

# 总 序

党的二十大胜利召开，吹响了以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的前进号角。习近平总书记强调“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”<sup>①</sup>，明确要求到2035年要建成教育强国、科技强国、人才强国。新时代新征程对科技界提出了更高的要求。当前，世界科学技术发展日新月异，不断开辟新的认知疆域，并成为带动经济社会发展的核心变量，新一轮科技革命和产业变革正处于蓄势跃迁、快速迭代的关键阶段。开展面向2035年的中国学科及前沿领域发展战略研究，紧扣国家战略需求，研判科技发展大势，擘画战略、锚定方向，找准学科发展路径与方向，找准科技创新的主攻方向和突破口，对于实现全面建成社会主义现代化“两步走”战略目标具有重要意义。

当前，应对全球性重大挑战和转变科学研究范式是当代科学的时代特征之一。为此，各国政府不断调整和完善科技创新战略与政策，强化战略科技力量部署，支持科技前沿态势研判，加强重点领域研发投入，并积极培育战略新兴产业，从而保证国际竞争实力。

擘画战略、锚定方向是抢抓科技革命先机的必然之策。当前，新一轮科技革命蓬勃兴起，科学发展呈现相互渗透和重新会聚的趋

---

<sup>①</sup> 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告. 北京: 人民出版社, 2022: 33.

势，在科学逐渐分化与系统持续整合的反复过程中，新的学科增长点不断产生，并且衍生出一系列新兴交叉学科和前沿领域。随着知识生产的不断积累和新兴交叉学科的相继涌现，学科体系和布局也在动态调整，构建符合知识体系逻辑结构并促进知识与应用融通的协调可持续发展的学科体系尤为重要。

擘画战略、锚定方向是我国科技事业不断取得历史性成就的成功经验。科技创新一直是党和国家治国理政的核心内容。特别是党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央明确了我国建成世界科技强国的“三步走”路线图，实施了《国家创新驱动发展战略纲要》，持续加强原始创新，并将着力点放在解决关键核心技术背后的科学问题上。习近平总书记深刻指出：“基础研究是整个科学体系的源头。要瞄准世界科技前沿，抓住大趋势，下好‘先手棋’，打好基础、储备长远，甘于坐冷板凳，勇于做栽树人、挖井人，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破，夯实世界科技强国建设的根基。”<sup>①</sup>

作为国家在科学技术方面最高咨询机构的中国科学院（简称中科院）和国家支持基础研究主渠道的国家自然科学基金委员会（简称自然科学基金委），在夯实学科基础、加强学科建设、引领科学研究发展方面担负着重要的责任。早在新中国成立初期，中科院学部即组织全国有关专家研究编制了《1956—1967年科学技术发展远景规划》。该规划的实施，实现了“两弹一星”研制等一系列重大突破，为新中国逐步形成科学技术研究体系奠定了基础。自然科学基金委自成立以来，通过学科发展战略研究，服务于科学基金的资助与管理，不断夯实国家知识基础，增进基础研究面向国家需求的能力。2009年，自然科学基金委和中科院联合启动了“2011—2020年中国学科发展

---

<sup>①</sup> 习近平. 努力成为世界主要科学中心和创新高地 [EB/OL]. (2021-03-15). [http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-03/15/c\\_1127209130.htm](http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-03/15/c_1127209130.htm)[2022-03-22].

战略研究”。2012年，双方形成联合开展学科发展战略研究的常态化机制，持续研判科技发展态势，为我国科技创新领域的方向选择提供科学思想、路径选择和跨越的蓝图。

联合开展“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”，是中科院和自然科学基金委落实新时代“两步走”战略的具体实践。我们面向2035年国家发展目标，结合科技发展新特征，进行了系统设计，从三个方面组织研究工作：一是总论研究，对面向2035年的中国学科及前沿领域发展进行了概括和论述，内容包括学科的历史演进及其发展的驱动力、前沿领域的发展特征及其与社会的关联、学科与前沿领域的区别和联系、世界科学发展的整体态势，并汇总了各个学科及前沿领域的发展趋势、关键科学问题和重点方向；二是自然科学基础学科研究，主要针对科学基金资助体系中的重点学科开展战略研究，内容包括学科的科学意义与战略价值、发展规律与研究特点、发展现状与发展态势、发展思路与发展方向、资助机制与政策建议等；三是前沿领域研究，针对尚未形成学科规模、不具备明确学科属性的前沿交叉、新兴和关键核心技术领域开展战略研究，内容包括相关领域的战略价值、关键科学问题与核心技术问题、我国在相关领域的研究基础与条件、我国在相关领域的发展思路与政策建议等。

三年多来，400多位院士、3000多位专家，围绕总论、数学等18个学科和量子物质与应用等19个前沿领域问题，坚持突出前瞻布局、补齐发展短板、坚定创新自信、统筹分工协作的原则，开展了深入全面的战略研究工作，取得了一批重要成果，也形成了共识性结论。一是国家战略需求和技术要素成为当前学科及前沿领域发展的主要驱动力之一。有组织的科学研究及源于技术的广泛带动效应，实质化地推动了学科前沿的演进，夯实了科技发展的基础，促进了人才的培养，并衍生出更多新的学科生长点。二是学科及前沿

领域的发展促进深层次交叉融通。学科及前沿领域的发展越来越呈现出多学科相互渗透的发展态势。某一类学科领域采用的研究策略和技术体系所产生的基础理论与方法论成果，可以作为共同的知识基础适用于不同学科领域的多个研究方向。三是科研范式正在经历深刻变革。解决系统性复杂问题成为当前科学发展的主要目标，导致相应的研究内容、方法和范畴等的改变，形成科学研究的多层次、多尺度、动态化的基本特征。数据驱动的科研模式有力地推动了新时代科研范式的变革。四是科学与社会的互动更加密切。发展学科及前沿领域愈加重要，与此同时，“互联网+”正在改变科学交流生态，并且重塑了科学的边界，开放获取、开放科学、公众科学等都使得越来越多的非专业人士有机会参与到科学活动中来。

“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”系列成果以“中国学科及前沿领域 2035 发展战略丛书”的形式出版，纳入“国家科学思想库-学术引领系列”陆续出版。希望本丛书的出版，能够为科技界、产业界的专家学者和技术人员提供研究指引，为科研管理部门提供决策参考，为科学基金深化改革、“十四五”发展规划实施、国家科学政策制定提供有力支撑。

在本丛书即将付梓之际，我们衷心感谢为学科及前沿领域发展战略研究付出心血的院士专家，感谢在咨询、审读和管理支撑服务方面付出辛劳的同志，感谢参与项目组织和管理工作的中科院学部的丁仲礼、秦大河、王恩哥、朱道本、陈宜瑜、傅伯杰、李树深、李婷、苏荣辉、石兵、李鹏飞、钱莹洁、薛淮、冯霞，自然科学基金委的王长锐、韩智勇、邹立尧、冯雪莲、黎明、张兆田、杨列勋、高阵雨。学科及前沿领域发展战略研究是一项长期、系统的工作，对学科及前沿领域发展趋势的研判，对关键科学问题的凝练，对发展思路及方向的把握，对战略布局的谋划等，都需要一个不断深化、积累、完善的过程。我们由衷地希望更多院士专家参与到未来的学

## 总 序

科及前沿领域发展战略研究中来，汇聚专家智慧，不断提升凝练科学问题的能力，为推动科研范式变革，促进基础研究高质量发展，把科技的命脉牢牢掌握在自己手中，服务支撑我国高水平科技自立自强和建设世界科技强国夯实根基做出更大贡献。

“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”

联合领导小组

2023年3月



# 前 言

地球科学是认识地球形成和演化的自然科学，研究对象涵盖地球内部固体圈层（地壳、地幔、地核）、地球表层流体圈层（水圈、生物圈、冰冻圈等）和地球表面的气体圈层（大气圈、电离层等），研究时间为自地球诞生直至今天。地球科学以地球各圈层的结构、组成及其演化，以及地球各圈层相互作用的过程、变化、机理及它们的相互关系为主要研究内容，目标是提高对地球的认知水平，并利用获取的知识体系为解决人类宜居的资源 and 能源供给、生态环境保护、自然灾害防治等重大问题提供科学依据、技术支撑与解决方案。地球科学正在发生深刻的变革，从专注于地球本身，转向越来越注重向行星科学方向拓展，将对地球的研究积累借鉴在研究太阳系内与系外行星、卫星、彗星等天体，行星系的基本特征，以及它们的形成和演化规律上。

当今，地球科学理念更加强调以解决复杂的经济社会问题、满足不断变化的人类需求为导向。在发展过程中越来越强调交叉融合，期望以地球系统的理论来整合不同圈层之间的相互关系和内在演化。随着技术的进步，强调使用新观测、新方法来整合已有数据，构建合理的理论模型来认识和理解人类赖以生存的地球与行星空间；同时，面向地球利用与管理，回答人类宜居且持续发展的相关科学问题，尤其是对人类生存和发展面临的资源、生态、环境、灾害和气

候变化等的挑战，制订地球科学研究战略的优先目标和行动计划，为国家和社会公众服务。

2035 年前或更长的一段时间内，中国地球科学将面临更加严峻的形势。过去，中国地球科学经历了快速发展，实现了从追赶到并行的飞越。未来，中国地球科学要实现超越和引领，必须走出有中国特色的地球科学研究之路，需要有全球思维和宇宙视野，需要在研究思考中国问题的同时走出国门去研究具有全球挑战性的科学前沿，需要完成基础研究与实际应用全面结合、野外观测与室内模拟紧密结合、宏观与微观相结合、跨学科交叉融通，从而向定量化、智能化方向不断前进。

为了落实“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”对基础研究的战略定位，从学科发展、科学前沿和国家紧迫需求等方面加强基础研究，国家自然科学基金委员会与中国科学院联合开展学科发展战略研究，旨在筹划未来，推动我国学科均衡协调发展，促进原创性成果和理论的诞生。希望通过充分研讨和广泛的咨询审议，提出 2035 年前我国地球科学的学科发展布局、优先发展方向和学科交叉的重大科学问题等，以期为国家发展基础研究提出政策建议，为相关基础研究的战略发展规划提供决策依据。

根据中国科学院和国家自然科学基金委员会地球科学部的统一部署，2020 年 4 月中旬，地球科学发展战略研究组召开了第一次网络会议，决定按照地球科学主要涉及的地理科学、地质学、地球化学、地球物理学、大气科学和行星科学六个学科研究组开展地球科学学科发展战略研究工作，并确定了各学科研究组的负责人员名单以及责任秘书名单。虽然资源与环境科学、海洋科学与空间科学都属于地球科学研究范畴，但在上述领域单独开展战略研究，本书不再涉及。

根据学科发展战略研究整体工作计划的部署，地球科学发展战

略研究组先后召开了四次会议，布置战略研究报告的撰写工作，根据进展进行交流和讨论，落实院士的意见和建议，从而完善了战略研究并完成了本书。其间，各学科研究组也进行了频繁交流和研讨，分析国内外发展现状、趋势和国家发展的紧迫需求，研究不同学科的特点、发展规律与战略地位，提出和建议本学科的发展布局、优先领域与重大交叉领域、国际合作与交流的方向和举措等。

