

陕西省科学技术进步奖公示信息

(2026年度)

一、项目基本情况

项目名称	水分子催化大气反应机制及其在痕量大气组分在线检测中的应用
主要完成人	张田雷，王竹青，谭文渊，王睿，杨冰，张勇奇，文明杰
主要完成单位	陕西理工大学，德州学院，四川轻化工大学

二、提名意见（适用于单位提名）

提 名 者	汉中市人民政府	提名等级	☐ 一等奖 ☐ 二等奖 ☒ 三等奖
提名意见： 本项目《水分子催化大气反应机制及其在痕量大气组分在线检测中的应用》属量子化学与环境化学交叉技术开发成果，贴合我省生态环境治理重点发展方向。项目由我校张田雷团队牵头，联合德州学院、四川轻化工大学历时十余年协同攻关，依托国家自然科学基金、省自然科学基金等9项课题开展系统研究。理论层面，项目构建多尺度量子模拟体系，阐明大气自由基单/三重态差异化反应规律，原创水分子双模式催化机理，借助分子动力学揭示云雾界面气溶胶生成微观路径；6篇成果刊发国际权威大气期刊，总引用129次，获国内外同行广泛认可，完善大气污染微观转化理论。技术方面，基于水增敏原理首创非均相界面化学发光检测技术，检测限pptv级，灵敏度较商用设备提升百倍；自主研发SO₂、NO₂、O₃系列便携式监测装备，获授权发明专利5件，已在商洛、榆林、德州多地环境监测单位规模化应用，适配山区、化工园区复杂场景，大幅降低监测运维成本，为区域大气精准管控提供国产化装备支撑。项目实施期间培育十余名硕士，多名成员晋升高级职称，第一完成人获评省级区域发展人才，团队斩获省高校科技奖二、三等奖各1项。 该项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件。 提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。			
说明：省科学技术进步奖一、二、三等奖项目，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，“提名二等奖”的评审落选项目不再降格参评三等奖。项目组与提各单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目正式提交后，提名等级建议不得变更。 软科学标准计量科普类项目请勾选“二等奖”或者“三等奖”。			

三、项目简介

(限 2 页)

本成果属于量子化学、环境化学交叉融合的技术开发类成果，聚焦我国大气复合污染防控重大需求，针对对流层氧化性自由基微观转化机理不明、高湿环境二次污染爆发成因不清、痕量大气污染物现场高精度在线监测装备国产化程度低三大核心瓶颈，历时10年（2015.01~2025.12），依托3项国家自然科学基金、3项陕西省自然科学基金、3项陕西省教育厅专项科研计划持续攻关，构建“理论机理揭示-水催化规律挖掘-国产化监测装备创制”一体化创新体系，打通大气微观理论研究到环境监测工程应用完整链条，为区域雾霾、光化学污染精准溯源治理提供原创理论支撑与成套国产化技术装备。

项目系统解决两大核心科学与工程难题：一是 HO_2 、HS、Criegee中间体、硫氮氧化物等高活性大气自由基微观反应路径存在学术分歧，水分子单/多聚团簇、云雾气液界面双重催化机制长期缺乏直接分子动力学证据，现有数值模型动力学参数与野外实测偏差大，无法解释静稳高湿天气二次污染物突增现象；二是传统大气监测设备多采用均相检测体系，灵敏度仅ppb级别、抗干扰能力弱、设备笨重昂贵，难以适配山区、乡镇、工业园区等复杂场景的快速连续在线监测，国内缺少基于界面增敏原理的微型化多组分检测成套技术。围绕上述痛点，项目形成三项系统性核心成果：

