

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	供水系统致病真菌暴发机制及其消毒控制理论
主要完成人	文刚、刘刚、万琪琪、曹瑞华、李凯、吴戈辉
主要完成单位	西安建筑科技大学、中国科学院生态环境研究中心

二、提名意见（适用于提名单位）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖
-------	--------	------	--

提名意见：

饮用水中致病真菌污染已成为近年来全球公认的新兴环境与健康难题。致病真菌具有耐氯性强、易于聚集萌发复活、控制难的特征，严重威胁供水安全。然而，目前国际上关于供水系统致病真菌迁移转化规律与暴发机制、致病真菌的耐氯特征与机理、致病真菌消毒控制理论均存在科学空白，缺乏系统性的理论突破。该项目历时十余年的系统研究，揭示了致病真菌在供水系统中迁移转化规律与暴发机制，探明了致病真菌个体原因与群体作用介导的耐氯机制，系统揭示了物理、化学及高级消毒技术对真菌的控制原理，构建了供水系统致病真菌消毒技术体系。

该项目发表论文 70 余篇，包括 SCI 论文 52 篇，水处理领域 Nature Index 期刊 Water Research 和 Environmental Science&Technology 论文 20 篇，出版专著 1 部，培养了 20 余名博士和硕士人才，研究成员先后获国家高层次人才，国家高层次青年人才和陕西省青年人才，研究成果获得了包括中国科学院院士朱永官研究员等国内外专家的高度认可与评价。该项目选题新颖、创新性强，有力推动了供水系统生物风险识别和控制理论体系的发展，为我省乃至全国饮用水安全保障起到重要的理论支撑。提名材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员无争议。

提名该项目为省自然科学奖二等奖。

说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。

三、项目简介

供水系统面临着多种生物风险威胁，其中致病真菌污染是近年来备受关注的全球性新兴环境污染问题。迄今全球已有超过 30 个国家报道过供水系统致病真菌暴发事件。该类污染一旦发生，可经由饮水、淋浴等途径导致人群暴露，对老人、儿童等免疫脆弱人群造成尤为严重的威胁，不仅可能引发急慢性呼吸道感染，还可能造成哮喘、过敏等多种疾病，严重威胁公众健康。

然而，目前国际上在供水系统致病真菌迁移转化规律与暴发机制、致病真菌的耐氯特征与机理、致病真菌消毒控制理论方面均存在科学空白，缺乏系统性的理论认知。该项目在国家自然科学基金、陕西省自然科学基金基础研究计划等课题的支持下，团队历经 10 余年基础理论攻关，系统阐明致病真菌在供水系统中迁移转化规律、快速暴发机制与消毒控制原理，取得了以下主要创新成果：

（一）系统阐明了供水系统中致病真菌从源头到龙头的迁移转化规律，厘清供水系统致病真菌污染来源，首次揭示了供水系统致病真菌生长暴发特征与机制，率先构建了供水管网生物风险的“四相微生态结构”理论，揭示了管网中生物风险的多相赋存形态和潜在风险。显著提升了对全流程供水系统致病真菌环境行为的科学认知。

（二）发现了致病真菌细胞的高耐氯性现象，系统揭示了其在供水系统中基于个体特性与群体作用所介导的耐氯机制，并首次阐明致病真菌可通过络合饮用水中金属离子以增强其耐氯性的新原理。显著拓展了供水系统生物风险耐氯知识体系，丰富了病原菌耐氯机制的学术内涵。

（三）系统构建了饮用水致病真菌消毒理论体系，首次发现其在紫外消毒中的光复活现象并建立了一阶饱和动力学模型，创新提出了采用高渗透性氯胺或 UV/Cl_2 组合消毒策略以实现耐氯真菌的高效控制的理论方法。该研究填补了饮用水致病真菌消毒理论长期缺失的空白，为其高效防控提供了坚实的理论依据。

本项目共计发表高水平论文 70 余篇，包括 SCI 论文 52 篇，水处理领域 **Nature Index** 期刊 **Water Research**（16 篇）和 **Environmental Science&Technology**（4 篇）论文共计 20 篇，出版专著 1 部，培养了 20 余名博士和硕士专业人才（陕西省优博 1 名，中国冶金教育学会优硕 1 名），研究成员先后获国家高层次人才、国家高层次青年人才、陕西省杰出青年基金、陕西省百名优秀青年科技新星等荣誉。

项目组在饮用水中致病真菌检测和控制方面发表论文数量居全球第 1 位。相关研究成果获中国科学院院士/国际科学理事会副主席朱永官研究员、美国国家工程院院士/ES&T 副主编 **Paul Westerhoff** 教授等 30 多个国家和地区的知名学者高度评价。

