

燃煤电厂附近农田环境及蔬菜中硫的污染评价

代恒美¹, 张 华¹, 刘 龙², 韦 艳¹, 潘 莎^{1*}

(1. 贵州医科大学公共卫生学院/环境污染与疾病监控教育部重点实验室, 贵阳 550025; 2. 贵州医科大学食品安全学院, 贵阳 550025)

摘 要: 了解某燃煤电厂附近农田环境及蔬菜中硫含量及污染水平, 以期为区域农业生态环境质量、食品安全评价及食品中硫限量标准的制定提供理论依据。对某燃煤电厂周围大气、农田土壤和蔬菜中硫含量进行测定, 并研究其相互关系。结果表明: 燃煤电厂周边 0.5、1 km 处大气 SO₂ 浓度 (0.5 km: 0.66 mg/m³, 1 km: 0.57 mg/m³) 超过《环境空气质量标准 (GB 3095-2012)》二级标准限值。0.5 km 处土壤硫含量 (540.91 mg/kg) 超过我国土壤硫含量范围和贵州省土壤硫背景值。蔬菜硫含量范围为 4.5~34.3 mg/g, 平均含量为 15.2 mg/g, 11 种蔬菜的单因子污染指数均大于 1。随着离污染源距离的增大, 空气中 SO₂ 浓度及白菜、豌豆尖和莴笋的硫含量均呈减小趋势。空气与土壤硫含量呈显著正相关, 蔬菜叶片硫含量与空气、土壤中硫含量的相关性不明显。燃煤电厂生产活动对周边一定区域空气、土壤造成硫污染, 周边蔬菜存在严重硫污染情况, 应及时采取相应的措施, 保证区域生态环境的安全。

关键词: 燃煤电厂; 空气; 土壤; 蔬菜; 硫污染

中图分类号: X503.231

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)04-0136-06

Sulfur Pollution Assessment of Cropland Environment and Vegetables around a Coal-Fired Power Plant

DAI Hengmei¹, ZHANG Hua¹, LIU Long², WEI Yan¹, PAN Sha^{1*}

(1. School of Public Health, the Key Laboratory of Environmental Pollution Monitoring and Disease Control, Ministry of Education, Guizhou Medical University, Guiyang 550025; 2. College of Food Safety, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To understand the S content and pollution level of cropland environment and vegetables around a coal-fired power plant, and provide a theoretical basis for evaluation of regional agro-ecological environment quality and food safety, and formulation of limit standard in food. The contents of S in air, soil and vegetables around a coal-fired power plant were determined, with their correlations analyzed. The results showed that the atmospheric SO₂ concentrations at 0.5 km (0.66 mg/m³) and 1 km (0.57 mg/m³) around the coal-fired power plant exceeded the second-level limits of the national ambient air quality standard (GB 3095-2012). The soil sulfur content at 0.5 km (540.91 mg/kg) exceeded the China's general range and background value of Guizhou Province. The sulfur content in vegetables ranged from 4.5 to 34.3 mg/g, with an average content of 15.2 mg/g. The single factor pollution index of 11 vegetable species was higher than 1. It was found that the decreases of sulfur concentration in air and three vegetables (*Brassica pekinensis*, *Pisum sativum* and *Lactuca sativa* var. *angustanalis*) is associated with the increase of the distance. There was a significant positive correlation with the air and soil sulfur content, but sulfur contents in the leaves did not correlated with those in air and soils. It is concluded that the air and soil in certain surrounding areas subjected to sulfur pollution caused by the production activities of a coal-fired power plant, and there is serious sulfur-pollution in vegetables around a coal-fired power plant. Corresponding measures should be taken to ensure the safety of regional ecological environment.