(1)建立双自由基差异化动力学理论体系。集成全局团簇构型搜索、CASSCF/CCSD(T)多参考高精度量子化学计算与CVT/SCT隧穿校正动力学模型，首次区分 HO_2 参与双自由基反应三重态优势通道、非 HO_2 体系单重态主导反应规律，完整阐明 CH_2OO 与水、甲醛低能环状过渡态水解机制，修正国际通用大气化学模型动力学参数，定量厘清自由基生成、消耗完整转化链条，填补大气双自由基微观反应理论空白。相关5篇代表性论文发表于《Physical Chemistry Chemical Physics》《Atmospheric Chemistry and Physics》《Journal of Environmental Sciences》等国际权威大气化学SCI期刊，截至2025年底总引用119次、他人独立引用61次，被《Journal of the American Chemical Society》《Science of The Total Environment》等顶刊正面评述，获得国内外大气化学领域同行广泛认可。

(2)原创水分子分级催化与气液界面超快反应新机制。提出水分子直接抽氢/双氢转移双模式催化理论，破解水单体、二聚/三聚团簇催化效应学术争议，证实多步八元环水合通道为 HO_2 自反应优势路径；采用BOMD从头算分子动力学捕捉皮秒尺度

气-液界面反应全过程，证实云雾液滴溶剂化环境可将自由基反应速率提升2~3个数量级，直观观测 SO_3 与硫酸界面 $\text{S}_2\text{O}_7^{2-}\cdots\text{H}_3\text{O}^+$ 离子对生成过程，揭示酸性工业区气溶胶新粒子缺失形成路径，构建“气相水簇催化+气液界面转化”多尺度耦合理论框架，从分子层面解释高湿雾霾天二次污染爆发微观成因，丰富云雾化学、气溶胶生成理论体系。

(3)发明水增敏非均相界面化学发光检测技术，研制系列便携式在线监测装备。

基于前述水分子界面催化理论创新，突破传统均相检测局限，原创气-液界面水效应增敏发光新原理，自主研发微型迷宫式微流控反应器、纳米复合增敏试剂与多组分特异性干扰抑制剂，检测下限达pptv级，相较商用国标设备灵敏度提升1~2个数量级；配套开发微型超静音蠕动泵、一体化微流控气路与自动标定模块，实现0.1 s超快速信号响应，整机体积、功耗较传统大型监测设备分别降低60%、45%。项目累计授权5件核心发明专利、5项配套知识产权，形成ATMOS系列 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、甲醛多组分便携式在线检测仪，设备具备模块化、可扩展、野外便携连续监测优势，解决国内复杂区域痕量污染快速监测“卡脖子”装备短板。

成果已在陕西省商洛市中心城区、山东省德州市德城区、中科三清科技、商洛绿宝环境科技等多家环境监测单位落地应用（应用周期2017~2024年），数千组现场比对数据与省控、国控固定监测站点高度吻合，可高效完成复杂地形污染溯源、突发高值追踪，大幅降低野外监测人力、运维与设备采购成本，为地方生态环境部门精准实施大气管控提供低成本国产化技术方案。项目实施期间，团队获评陕西省特殊支持计划区域发展人才1人、获汉中市青年科技领军人才2人，获陕西省高校科技奖二、三等奖各1项，累计培养硕士研究生10余名、6名团队成员晋升高级职称，同步带动陕西省环境监测装备国产化技术迭代升级，兼具重大学术创新价值与显著生态社会效益。

本项目知识产权权属清晰、无争议，全部论文、专利均为本项目核心支撑成果，未在历年省部级及以上科技奖励、本年度其他提名项目中重复使用，所有合作完成单位、完成人均出具知情同意证明，材料齐全规范，符合陕西省科学技术进步奖提名申报全部条件。

四、客观评价

（限 2 页。围绕创新性、应用效益和经济社会价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价意见要有客观依据，主要包括与国内外相关技术的比较，国家相关部门正式作出的技术检测报告、验收意见、鉴定结论，国内外重要科技奖励，国内外同行在重要学术刊物、学术专著和重要国际学术会议公开发表的学术性评价意见等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。）

