

长江流域高山湖泊微塑料历史沉积记录研究

李 艳^{1,2*}, 祖明月¹, 王紫譔¹

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²湖南文理学院地理科学与旅游学院, 湖南 常德

收稿日期: 2025年9月4日; 录用日期: 2025年10月7日; 发布日期: 2025年10月20日

摘 要

微塑料作为一种新型污染物, 其全球分布与生态风险已成为环境科学领域的研究前沿。高山湖泊因其环境敏感性、沉积连续性和远离直接污染源的特点, 成为重建区域污染历史的理想档案库。本文系统综述了以长江流域高山湖泊沉积岩芯为研究对象, 开展微塑料污染历史演变研究的意义、主要方法、潜在发现与挑战。文章指出, 通过¹³⁷Cs和²¹⁰Pbex定年技术与拉曼光谱分析相结合, 能够有效重建该流域过去数十年至百年的微塑料沉积通量、聚合物组成及形态演变历史, 其记录与我国经济发展阶段和塑料消费模式密切相关。该研究对于理解微塑料的大气远程传输机制、评估人类世活动对环境的影响以及制定有效的塑料污染管控政策具有重要科学价值。

关键词

微塑料, 高山湖泊, 沉积记录, 历史重建, 长江流域, 环境污染

Research on Historical Deposition Records of Microplastics in Alpine Lakes within the Yangtze River Basin

Yan Li^{1,2*}, Mingyu Zu¹, Zixuan Wang¹

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

School of Geography Science and Tourism, Hunan University of Arts and Science, Changde Hunan

Received: September 4, 2025; accepted: October 7, 2025; published: October 20, 2025

Abstract

As an emerging contaminant, the global distribution and ecological risks of microplastics have

*通讯作者。

文章引用: 李艳, 祖明月, 王紫譔. 长江流域高山湖泊微塑料历史沉积记录研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(10): 1373-1381. DOI: 10.12677/ag.2025.1510127

become a research frontier in environmental science. Alpine lakes, characterized by environmental sensitivity, sedimentary continuity, and remoteness from direct pollution sources, serve as ideal archives for reconstructing regional pollution history. This paper systematically reviews the significance, methodologies, key findings, and challenges of studying microplastic pollution evolution using sediment cores from alpine lakes in the Yangtze River Basin. The study demonstrates that combining ^{137}Cs and ^{210}Pb dating techniques with Raman spectroscopy can effectively reconstruct decadal-to-centennial scale records of microplastic deposition fluxes, polymer composition, and morphological evolution in the basin. These records show strong correlations with China's economic development stages and plastic consumption patterns. This research holds significant scientific value for understanding atmospheric long-range transport mechanisms of microplastics, assessing the environmental impact of Homo sapiens activities, and formulating effective plastic pollution control policies.

Keywords

Microplastics, Alpine Lakes, Sedimentary Records, Historical Reconstruction, Yangtze River Basin, Environmental Pollution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塑料的发明及其大规模生产被视为“人类世”的显著标志之一[1]。伴随而来的塑料污染，尤其是直径小于 5 毫米的微塑料，已广泛分布于全球各地，从深海沟壑到世界屋脊。微塑料因其持久性、潜在毒性和生物累积效应，对生态系统和人类健康构成了潜在的严重威胁[2]。

长江流域作为中国社会经济的核心地带，塑料制品的生产、消费及废弃物的产生量极为庞大[3]。然而，目前对微塑料的研究主要集中于城市河流、河口和沿海等直接污染区域，对其长期污染历程的了解仍存在明显空白[4]。高山湖泊，如青藏高原东缘、云贵高原及秦巴山脉的湖泊，由于人迹罕至且受当地人类活动直接影响较小，其污染物主要依赖于大气干湿沉降输入[5]。这一特性使湖泊沉积物像一部“天然记录仪”，连续且完整地保存了历史时期经由大气输送的各种污染物的信息。因此，通过对长江流域典型山地湖泊岩芯的研究，可以有效地反演其污染演化历程，是研究区域环境演化的重要手段。