Key words: Coal-fired power plant; Air; Soil; Vegetables; Sulfur pollution

收稿日期: 2019-11-27

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2018]5779); 贵州省区域内一流学科建设项目-公共卫生与预防医学(黔教科研发[2017]85号); 贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2015]7332)

作者简介: 代恒美(1996-), 女, 在读硕士, 主要从事环境与健康研究。

通讯作者: 潘 莎, 女, 博士, 副教授, E-mail: pansha2004@163.com

硫(S)在自然界中分布广泛,以含硫气体的形式游离于空气中,也可以硫酸盐的形式存在于生物体和非生命环境中,是构成生物有机体的一种重要元素,与生物体的生命活动具有密切联系。适量硫摄入有利于维持生物体正常的代谢过程,过量摄入硫会对植物生理生态过程和人类健康产生严重的毒害作用^[1-2]。

硫是煤中重要组成元素,高硫煤在我国煤炭储量中占据较大比重,以煤为能源的火力发电是我国目前主要发电形式,燃煤电厂被认为是重要的人为硫排放污染源^[3]。煤中大量的硫扩散到周围环境,原有自然生态系统平衡将在一定程度上被破坏,生态环境质量受到严重影响。

蔬菜在陆地植被生态系统中占据极为关键的位置,是人类生活重要食物,其质量与安全与人类健康密切相关。蔬菜叶片是蓄积大气污染物的主要部位,吸收的污染物主要积累在叶部,向其他器官转移较少^[4],更能真实反映环境污染状况。环境中含硫气体通过蔬菜叶片气孔进入植株并将硫蓄积^[5],通过食物链直接或间接地进入人体,对人体健康产生危害。因此,蔬菜是人体暴露于硫污染物的重要媒介。

近年来,国内外学者对燃煤电厂周边环境污染及危害开展相关研究^[6-9],但对燃煤电厂周围种植的蔬菜硫含量状况及其污染程度的研究鲜有报道,该方面的基础数据较为缺乏。此外,目前我国《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中尚未对食品中硫的限量值作出规定,燃煤电厂周围蔬菜中硫污染状况的研究可为食品中硫限量标准的制定提供参考依据。基于此,本研究对某燃煤电厂周边农田环境及蔬菜硫污染状况进行系统分析,以期为区域农业生态环境质量和食品安全风险评估、硫污染的防治以及保护人群健康提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

研究区域为贵州某燃煤电厂,区域常年主导风向为南风。2017年10月、12月对燃煤电厂周边空气SO₂、土壤和蔬菜样品进行采集。以燃煤电厂为中心,选取有代表性的下风向研究区,在距离燃煤电厂0.5、1、2、3 km处布点,每一样点至少设置5个样地,每块自然农田为1个样地。在对应样地采集大气SO₂、土壤和蔬菜样品。

大气SO₂采集及分析按照《HJ 482-2009 环境

空气二氧化硫的测定》方法进行,采样时间为1 h。土壤样品采集采用梅花布点的原则,在每块农田采集5个点的土壤样品混合成一个样品,采样深度为0~20 cm,采集样品装入聚乙烯袋,贴上标签带回实验室。每份样品去除枯枝落叶、碎石等杂物,风干,混匀后用四分法缩分至约100 g,研磨过100目尼龙网筛后待测。

采集白菜(*Brassica pekinensis*)、红菜薹(*Brassica campestris* var. *purpurea*)、韭菜(*Allium tuberosum*)、空心菜(*Ipomoea aquatica*)、包心菜(*Brassica oleracea* var. *capitata*)、瓢儿菜(*Brassica campestris*)、青菜(*Brassica chinensis*)、生菜(*Lactuca sativa* var. *romana*)、茼蒿(*Chrysanthemum coronarium*)、豌豆尖(*Pisum sativum*)、莴笋(*Lactuca sativa* var. *angustanalis*)共11种,76份在研究区广泛分布的蔬菜样品。每份样品至少由采自同一种种植地3株独立的蔬菜混合。采样时将整棵植株连根拔起,装入保鲜袋密封保存。用自来水将蔬菜样品表面泥土冲洗干净,用去离子水冲洗、晾干,取蔬菜叶片于烘箱中105℃条件下杀青30 min,并在60~70℃条件下烘干至恒重,研磨过80目尼龙网筛,保存备用。叶片是蔬菜吸收大气污染物的主要部位,更能反映真实环境污染状况,本研究分析样品均为蔬菜叶片。

