

学术引领系列



国家科学思想库

中国学科发展战略

空间天气预报前沿

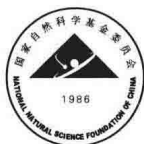
国家自然科学基金委员会
中国科学院



科学出版社



国家科学思想库



中国学科发展战略

空间天气预报前沿

国家自然科学基金委员会
中国科学院

科学出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

空间天气预报前沿 / 国家自然科学基金委员会, 中国科学院
编. —北京: 科学出版社, 2018.7

(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-057837-2

I. ①空… II. ①国… ②中… III. ①空间科学-天气预报
IV. ①P45

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第129205号

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 张 莉 张晓云 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 黄华斌 陈 敬

联系电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年7月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年7月第一次印刷 印张: 8 1/2

字数: 160 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

空间天气预报是20世纪90年代迅速发展起来的重要空间科学前沿领域之一，其意义在于：它是空间时代关系人类社会发展与生存安全的一种基本保障能力，是一个国家综合实力的体现，是关系人类社会将“地球实验室”的知识体系向“空间实验室”拓展的一种知识创新能力，是国家空间科学水平的一种基本量度。空间天气预报正成为空间界国际科技活动热点之一，受到广泛关注。

本书对空间天气预报前沿所涉及的学科内涵、特点、发展规律、战略价值、国内外发展现状和发展态势，以及未来的发展思路与方向进行了分析，为制订我国空间天气预报前沿科学发展战略提供了参考。本书可供空间科技领域的相关领导，科研、管理、教学人员和研究生、本科生，以及富有想象力的数学、物理、化学、气象、地理、生物等学科领域的爱好者阅读。

中国学科发展战略

联合领导小组

组 长：陈宜瑜 张 涛

副 组 长：秦大河 姚建年

成 员：王恩哥 朱道本 傅伯杰 李树深 杨 卫
武维华 汪克强 李 婷 苏荣辉 高瑞平
王常锐 韩 宇 郑永和 孟庆国 陈拥军
杜生明 柴育成 黎 明 秦玉文 李一军
董尔丹

联合工作组

组 长：苏荣辉 郑永和

成 员：龚 旭 孟庆峰 吴善超 李铭禄 董 超
孙 粒 王振宇 钱莹洁 薛 淮 冯 霞
赵剑峰

中国学科发展战略·空间天气预报前沿

项 目 组

组 长: 魏奉思 方 成

成 员 (按姓氏汉语拼音排序):

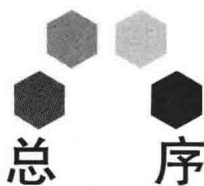
艾国祥	蔡震波	陈 耀	邓晓华	窦贤康
方涵先	冯学尚	黄 敏	黄荣辉	李崇银
刘代志	穆 穆	申倚敏	宋笑亭	唐歌实
涂传诒	万卫星	汪景琇	王 赤	王 水
王华宁	王劲松	王世金	吴 健	吴 雷
吴国雄	肖 佐	徐寄遥	徐文耀	杨惠根
杨元喜	易 忠	于 晟	宇如聪	张绍东
张效信	张永维	周 毅		

撰 写 组

组 长: 王 赤

成 员 (按姓氏汉语拼音排序):

陈 耀	杜 丹	杜爱民	冯学尚	郭建广
贺 晗	黄 鑫	李 晖	刘 颖	刘立波
毛 田	任丽文	申成龙	孙天然	王华宁
王世金	薛炳森	余 涛	张东和	张佼佼
张绍东	张效信	甄卫民	宗位国	左平兵



白春礼 杨 卫

17 世纪的科学革命使科学从普适的自然哲学走向分科深入，如今已发展成为一幅由众多彼此独立又相互关联的学科汇就的壮丽画卷。在人类不断深化对自然认识的过程中，学科不仅仅是现代社会中科学知识的组成单元，同时也逐渐成为人类认知活动的组织分工，决定了知识生产的社会形态特征，推动和促进了科学技术和各种学术形态的蓬勃发展。从历史上看，学科的发展体现了知识生产及其传播、传承的过程，学科之间的相互交叉、融合与分化成为科学发展的重要特征。只有了解各学科演变的基本规律，完善学科布局，促进学科协调发展，才能推进科学的整体发展，形成促进前沿科学突破的科研布局和创新环境。

