

## ◆特邀专稿◆

国外岩溶地区水资源开发利用技术及其对我国的启示<sup>\*</sup>马祖陆<sup>1</sup>,杨黄成<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林 541004;2. 广西师范大学,广西桂林 541004)

**摘要:**北方资源型及水质型缺水、南方洪涝灾害和季节性缺水、水资源与经济发展空间不匹配等是我国岩溶地区水资源开发面临的主要问题。近几十年来,尽管我国在岩溶水资源开发利用过程中掌握很多关键技术并研发出一些成功的模式,但是仍然存在着许多急需解决的问题。本文对国外岩溶地区水资源开发利用的成功经验、典型案例和关键技术进行分析,总结出雨水及表(浅)层岩溶水资源收集-储存-利用、岩溶含水层水资源调蓄与循环利用、中小流域岩溶水资源综合开发与管理、跨流域(区域)尺度岩溶水资源协调开发,以及岩溶大流域水资源梯级调蓄与综合开发等国外岩溶水开发的成功模式。基于上述模式对我国岩溶地区水资源规划、保护、管理和开发所带来的启示,提出借鉴国外跨流域(区域)尺度岩溶水资源协调开发经验,实施水资源跨流域协调开发,有效解决岩溶地区水资源与经济发展空间不匹配的问题;按照大流域岩溶水资源梯级调蓄与综合开发利用的思路,在西南岩溶区利用梯级分布且具有密切水文联系的岩溶大洼地,实施集防洪与调蓄水资源等多目标的大岩溶流域梯级水资源开发工程,解决南方岩溶区季节性缺水的难题;重视我国北方岩溶区地下水资源普遍超采造成岩溶含水层被疏干的水环境问题,启动向岩溶含水层回灌补水计划,增强北方岩溶含水层调蓄水资源的能力,提高水资源利用效率和改善地下水环境;推进极端干旱岩溶区收集-储存-综合利用雨水、表(浅)层岩溶水或坡面流的技术创新,为我国岩溶地区水资源可持续开发利用、生态经济发展提供技术支撑。

**关键词:**岩溶地区 水资源开发 含水层储存和回灌 关键技术与模式

中图分类号:P641.8 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2022)04-0352-12

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20221209.004

中国是一个严重缺水的国家。2020年全国水资源总量31 605.2亿 $m^3$ ,地下水资源总量为8 553.5亿 $m^3$ <sup>[1]</sup>,人均水资源占有量不足世界平均水平的1/4,是世界上21个贫水和较缺水的国家之一。我国

的基本状况是人多水少、水资源时空分布不均匀,南多北少,近31%的国土年降水量在250 mm以下,供需矛盾尖锐,用水缺口大<sup>[2]</sup>。全国600多个城市中有400多个供水不足,严重缺水城市有110个<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2021-12-02

修回日期:2022-04-05

<sup>\*</sup>国家重点研发课题“地表-地下水资源综合调控与高效利用技术”(2016YFC0502402)资助。

## 【作者简介】

马祖陆(1962-),男,研究员,主要从事岩溶脆弱生态修复、岩溶水文地质研究,E-mail:karstmazulu@163.com。

## 【引用本文】

马祖陆,杨黄成.国外岩溶地区水资源开发利用技术及其对我国的启示[J].广西科学院学报,2022,38(4):352-363.

MA Z L,YANG H C. Technologies for Development and Utilization of Water Resources in Karst Areas Abroad and Its Enlightenment to China [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences,2022,38(4):352-363.

中国也是一个岩溶大国,岩溶区总面积达 334 万  $\text{km}^2$ ,滇、黔、桂、湘 4 个主要岩溶省(自治区)地下水资源占全国的 21.19%,主要为岩溶地下水<sup>[1-3]</sup>。因此,岩溶水是岩溶地区人类生产与生活的重要资源。但由于岩溶地区脆弱的生态环境、特殊的水文地质结构和水-土-人口配置,以及降水时空分配不均等原因,长期以来岩溶地区干旱缺水现象尤其严重。据估计,仅滇、黔、桂三省(自治区)常年受旱面积就达到  $1.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,人畜饮水的水资源短缺量约达  $7 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[4]</sup>,制约了区域经济的发展。我国岩溶干旱总体上表现如下:在北方岩溶区,地下水过度开采、矿山水质污染导致大中城市地下水位下降、岩溶大泉枯竭,属典型的资源型缺水;在南方岩溶区,降水时空分布不均匀、水土配置不合理及岩溶发育不均匀导致水资源分布与经济发展地区需水空间不匹配,属季节性及局域性缺水。除降水等自然因素外,在地表水的使用和地下水的开采已趋饱和的状态下,水资源开发缺乏系统性、利用效率低、保护与开发利用(尤其水资源时空蓄)缺乏关键技术和可推广的成熟模式、管理手段缺乏等是主要原因。本文重点研究国外岩溶地区水资源开发利用的成功经验、典型案例、关键技术或模式,并基于上述内容对我国岩溶地区多目标水资源总体规划、保护、管理和开发提出建议,以期为我国岩溶地区岩溶水资源的开发利用、保护与管理提供借鉴。

## 1 国外岩溶地区水资源开发利用现状

岩溶水是指赋存并运移于“岩溶化”岩层中的水。岩溶水资源总体上丰富,占全球陆地总面积约 12%的岩溶地区为全球约 25%的人口提供饮用水<sup>[5]</sup>。但岩溶地区总体上表现为地表干旱缺水、地下水资源丰富但分布不均匀。除俄罗斯外,全球大多数岩溶区人口密集,地表干旱缺水严重,对岩溶水资源的开发利用有着迫切的需求。尤其在中国北方和西南岩溶地区,东南亚,欧洲中、西、东南部以及地中海沿岸国家,北美、中美洲和加勒比海,北非,中东等,岩溶水资源在人畜饮水、灌溉和工业用水的供水中占有重要的地位<sup>[6,7]</sup>。但是,由于碳酸盐岩分布、岩溶水文地质条件、水资源开发技术水平等的差异性,国外不同地区岩溶水资源开发潜力、开发程度有较大的差异。美国是岩溶水资源开采量最大的国家,岩溶水资源总开采量约为  $268 \text{ m}^3/\text{s}$ ,有远超 5 000 万的美国人依赖岩溶水,尤其是美国东部岩溶区各州的大部分地区<sup>[8]</sup>。美

