



追问跨学科研究之道——北京大学环境风洞五十年发展的启示

王秦歌¹, 胡敏^{2*}, 林官明², 王大洲¹

1. 中国科学院大学 人文学院, 北京 100049;

2. 区域环境安全全国重点实验室, 北京大学 环境科学与工程学院, 北京 100871

摘要: 环境风洞是低速风洞和空气动力学向非航空航天领域拓展的重要产物, 用于研究和解决大气污染物扩散、风工程、风荷载、城市风环境等环境治理和工业生产问题。本文以北京大学环境风洞五十年发展历程为案例, 围绕科研装置如何跨界进入新兴学科并推动跨学科知识生产这一问题, 梳理其从0#、1#、2#到3#的发展历程, 分析其如何在北京大学力学传统、国家环境保护需求和环境科学兴起的交汇中形成跨学科实验平台。研究发现, 北京大学环境风洞不仅推动了空气动力学在非航空航天领域的发展, 也深度参与了北京大学环境科学的建制化过程, 支撑了环境科学中心、环境模拟与污染控制国家重点联合实验室以及环境科学与工程学院的发展, 使大气污染研究从污染物来源与生成分析, 进一步拓展到输运、扩散、沉降等物理过程研究。北京大学环境风洞五十年的经验表明, 科研基础设施只有在问题牵引、问题转译、专长协商、平台建制和长期支撑共同作用下, 才能成为持续生产知识的跨学科平台。

关键词: 跨学科研究; 科研基础设施; 环境风洞; 环境空气动力学; 风工程与工业空气动力学; 知识生产; 平台建制

中图分类号: X-1; G322; V211.74

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(XXXX)XX-0001-16

引言

工业化和城市化的快速发展引发了一系列复杂环

境问题, 如大气污染、水污染、生态退化及公共健康风险等。这些问题通常涉及自然、工程与社会多个领域, 仅凭单一学科难以全面理解和有效应对。环境科

收稿日期: 2026-05-28; **修回日期:** 2026-06-15

基金项目: 区域环境安全全国重点实验室专项经费 (25L01RES)

作者简介: 王秦歌 (1996—), 女, 博士研究生, 研究方向为工程哲学、技术与工程史。E-mail: wqinge@126.com

*胡敏 (1966—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大气环境化学、颗粒物生成转化机制。E-mail: minhu@pku.edu.cn (通讯作者)

林官明 (1969—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为环境风洞模拟研究。

王大洲 (1967—), 男, 博士, 教授, 研究方向为工程哲学、工程史与创新政策研究。E-mail: dzwang@ucas.ac.cn

引用格式: 王秦歌, 胡敏, 林官明等. 追问跨学科研究之道——北京大学环境风洞五十年发展的启示[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20260076.

WANG Qinge, HU Min, LIN Guanming, et al. In Search of the Way of Interdisciplinary Research: Insights from Fifty Years of Development of the Environmental Wind Tunnel at Peking University[J]. Journal of Engineering Studies, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20260076.

学正是在此背景下形成的典型问题导向型综合学科^[1]。作为一门涵盖多分支的“大”学科或学科群组,环境科学既包括运用自然科学理论和方法的环境物理学、环境化学、环境生物学等,也包括借助社会科学理论和方法的环境社会学、环境经济学、环境法学、环境管理学等。可以说,环境科学是多学科在应对特定复杂客体(环境)问题时交叉融合的产物^[2]。因此,环境科学的研究方法必然需要整合不同学科领域的知识,依托具体问题或实验设计,跨越学科边界,将不同知识传统融入同一研究过程,从而形成跨学科的研究范式。

现有跨学科研究主要聚焦于项目合作、团队文化、评价机制与资助模式等议题^[3-5]。面对复杂科学问题,研究者往往需借助仪器平台获取技术、数据、方法及社会资本,科学仪器因此成为组织协作网络的关键节点^[6]。尽管已有研究关注科研基础设施(如科研仪器与设备)^[7-8],但对其在跨学科研究中的作用及其面临的问题,分析仍显不足。特别是如环境风洞这类实验设施,既未如国家大科学装置般获得充分重视,又有别于普通实验仪器,其在高校学科建设与跨学科知识生产中的作用,尚缺乏深入细致的探讨。

环境风洞属于低速风洞的一种。低速风洞是一种全封闭或部分封闭的管道系统,可形成具有一定速度

和压力的均匀气流,或具备特定温度与速度剖面的流动。在20世纪60年代之前,低速风洞主要应用于航空航天研究;此后,其应用逐渐扩展至非航空航天领域,例如用于研究大气扩散、风环境、城市规划及高层建筑风荷载的环境风洞(其结构与功能示意图见图1)。此外,还包括研究沙漠迁移的风沙风洞、模拟风生浪与冷却池热水循环的风水槽,以及研究船舶、帆船和潜艇水动力学特性的专用风洞等^[9]。

我国环境力学专家李家春院士曾指出,如果说20世纪是航空航天事业推动了力学的进步,那么在21世纪,环境问题则成为力学持续发展的重要推动力之一^[10]。这一论断为理解北京大学环境风洞的发展提供了关键视角。自20世纪70年代起,北京大学相继建成0#、1#、2#和3#环境风洞,其发展既继承了北京大学的力学与风洞实验传统,也参与了风工程、工业空气动力学及环境科学的形成与发展过程。尤为重要的是,环境风洞使空气动力学、大气环境化学、环境气象学和环境健康研究得以在同一问题链条中相互关联,并伴随北京大学环境科学中心、环境模拟与污染控制国家重点联合实验室以及环境科学与工程学院的建立,逐步融入环境科学的体制化进程。

基于上述分析,本文拟通过梳理北京大学环境风洞的发展历程,重点考察环境风洞如何依托跨学科合

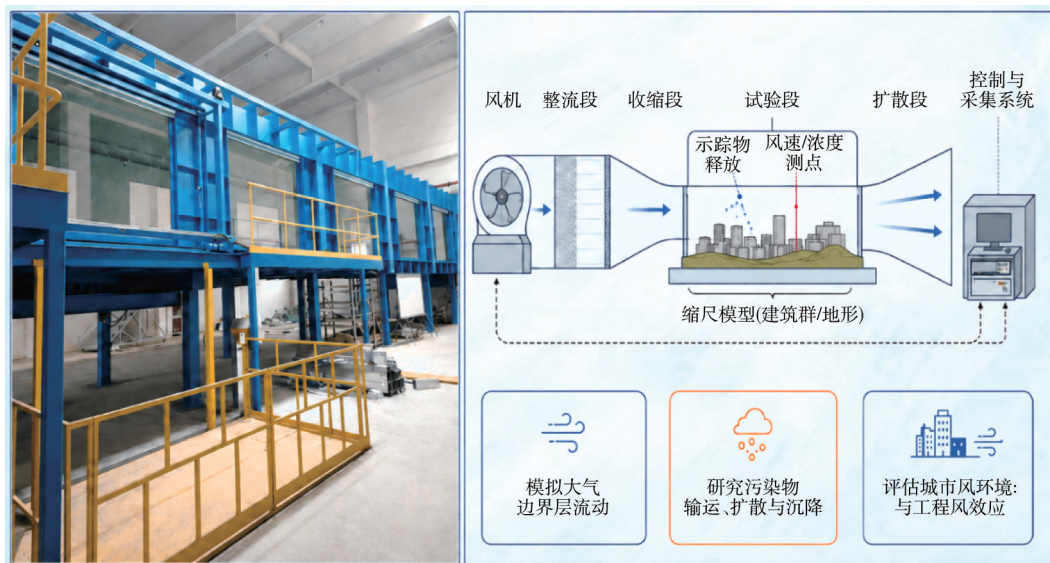


图1 环境风洞结构与功能示意图

Figure 1 Schematic Diagram of the Structure and Functions of an Environmental Wind Tunnel

作实现建立、运行并嵌入北京大学环境科学发展进程, 以及其作为科研基础设施, 如何进一步推动跨学科问题解决、知识生产与平台建设, 旨在回答科研装置如何“跨界”进入新学科领域并反哺该学科发展的核心问题, 以期为跨学科研究提供参考与启示。

1 从风洞到环境风洞 (1958—1975)

北京大学环境风洞的形成, 源于北京大学力学传统、流体力学应用取向与20世纪70年代国家环保需求的共同作用。力学本身作为自然科学与工程技术的桥梁^[11], 其研究范围往往随着工程实践和社会生产需求的演进而扩展, 流体力学尤其如此: 既有坚实的理论基础, 又广泛服务于航空航天、能源、化工、环保、医药等领域^[12]。正是这种学科的开放特性, 使北京大学力学系得以将大气污染扩散问题转化为空气流动、湍流扩散与边界层模拟问题进行研究; 同时, 国家环保需求也为其提供了现实导向与动力。

