

秦正峰, 许琦, 贾敏, 等. “一带一路”岩溶区编图与特征分析[J]. 中国岩溶, 2025, 44(3): 645-656, 668.

DOI: 10.11932/karst20250311

“一带一路”岩溶区编图与特征分析

秦正峰^{1,2}, 许琦^{1,2}, 贾敏³, 毕雪丽^{1,2}, 杨象鹏^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406; 3. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 文章利用MRT和ENVI软件对收集到的降水量、遥感卫星数据进行处理, 编制完成“一带一路”岩溶区卫星影像图、地势图、降雨量图、蒸发量图、地表温度图等图件; 通过整合遥感影像图、地质图、文献等资料数据, 并结合野外实地验证, 开展了高原、大斜坡、平原、滨海岩溶特征与地质、气候背景的对比分析, 结果表明: (1) “一带一路”岩溶区分布面积约1 230万km², 占全球岩溶分布面积的一半以上, 中国、俄罗斯和哈萨克斯坦岩溶面积位居前三; (2) 高程在0~1 000 m分布的岩溶面积占总岩溶面积的74%, 3500 m以上分布的占比只有8%; 地表温度在9℃以上的岩溶区面积占65.3%, 而9℃以下的只占34.7%; 年降雨量在0~210 mm分布的岩溶面积约占总面积的31%, 210~540 mm的占32%, 540~840 mm的占18%, 超过840 mm的占19%; 蒸发量在205 mm以下分布的岩溶面积占总面积的51.4%; (2) 埃塞俄比亚、克罗地亚、土耳其、伊朗、泰国以及中国南方岩溶发育的条件、岩溶地貌的控制因素是: 可溶岩的岩性和构造是驱动岩溶发育的内动力, 气候是驱使岩溶发育的外动力, 内外动力因素共同影响岩溶地貌发育; 中国南方岩溶在不同的历史时期形成了不同的垂直水文剖面 and 溶蚀—侵蚀基准面, 为适应基准面的变化, 形成高程不同的岩溶地貌发育区, 且高程的巨大差异也会引起气候、水文、构造条件的差异。

关键词: “一带一路”; 岩溶地貌; 分布范围; 发育特征; 对比分析

创新点: (1) 利用遥感解译和综合制图等手段研究总结“一带一路”不同高程、温度、降雨量和蒸发量下岩溶的分布规律; (2) 开展岩溶特征与地质、气候背景的对比研究, 以中国南方岩溶为例分析构造抬升作用对岩溶地貌的分异影响。

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2025)03-0645-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

2013年中国国家主席习近平在出访哈萨克斯坦和印度尼西亚期间, 先后提出共建“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”的倡议(以下简称“一带一路”), 迅速引起世界沿线国家的广泛共鸣,

为地学合作与发展带来了新的历史机遇^[1]。“一带一路”沿线是全球能源资源产出和供应的重要地区。“一带一路”已发现石油、天然气、煤炭、铁、铝、铀、铜、钾盐、稀土、石墨等近200种能源和矿产资源^[2]。其中, 石油储量占世界55%, 天然气占76%^[3]。碳酸盐岩油气藏在全球油气资源中占有极为重要的地位。

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20242982, DD20221808, DD20190452)

第一作者简介: 秦正峰(1992—), 男, 助理研究员, 从事水文地质、境外编图等研究工作。E-mail: 1554310026@qq.com。

通信作者: 许琦(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、境外编图等研究工作。E-mail: xuqimail@foxmail.com。

收稿日期: 2024-02-15

据统计,碳酸盐岩油气资源量约占全球油气资源量的 70%,探明可采储量约占 50%,产量约占 60%^[4]。同时,由于地质构造复杂,地形起伏度剧烈、气候多变,地震频发,以及人类活动的剧烈影响,使得该地区成为全球滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害频发,人员伤亡和财产损失最为严重的区域^[5]。

截止到 2013 年底,全球具有岩溶特征世界遗产地共 53 处,其中世界自然遗产 42 处,有 7 处位于热带雨林气候带,热带草原气候带和温带大陆性气候带均分布有 5 处遗产地,地中海气候带和高原山地气候带分别有 4 处^[6]。“一带一路”沿线岩溶面积占全球岩溶分布面积的 50% 以上。秀美的岩溶地貌和奇特的洞穴景观成为重要的旅游资源,丰富的岩溶水资源和碳酸盐岩油气资源保障了人类的生存和发展。“一带一路”沿线大部分岩溶区是人类活动比较集中和强烈的地区,在全球变化背景下,这些地区共同面临的岩溶干旱、石漠化、水污染等环境问题突出,塌陷、洼地内涝等地质灾害问题严峻,严重威胁区域生态环境安全。

2016 年底,中国地质调查局依托联合国教科文组织国际岩溶研究中心,启动了“全球岩溶动力系统资源环境效应”国际大科学计划。为促进“一带一路”沿线国家合作,推进“全球岩溶动力系统资源环境效应”国际大科学计划的实施,2017 年,中国地质调查局启动了 1:1000 万全球岩溶地质系列图件编制计划,为搭建全球岩溶信息大数据平台奠定了良好基础,对推进岩溶地质学科发展具有重要意义。

本研究依托中国地质调查局项目“‘一带一路’重点区岩溶地质环境对比与编图”编制了“一带一路”岩溶地质环境专题图件,通过整合遥感影像图、地质图等资料,结合野外实地验证,开展了高原、大斜坡、平原、滨海岩溶特征与地质、气候背景的对比分析,以期为岩溶地质科学研究和岩溶地质国际合作提供支撑依据。

1 数据来源及处理方法

“一带一路”岩溶区专题图包括“一带一路”岩溶地区卫星影像图、地势图、降雨量图、蒸发量图、地表温度图。

1.1 数据来源

1.1.1 降雨量数据

本研究中所用的降雨量资料是来自美国国家大气研究中心的气象数据产品。本次研究需全球范围的降雨量数据(比例尺为 1:1000 万),故选择全球降水气候计划(GPCP)提供的 0.5°空间分辨率月值数据集。

1.1.2 中分辨率成像光谱仪(MODIS)传感器数据

(1)MOD11A2 数据

MOD11A2 是美国地质调查局开发的遥感卫星数据集,用于监测全球地表温度。本研究使用的是 MOD11A2 陆地地表温度产品(LST)。

(2)MOD13Q1 数据

MOD13Q1 数据产品共有归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)等 12 个波段。NDVI 可用于植被状况的全球监测和产品展示、土地覆盖和土地覆盖变化。本研究使用了归一化植被指数算法反演的 250 m 分辨率 2002—2017 年连续 16 d 平均 NDVI 产品。

(3)MOD16A2 数据

MOD16A2 V105 产品以 1 km 像素分辨率提供 8 d 全球陆地蒸散量(ET)信息,可通过美国航空航天局(NASA)网站下载。

1.1.3 数字高程模型数据(DEM)和卫星影像数据

DEM 包含了地球表面各处的高程信息,可分析表征岩溶分布区域的地貌特征。本研究所使用的 DEM 数据来自目前广泛使用的航天飞机雷达地形测绘使命数据(SRTM)。卫星影像数据来源于谷歌卫星影像。

1.2 处理方法

通过 NASA 网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)下载 NDVI、LST 和 ET 的 2018 年相应数据产品,通过 NOAA 网站(<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcp.html>)获取降雨量等气象数据,通过地理空间数据云网站(<https://www.gscloud.cn/>)下载 DEM 数据,对“一带一路”岩溶地区进行环境遥感解译,过程如下:

(1)MOD13Q1/MOD11A2/MOD16A2 数据:利用

MRT(MODIS Reprojection Tool)工具,进行数据拼接、投影转换等影像处理,输出的像元大小为 0.1° ,投影坐标系为WGS84;提取MOD13Q1数据的NDVI数据集、MOD11A2数据的日间LST和夜间LST数据集、MOD16A2数据的ET数据集;通过IDL(Interactive Data Language)编程,将数据在时间上进行合成,得到年均数据;

