

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.03.001

引用格式:姜月华,周权平,倪化勇,等. 长江经济带环境地质调查研究进展[J]. 华东地质, 2023, 44(3): 239-261. (JIANG Y H, ZHOU Q P, NI H Y, et al. Progress of environmental geological investigation and research in the Yangtze River Economic Zone[J]. East China Geology, 2023, 44(3): 239-261.)

## 长江经济带环境地质调查研究进展

姜月华<sup>1,2</sup>, 周权平<sup>1,2</sup>, 倪化勇<sup>3</sup>, 陈立德<sup>4</sup>, 程和琴<sup>5</sup>, 雷明堂<sup>6</sup>, 葛伟亚<sup>1,2</sup>, 马 腾<sup>7</sup>,  
施 斌<sup>8</sup>, 程知言<sup>9</sup>, 段学军<sup>10</sup>, 苏晶文<sup>1,2</sup>, 朱锦旗<sup>11</sup>, 修连存<sup>1</sup>, 向 芳<sup>12</sup>, 朱志敏<sup>3</sup>,  
冯乃琦<sup>13</sup>, 谢忠胜<sup>3</sup>, 谭建民<sup>4</sup>, 彭 轲<sup>4</sup>, 郭盛乔<sup>11</sup>, 伏永朋<sup>4</sup>, 任海彦<sup>14</sup>, 孙建平<sup>15</sup>,  
杨 强<sup>15</sup>, 朱继良<sup>15</sup>, 王东辉<sup>16</sup>, 李明辉<sup>16</sup>, 刘广宁<sup>4</sup>, 范晨子<sup>17</sup>, 王新峰<sup>15</sup>, 史玉金<sup>18</sup>,  
王寒梅<sup>18</sup>, 董贤哲<sup>19</sup>, 陈焕元<sup>20</sup>, 郝社峰<sup>11</sup>, 邓娅敏<sup>7</sup>, 李 云<sup>1,2</sup>, 肖则佑<sup>21</sup>, 杨 海<sup>1,2</sup>,  
刘 林<sup>1,2</sup>, 金 阳<sup>1,2</sup>, 张 鸿<sup>1,2</sup>, 梅世嘉<sup>1,2</sup>, 齐秋菊<sup>1,2</sup>, 吕劲松<sup>1,2</sup>, 侯莉莉<sup>1,2</sup>,  
陈 刚<sup>1,2</sup>, 陈 孜<sup>1,2</sup>, 贾正阳<sup>1,2</sup>

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;2.自然资源部流域生态地质过程重点实验室,江苏 南京 210016;3.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川 成都 611734;4.中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北 武汉 430205;5.华东师范大学,上海 200241;6.中国地质科学院岩溶地质研究所,广西 桂林 541004;7.中国地质大学(武汉),湖北 武汉 430074;8.南京大学,江苏 南京 210023;9.江苏省地质矿产勘查局,江苏 南京 210018;10.中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏 南京 210008;11.江苏省地质调查研究院,江苏 南京 210018;12.成都理工大学,四川 成都 610059;13.中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所,河南 郑州 450006;14.南京农业大学,江苏 南京 210095;15.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071051;16.中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081;17.国家地质实验测试中心,北京 100037;18.上海市地质调查研究院,上海 200072;19.浙江省水文地质工程地质大队,浙江 宁波 315012;20.浙江省核工业二六二大队,浙江 湖州 313000;21.江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队,江西 赣州 341001)

**摘要:** 中国地质调查局近年组织实施了“长江经济带地质环境综合调查工程”,采用环境地质调查、评价、监测以及专题研究和综合研究相结合等方法,取得了一批重要的成果和认识:① 构建了长江经济带地质资源环境综合信息管理与服务系统,系统梳理了长江经济带与重点区域的资源环境条件和重大地质问题,提出了相关建议;② 提出长江续接贯通时间是在距今 75 万年的早、中更新世之交的新认识;③ 探索形成流域 5 个系列生态修复示范关键技术和方法体系;④ 构建长江流域重大水利工程与地质环境效应研究方法体系,创建一套多模态传感器系统,提出重大水利工程对地质环境影响的新判断;⑤ 探索建立流域尺度地球关键带调查评价监测理论和方法体系;⑥ 创新应用“光纤技术”监测地面沉降和地裂缝、长江崩岸以及城镇地下空间开发利用扰动取得突破,相关技术引领光纤监测技术发展;⑦ 自主研发机载航空高光谱仪,建立航空高光谱遥感综合调查技术方法;⑧ 探索形成流域 3 种尺度资源环境承载能力和 8 种国土空间开发利用适宜性评价方法体系;⑨ 调查研究成果在支撑服务长江经

\* 收稿日期:2023-07-10 修订日期:2023-08-31 责任编辑:谭桂丽

**基金项目:** 中国地质调查局“长江经济带地质环境综合调查工程(编号:工批 2015-03-02, NO0531, NO0802)”、“长江经济带地质资源环境综合评价(编号:DD20190260)”、“长三角南京—上海—温州城镇规划 1:5 万环境地质调查(编号:DD20160246)”、“长江经济带暨长三角一体化发展区资源环境承载力监测评价(编号:DD20221728)”、国家自然科学基金(编号:41972101, 41572093)和国家重点研发计划“岩溶发育特征的快速探测与精细刻画技术和装备研发(编号:2022YFC3705001)”项目联合资助。

**第一作者简介:** 姜月华,男,1963 年生,研究员,博士,主要从事环境地质和水文地质工作。Email:316664105@qq.com。

经济带国土空间规划、流域生态环境保护和修复、支撑服务新型城镇化战略、重大工程规划建设、地质灾害防治、脱贫攻坚和国家地下战略储油储气库基地建设等方面均得到了广泛应用,形成 21 支稳定的环境地质调查专业团队。

**关键词:** 长江经济带;长江流域;环境地质;水文地质;工程地质;地质环境;地质调查;资源环境承载能力

**中图分类号:** P642;X14

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2023)03-239-23

长江经济带覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、四川、重庆、云南、贵州等 11 个省(市),横跨我国东中西三大地势阶梯。长江经济带面积约 204.89 万  $\text{km}^2$ ,占全国陆域面积的 21.33%,人口 6.02 亿,占全国人口数量的 43%,GDP 总量 45.78 万亿,占全国总量的 46.02%(2019 年)<sup>[1]</sup>,是中国综合实力最强、战略支撑作用最大的区域之一。长江经济带人口规模和经济总量占据全国“半壁江山”,生态地位突出,发展潜力巨大。

推动长江经济带高质量发展,打造中国经济新的支撑带,是党中央、国务院作出的重大战略部署。长江经济带发展战略的实施,对地质调查工作提出了新的更高要求。2016 年 3 月 25 日,中国共产党中央委员会审议通过《长江经济带发展规划纲要》<sup>[2]</sup>,提出大力保护长江生态环境、加快构建综合立体交通走廊、创新驱动产业转型升级、积极推进新型城镇化等重大任务。为支撑服务长江经济带发展战略,自然资源部中国地质调查局部署实施了“长江经济带地质环境综合调查工程”。该工程以支撑服务长江经济带黄金水道功能提升、立体交通走廊建设、产业转型升级、新型城镇化建设、绿色生态廊道打造等重大任务为目标,以研究解决影响和制约长江经济带发展的重大地质问题为导向,在“4 个经济区”(长三角、皖江、长江中游和成渝)、“3 条发展线”(沿江、沿海和沿高铁线)和“4 个重点区”(重要城镇区、重大工程区、重大问题区和重要生态区)部署开展了地质环境综合调查工作<sup>[3-4]</sup>。工程实施过程中围绕长江贯通时限和演化、流域重大水利工程与地质环境多元响应、流域地球关键带监测、流域生态修复示范关键技术、流域资源环境承载能力评价、光纤监测地下深部地层变形和机载高光谱探测环境变化技术研发等重大科学技术问题进行了相应研究和探索,取得了系列进展和创新成果,这些成果在支撑服务长江经济带国土空间规划、支撑服务流域生态环境保护和修复、支撑服务新型城镇化战略、重大工程规划建设、地质灾害防治、脱贫攻坚和国家地下战略储油储气库基地建设等方面得到了广泛应用。本文简要阐述近年调查研究取

得的进展,同时对下一步地质工作提出相关建议。

## 1 研究区概况

长江经济带地势西高东低,地貌与地质情况复杂,资源环境条件和重大地质问题与地貌及地质背景密切相关<sup>[5-10]</sup>。长江经济带可划分出东部低山平原、东南低中山地、西南中高山地和青藏高原 4 个地貌区。长江经济带地层发育齐全,自太古界至新生界第四系均有出露<sup>[11-15]</sup>。

长江经济带地质构造演化历史复杂<sup>[16-18]</sup>(图 1),太古宙—古元古代为陆块基底形成时期,中元古代—新元古代中期为超大陆裂解→三大洋形成发展→大陆边缘多岛弧盆系形成→转化为造山系,新元古代晚期—中三叠世为华北和扬子等陆块陆缘增生及其彼此之间聚合时期,晚三叠世以来主要受到西南印度板块与欧亚板块陆陆碰撞造山导致的青藏高原物质向东挤出和东部太平洋板块向西俯冲的双重影响<sup>[19-21]</sup>。

长江经济带水文地质和工程地质条件复杂<sup>[7,9]</sup>(图 2)。地下水类型包括孔隙水、岩溶水、裂隙水和孔隙裂隙水等。碎屑岩类裂隙水—孔隙水主要分布于四川盆地,基岩裂隙水分布于广大丘陵山区,岩溶裂隙溶洞水主要分布于西部的云贵高原,松散岩类孔隙潜水及承压水主要分布于长江三角洲平原、鄱阳湖平原及江汉和洞庭湖平原的第四系含水层中。岩土体按介质和结构特征划分为完整坚硬的基岩类、半胶结的岩类、松散土类以及特殊土等。

长江经济带地貌、地质构造、水文地质和工程地质条件复杂多变且上中下游差异显著,因此导致的区域活动断裂、岩溶塌陷、滑坡崩塌泥石流灾害、地面沉降等重大地质问题也呈现不同的分布特征<sup>[6-9,22-27]</sup>。