北京大学具有深厚的力学科研基础。1952年, 周培源在北京大学创办了中国第一个力学专业。1955年, 流体力学家周光炯^①^[13]加入数学力学系。1956年9月, 在周培源、周光炯等人的推动下, 流体力学教研室成立。通过举办低速风洞、边界层和高超声速流动等讨论班, 成立流体实验室, 使国外流体力学最新成果迅速被青年学者掌握。1956年和1957年, 黄敦^②^[14]和孙天风^③^[15]分别从海外学成归来任教, 苏联专家别洛娃也参与培养流体力学方向的研究生, 并支持航天风洞的建设。由此, 北京大学的流体力学教学与科研队伍迅速形成。

1954年, 北京大学数学力学系提出建造一座用

于教学与科研的中低速大型风洞。经周培源与陆士嘉、钱学森、钱伟长等人商议, 北京大学数学力学系联合中国科学院力学所、北航、清华等单位的科研力量共同开展建设。风洞的气动设计由魏中磊负责, 机械设计由陈耀纲负责, 而设计实施、加工、安装与调试等工作则由周光炯、伍荣林^④^[16]等人组织推进。建设过程中, 大量木加工、金加工及水磨石壁面等任务由数力系师生协作完成^[13]。1958年10月1日, 该风洞正式投入运行, 成为当时我国唯一能够进行飞行器型号试验的风洞。这一风洞的建设不仅积累了大型低速风洞在设计、加工、运行和测试方面的经验, 也推动了流体力学学科的发展。因此, 北京大学在此期间形成的流体力学科研队伍, 以及在风洞建设与运行中取得的经验, 为后来环境风洞的诞生奠定了理论基础与技术保障。

20世纪70年代, 中国环境保护事业的起步为这一转变提供了外部条件。1972年6月, 联合国在斯德哥尔摩召开首次人类环境会议, 中国派出了由工业、农业、水利、卫生、外交等部门组成的31人高规格代表团与会, 代表团的组建由周恩来总理亲自过问并推动^[17]。这次会议后, 环境保护开始进入中国国家治理和科学研究的议程。1973年8月5日至20日, 国务院召开第一次全国环境保护会议^[18], 地方政府、有关部门、工厂代表及科学界代表等300余人参与。会议形成的《关于保护和改善环境的若干规定(试行草案)》提出, 要大力开展环境保护科学研究, 并对所需材料、设备、仪器等作出安排^[19], 这标志着环境问题开始成为需要多学科共同参与的国家性科学课题。

正是在这一背景下, 北京大学唐孝炎、叶文虎等

① 周光炯 (1919—2018), 长期致力于流体力学、空气动力学及多相流体力学的教学与科研工作。为学习先进航空技术, 于1947年赴美国明尼苏达大学航空系深造, 先后取得硕士和博士学位。毕业后留美工作, 1954年回国。次年应周培源之邀, 进入北京大学数学力学系任教。1963年随力学系迁至北京大学陕西汉中分校, 1978年迁返北京^[13]。

② 黄敦 (1928—2019), 1948年毕业于清华大学机械系。1956年毕业于苏联莫斯科大学力学数学系, 主攻空气动力学和流体力学。1956年回国后在北京大学数学力学系任教, 开设了流体力学、爆炸力学、启动力学等课程^[14]。

③ 孙天风 (1920—2010), 1943年毕业于昆明西南联大航空工程系, 并留校担任助教。1946年随校迁回清华大学航空工程系继续任教。1948年至1956年, 在美国康奈尔大学航空工程学院学习与工作, 师从空气动力学家W.R.西尔斯 (W.R.Sears)。1957年回国后, 于北京大学数学力学系任职^[15]。

④ 伍荣林 (1908—2002), 空气动力学家, 我国风洞工程的奠基人之一。1935年毕业于麻省理工学院航空工程系, 次年主持建造了国内第一座1.2 m回路式低速风洞。新中国成立后, 先后在广州军管会、中南军区空军司令部、华北大学工学院及北京航空学院任教, 并主持或参与设计了国内多座风洞的规划和建设^[16]。

老一辈科学家开始思考如何将各自所学专业应用于环境领域,为解决国家的环境问题贡献所能。时任北京大学技术物理系教授的唐孝炎^①[20]提出成立环境化学教研室^[21];时任北京大学数学力学系助教的叶文虎,则从流体力学研究转向大气污染扩散问题的探索。两者分别代表了北京大学环境科学早期形成的两条重要路径:一是大气环境化学路径,聚焦于大气污染物的生成、转化与二次污染的形成;二是流体力学路径,着眼于污染物在空气中的输运、扩散与稀释。

叶文虎的研究转向是北京大学环境风洞诞生的重要因素。1956年,叶文虎考入北京大学数学系,但他并不满足于单纯的理论研究,对应用研究抱有更浓厚的兴趣,因而申请转至力学专业。1962年毕业后,他留校担任周培源的助教,从事湍流理论与实验研究,参与了湍流实验室的筹建以及中国第一台湍流测量仪的试制工作^{[22]23-30}。这段经历为他从流体力学角度理解大气运动和污染物扩散奠定了学科基础。在第一次全国环境保护会议上,周培源作为杰出科学家出席会议,并在会后意识到治理污染与保护环境将成为未来科研的重要方向,于是鼓励叶文虎更多地关注和研究环境污染问题。此后,叶文虎找来罗马俱乐部报告《增长的极限》^②进行研读,并积极参与各类环境保护相关的研讨会。

真正促使叶文虎学科转向的,是北京西郊环境质量评价研究。20世纪70年代初,北京西郊工业污染问题日渐引起重视。1973年第一次环境保护会议召开后,北京市“三废”治理办公室(即后来的北京市环境保护局)组织北京市环境保护科学研究所、中国科学院贵阳地球化学研究所、北京医学院、北京市卫生防疫站、北京农业科学院、中国科学院大气物理研

究所、北京市水文地质大队、中国科学院地理研究所、北京市园林局、北京市石景山区卫生局等30多家单位、近200名科研人员,对北京西郊的环境污染源与污染现状展开调查评价,研究环境污染与人体健康的关系,并探讨主要环境问题的治理技术、环境规划与环境政策等^[23]前言。周培源接到邀请后因事务繁忙,委派叶文虎代为参与。叶文虎在西郊环评工作中意识到,环境评价关注的是污染粒子在流体中的迁移转化、浓度分布及受体反应过程,这与传统流体力学研究固体在流体中的受力状况不同,除力学外还需涉及多学科知识。为此,他找来化学、生物学等书籍进行研读。为开展大气污染扩散研究,他还在北京大学力学系筹建了首个环境实验室,添置仪器设备,探索模拟实验方法,分析实验数据。在此过程中,叶文虎逐步认识到,大气污染物的迁移扩散与湍流理论密切相关。在大气边界层中,大气运动属于湍流流动,因此运用湍流理论研究大气污染问题前景广阔。风洞不再仅是航空航天空气动力学实验装置,也可能成为环境研究的重要实验工具。他认为风洞将在环境空气实验中发挥重要作用,于是萌生了建造环境风洞的设想。这一想法获得了周培源的支持^{[22]38-40}。叶文虎与几位同事利用简陋的马粪纸、电风扇以及老旧的电阻、电容、电位差计,探索环境空气动力学的理论框架与实验方法,建成了中国第一个环境风洞。由于设备粗糙、构造简单,仅为初步尝试,该风洞被称为0#环境风洞。

在“西郊环评”的大气协作组中,北京大学数学力学系负责“大气污染规律的风洞实验研究”部分,地球物理系^③[24]则承担编写“北京西郊大气污染扩散规律的数值计算”部分。前者主要采用风洞模拟方

① 唐孝炎(1932—2025),1954年7月毕业于北京大学化学系并留校任教;1972年,在北京大学陕西汉中分校担任技术物理系环境分析化学教研室主任;1985年7月,任北京大学环境科学中心主任;1995年5月,当选为中国工程院院士。开创了我国大气环境研究,创建了环境化学专业,在大气臭氧、酸雨及大气细颗粒物(气溶胶)化学领域完成了多项具有开拓性与创新性的系统工作,是我国大气环境及大气环境化学领域的学术带头人^[20]。

② 1968年,来自意大利、英国、加拿大等国的约30名科学家、社会学家及经济学家共同创立了罗马俱乐部,针对人口、资源、污染等全球性问题展开研究。1972年,该组织发布了研究报告《增长的极限》,呼吁人类反思社会发展与地球资源环境之间的关系。

③ 北京大学地球物理系源自清华大学地学系气象组。1952年院校调整后,清华大学气象系并入北京大学物理系,成为该系下设的气象专业。1959年1月,原北京大学物理系的气象专业与物理专业的地球物理组整合,共同组建了北京大学地球物理系。建系之初,该系设有地球物理学、应用地球物理学、大气物理学、天气动力学四个专业,并设有与中央气象局合办的气象函授室。1960年,专业进行了一次调整:应用地球物理专业被撤销,同时设立了高层大气物理与空间物理专业及天体物理专业,并成立了地球物理教研室、大气物理教研室、天气动力教研室、高层大气与空间物理教研室以及天体物理教研室^[24]。

