

云南杞麓湖底泥营养物质分布及释放特征*

赵海光¹, 张甫², 尚江涛¹, 杜彩东¹, 刘畅¹, 段怡君¹, 赵祥华¹**, 潘继征²**

(1. 云南省生态环境科学研究院/云南省重金属污染控制工程技术研究中心, 昆明 650034;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所/湖泊与流域水安全重点实验室, 南京 211135)

摘要: 在外源污染持续削减背景下, 内源污染已成为制约杞麓湖水质改善与精准治理的关键瓶颈。为揭示云南高原典型重污染湖泊杞麓湖底泥污染特征、内源释放风险及污染来源, 2024—2025 年对全湖 20 个采样点底泥总氮 (TN)、总磷 (TP)、有机质 (OM) 及重金属含量进行系统调查, 并采用克里金插值分析其空间分布特征, 结合内梅罗指数法和主成分分析 (PCA) 评价污染程度并解析来源; 在此基础上, 选取西部河口、湖心及东北部典型区域开展静态模拟实验, 定量评估氮磷释放通量。结果表明: 杞麓湖表层底泥 TN、TP 和 OM 含量分别为 2120~11300 mg/kg、270~2280 mg/kg 和 41.4~260 g/kg, 70% 的区域达中度及以上复合污染 (内梅罗指数 > 2.0), TN 为综合污染的主导因子。污染空间异质性显著, 西南部入湖河口区和湖心区形成主要污染热点。PCA 结果表明, 杞麓湖底泥污染主要受两类来源共同影响: 一类是以 TP 及 Cd、Pb、Cu、Zn 等重金属为特征的农业面源与工业复合污染, 另一类是以 TN 和 OM 为特征的生活污水及内源生物有机污染。静态释放实验表明, 氮磷释放风险存在显著空间分异: 湖心与东北部受藻源性有机质分解驱动, 为高效释放区, TP 和氨氮最大释放通量分别达 2.80 mg/(m²·d) 和 146.1 mg/(m²·d); 西部河口区则因外源硝酸盐输入与有机质累积耦合, 脱氮作用强于有机氮矿化, 表现为 TN 净吸收的潜在脱氮汇。研究表明, 高原浅水湖泊底泥内源污染存量与释放风险存在明显空间非均一性及功能分异, 可为内源污染的分区治理与精准管控提供科学依据。

关键词: 杞麓湖; 底泥; 内源污染; 氮磷; 空间分布; 静态释放; 源解析

On the Distribution and Release Characteristics of Nutrients in the Sediments of Lake Qilu, Yunnan Province

Zhao Haiguang¹, Zhang Fu², Shang Jiangtao¹, Du Caidong¹, Liu Chang¹, Duan Yijun¹, Zhao Xianghua¹**, Pan Jizheng²**

(1. Yunnan Provincial Academy of Eco-Environmental Sciences / Yunnan Provincial Engineering and Technology Research Center for Heavy Metal Pollution Control, Kunming 650034, Yunnan, P.R.China)

(2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, Jiangsu, P.R.China)

Abstract: Under the continuous reduction of external pollution loads, internal loading has become a critical bottleneck restricting water quality improvement and precise management of Lake Qilu, Yunnan Province. To reveal sediment pollution characteristics, internal release risks, and pollution sources in this typical heavily polluted plateau lake in Yunnan, systematic surveys of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), organic matter (OM), and heavy metals in sediments were conducted at 20 sampling sites across the lake from 2024 to 2025. Kriging interpolation was used to analyze their spatial distribution patterns, while the Nemerow

*2025-08-25 收稿; 2025-12-02 收修改稿。

国家自然科学基金联合基金项目(U2202209)、云南省科技厅重点研发计划(202503AT100002, 202303AC100019)和兴滇英才支持计划 2025 年度青年人才项目 (530000251100004339966) 联合资助。

*通讯作者: 赵祥华, E-mail: 1030196675@qq.com; 潘继征, E-mail: jzhp@niglas.ac.cn

pollution index and principal component analysis (PCA) were applied to evaluate pollution levels and identify potential sources. Based on this, static incubation experiments were further carried out in three representative regions—the western estuary, the lake center, and the northeastern area—to quantitatively assess nitrogen and phosphorus release fluxes. Results showed that TN, TP, and OM contents in surface sediments ranged from 2120 to 11300 mg/kg, 270 to 2280 mg/kg, and 41.4 to 260 g/kg, respectively. Approximately 70% of the lake area reached moderate or higher composite pollution levels (Nemerow index > 2.0), with TN as the dominant factor in composite pollution. Significant spatial heterogeneity was observed, with the southwestern estuarine area and central lake zone representing major pollution hotspots. PCA results indicated that sediment pollution in Lake Qilu was primarily influenced by two source categories: agricultural non-point source and industrial composite pollution characterized by TP and heavy metals such as Cd, Pb, Cu, and Zn, and domestic sewage and endogenous organic pollution characterized by TN and OM. Static incubation experiments further demonstrated significant spatial differentiation in nitrogen and phosphorus release risks. The central and northeastern regions, driven by algal-derived organic matter decomposition, acted as high-efficiency release zones, with maximum release fluxes of TP and ammonia nitrogen reaching 2.80 mg/(m²·d) and 146.1 mg/(m²·d), respectively. In contrast, the western estuarine area exhibited net TN absorption and functioned as a potential denitrification sink, where denitrification exceeded organic nitrogen mineralization due to the coupling of external nitrate input and organic matter accumulation. These findings reveal marked spatial heterogeneity and functional differentiation in sediment pollutant stocks and release risks in shallow plateau lakes, providing a scientific basis for zone-specific control and precise management of internal pollution in Lake Qilu.

Keywords: Lake Qilu; Sediment; Endogenous pollution; Nitrogen and phosphorus; Spatial distribution; Static release; Source apportionment

湖泊是地球表层重要的淡水资源库和独特的生态系统^[1],而在全球湖泊系统中,高原湖泊因其高海拔、强辐射、生态系统脆弱等特征,具有重要的科研价值和生态战略意义^[2]。以云南九大高原湖泊为代表的云贵高原湖泊群,是维系西南区域生态安全的基石。近年来,受人类活动加剧影响,大量污染物入湖导致多数高原湖泊面临富营养化加剧与蓝藻水华频发的严峻挑战^[3-4]。

杞麓湖作为典型的高原陷落性浅水封闭湖泊,水体交换极其缓慢。其流域(约 350 km²)内高强度的农业活动导致了极其严重的农业面源污染^[5-6]。据估算,农业面源对入湖 TN 和 TP 的贡献率分别高达 83.06% 和 91.12%^[7],是导致湖泊水质恶化的最主要驱动力。在这种自然滞水与人为强排的双重压力下,杞麓湖水质自 20 世纪 80 年代起持续恶化,虽在阶段性治理下曾短暂改善,但 2019 年以来再度恶化并长期处于劣 V 类,蓝藻水华频发^[8-9]。

长期高负荷的外源输入使得湖底沉积物演变为巨大的污染累积库^[10]。在特定条件下,沉积物可向上覆水持续释放污染物,形成内源污染^[11],成为湖泊富营养化治理的重要障碍^[12-13]。尤其在浅水湖泊中,风浪扰动易引发底泥再悬浮,进一步促进污染物向上覆水释放,导致在外源削减后内源污染仍可能成为制约水质改善的关键因素^[14]。目前,针对杞麓湖的研究多集中于水质评价与外源估算,而对其底泥污染物的空间分布特征、多源复合机制及界面释放风险的空间分异尚缺乏系统解析^[15-16]。基于此,针对杞麓湖受高强度农业干扰的污染特征,系统开展全湖底泥空间勘查与原位释放模拟,旨在定量揭示其内源污染的存量格局与释放风险分异机制,为重污染浅水湖泊的精准分区治理与管控提供科学依据^[17]。

1 研究区域概况

杞麓湖位于云南玉溪市通海县境内(102°45′-102°50′E, 24°15′-24°20′N),为典型高原浅水湖泊,流域面积 320 km²,水体面积 36 km²,平均水深 2.5 m,年蓄水量约 9000 万 m³。湖泊属封闭型内陆湖,受西南季风影响,年均气温 16℃,降水 1200 mm,水文补给主要依赖地表径流和地下水^[18]。

受农业面源(高强度蔬菜种植)和生活污水输入的双重影响,湖泊呈现重度富营养化,水质长期劣 V 类,蓝藻水华频发^[19]。中国湖泊普遍面临富营养化的严峻挑战^[20],在巨大的外源污染负荷与内源释放双重压力下,杞麓湖水环境问题尤为突出。相关研究表明,杞麓湖重度富营养化已引发显著生态健康风险,湖区不仅蓝藻水华频发,还伴随浮游生物群落异常演替及微囊藻毒素蓄积^[21-22]。

