

岩溶动力学的理论探索与实践

袁道先 章 程

中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004

摘 要 国土资源部岩溶动力学重点实验室的研究群体自 1990年以来连续成功实施了 3个国际岩溶对比计划项目,包括 IGCP299、IGCP379、IGCP448,在岩溶形成、碳循环、岩溶生态和水资源等领域,为国际岩溶学术界提供了共同解决岩溶地区资源环境问题的机会,将地球系统科学思想引入现代岩溶学,建立岩溶动力学理论,有力地推动了国际岩溶学科的发展。目前正在执行的 IGCP513“岩溶含水层与水资源”项目继续引领国际岩溶地质研究方向。相关成果为在中国桂林建立联合国教科文组织“国际岩溶研究中心”(RCK)奠定了坚实基础。由此回顾了 20多年来岩溶动力学理论在中国的发展过程。概述了其主要的科学成果和应用前景。指出了地球系统科学的引入、全球视野的研究和及时将理论用于解决岩溶地区的资源环境问题在现代岩溶学发展中的重要意义。经过 20余年的不断探索,形成了岩溶动力学理论的基本思路,并创造性地总结了一套捕捉碳、水、钙循环的行踪的工作方法。通过全球对比,提出“岩溶形态组合”概念,将岩溶形态组合与岩溶形成环境条件建立对应关系,解决异质同相、同质异相这一令岩溶学者迷惘的问题。将岩溶学引入全球变化研究,一方面把岩溶作用与全球碳循环紧密的联系在一起,通过对 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ 系统(岩溶动力系统)的定位观测,发现全球最大的碳库—碳酸盐岩体在全球碳循环中仍甚活跃;另一方面,岩溶动力系统(KDS)对环境变化十分敏感,响应及时,其相关沉积物可记录全球变化。将岩溶地质过程与生态学联系在一起,将现代岩溶学理论的研究推向应用,与生产实践结合。在岩溶动力系统运行机制和运行规律、我国岩溶动力系统的类型划分和分布规律、在表生岩溶系统碳循环与大气 CO_2 源汇关系、利用石笋记录重建古气候、古环境变化过程及中国西南岩溶生态系统研究等方面均获得了突出成果,如首次估算了我国和全球因碳酸盐岩溶蚀回收大气 CO_2 的量,中国为 $1.774 \times 10^7 \text{ t/a}$,而全球为 $6.08 \times 10^8 \text{ t/a}$;证实了西南岩溶区典型表层岩溶泉水化学的季节、日变化与暴雨动态,表层岩溶泉水化学取样的频率需要重新审定,而且水文水化学的连续监测对于岩溶作用强度和岩溶作用碳循环的高精度评价是十分必要的;要了解岩溶系统水化学的变化,仅考虑水-岩相互作用是不够的,我们还必须重视 CO_2 气体对岩溶系统中水化学变化的影响,即岩溶系统水化学动态的变化是 $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ 三者相互作用引起的,水-岩-气相互作用的概念必须引入岩溶水化学的研究中;揭示了过去 0.16 Ma来亚洲季风和低纬度地区降雨变化的特征,说明太阳辐射强度增高,驱动了盛间冰期的出现,重建了荔波地区 2.3 ka来古气候环境的演变历史,贵州董哥洞石笋提供了低纬度、低海拔地区,可较好定年,更接近水汽来源区的古气候变化的替代指标;石笋记录发现末次冰期以来存在有多次冷事件—Heinrich冷事件 H1~H5跃变事件,新仙女木事件在我国南方的洞穴沉积物中具有显著的反映。对西南 8省区市岩溶县、石漠化严重县统计和空间分布特征的分析研究表明地质地貌条件对岩溶区资源、环境和社会经济具有制约作用,认为西南岩溶区石漠化综合治理首先要在岩溶地质条件的基础上,结合气候、水文和社会经济状况,才能深入分析岩溶区石漠化的成因、危害和类型。划分出岩溶区石漠化综合治理区域 8大区成为“西南岩溶石漠化综合治理规划大纲”编写的重要基础。

关键词 现代岩溶学; 地球系统科学; 岩溶动力学理论; 全球对比

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1006-3021(2008)03-355-11

Karst Dynamics Theory in China and its Practice

YUAN Daoxian ZHANG Cheng

Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, The Karst Dynamics Laboratory, MLR, Guilin, Guangxi 541004

本文由国家自然科学基金项目(编号: 40672165)及 IGCP513“全球岩溶含水层和水资源研究”项目联合资助。

收稿日期: 2008-05-05; 改回日期: 2008-05-15。责任编辑: 刘志强。

第一作者简介: 袁道先, 男, 1933年生, 研究员, 中国科学院院士, 主要从事水文地质、环境地质和岩溶学的研究; 通讯地址: 541004, 广西桂林市七星路 50号; E-mail: dxuyan@karst.edu.cn

Abstract IGCP-513 "Karst Aquifers and Water Resources" (2005-2009) is a karst-related IGCP project that continues the trend of international karst geology research. Since 1990, three karst-related IGCP Projects (IGCP 299, IGCP 379 and IGCP 448) have been implemented successively with Prof. Yuan Daoxian from the Institute of Karst Geology, CAGS, as Leader of the International Working Group. All these four projects have provided opportunities for karst research communities worldwide to study together and solve resources and environment problems in the fields of karst formation, carbon cycle, karst ecology and water resources. Earth System Science has been introduced into the study of modern karstology, and Karst Dynamics Theory has been established, thus improving the development of karst science. The achievements of these projects have laid a solid foundation for the establishment of the International Research Centre on Karst (RCK) under the auspice of UNESCO in Guilin, China. From this point, this paper presents a review of the development of Karst Dynamics Theory in China during the past couple of decades. The major scientific achievements are summarized, and the perspectives of their practical utilization are illustrated. The importance of Earth System Sciences and Global View in the development of modern karstology in China is emphasized. The history of the development of Karst Dynamics Theory in China can be traced back to 20 years ago in the study of karst geochemistry, in which a series of field portable facilities were used to reveal the behaviors of Karst Dynamics System as well as the directions (dissolution or deposition) and intensity of karst processes, thus providing the methodological background for the development of the Karst Dynamics Theory. The Karst Dynamics Theory is defined as the discipline for studying structures, behaviors, functions and types of the karst dynamics system (KDS) in the world. The KDS is the karst system of material, the energy transfer in the forms of carbon cycling, water cycling, calcium and other element cycling on the interfaces between lithosphere, atmosphere, hydrosphere and biosphere. Consequently, the major functions of KDS are: the forcing of the formation of karst; the regulation of the greenhouse gas in the atmosphere and environment acidification; the promotion of the migration or deposition of elements, thus forming mineral deposits and bringing about impacts on human life; to record the processes of climate and environmental changes. As the KDS is influenced by geological, hydrological, climatic and biological processes, there are different types of KDS in the world. The idea of Karst Feature Complex (KFC) is an important part of the Karst Dynamics Theory. The KFC is defined as a group of karst features which include macroscopic and microscopic forms, surface and subterranean forms, and dissolution forms as well as depositional forms developed under similar environments. The idea of KFC helps karst researchers avoid the confusion of isomorphism, thus benefiting the global karst comparison and the smooth running of IGCP299. Through years of monitoring on dozens of typical karst dynamic system sites both in China and abroad, the differences in the behaviors of different types of KDS as well as their relationships with rainfall, especially thunderstorm events, vegetation, and soil condition were revealed. The largest carbon reservoir (carbonate rock mass) obviously remains active in global carbon cycle, the data from the site automatic records indicate that KDS is highly sensitive to environmental change, and the response time scale may be hours or even minutes. Continuous site observation shows that the seasonal and diurnal hydrochemical variations tend to co-vary with thunderstorm events. Hydrogeochemical sampling strategies for epikarst springs in karst areas with monsoon climate like southwest China should be redesigned, and continuous hydrogeochemical observation is needed for accurate evaluation of karstification intensity and carbon cycle. It is also found that the consideration of only water-rock interaction is not sufficient for understanding the hydrochemical variation in karst systems, that the variable effects of CO₂ on the system should be evaluated, and that the consideration of water-rock-gas interaction as a whole is thus a must in understanding the regularity of the spatial and temporal variations in KDS. Taking the advantage of the CO₂ involvement in karst processes, the Karst Dynamics Theory contributes to the global change study in 2 ways: Concerning the carbon sink or carbon source of the atmospheric CO₂ through the karst process, it is estimated that about 17.74×10^6 t of carbon is removed by dissolution of carbonate rocks from the atmosphere in the karst regions of China, whereas the amount from the atmosphere in global karst regions is 6.08×10^8 t, i.e., about 1/3 of the missing carbon sink. On the other hand, a lot of CO₂ outgassing points from active tectonism were identified along the Tethys zone from Tibet westward to France, which become an important source of atmospheric CO₂; For the purpose of providing high resolution past climate change proxies from karst sediments, especially speleothemes for the test of GCM, some abrupt changes in paleomonsoon on termination I, II were revealed. A lot of papers in this aspect have been published in important international journals such as Science, Holocene and Quaternary International. For example, thorium-230 ages and oxygen isotope ratios of stalagmites from Dongge Cave in China characterize the Asian Monsoon and low-latitude precipitation over the past 160000 years. Numerous abrupt changes in ¹⁸O/¹⁶O values result from changes in tropical and subtropical precipitation driven by insolation and millennial-scale circulation shifts. The Last Interglacial Monsoon lasted 9.7 ± 1.1 thousand years, beginning with an abrupt (less than 200 years) drop in ¹⁸O/¹⁶O values 129.3 ± 0.9 thousand years ago and ending