## 2 研究进展

### 2.1 夯实了解决资源环境和基础地质问题的基础

(1)大幅提升了长江经济带水工环地质调查工

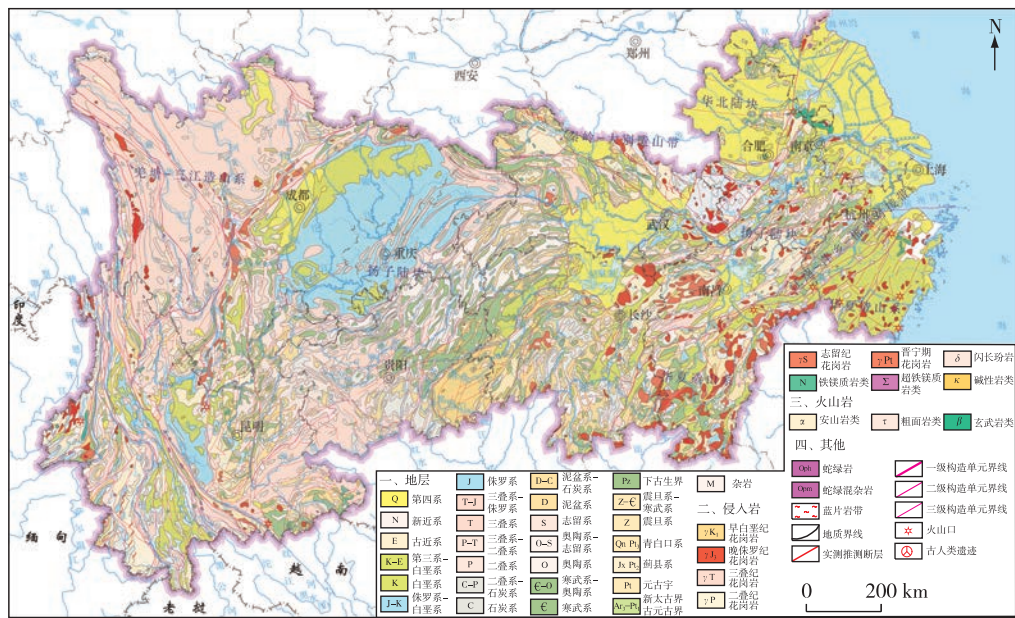
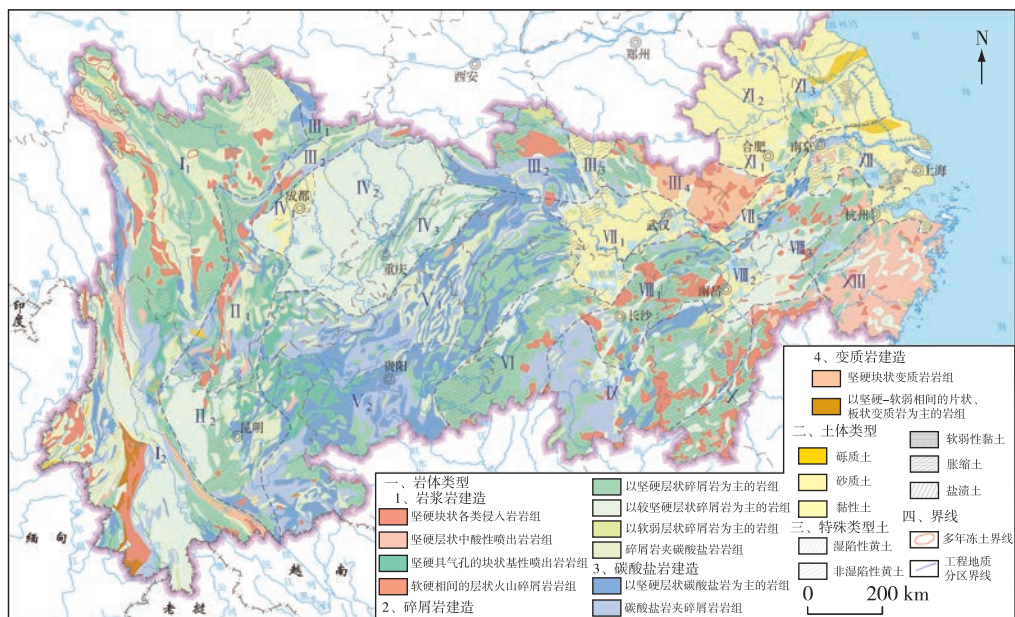


图 1 长江经济带地质构造图

Fig. 1 Geological tectonic map of the Yangtze River Economic Zone



I. 横断山脉工程地质区(I<sub>1</sub>. 川西高原山地工程地质亚区;I<sub>2</sub>. 横断山脉工程地质亚区);II. 川西南、滇中高山与高原工程地质区(II<sub>1</sub>. 川滇南北构造带山地工程地质亚区;II<sub>2</sub>. 滇中高原工程地质亚区);III. 秦岭大别山山地工程地质区(III<sub>1</sub>. 秦岭中山山地工程地质亚区;III<sub>2</sub>. 大巴山武当山中低山地工程地质亚区;III<sub>3</sub>. 南阳盆地工程地质亚区;III<sub>4</sub>. 大别山低山丘陵工程地质亚区);IV. 四川盆地工程地质区(IV<sub>1</sub>. 川西冲洪积平原工程地质亚区;IV<sub>2</sub>. 川中低山丘陵工程地质亚区;IV<sub>3</sub>. 川东低山丘陵工程地质亚区);V. 云桂川、鄂西岩溶高山高原工程地质区(V<sub>1</sub>. 鄂西、黔北中低山岩溶工程地质亚区;V<sub>2</sub>. 云贵高原岩溶工程地质亚区);VI. 湘西低山丘陵工程地质区;VII. 江汉与长江下游湖积冲积平原工程地质区(VII<sub>1</sub>. 江汉湖积冲积平原工程地质亚区;VII<sub>2</sub>. 长江下游湖积冲积平原工程地质亚区);VIII. 华东低山丘陵工程地质区(VIII<sub>1</sub>. 湘赣边区低山丘陵工程地质亚区;VIII<sub>2</sub>. 鄱阳湖湖积冲积平原工程地质亚区;VIII<sub>3</sub>. 浙皖边区低山工程地质亚区);IX. 湘赣粤低山丘陵工程地质区;X. 闽赣粤低山丘陵工程地质区;XI. 黄淮海平原工程地质区(XI<sub>1</sub>. 嵩山伏牛山及其山麓冲洪积平原工程地质亚区;XI<sub>2</sub>. 大别山北麓岗地及冲积洪积平原工程地质亚区;XI<sub>3</sub>. 苏北黄淮冲积平原工程地质亚区);XII. 长江三角洲工程地质区;XIII. 闽粤中低山工程地质区

图 2 长江经济带工程地质图

Fig. 2 Engineering geological map of Yangtze River Economic Zone



作程度,基本查明长江经济带资源环境条件和重大地质问题,为长江经济带绿色生态廊道生态环境保护、湖泊湿地生态环境修复、地质灾害防治和工程规划建设提供了基础地质数据。

完成 1:50 000 环境地质调查面积 107 488 km<sup>2</sup>

(图 3),形成首批国家基础性和公益性 1:50 000 环境地质调查标准图幅,共提交 1:50 000 环境地质、水文地质、工程地质和灾害地质调查 241 个标准图幅及其说明书,这些图件成果显著提升了长江经济带 1:50 000 水工环地质调查工作程度。

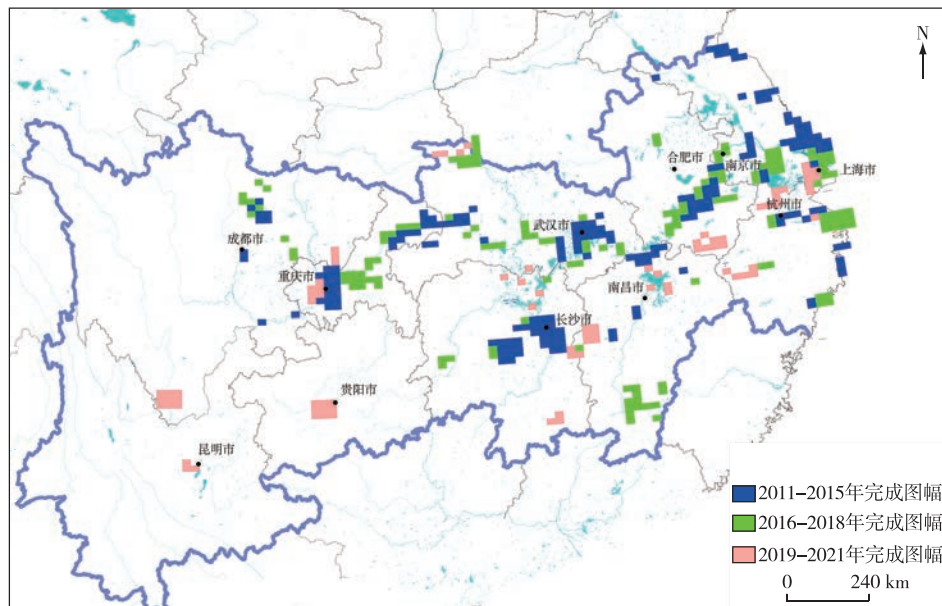


图 3 长江经济带 1:5 万环境地质、水文地质、工程地质和灾害地质调查工作程度图

Fig. 3 Work degree of 1:50 000 environmental geology, hydrogeology, engineering geology and disaster geology survey in the Yangtze River Economic Zone

(2)提出长江续接贯通时间是在距今 75 万年的早、中更新世之交,初步解开长江起源与演化“世纪谜题”。长江演化史研究始于 1907 年<sup>[28]</sup>,之后百余年,众多中外科学家对“长江何时东流”这一科学问题却一直存在重大争议,有前古近纪<sup>[29]</sup>、古近纪<sup>[30-31]</sup>、中新世或渐新世/中新世之交<sup>[32-34]</sup>、晚上新世—早更新世<sup>[35]</sup>、更新世<sup>[36-39]</sup>、早更新世<sup>[40-42]</sup>、早更新世晚期<sup>[43]</sup>、中更新世<sup>[44-45]</sup>、中更新世晚期<sup>[46]</sup>等多种观点。本次研究创新应用冲积扇成因理论、300 余个高精度钻孔构成的联合沉积相剖面对比法、夷平面和河流阶地分析、高精度定年技术、阴极发光、电子探针、扫描电镜和遥感等方法,从流域视角剖析了长江中下游沿江砾石层成因、岩相古地理特征、长江上游三峡夷平面和阶地特征以及云南石鼓长江大拐弯成因(图 4),提出长江续接贯通时间是在距今 75 万年的早、中更新世之交及未贯通之前长江下游存在“古扬子江”的新认识,初步解开长江起源与演化“世纪谜题”。

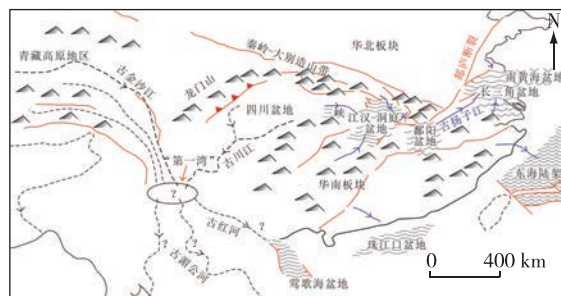


图 4 早更新世晚期河流和盆地分布示意图(据郑洪波等<sup>[34]</sup>修改)

Fig. 4 Distribution of rivers and basins during the late Early Pleistocene (modified by ZHENG H B et al<sup>[34]</sup>)

(3) 建立重要城市群和城市重点规划区三维地质结构模型,为城镇国土空间规划提供了基础地质依据。基本查明长江经济带、长三角、苏南、江苏沿海、皖江、长株潭、长江中游和成渝 7 个重要经济区

(城市群)以及宁波、成都、南京、安庆、上海、杭州、武汉、金华、温州、南通、丹阳、广安等 15 个城市地质

资源环境条件和重大地质问题<sup>[7]</sup>,在城镇重点规划区建立了三维地质结构模型(图 5)。

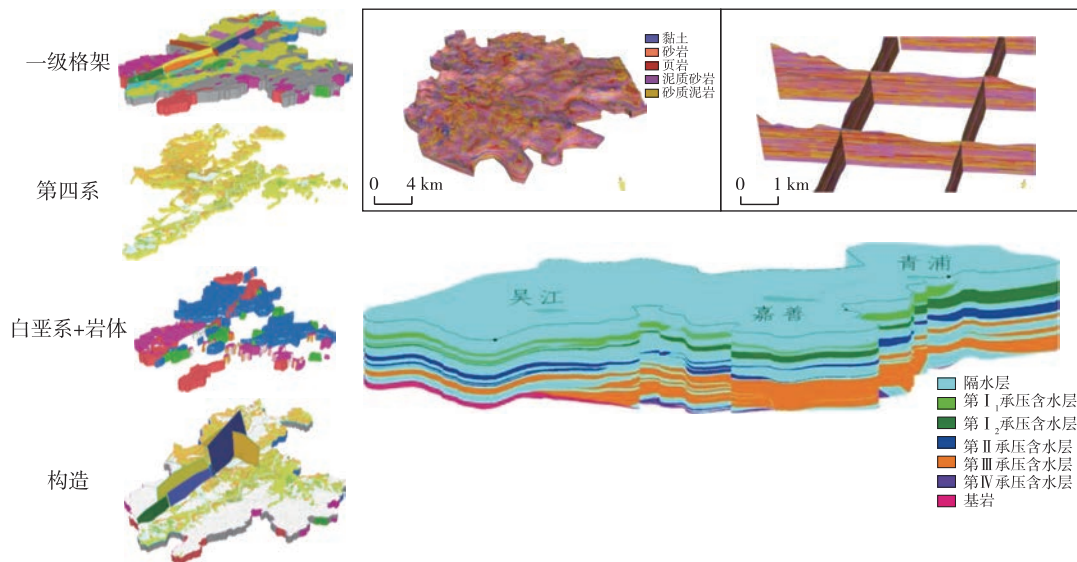


图 5 重要城市群和城市重点规划区三维地质结构模型

Fig. 5 3D geological structure models of important urban agglomerations and key urban planning areas

