

# 青海省湖泊沉积物中有机氯农药的空间分布、 来源解析和风险评估

刘嘉璇, 蒲昶, 姚煌, 瞿程凯

中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 湖北 武汉, 430074

**摘要:** 为认识青海省湖泊沉积物中有机氯农药(OCPs)的污染特征及其潜在生态风险,以青海省19个典型湖泊为研究对象,系统分析沉积物中滴滴涕类(DDTs)、六氯环己烷类(HCHs)、氯丹类(CHLs)、艾氏剂类(DRINs)、硫丹类(SULPHs)及灭蚊灵(Mirex)等OCPs的含量水平、组成特征及空间分布规律,结合特征比值法解析其来源,并采用危害商(HQ)及沉积物质量基准对其生态风险进行评价。结果表明,青海省湖泊沉积物中OCPs含量范围为3.64–10.6 ng/g, OCPs的污染程度及生态风险均表现为长江源区>柴达木盆地>黄河源区;来源解析显示,DDTs主要来源于历史残留,HCHs则主要受全球蒸馏效应驱动的远距离大气输送影响;生态风险评估结果表明,基于效应区间低值/中值(ERL/ERM)标准(基于海洋沉积物),所有样品均处于无风险水平;基于临界效应水平/可能效应水平(TEL/PEL)标准(基于淡水沉积物),31.6%的样品存在潜在生态风险;结合物种敏感性分布(SSD)模型计算HQ发现,仅Aldrin、Endrin、 $\alpha$ -Endosulfan及Endosulfan sulfate对超过50%的湖泊表现出潜在风险,约53%的OCPs不会对生态系统造成风险。

**关键词:** 有机氯农药; 青海省; 湖泊沉积物; 空间分布; 生态风险

**中图分类号:** X52

**收稿日期:** 2025-12-26

## Spatial Distribution, Source Apportionment and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Lake Sediments of Qinghai Province

JIAXUAN Liu, CHANG Pu, HUANG Yao, CHENGKAI Qu

*State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

**Abstract:** To investigate the contamination characteristics and potential ecological risks of organochlorine pesticides (OCPs) in lake sediments of Qinghai Province, 19 typical lakes were selected as study sites. The concentrations, compositional profiles, and spatial distribution patterns of OCPs, including dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs), hexachlorocyclohexanes (HCHs), chlordanes (CHLs),

---

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(No.4237071752).

**第一作者简介:** 刘嘉璇(2000-),女,硕士研究生,主要研究方向为有机氯农药环境地球化学方向研究,ORCID: 0009-0007-2745-0123, E-mail: liu\_jiaxuan@cug.edu.cn.

**通讯作者简介:** 瞿程凯(1988-),男,教授,博士生导师,主要从事持久性有机污染物的环境地球化学行为及其生态毒理与健康风险的研究,ORCID: 0000-0001-9531-4018, E-mail: chengkaiqu@sina.com

drins (DRINs), endosulfans (SULPHs), and mirex, were systematically analyzed. Source identification was conducted using diagnostic ratios, and ecological risks were assessed based on hazard quotients (HQ) and sediment quality guidelines. The results showed that OCP concentrations in lake sediments ranged from 3.64 to 10.6 ng/g. Both concentrations and ecological risks exhibited a spatial pattern of Yangtze River source region > Qaidam Basin > Yellow River source region. Source analysis indicated that DDTs were primarily derived from historical residues, whereas HCHs were mainly influenced by long-range atmospheric transport driven by the global distillation effect. Ecological risk assessment revealed that, according to the Effects Range-Low/Effects Range-Median (ERL/ERM) criteria, all samples posed no ecological risk. However, based on the Threshold Effect Level/Probable Effect Level (TEL/PEL) criteria, 31.6% of the samples exhibited potential ecological risks. Furthermore, hazard quotient (HQ) evaluation based on the species sensitivity distribution (SSD) model indicated that only four compounds—Aldrin, Endrin,  $\alpha$ -Endosulfan, and Endosulfan sulfate—posed potential risks to more than 50% of the lakes, while approximately 53% of the OCPs were unlikely to cause ecological risks.

**Key words:** Organochlorine pesticides (OCPs); Qinghai Province; Sediments; Spatial distribution; Ecological risk.

## 引言

青海省位于青藏高原东北部，是“世界第三极”的重要组成部分，也是长江、黄河和澜沧江三大水系的发源地，该区域在维护国家生态安全和水资源保障方面发挥着关键作用（Wang et al., 2022）。省内湖泊资源丰富，面积大于 1 km<sup>2</sup> 的湖泊超过 1400 个，总面积达 50000 km<sup>2</sup>，占全国湖泊面积的 19%（祁昌贤, 2023）。

然而，近年来气候变化已对青海省湖泊生态系统产生了显著的影响。全球变暖下，区域降水增加和冻土退化等因素导致湖泊水文特征发生明显变化（谢刚等, 2025）。与此同时，水文变化还可能影响水体中有机物的含量及组成，进而改变微生物对污染物的降解与转化（蒋宏忱和王北辰, 2025；熊净等, 2024）。

青海省独特的地理位置使其处于东亚季风、印度季风、西风环流及冬季风的交汇区（丁之勇等, 2018），因而成为大气污染物远距离传输的重要汇集地。同时，OCPs 可通过大气长距离传输到达远离污染源的区域，并在“冷捕集”效应作用下优先在高海拔、低温地区沉积富集（Scheringer et al., 2004）。因此，在气候变化与大气输送共同作用下，青海湖泊生态系统更易受到 OCPs 等持久性污染物的输入与累积影响。

需要指出的是，尽管许多国家已禁止使用 OCPs 且历史残留在环境中的 OCPs 经过数十年的自然降解，但 OCPs 的环境输入并未完全终止。结合 Li 等人（Li et al., 2023）的研究结果，当前部分国家使用的农药中仍含有一定量的 OCPs 杂质，这可能是 OCPs 持续输入环境的重要来源之一。因此，OCPs 并非单纯的历史遗留污染物，仍可能持续输入环境，并在全球范围内被持续检出，包括极地等人类活动相对稀少的偏远地区（Kahkashan et al., 2019；薛斌, 2014）。OCPs 在这些偏远地区持续存在的机制仍是当前研究的核心科学问题之一。以我国为例，尽管自 1983 年起全面禁用 OCPs，但其在水体、沉积物、土壤和生物体中仍有广泛残留（陈燕等, 2021；孙雅雪, 2023；谢婷, 2014；李秋旭等, 2015），对生态系统构成了长期威胁（Sultan et al., 2022），说明持续开展 OCPs 环境监测仍具有必要性。

湖泊沉积物是 OCPs 的重要环境归宿和长期储存库，其中 OCPs 浓度通常比水体高出数百至千倍（Gong et al., 2010），并可通过颗粒物再悬浮、孔隙水扩散等过程重新释放到水体中，进而进入食物链，对底栖生物群落产生毒性效应，并最终对人类健康造成潜在风险（Ivanova et al., 2021）。因此，沉积物不仅能够记录湖泊中 OCPs 的长期累积特征，也是评估其潜在生态风险的重要环境介质。

就青藏高原地区而言，现有研究多局限于单一湖泊或小区域尺度。例如，谢婷（2014）对青藏高原 5 个湖泊的沉积物进行了研究，发现其 OCPs 浓度水平比北极和南极的相关报道高，与南美洲及喜马拉雅南坡报道的浓度水平相当；Ding 等人（2023）通过对鄂陵湖的沉积岩芯的研究发现，20 世纪 60 年代后，沉积物中 OCPs 浓度的上升趋势主要归因于全球变暖、融雪融冰过程带来的污染物输入。

总体而言，现有研究虽提示青藏高原湖泊可能面临 OCPs 污染及气候变化驱动下的输入风险，但针对青海省不同区域湖泊沉积物中 OCPs 污染特征、来源差异及潜在生态风险的区域尺度系统研究仍然不足。本研究选取青海省三大区域（柴达木盆地、黄河源区和长江源区）的 19 个典型湖泊，系统分析其表层沉积物中 OCPs 的浓度水平、组成特征、空间分布、污染来源及生态风险，以为该区域脆弱生态系统的污染管控提供基线数据和分区管理依据。

## 1 材料与方法

### 1.1. 研究区概况

青海省地处中国西北内陆，地势呈西高东低格局，横跨青藏高原、内陆干旱盆地和黄土高原三大地貌单元。该区域气候呈显著垂直分布，年平均气温-5.1 至 9.0 °C，年降水量为 15-750 mm（多数地区 < 400 mm）。虽然农业活动以春小麦、青稞和油菜为主，规模相对有限，但 2021 年全省农药使用量仍达 1069 吨（陈文烈等和马睿, 2024）。受西风带传输及地表径流输送影响，OCPs 的遗留污染物在高原湖泊中表现出明显的累积效应，对区域生态系统构成潜在威胁。基于地质构造与水文特征，本研究将研究区划分为柴达木盆地、黄河源区和长江源区三个区域。

