

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.113>



流域地球系统科学与区域发展战略

谢树成¹, 严德天², 朱宗敏^{1,3}, 张宏斌¹, 凌文黎³, 彭松柏³

1. 中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 流域环境与长江文化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430078
2. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 湖北武汉 430078
3. 流域关键带演化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 以跨圈层作用为特征的地球系统科学正成为当前地球科学发展的主流, 同时我国当前特别注重区域经济社会的发展, 论文由此提出了流域地球系统科学与区域发展战略相结合的构想. 流域地球系统科学是在流域尺度上探索跨圈层的地质作用、地质演化与地质效应, 至少包括三个层次的研究主题, 分别是流域系统的深浅联动及其资源效应、流域系统的生物与环境的相互作用与协同演化, 以及流域环境和人类文明的关系. 论文以长江流域为例, 探索流域地球系统科学与长江经济带、长三角一体化等区域发展的关系, 系统总结了流域三大研究主题的进展以及有待突破的科学难题. 在时间跨度上, 流域地球系统科学不仅仅限于大河流域的形成及其后续的发展演化, 而且还可以追溯到流域形成之前的跨圈层作用. 要从时间尺度上突破流域地球系统科学这些难题, 进而服务区域经济社会的发展, 论文提出了跨圈层作用的一个关键抓手, 即水、热、碳三者之间的关系, 特别是其中的水热配置及其与碳循环的关系. 流域的水、热、碳直接关系到区域的大生态状况, 包括生态资源、生态环境、地质灾害和生态文明, 因而对区域经济社会发展异常重要.

关键词: 长江流域; 地球系统科学; 深地科学; 地球生物学; 全球变化; 古文化; 古人类; 区域规划.

中图分类号: P56

文章编号: 1000-2383(2025)03-815-15

收稿日期: 2024-09-29

Earth System Science in Drainage Regions Connected with Societal Development

Xie Shucheng¹, Yan Detian², Zhu Zongmin^{1,3}, Zhang Hongbin¹, Ling Wenli³, Peng Songbai³

1. State Key Laboratory of Geomicrobiology and Environmental Changes, Hubei Key Laboratory of Environment and Culture in Yangtze Regions, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China
3. Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, Wuhan 430074, China

Abstract: Earth system science becomes one of the most important themes of geosciences in modern days, featured by the investigations on interactions among Earth spheres. Meanwhile, Chinese governments are paying great attention to the societal development of some typical regions. Integration of the scientific frontiers of geosciences with regional societal development thus leads to the proposal of Earth system science in drainage regions in connection with the regional societal development, exemplified by the Yangtze drainage regions in which two national developmental strategies including the Yangtze economic

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42293290).

作者简介: 谢树成 (1967—), 男, 教授, 中国科学院院士, 主要从事地球生物学的教学与科研工作. ORCID: 0000-0002-5763-2928. E-mail: xiecug@163.com

引用格式: 谢树成, 严德天, 朱宗敏, 张宏斌, 凌文黎, 彭松柏, 2025. 流域地球系统科学与区域发展战略. 地球科学, 50(3): 815–829.

Citation: Xie Shucheng, Yan Detian, Zhu Zongmin, Zhang Hongbin, Ling wenli, Peng Songbai, 2025. Earth System Science in Drainage Regions Connected with Societal Development. *Earth Science*, 50(3): 815–829.

belt, and the economic integration of the lower Yangtze regions are being constructed. Earth system science in drainage regions deals with the geological processes, evolution and effects prior to, during and after the origin of the large river systems. Three issues are in particular discussed here; they include the interactions between surface and deep Earth and their effects on mineral resources, interactions and coevolution between life and environments, and the relationship between the environments and cultures and civilization in the drainage regions. Some important scientific achievements related to the three issues are summarized here, with the proposal of some critical points left to be deciphered. To further understand the evolution of the system in drainage regions in geological history, one of the most important linkages to deal with would be the coupling and co-evolution among water, carbon and heat, in particular the relationship between hydrothermal dynamics and carbon cycles. This linkage shows close connection with the regional resources, ecological environmental conditions, geohazards, the culture and civilization, understanding of which plays important roles on the regional societal development.

Key words: Yangtze drainage area; Earth system science; deep Earth science; geobiology; global change; ancient culture; ancient human; regional planning.

0 引言

当前地球科学正向地球系统科学快速转型发展,突出了跨圈层作用及其地质演化的重要性(2021—2030 地球科学发展战略研究组,2021;郑永飞等,2024).固体圈层与流体圈层在多时空尺度上如何互作,长时间尺度的地幔对流与短时间尺度的海洋大气环流如何交汇,地质上的东西两极与地理上的南北两极如何联动,地质时期与当今的全球变化如何对话(汪品先等,2018;“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”项目组,2024),这些重大科学难题对传统学科体系和知识体系都提出了前所未有的挑战,孕育着重大理论的突破.

与此同时,人类社会正处于百年未有之大变局的关键时期,我国特别重视区域的经济社会发展,党中央先后提出了大湾区、京津冀协同发展、

长江经济带发展、长三角一体化、黄河流域生态保护和高质量发展等区域发展战略.这些区域发展不仅限于资源能源的支撑能力,还涉及气候环境等自然要素,更涉及人文因素.如何将国家区域发展战略与地球系统科学发展紧密结合起来,担当地球科学的初心使命,这是当前我国地球科学家需要深入思考和谋划布局的重大任务.流域地球系统科学是一大可能的突破和融合方向.

流域地球系统科学是在流域尺度上探索跨圈层的地质作用、地质演化与地质效应.至少包括三个层次的研究主题(图 1),分别是流域系统的深浅联动及其资源效应、流域系统的生物与环境的相互作用与协同演化,以及流域环境和人类文明的关系.下面以长江流域为例,探索流域地球系统科学与长江流域发展的关系,提出了推动流域地球系统科学与长江发展的战略.

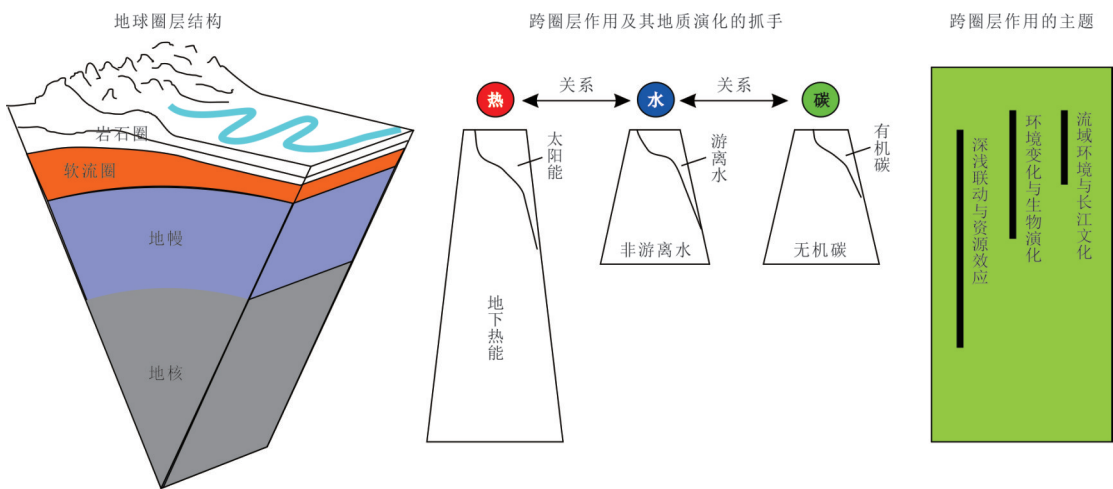


图 1 流域地球系统科学的抓手与研究主题(以长江流域为例)

Fig.1 Key points and scientific issues of the Earth system science of drainage areas , exemplified by Yangtze regions

1 深浅联动及其资源效应

长江流域是特提斯构造域与太平洋构造域的叠加地区,地质过程复杂,深浅联动多样,矿产资源丰富,是从地球系统角度研究多圈层相互作用与资源效应的天然实验室(图 2)。

1.1 主要的研究进展

长江流域的地质作用过程孕育了非常丰富的矿产资源和各类能源.已列入全国矿产储量表的 173 种矿产资源中,长江流域有 128 种,占全国探明矿产种数的 74%(王岩等,2022).品种多、储量大、品位高、多共生、易开采是长江流域矿产资源的突出特点.尽管成矿时代从太古宙到新生代都有分布,但最主要的是晚古生代与中生代,不同时代地层赋矿性具有明显差异.关于流域矿体密集分布的成因机制仍存较多争议,前人提出了多种解释模型,但多认为成矿作用与跨圈层的大规模岩浆活动密切相关(任纪舜,1990;莫宣学,2019).特别是,长江流域是我国锰矿资源的主要产地,在贵州、广西、四川等地区相继取得重大突破,仅贵州资源量就占

