

茶树重金属汞生物富集特征研究进展

李芬¹, 李梅^{1,2*}

(1. 滇西应用技术大学普洱茶学院, 云南普洱 665000; 2. 云南省农业科学院茶叶研究所, 云南勐海 666201)

摘要 从茶园环境汞的来源、茶树汞吸收及迁移转化、汞对茶树生长发育的影响、茶树及茶园土壤汞污染现状以及未来茶树重金属生物富集特征研究展望 5 个方面进行了系统的论述, 强调进行茶园汞在土壤—茶树中的迁移转化规律以及茶叶重金属汞含量与影响茶叶品质物质的相关性研究对生产无毒无害的绿色茶叶的重要性。

关键词 茶树; 重金属; 汞; 生物富集

中图分类号 S571 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)17-0008-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.17.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on Bioaccumulation of Heavy Metal Mercury in Tea Plant

LI Fen¹, LI Mei^{1,2} (1. West Yunnan University of Applied Sciences College of Tea (Pu'er), Pu'er, Yunnan 665000; 2. Tea Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Science, Menghai, Yunnan 666201)

Abstract We discussed five aspects including source of tea mercury, absorption and transfer of mercury, influence on growth and development, situation of mercury contamination and expectation of future research, emphasized the importance of the research of transfer of mercury in soil-tea plant and the correlation between mercury content and chemical substances which influences tea quality.

Key words Tea plant; Heavy metals; Mercury; Bioaccumulation

我国是茶叶生产大国, 茶叶是我国特色生物传统农产品。茶叶中含有有利于人体健康的茶氨酸、茶多酚和矿物质元素等^[1], 具有降低胆固醇、血管疾病以及患癌风险等的作用^[2]。其中, 茶多酚是茶叶中具有抗氧化突变的主要物质^[3]。茶叶的保健功能, 使其日益受到人们的喜爱。据报道, 全世界超过 45 个国家种植茶叶, 每天消费茶 180 亿~200 亿杯^[4]。

汞是毒性最强的重金属污染物之一^[5], Hg 的毒性比 Cd、Pb、Cu 的毒性强^[6-7]。汞有甲基汞和无机汞之分, 汞的形态不同, 毒性不同, 其中甲基汞的毒性最强, 具有高神经毒性、致癌性、心血管毒性、生殖毒性、免疫系统毒性和肾脏毒性^[8-10], 而甲基汞具有生物富集和食物链放大作用^[11], 导致处于食物链顶端的人类受到危害。

随着工业和经济的快速发展, 环境污染带来的茶叶质量安全问题备受关注。汞是一种全球性环境污染物, 可通过大气进行长距离传输, 使得偏远地区生物受到汞危害^[12]。汞在植物体内的含量超过一定值时, 将破坏植物细胞结构, 导致植物新陈代谢紊乱, 枯萎甚至死亡^[13]。前人对饮茶组和未饮茶组的血液重金属含量的研究对比表明, 饮茶组的血液 Hg 含量显著高于非饮茶组^[14]。Canuel 等^[15]也研究报道, 通过对吃鱼饮茶以及吃鱼不饮茶 2 组进行血液甲基汞含量的测定, 发现饮茶组血液中的甲基汞含量高于未饮茶组甲基汞含量的 40%。茶叶中的汞含量超过一定值, 不仅对茶树生长发育有影响, 甚至通过食物链导致人类身体受到汞危害。然而, 目前人们对茶叶汞生物富集特征研究报道较少, 茶树汞污染状况以及汞在茶树中的迁移转化机制尚不清晰。

1 茶园环境汞的来源

汞是一种全球性污染物, 具有长距离迁移的特征^[12]。

基金项目 滇西应用技术大学应用基础研究重点项目(2017XJKY0001)。
作者简介 李芬(1994—), 女, 云南文山山人, 助教, 硕士, 从事汞生物地球化学循环研究。*通信作者, 研究实习员, 硕士, 从事茶叶生物技术研究。
收稿日期 2018-12-17