2. 长江流域区域特征及其对微塑料沉积的影响

2.1. 潜在源区分析

长江流域作为中国经济社会发展最为活跃的区域之一，其塑料产业的历史演变与废弃物管理政策的变迁，直接影响了微塑料的排放与扩散路径[6]。

上游地区(成渝经济区)自 20 世纪 80 年代起逐渐发展成为西南地区的塑料工业中心，主要生产包装材料、农用薄膜及日用塑料制品等。伴随西部大开发政策的深入推进，塑料产能持续扩张，尤其是聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)等通用塑料的产量显著提升。废弃物处理方式从早期的露天堆放、填埋逐步转向焚烧和资源化利用，但在此过程中仍存在微塑料泄漏的风险。

中游地区(武汉都市圈、长株潭城市群)以汽车制造、电子产品和建材工业为主导，塑料消费结构更加多样化，工程塑料(如 ABS、PC)和特种塑料的使用量较大。该区域城市化进程迅速，生活垃圾产生量庞

大，微塑料通过污水处理厂排放、雨水径流等途径进入环境。

下游地区(长三角城市群)是中国塑料制品生产和消费最为集中的区域，尤其是浙江省和江苏省的塑料加工企业高度密集。塑料种类涵盖从通用塑料到高性能复合材料的全谱系。近年来，随着“禁塑令”和循环经济政策的推行，微塑料排放路径可能发生改变，然而历史累积效应依然显著。这些源区的塑料生产与消费模式的变化，预计将在高山湖泊沉积记录中留下清晰的时空印记。

2.2. 大气环流特征与微塑料传输路径

长江流域位于东亚季风区，大气环流呈现显著的季节性变化，这对微塑料的远程传输产生了重要影响(如图 1)。冬季风期(西北风向)受西伯利亚高压控制，盛行西北风，能够将上游四川盆地、关中平原等工业区的污染物向东南方向输送，进而影响云贵高原和秦巴山区的高山湖泊。夏季风期(东南风向)则以东南风为主导，源自长三角和中游城市群的微塑料可能向西北方向传输，影响青藏高原东缘的湖泊。春秋过渡期间，风向多变，传输路径复杂，可能导致多源混合的微塑料负荷。此外，地形抬升效应显著，例如青藏高原东缘和云贵高原的山地地形有利于湿沉降的发生，从而增强微塑料在湖泊中的沉降效率。

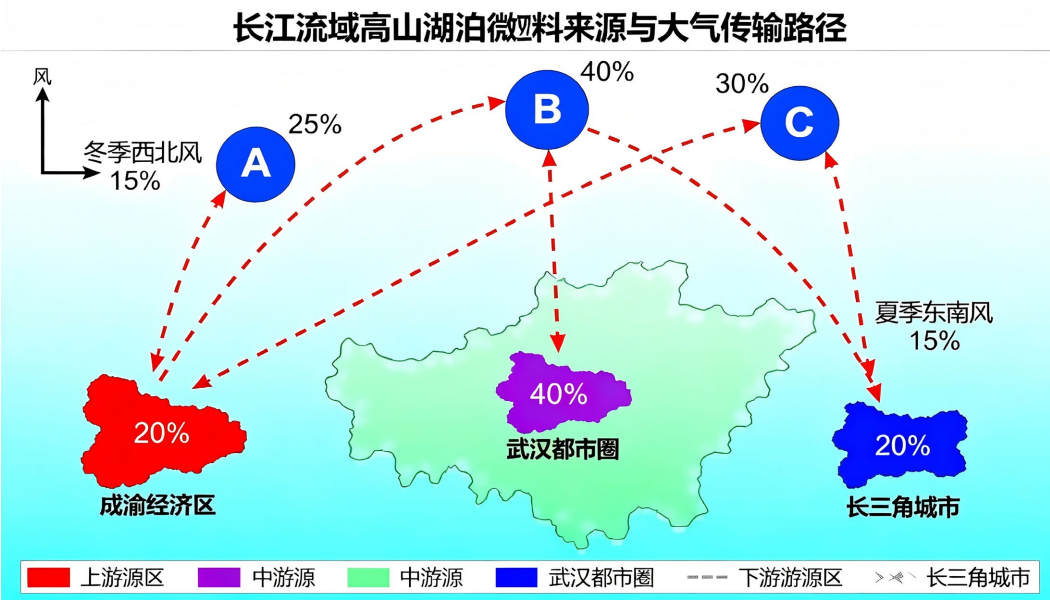


Figure 1. Schematic diagram of microplastic sources and atmospheric transport pathways in alpine lakes of the Yangtze River Basin
图 1. 长江流域高山湖泊微塑料来源与大气传输路径示意图