### 1.2. 样品采集

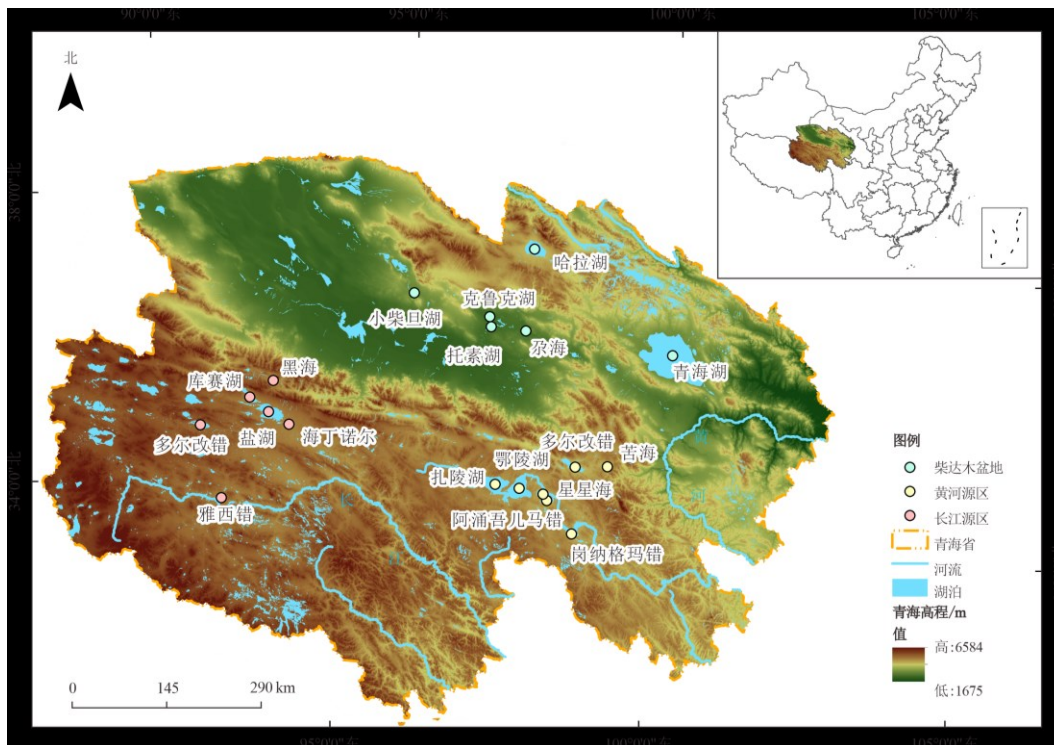


图 1 采样区地理位置图

Fig.1 Geographic Location of the Sampling Area

本研究于 2021 年 5-6 月开展采样工作。根据青海省湖泊分布特征、流域水文差异及生态功能分区，选取 19 个代表性湖泊设置采样点（图 1），包括淡水湖、微盐湖及高盐湖三种类型（表 1）。为确保样品的代表性，每个湖泊根据水域面积与形态特征采集 2-3 个表层沉积物样品（0-5 cm）：水域面积 > 50 km<sup>2</sup> 的湖泊布设 3 个采样点，以覆盖湖泊不同水文动力与物质沉积环境；水域面积 ≤ 50 km<sup>2</sup> 的湖泊布设 2 个采样点。最终共获得 47 个沉积物样品。

表 1 采样湖泊具体信息表

Table 1 Detailed Information of Sampled Lakes

编号	湖泊名称	采样点经度	采样点纬度	海拔/m	盐度/g·L <sup>-1</sup>
1	青海湖	99°21'11"-100°46'49"	36°37'12"-37°30'53"	3154	9.21
2	尕斯库勒湖	97°28'50"-97°35'43"	36°45'0"-37°26'58"	2800	68.91
3	托素湖	96°52'5"-97°1'12"	37°8'43"-37°11'57"	2760	16.68
4	克鲁克湖	96°51'13"-96°56'3"	37°15'37"-37°19'53"	2764	0.56
5	小柴旦湖	95°25'45"-95°36'12"	37°27'40"-37°31'15"	3130	24.83
6	哈拉湖	97°28'9"-97°45'56"	38°11'13"-38°12'37"	4039	1.58
7	冬给措纳湖	98°37'14"-98°40'55"	35°17'44"-35°23'45"	4046	3.71
8	扎陵湖	97°10'30"-97°53'2"	34°49'10"-35°6'44"	4251	0.50
9	星星海	98°6'19"-98°8'3"	34°49'11"-34°51'14"	4182	0.22
10	鄂陵湖	97°33'11"-97°45'9"	34°53'59"-35°45'9"	4233	0.31
11	岗纳格玛错	98°36'41"-98°41'8"	34°18'11"-34°19'25"	4168	0.20
12	阿涌吾儿马错	98°7'27"-98°8'34"	34°45'47"-34°46'32"	4182	0.52
13	苦海	99°11'23"-99°11'64"	35°21'19"-35°21'38"	4091	5.06
14	雅西错	92°33'14"-92°40'32"	34°17'8"-34°18'55"	4457	2.29
15	盐湖	93°29'10"-93°29'43"	35°22'37"-35°29'6"	4420	3.17
16	库赛湖	92°54'58"-92°57'37"	35°29'6"-35°45'39"	4444	7.93
17	海丁诺尔	93°39'39"-93°39'51"	35°29'12"-35°29'21"	4423	4.25
18	黑海	93°39'39"-93°39'48"	35°29'12"-35°29'21"	4391	0.32
19	多尔改错	94°2'23"-94°2'23"	35°51'43"-35°51'45"	4688	1.73

研究的样品采集使用抓斗采样器下放至湖泊沉积物表层，缓慢闭合抓斗以获取沉积物柱样，避免剧烈扰动导致沉积物混合，并自上而下刮取 0-5 cm 厚度的表层沉积物。采集的沉积物样品立即装入预先清洁的密封铝箔袋中，标记后运回实验室，于 -20 °C 条件下保存待分析。

### 1.3. 实验试剂和样品

实验所用二氯甲烷、正己烷、丙酮和甲醇为色谱级，均购自美国 Thermo Fisher Scientific 公司。26 种 OCPs 的标准品购自 o2si 公司。内标五氯硝基苯 (PCNB) 购自 o2si 公司。回收率指示物 TCMX 标准品购自 o2si 公司。PCB65 和 PCB155 标准品购自 Dr. Ehrenstorfer GmbH 公司。中性氧化铝和无水硫酸钠购自国药

集团化学试剂有限公司。硅藻土购自美国 Thermo Fisher Scientific 公司。

#### 1.4. 样品分析

OCPs 的测定：47 个沉积物样品被采集后置于冷冻干燥机冷冻干燥 24 h 后研磨并用 100 目孔径的尼龙筛筛分。随后称取 5 g 冻干研磨后的样品与硅藻土混合，并加入 20 ng 的 TCMX、PCB65 和 PCB155 回收率指示物，采用加速溶剂萃取仪（Dionex ASE350, USA）进行萃取，所有的样品采用相同的萃取条件：萃取溶剂为正己烷和丙酮（1:1, v/v）的混合溶液，萃取温度为 100°C，萃取压力为 1500 psi，预加热平衡时间为 5 min，静态萃取时间为 5 min，静态萃取次数为 2 次，溶剂淋洗体积为 60%萃取池体积，氮气吹扫时间为 60 s。随后，将萃取液经旋转蒸发仪浓缩至 1-2 mL，使用硅胶层析柱（从下至上依次为硅胶、氧化铝及无水硫酸钠，体积比为 6:3:1）净化，用二氯甲烷和正己烷（2:3, v/v）的混合溶液进行洗脱。目标洗脱液经旋转蒸发仪浓缩至 0.5-1 mL，将浓缩后的洗脱液转移至 2 mL 细胞瓶中，而后在温和的高纯氮气流下浓缩至 0.2 mL，仪器分析前加入 20 ng PCNB 作为内标得到待测液，实验步骤参考已发表文献（Gong et al., 2020）。采用气相色谱-三重四极杆质谱仪（GC-MS/MS，安捷伦 8890）分析样品中的 26 种 OCPs。色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为高纯氮气，流速为 2.25 mL/min，进样口温度为 290 °C，进样量 1 μL。色谱柱升温程序为 80 °C 保持 1 min；以 15 °C/min 升温至 140 °C，保持 2 min；以 4 °C/min 升温至 240 °C，保持 4 min；以 10 °C/min 升温至 290 °C，保持 1 min；在 300 °C 保持 8 min。

样品中总有机碳（TOC）的测定：采用重铬酸钾氧化-外加热法，称取 0.5 g 样品，加入 10 mL 0.4 mol/L 重铬酸钾-硫酸溶液，于油浴锅中加热至 190 °C，冷却后加入邻菲罗啉指示剂，用硫酸亚铁标准溶液滴定剩余的重铬酸钾，由消耗的重铬酸钾量按氧化校正系数计算出有机碳量。

#### 1.5. 质量分析与控制

实验过程保证严格的质量控制与质量保证。在样品前处理过程中，每 9 个沉积物样品添加一个空白样品和一个平行样品，以检查可能存在的基质干扰和交叉污染现象。空白样品中未检出目标化合物。

在仪器分析过程中，每天进行样品分析前先分析一个特定浓度的标准样品，作为仪器质量控制，用于评价仪器的稳定性。在沉积物样品中，回收率指示物的回收率分别为：TCMX（74.0±14.8%）、PCB65（69.1±10.2%）和 PCB155（75.9±14.1%）。

#### 1.6. 数据分析

沉积物样品中 OCPs 的浓度均以干重计。将 26 种 OCPs 分为 6 类： $\Sigma_9$ DDTs（滴滴涕类，包括 *p,p'*-DDD，*p,p'*-DDT，*p,p'*-DDE，*o,p'*-DDD，*o,p'*-DDT，*o,p'*-DDE，*p,p'*-DDNU，*p,p'*-DDMU 和 *p,p'*-(Dicofol+DBP)），

$\Sigma_4$ HCHs (六氯环己烷类, 包括  $\alpha$ -HCH,  $\beta$ -HCH,  $\gamma$ -HCH 和  $\delta$ -HCH),  $\Sigma_4$ CHLs (氯丹类, 包括 *cis*-Chlordane, *trans*-Chlordane, heptachlor 和 heptachlor epoxide),  $\Sigma_5$ DRINs (艾氏剂类, 包括 Aldrin, Dieldrin, Endrin, Endrin aldehyde 和 Endrin ketone),  $\Sigma_3$ SULPHs (硫丹类, 包括  $\alpha$ -Endosulfan,  $\beta$ -Endosulfan 和 Endosulfan sulfate) 以及 Mirex (灭蚊灵)。

方法检出限 (MDL) 定义为 3 倍信噪比对应的浓度, 目标化合物的 MDL 范围为 0.03–17.31 pg/g。当样品中相应化合物的浓度低于其 MDL 值时, 定义为未检出, 以 ND 取代。所有数据均经过回收率校正。

## 1.7. 生态风险评价

### 1.7.1 沉积物质量基准法

沉积物质量基准法 (SQGs) 是评估水体沉积物中污染物生态风险的常用手段。为提高评估结果的可靠性, 本研究采用两种互补的评价标准对青海省湖泊沉积物中 OCPs 的生态风险进行综合评估:

方法一: 阈值/效应值法 (TEL/PEL 法)。该方法由加拿大环境部长理事会 (CCME) 制定 (Macdonald et al., 2000), 适用于评估 *o,p'*-DDT、*p,p'*-DDT、*p,p'*-DDD、*p,p'*-DDE 和  $\Sigma$ DDT (以上几种 DDT 之和) 的生物毒性风险。评价标准如下: 当 OCPs 浓度 < 临界效应浓度 (TEL) 时, 表明 OCPs 产生不良生态效应的可能性较低; 当浓度介于 TEL 与可能效应浓度 (PEL) 之间时, 可能偶尔产生毒性效应; 当浓度 > PEL 时, 表明经常发生毒性效应。

方法二: 效应区间低/中值法 (ERL/ERM 法)。该方法由 Long 等人 (1995) 提出, 同样适用于上述 DDTs 同系物及总量的潜在风险评估。评价标准为: 当 OCPs 浓度 < 效应区间低值 (ERL) 时, 产生毒性效应的概率极低; 当浓度介于 ERL 与效应区间中值 (ERM) 之间时, 可能产生毒性效应; 当浓度 > ERM 时, 极有可能产生毒性效应。表 2 列出了上述各指标的具体数值。

表 2 生态效应区间值法的具体参数<sup>(1)</sup>

Table 2 Parameters of Ecological Effect Interval Value Method

	<i>o,p'</i> -DDT	<i>p,p'</i> -DDT	<i>p,p'</i> -DDE	<i>p,p'</i> -DDD	$\Sigma$ DDT
TEL (ng/g)	1.32	1.31	1.22	2.07	3.89
PEL (ng/g)	4.77	4.77	7.81	3.74	51.7
ERL (ng/g)	1.0	1.0	2.0	2.0	1.58
ERM (ng/g)	7.0	7.0	15.0	20.0	46.1

注: <sup>(1)</sup>数据参考前人研究 (Macdonald et al., 2000; Long et al., 1995)

### 1.7.2 物种敏感性分布 (SSD) 模型

由于缺乏直接的沉积物毒性数据, 本研究采用相平衡分配法将沉积物固相浓度转换为孔隙水相浓度。计算公式如式 (1) 和式 (2):

$$C_{PW} = \frac{C_S}{K_{OC} \times f_{OC}} \quad (1)$$

$$\text{Log}K_{OC} = 0.72 \times \text{Log}K_{OW} \quad (2)$$

式中， $C_{PW}$  表示孔隙水中 OCPs 的浓度 ( $\mu\text{g/L}$ )； $C_S$  表示沉积物中 OCPs 的浓度 ( $\text{ng/g}$ )； $K_{OC}$  表示该 OCPs 的有机碳-水分配系数，由正辛醇-水分配系数 ( $K_{OW}$ ) 推导得出； $f_{OC}$  表示沉积物样本中检测到的总有机碳的比例。

由于青藏高原特有物种的毒性数据匮乏，本研究参考国内外通用做法，选取了在分类学上具有代表性的全球标准物种构建物种敏感度分布 (SSD) 模型。OCPs 毒性数据来源于美国 EPA ECOTOX 数据库 (<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>) 及相关文献 (Raimondo et al., 2008; Gardner and Vincent, 1978; Sun et al., 2016)。所选毒性数据涵盖藻类、甲壳类和鱼类三个营养级，且包含至少 5 个物种。虽然这些非本地物种数据可能更倾向于反映一般性水生生态系统的敏感性，但所选物种已覆盖了研究区主要营养层级的典型生物门类。这种“分类学替代”方案虽然在区域特异性上存在一定的不确定性，但在现有数据条件下，仍是评估高原湖泊生态风险的一种科学且稳健的方法。

值得注意的是，高原独特的物理环境可能放大本土物种对环境 OCPs 的敏感性。一方面高海拔导致的低温环境会抑制物种体内解毒酶的活性，减缓对 OCPs 的代谢。另一方面，高原生物通常具有更高的脂肪含量，更易蓄积亲脂性 OCPs。为体现风险评估的保守性，本研究优先选取更敏感的慢性毒性数据中的半数致死浓度 ( $LC_{50}$ ) 和半数效应浓度 ( $EC_{50}$ ) 作为核心终点，对于缺乏慢性数据的 OCPs，根据欧盟委员会联合研究中心发布的《Technical Guidance Document on Risk Assessment》技术指导文件，采用 1:25 的慢性-急性比将急性数据转化为等效慢性毒性浓度。

本研究利用 shinyssdtools 程序 (<https://bcgov-env.shinyapps.io/ssdtools>) 构建 SSD 模型，分别采用 Log-normal、Log-logistic、Burr III、Weibull 和 Log-gumbel 五种分布函数对毒性数据进行拟合。依据赤池信息准则 (AIC) 和贝叶斯信息准则 (BIC) 优选最佳拟合模型 (AIC 和 BIC 值越小，表明拟合优度越高)。据此计算影响 5% 物种的有害浓度 ( $HC_5$ )。预测无效应浓度 (PNEC) 由  $HC_5$  除以评估因子 (AF) 得出。 $HC_5$  值越低，表明污染物的生态毒性越强。鉴于毒性数据已覆盖多个营养级且物种数量充足，同样根据欧盟发布的《Technical Guidance Document on Risk Assessment》，本研究设定 AF 为 5。

### 1.7.3 危害商 (HQ)

本研究采用危害商法 (HQ) 定量评估沉积物孔隙水中 OCPs 对水生生物的潜在生态风险。计算见公式

(3)：

$$HQ = \frac{MEC}{PNEC} \quad (3)$$

式中，HQ 为危害商；MEC 为孔隙水中的暴露浓度 ( $\mu\text{g/L}$ )；PNEC 为预测无效应浓度 ( $\mu\text{g/L}$ )。若  $HQ > 1$ ，表明存在潜在的生态风险；反之，则认为该区域的生态风险处于可接受水平。此外，为综合反映研究区整体风险水平及空间变异性，本研究进一步计算了各湖泊 HQ 的几何平均值 ( $HQ_{\text{geommean}}$ ) 及风险超过 PNEC 的概率。

## 2 结果与讨论

### 2.1. 沉积物 OCPs 含量水平及组成特征

青海省三个区域沉积物中 OCPs 均表现出较高的检出率 ( $>70\%$ )，其中 22 种 OCPs 在所有样品中均被检出 (检出率 100%)，仅 Dieldrin 和 Endrin ketone 2 种 OCP 的检出率小于 80%。各 OCPs 的含量水平如图 2a 所示。26 种 OCPs 的总浓度 ( $\Sigma_{26}\text{OCPs}$ ) 范围为 3.64–10.6 ng/g，平均值为 6.35 ng/g，中位数为 5.95 ng/g。在空间分布上， $\Sigma_{26}\text{OCPs}$  的平均浓度呈现出以下趋势：长江源区 (6.95 ng/g)  $>$  柴达木盆地 (6.65 ng/g)  $>$  黄河源区 (5.58 ng/g)。

在全球尺度上，青海地区 OCPs 污染水平介于南北极之间，约为北极北冰洋及周边地区 (12.1 ng/g) 的一半 (Kahkashan et al., 2019)，但高于南极洲普里兹港 (2.34 ng/g) (薛斌, 2014)。在国内，青海省湖泊 OCPs 浓度远低于太湖、白洋淀等经济发达地区 (陈燕等, 2021; 孙雅雪, 2023; 刘俐, 2021; 陶玉强和赵睿涵, 2020)。与西部其他欠发达地区相比，如：甘肃 (Xu et al., 2014)、新疆 (Shen et al., 2017)、青海、宁夏 (开晓莉, 2021)、西藏 (李俊, 2019)，OCPs 的浓度分布与《中国统计年鉴 2023》发布的区域 GDP 排序并不一致，这表明经济发展水平并非该地区 OCPs 残留的主控因素。研究指出，青藏高原 OCPs 污染程度与海拔高度呈正相关，主要受大气沉降驱动 (Yang et al., 2010)。本研究结果总体支持这一“高山冷捕集”机制：长江源区海拔最高的多尔改错 (4688 m) 检出了最高的 OCPs 含量；黄河源区湖泊虽基本遵循此规律，但冬给措纳湖的浓度异常偏高，这可归因于当地发达的畜牧业活动叠加了人为污染源 (马遥等, 2023)；而柴达木盆地由于海拔相对较低，其浓度分布与海拔的相关性较弱。值得注意的是，青海湖面积超过 1000 km<sup>2</sup>，受采样设计限制，3 个采样点难以全面覆盖其整体，故青海湖数据仅具有一定程度的代表性。

在不同组分中， $\Sigma_9\text{DDTs}$  是沉积物中的主要污染物，浓度范围为 1.77–5.16 ng/g (平均值 3.19 ng/g)，三个区域的平均浓度差异较小 (2.86–3.41 ng/g)。其含量低于北极冰洋及周边地区 (2.68–7.81 ng/g) (Kahkashan et al., 2019)，与南极普里兹港相近 (0.45–6.5 ng/g) (薛斌, 2014)，但远低于全球其他地区如太湖 (nd-18.43 ng/g) (陈燕等, 2021)。这表明青海湖流域的 DDTs 含量处于极低水平，未受到大规模污染源输入

的影响，人类活动的干扰程度较低。

$\Sigma_4\text{CHLs}$  的浓度范围为 0.74–1.55 ng/g（平均浓度 1.02 ng/g），在长江源区、黄河源区和柴达木盆地的平均浓度水平相似（0.92–1.13 ng/g）。其中 TC 与 CC 的含量（0.72–1.19 ng/g）高于北极冰洋及周边地区（0.15–1.11 ng/g）（Kahkashan et al., 2019），约为南极普里兹港的 10 倍（nd–0.10 ng/g）（薛斌, 2014）。研究区  $\Sigma_4\text{HCHs}$  的浓度（0.40–1.35 ng/g）略低于北极冰洋及周边地区（0.29–3.05 ng/g），但高于南极普里兹港（0.23–1.23 ng/g）。

