

# 酸性红壤产茶区土壤重金属污染评价及来源解析

谭华荣<sup>1</sup>, 王语思<sup>1</sup>, 史开篇<sup>2</sup>, 董 婷<sup>1</sup>, 姚有如<sup>1,3</sup>

(1. 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241003)

(2. 南京师范大学环境学院, 江苏 南京 210023)

(3. 江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241003)

**[摘要]** 茶园土壤重金属污染直接影响产茶区茶叶质量, 进而影响人体健康. 以福建省泉州市安溪县产茶区表层土壤为研究对象, 通过室内实验, 综合分析茶园土壤中 Pb、Zn、Cu、Cr、Ni、Co、Mn 和 Fe 的含量分布特征, 结合正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)模型, 探究重金属的来源. 结果表明: 研究区红壤中 Pb、Zn、Co 和 Mn 平均含量分别为福建省土壤背景值的 1.38、1.25、1.50 和 1.86 倍, 已存在明显的积累; 研究区土壤重金属污染程度较轻, 除少数样点的 Pb、Zn、Mn 存在中度污染之外, 其他重金属基本属于无污染或轻度污染; PMF 模型结果显示茶园红壤重金属来自 4 种污染源, 即交通源、矿业源、自然源和农业源, 贡献率分别为 21.89%、25.82%、27.76%、24.52%.

**[关键词]** 重金属, 茶园土壤, 污染评价, 源解析, 安溪

**[中图分类号]** X53 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2025)01-0038-07

## Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Soil of Acidic Red Soil Tea-Producing Area

Tan Huarong<sup>1</sup>, Wang Yusi<sup>1</sup>, Shi Kaipian<sup>2</sup>, Dong Ting<sup>1</sup>, Yao Youru<sup>1,3</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China)

(2. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3. Key Laboratory of Earth Surface Processes and Response in the Yangtze-Huaihe River Basin of Anhui Province, Wuhu 241003, China)

**Abstract:** Heavy metal pollution in tea garden soil directly impacts the quality of tea leaves in tea-producing regions, consequently influencing human health. In this paper, the surface soil of a tea-producing area in Anxi County, Quanzhou City, Fujian Province, is the focus of the research. The distribution characteristics of Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Co, Mn and Fe in tea garden soil are comprehensively analyzed through indoor experiments. The study also utilizes the probability matrix decomposition(PMF) model to explore the sources of pollutants. The results indicate that the mean contents of Pb, Zn, Co, and Mn in the red soil in the study area exceed 1.38, 1.25, 1.50, and 1.86 times the background value of the soil in Fujian Province, respectively, indicating significant accumulation. The level of heavy metal pollution in the soil in the study area is relatively low. Apart from moderate pollution of Pb, Zn, and Mn at a few sample points, the other heavy metals are mostly categorized as non-polluted or lightly polluted. PMF modeling reveals that the heavy metals in the red soil of the tea plantation originated from four pollution sources: transportation, mining, natural factors, and agriculture, contributing 21.89%, 25.82%, 27.76%, and 24.52%, respectively.

**Key words:** heavy metal, tea plantation soil, pollution assessment, source analysis, Anxi

茶因其独特的风味和清爽的口感, 加之其抗氧化活性可以降低血清胆固醇和脂蛋白氧化, 具有降低患糖尿病、心血管疾病和癌症风险等功效而成为全球最受欢迎的非酒精饮料之一<sup>[1-2]</sup>. 我国茶树栽培历史悠久<sup>[2]</sup>, 随着茶叶市场的不断拓展, 茶产业已经成为一些主要产茶区的支柱性产业, 其种植面积和产量逐年

收稿日期: 2024-02-19.

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202310370054)、国家自然科学基金资助项目(42207454)、安徽省自然科学基金青年项目(2108085QD156)、安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2021A0121)、安徽师范大学人才培育基金资助项目(2021xjxm032)、芜湖市应用基础研究项目(2022jc09).