(4)构建了长江经济带地质资源环境综合信息管理与服务系统,为长江经济带 11 个省(市)自然资源部门地质环境信息共享、中国地质调查局“地质云”建设提供支撑。采用 ArcGIS、MapGIS 双平台

研发,构建长江经济带地质资源环境综合信息管理与服务系统<sup>[7]</sup>(图 6),实现工程、项目和子项目地质数据存储、管理、查询、浏览、统计与三维可视化等方面服务。



图 6 长江经济带地质资源环境综合信息管理与服务系统

Fig. 6 Integrated information management and service system of the geological resources environment in the Yangtze River Economic Zone

## 2.2 促进了科学理论创新和技术方法进步

(1)探索形成流域 5 个系列生态修复示范关键

技术、方法体系并取得应用成效,为长江经济带尾矿废石资源化、减量化、盐碱地改良、湿地和污染场

地修复和生态保护提供技术支撑。

长江流域曾有 40 余万家化工企业围江,沿江生态环境较差<sup>[47]</sup>。长江经济带曾有 5.4 万多座矿山,累计损毁土地面积约 11 万  $\text{hm}^2$ ,工矿废弃地面积约 23 万  $\text{hm}^2$ ,固体废弃物存量达 84 亿 t,年排放废水超过 27 亿  $\text{m}^3$ ,尾矿年排放 2 亿 t,年利用 0.2 亿 t,废石年排放 8 亿 t,年利用 2.0 亿 t<sup>[26]</sup>,生态环境保护结构性、根源性和趋势性压力尚未根本缓解,需要持续打好污染防治攻坚战,急需开展生态修复示范和资源化、减量化利用。

本次工作组织开展了废弃矿山、滨海盐碱

地、长江沿岸湿地、沿江化工污染场地和重金属污染场地调查评价与生态修复示范<sup>[7,48]</sup>(图 7),形成 5 个系列生态修复示范关键技术和方法体系,取得积极进展和应用成效,相关示范案例成果被收入中国地质调查局编制的第一批《地质调查支撑生态保护修复案例集》(2021)<sup>[49]</sup>。其中,云南安宁磷矿山生态修复关键技术获 2022 年中国岩石力学与工程学会矿山修复专委会十大“矿山生态修复优秀创新技术”荣誉;滨海盐碱地改良技术获 2021 年江苏省地质学会科学技术一等奖。

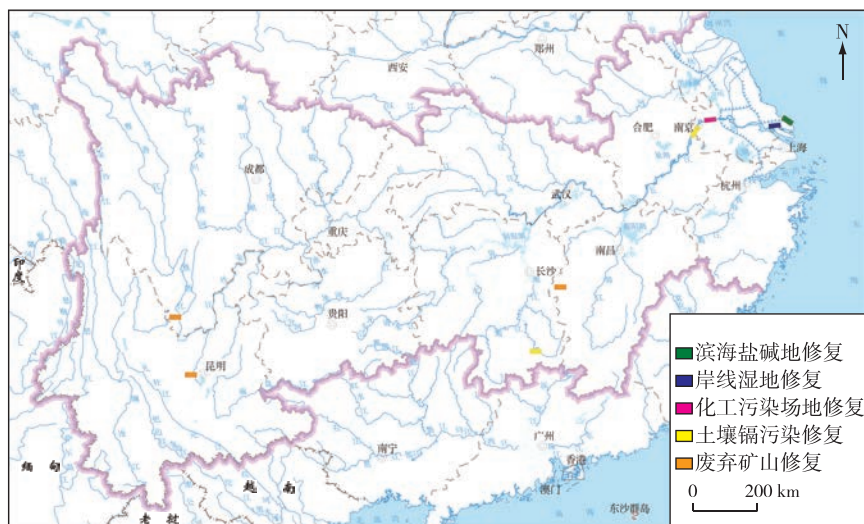


图 7 长江经济带生态修复示范区分布位置图

Fig. 7 Distribution of ecological restoration pilot areas in the Yangtze River Economic Zone

(2)构建大流域人类活动与地质环境效应研究方法体系,在潮区间变动、河槽冲刷、河床微地貌变化等研究方面取得重要进展,为长江岸滩防护和修复、沿岸防洪、长江大桥主桥墩维护等提供技术支撑。

自 20 世纪 60 年代以来,长江流域兴建了以三峡大坝为核心的一系列拦、蓄、引、调大型水利工程,这些工程不可避免地对长江中下游干流河槽和岸线冲刷产生影响<sup>[50-53]</sup>,从而威胁过江通道、港口码头和水厂等重要基础设施安全<sup>[54-57]</sup>。河槽冲淤演变事关岸线资源开发与利用以及两岸地区人民生命财产安全。针对这些影响和威胁,如何应对是当前有关政府部门、学术界与公众关注的焦点和难点<sup>[58-59]</sup>。鉴于长江中下游干流水砂条件的改变以及岸线崩塌有趋于发展严重的态势,本次工作构建

长江流域重大水利工程与地质环境效应研究方法体系,创建一套多模态传感器系统(图 8),相应成果被收入中国地质调查编制的《百项技术》一书,实现长江干流陆上和水下一体化水动力、沉积和地貌特征等同步或准同步测量与数据采集,获得一批最新原始数据。研究发现,长江干流河槽冲刷强烈,岸线窝崩、条崩发育。悬沙和床沙粗化,河床阻力下降,发育侵蚀型链珠状沙波,长江大桥主桥墩冲刷严重。潮区界显著上移,潮区界变动河段地貌发生重要变化。研究提出重大水利工程对长江中下游岸滩和河槽地质环境影响新判断和长江中游旱涝灾害防治地学新建议<sup>[7,52]</sup>。

(3)探索建立流域尺度地球关键带调查评价监测理论和方法体系,提升了我国地球关键带研究影响力。



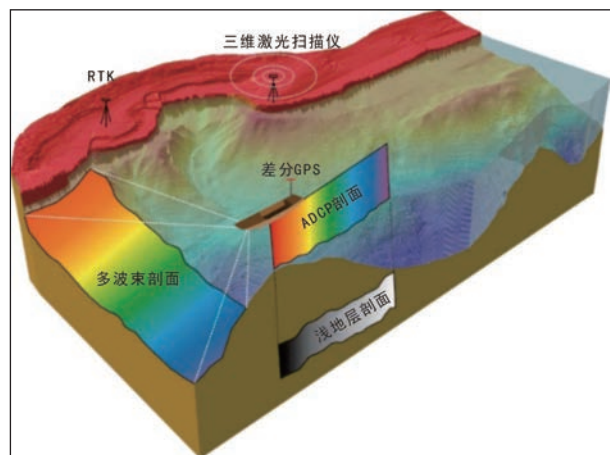


图 8 多模态传感器系统工作示意图

Fig. 8 Schematic diagram of multi-mode sensor system

2001年,美国国家科学研究委员会提出地球关键带概念伊始,地球关键带即被视为地球科学研究基础六大机遇之首<sup>[60]</sup>。地球关键带是指“靠近地球表面的、有渗透性的、介于大气圈和岩石圈之间的地带,垂直方向的范围从树的顶端往下直到地下水

深层,由地表岩石-土壤-水-生物-大气相互作用形成的不可分割、有机联系、不断变化的动态系统”。2015年,中美两国地质调查局局长进行战略对话,将地球关键带调查研究列为了优先合作领域,在此基础上,本次研究工作先后构建了江汉平原、洞庭湖湿地和太湖流域山丘区地球关键带监测站<sup>[61-63]</sup>,提出地球关键带界面空间分布特征调查与“五面四体”量化指标(图9),建立地球关键带界面过程监测与界面通量估算方法和平原区地质微生物填图方法,相关成果被收入中国地质调查局编制的《百项理论》,得到国际关键带委员会好评,认为“*This work provides the big data support for the Great Protection of the Yangtze River and a powerful reference for the design of the global monitoring network of the Critical Zone*”(本项工作为“长江大保护”提供了大数据支撑,为地球关键带全球监测网络设计提供强有力参考),并把江汉平原关键带监测站点(图9,图10)纳入全球地球关键带监测网络(CZEN),成为全球已注册48个关键带站点之一,提升了我国地球关键带研究影响力。

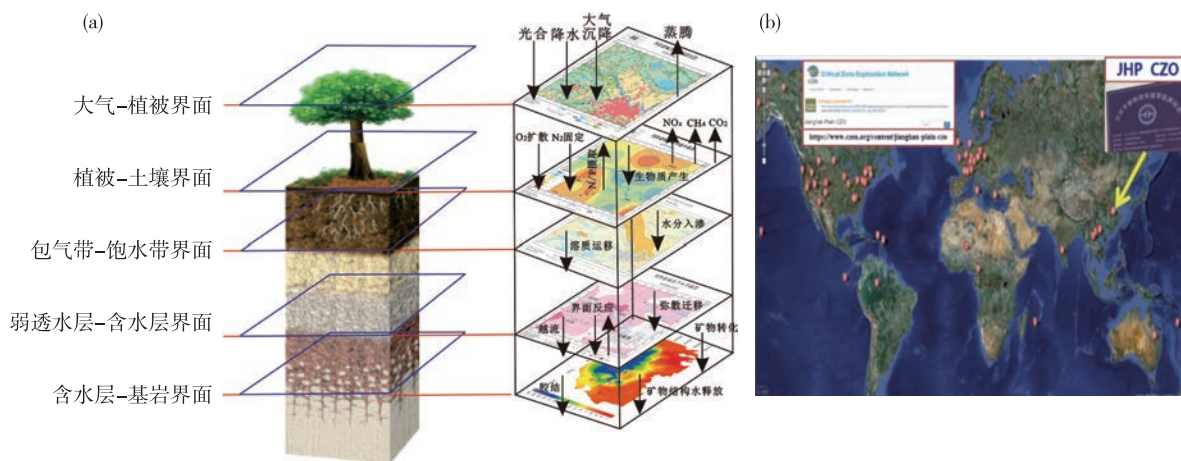


图 9 地球关键带垂向界面结构(a)和全球地球关键带监测网络图(b)

Fig. 9 Vertical interface structure of earth critical zone(a) and global monitoring network of earth critical zone(b)

(4)探索形成流域3种尺度资源环境承载能力和8种国土空间开发利用适宜性评价方法体系,为长江经济带国土空间规划、开发利用和重大工程选址提供基础支撑。

本次工作探索形成流域(长江经济带)、经济区(皖江经济带、苏南现代化示范区)和县(市)(丰都县、北川县)3种尺度资源环境承载能力评价方法体

系,评价成果为长江经济带国土空间规划编制和长江经济带“双评价”提供了技术支撑。建立的长江沿岸长江大桥、过江隧道、港口码头、仓储建设用、跨海通道以及盐(岩)穴战略油气储库等8种重大工程地质适宜性评价方法体系,为长江经济带重大工程规划建设、开发利用与选址提供地质支撑<sup>[7]</sup>(图11、图12、图13)。

