

# 自然环境中的流动与输运<sup>1)</sup>

李家春

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 针对 21 世纪的环境问题, 讨论了典型的自然环境中的流动、输运和其他物理、化学和生物过程, 分析了研究现状和趋向。通过实例说明用基于过程的动力学方法解决我国西部开发中的实际问题。

**关键词** 自然环境, 流动, 输运, 辐射, 化学反应, 生物过程, 生态演替

## 1 21 世纪的环境问题

人类已经跨入 21 世纪。

回顾过去, 从 50 年代起, 人类开始觉察到了日益严重的环境问题的威胁, 并从中吸取了教训。通过 1972 年斯德哥尔摩联合国环境大会 (UNCHE) 和 1992 年里约热内卢联合国环境与发展大会 (UNCED), 逐步取得共识: 环境问题是全人类的事业, 无论发达国家还是发展中国家都应将保护和改善环境作为自己义不容辞的职责, 必须坚持可持续发展的道路, 采取集约型经济发展的模式, 不能走先污染, 后治理的老路 (不破敬一郎 1995, 李家春, 吴承康 1998)<sup>[1, 2]</sup>。

展望未来, 世界人口还在增长, 主要是非洲, 印度, 亚洲等地区。人们对物质文明的需求, 因而对能源和资源的消耗也在不断增长, 因此, 21 世纪在这已有 60 亿人口居住的地球上, 人类活动对环境的压力不会减轻, 环境恶化的趋势不会缓解。可以肯定, 环境问题仍然是对人类的重大挑战 (Reible 1999)<sup>[3]</sup>。现代社会环境问题的特征是:

(1) 综合性的环境问题频繁发生。50 年前, 令人瞩目的仅局限于污染问题, 近一二十年来, 涉及的问题要广泛得多, 如:

**气候异常:** 指的是平均气温与降水的变迁, 如: 1980 年冷夏, 1984 年酷暑与特大降雪, 1989 年暖冬, 1984, 1986, 1987 年干旱和 1988 年连阴雨。影响到全球范围的有厄尔尼诺, 温室效应等 (朝仓正 1990)<sup>[4]</sup>。

**自然灾害:** 指的是因各种因素引起的风速、温度、降水、水位等环境因素突然变化, 对人类生活, 牲畜, 作物生长造成威胁的事件, 包括: 洪水, 台风, 龙卷风, 风暴潮, 火山, 地震, 滑坡, 泥石流, 尘暴, 风雪流等。

**环境污染:** 指的是因工农业生产和人类生活中排放到大气, 水体, 土壤中的各种有害物质, 如: 硫氧化物, 氮氧化物, 碳氢化合物, 氨氮, 有机磷, 毒物等它们对人类和生物的健康和生长造成危害。还包括发电厂的热污染, 核废料的放射性污染和导致臭氧层破坏的氯氟烃。

**生态恶化:** 指的是由于环境因素的变化, 造成原来生态系统的平衡失调, 生态演替过程的改变, 如: 过度放牧, 过度捕捞, 过度采伐, 过度开垦造成的土地荒漠化, 草场退化, 物种减少等现象 (不破敬一郎 1995, 孙儒泳 1986)<sup>[1, 5]</sup>。

上述这些问题不是孤立的, 而是互相联系的, 比如气候的变化可导致洪涝, 干旱灾情; 温室效应会导致海平面上升, 沿海城市淹没; 有机磷, 有机氮的污染可以触发藻类大量繁殖, 引起赤潮, 生态环境的恶化; 火山爆发会改变全球和区域气候。

1) 国家科技部攀登计划和国家基金委自然科学基金重点资助项目(批准号: 19832060)

