

研究论文

南极菲尔德斯半岛表层土壤中多环芳烃 分布特征、源解析及风险评价

刘昂¹ 公金文¹ 韩彬^{2,3} 赵军¹ 郑立^{1,2,3}

(¹ 青岛科技大学化工学院, 山东 青岛 266042;

² 自然资源部海洋生态环境科学与技术重点实验室, 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

³ 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要 多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)会在“全球蒸馏”效应(即“蚱蜢跳”效应)的作用下, 从低纬度地区转移到高纬度地区, 且有科学家在极区检测到 PAHs 的存在。本研究采用 GC-MS 技术对南极菲尔德斯半岛地区 20 个站点表层土壤中 16 种 PAHs 进行了分析, 考察了菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 的分布特征。结果表明, 20 个站点中 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 含量范围为 2.37~27.31 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}(\text{dw})$, 平均含量为 9.82 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}(\text{dw})$ 。2 环和 3 环 PAHs 是此研究区域的主要 PAHs。源解析综合分析结果表明, PAHs 主要来源于石油源和石油燃烧源, 且一定程度上受到大气远距离传输的影响。风险评估表明, 研究区域处于低生态风险水平, 但潜在的环境毒性不能被忽视。因此, 研究南极菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 分布特征、源解析及风险评价, 可以为该区域及南极其他地区污染控制和生态环境防治等提供科学依据, 对生态环境保护有着重要的意义。

关键词 菲尔德斯半岛 多环芳烃 源解析 风险评价

doi: 10.13679/j.jdyj.20200025

0 引言

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)是一类广泛分布在环境中的毒性污染物, 主要来自于人类活动和能源利用过程的不完全燃烧^[1], 环境中的 PAHs 具有半挥发性、难降解性及“三致效应”(致癌、致畸、致基因突变)等危害^[2], 受到社会的广泛关注。早在 20 世纪 80 年代, 美国环境保护局(USEPA)把 16 种 PAHs 列为优先控制的污染物^[3]。极地 PAHs 污染具有外源性的特点, 南极本地没有大量排放有机污染物的来源^[4], 由于“全球蒸馏”效应, 极地有机污染物一定程度

上受到大气输送的影响^[2]。土壤是 PAHs 在全球迁移的纽带, 其中环境中大部分的 PAHs 残留在土壤中^[5-6]。随着对极区科考的增加、旅游业的发展、以及海上运输活动的增加, 给脆弱的极区生态环境造成了一定的威胁。因此极区土壤介质中有机污染物的赋存水平受到国际环境学家的广泛关注^[7-8]。

菲尔德斯半岛位于南极乔治王岛的西南部, 是岛上最大的没有被冰雪覆盖的区域^[9]。由于南极是全球环境变化的重要组成部分, 且受到人类活动的影响较少, 于是成为全球污染、大洋环流及辐射背景值等科学研究的理想区域^[4]。早期有研究表明, 科学家们从南极的企鹅及雪燕等生物

[收稿日期] 2020 年 3 月收到来稿, 2020 年 6 月收到修改稿

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2016YFC0503602)和南北极站基业务化生态环境监测-菲尔德斯半岛土壤重金属和有机污染物调查项目资助

[作者简介] 刘昂, 男, 1995 年生。硕士研究生, 主要从事极地持久性有机污染物监测技术方面研究。E-mail: 980068545@qq.com

[通信作者] 韩彬, E-mail: hanbin@fio.org.cn

体中检测到了持久性有机污染物(POPs)的存在^[10]。21 世纪以来, 在南极地区积雪、沉积物和生物体中陆续检测出 PAHs, 对南极生态环境安全造成一定的威胁^[11]。为了考察近年来南极菲尔德斯半岛地区土壤中 PAHs 的污染状况, 本研究通过调查南极菲尔德斯半岛 20 个站点中表层土壤样品中的 16 种 PAHs, 分析了该区域表层土壤中 PAHs 的分布特征及其来源, 并进行了生态风险评价, 以期提供最新的南极调查数据, 并为该区域及南极地区污染控制和生态环境防治等提供科学依据。

1 研究方法

1.1 样品采集

样品于第 35 次南极科考期间采集。样品站点信息见表 1, 站位图见图 1, 采样点基本涵盖了机场、企鹅岛及长城站等科考站人类活动较频繁区域的表层土壤样品和人类活动相对较少的其他区域。样品为 0~10 cm 的表层土壤, 每个采样点均采集了 2 个及以上同类样品, 合并为一个样品,

