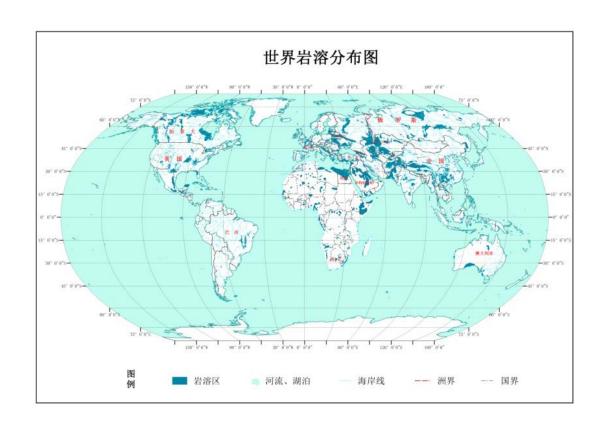


联合国教科文组织国际岩溶研究中心 学术成果汇编

Academic Achievements of International Research Center on Karst, under the Auspices of UNESCO



中国地质科学院岩溶地质研究所 联合国教科文组织国际岩溶研究中心 2016年4月 联合国教科文组织国际岩溶研究中心(以下简称"中心")于 2008 年 12 月 15 日在中国桂林挂牌成立并正式运行,该中心是联合国教科文组织赞助设立的第一个地学领域二类研究中心。

中心致力于在全球范围内更好地理解岩溶系统,以保持脆弱岩溶环境的良性生态循环,促进岩溶地区社会和经济可持续发展。基于此目标,在岩溶地质研究领域内广泛开展工作:全球范围内建立监测站点,揭示岩溶碳循环与全球气候变化之间关系;在西南地区进行详细的水文地质环境地质调查,并总结岩溶地区地下水资源开发利用成果;就日益突出的岩溶塌陷等地质灾害问题进行评价与监测预警;更新地球物理探测技术、示踪技术,解决对岩溶地区复杂的地下裂隙、管道探测问题;作为第一单位完成连续第五个国际地质对比计划IGCP/SIDA 598 项目;为我国南方喀斯特世界自然遗产地及世界地质公园的成功申报提供技术支持;开展中国与东南亚地区岩溶地质系列图编制项目,服务我国"一带一路"战略;在岩溶型储层成因和空间分布规律方面取得重要进展,对碳酸盐岩油气勘探与开发具有重要的意义。

国际岩溶研究中心是联合国教科文组织从事岩溶交叉性、综合性研究的唯一的国际机构,中心将通过国内外合作等方式,继续在岩溶地质领域开展调查研究,发挥桥梁纽带作用,引领世界岩溶学科进步,促进岩溶碳循环和全球气候变化国际合作,为全球岩溶资源合理利用服务,促进岩溶生态环境的和谐发展。

目 录

| —, | 联合国教科文组织国际岩溶研究中心工作成果 | . 1 |
|-----------|------------------------|-----|
| | (一) 中心简介 | . 1 |
| | (二) 国际岩溶培训班 | . 3 |
| _, | 联合国教科文组织国际岩溶研究中心学术成果 | . 6 |
| | (一) 岩溶碳循环与全球气候变化 | . 6 |
| | (二)全球岩溶碳循环监测网络 | 11 |
| | (三) 国际地质对比计划(IGCP) | 14 |
| | (四)世界自然遗产及世界地质公园申报 | 16 |
| | (五)中国与东南亚地区岩溶地质系列图编制 | 20 |
| | (六)岩溶地下水资源开发利用 | 24 |
| | (七) 钙循环与岩溶生态系统及石漠化综合治理 | 26 |
| | (八)碳酸盐岩油气储层研究进展 | 30 |
| | (九)岩溶塌陷调查评价与监测预警 | 34 |
| | (十)西南岩溶地区水文地质环境地质调查 | 37 |
| | (十一)地球物理探测技术进展 | 41 |
| | (十二) 岩溶地下水示踪技术 | 43 |

一、联合国教科文组织国际岩溶研究中心工作成果

(一) 中心简介

2008年2月,时任联合国教科文组织总干事松浦晃一郎先生与时任中国国土资源部副部长王寿祥先生签署了中心成立协定(图 1-1)。2008年12月15日,联合国教科文组织国际岩溶研究中心在中国桂林挂牌成立并正式运行(图 1-2),该中心是联合国教科文组织赞助设立的第一个地学领域二类研究中心。中心自成立以来,共举办了7次国际培训班;主办和协办国际学术会议11次;签署合作协议15份;出版专刊2部。中心成立了以汪民副部长为主席的第一届理事会(16人),以袁道先院士为主任的第一届学术委员会(32人),召开了4次理事会会议和3次学术委员会会议。2013年11月,岩溶中心顺利通过联合国教科文组织专家组第一个6年运行评估,评估组一致认为中心已经成为一个成效显著的教科文组织二类研究中心。截至2015年,中心共承担了6项国际合作项目。



图 1-1 中心成立协定签署



图 1-2 挂牌成立



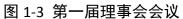




图 1-4 第一届学术委员会会议







图 1-5 中心运转(学术交流、主办学术会议、举办国际培训班)

(二)国际岩溶培训班

国际岩溶研究中心从 2009 年开始,每年举办一期国际培训班,目前已经成功举办了七届国际岩溶培训班。共吸引了来自 33 个国家的 147 名学员参与,并有幸邀请到来自 16 个国家(不含中国专家)的 35 位外籍一流专家授课。国际岩溶培训班是促成各类国际合作的最佳平台,一方面搭建科学技术传播平台,一方面促成双、多边国际合作。此外,国际培训班还积极响应国家"一带一路"和平共建倡议,为沿线国家岩溶地质研究提供重要支撑,目前,已惠及 18 个"一带一路"沿线国家。

表 2-1 2009-2015 年国际培训班主题信息列表

| | · · | | | | |
|-----|------------------|--------|---------------|-----|------|
| 期次 | 主题 | 开 班 | 支撑/协助机构 | 学员 | 涉及国 |
| | 土 | 时间 | 人特/奶奶机构 | (人) | 别(国) |
| | 岩溶水文地质与生态 | 2009 年 | 商务部 | 17 | 8 |
| | | (30 天) | | | |
| | 岩溶水文地质与碳循环 | 2010年 | 日 1 次 MG か1 | 17 | 11 |
| _ | | (12 天) | 国土资源部 | | |
| | 岩溶水文地质调查技术方法 | 2011 年 | 国土资源部 | 17 | 9 |
| 三 | | (12 天) | | | |
| т | 岩溶与水文地球化学 | 2012 年 | 国土资源部 西南大学 | 20 | 11 |
| 四 | | (12 天) | | | |
| | 流域岩溶水文地质调查、动态监测与 | 2013 年 | 〒 1 次 MG 台II | 21 | 18 |
| 五 | 应用 | (12 天) | 国土资源部 | | |
| · · | 岩溶生态系统与地质微生物 | 2014年 | 国土资源部 | 17 | 14 |
| 六 | | (14 天) | 中国地质大学(武汉) | | |
| 七 | 岩溶景观、地质公园、自然遗产地、 | 2015 年 | 国土资源部 | 0.0 | 00 |
| | 环境地质编图与数据挖掘 | (14 天) | 中国-东盟矿业合作论坛 | 38 | 20 |
| 合计 | | 106 天 | | 147 | 33 |
| | 环境地质编图与数据挖掘 | | 中国-东盟矿业合作论坛 | | |