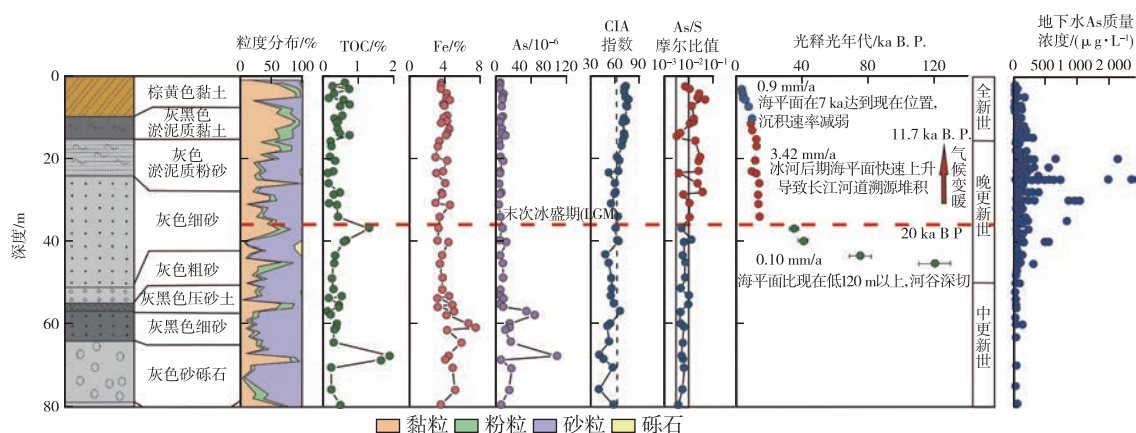


图 10 江汉平原关键带 JH002 孔水-土典型物质组分结构及界面图

Fig. 10 Typical component structure and interface characterization of water-soil materials of JH002 drilling in Jiangnan Plain earth critical zone

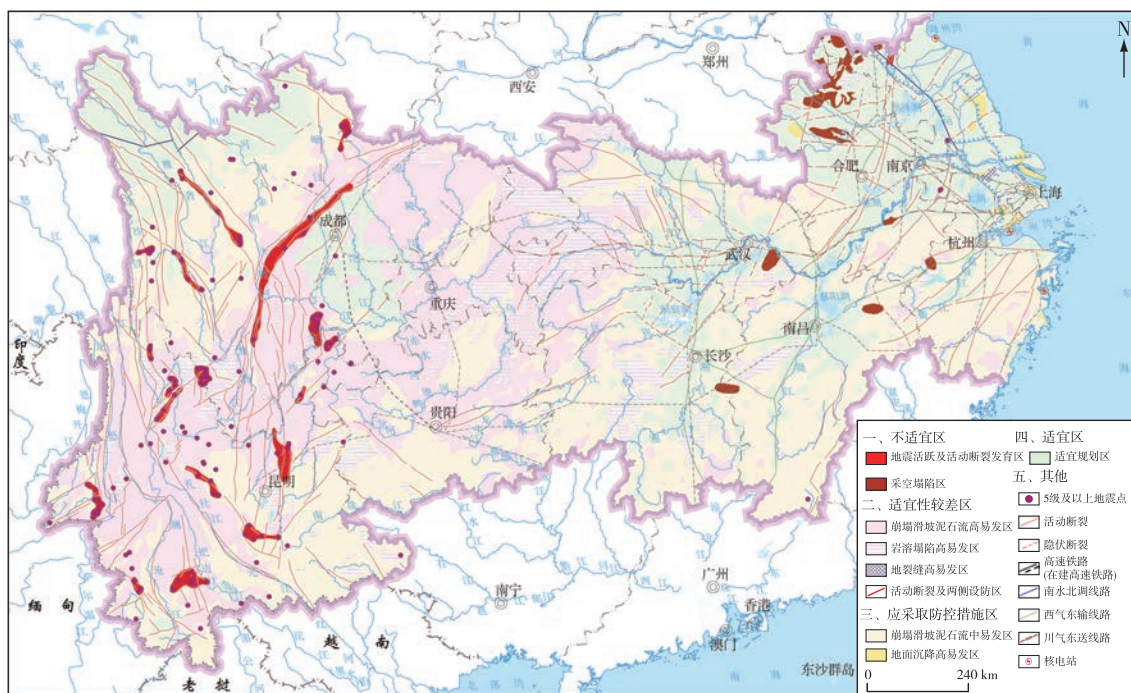


图 11 长江经济带城镇与重要基础设施建设地质适宜性评价图

Fig. 11 Evaluation of geological suitability of urban and important infrastructure construction in the Yangtze River Economic Zone

(5)打破国外技术壁垒,自主研发系列光纤传感器,创新应用“光纤技术”监测地面沉降和地裂缝、长江崩岸以及城镇地下空间开发利用扰动取得突破,引领了地质工程光纤监测技术发展,丰富和发展了地面沉降理论。

自主研发了 4 大类 14 种监测土体变形、岸线侵

蚀等各种光纤传感器,形成长距离堤防安全分布式光纤监控等关键技术,建立了 34 处光纤技术监测示范点,初步打成长三角长江崩岸、城镇地下空间开发利用扰动、地面沉降和地裂缝光纤监测示范基地<sup>[7,64-65]</sup>(图 14、图 15),地面沉降监测成果获 2018 年度国家科技进步一等奖。相关技术已推广应用至江





图 12 长江经济带地下水资源承载力评价图

Fig. 12 Evaluation of carrying capacity of groundwater resources in the Yangtze River Economic Zone

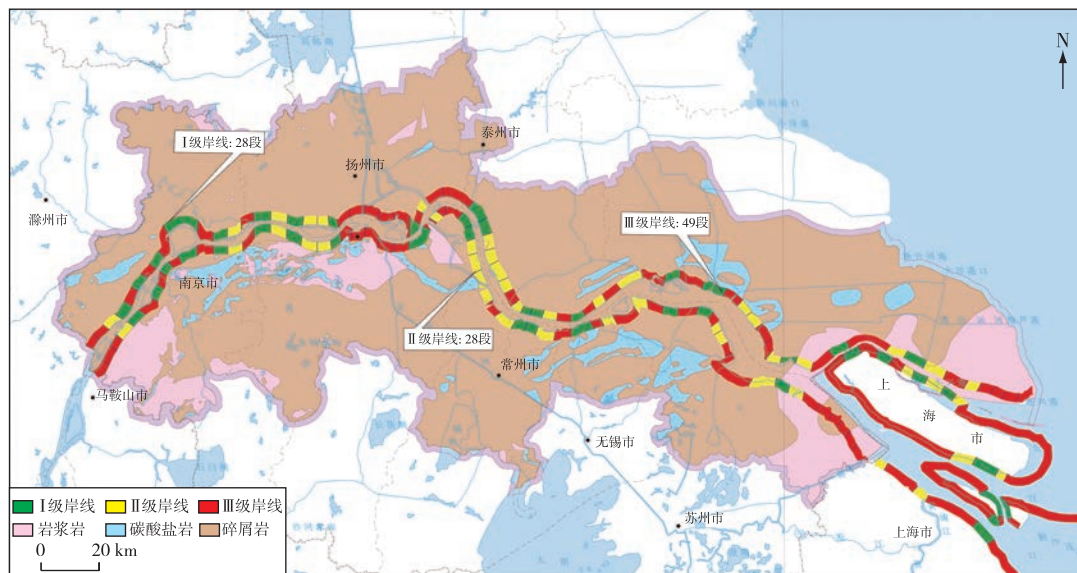


图 13 江苏—上海段长江大桥建设适宜性评价分区

Fig. 13 Division of suitability evaluation of bridge construction in Jiangsu-Shanghai section of the Yangtze River

苏沿海地面沉降、西安地裂缝、英国伦敦地铁、美国二氧化碳封存库变形监测等,引领了地质工程光纤监测技术发展。以上相关成果被收入中国地质调查局编撰的《百项理论》和《百项技术》<sup>[66]</sup>,引领了地质工程光纤监测技术发展,丰富和发展了地面沉降理论。美国地球物理学会(AGU)旗下《地球与空间科学新闻》

(Eos)以编辑视点(Editors' Highlights)版面,以“Fiber optics opens window into subsurface deformation”(光纤打开地下深部变形之窗)为题<sup>[67]</sup>,评述了工程在光纤监测地下深部变形方向的最新研究进展。

(6)突破国外技术封锁,自主研发机载高光谱系统,建立航空高光谱遥感综合调查技术方法,为长



图 14 长三角地区地面沉降、地裂缝和长江崩岸监测分布图

Fig. 14 Monitoring distribution of land subsidence, ground fractures and Yangtze River bank collapse in Yangtze River Delta

江经济带土地利用、矿山环境和水土质量变化等探测提供了科技支撑。

自主研发的机载高光谱系统,具有快捷、高效和高分辨率特点,通过国产化替代进口产品,降低了采购成本,推动了高光谱技术普及并实现产品转化应用<sup>[68]</sup>(图 16)。建立了航空高光谱遥感综合调查技术方法以及水土污染等光谱定量反演模型,服务领域广阔<sup>[7]</sup>。相关成果获 2020 年度江苏省地矿局优秀科技成果一等奖。

(7)建立我国岩溶地面塌陷防治工程勘察、监测和风险评估技术方法体系,为城市地下空间开发利用和重大基础工程建设中岩溶塌陷防控和监测预警提供地质解决方案。

本次工作开展了长江经济带岩溶塌陷发育规

律研究。研究显示,长江经济带岩溶塌陷高易发区面积 12.2 万 km<sup>2</sup>,主要分布在云南、贵州、湖南和湖北等省(图 17)。长江经济带有记录的岩溶塌陷灾害 2 000 多处<sup>[27]</sup>,造成建筑设施变形破坏,损毁土地资源,加剧地下工程和矿坑突水突泥灾害等。通过研究,建立了岩溶塌陷防治工程勘察、监测和风险评估方法体系与大型试验基地,划分出高、中、低岩溶塌陷易发区分布区,提出重庆“四山”交通隧道群建设影响下岩溶塌陷“水压-气压致塌”形成机理新认识 and 工程施工诱发岩溶塌陷防控新思路<sup>[69-70]</sup>(图 18、图 19),形成相关标准规范,相关成果<sup>[7]</sup>被收入中国地质调查局编撰的《百项技术》及获得 2018 年度中国岩石力学与工程学会科技进步一等奖。