全国的 49%(周琦,2024).前人提出许多成矿模型,主要分歧在锰质来源.其中,深部锰质来源近年来得到较为普遍的认可(周琦,2024)。

长江流域卤水锂矿具有分布集中、资源量大的特点,主要分布在青海、湖北和江西等地区(刘成林等,2021).近年来,前人在江汉、吉泰和苏北等长江流域多个中生代盆地发现了高盐度深层富锂卤水,且卤水中钾、铷、铯等元素具有工业开发价值(刘成林等,2016;余小灿等,2022).长江流域新生代深层富锂卤水受控于特殊的构造-岩浆活动背景,是地球表生与内生地质动力联合作用的产物。

长江流域煤炭资源丰富,除寒武系外,还广泛发育于早石炭世、晚二叠世、晚三叠世和新近纪等时代的地层中.作为一种特殊的沉积有机岩石,煤炭可以富集金属并形成煤型战略性金属矿床,煤系中战略性金属元素的赋存状态、分布规律、成矿机制以及有效提取和综合利用的研究因而是近年来煤地质学领域的研究前沿和热点问题(代世峰等,2024).除煤炭资源外,长江流域煤层气资源也十分丰富.煤炭还可为古地理、古气候和构造演化等重大科学问题提供线索。

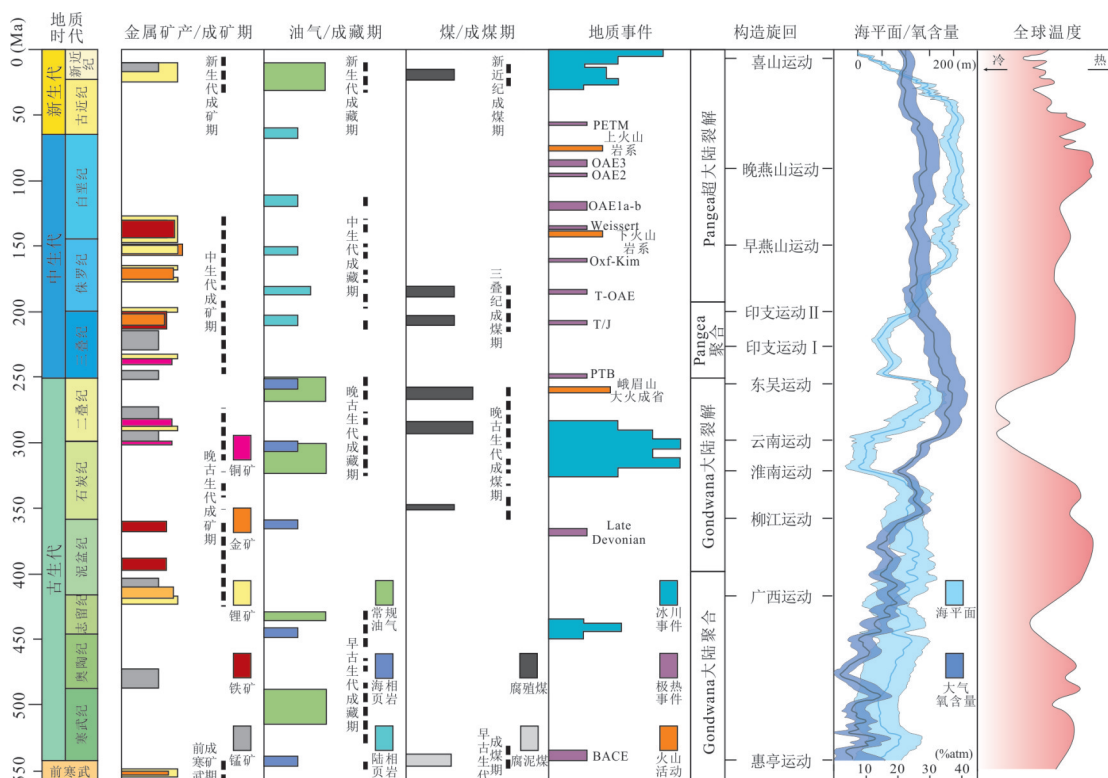


图 2 长江流域深浅联动及其资源效应

Fig.2 Interactions between surface and deep Earth and their resource effects in the Yangtze drainage area
资料主要据宁树正等(2013)、李建康等(2014)、邹才能等(2015)、张金川等(2016)、王登红等(2017)、邓文兵等(2019)、曹明轩等(2020)、王斌等(2020)、张莹刚等(2023)、Van der Meer *et al.* (2022)、Mills *et al.* (2023)

长江流域发育多套黑色岩系,包括震旦系陡山沱组、寒武系麦地坪组-筇竹寺组、奥陶系-志留系五峰组-龙马溪组、二叠系孤峰组-龙潭组-大隆组等。作为地球深部及地表多圈层联动作用下的产物,黑色岩系不仅记录了形成时的地质过程和生物活动,富集了多种贵金属元素,还可以生成石油和天然气,是研究地球系统演化、揭示油气和金属矿产富集机理的关键(Zou *et al.*, 2019; 朱日祥等, 2024)。特别是,黑色岩系不仅是常规油气勘探的烃源岩,也是页岩气的储集岩。长江流域页岩气可采资源量为 15.5 万亿方,占全国 62%(庞飞等, 2020)。作为页岩气生成的物质基础,有机质富集机制是页岩气研究的关键,也是指导页岩气勘查的基础(邹才能等, 2015)。总体而言,有机质富集取决于生物繁殖和埋藏时的古地理、古气候、古海洋及古环境等各种要素的有效配置和耦合,受控于地质时期生物圈与地球各圈层的相互作用。

地热能是蕴藏在地球内部的可再生能源(汪集旸, 2015)。长江流域地热资源丰富、热储类型多样,既有带状热储,也有层状及层状兼带状热储,岩性以花岗岩、砂岩和碳酸盐岩为主(王贵玲等, 2018)。长江流域 11 个省会城市每年可利用地热能折合标准煤 2.0 亿吨,可减排二氧化碳 1.66 亿吨,经济、环境与社会效益显著(王贵玲等, 2020)。

1.2 拟解决的关键科学难题

尽管前人在长江流域深浅联动的资源效应方面已经取得了许多重大认识,但还有许多关键难题有待突破。

一是区域的深浅联动问题。深地系统通过火山、构造运动对表层系统产生了重要影响,这已经有了许多共识,但人们对表层系统如何影响深地系统和深部过程目前还知之甚少。研究表明,地表系统的沉积物对造山运动、板块运动的启动、板块俯冲过程和速度、火山活动、地幔不均一性等都能产生重要影响。特别重要的是,长江中下游地区地层中的膏岩层物质可能对矽卡岩型-玢岩型铁矿的成矿和物质聚集有重要的作用,但浅表的膏岩层影响岩浆演化和热液活动的机制目前仍不清楚(Zeng *et al.*, 2024)。长江贯通以后,通过沉积物在时空上的变化如何影响深部地质过程,目前还没有答案。长江流域的表层系统如何影响各种深地过程还没有系统的实质性定量化评估。特别是,深浅联动的资源效应仍有待深入探究。例如,康滇地

区古-中元古代 Fe-Cu-Co 成矿带发育沉积型的 Cu-Co 矿床和热液型的 Fe-Cu-Co 矿床,两类矿床分别受控于沉积过程和岩浆热液活动,并在中-新元古代共同经历了变质-热液活动的叠加改造,成矿元素的迁移和富集机制存在争议。

二是流域的新能源问题。卤水锂资源、地热资源和氢能是长江流域重要的新能源类型。

全球范围内的高原环境可能是盐湖卤水钾锂成矿的重要条件之一(Munk *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2023),但长江流域白垩纪-古近纪是否存在高原地貌或沿岸高山仍需进一步论证。锂元素是否来自岩浆分异热流体,或来自花岗岩、结晶基底及老地层也尚不清楚。作为一种可再生能源,地热能与断裂系统关系密切(王贵玲等, 2020),断裂的发育程度、延伸深度和连通性对地热资源的形成和分布起着决定性作用。目前,人们对长江流域不同性质的断裂系统如何影响浅部与深部地热资源的分布及其对地热流体的补给、循环与排泄仍认识不清。氢能是一种清洁、高效、零碳的能源载体。氢源、连通氢源的断裂及具有储集和封存氢气能力的圈闭是氢气成藏的三个关键要素(Jin *et al.*, 2024)。中国东部深部流体活动地区检测到了高含量的氢气(魏琪钊等, 2024)。地质历史时期由于地壳减薄、地幔上涌而形成的裂谷型盆地,如长江流域的苏北盆地可能是我国氢气勘探的有利远景区(Jin *et al.*, 2024; 魏琪钊等, 2024)。

