

陕南茶园产地环境现状及其潜在生态风险评价

赵佐平, 付静, 岳思羽, 王蒙, 宋凤敏, 刘智峰, 汤波, 同延安

引用本文:

赵佐平, 付静, 岳思羽, 等. 陕南茶园产地环境现状及其潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1983–1992.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0266>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改性玉米秸秆吸附磷的动力学和热力学特征研究

韩珏, 李佳欣, 崔红艳, 吕纬, 白淑琴

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2008–2014 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0316>

不同改良剂对石灰性镉污染土壤的镉形态和小白菜镉吸收的影响

李丹, 李俊华, 何婷, 蒙佩佩

农业环境科学学报. 2015(9): 1679–1685 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.008>

钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 563–572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>

木炭施用对镉污染土壤小白菜生长及镉吸收的影响

罗洋, 高晋, 罗绪强, 李仪

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1676–1682 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0042>

水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响

张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 官迪, 彭华, 朱坚, 田发祥

农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1867–1872 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0432>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵佐平, 付静, 岳思羽, 等. 陕南茶园产地环境现状及其潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1983–1992.

ZHAO Zuo-ping, FU Jing, YUE Si-yu, et al. Assessing producing environment and potential ecological risk of tea plantation in southern Shaanxi Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 1983–1992.



开放科学 OSID

陕南茶园产地环境现状及其潜在生态风险评价

赵佐平^{1,2}, 付静^{1,2}, 岳思羽^{1,2}, 王蒙^{1,2}, 宋凤敏^{1,2}, 刘智峰^{1,2}, 汤波^{1,2}, 同延安^{3*}

(1. 陕西理工大学化学与环境科学学院, 陕西 汉中 723001; 2. 秦巴生物资源与生态环境省部共建国家重点实验室, 陕西 汉中 723001; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了解陕南茶园产地环境状况和潜在的生态风险, 以陕南茶园主要种植区为研究对象, 采集不同茶园土壤样品及相应茶园茶叶鲜样, 分析了土壤基本理化性状(pH、有机质、有效钾、有效磷、硝态氮、全氮、阳离子交换量)和土壤中Pb、Zn、Cu、Cr、Hg、As、Cd、Ni、Se、Mn、Fe、V和Mg等13种元素含量和茶叶中Pb、Cu、Cr、Hg、As、Cd和Se含量。以《绿色食品产地环境质量》(NY/T 391—2013)和陕西土壤背景值为评价标准, 对调查采样区茶园土壤肥力和土壤重金属元素潜在生态风险进行了评价; 同时结合《无公害食品茶叶》(NY 5244—2004)和《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(NY/T 659—2003)对茶园茶叶重金属进行生态风险评价。结果表明, 调查区域土壤肥力中理化指标平均含量处于NY/T 391—2013中的Ⅱ级标准范围。茶园土壤Pb、Zn、Cu、Cr、Hg、As、Cd、Ni、Se、Mn、Fe、V和Mg的平均含量分别为10.03、87.61、16.42、12.38、0.20、6.89、0.11、24.81、625.20、0.15、40 291.61、4 774.51 mg·kg⁻¹和76.82 mg·kg⁻¹, 变异系数范围为29.16%~58.82%, 其中Cd和Hg的变异系数分别为49.30%和48.55%。有5.76%的土壤样本中Cd含量和4.54%的土壤中Ni含量高于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险筛选值, 但远低于风险管控值。研究区域土壤重金属综合潜在生态风险指数平均值为102.15, 总体潜在生态风险仍然较低。Cd和Hg对潜在生态风险的贡献最大(分别为35.47%和46.53%), 而其他重金属的风险相对较小。研究表明, 研究区茶园茶叶中重金属含量符合NY 5244—2004和NY 659—2003相关标准。

关键词: 陕南地区; 茶园土壤; 茶叶; 产地环境; 潜在生态风险

中图分类号: X53; X826 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)09-1983-10 doi:10.11654/jaes.2020-0266

Assessing producing environment and potential ecological risk of tea plantation in southern Shaanxi Province

ZHAO Zuo-ping^{1,2}, FU Jing^{1,2}, YUE Si-yu^{1,2}, WANG Meng^{1,2}, SONG Feng-min^{1,2}, LIU Zhi-feng^{1,2}, TANG Bo^{1,2}, TONG Yan-an^{3*}

(1. College of Chemical and Environment Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 2. State Key Laboratory of Qinba Bio-Resource and Ecological Environment, Hanzhong 723001, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to assessed the producing environment and potential ecological risk of tea plantation soils in southern Shaanxi Province, a total of 330 topsoil samples were collected and analyzed for physico-chemical properties (pH, organic matter, available potassium, available phosphorus, nitrate, total nitrogen, cation exchange capacity) and thirteen mineral element concentrations (Pb, Zn, Cu, Cr, Hg, As, Cd, Ni, Se, Mn, Fe, V and Mg). And 33 leaves samples were collected and analyzed for seven mineral element concentrations (Pb, Cu, Cr, Hg, As, Cd and Se). Results showed that the physical and chemical index average content in soil fertility between the environment of green food quality Ⅱ standard range. The average concentration of Pb, Zn, Cu, Cr, Hg, As, Cd, Ni, Se, Mn, Fe, V and Mg in tea plantation

收稿日期: 2020-03-11 录用日期: 2020-04-20

作者简介: 赵佐平(1982—), 男, 陕西旬阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为环境污染修复。E-mail: zhaozuoping@126.com

*通信作者: 同延安 E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家公益性行业科研专项(201203045); 陕西省重点研发计划项目(2019NY-202); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(19JS012)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (201203045); The Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China (2019NY-202); Research Foundation of Education Bureau of Shaanxi Province, China (19JS012).

soils were 10.03, 87.61, 16.42, 12.38, 0.20, 6.89, 0.11, 24.81, 625.20, 0.15, 40 291.61, 4 774.51 and 76.82 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The coefficient of variation of the different elements ranged from 29.16% to 58.82%, and was 49.30% for Cd and 48.55% for Hg. In 5.76% and 4.54% of the samples, Cd concentrations and Ni concentrations exceeded the risk screening value of the *Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land* (GB 15618—2018), respectively. The average comprehensive potential ecological risk index was 102.15, and the overall potential ecological risk was low. Cd and Hg contributed the most to the potential ecological risk (35.47% and 46.53%, respectively), and the risks associated with other elements were relatively minor. Thus, measures should be taken to control Cd and Hg soil pollution to ensure the safe production of tea in the study area. The heavy metals in tea leaf samples all conform to the relevant standards of pollution-free food tea.