总之，本书提出了 2035 年前我国地球科学学科发展战略，旨在推动地球科学及各分支学科的均衡布局和协调发展，强化我国地球科学的优势领域，促进我国相对薄弱但属国际主流的分支学科和领域的发展，鼓励学科间的渗透融合和新交叉学科的成长，扶持与实验、观测、数据集成和模拟相关的分支学科的发展，重视地球科学与数学、物理学、化学和生物学等学科的交叉融通，加速学科创新型成果和理论的诞生。

在本书撰写过程中除了战略研究组和秘书组外，参与地理科学学科发展战略研究讨论和撰写的专家有陈利顶、陈莹莹、邓祥征、董治宝、方修琦、黄河清、黄昕、康世昌、李双成、李小雁、刘广、刘国彬、刘鸿雁、刘建宝、鹿化昱、欧阳竹、裴涛、秦伯强、冉有华、汤秋鸿、王琛、王根绪、王静爱、王旭峰、吴绍洪、杨晓燕、袁林旺、张国友、赵鹏军、郑东海、郑景云、周尚意；参与地质学学科发展战略研究讨论和撰写的专家有李长冬、刘传周、刘俊来、鲁安怀、彭建兵、彭澎、王焰新、肖举乐、谢先军、杨江海、杨志明、翟明国、张培震、朱茂炎、朱敏；参与地球化学学科发展战略研究讨论和撰写的专家有安芷生、陈玖斌、陈骏、陈曦、陈伊翔、陈振宇、关平、郭正堂、郝芳、贺怀宇、侯增谦、胡瑞忠、胡兆初、黄方、李高军、李建威、李曙光、李元、刘丛强、刘勇胜、刘耘、欧阳自远、彭平安、秦礼萍、汤艳杰、田辉、王强、王云鹏、韦刚健、吴春明、谢树成、许成、杨进辉、张宏福、赵子福、朱祥

坤；参与地球物理学学科发展战略研究讨论和撰写的专家有陈晓非、邓成龙、底青云、符励耘、韩江涛、黄清华、蒋长胜、雷兴林、李宁、廖杰、林君、刘财、卢占武、吕庆田、马胜利、沈旭章、孙道远、孙和平、田小波、王华、王尚旭、王贇、吴宗庆、徐涛、杨宏峰、杨挺、姚华建、叶玲玲、殷长春、曾祥方、周宇；参与大气科学学科发展战略研究讨论和撰写的专家有陈海山、陈活泼、丁爱军、段明铿、段晚锁、李锐、刘长征、陆春松、陆日宇、罗勇、孟智勇、苗世光、聂绩、任宏利、苏京志、孙建奇、田文寿、汪君、汪名怀、王开存、王林、王涛、王雪梅、武炳义、徐邦琪、杨军、袁文平、袁星、张强、张洋、赵海坤、周波涛；参与行星科学学科发展战略研究讨论和撰写的专家有崔峻、法文哲、葛亚松、耿言、贺怀宇、胡森、惠鹤九、孔大力、李雄耀、林巍、凌宗成、刘尚飞、泮燕红、綦超、秦礼萍、戎昭金、孙伟家、王华沛、王英、魏勇、肖智勇、徐晓军、杨军、杨石岭、杨蔚、尧中华、张贤国、张晓静、祝梦华。

人类在面对未知病毒时，更加深刻地体会到认识自然、研究自然的重要性，同时也意识到现有的知识体系还不足以保证人类与宜居地球的和谐发展。新冠疫情期间，地球科学领域许多著名科学家、科研一线的青年学者、国家自然科学基金委员会和中国科学院的相关领导积极参加本书研究组召开的大小网络研讨，在共同参与抗疫的同时仍然关心中国地球科学未来的发展，时刻保持对地球科学发展的热情。未知病毒的光顾，使我们进一步认识到地球与生命健康对人类的重要性，以及地球科学家所肩负的重大责任。在此，我们谨向指导、关心和参加本项工作的专家与科学管理工作表示衷心的感谢。

朱日祥

《中国地球科学 2035 发展战略》研究组组长

2020 年 10 月

# 摘 要

## 一、地球科学特点、发展规律与战略定位

地球科学是认识地球形成和演化的自然科学，但由于地球只是浩瀚宇宙中的一员，且有 46 亿年的形成历史，因此地球科学研究的时空尺度与其他学科有很大差别。地球科学研究对象涵盖地球各个圈层，研究时间为自地球诞生直至今日。研究内容包括圈层的结构、组成及其演化，以及地球各圈层相互作用的过程、变化、机理及它们的相互关系。研究目标为提高对地球的认知水平，并利用获取的知识体系为解决人类宜居的资源 and 能源供给、生态环境保护、自然灾害防治等重大问题提供科学依据、技术支撑与解决方案。当今，地球科学理念更加强调以解决复杂的经济社会问题、满足不断变化的人类需求为导向。在发展过程中越来越强调交叉融合，期望以地球系统的理论来整合不同圈层之间的相互关系和内在演化。随着技术的进步，强调使用新观测、新方法整合已有数据，构建合理模型来认识和理解人类赖以生存的地球与行星空间。同时，面向地球的管理，回答人类如何宜居且持续发展的相关科学问题，尤其是对人类生存和发展面临的资源、生态、环境、灾害和气候变化等的挑战，制订地球科学研究战略的优先目标和行动计划，为国家和社会公众服务。

本书提到的地球科学主要涉及地理科学、地质学、地球化学、地球物理学、大气科学和行星科学六个分支学科。

地理科学是研究表层地球系统的基础科学，以人类环境、人地关系、空间关联为核心，利用不同的时空尺度和地理单元来解读地理要素或者地理综合体的空间分布规律、时间演变过程和区域特征。地理科学的研究对象和研究内容是动态的、开放的和综合的，这也是地理科学的特色所在。研究对象是表层地球系统，其由岩石圈、水圈、大气圈、生物圈、冰冻圈、人类圈相互作用、相互渗透而形成。这一界面是地球上最复杂的一个界面，是物质“三态”相互作用、有机与无机相互转化的场所，又是地球内外营力相互作用的场所。从地理科学的发展历程来看，地理科学是地球科学的本源之一。

地质学是研究地球（主要是岩石圈）的物质组成、内部构造、外部特征、各圈层间相互作用和演变历史的学科。本书仅对地层学、古生物学、沉积学、矿物学、岩石学、矿床学、构造地质与大地构造学、第四纪地质学、前寒武纪地质学、水文地质学、工程地质学等分支学科进行发展战略研究。地质学的研究内容涉及资源、能源、环境、地质灾害和地球信息等，在现代经济和社会的可持续发展中占有举足轻重的地位。

地球化学是研究地球和其他宇宙天体乃至星际尘埃的各种元素及其同位素和有机质组成的分布、聚散、迁移和演化规律的一门学科。它主要采用元素和同位素分析、宏观和微观结构观测、分子和微生物示踪、同位素的理论与方法，着重研究地球和其他宇宙天体的演化过程，各内外圈层的物质组成、演化和相互作用与循环，以及人类活动对地球表层系统中物质的来源、分布、迁移、转化、循环和归趋及生态和环境系统的影响机制，并用于研究行星地球和生命起源、板块构造、宜居环境的形成和演化、大陆动力学等地球系统前沿科学理论，以及解决资源、能源、环境、防灾减灾等重要实

际问题。地球化学作为固体地球科学的重要支柱学科之一，有力地促进了地球科学研究范式的变革，在推动地球科学理论的革命中发挥了关键作用，在满足国家重大需求方面发挥了重要支撑作用。

地球物理学研究地球内部物质组分、状态、结构，以及地球内部各圈层相互作用和演化过程，是观测、实验和理论三位一体的现代学科。地球物理学基于物理学原理，利用仪器开展多物理场观测，发展和应用地球物理正反演技术，揭示地球内部物质物性的三维分布信息。地球物理学涵盖的领域非常广泛，主要包括以地球深部探测与动力学机制研究为重点的固体地球物理学与地球动力学、以地震孕育发生物理过程研究为重点的地震物理学、以矿产资源和油气资源勘探开发研究为重点的勘探地球物理学、以对地观测理论和技术研究为重点的大地测量学、以高温高压实验研究为重点的岩石地球物理学，以及地球物理观测仪器研制等。

大气科学是研究地球或行星大气组成、结构及其演变规律，物理和化学等过程及动力学机制，以及大气圈与其他圈层相互作用并通过模式实现定量化模拟和预测的一门学科。大气科学是地球科学的一个核心组成部分，与地理科学、地质学、地球化学、地球物理学、行星科学等其他分支学科紧密相连，并与物理、化学、数学、生态、农业、社会等学科交叉，共同促进和推动了相关自然与社会科学的发展。大气科学的重要目标是通过规律的认识来提高对天气、气候及极端天气气候灾害事件、空气质量的模拟能力，从而为防灾减灾、生态文明建设以及应对气候变化等国家重大需求服务。

行星科学是研究太阳系内与系外恒星、行星、卫星、彗星等天体和行星系的基本特征，以及它们的形成和演化的新兴交叉学科，成长于天文学和地球科学的交叉融合。行星科学主要聚焦于太阳系天体的研究，旨在认识它们的基本物理化学性质（如组成、结构及动力学）及其演化。行星科学研究包括但不局限于：揭示行星的地

表特征、岩浆活动、大气、海洋、物理场和内部动力学过程；通过比较研究，理解地球的形成与工作机制；探寻地外是否存在生命，回答我们是否孤独等终极问题；研究行星和小天体的极端环境，发现新的物理和化学法则；等等。行星科学可进一步划分为行星物理学、行星地质学和行星化学。

## 二、地球科学发展现状、发展趋势、战略目标

地球科学正在进入地球科学各分支整合阶段，即建立“地球系统”理论知识和方法技术体系的新时代，国际、国内的地球科学研究都在朝该方向发生深刻的变革。简言之，研究范畴更加综合，研究技术方法更加先进，基础研究与应用结合得更为紧密，研究对象的时空尺度不断拓展且更强调多学科、多部门的协同发展。发达国家或地区对于地球科学的发展更是高度重视，美国、英国、德国、欧盟等近年来也在不断推出大型科学计划，如地球透镜计划（EarthScope）、量化并理解地球系统（Quantifying and Understanding the Earth System, QUEST）、地球工程（Geotechnology）、全球变化、未来地球计划等。显然，地球不仅是我们人类生存的场所，更为我们提供了基本的生活物质（包括空气、水和粮食），从而决定了地球科学是一门应用性极强的学科。它的发展需要长期大量的观测、探测、分析、实验与模拟等方面的工作，更需要建制化力量的长期介入。地球科学的早期发展与人类社会的工业化关系密切，但近年来更多地关注人地和谐和行星地球问题，需要将地球置于整个太阳系甚至宇宙中来考虑，同时传统的地球科学即将进入“地球系统科学”新时代，基础研究与应用研究结合得更加紧密，为地球的资源、生态、环境和抗灾减灾服务；技术的高速发展对地球科学的促进作用愈发重要。我国地球科学的发展应当抓住历史机遇，为推动建设“人类命运共同体”和实现“全球治理”

