

doi: 10.12029/gc20210401

黄长生,周耘,张胜男,王节涛,刘凤梅,龚冲,易秤云,李龙,周宏,魏良帅,潘晓东,邵长生,黎义勇,韩文静,尹志彬,李晓哲. 2021. 长江流域地下水资源特征与开发利用现状[J]. 中国地质, 48(4): 979-1000.

Huang Changsheng, Zhou Yun, Zhang Shengnan, Wang Jietao, Liu Fengmei, Gong Chong, Yi Chengyun, Li Long, Zhou Hong, Wei Liangshuai, Pan Xiaodong, Shao Changsheng, Li Yiyong, Han Wenjing, Yin Zhibin, Li Xiaozhe. 2021. Groundwater resources in the Yangtze River Basin and its current development and utilization[J]. *Geology in China*, 48(4): 979-1000(in Chinese with English abstract).

长江流域地下水资源特征与开发利用现状

黄长生¹,周耘^{1,2},张胜男^{1,2},王节涛¹,刘凤梅¹,龚冲¹,易秤云^{1,2},李龙^{1,2},周宏²,
魏良帅³,潘晓东⁴,邵长生¹,黎义勇¹,韩文静²,尹志彬^{1,2},李晓哲^{1,2}

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北 武汉 430223; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院,湖北 武汉 430074;
3. 中国地质科学院探矿工艺研究所,四川 成都 611734; 4. 中国地质科学院岩溶地质研究所,广西 桂林 541004)

摘要:为提升对长江流域水文地质和地下水资源的认知程度,突破以往单独从地表水或地下水角度进行评价的局限性,长江流域水文地质调查工程以地球系统科学理论和水循环理论为指导,充分考虑地表水与地下水的转化关系,将水文地质单元和地表水流域有机结合,划分长江流域地下水评价单元,建立典型地下水资源评价模型,开展了新一轮长江流域地下水资源评价。评价结果表明:(1)长江流域水循环要素时空分布不均,降水以中游最多,并由东南向西北递减;地表径流主要集中在夏季,且长江北岸比南岸集中程度更高;蒸散发量总体上呈现东部高于西部的特征,最大值集中在长江中游一带;长江流域地下水位总体保持稳定,丰枯季水位变化总体不大,一般小于 2 m;长三角超采区的地下水漏斗面积已明显减小,相关环境地质问题得到了有效控制。(2)2020 年长江流域的地下水资源总量 2421.70 亿 m³/a,其中山区地下水资源量 2092.79 亿 m³/a,平原区地下水资源量 331.35 亿 m³/a;地下水储量较 2019 年整体略有增加趋势,其中四川盆地最为明显,共增加 23.72 亿 m³。(3)长江流域的水质上游优于下游,优质地下水主要分布在赣南地区和大别山南麓一带,部分地区水质较差的主要原因是原生劣质水的广泛分布。长江流域地下水开发利用水平整体很低,局部地区由于过往不合理的开发所引发的环境地质问题已得到缓解,岩溶塌陷、地面沉降等问题得到了较好控制。建议适当开发利用赣南地区和大别山南麓一带优质的基岩裂隙水。

关键词:地下水资源量;水质评价;开发利用;地质调查工程;长江流域

中图分类号:TV 211.1 2 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)04-0979-22

Groundwater resources in the Yangtze River Basin and its current development and utilization

HUANG Changsheng¹, ZHOU Yun^{1,2}, ZHANG Shengnan^{1,2}, WANG Jietao¹,
LIU Fengmei¹, GONG Chong¹, YI Chengyun^{1,2}, LI Long^{1,2}, ZHOU Hong², WEI Liangshuai³,
PAN Xiaodong⁴, SHAO Changsheng¹, LI Yiyong¹, HAN Wenjing², YIN Zhibin^{1,2}, LI Xiaozhe^{1,2}

(1. Wuhan Geological Survey Center of China Geological Survey, Wuhan 430223, Hubei, China;
2. China University of Geosciences (Wuhan) Geological Survey Research Institute, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, Sichuan China; 4. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China)

收稿日期:2021-05-27;改回日期:2021-07-12

基金项目:中国地质调查局项目(DD20190824)资助。

作者简介:黄长生,男,1964年生,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事水工环地质调查研究工作;E-mail:185236157@qq.com。

Abstract: In order to improve the cognition of hydrogeology and groundwater resources in the Yangtze River Basin and break through the limitations of previous evaluation from the point of view of surface water or groundwater, the hydrogeology survey project in the Yangtze River Basin was guided by the earth system science theory and water cycle theory. Based on the full consideration of the transformation relationship between surface water and groundwater, hydrogeology unit and surface water basin were organically combined to divide groundwater evaluation units in the Yangtze River Basin. A new round of groundwater resource evaluation in the Yangtze River basin was carried out through the establishment of typical groundwater resource evaluation model. The evaluation results show that the spatial and temporal distribution of water cycle elements in the Yangtze River basin is uneven, with the highest precipitation in the middle reaches and decreasing from southeast to northwest. Surface runoff is mainly concentrated in summer, the north bank is higher than the south bank in summer concentration surface runoff. Evapotranspiration is generally higher in the east than in the west, and the maximum value is concentrated in the middle reaches of the Yangtze River. The groundwater level in the Yangtze River basin remains stable on the whole, and the water level changes little in the peak and dry seasons, generally less than 2 m. The area of groundwater funnel in the Yangtze River Delta over-exploitation area has been significantly reduced, and the related environmental geological problems have been effectively controlled. In 2020, the total groundwater resources in the Yangtze River Basin was 242.170 billion m³/a, including 209.279 billion m³/a in hilly areas and 33.135 billion m³/a in plain areas. Compared with 2019, the groundwater storage increased slightly, especially in Sichuan Basin, with a total increase of 2.372 billion m³. The water quality in the upper reaches of the Yangtze River basin is better than that in the lower reaches, and the high-quality groundwater is mainly distributed in southern Jiangxi and the western foothills of Dabie Mountains. The main reason for poor water quality in some areas is the widespread distribution of primary inferior water. The development and utilization level of groundwater in the Yangtze River Basin is very low as a whole. The environmental geological problems caused by unreasonable development in some areas have been greatly solved, and karst collapse and land subsidence have been well controlled. It is suggested that high-quality bedrock fissure water should be properly developed and utilized in southern Jiangxi and south Dabie Mountains.

Key words: groundwater resources amount; utilization potential; water quality assessment; geological survey engineering; Yangtze valley

About the first author: HUANG Changsheng, male, born in 1964, doctor, professor, supervisor of doctor candidate, mainly engaged in hydrogeology, environmental geology and engineering geology; E-mail:185236157@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190824).

1 引 言

长江流域地下水资源开发利用的潜力巨大,但局部地区不合理的开发利用也带来了一系列的生态环境地质问题。因此,准确摸底“大保护”新形势下长江流域地下水资源的数量和质量,研究如何合理地开发利用和保护长江流域地下水资源,对促进水资源的可持续利用,实现流域经济社会与资源环境协调发展具有重要意义。

长江流域的水资源一直是学者们关注的重点。王政祥等(2011)通过对1956—2000年的长江流域水资源调查评价,掌握了流域内水资源数量的时空分布特点和演变趋势。王俊(2018)分析了长江流域水资源开发及供用水现状,并提出水资源开发利用存在的一些问题。Wu et al.(2021)根据气象资

料,采用Sen的趋势分析、Mann-Kendall检验法和连续小波变换等方法探究了长江流域极端降水事件的特征。夏雪瑾等(2011)、唐建华等(2016)探讨了大通站和徐六泾站之间的流量关系,认为大通年径流量基本能代表长江河口入海年径流量。韩玉芳等(2019)研究了三峡工程实施后,长江口徐六泾以下各河段水动力场变化特征和含沙量的变化特征。詹云军等(2021)选择GLEAM_V3.2a数据集,通过分段线性拟合、逐步回归和相关性分析了长江流域地表实际蒸散发演变趋势和影响因素。许静等(2020)从年份、月份、季度和水期4个时间段,对长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征进行了系统分析。范可旭等(2011)从水化学特征、湖库营养状态、水功能区达标情况等方面,对长江流域水资源质量进行了评价,认为地表水水质总体较好,水

库、湖泊有向富营养湖库转化的趋势。王琪等(2021)以流域内主要干流为研究对象,估算了碳酸和外源酸参与碳酸盐岩的溶蚀比例,探究人类活动对长江流域水化学特征的影响,发现人为因素对长江流域水质的影响增大。从当前研究成果来看,关于长江流域水资源方面的研究很多,特别是对降水、蒸散发、地表径流、水沙变化等方面已有较为深入研究(Li et al., 2015; Qi et al., 2019; Zhang et al., 2019; Yang et al., 2019; Chen et al., 2019; Gang et al., 2020; Wang et al., 2020; Peng et al., 2021; Ge et al., 2021; Yang et al., 2021),但由于区域内地下水开发利用程度很低,对长江流域地下水资源特征及其开发潜力的综合研究目前较少,而流域尺度的地下水资源开发利用已成为水资源研究的热点问题。赵良杰等(2021)在考虑不同水文地质参数的基础上,分析评价珠江流域地下水资源量,讨论了珠江流域三级阶地不同水流运动特征;曹建文等(2021)从地下水资源着手,梳理了粤港澳大湾区水资源环境条件,提出了应急后备水源地建议。李海涛等(2021)对雄安新区水文地质条件、地下水动态变化特征进行总结,采用地下水数值模拟技术分析雄安新区地下水可开采的最大资源量,进而评价雄安新区地下水可开采潜力。杨会峰等(2021)对海河流域水循环条件变化进行系统分析,针对浅层地下水和深层地下水分别展开评价。这些研究为长江流域地下水资源评价提供了重要的参考借鉴。

