



## 中国科学院力学研究所环境力学重点实验室研究工作进展

刘青泉

中国科学院力学研究所环境力学重点实验室, 北京 100190

中国科学院力学研究所环境力学重点实验室 (Key Laboratory of Environmental Mechanics, LEM) 是力学研究所重点培育发展的实验室之一. 中国科学院力学研究所最早在国内倡导环境力学研究, 积极推动力学与环境科学的交叉与融合. 早在 1960 年代就开始环境问题研究, 1986 年正式组建了环境流体力学研究组, 1989 年和 1992 年成立了环境流体力学和环境工程研究室. 1995 年合并成立了环境科学与技术研究中心, 2007 年成立了环境力学中心. 经过 20 余年的发展, 人才队伍建设和科研能力建设都达到了较高水平, 尤其在流域及海洋水环境、重大工程中的环境与灾害、大气与城市环境、工业节能减排和废弃物处理等方面, 逐步形成学科优势, 取得了丰硕科研成果, 于 2008 年 12 月正式成立了环境力学重点实验室.

LEM 的总体定位是, 面向国家发展战略需求, 致力于解决重大环境及灾害过程的力学关键科学问题; 重点研究影响和制约我国社会与经济可持续发展的重大及区域水环境、工业减排和城市大气污染、重大自然与工程灾害中的力学机理和演化规律; 不断突破关键技术并开拓新的研究方向, 为我国环境保护、防灾减灾提供科学依据和技术支撑; 建设特色鲜明、系统配套的科学实验和数值模拟平台; 促进我国环境力学领域的人才队伍建设, 推动和引领我国环境力学的学科发展, 建成具有国际重要影响的环境力学开放研究基地.

LEM 主要瞄准重大环境和重大灾害两大领域, 发挥力学学科的优势, 运用力学的基本原理和研究方法, 注重机理和定量化研究, 着重研究重大环境与灾害过程中的关键力学科学问题, 揭示重大环境与灾害的发生机理与演化规律, 为环境保护、环境修复、节能减排、灾害预防、污染治理提供科学依据、技术支撑和工程解决方案. 实验室确定的 3 个研究方向包括: (1) 自然环境流动规律及其环境影响; (2) 自然及工程地质灾害的预测、评价理论及方法; (3) 工业减排和城市环境污染及控制. 并在近期面向环境科学的发展大趋势和国家对环境保护、灾

害预测方面的重大需求, 在 3 个主要研究方向上分别重点研究: (1) 重大水环境的演化规律和治理方法; (2) 滑坡与溃坝灾害的发生机理和预测评价方法; (3) 应对全球气候变化的工业节能减排和城市大气污染.

LEM 设有流域水环境、海洋环境与工程应用、工程地质力学及应用、大气环境与数值模拟、高效洁净燃烧、废弃物处理 6 个课题组, 现共有固定科研人员 31 名. 其中中国科学院院士 2 名, 研究员 (博士生导师) 9 名, 国家杰出青年基金获得者 1 名, 科学院“百人计划”1 名, 973 项目首席科学家 1 名, 副研究员 9 名, 高级工程师和高级实验师 3 名. 形成了一支以著名环境力学家李家春院士和著名等离子体与燃烧学家吴成康院士为学术带头人, 高水平环境力学研究队伍. 同时, 实验室积极培养高水平青年人才, 目前在站博士后、在读博士生和硕士生共 67 名.

LEM 以自主创新为主, 建设了水环境实验系统、地质灾害实验系统、燃烧与等离子体实验系统、大气环境实验系统和环境力学数值仿真平台, 构建了实验室的技术支撑体系, 基本形成集理论分析、实验研究和数值模拟为一体, 装备配套的环境力学开放研究基地. 并分别与英国 Swansea 大学和北京世纪源博科技有限公司成立了“中英非连续介质力学及其工程灾害联合实验室”和“工业余热综合利用联合实验室”.