的中国方案提供地球科学依据。

对于地理科学领域，近十几年来国际地理科学在研究主题、应用实践、研究范式、基础平台等方面都呈现出一些新的发展态势，主要表现在以下几个方面：观测与测试手段的革新加速推进地理科学的创新；陆地表层系统综合研究成为核心主题；可持续性成为地理科学研究的新热点；模型与数据驱动的地理科学研究范式并驾齐驱；信息基础设施成为驱动地理科学快速发展的新引擎；地理科学中的部门地理学的快速发展促生了新兴学科领域。在新形势下，中国地理科学面临新的问题与挑战：创新性基础研究的环境依然有待改善；国际号召力有待进一步提升；综合集成方法论还需要持续加强；长期定位观测体系需要进一步完善。2035年前的发展目标为：服务国家需求，立足经世致用，紧紧抓住国家转型发展的历史机遇，在服务社会经济与资源环境协调可持续发展等重大问题中做出新的重要贡献；加强基础研究，优化学科体系，加大对地理科学基础研究中全球共性问题和前沿研究的投入，推动原创性、基础性、引领性研究；坚持中国特色，引领学科发展；加强地理科学教育，孕育高层次学科带头人。

地质学从传统地质学向以现代地球系统科学为核心的现代地质学转变，即向“大地质”“大地学”方向转变。从地质学的发展来看，我国与国外的差距主要表现在以下四个方面：一是学科质量上的差距，我国地质学发展规模“大而不强”；二是地质思维上的差距，我国地质学家在新理论和新方法上缺乏建树；三是地质观测、探测和分析技术上的差距，我国现有地质观测、探测和分析技术装备基本上从国外引进，一些核心技术和装备仍然落后于西方发达国家；四是地质学领军人物上的差距，近年来，我国地质学领域已经涌现出一些具有国际声誉的科学家，但整体而言仍偏少。2035年前，地质学学科应从分析学科现状出发，按照瞄准世界科技前沿、围绕国

家重大关切、着力源头创新的总体指导思想，优化学科布局，抓住学科发展机遇，力争实现如下发展目标：在若干学科分支方向和研究领域引领国际前沿；全面提升解决区域地质问题的能力，提高区域地质研究领域的国际影响力；完善服务宜居地球和美丽中国的学科体系；培育多个新的分支生长点，实现引领性原创成果的突破；培养一批在不同分支具有广泛国际影响力的领军人才，整体提升学科影响力。

地球化学作为固体地球科学的重要支柱学科之一，是地球科学开展定量化研究的核心学科。与国际地球化学发展相比，我国地球化学的发展还存在以下不足：论文数量显著增多，原创成果少；地球化学各分支学科发展不平衡；学科交叉深度不够，大数据应用落伍；地球化学核心仪器对外依赖程度大，自主研发能力薄弱。2035年前，地球化学学科的发展在保持地球化学优势分支学科（如化学地球动力学、元素地球化学、岩石地球化学、矿床地球化学、有机地球化学和同位素地球化学等）的同时，进一步加强各分支学科（如宇宙化学和行星化学、实验与计算地球化学等）的均衡发展；聚焦国际前沿 [如板块构造、大陆动力学、“三深”（深地、深海和深空）科学、地球系统科学、宜居星球演化]，探索未知领域，产出一批原创性成果，带动地球化学学科向前发展；面向国家和社会需求，为解决资源、能源、环境、人类健康乃至社会经济问题提供科学支撑；加强跨学科交叉融合，发挥地球化学大数据的优势，促进定量地球科学向前发展；加强平台建设和人才队伍建设，致力于核心分析技术和仪器研发，造就一批具有国际视野的创新领军人才和研究团队。

地球物理学是一门具有国家重大需求且面向国际科学前沿的战略学科，目前我国地球物理学研究仍存在明显不足，主要表现为：尚未提出过指导某一领域或分支学科发展的重要理论，前瞻性方法和技术的集成应用略显不足，地球物理学各个分支方向之间以及与

其他学科的深度交叉融合还需加强，对其他学科影响和辐射力不足，尚未在国内外地球科学界形成引领地位。2035年前的主要战略目标应包括下列方面：瞄准国际前沿，在加强观测的基础上，开展原创性、前瞻性和战略性研究，发现新现象，发展新方法，提出新理论，在若干领域形成一大批有国际影响力的学术成果，通过十几年的努力，实现地球物理学从“跟跑”到“并跑”，且在一些领域“领跑”的战略目标；紧扣国家需求，围绕资源开发、环境保护和灾害防治领域的重大科学问题，解决应用科学和产业发展所面临的具有共性的基础科学问题，研制新方法，开发新技术，解决困扰产业发展的“卡脖子”问题，为国家重大技术创新提供基础研究支撑；坚持以人为本，造就国际一流的地球物理人才队伍。

大气科学作为地球科学的一个核心组成部分，其发展已进入了一个全新的阶段，研究重点从气候系统拓展至地球系统，未来的发展趋势必将是多学科之间的交叉融合，以加强认识和理解地球系统各子系统之间的相互作用与机制。随着大气科学的发展，需要建立更加精细的观测网络以及更高分辨率的地球/气候系统数值模式，改进和提高天气、气候和空气质量的预报、预测准确度。大气科学的主要分支学科包括天气学、大气动力学、大气物理学、大气化学、气候系统与气候变化。我国大气科学2035年前的发展目标为：显著提高大气科学已有优势领域的国际竞争力，加速大气科学新兴分支学科及相关交叉学科的发展，培养更多适应国际大气科学发展趋势的高层次人才，力争在国际大气科学基础研究和前沿技术领域产出一批有重大影响力的创新成果，全方位提高中国大气科学的国际影响力和国际话语权，将中国发展成为大气科学研究强国。

行星科学领域在地球科学中的主要特色体现在以深空探测为主要研究手段，由地球科学、空间科学、天文学等学科交叉产生。行星科学和深空探测相辅相成，密不可分，深空探测催生了行星科学，

行星科学牵引了深空探测。我国的行星科学已经深度融入国际学界，并形成了良好的发展态势：高水平的行星科学人才团队已经初具规模，行星科学人才培养体系已经萌芽，行星科学相关专业组织陆续成立，行星科学相关期刊影响力不断扩大。认识行星的形成和演化是行星科学研究的主要目标。未来，行星科学研究仍将借助于深空探测工程、地球科学及天文学的发展，聚焦于揭示太阳系行星的空间、表面和内部特征，理解过去和现在发生的各种物理与化学过程，理解行星的起源、运行机制和演化，同时聚焦地外生命及其宜居环境要素研究，深入理解地球和地外行星宜居环境建立和发展，认识生命的起源和演化。

### 三、地球科学发展布局、优先发展领域、重大交叉领域

2035 年前，地球科学从面向学科发展和国家重大需求两个层面来均衡布局和协调发展，强化我国地球科学的优势学科和领域，促进我国相对薄弱但属国际主流的分支学科的发展，鼓励学科之间的交叉研究和渗透融合，推动各学科的创新型研究和新兴学科的发展。加强前沿性、基础性的分支学科的发展；扶持与实验、观测、数据集成和模拟相关的分支学科；重视地球科学、地球系统科学与其他学科的交叉，以获得原创性的成果并提出新的理论，同时为社会可持续发展和环境质量的改善提供科学依据。

#### （一）各分支学科发展布局、优先发展领域、重大交叉领域

##### 1. 地理科学

地理科学学科的战略布局以“需求导向，服务国家；突出优势，立足前沿；统筹规划，科学布局；强调交叉，追求创新”为原则。中国自然地理研究将仍对综合自然地理学、部门自然地理学、人类生存环境研究三个方面的布局进行深入研究。人文地理学按照四个

分支学科群进行战略布局，即以人类活动空间过程和格局集成研究为主要任务的综合人文地理学、以产业经济活动为主要研究对象的经济地理学、以人类生活空间为主要研究对象的城市与乡村地理学，以及以人类非物质活动为主要研究对象的社会文化地理学。信息地理学按照地理遥感科学、地理信息科学、地理数据科学三个分支学科群进行战略布局。

地理科学优先发展领域：综合自然地理学研究；部门自然地理学研究；人类生存环境学研究；综合人文地理学研究；经济地理学研究；城市与乡村地理学研究；社会文化地理学研究与政治地理学研究；信息地理学基础理论和原理方法；地理遥感科学研究；地理信息科学研究；地理数据科学研究。

地理科学交叉研究领域：典型生态水文过程和模拟；东亚人类生存环境变化与智人兴起；自然-人文-生态交叉融合模式构建；地域功能演变与区域可持续发展模式；人类活动物质空间与文化空间耦合；区域一体化与城乡协调发展的机制与路径；智慧城市与智能服务；重点区域地球表层系统综合观测与模拟；地球大数据。

## 2. 地质学

在“聚焦前沿，发挥优势；立足区位，瞄准全球；加强应用，服务国家；补齐短板，前瞻布局”布局原则的指导下，地质学各分支学科应围绕地球物质、生命、环境和构造演化的基础科学问题，立足国际学科前沿，加强学科交叉，发挥地域优势，拓展全球视野，加强平台建设，补齐研究短板，面向国家和社会需求，促进研究范式变革，产出一批原创性成果，全面提升学科国际影响力。

地质学优先发展领域：主要生物类群起源与演化过程及其整合的生物学机制；不同时间尺度的重大气候、环境演变；地球深部与表面地质过程中的矿物演化与响应机制；主要成矿系统的结构、成因和演化；特提斯和东亚岩石圈构造、演化与深部地球动力学；大

陆构造变形与人类宜居的地球系统；气候系统古增温与气候系统突变；全球变化下地球多圈层相互作用和青藏高原地质、资源与生态环境效应；地球关键带的水文生物地球化学过程与江河流域生态水文地质工程地质生态安全。

地质学交叉研究领域：生物宏演化及其地质背景；打造国际通用的高精度地质时间标尺；面向大数据的精时、活动古地理重建；俯冲带壳幔相互作用；前寒武纪构造体制及其资源-环境-生命效应；环境变化与人类活动；深部水文地质工程地质与城市地下空间开发利用。

### 3. 地球化学

地球化学分支学科的发展是地球科学发展的核心之一，地球化学学科布局的原则是：对地球化学发展具有带动作用，具有良好基础，能迅速提升我国地球化学的国际地位；解决制约我国经济与可持续发展的若干关键科学问题，以满足国家重大需求；突出学科交叉和融合，通过多学科联合攻关实现地球化学基础研究的重大突破。根据上述原则，在充分吸纳有关战略研究成果的基础上，加强综合分析归纳，认真分析国际科学前沿和国家经济社会发展战略需求中的科学问题，结合我国地球化学的优势和面临的挑战，确定优先发展方向和交叉学科。

地球化学优先发展领域：新的地球化学示踪体系和高精度年代学；早期地球构造范式与地幔温度；深地过程与地球气候恒温机制；地球内部状态与物质循环；板块构造过程与大陆形成和演化；地球内外系统的联动机制。