铝箔纸包好后放入密封样品袋中, -20℃ 冷冻保存带回实验室。将样品冷冻干燥 24 小时后研磨过 100 目筛处理, 待分析。

1.2 仪器与试剂

使用仪器有 GC 7890A-MS 5975C(美国安捷伦公司)气相色谱-质谱联用仪, 冷冻干燥仪(德国 Marin Christ 公司), 超声波清洗仪(昆山市超声仪器有限公司), 旋转蒸发仪(西安泰康生物科技有限公司)和氮吹仪(北京同泰联科技有限公司)。试剂有正己烷(色谱纯、德国默克 MERC 公司)、二氯甲烷(色谱纯、德国默克 MERC 公司), 无水硫酸钠(分析纯、天津科密欧公司), 硅胶(青岛海洋化工厂), 中性氧化铝(国药集团化学试剂有限公司), 铜粉(国药集团化学试剂有限公司)。混合标准品包括 16 种 PAHs: 萘(Nap)、二氢萘(Ace)、蒾(Acy)、芴(Fle)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、屈(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚苯[1,2,3-cd]芘(InP)、二苯并[a,h]蒽(DbA)、苯并[g,h,i]芘(BghiP)^[12]。

表 1 菲尔德斯半岛站位点信息
Table 1. The site information on the Fildes Peninsula

站位点	经度	纬度	站位点	经度	纬度
盘龙山	58°57'44.07"W	62°13'40.50"S	酒泉湾	58°57'24.35"W	62°13'28.54"S
长湖	58°57'56.07"W	62°12'22.07"S	机场东	58°58'25.23"W	62°11'32.68"S
化石山	58°58'22.28"W	62°12'15.89"S	机场西	58°59'28.04"W	62°11'36.37"S
明月山	58°59'31.22"W	62°12'23.86"S	地质湾	58°59'05.51"W	62°10'56.75"S
地理湾	59°00'21.62"W	62°12'42.73"S	风暴湾	58°59'22.60"W	62°11'09.95"S
风谷	58°59'03.01"W	62°12'38.23"S	生物湾	58°59'18.46"W	62°11'48.88"S
长城站	58°57'49.35"W	62°13'04.23"S	企鹅岛01	58°55'30.10"W	62°12'36.48"S
诺玛湾	58°54'31.35"W	62°11'19.57"S	企鹅岛02	58°55'03.44"W	62°12'40.14"S
乌拉圭站	58°54'22.59"W	62°10'52.82"S	企鹅岛03	58°55'05.51"W	62°12'41.86"S
俄罗斯站	58°57'11.22"W	62°11'49.10"S	企鹅岛04	58°55'34.63"W	62°12'56.83"S

注: 受天气及地势环境影响, 站位信息与实际采样点(图 1)略有偏差。

1.3 样品前处理

准确称取 5.0 g 经 100 目筛分、混合均匀的样品于 60 mL 梨形锥形瓶中, 向锥形瓶中加入 20 mL 正己烷和二氯甲烷(1:1)溶液, 同时加入 1.0 g 铜粉。采用超声萃取法提取 20 min 后静置 20 min, 提取上清液并转移到 60 mL 圆底烧瓶中。重复提取 2 次, 合并上清液。使用旋转蒸发仪在

40℃ 下将提取液浓缩至 2~4 mL。按顺序从下到上依次用硅胶、中性氧化铝与无水硫酸钠按质量比为 2:1:1 制成的层析柱纯化浓缩液, 用 20 mL 正己烷与二氯甲烷(7:3)混合溶液连续洗脱层析柱, 洗脱液旋转蒸发至 2 mL, 最后用流速为 30~50 mL·min⁻¹ 的氮气将洗脱液吹扫定容至 1 mL。

