

中国水生生态系统中多环芳烃的生态毒性与生态风险研究进展

秦宁, 何伟, 孔祥臻, 徐福留

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要:多环芳烃是我国环境中的主要污染物之一,对生态系统和人体健康具有严重危害。对中国水生生态系统中多环芳烃的生态毒性与生态风险研究进展进行了综述。从基因、细胞、个体、种群和群落等不同层次概括了多环芳烃的水生态毒性研究进展,介绍了水生生态系统多环芳烃生态风险的主要评价方法,综述了这些评价方法在中国的应用情况,分析了中国水生生态系统中多环芳烃的生态毒性与生态风险研究的存在问题与发展方向。多环芳烃的水生态毒性研究主要集中在水生生物种群与群落水平,基因与细胞水平的研究较少,而生态系统水平的研究基本为空白。在多环芳烃的水生生态风险方面,主要利用国外提出的一些评价方法,缺少自主创新的评价方法,探讨系统水平生态风险评价方法是中国研究人员可能的突破方向。

关键词:水生生态系统;多环芳烃;生态毒性;生态风险;中国

中图分类号:X131.2

文献标志码:A

文章编号:2095-2783(2013)12-1209-10

Research progress in ecotoxicity and eco-risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in China's aquatic ecosystems

Qin Ning, He Wei, Kong Xiangzhen, Xu Fuli

(Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban & Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), posing serious harm to ecosystem and human health, are one of the main pollutants in China's environment. In this paper, the ecotoxicity and ecological risks of PAHs in China's aquatic ecosystems are reviewed. The research progress in PAHs ecotoxicity covering different levels from genes, cells, individuals to populations and communities, are summarized. The major methods for ecological risk assessment of PAHs in aquatic ecosystems are introduced, and their applications in China are reviewed. The problems and further development for studies on the ecotoxicity and ecological risks of PAHs in China's aquatic ecosystems are analyzed. Studies on PAHs ecotoxicity focus mainly on aquatic species at the community level, but less emphasize on the gene and cell levels, and scarce at the ecosystem level. In the respect of aquatic ecological risk assessment of PAHs, the methods used are proposed mostly by foreign researchers, whereas few independent innovations are developed by Chinese counterparts. Therefore, the approach to system-level ecological risk assessment might be a breakthrough direction.

Key words: aquatic ecosystem; polycyclic aromatic hydrocarbons; ecological toxicity; ecological risk; China

多环芳烃(PAHs)是具有2个或2个以上苯环按照线性、角状或者簇状方式相连组成的有机化合物,具有超过10 000多种单体^[1]。由于PAHs具有分布广泛、环境持久性、长距离运输能力以及毒性效应,在过去的几十年里,其来源、分布、迁移、归趋、生态毒性以及污染控制对策等受到了广泛关注^[1-12]。PAHs主要来源于有机物(如燃煤、柴油和汽油等化石燃料以及秸秆和薪柴等生物质)的不完全燃烧^[9, 13-15]。在发达国家,由于能源使用效率的提高,PAHs的排放逐渐降低^[16-17];然而在中国,由于能源需求的逐渐增加以及能源使用效率较低,PAHs的排放量却逐渐上升^[14, 18]。据估计,在2004年,中国16种优控PAHs的大气排放量约为114 Gg,约占全

球PAHs排放总量的22%^[15]。不断增加的PAHs排放,使得中国PAHs的污染及其危害越来越严重。

水生生态系统是支撑整个地球生命系统的基础,不仅提供了维持人类生活和生产活动的基础产品,还具有维持自然生态系统结构、生态过程与区域生态环境的功能^[19]。PAHs能够通过废水排放、大气沉降、地表径流及原油泄漏等多种途径进入水体^[20],对水生生物造成不利影响;并通过饮水、皮肤接触及水产品食用等途径危害人体健康。近年来,我国科研人员在水体PAHs的污染状况方面已经开展了大量研究工作,如长江^[21-24]、黄河^[25-28]、珠江^[29-33]、滦河^[34]等大江大河,天津、沈阳等污染较重城市的市内河流^[35-37],太湖^[38-41]、巢湖^[42-44]、鄱阳湖^[45]、麓湖^[46]、

收稿日期:2013-07-18

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100001110035);国家自然科学基金资助项目(41030529,407250004)

作者简介:秦宁(1984—),男,博士研究生,主要研究方向为多环芳烃的多介质分布与生态风险

通信联系人:徐福留,教授,主要研究方向为污染物表生行为与环境效应, xuff@urban.pku.edu.cn

红枫湖和洱海^[47-48],以及白洋淀^[49-52]等湖泊,杭州湾^[53]、渤海黄海沿岸^[54]、珠江三角洲^[55]、香港邻近海域^[56]和台湾高雄海港^[57]等海域。同时,我国科研人员在水生态系统中 PAHs 的生态毒性与生态风险方面也做了大量研究工作,本文对这两方面的研究进展进行综述,以便今后更好地开展相关研究。

1 中国水生生态系统中多环芳烃的生态毒性研究

进入水体的多环芳烃类物质,会对水生生态系统产生不同层次的毒性效应,包括基因、细胞、个体、种群、群落等,我国学者在这些层次上均开展了相关研究。

1.1 基因和细胞水平毒性

多种 PAHs 具有 DNA 损伤、诱导有机体基因突变以及染色体畸变等毒性作用。PAHs 在人体中造成 DNA 损伤的可能机制主要有两类,一类是 PAHs 代谢过程中的中间活性产物与 DNA 共价结合形成加合物,另一类是其在体内生物转化时产生大量活性氧,从而造成氧化性 DNA 损伤^[58]。国内对水生生态系统中 PAHs 基因细胞毒性的研究多集中在鱼类、底栖水生动物以及两栖类动物。两栖类种群衰退现象越来越受到关注,同时底栖生物,如贝类,由于其代谢率低,对有机污染物具有较强的累积作用,这两类常被用作水环境污染的指示生物。王俊玲等^[59]研究了苯并[a]芘和菲以及二者联合对两栖动物黄河花背蟾蜍肝脏超氧化物歧化酶(SOD)和丙二醛(MDA)水平的影响;王静等^[60]研究了多环芳烃化合物对底栖动物栉孔扇贝组织芳烃羟化酶活性的影响。这些研究都证实,多环芳烃进入生物体后经过细胞色素 P450 混合功能氧化酶系代谢,形成的中间代谢产物,如活性氧物质,是造成生物机体脂质过氧化,蛋白质和 DNA 损伤的主要原因。

肝脏是多环芳烃类化合物进行生物转化的重要器官,也是其有害作用的重要靶器官,因而鱼类基因和细胞毒性研究主要集中于鱼类肝脏 DNA 的损伤研究以及相关酶活性的影响。陈奕欣等^[61]研究了苯并[a]芘和芘对梭鱼肝脏 DNA 的损伤;王隽媛等^[62]研究了萘对斑马鱼内脏还原型谷胱甘肽、谷胱甘肽过氧化物酶和谷胱甘肽硫转移酶的胁迫与生物响应;王重刚等研究了苯并[a]芘和芘暴露对梭鱼肝脏超氧化物歧化酶^[63]以及谷胱甘肽过氧化物酶^[64]活性的影响;徐楠等^[65]对比了 5 种多环芳烃化合物对鲤鱼肝微粒体芳烃羟化酶(AHH)的诱导,并发现多环芳烃对 AHH 的诱导具有良好的剂量效应关系,AHH 活性升高的大小可以作为监测多环芳烃对水体污染程度的一种生物指标。除了对于肝脏的研究外,Niu 等^[66]研究了 PAHs 对虹鳟鱼腮细胞系细胞毒性,并建立了能预测 PAHs 细胞毒性的 Fisher 线性判别函数,分析了 PAHs 的细胞毒性。