地球化学交叉研究领域：地球内部运行机制及其浅表地质、资源环境效应；造山带与俯冲带的形成和演化；超大陆旋回的岩石圈、水圈、大气圈和生物圈效应；关键地质时期生命-环境协同演化；亚洲新生代构造过程、环境演化历史及其与全球环境变化的联系；跨学科与跨学部交叉研究。

#### 4. 地球物理学

在“保持优势，均衡发展；立足前沿，鼓励交叉；需求导向，突出重点；重视观测，发展技术”布局原则的指导下，地球物理学学科发展布局主要由以下七个学科方向组成：深部探测，震源物理与强震机制，地震活动与地震灾害，重、磁、电、热学科，地壳变形与地球动力学，勘探地球物理，地球物理仪器研发。在总体发展战略布局体系下，以国家重大需求为导向，以国际科学前沿为目标，确定各分支学科的优先发展方向。

地球物理学优先发展领域：地球物理新理论、新技术和新方法；地球深部结构与圈层相互作用；大陆强震机理与灾害评价；深层油气藏与绿色能源勘探开发；战略性关键矿产核心勘探技术；关键地球物理装备研发；人类活动诱发地震的特征、机理与防控；全球一体化重力场信息获取的关键技术与理论方法。

地球物理学交叉研究领域：青藏高原深部动力过程及其资源环境灾害响应；全球板块俯冲带和主要造山带的深部结构与性质；空间物理与行星物理新方法和新技术；复杂深层资源能源探查的新理论与新技术。

#### 5. 大气科学

从当前中国大气科学研究水平的实际出发，突出气候学和大气化学等优势领域，结合国际大气科学发展动向和国家经济建设需求，打造大气科学新兴分支学科及相关交叉学科生长点；始终坚持基础研究，根据国际大气科学研究的发展态势，积极探索前沿技术；加强国际合作，重视人才建设；强化原始创新，注重从0到1的开创性研究，力争重大突破；服务国家重大需求，紧密围绕重大科学问题，建成大气科学强国。未来，大气科学研究将以四个基础分支学科展开：天气学和天气动力学、气候学和气候动力学、大气物理学、大气化学。

大气科学优先发展领域：“天-地-空”一体化气象观测网络；

极端天气气候事件变化及机理；大气环境污染及影响；高分辨率地球系统数值研发与应用；多尺度无缝隙集合预报；城市和城市群的天  
气、气候、环境效应与可持续发展。

大气科学交叉研究领域：气候、大气环境、生态系统的相互作用；气象-水文-地质综合灾害研究与预警预测；人工智能、大数据科学与天气预报及气候预测。

## 6. 行星科学

我国行星科学发展战略布局的关键在于“高起点、快发展、广交叉、深融合”。行星科学的主要研究目标演变为行星的起源与演化，主要研究内容为行星物质成分与多圈层结构及其动力学过程，绝大部分研究方法与思路也在地球科学范畴。地球科学是我国最具国际影响力的基础学科之一，学科门类齐全，基础雄厚。另外，得益于国际深空探测数据的开放政策和国家对人才引进的强力支持，我国的行星科学已经深度融入国际学界，并形成了良好的发展态势。“中国天眼”，即 500 米口径球面射电望远镜（five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST）等重大基础设施的完成，也为行星科学的发展提供了重要平台。我国的行星科学通过广交叉和深融合吸取营养，实现高起点和快发展。

行星科学优先发展领域及交叉研究领域：太阳系原始物质与行星形成；撞击和表面地质过程；行星的内部结构；行星的岩浆活动与行星幔的演化；行星的大气、海洋；行星的磁场；行星宜居环境的起源和演化；行星的有机物与生命探测；太阳系外行星探测；行星资源开发利用。

### （二）我国地球科学的重大交叉领域

#### 1. 地球与行星观测的新理论、新技术和新方法

地球与行星物质物理化学性质和过程的观测技术、实验方法与

计算模拟技术；深空、深地、深时、深海和宜居地球探测技术集成；地球科学大数据的分析、同化、融合和共享技术；地球观测和多源数据融合平台构建及关键技术；纳米地球科学与行星地球科学新技术、新方法及相关仪器设备；多尺度、多参数和跨维度综合分析平台。

## 2. 行星宜居性及演化

宇宙、太阳系起源与演化；日地相互作用；行星大气同位素特征；行星大气及其对宜居性的影响；行星电离层同位素组成与大气逃逸机制；宜居行星物质来源及挥发分演化；地质历史时期地球大气同位素组成；行星固体圈层中气体同位素的组成；行星宜居性演变的关键地质过程制约；地表环境灾变及其与太阳及行星活动的关系。

## 3. 地球深部过程与动力学

全球及典型区域深部物质、结构和运动特征；板块物质运动的时间和空间轨迹的精确描述技术与方法；地球深部与表层过程的相互作用；地幔柱的起源、演化及其环境效应；地球深部过程及演变对资源环境的控制机制；板块俯冲起始的关键条件和驱动力；俯冲界面岩石圈流变性质的变化；地球内/外核的结构与成分；地核的形成与演化；地球发动机动力学；核幔边界结构与成分；地幔柱的结构与成分；地幔柱动力学。

## 4. 海洋过程与极地环境

海洋动力学及其与生物地球化学、生态过程的耦合作用；极地环境快速变化与多圈层相互作用；深海多圈层物质能量循环及资源效应；高-低纬海洋过程对全球变化的驱动和响应；近海多界面耦合过程；海洋多尺度动力过程与海-气相互作用；深海极端环境下的生命特征、生存极限及适应策略的遗传、生理与生化机制及其结构基础；微生物驱动黑暗深海物质循环、能量流动和生态系统平衡的过程与机制；生命起源及深海生命与地球的协同演化机制；洋-

陆边界深部过程及资源效应。

## 5. 地球系统过程与全球变化

地球多圈层相互作用过程与环境效应；生物与环境协同演化机制；典型地理单元生物地球化学循环与生态、社会和健康效应；地球系统碳转化速率与影响；多尺度气候-水文-土壤-植被耦合机制与模拟；碳循环关键过程对升温和大气二氧化碳浓度的敏感性；人类社会排放、土地利用变化和物质循环等对气候系统的反馈；地表系统对生命支撑要素的承载力；海-陆-气相互作用与数值模拟；陆面模式与碳氮循环过程；新一代气候系统与地球系统模式；地球形变与地壳运动、陆海基准、近地空间天气效应及地球内部质量迁移的综合观测和融合分析。

## 6. 天气与气候系统的可持续发展

大气物理、大气化学过程及相互影响机制；大气能量和物质循环及圈层相互作用对天气气候和大气环境的影响；天文因素对地球气候变化的影响；天气气候和大气环境变化的机制及预报预测理论和技术；气候系统中云和大尺度大气环流及其之间的相互作用；天气气候数据均一化、同化、再分析技术与系统；气候变化与水循环时空变异及机理；天气和气候极端事件；气候变化的区域响应与适应；气候系统监测平台；大气模式与气候系统。

## 7. 人类活动与环境

环境污染过程、调控与修复；环境质量演变、预测与管理；污染物的环境风险与健康效应；城镇化与资源环境承载力；人类活动与城乡融合过程、效应及调控；人类活动与资源环境耦合调控；地表环境变化与生态服务；世界政治经济格局重塑的资源环境制衡与风险预警；地表过程致灾机理与链式灾害演化机制；地质与工程灾害的致灾机理、识别预警与防控；地理实体与虚拟空间映射下重大

突发公共安全事件的过程推演；环境变化与人畜共患传染病风险。

## 8. 资源能源形成理论及供给潜力

资源形成与富集机理；深层油气勘探理论与技术；天然气水合物开发理论与技术；地球内部有机-无机相互作用及资源效应；圈层物质循环与成矿；全球典型沉积盆地火山热液、缺氧事件和全球性快速气候变化与富有机质沉积体的关系。

## 9. 空间天气过程和行星空间环境

太阳爆发活动及其行星际传输和太阳周行为；空间天气、空间气候和日地联系的基本物理过程；行星系统与太阳风的耦合；中高层大气、电离层与低层大气以及磁层的耦合和多尺度过程；行星空间环境中的物质和能量输运；行星空间环境中高能带电粒子的加速和逃逸机制；行星及其卫星的地质活动和对空间环境的影响；空间天气预报和灾害性空间天气预警的模式和方法；空间天气对航空航天、通信导航、精密定位等的影响。

## 10. “两洋一海”综合观测及集成研究

多圈层耦合的海洋系统模拟器和智能预报预测技术与系统研发；海洋地球系统理论、大数据与信息服务；海洋固-水-气演变过程和灾害机理；深海全天候原位实时观测体系；洋盆间的水体、物质、能量交换及全球效应；洋-陆边界深部结构、流变特征对比；洋-陆边界深部-表生耦合作用；洋-陆边界深部物质、能量运移过程与机制及资源效应；空天地与海底基准统一，水下定位、导航与授时（positioning, navigation and timing, PNT）体系。

## 11. 重大地质-环境-生物事件的全球对比

地球早期地质-环境背景演变与生命演化；重大气候转折期的环境与生命演变；生物大灭绝与复苏及其环境背景；深时高精度地质年代格架；地理实体与虚拟空间映射下重大突发公共安全事件

的过程推演；全球典型沉积盆地火山热液、缺氧事件和全球性快速气候变化与富有机质沉积体的关系；全球俯冲带演化及其环境、生物演化响应；生物演化、水体环境、大气化学组成突变的成因联系。

## 12. 城市群可持续发展

基于可持续发展目标的城市群典型要素与监测机理；城市群要素的综合表达与集成分析；人文-自然复合空间演化过程及模拟；城市群区域发展与空间重构；城市群产业转型、发展、演化与调控；城市群典型过程及生态环境效应；区域经济发展与环境质量相互作用；城市社会城乡统筹与城乡一体化作用机理；人地耦合视角的城市群空间治理路径；城市社会公平性、宜居性及其调控原理；城镇化与资源环境承载力；人类活动与城乡融合过程、效应及调控；城市群可持续发展路径及定量评估。

## 13. “一带一路”区域固体-表生地球科学综合研究

“一带一路”沿线构造-气候因素对地表物质循环和环境演化的影响机制，地表环境对地球深部过程的响应；“一带一路”沿线富有机质沉积体形成的机制、分布规律及产烃潜力评价；“一带一路”沿线气候变化与水安全；“一带一路”区域生态系统结构、功能与服务；“一带一路”区域资源利用与生态保护；全球气候变化和人类活动对“一带一路”区域生态环境的影响与适应；“一带一路”生态系统多重压力的缓解策略；“一带一路”人类文明演化与生存环境；“一带一路”区域环境变化与全球可持续发展目标。

## 四、地球科学发展保障措施

为推动我国地球科学学科的自身发展和更好地服务国家经济社会发展需要，圆满完成“十四五”规划和至 2035 年的中长期科技发

展任务，从根本上解决我国一些领域的“卡脖子”问题，实现创新型国家建设的目标，地球科学学科的发展需要从能力建设、队伍建设、制度建设、法规建设、国际合作、学科交叉和公众科普等方面采取有力措施，调整和完善国家基金资助机制，具体如下。

