

DOI:10.11937/bfyy.201608051

大气颗粒物中多环芳烃污染特征与环境行为研究进展

查 燕^{1,2}, 冯 驰^{1,2}, 张 银 龙^{1,2}, 王 月^{1,2}, 李 威^{1,2}

(1. 南京林业大学 江苏省南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037;

2. 南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘 要:近年来城市空气污染严重,雾霾天气频发,多环芳烃作为大气颗粒物中的典型污染物,具有显著的致癌、致畸、致突变效应,因而受到国内外学者的广泛关注。该文详细介绍了大气颗粒物中多环芳烃的污染特征、影响因素及环境行为,提出了应加强对多环芳烃在大气-植被-地表系统中污染特征的研究,并对该领域的研究提出展望,对今后修正和完善多环芳烃在不同介质间的迁移归趋模型及加强区域环境保护具有重要意义。

关键词:大气颗粒物;多环芳烃;污染特征;环境行为

中图分类号:X 513 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)08-0188-06

随着城市化进程的不断加快,城市大气污染已经成为广泛关注的环境问题。大气颗粒物(particulate matter, PM)一直是全球多数城市特别是发展中国家的首要污染物^[1-2],被广泛认定是对人体健康最有害的污染物之一^[3-4]。细颗粒物PM_{2.5}因粒径小、重量轻,在大气中的滞留时间长,不仅是形成雾霾天气最主要的因素^[5-6],而且对城市区域的人群健康构成严重威胁^[7-8],成为人类健康的头号杀手。多环芳烃作为大气细颗粒物中的重要组成成分,主要吸附于大气颗粒物表面,并且广泛存在于环境中,是一种持久性有机污染物,具有致癌性、致畸性、致基因突变性,城市中的疾病高发可能与大气细颗粒物中的PAHs污染有关^[9],其中毒性较强的中、高环多环芳烃主要吸附在颗粒物表面,易进入人体呼吸系统,甚至通过肺泡直接进入人体,对人体健康危害巨大^[10-11]。近年来,大气半挥发性有机污染物引起国内外学者的广泛关注,成为研究的热点问题。现对大气中多环芳烃的污染特征、影响因素以及环境行为等方面的研

究成果进行了综述,以便更全面地了解PAHs在环境中的行为,从而为城市有效控制PAHs的措施提供科学依据。

1 大气颗粒物中PAHs的含量水平

1.1 区域含量特征

从表1可以看出,国内各城市大气颗粒物中多环芳烃的含量显著高于国外城市,尤其是以煤炭、石油为主要能源的一线城市,多环芳烃质量浓度甚至超过了100 ng/m³。国外城市除波兰的上西里西亚和印度的德里以外,其他城市大气中多环芳烃污染浓度显著低于国内城市。这主要源于我国目前正处于发展阶段,在发展的过程中燃烧大量的煤炭、石油等化石燃料,从而加大了多环芳烃的排放量。

表1 不同城市大气中多环芳烃污染浓度

Table 1 Atmosphere PAHs concentration in different cities

研究区域	PAHs 浓度/(ng·m ⁻³)	参考文献
印度 德里	105±85	[12]
波兰 上西里西亚	153.9	[13]
意大利 托斯卡耐	13	[14]
德国 奥格斯堡	11	[15]
日本 横滨	0.31~6.16	[16]
韩国 首尔	3.9~119.9	[17]
中国 百色	4.7~142.3	[10]
中国 郑州	111	[18]
中国 济南	54±23.06	[19]
中国 贵阳	52.96	[20]
中国 福州	115.45~187.76	[21]
中国 哈尔滨	8.1~37.2	[22]
中国 南京	182.45	[23]
中国 上海	2.25~221.60	[24]
中国 北京	268	[25]

第一作者简介:查燕(1989-),女,博士研究生,研究方向为环境生态学。E-mail:zzxcv10130221@163.com.

责任作者:张银龙(1963-),男,博士,教授,博士生导师,现主要从事环境生态学与城市生态学及生态环境与评价等研究工作。E-mail:ecoenvylz@163.com.

