

李悦, 管运涛, 潘伟杰. 深圳市供水系统中标准外污染物风险筛查[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 61-71.
 LI Y, GUAN Y T, PAN W J. Risk screening of non-standard pollutants in water supply system in Shenzhen[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(11): 61-71.

深圳市供水系统中标准外污染物风险筛查

李悦^{1,*}, 管运涛², 潘伟杰¹

(1. 深圳市水务<集团>有限公司水质监测中心, 广东深圳 518031; 2. 清华大学深圳国际研究生院, 广东深圳 518055)

摘要 【目的】鉴于深圳市供水系统面临传统污染与新污染物的双重风险, 此文结合当地化学产品生产使用产业链特征, 针对《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 未覆盖的污染物开展风险筛查, 以强化饮用水安全管控。【方法】研究通过明确水源污染特征、开发风险评价方法、获取关键参数三步法来推进。首先, 从 13 个国家/地区及国际组织的水质标准、多国优先污染物清单、美国国家环境保护局毒性数据库及高影响力文献中, 筛选出 1 870 项待选污染物。其次, 再经毒性数据与标准限值筛选, 得到 542 项可评估污染物, 并建立“标准覆盖-管控情况-综合项”评分体系。最终识别出 108 项标准外污染物。【结果】108 项污染物中仅 1,4-二氧六环为中风险, 其余均为低风险, 且均具备参考标准或毒性数据。基于此, 研究推导了污染物参考限值, 并按风险等级提出监测频次建议。【结论】本文提升了城市水质监管技术水平, 所建方法兼具科学性与可复制性, 为区域污染物监管制度及公共健康政策制定提供了科学依据。

关键词 饮用水水质标准 供水系统 标准外污染物 污染物筛查 污染物限值

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)11-0061-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.11.007

Risk Screening of Non-Standard Pollutants in Water Supply System in Shenzhen

LI Yue^{1,*}, GUAN Yuntao², PAN Weijie¹

(1. Water Quality Monitoring Center, Shenzhen Water Affairs <Group> Co., Ltd., Shenzhen 518031, China;

2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract [Objective] Given the dual risks of traditional pollution and emerging pollutants in Shenzhen's water supply system, this paper conducts risk screening for pollutants not covered by the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022), combining the characteristics of the local chemical production and usage industrial chain to strengthen drinking water safety management. [Methods] This paper proceeded through three steps, including clarifying the characteristics of water source pollution, developing risk assessment methods, and obtaining key parameters. Firstly, 1 870 candidate pollutants were screened from water quality standards of 13 countries/regions and international organizations, priority pollutant lists of multiple countries, Environmental Protection Agency's toxicity database, and high-impact literatures. Then, 542 assessable pollutants were obtained through screening based on toxicity data and standard limits, and a "standard coverage-management condition-comprehensive items" scoring system was established, ultimately identifying 108 non-standard pollutants. [Results] Among the 108 pollutants, only 1,4-dioxane was medium-risk, and the rest were low-risk, all with reference standards or toxicity data. Based on this, the paper derived reference limits for pollutants and proposed monitoring frequency suggestions by risk level. [Conclusion] This paper improves the technical level of urban water quality supervision, and the established method is both scientific and replicable, providing a scientific basis for the formulation of regional pollutant supervision systems and public health policies.

Keywords quality standard of drinking water water supply system non-standard pollutants pollutant screening pollutant limits

[收稿日期] 2024-08-02

[基金项目] 佛山市顺德区核心技术攻关项目(2230218004273)

[通信作者] 李悦(1983—), 女, 高级工程师, 主要从事水处理新技术、新工艺的研发、成果转化与推广等工作, E-mail: yue-li22@mail.tsinghua.edu.cn。

人类对饮用水安全性的需求促进了全球范围内饮用水水质标准的建立与持续改进。国际机构如世界卫生组织(WHO)以及美国、日本、欧盟等国家基于各自水环境的具体污染状况,持续调整和提升饮用水水质标准。科学地设定饮用水水质标准通常基于一个原则,即“长期连续饮用自来水不应对人体健康产生不利影响”,据此确定饮用水卫生标准的基准值^[1]。在国际上,水质标准的制定已形成一套成熟的程序,该程序一般包括以下4个关键步骤:污染物筛查、风险评估、优先控制污染物的确定以及水质标准限值的计算。

然而,随着经济和社会的快速发展,大量新污染物不断出现。目前,新污染物面临的主要挑战:其数量和种类的不确定性、检测技术的缺乏、风险评估体系的不完备,以及传统水处理技术对其难去除等。鉴于此,采用国际公认的水质标准制定流程,并结合深圳市特有的水环境污染特征,对供水系统中的新污染物进行系统的风险评估,对于确保饮用水可以直接安全饮用具有极其重要的科学和实践意义。

1 研究方法

首先筛查目标污染物,目标污染物的选择应综合考虑国外标准共同关注、却未列入我国标准的污染物,流域/地区特有污染物和在学术研究前沿引起广泛重视的新污染物。其次量化评估风险,包括暴露评估、毒性评价和风险定量3个部分。其中,暴露评估主要考虑饮用水中污染物的浓度水平和摄入量。毒性评价的数据主要来源于文献报道、毒理学试验、流行病学调查和计算毒理学。风险定量常用商值法、相对风险法和概率法,也可以选择以疾病负担/社会负担作为终点的风险评价方法。另外,在优先控制污染物的筛选和水质标准限值推导过程中,应综合考虑水厂技术水平、处理成本、实验室检测分析水平等。

1.1 污染物筛查

污染物筛查数据来源包括以下4种:(1)我国和其他主要国家、地区的饮用水水质标准,共收集了包括美国、加拿大、新加坡、德国、英国、新西兰、印度、日本、不丹、加纳、柬埔寨、东地中海区域国家(苏丹、埃及、伊朗、约旦、黎巴嫩、摩洛哥、阿曼、巴勒斯坦、叙利亚和突尼斯)等国家,欧盟和WHO等机构的饮用水卫生管理标准;(2)我国和其他主要国家地区的政策法规和优先污染物控制名单,主要