三是资源的开发利用问题。2021 年 3 月 1 日,我国第一部流域法,即《中华人民共和国长江保护法》正式实施。该法律对长江流域矿产资源开发、利用、保护、修复等方面做出了重要的制度安排,以确保在资源开发的同时保护生态环境,实现可持续发展。要在牢牢守住生态红线的同时,加强区域内成矿规律研究与成矿预测,在成矿潜力较大的靶区内找矿采矿,通过加强产业的集中度,降低对环境的影响。资源高效综合利用是实现长江流域可持续发展的关键。比如,长江中下游地区的矽卡岩型铜金铁矿床中普遍伴生有镉、钴、硒、碲和铼等重要元素,之前并未得到很好的利用。通过尾矿治理回收不仅可以解决环保问题,还可提供国家亟需的关键资源。深层-超深层油气是未来能源勘探的主战场。长江流域深层油气资源丰富、勘探开发程度低,中西部叠合盆地深层发育的多套油气成藏组合、东部断陷盆地深洼区与前中-新生界

古潜山油气藏、深层页岩气、煤层气等资源潜力巨大,勘探开发前景广阔,是未来重点攻关领域。

2 生物演化与环境变迁的关系

在地球历史上,生物与环境一直在发生相互作用,进而出现协同演化的关系(谢树成和殷鸿福, 2014)。长江流域跨越了我国三大地貌台阶,当今流域的生态系统是长期演化的结果,涉及生物圈与其他圈层之间的相互作用(图3),其中的关键是水热配置与生物演化的关系。

2.1 主要研究进展

扬子板块发育了很好的地层系统,记录了当时海洋生态系统的演变,以及区域的气候环境与生物之间的长期相互作用过程。我国目前拥有的11个金钉子都来自这个地区。

在元古宙,扬子板块北缘的神农架地区是世界上晚前寒武纪地层保存最完整的地区之一。尽管世界其他地方发现了41亿年前可能存在的生命迹象,但扬子板块的最早生命系统大多发育在中元古界。中元古界神农架群发育丰富的含叠层石白云岩。叠层石类别多样,纹层清晰,是记录区域早期微生物演化及其与环境关系的重要岩石,可能蕴

含着原核生物向真核生物发展演化以及真核生物多样化的过程,但这方面还未有实质性的突破。

神农架地区新元古界由下自上分为青白口系、南华系、震旦系,其中南华系包括莲沱组、古城组、大塘坡组和南沱组。古城组和南沱组主要由冰碛岩组成,大塘坡组属间冰期沉积。南沱组冰碛岩之上直接被约635 Ma前的华南陡山沱组盖帽碳酸盐岩所覆盖。盖帽碳酸盐岩是指直接覆盖于新元古代冰碛岩之上的,主要由微晶方解石和白云石等组成的相对均质的薄层状碳酸盐岩地层。盖帽白云岩标志着新元古代全球性冰川“雪球地球”事件的结束,它具有独特的沉积构造以及显著的碳同位素负漂移等地球化学特征。新元古界很好地记录了雪球地球时期及其消融过程中的生物演化。Ye *et al.* (2015)曾在冰期沉积的泥质层发现了大型宏体生物,冰碛岩之上的盖帽白云岩可能是微生物作用的产物(Chang *et al.*, 2020)。

在显生宙,寒武纪清江生物群的发现则见证了后生动物的大爆发(Fu *et al.*, 2019)。奥陶纪早期出现了生物大辐射,晚期则以显生宙的第一次生物大灭绝为特征。志留纪-泥盆纪出现了鱼类的多样化过程以及随后的显生宙第二次生物大灭绝。石炭纪-二叠纪出现陆地生态系统的大发展,特别是热带雨

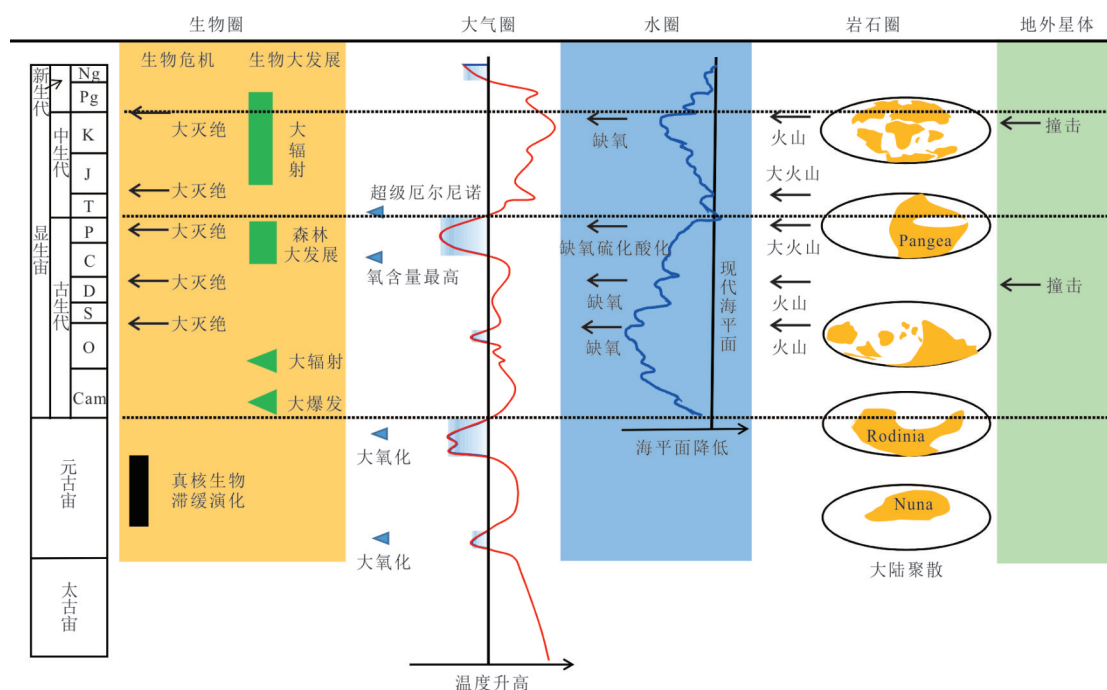


图3 生物圈与地球其他圈层以及地外星体的关系

Fig.3 Interactions and co-evolution among the biosphere, the other Earth spheres and the extraterrestrial bolides

其中,缺氧、火山活动、地外星体撞击等重大地质事件只标出与生物大灭绝相关的层位。资料据 Cloud (1948)、Hallam (1992)、Raup (1992)、Sepkoski (1986)、Ernst and Youbi (2017)、Li *et al.* (2019)、Lyons *et al.* (2021)、谢树成 (2023)、Sun *et al.* (2024)

林的出现,进而导致冰期的出现(Judd *et al.*, 2024).二叠纪-三叠纪之交见证了从冰室气候向温室气候转变过程中出现的显生宙的第三次生物大灭绝(Sun *et al.*, 2012),并出现了超级厄尔尼诺现象(Sun *et al.*, 2024),扬子地区是全球研究这次最严重生物危机及其与气候关系的最好区域.三叠纪见证了生物危机后生态系统的快速复苏而出现的贵阳生物群(Dai *et al.*, 2023),末期见证了第四次生物大灭绝.侏罗纪以来形成了诸多的陆相盆地,开始了陆地生物演化进程.

印支运动和燕山运动使得流域系统开始成形与发育.在 23 Ma 前,流域的上、中、下游还各自独立发展,主体还处于行星风系控制的气候背景.23 Ma 之后,季风系统形成并加强(Guo *et al.*, 2002),导致水热配置出现重大变化,原本干旱的中下游地区变得湿润,长江贯通并不断地发展演化(Zheng *et al.*, 2013).

2.2 拟解决的关键科学难题

目前,人们对流域系统所在区域的生物演化史及其与气候环境的关系已经有了框架性认识,但一些关键科学难题还有待于深入,具体包括这样三个层次的科学难题.

首先,气候环境演化的驱动力问题.这是一个非常复杂的重大挑战性难题,涉及地球与其他星球的关系、地球系统内外的联动,以及地球表层系统各圈层之间的相互作用.主要的难题包括新元古代雪球地球的形成与消融、第二次大氧化事件的时间与过程及其机制、二叠纪末期的大海退、显生宙海洋水化学的演化(特别是方解石海与文石海的交替演变)、冰室气候向温室气候的转变过程与机制、行星风系向季风系统(包括巨季风系统)转变的过程和机制,等等.

其次,在生物与环境关系中,人们了解更多的是气候环境变化对生物演化的影响,但反过来,生物演化又是如何影响气候环境变迁的,了解得极少.一方面是缺乏定量化的数值模型模拟,另一方面对生态系统运转的齿轮——地质微生物了解得很少,特别是那些对气候环境起重要作用的地质微生物功能群在分布、结构和丰度等方面的特征,研究得很有限.例如,从前寒武纪以微生物为主导的扁平生态系统到寒武纪生命大爆发以后出现了立体生态系统,这种生态转变除了人们熟知的底质革命以外,到底对气候环境起了多大作用,目前还没有定量化的评估.又例如,

二叠纪-三叠纪之交最严重的生物大灭绝发生以后,在早三叠世出现了极端温室气候,生态系统危机对这一极端气候事件到底贡献有多大,人们一无所知.因此,生态系统大发展以及大危机出现以后,对气候环境影响的评估需要极大加强.