研究成果“供水系统中丝状真菌快速检测方法建立与控制技术原理”获 2022 年陕西高等学校科学技术一等奖；研究成果“水源生物风险快速监测、暴发特征与供水水质安全保障”获中国环境保护科学技术二等奖。

本项目研究成果成功应用于陕西、甘肃等地 3 个自来水厂（总处理水量 17.5 万 m^3/d ，服务人口超 80 万人），有效控制生物风险，取得了一定的经济效益和显著的社会效益。

四、客观评价

1.5 篇代表作分析

Web of Science 核心合集数据统计：项目组在水中致病真菌检测和控制方面发表**论文数量居全球第 1 位**（其他附件 1）。5 篇代表作均发表在本领域的权威国际期刊，包括 **Nature Index** 期刊目录的 Environmental Science & Technology（IF11.3）**1 篇**、Water Research（IF12.4）**3 篇**和环境领域国际 TOP 期刊 Chemical Engineering Journal（IF13.2）**1 篇**。

截止 2025 年 8 月，五篇代表作严格他引 217 次。根据 SCIE 数据库统计：以“fungal spores”（真菌孢子）和“chlorine”（氯）为主题词检索，代表性论文 4 被引次数排名第 11/328；以“fungal spores”（真菌孢子）and“UV disinfection”（紫外消毒）为主题词检索，代表性论文 5 被引次数排名第 11/187。（其他附件 8）

2. 科技及学术奖励

- (1) 2022 年 3 月，项目第一完成人主持的研究成果“供水系统中丝状真菌快速检测方法建立与控制技术原理”获**陕西省高等学校科学技术一等奖**，该成果支撑本项目创新点 1、2、3 的主要内容。（其他附件 2）
- (2) 2024 年 12 月，项目第一完成人主持的研究成果“水源生物风险快速监测、暴发特征与供水水质安全保障”获**中国环境保护科学技术二等奖**，该成果支撑本项目创新点 1、2、3 的主要内容。（其他附件 3）
- (3) 2024 年 11 月，项目第一完成人指导的博士学位论文《紫外发光二极管及其联合氯消毒对水中真菌孢子的控制效能与机理》获**陕西省优秀博士学位论文**，该成果支撑本项目创新点 1、3 的主要内容。（其他附件 4）
- (4) 2022 年 7 月，项目第三完成人获**第十六届奥加诺（水质与水环境）奖学金**（全省唯一入选），该成果支撑本项目创新点 1、3 的主要内容。（其他附件 5）
- (5) 项目第一完成人指导的硕士学位论文《臭氧及臭氧/氯联合灭活对水源水中真菌的控制效果与机理》获 2024 年**中国冶金教育学会优秀硕士学位论文**，该成果支撑本项目创新点 3 的主要内容。（其他附件 6）
- (6) 2020 年 8 月，项目第三完成人的论文《UV-LEDs 和 LPUV 对水中真菌孢子的灭活效能及其光复活特性》获**全国水处理与回用学术会议优秀会议论文奖**，该成果支撑本项目创新点 1、3 的主要内容。（其他附件 7）

3. 成果重要引用与评价

一、对“供水系统致病真菌迁移转化、多相赋存形态、暴发机制”的客观评价

- (1) 中国科学院院士、中国科学院生态环境研究中心主任、国际科学理事会副主席朱永官教授在“*Water Res.* 2022, 223: 119018”引文 1 中对代表性论文 3 进行评价：**项目组提出**生物污染存在的“四相微生态结构”**理论非常重要**，这有助于深入探索微塑料影响病原体和耐药基因传播的内在机理。
- (2) 中国应用化学学会水处理学科组秘书长、国家杰出青年科学基金获得者、浙江大学王东升教授在“*Front. Environ. Sci. Eng.* 2024, 18(11): 136”引文 2 中对代表性论文

3 进行评价：**高度认可项目组**在实际管网中探究生物膜形成规律和特性的必要性，对掌握现实场景下生物膜特性具有重要意义。

- (3) 国际水协会会士、国家杰出青年科学基金获得者、清华大学秀钟书院院长胡洪营教授在“*J. Hazard. Mater.* 2021 413: 125283”引文 3 中对代表性论文 3 进行评价：发现了供水系统中以假单胞菌为主的优势微生物具有易分泌胞外聚合物特性，**充分肯定了**其对管网微生态结构的重要影响。