at an abrupt (less than 300 years) rise in $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ values 119.6 ± 0.6 thousand years ago. The start coincides with insolation rise and measurements of full interglacial conditions, indicating that insolation triggered the final rise to full interglacial conditions. The paleoclimate environment evolution since 2300 years ago in Libo, China, was reconstructed by lots of paleoclimatological records of stalagmite. Many cold Heinrich events H1-H5 since the last glacial stage and abrupt events such as Younger Dry events are clearly recorded by stalagmites of south China. The Karst Dynamics Theory has been applied to the sustainable development of karst regions in China, especially to the rehabilitation of the rock desertification areas in southwest China which covers about 100000 km^2 with a population of about 30 millions. Because of the leakage of water resources, the shortage of soil, and the alkaline background of carbonate rocks, the karst ecosystems are characterized by petrophile, xerophile, and calciphile on the surface. The lack of sunshine, the rather stable temperature, and slow underground metabolism constrain the biodiversity in karst areas. Under the guidance of karst dynamics, plants that enjoy both ecological and economic benefits are selected under the particular KDS geochemical background to be used in the rehabilitation of rock desertification areas, and water resources in thousands of underground streams in southwest China are managed in accordance with the special behaviors of KDS. The development and utilization of Karst Dynamics Theory is designated as a principal target of the newly approved International Research Centre on Karst (IRCK) in Guilin under the auspices of UNESCO. This discipline will be developed continuously under the joint effects of karst scientists both from China and abroad.

Key words modern karstology; earth system sciences; karst dynamics theory; global correlation

在中华人民共和国政府与联合国教科文组织于 2008 年 2 月 11 日签订的关于在中国桂林建立由教科文组织资助的国际岩溶研究中心的协定中,明确提出该中心的第一个目标是促进“岩溶动力学”的发展。接着,国土资源部副部长、中国地质调查局局长汪民同志在 2008 年 2 月 23 日全国地质工作会议的报告中,在讲到地质科学要大发展时,又指出要通过实施一批巨大工程继续保持我国在岩溶动力学等领域的世界领先地位。因此,有必要说明一下什么是岩溶动力学,它有什么特点?它是在什么背景下发展起来的,它的基本方法特点和理论成果,以及与社会经济发展的关系。

自 70 年代逐步发展起来的现代岩溶学有两个重要特点,一是引入了地球系统科学;二是从全球角度研究岩溶(袁道先, 2006)。中国岩溶不但以其 $3.44 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的总面积,约占国土面积的 $1/3$,为世界瞩目;而且由于中国大陆碳酸盐岩古老坚硬、新生代以来大幅度抬升、未受末次冰期大陆冰盖的刨蚀破坏、以及季风气候水热配套(夏湿冬干) 4 个条件,岩溶发育完好,类型多样,使其在国际上有范例性。但把这种地域上的优势变为学科上的优势,则需要有新的学术思想,充分利用我们的地域优势,持之以恒地进行调查研究,进行国际合作对比,使用新技术方法,不断提高研究水平,并探索把对自然规律或现象的新认识用于可持续发展战略。

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。它长期处于对纷繁的岩溶形态进行描述、分类,及对其

成因进行思辨的过程中。虽然岩溶学者在 100 多年前就已认识化学溶蚀作用对岩溶形成的重要性,但是指导岩溶研究的学术思想,从地壳升降与水动力条件的相互作用开始,然后是水文地球化学(水岩相互作用)到地球系统科学,经历了数十年。水岩相互作用的学术思想把岩溶作用作为一种发生在岩石圈和水圈界面上的地质作用来研究。它在揭示岩性、地质构造和水文地球化学条件如何控制岩溶发育的规律上起了重要作用。1962 年前苏联学者(1962)提出岩溶发育有 4 个基本条件,即可溶岩、可溶岩能透水、有侵蚀性的水和水是不断运动的,就是这种学术思想的很好概括。它曾被我国岩溶学术界广泛接受。其中“有侵蚀性的水”这个条件,可以被理解为具有大气圈、生物圈的内涵,但并不明确,而且也可以作其它的理解。这样完成的许多有关岩溶发育规律的研究成果,常以岩性、地质构造和水文地质条件如何控制岩溶发育的论述而告终。但是,与碳、水、钙循环共存的岩溶作用,如不是紧紧地抓住它在岩石圈、大气圈、水圈和生物圈界面上的物质能量运动规律,即以地球系统科学为指导,就很难说清楚。

1 由地球系统科学的引入到建立岩溶动力学基本理论

1987 ~ 1990 年之间执行的面上基金项目“中国东部岩溶地球化学研究”(编号: 4860145),为把地球系统科学理论引入岩溶学研究作了理论上和方法上的准备。岩溶作用在 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ 体系中进

行,而这个系统对环境变化的反应是很敏感的。该项目采用了一系列便携式仪器(pH计、CO₂测定仪、暂时硬度测定盒、电导仪等),采用现场系统监测的方法,以实际数据揭示了CO₂-H₂O-CaCO₃系统中碳、水、钙在四圈层间循环的规律及其与岩溶作用方向(溶蚀或沉积)和强度的关系。例如当有较多CO₂进入系统中,则水的pH降低,溶蚀作用加强,反之则发生沉淀。同时,通过分布在不同地质、气候、水文、植被条件下的1931个岩溶水化学资料,结合溶蚀试验,揭示了不同环境下岩溶作用的规律和差别,和许多溶蚀形态和次生碳酸钙沉积形态的成因。这些科学思路和方法也为我们申请IGCP299、IGCP379、IGCP448 3个连续执行的国际对比计划打下了基础。

