

# 现代岩溶学

袁道先 蒋勇军 沈立成 蒲俊兵 肖琼等 编著



科学出版社

# 现代岩溶学

袁道先 蒋勇军 沈立成 蒲俊兵 肖琼等 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书在简要介绍岩溶发育、岩溶形态、岩溶动力系统基本知识的基础上,概括了世界岩溶的形态组合特征,揭示了其形成环境和机理,论述了现代岩溶学研究的科学目标以及在全球变化中的重要意义;同时揭示岩溶地区丰富矿产和水土资源的形成过程与机理,以及资源与较低环境容量之间的矛盾,并提出相应的防治对策。本书的特点是采用地球系统科学的认识论和方法论指导岩溶研究,实现岩溶地区人与环境相和谐。

本书既可作为高校地质学和地理学专业基础教材使用,还可供环境、生态等有关科研、教学人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代岩溶学 / 袁道先等编著. —北京: 科学出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-03-047178-9

I. ①现… II. ①袁… III. ①岩溶—研究 IV. ①P642. 25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 012800 号

责任编辑: 文 杨 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 迷底书装

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 23 1/4

字数: 551 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前言

自20世纪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。中国岩溶不但以其344万 $\text{km}^2$ 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）影响下岩溶发育完好、类型多样，使其成为国际范例。但要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。随着人口的持续增长和社会经济的快速发展，人类以空前的速度和规模利用自然资源，并引发一系列生态环境问题。岩溶环境因其“脆弱性”和“敏感性”与人类社会、经济发展息息相关，目前，正受到研究人员的广泛关注。

与此同时，广大从事岩溶研究的专家与学者纷纷就岩溶及其环境问题展开探讨，各大专院校也加强了岩溶相关专业的人才培养力度。但在这一过程中，遇到了专业教材建设落后的问题。在这种背景下，根据人才培养目标，按照“厚理论、重实践”的写作思路，吸收国内外最新研究成果，从构建岩溶学学科体系的角度上，编著了《现代岩溶学》一书，以期满足高校相关专业教学与广大岩溶研究工作者的急需。

本书以地球系统科学理论和相应的研究方法为指导，引用近十年来国内外最新研究成果，根据袁道先院士的学术思想编写而成。本书共四篇，分为十三章。其中第一章为绪论，第一篇普通岩溶学（第二至第五章），第二篇区域岩溶学（第六至第七章），第三篇全球变化岩溶学（第八至第九章），第四篇专门岩溶学（第十至第十三章）。

本书在编写过程中，得到了西南大学地理科学学院、中国地质科学院岩溶地质研究所、国土资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室、联合国教育、科学及文化组织国际岩溶研究中心、广西院士工作站的大力支持；是国家自然科学基金项目（4860145、49070155、49472170、49632100、40231008、40672165、41072192、41172331、41202185、41302213、41472321、41572234、41202184）、国际地质对比计划项目（IGCP299、IGCP379、IGCP 448、IGCP513、IGCP598）、中国地质调查局项目（1212011087119、12120113006700）以及重庆市科学技术委员会项目（CSTC2010BC7004、CSTC2013JCYJYS20001）历年来研究成果的结晶。除编著者外，杨琰、李廷勇、刘子琦、孙玉川、李林立、吴月霞、杨平恒、魏兴萍、贺秋芳、何多兴、杨勋林、胡宁、张强、张治伟、高彦芳、朱章雄、袁文昊、伍坤宇等为本书的编写做了大量工作；余琴、张媚、谢正兰、廖昱、梁作兵、王尊波等为本书绘制插图，对他们表示衷心的感谢。

作者  
2015年8月

# 目 录

## 前言

第一章 绪论 .....	1
--------------	---

## 第一篇 普通岩溶学

第二章 地质、气候、水文、植被与岩溶形成 .....	13
第一节 岩溶发育的地质条件 .....	13
第二节 岩溶发育的气候条件 .....	21
第三节 岩溶发育的水文条件 .....	23
第四节 岩溶发育的生物条件 .....	26
第三章 岩溶形成与碳、水、钙循环 .....	31
第一节 全球碳、水、钙循环与岩溶形成 .....	31
第二节 岩溶动力系统运行特征的经验判别 .....	40
第三节 岩溶动力系统运行特征的定量判别 .....	45
第四章 岩溶形态组合及其形成环境与特征 .....	53
第一节 岩溶形态——岩溶学研究的基础 .....	53
第二节 岩溶基本形态 .....	56
第三节 岩溶形态组合 .....	63
第五章 碳酸盐岩洞穴 .....	73
第一节 概述 .....	73
第二节 碳酸盐岩洞穴的形成条件、机理、形态和分布 .....	75
第三节 洞穴资源 .....	84
第四节 洞穴环境与生态系统 .....	89
第五节 洞穴研究、探测与保护 .....	93



