陈伟胜,石 晴,张智珂,等.土壤重金属源汇定量解析与风险可持续管控 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1444-1459.
Chen W S, Shi Q, Zhang Z K, et al. Quantitative analysis of source-sink and sustainable risk control for heavy metals in soil [J]. China Enviromental Science, 2026,46(3):1444-1459.

土壤重金属源汇定量解析与风险可持续管控

陈伟胜[1],石 晴[1],张智珂[1],刘瑞平[3*],张 健[5],宋易南[6],张婧卓[7],杨 洋[4],张 昊[4],赵 彬[2*] (1.华北水利水电大学,河南 郑州 450046；2.广东省科学院生态环境与土壤研究所,广东 广州 510650；3.生态环境部环境规划院,土壤污染防治与安全全国重点实验室,北京 100041；4.生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心,北京 100012；5.生态环境部环境工程评估中心,北京 100041；6.中国石油集团安全环保技术研究院有限公司,北京 102206；7.广东省生态环境监测中心,广东 广州 518049)

摘要：针对当前土壤重金属源头防控技术存在精准性与系统性不足等问题,研究了国内外土壤重金属源汇定量解析方法,分析其历史沿革、类型特征、基础原理及优劣势,揭示其在源头识别和通量解析中的角色及内在关联.结果表明,经过数 10a 探索迭代,以数理统计、受体数学模型、物理化学特征指纹为代表的源解析已成为土壤重金属源头阻控的基础,但随着土壤污染防治理念由传统调查修复向源汇可持续风险管理转变,通量精准核算对管控成效的重要性日益凸显.鉴于此,本文提出一套针对“源-汇-端”“三位一体”风险管控体系:以科学“源”诊断为基础,以通量“汇”干预为核心,以受体“端”验证为保障,践行“预防为主、修复为辅”理念,推动粮食安全与土壤资源永续利用.

关键词：土壤；重金属；源汇解析；可持续性；风险管控
中图分类号：X53 **文献标识码**：A **文献编号**：1000-6923(2026)03-1444-16

Quantitative analysis of source-sink and sustainable risk control for heavy metals in soil. CHEN Wei-sheng[1], SHI Qing[1], ZHANG Zhi-ke[1], LIU Rui-ping[3*], ZHANG Jian[5], SONG Yi-nan[6], ZHANG Jing-zhuo[7], YANG Yang[4], ZHANG Hao[4], ZHAO Bin[2*] (1.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China；2.Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China；3.State Key Laboratory of Soil Pollution Control and Safety, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100041, China；4.Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China；5.Appraisal Center for Environment & Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100041, China；6.CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology, Beijing 102206, China；7.Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Centre, Guangzhou 518049, China). *China Enviromental Science*, 2026,46(3)：1444~1459

Abstract：The source prevention and control technologies for heavy metals in soil at that time were plagued by problems such as insufficient precision and systematicness. This quantitative analysis methods of soil heavy metal sources and sinks at home and abroad were studied in this paper. Their historical evolution, type characteristics, basic principles, advantages and disadvantages were analyzed, and their roles and intrinsic correlations in source identification and flux analysis were revealed. The results show, after decades of exploration and iteration, source apportionment represented by mathematical statistics, receptor mathematical models, and physicochemical characteristic fingerprints had become the foundation for controlling the sources of heavy metals in soil. However, as the concept of soil pollution prevention and control shifted from traditional investigation and remediation to sustainable risk management of sources and sinks, the importance of precise flux calculation for control effectiveness had become increasingly prominent. In view of this, a "source-sink-end" "three-in-one" risk control system was proposed in this paper: based on scientific "source" identification, centered on flux "sink" characterization, and guaranteed by receptor "end" verification, this system was designed to practice the concept of "prevention first, remediation second", and to promote food security and the sustainable utilization of soil resources.

Key words：soil；heavy metal；quantitative source-sink analysis；sustainability；risk control

收稿日期：2025-08-12
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3700805);国家自然科学基金资助项目(42307021);广东省基础与应用基础研究基金广东省自然科学基金资助面上项目(2024A1515010733);广东省科学院发展专项资金资助项目(2022GDASZH-2022010105)
* 责任作者：赵彬, 副研究员, bzhao@soil.gd.cn; 刘瑞平, 工程师, liurp@caep.org.cn

联合国粮农组织(FAO)发布的《世界土壤资源状况》报告指出,土壤条件恶化的情况已超过其改善的情况,并已严重威胁到土壤安全[1-3].全世界每年排放到环境中的重金属高达数 10 万 t[4],其不可降解与累积性导致土壤生态系统功能急剧退化[5],对作物植被生长及人体健康造成严重影响[6-8].为量化这一动态过程,引入“土壤重金属通量”概念并将其定义为单位时间内通过单位面积土壤界面的重金属质量[9-10].土壤重金属源头控制是高效预防和节约成本的关键策略,其成本投入仅为风险管控和治理修复的 1/10 和 1/100[11].近年来,该领域的研究范式已逐步由传统的静态“浓度评估”转向动态的“过程与通量”,并呈现出多技术融合的发展趋势[12-13],特别是在人工智能、机器学习等前沿技术的推动下,土壤重金属通量的监测与模拟精度显著提升[14].目前,国内外土壤重金属污染防治正转向从源头控制风险的可持续新模式.我国从《土壤污染防治行动计划》(2016)到《土壤污染防治法》(2019)再到《土壤污染源头防控行动计划》(2024),政策思路逐渐从“污染修复”转变为“污染管控”,强调污染预防和风险管控.从国际层面上看,发达国家的政策也从原始的“补救管理”逐步转变为“风险控制”[15-16];近年来欧洲出现了许多关于土壤管理政策分析的研究,且加拿大、英国与美国均将绿色修复框架纳入本国环境治理体系,旨在通过技术集成与政策引导,推动修复过程的低碳化与资源循环利用,而强化环境可持续发展能力[17-18].为系统评估源解析与通量研究的发展深度、为后续构建融合性技术体系奠定基础,尽管土壤源汇技术历经长期发展已趋于成熟.然而该成套技术迈向大规模实际应用仍面临精准性不足、动态追踪性难等诸多挑战,且我国土壤重金属源汇定量解析研究大多仅以定性或半定量的传统多元统计方法和受体模型为主,不同方法所得结果之间存在较大差异[19].而源解析工作大多局限于污染调查、统计分析、模型模拟方面的基础研究或小型场地示范,难以与其他污染防控技术相融合,从而阻碍了基于源汇定量解析的污染风险防控技术体系的发展和应用.在此背景下,贯彻落实可持续发展理念、实现土壤重金属污染源头防治的总体目标,亟需依托源汇定量解析理论与技术,对污染来源及其贡献量进行精确识别与通量评估.鉴于此,本文分析了以源解析和通量核算为代表的源汇研究技术特征,在回顾国内外源解析与通量研究的基础上,对比分析了现有的源解析与通量的技术特征,进一步阐明了源汇定量解析技术在土壤重金属污染风险防控中的专业角色和特殊贡献,为土壤重金属风险管控的实施构建一套完整的技术体系,为土壤重金属治理能效提升及土壤污染风险防控提供参考.

1　研究方法

聚焦于 Web of Science 核心合集数据库不同国家/地区的近 10 年的相关文献,采用由宽至窄、分主题与融合检索相结合的策略进行了系统性检索.中国近 10a 有关土壤重金属通量与源解析的发文量,检索关键词为“Soil”and“Heavy metal”and“Flux”和“Soil”and“Heavy metal”and“Source resolution”其中,中国关于源解析和通量主题相关文献的发布分别达到 11316 篇和 1226 篇,数据检索于 2025 年年中.

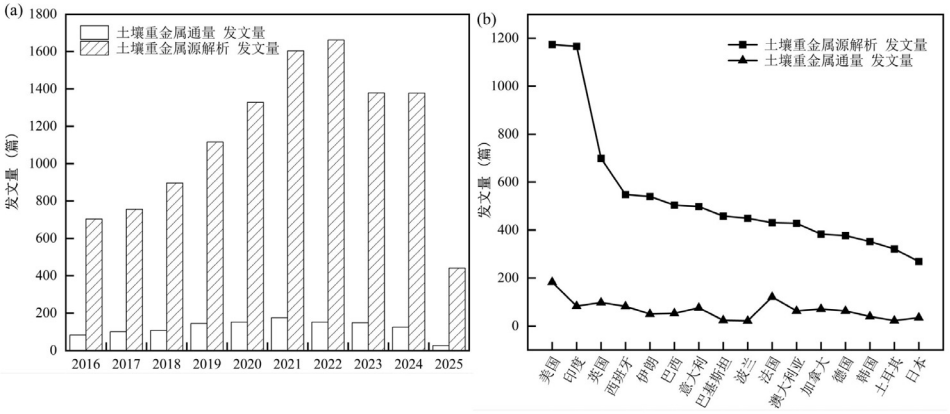


图 1　近 10a 土壤重金属污染源汇解析主题相关学术论文统计量

Fig.1　Statistics of academic publications related to the source apportionment and flux assessment of heavy metals in soil over the past decades

如图 1(a)所示,相比于源解析研究的科技论文发文量,通量的发文量仅占其约 6%~15%,两者之间存在时间和数量的非平衡发展结果,可能是由于源解析技术发展相对早于通量且受限于早期科技水平落后等原因.尽管 2022 年后源解析主题文献发文量有所下降,但仍保持每年 1400 篇以上发表在科技期刊.图 1(b)则反映出美国、印度、英国是源解析相关研究发文量最多的 3 个国家,反映其在土壤重金属污染源解析和通量研究领域的活跃度及前沿技术水平.

