

土壤-蔬菜系统中砷转移规律的研究

黄瑞卿 (福州市农产品质量安全检验检测中心, 福建福州 350001)

摘要 [目的]探究砷在土壤-蔬菜系统中的转移规律。[方法]采用氢化物原子荧光光度法测定福建省8个县、区的20多个品种蔬菜样品和对应耕作层土壤样品砷含量。[结果]采样区耕作层土壤全砷含量在0.94~25.27 mg/kg, 平均值为5.91 mg/kg, 未超过国家二级标准。采样区耕作层土壤有效砷含量在0.21~2.86 mg/kg, 平均为0.84 mg/kg。蔬菜可食用部分砷含量在未检出~0.163 mg/kg。其中, 水生类蔬菜、绿叶类蔬菜砷含量较高, 豆类、瓜类、根茎类和茄果类砷含量较低, 所有蔬菜的砷含量均低于食品安全国家标准, 表明采样区蔬菜未遭受明显砷污染。大多数蔬菜品种可食用部分砷含量分别与土壤全砷含量、土壤有效砷含量之间存在显著正相关关系。用转移系数来表示蔬菜对砷的吸收能力, 发现转移系数有随土壤全砷含量的提高而减小的趋势, 主要呈幂关系。但转移系数基本不随有效砷含量的变化而变化。通过DPS统计软件的聚类分析可按转移系数(全量基和有效基)中位值把蔬菜对土壤全砷和有效砷的转移能力分为3类: 即低转移能力、中等转移能力和高转移能力。[结论]研究结果为正确评价、预报、预测福建省土壤及蔬菜砷污染提供了理论依据。

关键词 土壤; 蔬菜; 砷; 转移系数

中图分类号 X503.231 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)27-0012-05

Regular Pattern of Arsenic Transferring Movement in Soil-vegetable System

HUANG Rui-qing (Fuzhou Testing Center for Safety and Quality Inspection of Agricultural Products, Fuzhou, Fujian 350001)

Key words [Objective] The aim was to study the regular pattern of Arsenic transferring movement in the soil and vegetable. [Method] We utilized Hydride Generation Atomic Fluorescence Spectrum to determinate the Arsenic content between more than 20 varieties of vegetable's samples and their corresponding farming layer of soils in the area of 8 counties and districts of Fujian Province. [Result] The total Arsenic contents inside of the soils were in the range of 0.94-25.27 mg/kg and in average of 5.91 mg/kg, in that did not exceed the National Secondary Standards. The effective Arsenic contents inside of the soils were in the range of 0.21-2.86 mg/kg and in the average of 0.84 mg/kg. And the edible Arsenic contents in vegetable were in the range of not detected-0.163 mg/kg. Among them, the Arsenic contents of Aquatic Vegetables and Green Leafy Vegetables were much more higher comparing with the Arsenic contents of beans, melons, rhizome and eggplant, whose were quite lower. Moreover, the Arsenic contents of all vegetables were lower than the National Food Safety Standards, indicating that the sampling areas of vegetables did not suffer from significant Arsenic pollution. Furthermore, the edible Arsenic contents of most vegetable varieties had obviously positive correlation with the total Arsenic contents and the effective Arsenic contents. Thus, we used the transfer coefficient to indicate the absorptive capacity of the Arsenic in vegetables, and found out that the transfer coefficient decreased as the total Arsenic contents increase, mainly following the power law. However, the transfer coefficient did not change with the effective Arsenic contents. Using the clustering method provided by DPS statistical software, we categorized the vegetable into three categories: the low, the medium and the high transfer capacity, based on the median of the transfer coefficient of the total and effective Arsenic contents. [Conclusion] The results provide reference for correct evaluation, prediction and prediction of As pollution of soil and vegetables in Fujian Province.

