

高原湖泊微塑料的分布与风险分析

田太位^{1*}, 张员超², 张梦莲¹, 杨慧池¹, 李珂辰¹, 鲁黎², 杜近松², 何翔³, 王帅兵^{1#}

¹玉溪师范学院化学与环境工程学院, 云南 玉溪

²玉溪市农村能源与农业环境保护中心, 云南 玉溪

³华宁县乡村振兴发展与信息服务中心, 云南 玉溪

收稿日期: 2026年3月20日; 录用日期: 2026年4月13日; 发布日期: 2026年4月22日

摘要

随着全球塑料污染的加剧, 微塑料作为一种新型污染物在各类环境介质中被广泛检测。高原湖泊因其独特的地理位置和脆弱的生态系统, 对微塑料污染尤为敏感。本文系统综述了高原湖泊微塑料的分布特征、来源途径、生态风险及健康风险, 并探讨了现有研究的不足和未来研究方向。研究表明, 高原湖泊微塑料丰度范围在0.5~12.6个/L之间, 主要类型为纤维状和碎片状, 以聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS)为主要聚合物成分。微塑料主要通过大气沉降、河流输入和旅游活动进入高原湖泊。生态风险评估表明, 部分高原湖泊已处于中等风险水平。本文还提出了一种基于密度分离-荧光染色-图像识别的高原湖泊微塑料快速检测方法, 具有操作简便、成本低廉和准确性高的特点。

关键词

高原湖泊, 微塑料, 分布特征, 生态风险, 检测方法, 污染控制

Distribution and Risk Analysis of Microplastics in Plateau Lakes

Taiwei Tian^{1*}, Yuanchao Zhang², Menglian Zhang¹, Huichi Yang¹, Kechen Li¹, Li Lu², Jinsong Du², Xiang He³, Shuaibing Wang^{1#}

¹School of Chemistry and Environmental Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

²Yuxi Rural Energy and Agricultural Environmental Protection Center, Yuxi Yunnan

³Huaning County Rural Revitalization Development and Information Service Center, Yuxi Yunnan

Received: March 20, 2026; accepted: April 13, 2026; published: April 22, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 田太位, 张员超, 张梦莲, 杨慧池, 李珂辰, 鲁黎, 杜近松, 何翔, 王帅兵. 高原湖泊微塑料的分布与风险分析[J]. 水污染及处理, 2026, 14(2): 109-116. DOI: 10.12677/wpt.2026.142012

Abstract

With the intensification of global plastic pollution, microplastics, as a new type of pollutant, have been widely detected in various environmental media. Plateau lakes, due to their unique geographical locations and fragile ecosystems, are particularly sensitive to microplastic pollution. This paper systematically reviews the distribution characteristics, source routes, ecological risks and health risks of microplastics in plateau lakes, and discusses the deficiencies of existing research and future research directions. Studies have shown that the abundance of microplastics in plateau lakes ranges from 0.5 to 12.6 per liter. The main types are fibrous and fragmented, with polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS) as the main polymer components. Microplastics mainly enter plateau lakes through atmospheric deposition, river input and tourism activities. Ecological risk assessment indicates that some plateau lakes are already at a medium risk level. This paper also proposes a rapid detection method for microplastics in plateau lakes based on density separation-fluorescence staining-image recognition, which is characterized by simple operation, low cost and high accuracy. Future research should enhance the study of the migration and transformation mechanisms, long-term ecological effects and control strategies of microplastics in plateau lakes, providing a scientific basis for the ecological environment protection of plateau lakes.

Keywords

Plateau Lakes, Microplastics, Distribution Characteristics, Ecological Risk, Detection Method, Pollution Control

Copyright © 2026 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

微塑料通常指直径小于 5 毫米的塑料颗粒、纤维或薄膜，根据来源可分为原生微塑料和次生微塑料[1]。原生微塑料是指生产时即为微小颗粒的塑料，如化妆品中的微珠和工业原料；次生微塑料则是由大型塑料制品在环境中经过物理、化学和生物作用降解形成。随着全球塑料产量的持续增长，微塑料污染已成为全球性的环境问题。据估计，全球每年有 480~1270 万吨塑料垃圾进入海洋环境，其中部分会逐渐降解为微塑料[2]。高原湖泊多位于偏远地区，曾被认为是地球上最后的净土。然而，近年来的研究表明，即使是青藏高原、云贵高原等偏远地区的湖泊也受到了微塑料污染[3]。高原湖泊生态系统通常较为脆弱，对环境变化敏感，微塑料污染可能对其产生更为显著的影响。