基金项目:江苏省高校自然科学研究重大资助项目(13KJA180002);2015年度普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYZZ15-0255);江苏省高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2015-12-18

1.2 时间变化特征

大气中多环芳烃质量浓度在时间上表现出季节性差异,其总体趋势为冬季含量较高,但也有研究表明,春季大气中多环芳烃质量浓度高于冬季^[26]。从气相分布角度分析,气态和颗粒态多环芳烃质量浓度也具有明显的季节特征,与全年总多环芳烃的质量浓度变化趋势相同^[27];从环数分布角度分析,高环多环芳烃在冬季所占比例明显高于夏季,低环多环芳烃比例明显低于夏季^[10,26];通过对昼夜之间多环芳烃质量浓度的连续监测发现多环芳烃的质量浓度出现2个峰值,一般出现在上午和傍晚时期^[28]。

1.3 空间变化特征

近年来,随着城市化进程的不断加快,大气中多环芳烃污染现象越来越普遍,并呈现出城市中心高于郊区的趋势^[21,26],这种趋势在经济发达地区更为显著。通过对城市不同功能区大气中多环芳烃污染浓度的研究,发现工业区和交通区明显大于文教区和居民区^[29];从微观尺度上看,污染源下风向地区更容易累积较多的多环芳烃,污染源上风口地区不利于多环芳烃累积,污染程度较轻^[30];从宏观尺度研究发现大气中多环芳烃的污染浓度呈现出石家庄>北京>天津的特点^[31]。

2 影响大气中多环芳烃的气相分布因素

多环芳烃作为半挥发性有机物,在空气中的存在形态与自身理化性质和环境温度等因素有关^[32-33],其气相分布主要受颗粒物粒径、分配系数、过饱和蒸汽压影响。

2.1 大气中多环芳烃与颗粒物粒径相关性研究

研究表明大气中多环芳烃主要吸附在细颗粒表面,国外学者 KERRER 等^[34]研究发现约有 70%~90%的多环芳烃吸附在小于 5 μm 的颗粒物表面,NKATARAMAN 等^[35]的研究表明 85%以上的多环芳烃都存在于空气动力学直径 $<0.12 \mu\text{m}$ 的颗粒物表面。国内学者郭红连等^[32]研究发现绝大部分多环芳烃主要集中在 0.43~2.10 μm 的细颗粒物表面;另一项研究表明北京大气中 47%~65%的多环芳烃分布在 1.1 μm 的细颗粒物表面^[33]。蒋亨光^[36]的研究发现粒径 $<7 \mu\text{m}$ 的可吸入粒子中所含多环芳烃约占总量的 95%,其中粒径 $<1.1 \mu\text{m}$ 的粒子所含多环芳烃占总量的 60%~70%。总体上颗粒物中多环芳烃含量随着颗粒物粒径的减少呈现不断增加的趋势^[37-39]。

2.2 分配系数与过饱和蒸汽压影响

气态和颗粒态多环芳烃的分布特征与分配系数 K_p 和过饱和蒸汽压 p_i^0 间呈良好的线性关系^[40],其中过饱和蒸汽压与温度有关,在高温、高压环境下,颗粒物粒径越大对多环芳烃的气相分配影响作用就越明显,高环多环芳烃易吸附在颗粒相中^[22-23],与 VENKATARAMAN 等^[41]研究发现颗粒物的粒径对半挥发性有机物的气相

分配系统有一定影响的结果一致。但 PANKOW 等^[42]研究表明大气半挥发性有机物的气固相分配系数与总颗粒物粒径分布不存在相关性,仅与总颗粒物的质量浓度及大气环境温度有关,当温度升高时,颗粒态的浓度越大,越易转化成气态多环芳烃。大气中多环芳烃的气相分配也受到气溶胶与有机物的相互作用影响,具体表现为影响多环芳烃的气固吸附机理。

3 大气中多环芳烃的影响因素分析

大气中多环芳烃在无特殊天气的影响下,其浓度主要受环境介质中多环芳烃污染源影响较为显著,主要取决于污染物的位置和源强。例如冬季燃煤取暖可能是造成冬季大气中多环芳烃污染浓度高于其它 3 季的主要原因。在污染源分布及排放相对稳定的情况下,大气中多环芳烃的浓度取决于各种气象条件,例如气温、风向、风速、降雨、湿度等。当天气变化时,气象因素会引起气相和颗粒相的多环芳烃的时空分布规律。近年来,关于大气中多环芳烃与气象条件的相关性分析研究越来越多。由于各个国家的地理环境具有差异性,加上较多因素的综合作用,造成了气象因素对大气中多环芳烃的影响也是复杂多样的。