表 2-2 培训班学员涉及国别统计表

| 1 東埔寨 Cambodia 4 2 印度 India 6 3 印度尼西亚 Indonesia 9 4 伊朗 Iran 2 5 老挝 Laos 4 6 马来西亚 Malaysia 3 蒙古 Mongolia 2 4 海側 Myanmar 2 5 華泉 Thailand 13 10 越南 Vietnam 12 12 中国 China 22 13 澳大利亚 Australia 2 14 世帝亚新几内亚 Papua New Guinea 1 15 埃塞俄比亚 Ethiopia 10 16 肯尼亚 Kenya 5 17 北州 Wigeria 3 18 非洲 南非 South Africa 2 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 马干达 Uganda 3 21 東京 Uganda 3 22 匈牙利 Hungary 4 3 第三日和東 Zimbabwe 3 23 東京 Bouth Africa 2 24 東京 Uganda 3 25 欧洲 第三日和東京 Zimbabwe 3 26 東京 Bouth Africa 2 27 東京 Bouth Africa 2 28 東京 Uganda 1 27 | 序号 | 大洲 | 衣 2-2 培训班字页涉及国别统计表 国家 | 参与学员人数 |
|--|----|-------------------|---------------------------------------|--------|
| 印度尼西亚 Indonesia 9 伊朗 Iran 2 老挝 Laos 4 日来西亚 Malaysia 3 蒙古 Mongolia 2 編甸 Myanmar 2 非律宾 Philippines 2 源国 Thailand 13 越南 Vietnam 12 中国 China 22 澳大利亚 Australia 2 巴布亚新几内亚 Papua New Guinea 埃塞俄比亚 Ethiopia 10 肯尼亚 Kenya 5 尼日利亚 Nigeria 3 南非 | 1 | | 柬埔寨 Cambodia | 4 |
| ### ### ### ### ### ### #### #### ## | 2 | 1 | 印度 India | 6 |
| 5 老挝 Laos 4 6 马来西亚 Malaysia 3 7 蒙古 Mongolia 2 8 續面 Myanmar 2 9 菲律宾 Philippines 2 10 泰国 Thailand 13 11 越南 Vietnam 12 12 中国 China 22 13 大洋洲 巴布亚新几内亚 Papua New Guinea 1 15 埃塞俄比亚 Ethiopia 10 16 肯尼亚 Kenya 5 17 尼日利亚 Nigeria 3 18 菲洲 南非 South Africa 2 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 乌干达 Uganda 3 21 乌干达 Uganda 3 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 欧洲 第名代亞 Slovak 4 27 斯洛伐克 Slovak 4 28 斯洛伐克 Slovak 4 29 俄罗斯 Russia 2 29 俄罗斯 Russia 2 29 世面 Brazil 6 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 4 基連 中華 | 3 | | 印度尼西亚 Indonesia | 9 |
| 66 亚洲 马来西亚 Malaysia 3 7 蒙古 Mongolia 2 8 郷甸 Myanmar 2 9 非律宾 Philippines 2 10 泰国 Thailand 13 11 越南 Vietnam 12 12 中国 China 22 13 大洋洲 巴布亚新几内亚 Papua New Guinea 1 15 埃塞俄比亚 Ethiopia 10 16 肯尼亚 Kenya 5 17 尼日利亚 Nigeria 3 18 非洲 南非 South Africa 2 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 乌干达 Uganda 3 21 山桑尼亚 Tanzania 1 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 欧洲 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛伐克 Slovak 4 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 29 俄罗斯 Russia 2 20 西西 Mexico 2 20 松鲁 Peru 4 | 4 | | 伊朗 Iran | 2 |
| 一字 | 5 | 1 | 老挝 Laos | 4 |
| ### 第四 Myanmar 2 | 6 | चाः भाग | 马来西亚 Malaysia | 3 |
| 9 菲律宾 Philippines 2 10 泰国 Thailand 13 11 越南 Vietnam 12 12 中国 China 22 13 澳大利亚 Australia 2 14 巴布亚新几内亚 Papua New Guinea 1 15 埃塞俄比亚 Ethiopia 10 16 肯尼亚 Kenya 5 17 尼日利亚 Nigeria 3 18 事帯 South Africa 2 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 乌干达 Uganda 3 21 里西布 Zimbabwe 3 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 25 東尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 4 斯洛文尼亚 Slovenia 2 29 俄罗斯 Russia 2 29 俄罗斯 Russia 2 20 巴西 Brazil 6 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 泰普 Peru <td>7</td> <td>- <u>YE 7</u>71]</td> <td>蒙古 Mongolia</td> <td>2</td> | 7 | - <u>YE 7</u> 71] | 蒙古 Mongolia | 2 |
| Table | 8 |] | 缅甸 Myanmar | 2 |
| Description | 9 | 1 | 菲律宾 Philippines | 2 |
| 12 中国 China 22 13 澳大利亚 Australia 2 14 巴布亚新几內亚 Papua New Guinea 1 15 埃塞俄比亚 Ethiopia 10 16 肯尼亚 Kenya 5 17 尼日利亚 Nigeria 3 18 非洲 南非 South Africa 2 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 乌干达 Uganda 3 21 匈牙利 Hungary 4 22 该兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 欧洲 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛伐克 Slovak 4 28 西班牙 Spain 1 29 西班牙 Spain 1 30 巴西 Brazil 6 31 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 10 |] | 泰国 Thailand | 13 |
| 大洋洲 | 11 | | 越南 Vietnam | 12 |
| 大洋洲 | 12 |] | 中国 China | 22 |
| 14 Papua New Guinea 1 15 埃塞俄比亚 Ethiopia 10 16 肯尼亚 Kenya 5 17 尼日利亚 Nigeria 3 18 非洲 南非 South Africa 2 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 乌干达 Uganda 3 21 匈牙利 Hungary 4 23 沒好 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 废洲 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 美洲 | 13 | | 澳大利亚 Australia | 2 |
| Papua New Guinea 10 16 16 17 18 18 18 19 19 19 19 19 | 14 | 大洋洲 | | 1 |
| 16 肯尼亚 Kenya 5 17 尼日利亚 Nigeria 3 18 南非 South Africa 2 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 乌干达 Uganda 3 21 海巴布韦 Zimbabwe 3 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | | | | |
| 17 尼日利亚 Nigeria 3 18 事非 South Africa 2 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 乌干达 Uganda 3 21 海巴布韦 Zimbabwe 3 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | | 1 | | |
| 18 非洲 南非 South Africa 2 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 乌干达 Uganda 3 21 海巴布韦 Zimbabwe 3 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛伐克 Slovak 4 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | | _ | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | |
| 19 坦桑尼亚 Tanzania 1 20 乌干达 Uganda 3 21 津巴布韦 Zimbabwe 3 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 17 | _ | | 3 |
| 20 乌干达 Uganda 3 21 津巴布韦 Zimbabwe 3 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 18 | 非洲 | | 2 |
| 21 津巴布韦 Zimbabwe 3 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 19 | | | 1 |
| 22 匈牙利 Hungary 4 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 20 | | | 3 |
| 23 波兰 Poland 1 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 21 | | 津巴布韦 Zimbabwe | 3 |
| 24 罗马尼亚 Romania 6 25 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 22 | _ | 匈牙利 Hungary | 4 |
| 25 欧洲 塞尔维亚 Serbia 2 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 秘鲁 Peru 4 | 23 | | 波兰 Poland | 1 |
| 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 24 | | 罗马尼亚 Romania | 6 |
| 26 斯洛伐克 Slovak 4 27 斯洛文尼亚 Slovenia 2 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 25 | | 塞尔维亚 Serbia | 2 |
| 28 西班牙 Spain 1 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 26 | 1:5/(1/11 | 斯洛伐克 Slovak | 4 |
| 29 俄罗斯 Russia 2 30 巴西 Brazil 6 31 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 27 | | 斯洛文尼亚 Slovenia | 2 |
| 30 巴西 Brazil 6 31 墨西哥 Mexico 2 32 秘鲁 Peru 4 | 28 | | 西班牙 Spain | 1 |
| 31 美洲 墨西哥 Mexico 2 秘鲁 Peru 4 | 29 | | 俄罗斯 Russia | 2 |
| | 30 | | 巴西 Brazil | 6 |
| 数置 Peru 4 | 31 | 李 知 | 墨西哥 Mexico | 2 |
| 33 美国 USA 2 | 32 | | 秘鲁 Peru | 4 |
| | 33 | | 美国 USA | 2 |

图 2-1 培训班教学员分布图

二、联合国教科文组织国际岩溶研究中心学术成果

(一) 岩溶碳循环与全球气候变化

1.地质历史时期碳酸盐岩形成对原始地球大气产生碳汇效应

在全球碳循环模式中,主要考虑了海洋、陆地植被、土壤,而没有考虑岩石圈的风化对大气 CO₂产生的碳汇效应。从长时间尺度看,地球岩石圈中的碳酸盐岩是相对年轻的岩石,主要发生在显生宙,并随生物活动的加强不断增加,而古老的硅酸盐岩则随(生物)风化的加强不断减少。其作用过程可以写成以下反应式:

$$(Ca,Mg)SiO_3+2CO_2+3H_2O$$
 ______ (Ca,Mg) $CO_3+CH_2O+O_2+H_4SiO_4$ 生物作用

这一过程中硅酸盐岩的风化被认为是消耗大气 CO₂ 的主要过程,而对 另一个过程,及碳酸盐岩的形成是伴随着生物有机过程,碳酸盐岩是地球 上重要的、发生在清洁浅海环境的化学沉积岩(图 1-1、图 1-2)。

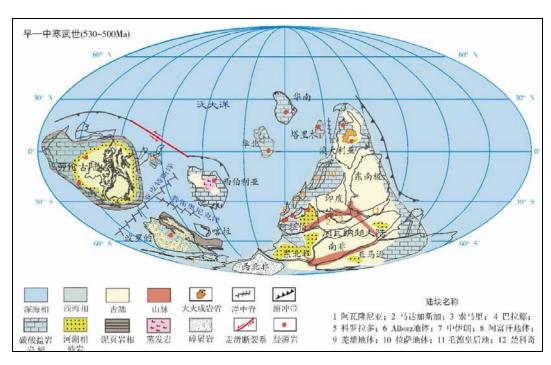


图 1-1 早-中寒武世(530-550Ma)岩相恢复图

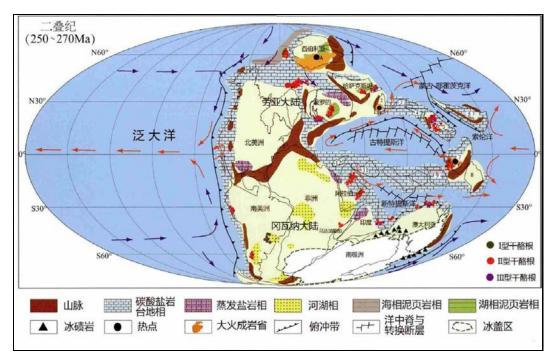


图 1-2 二叠系(250-270Ma)岩相恢复图

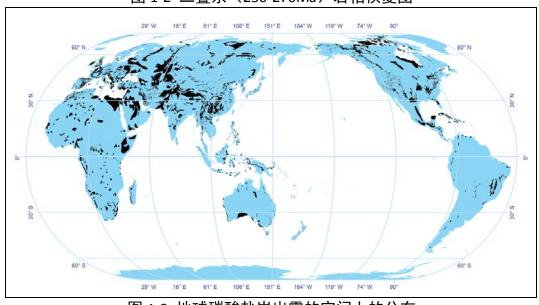


图 1-3 地球碳酸盐岩出露的空间上的分布

这一过程的结果是使原始地球大气 25%以上的 CO₂浓度,下降到现代地球大气中的 0.03~0.04%CO₂浓度,地球地质历史时期,储存在碳酸盐岩中的碳达 61×10¹⁵t,是现代地球上最大的碳库,其碳量占全球总碳量的 99%;因此,地球上的沉积岩-碳酸盐岩的形成、对原始地球大气产生重要的碳汇效应。