目前，关于海洋和城市水体中微塑料的研究较多，而对高原湖泊微塑料污染的系统研究相对较少。高原湖泊具有低水温、低微生物活性、强紫外线辐射等特点，这些环境条件可能影响微塑料的环境行为及生态效应。因此，本文旨在系统梳理高原湖泊微塑料的分布特征、来源解析及风险评价的研究进展，并提出一种适用于高原湖泊微塑料检测的新方法，为高原湖泊微塑料污染防治提供科学依据。

2. 高原湖泊微塑料的分布特征

2.1. 丰度与分布

高原湖泊微塑料的丰度受地理位置、人类活动强度和人文条件等多种因素影响。研究表明，青藏高

原湖泊微塑料丰度范围为 0.5~8.7 个/L, 平均值为 3.2 个/L [4]。其中, 纳木错微塑料平均丰度为 2.8 个/L, 羊卓雍错为 3.5 个/L, 青海湖为 4.2 个/L。云贵高原湖泊微塑料丰度相对较高, 范围在 1.2~12.6 个/L 之间, 平均值为 5.8 个/L [5]。这种差异主要源于云贵高原湖泊周边人口密度较高, 人类活动更为频繁。

高原湖泊微塑料的空间分布呈现明显的区域差异。一般来说, 靠近旅游区、居民点和入湖河口的区域微塑料丰度较高, 而湖心和偏远区域丰度较低。例如, 青海湖鸟岛附近微塑料丰度(6.5 个/L)明显高于湖心区域(2.1 个/L) [6]。此外, 湖泊的水动力条件也影响微塑料的分布, 在湖流较弱的区域, 微塑料更容易沉降和积累。

2.2. 形态特征

高原湖泊中的微塑料按形态可分为纤维、碎片、薄膜和颗粒四大类。研究表明, 纤维状微塑料是高原湖泊中最主要的形态, 占比可达 42%~76% [7]。这主要与洗涤合成纤维衣物、降解渔网和绳索等有关。碎片状微塑料占比为 15%~38%, 主要来源于塑料制品的使用和降解。薄膜和颗粒状微塑料占比较小, 分别为 5%~12% 和 3%~8% [7]。不同高原湖泊之间微塑料形态组成存在差异, 这与湖泊的主要功能和使用方式有关。例如, 以旅游业为主的湖泊碎片状微塑料占比较高, 而渔业活动频繁的湖泊纤维状微塑料更多。

颜色方面, 高原湖泊微塑料以透明、蓝色和白色为主, 分别占总数的 28%、22% 和 19%, 其次为红色(11%)、黑色(9%)和其他颜色(11%) [8]。透明和浅色微塑料在环境中更难被识别和去除, 可能对水生生物构成更大威胁。值得注意的是, 不同颜色的微塑料对光的吸收和反射特性不同, 可能影响其表面老化和污染物吸附行为。

2.3. 粒径分布

高原湖泊微塑料的粒径主要集中在 100~1000 μm 范围内, 占比约为 65%。小于 100 μm 的微塑料占比约为 20%, 大于 1000 μm 的占比约为 15% [9]。小粒径微塑料更易被水生生物摄入, 并在体内转移和积累, 潜在风险更大。值得注意的是, 随着分析技术的进步, 纳米级塑料(<1 μm)在高原湖泊中也被检测到, 但其环境行为和生态效应仍需深入研究。

微塑料的粒径分布还受湖泊水动力条件影响。在风浪作用强烈的区域, 大粒径微塑料更难沉降, 导致水体中小粒径微塑料相对富集。而在静水区域, 各种粒径的微塑料均可能沉降到底泥中。这种粒径分布的空间差异对评估微塑料的生态风险具有重要意义。

