



前言

在探索自然奥秘与推动人类社会进步的历程中，科学技术始终是驱动发展的不竭动力。人的一生可以说是不断实践的过程，也是探索知识的过程，更是认知世界的过程。每一个人的一生充满了对自然、社会、历史、文化的不同兴趣，到后来可能都成为各自难以割舍的情愫，融合为生命历程的一部分。

人们对任何事物的兴趣必然受到诸多因素的影响，无论是哲学家、科学家、艺术家、工程专家……还是普通人，可能都不例外；并且人们在不同的阶段，往往也都有着不同的兴趣与追求。2022 年是史蒂芬·霍金诞辰 80 周年，他的物理学贡献似乎已经成为人们的共识，甚至有些人认为他是自柏拉图以来最伟大的思想家之一，甚至将霍金的物理学成就与爱因斯坦的相提并论。霍金的代表作《时间简史》广为人知，而他最重要的贡献似乎是 20 世纪 80 年代对宇宙量子起源的研究——宇宙无边界假设。据说这个理论非常深奥，以至于霍金曾给数百位物理学家演讲，但这些物理学家迷惘地认为没有多少人能够听得懂这个理论。40 年前，我曾阅读过鄂华著的反映世界著名科学家故事的《盗火者的足迹——世界著名科学家的故事》，作者所描述的“阿尔切特里林中小屋（伽利略）”“让那燕子归来（玛丽·居里）”“弯曲的球面（小玛尔达、爱因斯坦）”“虹（弗兰西斯·培根）”“亚诺河之舟（伽利略）”“阿尔卑斯的火焰（爱因斯坦）”“生命的珊瑚（达尔文）”以及“走向命运的星辰（布鲁诺）”，无不给人以心灵的震撼与启迪。书中描写了爱因斯坦与居里夫人在阿尔卑斯山的对话，那时世人难以理解与想象的相对论是只有他们彼此才能够真实体会的科学语言，那场景似乎还呈现在我的脑海里。列奥纳多·达·芬奇是意大利文艺复兴时期的画家、科学家、发明家，现代学者称他为“文艺复兴时期最完美的代表”，他在绘画领域的杰作《蒙娜丽莎》和《最后的晚餐》等为世人皆知；他还擅长雕塑、发明、建筑，通晓数学、生物学、物理学、天文学、地质学等学科。作为传奇式的人物，他在诸多领域的成就同样也为人们所称道。鲁迅是人们熟知的文学家、思想

家，其实他还是设计师及美术家。他弃医从文众人皆知，而对于他从南京矿路学堂求学开始，初次接触西方的现代自然科学，“才知道世界上还有所谓格致、算学、地理、历史、绘画和体操”，以及“走异路，逃异地，求新知”的人生历程，在当代人群中了解者就少了许多。著名地质学家黄汲清先生曾评价鲁迅是“第一位撰写讲解中国地质文章的学者，《中国地质略论》和《中国矿产志》是中国地质工作史中开天辟地的第一章”。由于笔者研究生阶段，更多地学习了地质学，对此才略有了解。在中国家喻户晓的《十万个为什么》，自从1961年出版以来，就被公认为科学普及的经典之作。叶永烈先生参加了第1版至第6版的写作，前后长达半个世纪，也成了他的成名作与代表作。他曾先后创作科幻小说、科学童话、科学小品、科普读物700多万字，后来转向纪实文学创作，出版有6卷本《叶永烈自选集》，涉猎领域极其广泛。伟大的哲学家、思想家、革命家弗里德里希·恩格斯所著《欧根·杜林先生在科学中实行的变革》（*Herr Eugen Dühring's Revolution in Science*，即中译本《反杜林论》），清晰地表达了马克思主义的基本原理，首次全方位地阐明了马克思主义的特点，使马克思主义的世界观和方法论深入人心，为马克思主义理论在世界范围内的广泛传播做出了重要贡献。笔者从中学开始至少系统地读过该书三遍，时至今日依然对于书中所论及的哲学观点、科学思想、社会理念有着极大的兴趣，以至于笔者多次在大学的讲坛上引用恩格斯批判杜林的一句话——“如果杜林先生不承认 $\sqrt{-1}$ 的意义，那我也就无话可说了”，以此来启示学生的创新理念与逻辑思维，并力图激发学生的探索精神。路德维希·凡·贝多芬是大家熟悉的欧洲古典主义时期作曲家，维也纳古典乐派代表人物之一。他一生历经坎坷与磨难，但对音乐的天赋与执着，使他创作的数量众多的音乐作品具有恢宏气势与强烈感染力，并将古典主义音乐推向高峰。贝多芬一生创作的体裁十分广泛，无论是在器乐领域，交响曲、管弦乐曲和戏剧配乐、钢琴协奏曲、小提琴协奏曲、重奏曲、钢琴奏鸣曲，以及小提琴与大提琴奏鸣曲、变奏曲等，还是在声乐领域，歌剧、清唱剧、弥撒、合唱幻想曲和艺术歌曲均有涉猎。时至今日，人们仍然迷恋他的神奇音乐，诸如声乐套曲《致远方的爱人》（*An die ferne Geliebte*）等。他对古典音乐的重大贡献，对奏鸣曲式和交响乐套曲结构的发展和创新，成就了他“乐圣”与“交响乐之王”的殊荣。纵观历史长河，一个人只有把自己的命运与时代紧密地联系在一起，以极大的自制力与坚韧性不断地超越自我，才可能在自己热衷的领域有所建树。艾萨克·牛顿是英国著名的物理学家、数学家，也是百科全书式的人物，著有《自然哲学的数学原理》。他对于物理学的贡献世人皆知，在美国学者麦克·哈特所著的《影响人类历史进程的100名人排行榜》（1978年首版）中，牛顿仅次于穆罕默德，名列第二位。牛顿对人类进步做出了巨大的贡献，但他也不能不受时代的局限，把那些暂时无法解释的自然现象归结为上帝的安排，似乎使自己蹈向了唯心主义的覆辙。法国知名艺术批评家、史学家，被称为“批评家心目中的拿破仑”的H.A. 丹纳，在其所著的《艺

