

陆面过程的模式 与观测研究

李家春 欧阳兵 主编



科学出版社

989478

陆面过程的模式与观测研究

李家春 欧阳兵 主编

989478

科学出版社

1996

200
(不
样

1, 无
用
量数

过程
生态
科学
则研
的成

数
目
是供

讨
采

unit

els, J

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是中国科学院“八五”重点基础研究项目“大尺度生态环境问题模式、指标体系及其应用研究”的成果汇编。着重研究全球、区域和局地的生态环境问题及其数学模型,其中包括:农田、森林、沙漠等典型的均匀下垫面的陆面过程,非均匀下垫面的陆面过程和参数化方法,水资源的测定、管理与调控,陆面过程对大气环流的影响等方面的问题,并讨论了不同尺度模式间的联系与差异。最后,我们根据模式的要求,提出了在生态站网进行野外常规和特定观测的指标体系,即:测试的项目,频度,精度与仪器。本书可供气候学、地理学、生态学、水文学、农林学等有关专业师生和科研机关,尤其是从事生态系统网络研究的有关人员参考。

陆面过程的模式与观测研究

李家春 欧阳兵 主编

责任编辑 刘嘉善 聂松媛

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1996年10月第 一 版 * 开本: 787×1092 1/16

1996年10月第一次印刷 印张: 11 3/4

印数: 1—500 字数: 267 000

ISBN 7-03-005402-4/O·861

定价: 29.00 元

序

人类为了生存和栖息,从刀耕火种的时代起,就同自然界发生了关系,在改造自然的同时,也无意地破坏了自己的生存环境.但是,古代的这种局地 and 轻微的影响,并未引起人们的注意.17世纪工业革命后,尤其是第二次世界大战以后,由于人口剧增,工业发展,能源、矿产、土地资源利用不当,使环境污染在世界范围内普遍发生.近30年来,全球气候变暖、臭氧空洞、厄尔尼诺、土地沙漠化、热带雨林锐减、酸雨等各种自然灾害等问题频频发生.所以,人们愈来愈意识到,环境变迁是对人类经济与社会可持续发展的严重障碍.可以预见,环境问题将是未来的21世纪人类所面临的最具有挑战性的课题.

环境问题大多发生在地球表层附近的地圈、水圈(包括海洋)、冰雪圈、大气圈和生物圈中.它们不仅局限于环境污染,还应包括:气候变化、自然灾害、生态平衡等诸多方面,也就是说,凡是因温、湿、风、压、降水、浪、流、潮、水位和大气、土壤、水体的成分、生物多样性的急剧或长期变化,对人类生存环境构成威胁的各种现象都属于环境问题;显然,这些环境问题同地球界面过程紧密相关,涉及各种不同的时间与空间尺度,如:时间跨度可从大气湍流1/10秒到全球变化的50至100年的数量级,空间范围可以从毛细波厘米量级到地块、小尺度、中尺度、天气尺度、全球尺度、多尺度是地球科学的普遍现象;为了解决各种环境问题,涉及地球物理、大气化学、生物化学、生态演替等过程,并正在逐步从定性或统计描述过渡到定量的动力学的描述,需要气象学家、海洋学家、水文学家、生物学家、地球物理学家、力学家、应用数学家,计算数学家同环境科学家的通力合作;本世纪下半叶以来,由于技术的进步,测量的手段也发生了革命,从过去的野外考察、定位站的建设,到用卫星技术在空间进行微波、红外和可见光的观察.由此可见,多样性、多尺度、多学科交叉与多种研究手段是现代环境科学研究的主要特征.

陆面过程是环境问题的重要组成部分.一方面,陆地占整个地球表面的1/3,自然对全球与区域环境有重大影响.比如:由于季节变化改变的陆面上南北半球的冰雪覆盖程度,植被类型以及土壤的湿度都会影响对太阳辐射的反照率,地球的能量收支,蒸发量,粗糙度,所以,大气环流对上述这些因素的变化都是十分敏感的.另一方面,这是因为陆地是人类从事生产活动和生活的主要场所,对人类的生存环境有着直接的影响.而且,人类活动对于环境的干扰主要也是通过陆地与大气的相互作用而实现的.比如:在热带地区茂密的雨林,近30年来由于过度采伐,遭受了严重的破坏,面积锐减;在草原地区,由于滥垦和过度放牧,使草原退化,加剧了沙漠化的进程;城镇建设与房地产的开发缩小了耕田面积;总之,土地利用方式也会对全球的气候产生重大影响.因此,有必要对陆地大气的相互作用进行深入研究,以便确定它们之间的动量,质量,能量通量,改进全球气候模式(GCM)中现有的参数化方案.