通过人为源(包括燃煤、垃圾焚烧、金属制造冶炼等^[16-17])和自然源(包括地热活动、地表土壤、水体、植被、森林火灾等)途径释放进入大气^[18]。进入大气中的汞主要以单质汞、活性气态汞、颗粒汞 3 种形式存在, 可在大气中长时间的停留^[19-20], 并通过大气进行长距离传输, 通过干湿沉降进入偏远地区的林业生态系统^[21]。农业生态系统中的汞还来自种子消毒剂、肥料以及杀虫剂等的使用, 据报道, 1952—1974 年仅日本就向农田施用了 8.8×10^7 t 含汞为 0.27% 的杀虫剂^[22]。研究表明, 已在美国、日本、新西兰和土耳其等国家批准使用, 一直用于除草剂、杀虫剂的碘甲烷具有促进汞甲基化的作用^[23], 使得植物富集大量汞, 进而影响植物的生长发育以及人类的身体健康。

综上所述, 茶园环境中的汞主要来自以下 4 个方面:

- ①大气长距离传输, 通过干湿沉降到达茶园植株以及土壤中;
- ②局部地区的环境汞污染, 如垃圾焚烧、燃煤等;
- ③地质岩石风化作用, 茶树从土壤中吸收汞;
- ④含汞杀虫剂、肥料等的使用, 使茶叶以及茶园土壤中的汞含量增加。

2 茶树汞吸收及迁移转化

2.1 茶树汞吸收方式 植物吸收汞主要通过以下 4 种方式: ①通过根部, 从土壤和土壤溶液中吸收汞, 经过木质部从下往上运输^[24-26]; ②通过叶片气孔的呼吸作用从大气中吸收气态汞^[27]; ③通过叶片表面, 吸附大气中的颗粒态汞^[28-29]; ④叶片从大气降水中吸收汞^[30]。对大多数植物来说, 这 4 种吸收方式都存在, 只是不同的植物每一种吸收方法存在一定的差异。如苔藓主要是吸收大气中的汞, 使得其成为地区大气汞沉降的指示性生物^[31]。

2.2 汞在茶树中的迁移转化 对其他植物的研究报道表明, 汞在植物体内的迁移转化主要存在 2 种形式, 一是根部从土壤中吸收的汞从下往上运输, 由于阻碍汞运输机制的存在^[32], 这个过程很难发生, 运输量较少, 到达植物叶片的汞仅为叶片总汞的 10%^[25]; 二是叶片从大气中吸收的汞从上

往下运输到根部,这个过程较容易发生^[33],特别是甲基汞^[24]。且对苔藓的研究表明,汞在苔藓体内可发生 Hg^{2+} 与 Hg^0 的相关转化^[34]。

3 汞对茶树生长发育的影响

对植物的研究表明,有机汞的毒性远远大于无机汞的毒性。汞对植物的毒性主要通过以下 3 个方面,一是通过减少土壤中的微生物^[35]和原生动物的数量^[36],影响土壤生态系统的物质能量的循环和流动;二是通过抑制酶的活性^[37]、抑制种子的萌发^[6]以及根系的新陈代谢^[13],影响植物的光合作用、水分利用率等^[38];三是汞通过与蛋白质结合,改变 DNA 正常结构,导致蛋白质沉淀^[39]。同时通过与叶绿素蛋白中的氨基酸结合^[40],影响植物的光合作用。

对茶树的研究表明,Xiong 等^[41]通过在茶叶土壤中人为的添加汞,测定茶叶在汞胁迫下的光合特性,发现在汞胁迫下,茶叶叶绿素含量、脯氨酸以及丙二醛下降,其中不同品种茶树下降水平不一样。与其他植物一样,汞胁迫下茶树的生长发育将受到影响。

