



纪念孙枢院士诞辰 85 周年

编者按: 本期继续刊发“纪念孙枢院士诞辰85周年”专栏文章。文章作者王成善院士, 中国地质大学(北京)教授, 在沉积学与地球系统科学发展等方面曾与孙枢院士有过紧密合作, 期间共同发表了多篇合作论文; 肖文交研究员, 孙枢院士的博士生。从王成善院士和肖文交研究员的文章, 读者可以体会到孙枢院士在沉积学、沉积大地构造和资源环境等多个方面的影响。孙先生无疑是中国地球科学界的楷模, 将不断给我们后来者鼓励与鞭策。

孙枢院士学术成就简介

王成善^{1*}, 肖文交^{2†}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* 通讯作者, E-mail: chshwang@cugb.edu.cn

† 通讯作者, E-mail: wj-xiao@mail.iggcas.ac.cn

孙枢院士, 1933年生, 地质学家。中国科学院院士、第三世界科学院院士、国际欧亚科学院院士、太平洋科学协会终身会员、伦敦地质学会荣誉会员。曾任中国科学院地质研究所所长、中国科学院资环局局长、国家自然科学基金委员会副主任、中国科学院地学部主任、教育部长江学者聘任顾问组成员、《中国科学》副主编、《地质学报》副主编、*Journal of Asian Earth Sciences*编委、太平洋科学协会地球科学委员会主席、国际地科联全球沉积地质计划委员会委员、大洋钻探计划中国专家委员会(ODP-China)主任等职。曾任中国地质学会副理事长、中国石油学会副理事长、中国矿物岩石地球化学学会副理事长等职。获国家自然科学奖二等奖和何梁何利科学技术进步奖等。

孙枢院士长期从事地质学研究, 尤其是沉积学和沉积大地构造研究。发表科技论文280余篇, 撰写科技报告20余份, 主编文集8部, 出版专著4册。

1 中国沉积学主要奠基人和重要推动者之一

孙枢先生系统研究了中国主要构造单元的沉积学特征, 对中国沉积学学科发展作出了重要贡献。

早在20世纪60年代初期, 孙枢先生开始研究龙门山拗陷泥盆纪沉积岩的有机地球化学问题, 探讨了生物和有机质对沉积岩地球化学过程的作用(孙枢和陈其英, 1964)。20世纪80年代初, 孙枢先生开始对华北地台及其周缘沉积盆地以及中国的浊流沉积进行了深入研究。他对河南西部和陕西东部秦岭以北地区沉积盆地的地层剖面和岩石化学进行了仔细研究, 划分了该地区的沉积相, 并讨论了其岩相古地理特征(孙枢等, 1981a, 1981b, 1981c, 1982)。在1981年主编出版的《沉积岩石学研究》中, 他系统总结了国内外关于沉积岩研究的主要进展, 对中国沉积学的发展起到重要推动作用。在此基础上, 孙先生对中国“地台区”裂陷盆地沉积特征进行了全面总结(孙枢等, 1987)。

中文引用格式: 王成善, 肖文交. 2018. 孙枢院士学术成就简介. 中国科学: 地球科学, 48: 1116–1124. doi: 10.1360/N072018-00179

英文引用格式: Wang C S, Xiao W J. 2018. Brief introduction to the scientific achievements of Academician Shu Sun (in Chinese). *Scientia Sinica Terrae*, 48: 1116–1124. doi: 10.1360/N072018-00179

华南地区是中国地壳结构和构造演化过程最为复杂的地区之一, 中生代地层包含具有商业价值的油气、煤炭、油页岩和沉积型铜矿等资源. 在此背景下, 孙枢先生对华南地区中生代的沉积过程进行了详细研究, 揭示了华南地区中生代的沉积环境和沉积历史与多地体碰撞过程相关, 并指出沉积环境演变与古气候变化存在紧密关系(Sun等, 1989).

孙枢先生是中国最早开展浊流沉积和其他重力流沉积研究的地质学家之一. 1984年和1987年, 他先后发表《我国浊流沉积与其他重力流沉积研究进展概况和发展方向问题刍议》和《浊流沉积与等深流沉积》, 这些开拓性的论文为中国重力流沉积的研究树立了范例.

进入20世纪90年代, 孙枢先生带领同事和学生对中国不同构造单元的沉积作用进行了深入系统的研究. 90年代初, 孙先生总结了80年代中国沉积学研究取得的成果(孙枢, 1990; 孙枢和王清晨, 1991), 并指出后续沉积学研究应该加强的地方. 在他的指导和领导下, 华南地区的岩相古地理(陈海泓和孙枢, 1988)、煤系沉积(王清晨等, 1991)、前陆盆地(陈海泓等, 1992a)、滑塌构造(李培军等, 1996)及深水沉积(李培军等, 1997, 1998)等研究取得重大进展. 孙枢等(1998)发表《沉积盆地研究的基本趋向和对中国今后研究的设想》, 为世纪之交中国沉积学的发展指明了方向.

21世纪以来, 孙枢先生依然笔耕不辍, 对沉积学诸多问题继续深入研究. 塔里木盆地奥陶系一系列油气田的发现, 揭示了深埋地下的古岩溶是碳酸盐岩油气田形成的重要储层. 在这个背景下, 他开展了塔里木盆地轮东1井奥陶系洞穴的研究, 基于洞穴形成历史恢复, 对古岩溶有利区进行预测评价, 这对古地理学与古岩溶学研究具有重要意义(孙枢等, 2013).