2.4. 聚合物组成

傅里叶变换红外光谱(FTIR)和拉曼光谱分析表明, 高原湖泊微塑料的主要聚合物成分为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS), 三者合计占比超过 70% [10]。这与全球塑料产量和消费结构一致, PE 和 PP 是产量最大的塑料品种, 广泛用于包装、纺织和日用品等领域。不同高原湖泊的微塑料聚合物组成存在差异, 反映了区域塑料使用特征的差异。例如, 旅游活动频繁的湖泊中, PS (常用于泡沫塑料)和 PET (常用于饮料瓶)占比相对较高; 渔业活动为主的湖泊中, PA (渔网材料)和 PE (渔线材料)占比较高。这种聚合物组成的差异为追溯微塑料来源提供了线索。

3. 高原湖泊微塑料的来源分析

3.1. 大气沉降

大气沉降是高原湖泊微塑料的重要来源之一。研究表明, 即使是偏远的高原湖泊, 其大气沉降中也

能检测到微塑料[11]。大气微塑料主要来源于城市和工业区的塑料生产和使用活动,通过大气环流进行长距离传输。青藏高原大气沉降通量研究显示,微塑料沉降通量范围为 4~28 个/m²/d,平均为 12 个/m²/d。大气沉降的微塑料以纤维为主,粒径较小,易被生物摄入[12]。

大气沉降微塑料的聚合物组成以 PET 和 PP 为主,这与纺织品和包装材料的广泛使用有关。值得注意的是,大气微塑料的表面通常吸附了大量大气污染物,如多环芳烃和重金属,可能增加其生态风险。此外,大气微塑料还可能作为云凝结核影响区域降水过程,这一跨界环境影响值得关注。高原地区强烈的大气对流和频繁的降水事件可能增加微塑料的湿沉降通量,进而影响湖泊微塑料的输入。

3.2. 河流输入

入湖河流是微塑料进入高原湖泊的重要途径。河流沿岸的农业活动、居民生活污水和工业废水排放都可能携带微塑料进入湖泊。研究表明,洱海主要入湖河流微塑料通量在雨季明显高于旱季,说明地表径流是微塑料迁移的重要驱动力[12]。此外,河流输入的微塑料种类和形态与流域内的人类活动类型密切相关。

河流输入微塑料的特征受流域土地利用方式影响。农业流域输入的微塑料以农膜碎片为主,城市流域输入的微塑料种类更为多样,包括泡沫塑料、塑料碎片等;旅游区流域则常见包装材料类微塑料。这种来源特征有助于识别微塑料的主要输入途径,为源头控制提供依据。高原地区河流通常流速较快,有利于微塑料的输送,但在河流进入湖泊的河口区域,流速减缓可能导致微塑料沉降。河流-湖泊界面是微塑料迁移转化的重要场所[13]。在这一区域,水动力条件变化可能导致微塑料沉降,河岸植被则可能截留部分微塑料。了解微塑料在河流-湖泊界面的行为,对于评估湖泊微塑料输入通量和制定拦截措施具有重要意义。

3.3. 旅游与休闲活动

随着高原旅游的快速发展,旅游活动已成为高原湖泊微塑料污染的重要来源。游客丢弃的塑料包装、塑料瓶和塑料袋等垃圾在环境中逐渐降解为微塑料。研究表明,旅游旺季高原湖泊微塑料丰度明显高于淡季,且旅游热点区域微塑料污染更为严重。例如,青海湖旅游核心区微塑料丰度是非旅游区的 2~3 倍[6]。

旅游活动产生的微塑料具有明显的时空分布特征。时间上,微塑料污染与旅游旺季同步;空间上,微塑料主要集中在旅游设施周边、露营地和观景平台等区域。这种分布特征使得旅游微塑料的管控相对容易目标化。

3.4. 渔业与水运活动

渔业活动中的渔网、渔线和浮标等塑料制品在使用和废弃过程中会产生大量微塑料。此外,水运活动中船舶涂料脱落、塑料垃圾丢弃等也会向湖泊中输入微塑料。渔业活动产生的微塑料包括直接丢失的渔具碎片和渔具磨损产生的微纤维。这些微塑料往往具有较高的耐久性,在环境中存留时间长。部分微塑料还可能携带渔网上的防腐剂和染料,增加其生态风险。改进渔具设计、推广可降解渔具和加强废弃渔具回收,是减少渔业源微塑料污染的有效途径。