最后,生物与生物之间的相互作用问题.人们已经开展了大量生物类群及其演化的研究,但对生物与生物之间的相互作用了解得极少.尽管在昆虫与植物的协同演化上已经有了许多认识,但有关植物与动物、宏体生物与微生物之间的相互作用知之甚少(谢树成和罗根明, 2023).例如,在地球历史上,每次重大生物演化事件都与气候环境密切相关,但后者如何通过影响生物之间的相互作用而影响生物演化的,病毒是否通过基因水平转移而影响宏体生物的重大演化事件?每次重大生物演化事件是否是病毒-微生物-宏体生物之间在分子水平上的相互作用造成的?这些重大难题都有待破解.特别是,由于强烈的人类活动,流域环境出现退化,那么人类活动如何通过微生物过程影响气候变化和流域环境退化,阐述这个因果逻辑链,直接关系到如何利用微生物进行效应评估、危机预警和生境修复.

3 流域环境与长江文化的关系

全球四大古文明都发源于大河流域,包括非洲尼罗河中下游地区的古埃及、西亚幼发拉底河和底格里斯河的古巴比伦、南亚印度河和恒河中下游地区的古印度,以及东亚黄河和长江中下游地区的古代中国.长江流域具有灿烂的古文化和古文明,与流域环境演变密切相关,流域见证了“百万年人类史,一万年文化史,5千多年文明史”(王学斌, 2022).这里以长江中游,特别是湖北省境内的古人类、古文化和古文明发展为例进行分析.

3.1 区域气候环境对古人类和古文化时空演替的影响

鄂西早期古人类主要包括“建始人”和“郧县人”等(李天元和冯小波, 2004; 湖北省博物馆, 2007).建始直立人遗址位于湖北省恩施土家族苗族自治州建始县,地质年代为 2.15~1.95 Ma 之间,是中国首次发现的直立人与巨猿共生的化石点.之后,在湖北郧县汉江河畔发现了“郧县人”,既有直立人的原始性,又有早期智人的进化特征,地质时代为 1.0~0.8 Ma,对研究直立人与早期智人的关系意义重大

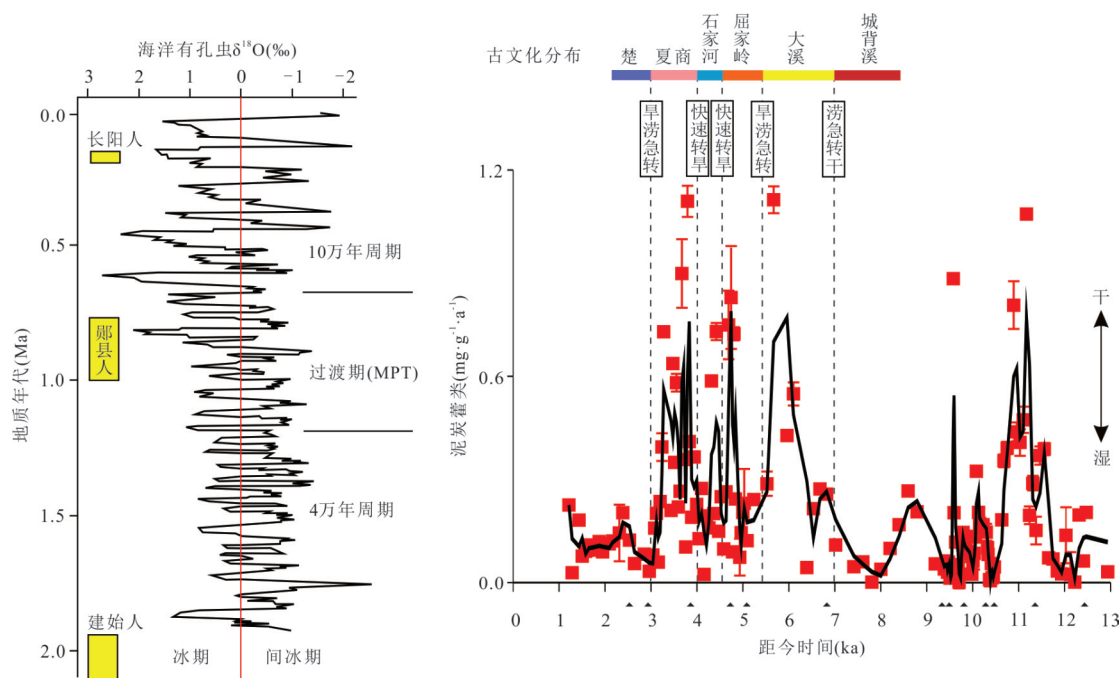


图4 气候(温度-左和湿度-右)变化与长江中游古人类(左)和古文化(右)的关系

Fig.4 Relationship among the climate (temperature-left and hydroclimate-right) change, ancient human (left) and ancient cultures (right) in the middle of Yangtze regions

据 Shackleton and Dpdyke(1976)和 Xie *et al.* (2013)修改

(湖北省博物馆, 2007). 除此之外, 在清江流域长阳地区发现了距今近 200 ka 的早期智人“长阳人”(徐行华, 2019), 并在长阳地区发现 130 ka 前的人类用火遗迹. 值得注意的是, “建始人”生活的时期是全球气候突变时期, 大致对应了沃克环流和赤道太平洋东西温度梯度的加强(Ravelo *et al.*, 2004). “郧县人”生活的时期正是中更新世气候转型期(Mid-Pleistocene transition, 简称 MPT), 也叫中更新世革命(1.25~0.70 Ma), 气候从对称的 41 ka 主导周期向不对称的 100 ka 主导周期转变(Shackleton and Dpdyke, 1976; Pisias *et al.*, 1981), 冰期开始变强, 持续时间加长, 这种气候转型通过影响哺乳动物而影响古人类的演化(图4). 由此可见, 生活在旧石器时代的古人类演化与区域乃至全球的气候变化特别是温度变化密切相关.

除了旧石器时代的古人类演化与流域环境变迁有关系外, 新石器时代的古文化发展也与流域环境有关, 特别是水文气候(图4). 通过鄂西神农架地区大九湖泥炭地的好氧细菌藓烷通量重建的干湿古气候变化, 与长江中游的古文化演替具有很好的对应关系(Xie *et al.*, 2013), 一般从涝到旱或者从旱到涝的急剧转变时期, 也就是旱涝急转时期正是古文化转换时期. 同时, 干湿古气候还影

响了古文化遗址的空间迁移, 干的时期古文化遗址明显在江汉盆地增多, 湿的时期(因易发洪涝)古文化遗址在高地上相对增多. 新石器文化之后的夏商时期总体偏干, 甚至是全新世以来流域最干的时期, 代表商文化的盘龙城才能建立在长江边. 相反, 之后的楚文化时期, 则是长江中游比较湿润的时期, 易发洪涝, 楚文化在农业、水利、军事、生活和宗教上都体现了水的印记(谢树成等, 2015).

如果说旧石器时代的古人类演化与温度变化关系密切, 那么新石器文化的演替则与流域的干湿变化相关. 前者古人类主要生活在洞穴内, 温度可能通过影响哺乳动物等食物来源而影响古人类的演化. 后者, 古人类走出洞穴进入平原生活, 与干湿有关的旱灾和洪灾变为重要的影响因子. 长江流域考古发现的水利系统与区域的这些水文气候密切相关. 长江中游的屈家岭遗址出现了迄今考古发现最早的水利设施之一(湖北省文物考古研究院等, 2024), 石家河遗址则出现了护城河和城内的水系、水门、拦水坝、小型水库、东河引水工程等组成的大型水利系统(方勤等, 2023). 长江下游的良渚遗址发现了由外围水利设施和城址区的古河道及水城门系统构成的一整套水利系统(浙江省文物考古研究所, 2019). 流域的城

头山遗址、凤凰咀遗址、城河遗址、纪南城遗址等都发现了利用水资源的遗迹和现象(方勤, 2024)。

3.2 区域地质地理环境对长江文化特质的影响

长江流域强大而多样的生态环境资源孕育了璀璨的中华文明,从这一点上来说,流域环境应该也对长江文化的特质产生了一些重要影响,也就是说地质地理方面的要素与长江文化的一些要素存在关联性(冯天瑜, 1991; 邓先端, 2002; 刘玉堂, 2016)。

首先,长江流域的地质地理环境具有非常高的多样性,比如大家熟悉的江汉盆地的湿地生态系统、周边山区的洞穴系统等。这样自然环境的多样性就影响了这个地区古代文化或者古代文明的多样性,所以长江流域的古文化特别丰富。例如上游的巴蜀文化,中游的石家河文化、楚文化等荆楚文化,下游的良渚文化、上山文化等吴越文化。