孙枢先生在坚持一线科研的同时, 与同事及研究生合作开展沉积学研究. 在孙枢先生的指导下, 李忠等(2000)和李任伟等(2002)开展了大别造山作用与合肥盆地沉积响应的研究, 邱振等(2014)开展了瓜德鲁普统-乐平统全球界线层型剖面沉积相和层序地层的研究和利用SIMS锆石U-Pb法对层型剖面的膨润土进行了高精度年代学研究(Qiu等, 2016). 白云石(岩)问题一直是沉积学领域长期关注的研究主题之一.

由雪莲等(2011, 2014)对塔里木盆地寒武纪叠层石白云岩中微生物组构特征进行了研究(You等, 2013), 探讨了微生物因素对原生白云石成因的重要意义. 岩石学和地球化学研究表明, 准噶尔盆地东北缘晚石炭世沉积岩是晚古生代北疆地区洋壳俯冲消减作用的沉积响应(陶辉飞等, 2012; Tao等, 2014), 对中亚造山带晚古生代演化过程提供了重要制约.

在回顾国内外沉积学研究进展基础上, 孙枢(2005a)再次提出了中国沉积学今后发展需要加强和重视的研究领域. 他指出, 就沉积类型而言, 需要加强和重视包括陆相沉积、碳酸盐沉积、近岸和浅海硅质碎屑沉积、深海沉积的研究; 新的发展方向包括沉积盆地、古气候与沉积作用、前寒武纪沉积、人类生存环境沉积学、区域沉积学和全球沉积学. 文中还对中国如何继续深化这些研究提出了一些需注意的问题, 如需长期不懈地对一些科学问题和沉积现象深入研究和观测, 以及重视新方法及新技术的应用等. 此外, 孙枢先生还论述了“深时”研究的概念及其重要性, 预测“深时”研究将成为未来国际和国内地球科学重大研究领域, 同时指出沉积学将在“深时”研究中扮演核心学科的角色(孙枢和王成善, 2009). 需要指出的是, 中国科学院学部和国家自然科学基金委的中国沉积学学科发展战略研究项目, 就是由他亲自建议和推动下开展的.

孙枢先生是中国沉积学的主要奠基人和重要推动者之一, 他的地质科研究生涯充分见证了中国沉积学研究由弱到强的发展历程.

2 中国磷块岩研究

磷块岩是一种以碳氟磷灰石为主要矿物组分的沉积磷矿, 广泛应用于化工、医药、食品、国防、冶金、纺织、玻璃、陶瓷等领域. 孙枢先生在从事沉积学研究的过程中, 特别重视磷块岩的研究, 对磷块岩的成因、分类和沉积环境进行了深入的剖析.

龙门山拗陷中段是一个具有重要意义的泥盆纪沉积磷矿的成矿区. 孙先生在20世纪60年代对该成矿区沉积岩中一种罕见的自生矿物——磷锆铝石的结构、化学成分和类质同象现象进行了详细的研究(孙枢, 1966). 孙枢先生对川西磷块岩的结构、矿物成分和矿石结构进行了研究, 在此基础上探讨了磷块

岩的沉积环境和成因: (1) 磷块岩是泻湖和半局限性海盆沉积, (2) 成磷盆地的深度不大, 磷块岩是浅水沉积, (3) 磷质来自大陆, (4) 磷块岩是磷从海水直接沉积的产物, 沉积方式属于化学沉积(孙枢等, 1973).

孙先生进一步研究了海相磷块岩的形成条件, 并从磷块岩的成矿时代和现代海底磷酸盐沉积作用出发, 对磷块岩的基本岩石类型和特征进行了系统总结. 在此基础上, 论述了磷块岩的形成条件包括古地理条件、古气候条件、生物条件和地球化学条件及地质物理条件(中国科学院地质研究所七室成矿成岩组, 孙枢执笔). 在研究川西磷酸盐岩的过程中, 孙先生发现川西海相铝磷酸盐岩是一种沉积磷酸盐岩的新类型, 且仅见于中国四川什邡一带中泥盆世地层之中(Sun, 1992; 孙枢, 1998a). 据此他指出, 沉积磷酸盐岩可以分为磷块岩和原生铝磷酸盐岩. 铝磷酸盐岩不仅是一种潜在的资源, 而且是古气候和古地理研究的指示物, 它的发现是磷酸盐岩研究的重要突破.

孙先生关于磷块岩的研究是沉积磷矿矿床成因研究的重大理论创新, 为沉积磷矿的勘查和开采提供了重要的科学支撑.

3 沉积-大地构造

孙枢先生另外一个重要学术成就和贡献是通过沉积盆地来研究中国大地构造. 1985年, 孙枢先生出版了专著《华北断块区南部前寒武纪地质演化》, 该书详细论述了华北南部的前寒武纪地质演化, 是研究该地区前寒武纪地质的重要参考资料. 由孙枢先生、钟大赉先生和李荫槐先生1988年主编的《断块构造理论及其应用》系统总结了断块构造理论的基本内涵和原理及其广泛应用, 对后来断块构造的研究产生了深远影响.

孙枢先生对于中国大地构造的研究, 最具重要影响的贡献是关于华南大地构造演化的研究. 通过地质图图型的重新解释, 他与许靖华先生合作指出了华南存在一个规模和变形样式均可与北美阿巴拉契亚造山带南部相类似的碰撞造山带(许靖华等, 1987; Hsü等, 1988a, 1988b, 1989). 根据中生代沉积历史的研究, 他指出华南前中生代经历了加里东期和海西期造山运动, 中新生代的构造环境为多地

体的碰撞过程(Sun等, 1989). 皖赣蛇绿混杂岩、蓝田-乐平-西山构造窗及庐山飞来峰的发现为华南早中生代的造山作用和构造演化模式提供了强有力的支持(李继亮等, 1989).