### 1. 加强长期的监测观测能力建设

随着人类对地球认识和研究需求的变化，以及研究技术手段的不断升级和新方法、新设施的不断引入，地球科学研究的时空尺度加速扩大。研究对象既可以是小到纳米级的岩石物质结构，又可以是大到数万千米直径的空间行星天体。研究时间尺度既可以是瞬时，又可以是数亿年。近年来，继“深地”“深海”“深空”研究之后，“深时”研究得到高度重视。2020年，美国国家科学研究委员会（National Research Council, NRC）发布报告提出了“时域地球”（Earth in Time）的概念。所有这一切均超出人类自身的能力范畴，需要借助仪器设施等“工具”来实现。实验室、野外观测台站、航空飞行器、对地观测卫星等是地球科学观测检测和获取原始数据资料开展创新性研究的重要途径。以解决地球科学重大科学问题以及地理科学、地质学、地球化学、地球物理学、大气科学和行星科学技术创新为导向，加强国家资助和宏观管理的国家层面基础平台建设，建立和完善地球科学“地（地下深部）-陆（地表浅层）-海-空-天”一体化立体监测观测体系，从地球内部到地外天体对地球开展长期持续性观测和监测。同时，建设与体系配套的数据采集、存储和分析的设施和能力，制订数据共享和服务机制，为地球科学的创新和发展提供基础保障。同时，基于地球科学自身研究对象的特点，重视野外天然气实验室建设，遴选一些具备特殊地质、地貌或气象的区域，设立国家地球科学研究保护区，配备相关仪器设施支出开展长期原位（in situ）研究。以此缩短我国在地球科学重大基

础理论研究领域与国外的差距，提升我国地球科学研究水平。

## 2. 加强以培养新一代地球科学家为目标的人才队伍建设

在所有制约地球科学发展的决定性因素中，人的因素是最为关键，也是最难提升的制约因素。拥有人才就拥有未来，用好人才就能获得发展。全面建成小康社会和实现社会主义现代化，需要大力实施人才强国战略。应该着眼于地球科学未来的学科发展需要，不断完善自主创新型人才培养、引进、选拔机制，实施激励自主创新的评价奖励制度，健全不同类型人才的考核标准，做好对自主创新型人才的服务保障工作，最大限度地调动各类人才的创造性，做到“人尽其才、才尽其用”，提升我国地球科学研究的创新能力。地球科学研究主要为基础研究和应用基础研究，重大突破的获得主要依赖于长期不断的研究积累，这就需要相对稳定的研究队伍作为保障。因此，在进行面向未来的新一代人才队伍建设方面，应注重不同功能型人才的比例，既要有能把握国际学科前沿的战略型科学家，又要有能扎根基层探索科学前沿和解决具体问题的战术科学家，更要有大量从事观测实验和数据分析的技术型人才与服务于整个科研过程的组织管理人才。同时，还应采取相关措施激励团队内或团队间的合作和有序竞争。

## 3. 完善国家基金和相关项目资助制度建设

地球科学是一门与自然环境演化和社会经济发展密切相关的基础学科，与其他基础学科一样，具有周期长、回报慢和厚积薄发的特点，其发展是一个需要长期投入的过程，持续和稳定的设施、经费、人员、政策等的支持是地球科学可持续发展的最基本保障。因此，需要结合学科特色，完善国家基金和相关项目资助制度建设，突出竞争择优和稳定支持相结合，在已有资助基础上适当增加新的模式。制订学科发展战略和设立大科学计划是保障基础研究获得稳

定资助的重要手段。国内外实践表明，大科学计划在探索未知知识、促进学科发展和解决重大科学问题方面发挥着重要作用。近年来，美国、欧盟、加拿大、澳大利亚等围绕地球关键带、人类世、地下-地表耦合过程、地震和火山等地质灾害等地球科学关键领域持续提出国际性大科学研究计划，或者对重点研发项目进行长期大额度稳定经费资助，引领国际地球科学的创新性研究，并取得多项重要研究成果。目前，我国已具备围绕地球科学的一些重大热点领域，牵头组织全球或区域尺度大科学计划和大科学工程的条件。如设计得当，必将极大地提升我国地球科学的研究水平。同时，在科学研究过程中，总会存在一些可能具有颠覆性效果的变革性研究不能得到共识，错失获得项目资助的机会。除了已有的“重大非共识项目”外，对一些小型、探索性的可能会在某个领域产生突破的想法或项目也建议给予适当的资助机会。此外，基于大数据的新的科研范式已经形成，“公民”科学、大数据科学等已经成为科学研究的重要补充，但目前在一些国家项目的设立和经费的使用管理上还未就这一变化制订相应的措施，建议今后进行完善。

#### 4. 完善地球科学研究相关法规建设

随着地球科学研究领域的不断拓展，以及研究过程一些新问题的产生，已有的一些法律法规已经不能完全涵盖。例如，随着人类技术的进步，对太空其他行星开展科学研究和资源探测已经不再是科学幻想。2017年7月，卢森堡通过了《太空资源勘探与利用法(草案)》，明确了太空资源可以被占有，并规定了空间勘探任务的授权和监督程序，成为第一个为太空采矿提供法律框架的欧盟国家。目前国际上对太空矿产资源的开发还没有公认的法规或条约，如果我国能尽快开展相关研究并前瞻性地制定相关法规或政策，必将对未来我国开展太空矿产资源勘探开发提供法律保障，并在国际太空

矿产资源开发法律制定中掌握话语权。从全面依法治国出发，很有必要建立健全与地球科学研究相关的法律法规体系，规范地球科学研究行为，并规避地球科学研究中可能出现的风险。2021 年《中华人民共和国民法典》的出台为制定细化的地球科学研究的相关法律法规带来了曙光。

### 5. 建立以我为主互惠共赢的国际合作模式

随着人类对地球和地外行星认识的不断深入，跨领域、跨国别合作已成为当今地球科学研究的主要方式。我国复杂的大陆物质组成与地质结构、广阔的国土面积和独特的阶梯状地形、特有的北半球季风-干旱气候环境、丰富的古生物化石埋藏等，为我国地球科学的发展提供了独特的研究对象、科学问题和天然的研究实验室，但仅靠我国地球科学家自身的力量是无法完全解决这些重大科学问题的。中国是地球的一个区域，中国地球科学问题的研究需要全球的背景支撑。因此，一些重大基础研究需要来自不同国家、不同机构和不同学科领域科学家的共同参与，以全球的视野和国际化的方案合作来完成。基于此，建议在地球科学未来国际合作中，应本着互惠共赢的原则开展双边和多边合作，在我国具有优势的项目上要突出以我为主的原则，利用经费杠杆等手段引导国际合作人员与我国科研人员一起解决我方提出的我国特殊的地球科学问题和全球性问题，在一些相对薄弱的环节则可以通过合作学习及引进和吸收国际先进理论、技术和方法，扩大我国地球科学研究队伍，逐步提升我国在国际学术界的影响力。

### 6. 推动地球科学学科交叉研究

地球科学研究领域的广泛性和研究对象的复杂性，使得一些科学问题具有综合性，需要组织具有不同学科知识背景的研究人员共同参与和解决。加强各学科之间的交叉研究已经成为全球科学界

的共识，2017年国际科学理事会（International Council for Science, ICSU）和国际社会科学理事会（International Social Science Council, ISSC）通过全体参会代表投票表决的方式形成合并决议，在2018年组建成新的国际科学理事会（International Science Council, ISC）。地球深部、人类世、气候系统等地球科学问题的研究和解决都需要多方面的人才配合来完成。建议在国家项目设立中适当增加交叉领域的项目数量和强度，鼓励组织跨领域研究团队来开展研究。

### 7. 加强科普，提高公众对地球科学的认知度和参与度

加强地球科学专业教育并向公众传播和普及地球科学知识是地球科学研究机构和研究人员的重要历史使命与社会责任。只有更多的人通过学习地球科学知识，了解地球科学在资源、环境和灾害方面的作用，更好地认识我们共同赖以生存的这个星球，人类才能更好地管理和利用地球，实现真正的人地和谐发展。针对不同的群体应采取不同的策略，对在校学生应开展较系统的地球科学知识课程，重点是吸引和培养未来能从事地球科学研究的后备人才；而对普通大众，则宜采取喜闻乐见和寓教于乐的方式，增强公众对地球科学及其分支学科研究对象、方法和技术手段的了解与兴趣，营造能支撑地球科学研究的良好社会氛围。



# Abstract

The Research Group on Development Strategy of Earth Science in China for 2035 was led by Professor Rixiang Zhu since April in 2020. Prof. Rixiang Zhu is an academician of the Chinese Academy of Sciences, a fellow of the American Geophysical Union, and was awarded the Petrus Peregrinus Medal by the European Union of Geosciences. Prof. Zhu invited 15 leading scientists with different area of expertise in Earth science from various institutions in China. The Research Group held regular workshops, with members presenting brief overviews of topics related to their research specialties and discussed frontiers and needs in Earth science before 2035. Draft chapters were edited by Profs. Chengshan Wang, Huijun Wang, Yigang Xu, Xianhua Li, Fuyuan Wu, Shuzhong Shen, Renhe Zhang, Tielong Zhang, Peizhen Zhang, Fahu Chen, Yongfei Zheng, Yongyun Hu, Rui Gao, Jie Fan, and Yongxin Pan with helps from secretaries Bo Wan, Chaolin Zhang, Qiang Wang, Xiumian Hu, Liang Zhao, Dabang Jiang, Yunpeng Dong, Yong Wei and Xin Li. Edited versions were circulated amongst the whole group, and the final document was collated and edited by Rixiang Zhu.

## **1. Scientific Significance and Strategic value of Earth Science**

Earth science is the natural science that explains the Earth's formation

and evolution. Earth science is a highly applicable field of study due to the fact that the planet not only serves as our home but also provides us with essential life-sustaining resources. The scope of Earth science research includes the structure, composition, and evolution of Earth's layer, as well as the process, change, mechanism, and interaction between layers. The objective of Earth science research is to increase the level of understanding of the planet and to use the acquired knowledge system to provide scientific basis, technical support, and solutions for resolving major issues such as human livable resources and energy supply, ecological environmental protection, and natural disaster prevention and control.

The Earth is only a member of the vast universe, and it is approximately 4.6 billion years old. The spatio-temporal scale of Earth science research differs greatly from that of other disciplines. The objects of Earth science research include the Earth's interior layers (crust, mantle, and core) and the Earth surface system (biosphere, soil sphere, hydrosphere, cryosphere, geosphere, anthroposphere, and atmosphere) . The research period spans from Earth's formation to the present. With the advancement of modern Earth science concepts, there is a greater emphasis on resolving complex economic and social problems and meeting the evolving needs of humans. Increasing emphasis is placed on interdisciplinary development, and it is anticipated that the interrelationships and internal evolution of different spheres will be incorporated into the theory of the Earth system. It emphasizes the use of new observations and new methods to integrate existing data, build reasonable models to recognize and understand the Earth and planetary space on which humans live, answer scientific questions about how humans can be habitable and sustainable, and serve the country and the public as technology advances.