DDTs、CHLs 和 HCHs 在南北极及青藏高原的分布差异与其大气长距离迁移能力密切相关。已有研究表明，由于 CHLs 具有较高的分子量和辛醇–水分配系数，相比 DDTs 和 HCHs 更易与颗粒物结合并沉积，因此在长距离迁移过程中损失更多（Frank and Mackay, 1993）。Voldner 和 Li（1995）指出全球 OCPs 的使用主要集中在北半球国家，本研究中三种 OCPs 在南北极及青藏高原的分布特征支持了这一结论。

其余 OCPs（ $\Sigma_5\text{DRINs}$ 、 $\Sigma_3\text{SULPHs}$  和 Mirex）的浓度极低，均小于 1 ng/g，远低于太湖等经济发达地区（陈燕等, 2021；孙雅雪, 2023；刘俐, 2021；陶玉强和赵睿涵, 2020）。但由于缺乏南北极的相关监测数据，无法进行进一步的对比分析。

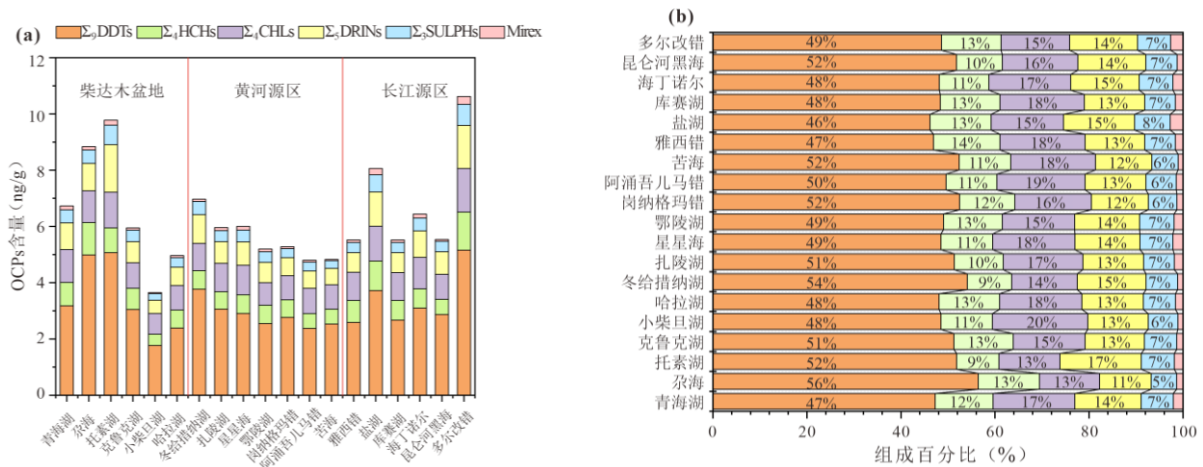


图 2 青海省湖泊沉积物中 OCPs 的浓度水平 (a) 及组成特征 (b)

Fig.2 Concentration Levels and Compositional Profiles of OCPs in Sediments from Lakes of Qinghai Province

尽管不同湖泊 OCPs 总含量受海拔及局部源影响存在差异，但其组成（图 2b）却呈现出相似性： $\Sigma_9\text{DDTs}$  在所有湖泊沉积物中均占据主导地位，其次为  $\Sigma_4\text{CHLs}$ 、 $\Sigma_5\text{DRINs}$  和  $\Sigma_4\text{HCHs}$ ，而  $\Sigma_3\text{SULPHs}$  和 Mirex 的贡献微乎其微。这一组成特征可能与青藏高原东南部的 OCPs 主要来源于大气远程传输（Yang et al., 2013）及印度持续排放 DDTs 的背景相关（Wang et al., 2016）。值得注意的是，受近年来印度加强 DDTs 排放管控的影响，本研究中 DDTs 的占比已低于 20 世纪后半叶的高占比水平（Ding et al., 2023），这反映了近年来印度及周边国家加强 DDTs 排放管控的成效。

## 2.2. 源解析

### 2.2.1 DDTs: 历史残留与高盐环境的保存效应

沉积物中 DDT/(DDE+DDD) 的比值常用于指示污染源的新旧程度(阈值为 1) (Pereira et al., 1996)。本研究中, 74% 的湖泊该比值小于 1 (如图 3), 表明主要为历史残留, 这与我国 1983 年停止生产及 1990s 全面禁用 DDTs 的背景相符 (裴远, 2023)。值得注意的是, DDT/(DDE+DDD) 比值大于 1 的湖泊主要集中于高盐湖及微盐湖, 如尕斯库勒湖 (68.91 ng/g)、苦海 (5.06 ng/g) 和冬给措纳湖 (3.71 ng/g)。这提示着, 盐度可能通过物理化学过程、微生物作用等多重机制, 抑制了污染物的降解和迁移, 使污染物更稳定地保留在沉积物中, 延长了其环境滞留时间。例如, Wang 等人 (2024) 的研究表明, 高于 13 g/L 的水体盐度会对脱卤细菌 (如 *Dehalococcoides* 属) 的活性产生抑制作用, 导致 DDT 的降解受阻。因此, 本研究中部分湖泊较高的 DDT/(DDE+DDD) 比值不宜简单解释为近期输入, 其也可能与高盐度下母体 DDT 降解受限有关, 从而导致较高比例的母体 DDT 在沉积物中保留。然而, 鉴于目前关于高原高盐环境中盐度对 DDT 降解过程影响的研究仍较为有限, 尚不能排除局部输入的影响。

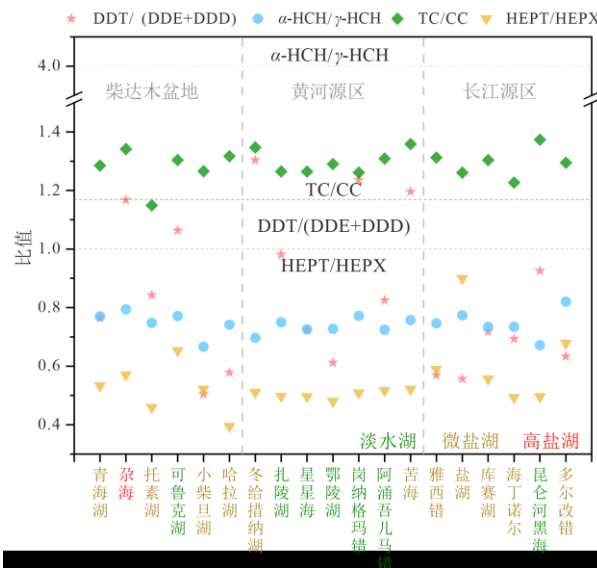


图 3 青海省湖泊沉积物中 OCPs 异构体比值特征

Fig.3 Isomer Ratios of OCPs in Sediments from Lakes of Qinghai Province

在空间上, 高比值湖泊主要集中于受印度洋季风影响较早 (Guo, et al., 2024) 的黄河源区, 而更晚受到季风气候的长江源区比值则普遍较低, 三个区域内出现高比值湖泊的概率与季风影响程度一致。结合青藏高原大气沉降是主要输入途径的结论 (黄焕芳, 2018), 该分布特征反映了污染物随大气传输的“分馏效应”及不同区域沉积环境 (盐度) 对降解速率的调控差异。

### 2.2.2 HCHs: 林丹输入与高山冷捕集效应

HCHs 通常有两种形式: 工业级和林丹。当工业级 HCH 持续输入时,  $\alpha/\gamma$ -HCH 的比值将保持在 4-7 之间; 而林丹输入时,  $\alpha/\gamma$ -HCH 的比值小于 4 并逐渐趋近于 1 (Walker et al., 1999)。

如图 3 所示, 本研究中  $\alpha/\gamma$ -HCH 比值范围为 0.58-0.85, 明确指示了林丹为主要来源, 这与全球及区域大气的监测结果一致 (Shunthirasingham et al., 2010), 暗示了林丹主要来源于全球大气。三个区域的  $\alpha/\gamma$ -HCH 平均比值相近 (0.736-0.748), 空间分布上比值呈现长江源区 > 柴达木盆地 > 黄河源区的特征。考虑到  $\alpha$ -HCH 比  $\gamma$ -HCH 具有更强的挥发性和大气传输能力, 该比值与海拔高度的正相关性验证了“高山冷捕集效应” (Davidson et al., 2003): 即挥发性更强的异构体倾向于迁移至更高海拔 (长江源区) 后冷凝沉降。尽管柴达木盆地海拔相对较低, 但其独特的盆地地形可能导致污染物的局部滞留, 使其比值处于中间水平。

### 2.2.3 氯丹: 低温抑制与环境对指标的干扰

TC/CC 比值常被用作判断氯丹输入新旧程度的指标: 比值接近或低于 1.17 暗示历史残留或长期降解, 而高于 1.17 则可能指示近期输入 (Su et al., 2008; Baek et al., 2011), 但在高寒环境中该指标需谨慎解读。本研究中 96% 的样品 TC/CC 比值约为 1.3 (>1.17), 表面上指示“近期输入”。然而, 结合 DDTs 和 HCHs 的历史残留结论, 这一高比值可归因于低温对 TC 降解的抑制作用。类似现象在北极沉积物中也有报道 (余鹏, 2011; Barrie et al., 1992), 表明极地/高山环境的低温条件会延缓 TC 的降解速率, 导致 TC/CC 比值维持在较高水平, 而非存在新污染源。

在氯丹降解产物分析中, HEPT 可通过光解或环氧化作用转化为 HEPX (Pozo et al., 2011)。绝大多数湖泊中 HEPT/HEPX 比值 < 1, 表明其在环境中已发生显著降解。唯一的例外是鄂陵湖 (比值 > 1), 其代谢产物 HEPX 浓度异常偏低。这推测与该湖泊特定的阈限环境有关: 作为高营养级湖泊, 高密度的浮游植物降低了水体透明度 (陈育斌等, 2025), 限制了 HEPT 向 HEPX 转化所需的光解条件。

