

蒲俊兵. 现代岩溶学学科体系: 祝贺《现代岩溶学》出版六周年[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 429-440.

DOI: 10.11932/karst20220310

现代岩溶学学科体系 ——祝贺《现代岩溶学》出版六周年

蒲俊兵

(重庆师范大学地理与旅游学院/长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室/三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 作为现代地球科学学科体系重要组成部分的岩溶学一直以来都被认为是地质学、地理学、环境科学、生态学之间的交叉、边缘学科, 并未建立起自己独立的学科体系。面对全球岩溶地貌分布广泛、生态环境脆弱及问题复杂多样且同经济社会发展密切相关等情况, 文章在简要回顾国内外岩溶学发展历程的基础上, 通过对近三十年国内外岩溶研究相关学科发展情况的分析, 以地球系统科学、岩溶动力学理论为指导, 讨论构建现代岩溶学学科体系这一重要问题。文章围绕岩溶动力系统的四大功能和岩溶区资源环境生态问题的实际, 从地质学、地理学、地球化学、生态学、环境学、水文学等与现代岩溶学研究相关的学科出发, 尝试构建现代岩溶学学科体系, 其主要的学科分支包括岩溶地质学、岩溶地貌学、岩溶水文地质学、岩溶环境学、岩溶工程地质学、岩溶生态学、岩溶资源学、全球变化岩溶学、洞穴学等九个分支学科, 并简要阐述了各分支学科的科学内涵和定位。分支学科的构建, 体现了国际岩溶科学研究中相关研究方向和学科发展独立性和交叉性的统一, 体现了国际岩溶学发展的现状和趋势, 对于国际岩溶学的发展具有较为重要的意义。

关键词: 学科体系; 九个分支学科; 四大功能; 岩溶动力学; 现代岩溶学

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)03-0429-12 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶分布面积占全球无冰雪覆盖的陆地总面积的15.2%^[1], 是地球表面重要的景观类型。国内外科学家对岩溶区独特的地质地貌特征和资源环境生态问题及对区域社会发展的重要影响开展了大量的科学研究工作, 取得了大量重要成果, 推动了学科的发展^[2-3]。岩溶区相关的景观特征和资源环境生态问题均受控于区域地质地貌条件, 因此, 长期以来岩溶学被认为是一门边缘学科, 其研究理念及方法多采用地质学、地理学、水文学、环境学、生态学等学

科及它们的分支学科的研究思路和方法。在一些领域, 多学科交叉成为特点, 这样就使得岩溶学自己的学科体系淹没于学科交叉的背景之中, 引发了学科体系不全、特色不明、定位不准等问题, 对学科的可持续发展造成了一定的不利影响。

岩溶学(Karstology 或者 Karst science)的形成、发展具有较长的历史, 但最开始同其它地学相关学科一样都是从对人类生活所处的自然环境的独特现象的原始认知方面开始。在我国的许多古籍中均有关于洞穴、地下河、泉、石钟乳等岩溶现象的描述, 如《周易》、《山海经》、《神农本草经》、《水经注》、

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0107100); 国家自然科学基金(41977166); 重庆师范大学基金项目(21XRC002)

作者简介: 蒲俊兵(1982-), 男, 研究员, 博士, 主要从事岩溶地质作用与环境变化方面的研究。E-mail: junbingpu@163.com。

收稿日期: 2022-03-01

《梦溪笔谈》等^[4]。明朝伟大的地理学家徐霞客(1587-1641)对我国南方亚热带岩溶地区进行了详细的考察,对亚热带岩溶、岩溶作用机制、洞穴形成等都有深刻的科学认识,提出了很多我国沿用至今的岩溶术语,如“石山”、“环洼”、“峰林”、“(丛立之峰)峰丛”、“离立”、“天生桥”等,对世界岩溶学做出了重要的贡献,相关工作比俄国的 M.B.罗蒙诺索夫早了一个世纪,比西欧学者则早了 200 多年^[4-7]。国外的岩溶学发展最初也是从对泉水和洞穴的利用开始,特别是古代文明较为发达的地中海沿岸地区,如古罗马、古希腊。一些古罗马时代的岩溶泉引水工程,迄今还发挥重要的效益^[8]。19 世纪中期以前,国外一些著作对洞穴、泉水、钟乳石、石笋、洼地等有一些具体的描述,但岩溶学多处于初步的认知阶段,发展缓慢。1893 年,塞尔维亚地理学家斯维依奇(Jovan Cvijić)的博士论文《岩溶现象》(Das Karstphänomen)发表^[9]及 1930 年 W. M. Davis 的《石灰岩地区的洞穴》^[10]长篇文章发表以后,欧美相关国家或地区的岩溶学进入了快速发展时期,而此时处于清末民初的我国,社会动荡,岩溶学发展滞后。20 世纪初我国地质学先驱丁文江先生在云贵地区开展地质矿产调查时,对岩溶地貌进行了相关调查,随后高振西先生对我国岩溶地形进行了初步的总结^[11]。同期,我国在洞穴古生物、古人类的调查方面取得了重大成就,如周口店龙骨山北京人的发现等^[12]。随着新中国的成立,从解决国民经济建设的实际问题出发,我国的岩溶研究主要集中在岩溶找水与地下水开发、岩溶水利水电与铁路工程地质等方面,在区域岩溶地貌、岩溶发育规律、岩溶水文地质等方面也有重要的进展^[13-19]。20 世纪 70-90 年代,大量经典的岩溶学著作问世,国内外岩溶学都进入了快速发展时期^[20-32]。特别是 80 年代以来,地球系统科学的学术思想和从全球视野开展的研究,以及岩溶动力学理论的创立,给岩溶学的发展带来了强大的动力^[2],相关的研究领域也从传统的岩溶地貌学、洞穴学、岩溶水文地质扩展到岩溶发育的物理化学机制、岩溶生物地球化学、岩溶环境学、岩溶生态学、岩溶作用与全球变化、退化岩溶环境治理、岩溶区可持续发展等领域,形成了广阔的研究领域。从 20 世纪 90 年代初以来至今,我国连续主持 6 个岩溶领域的联合国教科文组织国际地学计划(IGCP)及 2008 年联合国教科文组织在桂林成立国际岩溶研究中心,奠定了我国在全球岩