## 第二篇 区域岩溶学 (全球岩溶对比)

第六章 全球岩溶的基本类型 .....	99
第一节 全球岩溶分布及研究区域岩溶的意义 .....	99
第二节 研究区域岩溶的基本方法 .....	103
第三节 全球岩溶的基本类型和典型实例 .....	107
第七章 中国岩溶的基本类型及与全球岩溶的对比 .....	162
第一节 中国岩溶的分布特点及发育的自然地理条件 .....	162
第二节 中国岩溶的基本类型及特点 .....	168
第三节 中国主要岩溶区的资源环境问题 .....	180

## 第三篇 全球变化岩溶学

第八章 岩溶作用的大气温室气体源汇 .....	205
第一节 全球碳循环概述 .....	205
第二节 碳循环中的地质作用 .....	211
第三节 碳循环中的岩溶作用 .....	213
第九章 过去全球变化的岩溶记录 .....	230
第一节 地球系统 .....	230
第二节 全球变化研究的核心科学问题 .....	235
第三节 过去全球变化研究 .....	241
第四节 古环境的岩溶沉积记录 .....	248

## 第四篇 专门岩溶学

第十章 岩溶地区的矿产资源 .....	259
第一节 概述 .....	259
第二节 中国岩溶矿床分类 .....	260
第三节 岩溶矿床的矿物学种类 .....	285
第四节 研究岩溶矿床的几个科学问题 .....	290
第十一章 岩溶水文学与水资源 .....	292
第一节 岩溶水资源的重要意义 .....	292



第二节	岩溶水的基本特征 .....	294
第三节	岩溶水资源的勘察、评价和开发 .....	306
第四节	与岩溶水有关的环境问题 .....	316
<b>第十二章</b>	<b>岩溶地区的土地利用及石漠化防治 .....</b>	<b>319</b>
第一节	概述 .....	319
第二节	我国西南石漠化问题的全球视野 .....	323
第三节	我国西南石漠化问题的现状 .....	326
第四节	治理对策和经验 .....	329
第五节	石漠化综合治理中的科技问题 .....	335
<b>第十三章</b>	<b>岩溶地区的地质灾害与防治 .....</b>	<b>337</b>
第一节	岩溶地区的地面塌陷 .....	337
第二节	岩溶地区的洪涝灾害 .....	344
第三节	岩溶地区的危岩崩塌 .....	350
<b>主要参考文献</b>	.....	<b>353</b>




中华人民共和国政府与联合国教育、科学及文化组织（以下简称联合国教科文组织）于2008年2月11日签订的《关于在中国桂林建立联合国教科文组织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。此后，2008年2月23日国土资源部副部长、中国地质调查局局长汪民同志在全国地质工作会议的报告中指出，地质科学要大发展，需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，它的基本方法和理论成果，以及与社会经济发展的关系。

自20世纪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344万 $\text{km}^2$ 的总面积（约占我国国土面积的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）四个有利条件，岩溶发育完好，类型多样，使其在国际上具有范例性。但要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，使用新技术新方法，不断提高研究水平，并探索将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，比地学中研究其他表生地质作用的领域要晚。它长期处于对纷繁的岩溶形态进行描述、分类，以及对其成因进行思辨的过程中。虽然岩溶学者在100多年前就已认识到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到重要作用。1962年苏联学者Соколов提出岩溶发育有四个基本条件，即可溶岩、可溶岩能透水、有侵蚀性的水和不断运动的水，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”这一条件，可以被理解为具有大气圈、生物圈的内涵，但并不明确，而且也可以作其他的理解。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，如果不紧扣在岩石圈、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，就很难论述清楚。