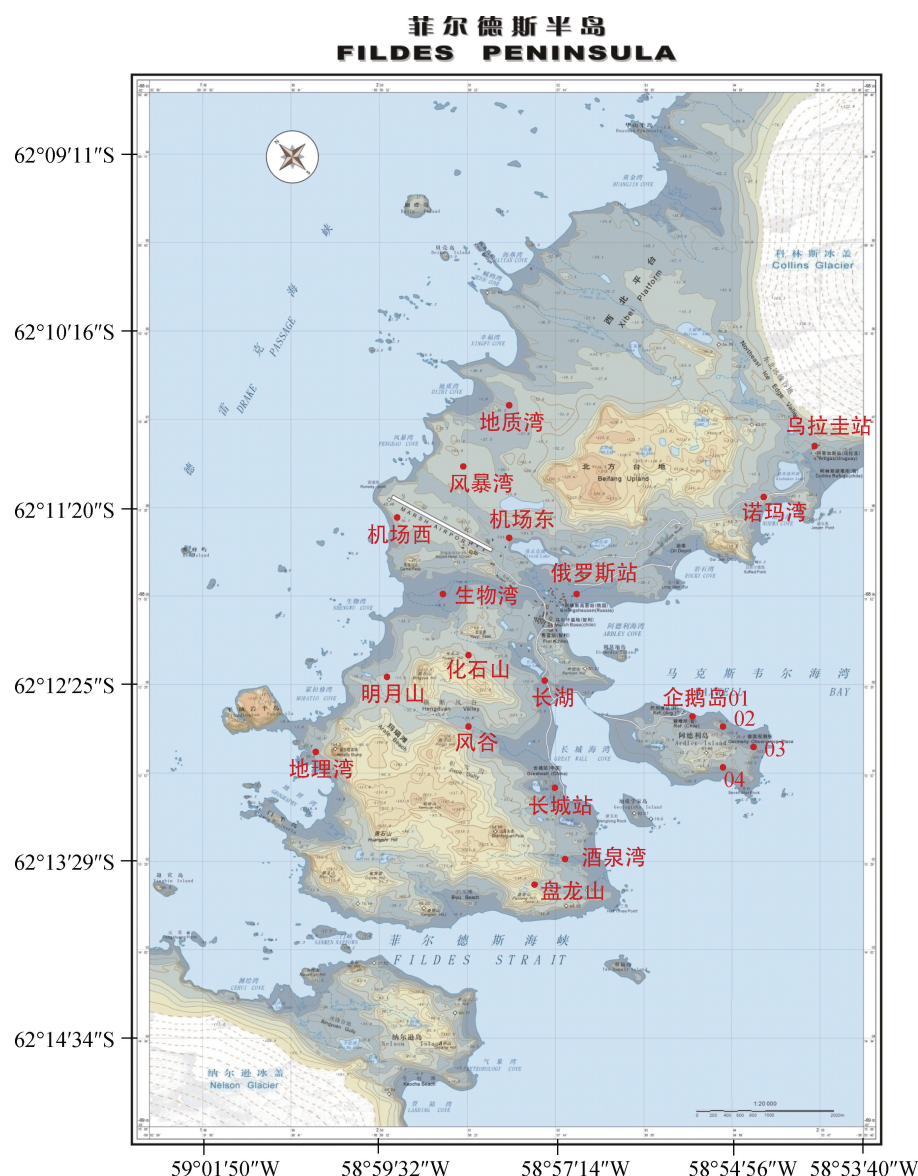


图 1 菲尔德斯半岛采样点(武汉大学中国南极测绘研究中心制作)

Fig.1. Sampling sites in Fildes Peninsula(Compiled by Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping Wuhan University)

1.4 仪器分析

分析方法参照文献[12], 利用 GC-MS (Agilent7890AGC/5975C MSD)气相色谱-质谱联用仪使用外标法对 PAHs 含量进行定量分析。气相色谱条件: 进样口温度为 280 °C, 进样量为 1 μ L, 载气为高纯 H_2 , 保持流量为 1.0 $mL \cdot min^{-1}$, 不分流进样。石英毛细管柱型号: Agilent HP-5MS (30 $m \times 0.25 mm \times 0.25 \mu m$)。升温程序: 初温 80 °C, 以 4 °C $\cdot min^{-1}$ 的速率升温到 150 °C, 然后以 15 °C $\cdot min^{-1}$ 的速率升温到 280 °C, 并最终保持

12 min。质谱条件: EI 源电离, 传输线温度 280 °C, 四极杆温度 150 °C, 离子源温度 230 °C, 离子扫描为 SIM 模式。

1.5 质量控制

根据 USEPA 认证的 QA/QC 控制要求。土壤样品分析过程设有分析方法空白、空白加标、样品和加标平行样^[12]。空白样品中未检出目标物污染物 PAHs, 加标回收率为 71%~115%, 每组平行样品的相对标准偏差均小于 15%, 16 种 PAHs 的检出限为 0.01~0.15 $ng \cdot g^{-1}$ 。满足实验要求。

2 结果与讨论

2.1 土壤中 16 种 PAHs 的含量

菲尔德斯半岛 20 个表层土壤样品中 16 种 PAHs 含量分布见表 2, $\sum_{16}\text{PAHs}$ 含量如图 2 所示。其中 InP 在大部分站点样品中未被检测到, BaA、Chr、BaP、DbA 和 BghiP 在部分站点中未检出, 其余 10 种 PAHs 在所有站点中均有检出。PAHs 浓度范围为 $2.37\sim 27.31\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量为 $9.82\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。与马新东等^[2]报道的菲尔德斯半岛土壤介质中 PAHs 含量($68.9\sim 374\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)相比, 浓度有所降低。低于北极新奥尔松区域土壤中 PAHs 平均含量($191\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[13], 更是低于王小萍等^[14]报道的珠穆朗玛峰的 PAHs 浓度($168\sim 595\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。其中, 风暴湾的含量最低为 $2.37\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 长城站的内容最高