古地磁学与大地构造学相结合的研究进一步表明华南经历了复杂的多阶段造山过程. 四川武隆地区二叠-三叠系磁性地层学的研究表明, Illawarra反转起始于吴家坪阶上部, 而Kiaman极性段中则存在着若干正向极性(陈海泓等, 1992b). 古地磁研究表明早三叠世时期, 华夏地块与扬子地块之间存在宽阔的大洋(陈海泓等, 1992c). 进一步的古地磁学研究表明华南是由若干不同的岩石圈板块拼合而成的(Chen等, 1994; 陈海泓等, 1994), 存在着多岛洋造山格局(Xiao等, 2001). 此外, 孙枢先生和他领导的研究团队对华南板块的旋转运动(陈海泓等, 1992d)、雪峰山大地构造(陈海泓等, 1993)、蓝田构造窗(徐树桐等, 1993)、浙西北反转构造(肖文交等, 1998)和前陆褶皱冲断带构造极性(肖文交等, 2000)等进行了详细研究, 创新性地提出这些区域性的构造是华南中生代造山作用的产物, 属于特提斯构造域造山带的组成部分.

孙枢先生及合作者提出秦岭造山带是在中生代早期由华北陆块与扬子陆块之间的碰撞形成(王清晨等, 1989). 孙枢先生论述了中国的印支造山带与东特提斯洋的消亡之间的时空关系(Sun等, 1991), 是中国早期关于特提斯构造域大地构造演化研究的重要成果.

大地构造相概念是在研究造山带基础上提出来的, 同一个大地构造相具有相似的岩石-构造组合, 对研究古老造山带形成演化方面具有重要意义. 孙枢先生与许靖华先生等合作, 编制了《1:4000000中国大地构造相图》, 于1998年出版, 对推动中国大地构造相和造山带的研究发挥了重要作用.

孙枢先生和李继亮先生等对碰撞造山带进行了深入研究, 对碰撞造山带的分类、大地构造相和碰撞事件时限的确定等诸多方面进行了深入探讨(Li等, 1999; 李继亮等, 1999a, 1999b). 这些研究成果对于现在的地质学者开展造山带相关研究具有重要的参考借鉴意义.

孙枢先生积极倡导中国西部中亚型造山与成矿的研究. 中亚造山带是全球最大的显生宙增生型造山带, 中亚地区蕴藏着重要的金属矿产和油气资源.

根据蛇绿岩地球化学和年代学的研究,北疆古生代存在多岛海的构造-古地理格局(Wang等, 2003). 综合蛇绿混杂岩、增生杂岩和岛弧岩浆岩时空演变特征,中亚造山带在古生代至中生代早期经历了多俯冲带多方向的复式增生造山作用(Xiao等, 2010, 2015).

孙枢先生积极推动韧性剪切带的研究,指导发现了浅层次微型韧性剪切带并对其形成机理进行了探讨(侯泉林等, 1995). 系统的Ar/Ar同位素年代学研究表明,东天山北部秋格明塔什-黄山巨型韧性剪切带的活动在时间上具有多期性,早期为挤压推覆剪切作用,发生于300Ma之后,至少延续到了283Ma,但在280Ma时已经终止;晚期为右行走滑剪切变形作用,主活动期的时代为263~243Ma(陈文等, 2005).

板块构造理论对地质科学的许多领域产生了革命性的影响,也催生了活动论古地理(孙枢, 2005b). 孙枢先生对活动论古地理的研究进展进行了述评,指出中国的活动论古地理研究要进入造山带,区域研究要把克拉通和造山带结合起来(孙枢, 2005b).

孙枢先生关于中国大地构造的创新研究成果体现了一个杰出的地质学家对学科前沿和发展方向的准确把握,体现了超前的学术思想和敢为人先的科学精神.

4 地质综合科学考察

地质学是一门实践性很强的基础学科,野外实地科学考察是地质学研究的基础. 孙先生特别注重野外地质科学考察(孙枢和姜春潮, 1959). 孙枢先生早在20世纪50年代末至60年代初就在黑龙江流域进行了广泛的地质综合科学考察,出版了若干关于东北地区地质的科考报告. 主要出版的科学报告有《中国东北北部地质矿产概况》、《小兴安岭、张广才岭和完达山地区地质》、《小兴安岭东部、完达山和张广才岭北部沉积岩和变质岩地层剖面的特点对比和矿产资源分布规律》、《黑龙江省东部前震旦系的基本特点及其对比》和《黑龙江流域综合考察报告——地质部分》等.

孙枢先生等编著的《小兴安岭东部、完达山和张广才岭北部沉积岩和变质岩地层剖面的特点对比和矿产分布规律》系统总结了区域内基本构造单元(鹤

岗地块)的沉积岩、变质岩和火成岩以及与之相关的各种矿产. 在《中国东北北部地质矿产概况》一书(中国科学院黑龙江流域综合考察队地质组, 1959)中,详细描述了区域内各个地质时代的地层分布情况和地层划分的依据;分区叙述了各个构造阶段的岩浆活动情况和岩浆岩分布的现状;对区域的大地构造单元进行了较详细的划分,并提出了新的见解. 书中对于内生矿床和外生矿床的分区和成矿规律也做出了初步总结.

孙枢先生带领中国科学院黑龙江流域综合考察队地质组,在系统地考察和梳理了对黑龙江省东部地区前震旦系和小兴安岭、张广才岭、完达山地区的地层、岩浆活动和地质构造之后,总结出一系列规律,提出一些新的观点和见解(Yu等, 1961; 孙枢等, 1961; 孙枢, 1962; 中国科学院黑龙江流域考察队, 1963).

这些科学考察报告的出版,极大地促进了对中国东北地区区域地质研究,是研究东北地区地质演化宝贵的学术资料,具有重要的科学价值.