2.3. 湖泊选择依据与湖沼学背景

本研究拟选择以下三类高山湖泊作为研究对象，依据其地理分布、湖沼特征及受人类干扰程度进行筛选(如表 1)。

青藏高原东缘湖泊(如泸沽湖、伍须海)海拔高(>3000 m)，受直接人为影响极小，大气沉降为主控输入途径。湖沼学参数显示流域面积小，沉积速率低(约 0.1~0.3 cm/年)，年代分辨率高，适合百年尺度重建[7]。

云贵高原湖泊(如洱海、抚仙湖)位于季风交汇带，受中下游和东南亚污染物交叉影响，具有空间代表性。湖沼学参数显示水深较大(部分超过 100 m)，沉积物连续性好，已有较多背景数据支持[8]。

秦巴山区湖泊(如天池、神农架高山湖群)靠近中游城市群，对区域经济发展响应敏感，具典型性与对比价值。湖沼学参数显示沉积速率中等(0.3~0.5 cm/年)，适合高分辨率年代重建[9]。

Table 1. Basic characteristics and sampling suggestions of three types of alpine lakes
表 1. 三类高山湖泊的基本特征与采样建议

区域	海拔范围(m)	沉积速率(cm/年)	代表性湖泊	主要输入途径	研究优势
青藏高原东缘	>3000	0.1~0.3	泸沽湖、伍须海	大气沉降	年代分辨率高，干扰极小
云贵高原	1800~2500	0.2~0.4	洱海、抚仙湖	大气与径流交叉	沉积连续，背景数据丰富
秦巴山区	1500~2800	0.3~0.5	天池、神农架	大气与局部人类活动	对经济响应敏感，对比性强

2.4. 高山湖泊作为研究载体的独特优势

长江流域的高山湖泊在研究微塑料历史记录方面具有独特且不可替代的优势：

- 1) 环境的“哨兵”作用：这些湖泊构成相对封闭的生态系统，汇水区域简单明了。微塑料主要通过大气远程传输进入湖泊，能够有效反映区域尺度的污染背景，而非局限于局部点源污染[5]。
- 2) 连续的沉积档案：得益于稳定的水文条件和较慢的沉积速率，湖泊沉积物层序分明，年代序列完整无缺，从而提供高分辨率的时间序列信息[10]。
- 3) 对人类活动的指示性：沉积物中微塑料的积累通量及其聚合物类型的变化，直接映射出流域乃至国家层面的塑料生产量、消费模式及废物管理政策的演变趋势[11]。

3. 研究方法与技术路线

3.1. 研究点选择与岩芯采样

研究点的选择需具备代表性(如分布在长江上、中、下游不同区段)和典型性(如海拔较高、受直接人为干扰小)。采样多使用重力或活塞采样器在湖泊最深区域采集未扰动的柱状岩芯，并在现场进行分层切割，低温冷冻保存运输至实验室，严防采样过程中的大气微塑料污染。

3.2. 沉积物定年技术

建立精确的年代框架是历史重建的核心。目前，普遍采用 ^{210}Pb 定年法(适用于测定过去 100~150 年的沉积年代，分辨率可达年际尺度)与 ^{137}Cs 时标法(利用 1950 年代大气核试验开始出现、1963 年全球峰值和 1986 年切尔诺贝利事故峰值作为验证时标)相结合的方式，为每个沉积层位赋予准确的日历年龄[12]。 ^{137}Cs 作为一种人工放射性核素，源自大气核试验。尽管它并非独立的定年方法，却是一个极其珍贵的时标标记，在验证和校准 ^{210}Pb 年代模型的过程中发挥着至关重要的作用。