(2)DEM数据需通过ENVI(The Environment for Visualizing Images)软件对其进行重投影及重采样,输出坐标系为WGS84、像元大小为 $0.002^{\circ}\times 0.002^{\circ}$ 的图像;降雨量数据需通过IDL编程读取,获得研究区的年降雨量数据,进而编图。

通过遥感解译出的年降雨量、年均气温、年蒸发量、高程、卫星影像图等栅格精度为1:1000万,与1:1000万“一带一路”地理底图及岩溶区(来自新西兰Auckland大学地理、地质与环境科学学院研究成果)叠加,最终成图。

1.3 处理环境

本次研究利用MRT将MODIS影像从原始正弦

曲线投影转换为UTM-WGS84投影坐标系,选择影像中的空间子集和波段子集进行投影转换;利用ENVI下IDL编程语言对数据进行计算,生成各项环境指标数据;利用ArcMap进行最终的制图处理及岩溶面积统计。

2 “一带一路”岩溶区地理环境

“一带一路”涵盖了欧亚板块、澳大利亚—印度板块及阿拉伯板块,大陆岩石圈历经多期、多旋回聚合—裂解,地质构造演化复杂,主要分布有太古宙、早元古代、晚元古代固结的地台,其中比较著名的有扬子地台、中朝地台、西伯利亚地台、阿拉伯地台及印度地台。区内造山活动带发育且演化复杂,古生代、中生代及新生代造山带展布整个区域^[1]。“一带一路”地区地形起伏剧烈,高差达8 km以上,其中海拔最高处位于青藏高原地区,海拔最低处位于东南亚区。区内高原、高山、丘陵、平原、盆地等地貌类型都有分布,最大坡度为 65° ,位于东亚区,平均坡度最大区域位于南欧地区,最小区域位于东非地区^[7]。

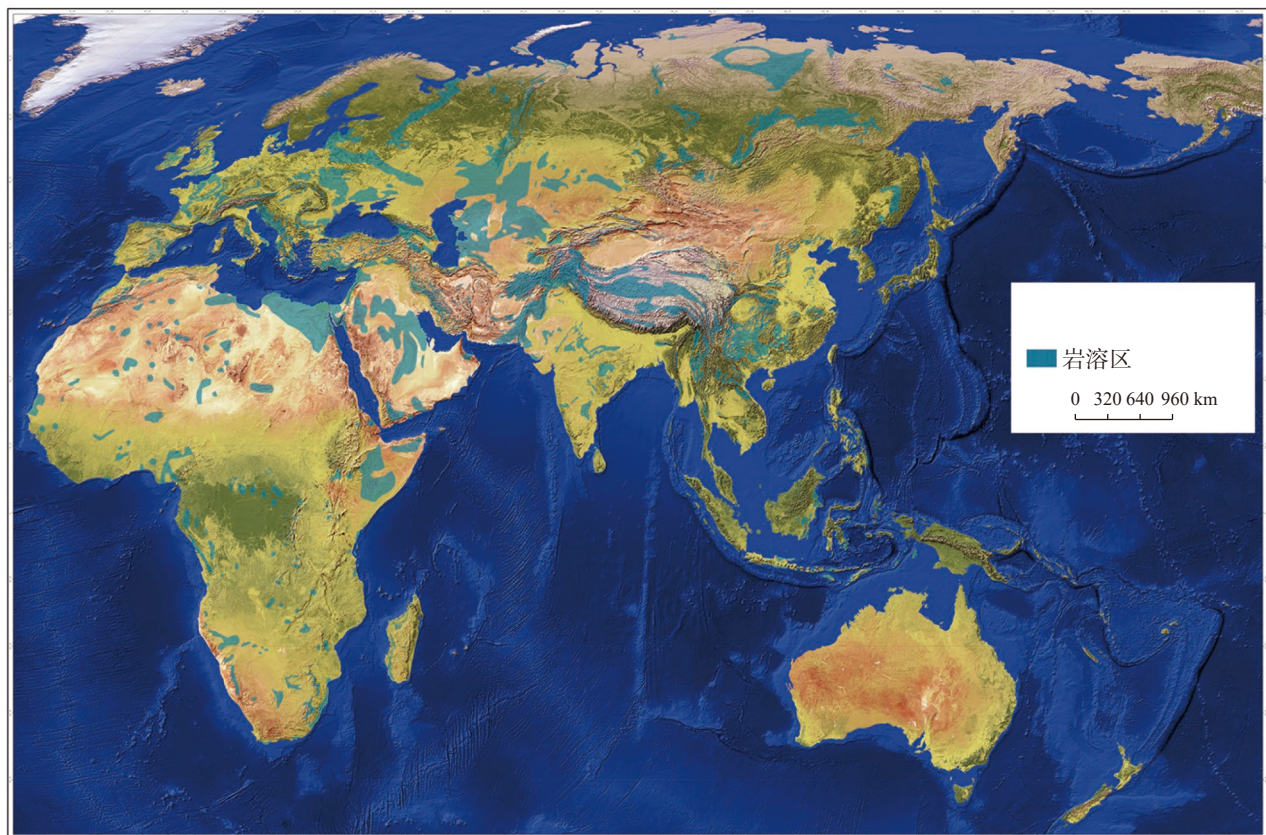


图1 “一带一路”岩溶区卫星影像图

Fig. 1 Satellite image map of karst regions along the Belt and Road

2.1 “一带一路”岩溶区卫星影像

“一带一路”岩溶分布广泛,面积约 1230 万 km², 占全球岩溶分布面积的一半以上。从沿线国家岩溶分布情况看,面积大于 20 万 km² 的有中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、沙特阿拉伯、埃及、巴基斯坦、印度、利比亚、阿富汗、伊朗、乌克兰、埃塞俄比亚、乌兹别克斯坦、土耳其 14 个国家(图 1)。

主要岩溶国家中,中国、俄罗斯、哈萨克斯坦三个国家的岩溶面积超过了 100 万 km²,其中中国岩溶面积约为 344 万 km²,约占国土面积的 35.83%;乌兹别克斯坦和埃及的岩溶分布面积约占国土面积的一半;巴基斯坦、阿富汗、乌克兰岩溶分布面积都占国土面积的 40% 以上,以第纳尔岩溶闻名世界的克罗地亚岩溶面积为 29356 km²,约占国土面积的 51.87%(表 1)。

表 1 主要国家岩溶面积统计表
Table 1 Statistics of karst regions in major countries

国家名称	岩溶面积/km ²	国土面积/km ²	岩溶面积占比/%
中国	3440000 ^[8]	9600000	35.83
俄罗斯	1710290	17098200	10.00
哈萨克斯坦	1034859	2724901	37.98
沙特阿拉伯	630229	2150000	29.31
埃及	496123	1001450	49.54
巴基斯坦	382795	881912	43.41
印度	325321	2980000	10.92
利比亚	288475	1760000	16.39
阿富汗	265797	652230	40.75
伊朗	262178	1645000	15.94
乌克兰	248855	603500	41.24
埃塞俄比亚	246993	1104300	22.37
乌兹别克斯坦	222289	447400	49.68
土耳其	300000 ^[9]	783562	38.29
克罗地亚	29356 ^[10]	56600	51.87

2.2 “一带一路”岩溶区地形

地形是影响岩溶发育的重要因素,不同高程直接导致温度、降雨量等气候因子的不同,岩溶发育程度在不同高程下差异较大。“一带一路”平均海拔最高的区域位于东亚,平均海拔最低的区域位于东欧,东亚、中亚及西亚的高程范围跨度较大。海拔最高的岩溶区位于中国青藏高原地区(海拔在 3500 m 以上),中国西南的云南石林(1700~2200 m)、重庆武