3.1 风速和风向因素

一般来说,风速较大时对污染物浓度起到稀释作用,风速较低时则加剧了污染物的累积^[25]。不同季节的风速影响也具有差异性,风速对冬季大气中多环芳烃影响显著,加之冬季气温较低,易频繁出现逆温层,且风速较小可使得大气中多环芳烃不易向外扩散,易于富集,从而导致局部范围的多环芳烃浓度急剧升高^[27]。

此外,风向也能直接影响多环芳烃在大气空间上的分布趋势。VARODAR 等^[43]研究表明风向对美国芝加哥大陆上空大气中多环芳烃含量具有重要影响。程书波等^[44]研究发现夏季大气中多环芳烃的风向作用下产生累积效应,到达中部地区大部分多环芳烃发生沉降,在城市中心形成“空心效应”。

3.2 降雨因素

雨水中多环芳烃主要来源于降雨冲刷大气中气相和颗粒相多环芳烃,随着降雨过程的持续进行,多环芳烃浓度呈现出不断下降的趋势^[25]。张迪瀚等^[25]和俞梁敏等^[26]研究发现降雨对大气中颗粒态多环芳烃的去除作用明显,其中颗粒相多环芳烃浓度占总多环芳烃浓度的 65%^[45],并以 4 环颗粒相多环芳烃为主^[46]。OFFENBERG 等^[47]对降雨前后大气中多环芳烃的浓度变化研究,结果表明部分场次雨后大气多环芳烃浓度反而上升,雨后大气中多环芳烃浓度会在短时间内迅速恢复,这可能与降雨中和降雨后期持续污染物排放有关,此外大气中气相和颗粒相多环芳烃的沉降速率与降雨时间、降雨强度显著相关^[46]。夏季多雨天气并伴随风速较大的情况下也

能增加大气中多环芳烃的快速扩散^[27]。

3.3 温度因素

多环芳烃作为高温中不完全燃烧成因的产物,以气态和微粒态的形式进入大气。当周围温度降低时,多环芳烃将凝结在颗粒物表面或地表。当温度升高时,吸附在颗粒物表面的多环芳烃会再次挥发至大气环境中^[48]。夏季较强紫外线以及高 OH^- 粒子浓度对大气中多环芳烃具有相对较强的降解作用,易引起低分子量组分的多环芳烃挥发至气相中^[49]。颗粒态总多环芳烃浓度值随温度升高而逐渐降低的趋势得到广泛证实。MARWAN 等^[50]、何宗健等^[51] 研究表明大气中颗粒态多环芳烃的浓度将随温度升高而逐渐降低,而气态多环芳烃污染物浓度会随温度升高而升高,总体上多环芳烃总量与温度呈弱相关性。此外,温度与风速的综合作用对颗粒物沉降有一定影响,一般温度低风速小有利于颗粒物沉降,而温度高风速增大时,则不利于颗粒物沉降^[52]。研究发现当温度高于 20°C 时,温度对总多环芳烃的化合物去除作用明显,此时风速作用不显著^[49]。

4 大气中多环芳烃的环境行为

城市大气环境中多环芳烃受到自身理化性质、温度、风速、风力、降雨、光照条件的影响,低分子量和高分子量多环芳烃的环境行为不同。低分子量多环芳烃主要以气态的形式存在,降解速度较快,大大降低了多环芳烃长距离迁移的可能性。高分子量多环芳烃主要以细颗粒的形式存在,不易与 $\cdot\text{OH}$ 等物质发生氧化反应,光降解是高分子量多环芳烃降解的主要形式。研究表明大气中多环芳烃可以通过干湿沉降、光降解反应及自由基反应等方式从大气中去除,从而影响其迁移行为^[53]。其中亚洲东部排放的多环芳烃在一定气象条件下能迁移到美国海岸^[54],俄罗斯排放的多环芳烃在一定程度上影响北极大气多环芳烃的含量^[55],而吸附在不同介质中的多环芳烃环境行为是不同的。

4.1 大气-植被-土壤的环境行为

大气中多环芳烃通过干湿沉降和分子扩散的形式进入土壤,多环芳烃组分在土壤颗粒、土壤空气和土壤间隙水中进行重新分配,一般认为多环芳烃主要吸附在细颗粒表面^[56-57],谢雨杉^[58] 通过对大气-植被-土壤系统中多环芳烃研究发现,大气中多环芳烃被固定在土壤中,能够降低多环芳烃的迁移性。植被与不透水层膜中多环芳烃通过扩散作用再次返回大气中,其中低环多环芳烃的扩散作用强于高环多环芳烃,高环多环芳烃易被吸附在不透水层膜中。