溶研究中的重要地位。

迄今为止,系统的岩溶学的发展已经走过了上百年的时间,但是对岩溶学特别是现代岩溶学的学科体系及其在现代科学体系中的地位的认识还不够,国内外相关高校本科阶段开设现代岩溶学相关的课程或内容的还不多见,一些学校在研究生培养阶段将其作为选修课进行开设,这明显制约了学科的进一步发展和相关人才的培养。2016 年出版的《现代岩溶学》^[3]是第一本以地球系统科学思想为指导的岩溶学学科性质的著作,从理论与实践相结合的角度,将岩溶学高度归纳为普通岩溶学、区域岩溶学、全球变化岩溶学和专门岩溶学四个大的分支学科,并分别阐述了每项分支学科所涉及的具体内容,这对于岩溶学学科的发展起到了巨大的推动作用。然而,由于岩溶地质环境的复杂性和涉及的研究方向、领域、交叉学科众多,该专著对构成四个大的分支学科的基础体系方面多从研究内容或方向方面进行构建,但对基础学科或者分支学科的关注还较薄弱。因此,讨论现代岩溶学的学科体系及其分支学科的特点,构建现代岩溶学学科体系就显得十分重要且必要。

1 现代岩溶学的学科基础指导理论

自 20 世纪 80 年代地球系统科学思想和概念被提出并蓬勃发展以来,根据地球系统多圈层相互作用思想开展科学研究逐渐成为地质学、地理学、环境学、生态学等学科的核心研究思想,但岩溶学采用地球系统科学的认识论和方法论,比地学中研究其它表生地质作用的领域较晚^[33]。指导岩溶学研究的学术思想从十九世纪末二十世纪初的基于形态描述、分类与成因追溯的经典地质、地貌学方法,发展到地壳升降与水动力条件的相互作用思想,然后发展到水圈和岩石圈界面上的地质作用理论即水-岩相互作用的理论,经历了数十年。我国岩溶学术界广泛接受的前苏联学者 D.C.索科洛夫 1962 年总结的岩溶发育的四个基本条件(可溶性岩石、岩石的透水性、侵蚀性的水和水的运动性)即是基于水-岩相互作用的岩溶学研究指导思想^[34]。在当前许多地貌学、地理学、地质学的教课书中仍是以该思想或理论作为涉及岩溶或喀斯特章节教学内容的主要乃至唯一指导理论。然而,随着地球系统科学思想的发展和深

入,与全球碳、水、钙循环共存的岩溶作用的研究与发展及相关重大资源环境生态问题的解决迫切需要新的科学思想或学科理论。

在地球系统科学思想的指导下,20世纪80年代末和90年代初,袁道先^[35]从全球碳、水、钙耦合循环的思路出发重新认识了岩溶作用的过程和机制,提出岩溶作用是在碳循环及与其相偶联的水循环、钙循环系统中碳酸盐(岩)的被溶蚀或沉积,而各种岩溶形态则是这一复杂的循环系统的运动在碳酸盐(岩)上留下的轨迹的岩溶动力系统思想,并指出岩溶动力系统是控制岩溶形成演化,并常受制于已有岩溶形态的,在岩石圈、水圈、大气圈、生物圈界面上的,以碳、水、钙循环为主的物质、能量传输、转换系统^[36]。同时在实际工作中建立了一系列捕捉岩溶动力系统中碳、水、钙循环追踪的野外和实验室工作方法,创立了研究岩溶动力系统的结构、功能和运行规律及其应用的岩溶动力学理论体系^[33,36]。岩溶动力学理论体系的创立从地球系统科学思想的高度革新了传统岩溶研究的指导理论,使得各学科有机联系并形成了广泛的交叉和渗透,得到了国内外的广泛认可。1994年联合国教科文组织国际地学计划(IGCP)执行局主席 Malcolm Brown 院士在 IGCP 官方刊物 *Nature & Resources* 专文介绍了岩溶动力学理论^[37]。国际上相关的岩溶研究机构,如斯洛文尼亚科学与艺术院岩溶研究所、美国国立洞穴与岩溶研究所、美国岩溶水研究所、美国霍夫曼环境研究中心、巴西岩溶研究所、英国洞穴研究会、塞尔维亚贝尔格莱德大学岩溶水文地质研究中心、西班牙马拉加大学岩溶水文地质中心、罗马尼亚洞穴研究所等国际岩溶研究机构以及国际水文地质学家协会岩溶委员会、国际地理联合会岩溶委员会、美国洞穴基金会等国际相关岩溶学术机构均对岩溶动力学理论进行了充分的肯定,在他们相关的教学、培训中均对岩溶动力学理论进行介绍。2008年联合国教科文组织设立的第一个地学国际研究中心——国际岩溶研究中心将岩溶动力学理论作为中心指导理论写入了中心章程。

岩溶动力学理论认为岩溶动力系统是一个高度开放且敏感的三相不平衡系统。它由固相、液相、气相三部分构成,固相部分由各种以碳酸盐岩为主的岩石及其中的裂隙网络构成,液相部分为含有以 Ca^{2+} (Mg^{2+}), HCO_3^- , CO_3^{2-} , H^+ 和溶解 CO_2 为主要成分

的水流,气相部分则为以 CO_2 为主的各种参与岩溶作用的气体^[2,33]。由此,岩溶动力系统就同地球四大圈层密切联系起来,从以往的对岩溶作用的单因素(要素)分析发展到从地球四大圈层界面上“水-岩-气-生”相互作用的多因素(要素)分析的新阶段。经过多年的调查研究,袁道先等^[2,33,36]总结了岩溶动力系统的四大功能,即:①驱动各种岩溶形态的形成;②通过岩溶作用调节大气温室气体(CO_2)浓度,缓解环境酸化;③驱动元素迁移、富集、沉淀,形成有用矿产资源,影响生命;④记录全球环境变化过程。由此可见,岩溶区的一切资源、生态、环境问题(水土资源、矿产资源、岩溶旅游资源、生态资源与生物多样性、岩溶地质灾害、水土污染和石漠化等)都同岩溶动力系统的结构、功能、运行机制密切相关,岩溶动力学理论也由此成为地球系统科学引入岩溶研究以后发展起来的现代岩溶学的学科核心理论,它与地质学、地貌学、水文学、生态学、环境学、全球变化科学等学科有着广泛的交叉前景,对于科学解决岩溶区乃至某些全球性资源生态环境问题,实现区域人地和谐和可持续发展至关重要。

2 现代岩溶学学科体系

现代岩溶学的学科基础指导理论是岩溶动力学理论,其岩溶动力系统的四大功能即构成了现代岩溶学学科体系中的“四梁”。根据这四大功能的特点及符合学科对象独立、学科问题独立、学科特征独特和社会服务功能独特^[38]这四个构成一门学科的基本要求来看,现代岩溶学学科可分为岩溶地质学、岩溶地貌学、岩溶水文地质学、岩溶环境学、岩溶工程地质学、岩溶生态学、岩溶资源学、全球变化岩溶学、洞穴学等九个分支学科,这九个分支学科就构成了现代岩溶学学科体系的主体(图1,图2)。九个分支学科既具有较强的独立性和独特性,又在实际的教学、研究过程中存在一定程度的交叉,这体现了利用多学科综合手段深入认识并解决实际问题的特点。