通讯作者: 姚有如, 博士, 讲师, 研究方向: 水土污染物控制研究. E-mail: yaoyouru@ahnu.edu.cn

提升。然而,在茶园的酸性土壤中,重金属极易通过茶树根系转移至茶叶中并发生富集,进而对人体健康构成威胁<sup>[3]</sup>。因此,作为全世界最受欢迎的饮品之一,茶叶的重金属污染状况备受关注。茶树是一种嗜酸性树种,生长需要适宜的坡度、良好的水热条件等<sup>[4-5]</sup>,我国南方的丘陵地带是最主要的产茶区<sup>[6]</sup>。红壤是适宜茶树生长的主要土壤类型,红壤的酸性特征、孔隙结构和肥力状况与茶树的生长偏好具有一致性。然而,红壤的强酸性特征也导致重金属活性高,使重金属容易在固-液界面和土壤-生物系统内发生迁移与转化,影响茶叶品质 and 安全性。因此,对红壤茶园土壤的重金属污染特征开展深入研究,可以更好地保护环境、保证茶叶质量以及促进农业可持续发展。

重金属难以被降解且具有生物毒性,不仅会影响作物的产量和品质,还能通过食物链对人类健康造成威胁。研究表明,重金属经食物链进入人体后通常会富集于人体的各个器官,长期接触重金属会对人体造成许多严重且不可逆的损伤,影响人体各项生理机能,导致人体出现较严重慢性非致癌甚至是致癌风险<sup>[1,7]</sup>。因此,茶叶以及茶园土壤中的重金属污染状况及其造成的健康风险一直备受学者关注<sup>[8-11]</sup>。周国华等<sup>[9]</sup>对铁观音茶园中土壤-茶叶系统的微量元素进行研究后认为,土壤-茶叶系统中微量元素的迁移由地质背景和成土母质等自然因素主导,与人类活动关联较小。孙境蔚等<sup>[11]</sup>在土壤-茶树体系中重金属生物可利用性的研究中发现,土壤中重金属的生物活性与土壤 pH 值呈负相关,pH 值越低,重金属在茶树等生物体中迁移转化的活性越强。由于各重金属的性质存在差异,导致其迁移状态和潜在风险不同,弓秋丽等<sup>[10]</sup>认为茶叶中的 Zn、Cu 和 Ni 能够通过饮用等方式直接进入人体并产生累积,其中, Ni 和 Cu 会对人体健康造成较明显的威胁。除此之外,已有研究表明我国部分地区生产的茶叶已经存在重金属污染,例如我国安徽省、福建省、贵州省及云南省等地产出的茶叶中 Pb 含量较高,甚至已有部分茶叶样品超出欧盟茶叶 Pb 含量标准<sup>[8]</sup>。

茶叶中的重金属主要来源于土壤,因此健康的土壤环境是生产优质茶叶的前提<sup>[12]</sup>。然而,工矿业生产、不恰当的农业活动、化石燃料燃烧以及大量生产生活污水的排放均会导致土壤中出现重金属污染,从而威胁茶叶产量与品质<sup>[13]</sup>。因此,对茶园土壤重金属污染进行经常性评价可以为生产安全优质的茶叶提供一定参考,而对其进行来源解析有利于精确探究人类活动对茶园土壤重金属污染的影响,为更好地治理与调控茶园土壤污染状况和提升茶叶品质奠定理论基础。