为了满足长江流域高质量绿色发展需求,本文基于水循环理论和地球系统科学理论,突破以往单独从地表水和地下水角度进行划分的局限性,将水文系统、含水系统和地下水流系统有机结合,在长江流域各地下水资源区评价的基础上,对地下水资源量分布及特征进行了分析,对长江流域地下水水质进行了评价,为区域经济社会发展规划、地下水资源开发利用提供了基础资料。

2 研究区概况

2.1 自然地理

长江流域位于 $90^{\circ}33' \sim 122^{\circ} 25'E$, $24^{\circ}30' \sim 35^{\circ} 45'N$ 。横跨中国三大地形阶梯,干流流经青藏高原、横断山脉、云贵高原、四川盆地、江南丘陵、长江中下游平原,最后经由崇明岛以东汇入东海,全流域面积

约180万 km^2 ,是中国最为重要的经济区域带之一(孟宪萌等, 2019)。长江流域呈东西长,南北短的流域形状,地势西高东低,由河源至河口,总落差约5400 m。流域地貌类型复杂多样,山地、丘陵面积占总面积67.2%,平地占28.1%,水面占4.7%。长江流域处于欧亚大陆东部的副热带地区,气候为典型的季风气候,流域多年平均降水量为1092 mm,年降水量的地区分布及年内分配很不均匀。

2.2 水文地质

根据地下水赋存的含水层介质特征、储存和运移的空间形态特征,长江流域地下水类型分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类岩溶水、红层孔隙裂隙水和基岩裂隙水4大类。松散岩类孔隙水以第四系松散沉积物为主体,主要分布于成都平原、安宁河谷平原、若尔盖草原、云南的断陷盆地、长江中下游地区的冲积平原以及沿长江、汉江等大型河流的河谷地带,分布面积约28万 km^2 ,含水岩组以第四系、古近系、新近系等松散、松软沉积物为主,岩石孔隙发育,富水性强、中等;碳酸盐岩类岩溶水主要分布在滇、黔、川、渝、鄂、湘等地区,分布面积约37万 km^2 ,含水岩组以石炭系、二叠系、三叠系、寒武系和部分奥陶系的白云岩与灰岩为主,富水性强、中等;红层孔隙裂隙水主要分布在湖南、江西、重庆、湖北等小部分地区,常赋存于砂岩、砾岩等孔隙裂隙中,易形成孔隙裂隙承压水;基岩裂隙水则广泛分布于全流域丘陵山区及盆地内,分布面积约90万 km^2 ,含水岩组主要包括一般碎屑岩、变质岩和岩浆岩,贮水构造分布极不均,含水性能差异较大,富水性中等、弱(图1)。

长江流域盆地、平原区以古近系、新近系和第四系为主体,岩石孔隙发育,富水性好,该类松散松软类含水岩组是该区内重要的含水岩层。山丘区各时代地层均有分布,岩性类别为可溶岩、红色碎屑岩、一般碎屑岩、变质岩以及岩浆岩。长江流域的各类地下水主要赋存于这六类含水岩组中(表1)。其中,可溶岩是流域内重要的含水岩层,裂隙、溶洞发育,含水丰富,其次为一般碎屑岩和变质岩,岩石裂隙发育,含水性较好,而岩浆岩等块状岩石含水性较差,主要在风化带中赋存浅层地下水。

地下水的补给、径流和排泄条件,决定地下水的形成、赋存及运动方式。长江流域地下水最主要

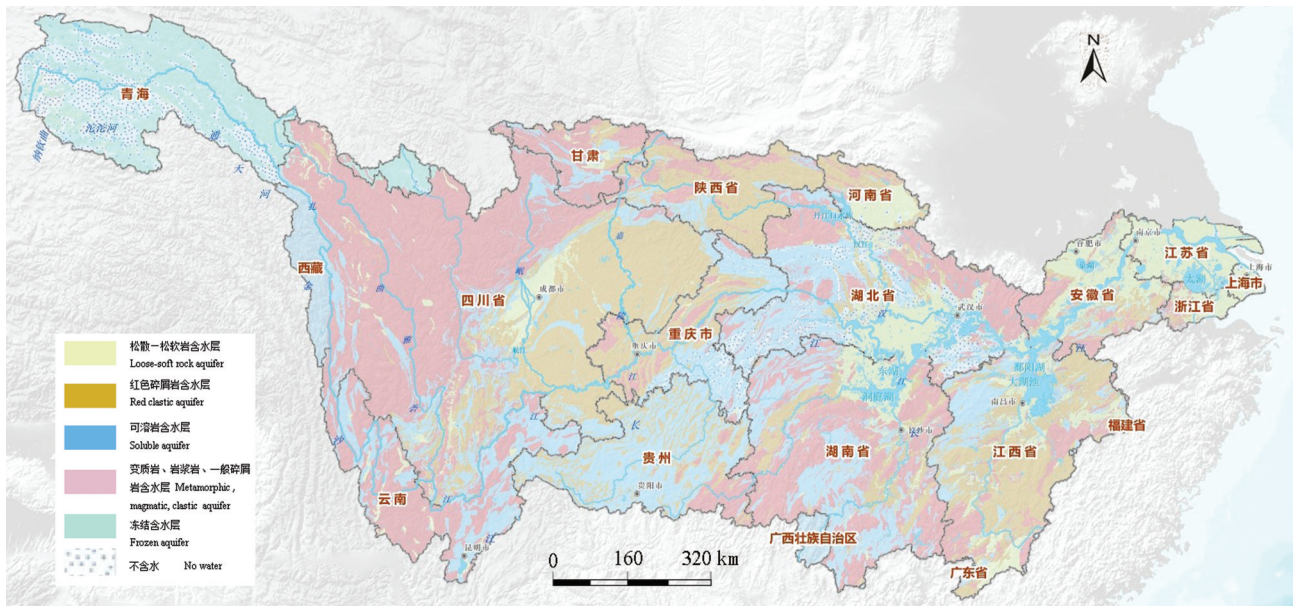


图1 长江流域水文地质图
Fig.1 Hydrogeological map of Yangtze River Basin

的补给来源是大气降水补给,其补给方式大体可区分为两种:一种为降雨或降雨形成地面片流,通过微细孔隙、裂隙、溶隙、土壤、风化壳分散缓慢下渗补给;另一种则是降雨形成地面片状或线状水流,经岩溶洼地、岩溶槽谷等封闭、半封闭地形汇聚进入落水洞的集中快速灌入式补给。基岩裂隙水和松散岩类孔隙水的补给形式主要是前者;岩溶地下水这两种补给方式并存,但以补给量而论,则以后者为主。长江流域山丘区地下水资源量全部由降水补给形成;平原区地下水资源量除了降水补给以外,还接受地表水体补给和山前侧向补给。长江流

域山丘区地下水绝大部分通过河道排泄,极少部分水量通过开采、山前侧向和山间河谷平原潜水蒸发排泄;在平原区总排泄量中,56%由河道排泄,44%是由潜水蒸发和实际开采排泄。

3 研究方法数据来源

本文利用最新的调查数据,研究降水、径流、蒸散发、地下水位、地下水降落漏斗等水循环要素的演变特征,以地球系统科学理论和水循环理论为指导,充分考虑地表水与地下水的转化关系,将水文地质单元和地表水流域有机结合,划分长江流域地

表1 长江流域主要含水层划分
Table 1 Division of main aquifer in Yangtze River Basin

含水岩组	地下水类型	地层代号	分布区域	富水性
松散松软岩类	松散岩类孔隙水	Q、N、E	四川盆地、江汉洞庭平原 鄱阳湖流域、长江三角洲	中—强
可溶岩类	碳酸岩盐类 岩溶水	C、P、T、 Є、O ₂	长江中上游	中—强
红色碎屑岩类	红层孔隙裂隙水	K、J	嘉陵江流域、衡邵盆地 吉泰盆地、赣州盆地	弱—中
一般碎屑岩类		D、S、T J、Є、O		中等
变质岩类	基岩裂隙水	Ar、Ht、Ch、 Qb-Z、Qb-Nh、Jx	全流域分布	弱—中
岩浆岩类		γ、η		弱

下水评价单元,建立典型地下水资源评价模型,开展长江流域地下水资源量计算和评价(图2)。

为便于地下水资源的计算和评价,首先依据长江流域五级分区原则进行划分。地下水资源二级分区主要依据原国土资源部全国第二轮地下水资源评价的地下水资源区进行划分,对重要的地貌单元界线进行校核(如江汉平原、四川盆地东缘等),兼顾流域和区域水文地质特征,反映完整的地下水补给、径流、排泄过程及形成演化,突出以地下水汇流盆地为单元的平原汇流区和山丘补给区;三级区的边界以水利部水资源三级区划分为基础,由于突出了盆地、平原的地下水资源二级区,故在水资源三级区中按山区-平原界线再次划分;地下水资源四级及以下分区,以水文地质理论为指导,充分考虑含水层结构和地下水循环,依据含水岩组的特征和补径排条件划分含水系统,使用不同地下水类型的含水系统进行地下水资源评价单元的划分;地下水资源五级分区或计算分区作为地下水资源的基本计算单元,尽量保持水文系统和含水系统的完整性和统一性,同时考虑不同区域的工作程度、资料精度和评价方法的适宜性,兼顾已有水文站点的分布。有的地区将五