2.现代岩溶作用消耗大气/土壤 CO₂,参与全球碳循环

碳酸盐岩是可溶岩,在 CO₂-H₂O 系统中具可溶性,且消耗大气/土壤 CO₂,将其以 HCO₃的形式转移到水体中,并对 CO₂浓度变化、降水响应敏感。

在地球表层系统,以 CO₂+H₂O 为中心环节将生物有机碳循环与"CO₂-H₂O-碳酸盐"三相不平衡开放岩溶动力系统相耦联(图 1-4),并且土壤是碳酸盐岩溶解消耗大气/土壤 CO₂最为敏感的部位。

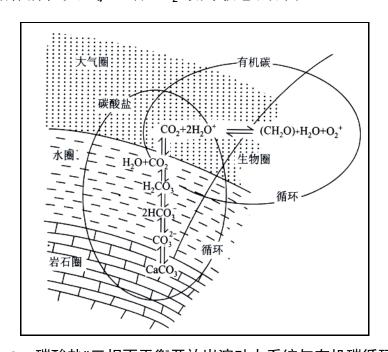


图 1-4 "CO₂—H₂O—碳酸盐"三相不平衡开放岩溶动力系统与有机碳循环耦合的示意图 占陆地面积 9.3%-15.9%的碳酸盐岩溶解构成陆地水域向海洋输送 DIC 的主体,碳酸盐岩溶解产生的碳汇通量对陆地风化碳汇的贡献达到 37%~51.4%;全球碳酸盐岩溶解消耗大气/土壤 CO₂ 的通量因不同研究者和不同方法有所差异,为 0.1-0.6PgC/a,如取中间值 0.3PgC/a;全球陆地生态系统植物的光合作用将消耗大气 CO₂,每年陆地森林生态系统将产生 1.7±0.5 Pg C/yr 的净碳通量,而全球土壤有机碳库在合理的管理下可产生净碳通量 0.4-1.2 Pg C/yr;为此,岩溶作用产生的碳汇通量约占陆地森林碳汇通量的

17.65%、土壤碳汇通量的 37.5%:

岩溶流域碳循环过程主要包括 3 个部分: (1)碳酸盐岩溶解、生成水体中的无机碳; (2) 无机碳随水流在岩溶介质中的迁移; (3)水生植物与无机碳-有机碳之间的转化。

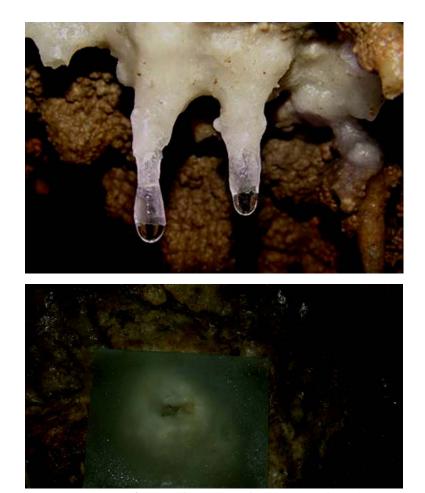


图 1-5 岩溶洞穴滴水与化学次生沉积物形成

3.岩溶洞穴石笋沉积记录高分辨率气候环境变化

地表碳酸盐岩溶解,岩溶水携带大量的大气/土壤、岩石的碳,迁移到洞穴环境,洞穴滴水的快速运动,导致水体中 CO₂ 的逸出,发生次生化学沉积物沉积,其结果:一方面,导致洞穴空气中 CO₂浓度增加;另一方面,化学次生化学沉积物(石笋为最佳)发生沉积,由于岩溶水中的水来源于大气降水,包含水汽团来源及运移过程信息、溶解碳酸盐岩的 CO₂包含地表生

物-气候信息,因此,石笋中就蕴藏着地表气候环境变化的信息。

鉴于现代技术水平的提高,石笋作为过去气候变化记录的载体,与湖泊、黄土、泥炭等载体相比,具备两方面的优势:测年的精确性和高分辨率(甚至达到年际、年代际)。

通过中国南方低纬度岩溶区贵州荔波董哥洞石笋的详细研究,揭示 6a / 5e 时段冰期向间冰期转换年代为 129.28±0.45ka BP,转换过程是一个快速回暖过程,持续时间 200 年,气温变幅达 9.7℃; 而由 5e / 5d 时段间冰阶向冰阶转化表现为较为缓慢的转换特征,持续时间 2700 年,气温变幅达 10℃。

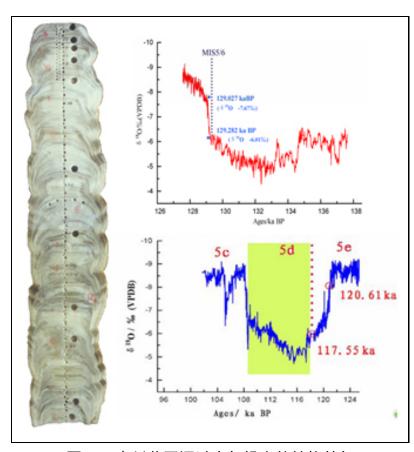


图 1-6 贵州董哥洞过去气候事件转换特征

(二)全球岩溶碳循环监测网络

全球岩溶碳循环监测网络建设工作始于 2010 年,依托岩溶地质研究所承担的地质调查项目已在中国、中南半岛、美洲与欧洲等典型岩溶环境区建立岩溶碳循环与环境变化监测站 35 处,其中美国、斯洛文尼亚、泰国、印度尼西亚等国际对比点 5 处。随着国际合作研究深入,将在全球典型岩溶区建立更多的碳循环监测站。国内监测站有 7 处实现在线远程监测,初步建立监测数据管理平台,构建碳汇评估模型 2 个。

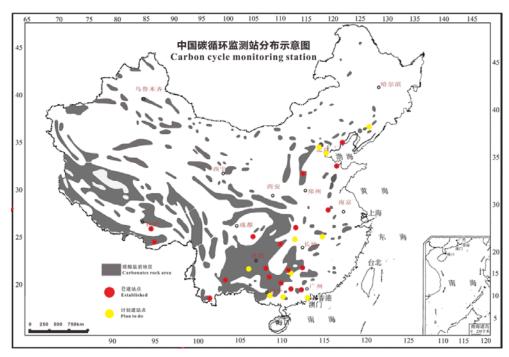


图 2-1 部分国内已建站点(2015年至今)

| 1 | 秦皇岛海水碳汇指标监测站 | 10 | 昆明青龙洞站 |
|---|--|----|---|
| | Oinhaungdao, Hebei | | Kunming, Yunnan |
| 2 | 山东滨州黄河站 | 11 | 云南西双版纳勐腊站 |
| | Binzhou, Shandong | | Banna, Yunnan |
| 3 | 山西跑马神泉站 | 12 | 贵州茂兰板寨(3个) |
| | Fenyang, Shanxi | | Maolan, Guizhou, 3 stations |
| 4 | 安徽寿县珍珠泉站 | 13 | 马山弄拉站 |
| | Shou County, Anhui | | Mashan, Guangxi |
| 5 | 长江三峡沙市站 | 14 | 桂林丫吉、毛村、寨底等站(15个) |
| | Shashi, Hubei | | Guilin, Guangxi, 15 stations |
| 6 | 湘西大龙洞站、屋檐洞站(2个) | 15 | 郴州万华岩站 |
| | West Hunan, 2 stations | | Chenzhou, Hunan |
| 7 | 重庆青木关站、金佛山站(2个) | 16 | 广西柳州、武宣站(2个) |
| | Qingmuguan and Jinfo mountain, Chongqing, 2 stations | | Liuzhou and Wuxuan, Guangxi, 2 stations |
| 8 | 西藏拉萨河站 | 17 | 广西梧州站 |
| | Lhasa River, Tibet | | Wuzhou, Guangxi |
| 9 | 西藏山南站 | 18 | 广州北江站、东江站(2个) |
| | Shannan, Tibet | | Beijiang and Dongjiang, Guangdong, 2 stations |