1.2 样品分析

土壤、蔬菜样品中硫含量分别采用改进硫酸钡比浊法^[9]、湿硝化硫酸钡比浊法^[10]进行测定。分析过程中采用国家标准物质GBW07405(GSS-5)、GBW10020(GSB-11)进行质量控制,其测定值在标准值测定范围内。每个样品做3组平行,误差范围控制在10%以内。

1.3 蔬菜污染程度评价方法

采用单因子指数法对蔬菜污染程度进行评价,计算公式为^[11]:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中 P_i 为污染物硫的单因子指数; C_i 为蔬菜中硫的实测含量(mg/g); S_i 为蔬菜中硫含量的评价值,由于我国目前尚未制定蔬菜中硫的限量卫生标准值,硫在植物体中的正常含量为1~6 mg/g^[12,13],本研究采用正常植物硫含量的上限值作为评价标准值(6 mg/g)。 $P_i \leq 1$ 表明未受污染, $P_i > 1$ 表明已经受到污染, P_i 值越大,污染越严重。将评价结果划分为5个等级,见表1。

1.4 数据处理

采用SPSS 16.0软件对数据进行统计分析。

表1 蔬菜污染分级标准

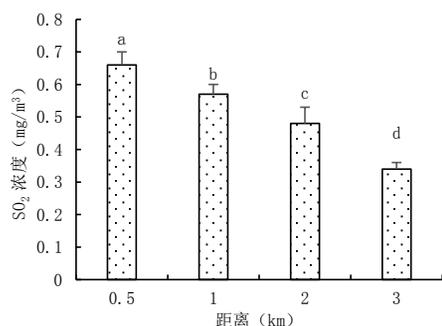
等级划分	污染指数	污染等级
1	$P \leq 0.7$	优良
2	$0.7 < P \leq 1.0$	安全
3	$1.0 < P \leq 2.0$	轻污染
4	$2.0 < P \leq 3.0$	中污染
5	$P > 3.0$	重污染

不同距离处SO₂浓度、土壤硫含量、蔬菜硫含量比较采用单因素方差分析(One-way ANOVO, LSD)进行差异显著性检验。相关性分析采用Pearson相关分析法。

2 结果与讨论

2.1 硫污染对大气的影

排放的气体污染物在水平方向上的扩散会对周围一定范围内的生态环境质量造成较大影响^[13],为了解燃煤电厂排放SO₂在空间水平的分布状况,分析距污染源不同距离处大气中SO₂的浓度水平(图1)。燃煤电厂周边大气SO₂的浓度范围为0.31~0.70 mg/m³,平均浓度为0.53 mg/m³。SO₂浓度存在空间差异,随着离污染源相对距离的增大,空气SO₂含量呈减小趋势。空气中SO₂含量的高低与本身排放浓度、污染源距离以及风向有关^[14],且SO₂是随空气运动被扩散稀释,说明燃煤电厂周边空气中硫含量与电厂排放的硫污染物有直接的关系。SO₂是燃煤电厂运行产生的关键大气污染物之一,是构成酸雨的主要物质,对呼吸道黏膜和眼睛有强烈刺激作用,可引起气管炎、哮喘、肺气肿等多种呼吸道疾病,甚至与肺癌的发生有关;与大气中飘尘共存时其毒性加重。当大气中SO₂的浓度为572.5 mg/m³时,会使人呼吸困难,机体免疫力受到明显抑制;浓度大于715.6 mg/m³时,可导致死亡^[15]。我国环境空气质量标准



