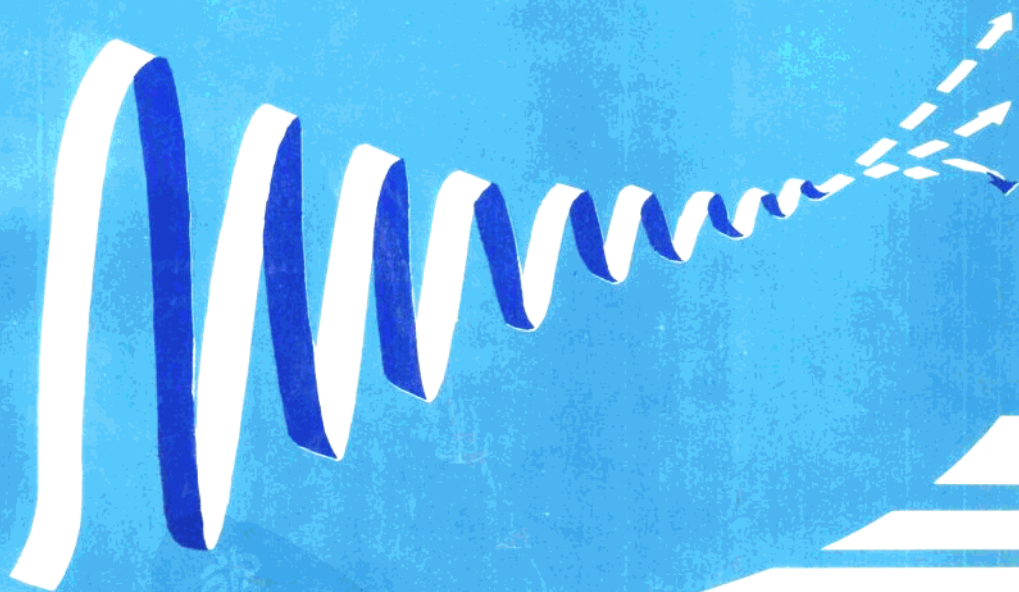


# 海面变化与环境变迁

海面—地面系统和海—气—冰系统初探

谢志仁 著



贵州科技出版社

## 前 言

人类的生存环境是一个极为庞杂的大系统,其中与人类关系最密切的是地表环境系统。地表环境系统可以分为生物环境与物理环境两大范畴,后者的3个最基本的子系统是大气圈、水圈和岩石圈,它们分别对应于物质的3种基本状态,各自又包含着众多的环境因子。环境系统的各个子系统以及各种环境因子之间存在着错综复杂的联系。海面升降变化从表面上看来似乎只是水圈的变化,实际上海面变化的内在机理使它足以成为衡量3个地表环境子系统变化的重要准尺。因此,环境变迁研究应该从环境系统的整体性和联系性着眼,而选择综合性最强的海面变化研究入手无疑是一条有效的途径。

在现代地学发展史上,海面变化是一个经久不息的热点,究其原因有二。原因之一在于海面变化的敏感性和复杂性。海面变化是地球表层大气圈、水圈、岩石圈变化的直接表现,同时也受到地球内部各圈层以及地球外部各宇宙圈层变化的牵制。这就意味着不同时空尺度的海面变化实则隐含着环境系统诸多因子极为丰富的变化信息。所谓“牵一发而动全身”,海面变化研究就是联系现代地球系统科学各分支的一条重要纽带。原因之二在于海面变化对人类自身发展的深刻影响。与末次冰期的冰川消融过程相伴随的气候变暖和海面上升,曾是促使人类摆脱漫漫百万年石器时代跨入文明迅速发展新时期的重要外在因素。而当前由于人类对地球环境的干扰所引发的新一轮气候变暖和海面上升的潜在威胁,则正在有力地将会面变化研究从传统的史料研究、理论研究推进到预测研究、应用研究的新高度。

作者自1978年起,师从我国著名地质地理学家杨怀仁教授从事海面变化和环境变迁研究。10余年来略有所得,也深感海面变化课题之“博大精深”及其研究手段的相对落后。诚然,海面变化之于环境系统,犹如神色、脉络之于人体,表象中隐含着系统运行的宝贵信息。然而,若无“望闻问切、八纲辨证”的手段,实难窥其内在。要想探得海面变化的真谛,就必须对海面变化研究的方法论问题有所思考,有所实践。作为本书主线展开的“海面—地面系统”和“海—气—冰系统”概念及其应用可视为此类思考和实践的一种尝试。这一尝试强调从环境系统的观点出发,将海面升降和气候波动、冰川进退、岸线摆动等环境因子的变化过程都如实地还原到环境系统中加以考察,注意各种环境因子之间的联系和反馈机制并以适当的模型加以描述,同时努力发掘多种信息载体,获得尽可能多的环境变化信息以适应数学方法的渗透。作者以为这就是海面变化和环境变迁研究方法的要点,也是贯穿本书始末的基本思路。

本书论述海面变化和环境变迁的空间范畴包括中国东部和全球,着重研究全球变化网络中的区域变化规律;论述的时间范畴跨越过去、现在、未来,以过去2万年的变化历史、规律和机制为核心内容,以近百年来的变化特征和下一世纪的变化趋势作为其延伸和归宿。之所以选择2万年作为核心研究时段,首先是出于理性思考。因为这一时段包含了第四纪诸多冰期旋回中最后一个完整的冰消期,保存下来的各类环境变化信息载体的数量最为丰富,因而成为研究各种 $10^1 \sim 10^2$ 年时间尺度的环境变化过程和机制的最佳时段,成为未来环境预