### 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年执行的国家自然科学基金项目“中国东部岩溶地球化学研究”（编号：





4860145), 为将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。岩溶作用是在  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$  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、 $\text{CO}_2$  测定仪、电导仪、碱度计等), 采用现场系统监测的方法, 以实际数据揭示了  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$  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  $\text{CO}_2$  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以及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联合国教科文组织国际地质对比计划 (IGCP299、IGCP379、IGCP448、IGCP513、IGCP598) 并连续执行这些项目打下了基础。

由此发展起来的岩溶地球化学及其一系列捕捉碳、水、钙循环行踪的野外工作方法, 也为地球系统科学的学术思想引入岩溶学研究中起到了桥梁作用 (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, 与  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$  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储存、转移和各种环境问题发生、发展的场所, 成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以及与其相耦联的水循环、钙循环系统中碳酸盐的溶蚀或沉积, 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 1-1 所示的概念模型来描述。

图 1-1 概念模型表明, 岩溶动力系统由固相、液相、气相三部分构成, 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  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\text{Mg}^{2+}$ )、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{H}^+$  和溶解  $\text{CO}_2$  为主要成分的水流; 气相部分则以  $\text{CO}_2$  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, 又与地球四圈层有着密切联系。在其固相部分, 不但通过碳酸盐岩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深大断裂与地幔联系, 使深源  $\text{CO}_2$  得以积极参与岩溶动力系统的运行并向大气释放。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)。气相部分属于大气圈的组成部分, 也通过气体的  $\text{CO}_2$  交换和生物圈、岩石圈及人类活动密切联系 (光合作

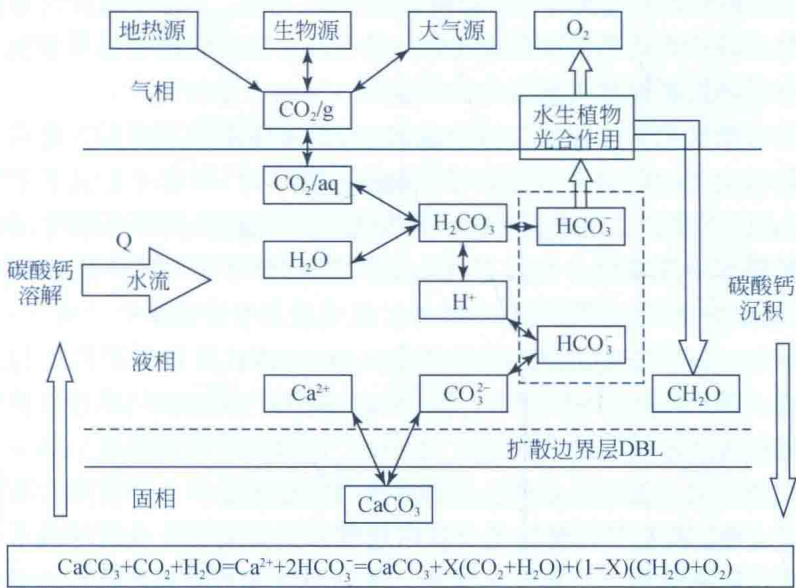


图 1-1 岩溶动力系统

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, 已掌握岩溶动力系统有四大功能: ①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、水土流失、地面塌陷、生物多样性受限等; ②通过岩溶作用由大气回收或向大气释放  $\text{CO}_2$ , 调节大气温室气体浓度, 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, 由于岩溶动力系统与全球四圈层的密切关系, 它可以敏感的反应并忠实的记录各种环境因子, 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, 通过国际合作研究带动的技术方法不断改进, 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变化、日变化与暴雨动态(Zhang et al., 2005; Liu et al., 2007)。这些变化说明对于东亚季风气候控制下的岩溶地区(即温度、降雨和植被方面存在明显的季节性

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, 还必须重视  $\text{CO}_2$  对岩溶系统中水化学变化的影响 (刘再华等, 2003, 2007), 即岩溶系统水化学动态的变化是  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$  三者相互作用引起的。如发现岩溶裂隙水在洪水期间 pH 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 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二氧化碳分压 ( $P_{\text{CO}_2}$ ) 高于正常情况的  $P_{\text{CO}_2}$ , 而它的方解石饱和指数 (SIc) 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 SIc 降低, 但  $P_{\text{CO}_2}$  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  $\text{CO}_2$  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。典型地下河水水化学的监测结果表明,  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  离子含量在雨季出现峰值,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  等离子含量则降低, 主要受季节变化控制;  $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  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, 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