4.2 大气-水界面的环境行为

多环芳烃通过大气干湿沉降、城市地表径流、工业污水以及油水泄露等方式进入水体^[59],水体中多环芳烃的环境行为与自身理化性质有关,具有溶解、吸附、沉

降、挥发、生物降解和富集等特性^[60],其中气态污染物在水-气界面交换是半挥发性有机物在自然环境中的—种重要环境行为^[61],大气对湖水的作用方式包括 3 种:颗粒物的干湿沉降、气态湿沉降和水-气界面气态交换,当挥发作用大于吸收作用时,湖水成为大气的污染源。多环芳烃在不同介质中的交换通量方式不同,其中萘、二氢萘的交换通量方向是由湖水挥发进入大气,其它主要化合物都是从大气进入水体。李军等^[61] 研究发现多环芳烃在气-水界面的交换通量不仅直接与化合物本身的物化性质有关,还与气态与溶解态的浓度值的影响,还受气象条件的影响,风速的加大和温度的升高都能加大多环芳烃的交换通量。

4.3 大气-土壤的环境行为

土壤和大气之间存在着动态交换分配过程,多环芳烃通过污染源排放后进入大气,在干湿沉降的方式下进入土壤,土壤又通过挥发作用重新进入大气,在此过程中土壤既是大气中多环芳烃的受体,也是大气中多环芳烃的间接来源。不同分子量多环芳烃的环境行为具有差异性,2-3 环多环芳烃主要来源于土壤,5-6 环也是土壤重要的汇,中等分子量的交换趋势具有较大变异性^[62]。王德高等^[63] 研究发现土壤-大气的交换分配过程直接影响多环芳烃在环境中的归趋,其动态交换受温度影响,夏季比冬季更容易从土壤扩散到大气,市区环境因热岛效应影响其扩散作用也强于郊区。

4.4 多介质的环境行为

污染物进入环境后会在不同环境介质中发生迁移,在此过程中受到各种物理、化学、生物等因素的影响。各环境介质内以及环境介质之间发生污染物的迁移转化过程更为复杂。国内外学者对污染物的多介质模型进行了研究,SCHRIMAN 等^[64] 通过建立动态逸度模型(UNITree)计算化合物在植物中的富集;MACHAY^[65] 应用 QWASI 逸度模型对湖泊中不同化合物的迁移归趋进行研究,包括平流、挥发、沉降、再悬浮、再沉降的过程。随后,DIAMOND 等^[66] 建立沉积物-水迁移过程的模型,并模拟了不同化学品在沉积物-水之间的迁移过程,董继元等^[67] 通过多介质模型等研究发现所有组分的多环芳烃在各介质的迁移过程包括大气-土壤、大气-植被、植被-土壤,大气-不透水层的有机膜。其中,土壤降解是多环芳烃在系统中损失的主要途径。而大气到不透水层的有机膜的交换通量最为显著,以气相扩散为主。而低环组分易被再次挥发到大气中,又通过平流和大气中降解,高环组分更容易吸附在不透水层。随着雨水冲刷进入水体,并最终通过扩散沉降作用汇集在沉积物中。有机膜的存在加速了多环芳烃在大气-有机膜相-水体之间的交换和运动。

5 讨论

目前,对于大气颗粒物中多环芳烃的研究主要集中在时空尺度上的污染特征、季节变化及影响因素方面,但是针对多环芳烃在不同环境介质中的迁移归趋研究还处于起步阶段。综上所述,关于大气颗粒物中多环芳烃的研究方向比较多,但仍然存在不足和需要改进的方面。

对大气颗粒物中多环芳烃的浓度监测多以单个城市的特定功能区为研究对象,忽略了多环芳烃的长距离迁移性以及不同城市区域环境之间的相互影响。研究对象大多是小尺度区域,使得整体研究缺乏系统性,今后应展开对多环芳烃在大尺度区域环境中的影响的研究。

关于气象因子与多环芳烃质量浓度之间的相互关系研究不够深入,虽然研究表明大气颗粒物中多环芳烃的浓度变化是由各种气象因子共同作用,但是很少有结合城市街道峡谷内易出现的逆温层特殊气候进行研究。