由此发展起来的岩溶地球化学及其一系列捕捉碳、水、钙循环的行踪的野外工作方法,为把地球系统科学的学术思想引入岩溶研究起了桥梁作用(袁道先,1990)。按地球系统科学观点,地球不同于任何其他已知星球之处,在于它具有一个由岩石圈、大气圈、水圈和生物圈构成的表层系统(林海,1988; Mackenzie et al, 1995)。生物圈在这个表层系统中具有特殊作用,因为它能够通过以碳循环为主的作用过程捕获、赋存、转化太阳能,驱动表层物质、能量循环,引发各种表层地质作用(张昀,1995),其中也包括岩溶作用。

碳循环是一个“二氧化碳—有机碳—碳酸盐”的系统,它与CO₂-H₂O-CO₃²⁻三相不平衡开放系统相耦联,构成了岩溶动力系统。在这个系统中,物质、能量以不同方向、方式和强度不断地运动,产生了各种各样的地表、地下岩溶形态。它们或保存于碳酸盐岩的表面,或保存于碳酸盐岩及其衍生物的内部结构或成分中。这些岩溶形态既是各种资源贮存、转移和各种环境问题发生、发展的场所,为解决岩溶地区各种实际问题的基础,又保存着岩溶作用系统的大气圈、水圈和生物圈变化的大量信息,能够被人们用来研究、预测地球表层环境的变化。

从地球系统科学来看,岩溶作用是在碳循环及与其相耦联的水循环、钙循环系统中碳酸盐的被溶蚀或沉积,而各种岩溶形态就是这个复杂的循环系统的运动在碳酸盐岩上留下的轨迹。因此,岩溶动力系统可定义为控制岩溶形成演化,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(袁道先等,2002)。其结构可用图1所表示的

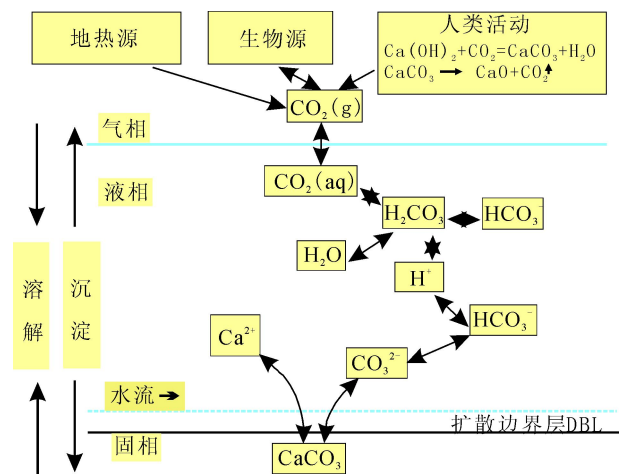


图1 岩溶动力系统概念模型

Fig 1 Conceptual model of the karst dynamics system

概念模型来描述。

图1概念模型表明岩溶动力系统由固相、液相、气相3部分构成,固相部分为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Ca²⁺(Mg²⁺), HCO₃⁻, CO₃²⁻, H⁺和溶解CO₂为主要成分的水流;气相部分则为以CO₂为主的各种参与岩溶作用的气体。由于岩溶动力系统是一个开放系统,其边界既受制于已有的地表地下岩溶形态系统,又与地球四圈层有密切联系。在其下部的固相部分,不但通过碳酸盐岩及其中的裂隙网络而与整个岩石圈联系,而且还通过现代活动断裂与地幔联系,使深源CO₂得以积极参与岩溶动力系统的运行并向大气释放。其中间的液相部分,实际上是全球水圈的一部分,它不但是岩溶动力系统的枢纽,而且通过它与生物圈、人类活动、大气圈联系(如光合作用吸收水分和碳、水工建筑改变水的运动),使它们积极参与岩溶作用(溶蚀或沉淀)。上部的气相部分属于大气圈的组成部分,也通过气体的CO₂交换和生物圈、岩石圈及人类活动密切联系(光合作用、石灰的烧制、水泥的固化等),使它们积极参与岩溶动力系统的运行。

岩溶动力系统概念模型的提出为研究碳酸盐岩在全球碳循环中的地位和作用提供了理论依据和方法。它是一个开放的三相不平衡系统,与地球的“四圈层”密切联系。其基本特征是对环境反应敏感。通过前期的研究,我们已掌握岩溶动力系统有4大功能:驱动各种岩溶形态的产生,并通过其所造成的地表地下双层岩溶空间结构和碱性地球化学背景导致一系列环境问题,如旱、涝、石漠化、水土贫

瘠、地面塌陷、生物多样性受限等;通过岩溶作用由大气回收或向大气释放 CO_2 ,调节大气温室气体浓度,缓解环境酸化;驱动元素迁移、富集、沉淀,形成有用矿产资源,影响生命;记录全球环境变化过程,由于岩溶动力系统与全球四圈层的密切关系,它可以敏感地反应并忠实地记录各种环境因子,包括降雨量、气温、植被、地下水位与海平面升降、酸碱度等变化,为研究全球变化提供依据。可见,岩溶动力学对于岩溶地区一切资源、环境问题(水资源、土地资源、矿产资源、岩溶旅游资源、岩溶塌陷、水污染和石漠化等)都有触一发而动千钧之功能,是地球系统科学引入岩溶学以后发展起来的现代岩溶学的核心理论,与全球变化、第四纪地质、全球水循环、全球生态系统、矿床与油气地质有广泛的学科交叉前景,可吸引地学界不同学科的广大学者参与研究,需要持之以恒地建设发展。对岩溶动力系统结构、功能、运行机制的正确认识,是科学地合理地解决岩溶地区乃至某些全球性资源环境问题的关键。

2 定位自动监测揭示的岩溶动力系统运行机制和规律

在岩溶动力学基本理论的指导下,及通过国际合作研究带动的技术方法手段的不断改进,研究群体在岩溶动力系统运行机制和规律方面获得了大量新认识。如通过高分辨率自动化监测(pH、电导率、水温、水位等)了解不同时间尺度下,岩溶系统水化学对降雨补给的响应过程,表层岩溶环境的控制因子和生物地球化学过程。证实了西南岩溶区典型表层岩溶泉水化学的季节、日变化与暴雨动态(Zhang et al, 2005; Liu et al, 2007)。这些变化说明,对于西南季风气候控制下的岩溶地区(即存在温度、降雨和植被方面明显的季节性变化),表层岩溶泉水化学取样的频率需要重新审定,而且水文水化学的连续监测对于岩溶作用强度和岩溶作用碳循环的高精度评价是十分必要的。同时,研究结果对利用岩溶记录进行高分辨率古气候环境重建具有重要的启示意义。

要了解岩溶系统水化学的变化,仅考虑水-岩相互作用是不够的,我们还必须重视 CO_2 气体对岩溶系统中水化学变化的影响(刘再华等, 2007),即岩溶系统水化学动态的变化是 $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ 三者相互作用引起的。如发现岩溶裂隙水在洪水期间 pH 值呈降低趋势,而电导率呈升高的不寻常变化。与此相反,对于岩溶管道水,同样是在洪水期间,它