Keywords: southern Shaanxi; tea plantation soil; tea leaves; producing environment; ecological risk

随着工业和农业的快速发展,工业“三废”排放、矿产资源开采、化肥农药施用及汽车尾气等使土壤污染问题不容忽视,其中土壤重金属污染一直都是广大研究者广泛关注的问题^[1-3]。有关资料显示,我国受重金属污染的耕地土壤面积已超过2 000万 hm^2 ,占全国耕地总面积的20%,每年约有1 200万t的粮食受到重金属污染,经济损失多达200亿元^[4]。

重金属污染与其他污染不同,其具有累积性、复杂性、隐蔽性、不可逆转性、滞后性、严重性,一旦进入土壤环境,则会导致农产品中重金属累积,并通过食物链进入人体,从而危害人体健康^[5]。因此,土壤重金属污染及其生态风险评价,特别是农业产地环境中重金属含量及由其引起的环境污染问题越来越引起人们的关注和重视。近年来,广大科研工作者在农田土壤重金属含量及土壤重金属质量评价^[6-12]、污水灌溉及矿区污染对土壤质量的影响^[13-14]等方面均有较多的研究。

随着茶饮料的作用和功效被认可^[15],茶叶产地环境质量问题也引起了人们的广泛关注。近年来,有关茶园土壤肥力特征、理化性状和有益矿质元素对茶叶品质的影响等方面的报道较多^[16-17],随着环境污染特别是土壤重金属污染问题的日益突出,茶园土壤重金属污染问题亦引起更多关注^[18-20]。陈宗懋等^[21]研究发现,茶树是一种多年生的常青植物,其在土壤中富集重金属的能力比在相同条件下的其他植物具有更高的敏感性。外源重金属进入茶园土壤后很难被微生物降解,一般也不易随水分淋失,而常在土壤环境中富集,甚至转化成具有更大毒性的甲基化合物^[22]。茶园土壤重金属的污染主要来源于农业生产,化肥、农药的大量施用和污泥、动物粪便等有机肥的施用都会造成重金属进入土壤,并使其含量升高富集。吴永刚等^[23]研究表明,长期使用化肥和农药导致茶园土壤受到不同程度的污染,并通过根系吸收使茶叶中重金属

的浓度增加。石元值等^[24]研究表明,由于大量化肥和农药的施用,过去10年,茶叶中Cd、As的含量升高了近1倍;Michael等^[25]的试验发现,茶园土壤中重金属含量与茶叶中重金属含量呈线性相关。

茶叶作为特殊的饮品植物,如果茶园土壤被污染,则会使污染物富集在叶片中,连续浸泡茶叶,浸出污染物的可能性则较大,从而对人体健康造成潜在威胁。因此,茶园土壤肥力及土壤重金属污染物问题更易引起关注。陕西省作为西北地区最大的茶叶种植基地,茶园面积达到14.39万 hm^2 ,占全国茶园总面积的5%。近5年来,陕西茶园增长面积始终排在全国前列,而陕西茶园主要集中在陕南,该区域茶叶种植生产已成为农民脱贫致富和生态保护的主要产业。在大力发展种植茶树的同时却少有学者对该区域茶叶种植环境进行系统调查研究。因此,本文以陕南茶叶主要种植区土壤和茶叶为研究对象,通过土壤样品的采集,测定分析其土壤理化性状(pH、有机质、有效钾、有效磷、硝态氮、全氮、阳离子交换量)和矿质元素含量(Pb、Zn、Cu、Cr、Hg、As、Cd、Ni、Se、Mn、Fe、V、Mg)及茶叶中Pb、Cu、Cr、Hg、As、Cd、Se的含量,探讨了调查区域茶园土壤肥力、茶园土壤矿质元素含量特征、茶园土壤矿质元素相关性以及茶叶中重金属含量与土壤重金属含量的关系,同时采用Hakanson潜在生态危害指数法评价了该区域茶园土壤重金属的生态风险,以为陕南茶园土壤生态风险预警和茶叶安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于汉中盆地($106^{\circ}51' \sim 108^{\circ}05' \text{E}$, $32^{\circ}12' \sim 33^{\circ}15' \text{N}$),是陕西主要茶叶种植区,由平坝、丘陵和山地3种地貌组成,南低北高。平坝地区海拔500~600 m,地势平坦,土壤肥沃,占总面积的

34.62%;丘陵地区海拔600~800 m,地势起伏较大,占总面积的28.12%;剩下37.26%的地区包括山地,其地形复杂,土壤贫瘠,海拔700~2 038 m。该区域属于温暖的亚湿润带,具有北亚热带季风气候,年均气温12~16℃,年平均降雨量700~1 800 mm。由于北秦岭山脉可防止冷空气的进入,而使该地气候温暖潮湿。以该地为调查区域研究陕南茶园土壤环境现状具有较强的代表性。

1.2 样品采集

选取陕南汉中盆地茶叶主栽区:勉县、南郑区、西乡县、镇巴县、宁强县、城固县、洋县和略阳县8个县区茶园土壤及茶叶为调查对象,以选定县区的茶园总面积,结合全国第二次土壤普查抽样点的位置为依据,优化确定了采样点的数量和分布。

以网格化布点采集茶园表层土壤(0~30 cm),以500 m×500 m网格范围对角线采样,同一网格5个样点混合为1个混合样,共采集330个土壤混合样品。同时随土样网格采摘茶叶鲜样33份。土壤样品风干后除杂,玛瑙研钵研磨,分别过0.149 mm和0.841 mm尼龙筛,自封袋保存,供重金属全量分析和pH测定。茶叶鲜样经蒸馏水洗净、杀青后烘干,研磨粉碎过筛后供重金属全量分析。