目前对多环芳烃干湿沉降的研究多集中在植物叶面和地表2种介质上,但很少涉及到不同环境介质中的二次迁移归趋行为。城市植物叶面尘和地表尘暴露在开敞环境中,受到各种因素的影响。特别是地表灰尘再悬浮过程对大气颗粒物中污染物的影响,以及叶面尘在解释污染物在大气-植被-地表系统中的迁移规律作用需要进一步研究。研究这些作用和过程有助于更好地了解 and 深化大气-植被-地表中颗粒物及携带污染物的去向,为利用叶面颗粒物监测环境污染提供相关信息,对加强区域环境保护具有重要意义,更重要的是能修正和完善主要污染物在不同环境介质间的迁移归趋模型。

参考文献

- [1] NOWAK D J, CRANE D E, STENENS J C. Air pollution removal by urban trees ashubs in the United States[J]. Urban For Urban Green, 2006, 4 (3-4): 115-123.
- [2] SHIAHAR V, KHILLARE P, AHARWAL T, et al. Metallic species in ambient particulate matter at rural and urban location of Delhi[J]. Hazard Mater, 2010, 175: 600-607.
- [3] WHO. Air quality guidelines, Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide[M]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2006.
- [4] POPE C A, DOCKERY D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect[J]. Air Waste Manag Assoc, 2006, 56: 709-742.
- [5] 史兵方, 李拥军, 刘细祥. 中国多环芳烃区域地球化学研究进展[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(5): 10-20.
- [6] 温学新. 环境因素与肺癌关系研究进展[J]. 交通医学, 2000, 14(5): 457-458.
- [7] CHARRON A, HARRISON R M. Fine(PM_{2.5}) and coarse(PM_{2.5-10}) particulate matter on a heavily trafficked London highway: sources and processes[J]. Environ Sci Technol, 2005, 39: 7768-7776.
- [8] PUTAUD J P, van DINGENEN R, ALASTUEY A, et al. A European aerosol phenomenology 3: physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe[J]. Atmos Environ, 2010, 44: 1308-1320.
- [9] 刘树保, 邓秀芬. 大气颗粒物中多环芳烃污染特征及防治对策[J]. 油气田环境保护, 2012, 22(2): 32-34.
- [10] BEALEY W J, MCDONALD A G, NEMITZ R, et al. Estimating the reduction of urban PM₁₀ concentrations by trees within an environmental information system for planners[J]. Environ Manag, 2007, 85: 44-58.
- [11] MCDONALD A G, BEALEY W, FOWLER D, et al. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM₁₀ in two UK conurbations[J]. Atmos Environ, 2007, 41: 8455-8467.
- [12] SARKAR S, KHLIAE P S. Profile of PAHs in the inhalable particulate fraction: source apportionment and associated health risks in a tropical megacity[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(2): 1199-1213.
- [13] ROGULAO K W, KOZIELSKA B, KLEJNOWSKI L K, et al. Hazardous compounds in urban PM in the central of Upper Silesia(Poland) in winter[J]. Archives of Environmental Protection, 2013, 39(1): 53-65.
- [14] MARTELLINI T, GIANNONIL M, LEPRI L, et al. One year intensive PM_{2.5} bound polycyclic aromatic hydrocarbons monitoring in the area of Tuscany, Italy. Concentrations, source understanding and implications[J]. Environmental Pollution, 2012, 164: 252-258.
- [15] PIETROGRANDE M C, ABBASZADE G, SVHNELLE-CHNELLE-KREIS J, et al. Seasonal variation and source estimation of organic compounds in urban aerosol of Augsburg, Germany[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(7): 1861-1868.
- [16] SALAM M A, SHIRASUNA H, MASUNAG. Particle associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of urban and suburban residential area[J]. Environ Sci Tech, 2011, 8(2): 255-266.
- [17] PARK S S, KIM Y J, KANG C H. Polycyclic aromatic hydrocarbons in bulk PM_{2.5} and size-segregated aerosol particle samples measured in an urban environment[J]. Environ Monit Assess, 2007, 128: 231-240.
- [18] WANG J, GENGN X Y. PAHs in PM_{2.5} in Zhengzhou: concentration, carcinogenic risk analysis, and source apportionment[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(11): 7461-7473.
- [19] 杨飞, 杨凌霄, 孟川平, 等. 济南市 PM_{2.5} 中多环芳烃的季节变化特征及健康风险评价[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(3): 389-396.
- [20] 杨成阁, 胡菁, 郭军, 等. 贵阳市冬、夏季 PM_{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2014, 33(1): 161-162.
- [21] 易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 等. 福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1252-1256.
- [22] 马万里, 李一凡, 孙德智, 等. 哈尔滨市大气中多环芳烃的初步研究[J]. 中国环境科学, 2010, 30(2): 145-149.
- [23] 李秋歌, 赵欣, LI A, 等. 南京大气中多环芳烃的相分[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(4): 34-39.
- [24] 熊胜春, 陈颖军, 支国瑞, 等. 上海市大气颗粒物中多环芳烃的季节变化特征和致癌风险评价[J]. 环境化学, 2009, 28(1): 117-120.
- [25] 张迪瀚, 马永亮, 贺克斌, 等. 北京市大气颗粒物中多环芳烃(PAHs)污染特征[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1269-1275.
- [26] 俞梁敏, 姜达胜, 陈诚, 等. 昆山市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 污染特征研究[J]. 环境影响评价, 2015, 37(1): 78-85.
- [27] 周变红, 张承中, 王格慧. 西安城区大气中多环芳烃的季节变化特征及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2324-2331.
- [28] 曹强, 吴庆, 蒋蓉芳, 等. 某城市交通区大气多环芳烃污染的时空分布特征[J]. 环境与职业医学, 2008, 25(1): 13-15.
- [29] 赵雪艳, 任丽红, 姬亚芹, 等. 重庆主城区春季大气 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 中多环芳烃来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1395-1402.
- [30] LIU G Q, TONG Y P, JOHN H T, et al. A source study of atmospheric