级分区作为基本的计算单元,有的地区则在五级分区的基础上进一步细化为子单元。

由于平原及山区地下水资源量计算采用不同方法,所以划分原则亦有不同,平原区依据水文系统分布特征和地下水补径排条件划分;山区主要依据相对独立的含水系统或地下水流系统的边界来确定。长江流域划分为10个二级分区,53个三级分区,195个四级分区,共有23371个子单元(表2)。

在地下水资源分区结果的基础上,进行地下水资源量的试算。计算过程中,平原盆地区以地下水补给项包括降水入渗补给量、山前侧向补给量、地表水体补给量等,各项补给量之和为总补给量;山丘区以地下水总排泄量作为地下水资源量,计算方法以径流模数法为主,部分地区采用基流分割法进行对比,少数缺少径流资料的地区则采用降水入渗系数法进行计算。试算完成后通过历史数据的比较、监测结果对比和水均衡验算对结果进行检验,适当调整参数以提高计算结果的精度。

区域资料主要来源于1:5万和1:20万区域水文地质调查成果,其中1:5万水文地质调查主要集中在云贵渝、长江中游丘陵山区、长江下游三角洲局部地区,共计620幅、覆盖面积25万km²。1:20万水文地质调查包括了除长江源及青藏高原外的全部区域,共计274幅、覆盖面积155万km²。气象数据来源中国气象局,全面收集了流域内857个国家站点的气象资料。水文数据主要来源于水资源公报和水土保持公报、水文监测站点提供的资料和中国地质环境监测院提供的中国地下水水位动态变化数据等。

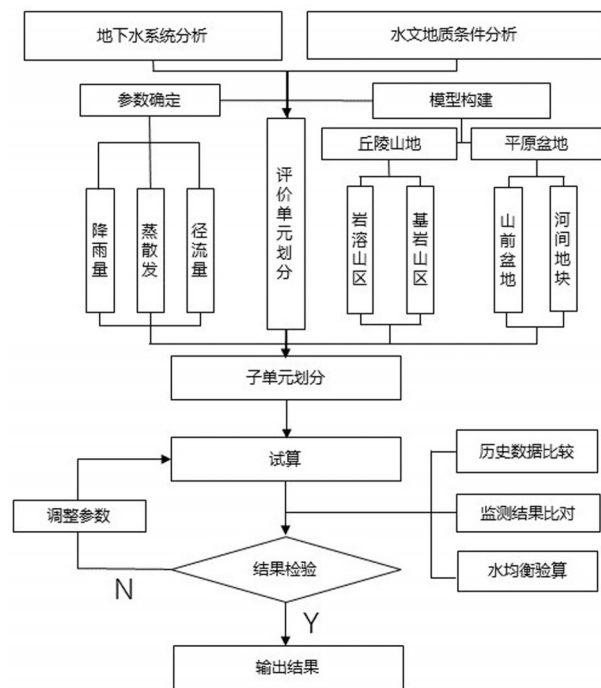


图2 长江流域地下水资源量计算过程图
Fig.2 Calculation process of groundwater resources in Yangtze River Basin

4 区域水循环要素变化

4.1 降水量变化

长江流域的气候、地理条件决定着长江流域降水、蒸发、径流等水平衡要素的时空变化及各要素之间的相互关系(杨远东, 1984)。受气候、水汽来源、地形等因素的综合影响,长江流域降水的地区分布很不均匀,总的趋势是由东南向西北递减、山区多于平原、迎风坡多于背风坡。就长江上、中、下游段来看,降水以中游最多,上游较少。根据中国气象局和长江流域水资源公报统计1956—2020年系列,长江流域多年平均年降水深约为1092 mm(表

表2 长江流域地下水资源计算分区(个)

Table 2 Calculation zonation of groundwater resources in Yangtze River basin

流域位置	四级区	五级区	子单元
上游	71	187	15246
中游	107	1861	7847
下游	17	233	278
合计	195	2281	23371

3),折合年降水量为19467亿 m^3 ,属于降水较丰沛的地区。1956—1980年、2000—2009年降水较多年平均偏小,1980—1999年、2010—2020年较多年平均偏大。

2020年长江流域出现了1998年以来最严重汛情,降水深为1441.5 mm,为1961年以来最多。2020年受厄尔尼诺现象等不利气候因子影响,长江流域入梅早,降雨持续时间长、强度大(夏军等, 2021)。长江流域2019年7月—2020年6月时段内,降雨量在19.20~5420.30 mm,总体上东部大于西部,南部大于北部,且中上游地区的降雨量相对于多年平均降雨量较少,但是长江三角洲地区降雨量相对年平均值较大。该时段内的降雨分配极度不均,部分地区表现为“大旱大涝”,汛期在4—10月,降雨强度大、降雨量大、洪涝严重,占全年降水量的60%~70%;枯水期为10月至明年的4月,降雨偏少、连续干旱。

4.2 径流量变化

长江流域径流量年际变化较大,年内分配不均匀。长江径流年内分配与降水相同,主要集中在夏季,长江干流上游比下游、长江北岸比南岸集中程度更高。干支流控制站最枯3个月径流量占年径流量的比例一般在5.0%~12.0%。长江干流上、中和下游代表性水文站宜昌、汉口、大通多年平均年径流量分别为4340亿 m^3 、7060亿 m^3 、8910亿 m^3 ,多年平均入海径流量9125亿 m^3 。长江流域1956—2020年均降水深和径流深变化趋势见图3。根据长江流域水资源公报总计,从图3中可见,1980年以前、2000—2009年较多年平均偏小,1980—1999年、2010—2020年较多年平均偏大。2020年由于降雨量增大,径流量随之增大。从整体上来看,1956—2020年长江流域降水和径流没有发生显著变化,但2008年以后降水深和径流深极端化趋势加剧。

4.3 蒸散发量变化

蒸散发作为连接水平衡和地表能量平衡的

表3 长江流域1956—2020年年均降水深变化

Table 3 Variation of annual average precipitation depth in Yangtze River Basin from 1956 to 2020

年代	降水深/mm	年代	降水深/mm
1956—1959	1074	1990—1999	1107
1960—1969	1081	2000—2009	1050
1970—1979	1067	2010—2020	1130
1980—1989	1094	多年平均	1092

唯一途径,被认为是气候变化和水循环最重要的指标,其时空分布影响着旱涝格局(詹明月等, 2020; Yin et al., 2021)。2000年以来,整个长江流域年蒸散发量的变化不明显,但蒸散发量的空间格局呈现明显的分异性(尹剑等, 2020)。蒸散发空间分布大体上呈现东部高于西部,南部高于北部,低海拔高于高海拔,干流附近高于其他地区的特征。

采用PML_V2数据集估算2020年长江流域蒸散发量。PML_V2在PML模型的基础上,根据气孔张开的程度耦合了植被蒸腾(EC)和总初级生产力(GPP)过程(Zhang et al., 2019)。GPP过程即绿色植物单位时间通过光合作用途径固定有机碳的总量,是陆地表面固碳的主要驱动力。PML_V2有效分离了蒸散发过程的三个主要分量(植被蒸腾、土壤蒸发和冠层截流蒸发),使得GPP与EC相互制衡,从而提高GPP、蒸散发和植被水分利用效率的模拟精度。PML_V2蒸散发采用MODIS驱动数据和GLDAS驱动数据,其中MODIS数据包括叶面积指数、反射率、发射率、辐射系数;GLDAS数据包括温度、气压、风速、比湿、降水、长波辐射通量和短波辐射通量。

PML_V2数据集估算结果显示,2020年长江流域总蒸散发量为731.56 mm,蒸散发空间格局呈现明显的分异性,各二级流域蒸散发量如图4所示。年蒸散发量最大的3个流域依次为宜昌—湖口段、鄱阳湖流域、湖口以下干流,主要集中在长江中下游,年均蒸散发量均>900 mm。年蒸散发量最小的流域由小到大依次为金沙江石鼓以上、岷沱江流域和嘉陵江流域,主要集中在长江上游,年蒸散发量不足610 mm。长江流域蒸散发空间分布呈现东部高于西部,南部高于北部,低海拔高于高海拔的特征,长江中下游蒸散发明显高于上游。

4.4 地下水水位变化

2019年以来,中国地质调查局统一部署开展了

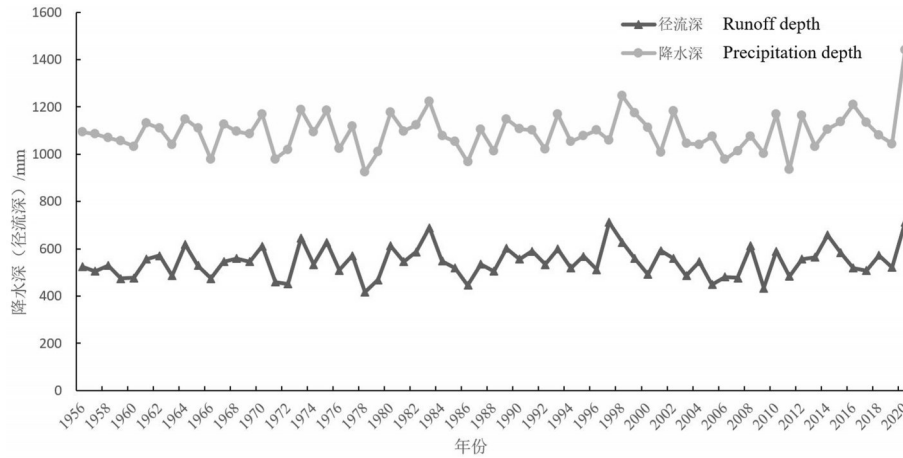


图3 长江流域1956—2020年均降水深、径流深变化图

Fig.3 Variation of annual precipitation depth and runoff depth in the Yangtze River Basin from 1956 to 2020