1.3 样品的分析与测定方法

土壤理化性质:有机质采用重铬酸钾-浓硫酸氧化(外加热法),硫酸亚铁溶液滴定法测定;pH以土水比为1:5 pH计测定;硝态氮以0.01 mol·L⁻¹的CaCl₂溶液作浸提剂,紫外分光光度法测定;有效钾以1 mol·L⁻¹的NH₄OAc溶液作浸提剂,火焰光度法测定;有效磷以混合酸(取浓HCl 4 mL和浓H₂SO₄ 0.7 mL,定容至1 L)作浸提剂,分光光度计700 nm波长下测定;土壤阳离子交换量采用1 mol·L⁻¹的乙酸铵交换法测定^[26];全氮采用元素分析仪测定。

土壤矿质元素:以HNO₃-H₂SO₄消解后,原子荧光光谱仪测定Se、As和Hg含量。以HNO₃-HClO₄-HF三酸消解后,用火焰原子吸收分光光度计测定Cu、Cr、Zn、Ni、Mn、Fe、Mg含量,石墨炉原子吸收分光光度计测定V、Pb、Cd含量。茶叶样品中Pb、Se、Cu、Cr、Hg、As、Cd含量的测定采用GB/T 30376—2013中的方法。分析质量控制,采用GSS-14标准物质加标回收,回收率分别为Ni 94.1%~99.6%,Mn 95.3%~99.9%,Fe 95.5%~100.5%,V 92.3%~99.9%,Mg 96.1%~102.9%,Cr 96.4%~101.3%,Cu 95.9%~101.5%,Pb 96.5%~108.2%,Zn 92.9%~100.6%,Cd 93.2%~

104.9%,Se 95.6%~100.8%,Hg 93.6%~99.8%,As 94.3%~99.6%。

1.4 评价方法

土壤肥力评价方法:以《绿色食品产地环境质量》(NY/T 391—2013)进行评价。

土壤重金属污染评价方法有单因子污染指数法和综合污染指数法^[13],本研究以陕西省土壤背景值^[27]和中国土壤背景值^[28]作为参比值,采用Hakanson潜在生态风险指数法,进行茶园土壤重金属污染风险评价。潜在生态风险指数法由瑞典科学家Hakanson提出,主要是用于对土壤重金属潜在生态风险进行评估,其特点是综合考虑了多元素的浓度、毒性、生态敏感性和协同作用^[29]。其公式如下:

$$C_i^i = C_i / C_n^i$$

$$C_d = \sum C_i^i$$

$$E_i^i = T_i^i / C_i^i$$

$$IR = \sum E_i^i$$

式中: C_i^i 为第*i*种重金属元素的单因子污染指数; C_i 为第*i*种重金属元素的实测含量; C_n^i 为重金属*i*的背景参考值; C_d 为多种重金属污染指数之和; E_i^i 为单项重金属的潜在生态危害系数; T_i^i 为重金属*i*的毒性响应系数,反映该重金属的毒性水平及水体对重金属元素污染的敏感程度; IR 为区域内多种金属潜在生态风险系数。

重金属毒性系数 T_i^i (Hakanson)分别为Hg(40)>Cd(30)>As(10)>Cu(5)=Pb(5)=Ni(5)>Cr(2)=V(2)>Zn(1)=Mn(1)^[13,29-30]。单因子重金属潜在生态风险指数 E_i^i : $E_i^i < 40$ 为轻度污染, $40 \leq E_i^i < 80$ 为中度污染, $80 \leq E_i^i < 160$ 为较强污染, $160 \leq E_i^i < 320$ 为很强污染, $E_i^i \geq 320$ 为极强污染;区域多因子重金属综合潜在生态风险指数 IR : $IR < 150$ 为轻度污染, $150 \leq IR < 300$ 为中度污染, $300 \leq IR < 600$ 为较强污染, $IR \geq 600$ 为很强污染。

1.5 数据处理与分析

测定数据结果为平均值,采用Excel 2016和SPSS 19.0等软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 茶园土壤肥力现状评估分析

研究区域330个土壤样品理化性状分析结果见表1,依据《绿色食品产地环境质量》(NY/T 391—2013)中肥力标准进行评价分析。由表1可知,研究区域茶园土壤各理化指标差异较大,其中pH范围为4.19~5.54,整体呈酸性,茶树为喜酸性植物,适宜pH

表1 研究区域土壤肥力现状统计分析

Table 1 Summary statistics of soil fertility in the topsoil in the study area

理化性状 Physical and chemical characteristics	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	变异系数/% Coefficient of variation	标准差 Standard deviation	《绿色食品产地环境质量》(NY/T 391—2013) Green food—Environmental quality for production area		
						I	II	III
pH	5.54	4.19	4.78	12.00	0.57	—	—	—
有机质/(g·kg ⁻¹)	35.07	8.77	15.07	16.45	2.48	>20	15~20	<15
有效钾/(mg·kg ⁻¹)	221.43	31.46	83.24	29.48	24.54	>100	50~100	<50
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	5.49	0.47	1.15	49.56	0.57	>10	5~10	<5
硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	58.68	1.54	14.85	71.78	10.66	>20	15~20	<15
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.91	0.52	0.91	64.83	0.59	>1.0	0.8~1.0	<0.8
阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	18.21	5.62	15.12	20.63	3.12	>20	15~20	<15

范围为4.5~5.5,调查区域92%的茶园土壤pH处于该范围,说明调查区域茶园土壤酸碱度适宜茶树生长。有机质、有效钾、有效磷、硝态氮、全氮、阳离子交换量是土壤肥力的重要指标,调查区域土壤有机质含量8.77~35.07 g·kg⁻¹,有效钾31.46~221.43 mg·kg⁻¹,有效磷0.47~5.49 mg·kg⁻¹,硝态氮1.54~58.68 mg·kg⁻¹,全氮0.52~1.91 g·kg⁻¹,阳离子交换量5.62~18.21 cmol·kg⁻¹。对照NY/T 391—2013中肥力标准,研究区域土壤样本中有机质、有效钾、全氮、阳离子交换量的平均值均处于Ⅱ级标准范围,说明研究区域整体上土壤肥力较为丰富。但变异系数较大,说明各理化指标离散程度较大,有机质、有效钾、硝态氮、全氮、阳离子交换量最小值均小于Ⅲ级标准,说明部分茶园土壤肥力相对较差。有效磷含量最大值处于Ⅱ级标准,最小值和平均值均处于Ⅲ级标准,说明研究区域整体处于缺磷状态。