20 世纪 90 年代初, 由中国科学家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, 并于 1990~1994 年执行, 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。通过全球不同物理、化学、生物学条件下的岩溶形态组合的对比, 更深刻地揭示了岩溶形成机理。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, 带头做好国内对比, 以推动全球岩溶对比研究。这一时期, 国家自然科学基金项目“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 年), 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, 组织 8 个国家的 40 多位岩溶学者进行了行程 6700km, 跨越中国三种类型岩溶 (南方亚热带潮湿型岩溶、西南高山与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 项目的学术思路和方法, 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和微观的、地表和地下的、溶蚀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三种优势岩溶类型的基本特征做出了总结,划分出6个类型的表层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,即坚硬古老碳酸盐岩、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研究,也得到了相关项目的支持。为发展中国岩溶研究,培养青年岩溶学者提供了新的条件。这个阶段有几个重要发现:①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十分活跃(Yuan et al., 1998; 袁道先, 1999a, 1999b; 袁道先等, 2000);②发现四川黄龙及西藏至法国东南部特提斯地区(Tethys)的大批大型钙华是由于地球深部 $\text{CO}_2$ 释放所造成(袁道先等, 2000);③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1.22m的石笋切面的微层照片及初步测年结果给国家自然科学基金委汇报时,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 $^{14}\text{C}$ 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3.6万年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年,在干冷期可达500年。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,由中国提出新的国际地质对比计划IGCP379项目“岩溶作用与碳循环”获得批准,并于1995~1999年实施。它有两个科学目标:①评价岩溶作用(含表生及深部岩溶作用)对大气 $\text{CO}_2$ 源汇的影响;②从岩溶沉积物提取高分辨率的古环境变化信息,着重于那些缺乏其他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。国家自然科学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“中国南方碳酸盐岩风化成土地球化学过程与环境变化项目”(编号:49833020),以及10多个资助额度较高的面上项目加强了对这个领域的资助,形成了由10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)。取得了重要成果:①在表生岩溶系统碳循环与大气 $\text{CO}_2$ 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 $\text{CO}_2$ 的量,中国为1774万t C/a,而全球为6.08亿t C/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 et al., 1998; 袁道先等, 2000; Yuan et al., 2002);②深部 $\text{CO}_2$ 释放问题,发现沿中国28条主要活动断裂带,有大量 $\text{CO}_2$ 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 $\text{CO}_2$ 和壳源变质 $\text{CO}_2$ 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 $\text{CO}_2$ 释碳量为26.8万t C。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



4000 万 tC/a (Yuan et al., 2002b); ③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)。自 2000 年以来, 研究群体已在黔、滇、桂 (或湘)、渝等省 (市) 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<sup>14</sup>C、TIMS-U 系或 ICP-MS<sup>230</sup>Th、 $\alpha$  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素等手段提取古气候记录, 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。例如对贵州与广西交界处的荔波县董哥洞的两根石笋 (分别高 210cm、304cm) 的氧同位素和 Th-230 测年研究, 揭示了过去 0.16Ma 来亚洲季风和低纬度地区降雨变化的特征 (Yuan et al., 2004) (图 1-2)。在此期间内, 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  $(9.7 \pm 1.1)$  ka, 从距今  $(129.3 \pm 0.9)$  ka 前开始, 表现为在不到 200 年的时间里, 氧同位素比值突然变轻了 3‰, 而在距今  $(119.6 \pm 0.6)$  ka 前结束, 表现为在不到 300 年的时间里, 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  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  记录, 重建了荔波地区 2.3ka 以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 年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伐事件进行对比。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 ~ 11.0kaBP 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 I 的年龄, 得到了明确的定位, 其时限为 11.3 ~ 12.5kaBP。

通过对桂林响水洞的石笋进行高精度的 TIMS-U 系测年和碳、氧同位素分析, 建立了中全新世 6000aBP 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 (6000aBP) 以来的季风气候变化, 大致可分为两个气候期: 6000 ~ 3568aBP 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 ~ 373aBP 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 ~ 784aBP,  $\delta^{13}\text{C}$  均趋向于偏负或偏轻, 表明森林植被茂盛。从 3800 ~ 784aBP,  $\delta^{13}\text{C}$  记录曲线揭示出为 5 个干旱和潮湿亚阶段, 并以

