马雪梅,周迅,高苑,等.湖光岩玛珥湖沉积物雨水芳烃化合物组成研究[J].环境科学与技术,2024,47(S1):21-27. Ma Xuemei, Zhou Xun, Gao Yuan, et al. A study on the composition of polycyclic aromatic hydrocarbons, sediments and wet precipitation in Huguangyan Maar Lake[J]. Environmental Science & Technology,2024,47(S1):21-27.

湖光岩玛珥湖沉积物雨水芳烃化合物组成研究

马雪梅， 周迅， 高苑， 罗涛，
王遥平， 宋之光*
（广东海洋大学化学与环境学院,广东 湛江 524000）

摘 要:该文利用气相色谱-质谱联用仪,对大气降水、湖光岩玛珥湖表层湖水和沉积物中16种优控多环芳烃(PAHs)化合物进行研究。结果表明:(1)大气降水和表层湖水中检出15种优控PAHs,总浓度分别为244.78 ng/L和117.31 ng/L;沉积物中检出16种优控PAHs,总浓度为304.42 ng/g。大气降水、表层湖水、沉积物中2~3环PAHs占比呈顺序降低,4~6环PAHs占比呈顺序递增。(2)大气降水中Chr、BbF、BkF、BaP、IcdP致癌单体多环芳烃含量超过标准规定限值,BaA略低于标准规定限值;湖光岩玛珥湖表层湖水中的BaA、BbF、BkF、BaP等致癌性多环芳烃化合物含量低于标准规定的限值,Chr和IcdP含量略高于标准规定的限值。(3)湖光岩玛珥湖沉积物中Nap、Acy、Ace、Flu、Phe、Ant、Fla、Pyr、BaA、Chr、BaP、DahA化合物含量均远低于沉积物质量基准值ERL,无生态风险。而尚无规定安全值的BbF、BkF、InP和BghiP的生态风险需要进一步关注。总体上湖光岩玛珥湖表层湖水和沉积物PAHs生态风险低。

关键词:表层湖水； 沉积物； 大气降水； 多环芳烃化合物； 湖光岩玛珥湖
中图分类号:X524 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.2510.22.338 **文章编号:**1003-6504(2024)S1-0021-07

A Study on the Composition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Sediments and Wet Precipitation in Huguangyan Maar Lake

MA Xuemei， ZHOU Xun， GAO Yuan， LUO Tao，
WANG Yaoping， SONG Zhiguang*
（College of Chemistry and Environmental Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524000, China）

Abstract: This study has analyzed the abundance distribution of 16 priority controlled polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) compounds in lake surface water, sediments and wet precipitation of Huguangyan Maar Lake by using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results show that: (1) The total concentrations (∑PAHs) of the 15 preferred control PAHs detected in wet precipitation and surface lake water were 244.78 ng/L and 117.31 ng/L, respectively; The total concentration (∑PAHs) of 16 preferred PAHs detected in the sediment was 304.42 ng/g. The proportion of 2-3 ring PAHs decreased sequentially from wet precipitation to surface lake water to sediment, and the proportion of 4-6 ring PAHs increased sequentially. (2) The content of Chr, BbF, BkF, BaP and IcdP carcinogenic monomeric PAHs in wet precipitation exceeds the standard threshold values, and BaA is slightly below the standard threshold value; The content of BaA, BbF, BkF and BaP etc. specified carcinogenic PAHs in the surface lake water of Huguangyan is lower than the standard threshold value, and the content of Chr and IcdP is slightly higher than the threshold value specified in the standard. (3) The content of Nap, Acy, Ace, Flu, Phe, Ant, Fla, Pyr, BaA, Chr, BaP, and DahA compounds in the sediments is well below the sediment quality reference value of ERL, and there is no ecological risk. The ecological risks of BbF, BkF, InP and BghiP, for which safety threshold have not been specified, need further attention. Overall, the ecological risk of 16 PAHs in the lake surface water and sediments of the Huguangyan Maaar Lake were low.