其次,长江中下游总体处于平原地区,相对比较开阔,古人交流就会很容易、很多,这样反映在文化上,就具有很好的开放性和包容性。

再次,这个地区的资源特别丰富,除了水资源、生物资源、土地资源外,还有矿产资源,例如鄂东南的铁矿、铜矿等。有了这么多资源,先人就会创造出许多办法来利用它们,包括水利系统、矿冶技术等,这样容易导致文化具有很强的创新性和进取性。实际上,新石器文化的许多水利工程,青铜器和铁器时代的金属利用技术等都体现了这些创新。铜绿山先民采矿冶铜,以盘龙城、曾国为代表的地方重镇保障了铜矿资源可以源源不断地输送到中原,造就了以“金道锡行”为核心的青铜文明。

最后,也是最重要的是,尽管这个地区经常出现洪涝、频繁的旱涝急转等自然灾害,但古文化不断发展,勾勒出从依赖自然,到治理自然,再到人地和谐的发展轨迹。党中央提出的长江流域实行“共抓大保护、不搞大开发”,为我们正确处理人与自然的和谐关系指明了方向。

3.3 拟解决的关键科学难题

尽管人们已经在流域环境以及流域的古文化方面都取得了突出进展,也基本建立了两者之间存在密切联系的大框架认识,但一些关键难题还有待深入。

首先,剖析中华文明演化连续性的区域环境因素。在世界四大文明中,唯一一直在发展演化而没有中断的文明是中华文明,这种特质的形成在多大程度上是受到区域环境发展演变的影响,

又有多大程度是源于文明本身所固有的特质,这是一个值得深入探讨的问题。特别是,黄河文化与长江文化进行了多次的相互影响,有些时期是黄河文化对长江文化产生更大的影响,有些时期则正好相反。这些相互影响的环境驱动因素是什么。

其次,需要加强定量化和多学科交叉融合研究,实现从定性到量化评估的跨越。流域气候环境的变化可以实现量化,古文化的时空变迁也需要进行定量分析,只有这样才能定量评估流域环境变迁对古文化演替的贡献权重。一方面,需要借助当今区域自然地理的技术方法进行分析,另一方面需要借助大数据和数值模型进行量化剖析。这些定量分析特别需要多学科的交叉融合工作,自然科学与人文社科交叉融合的难度很大,需要构建新的平台以促进这方面的交叉融合,形成从跨学科体系向超学科体系的发展。超学科体系是跨学科的高级阶段,是从经济社会面临的重大现实难题出发,开展自然科学与社会科学等不同学科领域的合作。

4 流域系统的跨圈层作用与水热碳关系

前述三大主题分别阐述了流域地球系统与资源、环境和文化发展的关系,这是一个区域发展的关键核心要素。那么,通过什么“牛鼻子”可以把这三大主题整合起来而放在地质时间轴上形成一个统一的整体?也就是流域地球系统科学的跨圈层相互作用在地质时间演化上需要主抓的“牵一发而动全身”的核心是什么。这个核心需要把流域的深地系统与表层系统这两大体系放在地质时间轴上统一起来,同时又能服务区域经济社会的发展。

4.1 跨圈层地质作用与水热碳的可能关系

笔者提出了用水热碳的关系来统筹流域这个庞大系统的跨圈层作用及其地质时间演化(图1)。水热碳的关系实际上体现了流域物质循环和能量流动的关系,记录了流域系统物理过程、化学过程和生命过程交织的动力学过程,是跨圈层地质作用过程的具体写照,但人们对三者之间的关系了解得极少,阐述三者之间的关系是流域地球系统科学的关键所在。不同流域、同一流域的不同演化阶段具有不同的水热配置、水碳关系。例如,长江流域是一个湿润地区,发育了种类众多的湿地生态系统,而同一纬度的其他地区则多

半是干旱半干旱地区,长江流域就以特殊的水热碳关系区别于其他地区.同时,长江流域形成之前和形成之后也具有明显不同的水热碳关系.

首先,水是流域系统有别于其他系统的一大关键因素,实际上体现了水圈与其他圈层的关系.从流域角度来分析,表层系统的一大重要特征是水.没有水就没有流域系统,水造就了流域系统的各种生境,特别是湿地生态系统.长江流域出现的众多湿地生态系统与水密切相关.流域系统的人类从古到今围绕水这个主题不断地发展和抗争,包括水影响水利工程、农业乃至军事和宗教,进而影响了古文化的演替.这一点在长江流域的新石器文化以及楚文化上反映得尤其明显.例如,新石器时代的城背溪文化、大溪文化、石家河文化、屈家岭文化等不同文化之间的演替都与地区的水文状况密切相关(Xie *et al.*, 2013).实际上,人文要素离不开自然环境,流域环境是文化形成演化的根基,长江流域文明起源与发展依赖于流域的自然资源与自然生态系统的巨大服务功能.环境变迁的周期性特征塑造了古文化演化的阶段性,这正是“一方水土养育一方人”的最好写照!

从表层系统进入深地系统,水也起了至关重要的作用.板块俯冲可以把地表大量的水通过沉积物输入到深地系统,并对区域的物质组成和结构、岩浆活动、构造变形、地震产生影响.超大陆的聚合被认为是沉积物的润滑作用加速了板块俯冲作用而造成的,其中水是关键.就扬子板块而言,以下现象是否与水存在或多或少的联系,值得深入探索:扬子板块北缘与南秦岭邻接,西部与神农架、松潘甘孜接壤,都出现过多岛洋,并在新元古代出现比较频繁的洋陆俯冲(Deng *et al.*, 2017);长江上游的三江地区出现的居里面变浅、在35~28 Ma出现深熔变质、在15~8 Ma出现动力学转换等深地过程的时空变化;在现代扬子区的深部,上地壳出现的低阻,中下地壳和地幔出现软弱层等.另外,一些区域地质灾害也与水文状况有关.例如,暴雨导致区域的滑坡频发(梁益同等, 2015);三峡蓄水后,水通过断裂进入三叠纪灰岩,造成孔隙水压力增加,导致巴东地区出现一些地震(Huang *et al.*, 2018).

其次,碳也是一个影响流域地球系统过程的重要因素,这实际上体现了生物圈与其他圈层的关系.地球上的生命都是碳基生命,而表层系统的各类过程都或多或少有生命系统的参与,特别是微生物,

因而流域表层系统的各类过程都涉及碳循环.最近发现,泥炭湿地生态系统,通过高等植物与微生物的相互作用可以减少甲烷等温室气体向大气排放,可以实现基于自然过程的碳减排(Huang *et al.*, 2018).这样的甲烷过程也可以出现在动物与微生物之间(Sun *et al.*, 2024).在深地系统,地幔是地球上最大的碳储库,岩浆作用和火山活动等许多深地过程通过挥发分影响表层系统,而挥发分除了水就是CO、CO₂、CH₄等含碳的气体.

最后,热是影响表层系统和深地系统相互作用的另一个关键因素.水和碳都是流域系统的重要物质循环.一个系统除了物质循环还有能量流动,也就是热的问题.在表层系统,热直接影响能量分配,进而影响温度、降水等气候条件,热驱动了大洋环流、大气环流和生命活动(Jian *et al.*, 2022).当然,地球深部最重要的一个特征是热,不管是岩浆活动还是火山活动乃至地震都是释放热的过程,把深地的热传导到地表,深地系统通过热强烈地影响和改变了表层系统的演化.

4.2 未来需要突破的若干难题

在数据驱动的科学范式变革时代(Fan *et al.*, 2020),围绕流域地球系统科学的跨圈层地质作用与水热碳的关系,未来需要突破许多重大科学难题.下面以长江流域为例进行分析.

第一大难题是新生代青藏高原隆升与中国东部地区气候演变、水系重组和湿地系统演变的关系.这是流域深浅联动与水热碳的关系.青藏高原隆升对东亚乃至全球气候的影响人们已经有了比较清楚的认识,尽管一些具体机制还有待深入.高原隆升对东部气候的演变目前只有一些大框架的认识,还没有取得重大的实质性突破,特别是对东部地区干湿古气候的演化及其对水系重组的影响目前还了解得极少,长江贯通虽有较大进展,但还存在一些争议.干湿古气候演变和水系重组又极大地影响流域环境变化,特别是流域的湿地生态系统,但水热关系、水碳关系还远未查明.例如,23 Ma 青藏高原快速隆升、风系的转变所导致季风降雨的时空变化,以及这些变化反过来又对三大台阶地貌以及长江贯通的影响.又例如,构造掀斜作用导致流域沉降中心不断地发生空间迁移,特别是长江中游沉降中心从云梦泽到洞庭湖转移,对流域环境和古人类活动都有重大的影响.再例如,伊佐奈琦洋的洋中脊向下扬子克拉通地幔

的俯冲,可能与长江中下游的成矿带有关,但与黄海和东海分异的关系,以及对长江中下游环境的影响,目前还不清楚(杨文采,2023)。反过来,水作为流域的一个标志性要素,在影响表层系统的同时,又是如何影响深地系统的,目前还知之甚少,亟待不同领域的专家去攻克。最近相关研究揭示了河流袭夺事件是助推珠穆朗玛峰成为世界之巅的一大因素,说明了河流演化对山峰高度的深远影响(Han *et al.*, 2024)。