隆(900~1200 m)以及土耳其托罗斯山脉(从海拔 3000 多米的山顶至地中海沿岸岩溶均有发育)、安纳托利亚高原(平均海拔 1200 m)等岩溶区海拔也相对较高^[11],海拔较低的岩溶区主要位于中欧、东欧、东南亚及中国广西桂林地区(小于 200 m)。根据统计计算,高程在 200 m 以下的平原区岩溶面积约为 354 万 km²,200~500 m 的丘陵区岩溶面积约为 341 万 km²,500~1000 m 的低山区岩溶面积约为 214 万 km²,1000~3500 m 的中高山区岩溶面积约为 223 万 km²,3500 m 以上的高山区岩溶面积约为 98 万 km²。岩溶大多分布在海拔低于 1000 m 的平原、丘陵以及低山地区,分布面积为 909 万 km²,约占总岩溶面积的 74%,而海拔高于 3500 m 的高山区岩溶只占总岩溶面积的 8%,主要分布于青藏高原地区(图 2)。

“一带一路”与特提斯构造域具有很大的重叠性,特提斯构造域是现今地球上横跨欧亚大陆南缘的一个巨型造山系统,西起地中海西部,向东经阿尔卑斯至土耳其安纳托利亚高原和伊朗高原、巴基斯坦、阿富汗,经帕米尔延伸至喜马拉雅和青藏高原,进入缅甸和东南亚,绵延数千千米,是地球上最年轻、最大规模的造山带^[12]。它的形成经历了一个漫长而复杂的过程,伴随着地球显生宙期间位于北方劳亚大陆和南方冈瓦纳大陆之间的特提斯洋系统的演化。特提斯系统经历了多期次的大陆裂解、洋底扩张、大洋俯冲和大陆碰撞造山,包含了多期次、循环往复的威尔逊旋回过程^[13],从而造就了“一带一路”复杂多变的地形以及区内强烈的构造发育,如伊朗由于板块挤压形成的扎格罗斯造山带,北部发育以逆冲构造为主的冲断带,南部发育以宽阔向斜—背斜为主的前陆褶皱带。

岩溶系统的发育与分布受岩性、构造等条件的综合影响^[14-21]。碳酸盐岩是最重要的可溶岩,多数沉积碳酸盐岩形成于被动大陆边缘的浅海淹没碳酸盐台地环境^[22],在特提斯洋扩张阶段,如中生代大部分时期,其两侧(冈瓦纳大陆北缘和劳亚大陆南缘)形成了广阔、沉降缓慢的被动大陆边缘,这些被动边缘提供了大面积温暖、光照充足和营养物质适中的浅海环境(陆架、台地、缓坡),是碳酸盐生物繁盛和碳酸盐沉积物大量生成的最理想场所。构造因素包括裂隙、褶皱和断裂。褶皱决定了地层的空间展布,控制可溶岩及岩溶带的分布,褶皱核部或转折端常为应力集中带,节理裂隙发育,有利于水的溶蚀作用,

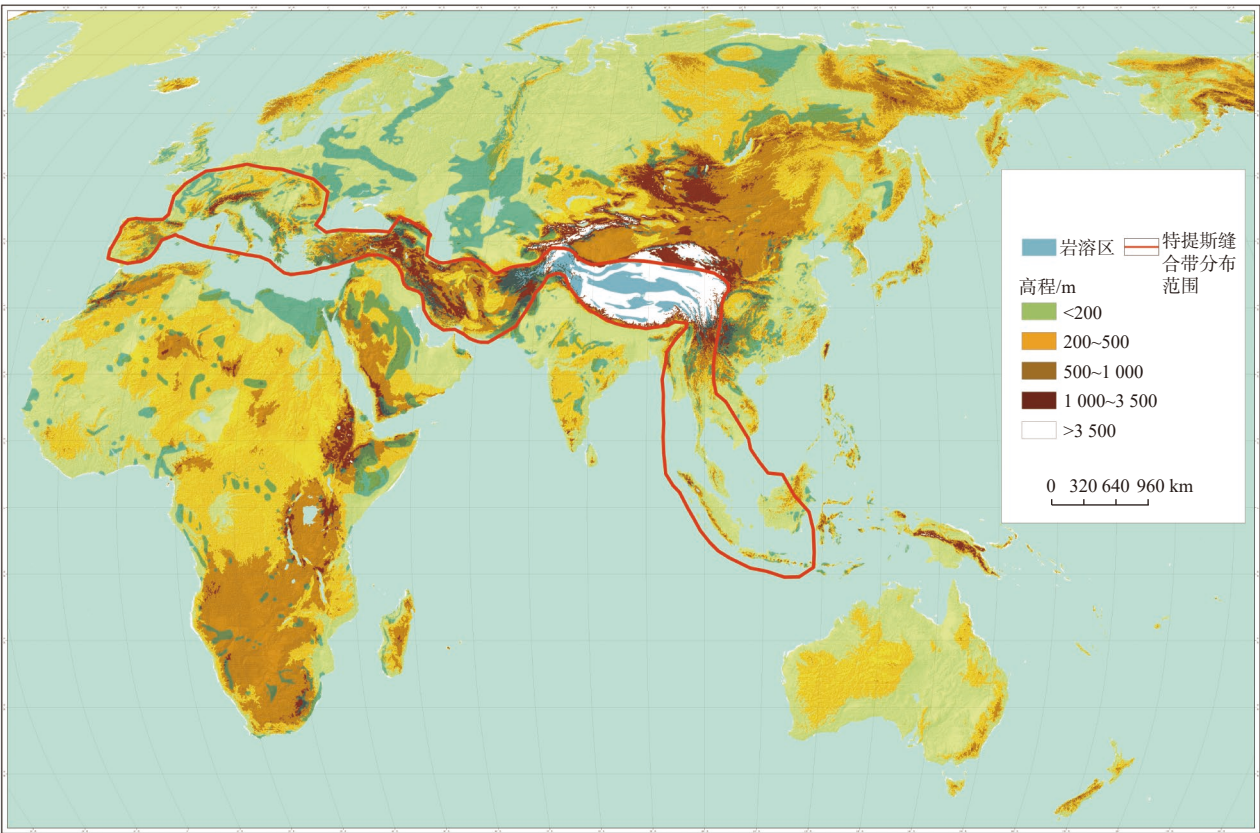


图 2 “一带一路”岩溶区地势图
Fig. 2 Topographic map of karst regions along the Belt and Road

从而加速岩溶进程；断裂构造在形成过程中产生的构造裂隙极为发育，可使被非可溶岩或隔水层分隔的不同可溶岩层中的地下水得到有效沟通，因此断裂带及近侧围岩岩溶发育强度更高、深度更大，且岩溶发育区的展布方向一般与断裂走向一致^[23-24]。岩溶地貌和形态是地层组合和构造作用的集中反映。岩溶谷地、峡谷一般沿向斜、断裂构造和地层界线发育；坡立谷一般沿向斜或地堑等主构造发育；溶蚀漏斗一般位于两组裂隙的交叉部位；线状组合的漏斗和干谷多沿主节理或裂隙发育，也是洞穴和地下水流发育的优先方向^[22]。“一带一路”岩溶区大多分布在特提斯缝合带及其周边区域，古生代、中生代和新生代都有碳酸盐岩沉积，在不同构造组合以及气候条件的作用下，形成千姿百态、类型不同的岩溶地貌。

3 “一带一路”岩溶区气候

“一带一路”沿线活跃的地壳运动，决定了驱动岩溶发育的内动力较为强烈，而气候类型的多样性

则成为驱使岩溶发育的外动力因素。气候变化主要通过改变水的溶蚀能力来影响岩溶发育的速度、规模和类型。对岩溶作用影响最大的气候要素是降雨量和温度，而降雨量和年均温度均与年蒸发量呈现较为一致的变化趋势。

降水的多少不仅影响水的渗透和水的循环，而且雨水在下渗过程中吸收了空气和土壤中的 CO₂，溶蚀能力大大增强。而气温主要影响微生物的生物化学反应速度，一般来说气温高则反应速度快，可分解产生更多的有机酸和 CO₂，增强水的溶蚀能力。因此，就气候条件来看，热带岩溶地表地下都很发育；亚热带岩溶地表地下相对发育，但发育规模和程度不如热带；温带地表岩溶不发育，以地下隐伏岩溶为主；而青藏高原等高寒地区，现代岩溶极其微弱^[25]。