## 1 材料与方法

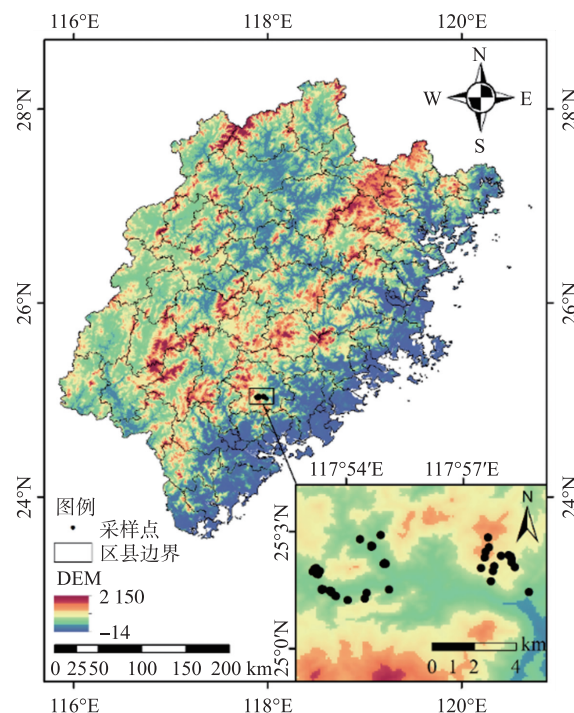
### 1.1 研究区概况

安溪县(117°36′–118°17′E, 24°50′–25°26′N)位于福建省东南部,隶属泉州市。安溪是中国古老的茶业产区,主产的铁观音因其品质优异、质量上乘而被列入中国十大名茶行列,其延伸出的品牌价值在茶叶类产业中常年领跑。茶产业作为安溪县的重要富民产业和支柱产业,全县 120 万人口中有 80% 从事涉茶产业,农民年均纯收入有 56% 来自茶产业。

### 1.2 样品采集与分析

土壤样品于 2023 年 7 月采集,采样前 5 天天气以多云或阴天为主,无降雨天气。选择福建省泉州市安溪县的西坪镇和芦田镇为研究案例地,结合其实际地形、河流和土地利用等情况设置采样点,采样点分布如图 1 所示。选取的每个采样点以 3 m×3 m 为样方,按照梅花型布点法采取表层土壤(0~20 cm)充分混匀后,用“四分法”取 500 g 土样密封装袋并记录信息,共获得 45 个土壤样品。

土壤样品带回实验室后除去砂砾、植物根系等异物,在室内自然风干。将自然风干的土壤按实验要求分别研磨过 10 目(1.65 mm)、60 目(0.30 mm)和 100



注:底图来源于自然资源部标准地图服务系统,审图号:GS(2020)4619,底图无修改。

图 1 研究区域及采样点分布图

Fig. 1 Study areas and soil sampling sites

目(0.15 mm)筛,过 10 目和 60 目的样品用于测定土壤理化性质,过 100 目的样品用于测定土壤重金属元素.

本研究中土壤 pH 值采用电位法(水土比为 2.5:1)测定<sup>[14]</sup>;采用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub>对土壤进行消解,并用电感耦合等离子体发射光谱仪(Perkin Elmer ICP-OES Optima 7000)测定土壤重金属元素<sup>[15]</sup>. 实验过程严格质量控制,平行样测定的相对标准偏差(RSD)总体控制在 5% 以下,标准物质(GSS-3a)的整体回收率范围在 81%~118%.

1.3 研究方法

1.3.1 内梅罗指数法

内梅罗指数法是以单因子污染指数法为基础,兼顾了单元素污染指数的极值和平均值,能够突出高浓度重金属对整体污染的影响,作为一种计权型多因子环境质量指数被广泛运用<sup>[16]</sup>. 具体参数与方法参阅文献[16].

1.3.2 地质累积指数法

地质累积指数法常被用于土壤重金属污染程度的定量研究中,能够直观反映外源重金属在土壤中的富集程度和污染情况,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_i}{1.5B_i} \right),$$

(1)

式中, $I_{geo}$ 为地质累积指数; $C_i$ 为元素*i*的实测浓度(mg/kg); $B_i$ 为元素*i*的地球化学背景值(mg/kg),主要参照陈振金等的《福建省土壤环境背景值研究》<sup>[17]</sup>;1.5 为  $B_i$  的修正指数. 具体的评价分级参阅文献[18].

