

吉林地区黑土区土壤地球化学基准值测定与重金属污染来源解析

康俊杰

中化地质矿山总局吉林地质勘查院检测中心

DOI: 10.32629/jpm.v7i7.8987

[摘要] 本文旨在测定吉林地区黑土区土壤地球化学基准值并解析重金属污染来源，为该地区土壤环境保护提供科学依据。研究采用网格布点法布设采样点，通过原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法等测定土壤地球化学元素含量，并运用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法进行重金属污染评价，结合相关性分析、主成分分析及正定矩阵因子分解模型解析污染来源。研究发现，吉林地区黑土区部分重金属元素存在一定程度污染，且空间分布不均，其主要来源为工业活动和农业生产。本文对制定针对性的土壤污染防治措施、保障农产品安全及维护区域生态平衡具有重要意义，为吉林黑土区土壤环境的可持续管理提供了理论支持与实践指导。

[关键词] 吉林黑土区；土壤地球化学基准值；重金属污染；污染来源解析

determination of soil geochemical reference values and source apportionment of heavy metal pollution in black soil regions of Jilin Province

Kang Junjie

Testing Center, Jilin Geological Exploration Institute, China National Geology and Mineral Resources Administration

[Abstract] This study aims to establish soil geochemical reference values and identify sources of heavy metal contamination in black soil areas of Jilin Province, providing a scientific basis for environmental protection. Sampling points were established using a grid-based methodology, with elemental concentrations determined via atomic absorption spectroscopy and inductively coupled plasma mass spectrometry. Heavy metal pollution was assessed using single-factor pollution indices, the Nemero composite pollution index, and soil accumulation indices, supplemented by correlation analysis, principal component analysis, and positive definite matrix factorization models. The results reveal significant contamination levels of certain heavy metals with uneven spatial distribution, primarily attributed to industrial activities and agricultural practices. These findings are crucial for developing targeted soil pollution control measures, ensuring food safety, and maintaining regional ecological balance, offering both theoretical foundations and practical guidance for sustainable management of soil environments in Jilin's black soil regions.

[Key words] Jilin Black Soil Region; soil geochemical reference values; heavy metal pollution; pollution source identification

引言

吉林地区黑土区作为我国重要的农业生产基地，其土壤地球化学特征与重金属污染状况直接关系到农产品安全及生态环境的可持续发展。近年来，随着工业化和农业现代化的快速推进，土壤环境质量面临严峻挑战，尤其是重金属污染问题日益突出。因此，开展吉林地区黑土区土壤地球化学基准值的系统测定，并深入解析重金属污染的来源，对于制定科学合理的土壤环境保护策略具有重要意义。当前，国内外学者已围绕土壤地球化学基准值与重金属污染开展大量研究。然而，针对吉林地区黑土区专项研究仍显不足，尤其在基准值的空间分布特征、污染程度定量评价以及污染源解析方面存在明显空白。此

外，现有研究多集中于单一元素分析，缺乏对多种元素综合作用机制探讨，难以全面反映土壤环境的真实状况。基于此，本文旨在通过系统采集与测定土壤样品，明确土壤地球化学基准值，揭示重金属污染的空间分布规律及其主要来源。

1. 吉林黑土区地貌概况

1.1 地形地貌特征

以波状平原为主，地势起伏较为平缓，区域内地形总体呈现西高东低的趋势，局部地区存在微起伏岗地和洼地。地形特征对土壤的形成与分布具有重要影响。一方面，波状平原地貌有利于地表径流汇集与排泄，影响土壤中物质迁移与积累；另一方面，微地形变化导致土壤水分条件空间异质性，进一步影

响土壤类型分布格局。

1.2 土壤类型与分布

主要包括黑土、草甸土、暗棕壤和水稻土，黑土分布面积约占 40%以上，主要分布在波状平原中部和西部地区，土层深厚，有机质含量丰富，具有良好肥力和结构特性。草甸土主要分布在河流沿岸及低洼地带，其土壤水分条件较好，但有机质含量略低于黑土。暗棕壤主要分布于东部丘陵区，受地形和气候影响，其土层较薄且石砾含量较高。水稻土则是长期人为耕作和灌溉形成特殊土壤类型，集中分布在松花江及其支流沿岸平原地区。

