

目录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	VI
第一章 绪论.....	1
1.1 微塑料的概述.....	1
1.1.1 微塑料的定义和来源.....	1
1.1.2 微塑料在水环境中的分布及危害.....	1
1.2 镉的概述.....	3
1.2.1 镉的基本性质和来源.....	3
1.2.2 镉造成的环境污染问题及危害.....	3
1.3 模式动物的选择.....	5
1.3.1 斑马鱼的应用和优点.....	6
1.3.2 鲫鱼的应用和优点.....	6
1.4 氧化应激指标的意义和作用.....	7
1.4.1 超氧化歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 的作用和意义.....	7
1.4.2 丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 的作用和意义.....	7
1.4.3 金属硫蛋白 (Metallothionein, MT) 的作用及意义.....	7
1.4.4 热休克蛋白 70 (Heat Shock Protein 70, HSP70) 的作用及意义.....	7
1.5 DNA 修复系统.....	8
1.6 研究现状.....	9
1.7 研究内容、意义和技术路线.....	10

1.7.1 研究内容	10
1.7.2 主要研究意义	10
1.7.3 技术路线	11
第二章 微塑料对镉在斑马鱼胚胎中生物积累与毒性的影响	12
2.1 引言	12
2.2 材料与方法	12
2.2.1 主要试剂和材料	13
2.2.2 微塑料 (MPs) 预处理	13
2.2.3 吸附动力学实验	14
2.2.4 斑马鱼饲养和胚胎收集	14
2.2.5 斑马鱼暴露实验设计	15
2.2.6 斑马鱼发育指标检测	16
2.2.7 斑马鱼行为轨迹分析	17
2.2.8 镉含量测定的测定	17
2.2.9 相关基因的测定	17
2.2.10 数据统计与分析	20
2.3 结果与讨论	20
2.3.1 吸附等温线模型	20
2.3.2 斑马鱼微塑料暴露实验	21
2.3.3 斑马鱼混合暴露实验	24
2.4 本章小结	32
第三章 微塑料对镉在鲫鱼体内生物积累与毒性的影响	34
3.1 前言	34
3.2 材料与方法	34

3.2.1 实验试剂和仪器	34
3.2.2 鲫鱼的饲养	35
3.2.3 微塑料 (MPs) 预处理	35
3.2.4 鲫鱼暴露实验设计	35
3.2.5 镉含量测定	36
3.2.6 微塑料含量测定	36
3.2.7 鲫鱼生理指标检测	37
3.2.8 数据统计与分析	39
3.3 结果与讨论	40
3.3.1 鲫鱼体重变化	40
3.3.2 鲫鱼组织镉的分布	40
3.3.3 鲫鱼组织微塑料的分布	41
3.3.4 微塑料和镉对鲫鱼肝脏 SOD 活性和 MDA 含量的影响	42
3.3.5 微塑料和镉对鲫鱼肝脏氧化应激相关基因表达的影响	44
3.3.6 微塑料和镉对鲫鱼肝脏线粒体和 ATP 相关基因表达的影响	45
3.4 本章小结	48
第四章 结论与展望	49
参考文献	50
致谢	65
攻读学位期间取得的学术成果	66

第一章 绪论

1.1 微塑料的概述

1.1.1 微塑料的定义和来源

微塑料 (Microplastics, MPs) 是指在环境中粒径小于 5 mm 的塑料^[1]。根据尺寸不同, MPs 又可划分为微米塑料 (1 μm -5 mm)、亚微米塑料 (100 nm-1 μm) 和纳米塑料 (1 nm-100 nm)。同时根据其来源不同, MPs 又可以划分为初级 MPs 和次级 MPs。初级 MPs 是指直接排放到环境中粒径小于 5 mm 的塑料; 次级 MPs 是指粒径较大的塑料在环境因素的作用下形成的尺寸小于 5 mm 的塑料^[2]。

MPs 在环境中的主要来源: (1) 塑料膜使用后残膜的降解; (2) 污泥堆肥与污水灌溉中含有的 MPs; (3) 使用化妆品和洗浴用品产生的市政污水; (4) 伴随风雨雪天气沉降的 MPs^[3]。研究表明: 尽管污水处理厂可以去除高达 95% 的 MPs, 但仍少量 MPs 无法被有效处理, 而被排放到自然水体中^[4]。