Key words: wet precipitation; surface water; sediments; PAHs; Huguangyan Maar Lake

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com
收稿日期:2022-11-10;修回2023-01-10
基金项目:广东海洋大学博士科研启动项目(R17001)
作者简介:马雪梅(1995-),女,硕士研究生,研究方向为海洋资源与环境,(电子信箱)18143740565@189.cn;*通讯作者,男,教授,博士生导师,博士,研究方向为有机与海洋地球化学,(电子信箱)zgsong_ocean@163.com。

多环芳烃化合物(polycyclic aromatic hydrocarbons,也称PAHs)是一类持久性有机污染物,其普遍存在于大气、水、土壤、生物等环境介质中,可通过食物链在生物体内富集且难以被降解,并对生物体的健康产生严重危害[1-4]。多环芳烃在环境中的来源可以大致分为自然来源与人为来源,自然来源主要有火山爆发、森林火灾等;人为来源主要有石油泄漏、石油产品精炼加工以及石油和其他有机质的不完全燃烧[1,5]。自然或者人为产生的PAHs输入大气后可以通过干、湿沉降重新进入土壤和水体以及沉积物中,并进入生物圈,对生态环境造成破坏[6,7]。近几十年来,伴随着我国经济与社会的快速发展和能源消耗的持续增加,PAHs污染成为突出的环境问题之一[8-10]。湖泊是陆地上重要的生态系统,其具有饮用水资源、渔业资源、生物多样性资源和旅游价值资源等多项生态服务功能,与人类生活息息相关[11]。湖泊也是PAHs的主要环境归宿之一,因此湖泊中的PAHs污染受到广泛关注[12,13]。我国对东部、云贵、东北及蒙新和青藏湖区的湖泊水体及沉积物多环芳烃污染进行了大量的研究,研究表明我国约89%湖泊处于中度污染以上,49%的湖泊处于重度及严重污染。其中东部湖区湖泊污染最严重,以高环多环芳烃为主,而云贵、蒙新和青藏湖区以低环多环芳烃为主[14]。湖泊中的PAHs来自于大气干湿沉降、地表径流以及污染源的直接排放等[6,15]。

湖光岩玛珥湖(以下简称湖光岩)由火山爆发遗留的火山口积水形成的具有独特地质地貌特征的封闭性的淡水湖,位于湛江市区西南部18 km处。湖光岩面积大小为2.1 km^2,最大水深约为21 m[16],湖泊形态呈心形,无出入水口,生态系统稳定。属于世界地质公园,国家AAAA级风景区。前人对湖光岩的研究主要集中在古气候、地质构造、元素组成和浮游生物研究,而对多环芳烃的研究几乎没有报道。因此,通过对湖光岩表层湖水-沉积物和区域大气降水中多环芳烃化合物组成分布对比分析,以期了解封闭性风景区湖泊PAHs的分布情况,以及该区域大气降水中PAHs的分布情况,为湖光岩生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 湖光岩地理概况与样品采集

湖光岩是中国雷琼世界地质公园的组成部分,位于广东省湛江市区西南约18 km处,湖泊四周是由火山灰形成的环形低矮山丘构成湖泊的地表汇水区。火山丘海拔高度在40~90 m之间,主要由火山碎屑岩构成,其上长满茂密的植被形成湖泊与外界的天然屏障。作为旅游景点,湖泊周围修建有人行步道和专供观光电瓶车使用的环湖公路,环湖并修有2处观景台。大气降水样品、表层湖水以及沉积物样的采集均在2021年6月进行。表层湖水与沉积物的采集是在远离游客观景台的僻静处采集5个点共10 L水样和1个沉积物样品,因湖光岩近岸沉积物粗砂质较多,粗砂质土壤不易保存有机质,故在采集水样的5个点中选择了呈泥质状态的一个沉积物样;大气降水的采集是用直径为40 cm的采雨器在离湖泊约1 km外的广东海洋大学实验楼楼顶收集2周内的降雨共6 L雨水样品,所有样品采集后即时置于-4 ℃冰柜冷冻保存。

1.2 样品处理与分析

沉积物样品冷冻干燥研磨至100目,称取30 g样品,加入已知量的PAHs回收率指示物标样:萘-d8(Nap-d8)、苊-d10(Ace-d10)、菲-d10(Phe-d10)、䓛-d12(Chr-d12)和苝-d12(Phy-d12),用二氯甲烷+甲醇(体积比9:3)混合试剂索氏抽提72 h,并用活化后的铜片脱硫。萃取液浓缩后,进行氧化铝硅胶层析柱分离,所得饱和烃和芳烃族组分浓缩至2 mL小瓶待测。

所收集表层湖水、大气降水样品经0.45 μm滤膜过滤去除颗粒物后,分别量取1 L水样于分液漏斗中,加入25 mL CH_2Cl_2,并加入已知量的PAHs回收率指示物标样,进行液液萃取,重复萃取3次。二氯甲烷萃取液进行除水去乳化浓缩后,经氧化铝硅胶层析柱分离出饱和烃和芳烃族组分,再浓缩至2 mL小瓶待测。