- polycyclic aromatic hydrocarbons in Shenzhen, South China[J]. *Enviro Monit Assess*, 2010, 163:599-606.
- [31] 王超, 张霖琳, 刀谔, 等. 京津冀地区城市空气颗粒物中多环芳烃的污染特征及来源[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1):1-6.
- [32] 郭红连, 陆晨刚, 余琦, 等. 上海大气可吸入颗粒物中多环芳烃(PAHs)的污染特征研究[J]. *复旦大学学报(自然科学版)*, 2004, 43(6):1107-1112.
- [33] 黄云碧, 王铁冠, 周家斌, 等. 大气颗粒物中多环芳烃的粒径分布[J]. *化工时刊*, 2006, 20(8):5-8.
- [34] KERRER M, MONN C, WANNER H U. Outdoor concentrations of PM₁₀ & particulate PAHs at an urban road[J]. *Aerosol Sci*, 1995(26):385-386.
- [35] NKATARAMAN C, FRIEDLANDER S K. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons and elemental carbon. 2. Ambient measurements and effects of atmospheric processes[J]. *Environ Sci Technol*, 1994, 28(4):563-572.
- [36] 蒋亨光. 多环芳烃在不同粒径颗粒物中的分布[J]. *环境科学*, 1985, 6(2):18-23.
- [37] 王玮, 岳欣, 陈建华, 等. 北京市交通路口大气颗粒物污染特征研究(Ⅲ)[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(2):43-47.
- [38] 卢媛媛, 邹红娟, 吕晋, 等. 武汉市浅水湖泊生态系统健康评价[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(9):66-68.
- [39] 冯沈迎, 全青, 阮玉英, 等. 空气颗粒物中 PAHs 的粒径分布与污染特征[J]. *内蒙古环境保护*, 2000, 12(4):16-19.
- [40] 陆晨刚, 李春雷, 陈立民. 大气中多环芳烃气固相分配与颗粒物粒径的关系[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(2):153-156.
- [41] VENKATARAMAN C, THOMAS S, KULKARNI P. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons gas/particle partitioning to urban aerosols[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1999, 30(6):759-770.
- [42] PANKOW J F, BIDDLEMAN T F. Effects of temperature, TSP and percent non-exchangeable material in determining the gas-particle partitioning of organic compounds[J]. *Atmospheric Environment*, 1991, 25A(10):2241-2249.
- [43] VARODAR N, TASDEMIR Y, ODABASI M, et al. Characterization of atmospheric concentrations and partitioning of PAHs in the Chicago atmosphere[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 327:163-164.
- [44] 程书波, 刘敏, 欧冬妮, 等. 城市灰尘 PAHs 累积与迁移过程的影响因素研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(1):179-182.
- [45] 刘志刚, 胡丹, 欧浪波, 等. 北京郊区树冠穿透水中多环芳烃的污染特征与通量计算[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 30(6):1200-1207.
- [46] 叶友斌, 张巍, 胡丹, 等. 城市大气中多环芳烃的降雨冲刷[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(7):985-991.
- [47] OFFENBERG J H, BAKER J E. Precipitation scavenging of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons along an urban to over-water transect[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(17):3763-3771.
- [48] GUSTAFSON K E, DICKHUT R M. Particle/gas concentrations and distributions of PAHs in the atmosphere of southern Chesapeake Bay[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31:140-147.