1.1.2 微塑料在水环境中的分布及危害

1.1.2.1 微塑料在水环境中的分布

因具有重量轻、耐腐蚀、价格低等优点, 塑料被人们广泛用于各个领域^[5]。但是由于环保意识不强和处理技术滞后等因素, 造成生活生产过程中的 MPs 进入到环境中。在全球的淡水和海水中, 几乎都能检测到 MPs 的存在。甚至在青藏高原这样人口稀少的地区, 也已经在湖泊、河流以及沉积物中检测到了 MPs^[6]。同时青藏高原河流中的 MPs 还可能会通过水流输送到下游地区, 进而造成下游地区饮用水安全等一系列问题。

大量的 MPs 通过河流进入海洋, 对海洋生态系统造成了严重的污染, 其影响是难以衡量的^[7]。据统计, 全球海洋中漂浮着大约 5.25 亿个 MPs^[8]。Cincinelli 等^[9]调查发现, 科西嘉岛附近的地中海海域中 MPs 的含量高达 62000 item/m², 远远高于当地地表水中的 MPs 的含量。Maria 等^[10]调查发现, 加利福尼亚湾公海中 MPs 含量为 9.67 item/m³, 远超出了该海域水生生物的耐受限度。Emilia 等^[11]对波罗的海北部的芬兰湾进行分析, 发现该海域内 MPs 的浓度为 0-1.6 item/m³。同

时海洋中的 MPs 在风和海洋环流的影响下肆意扩散，造成了海洋环境中 MPs 的跨区域污染^[12]。

1.1.2.2 微塑料的危害

大量的 MPs 进入水环境后，会对水生生物造成威胁。MPs 的出现会影响水生生物的生长和繁殖，例如，MPs 可以附着在藻类等生物表面，影响其光合作用^[13]；MPs 被紫贻贝摄入后，会通过降低消化系统中肠道细胞的稳定性影响其正常的生长^[14]；成年牡蛎在经过 2 个月的 MPs 暴露后，其生殖率显著下降^[15]；鱼类在摄入 MPs 后，会导致其生长速率减缓^[16]。另外，塑料在生产制造过程中添加的化学试剂（如增塑剂、阻燃剂和紫外线稳定剂），会在塑料破碎的过程中渗出，这些渗出的化学物质也会对各种生物产生潜在的危害^[17]。研究发现，在全球 24 个国家和地区捕获的鱼类中，超过 60% 的鱼类体内发现了 MPs 的存在^[18, 19]。与野生鱼类相比，人工养殖的鱼类长期生长在塑料的养殖设备中，大大增加了人工养殖的鱼类摄入 MPs 的可能^[20, 21]。而且这些 MPs 还可以通过食物链传递到人类，最终对人类健康产生不利的影响^[22]。

MPs 具有粒径小、比表面积大、疏水性强等特点，这些特点使 MPs 能够吸附水域中的重金属、有机物和抗生素等污染物。这种吸附现象通常是由于 MPs 与污染物之间的吸附作用造成的，例如疏水相互作用、氢键吸附和静电相互作用^[23]。疏水相互作用主要是通过分子的疏水基团与水相互排斥而发生的，疏水基团一般是非极性基团^[24]。疏水相互作用提供了蛋白质折叠的主要推动力，并在稳定大多数蛋白质的结构和性质方面发挥着关键作用^[25]。分子间的氢键是一种分子间的作用力。氢原子与电负性大、半径小的原子以共价键形成强极性键。氢键吸附就是通过氢键吸附溶液中的溶质分子^[26]。MPs 主要通过静电相互作用吸附环境中的重金属^[27]。在水环境中，当零电荷点 (pH_{pzc}) 低于环境中的 pH 值时，MPs 表面会携带负电荷^[28]。而带正电荷的金属离子与 MPs 基团结合进行电荷中和，实现 MPs 对重金属的吸附作用。Noreen 等^[29]研究了多种重金属在 MPs 表面的吸附作用；Verla 等^[30]研究发现每克 PE 可吸附数百微克的重金属；Mohsen 等^[31]研究也发现了 MPs 对不同金属的不同吸附能力，如铬 (Chromium, Cr) 为 $430 \mu\text{g/g}$ 、镉 (Cadmium, Cd) 为 $76.7 \mu\text{g/g}$ 、铁 (Iron, Fe) 为 $97.8 \mu\text{g/g}$ ；Li 等^[32]研究对比了

