

doi: 10.12029/gc20210403

赵良杰, 杨杨, 曹建文, 夏日元, 王喆, 栾崧, 林玉山. 2021. 珠江流域地下水资源评价及问题分析[J]. 中国地质, 48(4): 1020–1031.
Zhao Liangjie, Yang Yang, Cao Jianwen, Xia Riyuan, Wang Zhe, Luan Song, Lin Yushan. 2021. Groundwater resources evaluation and problem analysis in Pearl River Basin[J]. Geology in China, 48(4): 1020–1031(in Chinese with English abstract).

珠江流域地下水资源评价及问题分析

赵良杰, 杨杨, 曹建文, 夏日元, 王喆, 栾崧, 林玉山

(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, 广西 桂林 541004)

摘要:本文在梳理流域地下水资源评价现状及历史的基础上, 讨论了水资源评价方法和分区原则, 将珠江流域划分为 129 个四级地下水系统, 以地下水系统为评价单元, 在充分考虑不同水文地质参数的基础上, 分析评价地下水资源量及存在的问题, 讨论珠江流域三级阶地不同水流运动特征, 阐述了评价的精度以及水利工程对地下水循环的影响。通过本次评价, 珠江流域地下水天然资源量 1374.16 亿 m^3 , 可开采量为 578.7 亿 m^3 , 开发利用率仅 10.01%。珠江流域跨度较大, 水动力特征迥异: 上游云贵高原深切峡谷区、中游桂中峰丛洼地区、下游冲洪积平原区, 据不完全统计, 珠江流域蓄水量大于 100 万 m^3 的水库 32 座, 水利工程的修建以及水库对水资源调蓄和分配给地下水资源评价带来一定困难, 不同部委对地表水和地下水概念上的分歧导致二者间流域边界不一致以及流域水资源评价结果的差异, 为此提出了解决问题的建议, 以期为地下水开发利用与治理保护服务。

关键词:地下水资源; 珠江流域; 水循环; 开发利用; 地表水; 地质调查工程

中图分类号: P641.8 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2021)04–1020–12

Groundwater resources evaluation and problem analysis in Pearl River Basin

ZHAO Liangjie, YANG Yang, CAO Jianwen, XIA Riyuan, WANG Zhe, LUAN Song, LIN Yushan

(Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources/Guangxi Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, 541004, Guangxi China)

Abstract: On the basis of the current situation and history of groundwater resources evaluation in the Pearl River Basin, the water resources evaluation methods and zoning principles were discussed, and 129 four level groundwater systems are divided. Taking the groundwater system as the evaluation unit, based on the full consideration of different hydrogeological parameters, this paper analyzes and evaluates the amount of groundwater resources and the existing problems, discusses the characteristics of different flow movement in the three terraces of the Pearl River Basin, and expounds the accuracy of the evaluation and the influence of water conservancy projects on groundwater circulation. Through this evaluation, the natural groundwater resources in the Pearl River Basin are 137.416 billion m^3 , the exploitable amount is 57.87 billion m^3 , and the development and utilization rate is only 9.8%. The Pearl River Basin has a large span, and its hydrodynamic characteristics are quite different, characterized by the deep valley area in

收稿日期: 2021–03–24; 改回日期: 2021–5–24

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190342)、广东省地下水资源调查监测评价(0835–210Z22803141)和广西自然科学基金面上项目(2018GXNSFAA294015)联合资助。

作者简介: 赵良杰, 1986 年生, 男, 博士, 助理研究员, 从事岩溶水循环与水资源评价工作; E-mail: zhaoliangjie@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 杨杨, 1988 年生, 女, 助理研究员, 从事岩溶水资源调查监测评价工作; E-mail: yangyang_a@mail.cgs.gov.cn。

the upper reaches of Yunnan-Guizhou Plateau, the peak cluster depression area in the middle reaches of Guangxi, and the alluvial proluvial plain area in the lower reaches. According to incomplete statistics, there are 32 reservoirs in the Pearl River basin with a storage capacity of more than 1 million m³. The construction of water conservancy projects and the regulation and distribution of water resources by reservoirs bring some difficulties to the evaluation of groundwater resources. The main problems are the inconsistency of the basin boundaries between surface water and groundwater caused by the differences in the concepts of surface water and groundwater between different ministries and commissions. Therefore, the countermeasures and methods to solve the problems are put forward, so as to provide reference for the development, utilization, control and protection of groundwater.

Key words: groundwater resources; Pearl River; hydrologic cycle; development and utilization; surface water; geological survey engineering

About the first author: ZHAO Liangjie, born in 1986, male, doctor, assistant researcher, engaged in karst water circulation and water resources evaluation; E-mail: zhaoliangjie@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: YANG Yang, born in 1988, female, assistant researcher, engaged in the investigation, monitoring and evaluation of karst water resources; E-mail: yangyang_a@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190342), the Groundwater Resources Survey, Monitoring and Evaluation of Guangdong Province (No.0835-210Z22803141) and the General Project of Guangxi Natural Science Foundation (No.2018GXNSFAA294015).

1 引言

地下水供水对于保证中国城市及工农业供水安全起着十分重要的作用(唐红侠等,1998;王丽等,2005;袁丙华和毛郁,2011),国际社会和世界各国对水资源变化及其对社会经济的影响非常重视(Charlton and Arnell, 2011; Estrela et al., 2012)。珠江流域地下水资源丰富,居中国七大江河的第二位,但由于经济发展快,人类活动频繁,加上水资源评价管理的不合理和过度开发,导致流域内水土流失严重、岩溶区石漠化问题突出、湖泊萎缩、湿地退化以及海水入侵等一系列地下水资源环境生态问题,特别是分布较广的岩溶山区和珠江三角洲地区水资源问题十分突出(蒋忠诚和袁道先,1999;邹胜章等,2005;张建云等,2013;王宇,2020),已成为制约经济社会可持续发展的重要因素,因此需要从地下水科学角度深入研究珠江流域水资源问题(邹胜章,2006)。陈特固等(2008)根据50年气象资料分析全球气候变暖与珠江口平均海平面上升的关系;姜光辉和郭芳(2009)利用长期观测的降水、水位和流量数据,分析了中国西南地区表层岩溶带的水文动态特征;刘丙军等(2010)根据125个气象观测站的50年资料讨论了珠江流域下游地区降雨的空间分布规律;刘绿柳等(2012)应用水文模型分析了珠江主干流西江的径流过程;张建云等(2013)研究了

中国北方水资源开发利用及供需矛盾问题;李原园等(2014)结合中国水资源评价资料成果,分析了气候变化对中国可更新水资源量的影响;许燕等(2018)采用SDSM模型预估了珠江中上游气候变化对流域水资源的合理开发利用相应;王宇(2019)针对西南岩溶区提出地下水流域边界划分的原则和方法;陈飞等(2020)基于全国水资源调查评价和水资源公报等资料,对中国60余年来地下水资源演变规律与影响因素进行了系统分析。

从当前研究成果来看,前人对降水、地表水以及地下水资源演变规律已有较为深入研究(Ghasemizadeh et al., 2012; Fiorillo, 2014; 姜光辉, 2016; Adji and Bahtiar, 2016; 赵良杰等, 2017; 夏日元等, 2020),但珠江流域地下水资源评价研究还相对缺乏。为了满足珠江流域层面地下水管理需求,本文在系统梳理珠江流域地下水资源调查评价现状和历史的基础上,阐述了地下水资源评价方法,分析了其中存在的主要问题,以期对地下水开发利用与治理保护提供参考依据,对开展新一轮水资源调查评价具有良好的支撑作用。