测研究最重要的前进基地。其次则是由于作者对这一段自然史和文明史的偏爱。过去的2万年是自然史与人类史上的重大转折时期,过去的2万年中充满了人类文明与环境激变的千古之谜。在这一期限的最初2000年中,北半球的大陆冰流达到晚更新世以来的最大规模。今日碧波荡漾的北美大湖,林海茫茫的北欧山地,都被覆盖在两三千米厚的冰层之下。与此同时,海面下降百米左右,全球陆地面积增加18%。从距今18000年之后,全球气温回升,冰流迅速消融。回归海洋的冰融水使2600多万平方公里的陆架平原重新沦为海底,与高温相随而来的丰富降水,则在大陆上造成了横流的洪水。海面和气温的回升伴随着逆转,形成了激烈的振荡。海水在漫长的大陆边缘退而复进,与陆地竞相角逐。森林在广袤的北方大地盛而复衰,与苔原交互重现。丰沛的雨水曾给撒哈拉沙漠带来湖泊、清泉、绿荫和精美的壁画,接踵而来的干旱留下的则是黄沙中的盐滩、泉华、树桩和阴森的废堡。中世纪的暖流刚赐给格陵兰冰原以“绿色大地”的美名,小冰期的寒风旋即将拓荒者的后裔驱入饥饿与死亡之境。在这动荡的年月里,哺乳动物迎来的是又一个新的灭绝时期,而人类则脱颖而出,在与一次又一次侵袭而来的“大洪水”、“小冰期”灾变的斗争中,从地球表面的亘古荒原上建起了村落和城镇,发展了农业和工业,并在最近开始了向信息时代的进军。人类在为自己的力量和成就骄傲的同时不仅要问:不久以前他们所经历过的那些“大洪水”、“小冰期”究意是怎样的来历?此类环境剧变今后是否还会重演?预知未来是人类本能的渴望,而预测未来的基础则是认识过去和今天。两万年来发生在地球大气圈、水圈、岩石圈中的各种短尺度变化,曾经给人类带来过并将继续带来深刻影响。环境变迁有其自身的发展规律,而人类活动对环境的影响亦在不断加强。追溯环境变迁的历史事实,探寻其内在规律,以期对自然因素与人为干扰交互作用下的环境变迁趋势作出科学预测,这是当代地球科学和环境科学面临的重大课题,也是本书宗旨所在。

本书的具体论述按3部分展开。第一部分“概念和方法”包括第一章和第二章。第一章着重论述了环境系统概念以及海面变化与环境变迁研究的基本思路。第二章建立了海面—地面系统的概念模式及其4种数学模型。第二部分“历史与机制”包括第三、四、五章。其中第三章具体运用前两章提出的概念和方法论证了2万年来中国东部和全球海面升降运动的历史过程和波动特征。第四章通过海面波动史实与全球气候波动史实的对比,提出了全球海—气—冰系统概念及其振动机制分析,建立了具有全球对比意义的2万年气候—海面波动序列划分方案。第五章论证了大陆边缘地面升降运动与气候—海面变化之间的内在联系,并按12个分区定量探讨了中国东部沿海平原和陆架区2万年来地面升降与海岸变迁的过程与特征。第三部分“现状与趋势”包括最后三章。其中第六章论证了近百年来气候—海面变化过程和地面升降特征,着重分析了人类活动的影响。第七章讨论了海面变化趋势预测方法,详细分析了温室效应影响下未来全球气候、海面和我国东部地面升降与海面变化的趋势。第八章提出了“海面上升灾害”概念,全面阐述了典型区海面上升灾害的属性、灾情、机制、趋势与对策。书中提出的主要学术成果可概括为以下4个方面。

1. 海面变化方面:根据从我国东部沿海平原1339个钻孔的浅部地层资料中提取的1286个广义海面遗迹点,建立了12个分区的海面相对变化曲线,并进而经地面升降校正建立了中国东部2万年海面升降运动曲线。根据从世界各地130条海面变化曲线中筛选出来的67条曲线的分区统计结果,建立了2万年全球平均海面变化曲线。这些曲线的定量分析

结果表明,最近 18000 年间全球海面升降运动发生过 9 次千年级的准周期性波动。对近百年来的海面变化,从世界各地 688 个验潮站的长期观测记录中筛选出 208 个序列,采用与前人不同的纬度分组和地区分组统计方法,拟合了新的全球海面变化曲线和海面上升速率值,并检验了地面沉降、地球自转等因素对全球海面变化趋势的影响。在综合了全球性和地区性气候、海面变化和地面升降变化研究成果的基础上,提出了中国东部沿海试点区 21 世纪海面上升幅度预测方案。

2. 气候变化和冰川脉动方面:根据对世界各地冰川、气温、海温及同位素资料的综合分析,提出了“冰消期中的小冰期旋回”概念,并且发现:18000 年间 9 次“小冰期”的发生时间和准周期与全球海面波动期一致,这种千年级的气候—海面波动的连续序列具有阻尼振动特性,同时又表现出阶段性和突变性,这些特性与全球海—气—冰系统内外的反馈机制和某些宇宙性因素和偶发事件之间存在着因果关系。对近百年来的气候变化,采用建立多种参照系的方法,论证了温室效应问题,为人类已经干扰了全球气候—海面自然变化趋势的观点提供了若干新论据。

3. 地面升降和海岸变迁方面:根据全球分区海面相对变化曲线的对比,验证了冰消期中全球性均衡运动的概念。对中国东部构造运动、均衡运动、沉积物加积作用和压实作用定量研究的结果,论证了东海陆架最低岸线位置,获得了东海陆架沉降速率数据及 11 个沿海平原分区的全新世地面升降速率分项指标。从中发现,均衡运动是我国东部沿海平原全新世地面沉降运动中的主导因素,其中又以“沉积均衡运动”起决定性的作用。在综合了气候—海面波动和地面升降数据的基础上,利用三维海面—地面联合模型进行了海岸线变迁的模拟试验,获得了 2 万年来 9 次千年级气候—海面波动期中中国东部陆架区、长江三角洲平原区和苏北沿海平原区的古地形图和岸线变迁图,提出了中国东部陆架区冰消期岸线变迁分期方案。