本项目通过揭示 $\text{HO}_2 + \text{HO}$ 、 $\text{HO}_2 + \text{HS}$ 及 $\text{CH}_2\text{OO} + \text{H}_2\text{O}$ 等关键气相及非均相气液界面反应中水分子的催化作用机制，发现其不仅能促进过渡态环状结构形成、显著降低反应能垒，而且气-液界面的特殊溶剂化环境可大幅加速反应进程，这些理论发现为深入理解自由基反应机制提供了新视角。基于此机理创新，项目团队成功研发了集非均相界面化学发光检测、气液界面增强反应和电动流体流量调节技术于一体的痕量气体检测系统，实现了对 SO_2 、 NO_2 、 O_3 等组分 0.1 秒级超灵敏检测，其灵敏度较现有标准提升 1~2 个数量级，在抗干扰性、响应速度和便携性方面均取得突破性进展。本项目理清了氧化性污染物在气相及非均相气液界面的作用机制，实现了大气痕量组分的超灵敏快速检测，为大气污染物的精准识别与高效防控提供了重要的科学支撑和技术手段。

1. 重要学术刊物的引用评价

本成果 6 篇代表性论文被 Web of Science 总引 129 次，他引 67 次，单篇最高他引 17 次。例如，英国 University of Leeds 的 Blitz 和 Seakins 等人在其发表于 Journal of the American Chemical Society Au (2023, 3, 6, 1684-1694) 研究论文“New Measurements and Calculations on the Kinetics of an Old Reaction: $\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ ”一文中，引用了代表性论文 1，提到“最近的几项研究预测 k_1 与水有显著的相关性，尽管 $[\text{H}_2\text{O}]$ 的变化很大，但实验测量的结果却未报告”。美国 University of California 的 Sinha 等人在其发表于 Journal of the American Chemical Society (2025, 147, 1, 211-222) 研究论文“Tropospheric Fate of Methylhydroxycarbene and the Ability of a Single Water Molecule to Efficiently Promote Its Isomerization into Acetaldehyde”一文中，引用了代表性论文 2，提到“水分子及其团簇，尤其是通过其羟基官能团的水簇，既可以作为氢供体，也可以作为氢受体，从而作为许多反应的催化剂”。山东大学杜林教授等人在其发表于 Atmospheric Chemistry and Physics (2025, 25, 8575-8590) 研究论文“*Atmospheric fate of organosulfates through gas-phase and aqueous-phase reactions with hydroxyl radicals: implications for inorganic sulfate formation*”一文中，引用了代表

性论文 6，提到“该方法已在先前的一系列研究中成功应用，并被证明能够有效解析过渡态构型。”。这些引用充分说明我们的研究系列工作得到了国内外学术界的极大关注，具有重要的学术意义和潜在应用价值。

2. 科技成果评价结论

本研究团队已获得国家自然科学基金 3 项(22073059, 21603132, 22203052)，陕西省自然科学基金项目 3 项(2022JM-060, 2019JM-336, 2019JQ-880)，陕西省教育厅项目 3 项(14JK1154, 18JK0147, 23JC023)，其中 3 项国家自然科学基金项目(22073059, 21603132, 22203052)、3 项陕西省自然科学基金项目(2022JM-060, 2019JM-336, 2019JQ-880)以及 2 项陕西省教育厅专项科研计划(14JK1154, 18JK0147)均顺利结题。本项目所研制的二氧化硫、二氧化氮在线检测仪已应用于商洛市中心城区、德州市德城区等地区现场的二氧化硫、二氧化氮的实时浓度监测，检测结果与当地国控或省控站点数据较为吻合，检测单位认为基于本成果提供的检测设备大大节约了监测大气二氧化硫、二氧化氮的时间与精力，可以轻松解决复杂地形的大气污染监控与实时监测，并获得准确可靠的结果。

3. 获奖情况

基于本研究成果，完成人受到陕西省委组织部、汉中市科学技术局的认可，分别授予第一完成人张田雷“陕西省特殊支持计划区域发展人才”、“汉中市青年科技领军人才”等称号，并获得“陕西省高等学校科学技术奖二等奖”、“陕西省高等学校科学技术奖三等奖”各 1 项。

总的来说，“水分子催化大气反应机制及其在痕量大气组分在线检测中的应用”成果在学术界和实际应用中都产生了积极的影响，为解决大气污染问题提供了重要的理论依据和技术支持。