1.2 个体水平毒性

除了在基因细胞水平造成危害之外,PAHs 可以被海洋生物个体所富积或贮存,并且通过食物链最终进入人体。因而对于水生生物个体 PAHs 的研究也显得尤为重要。然而国内对水生动物个体的系统研究仍比较缺乏,这些研究主要关注 PAHs 对个体生命指标的影响以及对局部组织造成的危害。顾晓英等^[67]研究了屈对三疣梭子蟹血细胞密度、溶菌酶活力、酸性磷酸酶活力、碱性磷酸酶活力、超氧化物歧化酶活力、酚氧化酶活力等免疫因子的影响。吴玲玲等^[68]研究了菲对斑马鱼组织结构的影响。菲暴露后的斑马鱼的鳃和肝组织均受到了损害,表现为鳃小片上皮细胞肿大和水肿,部分肝细胞出现肿大、细胞质中出现空泡。

藻类是水生生态系统初级生产力的重要组成部分,其在水生态系统的食物链中发挥着巨大作用。因此水生植物的个体 PAHs 的研究主要集中于各种藻类。吕剑涛等^[69]研究了 3 种多环芳烃对 3 种赤潮微藻类胡萝卜素含量的影响,结果发现低浓度的菲、芘和蒽处理使 3 种赤潮微藻的类胡萝卜素含量有所提高,而高浓度处理则降低藻细胞内的类胡萝卜素含量;田继远等^[70]采用水生毒理学方法以及通过分析蒽对 2 种海洋微藻的几种生理生化指标的影响,研究了蒽胁迫对两种海洋微藻的毒性效应,结果表明,随着蒽浓度的不断增大,海洋微藻的相对增长率逐渐降低,同时发现加入外源性抗氧化剂可缓解蒽胁迫对微藻的毒害作用。

1.3 种群与群落水平毒性

国内对于水生生态系统种群的研究,可以大致归纳为 3 个方面:1)PAHs 对于各种群的实验毒性指标的获得,如半数致死浓度(LC50)、半数生长抑制浓度(EC50)的测定;2)多种 PAHs 联合毒性的实验研究;3)多环芳烃与 UV-B 辐射的协同作用。

实验毒性指标的研究方面,黄健等^[71]研究了蒽与苯并[a]芘对海洋微藻致毒影响,并得到了各自 72 h 的 EC50;徐东晖等^[72]研究了萘对火腿许水蚤急性和慢性毒性效应,得到萘对火腿许水蚤 48 h LC50 和 96 h LC50;张朝等^[73]研究了 1-硝基芘(1-NP)对斜生栅藻的毒性,得到了 1-NP 抑制斜生栅藻生长的 96 h EC50;陈辉辉等^[74]研究了多环芳烃对唐鱼的急性毒性效应,得到了菲和萘对唐鱼 96 h 的 LC50 以及安全质量浓度;杨涛等^[75]在实验室条件下研究了菲对红鳍笛鲷的 96 h 急性毒性。这些研究为 PAHs 在水生态系统的生物毒性研究提供了具有宝贵价值的基础数据。

PAHs 联合毒性研究方面,黄健等^[76]比较了 3 种多环芳烃(蒽、苯并[a]芘及 1,2-苯并蒽)单剂和混剂对青岛大扁藻和球等鞭金藻的急性毒性和联合毒性。对青岛大扁藻的研究表明,蒽与苯并[a]芘的联

合及苯并[a]芘与 1,2-苯并蒽的联合为协同作用,蒽与 1,2-苯并蒽的联合及蒽、苯并[a]芘与 1,2-苯并蒽的联合为拮抗作用;对球等鞭金藻研究表明,苯并[a]芘与 1,2-苯并蒽的联合为协同作用,其他联合均为拮抗作用。张蕾等^[77]研究了 2,6-二硝基甲苯(2,6-DNT)和 4-硝基甲苯(4-NT)两种硝基芳烃对虹鲟鱼的毒性,研究表明,2,6-DNT 的急性毒性大于 4-NT,并应用 Marking 相加指数法评价二者的联合毒性,其联合毒性效应为协同作用。联合毒性效应研究为风险评价提供了依据。这些研究表明,多环芳烃具有比较复杂的联合毒性效应,其联合毒性效应因 PAHs 的种类的不同而变化,也因受作用的生物种群不同而变化,在进行风险评价的过程中不能同一而论而要针对具体情况进行探讨。

生态毒理学通过对水生生物毒性研究表明,阳光中的紫外辐射(UV)能够促进多环芳烃的生物毒性。因此多环芳烃与 UV 辐射的协同作用也是研究的热点。王亚等^[78]研究了 UV-B 辐射和蒽对青岛大扁藻生长以及米氏凯伦藻的影响以及两者的联合毒性效应。结果表明,蒽对青岛大扁藻和米氏凯伦藻的生长具有抑制效应,小剂量的 UV-B 辐射具有刺激作用,随着剂量的增加表现出抑制作用,蒽与 UV-B 的联合则表现出更强的抑制作用,二者表现为协同作用。王丽平等^[79]研究了多环芳烃对海洋硅藻中肋骨条藻的光毒性效应。结果表明,阳光中的紫外辐射能够促进多环芳烃的生物毒性,UV 照射不仅能够促进多环芳烃对中肋骨条藻的毒性,也能够改变它们对中肋骨条藻的相对毒性。于娟等^[80]研究了蒽单独胁迫以及 UV-B 共同作用对小新月菱形藻和亚心形扁藻的毒害作用。结果表明,蒽单独胁迫以及蒽与 UV-B 共同作用都使这 2 种海洋微藻受到伤害,蒽在 UV-B 辐射下发生的光致毒性使海洋微藻受到更大的伤害,2 种藻类叶绿素 a、类胡萝卜素含量在 UV-B 辐射存在下也比无 UV-B 辐射低。

对生物群落的研究更多关注在不同水生生物对多环芳烃的敏感性以及富集特征比较。黄健等^[71]比较研究了蒽与苯并[a]芘对海洋微藻致毒影响,发现 3 种微藻对蒽的敏感性由高到低依次为新月菱形藻、球等鞭金藻和亚心形扁藻,而对苯并[a]芘的敏感性由高到低依次为亚心形扁藻、新月菱形藻和球等鞭金藻。江玉等^[81]采用静态实验方法研究了 4 种多环芳烃对 6 种海洋浮游植物的生物急性毒性效应,发现 4 种芳烃对 6 种浮游植物的生物急性毒性顺序为:小新月菱形藻>甲藻>三角褐指藻>中肋骨条藻>小球藻>亚心形扁藻。江锦花等^[82]研究了台州湾 5 种海洋生物体内多环芳烃富集特征,结果表明,蓝圆鲈、红点圆趾蟹、海鳗、日本沙蚕和棱鲯体内,对 PAHs 富集系数最大的是棱鲯,最小的是红点圆趾蟹,底栖生物对高毒性的 PAHs 具有极强的富集能力。王悠等^[83]研究了蒽对扁藻和盐藻的毒性效