参考美国国家环境保护局(Environmental Protection Agency, EPA)的候选污染物清单(contaminant candidate list, CCL)、美国毒物和疾病登记署(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR)的2022年优先污染物清单(substance priority list, SPL)、我国的第一批和第二批优先控制污染物清单和重点管控污染物清单、美国毒物和国际癌症研究署(International Agency for Research on Cancer, IARC)的癌症分级清单和我国香港地区针对饮用水安全制定的《香港饮用水水质标准监察名单》和《香港饮用水水质观察名单》;(3)EPA公布可查的具有相关毒性数据以进行健康风险评价的污染物名单,主要参考EPA的风险与信息综合管理系统(integrated risk and information system, IRIS)数据库中汇总的化合物毒性数据信息,重点关注其经口摄入的参考剂量(reference dose, RfD)和致癌斜率因子(cancer slope factor, CSF);(4)与水环境特别是饮用水中污染物相关的重要文献,以“农药”“药物”“全氟化合物”等为关键词,在Web of Science上进行文献检索,选取影响因子大于等于8或者引用次数超过50的,且提供了具体检出数据的文献进行新型污染物赋存信息提取和归纳总结。

1.2 风险评估和优先污染物筛选

风险评估和优先污染物筛选的技术路线如图1所示。

数据的来源是1.1节中涉及的污染物汇总为待选污染物池A,然后,根据污染物是否在饮用水中有可参考的标准限值或可供健康风险评价使用的毒性数据(通常指CSF和RfD)进行第一次筛选,若“有”,则进入可评估清单B,若“无”,则进入不可评估清单B1。在B1清单中的污染物,若在日后的研究中具备了参考标准限值或毒性数据,则可以再次进入可评估清单B。

在清单B中引入评分系统,评分项包括标准覆盖情况、管控情况和综合项3类,评分细则如表1所示。在标准覆盖情况中,主要考虑重要国家、地区和组织发布的标准限值,以10分为满分给污染物的标准覆盖情况赋分。例如,典型有机污染物苯并(a)芘的标准覆盖率为84.6%(13个主要国家、地区和组织中有11个有限值要求),其标准覆盖得分为8.5分。在管控情况中,主要考虑EPA的CCL, ATSDR的SPL, IARC癌症分级清单,我国的第一批

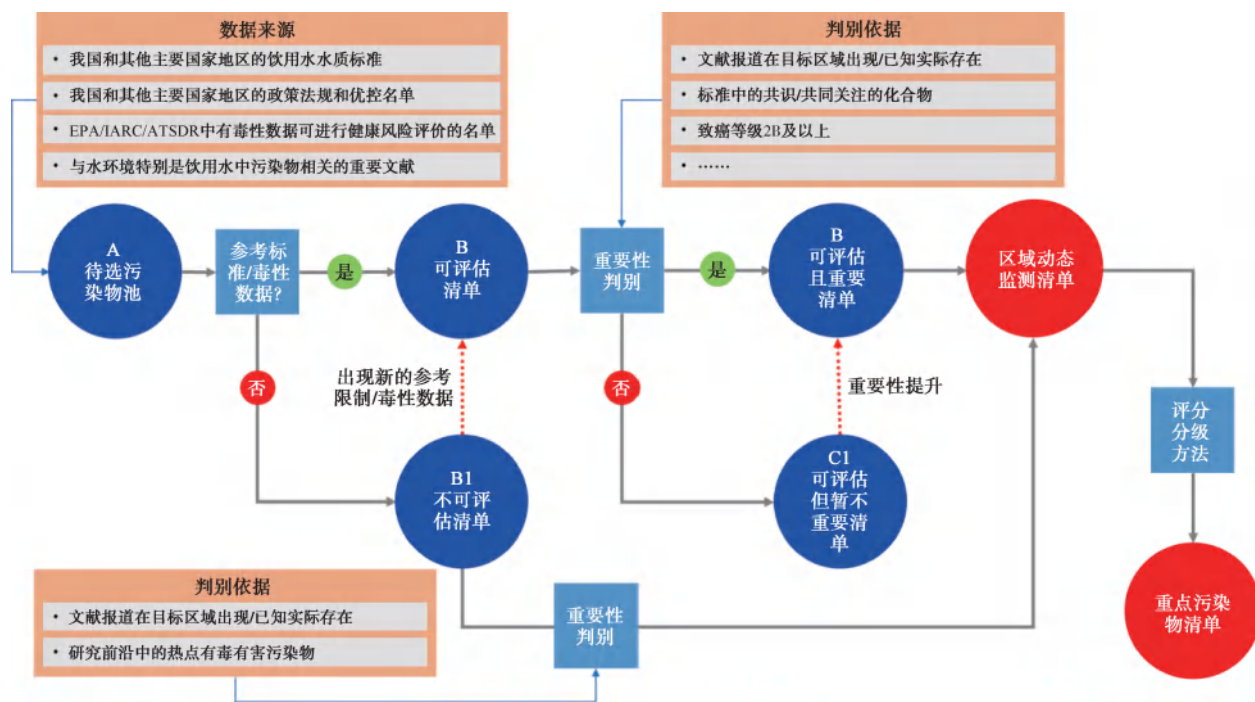


图 1 风险评估和优先污染物筛选技术路线

Fig. 1 Technical Route for Risk Assessment and Priority Pollutant Screening

表 1 污染物评分细则

Tab. 1 Pollutant Scoring Rules

类别	科目	赋分方式/得分
标准覆盖情况	美国、欧盟、WHO、新加坡、加拿大、日本、德国、新西兰、印度和我国香港地区的饮用水标准	标准覆盖率×10
管控情况	EPA 候选污染物清单	1
	ATSDR2022 优先污染物	1
	《优先控制化学品(第一批)》《优先控制化学品(第二批)》《重点管控新污染物清单(2023 年版)》	1
	《香港饮用水水质标准观察清单》《香港饮用水水质标准监察清单》	0.5
	IARC 致癌物分级:1 类	3
	IARC 致癌物分级:2A 类	2
	IARC 致癌物分级:2B 类	1
	环境检出:深圳地区	3
	环境检出:深圳以外地区(国内)	1
	《我国仅限用农药名录 2023 版》:部分禁用	-1
综合项	是否为嗅味物质	1