2.2 茶园土壤矿质元素含量分析

调查区域土壤样品中13种元素含量分析结果见表2,依据陕西省土壤背景值^[27]、中国土壤背景值^[28],并结合《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值进行评价分析。由表2可知,陕南不同茶园间各元素含量差异较大,Pb:2.45~29.16 mg·kg⁻¹,均值为10.03 mg·kg⁻¹;Zn:25.73~146.94 mg·kg⁻¹,均值为87.61 mg·kg⁻¹;Cu:7.48~29.03 mg·kg⁻¹,均值为16.42 mg·kg⁻¹;Cr:0.83~27.76 mg·kg⁻¹,均值为12.38 mg·kg⁻¹;Hg:0.08~0.38 mg·kg⁻¹,均值为0.20 mg·kg⁻¹;As:2.31~13.97 mg·kg⁻¹,均值为6.89 mg·kg⁻¹;Cd:0.03~0.32 mg·kg⁻¹,均值为0.11 mg·kg⁻¹;Ni:14.95~72.91 mg·kg⁻¹,均值为24.81 mg·kg⁻¹;Mn:247.92~1 213.53 mg·kg⁻¹,均值为625.20 mg·kg⁻¹;Se:0.08~0.63 mg·kg⁻¹,均值为0.15 mg·kg⁻¹;Fe:9 020.42~71 654.24 mg·

kg⁻¹,均值为40 291.61 mg·kg⁻¹;Mg:1 173.21~11 661.33 mg·kg⁻¹,均值为4 774.51 mg·kg⁻¹;V:21.14~286.42 mg·kg⁻¹,均值为76.82 mg·kg⁻¹。调查样本中13种元素的最大含量和平均含量均超过陕西土壤背景值或中国土壤背景值的元素有Zn、Hg、As、Cd、Mn、Se、Fe,其平均含量分别为陕西土壤背景值1.26、1.11、1.07、1.11、1.10、1.53、1.30倍,说明这7种元素在采样区茶园土壤中有一定程度的累积,但分布不均,其中土壤Zn、Hg、As、Cd、Mn、Se和Fe含量超过陕西土壤背景值的样本比例分别为43.13%、35.29%、27.45%、38.17%、39.12%、20.48%和47.45%,表明在种植环境中外界因素已经导致调查区域土壤中这7种元素含量升高,并以由高到低Fe、Zn、Mn、Cd、Hg、As、Se的顺序累积。Pb、Cu、Ni、Mg和V的平均含量均低于背景值,但最大含量仍然高于背景值,说明该5种元素累积程度分布也不均。仅有Cr的最大值和平均值均低于背景值。

变异系数(Coefficient of variation, CV)可以反映各元素在研究区域分布和累积程度的差异大小。供试茶园土壤中这13种元素的变异系数由大到小依次为Se、As、Mn、Cd、Hg、Cr、V、Zn、Pb、Fe、Ni、Cu和Mg(表2),其中Se、As、Mn、Cd和Hg的变异系数分别达58.82%、52.24%、51.55%、49.30%和48.55%,说明研究区不同茶园间土壤中这5种元素的分布差异较大。

依据GB 15618—2018中风险筛选值进行评价,有5.76%的样本中Cd含量和4.54%的样本中Ni含量高于该风险筛选值,但远低于风险管控值(Cd,1.50 mg·kg⁻¹,pH≤5.5)。土壤污染风险筛选值指土壤中污染物的含量等于或低于该值时,对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境的风险低,一般可以忽略,超过该值时,对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险,应当加强土壤环境监测和农产品协同监测,原则上应当采取安全利用措施。

表2 研究区域土壤矿质元素含量统计分析

Table 2 Summary statistics of mineral element concentrations in the topsoil in the study area

矿质元素 Mineral element	最大值 Maximum/ (mg·kg ⁻¹)	最小值 Minimum/ (mg·kg ⁻¹)	平均值 Mean/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数CV Coefficient of variation/%	标准差 Standard deviation/ (mg·kg ⁻¹)	土壤背景值 Soil background value/(mg·kg ⁻¹)	农用地土壤污染风险管控标准*** Risk control standard for soil contamination of agricultural land			
							pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
Pb	29.16	2.45	10.03	37.36	3.75	20.90*	70	90	120	170
Zn	146.94	25.73	87.61	37.42	32.79	69.40*	200	200	250	300
Cu	29.03	7.48	16.42	29.16	4.79	19.50*	50	50	100	100
Cr	27.76	0.83	12.38	45.97	5.69	61.10*	150	150	200	250
Hg	0.38	0.08	0.20	48.55	0.10	0.18*	1.30	1.80	2.40	3.40
As	13.97	2.31	6.89	52.24	3.60	6.42*	40	40	30	25
Cd	0.32	0.03	0.11	49.30	0.07	0.09*	0.30	0.30	0.30	0.60
Ni	72.91	14.95	24.81	32.88	8.16	33.9*	60	70	100	190
Mn	1 213.53	247.92	625.20	51.55	322.31	568*	—	—	—	—
Se	0.63	0.08	0.15	58.82	0.09	0.10*	—	—	—	—
Fe	71 654.24	9 020.42	40 291.61	35.56	1 4331.12	30 900*	—	—	—	—
Mg	11 661.33	1 173.21	4 774.51	28.18	1 345.61	6 300**	—	—	—	—
V	286.42	21.14	76.82	42.57	37.22	82.4**	—	—	—	—

注:*陕西省土壤背景值^[27];**中国土壤背景值^[28];***《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中风险筛选值。

Note: *Soil background values in Shaanxi Province, China^[28]; **China soil background values^[28]; ***The risk screening value of Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land(GB 15618—2018).