Abstract Soil; Vegetables; As; Soil-plant transfer factor

砷(As)是一种重要的元素,自公元1250年左右对元素砷提取成功后,砷便有了多方面的用途。近百年来,随着工农业的发展,砷化物广泛应用于有色金属、色素、染料、玻璃及医药等领域,由此引起土壤环境砷污染。土壤被砷污染后,不仅影响作物的产量和品质,并且可以通过食物链最终危害人类健康,有研究表明砷可能引起皮肤癌、膀胱、肝脏、肾、肺和前列腺癌以及冠状动脉等疾病^[1-2]。

蔬菜是人民日常生活中必不可少的食物之一,食用量大,较低水平的砷污染就可以造成极大的危害,所以蔬菜的砷安全问题对人体的健康非常重要。自20世纪80年代以来不少国内外专家学者对蔬菜砷含量及其在体内累积和分布规律进行了研究^[3-6],总结前人的研究成果发现,以往研究都集中在对菜园土壤砷及蔬菜砷含量的调查及砷在蔬菜体内的分布规律研究,对蔬菜砷与土壤砷特别是蔬菜砷与土壤有效砷的相关关系,以及蔬菜吸收砷的机理和蔬菜砷转移能力的研究相对较少。笔者在总结前人研究成果的基础上,调查了福建省部分县、市、区的蔬菜生产地土壤及其对应蔬

菜可食部分的砷含量,并对福建酸性菜园土壤砷与蔬菜砷的相关关系、蔬菜砷的转移能力与转移规律进行了一系列研究,以期正确评价、预报、预测福建省土壤及蔬菜砷污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料 为了使研究结果更符合田间的情况,完全采用田间采集的作物和相应的土壤进行研究。供试样品分别来自福建省龙岩市新罗区(XL)、南平市延平区(YP)、宁德市古田县(GT)和蕉城区(JC)、福州市郊区(FZ)、长乐(CL)、闽侯(MH)和琅岐(LQ)等地,蔬菜样品包括10大类20多个品种,近300个样品。

1.2 方法

1.2.1 样品采集和处理。 采样时,首先选择作物种类和采样小区,在选定的采样小区上采集作物的可食用部分,每个采样小区采集3~5个样品组成一个混合样品。同时采集相应耕作土壤组成混合样品。样品采集后尽快运回实验室处理。新鲜蔬菜样品经洗净后,适当滤干以除去外表的水分,称鲜重。置于80~90℃鼓风干燥箱中烘15~30 min以杀酶;之后置于烘干箱中低温烘干(约65℃),必要时在微波炉中加速烘干。称烘干重,并计算含水量。烘干后的植物样品

作者简介 黄瑞卿(1979—),男,福建德化人,农艺师,硕士,从事农产品和农业环境质量安全检测研究。

收稿日期 2017-08-28

用不锈钢粉碎机粉碎后过 0.5 mm 尼龙筛,储存于密封塑料袋备用。土样经风干磨细后,过 2 mm 筛,少量过 0.149 mm 筛,储存于密封的塑料袋中备用。

1.2.2 土壤和植物样品含砷量的测定。在供试样品测定之前,先用标准土壤质控样和植物质控样检验测定方法,直至测定结果符合标样保证值。

1.2.2.1 土壤样品全砷含量测定。土样经硫酸-硝酸-高氯酸消解后,用氢化物原子荧光光度法测定。

1.2.2.2 植物样品全砷含量测定。植物样品经 1:1 王水消解后,用氢化物原子荧光光度法测定。

1.2.2.3 土壤样品有效砷含量的测定。称取 <2 mm 风干土样 5.00 g 于 150 mL 加盖塑料瓶中,按液土比 15:1 加入 75 mL 0.5 mol/L NaH_2PO_4 ,在振荡器上以 250 r/min 的速度振荡 120 min。到达时间后,立即取出用定量滤纸干过滤,同时做空白。滤液与标准系列溶液同时在原子荧光光谱仪上测定。

2 结果与分析

2.1 采样区土壤、蔬菜可食部分砷含量状况

2.1.1 土壤砷含量状况。采样区土壤全砷含量在 0.94 ~ 25.27 mg/kg,平均值为 5.91 mg/kg,与苏年华等^[7]的调查结果(福建无污染蔬菜地土壤砷含量 5.97 mg/kg)相一致。也与夏家淇^[8]的研究结果相近。调查结果发现,新罗、延平两地有一些样品全砷含量超出国家一级标准(但未超出二级标准),其中新罗区的新皮土壤全砷平均含量已接近一级标准的上限,说明该地区菜园土壤可能在一定程度上受到砷的污染。其余土样全砷含量均在土壤环境质量一级标准之内。