和第二批优先控制污染物清单和重点管控污染物清单,以及我国香港的观察和监察名单,以 10 分为满分给管控情况赋分。例如典型有机污染物苯并(a)芘为 1 类致癌物,除 EPA CCL 以外的清单均有收录,其管控情况得分为 5.5 分。综合项中包括了环境检出情况、农药禁用信息和嗅味物质信息等。其

中环境检出情况分为在深圳有检出和只在深圳以外地区有检出(国内)2 种,样品类型包括了饮用自来水和地表水,其中在深圳有检出赋 3 分,只在深圳以外地区有检出(国内)赋 1 分,没有检出报道不赋分;农药禁用信息来源参考《我国禁限用农药名录 2023 版》,包括禁止使用的农药 52 种和在部分范围

内禁止使用的农药 16 种,其中禁止使用的农药被排除在清单外,部分范围内禁止使用的 16 种农药赋-1 分;若污染物是嗅味物质,则赋 1 分,判断是否为嗅味物质参考《饮用水嗅味控制与管理技术指南》^[2]中提出的 100 种嗅味物质清单。例如 1,4-二氧六环在深圳有检出报道,非农药且为嗅味物质,其综合项得分为 4 分。

通过对每个化合物评分和排序实现从清单 B 至清单可评估且重要清单 C 和可评估但暂不重要清单 C1 的提炼,出现在 1 个以上的水质标准/管控清单或致癌等级高于 2B 级,进入可评估且重要清单 C;否则进入可评估但暂不重要清单 C1。对清单 C 中的污染物进行最后的提炼,排除以下污染物:(1)《我国禁限用农药名录 2023 版》中的禁用农药;(2)饮用水中出现可能性小或浓度和风险极低的;(3)近 5 年深圳市水务(集团)有限公司水质监测中心在深圳市及周边水环境中调研中未检出的污染物。提炼后筛查出深圳市供水系统的标准外污染物清单。

1.3 水质标准限值推导

为了明确深圳市供水系统的标准外污染物清单的管控限值,首选参考饮用水标准中限值或可供进行健康风险评价的毒性数据。对于没有可参考限值的污染物,根据其毒性数据和健康风险评价方法,可以推算出经饮用水暴露途径的污染物限值以供参考^[3]。

经饮用水途径暴露的人体健康风险可以分为致癌风险和非致癌风险 2 种,使用饮用水中污染物的测量浓度计算其日均暴露量,如式(1)~式(3)。

$$A_{ADI} = (CI_{IR} E_{ED} E_{EF}) / (B_{BW} A_{AT}) \quad (1)$$

$$C_{CR} = A_{ADI} C_{CSF} \quad (2)$$

$$H_{HI} = A_{ADI} / R_{rd} \quad (3)$$

其中: A_{ADI} ——平均暴露量,ng/(kg·d);

C ——饮用水中污染物的质量浓度,ng/mL;

I_{IR} ——饮用水摄入量,mL/d;

E_{ED} ——暴露时间,a;

E_{EF} ——暴露频率,取值为 365 d/a,d/a;

B_{BW} ——体重,kg;

A_{AT} ——年平均暴露时间,d;

C_{CR} ——致癌风险系数;

C_{CSF} ——经口暴露的 CSF,kg/(d·ng);

H_{HI} ——非致癌风险系数;

R_{rd} ——RfD,ng/(kg·d)。

CSF 和 RfD 2 种信息来源于 EPA 的 IRIS 数据库。终生暴露的致癌风险系数一般可接受的风险水平为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$,非致癌风险系数 $H_{HI} = 1$ 作为判断是否有非致癌风险的阈值,值越高则风险越高。通过对致癌和非致癌风险阈值的确定,可以反算出通过饮用水暴露途径能接受的浓度限值。

2 结果和讨论

根据研究方法和路线中的数据来源和评分方法,分类获取了清单 A、B、B1、C、C1 和深圳市供水系统的标准外污染物清单,各清单分别包含 1 870、542、1 328、212、196 项和 108 项。

按照总分将深圳市供水系统的标准外污染物分为 3 个风险级别,并基于污染物的风险级别、水源的敏感性、水质变化的动态、现有处理工艺的效果以及监管要求等因素给出监测频次建议。低风险级别(0~10 分):每年至少 1 次。由于风险较低,可以进行年度监测,以确认污染物水平是否保持稳定。中等风险级别(11~15 分):每半年 1 次。中等风险级别的污染物需要更频繁的监测来跟踪其变化趋势,以便及时发现潜在风险。高风险级别(16~20 分):在风险确认初期每月 1 次,以快速掌握污染物动态;稳定后每季度 1 次,以持续监控高风险污染物,保障公共健康安全。监测频次还应考虑实验室的检测能力和成本效益,根据深圳市的具体情况和资源进行调整,以确保监测计划的科学性和可行性。

