

# 山东芋主产区的重金属检测及影响因素分析

邹日<sup>1,2</sup> 高苹<sup>1</sup> 柏新富<sup>2</sup> 李锡香<sup>1</sup> 刘中笑<sup>1</sup> 张素君<sup>1</sup> 王秉人<sup>1</sup> 沈镛<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081; <sup>2</sup>鲁东大学生命科学学院, 山东烟台 264025)

**摘要:** 对山东芋主产区的球茎、农田土壤和灌溉水进行重金属抽样检测, 依据 GB 18406.1—2001, 83 份球茎样本的 As、Hg 和 Pb 含量均未超过限量标准, 33 份芋球茎样本的 Cd 含量超过限量标准  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 但超出量较小, 最高仅为  $0.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 超标样本的分布区域不集中。依据 GB/T 18407.1—2001, 83 份土壤样本中的 Pb、Hg 和 As 含量均未超过对应 pH 值的限量标准, 6 份土壤样本的 Cd 含量超过限量标准  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  ( $\text{pH} < 7.5$ ), 最高值为  $0.944 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。31 份灌溉水样的 4 种重金属含量均未超标。检测结果表明, 山东芋主产区的农田未受到 4 种主要重金属的污染。相关性分析结果显示, 芋球茎的 Cd、Pb 含量与土壤中 Cd、Pb 含量分别呈极显著或显著正相关, 表明芋球茎积累的 Cd、Pb 主要来源于土壤。芋球茎的 Cd 含量与土壤 pH 值呈显著负相关, 土壤 Cd、As、Pb 与有机质含量呈极显著或显著正相关, 表明土壤 pH 值和有机质含量是影响重金属积累的重要因素。农药和化肥的施用等可能导致了山东部分地区土壤中 Cd 的积累。

**关键词:** 芋; 重金属; 土壤; 球茎; 灌溉水

重金属是指密度在  $5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的金属。随着全球人口的快速增长、工业生产规模的不断扩大和城市化的快速发展, 土壤重金属污染日益严重 (杨苏才等, 2006)。植物通过根系吸收重金属, 并具有一定的富集能力, 通过食物链最终影响人类健康。砷 (As)、汞 (Hg)、铅 (Pb)、镉 (Cd) 是危害人类健康的 4 种主要有毒重金属 (游勇和鞠荣, 2007)。目前, 我国农田土壤中的 Cd、Pb、Hg、As 等重金属污染问题非常突出 (张继舟等, 2012), 在部分地区的蔬菜产品中检出率较高, 超标现象严重 (陈玉成等, 2003; 李学德等, 2004; 林梅, 2011; 代平等, 2012; 刘勇等, 2012)。

芋 [*Colocasia esculenta* (L.) Schott] 是山东胶东半岛地区重要的出口创汇蔬菜, 其球茎质地细腻, 品质极佳, 深受消费者欢迎。随着种植面积的扩大和出口量的增加, 日本等国对我国生产的芋球

茎的农药和重金属残留量等标准也日渐提高, 逐步限制了山东芋的出口量。本试验通过抽样检测胶东半岛地区芋球茎、土壤和水源中 Cd、Pb、Hg、As 等 4 种重金属含量, 同时测定土壤的理化性质, 分析其相关性, 旨在全面了解及综合评价 4 种主要重金属在山东出口芋主产区的残留量, 探讨 Cd、Pb、Hg、As 4 种重金属在芋球茎中的富集规律, 分析其影响因素, 为山东出口芋的安全生产技术研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本采集

1.1.1 样本采集地及分布范围 在 2010 年 8~10 月期间, 分 3 次分别在山东芋主产区采集收获期的芋球茎、芋种植地的土壤及灌溉水源的样本。采样地包括青岛市、烟台市和威海市 3 个地级市及下属的 6 个县级市、14 个乡镇 (镇) 的 33 个村, 每个村的采样地块在 2~3 个不等。共采集土壤和芋球茎样本各 83 个、水样 31 个 (表 1)。在青岛和威海地区的芋主栽品种为 8520, 在烟台地区多为莱阳孤芋。利用 GPS 定位系统测定采样地的地理位置位于东经  $119.73^\circ \sim 121.23^\circ$ , 北纬  $35.94^\circ \sim 37.65^\circ$  之间, 采样地基本覆盖了山东省胶东半岛的芋主产区。

邹日, 女, 硕士研究生, 专业方向: 生理生态学, E-mail: zouri2009@sina.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 沈镛, 女, 博士, 副研究员, 专业方向: 蔬菜种质资源, E-mail: shendi@caas.cn