应,发现蒽对盐藻和扁藻的生长只有抑制效应,并且扁藻对蒽的毒性胁迫表现得更为敏感。

实验室的毒理实验往往在比较理想的环境下完成,而在自然环境中,PAHs 的水生态毒性效应往往比较复杂,需要针对具体水域进行具体研究。乔敏等^[84]测试了太湖梅梁湾表层水和沉积物有机提取物的直接和间接遗传毒性,并与同期进行的化学分析数据进行了相关分析。结果表明,沉积物有机提取物表现出间接遗传毒性和显著剂量-效应关系,梅梁湾沉积物中多环芳烃含量与间接遗传毒性之间存在相关性,并推测沉积物中存在间接致突变物质的积累,而多环芳烃可能是导致梅梁湾沉积物遗传毒性的主要风险因子之一。崔志松等^[85]以重庆市主城区大溪沟和寸滩 2 个点为代表,研究了重庆市主城区长江和嘉陵江水中酞酸酯类和多环芳烃类为主的重庆市水源地对斑马鱼胚胎仔鱼的毒性,发现重庆市主城区嘉陵江和长江水中有机污染物对斑马鱼具有降低胚胎孵化率及增加仔鱼畸形率的毒性作用。吴玲玲等^[68]采集长江口表层水体样品,测定了样品中菲的对受试斑马鱼鳃和肝组织结构的影响。结果显示长江口表层水体受到一定程度的菲污染,长江口表层水体中的菲含量已经对鱼体的鳃和肝组织产生了毒性。以上环境提取物研究表明,水生生态系统中的 PAHs 存在遗传毒性效应,并且在某些具体水域已经对生物体造成危害。

2 中国水生生态系统中多环芳烃的生态风险研究

在以上毒理学研究的基础上,国内学者对于水生生态系统 PAHs 生态风险也有比较广泛的研究。除了继承和沿用国外一些先进的风险评价理论之外,对于评价方法也有一定的发展。生态风险评价定义为估算特定环境中风险发生概率的过程^[86-87]。水生生态系统的风险评价针对的介质主要是水体以及沉积物,常用的生态风险评价有阈值法、物种敏感度曲线法、概率风险评价法等。

2.1 阈值法生态风险评价

阈值法是最简单也是最常用的方法,通过水中污染物的含量与环境基准的商值衡量水体或者沉积物的风险^[88]。由于方法使用简单,阈值法在水生生态系统的风险评价中被广泛用于风险的初步判断。孙清芳等^[89]使用推广风险系数法评价了松花江水体 8 种 PAHs 的生态风险,研究表明,枯水期 PAHs 已经对水生生物构成了生态风险。武江越等^[90]应用阈值法评价了辽河水体 PAHs 的生态风险,同样发现枯水期沈阳段以及抚顺段部分点位,有较强的负面效应。杨建丽等^[91]采用欧盟适风险评价技术指南的阈值法对长江口水体中的萘、菲、蒽、荧蒽进行了生态风险评价,发现长江口水体中 4 种 PAHs 中蒽存在一定生态风险。阈值法对水体的这些风险研究表

明,不同 PAHs 对生态系统的风险有较大差异。此外,水体风险受到丰水期和枯水期的影响显著。

在沉积物的生态风险评估方面,阈值法的应用更为广泛。主要参照的阈值为 Long 等^[92]于 20 世纪 90 年代提出的沉积物生态标准。这一标准在我国的 PAHs 沉积物风险研究中被广泛地采用。此外,ESBs 方法也是近年来受到重视的一种沉积物阈值风险评估方法,EPA ESBs 方法来源于保护底栖生物的环境基准,该方法提出的 PAHs 阈值可以被应用于沉积物生态风险的评估,在国外已经有了一些应用^[93-94],由于提出时间较晚,在国内应用报道还不多。

在我国的河流沉积物 PAHs 风险研究方面,刘爱霞等^[95]采用平均效应区间中值商法和阈值效应浓度、可能效应浓度法分析黄河口表层沉积物中 PAHs 的生态风险,阈值效应浓度和可能效应浓度法评价结果表明表层沉积物中 4 种 PAHs 单体具有一定的生态风险,平均效应区间中值商法结果表明发生综合生态风险的可能性较小;欧冬妮等^[96]研究了长江口滨岸沉积物中多环芳烃生态风险,同样发现表层沉积物中部分 PAH 化合物的含量超过了 ER-L 值和 ISQV-L 值;周俊丽等^[97]研究了长江河口表层沉积物中 PAHs 的生态风险,发现严重的生态风险在长江河口表层沉积物中不存在,然而排污口附近沉积物存在一定的生态风险;王学彤等^[98]分析了台州市路桥区 37 个河流沉积物样品中优控 PAHs 的浓度,并对其生态风险进行评价,结果表明 37 个河流沉积物样品中部分采样点存在一定的生态风险。

湖泊沉积物方面,李玉斌等^[99]和乔敏等^[100]分别对太湖梅梁湾进行了 PAHs 风险研究,发现芴的浓度略高于生态风险评估区间低值,具有一定的潜在生态风险;张路等^[101]以太湖的重污染湖区——五里湖为研究对象,分析了疏竣湖区底泥中典型持久性有机污染物的蓄积规律和对生态的潜在影响,发现有 4 种多环芳烃含量超过了生态风险效应区间低值。湿地和水库方面,朱樱等^[50]和胡国成等^[102]分别对小白洋淀沉积物的 PAHs 生态风险进行了报道,前者发现沉积物中的芴、菲含量在潜在生态风险介于 10%~50%之间。胡国成等^[102]研究表明,安州采样点表层沉积物对生物存在潜在危害;赵健等对河北王快水库使用了阈值法进行了 PAHs 生态风险评估,发现芴化合物含量超过了风险评估低值,可能存在对生物的潜在危害;郭建阳等^[103]评估了密云水库沉积物中多环芳烃的生态风险,同样发现除了芴和菲之外,密云水库沉积物中的多环芳烃对生态环境的影响目前都处于较低风险水平。

海洋沉积物研究方面,黎晓霞等^[104]研究了厦门西海域表层沉积物中多环芳烃含量分布并进行了生态风险评估,结果表明 PAHs 对生物的危害程度较轻;刘爱霞等^[105]采用平均效应区间中值商法、有机

碳归一化法和效应区间低、中值法等评价方法,对日照近岸海域表层沉积物中多环芳烃的生态风险进行分析,并对不同方法结果进行了比较探讨;李庆召等^[106]也对厦门湾海域表层沉积物多环芳烃污染进行了风险评估,发现 PAHs 的总量远低于 ERL 值;王鹏等^[107]分析了大亚湾大鹏澳表层沉积物中 PAHs 的生态风险,发现大鹏澳海域已受到 PAHs 的影响,存在一定的生态风险;刘亮等^[108]评价了大连湾表层沉积物中 PAHs 生态风险,结果发现大部分采样点的 TEQ 值远远超出无观察效应值,表明大连湾内大部分采样点可能已受到 PAHs 的影响。

2.2 概率风险评估

由于阈值法仅对风险商进行了计算,商值法的计算结果是个确定值,不是一个风险概率的统计值,其计算存在着很多不确定性,因而它仅仅能够对水生生态系统的风险进行粗略的估计^[109],更多地用于风险的初步分析。相比之下概率风险评估则考虑了环境浓度以及毒理数据的统计意义。概率风险评估的基本假设是一组生物的敏感性可以被一个分布所描述,同样在一个区域的 PAHs 环境含量同样可以被另一个分布所描述,两个曲线重叠部分反映的则是环境中受影响的物种比率。概率风险评估中,潜在生态风险可通过计算暴露曲线与效应曲线之间的重叠面积得到。概率风险评估的风险被定量化,不仅具有了统计意义,而且能够实现不同化合物之间的风险相互比较。

概率风险更多的用于水体风险评估,而用于沉积物的研究较少。Yang 等^[110]使用概率风险评估了天津河流 PAHs 的生态风险;Wang 等^[25]通过概率风险评估方法计算表明黄河水体具有较小的 PAHs 生态风险;Guo 等^[39]应用概率方法评价了太湖 8 种 PAHs 的生态风险大小,发现荧蒽具有较高的风险值;石璇等^[35]用重叠面积和联合概率曲线两种概率风险评估的方法分析城市水体多环芳烃的相对生态风险,结果表明在所研究的 8 种化合物中芴的风险最大;冯承莲等^[109]以现有的中国主要河流中多环芳烃的浓度数据为基础,结合毒性数据库中 PAHs 水相浓度对水生生物的毒性数据,用概率风险评估法分析了这 7 种 PAHs 对水生生物的生态风险,排列了 7 种筛选出的 PAHs 风险大小顺序;董继元等^[111]应用商值法、概率密度函数重叠面积和联合概率曲线 3 种风险评估方法对黄河兰州段的生态风险进行了评价,并通过对不同方法及评价结果的分析表明,联合概率曲线方法更适用于黄河兰州段 PAHs 的风险表征。

2.3 物种敏感度曲线

概率风险评估法具有统计学意义,其估算结果较符合实际情况,但是必须使用大量数据作为支撑,且往往是针对某一区域进行评估。此外,概率风险

评价法对于多种多环芳烃的联合风险估算不够完善,往往是假设多种 PAHs 具有相同的致毒机理,使用一系列等效因子换算为 BaP 等摩尔浓度,再进行重叠面积估算。多种 PAHs 的致毒机理具有较大差异,因而,依据不同化合物的等摩尔浓度计算的结果具有数量级上的较大差异,甚至出现毒性机理相同的总风险小于单一化合物的风险的情况。物种敏感度曲线法(SSD)同样是基于生物毒性敏感度分布曲线的一种评价方法,在一定程度上弥补了概率方法的缺陷。SSD 的基本假设同样是基于生物的敏感性分布曲线,不同的是通过样点环境浓度在曲线上的位置直接获得该样点的物种受影响比率,因而能够直接提供具体样点的生态风险。对于联合风险,SSD 方法做了两种假设,对于致毒机理明确相同的多种化合物,使用浓度加和进行计算,对于机理未知或者不同的,使用效应加和进行风险估计,尽管其计算选择仍然依赖于对 PAHs 毒性机理的了解,但是与概率方法相比提供了更多的选择,往往可以得到更具说服力的结果。我国 SSD 的相关研究方面, Qin 等^[44]使用 SSD 方法评价了对巢湖各样点的生态风险,并且与概率风险评价结果进行了比对,并对不确定性进行了探讨;郭广慧^[112]通过 SSD 法计算了太湖各点 PAHs 污染生态风险,并对其风险空间分布进行了探讨;蒋丹烈等^[113]尝试将 SSD 方法应用到沉积物的生态风险评价中,为太湖沉积物 PAHs 生态基准的建立提供了科学依据和方法。

3 结 语

多环芳烃在水生生态系统生态毒性和生态风险在我国已经得到了越来越多的关注。然而,由于多环芳烃类物质种类较多,理化性质各不相同,对于多环芳烃类物质的研究仍然存在一些问题。毒理研究方面,主要集中在水生生物种群与群落水平,基因与细胞水平的研究较少,而生态系统水平的研究基本为空白;并且,这些研究主要集中于几种较为常见的多环芳烃,如蒽、菲、苯并[a]芘等,对于其他排放量大的优控 PAHs 以及一些取代芳烃的毒理效应研究较少;同时由于毒性机理的不明确,多种 PAHs 联合毒性风险评估受到了限制。无论是概率风险评价使用的等效因子法^[114],还是 SSD 应用的浓度加和或效应加和,都依赖于 PAHs 的致毒机理。同时,毒理数据的不确定性也是概率风险评价不确定性的主要来源。因此,更深入地进行多种 PAHs 的生态毒理研究,探讨相应的联合风险评价方法以及生态系统水平上的风险评估方法,将是未来的发展方向。

[参考文献] (References)

- [1] Dennis T L. Perspective on ecotoxicology of PAHs to fish [J]. Hum Ecol Risk Assess, 2007, 13 (2): 302-316.
- [2] Keith L H, Telliard W A. Priority pollutants I: a perspective view [J]. Environ Sci Tech, 1979, 13 (4): 416-423.
- [3] Bouloubassi I, Saliot A. Composition and sources of dissolved and particulate PAH in surface waters from the Rhone Delta (NW Mediterranean) [J]. Mar Pollut Bull, 1991, 22(12): 588-594.
- [4] Shaw G R, Connell D W. Prediction and monitoring of the carcinogenicity of polycyclic aromatic-compounds (PACs) [J]. Rev Environ Contam Toxicol, 1994, 135: 1-62.
- [5] Wagrowski D M, Hites R A. Polycyclic aromatic hydrocarbon accumulation in urban, suburban, and rural vegetation [J]. Environ Sci Tech, 1997, 31 (1): 279-282.
- [6] Smith K E C, Thomas G O, Jones K C. Seasonal and species differences in the air-pasture transfer of PAHs [J]. Environ Sci Tech, 2001, 35(11): 2156-2165.
- [7] Tao S, Cui Y H, Xu F, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin [J]. Sci Total Environ, 2004, 320(1): 11-24.
- [8] Tao S, Li X R, Yang Y, et al. Dispersion modeling of polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of biomass and fossil fuels and production of coke in Tianjin, China [J]. Environ Sci Tech, 2006, 40(15): 4586-4591.
- [9] Neff J M. Polysyclic Aromatic Hydrocarbons in the Aquatic Environment (Sources, Fates and Biological Effects) [M]. London: Applied Science Publisher, 1979.
- [10] Rand G M, Petrocilli S R. Fundamentals of Aquatic Toxicology [M]. 1985, Hemisphere: New York, 416-454.
- [11] Keith Bull. Protocol to 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Persistent Organic Pollutants [R]. Geneva, Switzerland: UNECE, 1998: 1-11.
- [12] NEP Chemicals. Regionally Based Assessment of Persistent Toxic Substances [R]. Geneva, Switzerland: UNEP, 2004: 1-207.
- [13] Baek S O, Field R A, Goldstone M E, et al. A review of atmospheric polycyclic aromatic-hydrocarbons-sources, fate and behavior [J]. Water Air Soil Pollut, 1991, 60(3/4): 279-300.
- [14] Xu S S, Liu W X, Tao S. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China [J]. Environ Sci Tech, 2006, 40(3): 702-708.
- [15] Zhang Y X, Tao S. Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004 [J]. Atmos Environ, 2009, 43(4): 812-819.
- [16] Pacyna J M, Breivik K, Munch J, et al. European atmospheric emissions of selected persistent organic pollutants, 1970-1995 [J]. Atmos Environ, 2003, 37: S119-S131.
- [17] Sun P, Blanchard P, Brice K A, et al. Trends in polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in the Great Lakes atmosphere [J]. Environ Sci Tech, 2006, 40

