

## 机场除冰废液的生态环境影响与控制措施研究

赵晓辉<sup>1</sup>, 张盼伟<sup>1</sup>, 杨嘉<sup>2</sup>, 万晓红<sup>1</sup>, 张海燕<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038; 2. 北京首都国际机场股份有限公司飞行区管理部, 北京 100621; 3. 西安高科理化技术有限责任公司, 西安 710065)

**摘要:** 为系统解决除冰废液对机场生态环境造成的影响, 有效应对除冰废液污染对机场绿色运行管理带来的关键挑战, 本文系统分析了国内外机场除冰废液的成分、使用规模及排放状况, 阐明了除冰废液对机场及周边水体造成的复杂生态环境影响, 如有机负荷增高、溶解氧降低、盐度上升以及土壤盐分积累和理化性质改变等, 尤其是其添加剂中持久性有机污染物造成的环境污染问题。据此本文提出了综合管理策略, 强化除冰废液的有效收集、处理和回收利用; 研发高效处理技术, 进一步探索经济可行的回收利用途径, 为机场除冰废液污染防控和可持续发展提供科学支撑。

**关键词:** 机场生态环境; 除冰废液; 废液污染; 土壤生态; 水环境

**中图分类号:** V351.11; X738.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)01-0068-05

### Research on the ecological and environmental impacts and control measures of spent airport deicing fluids

ZHAO Xiaohui<sup>1</sup>, ZHANG Panwei<sup>1</sup>, YANG Jia<sup>2</sup>, WAN Xiaohong<sup>1</sup>, ZHANG Haiyan<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Airfield Management Department, Beijing Capital International Airport Co., Ltd., Beijing 100621, China; 3. Xi'an Gaoke Physical and Chemical Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To systematically address the impacts of spent deicing fluids on the ecological environment of airports and effectively respond to the core challenges posed by pollution from spent deicing fluids to green operational management at airports, this paper systematically analyzes the composition, application scale, and discharge characteristics of spent deicing fluids at airports both domestically and internationally. It elucidates the complex ecological and environmental impacts of spent deicing fluids on airports and surrounding water bodies, such as increased organic loading, decreased dissolved oxygen, elevated salinity, as well as soil salt accumulation and changes in physicochemical properties, especially the environmental pollution caused by persistent organic pollutants in their additives. Based on the above analysis, the paper proposes comprehensive management strategies to strengthen effective collection, treatment, and recycling of spent airport deicing fluids; it also proposes developing efficient treatment technologies, further exploring economically feasible recycling routes, and providing scientific support for pollution prevention and control of spent deicing fluids and for sustainable development at airports.

**Key words:** airport ecological environment; spent deicing fluids; fluid pollution; soil ecology; aquatic environment

中国拥有全球第二大航空运输系统<sup>[1]</sup>。为确保飞行安全, 国际民航组织明确要求机场和航空公司对机场道面、飞机关键表面附着的冰、雪或霜冻等进行清除作业。飞机除冰液(ADF, aircraft deicing fluid)、飞机防冰液(AAF, aircraft antiicing fluid)及道面除冰液(PDF,

pavement deicing fluid)作为有效除去冰、霜、积雪的化学品, 在机场得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。尽管高效的除/防冰液在保障航空安全方面成效显著, 但其在冬季的大规模、高频率使用也引发了日益凸显的环境问题。

国内外学者在除冰废液的生态环境影响方面开

收稿日期: 2025-10-11; 修回日期: 2025-11-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2602000); 流域水循环与水安全全国重点实验室开放研究基金资助(SKL2025TDGG01)

作者简介: 赵晓辉(1987—), 女, 河南信阳人, 正高级工程师, 博士, 研究方向为水环境监测与评价研究。

展了广泛研究。一方面,有研究关注了除冰废液在周边环境中的分布与扩散特征,如 Novak 等<sup>[9]</sup>发现,在加拿大某机场,超过 60%的 ADF 流失到周边土地;奥斯陆国际机场每年降雨量达 100 000 m<sup>3</sup>,其中丙二醇(PG, propylene glycol)浓度范围处于 20~1 600 mg/L,且大部分是在融雪期产生的。另一方面,也有研究探索总结了除冰废液对水质、水生态的影响与污染控制策略,魏芳等<sup>[10]</sup>指出大量除冰废液如果直接进入机场周边环境中,将大幅度提高周围水体的化学需氧量(COD, chemical oxygen demand),可能对生态环境造成严重污染和破坏。但中国大多数机场对飞机除冰废液的处理仍处于起步阶段,相关研究需要进一步加强。