## 2.3. 生态风险评价

### 2.3.1 基于沉积物质量基准的生态风险评估

基于两种沉积物质量基准的生态风险结果 (表 3)。就单体化合物而言, *o,p'*-DDT 和 *p,p'*-DDD 浓度均低于 ERL 和 TEL 阈值, 表明生态风险极低。相比之下, *p,p'*-DDT 和 *p,p'*-DDE 分别有 6.4% 和 2.1% 的样品浓度, 介于低阈值 (TEL/ERL) 与高阈值 (PEL/ERM) 之间, 表明在部分湖泊中, 这些化合物可对底栖生物产生偶尔的毒性效应。造成这种风险差异可归因于 *p,p'*-DDT 和 *p,p'*-DDE 具有更强的疏水性和环境持久性, 更易在沉积物中吸附并在生物脂肪组织中富集, 从而对水生生态系统构成潜在的中等程度威胁 (De et al., 2014)。

表 3 基于两种沉积物质量基准的沉积物 OCPs 生态风险评价

Table 3 Ecological Risk Assessment of Sediment OCPs Based on Two Sediment Quality Standards

化合物	本研究浓度 范围	ERL <sup>(1)</sup> (ng/g)	ERM <sup>(1)</sup> (ng/g)	比例 (%)			TEL <sup>(1)</sup> (ng/g)	PEL <sup>(1)</sup> (ng/g)	比例 (%)		
				<ERL	ERL-ERM	>ERM			<TEL	TEL-PEL	>PEL
				<i>o,p'</i> -DDT	0.78-3.42	1.0			7.0	100	0
<i>p,p'</i> -DDT	0.14-1.59	1.0	7.0	93.6	6.4	0	1.19	4.77	93.6	6.4	0
<i>p,p'</i> -DDE	0.22-2.28	2.2	27.0	97.9	2.1	0	2.07	374	97.9	2.1	0
<i>p,p'</i> -DDD	0.26-0.98	2.0	20.0	100	0	0	1.22	7.81	100	0	0
ΣDDTs	0.65-2.96	1.58	46.1	68.4	31.6	0	3.89	51.7	100	0	0

注：<sup>(1)</sup>数据参考前人研究 (Macdonald et al., 2000; Long et al., 1995)

值得注意的是，ΣDDTs 在两种评价系统中存在较大的差异。依据 ERL/ERM 标准（基于海洋沉积物），100%的样品被判定为无风险；而依据 TEL/PEL 标准（基于淡水沉积物），31.6%的样品显示存在潜在风险。进一步分析这 31.6%的湖泊，发现其盐度跨度较大：尕海、托素湖和冬给措纳湖的盐度高于海水，而扎陵湖、盐湖和多尔改错的盐度则略低于海水。因此，单一标准难以准确界定该区域的风险水平，ΣDDTs 的真实生态风险应介于两种评估结果之间，且空间上表现为黄河源区的潜在生态风险相对较高。

总体而言，研究区内所有样品的 OCPs 浓度均未超过 ERM 或 PEL 高风险阈值，表明不会经常发生显著的生物毒性效应。然而，考虑到 OCPs 具有显著的生物富集与生物放大效应（李雪梅等, 2007; Zhang et al., 2014），即使在沉积物浓度未超标的情况下，长期暴露仍可通过食物链传递风险，因此仍需加强对该区域 DDTs 的环境监测与管控。

### 2.3.2 基于物种敏感性分布的 HC<sub>5</sub> 与 PNEC 估算

为满足 USEPA 的统计要求，本研究筛选的数据均涵盖至少 3 个门类 8 个科，并采用 AIC 最小准则筛选最佳拟合模型以降低模型拟合过程中的不确定性（表 4）。

针对青藏高原特有水生生物毒性数据的缺失问题，本研究通过分类学替代与生物富集特征校核验证了模型的适用性。从系统分类学角度来看，研究区域优势物种裂腹鱼亚科 (*Schizothoracinae*) 与模型试验物种鲤鱼 (*Cyprinus carpio*) 同属鲤科 (*Cyprinidae*)，二者相近的亲缘关系及生理结构为毒性预测提供了比较和印证的基础。文献对比显示 (Yang et al., 2010; 崔庆兰, 2011; 元学奎, 2012; Zhao et al., 2013)，受高海拔低温环境及高原鱼类高体脂特征的影响，青海省土著鱼类对 OCPs 的生物富集能力显著高于太湖等低海拔湖泊（约为后者的 18 倍）。基于生物富集因子的差异 (Yang et al., 2010; 崔庆兰, 2011; 元学奎, 2012; Zhao et al., 2013)，本研究对标准受试生物的毒性阈值进行了区域化校核。结果显示，本研究所采用的鲤鱼慢性毒性数据与基于富集效率推演出的裂腹鱼急性毒性数据的敏感性位次在 SSD 曲线上具有高度一致性 (图 4a)，

由此验证了利用通用物种构建 SSD 模型评估青海省典型污染物风险的可行性。

表 4 OCPs 的 SSD 参数

Table 4 Parameters of SSDs for OCPs

OCPs	N	拟合函数	SD	HC <sub>5</sub> (μg/L)	PNEC (μg/L)
<i>p,p'</i> -DDT	157	Log-gumbel	252.16	0.0564	0.0113
<i>p,p'</i> -DDE	9	Log-normal	30.33	0.0787	0.0157
<i>p,p'</i> -DDD	26	Log-normal	159.89	0.0131	0.0026
$\alpha$ -HCH	19	Log-normal	229.54	5.62	1.1240
$\gamma$ -HCH	131	Burr III	13705.84	0.235	0.0470
$\delta$ -HCH	9	Weibull	154.91	2.83	0.5660
Chlordane (technical)	23	Log-gumbel	79.08	0.323	0.0646
Heptachlor	49	Log-normal	19.17	0.238	0.0476
Aldrin	57	Burr III	1167.94	0.166	0.0332
Endrin	83	Log-gumbel	146.93	0.0176	0.0035
Dieldrin	80	Log-gumbel	90.81	0.0904	0.0181
$\alpha$ -Endosulfan	13	Log-normal	105.29	0.0052	0.0010
$\beta$ -Endosulfan	9	Log-gumbel	124.84	0.0716	0.0143
Endosulfan sulfate	8	Weibull	128.11	0.00738	0.0015
Mirex	25	Log-normal	1799.73	2.53	0.5060

注：“N”代表数据数量；“SD”代表标准差；“HC<sub>5</sub>”代表受影响物种中 5% 的物种的危险浓度；“PNEC”表示预测无效应浓度。

基于 HC<sub>5</sub> 值，可供评估的 15 种 OCPs 毒性由高至低为：硫丹类 > 滴滴涕类 > 艾氏剂类 > 氯丹类 > 灭蚊灵 > 六氯苯环己烷类。SSD 曲线形态表明，无脊椎动物（尤其是昆虫纲）对 OCPs 的敏感性显著高于脊椎动物，这符合营养级越高耐受力越强的生态学规律（李斌等, 2014）。鱼类因食性差异及生活史差异导致其 OCPs 富集能力不同（Azevedo et al., 2022），因此在 SSD 曲线上呈现出较宽的分布区间（图 4）。

在硫丹类物质中，其急性毒性显著高于 DDTs（阳宇翔等, 2016），其生态风险呈现复杂的浓度和物种依赖性。本研究中，三种硫丹同系物的 SSD 曲线随浓度区间发生分化（图 4b）：在低浓度区间（<0.1 μg/L）， $\alpha$ -Endosulfan 和 Endosulfan sulfate 对高敏感物种（如昆虫）的毒性效应相近；而  $\beta$ -Endosulfan 对生理功能复杂的物种毒性相对更强（Yan et al., 2019）。结合青海省湖泊的实际浓度，其生态风险排序为： $\alpha$ -Endosulfan（影响 42% 物种） > Endosulfan sulfate（影响 23% 的物种） >  $\beta$ -Endosulfan（影响 19% 的物种），与 HC<sub>5</sub> 反映的固有毒性一致。

三种 DDT（*p,p'*-DDT，*p,p'*-DDE 和 *p,p'*-DDD）的 SSD 曲线形态相似（图 4a），其 HC<sub>5</sub> 值在 0.0026–0.0157 μg/L 之间，其中 *p,p'*-DDD 表现出的最高计算毒性主要源于数据偏差（多涵盖高敏感数据）。值得注意的是，基于 SSD（孔隙水）的评估显示 *p,p'*-DDT 和 *p,p'*-DDE 基本无风险，这一结论与前文基于沉积物质

量基准的评价结果（存在潜在风险）略有不同。这可归因于相平衡分配法计算中，不同 DDT 同系物的  $K_{oc}$  存在差异，导致推导出的水相浓度较低，从而在 SSD 评估中表现为低风险。