五、应用情况

1. 应用情况（限 2 页）

大气污染防治已成为全世界关注的重大现实问题。现阶段我国大气污染形势仍然十分严峻，大气环境稳中向好趋势尚不稳固。本成果开展的氧化性污染物作用机制及其在痕量大气组分在线检测中的应用，对消除大气雾霾污染及改善大气环境质量等相关应用研究提供了参考。

（1）所揭示的气相及液滴气液界面上过氧自由基、羟基自由基、Criegee 中间体、氮/硫氧化物的物理化学微观反应机理，特别是水分子及团簇以及液滴界面水分子的催化机制及作用规律，可为国内外研究人员进一步深入开展其它大气氧化性污染物的微观反应机制研究提供丰富的物理化学信息。与此同时，本成果不仅对认识实验上不易或无法解决的大气氧化性污染物的形成与消耗机制具有重要学术意义，而且可为消除大气雾霾污染等相关应用研究提供理论指导。

（2）所研制的便携式二氧化硫、二氧化氮、臭氧实时在线检测仪已成功应用于商洛市中心城区、德州市德城区等地区。检测期间，对国控站点附近二氧化硫、二氧化氮、臭氧突发高值的污染来源进行了有效追踪，可为当地及时制定精准的大气污染防治措施提供了技术支撑。本发明成果有望在大气污染物实时监测过程中发挥重要作用并产生巨大的社会经济效益。

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	论文	Role of the $(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1-3$) cluster in the $\text{HO}_2 + \text{HO} \rightarrow {}^3\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ reaction: mechanistic and kinetic studies	中国	DOI: 10.1039/c8cp00020d	2018 年 2 月 22 日	Physical Chemistry Chemical Physics	陕西理工大学, 四川理工大学	Tianlei Zhang, Xinguang Lan, Zhangyu Qiao, Rui Wang, Xiaohu Yu, Qiong Xu, Zhiyin Wang, Linxia Jina and ZhuQing Wang
2	论文	The catalytic effect of water, water dimer and water trimer on the $\text{H}_2\text{S} + {}^3\text{O}_2$ formations from the $\text{HO}_2 + \text{HS}$ reaction in tropospheric conditions	中国	DOI: 10.1039/C6CP00654J	2016 年 5 月 19 日	Physical Chemistry Chemical Physics	陕西理工大学, 陕西师范大学, 四川理工大学	Tianlei Zhang, Chen Yang, Xukai Feng, Jiaxin Kang, Liang Song, Yousong Lu, Zhiyin Wang, Qiong Xu, Wenliang Wang and Zhuqing Wang
3	论文	Atmospheric chemistry of the self-reaction of HO_2 radicals: stepwise mechanism versus one-step process in the presence of $(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1-3$) clusters	中国	DOI: 10.1039/c9cp03530c	2019 年 10 月 1 日	Physical Chemistry Chemical Physics	陕西理工大学, 复旦大学, 贵州民族大学, 陕西师范大学	Tianlei Zhang, Mingjie Wen, Yongqi Zhang, Xinguang Lan, Bo Long, Rui Wang, Xiaohu Yu, Caibin Zhao a and Wenliang Wang
4	论文	The favorable routes for the hydrolysis of CH_2OO with $(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1-4$) investigated by global minimum searching combined with quantum chemical methods	中国	DOI: 10.1039/d0cp00028k	2021 年 5 月 6 日	Physical Chemistry Chemical Physics	陕西理工大学, 复旦大学, 陕西师范大学, 国立台湾大学, 四川理工大学	Rui Wang, Mingjie Wen, Shuai Liu, Yousong Lu, Lily Makroni, Balaganesh Muthiah, Tianlei Zhang, Zhiyin Wang and Zhuqing Wang
5	论文	Multiple evaluations of atmospheric behavior between Criegee	中国	DOI: 10.1016/j.jes.2022.06.004	2022 年 6 月 11 日	Journal of Environmental Sciences	陕西理工大学, 广	Tianlei Zhang, Mingjie Wen, Chao Ding, Yongqi Zhang,