使用气相色谱-质谱联用仪(Trace 1300-ISQ7000)对EPA 16种优控PAHs化合物进行分析检测,离子源采用电子轰击源(EI),离子通道选择全扫描(TIC)和选择离子(SIM)双扫描模式进行扫描。色谱柱使用DB-5(60 m×0.25 mm×0.25 μm)石英毛细管色谱柱,载气为高纯氦气,柱流量为1 mL/min。升温程序为:初始温度80 ℃,保留2 min,以3 ℃/min升温到290 ℃保留20 min。

1.3 质量保证与控制

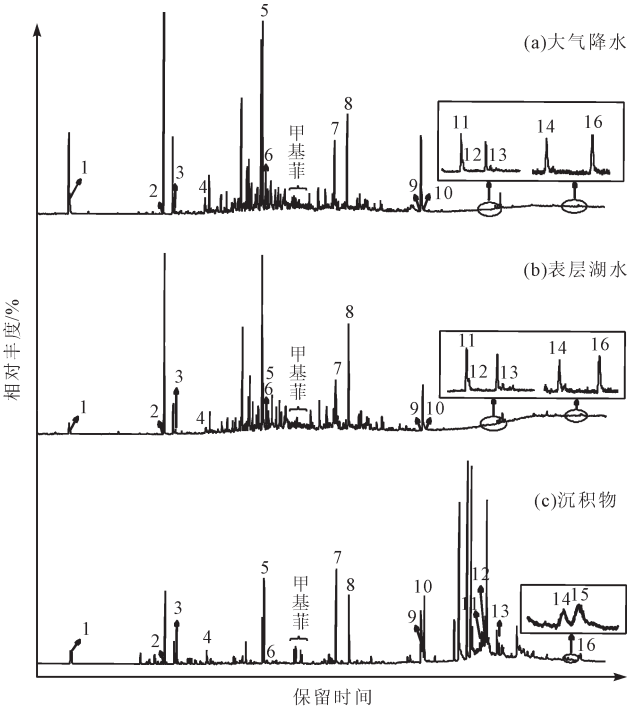
实验分析过程中所使用的玻璃器皿经过碱性洗涤液浸泡8 h,分别经流水和超纯水各清洗3遍,置于烘箱中150 ℃,5 h,再经二氯甲烷冲洗3遍后使用。实验过程中采用空白、平行样对分析过程进行质量监控。分析样品均加入回收率指示物标样来评估样品分析过程,本次实验回收率的范围:由于萘-d8易挥发,其回收率<50%,苊-d10为50%~86%,菲-d10

为67%~116%,䓛-d12为84%~111%,苝-d12为81%~137%。平行样相对标准偏差低于20%,化合物的定量采用4点校正曲线和内标法进行,最终结果经回收率校正。

2　结果与分析

2.1　大气降水、表层湖水、沉积物样品中PAHs含量分布特征

大气降水样品、表层湖水、沉积物样品中16种PAHs化合物的鉴定及浓度列示于图1、2和表1。从图表1可以看出,大气降水和表层湖水样品中除了二苯并[a,h]蒽未检出外,其他15种优控PAHs均有检出,而沉积物样品中16种优控的PAHs均有检出,包括萘(Nap)、苊烯(Acy)、苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(IcdP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)、苯并[g,h,i]苝(BghiP)。大气降水∑PAHs为244.78 ng/L,表层湖水∑PAHs为117.31 ng/L,沉积物∑PAHs为304.42 ng/g。总体上,∑PAHs含量,沉积物>大气降水>表层湖水。大气降水和湖水中6种致癌单体多环芳烃∑PAHs含量分别为33.49 ng/L、21.39 ng/L。与《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)[17]中规定的BaP限值2.8 ng/L和美国EPA标准规定的限值相比,大气降水中BaP含量超过地表水环境质量标准中规定的限值,Chr、BbF、BkF、BaP、IcdP含量超过美国EPA标准规定限值,湖光岩表层湖水中的BaP含量低于我国地表水环境质量标准中规定的限值,BaA、BbF、BkF、BaP含量均低于美国EPA标准规定的限值,Chr和IcdP含量略高于美国EPA标准规定的限值。根据Long等[18]生态风险评价原则,当BkF和BbF存在环境中时,会对生物体的健康造成一定的威胁,而湖光岩表层湖水中和沉积物中检出BkF和BbF浓度较低,表明湖光岩湖水中6种致癌单体多环芳烃对生物体的有害性低或无危害。



注:1.NaP;2.Acy;3.Ace;4.Flu;5.Phe;6.Ant;7.Fla;8.Pyr;9.BaA;10.Chr;11.BbF;12.BkF;13.BaP;14.IcdP;15.DahA;16.BghiP,下同。