(2) 时空多尺度普遍存在。以上所列出的环境问题的时空尺度跨度大：空间尺度从全球尺度，天气尺度，流域尺度，中小尺度到微尺度，时间尺度可以从百年量级到秒的量级。在气候系统中有古气候变化（包括万年以上的地质期，千年左右的历史期，数百年的超长期变化）和现代气候变化（包括：长期、数十年的年代际，中期、数年的年际和短期、月或季的变化）(Biniston 1998, Biggs 1996, 李崇银 1995)<sup>[6-8]</sup>。虽然人们更关心后者，但研究前者亦可对人们了解规律有启示。由于外界的强迫本身是多尺度的，如：太阳轨道参数变化，地球磁场的 22 年周期，太阳黑子活动，地球的公转，自转，月球的运动。另一方面，因大小尺度的相互作用，所以可以出现多尺度现象。然而，凡是不需要分辨的尺度可以用平均量来估计，如：海洋潮汐的余流，Stokes 波的漂流。要考虑不能分辨的小尺度的影响，必须用亚格子模型或参数化方法处理。比如：云物理过程，大气边界层和水圈，地圈，冰雪圈界面过程的参数化以及湍流中的亚格子模型。通过高分辨率的计算和实验先验地检验现有的模式是关键性的 (Zhou 1998, Meneveau 2000)<sup>[9]</sup>。所以，现在看来，环境力学不仅是如 Batchelor 所说的小尺度的地球流体力学，而是多尺度的流体力学分支 (Turner 2000)<sup>[10]</sup>。

(3) 人类活动的干扰不容忽视。人类活动的主要影响有：微量气体诸如二氧化碳，甲烷的排放在过去 250 年间有很大增长，致使气温增加；工业排放二氧化硫和海洋生物的 DMS (硫化氢，二甲基硫醚) 形成气溶胶。它可以吸收或散射辐射，并形成凝结核，影响降水与天气。土地利用的变化包括：森林变为耕地，草原变为沙漠，改变了反照率和下垫面的水热特性，从而影响区域的气候。这些人为的干扰往往不易同自然的变迁相区分 (Biggs 1996)<sup>[7]</sup>。

## 2 自然环境中的流动与输运

流体力学研究的对象可以分为工业与自然环境中的流动，两者往往有很大的不同。流体力学研究人员较了解前者，对诸如：边界层，混合层，槽流，管流，射流等典型流动已耳熟能详。对于后者，尚需认识，甚至进一步研究。这里，我们列出较重要的范例。另一方面，环境问题也离不开其他物理，化学和生物过程，我们也进行了一些讨论。它们都是研究环境问题的重要基础和基本环节。

### 2.1 流动过程

这里仅讨论与环境问题紧密有关的特殊流动。

**大气边界层** 人类和生物大多生活在贴近地表的大气边界层内，所以是环境流体力学研究的重要对象。大气边界层是厚 1~2km 受下垫面影响的下层大气，它的运动是由外层自由大气驱动的。接近于地面 100m 是常通量的近地层。近三四十年来，人们首先得到了 Monin-Obukhov 相似律。相比于近地层速度的对数廓线，它可以考虑大气稳定度的影响。我们在这里列出经过大量现场观测（如：澳大利亚 Wagnara）检验的 Businger-Dyer 公式

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left( \ln \frac{z}{z_0} - \psi_M \right)$$

不稳定情况

$$\psi_M = 2 \ln((1 + \phi_M^{-1})/2) + \ln((1 + \phi_M^2)) + 2 \arctan(\phi_M^{-1}) + \pi/2$$

$$\phi_M = (1 - 16\zeta)^{-0.25}$$

稳定情况

$$\psi_M = -4.7\zeta$$

其中

$$\zeta = \frac{z}{L}, \quad L = \frac{\mathcal{Q}(\tau/\rho)^{3/2}}{kg(H/\rho C_p)}$$

$L$  为 Monin-Obukhov 长度。Rossby 相似律可推广到全边界层。70 年代以后, 由于湍流测量技术的进步和湍流模拟的发展, 获得了大气边界层湍流的统计行为和相干结构。其中, 对流边界层研究得比较充分。对流边界层在近地层以上是混合层(0.1~0.8h)和对流层顶附近的卷夹层(0.8~1.2h)。研究重点是混合层顶的卷夹、能量传输的逆梯度现象, 对流涡在湍流模拟和通量计算中的作用, 并发现了对流边界层中的上升流与下沉流动的不对称性。稳定边界层的研究相对滞后, 原因是内波与湍流的相互作用, 稳定边界层的高度受辐射冷却等多种因素影响, 低湍流度给测试带来困难 (Li 1992)<sup>[11]</sup>。由于植被的阻滞作用, 在冠层附近, 速度廓线有拐点, 所以在那里形成剪切层。最近提出的混合层比拟 (Finnigan 2000)<sup>[12]</sup>, 使我们对于植被层内湍流的统计特性和结构的认识都有了新的进展。大气边界层的研究成果已被应用于天气, 气候和污染预报。未来的研究应重视云盖边界层, 非均匀下垫面边界层及其在全球和区域大气环流模式中的应用 (Garratt 1996)<sup>[13]</sup>。