2 流域概况

珠江流域是中国水资源一级区,地理位置为102°14'~115°57'E, 21°35'~26°50'N。珠江干流河道全长2214 km,流经云南、贵州、广西、广东,珠江流

域总面积约43.81万 km²,包括的二级流域有南北盘江、红柳江、郁江、西江、北江、珠江三角洲及东江流域(图1)。珠江源头位于曲靖市马雄山东麓,自西向东南流至三水市珠江三角洲,注入南海,主河道平均坡降0.446%。珠江流域地势西高东低,自西向东南横跨3个地形阶梯,西北部为高山深谷相间的云贵高原、断陷盆地,海拔2400~3000 m,中部为峰丛洼地和丘陵盆地,海拔200~800 m,东南部为冲积平原和三角洲地带(图2)。珠江流域主要划分四类含水岩组:碳酸岩类岩溶水、碎屑岩类裂隙水、松散岩类孔隙水以及岩浆岩裂隙水,其中岩溶区约占40%。珠江流域降水充沛,多年平均降水量为1549.7 mm,时空分布不均导致旱涝灾害较为频繁。流域内东西部经济社会发展以及水资源生态状况存在明显差异,因此上游需重点关注珠江源生态功能区生态用水和深部地下水资源开发利用潜力问题;中游峰丛洼地需重点关注流域生态重建问题;下游为丘陵谷地、滨海平原,重点关注生态水资源保障与经济开发区水资源保护问题。

3 调查评价基础及数据来源

地矿部门20世纪70年代末至80年代初完成1:20万区域地质调查和1:20万水文地质调查,提供

了相应的地质系列图件和调查报告(图3)。2016年岩溶地质研究所完成西南八省区1:50万水文地质编图工作。其他部门在20世纪80年代开展了土壤普查,林地调查和土地资源调查。20世纪70年代末编绘了1:360万“南方岩溶地区水文地质图”。20世纪80年代后编制了西南各省区1:50万水文地质图、1:400万中国可溶岩类型图、1:400万中国水文地质图、1:400万中国环境地质图等多种比例尺的系列图件。此后,西南岩溶石山区开展了各种比例尺的水工环调查评价工作,其中包括重点地区水文地质调查、农田供水水文地质调查、干旱地区地下水资源调查、区域环境地质调查评价、城市供水水文地质勘查。矿区水文地质勘察评价、区域水文地质工程地质综合勘查评价及各类水源地的勘察(章程等,2014;夏日元,2018)。

2003—2015年实施的“西南岩溶地区地下水与环境地质调查”计划项目和2016—2018年实施的“岩溶地区水文地质环境地质综合调查工程”,在珠江流域岩溶干旱缺水和石漠化重点地区,以典型岩溶流域为单元,开展了1:5万水文地质和环境地质调查。截至2019年,流域内已完成1:5万水文地质调查412幅,面积约16.4万 km²,占流域总面积的37%(图3)。已调查区主要分布在珠江流域西部的红柳江、南北盘

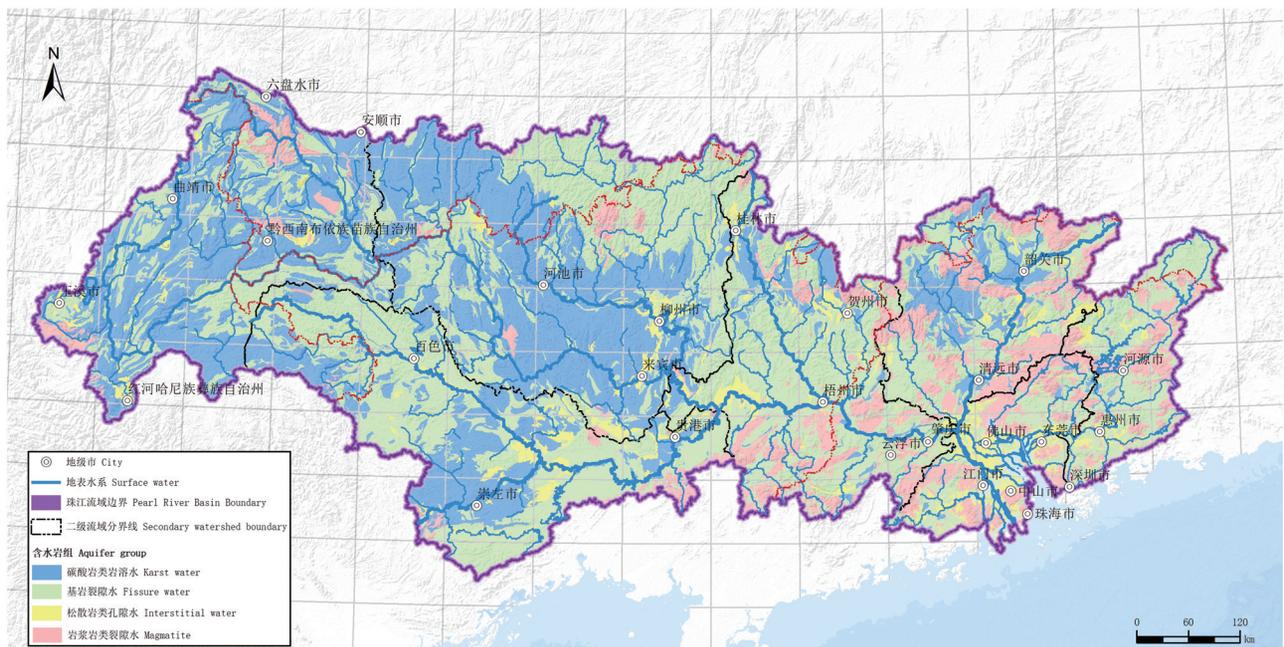


图1 珠江流域含水岩组类型分布

Fig.1 Types and distribution of aquifer strata in the Pearl River Basin

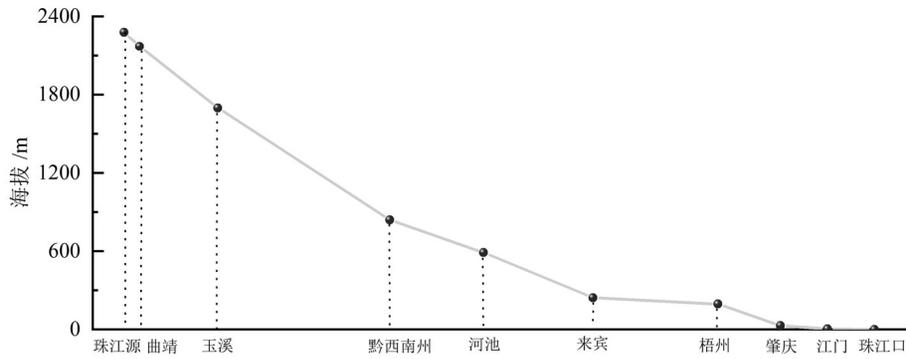


图2 珠江流域干流方向海拔分布

Fig.2 Altitude distribution along the main stream of the Pearl River Basin

江及郁江流域,东部诸水系调查程度较低。

中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的数
据:中国气象背景数据集 500 m 分辨率、中国 1980
年以来逐年年降水量空间插值数据集、中国 1980 年
以来逐年年平均气温空间插值数据集,9 个水文站
月尺度数据,自 2010 年 1 月至 2016 年 12 月。中国
地质环境监测院提供的 2019—2020 年中国地下水
水位动态变化数据等。借助 ArcGIS 空间分析功能,
从上述各种数据中提取生成相应的珠江流域数据。
图 4 表示柳江站流量、降雨及气温多年平均动