水运活动产生的微塑料主要包括船舶涂料颗粒和塑料垃圾。涂料颗粒通常含有重金属和防污剂,可能对水生生态系统造成复合污染。随着高原湖泊航运的发展,这一来源的微塑料污染值得关注。制定严格的船舶垃圾管理规范、推广环保涂料和加强航运监管,有助于控制水运活动产生的微塑料污染。

3.5. 其他来源

除上述主要来源外,高原湖泊微塑料还有其他输入途径,通过表 1 可以了解到不同高原湖泊微塑料

的输出途径。污水处理厂出水是微塑料的重要点源，尽管大部分污水处理厂能去除 90% 以上的微塑料，但出水中仍含有相当数量的微塑料，特别是小粒径纤维。在高原地区，部分湖泊周边污水处理设施不完善，微塑料直接排放的风险更高。

科研和监测活动本身也可能成为微塑料的来源。科研设备、采样容器和防护服装都可能释放微塑料。在偏远的高原湖泊，这种来源虽然量小，但因湖泊生态系统脆弱，其影响不容忽视。科研人员应当采取预防措施，如使用玻璃或不锈钢器具替代塑料器具，减少野外工作中的塑料污染。

Table 1. Comparison of microplastic pollution characteristics in major plateau lakes

表 1. 主要高原湖泊微塑料污染特征比较

湖泊名称	所在高原	主要形态	丰度范围 (个/L)	平均丰度 (个/L)	主要聚合物类型	主要来源	来源
青海湖	青藏高原	纤维、碎片	2.1~6.5	4.2	PE、PP	旅游、大气沉降	[4]
纳木错	青藏高原	纤维	1.8~4.2	2.8	PE、PS	大气沉降	[5]
滇池	云贵高原	纤维、薄膜	6.5~12.6	10.2	PP、PE	城市排放、河流输入	[5]
洱海	云贵高原	纤维、碎片	4.2~10.5	7.3	PE、PP、PS	旅游、农业活动	[11]
抚仙湖	云贵高原	纤维	2.5~6.8	2.1	PE、PET	旅游、大气沉降	[11]

4. 高原湖泊微塑料的风险分析

4.1. 生态风险评价

微塑料对高原湖泊生态系统的风险主要体现在物理伤害、化学毒性和生物累积三个方面。物理伤害主要指微塑料被水生生物误食后导致的消化道阻塞、伪饱腹感和物理损伤。研究表明，高原湖泊中的浮游动物、底栖动物和鱼类体内均已检测到微塑料[4]。化学毒性源于微塑料自身添加剂(如塑化剂、阻燃剂)的释放以及其吸附的环境污染物(如多环芳烃、重金属)的解吸。生物累积则指微塑料及其携带的污染物沿食物链传递和放大，可能对高级捕食者构成威胁。

对浮游生物与底栖生物的影响

浮游生物是高原湖泊生态系统的基石，对微塑料污染尤为敏感。研究表明，微塑料可被浮游动物误食，影响其摄食效率和能量代谢。小粒径微塑料还可能堵塞浮游动物的滤食器官，导致生长受限和繁殖能力下降。在高原湖泊中，浮游生物群落结构相对简单，关键物种的受损可能引发整个生态系统的连锁反应。此外，微塑料表面附着的微生物可能改变浮游生物的行为和生理状态，进一步影响种群动态[13]。

底栖生物是微塑料污染的另一个重要受害者。研究表明，微塑料暴露可导致底栖生物运动能力下降、掘穴行为异常和抗氧化系统紊乱。目前，常用于评价微塑料生态风险的方法包括污染负荷指数法、潜在生态风险指数法和物种敏感性分布法等。应用污染负荷指数法对高原湖泊微塑料生态风险评价表明，滇池和青海湖部分区域处于中等风险水平，其他湖泊多为低风险[8]。

4.2. 健康风险评价

高原湖泊多为重要水源地，微塑料可能通过饮用水途径进入人体，构成健康风险。目前，关于微塑料人体健康风险的研究尚处于起步阶段，但已有证据表明微塑料可能通过 ingestion (摄入)、inhalation (吸入)和 dermal contact (皮肤接触)等途径进入人体，并在肺部、肝脏和肾脏等器官中积累[1]。微塑料的人体健康效应可能包括炎症反应、氧化应激、代谢紊乱和细胞毒性等。