从气候类型来看，中国南部及西南地区岩溶属于亚热带季风和湿润气候，南亚及东南亚岩溶区属于热带季风和热带雨林气候，伊朗西南部岩溶属于干旱半干旱气候，青藏高原岩溶属于高原山地气候，土耳其西南岩溶区属于地中海气候，埃塞俄比亚东南岩溶区属于热带草原气候。

3.1 “一带一路”岩溶区降雨量

“一带一路”多年平均降雨量呈东南多、西北少,沿海多、内陆少的分布规律。降雨量最为丰富的岩溶区位于泰国、印度尼西亚、马来西亚等东南亚地区,中国西南岩溶区和欧洲地中海沿岸岩溶区等降雨量也较丰富;非洲北部、阿拉伯半岛及中亚等岩溶区降雨量较贫乏。根据计算,年降雨量在 0~210 mm 分布的岩溶面积约占总面积的 31%, 210~540 mm 分布的岩溶面积约占总面积的 32%, 540~840 mm 分布的岩溶面积约占总面积的 18%, 年降雨量超过 840 mm 分布的岩溶面积约占总面积的 19%(图 3)。

3.2 “一带一路”岩溶区地表温度

若单纯考虑水对碳酸钙的溶解,则温度为正影响,而考虑 CO_2 在水中的溶解和碳酸的形成以及它们对碳酸钙的溶解,则温度为负影响,但温度对植被、细菌及土壤中的 CO_2 含量有重要影响,因此,温度对岩溶作用的正影响大于其负影响,而在高寒地区偏低的温度下,对岩溶形态起到重要作用的只剩下物理风化作用。“一带一路”地表温度基本上呈南高北

低的分布趋势,温度较高的岩溶区主要分布在非洲北部、阿拉伯半岛等南亚地区,温度较低的岩溶区主要分布在中国的青藏高原以及俄罗斯中北部地区。根据统计计算,地表温度在 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的岩溶区面积只占 34.7%,地表温度在 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的岩溶区面积占 65.3%(图 4)。

3.3 “一带一路”岩溶区蒸发量

一般来说,降雨量、温度越高的地区其蒸发量也越大,“一带一路”地区蒸发量基本呈现沿海高、内陆少的分布规律。蒸发量较高的岩溶区主要分布在中国西南、东南亚、非洲中部及欧洲地中海沿岸地区,蒸发量较低的岩溶区以非洲北部、阿拉伯半岛及中亚地区为主。据统计,蒸发量在 205 mm 以下分布的岩溶面积占总面积的 51.4%,在 205~430 mm 分布的岩溶面积占总面积的 30.8%,在 430 mm 以上分布的岩溶面积占总面积的 17.8%(图 5)。