目前,对于除冰废液在环境中的迁移转化规律及长期积累对生态系统的潜在影响研究不够深入,在探索高效可行的除冰废液收集处理技术与污染控制策略方面,缺乏系统和针对性的研究。因此,开展机场除冰废液的环境影响和污染特征研究,科学评估其对机场周围水体和土壤生态环境的潜在影响,并探索高效可行的除冰废液收集处理技术与污染控制策略,对于保障航空安全与生态环境可持续性发展至关重要。

## 1 国内外机场除/防冰液使用及污染现状

### 1.1 机场除/防冰液的使用状况

截至 2024 年底,中国共有运输机场(不含港澳台地区)263 个,通用机场达到 475 个<sup>[9]</sup>,除/防冰液需求量巨大。飞机除/防冰液使用量受天气条件、航空器构型及作业规程等多重因素影响。根据美国环境保护署(EPA, Environmental Protection Agency)2012 年对美国各地机场的调查显示,I 型 ADF 的使用量能达到 193 000 gal/a(1 gal ≈ 3.79 L)<sup>[9]</sup>。据估算,一架 B737-800 型飞机的一次除霜过程大约需要 100 L 除/防冰液,一座中/大型国际机场的飞机除/防冰液年用量在 500~600 t 之间,东北和新疆地区能达到近 1 000 t。

### 1.2 机场除/防冰液的主要成分及特点

#### 1.2.1 飞机除/防冰液

国际民航业遵循汽车工程师协会(SAE, Society of Automotive Engineers)制定的 AMS1424/1428 等技术规范,将 ADF/AAF 按流变学特性划分为 I 型牛顿流体与 II/III/IV 型非牛顿流体两大体系。I 型牛顿流体的热力学特性导致其防冰时效通常较短,主要用于除冰,也用于防冰;II/III/IV 型非牛顿流体则通过一些高分子增稠剂改变流体性质,显著提升防冰保持时间<sup>[11]</sup>。

ADF 通常以 50%~80%乙二醇(EG, ethylene glycol)或 PG 为冰点抑制剂主体成分。据报道,其添加剂浓度范围通常在 1%~2%(v/v)到 10%~20%(v/v),用于改善其附着力、腐蚀性、易燃性等性能<sup>[6]</sup>。这些添加剂种类丰富,功能各异:烷基酚/烷基酚聚氧乙烯醚类表面活性剂的主要作用是降低 ADF 的表面张力;有机膦酸或苯并三氮唑及其衍生物类缓蚀剂可有效减缓腐蚀过程。此外,添加剂还包括高分子量、非线性聚合物类的增稠剂、偶氮染料、防腐添加剂和润湿剂等<sup>[7]</sup>。

#### 1.2.2 道面除冰液

由于氯盐及尿素等化合物对金属和水泥材料的腐蚀性及其环保缺陷和成本高昂等问题,为提升机场的环境友好性,PDF 普遍采用醋酸盐(CMA, calcium magnesium acetate)替代早期氯盐、尿素类产品<sup>[8]</sup>。美国等发达国家机场最早使用 PDF 的主要成分是醋酸钙镁。目前,国内外机场 PDF 的主要成分以有机酸盐为主,常见的如醋酸钾、醋酸钠、醋酸钙镁及甲酸钠等<sup>[9]</sup>。

PDF 一般包括 60%~70%的离子液体、30%~40%的盐和其他物料。其中:盐类包括有机盐或无机盐,如乙酸钠、乙酸钾、乙酸钙、碳酸钾、碳酸钠和碳酸钙等;其他物料包括多种功能添加剂,如水分散性层状硅酸盐或气相二氧化硅聚羧酸衍生物类无机增稠剂,以碱金属磷酸盐、烷基磷酸盐、苯并咪唑、苯三唑、甲基苯三唑等构成的缓蚀剂等<sup>[10]</sup>。