采样区土壤有效砷含量在 0.21 ~ 2.86 mg/kg,平均值为 0.84 mg/kg。有效度(有效砷含量/全砷含量)在 3.41% ~ 44.45%,平均为 15.54%。

2.1.2 采样区蔬菜可食部分砷含量状况。调查结果显示,各采样区的蔬菜可食用部分砷含量以鲜基计在未检出 ~ 163.31 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。有数个豆类蔬菜砷未检出,表明豆类蔬菜砷含量普遍较低,这与前人得出的结论基本一致^[9]。不同蔬菜种类,就其蔬菜鲜基砷平均含量而言从大到小依次是水生蔬菜类(47.53 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、绿叶菜类(38.37 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、葱蒜类(31.82 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、芥菜类(20.71 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、薯芋类(19.21 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、甘蓝类(18.55 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、白菜类(17.86 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、豆类(11.65 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、瓜类(10.34 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、根菜类(8.56 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、茄果类(4.36 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。我国食品安全国家标准规定蔬菜砷最大允许限量为 0.5 mg/kg(GB 2762—2012),受调查采样区蔬菜可食用部分砷含量均在这个允许的范围之内,即受调查的蔬菜无一超标。

不同种类植物砷含量水平和分布状况同时会受到植物基因型、生长特性、生长环境的影响^[10],不同种类植物砷含量大小为:旱生植物 > 水生植物,禾谷类植物 > 豆类、蔬菜。不同的植物器官,由于外部形态及内部结构不一,吸收重金属元素的生理生化机制各异,故其对砷的累积量差异也较

大。一般认为,不同器官砷含量大小为:根 > 茎、叶 > 子粒、果实,即呈现自下而上的递减规律^[11]。

调查结果显示,水生蔬菜含砷量最高,原因在于水生植物本身具有吸收重金属元素的功能,它们能通过体表摄取一些重金属元素,这种摄取是通过植物机体分泌的各种有机配体、高分子螯合物和多种氨基酸、蛋白质、酶等物质与重金属元素的作用来实现的^[12]。植物对营养元素的吸收、运输机制的研究已有多年历史,但至今关于运输动力学和运输机理的某些认识仍处于假说阶段,对非必需性化学元素砷的吸收和运输机制的研究更是如此。迄今为止,国内外只有少数关于这方面的研究报道。Tu 等^[13]认为植物对砷的吸收和运输与磷的迁移系统有关。张素芹等^[14]认为砷主要富集于根而首先伤害根,还认为砷在植物体内的迁移与根组织内共质体主动运输有关,与磷和硫在共质体主动运送过程中相互影响,并经这一途径伴随磷和硫进入导管向上迁移。

2.2 蔬菜砷含量与土壤全砷及土壤有效砷含量间的关系 植物体内砷的主要来源是土壤,植物砷含量与土壤全砷含量之间存在一定的正相关关系,但也有少数研究发现蔬菜中的砷含量与其生长土壤中的全砷相关关系不明显^[15]。

2.2.1 蔬菜砷含量与土壤全砷含量的关系。通过研究蔬菜可食用部分砷含量与对应土壤全砷含量间的相关关系发现,所有蔬菜样品可食用部分砷含量与对应土壤全砷含量之间呈显著直线正相关,相关系数 $r = 0.146$ [$n = 262, P_{0.05}(200) = 0.138$],这与部分研究结果相一致^[16]。就各类蔬菜而言,部分蔬菜砷含量与土壤全砷含量间除存在着直线正相关外,还存在着指数正相关和部分乘幂正相关,但 3 种不同回归方程的拟合效果不同。由表 1 可知,呈极显著直线正相关的有大白菜、花菜、芥菜、芹菜和葱;呈极显著指数正相关的有大白菜、花菜、芹菜和葱。