第二大难题是流域干湿气候、湿地系统与地质灾害、资源能源的关系。这是地球表层系统水热碳对资源和灾害的影响。以气候干湿状况为代表的水,不仅决定了流域现代湿地生态系统的发育情况,而且还与江汉盆地白垩纪到古近纪的古盐湖发育情况有关,后者又与锂资源密切相关。流域的暴雨,特别是旱涝急转,会对区域的滑坡等地质灾害产生重要影响。干湿状况又影响碳酸盐岩地区的岩溶地质作用,后者又对碳循环产生重要影响。据研究,洞穴很可能是温室气体甲烷的一个汇(Lennon *et al.*, 2017)。所有这些变化,又直接影响了古文化的演替以及现代文明的发展(谢树成等, 2015)。尽管在这些主题上已经有了一些初步认识,但还有待于深入,特别是在机制方面。正由于区域上水热碳关系的机制不清,定量化研究程度不够,导致很难对一些地球表层系统的重大地质事件做出准确的预警和预测。人们亟需依靠大数据对地球表层系统这些挑战性难题进行突破。

第三大难题是流域重大工程对长江水系演化与人类文明发展的影响。长江流域是全球四大文明的发源地之一,从古到今的人类活动都很强烈,特别是在当代。为了应对各种难题,人们修建了诸多重大工程。这些工程对长江水系的演化会产生怎样的影响,目前还很不清楚。例如,被誉为“国之重器”的三峡大坝可以说是全球最大的水利工程,通过发电、航运、防洪、旅游等诸多方面对我国经济社会产生了巨大有益的影响,但也对库区和下游的生态环境和诸多河道产生了不利的影响。下游水位下降,一些河道淤积加剧,而另一些河道则侵蚀作用加剧(许全喜等,2023)。随着时间的积累,这些不同河道进行的不同地质作用势必对整个长江水系产生影响,进而影响整个流域的生态环境。这些变化又直接影响未来产业的布局 and 规划,进而影响区域经济社会的发展。但目前由于缺乏定量研究,缺乏大数据和数值模拟研究,人们还很难预测未

来百年乃至千年时间尺度整个水系会如何变化。这种预测直接关系到流域的未来发展,因而具有特别重要的意义。长江模拟器的推出为解决这些难题提供了一个重要的科技支撑(夏军等,2022)。

5 结论

流域地球系统科学是当前地球系统科学时代的一大突破方向,它不仅可以解剖流域体系与地球系统科学有关的重大理论难题,而且还可以为区域经济社会的发展提供科学支撑。其中,最为关键的是三大主题,包括深浅联动及其资源效应、生物演化与环境变迁的关系,以及流域环境与古文化和古文明的关系。为了促进人类社会的可持续发展,当前更要突破流域环境与区域文化的关系,这需要实现从跨学科到超学科体系的发展,需要大数据和数值模型模拟等定量研究。

如何统一流域地球系统科学的这三大主题至关重要,而解剖水热碳三者之间的关系是关键。不同流域、同一流域的不同演化阶段具有不同的水热配置、水碳关系,长江流域与同纬度其他地区的对比,以及长江流域的不同演化阶段等都具有不同的水热碳关系。水和碳涉及一个流域的物质循环,而热则是一个流域的能量流动,因此,水热碳关系实际上承载了流域系统的跨圈层作用过程这个地球系统科学的核心。

致谢:谨以此文祝贺恩师殷鸿福院士 90 华诞,感谢他不断开拓学科新方向,推动古生物学向地球生物学的发展!

References

- Cao, M. X., Chu, P. L., Duan, Z., et al., 2020. Spatial-Temporal Evolution and Controversy of the Mesozoic Volcanism in South China. *Geological Review*, 66(4): 795—812 (in Chinese with English abstract).
- Chang, B., Li, C., Liu, D., et al., 2020. Massive Formation of Early Diagenetic Dolomite in the Ediacaran Ocean: Constraints on the “Dolomite Problem”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(25): 14005—14014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916673117>
- Cloud, P. E. Jr., 1948. Some Problems and Patterns of Evolution Exemplified by Fossil Invertebrates. *Evolution*, 2 (4): 322—350. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1948.tb02750.x>

- Dai, S. F., Zhao, L., Wang, N., et al., 2024. Advance and Prospect of Researches on the Mineralization of Critical Elements in Coal-Bearing Sequences. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43(1): 49—63 (in Chinese with English abstract).
- Dai, X., Davies, J. H. F. L., Yuan, Z. W., et al., 2023. A Mesozoic Fossil Lagerstätte from 250.8 Million Years Ago Shows a Modern-Type Marine Ecosystem. *Science*, 379(6632): 567—572. <https://doi.org/10.1126/science.adf1622>
- Deng, H., Peng, S. B., Polat, A., et al., 2017. Neoproterozoic IAT Intrusion into Mesoproterozoic MOR Miaowan Ophiolite, Yangtze Craton: Evidence for Evolving Tectonic Settings. *Precambrian Research*, 289: 75—94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.003>
- Deng, W. B., Zhang, Y. W., Kong, L. H., et al., 2019. Current Status of Manganese Ore Resources in China and Selecting for National Physical Geological Data of Manganese Ore Deposits. *China Mining Magazine*, 28(9): 175—182 (in Chinese with English abstract).
- Deng, X. R., 2002. Ecological Characteristics of the Culture in the Yangtze Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 11(3): 199—202 (in Chinese with English abstract).
- Ernst, R. E., Youbi, N., 2017. How Large Igneous Provinces Affect Global Climate, Sometimes Cause Mass Extinctions, and Represent Natural Markers in the Geological Record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 478: 30—52. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.03.014>
- Fan, J. X., Shen, S. Z., Erwin, D. H., et al., 2020. A High-Resolution Summary of Cambrian to Early Triassic Marine Invertebrate Biodiversity. *Science*, 367(6475): 272—277. <https://doi.org/10.1126/science.aax4953>
- Fang, Q., 2024. To Continually Deciphering the Meaning of the Changjiang Culture (for Inheritance). China Daily, 31st of August, Page 7 (in Chinese).
- Fang, Q., Zhao, Y., Li, R., et al., 2023. Archaeological Investigation on the Irrigation System and the Relic Site of Shijiahe. *Jianhan Archaeology*, (1): 19—35, 145 (in Chinese).
- Feng, T. Y., 1991. Geographical Environment and Culture Innovation. *Theory Monthly*, (1): 6—10 (in Chinese).
- Fu, D. J., Tong, G. H., Dai, T., et al., 2019. The Qingjiang Biota: A Burgess Shale-Type Fossil Lagerstätte from the Early Cambrian of South China. *Science*, 363(6433): 1338—1342. <https://doi.org/10.1126/science.aau8800>
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., et al., 2002. Onset of Asian Desertification by 22 Myr ago Inferred from Loess Deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159—163. <https://doi.org/10.1038/416159a>
- Hallam, A., 1992. Phanerozoic Sea-Level Changes. Columbia University Press, New York.
- Han, X., Dai, J. G., Smith, A. G. G., et al., 2024. Recent Uplift of Chomolungma Enhanced by River Drainage Piracy. *Nature Geoscience*, 17: 1031—1037. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01535-w>
- Huang, R., Zhu, L. P., Encarnacion, J., et al., 2018. Seismic and Geologic Evidence of Water-Induced Earthquakes in the Three Gorges Reservoir Region of China. *Geophysical Research Letters*, 45(12): 5929—5936. <https://doi.org/10.1029/2018gl077639>
- Huang, X. Y., Pancost, R. D., Xue, J. T., et al., 2018. Response of Carbon Cycle to Drier Conditions in the Mid-Holocene in Central China. *Nature Communications*, 9(1): 1369. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03804-w>
- Hubei Institute of Cultural Relics and Archaeology, Jingmen Museum, Jingmen Protection Center of Qujialing Relic Site, 2024. Relic Site of Qujialing in Jingmen of Hubei Province. *Archaeology*, (10): 18—33 (in Chinese).
- Hubei Provincial Museum, 2007. Yunxian Man: The Ancient Human in the Middle Yangtze Region. Cultural Relics Press, Beijing (in Chinese).
- Jian, Z. M., Wang, Y., Dang, H. W., et al., 2022. Warm Pool Ocean Heat Content Regulates Ocean-Continent Moisture Transport. *Nature*, 612(7938): 92—99. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05302-y>
- Jin, Z. J., Zhang, P. P., Liu, R. C., et al., 2024. Discovery of Anomalous Hydrogen Leakage Sites in the Sanshui Basin, South China. *Science Bulletin*, 69(9): 1217—1220. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.03.002>
- Judd, E. J., Tierney, J. E., Lunt, D. J., et al., 2024. A 485-Million-Year History of Earth's Surface Temperature. *Science*, 385(6715): eadk3705. <https://doi.org/10.1126/science.adk3705>
- Lennon, J. T., Nguyễn-Thùy, D., Phùm, T. M., et al., 2017. Microbial Contributions to Subterranean Methane Sinks. *Geobiology*, 15(2): 254—258. <https://doi.org/10.1111/gbi.12214>
- Li, J. K., Liu, X. F., Wang, D. H., 2014. The Metallogenic Regularity of Lithium Deposits in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269—2283 (in Chinese with English abstract).
- Li, T. Y., Feng, X. B., 2004. The Ancient Human in the Yangtze Regions. Hubei Education Press, Wuhan (in Chinese).