二、对“供水系统中致病真菌耐氯规律与耐氯机制”的客观评价

- (1) 国家高层次人才、同济大学环境学院党委书记徐斌教授在“*Environ. Sci. Technol.* 2024, 58: 17817-17827”，“*Environ. Sci. Technol. Lett.* 2023, 10: 1173-1180”等多篇论文中引用了本项目关于真菌消毒控制效果和真菌高耐氯性的研究成果，并在引文 4 中肯定了申报人对相关领域的研究贡献，并对代表性论文 4 评价：**项目组拓宽了**饮用水生物风险的研究范畴，完善了致病真菌耐氯特征与耐氯机制。
- (2) 国际紫外线协会（IUVA）主席，美国科罗拉多大学环境工程系 Karl G. Linden 教授在“*Environ. Sci. Technol.* 2023, 57: 21876-21887”引文 5 中对代表性论文 2 多次引用并评价：**充分肯定了项目组发现**的真菌聚集导致的失活速率常数降低的耐氯规律，并强调了相关研究可用于指导后续耐氯真菌的控制技术探究。
- (3) 俄罗斯工程院外籍院士、国家杰出青年科学基金获得者李爱民教授在“*Env. Pollution* 2024: 340 122796”引文 6 中对代表性论文 4 进行评价：**充分认可项目组提出**的二氧化氯是一种对耐氯真菌具有高效控制效果的消毒方法。

三、对“致病真菌消毒控制理论体系”的客观评价

- (1) 中国工程院院士、哈尔滨工业大学马军教授在“*Environ. Sci. Technol.* 2023 57(45):17629-17639”论文中评价：**充分肯定课题组**在高级消毒领域的研究工作，并进一步证实了自由基对提升消毒效果的促进作用。（其他附件 9）
- (2) 美国国家工程院院士，科睿唯安“高被引科学家”，ES&T 副主编 Paul Westerhoff 教授在“*Environ. Sci. Technol.* 2025, 59: 8800-8811”引文 7 中对代表性论文 2 大量引用评价：**完全认同**UV 是一种灭活水中真菌孢子的高效技术，并借鉴了真菌计数方法与控制机理探究方法，肯定了项目组在真菌消毒控制方面的创新成果。
- (3) 国家杰出青年科学基金获得者、湖南大学汤琳教授在“*Front. Environ. Sci. Eng.* 2023, 17(3): 29-43”引文 8 中对代表性论文 5 进行评价：**充分认可**高级消毒技术对耐氯微生物的高效控制效果，强调高级消毒技术中活性物种对微生物灭活的重要性。

4. 媒体及期刊报道

- (1) 西安广播电视台以“古都先锋—为有源头活水来”为题**专题报道了文刚教授团队**关于饮用水水质安全保障的探索实践经验。（其他附件 16）
- (2) 基于前期研究基础和成果，《净水技术》在“**大家之言**”栏目并以**期刊封面专题报道**了评述文章“丝状真菌—城镇供水系统生物风险和安全保障的新挑战”（净水技术, 2022, 41(3): 1-11, 19）。（其他附件 17）

五、代表性论文专著目录
(不超过 8 条, 其中代表性论文不超过 5 篇, 代表性专著不超过 3 部)

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷 页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间 (年 月 日)	通讯 作者 (含共 同)	第一 作者 (含共 同)	国内作者	他 引 总 次 数	检 索 数 据 库	知识 产 权 是 否 归 国 内 所 有
1	The protective role and mechanism of melanin for <i>Aspergillus niger</i> and <i>Aspergillus flavus</i> against chlorine-based disinfectants	Water Research	Xiangqian Xu, Ruihua Cao, Kai Li, Qiqi Wan, Gehui Wu, Yuzhao Lin,	2022, 223: 1190-39	2022 年 08 月 30 日	Gang Wen	Xiangqian Xu	徐向前, 曹瑞华, 李凯, 万琪琪, 吴戈辉, 林俞兆, 黄廷林, 文刚	18	SCI	是
2	Simultaneously enhance the inactivation and inhibit the photoreactivation of fungal spores by the combination of UV-LEDs and chlorine : Kinetics and mechanisms	Water Research	Qiqi Wan, Gang Wen, Ruihua Cao, Hui Zhao, Xiangqian Xu, Yuancheng Xia, Gehui Wu, Wei Lin, Jingyi Wang,	2020, 184: 1161-43	2020 年 07 月 12 日	Gang Wen	Qiqi Wan	万琪琪, 文刚, 曹瑞华, 赵辉, 徐向前, 夏远程, 吴戈辉, 林薇, 王静怡, 黄廷林	38	SCI	是
3	360-Degree Distribution of Biofilm Quantity and Community in an Operational Unchlorinated Drinking Water Distribution Pipe	Environmental Science & Technology	Gang Liu, Ya Zhang, Xinlei Liu, Frederik Hammes, Wen-Tso Liu, Gertjan Medema, Peter Wessels, Walter van der Meer	2020, 54(9) : 5619-5628	2020 年 04 月 07 日	Gang Liu	Gang Liu	刘刚	33	SCI	是