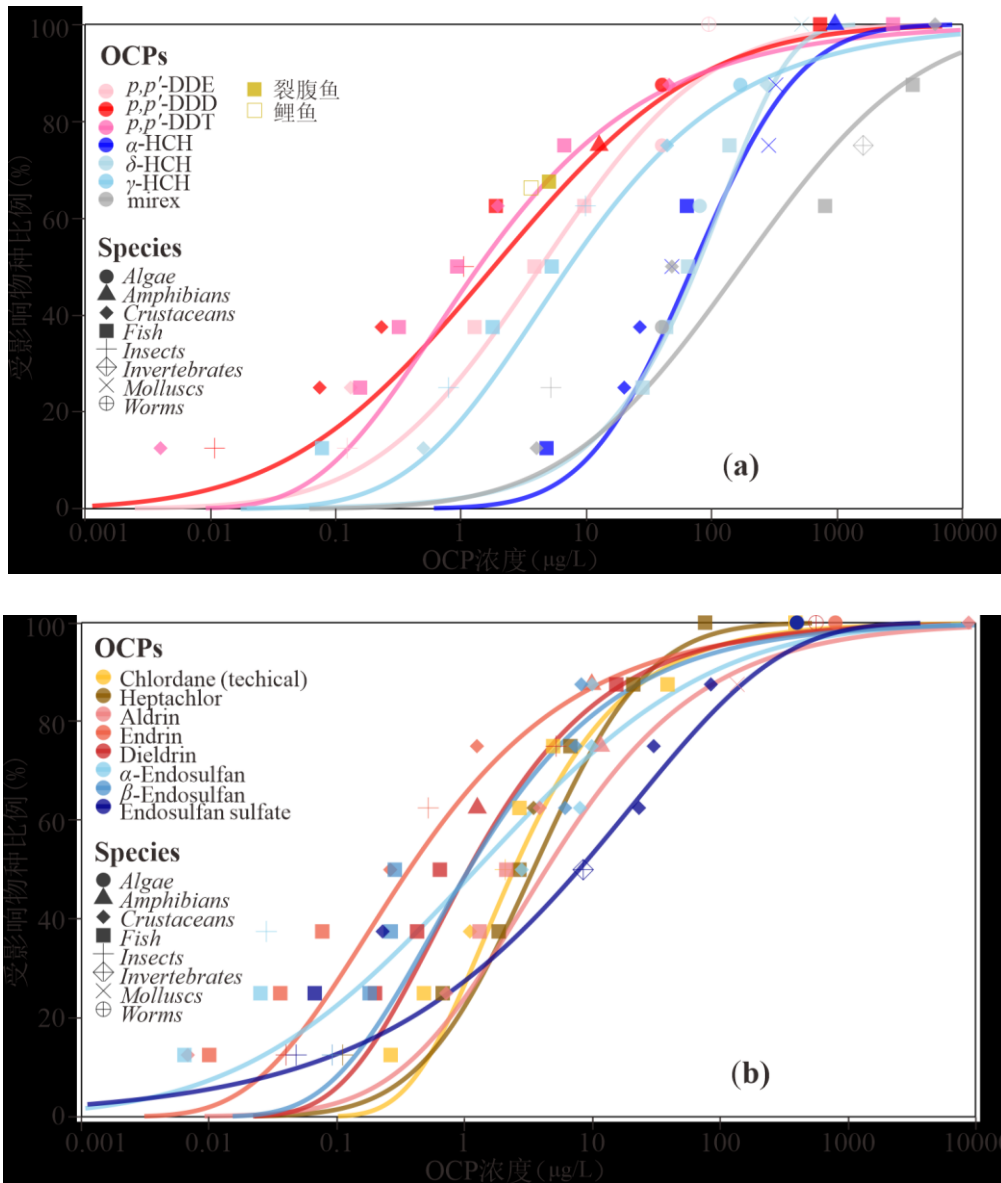


图4 典型 OCPs 组分的物种敏感性分布 (SSD) 拟合曲线

Fig.4 Species Sensitivity Distribution (SSD) Fitted Curves for Typical OCP Components

Aldrin, Endrin 和 Dieldrin 的 SSD 曲线具有一定差异 (图 4b)，其主要受影响物种为鱼类。Carr 等人 (1999) 指出，Aldrin, Endrin 和 Dieldrin 主要通过干扰中枢神经系统影响鱼类发育，其固有毒性排序为：Endrin > Dieldrin > Aldrin。然而，由于本研究区域沉积物中 Aldrin 的实际检出浓度最高，导致实际生态风险排序发生变化：Endrin (影响 24% 的物种) > Aldrin (影响 23% 的物种) > Dieldrin (影响 10% 的物种)。

七氯和工业级氯丹的 SSD 曲线呈交叉形态 (图 4b)。这种交替现象反映了不同物种对两类化合物的敏

感性差异：甲壳类对 Heptachlor 更敏感，而藻类对工业级 Chlordane 更敏感 (Schimmel, et al., 1976)。此外，Malarkey 等人 (1995) 发现两者具有协同致癌效应，暗示其毒性机制存在关联。

三种 HCH ( $\alpha$ -HCH,  $\gamma$ -HCH 和  $\delta$ -HCH) 的固有排序为： $\gamma$ -HCH >  $\delta$ -HCH >  $\alpha$ -HCH。其中  $\gamma$ -HCH 因其难降解性和高生物活性 (Deng et al., 2024)，与另外两种异构体表现出明显的差异 (图 4a)。就实际风险而言，在本研究推导的水体浓度区间 ( $2.40 \times 10^{-3}$ – $8.7 \times 10^{-1}$   $\mu\text{g/L}$ ) 内，仅扎陵湖的  $\gamma$ -HCH 就影响约 10% 的物种，而  $\alpha$ -HCH 和  $\delta$ -HCH 基本不构成生态风险。

综上所述，本 SSD 模型通过引入评估因子并结合本地生物富集特征分析，较好地平衡了数据的通用性与区域的特殊性，可为青海省沉积物污染管控提供科学依据。但受限于高原特有种毒理数据的匮乏，模型预测仍存在一定的不确定性。高原特有的低气压、强辐射及低温环境可通过改变污染物生物有效性及生物代谢速率，进一步改变物种的敏感性分布。未来研究应重点开展针对冷水鱼类、高原底栖无脊椎动物的本地化毒理试验，补充区域特异性参数，以构建更加精准的高原水生生态风险评估体系。

### 2.3.3 危害商 (HQ)

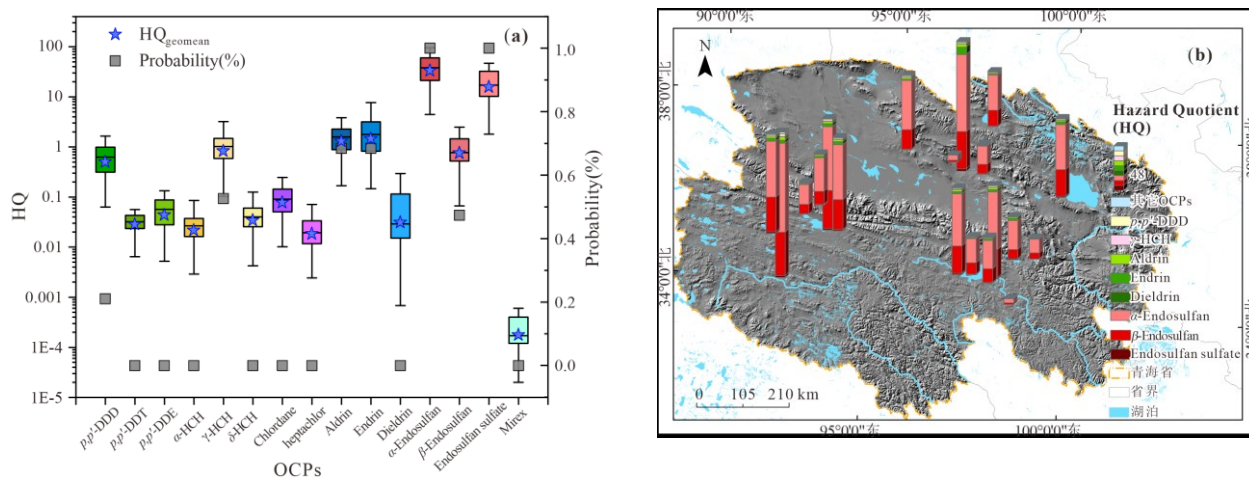


图 5 青海省典型湖泊沉积物中 OCPs 的生态风险及空间分布：(a) 不同 OCPs 的 HQ 值及暴露浓度超过 PNEC 的概率；(b) 青海省不同区域 HQ 值的空间分布

Fig.5 Ecological Risk and Spatial Distribution of OCPs in Sediments of Typical Lakes in Qinghai Province:

(a) the HQ values of OCPs and the probabilities of their exposure concentrations exceeding the PNEC; (b) the distribution of HQ values in Qinghai Province.

当  $HQ > 1$  时，表明 OCP 对生态系统存在潜在风险。结果显示 (图 5a)，HQ 范围为  $1.70 \times 10^{-5}$ –95.8， $HQ_{\text{geomean}}$  范围为  $1.80 \times 10^{-4}$ –33.4，不同 OCPs 的生态风险具有差异。基于超过 PNEC 的概率，风险排序为： $\alpha$ -Endosulfan (100%) = Endosulfan sulfate (100%) > Aldrin (68.4%) = Endrin (68.4%) >  $\gamma$ -HCH (52.6%) >  $\beta$ -Endosulfan (47.4%) > p,p'-DDD (21.1%) > 其它 OCPs (0%)。基于  $HQ_{\text{geomean}}$  和超标概率，研究区 OCPs 可划分为三个风险等级：(1) 高风险组 (Aldrin、Endrin、 $\alpha$ -Endosulfan 和 Endosulfan sulfate)， $HQ_{\text{geomean}}$  均

>1, 超过 50%湖泊浓度高于 PNEC; (2) 中等风险组 ( $\gamma$ -HCH,  $\beta$ -Endosulfan 和  $p,p'$ -DDD), 部分湖泊存在潜在威胁; (3) 低风险组: 其余 OCPs 基本不构成生态风险。

累积危害商 ( $\Sigma$ HQ) 呈显著空间差异 (图 5b), 雅西错湖最高 ( $\Sigma$ HQ>150), 岗纳格玛错最低 ( $\Sigma$ HQ<10)。柴达木盆地的托素湖及长江源区的雅西错湖、盐湖和多尔改错湖  $\Sigma$ HQ 均超过 100, 表明底栖生物面临较高生态威胁。值得注意的是, 这 4 个高风险湖泊均为微盐湖, 暗示盐度增加可能通过盐析效应降低污染物溶解度、提高生物有效性, 从而加剧生态风险 (Saranjampour, et al., 2017)。总体上, 生态风险呈现长江源区>黄河源区>柴达木盆地的空间格局, 与沉积物 OCPs 浓度分布一致。

### 3 结论

(1) 青海省 19 个湖泊沉积物中  $\Sigma$ OCPs 含量为 3.64–10.6 ng/g, 其中 DDTs 为主要组分。全省 OCPs 整体处于低污染水平, 空间上呈现长江源区>柴达木盆地>黄河源区的趋势。研究区 OCPs 的污染程度与海拔高度呈显著正相关, 大气远程传输及高山冷捕集效应是其主控因素, 而本地经济活动影响有限。

(2) DDTs 主要源于历史残留, 其空间分布受大气传输中的分馏效应及不同区域沉积环境的差异化调控; HCHs 明确指向林丹的输入, 且  $\alpha$ -HCH/ $\gamma$ -HCH 的比值随海拔升高而增加的特征, 证实了高海拔环境对挥发性污染物的冷捕集机制。