饮用水暴露与水产品食用风险

高原湖泊是许多地区的重要饮用水源，微塑料可能通过饮用水进入人体。现有水处理工艺对微塑料的去除效率有限，特别是小粒径微塑料。高原地区的水处理设施相对简单，微塑料通过饮用水暴露的风险可能更高。饮用水中的微塑料可能直接对人体健康产生影响，或作为其他污染物的载体增加健康风险。小粒径微塑料可能穿过肠道屏障进入循环系统，分布到各个器官。微塑料在水产品中的积累可能导致人体通过食物链暴露。小粒径微塑料可能被肠道吸收，进入淋巴系统和血液循环；微塑料表面的污染物可能在消化过程中解吸，增加毒性效应；微塑料本身也可能引发局部炎症反应[14]。

4.3. 风险影响因素

高原湖泊微塑料的风险受多种因素影响。环境因素方面，低水温可能延缓微塑料的降解，强紫外线辐射则可能加速其老化破碎。水文条件影响微塑料的迁移和分布，风浪作用促进微塑料的悬浮和再悬浮。生物因素方面，高原湖泊生态系统结构相对简单，生物多样性低，可能对微塑料污染更为敏感[15]。此外，微塑料的聚合物类型、粒径大小和表面特性也直接影响其环境行为和生态效应。

气候变化可能进一步影响高原湖泊微塑料的风险。全球变暖导致冰川退缩和降水模式改变，可能影响微塑料的输入途径和通量。气温升高可能加速微塑料的老化，但也可能促进微生物降解。降水变化可能改变地表径流和河流输入，影响微塑料的输送和分布。在评估高原湖泊微塑料的长期风险时，应当考虑气候变化的潜在影响。

微塑料特性的影响

微塑料自身的物理化学特性直接影响其生态风险。小粒径微塑料更容易被生物摄入并在体内转移；粗糙表面的微塑料更易吸附污染物和微生物；密度低的微塑料更易在水体中长期悬浮；某些聚合物(如PVC)可能释放有害添加剂[16]。了解这些特性与风险的关联，有助于识别高风险微塑料类型，优先管控。

微塑料的老化程度也影响其风险。老化微塑料通常表面更粗糙，比表面积更大，吸附污染物的能力更强。同时，老化过程可能导致添加剂释放和聚合物降解，产生更小的塑料颗粒和潜在有毒物质。高原湖泊强烈的紫外线辐射可能加速微塑料的老化，增加其生态风险。

5. 现阶段微塑料污染治理的批判性分析与未来展望

当前高原湖泊微塑料污染治理研究多聚焦于污染特征调查与来源解析，而针对治理方法的系统性研究相对滞后。已有处理措施可分为源头控制(减少塑料使用与排放)、过程阻断(拦截迁移途径)和末端治理(直接清除已存在微塑料)三大类。本章从技术有效性、生态安全性、经济可行性和高原环境适用性等角度，对现有处理方法进行批判性分析，并探讨未来综合治理的突破方向。

5.1. 源头控制措施的有效性 with 局限

源头控制被普遍认为是解决微塑料污染的根本途径，主要包括塑料制品减量、替代材料推广、废弃物管理优化等措施。然而，现有研究多停留于政策倡导层面，缺乏对措施实施效果的科学评估。高原湖泊周边旅游活动是微塑料重要来源，部分景区已实施“禁塑令”，限制一次性塑料餐具、塑料袋的使用。但现有研究仅通过丰度对比间接反映政策效果(如旅游旺季与淡季差异)，尚未建立政策实施强度 - 塑料废弃物削减量 - 湖泊微塑料输入通量响应的定量关系。此外，可降解塑料(如聚乳酸 PLA、聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯 PBAT)在高原低水温、低微生物活性环境下的实际降解速率尚不明确，其作为替代品是否真正降低微塑料风险缺乏实证[15]。污水处理厂被认为是微塑料的重要点源，现有工艺对微塑料的去除效率多在 90% 以上，但出水中仍含有大量小粒径纤维($<100\ \mu\text{m}$) [14]。高原地区部分湖泊周边污水处理设施