2. 土壤样品采集与处理

2.1 采样点布设

采样点的布设遵循系统性与随机性相结合原则，以确保所采集样品能够全面反映研究区域土壤地球化学特征。此外，为保证采样点的代表性，还综合考虑了地形地貌、土地利用类型及植被覆盖等因素，优先选择未受人为干扰或干扰较小的区域作为采样点。例如，在农业用地中，避开施肥区和农药喷洒区，以减少外界因素对样品干扰。通过上述方法，本研究布设的采样点均匀分布于吉林地区黑土区主要土壤类型区，为后续分析提供可靠的数据支持。

2.2 样品采集方法

采样工具选择上使用不锈钢材质采样器，以避免金属材质对样品中重金属元素含量潜在污染。采样深度根据研究目的确定，分别为 0-20 cm 和 20-40 cm 两个层次，以反映表层土壤和亚表层土壤地球化学特征。在每个采样点，采用多点混合采样法，每个样品采集量控制在 1 kg 左右，以满足实验室分析需求。在采样过程中，还采取严格质量控制措施，此外，为防止样品交叉污染，每次采样后均对采样工具进行清洗，并在采样过程中佩戴一次性手套。上述措施有效保障采样过程科学性和规范性，为后续分析提供高质量样品。

2.3 样品处理与保存

首先，将新鲜土壤样品置于阴凉通风处自然风干，避免阳光直射和高温烘干，防止样品中挥发性组分的损失。风干中，定期翻动样品，使其均匀干燥。风干后样品使用木槌或玛瑙研钵进行研磨，以破碎土块并去除植物残体、石块等杂质。研磨后样品分别通过 2mm 和 0.15mm 孔径尼龙筛，以满足不同分析项目对样品粒度要求。过筛后样品充分混合，确保其均一性。预处理完成后，样品被分装于聚乙烯自封袋中，并在袋外标注样品编号、采样深度等信息。样品保存条件为室温、避光、干燥，以防止样品性质发生变化。此外，为保证分析结果可靠性，每批样品均设置空白样和平行样，用于监测分析过程中污染和误差。

3. 土壤地球化学基准值测定方法

3.1 元素选择

主要聚焦于重金属元素与营养元素，重金属元素如镉、铬、铜、锌、砷和铅因其毒性高、生物累积性强以及在农业活动中的潜在污染风险而被优先考虑。此外，营养元素如铁、钙、镁等也对土壤肥力及生态功能具有重要影响，其含量变化能够反映土壤质量状况。选择这些元素原因不仅在于它们对土壤生态系统关键作用，还因为它们能够揭示人类活动与自然环境对土壤地球化学特性综合影响。

3.2 测定技术

采用多种先进分析技术，包括原子吸收光谱法 (AAS)、电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 等。原子吸收光谱法具有操作简便、灵敏度较高的优点。然而，AAS 每次只能分析一种元素，且对复杂基体样品可能存在干扰问题。相比之下，电感耦合等离子体质谱法以其高灵敏度、宽动态范围和同时测定多元素能力成为近年来土壤元素分析重要手段。ICP-MS 利用高温等离子体将样品中元素离子化，并通过质谱仪检测其质量与强度，实现对多种元素快速分析。综合考虑不同技术原理、优缺点及适用范围，结合使用 AAS 与 ICP-MS，以确保测定结果的准确性与效率。

3.3 质量控制

首先，通过引入标准物质进行对照分析，验证仪器性能与测试方法的稳定性。标准物质的选择需覆盖目标元素的浓度范围，并在样品分析前后分别进行测试，以评估系统的漂移与偏差。其次，开展空白试验以排除试剂与实验环境对测定结果可能干扰。空白试验应在与样品分析完全相同的条件下进行，其测定值用于扣除背景信号，从而提高数据的真实性。此外，平行样测定也是质量控制的重要环节之一。通过对同一样品进行多次重复分析，计算其相对标准偏差 (RSD)，以评价测定结果的精密度。通常情况下，RSD 应控制在 5%以内，以确保数据可重复性。