4 不同岩溶区特征与地质、气候背景对比

开展高原、大斜坡、平原、滨海岩溶特征与地质、

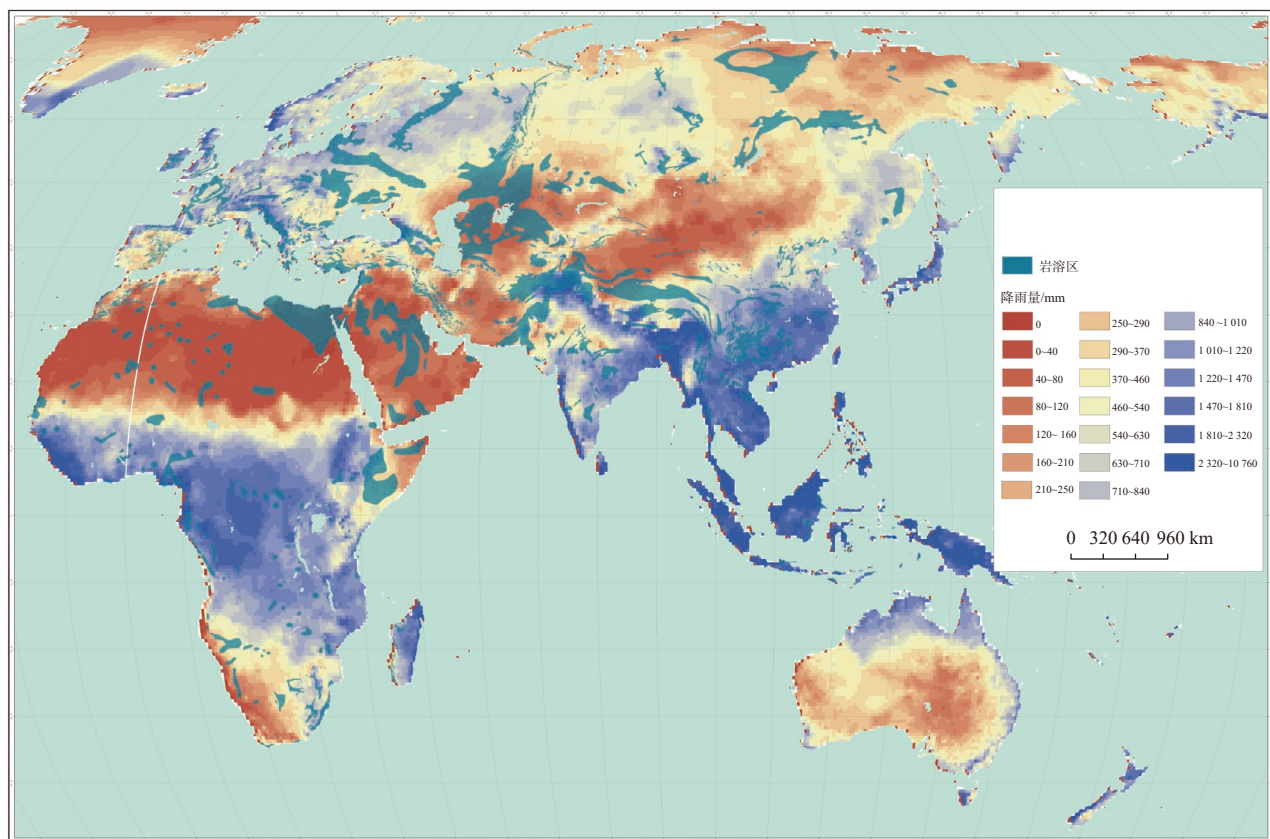


图 3 “一带一路”岩溶区降雨量图

Fig. 3 Precipitation of karst regions along the Belt and Road

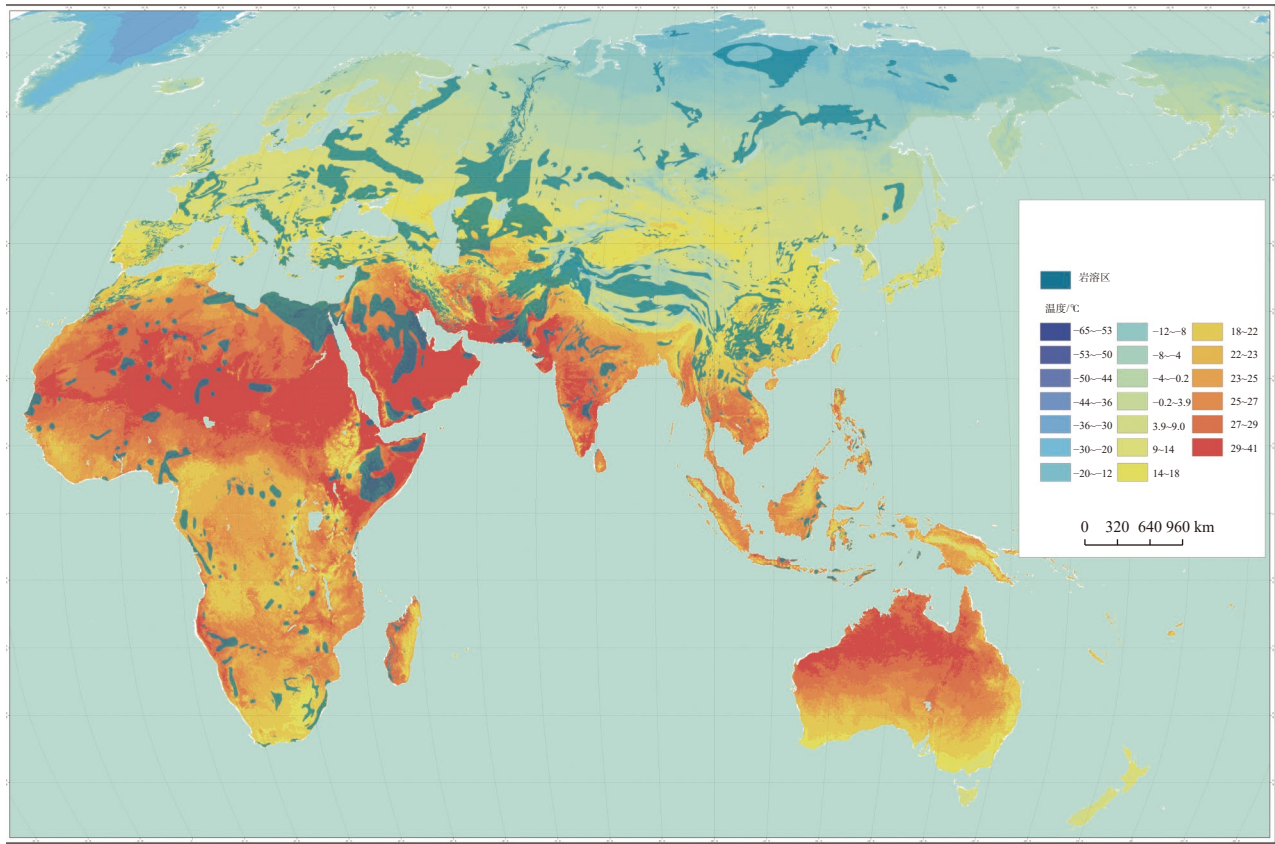


图 4 “一带一路”岩溶区地表温度图

Fig. 4 Surface temperatures of karst regions along the Belt and Road

气候背景对比研究,选择埃塞俄比亚、克罗地亚、土耳其、伊朗、中国西藏、重庆、贵州、广西,泰国沙墩等典型岩溶区作为研究对象,对比“一带一路”沿线不同国家碳酸盐岩地层、海拔高度、年均气温、年均降雨量、岩溶形态发育特征等,总结出不同区域岩溶发育的控制因素(表 2)。

埃塞俄比亚东南岩溶区处于东非高原,为热带草原气候,与东非裂谷形成相关的构造运动控制岩溶地貌发育,洞穴系统大都沿着 NE-SW 方向的裂谷通道发育,与埃塞俄比亚主裂谷的主要方向平行^[26],最著名的当属贝尔山国家公园的 Sof Omar 洞穴,其也是埃塞俄比亚规模最大、长度最长的洞穴(长约 15 km、高约 20 m),现已成为著名的旅游胜地。

克罗地亚的第纳尔岩溶形成于一个构造活跃区,在这里几个大小不等的大地构造板块直接接触。非洲板块连同较小的亚得里亚海板块向北延伸至阿尔卑斯山,亚得里亚海板块俯冲至第纳尔板块之下,是第纳尔山脉的基底部分。因此,这是一个地震频繁的古构造和新构造活跃区。该区以中生代、新生代可溶性碳酸盐岩为主,厚度达 8 km,具有良好的水文

地质条件,岩溶作用十分突出,发育坡立谷、溶蚀洼地、峡谷、落水洞、竖井、天生桥等。第纳尔岩溶是洞穴学和洞穴勘探以及岩溶现代水文地质学的发源地,许多与岩溶相关的国际公认术语以及理论都诞生于此^[29]。截至 2021 年 8 月,克罗地亚第纳尔岩溶区共记录了约 12 500 个洞穴,其中最长的为 Crnopac 洞穴,长度为 54.7 km^[30]。

土耳其主要岩溶区为地中海气候,其岩溶发育强度超过了地中海周围其他地区,这是由于阿尔卑斯—喜马拉雅造山带(阿拉伯板块与安纳托利亚板块碰撞)的强烈构造活动,将碳酸盐岩抬高至海平面以上,在淡水和海洋之间形成强大的能量梯度。造山运动产生强烈的褶皱和断层,为初始水循环提供断裂系统,促进了岩石溶解和次生孔隙的形成,高差巨大、陡峭的地形,成为气团运动的障碍,迫使气团上升并沉淀雨雪,加速碳酸盐岩的溶解,发育大型洞穴系统、竖井及温泉等^[31]。据统计,土耳其有超过 2 万个洞穴分布在岩溶地区,其中最长的洞穴为 Pinargozu 洞(长度为 8 500 m),而 Peynirlikonu 是已知最深的落水洞(深度为 1 429 m)^[9]。此外,由断层作用形成的棉花堡温泉,

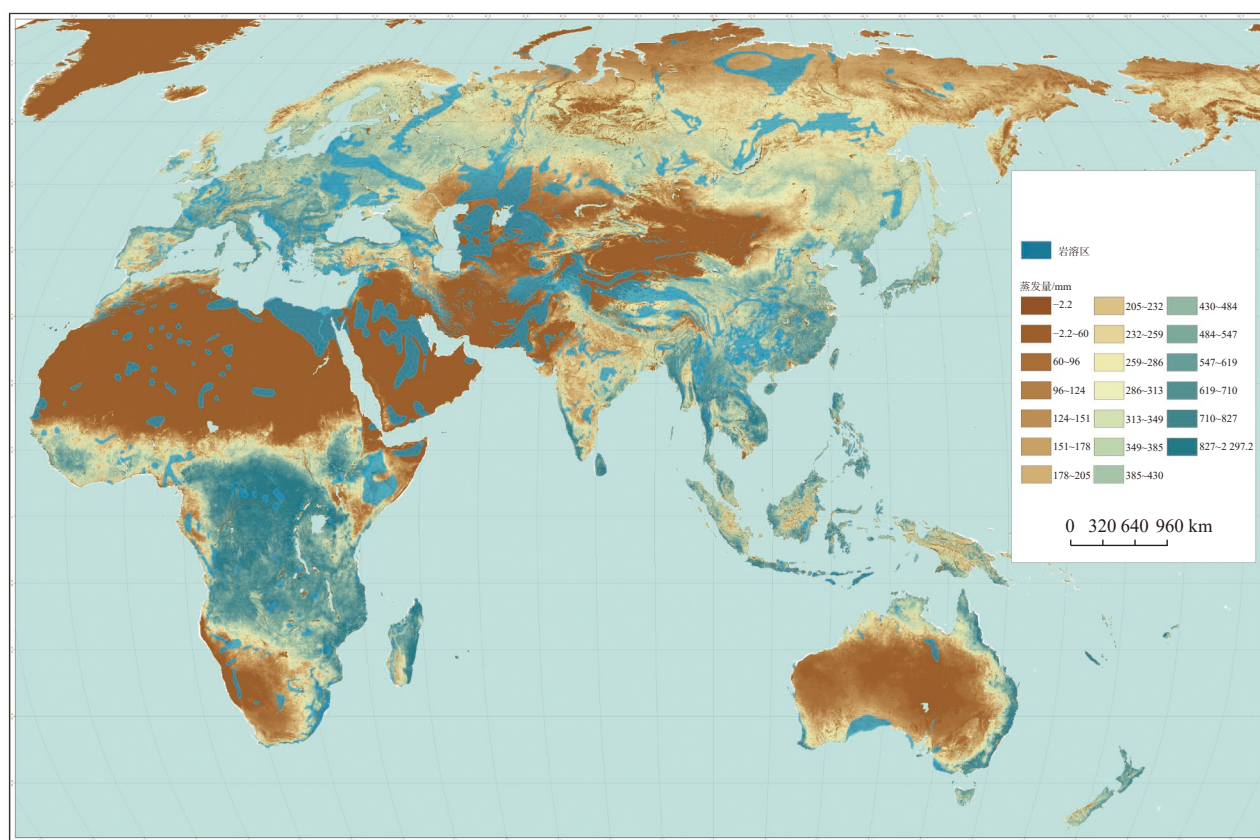


图5 “一带一路”岩溶区蒸发量图

Fig. 5 Evaporation of karst regions along the Belt and Road

因其美丽壮观的钙华景观,成为举世闻名的度假胜地,同时也被列为文化自然双重遗产。

伊朗西南岩溶区位于阿拉伯板块东北缘的扎格拉斯山脉褶皱带,是阿尔卑斯—喜马拉雅造山带的一部分。其岩溶受褶皱构造与抬升控制显著,在干旱半干旱气候的影响下,主要地貌形态为紧密背斜成高山,宽缓向斜成坡立谷,且泉点众多。例如,扎格拉斯山脉的 Kazeroon 断层穿过 Dashtak 背斜,发育众多泉点,其中 Sasan 泉是 Kazeroon 市以及波斯湾沿岸港口城市的重要水源地,主出口海拔 813.56 m,平均流量为 $6.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,经现场测试分析,电导率为 $935 \text{ } \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, HCO_3^- 浓度为 $4.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 浓度为 $110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,溶解氧为 $5.175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氧化还原电位为 77.93 mv ,总溶解固体为 $473.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