4. 应用研究方面:在三维海面—地面联合模型模拟试验中,作者提出了“成岸率”和“平均成岸年代”概念及其分析方法,论证了这种方法应用于沿海平原及陆架区“古滨海砂矿”勘查的可能性。根据海面—地面系统概念的引伸,提出海面上升灾害概念及其基本属性、发生机制分析,并以环渤海地区为例对海面上升灾害的现实灾情和发展趋势进行了全面分析,提出了防治这种“无形水灾”的基本战略、基本方针和具体措施。

本书是作者近 10 余年来从事海面变化和环境变迁研究的成果总结之一,全书内容据作者于 1981~1993 年期间完成的多项成果精炼而成。本书第一章至第五章素材主要取自 1986 年完成的“两万年环境变迁模拟—气候、海面与地壳运动的反馈机制”一文。这是国内第一篇自然地理学博士学位论文,原文 30 万字,曾经 13 位专家评审并获得很高评价。此五章部分成果取自 1981 年完成的硕士学位论文“江浙沿海平原及相邻陆架区 18000 年以来的海面变化”,原文约 16 万字。本书第六、七两章主要取自 1992 年完成的“长江三角洲地区海面变化趋势试点研究”,这是国家自然科学基金委员会和中国科学院联合资助的“七·五”重大项目子课题成果之一,原文 17 万字,曾经 5 位专家评审,认为居国内首创领先和国际先进水平。该两章的部分成果取自 1993 年结题的国家教委博士点基金项目“中国东部海面变化趋势及其对沿海环境和经济的影响”成果中由本书作者完成的部分内容。本书第八章素材取自 1991 年完成的“环渤海地区的海面上升灾害—属性、灾情、机制、趋势与对策”一文。这是

国家科委软科学研究计划项目“我国沿海地区重大自然灾害防治与对策的预研究——以环渤海地区为例”研究成果之一,原文约8万字。

作者为完成本书包涵的各项研究,参阅了90多种专著、1300多篇中、外文献,对我国东部沿海5省3市进行了实地调查,走访了50多家有关单位,分析整理了该区域280多份地质报告,对2100多个钻孔岩性资料、90多组微古、孢粉资料进行了编录和统计处理,对中国东部沿海平原和陆架区1200多个海面遗迹点、100多个碳14年龄测定数据、40多个验潮站的2000多个潮位数据,以及世界各地130多条海面变化曲线、数十条气候指标变化曲线、200多个验潮站的10000多个海平面数据等大量资料进行了多种形式的统计分析。因此全书的论述完全是在实际资料的基础上展开的。为便于读者作进一步的分析研究,书末6个附录给出了主要基础资料的索引。

在完成本书研究的全过程中,作者曾得过校内外师长、学友、同行和管理人员数十人的指点和帮助。值此成书之际,谨向他们深表谢意。我要特别感谢我的硕士学位和博士学位导师杨怀仁教授10余年来在学术上、精神上乃至具体事务上所给予的始终不渝的指导、关心和支持。感谢我的学友中国科学院研究生院赵英时教授提供了她精心收集整理的有关河北平原地质地貌等方面的全部原始资料。感谢我的学长中国科学院海洋研究所韩友松研究员在本人赴青岛工作期间给予多方面的照顾并为海面上升灾害研究提供了极为宝贵的资料。感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所赵宏先生在我初涉数值模拟研究时提供“分块趋势面”计算程序并多次讲解回答了该程序设计使用的有关问题。本作者怀着深深的敬意向先后悉心审阅本书各部分成果素材并提出宝贵意见使本人在修订成书过程中受益匪浅的各位评审专家表示诚挚的谢意,他们是:地质矿产部地质力学研究所孙殿卿院士、中国科学院古脊椎动物与古人类研究所贾兰坡院士、中国科学院地理研究所陈述彭院士、中国科学院地质研究所刘东生院士、中国科学院南京地理与湖泊研究所施雅风院士、南京大学任美镔院士、郭令智院士、么枕生教授、盛承禹教授、华东师范大学陈吉余教授、严钦尚教授、许世远教授、杭州大学冯怀珍教授、河海大学周恩济教授、中国科学院海洋研究所秦蕴珊研究员、赵松龄研究员、毛汉礼研究员、地质矿产部地质力学所段万倜研究员。在本书出版之际,我要向在本书几经周折的出版过程中给予诸多帮助的北京师范大学史培军教授、南京大学徐馨教授、贵州科技出版社陈克贤编审、贵州省地矿局沈志达高级工程师、欧阳黔森工程师表示衷心的感谢。同时,本作者怀着一种特殊的心情深深感谢我的妻子南京林业大学樊仲英副教授,她多年来给予本人以全方位的支持,包括完成本书全部书稿的整理和誉写。愿本书在当前地球科学交叉渗透迅速发展的潮流中能溅起一朵小小的浪花,以此回报所有关心帮助过我的人们。

谨以此书献给我的导师、我的家人、我的师友!