(8)编制环境地质调查系列标准规范 29 份,为规



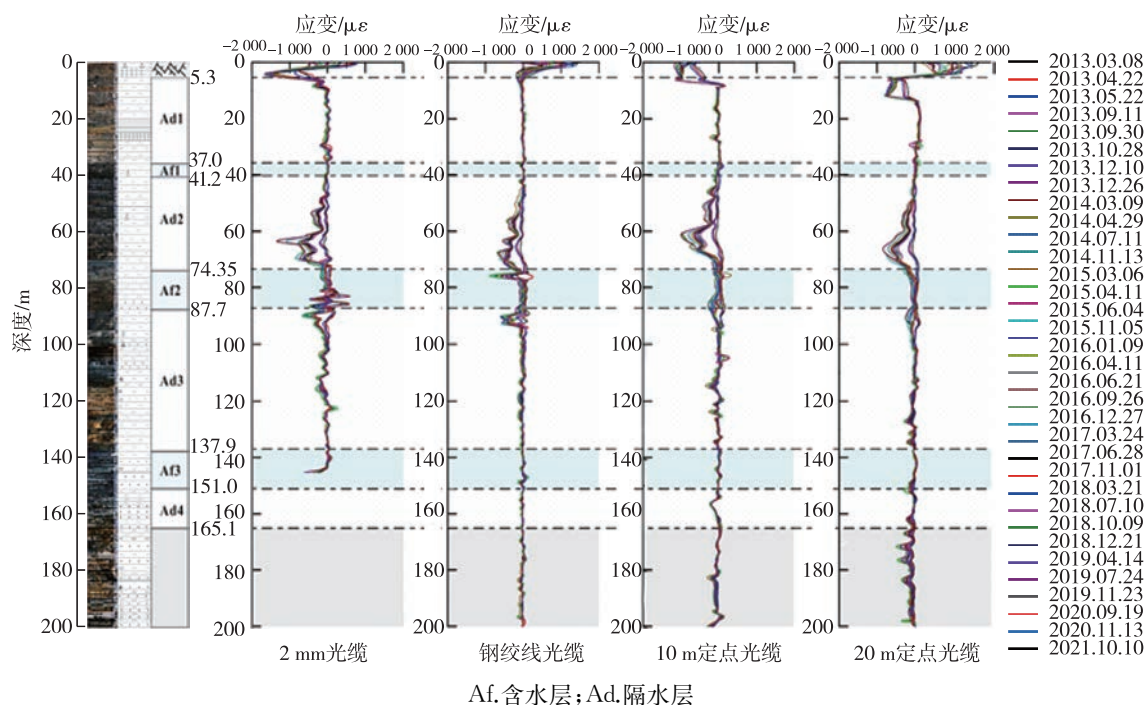


图 15 苏州盛泽地面沉降光纤监测孔应变分布图

Fig. 15 Distribution map of ground subsidence optical fiber monitoring hole strain in Shengze, Suzhou

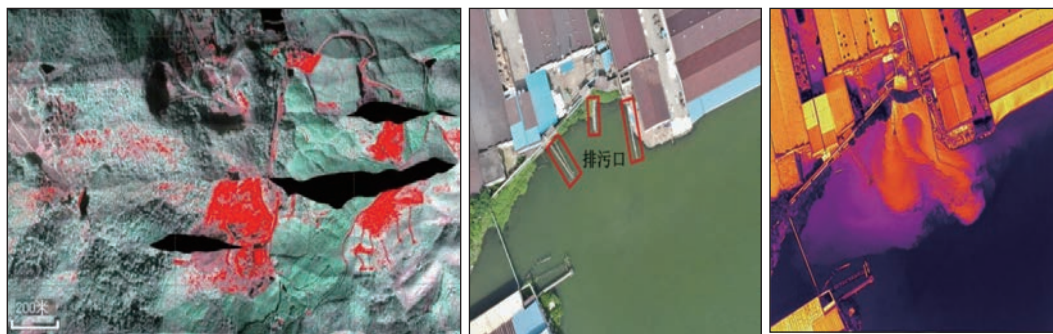


图 16 高光谱遥感识别某矿山粉尘污染分布(左:红色)和污水排放晕(右)

Fig. 16 Identification of dust pollution distribution (left; red) and sewage discharge halo (right) in a mine by hyperspectral remote sensing

范和指导我国 1:50 000 环境地质调查工作提供支撑,并对环境地质学学科发展和科技进步有重要影响。

组织编制的 29 份环境地质调查系列标准指南中,已经发布实施 6 份,分别为《环境地质调查规范(1:50 000)》、《环境地质调查技术要求(1:50 000)》、《地面沉降和地裂缝光纤监测规程》、《岩溶地面塌陷监测规范》、《岩溶地面塌陷防治工程勘察规范》和《生态地质环境调查航空高光谱遥感方法指南》(图 20);列入国标、行标和地标编制计划 7

份,分别为《工矿废弃地土地复垦水土环境质量调查评价规范》、《河湖岸线资源调查技术规范》、《钒钛磁铁矿尾矿资源综合利用调查与评价指南》、《钒钛磁铁矿矿物定量检测方法》、《煤矿地表沉陷区监测技术指南》、《煤矿地下空间调查技术指南》和《煤矿地下空间开发利用适宜性评价技术指南》。这些标准指南为规范和指导我国 1:50 000 环境地质调查工作提供了基础支撑,并对环境地质学学科发展和科技进步有重要影响。



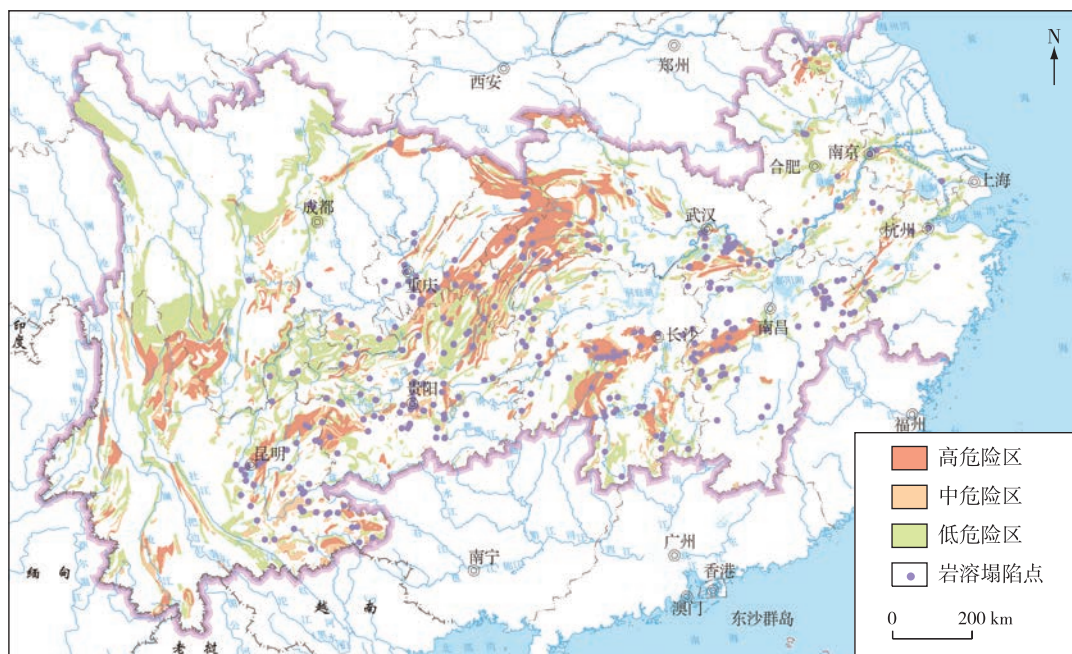


图 17 长江经济带岩溶塌陷易发区分布图

Fig. 17 Distribution of karst collapse risk area in Yangtze River Economic Zone

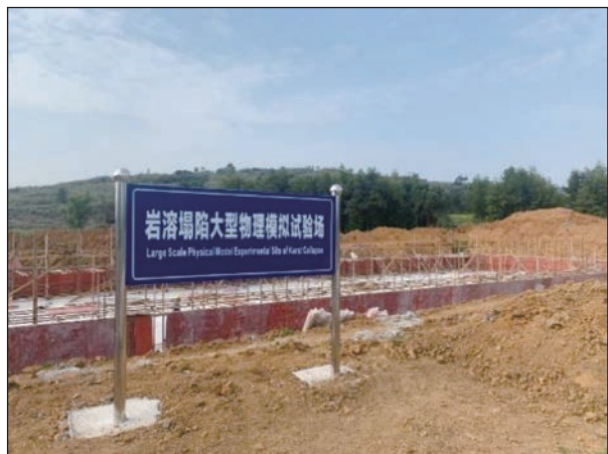


图 18 岩溶塌陷大型试验基地

Fig. 18 large-scale test base

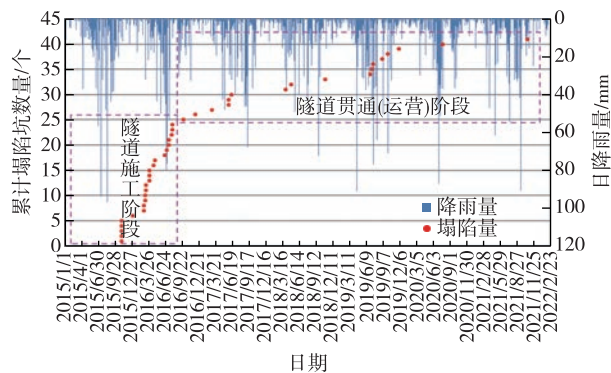


图 19 岩溶塌陷与降雨、工程施工时间关系图

Fig. 19 The relation between karst collapse, rainfall and construction time

### 2.3 推动了成果转化应用和有效服务

工程实施以来,编制的《支撑服务长江经济带发展地质调查报告》等成果获中央及部省级以上领导批示 19 次。其中《支撑服务长江经济带发展地质调查报告》得到时任国务院副总理张高丽批示和时任江苏省副省长徐鸣批示,《长江经济带国土资源与重大地质问题图集》提交中央财经领导小组办公室(118 册),相关成果得到自然资源部国土空间规

划局、长江经济带 11 省(市)自然资源部门和规划部门应用;《重大水利工程对长江中下游干流河槽和岸滩影响评价》成果得到中国农工民主党中央委员会、中共江苏省委和江苏省战略与发展研究中心应用;编制的《支撑服务长三角一体化发展地质调查总体方案(2021—2035 年)》提交国家发展改革委“推动长三角一体化发展领导小组办公室”和长三角生态绿色一体化发展示范区执行委员会;编制的《中国城市地质调查报告》得到时任国土资源部部长姜大明批示;长江经济带地下盐穴评价成果(图

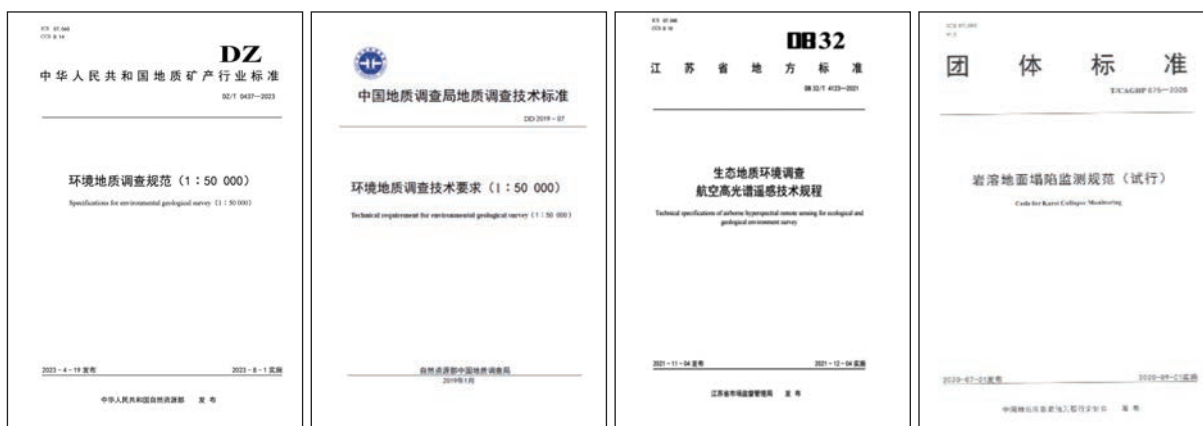


图 20 发布的部分标准规范

Fig. 20 Partially published standard specifications

21)得到财政部经济建设司、自然资源部矿业权司和中国地质调查局等部门重视,江苏连云港地下水封洞库评价成果(图 22)得到时任江苏省委书记李强和省长吴政隆的批示;赣南脱贫攻坚找水打井成果<sup>[70]</sup>(图 23)得到时任自然资源部部长陆昊 3 次批示表扬;编制有关《长江保护修复-攻坚战行动计划》、