构造抬升作用也会引起岩溶地貌的分异。以中国南方为例,在新构造运动期间,该地区受到掀斜式阶段性抬升作用的改造,地势自西向东逐渐形成三级阶梯^[32]:第一阶梯主要为海拔在 3500 m 以上的青藏高原地区,第二阶梯为海拔 1000~3500 m 之间的中高山地区(主要包括云南省、四川省、重庆市以及

贵州省西部),第三阶梯为海拔 1000 m 以下的丘陵平原区(主要包括贵州东部、广西桂林等地)。其在不同的历史时期形成了不同的垂直水文剖面 and 溶蚀—侵蚀基准面,区域地貌为适应基准面的变化,形成了高程不同的岩溶地貌发育区,且高程的巨大差异也会引起气候、水文、构造条件的差异,从而引起岩溶地貌的分异:

中国青藏高原区域位于第一级地势阶梯,海拔高、气温低,降雨量稀少,现代岩溶发育受到限制,仅在岩石表面发育溶痕等微岩溶形态;而第三纪时期热带—亚热带环境下发育演化的覆盖型岩溶剥露地表后,经青藏高原隆升,再受高寒干燥气候的影响形成的岩溶形态类型多样,形成了以各种冰川或冰缘霜冻溶蚀形态为主的高山岩溶,如冻蚀石柱、石墙、石灰岩质岩锥以及岩溶泉和钙华^[33]。

中国西南云贵高原、四川和重庆位于第二级地势阶梯,降水丰富,气候湿润,由于地理上处于坡度陡降区,河流下切侵蚀动力强,岩溶垂向极为发育:在强烈线性隆起的横断山脉地区发育了高山峡谷型地貌类型;在中等隆起的川西高原和云贵高原地区,

表 2 高原-大斜坡-平原-滨海岩溶特征与地质、气候背景对比

Table 2 Comparative analysis of karst characteristics and geological/climatic contexts across plateaus, large slopes, plains, and coastal zones									
国家、省 (区、市)	埃塞俄比亚	克罗地亚	土耳其	伊朗扎格拉斯	中国西藏	中国重庆	中国贵州	中国广西	泰国沙墩
地点	Sof Omar洞穴 ^[26]	Čikola峡谷 ^[27]	棉花堡 ^[28]	卡泽隆Sasan泉	那曲, 安多 县北山	金佛山岩溶	荔波岩溶	桂林岩溶	沙墩公园
区域	东非裂谷高原	大陆斜坡	大陆高原斜坡	大陆高原褶皱带	青藏高原	大陆高原边缘	大陆高原斜坡	大陆冲积平原	滨海海岸
气候带	热带草原气候	地中海气候	地中海气候	干旱—半干旱 旱气候	高原高山气候	亚热带季风 气候	亚热带季风 气候	亚热带季风 气候	热带季风 气候
地层 岩性	侏罗系灰岩	白垩系、始新世—渐新世灰岩	上新世灰岩	渐新世—中新世 灰岩	侏罗系泥 晶灰岩	二叠系、三叠系 灰岩	三叠系灰岩、白 云岩	泥盆系灰岩、 白云岩	奥陶系灰岩
年均降 雨量/mm	500~600	950~1 250	500~700	700~850	400~500	1 286~1 434	1 000~1 200	1 800~2 000	1 600~1 800
年均气 温/℃	10~16	12~15	16~22	15~18	0~4	8~17	16~18	18~20	24~26
海拔/m	1 332	280	320	810	4 900	1 900	400	170	10
洞穴发 育情况	大型洞穴系统	大型洞穴系统, 发育竖井	大型多层洞穴系 统, 发育竖井	水平洞穴	小型洞穴	大型洞穴系统	多层洞穴系统	峰丛大洞、峰 林小洞	多层洞穴系统
地貌控 制因素	与东非裂谷形成 相关的构造运动 控制洞穴走向和 发育	发育以逆断层为 主的挤压构造, 岩溶作用深入地 下深层	阿尔卑斯造山运 动期间的褶皱和 逆冲断层作用, 断裂发育	卡泽隆的区域走 滑断裂在 Dashrak背斜西 北倾向附近经过	高寒降水量低, 现代岩溶发育受 到限制, 仅在基 岩表层发育微弱 溶蚀	区域降水丰沛, 地表、地下岩溶极为 发育, 而坡度陡降, 河流下切, 地表 及地下水快速流出, 构成峰丛洼地 和深切峡谷的组合	区域高温多雨, 地表及地下岩溶强 烈发育, 地形平缓接近区域侵蚀基 准面, 发育典型的峰丛、峰林平原组 合; 在滨海区域, 则发育海上石林		
岩溶 地貌 (地表)	岩溶峡谷、谷地	坡立谷、溶蚀洼 地、峡谷、落水 洞、竖井等	落水洞、竖井、 溶蚀洼地、坡立 谷、大型温泉	岩溶谷地、 坡立谷	现代岩溶不发育, 以溶痕、溶孔为 主; 古岩溶地貌 包括冻蚀石柱、 石墙等冰川溶蚀 形态	峰丛洼地 峰丛峡谷	峰丛洼地、谷地、 峡谷	峰丛、峰林 平原	峰林平原 海上石林
岩溶 地貌 (地下)	溶洞, 类型较丰 富的洞穴堆积物	溶洞, 类型较丰 富的洞穴堆积物	溶洞, 类型较丰 富的洞穴堆积物	不发育	不发育	溶洞, 类型较丰 富的洞穴堆积物	溶洞, 类型丰富 的洞穴堆积物	溶洞, 类型极丰富的洞穴堆积物	

发育峰林谷地、峰丛峡谷等地貌。

中国广西和泰国等中南半岛平原岩溶区位于第三级地势阶梯,高温多雨,地表及地下岩溶强烈发育,由于地形平缓,海拔较低,区域侵蚀基准面接近海平面,发育典型的峰丛谷地、峰林平原和孤峰平原地貌;在东南亚泰国等滨海区域,则发育有独特的海上峰林,如泰国的沙墩、苏梅岛海上峰林,越南的下龙湾(包含有 1 600 余座岛屿,有“海上桂林”的美称)。

5 结论与展望

(1)“一带一路”岩溶分布面积约 1 230 万 km², 占全球岩溶分布面积一半以上,中国、俄罗斯和哈萨克斯坦岩溶面积位居前三;高程在 0~1 000 m 分布的岩溶面积占总岩溶面积的 74%, 3 500 m 以上分布的岩溶面积占比只有 8%;地表温度在 9℃ 以上的岩溶区面积占 65.3%, 而 9℃ 以下的岩溶区面积只占 34.7%;年降雨量在 0~210 mm 分布的岩溶面积约占总面积的 31%, 210~540 mm 区间约占 32%, 540~840 mm 区间约占 18%, 超过 840 mm 分布的岩溶面积约占总面积的 19%;蒸发量在 205 mm 以下分布的岩溶面积占总面积的 51.4%。

(2)对比埃塞俄比亚、克罗地亚、土耳其、伊朗、泰国以及中国南方岩溶发育的条件、岩溶地貌的控制因素:可溶岩的岩性和构造是驱动岩溶发育的内动力,提供岩溶作用的基本框架,而气候是驱使岩溶发育的外动力因素,内外动力因素共同影响岩溶地貌发育。以中国南方岩溶为例分析了构造抬升作用对岩溶地貌的分异影响:构造抬升通过改变侵蚀基准面和水文结构,驱使岩溶地貌在不同高度分层发育,巨大的高差又引起水热等条件的变化,共同导致了岩溶地貌的多样化格局。

2023 年是习近平总书记共建“一带一路”倡议提出十周年,总书记在第三届“一带一路”国际合作高峰论坛开幕式上发表的主旨演讲,为“一带一路”明确了新方向,注入了新动力;今后的工作重点将是与合作国共建岩溶地质环境监测站,推动“一带一路”岩溶关键带和岩溶碳循环相关研究,服务于岩溶地区资源合理利用和经济社会可持续发展。

参考文献

[1] 王瑞江,陈其慎,聂凤军,梅燕雄.关于“一带一路”地学合作

若干问题的思考[J].地球学报,2016,37(4):433-40.