术哲学》(中文版为傅雷所译)中,系统地诠释了艺术的本质及其产生,剖析了意大利文艺复兴时期绘画的全貌,解读了艺术与哲学的深刻关系,提出了从种族、环境、时代三个原则出发,认识物质文明与精神文明的理论构架,从思想感情、道德宗教、政治法律、风俗人情等方面,阐述了绘画艺术所表征的社会表面现象,为从哲学意义上认识社会的基本动力在于生产力与生产关系提供了启示。这些也是他在欧洲学术界的影响至今还未消失的重要因素。基于类似的思维方式,我们所开展的研究工作,如果把哲学思辨理念与探索精神融合其中,则能从更高层面解析科学的本真,理解科学规律,延展科学哲学的内涵。《周易》是中国传统思想文化中自然哲学与人文实践的理论根源,揭示先民对自然、社会、事物的独特认知,是古代中华民族思想智慧的结晶,对中国数千年来的政治、经济、文化等领域都产生了极其深刻的影响。孔子深得《易经》之道,先秦时期百家争鸣,所有学派不同程度地受到了《易经》影响。宋代哲学家,如邵雍、周敦颐、张载、程颢、朱熹等人对易经也都有很深的造诣。毛泽东曾讲:“中国古人讲,‘一阴一阳之谓道’,这是古代的两点论。”爱因斯坦、李约瑟、黑格尔等对易经也给予了极高的评价,认为《周易》代表了中国人的智慧。当今快速发展的量子科学,似乎在更深的层次探索复杂世界的奥秘,有人认为《周易》的某种理念与目前人们探究未知事物的思想似乎也间接地具有共通性。中央电视台推出的大型文化类节目《典籍里的中国》,通过时空对话的创新形式,讲述典籍在五千年历史长河中源起、流转及传承故事。其中一期有关《周易》的节目,诠释了历代思想家、科学家、哲学家对《周易》这一文化瑰宝传承所作出的不朽功勋,也成为我们奋进新时代、树立文化自信的重要源泉,对于当代辩证思维与科学研究也具有无限的滋养与启示。魔术可以讲是一种幻觉、戏法和精妙的骗术组合。魔术是超脱常识的现象,是把在常识下即能做到的事情,用另一种非常识的方式使其发生,并再现奇迹的行为。在探究未知的道路上,人人似曾有过相同的梦想,那就是要像魔术师那样博学多艺,把奥秘与神奇永远留给观众。而作为魔术师,则要大胆探索、独辟蹊径。除了创新思维之外,各类知识的积累、逻辑技巧的应用、科学理念的把握、日常习惯的审视以及对人们观感的挑战,都是魔术师需要修炼的。大卫·巴格拉斯国际魔术奖(The David Berglas International Magic Award)是国际魔术界最高奖项,刘谦是亚洲首位获此殊荣的魔术师。有人曾评论刘谦对空间、几何、时间和运动的独到理解,是他与其他魔术师之间的真正差异,而这一切来源于他对于魔术魅力的无限热爱以及不懈地求新求变。4月25日是“世界防治疟疾日”,2022年是发现青蒿素50周年,中国国家主席习近平向青蒿素问世50周年暨助力共建人类卫生健康共同体国际论坛致贺信。通向诺贝尔奖的科学之路从来就不是平坦的,以屠呦呦为代表的中国科学家,开展了一系列艰辛的探索,首先发现并成功提取的特效抗疟药,帮助中国完全消除了疟疾,也向全球积极推广应用青蒿素,挽救了全球特别是发展中国家数百万人的生命,为全球疟疾防治、

佑护人类健康做出了重要贡献。人类探索宇宙的脚步从来就没有停歇过，无论是苏联研发的人类第一颗人造地球卫星，还是实现人类首次登月的美国阿波罗 11 号飞船；无论是人类探索火星的壮举，还是人类探索土星的神奇；从加加林第一次进入太空，到后续的空间站，再到埃隆·马斯克的 SpaceX，人类每一次都把触角伸向更神秘、更遥远的地方。研究表明，以人类目前的最高科学技术观测距地最远的距离大概是 920 亿光年，而这个观测范围相对于整个宇宙来说也许还有相当大的差距。中国航天也宛若人类探索星辰大海历程中的一颗崭新而明亮的新星，人类认知的发展从未脱离过对科学技术的无畏追求。量子纠缠（quantum entanglement）是一种纯粹发生于量子系统的现象，这个在 20 世纪初就被科学家提出的观点，在 21 世纪的今天似乎备受关注；2022 年 10 月 4 日，诺贝尔奖委员会公布了年度物理学奖获得者阿兰·阿斯佩、约翰·克劳泽和安东·塞林格，以表彰他们在“纠缠光子实验、确立对贝尔不等式的违反和开创性的量子信息科学”方面的成就，“这些开创性实验不仅确认了量子力学是正确的，还开启了第二次量子革命”。量子力学相关领域观点被理论与实践逐渐证实，预示着人类对于宇宙的认识也可能将发生根本性的改变。2023 年 9 月 2 日，“千名院士·千场科普”首场报告会在中国科学院学术会堂举行，天文学家武向平院士系统地介绍了“宇宙从何而来，宇宙向何处去，谁在主宰宇宙”等重大问题，强调了“自然科学理论体系正在经历百年之大变局”。笔者在线聆听了武院士的报告，感触颇深。无独有偶，在电视上观看了中国科学院原院长白春礼院士在“中国经济大讲堂”节目所做的关于“国之重器为社会带来的价值”报告，他强调大科学装置对科学探索的重大贡献，使笔者对于目前人类在太空领域所关注的“两暗一黑三起源”问题有了更浓厚的兴趣，也对自己的宇宙观与科学及哲学思维有了更深的启示。科学的发展历来需要不断创新，对于未知世界的认识历来是需要探索精神的，需要在不断地追求之中提升思维，完善认知。而一个人的努力往往是有限的，一批人、一代人的坚守与执着，才可能起到承前启后、继往开来的作用，才可能完成一代又一代人的夙愿！