深圳市供水系统的标准外污染物清单信息如表 2 所示。

深圳市供水系统的标准外污染物清单中的污染物均有可参考的饮用水水质标准或可进行健康风险评价的毒性数据。根据 2 种数据类型,针对清单中的污染物给出深圳市饮用水中的参考标准限值。第一类有可参考的饮用水水质标准的污染物,如果只有一个水质标准数值,则直接引用;若有 2 个数值,在保守情况下选择数值低的那一个;若有 3 个或 3 个以上的数值,则使用其中位数。第二类有可进行健康风险评价的毒性数据,根据 1.3 节中毒性数据和健康风险评价方法,对致癌风险和非致癌风险阈值设定分别为 1×10^{-6} 和 1,反推在安全阈值下的日

表 2 动态监测清单
Tab. 2 Dynamic Monitoring List

分类	中文名	英文名	化学物质登 录号(chemical abstracts servi- ce, CAS)	管控情 况评分	标准覆 盖评分	综合 项评分	总分	风险 级别
化工原料	1,4-二氧六环	1,4-dioxane	123-91-1	3.5	4.6	4	12.1	中风险
农药	二嗪磷	diazinon	333-41-5	4.5	0.8	3	8.3	低风险
农药	西玛津	simazine	122-34-9	0.5	4.6	3	8.1	低风险
化工原料	1,2-二氯丙烷	1,2-dichloropropane	78-87-5	4.5	3.8	0	8.3	低风险
农药	异丙甲草胺	metolachlor	51218-45-2	1.5	3.8	3	8.3	低风险
化工原料	苯胺	aniline	62-53-3	3	0.8	3	6.8	低风险
化工原料	1,1,2,2-四氯乙烷	1,1,2,2-tetrachloroethane	79-34-5	3	0	3	6.0	低风险
化工原料	1,3-二氯丙烯	1,3-dichloropropene	542-75-6	2.5	3.8	0	6.3	低风险
消毒副产物	二溴乙腈	dibromoacetonitrile	3252-43-5	1.5	3.8	0	5.3	低风险
农药	禾草敌	molinate	2212-67-1	1.5	3.8	0	5.3	低风险
化工原料	次氨基三乙酸	nitrilotriacetic acid and its salts	139-13-9	1.5	3.8	0	5.3	低风险
农药	乙硫磷	ethion	563-12-2	1.5	0.8	3	5.3	低风险
农药	甲草胺	alachlor	15972-60-8	0.5	4.6	0	5.1	低风险
农药	丁草胺	butachlor	23184-66-9	0.5	1.5	3	5.0	低风险
农药	2-羟基阿特拉津	2-hydroxyatrazine	2163-68-0	1.5	2.4	1	4.9	低风险
农药	噻草酮	metribuzin	21087-64-9	1.5	2.4	1	4.9	低风险
农药	特丁津	terbuthylazine	5915-41-3	0.5	3.8	1	5.3	低风险
农药	异丙隆	isoproturon	34123-59-6	0.5	3.8	1	5.3	低风险
农药	杀虫畏	tetrachlorvinphos	961-11-5	1.5	0	3	4.5	低风险
农药	乙拌磷	disulfoton	298-04-4	2.5	0.8	1	4.3	低风险
化工原料	壬基酚	nonylphenol	25154-52-3	2.5	0.8	1	4.3	低风险
农药	倍硫磷	fenthion	55-38-9	0.5	0.8	3	4.3	低风险
农药	仲丁威	fenobucarb	3766-81-2	0.5	0.8	3	4.3	低风险
农药	甲基嘧啶磷	pirimiphos-methyl	29232-93-7	0.5	0.8	3	4.3	低风险
农药	异丙威	isoprocarb	2631-40-5	0.5	0.8	3	4.3	低风险
农药	敌草隆	diuron	330-54-1	2.5	1.5	0	4.0	低风险
化工原料	联苯胺	benzidine	92-87-5	4	0	0	4.0	低风险
化工原料	二氯甲基醚	bis(chloromethyl) ether	542-88-1	4	0	0	4.0	低风险
化工原料	联苯	biphenyl	92-52-4	0	0	4	4.0	低风险
化工原料	2,6-二甲基苯酚	2,6-dimethylphenol	576-26-1	0	0	4	4.0	低风险
化工原料	环己酮	cyclohexanone	108-94-1	0	0	4	4.0	低风险
化工原料	3-甲基苯酚	3-methylphenol	108-39-4	0	0	4	4.0	低风险
化工原料	苯甲醛	benzaldehyde	100-52-7	0	0	4	4.0	低风险
农药	丙环唑	propiconazole	60207-90-1	0	0.8	3	3.8	低风险
农药	杀螟腈	cyanophos	2636-26-2	0	0.8	3	3.8	低风险
化工原料	2-甲基-4-氯苯氧乙酸	2-methyl-4-chlorophenoxyacetic acid (MCPA)	94-74-6	0.5	3.8	0	4.3	低风险
化工原料	2,4,5-涕丙酸	fenoprop	93-72-1	0.5	3.8	0	4.3	低风险

(续表2)

