的栽培方式决定了其灌溉水执行的标准要高于 NY 5010-2002 无公害食品蔬菜产地环境条件中规定的灌溉水质量指标要求, 即不是  $\leq 0.05 \text{ mg/L}$ , 应是  $\leq 0.03 \text{ mg/L}$ 。

### 参考文献 (References)

- [1] 周双庆, 张洪海. 水芹无水芹无节化生产技术规程[J]. 江苏农业科学, 2007(增刊): 201-202.
- [2] 张真和, 鲁波. 当代中国蔬菜产业的回顾与展望[J]. 长江蔬菜, 2005(5): 6.
- [3] 江解增, 秦玉莲, 缪旻珉. 江苏省部分水芹品种的品质分析[J]. 中国蔬菜, 2010(24): 61-65.
- [4] 徐国友, 王继胜, 周刚, 等. 不同的追肥种类对溧阳白芹产品冷藏保鲜效果的影响[J]. 上海蔬菜, 2008(1): 108-109.
- [5] 周刚, 陆伟英. 溧阳白芹春延迟栽培技术[J]. 长江蔬菜, 2015(5): 23-24.
- [6] 刘荣国, 刘裕岭. 水芹的生长发育特性及配套栽培技术[J]. 上海蔬菜, 2007(4): 34-36.
- [7] 朴明浩, 瞿鹏, 徐加宽, 等. 追肥对白芹吸收积累铅的影响[J]. 世界生态学, 2015(4): 23-28.
- [8] Yadav, S.K. (2010) Heavy Metals Toxicity in Plants: An Overview on the Role of Glutathione and Phytochelatins in Heavy Metal Stress Tolerance of Plants. *South African Journal of Botany*, **76**, 167-179.
- [9] Duong, T.T.T. and Lee, B.K. (2011) Determining Contamination Level of Heavy Metals in Road Dust from Busy Traffic Areas with Different Characteristics. *Journal of Environmental Management*, **92**, 554-562.
- [10] Peralta-Videa, J.R., Lopez, M.L., Narayan, M., et al. (2009) The Biochemistry of Environmental Heavy Metal Uptake by Plants: Implications for the Food Chain. *International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, **41**, 1665-1677.
- [11] Zhang, J., Deng, H.G., Wang, D.Q., et al. (2013) Toxic Heavy Metal Contamination and Risk Assessment of Street Dust in Small Towns of Shanghai Suburban Area, China. *Environmental Science and Pollution Research*, **20**, 323-332.
- [12] 黄凯丰, 时政, 宋毓雪, 等. 水芹的理化特性研究[J]. 北方园艺, 2011(9): 23-25.
- [13] 王昕, 徐文娟, 刘颖. Cd、Pb 复合污染在水芹不同器官的富集特性研究[J]. 长江蔬菜, 2014(22): 53-55.