的 pH 值是升高的,而电导率呈正常的降低。此外,发现洪水时裂隙水的 P_{CO_2} 高于正常情况的 P_{CO_2} ,而它的 SI κ 值比正常情况低。与此相对,对于管道水,尽管同一洪水期间其 SI κ 降低,但 P_{CO_2} 也降低。从这些结果,可以推断,至少有两个关键的过程控制着洪水期间的水化学变化。一个是雨水的稀释作用,另一个是水-岩-气的相互作用。然而,对于裂隙水来说,后者的作用可能更重要,即在洪水期间,高浓度的土壤 CO_2 溶解于水中,则更具侵蚀性的水能溶解更多的石灰岩,从而增强水的电导率。而对于管道水,雨水的稀释作用更重要。总之,水-岩-气相互作用的概念必须引入岩溶水化学的研究中。

地下河在西南岩溶区的水资源中占据重要的位置,是西南岩溶区重要的饮用水源。地下河因对人类活动敏感,地下河水质问题越来越受关注。典型地下河水样的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 等离子含量的监测结果表明, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 离子含量在雨季出现峰值, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等离子含量则较低,主要受季节变化控制; K^+ 、 Cl^- 季节变化较为复杂(Guo et al, 2007)。暴雨过程地下河主要离子含量并不完全受流量控制。在过去 20 a,只有 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 离子含量有显著增加。这有助于我们更好地认识岩溶区相应的环境问题。

3 全球岩溶对比的收获——“岩溶形态组合”方法的应用和全球视野的中国岩溶

1990年初,由中国提出的国际地质对比计划 IGCP299 项目“地质、气候、水文与岩溶形成”获得批准,于 1990~1994 年间执行,由联合国教科文组织和国际地质科学联合会联合资助,由中国负责组织实施(Yuan et al, 1998)。这为我们从全球视野研究岩溶提供了很好的机遇。我们可以通过全球不同的物理、化学、生物学条件下的岩溶形态组合的对比,更深刻地揭示岩溶形成机理。但作为一个 IGCP 项目的建议国和组织国,首要的任务是充分利用中国岩溶的地域优势,带头作好国内对比,以推动全球岩溶对比。这时,基金项目“中国典型地区岩溶的形成及其与环境的相互影响”(49070155)及时启动(1990~1994),原地质矿产部也在 1992 年启动了相应项目(8502218)。通过定位观测和深入的现场对比,确定了中国大陆三种主要类型岩溶的形态组合特征,揭示了其各自的形成环境和机理(Yuan et al, 1998; 袁道先等, 1999; 袁道先,

1999a, 1999b)。以此为基础,我们组织 8 个国家的 40 多位岩溶学者进行了行程 6700 km 跨越中国 3 大类型岩溶(南方亚热带潮湿型岩溶,西南高山和高原型岩溶,和北方干旱半干旱型岩溶)的对比。通过现场讨论,统一了 IGCP299 的学术思路和方法,同意采用由我们提出的“岩溶形态组合”(即在相同环境下形成的宏观的微观的、地表的地下的、溶蚀的和沉积的岩溶形态的配套组合)作为全球岩溶对比的基础,推动了全球岩溶对比的顺利进行(Yuan et al, 1998)。根据不同的地质、气候、水文、生态条件对岩溶动力系统进行了分类,以此作为在全国区别对待不同的资源、环境和生态问题的依据。从我国岩溶形成的背景条件和基本特征出发,用“岩溶形态组合”的概念对中国大陆的 3 种优势岩溶类型的基本特征作出了总结,划分出 6 个类型的表生岩溶动力系统和深部岩溶动力系统亚类,提出了它们的分界线。这是我国区域岩溶研究成果的一次全面、系统的总结。在全球对比的基础上,指出了我国大陆岩溶的特点,以及造成这些特点的四大优势背景条件,即坚硬古老碳酸岩、新生代大幅度抬升、季风区水热配套、未受末次冰期大陆冰盖刨蚀。

由多边国际对比活动所引出的一些双边合作项目,也得到了基金国际合作项目的支持。它们为发展中国岩溶研究,培养青年岩溶学者提供了新的条件。在这个阶段有几个重要发现:通过对 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ 系统(岩溶动力系统)的定位观测,发现全球最大的碳库—碳酸盐岩体在全球碳循环中仍甚活跃(Yuan, 1998; 袁道先, 1999a, 1999b; 袁道先等, 2000); 发现四川黄龙及西延至法国东南部 Tethys 地区的大批大型钙华是由于地球深部 CO_2 释放所造成(袁道先等, 2000); 由于 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ 系统对环境变化的敏感性,岩溶沉积物可以为全球变化研究提供高分辨率的环境变化信息。1993 年我们把桂林盘龙洞一个高 1.22 m 的石笋切面的微层照片及初步测年结果到基金委汇报时,引起地球科学部负责同志的高度重视,立即决定追加经费,并组织北京大学技术物理系使用加速器 C14 技术联合攻关。通过稳定同位素和地球化学综合研究,建立了中国南方 36 ka 以来第一个古环境变化的连续石笋剖面。不但重建了末次冰期以来环境变化的全过程,而且揭示了新仙女木事件等几个气候跃变的过程(袁道先等, 1999)。其分辨率在暖湿期可达 100 a, 在干冷期可达 500 a。这些新进展,为现代岩溶学进入全球变化研究,和申请新的 IGCP

项目提供了科学依据。

4 现代岩溶学和全球变化研究

1995 年初,由中国提出的新的国际对比计划 IGCP379“岩溶作用与碳循环”获得批准于 1995 ~ 1999 年间实施。它有两个科学目标:评价岩溶作用(含表生及深部岩溶作用)对大气 CO_2 源汇的影响,从岩溶沉积物提取高分辨率的古环境变化信息,着重于那些缺乏其它古环境变化替代指标的地区(Yuan, 1998)。这个项目的实施,标志着现代岩溶学的进一步发展完善,并在全球变化研究中发挥其应有的作用。国家基金委以两个重点项目:中国典型岩溶动力系统与环境的相互作用和演变项目(编号:49632100);和由中国科学院地球化学研究所执行的“中国南方碳酸盐岩风化成土地球化学过程与环境变化”,以及十多个资助额较高的面上项目加强了对这个领域的资助。形成了由十多个在岩溶研究方面各具特色的单位构成的国家级研究队伍。国土资源部也实施了相应的重点基础研究项目(编号:9501104)。几年来取得了重要成果:在表生岩溶系统碳循环与大气 CO_2 源汇关系方面,通过长期定位观测从多方面揭示了岩溶动力系统中碳循环的运行机制,用多种方法估算了溶蚀作用回收大气 CO_2 的量,中国全国为纯碳 $1.774 \times 10^7 \text{ t/a}$,而全球为 $6.080 \times 10^8 \text{ t/a}$ 。后者占当前全球碳循环模型中的遗漏汇(Missing Sink)的 1/3,成为全球变化研究中需要认真注意的问题(Yuan, 1998; 袁道先等, 2000; Yuan et al, 2002);深部 CO_2 释放问题,发现沿中国 28 条主要活动断裂带,有大量 CO_2 释放点,在碳酸盐岩地区,常伴随大量钙华沉淀,通过同位素示踪,揭示其来源为幔源 CO_2 和壳源变质 CO_2 不同比例的混合,并用 1370 个地热点的历史资料,估算西藏及其邻近地区年 CO_2 释碳量为 $2.68 \times 10^5 \text{ t}$ 。过去的观测方法,可能已是释气之后的数据,如果改善观测方法,可能达到 $4 \times 10^7 \text{ t/a}$ (Yuan et al, 2002b);以岩溶记录重建环境变化过程,使用新技术方法,高分辨率及古环境信息提取等方面都取得了许多进展(袁道先等, 1999a, 1999b; Yuan et al, 2004)。从 2000 年以来研究群体已在黔、滇、桂(或湘)等省的广阔岩溶区进行了千余个洞穴的详细调查,取石笋样近百件,并以大型石笋为主,在详细沉积学研究的基础上,采用 AMS^{14}C 、 TMS-U 系或 $\text{CPMS}^{230}\text{Th}$ 计数 U 系等方法测年,并以碳、氧同位素为主,配合微层发光及微量元