分析结果发现,大部分蔬菜均以线性关系的显著性最高,说明大部分蔬菜可食用部分砷含量与土壤全砷含量之间存在直线正相关关系。但也发现几种蔬菜砷含量与土壤全砷含量无相关关系,如白菜、葫芦、丝瓜和黄瓜。而苦瓜、豇豆和菜豆砷含量则与土壤全砷含量呈一定的负相关关系。出现这种现象的可能原因:一是各样本取自不同地区,蔬菜的生长状况不同,所以相关关系不显著;二是土壤性质上的差异淡化了蔬菜砷含量与土壤全砷含量间的关系;三是葫芦、丝瓜、豇豆、菜豆等属于果实类蔬菜,可食用部分距土壤最远,而砷在植物体内的迁移相对较小,故受土壤条件的影响不明显。

2.2.2 蔬菜砷含量与土壤有效砷含量的关系。通过对各种蔬菜砷与土壤有效砷的回归分析发现,部分蔬菜砷含量与土壤有效砷含量除存在直线正相关外,还存在着指数正相关和部分乘幂正相关。由表 2 可知,呈极显著直线正相关的有大白菜、白菜、花菜、芥菜、芹菜、空心菜、叶用莴苣、番茄、葫芦、细香葱和姜;呈极显著指数正相关的有萝卜、大白菜、白菜、花菜、芥菜和细香葱;呈极显著乘幂正相关的有萝卜、白菜、细香葱和大蒜。

表1 蔬菜砷含量与土壤全砷含量的相关系数统计

Table 1 The coefficient correlation between As contents of vegetables and contents of total arsenic of soil

序号 No.	蔬菜类别 Vegetable type	样品数 Number of samples	相关系数 Correlation coefficient		
			线性相关 Linear correlation	指数相关 Index correlation	乘幂相关 Exponentiation correlation
1	萝卜	10	0.591	0.543	0.532
2	大白菜	13	0.917**	0.836**	—
3	白菜	37	0.020	0.033	0.020
4	花菜	9	0.848**	0.819**	—
5	芥蓝菜	5	0.164	0.197	—
6	包菜(结球甘蓝)	6	-0.389	-0.381	—
7	芥菜	9	0.914**	0.760*	—
8	芹菜	9	0.867**	0.773**	0.652*
9	空心(蕻)菜	16	0.440	0.467	0.553*
10	叶用莴苣	9	0.783*	0.731*	0.692*
11	番茄	6	0.149	0.150	—
12	茄子	12	0.149	0.174	—
13	葫芦	8	0.067	0.205	—
14	苦瓜	7	-0.599	-0.682	—
15	丝瓜	17	0.065	0.081	—
16	黄瓜	7	0.026	—	—
17	豇豆	10	-0.294	-0.352	—
18	菜豆	9	-0.709*	-0.693*	—
19	细香葱	11	0.819**	0.736**	0.568
20	大蒜	5	0.875*	0.879*	0.885*
21	韭菜	9	0.731*	0.669*	—
22	姜	5	0.764	0.862*	0.836*
23	芋	6	0.605	0.452	—
24	茭白	9	0.269	0.248	0.713*
25	莲藕	6	0.778	0.522	—

注：“*”表示 $P < 0.05$ ，“**”表示 $P < 0.01$ Note: * indicated $P < 0.05$; ** indicated $P < 0.01$

分析结果表明,在相关关系呈显著和极显著的蔬菜当中除萝卜是幂相关系数(0.764) > 指数相关系数(0.760) > 直线相关系数(0.683),大蒜是幂相关系数(0.926) > 直线相关系数(0.745) > 指数相关系数(0.740)以外,其余蔬菜均表现为直线相关系数大于指数相关系数和幂相关系数,达显著和极显著直线正相关的蔬菜种类达16个。上述结果表明,大部分蔬菜可食用部分砷含量与土壤有效砷之间存在显著直线相关。与蔬菜砷和土壤全砷的直线正相关关系比较而言,蔬菜砷和土壤有效砷的正相关关系要显著得多,说明用土壤有效砷来评价土壤砷对蔬菜的生物有效性要比用土壤全砷更合理。

2.3 土壤砷向蔬菜转移能力的研究 为了比较各种土壤中不同蔬菜对砷的吸收和累积能力的差异,该研究计算了土壤-蔬菜砷转移系数,即蔬菜体内砷含量(鲜基)与相应土壤砷含量间的比值^[17-18],转移系数越大,蔬菜对土壤砷的吸收能力也越强。