		intermediates and HCHO: Gas-phase and air-water interface reaction					东工业大学, 德州学院, 山东大学	Xiaohui Ma, Zhuqing Wang, Makroni Lily, Junhai Liu, Rui Wang
6	论文	Reaction of SO ₃ with H ₂ SO ₄ and its implications for aerosol particle formation in the gas phase and at the air-water interface	中国	DOI: 10.5194/acp-24-4029-2024	2024 年 4 月 4 日	Atmospheric Chemistry and Physics	陕西理工大学, 中国科学院, 运城学院	Rui Wang, Yang Cheng, Shasha Chen, Rongrong Li, Yue Hu, Xiaokai Guo, Tianlei Zhang, Fengmin Song, and Hao Li
7	专利	一种二氧化硫检测系统及检测方法	中国	ZL201711289439.0	2020-06-23	3854202	陕西理工大学	张田雷, 王竹青
8	专利	自标定式二氧化氮连续在线检测装置及检测方法	中国	ZL201610310593.0	2018-10-02	3097816	四川轻化工大学	王竹青, 付大友, 袁东, 潘传江, 张洪, 卢令
9	专利	氮氧化物及过氧乙酰基硝酸酯联合在线检测装置及方法	中国	ZL201710285288.5	2019-05-14	3374486	四川轻化工大学	王竹青, 付大友, 袁东, 谭文渊, 杨冰, 黄勇
10	专利	一种二氧化氮及臭氧联合在线检测装置及方法	中国	ZL201810920658.2	2018-8-14	6019743	四川轻化工大学	王竹青, 付大友, 袁东, 谭文渊, 杨冰, 李佳祁, 陈雨琴, 廖琴瑶

七、主要完成人情况表

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
张田雷	1	科技处副处长	教授	陕西理工大学	陕西理工大学	1. 项目的总体设计及论文修改及定稿等； 2. 揭示了水分子及其团簇存在如何影响氮/硫氧化物等大气反应机制； 3. 揭示了液滴气-液界面上 Criegee 中间体与痕量气体的反应机制； 4. 发明一种二氧化硫检测系统及检测方法和一种电动流体流量调节装置及调节方法。
王竹青	2	无	副教授	德州学院	德州学院	1. 参与揭示了 $(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1\sim 4$) 存在下 CH_2OO 水解反应机制； 2. 参与揭示了 Cls 与 HCHO 之间的气相和气-液界面行为； 3. 参与揭示了水分子及其团簇等痕量气体存在下 $\text{HO}_2 + \text{SO}_3$ 反应机制； 4. 参与发明一种二氧化硫检测系统及检测方法。
谭文渊	3	无	正高级实验师	四川轻化工大学	四川轻化工大学	参与完成多项大气污染物快速在线检测试剂体系开发，获得授权发明专利多件。
王睿	4	无	副教授	陕西理工大学	陕西理工大学	1. 揭示了 $(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1\sim 4$) 存在下 CH_2OO 水解反应机制，证实 $(\text{H}_2\text{O})_2$ 对 CH_2OO 水解反应的贡献最为显著； 2. 揭示了水分子及其团簇等催化 CH_2OO 水解反应的反应机理和动力学性质，为研究污染城市大气中 Criegee 中间体大气行为提供理论指导。
杨冰	5	无	讲师	德州学院	德州学院	参与完成多项大气污染物快速在线检测试剂体系开发，获得授权发明专利多件。
张勇奇	6	无	无	陕西理工大学	陕西理工大学	1. 参与揭示了水分子及其团簇等参与 N_2O_4 水解优势路径的反应机制和动力学信息； 2. 参与揭示了水分子及其团簇等痕量气体对 HNSO_2 水解形成氨基磺酸的影响。
文明杰	7	无	无	陕西	陕西	1. 参与揭示了水分子及其团簇等参与 N_2O_4 水解

				理工 大学	理工 大学	优势路径的反应机制和动力学信息； 2. 参与揭示了 Cls 与 HCHO 之间的气相和气-液界面行为，并解释了区域污染地区 Criegee 中间体-醛类的化学反应过程； 3. 参与揭示了水分子及其团簇等催化 CH₂OO 水解反应的反应机理和动力学性质。
--	--	--	--	----------	----------	--