- (20): 6221-6227.
- [18] Zhang Y X, Tao S, Cao J, et al. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China by county [J]. *Environ Sci Tech*, 2007, 41(3): 683-687.
- [19] 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价 [J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2091-2099.
Ouyang Zhiyun, Zhao Tongqian, Wang Xiaoke, et al. Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, 24(10), 2091-2099. (in Chinese)
- [20] Heemken O P, Stachel B, Theobald N, et al. Temporal variability of organic micropollutants in suspended particulate matter of the River Elbe at Hamburg and the River Mulde at Dessau, Germany [J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2000, 38(1): 11-31.
- [21] Feng C L, Xia X H, Shen Z Y, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Wuhan section of the Yangtze River, China [J]. *Environ Monitor Assess*, 2007, 133(1/2/3): 447-458.
- [22] He H, Hu G J, Sun C, et al. Trace analysis of persistent toxic substances in the main stream of Jiangsu section of the Yangtze River, China [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2011, 18(4): 638-648.
- [23] Wang L L, Shen Z Y, Wang H Y, et al. Distribution characteristics of phenanthrene in the water, suspended particles and sediments from Yangtze River under hydrodynamic conditions [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 165(1/2/3): 441-446.
- [24] Zhang L F, Shi S X, Dong L, et al. Concentrations and possible sources of polychlorinated biphenyls in the surface water of the Yangtze River Delta, China [J]. *Chemosphere*, 2011, 85(3): 399-405.
- [25] Wang L L, Yang Z F, Niu J F, et al. Characterization, ecological risk assessment and source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in water column of the Yellow River Delta, one of the most plenty biodiversity zones in the world [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 169(1/2/3): 460-465.
- [26] Li G C, Xia X H, Yang Z F, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the middle and lower reaches of the Yellow River, China [J]. *Environ Pollut*, 2006, 144(3): 985-993.
- [27] Sun J H, Wang G L, Chai Y, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Henan reach of the Yellow River, middle China [J]. *Ecotoxicol Environ Safety*, 2009, 72(5): 1614-1624.
- [28] Hui Y M, Zheng M H, Liu Z T, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Yellow River Estuary and Yangtze River Estuary, China [J]. *J Environ Sci-China*, 2009, 21(12): 1625-1631.
- [29] An T C, Qiao M, Li G Y, et al. Distribution, sources, and potential toxicological significance of PAHs in drinking water sources within the Pearl River Delta [J]. *J Environ Monitor*, 2011, 13(5): 1457-1463.
- [30] Chen M Y, Yu M, Luo X J, et al. The factors controlling the partitioning of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in the water-column of the Pearl River Estuary in South China [J]. *Mar Pollut Bull*, 2011, 62(1): 29-35.
- [31] Luo X J, Mai B X, Yang Q S, et al. Distribution and partition of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface water of the Pearl River Estuary, South China [J]. *Environ Monitor Assess*, 2008, 145(1/2/3): 427-436.
- [32] Zhang K, Liang B, Wang J Z, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in upstream riverine runoff of the Pearl River Delta, China: An assessment of regional input sources [J]. *Environ Pollut*, 2012, 167: 78-84.
- [33] Feng S L, Mai B X, Wei G J, et al. Genotoxicity of the sediments collected from Pearl River in China and their polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals [J]. *Environ Monitor Assess*, 2012, 184(9): 5651-5661.
- [34] Cao Z G, Liu J L, Luan Y, et al. Distribution and ecosystem risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Luan River, China [J]. *Ecotoxicology*, 2010, 19(5): 827-837.
- [35] 石璇, 杨宇, 徐福留, 等. 天津地区地表水中多环芳烃的生态风险 [J]. *环境科学学报*, 2004, 24(4): 619-624.
Shi Xuan, Yang Yu, Xu Fuli, et al. Ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Tianjin [J]. *Acta Sci Circumst*, 2004, 24(4): 619-624. (in Chinese)
- [36] Shi Z, Tao S, Pan B, et al. Partitioning and source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in rivers in Tianjin, China [J]. *Environ Pollut*, 2007, 146(2): 492-500.
- [37] Guo W, He M C, Yang Z F, et al. Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Xihe River, an urban river in China's Shenyang City: Distribution and risk assessment [J]. *J Hazard Mater*, 2011, 186(2/3): 1193-1199.
- [38] Qiao M, Wang C X, Huang S B, et al. Composition, sources, and potential toxicological significance of PAHs in the surface sediments of the Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. *Environ Int*, 2006, 32(1): 28-33.
- [39] Guo G, Wu F C, He H P, et al. Characterizing ecological risk for polycyclic aromatic hydrocarbons in water from Lake Taihu, China [J]. *Environ Monitor Assess*, 2012, 184(11): 6815-6825.
- [40] Tao Y Q, Yao S C, Xue B, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from drinking water sources of Taihu Lake, China: sources, partitioning and toxicological risk [J]. *J Environ Monitor*, 2010, 12(12): 2282-2289.
- [41] Zhang Y, Guo C S, Xu J, et al. Potential source contributions and risk assessment of PAHs in sediments from Taihu Lake, China: Comparison of three receptor models [J]. *Water Res*, 2012, 46(9): 3065-3073.
- [42] Wang J Z, Zhang K, Liang B, et al. Occurrence, source apportionment and toxicity assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of