国许多人口密集的州均开发利用岩溶含水层(如佛罗里达含水层、比斯坎含水层和爱德华兹-特里尼蒂含水层)中的地下水供水。人口数居美国第二的得克萨斯州,有一半以上人口依赖岩溶水系统供水,其中圣安东尼奥拥有 150 万人口,是美国利用岩溶含水层中的地下水供水的最大城市;佛罗里达州人口位居美国第三,大部分人口依赖岩溶水,现每天抽取的岩溶地下水资源量达到  $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,其中大约有 50%用于灌溉,35%(相当于  $58 \text{ m}^3/\text{s}$ )用于饮水。上述两州依赖岩溶水供水的人口数超过 3 500 万<sup>[8]</sup>。比斯坎岩溶含水层(Biscayne Karst Aquifer)的水资源开发程度更高,其中有 86%用于人畜饮水<sup>[8]</sup>。欧洲也是高度依赖岩溶水供水的地区,尤其是地中海沿岸一些高度岩溶化的国家,对岩溶水的开发利用依赖程度极高。如黑山共和国 90%的人口饮用岩溶水,该国最近完成的、利用位于斯卡达尔湖畔的波列塞斯特(Bolje Sestre)岩溶泉供水的大型项目,为黑山的整个沿海地区提供饮用水<sup>[9]</sup>。罗马尼亚 80%地下水为岩溶地下水<sup>[10]</sup>。波斯尼亚和黑塞哥维那、奥地利、阿尔巴尼亚,以及几个岩溶岛国,岩溶水资源丰富,均有一半以上的人口饮用岩溶地下水<sup>[11]</sup>。奥地利首都维也纳拥有欧洲最大的岩溶供水系统,为 170 万市民供水,格拉茨、萨尔茨堡和因斯布鲁克也主要由岩溶地下水系统供水<sup>[12]</sup>。尽管碳酸盐岩分布面积仅占全国国土面积的 3%,但印度 35%人口(大约有 4 600 万)每天都在利用岩溶水。其他利用岩溶水资源人口超过 1 000 万的国家有伊朗、墨西哥、印度尼西亚、俄罗斯、法国、菲律宾、土耳其和意大利。

据估算,2016 年全球岩溶水资源总开采量为  $127 \text{ km}^3$ (或平均  $4.027 \text{ m}^3/\text{s}$ ),仅占全球预计可更新的岩溶地下水资源总量的 4%,具有较高的开发潜力<sup>[5]</sup>,但地区上有较大的差异性。例如,奥地利水资源量目前仅开发利用 4.7%;欧洲 4 个典型的岩溶国家——波斯尼亚和黑塞哥维那、黑山、阿尔巴尼亚和马其顿均使用岩溶水,其中,阿尔巴尼亚人均可利用再生水资源量达  $13\,000 \text{ m}^3/\text{a}$  ( $35 \text{ m}^3/\text{d}$ ),但目前开发利用率仅 3.1%;波斯尼亚和黑塞哥维那的岩溶水资源利用率更低,仅 0.9%,其邻国克罗地亚岩溶水资源利用率则仅 0.6%<sup>[13]</sup>。在一些干旱或半干旱国家,虽然岩溶含水层多,但是由于降水少或不稳定,造成补给或可再生岩溶水资源严重短缺,人均水资源量甚至不足  $1\,000 \text{ m}^3/\text{a}$ ,典型的如沙特阿拉伯,需水量是其可利用再生水资源量的 8 倍;在阿曼,可再生水资源利

用率达到 84%, 突尼斯为 69%, 岩溶水的进一步开发利用潜力十分有限, 并有逐步减少的趋势<sup>[13]</sup>。索马里也是一个岩溶分布面积很广的国家, 但炎热、干旱的气候条件造成可再生水资源量十分短缺, 索马里兰和邦特兰地下水径流模数仅为  $0.5 - 1.5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ <sup>[14]</sup>, 几乎无可供开发的岩溶水资源。因此, 这些地区不得不更多地依赖脱盐淡化水, 或开发利用其他来源的水资源(如异地调水等)<sup>[5]</sup>。

## 2 国外岩溶地区水资源开发利用的技术方法与经验

岩溶地区水资源开发历史悠久。针对不同的水文地质条件, 尤其是在岩溶水的补给、径流、排泄区, 岩溶水的开发利用方式以及采用的技术方法有一定差异。

### 2.1 岩溶地下水排泄区

对于岩溶地下水排泄区来说, 主要是开发利用岩溶泉、岩溶地下河或岩溶地区地表河溪。开发利用方式包括直接筑渠取水, 在地下河出口、岩溶泉口或地表河有利河段筑坝蓄水以提高水位, 然后修渠引水; 或通过从上述岩溶水点钻孔抽提水并储存于高位蓄水工程(储水池、调节水库)中, 结合供水或灌溉系统, 达到饮用、灌溉、发电、旅游、水土保持和生态系统修复等多种目的。早在古罗马时期, 地中海沿岸的许多大型城市都建在岩溶大泉附近, 使用岩溶泉作为城市供水。如在那不勒斯和巴里, 沿袭第勒尼安(Tyrrhenian)海边的古渡槽所修建的普格利泽(Pugliese)引水长渡槽, 就是引岩溶大泉水为城市供水<sup>[15]</sup>。古罗马帝国修建了 11 条长 16 - 99 km 不等的引水长渠, 将  $>13 \text{ m}^3/\text{s}$  的岩溶大泉水引入罗马古城; 罗马市中心著名的特雷维(Trevi)喷泉, 也被引入供水渡槽, 成为城市供水系统的组成部分<sup>[16]</sup>。亚得里亚海沿岸的许多城市, 如里耶卡、斯普利特和杜布罗夫尼克等都建在岩溶大泉附近, 周边数百万居民仍然依靠岩溶泉供水<sup>[17]</sup>。美国仅流量大于  $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$  的岩溶大泉或地下河就有 40 多个, 最大流量可达  $56.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 。早期这些岩溶大泉仅用于城镇人畜饮水、农田灌溉, 后来逐渐涉及发电、旅游等, 如黄石公园岩溶泉的旅游开发。在西亚和北非, 引岩溶泉水进行自流灌溉是一种传统的灌溉方式<sup>[14]</sup>。对水资源丰富的封闭岩溶构造储水体, 最佳的开发方案是在山脚低洼处开挖大口井, 或在排泄口附近修建地表或地下蓄水工程自流引水<sup>[18]</sup>。美国的田纳西河流域、科罗拉多河, 欧洲的多

瑙河等是地表岩溶水资源开发的成功样板。当然, 在一些地形平坦、人口密集、需要大规模取水的地下水排泄区, 当泉(地下河)排泄量及地表河水不能满足需要时, 钻井取水也非常普遍, 如美国东南沿海的岩溶区<sup>[19]</sup>。

### 2.2 岩溶地下水径流区

在径流区, 岩溶地下水一般深埋于岩溶含水层中, 仅局部有天然地下水露头, 如溶潭、岩溶湖、地下河天窗或竖(斜)井。对于深埋岩溶地下水, 一般是通过详细的水文地质调查, 结合地球物理探测定井技术, 然后采用钻井取水的方式开发; 对有天然岩溶水露头的地下水, 则通常采用直接在地下水天然露头点抽提地下水的方式开发。

美国的岩溶地下水主要赋存于包括始新世奥拉拉(Olala)和杰克逊(Jackson)灰岩、二叠系灰岩、膏岩、盐岩、石炭系-奥陶系灰岩等在内的近 20 个重要岩溶含水层中。佛罗里达岩溶含水层位于地势低平的美国东南沿海, 分布面积达  $25.9 \text{ 万 km}^2$ ; 作为美国最重要的地下水供水水源, 该含水层赋存有丰富的岩溶地下水, 但地表排泄的岩溶水点却很少(约 27 个岩溶大泉, 总流量仅  $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 岩溶水资源的开发主要以打钻取水为主, 20 世纪 80 年代地下水开采量即达到  $1\ 135 \text{ 万 m}^3/\text{d}$  以上<sup>[19]</sup>。