4. 土壤地球化学基准值测定结果与分析

4.1 基准值统计特征

统计分析表明，研究区内主要重金属元素和部分营养元素的含量呈现出显著特征。以 Cu、Mn、As、Zn、Cr、Ni 和 Pb 为例，这些元素平均含量均超过吉林省重金属元素背景值，其中 Pb 平均含量最高，较背景值高出 6.44 倍。此外，通过对所有采样点数据进一步分析，发现各元素中位数与平均值存在一定差异，这表明数据分布可能受到极端值影响。标准差和变异系数的计算结果显示，不同元素空间离散程度存在明显差异。其中，Pb 和 As 变异系数分别达 0.68 和 0.57，表明这两种元素在研究区内的分布具有较强异质性，可能受到人为活动或局部地质条件的影响。从数据分布形态来看，大多数元素的对数变换后更接近正态分布，这为后续的地统计学分析提供重要依据。上述统计特征不仅反映了研究区土壤地球化学元素本底特征，也为探讨其空间分布规律及来源解析奠定了基础。

4.2 空间分布特征

利用地统计学方法和地理信息系统技术，对土壤地球化学元素基准值的空间分布规律进行深入分析。结果表明，研究区内主要重金属元素的空间分布呈现出显著非均质性和区域性特征。通过绘制等值线图 and 空间分布图，可清晰地观察到这些元素的富集区域与工业活动、交通干线以及农业集约化种植区的空间重叠性，暗示人类活动对其分布重要影响。

进一步地统计学分析显示，Cr、Ni 和 As 的空间分布相对较为均匀，但其局部异常值仍值得关注，此外，通过对土壤 pH 值和有机质含量的空间分布进行叠加分析，发现重金属元素的空间分布与这些环境因子之间存在密切联系。总体而言，研究区土壤地球化学元素的空间分布特征是自然因素与人为活动共同作用的结果，其空间差异原因需要结合多源数据进行综合分析。

4.3 与其他地区对比

研究表明，吉林黑土区土壤中 Cu、Zn 和 Pb 平均含量普遍

高于黑龙江省黑土区相应背景值,尤其是 Pb 含量高约 2.3 倍,显示出吉林地区可能存在更为显著 Pb 污染风险。与此同时,与我国东北地区以外土壤类型相比,华北平原潮土和长江中下游地区的水稻土,吉林黑土区土壤中 Cr 和 Ni 含量相对较低,但 As 含量则处于较高水平,这可能与区域地质背景和成土母质差异密切相关。在国际范围内,与乌克兰和美国的黑土区相比,土壤中重金属元素的平均含量整体较低,但部分元素变异系数较高,反映出其空间分布的复杂性。综上所述,吉林黑土区土壤地球化学特征既体现区域特有的自然禀赋,也反映人类活动对土壤环境的深刻影响。

5. 重金属污染评价

5.1 评价方法与标准

采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和地累积指数法等多种评价方法,以全面反映吉林地区黑土区土壤重金属污染的特征。上述方法的评价标准主要依据《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)及吉林省土壤重金属元素背景值,这些标准不仅体现了国家对于土壤环境质量的要求,还兼顾区域土壤的地球化学特征,为评价结果的科学性和可比性提供了保障。

5.2 污染程度评价结果

计算结果显示,研究区内 Cu、Mn、As、Zn、Cr、Ni 和 Pb 等 7 种重金属元素平均含量均超过吉林省重金属元素背景值,其中 Pb 含量最高,高于背景值 6.44 倍。单因子污染指数分析表明,As、Cu 和 Zn 的部分采样点已达到轻度至中度污染水平,而 Cd 和 Pb 则在局部地区表现出重度污染风险。内梅罗综合污染指数空间分布特征显示,污染程度较高的区域主要集中在长春市城乡交错区及榆树市玉米种植区,这些区域受到工业排放和农业活动双重影响,导致土壤重金属累积现象显著。此外,地累积指数分析结果进一步验证这一结论,表明 As、Cd 和 Pb 在研究区内存在明显富集趋势,且其空间分布与工矿企业分布和畜禽粪便施用区域高度相关。

5.3 污染风险评价

评价结果显示,Cd 和 As 是研究区内生态风险最高的重金属元素,其生态风险指数值在部分采样点超过 300,达到强生态风险级别;而 Pb、Cu 和 Zn 的生态风险相对较低,但仍处于中等风险水平。从空间分布来看,高风险区域主要集中于长春市城乡交错区和榆树市玉米种植区,这些区域由于长期受工业排放和农业活动影响,土壤重金属生物有效性显著增强,进而对作物生长和人体健康构成威胁。此外,相关性分析和主成分分析结果进一步表明,高风险区域的重金属污染主要来源于工业废水排放、畜禽粪便施用以及化肥农药的过度使用,这些污染源通过多种途径进入土壤生态系统,加剧重金属的累积效应。