LEM 坚持国家需求牵引, 学科推动, 积极承担国家重要科研任务. 2005 年以来承担了 70 余项科研任务, 包括“973”国家重点基础研究发展规划项目、国家“863”计划项目、国家自然科学基金重点项目、国家杰出青年科学基金项目、中国科学院知识创新工程重要方向项目、科学院百人计划项目、欧盟国际合作项目、自然科学基金面上项目, 以及面向国民经济建设的横向项目, 总到位科研经费款 6500 余万元. 尤其 2009 年, 实验室新主持承担地质体灾害领域“973”项目 1 项、煤层气开采领域的科技专项 1 项、高速列车气动噪声方面的国家支撑计划 1 项、水环境灾害领域的自然科学基金重点项目 1 项, 合

同额约 6 400 万元。目前在研项目近 50 项，总合同额达 1.0 亿元，为实验室的进一步发展提供了重要保证。

LEM 在环境力学与灾害防治领域研究方面有长期积累，取得了丰硕的成果，曾获全国科技大会奖 1 项、国家自然科学基金四等奖 1 项、国家发明二等奖 1 项、中国科学院科技进步一等奖 3 项、中国科学院自然科学二等奖 3 项、中国科学院科技进步二等奖 7 项、何梁何利科技奖 1 项等重要奖励 21 项。2005 年以来，获周培源力学奖 1 人，获石油与化工行业科技进步一等奖 1 项，重庆市科技进步二等奖 1 项，中国科学院抗震救灾先进科技团队，创新为民、科技救灾先进集体和先进个人。获国家杰出青年科学基金 1 人，入选“新世纪百千万人才工程国家级人选”1 人，科学院“百人计划”1 人。

近年来，LEM 在自然环境复杂流动及其环境影响、重大工程于地质灾害、工业环境与节能减排等 3 个主要研究方向获得显著的研究进展，主要研究成果体现在以下几个方面：

## 1 自然环境复杂流动及其环境影响

### 1.1 干旱环境土壤侵蚀动力学

(1) 针对黄土高原的复杂地形地貌特点，提出坡面流阻力的分类模式，充分考虑微小尺度流动对坡面流宏观阻力的影响，建立了坡面薄层水流的小尺度流动数值模型。通过数值模拟实验，细致讨论了坡面薄层水流的流动及其阻力特性，分析了绕流在其中发挥的重要作用，初步得出阻力与常见参数（如坡度、流量）之间的关系。

(2) 建立了能够合理反映植被覆盖、地形影响和非均匀降雨入渗过程的坡面降雨入渗产流模型，定量揭示出降雨过程、坡面特征和地表条件等因素对坡面产流的影响规律。进一步针对不平整复杂坡面，发展了二维坡面产汇流动力学模型，实现了对坡面流汇流和流路集中过程的自动模拟，为坡面上细沟的产生、发展以及细沟侵蚀计算提供了技术途径和方法。

(3) 针对黄土高原坡面通常存在不同的侵蚀模式，建立了物理机制清楚的细沟间侵蚀和细沟侵蚀动力学模型，发展了包括不同侵蚀模式的复杂坡面侵蚀输沙动力学预报数值模型，并进一步建立了能够较为准确描述细沟汇流的二维坡面侵蚀动力学模型。得到了坡面侵蚀的基本特征，以及坡度、坡长、雨型、雨强等因素对土壤侵蚀的影响规律，分析了侵蚀与坡度的定量关系，揭示了界限坡度并非常数的物理机制，给出了侵蚀界限坡度的科学解释和定量范围。

(4) 通过充分考虑和区分坡面流与沟道水流的不同特性，分别采用运动波和扩散波模型，并引入水流与沟道的自适应和反馈过程，将坡面二维产流及侵蚀模型推广到小流域，建立了小流域降雨产流产沙动力学预报模型，

应用于黄土高原黑草河小流域，预报结果与观测资料符合很好，较过去的分布式水文模型有明显改进。

### 1.2 河口非恒定流输沙

(1) 基于对径流和潮流共同作用下河口水流特征的深刻分析，应用平板振荡边界层理论及波流分解方法，导出了往复运动水流的流速垂向结构，获得了精确描述河口水流垂向结构的理论模式，该模式可以反映河口憩流时刻附近表底水流反向运动的特征。

(2) 运用大涡模拟方法，研究波流边界层中的湍流运动，建立了波流边界层湍流的数据库；对湍流数据库进行统计分析，获得了波流边界层湍流猝发结构的时空特征，即平均猝发周期和平均猝发面积比；利用平均猝发周期和平均猝发面积比对波流掀沙通量进行参数化，获得了基于湍流猝发特征的参数化波流掀沙通量公式。