我国引入近代科学后几经曲折，及至上世纪初开始逐步同西方科学接轨，建立了以学科教育与学科科研互为支撑的学科体系。新中国建立后，逐步形成完整的学科体系，为国家科学技术进步和经济社会发展提供了大量优秀人才，部分学科已进入世界前列，有的学科取得了令世界瞩目的突出成就。当前，我国正处在从科学大国向科学强国转变的关键时期，经济发展新常态下要求科学技术为国家经济增长提供更强劲的动力，创新成为引领我国经济发展的新引擎。与此同时，改革开放 30 多年来，特别是 21 世纪以来，我国迅猛发展的科学事业蓄积了巨大的内能，不仅重大创新成果源源不断产生，而且一些学科正在孕育新的生长点，有可能引领世界学科发展的新方向。因此，开展学科发展战略研究是提高我国自主创新能力、实现我国科学由“跟跑者”向“并行者”和“领跑者”转变的

一项基础工程，对于更好把握世界科技创新发展趋势，发挥科技创新在全面创新中的引领作用，具有重要的现实意义。

学科发展战略研究的核心是结合科学技术和经济社会的发展需求，在分析科学前沿发展趋势的基础上，寻找新的学科生长点和方向。在这个过程中，战略科学家的前瞻引领作用十分重要。科学史上这样的例子比比皆是。在 1900 年 8 月巴黎国际数学家代表大会上，德国数学家戴维·希尔伯特发表了题为“数学问题”的著名讲演，他根据过去特别是 19 世纪数学研究的成果和发展趋势，提出了 23 个最重要的数学问题，即“希尔伯特问题”。这些“问题”后来成为许多数学家力图攻克的难关，对现代数学的研究和发展产生了深刻的影响。1959 年 12 月，美国物理学家、诺贝尔奖得主理查德·费曼在加利福尼亚理工学院举行的美国物理学会年会上发表了题为“物质底层大有空间——一张进入物理新领域的请柬”的经典讲话，对后来出现的纳米技术作出了天才的预见。

学科生长点并不完全等同于科学前沿，其产生和形成不仅取决于科学前沿的成果，还决定于社会生产和科学发展的需要。1841 年，佩利戈特用钾还原四氯化铀，成功地获得了金属铀，可在很长一段时间并未能发展成为学科生长点。直到 1939 年，哈恩和斯特拉斯曼发现了铀的核裂变现象后，人们认识到它有可能成为巨大的能源，这才形成了以铀为主要对象的核燃料科学的学科生长点。而基本粒子物理学作为一门理论性很强的学科，它的新生长点之所以能不断形成，不仅在于它有揭示物质的深层结构秘密的作用，而且在于其成果有助于认识宇宙的起源和演化。上述事实说明，科学在从理论到应用又从应用到理论的转化过程中，会有新的学科生长点不断地产生和形成。

不同学科交叉集成，特别是理论研究与实验科学相结合，往往也是新的学科生长点的重要来源。新的实验方法和实验手段的发明，大科学装置的建立，如离子加速器、中子反应堆、核磁共振仪等技术方法，都促进了相对独立的新学科的形成。自 20 世纪 80 年代以来，具有费曼 1959 年所预见的性能、微观表征和操纵技术的

仪器——扫描隧道显微镜和原子力显微镜终于相继问世，为纳米结构的测量和操纵提供了“眼睛”和“手指”，使得人类能更进一步认识纳米世界，极大地推动了纳米技术的发展。

作为国家科学思想库，中国科学院（以下简称中科院）学部的基本职责和优势是为国家科学选择和优化布局重大科学技术发展方向提供科学依据、发挥学术引领作用，国家自然科学基金委员会（以下简称基金委）则承担着协调学科发展、夯实学科基础、促进学科交叉、加强学科建设的重大责任。继基金委和中科院于2012年成功地联合发布“未来10年中国学科发展战略研究”报告之后，双方签署了共同开展学科发展战略研究的长期合作协议，通过联合开展学科发展战略研究的长效机制，共建共享国家科学思想库的研究咨询能力，切实担当起服务国家科学领域决策咨询的核心作用。