欧洲岩溶地区多处于地下水径流带, 地表多洼地、坡立谷或溶蚀平原, 人口密集, 对岩溶水依赖程度高, 通过钻孔开发岩溶含水层地下水的方式也比较普遍。一些极端缺水的地方, 甚至通过对岩溶含水层钻孔的适度超采措施, 充分挖掘岩溶地下水资源的开发潜力, 来获取更多的可用水资源以满足生产、生活和生态用水需求。如 2004 年, Dimkić 等<sup>[20]</sup> 在塞尔维亚尼什市附近对具有虹吸型空洞的岩溶泉进行超额度开采, 在枯水季节成功为尼什市提供额外  $200 \text{ L/s}$  流量的岩溶地下水资源。这种方法在法国、黑山、约旦和美国等地均有许多成功的实例, 为其他岩溶地区含水层的开发提供了参考<sup>[21]</sup>。

径流区岩溶地下水资源的开发立足于拦截地下径流、开发含水层赋存地下水, 优点是充分挖掘了岩溶含水层赋存地下水的潜力, 就地及时解决了当地生态需水与工农业缺水问题, 减少了地表长距离引水工程的投资及其生态问题。但该做法的代价是下游排泄带水资源减少、含水层水位下降(尤其在超采情况下), 因此, 一些国家已经从流域角度进行总体评价和规划, 配合含水层回灌以科学开发利用岩溶水资源。

在地下水深埋、开发难度大的岩溶径流区,则建设地表蓄水工程以拦截地表洪水或径流,以解决当地缺水问题,并为下游地区水资源生态调蓄服务。

### 2.3 岩溶地下水补给区

位于地下水分水岭附近,通常地形陡峻,人迹罕至,地下水垂直入渗,埋藏较深,地表岩溶水资源极度匮乏。实施水源涵养、水土保持、保护湿地和生态环境等,是目前国内外在岩溶地下水补给区的普遍措施。但是,在一些人口较多的岩溶水补给区,为满足对水资源的需求,实施保护性开发也是一种常见的水资源开发利用方式。由于岩溶地下水贫乏,保护性开发主要是雨水资源、坡面径流的收集利用,表(浅)层岩溶水资源的开发利用,典型的如意大利南部的阿普利亚(Apulia)与巴斯利卡塔(Basilicata)岩溶区水资源的开发利用。

表 1 国外岩溶地区水资源开发利用关键技术模式

Table 1 Key technical modes of water development and utilization in karst area abroad

模式名称 Name of mode	代表性案例 Representative case	水资源开发特征 Characteristics of water resources development	优缺点 Advantages and disadvantages	适用条件 Applicable conditions
Collection-storage - utilization of rainwater and superficial karst water	Apulia and Basilicata karst areas in Italy	Collecting rainwater, intercepting surface streams or slope catchment, and collecting water from fissure and surface (shallow) karst spring by excavating diversion ditches or tunnels underground or at the foot of the mountain, then storing them in the reservoir at the bottom of depression or underground water storage cellars, cooperating with the water conveyance canal (pipe) system for water supply or irrigation	Advantages: Rainwater and shallow karst water are used as resources to the greatest extent, which can solve the problem of water shortage in karst areas where groundwater is extremely poor or difficult to develop with low cost Disadvantages: The project is small in scale and can only solve the problem of drinking water for a limited number of people and small-scale farmland irrigation	Karst area near watershed zone where lack of groundwater, or where the development of groundwater resources is difficult or with high cost
Storage, regulation, and cyclic utilization of water resources in karst aquifer	Aquifer storage and recovery project (USA)	Planned exploitation (over exploitation) of karst groundwater, artificial recharge of groundwater in the mining area, and scientific regulation and utilization of water resources in karst aquifers (regulation, storage and recycling of water resources)	Advantages: It can maximize the use of aquifer to regulate, store and utilize groundwater resources, realize the reuse of water resources and avoid karst water environment problems such as groundwater depletion Disadvantages: It is necessary to ensure the integrity of the aquifer hydrological system and the controllability of the implementation process of water recycling (it may require manual construction of the water storage project, with large investment)	Karst aquifer with sufficient capacity for water regulation and storage, closed hydrological system and controllable water cycle (for effective groundwater recharge and exploitation)
Comprehensive development and management for water resources in small or medium scale karst basins	Tennessee river basin (USA)	It emphasizes the unified planning and management for water, soil, countryside, forest, road and landscape within a river basin, and multi-objective development, paying equal attention to protection, development and governance. Water resources development is coordinated with regional economic development	Advantages: From the perspective of the overall service function of a karst watershed ecosystem, it is ensured that maximize the benefits of water resources development and utilization. Disadvantage: Detailed hydrological survey and monitoring data are required, and the development of water resources must coordinated with the government's regional economic plan	Small or medium scale karst basins

## 3 国外岩溶地区水资源开发利用的成功经验和模式

根据对国外岩溶水资源开发的成功经验及关键技术分析,从水资源时空调配利用、多种水资源综合开发与集成、不同尺度(中小岩溶流域、岩溶大流域、跨流域或区域)管理与多目标协调开发,以及岩溶含水层中地下水利用储存与重复利用等方面总结、凝练出以下 5 个成功的岩溶水资源开发技术模式:雨水及表(浅)层岩溶水资源收集-储存-利用、岩溶含水层水资源调蓄与循环利用、中小流域岩溶水资源综合开发与集成、跨流域(区域)尺度岩溶水资源协调开发、岩溶大流域水资源梯级调蓄与综合开发技术模式(表 1)。下面分别对各技术模式的水资源开发特征、优缺点及适用条件进行阐述。

续表

Continued table

模式名称 Name of mode	代表性案例 Representative case	水资源开发特征 Characteristics of water resources development	优缺点 Advantages and disadvantages	适用条件 Applicable conditions
Coordinated development of karst water resources at Inter basin (regional) scale	Rhine, Danube, etc (Europe)	Establishing an inter-basin management organization or a transnational coordination mechanism, building inter-basin (region) water transfer projects under unified planning for the development of karst water resources within the scope of inter basin (region), and implementing the coordinated development of water resources with multiple objectives	Advantages: From the perspective of regional development, it can effectively solve the problem of spatial mismatch between water resources and social and economic development, maximize the benefits of water resources development and take into account the interests of various regions within the inter-basin Disadvantages: The project is huge, which need huge investment, and regional coordination	The arid karst basin where economy is developed, population and cultivated land are concentrated, and demand for water is urgent; water resources in adjacent basins is abundant, where has low demand for water resources
Cascade regulation and comprehensive development of water resources in karst large watershed	Neretva & Trebinje karst basin	With the support of water resources optimal dispatching decision-making system, the flood is diverted and transported through canals or underground pipelines, to reservoirs within the whole large karst watershed, which are built according to local conditions, especially making full use of the water storage capacity of karst depressions and underground karst cave fissure systems at different elevations, for flood storage and water regulation and other use	Advantages: Emphasizing the coordinated development of man and nature. The construction of water conservancy projects has made full use of the favorable conditions of karst landform and hydrogeological structure, especially the water storage capacity of karst depressions and underground karst cave fissure systems. It can effectively realize the optimal regulation of water resources in time and space Disadvantage: It is very difficult to build a water conservancy project for flood storage and water regulation, especially in karst mountainous areas with developed caves and fissures underground, it may cost a lot of money	A large karst basin, and adjacent tributaries have close hydraulic connection (for example, originating from the same flood plain); karst depressions (poljes) or underground karst cave fissure hydrological system, which locate at different elevations and with hydraulic connection each others, has good conditions for building reservoirs by blocking caves

