

doi: 10.12097/gbc.2024.02.023

地球系统科学基本原理与应用展望

张万益¹, 杜璨¹, 胡雅璐¹, 刘江涛¹, 夏烨¹, 王丰翔², 黄宽², 史淳元²

ZHANG Wanyi¹, DU Can¹, HU Yalu¹, LIU Jiangtao¹, XIA Ye¹, WANG Fengxiang²,
HUANG Kuan², SHI Chunyuan²

1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

2. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031

1. Development and Research Centre, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. Hebei Geological University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China

摘要: 地球系统科学是一门应时代之需产生的科学, 它革新了地球科学工作者的思维方式、工作范式。自地球系统科学产生以来, 围绕其是否是一门科学、具有何种应用前景等一直存在争议。从地球系统科学的主要理论与基本原理视角出发, 对地球系统科学的概念内涵、理论体系及与地球科学之间的关系等本质特征进行剖析, 并对地球系统科学的方法技术进行了总结。针对解决的不同问题, 提出了地球系统科学在地球深部过程、岩石圈与外部圈层交互作用、外部圈层交互作用 3 个领域的应用展望。分析认为, 地球系统科学既是基于地球科学与系统论的科学观, 又是一套量化研究各圈层交互作用的先进工作方法体系, 是揭示地球圈层交互奥秘、解决地球宜居性的钥匙。

关键词: 地球系统科学; 地球科学; 源汇系统; 生态修复; 地球深部

中图分类号: P5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)08-1277-12

Zhang W Y, Du C, Hu Y L, Liu J T, Xia Y, Wang F X, Huang K, Shi C Y. Basic principles and application prospects of earth system science. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8): 1277-1288

Abstract: Earth system science is a science produced in response to the needs of The Times. It has revolutionized the way of thinking and working paradigm of earth geoscientists. Since its emergence, there have been controversies about whether it is a science and what potential applications it has. Using the method of literature review, this paper analyzed the essential characteristics of Earth system science, including its conceptual connotation, theoretical system, and relationship with geoscience, and summarized the methods and technologies of Earth system science. In view of the different problems to be solved, the paper puts forward the prospect of application of Earth system science in three fields: deep earth process, interactions between lithosphere and outer spheres, interaction between outer spheres. The analysis showed that the Earth system science is not only a natural science view based on geoscience and Systems theory, but also a set of advanced working method system to quantify the interactions of various Earth spheres, which is the key to reveal the mystery of the interactions of Earth spheres and solve the habitability of the earth.

Key words: Earth system science; geoscience; source-sink system; ecological restoration; deep earth

在过去 100 多年的时间里, 人类改造地球环境的能力随着科学技术的进步不断增强, 但地球的生态环境也随之不断恶化。一部分有先见的科学家意

识到地球“生病了”, 倡导科学家们要像医生一样长期监测研究地球的“病灶”, 及时提出“诊断方案”(Schellnhuber, 1999)。于是, 地球系统科学应运而

收稿日期: 2024-02-27; 修订日期: 2024-06-19

资助项目: 中国地质调查局项目《自然资源管理与现代地质工作战略研究》(编号: DD20230558)

作者简介: 张万益(1974-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事地球系统科学与地质调查规划研究、基础地质研究与地质找矿工作。

E-mail: wanyizhang0810@qq.com

生。随着人们对全球变化认识的日益加深,以及跨学科研究方法的迅速发展(Johnson et al., 2000),地球系统科学作为一门新的科学(周秀骥, 2004),在全球可持续发展中扮演了越来越重要的角色。地球系统科学的产生有着深厚的时代背景、强烈的现实需求和先进的科技支撑(NASA, 1986)。经历 40 多年的发展,地球系统科学已经从一个非常具有挑战性的概念,转变成了一门能够有效整合所有学科的强大新科学,成为 20 世纪科学界的最大成就,被誉为是人类科学史上的第二次哥白尼革命(Schellnhuber, 1999)。

关于地球系统科学是不是一门学科,学界众说纷纭。国外普遍认为,地球系统科学包括系统地质学(Merritts et al., 1998; Martin, 2016)和系统生态学(Wilkinson, 2006),是研究自然地理(Marsh et al., 2012)和气候科学(Cornell et al., 2012)的基础,尤其是将通常独立分析物质组成的传统学科联系起来,建立起对地球的完整认识(Steffen et al., 2020),以及人类社会对这些圈层的影响,是系统科学与地球科学的有机结合(Jacobson et al., 2000; Kump et al., 2009; Christiansen et al., 2014; Stanley et al., 2015)。中国科学家们虽然基于各自专业背景给出了不同版本的答案(叶笃正等, 1992; 陈述彭等, 1996; 毕思文, 1997, 1998a, b; 黄秉维等, 1999; 袁道先, 1999; 汪品先, 2003; 周秀骥, 2004; 刘东生, 2006),但对地球系统科学是将岩石圈、水圈、大气圈、生物圈作为研究对象,探寻物质和能量循环与相互作用这一观点认识基本一致(刘东生, 2002; 姚玉鹏等, 2005),并认为现有地球科学各分支学科都是地球系统科学的重要基础(周秀骥, 2004)。因此,地球系统科学首先是研究地球的科学。本文对地球系统科学的理论基础和研究方法进行系统剖析,以便人们更好地理解、应用地球系统科学。

1 地球系统科学的基本理论

地球系统科学以系统理论为统领,以地球科学及其分支学科、计算机科学等为重要支撑,聚焦地球系统的运行及人地关系耦合,在不同时代推出了系列理论,这些理论本身也体现了地球系统科学的不断完善过程。这些理论主要聚焦在地球表层的圈层交互作用,很少涉及岩石圈及地球内部的动力学过程。

1.1 系统论: 地球系统是一个由能量和物质交流连接的若干子系统组成的巨系统

1932 年,美籍奥地利理论生物学家路德维希·

冯·贝塔朗菲(Ludwig Von Bertalanffy)创立了系统论,并于 1937 年提出了一般系统论原理。该理论认为,任何系统不是各个部分的机械组合或简单相加,系统中各要素之间相互关联,构成了一个不可分割的整体(Bertalanffy et al., 1974)。系统中各要素不是孤立地存在着,每个要素在系统中都处于一定的位置上,起着特定的作用。

系统论是地球系统科学中研究解决具体问题的指导性理论。根据系统论,地球是一个复杂巨系统,包括岩石圈、水圈、大气圈和生物圈 4 个巨大的子系统。这四大子系统,同时也是 4 个巨大的相互依赖的能量和物质储库(Donner et al., 2009; Shi, 2014)。四大子系统又可划分为不同的三级子系统,以此类推。各系统时时刻刻在进行着能量和物质交换,彼此作用,相互关联。一个系统受到干扰时,就会造成其他系统的级联反应。在地球系统科学中,系统既是一个理念,又是一个研究单元。为了便于研究,针对不同的科学问题,可以将大的、复杂的问题分解成更小的、更容易研究的部分,即子系统,这种划分根据需要决定。子系统可大可小,可简单可复杂。如将水圈划分为海洋、冰川、河流、地下水等子系统(储库)。

1.2 盖娅假说: 地球系统具有天然的自我调节能力

支撑该观点的主要理论为盖娅假说(Gaia hypothesis),后来也被称为盖娅理论或盖娅原理。盖娅假说由化学家詹姆斯·洛夫洛克提出(Lovelock, 1979),并由微生物学家林恩·马古里斯共同推广。盖娅假说的科学研究聚焦在观察生物圈和生命演化如何影响全球温度、海洋盐度、大气中的氧气和其他影响宜居性的动态平衡等因素上,其核心思想认为地球是一个具有生命的超级有机体,地球上所有生物及其无机环境紧密结合,形成一个单一的、自我调节的复杂系统,进而维持地球上的生命(Lovelock, 1979; Pronk, 2002)。