注:不同小写字母表示在距污染源不同距离处大气SO₂浓度差异显著($P < 0.05$),下同

图1 各采样点大气中SO₂浓度

(GB 3095-2012)规定,大气SO₂小时均值二级标准浓度限值为0.5 mg/m³,即当空气中的SO₂小时平均浓度超过0.5 mg/m³时,对生态环境和人体健康有潜在危害。本研究区域大气环境属二类区,在距离污染源0.5、1 km处SO₂的小时平均浓度分别为0.66、0.57 mg/m³,均已超标,表明燃煤电厂排放的SO₂已对周边1 km范围内大气质量产生影响。研究表明,在SO₂污染区,人群因上呼吸道感染而引起的急诊住院率显著增加^[16]。支气管炎患者对0.56 mg/m³浓度的SO₂接触1 d以上可使其一般症状恶化^[17]。可见,居民如长期居住在燃煤电厂周边1 km范围内,呼吸道防御功能因受到SO₂慢性刺激而降低,呼吸道常见疾病发生的危险性将增加,严重危害身体健康。因此,建议电厂周边1 km范围内不宜居住居民。

2.2 硫污染对土壤的影响

燃煤电厂周边土壤中硫的含量范围为95.71~1 102.03 mg/kg,平均值为412.48 mg/kg^[9]。土壤硫含量在距污染源不同距离处,未表现出显著性差异,在距离污染源0.5 km处,平均含量为540.91 mg/kg(图2),超过我国土壤硫含量的范围(100~500 mg/kg),且高于贵州省土壤硫背景值(419 mg/kg),说明燃煤电厂排放的硫在周边0.5 km范围内已产生明显的土壤硫累积,潜在环境问题突出。

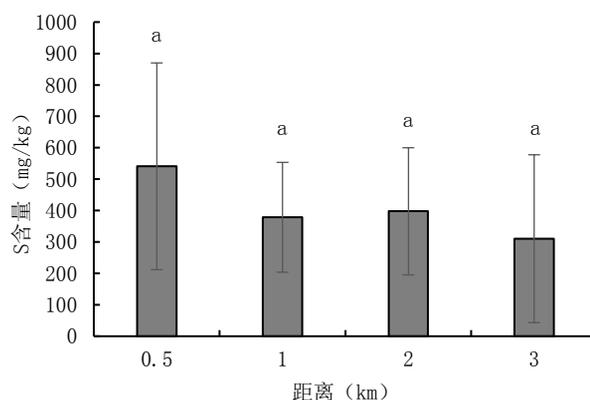


图2 各采样点土壤硫含量

2.3 硫污染对蔬菜的影响

2.3.1 蔬菜中硫的含量

燃煤电厂周围蔬菜硫的检出率为100%,含量范围为4.5~34.3 mg/g,平均含量为15.2 mg/g。与正常植物体内硫含量(1~6 mg/g)比较来看^[2, 12],大部分蔬菜样本硫含量超过正常含量上限值,超标率为84%,说明燃煤电厂周边蔬菜已发生严重的硫累积。不同种类蔬菜硫平均含量不同(图3),由高到低依次为包心菜>青菜>瓢儿菜>白菜>红菜薹>茼蒿>空心菜>莴笋>韭菜>生菜>豌豆尖。其中,包

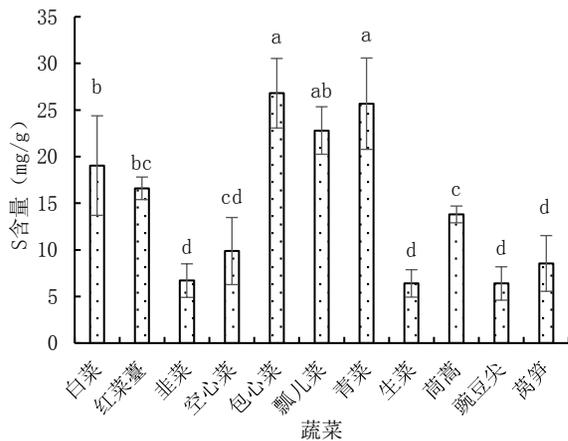


图3 不同种类蔬菜中硫含量

心菜、青菜中硫平均含量比较高(图3),说明这2种蔬菜富集硫的能力较强,可能与其叶面积较大有关。蔬菜叶面积越大,暴露于空气中的部分越多,接受大气硫沉降的机会越多,叶片积累的硫也越多。