全国地下水年度统测工作,统测工作分丰水期和枯水期两期。长江流域每年7—8月、11—12月分别开展丰水期、枯水期统测,流域上游略早于下游。长江流域统测面积92万km²,主要在平原盆地区,包括四川盆地、昆明盆地、昭通盆地、江汉—洞庭盆地、南襄盆地、鄱阳湖周缘平原、长江皖江段、长江三角洲等地区。长江流域的浅层地下水是指第一个稳定隔水层以上的潜水或微承压水,深层地下水是第一个稳定隔水层以下的地下水,主要是承压水。统测结果显示,2020年度长江流域地下水水位基本保持稳定,丰枯季水位变差不大。总体上,长江流域浅层地下水位的下降,在上游较下游明显、流域北侧较南侧显著,主要集中在嘉陵江流域达州—巴中

和汉水流域南阳;长江中下游浅层地下水位以上升为主(图5a)。长江中下游深层地下水位以上升为主,只在洞庭湖南侧有所下降(图5b)。

长江上游四川盆地及嘉陵江流域大部分地区丰水期地下水水位与枯水期相比上升幅度集中在2 m以内。长江上游丰枯季地下水水位总体较浅,且丰枯季水位变化较小,原因是本次调查地下水井位均位于碳酸盐岩台面,地势平缓,周边有低山提供补给,且地势平缓区域多有地表河湖。长江中下游,江汉平原超过60%的地下水统测点2020年水位较2019年同期上升,上升幅度集中在0.5~2.0 m。南襄盆地浅层地下水水位呈下降趋势,平均变幅0.64 m,其他地区地下水水位变化较小,基本与2019年持

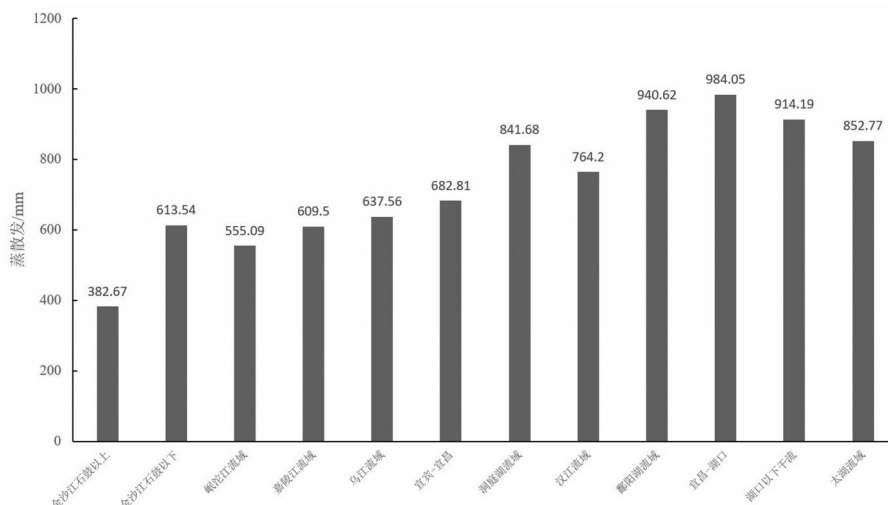


图4 2020年长江流域各二级流域蒸散量

Fig.4 Evapotranspiration of each secondary watershed in the Yangtze River Basin in 2020

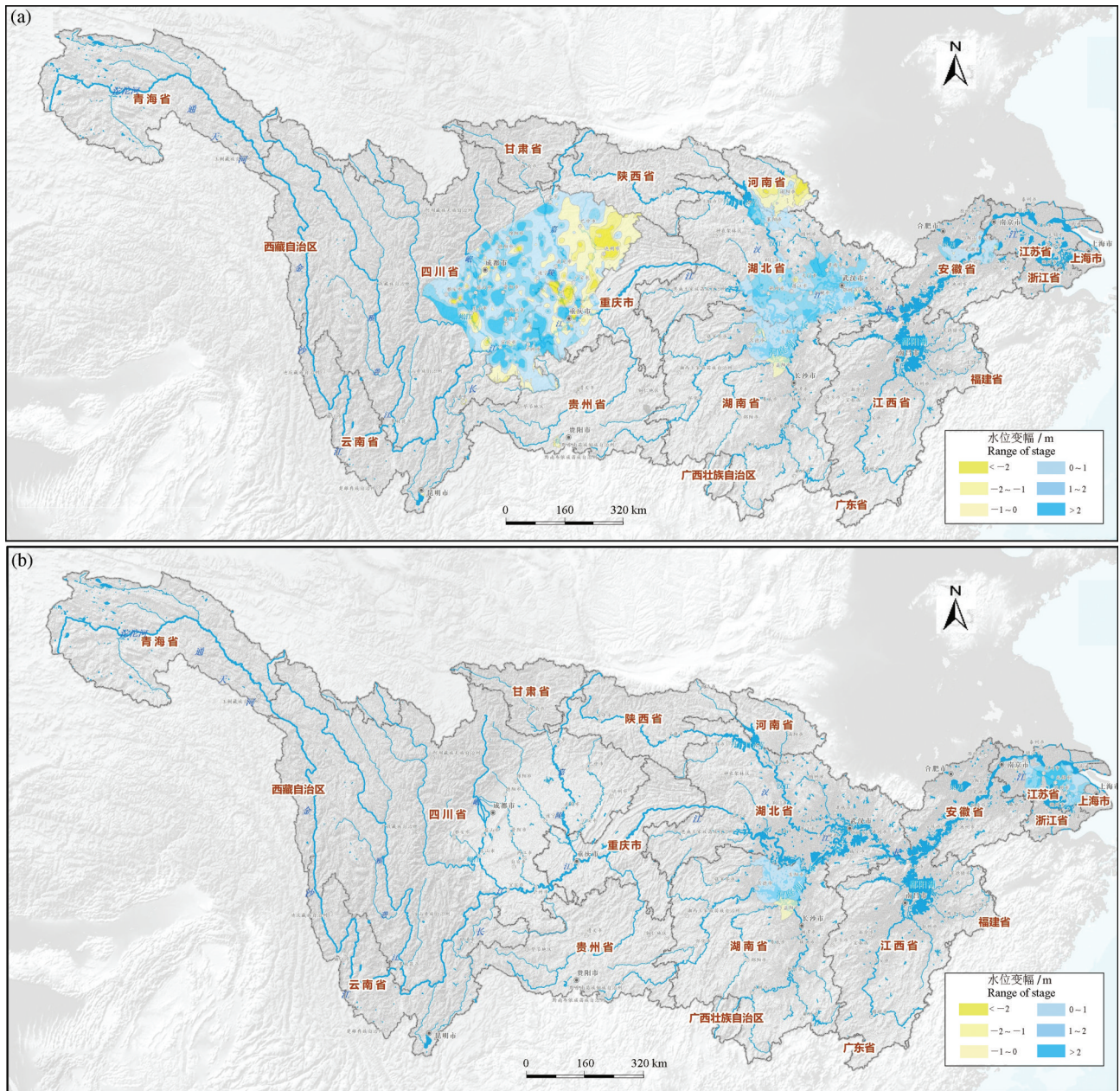


图5 2019—2020年长江流域重点平原盆地地下水位变幅图
a—浅层地下水;b—深层地下水

Fig.5 Variation of groundwater level in key plain basins of Yangtze River Basin from 2019 to 2020
a—Shallow groundwater;b—Deep groundwater

平。洞庭湖地区地下水位埋深一般0.1~7 m,水位高程一般20~45 m,受湖区地表水水量减少的影响,洞庭湖区地下水位目前呈普遍下降趋势,幅度不尽相同。

4.5 地下水降落漏斗变化

地下水资源在中国水资源中占有举足轻重的地位,由于其分布广、调蓄能力强、供水保证程度高,正被广泛地开发利用。然而,由于过去一段时

间内地下水的过度开采,水位下降至难以恢复,使某些区域形成大面积的降落漏斗。长江流域因地下水长期开采造成的水位下降区主要在南襄盆地和苏锡常平原等地区。

2020年度丰水期,南襄盆地浅层地下水位埋深在0.48~35.80 m,平均埋深12.10 m,平均水位高程为114.37 m,最大降幅为5.46 m,最大升幅为9.43 m(图6)。相比2019年,2020年南襄盆地统测区无新