盖娅假说的理论依据是: 自从地球上生命以来,太阳辐射强度增加了 25%~30%(Owen et al., 1979)。理论上,太阳辐射强度每增加或减少 10% 就足以引起全球海洋蒸发干涸或全部冻结成冰。但在地质历史上,地球上尽管发生过 3 次大的冰期和间冰期,地表的平均温度变化仅在 10℃ 上下,未出现大幅度的变化,表明地史上地球存在某种内部的自我调节机制。为了验证假说,詹姆斯·洛夫洛克开展

了一项著名的雏菊模型实验。该实验模型证明雏菊之间的竞争(基于温度对生长速率的影响)导致种群的平衡,这倾向于接近雏菊生长的最佳温度(Watson et al., 1983)。盖娅假说曾受到科学界的反对,也得到了许多科学实验的证明(Lovelock, 1990),并提供了一些有效的预测(Volk, 2003),在生态地质学和地球系统科学领域也得到应用,一些原理已被生物地球化学和生态学等领域所采用(孙枢等, 2008)。

1.3 人类世理论: 人类活动破坏了地球系统的自我调节

盖娅假说是建立在地球自身循环的基础上,即没有人类活动的干扰。随着科技的发达,人类改变地球环境的能力逐渐增强,地球短时间内自我调节的能力变得越来越有限,导致地球偏离自我调节的正常轨道,于是人类世(Anthropocene)的概念应运而生。该概念最早出现在 20 世纪 60 年代,前苏联科学家使用人类世来指代第四纪(Grinevald, 2008)。20 世纪 80 年代初,密西根大学研究淡水硅藻的生态学家尤金·斯托默提出了人类世的另一个概念,即近代人类活动对地球生态的巨大影响(Crutzen et al., 2000)。

目前通用的人类世概念由荷兰大气化学家、诺贝尔奖获得者保罗·克鲁岑提出(Crutzen et al., 2000)。在 *Geology of Mankind* 一文中,保罗·克鲁岑提出了人类世的具体阐释:“自 1784 年瓦特发明蒸汽机以来,人类的作用力越来越成为一个重要的地质营力;全新世已经结束,当今的地球已进入一个人类主导的新的地球地质时代——人类世”(Crutzen, 2002)。在这个解释中,保罗·克鲁岑强调人类世是一个地质

时代。在这个时代,人类的作用力打破了地球的自我调节能力(Crutzen et al., 2006; Steffen et al., 2007, 2020; Ruddiman et al., 2013; Zalasiewicz et al., 2015)。人类的作用力是当前地球演变的重要营力(Folke et al., 2021; Johnson et al., 2022),直接的证据之一是 CO_2 排放。美国 Keeling 教授和他的团队自 1958 年以来就在夏威夷 Mauna Loa 火山顶部持续观测,发现大气中 CO_2 的浓度逐年上升,由 1958 年的 318×10^{-6} 上升到如今的 426.62×10^{-6} 。而 1958 年之前的 80 万年中,大气中的 CO_2 浓度最高值不足 300×10^{-6} ,在冰期 CO_2 浓度只有 185×10^{-6} (图 1)(UCSD, 2024)。德克萨斯大学阿灵顿分校的 Adnan Rajib 研究小组研究了世界上 520 个主要流域,发现从 1992 年到 2019 年的 27 年间,受人类营力的影响,全球损失了 $60 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的洪泛平原(University of Texas at Arlington, 2023)。这是人类世中人类改变地球的另一个例证。

人类世的起始时间目前至少有 4 个方面的观点:①1 万年前的农业革命以来到现在和未来划为人类世(刘东生, 2004);②精确定为 1784 年,即从瓦特改良蒸汽机开始(Crutzen, 2002);③将 1945 年第一颗原子弹试爆作为人类世起点,加拿大安大略省的湖底淤泥中,发现了 20 世纪 40 年代核武器的放射性元素钚、化石燃料产生的粉煤灰等证据。该湖泊有可能成为第一枚“人类世”的“金钉子”(Witze, 2023);④有多个起点,而不是一个单一的起点时间(Walker et al., 2024)。因为人类世还是一个具有争议的概念,2024 年 3 月 4 日,国际地质科学联合会宣

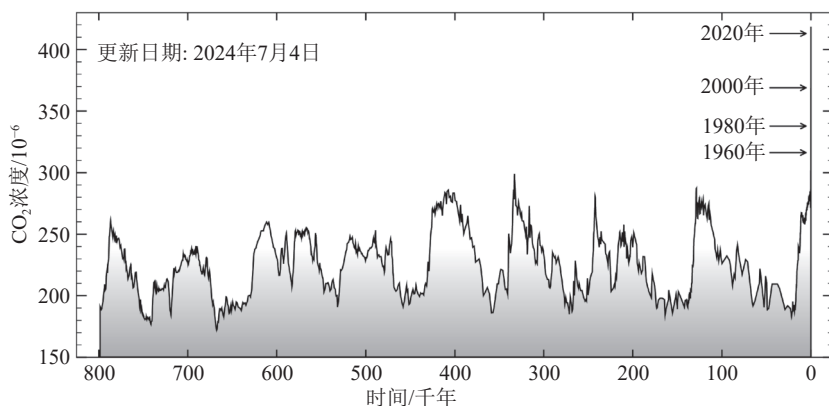


图 1 1958 年之前 80 万年冰芯记录大气中的 CO_2 含量及 1958 年之后大气中 CO_2 观测值
(据美国斯克里普斯海洋研究所网站修改)

Fig. 1 Atmospheric CO_2 record based on ice cores over 800000 years before 1958 and direct observations after and including 1958

布小组投票否决了人类世的提案。该决定标志着为地球划分一个具有人类活动印迹的地质时代的努力暂告一段落。

1.4 地球系统边界理论: 为人类划定安全操作空间

尽管人类世在学界存在争议, 但该概念及科学家们的努力为人类保护地球敲响了警钟, 具有足够的积极意义。科学家们对人类活动影响地球环境的担忧不无道理, 因为人类对地球的作用力越强, 地球反馈给人类的生态环境也越差, 人类最终由实施者变为受害者。因此, 人类迫切需要对地球的生物、化学和物理过程和循环(水、碳、氮、硫、磷等)进行有意识的管理, 包括管理人类自身对地球过程的影响, 为子孙后代留下碧海蓝天。

2009 年, 由瑞典斯德哥尔摩修复中心 Johan

Rockström 和澳大利亚国立大学 Will Steffen 领导的地球系统和环境科学家与 26 位著名学者合作, 提出了九大关键生物物理过程环境边界(Rockström et al., 2009)。即: 气候变化、生物多样性丧失、生物地球化学循环、平流层臭氧消耗、海洋酸化、淡水利用、土地利用变化、大气气溶胶负载、化学污染, 其中前 7 个边界已有具体参数界定(表 1)。按照界定的数据, 气候变化、生物多样和生物地球化学(氮、磷)三大边界已超过地球系统边界值(图 2-a)(Rockström et al., 2009)。随着影响的扩大, 至 2020 年, 受损的地球系统边界已扩展到土地使用和淡水利用这 2 个领域(图 2-b)(Rockström et al., 2020)。最新的研究发现, 9 个边界中有 6 个已经被超越(早先超标的气候变化、生物多样性、土地利用变化和生物地球化学