《深挖湖泊多蓄水,科学规划可采砂》、《存水入地调蓄资源涵养生态》等材料作为两会提案获水利部关注和认可,认为“对保护和修复长江流域水生态环境具有重要意义”,“为长江经济带航道工程与护岸保滩工程、冲淤灾害防治及生态修复提供科学依据”<sup>[7,52]</sup>。



图 21 长江经济带岩盐矿分布与盐穴储库开发利用适宜性评价图

Fig. 21 Distribution of rock salt deposits and suitability evaluation of salt cavern storage for development and utilization in the Yangtze River Economic Zone

港口码头和长江大桥等评价成果得到长江水利委员会、中国长江三峡集团有限公司、江西省彭

泽县发改委、南京长江第四大桥有限责任公司、南京市规划和自然资源局、扬中市水利局、安徽省交





图 22 江苏省连云港水封洞库建设适宜性评价图

Fig. 22 Suitability evaluation of water-sealed cavern storage in Lianyungang, Jiangsu Province

通规划设计研究总院等单位应用;川气东送二线天然气管道干线长江隧道(安庆、黄石、嘉鱼等处)选址评价成果提交中国石油化工集团公司;成都、广安等城市地质调查成果得到中国城市规划设计研究院西部分院应用;甬舟跨海通道重大工程选址评价成果(图 24)得到宁波市铁路建设指挥部和宁波市交通发展前期办公室应用;贵阳—南宁高速铁路、湘桂高速铁路、贵州道真至务川高速公路青坪特长隧道岩溶涌水、突水、突泥风险评价提出的建议,得到中铁二院工程集团有限责任公司、中国铁路南宁局集团有限公司、遵义市交通运输局应用;“环形正负电子对撞机(CEPC)-超级质子对撞机(SPPC)”重大工程选址适宜性评价成果得到浙江省科技厅关注,并在中国科学院高能物理研究所获得应用。充分利用中央资金引领作用,带动地方政府匹配投入资金 42 200 万元,打造了可推广复制的“皖江城市群、宁波城市和丹阳试点小城镇地质调

查模式”,促进了城市地质工作融入政府管理主流程,工程取得成果应用与转化成效十分显著<sup>[7]</sup>。

#### 2.4 促进了人才成长和团队建设

工程培养研究生 100 余人,形成 21 支稳定的环境地质调查专业团队。获国家、省部级奖励 9 项,获国家五大科技平台和基金项目 26 项,获省部级以上各类人才称号 10 人次,获部级创新团队 2 个,自然资源系统青年文明号 2 个,局级地质调查支撑服务脱贫攻坚工作优秀集体 1 个、“十三五”科学普及先进集体 1 个。授权发明专利 40 项,实用新型专利 42 项,软件著作权 50 项。截止 2020 年 10 月发表论文 404 篇(SCI 67 篇,EI 44 篇),出版专著 18 部,出版 9 期期刊专刊(辑)(图 25)。《中国地质》期刊“特别关注”栏目连续刊载工程 7 篇论文。形成科普产品(包括视频和读物等)33 项,先后 4 人出镜中央电视台财经频道(CCTV 2)、新闻频道(CCTV 13)和农业农村频道(CCTV 17)进行科普解读(图 26);





图 23 赣南脱贫攻坚乡村振兴找水打井照片

Fig. 23 Photos of groundwater exploration and well drilling in poverty alleviation and rural revitalization of the southern Jiangxi Province

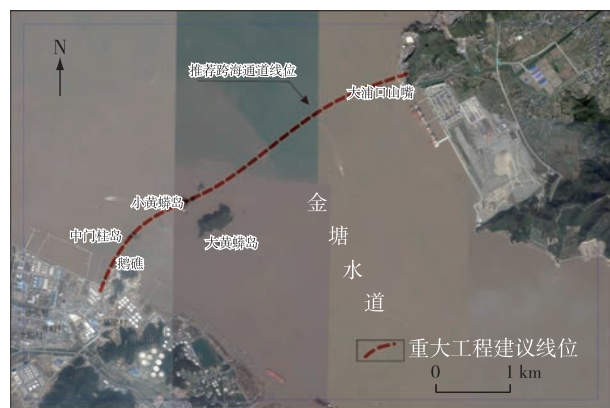


图 24 甬舟跨海通道线位走向选址评价建议图

Fig. 24 Site selection evaluation proposal map of Ningbo-Zhoushan cross-sea passage

作为技术支撑单位协助地方政府成功申报 2 处全国三星级地质文化村(江西高滩村和浙江红里山村)。

工程实施进一步做实做强了 2 个部级重点实验室、2 个局级业务中心和 2 个局级野外基地,新获批自然资源部流域生态地质过程重点实验室 1 个。

工程团队形成中国地质调查百项理论、百项技术和百项成果 14 项,形成 5 项生态修复示范案例成

果被收入中国地质调查局第一批《地质调查支撑生态保护修复案例集》(2021)。《长江经济带环境地质调查关键技术及其应用》入选自然资源部科技司“十三五”重大科技成果,并列为 7 项重点展示成果之一。综合集成成果《长江经济带环境地质和生态修复》获国家出版基金管理委员会 2022 年度国家出版基金资助出版,并被国家新闻出版署列为“十四五”国家重点出版物出版专项规划项目。中国地质大学(武汉)校长王焰新院士和清华大学副校长王光谦院士分别为《长江经济带环境地质和生态修复》和《长江中下游河槽物理过程》出版成果作序并作出好评。

### 3 下一步地质工作建议

“长江经济带地质环境综合调查工程”在长江贯通时限和演化、流域重大水利工程与地质环境多元响应、流域地球关键带监测研究、流域生态修复示范关键技术探索、光纤监测地下深部地层变形和机载高光谱探测环境变化技术研发、流域资源环境承载能力评价以及支撑服务长江经济带国土空间规划、支撑服务流域生态环境保护和修复、支撑服



图 25 出版的部分中英文著作和专刊

Fig. 25 Some of the published works and special issues in both Chinese and English



图 26 研究人员出镜中央电视台财经频道(CCTV2)、新闻频道(CCTV13)和农业农村频道(CCTV17)对有关重大地质问题和取得的地质成果进行科普解读

Fig. 26 Researchers interviewed by CCTV Financial Channel (CCTV2), News Channel (CCTV13) and Agriculture and Rural Channel (CCTV17) are making popular science interpretations of relevant major geological issues and achievements

务新型城镇化战略、重大工程规划建设、地质灾害防治、脱贫攻坚和国家地下战略储油储气库基地建设等方面取得了一系列进展和创新成果。下一步,建议从以下方面开展相关地质工作。

(1)开展服务长江经济带新型城镇化战略综合地质调查。围绕国家新型城镇化和长三角一体化战略,在长三角、沿淮、长江中游、滇中 4 个经济区/城市群以及吴江、嘉善和蚌埠等 12 个重要城镇规划

区,要部署开展 1:50 000 环境地质调查工作,基本查明区内重要城镇规划区和城市群不同层次地质环境条件和存在问题,提出与区域发展规划相适应的自然资源合理开发利用、生态保护与修复对策建议。

(2)开展服务长江经济带重要交通干线重大工程规划建设综合地质调查。围绕长江经济带交通干线重大工程、重大基础设施建设,在沿长江干流岸

带重点区、京广高铁沿线和沪昆高铁沿线、黔西和湘东地面塌陷区部署开展1:50 000环境地质调查工作,要基本查明沿江、沿海和沿高铁沿线重点地区地质环境条件和存在问题,基本查明岩溶塌陷、地壳稳定性、地面沉降、地裂缝和崩岸成因机理,为长江航道安全运营、沿线港口建设、跨江高速公路、铁路和沿江城镇建设的合理规划、科学选址、选线提供地学依据。

(3)开展服务生态环境保护综合地质调查。围绕生态环境保护建设,在鄱阳湖、洞庭湖、三峡库区、金沙江干流、钱塘江流域、重安江流域和太湖等生态敏感区部署开展1:50 000环境地质调查,基本查明环境敏感区、脆弱区和重大工程区地质环境条件和存在问题。围绕矿山开采和生态环境保护,在长江上游会理、会东,长江中游郴州、德兴等矿山集中区部署开展1:50 000环境地质调查,基本查明矿山集中区地质环境问题。

(4)开展服务贫困地区综合地质调查。围绕集中连片贫困区,在江西赣州等地部署开展1:50 000水文地质调查,选择有利区段开展地热等清洁能源调查工作,为长江经济带巩固脱贫攻坚成果提供支撑服务。

(5)开展科技创新。在长江重大水利工程区继续开展大流域地质环境效应研究,进一步探索大流域人类活动与地质环境效应模式。在洞庭湖、鄱阳湖等地开展地球多圈层交互带研究,在沿江、沿湖、滨海等湿地区,会理、德兴等典型矿集区,中西部岩溶塌陷区等地开展生态修复(整治)示范,形成典型矿山尾矿、河湖湿地等修复或者处置关键技术和技术规程,支撑生态环境保护 and 地质灾害防治。

(6)开展信息服务。进一步完善长江经济带地质资源环境综合评价信息平台,为实现11个省(市)的信息共享、地质云建设和长江经济带地质环境综合调查提供信息技术支撑。

**致谢:**本工程实施过程中得到了中国地质调查局、南京地质调查中心、武汉地质调查中心、成都地质调查中心、中国地质科学院岩溶地质研究所、中国地质调查局探矿工艺研究所、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心、中国地质大学(武汉)、华东师范大学、南京大学、江苏省地质调查研究院、上海市地质调查研究院、浙江省水文地质工程地质大队、浙江省地质调查院、苏州南智传感科技有限

公司、南京中地仪器有限公司等单位以及长江经济带11省(直辖市)国土资源部门等各级领导的关心和支持,魏广庆、邵长生、黄波林、季文婷、李晓昭、戴建玲、张水军、毛汉川、宋国玺、贾军元、宋志、邢怀学、刘建东、杨辉、杨国强、刘红樱、彭博、于俊杰、蒋仁、顾轩、崔玉贵、郑树伟、张家豪、石盛玉、黄海等参与了工程和项目工作及本文的编写,在此一并致以衷心的感谢!

## 参考文献

- [1] 国家统计局. 2020中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.  
National Bureau of Statistics. 2020 China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [2] 中国共产党中央委员会. 长江经济带发展规划纲要[EB/OL]. (2016-03-25)[2023-08-31]. <https://baike.so.com/doc/25121588-26103009.html>.  
CPC Central Committee. Outline of the plan for the development of the Yangtze Economic Belt[EB/OL]. (2016-03-25) [2023-08-31]. <https://baike.so.com/doc/25121588-26103009.html>.
- [3] 长江经济带地质环境综合调查工程简介[J]. 华东地质, 2016, 37(1): 76-78.  
Introduction to the geological environment comprehensive survey project of the Yangtze River Economic Belt [J]. East China Geology, 2016, 37(1): 76-78.
- [4] 长江经济带地质环境综合调查工程简介[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1300.  
Introduction to the geological environment comprehensive survey project of the Yangtze River Economic Belt [J]. Geology in China, 2021, 48(5): 1300.
- [5] 姜月华, 苏晶文, 张泰丽, 等. 长江三角洲经济区环境地质[M]. 北京: 地质出版社, 2015.  
JIANG Y H, SU J W, ZHANG T L, et al. Environmental geology of the Yangtze River Delta Economic Zone[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [6] 姜月华, 林良俊, 陈立德, 等. 长江经济带资源环境条件与重大地质问题[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1045-1061.  
JIANG Y H, LIN L J, CHEN L D, et al. Research on conditions of resources and environment and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone [J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1045-1061.
- [7] 姜月华, 周权平, 倪化勇, 等. 长江经济带环境地质和生态修复[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.