为 $27.31\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。总 PAHs 含量较高的站点是长城站、企鹅岛、俄罗斯站和机场东, 相比于其他站点, 俄罗斯站、长城站和机场东这三个站点 PAHs 含量高的一个可能原因是研究站和机场附近人类活动比较频繁, 受到人类日常活动以及飞机燃料泄漏、尾气排放产生一定污染的影响。机场东、西两个站点相距较近, 但其浓度有一定差异, 分析其原因可能为: 机场东位于机场跑道的起点, 机场西位于跑道终点, 飞机飞行过程中的燃料泄漏及尾气排等污染对机场东的 PAHs 浓度影响较大; 机场西靠近海岸, 受人类活动影响较小, 而机场东附近有建筑物, 人类活动较为频繁, 因此由人类活动所带来的 PAHs 污染问题在机场东更为突出。企鹅岛 PAHs 含量较高的原因可能是由于土壤中含有企鹅的排泄物, 有机质含量相对较高, PAHs 化合物易于富集在有机质含量高的土壤中所致^[15]。

表 2 菲尔德斯半岛表层土壤 PAHs 含量
Table 2. The contents of PAHs in topsoil of Fildes Peninsula

化合物	含量/($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	致癌性	荷兰土壤质量标准/($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	中国土壤第一标准限值/($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)
萘(Nap)	0.57~16.91	否	15	15
蒽(Acy)	0.03~0.36	否	—	5
二氢蒽(Ace)	0.03~0.56	否	—	5
芴(Fle)	0.04~0.86	否	—	5
菲(Phe)	0.36~3.21	否	50	20
蒽(Ant)	N.D.~0.33	否	50	10
荧蒽(Fla)	0.01~1.41	否	15	15
芘(Pyr)	0.05~1.21	否	—	10
苯并[a]蒽(BaA)	N.D.~0.71	是	20	5
屈(Chr)	N.D.~0.66	是	20	10
苯并[b]荧蒽(BbF)	N.D.~1.27	是	—	10
苯并[k]荧蒽(BkF)	N.D.~0.82	是	25	10
苯并[a]芘(BaP)	N.D.~2.78	是	25	10
茚并[1,2,3-cd]芘(InP)	N.D.~0.26	是	25	5
二苯并[a, h]蒽(DbA)	N.D.~2.18	是	—	5
苯并[g,h,i]芘(BghiP)	N.D.~8.74	否	20	8

注: N.D.表示低于检出限; “—”表示未做规定。

2.2 PAHs 的组成特征及源解析

由于环境中 PAHs 来源不同, PAHs 在苯环数量及排列方式上有所不同, 但是在 PAHs 迁移和沉降等环境过程中组分保持相对稳定^[16]。因此, PAHs 的不同组分特征可以作为环境中 PAHs 来源的一个依据^[17]。依据 16 种 PAHs 的苯环个数差异,

划分为低环(2、3 环)、中环(4 环)和高环(5、6 环)PAHs 3 类^[18]。低环 PAHs 主要来源于石油源, 中环和高环 PAHs 主要来源于化石燃料及生物质的不完全燃烧^[19]。菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 组成比例如图 3 所示。从图 3 可以看出, 研究的所有站点中, 低环 PAHs 占比为 40.44%~95.72%,

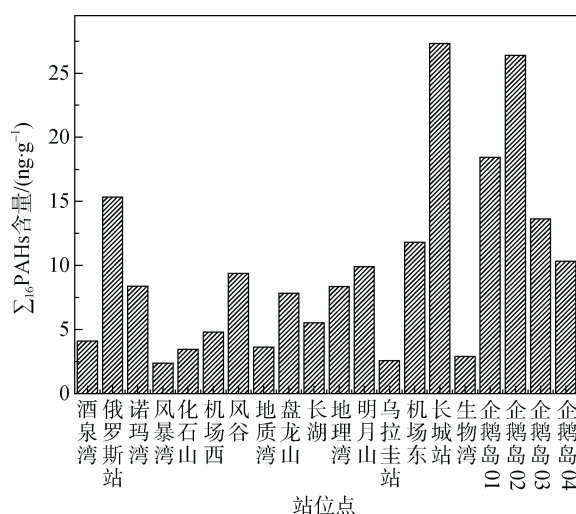


图2 菲尔德斯半岛表层土壤 PAHs 含量

Fig.2. The contents of PAHs in topsoil of Fildes Peninsula

中环 PAHs 占比为 2.31%~42.46%, 高环 PAHs 占比为 0.61%~30.69%。所以, 低环 PAHs 是此研究区域的主要 PAHs。机场东、企鹅岛站点的样品中所检测出的中环 PAHs、高环 PAHs 占比与低环相当, 推断此采样点表层土壤中 PAHs 来源为石油源和燃烧源的混合来源^[20], 这可能是机场东、企鹅岛站点 PAHs 浓度较高的一个原因, 而俄罗斯站和长城站以低环 PAHs 为主, 其浓度较高的原因需进一步研究。其他站点的样品中 PAHs 组成以低环为主, 石油源可能为主要来源^[20]。有研究表明, 低环 PAHs 具有更强的挥发性, 更容易随着大气传输, 所以, 在一定程度上受到大气传输的影响^[11]。