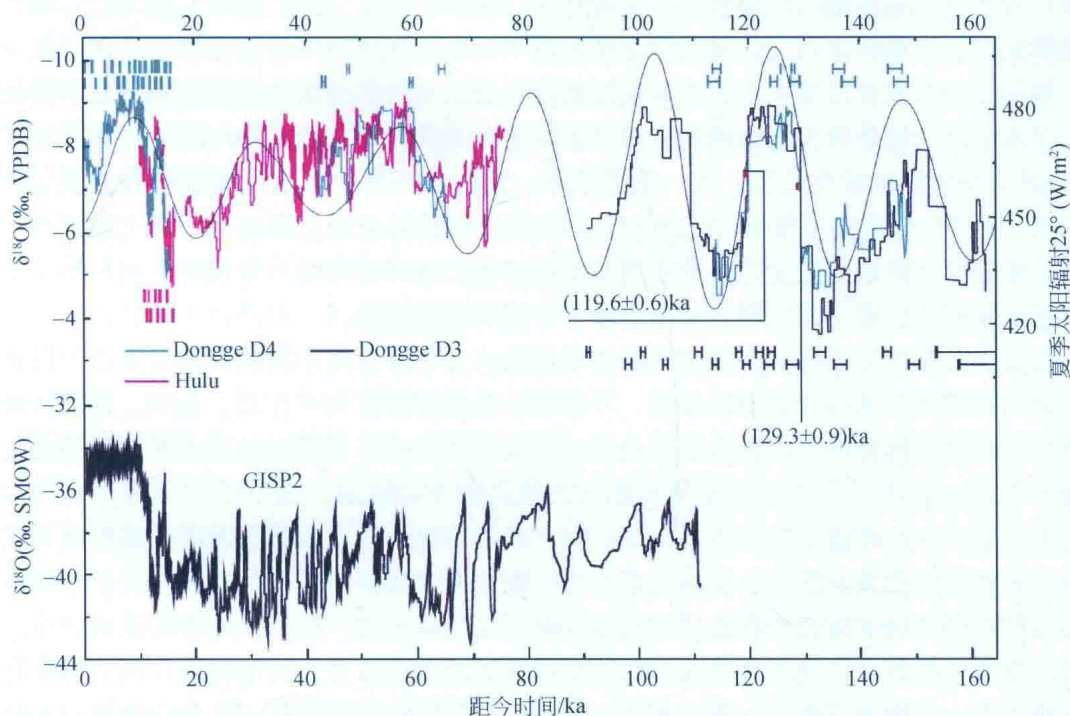



图 1-2 贵州董哥洞 D3、D4 石笋的氧同位素与太阳辐射强度 (袁道先, 2004)

500 ~ 650 年为一周期，其中，每一干旱亚期持续时间为 200 ~ 250 年，每一潮湿亚期持续时间为 300 ~ 400 年。从 784 aBP 开始（即相当于金朝，公元 1166 年）到 373 aBP（即相当于元朝末至明朝末，公元 1343 ~ 1577 年）， $\delta^{13}\text{C}$  从  $-9.02\text{‰}$  突然增大到  $-6.75\text{‰} \sim -3.81\text{‰}$ ， $\delta^{13}\text{C}$  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  $\text{C}_4$  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，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；高分辨率的监测也揭示了水生植物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)。通过前述研究，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。