2 土壤重金属源解析技术

2.1 常规源解析

土壤中重金属的来源可分为自然源和人为源.工矿活动、交通运输、污水灌溉等人为活动是土壤重金属污染的关键成因[20].如表 1 所示,土壤中污染物溯源方法可分为源识别法与源解析法,二者通常以定位源头和量化贡献,定性、定量追踪污染源的位置和比例.其中:源识别法属于传统的多元统计法,是通过研究变量间的关系建立模型从而定性判断不同重金属的来源.此方法基于重金属的相似分布特征并依赖于大量的样品采集[19].例如,Zeng 等[21]结合主成分分析和聚类分析,发现土壤中铬(Cr)、镍(Ni)、锌(Zn)的富集源自当地生产生活活动,铜(Cu)主要来自大气沉降,而砷(As)和铅(Pb)的积累则与农业活动与运输密切相关.马杰等[22]利用绝对因子分析/多元线性回归模型对重庆市煤矸山周边土壤进行来源解析,结果表明贡献最大的矿业源污染占土壤污染总通量的 37.1%.源解析法是基于源清单和受体模型定量计算各污染源贡献的方法,其包含源清单法、扩散模型法和受体模型法.源清单法是通过调查记录,获取各类污染源的排放因子与排放水平,从而估算污染源排放量的技术方法[19],例如,针对浙江和湖南地区的源清单调查显示,土壤重金属的主要输入途径为大气沉降和畜禽粪便,输出途径则以作物收割和淋滤为主[23].曾有研究使用 Zn 同位素追踪沿海地区的人为来源,将这些同位素特征与铁矿石的同位素特征进行了比较,成功区分了矿山尾矿、城市污水和天然岩石风化等多种来源[24].扩散模型法又称源模型法,是以污染源为研究对象,通过不同尺度数值模拟定量描述各类大气成分从源到受体的一系列物理化学过程[25-26].该法不局限于观测点位,并能较准确地分析得到不同地区的分担率,具体模型对比可参考表 2.受体模型是以研究区为研究对象,通过分析受体的化学和物理特征,利用数学方法定量解析各污染源对空气中颗粒物的贡献[25,27].刘鑫等[28]通过主成分分析和正定因子矩阵分解法,成功识别出滇西北地区土壤有机质的五大污染源,分别为工业源、农业源、生活源、自然源和交通源,其中 Pb 被确定为该区域的高风险元素,其非致癌健康风险评价结果显示,Pb 暴露对成年男性、成年女性及儿童群体的健康风险贡献率分别达到 53.76%、57.90%和 68.09%.Wu 等[29]改进了产品市场契合度模型(PMF)的不确定性分析方法,首次将土壤理化性质作为辅助变量纳入模型,揭示了天津农业土壤的主要人为来源为灌溉、大气沉降和污泥回用,分别占来源总量的 26.60%、19.56%和 2.86%.作为美国环境保护署(USEPA)推荐的经典受体模型,化学质量平衡法(CMB)最初主要应用于大气 PM_{10}/$PM_{2.5}$ 和挥发性有机物的来源解析,且近些年来也被广泛应用于河流沉积物中多环芳烃等污染物和土壤重金属的来源解析[30-31].Shi 等[32]利用该模型研究了城区和郊区道路灰尘中多种潜在有毒金属的污染水平、空间分布特征,并重点评估了这些金属通过手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触 3 种途径对儿童和成人造成的健康风险.总之,通过分析受体的化学和物理特征,利用数学方法定量解析各污染源对空气中污染物的贡献,是目前污染物源解析研究中最常见的技术手段[27, 33].然而我国在土壤重金属来源解析方面的研究起步相对较晚,现有研究主要集中在土壤污染物的定性识别与定量分析层面,而对污染源的精准溯源、贡献率评估及迁移转化机制的深入探究仍显不足,导致目前难以基于源解析结果制定科学、长效的污染治理策略,更难以从可持续发展视角构建土壤重金属污染管控体系.因此,未来研究需加强多源数据融合与模型优化,以提升源解析精度,并结合区域环境特征提出具有可操作性的长期治理方案,从而推动土壤重金属污染的风险管控与可持续发展[34].

2.2 新兴技术方法

目前,随着人工智能的发展,土壤源解析技术也得到不断拓展,包括基于机器学习理论的随机森林(RF)、条件推断树(CIT)、扫描核探针技术(SNM)与人工神经网络模式(ANN)在内的新型技术,在污染源识别方面都表现出了显著优势[35].

RF 是一种基于统计学理论的数据挖掘方法,能在不显著增加运算量的前提下提高预测精度,并估算各环境变量的重要性系数,从而识别影响重金属含量的主要因素[36];例如,宋志廷等[37]利用 RF 对天津市武清区 578 个表层土壤样品的 8 种重金属进行分析,发现除 Cr 以外,研究区其余重金属的平均含量均高于区域背景值.CIT 是通过二元递归分裂建立自变量和重金属浓度的回归关系,并基于统计检验选择关键自变量和分裂点;相关研究如 CIT 和有限混合物分布模型(FMDM)发现了中国珠三角地表土壤的重金属来源,并分配了自然背景和人类活动的贡献,且 CIT 和 FMDM 结果一致表明,珠三角地表层土壤中的镉(Cd)、Zn、Cu、Pb 和 Cr 主要由人为来源贡献,而表层土壤中的 As、Ni 和汞(Hg)主要来源于土壤母质[38].相较于 RF,CIT 模型更易于解释距矿区距离、高程等关键驱动因子.

SNM 与 ANN 为气溶胶源识别提供了新思路.该方法以单个气溶胶颗粒物化学表征为基础,用高分辨、高灵敏的扫描核探针测定单个气溶胶粒子的元素谱特征,并基于误差反向传输神经网络算法,构建人工神经网络识别系统,直接解析粒子来源并计算贡献率[39].在空间预测方面,Wong 等[40]提出的 4DGISHM 模型结合 SHAP(Shapley Additive Explanations)并行集成 AI 算法,实现了土壤 Cd 污染的时空动态模拟,为精准预测和管控土壤污染提供了新工具.赵萍等[41]提出遗传算法(GA)优化 BP 神经网络的复合模型(BPNN),通过数据扩增解决了小样本问题,并结合地理坐标与高程数据预测了安徽池州矿区土壤 pH 值及 Cd、Pb、Cr 等 7 种重金属的空间分布.结果显示,GABP 模型的 R^2 和均方根误差优于传统的反距离权重法(IDW)和 BPNN 方法,且解决了边界插值负值问题.此外,人工智能技术也在优化计算效率方面取得显著进展,Elissar 等[42]开发了一种高效的贝叶斯框架用于空气污染源识别,结合深度学习近似 Wasserstein(W2)距离,在保持污染源解析精度的同时,可将计算成本降低至少 3 倍,不仅提升了污染源解析的精度和效率,也为环境科学决策提供了依据.

2.3　技术特征对比分析

从技术类别、历史渊源、理论基础与优劣势方面总结分析了土壤重金属污染源头解析技术的方法特征,结果如表 1 所示.

表 1　源解析方法对比分析

Table 1　Technical comparison of source apportionment approaches

	方式	定性/定量	历史起源	基础理论	优点	局限性	参考文献
源识别法	因子分析法(FA)	定性	最早应用于心理学研究,后逐渐延伸进自然科学领域,近年国内也有将其应用于地面积灰中污染物的源解析研究	多元统计学	有效去除数据中的冗余信息,降低数据维度,且能处理多变量问题	适用场景有限,假设条件严格,解释性弱于主成分分析,且结果直观性不足并对数据质量要求高,影响了分析准确性	[25,43−45]
	主成分分析法(PCA)	定性	可追溯至 1901 年,由卡尔·皮尔逊提出	最大方差理论;特征值分解	所需指标更少,避免了指标之间共线性对结果的影响,能够使复杂的环境特征归结为简单的环境过程,并归纳出原始的环境特征	非线性数据处理能力有限,且降维过程易失真	[46]
	聚类分析法(CA)	定性	起源于分类学	数据点之间的相似性和距离度量	方法更直观,无需确定分类数量就能体现土壤元素间的相聚与分散特征	计算量大,准确度较低	[47−48]
	特征比值法	定性	/	比值定义法	精确度高	普适性不足	[49−50]
源清单法	投入品分析法	定量	/	/	对污染源的输入情况有着准确认识,过程简单、结果清晰	过度依赖于污染源数据、排放量统计与排放因子,且计算复杂、人力成本高,都会影响最终分析结果的可靠性	[51]
	同位素比值法	定量	可追溯于 20 世纪 60 年代,主要用于测量地壳物质中稳定同位素含量和比值	同位素质量守恒原理	精准区分各污染源贡献情况,有关 Pb 元素的应用非常成熟	预处理成本高,仅能针对特定同位素分析导致通用性不足	[52−54]
扩散模型法	扩散模型法(具体方法见表 2)	定量	可追溯到物理学中的扩散过程理论,特别是热力学中的扩散现象	概率论	有效区分本地与外来的污染排放源,并可适用于不同的范围尺度	难以确定污染源与土壤受体关系	[51]

续表 1

	方式	定性/定量	历史起源	基础理论	优点	局限性	参考文献
受体模型法	正定矩阵因子分析模型(PMF)	定量	由 PAATERO 等人于 1993 年开发,在应用中不断完善,现已成为 USEPA 推荐方法	矩阵分解;最小二乘法	可在源未知的情况下使用,且能在求解的过程中避免分解所产生负值,使分析结果更具现实意义	缺少可靠的因子数目判定方式,需要反复运行迭代过程来确定最小 Q 值和尽量小的残差值	[55−57]
	绝对因子分析/多元线性回归法(APCS−MLR)	定量	最早可追溯到 1985 年,由 Thurston 和 Spengler 首次提出,该模型最初为了解大气污染物来源解析问题	多元线性回归分析	适用于多种污染源解析与大规模数据处理,且能处理复杂的污染源问题	模型较为复杂,非线性关系可能不适用,适用范围受到特定环境和数据类型的限制,且过度依赖输入数据的准确性和完整性	[58−60]
	UNMIX	定量	Unmix 模型是 Henry 在 PCA 的基础上开发的受体模型,目前在国内使用较少	多元统计学;线性代数	分析过程迅速、结果相对准确,无需确定污染源个数和成分等信息,并在一定程度上可规避负值带来的影响	对不确定性参数的取值方法不同,结果可能存在差异	[61−62]
	CMB	定量	可追溯于 20 世纪 70 年代,由 Miller 在 1972 年提出,最初被称为化学元素平衡法,是国内外应用最广泛的受体模型	质量守恒定律	从一个土壤样品中就可得出结论,算法简单易懂,能清楚识别假定源和污染物关系并检验遗漏源	对共线源的解析效果不佳且污染源选择时依靠主观性较强	[63]

注:“/”代表此项内容不相关或暂无准确信息.