收稿日期: 2013-09-29 接受日期: 2014-01-22

基金项目: 公益性行业 (农业) 专项 (200903017-09-01), 农业部园艺作物生物学与种质创制重点实验室资助项目

表 1 检测样本的采样地及编号

编号	采样地	采样数	编号	采样地	采样数
A-1	青岛胶州里岔镇南楼村	3	I-3	威海乳山徐家镇东岭村	2
B-1	青岛胶州洋河镇前澄海村	2	J-1	烟台莱阳姜疃镇院庄村	3
B-2	青岛胶州洋河镇李子行村	3	J-2	烟台莱阳姜疃镇姜格庄村	3
D-1	青岛平度仁兆镇冷戈庄村	3	J-3	烟台莱阳姜疃镇西宅村	2
D-2	青岛平度仁兆镇沟东村	3	K-1	烟台莱阳大乔镇憩格庄村	2
D-3	青岛平度仁兆镇孙家汇村	2	K-2	烟台莱阳大乔镇大乔村	2
D-4	青岛平度仁兆镇店西村	2	L-1	烟台莱阳万第镇梁家疃村	3
E-1	青岛胶南黄山镇徐村	3	L-2	烟台莱阳万第镇前万第村	3
E-2	青岛胶南黄山镇沙沟东村	3	L-3	烟台莱阳万第镇小院村	3
F-1	青岛胶南宝山镇大窝格村	3	M-1	烟台海阳郭城镇战场泊村	2
F-2	青岛胶南宝山镇胡家村	2	M-2	烟台海阳郭城镇柳树村	2
G-1	青岛胶南六汪镇小沟村	3	N-1	烟台海阳朱吴镇宝石村	2
G-2	青岛胶南六汪镇柳杭沟村	2	N-2	烟台海阳朱吴镇上尹家村	2
H-1	威海乳山大孤山镇小孤山村	3	N-3	烟台海阳朱吴镇龙湾泊村	2
H-2	威海乳山大孤山镇八里甸村	2	O-1	烟台海阳小纪镇南埠村	2
I-1	威海乳山徐家镇黄疃村	3	O-2	烟台海阳小纪镇秀家疃村	3
I-2	威海乳山徐家镇西岭村	3	合计		83

1.1.2 样本采集方法 利用 HTSS01 土钻, 在每一地块通过五点取样法取 0~20 cm 土壤, 完全混匀, 即为该地块检测用土样; 在收获期的同一地块采用五点取样法, 取球茎约 40 个, 混匀即为芋球茎检测样本。如果该地块芋球茎已收获, 在不同袋中随机抽取芋球茎, 作为检测样本。在芋主产区依据灌溉水的种类主要采集了井水和河水, 采取了共用水源采集 1 份水样的原则, 每份水样采样量 500 mL。

## 1.2 重金属含量测定方法

1.2.1 芋球茎重金属含量测定 经削皮、切片、称量、烘干和磨碎处理后, 称取芋球茎样品 1.00 g 于消化管中 (可放数粒玻璃珠)。加 10 mL 混合酸 (浓硝酸:高氯酸=4:1), 浸泡过夜, 电炉消解, 若变为棕黑色, 再加混合酸, 直至冒白烟, 消化液呈无色透明或略带黄色, 自然冷却, 过滤至 25 mL 容量瓶中, 少量多次洗涤消化管, 定容, 混匀备用。同时作试剂空白对照, 原子吸收光谱仪测定重金属的含量。Cd 和 Pb 含量测定方法参照 GB/T 5009.15—2003 和 GB/T 5009.12—2010 石墨炉原子吸收光谱法, Hg 和 As 含量测定方法分别参照 GB/T 5009.17—2003 和 GB/T 5009.11—2003 原子荧光分光光度法。

1.2.2 土样、水样重金属含量测定 将土样取回后尽快风干, 去除植物残体和其他杂质, 用 0.25 mm 目筛筛成细土。称 0.2 g 干细土于消化管中, 加少量超纯水润湿, 加 4 mL 王水 (浓硝酸:浓盐酸

=1:3), 摇匀, 在电热板上由低温至微沸 2 h, 取下冷却, 水定容至 25 mL。同时作试剂空白, 原子吸收光谱仪测定重金属含量。Cd 和 Pb 含量测定参照 NY/T 1623—2008 石墨炉原子吸收分光光度法, Hg 和 As 含量测定分别参照 GB/T 22105.1—2008 和 GB/T 22105.2—2008 原子荧光分光光度法。水样直接用上述仪器测定 4 种重金属含量。

## 1.3 土壤、水样理化性质相关指标的测定方法

土壤有机质含量测定采用重铬酸钾容量法 (鲁如坤, 2000)。土壤和水样的 pH 值测定参照 NY/T 1377—2007 玻璃电极法。速效氮、速效磷、速效钾含量分别参照 NY/SH 025—1999 碱解扩散法、NY/SH 022—1999 等离子发射光谱法、NY/SH 024—1999 等离子发射光谱法。