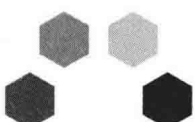
基金委和中科院共同组织的学科发展战略研究既分析相关学科领域的发展趋势与应用前景，又提出与学科发展相关的人才队伍布局、环境条件建设、资助机制创新等方面的政策建议，还针对某一类学科发展所面临的共性政策问题，开展专题学科战略与政策研究。自2012年开始，平均每年部署10项左右学科发展战略研究项目，其中既有传统学科中的新增长点或交叉学科，如物理学中的软凝聚态物理、化学中的能源化学、生物学中生命组学等，也有面向具有重大应用背景的新兴战略研究领域，如再生医学、冰冻圈科学、高功率、高光束质量半导体激光发展战略研究等，还有以具体学科为例开展的关于依托重大科学设施与平台发展的学科政策研究。

学科发展战略研究工作沿袭了由中科院院士牵头的方式，并凝聚相关领域专家学者共同开展研究。他们秉承“知行合一”的理念，将深刻的洞察力和严谨的工作作风结合起来，潜心研究，求真唯实，“知之真切笃实处即是行，行之明觉精察处即是知”。他们精益求精，“止于至善”，“皆当至于至善之地而不迁”，力求尽善尽美，以获取最大的集体智慧。他们在中国基础研究从与发达国家“总量并行”到“贡献并行”再到“源头并行”的升级发展过程中，

脚踏实地，拾级而上，纵观全局，极目迥望。他们站在巨人肩上，立于科学前沿，为中国乃至世界的学科发展指出可能的生长点和新方向。

各学科发展战略研究组从学科的科学意义与战略价值、发展规律和研究特点、发展现状与发展态势、未来5~10年学科发展的关键科学问题、发展思路、发展目标和重要研究方向、学科发展的有效资助机制与政策建议等方面进行分析阐述。既强调学科生长点的科学意义，也考虑其重要的社会价值；既着眼于学科生长点的前沿性，也兼顾其可能利用的资源条件；既立足于国内的现状，又注重基础研究的国际化趋势；既肯定已取得的成绩，又不回避发展中面临的困难和问题。主要研究成果以“国家自然科学基金委员会—中国科学院学科发展战略”丛书的形式，纳入“国家科学思想库—学术引领系列”陆续出版。

基金委和中科院在学科发展战略研究方面的合作是一项长期的任务。在报告付梓之际，我们衷心地感谢为学科发展战略研究付出心血的院士、专家，还要感谢在咨询、审读和支撑方面做出贡献的同志，也要感谢科学出版社在编辑出版工作中付出的辛勤劳动，更要感谢基金委和中科院学科发展战略研究联合工作组各位成员的辛勤工作。我们诚挚希望更多的院士、专家能够加入到学科发展战略研究的行列中来，搭建我国科技规划和科技政策咨询平台，为推动促进我国学科均衡、协调、可持续发展发挥更大的积极作用。



前 言

“中国学科发展战略·空间天气预报前沿”由中国科学院地学部推荐，是国家自然科学基金委员会-中国科学院学科发展战略联合学科研究项目之一。近百名空间天气领域的科技骨干历时三年多，举行各类研讨会十余次，经六次修改写成了本书。

空间天气科学是一门于 20 世纪 90 年代中期才迅速兴起的年轻的交叉学科，其驱动力主要来自三方面。第一，空间天气是关系经济社会发展的一个重要议题，常常给人类空间活动造成严重影响，正如美国国家航空航天局根据美国总统令制订的 2006~2016 年的十年战略计划中特别指出的，“空间天气对人类的危害越来越明显，因此认识并降低空间天气对人类的危害效应迫在眉睫”。第二，空间安全成为国家安全的战略制高点，没有空间安全就没有领土、领海和领空安全，专门研究空间天气对国家安全的影响，已经迅速发展成为一门新兴的军事空间天气学。第三，空间天气关系空间科技的进步，有助于把人类的知识体系从“地球实验室”向“空间实验室”拓展，不仅能引领新的探测技术发展，还会推动航天技术迈上新的台阶。空间天气预报便是它们的核心任务。现今，由国家自然科学基金委员会与中国科学院联合开展的空间天气预报前沿学科发展战略研究正逢其时。“十三五”期间，我国在空间天气领域部署了天基、地基两个国家级重大项目，本书的贡献者也多是这些国家级重大项目的参与者。因此，本书的出版将对这两个国家级重大项目的组织、实施，以至于最终的重要成果产出都具有积极的参考价值。