图1 多环芳烃化合物总离子流质谱图

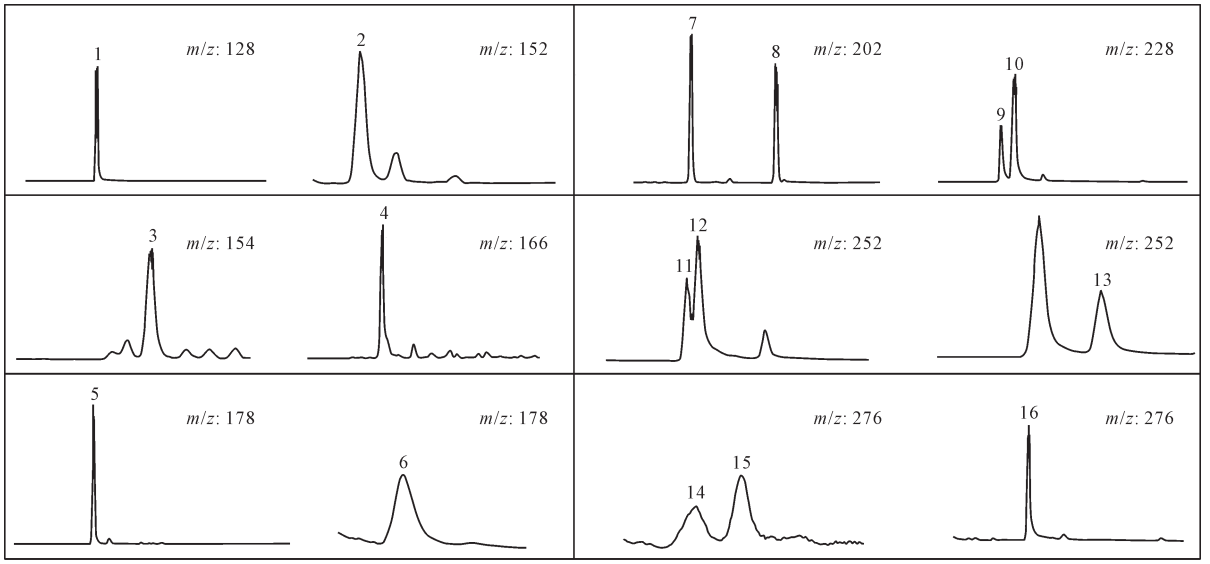


图2 16种多环芳烃化合物质谱鉴定图

2.2　大气降水、表层湖水、沉积物中不同环数PAHs的组成分布特征

图3、4显示大气降水中的PAHs组成特征为3环>4环>2环>6环>5环,其中PAHs单体为3环的Phe含

表1 大气降水与表层湖水及沉积物PAHs含量

PAHs	环数	TEF	水样/(ng·L⁻¹)			沉积物/(ng·g⁻¹)
			大气降水	表层湖水	EPA标准	
Nap	2环	0.001	20.69	11.37	–	18.38
Acy	3环	0.001	1.56	1.43	–	1.24
Ace	3环	0.001	2.82	2.56	–	0.91
Flu	3环	0.001	11.84	7.31	–	5.60
Phe	3环	0.001	83.98	24.43	–	28.56
Ant	3环	0.01	5.36	5.35	–	3.13
Fla	4环	0.001	32.10	12.62	–	35.97
Pyr	4环	0.001	43.68	25.28	–	27.82
BaA	4环	0.10	3.99	2.84	4.40	21.84
Chr	4环	0.01	6.24	4.50	4.40	41.27
BbF	5环	0.10	4.93	3.45	4.40	15.19
BkF	5环	0.10	4.54	3.20	4.40	15.17
BaP	5环	1.00	5.42	2.42	4.40	23.71
DahA	5环	1.00	ND	ND	4.40	11.60
IcdP	6环	0.10	8.37	4.98	4.40	2.73
BghiP	6环	0.01	9.26	5.57	–	50.58
∑PAHs			244.78	117.31		304.42