4	Inactivation of three genera of dominant fungal spores in groundwater using chlorine dioxide: Effectiveness, influencing factors, and mechanisms	Water Research	Gang Wen, Xiangqian Xu, Tinglin Huang, Hong Zhu, Jun Ma	2017, 125, 132-140	2017年8月18日	Gang Wen, Tinglin Huang,	Gang Wen	文刚, 徐向前, 黄廷林, 朱红, 马军	63	SCI	是
5	Inactivation of four genera of dominant fungal spores in groundwater using UV and UV/PMS: Efficiency and mechanisms	Chemical Engineering Journal	Gang Wen, Xiangqian Xu, Hong Zhu, Tinglin Huang, Jun Ma	2017, 328, 619-628	2017年7月14日	Gang Wen, Tinglin Huang,	Gang Wen	文刚, 徐向前, 朱红, 黄廷林, 马军	65	SCI	是
6	《农村生活供水建设技术指南》(专著)	中国建筑工业出版社	文刚, 黄廷林, 李凯, 万琪琪, 邓晓丽, 王彤, 陈铸昊, 曹瑞华	2019年3月第一版	2019年3月15日	文刚	文刚	文刚, 黄廷林, 李凯, 万琪琪, 邓晓丽, 王彤, 陈铸昊, 曹瑞华	0		是
7											
8											
合 计											
补充说明(视情填写):											

六、主要完成人情况表

姓 名	文刚	排 名	1
行政职务	副院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献：			
<p>（1）作为本项目的牵头人，主要负责项目的总体组织，包括制定项目的研究路线、研究方案、研究计划等。（2）完成了供水系统真菌迁移转化规律、真菌暴发特征与耐氯机制解析，以及真菌高效控制原理的研究工作。（3）对本项目的重要科学发现 1、2、3 做出了突出贡献。</p>			

姓 名	刘刚	排 名	2
行政职务	中科院饮用水科学与技术重点实验室副主任		
技术职称	研究员		
工作单位	中国科学院生态环境研究中心		
完成单位	中国科学院生态环境研究中心		
对本项目主要学术贡献：			
<p>（1）作为项目第二完成人，参与制定了项目的研究路线、研究方案研究计划，并协助项目的具体实施。（2）完成了饮用水中真菌快速检测方法的开发工作，提出了管网“四相微生态结构”理论。（3）对本项目的重要科学发现 1、2 做出了突出贡献。</p>			

姓 名	万琪琪	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献：			
<p>（1）作为项目第三完成人，参与项目消毒理论体系的构建。（2）提出了 UV/Cl₂、UV/PMS 等组合工艺对耐氯真菌的高效控制原理，报道了饮用水真菌孢子紫外消毒后的光复活现象及其动力学模型。（3）对本项目的重要科学发现 2、3 做出了突出贡献。</p>			

姓 名	曹瑞华	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	讲师		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献：			
<p>（1）作为项目第四完成人，参与制定了项目的研究路线与研究方案。（2）揭示了真菌在管网中多相赋存及暴发的核心驱动因子与时空异质性规律，建立了真菌耐氯性评估模型。（3）对本项目的重要科学发现 1、2 做出了突出贡献。</p>			

姓 名	李凯	排 名	5
行政职务	给排水教研室党支部书记		
技术职称	教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献：			
<p>（1）作为项目第五完成人，参与制定了项目的研究路线、研究方案研究计划，并协助项目的具体实施。（2）系统比较了物理、化学及高级消毒技术对真菌的控制原理。（3）对本项目的重要科学发现 2、3 做出了突出贡献。</p>			

姓 名	吴戈辉	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	无		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献：			
<p>（1）作为项目第六完成人，参与项目消毒理论体系的构建。（2）系统揭示了真菌远高于细菌的耐氯阈值，阐明了细胞壁黑色素、抗氧化系统和胞外多糖屏障等个体与群体协同作用下的耐氯性机制。（3）对本项目的重要科学发现 2、3 做出了突出贡献。</p>			