- [49] 谭吉华, 毕新慧, 段菁春, 等. 广州市大气可吸入颗粒物(PM₁₀)中多环芳烃的季节变化[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(7):855-862.
- [50] MARWAN A D, LEE H. Temporal trends, temperature dependence, and relative reactivity of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35:2264-2267.
- [51] 何宗健, 苏泓. 环境空气中多环芳烃的研究现状[J]. *江西科学*, 2008, 26(4):662-665.
- [52] 李军, 张干, 祁士华, 等. 广州麓湖大气多环芳烃的干湿沉降[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(3):193-199.
- [53] 毕新慧, 盛国英, 谭吉华, 等. 多环芳烃(PAHs)在大气中的相分布[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(1):101-106.
- [54] BEEKER S, HALSALL C J, TYCH W, et al. Resolving the long-term trends of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Canadian Arctic atmosphere[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40:3217-3222.
- [55] KILLIN R K, SLIMONICH S L, JAFFE D A, et al. Trans pacific and regional atmospheric transport of anthropogenic semi-volatile organic compounds to Cheeka Peak observatory during the spring of 2002[J/OL]. *Journal of Geo Physical Research Atmospheres*, DOI:10.1029/2003JD004386.
- [56] COUSINSL T, BECK A J, JONE K C. A review of the process involved in the exchange of semi-volatile organic compounds(SVOC) across the air-soil interface[J]. *The Science of the Total Environment*, 1999, 228(1):5-24.
- [57] 郎畅. 珠江三角洲多环芳烃归趋与输出模拟[D]. 北京:北京大学, 2008.
- [58] 谢雨杉. 上海城市大气 PAHs 排放特征与多介质归趋模拟[D]. 上海:华东师范大学, 2009.
- [59] 摆亚军. 环渤海西部地区地表水多环芳烃污染特征[D]. 北京:北京大学, 2008.
- [60] MANOLI E, SAMARA A C. Polycyclic aromatic hydrocarbons in natural waters: sources, occurrence and analysis[J]. *RAC-Trends in Analytical Chemistry*, 1999, 18(6):417-428.
- [61] 李军, 张干, 祁士华, 等. 多环芳烃在城市湖泊气-水界面上的交换[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(3):238-244.
- [62] 龚平, 王传飞, 王小萍, 等. 青藏高原大气和土壤多环芳烃空间分布及土气交换[C]. 持久性有机污染论坛 2012 暨第七届持久性有机污染全国学术研讨会, 2012.
- [63] 王德高, 杨盟, 贾宏亮, 等. 城市地区多环芳烃的土壤-大气交换分配研究[C]. 持久性有机污染论坛 2008 暨第三届持久性有机污染全国学术研讨会, 2008.
- [64] SCHRIMAN K W, REISHCL A, HUTZINGER O. UNITree A multimedia compartment model to estimate: The fate of lipophilic compounds in plants[J]. *Chemosphere*, 1987, 16(10-12):2653-2663.
- [65] MACHAY D. Handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals[M]. Second edition; CRC Press, 2006.
- [66] DIAMOND M, MACKARD D, COMETT R, et al. A model of the exchange of inorganic chemicals between water and sediments[J]. *Environmental Science and Technology*, 1990, 24(5):713-722.
- [67] 董继元, 王金玉, 张本忠, 等. 兰州地区多环芳烃的多介质归趋模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(2):570-578.