定年是一项复杂且涉及多个步骤的工作。在此过程中， ^{210}Pb 的运用为微塑料年代提供了连续且高分辨率的时间框架，而 ^{137}Cs 的引入则提供了一个精确的绝对时间点以供验证。将这两种方法相结合，为微塑料历史的重建提供了一个科奥的年代学依据。这一做法确保了后续有关污染趋势、通量计算以及与人类活动相关联的所有分析，都是在合理的时间序列之上进行的。

3.3. 微塑料的提取与鉴定

微塑料提取：沉积物样本需经过干燥和称重处理，随后利用密度分离法(常用饱和 NaCl 或 NaI 溶液)将微塑料与沉积物基质分离，接着，使用过氧化氢(H_2O_2)或 Fenton 试剂消解有机质，以纯化样本[13]。提取液被抽滤到特定孔径的滤膜上，在选择滤膜材质时，必须选用不会引入干扰的材料，如铝氧化物(Anodisc)、聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)或纤维素酯(Cellulose Ester)。应避免使用常规的混合纤维素酯膜，因为它在红外光谱下会产生显著干扰[14]。通常采用 5 μm 或 0.45 μm 孔径的滤膜，以便捕捉更微小的颗粒。

微塑料鉴定：首先在体视显微镜下进行初步观察，统计颗粒数量，并根据形状(纤维、碎片、薄膜、微珠)、颜色和尺寸进行分类[15]。然而，用显微镜观察不能精确地鉴别出聚合物的种类。为此，可采用傅里叶红外(μ -FTIR)和激光直接红外(LDIR)成像等手段，对颗粒物中的高分子组分(PE, PP, PS 等)进行逐个识别，以保证分析结果的准确性。

3.4. 数据分析与历史重建

在完成了沉积物定年、微塑料的提取、计数与鉴定之后，研究进入了最关键的数据分析与历史重建阶段(如图2)。这一过程旨在将海量的微观观测数据整合到时间维度中，揭示其内在规律和与环境驱动因素的关联。