5 资源与环境

孙枢先生十分重视与人类的生存和可持续发展息息相关的资源与环境问题. 孙枢先生论述了岩相古地理理论和方法在铁矿地质工作中应用(孙枢, 1977). 在系统总结了近年来金矿工作的进展情况后,他指出金矿工作需要突出重点,在抓紧西部研究工作的同时,还需重视研究程度较高的东部,争取在东部的沿海地区有新的发现,并在金的成矿类型、成矿模式和构造控矿方面实现认识上的突破和创新(孙枢, 1989, 1990).

在对中国东部大中型铜矿进行综合考察的基础上,并与国外进行对比总结后,孙枢先生等指出中国中东部陆壳是在几个古陆块之基础上增生而来;铜的成矿作用在空间上向板块边缘迁移,与板块边缘的地球化学突变密切相关;同时,划分了中国东部6大成矿期和9大成矿集中区,并进一步分析了中国东部中生代斑岩铜矿成矿与美洲西海岸的差别(秦克章等, 1999).

在前人工作基础上,以金属矿床的时空分布样式作为大地构造环境的标志,新疆主要的金属矿床的构造演化阶段得到了清晰的厘定(Qin等, 2001; 秦

克章等, 2002). Qin等(2002, 2005)概述了新疆北部主要的斑岩型、矽卡岩型、高硫型和中硫型低温热液矿床的主要特征、时空分布以及形成的大地构造环境. 基于此, 获得斑岩型铜矿的形成条件远远苛刻于低温热液矿床的形成条件, 并且斑岩型矿床在造山带中的分布范围比低温热液矿床更加局限的一些新认识(Qin等, 2002).

孙枢先生还总结了南极洲的地质和矿产资源概况, 详细介绍了东南极洲地盾、纵断山褶皱系、埃尔斯沃斯褶皱带、晚中生代-早新生代褶皱带、冈瓦纳大陆和南极洲之间的关系. 他在战略高度层面指出南极洲的矿产资源可能非常丰富, 但限于自然条件和地质研究程度, 阻碍了对此地区的认识(孙枢, 1981). 孙先生指出, 中国应该对南极洲及其海域给予更多的关注.

由孙枢和王铁冠先生(2016)主编出版的《中国东部中-新元古界地质学与油气资源》一书, 详细地介绍了全球范围及中国东部中-新元古代地层、生储盖层发育与沉积环境, 中国东部中-新元古代沉积盆地发育的地质构造背景与岩浆活动, 以及中国东部中-新元古界油气富集成藏、保存条件与资源前景. 书中总结了中-新元古界油气资源的全球性分布状况, 研究了华北燕山地区烃源岩、油源与油气成藏规律, 论述了南华北始寒武系的烃源与成藏条件, 为中-新元古代沉积盆地的形成以及油气资源成藏理论研究提供了科学依据和指导. 书中还指出, 中国东部成熟的盆地是否有油气资源和怎样才能有效地发现这些油气藏是国家所面临急需解决的两个问题. 通过几个成功的实例, 孙枢先生及合作者论述了使用地震学是发现油气资源进而解决油气资源不足这一问题的有效方法(Li和Sun, 2004).

根据国内外地球科学发展趋势和中国地球科学发展的需要, 中国科学院和国家环保局双重领导的地质环境系统研究中心于1997年初成立. 孙枢先生指出“这是中国地球科学界的一件大事, 它必将推动地质环境系统研究的前进, 为中国可持续发展战略的实现做出贡献”(孙枢, 1998b). 为此他还专门撰写文章, 就地质环境研究的理论基础、环境动力学与可持续发展的关系以及地质环境研究的主要任务等3个方面展开系统的论述, 并指出环境动力学研究将为实现人类可持续发展的理想提供理论思想、科学依据

和技术方法(孙枢, 1998b).

由于人类活动产生的温室气体(CO_2)浓度不断增加, 导致全球性的气候变化. 孙先生及合作者率先阐述了开展 CO_2 地质封存的重要性, 并着重说明了 CO_2 封存的原理、基本地质问题和动态监测, 并对其展开了可行性论述(曾荣树等, 2004; 孙枢, 2006). 孙先生建议中国应重视 CO_2 封存的科研工作, 综合运用地质学、地球化学、地球物理学、海洋地质学的理论, 研究 CO_2 分离、富集、输送和封存过程的问题; 同时建议展开国际合作, 逐步建立符合中国国情的C隔离技术体系.

资源和环境问题正威胁着人类的生存和可持续发展, 人类赖以生存的地球环境正受到自然和人为作用越来越严重的破坏, 这是一个全球性的问题. 孙枢先生综合考虑了国家需求和科学发展趋势, 针对中国资源与环境领域的学科发展战略给出了具体的建议: 首先应该高度重视科学与人才基地的建设, 建立起开放、流动、竞争的研究基地与实验室; 其次, 加强大型观测装备的建设和野外实验区的建设. 资源与环境科学数据的获取, 离不开高精度的大型观测设备. 在注重人才培养的同时, 需强化高精度数据的获取和共享能力, 建立资料数据共享的机制(孙枢和李晓波, 2001).

6 地球科学前沿战略

地球科学是中国发展较早的近代科学之一, 在20世纪中华振兴和现代化进程中发挥了重要作用, 其进一步发展成为决定未来世纪国家综合国力和科学技术水平的重要因素(中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组, 1998). 19世纪末20世纪初, 以孙枢先生为代表的一批科学家对固体地球科学前沿及中国地球科学取得的成就进行了梳理和总结, 并结合社会经济、国家战略等方面提供了相关的建议及改革措施, 并率先提出从地学大国走向地学强国的中国地球科学发展的目标(孙枢, 1986; 中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组, 1998; 陈运泰等, 1999; Sun和Zhou, 2003).