注:ND表示未检出;TEF表示毒性当量[19,20]。

量最高,为83.98 ng/L。

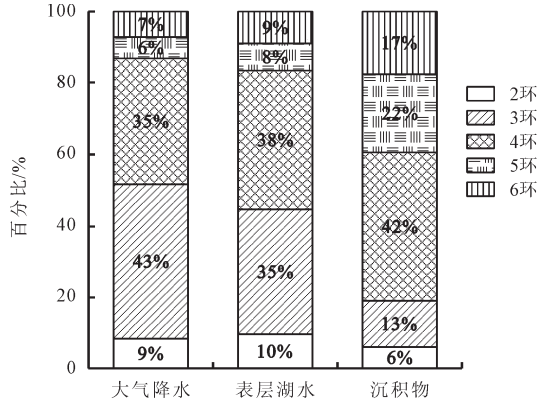


图3 大气降水、表层湖水与沉积物中不同环数PAHs相对丰度分布

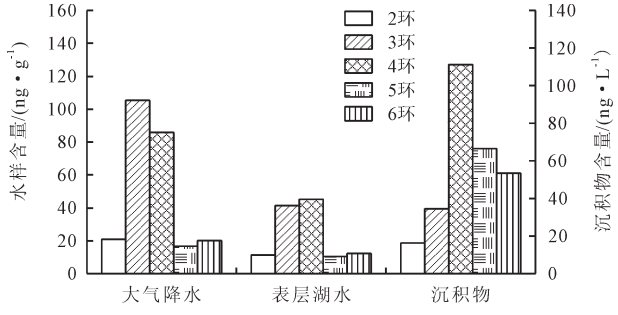


图4 大气降水、表层湖水与沉积物中不同环数PAHs丰度分布

表层湖水中PAHs组成特征为4环>3环>2环>6环>5环,其中含量最高的PAHs单体为4环的Pyr,为25.28 ng/L,其次为3环的Phe,为24.43 ng/L。沉积物中PAHs组成特征为4环>5环>6环>3环>2环,其中含量最高的PAHs单体为6环的BghiP,为50.58 ng/g,其次为4环的Chr,为41.27 ng/L。总体来看,大气降水样品中的2~3环PAHs总占比略高于4~6环PAHs,而表层湖水和沉积物中2~3 PAHs总占比均低于4~6环PAHs,且4~6环PAHs占比由表层湖水向沉积物呈递增趋势。这可能与PAHs在水相与沉积相之间物质的迁移有关,2~3环PAHs容易溶解水中,在环境中易于挥发,被生物富集、降解和光降解[21-23],从而呈现在大气降水-表层湖水-沉积物中占比相应减少的趋势。4~6环∑PAHs,从大气降水-表层湖水-沉积物中的占比呈递增趋势。这是因为与2~3环PAHs相比,4~6环PAHs的辛醇-水分配系数更高、亲脂性更强,更容易被沉积物吸附[24],造成了4~6环PAHs更多地聚集到湖底沉积物中,导致沉积物中4~6环的PAHs含量更高。另外,由于大气降水是短时期收集的,不同季节时间降水PAHs化合物组成会有较大差异,而湖水代表较长时间降水汇聚效应,沉积物更是更长时期湖水沉积物作用的产物。因此,大气降水与湖水、沉积物在化合物组成占比方面的差异也是必然的,这里既有转化、降解、生物聚集效应,也有沉积聚集效应,需要更长时期的观测分析。

2.3 与国内部分湖泊PAHs质量浓度均值对比

与中国境内不同湖泊水体中的PAHs丰度对比(图5)发现,大冶湖[25]、麓湖[26]水体中PAHs含量略低于湖光岩,西湖、南四湖、太湖、玄武湖、百花湖、巢湖[26]水体中PAHs含量比湖光岩水体高1~18倍;湖光岩沉积物中∑PAHs含量为304.42 ng/g,汤逊湖[27]、大冶湖[25]、白洋淀[28]、洞庭湖、南湖、洪湖、黄盖湖、东湖、鄱阳湖、龙感湖[29]沉积物中PAHs含量比湖光岩沉积物高1~5倍。与国内的其他湖泊水体和沉积物对比可知,湖光岩表层水体和沉积物中的PAHs污染程度较轻,但由于是封闭性水体,存在一定程度的聚集效应。