岩溶地质学是现代岩溶学中一门最基础的学科,也属于现行学科分类目录(国家标准 GB/T 13 745-2009)中二级学科“地质学”的一个分支。它主要研究形成各种岩溶现象的地质过程及演化,主要包括各种可溶岩(碳酸盐岩、硫酸盐岩、卤盐类岩石等)岩石学和岩相古地理、含可溶岩地层形成环境以及

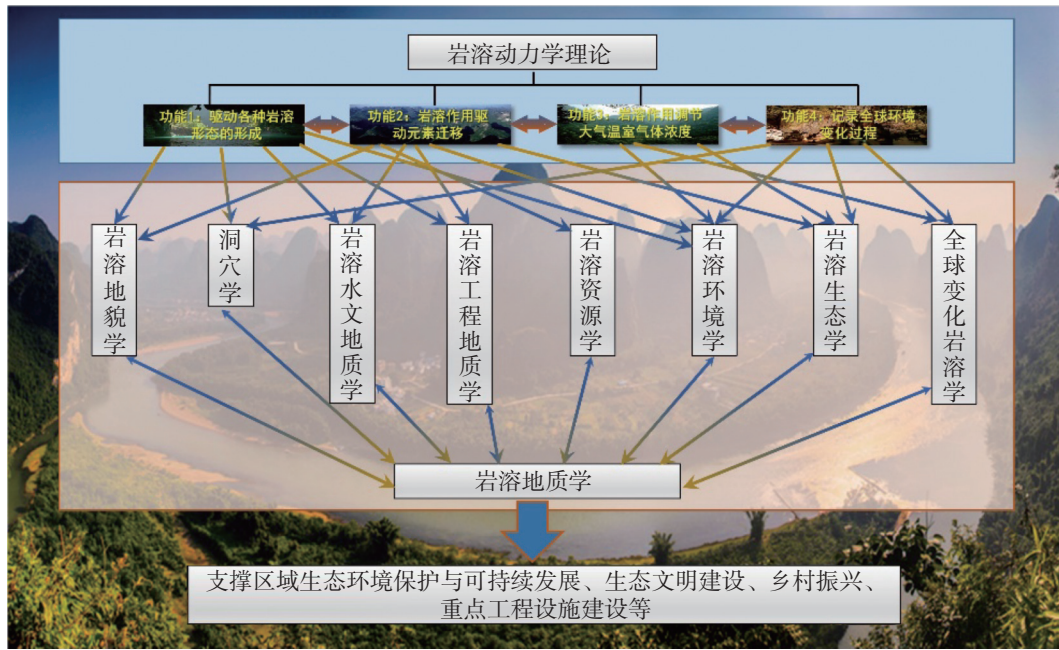


图 1 现代岩溶学学科体系
Fig. 1 Disciplinary system of modern karstology

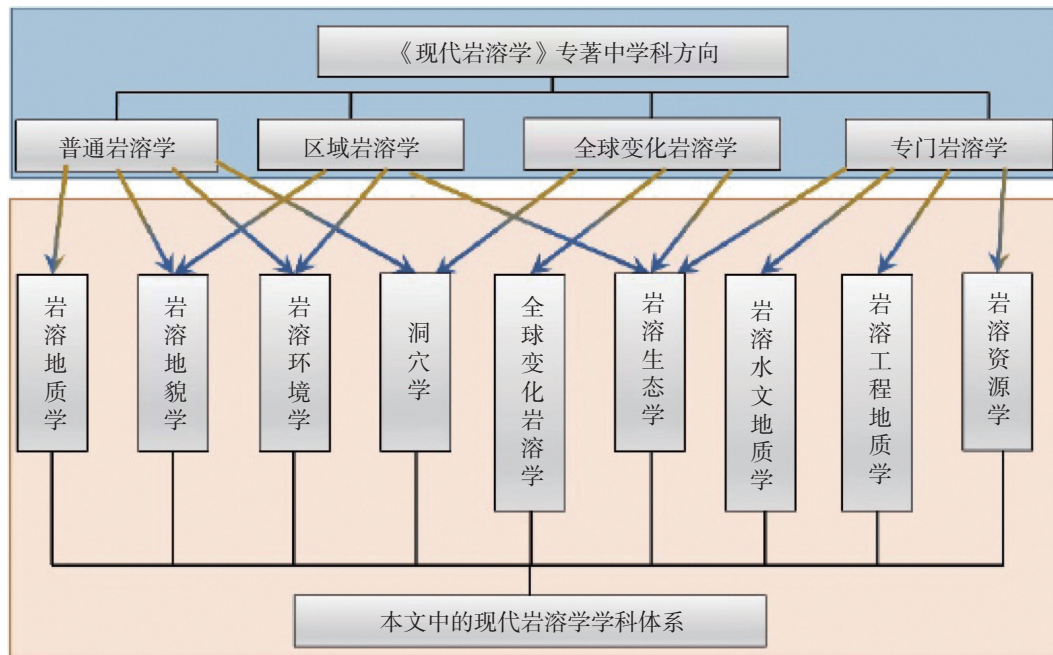


图 2 本文九个分支学科同《现代岩溶学》专著中四个分支方向的关系图
Fig. 2 Relationship between the nine subdisciplines of this paper and the four subdisciplines in the academic book *Modern Karstology*

它的形成过程、地质构造与地质作用、岩溶发育史等。岩溶地质学是现代岩溶学学科体系中具有统领性质的学科,是深入开展岩溶发育机理、水文地质过程、地质灾害防治与治理、退化生态修复、资源开发利用等的基础。利用岩溶动力学理论开展岩溶地质

学研究就是要分析和揭示形成特定岩溶地质问题、特定的地质时期碳、水、钙(镁)循环条件及同当时环境的相互作用关系及地质演化过程对碳、水、钙(镁)循环条件的改变和影响,找出关键影响因素及变化。岩溶区一切资源、环境、生态问题的产生、发

展都是在特定的岩溶地质背景下形成的,要解决涉及国民经济建设的相关难题都需要依靠深入的岩溶地质过程及演化的相关研究。这一分支学科的代表性或重要性论著主要是《中国岩溶研究》^[18]、《Carbonate Depositional Environments》^[39]、《Processes in Karst Systems: Physics, Chemistry, and Geology》^[32]、《Carbonate Sedimentology》^[40]、《中国岩溶动力系统》^[36]等。