### 1.3 机场除冰废液的污染特征

EPA 在 2004—2006 年期间,对明尼阿波利斯-圣保罗国际机场(MSP)、底特律大都会国际机场(DTW)、丹佛国际机场(DEN)、匹兹堡国际机场(PIT)及奥尔巴尼国际机场(ALB)开展了关于除冰废液的系统性调查研究<sup>[9]</sup>,结果表明,融雪的除冰废液中存在 EG、三唑类化合物和烷基酚类化合物等,明确了除冰废液中需要关注的污染物种类,具体包括以下 3 类:①常规水质参数,包括生化需氧量(BOD, bio-chemical oxygen demand)、COD、氮素、碱度、硬度、总溶解性固体、总悬浮固体、油和油脂等;②金属类污染物,包括铝、镉、硼、镉等;③有机污染物,包括 EG、PG、烷基酚类表面活性剂、苯并三氮唑及其甲基化衍生物等。

## 2 国内外机场除冰废液对生态环境的影响

国内外部分机场开展了除冰废液的定点收集,并加强了跑道附近土壤中除冰废液的降解来防止土壤

及地下水污染。但由于作业特性和场地限制,散落在地面的飞机除/防冰液,以及直接喷洒在跑道、滑行道和车行道的防冰液可能会以地面径流的方式进入机场周边乃至更广阔区域的水体与土壤系统<sup>[1]</sup>。

## 2.1 对机场周边土壤生态环境的影响

### 2.1.1 对土壤结构的破坏

机场除冰废液对周边土壤的影响主要表现为盐度升高引发的土壤结构改变。除冰废液中的盐分通过扩散转移随融冰雪水径流直接渗入土壤,使土壤盐度显著上升并积累,高浓度钠离子( $\text{Na}^+$ )能分散土壤中的有机颗粒和无机颗粒,导致土壤的渗透能力下降,造成土壤板结。Liu<sup>[12]</sup>研究了加拿大萨斯喀彻温省高速公路沿线除冰废液对周边环境盐度的影响,发现粉质黏土对 $\text{Na}^+$ 表现出更强的吸附能力,过量的 $\text{Na}^+$ 可能导致土壤渗透性变差。

### 2.1.2 对土壤化学性质的改变

Raspati 等<sup>[9]</sup>发现,CMA 类除冰废液会提高土壤的 pH 值,促进碳酸盐沉淀并降低重金属的溶解度;同时,CMA 中 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 也可能通过离子交换活化土壤中残留的重金属,增加其生物可利用性,导致重金属扩散风险。孙婷婷<sup>[13]</sup>研究发现,除冰液的使用导致土壤中的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 等水溶性盐离子含量显著升高。张淑茹等<sup>[14]</sup>研究认为,在施加融雪剂的土壤中,除 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 显著增加外,微量元素 Co 和 V 含量也明显升高。

### 2.1.3 对土壤微生物群落组成及功能的影响

除冰废液对土壤微生物生态系统的影响主要表现为对土壤微生物群落的组成结构及其代谢活性的改变<sup>[13]</sup>。除冰废液中所含的盐分和有机物成分是改变土壤微生物群落组成与活性的重要驱动因子,其中,高盐度对许多土壤微生物的生长与代谢具有抑制作用,其通过改变微生物细胞内的渗透压平衡,干扰微生物正常的生理生化功能;而有机物则可能为特定分解菌提供适宜的营养条件,促进其生长。

### 2.1.4 对土壤植物生长及代谢的影响

从植物生理生态角度分析,高盐度环境会通过渗透胁迫机制对植物产生多方面的不利影响。Ju<sup>[15]</sup>研究发现,由于渗透胁迫作用,高盐度会影响植物根系对水分和养分的吸收,造成植物盐害作用,从而抑制植物生长,引发多重植物胁迫效应,甚至导致植物死亡。从细胞层面,植物体内某些离子含量的升高可能会改变细胞质和细胞膜的通透性,破坏植物细胞内的离子

平衡和渗透调节机制,干扰植物代谢活动。例如,过多盐分的积累会抑制叶绿素和关键酶的合成,干扰植物光合作用和呼吸作用等核心生理过程<sup>[16]</sup>。

## 2.2 对机场周边水体生态环境的影响

### 2.2.1 对水体水质的影响

除冰废液进入水体后,表现为高 BOD 和高 COD 特征,导致水体溶解氧(DO, dissolved oxygen)水平下降,进而引发水体缺氧<sup>[17]</sup>。2008 年针对上海两个机场使用除冰液的应急监测数据显示,由于大量使用了以 PG 为主要成分的除冰液,上海虹桥国际机场附近水体 COD 浓度高达 1 258 mg/L<sup>[18]</sup>。此外,Koryak 等<sup>[19]</sup>研究也发现,匹兹堡国际机场河流上游水体 BOD 值为 2.4 mg/L,而河流下游水体 BOD 值升高至 15.2~34.4 mg/L,在部分区域内,水体 BOD 值可高达 942 mg/L。