3 土壤重金属通量评估原理与技术

3.1 重金属传输途径

重金属主要通过灌溉水、化肥施用、大气沉降等途径输入土壤;通过地表径流、地下水渗流、农作物收割等方式输出土壤[64].大气沉降、灌溉水[65]及化肥施用是农业和城市生态系统中 3 种主要的人为外源重金属输入途径,其通量的精确估算对于评估生态风险及制定污染防控策略至关重要[66].而大气沉降又分为干、湿两种形式,干沉降是指大气中的颗粒物在重力或与其他物体碰撞后发生沉降,湿沉降是指通过降雨、降雪等方式使颗粒物从大气中去除的过程[67].

表 2 大气沉降模型方法及特征对比

Table 2 Technical comparison of atmospheric deposition models

代别	方法	一般描述及特点	局限性	主要模块原理	输入参数	主要用途
一代	高斯扩散模型	提供一种全新的数据生成方法,解决现有生成模型在数据生成质量、多样性和可控性方面的局限	模型过于理想化,适用范围有限	基于高斯分布概率密度函数建立,运用了概率论、统计学等	污染物单位时间排放量·排气筒有效高度·排气筒出口处平均风速·水平方向的坐标·垂直方向的坐标·水平和垂直方向的扩散参数	大气污染预测和环保领域;评估不同排放源对环境的影响;优化污染源位置和排放量
	CALPUFF	结合拉格朗日和欧拉方法,能处理复杂地形和气象条件,适用于长距离传输模拟	化学机制简单,计算资源消耗大,耗时长且模型精度严重依赖于输入气象数据的空间密度	烟团释放、运动、扩散·化学转化·干湿沉降·地形影响	气象数据·污染源数据·地形数据·化学转化参数·沉降参数·模型参数	适用于中尺度(几十到几百公里)和非稳态条件
二代	欧拉网格模型	能够处理复杂的物理化学过程并模拟大尺度迁移趋势,便于与地理信息系统结合进行空间分析	对土壤异质性表征不足,界面扩散易导致污染源边界模糊,且计算成本偏高	多相流模型·界面捕捉技术·网格自适应技术·边界条件处理	网格尺寸·欧拉域定义·材料本构模型·初始条件·边界条件·控制参数	用于模拟重金属在土壤中的迁移过程,即重金属在梯度浓度作用下的迁移转化规律
三代	WRF−Chem	提供灵活、可扩展的气象模拟平台,适用于研究目的和实际天气预报	计算资源要求高,模拟时间长,成本昂贵,模拟结果依赖数据且造成结果不确定性因素多	大气动力学模拟·化学反应模拟·大气颗粒物模拟·辐射传输模拟	初始场和边界条件·气象要素参数·化学机制·化学物种初始浓度·气溶胶种类和浓度·气溶胶源项参数·排放源类型·排放数据前处理·时间步长和模拟时长·辐射传输参数	空气质量预报和评估;大气化学研究;气候变化研究;污染源解析
	CMAQ	模拟大气污染物浓度和空气质量,处理复杂空气污染状况	依赖数据的准确性,对计算资源的消耗大,且预处理步骤繁多,对某些过程的模拟有局限性	气象模型·化学机制模型·排放模型·传输模型·多尺度模拟	气象场数据·污染源排放清单·化学机制·初始条件和边界条件	预测空气质量;帮助政策评估;气候变化研究;污染物溯源;模型模拟验证

注:CMAQ是美国环保署开发的第三代空气质量模型;WRF−Chem是由气象场模块(WRF)和化学模块(Chem)在线完全耦合的新一代的区域空气质量模式;CALPUFF是一种非稳态拉格朗日高斯烟团模型;AERMOD模型是由美国国家环境保护局与美国气象学会组建的法规模式改善委员会在工业复合源模型框架的基础上开发的高斯稳态扩散模型.

大气沉降物中的重金属对土壤环境的影响不容忽视[68],大量实际观测和模拟实验结果表明,大气沉降是农田土壤重金属的主要来源,对重金属输入的贡献在 25%~85%之间变化[69].近几十年来,为研究大气沉降通量,研究学者通过空气质量模型分析,具体考虑了大气中不同物质、不同相态之间的相互转换和影响,更加客观真实地模拟污染物的转化和迁移过程.如表 2 所示,经过半个世纪的开发拓展已形成三代不同的空气质量模型:第一代高斯扩散模型适用于短距离模拟,计算简单快捷且经过了长期验证更具有可靠性[70-73],代表模型有高斯扩散模型、CALPUFF 系列等;利用 CALPUFF 模型模拟珠江三角洲中部地区的 Hg 浓度和沉积的结果表明,水泥生产是导致 Hg 沉降的最大贡献者,占比 13.0%,其次是燃煤电厂、有色金属冶炼、钢铁制造和城市生活垃圾焚烧,分别占比 6.5%、5.4%、3.5%和 3.4%[74].第二代欧拉网格模型拓展了远距离传输研究,弥补了第一代模型适用范围小的不足[75],有研究利用一维数值模型模拟了土壤冲洗修复过程中乙二胺四乙酸(EDTA)螯合 Pb 的动态过程,该模型同时求解了水流和传输方程,并考虑了螯合剂的化学性质以及重金属与不同土壤组分结合的特性[76].第三代综合模型能更精确的模拟传输中的复杂物理过程[33],代表模型有 CMAQ、WRF−Chem 等;利用 WRF−Chem 模型结合通量调整地表数据同化系统(FASDAS),对比分析纯气象、无同化化学及化学同化 3 种情景,结果表明 FASDAS 显著提高了模型在检索气象变量方面的性能,其数据同化对提升剧烈火山喷发期间的空气质量预测能力具有重要价值[77].模型比较上,CALPUFF 在距离 20km 以上范围的预测优于一代模型,而 CMAQ 对二次污染物的模拟效果更精准但计算成本偏高[78].

厘清大气重金属通过干、湿沉降向土壤的输入通量,是精准评估人类活动对区域生态环境影响的关键环节.CMAQ 模型作为研究大气重金属干湿沉降的重要工具,通过不断完善排放清单、改进模型参数化并结合多尺度观测数据,更准确地预测重金属在不同环境介质中的传输和归趋,为制定有效的污染控制策略提供科学依据[79].CAMx 模型已被用于评估大气中 Hg 的化学反应和沉降,对于公共健康领域中 Hg 的来源归属问题具有重要意义[80].同时,气象条件特别是降水量,直接调控湿沉降通量的时空分布[81].降水量大的时期和地区,通过降雨、降雪冲刷大气中颗粒物和其余气态污染物所带来的重金属湿沉降通量也更大[82-83].也有研究表明,尽管某站点降水中的金属元素浓度在旱季高于雨季,但由于雨季降水总量显著增加,其湿沉降通量仍表现为雨季高于旱季[84].

不同输入途径对土壤重金属的贡献存在显著差异.如图 2 所示,基于通量相关文献的数据挖掘与统计分析发现,大气沉降、灌溉水和化肥施用 3 种途径的重金属输入通量大小通常呈现 Zn>Pb>Cu>Cr>As>Ni>Cd>Hg 的规律,从输入途径分析,大气沉降是重金属输入土壤的首要途径,占总输入通量的 25%~85%,平均贡献率达 72.3%.该结果与多个研究结论相符[69,85-86];以湖南省为例,大气沉降输入的重金属占总输入通量的 51.21%~94.74%,显著高于肥料和灌溉水途径[87].具体而言,大气沉降和灌溉水途径的输入元素以 Zn 为主,其在图 2 统计的 3 种输入途径的众元素中占比 40%~60%,而化肥途径以元素 Cu 为主,占比 36.6%.然而,由于不同文献的实验设计存在差异、不同研究者对同一数据的提取标准不一致以及早期研究技术落后等因素,可能导致图 2 分析结果存在某种不确定性,建议采用 PRISMA 声明或 Newcastle−Ottawa 量表评估文献质量,并基于 GitHub、OSF(Open Science Framework)等平台公开的原始数据进行标准化分析以减少误差.与此同时,不同输入途径对土壤重金属的贡献具有特异性:工业区 34km 范围内的土壤中,大气沉降贡献了 43.18%的 Cd、80.76%的 Cu 和 97.75%的 Pb 的输入[88];法国 Dunkerque 工业区的冶金粉尘沉降导致表层土壤中 Cr、Ni、钼(Mo)占工业源重金属输入的 60%以上[89];也有研究表明,灌溉水在某些区域可贡献 60%~71%的 As、Cd、Cu 和 Hg,其 Cd 年输入通量达 0.90~1.35mg/(m^2·a)[88,90];同时,农业投入品也是重金属输入的重要来源之一,瑞士一项研究发现,矿物磷酸盐肥料和粪肥分别导致 0.49~0.57g/(hm^2·a)和 0.20~0.91g/(hm^2·a)的 Cd 输入土壤[91].此外,也有不少研究表明河流污染是重金属输入的主要影响因子,占比 96.22%[92];而交通源、畜禽粪便及工矿活动等途径也是土壤重金属的重要贡献源.譬如黄石市区的交通频繁区域 Pb 和 Zn

的贡献源或大于 40%[93].为此,我国生态环境部制定了《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)和《农田灌溉水质标准》以规范人为活动导致的重金属输入.目前通量核算主要基于灌溉水量、农药化肥施用量及其重金属含量进行估算,但不同农资产品的元素差异仍需更为系统的研究.表 3 整理了 3 种输入途径的计算公式以供参考.