岩溶地貌学是现代岩溶学中的一门基础学科,也属于现行学科分类(国家标准 GB/T 13745-2009)中三级学科“自然地理学”中地貌学的一个分支,发展历史最为悠久。它主要研究地球表面各种岩溶地貌(或形态)的特征、成因、分布和演化规律及其与形成环境的相关关系。岩溶地貌学旨在揭示岩溶区地表、地下各种岩溶地貌(或形态)形成的物理、化学、生物学机理,区域差别,明确其发育过程和演化规律,建立各种岩溶地貌(或形态)与形成环境之间的相关关系。研究区域岩溶的形成及其发育演化必须从岩溶地貌(或形态)的分析入手。岩溶区一切资源、环境、生态问题的形成、发展都要依赖于一定的岩溶地貌(或形态),所以解决前述问题也必须充分认识和了解岩溶地貌(或形态)。现代岩溶地貌学研究要求依据岩溶形态组合(karst feature complex)思想^①,克服“异质同相、异期同位”现象造成的混乱。岩溶地貌学及其知识体系具有广阔的社会应用前景,在岩溶景观资源开发、利用与保护,世界自然遗产、世界(国家或地方)地质公园申报、建设、评估与保护等方面发挥了巨大的作用。这一分支学科的代表性或重要性论著主要是《Karst Landforms》^[20]、《Karst Geomorphology》^[24]、《中国岩溶-景观、类型、规律》^[25]、《Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains》^[27]、《Karst Geomorphology and Hydrology》^[29]、《Karst of China (中国岩溶学)》^[30]、《Karst Hydrogeology and Geomorphology》^[31]等。

岩溶水文地质学是现代岩溶学中兼具基础和应性质的一门学科,也属于现行学科分类(国家标准 GB/T 13745-2009)中三级学科“水文地质学”的一个分支,发展历史悠久。它主要研究自然环境和人类活动影响下岩溶区的地下水储存、分布、运动及水

量和水质时空变化及演变规律、地表水-地下水相互转化规律、地下水资源评价、开发利用及水环境保护等内容。岩溶水文地质学旨在揭示赋存于岩溶介质中的地下水与含水介质本身相互作用的物理、化学、生物学规律及其对岩溶水文系统补给、径流、蓄积、排泄的影响,建立相关的勘查技术和研究方法,提出岩溶地下水开发利用和保护方案。岩溶水文系统最重要的特征是存在溶洞、管道、裂隙、孔隙共存的现象,具有不均质性、多级次性和水力联系的各向异性,因此岩溶地下水多存在层流与紊流共存、水位和流量变幅大、开发利用难度大、对环境变化响应敏感等特征。在裸露型岩溶区,由于覆盖层薄、地下水—地表水转换频繁,岩溶水文系统十分脆弱,易受人类活动影响诱发水质退化、地下水污染等问题,且治理恢复难度大。岩溶区特有的地质灾害问题的发生,如岩溶塌陷、内涝等往往同特殊的岩溶水文地质条件或系统原有的水文地质条件被改变相关,要解决这些问题也需要深入开展岩溶水文地质学的研究。因此,岩溶水文地质学及其知识体系具有广阔的国民经济运用前景,在岩溶地下水开发利用、岩溶区水利水电工程建设、岩溶区道路交通建设、污染岩溶含水层修复、岩溶地质灾害防治等方面发挥了巨大作用。这一分支学科的代表性或重要性论著主要是《岩溶地区供水水文地质工作方法》^[17]、《Karst Hydrology and Physical Speleology》^[21]、《Karst Hydrogeology》^[22]、《Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains》^[27]、《Karst Geomorphology and Hydrology》^[29]、《Karst Hydrogeology and Geomorphology》^[31]、《Methods in karst hydrogeology》^[42]、《岩溶水文地质学》^[43]等。

岩溶环境学是现代岩溶学与环境科学进行学科交叉研究中形成的一门基础学科,也属于现行学科分类目录(国家标准 GB/T 13745-2009)中三级学科“环境学其他学科”的一个分支,是二十世纪八十年代以来,随着国内外环境科学学科的发展和解决岩溶区特有的环境问题的需要而形成的新兴学科。岩溶环境学是研究岩溶环境系统的科学,主要研究围绕着人类的受岩溶条件制约的岩石圈、大气圈、水圈、生物圈的特征、相互作用关系和物质、能量循环演

① 岩溶形态组合(karst feature complex)是指一组在大致相同环境里形成的,由地表形态和地下形态、宏观形态和微观形态、溶蚀形态和沉积形态组成的岩溶形态^[41]。

化规律,以及产生的各种环境问题并针对性提出解决方案。岩溶环境系统是由可溶岩及其上覆风化残余的土壤、岩溶形态、岩溶水文系统、岩溶区的地表地下空气层和岩溶生物群落组成的一种富钙的碳酸盐三相不平衡的环境系统,其大气圈、水圈和生物圈都具有地表、地下双层结构^[26]。岩溶环境学的形成、发展主要是由于岩溶环境的特殊性及其带来的特殊的环境问题驱动的。在地球系统科学思想和岩溶动力学理论指导下,要充分认识岩溶环境特殊性和解决特殊的岩溶环境问题就需要现代岩溶学与现代环境科学进行深度学科交叉。在学科发展的过程中,岩溶区的社会人文环境变化及与自然环境的相互作用也逐渐成为岩溶环境学研究的一部分。岩溶环境学及其知识体系在岩溶区环境保护、规划、管理与治理、岩溶退化环境修复、岩溶区国土空间规划、岩溶区资源环境承载力评价、岩溶区环境地质灾害防治等方面具有广阔的应用前景。这一分支学科的代表性或重要性论著主要是《Karst Hydrology and Physical Speleology》^[21]、《岩溶环境学》^[26]、《Sinkholes and Subsidence》^[44]等。

岩溶工程地质学是现代岩溶学中具有较强应用性质的一门学科,是在岩溶地区进行工程建设实践中发展起来的一门学科,也属于现行学科分类目录(国家标准 GB/T 13745-2009)中二级学科“工程地质学”的一个分支。它是研究岩溶区的工程建设活动与地质环境相互作用和相互影响,并运用现代岩溶学及其他相关学科的技术方法解决工程地质问题,保障建设工作顺利进行和工程安全运营的科学。岩溶工程地质问题主要发生在裸露型和覆盖型岩溶区。碳酸盐岩、硫酸盐岩、卤盐类岩石等可溶性岩类是孔隙、裂隙、管道、溶洞相互交织的复杂的岩溶岩体和水文地质单元,给前期工程地质勘察、评价和选址带来较大困难,同时可诱发岩溶渗漏、地基失稳、地面塌陷、涌水(泥)、危岩崩塌等工程问题,给相关工程建设和安全运营带来较大威胁。岩溶工程地质学通过对岩溶系统组成、岩溶发育规律、水文地质条件与水动力特征、岩土工程力学性质等的分析和研究,评价区域工程地质条件,防治和处治各种岩溶工程地质问题,保障工程建设顺利进行和安全运行^[45]。新中国成立后,我国岩溶学的快速发展即是得益于制约岩溶地区大规模基础设施建设的工程地质问题的解决。岩溶工程地质学及其知识体系在岩溶区水