空间天气预报是空间科学中的一个重要前沿领域，它将日地物

理科学与地面和空间技术应用紧密结合,是空间天气的监测、研究、建模、应用和服务等多学科、多技术领域高度交叉综合的集中体现。由王赤研究员负责的项目工作组汇集了空间物理和空间天气学科领域近百名专家学者的智慧,对空间天气预报的国内外发展态势进行了客观分析;从经济社会的发展、科技进步、空间安全等多角度进行了空间天气预报需求分析;凝练出了空间天气预报前沿的重大科学问题;给出了如何推进空间天气预报领域的全球化建议;对空间天气预报领域的跨越发展提出了政策建议。

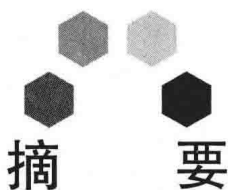
本书共分为五章。第一章是空间天气预报的科学意义与战略价值,由王劲松、王世金、符养等编写;第二章是空间天气预报学科的发展规律与研究特点,由王赤、张效信等编写;第三章介绍空间天气预报的国内外发展现状与发展态势,由汪景琇、王华宁、薛炳森等编写;第四章介绍空间天气预报领域的发展思路与发展方向,由万卫星、冯学尚、张绍东等编写;第五章是对我国空间天气预报发展提出的资助机制与政策建议,由魏奉思、王赤、于晟等编写。

空间天气预报前沿学科发展战略研究的战略研究专家组高度重视空间天气预报的全球性,重视发扬中国青年一代科学家的担当精神,将2013年魏奉思院士在第三届全球华人空间天气科学大会期间的倡议——由中国科学家牵头推动国际空间天气预报前沿研究计划纳入本项战略研究进行了深入研讨,现已步入商讨成立该计划委员会组织架构的起步行动阶段。这是落实空间天气预报前沿战略研究的重要举措。我们期待着它的实施能给我国从事空间天气科学研究的中青年学者带来更多施展才华的机会。

项目组希望本书的出版能增进广大读者对我国乃至世界的空间天气预报发展情况的了解,并在此向在百忙中为本书撰稿的各位专家,以及对本书的撰写提供材料、修改意见和建议的专家致以衷心的感谢。由于时间所限,本书中难免存在疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

魏奉思

2018年5月24日



一、科学意义与战略价值

日地空间是当前人类航天活动、空间和平利用的主要区域，是与人类生存发展息息相关的第四生存环境。众多空间技术系统（如通信卫星、导航定位、灾害监测、预警、各类遥感对地观测等）进入空间，目前在轨运行的卫星近千颗，人类对空间技术系统的依赖迅速增加。空间促进了航天产业和信息产业的巨大发展，也在人类开拓新能源、新交通、新通信等空间战略经济新领域展现了广阔的前景。然而，“水能载舟，亦能覆舟”，空间也使人类社会发展空间高技术领域面临着空间灾害性天气的安全挑战，如卫星失效或陨落、通信中断、导航定位失灵、电力系统烧毁、人类健康受损等，这使人类在发展航天、通信、导航、人类健康和国家安全等高技术领域蒙受巨大的损失。空间天气预报日益成为人类有效进出空间、和平利用空间、推动经济社会可持续发展必须拥有的一种基本能力，是需要人类共同努力的一项崇高事业。

（一）空间天气预报保障经济社会发展的安全

我国正面临建设世界科技强国的历史重任，中国的通信卫星、北斗导航、载人航天、探月工程、高分观测、神舟、天宫等正成为我国航天发展的标志性事件，“十三五”期间预计还将有近百颗卫星上天，我国经济社会发展对空间天气预报的依赖程度越来越高。已有统计表明，空间天气也致使我国有些卫星遭遇失败，我国航天安全和产业保护面临应对空间天气灾害的严峻挑战；我国广大的中