法,后者以数值计算为主。北京大学653分校力学系^①和数力系湍流组依据《西郊地区环境质量评价探索》会战协作组的要求,分别利用空气动力实验室的低速大风洞和自制的简易风洞,开展大气污染扩散规律的室内实验研究,内容包括中性稳定大气边界层的模拟实验、石景山电厂污染扩散规律的模型实验、烟囱出口动力高度实验,以及中性稳定条件下扩散系数的实验研究。报告指出,风洞实验能抓住关键影响因素,在满足主要相似性条件的基础上保持模拟条件稳定,并通过反复试验,以较少人力物力在较短时间内获得规律性认识。报告最后提出,未来应继续借助风洞实验,研究污染物在大气中的扩散规律,包括有温度层结时大气边界层、城市边界层以及山区和大面积区域的扩散问题。鉴于实验的特殊性,现有航空风洞已难以胜任,有必要建造以环境保护为主的工业风洞,以应对实际生产中的环保需求^{[23]112}。与此同时,北京大学地球物理系的数值计算研究也表明,若能进一步核实污染源资料,并结合现场观测与风洞模型实验,对地形作用加以修正,模拟精度将可提升^{[23]133}。由此,现场观测、风洞实验和数值模拟开始在同一问题领域中形成互补。正是在“西郊环评”期间,北京大学力学系(包括汉中分校与北京本校)与地球物理系围绕大气污染扩散问题展开协作,并认识到原用于航空航天领域的风洞,同样可用于研究大气污染物扩散,从而为日后共同建设与应用环境风洞奠定了基础。

除了叶文虎之外,这一时期,北京大学力学系也有学者认识到风洞的非航空航天应用潜力。比如1974年,孙天凤利用北京大学航空风洞进行了大气边界层气流的风洞模拟试验,该试验被认为是国内首次利用大型航空风洞开展的风工程研究^[26]。这一工作与叶文虎的环境空气动力学探索共同表明,北京大学风洞已经开始突破航空航天领域,转向环境保护、风工程等更广阔的应用场景。

因此,1958—1975年可视为北京大学环境风洞的孕育与初创阶段。这一阶段中,低速风洞和湍流研

究为其奠定了力学基础,而国家环境保护事业的发展则提供了问题导向。叶文虎、孙天凤等人对大气边界层模拟及污染扩散问题的探索,将航空风洞的传统与工业生产需求相结合。尽管0#环境风洞装置较为简易,但它标志着风洞从航空航天领域的实验工具,转向应用于环境科学与风工程领域。

2 从1#到3#:环境风洞的发展与环境科学的体制化(1975年至今)

0#环境风洞开启了北京大学在环境空气动力学领域的实验探索,但其简易条件难以满足持续研究的需求。航空用的低速风洞试验段具有定常的均匀气流,试验段长度可以设计得很短。相比之下,用于模拟大气边界层内环境流体力学问题的环境风洞,所需模拟的气流条件远较航空风洞更为复杂^[27]。因此,1#、2#和3#环境风洞的发展,体现了北京大学环境风洞逐步成为跨学科研究平台,并在交叉学科能力上持续提升的阶段性演进(北京大学环境风洞发展时间轴见图2)。

北京市环保办公室主任注意到叶文虎的工作,并给予其100万RMB的支持,由他负责在北京大学建设“环境风洞实验室”。叶文虎又从学校教委获得14万USD外汇,用于购置仪器。学校还专门抽调五名教员协助叶文虎筹建环境空气动力实验室——环境风洞^{[22]42-43}。这五位教员分别具备航空机械设计、化工机器与设备、工业与民用建筑设计、力学以及航空空气动力学等专业背景,日后深入参与了环境空气动力学和环境风洞的研究。1975年,北京大学1#环境风洞建成,但这还只是一个小型风洞,试验段尺寸为1.5 m×1.0 m×6.5 m,无法满足大气边界层模拟和复杂污染扩散实验的需求。然而,围绕1#环境风洞开展的早期工作,为后来大型环境风洞的建设积累了理论、仪器、技术和人员基础。1976年,在周培源支持下,北京大学力学系成立了“环境空气动力学研究组”。

① 1969年10月26日,中共中央发出《关于高等学校下放问题的通知》,北京大学数学力学系的力学专业与该校技术物理系、无线电系于同年10月一同迁往陕西汉中地区。1972年,北京大学汉中分校(653分校)力学系正式组建。1978年,北京大学汉中分校迁返北京。1979年3月,北京大学力学系重新建立^[25]。

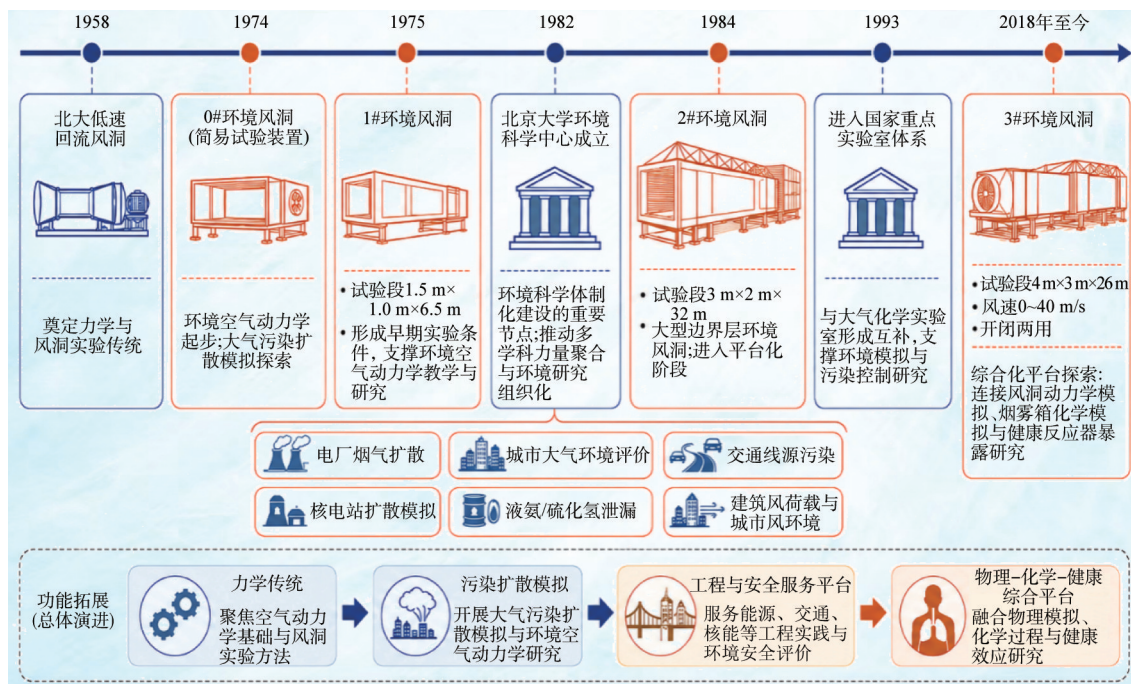


图2 北京大学环境风洞发展时间轴

Figure 2 Development Timeline of Peking University's Environmental Wind Tunnels

1#环境风洞运行期间, 叶文虎围绕湍流理论与大气污染扩散问题, 开展了一系列风洞模拟实验与现场试验, 在解决实际问题的同时, 逐步推动了环境空气动力学的发展。1979年, 为满足北京大学地球物理系大气物理专业研究生的学习需求, 叶文虎与从事大气物理研究的张霭琛^①合作编写了《环境空气动力学讲义》, 并在研究生班进行讲授^{[29]1}。此后, 两人在大气污染扩散、风洞实验、相似准则及大气边界层湍流扩散等方面建立了长期合作关系。张霭琛的参与表明, 环境空气动力学并非单纯从力学领域单向延伸而来, 而是在力学、大气物理与环境问题的交叉融合中逐渐形成的学科方向。

1983年, 叶文虎与张霭琛合著了《环境空气动力学引论》(上下册)^[29], 较为系统地阐述了环境空气动力学, 并将其界定为空气动力学的一个独立分支学科。其研究内容主要包括三个方面: (1) 风环境问题, 关注从地面至约 1 km 高空范围内, 风速 (大小

与方向) 所呈现的特征; (2) 风扩散问题, 主要研究固态与液态粒子在大气中的迁移和扩散规律, 是融合数学、力学、大气物理学和大气化学的综合性研究; (3) 风荷载问题, 亦属“建筑空气动力学”范畴, 即在建筑设计过程中需充分考虑风荷载的影响, 以避免建筑因风致损甚至倒塌。书中指出, 环境空气动力学的未来发展应注重机理研究与工程实践相结合, 促进数学、力学、气象学与化学领域工作者的紧密协作, 并综合运用现场测试、数值模拟与实验室模拟三种研究手段^{[29]1-5}。由此可见, 环境空气动力学具有鲜明的跨学科特征。