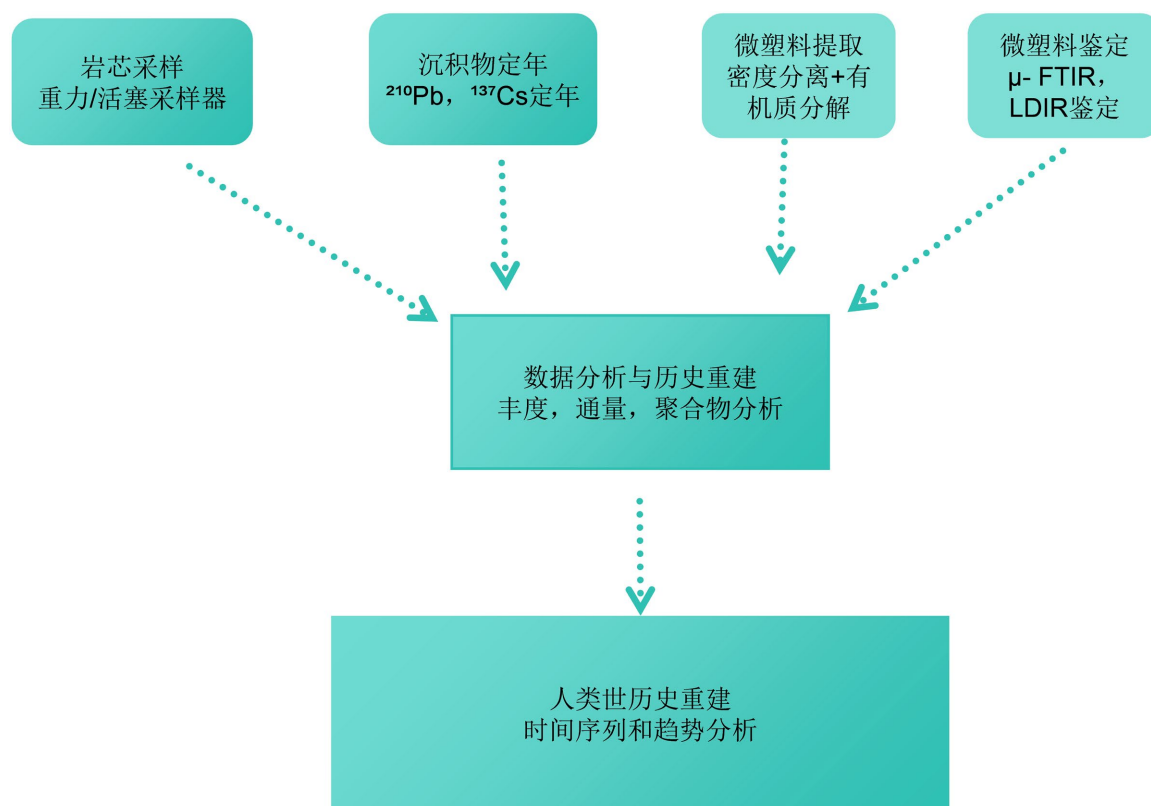


Figure 2. Technology roadmap for microplastic research in alpine lakes

图 2. 高山湖泊微塑料研究技术路线图

在处理所有样本时，必须扣除在现场空白和程序空白中检测到的微塑料数量，以消除采样和处理过程中可能产生的污染。这是确保数据分析准确性的关键步骤。校正后的微塑料丰度(颗粒数)应等于样本计数减去空白样本的平均计数[16]。

为了在不同层位之间进行公正的比较，微塑料数量需要进行标准化处理。其中一种方法是质量标准化，即计算每千克干沉积物中的微塑料颗粒数(颗粒数/千克干重)。这是一个常用指标，因为它考虑到了沉积物含水量和密度的变化。

沉积通量是重建历史污染的关键指标。它通过计算每年每平方米湖底沉积的微塑料颗粒数来衡量。公式如下：

$$\text{质量累积速率(MAR, g/cm}^2\text{/年)} = \text{沉积物干密度(g/cm}^3\text{)} \times \text{线性沉积速率(cm/年)}$$

微塑料沉积通量(颗粒数/m²/年) = 微塑料丰度(颗粒数/g) × MAR (g/cm²/年) × 10⁴ (单位转换)

通量数据的好处在于它排除了沉积速率变化可能带来的干扰,从而能够更真实地反映进入湖泊的微塑料绝对量的历史变化趋势[17]。

将鉴定出的微塑料丰度(如颗粒数/千克干重)、聚合物类型比例、形态分布等数据,与已建立的精确年代序列进行对应,即可绘制出微塑料沉积通量随时间变化的曲线,进而重建其污染历史。

4. 科学价值与研究展望

4.1. 长江流域高山湖泊微塑料特征

对长江流域高山湖泊微塑料沉积记录的研究,预计将揭示其独特的污染历史。这一预期建立在一系列全球范围内的开创性研究基础之上,这些研究为我们提供了方法论范式和结果预测的重要参考。

Corcoran 等人对加拿大 Huron 湖沉积物的研究发现,微塑料的丰度自第二次世界大战结束(1940s 末)开始增加,并在 1970s 后急剧上升,这与北美塑料工业的繁荣时间点完全一致[18]。该研究是首次明确在湖泊沉积物中识别出微塑料时间趋势的经典之作。Peng 等人对中国东南沿海海洋沉积岩芯的研究发现,微塑料的沉积通量自 20 世纪 80 年代开始显著增加,并在 90 年代后加速增长,其趋势与中国和亚太地区的塑料产量高度相关($R^2 > 0.9$),为沉积记录反映区域经济活动提供了强有力的证据[19]。Materić 等人对北极冰川冰芯的研究重建了 1940s 以来的微塑料沉积记录。他们发现,早期(1960s 以前)的颗粒主要由 PE 和 PP 组成,而后期则出现了 PET、PA 和乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(EVA)等多种聚合物,直接证明了大气传输的微塑料成分随全球塑料消费结构的变化而演变[20]。Brandon 等人对瑞典西部沿海沉积物的研究指出,纤维是最主要的形态,且其丰度自 1960s 以来持续增长。同时,碎片形态的微塑料比例也在近几十年大幅增加,这与塑料废弃物数量的增加及其在环境中暴露时间的延长导致其更充分破碎的理论相符[21]。Brandon 等人对加州沿海的海洋沉积岩芯进行了长达 175 年的历史重建。研究发现,自 1945 年以来,微塑料的沉积速率呈指数级增长,其累积量与北美和全球的塑料产量曲线几乎完美重合(数量级上增加了好几个指数级)[21],令人震惊地揭示了沉积记录与人类塑料生产活动的直接定量联系。