作 者

1994年11月26日

于南京大学

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第一章 海面变化与环境系统.....             | (1)  |
| 第一节 从环境系统看海面变化.....            | (1)  |
| 一、环境系统概念 .....                 | (1)  |
| 二、海面变化在环境系统中的地位 .....          | (3)  |
| 第二节 海面变化和环境变迁研究的基本思路.....      | (4)  |
| 一、海面变化和环境变迁研究的新要求 .....        | (4)  |
| 二、方法论 .....                    | (5)  |
| 第二章 海面—地面系统及其数学模型.....         | (7)  |
| 第一节 概念和术语.....                 | (7)  |
| 一、海面升降运动 .....                 | (7)  |
| 二、地面升降运动 .....                 | (8)  |
| 三、海面变化曲线 .....                 | (9)  |
| 四、海岸线变迁 .....                  | (9)  |
| 第二节 海面—地面系统模型.....             | (9)  |
| 一、基本方程.....                    | (10) |
| 二、数学模型.....                    | (11) |
| 第三章 全球和中国东部两万年海面波动史 .....      | (17) |
| 第一节 全球海面升降运动的变化过程 .....        | (17) |
| 一、理论曲线反映的变化趋势.....             | (17) |
| 二、实测曲线反映的变化趋势.....             | (21) |
| 三、速度曲线反映的过程细节.....             | (24) |
| 第二节 中国东部的海面升降运动过程 .....        | (29) |
| 一、相对变化曲线拟合.....                | (29) |
| 二、绝对变化曲线拟合.....                | (39) |
| 三、速度曲线与波动期划分.....              | (44) |
| 第三节 中国东部海面波动与全球平均海面波动的对比 ..... | (47) |
| 一、关于波动期的划分.....                | (47) |
| 二、关于海面波动的原因.....               | (48) |
| 第四章 冰消期气候的振动与突变 .....          | (50) |
| 第一节 气候振动现象 .....               | (50) |
| 一、冰川脉动与脉动期划分.....              | (50) |
| 二、其它气候指标的振动现象.....             | (54) |
| 三、气候振动与海面波动的对比.....            | (58) |



|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 第二节 冰消期气候—海面波动的全球序列 .....            | (61)  |
| 一、冰消期概念 .....                        | (61)  |
| 二、冰消期中的小冰期旋回 .....                   | (63)  |
| 三、小冰期旋回的变化幅度与冰流快速反应机制 .....          | (66)  |
| 第三节 冰消期中气候振动的机制 .....                | (69)  |
| 一、气候振动概念的气候学—物理学定义 .....             | (69)  |
| 二、海—气—冰系统振动的恢复力—反馈作用机制 .....         | (72)  |
| 三、气候系统基本振动模式解析 .....                 | (74)  |
| 四、冰消期海—气—冰系统的阻尼振动模式 .....            | (77)  |
| 第四节 非周期性因素对冰消过程的影响 .....             | (79)  |
| 一、海—气—冰系统内部非周期性因素的影响 .....           | (80)  |
| 二、海—气—冰系统外部因素的影响 .....               | (85)  |
| 第五章 冰消期地面升降与海岸变迁 .....               | (90)  |
| 第一节 冰消期地面升降运动的特点 .....               | (90)  |
| 一、全球性的地壳均衡调整 .....                   | (90)  |
| 二、大陆边缘的地面升降 .....                    | (93)  |
| 三、河口三角洲地区的沉降 .....                   | (95)  |
| 第二节 中国东部沿海平原的全新世地面升降运动 .....         | (97)  |
| 一、沉积作用造成的地面上升效应 .....                | (97)  |
| 二、地面沉降因素的理论估算 .....                  | (99)  |
| 三、关于地面升降速度变化的讨论 .....                | (104) |
| 第三节 冰消期中东海大陆架的沉降 .....               | (106) |
| 一、沉降现象 .....                         | (106) |
| 二、沉降原因及分项估算 .....                    | (107) |
| 三、晚更新世末期东海最低海面与最低岸线的位置 .....         | (110) |
| 第四节 中国东部冰消期海侵区古地面变化和海岸线变迁的数值模拟 ..... | (113) |
| 一、陆架区的模拟试验 .....                     | (113) |
| 二、沿海平原区的模拟试验 .....                   | (116) |
| 三、成岸率与平均成岸年代分析 .....                 | (120) |
| 第六章 气候—海面变化和地面升降的近期趋势 .....          | (126) |
| 第一节 近百年来的海面变化 .....                  | (126) |
| 一、全球平均海面变化趋势 .....                   | (126) |
| 二、全球平均海面变化过程解析 .....                 | (128) |
| 三、中国东部平均海面变化 .....                   | (135) |
| 第二节 气候—海面近期趋势中的人为因素干扰 .....          | (137) |
| 一、本世纪以来的气温波动过程及其自然趋向 .....           | (137) |
| 二、人为干扰检验 .....                       | (138) |
| 第三节 地面升降运动的近期趋势 .....                | (147) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 一、概况 .....                  | (147) |
| 二、近期地面沉降趋势试点研究 .....        | (148) |
| <b>第七章 海面变化的未来趋势</b> .....  | (158) |
| 第一节 海面变化趋势预测方法 .....        | (158) |
| 一、基本方法 .....                | (158) |
| 二、地区性海面变化趋势预测方法 .....       | (164) |
| 第二节 海面升降运动变化趋势 .....        | (166) |
| 一、全球性海面升降运动变化的未来趋势 .....    | (166) |
| 二、地区性海面升降运动变化的未来趋势 .....    | (176) |
| 第三节 地区性相对海面变化趋势预测试点研究 ..... | (186) |
| 一、地面沉降的未来趋势 .....           | (187) |
| 二、相对海面上升的可能情景 .....         | (189) |
| 三、初步结论与讨论 .....             | (198) |
| <b>第八章 海面上升灾害及其对策</b> ..... | (205) |
| 第一节 海面上升灾害的属性与灾情 .....      | (205) |
| 一、基本属性 .....                | (205) |
| 二、灾情现状 .....                | (208) |
| 第二节 海面上升灾害的机制与趋势 .....      | (218) |
| 一、发生机制 .....                | (218) |
| 二、发展趋势 .....                | (225) |
| 第三节 海面上升灾害的防治对策 .....       | (231) |
| 一、战略思考 .....                | (232) |
| 二、近期对策 .....                | (233) |
| <b>参考文献</b> .....           | (237) |
| <b>附录</b> .....             | (249) |
| 附录一 世界各地海面变化曲线情况一览表 .....   | (249) |
| 附录二 世界主要验潮站情况一览表 .....      | (250) |
| 附录三 海面遗迹点及所在钻孔基本数据表 .....   | (254) |
| 附录四 中国东部沿海平原钻孔资料索引表 .....   | (288) |
| 附录五 东海大陆架碳 14 测年数据一览表 ..... | (294) |
| 附录六 中国东部沿海部分验潮站情况一览表 .....  | (297) |



