

大气全氟化合物污染研究综述

王璐^{1*}, 王毅², 李师³

¹ 广州机施建设集团有限公司 广东广州

² 三川德青科技有限公司 湖北武汉

³ 武汉启瑞药业有限公司 湖北武汉

【摘要】全氟化合物 (PFCs) 作为一类新兴持久性有机污染物广泛存在于全球的各种环境介质中, 而大气是 PFCs 进行远距离传输和化学转化的重要介质。分析了我国大气 PFCs 的分布情况, 综述了大气 PFCs 的来源与迁移转化情况, 并总结了大气 PFCs 的危害, 以期为我国大气 PFCs 的污染控制提供经验借鉴和理论参考。

【关键词】大气; 全氟化合物; 分布; 来源; 迁移转化; 危害

Review of Research on Atmospheric Perfluorinated Compounds Pollution

Lu Wang^{1*}, Yi Wang², Shi Li³

¹Guangzhou Jishi Construction Group Co., Ltd., Guangzhou, China

²SafeCleen Technologies Co., Ltd., Wuhan, China

³Wuhan QR Pharmaceuticals Limited, Wuhan, China

【Abstract】Perfluorinated compounds (PFCs), as a new class of persistent organic pollutants, are widely existed in various environmental media around the world, and the atmosphere is an important medium for long-distance transmission and chemical transformation of PFCs. This paper analyzed the distribution of atmospheric PFCs in China, summarized the sources, migration and transformation of atmospheric PFCs, and summarized the hazards of atmospheric PFCs, in order to provide experience and theoretical reference for the pollution control of atmospheric PFCs in China.

【Keywords】Atmosphere; Perfluorinated compounds; Distribution; Source; Migration and Transformation; Hazard

全氟化合物(PFCs)是指人工合成的一类 C 链上 H 全部被 F 取代的持久性有机污染物 (POPs), 其分子通式为 $C_nF_{2n+1}R$ 。环境中的 PFCs 可分为挥发性 PFCs 和离子型 PFCs^[1], 前者主要包括 PFCAs 和 PFSA 等, 后者则主要包括 FTOHs、FOSEs、FOSAs 等 (表 1)。其中, PFOA 和 PFOS 是环境中最典型最常检出的两种 PFCs, 也是环境中多种其他 PFCs 的最终转化产物^[2]。PFCs 具有良好的疏水性、疏油性、耐高温性、抗污性及化学稳定性等, 在纺织、造纸、电镀、包装、皮革等工业领域和农药、地毯、不粘锅等民用领域均得到广泛应用^[3]。与此同时, PFCs 还具有“三致”作用、难降解性、可远距离迁

移性、环境持久性、生物蓄积性及潜在毒性等, 因此进入环境中的 PFCs 可能会对生态环境及人体健康产生严重威胁^[4]。联合国环境规划署 (UNEP) 已先后于 2009 年、2019 年通过《关于持久性有机污染物的 Stockholm 公约》分别将全氟辛基磺酰氟 (PFSF) 和 PFOS 及其盐类、PFOA 列入受控名单。我国于 2021 年公布的《新污染物治理行动方案 (征求意见稿)》和《重点管控新污染物清单》也要求在 2025 年年底前逐步禁止 PFHxS 类的生产、加工使用及进出口, 并严格限制 PFOA 类和 PFOS 类 (包括 PFOS 及其盐类和 PFSF) 的生产及加工使用。大气是 PFCs 进行远距离迁移和光化学转化的重要途

作者简介: 王璐 (1991-) 男, 汉族, 河南郑州人, 助理工程师, 硕士, 主要从事环境污染及其防治、市政技术研究。

径^[5], 大气中的 FPCs 也是人体的主要暴露途径(呼吸)之一, 可能会直接损害人体健康, 因此对大气 FPCs 开展相关研究具有重要意义。

1 分布

对我国部分地区大气中 FPCs 的含量分布情况进行统计分析(表 2), 可以发现, 目前我国对降雪、降水、空气、总悬浮颗粒物(TSP)、PM_{2.5}、PM₁₀等介质中的 FPCs 均已开展一定的研究; 由于介质、含量等的差异, 不同研究中 FPCs 的计量单位也有所不同; 降雪和降水中的 FPCs 含量与空气和颗粒物相比明显具有更高的数量级; PFOA 是大气中最主要的 FPCs。空间分布方面, Chen 等^[6]发现拥有大量氟化工园区的东北地区相比西南地区具有更高的 FPCs 浓度和通量; Zhao 等^[7]对降水的研究也发现, FPCs 在拥有 200 多家纺织企业的山东潍坊和作为工业老城市的天津、吉林长春含量相对较高, 而