环境中 PAHs 来源可以根据不同 PAHs 的浓度比值进行初步判断, 本文根据测得的样品浓度计算了四种特定的 PAHs 比值, 即 $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe})$ 、 $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$ 、 Fla/Pyr 和 LMW/HMW (低环 PAHs/中、高环 PAHs)^[21]。有研究表明, 当 $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe})$ 小于 0.1, 说明存在石油源, $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe})$ 大于 0.1 说明燃烧源影响较大^[22]。 $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$ 小于 0.4 为石油源, $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$ 大于 0.5 表示煤、木材等生物质燃烧, 0.4~0.5 之间代表石油燃烧^[23]。 Fla/Pyr 小于 1、 LMW/HMW 大于 1 时, 表明 PAHs 来源于石油, Fla/Pyr 大于 1、 LMW/HMW 小于 1, 表明来源于煤炭、生物质和石油燃烧^[24-25]。这些比值结果将有助于分析菲尔德斯半岛土壤中 PAHs 的

来源, 菲尔德斯半岛样品浓度的四种比值结果见表 3, 比值对比图如图 4 所示。结果显示, $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe})$ 小于 0.1 的站点占 80%, Fla/Pyr 小于 1 的站点占 90%, 所有站点的样品 LMW/HMW 均大于 1, 初步推断其 PAHs 主要来自石油源。长城站、机场东、乌拉圭站和风谷站点 Fla/Pyr 的值接近 1, 表明受到化石燃料等高温燃烧的影响较大^[21]。 $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$ 的结果主要集中在 0.4~0.5 之间, 可能来源是石油燃烧。综上所述, 通过比值法初步判定研究区域内 PAHs 主要来源于石油直接污染及燃烧。

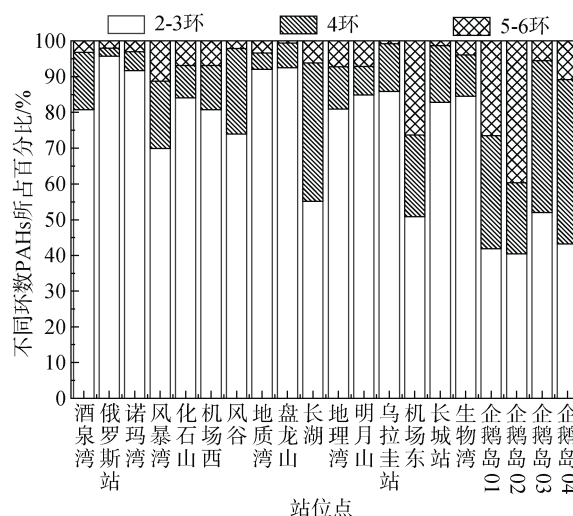


图3 菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 的组成

Fig.3. Composition of PAHs in topsoil of Fildes Peninsula

用同分异构体比值法判定多环芳烃来源通常会受到很多外界因素的干扰, 例如大气沉降、PAHs 的挥发性等, 导致分析结果不够准确, 故采用主成分分析法(PCA)进一步解析 PAHs 的来源^[26]。对菲尔德斯半岛土壤中 16 种 PAHs 的检测结果表明, 大多数样品中没有检测到 InP, 该化合物不参与主成分分析, 对其他 15 种 PAHs 进行 PCA 分析以确定其来源。根据特征根因子大于 1, 主成分分析矩阵见表 4。从表 4 可以看出, 菲尔德斯半岛土壤中 PAHs 来源可提取出 4 个主成分, 共解释了方差变量的 85.464%, 其中成分 1—4 分别为 34.523%、22.553%、16.201%和 12.186%。在成分 1 中, 低环 PAHs 占载荷较大, 主要包括 Nap、Acy、Fle 和 Ant。其中, Nap 化学性质不稳定, 易