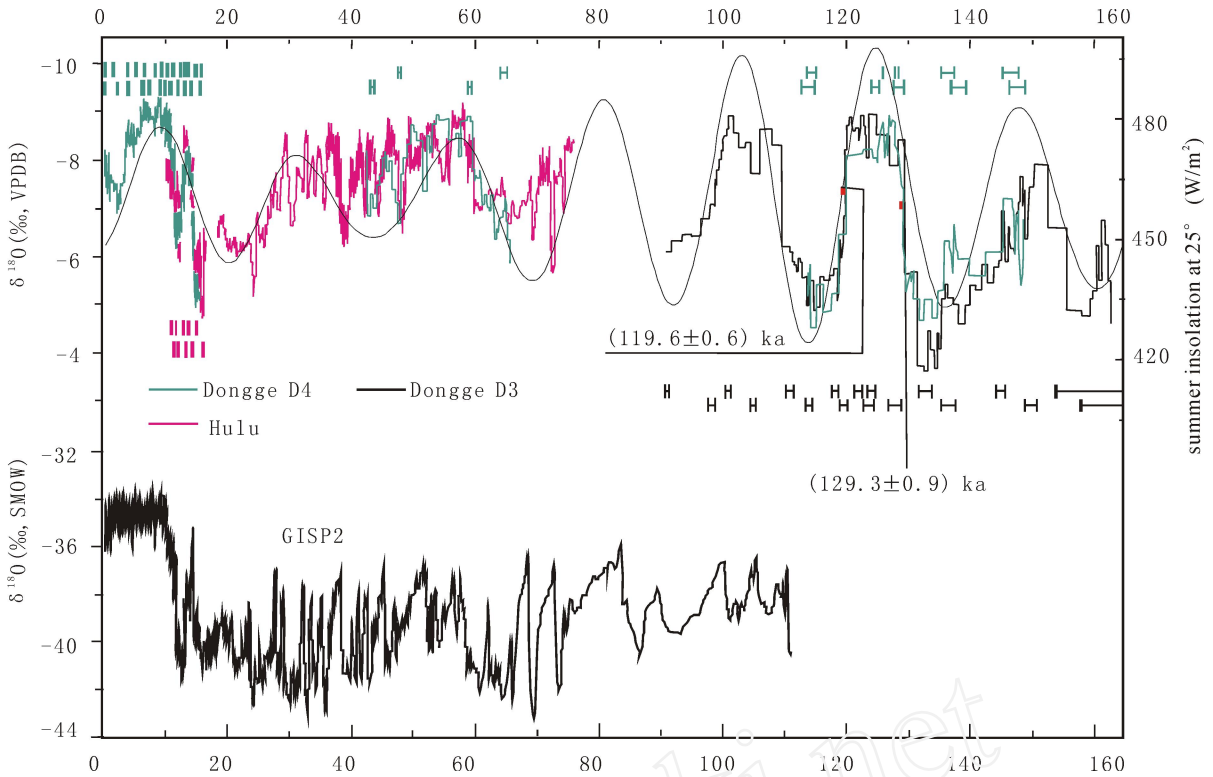


图 2 贵州董哥洞 D3、D4 石笋的氧同位素与太阳辐射强度

Fig 2 Oxygen isotope changes of stalagnite D3 and D4 from Libo, Guizhou Province, in comparison with summer insolation at 25 °

素等手段提取气候记录,取得多个石笋高分辨率气候变化的平行记录。在地域上包括了东亚季风或印度季风为主的两个气候区,在时间跨度上则包括了最后两次冰期—间冰期旋回。

如对贵州与广西交界处的荔波县董哥洞的两根石笋(各高 210 cm, 304 cm)的氧同位素和 Th-230 测年研究,揭示了过去 0.16 Ma 来亚洲季风和低纬度地区降雨变化的特征 (Yuan et al, 2004) (图 2)。在这个期间内,由太阳辐射强度和千年尺度大气环流波动所驱动的热带—亚热带降雨的变化,导致了许多次氧同位素比值的突变。本项研究揭示:前一个间冰期季风经历了 (9.7 ± 1.1) ka,从距今 (129.3 ± 0.9) ka 前开始,表现为在不到 200 a 的时间里,氧同位素比值突然变轻了 3‰,而在距今 (119.6 ± 0.6) ka 前结束,表现为在不到 300 a 的时间里,氧同位素比值突然变重了 3‰。其起始时间与太阳辐射强度增高,及相应的盛间冰期环境的出现时间一致。说明太阳辐射强度增高,驱动了盛间冰期的出现。董哥洞石笋提供了低纬度、低海拔地区,可较好定年,更接近水汽来源区的古气候变化的替代指标。根据董哥洞石笋的 ^{18}O 和 ^{13}C 记录,

重建了荔波地区 2.3 ka 来古气候环境的演变历史,揭示了石笋中记录的百年尺度的温暖期、温凉期、寒冷期等的气候事件,同时,也揭示出石笋记录的 10 a 尺度的气候波动与全球的气候变化具有明显的一致性 (张美良等, 2006)。

在洞穴石笋的古气候环境研究中,发现末次冰期以来的弱暖阶段中存在有多次冷事件—Heinrich 冷事件 H1~H5,在石笋记录中均有明显的反映,桂林响水洞石笋在末次冰期记录的 5 次冷事件,与北大西洋 Heinrich 冷事件 H1~H5 具有较好的对应关系,显示与北极地区存在着古气候的遥相关。通过对贵州七星洞 4 号和 6 号石笋的深入研究,进一步证实了 Heinrich 冷事件在石笋记录中的反映 (张美良等, 2003),可以与格陵兰冰芯 Dansgaard-Oeschger 旋回中突出的干冷事件或北大西洋的冰筏事件进行对比。研究表明末次冰期以来石笋记录冷暖事件所反映出的古季风环流变化,明显受北大西洋气候振荡的影响。

石笋记录的跃变事件表明,新仙女木事件在我国南方的洞穴沉积物中具有显著的反映 (Qin et al, 2005)。利用荔波、都匀和桂林等地的 4 个石笋

的精确测年,揭示在 12.5~11.0 ka BP 期间存在有一冷事件,并证实了末次冰期在荔波、都匀地区和桂林地区均存在有与新仙女木事件对应的冷事件。石笋记录末次冰期终止点的年龄,得到了明确的定位,其时限为 11.3~12.5 ka BP。