在当前世界百年未有之大变局背景下，迈向新征程，需要科学理念与开拓精神。追求科学，探索未知，要尊崇伦理观念，也需要道德的力量。人类切勿把自己凌驾于自然之上，人类在宇宙中可能只是微不足道的一分子而已。开启新征程，奋进新时代，新发展理念无疑是促进我们前进的动力。“互联网+”“AI+”……已经蕴含在当代科技发展与人们的思维方式中，远远超越了人类个体知识体系、意识与想象能力。在万物互联的时代，有人认为 AI 是产品的“灵魂”，特别是万物被链接，计算可以互动和赋予情感，人类与 AI 的差距会越来越大；“能源+计算=硅基生物体”，最终，硅基文明将能源和计算合为一体，驱动人类向更高层级进化。科技创新比以往任何时候都显得迫切与重要，但道德及伦理在科技进步的今天也显得异常重要。中国发布的全球发展倡议、全球安全倡

议、全球文明倡议，是构建人类命运共同体的中国智慧，对于个人及群体理念的引导与提升具有重要意义。人的一生是短暂的，在有限的生命里，能够做一些感兴趣的事情，并能有益于社会，那是普通人的追求。无论是幼年时曾读过的《宇宙的秘密》，还是《盗火者的足迹——世界著名科学家的故事》，或是受父亲书桌上的曲艺、中医学及各类典籍滋养，母亲绘画与剪纸技艺的启蒙，笔者在儿童时期也曾激发过自己对于绘画、书法、音乐、篆刻的浓厚兴趣，这种兴趣在一定程度上而言来自父母亲的爱好以及他们专长的烙印，遗憾的是笔者在上述方面至今没有一丝成就。即使如此，心灵深处似乎仍然还留存着一些印记，仿佛在诉说着难以回归的过往。笔者在 20 年前出版的第一部学术专著《地理信息科学的理论与方法》，其后出版的《遥感与 GIS 的理论与实践》《生态系统耦合的原理与方法》，以及纪传体文学作品《岁月如梭》中也曾多次提及过上述情感。对于专业知识与技能的学习，更多是笔者在 20 世纪 80 年代初期进入高等学校学习之后，特别是在其后实践中的学习与合作研究中的提升。笔者在诸多领域都曾有过不同的兴趣，不同程度地受到研究工作的影响与国内外科技发展的启迪。笔者在本科生、硕士研究生、博士研究生学习阶段的专业分别为林学、矿产资源与勘探以及森林经济学，但在科学研究中逐渐地对生态学、地理学、环境科学、信息科学，甚至自然辩证法与哲学等领域也发生了浓厚的兴趣，形成了对不同学科的感悟，并不断激发自己去思考与探索。实践是获取知识的不断源泉，也是人生最好的导师，只有实践才能获得真知。在全球变化的区域响应研究方面，基于气候变化情景，探索了全球变化背景下的区域可持续发展模式，凝练了认识全球变化及其区域响应的创新思路及应对策略。在生态系统耦合关系研究方面，提出了干旱区山地-绿洲-荒漠生态系统（mountain-oasis-desert system, MODS）耦合原理、机制与模式。在生态资产评估研究方面，完善了生态资产评价的原理与方法，定量估算了干旱区城市生态资产的价值，提出城市环境危机管理的模式；同时，分析了生态补偿的内涵、特征、标准、主体、原则以及生态补偿的机制与模式。在生态脆弱性研究方面，首次构建了生态脆弱性指数（ecological fragility index, EFI）方法体系及评价标准，凝练出了基于地理信息系统（geographical information system, GIS）的生态环境演变概念模型；并研究了流域生态需水等问题，建立了人工增雨环境效应评价指标体系。在地理信息科学研究方面，丰富了地理信息科学的基本概念、学科地位、科学体系，阐明了地理信息的获取、处理、分析、管理与更新的方法及途径。在生态信息科学研究方面，完善了生态信息科学的学科框架、原理与方法，探索了生态信息分类、表达方法及尺度效应等问题，提出了构建环境物联网（environmental internet of things, EIOT）维护生态安全的理念与作用。在景观格局与生态过程研究方面，重点研究了现代绿洲景观格局与景观地球化学循环、绿洲景观格局的虚拟实现、景观规划及土地整理等问题，揭示了景观格局与生态过程的耦合关系。在生态规划研究方面，重点探索了低碳生态规划、

景观生态规划以及城镇生态文明建设规划模式与方法。在生态工程的生态效应研究方面，重点研究了多层次人工植被防护体系的生态效应、二氧化碳减排林（carbon dioxide reduction forest, CDRF）的环境效应、飞播林的生态资产评估等，揭示了基于低碳理念的资源开发与环境保护模式。在数字制图及信息系统研究方面，探索了地理信息图谱（geographical information tupu, GITP）内涵，倡导 EIOT 等新概念，以及大数据、云计算、卫星导航及位置服务等信息技术，建立了生态安全评价的理论基础与指标体系，以及景观合理性识别系统、林业碳汇管理系统等。在环境信息科学研究领域，探索了环境信息科学的理论、方法与技术，特别是研究了环境信息的监测与评估技术、表达与重建技术，研发了环境监测及应急响应系统，针对大气污染特征及预警预报、宜居健康生态气象监测与评估等问题，研究了环境信息分类、环境遥感监测、环境物联网、环境信息可视化、环境数据挖掘、环境信息图谱、环境信息管理等理念、方法与技术，拓展了环境信息机理、模拟和智慧环保与“互联网+”应用研究。在碳减排机理及策略领域，在探讨水土、水盐、水碳耦合关系的基础上，重点从植被水分利用、土壤水分变化、水碳足迹、生态系统 C 循环和 N 循环、生态系统净初级生产力（net primary productivity, NPP）等方面，基于全球变化情景模式，阐述了 CDRF 稳定性特征与机制。相关研究得到数十项科研项目支持，包括了国家重点基础研究发展计划（973 计划）、国家科技支撑计划、国际科技合作重点项目计划等。近期开展的国家重点研发计划项目“典型脆弱生态修复与保护研究”重点专项“祁连山自然保护区生态环境评估、预警与监控关键技术研究”课题“祁连山自然保护区生态环境变化预测预警”（2019YFC0507403），以及被 UNEP、FAO 等组织评选的首批十大“世界生态恢复十年旗舰项目”中的“中国山水工程”的子项目“新疆塔里木河重要源流区（阿克苏河流域）山水林田湖草沙一体化保护和修复工程”（AKSSXXM2022620），为本书创新集成提供了重要研究基础。相关项目研究过程中，有一系列专家学者、同行、同事及学生们的共同参与，谨此表示衷心感谢。梳理几十年的研究工作，笔者感兴趣的热点方向不少，虽然有些进展，但受到多种因素的影响，不尽如人意的地方仍然不少。科技发展的确是日新月异，速度之快超越了个人的想象。正因如此，需要系统地梳理凝练科研之路，不断地激发科研情愫，催促自己始终与时代同行，并更好地深化对客观世界的认识。如果研学道路与科学探索历程对同行或后来者有一点借鉴，那正是笔者的初衷。