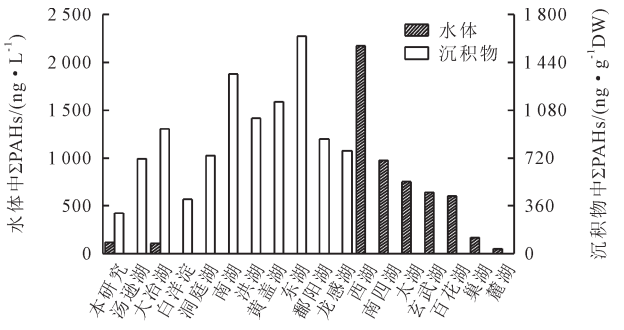


图5 与国内其他湖泊沉积物和水体中16种多环芳烃平均浓度对比

2.4　沉积物中PAHs生态风险评价

根据效应区间低值(ERL,生物有害效应概率<10%)和效应区间中值(ERM,生物有害效应概率>50%)生态风险评价法[18]对湖光岩沉积物进行生态风险评价,如表2所示,湖光岩沉积物中Nap、Acy、Ace、Flu、Phe、Ant、Fla、Pyr、BaA、Chr、BaP、DahA化合物检测含量均远低于沉积物ERL(效应区间低值)和ERM质量基准,这表明湖光岩沉积物中所检测的PAHs没有生物有害性和生态风险。另外,尚无规定安全值的BbF、BkF、IcdP和BghiP化合物在湖底沉积物均有一定含量的检出,故BbF、BkF、IcdP和BghiP化合物的生态风险需要进一步的关注。

表2　沉积物质量基准法评价结果　(ng/g)

PAHs	沉积物质量基准		沉积物
	ERL	ERM	
Nap	160	2 100	18.38
Acy	44	640	1.24
Ace	16	500	0.91
Flu	19	540	5.6
Phe	240	1 500	28.56
Ant	85.3	1 100	3.13
Fla	600	5 100	35.97
Pyr	665	2 600	27.82
BaA	261	1 600	21.84
Chr	384	2 800	41.27
BbF	–	–	15.9
BkF	–	–	15.17
BaP	430	1 600	23.71
DahA	63.4	260	11.6
IcdP	–	–	2.73
BghiP	–	–	50.58

2.5　大气降水、表层湖水、沉积物中PAHs来源分析

不同来源PAHs化合物间的组合比值存在明显差异,故可以应用这些比值来区分PAHs化合物的来源,常用的的比值有Ant/(Ant+Phe)、Fla/(Fla+Pyr)、BaA/(BaA+Chr)、IcdP/(IcdP+BghiP)[30-32]。当Ant/(Ant+Phe)<0.1时,PAHs来源于石油烃类,>0.1时,表明PAHs来源于石油燃烧源;当Fla/(Fla+Pyr)<0.4时,指示PAHs来源于石油烃类,在0.4~0.5之间,表明PAHs来源于石油烃类不完全燃烧排放,而>0.5则指示来源于煤及生物质燃烧排放;BaA/(BaA+Chr)<0.2,表明PAHs来源于石油源,在0.2~0.35之间,表明来源于石油燃烧排放,>0.35指示来源于煤及生物质燃烧;IcdP/(IcdP+BghiP)<0.2指示PAHs直接来源于石油烃类泄露,在0.2~0.5之间,表明来自于石油烃类燃烧,>0.5表明来自于煤及生物质燃烧源。大气降水、表层湖水及沉积物中PAHs化合物的相关比值列于表3。大气降水、表层湖水和沉积物中PAHs来源均较为广泛且相似,PAHs来自于石油烃类源、石油燃烧源,以及煤和生物质不完全燃烧排放源。

表3　PAHs同分异构体比值

项目	大气降水	表层湖水	沉积物
Ant/(Ant+Phe)	0.06	0.18	0.10
Fla/(Fla+Pyr)	0.42	0.33	0.56
BaA/(BaA+Chr)	0.39	0.39	0.35
IcdP/(IcdP+BghiP)	0.47	0.47	0.05

3　结论

(1)湖光岩区域大气降水和湖光岩表层湖水中检测出15种EPA优控PAHs化合物,ΣPAHs分别为244.78 ng/L、117.31 ng/L。而湖光岩沉积物检测出16种优控PAHs化合物,ΣPAHs为304.42 ng/g。大气降水、表层湖水、沉积物中2~3环PAHs占比呈递减趋势,以4~6环PAHs占比呈递增趋势。

(2)大气降水中BaP含量超过《地表水环境质量》(GB 3838-2002)中规定的限值,Chr、BbF、BkF、BaP、IcdP含量均超过美国EPA标准规定限值,表明大气中的6种致癌单体PAHs对生物体存在一定的有害性。湖光岩表层湖水中的BaP含量低于我国地表水环境质量标准中规定的限值,BaA、BbF、BkF、BaP含量均低于美国EPA标准规定的限值,Chr和IcdP含量略高于美国EPA标准规定的限值,表明湖光岩湖水中6种致癌单体PAHs对生物体的有害性低或无危害。

(3)湖光岩沉积物中的Nap、Acy、Ace、Flu、Phe、Ant、Fla、Pyr、BaA、Chr、BaP、DahA化合物含量均远低于沉积物质量基准值ERL,而尚无规定安全值的BbF、BkF、InP和BghiP化合物在沉积物中均有一定含量的检出,它们的生态风险需要进一步的关注。总体上,湖光岩沉积物PAHs的生物有害性低,生态风险低。