初步估算了长江、珠江与黄河流域年碳输出量,初步建立桂江流域水文(KWMS)模型,用于研究流域盆地碳平衡研究,评估全球气候变化、不同土地利用植被条件下碳汇增量。珠江流域年碳输出通量为 7.18×10⁶ tCO₂/a,碳汇强度为 21.96 tCO₂/km².a。长江流域年碳输出通量为 43.81×10⁶ tCO₂/a 碳汇强度为 25.69 tCO₂/km².a。黄河流域年碳输出通量为 20.69×10⁶ tCO₂/a,碳汇强度为 27.10tCO₂/km².a。



图 2-2 珠江流域碳汇监测站分布图



图 2-3 贵州茂兰板寨地下河监测站(左)和泰国北碧省普特地下河监测站(右)短时间尺度多参数自动化监测表明,岩溶动力系统对环境变化十分敏感,响应及时,在时间尺度上可以是季节、昼夜,甚至是小时。在不同的

气候条件下,水化学动态变化有不同的表现。暴雨期间,降雨开始阶段稀释作用明显,降雨中后期,CO₂效应逐渐占主导地位,因此有必要把水-岩-CO₂气体作为一个整体来解释表层岩溶作用的水文地球化学行为,为建立表层岩溶带水资源量与各因素之间的定量关系,计算不同表层岩溶带的水资源及其调蓄能力奠定基础。进一步证实岩溶作用在现代仍然很活跃,不能在全球碳循环研究中把所有地质作用(含岩溶作用)都作为长时间尺度,因而这一研究对修正全球碳循环模型具积极意义。

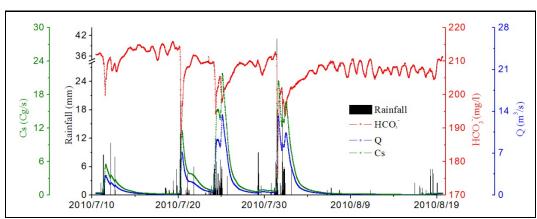


图 2-4 贵州茂兰板寨地下河降水-流量 HCO3 浓度-岩溶碳汇动态过程曲线

(三)国际地质对比计划(IGCP)

自 1990 年以来,由我国科学家袁道先院士提出申请,岩溶地质研究所为主持单位,IGCP 连续实施了五个国际岩溶地质对比计划项目。这五个项目分别是 IGCP 299"地质、气候、水文与岩溶形成"(1990-1994),IGCP 379"岩溶作用与碳循环"(1995-1999),IGCP 448"岩溶地质及其相关的生态系统全球对比"(2000-2004),IGCP513"岩溶含水层与水资源"(2005-2010),及IGCP598"环境变化与岩溶系统可持续性"(2011-2015)。这些项目的成功执行,一方面将我国岩溶地域优势转化为学术优势,提出岩溶动力学理论和一整套岩溶地球化学监测技术方法,极大地推动了现代岩溶学的完善与发展,并引领岩溶形态组合与环境变化、全球变化与岩溶碳循环、石漠化治理与生态恢复等前沿研究领域;同时通过 IGCP 平台形成广泛且稳定的国际岩溶研究团队,约 40 个国家的 200 余位科学家与管理人员参与到每个岩溶IGCP 项目,开展富有成效的双边与多边合作研究,培养一批具有国际视野的年轻岩溶学科带头人。

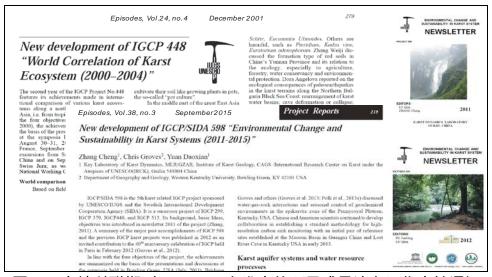


图 3-1 在地科联期刊(Episodes)上发表的项目成果论文及代表性通讯

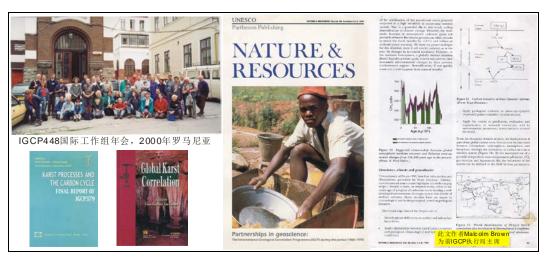


图 3-2 IGCP 项目报道及专著出版情况

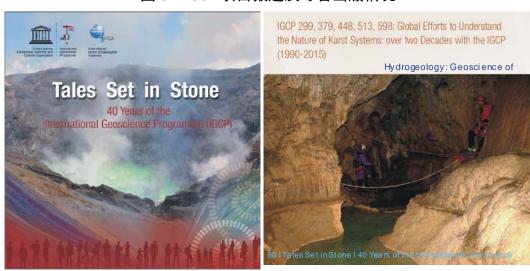


图 3-3 5 个岩溶 IGCP 项目成果总结(IGCP 成立 40 周年专著)



图 3-4 IGCP299-448 执行期间年度 Newsletter

(四)世界自然遗产及世界地质公园申报

世界自然遗产和世界地质公园是在自然保护体系中级别最高的站点, 建立世界自然遗产和世界地质公园,保护大自然馈赠的瑰宝,是联合国教 育科学文化组织(UNESCO)主要职能之一。

中国南方岩溶区是世界上热带一亚热带、湿润一半湿润平原、丘陵、 山地、高原岩溶系列发育最好的地区,反映了中国南方地质地貌发展史和 其特殊的自然地理状况,独特的地貌类型、生态系统、生物多样性、自然 美景和发育演化,具有显著的科研价值和意义。为了保护好这片全球面积 最大、景观最为壮丽的岩溶区,中国政府和国内外岩溶学界提出通过申报 世界遗产、世界地质公园、国家地质公园、来科学保护珍贵的地质遗产。 中心的科学工作者积极投身于地质遗产事业,先后完成了武降喀斯特、桂 林喀斯特、金佛山喀斯特三个中国南方喀斯特的申报材料,使她们成功入 选世界遗产名录:还完成了广西乐业—凤山世界地质公园、贵州织金洞世 界地质公园的申报材料,先后成功列为世界地质公园。此外,还应地方政 府之邀,成功申报 20 处国家级、省级地质公园,以及完成多处旅游景区的 资源调查、对比与评价及旅游开发规划与设计任务。这些工作,为地质景 观资源的开发利用注入大量、扎实的科学技术含量,产生了较大的社会、 经济、环境效益,也为相关研究提供了宝贵的天然实验室。

1.武隆喀斯特

武隆喀斯特为峡谷喀斯特的优秀代表,由芙蓉江芙蓉洞洞穴系统、 天生三桥、后坪冲蚀天坑洞穴群三个系统构成,均是在地壳的长期抬升、河

谷深切、排水基准下降的整体机制下发育形成,完美地展现了多类型、多层次亚热带深切峡谷喀斯特的典型特征。三个系统与区域排泄基准——乌江的距离由近及远,有序地展现了各自对新构造运动的响应时序和产物,系统记录了中更新统以来地壳抬升的历程,见证了长江及其支流演化历史。

2.桂林喀斯特

桂林喀斯特是世界上塔状喀斯特景观的杰出代表,并被国际公认为内 陆塔状喀斯特的典型地区。遗产地主要的地质地貌资源为连片分布的峰林 喀斯特、峰丛喀斯特、喀斯特峡谷河流和近百个洞穴。



图 4-1 高耸的武降天生桥

图 4-2 桂林漓江峡谷河流

桂林喀斯特代表了热带、亚热带喀斯特演化末期的地貌过程,其发育可能始于中生代,但受到白垩系地壳沉降和古湖相红层的埋藏,现代峰丛和峰林景观却是随着古近纪新构造运动的地壳抬升和湿热季风气候的到来而开始的,最终在南方喀斯特演化末期完整地表达了它的地貌过程。喜山运动造成构造性质的差异和水文地质特征不同,导致不同喀斯特类型的分化,即峰丛和峰林的协同共生、同时异态发展("桂林模式"),是峰林和峰丛喀斯特的发育演化地貌循环演化论的重要补充。

3.金佛山喀斯特

金佛山喀斯特是全球热带亚热带地区切割型台原喀斯特的典型代表,以波状起伏的古老夷平面、周长约 50~65 km 的封闭陡崖和夷平面下高海拔化石洞穴系统为主要形态特征。金佛山喀斯特记录了高海拔喀斯特高原的切割过程,包含了新生代以来该地区间歇性抬升和岩溶作用的证据,代表了中国南方喀斯特演化过程的早期阶段,并且反映了云贵高原边缘古老的地质地貌发育历史以及古近纪以来古地理环境的重大变迁对喀斯特地貌发育的重大影响。目前洞穴内发现亚洲最为古老的洞穴沉积物,为研究上新世(甚至中新世)以来区域新构造运动、地貌演化及古环境提供难得的场所,揭示了切割高原型台地喀斯特地表地貌一水文一洞穴一构造抬升协同演化的特点。



图 4-3 金佛山喀斯特高大的陡崖

4.广西乐业—凤山世界地质公园

公园占地面积 930 km², 划分为乐业县园区和凤山县园区。乐业县园区以全球分布密度最大的塌陷型天坑群为主要地质遗迹,凤山县园区则以大洞穴和水上天坑群为主,两个园区分别发育有大型地下河、全球跨度最大