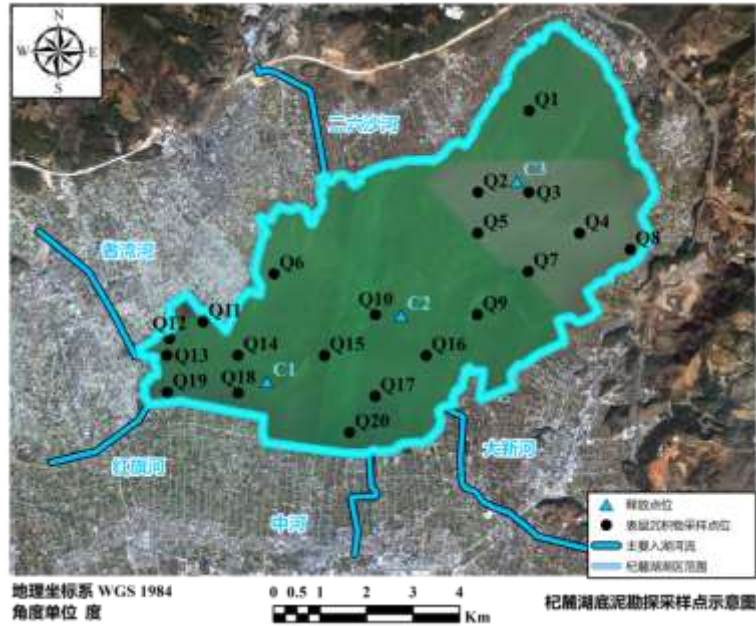


图1 杞麓湖底泥勘探采样点示意图

Fig.1 Schematic map of sediment sampling sites in Lake Qilu

2 材料与方法

2.1 采样点布设与样品采集

2024年11-12月,对杞麓湖全湖进行了系统调查,以评估全年污染物积累,为分析其空间分布特征,该调查共布设了20个勘探采样点(图1)。同时,为深入研究释放机制,2025年春季在湖泊西部(C1)、湖心(C2)及东北部(C3)三个代表性区域进行了水-泥同步调查,以模拟春季藻华前底泥初始释放潜能,避免夏季高温干扰。添加静态释放实验的3个区域(C1、C2、C3)选自20个勘查点位中的典型位置,基于空间分布分析,确保实验结果能代表全湖异质性,并与勘查数据互补:C1对应西南部河口区(Q14附近,高存量区),C2对应湖心区(Q17附近,生物沉降中心),C3对应东北部区(Q9附近,静水区)。

为进行空间分布特征分析,2024年11-12月使用抓斗式采泥器系统采集了全湖20个采样点的表层(0-10 cm)混合底泥,该方法可获得代表性较好的区域平均样品。为深入研究释放机制,于2025年春季在湖泊西部(C1)、湖心(C2)及东北部(C3)三个代表性区域,使用重力柱状采泥器采集含上覆水的原状水-泥柱状样品。获得完整且不受扰动的水-泥界面以准确评估静态释放界面通量。柱状样品在现场被立刻密封,竖直放置并尽快运回实验室。通过定时监测上覆水中氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、溶解性活性磷(SRP)等不同形态氮磷浓度的动态变化,来定量评估营养盐的释放通量和转化规律。

2.2 样品分析指标与测定方法

所有采集的表层底泥样品经冷冻干燥、剔除杂质后,使用玛瑙研钵研磨,并过100目尼龙筛,使样品均匀化后于样品袋中保存待测。各项主要污染物的测定方法如下:

(1)总氮(TN):采用经典的凯氏法(Kjeldahl method)进行测定^[23]。称取约0.2 g的干泥样品,经浓硫酸消解后,通过凯氏定氮仪(Kjeltec 8400, FOSS, 丹麦)蒸馏并使用盐酸标准溶液滴定,最终计算出样品中的总氮含量。

(2)总磷(TP):采用碱熔-钼锑抗分光光度法进行测定^[24]。称取约0.2 g的干泥样品,与氢氧化钠在马弗炉中高温熔融,冷却后经盐酸提取,最终使用紫外可见分光光度计(UV-2600, Shimadzu, 日本)在特定波长下测定其吸光度,换算出总磷含量。

(3)有机质(OM):采用灼烧减重法(Loss-on-ignition, LOI)测定^[25]。将坩埚和干泥样品在105℃下烘干

至恒重，称重后放入马弗炉中，于 550℃ 下灼烧 4h，冷却至室温后再次称重。两次称重值的差值与初始干重之比即为烧失量，在本研究中作为有机质含量的表征指标。

(4)重金属：样品经硝酸-氢氟酸-高氯酸（HNO₃-HF-HClO₄）体系进行微波消解^[26]，使重金属元素充分溶出。消解液定容后，采用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS,Agilent 7700x, 美国）测定铜（Cu）、铅（Pb）、锌（Zn）、铬（Cr）、镉（Cd）和砷（As）的含量；汞（Hg）采用催化热解-冷原子吸收分光光度法（HJ 923-2017）测定。

所有表层样品分析均在云南省生态环境科学研究院环境分析测试中心完成。分析过程严格遵循质量保证/质量控制（QA/QC）程序，通过设置方法空白、平行样及使用国家标准参考物质进行质量控制，所有质控样品的检测结果均在允许误差范围内，确保了数据的准确可靠。

为定量评估底泥向上覆水体释放氮、磷营养盐的潜能和速率，采用柱样静态培养法开展模拟实验，并参照大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放通量的估算方法计算氮、磷释放通量^[27]。根据前期空间分布分析结果，选取西部河口区（C1）、湖心区（C2）和东北部静水区（C3）3 个代表性点位（图 1），采集保持界面原状的完整水-泥柱状样品，在实验室内进行静态培养实验。

实验装置为有机玻璃柱（内径 90 mm，高 500 mm），每个点位设置三个平行样。通过虹吸小心移除管柱内沉积物上覆水，避免对沉积物表面的扰动。采集的原位上覆水水样通过 0.45 μm 醋酸玻璃纤维膜过滤，过滤去除藻类和悬浮物后，再用虹吸法沿壁小心滴注至柱内，液面高度距沉积物表面 20 cm 处停止，标注刻度。使其上方保留约 2 L 的原位湖水，进行为期 3d 的避光、恒温（20℃）培养。本实验设计旨在评估短期内源释放潜能，重点模拟突发环境改变（如藻华爆发导致缺氧）下的沉积物快速响应机制，而非旨在探究长期的水-泥界面平衡状态^[28-29]。培养期间，分别在第 0 h、12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 定时从上覆水中央抽取 20 mL 水样，并立即用取自采样点、经过 0.45 μm 醋酸玻璃纤维膜过滤的湖水进行等体积补充，以维持水体体积恒定。

采集的水样经 0.45 μm 滤膜过滤后，用于测定溶解态营养盐。水样用于分析氨氮、硝态氮、亚硝态氮、溶解性活性磷等溶解态营养盐的浓度。未过滤的原水样用于测定 TN 和 TP，TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定，TP 采用钼酸铵分光光度法测定。溶解有机氮（DON）和溶解有机磷（DOP）通过总溶解态氮/磷（同样采用消解法测定）减去上述溶解无机态氮/磷计算得出。颗粒态磷（PP）由 TP 减去总溶解态磷（TDP）计算得出。

营养盐的释放通量（Flux）根据以下公式计算：

$$\text{Flux} = \frac{V(C_n - C_0) + \sum_{i=1}^{n-1} V_i (C_{i-1} - C_a)}{A \times T}$$

其中， V 为上覆水体积（L）， C_n 和 C_0 分别为培养结束时和初始时上覆水中营养盐的浓度（mg/L）； V_i 和 C_{i-1} 分别为第 i 次采样的体积（L）和该次采样前上覆水中营养盐的浓度（mg/L）； C_a 为补充水样中营养盐的浓度（mg/L）； A 为沉积物与水的接触面积（m²）， T 为总培养时间（d）。

计算结果中，Flux 为培养周期内营养盐的平均释放通量（mg/(m²·d)）。通量为正值表示污染物从底泥向上覆水体释放，负值则表示底泥对上覆水中的污染物表现为净吸收。

2.3 底泥污染评价方法

2.3.1 综合污染指数 为全面反映各污染物对底泥的综合作用，并突出高浓度污染物对环境质量的影响，本研究采用了由 Nemerow N.L. (1974)^[30]提出的内梅罗综合污染指数法（Nemerow's Pollution Index）。该方法首先计算每种污染物的单项污染指数，然后通过公式计算综合污染指数。

计算公式如下：

(1)土壤单项污染指数 (P_i)