利水电工程建设、道路交通工程建设、城市地下空间开发利用、地下水库建设、隧道工程建设等领域具有十分广阔的运用前景并能发挥巨大的作用。这一分支学科的代表性或重要性论著主要是《水利水电岩溶工程地质》^[46]、《Water Resources Engineering in Karst》^[47]、《Sinkholes and Subsidence》^[44]、《Engineering Karstology of Dams and Reservoirs》^[48]、《岩溶工程地质学》^[45]等。

岩溶生态学是现代岩溶学与生态学进行学科交叉研究中形成的一门基础学科和新兴学科,也属于现行学科分类目录(国家标准 GB/T 13745-2009)中三级学科“生态系统生态学”的一个分支。它主要研究受岩溶环境制约的生态系统的结构、功能、运行机制及其与人类活动的相互影响。受岩溶环境制约的生态系统也叫岩溶生态系统,它由无机环境和生命两个部分组成,后者受前者制约,并受到无机方面的“岩溶动力系统”和生命方面的“遗传信息传递系统”联合作用驱动^[49]。岩溶生态学通过研究主要由岩溶水文地质系统组成的无机环境和在无土、缺水、富钙、偏碱的地面环境及无光、潮湿、相对恒温的地下环境受遗传信息传递系统控制的特殊生产者、消费者和分解者群落的形成和演化来揭示岩溶生态系统的特征、运行规律并加以保护和合理开发利用。岩溶生态系统对人类健康也有特殊影响。此外,由于岩溶水文地质系统本身的脆弱性加之不合理的人类活动干扰,一些区域岩溶生态系统退化,诱发生物多样性丧失、旱涝灾害频发、水土污染和石漠化等严重问题,岩溶生态学的理论和相关技术方法是解决这些问题的重要科技支撑。岩溶生态学及其知识体系同生态文明建设密切相关,在岩溶生态系统保护、退化岩溶环境治理、石漠化综合治理、生物多样性保护、地下生物群认识与保护等方面发挥了重要作用。这一分支学科的代表性或重要性论著主要是《Rock Desertification in the subtropical karst of south China》^[50]、《On the Karst Ecosystem》^[51]、《受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统》^[52]、《The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats》^[53]等。

全球变化岩溶学是现代岩溶学与全球变化科学、气候学、生态学、环境学等进行学科交叉研究中形成的一门新兴学科、特色学科,在现行学科分类目录(国家标准 GB/T 13745-2009)中尚无相关性学科。

全球变化岩溶学是地球系统科学思想引入岩溶学研究以后,从全球碳、水、钙物质循环的角度研究岩溶与环境变化的关系而发展起来的。它主要研究岩溶动力系统运行过程与全球温室气体(主要是 CO_2)源汇的关系和解译岩溶沉积物中高分辨率全球或区域环境变化的信息。 CO_2 和水是岩溶作用的主要驱动力,在形成岩溶溶蚀形态的过程中快速消耗大气 CO_2 ,产生碳汇效应。另一方面,在形成各种岩溶沉积形态的过程中又快速释放出 CO_2 ,这一吸收与释放共存的作用过程,调节着大气 CO_2 的浓度,成为调控岩溶碳循环过程和提高并稳定岩溶碳汇的重要研究对象。此外,一些与断裂活动、热液活动有关的岩溶作用(深部岩溶动力系统)在地表伴随碳酸钙的沉积常释放大量深部来源 CO_2 ,成为碳源。岩溶洞穴沉积物敏感的记录了环境变化的信息,且分辨率高、定年准确、代用指标丰富、分布广,成为继深海沉积、黄土、冰芯记录后全球变化研究的重要支柱。全球变化岩溶学是目前国际研究热点和前沿领域,其知识体系在碳汇效应评价、固碳增汇能力提升、气候环境变化预测及应对极端气候、环境演化与人类适应等方面发挥了重要作用,具有广阔的发展和应用前景。这一分支学科的代表性或重要性论著主要是《The carbon cycle in karst》^[54]、《A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China》^[55]、《中国岩溶动力系统》^[35]、《碳循环与岩溶地质环境》^[56]、《Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon》^[57]、《Ice age terminations》^[58]、《Speleothem Science: From Process to Past Environments》^[59]、《The Asian monsoon over the past 640000 years and ice age terminations》^[60]、《Large and active CO_2 uptake by coupled carbonate weathering》^[61]等。

岩溶资源学是现代岩溶学与资源科学进行学科交叉研究中形成的一门基础性、应用性学科,在现行学科分类目录(国家标准 GB/T 13745-2009)中尚无相关性学科。它主要是研究与岩溶系统相关的各种资源(主要是自然资源)的形成、赋存、演化、分布的理论、规律和相关资源的保护、开发与可持续利用的理论、技术和方法。岩溶资源包括水资源、空气资源、景观资源、矿产资源、油气资源、地热资源、特殊的生物资源等。岩溶系统的构成基础——可溶

岩本身就是一种重要的矿产资源。地表、地下相关的岩溶形态为各种资源提供了赋存或运移空间。合理开发、利用和保护岩溶资源需要系统的研究地质时期和现代岩溶动力系统运行规律,揭示各种资源与岩溶形态之间的匹配关系和演变,为提高资源开发利用效率和可持续利用提供支撑。岩溶资源学及其知识体系在国家能源资源安全与保障、乡村振兴、生物多样性保护等方面具有广阔的发展前景。这一分支学科的代表性或重要性论著主要是《Paleokarst》^[62]、《Paleokarst Related Hydrocarbon Reservoirs》^[63]、《Cave minerals of the world》^[64]、《Water in Karst: Management, Vulnerability, and Restoration》^[65]等。

洞穴学是现代岩溶学的一门独有和古老的学科。它是研究人可进入的洞穴的科学,主要研究洞穴成因、洞穴地貌和地质过程、洞穴沉(堆)积物及各种形态成因、过程和环境意义、洞穴物理、化学、水文和气象过程、洞穴生物与微生物、洞穴古生物和考古、洞穴文化艺术、洞穴勘测与制图技术、洞穴开发利用和保护、洞穴旅游、洞穴医疗等,在现行学科分类目录(国家标准 GB/T 13745-2009)中尚无相关性学科。现代岩溶学注重从多圈层相互作用的角度研究可溶性岩类(碳酸盐岩、硫酸盐岩、卤盐类岩石等)分布区洞穴系统的物质、能量循环过程、机理与环境的关系及对洞穴特殊生态系统、微生物生物地球化学过程的影响。在一些火成岩、砂岩分布区形成的洞穴,也可借鉴现代岩溶学的相关研究思路 and 手段开展相关研究工作。在岩溶地区的一些人工开凿洞穴,为研究其地质结构稳定性、对区域地质环境的影响和开凿后的环境变化也可借鉴洞穴学的研究方法和手段。一些由地下热液形成的深部(深成)洞穴,其同表生岩溶作用形成的洞穴不一样,但也属于洞穴学的研究范畴,需采用现代岩溶学、油气地质、地球化学等综合性的研究手段。洞穴学的知识体系在洞穴景观资源开发、利用和保护、区域环境演变研究、生态系统及生物多样性保护、地下空间开发利用等方面具有十分广阔的运用前景。这一分支学科的代表性或重要性论著主要是《Karst Hydrology and Physical Speleology》^[21]、《桂林岩溶地貌与洞穴研究》^[28]、《应用岩溶学与洞穴学》(1985)^[66]、《Speleogenesis: evolution of Karst Aquifers》^[67]、《Cave Geology》^[68]、《Speleothem Science: From Process to Past Environments》^[59]等。