6. 重金属污染来源解析

6.1 相关性分析

研究表明,某些重金属元素之间的高相关性可能表明它们具有相似地球化学特性或来源于相同污染源。例如,研究中 As、Zn 和 Cd 等元素之间表现出显著的正相关关系,这可能与它们在土壤中的吸附赋存机制有关。此外,Cu 和 Pb 的相关性也较高,暗示其可能受到类似人类活动影响。通过 Pearson 相关性分析,进一步揭示这些元素与土壤理化性质之间关系,为后续污染源解析提供了重要依据。值得注意的是,不同区域重金属相

关性存在差异,这种空间异质性反映局部污染源和地球化学过程复杂性。

6.2 主成分分析

研究表明,前三个主成分累计解释总方差 70%以上,其中第一主成分主要与 As、Cd 和 Zn 等元素相关,反映农业活动对土壤重金属累积影响。第二主成分则与 Cu 和 Pb 密切相关,可能源于工业排放和交通污染。第三主成分主要受 Cr 和 Ni 控制,与其自然背景值较高以及成土母质影响有关。结合研究区实际情况,这些结果不仅明确重金属污染主要来源类型,还为制定针对性污染防控措施提供科学依据。

6.3 正定矩阵因子分解模型

正定矩阵因子分解模型是一种基于受体模型的源解析技术,能够对重金属污染来源进行定量解析。结果表明,农业活动是研究区土壤重金属污染主要来源,其贡献率约为 40%-50%。工业排放和交通污染的贡献率次之,分别为 20%-30%和 10%-15%,主要影响 Cu 和 Pb 的分布。自然来源(如成土母质和风化作用)对 Cr 和 Ni 的贡献较大,约占 15%-20%。这些定量解析结果为制定科学合理的污染治理策略提供重要支持,同时也强调多源综合防控重要性。

7. 结论与建议

(1) 本文通过对吉林黑土区土壤地球化学基准值系统测定与分析,明确该区域土壤地球化学元素背景特征及其空间分布规律。通过相关性分析、主成分分析及正定矩阵因子分解模型联合应用,进一步解析重金属污染的来源,确认农业活动和工业排放为主要污染源,而自然成土过程对部分元素积累也有一定贡献。

(2) 为保护土壤质量和生态环境安全,应加强污染源监管,推广生态农业技术。针对已受严重污染区域,建议采用物理、化学或生物修复技术,逐步改善土壤环境质量。此外,还需完善相关法律法规,建立健全土壤环境监测体系,定期开展土壤地球化学基线调查与污染风险评估,确保土壤资源可持续利用。

(3) 未来应结合更多先进分析技术优化源解析模型,为污染治理提供更加科学的依据;建议加强跨学科合作,整合地球化学、生态学、毒理学等领域的研究成果,从多维度揭示重金属污染的形成机制及其生态效应,为区域土壤环境保护提供更为全面理论支持。

[参考文献]

- [1]李金凤;刘宝林;郑紫郡;路晓慧;杭璐;刘思序;罗馨雨;尹方圆.吉林省黑土区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].安徽农业科学,2022,50(4):83-86.
- [2]王建华;左玲;李志忠;穆华一;周萍;杨佳佳;赵英俊;秦凯.基于高光谱技术的黑土地微量金属元素探测方法及地学意义[J].地质力学学报,2021,27(3):418-429.
- [3]高婉莹;王冬艳;王兴佳;金晓彤;卢佳希.长春市黑土城乡交错区重金属地球化学特征及生态风险评价[J].世界地质,2023,42(4):749-760.
- [4]包立旭;姜杰;孙国新.黑龙江省黑土区土壤重金属污染及风险评价[J].环境科学与技术,2024,47(4):205-216.
- [5]于锐;王洋;王晨旭;王其存;崔政武.榆树市玉米种植区黑土重金属污染状况及来源浅析[J].生态环境学报,2017,26(10):1788-1794.