全书正文各章节自成体系，各章节直接或间接地具有一定的关联性。首先，各章的第 1 节为研究背景，主要从学科内涵、特点、分类以及创新方向等方面进行了简要阐述；其次，依托作者已出版专著成果的框架体系（专著封面及目录纲要）及核心内容（框 A），进行了延伸及拓展；再次，由于各个学科特点不同，研究的深度亦有差异，主要内容反映了各主题研究的总体特色及一般规律，有文字、图表等表达方式，部分体现在框 B 中。

需要说明的是，在本书第3篇中，作者曾搜集了合作者及同行共同参与研究及科教活动的大量珍贵照片，反映了作者本书主题——生态环境与地理信息领域的发展、融合与探索的足迹，佐证了思想交融、科学传承、合作研究、创新协同的一系列客观实践及重大事件，遗憾的是未能最终全部体现在书中。笔者重视各类法律法规的贯彻，既曾是科研道德规范、知识产权以及安全保密等方面的管理者，也是践行者。但在科学研究及教育相关领域，无限泛化各种所谓权利的情况，直接制约了科教活动的表现形式与传播途径，失去了拍摄照片的真正价值与初衷，使本来可以生动活泼的表达形式显得暗淡而单调。另外，初稿中涉及诸多遥感影像或图形图像的表达，考虑审图问题，一概进行了调整。文末的参考文献大量选用与作者直接或间接接触过的中国科学院院士和中国工程院院士及其团队的研究成果，在作者多年的研究中曾多次获得过他们的真诚帮助与思想启示，本书力图体现研究工作的代表性以及相关研究方向的创新性，借此也对相关院士及其团队表示衷心感谢！

在认识客观事物的过程中，人们对所获得的知识体系有着不同的分类。学习者或研究者基于自身的兴趣爱好或者机遇缘分，选择若干门类进行探索。学科主要指的是一个科学共同体系，也是科学、知识及创造的分类，主要是面向硕士研究生及博士研究生培养的。2022年，国务院学位委员会、教育部印发通知，发布《研究生教育学科专业目录（2022年）》和《研究生教育学科专业目录管理办法》，新版目录有14个门类，共有一级学科117个。专业是在学科的基础上，对科学研究获取的知识进行体系化分类，面向高等学校学生进行知识传授，它主要是面向本科生培养的。学科和专业的分类体系和名称略有差异，存在一定的对应关系，但并不是一一对应的。基于上述原则，本书涉及学科及专业的不同领域，但更多从学科的角度，梳理与总结了过去40年来笔者对相关领域的学习、实践、研究及应用等方面的认知。尽管笔者对相关领域有着极大的兴趣，但时间精力的局限性以及理念方法的局限性，对许多方面的认识也必然存在一定的局限性。我们正处于科技快速发展的新时代，科技发展日新月异，新思想、新方法层出不穷，为认识与探索未知领域提供了崭新途径。新发展理念促进新时代的全面发展，知识交叉融合已成为新时代科技发展的基础，人工智能、大数据、云计算、物联网、区块链、元宇宙、数字孪生……新概念日新月异，层出不穷；伴随着科技进步，人类的智慧也在不断地开拓与发展之中；相信人类的智慧在不断探索中会得以更快地创新与跨越，并不断地推动着人类文明的进步。

2020年初，世界范围内COVID-19严重肆虐，至2023年初仍有200多个国家和地区受到病毒影响，给人类的可持续发展带来了严重挑战。重新审视人类的发展理念，可以发现遵从生态伦理，深刻体会人类命运共同体理念，比任何时候都更有现实意义。我们必须以守望地球的情怀，遵循自然规律，团结协作，科学应对当前以及未来地球系统

发生的一切问题，为共筑人类美好未来不懈努力！

“加快建设科技强国是全面建设社会主义现代化国家、全面推进中华民族伟大复兴的战略支撑”，“实现高水平科技自立自强，是中国式现代化建设的关键”，“加快实现高水平科技自立自强，是推动高质量发展的必由之路”，科技创新与自立自强永远在路上。2023 年是笔者进入高等院校学习工作的整整 40 周年，也是自己的花甲之年，回顾往昔，岁月如歌；展望未来，梦想犹在！愿生命的航船在波涛中不断向前，愿人生的历程在奋进中持续延伸。

在本书付梓之际，对所有同仁致以诚挚谢意！

谨以此书献给培养我的母校，以及工作的中国科学院和南京信息工程大学！

谨献给养育我的父母王珞先生及雷莲珠女士！

谨献给与我一路同行的师长、同行及学生们！

谨以纪念逝去的青春过往与岁月流年！

王让会

2023 年秋

目 录

前言

第 1 篇 科 学 研 究

第 1 章 生态学研究	3
1.1 生态学研究背景	3
1.2 生态系统生态学	4
1.3 景观生态学	18
1.4 生态规划学	25
1.5 生态工程学	28
第 2 章 环境科学研究	31
2.1 环境科学研究背景	31
2.2 环境危机管理	34
第 3 章 地理学研究	39
3.1 地理学研究背景	39
3.2 全球变化与区域响应	40
3.3 气候变化的评估研究	43