的岩溶天生桥、世界级洞穴大厅等地质遗迹。它们均发育在高峰丛深洼地 地貌背景上,系统性、自然性、优美性及典型性堪称全国之最。2010年10 月通过专家的评审,进入世界地质公园网络。



图 4-4 乐业大石围天坑

图 4-5 织金洞流水沉积物

5.贵州织金洞世界地质公园

公园占地面积 170 km², 划分为织金洞、绮结河和东风湖 3 个园区。织金洞规模宏大,为 4 层迷宫式化石洞穴系统,洞内次生化学沉积物类型齐全,形态优美、独特,体量巨大。2015 年 9 月通过专家的评审,被正式纳入 UNESCO 世界地质公园网络成员。

(五) 中国与东南亚地区岩溶地质系列图编制

中国地质科学院岩溶地质研究所 2014-2015 年开展了中国与东南亚地区岩溶地质系列图编制子项目(子项目编码: 12120114006301),该项目属于中国地质调查局"一带一路"基础地质调查与信息服务计划。项目总体目标任务为:通过与东南亚各国的多边或双边合作,开展中国及东南亚地区岩溶地质环境情况综合研究,合作编制岩溶地质及环境地质系列图件,填补中国及东南亚地区岩溶地质及环境地质系列图件的空白,为我国和东南亚各国岩溶水资源规划、岩溶地质环境保护与治理、防灾减灾提供科学依据。通过两年的编图工作,形成的主要成果如下。

1.收集了一批境外地质资料

通过局属单位和开展国际交流,收集了"一带一路"基础地质、水文地质、环境地质相关图件;东南亚地区岩溶地质调查成果报告;东南亚地区地理地质图书资料,这些资料为本项目编图工作提供了数据基础,同时也为建设全球岩溶地质数据库补充了资料,便于后续开展相关研究。

| | 7071 771111179 | <u> </u> |
|--------------|----------------|----------|
| 资料类别 | 单位 | 数量 |
| 图件资料 | 份 | 130 |
| 成果报告 | 份 | 52 |
| 图书资料 | 份 | 45 |
| 交流报告 | 份 | 10 |
| - | | |

表 5-1 项目收集境外资料情况表

2.建立了中国-东盟岩溶地质编图国际合作专家网络

通过组织召开中国-东盟矿业合作论坛地质环境保护论坛、项目交流会, 出访交流会,与来自泰国、马来西亚、印度尼西亚、越南、老挝、缅甸、 柬埔寨、菲律宾的相关专家针对东南亚地区环境地质问题和编图开展了交流与研讨,并签署了合作会议纪要,建立了较好的合作关系,为共同编制中国与东南亚地区岩溶地质系列图及开展后续研究奠定了合作基础。





图 5-1 2014 年、2015 年中国-东盟矿业合作论坛地质环境保护论坛





图 5-2 编图项目交流会



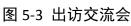




图 5-4 提交东盟秘书处的会议总结报告

3.开展了东南亚国家岩溶地质野外调查工作,完成出访总结报告

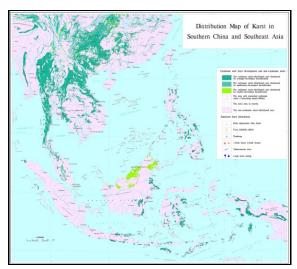
2014 年出访泰国、马来西亚、印度尼西亚, **2015** 年出访缅甸, 通过赴 这些国家开展实地调查,提高了对其岩溶分布及发育情况认识,为系列图 编制积累经验。

4.在泰国开展了中国与中南半岛岩溶地质对比研究

与泰国自然资源与环境部地下水资源厅合作,在泰国中西部典型岩溶区开展了岩溶水文地质调查与碳循环监测、地球物理探测技术应用试验与研究工作;建立了 2 个地下水与碳循环监测站,并对比中泰岩溶形态组合特征与发育环境差异,初步评估了泰国岩溶作用与碳循环强度。

5.合作编制了岩溶地质系列图件

通过综合分析中国与东南亚国家相关地质资料,与东南亚国家相关专家合作编制了中国南部及东南亚地区岩溶分布特征图、中国南部及东南亚地区水文地质图。图件主要内容包括中国南部及东南亚地质地理、碳酸盐岩发育分区、典型岩溶特征点、地下水赋存特征、地下水水质等。并在编图过程中对岩溶发育程度分级体系,地下水分类分级体系进行了完善。



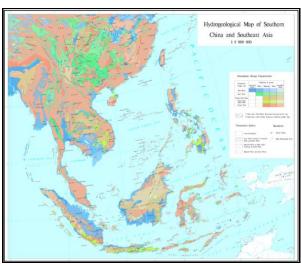


图 5-5 中国南部及东南亚地区岩溶分布特征图、水文地质图

6.编制了"一带一路"相关图件

通过参与地质调查局"一带一路"重要图集编制工作,与相关单位共同编

制了《"一带一路"地下水资源图》、《"一带一路"地热资源图》,图集提交中央领导审阅,获得了中央领导的认可与批示,为服务国家决策提供了科学依据。

(六) 岩溶地下水资源开发利用

2003-2015 年,在西南岩溶地区,针对不同类型区水文地质特点和地下水开发利用条件,因地制宜地,采取堵洞蓄水、暗河截流、大泉壅水、钻井、大口井、斜井等多种方式,开展了岩溶地下水开发利用与生态环境综合治理示范。实施岩溶地下河和大泉开发利用工程 12 处;表层岩溶水调蓄 20 余处,开挖浅井 50 多口;岩溶蓄水构造钻探成井 300 多眼。总供水量达 20 万吨/日,解决了 100 多万人饮用水和 50 多万亩耕地灌溉用水问题。

1.贵州平塘县巨木地下河拦蓄和提引工程

在巨木地下河出口处筑坝拦蓄地下水,形成库容 63 万立方米的地下水库,抬高水位 20 米,建设水电站 1 座。解决了塘边镇 5000 多人和 10000 头大牲畜的饮用水以及 6000 亩农田灌溉用水问题。促进了粮食产量提高,水稻增收 90.0 万公斤/年,油菜增产 8.82 万公斤/年,年经济收入 145 万元。

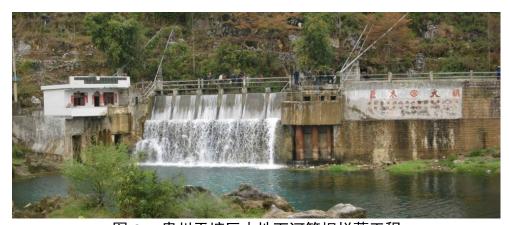


图 6-1 贵州平塘巨木地下河筑坝拦蓄工程

2.云南泸西盆地皮家寨岩溶大泉束流调压壅水工程

在泸西县皮家寨大泉,采用防渗束流和调压壅水措施,建成引水自流 灌溉工程,将泉口水位壅高 4.4 米,供水量 6 万立方米/日。既解决了泉口 下游 8000 亩耕地的排涝问题,又解决了 2000 亩水稻、1000 亩烤烟、1000 亩除虫菊的灌溉用水困难,还改善了泸西盆地东部边缘 25000 亩耕地的灌溉以及东沟沿线 15000 人的生活用水条件。2011 年,利用束流调压池建成了冷水鱼养殖场,年产值达到 100 多万元。

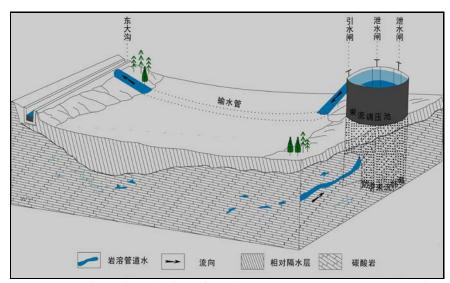


图 6-2 云南省泸西盆地岩溶大泉束流调压壅水开发示范工程

3.广西都安峰丛洼地表层岩溶带调蓄工程

在广西都安县三只羊示范区,在表层岩溶泉和坡面流汇集的山凹部位, 分散修建蓄水池 7 处,采用滴灌技术,满足果树和药材基地的用水需要, 建立了峰丛岩溶区立体生态农业模式和名特优果树基地,生态恢复与经济 建设相结合,当地居民人均年收入增加了 1200 多元。



图 6-3 广西都安县三只羊表层岩溶带调蓄水柜与药材基地

(七) 钙循环与岩溶生态系统及石漠化综合治理

1.地质背景制约岩溶环境脆弱性

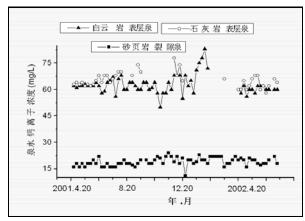
影响生态系统形成、演变的因素中,气候因素、水文因素是塑造生态系统的长期的、缓慢的驱动力,而地质、地貌因素则是生态系统得以存在和发展的载体和物质基础。碳酸盐岩是构建岩溶生态环境的物质基础,也是制约岩溶生态环境的重要因子。地质背景制约岩溶生态环境脆弱性主要表现在以下3个方面: 1. 土壤资源先天不足; 2. 水资源以地下水为主体,面临季节性干旱; 3. 植被立地条件差,生长、演化缓慢。