WANG Ruijiang, CHEN Qishen, NIE Fengjun, MEI Yanxiong. Consideration of some problems concerning the earth sciences cooperation in “One Belt and One Road” Construction[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(4): 433-440.

[2] 刘大文.“一带一路”地质调查工作刍议[J].中国地质,2015,42(4):819-827.

LIU Dawen. A tentative discussion on the “Belt and Road” geological survey[J]. Geology In China, 2015, 42(4): 819-827.

[3] 陈喜峰,施俊法,陈秀法,叶锦华.“一带一路”沿线重要固体矿产资源分布特征与潜力分析[J].中国矿业,2017,26(11):32-41.

CHEN Xifeng, SHI Junfa, CHEN Xiufa, YE Jinhua. Distribution characteristic and potential analysis of important solid mineral resources in “Belt and Road” area[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(11): 32-41.

[4] 李阳,康志江,薛兆杰,郑松青.中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(4):669-678.

LI Yang, KANG Zhijiang, XUE Zhaojie, ZHENG Songqing. Theories and practices of carbonate reservoirs development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 669-678.

[5] 杨冬冬,邱海军,胡胜,邹强,朱亚茹.“一带一路”地区地质灾害时空分布特征及防治对策[J].科技导报,2020,38(16):45-52.

YANG Dongdong, QIU Haijun, HU Sheng, ZHU Yaru. Temporal and spatial distributions of geo-hazards along the “Belt and Road” and policy recommendations for disaster prevention[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(16): 45-52.

[6] 文正红.中国南方喀斯特生态过程及其世界遗产价值研究[D].贵阳:贵州师范大学,2015.

WEN Zhenghong. Global geomorphic comparison and world heritage values of South China Karst [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2015.

[7] 郝林钢.“一带一路”分区自然地理特征及水资源分析[D].郑州:郑州大学,2019.

HAO Lingang. Physiographic characteristics and water resources analysis of the regions among the “Belt and Road” [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.

[8] 曹建华.岩溶:全球气候变化的地质过程之旅[J].国土资源科普与文化,2015(4):4-9.

[9] ALI YAMAÇ E G, EZGI TOK, KORAY TÖRK. Cave and Karst Systems of the World [M]. Berlin, Germany: Springer Nature, 2021.

[10] GARASIC M. The dinaric karst system in Croatia [J]. The Dinaric Karst System of Croatia, 2021: 25-45.

[11] GILLI E. Karst Areas of Turkey. Caves and Karst of Turkey (Volume 2) [M]. Berlin, Germany: Springer Nature, 2022.

[12] 吴福元,万博,赵亮,肖文交,朱日祥.特提斯地球动力学[J].岩石学报,2020,36(6):1627-1674.

WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, XIAO Wenjiao, ZHU

- Rixiang. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6): 1627-1674.
- [13] 李忠海, 崔峰源, 杨舒婷, 钟辛易. 特提斯演化的关键动力学过程与驱动力[J]. *中国科学(地球科学)*, 2023, 53(12): 2701-2722.
- LI Zhonghai, CUI Fengyuan, YANG Shuting, ZHONG Xinyi. Key geodynamic processes and driving forces of Tethyan evolution. *Science China Earth Sciences*, 2023, 53(12): 2701-2722.
- [14] 刘元晴, 周乐, 王新峰, 吕琳, 路小慧, 于开宁, 张伟峰. 北方岩溶区断裂带水文地质性质及结构模型[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6): 975-985.
- LIU Yuanqing, ZHOU Le, WANG Xinfeng, LV Lin, LU Xiaohui, YU Kaining, ZHANG Weifeng. Hydrogeological structure model of the fault zone in the karst area of north China[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 975-985.
- [15] 陈亮晶, 姚腾飞, 周鑫. 湖南道县铁锰矿区岩溶发育影响因素分析[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(3): 240-247.
- CHEN Liangjing, YAO Tengfei, ZHOU Xin. Analysis on impact factors of karst development in Dao county iron and manganese mining area of Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(3): 240-247.
- [16] 黄盛财, 成建梅, 巴净慧, 李仲夏, 徐文杰, 王研. 基于滇中典型紧窄单斜岩溶水系统特征的隧洞涌水条件分析[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(3): 528-537.
- HUANG Shengcai, CHENG Jianmei, BA Jinghui, LI Zhongxia, XU Wenjie, WANG Yan. Analysis of tunnel inflow conditions based on the characteristics of typical tight-narrow monoclinic karst water system in the central Yunnan Province, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(3): 528-537.
- [17] 吴亚楠, 杨涛, 焦玉国, 刘志涛, 王延岭, 翟代廷, 周绍智, 魏凯, 程凤. 山东省岩溶塌陷发育特征及诱因分析[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 128-138, 148.
- WU Ya'nan, YANG Yuntao, JIAO Yuguang, LIU Zhitao, WANG Yanling, ZHAI Daiting, ZHOU Shaozhi, WEI Kai, CHENG Feng. Analysis on development characteristics and inducement of karst collapse in Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 128-138, 148.
- [18] 冯亚伟. 山东省岩溶塌陷分布规律及成因机制[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 205-214.
- FENG Yawei. Distribution and genesis of karst collapse in Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 205-214.
- [19] 和祥, 董学兰, 杨超, 刘鹏, 薛博强. 云南鹤庆县北衙金矿岩溶发育及富水特征[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(6): 1173-1182.
- HE Xiang, DONG Xuelan, YANG Chao, LIU Peng, XUE Boqiang. Characteristics of karst development and water abundance of the Beiya Gold Deposit in Heqing county of Yunnan[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(6): 1173-1182.
- [20] 杨杨, 赵良杰, 夏日元, 王莹. 珠江流域岩溶地下河分布特征与影响因素研究[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(4): 562-576.
- YANG Yang, ZHAO Liangjie, XIA Riyuan, WANG Ying. Distribution and influencing factors of karst underground rivers in the Pearl River Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(4): 562-576.
- [21] 蒙彦, 郑小战, 雷明堂, 李卓骏, 贾龙, 潘宗源. 珠三角地区岩溶分布特征及发育规律[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(5): 746-751.
- MENG Yan, ZHENG Xiaozhan, LEI Mingtang, LI Zhuojun, JIA Long, PAN Zongyuan. Karst distribution and development in the Pearl River Delta[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 746-751.
- [22] 陈宏峰, 张发旺, 何愿, 夏日元, 邹胜章, 苏春田, 罗书文. 地质与地貌条件对岩溶系统的控制与指示[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(5): 42-47.
- CHEN Hongfeng, ZHANG Fawang, HE Yuan, XIA Riyuan, ZOU Shengzhang, SU Chuntian, LUO Shuwen. Geological and geomorphologic settings acting as the controlling factors and indicators for karst systems[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(5): 42-47.
- [23] 陈明, 王运生, 曹水合, 杨栓成. 旺苍地区岩溶地貌形态特征及成因机理研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(2): 11-17.
- CHEN Ming, WANG Yunsheng, CAO Shuihe, YANG Shuancheng. Study on the morphology features and genetic mechanism of karst in Wangcang area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(2): 11-17.
- [24] 姜文, 柏道远, 尹欧, 杨帆, 彭祖武, 钟响, 李彬, 李银敏. 湘中灰山港—煤炭坝地区岩溶发育特征及其构造控制[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(1): 1-12.
- JIANG Wen, BAI Daoyuan, YIN Ou, YANG Fan, PENG Zuwu, ZHONG Xiang, LI Bin, LI Yinmin. Characteristics of karst development and its structural control in the Huishangang-Meitanba area of central Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 1-12.
- [25] 任美镠, 刘振中, 王飞燕, 程俊贤, 余锦标, 刘泽纯, 潘瑞鸿. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983.
- REN Meiliu, LIU Zhenzhong, WANG Feiyan, CHENG Junxian, YU Jinbiao, LIU Zechun, PAN Ruihong. Karstology[M]. Beijing: Commercial Press, 1983.
- [26] ASRAT A. Geology, geomorphology, geodiversity and geoconservation of the Sof Omar Cave System, Southeastern Ethiopia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2015, 108(8): 47-63.
- [27] BONACCI O, TERZIĆ J, ROJE-BONACCI T, FRANGEN T. An Intermittent Karst River: The Case of the Čikola River (Dinaric Karst, Croatia)[J]. *Water*, 2019, 11(11): 2415.
- [28] GÜNAY G. Karst Hydrogeology of Pamukkale Thermal Springs, Denizli, Turkey[J]. *Caves and Karst of Turkey*, 2022, 2: 81-84.
- [29] GARASIC M. Introduction to Karst and Geology of Croatia [J]. The Dinaric Karst System of Croatia, 2021: 1-24.
- [30] GARASIC M. Caves in Croatia—Caves in the Central Part of Dinaric Karst [J]. The Dinaric Karst System of Croatia, 2021: 101-144.
- [31] GÜNAY G. Chapter 10.6 – Case Study: Geological and hydrogeological properties of Turkish karst and major karstic springs [J]. *Groundwater Hydrology of Springs*, 2010: 479-497.
- [32] 程维明, 周成虎, 李炳元, 申元村. 中国地貌区划理论与分区体系研究[J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 839-856.
- CHENG Weiming, ZHOU Chenghu, LI Bingyuan, SHEN Yuan-