第 4 章	信息科学研究	46
4.1	信息科学研究背景	46
4.2	地理信息科学	47
4.3	生态信息科学	52
4.4	环境信息科学	56

第 2 篇 融合 发展

第 5 章	交叉学科研究	65
5.1	交叉学科研究背景	65
5.2	生态水文与区域地理	67
5.3	低碳发展与生态安全	81
5.4	资源环境效应与生态环境修复	87
5.5	绿洲体系建设与荒漠资源利用	90
第 6 章	技术领域研究	98
6.1	RS 技术与 GIS 技术	99
6.2	数字制图技术	112
6.3	生态环境技术	116
6.4	信息分析技术	139
6.5	信息管理技术	142

第 7 章 多学科综合研究	149
7.1 LUCC 及其功能研究	149
7.2 BGC 过程研究	152
7.3 再生资源遥感研究	155
7.4 环境及灾害评价研究	157
7.5 生态补偿研究	169
7.6 生态产品及 ECP 研究	173
7.7 GNSS 及北斗研究	177
7.8 碳排放足迹研究	179

第 3 篇 实践探索

第 8 章 科学考察	187
8.1 资源及生态考察	188
8.2 环境与地理考察	211
8.3 产业与发展考察	220
8.4 相关综合性考察	231

参考文献	251
附录 1：科教活动	260
附 1.1 重大科技活动	261
附 1.2 人才培养	268
附 1.3 学科建设	269
附 1.4 社会服务	269
附 1.5 国际合作	271
附 1.6 其他活动	273
附录 2：学术论文统计	278
附录 3：照片拍摄者	280
附录 4：学生名录	281
附录 5：作者介绍	282



第 *1* 篇

科 学 研 究

第 1 章

生态学研究

1.1 生态学研究背景

生态学（ecology）的学科体系非常庞大。传统的生态学是研究生物之间和生物与周围环境之间相互关系及其反馈机制的科学。按照研究层次、生物类群、生境类型、研究性质以及与其他学科的相关性，生态学有诸多不同的分类。一段时期生态学在中国曾被划分为生态科学、生态工程学与生态管理学三大门类。虽然不同的划分对于人们认识客观对象具有一定的影响，但生态学作为研究生物与生物、生物与环境之间相互关系及其反馈机制的内涵特征始终没有改变。随着理论研究的深化，生态学也被赋予了诸多新内涵。2018 年，作为一级学科的生态学正式发布其相关二级学科，包括了植物生态学、动物生态学、微生物生态学、生态系统生态学、景观生态学、修复生态学及可持续生态学七个二级学科。生态学二级学科的发布指导人们更加科学地理解生态现象与生态过程。生态学是一门研究宏观生命系统的结构、功能及其动态的科学，它为人类认识、保护和利用自然提供理论基础和解决方案，也是生态文明建设的重要科学基础。经过 150 多年的发展，生态学的科学内涵和社会需求已经发生了巨大变化。生态学不再仅限于生物学范畴内的研究，而是融合了地学、环境学、资源学乃至经济学、社会学等多个学科的知识 and 进展，成为一门独具理论体系，并具有广泛应用的综合交叉学科（方精云，2021）。此外，生态学学科分支还有按照其他角度的分类，特别是学科的交叉与融合，形成数量生态学、化学生态学、物理生态学以及生态哲学、生态美学、生态伦理学等，具有不同的研究侧重点与现实指导意义。现代生态学具有一系列特征，一方面，以

全球生态学和空间生态学为特征的宏观生态学发展迅速；另一方面，以分子生态学为特征的微观生态学发展也异常活跃（康乐，1996）。应对气候变化、生物多样性保护以及可持续发展成为生态学相关分支学科开展研究的重要内容，生态学的研究范围、研究方法等呈现多样化。在人类命运共同体这一全球价值观背景下，生态文化、生态伦理、生态产业等的发展在当代社会愈加迫切。2023年8月15日是中国第一个全国生态日，有专家认为生态学是生态文明建设（ecological civilization construction, ECC）的基础性学科，以生态系统为代表的自然环境为人类提供了生存与发展的条件与资源，“绿水青山就是金山银山”是人类对自然价值认识的精辟概括；全国生态日的设立是人类对当前全球性生态危机全面觉醒的标志，也是对人与自然和谐共生的呼唤。

至2023年，教育部已经组织开展了五轮学科评估。生态学进入“双一流建设学科”名单的高校，相关学科考核结果名列前茅。2017年12月，教育部公布了全国第四轮学科评估，该评估于2016年在95个一级学科范围内开展（不含军事学门类等16个学科），共有513个单位的7449个学科参评。根据第四轮学科评估结果，有11所高校的生态学入选了全国“双一流建设学科”。而全国第五轮学科评估在评估方式以及数据应用等方面更强调了内涵建设与社会认同度等方面的客观要求，评估结果未如之前那样向社会公布；强调学科评估不是静态的，而是动态变化的，引导高校全面开启新时代学科建设新局面。在新形势下，生态学学科正在生态环境保育、生物多样性维护（魏辅文等，2014）、和谐人地关系、实现低碳目标，以及促进区域发展等方面发挥着越来越大的作用。

1.2 生态系统生态学

1935年，英国植物生态学家 A.G.Tansley 提出具有划时代意义的生态系统（ecosystem）概念，强调生态与环境是功能上不可分割的统一的自然实体，认为生态系统是一个生态学上的功能单位。随着学科不断发展，生态系统作为生态系统生态学的核心，从不同的角度审视出发，会有不同的解读。群落学的发展使人们可以把生态系统理解为不同群落的组合。而系统论、控制论以及信息论“老三论”与耗散结构论、协同论与突变论“新三论”的发展，也启示人们可以把生态系统理解为远离平衡态的，开放的非线性耗散结构系统，这种解读显然更加复杂。生态系统生态学把系统论等学科思想与生态系统内涵特征相结合，研究生态系统结构与功能、物质循环、能量流动与信息传递问题，特别是研究以生物地化循环（biogeochemical cycle, BGC）为特征的各类生态过程及其演变机制，研究生态系统稳定性与生态系统服务功能，对于评价生态适宜性、脆弱性、安全性、健康状况、风险水平、发展潜力等具有重要理论价值与现实意义。而耦