不同材质的 MPs 老化前后对 Cr (VI) 的吸附能力的影响。MPs 吸附污染物的同时,也会改变污染物对生物体的毒性。LG 等^[33]研究发现,MPs 会降低 Cr (VI) 引起的毒性效应。Luis 等^[34]发现水中的 MPs 会影响 Cr (VI) 对虾虎鱼早期幼体的急性毒性。Zhou 等^[35]研究发现,MPs 加重了 Cd 对生物生长发育造成的负面影响,这可能是因为 MPs 增加了环境中 Cd 的生物可给性。Zhang 等^[36]研究发现,MPs 的存在加剧了 Cd 的毒性作用,主要表现为加剧了 Cd 对肠道系统造成的损伤。Wang 等^[37]研究发现,MPs 增强了 Cd 对鱼类免疫系统的影响。Wang 等^[38]研究发现,MPs 增强了 Cd 对藻类细胞的破坏性,从而对藻类的生长发育造成负面影响。众多研究表明 MPs 的存在会进一步加剧环境中其它污染物的健康风险,因此水环境中 MPs 的存在引起社会各界的广泛关注。

1.2 镉的概述

1.2.1 镉的基本性质和来源

Cd 是元素周期表中的第 48 号元素,位于第 5 周期。其密度为 8.650 g/cm^3 ,是一种银白色的重金属。熔点为 320.9°C ,沸点为 765°C ,具有韧性和延展性。当在空气中加热时,Cd 金属会形成棕色的氧化镉烟雾 (CdO)。Cd 在自然界中多以化合物的形式存在,常见于锌矿石、含锌铅矿石或复杂的铜-铅-锌矿石,其在化合物的价态几乎都是+2 价^[39]。

Cd 是一种稀有元素,我国土壤 Cd 的背景值为 $0.017\text{-}1.8 \text{ mg/kg}$ ^[40]。与自然因素相比,人类活动是导致环境中 Cd 含量升高的主要原因^[41]。由于具有耐腐蚀、低熔点、高导热性和导电性等特点,Cd 在工业领域中被广泛应用于电池、颜料、涂料、油漆和塑料稳定剂等领域。Cd 污染的三大主要来源:废气、工业废水和固体废物。煤炭燃烧、钢铁生产和磷肥制造产生的的废气是大气 Cd 污染的主要来源^[42],而铅锌矿的选矿废水及其相关工业(电镀、碱性电池等)废水是含 Cd 工业废水的主要来源。废旧电池的浸出和金属冶炼过程中含 Cd 矿渣的排放是固体废物中的 Cd 污染的主要来源^[43, 44]。

1.2.2 镉造成的环境污染问题及危害

1.2.2.1 镉污染水体问题的严峻性

自上个世纪五十年代以来,世界范围内 Cd 污染事件频发, Cd 污染已经成为全球性环境问题,受到了国内外的广泛关注。日本富山县地区炼锌厂向河流中排放大量含 Cd 废水,造成当地河流中 Cd 含量严重超标^[45]。法国洛塔河流域由于采矿活动造成了历史性的 Cd 污染事件。目前该流域河流地表水和沉积物中 Cd 的含量仍远远超过法国其他地区^[46]。Steven 等^[47]研究发现英国德文郡矿区下游地区的地表水和河流沉积物中 Cd 含量严重超标。坎普尔是印度重要的皮革生产基地,皮革厂排放的含 Cd 污水造成当地河流中 Cd 含量超标,同时对当地的农田造成了严重的 Cd 污染^[48]。

近年来,在我国境内也曾多次发生 Cd 污染事件。黄埔江流域地表水 Cd 含量严重超标^[49];广西龙江发生严重的 Cd 污染事故^[50];大冶湖 Cd 含量严重超标^[51]。在江苏省丁蜀镇,该地区多家颜料厂、陶瓷企业和紫砂壶工厂排放含 Cd 污水,造成当地河流和土壤中 Cd 含量远超过江苏省水体及土壤环境的背景值^[52]。水环境中 Cd 含量超标不仅对水生生物(如底栖动物和鱼类)造成了极大的危害,同时也危及供水安全^[53]。