(3) 采用 Stokes 动力学方法，从颗粒尺度研究群体泥沙的絮凝运动，建立了模拟泥沙颗粒絮凝沉降过程的模型，运用 Ewald 求和、周期域及并行计算等技术，加快了计算速度，研究了盐水环境中的群体泥沙沉降运动，获得了宏观沉速与盐度的关系。另一方面，基于细颗粒泥沙的絮凝过程和絮团分形特征，获得了一个包含盐度和基本粒子尺寸等动力学因素的泥沙絮团沉速理论公式，得到天津新港泥沙沉降实验结果的验证。

(4) 针对河口径流、潮汐、波浪、盐水等环境条件，在对河口水流结构、波浪掀沙、泥沙絮凝沉降等有关非定常输沙基本理论问题系统研究的基础上，分别建立了适用于狭长型河口的一维和垂直二维、适用于宽阔河口的水平二维、以及准三维水-盐-沙输运模型，并用以研究了河口盐水入侵、最大浑浊带等环境现象，揭示出二者随径流和潮流相对强弱变化的规律。应用于长江口实际情况，为深水航道治理工程提供了科学依据。

### 1.3 湖泊水质环境

(1) 基于对太湖地形和水动力特征的分析，建立了太湖平面二维浅水水动力学模型和相应的模型参数系统。通过对太湖风生流的模拟，分析了太湖风生流的基本形态特征，得到了不同湖区的流动规律和水动力特征，揭示了不同湖区流动差异的形成原因，以及太湖水体交换机制和特征。

(2) 给出了湖泊富营养化评价的一般标准，以此为基础，根据太湖多年水质监测数据，分析了太湖水质现状，研究了太湖水质的时空变化特征；在二维水动力模型基础上，建立了物质输移扩散模型，以总磷为研究对象，建立了太湖总磷浓度场模型。细致模拟分析了太湖总磷浓度的时空分布特征，揭示了太湖流场对总磷时空分布的影响规律。

(3) 建立了以藻类生长为核心的生态动力学模型，

结合二维水动力模型和物质输移扩散模型,初步建立了太湖水质生态-水动力学耦合模型;对太湖藻类生长的特征和影响因子进行了数值模拟研究,结果表明,磷是太湖藻类生长的营养盐限制因子,温度是太湖藻类生长的主要控制因子,得到了它们影响藻类增长的阈值范围,并给出了太湖藻类生长和水华暴发的危险区域分布。

#### 1.4 海洋环境和流固耦合

(1) 研究了两层分层的线性、2~5 阶 Stokes、椭圆余弦内波,以及强非线性孤立内波理论的适用范围;建立了基于高阶 KdV 方程的内孤立波演化模型,分析了内波在复杂地形的传播演化规律;采用摄动展开法导出了连续分层和强分层内孤立波诱导的垂向流场本征值问题,给出了基于势函数理论的内波流场计算方法。应用于南海,给出了白云凹陷处的内波流场和特征参数。在此基础上,研究了海洋平台在内波流场中的内波载荷和运动响应,开发了海洋平台内波载荷计算软件,为南海油田开发提供了科学依据。

(2) 综合考虑波流与海底泥沙的耦合,提出了沙波尺度不同其运移机理各异的基本概念,建立了风浪、潮流联合作用下大(小)尺度沙波的力学模型,将粗沙质沙波运移的经验公式模型拓展到细沙质情况,解释了理论与实测不符的原因;针对南海北部湾海域地形特征提出了三维计算模型,成功预测了该海域海底沙波运移。

(3) 建立加载波与底床土层的耦合力学模型,探究各种加载条件下海底土层的动力学特征,给出了波浪衰减因子与海底土层性质对应的分区图;研究了粉土质底床的特性,从理论上揭示了其共振液化机理,合理地解释了实验现象;针对极端波况,给出布局防波堤、桩柱等工程设施的位置时应避开的敏感区域,为工程设计提供了可参考的科学依据。

(4) 深入分析了结构、冰运动以及冰破碎的复杂动力学性质,建立了一个 IIV 动力学模型,揭示了 IIV 共振是强迫振动和自激振动在一定条件下的结合,以及 IIV 共振中的自激成分是冰破碎的动力学性质造成的冰与结构动量交换的非对称性引起的一种正反馈机制,预报了结构特性和冰的特性对锁频的影响。