(3) 研究区生态状况整体稳定, 但硫丹类 (含  $\alpha$ -Endosulfan 和 Endosulfan sulfate)、艾氏剂类 (含 Aldrin 和 Endrin) 及  $p,p'$ -DDD 表现出较高的生态风险。尽管多数湖泊处于低风险水平, 但托素湖 (柴达木盆地) 及长江源区的雅西错、盐湖、多尔改错这 4 个微盐湖呈现出较高的生态风险, 反映了 OCPs 在高海拔微盐湖 (封闭性强、生态系统脆弱) 中的累积特征, 其对底栖生物的潜在影响值得关注。

### References

- Azevedo, L. S., Pestana, I. A., Nascimento, L., et al, 2022. Risk of exposure to Hg and pesticides residues in a traditional fishing community in the Amazon: a probabilistic approach based on dietary pattern. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(23): 34164-34173. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18409-y>
- Baek, S. Y., Choi, S. D., Chang, Y. S, 2011. Three-year atmospheric monitoring of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in polar regions and the South Pacific. *Environmental Science & Technology*, 45(10): 4475-4482. <https://doi.org/10.1021/es1042996>
- Barrie, L. A., Gregore, D., Hargrave, B., et al, 1992. Arctic contaminants: sources, occurrence and pathways. *Science of The Total Environment*, 122 (1): 1-74. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90245-N](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90245-N)
- Carr, R., Couch, T., Liu, J., et al, 1999. The Interaction of Chlorinated Alicyclic Insecticides with Brain Gaba A Receptors in Channel Catfish (*Ictalurus Punctatus*). *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*,

56: 543-553. <https://doi.org/10.1080/00984109909350176>

- Chen, W. L., Ma, R., 2024. System dynamics analysis of green development of agriculture and animal husbandry in ethnic areas—A case study of Qinghai Province. *Qinghai-Tibet Plateau Forum*, 12(4): 1-17 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Ren, X. M., Qiu, Y., et al., 2021. Distribution characteristics and ecological risk assessment of organochlorine pesticides in water of Taihu Lake Ecological Protection Leading Area. *Environmental Pollution and Control*, 43(7): 886-892 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. B., Liang, S., Han, B., et al., 2025. Characteristics of phytoplankton functional groups and driving factors in Zhaling Lake and Eling Lake. *Journal of Hydroecology*, 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Cui, Q. L., 2011. Distribution characteristics and preliminary health risk assessment of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in aquatic organisms at different trophic levels of Taihu Lake (Dissertation). Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Davidson, D. A., Wilkinson, A. C., Blais, J. M., et al, 2003. Orographic cold-trapping of persistent organic pollutants by vegetation in mountains of western Canada. *Environmental Science & Technology*, 37(2): 209-215. <https://doi.org/10.1021/es020605q>
- De Perre, C., Trimble, A. J., Maul, J. D., et al, 2014. Ecological bioavailability of permethrin and *p,p'*-DDT: Toxicity depends on type of organic matter resource. *Chemosphere*, 96: 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.030>
- Deng, W., Takada, Y., Nanasato, Y., et al, 2024. Transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing bacterial  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane dehydrochlorinase LinA. *BMC Biotechnology*, 24(1): 42. <https://doi.org/10.1186/s12896-024-00867-0>
- Ding, Y., Qi, S. H., Huang, H. F., et al, 2023. Sedimentary records of persistent organic pollutants (OCPs and PCBs) in Ngoring Lake, the central Tibetan Plateau, China: Impacts of westerly atmospheric transport and cryospheric melting. *Science of The Total Environment*, 891: 164655. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164655>
- Ding, Z. Y., Lu, R. J., Liu, C., et al., 2018. Characteristics of climate change and its monsoon circulation factors in the Qinghai Lake surrounding area. *Advances in Earth Sciences*, 33(3): 281-292 (in Chinese with English abstract).
- Frank Wania, Mackay, D. (1993). Global Fractionation and Cold Condensation of Low Volatility Organochlorine Compounds in Polar Regions. *Ambio*, 22(1), 10-18. <http://www.jstor.org/stable/4314030>
- Gardner, D. R., Vincent, S. R., 1978. Insecticidal and neuroexcitant actions of DDT analogs on the cockroach, *Periplaneta americana*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 20(1): 294-302. <https://doi.org/10.1007/BF01683524>
- Gong, P., Wang, X., Sheng, J., et al, 2010. Variations of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in

- atmosphere of the Tibetan Plateau: role of the monsoon system. *Atmospheric Environment*, 44(21-22): 2518-2523. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.025>
- Gong, X., Li, Q., Zhang, L., et al, 2020. The occurrence of organochlorine pesticides (OCPs) in riverine sediments of hilly region of southern China: Implications for sources and transport processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 216: 106580. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106580>
- Guo, R., Yu, W., Zhang, J., et al, 2024. Different dynamics drive Indian Ocean moisture to the southern slope of central Himalayas: An isotopic approach. *Geophysical Research Letters*, 51(11): e2024GL109359. <https://doi.org/10.1029/2024GL109359>
- Jiang H. C., Wang B. C., 2025. Microbial Role in Carbon and Nitrogen Cycling in Lakes on the Qinghai-Xizang Plateau. *Earth Science*, 50(3): 877-886. (in Chinese with English abstract).
- Huang, H. F., 2018. Study on long-range atmospheric transport and transformation of organochlorine pesticides on the Qinghai-Tibet Plateau (Dissertation). Wuhan: China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Ivanova, A., Wiberg, K., Ahrens, L., et al, 2021. Spatial distribution of legacy pesticides in river sediment from the Republic of Moldova. *Chemosphere*, 279: 130923. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130923>
- Kahkashan, S., Wang, X., Chen, J., et al, 2019. Concentration, distribution and sources of perfluoroalkyl substances and organochlorine pesticides in surface sediments of the northern Bering Sea, Chukchi Sea and adjacent Arctic Ocean. *Chemosphere*, 235: 959-968. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.219>
- Kai, X. L., 2021. Environmental behaviors and health risks of heavy metals and organochlorine pesticides in Qingshui River (Dissertation). Yinchuan: Ningxia University (in Chinese with English abstract).
- Li, B., Xie, Q. L., Liu, X. Y., et al., 2014. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in Liuxi River and their ecological risks to freshwater organisms. *Journal of Agro-Environment Science*, 33(2): 367-374 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., 2019. Geochemical behaviors of persistent organic pollutants in Tibet: Sources and migration (Dissertation). Beijing: China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Chang, R., Ban, X., et al., 2023. Primary emissions or environmental persistence contribute to the present DDTs: Evidence from sediment records in Tibetan lakes. *Journal of Hazardous Materials*, 459: 132342. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132342>
- Li, Q. X., He, C., Ma, Z. H., et al., 2015. Levels and distribution of organochlorine pesticides and dioxin-like polychlorinated biphenyls in atmospheric particles from Xining City and Tianjun County, Qinghai Province. *Environmental Science*, 36(2): 402-407 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. M., Zhang, Q. H., Gan, Y. P., et al., 2007. Research progress on accumulation and magnification of persistent organic pollutants in food chains. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 13(6): 902-905 (in

Chinese with English abstract).

- Liu, L., 2021. Analysis of pollution characteristics and ecological risk assessment of typical organic pollutants in surface water of Taihu Lake (Dissertation). Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Long, E. R., Macdonald, D. D., Smith, S. L., et al, 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19(1): 81-97. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>
- Ma, Y., Ma, Y., Ding, S. X., 2023. Evaluation of high-quality development of ecological animal husbandry in the Three-River-Source Region—A case study of Golog Tibetan Autonomous Prefecture. *Journal of Qinghai Normal University (Social Sciences Edition)*, 45(4): 92-100 (in Chinese with English abstract).
- Macdonald, D. D., Ingersoll, C. G., Berger, T. A., 2000. Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39(1): 20-31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>
- Malarkey, D. E., Devereux, T. R., Dinse, G. E., et al, 1995. Hepatocarcinogenicity of chlordane in B6C3F1 and B6D2F1 male mice: evidence for regression in B6C3F1 mice and carcinogenesis independent of ras proto-oncogene activation. *Carcinogenesis*, 16(11): 2617-2625. <https://doi.org/10.1093/carcin/16.11.2617>
- Pei, Y., 2023. Research on the spread and application of DDT in China after the victory of the War of Resistance Against Japanese Aggression (1945-1949) (Dissertation). Wuhan: Hubei Academy of Social Sciences (in Chinese with English abstract).
- Pereira, W. E., Domagalski, J. L., Hostettler, F. D., et al, 1996. Occurrence and accumulation of pesticides and organic contaminants in river sediment, water and clam tissues from the San Joaquin River and tributaries, California. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 15(2): 172-180. <https://doi.org/10.1002/etc.5620150216>
- Pozo, K., Harner, T., Lee, S. C., et al, 2011. Assessing seasonal and spatial trends of persistent organic pollutants (POPs) in Indian agricultural regions using PUF disk passive air samplers. *Environmental Pollution*, 159(2): 646-653. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.09.025>
- Qi, C. X., 2023. Analysis of lake area changes and influencing factors on the Qinghai-Tibet Plateau (Dissertation). Xining: Qinghai University (in Chinese with English abstract).
- Qi, X. K., 2012. Study on levels, historical trends and migration laws of organochlorine pesticides in Taihu Lake (Dissertation). Beijing: Minzu University of China (in Chinese with English abstract).
- Raimondo, S., Vivian, D. N., Delos, C., et al, 2008. Protectiveness of species sensitivity distribution hazard concentrations for acute toxicity used in endangered species risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(12): 2599-2607. <https://doi.org/10.1897/08-157.1>
- Saranjampour, P., Vebrosky, N. E., Armbrust, K., 2017. Salinity impacts on water solubility and N-octanol/water partition coefficients of selected pesticides and oil constituents: Salinity affects measurements of chemicals