在没有直接排放源的湖北宜昌含量最低; 郑宇^[8]对大气颗粒物的研究则发现, FPCs 在几个典型城市总体呈常熟市化工园区>沧州市>北京市>张家口市。季节性分布方面, Zhao 等^[7]发现中国中东部城市降水中的 FPCs 在半年内的季节性变化并不显著, 但整体呈冬季、夏季>春季, 这可能是因为华北地区冬季空气污染较重, 而夏季高温会加速 FPCs 及其前体物的挥发; 王颖^[9]对北京 TSP 中的 FPCs 进行分析发现, FPCs 存在明显的季节性差异(即冬季>夏季), 这可能是因为冬季北京的大量供热厂燃烧煤炭导致空气污染加重, 而夏季频繁的降雨对大气中的 TSP 形成了冲刷; 而李冰洁等^[10]则发现浙江 PM_{2.5} 中的 FPCs 含量由秋季至冬季基本表现为增高的趋势, 这可能与冬季较强的逆温现象和趋于稳定的大气环境有关, 地面附近的污染物在冬季难以扩散和转移。

表 1 环境中常见的全氟化合物

名称	英文全称	简称	分子通式	代表性物质
全氟羧酸类	perfluoroalkylcarboxylicacids	PFCAs	$C_nF_{2n+1}COOH$	全氟辛酸(PFOA)、全氟壬酸(PFNA)、全氟癸酸(PFDA)、全氟戊酸(PFPeA)、全氟己酸(PFHxA)、全氟庚酸(PFHpA)等
全氟磺酸类	perfluoroalkyl sulfonic acids	PFSAs	$C_nF_{2n+1}SO_3H$	全氟辛烷磺酸(PFOS)、全氟己烷磺酸(PFHxS)、全氟丁烷磺酸(PFBS)、全氟癸烷磺酸(PFDS)等
全氟调聚醇	fluorotelomer alcohols	FTOHs	$C_nF_{2n+1}C_2H_4OH$	4:2FTOH、6:2FTOH、8:2FTOH、10:2FTOH等
全氟烷基磺酰胺类	perfluoroalkyl sulfonamides	FOSAs	$C_nF_{2n+1}SO_2NH_2$	N 甲基全氟辛烷磺酰胺(NMeFOSA)、N 乙基全氟辛烷磺酰胺(NEtFOSA)等
全氟烷基磺酰胺乙醇	perfluorooctane sulfamidoethanol	FOSEs	$C_nF_{2n+1}SO_2NH_2-C_2H_4OH$	N 甲基全氟辛烷磺酰胺乙醇(NMeFOSE)、N 乙基全氟辛烷磺酰胺乙醇(NEtFOSE)等