- Chaohu, one of the most polluted lakes in China [J]. *J Environ Monitor*, 2011, 13(12): 3336-3342.
- [43] Yang L H, Cheng S P, Wu Z B. Anthropogenic organic contaminants in water and surface sediments of large shallow eutrophic Chaohu Lake, China [J]. *Fresen Environ Bull*, 2009, 18(11): 2048-2054.
- [44] Qin N, He W, Kong X Z, et al. Ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the water from a large Chinese lake based on multiple indicators [J]. *Ecol Indic*, 2013, 24: 599-608.
- [45] Lu M, Zeng D C, Liao Y, et al. Distribution and characterization of organochlorine pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Poyang Lake, China [J]. *Sci Total Environ*, 2012, 433: 491-497.
- [46] Li J, Cheng H R, Zhang G, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) deposition to and exchange at the air-water interface of Luhu, an urban lake in Guangzhou, China [J]. *Environ Pollut*, 2009, 157(1): 273-279.
- [47] Guo J Y, Wu F C, Zhang L, et al. Screening Level of PAHs in Sediment Core from Lake Hongfeng, Southwest China [J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2011, 60(4): 590-596.
- [48] Guo J Y, Liang Z, Liao H Q, et al. Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in Lake Erhai, Southwest China [J]. *J Environ Sci-China*, 2011, 23(8): 1308-1315.
- [49] Guo W, Pei Y S, Yang Z F, et al. Assessment on the distribution and partitioning characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Lake Baiyangdian, a shallow freshwater lake in China [J]. *J Environ Monitor*, 2011, 13(3): 681-688.
- [50] 朱樱, 吴文婧, 王军军, 等. 小白洋淀水-沉积物系统多环芳烃的分布、来源与生态风险[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(5): 637-646.
Zhu Ying, Wu Wenjing, Wang Junjun, et al. Distribution, sources and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in water-sediment system in Lake Small Baiyangdian [J]. *J Lake Sci*, 2009, 21(5): 637-646. (in Chinese)
- [51] Hu G C, Luo X J, Li F C, et al. Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: Concentrations, sources profiles and potential risk [J]. *J Environ Sci-China*, 2010, 22(2): 176-183.
- [52] Qin N, Kong X Z, Zhu Y, et al. Distributions, sources, and backward trajectories of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons at lake small baiyangdian, Northern China [J]. *Sci World J*, 2012: article No. 416321.
- [53] Zhang R, Zhang F, Zhang T C. Sedimentary records of PAHs in a sediment core from tidal flat of Haizhou Bay, China [J]. *Sci Total Environ*, 2013, 450: 280-288.
- [54] Jiao W T, Wang T Y, Khim J S, et al. PAHs in surface sediments from coastal and estuarine areas of the northern Bohai and Yellow Seas, China [J]. *Environ Geochem Health*, 2012, 34(4): 445-456.
- [55] Mai B X, Fu H M, Sheng G Y, et al. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China [J]. *Environ Pollut*, 2002, 117(3): 457-474.
- [56] Wang H S, Liang P, Kang Y A, et al. Enrichment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mariculture sediments of Hong Kong [J]. *Environ Pollut*, 2010, 158(10): 3298-3308.
- [57] Chen C W, Chen C F. Distribution, origin, and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan [J]. *Mar Pollut Bull*, 2011, 63(5/6/7/8/9/10/11/12): 417-423.
- [58] 王欣心, 金银龙. 多环芳烃遗传毒性研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2010, 27(2): 174-177.
Wang Xinxin, Jin Yinlong. Research progress on genotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *J Environ Health*, 2010, 27(2): 174-177. (in Chinese)
- [59] 王俊玲, 王耀玲. 苯并(a)芘和菲对黄河花背蟾蜍肝脏脂质过氧化的影响[J]. *毒理学杂志*, 2010, 24(3): 206-207.
Wang Junling, Wang Yaoling. Effects of BaP and Phe on lipid peroxidation in liver of *bufo raddei* from Yellow River [J]. *J Toxicol*, 2010, 24(3): 206-207. (in Chinese)
- [60] 王静, 潘鲁青, 苗晶晶. 多环芳烃化合物对栉孔扇贝组织芳烃羟化酶活性的影响[J]. *海洋科学*, 2007, 31(12): 18-23.
Wang Jing, Pan Luqing, Miao Jingjing. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on aryl hydrocarbon hydroxylase activities of marine scallop *Chlamys farre-ri* [J]. *Mar Sci*, 2007, 31(12): 18-23. (in Chinese)
- [61] 陈奕欣, 王重刚, 李钦, 等. 苯并(a)芘和芘对梭鱼肝脏DNA损伤的研究[J]. *海洋学报: 中文版*, 2000, 22(2): 92-96.
Chen Yixin, Wang Chonggang, Li Qin, et al. Benzo(a) pyrene and pyrene including DNA damage in *Mugil so-iuy* [J]. *Mar Sci*, 2000, 22(2): 92-96. (in Chinese)
- [62] 王隽媛, 边红枫, 金香琴, 等. 萘对斑马鱼 (*Danio rerio*) 内脏团抗氧化防御系统的胁迫与生物响应[J]. *环境科学*, 2009, 30(2): 516-521.
Wang Junyuan, Bian Hongfeng, Jin Xiangqin, et al. Stress and biological response of naphthalene on the antioxidant defense system in visceral mass of Zebrafish (*Danio rerio*) [J]. *Environ Sci*, 2009, 30(2): 516-521. (in Chinese)
- [63] 王重刚, 余群, 郁昂, 等. 苯并(a)芘和芘暴露对梭鱼肝脏超氧化物歧化酶活性的影响[J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(4): 10-13.
Wang Chonggang, Yu Qun, Yu Ang, et al. Effect of benzo(a) pyrene and pyrene exposure on hepatic superoxide dismutase in *Mugil so-iuy* [J]. *Mar Environ Sci*, 2002, 21(4): 10-13. (in Chinese)
- [64] 王重刚, 郑微云, 余群, 等. 苯并(a)芘和芘对梭鱼肝脏谷胱甘肽过氧化酶活性的影响[J]. *海洋科学*, 2002,

- 26(6): 35-38.
- Wang Chonggang, Zhen Weiyun, Yu Qun, et al. The effect of benzo(a) pyrene and pyrene exposure on hepatic glutathione peroxidase in Mugil so-iuy [J]. Mar Sci, 2002, 26(6): 35-38. (in Chinese)
- [65] 徐楠, 王春霞, 呼世斌, 等. 五种多环芳烃化合物对鲤鱼肝微粒体芳烃羟化酶的诱导[J]. 中国环境监测, 2000, 16(6): 8-11.
- Xu Nan, Wang Chunxia, Hu Shibin, et al. The induction of aryl hydrocarbon hydroxylase (AHH) of carp liver microsome by five aromatic hydrocarbon compounds [J]. Environ Monitor China, 2000, 16(6): 8-11. (in Chinese)
- [66] Niu J F, Yu G. The use of fishes' discriminant analysis in classification models for the ability of PAHs to be directly cytotoxic to a cell line from the rainbow trout gill [J]. Comput Appl Chem, 2004, 21(6): 803-806.
- [67] 顾晓英, 钱云霞, 施祥元, 等. 多环芳烃—屈对三疣梭子蟹免疫影响的初步研究[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2009, 28(3): 352-357.
- Gu Xiaoying, Qian Yunxia, Shi Xiangyuan, et al. A primarily study on the immune response of *Portunus trituberculatus* to organic pollutants [J]. J Zhejiang Ocean Univ-Nat Sci, 2009, 28(3): 352-357. (in Chinese)
- [68] 吴玲玲, 明玺, 陈玲, 等. 长江口水域菲含量及对斑马鱼组织结构的影响[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(7): 13-15.
- Wu Lingling, Ming Xi, Chen Ling, et al. Phenanthrene in waters of the Yangtze Estuary and its histopathological effect on zebrafish [J]. Environ Sci Tech, 2007, 30(7): 13-15. (in Chinese)
- [69] 吕剑涛, 孙广莲, 唐学玺. 3种多环芳烃对3种赤潮微藻类胡萝卜素含量的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(5): 478-481.
- Lu Jiantao, Sun Guanglian, Tang Xuexi. Effect study on three kind of polycyclic aromatic hydrocarbons on carotenoid content of three species in red tide microalgae [J]. Mar Environ Sci, 2009, 28(5): 478-481. (in Chinese)
- [70] 田继远, 唐学玺, 于娟, 等. 蒽胁迫对2种海洋微藻的毒性效应[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2002, 32(6): 919-925.
- Tian Jiyuan, Tang Xuexi, Yu Juan, et al. Toxic effect of anthracene stress on two species of marine microalgae [J]. J Ocean Univ Qindao-Nat Sci, 2002, 32(6): 919-925. (in Chinese)
- [71] 黄健, 刘向东, 唐学玺. 蒽与苯并[a]芘对海洋微藻致毒影响的比较研究[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2000, 30(3): 499-502.
- Huang Jian, Liu Xiangdong, Tang Xuexi. Study of the anthracene and benzo[a]pyrene toxicity effect on marine microalgae [J]. J Ocean Univ Qingdao-Nat Sci, 2000, 30(3): 499-502. (in Chinese)
- [72] 徐东晖, 刘光兴. 多环芳烃(蔡)对火腿许水蚤(*Schmackeria poplesia*)急性和慢性毒性效应的研究[J]. 生态毒理学报, 2010, 5(4): 543-548.
- Xu Donghui, Liu Guangxing. A study on the acute and chronic effects of NAPH on *Schmackeria poplesia* [J]. Asian J Ecotoxicol, 2010, 5(4): 543-548. (in Chinese)
- [73] 张朝, 竺乃恺, 杜秀英, 等. 1-硝基芘对斜生栅藻的毒性研究[J]. 环境化学, 1998, 17(6): 554-557.
- Zhang Zhao, Zhu Naikai, Du Xiuying, et al. Toxicity effects of 1-nitropyrene on *Scenedsmus obliquus* Kutz [J]. Environ Chem, 1998, 17(6): 554-557. (in Chinese)
- [74] 陈辉辉, 覃剑晖, 刘海超, 等. 典型重金属、多环芳烃及菊酯类农药对唐鱼的急性毒性效应[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(4): 511-515.
- Chen Huihui, Tan Jianhui, Liu Haichao, et al. Acute toxicity of representative heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and pyrethroid pesticide to *Tanichthy salbonubes* [J]. J Huazhong Agric Univ, 2011, 30(4): 511-515. (in Chinese)
- [75] 杨涛, 陈海刚, 蔡文贵, 等. 菲胁迫对红鳍笛鲷急、慢性毒性效应的研究[J]. 水产学报, 2011, 35(2): 298-304.
- Yang Tao, Chen Haigang, Cai Wengui, et al. Acute and chronic toxicity effects of phenanthrene in seawater on crimson snapper (*Lutjanus erythropterus*) [J]. J Fish China, 2011, 35(2): 298-304. (in Chinese)
- [76] 黄健, 韩德婷, 唐学玺, 等. 多环芳烃对2种海洋微藻的联合毒性效应研究[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2003, 33(1): 71-74.
- Huang Jian, Han Deting, Tang Xuexi, et al. Study on the toxic coefficient of polycyclic aromatics hydrocarbons on two kinds of marine microalgae [J]. J Ocean Univ Qindao-Nat Sci, 2003, 33(1): 71-74. (in Chinese)
- [77] 张蕾, 徐镜波. 硝基芳烃对虹鲟鱼(*Poecilia reticulata*)的毒性[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 31-33.
- Zhang Lei, Xu Jingbo. The toxicity of nitrotoluenes to guppy [J]. Ecol Environ, 2004, 13(1): 31-33. (in Chinese)
- [78] 王亚, 王仁君, 胡茂辉, 等. UV-B辐射和蒽对青岛大扁藻生长的影响[J]. 曲阜师范大学学报: 自然科学版, 2010, 36(1): 96-99.
- Wang Ya, Wang Renjun, Hu Maohui, et al. The effects of UV-B radiation and anthracene to the growth of the *Platymonas subcordiformis* (Wille) Hazen [J]. J Qufu Norm Univ-Nat Sci, 2010, 36(1): 96-99. (in Chinese)
- [79] 王丽平, 郑丙辉, 孟伟. 多环芳烃对海洋硅藻中肋骨条藻的光毒性效应[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 128-132.
- Wang Liping, Zheng Binghui, Meng Wei. Phototoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons to marine diatom *Skeletonema costatum* [J]. Res Environ Sci, 2007, 20(3): 128-132. (in Chinese)
- [80] 于娟, 唐学玺, 田继远. 蒽与UV-B辐射共同作用对2种海洋微藻的毒性效应[J]. 中国水产科学, 2002, 9(2): 157-160.
- Yu Juan, Tang Xuexi, Tian Jiyuan. Joint toxic effects of anthracene and UV-B radiation on *Nitzschia closterlum* and *Platymonas subcordiforming* [J]. J Fish Sci