生育期长短是作物的重要生物学特性,是影响作物干物质积累的重要因素^[18]。各种作物的生育期长短有较大差别,根据蔬菜的生育期长短不同,把本研究中蔬菜分为短生育期蔬菜(50 d左右)和长生育期蔬菜(100 d左右),包心菜、青菜、瓢儿菜、白菜、茼蒿、空心菜、生菜、豌豆尖为短生育期蔬菜,莴笋、韭菜、红菜薹为长生育期蔬菜。由图4可知,短生育期蔬菜的硫含量高于长生育期蔬菜,主要原因可能是由于生长时间较长的蔬菜,因对周围环境的适应而逐渐增强抗污染能力,同时可能与周围环境中硫达到一种动态平衡;此外,积累在蔬菜体内的硫可随时间的延长被稀释。

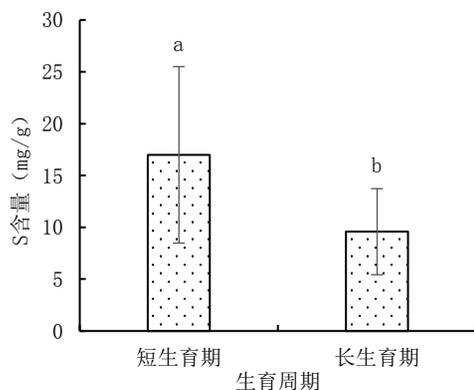


图4 不同生育周期蔬菜中硫含量

为进一步了解污染源对蔬菜硫含量的影响,选取距污染源不同距离处均有分布的4种蔬菜(白菜、青菜、豌豆尖和莴笋)作为研究对象,对不同距离处蔬菜硫含量进行比较分析(图5)。发现除青菜外,其余3种蔬菜均表现为随着离污染源

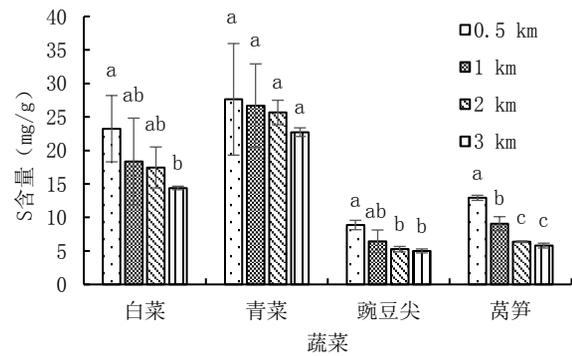


图5 不同蔬菜硫含量的空间变异

距离的增大,蔬菜硫含量减小的趋势。有研究表明,蔬菜污染物含量与污染源距离有关^[19],与本研究结果一致。

2.3.2 蔬菜硫污染评价

由表2可知,11种蔬菜的单因子污染指数均大于1,其中,白菜(3.17)、包心菜(4.47)、瓢儿菜(3.80)和青菜(4.28)表现为重污染,红菜苔(2.77)和茼蒿(2.30)表现为中污染,其余均为轻污染。研究表明,动物摄入过量硫可造成心肌血供障碍甚至实质性的损害^[20]。由此可见,燃煤电厂周边蔬菜已受到比较严重的硫污染,人们如长期食用,可能会导致相关疾病的发生。本研究所分析蔬菜硫含量均为叶片,蔬菜叶片更易受到污染物的污染,其积累污染物的能力比根、茎、果实等其他器官强^[19],建议当地居民不选择种植叶菜类蔬菜。