在研讨从地学大国走向地学强国的战略目标过程中, 孙枢先生指出, 研究水平的提高涉及许多方面的因素, 但是研究水平的最终把关还得依赖论文的

最终评价和发表. 但论文仅是研发产出的指标之一, 且论文创作不是数数量(包括论文数量), 主要看论文的质量, 论文的科学价值及其对科学发展的影响是质量评价的根本要素(中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组, 1998).

孙枢先生前瞻性地意识到深海基础研究的前沿性和潜在的重大应用前景, 并十分关注中国深海大洋研究(孙枢, 1995). 孙先生代表地学界的专家、院士, 多次参加国务院有关机构的讨论, 争取到中国于1998年正式参加国际大洋钻探计划. 随后十多年里, 他先后主持国际大洋钻探(ODP)和综合大洋钻探(IODP)中国专家委员会, 通过对委员会活动的指导, 和参加南海大洋钻探航次靠港仪式等活动, 有力地推进了中国的深海研究. 孙先生高度评价中国在国际大洋钻探中取得的一系列学术成就, 同时就深海研究的战略方面提供了相应建议, 并指出中国地球科学要继续扩大向深海大洋的进军力度, 以迎接新世纪的挑战, 为实现科教兴国战略目标做出新的贡献(孙枢, 2003a, 2014).

孙枢先生也是中国极地研究的倡导人和推动者之一. 1980年受国家海洋局的委托, 他作为国家观察员代表中国首次出席在新西兰举行的南极研究科学委员会(SCAR)会议, 会后提出中国尽快开展南极科学考察的建议. 晚年他又出任国家海洋局极地科学重点实验室学术委员会主任, 2017年4月27日向委员会所做的半小时工作总结, 成了孙枢先生最后的一次科学业务报告.

孙先生积极提倡和推进地球系统科学研究, 系统地研讨了地球科学作为一个整体、一个超级学科发展趋势, 探索了地球各圈层(大气圈、水圈、生物圈、地壳、地幔和地核以及它们的组成部分)的深入研究推动各分支学科的继续发展, 指出地球各圈层相互作用的研究标志着地球系统科学的逐步建立与发展(中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组, 2001).

作为地球系统科学的有机组成部分, 气候变化及其与之相联系的整个地球系统的变化对人类的生存和发展产生了非常显著的影响. 因此认识气候变化以及应对气候变化, 即是科学的前沿问题, 也是环境问题、经济问题、政治问题和国家安全问题, 是在未来20年国家发展的重要战略机遇期必须面对的重

要问题之一(秦大河等, 2004). 在深入分析中国气象事业的现状、国家需求和世界科技发展趋势的基础上, 提出了坚持公共气象的发展方向, 大力提升气象信息对国家安全的保障能力, 大力提升气象资源为可持续发展的支撑能力的战略思想(孙枢, 2005c; 秦大河等, 2005).

孙枢先生在地球系统科学研究实际应用方面, 孙枢先生等介绍了Gaia理论的提出背景、科学内涵, 及其最初验证模型, 着重分析了Gaia理论在全球变化、地质事件、生物进化研究中的应用(孙枢和王成善, 2008). 孙枢先生强调生物圈是地球具有生命的直观体现, 同时也是联系地球各圈层的关键环节; 正确认识生物圈对于全球环境演化的调节作用, 不仅帮助我们认识地球系统的全貌, 更可以推动地学研究深入发展, 对全面研究全球变化有积极意义.

7 大数据与数字地球

孙枢先生是中国科学大数据和数字地球的倡导者. 地球科学的科技活动产生地球数据, 地球数据又是形成地球科学假说、模式和理论的根据. 同时, 当代人类活动包括经济活动、社会活动、日常生活和军事活动等, 越来越多地需要数据共享(孙枢, 2003b). 从地球科学发展战略的角度, 分析了“数字地球”对中国的挑战以及“数字地球”本身所面临的挑战, 论述了发展“中国数字地球”的必要性和可能性, 提出了发展“中国数字地球”的战略措施(徐冠华等, 1999).

孙枢先生等介绍了对“数字地球”的不同学术理解和当前国内外数字地球发展重点领域或方向, 同时展望了“数字地球”在全球变化研究中的应用前景; 在实际应用方面指出在第四纪环境演变研究中要重视广泛应用对地观测技术, 建立数据库, 进而阐明全球变化的区域响应过程, 揭示区域和全球变化过程中人与自然的在其中的作用程度, 为可持续发展模式的建立提供科学依据(孙枢和史培军, 2000).

致谢 孙枢院士科学成就丰厚, 涉猎地球科学诸多领域及分支学科, 本文难以全部涵盖, 谨以此文纪念孙先生. 感谢郑永飞院士、吴福元院士的邀请, 感谢汪品先院士提出建设性修改意见, 感谢成文过程中得到宋东方和王浩等的协助.