1.2.2.2 镉的毒性及危害

根据美国疾病与毒物登记署的排名, Cd 是第七大毒性重金属^[54],其已被国际癌症研究机构列为 I 类致癌物^[55]。Cd 通过胃肠道或呼吸道进入体循环后,被输送到靶器官,肝脏是 Cd 的主要靶器官之一。Cd 通过降低总巯基等非酶抗氧化剂的活性,并使超氧化物歧化酶等抗氧化酶失活,诱导氧化应激造成肝损伤^[56]。通过大鼠暴露实验表明, Cd 引起大鼠肝脏组织细胞质空泡化、线粒体嵴破坏、脂肪变性等病理性变化^[57]。另外小鼠和人体肝脏细胞的体外研究表明, Cd 引起的细胞凋亡是造成肝损伤的主要原因,而这种细胞凋亡可能是由 Cd 造成的线粒体功能障碍引起的^[58]。

肾脏是 Cd 的另一重要的靶器官,当肾脏中 Cd 的含量超过生物的耐受限度时,将会造成肾功能障碍。进入到生物体内的 Cd 以及未滞留在肝脏中的 Cd 均会通过血液循环到达肾脏^[59]。同时由于肾脏缺少消除多余重金属的能力,几乎所

有重吸收的 Cd 都存留在肾脏中，只有一小部分通过尿液排出体外。Jin 等^[60]研究发现，长期接触 Cd 可能会导致肾小管功能障碍和肾小球通透性增加。与 Cd 作用于肝脏的机制相似，肾脏中的 Cd 也会造成氧化损伤，导致肾小管细胞凋亡、营养物质的再吸收能力丧失。

Cd 暴露会导致骨质流失、骨骼矿物质含量减少，严重者会导致骨折。有大量研究表明，Cd 会干扰钙、胶原蛋白和维生素 D 的代谢，并且降低骨矿化程度阻碍了骨骼的形成^[61]。长期接触高浓度的 Cd 会造成“痛痛病”，该疾病的主要特征是骨骼软化和骨质疏松症，同时具有严重的骨折倾向^[62]。该疾病最早大面积爆发在日本富山县，时至今日仍有新的病例产生。

Cd 暴露会影响雄性的生殖系统，主要影响包括精子质量、精子活力、生长激素的合成与释放等方面。有关研究表明，Cd 会导致雄性睾丸体积减小、甚至损伤睾丸结构破坏睾丸功能^[63]。Malihezaman 等^[64]通过成年雄性小鼠精管组织学切片观察以及睾丸中 Cd 含量的测定，验证了睾丸是对 Cd 毒性非常敏感的器官之一。Samel 等^[65]研究发现 30 mg/L Cd 暴露 30 天后，大鼠体内睾丸和精囊的重量显著降低，同时通过诱导高浓度的活性氧降低精子活力和数量，这很可能是 Cd 导致男性不孕的原因。

而鱼类作为人类重要的食物蛋白质来源之一，其体内的 Cd 可以通过食物链传递到人体，从而对人体健康造成不同程度的危害^[66]。因此利用鱼类动物来检测污染物对环境造成的影响，是评价生态系统安全性的有效途径。

1.3 模式动物的选择

在生物实验中利用模式动物进行相关实验，从而揭示具有普遍规律的生命现象。目前，按照不同发育阶段进行划分，鱼类的毒性测试实验主要包括成鱼毒性实验，幼鱼毒性实验及早期发育阶段的毒性实验。考虑到早期发育与幼鱼阶段是鱼类重要的生长发育阶段，且对污染物暴露更加敏感，因此本研究拟选取早期发育与幼鱼阶段开展实验，通过化学和生物学相结合的方法，探究 MPs 对 Cd 在不同生长阶段鱼体内的生物积累和毒性的影响。