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安建筑科技大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目牵头完成单位，全面负责该项目的具体实施和技术管理。积极组织人力申报并获准国家自然科学基金“复合污染地下水供水系统中丝状真菌爆发与控制机理”、“给水管网中致病性真菌耐氯性增强机制及其风险控制”等一系列国家级科研课题，专门组建了重点科技创新团队（饮用水水质安全保障），依托陕西省环境工程重点实验室，西北水环境教育部重点实验室等平台，抽调精干力量，负责该项工作。在项目开展过程中，在实验条件、办公环境，跨学科人员组成等方面为本项目给予了大力支持。</p> <p>本项目中饮用水真菌快速检测方法开发，管网真菌多相赋存及暴发的核心驱动因子与时空异质性规律，真菌耐氯性机制解析与高效消毒控制理论等主要创新成果都由本单位相关科研人员完成。</p>	

单位名称	中国科学院生态环境研究中心
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目的主要完成单位之一，积极组织技术力量，对基于流式细胞术的真菌快速检测新方法等问题进行持续探索，在环境领域国际 Top 期刊 <i>Environmental Science & Technology</i> 发表关于管网“四相微生态结构”理论等方面的科研论文。提供必要的实验平台、仪器设备、物质条件等，参与真菌在管网中多相赋存及暴发的核心驱动因子与时空异质性规律探究等科学研究工作，为揭示饮用水真菌暴发特征与耐氯机制提供理论及技术支持。</p> <p>联合西安建筑科技大学主要完成人，成功申报陕西省重点科技创新团队项目，积极调配人员，依靠本单位的科研平台及技术攻关实力，为本项目的顺利完成提供了坚实的保障。</p>	

附表 1

完成人合作关系说明

本项目由文刚（西安建筑科技大学）、刘刚（中国科学院生态环境研究中心）、万琪琪（西安建筑科技大学）、曹瑞华（西安建筑科技大学）、李凯（西安建筑科技大学）、吴戈辉（西安建筑科技大学）6 人主要完成。项目主要完成单位及人员之间有着长期的科研合作，主要完成人之间的合作关系如下：

第一完成人文刚为西安建筑科技大学教授，国家高层次青年人才，环境与市政工程学院副院长，陕西省重点科技创新团队（饮用水水质安全保障）带头人，陕西省首届杰出青年基金获得者，主持该项目全面研发工作，发表多篇学术论文，出版专著 1 部，以第一完成人获得了 2022 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖，2024 年环境保护科学技术奖-科技进步二等奖，并指导第三完成人获得了 2024 年陕西省“优秀博士学位论文奖”。

第二完成人刘刚为中国科学院生态环境研究中心研究员，国家高层次人才，与西安建筑科技大学文刚教授团队合作开展供水水质安全保障方面的研究，签订合作协议，完成共同立项。

第三完成人万琪琪现在西安建筑科技大学环境与市政工程学院工作，为第一完成人文刚教授科研团队核心成员，与第一完成人、第四完成人、第五完成人、第六完成人共同获奖，合作发表论文。

第四完成人曹瑞华现在西安建筑科技大学环境与市政工程学院工作，为第一完成人文刚教授科研团队核心成员，与第一完成人、第三完成人、第五完成人、第六完成人共同获奖，合作发表论文。

第五完成人李凯为西安建筑科技大学教授，与第一完成人、第三完成人、第四完成人、第六完成人共同获奖，合作发表论文。

第六完成人吴戈辉于 2020 年研究生入学加入文刚教授团队，与第一完成人、第三完成人、第四完成人、第五完成人共同获奖，合作发表论文。

第一完成人签名：

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	文刚/1, 万琪琪/3, 曹瑞华/4, 李凯/5, 吴戈辉/6	2022.6.16	2023.12.31	The protective role and mechanism of melanin for <i>Aspergillus niger</i> and <i>Aspergillus flavus</i> against chlorine-based disinfectants	必备附件 1.1
2	论文合著	万琪琪/3, 文刚/1, 曹瑞华/4, 吴戈辉/6	2020.4.25	2023.12.31	Simultaneously enhance the inactivation and inhibit the photoreactivation of fungal spores by the combination of UV-LEDs and chlorine: Kinetics and mechanisms	必备附件 1.2
3	专著合著	文刚/1, 李凯/5, 万琪琪/3, 曹瑞华/4	2017.08.01	2020.12.31	《农村生活供水建设技术指南》	必备附件 1.6
4	共同获奖	文刚/1, 万琪琪/3, 曹瑞华/4, 李凯/5, 吴戈辉/6	2022.03.01	2022.12.31	2022 年陕西高等学校科学技术奖一等奖	其他附件 2
5	共同获奖	文刚/1, 万琪琪/3, 曹瑞华/4	2022.09.01	2024.12.31	中国环境保护科学技术奖-科技进步二等奖	其他附件 3
6	共同立项	文刚/1, 刘刚/2, 李凯/5	2020.01.01	至今	创新团队项目：饮用水水质安全保障创新团队	其他附件 10