**振荡边界层** 振荡边界层可以由边界往复运动或水流往复运动产生。在实际问题中, 表面波或潮汐运动可以在水底形成这类非正常的边界层, 它对于海岸带, 河口的物质输运是重要的。振荡边界层的厚度为

$$\delta_s = \sqrt{\nu T}$$

其中,  $T$  为周期,  $\nu$  为运动黏度。所以, 波浪造成的边界层厚度仅为厘米量级。由于潮汐较长的周期, 边界层可以遍及整层水体。层流状态的振荡边界层的速度分布为

$$u(z, t) - u_\infty(t) = A\omega \exp\left[-(1+i)\frac{z}{\delta_s}\right] e^{i\omega t}$$

其状态的转换取决于雷诺数

$$Re_\delta = A\sqrt{\frac{2\omega}{\nu}}$$

其中,  $A$  为振幅。按雷诺数大小, 可以分为层流, 扰动层流, 间隙湍流, 完全发展湍流。雷诺数小于 100 时为层流, 大于 3500 时为完全发展湍流, 其间可以是部分时间是层流, 部分时间是湍流 (李家春等 1999)<sup>[14]</sup>。若考虑自由面变形, 可以应用黏性波浪理论。列维奇(1955)<sup>[15]</sup> 给出了无限深的解析解, 在小黏性假定下, 与无黏性理想流体波动理论的结果不同之处为: 波其幅以指数律衰减, 衰减系数为

$$d = 2\nu k^2$$

由于自然界有径流, 沿岸流的存在, 需要研究波流共同作用下的海底边界层, 还要考虑岸线, 地形, 盐度的影响。

**浮力对流** 在自然环境中, 由于温度、组分的不同, 可以造成密度差, 在重力场中会由此产生浮力对流, 除了大气边界层外, 海洋中的涌升流, 热盐环流, 地球内部的岩浆库, 地幔对流均属于这类流动 (Turner 2000)<sup>[16]</sup>。浮力对流最大的特点是其特征速度不是事先给定的, 而是由温度差或密度差决定的, 其无量纲数是 Grashof 数

$$Gr = \frac{\alpha g \Delta T L}{\nu}$$

其中,  $\alpha$  为体积膨胀系数。对于温度差, 密度差不大的低速的环境问题, 往往采用 Boussinesq 近似, 即除了在浮力项外, 认为流体是不可压缩的, 从而简化了问题。在烟囱或排水口上, 会

因浮力形成羽流, 对上升距离, 流动逆转以及卷夹周围流体的混合过程, 已经进行了一些研究。需要研究伴有相变的浮力对流, 在多孔介质中的浮力对流等 (Lumley 1996) [17]。

**旋转系统中的流动** 研究在旋转的地球上的大尺度、低速流动, 必须考虑科氏力的影响。衡量惯性力与科氏力比值的无量纲数为罗斯贝数

$$Ro = \frac{U}{fL}$$

其中,  $f = 2\Omega \sin \phi$  为科氏参数,  $U, L$  为特征长度。由于大气运动流速较大, 所以, 大气运动在千公里, 海洋运动在百公里量级, 要计及旋转效应。泰勒柱, 地转流, 艾克曼效应, 海流的西部强化都是旋转效应的体现。旋转效应随纬度而变, 如果研究的纬度范围不大, 可以采用  $f$  平面或  $\beta$  平面近似。在旋转系统中的旋涡运动的特点是: 位势涡度守恒。因此, 在热带气旋运动中, 会形成  $\beta$  效应涡对艾克曼效应非对称结构, 导致异常路径发生。在旋转系统中, 垂向速度分量远小于水平速度分量, 运动是准二维的。由于没有涡的拉伸变形, 所以, 能量从小尺度向大尺度转移, 涡拟能有正向级串现象, 所以, 地球流体是二维湍流的天然实验室。此外, 在临界距离以内, 同向涡会合并 (Lumley 1996, Hopfinger 1988) [17, 18]。