分类	中文名	英文名	化学物质登录号 (chemical abstracts service, CAS)	管控情况评分	标准覆盖评分	综合项评分	总分	风险级别
化工原料	2-(4-氯-2-甲基苯氧基)丙酸	mecoprop (MCP)	93-65-2	0.5	3.8	0	4.3	低风险
化工原料	乙二胺四乙酸	edetic acid	60-00-4	0.5	3.8	0	4.3	低风险
农药	二甲戊灵	pendimethalin	40487-42-1	0.5	3.8	0	4.3	低风险
农药	氰草津	cyanazine	21725-46-2	0.5	3.8	0	4.3	低风险
化工原料	1,2,3-三氯丙烷	1,2,3-trichloropropane	96-18-4	3.5	0	0	3.5	低风险
农药	三唑酮	triadimefon	43121-43-3	0.5	0	3	3.5	低风险
农药	2,4-滴丙酸	dichlorprop	120-36-5	1	2.4	0	3.4	低风险
化工原料	六氯环戊二烯	hexachlorocyclopentadiene	77-47-4	2.5	0.8	0	3.3	低风险
化工原料	水合氯醛-(水合三氯乙醛)	chloral hydrate	302-17-0	2.5	0.8	0	3.3	低风险
药物与个人护理品	炔雌醇	ethinyl estradiol (17-alpha ethinyl estradiol)	57-63-6	1.5	0.8	1	3.3	低风险
农药	氯菊酯	permethrin	52645-53-1	1.5	0.8	1	3.3	低风险
药物与个人护理品	17-β-雌二醇	estradiol (17-beta estradiol)	50-28-2	1.5	0.8	1	3.3	低风险
农药	敌草快	diquat	231-36-7		3.8		3.8	低风险
农药	腐霉利	procymidone	32809-16-8	0.5	1.5	1	3.0	低风险
消毒副产物	N-二丙基亚硝酸胺	N-nitroso-di-n-propylamine (NDPA)	621-64-7	3	0	0	3.0	低风险
消毒副产物	N-二乙基亚硝酸胺	N-nitrosodiethylamine (NDEA)	55-18-5	3	0	0	3.0	低风险
化工原料	1,2-二苯肼	1,2-diphenylhydrazine	122-66-7	3	0	0	3.0	低风险
化工原料	2-甲基苯酚	2-methyl-phenol	95-48-7	2	0	1	3.0	低风险
农药	扑草净	prometryn	7287-19-6	0	0	3	3.0	低风险
化工原料	2,4-二氯苯氧丁酸	4-(2,4-dichlorophenoxy) butyric acid (2,4-DB)	94-82-6	0.5	2.4	0	2.9	低风险
化工原料	2,4,5-三氯苯氧乙酸	2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid	93-76-5	0.5	2.4	0	2.9	低风险
农药	绿麦隆	chlorotoluron	15545-48-9	0.5	2.4	0	2.9	低风险
农药	扑灭津	propazine	139-40-2	1	0.8	1	2.8	低风险
化工原料	六氯乙烷	hexachloroethane	67-72-1	2.5	0	0	2.5	低风险
化工原料	1,1,1,2-四氯乙烷	1,1,1,2-tetrachloroethane	630-20-6	2.5	0	0	2.5	低风险
农药	乙烯菌核利	vinclozolin	50471-44-8	1.5	0	1	2.5	低风险
农药	乙氧氟草醚	oxyfluorfen	42874-03-3	1.5	0	1	2.5	低风险
农药	异菌脲	iprodione	36734-19-7	1.5	0	1	2.5	低风险
农药	甲胺磷	methamidophos	10265-92-6	1.5	0	1	2.5	低风险
化工原料	异丙基苯	cumene	98-82-8	1.5	0	1	2.5	低风险
化工原料	邻苯二甲酸丁苄酯	butyl benzyl phthalate	85-68-7	1.5	0.8	0	2.3	低风险
农药	甲萘威	carbaryl	63-25-2	1.5	0.8	0	2.3	低风险
农药	硫双灭多威	thiodicarb	59669-26-0	1.5	0.8	0	2.3	低风险
农药	溴苯腈	bromoxynil	1689-84-5	1.5	0.8	0	2.3	低风险
化工原料	反-1,2-二氯乙烯	trans-1,2-dichloroethylene	156-60-5	1.5	0.8	0	2.3	低风险

(续表2)

分类	中文名	英文名	化学物质登 录号(chemical abstracts servi- ce,CAS)	管控情 况评分	标准覆 盖评分	综合 项评分	总分	风险 级别
农药	克菌丹	captan	133-06-2	1.5	0.8	0	2.3	低风险
农药	保棉磷	azinphos-methyl	86-50-0	1.5	0.8	0	2.3	低风险
农药	杀螟硫磷	fenitrothion	122-14-5	0.5	0.8	1	2.3	低风险
农药	噻唑膦	fosthiazate	98886-44-3	0.5	0.8	1	2.3	低风险
农药	吡丙醚	pyriproxyfen	95737-68-1	0.5	1.5	0	2.0	低风险
农药	茅草枯	2,2-dichloropropionic acid	75-99-0	0.5	1.5	0	2.0	低风险
农药	绿草定	triclopyr	55335-06-3	0.5	1.5	0	2.0	低风险
化工原料	N-亚硝基吡咯烷	N-nitrosopyrrolidine (NPYR)	930-55-2	2	0	0	2.0	低风险
化工原料	喹啉	quinoline	91-22-5	2	0	0	2.0	低风险
化工原料	二苯基亚硝胺	N-nitrosodiphenylamine	86-30-6	2	0	0	2.0	低风险
化工原料	2,4-二氯苯酚	2,4-dichlorophenol	120-83-2	2	0	0	2.0	低风险
化工原料	二氯乙醚	bis(chloroethyl) ether	111-44-4	1	0	1	2.0	低风险
化工原料	吡啶	pyridine	110-86-1	1	0	1	2.0	低风险
化工原料	四氢呋喃	tetrahydrofuran	109-99-9	1	0	1	2.0	低风险
化工原料	2-氯苯酚	2-chlorophenol	95-57-8	1	0	1	2.0	低风险
农药	特草定	terbacil	5902-51-2	1	0.8	0	1.8	低风险
农药	2,4-二氯苯氧乙酸	2,4-dichlorophenoxyacetic acid	94-75-7	0	0.8	1	1.8	低风险
农药	利谷隆	linuron	330-55-2	1.5	0	0	1.5	低风险
农药	二溴磷	naled	300-76-5	1.5	0	0	1.5	低风险
农药	炔螨特	propargite	2312-35-8	1.5	0	0	1.5	低风险
农药	野麦畏	triallate	2303-17-5	1.5	0	0	1.5	低风险
化工原料	异佛尔酮	isophorone	78-59-1	1.5	0	0	1.5	低风险
农药	亚安硫磷	phosmet	732-11-6	1.5	0	0	1.5	低风险
农药	敌稗	propanil	709-98-8	1.5	0	0	1.5	低风险
农药	噻节因	dimethipin	55290-64-7	1.5	0	0	1.5	低风险
农药	茵草敌	EPTC (s-ethyl-dipropylthiocarbamate)	759-94-4	1.5	0	0	1.5	低风险
农药	苯磺隆	tribenuron methyl	101200-48-0	0.5	0	1	1.5	低风险
农药	苄嘧磺隆	bensulphuron methyl	83055-99-6	0.5	0	1	1.5	低风险
农药	五氯硝基苯	quintozene (pentachloronitrobenzene)	82-68-8	0.5	0	1	1.5	低风险
化工原料	二氯异乙醚	bis(2-chloro-1-methylethyl) ether	108-60-1	0.5	0	1	1.5	低风险
农药	灭多威	methomyl	16752-77-5	1.5	0.8	-1	1.3	低风险
农药	氟虫腈	fipronil	120068-37-3	1.5	0.8	-1	1.3	低风险
农药	涕灭威	aldicarb	116-06-3	0.5	1.5	-1	1.0	低风险
农药	联苯菊酯	biphen thrin	82657-04-3	0	0	1	1.0	低风险
化工原料	叔丁基乙醚	ethyl tertiary butyl ether	637-92-3	0	0	1	1.0	低风险
化工原料	乙二醇单丁醚	2-butoxyethanol	111-76-2	0	0	1	1.0	低风险