### 2.2.2 水体富营养化与生物异常增殖

机场除冰废液经地表径流进入水体后,可促进藻类过度繁殖,引发水体富营养化等问题。Exton 等<sup>[6]</sup>研究发现,冬季机场除/防冰液使用后,其排放水域常出现异常增殖的不良生物膜(URBs, undesirable river bio-films),即“污水真菌”(sewage fungus)。URBs 往往作为水质不佳的主要生物指标,这种微生物聚集体以丝状细菌 *Sphaerotilus natans* 为优势种群,其形成与除/防冰液中冰点抑制剂(如醋酸钠、EG、PG)提供的适宜碳源和生长条件密切相关。

### 2.2.3 添加剂的持久性污染

Cancilla 等<sup>[20]</sup>在北美机场的地下水中发现甲苯三唑的浓度为环境水平的 25 倍。Corsi 等<sup>[7]</sup>从 9 种飞机除/防冰液中筛选出壬基酚聚氧乙烯醚(NPEO, nonyl-phenol ethoxylates)和辛基酚聚氧乙烯醚(OPEO, octyl-phenol ethoxylates)等多种表面活性剂。在米切尔将军国际机场径流中检测出的 NPEO 最高浓度达到 1 190  $\mu\text{g/L}$ ,机场附近河流中最高浓度为 77  $\mu\text{g/L}$ ,是机场上游河流浓度的 15 倍。

### 2.2.4 复合生物毒性效应

除冰废液中的添加剂在环境中的含量比较低,但是往往具有难降解性、持久性,甚至具有内分泌干扰性和水生生物毒性等<sup>[21]</sup>。Mohiley 等<sup>[22]</sup>实验证实 ADF/AAF 对浮萍的半数效应浓度(EC<sub>50</sub>, median effect concentration)低至 0.029~0.074 mL/L,对发光细菌的 EC<sub>50</sub> 为 12.89~47.00 mL/L。Sulej-Suchomska 等<sup>[23]</sup>利用 Microtox、Thamnotoxkit 等生物毒性测试法对 2011—2013 年所调查机场径流的生物毒性进行了分析,发现所调查机场中有 16.8%的机场具有极高的急性毒性水平。

### 3 机场除冰废液的控制措施

目前,中国对除冰废液的系统化治理仍处于探索阶段,主要包括除冰废液的收集、处理和回收利用等环节,以实现除冰废液的无害化处理和有效资源利用。

#### 3.1 机场除冰废液收集和储存

目前机场除冰废液收集方式及设备主要有除冰废液存储系统,除冰坪、停机坪和登机门等区域的除冰废液集中收集系统,雨污分流式挡板系统和除冰废液回收车等。

机场除冰废液存储系统主要位于机场周围的开放水域或蓄水池,用于保留/存储机场和飞机除冰废液,常见的存储设施包括滞留池、平衡池、蓄留池及储罐或分液罐等;除冰废液集中收集系统通过在除冰坪、停机坪和登机门等区域设置专用设施,利用安装土工格、栅沟渠或集液槽截留废液;雨污分流式挡板系统采用双管道独立排放设计,将高浓度除冰废液与普通雨水分流后进行废液处理流程<sup>[24]</sup>;除冰废液回收车主要配备高效真空抽吸装置与机载储罐,直接回收地面残留除冰废液,并通过滤网进行固体杂质预处理,如美国 GLOBAL 公司生产的全系列飞机除冰车。

#### 3.2 除冰废液的处理与回收利用

据美国 EPA 估计,已开展除冰作业的美国机场中大约有 46% 的机场具有除冰废液处理或回收系统,采用的处理和回收技术包括均质化、油水分离、砂或其他介质过滤、膜分离和生物处理等<sup>[9]</sup>。

##### 3.2.1 除冰废液处理

###### 1) 污水处理厂

目前,针对除冰废液的污水处理技术主要包括反渗透法、厌氧消化法、活性污泥法、人工曝气技术等。其中,活性污泥法展现出较强的抗冲击负荷能力,即使在有机负荷率较高的条件下,仍能保持较高的污染物去除效率。以美国辛辛那提国际机场为例,该机场采用基于活性污泥法的处理技术对除冰废液进行处理,COD 去除效率可达 99%。