4 茶叶及茶园汞污染现状

4.1 茶叶汞污染现状 由于研究手段以及研究方法的限制,目前所报道的茶树重金属含量的检测以及迁移转化规律的研究多集中在 Pb、Cr、Cd、As 等的元素^[42-43],对汞元素的研究报道较少(表 1)^[44-52]。国内所报道的茶叶汞含量在 $1.0 \sim 31.3 \mu\text{g}/\text{kg}$ ^[44-45],国外所报道的为 $10 \sim 200 \mu\text{g}/\text{kg}$ ^[46]。依据国家标准 GB 2762—2012《食品安全国家标准食品中污染物限量》中重金属汞 $300 \mu\text{g}/\text{kg}$ 的食品质量阈值,目前所报道的茶叶重金属汞含量未出现超标的现象,且国内报道的汞含量较国外的低,可能是因为我国局部地区汞污染较少,也可能是因为样品数量少,没有代表性和典型性。

对茶树不同部位汞富集特征的研究表明,茶树根的汞含量最大,其次为老叶,其富集顺序为树根>老叶>树皮>嫩叶>树干^[45]。这与汞在植物中的富集特性相似,即随着树叶叶龄的增加,叶片汞含量呈现增加的趋势^[47]。前人对不同茶树品种汞富集特征进行了研究,不同品种茶树汞累积特征存在差异,其中白叶一号富集浓度最大^[44]。

4.2 茶园汞污染现状 茶园土壤是茶树最基本的营养物质及养料来源,茶园土壤重金属污染状况关系着茶叶的品质及产量。茶园土壤汞含量超标的报道较多。周国兰等^[53]对贵州 14 个乡镇的茶园土壤进行汞含量调查,其中有 4 个乡镇的土壤汞含量大于发展无公害茶园的 $0.3 \text{ mg}/\text{kg}$ (NY/T 5020—2001《无公害食品茶叶产地环境条件》)的标准阈值。凌彩金等^[54]对广东英德茶园土壤进行重金属安全性评价,汞含量在 $0.043 \sim 0.140 \text{ mg}/\text{kg}$,李友勇等^[51]对云南西双版纳景洪市的茶园重金属污染评价显示,土壤中的汞含量在 $0.04 \sim 0.15 \text{ mg}/\text{kg}$ 。李云等^[52]对西南地区土壤重金属汞含量进行了系统的调查与研究,西南地区土壤重金属汞含量范围在 $0 \sim 0.13 \text{ mg}/\text{kg}$ 。郭雅玲等^[55]对 150 个茶园土壤进行汞含量调查,土壤中的汞含量为 $0.031 \sim 0.355 \text{ mg}/\text{kg}$,部分地区出现超标现象。夏锐等^[56]对云南茶叶主产区西双版纳、普

洱、临沧和保山等地区茶园土壤进行汞含量调查,土壤汞含量在 $0.03 \sim 0.41 \text{ mg}/\text{kg}$,超标率达 5.71%。

表 1 国内外文献报道的茶叶汞含量范围

Table 1 Range of mercury concentration in tea from recently reported data

茶叶种类 Tea varieties	国家 Country	样品数量 Number of samples	茶叶汞含量 Range of mercury concentration in tea/ $\mu\text{g}/\text{kg}$	文献 Literature
—	中国	30	2.1~6.6	[44]
绿茶 Green tea	中国	15	6.7~17.8	[45]
花茶 Scented tea	中国	3	24.5~31.3	[45]
红茶 Black tea	中国	4	11.3~21.8	[45]
黄茶 Yellow tea	中国	3	19.1~19.5	[45]
绿茶 Green tea	日本	5	2.2~9.3	[45]
红茶 Black tea	伊朗		10~200	[46]
绿茶 Green tea	中国	15	2.7~4.8	[48]
乌龙茶 Oolong tea	中国	1	3.3	[48]
花茶 Scented tea	中国	1	2.9	[48]
普洱茶 Pu'er tea	中国	36	1~13	[49]
—	中国	32	13~90	[50]
—	中国	210	0~0.6	[51]
—	中国	15	50~70	[52]