## 2.2 输运过程

在自然界中, 有许多大小不等的微小颗粒, 如: 烟雾, 尘埃, 火山灰, 盐粒, 云雾, 泥沙, 花粉, 病毒等。若它们的尺度在 1~100nm, 在大气和水中组成气溶胶或悬浮液。研究这一分散体系, 可以用不同的模型, 如: 非牛顿流模型 (如: 高含沙水流, 泥浆), 单颗粒模型, 被动标量模型, 多相流模型等。所谓被动标量模型指的是分散质的浓度很小, 不会影响分散介质流动行为, 所以, 可以首先获得流场性质, 然后预测被动标量的输运特性, 两者之间不互相耦合。我们要研究分散质在分散介质中的扩散, 沉降, 絮凝等过程。

**扩散** 在温度变化不大的情况下, 预测温度场也可以采用这个模型。层流运动的扩散系数可以由分子动理论导出。在湍流的情况下, Taylor 统计理论的结果表明: 短时位移方差与时间平方成正比, 而长时间位移方差与 Lagrange 积分时间尺度和时间之积成正比。所以扩散系数与速度方差与 Lagrange 积分时间尺度之积成正比 (Brenner 2000) [19]。对于悬浮液的情况, 微小粒子的迁移是由 Brown 运动引起的。根据 Einstein 理论, 其类比的扩散系数表达式为

$$D = \frac{kT}{6\pi\nu R}$$

其中,  $k$  是玻兹曼常数,  $T$  是绝对温度,  $\nu$  是运动黏度,  $R$  是分散质颗粒半径。

湍流运动的扩散系数是依赖于流动的, 所以并非是常数。最近, 对于被动标量的研究指出了被动标量场与速度场统计行为的区别: 表现在即使速度场是高斯分布的, 标量场的 pdf 仍非高斯分布的; 网格湍流的被动标量可以在低雷诺数时满足标度律; 被动标量比速度场有更大的间歇性; 在惯性子区与耗散区均出现各向异性, 所以, 这是一个有待深入研究的领域 (Warhaft 2000) [20]。此外, 应注意到湍流的大尺度相干结构将对物质, 能量输运起主导作用。

**沉降** 分散体系中的分散质在重力场中会发生沉降, 并从介质中分离出来。对于固体颗粒, 可以用 Stokes 公式计算阻力与沉速。对于气体中的球形液滴或水中的气泡, 由于液滴或气泡内的流体被带动, 阻滞较小, 所以沉速较大。其表达式为

$$U = \frac{2}{3} \frac{\rho - \rho'}{\mu} g a^2 \frac{\mu + \mu' + 2e/3a}{2\mu + 3\mu' + 2e/a}$$

其中,  $a$  为颗粒半径,  $e$  为表面黏度系数, 即表面张力与表面速度改变之比,  $\rho$  为密度,  $\mu$  为黏度, 上标'指内部流体的特性。对于大的液滴或气泡, 由于形状变化和雷诺数增大, 沉速

可以用如下公式

$$U = \sqrt{\frac{2\rho gV}{C_f \rho S}}$$

其中,  $V$  为液滴 (或气泡) 体积,  $S$  为迎风面积,  $C$  为阻力系数。增添表面活性物质, 改变表面张力也能改变其沉降特性。上述过程对于泥沙输运, 酸雨的干、湿沉降研究十分重要。

**凝并** 分散质通过布朗运动互相接近到很近的距离, 使范德华力起作用时, 就会发生凝并现象。但是, 由于颗粒表面的电荷排斥力是稳定因素, 阻止它们接近到很近的距离。如果不考虑这种稳定因素, 则称为快速凝并, 可以获得这种由布朗运动引起的凝并过程时间演化规律

$$n = \frac{n_0}{1+t/T}, \quad T = 8\pi DRn_0$$

其中,  $n$  为粒子数,  $R$  为凝并半径(等于质点直径),  $D$  为布朗扩散系数,  $T$  为凝并特征时间。也可以计算剪切流中的凝并过程, 称为梯度凝并。凝并发生在大气气溶胶, 泥沙输运中。凝并可以极大地影响沉速。类似地, 还需要研究溶解, 乳化, 分裂。在界面上的吸附及其它物质和能量交换过程也应受到重视。