# 第一章 海面变化与环境系统

## 第一节 从环境系统看海面变化

### 一、环境系统概念

#### (一) 定义

“环境”一词，其本意是“环绕着的境界”，因此，它总是相对于“被环绕者”而言的。在现代环境科学的概念里，这个“被环绕者”就是人类，而所谓环境则是人类之外的一切自然系统，从空气、水、土地、动植物到地核、地幔，从月亮、太阳、银河系到总星系。它们与人类之间以及彼此之间存在着各种形式的联系，它们共同组成了一个庞大的多级谱系。环境系统就是整个自然界各种物体相互联系所构成的这样的一个总体，一个巨系统。

#### (二) 结构

环境系统的成分虽然庞杂，但其结构是有序的。可以按空间尺度将环境系统划分为3个基本的层次，即：地表环境系统，地球环境系统和宇宙环境系统。每个层次中都包括有若干基本的子系统。例如，与人类关系最密切的地表环境系统就是由大气圈、水圈、岩石圈及其交接面附近的生物圈所构成的。环境系统的这3个基本层次及其所属的子系统内部及相互之间存在着极为复杂的自控功能和反馈联系，这种情形如图1—1所示。

地表环境系统所包含的4个子系统可按其作用性质划分为两个范畴：生命现象范畴和物理现象范畴。前者发生在生物圈子系统内，属于生态科学的研究范围，后者发生在其余3个子系统内，属于地球科学的研究范围。当然，二者之间是互相交叉，密切联系的。

#### (三) 环境因子

地表物理环境的3个子系统各自都包含着一些基本的环境因子，每一个环境因子可以用少量指标加以明确度量。环境变迁研究所追索的环境历史通常就是以这些指标值的定性或定量描述来表证的。地表物理环境系统所包含的主要环境因子已在表1—1中列出。当然，图1—1所示的每一环境子系统都包含有自己的环境因子，此处不再一一列举。但是，必须指

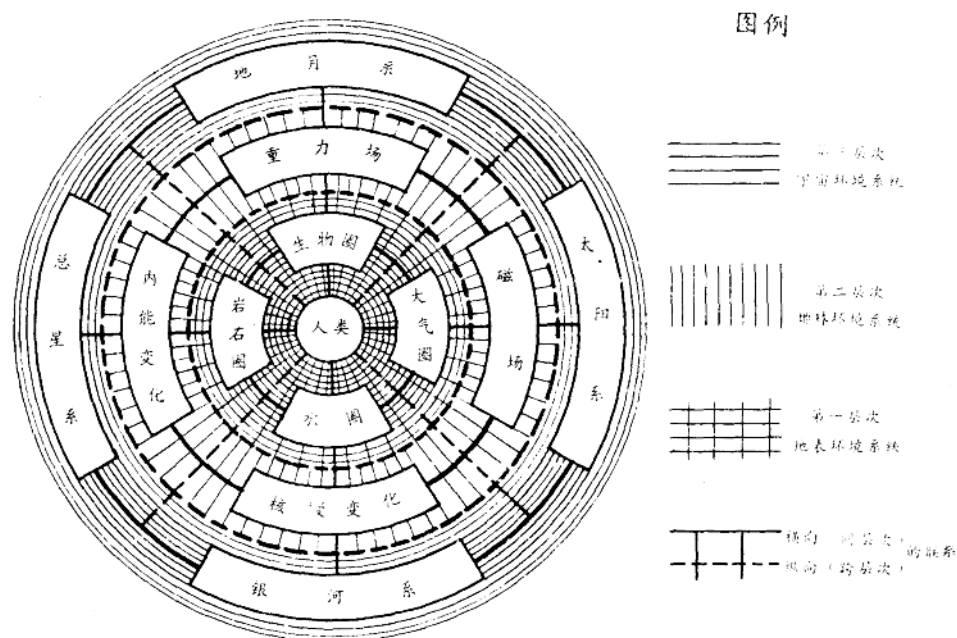


图 1—1 环境系统的三层次结构示意图

出,各种环境因子虽然归属于各个不同的环境子系统,但其变化原因却不一定仅限于该子系统内部。这是因为横向联系的存在,也即各环境因子之间可以构成新的反应系统。例如,海面升降既可与本子系统内的河道演变构成体系,又可与外部的降水变化或地壳运动互为体系。结果,海面升降指标的变化就不仅是水圈的变化结果,而且也是大气圈和岩石圈的变化结果。同样,河道演变就不仅与河床内水沙冲淤平衡变化有关,而且与气候、海面变化和地球自转速度变化密切相关。黄河、长江等河流全新世以来河道摆动实例很好地说明了这种理论关系的实际意义(杨怀仁、韩同春等,1985)。海面升降、河道演变的情况如此,其它环境因子的变化概莫能外,一般均非单一体系的变化结果,而是多种反应体系共同作用的结果。这是因为任何一种环境因子都只是环境系统中的某一组分而并非孤立之物。