1.3.1 斑马鱼的应用和优点

斑马鱼 (Zebrafish) 是一种小型淡水硬骨鱼，其基因与人类的相似度高达 87%，因此在毒理学和生物学中广泛应用。斑马鱼作为模式生物，具有以下优点：

(1) 个体小，适合在实验室进行养殖：成年斑马鱼体长约 3-5 厘米，饲养空间较小；

(2) 繁殖能力强，繁殖周期短：每次能够繁殖数百颗卵，每间隔一周就可以再次繁殖，为科研提供充足的实验材料；

(3) 体外受精、胚胎透明：在实验过程中可以利用显微镜观察胚胎的发育过程；

(4) 实验操作简单：进行暴露实验时，只需将要研究的外溶物溶解在胚胎培养液中；

(5) 遗传学背景清楚，基因与人类高度同源：全基因组测序已顺利完成，多个数据库涵盖了斑马鱼遗传和基因组信息。

1.3.2 鲫鱼的应用和优点

鲫鱼属于硬骨鱼纲 (*Osteichthyes*)、鲤形目 (*Cypriniformes*)、鲤科 (*Cyprinidae*)、鲤亚科 (*Cyprillinae*)、鲫属 (*Carassius*)。鲫鱼是我国分布广泛的经济型鱼类，多产于黄河流域、长江流域^[67]。它们具有抗寒性强，蛋白质含量高，肉质好，并能供给人体必需的营养物质等优点，在世界范围内具有重要的经济价值。众多文献资料表明，国内外不少学者将鲫属鱼类广泛应用到了遗传学、内分泌学、毒理学、环境科学等领域的实验研究。尤其是在急性毒理实验、药品及化学品毒性评价方面，得到了国内外学者的关注和认可。鲫鱼作为实验动物运用在毒理学实验中具有以下优势：

(1) 鲫鱼经过长时间的人工养殖和自然选择，已经成为一个稳定遗传的品种；

(2) 饲养操作简单，在实验过程仅需投喂适量的饲料即可；

(3) 鲫鱼作为我国重要的食用鱼，在我国水产市场具有重要地位。以鲫鱼作为实验对象，为鲫鱼的水产养殖和人类健康提供精确的科学指导。

1.4 氧化应激指标的意义和作用

当生物体受到外界环境的刺激时，生物体可能会产生过量的活性氧自由基 (Reactive Oxygen Species, ROS)，从而产生氧化应激^[68]。有大量的研究表明，氧化应激是诱发环境污染物多种疾病的一个重要因素^[69]。因此，氧化应激是毒理学研究的热点之一^[70]。

1.4.1 超氧化歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 的作用和意义

SOD 通常存在生物的线粒体和细胞浆中^[71]，它主要负责将超氧化阴离子 ($O_2^{\cdot-}$) 催化歧化成 H_2O_2 和 O_2 ，保证生物体内 ROS 维持在适宜的范围内，保护机体免受超氧化阴离子的氧化损伤^[72]。大量研究表明 SOD 等抗氧化酶在斑马鱼早期胚胎发育中就已经形成，借助对 SOD 等酶活性的研究，对探索外源性污染物对生物体的毒性作用有着重要作用。

1.4.2 丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 的作用和意义

当机体内产生大量 ROS 后，ROS 会攻击脂质中的不饱和脂肪酸，发生脂质过氧化反应，从而导致细胞膜的流动性和通透性发生改变，最终使机体组织、器官等受到损伤^[73]。MDA 作为脂质过氧化反应的特异性产物之一，常被作为评价氧化损伤程度的重要指标^[74]。

1.4.3 金属硫蛋白 (Metallothionein, MT) 的作用及意义

MT 是一类多功能诱导性蛋白，广泛存在于动物、植物、微生物体内。MT 具有清除自由基、参与重金属解毒、参与调节激素和细胞代谢的功能，在细胞增殖分化控制中都有重要作用^[75]。MT 广泛存在于大多数哺乳动物的内脏器官中，尤其是肝和肾细胞中，而且参加其功能调节^[76]。MT 是一种目前所知的最有效的自由基清除剂，其清除氧自由基的能力约为谷胱甘肽的 25 倍，具有极强的抗氧化性。

1.4.4 热休克蛋白 70 (Heat Shock Protein 70, HSP70) 的作用及意义

HSP 又称为应激蛋白，是生物细胞在受到生物应激等刺激后，发生热休克反应产生的一类在生物进化中最保守并由热休克基因所编码的伴随细胞蛋白^[77]。其中 HSP70 为 HSP 中最保守和最重要的一族，在大多数生物中含量最多。同时

HSP 还具有多种生物功能，包括分子伴侣功能、参与免疫反应、抗氧化功能等，广泛的生物学功能使其成为生命科学研究中的热点^[78]。HSP70 相关基因被认为是评估毒性作用时灵敏可靠的生物标记物。

1.5 DNA 修复系统

DNA 是分子结构复杂的有机化合物，主要负责储备和传递遗传信息。在细胞复制过程中，DNA 容易受到外界干扰而影响生命发育过程中遗传信息的传递。DNA 损伤是指环境中的物理或化学因素引起机体内细胞 DNA 结构的改变。为了应对 DNA 损伤，生物体进化出复杂的 DNA 损伤反应调控机制，称为 DNA 损伤响应 (DNA Damage Response, DDR)^[79]。DNA 修复机制主要包括：碱基切除修复 (Base Excision Repair, BER)、核酸切除修复 (Nucleotide Excision Repair, NER)、DNA 错配修复 (DNA Mismatch Repair, MMR) 和同源介导的双链 DNA 修复 (Homology Directed Repair, HDR)。每种修复机制都具有特异性，具体如下：