### 3.1 雨水及表(浅)层岩溶水资源收集-储存-利用技术模式

该模式以阿普利亚与巴斯利卡塔岩溶区为代表。阿普利亚与巴斯利卡塔岩溶区位于意大利南部,水资源贫乏。本模式中,水资源开发利用的主要特点是通过在地表(包括屋顶)修建各种沟渠、梯田等收集雨水、拦截地表沟溪或坡面集水,对表(浅)层岩溶裂隙水围堰引水,在地下(尤其山麓)开挖沟槽或隧洞拦截岩溶裂隙水,形成地表-地下沟渠化水资源收集系统,配合在洼地低洼处蓄水或在地下建设储水设施(储水池塘、水窖)、输(送)沟渠管网系统。至今该地区还保留有许多早期的水利工程遗迹,尤其是保留了众多的在坡麓人工挖掘收集坡面流的沟渠、截留表层岩溶裂隙水的地下沟槽,以及收集岩溶水的水窖、储水池和输水管道(地表、地下水渡槽)。这些岩溶水收集-储存-输送工程至今仍发挥着作用,其通过对地表径流的渠化,配合梯田化,降低了地表、地下水土流失强度,提高了土壤、植被保水、涵养水源的能力。其中,保存最好的阿尔贝罗贝洛镇(Alberobello)被联合国教科文组织列为世界文化遗产<sup>[22]</sup>。

### 3.2 岩溶含水层水资源调蓄与循环利用

岩溶含水层过度开采导致出现诸如区域地下水位下降、泉水干枯、地面塌陷、海水入侵等问题,进而导致水质恶化等生态环境问题,典型的如地中海地区最大的岩溶泉——叙利亚拉斯艾因(Ras el Ain)泉由于灌溉棉田被过度抽水而不复存在<sup>[18]</sup>。伊拉克北部的贝哈尔(Bekhal)泉,其丰水期流量为 17 m<sup>3</sup>/s,枯水季节因过度抽水导致枯季泉流量急剧减少,由此减少的下游河流径流量不仅导致附近的索兰市和周边许多村镇居民生活用水、灌溉用水短缺,而且也造成依赖岩溶水资源的生态系统缺水,这种情况在干旱岩溶区极为典型。罗马尼亚及地中海沿岸的西班牙等国家对于岩溶地下水的超量开发均在一定程度上导致含水层地下水的盐度升高,一些地方水质标准甚至不得不将总溶解固体(Total Dissolved Solids,简称TDS) < 3 000 mg/L 的岩溶水作为淡水进行开发利用<sup>[23]</sup>。针对上述问题,国外提出 3 种解决方案:一是有计划开采,控制地下水开采量不超过年度岩溶含水层的可补给潜力;二是对开采的地下水进行人工补给,包括通过岩溶水资源的重复利用,实现地下水资

源的动态平衡;三是水资源优化配置和科学调控<sup>[23,24]</sup>。其中利用岩溶含水层调蓄地下水资源,并通过向岩溶含水层人工补给水资源,从而实现岩溶水资源调蓄与循环利用的方案,成为当前岩溶地区水资源优化配置和调控利用的焦点。

地下水调蓄的关键是岩溶含水层具备储蓄调节地下水的功能。提高岩溶含水层调蓄容量的方法包括建设地下岩溶水调蓄水库(包括建设地表-地下联合调蓄库),如堵洞成库、帷幕灌浆封闭地下水或构建无坝的天然地下水库(储水构造),也包括含水层适度超采提高其调蓄能力。而水资源补给除天然的降水、跨流域补水等外,通过钻孔或落(消)水洞(带)的人工补给,是实现岩溶含水层地下水调蓄和循环利用、修复岩溶含水层和区域岩溶生态环境、提高岩溶水供水能力和利用效率的主要途径。欧美一些国家从19世纪末即开始岩溶含水层作为地下蓄水介质储蓄地下水资源和地下水人工补给的实践。20世纪80年代美国开始实施“含水层储存和回采工程(Aquifer Storage and Recovery, ASR)计划”,即在干旱或半干旱岩溶地区,于枯水期(用水高峰期)适度超量开采地下水,增加含水层存储空间,于丰水期实施向含水层回灌补给并储存地下水,以解决因地下水过度开采所引起的地下水资源枯竭和海水入侵等问题,从而达到地表-地下水资源的时空调蓄<sup>[24,25]</sup>。同时期实施的“地下水管理行动项目(GMA)”,在科罗拉多河拦河修建蓄水工程和530 km引水渠道,通过不同时段动态调配地表水、地下水水资源,以及建设补给池、钻孔和沿河道对地下含水层进行人工注水补给“中水”,实现水资源的有效调控和可持续循环利用<sup>[24,25]</sup>。统计资料表明,美国每年人工补给地下水(含水层)的量可达地下水抽水总量的30%,德国有20个大城市达到40%以上,荷兰也达到20%<sup>[26]</sup>。

ASR在防止海水入侵、增加可利用水资源方面发挥着重要作用,而地下水库是ASR的基础。日本长崎县野亩崎町桦岛在1972年建设了世界上第一座有坝地下水库,荷兰阿姆斯特丹市自20世纪中叶开始引莱茵河水,通过天然风积沙丘注水方式人工补给地下水<sup>[27]</sup>。到2002年,美国正在运行的ASR系统有56个,而建成的系统更是达到100个以上<sup>[28]</sup>。

### 3.3 中小流域岩溶水资源综合开发与管理技术模式

20世纪中后期,美国提出以流域为单位的水资源综合开发与治理思路,田纳西河流域综合治理是成功实现这一思路的典范<sup>[29,30]</sup>。田纳西河属于典型的

岩溶流域,位于美国东南部,其发源于阿巴拉契亚山脉中南部西弗吉尼亚州与北卡罗来纳州境内,全长1 043 km,流域面积10.4万km<sup>2</sup>。早期由于大规模掠夺式开发,导致流域内森林破坏、干旱缺水、土地退化和环境(水质)污染等一系列问题,经济发展滞后。美国提出的以流域为单位的中小流域综合开发与治理方案首先以田纳西河流域为试点,总体思路和措施如下。

(1)成立具有高度自治的田纳西河流域建设局,开展以流域为单位的水资源科学评价,实施水、土、田园、林、路、景观等的统一规划、协调开发和统一管理。以水资源开发为主线,实施航运、防洪、发电、灌溉、旅游、人畜饮水与生态需水等多目的的综合开发。

(2)水资源开发与综合调控利用相结合。根据流域水资源分布特点,因地制宜,实现流域内不同水资源(河水、岩溶地下水)在时空上的调控利用。如岩溶地下水的开发主要用于人畜饮水和农田灌溉,一些岩溶泉成为下游流域唯一的灌溉水源;而沿田纳西河修建的梯级水利枢纽,通过水资源时空调蓄,有效提高地表-地下水位,增加枯季可用水量,实现供水、航运、防洪、渔业、发电、旅游多目标的开发利用,促进流域经济发展<sup>[31]</sup>。