参考文献

- 陈海泓, 孙枢. 1988. 黄县盆地第三纪含煤岩系岩相与沉积环境. 岩石学报, 4: 50–58
- 陈海泓, 孙枢, 李继亮, 王清晨, 彭海波, 许靖华. 1992a. 前陆盆地的构造控制作用: 以湘西中生代沅麻盆地为例. 见: 李继亮, 编. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社. 17–31
- 陈海泓, 孙枢, 李继亮, Heller F, Dobson J. 1992b. 四川武隆地区二叠-三叠系磁性地层学研究. 中国科学B辑, 22: 1317–1324
- 陈海泓, 孙枢, 李继亮, 许靖华. 1994. 华南早三叠世的古地磁学与大地构造. 地质科学, 29: 1–9
- 陈海泓, 孙枢, 李继亮, 许靖华, Heller F, Dobson J. 1992c. 华南与扬子板块早三叠世分隔的古地磁学初步证据. 科学通报, 37: 537–539
- 陈海泓, 孙枢, 李继亮, 许靖华, Heller F, Dobson J. 1992d. 华南板块的旋转运动. 科学通报, 37: 724–726
- 陈海泓, 孙枢, 李继亮, 王清晨, 彭海波, 徐树桐, 许靖华. 1993. 雪峰山大地构造的基本特征初探. 地质科学, 28: 201–210
- 陈文, 孙枢, 张彦, 肖文交, 王义天, 王清利, 姜立丰, 杨俊涛. 2005. 新疆东天山秋格明塔什-黄山韧性剪切带Ar-Ar年代学研究. 地质学报, 79: 790–804
- 陈运泰, 孙枢, 吴忠良. 1999. 跨世纪的中国地球科学. 地球科学进展, 14: 110–117
- 侯泉林, 李继亮, 孙枢, 李培军. 1995. 浅层次微型韧性剪切带的发现及其形成机理讨论. 科学通报, 40: 636–638
- 李继亮, 孙枢, 郝杰, 陈海泓, 侯泉林, 肖文交. 1999a. 论碰撞造山带的分类. 地质科学, 34: 129–138
- 李继亮, 孙枢, 郝杰, 陈海泓, 侯泉林, 肖文交, 吴继敏. 1999b. 碰撞造山带的碰撞事件时限的确定. 岩石学报, 15: 315–320
- 李继亮, 孙枢, 许靖华, 陈海泓, 彭海波, 王清晨. 1989. 南华夏造山带构造演化的新证据. 地质科学, 3: 217–225
- 李培军, 侯泉林, 李继亮, 孙枢. 1996. 闽西南地区下三叠统溪口组中的孤立滑塌岩块及其地质意义. 科学通报, 24: 2250–2253
- 李培军, 侯泉林, 孙枢, 李继亮. 1997. 闽西南地区早三叠世溪口组浊流沉积. 沉积学报, 15: 50–57
- 李培军, 侯泉林, 孙枢, 李继亮. 1998. 闽西南地区早三叠世溪口组深水沉积及其演化. 中国科学D辑: 地球科学, 28: 219–225
- 李任伟, 孙枢, 李忠, 江茂生, 金福全, 李双应. 2002. 高压-超高压岩石对合肥盆地侏罗系沉积的贡献. 岩石学报, 18: 526–530
- 李忠, 孙枢, 李任伟, 江茂生. 2000. 合肥盆地中生代充填序列及其对大别山造山作用的指示. 中国科学D辑: 地球科学, 30: 256–263
- 秦大河, 孙枢, 符淙斌. 2004. 关于气候变化应对战略的建议. 科学中国人, 9: 28–29
- 秦大河, 孙鸿烈, 孙枢, 刘英金. 2005. 2005~2020年中国气象事业发展战略. 地球科学进展, 20: 268–274
- 秦克章, 孙枢, 李继亮, 肖文交, 郝杰. 2002. 北疆古生代矿床组合的六大构造阶段划分及其意义. 矿床地质, 21: 203–206
- 秦克章, 汪东波, 王之田, 孙枢. 1999. 中国东部铜矿床类型, 成矿环境, 成矿集中区与成矿系统. 矿床地质, 18: 359–371
- 邱振, 孙枢, 王清晨, 邹才能. 2014. 瓜德鲁普统-乐平统全球界线层型剖面沉积相和层序地层. 沉积学报, 32: 429–441
- 孙枢. 1962. 黑龙江流域综合考察总报告——地质部分. 北京: 科学出版社
- 孙枢. 1966. 沉积岩中的含硫和钙的磷锶铝石. 地质科学, 7: 22–31
- 孙枢. 1977. 铁矿地质工作中中岩相古地理方法. 见: 富铁矿找矿理论和方法汇编. 河南冶金地质勘探公司. 351–365
- 孙枢. 1981. 南极洲地质概况与矿产资源问题. 国外地质, 9: 1–7
- 孙枢. 1986. 固体地球科学研究的前沿. 地球科学进展, 1: 7–8
- 孙枢. 1989. 中国科学院金矿地质工作的进展. 中国科学院院刊, 4: 147–149
- 孙枢. 1990. 我院黄金科技工作概况及对今后工作的意见. 见: 中国金矿大全(第3卷). 北京: 科学出版社
- 孙枢. 1995. 大洋钻探与中国地球科学. 地球科学进展, 10: 213–214
- 孙枢. 1998a. 沉积磷酸盐岩的新类型——川西中泥盆世铝磷酸盐岩. 见: 朱光亚, 周光召, 编. 中国科学技术文库(院士卷). 北京: 科学技术出版社. 2415–2426
- 孙枢. 1998b. 地质环境系统研究. 北京: 海洋出版社. 105
- 孙枢. 2003a. 将我国深海大洋研究推向新阶段. 地球科学进展, 18: 653
- 孙枢. 2003b. 地球数据是地球科学创新的重要源泉——从地球科学谈科学数据共享. 中国基础科学, (1): 19–23
- 孙枢. 2005a. 中国沉积学的今后发展: 若干思考与建议. 地学前缘, 12: 3–10
- 孙枢. 2005b. 活动论古地理研究评述. 矿物岩石地球化学通报, 24: 355–356
- 孙枢. 2005c. 对我国全球变化与地球系统科学研究的若干思考. 地球科学进展, 20: 6–10
- 孙枢. 2006. CO₂地下封存的地质学问题及其对减缓气候变化的意义. 中国基础科学, 8: 17–22
- 孙枢. 2014. 十年来中国IODP专家委员会工作简要回顾. 地球科学进展, 29: 317–321
- 孙枢, 白顺良, 傅家谟, 冯增昭, 王妙月, 徐永昌, 陈丕基, 赵生才, 孙卫国. 1990. 沉积地壳研究的新进展. 见: 中国地质学会, 编. 当今世界地球科学动向——中国科学家谈第28届国际地质大会. 北京: 地质出版社. 45–54
- 孙枢, 陈海泓. 1987. 浊流沉积与等深流沉积. 见: 张炳熺, 编. 当代地质科学动向. 北京: 地质出版社. 73–77
- 孙枢, 陈其英. 1964. 龙门山拗陷中段泥盆系生物元素地球化学. 地质科学, 2: 103–124
- 孙枢, 陈其英, 陈开惠. 1973. 川西磷酸岩. 地质科学, 8: 196–216
- 孙枢, 陈其英, 戴永定, 陈志明. 1961. 黑龙江省东部前震旦系的基本特点及其对比. 中国科学院地质研究所集刊. 北京: 科学出版社. 第7号: 75–84
- 孙枢, 陈志明, 侯奎, 黄育才, 林晓刚. 1981a. 河南舞阳鲁山云梦山组底段潮汐沉积. 沉积岩石学研究. 北京: 科学出版社. 109–119