## 2 自然及工程地质灾害

### 2.1 滑坡灾害发生机理及监测预警系统

(1) 针对滑坡研究的对象(地质体)具有非均质、非连续、流固耦合和未知当前状态等复杂特性,提出了基于连续介质力学离散元方法(continuum-based discrete element method, CDEM)。该方法不仅可以模拟不同尺度地质体材料的非均质、非连续、流固耦合的特性,而且可以模拟地质体由连续到非连续的演化过程,利用该方

法开发了“基于离散元法的边坡稳定性分析软件”,发展了滑坡预测预报研究理论和方法。

(2) 提出了一种基于浮点遗传算法,应用样条函数构筑滑裂面减小自由度的有效搜索边坡非圆弧滑裂面的数值方法。建立了均质及带裂隙边坡的饱和-非饱和耦合渗流模型,进一步发展了边坡渗流与稳定性耦合分析方法和动力学模型,细致分析了水渗流诱导滑坡的内在机理;应用于三峡滑坡,揭示了降雨和库水位涨落对滑坡体稳定性的影响规律。

(3) 开发了两类地质体变形监测设备,一类是专业监测设备,包括地表位移监测设备、深部滑坡监测设备、地下水位监测设备和降雨量监测设备,可在野外无人值守环境下,低成本、高精度、全天候、全自动地对滑坡变形进行长期动态监测,并实现了监测数据实时,无线传输。另一类是滑坡监测专业手机,实现了“群测群防”滑坡点监测数据的无线自动传输和数字化管理,克服了以往“群测群防”监测数据传输效率低、数据分析和利用效率低、数据管理困难等缺点。

(4) 提出了将当地居民、政府管理部门和科研人员 3 方面的力量有机结合起来“CAS”减灾防灾模式。以信息技术为载体,将滑坡动态监测技术与数值模拟相结合,发展了滑坡灾害监测、预警及决策技术。在 Skyline, ArcGIS 和力控等商用软件二次开发的基础上,融合多项具有独立知识产权的监测手段、数值模拟分析方法开发了“滑坡灾害监测、预警及决策系统”,为滑坡灾害防治决策科学化及实施预案奠定了基础。

### 2.2 洪水及风暴潮灾害

(1) 建立了复杂主支流交汇的力学模型和简化解析解,得到了主支流交汇的相互影响规律;发展了一、二维交错衔接的洪水演进动力学模型和复杂水系的洪水预报模型;通过概化实际问题为几种典型模式,有效排除次要因素的分析方法,突出复杂水系洪水相互作用的内在机理。应用于实际问题研究,为区域防洪决策提供了科学依据。

(2) 气候变化加剧了大气环流发展的非平稳过程,为了合理分析和预测台风频率和强度极值,通过细致分析西北太平洋地区 1945 年~2008 年热带气旋资料,采用时间序列和概率密度分布方法,以 PDI 指数为表征,并利用极值理论,得到了南海地区热带气旋发生的频次和强度以及非平稳过程下的极值风速,主要表现为年发生频次的增加和强度增加,非平稳过程下 50 年一遇的极值风速相比平稳过程增加了 3.2% 左右。

(3) 针对台风导致的风暴潮问题,建立了风暴潮流及其诱起的泥沙输运的二维数学模型,研究了气压、风应力、海深、底坡等对风暴潮位、流场结构、水流速度等

的影响. 应用于台风过境港湾的泥沙输运研究, 详细讨论了台风路径、强度、移动速度等对港湾泥沙输运的影响规律, 发现港湾内地形的冲淤情况决定于台风的移动方向, 而冲淤的幅度决定于台风强度和其路径与港湾的相对位置.

(4) 针对水体渗流可能导致的土石坝体和河道堤防破坏问题, 深入研究了复杂土石结构体的水渗流规律, 建立了降雨入渗、堤基管涌、堤坝渗流及其与应力变形的耦合有限元模拟方法, 编制了大型计算软件, 并在大渡河、黑水河、拉萨河水电开发等工程中得到应用, 初步实现了大型渗流和土石体结构破坏耦合计算模型的软件化.