(3)水生态与环境保护修复。建立国家森林公园保护区(公园)涵养水土,在河流两岸各支流河口修建梯级水库形成湿地,有效净化水质,调节小气候,改善区域水环境。

### 3.4 跨区域(区域)尺度岩溶水资源协调开发技术模式

欧洲中部为岩溶山地,岩溶化程度高、地势高。河流水系如规模较大的多瑙河、莱茵河、罗纳河、内雷特瓦河等,均来源或源自岩溶山区,且多为跨国河流。而耕地集中在欧洲北部、东部平原及山脉的周边沿海地域,加上人口密集,这些地区对水资源的需求迫切。这种水土地域分布特点以及社会发展需求确定了欧洲跨区域(区域)尺度的水资源协调开发技术模式。除了水资源保护与管理立法、泉水或地下水开发利用、建设梯级电站等措施外,其水资源开发的主要特点如下。

(1)建立在欧盟框架下的流域或跨流域管理机构或跨国协调机制,积极推进跨境(国)、跨流域的水资源开发,对水资源开发(包括水资源调配、防洪、发电、生态保护、航运等方面)实施跨国、跨流域协调规划与管理。2000年9月欧盟议会和理事会通过了《欧盟

水框架指令》(EU Water Framework Directive)并于2000年12月22日生效<sup>[32]</sup>,进一步推进了欧洲跨流域尺度、跨国性区域水资源可持续综合开发与调控利用。

(2)强调人与自然协调可持续发展,开发、保护与修复并重。以可持续开发、人与自然协调发展为出发点,兼顾经济效益与生态效益。在跨流域(跨国)尺度的区域水资源调查、评价、规划的基础上,采用生态措施与工程措施相结合,开发与保护并重,综合开发利用水资源。其中,人与自然协调发展是欧洲水资源开发利用的亮点之一。

(3)跨流域调水工程与水资源协调开发、统一调配。欧洲平原地区耕地多,但河流稀疏并直入大海,灌溉用水短缺。通过跨流域水资源综合开发与科学

调控,形成相互连通的跨流域调水工程在欧洲十分常见。如多瑙河与莱茵河之间的运河带来巨大的航运、旅游和水资源调度效益,其中,莱茵河被认为是世界上人与河流关系处理最成功、管理最好的河流<sup>[32]</sup>。

### 3.5 岩溶大流域水资源梯级调蓄与综合开发技术模式

内雷特瓦河、特雷比涅河位于波斯尼亚和黑塞哥维那东南部岩溶山区,流域局部延伸到塞尔维亚和黑山,然后穿越克罗地亚汇入(或潜入)亚得里亚海。两条河流均为典型的岩溶山区河流,以岩溶地下河、岩溶泉为源,并在中下游河段通过地下岩溶管道相互连通,具有明显的水力联系,因此本文将其归属为岩溶大流域范畴,是一个跨国岩溶流域(图1)。

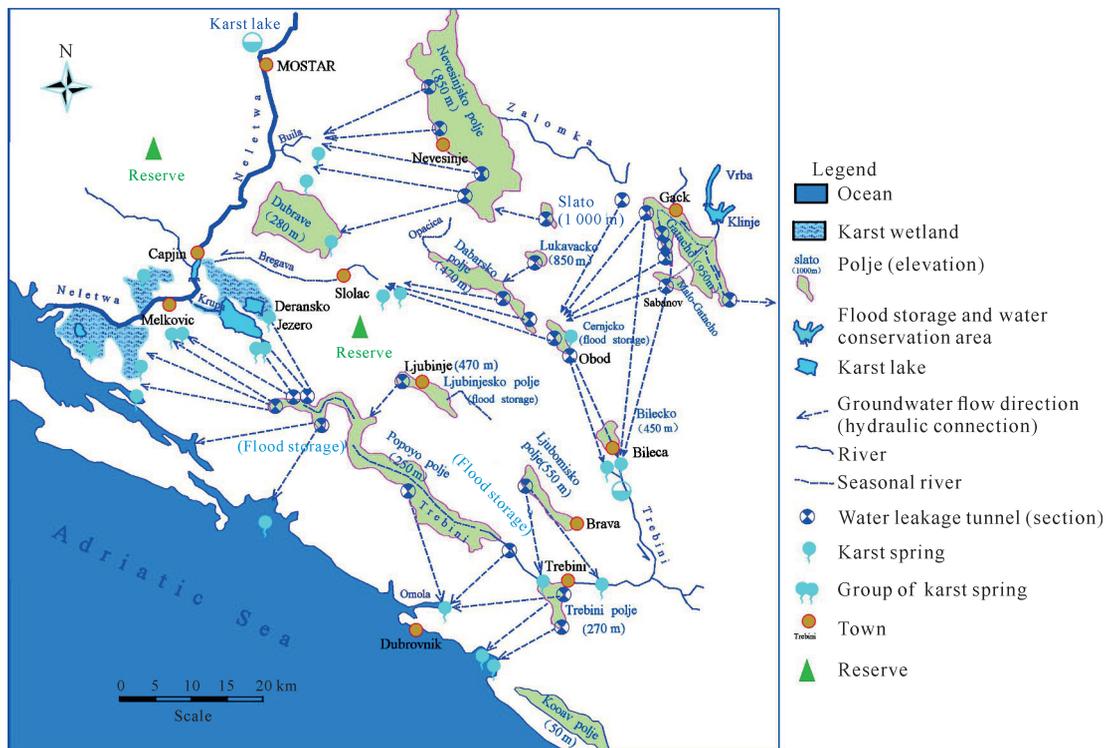


图1 内雷特瓦-特雷比涅河大流域岩溶水文系统<sup>[33]</sup>

Fig. 1 Karst hydrological system in Neletwa-Trebini River Basin<sup>[33]</sup>

内雷特瓦-特雷比涅岩溶大流域地表-地下水开发利用模式是在欧洲跨流域规划管理和调配水资源、人与自然协调开发框架下的进一步拓展,其主要特点如下。

(1)按照岩溶水生态系统“近自然恢复”的思路,在两个具有相互水力联系的大流域框架下,实施以防洪排涝与水生态调蓄为主线,兼顾发电、灌溉和旅游等多个目标。坚持在水资源总体评价、规划的基础

上,实施水资源统一开发与调控利用。其中,始于20世纪60年代的特雷比涅多目标岩溶水文-水力系统计划,是从大流域尺度将水资源开发与防洪、水环境保护与修复有机结合的成功案例<sup>[33]</sup>。

(2)坚持在工程措施辅助下的生态修复、保护与开发并重。在岩溶水补给区实施水源林保护,恢复植被生态系统,涵养水源;在岩溶水径流区,通过疏通或封堵落水洞,充分利用岩溶地下管道和不同高程的岩

溶谷地库容, 辅以排涝渠道, 建设防洪排涝(包括跨流域的排涝)工程、生态蓄洪区, 结合在主河道建设的梯级水电站, 达到防洪排涝、水资源时空调蓄、发电等目的; 在近滨海的河流下游段、岩溶地下水排泄区, 则以优化农田灌溉系统, 建设岩溶湿地、滨海岩溶湿地保护区为主要目标。