- JIANG Y H, ZHOU Q P, NI H Y, et al. Environmental geology and ecological restoration of the Yangtze River Economic Belt [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2021.
- [8] JIANG Y H, LIN L J, CHEN L D, et al. An overview of the resources and environment conditions and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone, China [J]. China Geology, 2018, 1(3): 435-449.
- [9] 中国地质调查局. 长江经济带国土资源与重大地质问题图集[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- China Geological Survey. Atlas of land resources and major geological issues in the Yangtze River Economic Belt [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [10] 中国地质调查局. 中国重要经济区和城市群地质环境图集——长江三角洲经济区[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2015.
- China Geological Survey. Geological environment atlas of important economic zones and urban agglomerations in China——Yangtze River Delta Economic Zone [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2015.
- [11] 潘云唐. 丁文江在地层古生物学上的卓越贡献[J]. 古生物学报, 1988, 27(5): 653-657.
- PAN Y T. Outstanding contributions to stratigraphic paleontology [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1988, 27(5): 653-657.
- [12] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Guizhou Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [13] 江苏省地质矿产局. 宁镇山脉地质志[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989.
- Geology and Mineral Resources Bureau of Jiangsu Province. Geology of Ningzhen Mountains [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1989.
- [14] 浙江省地质矿产局. 浙江省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- Geology and Mineral Resources Bureau of Zhejiang Province. Petrostratigraphy in Zhejiang Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- [15] 黄慧珍, 唐保根, 杨文达, 等. 长江三角洲沉积地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- HUANG H Z, TANG B G, YANG W D, et al. Sedimentary geology of Yangtze River Delta [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [16] 郭文魁. 滇北之早期海西运动[J]. 地质论评, 1942, 7(增刊1): 9-16.
- GUO W K. The early Hercynian movement in northern Yunnan [J]. Geological Review, 1942, 7(Z1): 9-16.
- [17] 陈修颖. 长江经济带空间结构演化及重组[J]. 地理学报, 2007, 62(12): 1265-1276.
- CHEN X Y. The formation, evolvement and reorganization of spatial structure in Yangtze River Economic Zone [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(12): 1265-1276.
- [18] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.
- SHU L S. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [19] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学(地球科学), 2013, 43(10): 1553-1582.
- ZHANG G W, GUO A L, WANG Y J, et al. Tectonics of South China continent and its implications [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2013, 43(10): 1553-1582.
- [20] 吴中海, 周春景, 谭成轩, 等. 长江经济带地区活动构造与区域地壳稳定性基本特征[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 379-411.
- WU Z H, ZHOU C J, TAN C X, et al. The active tectonics and regional crustal stability features in the area of Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3): 379-411.
- [21] 孙玉军, 吴中海, 贾凤琴. 长江经济带地区岩石圈热流变结构和深部动力学[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 421-429.
- SUN Y J, WU Z H, JIA F Q. Lithospheric thermal-rheological structure and deep geodynamics in the Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3): 421-429.
- [22] 尹赞勳. 云南地质研究的进展[J]. 地质论评, 1936, 1(3): 277-294.
- YIN Z X. Progress of geological research in Yunnan [J]. Geological Review, 1936, 1(3): 277-294.
- [23] 自然资源部中国地质调查局. 支撑长江经济带国土空间规划的资源环境条件与重大问题分析报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2018.
- China Geological Survey, Ministry of Natural Resources. Analysis report on resource and environmental conditions and major problems supporting the territorial spatial planning of the Yangtze River Eco-

- onomic Belt [R]. Beijing: China Geological Survey, 2018.
- [24] 国土资源部中国地质调查局. 中国耕地地球化学调查报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2015.  
China Geological Survey, Ministry of Land and Resources. Geochemical survey report of cultivated land in China [R]. Beijing: China Geological Survey, 2015.
- [25] 国土资源部中国地质调查局. 中国能源矿产地质调查报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2016.  
China Geological Survey, Ministry of Land and Resources. China energy and mineral geological survey report [R]. Beijing: China Geological Survey, 2016.
- [26] 国土资源部中国地质调查局. 支撑服务长江经济带发展地质调查报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2015.  
China Geological Survey, Ministry of Land and Resources. Geological survey report on the development of the Yangtze River Economic Belt [R]. Beijing: China Geological Survey, 2015.
- [27] 国土资源部中国地质调查局. 中国岩溶地质调查报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2016.  
China Geological Survey, Ministry of Land and Resources. Report of karst geological survey in China [R]. Beijing: China Geological Survey, 2016.
- [28] WILLS B, BLACKW E E, SARGENT R H. Research in China [M]. Washington: Press of Gibson Brothers, 1907: 278-339.
- [29] 陈丕基. 中国侏罗、白垩纪古地理轮廓——兼论长江起源[J]. 北京大学学报, 1979(3): 90-109.  
CHEN P J. Paleogeographic outline of Jurassic and Cretaceous in China: on the origin of the Yangtze River [J]. Journal of Peking University, 1979(3): 90-109.
- [30] RICHARDSON N J, DENSMORE A L, SEWARD D, et al. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene? [J]. Geology, 2010, 38(6): 551-554.
- [31] 郑月蓉, 李勇. 长江水系在三峡段初始形成时间研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2009, 32(6): 808-811.  
ZHENG Y R, LI Y. Study on initial formation time of Three Gorges Region in the Yangtze Aquo-System[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2009, 32(6): 808-811.
- [32] CLARK M K, SCHOENBOHM L M, ROYDEN L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns[J]. Tectonics, 2004, 23(1): TC1006.
- [33] CLIFT P D, BLUSZTAJN J, NGUYEN A D. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet-SW China before 24 Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L19403.
- [34] 郑洪波, 魏晓椿, 王平, 等. 长江的前世今生[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(4): 385-393.  
ZHENG H B, WEI X C, WANG P, et al. Geological evolution of the Yangtze River (in Chinese) [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2017, 47(4): 385-393.
- [35] 范代读, 李从先. 长江贯通时限研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(2): 121-131.  
FAN D D, LI C X. Reviews on research of timing of the Yangtze draining the tibetan plateau to the East China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(2): 121-131.
- [36] 任美镔, 包浩生, 韩同春, 等. 云南西北部金沙江河谷地貌与河流袭夺问题[J]. 地理学报, 1959, 25(2): 135-155.  
REN M E, BAO H S, HAN T C, et al. The geomorphology and river usurpation of the Jinsha River valley in northwest Yunnan Province [J]. Acta Geographica Sinica, 1959, 25(2): 135-155.
- [37] 杨怀仁, 徐馨, 杨达源, 等. 长江中下游环境变迁与地生态系统[M]. 南京: 河海大学出版社, 1997.  
YANG H R, XU X, YANG D Y, et al. Environmental change and geoecosystem in the middle and lower reaches of the Yangtze River [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1997.
- [38] 杨达源. 长江地貌过程[M]. 北京: 地质出版社, 2006.  
YANG D Y. Geomorphic process of Yangtze River [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [39] 张玉芬, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原沉积物磁学特征及对长江三峡贯通的指示[J]. 科学通报, 2008, 53(5): 577-582.  
ZHANG Y F, LI C A, WANG Q L, et al. Magnetic characteristics of sediments in Jiangnan Plain and their implications for the Three Gorges of Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(5): 577-582.
- [40] 孔屏. 金沙江何时开始向东流[J]. 地质科学, 2009, 44(4): 1256-1265.  
KONG P. When the Jinsha River started to flow east [J]. Chinese Journal of Geology, 2009, 44(4): 1256-1265.
- [41] 李华勇, 明庆忠. 金沙江石鼓—宜宾段河谷—水系演化研究综述与讨论[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(2): 50-55.  
LI H Y, MING Q Z. Summary and prospects for the

- Valley & Drainage evolution of the Shigu-Yibin Section of the Jinsha River[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 27(2): 50-55.
- [42] 杨建, 李长安, N'djdit Jacques Dembele, 等. 峨眉山玄武岩作为长江上游特征源岩对三峡贯通的指示[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(4): 431-442.
- YANG J, LI C A, N'DJIDIT J D, et al. Emeishan basalts as provenance indicators: Implications for formation of the Three Gorges[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 2014, 39(4): 431-442.
- [43] 程捷, 刘学清, 高振纪, 等. 青藏高原隆升对云南高原环境的影响[J]. *现代地质*, 2001, 15(3): 290-296.
- CHENG J, LIU X Q, GAO Z J, et al. Effect of the Tibetan Plateau uplifting on geological environment of Yunnan Plateau [J]. *Geoscience*, 2001, 15(3): 290-296.
- [44] 向芳, 王成善, 李国忠, 等. 宜昌地区第四纪沉积物重矿物特征及其与三峡贯通的关系[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(2): 117-121.
- XIANG F, WANG C S, LI G Z, et al. Character of heavy minerals in Quaternary sediments in Yichang area and its relationship with cut-through of the Yangtze Three Gorges, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33(2): 117-121.
- [45] 明庆忠, 史正涛, 董铭. 长江第一弯成因及形成时代探讨[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(3): 119-126.
- MING Q Z, SHI Z T, DONG M. The inquiry on genesis and formation times of The First Bend of Yangtze River[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(3): 119-126.
- [46] 张信宝, 刘彧, 王世杰, 等. 黄河、长江的形成演化及贯通时间[J]. *山地学报*, 2018, 36(5): 661-668.
- ZHANG X B, LIU Y, WANG S J, et al. On the chronology of the Yellow Rivers and the Yangtze Rivers [J]. *Mountain Research*, 2018, 36(5): 661-668.
- [47] 国家发展改革委员会. 长江沿江化工企业关改搬转超过八千家 [EB/OL]. (2021-01-07)[2023-08-31]. [https://www.sohu.com/a/442965968\\_100217607](https://www.sohu.com/a/442965968_100217607).
- National Development and Reform Commission. More than 8 000 chemical enterprises along the Yangtze River have been relocated [EB/OL]. (2021-01-07)[2023-08-31]. [https://www.sohu.com/a/442965968\\_100217607](https://www.sohu.com/a/442965968_100217607).
- [48] 姜月华, 倪化勇, 周权平, 等. 长江经济带生态修复示范关键技术及其应用[J]. *中国地质*, 2021, 48(5): 1305-1333.
- JIANG Y H, NI H Y, ZHOU Q P, et al. Key technology of ecological restoration demonstration in the Yangtze River Economic Zone and its application[J]. *Geology in China*, 2021, 48(5): 1305-1333.
- [49] 自然资源部水文地质环境地质调查部. 地质调查支撑生态保护修复案例集[R]. 北京: 中国地质调查局, 2021.
- Department of Hydrogeology and environmental Geological Survey, Ministry of Natural Resources. Case collection of geological survey supporting ecological protection and restoration [R]. Beijing: China Geological Survey, 2021.
- [50] 石盛玉, 程和琴, 郑树伟, 等. 三峡截流以来长江洪季潮区界变动河段冲刷地貌[J]. *海洋学报*, 2017, 39(3): 85-95.
- SHI S Y, CHENG H Q, ZHENG S W, et al. Erosional topography of the tidal limit in the Yangtze River in flood seasons after the river closure at Three Gorges[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(3): 85-95.
- [51] ZHENG S W, CHENG H Q, SHI S Y, et al. Impact of anthropogenic drivers on subaqueous topographical change in the Datong to Xuliujing reach of the Yangtze River[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2018, 61(7): 940-950.
- [52] 程和琴, 姜月华. 长江中下游河槽物理过程[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- CHENG H Q, JIANG Y H. Physical processes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [53] 姜月华, 程和琴, 周权平, 等. 重大水利工程对长江中下游干流河槽和岸线地质环境影响研究[J]. *中国地质*, 2021, 48(6): 1681-1696.
- JIANG Y H, CHENG H Q, ZHOU Q P, et al. The influence of major water conservancy projects on the geological environment of channel and shoreline in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Geology in China*, 2021, 48(6): 1681-1696.
- [54] WILLIAMS G P, WOLMAN M G. Downstream effect of dams on alluvial rivers [J]. *USGS Professional Paper*, 1984: 1286.
- [55] CARRIQUIRY J D, SANCHEZ A, CAMACHO-IBAR V F. Sedimentation in the northern Gulf of California after cessation of the Colorado River discharge [J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 144(1/2): 37-62.
- [56] JIANG Y H, CHENG H Q, ZHOU Q P, et al. Influ-