图 7-1 岩溶区碳酸盐岩风化成土速率十分缓慢、土壤层浅薄而分散

2.钙循环制约岩溶生态系统特征

与玄武岩、花岗岩相比具有一个共同的特征,碳酸盐岩具有明显富钙性,这就构成了岩溶生态系统的富钙性生长在岩溶地区的植被与非岩溶地区的植被相比,具有高的灰分及钙含量,而硅铝含量较低。



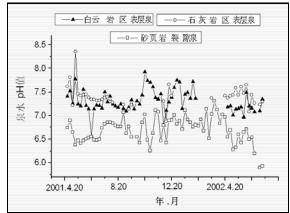


图 7-2 发育在石灰岩、白云岩、砂页岩区泉水钙离子含量、pH 值对比

3.石漠化综合治理技术途径-典型案例

石漠化发生不仅破坏了人类生存、生产的环境,更导致区域的人口贫困,制约了经济社会发展。根据中国西南岩溶生态系统特征、石漠化分布的特点,其综合治理的对策可归纳为:水是龙头,土是关键,植被(经济植物)是根本,区域生态经济双赢、农民脱贫致富是目标。在具体实施过程中特别强调因地制宜、分类指导。

(1)水是龙头——以岩溶流域为单元,地表、地下水综合开发利用

有效开发水资源需要注意以下几点:①关注植被覆盖率,提高岩溶表层带对水循环的调蓄能力,注意地头水柜、水窖建设要与岩溶表层带(泉)有机结合,充分利用坡面径流,尤其是地下水埋深大的岩溶区;② 充分利用有利的地质、地理条件,开发利用地下水,使水、土资源协调。同时关注地下水与土地利用之间的关系,防止地下水源的污染。

(2)土是关键——抢救土壤资源、遏制水土流失,提高土地生产力

抢救水土资源主要包括 3 个方面的内容: ①保持土壤总量、保护现有 耕地面积。采取的主要措施有坡改梯、砌墙保土、配套小型水利工程, 遏 制水土流失;② 提高和保持土壤有机质含量是土壤改良的重要措施,在自然状态条件,石灰土土层薄,但有机质含量、土壤肥力水平较高,有机质结构稳定、土壤肥力持久,团粒结构良好。保持和提高石灰土有机质含量也是对石灰土中若干营养元素有效态含量的提高也大有卑益;③提高石灰岩地区成土速率,凡是可以提高土壤环境中的 CO₂ 浓度、有机酸和土壤生物酶(尤其是碳酸苷酶)的浓度和活性的技术,均可促进碳酸盐岩的溶蚀可成土速率。

(3)植物(经济植物)是根本——物种选择、生物地球化学的研究是岩溶石 漠化区生态经济建设的途径

生长在岩溶环境中的植物物种长期对岩溶环境的适应,形成一批岩溶环境中特有的岩溶植被,岩溶植被具有 3 个基本的特征:富钙性、旱生性、石生性。对岩溶石漠化区具有良好适应的生态经济物种,包括饲料灌木木豆、山毛豆,木本任豆;药用藤本植物金银花、使君子等。目前该方面的研究、开发工作相对薄弱。

(4)生态经济双赢、农民脱贫致富是目标——因地制宜开展农村产业结构调整

西南岩溶生态系统特征、运行规律受到碳酸盐岩类型、结构、成分和组合特征的影响,如石灰岩、白云岩为物质基础构成的生态系统中的水循环及水资源赋存,土壤形成及土壤资源利用均存在差异。因此,因地制宜开展农村产业结构调整首先要根据西南岩溶发育的特征,结合区域自然、社会经济特点,石漠化状况,对西南岩溶石漠化区进行类型区划分,不同

- 的类型区具有不同结构特征,其农村产业结构调整也应有不同的措施方案。 对西南岩溶石漠化区农村产业结构调整的原则主要有以下考虑:
- ①重点突出,岩溶石漠化综合治理应明确重点区域,即综合治理的重点是轻度、中度石漠化区,是农村产业结构调整的重点区域,重度石漠化以封育为主;
- ②保土节水,改变以粮食生产的传统产业结构,重视发展经济灌木产业和草食畜牧业;
- ③因地制宜,主要有两层含义:其一,要根据岩溶环境特征,制定合理科学的规划,因地质、地貌和气候条件的差异形成不同的岩溶环境应区别对待、实施分类指导。其二,产业结构的具体内容和运作模式要与当地特点相吻合;
- ④可持续性,包括两层含义:其一是产业结构链的延伸、科技附加值的增值和生态友好;其二是根据岩溶环境的分散多样性特点,探索和推广"公司+基地+农户"等多种适应性的管理模式,使农村产业结构在生态、经济两方面都具有可持续性。

(八)碳酸盐岩油气储层研究进展

碳酸盐岩油气储层研究方面,以鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和塔里木盆地及南方下古生界碳酸盐岩中发育的古岩溶为研究对象,采用岩溶动力成因组合分析法、古水动力相关分析法、地球化学分析以及岩溶储层介质结构定量评价和预测等技术手段,建立了一套适合碳酸盐岩油气藏古岩溶研究方法,掌握了古岩溶与深岩溶的形成条件、影响控制因素及其与油气富集关系,识别出多种多样的岩溶储层成因类型,建立了碳酸盐岩岩溶储层形成与演化地质模式,实现了对油气聚集有利的岩溶储层预测,在岩溶型储层成因机理和空间分布规律研究方面取得了重要新进展,对碳酸盐岩油气勘探与开发具有重要的指导意义。

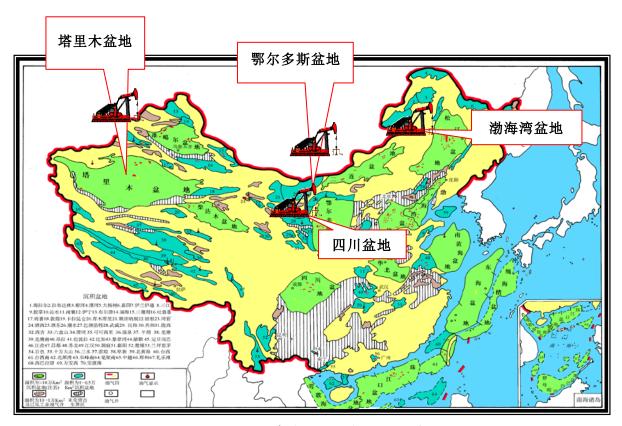


图 8-1 我国碳酸盐岩油气资源分布图

国内碳酸盐岩油气资源量 300×108t 油当量,主要分布在塔里木盆地、

四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地。中国碳酸盐岩储层主要以岩溶风化壳型和台地边缘礁滩型为主,白云岩储层和台内颗粒滩储层的油气田也陆续有发现,勘探开发潜力较大。中国南方由于构造复杂,成熟度高,因此要重视局部的封盖条件研究并加大对岩性地层圈闭、天然气田、深层油气田的勘探。古气候、古纬度控制了油气的生成和碳酸盐岩的发育,古构造及其演化控制了碳酸盐岩的储层规模及油气富集程度,沉积成岩作用控制了碳酸盐岩大油气田的储集性能,有利的生储盖配置是碳酸盐岩大油气田形成的重要保证。

1.建立了碳酸盐岩油气田古岩溶识别方法

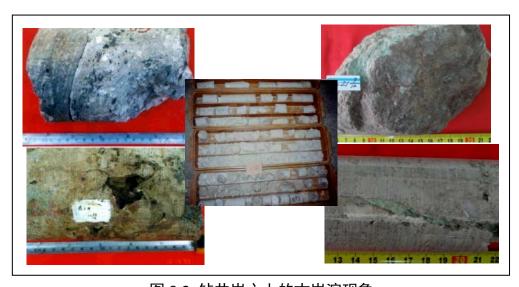


图 8-2 钻井岩心上的古岩溶现象

以碳酸盐岩中的古岩溶为研究对象,在古地质、古构造、古地形、古气候和古水文地质条件综合分析的基础上,运用地球化学分析、古地貌恢复和地球物理探测等综合方法,识别古岩溶;利用古岩溶形成条件、古岩溶地貌类型、古岩溶形态特征及深岩溶作用机制等现代岩溶理论研究古岩溶发育分布对油气储层的控制规律,对宏观的一微观的、裸露的一埋藏的、溶蚀的一充填的岩溶形态进行成因组合分析,系统研究古岩溶区域上分区

差异性、垂向上分带性、时代分期性,建立岩溶储层形成地质模型,揭示古岩溶对油气聚集的控制规律,指导油气勘探开发。

塔里木盆地在埋深 5000m 以下仍见有洞穴保存相对完整的洞穴(洞底—洞中—洞顶结构)

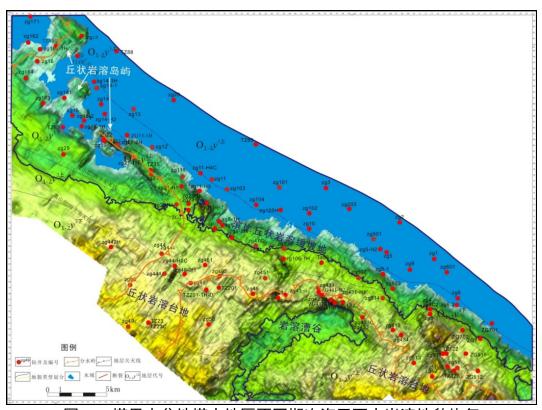


图 8-3 塔里木盆地塔中地区不同期次海平面古岩溶地貌恢复

2.完成了多项代表性研究项目

- (1)国家"973"计划项目课题"碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究"
- (2)国家自然科学基金项目"碳酸盐岩储层古岩溶模式及其对油气藏的控制机制研究"
 - (3)"九五"国家科技攻关项目"鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶特征研究"
- (4)中国石化科技攻关项目"塔河油田主体区碳酸盐岩缝洞型油藏古岩溶储集体发育特征研究"
 - (5)中国石油科技攻关项目"轮古潜山奥陶系古岩溶特征研究"