需要进一步说明的是, 叶文虎等人所提出的“环境空气动力学”, 与后来力学界所称的“风工程与工业空气动力学”实质上是相通的。20世纪70年代末至80年代初, 中国空气动力学界开始关注航空航天以外的应用领域。1977年, 国防科委组织中国风洞考察团访问欧洲空气动力学研究机构时, 特意考察了

① 张霭琛 (1933—2017), 1954年毕业于北京大学物理学系并留校任教。1982年, 赴澳大利亚联邦工业与科学研究中心进修, 主攻近地面层湍流结构及其探测技术。1983年回国后, 于北京大学地球物理系继续从事教学科研工作。主要研究方向包括大气探测技术、大气边界层结构及大气湍流扩散^[28]。

对方在风工程和工业空气动力学方面的研究工作,学习其如何为国民经济服务。1980年11月,在庄逢甘和孙天风的推动下,中国空气动力学研究会成立了工业空气动力学专业委员会^[30]。1982年,在中国力学学会第二届全国理事会扩大会议上,钱学森、钱伟长等人强调力学应服务于工程技术与生产建设,能源与环境问题被列为当时生产实践中的关键课题^[31]。孙天风与林荣生关于工业空气动力学研究与应用的报告,将大气边界层风特性、建筑物与构筑物的风荷载作用、风致质量迁移与扩散等列为重点研究方向,并引用了叶文虎于1981年在北京大学力学系所作的《某化工厂山区大气污染扩散规律实验研究报告》^[32],以及北京大学力学系环境小组1982年发表于《力学与实践》的《环境风洞设计中的几个问题》^{[27][32]}。由此可见,北京大学的环境风洞具有双重学科属性:在环境科学中,它是研究大气污染物扩散与迁移的实验平台;在力学体系中,则成为风工程与工业空气动力学的重要实验基础设施。

与此同时,北京大学环境科学也开启了体制化建设的进程。20世纪70年代末,环境教育逐渐受到重视,但环境化学、生态学与环境生物学、水资源与环境、大气物理学与大气环境等方向仍主要依托化学、生物学、地质学和大气科学等母学科发展,环境科学尚未完全成为一门独立建制的学科^[33]。1978—1979年,国家教委在南京大学召开全国高等院校环境科学研讨会,叶文虎受邀出席。会上,叶文虎注意到北京大学有六七个系的骨干教师参会,但学校本身并未设立专门的环境科学机构。鉴于此,在1979年,叶文虎联合北京大学地质地理系的王恩涌、陈静生,地球物理系的陈家宜,以及化学系的高小霞等人,共同向学校提议成立环境科学中心。这一设想最初遭遇阻力,原因之一在于当时许多人尚未承认“环境科学”作为独立学科的地位。经过持续推动,1982年,时任北京大学校长张龙翔批准成立北京大学环境科学中心^{[22][61]}。1983年,该中心获得环境科学专业博士点授权;1985年,中心转为实体机构,并收编了力学系

的环境空气动力学研究组,使环境空气动力学从力学系转入环境科学中心,进一步推动了北京大学环境科学的建制化发展。中心随后正式招收研究生,研究方向涵盖环境化学、环境地学、大气物理、环境规划与管理、环境经济学及环境法等。叶文虎推动环境科学中心的建设,并非仅仅旨在传统学科之外增设一个新机构,而是希望围绕环境问题整合不同知识资源,构建一种横向综合研究体系。因此,他的设想不仅限于一般的“跨学科合作”,更带有某种超学科(transdisciplinarity)取向——以“环境问题”作为统一的实践对象和组织原则,将力学、化学、地理、气象、法学、经济学等知识共同纳入同一问题场域,跨越学科界限,实现多领域知识的协调,追求整体性与系统性^[34]。环境风洞不仅将力学实验方法引入环境科学,也为环境科学中心提供了一个能够联结大气物理、环境化学、风工程及环境评价的物质平台。

在推进学科发展的过程中,叶文虎还计划进一步建设一座大型、具备世界先进水平的环境风洞。1978年,在周培源的支持下,叶文虎向教育部提交报告,建议购置DISA热线风速仪^①。1980年5月,他完成了《探头调节机构设计中的一些问题》^{[22][47]}与《环境风洞(大气边界层风洞)及其设计中的几个问题》^{②[27]}两篇论文。同年8月,叶文虎组织人员翻译丹麦产DISA热线风速仪系统的相关技术资料。1982年5月1日至6月22日,他赴英国和美国进行了为期两个月的考察,重点调研了国外环境风洞的建设与实验情况,为2#环境风洞的筹建积累了重要资料^{[22][45-50]}。1984年,北京大学2#环境风洞建成并投入使用。该风洞试验段尺寸为3 m×2 m×32 m,是一座大型直流式边界层环境风洞。与1#风洞相比,2#风洞在尺度、试验段长度、边界层发展条件及测试能力等方面均有显著提升,使北京大学的大气污染扩散研究从小规模探索迈入了较为系统的可控实验模拟阶段。此后,2#环境风洞长期服务于大气污染扩散、复杂下垫面、建筑风荷载、城市风环境、核电站应急扩散等多类研究与应用任务,成为北京大学环境科学中

① DISA(丹迪/Dantec)热线风速仪是一种高精度的动态流体测量仪器,专门用于流体流动研究,尤其是湍流分析。它基于热平衡原理,通过维持极细金属丝(热线)温度恒定,将流速测量转化为电流变化量的高精度检测,从而实现对流体速度的精准测量。

② 这篇文章,于1982年发表于《力学与实践》^[27]。

心及后续成立的环境模拟与污染控制国家重点联合实验室的重要模拟平台。

2018年,为修建工学大楼,学校决定拆除原有的航空风洞与2#环境风洞。由此,北京大学环境风洞进入了第三个发展阶段。新建的3#环境风洞位于北京大学昌平校区,试验段尺寸为4 m×3 m×26 m,风速范围0~40 m/s,具备开闭两用功能,能够模拟充分发展的大气边界层流动,并配备了新型现代化测试仪器。更重要的是,该风洞被赋予了更综合的环境模拟功能,有望进一步实现空气动力学模拟、烟雾箱化学反应模拟以及健康反应器暴露效应模拟的联动。

这种综合化趋势与环境科学自身的发展方向密切相关。传统上,大气环境化学和环境空气动力学在研究问题、实验装置及学术共同体方面相对分离。大气环境化学主要依赖现场观测、化学分析与烟雾箱模拟,重点关注污染物如何反应、转化,并生成臭氧、二次有机气溶胶和细颗粒物;环境空气动力学则更多运用风洞实验与流体力学方法,着重研究污染物在大气边界层、复杂地形及城市建筑群中的扩散、输送、沉降与再悬浮过程;环境健康研究则进一步聚焦于污染物暴露对人体或生物系统的影响。若环境风洞能与烟雾箱及健康反应器实现有效连接,便有望将“污染物生成-化学转化-动力输送-沉降暴露-健康效应”整合进同一问题链条中,从而推动环境科学实现真正的多学科融合,而非简单的学科叠加^[35]。

由此看来,从1#到3#风洞,北京大学环境风洞的发展伴随了北京大学环境科学体制化及综合性研究平台的形成过程。1#环境风洞使环境空气动力学从构想进入实验探索阶段;2#环境风洞使环境风洞成为大型边界层物理模拟平台,并被纳入环境科学中心及国家重点实验室体系;3#环境风洞在新装置条件下尝试连接大气动力学、大气环境化学和环境健康研究,构建起更为综合与交叉的环境模拟平台。

3 北京大学环境风洞的功能分析

环境风洞的出现,标志着低速风洞由航空航天领域延伸至非航空航天领域。借助环境风洞,可以研究大气扩散、风环境、城市规划和高层建筑风载荷等问题^[9]。因此,作为科研基础设施,北京大学环境风洞最初主要服务于大气污染扩散的实验模拟;然而在长期使用过程中,其功能已不仅限于环境科学领域,更拓展到风工程、工业空气动力学等更广泛的学科。这些功能可概括为应用服务和基础科学探索两大类,两者间的比例关系,体现了跨学科平台运行中的内在张力。

从项目承担情况来看,北京大学环境风洞长期以应用服务为主要功能。据现有项目清单统计^①^{[22]52-59},1975—2018年间,该风洞共承担项目188项。其中,涉及环境治理^②、公共安全(主要集中在核电、化工领域^③)以及政府或企业委托的社会需求类项目共38项,占比20.2%;属于建筑、交通、能源、体育场馆等领域的工程风环境与风荷载测试类项目共118项,占比62.8%。两者合计156项,占全部项目的83.0%。相比之下,直接面向基础科学探索类^④的项目为32项,占比17.0%。前两类体现了应用服务功能,后一类则属于科学探索功能。