基于现有全球类似研究,对长江流域高山湖泊的微塑料研究可得到以下规律(如图 3):

1) 清晰的时间趋势:微塑料的沉积通量预计将从 20 世纪 70 年代末或 80 年代初开始呈现显著上升趋势,这与我国改革开放后经济腾飞、塑料消费量指数级增长的历史阶段高度吻合。近年来,随着环保意识的提升和“限塑令”等政策的实施,增长趋势可能趋于平缓或出现波动。

2) 聚合物组成的演变:前期沉积层主要由低密度高分子如聚乙烯和聚丙烯(PP)组成。近期层位中,聚合物的类型会越来越丰富,如聚对苯二甲酸二醇酯(PET)、PVC (PVC)等,体现出塑料制品的多样化发展趋势。

3) 形态特征的变迁:纤维(可能来自合成纺织品的洗涤)和碎片可能始终是主要形态。近期层位中次级微塑料的比例预计会增加,并且其平均粒径将会变小,这一点与塑料产品在自然环境中的不断老化破坏相吻合。

4) 关联人类活动与政策:微塑料累积曲线可与区域的塑料产量、国内生产总值(GDP)、人口数据等宏观经济指标进行相关性分析,从而定量评估人类活动的驱动作用,并检验环保政策的实际效果。

综上所述,长江流域高山湖泊的微塑料沉积记录研究,将首次为该区域提供一份长达百年的、高分辨率的“塑料污染年代学”。它既可以检验中国地区气候变化背景下的普适性,又可以从大气输送这一独特的角度,深入认识内陆人为活动对高寒山区生态系统产生的深刻影响。这项研究的实施,将为中国的微塑料再循环模式的建立提供重要的基础资料支持,为我国和世界范围内的塑料污染控制策略的制定提供重要的科学依据。