表 1 首轮地球系统边界主要指标 (Rockström et al., 2009)

Table 1 The preliminarily proposed planetary boundaries

序号	地球系统过程	控制变量	边界值	当前值	工业化前值
1	气候变化	大气中的二氧化碳浓度/ 10^{-6}	350	387	280
		辐射强度变化/ $(W \cdot m^{-2})$	1	1.5	0
2	生物多样性丧失	灭绝率(百万物种数/a)	10	> 100	0.1-1
3	生物地球化学循环	从大气中清除的人为氮气量/ $(Mt \cdot a^{-1})$	35	121	0
		进入海洋的磷量/ $(Mt \cdot a^{-1})$	11	8.5 ~ 9.5	-1
4	平流层臭氧消耗	臭氧浓度(DU)	276	283	290
5	海洋酸化	表层海水中文石的全球平均饱和状态(Ω_{arag})	2.75	2.90	3.44
6	淡水利用	全球人类用水量/ $(m^3 \cdot a^{-1})$	4000	2600	415
7	土地利用变化	全球土地覆盖转化为耕地的百分比/%	15	11.7	低
8	大气气溶胶负荷	大气中的总颗粒物浓度, 以区域为基础		尚未量化	
9	化学污染	浓缩有毒物质, 塑料, 内分泌干扰物, 重金属和放射性污染物进入环境		尚未量化	

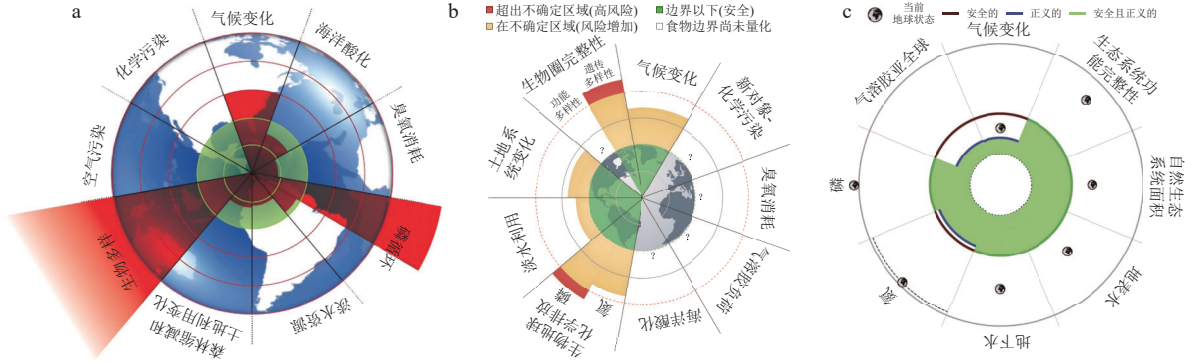


图 2 从给人类设定安全操作空间至设定安全且正义的空间(a, b, c 分别据 Rockström et al., 2009, 2020, 2023 修改)

Fig. 2 From setting a safe operating space for humanity to setting a safe and just operating space

a—至 2009 年有三大边界已被超过边界值; b—至 2020 年有五大边界已被超过边界值; c—至 2023 年有六大边界已被超过边界值

边界越界水平都有所上升, 海洋酸化临近边界, 气溶胶则在区域范围内超过了边界)(Richardson et al., 2023), 表明人类已超出了地球 2/3 的安全操作空间。

地球系统边界表面上是评价地球的生态环境承受能力, 实际上是要变成国际行动, 限定人类的活动强度。2012 年, 联合国非正式会议上认可了地球系统边界的概念。但是发展中国家反对地球系统的边界值和实用价值, 认为地球系统边界未考虑到世界各国的发展水平, 若将发展中国家与发达国家一视同仁, 势必对发展中国家造成不公平, 将会影响本国经济发展。基于此, Rockström et al. (2023) 重新定义了“安全且正义的”8 个边界(图 2-c), 主要的考虑是一方面要满足人类对地球的最基本需求, 确保人人都有权利享受相应的资源与环境, 另一方面又不能突破生态环境天花板。

2 地球系统各圈层交互作用基本原理

地球巨系统由各子系统组成, 各子系统相互关联。无论是地球巨系统还是各子系统, 都遵循物质不灭定律和能量守恒定律, 彼此之间通过物质和能量的循环、反馈实现相互作用。

2.1 地球系统的类型

系统是由相互作用相互依赖的若干组成部分结合而成的、具有特定功能的有机整体, 而这个有机整体又是其从属的更大系统的组成部分(钱学森, 2001)。为研究方便, 地球系统及其子系统要设置人为边界, 以此与其他子系统区别, 即每个系统都有空间边界和时间边界。不同的系统类型, 区别在于其空间边界是否允许物质或能量进出系统。根据空间边界性质不同, 系统可分为孤立系统、封闭系统、开放系统 3 类(Skinner et al., 2010)。

- ①孤立系统的空间边界既没有能量进出、也没有物质进出。孤立系统是一个理论上的系统, 自然界中并不存在。
- ②封闭系统是与周围环境隔离的系统, 系统内只有能量进出, 没有物质进出。如地球大系统是一个封闭系统, 只有太阳能量辐射进入地球以及地球散热。对于从大气中缓慢逃逸到太空的氢气、人造卫星发射, 以及流星、宇宙尘埃降落地球等物质的进出, 相比地球的质量而言完全可以忽略不计。
- ③开放系统是既有物质进出又有能量进出的系统。在开放系统中, 各组成部分以相互关联的方式发挥作用(Christopherson et al., 2014)。地球的各子系统都是

开放系统。

2.2 循环是同一物质在不同储库间的交互作用

物质或能量从一个储库运移到另一个储库的运动过程被称为一个循环。储库是物质或能量在系统内储存一段时间的地方(蒋有绪, 1995), 储库同时也是一个子系统。如一定的时间内湖泊储存一定量的水, 湖泊就是水的储库。循环是实现多圈层交互作用的重要方式。如水从湖泊蒸发到大气圈, 然后又以降水的形式返回湖泊。

又如碳以一种复杂的自然循环贯穿地球系统。大气中的 CO_2 生物吸收, 就暂时被封存在生物圈。当生物死亡或燃烧时, 一部分碳继续回到大气中, 另一部分碳被埋藏封存在岩石圈中, 形成煤炭或石油天然气等。此外, 岩石风化会吸收大气中的二氧化碳, 海洋是另一个重要的碳储库。

2.3 反馈是不同物质在同一储库中的交互作用

反馈是控制论中的概念, 指将系统的输出返回到输入端并以某种方式改变输入, 进而影响系统功能的过程。在地球系统科学中, 物质和能量的循环, 势必会造成输入方增多, 输出方减少。输入多的一方和输出少的一方均会对输出或输入作出反应, 导致系统状态发生变化, 建立新的平衡。这种对输出或输入做出的反应称为反馈。由反馈产生的动态平衡维持着地球各子系统的运行。按照作用的方向, 反馈分正反馈和负反馈。

负反馈, 即系统的响应与初始输入的方向相反, 负反馈通常被视为自我调节。一个自我调节的系统被称为具有内稳态的特性, 也就是说, 系统不是静态或不变的, 而是一个动态的平衡过程。负反馈通常导致系统保持平衡的状态。就像人体过热时, 人体就会通过负反馈产生汗水, 汗水蒸发降低体温, 维持体温平衡。