重金属富集率 = 芋球茎重金属含量 / 土壤重金属含量 × 100%

采用 Excel 软件进行平均值、标准差和相关系数计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 芋球茎重金属含量的检测分析

对采集自山东芋主产区 33 个村的芋球茎样本分别检测 Pb、Cd、As、Hg 的含量, 结果见表 2。从表 2 可以看出, 83 份芋球茎样本中的 Pb、As、Hg 含量差异较小, 变化范围分别在 0~0.042 6、

0~0.003 3、0~0.001 2 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,富集率分别在 0~0.249%、0~0.020%、0~3.953% 之间。Cd 含量变化为 0~0.360 0 mg·kg<sup>-1</sup>, 差异较大,平均 0.061 mg·kg<sup>-1</sup>, 富集率 0~482.56%, 另有 14 份土壤样本 Cd 含量为未检出,但在芋球茎中均检测出 Cd 具有一定含量。以上分析显示,芋球茎对 Cd 的富集率明显高于其他 3 种重金属。

参照《农产品安全质量无公害蔬菜》(GB 18406.1—2001), 在检测的 83 份芋球茎样本中,

Pb、As 和 Hg 含量均未超过限量标准 0.2、0.5 mg·kg<sup>-1</sup> 和 0.01 mg·kg<sup>-1</sup>, 但有 33 个样点芋球茎的 Cd 含量超过限量 0.05 mg·kg<sup>-1</sup>。超标样本的采集区域不集中,均匀分布于 6 个市。《无公害蔬菜食品水生蔬菜》(NY 5238—2005)、《无公害食品芋头安全生产指标》(NY 5251—2004) 的 Cd 含量标准与 GB 18406.1—2001 一致。《食品中污染物限量标准》(GB01.1—2001) 的 Cd 限量标准为 0.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 据此标准统计则共有 14 份芋球茎样本的

表 2 芋球茎及相应种植土壤中的 4 种重金属含量及富集率

编号	芋球茎/mg·kg <sup>-1</sup>				土壤/mg·kg <sup>-1</sup>				Pb 富集率 %	Cd 富集率 %	As 富集率 %	Hg 富集率 %
	Pb	Cd	As	Hg	Pb	Cd	As	Hg				
A-1	0.013 5	0.023 5	0.001 8	ND	16.00	0.012 9	8.79	0.107 0	0.084	182.20	0.020	0
	0.042 6	0.024 0	ND	ND	17.10	0.090 3	6.77	0.021 7	0.249	26.58	0	0
	0.005 8	0.030 1	ND	ND	16.20	0.103 0	7.01	0.023 0	0.036	29.22	0	0
B-1	0.014 2	0.021 6	ND	ND	8.13	0.063 6	7.32	0.050 3	0.175	33.96	0	0
	0.005 2	0.069 9	ND	ND	11.60	0.020 6	7.74	0.047 1	0.045	339.32	0	0
B-2	ND	0.083 0	ND	ND	12.80	0.031 6	7.52	0.060 0	0	262.66	0	0
	ND	0.101 0	ND	ND	8.62	0.042 1	6.02	0.060 6	0	239.91	0	0
	ND	0.112 0	ND	ND	10.00	0.108 0	5.37	0.072 3	0	103.70	0	0
D-1	ND	0.097 1	ND	ND	15.80	0.039 4	5.07	0.063 8	0	246.45	0	0
	ND	0.098 3	ND	ND	13.50	0.049 5	7.70	0.088 6	0	198.59	0	0
	0.019 4	0.035 8	ND	ND	12.50	0.054 2	5.36	0.114 0	0.155	66.05	0	0
D-2	0.008 4	0.032 3	ND	ND	6.05	0.038 6	5.75	0.063 2	0.139	83.68	0	0
	0.001 3	0.068 0	ND	ND	6.65	0.030 8	5.91	0.064 3	0.020	220.78	0	0
	0.002 2	0.075 9	ND	ND	11.90	0.020 6	5.48	0.041 6	0.018	368.45	0	0
D-3	ND	0.018 7	ND	ND	12.00	0.276 0	5.14	0.010 4	0	6.78	0	0
	ND	0.116 0	ND	ND	14.60	0.061 2	4.81	0.012 4	0	189.54	0	0
D-4	0.002 0	0.117 0	ND	ND	14.40	0.089 0	5.43	0.014 6	0.014	131.46	0	0
	ND	0.028 9	ND	ND	13.80	0.204 0	5.29	0.019 5	0	14.17	0	0
E-1	ND	0.027 4	ND	ND	15.30	0.073 9	5.49	0.023 6	0	37.08	0	0
	ND	0.057 2	ND	ND	11.80	0.055 3	5.67	0.015 2	0	103.44	0	0
	0.005 4	0.030 3	ND	ND	16.20	0.090 8	5.89	0.009 8	0.033	33.37	0	0
E-2	0.005 4	0.099 0	ND	ND	22.00	0.108 0	5.54	0.019 0	0.025	91.67	0	0
	0.010 8	0.039 7	ND	ND	13.50	0.117 0	9.28	0.015 6	0.080	33.93	0	0
	ND	0.039 8	ND	ND	13.80	0.228 0	6.54	0.015 6	0	17.46	0	0
F-1	0.026 5	0.085 2	ND	ND	45.40	0.326 0	6.15	0.017 1	0.058	26.13	0	0
	0.002 1	0.040 9	ND	ND	17.20	0.110 0	3.88	0.015 1	0.012	37.18	0	0
	ND	0.055 9	ND	ND	42.40	0.254 0	5.94	0.009 2	0	22.01	0	0
F-2	0.006 9	0.101 0	ND	ND	14.00	0.075 8	5.69	0.031 8	0.049	133.25	0	0
	0.002 3	0.079 4	ND	ND	17.60	0.082 8	4.85	0.010 6	0.013	95.89	0	0
G-1	ND	0.035 2	ND	ND	15.20	0.075 0	4.25	0.013 2	0	46.93	0	0
	ND	0.026 5	ND	ND	14.60	0.041 7	4.58	0.019 2	0	63.55	0	0
	0.004 4	0.025 9	ND	ND	16.70	0.069 5	3.11	0.010 1	0.026	37.27	0	0
G-2	ND	0.093 3	ND	ND	13.00	0.072 8	5.38	0.012 2	0	128.16	0	0
	ND	0.073 9	ND	ND	11.00	0.059 7	5.32	0.009 7	0	123.79	0	0
H-1	0.002 9	0.301 0	ND	ND	15.70	0.085 3	6.21	0.019 0	0.018	352.87	0	0
	ND	0.033 8	ND	ND	16.20	0.345 0	4.61	0.033 4	0	9.80	0	0