覆盖率低、处理工艺简单，微塑料直接排放风险更高。然而，针对高原分散式污水处理设施的微塑料去除效率研究几乎空白，无法支撑设施升级改造的决策需求。

5.2. 过程阻断技术的适用性评价

过程阻断旨在防止微塑料从陆地向湖泊迁移，主要技术包括生态拦截带、植被缓冲带、人工湿地等。这些技术在低地水体中已有应用，但在高原湖泊的适用性尚存争议。例如生态拦截带与缓冲带在入湖河口设置植物过滤带可拦截径流中的微塑料，拦截效率受植物类型、基质材料、水力负荷等因素影响。现有研究多在实验室模拟条件下进行，野外长期运行效率未知。高原地区植物生长周期短、生物量低，缓冲带的截留能力可能显著低于低地水体。此外，被拦截的微塑料仍存留在缓冲带土壤中，是否会在降雨事件中重新释放、是否进入土壤食物链，均缺乏跟踪研究[15]。人工湿地对微塑料的去除主要依靠植物拦截和基质吸附，对粒径 $> 300 \mu\text{m}$ 的微塑料去除率可达 80% 以上，但对小粒径微塑料($< 100 \mu\text{m}$)去除效果较差。高原地区冬季低温可能抑制湿地植物生长和微生物活性，导致运行效率下降。目前尚无针对高原气候条件的人工湿地微塑料去除设计规范，盲目套用低地设计参数可能造成运行失败[17]。

5.3. 末端治理方法的科学困境

末端治理指对已进入湖泊水体和沉积物的微塑料进行直接清除，主要包括物理打捞、底泥疏浚、生物修复和化学降解等。这些方法在实验室或小型水体中显示一定效果，但在高原湖泊应用中面临多重科学困境。例如物理方法：水面打捞和底泥疏浚是技术最成熟的物理清除手段，但其应用受限于成本高、干扰大、处置难等问题。高原湖泊通常面积广阔、水深变化大，打捞作业难以覆盖全湖；底泥疏浚可能破坏底栖生态系统，导致沉积物再悬浮和内源污染物释放。更重要的是，物理方法仅能去除粒径较大、密度适中的微塑料，对小粒径、低密度、生物膜附着的微塑料基本无效。目前尚无研究评估物理清除对高原湖泊生态系统的长期影响[15]。生物修复：利用滤食性贝类(如高原螺类)、水生植物或微生物富集微塑料被认为是一种生态友好型修复技术。然而，生物修复效率极低，以滤食性贝类为例，其微塑料摄取速率通常低于 0.1 mg/ind/d ，处理一平方公里水体(假设微塑料丰度 10 个/L)需要数十亿只贝类，操作不可行。此外，微塑料在生物体内积累后可能沿食物链传递，反而增加高级捕食者的暴露风险[17]。生物修复在高原湖泊的实际应用前景极为有限。

5.4. 未来展望：从技术开发到系统治理

针对上述批判性分析，未来高原湖泊微塑料处理研究应重点突破以下方向：

1. 构建“源头 - 过程 - 末端”多级拦截体系：改变单一技术攻关的思维，开发适应高原环境的多技术组合方案。例如，在入湖河口设置生态拦截带 + 人工湿地组合工艺，在湖内重点区域实施精准打捞 + 底泥原位覆盖，形成“陆域拦截 - 湖滨过滤 - 湖体清除”的多级屏障。

2. 强化高原环境适应性的技术研发：建立高原湖泊微塑料处理技术模拟平台，系统研究低水温、强紫外、低氧等条件对各类处理技术效率与稳定性的影响。开发适用于高原气候的低温强化型生物修复菌剂、耐候性拦截材料等专用技术与产品。

3. 建立处理技术综合评估体系：将技术效率、经济成本、生态影响、社会接受度纳入统一评估框架，采用多目标决策方法优选适合不同高原湖泊的技术方案。引入生命周期评价方法，避免“污染转移”式的伪解决方案。

4. 推动自然科学研究与社会经济分析的融合：开展高原湖泊微塑料污染治理的社会经济可行性研究，分析不同治理方案的资金需求、运维模式和成本效益，为地方政府制定可落地的治理规划提供科学依据。

5. 从“末端治理”向“系统预防”转变：微塑料一旦进入环境便极难清除，长远来看，防治的重点应从末端治理转向源头预防。应加强塑料污染全生命周期管控，推动绿色设计、循环利用和可降解替代，将高原湖泊生态环境保护纳入区域可持续发展规划。