正反馈, 即系统的响应与初始输入的方向相同。正反馈可使系统更加偏离平衡位置, 放大了原来的干扰, 不能维持系统的稳态。正反馈也被称为“恶性循环”。在自然系统中, 这种不受控制的系统变化超过一个临界极限时, 便会导致生态系统崩溃。如森林破坏就会造成水土流失, 水土流失严重就会导致山体滑坡或泥石流等灾害。作为长期封存碳的化石燃料, 当被人类开采和燃烧时, 就会使碳以比自然释放更快的速度排放到大气中。其结果是陆地储库中的碳输入到大气储库中, 大气中 CO_2 的变

化又反过来影响全球气候变暖,影响了人类自己的生存环境。

3 地球系统科学研究方法原理

地球系统科学是一整套归因分析和因果推理的过程,研究的目的是了解地球如何变化及其对地球上生命的影响,重点是预测和采取措施减轻不良后果。通过识别和了解地球系统变化规律,识别和监测自然和人类活动对地球系统的主要作用、地球系统对这些作用做出何种反馈、这些反馈对人类又产生哪些影响。最后,能够准确预测未来的变化,以及对这种变化提前作出什么样的应对措施。为了达到这种认知和理解水平,需要用物理学、化学、生物学、数学等多学科的知识描述每个子系统内部的物理、化学和生物过程,以及系统之间的相互作用。

3.1 选取原型

地球系统科学研究中,需要根据所需要解决的问题来确定原型。原型是指所需要研究的对象或过程,它可以是地球系统或子系统,也可以是过程。原型可以是一个盆地,一个流域,或者一个行政地区等。一个原型实际上就是一个有空间边界的系统,是一个相对独立的研究单元。在地球表层系统,一个小的子系统,往往通过地球关键带的研究方式来实现。在垂向上,地球关键带指从地下水底部或者土壤-岩石交界面一直向上延伸至植被冠层顶部的连续体域,包括岩石圈、水圈、生物圈、大气圈等圈层交汇的异质性区域(NRC, 2001)。在横向上,如美国 15 个地球关键带大部分是以流域为边界,面积为 $0.07\sim 615\text{ km}^2$ (Wlostowski et al., 2021)。也有以地层单元或社区为界,如马塞勒斯页岩关键带是以含页岩气的页岩地层及影响的社区为空间边界(Dybas, 2011)。

中国的科学家们根据功能属性和所需要解决的问题,在平面空间上划分出了岩溶关键带(吴泽燕等, 2019)、黄土关键带(金钊等, 2020)、红壤关键带(Wu et al., 2019)、黑土地关键带(戴慧敏等, 2020)等。中国的生态功能区划(环境保护部等, 2015),是以生态功能属性为依据而划分的关键带,不同类型的生态功能区都可作为一个子系统而研究。在地球深部系统,也可围绕相应的科学问题选取原型,研究的思路与方法都可以参照地球表层系统,只是研究的物质有差异、研究的时间尺度更大。

3.2 确定储库(源、汇)

地球系统中的储库(源、汇),实际上就是物质和能量在一定时间内的输入、输出的储存空间。在一个储库中,如果一定时间内物质或能量输入量大于输出量时,该储库就被称为汇,相反就称为源。

储库之间和储库内部的能量或物质相互作用,是永远不会停息的。储库之间在一段时间内相互交换的量的多少用通量表示。通量也可能会发生变化,发生变化后的储库,为了维持系统平衡,则以反馈形式产生新的变化。地球四大圈层(储库)及它们之间的相互作用研究,形成了地球系统科学的研究基础。为进一步加强对于 4 个自然圈层的研究,科学家们增加了第五个圈层:人类圈。人类圈有利于研究人类在资源利用、生态干扰及对地球系统其他部分的影响(陈之荣, 1995; Bertolami et al., 2018; Folke et al., 2021)。

源、汇是地球科学中的通用概念。矿床学中的成矿系统概括起来就是“源区”、“通道”和“场所”(吕庆田等, 2019; 邓军等, 2020; 刘家军等, 2020),石油地质学中的源(烃源岩)、运(成藏作用、通道)、储集岩(储、盖、保),水文地质学中的源、渠、汇等的含义大同小异。在地球系统科学中,表述为储库(输出)、运移、储库(输入),目标都是探究物质从哪里来到哪里去。

3.3 观测通量

通量是单位时间内流经某单位面积的物质或能量的量,是表示物质或能量输入或输出强度的物理量(王振会, 2011),是研究过程中监测获取的重要数据。全球性的通量主要是通过卫星,如碳卫星、气溶胶卫星、海洋盐度卫星、森林生物量卫星、森林蓄积量卫星等观测。小尺度的通量观测依靠通量塔和各种类型的传感器。全球长期通量观测网络概念最早起源于 1993 年,由国际地圈-生物圈计划首次提出(车凤翔, 2006),国际科学委员会在 1995 年的 La Thuile 研讨会上对此概念进行正式讨论。La Thuile 会议后,全球通量观测塔及区域性观测网的建立得到了快速发展,1996 年后,欧洲 Euro Flux 和美洲 Ameri Flux 均开始启动(Greco et al., 1996)。随着欧洲和美洲区域通量网的建立及对地观测卫星的应用(彭令等, 2023),1998 年 NASA 决定成立全球规模的通量监测网络。2002 年,中国也建成了陆地生态系统通量观测研究网络,对典型陆地生态系统与大气间

CO₂、水汽、能量通量的日、季节、年际变化进行长期观测研究, 研究站点(网)已达 79 个(观测塔 83 座)。

3.4 建模与预测

在选取原型(创建子系统)之后, 建立与之对应的准确模型(即将原型图型化或数学化), 是研究地球系统科学的关键一步。模型是对原型的一部分或全部的简化、理想化的表达方式。模型的简单性使系统更容易研究和模拟。模型由目标、变量和关系三部分组成(窦胜功等, 2005)。地球系统科学中的模型类型有多种形式: ①描述性的概念模型, 通常是一般化的, 如某一定区域内土壤、森林和大气之间的能量和物质的输入和输出; ②数值模型, 如大气或海洋过程演化的数学方程式, 水文系统的模型展示水在大气、地表、地下的通量方程等; ③依靠数值模型等多种模型建立起的计算机模型, 比如各类天气预报模型等。用计算机模型测试施加了某种类型数值的变化, 预测现实世界中可能会发生哪些变化, 是计算机模型预测的主要功能。

地球系统及其子系统是一个典型的非线性系统, 数据量巨大, 参数繁多, 通常只能通过概率论和统计科学进行建模, 如基于相关性分析的回归分析方法、基于属性研究的因子分析方法等。此外, 针对时间序列数据的频谱分析技术、针对空间分布数据的聚类分析技术等方法也在地球系统建模中得到了应用。无论是数值模型还是计算机模型, 都是将地球系统通过合理的数据建模抽象成数学问题, 将海量观测监测数据定量描述地球系统, 最终揭示地球系统的运行机制, 预测未来的变化。地球系统的预测结果是否准确, 完全取决于初始数据(观测值)或边界值及模型是否正确。因此, 模型建立之后, 需要根据相关初始数据(观测值)与模拟结果进行模型验证, 不断测试修订得出更加科学的新模型。地球系统预测是典型的大规模科学仿真应用, 其中包含了大量的复杂运算过程, 需要高性能计算能力和优化算法的支撑。以美国通用地球模拟模式(CESM)为例, 仅其中的大气模型就在中国的神威太湖之光的超级计算机上扩展使用了 2.4 万个主核和 153.6 万个从核(刘鑫等, 2018)。