- (6)国土资源公益性行业科研专项经费项目"塔里木盆地古潜山奥陶系 风化壳油藏岩溶储层预测"
- (7)中国石油科技攻关项目"塔中 II 区鹰山组层间岩溶储层展布规律研究"
- (8)地质调查项目"雪峰山西侧地区海相油气地质调查"专题:"雪峰山西侧岩溶与白云岩储层的形成和分布规律研究"

3.取得了丰硕的研究成果

掌握了岩溶型油气储层发育与分布规律,为岩溶研究开拓了新领域。 分别建立了塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和黄骅坳陷奥陶系古岩溶发育演化 模式(发表于《石油勘探与开发》,2004),探索了碳酸盐岩古岩溶识别方 法,揭示了古岩溶对油气聚集的控制规律(发表于《地球学报》,2004,2006)。 2015 年获"一种地貌恢复方法和装置"专利(申请号 201510133761.9)、"一 种碳酸盐岩溶蚀过程模拟试验装置"专利(申请号 201510522347.7)。塔 河油田四区古岩溶研究成果为该区勘探部署和油藏二次开采提供了技术支 撑,促进增产 450 万吨。

(九) 岩溶塌陷调查评价与监测预警

岩溶塌陷是我国岩溶地区重要地质灾害类型,也是全球广泛分布的地质灾害问,据不完全统计,已有包括中国、美国、南非、意大利、法国、英国、德国、俄罗斯、波兰、捷克、南斯拉夫、比利时、土耳其、加拿大以及以色列等 23 个国家发生过岩溶塌陷。

中国地质科学院岩溶地质研究所一直将岩溶塌陷的防治研究作为重要研究领域,先后完成了40多项与之有关的项目,2010年启动重点地区岩溶塌陷1:5万综合地质调查项目,现已完成2.7万平方千米的调查工作,在广州、湖南宁乡、安徽铜陵、广西来宾建成岩溶塌陷监测示范站,建成了中国地质调查局-中国地质科学院岩溶塌陷防治重点实验室,初步形成了岩溶塌陷调查、监测和评价技术方法体系。

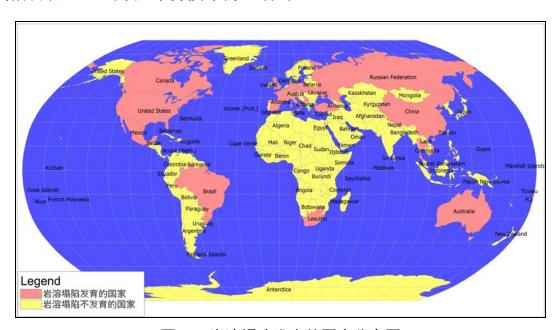


图 9-1 岩溶塌陷发育的国家分布图

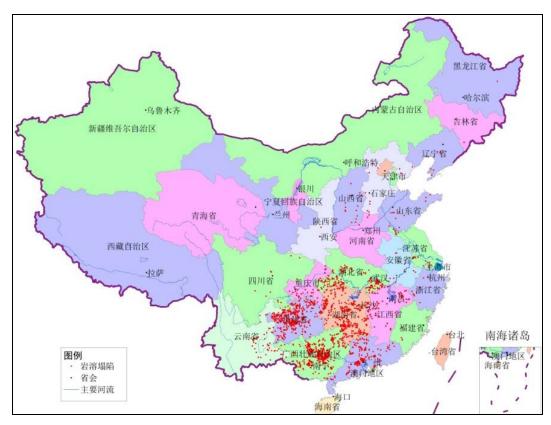


图 9-2 全国岩溶塌陷分布图(2014)

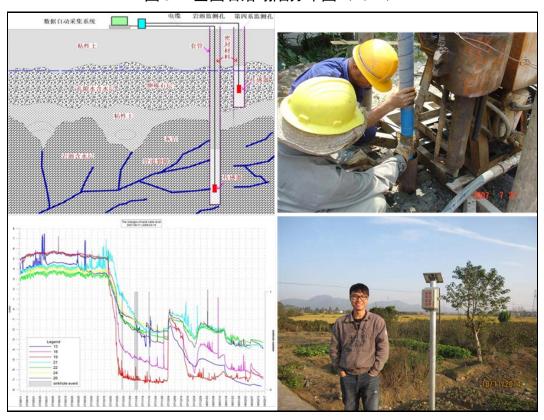


图 9-3 岩溶塌陷动力监测示范



图 9-4 岩溶塌陷分布式光纤监测示范站

(十) 西南岩溶地区水文地质环境地质调查

2003 年至 2015 年,中国地质调查局联合西南 8 省(区、市)地矿局、科研院所和大专院校等 30 多家单位,开展了"西南岩溶地区地下水与环境地质调查综合研究"、"西南岩溶石山地区地下水及环境地质调查"、"西南岩溶地区水文地质环境地质调查"和"南方岩溶水文地质环境地质综合调查与整治示范",完成 1:5 万水文地质调查面积 23 万平方千米(图 1),综合地球物理探测 60000 点,岩溶洞穴探测 60000 米,水文地质钻探 58000米,共投入经费 4.8 亿元。查明了工作区地下水开发利用条件,制定了岩溶水资源开发利用方案和地质环境综合整治区划。选择典型地段进行了岩溶地下水开发利用和生态环境综合治理示范,为西南岩溶干旱缺水区水资源合理利用、石漠化治理和生态环境保护提供了技术支撑。在 2009-2011 年国土资源部组织的抗旱找水打井中,利用 1:5 万水文地质调查成果,在已查明的富水区块和地下水径流带快速定井,勘探成井率达到 85%以上,成井 2348 眼,成功解决了 520 万人饮水困难。

1.调查发现西南岩溶地区有地下河 2763 条,枯季径流量 470 亿立 方米/年,具有较大的水资源开发利用潜力

西南岩溶地区,由于碳酸盐岩中溶蚀作用强烈,导致大气降水和地表水快速渗漏到地下,地表水系不发育,地下则发育了 2763 条地下河,总长度 13493 千米,汇水面积 30 万平方千米,枯季径流量达 470 亿立方米/年,相当于黄河的径流量。

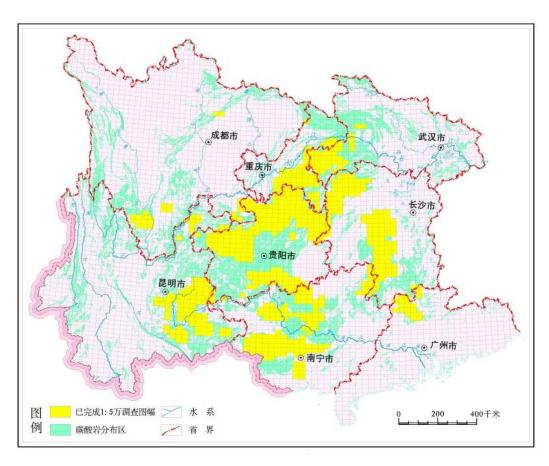


图 10-1 西南岩溶地区 1:5 万水文地质环境地质调查分布图

2.对西南岩溶地区地下水资源量进行了评价,得出岩溶地下水开 发利用潜力为 517 亿立方米/年

表 10-1 西南岩溶地区地下水开发利用潜力

| X 10 1 HINGHISE 1 (1) (1) (1) | | | |
|-------------------------------|--|--|--|
| 剩余可开发利用量(亿立方米/年) | | | |
| 85.86 | | | |
| 122.84 | | | |
| 152.55 | | | |
| 59.67 | | | |
| 15.76 | | | |
| 4.36 | | | |
| 61.47 | | | |
| 14.87 | | | |
| 517.38 | | | |
| | | | |

调查区岩溶地下水天然资源量 1763 亿立方米/年,可开发利用量为615 亿立方米/年,现开采量 98 亿立方米/年,开采程度为 16%。岩溶地下水开发利用潜力较大,达 517 亿立方米/年(表 3-1、图 3-2)。