This book proposes a strategy for the development of China's Earth

science disciplines to 2035, with the goals of promoting the balanced layout and coordinated development of Earth science and their various sub-disciplines; strengthening the advantageous areas of China's Earth science; promoting the development of China's relatively weak sub-disciplines and fields; encouraging the growth of interdisciplinary research; promoting the development of sub-disciplines associated with experimentation, observation, data integration, and simulation; prioritizing the cross-integration of Earth sciences and mathematics, physics, chemistry, and biology; and hastening the emergence of creative achievements and theories in disciplines.

## **2. Research characteristics and development trends in the field of Earth science**

Earth science is entering the integration stage of various branches of science, that is, the establishment of a new era of theoretical knowledge and methodological technology system of "Earth system". China's domestic and international earth science research is undergoing profound changes in this direction. In general, the scope of Earth science's research is becoming more comprehensive. Meanwhile research technology methods are becoming more advanced. Basic research and application are becoming more closely integrated. The spatio-temporal scale of research objects in Earth science is constantly expanding, and more emphasis is placed on the coordinated development of interdisciplinary studies. The advancement of Earth science is a priority for developed countries, and in recent years, countries like the United States, the United Kingdom, Germany, the European Union, and others have launched numerous large-scale scientific initiatives like the Earth Lens Plan and the Future Earth Plan. The advancement of earth science necessarily requires long-term and extensive observation, detection, analysis, experimentation, and

simulation, and even requires long-term intervention of organizational systems forces.

The early-stage development of Earth science is closely related to the industrialization of human society. In recent years, however, more attention has been given to the harmony between human beings and Earth and the scientific research on planet earth. It is necessary to place the Earth in the entire solar system and even the universe to understand how Earth works. In the meanwhile, the traditional Earth science is about to enter a new era of “Earth System Science”, and the combination of basic research and applied research is increasingly closer, serving the resources utilization, ecology and environment protection, and disaster resistance and reduction. The rapid development of technology is becoming more and more important in support of Earth science. By seizing the historical opportunity, Chinese Earth science community should provide their scientific support to a shared future for mankind and solutions to global governance.

Future Earth science will be balanced and coordinated development at two levels of disciplinary development and major national needs, will strengthen the dominant disciplines and fields of Earth science in China. Future Earth science should also strengthen the development of cutting-edge and basic sub-disciplines; support sub-disciplines related to experimentation, observation, data integration, and simulation; emphasize the merging of Earth science, Earth system science, and other disciplines to obtain original results and propose new theories, as well as provide a scientific basis for sustainable social development and improvement of environmental quality.

### **3. Key scientific issues, development goals and important research directions in the field of Earth science**

The following is a list of the priority development areas in China for

the various branches of Earth science to 2035.

Geographical science include: integrated geography (theoretical geography, applied geography, regional geography, and historical geography); physical geography (integrated physical geography, sectoral physical geography, and human living environment); human geography (integrated human geography, economic geography, urban geography, rural geography, sociocultural and political geography); and information geography (geographic remote sensing science, geographic information science, geographic data science).

Geology: the origin and evolution of major biological taxa and their integrative biological mechanisms; major climatic and environmental evolutions on different time scales; mineral evolution and response mechanisms in deep and surface geological processes of the Earth; structure, genesis and evolution of major metallogenic systems; tectonics, evolution and deep geodynamics of Tethys and East Asian lithosphere; continental tectonic deformation and human habitability as a system; warming of the paleo-climate system and abrupt changes in the climate system; interaction of the Earth's multi-sphere under the background of global change, and the effects of Qinghai-Xizang Plateau on the geology, resource and ecological environment; hydro-biogeochemical processes in Earth Critical Zone, and ecological hydrogeology safety and ecological safety of engineering geology in river basins.

Geochemistry: innovative geochemical tracing systems and precise chronology; tectonic paradigms and mantle temperatures of the early Earth; deep-Earth processes and the temperature-maintaining mechanism of the planet's climate; the interior state of the Earth and the matter cycle; plate tectonic processes and the formation and evolution of continents; mechanism connecting the internal and external systems of the planet.

Geophysics: new theories, new technologies and new methods of geophysics; the deep structure of the Earth and the interactions between

different Earth's spheres; strong seismic mechanism of continents and disaster evaluation; deep oil and gas reservoirs and the exploration and development of green energy; core exploration technologies for strategic key minerals; research and development of key geophysical equipment; characteristics, mechanisms and, prevention and control of earthquakes induced by human activities; key technologies and theoretical methods for global integrated gravity field information acquisition.

Atmospheric science: space-air-ground integrated observation network; changes and mechanisms of extreme weather and climate events; atmospheric environmental pollution and impacts; research, development and application of high-resolution Earth system numerical value; multi-scale ensemble forecasting; weather, climate, environmental effects and sustainable development of cities and urban agglomerations.

Planetary Science: primordial matter and planet formation in the Solar System; impacts and surface geological processes; internal structure of the planet; planetary magmatic activity and evolution of planetary mantles; planetary atmospheres, oceans; magnetic field of the planet; origin and evolution of planetary habitable environments; planetary organic matter and life detection; exploration of extrasolar planets; development and utilization of planetary resources.

# 目 录

总序 / i

前言 / vii

摘要 / xi

Abstract / xxxiii

## 第一章 地理科学 / 1

### 第一节 战略地位 / 1

- 一、地理科学：研究地球表层系统的基础科学 / 1
- 二、地理科学：从知识到决策的经世致用之学 / 3
- 三、地理科学对实施《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2021—2035年）》的支撑作用 / 4

### 第二节 发展规律与发展态势 / 5

- 一、基本定义与内涵 / 5
- 二、发展规律和研究特点 / 8

### 第三节 发展现状 / 11

- 一、我国地理科学发展现状 / 11
- 二、地理科学国际发展态势 / 29

三、我国地理科学面临的问题与机遇 / 32

#### 第四节 学科发展布局 / 36

一、战略目标 / 36

二、战略布局 / 38

三、学科优先发展方向和交叉学科 / 44

#### 第五节 优先发展领域 / 58

一、优先领域发展目标 / 58

二、优先领域重点方向 / 60

三、重大交叉研究领域 / 76

#### 第六节 国际合作与交流 / 80

一、国际合作与交流中的新时代使命 / 80

二、地理科学在国际合作与交流中的主要领域 / 81

本章参考文献 / 87

## 第二章 地质学 / 94

### 第一节 战略地位 / 94

### 第二节 发展规律与发展态势 / 96

一、地质学学科特点 / 96

二、地质学国际发展动态与趋势 / 97

### 第三节 国际地位与发展现状 / 101

一、我国地质学的国际地位 / 101

二、我国地质学的发展现状 / 105

### 第四节 学科发展布局 / 107

一、指导思想、布局原则、发展目标 / 107

二、学科优先发展方向 / 110

### 第五节 优先发展领域 / 117

- 一、优选原则与重点方向 / 117
- 二、重大交叉研究领域 / 123
- 第六节 国际合作与交流 / 127
  - 一、地质学国际合作交流现状 / 127
  - 二、地质学学科国际合作基本思路 / 129
  - 三、地质学领域国际合作的主要任务 / 129
- 本章参考文献 / 131

### 第三章 地球化学 / 133

- 第一节 战略地位 / 133
- 第二节 发展规律与发展态势 / 136
  - 一、基本定义与内涵 / 136
  - 二、发展规律和研究特点 / 136
- 第三节 发展现状 / 139
  - 一、总体发展现状 / 139
  - 二、各分支学科发展现状 / 142
- 第四节 学科发展布局 / 153
  - 一、战略目标 / 153
  - 二、战略布局 / 154
  - 三、学科优先发展方向和交叉学科 / 172
- 第五节 优先发展领域 / 176
  - 一、优先领域发展目标 / 176
  - 二、优先领域重点方向 / 177
  - 三、重大交叉研究领域 / 186
- 第六节 国际合作与交流 / 188
- 本章参考文献 / 190

## 第四章 地球物理学 / 192

### 第一节 战略地位 / 192

### 第二节 发展规律与发展态势 / 195

#### 一、基本定义与内涵 / 195

#### 二、学科发展规律 / 195

#### 三、学科的研究特点 / 197

### 第三节 发展现状 / 198

#### 一、地震学发展现状 / 198

#### 二、重磁电热学科发展现状 / 205

#### 三、勘探地球物理发展现状 / 208

#### 四、地壳形变与地球动力学发展现状 / 212

### 第四节 学科发展布局 / 214

#### 一、战略目标 / 214

#### 二、战略布局 / 214

#### 三、学科优先发展方向和交叉学科 / 216

### 第五节 优先发展领域 / 227

#### 一、优先领域的遴选原则和发展目标 / 227

#### 二、优先领域重点方向 / 227

#### 三、重大交叉研究领域 / 232

### 第六节 国际合作与交流 / 234

### 本章参考文献 / 234

## 第五章 大气科学 / 237

### 第一节 战略地位 / 237

### 第二节 发展规律与发展态势 / 240

#### 一、基本定义与内涵 / 240

- 二、发展规律和研究特点 / 241
- 第三节 发展现状 / 245**
  - 一、天气学 / 245
  - 二、大气动力学 / 247
  - 三、大气物理学与大气探测 / 249
  - 四、大气化学 / 251
  - 五、气候系统与气候预测 / 253
  - 六、气候变化及其影响 / 255
  - 七、应用气象学 / 257
- 第四节 学科发展布局 / 259**
  - 一、战略目标 / 259
  - 二、战略布局 / 259
  - 三、学科优先发展方向和交叉学科 / 261
- 第五节 优先发展领域 / 261**
  - 一、优先领域发展目标 / 261
  - 二、优先领域重点方向 / 263
  - 三、重大交叉研究领域 / 275
- 第六节 国际合作与交流 / 279**
- 本章参考文献 / 282**

## **第六章 行星科学 / 284**

- 第一节 战略定位 / 284**
  - 一、定义与研究内涵 / 284
  - 二、与地球科学的天然关系 / 285
  - 三、科学意义和战略价值 / 286
- 第二节 发展规律和发展态势 / 286**

## 中国地球科学 2035 发展战略

- 一、行星物理学 / 287
- 二、行星地质学 / 288
- 三、行星化学 / 289
- 四、行星探测技术 / 290

### 第三节 发展现状 / 291

- 一、行星物理学 / 291
- 二、行星地质学 / 292
- 三、行星化学 / 293
- 四、行星大气和海洋研究 / 294
- 五、探测技术和实验分析平台 / 295

### 第四节 学科发展布局 / 296

- 一、战略目标 / 296
- 二、战略布局 / 297
- 三、主要研究方向 / 298

### 第五节 优先发展领域 / 300

- 一、太阳系原始物质与行星形成 / 300
- 二、撞击和表面地质过程 / 304
- 三、行星的内部结构 / 308
- 四、行星的岩浆活动与行星幔的演化 / 311
- 五、行星的大气、海洋 / 314
- 六、行星的磁场 / 317
- 七、行星宜居环境的起源和演化 / 319
- 八、行星的有机物与生命探测 / 321
- 九、太阳系外行星探测 / 323
- 十、行星资源开发利用 / 326