1.3.3 PMF 模型

正定矩阵因子分解(PMF)模型是基于因子分析法改进的统计学模型,由 Paatero 等<sup>[19]</sup>在 20 世纪 90 年代提出,其原理是利用最小迭代二乘算法,将原始矩阵  $E_{ik}$  分解成两个因子矩阵  $A_{ij}$  和  $B_{jk}$ , 以及一个残差矩阵  $\epsilon_{ik}$ . PMF 模型的基本方程以及不确定性计算方式具体可参见文献[20].

2 结果与讨论

2.1 茶园土壤重金属含量特征

安溪县茶园红壤的 pH 值为(4.22±0.36),呈现出极酸性特征. 酸性土壤可能会加剧土壤中重金属的迁移. 该区域土壤中重金属含量特征如表 1 所示,与福建省土壤背景值相比,Pb、Zn、Co 和 Mn 的平均含量均超过背景值,超标比例分别为 38.43%、23.79%、49.71%和 85.81%. 其中,以 Mn 超过背景值比例最高. 此外,所有重金属变异系数介于 34.24%~98.21%之间,均呈现出中等程度变异水平. 结果表明,该区域茶园土壤重金属分布具有不均一性,各点位之间存在着不同的污染风险.

表 1 安溪茶园土壤重金属含量特征  
Table 1 Characteristics of heavy metal content in soil of Anxi tea plantation mg/kg

元素	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	背景值
Pb	14.92	153.74	48.31	28.87	59.75	34.9
Zn	46.98	250.50	102.37	43.02	42.02	82.7
Cu	2.61	14.00	8.63	3.28	38.00	21.6
Co	1.91	19.73	11.09	5.07	45.73	7.41
Cr	5.41	47.83	23.96	8.99	37.52	41.3
Ni	—	21.56	4.41	4.49	98.21	13.5
Mn	75.08	1 572.71	520.26	359.12	69.03	280
Fe	9 215.33	46 665.09	28 833.92	9 874.07	34.24	42 700

注:“—”表示未检出.

2.2 红壤茶园土壤重金属污染特征

研究区茶园红壤 pH 值均低于 5.5,因此本研究采用 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》中 pH 值低于 5.5 的标准选取风险筛选值,但由于该标准中仅对部分重金属划定风险筛选值,所以本研究仅对茶园土壤样本中 Pb、Zn、Cu、Cr、Ni 等 5 种重金属进行内梅罗污染指数评价. 如表 2 所

示,安溪县茶园红壤中 5 种重金属的单因素污染指数平均值呈现 Pb (0.69) > Zn (0.51) > Cu (0.17) > Cr (0.16) > Ni (0.08) 的分布特征,除 Pb 的单因素污染指数接近警戒值之外,其他重金属均处于安全水平. 如表 3 所示,内梅罗综合污染指数结果表明,安溪县茶园土壤重金属污染处于较低水平. 但是,有 4.4% 的样点土壤重金属处于警戒范围内,此外,分别有 2.2% 和 4.4% 的样点土壤重金属达到轻度污染和中度污染水平.

表 2 安溪茶园土壤重金属单因素污染指数

Table 2 Single factor pollution index of heavy metals in Anxi tea plantation soil

元素	最小值	最大值	平均值	污染程度
Pb	0.21	2.20	0.69	清洁(安全)
Zn	0.23	1.25	0.51	清洁(安全)
Cu	0.05	0.28	0.17	清洁(安全)
Cr	0.04	0.32	0.16	清洁(安全)
Ni	0.00	0.36	0.08	清洁(安全)

表 3 安溪县土壤重金属内梅罗综合污染指数占比

Table 3 Percentage of Nemerow composite pollution index of heavy metals in Anxi tea plantation soil

污染指数	$NPI \leq 0.7$	$0.7 < NPI \leq 1$	$1 < NPI \leq 2$	$2 < NPI \leq 3$	$NPI > 3$
污染程度	安全	警戒线	轻度污染	中度污染	重度污染
占比/%	88.9	4.4	2.2	4.4	0.0