均暴露量,并进一步计算对应的污染物浓度阈值。其中使用的参数参考 EPA 和文献推荐值:饮用水日摄入量为 2 L/d,暴露时间为 60 年,暴露频率为 365

d/a,体重为 60 kg,年平均暴露时间为 365 d。值得注意的是,此处的计算结果,仅代表通过饮用水途径暴露的可接受风险和对应的浓度阈值,如表 3 所示。

表 3 动态监测清单参考限值
Tab. 3 Reference Limits of Dynamic Monitoring List

分类	中文名	英文名	CAS	总分	参考标准值/ (mg·L ⁻¹)	标准来源
化工原料	1,4-二氧六环	1,4-dioxane	123-91-1	12.1	0.05	水质标准
农药	二嗪磷	diazinon	333-41-5	8.3	0.005	水质标准
农药	西玛津	simazine	122-34-9	8.1	0.002	水质标准
化工原料	异丙甲草胺	1,2-dichloropropane	51218-45-2	7.6	0.01	水质标准
农药	1,2-二氯丙烷	metolachlor	78-87-5	7.6	0.04	水质标准
化工原料	苯胺	aniline	62-53-3	6.8	0.02	水质标准
化工原料	1,1,2,2-四氯乙烷	1,1,2,2-tetrachloroethane	79-34-5	6.0	0.01	风险评价
化工原料	1,3-二氯丙烯	1,3-dichloropropene	542-75-6	5.6	0.02	水质标准
消毒副产物	二溴乙腈	dibromoacetonitrile	3252-43-5	5.3	0.07	水质标准
农药	禾草敌	molinate	2212-67-1	5.3	0.006	水质标准
化工原料	次氨基三乙酸	nitrilotriacetic acid and its salts	139-13-9	5.3	0.2	水质标准
农药	乙硫磷	ethion	563-12-2	5.3	0.003	水质标准
农药	甲草胺	alachlor	15972-60-8	5.1	0.02	水质标准
农药	丁草胺	butachlor	23184-66-9	5.0	0.03	水质标准
农药	2-羟基阿特拉津	2-hydroxyatrazine	2163-68-0	4.8	0.2	水质标准
农药	噻草酮	metribuzin	21087-64-9	4.8	0.07	水质标准
农药	特丁津	terbuthylazine	5915-41-3	4.6	0.007	水质标准
农药	异丙隆	isoproturon	34123-59-6	4.6	0.009	水质标准
农药	杀虫畏	tetrachlorvinphos	961-11-5	4.5	0.015	风险评价
农药	乙拌磷	disulfoton	298-04-4	4.3	0.004	水质标准
化工原料	倍硫磷	nonylphenol	55-38-9	4.3	0.006	水质标准
农药	仲丁威	fenthion	3766-81-2	4.3	0.03	水质标准
农药	甲基嘧啶磷	fenobucarb	29232-93-7	4.3	0.1	水质标准
农药	异丙威	pirimiphos-methyl	2631-40-5	4.3	0.01	水质标准
农药	壬基酚	isoprocab	25154-52-3	4.3	0.3	水质标准
农药	敌草隆	diuron	330-54-1	4.0	0.02	水质标准
化工原料	联苯胺	benzidine	92-87-5	4.0	0.015	风险评价
化工原料	二氯甲基醚 ¹	bis(chloromethyl) ether	542-88-1	4.0	0.000 000 002	风险评价
化工原料	联苯	biphenyl	92-52-4	4.0	0.000 06	风险评价
化工原料	2,6-二甲基苯酚	2,6-dimethylphenol	576-26-1	4.0	0.000 3	风险评价
化工原料	环己酮	cyclohexanone	108-94-1	4.0	2.5	风险评价
化工原料	3-甲基苯酚	3-methylphenol	108-39-4	4.0	0.025	风险评价
化工原料	苯甲醛	benzaldehyde	100-52-7	4.0	0.05	风险评价
农药	丙环唑	propiconazole	60207-90-1	3.8	0.05	水质标准
农药	杀螟腈	cyanophos	2636-26-2	3.8	0.003	水质标准

(续表3)