第六节 国际合作与交流 / 328

一、国际合作现状分析 / 328

二、加强国际合作与交流的必要性 / 329

三、未来合作的主要方向 / 329

本章参考文献 / 332

关键词索引 / 334



# 地理科学

## 第一节 战略地位

### 一、地理科学：研究地球表层系统的基础科学

地理科学是研究地球表层中人类生存环境的空间格局、时间演化以及人类与环境相互作用的科学（陈发虎等，2019；傅伯杰，2017）。黄秉维（1996）认为，地理科学是基础学科，它的研究范围是地表上下与人类生存和活动有密切关系的一个薄层，一个自然与社会开放的复杂系统，并提出了地球表层系统科学的概念。鉴于地理科学在科学体系和社会发展中的重要地位与独特作用，钱学森（1994）曾指出“地理科学是与自然科学、社会科学等相并列的科学部门”，充当自然科学与社会科学之间桥梁的角色，而地球表层系统是一个“开放的复杂巨系统”，是系统中“最为困难的一种”。在遥感科学、地理信息科学、空间社会理论、全球变化等变革性技术与新的研究领域出现后（National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, 2019），新时代的地理学发生了深刻的改变——正在从地理学向地理科学进行华丽转

身，研究主题更加强调地球表层系统的综合研究，研究范式经历着从地理学知识描述、格局与过程耦合，向复杂人地系统的模拟和预测转变（陈发虎等，2019；傅伯杰，2017）。从地理学的发展历程来看，地理学是地球科学的本源之一，地球科学中许多其他学科最初都属于地理学内部的分支学科，在发展完善后从地理学中独立出来形成新的学科。地理学从传统的定性描述向语言表达的定量化、分析手段和实验方法的科学化、过程表达的模型化、时间表达的可预测化转变，实现了传统地理学向现代地理科学的成功转型，进一步凸显了地理科学思想的综合性、面对客体的区域性（到全球性）、多学科性质的交叉性和面向社会发展的实用性特点。

地理科学的研究对象是地球表层系统，它由岩石圈、水圈、大气圈、生物圈、冰冻圈、人类圈相互作用、相互渗透而形成，这一界面是地球上最复杂的一个界面，是物质三态相互作用、有机与无机相互转化的场所，又是地球内外营力相互作用的场所。地理科学研究必须把地球表层系统，又称“水-土-气-生-人”综合体（程国栋和李新，2015）当作一个整体来看待。地球表层是人类社会赖以生存的环境，维持人类的可持续发展必须要保护地球表层系统，尤其是受人类活动影响最为深刻的陆地表层系统（傅伯杰，2017）。地理科学以人类环境、人地关系、空间关联为核心，以不同的时空尺度和地理单元来解读地理要素或者地理综合体的空间分布规律、时间演变过程和区域特征。地理科学的研究对象和研究内容具有动态、开放、综合的特点，这也是地理科学的特色所在。地理科学不仅研究地球表层系统的自然性，还研究它的社会性和经济性。地理科学具有区域性、综合性和文理工交叉的属性（陈发虎等，2019）。综合性是地理科学存在的依据，是地理科学最大的特色，也是地理科学最大的困难，综合地研究地理环境是辩证认识地理环境形成与发展的根本途径（黄秉维，1960）。地理科学综合性的另外一个体现就是研究主题从“单一”走向“多元”，再走向“系统”，强调以地球表层系统研究，尤其是陆地表层系统研究为重点，运用地理科学的系统视角与科学工具，分析和理解当今人类社会面临的重大问题。对地观测、定量建模、大数据、物联网、虚拟现实等新技术也进一步推动了地理科学的综合集成。地理科学通过综合各种最新的技术手段和知识理论，探索和揭示地球表层系统中地理要素与地理综合体的发展演变规律，进而为人与自然和谐发展服务，

因此地理科学是研究地球表层的基础科学。目前，地理科学作为基础科学所面临的最大挑战是缺乏系统的理论体系来支撑地球表层系统中各要素的有机集成。

## 二、地理科学：从知识到决策的经世致用之学

地理科学研究与人类生存环境密切相关（陈发虎等，2019），无论是在服务国民经济和社会发展和国家战略需求方面，还是在服务全球协作与倡议中，地理科学都发挥着举足轻重的作用，地理科学正日益成为全球、地区、国家、城市治理体系现代化的核心驱动力（傅伯杰，2017；樊杰，2019）。

地理科学在服务国家发展和建设方面扮演着不可或缺的角色。地理科学是我国社会主义生态环境建设、物质文明建设、精神文明建设和政治文明建设的重要依靠（钱学森，1994）。随着社会经济和科学技术的快速发展，地理科学在支撑经济社会发展和国家发展战略决策方面呈现出如下总体趋势，即国家服务需求越来越多，服务的能力越来越强。我国的基本国情是人口总量大，人均资源占有量少，资源利用率低；同时，我国生态环境比较脆弱，环境压力很大，特别是近几十年来快速的城镇化发展，导致了一系列人与自然系统的复合问题，如城市病、土地荒漠化、冰川快速消融、冻土退化等。应对我国社会经济发展带来的资源和环境问题，亟须地理科学理论和方法的指引。地理科学在国民经济建设和社会发展中发挥了重要作用（陈发虎等，2020），在“一带一路”建设、国家生态文明建设、美丽中国建设、长江经济带建设、黄河流域生态保护和高质量发展、新型城镇化推进、精准扶贫、乡村振兴、城乡一体化、国土空间规划、智慧城市建设等方面发挥的作用进一步凸显。我国地理科学正面临前所未有的机遇，需要紧紧围绕国家重大需求，创新发展综合性的理论、方法和技术，逐步形成具有鲜明中国特色、深远国际影响的地理科学体系，为我国社会发展服务（傅伯杰，2017）。

地理科学为全球协作与倡议提供重要支撑。地理科学在未来地球计划、联合国可持续发展目标、应对全球变化等方面扮演着重要角色。随着地球进入人类世，地球载荷不断加重，如何通过“人地协同”、“适度改造自然”、创新发展、协调发展、绿色发展等手段提高地球的承载力，实现世界的可持续

发展（史培军等，2019），一直是人类发展所追求的目标。地理科学可为全球可持续发展提供必要的理论知识、研究手段和方法，能够有效应对可持续发展目标给学术界带来的挑战，地理科学作为一门学科，已经与可持续发展紧密结合（Liu et al., 2019）。地理科学也在地缘政治博弈与区域稳定中发挥着重要作用。例如，“亚洲水塔”自然环境变化与周边社会经济政治因素相叠加，这些自然与人文变化的耦合不仅影响“亚洲水塔”周边地区的水力资源开发计划与基础设施安全，而且影响地缘政治的复杂性及地缘战略竞争的强度。

地理科学研究的“水-土-气-生-人”五大要素中既有自然要素又有社会要素，这就决定了地理科学具有自然属性与社会属性相结合的特点，而经世致用正是这一特点的体现。然而，受限于当前地理科学的理论体系和地理要素定量表达水平，地理科学在支撑国家、地区乃至全球发展战略中仍有许多乏力之处，因此地理科学在从知识向决策支撑的转化中仍有很大的发展空间。

### 三、地理科学对实施《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2021—2035年）》的支撑作用

《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2021—2035年）》是促进我国科学技术创新发展的指导性文件，而地理科学发展规划是其中的重要组成部分。地理科学发展规划系统梳理了过去十几年间所取得的主要进展，分析了国内外研究热点和存在的问题，提炼了新时期地理科学发展的生长点和发展机遇，为地理科学未来的发展指明了方向，为国家推动地理科学发展提供了抓手。

此外，地理科学与《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2021—2035年）》中多个领域的基础研究和前沿技术都有密切的联系。其中，对《资源与环境科学发展战略报告》的支撑作用是：地理科学综合研究范式、多元化和精细化的地理数据以及不断完善的地理分析方法，在支撑资源管理与配置、环境监测与评估、灾害预测与控制中发挥着重要作用。对《地球系统科学（能源、环境和气候）发展战略报告》的支撑作用是：地理科学的理论和方法在能源生产与消费结构优化、产业结构调整、应对气候变化等方面发挥着重要作用。对《信息科学发展战略报告》的支撑作用是：地球大数据理论

与方法丰富了信息科学的研究对象和内容，地理信息和地理数据的组织与管理、时空大数据的传输与处理等需求对信息科学提出了更高的要求，推动了信息科学与地理科学的交叉和发展。

## 第二节 发展规律与发展态势

### 一、基本定义与内涵

地理科学是研究地球表层中人类生存环境的空间格局、时间演化以及人类与环境相互作用的科学（陈发虎等，2019；傅伯杰，2017）。地理科学的研究对象涵盖地球表层系统空间中的自然、人文和信息要素，分别对应自然地理学、人文地理学和信息地理学（图 1-1），并最终形成综合地理学、自然地理学、人文地理学和信息地理学四大分支学科（图 1-2）。

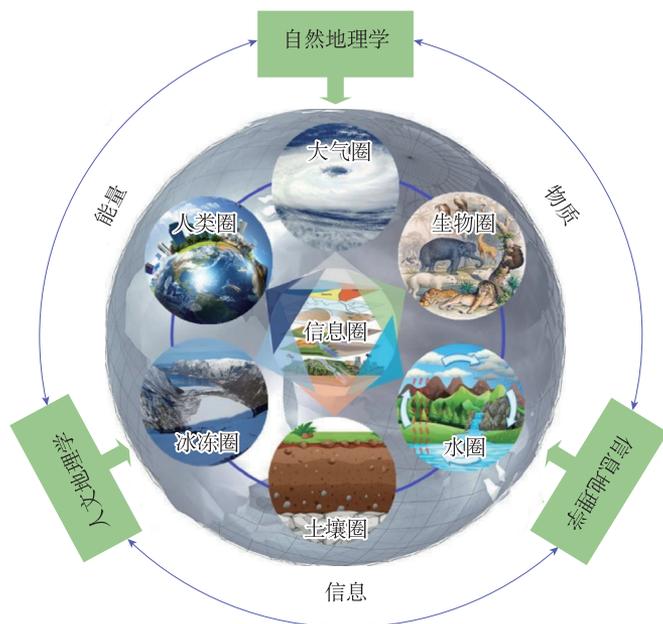


图 1-1 地理科学的研究对象——地球表层系统

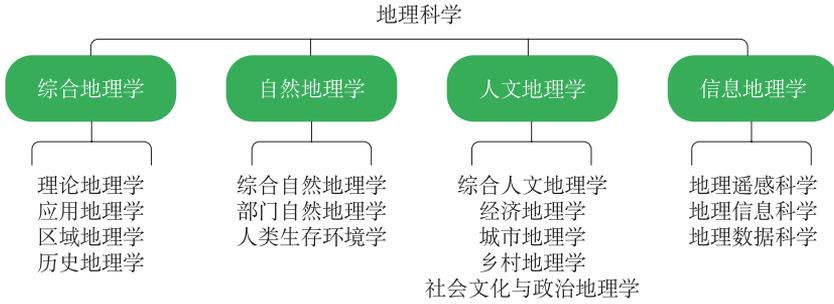


图 1-2 地理科学的学科体系

综合地理学是地理科学其他分支学科的支点。这是因为，综合性是地理科学存在的依据，是地理科学最大的特色，也是地理科学最大的困难，综合地研究地理环境是辩证认识地理环境形成与发展的根本途径（黄秉维，1960）。综合地理学主要包括理论地理学、应用地理学、区域地理学和历史地理学（图 1-2）。理论地理学的重新构建将为地理科学的整体发展提供系统的方法体系和理论支点。应用地理学以地理科学的方法和理论为指引，解决各类自然与人类社会经济发展息息相关的实际应用问题。区域地理学以区域地理考察为基础，服务各种地理区划和区域规划。历史地理学则以地理环境随时间的变易为核心，利用中国悠久且丰富的文献记载资料，在时空交织的体系下研究历史时期的人地关系及其地域分异。