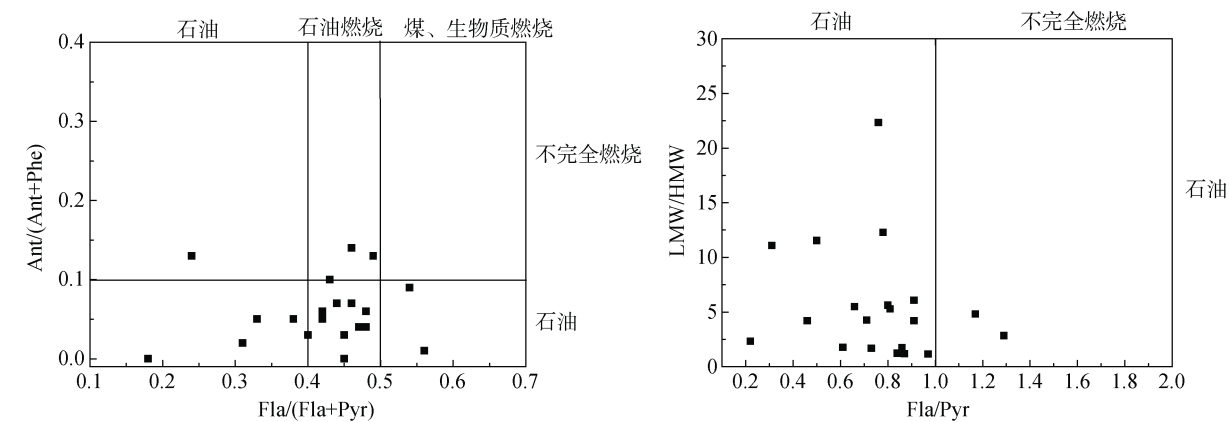


图 4 菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 来源鉴别
Fig.4. Source identifications of PAHs in topsoil of Fildes Peninsula

表 3 菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 的比值分析
Table 3. The ratio analysis of PAHs in topsoil of Fildes Peninsula

站点点	Ant/(Ant+Phe)	Fla/(Fla+Pyr)	Fla/Pyr	LMW/HMW
酒泉湾	0.063	0.477	0.913	4.190
俄罗斯站	0.104	0.431	0.757	22.340
诺玛湾	0.125	0.416	0.312	11.078
风暴湾	0.000	0.180	0.219	2.324
化石山	0.005	0.447	0.809	5.283
机场西	0.020	0.315	0.459	4.186
风谷	0.011	0.564	1.291	2.838
地质湾	0.054	0.333	0.499	11.544
盘龙山	0.067	0.437	0.777	12.296
长湖	0.135	0.455	0.836	1.227
地理湾	0.059	0.238	0.713	4.256
明月山	0.030	0.378	0.805	5.624
乌拉圭站	0.042	0.477	0.912	6.085
机场东	0.129	0.492	0.970	1.036
长城站	0.094	0.540	1.172	4.807
生物湾	0.033	0.399	0.663	5.468
企鹅岛01	0.069	0.462	0.857	1.720
企鹅岛02	0.049	0.421	0.728	1.679
企鹅岛03	0.043	0.466	0.871	1.084
企鹅岛04	0.045	0.446	0.607	1.760

挥发，可能受到大气远距离传输的影响^[27]，也有研究指出 Nap 来源于石油泄漏^[28]，Acy 和 Ant 主要来源于石油和相关产物在生产和运输过程中的泄漏^[28-29]；Fle 主要来源于焦炭源^[30]。故低环 PAHs 载荷较高的成分 1 以石油源为主，这与前文判断相吻合。DbA 和 BghiP 在成分 2 中载荷较大，两者是汽油燃烧的代表物^[31]。成

分 3 主要由 BbF 和 BkF 确定，故代表柴油燃烧源^[32]。最后成分 4 载荷较大的是 BaA 和 Chr，BaA 被认为是汽车尾气代表物^[31]，而 Chr 则被认为是煤的燃烧^[33]。综合分析可见菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 主要来源于石油和石油燃烧，一定程度上受到大气远距离传输的影响，与比值法判断结果基本一致。

表 4 菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 的主成分矩阵
Table 4. The component matrix of PAHs in topsoil of Fildes Peninsula

PAHs	Principal Component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Nap	0.939	0.008	-0.123	0.031
Acy	0.960	-0.138	-0.053	0.041
Ace	0.765	0.201	0.225	0.130
Fle	0.889	0.038	0.229	-0.020
Phe	0.656	0.644	0.170	0.066
Ant	0.860	0.413	0.020	0.017
Fla	0.668	0.576	0.045	0.275
Pyr	0.572	0.701	0.142	0.226
BaA	0.165	0.478	0.159	0.801
Chr	0.031	-0.070	0.164	0.980
BbF	0.060	0.267	0.881	0.205
BkF	0.050	-0.021	0.967	0.110
BaP	0.143	0.586	0.680	0.020
DbA	-0.025	0.789	0.081	0.133
BghiP	0.044	0.802	0.159	-0.045
Variance%	34.523	22.553	16.201	12.186
Cumulative variance %	34.523	57.076	73.278	85.464

2.3 PAHs 的生态风险评价

为了评估菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 的潜在风险, 将所测得的 16 种 PAHs 含量与荷兰土壤 16 种 PAHs 标准值进行了比较^[34], 结果见表 2。参照荷兰土壤质量标准, 16 种 PAHs 均在标准值安全范围内。虽然 Acy、Ace、Fle、Pyr、BbF 和 DbA 没有规定最低安全值, 而且这 6 种 PAHs 只在部分站点中检出且含量较低, 但由于南极生态系统较为脆弱、生物多样性较少, 微量污染元素的存在可能会对极端的南极环境产生一定的副作用和毒性, 所以不能忽视南极环境潜在的生态风险。菲尔德斯半岛土壤中 16 种 PAHs 含量与中国土壤环境质量第一标准限值进行比较(表 2), 结