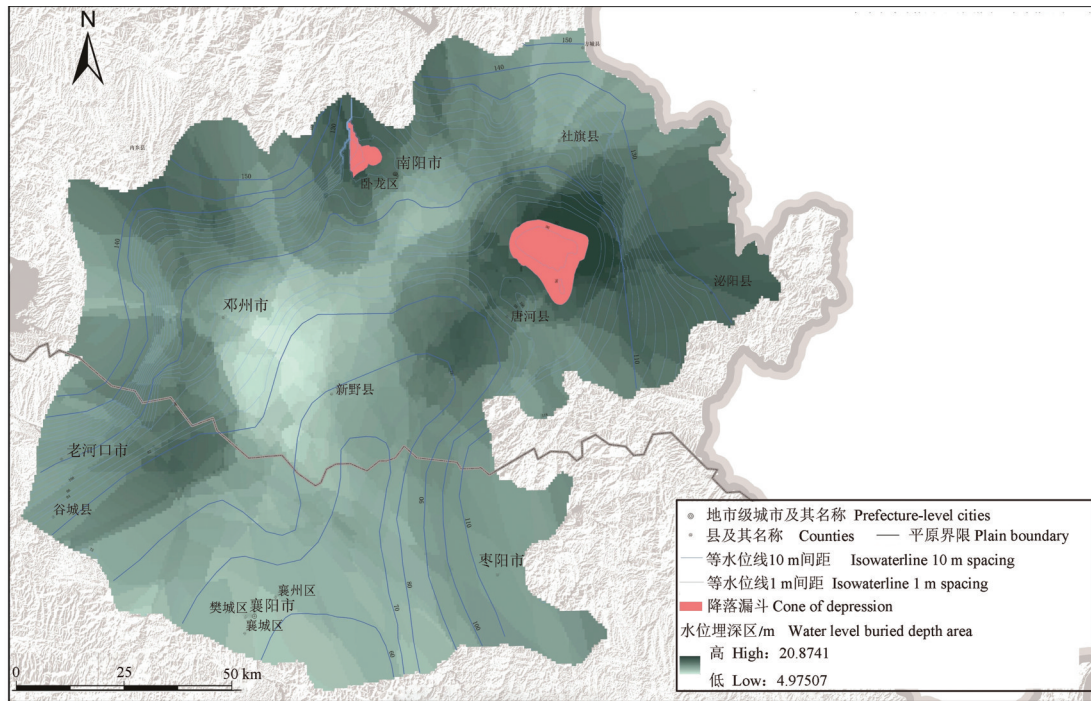


图6 2020年南襄盆地浅层地下水漏斗分布图

Fig.6 Distribution of shallow groundwater funnels in Nanxiang Basin in 2020

增地下水降落漏斗,原襄阳市区地下水降落漏斗因水位抬升已消失。原南阳市区地下水降落漏斗中心水位降幅约4.3 m,以112 m等水位线闭圈,漏斗面积增大48 km²,同比增大269%;原新野县地下水降落漏斗中心水位降幅1.2 m,以97 m等水位线圈闭,漏斗面积为230 km²,同比增大41.5%。

南襄盆地地下水主要补给来源为降雨入渗补给,排泄去向以人工开采为主。相比2019年,南阳市降雨量相对减少,但因市区集中供水、农田灌溉用水量的增大,使开采量增大1亿m³,南阳市地下水降落漏斗范围不断扩大;襄阳市相比2019年年降雨量增加约100 mm,开采量减少约0.3亿m³,使襄阳市地下水水位高程整体出现回升状态,襄阳市区漏斗已消失。

苏锡常水位降落漏斗是形成时间最早、分布面积最广、水位埋深最大的水位降落漏斗。地下水统测表明,苏锡常地区浅层地下水埋深总体较浅,浅层地下水水位整体相对稳定,季节性变化较明显。中部和东部的大部分地区地下水水位埋深小于5 m;在东部宁镇扬丘陵岗地地区多发育岩溶水和裂隙水,地下水埋深较大,整体埋深在20 m以内。浅层地下水水位高低与地形起伏相一致,整体上西

高东低,且越向西部,水位等值线越平缓。在无锡、常州地区出现零星小型地下水降落漏斗(图7)。

苏锡常地区深层地下水水位呈逐年上升趋势,北部深层水埋深较浅,南部和东南部苏锡常及南通地区水位埋深较大,且存大面积地下水降落漏斗。在常州市区、无锡市区及江阴地区存在相对较大面积的降落漏斗,中心水位埋深约45.62 m,面积约为439 km²;苏州吴江区漏斗范围较小,漏斗中心水位埋深约37.64 m。南通市区和海门漏斗中心水位埋深25.8 m。2020年,苏锡常地区深层地下水漏斗面积达到512.7 km²,相比2019年,降落漏斗总面积减小32.8 km²。漏斗中心最大水位埋深呈现波动状态,由2019年的136.5 m变化为135.8 m。苏锡常地区深层地下水禁采以来成效显著,区域性水位持续下降的局面得到有效控制。

长江流域地下水下降区(漏斗)面积普遍小于50 km²,在南襄盆地以及苏锡常平原地区分布面积相对较大。漏斗主要成因是工农业开采用水以及基坑开挖排水,随着地下水压采的实施,地下水漏斗面积在逐年减小。但地下水压采、禁采措施不是解决地下水资源开发与控制地面沉降矛盾的积极对策和科学方法。应从水文地质条件、地质环境等

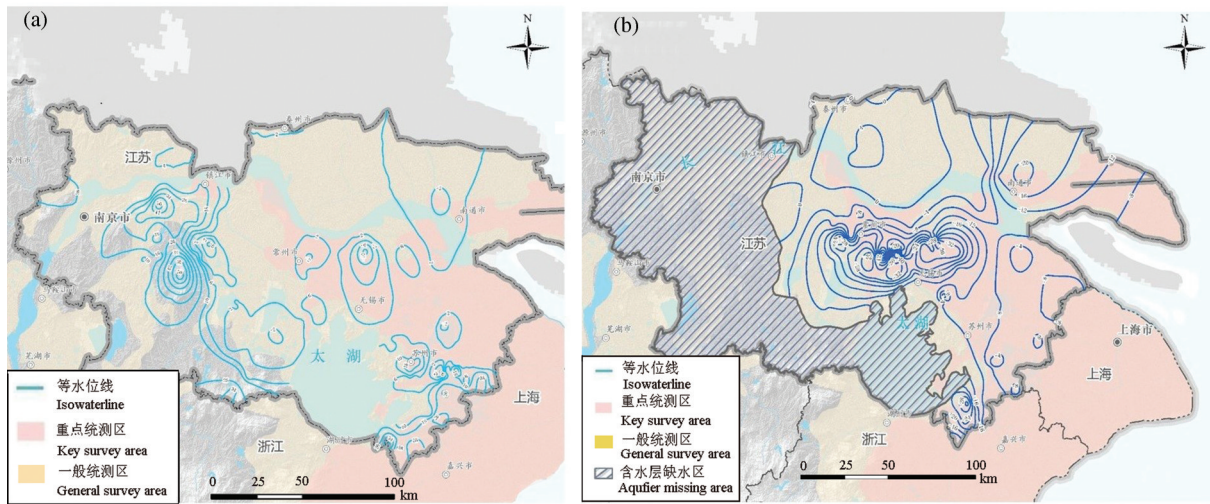


图7 苏锡常平原等水位线图

a—浅层地下水;b—深层地下水

Fig.7 Isowater level diagram of Suzhou-Wuxi-Changzhou Plain

a-Shallow groundwater; b-Deep groundwater

客观条件出发,根据地下水功能要求、水资源配置方案及地下水利用保护的需,对其实行宏观调控,形成地表水资源和地下水资源的统一规划、统一调度、统一利用的科学格局,合理利用浅层地下水资源,增加水资源调蓄能力。

5 地下水资源特征

5.1 地下水资源数量

5.1.1 地下水资源时空分布

长江流域多年平均地下水资源量为2468亿m³,约占全国地下水资源量的30.3%,其中山丘区地下水资源量为2255.8亿m³,平原区地下水资源量为

247.6亿m³。根据2006—2020年水资源公报和自然资源部地下水资源量统计结果,从年际变化来看(图8),长江流域地下水资源量最丰富的年份为2016年,达2706.5亿m³,其次为2010年,达2619亿m³。2011年由于旱情严重,地下水资源量仅为2138亿m³。长江流域地下水资源量在空间分布上具有一定的不均匀性,2020年长江上游(宜昌以上)地下水资源量为1132.19亿m³,占全流域的46.8%;长江中游(宜昌至湖口)地下水资源量为1125.67亿m³,占全流域的46.5%;长江下游(湖口以下)地下水资源量为163.84亿m³,占全流域的6.7%。

计算表明,2020年长江流域地下水资源量丰

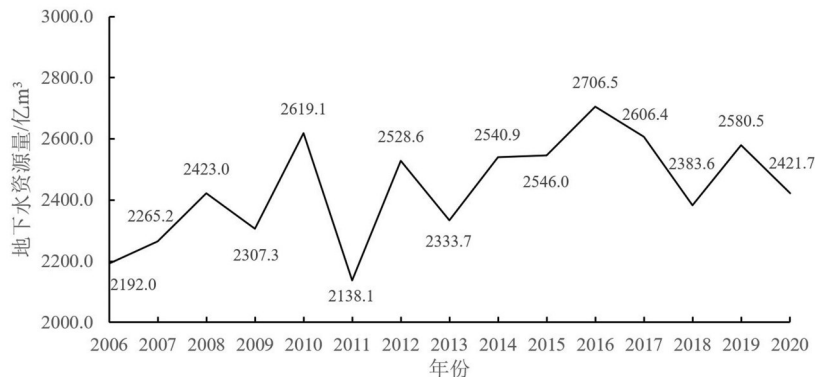


图8 长江流域2006—2020年地下水资源量变化图

Fig.8 Variation of groundwater resources in Yangtze River Basin from 2006 to 2020

表4 2020年长江流域二级评价分区地下水资源量(亿 m³)统计

二级区	山丘	平原	地下水	二级区	山丘	平原	地下水
金沙江流域区	427.91	9.8	437.71	洞庭湖水系区	511.52	1.24	512.76
大渡河—嘉陵江上游地区	218.14	0.09	218.23	江汉洞庭平原汇流区	1.22	111.54	112.66
四川盆地汇流区	236.91	56.22	293.13	鄱阳湖水系区	197.84	17.07	213.28
乌江流域区	183.12	0	183.12	巢湖及皖江汇流区	47.75	46.7	94.05
长江中游区	258.92	28.35	286.97	长江三角洲汇流区	9.46	60.34	69.79
				合计	2092.79	331.35	2421.70