各类蔬菜以鲜基计的土壤全砷转移系数分别在0.000 1~0.042 9。不同种类蔬菜砷转移能力有的差距达几百倍,即使同种蔬菜砷转移能力差距有的也在几十倍以上,由于转移系

表2 蔬菜砷含量与土壤有效砷含量的相关系数统计

Table 2 The coefficient correlation between As contents of vegetables and contents of the available As of soil

序号 No.	蔬菜类别 Vegetable type	样品数 Number of samples	相关系数 Correlation coefficient		
			线性相关 Linear correlation	指数相关 Index correlation	乘幂相关 Exponentiation correlation
1	萝卜	10	0.683*	0.760**	0.764**
2	大白菜	13	0.853**	0.729**	—
3	白菜	37	0.602**	0.512**	0.486**
4	花菜	9	0.924**	0.890**	—
5	芥蓝菜	5	0.085	0.169	—
6	包菜(结球甘蓝)	6	-0.219	0.072	—
7	芥菜	9	0.861**	0.792**	—
8	芹菜	9	0.846**	0.664*	0.549
9	空心(蕻)菜	15	0.635**	0.583*	0.614*
10	叶用莴苣	9	0.799**	0.712*	0.748*
11	番茄	6	0.888**	0.853*	—
12	茄子	12	0.188	0.102	—
13	葫芦	8	0.916**	0.759*	—
14	苦瓜	7	0.000	0.035	—
15	丝瓜	17	0.732	0.593	—
16	黄瓜	7	0.287	—	—
17	豇豆	10	-0.464	0.506	—
18	菜豆	9	0.138	0.263	—
19	细香葱	11	0.950**	0.848**	0.751**
20	大蒜	5	0.745	0.740	0.926**
21	韭菜	9	0.609	0.615	—
22	姜	5	0.868*	0.890*	0.805
23	芋	6	0.443	0.324	—
24	茭白	9	-0.219	-0.157	-0.694*
25	莲藕	6	0.778*	0.760*	—

注：“*”表示 $P < 0.05$ ，“**”表示 $P < 0.01$ Note: * indicated $P < 0.05$; ** indicated $P < 0.01$

数差异太大,为避免简单地平均所造成的误差,该研究以中位值为研究对象,通过DPS统计软件的聚类分析按转移系数(全量基)中位值把蔬菜对土壤全砷的转移能力分为3类:一类为 $< 0.001 4$,属低转移能力,包含的蔬菜种类按转移系数(全量基)由小到大依次为番茄、丝瓜、茄子、葫芦、萝卜、豇豆、苦瓜;二类为 $0.001 4 \sim 0.004 5$,属中等转移能力,包含的蔬菜种类按转移系数(全量基)由小到大依次为花菜、大白菜、白菜、韭菜、叶用莴苣、姜、芋、黄瓜、芥菜、茭白;三类为 $> 0.004 5$,属高转移能力,包含的蔬菜种类按转移系数(全量基)由小到大依次为细香葱、大蒜、空心菜、芹菜、莲藕。

各类蔬菜以鲜基计对土壤有效砷的转移系数分别在 $0.000 1 \sim 0.190 2$,通过DPS统计软件的聚类分析按转移系数(有效基)中位值也把蔬菜对土壤有效砷的转移能力分为3类:一类为 $< 0.010 9$,属低转移能力,包含的蔬菜种类按转移系数(有效基)由小到大依次为番茄、丝瓜、葫芦、茄子、萝卜、花菜;二类为 $0.010 9 \sim 0.024 7$,属中等转移能力,包含的蔬菜种类按转移系数(有效基)由小到大依次为苦瓜、豇豆、黄瓜、大白菜、韭菜、姜、大蒜、叶用莴苣、白菜、芥菜、茭白;三类为 $> 0.024 7$,属高转移能力,包含的蔬菜种类按转移系数(有效基)由小到大依次为芋、芹菜、细香葱、莲藕、空心菜。