(3) 在建立的大流域水资源实时优化调度系统的支持下, 通过跨流域输水渠道及其控制枢纽, 对各河流、天然或人工蓄水工程、生态蓄洪区的水资源进行科学调度, 确保大岩溶流域水生态系统的良好运行及生态服务功能的提升<sup>[33]</sup>。其中, 充分利用岩溶地下管道、排洪渠, 雨季将洪水输送到相互联系的相邻岩溶流域, 借助岩溶含水层地下储水库容和不同高程岩溶洼(谷)地修建的生态蓄洪区, 实现水资源的时空调蓄; 在枯水季节确保水生态系统的良好运行, 是本模式的主要特征。

#### 4 我国岩溶地区水资源开发现状

我国岩溶地区水资源开发历经数十年, 有许多成功的经验, 可归纳为 3 种技术模式<sup>[34]</sup>: 蓄水模式、引水模式、提水模式。

蓄水模式包括溶洼成库、溶谷成库、地下河堵洞成库、地下河出口(泉口)围水成库等模式。典型的如广西靖西龙潭地下河出口建坝蓄水、贵州安顺油菜河汇入龙宫地下河的入口和广西上林大龙洞地下河明流段(伏流入口, 补给区与径流区交接地带)处堵洞成库, 是溶洼堵洞成库的典型代表, 解决了当地供水、工农业用水和发电等问题。至于利用大型岩溶洼地或谷地因地制宜建设地表蓄水工程更是非常普遍, 尤其是 20 世纪中叶在岩溶地区建设有一大批地表水库, 但由于缺乏详细的前期调查、勘探和系统规划, 多数水库渗漏严重, 达不到设计效果, 催生了很多问题水库。近年来随着水坝防渗、帷幕灌浆技术的进步, 岩溶地区蓄水工程将有更广阔的应用前景。当前一些缺水严重、岩溶发育强烈、成库条件较差的地区, 已经逐步开展全库防渗的蓄水工程建设。

引水模式是在天然岩溶水点, 如落水洞或地下河天窗、溶井、脚洞等地取水, 包括在水位较高的水点直接引水、筑坝抬高水位引水、堵洞截流引水和隧洞截流引水等。典型的如云南广南苏都库地下河截流壅水引水工程, 在地下河天窗的中间部位设置高 12 m 的混凝土堵体, 堵水抬高水位, 实现自流引水, 解决了苏都库村及周围 3 个小村子人畜饮水, 300 余亩

(1 亩 $\approx$ 666.67 m<sup>2</sup>) 水田、400 余亩(1 亩 $\approx$ 666.67 m<sup>2</sup>) 旱地灌溉用水困难及雨季排洪。而广西南丹拉友地下河段洞内建坝抬高水位后, 在八圩谷地通过溶洞或钻孔取水, 或凿引水隧道灌溉水田 500 亩(1 亩 $\approx$ 666.67 m<sup>2</sup>), 装机发电 150 kW。

提水模式包括利用岩溶水的天然露头(岩溶泉、地下河天窗或出口、竖井、溶潭、岩溶河、岩溶湖泊或水库)提水和打井提水两种形式。前者典型的如广西武鸣城厢镇东风农场天窗提水工程, 利用位于武鸣城厢镇东风农场峰丛谷地中部的地下河天窗“印月潭”提水。后者是通过地面调查、物探、遥感等技术定井位, 然后打井抽水, 用于人畜饮用和农田灌溉, 在西南岩溶地区很普遍。近年来随着物探找水定井技术的不断成熟, 定井成功率达到 90% 以上, 这项技术模式几乎成为岩溶地下水开发的主流。如 2010-2014 年在广西区内启动的抗旱打井项目共成井 1 840 孔, 开采地下水 493 833.35 m<sup>3</sup>/d, 解决了 125.4 万人的饮水问题<sup>[35]</sup>。

无论蓄水、引水还是提水方式, 都建立在有水可开发的前提下, 可以根据岩溶水在补给区、径流区或排泄区的赋存形式, 确定相应的开发利用方式。如在贵州平塘巨木地下河中部径流区, 在洼地底部围堵地下河成库, 实施蓄、提、引结合的水资源开发工程<sup>[36]</sup>; 而在干旱缺水的分水岭地带或开发成本过高的岩溶干旱盆地, 可借鉴表层岩溶水开发与水柜相结合的模式<sup>[37]</sup>, 或采用跨流域(区域)尺度岩溶水资源协调开发模式, “滇中引水”“黔中引水”工程即是基于跨流域引水的思路。

#### 5 国外岩溶地区水资源开发利用技术模式对我国的启示

如上节所述, 我国岩溶地区水资源开发利用取得了显著成效, 但仍然存在不少问题, 而国外成功的经验、技术模式或可供我国借鉴。

一是水资源开发利用缺乏系统性。尽管我国对岩溶水文系统的认知已经明显提高, 设置流域管理委员会, 对跨行政区域的流域实施统一管理, 但是由于岩溶区的特殊性, 目前水资源开发仍属于需求驱动, 各自为政, 缺乏从流域整体效益最大化或流域生态系统总体服务功能提升角度进行统筹规划和多目标协调开发的思维。这种无序的水资源开发方式会导致一系列水环境问题。如云南丽江城市给排水系统是我国古代岩溶水开发的成功典范, 但自 20 世纪后期,

无序的地下水过度开发导致地下水位逐步下降,最终导致主要水源地黑龙潭泉群枯竭(内容来源于中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司《丽江市黑白水河引水丽江坝水生态修复工程初步设计报告》)。此外,一些大型工程(如水电站建设、引水隧道或公路隧道)施工引发的水环境问题,也是因为水环境评价限于工程区范围,对所涉及的岩溶水系统水文地质结构的复杂性认识不足所致。如雅砻江二级水电站隧洞施工过程中因破坏锦屏岩溶储水构造致使区域水位下降,进而导致磨房沟、老庄子两大相邻岩溶泉(群)枯竭。因此,借鉴美国田纳西河、欧洲跨流域或大流域水资源开发模式,开展以流域、跨流域(区域)为单位的岩溶水资源调查、评价与开发利用规划十分必要,穿越岩溶区的大型工程建设的水环境评价也应拓展到所涉及的整个岩溶流域尺度。

二是岩溶水资源的时空调蓄技术需要进一步完善。我国岩溶地区尤其是岩溶发育强烈的南方岩溶区,降水时空分布不均及含水介质不均匀,地表水通过落水洞和地下管道快速流失,造成季节性、区域性缺水。解决方案除了增强植被-土壤系统涵养水源能力外,还可以进一步完善岩溶水资源的时空调蓄技术,包括修建地表、地下或地表-地下联合调蓄水库。完善时空调蓄技术可借鉴国外两种成功模式——雨水及表(浅)层岩溶水收集-储存-利用技术模式和岩溶大流域水资源梯级调蓄与综合开发技术模式。前者广泛应用于岩溶发育较弱、地下水贫乏或地下水深埋而开发难度大的岩溶区,尤其是分水岭地带,该模式主要利用雨水资源、坡面径流和表(浅)层岩溶水,类似于我国西南岩溶区常见的“雨水收集+水窖”技术。后者即在适宜地点(洼地、谷地、河谷平原、地表-地下水转换带等)建设兼顾水资源利用与水生态调节功能的地表、地下或地表+地下联合蓄水调节工程。按照内雷特瓦-特雷比涅梯级水资源调蓄的启示,充分利用我国西南岩溶区地形西高东低、峰丛洼(谷)遍布不同高程岩溶台地的特点,优先探查具有水力联系的洼(谷、盆)地和岩溶储水构造,构建梯级地表-地下水资源调蓄工程,进一步优化和完善岩溶水资源调控体系。20世纪五六十年代我国岩溶地区修建了众多类型的水库,虽然许多水库渗漏严重已经失去其价值,但是经过适当改造,在流域水生态调蓄中仍然可以发挥重要的作用。