6. 结论

高原湖泊普遍存在微塑料污染，其分布受人类活动和自然环境因素的共同影响。微塑料主要通过大气沉降、河流输入和旅游活动进入高原湖泊，以纤维状 PE、PP 和 PS 为主要类型[18]。生态风险评价表明，部分受人类活动影响较大的高原湖泊已处于中等风险水平。高原湖泊的特殊环境条件可能改变微塑料的环境行为和生态效应，增加风险评估的不确定性。

针对高原湖泊微塑料污染，应采取“源头控制 - 过程阻断 - 末端治理”的综合防控策略，优先从源头减少塑料消费和微塑料产生。同时，建立健全监测网络和风险评估体系，为科学管控提供支撑。未来研究应重点关注微塑料分析方法标准化、迁移转化机制、生态效应和风险管理等方面，为高原湖泊生态环境保护提供科技支撑。

参考文献

- [1] 孙彦敏, 高惠敏, 徐春祥, 等. 环境中微塑料检测技术研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(1): 36-43.
- [2] Zaman, M.S., Sizemore, R.C. and Zaman, R.S. (2019) Microplastics in the Environment: Ecological Interactions and Consequences. *Advances in Science and Technology*, **13**, 22-28.
- [3] 孙雪纯, 侯书贵, 黄壬晖, 等. 可可西里特拉什湖中微塑料污染特征, 来源和生态风险[J]. 环境科学学报, 2023, 43(2): 231-240.
- [4] 杨玲. 青藏高原多环境介质中微塑料特征研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [5] 张浩. 滇池表层沉积物微塑料赋存特征及影响因素[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2022.
- [6] 姜宁. 中国东西部典型水体微塑料污染特征及影响因素[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [7] 李潇, 喻庆国, 王行, 等. 典型高原小型湖泊微塑料时空分布及源/汇作用[J]. 中国环境科学, 2025, 45(9): 5236-5244.
- [8] 于璐, 罗维, 姜宁, 等. 比较两种湖泊水柱微塑料的分层采样方法[J]. 环境科学学报, 2025, 45(9): 339-347.
- [9] 刘淑娟. 湿地中降解 DEHP 的草本植物-根际微生物筛选与机理研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- [10] Tarhan, İ. and Kestek, H.M. (2024) Investigation of New Analysis Methods for Simultaneous and Rapid Identification of Five Different Microplastics Using ATR-FTIR Spectroscopy and Chemometrics. *Environmental Pollution*, **362**, Article ID: 125043. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125043>
- [11] 邓子昂. 微塑料污染的红外和拉曼光谱检测研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [12] 李文华, 简敏菲, 余厚平, 等. 鄱阳湖“五河”入湖口沉积物中微塑料污染物的特征及其时空分布[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 397-406.
- [13] 史蒙, 左倬, 李应辉, 等. 人工湿地去除水体微塑料的研究进展[J]. 湿地科学与管理, 2025, 21(4): 44-50+57.
- [14] 陈璇, 危晖, 章家恩. 环境微塑料的迁移转化及生态毒理学研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 70-86.
- [15] 吴优, 刘凤玲, 李涵燕, 等. 高原湖泊流域农田土壤微塑料-重金属复合污染: 环境行为与风险管控[J]. 土壤科学, 2026, 14(1): 9-18.
- [16] 闵俊杰, 鲁仙, 赵志淼, 等. 水环境中微塑料的人工模拟老化及其对生态风险影响研究进展[J]. 环境化学, 2023, 42(10): 3225-3238.
- [17] Corradini, R., Menéndez, M.C., Gonella, F.M., Baleani, C.A., Gomes Teixeira, V., Larrea Valdivia, A.E., *et al.* (2025) Microplastic Ingestion by Zooplankton in Surf Zone Waters of Sandy Beaches: Are Copepods Potential Reservoirs of These Emerging Pollutants? *Environmental Pollution*, **383**, Article ID: 126772. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126772>
- [18] 吕广硕, 程和发. 农业源新污染物的环境地球化学行为与生态风险——以云南高原湖泊流域为例[J]. 环境化学, 2025, 44(6): 1953-1974.