态变化曲线。

4 地下水资源评价方法及分区

4.1 分区原则

地下水资源分区的基本原则为:(1)一级、二
级、三级资源区尽可能保持与水利部水资源评价成
果的连贯性和一致性,便于开展地下水资源评价校
核和确权,保持流域系统的完整性,体现地形地貌
的差异,兼顾行政分区和控制性水文站点分布(王
宇, 2002; 曹建华等, 2018);(2)四级资源区主要依

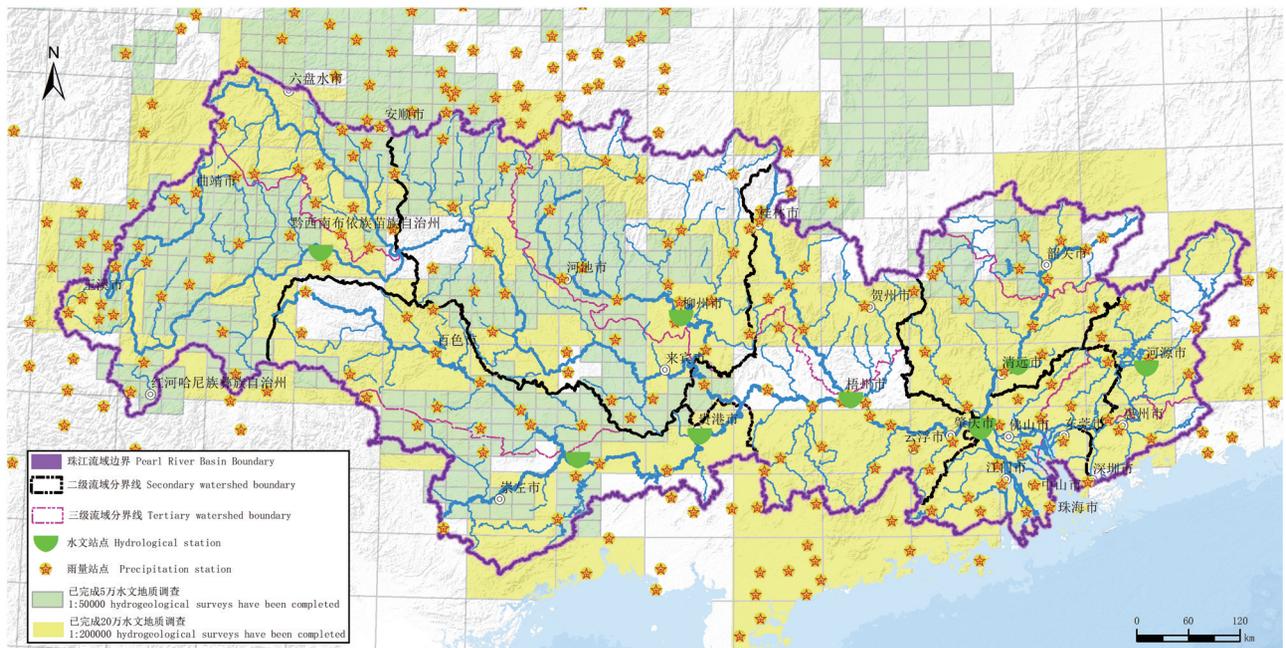


图3 珠江流域调查评价基础及水文站分布图

Fig.3 Basic survey and distribution map of hydrological stations of the Pearl River Basin

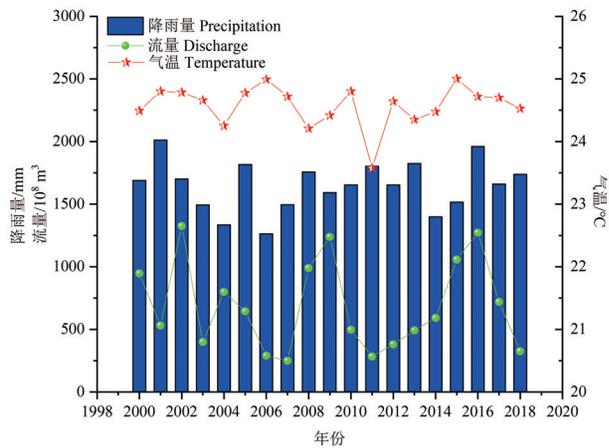


图4 柳江站流量、降雨及气温多年平均动态变化曲线
Fig.4 Multi-year average dynamic variation curve of discharge, rainfall and temperature at Liujiang Station

据水利部全国水资源分区为基础进行划分,在水文地质条件复杂区根据汇总需要进行适当修编;(3)依据次级小流域或含水岩组(松散岩类、碳酸盐岩类、碎屑岩类、岩浆岩类、变质岩类)特征和补径排条件划分的若干个含水系统,以含水系统作为地下水资源评价的基本单元;(4)要基本能反映地下水资源类型和地区的差异,突出地下水资源的赋存与分布规律,便于分析总结地下水资源的成因和演化规律(蒋忠诚, 2006; 赵良杰, 2019);(5)以区域总体含水岩组特征为依据,对于出露范围较小、对地下水的补径排影响较小的含水岩组进行合并(朱秀迪等, 2017)。例如,在一个地下水资源四级分区中,其东部为岩溶区,西部为碎屑岩区,则可以根据碳酸盐岩与碎屑岩的界线划分为东西2个地下水资源四级分区,分别作为岩溶水和基岩裂隙水的评价单元。评价单元的划分基于水循环理论和地球系统科学理论,体现地下水和地表水循环的一体化;依据地下水流系统理论划分地下水资源四级分区,将水文系统、含水系统和地下水流系统有机结合,突破以往单独从地表水和地下水角度进行划分的局限性,充分考虑地表水与地下水的转化关系,提高对地下水资源赋存与分布规律的认识。通过对评价区气象水文、地形地貌、地质及水文地质条件等的调查研究,在地下水资源四级分区的基础上,根据地下水含水介质的不同,按孔隙水、裂隙水、岩溶水3种地下水含水介质类型进行含水系统划分,在

各含水系统中划分子系统进行地下水资源评价参数的计算,以含水系统作为地下水资源评价的基本单元。珠江流域包括南北盘江、红柳江、郁江、西江、北江、东江、珠江三角洲7个二级流域,共划分三级流域14个,四级水文地质单元129个。

4.2 地下水资源评价方法

地下水资源评价主要是根据水流转化规律和水量平衡原理进行的。以水均衡理论为基础的方法主要有降雨入渗系数法(补给法),径流模数法(排泄法),基流分割法等。

采用降水渗入系数法计算地下水资源量,计算公式如式(1),采用径流模数法计算地下水资源量,计算公式如式(2)。

$$Q = \alpha \cdot F \cdot P \quad (1)$$

$$Q = 3.1536 \cdot M \cdot F \quad (2)$$

其中, Q 为地下水资源量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); α 为降水渗入系数(无量纲); F 为接受降水渗入补给的面积(km^2); P 为降雨量($\text{m} \cdot \text{a}$); M 为平均径流模数($1/\text{s} \cdot \text{km}^2$)。

在流域出口断面的流量过程线中,分为基流和地表径流两个部分,而河流是地下水最主要的排泄地带,因此可采用基流分割法将地下水资源量分割出来。珠江流域降雨入渗系数根据含水层性质分为4类,碳酸盐岩类岩溶水介于0.28~0.59,碎屑岩类裂隙水介于0.15~0.23,岩浆岩类裂隙水介于0.1~0.14,松散岩类孔隙水介于0.14~0.16。