- China, 2002, 9(2): 157-160. (in Chinese)
- [81] 江玉, 吴志宏, 韩秀荣, 等. 多环芳烃对海洋浮游植物的生物毒性研究[J]. 海洋科学, 2002, 26(1): 46-50.
Jiang Yu, Wu Zhihong, Han Xiurong, et al. Toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to marine algae [J]. Mar Sci, 2002, 26(1): 46-50. (in Chinese)
- [82] 江锦花, 丁理法. 台州湾五种海洋生物体内多环芳烃的浓度、富集特征及环境效应[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(5): 394-397.
Jiang Jinhua, Ding Lifa. The concentration, bioaccumulation and environmental impacts of polycyclic aromatic hydrocarbons in organism in sea [J]. Environ Pollut Control, 2007, 29(5): 394-397. (in Chinese)
- [83] 王悠, 唐学玺, 杨震, 等. 葱对扁藻和盐藻的毒性效应[J]. 海洋通报, 1999, 18(6): 84-86.
Wang You, Tang Xuexi, Yang Zhen, et al. Effect of anthracene on *Platymonas* sp. and *Dunaliella* spp [J]. Mar Sci Bull, 1999, 18(6): 84-86. (in Chinese)
- [84] 乔敏, 王春霞, 黄圣彪, 等. 太湖梅梁湾水体和沉积物中有机污染物的遗传毒性[J]. 中国环境科学, 2006, 26(2): 224-227.
Qiao Min, Wang Chunxia, Huang Shengbiao, et al. Genotoxicity of organic pollutant water and sediment in Meiliang Bay, Taihu Lake [J]. China Environ Sci, 2006, 26(2): 224-227. (in Chinese)
- [85] 崔志松, 郑立, 杨伯娟, 等. 两种海洋专性解烃菌降解石油的协同效应[J]. 微生物学报, 2010, 50(3): 350-359.
Cui Zhisong, Zheng Li, Yang Baijuan, et al. Synergic effect of marine obligate hydrocarbonoclastic bacteria in oil biodegradation [J]. Acta Microbiol Sin, 2010, 50(3): 350-359. (in Chinese)
- [86] Maltby L, Blake N, Brock T C M, et al. Insecticide species sensitivity distributions: Importance of test species selection and relevance to aquatic ecosystems [J]. Environ Toxicol Chem, 2005, 24(2): 379-388.
- [87] Domene X, Ramirez W, Mattana S, et al. Ecological risk assessment of organic waste amendments using the species sensitivity distribution from a soil organisms test battery [J]. Environ Pollut, 2008, 155(2): 227-236.
- [88] Solomon K, Giesy J, Jones P. Probabilistic risk assessment of agrochemicals in the environment [J]. Crop Protect, 2000, 19(8/9/10): 649-655.
- [89] 孙清芳, 冯玉杰, 高鹏, 等. 松花江水中多环芳烃(PAHs)的环境风险评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4): 568-572.
Sun Qingfang, Feng Yujie, Gao Peng, et al. Risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water of the Songhua River [J]. J Harbin Inst Tech, 2010, 42(4): 568-572. (in Chinese)
- [90] 武江越, 刘征涛, 冯流, 等. 辽河水体中多环芳烃的分布特征及风险评估[J]. 环境化学, 2012, 31(7): 1116-1117.
Wu Jiangyue, Liu Zhengtao, Feng Liu, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water of Liaohu River and risk assessment [J]. Environ Chem, 2012, 31(7): 1116-1117. (in Chinese)
- [91] 杨建丽, 刘征涛, 冯流, 等. 长江口水体中 PAHs 的基本生态风险特征[J]. 环境科学研究, 2009, 22(7): 784-787.
Yang Jianli, Liu Zhengtao, Feng Liu, et al. Base ecological risk of PAHs in water of Yangtze River estuary [J]. Res Environ Sci, 2009, 22(7): 784-787. (in Chinese)
- [92] Long E R, Field L J, MacDonald D D. Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines [J]. Environ Toxicol Chem, 1998, 17(4): 714-727.
- [93] Bejarano A C, Michel J. Large-scale risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in shoreline sediments from Saudi Arabia: Environmental legacy after twelve years of the Gulf war oil spill [J]. Environ Pollut, 2010, 158(5): 1561-1569.
- [94] Weinstein J E, Crawford K D, Garner T R, et al. Screening-level ecological and human health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in stormwater detention pond sediments of Coastal South Carolina, USA [J]. J Hazard Mater, 2010, 178(1/2/3): 906-916.
- [95] 刘爱霞, 郎印海, 薛荔栋, 等. 黄河口表层沉积物中多环芳烃(PAHs)的生态风险分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 441-446.
Liu Aixia, Lang Yin Hai, Xue Lidong, et al. Ecological risk assessment of PAHs in surface sediments from the Yellow River estuary [J]. Ecol Environ, 2009, 18(2): 441-446. (in Chinese)
- [96] 欧冬妮, 刘敏, 许世远, 等. 长江口滨岸水和沉积物中多环芳烃分布特征与生态风险评价[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 3043-3049.
Ou Dongni, Liu Min, Xu Shiyuan, et al. Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in overlying waters and surface sediments from the Yangtze estuarine and coastal areas [J]. Environ Sci, 2009, 30(10): 3043-3049. (in Chinese)
- [97] 周俊丽, 刘征涛, 孟伟, 等. 长江河口表层沉积物中 PAHs 的生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(7): 778-783.
Zhou Junli, Liu Zhengtao, Mengwei, et al. Discussion of ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in partial surface sediments of the Yangtze River Estuary [J]. Res Environ Sci, 2009, 22(7): 778-783. (in Chinese)
- [98] 王学彤, 贾英, 孙阳昭, 等. 典型污染区河流表层沉积物中 PAHs 的分布、来源及生态风险[J]. 环境科学, 2010, 31(1): 153-158.
Wang Xuetong, Jia Ying, Sun Yangzhao, et al. Distribution, possible source and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments from a typical contaminated area [J]. Environ Sci, 2010, 31(1): 153-158. (in Chinese)
- [99] 李玉斌, 刘征涛, 冯流, 等. 太湖部分沉积物中多环芳烃生态风险评估[J]. 环境化学, 2011, 30(10): 1769-1774.
Li Yubin, Liu Zhentao, Feng Liu, et al. Ecological risk assessment of PAHs in the sediment from Taihu Lake