4 地球系统科学的应用展望

地球系统科学与地球科学的共同点都是研究地球为人类服务的科学。地球系统科学需要地球科学

提供最基本的理论支撑。与地球科学比, 地球系统科学具有诸多方面的先进性和实用性。包括: ①全面的系统观。既体现了理论的系统化, 又体现了研究思路考虑多圈层影响的系统化; ②技术方法的先进性。包括建模技术、观测监测技术, 大数据与人工智能技术等, 将以描述性为主的地球科学推向了以数字为主的定量化科学; ③研究维度的升级。地球系统科学与地球科学都是解决在一定的时间与空间中, 物质的存在形式, 从哪里来、到哪里去的哲学问题。不同的是, 地球科学往往聚焦在研究物质的四维(三维空间加时间), 地球系统科学则体现时间演变的持续性, 即不同时间物质的空间变化结果及可能对未来的影响, 属于五维时空观。

地球系统科学本身也存在短板。①模型在多大程度上代表原型? 科学家们认为地球是可以被认知的, 可以通过一定的模型方法手段预测未来。然而, 任何模型, 都是抓住核心过程对原型进行简化, 从而用个别数据实现计算机求解(周天军等, 2022)。事实上, 人类目前的认知程度和科学技术水平还十分有限, 而地球系统非常复杂, 地球系统的许多自然“模式”和跨越时空的变化都超出了科学家们的认知, 无法像在实验室那样去模拟地球系统, 于是模拟预测不准也在情理之中。如南极洲气候模拟与实际相差较大。南极洲各地的 78 个冰芯数据显示, 自 1950 年以来南极洲变暖的速度几乎是世界其他地区的 2 倍。这个速度比气候模型预测的速度高出 20%~50%(Casado et al., 2023)。②固体地球中如何应用地球系统科学? 地球系统科学经过 40 多年的发展, 在水文学、大气科学、海洋学等流体圈层领域, 由于数据本身定量化、体系化程度较高, 数据建模较为成熟, 发展相对较迅速; 而在固体地球中, 数据定量化程度低, 数据建模难度大, 还未引起地球科学家们足够的兴趣。展望未来, 围绕地球深部与岩石圈演化、岩石圈与外部圈层交互作用、外部圈层之间交互作用等方面, 地球系统科学的应用前景十分广阔。

4.1 地球深部过程与岩石圈演化

面向地球深部过程、岩石圈演化对资源环境效应, 该领域具有大时间尺度(以百万年计)、大空间尺度的特点, 难以获取监测数据。如何有效揭示大陆地壳演化、深部物质循环、板块俯冲作用与岩浆作用对浅层岩石圈的影响等, 是地球深部与岩石圈演化研究的热点难点(毕思文, 2003)。研究大时间尺度

的地球深部及岩石圈演化,通常采用直接法和间接法。直接法是针对深部的 C、H、O、S 等物质循环,采取流体包裹体、同位素地球化学、热力学等方法,结合岩相学、地球化学等数据,计算模拟输入、输出通量(Plank et al., 2019; Li et al., 2020; 李三忠等, 2023)。间接法是通过示踪或反演,该方法需要获取信息保存完整的岩石或矿物。如锆石是地球上最古老的矿物之一,因其化学性质稳定、携带丰富的同位素、地球化学、古地磁等信息,能反映其形成时的地质背景和地质条件,成为目前地质学家用的最多的一种示踪或反演矿物。相关应用包括挖掘 S 型花岗岩锆石中的包裹体意义(Vogt et al., 2023)、锆石磁性测年(Taylor et al., 2023)、锆石形态与找矿(Nathwani et al., 2023)、用锆石中的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 探测岩浆结晶的深度(Moreira et al., 2023),通过锆石年代学和热模拟预测火山喷发(Weber et al., 2020),通过太古宙单颗粒锆石古地磁场强度结果约束地球早期板块运动(Tarduno et al., 2023)等。基于成矿系统(成矿要素、成矿作用过程、成矿产物、成矿后的变化与保存 4 个要点)(翟裕生, 2000)的成矿预测,通过确定成矿时间内的主要成矿作用,成矿后的主要成矿作用,有效反映成矿元素来源的示踪物质(如硫、氧、氢、铅等同位素)、源区的性质等,则具有直接和间接相结合的特点,不能一概而论。

4.2 岩石圈与外部圈层交互作用

面向宜居地球的局域环境变化,该领域具有小时间尺度、小空间尺度的特点,涉及岩石圈表层、水圈、生物圈、人类圈的交互作用。生态系统保护修复是该领域的重要应用方向之一,重点解决人类活动下的森林、草原、湿地、荒漠、河流、湖泊、沙漠、农田、矿山等生态系统的反馈情况。早在 2008 年,全球地球系统治理项目就已关注到荒漠化和土壤退化的区域生态系统修复。生态系统保护修复的核心理论基础是地球系统科学,涉及地球的各个圈层,以行政区、小流域、地质块体、生态问题区等为单元,针对主要生态问题识别生态敏感地区(徐勇等, 2019; 黄培真等, 2024)、建立调查与评价、探测与监测、模拟与预测全流程技术体系(侯增谦, 2018),运用地球科学等多学科技术手段查明生态向好或向坏的原因,查明从岩石圈到土壤圈、水圈、生物圈乃至人类圈的物质循环机理等(张万益等, 2022)。如 2018 年,广西河池市某地施工一个多月后,下游 1000 m

处的鱼塘就发生了死鱼事件。中国地质大学(北京)杨忠芳教授调查显示,施工地为一黑色岩系分布区,因黑色岩系中含有大量的硫化物和重金属(源),暴露于地表后(人工扰动),硫化物迅速氧化,遇水形成硫酸(土壤 pH 值降至最低 2.12)并活化晶格中的重金属镉离子,导致下游水中(汇)的 Cd 含量最高升至 0.570 mg/L,超标上百倍(标准 Cd 含量<0.005 mg/L),危害水生生态系统(生态反馈)(与杨忠芳个人交流)。这种系统性、跨圈层的调查为地球系统科学服务生态系统保护修复提供了案例。

4.3 外部圈层交互作用

面向全球变化、全球治理等方向,该领域具有小时间尺度、大空间尺度特点,主要涉及大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈、人类圈等圈层,水、CO₂ 等是圈层中交互作用最活跃的因素。随着地球系统科学的思想与方法逐渐成熟,地球系统科学在解决全球性的问题中越来越受到人们的重视。地球系统科学从萌发之初的 1980 年世界气候研究计划、1986 年的国际地圈生物圈计划、1996 年的国际全球环境变化人文因素计划、再到 21 世纪初产生的可持续性科学等等,地球系统科学都在其中起主导作用。2001 年阿姆斯特丹全球变化宣言中认为,地球系统现在“远远超出过去 50 万年所展现的正常状态”,并且“人类活动产生的变化远远超出了自然变化”(Pronk, 2002)。从用以解决气候变化的气候系统模式,发展到耦合生态环境系统和人类圈的地球系统模式,将在地球系统大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈和岩石圈表层的基础上加入人类圈系统,可靠地预测未来,为气候变化应对、自然灾害防御、能源、农业等涉及可持续发展的行动提供科技支撑(周天军等, 2022)。

5 结 论

(1)地球系统科学是一门应时代之需产生的科学,因解决生态环境问题而萌芽,因促进人与自然和谐共生而兴盛。地球系统科学既是一门系统性的研究地球的科学,又是指导地球科学发展的先进思维方式和工作范式。如果说传统的地球科学的研究范式和目的是将今论古、还原地球现今各现象的历史演化特征,地球系统科学的研究范式和目的则是以地球的古今预测将来、为人类建设宜居地球提供应对方案。地球系统科学脱胎于地球科学,二者不能割裂。