3 结 语

构建现代岩溶学学科体系,并不是标新立异的提法,而是依据国内外为解决岩溶地区面临的独特资源、环境、生态等问题所提出的科学理论、建立的相关技术方法而形成的,是科学研究的成果、解决实际问题的效果而孕育的,也是学科发展的必然。需要特别说明的是,从便于进行科学体系分类和开展教学实践活动的角度,对现代岩溶学学科进行了科学的分类。但是,上述各个分支学科在保持各自独立性的同时,在实际研究、调查中也不是截然分开的,而是为深入认识和解决某一问题,不同学科间经常进行交叉和渗透,这也是现代科学研究的基本思路 and 手段。从支撑服务国家重大需求来看,现代岩溶学也大有用武之地,并能做出重大贡献。岩溶面积占我国国土面积的 1/3,在美丽中国建设、退化生态修复、各种交通线路建设、油气和矿产资源开发利用、南海海岛开发与利用、乡村振兴等涉及国民经济的重要行业领域中不可避免的会遭遇岩溶问题或与岩溶相关的问题。“一带一路”沿线是世界岩溶集中分布区,约占全球岩溶总面积的 60%,共同面临生态退化、石漠化、缺水、旱涝频发等重大生态环境问题。联合国 2015-2030 年 17 项可持续发展目标中消除贫困、清洁饮水、清洁能源、气候行动、陆地生物等也同岩溶环境密切相关。要解决这些问题或实现相关目标,都需要依靠现代岩溶学的理论、技术和方法。此外,现代岩溶学中关于岩溶碳循环与全球变化的知识体系能在国家“碳达峰、碳中和”战略中区域碳循环的调控和碳汇效应评价方面发挥重要作用。总之,时代在召唤现代岩溶学学科的建立,现代岩溶研究也以其丰硕的成果回应时代的召唤,两者相互哺育,共同培育了现代岩溶学学科体系。

致谢: 仅以此文献给我尊敬的导师、国际著名岩溶学家、现代岩溶学和岩溶动力学理论的创始人袁道先院士九十华诞!

参考文献

- [1] Goldscheider N, Chen Z, Auler A S, Bakalowicz M, Broda S, Drew D, Hartmann J, Jiang G, Moosdorf N, Stevanovic Z, Veni G. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(5): 1661-1677.
- [2] 袁道先. 现代岩溶学和全球变化研究[J]. *地质前缘*, 1997, 4(1-2): 17-25.
YUAN Daoxian. Modern Karstology and Global Change Study[J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(1-2): 17-25.
- [3] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 蒲俊兵, 肖琼. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1-363.
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, PU Junbing, XIAO Qong. *Modern Karstology*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 1-363.
- [4] 朱德浩, 李慧芳. 世界岩溶地貌和洞穴考察研究的先驱: 徐霞客[J]. *中国岩溶*, 1991, 10(3): 245-250.
ZHU Dehao, LI Huifan. Xiake Xu: a pioneer on karst geomorphology and cave survey and research in the world[J]. *Carsologica Sinica*, 1991, 10(3): 245-250.
- [5] 杨文衡. 徐霞客对我国古代岩溶洞穴研究的贡献[J]. *中国岩溶*, 1983, 2(2): 137-145.
YANG Wenheng. Xu Xiake's contributions to the study of Chinese ancient karstic caves[J]. *Carsologica Sinica*, 1983, 2(2): 137-145.
- [6] 任美镔. 徐霞客对世界岩溶学的贡献[J]. *地理学报*, 1984, 39(3): 252-258.
REN Meie. Xu Xiake's contributions to world karst sciences[J]. *Acta Geographica Sinica*. 1984, 39(3): 252-258.
- [7] 缪钟灵. 论徐霞客对西南喀斯特研究的贡献[J]. *地理研究*, 1986, 5(4): 18-24.
MIAO Zhongling. Xu Xiake's contributions to karst research in southwest China[J]. *Geographical Research*, 1986, 5(4): 18-24.
- [8] LaMoreaux J W, Stevanović Z. *Historical Overview on Karst Research*[M] // Stevanović Z. *Karst Aquifers—Characterization and Engineering*, Switzerland: Springer International Publishing 2015: 3-18.
- [9] Cvijić J. *Das Karstphänomen. Versuch einer morphologischen Monographie*[D]. *Geographischen Abhandlung*, Wien V, 1893, 3: 218-329.
- [10] Davis W M. Origin of Limestone Caverns[J]. *Geological Society of America Bulletin* 1930, 41(3): 475-628.
- [11] 高振西. 喀斯特地形略论[J]. *地质论评*, 1936, 1(4): 108-129.
GAO Zhenxi. Brief discussions on karst topography[J]. *Geological Review*, 1936, 1(4): 108-129.
- [12] Pei W C. An Account of the Discovery of An Adult Sinanthrops Sku II in the Choukoutien Deposit I[J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1929, 8(3): 203-205.
- [13] 曾昭璇. 论石灰岩地形[M]. 北京: 商务印书馆, 1957: 1-103.
ZENG Zhaoxuan. *On limestone topography* [M]. Beijing: The Commercial Press, 1957: 1-103.
- [14] 谷德振. 中国喀斯特研究现状[J]. *科学通报*, 1961, 12(11): 1-11.
GU Dezhen. Research progresses on karst research in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1961, 12(11): 1-11.
- [15] 卢耀如. 中国南方喀斯特发育基本规律的初步研究[J]. *地质*