表2 燃煤电厂周围蔬菜硫的污染指数评价

蔬菜	单因子污染指数	污染等级
白菜	3.17	重污染
红菜薹	2.77	中污染
韭菜	1.12	轻污染
空心菜	1.65	轻污染
包心菜	4.47	重污染
瓢儿菜	3.80	重污染
青菜	4.28	重污染
生菜	1.07	轻污染
茼蒿	2.30	中污染
豌豆尖	1.07	轻污染
莴笋	1.42	轻污染
蔬菜均值	2.53	中污染

2.3.3 蔬菜、空气和土壤间含硫量的相关性

植物既可通过叶片吸收空气中的污染物,也可通过根系吸收土壤中的污染物^[21],两条途径均能影响植物叶片中污染物的含量。对污染区域蔬菜、空气和土壤之间硫含量的相关性分析,有助

于更好地了解蔬菜叶片硫含量的影响因素。结果表明:空气与土壤硫含量呈显著正相关,蔬菜叶片硫含量与空气、土壤硫含量均无显著相关性(表3)。SO₂的比重大于空气,在重力作用下,可向地面沉降。研究区域内空气与土壤存在显著相关性,说明燃煤电厂周边大气硫的沉降是土壤中硫积累的一个重要途径。蔬菜叶片硫含量与土壤硫含量的相关性不显著,说明蔬菜根系从土壤中吸收的硫很少向叶片迁移,土壤硫并非叶片硫含量的主要来源。研究表明,叶片污染物主要来源于大气,其含量能直接反映区域大气污染程度,可用于大气污染的生物监测^[22]。本研究蔬菜硫含量与空气硫含量不存在显著相关性,与相关研究结果一致^[23-24]。这可能是由于作物叶片出现生理功能衰退时,叶片硫含量与其环境空气中的SO₂浓度不一定吻合^[25]。空气中SO₂可通过蔬菜叶片气孔进入体内,参与各种生理生化反应,扰乱正常的代谢活动,对蔬菜的生理生态功能造成影响^[26]。对菜豆进行低浓度SO₂长期暴露试验结果显示,在0.4 mg/m³ SO₂(200 min/d)作用30 d,菜豆生长受到明显抑制,光合效率明显下降,植株总重和叶面积分别较对照减少23.7%和17.5%^[27],这表明低浓度SO₂长期作用会对植物生长及生理功能产生影响。本研究中,燃煤电厂周边大气SO₂的平均浓度为0.53 mg/m³,说明该电厂周边蔬菜在长期SO₂的作用下,可能致使其生理功能受到影响,从而呈现出叶片硫含量与空气SO₂含量的相关性不显著。

表3 蔬菜、空气和土壤中硫含量的相关性

	蔬菜	空气	土壤
蔬菜	1	-0.107	0.108
空气		1	0.833**
土壤			1

注:“**”表示在0.01水平(双侧)上显著相关

3 结 论

3.1 燃煤电厂周围大气硫含量存在空间差异,随着离污染源距离的增大,空气中SO₂浓度呈减小趋势;燃煤电厂排放的硫已对周边1 km范围内大气质量和0.5 km范围内土壤产生影响,建议电厂周边1 km范围内不要居住居民。

3.2 燃煤电厂周边蔬菜的硫含量水平较高,受到严重的硫污染,建议当地居民不选择种植叶菜类蔬菜,或者可在该电厂附近农田发展大棚蔬菜,

以保证食品质量安全。不同生育期长短蔬菜中硫含量不同。白菜、豌豆尖和莴笋叶片中硫含量与污染源距离有关。

3.3 空气与土壤硫含量呈显著正相关,蔬菜叶片硫含量与空气、土壤中硫含量的相关性不明显。

综上所述,燃煤电厂的生产活动已对周边一定区域空气、土壤造成不同程度的硫污染,给农业种植和居住环境造成严重影响,对人体健康构成较大威胁。建议相关管理部门重视燃煤电厂周边环境问题,加强和完善电厂周边环境的监测、预报和管理,提高监督监管的有效性,并制定出符合燃煤电厂周边环境特征的定期环境影响后评价机制,保证区域生态环境的安全。