2A616/03

近 30 年来,随着计算机的发展,陆地大气相互作用的模式不断涌现,它们在本质上都属于计算土壤、植被、大气间交换的方案 (SVATS). 60 年代,最有代表性的是“桶式模型”(bucket model),它是建立在水分质量守恒基础上的简单模式,还没有考虑植被覆盖的影响. 80 年代,由于研究的进展,人们考虑了生物或植被的作用,提出了 BATS 和 SIBS 模型. 两者在许多方面十分相似,比如说,要输入同样的地表气象数据,输出同样的地表通量;它们都可以考虑覆盖在平坦台地单一均匀的植被层,并可用一个大叶片、大气孔来代表;气孔的开闭都会对光、温、蒸汽压、叶水势亏缺和根系附近的土壤湿度发生响应;辐射都以 0.7 微米为界,分为可见光和红外光;它们对降水的截流也采用类似的子模型;大气湍流都使用 K 模式. 不同的是 SIBS 在预处理过程中较复杂,以便获得较少的植被冠层参数. 它们还被结合到 GCM 的模拟中去,改进了模拟的结果,仅增加 20% 的工作量. 但它们只适用于有限的十几种均匀的植被类型. 与此同时,英国气象局和法国气象研究中心提出了介于两者之间的模式: UKMO SVAT 和 CNRM SVAT. 其辐射和气孔的子模型都更为简单,但 UKMO SVAT 有两个优点:即可以考虑有限尺度风暴下的土壤与植被层中的水分储存以及在网格尺度内有两种植被的情况. 最主要的是便于同 GCM 模式相结合. 上述模式仅研究了垂直方向上的水分和能量通量,没有考虑网格内和网格间通过地表或地下径流导致的水分和能量的水平重新分布,于是发展了水文模式. 水文模式通常以流域为单位进行分析,由于时间分辨率较低,它们只可用流域内水分总量平衡来校验 GCM 的研究结果. 改进的水文模式应是相当可靠,不需要单站的水文历史资料来校验,它可独立应用同 GCM 相结合,获得地球表面水平方向上的水分与能量通量. 陆地大气的相互作用也存在不同尺度的问题. 一方面,在比较均匀的平原、草地、沙漠,有较大的空间尺度;另一方面,陆地与海洋的根本差别在于它的不均匀性:在多数情况下,陆面上分布着类型不同的下垫面,有森林、草原、农田、沙漠、丘陵、山地、冰雪、水体、城镇、农田的作物也种类繁多,有时还互相间作,而且随季节变化,它们处在不同的生长期,其地块的大小也在变化,从而改变了下垫面的粗糙度,热状况以及近地层大气边界层的结构. 因此,为了了解全球或区域尺度的大气环流的机理,需要了解小尺度的湍流交换过程,相应地,时间尺度范围也包括从 1/10 秒到数十年量级的跨度. 由于计算机的能力有限,目前,大气环流模式的网格尺度一般为一个纬度乘一个纬度的大小,实际上,陆地上的下垫面即使在这样一个小范围内,也往往是极度不均匀的,所以,非均匀下垫面的参数化方案还是一个悬而未决的问题. 非均匀下垫面上的地气相互作用模式研究是目前最具有挑战性的课题. 对于理想的非均匀下垫面,可以用 J.C.R. Hunt 的小扰动理论获得分析解. 观察表明,在新的下垫面上将发展内边界层,其高度在下风向不断增长;这时,风速,温度以及其它标量开始都处于非平衡状态,并发生一个复杂的湍流响应过程. 对于不规则的非均匀下垫面,要寻找一种适当的平均方法. 研究结果表明,对于相对均匀的下垫面,误差主要来自试验,可用简单平均方法;对于长度尺度小于 10 公里的无序混合地块,适合用加权平均法,混合高度法,统计动力学方法等. 对于陆面由大于 10 公里的非均匀下垫面覆盖的情况,则需要用中尺度模式来得到平均通量. 综上所述,考虑植被的影响和非均匀下垫面上的通量是陆面过程当前学术界关注的两个前沿方向.

野外观测是检验理论与各种模式的必不可少的手段. 60 年代以来,人们建设了不同类型的定位观测站,对不同下垫面的陆面过程进行了长期系统的测量,如:中国科学院在全国各地建设了 50 多个不同类型的定位站,为 90 年代建立生态系统观察站网