- 学报, 1965, 45(1): 108-129.
- LU Yaoru. A preliminary study on the basic law of karst in south China[J]. *Geological Sinica*, 1965, 45(1): 108-129.
- [16] 地质局书刊编辑室. 岩溶地区水文地质及工程地质工作经验汇编(第一辑)[M]. 北京: 地质出版社, 1975: 1-146.
- Editorial department of books and periodicals of Geological Bureau. . Compilation of working experiences on hydrogeology and engineering geology in karst areas (the First edition)[M]. Beijing: Geological Press, 1975: 1-146.
- [17] 广西壮族自治区水文工程地质队. 岩溶地区供水水文地质工作方法[M]. 北京: 地质出版社, 1979: 1-356.
- Hydrogeology & engineering geology team of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Hydrogeological working methods for water supply in karst area [M]. Beijing: Geological Press, 1979: 1-356.
- [18] 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-336.
- Karst research group, Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Karst research in China [M]. Beijing: Science Press, 1979: 1-336.
- [19] 铁道部第二期测设计院. 岩溶工程地质[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984: 1-337.
- The second survey and design institute on railway, Ministry of Railways. Karst engineering geology [M]. Beijing: Chinese Railway Press. 1984: 1-337.
- [20] Sweeting M M. Karst Landforms[M]. London, Macmillan: Cambridge University Press, 1972: 1-362.
- [21] Bögli A. Karst Hydrology and Physical Speleology [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1980: 1- 284.
- [22] Milanović P T. Karst Hydrogeology [M]. Colorado, USA: Water Resources Publication, 1981: 1-434.
- [23] 任美镠, 刘振中. 岩溶学概论 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983: 1-331.
- REN Meie, LIU Zhenzhong. Introduction to karst sciences [M]. Beijing: The Commercial Press, 1983: 1-333.
- [24] Jennings J N. Karst Geomorphology [M]. UK Oxford: Basil Blackwell, 1985: 1-293.
- [25] 卢耀如. 中国岩溶: 景观、类型、规律 [M]. 北京: 地质出版社, 1986: 1-286.
- LU Yaoru. Karst in China: landscape, types and rules [M]. Beijing: Geological Press, 1986: 1-286.
- [26] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 1-332.
- YUAN Daoxian, CAI Guihong. Karst environmental sciences [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1988: 1-332.
- [27] White W B. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains [M]. New York: Oxford University Press, 1988: 1-464.
- [28] 朱学稳, 汪训一, 朱德浩. 桂林岩溶地貌与洞穴研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-249.
- ZHU Xuewen, WANG Xunyi, ZHU Dehao. Researches on karst geomorphology and caves in Guilin [M]. Beijing: Geological Press, 1988: 1-249.
- [29] Ford D C, Williams P W. Karst Geomorphology and Hydrology [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1-601.
- [30] Yuan D, Zhu D, Weng J, et al. , Karst of China [M]. Beijing: Geological Press, 1991: 1-239.
- [31] Ford D C, Williams P. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. London: John Wiley and Sons Ltd. , 2007: 1-562.
- [32] Dreybrodt W. Processes in Karst Systems: Physics, Chemistry, and Geology [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1988: 1-288.
- [33] 袁道先, 章程. 岩溶动力学的理论探索与实践 [J]. 地球学报, 2008, 29(3): 355-365.
- YUAN Daoxian, ZHANG Cheng. Karst dynamics theory in China and its practice [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(3): 355-365.
- [34] Соколов Д. С. Основные условия развития карста [M]. Гостеолтехизд, 1962: 1-322.
- [35] 袁道先. 碳循环与全球岩溶 [J]. 第四纪研究, 1993, 13(1): 1-6.
- YUAN Daoxian, Carbon cycle and global karst [J]. *Quaternary Sciences*. 1993, 13(1): 1-6.
- [36] 袁道先, 刘再华, 林玉石. 中国岩溶动力系统 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-275.
- YUANG Daoxian, LIU Zaihua, LIN Yushi. Chinese karst dynamics system [M]. Beijing: Geological Press, 2002: 1-275.
- [37] Brown G M. Understanding Earth's environment [J]. *Nature & Environment*, 1994, 30(3&4): 21-29.
- [38] 宋长青, 张国友, 程昌秀, 陈发虎. 论地理学的特性与基本问题 [J]. *地理科学*, 2020, 40(1): 6-11.
- SONG Changqing, ZHANG Guoyou, CHENG Changxiu, CHEN Fahu. Nature and basic issues of geography [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(1): 6-11.
- [39] Scholle P A, Bebout D G, Moore C H, Carbonate Depositional Environments [M]. Oklahoma, USA: The American Association of Petroleum Geologists, 1983: 1-691.
- [40] Tucker M E, Wright V P, Carbonate Sedimentology [M]. Oxford, UK: Blackwell, 1990: 1-482.
- [41] 袁道先. 现代岩溶学和我的一些工作 [J]. 中国科学院院刊, 1993, 8(3): 252-253.
- YUAN Daoxian. Modern karst sciences and some of my work [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*. 1993, 8(3): 252-253.
- [42] Goldscheider N, Drew D. Methods in Karst Hydrogeology [M]. London, UK: Taylor & Francis, 2007: 1-264.
- [43] 韩行瑞. 岩溶水文地质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-331.
- HAN Xingrui. Karst Hydrogeology [M]. Beijing: Science Press, 2015: 1-331.
- [44] Waltham T, Bell F, Culshaw M. Sinkholes and Subsidence [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005: 1-382.
- [45] 韩行瑞, 郭密文. 岩溶工程地质学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2020: 1-298.

- HAN Xingrui, GUO Miwen. Karst engineering geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press CO., Ltd., 2020: 1-298.
- [46] 邹成杰, 张汝清, 光耀华, 等. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 1-385.
- ZOU Chengjie, ZHANG Ruqing, GUANG Yaohua, et al. Karst engineering geology on water conservancy and hydropower[M]. Beijing: Water & Power Press, 1994: 1-385.
- [47] Milanović P T. Water Resources Engineering in Karst[M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2004: 1-328.
- [48] Milanović P T. Engineering Karstology of Dams and Reservoirs[M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2018: 1-354.
- [49] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 461-466.
- YUAN Daoxian. World correlation of karst ecosystem: Objectives and implementation plan[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(4): 461-466.
- [50] Yuan D. Rock Desertification in the subtropical karst of south China[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1997, 108(Suppl. Bd): 81-90.
- [51] Yuan D. On the karst ecosystem[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(3): 336-338.
- [52] 曹建华, 袁道先, 裴建国, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 1-188.
- CAO Jianhua, YUAN Daoxian, PEI Jianguo, et al. Karst ecosystem of southwest China constrained by geological setting[M]. Beijing: Geological Press, 2005: 1-188.
- [53] Culver D C, Pipan T, The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats[M]. New York, USA: Oxford University Press, 2009: 1-254.
- [54] Yuan D. The carbon cycle in karst[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1997, 108(Suppl-Bd): 91-102.
- [55] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2345-2348.
- [56] 袁道先, 刘再华, 蒋忠诚, 等. 碳循环与岩溶地质环境[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-240.
- YUAN Daoxian, LIU Zaihua, JIANG Zhongcheng, et al. Carbon cycle and karst geological environment[M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-240.
- [57] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon[J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575-578.
- [58] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, et al. Ice age terminations[J]. *Science*, 2009, 326(5950): 248-252.
- [59] Fairchild I J, Baker A. Speleothem Science: From Process to Past Environments[M]. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2012: 1-432.
- [60] Cheng H, Edwards R L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534: 640-646.
- [61] Liu Z, Macpherson G L, Groves C, et al. Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 182: 42-49.
- [62] Jame N P, Choquette P W. Paleokarst[M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1988: 1-416.
- [63] Fritz P, Wilson J, Yurewicz D A. Paleokarst Related Hydrocarbon Reservoirs[M]. Oklahoma, USA: Society for Sedimentary Geology, 1993: 1-274.
- [64] Hill C, Forti P. Cave minerals of the world[M]. Alabama, USA: National Speleological Society, Inc., 1997: 1-462.
- [65] Kresic N. Water in Karst: Management, Vulnerability, and Restoration [M]. New York, USA: McGraw-Hill Companies, Inc, 2013: 1-708.
- [66] 张英骏, 缪钟灵, 章典, 等. 应用岩溶学与洞穴学[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1985: 1-287.
- ZHANG Yingjun, MIAO Zhongling, ZHANG Dian, et al. Applied karst science and speleology [M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1985: 1-287.
- [67] Klimchouk A B, Ford A B, Palmer A N, et al. Speleogenesis: evolution of Karst Aquifers[M]. Alabama, USA: National Speleological Society, Inc., 2000: 1-527.
- [68] Palmer A N. Cave Geology[M]. Dayton, Ohio, USA: Cave Books, 2007: 1-454.