(4)与国内的其他湖泊水体和沉积物对比,湖光岩表层水体和沉积物中的PAHs污染程度较轻,但由于是封闭性湖泊,存在一定程度的聚集效应。

(5)根据PAHs化合物分子比值法判断PAHs来源,结果显示,大气降水、表层湖水和沉积物中PAHs来源均较为广泛且相似,PAHs来自于石油烃类源、石油燃烧源以及煤和生物质不完全燃烧排放源。

[参考文献]

[1] 王尊波,孙玉川,梁作兵,等. 岩溶区多环芳烃的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2015,37(9):84-91.
Wang Zunbo, Sun Yuchuan, Liang Zuobing, et al. The research progress of polycyclic aromatic hydrocarbons in Karst areas[J]. Environmental Pollution & Control, 2015,37(9):84-91.

[2] Thiombane M, Albanese S, Di Bonito M, et al. Source patterns and contamination level of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban and rural areas of Southern Italian soils[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019,41(2):507-528.

[3] Petsas A S, Vagi M C. Trends in the bioremediation of pharmaceuticals and other organic contaminants using native or genetically modified microbial strains: a review[J]. Current Pharmaceutical Biotechnology, 2019,20(10):787-824.

[4] Beriro D J, Cave M R, Wragg J, et al. A review of the current state of the art of physiologically-based tests for measuring human dermal in vitro bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016,305:240-259.

[5] 岳敏,谷学新,邹洪,等. 多环芳烃的危害与防治[J]. 首都师范大学学报:自然科学版, 2003,24(3):40-44.
Yue Min, Gu Xuexin, Zou Hong, et al. Killer of health-polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2003,24(3):40-44.

[6] 韩菲. 多环芳烃来源与分布及迁移规律研究概述[J]. 气象与环境学报, 2007,23(4):57-61.
Han Fei. Review on origin, distribution and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2007,23(4):57-61.

[7] 许后效,毛文永. 多环芳烃的环境化学行为[J]. 环境科学丛刊, 1980(10):36-42.
Xu Houxiao, Mao Wenyong. Environmental chemical behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environmental Science Series, 1980(10):36-42.

[8] 蹇兴超. 多环芳烃(PAH)的污染[J]. 环境保护, 1995,23(10):31-33.
Jian Xingchao. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) pollution[J]. Environmental Protection, 1995,23(10):31-33.

[9] Lu L Y, Ni R. Bibliometric analysis of global research on polycyclic aromatic hydrocarbons and health risk between 2002 and 2021[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022,29(56):84034-84048.

[10] Zhang Y, Yuan L M, He S L, et al. Contemporary research progress on the detection of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19(5):2790.

[11] 张运林,秦伯强,朱广伟,等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题[J]. 科学通报, 2022,67(30):3503-3519.
Zhang Yunlin, Qin Boqiang, Zhu Guangwei, et al. Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2022,67(30):3503-3519.

[12] 刘东红,陶玉强,周文佐. 持久性有机污染物在中国湖泊生物中分布与富集的研究进展[J]. 湖泊科学, 2018,30(3):581-596.
Liu Donghong, Tao Yuqiang, Zhou Wenzuo. Research progress on distribution and enrichment of persistent organic pollutants in lake organisms in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(3):581-596.

[13] 黄柱良,蔡家伟,王儒威. 中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子[J]. 环境科学, 2023,44(1):138-157.
Huang Zhuliang, Cai Jiawei, Wang Ruwei. Spatiotemporal distribution and driving factors of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in inland sediments of China[J]. Environmental Science, 2023,44(1):138-157.

[14] 孙恬,叶斌,王延华,等. 中国湖泊PAHs污染现状及其源解析研究进展[J]. 环境科学与技术, 2020,43(6):151-160.
Sun Tian, Ye Bin, Wang Yanhua, et al. Pollution of PAHs in China's Lakes and its source apportionment: a review[J]. Environmental Science & Technology, 2020,43(6):151-160.

[15] 罗小林,郑一,张巍,等. 城市降雨径流多环芳烃污染研究的进展与展望[J]. 环境科学与技术, 2011,34(4):55-59.
Luo Xiaolin, Zheng Yi, Zhang Wei, et al. PAHs pollution of urban rainfall runoff: progress and prospects[J]. Environmental Science & Technology, 2011,34(4):55-59.