(2)地球系统科学的传统理论聚焦于地球表

层。认为地球大系统是一个能够自我调节的“生命体”。地球大系统由岩石圈、水圈、大气圈、生物圈等子系统组成, 子系统中的能量和物质循环、反馈构成了地球大系统“生命”自我调节的主要方式。自从工业革命之后, 人类的活动干扰了地球的自我调节速度, 导致地球在很多方面突破了临界点, 进而引发了系列生态环境问题。

(3) 地球系统科学虽然也存在一些局限, 但具有广阔应用前景。无论是在探索地球深部过程、岩石圈演化对资源环境效应等大时间大空间尺度的基础科学问题, 还是在全球变化与全球治理等小时间大空间尺度、宜居地球的局域环境变化小时间小空间尺度等应用基础科学问题方面, 都需要运用地球系统科学的系统方法和思维理念。

致谢: 本文在成文过程中得到了自然资源部科技司司长姚华军、一级巡视员单卫东、处长杨峥, 国务院原参事张洪涛, 中国地质调查局伍光英、邱士东研究员, 中国地质大学(北京)雷涯邻、杨忠芳教授, 中国自然资源经济研究院张新安研究员, 中国科学院空天信息创新研究院毕思文研究员, 中国科学院地理科学与资源研究所沈镭研究员, 同济大学杨守业教授, 中国地质科学院吴登定、何庆成研究员, 自然资源部信息中心吴其斌研究员, 中国地质调查局发展研究中心霍雅勤、李瑞玲、张志等研究员的大力支持, 四位审稿专家为本文提出了非常有益的修改建议, 在此一并表示诚挚感谢。

References

- Bertalanffy L V, Sutherland J W. 1974. General system theory: foundations, development, applications[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-4(6): 592.
- Bertolami O, Francisco F. 2018. A physical framework for the earth system, Anthropocene equation and the great acceleration[J]. *Global and Planetary Change*, 169: 66–69.
- Bi S W. 1997. Earth system science and sustainable development (I): the research of meaning, present and content[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 17(6): 105–111 (in Chinese with English abstract).
- Bi S W. 1998a. Earth system science and sustainable development (V): summary of basic theory[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 18(3): 62–72 (in Chinese with English abstract).
- Bi S W. 1998b. Earth system science and sustainable development (VI): the base to universal tectonics theory of Earth system science[J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 18(4): 71–83 (in Chinese with English abstract).
- Bi S W. 2003. Earth system science: the frontier of earth science and scientific basis of the sustainable development strategy in the 21st century[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(8): 601–612 (in Chinese with English abstract).
- Casado M, Hébert R, Faranda D, et al. 2023. The quandary of detecting the signature of climate change in Antarctica[J]. *Nature Climate Change*, 13(10): 1082–1088.
- Che F X. 2006. Principles and methods for terrestrial ecosystem flux observations[M]. Beijing: Science Press: 9–78 (in Chinese with English abstract).
- Chen S P, Zeng B. 1996. Earth system science and geo-Informatics[J]. *Geographical Research*, 15(2): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z R. 1995. Anthroposphere and earth system[J]. *Progress in Geophysics*, 10(2): 106–110 (in Chinese with English abstract).
- Christiansen E H, Hamblin W K. 2014. Dynamic earth: An introduction to physical geology[M]. Massachusetts: Jones & Bartlett Learning: 62–67.
- Christopherson R W, Birkeland G, Moreau J. 2014. Geosystems: An introduction to physical geography[M]. London: Pearson Education Limited: 5–68.
- Cornell S E, Prentice I C, House J I, et al. 2012. Understanding the earth system: Global change science for application[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 39–64.
- Crutzen P J, Stoermer E F. 2000. The Anthropocene[J]. *IGBP Global Change Newsletter*, 41: 17–18.
- Crutzen P J. 2002. Geology of mankind[J]. *Nature*, 415(6867): 23.
- Crutzen P J. 2006. Earth system science in the Anthropocene: emerging issues and problems[M]. Berlin: Springer: 13–18.
- Dai H M, Zhao J, Liu G D, et al. 2020. Progress in the quality survey of black soil in Northeast China[J]. *Geology and Resources*, 29(3): 299 (in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang Q F, Chen F C, et al. 2020. Further discussion on the Sanjiang Tethyan composite metallogenic system[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 106–136 (in Chinese with English abstract).
- Donner R, Barbosa S, Kurths J, et al. 2009. Understanding the Earth as a complex system – Recent advances in data analysis and modelling in Earth sciences[J]. *European Physical Journal Special Topics*, 174(1): 1–9.
- Dou S G, Zhang L X, Lu J H. 2005. Organizational behavior course[M]. Beijing: Tsinghua University Press: 1–21 (in Chinese).
- Dybas C L. 2011. Can Marcellus shale gas development and healthy waterways sustainably coexist?[EB/OL]. (2011–12–09)[2024–07–05]. <https://new.nsf.gov/news/can-marcellus-shale-gas-development-healthy>.
- Folke C, Polasky S, Rockstrom J, et al. 2021. Our future in the Anthropocene biosphere[J]. *Ambio*, 50(4): 834–869.
- Greco S, Baldocchi D D. 1996. Seasonal variations of CO₂ and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest[J]. *Global Change Biology*, 2(3): 183–197.
- Grinevald J. 2008. La biosphère de l'Anthropocène: Climat et pétrole, la double menace—références transdisciplinaires(1824–2007)[M]. Geneva: Georg Éditeur: 283–292.