参考文献:

- [1] Abdallab M, Dubousset L, Meuriot F, et al. Effect of mineral sulphur availability on nitrogen and sulphur uptake and remobilization during the vegetative growth of *Brassica napus* L. [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(10): 2635-2646.
- [2] 裴男才,陈步峰,邹志谨,等. 珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条S含量比较[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6114-6120.
- [3] 赵东阳,靳雅娜,张世秋. 燃煤电厂污染减排成本有效性分析及超低排放政策讨论[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(9): 2841-2848.
- [4] 杨得坡,张铭哲,孙新彦,等. 15种蔬菜叶片中氯硫氟元素含量分析研究[J]. *农业环境科学学报*, 1993, 12(1): 26-29.
- [5] 杨和连,游宏建,岳细云,等. 新乡市卫河沿岸果菜类蔬菜重金属As、Cr污染分析[J]. *东北农业科学*, 2019, 44(2): 49-51, 56.
- [6] 李志雄,梁美生,姜俊杰. 火电厂周围大气环境中硫化物分布规律的探讨[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(2): 998-1002.
- [7] 高兰兰,傅成诚,冯新斌,等. 贵州东部某燃煤电厂汞排放对周边环境空气及土壤的影响[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(3): 51-58.
- [8] Radić S, Medunić G, Kuharić Ž, et al. The effect of hazardous pollutants from coal combustion activity: Phytotoxicity assessment of aqueous soil extracts [J]. *Chemosphere*, 2018, 199: 191-200.
- [9] 刘 龙,胡 晓,杨璐琿,等. 土壤全硫测定方法的改进及其在燃煤电厂周边土壤分析中的应用[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(2): 216-220.
- [10] 潘如圭. 植物体内总硫量测定方法的选择[J]. *环境污染与防治*, 1982(5): 29-30.
- [11] 叶劲松,吴 克,俞志敏,等. 合肥市售蔬菜Pb和Cd含量调查及健康风险预警评价[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(2): 85-90.
- [12] Ernst W H, Krauss G J, Verkleij J A, et al. Interaction of heavy metals with the sulphur metabolism in angiosperms from an ecological point of view [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2008, 31(1): 123-143.
- [13] 于 群,区宇波. 广州主要工业源排放的气态污染物扩散

- 模拟研究[J]. 中国环境监测, 2011, 27(4): 84-88.
- [14] 陈庆男. 天津市树木叶片含硫量与空气中二氧化硫污染关系的研究[J]. 生态学杂志, 1984(5): 15-19.
- [15] 赵彩婷, 任一艳. 二氧化硫(SO₂)治理方法探讨[J]. 广州化工, 2012, 40(12): 60-62.
- [16] 刘玉香. SO₂的危害及其流行病学与毒理学研究[J]. 生态毒理学学报, 2007, 2(2): 225-231.
- [17] 周旋, 李庆新, 严向东, 等. 硫酸厂SO₂事故排放对人体健康危害的评价[J]. 环境科学与技术, 2003, 26(S2): 58-59.
- [18] 王凯玺, 丁增伟, 张海金, 等. 谷子灌浆期叶片比叶重变化及产量关系研究[J]. 东北农业科学, 2016, 41(1): 32-34.
- [19] 杨成, 罗绪强, 王娅, 等. 电解铝厂周边蔬菜氟含量特征[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(11): 186-190.
- [20] 刘丽光, 任长林. 硫与硒在心肌损害中相关关系的实验研究[J]. 职业卫生与应急救援, 1997, 15(2): 73-74.
- [21] 陈毛华, 刘明广, 郭斌, 等. 阜阳市颍州区城郊菜地重金属污染调查与评价[J]. 东北农业科学, 2016, 41(3): 37-40.
- [22] Simon E, Harangi S, Baranyai E, et al. Influence of past industry and urbanization on elemental concentrations in deposited dust and tree leaf tissue[J]. Urban forestry & urban greening, 2016, 20: 12-19.
- [23] 洪渊, 黄俊华, 张冬鹏. 深圳市园林植物叶片含硫量的特点[J]. 生态科学, 2007, 26(2): 122-125.
- [24] Balsberg-Pählsson A M. Effects of heavy-metal and SO₂ pollution on the concentrations of carbohydrates and nitrogen in tree leaves [J]. Canadian Journal of Botany, 2011, 67(7): 2106-2113.
- [25] 丁启夏. 兰州市区大气二氧化硫污染对蔬菜含硫量的影响[J]. 农业环境科学学报, 1987, 6(5): 35-36.
- [26] 杨晓晓, 杨丹, 方欢欢, 等. 3种地被植物对二氧化硫胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报, 2016, 36(2): 361-369.
- [27] 曹洪法, Taylor O C. 低浓度SO₂长期暴露下菜豆的生长发育和气孔反应[J]. 环境科学学报, 1985, 5(2): 108-112.