- Chinese).
- Li, Z. X., Mitchell, R. N., Spencer, C. J., et al., 2019. Decoding Earth's Rhythms: Modulation of Supercontinent Cycles by Longer Superocean Episodes. *Precambrian Research*, 323: 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.01.009>
- Liang, Y. T., Liu, J. H., Li, L., et al., 2015. Study of Estimating Critical Rainfall of Landslide Based on Soil Erosion Model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24(3): 464–468 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Lowenstein, T. K., Wang, A. J., et al., 2023. Brine: Genesis and Sustainable Resource Recovery Worldwide. *Annual Review of Environment and Resources*, 48: 371–394. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112621-094745>
- Liu, C. L., Yu, X. C., Yuan, X. Y., et al., 2021. Characteristics, Distribution Regularity and Formation Model of Brine-Type Li Deposits in Salt Lakes in the World. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2007–2029 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Yu, X. C., Zhao, Y. J., et al., 2016. A Tentative Discussion on Regional Metallogenic Background and Mineralization Mechanism of Subterranean Brines Rich in Potassium and Lithium in South China Block. *Mineral Deposits*, 35(6): 1119–1143 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. T., 2016. Characteristics of Changjiang Culture. *Culture Development Review*, 15(2): 97–100 (in Chinese).
- Lyons, T. W., Diamond, C. W., Planavsky, N. J., et al., 2021. Oxygenation, Life, and the Planetary System during Earth's Middle History: An Overview. *Astrobiology*, 21(8): 906–923. <https://doi.org/10.1089/ast.2020.2418>
- Mills, B. J. W., Krause, A. J., Jarvis, I., et al., 2023. Evolution of Atmospheric O₂ through the Phanerozoic, Revisited. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 51: 253–276. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-032320-095425>
- Mo, X. X., 2019. Magmatism and Deep Geological Process. *Earth Science*, 44(5): 1487–1493 (in Chinese with English abstract).
- Munk, L. A., Hynke, S. A., Bradley, D. C., et al., 2016. Lithium Brines: A Global Perspective. In: Verplanck, P. L., Hitzman, M. W., eds., Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. Society of Economic Geologists, Littleton. <https://doi.org/10.5382/rev.18.14>
- Ning, S. Z., Li, H. T., Tan, J. Q., et al., 2013. Coal Resources Distribution and Tectonic Division in Southern China. *Coal Science and Technology*, 41(7): 16–18, 23 (in Chinese with English abstract).
- Pang, F., Zhang, Z. H., Zhang, J. F., et al., 2020. Progress and Prospect on Exploration and Development of Shale Gas in the Yangtze River Economic Belt. *Earth Science*, 45(6): 2152–2159 (in Chinese with English abstract).
- Pisias, N. G., Moore, T. C., 1981. The Evolution of Pleistocene Climate: A Time Series Approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 52(2): 450–458. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(81\)90197-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(81)90197-7)
- Raup, D. M., 1992. Large-Body Impact and Extinction in the Phanerozoic. *Paleobiology*, 18(1): 80–88. <https://doi.org/10.1017/s0094837300012227>
- Ravelo, A. C., Andreasen, D. H., Lyle, M., et al., 2004. Regional Climate Shifts Caused by Gradual Global Cooling in the Pliocene Epoch. *Nature*, 429(6896): 263–267. <https://doi.org/10.1038/nature02567>
- Ren, J. S., 1990. The Tectonic Evolution and Mineralization of the Continental Lithosphere in Eastern China and Adjacent Areas. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Sepkoski, J. J. Jr., 1986. Phanerozoic Overview of Mass Extinction. In: Raup, D. M., Jablonski, D., eds., Patterns and Processes in the History of Life. Springer, Berlin, 277–295. https://doi.org/10.1007/978-3-642-70831-2_15
- Shackleton, N. J., Opdyke, N. D., 1976. Oxygen-Isotope and Paleomagnetic Stratigraphy of Pacific Core V28-239 Late Pliocene to Latest Pleistocene. Geological Society of America Memoirs, Boulder. <https://doi.org/10.1130/mem145-p449>
- Strategic Research Group of Disciplines and Frontiers of China for 2021–2035, 2024. Strategic Development on Earth System Science (Energy, Environments and Climate) for 2021–2035. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Strategic Research Group of Geosciences for 2021–2030, 2021. Strategic Development on Geosciences for 2021–2030: Past, the Present and the Future of the Habitable Earth. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Sun, F. N., Luo, G. M., Pancost, R. D., et al., 2024. Methane Fueled Lake Pelagic Food Webs in a Cretaceous Greenhouse World. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(44): e2411413121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2411413121>
- Sun, Y. D., Farnsworth, A., Joachimski, M. M., et al.,

2024. Mega El Niño Instigated the End-Permian Mass Extinction. *Science*, 385(6714): 1189—1195. <https://doi.org/10.1126/science.ado2030>
- Sun, Y. D., Joachimski, M. M., Wignall, P. B., et al., 2012. Lethally Hot Temperatures during the Early Triassic Greenhouse. *Science*, 338(6105): 366—370. <https://doi.org/10.1126/science.1224126>
- van der Meer, D. G., Scotese, C. R., Mills, B. J. W., et al., 2022. Long-Term Phanerozoic Global Mean Sea Level: Insights from Strontium Isotope Variations and Estimates of Continental Glaciation. *Gondwana Research*, 111: 103—121. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.07.014>
- Wang, B., Li, J. C., Wang, C. X., et al., 2020. An Overview of Characteristics and Prospecting of Gold Ore Deposits in China. *Geological Journal of China Universities*, 26(2): 121—131 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Liu, L. J., Dai, H. Z., et al., 2017. Discussion on Particularity and Prospecting Direction of Large and Super-Large Spodumene Deposits. *Earth Science*, 42(12): 2243—2257 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. L., Liu, Y. G., Zhu, X., et al., 2020. The Status and Development Trend of Geothermal Resources in China. *Earth Science Frontiers*, 27(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. L., Zhang, W., Lin, W. J., et al., 2018. Project Progress of Survey, Evaluation and Exploration Demonstration of National Geothermal Resource. *Geological Survey of China*, 5(2): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Y., Pang, Z. H., Hu, S. B., et al., 2015. Geothermics and Its Applications. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, P. X., Tian, J., Huang, E. Q., et al., 2018. Earth System and Evolution. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, X. B., 2022. How to Understand China's Several-Million-Years Human History, Ten-Thousand-Years of Culture, and Five-Thousand-Years Civilization? The Study Times, 20th of June, Page 4 (in Chinese).
- Wang, Y., Wang, D. H., Huang, F., 2022. Characteristics and Metallogenic Regularity of Mineral Resources in the Yangtze River Basin. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1724—1735 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Q. Z., Zhu, R. K., Yang, Z., et al., 2024. Geological Characteristics, Formation Distribution and Resource Prospects of Natural Hydrogen Reservoir. *Natural Gas Geoscience*, 35(6): 1113—1122 (in Chinese with English abstract).
- Xia, J., Zhan, C. S., Zeng, S. D., et al., 2022. Theoretical Method and Practical Exploration of Yangtze River Simulator Construction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 53(5): 505—514 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., 2023. Geobiology. High Education Press, Beijing (in Chinese).
- Xie, S. C., Evershed, R. P., Huang, X. Y., et al., 2013. Concordant Monsoon-Driven Postglacial Hydrological Changes in Peat and Stalagmite Records and Their Impacts on Prehistoric Cultures in Central China. *Geology*, 41(8): 827—830. <https://doi.org/10.1130/G34318.1>
- Xie, S. C., Hu, C. Y., Gu, Y. S., et al., 2015. Paleohydrological Variation since 13 ka BP in Middle Yangtze Region. *Earth Science*, 40(2): 198—205 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Luo, G. M., 2023. Opportunities and Challenges for the Development of Geobiology. *Acta Palaeontologica Sinica*, 62(4): 454—462 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Yin, H. F., 2014. Progress and Perspective on Frontiers of Geobiology. *Science in China: Earth Sciences*, 44(6): 1072—1086 (in Chinese).
- Xu, Q. X., Dong, B. J., Yuan, J., et al., 2023. Scouring Effect of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River and Its Impact after the Impoundment of the Three Gorges Project. *Journal of Lake Sciences*, 35(2): 650—661 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. H., 2024. U-Series Dating on the Sites of Paleolithic Liupojiuchang and Changyang Man (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., 2023. Origin of the Mid-Lower-Yangtze Tectonic Belt and Yanshanian Ocean Subduction. *Geological Review*, 69(5): 1619—1627 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Q., Tong, J. N., Xiao, S. H., et al., 2015. The Survival of Benthic Macroscopic Phototrophs on a Neoproterozoic Snowball Earth. *Geology*, 43(6): 507—510. <https://doi.org/10.1130/G36640.1>
- Yu, X. C., Liu, C. L., Wang, C. L., et al., 2022. Genesis of Lithium Brine Deposits in the Jiangnan Basin and Progress in Resource Exploration: A Review. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 107—123 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. P., Zhao, X. F., Spandler, C., et al., 2024. The Role of Iron-Rich Hydrosaline Liquids in the Formation of Kiruna-Type Iron Oxide-Apatite Deposits. *Science*