表 2 我国部分地区大气全氟化合物的含量分布情况

研究区域	介质	采样时间	含量 (pg/m ³)	主要成分	文献
中国北方 19 个城市	降雪	2013 年 1 月	33.5~229ng/L	PFOA、PFOS、PFHpA、PFHxA 等	[11]
北京城区	降雪	2009 年 11 月	0.47~7.94ng/L (2.37 ng/L)	PFOA 等	[12]
沈阳	降雪	2006 年 2 月	2.6~68.6ng/L	PFOA、PFOS	[13]
中国中东部城市	降雪、降雨	2010 年 1~7 月	4.7~152ng/L	PFOA 等	[7]
中国 28 个城市	降水	2016 年 5~9 月	4.8~190ng/L (38.5ng/L)	三氟乙酸盐 (TFA)、PFOA、PFOS	[6]
北京市	降水	2018 年 7~10 月, 2019 年 7~8 月	0.23~62.4ng/L (23.3ng/L)	PFOA、PFBA 等	
北京市	颗粒物	2018 年 11 月~2019 年 2 月、2019 年 7 月	4.77~21.0 (9.33)	PFOA 等	[8]
河北沧州	颗粒物	2019 年 6 月	188~217 (203)	PFOA 等	
张家口	颗粒物	2019 年 7 月	0.69~1.65 (1.17)	PFOA 等	
常熟市氟化工园区	颗粒物	2017 年 8 月	37.3~989 (248)	PFOA 等	
珠江三角洲	空气	2013 年 11 月~2014 年 1 月	53.7~225 (122±41.5)	PFOS、PFOA、PFPeA、PFHpA 等	[14]
深圳	空气	2014 年 11 月~2015 年 1 月	23.7~157 (79.0)	8:2FTOH、6:2FTOH、PFPeA、PFOA 等	[15]
辽宁阜新氟化工园区	空气 室外降尘	2016 年 9~10 月	离子型 4900±4200 非离子型 1400±3000 离子型 2.3~3300 ng/g	PFBA、PFOA 等 FTOHs、FTIs 等 PFBA、PFOA、PFBS 等	[16]
浙江省	PM _{2.5}	2021 年发表	131.63~578.53 (251.93)	PFOA、PFHxA、PFHpA 等	[10]
北京	PM _{2.5} PM ₁₀ TSP	2015 年 6 月	87.03-96.77 ng/g 99.82-101.41 ng/g 118.69-141.87ng/g	PFBA、PFOA、PFPeA 等	[17]
北京	TSP	2015 年冬季 2015 年夏季 2016 年冬季 2016 年夏季 2017 年冬季 2017 年夏季 2018 年冬季 2018 年夏季 2019 年冬季 2019 年夏季	72.72~429.22 (246.76) 57.54~104.13 (84.02) 314.61~1099.48 (619.68) 79.08~311.45 (168.40) 388.81~815.65 (526.90) 90.49~286.31 (153.23) 76.96~266.01 (159.90) 42.37~236.59 (98.11) 107.68~353.42 (180.73) 63.79~193.68 (90.62)	PFBA、PFPeA、PFOA、PFHxA、PFNA、PFOS 等	[9]

注: 括号内为 FPAs 含量的平均值, 冬季是指 12、1、2 月, 夏季是指 6、7、8 月。

2 来源与迁移转化

环境中 FPCs 的来源可分为直接来源与间接来源,前者主要为 FPCs 工厂生产、加工、运输及 FPCs 产品使用过程的直接排放,是环境中 FPCs 的主要来源,我国中东部约有 80~90%的 PFOA 或 PFOS 直接来源于制造业与工业厂区^[18],美国环境保护署 (USEPA) 发现氟聚合物工厂分别约有 23%、12%、65%的 PFCAs 会排放至大气、水体及土壤环境中^[19],而土壤和水环境中的 PFCs 又可通过挥发进入至大气中;后者主要为环境中的全氟聚合物等前体物质在大气中被氧化、光降解、化学降解,并经化学键的断裂与重排而形成稳定的 PFASs 和 PFCAs 等,间接来源在环境中 FPCs 的占比很小,但对其迁移转化、介质分配有重要作用^[20]。人口密度较高和工业活动密集的城镇区域是大气 FPCs 的重要来源地区,而偏远区域 FPCs 的主要来源则与大气 FPCs 的远距离迁移有重要关系。目前对大气 FPCs 的远距离迁移主要有三种假说:一是 FTOHs、FOSAs、FOSEs 等中性挥发性 FPCs 因其足够的半衰期可直接在大气中远距离传输,同时这些挥发性 FPCs 还能作为前体物质而氧化降解形成 PFOA、PFOS 等,因此可在北极冰盖上检测到 PFOA、PFOS^[21-22],中性易挥发的 FPCs 主要以大气迁移作为传播途径;二是离子型 FPCs 受到大气颗粒物的吸附而随之远距离传输^[23-25],同时长链的挥发性全氟及多氟烷基化合物 (PFASs) 因其较高的疏水性而易与颗粒结合^[26],并可能进一步远距离迁移;三是 FPCs 可在水-气界面形成胶团,并以气溶胶的形式(如海浪气溶胶等)进行远距离运输迁移^[27-29]。在一些地毯店、家具店及室外用品店,室内空气中高浓度的 FPCs 会不断向室外传播。大气中的 FPCs 可通过干湿沉降转移指土壤和水环境中^[30],而降水等同时也会造成 FPCs 含量的季节性差异^[31]。大气中的 FPCs 可通过蒸腾作用直接转移至植物叶片中,还会通过呼吸、皮肤接触等直接进入动物和人体^[32]。实际上,呼吸暴露是人体 FPCs 的主要来源之一,Haug 等^[33]的研究发现人体血清中 FPCs 的含量与其居住处室内灰尘的 FPCs 含量呈显著正相关,且女性从灰尘中摄入的 FPCs 高达总摄入量的 50%。