- Hou Z Q. 2018. Supporting integrated natural resource management and systemic restoration based on Earth system science[EB/OL]. (2018-06-12)[2024-07-05]. Journal of Natural Resources. https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201806/t20180612_461497.html (in Chinese).
- Huang B W, Zheng D, Zhao M C. 1999. Modern natural geography[M]. Beijing: Meteorological Press: 5-66 (in Chinese).
- Huang P Z, Zhao H F, Wu K N, et al. 2024. Research on land-space ecological restoration zoning based on the types of Earth's Critical Zone: A case study of Xixia County, Henan Province[J]. Geological Bulletin of China, 43(8): 1325-1335 (in Chinese with English abstract).
- Jacobson M C, Charlson R J, Rodhe H, et al. 2000. Earth system science from biogeochemical cycles to global changes (2nd Edition)[M]. London: Elsevier Academic Press: 3-13.
- Jiang Y X. 1995. On study of structure and function of world forest ecosystem[J]. Forest Research, 8(3): 314-320 (in Chinese with English abstract).
- Jin Z, Wang Y Q, Gao G Y, et al. 2020. Comprehensive Earth critical zone observation and Terrestrial Surface Flux monitoring provide strong scientific support for ecological protection and regional sustainable development on the Loess Plateau of China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 35(3): 378-387 (in Chinese with English abstract).
- Johnson A, Sigona A. 2022. Planetary justice and 'Healing' in the Anthropocene[J]. Earth System Governance, 11: 1-9.
- Johnson D R, Ruzek M, Kalb M. 2020. Earth system science and the internet[J]. Computers & Geosciences, 26(6): 669-676.
- Kump L, Kasting J, Crane R G. 2009. The Earth system (3rd Edition)[M]. London: Pearson: 1-432.
- Li S Z, Liu L J, Su Y H, et al. 2023. Carbon tectonics: A new paradigm for Earth system science[J]. Chinese Science Bulletin, 68(4): 309-338 (in Chinese with English abstract).
- Li, J, Schwarzenbach E M, John T, et al. 2020. Uncovering and quantifying the subduction zone sulfur cycle from the slab perspective[J]. Nature Communications, 11(1): 514.
- Liu D S. 2004. Demand of Anthropocene study in the new stage of geoscience: In honor of late geologist Huang Jiqing for his innovative spirit[J]. Quaternary Sciences, 24(4): 369-378 (in Chinese with English abstract).
- Liu D S. 2002. Global change and sustainability science[J]. Earth Science Frontiers, 9(1): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Liu D S. 2006. Step into Earth system science: Rudiment Earth system science and our opportunities[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 20(5): 266-271 (in Chinese with English abstract).
- Liu J J, Zhai D G, Wang D Z, et al. 2020. Classification and mineralization of the Au-(Ag)-Te-Se deposits[J]. Earth Science Frontiers, 27(2): 79-98 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Guo H, Sun R J, et al. 2018. The characteristic analysis and exascale scalability research of large scale parallel applications on Sunway TaihuLight Supercomputer[J]. Chinese Journal of Computers, 41(10): 2209-2220 (in Chinese with English abstract).
- Lovelock J E. 1979. Gaia: A new look at life on Earth[M]. Oxford: Oxford University Press: 176.
- Lovelock J E. 1990. Hands up for the Gaia hypothesis[J]. Nature, 344: 100-102.
- Lü Q T, Meng G X, Yan J Y, et al. 2019. Multi-scale exploration of mineral system: concept and progress-A case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt[J]. Geology in China, 46(4): 673-689 (in Chinese with English abstract).
- Marsh W M, Kaufman M M. 2012. Physical geography: great systems and global environments[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 15-171.
- Martin R. 2016. Earth's evolving systems: the history of planet Earth (2nd Edition)[M]. Massachusetts: Jones & Bartlett Learning: 51-199.
- Merritts D, Menking K, DeWet, et al. 1998. Environmental Geology: an Earth System Science approach[M]. New York, Basingstoke: W H Freeman and Company: 4-121.
- Moreira H, Buzenchi A, Hawkesworth C J, et al. 2023. Plumbing the depths of magma crystallization using $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ in zircon as a pressure proxy[J]. Geology, 51(3): 233-237.
- Nathwani C L, Wilkinson J J, Brownscombe W, et al. 2023. Mineral texture classification using deep convolutional neural networks: An application to zircons from porphyry copper deposits[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128(2): 1-19.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). 1986. Earth system science overview: A program for global change[R].
- National Research Council (NRC). 2001. Basic research opportunities in Earth Science[R].
- Owen T, Cess R D, Ramanathan V. 1979. Earth: An enhanced carbon dioxide greenhouse to compensate for reduced solar luminosity[J]. Nature, 277(5698): 640-642.
- Peng L, Yin Z Q, Jin A F, et al. 2023. Status and enlightenment of natural resources monitoring and observation network construction in China and aboard[J]. Geological Bulletin of China, 42(12): 2156-2164 (in Chinese with English abstract).
- Plank T, Manning C. E. 2019. Subducting carbon[J]. Nature, 574(7778): 343-352.
- Pronk J. 2002. The Amsterdam declaration on global change[J]. Challenges of Changing Earth: 207-208.
- Qian X S. 2001. On Macro Architecture and Micro Architecture[M]. Hangzhou: Hangzhou Publishing House: 1-410 (in Chinese).
- Richardson K, Steffen W, Lucht W, et al. 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries[J]. Science Advances, 9(37): 1-16.
- Rockström J, Beringer A, Crona B, et al. 2020. Planetary boundaries: A compass for investing for the common good[C]//Bril H, Kell G, Rasche A. Sustainable investing: A path to a new horizon. London: Routledge: 109-128.
- Rockström J, Gupta J, Qin D, et al. 2023. Safe and just Earth system boundaries[J]. Nature, 619(7968): 102-111.
- Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. 2009. A safe operating space for humanity[J]. Nature, 461(7263): 472-475.

- Ruddiman W F. 2013. The Anthropocene[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1): 45–68.
- Schellnhuber H J. 1999. ‘Earth system’ analysis and the second Copernican revolution[J]. *Nature*, 402(6761): C19–C23.
- Shi J. 2014. Enhancing remote sensing research on global change to improve our understanding on Earth system processes[J]. *Science China Earth Sciences*, 57(10): 2281–2282.
- Skinner B J, Murck B W. 2010. The blue planet: an introduction to Earth System Science (3rd Edition)[M]. Hoboken: Wiley: 1–674.
- Stanley S, Luczaj J. 2015. Earth system history (4th Edition)[M]. Oxford: Macmillan: 1–21.
- Steffen W, Crutzen P J, McNeill J R. 2007. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature[J]. *Ambio*, 36(8): 614–621.
- Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. 2020. The emergence and evolution of Earth system science[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(1): 54–63.
- Sun S, Wang C S. 2008. Gaia theory and Earth system science[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Tarduno J A, Cottrell R D, Bono R K, et al. 2023. Hadaean to Palaeoarchaeon stagnant-lid tectonics revealed by zircon magnetism[J]. *Nature*, 618: 531–536.
- Taylor R J, Reddy S M, Saxey D W et al. 2023. Direct age constraints on the magnetism of Jack Hills zircon[J]. *Science Advances*, 9(1): 1–6.
- UCSanDiego(UCSD). 2024. The keeling curve is a daily record of global atmospheric carbon dioxide concentration maintained by scripps institution of oceanography at UC San Diego[EB/OL]. (2024–07–04)[2024–07–05]. <https://keelingcurve.ucsd.edu>.
- University of Texas at Arlington. 2023. Study reveals human destruction of global floodplains[EB/OL]. (2023–09–08)[2024–07–05]. <https://www.uta.edu/news/news-releases/2023/09/08/rajb-flood-plains>.
- Vogt M, Schwarz W H, Schmitt A K, et al. 2023. Graphitic inclusions in zircon from early Phanerozoic S-type granite: Implications for the preservation of Hadean biosignatures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 349: 23–40.
- Volk T. 2003. Gaia's body: Toward a Physiology of Earth[M]. Cambridge, Mass: MIT Press: 93–124.
- Walker M J C, Bauer A M, Edgeworth M, et al. 2024. The Anthropocene is best understood as an ongoing, intensifying, diachronous event[J]. *Boreas*, 53(1): 1–3.
- Wang P X. 2003. Earth system science in China quo vadis?[J]. *Advances in Earth Science*, 18(6): 837–851 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z H. 2011. The Atmospheric sounding course[M]. Beijing: Meteorological Press: 343–344 (in Chinese).
- Watson A J, Lovelock J E. 1983. Biological homeostasis of the global environment: The parable of daisyworld[J]. *Tellus*, 35B(4): 286–289.
- Weber G, Caricchi L, Arce J L, et al. 2020. Determining the current size and state of subvolcanic magma reservoirs[J]. *Nature Communications*, 11(1): 1–14.
- Wilkinson D M. 2006. Fundamental processes in Ecology: an earth systems approach[M]. Oxford: Oxford University Press: 57–67.
- Witze A. 2023. This quiet lake could mark the start of a new Anthropocene epoch[J]. *Nature*, 619(7970): 441–442.
- Wlostowski A N, Molotch N, Anderson S P, et al. 2021. Signatures of hydrologic function across the critical zone observatory network[J]. *Water Resources Research*, 57(3): 1–28.
- Wu H, Song X, Zhao X, et al. 2019. Accumulation of nitrate and dissolved organic nitrogen at depth in a red soil critical zone[J]. *Geoderma*, 337: 1175–1185.
- Wu Z Y, Zhang C, Jiang G C, et al. 2019. Advance of karst critical zone and its carbon cycle[J]. *Advances in Earth Science*, 34(5): 488–498 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y, Wu D D, Yang J F, et al. 2019. Earth system science and strategic research on transformation development of geological work[M]. Beijing: Geology Press: 1–212 (in Chinese).
- Yao Y P, Ma F C. 2005. A discussion on the conceptual model for the strategy of the Earth system research in China[J]. *Advances in Earth Science*, 20(2): 144–148 (in Chinese with English abstract).
- Ye D Z. 1992. Pre-study of global change in China[M]. Beijing, Meteorological Press: 15–39 (in Chinese).
- Yuan D X. 1999. Remarks on Earth system science[J]. *Geological Journal of China Universities Remarks on Earth System Science*, 5(1): 2–7 (in Chinese with English abstract).
- Zalasiewicz J, Waters C N, Williams M, et al. 2015. When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal[J]. *Quaternary International*, 383: 196–203.
- Zhai Y S. 2000. Metallogenic system and its evolution: from preliminary practice to theoretical consideration[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 333–339 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W Y, Wang F X, Song Z F. 2022. The key to ecological protection in the Yellow River—Earth system science[J]. *Journal of Hebei Geo University*, 45(2): 23–26 (in Chinese with English abstract).
- Zhou T J, Zhang W X, Chen D L. 2022. Understanding and building upon the pioneering work of Nobel Prize in Physics 2021 laureates Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann: From the greenhouse effect to Earth system science and beyond[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 52(4): 579–594 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X J. 2004. Some cognitions on Earth syetem science[J]. *Advances in Earth Science*, 19(4): 513–515 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毕思文. 1997. 地球系统科学与可持续发展 (I)——研究的意义、现状及其内涵[J]. *系统工程理论与实践*, 17(6): 105–111.
- 毕思文. 1998a. 地球系统科学与可持续发展 (V)——理论基础概述[J]. *系统工程理论与实践*, 18(3): 62–72.
- 毕思文. 1998b. 地球系统科学与可持续发展 (VI)——地球系统科学统一构造理论基础[J]. *系统工程理论与实践*, 18(4): 71–83.
- 毕思文. 2003. 地球系统科学——21 世纪地球科学前沿与可持续发展战略科学基础[J]. *地质通报*, 22(8): 601–612.