表 1—1 地表物理环境系统及其主要环境因子

| 大 气 圈 |      |      | 水 圈  |      |      |      | 岩 石 圈 |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 气温变化  | 降水变化 | 气压变化 | 海面升降 | 湖泊演变 | 河道演变 | 岸线变迁 | 地壳运动  | 火山爆发 | 地震活动 |

## 二、海面变化在环境系统中的地位

### (一) 多层次的联系

从表 1—1 可知,海面升降是水圈子系统下的一项环境因子。海面升降的实质是海洋水体表面形状和位置的变化,其主要的量度指标是海面高度。现代海面高度测量的理论基准是参考椭球体,而对海面的实际测量是以设在陆地上的水准零点为基准的,因此海面高度变化的测量成果中就不可避免地包含了水准零点所在地的地面高度变化量。至于古海面高度的测量,唯一的途径是测量遗留在陆地和海底的古海面遗迹。因此遗迹所在地地面升降的影响势必更大。也就是说,由水准测量获得的海面高度的变化,都只是海面相对于地面的变化,它可能只是地壳运动的结果,也可能只是海面升降的结果,更大的可能则是这两个不同的环境子系统下属的环境因子共同变化的结果。因此,从标度上看,海面升降与岩石圈的变化有不可分割的联系。

从海面升降的实质上看,海面升降无非是海洋水体表面位置和形状的变化。位置的变化有两项基本成因,即:①水体质量变化;②洋盆容量变化。前者主要取决于全球水平衡转移,因而与大气圈的变化密切相关,后者主要与岩石圈的变化有关。形状的变化除风浪等短期机制外有一项基本成因,即大地水准面变形。在这一点上,海面升降与高一层次的地球环境系统中的重力场子系统,核—幔子系统发生了直接联系,同时又与更高层次的宇宙环境系统中的地—月子系统、太阳系子系统发生了直接联系。

### (二) 环境变迁的准尺

由此看来,海面升降这一环境因子在整个环境系统中处于一种十分特殊的地位。海面升降研究的根本目的就在于从海面相对变化的表面现象中将分属于各个环境子系统的环境因子变化量逐一分解出来。因此,海面升降研究是以环境系统的整体性和联系性着眼来研究环境变迁的一条重要途径,海面升降的研究成果可以作为环境变迁的一种重要准尺。也正是在这个意义上,可以说海面变化是地球的“脉搏计”和“巨型温度计”(杨怀仁,1984)。正因为如此,近一二十年来,海面变化研究成为国际地学界中一个经久不衰的热点,发展十分迅速。我国的海面变化研究近年来发展也很快,但似乎尚未走出“就事论事”的圈子——就海面遗迹论海面变化,很少涉及其它。因此希望我国环境科学界给予古代和近代的海面变化研究以更多的重视,希望有更多的气象学家、天文学家、地球物理学家、生物学家和社会学家关心这一研究领域,也希望海面变化研究者以更高的眼界,努力开拓理论海面变化研究和应用海面变化研究的新领域。

## 第二节 海面变化和环境变迁研究的基本思路

### 一、海面变化和环境变迁研究的新要求

#### (一) 次级波动与突变事件的研究

环境变迁和海面升降的近代概念是在地质学经典理论的形成时期相继提出的。气候及其它环境因素曾发生过波动或变迁的思想最初以 18 世纪末至 19 世纪 20 年代间发展起来的冰期概念为代表,到本世纪初通过彭克(A. Penck)等人对阿尔卑斯冰川的深入研究形成了完整的冰期学说。与此同时,通过对中低纬地区湖滨线变化的研究形成了雨期学说。冰川——海面升降的概念早在 19 世纪 30 年代和 40 年代就由莱伊尔(C. Lyell)加以论述,至 19 世纪末期又由休斯(E. Suess)等人进一步发展。这些概念与同时期形成的其它经典地质理论一样,是在与圣经所宣扬的“创世说”、“灾变说”的斗争中发展起来的。它们以均变论为特征,是当时新思潮的代表。然而,事过百多年之后,均变论已开始受到当今地学革命浪潮的冲击。现代科学技术的渗透使地学工作者已经能够对环境历史进行相当精细的观测。人们发现许多环境变迁过程的方式,速度和幅度古今之间往往有巨大的差别,以人类过去几十年,几百年乃至几千年的经验看来,似乎是不可能的变化在地质历史上却确实发生过。例如,发生在晚冰期中的著名的阿勒罗德(Allerod)振动,在短短一二百年内全球温度变化即可达到与冰期—间冰期幅度相接近的程度,全球的冰流格局、海陆轮廓、动植物面貌也同时发生大起大落的变化。据 Flohn(1979)的看法,此类突变事件发生的几率是  $1/10^4$  年,有时甚至是  $1/10^5$  年。人们不竟要问,不久以前曾经发生过的此类环境剧变事件今后是否还会重演?然而作为环境变迁研究基础的冰期学说、海面变化学说,都是建立在万年级的均匀变化的概念基础上的,难以对此作出满意的回答。因此环境变迁研究的新要求首先就是加强地质变化背景下各种短尺度(百年级、十年级)次级波动的研究。同时,也应加强对环境变迁过程中的突发事件和灾变事件的研究。

#### (二) 人类与自然交互作用的研究

作为“被环绕者”而居于环境系统中心的人类,由于自身的迅速发展正在对地表环境系统产生日益增强的影响。例如,由于人类经济活动释放到大气中的二氧化碳等温室效应气体不断增强,人类已面临下一世纪全球气温和海面大幅度上升的严重挑战,气温和海面上升幅度有可能会超过过去 200 万年以来的任何时候。至于人类活动造成的旱涝频率变化、沙漠扩大、地面沉降等等环境恶化的事例更是不可胜数。因此,加强人为活动与自然过程交互作用的研究是环境变迁研究第二方面的新要求。