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

其中， C_i 是土壤污染物的实测浓度值； S_i 是该污染物的评价标准或背景值。

(2)内梅罗污染指数 (PN)

$$P_N = \sqrt{\frac{(\overline{P_i, ave})^2 + (P_{i, max})^2}{2}}$$

其中, $P_{i, ave}$ 是所有污染物单项污染指数的平均值; $P_{i, max}$ 是所有污染物单项污染指数中的最大值。

根据计算出的内梅罗污染指数(PN), 将污染等级划分为五级, 具体标准见下表。

表 1 底泥内梅罗污染指数评价标准

Tab.1 Evaluation criteria of Nemerow pollution index for sediments

等级	内梅罗污染指数 (PN)	污染等级
I	$PN \leq 0.7$	清洁 (安全)
II	$0.7 < PN \leq 1.0$	尚清洁 (警戒限)
III	$1.0 < PN < 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < PN \leq 3.0$	中度污染
V	$PN > 3.0$	重污染

2.3.2 有机污染指数法 有机污染指数法是评价底泥受有机物污染程度的常用方法。该方法主要以底泥中的 OM 含量作为核心评价指标, 通过将其与相关标准进行对比, 对有机污染水平进行定性分级。

评价标准主要参照相关湖泊研究中普遍采用的底泥有机质污染分级标准^[31-32]。该标准根据有机质含量的不同, 将底泥有机污染程度划分为 4 个等级, 具体如下: I 级 (清洁): 有机质含量 $< 40 \text{ g/kg}$ 。有机质含量处于该区域自然环境背景值范围内, 未受到明显的外源有机污染。II 级 (轻度污染): 有机质含量在 $40 - 60 \text{ g/kg}$ 之间。有机质含量已表现出一定程度的累积, 反映了外源有机物的输入, 但尚未成为底泥环境质量的主要制约因素。III 级 (中度污染): 有机质含量在 $60 - 100 \text{ g/kg}$ 之间。有机质含量显著富集, 其分解过程会大量消耗底泥-水界面的溶解氧, 可能导致局部厌氧, 对底栖生态系统构成潜在威胁, 已成为较强的内源污染源。IV 级 (重度污染): 有机质含量 $> 100 \text{ g/kg}$ 。有机质含量极高, 表明底泥受到严重的外源有机物污染。底泥通常呈现出发黑、发臭等厌氧特征, 是湖泊内源污染的强烈释放源, 对上覆水质和生态系统构成严重威胁。

通过测定杞麓湖各采样点底泥的有机质含量, 并与上述分级标准进行对比, 从而对杞麓湖底泥的有机污染状况进行空间上的定性评价和等级划分。

2.4 数据处理分析方法

为探究底泥中各污染物之间的内在联系并初步解析其潜在来源, 采用 SPSS 27.0 软件对数据进行统计分析。首先, 通过 Pearson 相关性分析检验 TN、TP、OM 及多种重金属 (如 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, As, Hg) 含量之间的相关关系。在此基础上, 采用主成分分析 (PCA) 对污染物数据进行降维, 识别具有相似来源和迁移行为的污染物组合, 从而推断其主要污染源^[33], 在进行 PCA 分析前, 对数据进行 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和 Bartlett 球形检验, 结果显示 ($KMO > 0.6, p < 0.001$) 数据适合进行因子分析。

采样点分布图与插值图的绘制使用 ArcGIS PRO 软件完成, 空间插值方法为克里金插值法; 原始数据处理、Pearson 相关性分析及 PCA 分析均使用 SPSS 27.0 软件完成; 折线图及柱状图的绘制使用 Origin 2017 及 R studio 软件完成。

3 结果与讨论

3.1 底泥营养物质含量及空间分布

3.1.1 TN 含量及空间分布 表层底泥 TN 含量介于 $2120 - 11300 \text{ mg/kg}$, 平均达 5965 mg/kg 。该均值远超我国东部湖区未污染底泥背景值上限 ($1106.24 - 1115.19 \text{ mg/kg}$)^[34], 且显著高于太湖梅梁湾 (约 4000 mg/kg)^[35] 和北美卡莱尔湖 (均值 2380 mg/kg)^[36], 表明杞麓湖氮素富集极度严重。空间分布上 (图 2a), TN 异质性显著, 极值比达 5.3 (最高值 Q17: 11300 mg/kg , 最低值 Q11: 2120 mg/kg)。高值热点区主要集中于

承接主要入湖河道的湖泊西南部和南部，如 Q17、Q14 (10400 mg/kg)、Q18 (8610 mg/kg) 和 Q12 (8350 mg/kg) 均位于此区域，形成了连片的氮素高度富集区。相比之下，东北部（如 Q3: 3220 mg/kg）与部分中部区域（如 Q7: 2410 mg/kg）TN 含量相对较低。

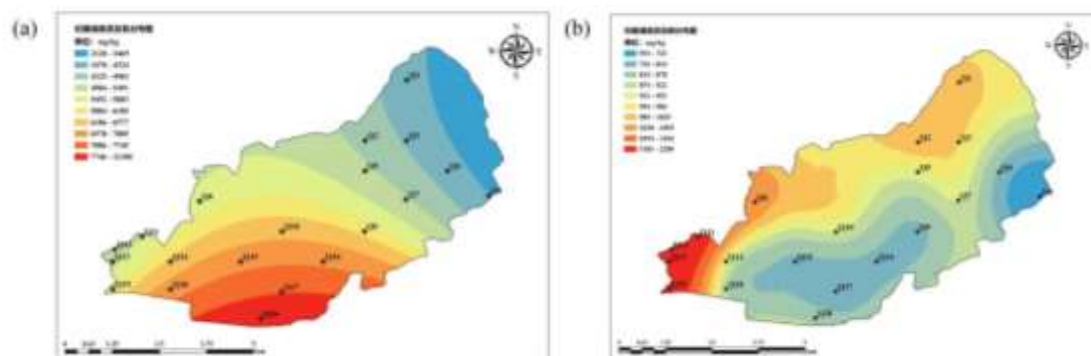


图2 杞麓湖底泥总氮，总磷 (TN, TP) 空间分布图

Fig.2 Spatial distribution map of total nitrogen (TN,TP) in sediments of Lake Qilu

3.1.2 TP 含量及空间分布 表层底泥 TP 含量介于 270~2280 mg/kg，平均为 960 mg/kg。整体上，杞麓湖表层底泥 TP 处于较高水平，西部入湖区多个点位超过 1000 mg/kg，表明局部区域存在明显磷富集现象，部分点位 TP 水平接近滇池相关报道值^[37]。空间分布上（图 2b），TP 呈现与 TN 不同的多中心高值特征。TP 高值区主要位于邻近农业区和河口的西部及西南部，其中 Q11、Q19 和 Q13 分别达到 2280 mg/kg、1870 mg/kg 和 1860 mg/kg；同时，湖泊中部（Q2: 1170 mg/kg；Q10: 1100 mg/kg）亦存在相对高值区。低值区主要分布于东部（Q8: 270 mg/kg）和南部局部（Q17: 540 mg/kg），与 TN 的分布热点形成明显的空间错位。

3.1.3 OM 含量及空间分布 表层底泥 OM 含量介于 41.4~260 g/kg，平均为 123.5 g/kg。空间分布上（图 3），OM 与 TN 格局高度吻合，表现出强同源性。高值区集中于西南部和南部，Q17 (260.0 g/kg)、Q12 (219.7 g/kg) 和 Q14 (215.3 g/kg) 均属重度有机污染，反映了生活污水、农业退水及内源生物残骸在此区域的大量沉降与累积；低值区则散布于北部和东部（如 Q7: 41.4 g/kg；Q11: 43.7 g/kg）。

高浓度 OM 累积对底泥磷循环具有核心调控作用。在富营养化湖泊中，藻源有机质的大量富集会显著改变表层底泥的物理结构与生物地球化学过程^[38]。一方面，高有机质含量可降低底泥密实性，增强表层沉积物的疏松性与再悬浮敏感性，从而促进颗粒态营养盐迁移；另一方面，藻源有机质的异养分解会持续消耗界面溶解氧，形成还原环境，进而促进铁结合态磷的还原释放，提升沉积物向上覆水的释磷风险。这一机制为湖心高 OM 区表现出的较高磷释放风险提供了合理解释，也表明有机质持续累积对湖泊富营养化形成正反馈效应。