续表

编号	芋球茎/mg · kg <sup>-1</sup>				土壤/mg · kg <sup>-1</sup>				Pb 富集率	Cd 富集率	As 富集率	Hg 富集率
	Pb	Cd	As	Hg	Pb	Cd	As	Hg	%	%	%	%
H-2	ND	0.048 6	ND	ND	14.60	0.090 3	4.04	0.020 0	0	53.82	0	0
	ND	0.034 8	ND	ND	21.20	0.098 6	5.82	0.025 8	0	35.29	0	0
I-1	ND	0.016 2	ND	ND	15.40	0.043 7	10.30	0.011 1	0	37.07	0	0
	ND	0.034 3	ND	ND	11.00	0.102 0	3.47	0.013 0	0	33.63	0	0
I-2	0.003 5	0.121 0	ND	ND	12.00	0.072 2	3.49	0.010 1	0.029	167.59	0	0
	ND	0.045 1	ND	ND	15.00	0.030 8	3.78	0.008 0	0	146.43	0	0
I-3	ND	0.255 0	ND	ND	16.80	0.136 0	7.55	0.022 8	0	187.50	0	0
	0.002 1	0.020 6	ND	ND	14.00	0.090 5	4.45	0.016 4	0.015	22.76	0	0
J-1	ND	0.096 0	ND	ND	12.80	0.052 7	5.37	0.018 1	0	182.16	0	0
	ND	0.022 1	ND	ND	16.20	0.111 0	5.78	0.013 1	0	19.91	0	0
J-2	0.009 1	0.131 0	ND	ND	17.20	0.047 9	4.54	0.018 0	0.053	273.49	0	0
	ND	0.166 0	ND	ND	18.40	0.034 4	12.30	0.034 7	0	482.56	0	0
J-3	ND	0.012 1	ND	ND	23.50	0.018 1	11.70	0.032 8	0	66.85	0	0
	0.005 6	0.028 4	ND	ND	32.40	0.143 0	10.20	0.032 2	0.017	19.86	0	0
K-1	0.001 3	0.008 2	ND	ND	18.60	ND	11.80	0.030 1	0.007	—	0	0
	ND	0.014 3	ND	ND	14.40	0.496 0	8.75	0.028 1	0	2.88	0	0
K-2	ND	0.360 0	ND	0.001 0	12.90	0.944 0	9.14	0.025 3	0	—	0	3.953
	ND	0.043 3	ND	ND	11.00	ND	11.30	0.048 4	0	—	0	0
K-3	ND	0.045 5	ND	ND	16.70	ND	11.60	0.095 9	0	—	0	0
	ND	0.009 4	ND	ND	10.90	ND	5.71	0.033 0	0	—	0	0
L-1	ND	0.006 1	ND	ND	14.10	ND	10.90	0.251 0	0	—	0	0
	0.006 5	0.128 0	ND	ND	15.00	ND	5.33	0.025 0	0.043	—	0	0
L-2	ND	0.016 5	ND	ND	12.20	ND	7.37	0.022 3	0	—	0	0
	ND	0.001 6	ND	ND	17.00	ND	10.30	0.032 9	0	—	0	0
L-3	0.002 3	0.018 5	0.003 3	ND	20.70	0.082 2	23.20	0.034 1	0.011	22.51	0.014	0
	0.007 2	0.006 8	ND	ND	17.30	ND	6.22	0.024 7	0.042	—	0	0
M-1	ND	0.005 8	ND	ND	13.90	ND	6.28	0.032 0	0	—	0	0
	ND	0.064 0	ND	ND	16.90	0.071 8	6.15	0.028 2	0	89.14	0	0
M-2	ND	0.036 0	ND	ND	14.80	0.086 6	10.10	0.094 3	0	41.57	0	0