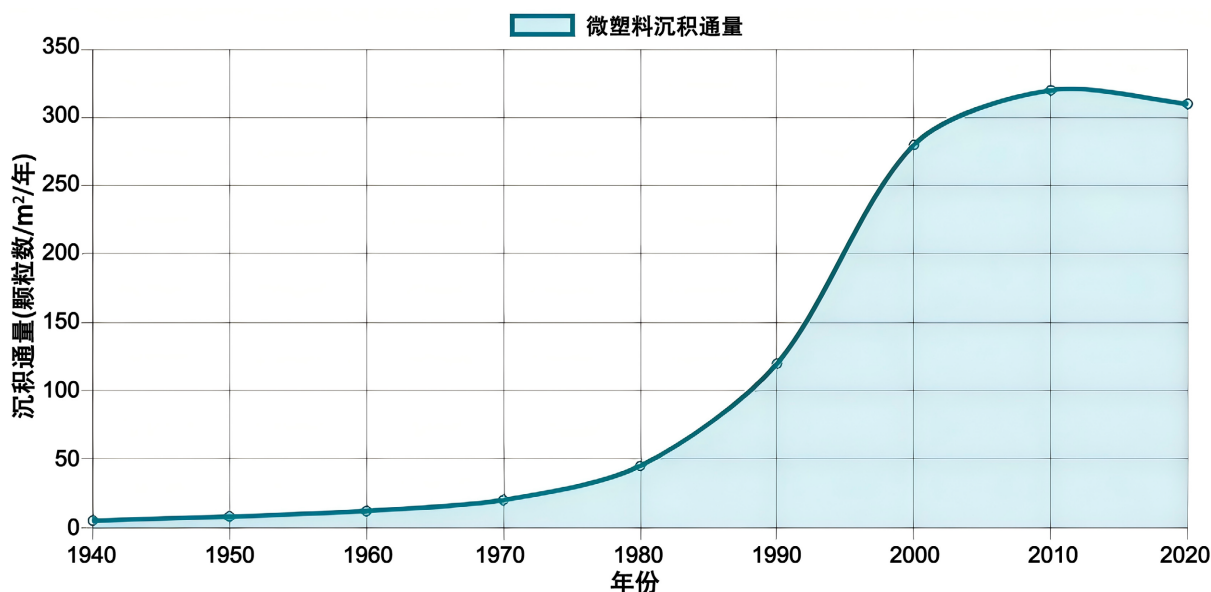


Figure 3. Historical trends in expected microplastic deposition flux

图 3. 预期微塑料沉积通量历史变化趋势

4.2. 微塑料研究面临诸多挑战和展望

污染控制：从野外采样到实验室分析的全过程，需严格执行严格的空白样和质控程序，以排除环境中无处不在的微塑料(尤其是纤维)的污染[22]。

标准化问题：目前从采样、前处理到分析鉴定的各个环节，由于缺乏全球统一的标准方法，导致不同研究间的数据可比性较差[23]。

小尺寸颗粒的检测极限：对纳米塑料以及直径小于 20 微米的微塑料的检测与鉴定，目前依然是技术领域的一大难题，而这些微小颗粒很可能潜藏着更高的环境风险[24]。

生态风险评价：未来研究需将历史记录与沉积物毒性测试、生物标志物分析相结合，深入评估微塑料长期累积的生态效应[25] [26]。

展望：未来研究应致力于以下方面：(1) 构建标准化的分析方法；(2) 开展多湖泊、多流域的对比研究，揭示空间分布规律；(3) 结合大气化学传输模型，实现精准溯源；(4) 将微塑料记录与其他污染物(如黑碳、重金属)记录进行多指标综合分析，全面解读“人类世”湖泊沉积物的环境指示意义[27] [28]。

5. 结论

对长江流域高山湖泊沉积岩芯中的微塑料进行分析，是重建我国区域微塑料污染历史的有效途径[29]。这项研究不仅能够揭示塑料污染随社会经济变迁的演变历程，更能突出微塑料通过大气进行远程传输所引发的全球性环境问题[30]。其所提供的长期观测数据对于验证模型、评估政策成效及预测未来趋势至关重要，将为全球和国家的塑料污染治理战略奠定坚实的科学基础。

参考文献

- [1] Rochman, C.M., Tahir, A., Williams, S.L., Baxa, D.V., Lam, R., Miller, J.T., *et al.* (2015) Anthropogenic Debris in Seafood: Plastic Debris and Fibers from Textiles in Fish and Bivalves Sold for Human Consumption. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 14340. <https://doi.org/10.1038/srep14340>
- [2] Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., *et al.* (2004) Lost at Sea: Where Is