以土壤全砷和以土壤有效砷为基础的分类结果不完全一致,但从总体来看,瓜果类蔬菜对土壤砷的富集能力最低,豆类、块根块茎类及部分茎叶类蔬菜对土壤砷的富集能力居中,而水生蔬菜及部分茎叶类和根茎类蔬菜对土壤砷的富集能力比较高。如水生蔬菜中的莲藕砷全量基转移系数是瓜果类中番茄的 20 倍,砷有效基转移系数是番茄的 21 倍。这些研究结果和夏立江等^[19]、黄雅琴等^[20]、凌乃规^[21]的研究结果大致相同但不完全一致。

蔬菜对土壤砷的这种转移规律可为蔬菜的区域规划种植起到科学的指导作用。如在受污染、砷含量较高的土壤上有意识地增加瓜果、豆类和块根块茎类蔬菜的种植比例而相应地减小叶菜及根茎类的种植比例,从而有利于提高受污染土壤的使用率,同时又不至于造成蔬菜的砷污染而对人体健康产生影响。此外,根据不同蔬菜种类品种间存在的对砷转移能力的差异,能够有针对性地筛选或选育耐砷、抗砷污染

的类型品种。

2.4 蔬菜砷转移系数与土壤全砷和有效砷含量间的关系 通过研究发现,蔬菜体内砷含量与土壤全砷和有效砷之间并不只是呈现线性关系,而且也发现部分土壤-蔬菜砷转移系数变化较大,一方面可能是受土壤性质的影响,另一方面可能与土壤中全砷与有效砷的含量有关,为进一步研究不同类别蔬菜砷的转移规律,探明土壤-蔬菜砷转移能力与土壤全砷和土壤有效砷之间的相关关系,该研究针对每一种蔬菜,进行了转移系数与土壤全砷及土壤有效砷的相关关系分析。

2.4.1 蔬菜砷转移系数(全量基)与土壤全砷含量的关系。 分析发现转移系数是一个随土壤全砷含量变化而变化的量。单从每一种蔬菜的分析来看,虽然两者间的关系达 0.01 和 0.05 显著水平的不多,但从表 3 仍能看出蔬菜砷转移系数与土壤全砷含量主要呈负指数相关关系的趋势,而且蔬菜砷转移系数减小的速度伴随土壤全砷含量的提高而趋于变缓。

表 3 蔬菜砷转移系数(全量基)与土壤全砷的相关系数统计

Table 3 Relationship between transferring coefficient of total arsenic and the content of total arsenic in soil

序号 No.	蔬菜类别 Vegetable type	样品数 Number of samples	相关系数 Correlation coefficient			
			线性相关 Linear correlation	指数相关 Index correlation	幂乘相关 Exponentiation correlation	对数相关 Logarithmic correlation
1	萝卜	10	-0.308	-0.125	-0.170	-0.378
2	大白菜	10	0.598	0.486	0.417	0.517
3	白菜	35	-0.402	-0.464**	-0.491**	-0.449**
4	花菜	6	0.581	0.655	0.000	0.634
5	芥菜	7	0.676	0.489	0.321	0.457
6	芹菜	9	0.760*	0.505	0.402	0.656*
7	空心(梗)菜	17	-0.336	-0.610**	-0.500*	-0.500*
8	叶用莴苣	7	0.588	0.306	0.271	0.552
9	番茄	5	-0.039	0.073	0.140	0.057
10	茄子	11	-0.261	-0.234	-0.279	-0.279
11	葫芦	6	-0.170	-0.331	-0.225	-0.056
12	苦瓜	5	-0.659	-0.540	-0.616	-0.747
13	丝瓜	13	-0.115	-0.351	-0.392	-0.145
14	黄瓜	6	-0.552	-0.449	-0.484	-0.565
15	豇豆	8	-0.507	-0.287	-0.335	-0.565
16	细香葱	11	0.467	0.267	0.231	0.430
17	大蒜	5	0.724	0.716	0.726	0.745
18	韭菜	8	0.518	0.629	0.711*	0.580
19	姜	5	0.156	0.329	0.523	0.353
20	芋	5	-0.447	-0.379	-0.564	-0.626
21	茭白	9	-0.285	-0.841**	-0.800**	-0.271
22	莲藕	5	0.065	-0.132	-0.120	0.088