合概念的引入,进一步深化了人们对生物与生物之间、生物与环境之间关系的认识,也是生态模型模拟研究的重要基础(Patterson, et al., 2020),有助于开展界面过程、交错带以及复杂过程的监测评估及预警研究工作。

随着生态学学科自身发展与国家生态环境高质量发展目标的需求变化,生态学与资源开发、环境保护以及经济发展密不可分(马世骏和王如松, 1984),并表现出了一系列新特点。进入21世纪,各类新理念以及新技术,如分子技术、稳定同位素技术、高通量野外观测技术、联网观测与控制实验技术,以及大数据技术相继出现,促进了生态学的新发展。生态学的研究思路、研究对象、研究方法、研究深度与广度等方面发生了一系列的变化,如理论研究系统化、应用研究实用化、研究对象复杂化、研究方法科学化、研究过程长期化、研究尺度多样化;再如,要素监测立体化、预测手段模型化、数据处理可视化、信息共享网络化(龚健雅等, 2009)。随着科学理念的深入,生态学将为城市规划、乡村建设、低碳环保、应对气候变化以及可持续发展提供重要理论支撑与科学方法。

在不同的生态系统中,生物与环境要素的耦合关系不同,生态过程特征各异,具有重要作用的反馈机制也不同。生态系统生态学表现出了重要的指导价值(方精云和刘玲莉, 2021)。一般而言,在生物生长过程中,个体越来越大;在种群增长的过程中,种群数量不断上升,这些属于正反馈。正反馈虽然是有机体生长、发育所必需的,但它不能维持系统的稳定状态。负反馈主要是指在受到外界影响或干扰后,生态系统通过一系列的自我调节功能,减轻这种干扰或影响的程度,并力图恢复到平衡或稳定状态的过程。因此,要使系统维持稳定状态,需要通过负反馈机制予以实现。由于在一般情况下,具有负反馈调节机制的生态系统自身会保持一种动态平衡。对于受损生态系统,通过一系列技术手段,在认识了受损特征、受损过程的情况下,人们就有可能遵循负反馈机制的思路与方法,在自然、社会、经济、科学技术条件允许的界限内,寻求维护生态系统稳定、优化生态系统结构、增强生态系统功能的策略。

从理论上而言,生态系统反馈机制的建立与熵的原理是分不开的。生态系统作为一个开放的系统,只要能够从外部环境得到足够的负熵流抵消内部的熵增,就将形成耗散结构系统,并朝着进化的方向发展。生态系统在受到自然及人为要素干扰后,发生了一系列退化现象,必须进行生态恢复和重建,使生态系统重新进入低熵状态。因此,在生态建设过程中,必须从引起这种变化的驱动要素入手,通过有效恢复和逐步发挥生态系统的反馈机制,实现生态系统良性循环。生态系统反馈机制是极其复杂的过程,它通过系统中生物与环境要素的相互作用而体现。生境状况的改善必然增强植被在生态系统中的地位和作用,伴随着物质循环和能量转换的信息传递过程就显得日益重要,反馈过程也就越为复杂。理论研究和客观实践表明,若要进行生态恢复与重建,就必须认识生态

系统的反馈作用过程，并对生态系统进行适时与适度的人为干预。从系统熵的角度而言，就是要降低系统熵值，增强系统有序程度。自然状态下，生态系统总是朝着种类多样化、结构复杂化和功能完善化的方向发展。生态系统的自我调节功能是有限度的，当自然或者人为干扰因素超过一定阈值时，生态系统的自我调节功能就会受到损害，从而引起生态失衡与稳定性减弱，生态系统的脆弱性明显增强。在热力学或信息论中，有一系列模式适用于对不同状态下系统中熵值及其变化模拟与估算，而在生态学领域尚缺乏这类模式。但这种思路对于研究生态过程及其反馈机制中的不确定性问题，具有重要的启示作用。在人类对生态系统的影响日益增强的现实情况下，通过科学合理地增强负反馈调节，使生态系统的自我保护能力增强，进而减轻人类活动对生态系统的干扰，这不失为维持生态系统稳定性的一个新思路。2024年8月15日是中国第二个全国生态日，大众学习生态、认识生态、保护生态、建设生态、提升生态的氛围更加浓厚。人们正坚持山水林田湖草沙生命共同体理念，积极投身建设“美丽中国”实践。相信在不远的将来关于“盖亚假设（Gaia hypothesis）”，也就是地球是一个“超级有机体”的理念也会被更多公众所认同。

1.2.1 生态系统耦合关系

生态系统尺度上，厘清生态要素之间的耦合关系、各类生态过程之间的耦合关系，以及不同生态功能之间的耦合关系，是认识生态系统耦合关系的核心（王让会和张慧芝，2005）。提升生态系统多样性、稳定性、持续性的科学需求为生态工作者开展生态系统结

构与功能、生态过程演变规律、生态系统保护和修复，以及推动以国家公园为主体的自然保护地体系建设、建立生态产品价值实现机制，提供了新理念与新思想（图 1-1，框 A1-1）。