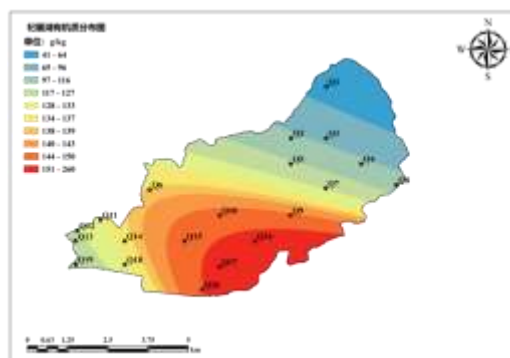


图3 杞麓湖底泥有机质 (OM) 空间分布

Fig.3 Spatial distribution map of organic matter (OM) in sediments of Lake Qilu

综合上述主要污染物空间分布格局，其显著的异质性主要受控于外源输入与内源过程的双重驱动机制：

(1) 外源“河口拦截效应”：西南部及南部入湖区（如 Q12、Q14、Q17）作为 TN 和 OM 的极值热点，

主要承接了红旗河、中河等入湖河流携带的高强度农业退水与生活污水。污染物入湖后受水动力骤降影响，在河口区迅速沉降累积，形成高负荷的外源拦截带。

(2) 内源“生物沉降中心效应”：湖心区（如 Q10、Q16）亦呈现营养盐高值，主要与内源生物残骸的沉降富集有关。重度富营养化条件下产生的大量藻类等生物残骸，在湖流与重力作用下向该静水区域汇集，导致有机质及氮磷在湖心表层底泥中持续富集。

值得注意的是，TP 在西部边缘（Q11、Q19）的极高值分布，除受河口拦截和生物沉降中心效应影像外，可能还叠加了局地农业或工业输入。这种由外源输入、水动力条件与沉积动力学共同造成的空间异质性格局，与杞麓湖高原浅水、封闭性强的湖泊特征密切相关^[18, 27]。

3.2 污染物来源的多元统计分析

为揭示底泥污染物的内在联系及潜在共同来源，对 20 个采样点的 10 项主要理化指标（TN、TP、OM 及多种重金属，详见附件 S1）进行 Pearson 相关性分析与主成分分析（PCA）。

3.2.1 污染物相关性分析 各污染物之间存在复杂且显著的相关关系(图 4)。TN 与 OM 呈极显著的强正相关 ($r > 0.9, p < 0.01$)，表明二者具有高度同源性。TN 与 OM 的高度相关性通常与生活污水输入及富营养化背景下藻类等内源生物残骸累积有关^[39]。TP 与重金属 Pb、Cd 也呈现显著正相关，具有明确的污染指示意义。TP 与 Cd、Pb 的伴生关系常被视为农业面源与交通排放复合影响的指示特征，其中 TP 与 Cd 的关联多与磷肥施用有关，Pb 则通常受交通排放影响^[40]。此外，重金属 Cu 与 Zn 表现出紧密的正相关。Cu 与 Zn 的同源性通常指向工业活动及农业投入共同作用下的复合来源，如金属制造、电镀和杀菌剂施用等^[41]。

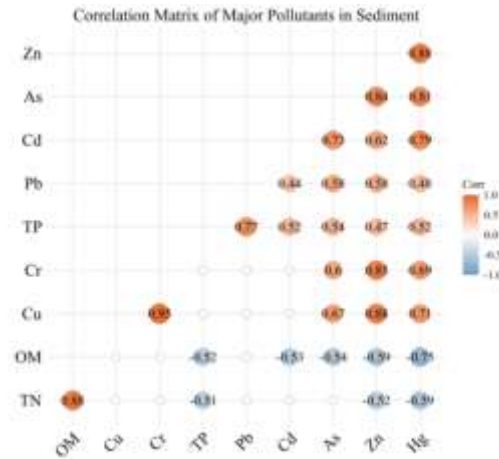


图 4 杞麓湖沉积物中主要污染物含量的 Pearson 相关性矩阵

Fig.4 Pearson correlation matrix of major pollutants in the sediments of Lake Qilu

3.2.2 主成分分析 (PCA) 主成分分析结果显示，前两个主成分（PC1 和 PC2）累计方差贡献率达 77.5%（PC1: 60.6%, PC2: 16.9%），有效提取了底泥污染源的主体信息（图 5）。第一主成分（PC1）贡献了绝大部分的方差（60.6%），并清晰地 将污染物分为两组。正半轴高度富集 TN 与 OM，代表以生活污水和内源生物残骸为主的有机污染源^[42-43]；负半轴则聚集 TP 及所有重金属（Cu, Cr, Zn, Pb, Cd, As, Hg），指向农业面源（磷肥与农药）及工业点源构成的复合污染。这一特征与农业密集型流域的典型源解析结果一致，即 TP、Pb 和 Cd 的强关联常被作为识别农业面源与交通排放复合污染的有效指标^[44]。第二主成分（PC2）进一步细分了复合源中重金属的迁移途径差异：正半轴高载荷的 Cu、Cr、Zn 多关联于特定工业活动（冶金、电镀）及杀菌剂施用；负半轴高载荷的 TP、Pb、Cd 和 As 则更符合磷肥施用与交通排放的来源特征，这与 Deng 等^[45]在太湖流域的解析结果高度吻合。综合对比空间响应特征：PC1 正半轴点位（Q17、Q14、Q18、Q12）受 TN 和 OM 驱动显著，表明西南部和湖心区作为生活污水与生物沉降热点的空间规律；反之，PC1 负半轴点位（Q11、Q13、Q19）受 TP 与重金属载荷主导，说明西部入湖河口区主要承接农业面源复合污染；其余点位（如 Q1、Q3、Q7）靠近坐标原点，综合污染程度相对较轻。多元统计结果与空间插值分析高度契合，为分区管控提供了参考依据。

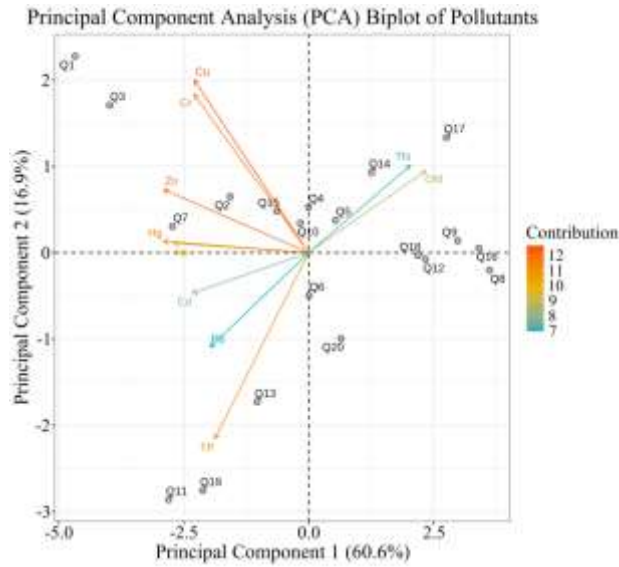


图5 杞麓湖沉积物中主要污染物含量的主成分分析图

Fig.5 Principal component analysis (PCA) of major pollutant contents in the sediments of Lake Qilu

3.3 底泥营养物质释放特征

底泥污染物的存量水平并不完全等同于其实际环境风险，后者更直接取决于污染物跨界面迁移的能力，即内源释放特征^[46]。鉴于浅水湖泊风浪扰动易引发表层沉积物再悬浮，颗粒态营养物质迁移是内源污染的重要组成部分。为此，基于前期空间与溯源分析，选取具有地球化学功能代表性的 C1（西部入湖区）、C2（湖心生物沉降区）及 C3（东北部静水区），开展水-泥界面静态释放模拟实验。实验不仅监测溶解态营养盐，亦同步核算 TN 和 TP 通量，以全面评估包含潜在悬浮颗粒态在内的综合净交换风险^[47-48]。

3.3.1 静态释放过程与形态转化 培养期间上覆水氮磷形态浓度的动态变化，直观地反映了底泥-水界面生物地球化学过程的区域差异（图 6）。各点位氨氮（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ）浓度均呈线性增加，表明有机氮矿化是氨氮释放的主导驱动力。厌氧条件下，沉积物中新鲜有机质的分解是内源氨氮的主要来源^[49]。相反，硝态氮（ $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ）浓度在 C2 和 C3 快速下降，而 C1 相对稳定，表明 C2 和 C3 存在更强烈的反硝化或异化还原为氨的过程，消耗了界面 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。

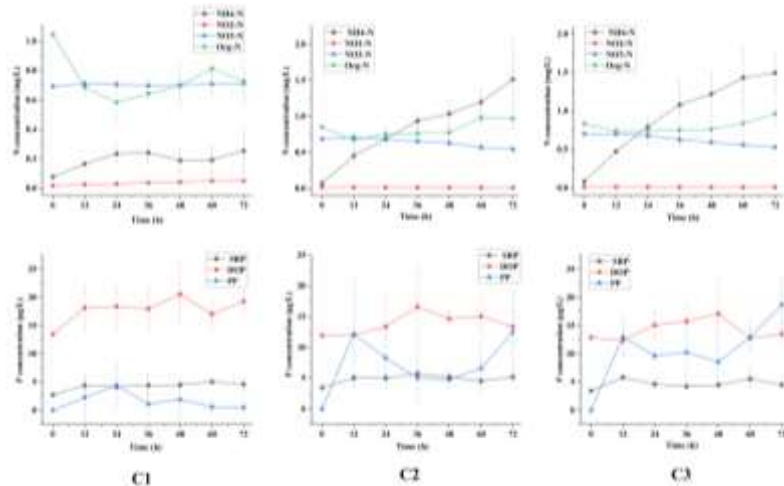


图6 杞麓湖底泥静态释放过程中上覆水氮磷形态浓度变化

Fig.6 Variation of nitrogen and phosphorus forms in overlying water during static release from sediments of Lake Qilu