BER 是自然界中最常见的 DNA 修复方式，是去除氧化和甲基化碱基的最主要途径^[80]。主要的修复过程为：(1) DNA 糖基化酶去除损坏的碱基，同时产生一个无碱基位点；(2) 核酸内切酶在该位点 5'端将 DNA 链的磷酸二酯键切开，去除剩余的糖基部分；(3) DNA 聚合酶在缺口处以另一条链为模板，合成互补序列；(4) DNA 连接酶将切口重新连接，使 DNA 恢复正常结构。

NER 主要是应对由 UV 辐射和亲电子化学物质引起的 DNA 损伤。主要的修复过程包括：(1) 损伤识别：通过酶系统识别 DNA 损伤部位；(2) 核酸切除：去除受损的寡核苷酸，使受损的单链脱离；(3) 复制修复：核酸切除后，在 DNA 连接酶等蛋白的作用下，以剩下的单链为模板完成复制和缺口的连接。

MMR 是复制后的 DNA 损伤的修复机制，主要是用于修正 DNA 聚合酶的错误，同时保护细胞重复的核 DNA 免于发生点突变。主要的修复过程：(1) 切除错配的 DNA 链；(2) 在 DNA 聚合酶的作用下使用模板链进行 DNA 的重新合成^[81]。

HDR 是细胞内一种修复 DNA 双链损伤的机制。只有当细胞核内存在与损伤 DNA 同源的 DNA 片段时, HDR 才能发生。修复大多发生在细胞的 G2 期和 S 期。主要的修复过程: (1) 联会前期: 修复过程从 5' 末端链的核酸降解开始^[82]; (2) 联会期: 链交换蛋白介导同源序列的寻找和 DNA 链的入侵, 这是 HDR 修复的关键步骤^[83]; (3) 联会后期: 以 3' 端为引物进行 DNA 合成。

1.6 研究现状

目前环境中 MPs 种类多样, 来源广泛, 主要有聚乙烯 (Polyethylene, PE)、聚对苯二甲酸乙二酯 (Polyethylene Terephthalate, PET)、聚酰胺-6 (Polyamide 6, PA6)、聚丙烯 (Polypropylene, PP)、聚苯乙烯 (Polystyrene, PS)、聚氯乙烯 (Polyvinyl Chloride, PVC) 和聚甲醛 (Polyformaldehyde, POM) 等。其中 PE、PET 和 PA6 这三种类型的 MPs 用途最为广泛, 进而引起人们的更多关注。所以本次实验选用 PE、PET 和 PA6 作为实验材料。

PE 是乙烯经聚合制得的一种热塑性树脂, 具有不吸水、不透水等特点, 被广泛用于工业包装中。同时 PE 具有化学稳定性好, 耐低温, 耐酸碱侵蚀, 电绝缘性优良等特点^[84], 因此被广泛应用于电工等方面。Peter 等^[85, 86]调查发现水环境中 PE 浓度为 0.89-30 mg/L。PET 是一种结晶型饱和聚酯, 它是世界上产量最高的塑料之一, 2015 年全球产量超过 3300 万吨。同时 PET 也是生活中常见的一种树脂, 具有优良的物理机械性能, 长期使用温度可达 120°C, 同时也具有电绝缘性优良的特点。Mintenig 等^[87]研究表明, 水环境中 PET 的浓度为 6 μg/L-10 mg/L。PA6 为乳白色或微黄色角质状结晶型复合物, 是五大工程塑料之一, 用途最为广泛。PA6 的应用范围, 涵盖家纺、家居服、婴儿用品、窗帘布、防护服、军用迷彩服、汽车内饰等领域^[88]。据报道, PA6 是各种地表水、饮用水、鱼类中含量最丰富的 MPs 之一^[89]。Khosrovyan 等^[90, 91]研究发现 PA6 在水环境中的浓度可到达 100 mg/L。

PE 表面具有大量亚甲基基团 (-CH₂)、羟基 (-OH) 和羰基 (-C=O) 等官能团; PET 表面具有羟基 (-OH)、羰基 (-C=O) 和醚键 (C-O-C) 等官能团; PA6

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/396204115123010201>