和亚洲中心奠定了基础。卫星讯号的反演研究也已经开展,从而极大地促进了这一领域的研究工作。为适应前沿课题研究的需要,80年代以来,国际学术界组织了大规模的野外观测计划和合作研究,其中最有影响的是:国际卫星气候计划 (ISLSCP) 的第一个野外试验 (FIFE)。该试验采用在卫星、飞机、和地面设备对位于美国 Kansas 州中部 15×15 平方公里上因烧荒、畜牧而变化着的草原的陆面过程进行同步观测;亚玛逊河区微气象试验 (ARME)。该英巴合作项目的主要目的是通过对热带雨林的观测,改进亚玛逊盆地 GCM 模式的陆面过程描述;水文-大气先行试验计划 (HAPEX)。这项试验计划由 TOULOUSE 国家气象研究中心在法国西南部 100×100 平方公里覆盖着混合作物和森林 (主要是松树) 的土地上组织实施,在那里有许多自动气象观测站网与长期水文数据,并在一个阶段,采用卫星、飞机、系留气球、地面加强观测,配合中尺度模式的分析与数值模拟,以对具有代表性的植被类型,改进 GCM 的陆面水文过程。相应地,我国著名气象学家叶笃正教授和日本著名气象学家山元龙三郎共同倡议的“中日合作黑河地区地气相互作用野外观测试验研究”(简称黑河试验, HEIFE),也被列为 HAPEX 第三个大型的国际试验项目。在我国河西走廊黑河流域中段一个 70×90 平方公里的地区,布置了 6 个高空或地面气象站, 5 个微气象基本站和 5 个自动天气站, 4 个水文站。除了常规观测外,在加强观测期间,在沙漠、戈壁、绿洲及其交界处,还用超声风速仪、红外湿度仪测量湍流脉动,用多普勒声雷达和低空探空观测边界层结构,着重研究干旱、半干旱地区的陆面过程和气候影响,以及该地区作物需水规律和节水技术。它们是一个用多学科、多站台、多种手段研究非均匀下垫面陆面过程的典型试验。以上的试验,也都归属于国际地圈生物圈计划 (IGBP) 和即将开展的全球能量和水分循环试验 (GEWEX)。为了系统地进行深入的基础与应用研究,有必要建立网络的信息系统,对由测试获得的大量数据进行采集,通讯,并建立数据库,其中应包括:气象、辐射、水文、土壤、植被的大量随时空变化的数据,要统一规定测试的项目、频度、布置、精度。建立全球和区域性的观测站网,有目标地组织大规模的观测试验,利用高新技术进一步提高测试的精度,时空分辨率和研究卫星数据的反演是当前陆地大气相互作用观测研究的主要趋向。

本书是中国科学院力学研究所环境和科学技术中心和大气物理所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室承担的院“八五”重点基础性研究项目“大尺度生态环境问题模式、指标体系及其应用研究”的新成果的汇集,这个项目是中国科学院生态系统站网研究的重要组成部分。全书分为五部分:总论、均匀下垫面的陆面过程、非均匀下垫面的陆面过程、区域尺度以上的陆面过程和水文大气模型、陆面过程观测的指标体系。除评述了陆地大气相互作用的研究现状外,反映了我们在农田、森林、沙漠生态系统陆面过程模型研究的新成果,考虑了大气湍流,植被的动态变化影响,干旱区蒸发的特点,并同我院山东禹城农业综合试验站,新疆阿克苏水文站,宁夏沙坡头沙漠站,辽宁长白山森林站的观测试验进行了比较;对非均匀下垫面的陆面过程研究,我们获得了植被群体对通量影响的定量公式;在区域尺度以上陆面过程的模式研究方面,我们成功地反演了确定山东省蒸发的卫星数据,分析了大气环流与降水过程对陆面过程的敏感性。最后,对常规与特定陆面过程加强观测的指标体系进行讨论。由此可见,我们的研究工作也正是本领域国际学术界关注的热点,在一些方面有创新,并对解决我国的生态环境问题有重要的实际应用。通过本项目的研究,我们还在学科交叉方面取得了经验。

在本书出版之际，我们要感谢中国科学院山东禹城农业综合试验站、新疆阿克苏水文站、宁夏沙坡头沙漠站、吉林长白山森林站所给与的资助与合作。特别要感谢我院社会发展与协调局的资助和赵剑平、田二垒同志的关心和支持。本书的出版也得到了中国科学院力学研究所环境科学与技术中心和大气物理所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室的支持和资助，在此一并致谢。由于编者水平所限，疏漏之处，在所难免，欢迎读者批评指正。

李家春，欧阳兵
一九九五年十月于北京

目 录

第一部分 总论	(1)
环境流体力学——它的意义, 内容与方法	李家春 (3)
用于大气环流模式的陆面物理过程参数化研究进展	戴永久, 曾庆存, 欧阳兵 (14)
植被-陆面过程耦合模式的动力框架	欧阳兵 (22)
第二部分 均匀下垫面的陆面过程	(27)
干旱地区陆面过程的研究	李家春, 姚德良, 沈卫明 (29)
阿克苏地区陆面蒸发的数值研究	沈卫明, 姚德良, 李家春 (37)
塔里木盆地陆气水热交换数值模拟	姚德良, 沈卫明, 李家春 (47)
植物固沙区土壤水热运移耦合模型研究	姚德良, 李家春, 沈卫明 (54)
Numerical simulation of water cycling and heat balance in agricultural ecosystems	D.L. Yao, W.M. Shen and J.C. Li (63)
在植物耗水条件下土壤水分动态的数值模拟	姚德良, 邱克俭, 冀伟, 孙菽芬 (71)
干旱地区陆面过程耦合模式及其应用	李家春, 姚德良, 沈卫明 (77)
Modelling of terrestrial ecosystem	B. Ouyang (88)
森林生态系统生物循环过程的耦合模型 (BCM) 及其数值模拟	欧阳兵 (98)
森林生态系统生物能流的瞬态分析	欧阳兵 (111)
第三部分 非均匀下垫面的陆面过程	(119)
Turbulence in the atmosphere and ocean	J.C. Li (121)
非均匀下垫面上大气边界层的研究进展	徐大鹏 (129)
非均匀植被的群体蒸发	徐大鹏 (134)
第四部分 区域尺度以上的陆面过程与水文模型	(139)
Sensitivity of IAP two-level AGCM to surface albedo variations	Z.H. Lin, Q.C. Zeng and B. Ouyang (141)
估算区域蒸发的能量法研究	聂松媛, 徐丰 (149)
用卫星数据估算区域水资源蒸发研究	聂松媛 (155)
负轮分析法在水环境规划与管理中的应用	聂松媛 (161)
第五部分 陆面过程观测的指标体系	(165)
Mathematical modelling and index system in ecology	J.C. Li (167)
陆面过程的观测指标体系研究	欧阳兵, 李家春, 姚德良 (173)