溶解性活性磷（SRP）在各点位的培养初期均快速增加，随后趋于平缓波动。该特征符合经典沉积物磷释放动力学，即在转为厌氧环境后，沉积物表层与氧化铁结合的磷会快速解吸释放，直至界面达到一个新的吸附-解吸平衡^[50]。颗粒态磷（PP）浓度在 C2 和 C3 培养后期显著增加，而 C1 则无明显变化。

3.3.2 氮磷释放通量的区域差异与空间分异机制 基于培养过程中的浓度变化，表明不同典型区域释放特征存在明显差异（图7）。

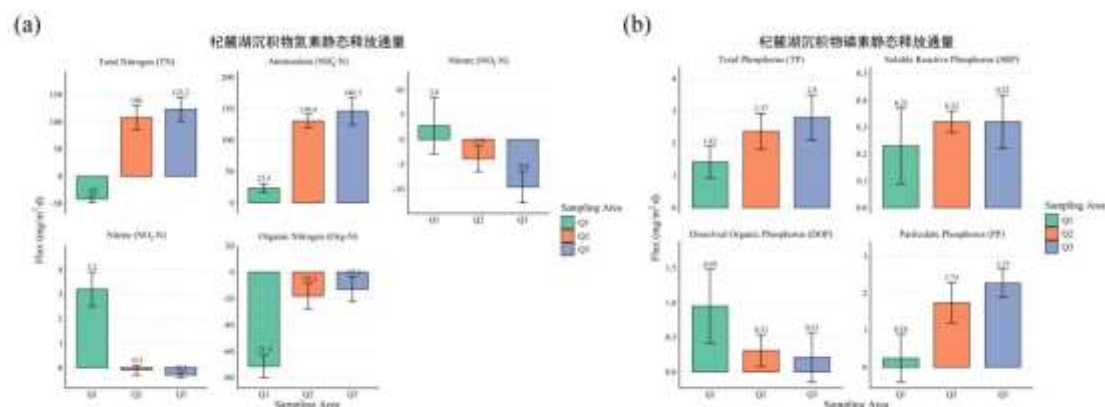


图7 杞麓湖底泥-水界面静态释放氮磷通量

Fig.7 Static release fluxes of nitrogen and phosphorus across the sediment-water interface in Lake Qilu

TN 释放的空间分异与机制： TN 释放通量在不同点位间表现出明显差异。中部（C2）和东北部（C3）均表现为 TN 的净释放，而西部入湖河口区（C1）虽然有较高的污染存量，却呈现出强烈的净吸收（ $-42.0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ），表现出潜在的脱氮汇。证实了高原淡水湖泊中底泥存量高低并不完全等同于释放风险。由于 C1 长期承接农业退水输入的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ，并同时接纳生活污水来源的易降解有机质，在电子受体与电子供体共同作用下，反硝化过程较为强烈，其脱氮作用强于有机氮矿化，因而表现为 TN 净吸收。相反，C2 和 C3 是释放风险较高的区域，受有机氮矿化-氨化主导。尤其是作为生物沉降中心的 C2，沉积物富含低 C/N 比的新鲜藻类残骸，极易被微生物分解，导致两区域极高的氨氮释放通量（分别高达 131.0 和 $146.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ）。

TP 及各形态磷释放与机制： 各点位均表现为 TP 的净释放，确认了底泥是重要的磷内源。东北部（C3）TP 释放通量最高（ $2.80 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ），国内其他重污染湖泊（如滇池草海）的报告值接近^[51]，并处于国际上富营养化浅水湖泊磷释放通量的较高范围^[52]。其驱动因素在于，杞麓湖局部水体滞留明显、交换能力较弱，这不仅有利于细颗粒悬浮物沉降，也更易促进对氧化还原条件高度敏感的铁结合态磷（Fe-P）在底泥中的富集。厌氧条件下 Fe^{3+} 还原导致磷酸盐大量解吸。湖心（C2）同样表现出较高的磷释放通量，与湖心作为生物沉降中心、易累积新鲜藻类残骸有关。结合 C2 较高的 OM 水平以及培养过程中较强的氨氮释放特征，表明藻源有机质分解较为活跃；该过程会持续消耗界面溶解氧，形成还原环境，从而促进铁结合态磷（Fe-P）释放。

在磷的形态贡献上，极易被生物利用的溶解性活性磷（SRP）在各点位均持续释放。值得注意的是，颗粒态磷（PP）在 C2 和 C3 的 TP 释放中占据主导（分别为 1.74 和 $2.27 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ），表明湖心与东北部区域除溶解态磷释放外，还存在较强的颗粒态磷迁移特征。这与内源有机质富集条件下藻类及浮游细菌形成的颗粒性物质累积，以及界面氧化还原变化共同作用有关，说明 PP 迁移是杞麓湖内源磷释放过程中不可忽视的组成部分。

3.4 杞麓湖与国内外典型湖泊底泥特征对比

为了更全面地评估杞麓湖底泥的污染状况及其内源释放风险，将杞麓湖与国内外典型富营养化湖泊底泥关键指标进行比较（图8）。在底泥营养物质含量方面，杞麓湖表现出显著的富集特征。其 TN（均值 $5965 \text{ mg}/\text{kg}$ ）与 OM（均值 $123.5 \text{ g}/\text{kg}$ ）呈现极端富集特征，显著高于同为高原湖泊的滇池^[53]以及其他国内外湖泊^[54-55]，表明其极高的氮素与有机污染复合现象。TP 均值（ $960.0 \text{ mg}/\text{kg}$ ）处于中等偏高水平，低于受磷矿带影响的滇池，但高于太湖与美国太浩湖（Lake Tahoe），表明杞麓湖呈现出高氮、中磷和高有机质并存的污染特征。在界面静态释放通量方面，杞麓湖同样显示出强烈的内源污染风险。其氨氮平均释放通量高达 $138.55 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，远超所列对比湖泊，凸显了内源氮库的脆弱性与高风险。同时，TP 平均释放通量（ $2.59 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ）与重度富营养化的滇池相当；虽低于伊利湖夏季缺氧期的极端高值，但显著高于太湖和巢湖^[56]，

表明其内源磷释放风险同样严峻。综合来看，异常高的 TN 与 OM 累积量，叠加极强的氨氮与 TP 界面释放潜能，共同构成了杞麓湖独特的内源污染机制。这一“高存量-高释放”特征是阻碍该湖泊水质改善的核心内在驱动力，凸显了实施底泥靶向治理的迫切性。

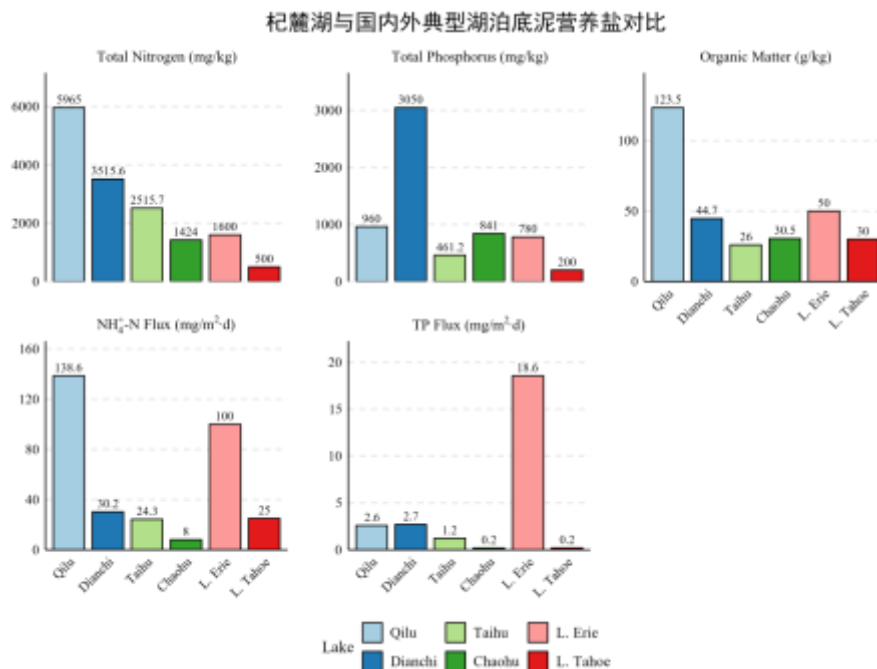


图8 杞麓湖与国内外典型富营养化湖泊底泥关键指标对比

Fig.8 Comparison of key sediment indicators between Lake Qilu and typical eutrophic lakes worldwide