保证茶园土壤符合农作物种植标准,是生产无公害茶叶的最基本保证。目前,国内外正尝试应用多种修复技术对汞污染土壤进行修复,有以下几种:热处理修复技术^[57]、淋滤法修复技术^[58-59]、固定化技术^[60]、电动修复技术^[61]、植物修复技术^[62]、基因工程技术^[63]、纳米修复技术^[64]。其中植物修复技术,与其他修复技术相比,因具有成本低、操作简便、不造成二次污染等优点,具有很好的汞污染土壤修复应用前景。目前,文献报道较多的重金属超富集植物^[65-66],周向军^[67]、郭彬等^[68]对土壤重金属超富集植物进行了较好的综述。在重金属汞富集植物的研究方面,前人研究发现加拿大杨(*Populus canadensis*)^[69]、红树木(*Rhizophora apiculata*)^[70]、苎麻(*Boehmeria nivea*)^[71]及转基因植物烟草^[72]和拟南芥^[73]等植物具有较强的汞吸收能力,能够通过将汞累积在体内而将土壤中的汞移除。

5 研究展望

目前,关于茶树汞生物富集特征的研究报道较少,仅有的几个报道也只是检测部分地区的茶叶汞含量,缺乏系统的全国性的茶叶汞含量的调查研究,数据量少,没有代表性。同时,由于研究手段、方法等诸多因素的影响,缺乏茶园汞在土壤—茶树中的迁移转化规律的研究以及汞含量与影响茶叶品质的相关物质,如咖啡碱、氨基酸、儿茶素等相关性的研究。因此,未来茶树重金属汞生物富集特征的研究可重点围绕以下 5 个方面开展。

(1) 重金属汞在茶园土壤—茶树中的迁移转化规律研究,探讨影响茶树叶片重金属汞含量的相关因素,如土壤、海拔、茶树树龄、茶树品种、大气等。同时运用汞同位素技术进行源解析,明确茶树叶片汞的主要来源,为建设绿色环境茶园提供科学的数据基础。

(2)进行系统的以云南、贵州等为代表的西南茶区,以广东、台湾、海南等为代表的华南茶区,以浙江、湖南等为代表的江南茶区和以陕西、甘肃等为代表的江北茶区全国四大茶区的重金属汞含量调查,探讨在气候、土壤条件等不同的情况下,四大茶区茶树重金属汞的生物富集特征的相同性和差异性。

(3)重金属汞含量与茶叶品质的相关性研究。影响茶叶的品质的相关物质有咖啡碱、氨基酸、儿茶素等。这些物质在茶树体内通过各种代谢途径合成,而茶树在重金属物质的胁迫下其生理代谢机制受到影响。因此,迫切需要重金属汞含量与茶叶品质进行相关性研究,以期对茶叶的绿色高品质生产提供理论和技术支撑。

(4)进行茶园土壤重金属汞污染修复技术的研究。茶园土壤的重金属汞污染程度关系着茶叶的质量与安全。通过物理化学、转基因以及植物修复技术等的应用,改善茶园土壤状况,保证茶叶绿色无公害化生产。

(5)进行茶叶以及土壤重金属汞含量检测技术的研究。目前,检测茶叶以及土壤重金属汞的传统方法步骤繁琐、检测成本高、耗时长,难以适应环境及市场的需求,急需建立简单实时快速的监测方法,为茶叶的优质高效生产提供坚实的基础。