	ND	0.014 4	ND	ND	22.70	0.131 6	7.70	0.023 7	0	10.94	0	0
N-1	ND	0.024 3	ND	ND	18.20	0.048 0	5.53	0.024 0	0	50.63	0	0
	ND	ND	ND	ND	19.20	0.041 2	10.80	0.028 9	0	0	0	0
N-2	0.013 6	0.011 0	ND	ND	28.30	0.049 6	9.57	0.028 6	0.048	22.18	0	0
	ND	0.004 7	ND	ND	30.90	0.216 0	11.30	0.103 0	0	2.18	0	0
N-3	ND	0.017 1	ND	ND	18.10	0.128 0	5.59	0.040 9	0	13.36	0	0
	ND	0.327 0	ND	0.001 2	18.50	0.404 0	6.45	0.043 4	0	80.94	0	2.765
O-1	ND	0.045 8	ND	ND	25.80	0.122 0	21.80	0.022 5	0	37.54	0	0
	ND	0.059 6	ND	ND	17.60	0.025 2	20.50	0.016 1	0	236.51	0	0
O-2	ND	0.024 9	ND	0.001 1	21.10	0.008 4	18.00	0.044 0	0	296.43	0	2.500
	ND	0.046 1	ND	ND	17.10	0.015 7	18.10	0.034 0	0	293.63	0	0
O-3	0.006 1	0.006 8	ND	ND	20.50	0.153 2	10.70	0.078 7	0.030	4.43	0	0
	ND	0.009 2	ND	ND	23.20	0.608 0	22.40	0.060 6	0	1.53	0	0
O-4	ND	0.055 9	ND	ND	14.50	0.108 6	12.60	0.030 4	0	51.47	0	0
	ND	0.002 7	ND	ND	19.10	ND	14.10	0.014 5	0	—	0	0
O-5	ND	0.055 6	ND	ND	18.20	ND	11.40	0.035 1	0	—	0	0
	0.003 2	0.050 6	ND	ND	15.60	ND	12.70	0.056 1	0.021	—	0	0
	ND	0.111 0	ND	ND	15.60	ND	8.74	0.025 1	0	—	0	0

注: ND 表示未检出; —表示土壤中未检出重金属的富集率。



Cd 含量超标。

### 2.2 土壤及灌溉水的重金属含量检测分析

2.2.1 采样地土壤重金属检测结果 对山东胶东半岛地区 33 个村的芋栽培土壤抽样检测 4 种重金属含量, 83 份土壤样本中 Pb、Cd、As、Hg 的含量范围分别在 6.05 ~ 45.40、0 ~ 0.944、3.11 ~ 23.20、0.008 ~ 0.251 mg · kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值依次为 16.679、0.101、8.142、0.036 mg · kg<sup>-1</sup>。土壤中 Cd 含量的变异系数最大, 为 141.576%, 其次为 Hg 94.31%、As 53.95% 和 Pb 37.82%。

参照《无公害蔬菜产地环境要求》(GB/T18407.1—2001), 83 份土壤样本中的 Pb、Hg 和 As 含量均未超过对应 pH 值的 Pb、Hg、As 限量标准。6 份土壤样本的 Cd 含量超过限量标准 0.3 mg · kg<sup>-1</sup> (pH < 7.5), 最高值为 0.944 mg · kg<sup>-1</sup>。

2.2.2 采样地水样的重金属检测结果 对 31 份不同采样地的灌溉水源的 4 种重金属含量检测结果显示, 只有少数采样地灌溉水源中检测出极低含量的 As (0.001 1 ~ 0.002 3 mg · kg<sup>-1</sup>), 其他 3 种重金属均未检测到。参照《无公害蔬菜产地环境要求》标准, 山东胶东半岛地区农田的井水和河水等主要灌溉水源达到无公害蔬菜产地环境要求。