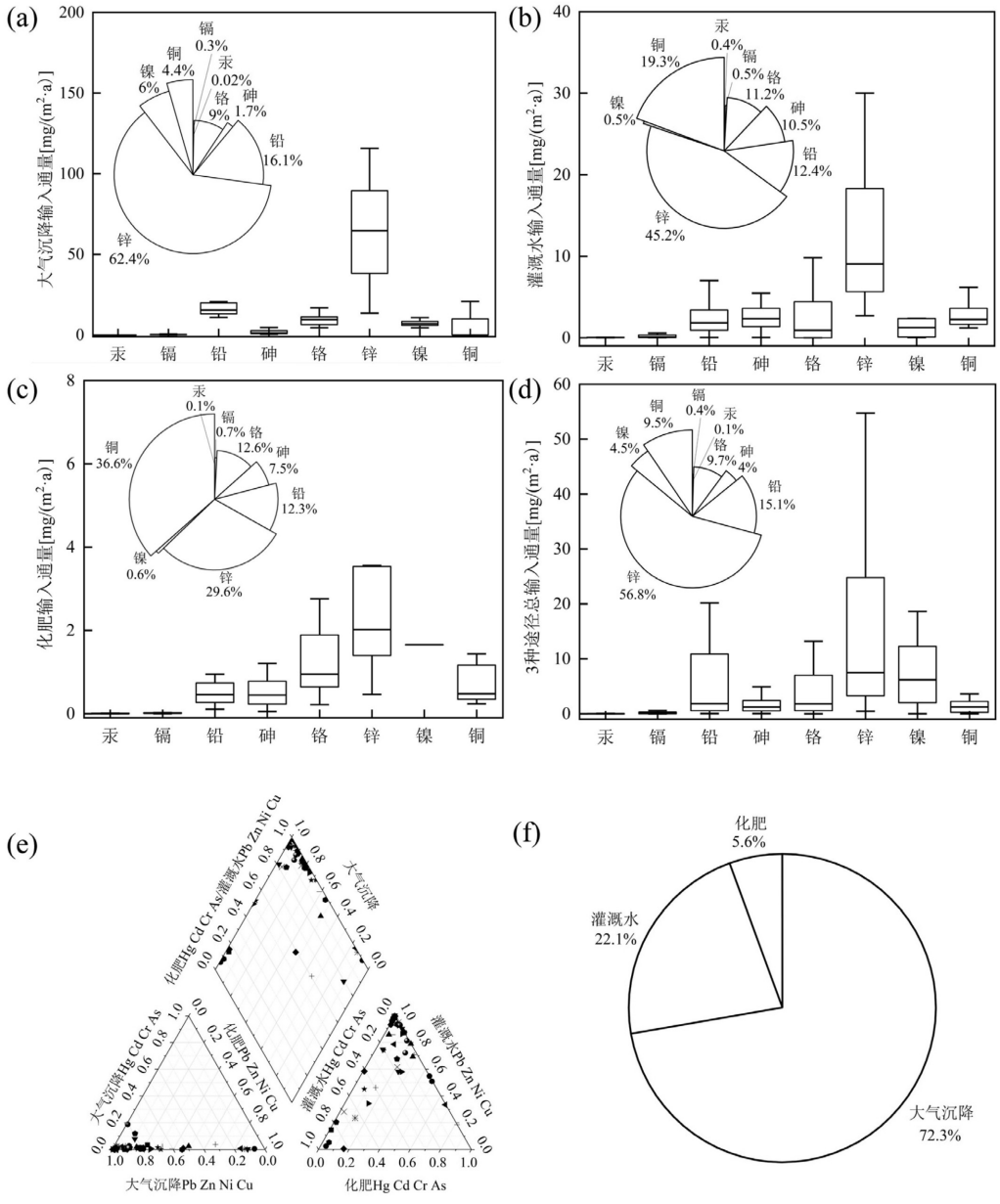


图 2 国内重金属输入土壤 3 种关键途径的通量

Fig.2 Statistical analyses of heavy metal input flux into soil through the pathways of atmospheric deposition, irrigation, and chemical fertilizers

所有数据均源自该主题已报道文献[23,85,87,90,103-109].(a)大气沉降途径重金属输入土壤的通量数据统计,饼图为大气沉降途径导致不同类别重金属输入土壤的比例;(b)灌溉水途径重金属输入土壤的通量数据统计,饼图为灌溉水途径导致不同类别重金属输入土壤的比例;(c)化肥施用途径重金属输入土壤的通量数据统计,饼图为化肥施用途径导致不同类别重金属输入土壤的比例;(d)3 种途径重金属的总输入通量数据统计,为 3 种途径下的不同类别重金属输入土壤比例;(e)3 种途径输入的重金属元素组分平衡分析;(f)3 种途径重金属输入占总输入通量的平均比例

从输出途径考虑,我国土壤重金属的输出途径主要包括物理迁移、化学转化和生物吸收 3 类,且因土壤条件和作物类型存异:红壤矿区重金属一般随地表径流迁移,而西南喀斯特矿区 19.5%的重金属以粉尘扩

散为主,集约农林区的重金属则主要以作物吸收和淋溶方式输出土壤[94].农作物吸收方面,农作物对不同重金属的富集能力呈现明显的器官特异性,小麦和玉米植株对 Cr、Cd、Pb、As 和 Hg 的富集规律表现出根>茎>籽粒,而玉米植株对 Cd 的富集表现出茎>根>籽粒的一般规律.这些差异可能源于作物生理特性与元素化学行为的交互作用[95].受限于土壤条件和重金属性质的复杂特点,不同的土壤类型、地貌特征、农作物类型及人为活动等因素都会影响重金属的输出.不同植物的生物量差异是调控土壤重金属输出的关键因素[96].在污染程度相近的土壤中,种植高生物量作物能通过收割移除重金属,并凭借其强大的水土保持功能从源头上抑制土壤重金属的输出[97-98].一项研究表明,在铁尾矿和铅锌尾矿区生长的 12 种优势木本植物,其重金属的积累特征各不相同,反映了不同植物物种在重金属修复方面的差异潜力[99].目前,关于土壤重金属的输出研究和模型构建较少,如表 4 及图 3 所示,常见的土壤重金属适用性数值模型包括作物收获及植物吸收模型、地表径流(SWAT)模型和地下水渗流(Hydrus−1D)模型等[100].

表 3　灌溉水与农业投入品输入通量模型

Table 3　Inputs flux models for irrigation and agricultural simulation

输入方式	公式	核心参数	重金属	参考文献
灌溉水	$Q = W \cdot C$	Q 为重金属在单位面积农田下受灌溉水的年均输入量,mg/(m^2·a);W 为单位面积农田年均灌溉用水量,数据来自各市的水资源利用公报,m^3/(m^2·a);C 为灌溉水中重金属质量浓度,μg/L	Zn、Cu、Cr、As、Cd、Hg.	[101]
化肥	$Q = CM/1000000$	Q 为重金属在某点位的年输入通量,g/(hm^2·a); C 为重金属在肥料中的含量,mg/kg;M 为某点位肥料的年施用量,g/(hm^2·a)	Cu、Zn、Ni、Cr	[102]
农药	$Q = q_{pcs} \cdot \frac{C}{S} \cdot f_p$	Q 为单位面积农田重金属经农药施用的年均输入量,mg/(m^2·a);q_{pes} 为农药年均施用量,数据来自各市统计年鉴,kg/a;C 为农药中重金属含量,mg/kg;S 为研究区域农田面积,m^2;f_p 为农药进入土壤系数,取 70%	Zn、Cu、Cr、As	[101]

表 4　3 种输出通量模型对比

Table 4　Comparison of three output flux models

输出方式	公式	核心参数	重金属	参考文献
地下渗流	$Q = V / A \cdot C \cdot P_h / P_n$	Q 为土壤渗流中重金属年输出通量,g/(hm^2·a);V 为样品体积,L;A 为收集容器口的表面积,mm^2;C 为重金属在土壤渗流样品中的含量,μg/L;P_n、P_h 分别为采样期间的降雨量和当年的全年降雨量,降雨量数据参照江苏省统计年鉴,mm	Pb、As、Cu、Cr、Hg	[101−110]
地表径流	$Q = \sum_{r-1}^{n} CV \times 10^{-6}$	Q 为地表径流中某重金属元素的输出通量,g/(hm^2·a);C 为尾水中重金属的平均输出浓度,μg/L;V 为尾水排放量,L/(hm^2·a); n 为排放的次数	Zn、Cu、Pb、As、Cd、Cr、Hg	[101]
农作物吸收	$Q=MC \times 10^{-4}$	Q 为水稻籽粒重金属输出通量,mg/(m^2·a);C 为籽粒中重金属的浓度,mg/kg;M 为水稻产量,kg/(hm^2·a)	Zn、Cd 、Cu	[88,101]

3.2　新兴技术方法

近年来,国内外新型通量技术研究在模型优化与验证领域取得显著进展,为污染物迁移及通量研究提供了多种创新解决方案.在传统模型改进方面,Qu 等[111]开发的 RAPCS/RGWR−CLU 空间源分配受体模型能够精准计算土壤重金属净输入通量并实现区域污染预警.Feng 等[112]构建的动态临界负荷模型(DCL)显著提升了重金属负荷评估的准确性,并可量化不同污染源的贡献率及土壤输入阈值.De 等[113]开发的综合模型框架则创新性的实现了农业生产对土壤重金属影响的动态模拟.在微观机理研究层面,Chen 等[114]将 DGT(Diffusive Gradient in Thin Films)和 DIFS(DGT−Induced Fluxes)模型结合,建立了可靠的生物有效性评估体系,为进一步研究重金属通量对于土壤环境质量和作物生态系统的影响提供了技术支撑.Liao 等[86]则通过 UNMIX 和 IFA(Immunological Fluorescence Assay)的联用技术,实现了郊区农田污染源的量化与精准识别.机器学习(ML)作为一种数据驱动的新范式,凭借强大的非线性拟合能力,从海量环境数据中“学习”规律,从而解析重金属迁移、转化及去除的内在复杂规律,通过构建高精度预测模型优化资源投入,提升污染

管控的高效性与精准性[115-116].

人工智能技术的深度融合正推动该领域跨越式发展.广东省科学院研发的地理可解释四维预测模型突破了传统 AI“黑箱”的局限,实现了重金属时空演变趋势的可视化预测,为土壤重金属通量评估提供高精度、可解释的污染空间分布预测模型[14].南京大学基于 5S(RS-GIS-GPS-ES-IDSS)一体化平台构建的高光谱-ANN 遥感监测系统,使现阶段土壤污染评估精度突破 85%,解决了传统化学分析耗时耗力的问题,尤其适用于沿海发达城市的土壤污染评估[117].刘立拓等[118]利用激光诱导击穿光谱(LIBS)结合 BP 人工神经网络建立定量分析模型,显著提升了 Cr 等重金属的检测精度且明显优于传统定标曲线法.中科院团队创新性整合 Cd 同位素指纹、PMF 和贝叶斯模型,实现矿区重金属输入-输出通量的动态解析,发现灌溉水贡献率高达 77%,年输入通量为 2160g/(hm^2·a),远超其年输出通量 486g/(hm^2·a),该方法突破了传统源解析模型的动态评估局限,实现“同位素-模型-通量”三位一体分析[119].在修复技术优化方面,杜兆林等[120]开发的生物炭修复智能预测模型通过 RF 算法将预测误差控制在±5%以内,为通量评估增加了一个关键的“管理维度”,对于指导如何最优地降低通量计算所得风险具有实际价值.昆明理工大学团队利用高光谱-IRIV-机器学习技术,攻克了现阶段山地农田土壤复合污染反演难题[121].尽管通量技术取得系列突破,但仍需在模型精度提升、不确定性量化及实地验证等关键环节持续优化.未来的溯源技术趋势应是构建一个“可信的数字孪生体”,需促进源汇技术与大数据分析、人工智能等先进方法的深度交叉融合,以实现污染源贡献的实时模拟、精准预测及不确定性量化,使传统的单一方法逐步演进为多技术融合的精准化与智能化体系,为土壤环境的精准治理与风险管理提供科学支撑.