- ence of major water conservation projects on river channels and shorelines in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021 (884). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07288-9>.
- [57] CHENG H Q, CHEN W, LI J F, et al. Morphodynamic changes of the Yangtze Estuary under the impact of the Three Gorge Dam, of estuarine engineering interventions and of climate-induced sea level rise[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2022 (580):117385.
- [58] SURIAN N. Downstream variation in grain size along an Alpine river: Analysis of controls and processes [J]. *Geomorphology*, 2002, 43 (1):137-149.
- [59] ZHENG S W, CHENG H Q, WU S H, et al. Morphology and mechanism of the very large dunes in the tidal reach of the Yangtze River, China [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 139(1): 54-61.
- [60] National Research Council. Basic research opportunities in earth sciences [M]. Washington: National Academies Press, 2001: 35-45.
- [61] 李俊琦, 马腾, 邓娅敏, 等. 江汉平原地球关键带监测网建设进展[J]. *中国地质调查*, 2019, 6(5): 115-123.
- LI J Q, MA T, DENG Y M, et al. Progresses on monitoring network construction of Earth's Critical Zone in Jiangnan Plain [J]. *Geological Survey of China*, 2019, 6(5):115-123.
- [62] SUN X L, DU Y, DENG Y M, et al. Contribution of groundwater discharge and associated contaminants input to Dongting Lake, Central China using multiple tracers ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43 (3): 1239-1255.
- [63] 杨海, 姜月华, 周权平, 等. 太湖流域平原水文试验区降雨产流过程特征研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6):506-514.
- YANG H, JIANG Y H, ZHOU Q P, et al. Study on characteristics of rainfall-runoff generation processes at a plain experimental area in Taihu Lake Basin [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2021, 49(6):506-514.
- [64] JIANG Y H, MEI S J, SHI B, et al. The application of optical fiber monitoring technique in environmental geological survey[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93 (Z2):349-350.
- [65] GU K, LIU S P, SHI B, et al. Land subsidence monitoring using distributed fiber optic sensing with Brillouin scattering in coastal and deltaic regions [J]. *The Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2020, 382: 95-98.
- [66] 姜月华, 杨天亮, 朱锦旗, 等. 长江三角洲地区地面沉降机理与防控 [M]. 北京: 国土资源部中国地质调查局, 2016:268-270.
- JIANG Y H, YANG T L, ZHU J Q, et al. Mechanism and prevention of land subsidence in Yangtze River Delta [M]. Beijing: China Geological Survey, Ministry of Land and Resources, 2016:268-270.
- [67] BAYANI CARDENAS. Fiber optics opens window into subsurface deformation [J]. *Earth & Space Science News*, 2018. <https://eos.org/editor-highlights/fiber-optics-opens-window-into-subsurface-deformation>.
- [68] 修连存, 郑志忠, 杨彬, 等. 机载高光谱成像技术在长江经济带苏、皖、浙地区生态环境保护中的应用 [J]. *中国地质*, 2021, 48(5): 1334-1356.
- XIU L C, ZHENG Z Z, YANG B, et al. Application of airborne hyperspectral imaging technology to the ecological environment protection of Jiangsu, Anhui and Zhejiang Provinces at Yangtze River Economic Belt [J]. *Geology in China*, 2021, 48(5): 1334-1356.
- [69] 蒋小珍, 雷明堂. 岩溶塌陷灾害的岩溶地下水气压力监测技术及应用 [J]. *中国岩溶*, 2018, 37(5):6.
- JIANG X Z, LEI M T. Monitoring technique and its application of karst groundwater-air pressure in karst collapse [J]. *Carsologica Sinica*, 2108, 37(5):6.
- [70] LEI M T, ZHOU W F, JIANG X Z, et al. Karst collapses and their formations [C]//Atlas of Karst collapses, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92912-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92912-1_1).
- [71] 刘林, 朱红兵, 姜月华, 等. 赣南宁都乡村振兴红层找水打井取得突破性进展 [J]. *华东地质*, 2021, 42 (2):209.
- LIU L, ZHU H B, JIANG Y H, et al. A breakthrough has been made in finding water and drilling wells in the red layer of rural revitalization in Ningdu, southern Jiangxi Province [J]. *East China Geology*, 2021, 42(2):209.

## Progress of environmental geological investigation and research in the Yangtze River Economic Zone

JIANG Yuehua<sup>1,2</sup>, ZHOU Quanping<sup>1,2</sup>, NI Huayong<sup>3</sup>, CHEN Lide<sup>4</sup>, CHENG Heqin<sup>5</sup>, LEI Mingtang<sup>6</sup>,  
GE Weiya<sup>1,2</sup>, MA Teng<sup>7</sup>, SHI Bin<sup>8</sup>, CHENG Zhiyan<sup>9</sup>, DUAN Xuejun<sup>10</sup>, SU Jingwen<sup>1,2</sup>,  
ZHU Jinqi<sup>11</sup>, XIU Liancun<sup>1,2</sup>, XIANG Fang<sup>12</sup>, ZHU Zhimin<sup>3</sup>, FENG Naiqi<sup>13</sup>, XIE Zhongsheng<sup>3</sup>,  
TAN Jianmin<sup>4</sup>, PENG Ke<sup>4</sup>, GUO Shengqiao<sup>11</sup>, FU Yongpeng<sup>4</sup>, REN Haiyan<sup>14</sup>, SUN Jianping<sup>15</sup>,  
YANG Qiang<sup>15</sup>, ZHU Jiliang<sup>15</sup>, WANG Donghui<sup>16</sup>, LI Minghui<sup>16</sup>, LIU Guangning<sup>4</sup>, FAN Chenzi<sup>17</sup>,  
WANG Xinfeng<sup>15</sup>, SHI Yujin<sup>18</sup>, WANG Hanmei<sup>18</sup>, DONG Xianzhe<sup>19</sup>, CHEN Huanyuan<sup>20</sup>,  
HAO Shefeng<sup>11</sup>, DENG Yamin<sup>7</sup>, LI Yun<sup>1,2</sup>, XIAO Zeyou<sup>21</sup>, YANG Hai<sup>1,2</sup>, LIU Lin<sup>1,2</sup>, JIN Yang<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Hong<sup>1,2</sup>, MEI Shijia<sup>1,2</sup>, QI Qiuju<sup>1,2</sup>, LÜ Jinsong<sup>1,2</sup>, HOU Lili<sup>1,2</sup>, CHEN Gang<sup>1,2</sup>,  
CHEN Zi<sup>1,2</sup>, JIA Zhengyang<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, Sichuan, China; 4. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 5. East China Normal University, Shanghai 200241, China; 6. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China; 7. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 8. Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 9. Jiangsu Geology & Mineral Exploration Bureau, Nanjing 210018, Jiangsu, China; 10. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China; 11. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, Jiangsu, China; 12. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 13. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, Henan, China; 14. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China; 15. Center For Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China; 16. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 17. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China; 18. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China; 19. Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ningbo 315012, Zhejiang, China; 20. Zhejiang Nuclear Industry 262 Brigade, Huzhou 313000, Zhejiang, China; 21. Jiangxi Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Gannan Geological Survey Brigade, Ganzhou 341001, Jiangxi, China)

**Abstract:** In recent years, China Geological Survey organized and implemented the “Comprehensive Geological Environment Survey Project of the Yangtze River Economic Zone”, which has obtained a batch of important results and understandings through environmental geological survey, evaluation and monitoring, as well as the combination of thematic research and comprehensive research: ① The project has established a comprehensive information management-service system for geological resources and environment in the Yangtze River Economic Zone (YREZ), systematically sort out the resource and environmental conditions and major geological problems in the whole zone and its key regions, and put forward relevant suggestions. ② It is proposed a new understanding that the continuous connecting of the Yangtze River occurred 750 000 years ago, at the turn of the early and middle Pleistocene. ③ It explores and forms five series of key technologies and methods system for ecological restoration demonstration in the Yangtze

river basins. ④ It formulates the research method system of major water conservancy projects and geological environment effects in the Yangtze river basin, creates a set of multi-modal sensor system, and rejudges the impact of major water conservancy projects on geological environment. ⑤ It explores and sets up the theory and method system of investigating, evaluating and monitoring earth critical zone at the basin scale. ⑥ With the innovative application of “optical fiber technology” in monitoring ground subsidence and cracks, Yangtze river bank collapse and urban underground space development disturbances, related technologies have made breakthrough and are leading the development of optical fiber monitoring science. ⑦ The comprehensive investigation technology and methods of aviation hyperspectral remote sensing have been set up through independent research and development of airborne aerial hyperspectral spectrometer. ⑧ It explored an evaluation system including three scales of resources-environment carrying capacity in the river basins and eight evaluation methods for the suitability of territorial space development and utilization. ⑨ The research results have been widely used in supporting and serving the territorial planning of the YREZ, the protection and restoration of the ecological environment in the river basins, the new urbanization strategy, the planning and construction of major projects, the prevention and control of geological disasters, the poverty alleviation, and the construction of the national underground strategic oil-gas storage base. At the same time, 21 stable professional teams of environmental geological survey have been formed.

**Key words:** Yangtze River Economic Zone; Yangtze river basins; environmental geology; hydrogeology; engineering geology; geological environment; geological survey; carrying capacity of resources and environment

## 《长江经济带环境地质和生态修复》专著再获殊荣

中国地质调查局南京地质调查中心姜月华研究员牵头完成的《长江经济带环境地质和生态修复》专著,近日再获殊荣——第五届湖北出版政府奖。这是该专著继2021年入选国家新闻出版署“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目,2022年获批国家出版基金资助、同年入选湖北省重点精品图书,近日再获第五届湖北出版政府奖。

该专著由中国地质大学出版社出版,是中国地质调查局“长江经济带地质环境综合调查工程”成果,工程以支撑服务长江经济带黄金水道功能提升、立体交通走廊建设、产业转型升级、新型城镇化建设、绿色生态廊道打造等为目标,在“4个经济区”“3条发展线”“4个重点区”开展了地质环境综合调查工作。专著在系统梳理长江经济带基础地质条件、地质资源和重大地质问题基础上,总结了在长江崩岸、地下空间开发利用扰动、地面沉降和地裂缝光纤监测技术与应用示范、机载航空高光谱仪研发与应用、流域地球关键带监测、环境地质调查标准研制等方面取得的成果和经验,提出了长江贯通时限和演化新认识、流域生态环境修复示范、流域重大水利工程与生态地质环境多元响应、流域尺度地球关键带调查研究、流域资源环境承载能力和国土空间开发利用适宜性评价等理论与技术方法体系,构建了11个省(市)地质工作协调联动机制和地质资源环境综合信息管理与服务系统,探索了城市群、城市及小城镇3个层次中央—地方合作新模式,阐述了在国土空间规划、生态环境保护修复、新型城镇化战略、重大工程规划建设、地质灾害防治、脱贫攻坚等方面取得的成效。

该专著为长江经济带国土空间规划、灾害防治和生态环境保护与修复提供了地质依据和科技支撑,紧跟当前长江大保护和长江经济带生态文明建设的主题,具有重要的科学价值。