### 2.3 其他物理、化学、生物过程

**辐射** 太阳辐射是地球上万物生长的能量来源, 是大气、海洋运动的主要驱动力。在地球大气层顶部的太阳辐射通量称为太阳常数

$$I_0 = 1.97 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}) = 1374 \text{ W}/\text{m}^2$$

这是最近卫星的测量数据, 它也随太阳活动和日地距离而有微小变化。太阳辐射通过大气层后, 到达地面由直接辐射和散射辐射组成, 前者可以表达为

$$I = \frac{I_0}{\rho^2} \sin h = \frac{I_0}{\rho^2} \cos Z = \frac{I_0}{\rho^2} (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega)$$

其中,  $\rho$  是相对日地距离,  $h$  是太阳高度,  $\phi$  是纬度,  $\delta$  是赤纬,  $\omega$  是时角。经过大气层后, 由上式和透明系数 (或浑浊度) 及云量可以计算直接辐射  $S$ 。此外, 大气中含气体分子, 气溶胶和小水滴。气体分子直径小于电磁波长, 发生 Rayleigh 散射, 气溶胶直径与波长相当, 发生米氏散射, 散射系数依赖于波长, 而且对于入射方向呈方向非均匀分布。于是可以得到地面的总辐射  $Q$  为直接辐射  $S$  和散射辐射  $q$  之和

$$Q = S + q$$

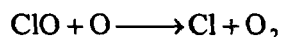
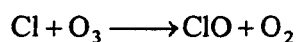
地面接受的辐射会发生反射, 反射系数  $\alpha$  依赖于下垫面的颜色, 湿度, 粗糙度。另一方面, 因地表温度较低, 会发生长波辐射  $U$ , 并从大气层部分地返回, 称为逆辐射  $G$ , 两者之差为有效辐射  $E$ 。于是, 由地表的辐射平衡可以得到净辐射  $R$  的表达式为

$$R = (1 - \alpha)Q - E$$

这是地面加热与发生感热、潜热交换的能量来源。(Berge 1990)<sup>[21]</sup>在水质模型中, 考虑浮游生物生长, 也需要计及辐射效应 (Hamilton 1997)<sup>[22]</sup>。

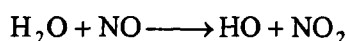
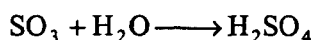
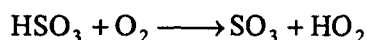
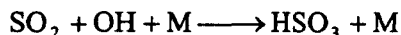
**化学反应** 在自然环境流动中必须考虑的典型化学反应举例如下(不破敬一郎 1995)<sup>[1]</sup>:

**臭氧层反应** 在对流层中氟里昂呈均匀分布, 到平流层因扩散和光分解, 氟里昂急剧减少。紫外线使氟里昂释放的氯原子通过如下反应破坏臭氧

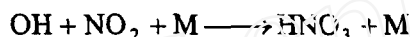


由于一氧化氯可以与平流层中的氧原子继续生成氯原子，并与臭氧反应，所以上述反应可以连锁式地发生，使一个氯原子长期存在，乃至破坏数万个臭氧分子。平流层中化学反应十分复杂，如：氢，氢氧自由基，甲烷，氮氧化物也直接，间接地参与反应。要解释南极上空的臭氧空洞，可能要考虑平流层中硫酸盐气溶胶表面的非均相反应。

**酸雨反应机理** 我们已经知道，大气中的硫氧化物，氮氧化物等是产生酸雨的主要因素，它们生成酸性物质的反应为

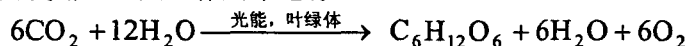


其中，M 为第三种物质。由于最后一个反应又生成了氢氧自由基，可以使反应连锁式地进行下去。至于硝酸形成的反应为



其反应速率要比硫酸形成的速率高一个数量级，所以，氮氧化物的平均寿命为 1d，比硫氧化物的寿命 10d 短得多。由于化学反应需要时间，所以仅在污染物远距离输送时，才需要考虑化学反应与干、湿沉降 (Lei 1998) [23]。