- All the Plastic? *Science*, **304**, 838-838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- [3] 王芳婷, 包科, 齐信. 长江流域武汉段典型湖泊中微塑料的赋存特征及生态风险评估[J]. 环境工程学报, 2023, 17(12): 3953-3959.
- [4] Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. and Galloway, T.S. (2011) Microplastics as Contaminants in the Marine Environment: A Review. *Marine Pollution Bulletin*, **62**, 2588-2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- [5] 陈灏, 张微微, 赵建国. 高山湖泊沉积物中微塑料的赋存特征与历史重建[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 3000-3008.
- [6] 李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷. 长江流域微塑料污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1439-1447.
- [7] 徐海, 盛恩国, 蓝江湖, 等. 青藏高原东缘近 2000 年湖泊气候记录及全球联系[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(2): 257-268.
- [8] 杨玉凤, 赵雁捷, 郑佳楠, 仇恒帅, 朱可欣, 赵钰, 郑文秀, 王荣. 近两百年来云贵高原横断山区聚龙湖沉积记录的流域多过程变化[J]. 湖泊科学, 2025, 37(4): 1345-1356.
- [9] 彭佳, 黄春玲, 陈旭. 沉积物记录的亚高山湖泊环境变化——以鄂东南云中湖为例[J]. 地理研究, 2018, 37(1): 220-230.
- [10] Zhang, K., Su, J., Xiong, X., Wu, X., Wu, C. and Liu, J. (2016) Microplastic Pollution of Lakeshore Sediments from Remote Lakes in Tibet Plateau, China. *Environmental Pollution*, **219**, 450-455. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.048>
- [11] Dong, M., Luo, Z., Jiang, Q., Xing, X., Zhang, Q. and Sun, Y. (2020) The Rapid Increases in Microplastics in Urban Lake Sediments. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 848. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57933-8>
- [12] Turner, S., Horton, A.A., Rose, N.L. and Hall, C. (2019) A Temporal Sediment Record of Microplastics in an Urban Lake, London, UK. *Journal of Paleolimnology*, **61**, 449-462. <https://doi.org/10.1007/s10933-019-00071-7>
- [13] 郑明凯, 王冬梅, 李飞. 沉积物中微塑料提取与鉴定方法研究进展[J]. 分析测试技术与仪器, 2022, 28(1): 1-10.
- [14] 高硕欣, 刘璐璐, 张凯旋, 等. 土壤微塑料的来源及分离鉴定方法[J]. 山东化工, 2023, 52(20): 136-138, 142.
- [15] 王颖, 刘建国, 周启星. 微塑料在环境中的分布、迁移及生态效应研究进展[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 1681-1692.
- [16] 赵雨辰, 肖蓉, 张恩, 等. 长江流域微塑料污染特征与来源解析研究进展[J]. 环境科学研究, 2021, 34(3): 593-604.
- [17] Allen, S., Allen, D., Phoenix, V.R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., *et al.* (2019) Atmospheric Transport and Deposition of Microplastics in a Remote Mountain Catchment. *Nature Geoscience*, **12**, 339-344. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>
- [18] Corcoran, P.L., Norris, T., Ceccanese, T., Walzak, M.J., Helm, P.A. and Marvin, C.H. (2015) Hidden Plastics of Lake Ontario, Canada and Their Potential Preservation in the Sediment Record. *Environmental Pollution*, **204**, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.04.009>
- [19] Peng, G., Zhu, B., Yang, D., *et al.* (2020) Microplastics in Sediments of the Changjiang Estuary, China. *Environmental Pollution*, **257**, Article ID: 113571.
- [20] Materić, D., Kjær, H. A., Vallelonga, P., *et al.* (2020) Microplastics in the Arctic: A Case Study with Sub-Surface Ice Cores from Northeast Greenland. *Environment International*, **145**, Article ID: 106087.
- [21] Brandon, J.A., Jones, W. and Ohman, M.D. (2019) Multidecadal Increase in Plastic Particles in Coastal Ocean Sediments. *Science Advances*, **5**, eaax0587. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0587>
- [22] 张远, 李斐, 钟寰, 等. 长江流域水环境中微塑料污染研究进展[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1129-1138.
- [23] 刘敏, 王佩, 罗专溪, 等. 高山湖泊沉积物中微塑料的污染特征及其环境指示意义[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 1025-1035.
- [24] Horton, A.A., Walton, A., Spurgeon, D.J., Lahive, E. and Svendsen, C. (2017) Microplastics in Freshwater and Terrestrial Environments: Evaluating the Current Understanding to Identify the Knowledge Gaps and Future Research Priorities. *Science of the Total Environment*, **586**, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
- [25] Eriksen, M., Lebreton, L.C.M., Carson, H.S., Thiel, M., Moore, C.J., Borerro, J.C., *et al.* (2014) Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLOS ONE*, **9**, e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- [26] 黄民生, 陈振楼, 徐亚同. 微塑料的环境行为与生态风险研究进展[J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 417-426.
- [27] 吴辰熙, 潘响亮, 骆永明. 土壤环境中微塑料污染: 来源、过程及风险[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1377-1388.
- [28] Bank, M.S. and Hansson, S.V. (2019) The Plastic Cycle: A Novel and Holistic Paradigm for the Anthropocene.

Environmental Science & Technology, **53**, 7177-7179. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02942>

- [29] 任源, 吴丰昌, 冯承莲, 等. 淡水环境中微塑料的污染现状与研究展望[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 1-10.
- [30] Evangeliou, N., Grythe, H., Klimont, Z., Heyes, C., Eckhardt, S., Lopez-Aparicio, S., *et al.* (2020) Atmospheric Transport Is a Major Pathway of Microplastics to Remote Regions. *Nature Communications*, **11**, Article No. 3381. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17201-9>