地下水可开采资源量是指在一定经济、技术条件下,可以持续开采利用的地下水量,并在开采过程中不发生水质恶化或其他不良地质现象(如地面沉降、岩溶塌陷、海水入侵等)的地下水量,并对生态平衡不致造成不利影响的情况下,有开采保证的地下水量源。根据珠江区水文地质条件及实际资料情况,如果以往为供水进行过1:5万~1:10万水源地质勘查及综合水文地质勘查,直接引用其成果,原成果计算有数值法、解析法、平均布井法等。研究程度低、资料缺乏的地区,以枯季泉水流量汇总作为开采资源,或者采用水文地质比拟法估算开采资源。对泉水、暗河有动态观测资料采用流量动态分析法计算允许开采量作为可开采资源量,部分资料缺乏的碳酸盐岩类地区,如果这些地区地下水普遍有分散开采的必要性,则以天然补给资源量为基础,采用特

枯年降雨量修正系数计算可开采资源量。

$$Q_{\text{开采}} = \beta \cdot \text{天然补给资源量} \quad (3)$$

其中, β 为降雨量修正系数,其取值为特枯年降雨量与拟计算年代平均降雨量之比值,一般取值为0.45~0.75(蒋忠诚等, 2006;石建省等, 2014;王宇等, 2020)。

5 结果及问题讨论

降水是形成珠江流域地下水资源量的主要来源,本次地下水资源量评价的对象是与大气降水和地表水体有直接水力联系的浅层地下水,且矿化度 $M \leq 1.0 \text{ g/L}$ 的地下淡水资源量。珠江流域地下水资源分布特征具有内陆多、沿海少,山丘区多、平原区少,东南部多、西北部少的特点。二级区中水资源总量最大的为红柳江流域 467.53 亿 m^3 ,最小为珠江三角洲 58.23 亿 m^3 。珠江流域地下水资源量模数高值区(地下水富水区)主要分布在红柳江下游、珠江三角洲及东江一带,地下水资源模数一般为 31.3~41.4 万 m^3/km^2 ,而模数低值区(地下水资源贫乏区)主要分布在南北盘江上游、郁江上游一带,地下水资源量模数一般为 16.5~22.6 万 m^3/km^2 ;平均地下水开采模数为 13.24 万 m^3/km^2 ,最大为东江流域 22.3 万 m^3/km^2 ,最小为南北盘江流域 5.54 万 m^3/km^2 ,平均可开采系数为 0.42,最大为珠江三角洲 0.69,最小为南北盘江流域 0.18。流域东部经济较为发达,开发利用率高,珠江三角洲开采量为 41.77%,而上游岩溶石山区开发利用率低,南北盘江流域仅为 5.07%(表1)。

地下水资源评价成果的可靠程度,根本上取决于水文地质勘查和研究程度的高低。根据现行的

规范要求(GB 15218-94 地下水资源分类分级标准),区域性地下水资源评价成果达到普查阶段,精度为D级,可以作为流域、省市一级制定水利建设规划、工业布局、农业区划、编制区域水文地质详查设计的依据。对于精度要求高的水源地勘查评价、建设项目水资源论证以及水资源确权登记等应补充开展 1:10000 或 1:50000 专门水文地质调查评价工作。

原国土资源部在 2000 年至 2002 年期间,组织开展了新一轮全国地下水资源评价工作,2014 年由 中国地质调查局岩溶地质研究所承担组织西南八省区(除广东)地下水资源评价工作,由于受气候变化、人类工程经济活动及地下水开采量急剧增长等因素的影响,区域水循环条件已发生了改变,导致地下水资源无论在数量、质量和区域分布上都发生了较大的变化,各年度水资源量对比详见表2。其中变化较大的为南北盘江流域和红柳江流域,主要原因是降雨的增加以及两个流域岩溶分布面积较广,而碳酸盐岩石山地区降雨入渗系数较大。

5.1 不同地貌类型地下水动力特征

珠江流域水动力特征按不同含水介质类型、地貌形态、水流特性等主要分3类,珠江上游云贵高原深切峡谷区、珠江中游桂中峰丛洼地地区以及珠江下游冲洪积平原区。

云贵高原深切峡谷地区受岩溶发育的影响,地下形成分布不均匀的岩溶多重介质(孔、隙、缝、管、洞)为主的地下水贮存和运动空间,管道、中宽裂隙和基岩孔隙介质并存,明流暗流交替循环,层流紊流相互转化(图5)。基岩裂隙介质系统主要包含成岩孔隙、微小裂隙以及碳酸盐岩基质部分,地下水

表1 各二级流域地下水资源及开采潜力

Table1 Groundwater resources and exploitation potential of each secondary basin

一级 水资源区	二级 水资源区	地下水天然资源 量/($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	可开采资源量 /($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	实际开采量 /($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	开采利用率/%
珠江流域	南北盘江流域	260.53	46	3.77	5.07
	红柳江流域	467.53	142.3	8.41	5.91
	郁江流域	175.64	72.3	8.40	11.62
	西江流域	180.19	86.2	10.20	11.83
	北江流域	135.85	86.5	5.84	6.75
	东江流域	96.19	60.1	3.33	5.54
	珠江三角洲	58.23	40.2	16.79	41.77
合计		1374.16	578.7	56.74	10.10

表2 不同年代各二级流域地下水资源量对比
Table 2 Comparison of groundwater resources of secondary basins in different years

流域名称	二级流域地下水资源量/(10 ⁸ m ³ /a)		
	2000年	2014年	2019年
南北盘江	201.44	199.823	260.53
红柳江	310.23	433.312	467.53
郁江	191.64	235.9	175.64
西江	175.99	172.96	180.19
北江	163.42		135.85
东江	101.97		96.19
珠江三角洲	70		58.23
合计	1214.69		1374.16

在该系统中流速小,但所占空间远远大于岩溶管道系统,是主要的储水空间。岩溶管道介质系统包含大裂隙和岩溶管道,地下水表现为快速流,为主要的径流通道。二者之间存在密切的水量交换,一般情况下基岩裂隙介质系统补给岩溶管道介质系统,地下水通过管道以地下河或泉的形式排出。地下水在岩溶含水介质运移过程中,在不同空间、不同时间具有不同的水流特征。经过实际应用,“岩溶基岩裂隙水可概化而符合达西流”已得到国内外众多学者的认可,但岩溶管道水流系统,则与达西流条件相差甚远,在岩溶含水介质组合多样性条件下它具有多种复杂特性。地下水在横向上分布不均匀,垂直分带明显,并具有补给区与排泄区的区分

特征。地下循环周期短,动态变化大,水力坡度陡,无统一的地下水面,地下水以溶洞赋存为主,向深部逐步过渡到裂隙赋存。地下水是以极不均匀的地下线状管道赋存为主要形式,珠江上游岩溶区地下水资源虽然丰富,但由于岩溶含水介质的多重性,受地形地貌影响的非均一性以及水流由快速流和慢速流构成的多相性,影响了地下河水资源的有效开发利用与保护,岩溶含水系统的强非均质性和复杂的流动状态给岩溶水资源的勘探和评价带来了很大的困难。

珠江流域中游多为岩溶峰丛洼地,峰林平原和岩溶谷地,地下水以相对均匀的网状或孔洞裂隙状赋存为其主要特征,较大规模的地下河和伏流少见,但短小的地下河、有水溶洞、溶潭、溶井、岩溶大泉却屡见不鲜。由于地势低平,地表水流缓慢,有利于降水和地表水入渗,入渗系数一般为0.2~0.4。该类型地貌中的碳酸盐岩,岩溶发育相对较均匀,具有良好的储水空间,特别是具有降水和侧向基岩裂隙水双重补给,地下水埋藏较浅,地下水较丰富。如图6所示,一次降水过程,在满足植物截留、包气带持水后产生重力下渗,当降水强度过大时,则形成坡面流,坡面流主要通过消水洞集中补给岩溶裂隙-管道系统,由于水流通道通畅,管道介质为区域局部的排泄基准面,管道水流在流量上主要表现为突涨突落、响应迅速以及动态变化大等特点,如