### 3 工业减排和环境污染及控制

#### 3.1 气固两相反应流对于燃烧污染物排放的影响

(1) 通过煤粉燃烧和流化床燃烧实验发现不同的空气-燃料比下 HCl 对于  $\text{NO}_x$  的生成影响不同; 实验结果表明 HCl 对 NO 生成所起的作用受到温度的影响; 从基元反应机理入手, 认为 HCl 影响 NO 生成的最终结果由 HCl 导致自由基减少和增加的两类基元反应的相互竞争决定. 这些基础研究结果对研究含氯燃料燃烧中的污染物排放、考察 HCl 在燃料分级燃烧和选择性非催化还原等方法中的影响有重要意义.

(2) 通过理论分析和实验相结合, 详细研究了煤与生物质混合燃烧或气化过程中燃料中所有主要矿物元素对于氯、钾和钠释放与沉积规律的影响, 阐明了不同温度、压力和空气-燃料比下典型生物质中碱金属和氯的释放行为, 分析了燃烧过程中结焦现象产生的原因. 研究结果对于生物质燃烧中的结焦抑制和可吸入颗粒物减排有重要作用.

(3) 采用 DPIV 系统测量了颗粒流动和传质的特性, 得到了气泡、颗粒运动以及换热特性不同于一般流化床的规律; 测量了颗粒运动的速度场和颗粒扩散特性, 分析计算得到颗粒的横向扩散系数; 通过热态试验研究了非均匀布风对流化床燃烧温度的影响, 并验证了非均匀布风流化床中换热系数的关联式. 揭示了非均匀布风在流化床流动、传质、传热和燃烧中的作用, 对于燃烧高水分、低热值的燃料有一定意义.

(4) 通过管道中燃烧波传播过程的实验研究, 比较了不同气体在管道中燃烧波的加速特性, 得到燃料的种

类、浓度、燃烧室的阻塞比(燃烧室结构)、出口面积比等参数与火焰(燃烧波)速度和压力波峰值压力的相互关系, 总结出一套非定常燃烧的控制方法; 建立扰动对管道中燃烧波发展影响的简化分析模型. 成功发展了“燃烧气脉冲除灰技术”并广泛应用于大型电厂锅炉; 进一步发展了低品位余热(间歇性、爆炸性和多尘性)的利用技术, 研究结果已应用于我国首台 10MW 电炉余热电站示范装置建设.

(5) 利用计算流体力学的方法对双套管气力输运过程中各参数的变化进行了详细的数值模拟. 将输运分为起始段和充分发展段分别研究, 保证气流量守恒, 输料率守恒, 编写总体能耗的计算程序. 该程序能够在已知输料率和输送距离的前提下给出能耗最小的气动参数.

#### 3.2 等离子体危险废物处理

(1) 采用磁矢量势取代磁感应强度来描述磁场, 使描述等离子体运动的偏微分方程组均化成椭圆型的, 发展了基于磁矢量势的电弧模型和耦合化学动力学, 避免了传统磁流体力学模型中磁场的积分运算, 大大减少了计算量, 并克服了传统 Maxwell 方程难于耦合高温化学反应计算的困难.

(2) 采用等离子体弧技术, 研发了三相交直流工频等离子体反应器和直流等离子体反应器, 实现了对危险废弃物的还原裂解处理, 不仅可以有效打断有机物的化学键, 达到很高的摧毁效率, 还不会在处理过程中排放  $\text{NO}_x$ , CO 和二恶英类等在有氧环境下生成的有害物质.

(3) 通过对造渣添加剂、进料形态、反应过程中传热和传质过程控制等方面研究, 掌握了将固体残渣形成物理和化学性质均极为稳定的玻璃体, 使残渣对有害物质捕集效率方面得到大幅度提高, 优于国际先进水平.

(4) 提出氧碳比概念, 数值分析了温度、含水率、氧碳比对平衡产物分布和合成气回收的影响; 研究了钙氯比、温度和水蒸气浓度对脱氯效率的影响, 提出了还原气氛下提高脱氯效率的尾气处理设计思想; 发展了完善的等离子体处理系统的尾气处理系统, 确保其对环境的影响优于焚烧法 2~3 个数量级.

(5) 研制建成了含预处理进料、主反应器和尾气处理子系统的完整的等离子体弧裂解废弃物的实验室规模示范系统(3t/d); 并建成了国内首套工业规模的化工固体危险废物处理系统和陕西咸阳医疗废弃物中试基地.