- 车凤翔. 2006. 陆地生态系统通量观测的原理及方法[M]. 北京: 科学出版社: 9-78.
- 陈述彭, 曾杉. 1996. 地球系统科学与地球信息科学[J]. 地理研究, 15(2): 1-11.
- 陈之荣. 1995. 人类圈与地球系统[J]. 地球物理学进展, 10(2): 106-110.
- 戴慧敏, 赵君, 刘国栋, 等. 2020. 东北黑土地质量调查成果[J]. 地质与资源, 29(3): 299.
- 邓军, 王庆飞, 陈福川, 等. 2020. 再论三江特提斯复合成矿系统[J]. 地学前缘, 27(2): 106-136.
- 窦胜功, 张兰霞, 卢纪华. 2005. 组织行为学教程[M]. 北京: 清华大学出版社: 1-21.
- 侯增谦. 2018. 立足地球系统科学, 支撑自然资源统一管理和系统修复[EB/OL]. (2018-06-12)[2024-07-05]. 中国自然资源报. https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201806/t20180612_461497.html.
- 环境保护部, 中国科学院. 2015. 《关于印发<全国生态功能区划(修编版)>的公告》[R].
- 黄秉维, 郑度, 赵名茶, 等. 1999. 现代自然地理[M]. 北京: 气象出版社: 5-66.
- 黄培真, 赵华甫, 吴克宁, 等. 2024. 基于地球关键带类型的国土空间生态修复分区研究——以河南省西峡县为例[J]. 地质通报, 43(8): 1325-1335.
- 蒋有绪. 1995. 世界森林生态系统结构与功能的研究综述[J]. 林业科学研究, 8(3): 314-320.
- 金钊, 王云强, 高光耀, 等. 2020. 地球关键带与地表通量综合观测研究为黄土高原生态保护和可持续发展提供有力的科技支撑[J]. 中国科学院院刊, 35(3): 378-387.
- 李三忠, 刘丽军, 索艳慧, 等. 2023. 碳构造: 一个地球系统科学新范式[J]. 科学通报, 68(4): 309-338.
- 刘东生. 2002. 全球变化和可持续发展科学[J]. 地学前缘, 9(1): 1-9.
- 刘东生. 2004. 开展“人类世”环境研究, 做新时代地学的开拓者——纪念黄汲清先生的地学创新精神[J]. 第四纪研究, 24(4): 369-378.
- 刘东生. 2006. 走向“地球系统”的科学: 地球系统科学的学科雏形及我们的机遇[J]. 中国科学基金, 20(5): 266-271.
- 刘家军, 翟德高, 王大钊, 等. 2020. Au-(Ag)-Te-Se 成矿系统与成矿作用[J]. 地学前缘, 27(2): 79-98.
- 刘鑫, 郭恒, 孙茹君, 等. 2018. “神威·太湖之光”计算机系统大规模应用特征分析与 E 级可扩展性研究[J]. 计算机学报, 41(10): 2209-2220.
- 吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 等. 2019. 成矿系统的多尺度探测: 概念与进展——以长江中下游成矿带为例[J]. 中国地质, 46(4): 673-689.
- 彭令, 殷志强, 金爱芳, 等. 2023. 国内外自然资源监测与观测网络建设现状及经验启示[J]. 地质通报, 42(12): 2156-2164.
- 钱学森. 2001. 论宏观建筑与微观建筑[M]. 杭州: 杭州出版社: 1-410.
- 孙枢, 王成善. 2008. Gaia 理论与地球系统科学[J]. 地质学报, 82(1): 1-8.
- 汪品先. 2003. 我国的地球系统科学研究向何处去[J]. 地球科学进展, 18(6): 837-851.
- 王振会. 2011. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社: 343-344.
- 吴泽燕, 章程, 蒋忠诚, 等. 2019. 岩溶关键带及其碳循环研究进展[J]. 地球科学进展, 34(5): 488-498.
- 徐勇, 吴登定, 杨建锋, 等. 2019. 地球系统科学与地质工作转型发展战略研究[M]. 北京: 地质出版社: 1-212.
- 姚玉鹏, 马福臣. 2005. 关于我国开展地球系统研究战略概念模型的讨论[J]. 地球科学进展, 20(2): 144-148.
- 叶笃正. 1992. 中国的全球变化预研究[M]. 北京: 气象出版社: 15-39.
- 袁道先. 1999. 对地球系统科学的几点认识[J]. 高校地质学报, 5(1): 2-7.
- 翟裕生. 2000. 成矿系统及其演化——初步实践到理论思考[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 25(4): 333-339.
- 张万益, 王丰翔, 宋泽峰. 2022. 地球系统科学是开启黄河流域生态保护的钥匙[J]. 河北地质大学学报, 45(2): 23-26.
- 周天军, 张文霞, 陈德亮. 2022. 2021 年诺贝尔物理学奖解读: 从温室效应到地球系统科学[J]. 中国科学: 地球科学, 52(4): 579-594.
- 周秀骥. 2004. 对地球系统科学的几点认识[J]. 地球科学进展, 19(4): 513-515.