参考文献

- [1] CABRERA C, GIMÉNEZ R, LÓPEZ M C. Determination of tea components with antioxidant activity[J]. Journal of agricultural & food chemistry, 2003, 51(15):4427-4435.
- [2] CHUNG F L, SCHWARTZ J, HERZOG C R, et al. Tea and cancer prevention; Studies in animals and humans[J]. Journal of nutrition, 2003, 133(10):3268S-3274S.
- [3] YAO L H, JIANG Y M, SHI J, et al. Flavonoids in food and their health benefits[J]. Plant foods for human nutrition, 2004, 59(3):113-122.
- [4] FERNÁNDEZ-CÁCERES P L, MARTÍN M J, PABLOS F, et al. Differentiation of tea (*Camellia sinensis*) varieties and their geographical origin according to their metal content[J]. Journal of agricultural & food chemistry, 2001, 49(10):4775-4779.
- [5] ASCHNER M. Mercury toxicity[J]. Journal of pediatrics, 2001, 138(3):450-451.
- [6] 马成仓, 洪法水. 汞对小麦种子萌发和幼苗生长作用机制初探[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4):373-378.
- [7] MISHRA A, CHOUDHURI M A. Amelioration of lead and mercury effects on germination and rice seedling growth by antioxidants[J]. Biologia plantarum, 1998, 41(3):469-473.
- [8] DIAS D, BESSA J, GUIMARÃES S, et al. Inorganic mercury intoxication: A case report[J]. Forensic science international, 2016, 259:e20-e24.
- [9] 黎丽, 陈春帆, 梁韬, 等. 汞暴露所致小鼠肾毒性的实验研究[J]. 四川生理科学杂志, 2015, 37(1):10-13.
- [10] NAKAMURA M, HACHIYA N, MURATA K Y, et al. Methylmercury exposure and neurological outcomes in Taiji residents accustomed to consuming whale meat[J]. Environment international, 2014, 68:25-32.
- [11] CLARKSON C E, RISCASSI A. Using pilochronology to determine daily mercury deposition in feathers of nestling waterbirds[J]. Environmental toxicology & chemistry, 2011, 30(9):2081-2083.
- [12] PACYNA J M, TRAVNIKOV O, DE SIMONE F, et al. Current and future levels of mercury atmospheric pollution on a global scale[J]. Atmospheric chemistry & physics, 2016, 16:12495-12511.
- [13] SUSZCZYNSKY E M, SHANN J R. Phytotoxicity and accumulation of mercury in tobacco subjected to different exposure routes[J]. Environmental toxicology & chemistry, 2010, 14(1):61-67.
- [14] COLAPINTO C K, ARBUCKLE T E, DUBOIS L, et al. Is there a relationship between tea intake and maternal whole blood heavy metal concentrations? [J]. Journal of exposure science & environmental epidemiology, 2016, 26(5):503-509.
- [15] CANUEL R, DE GROSBOIS S B, LUCOTTE M, et al. New evidence on the effects of tea on mercury metabolism in humans[J]. Archives of environmental & occupational health, 2006, 61(5):232-238.
- [16] WILSON S J, STEENHUISEN F, PACYNA J M, et al. Mapping the spatial distribution of global anthropogenic mercury atmospheric emission inventories[J]. Atmospheric environment, 2006, 40(24):4621-4632.
- [17] PACYNA E G, PACYNA J M, STEENHUISEN F, et al. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000[J]. Atmospheric environment, 2006, 40(22):4048-4063.
- [18] SHETTY S K, LIN C J, STREETS D G, et al. Model estimate of mercury emission from natural sources in East Asia[J]. Atmospheric environment, 2008, 42(37):8674-8685.
- [19] 陈乐恬, 张晓山, 林玉环, 等. 大气环境中汞的形态及其分析方法[J]. 环境化学, 1999(6):584-588.
- [20] SCHROEDER W H, MUNTHER J. Atmospheric mercury-An overview[J]. Atmospheric environment, 1998, 32(5):809-822.