基于地质累计指数的土壤重金属不同污染级别样点占比如表 4 所示. 各重金属元素  $I_{geo}$  值自上而下排序为  $Mn > Co > Pb > Zn > Fe > Cr > Cu > Ni$ . 具体而言, Cu、Cr 和 Fe 均呈现完全“无污染”状态. Pb、Zn、Co、Ni 和 Mn 均在茶园土壤中呈现出无污染到中度污染的特征,其中,Co 的污染状况相对严重,受污染的土壤样品占比达到 57.8%,其次是 Mn (37.8%)、Pb (31.1%) 和 Zn (17.8%),而 Ni 仅在个别样点中存在污染. 除此之外,茶园红壤中分别有 13.3%、4.5% 和 2.2% 的样点出现了中度的 Mn、Pb 和 Zn 污染,可能是受到较为频繁的人类活动的影响. Cu、Cr 和 Ni 的平均含量均低于背景值,表明在研究地茶园土壤中 Cu、Cr 和 Ni 不仅没有积累,甚至存在淋失的情况.

2.3 红壤茶园重金属来源分析

研究表明,金属间存在显著相关性且相关系数大于 0.6 则具有同源的可能性<sup>[21]</sup>. Spearman 相关分析结果显示,Zn、Cu、Co、Cr 和 Fe 五者之间均存在显著正相关,且 Zn 与 Co、Cr、Cu 与 Cr 以及 Fe 与 Cu、Co、Cr 的相关系数均大于 0.6,可能具有同源性(见图 2). 除此之外,Ni 与 Co、Cr、Mn 与 Zn、Cu、Co 之间也具有显著相关性,且 Mn、Zn 和 Co 之间的相关系数甚至高于 0.75,表明三者之间有较强的同源属性. 但 Pb 与其他重金属均不存在显著相关性.

基于 PMF 模型的运行原理,以 20 次作为模型的迭代运行次数,逐一调节因子个数(2~6),对比各项因子的模型运行结果发现,当因子数设置为 4 时, $Q_{lure}/Q_{robust}$  值均小于 1.5,8 种重金属的残差数值介于-3~3 之间且呈现正态分布,所有元素的总变量预测值与观测值之间的相关性( $r^2$ ) 均高于 0.85,表明设定 4 个

表 4 安溪县茶园土壤重金属地质累积指数特征

Table 4 Geological accumulation index of heavy metals in Anxi tea plantation soil

元素污染程度	无污染	无污染到中度污染	中度污染
Pb	64.4%	31.1%	4.5%
Zn	80.0%	17.8%	2.2%
Cu	100.0%	—	—
Co	42.2%	57.8%	—
Cr	100.0%	—	—
Ni	97.3%	2.7%	—
Mn	48.9%	37.8%	13.3%
Fe	100.0%	—	—

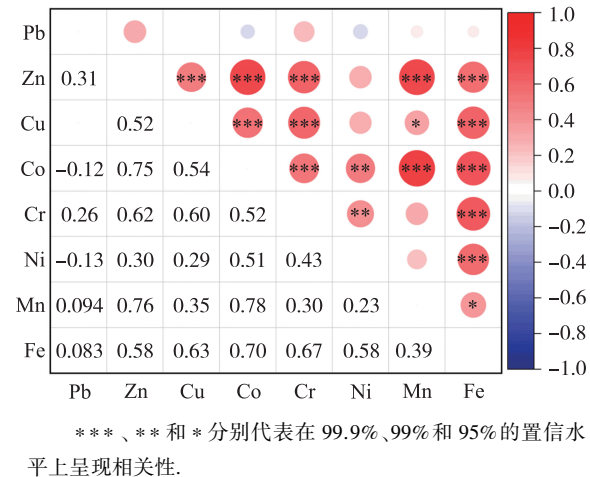


图 2 安溪茶园土壤重金属之间的相关性

Fig. 2 Correlation between heavy metals in soil of Anxi tea plantation

因子能使模型较好地解析茶园土壤重金属的来源<sup>[22]</sup>. 8 种重金属的污染源成分谱如图 3 所示.