从时间演变来看,北京大学环境风洞的应用重心呈现明显变化。1975—1989年,项目主要集中于工业污染扩散、电厂烟气扩散、城市大气环境评估及交通线源污染等环境治理议题。进入20世纪90年代后,工程风环境类项目快速增长,环境风洞的功能从污染扩散模拟扩展为风工程综合实验平台。2000—2009年,工程应用类项目达到高峰,成为风洞最主要的使用方向。2010—2018年,工程应用类项目有所减少,而基础探索类项目的占比则逐步回升。

与应用服务相比,北京大学环境风洞的基础科学

① 本文所有关于北京大学环境风洞项目的数据均来自《叶文虎传》中“表3-1 北京大学1#环境风洞部分测试记录(1975—1993)”和“表3-2 北京大学2#环境风洞部分测试记录(1984—2018)”。^{[22]52-59}

② 如石景山电厂污染扩散规律模型试验、盘县电厂烟囱烟气扩散模拟、徐州电厂烟囱烟气抬升与扩散实验、北京房山水泥厂环境影响评价、新街口公路线源污染实验等。

③ 如秦山核电站、山东海阳核电站、辽宁红沿河核电站、海南昌江核电站等大气扩散模拟,以及液氨泄漏扩散、硫化氢风洞测试等项目。

④ 如涡振控制(自然科学基金项目)、风障空气动力学研究、973气溶胶干沉降风洞模拟研究、边界层下表面风压空间结构研究、风力作用下沙粒起动随机特征的实验研究等项目。

探索项目数量较少,却更能凸显其作为环境科学实验平台的独特价值。相较于21世纪初期集中涌现的大量工程风荷载与重大工程服务项目,基础探索项目往往呈点状推进,缺乏连贯而稳定的研究序列。由此可见,环境风洞虽具备推动基础科学研究的能力,却未能充分将其转化为持续的基础知识产出。

北京大学环境风洞的基础科研价值首先体现在环境空气动力学问题的形成过程中。前文已述,20世纪70年代,随着中国环境保护事业的起步,大气污染扩散、工业排放影响以及城市环境质量评价等问题逐渐成为新的科学任务。1974年,叶文虎从湍流理论出发,提出建立“环境空气动力学”分支学科的设想,将空气动力学、湍流理论与大气污染扩散问题相结合。尽管“环境空气动力学”这一名称后来未在力学学科分类中成为主流术语,但其研究对象和方法在工业空气动力学、风工程和环境物理学等方向中得到延续与发展。因此,环境风洞促进了多领域的跨界合作。例如,环境风洞实验室与气象学领域学者(如张霭琛)保持长期合作,联合发表了多篇论文^[36-38]。1984年2月27日至3月1日,中国空气动力学研究会工业空气动力学专业委员会和中国气象学会大气化学与大气污染专业委员会联合召开了“全国大气污染扩散学术讨论会”。会议由孙天风主持,出席会议的有国内从事空气动力学、气象学和环境科学的专家、学者及科技工作者40余人。叶文虎也参加了此次会议,并撰写了会议纪要^[39]。尹洁芬、符致福、王新英等人与中国林业科学研究院合作,利用2#环境风洞开展了林带防风效应的研究^[40]。这也表明环境风洞能够服务于生态防护、农林工程等更广泛的领域。

1993年,北京大学环境风洞实验室与大气化学实验室共同组建了环境模拟与污染控制国家重点联合实验室。在这一平台架构中,环境风洞与大气化学实验室形成了互补关系:大气化学实验室主要关注污染物的生成、转化及二次污染形成等化学过程,环境风

洞则侧重于污染物的扩散、输运、沉降及复杂下垫面效应等物理过程。因此,环境风洞对环境科学研究的重要价值,在于将大气污染研究从局限于污染物“来源-生成”的化学分析,拓展至污染物“输运-扩散-沉降”的物理过程研究。二者共同纳入“环境模拟与污染控制”国家重点实验室体系,表明环境科学的基础研究难以仅凭单一方法完成,而需通过化学模拟、物理模拟、现场观测与数值模型的协同,形成对污染过程的系统阐释。然而,这一基础探索功能尚未得到充分发挥。

以大气气溶胶干沉降研究为例:大气气溶胶干沉降是指在无降水条件下,气溶胶颗粒物或气态污染物通过湍流输送、重力沉降、碰撞、截留和扩散等机制,沉积到地表、植被、水体、建筑物或其他下垫面的过程。它不仅涉及污染物在大气中的寿命与去除机制,也与区域传输、地表污染累积、生态输入及气候效应密切相关。若大气污染研究仅关注污染物的排放来源和化学生成,而忽视其扩散、沉降与去除机制,便难以形成完整的污染物生命周期解释。

北京大学环境风洞曾围绕大气气溶胶干沉降开展了三次研究,分别为2004年的“973^①气溶胶干沉降风洞模拟研究”、2013年的“大气边界层湍流中颗粒物干沉降机理”以及2018年的“典型下垫面比表面积与干沉降速度的关系”。大气气溶胶干沉降研究需同时考虑颗粒物粒径、颗粒物性质、湍流结构、下垫面粗糙度、比表面积以及沉降速度等多重因素,天然具备跨学科特性。环境风洞能够有效控制实验条件,分析各因素的影响,从而为干沉降速度模型、污染物去除机制和大气模型参数化提供实验支撑。然而,目前大气气溶胶干沉降研究尚未形成系统、成熟的成果体系。2004年、2013年和2018年的相关项目间隔较长,表明尽管该问题被多次关注,且具备依托环境风洞深入探索的条件,但持续积累的研究传统尚未建立。随着3#环境风洞的建设,以及烟雾箱、健康反应器等实验装置的进一步完善,干沉降、颗粒物输

① 国家重点基础研究发展规划(973计划)项目:1997年6月4日,国家科技领导小组第三次会议决定制定和实施《国家重点基础研究发展规划》,随后由科技部组织实施了国家重点基础研究发展规划,亦称“973计划”。瞄准科学前沿和国家发展中的重大关键问题,重点选择对我国经济建设和社会发展有重大意义的基础研究领域,力争在短时间有所突破。北京大学环境科学与工程学院胡敏教授在“973计划”项目“燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究”中,负责课题5“燃烧源可吸入颗粒物在环境大气中的去除机制”。

运、下垫面效应与健康暴露之间的联动研究仍具有广阔的拓展空间。

然而,这种拓展能否实现,不仅取决于硬件条件,更取决于能否建立稳定的研究课题设计、持久的经费支持与相对宽松的科研评价环境。对于干沉降等基础问题而言,真正关键在于通过长期实验累积、仪器校准、方法改进与数据比对,逐步形成可检验、可对比、可模型化的基础知识。因此,若要真正发挥3#环境风洞的基础探索功能,需要在项目资助与评价机制中为此类长期基础研究创造探索空间。与此同时,3#环境风洞的未来发展还面临实验技术队伍延续性的挑战。环境风洞实验高度依赖于模型制作、流场调试、示踪释放、测点布置、仪器校准、数据采集、误差判断与结果解析。实验人员不仅是复杂设备的管理者和使用者,也是实验问题的解决者与平台能力的重要维护者。他们凭借巧思与创造力解决实际问题,其工作内容常是学术同行难以完成的^[41]。然而现有高校评价体系仍偏重以论文、项目和学术头衔为核心的研究人员评估,对实验技术人员、工程师和平台维护人员在知识生产中贡献的认可尚显不足。若无稳定的实验技术人才与平台维护机制,即使硬件条件得以升级,环境风洞也难以持续承担复杂实验和长期基础研究的任务。

综上所述,北京大学环境风洞对基础科学探索的推动作用,可从两个层面来理解:一方面,它长期服务于环境治理、公共安全、风工程及重大工程建设,将复杂的现实问题转化为可控的实验问题,体现了高校科研基础设施服务国计民生的实际价值;另一方面,它也在风工程与工业空气动力学的发展、国家重点实验室的建设,以及大气污染输送、扩散、沉降机制研究中发挥了关键作用,同时推动了环境科学从污染物来源与化学生成研究,向污染物输送、扩散、沉降及再悬浮机制的深入拓展。然而,相比其平台潜力,其基础研究功能尚未得到充分发挥,具体表现为基础研究项目数量偏少、连续性不足,尤其对于沉降等关键问题的研究尚未形成稳定的学术传统。未来,要让北京大学3#环境风洞真正发挥其基础探索功能,需保障稳定的经费支持、营造宽松的科研环境、构建连续的人才梯队,并建立能够认可实验平台贡献的评

价机制。唯有如此,环境风洞才能从应用服务平台,逐步发展成为持续产出基础性知识的跨学科科研基础设施。

4 从环境风洞发展历程看跨学科研究之道

北京大学环境风洞的五十年发展历程中,积累了丰富经验,但也出现了基础研究连续性不强、实验技术队伍出现断层、评价机制有待改进等问题。由此可见,跨学科研究要想真正实现持续的知识创新,需要处理好问题引领、问题转译、专长协商、平台建制与长期支撑五个方面的关系。