- solubility & KOW. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36: 2274-2280. <https://doi.org/10.1002/etc.3784>
- Scheringer, M., Salzmann, M., Stroebe, M., et al, 2004. Long-range transport and global fractionation of POPs: insights from multimedia modeling studies. *Environmental Pollution*, 128(1-2): 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.08.027>
- Schimmel, S. C., Patrick, J. M., Forester, J., 1976. Heptachlor: toxicity to and uptake by several estuarine organisms. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 1(6): 955-965. <https://doi.org/10.1080/15287397609529397>
- Shen, B., Wu, J., Zhao, Z., 2017. Organochlorine pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of the Bosten Lake, Northwest China. *Journal of Arid Land*, 9(2): 287-298. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0008-4>
- Shunthirasingham, C., Oyiliagu, C. E., Cao, X., et al, 2010. Spatial and temporal pattern of pesticides in the global atmosphere. *Journal of Environmental Monitoring*, 12(9): 1650-1657. <https://doi.org/10.1039/C0EM00134A>
- Su, Y., Hung, H., Blanchard, P., et al, 2008. A circumpolar perspective of atmospheric organochlorine pesticides (OCPs): Results from six Arctic monitoring stations in 2000–2003. *Atmospheric Environment*, 42(19): 4682-4698. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.054>
- Sultan, M., Hamid, N., Junaid, M., et al, 2022. Organochlorine pesticides (OCPs) in freshwater resources of Pakistan: A review on occurrence, spatial distribution and associated human health and ecological risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 249: 114362. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114362>
- Sun, J., Wang, C., Peng, H., et al, 2016. *p,p'*-DDE Induces Gonadal Intersex in Japanese Medaka (*Oryzias latipes*) at Environmentally Relevant Concentrations: Comparison with *o,p'*-DDT. *Environmental Science & Technology*, 50(1): 462-469. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05042>
- Sun, Y. X., 2023. Pollution levels, source apportionment and risk assessment of organochlorine and triazine pesticides in Baiyangdian Lake (Dissertation). Baoding: Hebei University (in Chinese with English abstract).
- Tao, Y. Q., Zhao, R. H., 2020. Pollution status and distribution characteristics of persistent organic pollutants in lakes and reservoirs in China. *Journal of Lake Sciences*, 32(2): 305-324 (in Chinese with English abstract).
- Voldner, E. C., Li, Y. F., 1995. Global usage of selected persistent organochlorines. *Science of The Total Environment*, 160–161: 201-210. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04357-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04357-7)
- Walker, K., Vallero, D. A., Lewis, R. G., 1999. Factors Influencing the Distribution of Lindane and Other Hexachlorocyclohexanes in the Environment. *Environmental Science & Technology*, 33(24): 4373-4378. <https://doi.org/10.1021/es990647n>
- Wang, H., Jin, H., Wang, J., et al, 2024. *Dehalogenimonas* Strain W from Estuarine Sediments Dechlorinates 1,2-Dichloroethane under Elevated Salinity. *Environmental Science & Technology*, 59(1):779-790. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c08999>
- Wang, S., Wang, Q., Yuan, Z., et al, 2022. Organochlorine pesticides in riparian soils and sediments of the middle

- reach of the Huaihe River: A traditional agricultural area in China. *Chemosphere*, 296: 134020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134020>
- Wang, X., Ren, J., Gong, P., et al, 2016. Spatial distribution of the persistent organic pollutants across the Tibetan Plateau and its linkage with the climate systems: a 5-year air monitoring study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(11): 6901-6911. <https://doi.org/10.5194/acp-16-6901-2016>
- Xie, G., Li, L., Wen, L. J., et al., 2025. Spatiotemporal changes of snow cover in the Qinghai Lake Basin and possible impacts of lake effect in the past 20 years. *Plateau Meteorology*, 2025: 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Xie, T., 2014. Sedimentary records of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in lake sediments of the Qinghai-Tibet Plateau (Dissertation). Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Xiong, J., Sun Z. Y., Hu Y. L., et al., 2024. Characteristics of Dissolved Organic Matter in Alpine Mountain Soils and Its Effect on Riverine Dissolved Organic Matter Export. *Earth Science*, 49(1): 4169-4183. (in Chinese with English abstract).
- Xue, B., 2014. Residue characteristics and source apportionment of typical persistent organic pollutants in sediments from Prydz Bay and the waters near the Antarctic Peninsula (Dissertation). Beijing: China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Yan, J., Zhu, W., Wang, D., et al, 2019. Different effects of  $\alpha$ -endosulfan,  $\beta$ -endosulfan, and endosulfan sulfate on sex hormone levels, metabolic profile and oxidative stress in adult mice testes. *Environmental Research*, 169: 315-325. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.028>
- Yang, R., Wang, Y., Li, A., et al, 2010. Organochlorine pesticides and PCBs in fish from lakes of the Tibetan Plateau and the implications. *Environmental Pollution*, 158(6): 2310-2316. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.02.004>
- Yang, R., Zhang, S., Li, A., et al, 2013. Altitudinal and Spatial Signature of Persistent Organic Pollutants in Soil, Lichen, Conifer Needles, and Bark of the Southeast Tibetan Plateau: Implications for Sources and Environmental Cycling. *Environmental Science & Technology*, 47(22): 12736-12743. <https://doi.org/10.1021/es403562x>
- Yang, Y. X., Liu, X. Y., Zhan, Z. W., et al., 2016. Pollution characteristics and ecological risks of organochlorine pesticides in water sources of Guangdong and Guangxi. *Environmental Science*, 37(6): 2131-2140 (in Chinese with English abstract).
- Yu, P., 2011. Contents, distribution and enantiomeric characteristics of organochlorine pesticides in surface sediments of Arctic seas (Dissertation). Hangzhou: Zhejiang University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., Pan, Z., Bai, A., et al, 2014. Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides (OCPs) in food web of Nansi Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(4): 2039-2051.

<https://doi.org/10.1007/s10661-013-3516-5>

Zhao, Z., Zhang, L., Wu, J., et al, 2013. Residual levels, tissue distribution and risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in edible fishes from Taihu Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(11): 9265-9277. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3249-5>

#### 中文参考文献

陈文烈, 马睿, 2024. 民族地区农牧业绿色发展的系统动力学分析——以青海省为例. *青藏高原论坛*, 12(4): 1-17.

陈燕, 任晓鸣, 邱阳, 等, 2021. 太湖生态保护引领区水体有机氯农药分布特征及生态风险评价. *环境污染与防治*, 43(7): 886-892.

陈育斌, 梁帅, 韩冰, 等, 2025. 扎陵湖和鄂陵湖浮游植物功能群特征及驱动因子. *水生态学杂志*, 1-13

崔庆兰, 2011. 太湖不同营养级水生生物体中多氯联苯和有机氯农药的分布特征及其健康风险初探(硕士学位论文). 南京: 南京大学.

丁之勇, 鲁瑞洁, 刘畅, 等, 2018. 环青海湖地区气候变化特征及其季风环流因素. *地球科学进展*, 33(03):281-292.

蒋宏忱, 王北辰, 2025. 青藏高原湖泊碳氮循环微生物作用. *地球科学*, 50 (03): 877-886.

黄焕芳, 2018. 青藏高原有机氯农药的大气长距离迁移转化研究(博士学位论文). 武汉:中国地质大学(武汉).

开晓莉, 2021. 清水河重金属与有机氯农药的环境行为及健康风险研究(博士学位论文). 银川:宁夏大学.

李斌, 解启来, 刘昕宇, 等, 2014. 流溪河水体多环芳烃的污染特征及其对淡水生物的生态风险. *农业环境科学学报*, 33(2): 367-374.

李俊, 2019. 西藏地区持久性有机污染物的地球化学行为: 来源与迁移(博士学位论文). 北京:中国地质大学(北京).

李秋旭, 何畅, 马召辉, 等, 2015. 青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布. *环境科学*, 36(2): 402-407.

李雪梅, 张庆华, 甘一萍, 等, 2007. 持久性有机污染物在食物链中积累与放大研究进展. *应用与环境生物学报*, 13(6): 902-905.

刘俐, 2021. 太湖地表水典型有机物污染特征分析及生态风险评价(硕士学位论文). 南京:南京大学.

马遥, 马艳, 丁生喜, 2023. 三江源地区生态畜牧业高质量发展评价研究——以果洛州为例. *青海师范大学学报(社会科学版)*, 45(4): 92-100.

裴远, 2023. 抗战胜利后 DDT 在中国的传播与应用研究(1945-1949)(硕士学位论文). 武汉:湖北省社会科学院.

祁昌贤, 2023. 青藏高原湖泊面积变化及影响因素分析(硕士学位论文). 西宁: 青海大学.

亓学奎, 2012. 太湖有机氯农药的水平、历史趋势及迁移规律的研究(硕士学位论文). 北京: 中央民族大学.

孙雅雪, 2023. 白洋淀有机氯和三嗪农药的污染水平、来源解析及风险评估(硕士学位论文). 保定: 河北大学.

- 陶玉强, 赵睿涵, 2020. 持久性有机污染物在中国湖库水体中的污染现状及分布特征. 湖泊科学, 32(2): 305-324.
- 谢刚, 李琳, 文莉娟, 等, 2025. 近二十年青海湖流域积雪时空变化及湖泊效应的可能影响. 高原气象, 2025: 1-5.
- 谢婷, 2014. 青藏高原湖泊沉积物中多环芳烃和有机氯农药的沉积记录(硕士学位论文). 北京: 中国科学院大学.
- 熊净, 孙自永, 胡雅璐, 等, 2024. 高寒山区土壤溶解性有机质特征及其对河流溶解性有机质输出的影响. 地球科学, 49(1): 4169-4183.
- 薛斌, 2014. 南极普里兹湾和南极半岛附近海域沉积物中典型持久性污染物的残留特征和来源解析(博士学位论文). 北京:中国地质大学(北京).
- 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 等, 2016. 粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险. 环境科学, 37(6): 2131-2140.
- 余鹏, 2011. 北极海域表层沉积物中有机氯农药的含量、分布及对映体特征(硕士学位论文). 杭州:浙江工业大学.
- 赵睿涵, 陶玉强, 2020. 持久性有机污染物在中国湖库水体中的污染现状及分布特征. 湖泊科学, 32(2): 305-324.