因子 1 对 Pb 的贡献率最高, 达到 62.82%, 对 Zn 和 Cr 也分别有 33.04% 和 22.56% 的贡献. 据前文所述, 研究区红壤中 Pb 和 Zn 的平均含量分别超过土壤背景值 1.38 和 1.24 倍, 且均属于中等程度变异, 表明人为活动影响了土壤中 Pb 和 Zn 积累. 汽车尾气排放被认为是 Pb、Zn 的重要来源, 同时车辆的机械消耗、轮胎磨损以及润滑油等的使用也会产生大量 Pb、Zn 等重金属<sup>[23]</sup>, 这些重金属会随车辆运行释放至环境中, 并通过大气沉降、雨水冲刷等方式进入茶园土壤. 据实地调查得知, 茶园周边公路网密集, 分布有各级交通干道以便于茶叶运输, 且交通活动较为频繁. 此外, 本研究设置的采样点距离交通干道较近, 受交通活动的影响比较强烈. 因此, 推断因子 1 为交通源.

因子 2 的特征元素为 Mn 和 Co, 其贡献率分别为 74.01% 和 49.18%, Zn 也有接近 30% 的贡献率. 上述 3 个元素的平均含量均高于土壤背景值且变异系数超过 40%, 说明存在外界干扰. 已有研究表明, Mn 和 Zn 常伴生于铅锌矿中, 而 Co 多与 Mn 伴生存在, 在矿业加工过程中也会导致周围环境出现 Co 积累<sup>[24-26]</sup>. 安溪县矿产资源较为丰富, 矿物种类较多且开矿历史悠久, 且芦田镇、西坪镇等的地层中均有铅锌矿分布, 采矿过程中产生的大量携带重金属的扬尘经扩散迁移后会沉降于土壤表层, 经长期积累后会导致土壤出现 Mn、Zn 等污染. 因此, 推测因子 2 为矿业源.

因子 3 对 Cu、Cr、Fe 和 Co 有较大贡献, 分别为 51.67%、40.23%、40.02%、35.69%, 同时也对 Zn 有超过 20% 的贡献率. Cr 和 Cu 与基岩风化关系密切<sup>[27-28]</sup>, 加之本研究中 Cr 和 Cu 的平均含量远低于福建省土壤背景值且变异系数较低, 几乎未受人类活动干扰, 表明 Cr 和 Cu 的来源可能是成土母质, 在以往研究中也得出了类似结论<sup>[3]</sup>. Co 在闪长岩、正长岩等岩浆岩中有较多分布, 而安溪县地层则主要以闪长岩、正长岩、正长斑岩等为主, 岩层出露地表后经长期风化, 内部的 Co 元素会被释放进而进入土壤中积累. 红壤区高含量的 Fe 是在高温多雨的气候条件下, 土壤发生脱硅富铝铁化导致 Fe 相对富集, 而这一过程常发生于成土阶段<sup>[29]</sup>. 因此, 推测因子 3 为自然来源.

Ni 可作为因子 4 的标志性元素, 贡献率达到 82.21%, 其他元素也均有不同程度的贡献. 茶园红壤 Ni 的变异系数高达 98.21%, 空间分布不均匀, 可能受到人为活动的影响. Ni 通常存在于各类矿物中, 但也有研究表明以动物粪便制成的有机肥中存在明显的 Ni、Cu、Cr 和 Zn 超标<sup>[30]</sup>. 此外, 以往大量使用的无机农药中也含有大量重金属, 例如过磷酸钙类农药中含有较高浓度的 Co、Cu、Zn 等元素, 而 Fe、Zn、Ni 等也常用于各类除草剂中<sup>[25,31]</sup>. 因此, 推断因子 4 为农业源.