### 2.3 土壤理化指标的检测及相关性分析

2.3.1 土壤理化指标的检测结果显示 对山东芋产区 83 份土壤样本的理化性质相关指标进行检测分析, 结果显示 (表 3), 土壤 pH 值变化范围在 4.58 ~ 7.35 之间, 采集自青岛市和乳山市的土壤样本均偏酸性, 而莱阳市和海阳市的部分样本呈中性, 甚至略偏碱性。83 份土壤样本的速效氮、速效磷、速效钾和有机质含量的变化范围分别在 60.35 ~ 121.40 mg · kg<sup>-1</sup>、51.1 ~ 430.0 mg · kg<sup>-1</sup>、56.87 ~ 190.50 mg · kg<sup>-1</sup>、8.46 ~ 26.45 g · kg<sup>-1</sup> 之间。速效磷含量的变异系数最大, 达到 45.43%, 其次为有机质和速效钾含量, 分别达到 31.65% 和 31.19%, 速效氮的

表 3 土壤样本理化指标测定分析

项目	N mg · kg <sup>-1</sup>	P mg · kg <sup>-1</sup>	K mg · kg <sup>-1</sup>	有机质 g · kg <sup>-1</sup>	pH 值
范围	60.35 ~ 121.40	51.10 ~ 430.00	56.87 ~ 190.50	8.46 ~ 26.45	4.58 ~ 7.35
平均值	81.18	191.69	126.20	13.79	5.53
标准差	13.94	87.09	39.36	4.37	0.87
变异系数 /%	17.17	45.43	31.19	31.65	15.77

变异系数最小, 为 17.17% (表 3)。

2.3.2 芋球茎与土壤重金属含量及理化指标的相关性分析 由于在本试验中大部分芋球茎样本的 As 和 Hg 两种重金属含量均未检出, 因而, 仅利用 Excel 软件对各采样地的芋球茎样本及其相应种植地农田土壤的 Pb 和 Cd 含量进行相关性分析, 结果显示, 芋球茎的 Cd 和 Pb 含量分别与土壤中的 Cd 和 Pb 含量呈极显著和显著性正相关, 表明在本试验中, 芋球茎中积累的 Cd 和 Pb 主要来源于土壤。

为了了解芋球茎中 Cd 积累与栽培土壤理化性质的关系, 本试验对总样本数 (83 份) 和超过限量 (0.05 mg · kg<sup>-1</sup>) 的 33 份芋球茎样本的 Cd 含量与相应栽培土壤中速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量及其 pH 值进行相关性分析, 结果显示 (表 4), 83 份样本的 Cd 含量与土壤 pH 值呈显著负相关, 表明随着土壤酸性的增强芋球茎 Cd 积累量增加。芋对 Cd 的积累与土壤中 N、P、K 及有机质含量均未表现显著性相关。

表 4 芋球茎 Cd 含量与土壤理化指标的相关性分析

芋球茎 Cd 含量	N	P	K	有机质含量	pH 值
超标样本	0.140 0	-0.050 0	0.130 0	0.030 0	0.020 0
总样本	0.128 0	0.126 0	-0.041 0	-0.126 0	-0.263 0*

注: \* 表示相关性显著 ( $p < 0.05$ ), 下同。

### 2.3.3 土壤重金属含量与理化指标的相关性分析

通过对山东胶东半岛地区 83 份土壤样本的重金属含量与速效氮、速效磷、速效钾和有机质含量及 pH 值进行相关性分析, 结果显示 (表 5), 土壤中的有机质含量与土壤中的 As 和 Pb 含量呈极显著性正相关, 与 Cd 含量呈显著性正相关, 土壤中的 As 和 Pb 含量与土壤的 pH 值和速效氮含量的相关性均达到显著水平, 其中 As 含量又与土壤中的速效磷含量呈显著性负相关。综合上述分析结果, 土壤有机质含量是影响土壤重金属积累的重要因素, 其次为土壤的 pH 值和速效氮含量。在栽培过程中,

表 5 土壤重金属含量与理化指标的相关性分析

项目	As	Hg	Pb	Cd
N	0.23*	-0.10	0.23*	0.03
P	-0.27*	0.01	-0.05	0.14
K	0.06	-0.04	0.19	0.06
有机质	0.61**	-0.07	0.36**	0.26*
pH	0.24*	0.18	0.24*	0.07

注: \*\* 表示相关性达到极显著水平 ( $p < 0.01$ )。

通过适当调整栽培管理措施能够改善土壤的重金属积累。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 山东芋主产区环境条件及球茎的重金属含量检测分析