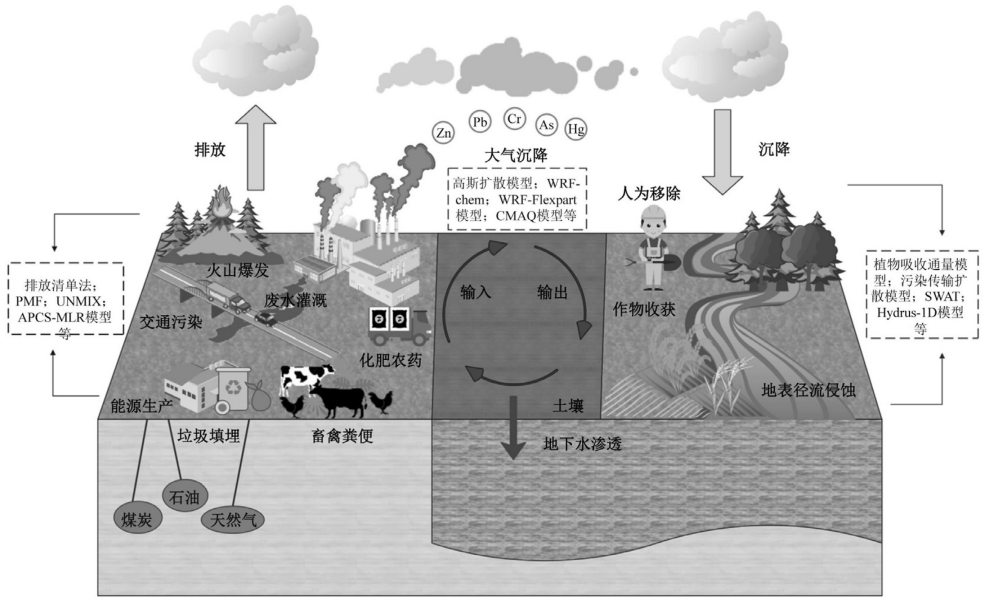


图 3 土壤重金属污染通量概念模型示意

Fig.3 Flux conceptual model of heavy metal contaminants into and from soil

图中左侧为重金属输入途径,右侧为重金属输出途径,虚线矩形方框内提供了输入-输出途径解析适配的数学模型

3.3 技术特征分析

通量解析作为污染演化预测的基石,整合了大气沉降、灌溉水输入、农业投入品输入、动植物吸收输出及淋溶流失等多界面流通数据,通过建立质量平衡模型实现定量表征重金属的净累积速率.该方法结合机器学习与地球化学机理,开发时空四维预测算法,可实现:1)污染热点识别;2)临界阈值预警;3)修复优先级动态评估.同时,通量预算分析能揭示关键控制节点,阻断高风险输入渠道,优化输出调控策略,实现精准靶向治理,有效弥补现实中的治理不足并规避风险过度,为风险管理提供决策支持.

同时,通量解析也是研究土壤重金属动力学的有力手段,通过量化污染物输入-输出动态平衡,揭

示重金属在土壤中的迁移路径、累积速率及界面交换过程,从而成为构建预测模型的核心方法论.其本质是对“源汇-过程”的系统解析,为污染趋势模拟提供时空动态基准.其具有三方面具体价值:1)阐明污染物的来源与去除机制;2)系统评估污染物潜在源汇特征及贡献率[122];3)预测污染物未来累积趋势,支撑污染预警与风险管控[123].由此可见,通量研究为土壤污染防治、安全利用及早期风险预警提供了理论依据,为了农产品安全生产及人群健康,应充分掌握重金属污染的输入-输出通量平衡规律,精准把控污染物的输入-输出通量密度[124-125].为预测未来土壤重金属累积趋势与浓度变化规律,促进土地资源的有序、可持续开发利用提供重要工具.

4　基于源汇定量解析的可持续风险管控体系

源解析与通量相互融合才能更好的解决土壤重金属污染问题.源解析技术作为解析重金属来源及环境风险评估的关键手段解决了历史土壤污染问题,以通量技术为风险预测及预防方式确保土壤的可持续发展.当前,土壤污染防治正经历从“被动修复”向“主动调控”的范式转变.基于此,如图 4 所示,提出一种基于“源-汇-端”的“三位一体”定量解析与可持续风险防控概念模型,该体系包括:1)“源头”诊断阶段——融合源解析技术精准识别污染来源及贡献率,突破早期扩散模型的不确定性局限;2)“汇中”干预阶段——通过通量调控技术量化输入-输出动态平衡,实施“控源-断链-减量”定向调控;3)“端点”验证阶段——建立动态优化机制,形成闭环管理.具体而言,是在明确治理范围的前提下,通过“源头”诊断实操,识别出主要污染源和关键靶区;实施汇中过程的有效干预,切断污染物的迁移扩散途径及土壤净输入通量,实现断源控汇的中端管控目的;最后通过“端点”验证与动态优化,持续监测土壤质量达标情况,对比分析检测结果及治理目标,客观评估整个管控体系的有效性、合理性和科学性,并适时适度做出合理性优化调整措施.该技术体系实现方法模式创新,凭借其溯源断汇端点管理,能有效克服现有模式治理效率低下、效果易反弹的弊端,提升治理行动的协同效率和最终成效,构建了一个“监测诊断→断源控汇→效果验证→反馈优化”的动态闭环管理体系,实现了从粗放治理向科学化、精细化、系统化调控的根本转变,明确了“源、汇、端”3 个环节的分工与协作关系,确保了诊断、干预、验证三元素形成一个紧密衔接、信息共享、责任明晰的有机整体.该体系以“预防为主、修复为辅”为核心理念,将污染治理提升至系统调控维度,实现从单一总量控制向通量趋势管理的技术跨越,为土壤安全保障提供精准支撑.

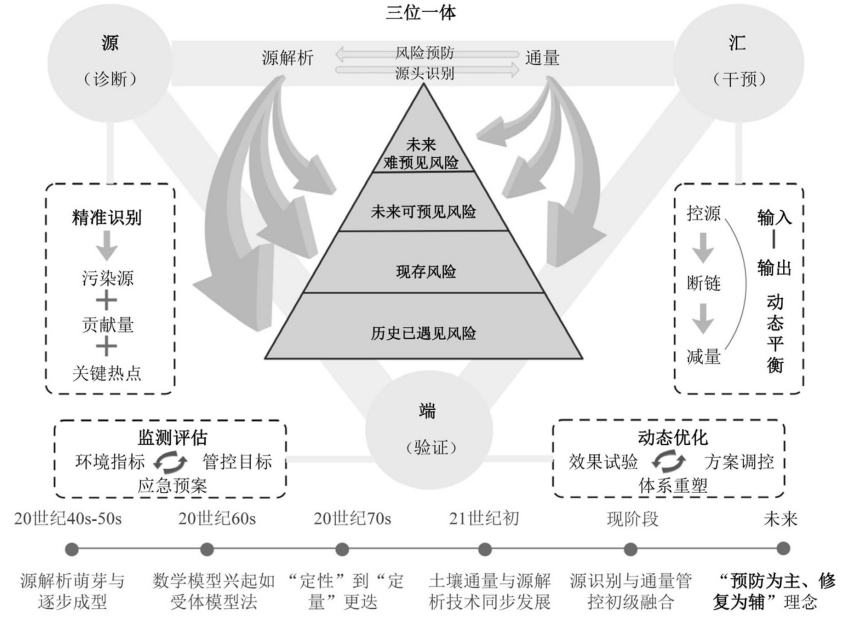


图 4　土壤重金属源汇定量解析与风险可持续管控概念模型

Fig.4　Conceptual model of source and sink-based sustainable soil heavy metal risk management

基于风险可预见性及时间尺度分析,包括历史已遇见风险、现存风险、未来可预见风险及未来难预见风险

5 结论

5.1 以源识别与通量为主的源汇定量解析技术在土壤重金属污染风险防控中发挥不可忽视的互补作用,具体,源解析技术在精准识别土壤重金属来源的基础上,为土壤治理与保护提供有效解决方案;通量评价则能预测重金属在土壤中的累积变化,对重金属污染的源头阻控和土壤资源可持续利用产生重要意义.

5.2 可持续发展要求既要解决历史污染源识别和定量解析问题,也需要有效预测土壤未来的环境风险,源汇技术科学衔接和有效融合可以为风险可持续管控提供关键支撑.

5.3 为从根本上防治土壤重金属污染,提出基于“源”与“汇”双核心要素与“源-汇-端”三位一体的可持续土壤污染风险管控体系,具体以源解析技术为土壤污染治理的前提,以通量定量解析与科学管控为主导,以末端减排与风险可控为目标,形成源汇技术的高度融合,贯彻实施“预防为主、修复为辅”的土壤安全治理创新理念,推动我国土壤资源的可持续开发利用.

参考文献:

[1] 于方明,姚亚威,谢冬煜,等.泗顶矿区 6 种土地利用类型土壤微生物群落结构特征 [J]. 中国环境科学, 2020,40(5):2262-2269.
Yu F M, YAO Y W, Xie D Y, et al. Study on the soil microbial community structure associated with six land use in siding mining area [J]. Chinese Environmental Science, 2020,40(5):2262-2269.

[2] 陈世宝,王 萌,李杉杉,等.中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考 [J]. 地学前缘, 2019,26(6):35-41.
Chen S B, Wang M, Li S S, et al. Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution prevention in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019,26(6):35-41.