## 5. 现代岩溶学与可持续发展

2000 年年初，由中国科学家提出的新的国际地质对比计划 IGCP448 项目“全球岩溶生态系统对比”在巴黎获得批准，并于 2000 ~ 2004 年实施 (Yuan, 2000b)。中国自然科学基金委又以重点项目“中国典型地区地质作用与碳循环研究”（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。例如在 20 世纪 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 km,水循环深达 700m 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。20 世纪 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的问题及防治对策,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,例如,通过 GIS 技术平台对广西壮族自治区以县为信息单元,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:①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;②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,从而达到经济效益和生态效益“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:①石灰土中营养元素的全量,除 B 外,其他元素均大于红壤的。其中石灰土中 Ca、Mg、Zn 的含量是红壤的 3.68 倍、4.64 倍、3.96 倍;Mn、Cu、Co、Fe 则分别是红壤的 1.68 倍、1.64 倍、1.39 倍和 1.25 倍;②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,其他营养元素有效态含量均小于红壤,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%;③石灰土上的植物叶片中 Ca、Mg、Mo 的含量高于红壤,P、Cu、Fe 含量两者几乎相同,而 Mn、Zn、B、Co 的含量低于红壤,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、枫香叶片形态解剖特征比较分析表明:①两种不同生境下的黄荆、枫香,其叶片形态解剖特征差异显著,岩溶区黄荆、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;②在同一生境中,与枫香比较,黄荆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地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,可见黄荆能更好地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;碳酸盐岩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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 分压时,可达 3 倍左右。毫无疑问,已往的研究由于未认识到碳酸酐酶(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 CO<sub>2</sub> 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,对西南八省区市岩溶县、石漠化严重县进行了统计和空间分布特征的分析(图 1-3),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八大区对国家发展和改革委员会《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2008~2015)》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。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

从三十多年来岩溶动力学在中国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难题的途径的不断发展过程,为我国地学的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) 在今后地学的发展中,地球系统科学理论的运用将发挥更加重要的作用。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



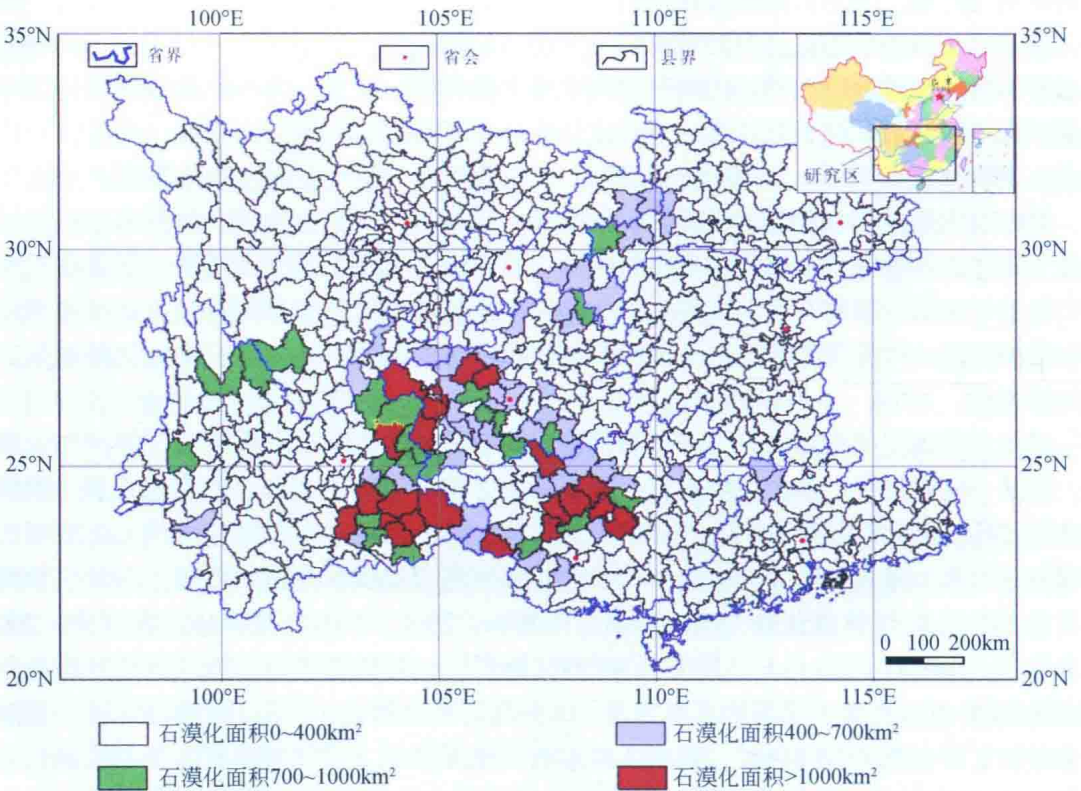


图 1-3 西南八省石漠化严重县分布图 (曹建华, 2008)

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。