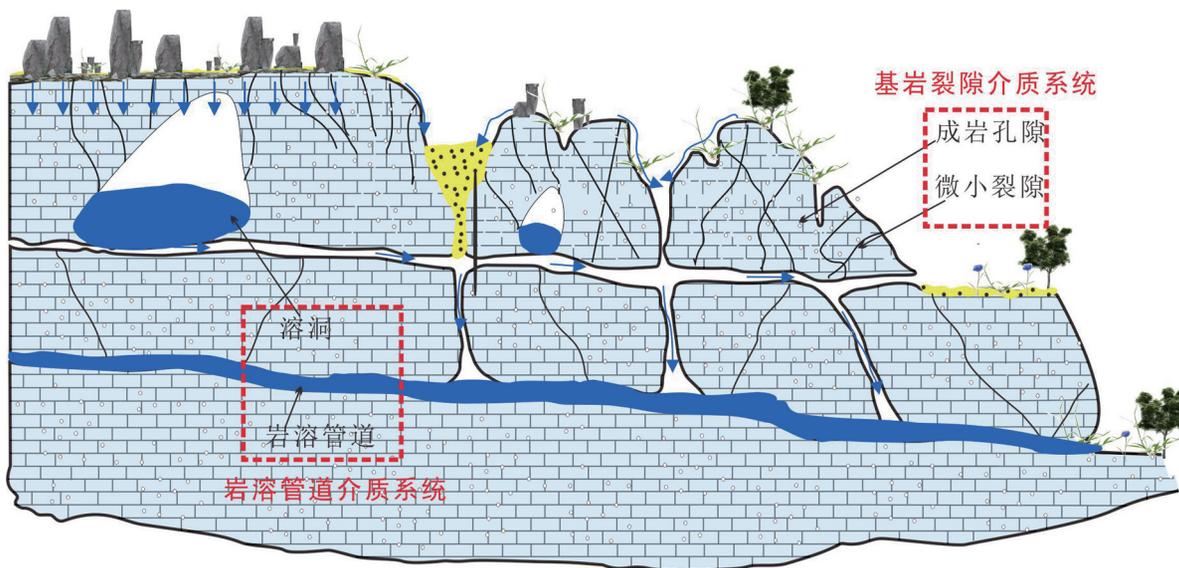


图5 云贵高原深切峡谷典型岩溶水动力剖面示意

Fig.5 Hydrodynamic profile of typical karst deep gorge in Yunnan-Guizhou Plateau

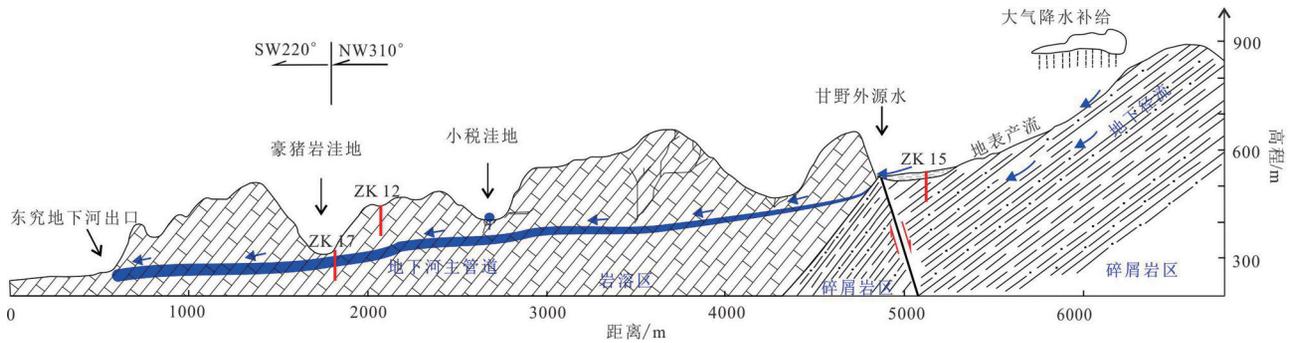


图6 峰丛洼地典型裂隙水动力剖面示意

Fig.6 Hydrodynamic profile of typical fissure water dynamics in peak cluster depression

果强降雨后下游管道空间堵塞,部分洼地在暴雨期经常形成内涝。地下河出口流量丰、枯水期流量介于0.05~5.5 m³/s,相差100多倍,管道介质水流对降雨响应快,管道内水位和流量随降雨增加而迅速增大,雨停后则快速衰减至降雨前水位流量,管道水流以快速流为主。

珠江流域下游冲洪积平原地下水的形成主要依赖于大气降水的人渗及局部水库、河流水渗漏补给,冲洪积平原表层多为透水性的亚砂土,加之地形平坦,有利于降雨下渗转变为地下水,一部分使潜水位升高形成调节存储量,一部分通过隔水层尖灭和交错形成的“天窗”继续垂向越流补给承压含水层,以及部分耗于蒸发和人为开采,地下潜水和承压水往滨海平原径流,排泄于海岸边溢出,局部排泄于切割沟谷(图7)。

5.2 地下水资源评价精度问题

地下水资源评价成果的可靠程度,根本上还是取决于水文地质勘查和研究程度的高低。研究程度越高,地下水系统边界划分、水文地质参数的选

取以及评价方法的选择更加精确和细致。而对于整个珠江流域而言,受岩性、地形地貌、水文地质条件制约,地下水分布极不均匀,且研究精度不一、地貌类型迥异、水文地质条件复杂、各地用水条件差异以及地表水体和生态环境各不相同,因此目前区域上地下水资源评价精度仅达到普查阶段。

另外关于地下水和地表水资源量概念存在认识上的分歧。水利部和自然资源部都开展过地下水资源评价与管理,监测数据和水资源评价分头管理,往往地表水、地下水是分开进行计算,造成水资源量重复计算问题,也忽略了地表水和地下水的空间分布和相互转化关系。水利部着重于地表水,认为天然出露地表的泉、地下河排泄量均为地表水,而自然资源部则认为是地下水,因此评价出的地下水资源量和资源潜力存在差异,尤其是南北盘江流域、红柳江流域等岩溶发育强烈的地区。