[3] Itps F, Food J, Nations A, et al. Status of the world’s soil resources (SWSR)—Main report [M]. Rome: Food and agriculture organization of the United Nations and intergovernmental technical panel on soils, 2015:4-6.

[4] Singh O, Labana S, Pandey G, et al. Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil [J]. Applied microbiology and biotechnology, 2003,61(5):405-412.

[5] Liang J, Feng C, Zeng G, et al. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China [J]. Environmental Pollution, 2017,225:681-690.

[6] 黄国锋,王中伟,谢志宜,等.基于 Meta 分析的广东省农用地土壤重金属污染现状 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1431-1443.
Huang G F, Wang Z W, Xie Z Y, et al. Meta analysis of heavy metal pollution in agricultural soil in Guangdong Province [J]. Chinese Environmental Science, 2025,45(3):1431-1443.

[7] Stankovic S, Kalaba P, Stankovic A R. Biota as toxic metal indicators [J]. Environmental chemistry letters, 2014,12(1):63-84.

[8] 任 宇,曹文庚,肖舜禹,等.重金属在土壤中的分布、危害与治理技术研究进展 [J]. 中国地质, 2024,51(1):118-142.
Ren Y, Cao W G, Xiao S Y, et al. Research progress on distribution, harm and control technology of heavy metals in soil [J]. Geology in China, 2024,51(1):118-142.

[9] Solangi S A, Baig J A, Afridi H I, et al. Environmental monitoring and assessment of heavy metals in paddy fields treated with synthetic and mixed fertilizers [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024,21(9):6695-6712.

[10] Shi T R, Ma J, Wu X, et al. Inventories of heavy metal inputs and outputs to and from agricultural soils: A review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018,164:118-124.

[11] 宋志晓,魏 楠,崔 轩,等.中国土壤污染源头管控现状及对策研究 [J]. 环境科学与管理, 2022,47(12):5-9.
Song Z X, Wei N, Cui X, et al. Research on current situation and countermeasures of soil pollution source control in China [J]. Environmental Science and Management, 2022,47(12):5-9.

[12] Wang J, Zhang X, Yang Q, et al. Pollution characteristics of atmospheric dustfall and heavy metals in a typical inland heavy industry city in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 71:283-291.

[13] Li W, Yang M, Liao K, et al. Distribution, sources, and ecological risks of heavy metal contamination at the sediment-water interface in the Dongjiang Basin based on in situ high-resolution measurements [J]. Environmental Pollution, 2025:126853.

[14] Wang Q, Li C, Hao D, et al. A novel four-dimensional prediction model of soil heavy metal pollution: Geographical explanations beyond artificial intelligence "black box" [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023,458:131900.

[15] Vrebos D, Bampa F, Creamer R E, et al. The impact of policy instruments on soil multifunctionality in the European Union [J]. Sustainability, 2017,9(3):407.

[16] Glæsner N, Helming K, De Vries W. Do current European policies prevent soil threats and support soil functions? [J]. Sustainability, 2014,6(12):9538-9563.

[17] Ridsdale D R, Noble B F. Assessing sustainable remediation frameworks using sustainability principles [J]. Journal of environmental management, 2016,184:36-44.

[18] Helming K, Daedlow K, Hansjürgens B, et al. Assessment and governance of sustainable soil management [J]. Sustainability, 2018, 10(12):4432.

[19] 陈雅丽,翁莉萍,马 杰,等.近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2019,38(10):2219-2238.
Chen Y L, Weng L P, Ma J, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019,38(10):2219-2238.

[20] 杨昱莹,刘 亮,陈 明,等.长三角地区南京市表土重金属污染特征及源解析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):3910-3918.

Yang Y Y, Liu L, Chen M, et al. Characterization and source analysis of topsoil heavy metal pollution in Nanjing, Yangtze River Delta Region [J]. Chinese Environmental Science, 2024,44(7):3910−3918.

[21] Zeng Q P, Wang Z, Luo Y, et al. Evaluation and source apportionment on potentially toxic elements pollution of agricultural soil in mango planting areas in Panzhihua City, China [J]. Soil and Sediment Contamination, 2025,34(1):104−126.

[22] 马　杰,秦启荧,王胜蓝,等.基于APCS−MLR模型和地理探测器的煤矸山周边土壤污染溯源解析和影响因素分析 [J]. 环境科学, 2024,45(12):7157−7165.
Ma J, Qin Q Y, Wang S L, et al. Source apportionment and influence factors analysis of heavy metals in soils around a coal gangue heap using the APCS−MLR model and Geo detector [J]. Environmental Science, 2024,45(12):7157−7165.

[23] Shi T, Ma J, Wu F, et al. Mass balance−based inventory of heavy metals inputs to and outputs from agricultural soils in Zhejiang Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2019,649: 1269−1280.

[24] Araújo D F, Boaventura G R, Machado W, et al. Tracing of anthropogenic zinc sources in coastal environments using stable isotope composition [J]. Chemical Geology, 2017,449:226−235.

[25] 张长波,骆永明,吴龙华.土壤污染物源解析方法及其应用研究进展 [J]. 土壤, 2007,39(2):190−195.
Zhang C B, Luo Y M, Wu L H. Methods for source apportionment of soil pollutants and their advances in application to soil environmental research [J]. Soils, 2007,39(2):190−195.

[26] 邢建伟,宋金明.中国近海大气颗粒物来源解析研究进展 [J]. 环境化学, 2023,42(3):942−962.
Xing J W, Song J M. Source apportionment of atmospheric particulates in China sea: A review [J]. Environmental Chemistry, 2023,42(3):942−962.

[27] 冯银厂.我国大气颗粒物来源解析研究工作的进展 [J]. 环境保护, 2017,45(21):17−20.
Feng Y C. Research progress of source apportionment of atmospheric particulates in China [J]. Environmental Protection, 2017,45(21): 17−20.

[28] 刘　鑫,池华剑,谭志强,等.中国滇西北某地区矿山、采石场等特殊区域周边土壤的重金属分布特征、源解析及风险评价 [J]. 光谱学与光谱分析, 2023,43(S1):327−328.
Liu X, Chi H J, Tan Z Q, et al. Heavy metals distribution characteristics, source analysis and risk evaluation of soils around mines, quarries, and other special areas in a region of Northwestern Yunnan, China [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023,43 (S1):327−328.

[29] Wu J, Li J, Teng Y, et al. A partition computing−based positive matrix factorization (PC−PMF) approach for the source apportionment of agricultural soil heavy metal contents and associated health risks [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,388:121766.

[30] 刘恩莲,王方华.济南市环境空气中多环芳烃的来源识别和解析 [J]. 中国环境监测, 2007,(1):58−62.
Liu E L, Wang F H. Analysis on source of the polycyclic aromatic hydrocarbons in Jinan's atmosphere [J]. Environmental Monitoring in China, 2007,(1):58−62.

[31] 金　蕾,华　蕾.大气颗粒物源解析受体模型应用研究及发展现状 [J]. 中国环境监测, 2007,(1):38−42.
Jin L, Hua L. Research and development status of receptor model on source apportionment of atmospheric particulate matter [J]. Environmental Monitoring in China, 2007,(1):38−42.

[32] Shi G T, Chen Z L, Bi C J, et al. A comparative study of health risk of potentially toxic metals in urban and suburban road dust in the most populated city of China [J]. Atmospheric Environment, 2011,45(3): 764−771.

[33] 张延君,郑　玫,蔡　靖,等.$PM_{2.5}$源解析方法的比较与评述 [J]. 科学通报, 2015,60(2):109−121.
Zhang Y J, Zheng M, Cai J, et al. Comparison and overview of PM2.5source apportionment methods [J]. Chinese Science Bulletin, 2015,60(2):109−121.

[34] 王浩东.阜新玛瑙产业集中区场地重金属风险管控研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2024.
Wang H D. Study on Risk Control of heavy metals from an agate industry concentration area site in Fuxin City [D]. Shenyang: Shenyang University, 2024.

[35] Zhang H, Yin A, Yang X, et al. Use of machine−learning and receptor models for prediction and source apportionment of heavy metals in coastal reclaimed soils [J]. Ecological Indicators, 2021,122:107233.

[36] Breiman L. Random forests [J]. Machine learning, 2001,45(1):5−32.

[37] 宋志廷,赵玉杰,周其文,等.基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 [J]. 环境科学, 2016,37(7):2756−2762.
Song Z T, Zhao Y J, Zhou Q W, et al. Applications of geostatistical analyses and stochastic models to identify sources of soil heavy metals in Wuqing district, Tianjin, China [J]. Environmental Science, 2016, 37(7):2756−2762.

[38] Hu Y, Cheng H, Technology. Application of stochastic models in identification and apportionment of heavy metal pollution sources in the surface soils of a large−scale region [J]. Environmental science & technology, 2013,47(8):3752−3760.

[39] Thooyavan Y, Kumaraswamidhas L A, Raj R D, et al. Modelling and characterization of basalt/vinyl ester/SiC micro−and nano−hybrid biocomposites properties using novel ANN–GA approach [J]. Journal of Bionic Engineering, 2024,21(2):938−952.

[40] Wong L A, Chen J C, Xue H, et al. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal waters: 1. Simulations and comparison with observations [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003,108(C5).

[41] 赵　萍,阮旭东,刘亚风,等.基于遗传算法和BP神经网络的矿区土壤重金属含量空间分布预测 [J]. 土壤, 2024,56(4):889−896.
Zhao P, Ruan X D, Liu Y F, et al, Prediction of spatial distribution of soil heavy metal contents in mining areas based on genetic algorithm and BP neural network [J]. Soil, 2024,56(4):889−896.

[42] Al Aawar E, Hammoud M A E R, Hoteit I. Two−step AI−aided Bayesian source identification of urban−scale pollution [J]. Atmospheric Environment, 2024,323:120388.

[43] 柯昌华,金文刚,钟　秦,等.玉溪市中心城区TSP源解析研究 [J]. 安全与环境学报, 2003,3(5):40−43.
Ke C H, Jin W G, Zhong Q, Xu F. An analysis of five chief pollution sources of TSP in downtown ambient air of YUXI through factor

analysis [J]. Journal of Safety and Environment, 2003,3(5):40-43.

[44] 冯精兰,刘书卉,申君慧,等.新乡市道路灰尘中 PAHs 的污染特征和来源解析 [J]. 环境化学, 2013,32(4):630-639.
Feng J L, Liu S H, Shen J H, et al. Pollution characteristics and source appointment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust from Xinxiang [J]. Environmental Chemistry and Ecotoxicology, 2013, 32(4):630-639.