- [21] LINDBERG S E, HANSON P J, MEYERS T P, et al. Air/surface exchange of mercury vapor over forests-the need for a reassessment of continental biogenic emissions [J]. Atmospheric environment, 1998, 32(5):895-908.
- [22] NAKAGAWA R, YUMITA Y. Change and behavior of residual mercury in paddy soils and rice of Japan[J]. Chemosphere, 1998, 37(8):1483.
- [23] YIN Y G, LI Y B, TAI C, et al. Fumigant methyl iodide can methylate inorganic mercury species in natural waters[J]. Nature communications, 2014, 5(1):1-7.
- [24] SCHWESIG D, KREBS O. The role of ground vegetation in the uptake of mercury and methylmercury in a forest ecosystem[J]. Plant & soil, 2003, 253(2):445-455.
- [25] BISHOP K H, LEE Y H, MUNTHER J, et al. Xylem sap as a pathway for total mercury and methylmercury transport from soils to tree canopy in the boreal forest[J]. Biogeochemistry, 1998, 40(2/3):101-113.
- [26] COCKING D, ROHRER M, THOMAS R, et al. Effects of root morphology and Hg concentration in the soil on uptake by terrestrial vascular plants[J]. Water air & soil pollution, 1995, 80(1/2/3/4):1113-1116.
- [27] FLECK J A, GRIGAL D F, NATER E A. Mercury uptake by trees: An observational experiment[J]. Water air & soil pollution, 1999, 115(1/2/3/4):513-523.
- [28] ST LOUIS V L, RUDD J W, KELLY C A, et al. Importance of the forest canopy to fluxes of methyl mercury and total mercury to boreal ecosystems[J]. Environmental science & technology, 2001, 35(15):3089-3098.
- [29] REA A W, LINDBERG S E, KEELER G J. Dry deposition and foliar leaching of mercury and selected trace elements in deciduous forest throughfall[J]. Atmospheric environment, 2001, 35(20):3453-3462.
- [30] XIAO Z, SOMMAR J, LINDQVIST O, et al. Atmospheric mercury deposition to grass in southern Sweden[J]. Science of the total environment, 1998, 213:85-94.
- [31] LODENIUS M. Dry and wet deposition of mercury near a chlor-alkali plant[J]. Science of the total environment, 1998, 213(1/2/3):53-56.
- [32] CAVALLINI A, NATALI L, DURANTE M, et al. Mercury uptake, distribution and DNA affinity in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) plants[J]. Science of the total environment, 1999, 243/244:119-127.
- [33] GAGGI C, CHEMELLO G, BACCI E. Mercury vapour accumulation in azalea leaves[J]. Chemosphere, 1991, 22:869-872.
- [34] BALARAMA KRISHNA M V, KARUNASAGAR D, ARUNACHALAM J. Study of mercury pollution near a thermometer factory using lichens and mosses[J]. Environmental pollution, 2003, 124(3):357-360.
- [35] MÜLLER A K, WESTERGAARD K, CHRISTENSEN S, et al. The effect of long-term mercury pollution on the soil microbial community[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2001, 36(1):11-19.
- [36] 牛世全, 宁应之, 马正学, 等. 重金属复合污染土壤中原生动物的群落特征[J]. 甘肃科学学报, 2002, 14(3):44-48.
- [37] 和文祥, 朱铭裘, 张一平. 土壤脲酶与汞关系中的作物效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(2):68-72.
- [38] KUJAWA M. Mercury-Environmental Aspects (Environmental Health Criteria 86). 115 Seiten, 10 Tab. World Health Organization. Geneva 1989. Preis:14,- Sw. fr.; 11,20 US \$ [J]. Molecular nutrition & food research, 2010, 34(10):975.
- [39] PATRA M, BHOWMIK N, BANDOPADHYAY B, et al. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance[J]. Environmental and ex-