第一部分 总论

环境流体力学 ——它的意义、内容和方法

李家春

(中国科学院力学研究所)

—

环境流体力学是研究同人类和生物在地球上生存环境及其变化趋势有关的流动问题的一门科学,是流体力学的重要分支.

近一二十年来,由于世界人口爆炸性增长与工业发展,人类正面临着世界范围的环境污染、生态恶化、灾害频生的严峻形势.环境、人口、粮食、资源、能源被并列为本世纪末与21世纪困扰人类的五大难题.环境问题的解决需要不同学科的科学家的参与和通力合作,其中流动问题占有相当重要的地位.当前最紧迫的世界范围的环境问题有:

- **全球气候变化** 人类毁坏森林与大量使用矿石燃料,使大气中 CO_2 含量从工业革命前的280ppm上升到1988年的350ppm.21世纪预计将达600ppm.其他温室气体含量也在增长. CH_4 正以每年1%的速度递增.人们预测到21世纪中,全球的平均气温将上升 $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$.其后果是:气候带与动植物带迁移,生态功能下降,某些物种灭绝;海平面将上升约1米,许多重要城市和良田被海水淹没;局部地区干旱严重,水资源紧缺.

- **臭氧空洞** 人类长期使用氯氟烃为制冷剂、发泡剂、烟雾剂,使空气中CFC含量倍增,破坏了臭氧层.在寒冷地区尤为严重:南极上空已形成面积为100万平方公里的空洞;北极上空臭氧层破坏亦很严重.由于大气层因此而不能阻挡 $\text{U}_\gamma\text{-B}$ 波段的紫外线,人类皮肤癌、白内障患者将激增,多数动植物与浮游生物亦将受害.此外,氯氟烃亦属温室气体.

- **酸雨** 由于工厂和汽车排放的硫氧化物、氮氧化物增加,继北欧酸雨之后,美国、加拿大、日本亦深受其害.如美国阿巴拉契山从佛特蒙到北卡罗莱一带酸雨pH值为2.3,使大批红云杉死亡.酸雨不仅破坏森林与作物,而且酸化水源、湖泊、土地,危害水生生物,腐蚀建筑物与文物.

- **厄尔尼诺 (El Nino) 与南方涛动 (ENSO)** 这指的是赤道东太平洋海面气温 (SST) 异常升高.这不仅使局部地区发生暴雨,而且还影响全球气候.如:在印度、东南亚和澳洲发生干旱;我国东北夏季持续低温,旱涝地区及梅雨季节变更.

- **土地沙漠化** 由于过度开垦荒地与砍伐森林,致使土地退化、肥力下降、水土流失、土地沙化.据统计,目前全世界每年有600万公顷土地变成沙漠,20亿公顷土地正在受到沙漠化的威胁,约有8.5亿人口生活在贫瘠的土地上.

● **灾害频发** 世界各地每年发生的灾害,如台风、风暴潮、洪水、泥石流、森林大火等有增加的趋势。其中有的与生态平衡被破坏有很大关系。在过去 20 年间,有 280 万人因灾害丧生,经济损失达数千亿美元。1949 年以来,死亡人数超过 1 万人的有 17 次,其中 1970 年孟加拉国风暴潮死亡人数达 30-50 万。

由此可见,环境问题与人类的命运是休戚相关的。尽管人类目前还不能与强大的自然力相抗衡,但是人类的活动对我们的生存环境确实有重要的影响。如果我们能够切实加强环境科学的研究,及时作出战略性的正确决策,并积极采取各种有效措施,那么,达到改善环境质量,减轻或防御各种自然灾害的目标完全是有可能达到的。否则,我们及子孙后代迟早将会受到大自然的惩罚。

鉴于环境问题的紧迫性与普遍意义,近年来,联合国,各国政府首脑及科学家都给予充分重视。以往的知识积累以及诸如遥感技术、计算机技术等现代技术的发展,亦使复杂环境问题的解决见到了一线曙光。因此,近 10 年来,组织了许多大型的国际性科学研究项目,例如:

·WCRP(世界气候研究计划)

·IGBP(国际地圈生物圈计划)

·IDNHR(国际减轻自然灾害 10 年)

其他还有国际水文计划 (IHP),人与生物圈计划 (MAB) 等。通过这些计划的执行和实施,人们将建立地球系统科学数据库,提出物理数学模型,预测大致的趋势,评估产生的后果。环境问题的研究将促进我们积极参与国际合作。一方面,我国地域辽阔,历史悠久,我国的气象、水文、地质资料对于研究全球性问题是不可缺少的。另一方面,通过国际合作,了解国际上的研究动态,使我国的环境科学研究尽早达到世界先进水平。