果表明 16 种 PAHs 均处于第一标准限值内。Maliszewska-Kordybach^[35]根据土壤中 PAHs 的污染程度划分了 4 个等级, $\sum$ PAHs 含量小于 $200\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 属于无污染; $\sum$ PAHs 含量介于 $200\sim600\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 属于轻度污染; $\sum$ PAHs 含量介于 $600\sim1\,000\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 属于重度污染; $\sum$ PAHs 含量大于 $1\,000\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 属于重度污染。从图 2 可知, 菲尔德斯半岛 $\sum_{16}$ PAHs 含量小于 $200\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 即无污染状态。综合比较以上 3 种土壤质量标准结果表明, 研究区域处于低生态风险水平, 但是日益频繁的科考、旅游、海上运输等人为活动在南极地区产生了一定的污染, 且 PAHs 在土壤中分解缓慢, 具有长期滞留性, 其潜在的环境毒性绝不能被忽视。

3 结论

1. 南极菲尔德斯半岛表层土壤中 16 种 PAHs 均有检出, $\sum_{16}$ PAHs 含量范围为 $2.37\sim27.31\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量为 $9.82\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。最高值出现在长城站样品, 俄罗斯站、长城站、机场东等有人类活动的站点相比其他站点 PAHs 含量较高。除企鹅岛站点的样品中所检测出的中环 PAHs、高环 PAHs 占比与低环相当外, 其他站点的样品均以低环 PAHs 为主。
 2. 利用 PCA 对菲尔德斯半岛表层土壤中 PAHs 进行源解析, 与比值法判断结果基本一致, 主要来源于石油源和石油燃烧源的混合源, 且一定程度上受到大气远距离传输的影响。
 3. 综合 3 种土壤质量标准结果表明, 菲尔德斯半岛地区处于低生态风险水平, 但由于南极生态环境的特殊性, 且不同程度地检测出 16 种 PAHs, 潜在的生态风险仍不能被忽视。
- 致谢 感谢第三十五次南极科考, 感谢南极长城极地生态国家野外观测研究站的支持。

参考文献

1 高凡, 贾建业, 杨木壮. 难降解有机污染物在土壤中的迁移转化[J]. 热带地理, 2004, 24(4): 337-340.

2 马新东, 姚子伟, 王震, 等. 南极菲尔德斯半岛多环境介质中多环芳烃分布特征及环境行为研究[J]. 极地研究, 2014, 26(3): 285-291.

3 MA Y G, LEI Y D, XIAO H, et al. Critical review and recommended values for the physical-chemical property data of 15 polycyclic aromatic hydrocarbons at 25 °C[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2010, 55(2): 819-825.

4 薛斌. 南极普里兹湾和南极半岛附近海域沉积物中典型持久性污染物的残留特征和来源解析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.