富,总量为2421.7亿m³/a。其中,山丘区地下水资源量为2092.79亿m³/a;平原区地下水资源量为331.32亿m³/a。从长江流域各行政区和流域分区的地下水资源评价结果(表4、表5、图9、图10)中可以看出,地下水资源量最丰富的是四川省,为608.20亿m³/a,其次是湖南、湖北、江西、云南省。由于广东省在长江流域的面积仅为0.02万km²,其地下水资源量仅为0.08亿m³/a。山丘区地下水资源量相对丰富的省(自治区)是广西、湖南和贵州;平原区地下水资源量相对丰富的省份是四川省、江西省和湖北省。从二级流域来看,金沙江流域区、洞庭湖水系区和四川盆地汇流区地下水资源量丰富,平均地下水资源量可达414.5亿m³;长江三角洲汇流区、巢湖及皖江汇流区及江汉洞庭平原汇流区地下水资源量相对较少,平均地下水资源量仅为92.2亿m³,较少原因主要是流域面积较小,并且地下水大多以平原地下水为主。

根据各行政区在长江流域内所占面积,计算山丘区和平原区内单位面积地下水资源量(图11)。山丘区地下水资源量相对丰富的省(自治区)是广西、湖南和贵州,江苏省偏高的原因是山丘区计算

面积相对较小。平原区地下水资源量相对丰富的省份是四川省、江西省和陕西省,上海市偏高的原因是平原区计算面积相对较小,而青海、西藏、甘肃、云南等地区在本次评价过程中未计算平原区面积。总体上,长江中上游地区地下水资源量相对丰富,在整个长江流域地下水资源量占比较高,长江下游地区单位面积地下水资源量丰富,但流域面积较小,地下水资源总量有限。

5.1.2 典型平原、盆地地下水储变量

2020年,中国首次完成全国地下水储存量变化年度评价。通过对比长江流域2019年与2020年同期地下水位信息,结合给水度分布规律,利用MapGIS软件将地下水位变差、给水度分区空间叠加处理,计算出长江流域地下水资源储存量状况。通过地下水储存量变化计算可知,除乌江流域、南阳—襄阳盆地呈轻微减少外,长江流域2020年地下水储量较去年整体上呈增加趋势。2019—2020年长江流域主要平原盆地地下水储存量增加37.99亿m³,增加的主要是浅层地下水,储存量增加了37.43亿m³。其中四川盆地浅层地下水增加最为明显,共增加23.72亿m³(图12,表6)。

表5 长江流域各省地下水资源量(亿 m³)统计Table 5 Statistics of groundwater resources (10⁸m³) in each province of the Yangtze River Basin

行政区	山丘	平原	地下水	行政区	山丘	平原	地下水
青海	39.17	0	39.17	湖南	420	36.6	456.6
西藏	14.16	0	14.16	广东	0.08	0	0.08
四川	542.1	66.1	608.2	广西	25.44	0	25.44
甘肃	39.28	0	39.28	江西	202.42	17.04	219.06
云南	139.42	0	139.42	福建	1.73	0	1.73
贵州	204.41	0	204.41	安徽	44.71	38.88	81.96
重庆	116	0	116	浙江	6.45	3.29	9.74
湖北	185.27	87.53	272.7	江苏	6.21	51.07	57.29
河南	12.48	12.39	24.57	上海	0	13.83	13.83
陕西	93.47	4.6	98.07	总计	2092.79	331.34	2421.7

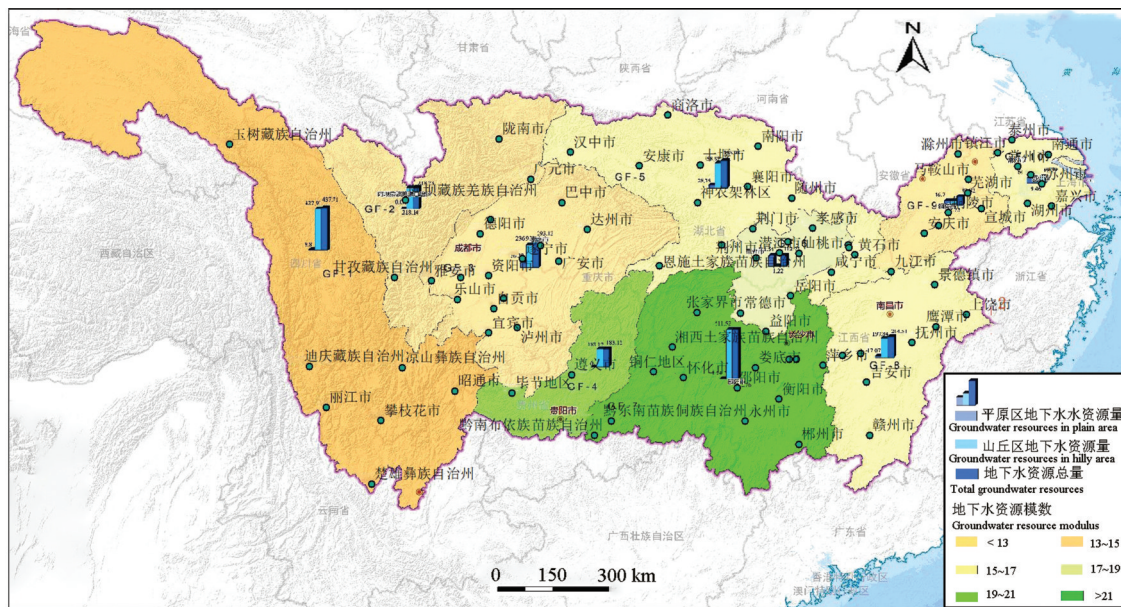


图9 2020年长江流域地下水资源分布图

Fig.9 Distribution of groundwater resources in Yangtze River Basin in 2020

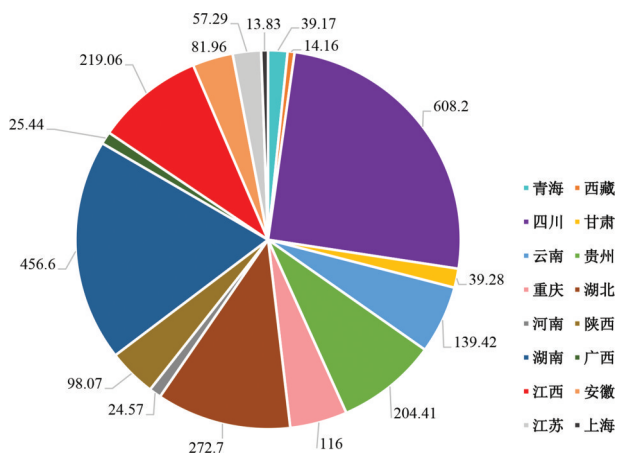


图10 2020年各省地下水资源量(亿m³/a)占比图

Fig.10 Proportion of groundwater resources in each province in 2020

长江流域的水储量的来源主要有区域地表水、冰川积雪水储量、土壤水储量和地下水储量,水储量会由于降水入渗而增加,随着土壤水分蒸发、植被蒸腾、河流输送以及向深层地下的渗透等过程而减少(严家宝等, 2016)。地表径流量的变化与引水工程有关,如丹江口水库本年度向北方供水达83.5亿m³,导致汉江流域水量减小;南水北调东线工程本年度调入山东6.74亿m³,使长江下游径流量减小。2020年长江中下游平原盆地地下水储变量增多,岩溶区地下水储变量减小。由于地下水循环速

度缓慢,相对于土壤水和地表水,地下水动态的季节性变化阶段可能会对总水储量幅度产生抑制作用(胡宝怡等, 2021)。总体而言,虽然长江流域水平衡各要素时空分布不均,并且不断地发生改变和转化,但流域整体水资源仍处于均衡的状态。

5.2 地下水质量

目前,我国地下水受到城市化、工业化、农业和矿业活动导致的水质恶化的威胁,一些地区城市污水、生活垃圾填埋场渗滤液以及化肥农药等的大量施用,导致污染区域正逐步从浅层地下水向深层地下水转移(李圣品等, 2019)。除此之外,超量开采地下水还可能引发海/咸水入侵,砷、铁和锰等原生污染物的溶解等,都会直接或间接的影响到人类生产生活。保证长江流域地下水水质良好在整个“长江大保护”中占据重要地位。

总体上,2020年长江流域地下水水质在流域上游优于中下游,云贵渝等岩溶水分布区的水质明显好于其他地区(图13、表7)。

5.2.1 上游地下水质量

长江流域上游主要涉及省份有四川、甘肃、青海、西藏以及重庆、贵州、云南等地。四川、甘肃、青海、西藏依据2019年国家地下水监测工程水质监测数据评价,评价选取监测点共计238个,常规指标中的铁、铜、亚硝酸盐、氰化物、碘化物、汞、硒、镉等8

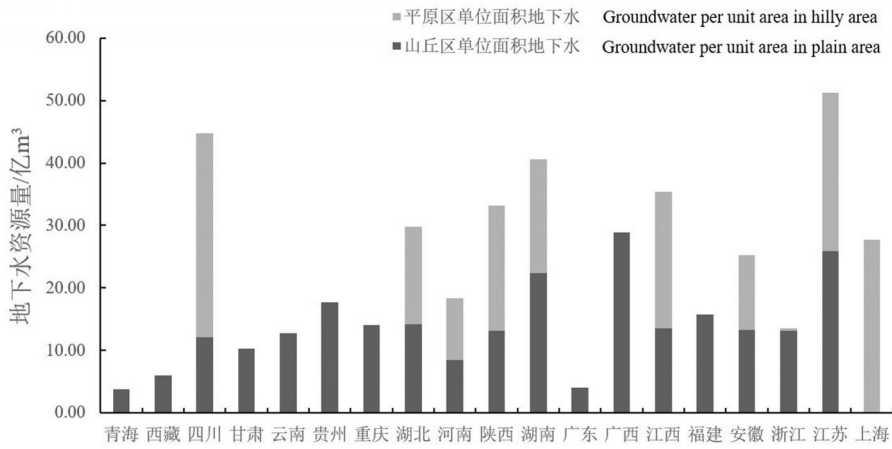


图11 各省丘陵区、平原区单位面积地下水资源量图

Fig.11 Map of groundwater resources per unit area in hilly and plain areas of each province