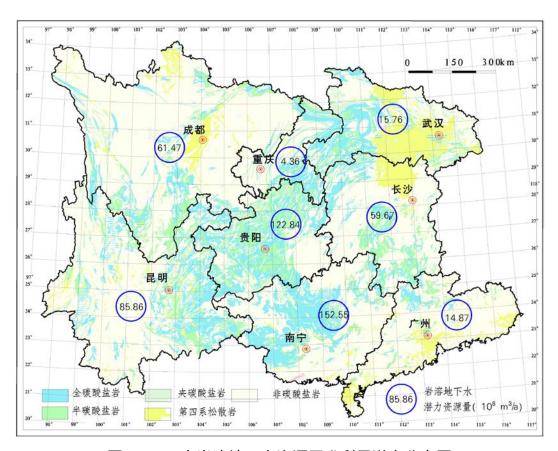


图 10-2 西南岩溶地下水资源开发利用潜力分布图

3.西南岩溶区干旱缺水严重,有 6637.6 万人存在饮水不安全问题。 降水时空分布不均、岩溶强烈发育导致地表水快速渗漏和人类过度垦殖是造成干旱灾害的主要原因

西南岩溶地区旱灾发生频率高,仍有 6637.6 万人存在饮水不安全问题, 缺水人口 1947 万人,缺水耕地 8662.9 万亩(表 3-2)。

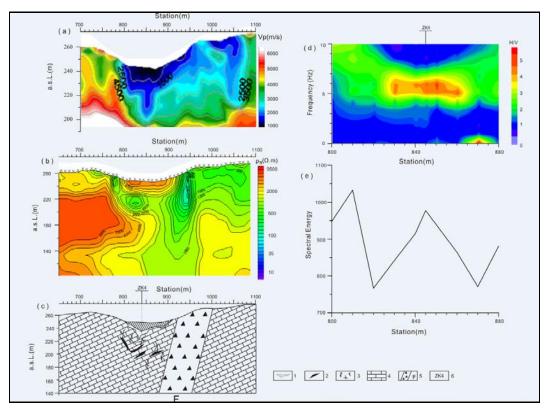
表 10-2 西南岩溶地区干旱缺水状况

| 省(区、市) | 饮水不安全人口 (万人) | 缺水人口 (万人) | 缺水耕地 (万亩) |
|--------|-----------------|--------------|--------------|
| 云 南 | 2702.0 | 965.0 | 4740.0 |
| 贵州 | 1299.8 | 686.3 | 1461.4 |
| 广西 | 1779.6 | 104.1 | 643.1 |
| 湖南 | 767.8 | 149.0 | 1370.0 |
| 湖北 | 88.4 | 42.6 | 448.4 |
| 合 计 | 6637.6 | 1947.0 | 8662.9 |

4.查明了岩溶地下河、岩溶大泉、表层岩溶水和蓄水构造带中地下水的开发利用条件,建议采取堵洞蓄水、暗河截流、大泉壅水、钻井、大口井、斜井等多种开发方式,提出了岩溶水资源有效开发利用与生态经济发展相结合模式.

(十一) 地球物理探测技术进展

"三定原则"应用于岩溶区地下含水地质结构和构造的探测和识别。综合水文地质模式与合适的物探方法相结合,在物探方法上解决定位、定深和定性问题。定位即提高物探方法的横向分辨率;定深即满足一定勘探深度下,提升纵向的分辨率;定性即对有意义的物探异常,判别它的含水属性。

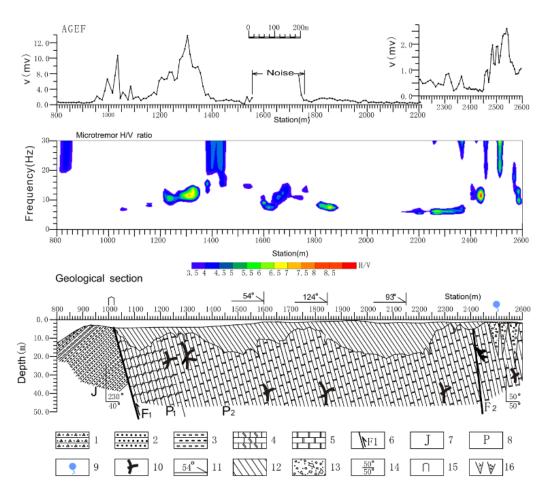


图例 1 第四系; 2 充水岩溶管道; 3 裂隙; 4 灰岩; 5 断层; 6 钻孔。

综合地球物理资料和地质推断解释剖面(泰国普特泉)。

- 1.音频大地电场法: 侏罗系砂岩、细砂岩呈低电位、宽缓的异常特征; 侏罗系砂岩与灰岩接触呈低/高电位台阶状异常; 而浅层溶沟、溶槽或地下 岩溶管道则表现为"V"型的电位异常特征。
- 2.微动 H/V 谱比法: 侏罗系砂岩、细砂岩,H/V 频谱幅值低,变化不明显; 而充水溶洞或岩溶破碎带,则表现为点状或圈闭高值异常,频率越低,

埋藏相对越深。



图名(由上至下) (a)微动法谱能量曲线 (b)微动法 H/V 谱比等值线图 (c)推断地质解释剖面

图例: 1 石英砂岩; 2 钙质粉砂岩; 3 砂岩; 4 细砾岩; 5 白云质灰岩; 6 白云岩; 7 断层; 8 侏罗系; 9 普特泉; 10 充水裂隙或岩溶管道; 11 测线方位; 12 第四系; 13 砂、砾石等充填物; 14 产状; 15 公路; 16 溶沟或溶槽。

(十二) 岩溶地下水示踪技术

1.简介

岩溶地下水示踪技术广泛应用于我国的水文地质调查工作当中,它是研究人工示踪剂在地下水中运动规律的一种方法。利用地下水示踪试验的结果可确定地下水的流速、流向、流量、补给来源和地下水的渗透系数,圈定地下汇水区的边界范围和各含水层之间的水利联系等等,以及在区域性水资源评定、地下水脆弱性评价、确定水库渗漏地段时可提供定性、半定量或定量的依据,可产生较大的社会和经济效益。

2.目的与作用

通过以岩溶流域为单元,选择不同类型的典型岩溶地下河流域,开展不同类型的地下水示踪技术研究与试验,分析研究示踪剂在岩溶地下河运移过程中呈现出不同的动态变化规律,总结相关示踪试验结果,为岩溶区地下河流域水文地质调查、水文地质特征研究、岩溶水文地质建模、岩溶区地下水脆弱性提供技术支撑,为岩溶区地下水资源的保护和利用提供相关依据。

3.应用现状

近年来国内外岩溶地下水示踪技术有较大的进展,已经从传统的简单 的地下水连通与否的研究,发展到利用示踪曲线来分析地下水过水通道的 展布形状,以及计算地下水的流量和示踪剂回收率等。

(1)应用领域

自 100 多年前地下水示踪技术在美国开始应用以来,示踪试验已突破

传统意义上只用于证实水点之间的连通,已被广泛地应用于地质和水文地质研究领域,如地下河流域面积的确定,了解含水层的性质,土壤中溶质的传输过程,水流流量的精确测定,地下水的流速与流向,水库渗漏途径的监测等。

(2)示踪剂

用于示踪试验的示踪剂也日益多样化,包括天然与人工的,稳定与非稳定的,物理与化学的及生物与指标示踪剂。

(3)监测技术

地下水示踪试验的自动化程度在不断提高,从传统的野外人工采样至室内分析,已发展为全程在线实时监测示踪剂,这也将成为当今国际水文地质研究示踪试验发展的重要方向和趋势。野外全自动荧光光度计具有多路激发、多路吸收特定波长的光的特点,可同时测量多种示踪剂,并且互不干扰。所有装置整合内置于探头中,携带方便,检出限高,对荧光素等示踪剂检出限可达 0.01 μg/L; 此外仪器对监测数据处理方便,内存大,可实现长时间在线监测,已大量用于地表水和钻孔的地下水示踪研究领域。

4.应用地区

"十二五"期间,根据我所地质调查项目任务中相关要求,围绕典型岩溶流域地质调查与地下水开发利用示范中存在的疑点布置示踪工作,在桂林海洋-寨底,贵州荔波、大小井、织金,重庆武隆鱼泉,以及境外地调项目《刚果(金)SICOMINES铜钴矿水文地质补充调查与研究》中开展示踪试验二十余次,同时开展新示踪剂、新示踪技术和测试方法的应用研究。

此外,针对社会需求,我所在岩溶区确定和评价水库渗漏等方面开展

了大量了工作,承担的横向项目有《龙江拔贡水电站改扩建工程库坝区岩溶专题研究》、《云南永德县大雪山水库库盆渗漏水文地质勘测研究》等。通过岩溶地下水示踪试验,结合岩溶水文地质、工程地质问题调查,可基本查明水库库内的岩溶发育特征、岩溶水文地质条件及岩溶渗漏问题,对工程地质条件给出明确结论,为工程设计方案、工程实施处理措施提供岩溶水文地质依据。

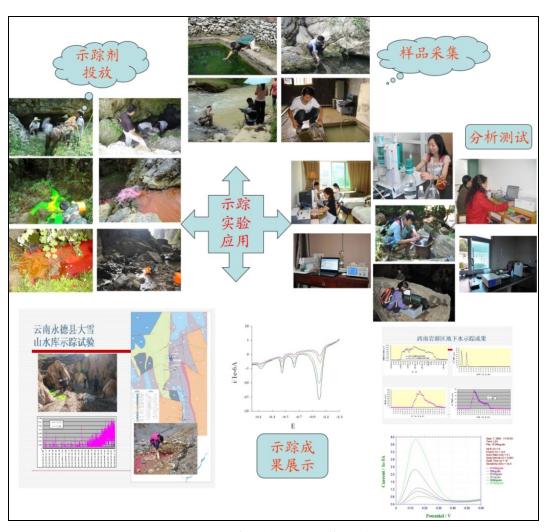


图 12-1 野外示踪试验现场工作及成果展示