(1) 跨学科研究往往始于重大现实问题的引领。北京大学环境风洞的诞生,正是国家环境保护事业起步、工业污染问题凸显以及城市环境评价需求共同作用的结果。大气污染问题要求研究者不仅明确污染物“是什么”和“从哪里来”,还需阐释其“如何运动”“如何扩散”“如何稀释”以及“如何影响不同区域”。这些问题天然超越了单一学科的边界。在此背景下,化学、力学、气象学、医学、地理学、生物学等学科的知识传统被引入环境问题的研究。叶文虎从湍流理论转向大气污染扩散研究,并主导建造环境风洞,并非出于个人兴趣的偶然转变,而是流体力学与湍流理论在国家重大现实需求推动下实现的学科转向。由此可见,跨学科研究往往始于重大问题牵引:来自既有学科的科研人员主动跨越学科边界,将自身专业知识和能力转化为解决国家发展与社会治理问题的资源。

(2) 跨学科研究需要进行问题转译。现实中的环境问题往往表现为污染、风险、健康损害和治理压力等形式,难以直接引入风洞实验。要使环境风洞成为有效的研究平台,就必须将大气污染问题转化为空气流动问题,将污染影响转化为污染物扩散与浓度分布问题,并将环境评价需求转化为风速、风向、湍流结构、下垫面粗糙度、示踪物释放和浓度测量等实验变量。叶文虎的关键贡献,正在于将污染物在大气中的迁移、扩散和稀释,理解为与大气边界层流动、湍流扩散和复杂下垫面条件相关的物理过程。若缺乏这种问题转译,现实需求便只能停留于治理压力层面,不同学科也难以围绕同一对象展开有效合作。

(3) 跨学科研究依赖专长协商。在复杂实验的知识生产过程中, 必须通过不同专家之间的协商、学习与相互理解来实现。在跨学科合作中, 专家专长可划分为“贡献性专长”与“互动性专长”。前者指能够实际参与某一领域的实践并作出实质性贡献的能力; 后者指虽不一定亲身实践, 但能理解该领域的语言、问题及判断方式, 并可与该领域专家进行有效交流的能力^[42]。叶文虎的跨界意义就在于, 他不仅具有湍流理论和力学实验方面的贡献性专长, 还通过参与西郊环评、环境保护会议和环境问题研究, 逐步获得环境科学领域的互动性专长, 并在参与环境问题研究中形成关于环境科学的贡献性专长。这使他能够在两种语言之间进行转译: 一方面把环境污染问题理解为湍流扩散和空气动力学问题, 另一方面又把风洞实验结果转化为环境评价和污染治理可以理解的知识。这种跨界能力, 正是跨学科研究中最稀缺、也最关键的能力。

(4) 跨学科研究需要借助平台建制, 将暂时性合作转化为持续的科研生态。仅依赖个人兴趣、临时项目或偶然合作, 跨学科研究难以实现可持续的知识产出。以北京大学环境风洞的发展为例, 跨学科研究必须通过装置、机构、团队、课程与方法的系统建制, 把短期协作转变为可延续的科研体系。从0#到3#风洞的演进, 正是这一平台建制过程的体现。0#环境风洞解决了“能否开展实验”的问题, 它虽简陋, 却实现了从无到有的突破, 使大气污染扩散问题首次得以通过实验进行表达。1#环境风洞回应了“如何开始实验”的挑战, 为环境空气动力学的教学、实验方法及仪器准备提供了基础条件。2#环境风洞则将北京大学环境风洞推入大型边界层物理模拟平台阶段, 使大气污染扩散、复杂下垫面、城市风环境及工程风效应等问题开始获得更系统的实验支持。3#环境风洞进一步朝向综合化平台探索, 尝试连接风洞动力学模拟、烟雾箱化学模拟与健康反应器暴露研究, 为污染物生成、转化、运输、沉降和暴露的链式研究提供条件。与此同时, 环境科学中心的成立, 使环境空气动力学不再限于力学系的内部探索, 而融入北京大学环境科学的整体建制; 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室的建设, 则促使环境风洞与大气化学实验室形成

互补。由此, 跨学科研究模式得以稳固, 成为北京大学环境科学研究的重要特色。

(5) 跨学科研究需要长期支撑, 为基础探索、技术人员及不确定性产出提供制度空间。以北京大学环境风洞承担的课题为例, 干沉降等基础问题通常研究周期长、变量复杂、短期产出不确定, 依赖长期实验积累、仪器校准、方法改进和数据比对。若评价机制仅关注短期论文数量与快速项目产出, 跨学科平台则易退化为应用服务平台, 难以发展为持续产生新知识的基础设施。长期支持还意味着承认实验技术人员与工程师在知识生产中的实质性贡献。环境风洞实验高度依赖模型制作、流场调试、示踪物释放、测点布置、仪器校准、数据采集、误差判断与结果解析。倘若缺乏稳定的实验技术人员队伍, 即使硬件条件持续升级, 平台的知识生产能力也可能逐渐衰退。

5 结论

当前, 随着国家对环境治理与大气科学研究重视程度的日益提升, 深入剖析科研基础设施在学科交叉融合中的关键作用, 对于优化科研资源配置、推动环境科学高质量发展具有重要的理论价值与现实意义。本文以北京大学环境风洞五十年发展历程为案例, 系统考察了科研基础设施如何跨界进入新兴学科并推动跨学科知识生产。结论如下。

(1) 环境风洞的诞生与发展, 是北京大学力学传统、国家环境保护需求、环境科学体制化建设以及现实应用任务共同作用的结果。按其跨学科能力的演进历程, 可划分为三个阶段。第一阶段是“孕育与初创阶段(1958—1975)”, 这一阶段以北京大学力学系流体力学科研队伍以及1958年建成的低速回流风洞所奠定的力学传统、20世纪70年代国家环境保护需求的兴起以及0#环境风洞的形成为主要标志, 体现出风洞装置从航空航天领域实验装置向非航空航天领域实验装置转化的开端。第二阶段是“平台化阶段(1975—2018)”, 这一阶段以1#、2#环境风洞的建设和使用为核心, 特别是2#大型边界层环境风洞的建成, 使北京大学的大气污染扩散研究从小规模试验进入系统化物理模拟平台阶段, 推动风工程、风载荷

等多元化的应用,并逐步嵌入环境科学中心和国家重点实验室体系。第三阶段是“综合化平台探索阶段(2018年至今)”,这一阶段以3#环境风洞建设为标志,为风洞动力学模拟、烟雾箱化学模拟和健康反应器暴露模拟的连接提供新的平台条件,从而使环境科学围绕污染物生成、转化、输运、沉降和暴露形成更完整的问题链条成为可能。

(2) 北京大学环境风洞的发展表明,科研基础设施在跨学科研究中发挥着重要的组织作用。一方面,该风洞长期服务于大气污染扩散、城市风环境、核电安全、工程风荷载等现实需求,将复杂的环境与工程问题转化为可控的实验问题,展现了高校科研平台以及空气动力学服务国计民生的价值。另一方面,它也促进了风工程与工业空气动力学的形成,特别是推动了环境科学的建制化发展,为污染物输运、扩散、沉降以及复杂下垫面效应等基础问题提供了实验条件,使环境科学研究得以从污染物“来源-生成”的化学分析,进一步拓展至“输运-扩散-沉降”的物理过程分析。由此可见,环境风洞不仅是一种实验设备,更是连接力学、大气物理、环境化学、风工程及环境治理实践的跨学科知识生产平台。

(3) 北京大学环境风洞的经验也表明,跨学科研究并不会随着平台建成而自然产生。当前环境风洞的工作以应用服务为主,基础探索类项目数量不多、持续性不强,干沉降等重要基础问题尚未形成稳定的研究传统,3#环境风洞未来也面临实验技术队伍接续等现实挑战。由此可见,推动跨学科研究既要有重大现实问题的牵引,也要将现实问题转化为各学科能够共同应对的科学问题;既需促成不同领域专家形成共同的语言与判断标准,也需通过装置、机构、课程、方法及人才培养实现平台的制度化建设;更需要在平台运行中,为长期基础研究、实验技术传承以及不确定的产出提供制度保障。

综上所述,北京大学环境风洞的经验表明,科研基础设施要成为持续生产知识的跨学科平台,不能仅依赖于硬件建设或鼓励合作的口号。其成功之道在于实现问题牵引、问题转译、专长协商、平台建制与长期支撑五个要素的协同作用。唯有如此,才能将现实需求转化为科学问题,将临时合作固化为科研生态,并最终使科研装置从服务现实的应用平台,跃升为能够持续产出基础性知识的创新策源地。

参考文献

- [1] 曲格平. 环境科学基础知识[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1984: 476-477.
Qu G P. Basic Knowledge of Environmental Science[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1984: 476-477.
- [2] 王续琨. 交叉学科、交叉科学及其在科学体系中的地位[J]. 自然辩证法研究, 2000, 16(1): 43-47.
Wang X K. Interdisciplinarity, interdisciplinary science and their position in the system of sciences[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2000, 16(1): 43-47.
- [3] National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Institute of Medicine, Committee on Science, Engineering, and Public Policy, Committee on Facilitating Interdisciplinary Research. Facilitating Interdisciplinary Research[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2005.
- [4] Vladova G, Haase J, Friesike S. Why, with whom, and how to conduct interdisciplinary research? A review from a researcher's perspective [J]. Science and Public Policy, 2025, 52(2): 165-180.
- [5] 曾粤亮, 喻莹, 高瑞瑞. 国内外跨学科科研合作研究进展、特点与前瞻: 以近五年发表的文献为基础的研究[J]. 科技情报研究, 2026, 8(2): 129-139.
Zeng Y L, Yu Y, Gao R R. Progress, characteristics and prospects of interdisciplinary research collaboration at home and abroad: Research based on literature published in the past five years[J]. Scientific Information Research, 2026, 8(2): 129-139.
- [6] Söderström K R. The structure and dynamics of instrument collaboration networks[J]. Scientometrics, 2023, 128(6): 3581-3600.
- [7] Karasti H, Millerand F, Hine C, et al. Infrastructure, work practices and knowledge production in large-scale scientific research[J]. Computer Supported Cooperative Work, 2010, 19: 1-37.