3 危害

大气中的 FPCs 经干湿沉降进入水环境后可能

会破坏水生生态系统,研究表明 FPCs 的前体物在大气降解后形成的中间产物可能对水生无脊椎动物及浮游植物等具有急、慢性毒性^[34-35],而一定量的 PFOS 甚至会导致鳟鱼、盐水虾等死亡^[36]。大气 FPCs 进入土壤环境后对土壤动植物都会产生危害。大气 FPCs 可直接被植物吸收,也可在干湿沉降至土壤环境后再被植物吸收并富集,其中短链 FPCs 主要富集在叶片与果实中,而长链 FPCs 则主要富集于根中^[37]。小麦、燕麦、玉米、生菜、土豆、黄瓜及胡萝卜等均能吸收并富集 FPCs^[38],一方面, FPCs (如 PFOS 等) 会直接影响陆生植物的出芽率和存活率^[39];另一方面,通过食物链的传递, FPCs 还会最终对动物、人类和生态系统造成威胁。进入土壤环境的 FPCs 也能直接对土壤动物产生威胁,徐冬梅等^[40]研究发现 PFOA 对蚯蚓的半致死浓度为 816.58 mg/kg (7d) 或 792.50 mg/kg (14d)。FPCs 对动物和人的肝脏、生殖系统、内分泌系统、免疫系统及神经系统等均具有毒性效应与致癌作用。生物体摄入的 FPCs 与蛋白质具有较强的亲和能力,因此容易吸附于蛋白质(特别是血浆蛋白)上,并易于富集在蛋白质含量较高的肝脏与肌肉组织中, PFOA 与 PFOS 的暴露可使啮齿类、非人类灵长类动物的肝脏产生脂质积累、细胞肿大和急性损伤等。侯沙沙等^[41]发现青少年性征发育与部分 FPCs 有关,其中,女性的阴毛发育和男性的外生殖器发育分别与 PFHxS 和 PFNA 有关。刘歌声^[42]的研究表明 PFOS 和 PFOA 可结合大肠杆菌细胞界面的疏水点并对其形成氧化损伤,进一步还会导致细胞的死亡。

4 结论与展望

作为新兴 POPs, FPCs 目前已在大气、水体、沉积物、生物及土壤等多种环境介质被检出,并可在这些环境介质中长期残留,还能通过食物链的逐级放大对生物体及人类造成威胁。大气是 FPCs 进行远距离传输和转化的重要介质,大气中的 FPCs 可通过皮肤接触及呼吸等直接进入人体,已引起不少学者的高度关注。然而,目前对大气 FPCs 的检测研究尚显不够,对大气 FPCs 的远距离传输也处于假说阶段。因此,今后应加强大气 FPCs 的检测研究,重视被动采样技术、FPCs 提取技术等的发展和相关检测标准体系的建立完善,并提升 FPCs 检测的灵敏度和精确度,同时还要逐步建立完善的监测体系以提升

监测数据的可用性和价值;另一方面,应通过新技术及化学计算模型等手段,对大气 FPCs 的远距离传输与转化进行模拟和预测,并对已有假说进行验证。此外,未来还应在国家相关政策文件的指导下加强对 FPCs 的源头治理和综合整治,着重开展 FPCs 替代物的研究,同时要防止替代物的再污染问题。