- cun. Geomorphological regionalization theory system and division methodology of China. [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 839-856.
- [33] 康小兵, 杨四福, 管振德, 张文发, 许模. 川西高原巴塘地区可溶岩地层分布与岩溶地貌发育特征[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 381-388.
- KANG Xiaobing, YANG Sifu, GUAN Zhende, ZHANG Wenfa, XU Mo. Distribution of soluble rock strata and development of karst landforms in the Batang area, west Sichuan plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 381-388.

Mapping and characteristic analysis of karst areas along the Belt and Road

QIN Zhengfeng^{1,2}, XU Qi^{1,2}, JIA Min³, BI Xueli^{1,2}, YANG Xiangpeng^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS /Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GAZR/ International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin , Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract The region along the Belt and Road is a critical global hub for energy production and supply, containing 55% of the world's oil reserves and 76% of its natural gas reserves. Carbonate rock oil and gas reservoirs hold an extremely important position in global hydrocarbon resources. Statistics show that carbonate reservoirs account for approximately 70% of the world's total oil and gas resources, 50% of proven recoverable reserves, and 60% of global production. By the end of 2013, there were 53 UNESCO World Heritage Sites featuring karst landscapes worldwide, including 42 designated as World Natural Heritage Sites. The stunning karst landscapes and unique cave formations have become major tourist attractions, while the abundant karst water resources and carbonate rock oil and gas reserves support human survival and development. The karst regions along the Belt and Road encompass over 50% of the global karst areas, which coincide with intensive human activities. In the context of global change, these regions face prominent environmental challenges, including karst drought, rocky desertification, water pollution, and severe geological hazards such as collapses and depression waterlogging, posing substantial threats to regional eco-environmental security.

Supported by a project of the China Geological Survey, this study employed MODIS Reprojection Tool (MRT) and the Environment for Visualizing Images (ENVI) software to conduct remote sensing interpretation of collected datasets, including annual precipitation, mean temperature, evaporation, elevation data, and satellite imagery. A specialized map of the karst geological environment along the Belt and Road was compiled, which laid a foundation for further classification of key types of karst belt along the route and serving the International Karst Science Program. By integrating remote sensing images, geological maps, literature, and other data, and combining with field verification, this study has compared the karst characteristics of plateaus, large slopes, plains, and coastal areas within their geological and climatic contexts. The main conclusions are as follows.

(1) Karst distribution areas along the Belt and Road span about 12.3 million km², representing over half of the global karst coverage. Among the countries along the Belt and Road, China, Russia, and Kazakhstan have the largest karst areas, ranking as the top three in terms of karst coverage.

(2) The characteristics of karst distribution under different elevations, temperatures, rainfall levels, and evaporation rates along the Belt and Road are quantitatively analyzed. Karst areas located between 0 m and 1,000 m in elevation account for 74% of the total karst area, whereas those above 3,500 m represent only 8%. Karst areas with surface temperatures above 9 °C comprise 65.3%, while those below 9 °C account for 34.7%. Regarding annual rainfall, karst areas receiving 0 mm to 210 mm constitute 31% of the total area, those receiving 210 mm to 540 mm account for 32%, 540 mm to 840 mm cover 18%, and areas with annual rainfall exceeding 840 mm represent 19%. Additionally, karst areas with evaporation rates below 205 mm account for 51.4% of the total.

(3) A comparative analysis of karst development conditions and controlling factors in Ethiopia, Croatia, Turkey,

(下转第 668 页)

form, extent, and intensity of underground karst development. Additionally, they illuminate the regional scope and fragmentation degree of the rock mass fracture zone. The RIM results accurately depict crucial geological details, including the location and shape of underground karst and the integrity of the rock mass, and they demonstrate a high degree of concurrence with the karst anomalies revealed through borehole panoramic digital imaging and results of drilling cores. Hence, the RIM emerges as a reliable and efficient method for detecting karst formations, offering direct insights into the developmental traits and extent of underground karst, which serves as a valuable scientific reference for the planning and implementation of aqueduct engineering projects.

Key words cross-hole radio imaging method, karst detection, characteristics of karst development, Central Yunnan Water Diversion Project

(编辑 杨杨)

(上接第 656 页)

Iran, Thailand, and South China reveals that the lithology and tectonics of soluble rocks serve as intrinsic drivers of karst development, establishing the fundamental framework for karst processes. Meanwhile, climate acts as an extrinsic driving force, with both factors jointly shaping the development of karst landforms. Taking the karst in South China as an example, this study analyzes the influence of tectonic uplift on the differentiation of karst landforms. Distinct vertical hydrological profiles and erosion-dissolution base levels have been formed during different geological periods. To adapt to changes in these base levels, karst geomorphological zones have been developed at varying elevations. Moreover, the significant disparities in elevation also induce variations in climate, hydrology, and tectonic conditions, which in turn cause geomorphological differentiation in karst landforms. Meanwhile, China's Qinghai-Xizang Plateau on the first terrain ladder is characterized by high altitude, low temperatures, and scarce rainfall. The development of modern karst is limited in this region, exhibiting only micro-karst formations on rock surfaces. In contrast, Southwest China (Yunnan, Sichuan, and Chongqing), located on the second terrain ladder, experiences abundant rainfall and steep slopes. This area undergoes intense fluvial downcutting, forming canyons and peak-cluster valleys. Meanwhile, Guangxi (China), Thailand, and other Indochina Peninsula plains lie on the third terrain ladder. These areas are characterized by a hot, humid climate and low-elevation terrains near sea level, exhibiting vigorous surface and subsurface karstification and developing classic karst landforms such as peak-cluster valleys, peak-forest plains, and isolated-peak plains.

Key words the Belt and Road, karst landform, distribution range, development characteristics, comparative analysis

(编辑 黄晨晖)