(责任编辑:王昱)

(上接第73页)

- [17] 刘银民, 程雨蒙, 李红梅, 等. 不同温度下绿僵菌对东亚飞蝗3龄蝗蛹的致病力影响[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(4): 642-647.
- [18] 岳梅, 雷仲仁, 孟涛, 等. 温度对绿僵菌LA菌株孢子萌发、酶活力及毒力的影响[J]. 植物保护, 2010, 36(2): 56-60.
- [19] 朱彬洲, 雷仲仁, 徐洪富, 等. 不同温湿度条件下绿僵菌LA菌株对东亚飞蝗的致病力[J]. 中国生物防治学报, 2010, 26(4): 448-452.
- [20] 樊金华, 谢映平, 薛皎亮, 等. 一株寄生油松毛虫的白僵菌毒素化学成分[J]. 微生物学报, 2008(5): 596-601.
- [21] 高英, 薛皎亮, 范三红, 等. 布氏白僵菌代谢毒素的分离纯化及其对油松毛虫幼虫的毒性研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3125-3133.
- [22] 胡丰林, 樊美珍, 李增智. 一种白僵菌代谢产物中生物活性物质的研究I: 具有清除自由基的活性物质的分离和制备[J]. 菌物系统, 2000, 19(4): 522-528.
- [23] Vilcinskas A, Matha V, Gotz P. Effects of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* and its secondary metabolites on morphology and cytoskeleton of plasmatocytes isolated from the greater wax moth, *Galleria mellonella*[J]. Journal of Insect Physiology, 1997, 43(12): 1149-1159.
- [24] Kershaw M J, Moorhouse E R, Bateman R, et al. The role of destruxins in the pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* for three species of insects[J]. Journal of Invertebrate Pathology, 1999, 74(3): 213-223.
- [25] Wakil W, Ghazanfar M U, Riasat T, et al. Effects of interactions among *Metarhizium anisopliae*, *Bacillus thuringiensis* and chlorantraniliprole on the mortality and pupation of six geographically distinct *Helicoverpa armigera* field populations[J]. Phytoparasitica, 2013, 41(2): 221-234.
- [26] Ali K, Wakil W, Zia K, et al. Control of *Earias vittella* (Lepidoptera: Noctuidae) by *Beauveria bassiana* along with *Bacillus thuringiensis*[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2015, 17: 773-778.
- [27] Yaroslavtseva O N, Dubovskiy I M, Khodyrev V P, et al. Immunological mechanisms of synergy between fungus *Metarhizium robertsii* and bacteria *Bacillus thuringiensis* ssp. *morrisoni* on Colorado potato beetle larvae[J]. Journal of Insect Physiology, 2017, 96(1): 14-20.

(责任编辑:王昱)