- perimental botany, 2004, 52: 199–223.
- [40] BERNIER M, CARPENTIER R. The action of mercury on the binding of the extrinsic polypeptides associated with the water oxidizing complex of photosystem II [J]. FEBS Letters, 1995, 360(3): 251–254.
- [41] XIONG H B, DUAN C Q, YAN K, et al. Physiological variation of tea plant under mercury stress [J]. Advanced materials research, 2013, 864–867: 205–208.
- [42] MARYAM S, FEREDDOON A. Toxic and essential mineral elements content of black tea leaves and their tea infusions consumed in Iran [J]. Biological trace element research, 2010, 134(1): 109–117.
- [43] SHOKRZADEH M, SABERYAN M, SARAVI S S S. Assessment of lead (Pb) and cadmium (Cd) in 10 samples of Iranian and foreign consumed tea leaves and dissolved beverages [J]. Toxicological & environmental chemistry reviews, 2008, 90(5): 879–883.
- [44] 秦玉燕, 时鹏涛, 王运儒, 等. 不同茶树种品种汞、汞、砷富集特性研究 [J]. 西南农业学报, 2017, 30(6): 1396–1401.
- [45] 王小平, 马以瑾, 徐元春. 原子荧光光谱法测定不同产地茶叶中 As, Se, Hg 和 Bi 四种元素含量 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(7): 1653–1657.
- [46] FALAHI E, HEDAIATI R. Heavy metal content of black teas consumed in Iran [J]. Food additives & contaminants: Part B, 2013, 6(2): 123–126.
- [47] 李芬, 王训, 罗辑, 等. 1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 [J]. 环境科学, 2017, 38(7): 3045–3053.
- [48] 刘耀华. 微波消解-原子荧光法测定茶叶中的微量汞和砷 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34(3): 141–142.
- [49] CAO H B, QIAO L, ZHANG H, et al. Exposure and risk assessment for aluminium and heavy metals in Puerh tea [J]. Science of the total environment, 2010, 408(14): 2777–2784.
- [50] 刘凡, 刘亚, 张燕琴, 等. 峨眉山市和夹江县茶园土壤及茶叶重金属污染评价 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(32): 123–125.
- [51] 李友勇, 梁名志, 田易萍, 等. 景洪市茶园茶叶和土壤中重金属的污染评价 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(15): 8972–8975.
- [52] 李云, 张进忠, 童华荣. 茶园土壤和茶叶中重金属的监测与污染评价 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31(5): 77–81.
- [53] 周国兰, 罗显扬, 赵华富, 等. 贵州凤冈县宜茶区土壤重金属含量状况及污染评价 [J]. 化学分析计量, 2010, 19(5): 68–70.
- [54] 凌彩金, 王秋霜, 赵超艺, 等. 英德茶园土壤重金属安全性评价 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41(4): 1506–1507.
- [55] 郭雅玲, 王果, 罗丹, 等. 福建铁观音茶园土壤中铅、镉、砷、铬、汞、铜、氟的环境质量现状分析 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 676–681.
- [56] 夏锐, 刘德和, 梁名志, 等. 云南省中低产茶园土壤化学成分现状调查及分析 [J]. 山东农业科学, 2015(8): 63–66.
- [57] CHANG T C, YEN J H. On-site mercury-contaminated soils remediation by using thermal desorption technology [J]. Journal of hazardous materials, 2006, 128(2/3): 208–217.
- [58] SUBIRÉS-MUÑOZ J D, GARCÍA-RUBIO A, VEREDA-ALONSO C, et al. Feasibility study of the use of different extractant agents in the remediation of a mercury contaminated soil from Almaden [J]. Separation & purification technology, 2011, 79(2): 151–156.
- [59] RAY A B, SELVAKUMAR A. Laboratory studies on the remediation of mercury contaminated soils [J]. Remediation journal, 2000, 10(4): 49–56.
- [60] CICERO C A, BICKFORD D F. Bench-scale vitrification studies with Savannah River Site mercury contaminated soil [R]. Office of scientific & technical information technical reports, 1995.
- [61] REDDY K R, CHAPARRO C, SAICHEK R E. Removal of mercury from clayey soils using electrokinetics [J]. Journal of environmental science & health: Part A, 2003, 38(2): 307–338.
- [62] MORENO F N, ANDERSON C W N, STEWART R B, et al. Effect of thioligands on plant-Hg accumulation and volatilisation from mercury-contaminated mine tailings [J]. Plant and soil, 2005, 275(1/2): 233–246.
- [63] EAPEN S, D'SOUZA S F. Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals [J]. Biotechnology advances, 2005, 23(2): 97–114.
- [64] XIONG Z, HE F, ZHAO D Y, et al. Immobilization of mercury in sediment using stabilized iron sulfide nanoparticles [J]. Water research, 2009, 43(20): 5171–5179.
- [65] 安志装, 陈同斌, 雷梅, 等. 蜈蚣草耐铅、铜、锌毒性和修复能力的研究 [J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2594–2598.
- [66] 王华, 曹启民, 桑爱云, 等. 超积累植物修复重金属污染土壤的机理 [J]. 安徽农业科学, 2006, 34(22): 5948–5950.
- [67] 周向军. 重金属超富集植物环境修复技术研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(3): 1408–1410.
- [68] 郭彬, 李许明, 陈柳燕, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(33): 10776–10778.
- [69] 林治庆, 黄会一. 木本植物对汞耐性的研究 [J]. 生态学报, 1989, 9(4): 315–319.
- [70] 陈荣华, 林鹏. 红树幼苗对汞的吸收和净化 [J]. 环境科学学报, 1989, 9(2): 218–224.
- [71] 龙育堂, 刘世凡, 熊建平, 等. 苎麻对稻田土壤汞净化效果研究 [J]. 农业环境科学学报, 1994, 13(1): 30–33.
- [72] 田吉林, 沈瑞娟, 何玉科. *MerB* 基因的序列修饰及转基因烟草对有机汞的高抗作用 [J]. 科学通报, 2002, 47(23): 1815–1819.
- [73] MEAGHER R B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants [J]. Curr Opin Plant Biol, 2000, 3(2): 153–162.