[45] Kleinman M T. The apportionment of sources of airborne particulate matter [M]. New York: New York University, 1977:8-9.

[46] 肖文丹,叶雪珠,张 棋,等.基于稳定同位素与多元素的土壤铅污染源解析 [J]. 中国环境科学, 2021,41(5):2319-2328.
Xiao W D, Ye X Z, Zhang Q, et al. Source apportionment of lead pollution in soil based on the stable isotope and multi element characteristics [J]. China Environmental Science, 2021,41(5):2319-2328.

[47] 张亚峰,马 强,施泽明,等.黄河流域青海段土壤重金属累积特征及源解析 [J]. 环境科学, 2024:1-15.
Zhang Y F, Ma Q, Shi Z M, et al. Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in soil of Qinghai section of the Yellow River Basin [J]. Environmental Science, 2024:1-15.

[48] 杨子鹏,肖荣波,陈玉萍,等.华南地区典型燃煤电厂周边土壤重金属分布、风险评估及来源分析 [J]. 生态学报, 2020,40(14):4823-4835.
Yang Z P, Xiao R B, Chen Y P, et al. Heavy metal distribution, risk assessment and source analysis of soil around a typical coal-fired power plant in South China [J]. Acta Ecological Sinica, 2020,40(14): 4823-4835.

[49] 张雅铷.基于多参数特征比值法的大气颗粒物污染类型快速识别方法及应用 [D]. 兰州:兰州大学, 2023.
Zhang Y R. Method of quickly identifying the types of particulate pollution based on multi-parameter feature ratio and its application [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.

[50] 刘贵荣.基于比值法的源解析技术研究 [D]. 天津:南开大学, 2015.
Liu G R. Study of source apportionment based on ratio method [D]. Tianjin: Nankai University, 2015.

[51] 刘宏波,瞿明凯,张健琳,等.土壤污染物源解析技术研究进展 [J]. 环境监控与预警, 2021,13(1):1-6.
Liu H B, Qu M K, Zhang J L, et al. Research progress in source apportionment of soil pollutants [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2021,13(1):1-6.

[52] 闫 颖,张晓文,郭波莉.铅-镉-锌-汞稳定同位素在重金属污染源解析中的研究进展 [J]. 环境化学, 2020,39(10):2712-2721.
Yan Y, Zhang X W, Guo B L. Applications of lead-cadmium-zinc-mercury stable isotopes in source identification of heavy metal pollutions [J]. Environmental Chemistry, 2020,39(10):2712-2721.

[53] 肖文丹,叶雪珠,张 棋,等.基于稳定同位素与多元素的土壤铅污染源解析 [J]. 中国环境科学, 2021,41(5):2319-2328.
Xiao W D, Ye X Z, Zhang Q, et al. Source apportionment of lead pollution in soil based on the stable isotope and multi element characteristics [J]. China Environmental Science, 2021,41(5):2319-2328.

[54] Wang J, Wang L, Wang Y, et al. Emerging risks of toxic metal (loid) s in soil-vegetables influenced by steel-making activities and isotopic source apportionment [J]. Environment International, 2021,146: 106207.

[55] 李 娇,滕彦国,吴 劲,等.PMF 模型解析土壤重金属来源的不确定性 [J]. 中国环境科学, 2020,40(2):716-725.
Li J, Teng Y G, Wu J, et al. Uncertainty analysis of soil heavy metal source apportionment by PMF model [J]. China Environmental Science, 2020,40(2):716-725.

[56] 叶盼青,阿不都艾尼·阿不里,孙小丽,等.天山北坡经济带土壤重金属来源及污染评价 [J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4704-4712.
Ye P Q, Abli A E, Sun X L, et al. Source analysis and pollution assessment of soil heavy metals in the economic belt on the northern slope of Tianshan Mountains. [J]. China Environmental Science, 2022, 42(10):4704-4712.

[57] 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.

[58] 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.
Liu N, Tang Y Y, Chen M, et al. Source apportionment of soil heavy metals in lead-zinc area based on APCS-MLR and PMF [J]. China Environmental Science, 2023,43(3):1267-1276.

[59] 沈宸宇,闫 钰,于瑞莲,等. APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 [J]. 环境科学, 2022,43(5):2476-2488.
Shen C Y, Yan Y, Yu R L, et al. APCS-MLR combined with PMF model to analyze the source of metals in sediment of Xinglin Bay suburban watershed, Xiamen [J]. Environmental Science, 2022,43(5): 2476-2488.

[60] 彭 聪,梁建宏,任 坤,等.基于 PCA-APCS-MLR 模型的滇池流域地下水质量影响因素定量识别 [J]. 环境科学研究, 2024,37(5): 1116-1126.
Peng C, Liang J H, Ren K, et al. Quantitative identification of factors affecting groundwater quality in Dianchi Lake Basin based on PCA-APCS-MLR model [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(5):1116-1126.

[61] 丁启振,周殷竹,周金龙,等.吐鲁番盆地绿洲区地下水硼的水文地球化学过程及健康风险 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2183-2196.
Ding Q Z, Zhou Y Z, Zhou J L, et al, Hydrogeochemical process and health risk of boron in groundwater in oasis area of Turpan Basin [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2183-2196.

[62] 蔡昂祖,张海霞,王小剑,等.Unmix 模型污染源解析研究进展及应用前景 [J]. 土壤通报, 2021,52(3):747-756.
Cai A Z, Zhang H X, Wang X J, et al. Review on the pollution source apportionment by unmix model and application prospect [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021,52(3):747-756.

[63] Miller M, Friedlander S, Hidy G, et al. A chemical element balance for the Pasadena aerosol [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1972,39(1):165-176.

[64] Zhang Z, Huang S, Chen H, et al. Deciphering the pollution risks, sources and their links of heavy metals in soils [J]. Science of The Total Environment, 2024,950:175331.

[65] 郑顺安,习 斌,吴泽赢,等.污灌区盐分累积对污染土壤汞释放通量的影响 [J]. 中国环境科学, 2018,38(3):1047-1053.
Zheng S A, Xi B, Wu Z Y, et al. A simulation study of mercury release

fluxes from soils under different salinity levels in the wastewater-irrigated area [J]. Chinese Environmental Science, 2018,38(3):1047-1053.

[66] 杨烨宇,李　程,杨忠芳,等.广西横州市岩溶与非岩溶区耕层土壤 Zn 通量特征 [J]. 中国环境科学, 2024,44(12):6817-6827.
Yang Y Y, Li C, Yang Z F, et al. Characteristics of Zn flux in cultivated soil layer in karst and non-karst areas of Hengzhou, Guangxi [J]. China Environmental Science, 2024,44(12):6817-6827.

[67] 王梦梦,原梦云,苏德纯.我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律 [J]. 中国环境科学, 2017,37(11):4085-4096.
Wang M M, Yuan M Y, Su D C. Characteristics and spatial-temporal variation of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition of China [J]. China Environmental Science, 2017,37(11):4085-4096.

[68] 陈其永,郜允兵,倪润祥,等.2000~2018 年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 [J]. 环境科学, 2022,43(9):4413-4424.
Chen Q Y, Gao Y B, Ni R X, et al. Temporal and spatial variation characteristics of heavy metal in atmospheric deposition in China from 2000 to 2018 [J]. Environmental Science, 2022,43(9):4413-4424.

[69] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. Science of the total environment, 2003,311(1-3):205-219.

[70] Cora M G, Hung Y T, Pagan-Rodriguez D. Air dispersion modeling: Using SCREEN3to determine the MAGLC of air toxics [J]. Environmental Quality Management, 2003,12(4):67-79.

[71] Alexeeff S E, Roy A, Shan J, et al. High-resolution mapping of traffic related air pollution with Google street view cars and incidence of cardiovascular events within neighborhoods in Oakland, CA [J]. Environmental Health, 2018,17(1):1-13.

[72] Petersen R L, Paumier J O, Guerra S A. Development, evaluation, and implementation of building downwash and plume rise enhancements in AERMOD [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2022,72(12):1423-1441.

[73] Elbir T, Pollution. Application of an ISCST3model for predicting urban air pollution in the Izmir metropolitan area [J]. International journal of environment and pollution, 2002,18(5):498-507.

[74] Xu H, Zhu Y, Wang L, et al. Source contribution analysis of mercury deposition using an enhanced CALPUFF-Hg in the central Pearl River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2019,250:1032-1043.

[75] 霍淑霞.冬季区域短期大气污染源的 HYSPLIT 模型研究 [J]. 环境科学与管理, 2025,50(1):130-134.
Huo S X. HYSPLIT Model Analysis of short-term regional air pollution sources in winter [J]. Environmental Science and Management, 2025,50(1):130-134.

[76] Antonucci A, Viotti P, Luciano A, et al. A numerical model of the soil flushing remediation in heavy metal contaminated soil [J]. Chemical engineering transactions, 2013,32:469-474.

[77] Snoun H, Alahmadi M M, Nikfal A, et al. Data assimilation enhances WRF-Chem performance in modeling volcanic ash clouds from Hunga Tonga–Hunga Ha'apai Eruption [J]. Journal of Meteorological Research, 2024,38(6):1122-1140.

[78] Sagan V, Pasken R, Zarauz J, et al. SO_2trajectories in a complex terrain environment using CALPUFF dispersion model, OMI and MODIS data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018,69:99-109.

[79] Jiang S L, Dong X Y, Han Z M, et al. Emissions and atmospheric dry and wet deposition of trace metals from natural and anthropogenic sources in mainland China [J]. Atmosphere, 2024,15(4):402.

[80] Chen C W, Chen Y T. Study on the chemical reaction and deposition calculation of mercury in the atmosphere [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020,576(1): 012004.

[81] 张　刚,王　宁,艾建超,等.持续性降水气象条件下土壤/大气间汞通量特征 [J]. 中国环境科学, 2013,33(3):409-415.
Zhang G, Wang N, Ai J C, et al. Characteristics of mercury flux between soil and air under the meteorological condition of durative precipitation [J]. Chinese Environmental Science, 2013,33(3): 409-415.