Pb、Zn、Cu、Cr、Hg和As的含量均未超过风险筛选值。因GB 15618—2018中未对Mn、Se、Fe、Mg和V 5种元素进行限定,故不做评价。

2.3 茶园土壤矿质元素相关性分析

采样区土壤矿质元素间相关性分析结果见表3。由表3可知,调查区茶园土壤中多数元素间存在相关性,其中Cd与Pb、Hg、Zn、As的相关性达到极显著水平,相关系数均大于0.224;Cu与Cr、Zn、Mn、Ni、Fe的相关系数依次为0.638、0.482、0.377、0.634、0.432,相关性达到极显著水平;Pb与Hg、Zn、Mn、Ni的相关性达到极显著水平;Cr与Zn的相关系数为0.399,Hg与As的相关系数为0.795,均达到极显著水平;Zn与Mn、Fe、Mg的相关系数及Mn与Ni、Fe、V的相关系数也均大于0.224,达到极显著水平。由此可知,研究区域土壤Cd、Pb、Hg、Zn和As均有相似的来源,且呈现相互伴随的复合污染现象;Cu、Cr、Mn、Zn、Ni和Fe 6种元素的来源途径也可能相同;Mn、Ni、Fe、V、Zn也有相关伴随的复合污染现象。也有研究表明^[31],茶园土壤pH和Eh共同控制各形态重金属的转换平衡,当pH<5时,土壤Eh的影响不显著,pH成为控制重金属存在形态的主要因素。本文采集的大部分茶园土壤pH在5以下,均值为4.78,所以茶园土壤重金属形态主要受土壤pH的影响,随着pH的降低,重金属从难

溶态转为易溶态的量会增加,进而可能影响茶叶中重金属含量的增加。但表3显示,pH与Cd、Cu和Fe的相关系数分别为0.275、0.354和0.227($P<0.01$),与As、Hg、Cr、Zn、Pb、Ni、V、Mg 8种元素之间相关性不显著,其主要原因是本研究重金属测定分析均采用全量分析。

2.4 茶叶中矿质元素评价分析

《无公害食品茶叶》(NY 5244—2004)、《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(NY 659—2003)和《有机茶》(NY 5196—2002)中规定的茶叶中Cd、Cr、As、Hg、Pb、Cu限量标准分别为 $Cd\leq 1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $Cr\leq 5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $As\leq 2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $Hg\leq 0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $Pb\leq 5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $Cu\leq 30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;《富硒茶》(NY/T 600—2002)中规定了富硒茶的Se范围为0.25~0.40 mg·kg⁻¹;茶叶中Zn、Mn、Ni、Fe、V和Mg的相关标准暂无,故不做评价。依此对33个茶园茶叶样品中6种重金属和Se进行分析评价,结果显示(表4),茶叶中各重金属元素含量差异较大,Pb为0.03~2.65 mg·kg⁻¹,均值为1.83 mg·kg⁻¹;Cu为3.18~20.16 mg·kg⁻¹,均值为13.42 mg·kg⁻¹;Cr为0.09~4.89 mg·kg⁻¹,均值为3.22 mg·kg⁻¹;Hg为0.02~0.30 mg·kg⁻¹,均值为0.16 mg·kg⁻¹;As为0.66~1.16 mg·kg⁻¹,均值为0.89 mg·kg⁻¹;Cd为0.02~0.19 mg·kg⁻¹,均值为0.08 mg·kg⁻¹;Se为0.06~0.45 mg·kg⁻¹,均值为

表3 土壤矿质元素和pH的相关性分析
Table 3 Correlation analysis between mineral elements and pH

矿质元素 Mineral element	Cd	Cu	Pb	Cr	Hg	As	Zn	Mn	Ni	Fe	V	Mg	pH
Cd	1.000												
Cu	-0.057	1.000											
Pb	0.319**	-0.133	1.000										
Cr	-0.083	0.638**	0.037	1.000									
Hg	0.858**	-0.042	0.235**	-0.093	1.000								
As	0.865**	-0.092	0.037	-0.144	0.795**	1.000							
Zn	0.239**	0.482**	0.348**	0.399**	0.061	0.015	1.000						
Mn	0.214*	0.377**	0.323**	-0.034	0.057	0.052	0.356**	1.000					
Ni	0.039	0.634**	0.319**	0.034	0.078	0.116	0.219	0.325**	1.000				
Fe	0.012	0.432**	0.213	-0.231	0.073	0.041	0.328**	0.872**	0.172	1.000			
V	0.031	0.062	0.103	-0.131	0.033	0.021	0.219*	0.412**	0.315**	0.654**	1.000		
Mg	0.012	0.132	0.111	-0.245	0.053	0.061	0.439**	0.212	0.072	0.129	0.217	1.000	
pH	0.275**	0.354**	-0.254	-0.092	0.092	-0.157	-0.017	0.201*	0.054	0.227**	0.051	0.022	1.000

注:**相关性在0.01水平上显著;*相关性在0.05水平上显著。
Note:**The correlation was significant at the 0.01 level;*The correlation was significant at the 0.05 level.

0.21 mg·kg⁻¹。32个茶园茶叶样品符合NY 5244—2004和NY 659—2003;33个茶园中茶叶Cu含量符合NY 5196—2002;4个茶园中茶叶Se含量符合NY/T 600—2002。另外,尽管茶园5.76%的土壤中Cd及4.54%的Ni含量超过GB 15618—2018中的风险筛选值,但茶叶中Cd均符合NY 5244—2004,因茶叶中Ni无标准,因此不作评价;虽然土壤中Hg含量并未超过GB 15618—2018中的风险筛选值,但茶叶中1.66%的样品Hg含量高于NY 5244—2004,这说明研究区域茶叶中相关重金属含量可能受多种因素影响。

结合表2和表4,对茶园土壤7种重金属和对应茶园茶叶中重金属含量进行了F检验。土壤中As、

Cd、Cr、Zn、Pb、Cu含量与茶叶中对应的重金属含量相关性并不显著,土壤样品中的Hg含量与茶叶样品中Hg含量有较为明显的正相关性。尽管如此,也并不能简单判断茶叶中这些重金属含量不受土壤中重金属的影响。因为,土壤pH和Eh也会影响茶叶对土壤中相关成分的吸收。土壤中重金属Hg对茶叶中Hg含量存在一定的正相关性,可能是pH使茶园土壤中易溶态Hg的量有所增加。因此,我们可以把调查区域茶园土壤中Hg含量作为衡量茶叶Hg的表征之一。