茶园红壤重金属 4 种污染源的贡献率如图 4 所示. 就单一污染源而言, 自然源对土壤重金属积累的贡献最高 (27.76%), 但是以交通源 (21.89%)、矿业源 (25.82%) 和农业源 (24.52%) 为代表的人类活动对茶园红壤重金属积累的影响远高于自然成土过程.

### 3 结论

(1) 研究区红壤中 Pb、Zn、Co 和 Mn 平均含量分别超过福建省土壤背景值的 1.38、1.24、1.50 和 1.86 倍, 其他元素整体不存在超标现象.

(2) 研究区土壤重金属污染程度较轻, 除少数样点的 Pb、Zn、Mn 存在中度污染之外, 其他重金属基本

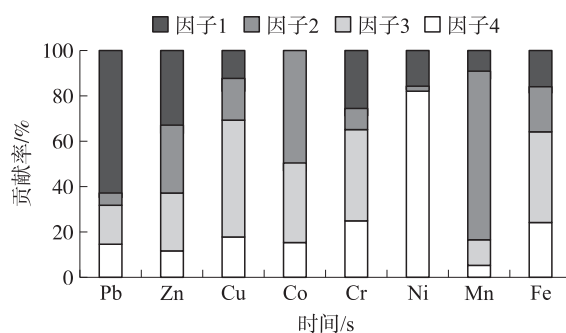


图 3 污染源因子贡献图

Fig. 3 Contribution map of pollution source factors

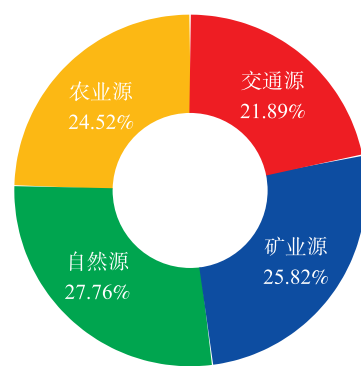


图 4 重金属污染源的贡献率

Fig. 4 Contribution of different sources of heavy metal pollution

属于无污染或轻度污染。

(3)PMF 模型结果显示茶园红壤重金属来自 4 种污染源,即交通源、矿业源、自然源和农业源,贡献率分别为 21.89%、25.82%、27.76%、24.52%,人为活动对重金属积累的贡献高于自然来源。