桂林附近已建立了 200 ka 以来气候变化的石笋剖面:使用高精度测年(AMSC14, TMS等)和高密度同位素测试,揭示了北京、广西荔浦等地元明清以来的环境变化事件。通过对桂林响水洞的石笋进行高精度的 TMS-U 系测年和碳、氧同位素分析,建立了中全新世 6.0 ka BP 以来桂林地区高分辨率的古气候变化时间序列。石笋剖面的碳、氧同位素记录揭示,桂林地区中全新世(6.0 ka BP)以来的季风气候变化,大致可分为两个气候期:6000~3568 a BP 为气候适宜期,显示东亚夏季风由强盛逐渐变为减弱的趋势,气候温暖湿润期;3568~373 a BP 为降温期,显示东亚夏季风减弱,东亚冬季风增强以及气候的大幅度波动。碳同位素记录表明,从 6000 a BP 到 784 a BP 期间, ^{13}C 均趋向于偏负或偏轻,表明森林植被茂盛。从 3800~784 a BP 间 ^{13}C 记录曲线揭示出为 5 个干旱和潮湿亚阶段,并以 500~650 a 为一周期,其中,每一干旱亚期持续时间为 200~250 a,每一潮湿亚期持续时间为 300~400 a。从 784 a BP 开始(即相当于金朝,公元 1166 年)到 373 a BP(即相当于元朝末至明朝末,公元 1343~1577 年), ^{13}C 从 -9.02‰ 突然增大到 -6.75‰~-3.81‰, ^{13}C 值突然偏重,是由于人类活动的影响造成的,反映当时人口的增多,森林被大量砍伐,大量垦荒耕植,反映此阶段以 C4 植物为主。

石笋记录所揭示的气候旋回的周期及其变化,以及终止点的特征等,可以与海洋同位素记录以及冰芯记录进行对比。而石笋剖面则是环境地层学与洞穴沉积学很重要的研究对象,研究纹层、纹层组、沉积结构构造及韵律特性,区分沉积间断及灾害性突变,这些都展示了现代岩溶学在全球变化研究中的可喜前景,并将为中国季风形成和演变的研究提供新的信息。与此同时,以揭示岩溶动力系统中碳、水、钙循环规律及其应用为目标的岩溶动力学理论也逐步发展完善。

通过研究发现云南白水台和四川黄龙钙华属于内生成因类钙华,证实四川黄龙沟钙华沉积的地表溪流水质基本上受到两种水混合的制约,即断层泉水和山区的融雪(冰)水。监测到根呼吸作用对云南白水台钙华水池中水化学日动态变化的控制(Liu

et al., 2003, 2006)。

5 现代岩溶学与可持续发展

2000 年初,由中国提出的新的国际对比计划 IGCP448“全球岩溶生态系统对比”在巴黎获得批准于 2000~2004 年间实施(Yuan, 2000b)。中国自然科学基金又以重点项目(编号:40231008)给予支持。国土资源部也以一个重点项目(编号:2000208)支持。它标志现代岩溶学与生态科学的结合登上了国际舞台。这种结合为中国岩溶地区的可持续发展提出了许多新思路,有的已发展成有应用前景的新技术。如在 80 年代后期,用岩溶地球化学研究提出的新思路,以高精度水文地球化学场的新技术分析整理了济南岩溶泉域历年的水化学资料,揭示了中寒武统张夏灰岩含水层通过断裂带穿透上寒武统崮山组相对隔水层向奥陶系灰岩含水层补给的途径,并因地制宜设计了新的示踪剂,用一次长 20 余千米,水循环深达 700 m 的大型示踪试验所证明。这一重要发现,为济南岩溶地下水的科学管理提供了新思路。90 年代初,贵州乌江渡水电站在运行仅数年后即在廊道中出现大量钙华,为解决其是否与防渗帷幕老化有关,及防治对策,运用岩溶动力学理论和同位素示踪技术,区分了钙华的来源和成因,提出了科学合理的防治措施。

岩溶生态系统是受岩溶环境制约的生态系统。近年来,对中国西南岩溶生态系统典型研究表明地质地貌条件对岩溶区资源、环境和社会经济具有制约作用,如通过 GIS 技术平台对广西以县为信息单元,系统统计和计算了碳酸盐岩出露面积及占土地面积的比例,森林、灌丛、草地覆盖率,土地垦殖率,地表、地下水径流模数,人口密度,人均国内生产总值及农民纯收入等数据,其结果显示:森林覆盖率与碳酸盐岩出露面积的比例呈负相关,灌丛、草地覆盖率与碳酸盐岩出露面积的比例呈正相关;岩溶地貌类型对水土资源的数量和有效开发利用存在明显的制约性,峰丛洼地县的人口密度,人均国内生产总值及农民纯收入等社会经济指标低于峰林平原县。从而揭示广西岩溶生态系统的脆弱性,并阐述其机理(曹建华等,2006)。此外对广西岩溶区发展营养体农业问题进行了初步探索(杨慧等,2006),通过适当调整农业结构,发展营养体农业以适应建设社会主义新农村发展的要求。以草地为主要特色的营养体农作物在生长期对于水热时间性要求较不严格,能在全部生长季节内充分地利用水热资源,

生产较多的有机物质(农产品),而且以其丰富的种质资源和众多的生活类型,较易达到优质、稳产、高产的目的,并且不仅可以为家畜提供丰富的饲料,而且在防止水土流失、培植土壤肥力等方面也有重要作用,从而达到经济效益、生态效益“双赢”的目的。

典型岩溶区营养元素的生物地球化学循环机理研究,为石灰土的改良和土壤资源的可持续利用提供科学依据。桂林毛村岩溶生态试验场石灰土、红壤对比分析,揭示富钙、偏碱的岩溶地球化学环境对土壤、植物中营养元素丰度的影响:石灰土中营养元素的全量,除 B 外,其它元素均大于红壤的。其中 Ca、Mg、Zn 石灰土的含量是红壤的 3.68、4.64、3.96 倍;Mn、Cu、Co、Fe 则分别是红壤的 1.68、1.64、1.39 和 1.25 倍;石灰土中营养元素有效态含量,除了 Ca、Mg、Cu 的有效态含量高于红壤的,其它营养元素有效态含量均小于红壤的,其中 Mn、Zn 有效态含量仅为红壤的 60%;Fe、P、Mo 的有效态含量仅为红壤的 30%~40%;B 的有效态含量仅为红壤的 10%;石灰土上的植物叶片中 Ca、Mg、Mo 的含量高于红壤的,P、Cu、Fe 含量两者几乎相同,而 Mn、Zn、B、Co 的含量低于红壤的,其中 Co 含量仅为红壤的 1/2, Mn 的含量仅为红壤的 1/3。进一步发现岩溶区土壤中 Zn 元素主要以残渣态(占总量 68.5%~85.0%)存在;岩溶区农田、林地石灰土中 Zn 元素相对活泼态:离子交换态(包括水溶态)、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态(松结有机结合态)的含量均比非岩溶区对应的要低,而相对稳定态:铁锰氧化物结合态、强有机结合态(包括部分硫化物态)的含量均比非岩溶区相对应的要高,包括残渣态含量也存在相同的趋势。这意味着岩溶土壤地球化学环境对土壤 Zn 的迁移、富集、形态转换具有明显的影响。长期耕种下岩溶区和非岩溶区土壤均会出现缺 Zn 状况,岩溶区情况更为严重。而适宜的土壤改良措施,可望提高土壤有效 Zn 形态的含量。

典型峰丛谷地生态系统中两种不同的生境(岩溶区和非岩溶区)中的黄荆、木和枫香叶片形态解剖特征比较分析表明:两种不同生境下的黄荆、

木和枫香,其叶片形态解剖特征差异显著,岩溶区黄荆、木和枫香叶片无论是表皮结构还是横切面结构都趋向旱化,两者在单位视野内上、下表皮细胞数目、下表皮气孔数目、气孔指数、气孔大小、叶片厚度、上表皮厚度、栅栏组织厚度存在着显著性差异;