低纬地区,处于全球电离层闪烁多发区域,卫星通信、导航定位经常受到影响,严重时可发生信号中断;我国要建设世界上规模最大的 1000 千伏特高压长距离输电网和数千千米长的油气管道等基础设施,如何抵抗空间天气引起的地磁感应电流也成为新问题;等等。1989 年 3 月 13~14 日,爆发了称为魁北克事件的太阳风暴,导致加拿大魁北克地区大范围停电,600 万居民停电 9 小时之久,损失功率近 200 亿瓦,直接经济损失达 5 亿美元。此事件也使很多近地卫星和同步轨道通信卫星等发生异常,甚至报废,全球无线电通信受干扰或中断,轮船、飞机导航系统失灵,美国海军的 4 颗导航卫星提前一年停止服务,预警跟踪目标丢失 6000 多个,宇航员、高空飞机乘客受到超警界的辐射剂量,甚至还导致美国新泽西州一座核电站的变压器烧毁。美国国家减灾委员会 2008 年就把空间天气纳入美国重大减灾挑战的十年计划。所有这些都表明,空间天气预报已成为保障经济社会发展安全的一种基本能力需求。

(二) 空间天气预报加速空间科技的进步

空间天气预报将把人类的知识体系从“地球实验室”向“空间实验室”拓展。日地空间系统是一个多圈层、多学科交叉、在地球上无法模拟或重现的复杂系统,涉及诸多物理性质不同的空间区域,如中性成分(中高层大气)、电离成分为主(电离层)、接近完全离化和无碰撞的等离子体(磁层和行星际),它涉及宏观与微观的多种非线性过程和激变过程,如日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)的传播、激波传播、磁场重联、电离与复合、电离成分与中性成分的耦合、重力波、潮汐波、行星波、上下层大气间的动力耦合等,这些都是当代自然科学最富原始创新发现的国际前沿课题。空间天气预报前沿研究,要探测的是日地系统和太阳系广阔未知世界,必将引领近太阳和深空探测技术及航天技术的发展,加速空间科技的进步。

(三) 空间天气预报倍增国家空间安全

现代战争是陆、海、空、天、电多维立体的高技术信息化战

争, 作战必须实施集大气环境、海洋环境、空间环境于一体的无缝隙保障。所有进入空间的军事技术系统(如它们的通信、轨道、姿态、导航、材料、元器件等)都受到空间天气的影响。据美方报道, 海湾战争中 40% 的武器未命中目标, 很大部分源于空间天气。通常中高层大气密度 20%~40% 的变化将导致远程导弹轨道打击精度 20~40 千米的误差。在 2001 年 4 月 1 日美军侦察机撞毁我军战斗机后的搜寻期, 4 月 3 日正值太阳风暴侵袭地球, 造成无线电通信中断 3 小时, 给搜寻工作、形势判断和决策造成很大困难。空间天气预报关系到争夺现代高技术战争的信息优势及战略打击武器的精确打击, 成为空间天气军力“倍增器”的核心。建设临近空间环境保障的空天一体化体系势在必行。在没有空间安全就没有领土、领空、领海安全的今天, 空间天气预报成为抢占国家安全制高点的重要保障。

二、发展规律与研究特点

1957 年第一颗人造卫星上天, 人类进入空间时代, 空间物理迅速发展成为一门新兴的多学科交叉的前沿基础学科, 主要研究地球空间、日地空间和太阳系中包括太阳、行星际空间、地球和行星的大气层、电离层、磁层, 以及它们之间的相互作用和因果关系。20 世纪 90 年代末, 空间物理开始进入“硬”科学时代的一个新的发展阶段, 强调科学与应用的密切结合, 由此产生了一门专门监测、研究和预报空间天气的变化, 旨在防止或减轻空间灾害, 服务于经济社会发展和空间安全的新兴学科——空间天气学。

(一) 定义与内涵

空间天气是指可以影响天基和地基技术系统, 并危及人类生活和健康的太阳、整个空间及地球磁场和高层大气的各种状态。空间环境的不利条件会扰乱卫星运行、通信、导航及电网, 导致各种社会经济损失, 并且影响人类的安全。随着科技的不断进步, 人类面对空间天气的脆弱性也极大地增长了。