2.5 茶园土壤重金属潜在生态风险评价

2.5.1 茶园重金属单项生态风险评价

对具有重金属毒性系数的10种重金属(Hg、Cd、

表4 研究区域茶叶重金属含量统计分析
Table 4 Summary statistics of heavy metal concentrations in the tea leaves in the study area

矿质元素 Mineral element	最大值 Maximum/ (mg·kg ⁻¹)	最小值 Minimum/ (mg·kg ⁻¹)	平均值 Mean/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation/%	标准差 Standard deviation/ (mg·kg ⁻¹)	标准值 Standard level/ (mg·kg ⁻¹)
Pb	2.65	0.03	1.83	73.08	1.33	5.0*
Cu	20.16	3.18	13.42	69.56	11.42	30**
Cr	4.89	0.09	3.22	81.34	0.17	5.0*
Hg	0.30	0.02	0.16	85.04	0.17	0.3*
As	1.16	0.66	0.89	28.11	0.25	2.0*
Cd	0.19	0.02	0.08	81.68	0.08	1.0*
Se	0.45	0.06	0.21	33.33	0.07	0.25~0.40***

注:*《无公害食品茶叶》(NY 5244—2004)和《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(NY 659—2003);**《有机茶》(NY 5196—2002);***《富硒茶》(NY/T 600—2002)。
Note:* Pollution-free food and tea (NY 5244—2004) and Residue limits for chromium, cadmium, mercury, arsenic and fluoride in tea (NY 659—2003); ** Organic tea (NY 5196—2002)^[36]; *** Rich selenium tea (NY/T 600—2002).

As、Cu、Pb、Ni、Cr、V、Zn和Mn)单项生态风险进行了评价,Fe、Mg和Se无重金属毒性系数,故不参与生态风险评价。风险评价结果见表5,单项污染物生态风险指数范围为:Hg 17.67~83.97, Cd 0~103.72, As 3.58~21.76, Pb 0~6.97, Cu 1.92~7.44, Ni 2.19~33.91, Cr 0.03~0.91, V 0.51~6.95, Zn 0.37~2.11, Mn 0.44~2.14。Hg、Cd、As、Pb、Cu、Ni、Cr、V、Zn和Mn的单项生态风险指数平均值分别为44.46、33.89、9.37、2.32、4.26、3.65、0.41、1.86、0.83和1.10,由高到低的排序为Hg、Cd、As、Cu、Ni、Pb、V、Mn、Zn、Cr。除Hg外,其他9种重金属元素的单项生态风险指数平均值均小于40。采样区重金属As、Pb、Cu、Ni、V、Mn、Zn、Cr单项生态风险指数的最大值均小于40,说明采样区这8种重金属都处于轻度生态风险等级,对陕南茶园土壤潜在生态风险贡献较低,基本没有影响。

尽管Cd的单项生态风险指数平均值<40,为33.89,但指数值的范围较宽,最高生态风险指数达103.72,单项生态风险指数值超过80的样本有18个,占总样本的5.46%,处于较强生态风险等级。同时有29.09%的样本处于中度生态风险等级,65.45%的样本处于轻度生态风险等级。Hg的生态风险指数的平均值>40,为44.46,最大值为83.97,生态风险等级处于轻、中度水平的占总样本的比重分别为42.42%和

51.82%,只有5.76%的样本达到较强生态风险等级。Cd和Hg对陕南茶园种植区土壤的生态风险分别贡献了35.47%和46.53%。因此,在调查茶园种植区土壤中,Hg和Cd是造成潜在生态风险的主要因素。

2.5.2 茶园土壤重金属综合潜在生态风险评价

研究区域土壤中Hg、Cd、As、Cu、Pb、Ni、Cr、V、Zn和Mn的综合潜在生态风险指数(IR)最大值为269.87,最小值为26.71,平均值为102.15(<150),表明该研究区域总体处于低潜在生态风险水平。研究区域330个样本的综合潜在生态风险指数统计见表6,由表6可知,272个样本处于轻度潜在生态风险水平,占总样本量的82.42%;58个样本处于中度潜在生态风险水平,占总样本量的17.58%,这表明研究区域茶园土壤重金属还处于轻潜在生态风险。

3 讨论

本研究选择Hakanson潜在生态风险指数法来评价茶园土壤重金属污染,该方法弥补了单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法和污染负荷指数法的缺点,将重金属生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,定量划分重金属的潜在风险等级。通过该方法评价发现,10种重金属中Cd和Hg的生态风险指数较高,最高生态风险指数分别达到

表5 土壤重金属单项生态风险指数统计
Table 5 Statistical analysis of the single ecological risk index of soil heavy metals

重金属 Heavy metal	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	样点分布频率Distribution frequency of samples				
					$E_i' < 40$	$40 \leq E_i' < 80$	$80 \leq E_i' < 160$	$160 \leq E_i' < 320$	$E_i' \geq 320$
					轻度 Low	中度 Medium	较强 Strong	很强 Very strong	极强 Greatly strong
Hg	83.97	17.67	44.46	20.30	140	171	19	0	0
Cd	103.72	0	33.89	27.95	216	96	18	0	0
As	21.76	3.58	9.37	4.86	330	0	0	0	0
Pb	6.97	0	2.32	2.09	330	0	0	0	0
Cu	7.44	1.92	4.26	1.21	330	0	0	0	0
Ni	33.91	2.19	3.65	5.33	330	0	0	0	0
Cr	0.91	0.03	0.41	0.18	330	0	0	0	0
V	6.95	0.51	1.86	1.02	330	0	0	0	0
Zn	2.11	0.37	0.83	0.33	330	0	0	0	0
Mn	2.14	0.44	1.10	0.39	330	0	0	0	0

表6 研究区域土壤重金属潜在生态风险指数统计
Table 6 Statistical analysis of the potential ecological risk index of soil heavy metals

潜在生态风险等级Potential ecological risk level	$IR < 150$	$150 \leq IR < 300$	$300 \leq IR < 600$	$IR \geq 600$
程度 Level	低 Low	中 Medium	较强 Strong	很强 Very strong
频率 Frequency	272	58	0	0
比例 Ratio/%	82.42	17.58	0	0

103.72和83.97,且通过样本统计发现Cd和Hg是研究区域茶园土壤潜在生态风险的主要因素,其生态风险贡献率分别为35.47%和46.53%,82%的生态危害都由这两种元素造成。