Discussions on the disciplinary system of modern karstology

——To commemorate the sixth anniversary of the publication of the academic book of *Modern Karstology*

PU Junbing

(Chongqing Key Laboratory of Wetland Science Research in the Upper Reaches of the Yangtze River / Chongqing Key Laboratory of Earth Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area / School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract As an important part of modern earth science, karstology (karst science) has always been considered as a cross and marginal discipline between geology, geography, environmental science and ecology, but has not established

its own independent discipline system. According to the latest statistics, 15.2% of the global ice-free continental land is characterized by the presence of carbonate rock. The extent of carbonate rocks displaying distinctive karst landforms, which is part of important landscape types on the earth's surface. However, for a long time, dominated research ideas and methods in karstology are mainly originated from geology, geography, hydrology, environmental science, ecology and other disciplines. In some research fields in karstology, interdisciplinary research has become the dominated characteristic, so the disciplinary systems of karstology itself is submerged in the interdisciplinary research background, which leads to the problems of incomplete disciplinary system, unclear characteristics, inaccurate orientation and so on, and has a certain adverse impact on the sustainable development of the karstological discipline. The widespread karst landform is a fragile ecological environment region with various and complex eco-environmental problems, which is also closely related with the economic and social development. For resolving these problems, it needs to utilize new scientific theory and technique. Based on a brief review of the karstology development at home and abroad, this paper analyzes the development of karstology and its related disciplines in the past 30 years, and discusses an important problem on constructing the disciplinary system of modern karstology under the guidance of earth system science and karst dynamics theory. According to the four functions of karst dynamic system (to drive the formation of karst features, to regulate greenhouse gas in atmosphere, thus mitigate environmental acidification, to drive the movements of elements, thus influence life and bring about formation of mineral deposits, and to record environmental changes) and the related resources, environment and ecological problems in karst area, this paper attempts to establish the disciplinary system of modern karstology on the basis of some views from geology, geography, geochemistry, ecology, environment and hydrology. The main subdisciplines in modern karstology include the following nine subdisciplines: karst geology, karst geomorphology, karst hydrogeology, karst environmental science, karst engineering geology, karst ecology, karst resource science, karstic global change science, and speleology. This paper also briefly discusses the scientific connotation and orientation of each branch subject. Karst geology discipline mainly studies the geological process and evolution of various karst phenomena, including petrology and lithofacies paleogeography of various soluble rocks (carbonate rocks, sulphate rocks, halide rocks, etc.), formation environment of strata containing soluble rocks and its formation process, geological structure and processes, development history of karst, etc. Karst geomorphology mainly studies the characteristics, genesis, distribution and evolution of various karst landforms or features on the earth's surface and their relationship with the formation environment. Karst hydrogeology mainly studies the storage, distribution and movement of karst groundwater, the spatio-temporal variations and evolution of karst groundwater quantity and quality, the mutual transformation between surface water and karst groundwater, the evaluation, exploitation and utilization of karst groundwater resources and the protection of water environment in karst areas under the influences of natural environment and anthropogenic activities. Karst environmental science mainly focuses on the characteristics, interaction relationship and evolution rules of material and energy cycle of the lithosphere, atmosphere, hydrosphere and biosphere constrained by karst around human beings. It also studies various environmental problems in karst areas and proposes corresponding solutions. Karst engineering geology is a science that studies the interaction and mutual influence between engineering construction activities and geological environment in karst areas, and solves engineering geological problems by using the techniques and methods of modern karstology and other related disciplines to ensure the smooth run of construction works and the safe operation of various engineering. Karst ecology mainly studies the structures, functions, operation mechanisms of ecosystem constrained by karst environment and its interaction between ecosystem and human activities. Karstic global change science mainly studies the relationship between the operation processes of karst dynamic system and the source and/or sink of global greenhouse gases (mainly CO₂) and the interpretation of high resolution global or regional environmental information in karst speleothems. Karst resource science mainly studies the theories and rules of formation, occurrence, evolution and distribution of various resources (mainly natural resources)

related to karst system and the theories, techniques and methods of protection, exploitation and sustainable utilization of related resources. Speleology is the science of caves accessible to human, which main studies cave formation, cave landform and related geological processes, the genesis, processes and environmental significance of cave speleothems (sediments) and various cave features, cave physical, chemical, hydrological and meteorological processes, cave biology and microorganism, cave paleontology and archaeology, cave culture and art, cave surveying and mapping technology, cave exploitation, utilization and protection, cave tourism, cave health care, etc. The establishment of these sub-disciplines reflects the unity of independence and interdisciplinarity of related research directions and disciplinary development in international karstological research, and also reflects the current situation and future trend in international karstological research, which have great significance to the development of international karstology.

Key words disciplinary system, nine sub-disciplines, four functions, karst dynamics, modern karstology

(编辑 张玲 杨杨)

(上接第 400 页)

extracellular carbonic anhydrase had significant effects on the photosynthetic carbon sink capacity of microalgae.

Although the content of native bicarbonate is high in karst lake water, inorganic carbon utilized by microalgae mainly comes from atmospheric carbon dioxide (photosynthetic carbon sink), and only a small amount of native bicarbonate (karst carbon sink) is utilized in karst lake water. The main contribution of carbonic anhydrase extracellular enzyme is accelerating the absorption, utilization and conversion efficiency of atmospheric carbon dioxide by microalgae, and finally promoted the growth of microalgae, carbon sequestration and increase sink. It is of great significance for scientific selection of human using microalgae with strong extracellular enzyme activity of carbonic anhydrase to increase carbon sink and serve the national strategy of "carbon neutrality".

Key words microalgae, karst carbon sink, carbonic anhydrase, karst lake

(编辑 张玲)