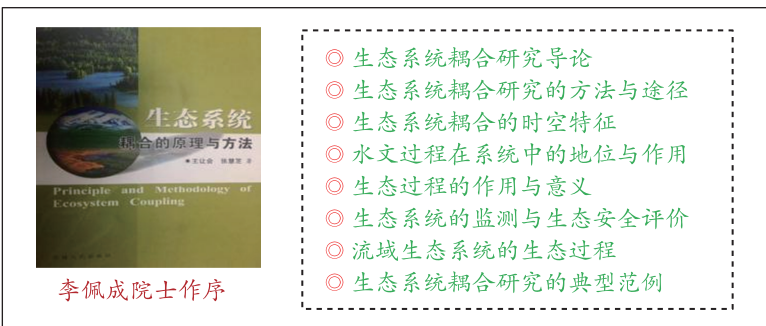


图 1-1 生态系统耦合的原理与方法

Fig.1-1 Principles and methodology of ecosystem coupling

框 A1-1

- ◆ 基于现代生态学的学科特点、研究现状与发展趋势，探索生态系统耦合研究的创新思路、重点内容、基本原理，阐述生态系统耦合的方法途径，分析生态系统耦合的时空特征，强调了水文过程及生物过程在耦合关系中的重要作用，揭示了流域生态过程及其要素耦合的特点，构建了生态系统耦合研究体系框架。
- ◆ 基于生态系统耦合关系的时空特征，通过分析生态系统的监测要素与关键问题，凝练生态系统安全的学术内涵及其 12 个特征，构建生态安全评价指标体系与评价模式，通过生态安全指数定量化地进行生态安全评价，揭示生态安全的理论内涵与现实特征。
- ◆ 生态系统耦合关系研究需要新理念与新方法的支撑，通过阐述生态系统耦合关系研究中生态信息获取、处理、分析、管理、更新与共享的理念与途径，以及生态制图方法、模型模拟方法、遥感（remote sensing, RS）、地理信息系统（geographical information system, GIS）、全球导航卫星系统（global navigation satellite system, GNSS）等技术方法，强调了遵循生态规律、强化生态伦理、倡导生态文明、维护生态安全对于资源环境和社会经济协调发展的重要作用，阐述了“数字流域”“生态产业”等热点问题，提出了生态安全评价与人地关系协调发展的一般模式。
- ◆ 从理论、方法、技术和应用等方面，系统地构建生态系统耦合研究的理论体系与方法体系，为全面地认识生态系统耦合研究的科学概念、学科地位与学科体系，提供有效支撑。

1.2.2 研究思路及其途径

干旱区山地-绿洲-荒漠系统（mountain oasis desert system, MODS）的耦合关系，可以通过系统之间以及要素之间的界面过程表现出来。系统界面上，物质、能量与信息分布特点、变化特征、作用方式与相互关系，直接制约着 MODS 的结构与功能。在 MODS 中，系统之间存在着多种界面，不同生态系统之间的交错带或过渡带就是重要的生态系统界面；而以土壤介质与大气介质为代表的相互作用界面，在生态系统耦合关系研究中具有重要的代表意义。土壤是一种具有复杂孔隙系统的自然体，孔隙被水和空气所充满，土-气界面具有重要的生态学意义。土-气界面上的水分通量向上传递表现为土壤水分的蒸发，向下则表现为水分的下渗（邵明安等，1987）。由于土-气界面相对比较简单，物理属性相对稳定，为人类防止土壤水分的过度消耗，提高水分利用效率，提供了可调控的对象与途径。

目前，界面调控的水热机制已经取得了不少研究成果，土壤中的水分受到各种力的作用，表现出不同的物理形态。同时，土壤的质地、结构、有机质，特别是土壤的地带性分布规律，影响着土壤一系列理化过程的进行，也必然影响着相关界面上所发生的生态过程。研究土壤中水、气、热、盐运移的规律，对于认识蒸发、蒸腾过程中能量转换及质量迁移的机理，提高水资源利用效率以及了解当地小气候效应，具有重要的理论价值和实践意义。在诸多复杂的生态过程中，水分迁移与热量传输是两个相互作用的过程，基于多孔介质中液态水黏性流动和水蒸气扩散的理论及热量平衡原理，是探索水热耦合关系背景下土壤水分迁移与热量传输的机理法，而基于不可逆过程热力学原理的热力学法在该过程研究中也具有重要作用。巢纪平和李耀钡（2010）开展了基于热力学和动力学耦合的二维能量平衡模式的荒漠化气候演变研究，一定程度上揭示了荒漠系统气候变化的复杂性。目前，利用数值模拟方法结合试验观测进行土壤水热迁移、土壤的蒸发散和降雨入渗、土壤冻融以及水盐运动（赖远明等，2001），成为水热耦合研究的一个重要方向，进行

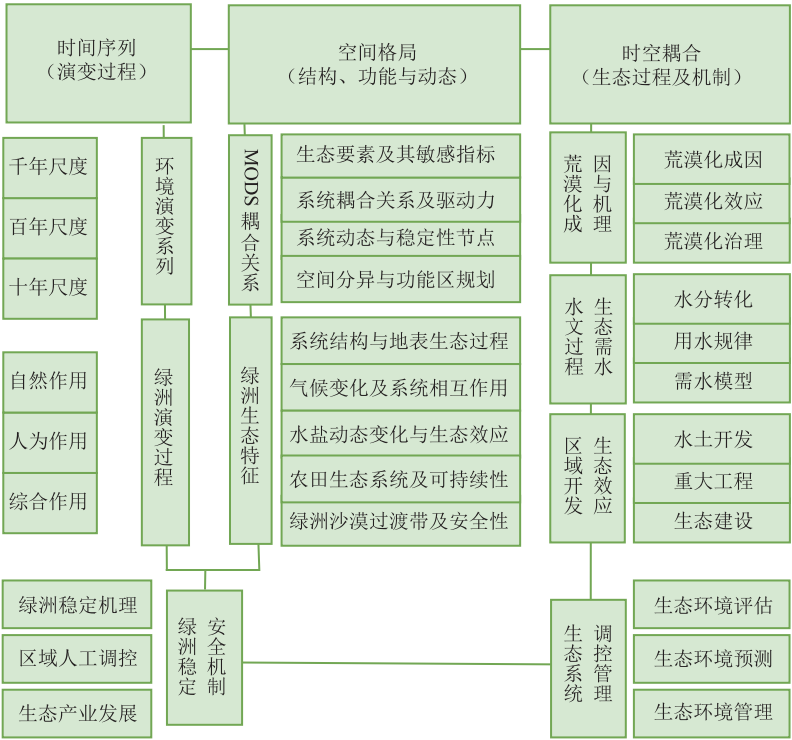


图 1-2 MODS 研究概念框架
Fig.1-2 Conceptual framework of MODS research

进行水热耦合研究也是界面过程研究的重要途径。MODS 中存在着多种界面，为了维护系统的稳定性与生态安全，提高系统的生产力，需要按照客观规律以及社会发展的需要，对系统进行调控。由于界面过程最富有生态学意义，应用生态学的反馈机制，探讨一定土地利用与覆盖条件下的调控模式与方法成为 MODS 耦合关系研究的落脚点。