### [参考文献] (References)

- [1] JU Y W, LUO Z W, BI J, et al. Transfer of heavy metals from soil to tea and the potential human health risk in a regional high geochemical background area in southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168122.
- [2] TAO C J, SONG Y X, CHEN Z, et al. Geological load and health risk of heavy metals uptake by tea from soil: What are the significant influencing factors? [J]. *CATENA*, 2021, 204: 105419.
- [3] ZHANG W H, YAN Y, YU R L, et al. The sources-specific health risk assessment combined with APCS/MLR model for heavy metals in tea garden soils from south Fujian Province, China[J]. *CATENA*, 2021, 203: 105306.
- [4] 崔莹莹, 周波, 陈义勇, 等. 广东茶区土壤肥力时空变化分析与综合评价[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(1): 85–95.
- [5] 唐俊贤, 王培娟, 俄有浩, 等. 中国大陆茶树种植气候适宜性区划[J]. *应用气象学报*, 2021, 32(4): 397–407.
- [6] 梅宇, 梁晓. 2021 年中国茶叶生产与内销形势分析[J]. *中国茶叶*, 2022, 44(4): 17–22.
- [7] HU C L, ZHANG X Y, ZHAN N, et al. Current status and health risk assessment of heavy metals contamination in tea across China[J]. *TOXICS*, 2023, 11(8): 662.
- [8] 吴林土, 高娜, 朱有为, 等. 茶树铅的吸收积累特征与茶园铅污染防控[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(8): 1664–1669.
- [9] 周国华, 曾道明, 贺灵, 等. 福建铁观音茶园生态地球化学特征[J]. *中国地质*, 2015, 42(6): 2008–2018.
- [10] 弓秋丽, 杨剑洲, 王振亮, 等. 海南省琼中县土壤-茶树中重金属的迁移特征及饮茶健康风险[J]. *物探与化探*, 2023, 47(3): 826–834.
- [11] 孙建蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 铁观音茶园土壤-茶树体系中重金属的生物有效性[J]. *环境化学*, 2020, 39(10): 2765–2776.
- [12] 莫晓丽, 黄亚辉. 茶树主要逆境胁迫反应及其适应逆境的生理机制[J]. *茶叶学报*, 2021, 62(4): 185–190.
- [13] WU X L, ZHANG D, WANG F, et al. Risk assessment of metal(loid)s in tea from seven producing provinces in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 159140.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 方凤满, 武慧君, 姚有如, 等. 鸟粪对同里湿地公园土壤重金属及其形态的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2925–2933.
- [16] 邓家逸, 余东, 吴昊, 等. 广西某铜冶炼场地土壤污染特征及源解析[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(11): 290–299.
- [17] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 1992, 13(4): 70–75.
- [18] SHARMA S, MINAKSHI, KAUR I, et al. Spatiotemporal assessment of potentially toxic elements in sediments and roadside soil samples and associated ecological risk in Ropar wetland and its environs[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(9): 635.
- [19] PAATERO P, TAPPER U. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, 5(2): 111–126.
- [20] 夏建东, 龙锦云, 高亚萍, 等. 巢湖沉积物重金属污染生态风险评价及来源解析[J]. *地球与环境*, 2020, 48(2): 220–227.
- [21] HUANG J L, WU Y Y, SUN J X, et al. Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with positive matrix factorization model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 415: 125629.
- [22] LIU P, WU Q M, WANG X K, et al. Spatiotemporal variation and sources of soil heavy metals along the lower reaches of Yangtze River, China[J]. *Chemosphere*, 2022, 291: 132768.
- [23] MEN C, LIU R M, XU L B, et al. Source-specific ecological risk analysis and critical source identification of heavy metals in road dust in Beijing, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 121763.
- [24] LIU X L, GAO W H, WEI T, et al. Distribution and source of heavy metals in Tibetan Plateau topsoil: New insight into the influence of long-range transported sources to the surrounding glaciers[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 346: 123498.
- [25] 付蓉洁, 辛存林, 于爽, 等. 石期河西南子流域地下水重金属来源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 796–806.
- [26] 刘楠, 唐莹影, 陈盟, 等. 基于 APCS-MLR 和 PMF 的铅锌矿流域土壤重金属来源解析[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(3):

1267-1276.

- [27] LI Y L, LI P Y, LIU L N. Source identification and potential ecological risk assessment of heavy metals in the topsoil of the Weining Plain(Northwest China)[J]. *Exposure and Health*, 2022, 14(2): 281-294.
- [28] 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 等. 阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4545-4555.
- [29] 程金, 张思文, 黄文卿, 等. 福建省耕地土壤 pH 空间分布及影响因素分析[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(12): 90-101.
- [30] 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 等. 张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(6): 3544-3561.
- [31] 冯韶华, 俞一帆, 张旭峰, 等. 中国农田土壤重金属污染源解析研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(9): 1300-1306.

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 21 页)

- [16] 吴利兰, 荆朝霞, 吴青华, 等. 基于 Stackelberg 博弈模型的综合能源系统均衡交互策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 142-150.
- [17] WANG X W, LI L Y, LI J D, et al. Traffic-aware multiple association in ultradense networks: A state-based potential game[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 4356-4367.
- [18] 曾君, 王侨侨, 刘俊峰, 等. 一种基于势博弈的微电网分布式运行优化算法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(24): 7195-7204.
- [19] BHATTI A B, BROADWATER R. Distributed nash equilibrium seeking for a dynamic micro-grid energy trading game with non-quadratic payoffs[J]. *Energy*, 2020, 202, 117709.
- [20] RAD M H A, WONG S W V, JATSKEVICH J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(3): 320-331.

[责任编辑: 陈 庆]