- Advances*, 10(17): eadk2174. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk2174>
- Zhang, J. C., Yang, C., Chen, Q., et al., 2016. Deposition and Distribution of Potential Shales in China. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 74–86 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. G., Mills, B. J. W., He, T. C., et al., 2023. Simulating the Long-Term Carbon Cycle in the Phanerozoic: Current Status and Future Developments. *Chinese Science Bulletin*, 68(12): 1580–1592 (in Chinese with English abstract).
- Zhejiang Institute of Cultural Relics and Archaeology, 2019. Comprehensive Research Report on the Liangzhu Archaeological Site. Cultural Relics Press, Beijing (in Chinese).
- Zheng, H. B., Clift, P. D., Wang, P., et al., 2013. Pre-Miocene Birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(19): 7556–7561. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216241110>
- Zheng, Y. F., Guo, Z. T., Jiao, N. Z., et al., 2024. A Holistic Perspective on Earth System Science. *Science in China: Earth Sciences*, 54(10): 3065–3090 (in Chinese).
- Zhou, Q., 2024. Geology of Mineral Resources in China • Guizhou Volume • Manganese Ores. Geological Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, R. X., Wang, H. J., Wang, H. J., et al., 2024. Multi-Spherical Interactions and Mechanisms of Hydrocarbon Enrichment in the Southeast Asian Archipelagic Tectonic System. *Science in China: Earth Sciences*, 54(2): 587–603 (in Chinese).
- Zou, C. N., Dong, D. Z., Wang, Y. M., et al., 2015. Shale Gas in China: Characteristics, Challenges and Prospects (I). *Petroleum Exploration and Development*, 42(6): 689–701 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhu, R. K., Chen, Z. Q., et al., 2019. Organic-Matter-Rich Shales of China. *Earth-Science Reviews*, 189: 51–78. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2018.12.002>
- ### 中文参考文献
- 曹明轩, 褚平利, 段政, 等, 2020. 华南中生代火山活动时空演化及其问题探讨. *地质论评*, 66(4): 795–812.
- 代世峰, 赵蕾, 王宁, 等, 2024. 煤系中关键金属元素的成矿作用研究进展与展望. *矿物岩石地球化学通报*, 43(1): 49–63.
- 邓文兵, 张彦文, 孔令湖, 等, 2019. 中国锰矿资源现状与国家级锰矿床实物地质资料筛选. *中国矿业*, 28(9): 175–182.
- 邓先瑞, 2002. 试论长江文化生态的主要特征. *长江流域资源与环境*, 11(3): 199–202.
- 方勤, 2024. 不断发掘内涵丰富的长江文化(传承之光). *人民日报*, 8月31日, 第7版.
- 方勤, 赵阳, 李瑞, 等, 2023. 天门石家河城址及水利系统的考古收获. *江汉考古*, (1): 19–35, 145.
- 冯天瑜, 1991. 地理环境与文化创造. *理论月刊*, (1): 6–10.
- 湖北省文物考古研究院, 荆门市博物馆, 荆门市屈家岭遗址保护中心, 2024. 湖北荆门市屈家岭新石器时代遗址. *考古*, (10): 18–33.
- 湖北省博物馆, 2007. 郧县人: 长江中游的远古人类. 北京: 文物出版社.
- 李建康, 刘喜方, 王登红, 2014. 中国锂矿成矿规律概要. *地质学报*, 88(12): 2269–2283.
- 李天元, 冯小波, 2004. 长江古人类. 武汉: 湖北教育出版社.
- 梁益同, 柳晶辉, 李兰, 等, 2015. 基于土壤侵蚀模型的滑坡临界雨量估算探讨. *长江流域资源与环境*, 24(3): 464–468.
- 刘成林, 余小灿, 袁学银, 等, 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型. *地质学报*, 95(7): 2007–2029.
- 刘成林, 余小灿, 赵艳军, 等, 2016. 华南陆块液体钾、锂资源的区域成矿背景与成矿作用初探. *矿床地质*, 35(6): 1119–1143.
- 刘玉堂, 2016. 长江文化的特质. *文化发展论丛*, 15(2): 97–100.
- 莫宣学, 2019. 岩浆作用与地球深部过程. *地球科学*, 44(5): 1487–1493.
- 宁树正, 李焕同, 谭节庆, 等, 2013. 华南煤炭资源分布与赋煤构造分区. *煤炭科学技术*, 41(7): 16–18, 23.
- 庞飞, 张作衡, 张君峰, 等, 2020. 长江经济带页岩气勘探开发进展及建议. *地球科学*, 45(6): 2152–2159.
- 任纪舜, 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社.
- “中国学科及前沿领域发展战略研究(2021–2035)”项目组, 2024. 中国地球系统科学 2035 发展战略. 北京: 科学出版社.
- 2021–2030 地球科学发展战略研究组, 2021. 2021–2030 地球科学发展战略: 宜居地球的过去、现在与未来. 北京: 科学出版社.
- 王斌, 李景朝, 王成锡, 等, 2020. 中国金矿资源特征及勘查方向概述. *高校地质学报*, 26(2): 121–131.
- 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 等, 2017. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向. *地球科学*, 42(12): 2243–2257.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等, 2020. 中国地热资源现状及发展

- 趋势. 地学前缘, 27(1): 1—9.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 等, 2018. 全国地热资源调查评价与勘查示范工程进展. 中国地质调查, 5(2): 1—7.
- 汪集旸, 庞中和, 胡圣标, 等, 2015. 地热学及其应用. 北京: 科学出版社.
- 汪品先, 田军, 黄恩清, 等, 2018. 地球系统与演化. 北京: 科学出版社.
- 王学斌, 2022. 如何理解我国百万年的人类史、一万年的文化史、五千多年的文明史? 学习时报, 6月20日, 第4版.
- 王岩, 王登红, 黄凡, 2022. 长江流域矿产资源特征及成矿规律. 地质学报, 96(5): 1724—1735.
- 魏琪钊, 朱如凯, 杨智, 等, 2024. 天然氢气藏地质特征、形成分布与资源前景. 天然气地球科学, 35(6): 1113—1122.
- 夏军, 占车生, 曾思栋, 等, 2022. 长江模拟器的理论方法与探索. 水利学报, 53(5): 505—514.
- 谢树成, 2023. 地球生物学. 北京: 高等教育出版社.
- 谢树成, 胡超涌, 顾延生, 等, 2015. 最近 13 ka 以来长江中游古水文变化. 地球科学, 40(2): 198—205.
- 谢树成, 罗根明, 2023. 地球生物学发展的机遇与挑战. 古生物学报, 62(4): 454—462.
- 谢树成, 殷鸿福, 2014. 地球生物学前沿: 进展与问题. 中国科学: 地球科学, 44(6): 1072—1086.
- 许全喜, 董炳江, 袁晶, 等, 2023. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响. 湖泊科学, 35(2): 650—661.
- 徐行华, 2019. 湖北长阳人遗址和柳陂酒厂旧石器遗址的铀系测年研究(硕士学位论文). 南京: 南京大学.
- 杨文采, 2023. 长江中下游构造带成因与燕山期的大洋俯冲. 地质论评, 69(5): 1619—1627.
- 余小灿, 刘成林, 王春连, 等, 2022. 江汉盆地大型富锂卤水矿床成因与资源勘查进展: 综述. 地学前缘, 29(1): 107—123.
- 张金川, 杨超, 陈前, 等, 2016. 中国潜质页岩形成和分布. 地学前缘, 23(1): 74—86.
- 张莹刚, Mills, B. J. W., 何天辰, 等, 2023. 显生宙长时间尺度碳循环演变的模拟: 现状与展望. 科学通报, 68(12): 1580—1592.
- 浙江省文物考古研究所, 2019. 良渚古城综合研究报告. 北京: 文物出版社.
- 郑永飞, 郭正堂, 焦念志, 等, 2024. 地球系统科学研究态势. 中国科学: 地球科学, 54(10): 3065—3090.
- 周琦, 2024. 中国矿产地质志·贵州卷·锰矿. 北京: 地质出版社.
- 朱日祥, 王红军, 王华建, 等, 2024. 东南亚多岛海构造体系圈层相互作用与油气富集机理. 中国科学: 地球科学, 54(2): 587—603.
- 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等, 2015. 中国页岩气特征、挑战及前景(一). 石油勘探与开发, 42(6): 689—701.