项均未出现Ⅲ类水质,其他项指标中出现Ⅳ、Ⅴ类水质。Ⅳ、Ⅴ类水中含量较高的一般化学指标及毒性指标为锰、铝、总硬度、硫酸盐及溶解性总固体,占比依次为36.97%、33.19%、19.33%、12.61%、11.34%,是导致评价区地下水水质较差的主要因子。本次多项指标综合评价分为一般评价标准和考虑原生背景组分两种层面进行,评价结果显示,在不考虑原生背景组分(锰、铝)的情况下,地下水水质评价结果以Ⅱ类水居多,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类水占比分别为15.55%、51.68%、0.84%,总占比达68.07%(图14)。

贵州、云南及重庆用于地下水水质评价样品数共997组,其中,贵州省评价样品数594组,云南省评价样品数208组,重庆市评价样品数195组。根据地下水水质评价结果及野外调查,贵州省、云南省、重庆市地下水水质总体良好,Ⅰ~Ⅲ类水总计在各省占比分别为96.3%、93.7%、95.9%。对贵州、云南和重庆市引起水质超标的重要影响指标进行统计,Ⅳ类水中中首要贡献因子为Pb,其次为亚硝酸(NO₂⁻)。除常规的水化学指标NO₃⁻和NO₂⁻外,有毒重金属Pb、Cd、Cr⁶⁺和类金属As的贡献率也较高,其中Pb的贡献率高达51%。F⁻的贡献率也超过

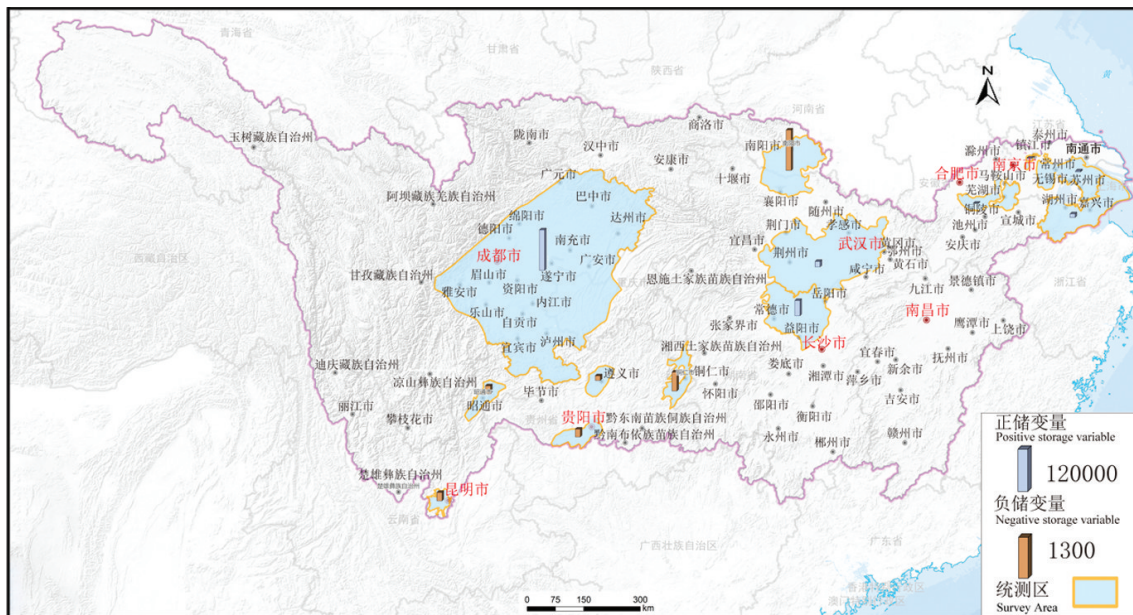


图12 长江流域主要平原盆地地下水储变量

Fig.12 Change of the groundwater storage in mainplain basins of Yangtze River Basin

表6 长江流域2019—2020年主要平原盆地地下水储变量

Table 6 Chang of the groundwater storage variables in main plain basins in Yangtze River Basin from 2019 to 2020

统测区	面积/km ²	地下水类型	埋深	储变量/亿 m ³
铜仁天星—朱家场片区	371.81	裂隙岩溶承压水	浅层	-0.12
贵阳周边平坝区	73.54	裂隙岩溶型潜水	浅层	-0.05
红枫湖水源地及周边	487.69	裂隙岩溶型潜水	浅层	-0.06
昆明盆地	324.51	孔隙型潜水	浅层	-0.05
昭通盆地	245.36	孔隙型潜水	浅层	-0.05
四川盆地	177861.48	孔隙型潜水	浅层	23.72
南襄盆地	17500	孔隙/裂隙岩溶型混合水	浅层	-0.26
江汉平原	46800	孔隙/裂隙岩溶型混合水	浅层	3.15
洞庭平原汇流区	15600	孔隙型混合水	浅层	8.97
长江三角洲汇流区	5018.81	松散岩类孔隙型潜水	浅层	2.08
巢滁皖及沿江诸河区	7027.12	孔隙型潜水	浅层	0.1
青戈江和水阳江及沿江诸河	493.13	孔隙型承压水	中层	0.04
太湖水网及崇明岛南通诸河	11340.97	孔隙型承压水	中层	0.52

10%, Se也有一定贡献率(图15a)。V类水中中首要贡献因子为Pb,其次为亚硝酸(NO₂⁻)。除常规的水化学指标NO₃⁻和NO₂⁻外,有毒重金属Pb、Cd、Hg和类金属As的贡献率也较高,其贡献率都超过了10%,Pb的贡献率超过30%。As、F⁻和I⁻的贡献率也超过20%(图15b)。

5.2.2 中下游地下水质量

长江中下游流域(江西、湖南、湖北、江苏、安徽、上海)共收集有2065个地下水水质监测点,整体

上,长江中下游流域地下水水质情况并不乐观。其中,I类水共58个点,占比2.8%;II类水共120个点,占比5.8%;III类水共375个点,占比18.2%。V类水分布区主要集中在长江三角洲汇流区、江汉平原地区,洞庭湖周边、汉江沿岸以及鄱阳湖北部的区域也分布较广(图16)。

长江中游江西省、湖南省地下水水质情况有明显改善趋势,主要改善的指标为浑浊度、氯化物等水质指标,可能由于年降水量明显增多使各项污染

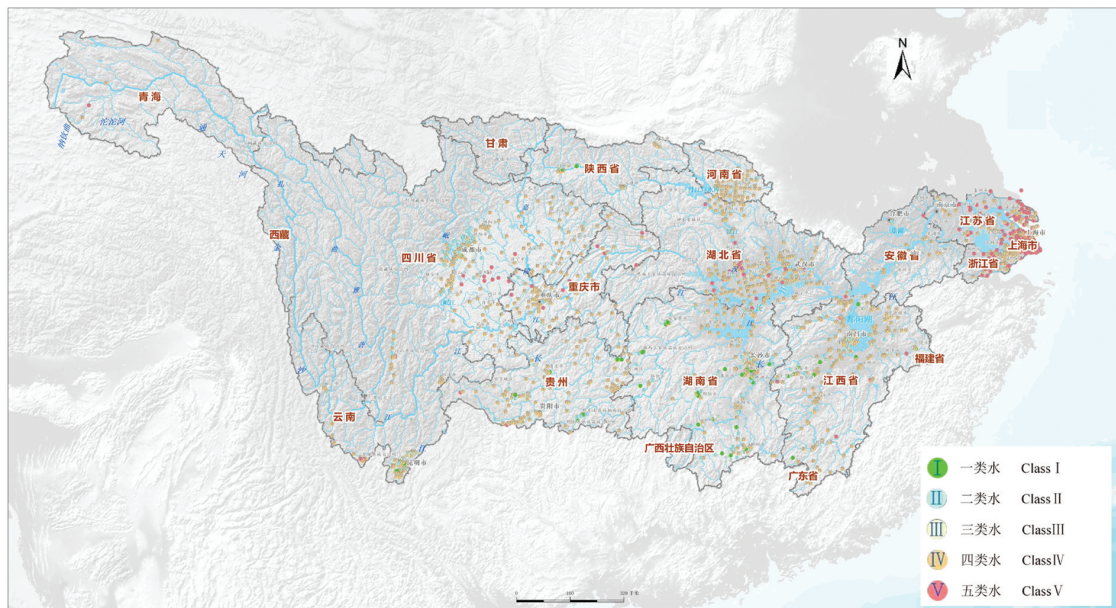


图13 2020年长江流域地下水水质图

Fig.13 Groundwater quality map of Yangtze River Basin in 2020

表7 长江流域地下水(个数)水质统计
Table 7 Statistics of groundwater quality in Yangtze River Basin