**生物过程** 对于绿色植物，主要有水分，矿物质和有机物的代谢。水分通过根系吸收，叶面气孔蒸发。有机物的代谢通过光合作用来进行



光合作用将无机物转变为有机物，并将光能转变为化学能以糖的形式储藏在植物体内。请注意生物对于外界环境的适应与调节能力，比如：在缺水时，叶面气孔会自动关闭，以减少蒸发，这可以在参数化的过程中加以体现 (Rosenberg 1974) [24]。在研究湖泊，海洋水质模型时，由于氮、磷污染，可以导致水体的富营养化。在模型中，需要考虑的因素很多，除了流体动力学过程外，需研究的生物化学过程有：浮游动物的生长，浮游植物代谢，营养盐循环，溶解氧、总磷，总氮平衡。对于长期气候模型来说，二氧化碳的如上的生物地球化学循环也是不可忽略的 (Hamilton 1997) [22]。

**生态演替** 众所周知，一切生物都会发生从低级到高级，简单到复杂的变化。当资源足够利用时，物种不断进化，生态系统趋于成熟。一般，自然进化需要数万至数十万年漫长的时间。但是，在有外界或人工干扰的生态系统，由于风暴，火灾和过度砍伐，放牧，捕捞，改变了生态系统的结构，导致了短期（几年或几十年）的物种更迭称为演替，这是从事环境科学研究的人员必须关心的。

在研究物理，化学，生物过程是要注意区分平衡和速率过程。对于前者，可以由流体的状态确定其组分；对于后者，要确定速率常数，以源汇项的形式出现在连续性方程及动量、能量方程中。综上所述，环境问题除了与力学、物理、化学学科有关外，必然涉及地球科学中的大气、海洋、水文、地质、地理领域；涉及生物科学中的生物化学，植物生理，生态领域；涉及工程科学的水利工程，海岸工程，能源工程等领域，所以是多学科交叉的。

### 3 环境力学的研究目标与途径

力学工作者的目标不是进行常规的天气, 海浪, 污染, 灾害预报和防治技术, 而是研究其中的宏观定性行为尚不清楚, 尚有争议的和目前认为定量预报不够精确, 其原因不明的那类问题。因此, 应采用区别与传统的环境问题的研究方法。要着重研究环境问题发生、发展和演化的动力学过程, 获得定性和定量的认识, 将机理研究, 规律分析与防治措施有机地结合起来, 从而使我们的决策更加科学, 更加优化。基于过程( process-based )的研究方法是环境力学的主要途径。从本质上来看, 环境问题是由携带着动量、能量、物质的流体运动和导致的迁移造成的, 所以上节研究的最基本的流动、输运过程及其有关的物理、化学、生物过程, 尤其是它们之间的耦合, 都应当是环境流体力学工作者需要认真研究的对象。

我国是发展中国家, 改革开放以来, 经济的高速发展带来了诸多的环境问题。除了与发达国家当年情况有许多共同之处外, 我国西部干旱地区的环境问题具有中国的特色。解决这些难题可以为我国的西部开发作出贡献, 也可以推进环境力学研究的进展。我们仅以此为例说明环境力学的研究途径:

**实例 1** 三北防护林的种植。50 年代, 为了保护新建的包兰铁路不受腾格里沙漠的侵害, 中国科学院沙漠所在中卫地区用草方格技术成功地种植了宽 500m 的油蒿, 柠条, 沙拐枣等耐旱植物, 形成防护林带。30 年后, 发现这些树木不能继续生存。我们用强迫恢复法, 湍流模式模拟了植被层的动量, 水分, 能量交换, 不同树种的需水量, 揭示了出现干沙层, 结皮层, 导致供水不足, 生态演替的机理, 因此, 选择节水树种, 控制间距, 破坏结皮层可以延长防护林的生长年代 (Berge 1990, 李家春 1999a, b, 谢正桐 1998)<sup>[21, 25-27]</sup>。

**实例 2** 黄土高原侵蚀。我们运用考虑降水, 入渗的坡面流模型。入渗采用修正的 Green-Ampton 模型, 坡面流采用运动波模型。根据黄土高原三个地区的降水, 土壤特性, 预测了径流与侵蚀特性, 符合实际观测。改善了二维模型, 获得的水流分叉与降水大厅实验一致, 为准确计算土壤侵蚀奠定了基础 (Parsons 1992)<sup>[28]</sup>。