注:“*”表示 $P < 0.05$, “**”表示 $P < 0.01$

Note: * indicated $P < 0.05$; ** indicated $P < 0.01$

2.4.2 蔬菜砷转移系数(有效基)与土壤有效砷含量的关系。 上述研究发现,蔬菜砷含量与土壤有效砷含量之间呈极显著线性正相关,但蔬菜砷转移系数与土壤有效砷含量之间的相关关系不明显,说明土壤有效砷含量的高低会影响到蔬菜对砷的转移量,但不会影响到蔬菜对砷的转移系数。

3 结论

采样区土壤砷含量均未超过国家二级标准,但个别土壤可能已遭受砷污染。

采样区水生类蔬菜、绿叶类蔬菜砷含量较高,豆类、瓜

类、根茎类和茄果类砷含量较低。蔬菜可食部分砷含量均未超过我国食品安全国家标准。

不同种类蔬菜对土壤砷的转移能力差距达数十甚至几百倍,通过 DPS 统计软件的聚类分析可按转移系数(全量基和有效基)中位值把蔬菜对土壤全砷和有效砷的转移能力分为 3 类,即低转移能力、中等转移能力和高转移能力。

大部分蔬菜可食用部分砷含量与土壤全砷含量之间存在直线正相关关系。大部分蔬菜可食用部分砷含量与土壤有效砷之间存在显著直线相关。与蔬菜砷和土壤全砷的直

线正相关关系比较而言,蔬菜砷和土壤有效砷的正相关关系更加显著,说明用土壤有效砷来评价土壤砷对蔬菜的生物有效性要比用土壤全砷更合理。

蔬菜砷转移系数与土壤全砷含量主要呈负指数相关关系的趋势,而且蔬菜砷转移系数减小的速度伴随土壤全砷含量的提高而趋于变缓。蔬菜砷转移系数与土壤有效砷含量之间的相关关系不明显,说明土壤有效砷含量的高低不会影响到蔬菜对砷的转移系数。

参考文献

- [1] 崔瑞平. 环境砷污染及其危害[J]. 遵义医学院学报, 1994, 17(3): 255 - 256.
- [2] 王连方, 颜世铭. 环境砷与地方性砷中毒[J]. 广东微量元素科学, 1997, 4(6): 7 - 12.
- [3] 宋波, 伏凤艳, 张学洪, 等. 桂林市菜地土壤和蔬菜砷含量调查与健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 728 - 735.
- [4] 涂杰峰, 刘兰英, 伍云卿, 等. 福州市主栽蔬菜品种对砷的积累及健康风险[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6761 - 6767.
- [5] 吴倩鑫, 杨联安, 于世锋, 等. 蔬菜地土壤重金属含量空间插值精度分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(23): 81 - 86.
- [6] MATHIEU N K, 曾希柏, 李莲芳, 等. 几种叶类蔬菜对砷吸收及累积特性的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 485 - 490.
- [7] 苏年华, 张金彪, 王玉. 福建省土壤重金属污染及其评价[J]. 福建农业大学学报(自然科学版), 1994, 23(4): 434 - 439.
- [8] 夏家淇. 土壤砷的环境基础研究[J]. 农村生态环境, 1993(4): 1 - 4.
- [9] 蔡保松, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性

的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 712 - 717.