- [8] Rådberg K K, Löfsten H. Developing a knowledge ecosystem for large-scale research infrastructure[J]. *The Journal of Technology Transfer*, 2023, 48(1): 441-467.
- [9] 颜大椿. 实验流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 20.
Yan D C. *Experimental Fluid Mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 20.
- [10] 中国力学学会. 力学学科发展报告-2018-2019[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2020: 474.
Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. *Report on Advances in Mechanics-2018-2019*[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2020: 474.
- [11] 尹协振, 贾来兵. 实验流体力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2023.
Yin X Z, Jia L B. *Experimental Fluid Mechanics*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2023.
- [12] 周光炯. 多相流体力学的发展现状及其展望(提纲)[J]. *力学与实践*, 1989, 11(2): 37-40.
Zhou G J. Development status and prospect of multiphase fluid mechanics (outline)[J]. *Mechanics in Engineering*, 1989, 11(2): 37-40.
- [13] 颜大椿, 陶映荃. 周光炯(1919—)[G]//中国科学技术协会. 中国科学技术专家传略: 工程技术编, 力学卷2. 福州: 福建教育出版社, 1997: 88-100.
Yan D C, Tao Y Q. Zhou Guangjiong (1919—)[G]//China Association for Science and Technology. Brief introduction of China science and technology experts: Engineering technology compilation, mechanics volume 2. Fuzhou: Fujian Education Press, 1997: 88-100.
- [14] 西南联大校友、北京大学数学科学学院教授黄敦去世享年90岁[EB/OL]. (2019-03-25)[2026-05-26]. <https://www.tsinghua.org.cn/info/1023/31405.htm>.
Professor Huang Dun, Alumnus of National Southwestern Associated University and Professor at the School of Mathematical Sciences, Peking University, Dies at the Age of 90[EB/OL]. (2019-03-25)[2026-05-26]. <https://www.tsinghua.org.cn/info/1023/31405.htm>.
- [15] 顾志福, 睢行严. 孙天凤(1920—)[G]//中国科学技术协会. 中国科学技术专家传略: 工程技术编, 力学卷1. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 454-461.
Gu Z F, Ju X Y. Sun Tianfeng (1920—)[G]//China Association for Science and Technology. Brief introduction of China science and technology experts: Engineering technology compilation, mechanics volume 1. Beijing: China Science and Technology Press, 1993: 454-461.
- [16] 王振羽. 伍荣林(1908—)[G]//中国科学技术协会. 中国科学技术专家传略: 工程技术编, 航空卷2. 北京: 航空工业出版社, 2002: 17-24.
Wang Z Y. Wu Ronglin (1908—)[G]//China Association for Science and Technology. *Biographies of Chinese Scientists and Technologists: Engineering and Technology, Aviation, Vol. 2*. Beijing: Aviation Industry Press, 2002: 17-24.
- [17] 丁金光. 国际环境外交[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2007.
Ding J G. *International Environmental Diplomacy*[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2007.
- [18] 李欢欢. 40年大气环境化学路: 访中国工程院院士唐孝炎[J]. *世界环境*, 2012(3): 24-25.
Li H H. 40 years' road of Chinese atmospheric environmental chemistry[J]. *World Environment*, 2012(3): 24-25.
- [19] 关于保护和改善环境的若干规定(试行草案)[G]//曲格平, 彭近新. 环境觉醒: 人类环境会议和中国第一次环境保护会议. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 264-267.
Several Provisions on the Protection and Improvement of the Environment (Draft for Trial Implementation)[G]//Qu G P, Peng J X. *Environmental awakening: Human environment conference and the first environmental protection conference in China*. Beijing: China Environmental Science Press, 2010: 264-267.
- [20] 张玮瑛. 燕京大学史稿: 1919—1952[M]. 北京: 人民中国出版社, 1999: 925-927.
Zhang W Y. *Yenching University Historical Script: 1919—1952*[M]. Beijing: People's China Publishing House, 1999: 925-927.
- [21] 林菲. 环境科学在中国的兴起——建制化过程的历史研究[D]. 北京: 清华大学, 2017: 99.
Lin F. *The rise of environmental science in China: A historical study of the institutionalization process*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017: 99.
- [22] 林官明, 贺艳青, 杨爱民. 环境科学的开拓者: 叶文虎传[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2026.
Lin G M, He Y Q, Yang A M. *Pioneer of Environmental Science: Biography of Ye Wenhui*[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2026.
- [23] 北京西郊环境质量评价协作组. 北京西郊环境质量评价研究[R]. 北京: 北京西郊环境质量评价协作组, 1977.
Collaborative Group for Environmental Quality Assessment of Beijing's Western Suburbs. *A study on environmental quality assessment of*

- Beijing's western suburbs[R]. Beijing: Collaborative Group for Environmental Quality Assessment of Beijing's Western Suburbs, 1977.
- [24] 陈国达. 中国地学大事典[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1992: 369.
- Chen G D. China Geoscience Event Book[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1992: 369.
- [25] 中国科学技术协会, 中国力学学会. 中国力学学科史[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012: 175-176.
- China Association for Science and Technology, Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. A Disciplinary History of Mechanics in China[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2012: 175-176.
- [26] 武岳, 孙瑛, 郑朝荣, 等. 风工程与结构抗风设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014: 129.
- Wu Y, Sun Y, Zheng C R, et al. Wind Engineering and Wind-Resistant Design of Structures[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2014: 129.
- [27] 北京大学力学系环境小组. 环境风洞设计中的几个问题[J]. 力学与实践, 1982(3): 19-23.
- Environmental Group, Department of Mechanics, Peking University. Several issues in the design of environmental wind tunnels[J]. Mechanics in Engineering, 1982(3): 19-23.
- [28] 中华人民共和国人事部. 新中国留学归国学人大词典[M]. 武汉: 湖北教育出版社, 1993: 767.
- Ministry of Personnel of the People's Republic of China. New China Dictionary for Returned Scholars Studying Abroad[M]. Wuhan: Hubei Education Press, 1993: 767.
- [29] 叶文虎, 张霭琛. 环境空气动力学引论: 上册[M]. 北京: 北京大学环境科学中心, 1983.
- Ye W H, Zhang A C. Introduction to Environmental Aerodynamics: Vol. I[M]. Beijing: Environmental Science Center, Peking University, 1983.
- [30] 王礼恒. 庄逢甘院士纪念文集[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011: 205-207.
- Wang L H. Collection of Commemorative Works of Academician Zhuang Fenggan[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2011: 205-207.
- [31] 钱伟长. 当前力学发展的趋向[G]//中国力学学会力学学报编辑部. 力学与生产建设: 中国力学学会第二届理事会扩大会议论文汇编 1982年5月. 北京: 北京大学出版社, 1983: 13-16.
- Qian W C. Current Trends in the Development of Mechanics[G]//Editorial Office of Acta Mechanica Sinica, Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Mechanics and Production Construction: Proceedings of the Enlarged Meeting of the Second Council of the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, May 1982. Beijing: Peking University Press, 1983: 13-16.
- [32] 孙天凤, 林荣生. 工业空气动力学的应用[G]//中国力学学会力学学报编辑部. 力学与生产建设: 中国力学学会第二届理事会扩大会议论文汇编 1982年5月. 北京: 北京大学出版社, 1983: 25-37.
- Sun T F, Lin R S. Research and Applications of Industrial Aerodynamics[G]//Editorial Office of Acta Mechanica Sinica, Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Mechanics and Production Construction: Proceedings of the Enlarged Meeting of the Second Council of the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, May 1982. Beijing: Peking University Press, 1983: 25-37.
- [33] 叶文虎, 栾胜基. 高等院校环境专业教育的思考[J]. 环境教育, 1995(1): 14-16, 47.
- Ye W H, Luan S J. Reflections on environmental education in colleges and universities[J]. Environmental Education, 1995(1): 14-16, 47.
- [34] Klein J T. Interdisciplinarity: History, Theory, and Practice[M]. Detroit: Wayne State University, 1990: 66.
- [35] Clark S G, Wallace R L. Integration and interdisciplinarity: Concepts, frameworks, and education[J]. Policy Sciences, 2015, 48(2): 233-255.
- [36] 叶文虎, 卢崇飞, 张霭琛. 大气边界层中湍流扩散问题的随机微分方程处理[J]. 气象学报, 1983(1): 69-78.
- Ye W H, Lu C F, Zhang A C. A stochastic differential equation approach to turbulent diffusion problems in the atmospheric boundary layer [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1983(1): 69-78.
- [37] 叶文虎, 张霭琛. 大气污染扩散的风洞实验及其相似准则[J]. 环境工程, 1984(1): 27-32.
- Ye W H, Zhang A C. Wind tunnel experiments on atmospheric pollution diffusion and their similarity criteria[J]. Environmental Engineering, 1984(1): 27-32.
- [38] 张霭琛, 刘树华, 叶文虎. 跃变型扩散的实验研究[J]. 大气科学, 1993(1): 39-43.
- Zhang A C, Liu S H, Ye W H. An experimental study on abrupt-change diffusion[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1993(1): 39-43.
- [39] 林荣生, 叶文虎. 把大气污染扩散的研究工作推向新的阶段[J]. 环境科学研究, 1984(7): 1-2.
- Lin R S, Ye W H. Push the research work of air pollution diffusion to a new stage[J]. Research of Environmental Sciences, 1984(7): 1-2.