八、主要完成单位情况表

单位名称	陕西理工大学
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 1.利用团簇构型搜索结合量子化学计算方法系统研究了水分子及其团簇、气溶胶前体酸/碱分子及其团簇催化过氧自由基、羟基自由基、Criegee 中间体和氮/硫氧化物等大气氧化性污染物的反应机制； 2.采用量子化学计算和第一性原理分子动力学模拟相结合的方法研究了液滴气-液界面上 Criegee 中间体与甲醛的大气反应动力学行为； 3.发明了一种二氧化硫检测系统及检测方法； 4.发明了一种电动流体流量调节装置及调节方法。	

单位名称	德州学院
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 1.参与揭示了$(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1\sim 4$)存在下 CH_2OO 水解反应机制； 2.参与揭示了 Cls 与 HCHO 之间的气相和气-液界面行为； 3.参与揭示了中性及酸性衡量气体存在下 $\text{HO}_2 + \text{SO}_3$ 反应机制； 4.参与发明一种二氧化硫检测系统及检测方法。	

单位名称	四川轻化工大学
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 1.参与发明了一种二氧化硫检测系统及检测方法； 2.参与发明了一种电动流体流量调节装置及调节方法； 3.参与发明一种二氧化硫检测系统及检测方法。	

完成人合作关系说明

序号	合作方式	合作关系人及排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	张田雷（第一完成人），王竹青（第二完成人），王睿（第四完成人），	2017 年 12 月 ~2018 年 2 月	Role of the $(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1-3$) cluster in the $\text{HO}_2 + \text{HO} \rightarrow {}^3\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ reaction: mechanistic and kinetic studies	知识产权 1
2	论文合著	张田雷（第一完成人），王竹青（第三完成人）	2015 年 5 月 ~2016 年 5 月	Catalytic effect of water, water dimer and water trimer on the $\text{H}_2\text{S} + {}^3\text{O}_2$ formations from the $\text{HO}_2 + \text{HS}$ reaction in tropospheric conditions	知识产权 2
3	论文合著	张田雷（第一完成人），王睿（第四完成人），张勇奇（第六完成人），文明杰（第七完成人）	2021 年 8 月 ~2022 年 8 月	Atmospheric chemistry of the self-reaction of HO_2 radicals: stepwise mechanism versus one-step process in the presence of $(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1-3$) clusters	知识产权 3
4	论文合著	张田雷（第一完成人），王竹青（第二完成人），王睿（第四完成人），文明杰（第六完成人）	2020 年 5 月 ~2021 年 5 月	The favorable routes for the hydrolysis of CH_2OO with $(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1-4$) investigated by global minimum searching combined with quantum chemical methods	知识产权 4
5	论文合著	张田雷（第一完成人），王竹青（第二完成人），王睿（第四完成人），张勇奇（第六完成人），文明杰（第七完成人）	2021 年 6 月 ~2022 年 6 月	Multiple evaluations of atmospheric behavior between Criegee intermediates and HCHO : Gas-phase and air-water interface reaction	知识产权 5
6	论文合著	张田雷（第一完成人），王睿（第二完成人）	2023 年 4 月 ~2024 年 4 月	Reaction of SO_3 with H_2SO_4 and its implications for aerosol particle formation in the gas phase and at the	知识产权 6

				air-water interface	
7	专利合作	张田雷（第一完成人），王竹青（第二完成人）	2019 年 6 月~2020 年 6 月	一种二氧化硫检测系统及检测方法	知识产权 7
8	专利合作	王竹青（第二完成人），谭文渊（第三完成人），杨冰（第五完成人）	2018 年 5 月~2019 年 5 月	氮氧化物及过氧乙酰基硝酸酯联合在线检测装置及方法	知识产权 9
9	专利合作	王竹青（第二完成人），杨冰（第五完成人）	2017 年 8 月~2018 年 8 月	一种二氧化氮及臭氧联合在线检测装置及方法	知识产权 10