参考文献

- [1] 何鹏飞. 深圳市大气中全氟化合物的残留特征研究[D]. 深圳:深圳大学,2016.
- [2] 李梦丹,李焯民,刘萍.利用箱式模型研究 PFCs 的大气化学特征[J].环境科学与技术,2018,41(04):1-8.
- [3] 史亚利,蔡亚岐.全氟和多氟化合物环境问题研究[J].化学进展,2014,26(04):665-681.
- [4] 盛南,潘奕陶,戴家银.新型全氟及多氟烷基化合物生态毒理研究进展[J].安徽大学学报(自然科学版),2018,42(06):3-13.
- [5] EllisDA, Martin J W,de Silva A O, et al. Degradation of Fluorotelomer Alcohols: A likely Atmospheric Source of Perfluorinated Carboxylic Acids.[J]. Environmental Science & Technology, 2004,38:3316-3321.
- [6] Chen H, Zhang L, Li M Q, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in precipitation from mainland China: Contributions of unknown precursors and short-chain (C2-C3) perfluoroalkyl carboxylic acids [J]. Water Research, 2019, 153: 169-177.
- [7] Zhao L J, Zhou M, Zhang T, et al. Polyfluorinated and Perfluorinated Chemicals in Precipitation and Runoff from Cities Across Eastern and Central China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2013, 64(2):198-207.
- [8] 郑宇. 典型城市大气中全氟化合物的污染特征[D].青岛:青岛大学,2020.
- [9] 王颖. 环境基体中全氟化合物和有机氯农药检测方法研究[D].南京:南京师范大学,2021.
- [10] 李冰洁,陈金媛,刘铮铮,等.浙江省大气颗粒物 PM2.5 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估[J].环境科学,2022,43(02):639-648.
- [11] Shan G Q, Chen X W, Zhu L Y. Occurrence, fluxes and sources of perfluoroalkyl substances with isomer analysis in the snow of northern China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 299:639-646.
- [12] 王杰明,潘媛媛,史亚利,等.北京城区降雪中全氟化合物的污染水平[J].中国科学:化学,2011,41(05):900-906.
- [13] 刘薇,金一和,全燮,等.沈阳市降雪中 PFOS 和 PFOA 污染现状调查[J].环境科学,2007(09):2068-2073.
- [14] Liu B L,Xie L W,Zhang H, et al. Spatial Distribution of Perfluorinated Compounds in Atmosphere of the Pearl River Delta, China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2019, 77(2):180-187.
- [15] 何鹏飞,张鸿,李静,等.深圳市大气中全氟化合物的残留特征[J].环境科学,2016,37(04):1240-1247.
- [16] Chen H, Yao Y M,Zhao Z, et al. Multimedia Distribution and Transfer of Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) Surrounding Two Fluorochemical Manufacturing Facilities in Fuxin, China[J]. Environmental Science & Technology: ES&T, 2018, 52(15):8263-8271.
- [17] Zhang C H, He X D, Li Z, et al. Perfluorinated Compounds (PFCs)in Ambient Air Particulates (PM2.5, PM10, TSP)in Beijing[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2016, 25(1):459-464
- [18] 孙瑞. 全氟化合物在上海市典型环境介质和非暴露人群血清中赋存及污染特征研究[D].上海:上海大学,2017.
- [19] Fluoropolymer Manufacturing Group. Fluoropolymer Manufacturers Group Presentation Slides[R]. U.S. EPAAdministrative Record A R 226-1094; U.S. EPA: Washington, DC, 2002.
- [20] 谢刘伟. 珠江三角洲大气中全氟化合物污染特征分析[D].深圳:深圳大学,2015.
- [21] Ellis D A, Martin J W, Mabury S A, et al. Atmospheric lifetime of fluorotelomer alcohols[J].Environmental Science and Technology, 2003, 37(17):3816-3820.
- [22] Schenker U, Macleod M, Matthew M, et al. Contribution of volatile precursor substances to the flux of perfluorooctanoate the arctic [J]. Environmental Science and Technology, 2008,42(10): 3710-3716.
- [23] Swackhamer D L. Global transport and fate of perfluorochemicals[J]. Environmental Monitoring, 2005, 7: 759-763.
- [24] Barber J L, Berger U, Chaemfa C, et al. Analysis of per- and polyfluorinated alkyl substancesin air samples from Northwest Europe[J]. Journal of Environmental