三是推进 ASR 技术在我国岩溶水环境修复、含水层水资源循环利用中的应用。我国一些岩溶地区,

水资源开发过量或存在水污染;或大型地下工程施工引发大规模涌水,造成不可逆的区域性岩溶水资源短缺与水环境问题,包括区域性水位下降及泉水断流、水质恶化等,典型的如济南泉群断流、娘子关泉流量减小及水质恶化、丽江黑龙潭泉水枯竭等。对这些水环境或岩溶水文系统的修复,可借鉴国外“岩溶含水层水资源调蓄与循环利用”技术模式,利用岩溶含水层储蓄水资源调蓄能力,修建地下储水工程,结合人工回灌补给地下含水层,恢复岩溶水文生态系统调节水资源和供水的能力。人工补给水源有3种:(1)拦截流域内地表水,目前国内人工补给水源的方式基本上属于此类,如通过玉符河人工回灌补给恢复济南泉<sup>[38]</sup>,渗漏水库对含水层地下水的补给也属于此类;(2)跨流域引外源水,如云南省丽江黑龙潭岩溶泉群的水生态修复即设计引黑、白水河水至东山顶,经岩溶洼地调控后,通过落水洞补给黑龙潭岩溶地下水系统,恢复黑龙潭泉群(内容来源于中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司《丽江市黑白水河引水丽江坝水生态修复工程初步设计报告》);(3)向含水层回灌“中水”是 ASR 技术应用的经典,能通过重复利用方式最大程度地提高水资源利用率。ASR 技术虽然在我国平原地区孔隙含水层已有成功的先例,但是由于回灌水源(“中水”)水质无法保障、回灌成本高及效益不明确,在我国岩溶地区还处于试验阶段<sup>[39]</sup>。但我国许多地方仍具备良好的 ASR 技术应用条件,包括独立的岩溶水文系统,具有确定的流域边界、汇水面积大、有巨大调节库容的岩溶岩含水层,有落水洞、洼地、漏斗、陷落柱或河床渗漏段等作为天然的人渗补给点,有临近地区发电厂冷却水或其他经处理的“中水”作为补给水源。因此,人工回灌含水层地下水,循环、重复利用水资源的 ASR 技术在我国岩溶区有广泛的应用前景,而近年来常有岩溶地区未经处理的工厂废水通过作为“下水道”的落水洞进入地下含水层污染地下水的报道,也从侧面表明岩溶地下水人工补给技术是可行的。

四是当前水资源开发利用率低。据统计,西南岩溶区约 78 km<sup>2</sup>,目前地下水开采量为 90.53 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,仅占允许开采量的 14.56%<sup>[40]</sup>,表明岩溶水资源开发利用技术仍然需要进一步提升。目前我国岩溶区水资源开发目标、手段仍单一,开发利用的水资源仍以地下水为主。虽然随着定井技术的提高,岩溶地下水开发能力进一步提升,但是仍然有绝大多数降水直接从地表或汇集成坡面径流后经落水洞等入

渗地下流失,尤其是地下水深埋、开发难度大的岩溶区。雨水资源化、坡面径流或表(浅)层岩溶水拦截利用、地表与地下水的调蓄与生态调蓄利用,以及水资源综合开发等国外先进技术对提高我国当前水资源开发利用有十分重要的借鉴作用。

五是当前岩溶水资源利用效率较低,水资源浪费较为普遍。我国当前单位水资源产出水平仅相当于美国的1/10、日本的1/20<sup>[2]</sup>,相当于增加了对水资源的需求。由于特殊的水土结构,岩溶地区对水资源的需求更甚。虽然近年来一些地区推广利用滴灌等节水技术,但是因缺乏对岩溶土壤水循环环境下作物需水指标的研究,以及相当一部分的地区仍采用传统的灌溉方式,水利用效率极低。对此,要进一步开展包括不同作物在岩溶环境下的用水指标在内的技术研究,提高用水效率;借鉴国外水资源管理经验,健全水资源开发利用的相关法规,加强节约用水宣传力度,提高政府和公众的节约用水意识,使用经济杠杆,遏止浪费水资源的行为;在流域水环境综合治理的思路下,充分借鉴国外“含水层储存和回采工程(ASR)”等技术,通过实施水资源采补相结合的循环利用等模式,有效提高岩溶水资源利用效率,促进经济和社会的可持续发展。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 2020年中国水资源公报[EB/OL]. (2021-07-09)[2021-11-20]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/t20210709\\_1528208.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/t20210709_1528208.html).
- [2] 王熹,王湛,杨文涛,等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. 环境工程, 2014, 32(7): 1-5.
- [3] 袁道先,曹建华. 岩溶动力学的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 黑亮. 岩溶地下水资源开发利用与饮水安全保障[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2017: 5-13.
- [5] VENI G, DUCHENE H R, CRAWFORD N, et al. Living with karst: A fragile foundation [M]. Alexandria, VA USA: American Geological Institute, 2001.
- [6] STEVANOVIĆ Z. Karst aquifers—Characterization and engineering [M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 2015: 47-126.
- [7] STEVANOVIĆ Z. Global distribution and use of water from karst aquifers [M]// PARISE M, GABROVSEK F, KAUFMANN G, et al. Advances in karst research: Theory, fieldwork and applications. London: The Geological Society of London, 2018: 217-236.
- [8] MAUPIN M A, BARBER N L. Estimated withdrawals from principal aquifers in the United States, 2000 [R]. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey, 2005: 46-52.
- [9] RADULOVIC M. Karst hydrogeology of montenegro. Special issue of geological bulletin [R]. Podgorica, Geol. Survey of Montenegro, 2000, 18(Spec. ed): 1-271.
- [10] FIORILLO F, STEVANOVIĆ Z. Introductory editorial thematic issue: Mediterranean karst hydrogeology [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(1): 1-3.
- [11] ROBINS N S. Island hydrogeology: Highlights from early experience in the west Indies and Bermuda [M]// HOWDEN N, MATHER J. History of hydrogeology. International Contribution to Hydrogeology. London: CRC Press, 2012: 29-40.
- [12] BENISCHKE R. Karst water resources of Austria, hydrogeological aspects and problems [C]// MILANOVIĆ P, STEVANOVIĆ Z. Karst 2018 "Expect the Unexpected": Proceedings of the International Symposium Trebinje /Bosnia and Herzegovina/. Belgrade: Centre of Karst Hydrogeology, 2018: 23-30.
- [13] FAO AQUASTAT. Food and agriculture organization of the United Nations (FAO)[EB/OL]. (2017-09-26)[2021-12-01]. [http://1656.rm.cglhub.com/nr/water/aquastat/water\\_use/index.stm](http://1656.rm.cglhub.com/nr/water/aquastat/water_use/index.stm).
- [14] FAO-SWALIM. Hydrogeological survey and assessment of selected areas in Somaliland and Puntland. Technical Report No. W-20, FAO-SWALIM (GCP/SOM/049/EC) Project [R/OL]. Nairobi, Kenya: FAO, 2012. [2021-11-28]. <https://faoswalim.org/content/w-20-hydrogeological-survey-and-assessment-selected-areas-somaliland-and-puntland-report-no>.
- [15] FIORILLO F. Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment [J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(3/4): 290-301.
- [16] LOMBARDI L, CORAZZA A. L'acqua e la città in epoca antica [M]// FUNICIELLO R, PRATURLON A, GIORDANO G. La Geologia di Roma, dal centro storico alla periferia - Part I, Memoire Serv Geol d'Italia. Firenze: Ist. Poligrafico dello Stato, 2008: 189-219.
- [17] STEVANOVIĆ Z. Case study: Major springs of south-eastern Europe and their utilization [M]// KRESIC N, STEVANOVIĆ Z. Groundwater hydrology of springs: Engineering, theory, management and sustainability. Burlington-Oxford: Elsevier Inc., 2010: 389-410.
- [18] STEVANOVIĆ Z. Karst aquifers in the arid world of Africa and Middle East: Sustainability or humanity [M]// Karst water environment: advances in research,