自然地理学是研究地球表层自然环境的空间特征、演变过程及其地域分异规律的一门自然科学，以自然科学属性为主。自然地理学研究人类生存环境中的地球表层自然环境系统，或者称为自然地理环境系统，涵盖气候、地貌、水文、土壤、生物等自然地理要素。传统的自然地理学可以分为部门自然地理学和综合自然地理学（图 1-2），其中部门自然地理学开展以单一自然地理要素为主的研究，综合自然地理学研究景观、土地等自然地理综合体。近年来，针对沙漠和湖泊湿地等特定地表单元、冰川和冻土等特殊自然地理要素的研究，以及针对流域系统乃至整个地球表层系统的多要素或全要素研究得到了发展。此外，针对过去人与环境的相互作用，自然地理学还开展了史前人群扩散、社会发展和文明演化的人类生存环境研究，构成了自然地理学与考古学、人类学等交叉的新领域——人类生存环境学（图 1-2）。自然地理学是地理科学的基础学科，也是地理科学与地球科学其他学科联系的纽带

(陈发虎等, 2019; 蔡运龙等, 2009; 傅伯杰, 2018; 郑度等, 2015)。

人文地理学是研究人类活动的空间差异和空间组织以及人类利用自然环境的学科, 具有社会科学与自然科学交叉的属性。人文地理学以人地关系为研究核心(吴传钧, 1991), 以人类活动的地域空间分布规律为研究对象(樊杰, 2019), 形成了综合人文地理学、经济地理学、城市地理学、乡村地理学、社会文化与政治地理学等主要分支(图 1-2)。经济全球化与地方化、区域可持续发展、城市化与城乡统筹、土地利用和空间治理等是人文地理学的研究重点, 同时, 社会、文化、政治、制度等要素也是人地关系综合研究的命题(冷疏影等, 2016)。由于研究对象是人类活动, 而人类活动的分布规律是自然环境因素和社会文化经济因素共同作用的结果, 人文地理学就表现出两大独特的学科属性: 一是学科具有自然与人文学科综合交叉的属性, 在地球科学体系中, 是非常有限的研究地球圈层中人文与自然圈层相互作用的一门分支学科; 二是具有学术研究与决策应用耦合互动的属性, 是服务国土空间格局优化配置和城乡区域发展战略政策最直接的一门学科(陆大道, 2017; 中国科学技术协会, 2012)。

信息时代的到来极大地促进了地理科学的发展, 地理科学的研究已从传统的自然地理空间、人文地理空间拓展到了信息地理空间, 构成了地理科学的第三类研究对象。“天-空-地”一体化遥感立体观测、物联网和社会感知体系的建立与发展, 实现了对自然、人文各类要素信息的实时动态采集与接入。各类地理数据融合集成技术、地理系统集成模型与决策支持系统的发展, 使得对地球表层系统的理解以及现实世界中的各类决策, 都愈发依赖于信息空间中的综合分析模型和情景预估。虚拟现实、增强现实和数字孪生等技术的发展日渐模糊了物理世界和现实世界的界限, 实现了自然地理空间、人文社会空间和信息空间的多重互动。信息技术, 特别是遥感和地理信息技术强烈地驱动了地理科学的革新(National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, 2019), 但也出现了过度技术导向, 越来越与信息科学亲缘, 而疏离地理科学。因此, 亟须重新审视信息地理学, 强化以人类生存环境为研究对象的地理科学, 促进地理科学的科学化和现代化, 大力推动地理科学的整体发展。

信息地理学是以信息技术为主要手段, 研究地球表层系统中自然、人文、

地理信息要素的分布特征、空间分异、空间联系，以及地理空间数据、信息的采集、传输、表达、分析和应用的地理科学的分支学科。信息地理学是一门自然地理、人文地理与信息科学技术深度融合的新兴交叉的地理科学二级学科，主要包括地理遥感科学、地理信息科学和地理数据科学（图 1-2），具有很强的技术科学属性，已成为地理科学中独特和不可或缺的组成部分。这主要体现在：完善地理科学的学科体系，通过信息手段有机联系地理科学众多分支研究领域，深化地理科学各分支领域的定量化和科学化研究，实现地理科学从过去和现状的定量描述到对未来定量预测的转变；吸收和引进信息科学等相关学科和领域的最新进展，如大数据、人工智能、物联网等，提高数据和知识的综合与集成水平，为解决复杂地理科学问题，更加深入地理解和模拟地球表层系统提供关键手段；作为自然地理、人文地理与社会服务的媒介，将地理科学研究成果输出到其他领域，产生知识溢出，促进区域协调与人类可持续发展。

## 二、发展规律和研究特点

### （一）发展规律

#### 1. 人类发展和国家战略驱动地理科学顺势前行

全球发展战略和国家重大需求对地理科学发展的推动作用巨大。地理科学的根本任务是在认识地球表层系统自然、人文过程基本规律的基础上服务社会（宋长青等，2018）。未来地球计划等国际计划的推进对地理科学提出了新的挑战（Seitzinger et al., 2015）；国家战略方针的制订与贯彻也以熟知我国地理国情为前提（陆大道，2020）。新时期，随着联合国可持续发展目标的提出和《巴黎协定》的生效，中国需要履行更多的国际责任；同时，全球地缘政治结构发生变化，如逆全球化趋势和美国“亚太再平衡”战略等对我国贸易与“一带一路”建设产生很多不确定性影响。国内生态文明与美丽中国建设、新型城镇化、精准扶贫、国土空间规划等可持续发展战略也面临着一系列严峻挑战。这些国际、国内重大需求都需要地理科学的理论、方法和技术顺势发展，提供科学支撑。

### 2. 技术进步推动地理科学重大革新

技术进步不断拓展着地理科学研究的观测能力、时空范畴和研究手段,从而推动地理科学深入发展,带来更多令人振奋的科学发现。遥感、传感器技术、高性能计算、实验技术(如分子生物学和测年技术)的进步,正在迅速提高我们探寻地球表层系统的能力(National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, 2020)。定位自动观测技术、遥感技术和网络技术的迅速发展,使得地理科学的研究数据呈指数增长,为开展地理系统研究、地理复杂特征研究提供了丰富的数据基础,为揭示地理区域综合本质特征提供了可能(宋长青等, 2020)。计算机模拟越来越快速、准确地表征地球表层系统的多尺度复杂性。物联网技术与自动观测技术的结合能快速、实时地收集地理要素的观测数据,带动地理科学进入大数据时代。大数据正在为地理科学创造新的机遇,对方法论和思维模式的创新产生革命性的影响(Guo et al., 2016; National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, 2019)。深度学习和人工智能等数据驱动的大数据方法可能会具备比传统物理模型更强的预报能力,极有可能在大数据时代调和模型和观测中扮演重要角色,为破译复杂的地理系统提供新的途径。

### 3. 自由探索推动地理科学创新发展

地理科学学者在好奇心驱动下的自由探索对地理科学的推动作用也尤为重要。在地理科学发展史上,此类例子不胜枚举。例如,我国科学家提出的“水-土-气-生-人”“综合集成研讨厅”等影响深远的概念,国际上近年来出现的行星边界、远程耦合、计算社会学等,都是自由探索的结果。基础科学难题的突破,除了依靠国家需求牵引和技术推动以外,科学家个人或小队历经多年的自由探索,也是地理科学前行的重要引擎。

## (二) 研究特点

### 1. 兼具自然科学、社会科学和技术科学属性是地理科学的学科特性

地理科学研究的“人-地”双重对象,决定了它既不是自然科学向社会科学边界的简单扩张,又不是社会科学对自然科学方法论的简单依赖,而是自然科学和社会科学共同面对人地复杂系统的深度融合。地理科学兼用自然

科学和社会科学的研究方法，并行地研究自然和社会系统。在未来地球计划等研究计划中，地理科学的这种角色更加突出，即以系统科学思维和可持续性为导向，注重自然与人文要素的相互耦合和作用。

地理科学是一个集基础理论 - 技术科学 - 应用技术为一体的完整体系。近年来，地理科学在研究方法和实践应用等领域中技术倾向趋于强化。地理科学与计算科学和信息科学交叉融合，协同解析人地系统的复杂问题，从而推动了信息地理学的诞生和发展，使地理科学具备了技术科学属性。大数据和人工智能分析等新技术为进一步全面、准确、实时、全域地感知和认知地理科学问题提供了新的机遇。地理科学的实践应用也从战略策略、规划编制、决策建议向行业技术标准、地理工程技术等发展（李吉均，1995）。

### 2. 综合集成的地球表层系统科学是地理科学的研究特性

地理科学是研究地球表层系统的科学。地球表层系统科学研究的重点是各圈层、各要素以及自然和人文现象之间的相互作用关系，地球表层系统概念的提出标志着地理科学向综合集成方向发展。地理科学在研究地球表层系统过程中，把与人类密切相关的水圈、土壤圈、大气圈、生物圈和人类本身作为有机联系的综合系统，进而综合地解决全球和区域性的资源环境问题。

面向地球表层系统科学研究，地理科学已逐渐形成了以整体观为统领，兼顾硬集成和软集成，既考虑自然系统又考虑“人”的方法体系。“从定性到定量的综合集成方法论”及其具体操作方法“综合集成研讨厅”（钱学森等，1990）是对地球表层系统复杂非结构化问题的解决方案。尤其是对于与“人”密切相关的行为、活动、影响、社会机理等的定性和定量研究，使得地理科学在地球表层系统科学研究中具备其他地球学科所不具备的独特优势。

### 3. 复杂性是地理科学的新焦点

地理科学对于“人地”关系的认知正在从系统性向复杂性发展。地理科学的复杂性集中体现在地球表层系统的多个方面：首先表现为空间尺度多样，从个人、家庭、社区、城市、城市群，到区域，最后到全球。其次表现为涉及要素多，以及它们之间复杂的相互作用关系，“水 - 土 - 气 - 生 - 人”（程国栋等，2014）只是一个高度概括，但每一个要素中都包含了大量具体要素，它们之间以及和系统外的相关要素之间相互作用，而人类活动更增加了其复