## 二、方法论

### (一) 系统论的启示

在环境变迁研究中强调环境系统的概念,强调海面升降研究的特殊地位,强调突发事件与次级波动研究,强调人与环境交互作用的研究,归根结蒂是从系统论的观点出发的。

系统论是本世纪40年代与信息论、控制论相继诞生的。这3种理论同起一源、三位一体,他们共同发源于“系统”的概念,现已结合形成广义系统论。系统论的思想和方法已在许多自然科学和社会科学领域内引起了深刻的变革,也为环境变迁研究提供了新思路和新方法。这些新思路和新方法可以归结为以下3项原则:

#### 1. 强调把单一的环境因子放在环境系统的网络中进行考察

在环境变迁研究中应该时时注意各种环境因子之间的动态联系与整体性,避免静止的,孤立的观点。例如,在气候变化研究中不仅要研究大气系统,还应该研究海—气系统,冰—气系统。在河道演变研究中不仅要研究河流系统内部诸因素的作用过程,还应注意气候、海面、地壳运动以及地球引力状态等因素对河流系统的作用过程。要做到这一点,必须打破传统的学科界限,而学科边缘区域恰恰是可望得到最大收获的“科学处女地”。在环境变迁研究领域里,有着许多这样的处女地等待去开发、去耕耘。

#### 2. 尽可能多地获得信息

环境系统的联系性和整体性一方面要求在研究单一环境因子变化时,要注意收集多种可能存在的反应系统的信息,另一方面也为这一努力提供了有用的线索。从这一观点出发,处理信息的着眼点不应放在删除“无用信息”,而应放在变“无用信息”为有用信息。扩大信息量的途径主要有以下两条:第一,根据系统动态联系的线索开辟新的信息源。例如以“广义海面遗迹”概念代替传统的“海岸遗迹”概念,就可以从沿海地区成千上万个钻孔的岩性描述资料中提取出海面升降的大量有用信息(参阅本书第二、三章)。引入“最低居住面”的概念,就可以从考古点的高程资料中开辟出海面升降的信息源(参阅杨怀仁、谢志仁等,1985)。第二,采用各种信息转换加工技术,使已有信息增殖。最常用的转换加工技术是各种数据标准化方法和数字滤波、谐波分析技术等。例如,将海面高度变化的信息转换为速度信息,不仅扩大了信息量,而且能更好地反映出海面升降的物理运动属性(参阅第三章)。

#### 3. 重视数学模型的建立与运用

模型是对反应系统内外控制调节功能的高度概括。建立模型的过程就是对系统功能深入认识的过程。这是应用系统分析和系统综合方法的有效途径。而模型一旦建立起来就是一种十分有用的试验手段和演绎工具,可以用来检验已有的认识并使之深化和完善。例如,建立某种海岸线变迁模型,其主要意义并不在于模拟出几条古海岸线的位置,而在于综合评价。通过对模型不同输入(影响岸线位置的主要参数)和相应输出(预测结果)的综合评价,可以获得对岸线及与之相关的其它环境因子变化过程的完整认识。如果模型是较完善的数学模型,那么就可以将定性的演绎过程变为数据的试验过程,利用电子计算机在很短的时间里模拟出各种不同条件下的岸线变迁过程,这种效果是传统的研究方法难以达到的。在气候

学、地球物理学等领域内,各种模型的应用已经取得十分显著的成绩,但是在环境变迁研究的大部分领域内模型和数学方法的应用还很不普遍,这是环境变迁研究中一个不可避免的问题。

## (二) 基本思路

综上所述,从环境系统的观点出发将海面升降和其它环境因子的变化过程如实地还原到环境系统中加以考察,注意各环境因子之间的联系(相关性),努力寻求这种联系的实质——系统的控制调节功能,以适当的模型加以描述,同时努力发掘多种信息源,获得尽可能多的信息,以适应数学方法的应用。这些就是环境变迁研究方法的要点,也是贯穿本书始终的基本思路。

## 第二章 海面—地面系统及其数学模型

### 第一节 概念和术语

如第一章第一节所述,海面升降在其标度和成因上与岩石圈的变化有密切的联系。从环境系统的观点来看,这些联系实际就是某些系统的调节控制功能,其中首推海面—地面系统。海面—地面系统是复杂的海面系统中的一个最基本的分支。要对海面升降过程进行深入的定量研究,必须抓住这个系统中的主要成分,弄清其作用过程,并以某些数学模型加以表述。为了正确理解本书中提出并实际应用的海面—地面系统数学模型,有必要首先明确一些基本概念和术语。

#### 一、海面升降运动

海面是海洋水体的上表面,亦即海洋水体与大气的界面。严格说来,海面与海平面是两个不同的概念,海面指的是海洋的真实表面,它是有形的,处于永不停顿的运动之中。而海平面则是一种无形的水平面,是假定海面波动平静时的静水位。二者相比较,前者更接近于海面变化研究的实质。因此在环境变迁研究领域内,宜以“海面”作为基本术语。

海面升降运动是在度量上与地面无关的海面变化(海面相对于地心的变化),亦即所谓海面的绝对变化。海面升降运动可以从形式上和成因上划分为许多类型,详见表2—1。在以往很长时期中,海面升降运动被认为是全球一致的。因此,海面变化研究一直局限在一维空间上,并不考虑海面升降量的横向变化。此为狭义的海面升降运动概念。随着卫星测量技术的发展和大地水准面形状研究的深入,全球不一致的海面变化问题已引起日益广泛的注意。所谓全球不一致的变化可以统称之为海面变形运动,其实质是海面波的传递。对海面变形运动的研究势必使全球尺度的海面变化研究从一维空间拓展到三维空间。在这个意义上,广义的海面升降运动不妨称之为“海面运动”。