Research Progress of Pollution Characteristics and Environmental Behavior of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matter

ZHA Yan^{1,2}, FENG Chi^{1,2}, ZHANG Yinlong^{1,2}, WANG Yue^{1,2}, LI Wei^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037; 2. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037)

鸢尾属植物育种研究进展

尹新彦^{1,2}, 储博彦^{1,2}, 李金霞^{1,2}, 赵玉芬^{1,2}, 张全锋^{1,2}, 贾红姗³

(1. 河北省林业科学研究院, 河北 石家庄 050061; 2. 河北省林木良种工程技术研究中心, 河北 石家庄 050061;

3. 河北农业大学 园林与旅游学院, 河北 保定 071000)

摘要: 鸢尾是园林绿化中重要的地被植物。从国内外鸢尾属植物的育种研究现状、常规杂交育种、体细胞杂交、倍性育种、辐射育种、转基因技术、分子技术等方面进行了综述, 对我国鸢尾属植物育种方向提出了展望及建议, 旨在加快我国鸢尾属植物的育种研究步伐。

关键词: 鸢尾; 杂交育种; 倍性育种; 转基因技术; 研究现状

中图分类号: S 682.1⁺9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0009(2016)08-0193-04

鸢尾属(*Iris*)为鸢尾科(Iridaceae)最大属^[1], 多年生草本植物, 有 300 余种, 大部分分布于北温带地区, 我国约 60 种、13 变种和 5 变型^[2]。鸢尾属植物花色几乎穷尽了所有颜色和可以想象到的颜色组合, 能形成良好的绿化景观^[3]。不仅可以作为造景材料用于草坪镶边、地被覆盖、水景映衬, 也可与常绿乔灌木搭配形成模纹花带, 还可以用于河道或边坡绿化, 保持水土。

DYKES(1913)和 SIMONET(1934)将鸢尾属系统的分为鳞茎类、块茎类、根茎类。根茎类鸢尾又分为饰冠鸢尾、有髯鸢尾和无髯鸢尾三大类^[4]。一般园艺种植的鸢尾都是有髯鸢尾和无髯鸢尾。无髯鸢尾分布极广, 一般不发生种间杂交, 除非种缘关系极近的种。有髯鸢尾种之间的亲缘关系则比较近, 因此, 许多种之间可进行杂交并产生新的杂交后代^[5]。

第一作者简介: 尹新彦(1971-), 女, 河北正定人, 硕士, 农业推广研究员, 现主要从事园林花卉育种与栽培等研究工作。E-mail: yinxyl2@163.com.

基金项目: 石家庄市科技支撑计划资助项目(141520862A)。

收稿日期: 2015-12-23

1 国内外研究概况

1.1 国内现状

公元 1—2 世纪《神农本草经》就有关于鸢尾和马蔺的记载。北宋时期苏颂以木版画形式在其《图经本草》中对鸢尾从叶到茎进行了详细记载。1936 年, 我国最早研究鸢尾属的文章《中国之鸢尾》发表, 其作者刘瑛对国内鸢尾属 35 个种及品种进行了详细记载。

我国鸢尾属植物的育种研究是从 20 世纪 90 年代开始。刘青林等^[6]进行了鸢尾花器官离体培养, 研究了体细胞无性系受离体培养影响的变异规律。周永红等^[7]对 *I. confusa*、*I. japonica* 及其杂交种的花粉减数分裂进行了分析, 标志着我国开始从细胞学领域推动鸢尾育种工作的进行^[8]。柯立明等^[9]对鸢尾进行了系统的种间杂交试验, 发现双亲性细胞融合存在障碍, 同时还发现不同的杂交组合障碍发生的部位和程度也不一样。目前, 国内鸢尾属育种工作主要集中于常规杂交育种及其后代优株选育、花色和抗性研究等方面, 并且已开始了辐射育种及杂交后代胚培养的研究。

1.2 国外现状

公元 6 世纪, 希腊的 DIOSCORIDE 所著的《Vienna

Abstract: In recent years, urban air pollution is serious and caused frequent haze weather. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) as typical pollutant in the atmospheric particulate matter are widely concerned by scholars at home and abroad due to their carcinogenic, teratogenicity and mutagenic effects. The paper introduced the pollution characteristics, influenced factor and environmental behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in domestic and abroad, and made perspectives in the research field. Exploring the pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere-vegetation-surface system had a great significance on revision and consummation of polycyclic aromatic hydrocarbons in different medium between migrating tending towards model and strengthening regional environmental protection in the future.

Keywords: atmosphere particulate matter; polycyclic aromatic hydrocarbons; pollution characteristics; environmental behavior