1. 耦合关系研究的概念框架

MODS 耦合关系研究涉及诸多问题，需要从多角度、多尺度、多层次开展信息获取与分析，需要多学科融合与探索，并构建其理论方法体系，实现综合性研究（图 1-2）。

2. 耦合关系研究途径与模式

围绕不同时空尺度的生态环境演变特征，针对重大生态环境问题，应用复杂性科学理念与信息化手段，实现现状生态环境评价以及未来变化趋势的预测与管理。图 1-3 展示了 MODS 的研究途径与模式。

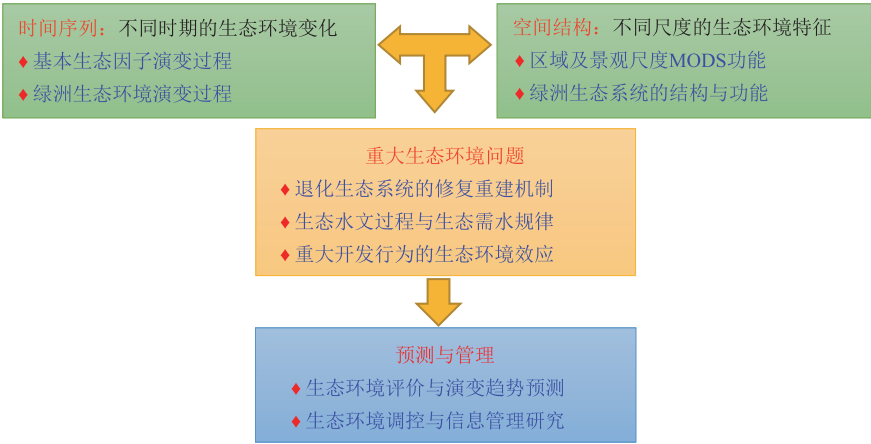


图 1-3 MODS 研究途径与模式

Fig.1-3 Research approaches and modes of MODS

1.2.3 耦合关系主要特征

全球变化对于干旱区资源环境的分布格局与时空变化造成了一定程度的影响，制约了土地利用与覆盖变化（land use and cover change, LUCC）的趋势与过程，并通过水热状况、景观带谱、气候效应、土地利用与人为活动表现出来，而上述特征又与 MODS 具有密切的耦合关系。人地关系与经济布局密切相关（吴传钧，2008）。在国家进一步加强黄河流域高质量发展的背景下，傅伯杰等（2021b）开展了黄河流域人地系统耦合机理与优化调控研究，对于引导深化耦合关系研究具有重要启示价值（框 B1-1）。

框 B1-1

☐ 深居内陆的地理区位	☐ 干旱型的大陆性气候
☐ 山盆相间的地貌格局	☐ 独特的三大生态系统
☐ 广泛发育的内陆流域	☐ 荒漠性的土壤及植被
☐ 复杂的生物地化过程	☐ 特色鲜明的景观外貌

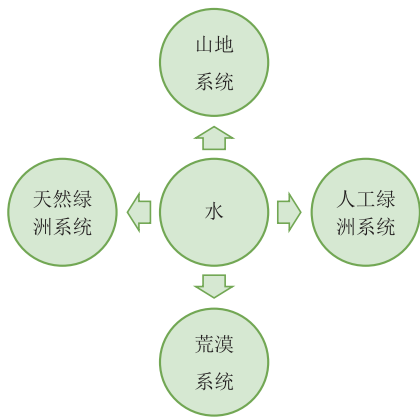


图 1-4 基于水要素的 MODS 耦合关系
Fig.1-4 MODS coupling relationship focused on water element

地貌特征与气候状况决定了耦合类型的基础框架，水文特征决定了耦合类型的空间格局，植被类型反映了耦合类型的宏观外貌，土壤状况制约了耦合类型的物质循环，人为活动影响了耦合类型的演变过程，图 1-4 展示了基于水要素的 MODS 耦合关系。山地系统是干旱区水资源的形成区，也是重要的矿质营养库和生物种质资源库；天然绿洲系统和人工绿洲系统是人类赖以生存，生产力相对较高的区域；荒漠系统则是干旱区面积广阔，环境相对恶劣的区域。维护 MODS 的生态安全是干旱区生态建设和经济发展的重要基础。图 1-5 展示了干旱区 MODS 的空间耦合关系。



图 1-5 干旱区 MODS 空间耦合关系
Fig.1-5 Spatial coupling of MODS in arid areas

自然及人为要素之间直接与间接的联系也必然反馈在区域综合性的生态响应方面。一些学者认为，中亚干旱区气候具有暖湿化的特征（陈发虎等，2023），与中国北方地区气候干旱化的趋势具有一定的差异性（符淙斌和马柱国，2008），这种响应制约了 MODS 的特征与规律。而系统的界面特征与界面过程，特别是水资源的形成、转化与消耗规律直接反映了干旱区 MODS 对全球变化的响应过程。MODS 的空间格局、动态变化、时空特点以及尺度转换与耦合模式问题，反映了系统之间及其内部的生态学机制。全球变化背景下，干旱区 MODS 耦合关系具有一系列特征及规律，水文状况影响生态系统的时空特征，制约系统中要素之间的耦合关系及其反馈机制。缺水是制约干旱区植被修复的主要因素，缺水限制自然植被的生长，影响生态的重建方式及效果。生态系统退化后，人们从环境对人类的反馈作用中逐渐地意识到了人与自然必须和谐相处；否则，人类就