- 孙枢, 陈志明, 黄育才, 侯奎. 1981b. 河南舞阳附近十三亿年前的古地貌与古气候. 沉积岩石学研究. 北京: 科学出版社. 75–87
- 孙枢, 陈志明, 王清晨. 1982. 豫陕中-晚元古代沉积盆地(二). 地质科学, 1: 5–12
- 孙枢, 从柏林, 李继亮. 1981c. 豫陕中-晚元古代沉积盆地(一). 地质科学, 4: 314–322
- 孙枢, 范德廉, 陈海泓, 王清晨. 1987. 中国地台区张裂盆地沉积. 沉积学报, 5: 6–18
- 孙枢, 姜春潮. 1959. 小兴安岭东部, 完达山和张广才岭北部沉积岩和变质岩地层剖面的特点对比和矿产分布规律. 见: 黑龙江流域组合考察学术报告(第1集). 北京: 科学出版社
- 孙枢, 李继亮. 1984. 我国浊流与其他重力流沉积研究进展概况和发展方向问题刍议. 沉积学报, 2: 1–7
- 孙枢, 李思田, 王成善. 1998. 沉积盆地研究的基本趋向和对我国今后研究的设想. 见: 欧阳自远, 编. 世纪之交矿物岩石学地球化学回顾与展望. 北京: 原子能出版社. 373–378
- 孙枢, 李晓波. 2001. 我国资源与环境科学近期发展战略刍议. 地球科学进展, 16: 726–733
- 孙枢, 史培军. 2000. 数字地球及其在全球变化研究中的应用前景. 第四纪研究, 20: 213–219
- 孙枢, 王成善. 2008. Gaia理论与地球系统科学. 地质学报, 52: 1–7
- 孙枢, 王成善. 2009. “深时”(Deep Time)研究与沉积学. 沉积学报, 27: 792–810
- 孙枢, 王铁冠. 2016. 中国东部中-新元古界地质学与油气资源. 北京: 科学出版社
- 孙枢, 王清晨. 1991. 80年代我国沉积学研究的回顾. 科学通报, 36: 161–164
- 孙枢, 张国伟, 陈志明等. 1985. 华北断块区南部前寒武纪地质演化. 北京: 冶金工业出版社. 216
- 孙枢, 赵文智, 张宝民, 刘静江, 张静和单秀琴. 2013. 塔里木盆地轮东1井奥陶系洞穴沉积物的发现与意义. 中国科学: 地球科学, 43: 414–422
- 孙枢, 钟大赉, 李荫槐. 1988. 断块构造理论及其应用. 北京: 科学出版社. 220
- 陶辉飞, 王清晨, 孙枢, 阳孝法, 姜琳. 2012. 准噶尔盆地东北缘早石炭世南明水组沉积环境及构造背景分析. 地质科学, 47: 941–954
- 王清晨, 彭海波, 孙枢. 1991. 赣北安源煤系沉积对构造活动的响应. 地质科学, (3): 231–238
- 王清晨, 孙枢, 李继亮, 周达, 许靖华, 张国伟. 1989. 秦岭的大地构造演化. 地质科学, (2): 129–142
- 肖文交, 李继亮, 孙枢. 1998. 浙西北地区反转构造初步研究. 地质科学, 33: 158–165
- 肖文交, 李继亮, 孙枢, 陈海泓. 2000. 构造平衡分析及其对前陆褶皱冲断带构造极性的制约: 以浙西北地区为例. 地质科学, 35: 257–266
- 许靖华, 孙枢, 王清晨, 陈海泓, 李继亮. 1998. 1:4000000中国大地构造相图. 北京: 科学出版社. 155
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学B辑, 17: 1107–1115
- 徐冠华, 孙枢, 陈运泰, 吴忠良. 1999. 迎接“数字地球”的挑战. 遥感学报, 3: 85–89
- 徐树桐, 孙枢, 李继亮, 江来利, 陈冠宝, 石永红. 1993. 蓝田构造窗. 地质科学, 28: 105–116
- Yu A. 霍达克, 孙枢. 1961. 中国东北及毗邻的苏联远东地区主要地质构造特征(俄文). 苏联科学院专报, 地质学专辑, 10: 97–110
- 由雪莲, 孙枢, 朱井泉. 2014. 塔里木盆地中上寒武统叠层石白云岩中微生物矿化组构特征及其成因意义. 中国科学: 地球科学, 44: 1777–1790
- 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 刘玲, 何凯. 2011. 微生物白云岩模式研究进展. 地学前缘, 18: 52–64
- 曾荣树, 孙枢, 陈代钊, 段振豪. 2004. 减少二氧化碳向大气层的排放——二氧化碳地下储存研究. 中国科学基金, 4: 196–200
- 中国科学院地质研究所(孙枢主编). 1981. 沉积岩石学研究. 北京: 科学出版社. 242
- 中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组. 1998. 中国地质科学发展战略的若干问题——从地学大国走向地学强国. 北京: 科学出版社. 52
- 中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组. 2001. 地球科学: 世纪之交的回顾与展望. 中国科学院院刊, 16: 101–105
- 中国科学院地质研究所七室成矿成岩组. 1976. 海相磷块岩形成条件的若干问题. 磷矿地质(一). 北京: 地质出版社. 66–81
- 中国科学院黑龙江流域综合考察队地质组. 1959. 中国东北北部地质矿产概况. 北京: 科学出版社. 44
- 中国科学院黑龙江流域考察队. 1963. 小兴安岭、张广才岭和完达山地区地质. 黑龙江流域及其毗邻地区地质(第1卷). 北京: 科学出版社. 267
- Chen H H, Sun S, Li J L. 1994. Permo-Triassic magnetostratigraphic in Wulong Area, Sichuan, China. Sci China Ser B, 37: 203–212
- Hsü, K J, Sun S, Li J L. 1988a. Huanan Alps, not South China Platform. Sci China Ser B, 31: 109–119
- Hsü K J, Sun S, Li J L. 1989. Mesozoic suturing in the Huanan Alps and the tectonic assembly of South China. In: Şengör A M C, ed. Tectonic Evolution of the Tethyan Region. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers. 551–565
- Hsü K J, Sun S, Li J L, Chen H H, Pen H P, Şengör A M C. 1988b. Mesozoic overthrust tectonics in South China. Geology, 16: 418–421
- Li J L, Sun S, Chen H H, Hao J, Hou Q L, Xiao W J. 1999. Discernment of tectonic vergence in collision orogenic belts. Sci Geol Sin, 8: 1–6
- Li S T, Sun S. 2004. Basin geodynamic analysis and hydrocarbon resources prediction in East China basins. J Sed Soc Jpn, 58: 85–59
- Qin K, Sun S, Li J, Fang T, Wang s, Liu W. 2002. Paleozoic epithermal Au and porphyry Cu deposits in North Xinjiang, China: Epochs, features, tectonic linkage and exploration