- [10] SCHMIDT A C, MATTUSCH J, REISSER W, et al. Uptake and accumulation behaviour of angiosperms irrigated with solutions of different arsenic species[J]. Chemosphere, 2004, 56(3): 305 - 313.
- [11] 杜丽娟, 米艳华, 陈璐, 等. 药用植物三七对土壤中砷的吸收转运及形态转化[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(6): 997 - 1002.
- [12] 唐尚坚. 水生植物吸收水中重金属的研究[J]. 渝州大学学报(自然科学版), 1993(4): 7 - 12.
- [13] TU S, MA L Q. Interactive effects of pH, arsenic and phosphorus on uptake of As and P and growth of the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. under hydroponic conditions[J]. Environmental and experimental botany, 2003, 50(3): 243 - 251.
- [14] 张素芹, 杨居荣. 农作物对铅镉砷的吸收与运输: 伤流及根系外渗分析[J]. 农业环境科学学报, 1992, 11(4): 171 - 175.
- [15] 武淑华, 韩爱民, 蔡继, 等. 蔬菜中重金属含量与土壤质量的关系[J]. 长江蔬菜, 2002, 14(S1): 41 - 43.
- [16] 胡勤海, 叶兆杰, 陈广照, 等. GaAs₃和Ga³⁺和As(V)对蔬菜种子萌发生理影响研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(2): 53 - 57.
- [17] 陈玉成, 赵中金, 孙彭寿, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 44 - 47.
- [18] 蔡立梅, 黄兰椿, 周永章, 等. 东莞市农业土壤和蔬菜砷含量及其健康风险分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(1): 197 - 200.
- [19] 夏立江, 华路, 韦东普. 部分地区蔬菜中的砷含量[J]. 土壤, 1996(2): 105 - 109.
- [20] 黄雅琴, 杨在中. 蔬菜对重金属的吸收累积特点[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1995, 26(5): 608 - 615.
- [21] 凌乃规. 蔬菜品种重金属元素含量差异性分析[J]. 广西农业科学, 2000(1): 13 - 15.

(上接第 11 页)

和代谢网络发生较大的差异,进而使微生物发生稳定遗传的突变^[7]。该研究针对脱落酸产生菌用 ARTP 对 6 个不同剂量诱变孢子悬浮液进行了初步的探索,并未对脱落酸产生菌原生质体进行诱变处理,后续研究需用原生质体进行诱变处理,对比诱变效果。

表 3 6 株突变株遗传稳定性

Table 3 The abscisic acid production stability of six mutation strains

菌株名称 Strain name	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
1-12	100	89.3	99.6	101.8	102.1
2-8	100	98.3	100.3	100.7	101.4
3-5	100	100.8	98.7	99.6	101.9
4-1	100	102.0	101.5	93.7	102.0
5-10	100	92.6	102.1	99.9	100.2
6-2	100	100.9	98.4	100.3	99.5

注:ABA 数据以 F₁ 的效价为 100%。其中,6-2 菌株的 S-ABA 产量比出发菌株提高 22.06%

Note: The statistics of ABA was carried out by taking the title of F₁ as 100%, among them the S-ABA's yield of strain 6-2 was improved by 22.06% comparing with starting strain

菌种的生产能力是发酵高产的前提^[8],ARTP 诱变脱落酸产生菌能有效提高其生产能力,其随着诱变剂量的增加,

虽然正变率呈下降趋势,但诱变幅度增大,菌株的稳定性好。通过提高菌种生产水平能大幅降低生产成本,达到提高经济效益的目的。

参考文献

- [1] LI S, ASSMANN S M, ALBERT R. Predicting essential components of signal transduction networks: A dynamic model of guard cell abscisic acid signaling[J]. PLoS Biology, 2006, 4(10): 1 - 17.
- [2] FREY A, GODIN B, BONNET M, et al. Maternal synthesis of abscisic acid controls seed development and yield in *Nicotiana glauca* [J]. Planta, 2004, 218(6): 958 - 964.
- [3] 施天穹, 彭辉, 季荣钰, 等. 微生物发酵法产脱落酸的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(7): 2140 - 2144.
- [4] LI X Y, LIU R J, LI J, et al. Enhanced arachidonic acid production from *Mortierella alpina* combining atmospheric and room temperature plasma (ARTP) and diethyl sulfate treatments[J]. Bioresource technology, 2015, 177(1): 134 - 140.
- [5] WANG Q, FENG L R, WEI L, et al. Mutation breeding of lycopene-producing strain *Blakeslea trispora* by a novel atmospheric and room temperature plasma (ARTP) [J]. Applied biochemistry and biotechnology, 2014, 174(1): 452 - 460.
- [6] 谭红, 周金燕. 脱落酸研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [7] 黎亮, 王泽建, 郭美锦, 等. 头孢菌素 C 产生菌的诱变育种及培养基优化[J]. 中国生物工程杂志, 2014, 34(8): 61 - 66.
- [8] ZHANG X, ZHANG C, ZHOU Q Q, et al. Quantitative evaluation of DNA damage and mutation rate by atmospheric and room-temperature plasma (ARTP) and conventional mutagenesis[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2015, 99(13): 5639 - 5646.