本次地下水资源评价分区未考虑地表水和地下水边界不一致问题,如图8所示,广西桂林市寨底流域北部属于湘江水系,边界南部属于桂江水系,

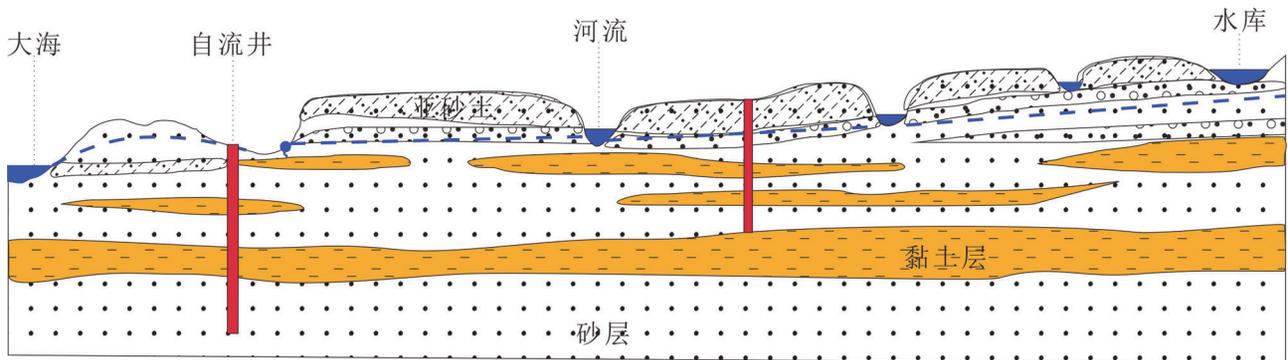


图7 滨海平原典型水动力剖面示意

Fig.7 Typical hydrodynamic profile of coastal plain

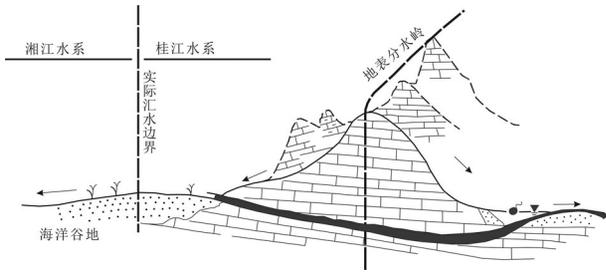


图8 湘江和桂江水系地表水地下水分水岭
Fig.8 Surface water and groundwater watershed of Xiangjiang and Guijiang water systems

然而由于地下水的向源袭夺,北部水流通过岩溶管道裂隙介质越过地表分水岭向流域内径流,根据枯季水位地质调查与地下水排泄点及洞穴管道的分布,地下水分水岭与地表水分水岭不一致,由于水动力对岩溶含水介质的作用,地表、地下分水岭不重合面积达6 km²。

对于降雨入渗系数和地下水径流模数的确定需要开展长期水动力监测、抽水试验、示踪试验以及钻孔取芯等工作手段,一般应开展1:5万或1:1万水文地质填图,针对没有开展工作的地区,采用参数比拟法进行评价,因此应用区域水资源和潜力评价成果作为行政管理水资源和项目水资源论证是不充分的,应根据实际需要和规范,进一步补充

相应精度的水文地质调查工作。

5.3 水利工程对地下水循环的影响

人为因素对地下水循环的影响主要是指各种水利工程修建以及人为开发和疏排地下水使地下水循环条件发生改变。水利工程可以有效地调蓄水资源,但是会直接影响地下水与地表水的动态平衡。据不完全统计,珠江流域正在使用的中型水库多达1000余座,其分布详见图9。珠江流域蓄水量大于100万 m³的水库分布详见表3,其中水位和蓄水量监测时间为2020年2月—6月。

水利工程蓄水量的主要来源是大气降水,其次是地下水。水库、大坝、引水工程的建设使地表水位抬高百米或数百米,并大面积的汇水,局部提高地表水位使地表水直接渗入地下使地下水增加,部分地区改变了地下水的循环条件,地下水得到充分补给,地下水位抬高,改变了其径流方向,向邻近河谷径流和排泄,使邻区获得丰富地下水。也有的使邻域地下水位抬高,形成沼泽化。水利工程修建后,大量地表水一段时间内被截堵,下游地区流量减少、水位下降,也会造成大量地下水向河谷排泄,加快地下径流使两岸地下水位下降。珠江上游云贵高原区以峡谷型水库居多,建设在浅变质岩或岩浆岩等透水性差的岩层,水库蓄水后对地下水影响

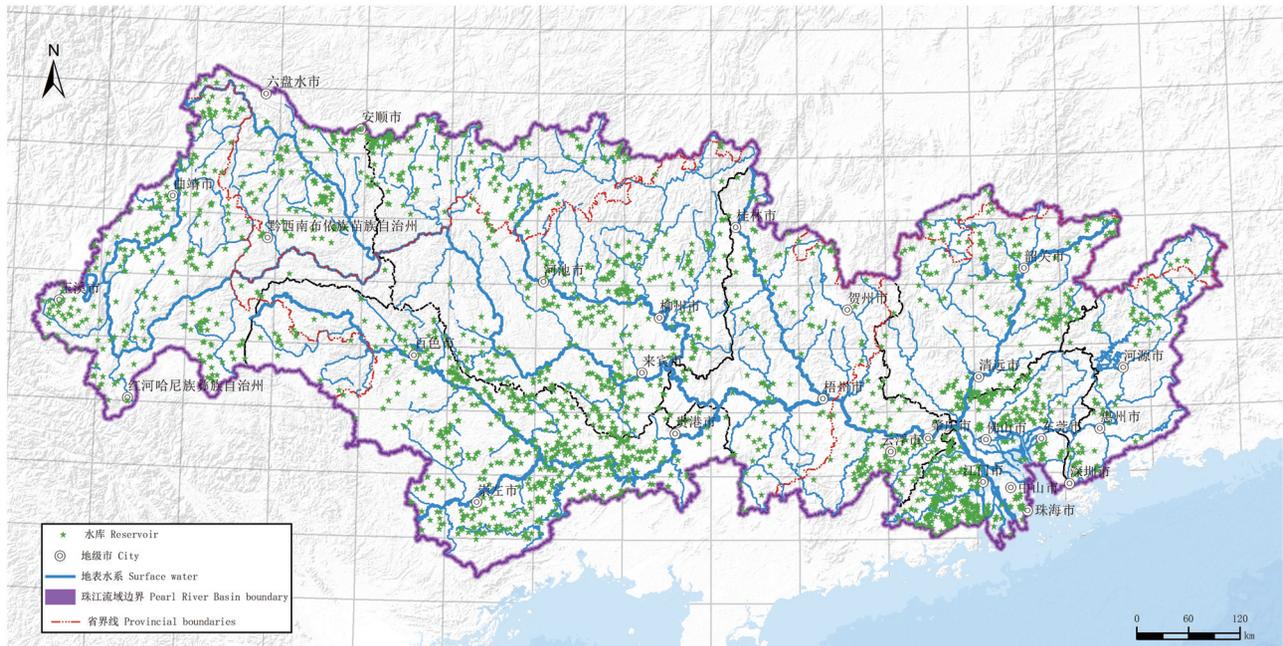


图9 珠江流域水库分布图
Fig.9 Reservoir distribution of the Pearl River basin

表3 珠江流域大型水库蓄水量

Table3 Water storage capacity of large reservoirs in the Pearl River basin

ID	省份	河名	站名	时间	水位/m	蓄水量 /10 ⁶ m ³
1	贵州	黄泥河	鲁布革	2020/6/4	1110.56	24.00
2	贵州	南盘江	天生桥(一级)	2020/4/8	754.07	47.14
3	广西	右江	百色水库	2020/2/26	216.65	34.43
4	广西	明江	那板水库	2020/2/26	209.08	1.58
5	广西	甘棠江	青狮潭	2020/2/26	212.33	1.39
6	广东	南水	南水	2020/2/26	208.01	6.42
7	广西	澄碧河	澄碧河	2020/3/2	181.47	8.07
8	广西	贺江	龟石	2020/2/26	176.78	2.28
9	广西	凤亭河	凤亭河	2020/3/2	169.01	2.85
10	广西	红水河	大化电站	2020/2/26	154.17	3.77
11	广东	东江	枫树坝	2020/2/26	149.85	8.45
12	广东	增江	天堂山	2020/2/26	145.09	1.27
13	广西	潯石江	屯六	2020/3/2	144.42	1.20
14	广东	锦江	锦江(仁化)	2020/2/26	131.44	1.14
15	广东	新丰江	新丰江	2020/2/26	106.13	75.44
16	广西	左江	左江	2020/3/2	107.45	2.77
17	广西	八尺江	大王滩	2020/3/2	98.84	1.10
18	广东	融江	大埔	2020/3/2	92.35	2.22
19	广西	六红河	达开	2020/3/2	92.59	1.74
20	广东	潭江	锦江	2020/2/26	86.53	2.16
21	广西	白沙江	六陈(坝首)	2020/3/2	86.92	1.53
22	广西	柳江	红花	2020/2/26	77.48	5.69
23	广东	大井河	良德水库(大坝)	2020/2/26	82.27	3.16
24	广东	西枝江	白盆珠	2020/2/26	66.35	2.71
25	广西	郁江	西津	2020/2/26	60.53	9.90
26	广东	翁江	长湖	2020/2/26	60.43	1.16
27	广西	南流江	小江水库	2020/2/26	55.5	4.11
28	广东	九洲江	鹤地水库(大坝)	2020/2/26	35.94	4.10
29	广东	大隆洞河	大隆洞	2020/2/26	26.12	1.02
30	广东	鹤洲水	大沙河	2020/2/26	32.87	1.12
31	广东	北江	飞来峡	2020/2/26	23.61	3.95
32	广西	洪潮江	洪潮江水库	2020/2/26	24.22	3.50

范围较狭窄,一般在两侧地下水分水岭以下的水位随库水位涨落,向邻谷渗漏的可能性极小,局部岩溶发育地段存在着渗漏的可能,部分水库修建后水压击穿覆土,疏通岩溶地下通道,造成雨季地下水到处外溢,旱季水库几百万方的水潜入地下,向邻河谷排泄。在珠江中游和下游地区地表水位抬高导致水文地质条件明显改变,尤其在岩溶地区修建的水利工程对地下水则有较大的影响,

有些水库的渗漏,致使地下河、岩溶大泉流量增大,地下水补给增加导致地下水位相应抬高。在平原区地下水位抬高一方面有利于地面蒸发作用,另一方面会产生次生潜育化。在丘陵山区由于水位的抬高、水压的增大,导致岩体中原先闭合的裂隙又重新张开,形成新的地下水通道,相邻河谷可能出现新的泉流。

水利工程的修建以及水库对水资源调蓄和分配给地下水资源评价带来一定困难,正确分析地表水与地下水之间的相互关系,计算两者之间的转化量,对于水资源评价和合理开发利用、水污染的预警与防治均具有重要的理论和实践意义。

6 结论及建议

在系统梳理珠江流域地下水资源调查评价现状和历史的基础上,揭示了地下水的分区特点,阐述了地下水资源评价方法及评价结果,分析了流域地下水资源评价存在的主要问题,得出以下结论:

(1)按照地下水流动特征及含水性质将珠江流域划分为129个四级地下水系统,以系统为评价单元计算珠江流域地下水天然资源量1374.16亿m³,可开采量为578.7亿m³,开发利用率仅10.01%。中上游岩溶石山区开发利用率仅为5%~11%,下游珠三角地区经济较为发达,开发利用率达41.77%。

(2)珠江流域水动力特征按不同含水介质类型、地貌形态、水流特性等主要分3类,珠江上游云贵高原深切峡谷区、珠江中游桂中峰丛洼地区以及珠江下游冲洪积平原区。

(3)水利部和自然资源部都开展过地下水资源评价与管理,地下水和地表水资源量概念存在认识上的分歧,二者边界的不重合以及水库调蓄作用给地下水评价带来一定困难。建议下一步工作应统一考虑地表水和地下水资源评价,正确分析二者之间的相互转化关系,以期对水资源的合理开发利用以及生态环境保护提供理论基础和科学支撑。

(4)在新一轮水资源调查评价中,加强地下水系统边界和参数的认识,严格水资源管理,改变地表水和地下水、城镇用水和农村用水、水量和水质等方面分割和脱节现象,考虑跨流域调水解决水资源供需矛盾、时空分布不均和开发利用较低等资源环境问题。

References

- Adji T N, Bahtiar I Y. 2016. Rainfall–discharge relationship and karst flow components analysis for karst aquifer characterization in Petoyan Spring, Java, Indonesia[J]. *Environmental Earth Sciences* 75(9): 735.
- Cao Jianhua, Yang Hui, Zhang Chunlai, Wu Xia, Bai Bing, Huang Fen. 2018. Characteristics of structure and material cycling of the karst critical zone in Southwest China [J]. *Geological Survey of China*, 5(5):1–12 (in Chinese with English abstract).
- Charlton M B, Arnell N W. 2011. Adapting to climate change impacts on water resources in England—An assessment of draft Water Resources Management Plans[J]. *Global Environmental Change*, 21(1):238–248.
- Chen Fei, Xu Xiangyu, Yang Yan, Ding Yueyuan, Li Jianqiang, Li yuanyuan. 2020. Investigation on the evolution trends and influencing factors of groundwater resources in China [J]. *Advances in Water Science*, 31(6):3–11 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tegu, Shi Xiaojun, Yu Kefu. 2008. The impacts of climate warming on Sea–level rise trends at Pearl River estuary during 1957–2006 [J]. *Guangdong Meteorology*, 30(2):1–3 (in Chinese with English abstract).
- Estrela T, Pérez–Martin, M A, Vargas E. 2012. Impacts of climate change on water resources in Spain[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6): 1154–1167.
- Fiorillo F. 2014. The recession of spring hydrographs, focused on karst aquifers[J]. *Water Resour Manage*, 28(7): 1781–1805.
- Ghasemizadeh R, Hellweger F, Butscher C, Padilla I, Vesper D, Field M, Alshwabkeh A. 2012. Review: Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico[J]. *Hydrogeology Journal*, 20(8): 1441–1461.
- Jiang Guanghui, Guo Fang. 2009. Hydrological character of epikarst in Southwest China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 36(5): 89–93 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Guanghui. 2016. The research progress and developing tendency of karst water [J]. *Carsologica Sinica*, 35(1): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhongcheng, Xia Riyuan, Shi Jian, Pei Jianguo, He Shiyi, Liang Binke. 2006. The application effects and exploitation capacity of karst underground water resources in southwest China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(5):495–502 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian. 1999. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(3): 302–308 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuanyuan, Cao Jianting, Shen Fuxin, Xia Jun. 2014. Changes of renewable water resources in China from 1956 to 2010 [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 44(9):2030–2038 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bingjun, Chen Xiaohong, Zeng Zhaofa. 2010. Spatial distribution law of rainfall in the lower reaches of The Pearl River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 25(12):2123–2131 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lüliu, Jiang Tong, Xujing, Zhai Jianqing, Luo Yong. 2012. Responses of hydrological processes to the climate change in the Zhujiang River Basin in the 21st century [J]. *Climate Change Research*, 8(1): 28–34 (in Chinese with English abstract).
- National Commission on Mineral Reserves. 1994. Groundwater resources classification and grading standards (GB 15218–94) [S]. Beijing: State Administration for Market Regulation (in Chinese).
- Shi Jiansheng, Li Guomin, Liang Xing, Chen Zongyu, Shao Jingli, Song Xianfang. 2014. Evolution Mechanism and Control of Groundwater in the North Plain [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 35(5): 527–534 (in Chinese with English abstract).
- Tang Hongxia, Zhu Xueyu. 1998. Groundwater resources evaluation and Utilization–planning in the complex hilly region—A case study in Yiyuan[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 34(6):677–684 (in Chinese with English abstract).
- Wang Li, Zhu Yuansheng, Ma Haitao, Li Gengyu. 2015. Study on groundwater, development, utilization and management in the Pearl River Basin[J]. *Pearl River*, 36(5): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yu. 2002. Classification, features of karst water system and key point for the evaluation to karst water exploration in southwest china karst area [J]. *Carsologica Sinica*, 21(2): 44–49 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yu. 2019. Study on watershed boundary division for unified evaluation of surface water and groundwater resources and environment in karst areas [J]. *Carsologica Sinica*, 38(6):823–830 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yu. 2020. Evaluation status and problems of groundwater resource potential in Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 39(2): 137–146 (in Chinese with English abstract).
- Xia Riyuan, Zhao Liangjie, Wang Zhe. 2020. Study on Water Circulation Mechanism of Typical Karst Underground River System [M]. Beijing: Science Press, 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Xia Riyuan. 2018. Investigation, Evaluation and Exploitation Model of Groundwater Resources in Karst Rock Mountains in Southwest China [M]. Beijing: Science Press, 106–119(in Chinese with English abstract).
- Xu Yan, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, Li Xiongyao, Shi Xiaoming, Tian Yichao, Wu Luhua. 2018. Simulation of future scenarios of climate change in the middle and upper reaches of the Pearl River using the Statistical Down Scaling Model (SDSM)[J]. *Carsologica Sinica*, 37(2): 228–237 (in Chinese with English abstract).

- Yuan Binghua, Mao Yu. 2001. Groundwater resources in karst rock mountain area in southwest China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 28(5):46–55 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Cheng, Jiang Zhongcheng, Worakul M, Pu Junbing, Lü Yong. 2014. Karst topography and hydro-geochemical characteristics in western Thailand and their correlation to that in southwestern China [J]. *Carsologica Sinica*, 33(1):1–8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jangyun, He Ruimin, Qi Jing, Liu Cuishan, Wang Guoqing, Jin Junliang. 2013. A new perspective on water issues in North China[J]. *Advances in Water Science*, (3):303–310 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Liangjie, Xia Riyuan, Yang Yang, Shao Jingli, Yi Lianxing, Wang Zhe. 2017. Discussion and application of simulation methods for karst conduit flow based on Modflow [J]. *Carsologica Sinica*, 36(3): 346–351 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Liangjie. 2019. Study of Water Exchange Mechanism of Karst Matrix and Conduit Medium [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 50–67 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiudi, Wang Zhigang, Zhang Xinchuan, Zhang Pingcang. 2017. Small watershed division utilization and hydrological characteristics of karst area in southwest of China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, (2):25–27 (in Chinese with English abstract).
- Zou Shengzhang, Zhang Wenhui, Liang Bin, Chen Hongfeng, Liang Xiaoping. 2005. A discussion of the assessment of groundwater vulnerability in epikarst zone of the karst area, Southwest China [J]. *Earth Science Frontiers*, (S1):152–158 (in Chinese with English abstract).
- Zou Shengzhang, Zhu Ming Qiu, Tang Jiansheng, Xia Riyuan. 2006. Water resources security in karst area of southwest China problems and counter measures [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10):1637–1642 (in Chinese with English abstract).
- 曹建华, 杨慧, 张春来, 吴夏, 白冰, 黄芬. 2018. 中国西南岩溶关键带结构与物质循环特征[J]. *中国地质调查*, 5(5): 1–12.
- 陈飞, 徐翔宇, 羊艳, 丁跃元, 郇建强, 李原园. 2020. 中国地下水资源演变趋势及影响因素分析[J]. *水科学进展*, 31(6): 3–11.
- 陈特固, 时小军, 余克服. 2008. 近50年全球气候变暖对珠江口海平面变化趋势的影响[J]. *广东气象*, 30(2): 1–3.
- 姜光辉, 郭芳. 2009. 我国西南岩溶区表层岩溶带的水文动态分析[J]. *水文地质工程地质*, 36(5): 89–93.
- 姜光辉. 2016. 融合生态学和提升岩溶水数值模拟技术的国际前沿研究[J]. *中国岩溶*, 35(1): 1–4.
- 蒋忠诚, 夏日元, 时坚, 裴建国, 何师意, 梁彬. 2006. 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析[J]. *地球学报*, 27(5): 495–502.
- 蒋忠诚, 袁道先. 1999. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. *地球学报*, 20(3): 302–308.
- 李原园, 曹建廷, 沈福新, 夏军. 2014. 1956—2010年中国可更新水资源量的变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(9): 2030–2038.
- 刘丙军, 陈晓宏, 曾照发. 2010. 珠江流域下游地区降水空间分布规律研究[J]. *自然资源学报*, 25(12):2123–2131.
- 刘绿柳, 姜彤, 徐金阁, 翟建青, 罗勇. 2012. 21世纪珠江流域水文过程对气候变化的响应[J]. *气候变化研究进展*, 8(1): 28–34
- 全国矿产储量委员会. 1994. 地下水资源分类分级标准(GB 15218–94)[S]. 北京: 国家市场监督管理总局.
- 石建省, 李国敏, 梁杏, 陈宗宇, 邵景力, 宋献方. 2014. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. *地球学报*, 35(5): 527–534.
- 唐红侠, 朱学愚. 1998. 复杂丘陵山区的地下水资源评价和开发利用规划——以沂源县为例[J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 34(6): 677–684.
- 王丽, 朱远生, 马海涛, 李耕宇. 2015. 珠江地下水资源开发利用变化研究和管理建议[J]. *人民珠江*, 36(5): 1–3.
- 王宇. 2002. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. *中国岩溶*, 21(2): 44–49.
- 王宇. 2019. 岩溶区地表水与地下水资源及环境统一评价的流域边界划分研究[J]. *中国岩溶*, 38(6): 823–830.
- 王宇. 2020. 云南省地下水资源潜力评价现状与问题分析[J]. *中国岩溶*, 39(2):137–146.
- 夏日元, 赵良杰, 王喆. 2020. 典型岩溶地下河系统水循环机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 25–31.
- 夏日元. 2018. 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, 106–119.
- 许燕, 王世杰, 白晓永, 李雄耀, 史晓明, 田义超, 吴路华. 2018. 基于SDSM的珠江中上游气候模拟及未来情景预估[J]. *中国岩溶*, 37(2):228–237.
- 袁丙华, 毛郁. 2001. 西南岩溶石山地区地下水资源[J]. *水文地质工程地质*, 28(5):46–55.
- 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 刘翠善, 王国庆, 金君良. 2013. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. *水科学进展*, (3):303–310.
- 章程, 蒋忠诚, Mahippong Worakul, 蒲俊兵, 吕勇. 2014. 泰国西部岩溶地貌和水文地球化学特征及其与中国西南岩溶的对比[J]. *中国岩溶*, 33(1):1–8.
- 赵良杰, 夏日元, 杨杨, 邵景力, 易连兴, 王喆. 2017. 基于MODFLOW的岩溶管道水流模拟方法探讨与应用[J]. *中国岩溶*, 36(3): 346–351.
- 赵良杰. 2019. 岩溶裂隙-管道双重含水介质水流交换机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 50–67.
- 朱秀迪, 王志刚, 任斐鹏, 张昕川, 张平仓. 2017. 西南岩溶区小流域划分与水文特征分析[J]. *中国水土保持*, (2): 25–27.
- 邹胜章, 张文慧, 梁彬, 陈宏峰, 梁小平. 2005. 西南岩溶区表层岩溶带水脆弱性评价指标体系的探讨[J]. *地质前缘*, (S1): 152–158.
- 邹胜章, 朱明秋, 唐建生, 夏日元. 2006. 西南岩溶区水资源安全与对策[J]. *地质学报*, 80(10): 1637–1642.

附中文参考文献