3.5 底泥综合污染指数评价

采用内梅罗综合污染指数法 ($P.N$) 定量表征底泥 TN、TP 的复合污染特征。该方法能够综合反映多种污染物的平均影响并突出最主要污染物对环境质量的贡献^[57]。鉴于目前国家及云南省尚无土壤 TN 与 TP 的污染物质量标准值，评价基准参考《中国土壤元素地球化学背景值与基准值》中云南省土壤地球化学背景值 (TN: 1768 mg/kg; TP: 1059 mg/kg) 进行选取^[58]。评价结果 (图 9) 表明，杞麓湖沉积物面临着严峻的营养盐复合污染。20 个代表性点位的内梅罗指数 ($P.N$) 范围为 1.28 至 5.21，均显示出不同程度的污染，无清洁点位。其中重度 ($P.N > 3.0$) 与中度污染 ($2.0 < P.N \leq 3.0$) 各占 35%。空间上，重度污染点位 (如 Q17, $P.N=5.21$; Q14, $P.N=4.82$) 主要集中于西南部和湖心区，与前期污染物空间分布格局一致。

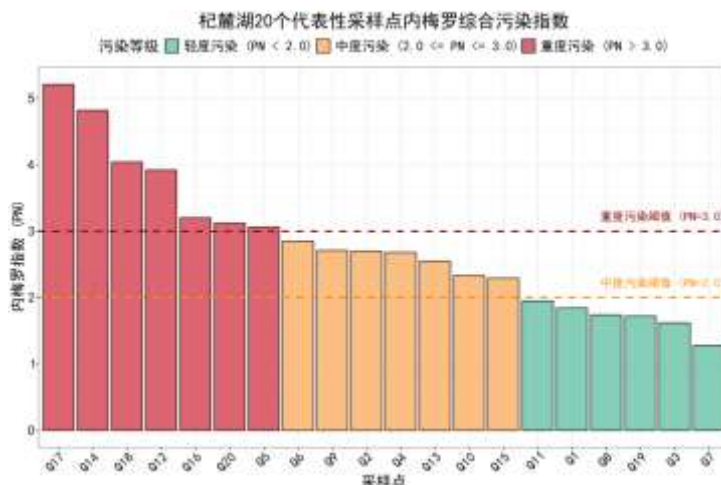


图9 杞麓湖表层沉积物内梅罗污染指数($P.N$)及污染等级划分

Fig.9 Nemerow Pollution Index ($P.N$) and pollution levels of surface sediments in Lake Qilu

单项污染指数 (P_i) 分析发现, TN 是导致综合污染指数偏高的首要因子。所有点位 TN 的 P_i 值均远大于 1 (最高 Q17 达 6.39), 而总磷仅在少数点位 (如 Q11) 表现出较高贡献。这一结果深刻反映了流域高强度农业模式叠加生活污水输入, 所形成的高氮低磷负荷特征。研究表明, 高强度外部氮输入可导致底泥 TN 成为综合污染的主导因子^[59]。

将污染指数与原位释放特征整合分析, 揭示了底泥存量格局与释放风险间显著的空间特异性耦合。例如, 受高强度复合输入驱动的西南部入湖区 (C1 周边 $P:N$ 极高), 受限于高沉积底质与厌氧条件, 演变为潜在的脱氮汇; 而湖心区 (C2) 和东北部 (C3) 在中重度复合污染背景下, 分别表现出以生物沉降分解和界面环境变化为主的释放特征, 是氮磷释放风险较高的区域。沉积物特性、水文输入及地球化学过程的差异, 共同决定了不同区域营养盐分布格局与释放风险的空间分异^[60]。这种由长期污染累积驱动的内源功能分区, 是导致外部负荷削减后水质改善停滞的关键内在驱动力。

3.6 底泥有机污染指数评价

沉积物中的有机质 (OM) 含量是衡量湖泊富营养化程度和驱动底栖带生物地球化学过程的关键指标^[61], 高 OM 水平显著增强氮循环和藻类增殖。参照相关湖泊研究中普遍采用的评价准则, 对底泥有机污染状况进行评价 (各点位详细评价结果见附表 S2)。结果显示, 杞麓湖底泥 OM 含量极高 (均值 122.0 g/kg), 20 个采样点中有 14 个 (占 70%) 达重度有机污染级别 (IV 级, OM > 100 g/kg)。该污染格局与 TN 的空间分布高度同源, 进一步印证了生活污水输入与内源藻类残骸沉降是全湖碳氮复合污染的核心来源。

底泥中广泛且重度的有机污染不仅是内源营养盐的巨大赋存库, 更是驱动界面释放风险空间分异的关键引擎。高浓度 OM 在微生物分解过程中会显著消耗界面溶解氧, 形成还原性环境^[62]。这不仅是激发铁结合态磷 (Fe-P) 还原性释放的先决条件, 也为底层反硝化过程提供了不可或缺的碳源 (电子供体)。

这一结果进一步解释了不同区域释放特征的差异: 在西南部入湖区 (C1), 较高的 OM 累积 (>200 g/kg) 与外源 $\text{NO}_3\text{-N}$ 输入共同作用, 表现出潜在脱氮汇特征; 而在藻体残骸密集沉降的湖心 (C2) 与东北部 (C3), 新鲜有机质分解及其耗氧过程则更可能促进氨氮释放, 并增强底泥中铁结合态磷 (Fe-P) 的释放风险。综合而言, 杞麓湖较高的有机质负荷构成了“藻类增殖-残骸沉降-缺氧分解-营养盐再释放”这一富营养化正反馈过程的重要环节。

4 结论

1) 底泥呈现极端富集特征, 且以 TN 为污染主导。全湖 70% 区域处于中度及以上污染水平。TN 含量 (最高 11300 mg/kg) 显著高于国内其他典型富营养化湖泊, 是驱动综合污染指数偏高的核心因子, 深刻反映了流域内高强度农业面源氮输入的长期累积效应。

2) 污染来源呈现显著的“二元复合”特征。PCA 分析成功剥离出两大污染主轴: 一是以 TP 和重金属为表征的农业面源与工业源复合污染; 二是以 TN 和 OM 为表征的生活污水与内源藻源贡献有机污染。这种来源差异决定了治理过程中必须采取氮磷异源同步控制策略。

3) 界面释放风险表现出明显的区域差异。底泥污染物赋存量与实际释放风险并非线性对应。湖心 (C2) 与东北部 (C3) 是营养盐释放风险较高的区域, 其中氨氮释放通量分别为 131.0 和 146.1 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 其较高释放与藻类残骸降解及相关界面过程有关, 而西部河口区 (C1) 虽具有较高污染物累积水平, 但表现为潜在脱氮汇特征。

4) 揭示了杞麓湖内源污染存量与释放风险相分离的演化特征。高强度外源输入、较强水体滞留和区域功能差异共同塑造了杞麓湖底泥污染的空间分异格局, 表明高原浅水湖泊内源污染治理应更加注重分区识别与精准调控。

5 附件

附表 S1 和附表 S2 见电子版 (DOI: 10.18307/2026.0526)。

6 参考文献

- [1] Zhao C, Li Z. Relations between physical and ecosystem service flows of freshwater are critical for water resource security in a large dryland river basin. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 129994. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129994.