环境科学的问题综合性强,需要多学科的交叉与渗透,才能使问题得到良好解决。除了社会学、经济学的问题外,它还与地学、生物学、数理科学紧密相关。就力学而言,目前有一个重要的发展趋势是同地学相结合,并开始产生了积极的效果。1988 年在法国 Grenoble 召开的第 17 届国际理论与应用力学大会将地壳动力学列为大会三个主题之一,中国力学家王仁作的大会报告为“大地构造分析中的一些力学问题”。1989 年国际理论与应用力学联合会 (IUTAM) 组织委员会决定参加国际减轻自然灾害 10 年的活动,并于 1992 年由 J. Lighthill, 郑哲敏组织召开 ICSU/WMO “热带气旋灾害”讨论会。显然,研究世界范围环境问题必须考虑地球物理、地球生物化学、植物生理等效应。因此,环境流体力学也必然是各学科相结合,主要是地学与力学相结合的产物。

综上所述,环境流体力学的研究对于解决人类生存环境的重大问题,对于促进国际合作,以及对于发展交叉学科和前沿学科都有重要意义。

二

以往人们认为环境流体力学只是研究污染问题,所以,研究内容较窄,仅局限于大气边界层和湍流扩散。为了研究世界范围的环境问题,我们认为,广义的环境流体力学应该包含下述内容:

● **气候** 根据世界气候研究计划,现已确定三大目标或方向:为期数周的长期天气预报;全球大气的年际变化和为期数年的热带海洋的年际变化;长期气候变化。

● **生态** 指生物群落通过物质循环、能量流动与其生存环境建立起来的有机整体,这是英国生态学家坦斯利于 1935 年提出的概念。我们的目的是通过生态系统的研究来

揭示微气象学的规律以及大气与下垫面的动量、质量、能量通量。

- 污染 指的是在大气圈、水圈、地圈所含的有害成分异常增加。此外, 还有水的温度异常 (有时叫热污染)。我们要了解在各种复杂条件下污染物的输运与扩散规律。

- 灾害 人类所处的环境参数, 如温度、风速、水位、降水等, 发生突发性的不利变化。灾害的种类极其广泛, 不胜枚举。

由此可见, 环境流体力学的内容是极其丰富的, 归结到一点, 主要研究地球表层的流动与输运, 尤其要着重研究生物圈、大气圈、地圈、水圈间的相互作用。

下面, 我们扼要介绍与环境问题有关的流体力学分支, 着重说明基本概念, 研究现状与主要方向。

2.1 大气海洋环流

大气海洋环流是地球流体力学的组成部分, 其最重要的特点是旋转与分层。由此形成二维化、大洋环流西部强化、Ekman 层、惯性波、内波、双扩散等独特现象。在运动方程中必须考虑科氏力与浮力效应, 往往可以作地转近似、Boussinesq 近似、 β 平面近似、薄层近似。

1904 年, Bjerknes 发表“从数学力学观点研究天气预报问题”, 开始用动力学方法研究大气环流。他认为, 大气在未来任何时刻的状态是由现在决定的。1922 年, Richardson 首先用数值方法进行天气预报, 1950 年 Von Neumann, Charney 等用电子计算机预报天气取得了成功。现在, 已能对 7—10 天的天气进行准确预报。

中长期天气与气候研究归纳起来, 主要具有如下几个特点:

全球性 大气中势能的动力转换功率为 $\partial E / \partial t = 2 \times 10^{18}$ 千瓦, 大气总动能为 10^{21} 焦耳。大气势能完全转换成动能所需时间量为 $\tau = \left(\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 5 \times 10^5$ 秒, 约 1 个星期; 天气系统消耗能量时间约为 3×10^5 秒。所以将 $t - t_0 > \tau$ 定义为长期天气过程。根据大尺度对流运动传播速度, 扰动的影响将遍及全球。

非绝热性 向外界的热量交换是大气环流长期变化的根本原因。否则大气的能量将消耗殆尽。由大气直接吸收太阳辐射能不多, 主要来自地表的反射、长波辐射、感热、潜热释放给大气。另一方面, 大气内部的加热场包括三个来源:

$$\rho \frac{dQ}{dt} = \epsilon_r + \epsilon_T + \epsilon_\tau$$

其中 ϵ_r 为辐射热流量, ϵ_T 为湍流热流量, ϵ_τ 为凝结热流量。将这些小尺度的小网格过程计入大尺度的运动数值模拟中去称为参数化。

主导系统 大气中的各种波动是多尺度的。高频分量衰减迅速 (波数为 7—10, 经 1 周衰减为 1/10; 波数为 4—6, 经 3 周衰减为 1/10; 波数 1—3 衰减到 1/10 需 37—220 天)。所以短期天气预报时, 只需考虑短波, 长波基本上不变, 可看作背景场。长期天气预报的主导系统是波数为 1—3 的超长波。

反馈与调节 海洋, 云, 冰原。

目前人们的主要注意力放在发展准确、有效的大气环流模式, 如英国气象局大气环流五层模式, 美国国家大气研究中心全球大气环流模式 (NCAR), 加利福尼亚大学大气环流模式等尤其要考虑与陆面, 海洋过程的耦合与相互作用。

在海洋环流方面, 1948 年 Stommel 给出了分析解, 解释了西部强化现象。风生环流的缺陷是没有考虑流动的铅直分布。目前的趋势是三维分层模型, 计及热盐环流的三

维效应. 海流对环境的作用是: 一方面通过海流将热量从赤道带到极地, 另一方面, 海洋是 CO_2 的汇, 可以减缓温室效应.