[82] 杨忠平,卢文喜,龙玉桥,等.长春市城区大气湿沉降中重金属及pH值调查 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009,39(5):887-892.
Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, et al. Current situation of pH and wet deposition of heavy metals in precipatation in Changchun City, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009,39(5): 887-892.

[83] Jiang M, Peng H, Liang S, et al. How atmospheric deposition contribute to watershed heavy metals contamination in coastal watersheds in China: A case study of Laizhou Bay [J]. Science of the Total Environment, 2024,954:176374.

[84] 李　丹,王克强,施亚盛,等.珠江三角洲典型站点大气金属元素的湿沉降特征、来源及生态风险评价 [J]. 环境科学学报, 2023,43(11): 206-217.
Li D, Wang K Q, Shi Y S, et al. Characteristics sources and ecological risk assessment of metal elements in atmospheric wet deposition at typical stations in the Pearl River Delta [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(11):206-217.

[85] Xia X, Yang Z, Cui Y, et al. Soil heavy metal concentrations and their typical input and output fluxes on the Southern Song-Nen Plain, Heilongjiang Province, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014,139:85-96.

[86] Liao S, Jin G, Khan M A, et al. The quantitative source apportionment of heavy metals in peri-urban agricultural soils with UNMIX and input fluxes analysis [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021,21:101232.

[87] Yi K, Fan W, Chen J, et al. Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of contaminated areas in Hunan Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2018,634: 67-76.

[88] 米雅竹,梁家妮,周　俊,等.典型冶炼厂大气沉降区农田耕层土壤重金属(Cd、Cu、Pb)输入输出平衡研究 [J]. 土壤学报, 2024,61(5): 1339-1348.
Mi Y Z, Liang J N, Zhou J, et al. Input and output balance of heavy metals(Cd, Cu, Pb)in arable soils in atmospheric deposition area of typical smelter [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,61(5):1339-1348.

[89] Casetta M, Philippe S, Courcot L, et al. A quantitative assessment of the behavior of metallic elements in urban soils exposed to industrial dusts near Dunkerque(northern France) [J]. Soil, 2025,11(2):467-488.

[90] Hou Q, Yang Z, Ji J, et al. Annual net input fluxes of heavy metals of

the agro-ecosystem in the Yangtze River Delta, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014,139:68-84.

[91] Imseng M, Wiggenhauser M, Keller A, et al. Fate of Cd in agricultural soils: A stable isotope approach to anthropogenic impact, soil formation, and soil-plant cycling [J]. Environmental science & technology, 2018,52(4):1919-1928.

[92] Peng D, Zhang J, Fan C, et al. Effects of terrestrial input on heavy metals in Zhanjiang Bay, a typical subtropical bay in the South China Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2024,199:116015.

[93] 何高波,徐 丹,桂智凡,等.黄石市城区土壤重金属分布特征及来源解析 [J]. 土壤通报, 2025,56(3):851-860.
He G B, Xu D, Gui Z F, et al. Source and distribution characteristics of heavy metals in soil in Huangshi, China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025,56(3):851-860.

[94] Xia Y, Gao T, Liu Y, et al. Zinc isotope revealing zinc's sources and transport processes in karst region [J]. Science of the Total Environment, 2020,724:138191.

[95] Wang S, Wu W, Liu F, et al. Accumulation of heavy metals in soil-crop systems: a review for wheat and corn [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017,24(18):15209-15225.

[96] Seth C S, Remans T, Keunen E, et al. Phytoextraction of toxic metals: a central role for glutathione [J]. Plant Cell and Environment, 2012, 35(2):334-346.

[97] Paz-Ferreiro J, Lu H, Fu S, et al. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: A review [J]. Solid Earth, 2014,5(1):65-75.

[98] Gao Y, Zhu B, Zhou P, et al. Effects of vegetation cover on phosphorus loss from a hillslope cropland of purple soil under simulated rainfall: A case study in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 85(3):263-273.

[99] Li Y L, Wang C Q, Yan C W, et al. Heavy metal concentrations and accumulation characteristics of dominant woody plants in Iron and lead-zinc Tailing areas in Jiangxi, Southeast China [J]. Forests, 2023, 14(4):846.

[100]石陶然.基于输入输出清单的浙江省农田土壤重金属预测预警及污染状况研究 [D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2019.
Shi T R. Prediction and early-warning forecast on heavy metals and their pollution status in agricultural soils in Zhejiang Province, China based on input-output inventory [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2019.

[101]杨 雳,董欣平,林 静,等.苏南太湖流域农田土壤重金属输入输出清单构建及风险预警 [J]. 中国环境科学, 2024,44(9):5085-5098.
Yang L, Dong X P, Lin J, et al. Input-output inventory and risk early warning of heavy metal in farmland soil in Taihu Lake Basin, Southern Jiangsu [J]. China Environmental Science, 2024,44(9):5085-5098.

[102]陈 雪,杨忠芳,陈岳龙,等.广西中东部 9 县区农田土壤 Se 输入通量研究 [J]. 物探与化探, 2020,44(4):820-829.
Chen X, Yang Z F, Chen Y L, et al. Selenium input flux in farmland soil of 9counties in the Middle East of Guangxi [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020,44(4):820-829.

[103]Peng H, Chen Y, Weng L, et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019,660:776-786.

[104]Pan X, Chin M, Gautam R, et al. A multi-model evaluation of aerosols over South Asia: common problems and possible causes [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(10):5903-5928.

[105]Jiang W, Hou Q, Yang Z, et al. Annual input fluxes of heavy metals in agricultural soil of Hainan Island, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014,21(13):7876-7885.

[106]Jiang F, Wang H, Chen J, et al. Carbon balance of China constrained by CONTRAIL aircraft CO_2 measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014,14(18):10133-10144.

[107]Cai K, Li C. Ecological risk, input flux, and source of heavy metals in the agricultural plain of Hebei Province, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19(4): 2288.

[108]刘子青,刘 菁,刘寒冰,等.我国耕地土壤重金属输入输出平衡变化分析 [J]. 农业环境科学学报, 2023,42(6):1274-1284.
Liu Z Q, Liu J, Liu H B, et al. Analysis of the changes in the input and output balance of heavy metals in Chinese agricultural soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023,42(6):1274-1284.

[109]丛 源,郑 萍,陈岳龙,等.北京农田生态系统土壤重金属元素的生态风险评价 [J]. 地质通报, 2008,(5):681-688.
Cong Y, Zheng P, Chen Y L, et al. Ecological risk assessments of heavy metals in soils of the farmland ecosystem of Beijing, China [J]. Geologcal Bulletin of China, 2008,(5):681-688.

[110]赵归梅,吴秋梅,胡文友,等.历史遗留矿区农田土壤重金属输入输出平衡研究 [J]. 农业环境科学学报, 2024,43(7):1492-1502.
Zhao G M, Wu Q M, Hu W Y, et al. Input and output balance of heavy metals from an abandoned mining area in farmland soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024,43(7):1492-1502.

[111]Qu M, Guang X, Wu S, et al. Determining the net input fluxes of pollutants based on the spatial source apportionment receptor model for early warning of regional soil pollution [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,471:134409.

[112]Feng W, Guo Z, Xiao X, et al. A dynamic model to evaluate the critical loads of heavy metals in agricultural soil [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2020,197:110607.

[113]De Vries W, Kros J, Voogd J C, et al. Integrated assessment of agricultural practices on large scale losses of ammonia, greenhouse gases, nutrients and heavy metals to air and water [J]. Science of the total Environment, 2023,857:159220.

[114]Chen R, Gao T, Cheng N, et al. Application of DGT/DIFS to assess bioavailable Cd to maize and its release in agricultural soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021,411:124837.

[115]陈亚松,刘家雯,赵云鹏,等.基于机器学习的人工湿地出水水质预测与影响因素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3161-3170.
Chen Y S, Liu J W, Zhao Y P, et al. Prediction of effluent water quality and analysis of influencing factors in constructed wetlands based on machine learning [J]. Chinese Environmental Science, 2025,45(6): 3161-3170.

[116]Yaseen Z M. An insight into machine learning models era in simulating soil, water bodies and adsorption heavy metals: Review, challenges and solutions [J]. Chemosphere, 2021,277:130126.

[117]Zhou W, Zhang J, Zou M, et al. Feasibility of using rice leaves hyperspectral data to estimate $CaCl_2$ extractable concentrations of

heavy metals in agricultural soil [J]. Scientific Reports, 2019,9(1): 16084.

[118]刘立拓,刘建国,赵南京,等.激光诱导击穿光谱数据特征自动提取方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011,38(s1):115002-115001.
Liu L T, Liu J G, Zhao N J, et al. Study on the automatic extraction method of spectral data features in laser induced breakdown spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011,38(s1): 115002-115001.

[119]Wu Q, Hu W, Tian K, et al. Quantification of sources and input-output pathways of heavy metals in soils from an abandoned mining watershed using Cd isotope tracing and inventory analysis [J]. Geoderma, 2025,459:117359.

[120]Du Z, Sun X, Zheng S, et al. Optimal biochar selection for cadmium pollution remediation in Chinese agricultural soils via optimized machine learning [J]. Journal of Hazardous Materials [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,476:135065.

[121]田安红,李智缘,付承彪,等.云南墨江矿区周边山地农田土壤重金属的高光谱反演 [J]. 农业工程学报, 2025,41(5):191-200.
Tian A H, Liu Z Y, Fu C B, et al. Hyperspectral inversion of soil heavy metals in mountain farmland around Mojiang Mining Areas in Yunnan, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025,41(5):191-200.

[122]Fu Y, Li F, Guo S, et al. Cadmium concentration and its typical input and output fluxes in agricultural soil downstream of a heavy metal sewage irrigation area [J]. Journal of hazardous materials, 2021,412: 125203.

[123]Xia F, Zhao Z, Niu X, et al. Modelling of soil environmental quality and early warning of integrated ecological risk [J]. Environmental Pollution, 2024,342:123103.

[124]Hou D, O'connor D, Igalavithana A D, et al. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020,1(7):366-381.

[125]Zhou Q, Tan Q, Zeng H, et al. Does soil pollution prevention and control promote corporate sustainable development? A quasi-natural experiment of "10-point soil plan" in China [J]. Sustainability, 2023, 15(5):4598.

作者简介：陈伟胜(1978-),男,山东潍坊人,副教授,博士,主要从事土壤与地下水污染修复研究.发表论文 23 篇.chenweisheng@ncwu.edu.cn.