重金属元素通过直接进入和相互迁移的方式造成土壤、水体和大气等各类环境要素的污染。土壤是蔬菜通过根部吸收重金属的主要介质,其重金属含量直接影响蔬菜对该元素的吸收和累积(邹日等,2011)。在本试验中,对山东省胶东半岛地区进行抽样检测和系统调查,种植芋的农田周边均无工厂等污染源,绝大多数地块远离城市,种植地大多不临近公路。检测结果显示,参照土壤环境质量标准(GB15618—1995),83份土壤样本的As、Hg、Pb含量均未超过二级标准,只有1份样本的Cd含量介于二级到三级标准之间。除了少数采样地灌溉水样本中检测出极低含量的As外,其他3种重金属在31份灌溉水样中均为未检出。上述调查及检测结果显示,山东芋主产区农田的周边环境无主要污染源,土壤和灌溉水源均未受到Cd、Hg、Pb、As 4种重金属的污染。

重金属首先在植物的根中积累,然后有一部分被转运到植株的其他部位,因而不同部位对重金属的积累量不同,通常植株的地下部大大高于地上部(潘静娴等,2006;任伟等,2010)。芋是以地下球茎为主要产品器官的作物种类,山东芋主产区83份球茎样本的As、Hg和Pb含量较低,均未超过各级食品限量标准。Cd含量相对较高,33份样本超过限量,但超出量较小,最高为 $0.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超标样本的采集区域不集中。相关性分析结果显示,芋球茎中积累的Cd主要来源于土壤。

#### 3.2 Cd积累的影响因素及防治措施

Cd具有移动性强、生物毒性大且易被植物吸收的特点(冯恭衍等,1993)。本试验结果显示,芋球茎与土壤中Cd含量呈极显著正相关,与前人研究结果一致(魏学玲等,2009)。芋球茎中Cd含量与土壤pH值呈显著负相关,土壤有机质含量与土壤Cd含量呈显著性正相关,且土壤中的Cd是芋球茎中Cd积累的主要来源,表明土壤pH值和有机质含量是影响芋球茎Cd积累的重要因素。pH

值的降低可导致碳酸盐和氢氧化物结合态重金属的溶解、释放,同时也可增加吸附态重金属的释放(祖艳群等,2003);土壤有机质包括土壤中各种动物、植物残体及微生物分解和合成的有机化合物。土壤有机质中的腐殖质是一类带有多种含氧功能团,如羧基、酚羟基和醇羟基等的高分子有机混合物,占有机质总量的50%~90%(吴曼等,2011)。腐殖质易与重金属元素发生络合或螯合反应,使进入土壤的外源重金属固定在腐殖质中(杨金燕等,2005)。同时腐殖质还会与土壤中的粘土矿物、氧化物等无机颗粒结合成有机胶体和有机-无机复合胶体,增加土壤的表面积和表面活性,使其对重金属的吸附能力远远超过任何其他的矿质胶体(白庆中等,2000)。因此,可以采取调节土壤pH值和增加有机质含量来降低芋球茎中的Cd积累。

土壤中的Cd主要来自于污水灌溉、污泥使用及施肥等。农业活动中长期使用含重金属的化学农药、化学肥料及含Pb、Cd等重金属的农膜,造成重金属进入土壤,从而使农业土壤中重金属含量明显升高(郭义龙等,2003)。磷肥含有Cd,其施用面积广而且量大,可造成土壤、作物和食品的严重污染(赵月兰和慕建华,1995)。本试验中,Cd在山东芋主产区灌溉水样本中均未检出,且种植地周边没有工厂,推测土壤中Cd可能来源于农药和化肥的施用等。从防治措施上,可在栽培环节上注意增施有机肥以提高土壤胶体对重金属的吸附能力,促进土壤中Cd形成沉淀。同时,还应注意含Cd较多的肥料和农药的合理使用。另外,由于表层土受人为栽培措施影响较大,通常其Cd含量高于深层土,生产中可深翻土地,降低表层土壤的Cd含量。

#### 参考文献

- 白庆中,宋燕光,王晖. 2000. 有机物对重金属在粘土中吸附行为的影响. 环境科学, 21(5): 64-67.
- 陈玉成,赵中金,孙彭寿,周虹,欧阳东,陈宏,张秀,殷捷. 2003. 重庆市土壤-蔬菜系统中重金属的分布特征及其化学调控研究. 农业环境科学学报, 22(1): 44-47.
- 代平,安瞳昕,吴伯志,字淑慧,牛华林. 2012. 云南通海蔬菜区土壤和蔬菜中重金属及农药残留分析. 安徽农业科学, 40(1): 161-163, 170.
- 冯恭衍,张炬,吴建平. 1993. 宝山区蔬菜重金属污染研究. 上海农学院学报, 11(1): 43-50.