2.2 大气海洋中的涡旋运动

涡旋是流体运动的基本单元, Kuchemann 将它比喻为 “sinews and muscles”. 湍流就是由大大小小的涡构成的. 所以, 它是流体力学的中心问题之一. 另一方面, 通过物理抽象, 离散涡、涡团法是求解大 Reynolds 数下粘性流体运动的有效方法.

1815 年, Cauchy 提出了涡旋的概念, 并把涡量解释为流体微团的旋转角速度 $\Omega = 2\omega$. H. von Helmholtz, L. Lord Kelvin 进一步发展了涡旋运动理论. 在地球物理流体力学中相应的形式为势涡守恒, 在正压条件下

$$\frac{\zeta + f}{H} = \text{const}$$

其中 ζ 为相对涡度, $f = 2\Omega \sin \theta$, H 为等势涡面间厚度. 我们亦可导出涡旋的动力学方程

$$\frac{d\omega}{dt} - (\omega \cdot \nabla)v + \omega \nabla \cdot v = -\nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) \times \nabla p + g \nabla \left(\frac{\rho'}{\rho} k \right) + \nu \nabla^2 \zeta$$

ω 为绝对涡度. 可见非正压, 非有势力, 涡管扭曲, 辐散, 粘性均可使绝对涡度发生变化.

在大气与海洋中, 外加强迫力使涡伸缩、扭曲; 粘性使涡发生弥散, 这种强迫力来自对流不稳定、正压斜压不稳定、地形与湍流边界层强迫力. 当强迫力较小时, 产生地转涡, 即 $\zeta \ll f$; 当强迫力较大时, 产生强大气涡, 即 $\zeta \gg f$. Hopfinger 用 DNS(直接数值模拟) 发现了另一种涡旋产生机制, 即二维湍流会逐渐形成一个个相互分离的涡.

我们不仅应该研究涡旋运动及其相互作用的规律(如涡的合并与配对), 而且要研究大气与海洋中的涡旋运动. 强大气涡与自然灾害密切相关. 温带气旋、台风与龙卷风, 表面看来都是强大气涡旋, 流环式中尺度涡、大洋中中尺度涡. 中尺度涡的发现不仅对海流动力学, 而且对海洋热力学、海洋化学等发展有影响, 可有效地模拟动量、热量、盐分与地球化学物质的大尺度相互交换, 对长期天气预报有重要意义.

2.3 大气海洋中的湍流扩散

大气与海洋都处于不规则的湍流运动中, 虽然小尺度部分可以视为局部各向同性, 但大尺度运动是各向异性的. 譬如, 铅直方向的涡粘性要比水平方向的小得多. 一般 K_y , K_l 可达 10^8 – $10^{11} \text{cm}^2/\text{sec}$, 它们是 K_z 的 10^4 倍. 在旋转分层流体中, 三维湍流还会自发地二维化. 二维湍流的一般特点是: 不仅质点的能量, 且拟能 $\Omega = (1/2)\omega^2$ 亦守恒. 拟能亦有级串现象. 存在着能量逆向传递区, 但标量的方差仍沿正向传递.

大气与海洋中的湍流可由动力与热力原因产生, 所以在

$$\frac{\partial E'}{\partial t} = -\overline{u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\overline{\rho'w'}}{\rho} g - \varepsilon$$

中第一项代表剪应力产生项, 第二项代表浮力项, ε 为粘性耗散项, 令

$$\text{Ri} = \frac{\overline{\rho'w'}}{\rho} / -\overline{u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$$

为 Richardson 数. 当 $\text{Ri} > 1$ 时, 湍流不能维持. 在海洋表面层, 波的破碎与 Langmuir 环流亦是湍流产生的原因.

一般地说, 行星边界层指的是计及 Ekman 效应的高度 $h = u^*/f = O(2\text{km})$. 在这一层中根据温度分布, 可以分为不稳定、中性、稳定三种情况, 这可以根据温度绝热递减率, Richardson 数或 Obukhov-Monin 长度来加以判别. 大气边界层可以分为近地层、混合层与界面层(逆温层附近), 其中的风速廓线及湍流扩散与大气稳定度密切相关.