根据330个茶园土壤样品的分析结果,结合潜在生态风险指数法评价显示调查茶园总体上是清洁的,但个别茶园受到Cd和Hg等重金属的影响,处于较强生态风险等级。如果是由于这10种重金属土壤背景值的原因,则该土壤环境是否适宜茶园生产种植还有待进一步论证;如果这种状况是人为因素引起,比如周边工业企业排放性污染、不合理施肥等原因,则需要从源头上加以控制。总之,尽管目前风险评价结果显示调查区域茶园的生态风险较低,但个别茶园中Cd和Hg等重金属环境问题仍应引起重视,特别是土壤样本中有5.76%的样本Cd含量高于GB 15618—2018中的风险筛选值。依据土壤污染风险筛选值有关规定,超过该值,对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险,应当加强土壤环境监测和农产品协同监测,原则上应当采取安全利用措施。相关性分析结果来看,土壤中多种类重金属含量与对应茶园茶叶中重金属含量并不存在一致性的问题。研究区域中,土壤样本中尽管有5.76%的样本Cd含量高于GB 15618—2018中的风险筛选值,但茶叶中Cd含量符合农业行业标准《无公害食品茶叶》(NY 5244—2004)。该现象可能有两种原因:其一是因为茶树对不同重金属吸收能力存在一定的差异性,土壤中重金属含量高未必能引起茶叶中相应重金属含量的超标;其二是茶叶中的重金属含量受多重因素影响,除了受土壤因素影响外,还同时受到诸如大气污染等因素的影响。

土壤的pH反映了土壤的酸碱性,而酸碱性可能会影响重金属的形态和活性。我们研究发现土壤pH与Cd、Cu和Fe含量达到显著相关性水平($P<0.05$)。有研究发现^[4],低pH可以促进土壤中重金属的溶解和活化。本研究区域茶园土壤pH均值为4.78,在该条件下,土壤中重金属Cd、Cu、Fe可能会少量溶解,一定程度上增加了其浸出量,从而可能会降低土壤中重金属Cd、Cu和Fe的浓度;但另一方面,酸性土壤环境可以改善茶叶种植土壤中重金属的生物可利用性。有研究表明^[31],土壤pH和Eh共同控制各形态重金属的转换平衡,当 $pH<5$ 时,土壤Eh的影响不显著,pH成为控制重金属存在形态的主要因素。随着pH的降低,重金属从难溶态转为易溶态的量会增加,进而可

能影响地上部分对重金属的吸收和带走量。重金属形态分析与茶叶中重金属的关系有待进一步研究。值得关注的是,茶树是一种多年生的常青植物,同等条件下,不论是富集土壤中重金属元素的能力还是对污染物的敏感程度都较其他植物强^[15]。因此,虽然长期吸收可降低土壤Cd、Cu和Mn的含量,但茶叶作为特殊的饮品植物,这种潜在威胁可能对人体健康危害会更大。随着土壤酸度的增加,土壤中重金属的移动性和生物有效性均会显著增加,这与谢忠雷等^[31]在茶园土壤pH对土壤中吸收Mn的研究结论相似;土壤酸性越强,土壤中重金属越易被茶叶吸收累积,对人体健康的威胁更大。因此,在轻度重金属污染的酸性土壤中,可以通过适当施用碱性介质,比如添加生物质炭等来提高土壤的pH,进而降低重金属的生物有效性,以达到安全生产的目的。对于已经造成较高生态风险的种植园,因严控“三废”入园,在新建茶园位置时,严格按照有机茶园要求进行选址种植,避开已有的污染源;在重金属含量背景值高的工矿企业附近以及交通发达的地段不宜发展茶园;已发展起来的应该建立防护林带以减轻汽车尾气造成的污染。施用农药、化肥和动物粪便过程中要注意Cd、Hg、Pb等有害元素的引入;提倡因土施肥、配方施肥。

4 结论

(1)研究区域茶园土壤肥力处于《绿色食品产地环境质量》(NY/T 391—2013)Ⅱ级标准范围;Zn、Hg、As、Cd、Mn、Se和Fe含量的平均值均超过了陕西土壤背景值,呈现不同程度的积累;有5.76%的样本中Cd含量和4.54%的样本中Ni含量高于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险筛选值,但远低于风险管控值。

(2)Hg和Cd是造成潜在生态风险的主要因素,对陕南茶园土壤生态风险贡献率分别为46.53%和35.47%。As、Cu、Pb、Ni、Cr、V、Zn和Mn的单项生态风险指数的最大值均小于40,对调查茶园土壤潜在生态风险贡献较低;综合潜在生态风险指数平均值为102.15(<150),表明该研究区域总体上处于较低的潜在生态风险水平。

(3)32个茶园茶叶样品符合《无公害食品茶叶》(NY 5244—2004)和《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(NY 659—2003),33个茶园中茶叶Cu含量符合《有机茶》(NY 5196—2002),4个茶园中茶叶Se含量符合《富硒茶》(NY/T 600—2002)。

参考文献:

- [1] Amini M, Afyuni M, Khademih, et al. Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of central Iran[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 347(1/2/3):64-77.
- [2] Cheng J L, Shi Z, Zhu Y W. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(1):50-54.
- [3] 宋珍霞, 高明, 王里奥, 等. 三峡库区农业土壤重金属含量特征及污染评价——以 Cu、Pb 和 Zn 为例[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6):2189-2194.
- SONG Zhen-xia, GAO Ming, WANG Li-ao, et al. Heavy metal concentrations in agriculture soils of the Three-Gorge Reservoir area and their pollution evaluation: Taking Cu, Pb, and Zn as examples[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27(6):2189-2194.
- [4] 秦鱼生, 喻华, 冯文强, 等. 成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(19):6335-6344.
- QIN Yu-sheng, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19):6335-6344.
- [5] 程旺大, 姚海根, 吴伟, 等. 土壤-水稻体系中的重金属污染及其控制[J]. *中国农业科技导报*, 2005, 7(4):51-54.
- CHENG Wang-da, YAO Hai-gen, WU Wei, et al. Heavy metal pollution and its countermeasures in soil-rice system[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2005, 7(4):51-54.
- [6] 谢正苗, 李静, 徐建明, 等. 杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜中 Pb、Zn 和 Cu 含量的环境质量评价[J]. *环境科学*, 2006, 27(4):742-747.
- XIE Zheng-miao, LI Jing, XU Jian-ming, et al. Evaluation on environmental quality of Pb, Zn and Cu contents in vegetable plantation soils and vegetables in Hangzhou suburb[J]. *Environment Science*, 2006, 27(4):742-747.
- [7] 敖明, 柴冠群, 范成五, 等. 稻田土壤和稻米中重金属潜在污染风险评估与来源解析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6):198-205.
- AO Ming, CHAI Guan-qun, FAN Cheng-wu, et al. Evaluation of potential pollution risk and source analysis of heavy metals in paddy soil and rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6):198-205.
- [8] 付华, 吴雁华, 魏立华. 北京南部地区农业土壤重金属分布特征与评价[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1):182-185.
- FU Hua, WU Yan-hua, WEI Li-hua. Distribution and evaluation of heavy metals in agricultural soil in southern area of Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):182-185.
- [9] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1):33-40.
- ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, LI Jiang-tao, et al. Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangze River delta: A case study of Taicang City Jiangsu Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1):33-40.
- [10] 陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J]. *生态学报*, 2012, 32(11):3487-3496.
- CHEN Jing-dou, DAI Qi-gen, XU Xue-hong, et al. Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11):3487-3496.
- [11] Zhou P L, Yao Y Y, Yan F D, et al. Cadmium accumulation characteristic in a soil-rice system in Zhejiang Province, China[J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2016, 11(12):817-826.
- [12] Suresh G, Sutharsan P, Ramasamy V, et al. Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam lake sediments, India[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 84:117-124.
- [13] 庞研, 同延安, 梁连友, 等. 矿区农田土壤重金属分布特征与污染风险研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11):165-171.
- PANG Yan, TONG Yan-an, LIANG Lian-you, et al. Distribution of farmland heavy metals and pollution assessment in mining area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery*, 2014, 45(11):165-171.
- [14] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 北京市凉水河灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(9):1175-1181.
- YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liang-feng irrigated area, Beijing City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9):1175-1181.
- [15] 张建勇, 江和源, 崔宏春, 等. 茶叶功能成分与新型食品开发[J]. *湖南农业科学*, 2011, 40(3):104-108.
- ZHANG Jian-yong, JIANG He-yuan, CUI Hong-chun, et al. The functional components of tea and the exploitation of new type food[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011, 40(3):104-108.
- [16] Lin D H, Zhu L Z. Polycyclic aromatic hydrocarbons: Pollution and source analysis of a black tea[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(26):8268-8271.
- [17] Lin D H, Tu Y Y, Zhu L Z. Concentrations and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in tea[J]. *Food Chemical Toxicology*, 2005, 43(1):41-48.
- [18] Han W Y, Zhao F J, Shi Y Z, et al. Scale and causes of lead contamination in Chinese tea[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(1):125-132.
- [19] 杨如意, 杨程, 石晓菁, 等. 硒镉高背景区茶叶中硒和砷、汞、镉的积累与浸出特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(9):2023-2030.
- YANG Ru-yi, YANG Cheng, SHI Xiao-jing, et al. Selenium, arsenic, mercury and cadmium in tea leaves and infusion of a green tea grown in an area with a high geological background of selenium and cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9):2023-2030.
- [20] 郭海彦, 周卫军, 张杨珠, 等. 长沙“百里茶廊”茶园土壤重金属含量及环境质量特征[J]. *环境科学*, 2008, 29(8):2320-2326.
- GUO Hai-yan, ZHOU Wei-jun, ZHANG Yang-zhu, et al. Content of soil heavy metals and characteristics of environmental quality in tea plantations of Changsha Baili tea zone[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8):2320-2326.

- [21] 陈宗懋, 阮建云, 蔡典雄, 等. 茶树生态系中的立体污染链与阻控[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 948-958.
CHEN Zong-mao, RUAN Jian-yun, CAI Dian-xiong, et al. Tri-dimension pollution chain in tea ecosystem and its control[J]. *Scientia Agricultura Sinica* 2007, 40(5): 948-958.
- [22] Huang S S, Liao Q L, Hua M, et al. Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong District, Jiangsu Province, China[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2148-2155.
- [23] 吴永刚, 姜志林, 罗强. 公路边茶园土壤与茶树中重金属的积累与分布[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2002, 26(4): 39-42.
WU Yong-gang, JIANG Zhi-lin, LUO Qiang. The accumulation and distribution of heavy metals in teas on both sides of highway[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 26(4): 39-42.
- [24] 石元值, 韩文炎, 马立峰, 等. 龙井茶中重金属元素 Pb 含量的影响因素探究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 899-903.
SHI Yuan-zhi, HAN Wen-yan, MA Li-feng, et al. Influence factors on lead contents in Longjing tea[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 899-903.
- [25] Michael Y, Chandravanshi B S, Wondimu T. Levels of essential and non-essential metals in leaves of the tea plant (*Camellia sinensis* L.) and soil of Wushfarms, Ethiopia[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(3): 1236-1243.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [27] 薛澄泽, 肖玲, 吴乾丰, 等. 陕西省主要农业土壤中十种元素背景值研究[J]. 西北农业大学学报, 1986, 14(3): 30-53.
XUE Cheng-ze, XIAO Ling, WU Qian-feng, et al. Studies of background values of ten chemical elements in major agricultural soil in Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest Agricultural University*, 1986, 14(3): 30-53.
- [28] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12-19.
WEI Fu-sheng, CHEN Jing-sheng, WU Yan-yu, et al. Study on soil environmental background values in China[J]. *Environment Science*, 1991, 12(4): 12-19.
- [29] Wang M E, Bai Y Y, Chen W P, et al. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 161: 235-242.
- [30] 徐争启, 倪世军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [31] 谢忠雷, 董德明, 李忠华, 等. 茶园土壤 pH 值对茶叶从土壤中吸收锰的影响[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 278-281.
XIE Zhong-lei, DONG De-ming, LI Zhong-hua, et al. Effects of soil pH on the uptake of Mn from soil into the tea leaves[J]. *Chinese Geographical Science*, 2001, 21(3): 278-281.