(上接第 4 页)

- [5] 韩雯, 韩榕. 不同时间的 UV-B 辐射对拟南芥幼苗生长的影响 [J]. 植物学报, 2015, 50(1): 40–46.
- [6] 韩榕. He-Ne 激光对小麦增强 UV-B 辐射损伤的修复效应及机理 [D]. 西安: 西北大学, 2002.
- [7] TERAMURA A H, SULLIVAN J H, LYDON J. Effect of UV-B radiation on soybean yield and seed quality: A 6-year field study [J]. Physiol Plant, 1990, 80(1): 5–11.
- [8] TERAMURA A H. Effects of ultraviolet-B irradiances on soybean [J]. Plant Physiol, 1980, 65: 483–488.
- [9] 孙林, 黄海山, 赵秀勇, 等. UV-B 辐射增强对冬小麦生长发育及产量的影响 [J]. 农村生态环境, 2004, 20(2): 24–27.
- [10] NOGUÉO S, ALLEN D J, MORISON J I L, et al. Characterization of stomatal closure caused by ultraviolet-B radiation [J]. Plant physiology, 1999, 121(2): 489–496.
- [11] 吴杏春, 林文雄, 郭玉春, 等. 植物对 UV-B 辐射增强响应的研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(3): 52–55.
- [12] TEVINI M, TERAMURA A H. UV-B effects on terrestrial plant [J]. Photochem and Photobiol, 1989, 50(4): 479–487.
- [13] TERAMURA A H. Effects of ultraviolet-B radiation on the growth and yield of crop plants [J]. Physiol Plant, 1983, 58(3): 415–427.
- [14] SMITH S, STILLMAN B. Purification and characterization of CAF-1, a human cell factor required for chromatin assembly during DNA replication in vitro [J]. Cell, 1989, 58(1): 15–25.
- [15] KAUFMAN P D, KOBAYASHI R, STILLMAN B. Ultraviolet radiation sensitivity and reduction of telomeric silencing in *Saccharomyces cerevisiae* cells lacking chromatin assembly factor-1 [J]. Genes Dev, 1997, 11(3): 345–357.
- [16] FISCHER S, PRYKHOZHII S, RAU M J, et al. Mutation of zebrafish *caf-1b* results in S phase arrest, defective differentiation, and p53-mediated apoptosis during organogenesis [J]. Cell Cycle, 2007, 6(23): 2962–2969.
- [17] 赵占克, 王玉凤. 组蛋白伴侣在发育过程中的功能 [J]. 遗传, 2010, 32(1): 41–48.
- [18] 宋松泉, 程红焱, 龙春林, 等. 种子生物学研究指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [19] VANDERAUWERA S, DE BLOCK M, VAN DE STEENE N, et al. Silencing of poly (ADP-ribose) polymerase in plants alters abiotic stress signal transduction [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104(38): 15150–15155.
- [20] 李晓阳, 陈慧泽, 韩榕. UV-B 辐射对拟南芥种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 植物学报, 2013, 48(1): 52–58.