近地层的内速分布可用 Monin-Obukhov 相似理论来描述:

$$u(z) = \frac{u^*}{\chi} \left[f\left(\frac{z}{L}\right) - f\left(\frac{z_0}{L}\right) \right]$$

其中 u^* 为摩擦速度, χ 为卡门常数 0.4, z_0 为粗糙度, L 为 Monin-Obukhov 长度:

$$L = -u^{*2} / \left(\chi \frac{g}{T} \frac{H'}{C_r \bar{p}} \right)$$

H' 为湍流热通量. 令 $\zeta = z/L$, 则 $\zeta > 0$ 为稳定情况, $\zeta = 0$ 为中性情况, $\zeta < 0$ 为不稳定情况.

$$f(\zeta) = \int \frac{\varphi_M(\zeta)}{\zeta} d\zeta + \text{const}$$

许多学者已给出 $\varphi_M(\zeta)$ 的具体形式.

近 20 年来, 由于测量手段与数值模拟的进展, 对于不稳定的对流边界层的结构有了深入的认识. 由于浮力作用, 它完全不同于通常的剪切湍流, CBL 中的湍流在铅直方向是空间相干的, 含能的大涡充满整个流场, 直至逆温层. 所以它的特征长度为 z_i , 特征速度为

$$\omega^* = \left[\frac{g}{\theta} \overline{\omega \theta_0} z_i \right]^{1/3}$$

ω^* 为 1m/s 量级.

近地层结构是由 z_i , g/θ , u^* , $\overline{\omega \theta_0}$ 支配的. 对于 CBL, 水平速度脉动要受到 ω^* 的影响. 因而受到 z_i 的影响, z_i 不是 M-O 参数, 所以, Monin-Obukhov 理论要予以修正. 譬如, σ_w/u^* 就偏离了 M-O 相似理论. 对于混合层中的湍流, 除了 z_i , ω^* 外, 还可引进 $\theta^* = \overline{\omega \theta_0}/\omega^*$, $c^* = \overline{\omega c_0}/\omega^*$ 作为主要参数, 这称为混合层标度假设. 一般来说, 这个假定是适用的, 但是许多因素如下垫面水平温度变化, 云对流, 逆温层卷吸作用等, 可以使这个假设不成立.

对于污染物湍流扩散的研究可以分为三个方面.

1970 年以前, 主要研究 100m 以下, 离污染源下游几公里的范围. 研究的途径主要有三条, 即梯度输运理论, Taylor 统计理论与相似理论.

1970 年以后, 由于对整个大气边界层的结构有了新的认识, 湍流扩散研究范围可包括整个 ABL 及污染源下游 20 公里的地方; 对于 CBL, 特征尺度为 z_i , 即大气边界层的厚度. 于是当 $-z_i/L > 10$ 时, 在 CBL 中对流起主要作用. 在 CBL 中, 湍流扩散的最主要特点是非高斯分布, 表面源与抬升源的情况有很大差异; 另一方面扩散参数随着下游距离迅速增加至一极限值, 但浓度侧向分布接近于高斯分布. 在 SBL 中, 由于剪切湍流为浮力与粘性耗散所抑制, 所以速度脉动很小 ($\sim 0.1\text{m/s}$), 长度尺度亦很小, 而铅直不均匀性很大, 其厚度一般为 10m 至几百米. 在近地层, u^* 和 z 分别为特征速度和特征长度, 远离表面的特征长度为 $l_B \sim \sigma_w/N$, 其中 N 为 Brunt-Väisälä 频率 ($L_B \sim 10\text{m}$). 对于 SBL, 由于特征长度小, 仍可用梯度扩散理论来进行计算, $u(z)$ 与 $k(z)$ 可采用 M-O

相似理论获得的结果. k 的值一般开始时增加随后再减小. 浓度分布开始时近高斯分布, 随后趋于均匀化. 此外, 由于随机的因素, 观测值与理论值仍有较大差异, 研究浓度涨落 $\sigma_c = (C - \langle c \rangle)^{1/2}$ 也是十分重要的.

近年来, 人们又开始注意污染物的远距离输送问题. 如病毒、花粉、火山尘、工业污染物、核电站泄漏物等, 这往往与污染物长时间排放有关. 酸雨也是重要的应用背景之一. 已经有一些污染物远距离输送的模式, 这时要考虑化学反应、放射性衰变、干沉降、湿沉降、向混合层外的损耗等过程.

2.4 沉积物异重流

两种或两种以上的流体, 主要因密度差异而产生的相对运动, 称为异重流. 这种密度差异可以由温度与成分不同引起. 异重流在自然界发生极其普遍, 如溢流, 涌潮, 焚风, 锋面, 盐水楔, 雪崩, 泥石流等.

异重流运动方程与一般流体运动方程相似, 只须以约化重力加速度 $g' = (\Delta\rho/\rho)g$ 代替通常的重力加速度即可. 我们这里着重讨论沉积物异重流, 这对于研究泥石流特别重要.

泥石流机理的研究是从 1954 年 Bagnold 提出分散应力 (dispersive stress) 后开始的. 主要困难是: 泥石流是偶发事件, 不易观察; 泥石流的特性因颗粒浓度、尺寸分布、通道形状而异; 一般, 速度可以达到 0.5–20m/s, 总体密度为 1400–2530kg/m³, 固体物质体积浓度为 25–80%. 所含细微颗粒 (比盐粒细) 只占 2%. 另一方面, 泥石流可以输运巨砾, 曾经有一块 3000 吨的巨石被搬运了几公里.