- [2] Li Z, Yang W, Zheng W *et al.* Variation trends and attribution analysis of lakes in the Qiangtang Plateau, the Endorheic Basin of the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2023, **623**: 129809. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129809.
- [3] Tang R, Wang S, Niu H *et al.* Analysis on driving factors of lake surface water temperature for major lakes in Yunnan-Guizhou Plateau. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(54): 82512-82528. DOI: 10.1007/s11356-022-21443-4.
- [4] Yu Z, Yang K, Luo Y *et al.* Secchi depth inversion and its temporal and spatial variation analysis—A case study of nine plateau lakes in Yunnan Province of China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, **100**: 102344. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102344.
- [5] Li N, Chang F Q, Zhang H C *et al.* Lake sediment records of climate change and human activities in the Qilu Lake catchment, Yunnan over the last 70 years. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2016, **36**(5): 60-66. DOI: 10.7699/j.ynnu.ns-2016-069. [李楠, 常凤琴, 张虎才等. 近 70 年来云南杞麓湖流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录. 云南师范大学学报(自然科学版), 2016, **36**(5): 60-66.]
- [6] Yu P H, Feng M X, Liu B *et al.* Delimitation and management of ecological redline in watershed considering ecological security pattern: A case study of Qilu Lake watershed, Yunnan. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(1): 89-99. DOI: 10.18307/2020.0109. [余珮珩, 冯明雪, 刘斌等. 顾及生态安全格局的流域生态保护红线划定及管控研究——以云南杞麓湖流域为例. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 89-99.]
- [7] 玉溪市人民政府. 杞麓湖流域国土空间保护和科学利用专项规划(2021-2035 年)文本. 玉溪: 通海县人民政府, 2023.
- [8] Wang Y Q, Guo X C, Lu S Y *et al.* Distribution characteristics, correlated factors, and health risk analysis of microcystins in a plateau eutrophic lake, Qilu Lake. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(1): 52-63. DOI: 10.18307/2024.0113. [王永强, 国晓春, 卢少勇等. 高原富营养化湖泊杞麓湖微囊藻毒素分布特征、相关因子及其健康风险分析. 湖泊科学, 2024, **36**(1): 52-63.]
- [9] Zhou Y, Zhang H C, Chang F Q *et al.* Seasonal variation of water quality parameters in Qilu Lake. *Advances in Geosciences*, 2017, **7**(4): 503-515. DOI: 10.12677/AG.2017.74051. [周瑜, 张虎才, 常凤琴等. 杞麓湖水质参数季节性变化. 地球科学前沿, 2017, **7**(4): 503-515.]
- [10] Sondergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, **506**(1): 135-145. DOI: 10.1023/B:HYDR.0000008611.12704.dd.
- [11] Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 2002, **14**(3): 193-202. DOI: 10.18307/2002.0301. [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 193-202.]
- [12] Liu H, Cai F, Huang Z *et al.* Seasonal hydrological variation impacts nitrogen speciation and enhances bioavailability in plateau lake sediments. *Water Research*, 2025, **271**: 122990. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122990.
- [13] Yu L Y, Yang H, Huang C C *et al.* Pollution characteristics of nitrogen and phosphorus in Dianchi Lake and its inflow rivers in summer. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(5): 961-971. DOI: 10.18307/2016.0505. [余丽燕, 杨浩, 黄昌春等. 夏季滇池和入滇河流氮、磷污染特征. 湖泊科学, 2016, **28**(005): 961-971.]
- [14] Yu Y, Yu Z, Jiang J *et al.* Assessing the impacts of fine sediment removal on endogenous pollution release and microbial community structure in the shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 2023, **897**: 165410. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165410.
- [15] Zhang Y, Luo P, Zhao S *et al.* Control and remediation methods for eutrophic lakes in the past 30 years. *Water Science and Technology*, 2020, **81**(6): 1099-1113. DOI: 10.2166/wst.2020.218.
- [16] Yang J L, Wen W W, Hu X R *et al.* Water quality change trends and cause analysis of the nine plateau lakes in Yunnan Province from 2013 to 2022. *Research of Environmental Sciences*, 2025, **38**(6): 1300-1311. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2025.03.05. [杨进腊, 温雯雯, 胡潇芮等. 云南九大高原湖泊 2013—2022 年水质变化趋势及其成因分析. 环境科学研究, 2025, **38**(6): 1300-1311.]
- [17] Yu P H, Feng M X, Liu B *et al.* Delimitation and management of ecological redline in watershed considering ecological security pattern: A case study of Qilu Lake watershed, Yunnan. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(1): 89-99. DOI: 10.18307/2020.0109. [余珮珩, 冯明雪, 刘斌等. 顾及生态安全格局的流域生态保护红线划定及管控研究——以云南杞麓湖流域为例. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 89-99.]
- [18] Yang H, Liu Y, Luo X *et al.* Cause analysis for the different change profiles of sedimentary heavy metals in Qilu Lake (Yunnan-Guizhou Plateau, China) over the past century. *Water Air and Soil Pollution*, 2020, **231**(9): 487. DOI: 10.1007/s11270-020-04847-w.
- [19] Tang Z A, Yang C L, Liu W Q *et al.* Vertical distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in sediments of the estuary wetland of Qilu Lake. *Environmental Chemistry*, 2025, **44**(2): 522-536. [唐中奥, 杨常亮, 刘雯清等. 杞麓湖入湖河口湿地沉积物氮磷垂向的分布特征. 环境化学, 2025, **44**(2): 522-536.]
- [20] Chen X F, Chuai X M, Yang L Y. Current situation, historical evolution and causes of eutrophication in typical lakes in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(4): 438-443. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4831.2014.04.005. [陈小锋, 揣小明, 杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(4): 438-443.]

- [21] Wang Y Q, Guo X C, Lu S Y *et al.* Distribution characteristics, correlated factors, and health risk analysis of microcystins in a plateau eutrophic lake, Qilu Lake. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(1): 52-63. DOI: 10.18307/2024.0113. [王永强, 国晓春, 卢少勇等. 高原富营养化湖泊杞麓湖微囊藻毒素分布特征、相关因子及其健康风险分析. 湖泊科学, 2024, **36**(1): 52-63.]
- [22] Yang H Y, Yang S, Liu Y *et al.* Seasonal succession of plankton community and its driving factors in a eutrophic lake (Lake Qilu) of Yunnan-Guizhou Plateau. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(4): 943-953. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.07.29. [杨鸿雁, 杨劭, 刘毅等. 云贵高原富营养化湖泊杞麓湖浮游生物群落的季节性演替及其驱动因子分析. 环境科学研究, 2020, **33**(4): 943-953.]
- [23] 中华人民共和国环境保护部. HJ 717-2014 土壤 总氮的测定 凯氏法. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [24] 中华人民共和国国家标准局. GB/T 9837-1988 土壤质量 总磷的测定 碱熔-钼锑分光光度法. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [25] 国家林业局. LY/T 1240-1999 沉积物中灼烧减量(LOI)的测定方法. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [26] 中华人民共和国环境保护部. HJ 832-2017 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [27] Qin B Q, Zhu G W, Zhang L *et al.* Estimation of internal nutrient release in large shallow lakes: A case study of Lake Taihu. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2005, **35**(S2): 33-42. DOI: 10.3321/j.issn:1006-9267.2005.z2.004. [秦伯强, 朱广伟, 张路等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例. 中国科学: 地球科学, 2005, **35**(S2): 33-42.]
- [28] Fan C X. Progress and prospect of research on lake sediment-water interface. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(5): 1191-1218. DOI: 10.18307/2019.0525. [范成新. 湖泊沉积物—水界面研究进展与展望. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1191-1218.]
- [29] Gong C S, Yao Q, Fan C X *et al.* Flux estimation of phosphorus release from sediments in an urban shallow lake: A case study of Xuanwu Lake, Nanjing. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(2): 179-183. DOI: 10.18307/2006.0213. [龚春生, 姚琪, 范成新等. 城市浅水型湖泊底泥释磷的通量估算——以南京玄武湖为例. 湖泊科学, 2006, **18**(2): 179-183.]
- [30] Nemerow N L. *Scientific stream pollution analysis*. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [31] Wang Y H, Qian S M, Xu N N *et al.* Distribution characteristics and assessment of sediment pollutants in the east area of Lake Chaohu. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(6): 22-26. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2004.06.006. [王永华, 钱少猛, 徐南妮等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价. 环境科学研究, 2004, **17**(6): 22-26.]
- [32] Jiang Y, Wu Z S, Zhao Z H *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in surface sediments of Lake Yangcheng, Jiangsu Province, China. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(11): 1590-1599. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.11.04. [蒋豫, 吴召仕, 赵中华等. 阳澄湖表层沉积物中氮磷及重金属的空间分布特征及污染评价. 环境科学研究, 2016, **29**(11): 1590-1599.]
- [33] Helena B, Pardo R, Vega M *et al.* Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research*, 2000, **34**(3): 807-816. DOI: 10.1016/S0043-1354(99)00225-0.
- [34] Wang J, Zhang J T, Zan F Y *et al.* Study on reference thresholds of total nitrogen and total phosphorus in sediments of shallow lakes in eastern China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(6): 992-999. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.06.015. [王健, 张靖天, 管逢宇等. 中国东部浅水湖泊沉积物总氮总磷基准阈值研究. 生态环境学报, 2014, **23**(6): 992-999.]
- [35] Fan X, Gao S, Zhang Y *et al.* Stimulation of high-concentration dissolved nitrogen and reactive phosphorus in Lake Taihu sediments on the initiation and maintenance of cyanobacterial blooms. *Science of the Total Environment*, 2022, **851**: 158088. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158088.
- [36] Pearce A R, Chambers L G, Hasenmueller E A. Characterizing nutrient distributions and fluxes in a eutrophic reservoir, Midwestern United States. *Science of the Total Environment*, 2017, **581**: 589-600. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.164.
- [37] Wu Z, Wang S R. Release mechanism and kinetic exchange for phosphorus (P) in lake sediment characterized by diffusive gradients in thin films (DGT). *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **331**: 36-44. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.02.022.
- [38] Wang J, Chen Q, Huang S *et al.* Cyanobacterial organic matter (COM) positive feedback aggravates lake eutrophication by changing the phosphorus release characteristics of sediments. *Science of the Total Environment*, 2023, **892**: 164540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164540.
- [39] Yang C, Yang P, Geng J *et al.* Sediment internal nutrient loading in the most polluted area of a shallow eutrophic lake (Lake Chaohu, China) and its contribution to lake eutrophication. *Environmental Pollution*, 2020, **262**: 114292. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114292.
- [40] Han D, Cheng J, Hu X *et al.* Spatial distribution, risk assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **115**(1-2): 141-148. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.11.062.
- [41] Chang W, Shu R, Sun J *et al.* Temporal and spatial distribution, ecological risk assessment and source identification of heavy metals in the surface sediments of Lake Taihu Basin, China. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, **234**(10): 650. DOI: 10.1007/s11270-023-06670-5.
- [42] Wang L F, Yang L Y, Kong L H *et al.* Spatial distribution, source identification and pollution assessment of metal content in the surface