- Monitoring, 2007, 9: 530-541.
- [25] Wilhelm M, Bergmann S, Dieter H H. Occurrence of perfluorinated compounds (PFCs) in drinking water of North Rhine-Westphalia, Germany and new approach to assess drinking water contamination by shorter-chained C4-C7 PFCs[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2010, 213(3): 224-232.
- [26] Martin J W, Mabury S A, Solomon K R, et al. Bioconcentration and tissue distribution of perfluorinated acids in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, 22(1): 196-204.
- [27] Barber J L, Berger U, Chaemfa C, et al. Analysis of per- and polyfluorinated alkyl substances in air samples from Northwest Europe[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2007, 9: 530-541.
- [28] Prevedouros K, Cousins I T, Buck RC, et al. Sources, fate and transport of perfluoro carboxylates [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(1): 32-44.
- [29] Mcmurdo CJ, Ellis D A, Webster E, et al. Aerosol Enrichment of the Surfactant PFO and Mediation of the Water-Air Transport of Gaseous PFOA[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(11): 3969-3974.
- [30] 齐鹏, 苏日古嘎, 杜艳青, 等. 全氟化合物的污染现状和检测技术的研究进展[J]. *化学世界*, 2021, 62(03): 137-143.
- [31] Ge H, Yamazaki E, Yamashita N, et al. Particle size specific distribution of perfluoro alkyl substances in atmospheric particulate matter in Asian cities[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2017, 19(4): 549-560.
- [32] 朱永乐, 汤家喜, 李梦雪, 等. 全氟化合物污染现状及与有机污染物联合毒性研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2021, 16(02): 86-99.
- [33] Haug L S, Huber S, Becher G, et al. Characterisation of human exposure pathways to perfluorinated compounds — Comparing exposure estimates with biomarkers of exposure[J]. *Environment International*, 2011, 37(4): 687-693.
- [34] Phillips M M, Dinglasan-Panlilio R J A, Mabury R A, et al. Chronic toxicity of fluorotelomer acids to *Daphnia magna* and *Chironomus dilutus*[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, 29(5): 1123-1131.
- [35] Dinglasan-Panlilio M, Mabury S A, Solomon K R, et al. Fluorotelomer Acids are More Toxic than Perfluorinated Acids[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(20): 7159-7163.
- [36] 司圆圆, 张卓婷, 王林钰, 等. 全氟化合物污染特征及生态风险评估[J]. *化工管理*, 2020(34): 98-99.
- [37] 陈诗艳, 仇雁翎, 朱志良, 等. 土壤中全氟和多氟烷基化合物的污染现状及环境行为[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(02): 468-478.
- [38] Zhang D Q, Wang M, He Q C, et al. Distribution of perfluoroalkyl substances (PFASs) in aquatic plant-based systems: From soil adsorption and plant uptake to effects on microbial community[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113575.
- [39] 曹莹, 张亚辉, 雷昌文, 等. 环境中全氟化合物污染状况及生态毒性评估[J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(6): 561-567.
- [40] 徐冬梅, 李婵丹, 王艳花. 全氟辛酸(PFOA)对蚯蚓的毒性作用[J]. *生态毒理学报*, 2012(05): 72-76.
- [41] 侯沙沙, 王晓晨, 谢琳娜, 等. 氟工厂附近青少年体内全氟化合物(PFASs)暴露特征分析及其与性征发育水平关联性初探[J]. *环境化学*, 2020, 39(04): 931-940.
- [42] 刘歌声. PFOS、PFOA 对大肠杆菌的毒性效应及致毒机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

收稿日期: 2021年3月20日

出版日期: 2022年4月22日

引用本文: 王璐, 王毅, 李师, 大气全氟化合物污染研究综述[J]. *资源与环境科学进展*, 2022, 1(1): 10-15
DOI: 10.12208/j.aes.20220003

检索信息: 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

版权声明: ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS