

doi: 10.12029/gc20210407

曹建文, 夏日元, 唐仲华, 赵良杰, 王喆, 栾崧, 王松. 2021. 粤港澳大湾区地下水资源特征及开发潜力[J]. 中国地质, 48(4): 1075-1093.
Cao Jianwen, Xia Riyuan, Tang Zhonghua, Zhao Liangjie, Wang Zhe, Luan Song, Wang Song. 2021. Groundwater resources in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and its development potential [J]. Geology in China, 48(4): 1075-1093(in Chinese with English abstract).

粤港澳大湾区地下水资源特征及开发潜力

曹建文¹, 夏日元¹, 唐仲华², 赵良杰¹, 王喆¹, 栾崧¹, 王松³

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/联合国教科文组织国际岩溶研究中心/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 3. 广东省水文地质大队, 广东 广州 510510)

摘要: 粤港澳大湾区是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一, 在国家发展大局中具有重要的战略地位, 大湾区未来的发展离不开水资源的支撑和良好的水生态环境。近年来, 随着大湾区经济的快速发展, 人口激增, 需水量上升, 水资源环境问题也日益突出, 水安全保障程度不足; 地下水是水资源的重要组成部分, 具有水量稳定、水质较好的特点, 可作为重要的应急备用水源。本文从地下水资源着手, 系统梳理了大湾区水资源环境条件、地下水资源状况、特征和开发利用潜力, 并提出了应急后备水源地建议, 得到以下认识: (1) 地下水可划分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩岩溶水、基岩裂隙水三大类, 其中松散岩类孔隙水和基岩裂隙水分布最广; (2) 湾区内地下水水化学类型较为复杂, 丘陵山区以 HCO_3^- -Na 型、 HCO_3^- -Ca 型及 HCO_3^- -Na+Ca 型为主, 冲积平原及山间盆地以 HCO_3^- +Cl-Na 型及 HCO_3^- +Cl-Na+Ca 型为主, 三角洲地区以 Cl-Na 型微咸-咸水为主; (3) 西江、北江及东江干流构成湾区内地下水排泄的总渠道, 各支流为地下水的局部排泄基准面, 地下水动态变化具季节性特征; (4) 地下水整体水质较好, I-III 类水占比高达 66.25%, 从丘陵山区到三角洲平原, 水质呈变差趋势, 尤其在广州、江门、中山、东莞等城市周边水质较差, 超标因子主要为氨氮、氯化物、氟化物、硫酸盐等, 三角洲地区发育大量“铁质水”和“氨氮水”, 水质性缺水问题突出; (5) 地下水开发利用程度很低, 东莞及中山等城市基本未开发利用地下水, 在各类地下水中, 碳酸盐岩岩溶裂隙水具有规模开采的开发利用潜力; (6) 综合分析相关资料, 提出将广花盆地等 10 处富水块段作为应急水源地备选, 经初步计算每年可为大湾区提供约 4.18 亿 m^3 的应急水源保障。为应对突发性水质污染及极端干旱气候等大规模供水危机, 保障粤港澳大湾区用水安全, 促进大湾区高质量发展, 建议加强大湾区的基础水文地质调查工作, 掌握地下水的水位、水质、水量的动态变化特征, 精准计算可用于应急备用开采的地下水储量。

关键词: 粤港澳大湾区; 水环境; 地下水资源; 应急水源地; 水文地质工程

中图分类号: P641.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)04-1075-19

Groundwater resources in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and its development potential

CAO Jianwen¹, XIA Riyuan¹, TANG Zhonghua², ZHAO Liangjie¹,
WANG Zhe¹, LUAN Song¹, WANG Song³

收稿日期: 2021-03-25; 改回日期: 2021-05-21

基金项目: 中国地质调查局项目“南北盘江流域水文地质调查”(DD20190342) 以及广东省地下水资源调查监测评价项目(0835-210Z22803141) 联合资助。

作者简介: 曹建文, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事水文地质、岩溶环境地质调查研究; E-mail: cjianwen@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 夏日元, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 主要从事水文地质、岩溶环境地质调查研究; E-mail: xriyuan@mail.cgs.gov.cn。

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/ Karst Dynamics Laboratory, MLR & GZAR, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Guangdong Hydrogeology Battalion, Guangzhou 510510, Guangdong, China)

Abstract: Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area (GBA) is one of the areas with the highest degree of openness and the strongest economic vitality in China. It has an important strategic position in the overall situation of national development. The future development of the bay area is inseparable from the support of water resources and a good water ecological environment. In recent years, with the rapid economic development of GBA, the population is increasing rapidly, the water demand is increasing. As a result, the water environment is deteriorating obviously, and many cities have a single water source, the local water resources storage capacity is limited, and the degree of water security is insufficient. Groundwater is an important part of water resources, with the characteristics of stable water quantity and good water quality, which can be used as an important emergency standby water source. Starting from the groundwater resources, based on the systematic summary of groundwater resources status, characteristics, development and utilization potential, some suggestions in water source of GBA were put forward. It is concluded that groundwater can be divided into three categories: pore water of loose rock, karst water of carbonate rock and fissure water of bedrock, among which pore water of loose rock and fissure water of bedrock are the most widely distributed. The hydro chemical types of groundwater in the bay area are relatively complex, with $\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\text{-Na+Ca}$ as the main types in the hilly area, $\text{HCO}_3\text{+Cl-Na}$ and $\text{HCO}_3\text{+Cl-Na+Ca}$ as the main types in the alluvial plain and intermountain basin, and Cl-Na brackish water as the main type in the delta area. The main streams of Xijiang, Beijiang and Dongjiang constitute the main drainage channels of groundwater in the bay area. The tributaries are the local discharge datum of groundwater. The groundwater changes dynamically with the seasons. The overall quality of groundwater is good, class I – III water of which accounts for 66.25%. From hilly areas to delta plain, the water quality shows a trend of deterioration, especially in Guangzhou, Jiangmen, Zhongshan, Dongguan and other cities. The main factors exceeding the standard are ammonia nitrogen, chloride, fluoride, sulfate, etc. The degree of groundwater development and utilization is very low. Groundwater has basically not been developed and utilized in Dongguan and Zhongshan. Of all kinds of groundwater, carbonate karst fissure water has the potential of large-scale exploitation and utilization. Based on the comprehensive analysis of relevant data, 10 water-rich blocks such as Guanghua basin are proposed as emergency water sources, which can provide 418 million m^3 of emergency water supply guarantee for GBA every year. In order to deal with the sudden water pollution and extreme arid climate and other large-scale water supply crisis, ensure the water safety of GBA, and promote the high-quality development of GBA, it is suggested to strengthen the basic hydrogeological survey of GBA, master the dynamic change of groundwater level, water quality and water quantity, and accurately calculate the groundwater storage that can be used for emergency exploitation.

Key words: Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area; water environment; groundwater resources; emergency water source; hydrogeological engineering

About the first author: CAO Jianwen, male, born in 1983, doctor, senior engineer, engaged in hydrogeological and karst environmental geological investigation and research; E-mail: cjianwen@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: XIA Riyuan, male, born in 1963, doctor, researcher, engaged in hydrogeological and karst environmental geological investigation and research; E-mail: xriyuan@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey “Nanpan–BeiPan River Basin Hydrogeological Survey” (No. DD20190342) and the underground water resources survey monitoring and evaluation project of Guangdong Province (No. 0835–210z22803141).

1 引 言

2017年3月,中国政府提出粤港澳大湾区建设的理念,以粤港澳大湾区建设、粤港澳合作、泛珠三

角区域合作等为重点,全面推进内地同香港、澳门互利合作。粤港澳大湾区作为当今中国最受瞩目的三大发展区域之一,拥有超级大城市群、世界性良港、国际金融中心、连片海湾、发达互联网业、制

造业中心等众多有利条件,是未来中国南方经济、文化、政治率先一体化的热点区域,该区域成功融合将会给区域发展带来质的飞跃(吴小明等,2018)。地处珠江三角洲的粤港澳大湾区,包括广州、深圳、珠海、佛山、中山、惠州、东莞、江门、肇庆9市以及香港、澳门2个特别行政区(赵钟楠,2018),特殊的气候、水文、地质等自然条件,加上多年来经济社会快速发展带来的高强度负荷,致使该区域面临各种水资源、水生态和水环境问题(程炯等,2006)。粤港澳大湾区独特的区情和高标准的建设要求,使得粤港澳大湾区水安全保障具有一定的特殊性,湾区未来发展离不开水资源的支撑和良好的水利环境。

水资源作为基础性的自然资源、战略性的经济资源、生态环境的控制性要素(Fitt, 2002; Gorelick et al., 2015; 殷志强等, 2018; Wang et al., 2019),是决定未来大湾区可持续发展的关键因素之一,国内很多学者针对珠三角及大湾区的水环境问题和水资源配置规划等开展了大量研究工作,大体可分为3个阶段。(1)20世纪80年代,云祖铿(1982)、陈培虹(1985)等在1:20万综合水文地质普查工作的基础上,对珠三角地区的地下水资源特征进行了总结,初步对珠三角地区的水文地质条件有了系统的认识;(2)2000年以后,随着经济高速发展,珠三角地区水资源污染情况日益凸显,研究重点聚焦于水环境及污染防治方面,杜庆棠(2006)分析了珠三角经济区主要城市的供水现状和前景,程炯等(2006)分析了珠三角地区的主要水环境问题,姚普(2013)对地下水化学特征进行了系统总结,狄效斌等(2008)等对珠三角地区的地下水特征及开发前景进行了分析,赵腾辉等(2016)、刘琦等(2016)对东江流域的有机质污染问题开展了系统研究;(3)2017年粤港澳大湾区建设理念提出后,研究聚焦于水资源安全保障方面,涂世亮(2019)研究了珠海东部地区的地下水特征并提出开发利用建议,郝艳茹等(2020)开展了大湾区应急后备水源地——广花盆地地下水化学特征的研究,查明了其水质污染来源,刘畅等(2019,2020)系统梳理了大湾区内存在的水环境污染、城市内涝及水文特征改变等问题,提出了治理大湾区水环境的4点对策,一些学者从整个湾区融合的角度,分析了存在的水利发展问题,并分别

提出了水资源开发利用的对策建议(吴小明等,2018;戴韵等,2019;龙颖贤等,2019)。

大湾区大气降雨丰沛,地表水系发育,水资源储量相对较大。但是,近年来伴随高速的城市化、工业化和人口集聚,大湾区的水资源供求日益趋紧,接近水资源总量控制红线,水环境问题也十分突出。目前大湾区水源供给类型单一,西江、北江及东江的地表水为其主要供水水源(杜庆棠,2006;赵钟楠,2018),一旦出现特殊干旱年份或遭遇突发事件导致地表水源供水减少的情况,大湾区的供水安全将面临极大隐患。城市应急水源是城市抵御突发性污染事件、应对极端干旱最有效的措施,是保障特殊时期供水安全的有力手段(王金凤,2012;李爱花等,2016;李美香等,2017)。《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确指出“加强饮用水水源地和备用水源安全保障达标建设及环境风险防控工程建设,保障珠三角以及港澳供水安全。”赋存于地面以下岩土空隙中的地下水约占全球淡水资源量的30%,是水资源的重要组成部分(周志芳等,2014),具有水量稳定,水质较好等特点,在珠江流域分布较广且还未进入规模开采(王智慧等,2005),目前国内很多城市已经将地下水作为重要的应急备用水源,并制订了相应的规划方案(贝德光,2013;黄智等,2016;杨巧莉,2018;吴继强,2019;付艳平等,2020),大湾区应急水源地建设也亟待提上日程。

关于珠三角和大湾区水资源方面的研究很多,但由于区域内地下水开发利用程度很低,对于地下水资源开发利用分析的综合研究目前较少。本文系统归纳总结了大湾区的水资源环境条件和地下水系统特征,对地下水资源量和质量进行了评价,在分析其开发利用潜力的基础上,提出选择10处富水块段作为大湾区的应急水源地备选。本文从地下水资源的视角谈大湾区未来可能会面临的水资源开发利用问题,以期为大湾区国土空间规划、自然资源调查管理和战略性综合地质调查工作提供决策参考。

2 水资源环境条件

2.1 自然条件

粤港澳大湾区行政区域包括广东省的广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、

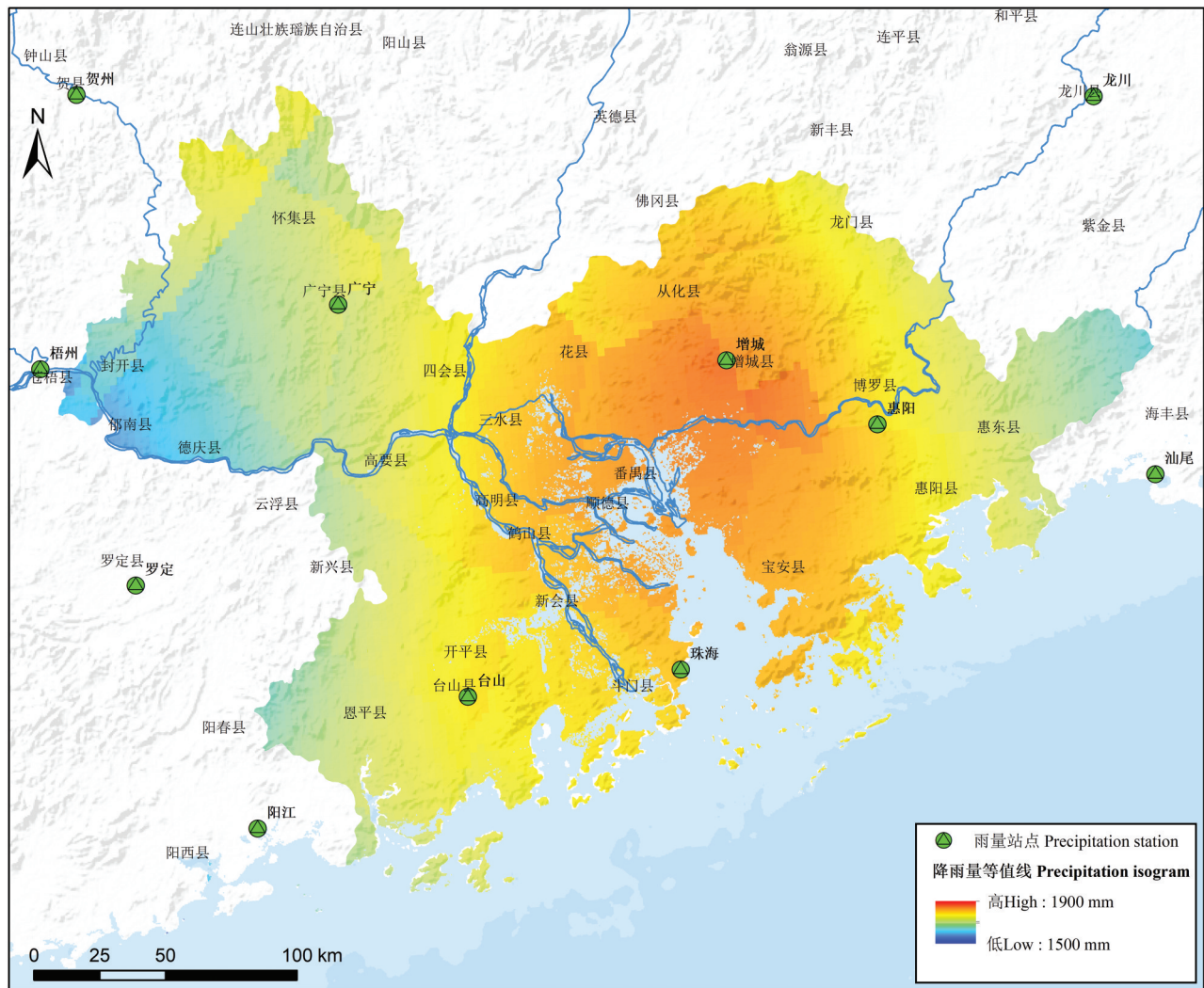


图1 大湾区多年平均降雨量分布图(据2009—2019年降雨资料)

Fig.1 Distribution of annual average rainfall in GBA (according to rainfall data from 2009 to 2019)

江门市、肇庆市以及香港、澳门特别行政区,涉及陆域面积5.6万 km^2 。属南亚热带季风气候区,年平均气温 22°C 。相对湿度80%,年降雨量1600~2000 mm,年蒸发量1142~1738 mm,降雨量大于蒸发量,夏秋常受台风袭击(狄效斌等,2008),降水量的总体趋势为中部高,东部和西部较低(图1)。总体地势北高南低,东、北、西三面环山,南临南海,三角洲和河谷平原内残丘、台地棋盘状散布。

粤港澳大湾区2019年常住总人口7265万人,人口密度约1295人/ km^2 ,是全国平均的近9倍(数据来源:中商产业研究院大数据库);其城镇化率超过85%,是全国人口最为集聚、城镇化水平最高的区域之一(张昱,2018)。2017年经济总量为10.1万亿元,

人均GDP14.6万元,是全国平均水平的2.4倍,经济总量仅次于纽约湾区,位居世界四大湾区第2位。

大湾区位于中国第二大河流——珠江的出海口,区内地表河网密布,纵横交错,水域宽广,海潮频繁,海陆水体联系密切。丰沛的降雨形成了大湾区密布的河网水系,汇集了西江、北江、东江和众多中小河流,各类河流324条,河道总长1600 km,河网密度高达 $0.83 \text{ km}/\text{km}^2$,是全国平均水平的5倍多(唐亦汉等,2015)。此外,区域内还有众多河口海湾,包括珠江河口、大亚湾、大鹏湾、广海湾及北海湾等。

2.2 地质背景

地层隶属华南地层大区中的东南地层区,地表出露元古系、震旦系、寒武系、泥盆系、白垩系、古近—新

近系、第四系。岩浆岩主要为燕山期二长花岗岩类,以粗粒或粗粒斑状花岗岩为主,风化层发育;第四系分布最广,沉积类型有冲积、湖积、海积及海陆混合堆积,富水性主要取决于颗粒粗细、厚度大小和分布位置;古近—新近系红色泥岩、砂砾岩为钙质泥质胶结,裂隙均被充填;碳酸盐岩地层在泥盆系、石炭系、二叠系均有发育,主要有上泥盆统天子岭组(D₃t)、下石炭统石磴子段(C₁ds)、中上石炭统壶天群(C₂₊₃ht)、中二叠统阳新群(P₂y),总体来看,壶天群灰岩岩溶最发育,其次为石磴子段和阳新群灰岩。

在构造单元上属华南褶皱系,经历了加里东、印支、燕山和喜马拉雅各期地壳运动,构造极为复杂。早期以褶皱为主,后期以岩浆活动和断裂作用为主,构造方向主要为北东和北东东向。历次构造运动形成的一系列褶皱和断裂,对地下水的赋存有明显的控制作用:广大丘陵山区构造裂隙和节理发育,风化层厚度大,因此裂隙潜水广泛分布;一系列的褶皱形成了多个向斜盆地,大部分向斜构造核部由上古生界碳酸盐岩组成,隐伏岩溶发育,蕴藏着丰富集中的岩溶水;区内岩浆岩广泛分布,深大断裂发育,形成多处温泉。

2.3 有待解决的水资源环境问题

随着湾区经济的快速发展,区内水资源环境问题也日益突出,归纳起来体现在以下5个方面:

(1) 水资源时空分布不均,人均水资源量较少

粤港澳大湾区多年平均水资源总量约为560亿m³,但水资源时空分配不均,75%~85%的径流量集中在4—9月,空间分布表现出山区多、平原少的特征(朱秋菊等,2018)。湾内入境水量丰富,多年平均年入境水量为2070亿m³,约为湾区本地水资源量的3.7倍(龙颖贤等,2019)。深圳、东莞、香港等东江供水城市人口集中、经济发达,但水资源量相对匮乏(龙颖贤等,2019),人均水资源量均远低于世界及全国平均水平。

(2) 供水水源结构单一,存在安全供水隐患

大湾区内多市水源单一,江河、水库等地表水为最主要的供水水源,并且本地水资源调蓄能力有限,境外调水依赖程度高,比如深圳市2018年境外引水占比超85%(深圳市水务局数据),香港自2005年以来80%以上供水来自东江,澳门98%的淡水资源依靠珠海市供应(龙颖贤等,2019)。一旦发生西

江上游曲靖地区化工泄露等类似突发水源性事故,将严重影响城市供水安全。

(3) 水质性缺水问题不容忽视

珠江三角洲地带河网水污染问题突出,大城市周边的河流污染最严重,如2018年广东省生态环境厅公布的20个省考重度污染(劣V类)江段中,有70%位于粤港澳大湾区内,以广州、深圳、佛山、东莞最为集中(龙颖贤等,2019),此外,广州河段沉积物各种重金属含量明显高于其他地区(刘宝林,2015);由于城市工业生产和生活的需要,珠三角地区水体出现不同程度的有机污染现象,如1988年受到华南环境科学研究所检测出珠江广州河段水体中存在DDT及PCB等持久性有机污染物(程炯等,2006),东江各支流有机污染严重,中下游水体中类蛋白质含量明显偏高(刘琦等,2016),在东江上游抗生素残留是一个普遍存在的现象(赵腾辉等,2016),深圳茅洲河水体有机物、N、P含量高,水体黑臭(蔡国飞,2017);作为湾区重要供水来源的水库富营养化和蓝藻水华事件频发,湾区11座大型水库大部分处于中营养水平至富营养水平(秦伯强,2007;陈伟涛,2011;孙秀峰等,2017)。

(4) 近岸海域水质较差

大湾区近岸水域基本上劣于第四类海水水质标准,水中无机氮、无机磷和活性磷等均存在超标现象,深圳和惠州等地赤潮多发(2017年广东省海洋环境状况公报);湾区近岸海域存在不同程度的重金属污染情况,如崖门主要受Pb、Co和Zn的污染,鸡啼门Cd污染比较严重(倪志鑫等,2016)。

(5) 沿海地区淡水资源减少

大湾区珠江三角洲地带因为地处感潮河段,90年代以来受珠江上游来水量减少、水位降低、滥采河砂等因素影响,河涌水体污染严重,海水倒灌、盐水楔上溯,导致可利用的淡水资源减少(王津等,2006;李惠萌等,2016)。如2005年,珠海市受咸潮上溯影响,造成自来水咸度过高,部分市民甚至只能购买矿泉水做饭或饮用(涂世亮,2019)。

3 地下水资源水量和水质评价

3.1 地下水系统特征

3.1.1 地下水类型

大湾区地下水根据含水介质类型可划分为:松散

岩类孔隙水、碳酸盐岩岩溶水、基岩裂隙水三大类。

松散岩类孔隙水主要分布于珠江三角洲平原区、山间盆地及大江两岸、各大河交汇处的冲积平原中,其次在山麓前沿地段亦有少量分布(图2)。多为含孔隙潜水,局部承压,水位埋深1~5 m,水位年变幅较小,一般0.5~1.5 m。含水层地层时代为自晚更新世至全新世沉积的河流相冲积层、冲洪积层、湖相沉积层以及三角洲相冲积-海积层等。一般来说,冲积平原孔隙水水量较山前洪积平原的为,后者又较山间盆地孔隙水量为大;各江河中、下游地带砂砾石含水层厚度大,含水量最丰富(图3);山间盆地的中心部位富水性好,边缘富水性差。江门、顺德勒流、盐步以西地区含水层为中粗砂赋存孔隙承压水,水量贫乏至中等,单井涌水量72~424 t/d;广花盆地含水层为中粗砂及粗砂,赋存孔隙潜水及微承压水,水量中等至丰富,单井涌水量121~2499 t/d;东莞石龙以东地区水量中等,局部贫乏,赋存潜水及孔隙承压水,单井涌水量58~112 t/d;山间盆地、谷地含水层为中粗砂,赋存孔隙潜水,富水性中等,局部贫乏,单井涌水量58~494 t/d;深圳市西乡、南头、蛇口、珠海市下栅至香洲,中山唐家至崖口及斗门平沙等地滨海沙堤砂地分布区,含水层为中粗砂,赋存孔隙潜水,水量中等至丰富,单井涌水量240~2058 t/d;流溪河、增江和东江北干流的岸边地带,含水层为中细一中粗砂,赋存孔隙潜水,水量丰富,单井涌水量721~5762 t/d;西、北江沿岸平原,含水层为中粗砂及粗砂,赋存孔隙潜水及孔隙承压水,富水性中等至丰富,单井涌水量一般100~1000 t/d。

基岩裂隙水包括红层裂隙水、层状基岩裂隙水和块状基岩裂隙水。红层裂隙水含水层为古近一新近系和白垩系砂页岩地层,主要分布怀集西北部闸岗盆地、珠江三角洲中部和西北部、河源盆地(图2),一般水量不十分丰富,泉水流量一般小于0.3 L/s;层状基岩裂隙水含水层属侏罗系至寒武系的碎屑岩及前寒武系变质岩地层,广泛分布于怀集、肇庆、开平、增城、惠州等地,泉水流量一般为0.3~1 L/s,属水量贫乏至中等;块状基岩裂隙水含水层为花岗岩和变质岩类,广泛分布于珠江三角洲外围的西南部、东北部、西北部和东部山区(图3),泉水常见流量0.1~1.0 L/s,属水量贫乏至丰富。基岩裂隙水主要贮存于岩石的风化和构造裂隙中,且多

集中于脆性岩类裂隙体系中。其中块状岩类裂隙水相对含水丰富。

碳酸盐岩岩溶裂隙水主要集中分布于广州北部广花盆地、龙归盆地、肇庆、蚬港一带、龙门—平陵一带、江门那扶盆地、大岗盆地、怀集盆地及三坑—太平冲积平原(图2),分为裸露型岩溶水和覆盖型岩溶水,裸露型岩溶水分布于肇庆、龙门、大岗、怀集、禾生坑等地,常呈孤峰突兀于平原之中,零星分布,出露面积小,富水型较差,地下水位埋藏深,地表多为干旱缺水;覆盖型岩溶水分布于广花盆地、龙门—平陵盆地、大岗盆地、怀集盆地及三坑—太平冲积平原,地下水位埋藏浅,多为承压水,水量中等至丰富。含水岩组包括壶天群灰岩、天子组灰岩、东岗岭组灰岩、岩关阶灰岩、石蹬子段灰岩,黄龙统灰岩、阳新群灰岩,覆盖层以第四系为主,上覆厚度0~50 m不等,碳酸盐岩多呈条带状分布,常组成背、向斜构造。受岩性、构造、地貌等条件控制,岩溶发育程度各不相同,富水性相差较大,具非均一性特征。

3.1.2 地下水补给、径流、排泄特征

湾区潮湿多雨,水系发育,平原区河、渠、塘、湖密布;丘陵山区,局部岩石破碎,风化强烈,植被茂盛。北部、西南部、西北部及东部的丘陵山区为地下水的补给区,西江、北江及东江干流贯穿全区,汇集于珠江三角洲,构成湾区内地下水排泄的总渠道,各支流为地下水的局部排泄基准面。

地下水补给:大湾区年降雨量1600~2000 mm,丰富的降水为地下水的渗入补给提供了充足的来源。但由于降雨在年内分配不均,不同季节地下水获得补给量也不同,丰水期获得补给量大,平水期次之,枯水期基本上无降水补给,而以排泄地下水为主。一般由红层、层状基岩、片麻岩及细粒花岗岩等组成的垌岗、丘陵、孤山,岩石裂隙不甚发育,植被稀少,大气降水后,很快流失,补给条件差;在粗粒花岗岩分布区,岩石节理裂隙发育,植被繁茂,具有较好的渗入补给条件。区内地下水的主要补给形式有降雨垂直入渗补给、河流的侧向入渗补给、基岩裂隙水的侧向补给、凝结水补给、灌溉回归水渗入补给及渠道渗漏形成的地下水补给,降雨垂直入渗补给为最重要的补给来源。

地下水径流:在广大丘陵山区,由于切割密度

和切割深度较大,基岩裂隙水普遍具有埋藏浅,径流途径短和动态变化大的特点,大气降雨入渗形成地下水后,多以泉水或泄流形式向邻近沟谷排泄。基岩裂隙水由丘陵山区流入平原后,地下水由淋滤型转入径流型,一部分侧向补给第四系孔隙承压水,而另一部分则成为地下潜流(隐伏基岩裂隙水和岩溶水),其径流形式由垂直循环转入水平循环。平原区地下水自北向南东,自北东向南西汇流,径流更加滞缓,至珠江三角洲前缘和滨海平原,地下水水位与地表水位近乎一致,使地下水宣泄不畅而形成水洼地带。

地下水排泄:有以下几种形式:(1)丘陵山区基岩裂隙水以泉水或渗流的方式向邻近沟谷排泄,成

为地表水和山区水库旱季的主要补给来源,西江、北江及东江为区域内地下水的主要排泄通道;(2)在丘陵山区与山前平原交接地带,部分基岩裂隙水常以地下潜流形式侧向补给第四系孔隙承压水;(3)本地区气候炎热,在盆地、平原地区地下水位埋深较浅,地表土面水分蒸发和植物蒸腾也贡献了一部分地下水排泄量;(4)井孔开采也是地下水排泄的一种形式,但湾区内人工开采地下水强度较低,排泄量有限。

3.2 地下水资源量评价

为便于地下水资源的计算和评价,首先评价区依据珠江流域五级分区原则进行划分,整个大湾区涉及到17个五级流域系统(图4),各评价单元按照

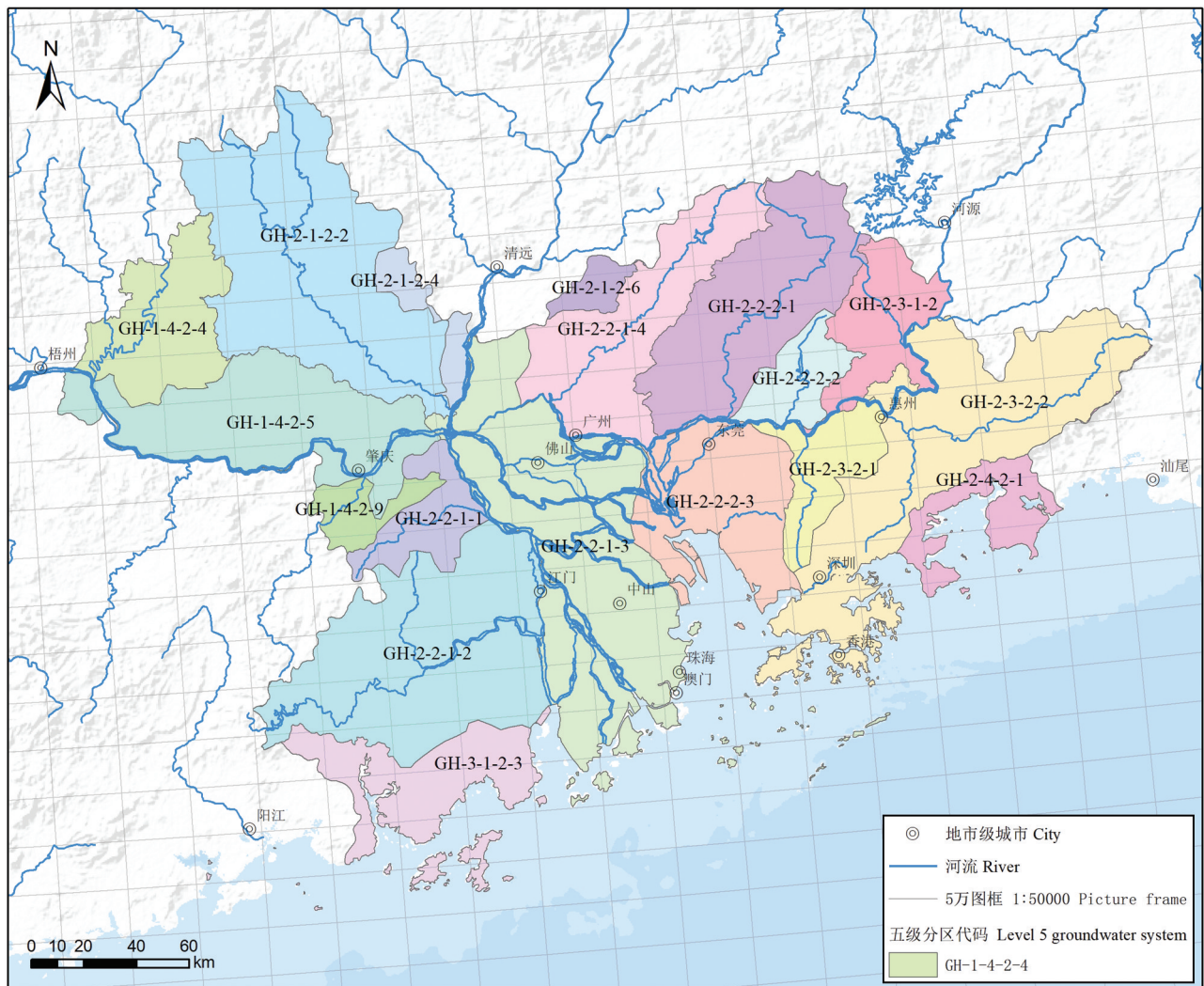


图4 研究区水资源评价五级分区图

Fig.4 Five level zoning map of water resources evaluation in the study area

表1 研究区地下水资源量评价分区及结果

Table1 Evaluation division and result of groundwater resources in the study area

五级分区	五级代码	面积/km ²	含水岩组类型	降雨入渗系数	降雨量/(mm/a)	资源量/(10 ⁸ m ³ /a)
贺江块段一区	GH-1-4-2-4	176.07	全碳酸盐岩层	0.39	1637.5	1.12
贺江块段二区	GH-1-4-2-4	1583.07	层状基岩	0.19	1637.5	4.93
贺江块段三区	GH-1-4-2-4	687.38	岩浆岩	0.14	1637.5	1.58
西江干流广东段一区	GH-1-4-2-5	168.96	全碳酸盐岩层	0.39	1641.7	1.08
西江干流广东段二区	GH-1-4-2-5	214.12	夹碳酸盐岩层	0.24	1641.7	0.86
西江干流广东段三区	GH-1-4-2-5	3699.00	层状基岩	0.10	1641.7	6.07
西江干流广东段五区	GH-1-4-2-5	231.78	松散岩类	0.10	1641.7	0.38
罗定江块段一区	GH-1-4-2-9	480.86	全碳酸盐岩层	0.28	1625	2.19
罗定江块段二区	GH-1-4-2-9	222.67	松散岩类	0.16	1625	0.58
绥江块段一区	GH-2-1-2-2	4004.64	层状基岩	0.39	1730	27.02
绥江块段二区	GH-2-1-2-2	2613.76	岩浆岩	0.21	1730	9.50
北江下游段一区	GH-2-1-2-4	651.09	全碳酸盐岩层	0.31	1775	3.58
潯江块段一区	GH-2-1-2-6	407.49	层状基岩	0.24	1800	1.76
高明河块段一区	GH-2-2-1-1	520.41	层状基岩	0.19	1750	1.73
高明河块段二区	GH-2-2-1-1	414.81	岩浆岩	0.14	1750	1.02
高明河块段三区	GH-2-2-1-1	275.74	松散岩类	0.10	1750	0.48
西北江三角洲一区	GH-2-2-1-2	174.44	全碳酸盐岩层	0.20	1725	0.60
西北江三角洲二区	GH-2-2-1-2	2461.24	层状基岩	0.15	1725	6.37
西北江三角洲三区	GH-2-2-1-2	2232.57	岩浆岩	0.13	1725	5.01
西北江三角洲四区	GH-2-2-1-2	1284.66	松散岩类	0.11	1725	2.44
珠江下游段一区	GH-2-2-1-3	1270.51	层状基岩	0.15	1800	3.46
珠江下游段二区	GH-2-2-1-3	1410.66	岩浆岩	0.14	1800	3.55
珠江下游段三区	GH-2-2-1-3	4739.94	松散岩类	0.10	1800	8.53
流溪河块段一区	GH-2-2-1-4	758.26	层状基岩	0.22	1800	2.94
流溪河块段二区	GH-2-2-1-4	2627.55	岩浆岩	0.16	1800	7.57
流溪河块段三区	GH-2-2-1-4	179.95	松散岩类	0.11	1800	0.36
增江块段一区	GH-2-2-2-1	286.14	全碳酸盐岩层	0.26	1800	1.34
增江块段二区	GH-2-2-2-1	2215.56	层状基岩	0.14	1800	5.58
增江块段三区	GH-2-2-2-1	1401.68	岩浆岩	0.10	1800	2.52
增江块段四区	GH-2-2-2-1	265.18	松散岩类	0.10	1800	0.48
横河块段一区	GH-2-2-2-2	538.51	层状基岩	0.21	1825	2.03
横河块段二区	GH-2-2-2-2	262.79	岩浆岩	0.15	1825	0.72
横河块段三区	GH-2-2-2-2	245.72	松散岩类	0.10	1825	0.45
东南江支流一区	GH-2-2-2-3	870.42	层状基岩	0.17	1850	2.74
东南江支流二区	GH-2-2-2-3	744.90	岩浆岩	0.13	1850	1.79
东南江支流三区	GH-2-2-2-3	1457.44	松散岩类	0.10	1850	2.70
东江以上广东段一区	GH-2-3-1-2	815.11	全碳酸盐岩层	0.22	1700	3.05
东江以上广东段二区	GH-2-3-1-2	156.38	夹碳酸盐岩层	0.22	1700	0.58
东江以上广东段八区	GH-2-3-1-2	769.18	松散岩类	0.22	1700	2.88
石马河一区	GH-2-3-2-1	905.82	层状基岩	0.18	1825	2.98
石马河二区	GH-2-3-2-1	228.66	岩浆岩	0.18	1825	0.75
石马河三区	GH-2-3-2-1	259.39	松散岩类	0.18	1825	0.85
西支江一区	GH-2-3-2-2	1145.32	全碳酸盐岩层	0.22	1725	4.37
西支江二区	GH-2-3-2-2	3537.72	层状基岩	0.22	1725	13.49
西支江三区	GH-2-3-2-2	1255.69	岩浆岩	0.22	1725	4.79
西支江四区	GH-2-3-2-2	550.72	松散岩类	0.22	1725	2.10
漂河块段一区	GH-2-4-2-1	1215.96	层状基岩	0.17	1625	3.36
漠阳江块段一区	GH-3-1-2-3	398.28	全碳酸盐岩层	0.54	1600	3.44
漠阳江块段二区	GH-3-1-2-3	289.31	夹碳酸盐岩层	0.40	1600	1.86
漠阳江块段三区	GH-3-1-2-3	1848.74	松散岩类	0.30	1600	8.87
合计		55156.27				178.41

地下水含水介质条件划分含水系统,进行水资源评价。传统意义上基岩山区水文地质调查地下水资源计算方法主要有大气降水入渗系数法、地下水径流模数法和泉水流量汇总法,但是泉水流量汇总法受到调查时泉水丰枯季节的不同和相互之间转化关系不明确的影响,且碎屑岩地层中水资源量统计性差,计算结果仅能提供参考值,不够准确。本次研究考虑到地下水资源各分区地貌、岩性、构造的差异以及实际条件,采用大气降水入渗系数法计算地下水资源量。

本次工作采用大气降水入渗系数法计算地下水资源量,具体计算公式为:

$$Q_{\text{补}}=100 \cdot \alpha \cdot F \cdot P$$

式中: $Q_{\text{补}}$ —地下水系统天然补给量($10^4 \text{ m}^3/\text{a}$); α —降雨入渗系数(无量纲); F —地下水系统面积(km^2); P —地下水系统范围内年内降水总量(m/a)。

本次评价使用10处气象站2019年的降雨量数据,分别为贺州站、梧州市、罗定站、阳江站、广宁站、台山站、珠海站、增城站、惠阳站、龙川站和汕尾站。

本次评价采用该区域1:5万和1:20万水文地质调查工作中建立的监测站汇水面积计算渗透系数,地

下水动态观测站以下降泉、岩溶大泉和地下河出口为主,各观测站点水文地质条件清晰,地下水汇水面积相对明确,并利用2019—2020年地下水位统测工作中测得的地下河和下降泉数据修正各评价分区参数。

经计算,2019年粤港澳大湾区地下水资源量约为178.41亿 m^3 。

3.3 地下水水化学特征

湾区内地下水水化学类型较为复杂。地下水化学类型及咸淡水的分布与岩性、构造、地形地貌、沉积成因以及水文等因素有密切关系(姚普,2013;孙厚云等,2018)。从山区到三角洲平原可将本区地下水大体划分为4种类型。

(1) HCO_3-Na 型及 $\text{HCO}_3-\text{Na}+\text{Ca}$ 型。主要分布于大湾区北部、西北部和东北部的中低山丘陵区,地形起伏较大,岩性多为岩浆岩和变质岩类,水力交替强烈,为地下水补给区,地下水以垂直运动为主,溶解总固体多小于 0.1 g/L ,pH值6~7。

(2) $\text{HCO}_3+\text{Cl}-\text{Na}$ 型及 $\text{HCO}_3+\text{Cl}-\text{Na}+\text{Ca}$ 型。主要分布于西、北、东江冲积平原及山间盆地区域,地形渐趋平缓,水力坡度减小,地下径流减弱,矿物质逐渐富集,氯、钠离子逐渐增多,溶解总固体

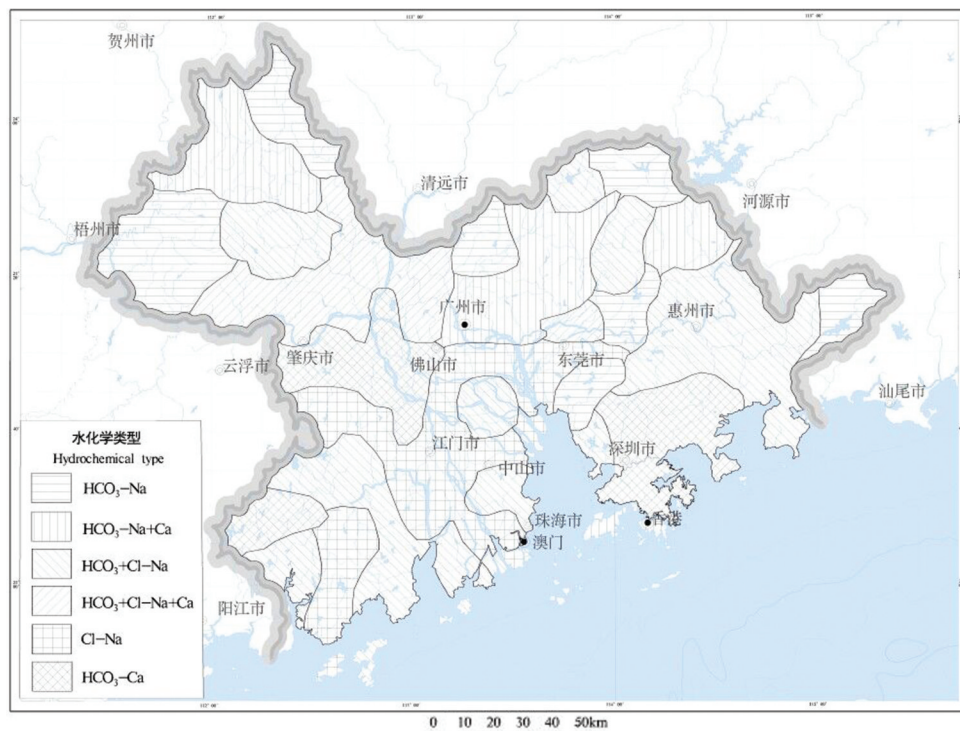


图5 研究区地下水化学类型分布图

Fig.5 Distribution of groundwater chemical types in the study area

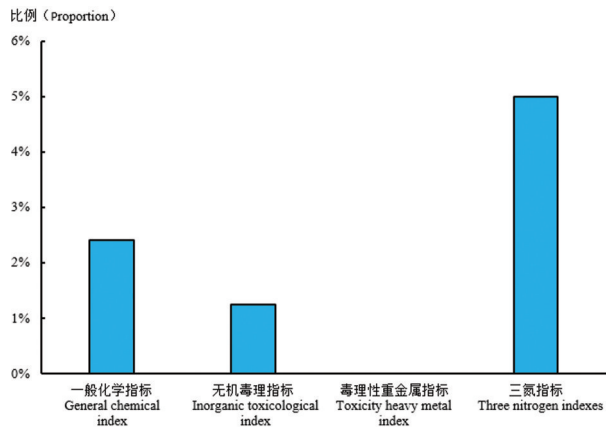


图6 研究区地下水中不同类别指标超标率

Fig.6 Over standard rates of different types of indicators in groundwater in the study area

0.02 ~ 0.5 g/L, pH值5.8~6.9。

(3)HCO₃-Ca型。主要分布于肇庆—三水、惠阳—龙岗—深圳两个片区内的低山丘陵地区,主要岩性为花岗岩、砂页岩及部分碳酸盐岩,溶解总固体多小于0.3 g/L,pH值6~8反映了地下水以溶滤作用为主,具有补排途径短的特征。

(4)Cl-Na型微咸—咸水。广泛分布于珠江三

角洲平原中部及南部,而山间盆(谷)地冲洪积层孔隙水除外。其分布范围与溶解性总固体大于1 g/L的范围基本一致,即广州、佛山以南,沙滘、勒流、江门一线以东和东莞石龙以西广大地区。晚更新世中期以来,几经海进海退,形成了广阔平坦的三角洲平原,地势平坦,水力交替作用十分迟缓,地下径流条件极差,大量氯、钠离子未被置换,地下水化学成分与海水成分大致相同,形成广大的咸水及微咸水区(云祖铿,1982;支兵发等,2015),溶解性总固体总的向南及向珠江口渐增,由微咸水(1 g/L≤M<3 g/L)过渡到半咸水(3 g/L≤M<10 g/L)、咸水(M≥10 g/L),最大可达25.67 g/L(中山坦洲)。咸水区内除松散层孔隙水是咸水外,其下伏基岩裂隙水溶解性总固体含量也较高。

此外,由于珠江三角洲具有独特的沉积过程,使三角洲松散层孔隙水中铁离子和铵离子含量普遍超过饮用水标准,使用时带来不少困难,这种超标准的地下水被称为“铁质水”和“氨氮水”(云祖铿,1982;狄效斌等,2008;吕晓立等,2021)。

3.4 地下水质量评价

2019年,通过对大湾区内国家地下水监测工程

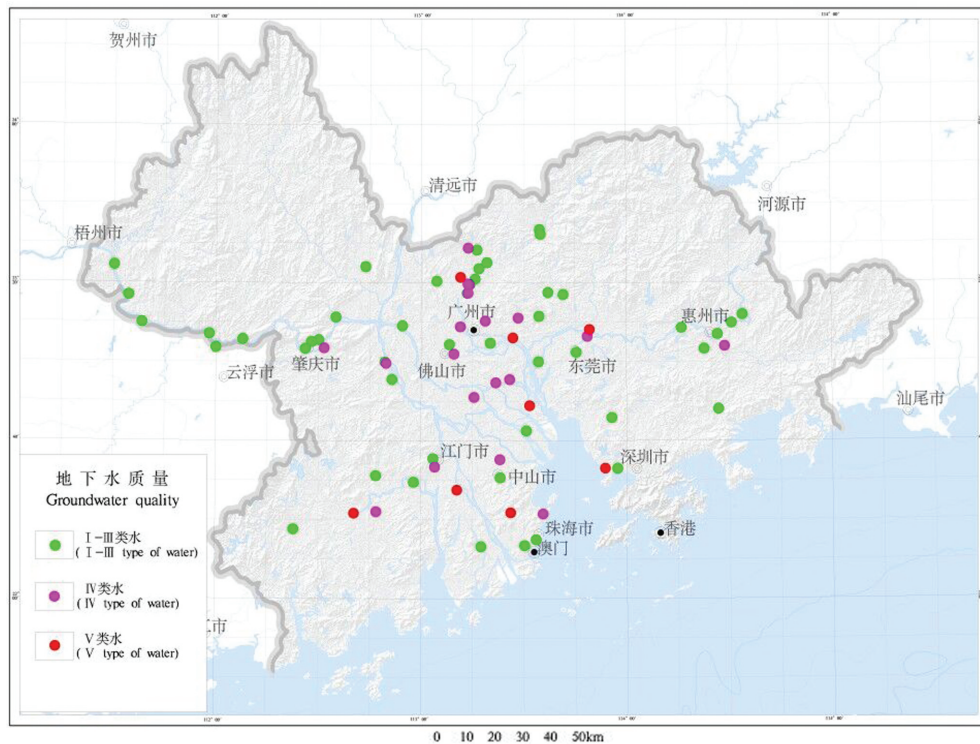


图7 研究区地下水质量评价结果图

Fig.7 Results of groundwater quality assessment in the study area

表2 粤港澳大湾区广东省9市供水量数据(1999年、2009年及2019年)
Table 2 Water supply data of nine cities in Guangdong Province(1999, 2009 and 2019)

城市	2019年			2009年			1999年		
	地下水 供水量/亿m ³	总供水量/ 亿m ³	占比/%	地下水 供水量/亿m ³	总供水量/ 亿m ³	占比/%	地下水 供水量/亿m ³	总供水量/ 亿m ³	占比/%
广州	0.39	62.3	0.63	0.62	75	0.83	0	85	0.00
深圳	0.03	21	0.14	0.11	17.95	0.61	1	12	8.33
珠海	0.01	5.8	0.17	0.01	4.59	0.22	0	7	0.00
佛山	0.01	30.9	0.03	0.08	39.19	0.20	0	33	0.00
惠州	0.32	19.7	1.62	0.55	21.81	2.52	1	20	5.00
东莞	0	19.8	0.00	0.07	20.8	0.34	0	15	0.00
中山	0	14.8	0.00	0.01	18.39	0.05	0	8	0.00
江门	0.31	26.7	1.16	0.54	29.45	1.83	0	30	0.00
肇庆	0.14	18.7	0.75	0.44	20.29	2.17	1	23	4.35
合计	1.21	219.7	0.55	2.43	247.47	0.98	3	233	1.29

80处钻孔的水样测试分析,按《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)开展水质评价工作,按《区域地下水污染调查评价技术要求》,地下水中某组分超地下水质量Ⅲ类水标准称为超标;而有机污染指标以评价检出限为标准,高于标准即为检出。

不同类别指标的超标情况有差异性,粤港澳大湾区整体的超标情况呈现出三氮指标>一般化学指标>无机毒理性指标>毒理性重金属指标。三氮指标的超标率过高主要是因为氨氮指标,其超标率均超过了10%,除氨氮指标外,硫酸盐、氯化物、铁、氟化物等指标均有超标现象,但超标率较低,仅在5%左右。

水质评价结果为:Ⅰ类水占总数的1.25%,Ⅱ类水占总数的16.25%;Ⅲ类水占总数的48.75%;Ⅳ类水占总数的23.75%;Ⅴ类水占总数的10.00%。从评价结果来看,粤港澳大湾区整体水质较好,Ⅰ~Ⅲ类水占比高达66.25%,超标水点比例为33.75%。Ⅰ~Ⅲ类水在粤港澳大湾区内均有分布,整体分布状态较为均匀;Ⅳ类水在广州、佛山等地集中分布,在中山、惠州、东莞等地呈散点状分布,超标因子主要为氨氮、氯化物、氟化物等;Ⅴ类水主要分布在江门、中山、东莞等地,超标因子主要为硫酸盐、氨氮等。

4 地下水资源开发利用潜力与应急后备水源地选择

4.1 地下水资源开发利用潜力分析

粤港澳大湾区广东省9市2019年地下水资源

量约178亿m³,占当地水资源总量的26%左右,但是开发利用程度很低。分析1999年、2009年及2019年的地下水供水量数据发现(表2):(1)地下水源供水量呈下降趋势,1999年为3亿m³,2009年降至2.43亿m³,2019年则仅有1.2亿m³;(2)地下水源供水量在总供水量中的占比也呈下降趋势,1999年为1.29%,2009年降至0.98%,2019年则仅占0.55%;(3)目前大湾区各城市中,江门及惠州地下水开发利用程度较高,地下水供水量在总供水量中的占比分别为1.62%及1.16%,东莞及中山基本未开发利用地下水(表2)。

大湾区内地下水类型复杂且分布不均,水化学特征多变,基岩山地区地下水循环迅速而水质较好,三角洲及河谷平原区松散层地下水径流缓慢而水质较差,西北江沿岸平原、珠江三角洲平原区松散层孔隙水普遍铁离子较高,并多伴有氨氮水出现。地下水动态受降雨影响明显,尤其是基岩山区地下水量年变化幅度剧烈,丰水期、枯水期水量差距悬殊。受构造、含水岩组、水化学特征等影响因素控制,不同地区地下水开发利用潜力也存在很大差异性。

不宜开采地下水的区域:珠江三角洲中部和南部地区,松散岩类孔隙水水量丰富,但多为咸水,且氨氮普遍超标,无法开发利用;红层裂隙水分布区地下水资源一般极其贫乏,不宜进行大规模的地下水开采。

适宜开采地下水的区域:三角洲后缘及山间谷

(盆)地以及山麓前缘地段,松散岩类淡水主要分布于此,但含水层普遍较薄,地下水贮存空间有限,水量中等,可作为乡村分散供水水源,进行小规模开采;广大丘陵山区基岩裂隙水广泛分布,普遍水质较好,但富水性一般,宜选择植被覆盖条件好,构造断裂发育地区进行地下水开采;广州北部广花盆地、龙归盆地、肇庆、蚬港一带、龙门—平陵一带、江门那扶盆地、大岗盆地、怀集盆地及三坑—太平冲积平原,发育覆盖型岩溶裂隙水,水质较好,水量中等—丰富为主,单孔出水量一般为100~2000 m³/d,最大可达15594 m³/d(广花盆地江村),开发利用潜力较好。

4.2 地下水应急水源地特征

4.2.1 概念及选取原则

有关城市应急水源的概念学术界尚未形成统一的想法,本文所指的应急水源地是在连续干旱或发生水安全突发事件情况下的非常规临时供水水源地,具有“应急”、“备用”、“水质要求高”三层含义(史正涛等,2008)。

关于地下水应急水源地的选择,本文遵从4个原则:(1)地下水资源可开采量应足够丰富;(2)地下水水质应符合相关饮用水标准;(3)水源地地段便利,具备较好的开采条件;(4)短时期内高强度的地下水开采不易引发次生地质灾害。

4.2.2 大湾区应急后备水源地选择

粤港澳大湾区人口集中、经济发达,但人均水资源量较低,供水水源主要为地表水,水源单一,多地对境外调水依赖程度高,地下水资源开发利用程度较低。各类型地下水中,基岩裂隙水水量较小,只能作分散的小型供水水源地;第四系孔隙水含水层普遍较薄,不仅水量有限,而且铁离子及氨氮含量普遍较高,在三角洲地区微咸水—咸水广泛分布,仅可作为农村分散居民供水水源,对于城市人口集中区的水源供给作用有限;碳酸盐岩岩溶水水量较丰富,且分布集中,便于规模开采,往往可以作为城市的供水水源地(徐社美,2012)。由于大湾区内碳酸盐岩分布面积有限,在地下水应急水源地建设中,建议将大湾区内及其周边区域的碳酸盐岩岩溶水集中区段统筹考虑,提高应急供水水源保障能力。综合收集分析相关资料,提出将以下10处富水块段作为应急水源地备选(表3,图8),经初步计算可为每年可为大湾区提供4.18亿m³的水源保障。

I-1 广花盆地。广州—花都盆地(简称广花盆地)位于广州市西部,珠江三角洲北部,总面积约1092.0 km²,为一个向西北封闭、向南西散开的复式向斜盆地,盆地内以隐伏石炭—二叠系灰岩为主,在强烈的构造作用下,形成了一系列的褶皱和断

表3 大湾区及周边地区应急水源地备选点
Table 3 Emergency water source sites in GBA and surrounding areas

分区	代号	名称	面积/km ²	含水层	钻孔涌水量/ (m ³ /d)	富水性 评级	可采水量/ (10 ⁴ m ³ /d)	建议保障 城市
大湾区 内 (I)	I-1	广花盆地	1092.0	石炭系—二叠系灰岩	17.28~15594	中等— 丰富	33.0	广州
	I-2	肇庆大沙—瑚底向斜谷地	216.0	石炭系石磴子灰岩、壶天群灰岩及天子岭灰岩	100~1000	中等— 丰富	2.6	肇庆
	I-3	金渡—蚬港—金利向斜谷地	178.8	石磴子段、壶天群及下二叠统灰岩	70~785	中等	8.1	肇庆
	I-4	大岗—梁村覆盖型岩溶区	72.0	东岗岭组灰岩	656~3155	中等	5.9	怀集
	I-5	仍图向斜盆地	35.0	石磴子段灰岩	122~1318	丰富	3.7	惠州
	I-6	龙岗—荷坳向斜盆地	42.0	石磴子段灰岩及壶天群灰岩	500左右	中等	4.5	深圳
	I-7	那扶向斜盆地	53.0	上石炭统块状灰岩	最大6900	丰富	11.3	恩平、台山
大湾区 外 (II)	II-1	清远向斜	95.0	天子岭组灰岩	300左右	中等	2.5	广州
	II-2	云浮盆地	139.4	下石炭统岩关阶灰岩和上泥盆统结晶灰岩	5~959	中等	1.2	肇庆
	II-3	三坑—回澜覆盖型区	307.0	泥盆系天子岭组灰岩	65~272	中等	6.7	广州
	II-4	横石塘—英德盆地	193.5	石磴子段灰岩与天子岭组灰岩	100~2600	中等— 丰富	35.0	广州
合计		2423.7					114.5	



图8 粤港澳大湾区地下水应急水源地建议点分布

Fig.8 Distribution of recommended groundwater emergency source sites in GBA

裂, 隐伏岩溶及其发育, 蕴藏着丰富的地下水资源。岩溶水富水性不均一, 盆地中、北部富水性较均匀, 钻井最大涌水量 $864\sim 15594\text{ m}^3/\text{d}$, 盆地西部钻井最大涌水量 $432\sim 2937\text{ m}^3/\text{d}$, 盆地东南部钻井最大涌水量 $17.28\sim 2592\text{ m}^3/\text{d}$ 。溶解性总固体由盆地北部的 $0.07\sim 0.25\text{ g/L}$ 至盆地南部一带逐渐提高到 0.5 g/L 。补给量约 $90\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 计算开采储量约 $33\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 其中较好的水源地有鸭岗、肖岗—三元里、新街—石龙、江村、双岗等地。但是历史上江村水源地曾因地下水大量开采出现降深漏斗, 并引起地面塌陷和房屋开裂。

I-2 肇庆大沙—湖底向斜谷地。位于肇庆市北郊至大旺农场一带, 面积 216.0 km^2 , 其中大沙—水基轴向北东, 肇庆—湖底轴向近东西, 轴部由石炭系、两翼由泥盆系组成, 西江贯穿期间, 谷地为第四系覆盖, 厚度 $20\sim 50\text{ m}$ 。主要含水层为石炭系石

磴子灰岩、壶天群灰岩及天子岭灰岩。其中, 石磴子灰岩分布面积最广, 富水性贫乏至中等, 壶天群灰岩次之, 富水性中等至丰富, 天子岭灰岩面积最小, 富水性贫乏至中等, 钻孔涌水量多在 $100\sim 1000\text{ m}^3/\text{d}$, 初步计算可采水量约 $2.6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 其中星湖水源地水量最为丰富。

I-3 金渡—蚬港—金利向斜谷地。位于肇庆市东侧, 栏柯山背斜与马鞍—白土及罗客向斜之间, 北翼由奥陶系、泥盆系砂砾岩、砂页岩组成, 南翼为构造破坏, 地形上呈中部狭窄向两端开展的谷地, 谷地中第四系厚度 $15\sim 30\text{ m}$, 覆盖型岩溶水分布面积 178.8 km^2 , 由石磴子段、壶天群及中二叠统灰岩组成, 水位埋深 $0.4\sim 2\text{ m}$, 单孔涌水量 $70\sim 785\text{ m}^3/\text{d}$, 富水性级别为中等, 初步计算可采水量约 $8.1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

I-4 大岗—梁村覆盖型岩溶区。位于怀集县

西侧大岗—梁村一带,面积72.0 km²,上覆第四系厚度4~19m,在山前有灰岩孤山出露,含水层为东岗岭组灰岩,水位埋深0.7~2.5 m,单孔涌水量656~3155 m³/d,由于该区地势平坦,主要河谷已切入灰岩,受东北部白垩系红层所阻,泉水出露较多,大的泉点有6处,流量合计约116.0 L/s,总体富水性好,初步计算可采水量约5.9×10⁴ m³/d。

I-5 仍图向斜盆地。地处惠阳凹陷北端,东江宽阔河谷平原,面积35.0 km²,为一向西南倾伏的复式向斜,开阔平缓,主要含水层为石磴子段灰岩,上覆厚度25~86 m的冲积砾卵石层,富水性由向斜核部向两翼逐渐减弱,单孔涌水量122~1318 m³/d,总体富水性好,初步计算可采水量约3.7×10⁴ m³/d。

I-6 龙岗—荷坳向斜盆地。位于深圳大断裂西北侧,为轴向北东、长12 km、宽1~5 km的狭长谷地,面积42.0 km²,上覆第四系厚度7~16 m,含水层为石磴子段灰岩及壶天群灰岩。单孔平均涌水量约500 m³/d,盆地内富水性以中等为主,西南部丰富,东北部贫乏,初步计算可采水量约4.5×10⁴ m³/d。

I-7 那扶向斜盆地。位于台山市西南角,面积53.0 km²,槽部出露上石炭统灰岩,向西倾没,南翼上泥盆统组成次一级褶皱,含水层为上石炭统块状灰岩,第四系覆盖层厚度0.5~20 m,发育多处上升泉,流量1.6~9.0 L/s,在那扶灰岩采石场中抽水涌水量达到6900 m³/d,富水性好,初步计算可采水量约11.3×10⁴ m³/d。

II-1 清远向斜。位于清远一带的北江河谷平原,面积约95.0 km²,自东部飞霞山向西部龙塘、清远呈喇叭状撒开,天子岭组灰岩仅呈小块出露,大部分隐伏于冲洪积层之下,发育五个北东向灰岩条带。岩溶水富水性不均一,钻孔涌水量多在300 m³/d,最大为3000 m³/d,初步计算可采水量约2.5×10⁴ m³/d。

II-2 云浮盆地。云浮盆地为北东—南西向的长条形盆地,属于六都—尖底单斜构造,地形北西高,东南略低,总面积139.4 km²,周边为上泥盆统变质岩及燕山期岩浆岩,盆地内含水层为下石炭统岩关阶灰岩和上泥盆统结晶灰岩。其中北部山地为裸露型岩溶水,泉流量一般1~10 L/s,单孔涌水量37~1023 m³/d,富水性贫乏至中等,局部丰富;中部及南部为覆盖—埋藏型岩溶水,富水性极不均一,以

中等为主,单孔涌水量5~959 m³/d,初步计算可采水量约1.2×10⁴ m³/d。

II-3 三坑—回澜覆盖型区。位于清远市西南角,面积约307.0 km²,含水层主要为泥盆系天子岭组灰岩,上覆第四系黏土及砂砾石层,局部覆盖泥盆系上统砂页岩。水位埋深0.4~10.5 m,一般靠近山前地带较深。单孔涌水量多在65~272 m³/d,最大858 m³/d,总体富水性为中等,初步计算可采水量约6.7×10⁴ m³/d。

II-4 横石塘—英德盆地。位于英德市—横石塘镇一带的北江谷地中,面积193.5 km²,呈北东20°方向延伸,盆地四周为中山—中低山,由桂头群砂岩及花岗岩组成,盆地边缘碳酸盐岩大面积出露,盆地中部为第四系覆盖,厚度4~30 m,北江自北往南流经盆地。石磴子段灰岩与天子岭组灰岩为主要含水层,盆地内岩溶大泉、地下暗河发育,单孔涌水量100~2600 m³/d,富水性中等至丰富,初步计算可采水量约35×10⁴ m³/d。

5 结 论

(1)粤港澳大湾区水资源总量丰富,但大部分为外来入境水量,湾区本地水量有限,并且在深圳、东莞、香港等人口集中城市,人均水资源量远低于世界及全国平均水平;多市水源单一,本地水资源调蓄能力有限,境外调水依赖程度高,饮水安全保障风险大;水环境问题突出,水质性缺水问题日益凸显,水库富营养化和蓝藻水华事件频发,近岸海域水质较差,在珠江三角洲感潮河段,河涌水体污染严重,可利用的淡水资源日益减少。

(2)大湾区地下水根据含水介质类型可划分为:松散岩类孔隙水、碳酸盐岩岩溶水、基岩裂隙水三大类,基岩裂隙水又包括红层裂隙水、层状基岩裂隙水和块状基岩裂隙水。松散岩类孔隙水和基岩裂隙水是主要地下水类型,在区内广泛分布,水量贫乏至中等;碳酸盐岩岩溶裂隙水在区内呈点状或条带状分布,总体面积较小,多集中在一些向斜盆地,按出露条件分为裸露型岩溶水和覆盖性岩溶水,裸露型岩溶水零星分布,富水性较差,覆盖性岩溶水地下水位埋藏浅,多为承压水,水量中等至丰富。

(3)研究区地下水阳离子以Ca²⁺和Na⁺为主,从山区到三角洲平原可将本区地下水划分为4种类

型:① HCO_3^- -Na型及 HCO_3^- -Na+Ca型;② HCO_3^- +Cl-Na型及 HCO_3^- +Cl-Na+Ca型;③ HCO_3^- -Ca型;④Cl-Na型。由于珠江三角洲具有独特的沉积过程,使三角洲松散层孔隙水中铁离子和铵离子含量普遍超标,发育大量“铁质水”和“氨氮水”,使得三角洲地区水质性缺水问题更为凸显。

(4)大气降雨为区内地下水的最主要补给源,此外还有河流侧向入渗补给、基岩裂隙的侧向补给、凝结水补给、灌溉回归水渗入补给和渠道渗漏补给等补给形式;地下水主要由北部山区向南部平原径流,径流速度自北向南逐渐减慢;西江、北江及东江为区域内地下水的主要排泄通道,泉水或渗流为最常见的排泄方式。

(5)大湾区地下水化学特征受流经区物源性质和沉积环境控制,还受洪水、海水入侵、咸潮上溯、农业灌溉、工业污染等多因素交互影响(Li et al., 2011; Wang et al., 2012a, 2012b),地下水污染的复合型风险正在加剧。粤港澳大湾区整体水质较好,I-III类水占比高达66.25%,超标水点比例为33.75%。从丘陵山区到三角洲平原,水质呈变差趋势,IV类水在广州、佛山等地集中分布,超标因子主要为氨氮、氯化物、氟化物等,V类水主要分布在江门、中山、东莞等地,超标因子主要为硫酸盐、氨氮等。

(6)粤港澳大湾区广东省9市2019年地下水资源量约178亿 m^3 ,占当地水资源总量的26%左右,但是开发利用程度很低,2019年地下水源供水量在总供水量中的占比仅为0.55%。珠江三角洲中部和南部地区松散岩类孔隙水水量丰富,但多为咸水;松散岩类淡水主要分布于三角洲后缘及山间谷(盆)地以及山麓前缘地段,但含水层普遍较薄,水量中等;基岩裂隙水广泛分布于除三角洲平原外的广大地带,水质较好,富水性普遍较差;碳酸盐岩岩溶裂隙水,水质较好,水量较为集中,具有一定规模开采的开发利用潜力。

(7)由于大湾区内碳酸盐岩分布面积有限,在地下水应急后备水源地建设中,建议将大湾区内及其周边区域的碳酸盐岩岩溶水集中区统筹考虑,提高供水水源保障能力,提出将广花盆地等10处富水块段作为应急后备水源地备选,经初步计算可为大湾区提供 $114.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的应急水源保障。

此外,对于具有开发潜力的应急后备水源地应

加大基础水文地质调查工作,需要系统掌握含水岩组分布、特征和地下水的水位、水质、水量的动态变化特征,对其可靠性进行论证,分析暂时可以用于应急备用开采的地下水储量,以保证在连续枯水年或在突发事件时有足够的储量可以借用。此外,应在丰水年(丰水时段)及时补偿或采取有效的人工拦蓄措施进行人工回补地下水,应急备用水源地启用后,应分析水源地周围由于地下水水位下降形成的降落漏斗、发展趋势及下降速度等,防止地面沉降、岩溶塌陷等地质灾害的发生。

References

- Bei Deguang. 2013. Establishment and Thinking of Nanning City Emergency Standby Water Source [J]. China Water & Wastewater, 29(24):11-14(in Chinese with English abstract).
- Cai Guofei. 2017. Brief introduction of water environment treatment of Maozhou River in Shenzhen [J]. Energy and Environment, (2): 59, 67(in Chinese).
- Chen Peihong. 1985. Brief introduction of groundwater resources in Pearl River Delta [J]. Pearl River, (1):41-43(in Chinese).
- Chen Weitao. 2011. Eutrophication assessment and analysis of four large reservoirs in Jiangmen City [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, (8): 52-54(in Chinese).
- Cheng Jiong, Wang Jizheng, Liu Ping, Chen Zhiliang. 2006. Problems and countermeasures of water-environment in Pearl River Delta Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 26(2):91-93 (in Chinese with English abstract).
- Dai Yun, Yang Yuanjing, Huang Hao. 2019. Strategic thinking on water resources allocation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Urban and Rural Development, (12):42-44 (in Chinese).
- Di Xiaobin, Sun Jichao, Jing Jihong, Huang Guanxing, Liu Jingtao. 2008. Analysis on reserving characteristic and exploiting foreground of groundwater in Pearl River Delta Region [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 6(6): 52-54, 67(in Chinese with English abstract).
- Du Qingtang. 2006. Development and utilization of groundwater resources in Pearl River Delta [J]. Guangdong Science & Technology, (11):108-110(in Chinese).
- Fitts C R. 2002. Groundwater Science [M]. San Diego California: Academic Press: 451.
- Fu Yanping, Yu Hongbo. 2020. Discussion on planning scheme of urban emergency standby water source in Changchun City [J]. Technical Supervision in Water Resources, (1):223-225, 278(in Chinese).
- Gorelick S M, Zheng C. 2015. Global change and the groundwater

- management challenge [J]. *Water Resources Research*, 51(5):3031–3051(in English).
- Hao Yanru, Wang Peng, Zhang Mingzhu, Zhang Jin, Li Dan, Pang Yuan. 2020. Hydrochemical characteristic and its driving force of groundwater in the covered Karst in Pearl River basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 29(2): 337– 344(in Chinese with English abstract).
- Huang Zhi, Long Siyu. 2016. On the construction of reserve water source in Guilin [J]. *Water & Wastewater Engineering*, (12):39–43 (in Chinese).
- Li Aihua, Li Jianqiang, Zhang Haibin, Hui Xiaoying, Xu Xiangyu. 2016. Alternate sources for emergency water supply in cities: Concepts and construction options [J]. *China Water Resources*, (16):14–17(in Chinese with English abstract).
- Li Huimeng, Qi Shuibing, Yang Fan, Tu Yanhong, Jiang Wei, Wang Yifei, Li Weijie. 2016. Research on sustainability of resource and environment in Pearl–River Delta [J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 9(8):9–14(in Chinese with English abstract).
- Li Meixiang, Huang Changshuo, Geng Leihua, Chen Xiaoyan. 2017. Requirements and solutions for construction of emergency water sources in cities [J]. *China Water Resources*, (7): 48–50(in Chinese with English abstract).
- Li Shengpin, Li Wenpeng, Yin Xiulan, Jin Aifang. 2019. Distribution and evolution characteristics of national groundwater quality from 2013 to 2017 [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46(6):1–8 (in Chinese with English abstract).
- Li Ying, Chen Baoming, Wang Zhonggen, Peng Shaolin . 2011. Effects of temperature change on water discharge, and sediment and nutrient loading in the lower Pearl River basin based on SWAT modelling [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 56(1): 68– 83(in English).
- Li Meixiang, Huang Changshuo, Geng Leihua, Chen Xiaoyan. 2017. Requirements and solutions for construction of emergency water sources in cities [J].*China Water Resources* (7): 48–50(in Chinese with English abstract).
- Liu Qi, Jiang Yuan, Ding Jiao, Hou Zhaojiang, Fu Lan. 2016. Exploring the pollution characteristics of dissolved organic matter in the primary Tributaries of the Dongjiang River [J]. *Journal of Natural Resources*, 31(7):1231– 1240(in Chinese with English abstract).
- Liu Baolin, Zhang Hong, Xie Liuwei, Wang Yanping, Wang Xinxuan, Zhao Liang. 2015. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments from the Pearl River Artery [J]. *Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition)*, 47(2): 141–147(in Chinese with English abstract).
- Liu Chang, Lin Shenhui, Jiao Xueyao, Shen Xiaoxue, Li Ruili. 2019. Problems and treatment countermeasures of water environment in Guangdong– Hong Kong– Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 55(6):1085–1096 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chang, Yu Xiangying, Gao Zhiyun, Luo Yuchi. 2020. Spatial and temporal variation characteristics and its influencing factors of iron in groundwater in Pearl River Delta [J]. *Environmental Protection Science*, 46(1):97–100(in Chinese with English abstract).
- Long Yingxian, Liu Yunfang, Yang Kun, Xu Min. 2019. Researches on problems and solutions of drinking water source protection in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area [J]. *Environmental Protection*, (23):24–28(in Chinese).
- Ni Zhixin, Zhang Xia, Cai Weixu, Liu Jingqin, Huang Xiaoping. 2016. Distribution, speciation and risk assessment of trace metals in surface sediment of the Zhujiang estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 35(3): 321–328(in Chinese with English abstract).
- Qin Boqiang. 2007. Lake Eutrophication and water environment security in China [J]. *Science and Society*, (3): 17–23(in Chinese).
- Shi Zhengtao, Liu Xinyou. 2008. Urban water safety and emergency water source construction——a case study of Kunming City [J]. *Urban Problems*, (2): 24–28(in Chinese).
- Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2018. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. *Geology in China*, 45(6): 1128– 1141(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiufeng, Huang Cui, Zhang Peng. 2017. Problems and countermeasures of small reservoirs operation management in Guangdong Province [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, (1): 18–20(in Chinese with English abstract).
- Tang Yihan, Chen Xiaohong. 2015. Multi– scale spatio– temporal characteristics and influence of precipitation variation in Zhujiang River Basin during the last 50 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 35(4):476–482(in Chinese with English abstract).
- Tu Shiliang. 2019. Analysis on exploitation and utilization of underground fresh water resources in Eastern Zhuhai [J]. *Ground Water*, 41(4):52–53, 57(in Chinese).
- Wang Jinfeng. 2012. Study on the Selection and Protection of Urban Reserve Water Source [D]. Yangzhou: Yangzhou University (in Chinese with English abstract).
- Wang Jin, Chen Nan, Yao Bo. 2006. Review on the influencing factors and comprehensive control of salt tide in Pearl River Delta [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, (4):4– 5, 8(in Chinese).
- Wang Zhihui, Deng Rui. 2005. Preliminary analysis on water quality status and pollution causes of groundwater centralized utilization area in Pearl River Basin [J]. *Pearl River*, (4):70–72(in Chinese).
- Wang Peng, Shen Licheng, Chen Xiaohong, Wang Zhijun, Liang Xuan, Hu Bill X, Lan Jiacheng, Zhai Xinxin. 2019. Response of soil water hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}$ DIC to changes in spatio– temporal variations under different land covers in SW China karst

- catchment [J]. Hydrology Research, 50(3): 925–944(in English).
- Wang Y, Jiao J J, Cherry J A. 2012a. Occurrence and geochemical behavior of arsenic in a coastal aquifer– aquitard system of the Pearl River Delta, China [J]. Science of the total environment, 427–428:286–297(in English).
- Wang Y, Jiao J J. 2012b. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China [J]. Journal of hydrology, 438–439: 112–124(in English).
- Wu Jiqiang. 2019. Current situation and Countermeasures of urban emergency standby water source construction in Xi'an City [J]. Ground water, 41(5):54–57(in Chinese).
- Wu Xiaoming, Wang Linghe, He Xinchun, Ru Xiangwen, Liu Jin. 2018. Strategic research on water conservancy with fusion prospect of Guangdong–Hong Kong–Macau Greater Bay Area [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 39(4):11–15(in Chinese with English abstract).
- Xu Shemei. 2012. Distribution and hydrogeological characteristics of karst water bearing formations in Guangzhou metropolitan area [J]. Ground water, 34(4):40–42(in Chinese).
- Yang Qiaoli. 2018. Construction of urban emergency standby water source project in Yangquan City [J]. Shanxi Water Resources, (6): 32, 35(in Chinese).
- Yao Pu. 2013. Chemical characteristics of groundwater in Pearl River Delta Economic Zone [J]. Ground water, 35(6):43,136(in Chinese).
- Yin Zhiqiang, Li Ruimin, Li Xiaolei, Meng Hui, Liu Qiong, Yang Nan, Wang Yi, Tong Xiaoxia, Li Chunyan, Gao Mengmeng. 2018. Research progress and future development directions of geo-resources and environment carrying capacity[J]. Geology in China, 45(6): 1103–1115 (in Chinese with English abstract).
- Yun Zuguo. 1982. Characteristics of groundwater in Pearl River Delta [J]. Tropical Geography, (1): 337–344,46–50(in Chinese).
- Zhang Yu. 2018. Research on the development of Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area [J]. (5): 5–6(in Chinese).
- Zhang Yu, Sui Wenjuan, Chen Junkun. 2018. Research on economic characteristics and development patterns of the world's typical bay areas [J]. International Economics and Trade Research, 34(10): 45–57(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhongnan, Chen Jun, Feng Jingze, Zhang Yue, Yuan Yong. 2018. Thoughts on issues of water security strategy in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area [J]. Pearl River, 39(12): 81–84, 91 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Tenghui, Chen Yihan, Han Wei, He Yiliang. 2016. The contamination characteristics and ecological risk assessment of typical antibiotics in the upper reaches of the Dongjiang River [J]. Ecology and Environmental Sciences, 25(10): 1707–1713(in Chinese with English abstract).
- Zhi Bingfa, Yao Pu, Jiang Shoujun, Tu Shiliang, Kong Dexiu, Wang Liangkui. 2015. Hydrochemical evidences of saline groundwater genesis in the Pearl River delta area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 42(4): 133–139, 149(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhifang, Zheng Hu, Zhuang Chao. 2014. Discussion of the permanent consumption of groundwater resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 45(12): 1458–1463(in Chinese with English abstract).
- Zhu Qiuju, Liu Xueming. 2018. The Key Points analysis for flood control evaluation of water resources allocation Project in the Pearl River Delta [J]. Pearl River, 39(10): 51–55(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 贝德光. 2013. 南宁市城市应急备用水源的建立与思考[J]. 中国给水排水, 29(24):11–14.
- 蔡国飞. 2017. 深圳茅洲河水环境治理简介[J]. 能源与环境, (2): 59, 67.
- 陈培虹. 1985. 珠江三角洲地下水资源简介[J]. 人民珠江, (1):41–43.
- 陈伟涛. 2011. 江门市4宗大型水库富营养化评价与分析[J]. 广东水利水运, (8): 52–54.
- 程炯, 王继增, 刘平, 陈志良. 2006. 珠江三角洲地区水环境问题及其对策[J]. 水土保持通报, 26(2): 91–93.
- 戴韵, 杨国晶, 黄鹤. 2019. 粤港澳大湾区水资源配置战略思考[J]. 城乡建设, (12):42–44.
- 狄效斌, 孙继朝, 荆继红, 黄冠星, 刘景涛. 2008. 珠江三角洲地区地下水贮存特征及其开发前景分析[J]. 南水北调与水利科技, 6(6): 52–54, 67.
- 杜庆棠. 2006. 珠江三角洲地区地下水资源的开发利用[J]. 广东科技, (11):108–110.
- 付艳平, 于洪波. 2020. 长春市城市应急备用水源规划方案探讨[J]. 水利技术监督, (1):223–225, 278.
- 郝艳茹, 王鹏, 张明珠, 张晋, 李丹, 庞园. 2020. 广花盆地地下水化学特征及其演化分析[J]. 生态环境学报, 29(2):337–344.
- 黄智, 龙思羽. 2016. 关于桂林市建设备用水源的思考[J]. 给水排水, (12):39–43.
- 李爱花, 郦建强, 张海滨, 回晓莹, 徐翔宇. 2016. 城市应急备用水源工程概念及建设思路[J]. 中国水利, (16):14–17.
- 李惠萌, 齐水冰, 杨帆, 涂燕红, 江伟, 王逸飞, 李伟杰. 2016. 珠三角区域资源环境可持续性研究[J]. 再生资源与循环经济, 9(8):9–14.
- 李美香, 黄昌硕, 耿雷华, 陈晓燕. 2017. 城市应急备用水源建设要求与思路[J]. 中国水利, (7): 48–50.
- 李圣品, 李文鹏, 殷秀兰, 金爱芳. 2019. 全国地下水水质分布及变化特征[J]. 水文地质工程地质, 46(6):1–8.
- 刘琦, 江源, 丁佼, 侯兆疆, 付岚. 2016. 东江流域主要支流溶解性有机质污染特征初探[J]. 自然资源学报, 31(7):1231–1240.
- 刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 王艳萍, 王鑫璇, 赵亮. 2015. 珠江干流表层沉积物重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 东北师大学报(自然

- 科学版), 47(2): 141-147.
- 刘畅, 林坤辉, 焦学尧, 沈小雪, 李瑞利. 2019. 粤港澳大湾区水环境状况分析及治理对策初探[J]. 北京大学学报(自然科学版), 55(6):1085-1096.
- 刘畅, 余香英, 郜志云, 罗育池. 2020. 珠江三角洲地区地下水中铁的时空变异特征及影响因素[J]. 环境保护科学, 46(1):97-100.
- 龙颖贤, 刘蕴芳, 杨昆, 徐敏. 2019. 粤港澳大湾区饮用水水源安全保障对策研究[J]. 环境保护, (23):24-28.
- 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 杨明楠, 李海军. 2021. 快速城镇化进程中珠江三角洲高铍地下水赋存环境及驱动因素[J]. 中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210425.1616.005.html>.
- 倪志鑫, 张霞, 蔡伟叙, 刘景钦, 黄小平. 2016. 珠江口沉积物中重金属分布、形态特征及风险分析[J]. 海洋环境科学, 35(3): 321-328.
- 秦伯强. 2007. 我国湖泊富营养化及其水环境安全[J]. 科学对社会的影响, (3): 17-23.
- 史正涛, 刘新有. 2008. 城市水安全及应急水源建设——以昆明市为例[J]. 城市问题, (2): 24-28.
- 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 张会琼, 蕙玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 45(6): 1128-1141.
- 孙秀峰, 黄翠, 张鹏. 2017. 广东省小型水库运行管理存在问题及对策分析[J]. 广东水利水电, (1): 18-20.
- 唐亦汉, 陈晓宏. 2015. 近50年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J]. 地理科学, 35(4): 476-482.
- 涂世亮. 2019. 珠海东部地区地下淡水资源开发利用浅析[J]. 地下水, 41(4): 52-53, 57.
- 王金凤. 2012. 城市备用水源地选择与保护研究[D]. 扬州大学.
- 王津, 陈南, 姚泊. 2006. 珠江三角洲咸潮影响因子及综合防治综述[J]. 广东水利水电, (4): 4-5, 8.
- 王智慧, 邓锐. 2005. 珠江流域片地下水集中利用区域水质现状与污染成因初步分析[J]. 人民珠江, (4):70-72.
- 吴继强. 2019. 西安市城市应急备用水源建设现状与对策探讨[J]. 地下水, 41(5):54-57.
- 吴小明, 王凌河, 贺新春, 汝向文, 刘晋. 2018. 粤港澳大湾区融合前景下的水利思考[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 39(4):11-15.
- 徐社美. 2012. 广州都会地区岩溶含水岩组的分布及水文地质特征研究[J]. 地下水, 34(4):40-42.
- 杨巧莉. 2018. 阳泉市城市应急备用水源工程建设[J]. 山西水利, (6): 32, 35.
- 姚普. 2013. 珠江三角洲经济区地下水化学特征分析[J]. 地下水. 35(6): 43+136.
- 殷志强, 李瑞敏, 李小磊, 孟晖, 刘琼, 杨楠, 王轶, 仝晓霞, 李春燕, 高萌萌. 2018. 地质资源环境承载力研究进展与发展方向[J]. 中国地质, 45(6): 1103-1115.
- 云祖铿. 1982. 珠江三角洲地下水特征[J]. 热带地理, (1): 337-344.46-50.
- 张昱. 2018. 粤港澳大湾区发展研究[J]. 城市观察, (5):5-6.
- 张昱, 眭文娟, 湛俊坤. 2018. 世界典型湾区的经济表征与发展模式研究[J]. 国际经贸探索, 34(10): 45-57.
- 赵钟楠, 陈军, 冯景泽, 张越, 袁勇. 2018. 关于粤港澳大湾区水安全保障若干问题的思考[J]. 人民珠江, 39(12): 81-84, 91.
- 赵腾辉, 陈奕涵, 韩巍, 何义亮. 2016. 东江上游典型抗生素污染特征及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 25(10): 1707-1713.
- 支兵发, 姚普, 姜守俊, 涂世亮, 孔德秀, 王良奎. 2015. 珠江三角洲地下咸水形成的水化学证据[J]. 水文地质工程地质, 42(4): 133-139, 149.
- 周志芳, 郑虎, 庄超. 2014. 论地下水资源的永久性消耗量[J]. 水利学报. 45(12):1458-1463.
- 朱秋菊, 刘学明. 2018. 珠江三角洲水资源配置工程防洪评价要点分析[J]. 人民珠江, 39(10): 51-55.