[16] 刘嘉麒, Negendank J F W, 王文远, 等. 中国玛珥湖的时空分布与地质特征[J]. 第四纪研究, 2000,20(1):78.
Liu Jiaqi, Negendank J F W, Wang Wenyuan, et al. Temporal and spatial distribution and geological characteristics of Maar Lake in China[J]. Quaternary Sciences, 2000,20(1):78.

[17] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
GB 3838-2002, Surface Water Environmental Quality Standards[S].

[18] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. Environmental Management, 1995,19(1):81-97.

[19] Zhang J Q, Qu C K, Qi S H, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmospheric dustfall from the industrial corridor in Hubei Province, Central China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2015,37(5):891-903.

[20] Nisbet I C T, LaGoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1992,16(3):290-300.

[21] 孟凡生,王业耀,张铃松,等. 河流中多环芳烃迁移转化研究综述[J]. 人民黄河, 2013,35(1):49-52.

Meng Fansheng, Wang Yeyao, Zhang Lingsong, et al. Research on transportation and transformation of PAHs in river [J]. Yellow River, 2013,35(1):49-52.

[22] 田蕴,郑天凌,王新红,等. 厦门西海域表层水中PAHs污染与PAHs降解菌分布的关系[J]. 热带海洋学报, 2003,22(6):15-21.
Tian Yun, Zheng Tianling, Wang Xinhong, et al. PAHs contamination and PAHs-degrading bacteria in surface water of sea area to the west of Xiamen[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003,22(6):15-21.

[23] 赵云英,马永安. 天然环境中多环芳烃的迁移转化及其对生态环境的影响[J]. 海洋环境科学, 1998,17(2):68-72.
Zhao Yunying, Ma Yong'an. Transport process and ecological impact of polycyclic aromatic hydrocarbons in the natural environment[J]. Marine Environmental Science, 1998,17(2):68-72.

[24] 蓝家程,孙玉川,肖时珍. 多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配[J]. 环境科学, 2015,36(11):4081-4087.
Lan Jiacheng, Sun Yuchuan, Xiao Shizhen. Water-sediment partition of polycyclic aromatic hydrocarbons in karst underground river[J]. Environmental Science, 2015,36(11):4081-4087.

[25] 张家泉,胡天鹏,邢新丽,等. 大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价[J]. 环境科学, 2017,38(1):170-179.
Zhang Jiaquan, Hu Tianpeng, Xing Xinli, et al. Distribution, sources and risk assessment of the PAHs in the surface sediments and water from the Daye Lake[J]. Environmental Science, 2017,38(1):170-179.

[26] 陶玉强,赵睿涵. 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[J]. 湖泊科学, 2020,32(2):309-324.
Tao Yuqiang, Zhao Ruihan. Occurrence and distribution of persistent organic pollutants in water of Chinese Lakes and reservoirs[J]. Journal of Lake Sciences, 2020,32(2):309-324.

[27] 李朋,苏业旺,张雅,等. 城市湖泊表层沉积物中PAHs的分布、来源及风险评价:以武汉市汤逊湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(6):1344-1353.
Li Peng, Su Yewang, Zhang Ya, et al. Distribution, source and risk assessment of PAHs in surface sediments of urban lakes:a case study of Tangxun Lake in Wuhan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(6):1344-1353.

[28] 陈滢谕,李傲雪,曾勇,等. 白洋淀表层沉积物多环芳烃风险的空间分布[J]. 生态学杂志, 2023:42(4):926-932.
Chen Yingyu, Li Aoxue, Zeng Yong, et al. Spatial distribution of PAHs risk in surface sediments of Baiyangdian Lake [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023:42(4):926-932.

[29] 万宏滨,周娟,罗端,等. 长江中游湖泊表层沉积物多环芳烃的分布、来源特征及其生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2020,32(6):1632-1645.
Wan Hongbin, Zhou Juan, Luo Duan, et al. Distribution, source characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of lakes along the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2020,32(6):1632-1645.

[30] Chen C F, Chen C W, Dong C D, et al. Assessment of toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan[J]. Science of the Total Environment, 2013,463/464:1174-1181.

[31] Yunker M B, MacDonald R W, Vingarzan R, et al. PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition[J]. Organic Geochemistry, 2002,33(4):489-515.

[32] 黄宏,魏青青,赵旭,等. 崾泗海域表层沉积物中多环芳烃污染水平、分子组成及源识别[J]. 环境科学研究, 2020,33(1):183-191.
Huang Hong, Wei Qingqing, Zhao Xu, et al. Contamination level, composition and source appointment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments of Shengsi Sea Area[J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(1):183-191.