- 郭义龙, 林壹兵, 胡少宜. 2003. 漳州市农业土壤重金属现状、分析及防治. 土壤, 35 (2): 131-135.
- 李学德, 花日茂, 岳永德, 曹德菊, 袁立志, 沈巍巍. 2004. 合肥市蔬菜中铬、铅、镉和铜污染现状评价. 安徽农业大学学报, 31 (2): 143-147.
- 林梅. 2011. 福州市上市蔬菜中重金属污染评价及防治措施. 江西农业学报, 23 (6): 129-131.
- 刘勇, 金枚, 吕晶晶, 袁纯, 张新英. 2012. 广西某矿区蔬菜中重金属含量的调查与评价. 安徽农业科学, 40 (2): 949-950, 955.
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- 潘静娴, 戴锡玲, 陆劭俊. 2006. 茭蒿重金属富集特征与食用安全性研究. 中国蔬菜, (1): 6-8.
- 任伟, 张思冲, 崔可瑜, 张丽会. 2010. 哈尔滨市东南郊菜地土壤重金属环境效应分析. 中国蔬菜, (14): 75-79.
- 魏学玲, 史如霞, 杨颖丽, 张园园, 贾鹏翔, 姜羽. 2009.  $Cd^{2+}$  胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响. 西北植物学报, 29 (10): 2031-2037.
- 吴曼, 徐明岗, 徐绍辉, 刘军领, 武海雯, 沈浦. 2011. 有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响. 农业环境科学学报, 30 (3): 461-467.
- 杨金燕, 杨肖娥, 何振立, 杨金英. 2005. 土壤中铅的吸附-解吸行为研究进展. 生态环境, 14 (1): 102-107.
- 杨苏才, 南忠仁, 曾静静. 2006. 土壤重金属污染现状与治理途径研究进展. 安徽农业科学, 34 (3): 549-552.
- 游勇和鞠荣. 2007. 重金属对食品的污染及其危害. 环境, (2): 102-103.
- 张继舟, 王宏韬, 倪红伟, 马献发, 袁磊. 2012. 我国农田土壤重金属污染现状、成因与诊断方法分析. 土壤与作物, 1 (4): 212-217.
- 赵月兰, 慕建华. 1995. 镉的食品污染及其检测. 四川畜牧兽医, (1): 42-43.
- 邹日, 沈颖, 柏新富, 李锡香. 2011. 重金属对蔬菜的生理影响及其富集规律研究进展. 中国蔬菜, (4): 1-6.
- 祖艳群, 李元, 陈海燕, 陈建军. 2003. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究. 农业环境科学学报, 22 (3): 289-292.

## Heavy Metal Detection and Analysis of Influence Factors in Main Taro Production Areas of Shandong Province

ZOU Ri<sup>1, 2</sup>, GAO Ping<sup>1</sup>, BAI Xin-fu<sup>2</sup>, LI Xi-xiang<sup>1</sup>, LIU Zhong-xiao<sup>1</sup>, ZHANG Su-jun<sup>1</sup>, WANG Jian-ren<sup>1</sup>, SHEN Di<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; <sup>2</sup>Life Science College of Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China)

**Abstract:** In this study, sampling test of heavy metals of tuber [*Colocasia esculenta* (L.) Schott], soil and water were performed in main production areas of Shandong Province. The results indicated that As, Hg and Pb contents of 83 tuber samples did not exceed the maximum limits of GB 18406.1—2001. Cd content of 33 samples with relatively even distribution exceeded the limit of  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  by a very small amount. The highest value of Cd content was  $0.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . According to GB/T 18407.1—2001, the As, Hg, Pb content of 83 soil samples did not exceed the maximum limits, while the Cd content of 6 soil samples exceeded the limit of  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  ( $\text{pH} < 7.5$ ) with highest value  $0.944 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Four heavy metal contents of 31 water samples did not exceed the maximum limits. It referred that taro production areas in Shandong Province were not polluted by the above mentioned 4 heavy metals. Further analysis revealed that the Pb and Cd contents of tubers were very significantly or significantly correlated with the Pb and Cd contents of soil, indicating that Pb and Cd in tubers mainly come from soil. The Cd content of tubers had a very significant negative correlation with pH value of soil, and the Cd, As and Pb contents in soil were very significantly or significantly correlated with the organic substance content, which indicating that pH value and organic matter contents were the main factors influencing heavy metal accumulation. The usage of agricultural medicine and fertilizers might cause Cd accumulation in some areas of Shandong Province.

**Key words:** Taro; Heavy metal; Soil; Tuber; Irrigation water