- 5 汪祖丞, 刘敏, 杨毅, 等. 上海城区多环芳烃的多介质归趋模拟研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 984-990.
- 6 WILD S R, JONES K C. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: A preliminary source inventory and budget[J]. Environmental Pollution, 1995, 88(1): 91-108.
- 7 CABRERIZO A, DACHS J, BARCELÓ D, et al. Influence of organic matter content and human activities on the occurrence of organic pollutants in Antarctic soils, lichens, grass, and mosses[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(3): 1396-1405.
- 8 WANG Z, NA G S, MA X D, et al. Occurrence and gas/particle partitioning of PAHs in the atmosphere from the North Pacific to the Arctic Ocean[J]. Atmospheric Environment, 2013, 77: 640-646.
- 9 何依芳, 黄清辉, 陈玲, 等. 南极菲尔德斯半岛近岸海洋生物体有机锡污染状况[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1256-1262.
- 10 TANIGUCHI S, MONTONE R C, BÍCEGO M C, et al. Chlorinated pesticides, polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in the fat tissue of seabirds from King George Island, Antarctica[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(1): 129-133.
- 11 NA G S, LIU C Y, WANG Z, et al. Distribution and characteristic of PAHs in snow of Fildes Peninsula[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(9): 1445-1451.
- 12 HAN B, LIU A, WANG S, et al. Concentration level, distribution model, source analysis, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Laizhou bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 150: 110690.
- 13 WANG Z, MA X D, NA G S, et al. Correlations between physicochemical properties of PAHs and their distribution in soil, moss and reindeer dung at Ny-Ålesund of the Arctic[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(11): 3132-3136.
- 14 王小萍, 姚檀栋, 丛志远, 等. 珠穆朗玛峰地区土壤和植被中多环芳烃的含量及海拔梯度分布[J]. 科学通报, 2006, 51(21): 2517-2525.
- 15 王意泽. 根际土壤中 PAHs 结合态残留的时空分布及植物可利用性[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- 16 林秀梅, 刘文新, 陈江麟, 等. 渤海表层沉积物中多环芳烃的分布与生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2005, 25(1): 70-75.
- 17 刘娜. 人类活动影响下江苏省典型海岸带多环芳烃分布特征研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2017.
- 18 ZHU Y D, YANG Y Y, LIU M X, et al. Concentration, distribution, source, and risk assessment of PAHs and heavy metals in surface water from the Three Gorges reservoir, China[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2015, 21(6): 1593-1607.
- 19 CHRISTENSEN E R, BZDUSEK P A. PAHs in sediments of the Black River and the Ashtabula River, Ohio: Source apportionment by factor analysis[J]. Water Research, 2005, 39(4): 511-524.
- 20 郭芬, 张远. 水环境中 PAHs 源解析研究方法比较[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(5): 11-16.
- 21 XUE R, CHEN L, LU Z B, et al. Spatial distribution and source apportionment of PAHs in marine surface sediments of Prydz Bay, East Antarctica[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 528-536.
- 22 NIEHUS N C, BROCKMEYER B, WITT G. Bioavailability and distribution of PAHs and PCBs in the sediment pore water of the German Bight and Wadden Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 138: 421-427.
- 23 DUDHAGARA D R, RAJPARA R K, BHATT J K, et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of PAHs in historically contaminated surface sediments at Bhavnagar Coast, Gujarat, India[J]. Environmental Pollution, 2016, 213: 338-346.
- 24 BUDZINSKI H, JONES I, BELLOCQ J, et al. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary[J]. Marine Chemistry, 1997, 58(1/2): 85-97.
- 25 MITRA S, CORSOLINI S, POZO K, et al. Characterization, source identification and risk associated with polyaromatic and chlorinated organic contaminants (PAHs, PCBs, PCBzs and OCPs) in the surface sediments of Hooghly estuary, India[J]. Chemosphere, 2019, 221: 154-165.
- 26 鲁根涛, 王雪雯, 张士超, 等. 黄河全流域岸边表层土壤中 PAHs 的分布、来源及风险评估[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 2078-2085.
- 27 陈锋, 孟凡生, 王业耀, 等. 基于主成分分析-多元线性回归的松花江水体中多环芳烃源解析[J]. 中国环境监测, 2016, 32(4): 49-53.
- 28 YE B X, ZHANG Z H, MAO T. Pollution sources identification of polycyclic aromatic hydrocarbons of soils in Tianjin area, China[J]. Chemosphere, 2006, 64(4): 525-534.
- 29 HARRISON R M, SMITH D J T, LUHANA L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U.K[J]. Environmental Science and Technology, 1996, 30(3): 825-832.
- 30 SIMCIK M F, EISENREICH S J, LIOY P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of

- Chicago and Lake Michigan[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(30): 5071-5079.
- 31 PENG C, CHEN W P, LIAO X L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of Beijing: Status, sources, distribution and potential risk[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(3): 802-808.
- 32 LEE B K, DONG T T T. Toxicity and source assignment of polycyclic aromatic hydrocarbons in road dust from urban residential and industrial areas in a typical industrial city in Korea[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2011, 13(1): 34-42.
- 33 KAMAL A, MALIK R N, MARTELLINI T, et al. Cancer risk evaluation of brick kiln workers exposed to dust bound PAHs in Punjab Province (Pakistan)[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 562-570.
- 34 MALISZEWSKA-KORDYBACH B, SMREZAK B, KLIMKOWICZ-PAWLAS A, et al. Monitoring of the total content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in arable soils in Poland[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(8): 1284-1291.
- 35 MALISZEWSKA-KORDYBACH B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: Preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11(1/2): 121-127.

ANALYSIS OF DISTRIBUTION, SOURCES AND ECOLOGICAL RISKS OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN TOPSOIL OF FILDES PENINSULA

Liu Ang¹, Gong Jinwen¹, Han Bin^{2,3}, Zhao Jun¹, Zheng Li^{1,2,3}

(¹ College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

² Key Laboratory of Marine Eco-Environmental Science and Technology, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

³ Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract

As a result of global distillation or the grasshopper effect, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) can shift from low to high latitudes, and they have been detected in the polar regions. In this study, gas chromatography-mass spectrometry was used to analyze 16 PAHs in the top soil of 20 sites on Fildes Peninsula in Antarctica. At the 20 sites, total concentration of the 16 PAHs ranged from 2.37 to 27.31 ng·g⁻¹ (dw), with an average of 9.82 ng·g⁻¹ (dw). Polycyclic aromatic hydrocarbons with two and three rings were dominant, and have been transported from petroleum and petroleum combustion sources over long distances to the study area through the atmosphere. The ecological risk assessment shows that while the study area is at low risk, attention needs to be paid to the potential environmental toxicity. Studies and assessments of PAH distribution, sources, and ecological risks are important and can provide the scientific basis for pollution control and environmental protection for Fildes Peninsula and other areas of Antarctica.

Keywords Fildes Peninsula, polycyclic aromatic hydrocarbons, source analysis, risk assessment