在同一生境中,与枫香比较,黄荆、木形态解剖结构更趋于旱生,两者叶片下表皮均有星状绒毛,而

枫香无表皮毛且无角质层。而表皮毛和角质层能更好的减少植物叶片的蒸腾失水,是旱生植物的基本形态解剖特征,是植物适应干旱环境的表现,可见黄荆、木能更好的适应岩溶石山干旱的环境,是岩溶石山地区植被生态恢复的好树种。

近年来的观测试验还获得了许多新发现,如石山地区岩溶动力系统运行规律与元素迁移,以及一些名特优产品,如金银花、苦丁茶的分布,引种,繁衍,退化的关系;碳酸盐地区对环境酸化的缓解作用及人体健康的影响;峰丛山区岩溶洼地中大气 CO₂浓度的倍增现象;地衣、藻类在碳酸盐岩表面繁衍的水文效应及对植被演替的影响;以及生物酶对岩溶动力系统运行的催化作用等(Yuan, 2000a, 2001, 2002a, 2002b; 袁道先, 2000; 袁道先等, 2000a; Liu et al, 2005)。溶解实验表明,对灰岩而言,加入自然界普遍存在的碳酸酐酶(CA)后,其溶解速率在高 CO₂分压时增加可达 10 倍,而对白云岩,其溶解速率增加主要在低 CO₂分压时,可达 3 倍左右。毫无疑问,已往的研究由于未认识到 CA 在风化中的催化作用,因此低估了风化作用的速率,同样也低估了风化作用对大气 CO₂沉降的贡献。

“十五”国土资源部重点项目“中国西南岩溶生态系统研究”的实施,对西南 8 省区市岩溶县、石漠化严重县进行了统计和空间分布特征的分析(图 3),使我们对西南岩溶生态系统特征有了较为正确和全面的认识(曹建华等, 2005),西南岩溶区石漠化综合治理首先要在岩溶地质条件的基础上,结合气候、水文和社会经济状况,才能深入分析岩溶区石漠化的成因、危害和类型。同时结合该地区的国家重点扶贫县、少数民族自治县、生态区位等为综合治理工程实施过程中轻重缓急、试点县的确定提供了重要依据,据此划分出岩溶区石漠化综合治理区域 8 大区对国家发改委“西南岩溶石漠化综合治理规划大纲”(2008)的编写起到了重要的参考作用。

这些新发现和研究成果,都为依靠科技防治中国岩溶地区严重的石漠化问题打开了新思路。它们尽管还有待不断的艰苦探索,但可预见其具有广阔的应用前景。

6 对地球科学发展的启示

从 20 多年来岩溶动力学在中国不断地由萌芽到逐渐形成理论和方法体系,由全球对比到介入全球变化的大领域,进而探索解决资源环境和可持续发展的难题的途径的不断发展过程,为我国地学的

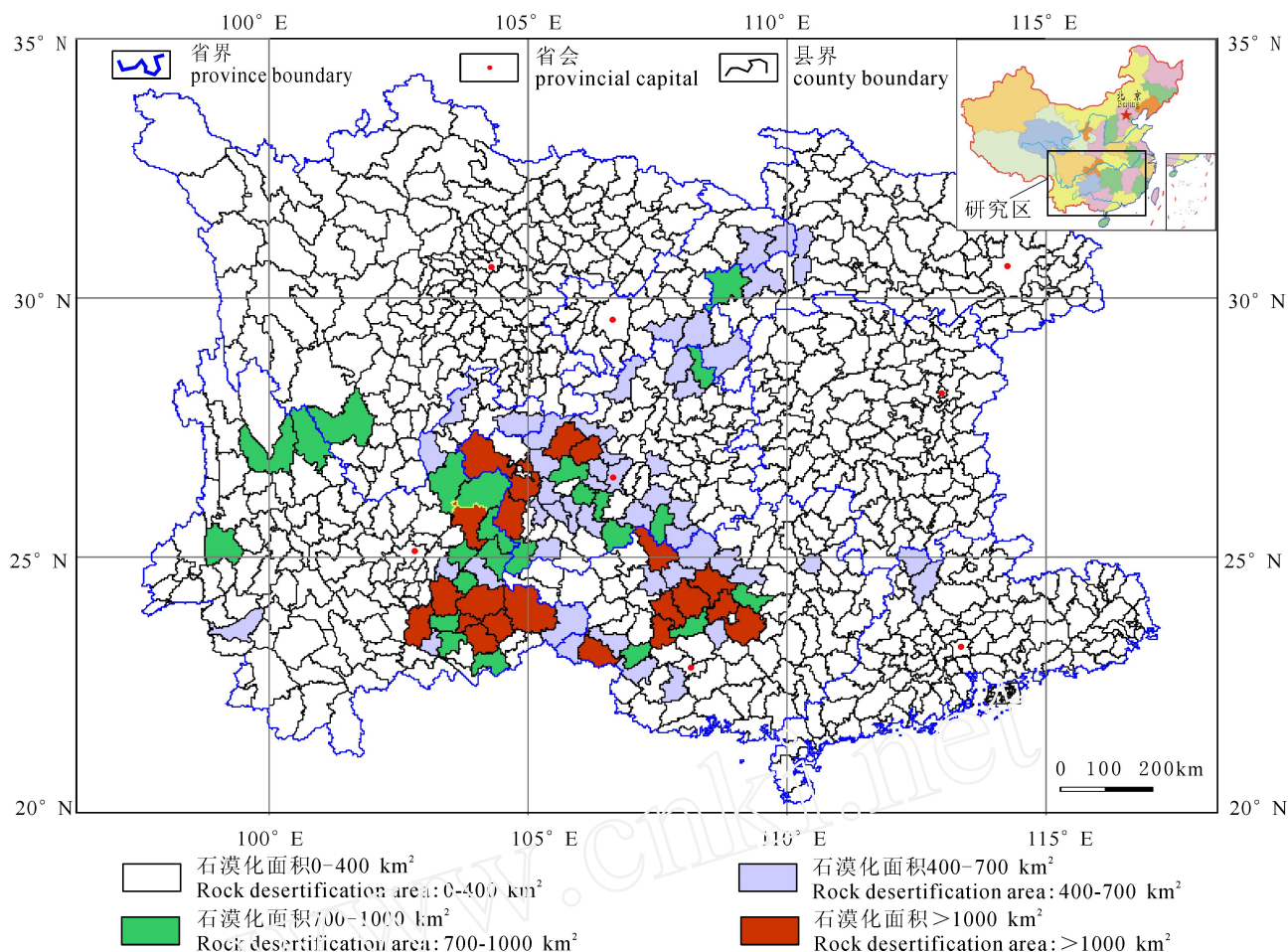


图 3 西南岩溶区石漠化严重县分布图

Fig 3 Distribution of counties suffering severe rock desertification in karst areas of southwest China

发展提出了以下启示：

(1)在地学方面，抓住那些在中国具有地域优势而又有重大国家需求的问题，提出地学前缘的新的科学问题，持之以恒地开展研究，比较容易取得重要进展。

(2)地球系统科学理论的运用，将在跨世纪地学的发展中发挥重要作用。但要做到这一点，地学各领域都要尽快找到适合本身需要的掌握各圈层间物质能量运动的工作方法。岩溶学发展中以岩溶地球化学一系列捕捉碳、水、钙循环的技术方法为突破口，可能是一个好的例子。