- significance. *Resour Geol*, 52: 291–300
- Qin K, Sun S, Li J, Xiao W, Wang Z. 2001. Temporal-spatial distribution pattern of metallic deposits: As guides of plate tectonic environments of Northern Xinjiang. In: *Proceedings of the Post-Doctor in China*. Beijing: Science Press. 540–545
- Qin K, Xiao W, Zhang L, Xu X, Hao J, Sun S, Li J. 2005. Eight stages of major ore deposits in northern Xinjiang, NW-China: Clues and constraints on the tectonic evolution and continental growth of central Asia. In: Mao J, Bierlein F P, eds. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. 1327–1330
- Qiu Z, Sun S, Wei H, Wang Q, Zou C, Zhang Y. 2016. SIMS zircon U-Pb dating from bentonites in the Penglaitan global stratotype section for the Guadalupian-Lopingian boundary (GLB), South China. *Geol J*, 51: 811–816
- Sun S. 1992. A new variety of sedimentary phosphates: Middle Devonian alumophosphate rocks in western Sichuan, China. In: *Exploration of Volcanoes and Rocks in Japan, China and Antarctica: Commemorative Papers for Professor Yukio Matsumoto*. 359–370
- Sun S, Li J, Chen H, Peng H, Hsu, K J, Shelton J W. 1989. Mesozoic and Cenozoic sedimentary history of South China. *AAPG Bull*, 73: 1247–1269
- Sun S, Li J L, Lin J L, Wang Q C, Chen H H. 1991. Indosinides in China and the consumption of eastern Paleo-Tethys. In: Muller D W, McKenzie J A, Weissert H, eds. *Controversies in Modern Geology: Evolution of Geological Theories in Sedimentology, Earth History and Tectonics*. London: Academic Press. 364–384
- Sun S, Zhou X H. 2003. Geological Sciences in China: Review and Prospects. In: Lu Y X, ed. *Science Progress in China*. Beijing: Science Press
- Tao H, Sun S, Wang Q, Yang X, Jiang L. 2014. Petrography and geochemistry of lower Carboniferous greywacke and mudstones in Northeast Junggar, China: Implications for provenance, source weathering, and tectonic setting. *J Asian Earth Sci*, 87: 11–25
- Wang Z, Sun S, Li J, Hou Q, Qin K, Xiao W, Hao J. 2003. Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang, China: Geochemical and geochronological constrains from the ophiolites. *Tectonics*, 22: 1014–1022
- Xiao W, Huang B, Han C, Sun S, Li J. 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. *Gondwana Res*, 18: 253–273
- Xiao W, Sun S, Li J, Chen H. 2001. South China archipelago orogenesis. In: Briegel U, Xiao W, eds. *Paradoxes in Geology*. Amsterdam: Elsevier. 15–37
- Xiao W, Windley B F, Sun S, Li J, Huang B, Han C. 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 43: 477–507
- You X, Sun S, Zhu J, Li Q, Hu W, Dong H. 2013. Microbially mediated dolomite in Cambrian stromatolites from the Tarim Basin, north-west China: Implications for the role of organic substrate on dolomite precipitation. *Terra Nova*, 25: 387–395

(责任编辑: 郑永飞)