- [40] 周士威, 程致力, 沈晓东, 等. 林带防风效应的实验[M]//中国林学会. 造林论文集. 北京: 中国林业出版社, 1987: 32-39.
Zhou S W, Cheng Z L, Shen X D, et al. Experiments on the windbreak effect of forest belts[M]//Chinese Society of Forestry. Collected Papers on Afforestation. Beijing: China Forestry Publishing House, 1987: 32-39.
- [41] Noke H, Mosey S, Vere K. Understanding university technicians' role in creating knowledge exchange routines and capabilities: A research agenda[J]. *The Journal of Technology Transfer*, 2024, 49(5): 1606-1630.
- [42] Collins H, Evans R. *Rethinking Expertise*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2007.

In Search of the Way of Interdisciplinary Research: Insights from Fifty Years of Development of the Environmental Wind Tunnel at Peking University

WANG Qinge¹, HU Min^{2*}, LIN Guanming², WANG Dazhou¹

1. School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. State Key Laboratory of Regional Environment and Sustainability, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

Highlights

Peking University environmental wind tunnels: incubation-platformization-integration.

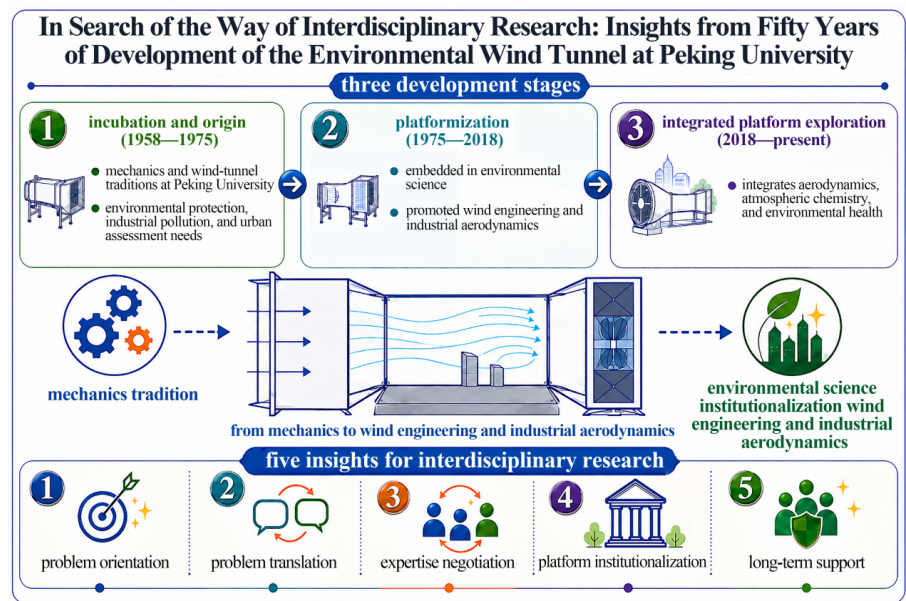
Mechanics and wind-tunnel traditions laid the technical foundation.

State environmental protection and industrial-urban assessment drove the shift.

Major real-world problems initiate and organize interdisciplinary research.

Problem translation, expertise negotiation, and support sustain the platform.

Graphical Abstract



Abstract: As a type of research infrastructure that extends low-speed aerodynamics and wind-tunnel experimentation into environmental science and engineering, environmental wind tunnels have played a significant role in atmospheric pollutant dispersion, wind engineering and industrial aerodynamics, urban wind environments, and environmental assessment. Since the construction and effective operation of such facilities depend not only on technical design, but also on the guidance of major real-world problems, interdisciplinary collaboration, and institutional support, it is crucial to trace the birth and development of Peking University's environmental wind tunnels. By examining how mechanics traditions, wind-tunnel experimental foundations, national environmental protection, industrial pollution problems, and urban environmental assessment jointly shaped this facility,

the study reflects on how environmental wind tunnels were built through interdisciplinary efforts, how they contributed to the development of environmental science, and what principles can be drawn for conducting interdisciplinary research more effectively.

A historical case-study approach is adopted to reconstruct the birth and development of Peking University's environmental wind tunnels. The study is based mainly on a review of historical documents, published literature, disciplinary records, institutional materials, and the project list of the 1# and 2# environmental wind tunnels from 1975 to 2018, supplemented by interviews with key participants involved in the construction, operation, and interdisciplinary use of the facilities. Through these materials, the development process from the low-speed recirculating wind tunnel completed in 1958, through the 0#, 1#, and 2# environmental wind tunnels, to the 3# environmental wind tunnel built after 2018 is traced. The analysis focuses on how environmental problems were translated into aerodynamic and experimental problems, how the wind tunnels were embedded in the institutional development of environmental science, and how their functions shifted between applied services and basic scientific exploration.

The formation of Peking University's environmental wind tunnels resulted from the convergence of its mechanics and wind-tunnel experimental traditions, the applied orientation of fluid mechanics, and the rise of China's environmental protection agenda in the 1970s. The development of the facility can be divided into three stages. The 0# and 1# tunnels marked the incubation and initial exploration stage, in which wind-tunnel methods were introduced into atmospheric pollution diffusion and environmental aerodynamics. The 2# tunnel marked the platformization stage, during which the facility became a large atmospheric-boundary-layer simulation platform serving pollution dispersion, complex underlying surfaces, wind loads, urban wind environments, public-safety-related diffusion studies, and wind engineering and industrial aerodynamics. The 3# tunnel represents an effort toward integrated environmental simulation, with the potential to connect aerodynamic simulation, smog-chamber chemical simulation, and health-effect exposure studies. Institutionally, the environmental wind tunnels were closely related to the establishment and development of Peking University's Center for Environmental Sciences, the State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, and the College of Environmental Sciences and Engineering. Scientifically, they helped extend atmospheric pollution research from pollutant sources and chemical formation to physical processes such as transport, dispersion, deposition, and resuspension. Project data from 1975 to 2018 show a persistent tension between applied services and basic research. Among 188 projects, 156 projects, or 83.0%, served environmental governance, public safety, commissioned social demands, and engineering wind-environment or wind-load testing, while only 32 projects, or 17.0%, directly addressed basic scientific exploration. Aerosol dry deposition studies in 2004, 2013, and 2018 demonstrate the platform's potential for basic environmental research, but also reveal the discontinuity of long-term knowledge accumulation.

The case shows that a research infrastructure becomes an interdisciplinary knowledge platform only when five elements operate together. First, major real-world problems provide problem orientation. Second, practical environmental pressures must be translated into scientific and experimental variables, such as wind speed, turbulence structure, underlying-surface roughness, tracer release, and concentration measurement. Third, expertise negotiation is needed so that researchers can move between the languages of mechanics, atmospheric science, environmental chemistry, engineering, and governance. Fourth, platform institutionalization transforms temporary collaboration into a research ecology through facilities, organizations, teams, courses, and methods. Fifth, long-term support is necessary for basic exploration, technical staff, instrument maintenance, and uncertain research outputs. The experience of Peking University's environmental wind tunnels suggests that universities and funding agencies should evaluate research infrastructure not only by short-term papers or commissioned services, but also by its capacity to translate social needs into scientific questions, sustain technical expertise, and generate basic knowledge across disciplinary boundaries.

Keywords: interdisciplinary research; research infrastructure; environmental wind tunnel; Environmental Aerodynamics; wind engineering and industrial aerodynamics; knowledge production; platform development