(3)在重大科学研究计划的实施中，执行者和管理者对新出现的苗头都要十分敏感。以便及时调动科研资源取得突破。两者之间及时的信息交流十分重要。对重要领域通过重大重点项目和面上项目相结合的办法给予持续资助，组成既有协作又有竞争的国家研究队伍，建设研究基地，培养研究梯队是使该领域在中国不断发展的保证。

(4)在科学研究计划实施过程中，加强国际合作、交流，吸取新思路，引入新技术，是提高研究水平的重要途径 (Yuan, 2002; Yuan et al, 2004)。有条件时，发挥中国地域或学科优势，组织由中国牵头的多边合作项目，则更为有利。

(5)要保持对新发现的自然规律或现象，及其可能的应用价值的敏感性。它既是基础研究不断创新的源泉，也是经济建设技术创新的需要。

参考文献

- 曹建华,袁道先,裴建国,章程,夏日元,张美良,谢运球,况明生. 2005. 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.
- 曹建华,袁道先,章程. 2006. 脆弱的广西岩溶生态系统:地质地貌对资源、环境和社会经济的制约 [J]. 中国人口、资源与环境, 16 (3): 383~387.
- 林海. 1988. 地球系统科学 [J]. 地球科学信息, (总 14): 1~8.
- 刘再华, WOLFGANG Dreybrodt. 2007. 岩溶作用动力学与环境 [M]. 北京:地质出版社, 1~237.
- 袁道先. 1990. 中国岩溶地球化学研究的进展 [J]. 水文地质工程地

- 质, (总 115): 41~42
- 袁道先. 1999a 对地球系统科学的几点认识 [J]. 高校地质学报, 5 (1): 1~6
- 袁道先. 1999b “岩溶作用与碳循环” 研究进展 [J]. 地球科学进展, 14 (5): 425~432
- 袁道先, 覃嘉铭, 林玉石, 张美良, 李彬. 1999. 桂林 20 万年石笋高分辨率古环境重建 [M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1~69.
- 袁道先. 2000. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见 [J]. 中国岩溶, 19 (2): 103~108
- 袁道先, 蒋忠诚. 2000b IGCP379“岩溶作用与碳循环” 在中国的研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 27 (1): 49~51.
- 袁道先, 谢运球. 2000d 中国碳酸盐岩洞穴的开发与保护, 韩国洞穴保护学术讨论会议特邀报告. 见: 韩国洞穴保护学术讨论会议论文集, 31~55.
- 袁道先, 刘再华, 林玉石, 沈继芳, 何师意, 徐胜友, 杨立铮, 李彬, 覃嘉铭, 蔡五田. 2002. 中国岩溶动力系统 [M]. 北京: 地质出版社, 275.
- 袁道先. 2006 现代岩溶学在我国的发展 [J]. 地质论评, 52 (6): 733~736
- 杨慧, 曹建华, 张连凯, 黄黎英, 申宏岗. 2006 广西岩溶区发展营农农业问题初探 [J]. 云南农业大学学报, 21 (3A): 116~120
- 张昀. 1992 新地球观 [J]. 地球科学进展, 7 (1): 57~64.
- 张美良, 袁道先, 林玉石, 覃嘉铭, 章程, 程海. 2003. 桂林响水洞 6.00 ka B P 以来石笋高分辨率的气候记录 [J]. 地球学报, 24 (5): 439~444.
- 张美良, 程海, 林玉石, 覃嘉铭, 朱晓燕, 冉景丞, 杨琰, 陈会明, EDWARDS R L. 2006 贵州荔波地区 2000 年来石笋高分辨率的气候记录 [J]. 沉积学报, 24 (3): 339~348
- chemistry in a Travertine-depositing Stream at Baishuitai, Yunnan, SW China [J]. Aquatic Geochemistry, 12 (2): 103~121.
- LU Zaihua, LI Qiang, SUN Haihong, WANG Jinliang. 2007. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO₂ and dilution effects [J]. Journal of Hydrology, 337: 207~223.
- MACKENZIE F T, MACKENZIE J Z. 1995. Our changing planet, an introduction to Earth system science and global environmental change [M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall Inc
- Q N Jiaming, YUAN Daoxian, CHENG Hai, L N Yushi, ZHANG Meiliang, WANG Fuxing, EDWARDS R L, WANG Hua, RAN Jingcheng. 2005. The Younger Dryas and climate abrupt events in the Early and middle Holocene: stalagmite oxygen isotope record from Maolan, Guizhou, China [J]. Science in China (Ser D), 48 (4): 530~537.
- YUAN Daoxian. 1998. Contribution of IGCP379 “Karst Processes and Carbon Cycle” to global change [J]. Episodes, 21 (3): 198.
- YUAN Daoxian, LU Zaihua. 1998. Global Karst Correlation, Final Report of IGCP 299 “Geology, Climate, Hydrology and Karst Formation” [M]. Beijing: Science Press, 1~308.
- YUAN Daoxian. 2000a. Ecological Problems in the Subtropical Karst of South China [A], Abstract Book, NATO ARW Sustainable Mineral Resources Management of Karst Areas [C]. Portoroz, Slovenia, 9~10.
- YUAN Daoxian. 2000b. IGCP448: World Correlation of Karst Ecosystem (2002-2004) [J]. Episodes, 23 (4): 285~286.
- YUAN Daoxian. 2001. On the karst ecosystem. Acta Geologica Sinica (English edition), 75 (3): 336~338.
- YUAN Daoxian. 2002a. Geological environments and human health in China [J]. In: Environmental Health Perspectives, USA. 110 (9).
- YUAN Daoxian. 2002b. Geology and geohydrology of karst and its relevance to society [R], Invited Speech at the 30th Session of IGCP Scientific Board, February, UNESCO/Paris: in Minutes 30th Session of IGCP Scientific Board, 13~15.
- YUAN Daoxian, ZHANG Cheng. 2002. karst processes and the carbon cycle, final report of IGCP 379 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~220.
- YUAN Daoxian, CHENG Hai, Lawrence E R, Dykoski C A, Kelly M J, ZHANG Meiliang, Q N Jiaming, L N Yushi, WANG Yongjin, WU Jiangyin, Dorale J A, AN Zhisheng, CAI Yanjun. 2004. Timing, Duration, and Transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon [J]. Science, 304 (23): 575~578.
- ZHANG Cheng, YUAN Daoxian, CAO Jianhua. 2005. Analysis on the environmental sensitivities of typical dynamic epikarst system at the Nongla monitoring site, Guangxi, China [J]. Environmental Geology, 47 (5): 615~619.

References

. . . 1962 . . . :
 , 322

- GUO Fang, JIANG Guanghui, YUAN Daoxian. 2007. Major ions in typical subterranean rivers and their anthropogenic impacts in southwest karst areas China [J]. Environmental Geology, 53 (3): 533~541.
- LU Zaihua, ZHANG Meiliang, LI Qiang, YOU shengyi. 2003. Hydrochemical and isotope characteristics of spring water and travertine in the Baishuitai area (SW China) and their meaning for paleoenvironmental reconstruction [J]. Environmental Geology, 44 (6): 698~704.
- LU Zaihua, YUAN Daoxian, WOLFGANG Dreybrodt. 2005. Comparative study of dissolution rate-determining mechanisms of limestone and dolomite [J]. Environmental Geology, 49 (2): 274~279.
- LU Zaihua, LI Qiang, SUN Haihong, LAO Changjun, LI Huaaju, WANG Jinliang, WU Kongyun. 2006. Diurnal Variations of Hydro-