###### 2) 湿地系统

湿地系统是一种生态式的污水处理技术,其主要是通过植物—填料—微生物的生物、物理和化学作用去除水中的污染物,具有运行费用低、维护管理简单、对周边环境影响小、可以分散化与小型化建设的特点。如布法罗尼亚加拉国际机场采用湿地处理系统处理除冰废液,在 2010—2011 年除冰季期间,BOD 浓度超

过 20 000 kg/d,系统平均运行效率达到 98.3%<sup>[25]</sup>。

##### 3.2.2 除冰废液回收利用

当前,国际上普遍推行的除冰废液回收利用策略以资源循环利用为核心,综合运用醇类回收技术与再利用技术形成协同处理体系。

###### 1) 醇的分离回收

除冰废液成分复杂,醇的回收技术要求高、耗能高,成为制约除冰废液回收利用技术发展的主要因素。Lehto 等<sup>[26]</sup>开发的基于膜的微滤和纳滤预处理、反渗透预浓缩及膜蒸馏工艺,可以高效去除废液中 95% 的固体和胶体杂质,有效浓缩 EG 至 60%。北京大兴国际机场应用的除冰废液处理及再生系统设施,采用杂质分离、高效醇水浓缩分离、电解质控制、水耗氧量控制及除冰液再生等关键技术,完成了对除冰废液的处理及再生,实现了资源的循环利用<sup>[27]</sup>。

###### 2) 碳源替代物

目前,已有研究将除冰废液作为碳源替代物应用于市政废水处理工艺中。Zhang 等<sup>[28]</sup>使用富含脂肪酸的餐厨垃圾发酵罐出水作为反硝化的补充碳源,发现与单独使用甲醇相比,其反硝化动力学速率显著提高。Sayin 等<sup>[29]</sup>实验发现,在温度低至 13 ℃ 条件下,除冰废液作为碳源的脱氮速率高于商业碳源 MicroC2000A,其还通过动态建模研究发现,若能收集纽约市拉瓜迪亚机场 40% 的除冰废液作为污水处理厂碳源,可减少约 30% 的商业外源碳源使用。

## 4 结语

大量使用机场除/防冰液是保障机场冬季安全运行的关键举措,然而,除冰废液中的高溶性组分可经降雨径流迁移至周边水体。该废液成分复杂,在不同机场排放的成分浓度差异明显,其中,EG/PG 及甲酸盐/乙酸盐等冰点降低剂作为主要活性成分,是水环境有机污染的主要来源。此外,除/防冰液含有多种专有添加剂,尽管添加剂在环境中的含量很低,但其往往具有长期残留性、生物累积性和生物毒性,对生态系统构成潜在风险。因此,开展除冰废液中污染物的环境行为和生态效应的研究具有重要意义。

目前,中国对除冰废液的系统化治理仍处于探索阶段,由于各机场在环境条件、气象特征、排水基础设施条件和除冰作业方面都具有独特特征,除冰废液处理技术研发与应用也必须结合各机场的实际运作特点进行优化。同时,机场还应从经济性、能源利用效率

及低碳环保等多维度出发,有效收集、处理并回收利用除冰废液以减少废液排放、促进资源再利用。未来,应积极推动环境友好型除冰剂的研发与推广,探索替代性除冰技术的创新应用,为机场除/防冰液管理提供有力支撑。