泥石流可以分为四大类: 滑坡, 岩崩, 火成碎屑流, 泥流. 后三种均可称为沉积物异重流. 在此过程中, 由于隙间流体与所有颗粒均为重力所迁移, 固相与液相间的相对运动起的作用很小, 这是与二相流区别的地方.

为了使沉积物连绵不断, 必须有某种向上支托沉积物的力, 这种力来自颗粒间的动量交换与泥浆浮力. 另一种观点认为, 来自隙间泥浆的塑性强度. 根据这两种观点可以建立泥石流的力学模型.

颗粒流 (granular flow) 模型 固体颗粒间相互作用占主导地位. 其特点是体积会发生改变; 剪应力与正应力比趋于常数 $\tan \alpha$, α 称为内摩擦角 (玻璃球为 24°, 沙为 37°); 大的能量耗散; 小的颗粒流雷诺数 $Re_G = \frac{\rho U H_s}{\mu_{eff}}$ (在 4–25 范围内). 用这一模型可得速度分布为

$$\frac{u_s - u}{u_s} = \left(1 - \frac{y}{h}\right)^{3/2}$$

由此可以计算流量, 上游供水量等. 在流动过程中会发生颗粒集聚现象.

粘-塑流变模型 较常用的是 Bingham 塑性流体模型, 这里 $\tau = \tau_y + \mu du/dy$, τ_y 是屈服强度. 这时可得速度分布为

$$\frac{u_s - u}{u_s} = \left(1 - \frac{h}{H} \frac{y}{h}\right)^2$$

H 为剪应力, 等于屈服强度的纵坐标. 在 H 以上剪应力小于 τ_s , 所以, 这部分流体象刚体一样移动, 好象是飘在河流上的一条小筏. 在缓坡上, 一般采用 Coulumb 粘性模型, 应力应变关系为 $\tau = C + \sigma \cdot \tan \varphi + \mu du/dy$, 这就是说, 屈服强度不仅是材料的性质, 而且依赖于流动本身.

对泥石流研究，重要的问题还有释放机理，泥石流的沉积，与结构物的作用力，泥石流的防治等。

2.5 风沙流

研究风沙流的目的主要是为防止沙漠的迁移与扩大，此外，对沙漠工程也有重要意义。

当地面有风沙运动时，Bagnold 发现地面上的风速分布为

$$u = 5.75u^* \log(z/z_t) + u_t$$

z_t 与沙面上沙波高度有关 (细沙 $z_t = 0.3\text{cm}$, 混合沙 $z_t = 1\text{cm}$)。律格建议卡门常数应取 0.375, 所以系数应为 6.13, 而 $z_t = 10d$, $u_t = 8.49d$, 其中 d 为沙粒直径 (mm), u_t 以 m/s 计算。

地表沙粒开始脱离静止状态的临界风速度为起动风速。超过起动风速的风称为沙风。Bagnold 将起动风速分为流体起动值 (fluid threshold) 和冲击起动值 (impact threshold), 后者为在跃移沙粒冲击下的起动风速, 其公式为

$$u_t^* = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d}$$

u_t^* 是临界摩擦速度, ρ_t 为沙粒密度, d 为沙粒直径。在一定直径范围内, $u_t^* \propto \sqrt{d}$ 。冲击起动速度一般比流动起动速度小 20%。粗糙地面, 沙子含水率增加, 均要求增大起动速度。

风速达到起动风速时, 地表沙粒开始移动, 形成风沙流。根据风力、颗粒大小和质量不同有悬移 (suspension), 跃移 (saltation) 和蠕移 (creep) 三种运动形式。将沙粒搬运到别处叫风沙搬运作用。

一般小沙粒 (0.1mm 以下) 处于悬移状态。中等沙粒 (0.1–0.15mm) 为跃移状态, 沙粒被扬起后, 被气流加速并以一定角度迅速下落, 这时由于沙粒有巨大动量, 不仅本身可以反弹, 而且可使落点周围的沙粒飞溅起来处于跃移状态。较大的沙粒 (0.5mm 以上) 能在地面上滚动或滑动, 称为蠕移。跃移占输沙量的 70% 以上, 是风沙运动的主要形式。

风沙流的结构主要是指含沙量沿铅垂线的分布。一般地说, 风沙运动是一种贴近地面的风沙搬运现象 (主要在离地 10–30cm 内)。总输沙量公式为

$$q = C \sqrt{\frac{d}{D} \frac{\rho}{g}} u^{*3}$$

C 为常数 (均匀沙 $C = 1.5$, 天然混合沙 $C = 1.8$, 粒度分散的沙 $C = 2.8$)。输运率还受沙粒比重, 形状, 湿润程度, 空气稳定度, 地表状况的影响。

此外, 风蚀, 沙漠化的人工防治也是重要的研究方向。

2.6 海气相互作用

海洋与大气界面上的动量、质量与能量交换, 对于全球气候和海洋上层混合层的结构都有重要作用。一般来说, 在动量传递时, 大气运动起着主导作用; 在能量传递时, 海洋起着主导作用。