- [J]. *Environ Chem*, 2011, 30(10): 1769-1774. (in Chinese)
- [100] 乔敏, 黄圣彪, 朱永官, 等. 太湖梅梁湾沉积物中多环芳烃的生态和健康风险[J]. *生态毒理学报*, 2007, 2(4): 456-463.
Qiao Min, Huang Shengbiao, Zhu Yongguan, et al. Ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Meiliang Bay, Taihu Lake [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2007, 2(4): 456-463. (in Chinese)
- [101] 张路, 范成新, 鲜启鸣, 等. 太湖底泥和疏浚堆场中持久性有机污染物的分布及潜在生态风险[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(1): 18-24.
Zhang Lu, Fan Chengxin, Xian Qiming, et al. Persistent organic pollutants (POPs) distribution and ecological risk on sediment in Lake Taihu and slurry stockyard [J]. *J Lake Sci*, 2007, 19(1): 18-24. (in Chinese)
- [102] 胡国成, 郭建阳, 罗孝俊, 等. 白洋淀表层沉积物中多环芳烃的含量、分布、来源及生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(3): 321-326.
Hu Guocheng, Guo Jianyang, Luo Xiaojun, et al. Distribution, sources, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Baiyangdian Lake [J]. *Res Environ Sci*, 2009, 22(3): 321-326. (in Chinese)
- [103] 郭建阳, 廖海清, 韩梅, 等. 密云水库沉积物中多环芳烃的垂直分布、来源及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2010, 31(3): 626-631.
Guo Jianyang, Liao Haiqing, Han Mei, et al. Temporal distribution, sources, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment core from Miyun Reservoir [J]. *Environ Sci*, 2010, 31(3): 626-631. (in Chinese)
- [104] 黎晓霞, 蔡河山, 张珞平. 厦门西海域表层沉积物中多环芳烃含量分布及生态风险评估[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(5): 43-46.
Li Xiaoxia, Cai Heshan, Zhang Luoping. Concentrations and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments at western Xiamen Bay and assessment of their ecological risk [J]. *J Trop Oceanogr*, 2008, 27(5): 43-46. (in Chinese)
- [105] 刘爱霞, 郎印海, 薛荔栋, 等. 日照近岸海域表层沉积物中多环芳烃的生态风险分析[J]. *环境化学*, 2008, 27(6): 805-809.
Liu Aixia, Lang Yin Hai, Xue Lidong, et al. Ecological risk assessment of PAHs in the costal surface sediment from Yellow Sea (Rizhan City) [J]. *Environ Chem*, 2008, 27(6): 805-809. (in Chinese)
- [106] 李庆召, 李国新, 罗专溪, 等. 厦门湾海域表层沉积物重金属和多环芳烃污染特征及生态风险评估[J]. *环境化学*, 2009, 28(6): 869-875.
Li Qingzhao, Li Guoxin, Luo Zhuanxi, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment from Xiamen Bay [J]. *Environ Chem*, 2009, 28(6): 869-875. (in Chinese)
- [107] 王鹏, 林钦, 柯常亮, 等. 大亚湾大鹏澳表层沉积物中 PAHs 特征及生态风险[J]. *贵州农业科学*, 2010, 38(12): 208-212.
Wang Peng, Lin Qin, Ke Changliang, et al. Characteristics and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Dapeng'ao Bay of Daya Bay [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2010, 38(12): 208-212. (in Chinese)
- [108] 刘亮, 张俊海, 胡莹莹, 等. 大连湾表层沉积物中多环芳烃的生态风险评估[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(4): 477-480.
Liu Liang, Zhang Junhai, Hu Yingying, et al. Ecological risk assessment on polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Dalian Bay [J]. *Mar Environ Sci*, 2011, 30(4): 477-480. (in Chinese)
- [109] 冯承莲, 雷炳莉, 王子健. 中国主要河流中多环芳烃生态风险的初步评价[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(6): 583-588.
Feng Chenglian, Lei Bingli, Wang Zijian. Preliminary ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in main rivers of China [J]. *China Environ Sci*, 2009, 29(6): 583-588. (in Chinese)
- [110] Yang Y, Shi X, Wong P K, et al. An approach to assess ecological risk for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water from Tianjin [J]. *J Environ Sci Health A*, 2006, 41(8): 1463-1482.
- [111] 董继元, 王式功, 尚可政. 黄河兰州段多环芳烃生态风险的初步评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(4): 50-55.
Dong Jiuyuan, Wang Shigong, Shang Kezheng. Preliminary assessment on ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons at the Lanzhou section of the Yellow River [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2011, 25(4): 50-55. (in Chinese)
- [112] 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 等. 太湖水体多环芳烃生态风险的空间分布[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(6): 1032-1039.
Guo Guanghui, Wu Fengchang, He Hongping, et al. Spatial distribution of ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface waters of Lake Taihu [J]. *China Environ Sci*, 2012, 32(6): 1032-1039. (in Chinese)
- [113] 蒋丹烈, 胡霞林, 尹大强. 应用物种敏感性分布法对太湖沉积物中多环芳烃的生态风险分析[J]. *生态毒理学报*, 2011, 6(1): 60-66.
Jiang Danlie, Hu Xialin, Yin Daqiang. Ecological risk assessment on polycyclic aromatic hydrocarbons of sediment in Taihu Lake using species sensitivity distributions [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2011, 6(1): 60-66. (in Chinese)
- [114] Nisbet I C T, Lagoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regul Toxicol Pharm*, 1992, 16(3): 290-300.