空间天气学是空间天气(状态或事件)的监测、研究、建

模、效应、预报及其对人类活动的影响、开发利用空间和服务经济社会发展等方面的集成,是多种学科(空间物理、太阳物理、地球物理、大气物理、等离子体物理等)与多种技术(航天技术、通信导航技术、探测技术、计算机技术等)的高度综合与交叉。空间天气学的基本目标是把获得的知识用于预测和应对空间天气对人类社会生存、发展、安全的影响,保障经济社会的可持续发展。

对日地空间某处未来一定时期内的空间天气状况进行预测,称为空间天气预报,其主要内容为日地空间中短于数周的空间天气事件或过程,也涉及一个太阳活动周之内的空间天气变化趋势。由于人类社会对高技术系统的依赖程度日益加强,空间天气预报正在成为保障人类社会生存发展安全的一种基本能力。

(二) 发展规律与特点

(1) 空间天气预报能力高度依赖于空间探测技术的进步,对空间科技进步极具驱动性。空间天气预报开始于地基监测,随着 1957 年第一颗人造卫星上天,空间天气预报也伴随着航天技术和空间探测技术的发展而迅速发展起来。人类开始利用发射卫星监测和预报空间天气事件的发生和演化,它把从日地系统单一区域现象的预报向系统整体行为的集成预报方向推进,也正从统计经验预报向以卫星观测数据驱动的数值预报方向发展。空间探测技术的每一次重大突破,都给空间天气预报的能力提升带来飞跃。

(2) 空间天气预报的水平高度依赖于对日地空间天气变化过程的科学认知的进步,对学科发展有重要引领作用。半个多世纪的空间探测研究表明,日地空间是一个由太阳大气、行星际空间、地球磁层、电离层和热层组成的多圈层的复杂耦合系统,如何预报如磁暴、电离层骚扰、电离层暴、热层暴、粒子暴等空间天气变化,在很大程度上取决于对由空间物理、太阳物理、大气物理、地球物理等多学科交叉所决定的日地系统空间天气变化过程的科学认知水平。

(3) 空间天气预报的影响力高度依赖于服务于经济社会的发

展,对发展安全有极强的应用服务性。空间天气几乎影响一切的航天活动、频谱通信、空间军事技术系统与活动,已成为影响全球经济发展的重要议题。为应对空间天气事件、减缓和规避空间天气灾害,美国、欧洲等多个技术发达国家和地区相继制订了国家空间天气战略计划,联合国、世界气象组织、国际空间研究委员会等组织都纷纷制订了国际计划。

(4) 空间天气预报的发展高度依赖于空间天气预报的国际合作的广度和深度,极具国际合作开放性。空间天气现象发生的空间范围十分巨大,从太阳到地球乃至更遥远的太阳系边界,同时具有很强的空间与时间变化特性,要预报空间天气发生、发展及其对人类活动的影响,越来越需要国际合作。空间天气预报早已从部门行为、国家或区域行为发展为全球性行为,如成立了总部设在美国的国际空间环境服务组织(International Space Environment Service, ISES),共有 15 个成员,中国就是其中之一。目前,以美国国家航空航天局为首、组织世界众多国家参加的国际与太阳同在(International Living with a Star)计划就是一个聚焦空间天气、由应用驱动、规模空前宏大的国际空间天气卫星计划。国际空间环境服务组织于 2014 年 10 月共同制订“认识空间天气,保障人类社会”的路线图就是其典型代表。

三、发展现状与发展态势

(一) 国际发展现状与趋势

1. 国际发展现状

从 20 世纪中叶开展国际地球物理年(IGY)活动开始,相继发现了诸多空间天气现象,20 世纪下半叶,随着航天、通信导航等空间活动常受到空间天气的影响,空间天气预报作为空间时代应对空间天气灾害、保障人类生存发展安全的一种基本能力,受到人们的高度关注,近 20 年来取得了长足进步。下面分别从空间天气的监测、建模、预报和服务四个方面予以简介。

(1) 空间天气监测体系。空间天气以地基为基础、以天基为