- sediments of Nansi Lake, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **140**: 87-95. DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.02.008.
- [43] Hou Y, Li B, Feng G *et al.* Responses of bacterial communities and organic matter degradation in surface sediment to *Macrobrachium nipponense* bioturbation. *Science of the Total Environment*, 2021, **759**: 143534. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143534.
- [44] Jiang M, Wang Q, Tian X *et al.* Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of sediment heavy metals in two hydrologically connected lakes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, **10**: 1005194. DOI: 10.3389/fevo.2022.1005194.
- [45] Deng J, Zhang J, Yin H *et al.* Ecological risk assessment and source apportionment of metals in the surface sediments of river systems in Lake Taihu Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(21): 25943-25955. DOI: 10.1007/s11356-020-08993-x.
- [46] Jeppesen E, Sondergaard M, Jensen J P *et al.* Lake responses to reduced nutrient loading – an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(10): 1747-1761. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2005.01415.x.
- [47] Li C, Shen J, Feng J *et al.* Variations of phosphorus in sediments and suspended particulate matter of a typical mesotrophic plateau lake and their contribution to eutrophication. *Scientific Reports*, 2024, **14**(1): 26551. DOI: 10.1038/s41598-024-77866-w.
- [48] Pearce A R, Chambers L G, Hasenmueller E A. Characterizing nutrient distributions and fluxes in a eutrophic reservoir, Midwestern United States. *Science of the Total Environment*, 2017, **581**: 589-600. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.164.
- [49] Liu H, Cai F, Huang Z *et al.* Seasonal hydrological variation impacts nitrogen speciation and enhances bioavailability in plateau lake sediments. *Water Research*, 2025, **271**: 122990. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122990.
- [50] Ni Z K, Wang S R, Wang Y *et al.* Phosphorus release characteristics of sediments in Erhai Lake and their impact on water quality. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(5): 3753-3766. DOI: 10.1007/s12665-015-4715-x.
- [51] Wu Z, Wang S R. Release mechanism and kinetic exchange for phosphorus (P) in lake sediment characterized by diffusive gradients in thin films (DGT). *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **331**: 36-44. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.02.022.
- [52] Ding S, Chen M, Gong M *et al.* Internal phosphorus loading from sediments causes seasonal nitrogen limitation for harmful algal blooms. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 872-884. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.348.
- [53] Yang W Q, Xiao H, Li Y *et al.* Vertical distribution and release characteristics of phosphorus forms in the sediments from the river inflow area of Dianchi Lake, China. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2018, **30**(1): 14-22. DOI: 10.1080/09542299.2017.1352460.
- [54] Anderson H S, Johengen T H, Godwin C M *et al.* Continuous in situ nutrient analyzers pinpoint the onset and rate of internal P loading under anoxia in Lake Erie's Central Basin. *ACS ES&T Water*, 2021, **1**(4): 774-781. DOI: 10.1021/acsestwater.0c00138.
- [55] Domagalski J L, Morway E, Alvarez N L *et al.* Trends in nitrogen, phosphorus, and sediment concentrations and loads in streams draining to Lake Tahoe, California, Nevada, USA. *Science of the Total Environment*, 2021, **752**: 141815. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141815.
- [56] Yang P, Yang C H, Ma X Y *et al.* Sediment pollution characteristics and dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 712-722. DOI: 10.13227/j.hjlx.202005320. [杨盼, 杨春晖, 马小燕等. 巢湖南淝河入湖口底泥污染特征及清淤疏浚评估. *环境科学*, 2021, **42**(2): 712-722.]
- [57] Wu X H, Qin J, Wu B *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics and evaluation of nutrients in surface sediments of Qilu Lake. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, **2**(4): 321-326. DOI: 10.3969/j.issn.1674-991X.2012.04.046. [吴献花, 秦洁, 吴彬等. 杞麓湖表层底质营养盐的时空分布特征及评价. *环境工程技术学报*, 2012, **2**(4): 321-326.]
- [58] 杨忠芳, 夏学齐, 余涛等. 中国土壤元素地球化学背景值与基准值 [M]. 北京: 地质出版社, 2023.
- [59] Schindler D W, Carpenter S R, Chapra S C *et al.* Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(17): 8923-8929. DOI: 10.1021/acs.est.6b02204.
- [60] Pearce A R, Chambers L G, Hasenmueller E A. Characterizing nutrient distributions and fluxes in a eutrophic reservoir, Midwestern United States. *Science of the Total Environment*, 2017, **581**: 589-600. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.164.
- [61] Liu H, Cai F, Huang Z *et al.* Seasonal hydrological variation impacts nitrogen speciation and enhances bioavailability in plateau lake sediments. *Water Research*, 2025, **271**: 122990. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122990.
- [62] Rao Y, Wang Y, Hua Y *et al.* Short-term phosphorus transformation in shallow-lake sediments mediated by nitrogen and iron under anoxic conditions. *International Journal of Sediment Research*, 2024, **39**(2): 266-275. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2023.12.007.

附表 S1 杞麓湖沉积物重金属含量

Table S1 Concentrations of heavy metals in sediments from Qilu Lake

采样点编号	TN	TP	OM	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg
Q1	3700	1050	65.3	75.5	26	163	156	0.73	22.3	0.214
Q2	5560	1170	115.6	43.1	32	107	115	0.64	11.2	0.159
Q3	3220	970	62.3	61	35	141	175	0.73	16.3	0.196
Q4	5630	800	121.7	28.7	25	79	94	0.51	10.2	0.135
Q5	6440	850	133.7	25.3	20	66	76	0.5	10.5	0.138
Q6	5820	1260	107.4	22.9	27	85	70	0.54	10.8	0.107
Q7	2410	1060	41.4	38.2	27	105	128	0.7	15.2	0.191
Q8	3750	270	112.7	6.9	8	26	33	0.23	1.93	0.041
Q9	5760	600	181.4	12.4	13	37	47	0.3	5.35	0.069
Q10	4730	1100	115.5	32.9	27	85	111	0.51	3.77	0.141
Q11	2120	2280	43.7	20	58	98	81	0.54	16.3	0.139
Q12	8350	870	219.7	13.8	28	56	42	0.38	7.69	0.084
Q13	4900	1860	125.8	17.8	39	99	56	0.62	11.9	0.141
Q14	10400	690	215.3	24.5	31	68	82	0.62	10.8	0.095
Q15	4850	620	101.2	32.6	29	77	99	0.75	10.7	0.129
Q16	6790	700	188.2	9.9	9	30	37	0.28	5.54	0.066
Q17	11300	540	260	24.2	23	48	67	0.48	8.2	0.073
Q18	8610	740	166.6	14.4	23	40	46	0.45	9.14	0.087
Q19	2760	1870	54.2	10.2	26	77	30	1.12	15.4	0.185
Q20	6500	950	56.3	13	26	57	39	0.51	8.11	0.146

附表 S2 杞麓湖底泥有机污染指数评价

Tab.S2 Evaluation of organic pollution index in the sediments of Lake Qilu

采样点编号	有机质 (OM) (g/kg)	有机污染等级
Q1	65.3	中度污染 (III 级)
Q2	115.6	重度污染 (IV 级)
Q3	62.3	中度污染 (III 级)
Q4	121.7	重度污染 (IV 级)
Q5	133.7	重度污染 (IV 级)
Q6	107.4	重度污染 (IV 级)
Q7	41.4	轻度污染 (II 级)
Q8	112.7	重度污染 (IV 级)
Q9	181.4	重度污染 (IV 级)
Q10	115.5	重度污染 (IV 级)

Q11	43.7	轻度污染 (II 级)
Q12	219.7	重度污染 (IV 级)
Q13	125.8	重度污染 (IV 级)
Q14	215.3	重度污染 (IV 级)
Q15	101.2	重度污染 (IV 级)
Q16	188.2	重度污染 (IV 级)
Q17	260	重度污染 (IV 级)
Q18	166.6	重度污染 (IV 级)
Q19	54.2	轻度污染 (II 级)
Q20	56.3	轻度污染 (II 级)