- management and policy. YOUNOS T, SCHERIBER M, FICCO K K, eds. Cham; Springer International Publishing, 2019: 1-43.
- [19] ZEKTSER S I, EVERETT G L. Groundwater resources of the world and their use. IHP-VI, series on groundwater No. 6 [M]. Paris: UNESCO, 2004.
- [20] DIMKIĆ D, DIMKIĆ M, SORO A, et al. Overexploitation of karst spring as a measure against water scarcity [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(25): 20149-20159. DOI 10. 1007/s11356-017-9001-x.
- [21] STEVANOVIĆ Z, MILANOVIĆ P. Engineering challenges in karst [J]. *Acta Carsologica*, 2015, 44(3): 381-399.
- [22] PARISE M, SAMMARCO M. The historical use of water resources in karst [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 143-152. DOI: 10. 1007/s12665-014-3685-8.
- [23] VALLEJOS A, ANDREU J M, SOLA F, et al. The anthropogenic impact on Mediterranean karst aquifers: Cases of some Spanish aquifers [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 185-198.
- [24] GALE I N, WILLIAMS A T, GAUS I, et al. ASR-UK: Elucidating the hydrogeological issues associated with aquifer storage and recovery in the UK [R]. London: UK Water Industry Research Limited, 2002.
- [25] 杜新强, 廖资生, 李砚阁, 等. 地下水库调蓄水资源的现状与展望[J]. *科技进步与对策*, 2005(2): 178-180.
- [26] JACOBS K L, HOLWAY J M. Managing for sustainability in an arid climate: Lessons learned from 20 years of groundwater management in Arizona, USA [J]. *Hydrogeology Journal*, 2004, 12(1): 52-65.
- [27] 王从荣, 尤爱菊, 束龙仓. 地下水库研究的现状及展望[J]. *浙江水利科技*, 2018(5): 68-71.
- [28] 韩再生. 为可持续利用而管理含水层补给——第四届国际地下水人工补给会议综述[J]. *地质通报*, 2003, 22(2): 142-143.
- [29] 黄国夫, 董永杰, 付萍. 国外水资源开发利用的经验教训[J]. *华东地质学院学报*, 2001, 24(3): 205-208.
- [30] 贺缠生, 傅伯杰. 美国水资源政策演变及启示[J]. *资源科学*, 1998, 20(1): 71-77.
- [31] 郑育华, 欧阳芳, 吕德龙. 美国田纳西河考察[J]. *陕西水利*, 1998(5): 44-45.
- [32] 李雪松, 秦天宝. 欧盟水资源管理政策分析及对我国跨边界河流水资源管理的启示[J]. *生态经济*, 2008(1): 38-41, 55.
- [33] DAŠIĆ T, VASIĆ L. Flood protection and water utilization of karst poljes: Example of Gatačko Polje, Eastern Herzegovina [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(10): 233.
- [34] 裴建国. 西南岩溶地区地下水开发与石漠化治理区划成果报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2006.
- [35] 覃小群, 宋开本, 黄奇波, 等. 广西岩溶峰林区地下水赋存特征及钻探成井模式[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(5): 618-625.
- [36] 王明章. 贵州巨木地下河流域石漠化地学治理实验及其意义[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(2): 107-112.
- [37] 蒋忠诚, 李先琨, 胡宝清, 等. 广西岩溶石山区石漠化及其综合治理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 156-162.
- [38] 吴兴波, 牛景涛, 牛景霞, 等. 人工回灌对济南泉水系统修复的影响[J]. *人民黄河*, 2004, 26(8): 20-22.
- [39] 周俊, 陈凯麒, 梁鹏, 等. ASR技术模式在我国地下水工程应用应用中面临的问题与应用展望[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(6): 192-195.
- [40] 夏日元. 西南岩溶石山区地下水资源调查评价与开发利用模式[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

## Technologies for Development and Utilization of Water Resources in Karst Areas Abroad and Its Enlightenment to China

MA Zulu<sup>1</sup>, YANG Huangcheng<sup>2</sup>

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541004, China)

**Abstract:** The main problems of water resources development in karst areas in China are resource-based and pollution-induced water shortage in the north, flood-water logging disaster and seasonal water shortage in the south, and mismatch between water resources and economic development space. Although many key technologies have been developed, and some successful models have been summarized in the exploitation and utilization of karst water resources in recent decades, there were still many problems to be solved. The successful experience, typical cases and key technologies of water resources development and utilization in karst areas abroad were analyzed in this article, and the successful modes of karst water development abroad were summarized, which include collection-storage-utilization of rainwater and superficial karst water, storage, regulation and recycling of water resources in karst aquifers, comprehensive development and management for water resources in small or medium scale karst basins, coordinated development of karst water resources at inter basin (regional) scale, cascade regulation and comprehensive development & utilization of water resources in large karst basins. Based on the enlightenment of the above model to the planning, protection, management and development of water resources in karst areas of China, it is proposed to learn from the experience of coordinated development of karst water resources at the inter-basin (regional) scale in foreign countries, and implement coordinated development of water resources across basins to effectively solve the problem of mismatch between water resources and economic development space in karst areas. According to the idea of cascade regulation, storage and comprehensive development and utilization of karst water resources in large watershed, the cascade water resources development project of large karst basin with multi-objectives of flood control and water resources regulation and storage is carried out in karst depressions with cascade distribution and close hydrological connection in southwestern karst area to solve the problem of seasonal water shortage in southern China. It is necessary to pay attention to the problem of water environment caused by the overexploitation of groundwater resources in karst areas of northern China. The plan of recharge to karst aquifers should be initiated to enhance the water storage capacity of northern karst aquifers, to improve water resource utilization efficiency and the groundwater environment. And finally, it is necessary to promote the technological innovation of collecting, storing and comprehensively utilizing rainwater, shallow karst water or slope flow in extremely arid karst areas to provide technical support for the sustainable development and utilization of water resources and ecological economy development in China.

**Key words:** karst area; water resources development; aquifer storage and recovery; key technology and mode

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkxyxb/ch>