#### 4 结束语

可以预见, 由于人口和物质需求的继续增长, 21 世纪的环境问题不会缓解。流体力学工作者应该针对全球和我国的环境问题, 研究自然环境中的流动、输运和其他物理、化学、生物过程。基于过程的研究途径可以使研究的定性和定量的预测都有所改进, 并为控制与防治环境恶化提出相应的措施。为了使我国的山川更加秀美, 需要更多的流体力学工作者从事环境流动的研究, 并与相关学科的研究人员紧密合作, 为改善人类的生存环境、开发我国西部地区经济, 发展环境科学作出贡献。

#### 参 考 文 献

- 1 不破敬一郎. 地球环境手册. 中国环境科学出版社, 1995
- 2 李家春, 吴承康. 环境力学与可持续发展. 力学进展, 1998, 18(4): 433-441
- 3 Reible DD. Fundamentals of Environmental Engineering. Lewis Publisher, 1999
- 4 朝仓正. 气候异常与环境破坏. 气象出版社, 1990
- 5 孙儒泳, 林特溟. 近代的生态学. 科学出版社, 1986
- 6 Beniston M. From Turbulence to Climate. Springer-Verlag, 1998
- 7 Biggs GR. The Oceans and Climate. Cambridge University Press, 1996
- 8 李崇银. 气候动力学引论. 气象出版社, 1995
- 9 Zhou Y. Advances in the fundamental aspects of turbulence: energy transfer, interacting scales and selfpreservation in isotropic decay. *Appl Mech Rev.* 1998, 51(4): 267-301

- 10 Meneveau C, Katz J. Scale-invariant and turbulent models for large eddy simulation. *Ann Rev Fluid Mech*, 2000, 32: 1~32
- 11 Li JC. Turbulence in atmosphere and ocean, in "Some new Trends in TPFM", Peking University Press, Beijing, 1992. 427~433
- 12 Finnigan J. Turbulence in plant canopy. *Ann Rev Fluid Mech*, 2000, 32: 519~570
- 13 Garratt JR et al. The atmospheric boundary layer-sciences in knowledge and applications, in "Boundary Layer Meteorology, 25 Anniversary Volume", Eds by Garratt JR, Kluwer Academic Publishers, Netherland, 1996. 9~37
- 14 李家春, 周济福, 谢正桐(c). 振荡边界层及其应用研究. *力学进展*, 1999, 29 (4): 451~460
- 15 列维奇. 物理化学流体力学. 上海科技出版社, 1959
- 16 Turner JS. Development of geophysical fluid dynamics: the experiment of laboratory experiment. *Appl Mech Rev*, 2000, 53(3): 11~22
- 17 Lumley JL et al. Research Trends in Fluid Dynamics. AIP, 1996
- 18 Hopfinger EJ. Turbulence and vortices in rotating fluids, in "Theoretical and Applied Mechanics", Eds by Germain P, Elsevier Science Publisher, Netherland, 1988. 117~138
- 19 Brenner MP, Stone HA. Modern classical physics through the work of GI Taylor. *Physics Today*, 2000, 5: 30~35
- 20 Warhaft Z. Passive scalar in turbulence. *Ann Rev Fluid Mech*, 2000, 32: 203~240
- 21 Ten Berge H M F. Heat and water transfer in bare topsoil and the lower atmosphere, Pudoc, Wageningen, Netherland, 1990
- 22 Hamilton DP, Schladow SG. Prediction of water quality in lakes and reservoirs. *Ecological modeling*, 1997, 96: 91~123
- 23 Lei XE et al. Physical, Chemical, Biological Processes and Mathematical Model on Air Pollution, China Meteorological Press, 1998
- 24 Rosenberg NJ. Microclimate: Biological Environment, John Wiley & Sons, 1974
- 25 李家春等(a). 干旱地区陆面过程耦合模式及其应用. *应用数学与力学*, 1999, 20 (1): 1~10
- 26 李家春, 谢正桐(b). 植被层湍流的大涡模拟. *力学学报*, 1999, 31(4): 406~414
- 27 谢正桐, 李家春, 姚德良. 考虑植被影响的陆气耦合模式. *力学学报*, 1998, 18(3): 267~276
- 28 Parsons AJ, Abrahams AD. Overland Flows, UCL Press, 1992
- 29 周济福, 刘青泉, 李家春. 河口混合过程研究. *中国科学, A辑*, 1999, 29(9): 834~843