分类	中文名	英文名	CAS	总分	参考标准值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	标准来源
化工原料	二甲戊灵	2-methyl-4-chlorophenoxyacetic acid (MCPA)	40487-42-1	3.6	0.02	水质标准
化工原料	氰草津	fenoprop	21725-46-2	3.6	0.000 7	水质标准
化工原料	2-甲基-4-氯苯氧乙酸	mecoprop(MCPP)	94-74-6	3.6	0.5	水质标准
化工原料	2,4,5-涕丙酸	edetic acid	93-72-1	3.6	0.01	水质标准
农药	2-(4-氯-2-甲基苯氧基)丙酸	pendimethalin	93-65-2	3.6	0.01	水质标准
农药	乙二胺四乙酸	cyanazine	60-00-4	3.6	0.6	水质标准
化工原料	三唑酮	1,2,3-trichloropropane	43121-43-3	3.5	0.015	风险评价
农药	1,2,3-三氯丙烷	triadimefon	96-18-4	3.5	0.002	风险评价
农药	2,4-滴丙酸	dichlorprop	120-36-5	3.3	0.1	水质标准
化工原料	六氯环戊二烯	hexachlorocyclopentadiene	77-47-4	3.3	0.05	水质标准
化工原料	呋雌醇	chloral hydrate	57-63-6	3.3	0.000 02	水质标准
药物与个人护理品	17 β -雌二醇	ethinyl estradiol (17-alpha ethynyl estradiol)	50-28-2	3.3	0.000 08	水质标准
农药	氯菊酯	permethrin	52645-53-1	3.3	0.3	水质标准
药物与个人护理品	水合氯醛	estradiol (17-beta estradiol)	302-17-0	3.3	0.02	水质标准
农药	敌草快	diquat	231-36-7	3.1	0.025	水质标准
农药	腐霉利	procymidone	32809-16-8	3.0	0.09	水质标准
消毒副产物	N-二丙基亚硝酸胺 ¹	N-nitroso-di-n-propylamine (NDPA)	621-64-7	3.0	0.000 000 07	风险评价
消毒副产物	N-二乙基亚硝酸胺 ¹	N-nitrosodiethylamine (NDEA)	55-18-5	3.0	0.000 000 003	风险评价
化工原料	扑草净	1,2-diphenylhydrazine	7287-19-6	3.0	0.002	风险评价
化工原料	1,2-二苯肼 ¹	2-methyl-phenol	122-66-7	3.0	0.000 000 6	风险评价
农药	2-甲基苯酚	prometryn	95-48-7	3.0	0.03	风险评价
化工原料	绿麦隆	4-(2, 4-dichlorophenoxy) butyric acid (2,4-db)	15545-48-9	2.8	0.03	水质标准
化工原料	2,4-二氯苯氧丁酸	2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid	94-82-6	2.8	0.09	水质标准
农药	2,4,5-三氯苯氧乙酸	chlorotoluron	93-76-5	2.8	0.009	水质标准
农药	扑灭津	propazine	139-40-2	2.8	0.07	水质标准
化工原料	乙烯菌核利	hexachloroethane	50471-44-8	2.5	0.012 5	风险评价
化工原料	乙氧氟草醚	1,1,1,2-tetrachloroethane	42874-03-3	2.5	0.001 5	风险评价
农药	异菌脲	vinclozolin	36734-19-7	2.5	0.02	风险评价
农药	甲胺磷	oxyfluorfen	10265-92-6	2.5	0.000 03	风险评价
农药	六氯乙烷	iprodione	67-72-1	2.5	0.000 4	风险评价
农药	1,1,1,2-四氯乙烷	methamidophos	630-20-6	2.5	0.000 02	风险评价
化工原料	异丙基苯	cumene	98-82-8	2.5	0.05	风险评价
化工原料	甲萘威	butyl benzyl phthalate	63-25-2	2.3	0.05	水质标准
农药	硫双灭多威	carbaryl	59669-26-0	2.3	0.08	水质标准
农药	溴苯腈	thiodicarb	1689-84-5	2.3	0.03	水质标准

(续表3)

分类	中文名	英文名	CAS	总分	参考标准值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	标准来源
农药	克菌丹	bromoxynil	133-06-2	2.3	0.3	水质标准
化工原料	保棉磷	trans-1,2-dichloroethylene	86-50-0	2.3	0.1	水质标准
农药	杀螟硫磷	captan	122-14-5	2.3	0.003	水质标准
农药	噻唑膦	azinthos-methyl	98886-44-3	2.3	0.003	水质标准
农药	邻苯二甲酸丁苄酯	fenitrothion	85-68-7	2.3	0.5	水质标准
农药	反-1,2-二氯乙烯	fosthiazate	156-60-5	2.3	0.1	水质标准
农药	吡丙醚	pyriproxyfen	95737-68-1	2.0	0.3	水质标准
农药	茅草枯	2,2-dichloropropionic acid	75-99-0	2.0	0.08	水质标准
农药	绿草定	triclopyr	55335-06-3	2.0	0.006	水质标准
化工原料	N-亚硝基吡咯烷 ¹	N-nitrosopyrrolidine (NPYR)	930-55-2	2.0	0.000 000 2	风险评价
化工原料	喹啉 ¹	quinoline	91-22-5	2.0	0.000 000 2	风险评价
化工原料	二苯基亚硝胺	N-nitrosodiphenylamine	86-30-6	2.0	0.000 1	风险评价
化工原料	2,4-二氯苯酚	2,4-dichlorophenol	120-83-2	2.0	0.002	风险评价
化工原料	二氯乙醚 ¹	bis(chloroethyl) ether	111-44-4	2.0	0.000 000 5	风险评价
化工原料	吡啶	pyridine	110-86-1	2.0	0.000 5	风险评价
化工原料	四氢呋喃	tetrahydrofuran	109-99-9	2.0	0.5	风险评价
化工原料	2-氯苯酚	2-chlorophenol	95-57-8	2.0	0.003	风险评价
农药	特草定	terbacil	5902-51-2	1.8	0.04	水质标准
农药	2,4-二氯苯氧乙酸	2,4-dichlorophenoxyacetic acid	94-75-7	1.8	0.03	水质标准
农药	利谷隆	linuron	330-55-2	1.5	0.001	风险评价
农药	二溴磷	naled	300-76-5	1.5	0.001	风险评价
农药	炔螨特	propargite	2312-35-8	1.5	0.01	风险评价
农药	野麦畏	triallate	2303-17-5	1.5	0.007	风险评价
化工原料	亚安硫磷	isophorone	732-11-6	1.5	0.01	风险评价
农药	敌稗	phosmet	709-98-8	1.5	0.003	风险评价
农药	噻节因	propanil	55290-64-7	1.5	0.01	风险评价
农药	苄草敌	dimethipin	759-94-4	1.5	0.013	风险评价
农药	苯磺隆	EPTC (s-ethyl-dipropylthiocarbamate)	101200-48-0	1.5	0.004	风险评价
农药	苄嘧磺隆	tribenuron methyl	83055-99-6	1.5	0.1	风险评价
农药	五氯硝基苯	bensulphuron methyl	82-68-8	1.5	0.002	风险评价
农药	异佛尔酮	quintozone (pentachloronitrobenzene)	78-59-1	1.5	0.1	风险评价
化工原料	二氯异乙醚	bis(2-chloro-1-methylethyl) ether	108-60-1	1.5	0.02	风险评价
农药	灭多威	methomyl	16752-77-5	1.3	0.03	水质标准
农药	氟虫腈	fipronil	120068-37-3	1.3	0.000 5	水质标准
农药	涕灭威	aldicarb	116-06-3	1.0	0.01	水质标准
农药	联苯菊酯	biphenethrin	82657-04-3	1.0	0.008	风险评价
化工原料	叔丁基乙醚	ethyl tertiary butyl ether	637-92-3	1.0	0.5	风险评价
化工原料	乙二醇单丁醚	2-butoxyethanol	111-76-2	1.0	0.05	风险评价