### 参考文献:

- [1] 魏芳, 庞宗宇, 赵强. Fenton 氧化法在飞机除冰废水处理中的研究进展[J]. 自然科学, 2022, 10(5): 728-741.
- [2] FREEMAN A I, SURRIDGE B W J, MATTHEWS M, et al. Understanding and managing de-icer contamination of airport surface waters: a synthesis and future perspectives[J]. Environmental Technology & Innovation, 2015, 3: 46-62.
- [3] NOVAK L J, HOLTZE K, KENT R A, et al. Acute toxicity of storm water associated with de-icing/anti-icing activities at Canadian airports[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, 19(7): 1846-1855.
- [4] 中国民用航空局. 2024 年民航行业发展统计公报[R]. 北京: 中国民用航空局, 2025.
- [5] US Environmental Protection Agency. Technical development document for the final effluent limitations guidelines and new source performance standards for the airport deicing category[R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2012.
- [6] EXTON B, HASSARD F, MEDINA-VAYA A, et al. Impact of carbon sources in airport de-icing compounds on the growth of *Sphaerotilus natans*[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1320487.
- [7] CORSI S R, ZITOMER D H, FIELD J A, et al. Nonylphenol ethoxylates and other additives in aircraft deicers, antiicers, and waters receiving airport runoff[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(18): 4031-4037.
- [8] CORSI S R, GEIS S W, BOWMAN G, et al. Aquatic toxicity of airfield-pavement deicer materials and implications for airport runoff[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(1): 40-46.
- [9] RASPATI G S, LINDSETH H K H, MUTHANNA T M, et al. Potential of biofilters for treatment of de-icing chemicals[J]. Water, 2018, 10(5): 620.
- [10] 周洪, 梅拥军, 王航, 等. 增稠型道面除冰防冰液及其制备方法: CN, 102757763A [P]. 2014-07-09.
- [11] RAMAKRISHNA D M, VIRARAGHAVAN T. Environmental impact of chemical deicers: a review[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 166(1): 49-63.
- [12] LIU G Q. Salinity analysis and trend detection for the ambient environment of a highway section in Saskatchewan subjected to the use of deicing salt[D]. Regina, Saskatchewan, Canada: The University of Regina, 2006.
- [13] 孙婷婷. 化学融雪剂对高速公路路旁土壤中水溶性盐离子含量及氮素转化的影响[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013.
- [14] 张淑茹, 赵淑华, 沈宇翔, 等. 氯盐类融雪剂对土壤环境影响的初步调查[J]. 中国卫生工程学, 2009, 8(3): 150-151.
- [15] JU J H. Salt tolerance of phragmites australis and effect of combing it with topsoil filters on biofiltration of CaCl<sub>2</sub> contaminated soil[J]. Sustainability, 2024, 16(19): 8522.
- [16] 严霞, 李法云, 刘桐武, 等. 化学融雪剂对生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2209-2214.
- [17] 夏祖西, 彭华乔, 苏正良, 等. 机场除冰液对环境的影响[J]. 中国民用航空, 2008(9): 51-52.
- [18] 胡雄星, 韩中豪. 机场使用除冰液的应急监测[J]. 中国环境监测, 2012, 28(1): 110-112.
- [19] KORYAK, STAFFORD, REILLY, et al. The impact of airport deicing runoff on water quality and aquatic life in a Pennsylvania stream[J]. Journal of Freshwater Ecology, 1998, 13(3): 287-298.
- [20] CANCELLA D A, MARTINEZ J, VAN AGGELEN G C. Detection of aircraft deicing/antiicing fluid additives in a perched water monitoring well at an international airport[J]. Environmental Science & Technology, 1998, 32(23): 3834-3835.
- [21] CORSI S R, GEIS S W, LOYO-ROSALES J E, et al. Characterization of aircraft deicer and anti-icer components and toxicity in airport snowbanks and snowmelt runoff[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(10): 3195-3202.
- [22] MOHILEY A, FRANZARING J, CALVO O C, et al. Potential toxic effects of aircraft de-icers and wastewater samples containing these compounds[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(17): 13094-13101.
- [23] SULEJ-SUCHOMSKA A M, PRZYBYŁOWSKI P, POLKOWSKA Ż. Potential toxic effects of airport runoff water samples on the environment[J]. Sustainability, 2021, 13(13): 7490.
- [24] 曾萍, 彭华乔, 吴海涛, 等. 飞机除冰废水处理研究进展[J]. 四川环境, 2016, 35(4): 123-127.
- [25] WALLACE S, LINER M. Design and performance of the wetland treatment system at the Buffalo Niagara International Airport[J]. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, 2011, 38:36-42.
- [26] LEHTO J, HEIKKINEN J, KYLLÖNEN H, et al. Purification of spent deicing fluid by membrane techniques[J]. Water Science and Technology, 2021, 84(8): 2014-2027.
- [27] 路海锋, 崔伟. 北京大兴国际机场除冰废水处理及再生系统设计应用[J]. 给水排水, 2022, 58(S2): 273-276.
- [28] ZHANG H W, JIANG J G, LI M L, et al. Biological nitrate removal using a food waste-derived carbon source in synthetic wastewater and real sewage[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 166: 407-413.
- [29] SAYIN A, SOLEIMANIFAR M, ROSENTHAL A, et al. Evaluation of aircraft deicing fluid as an external carbon source for denitrification[J]. Science of the Total Environment, 2024, 925: 171795.

(责任编辑: 明月)