海面变化概念的这些新发展尚未形成被一致采用的新术语。从 Suess(1904)提出“eustatic movement”至今已有 90 年。尽管这一术语(eustatic 及其派生词 eustasy 等)不断地引起概念的混淆但至今仍被广泛采用。在国内,eustasy(eustacy,eustatism)有多种中文译名见于不同版本的英汉专业辞书和不同作者撰写的论文之中。本书在强调概念的发展时用限定词“狭义的”、“广义的”对 eustasy 的经典概念和现代概念加以区分。在其它场合,狭义的



海面升降运动一般简称为“海面升降运动”，或有时也称为“全球性海面升降运动”。全球不一致的海面变化统称为海面变形运动，有时也称之为“地区性海面升降运动”。在需要泛指的情况下，则以“海面绝对变化”一词表述“广义的海面升降运动”的含义，将“全球性海面升降运动”和“地区性海面升降运动”这两种基本类型均包括在内。

表 2-1 广义的海面升降运动分类方案

| 基 本 类 型                    | 类           | 亚 类         | 型 式     |
|----------------------------|-------------|-------------|---------|
| 全球一致的海面升降运动<br>(狭义的海面升降运动) | 海水体积变化类     | 海水质量变化亚类    | 冰 川 型   |
|                            |             |             | 原 生 水 型 |
|                            | 海盆容积变化类     | 海水密度变化亚类    | 海水温度型   |
|                            |             |             | 海水盐度型   |
|                            |             | 内 力 作 用 亚 类 | 海底扩张型等  |
|                            |             | 外 力 作 用 亚 类 | 均衡运动型   |
| 全球不一致的海面升降运动<br>(海面变形运动)   | 规 则 变 形 类   | 地 球 自 转 亚 类 | 海洋沉积型   |
|                            |             |             | 自转速度型   |
|                            | 不 规 则 变 形 类 | 地球内部作用亚类    | 自 转 轴 型 |
|                            |             |             | 核—幔变化型等 |
|                            |             | 地球外部作用亚类    | 潮 汐 型 等 |

## 二、地面升降运动

广义的地面系指岩石圈的上表面。在海面变化研究中采用的地面概念是狭义的，它被定义为岩石圈与海洋水体的界面，包括古今的海底、海岸带及邻近的陆地表面。所谓地面升降运动是指在度量上与海面无关的地面升降变化(地面相对于地心的变化)，亦即地面的绝对升降。地面升降运动的成因分类如表 2-2 所示。

地面升降运动可以理解为地面运动的一个组成部分。广义的地面运动概念是指岩石圈上表面几何形态在三维空间的变化过程。地面运动与地壳运动是两个不同的概念，地壳运动侧重于研究地壳物质的位移，而地面运动则侧重于这种位移对地壳表面几何形态的效应。此外，地面运动还包括了非地壳运动的表面形态效应。

表 2-2 地面升降运动的成因分类

|             |                       |             |
|-------------|-----------------------|-------------|
| 外力引起的地面升降运动 | 均衡调整                  | 冰 川 均 衡 运 动 |
|             |                       | 水 均 衡 运 动   |
|             |                       | 沉 积 均 衡 运 动 |
|             | 松 散 层 的 沉 积 — 压 实 作 用 |             |
| 内力引起的地面升降运动 | 滑 塌 作 用 等             |             |
|             | 各种构造运动引起的地壳垂直运动       |             |

### 三、海面变化曲线

海面变化曲线是对海面升降运动过程的数学描述,是海面变化定量研究成果的一种直观的浓缩的表现形式。海面变化曲线包括许多不同的类型,表 2—3 列出了一种分类方案,这种分类实际上是对不同目的,不同方法的海面变化研究的分类。需要说明的是:所谓海面相对变化曲线即国外文献中习称的“滨线”变化曲线,反映海面相对于地面(海底或陆地)的高度变化。所谓海面绝对变化即海面相对地心的高度变化,它是从海面相对变化量中扣除了地面升降量的结果。因此,海面绝对变化曲线与广义的海面升降运动曲线是同义词,它是对全球一致的海面升降运动(狭义的海面升降运动)和海面变形运动综合效果的数学描述。

表 2—3 海面变化曲线的分类

|             |                     |
|-------------|---------------------|
| 按 运 动 性 质 分 | 海 面 相 对 变 化 曲 线     |
|             | 海 面 绝 对 变 化 曲 线     |
| 按 主 变 量 分   | 海 面 高 度 变 化 曲 线     |
|             | 海 面 升 降 速 度 曲 线     |
| 按 研 究 范 围 分 | 全 球 性 曲 线           |
|             | 地 区 性 曲 线           |
| 按 数 据 来 源 分 | 理 论 ( 计 算 模 式 ) 曲 线 |
|             | 实 测 曲 线             |

### 四、海岸线变迁

海岸线是海面与地面的交线。古海面与古地面的交线即为古海岸线,所以古海岸线兼具指示古海面高度与古地面高度的双重意义。海岸线变迁的本质是海面升降运动与地面升降运动的合运动,它可以分解为垂直升降与平面摆动两个分量。在海面升降和地面升降研究中,海岸线的垂直升降历来是一个基本研究方向。但是海岸线的平面摆动同样是海面升降和地面升降的信息源,其意义也是不应忽视的。

## 第二节 海面—地面系统模型

海面变化研究中的一个不可回避的关键科学问题是海面绝对变化量与地面绝对变化量的分离与估算,即通常所说的“地面升降校正”。应该说,真正的建立在地心坐标系上的古海面绝对变化量在现有技术系统下是难以获得的,迄今为止为解决这一难题所提出的各种方