注:¹ 表示浓度阈值水平较低,对监测技术和处理技术要求较高。

部分计算得出的浓度阈值可能较低(小于1 ng/L),对监测技术和处理技术要求过高,在结果中已标注出来以供参考。同时,考虑重要性和监测成本,可根据评分高低顺序,对污染物进行分级管理,制定相应的监测与管控方案。

3 结论

目前,水中标外污染物在世界各地的河流、湖泊、地下水和饮用水等各种水环境和土壤中被频繁检出,环境中的浓度虽然不高,仅为 ng/L~μg/L,但由于其连续不断地进入并久存于水环境中,可能通过食物链的生物积累和各物种间复杂的相互作用,造成慢性生态毒效应,从而对人类和生态系统构成潜在危害,因此,标准外污染物的处理和去除也成为当前急需解决的环境问题之一。

(1)本文通过明确水源污染特征、开发风险评估方法、获取标准制定所需的关键参数等步骤筛查深圳市标准外污染物风险,并建立了适用于深圳市供水系统的标准外污染物动态监测

清单。

(2)依据标准外污染物动态监测清单,可在深圳市开展一次供水系统水质检测,检测结果结合我国《新污染物治理行动方案》,制定相应的环境风险管控措施,以保障深圳市水质安全。

参考文献

- [1] 胡建英, 安伟, 曹红斌, 等. 化学物质的风险评价[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
HU J Y, AN W, CAO H B, et al. Risk assessment of chemical substances[M]. Beijing: Science Press, 2012.
 - [2] 杨敏, 于建伟, 苏命, 等. 饮用水嗅味控制与管理技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
YANG M, YU J W, SU M, et al. Technical guidelines for odor control and management of drinking water[M]. Beijing: China Architecture Publishing & Building Press, 2022.
 - [3] 杨敏, 安伟, 胡建英, 等. 饮用水水质风险评估技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
YANG M, AN W, HU J Y, et al. Drinking water quality risk assessment technology[M]. Beijing: Science Press, 2018.
-
- (上接第 60 页)
- [20] PETER A, GUNTEN U V. Oxidation kinetics of selected taste and odor compounds during ozonation of drinking water[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(2): 626-631.
 - [21] YANG J, LUO C, LI T, et al. Superfast degradation of refractory organic contaminants by ozone activated with thiosulfate: Efficiency and mechanisms[J]. Water Research, 2020, 176: 115751. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115751.
 - [22] HAN U, LEE Y G, BYEON J, et al. Mitigation of benzoic acid-driven autotoxicity in waste nutrient solution using O₃ and O₃/H₂O₂ treatments: Seed germination and root growth of *Lactuca sativa* L. [J]. Environmental Pollution, 2023, 331: 121930. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121930.
 - [23] TAN S, LONG K, CHEN W, et al. Synergistic oxidation of humic acid treated by H₂O₂/O₃ activated by CuCo/C with high efficiency and wide pH range[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 358: 120896. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120896.
 - [24] LEE W, CHOI S, KIM H, et al. Efficiency of ozonation and O₃/H₂O₂ as enhanced wastewater treatment processes for micropollutant abatement and disinfection with minimized byproduct formation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 454: 131436. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131436.
 - [25] CHEN F, ZHANG Y S, BAI C W, et al. Ozone meets peroxides: A symphony of hybrid techniques in wastewater treatment [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 483: 149129. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149129.
 - [26] 古小超, 姜伟, 李泽利, 等. 土臭素和 2-甲基异茨醇去除方法和路径研究进展[J]. 环保科技, 2021, 27(2): 58-64.
GU X C, JIANG W, LI Z L, et al. Latest research progress on the removal methods and mechanism of geosmin and 2-methylisoborneol [J]. Environmental Protection and Technology, 2021, 27(2): 58-64.
 - [27] CAVALHERI P S, DA SILVA T F, MIGUEL E D S C, et al. Enhanced degradation and toxicity reduction of diclofenac and ketoprofen using UASB reactor and O₃/H₂O₂ at neutral pH[J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, 72: 107644. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107644.