水质类别	I~III	IV	V
上游	954	177	28
中游	949	647	505
下游	1047	716	593
合计	2950	1540	1126

元素浓度下降,造成了水质改善。优质地下水主要分布在江西赣南地区、大别山南麓一带和湖南澧水澧县以上地区。江西赣南地区约有3/4的监测点WQI指数均处于50以下,处于清洁状态。溶解性总固体在潜水含水层和承压含水层中表现相近,平均值分别为240.3 mg/L、237.9 mg/L,符合地下水I类水标准,整体情况较好。赣南兴国发现了稀有的富锂富锶优质天然饮用矿泉水,其中锂含量是国家标准的8倍,该特色矿泉水有效支撑了脱贫攻坚(龚磊等, 2019)。

5.2.3 水质超标原因浅析

长江上游水质超标项主要是锰、铝,超标原因与原生环境相关。例如成都平原、峨眉平原等冰积泥砾含水层中有锰结核,在地下水运移、溶解作用下,使得地下水普遍含锰量较高,而铝是地壳中含量居第三的元素,土壤中铝元素溶解进入天然水体,所以天然水体或多或少有一定量的铝。青海、西藏、四川、甘肃四省某些地区水质较差是由于取样点集中分布在四川

盆地,原生劣质水分布广泛,在自然条件下铁、锰的含量就已经超标,虽然对Fe、Mn超标的监测点,水质等级均下调一级,但原生劣质地下水仍会影响其他指标,如肉眼可见物、浑浊度等。

长江中游地区的湖北省、安徽省地下水水质略有恶化趋势,安徽省砷等重金属元素的恶化是使水质情况下降的主要原因,可能是由于2019年降水量减少使各项污染元素浓度增加造成了水质恶化。湖北省肉眼可见物、铁、COD超标情况最为严重,浑浊度、砷、氨氮,可能是由于降水量减少和当地的农业活动造成了水质恶化。

长江下游水质相对较差,江苏省、上海市地下水水质情况有恶化趋势,汛期降水量减少使各项污染元素浓度增加造成了水质恶化,上游污染和河海相互作用的影响导致污染元素富集。沿海地区由于海陆交互作用,钠、氯化物、碘化物、溶解性总固体等指标会受到自然影响,铁、锰离子的形成是水化学作用、离子交换吸附、“盐”效应等综合作用的必然结果(曾昭华, 1994),也是本次水质评价结果中铁锰含量较高的重要原因。

6 地下水开发利用及相关地质环境问题现状

6.1 地下水开发利用现状

地下水在社会经济发展中具有重要作用,合理

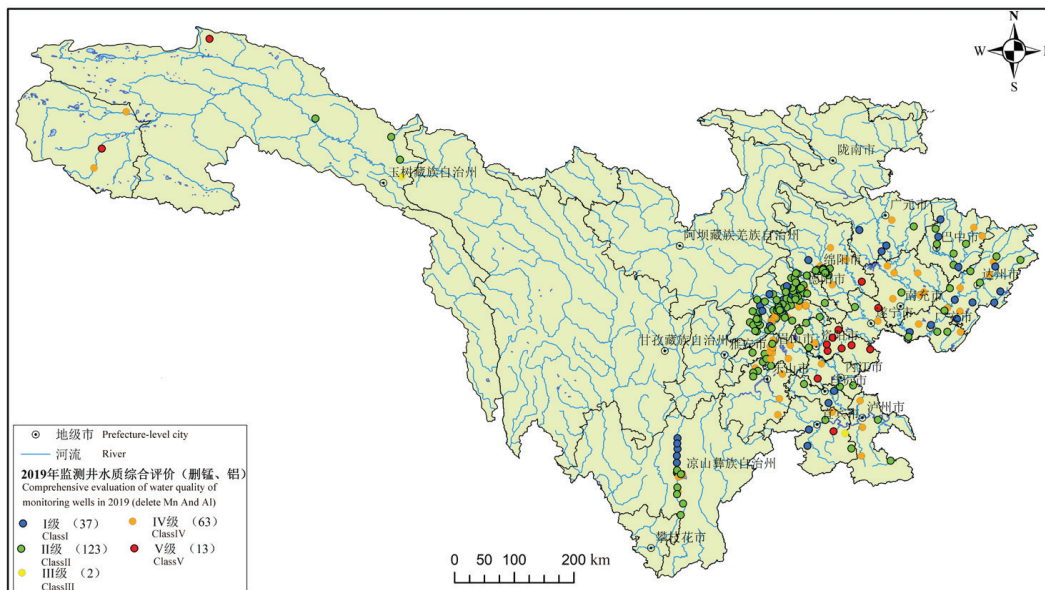


图14 四川、甘肃、青海、西藏地下水评价结果空间分布图

Fig.14 Spatial distribution map of groundwater evaluation results in Sichuan, Gansu, Qinghai and Tibet

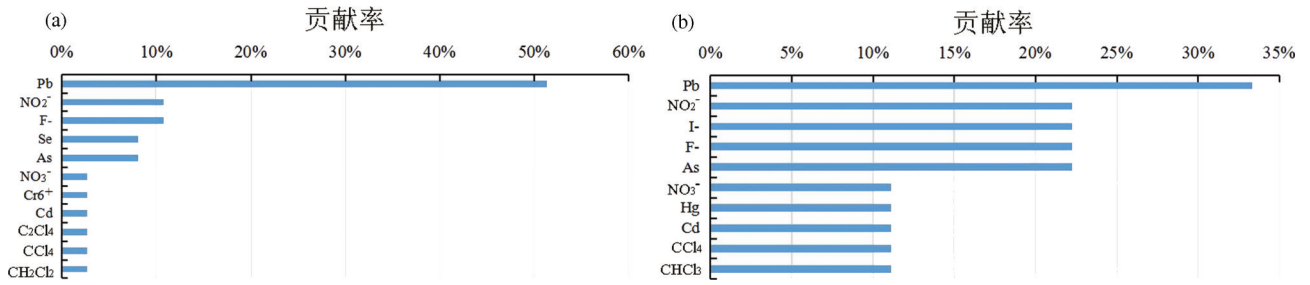


图 15 长江流域云贵渝Ⅳ类(a)、Ⅴ类(b)地下水水质影响指标贡献率统计图

Fig.15 Statistical diagram of contribution rate of groundwater quality impact indicators in Yunnan, Guizhou and Chongqing (a) and V (b) of Yangtze River Basin

开发利用地下水资源是在“长江大保护”背景下的新的机遇和挑战(王政祥等, 2008; 景佳俊等, 2019)。长江流域地下水资源丰富,降雨和地表径流对地下水的补给充足,与全国其他流域特别是北方地区相比,长江流域地下水开发利用水平较低,2006—2019年均地下水开采量仅为地下水资源量的3.21%(图17)。

长江上游西部地区人口稀少,地形复杂,耕地分散,开发难度较大,水资源开发利用的工程条件较差,水资源开发利用程度较低;下游地区,特别是长江三角地区人口密集,经济较发达,开发利用条件相对较好,其水资源开发利用程度较高。按水资

源二级区统计,地下水开采总量最多的为洞庭湖水系,其开采量为20.82亿m³,占长江流域地下水开采总量的25.14%,其次为汉江,开采量为16.48亿m³,占长江流域地下水开采总量的19.90%。石鼓以上二级区地下水开采量最少,仅0.03亿m³。

中国人均地下水拥有量为172.97 m³,人均地下水资源拥有量与经济发展增加的用水需求之间的矛盾加深,尤其是长江下游地区,2020年,上海市的人均地下水资源仅为56.96 m³(图18)。长江流域人均地下水资源区域分布与地区经济发展水平呈反比,在经济发达的江浙沪地区,人均地下水资源较少,而在经济欠发达的西南地区,人均地下水资源

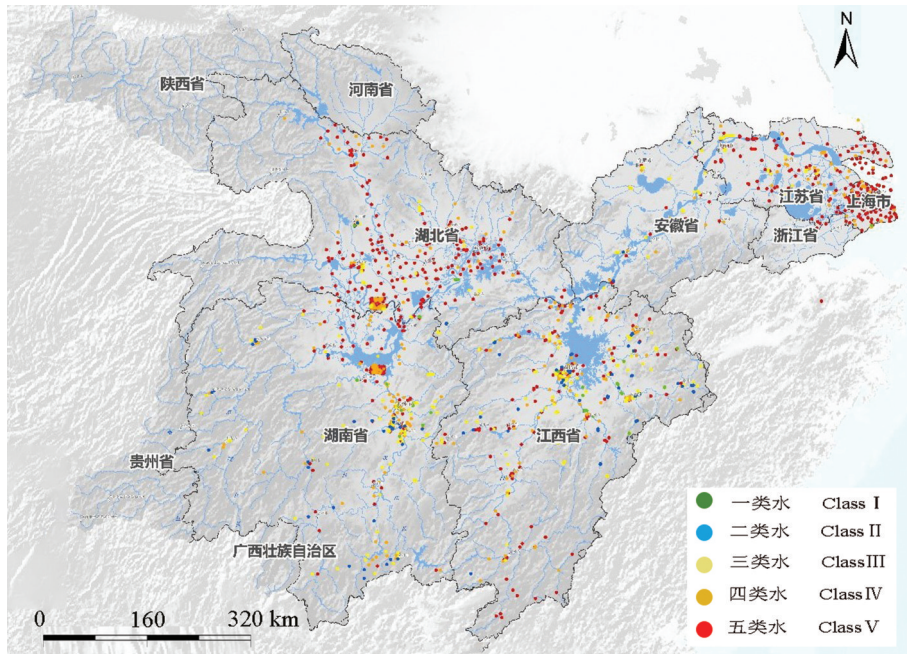


图 16 2020年长江中下游流域地下水水质略图

Fig.16 Groundwater quality map of the middle and lower reaches of the Yangtze River in 2020

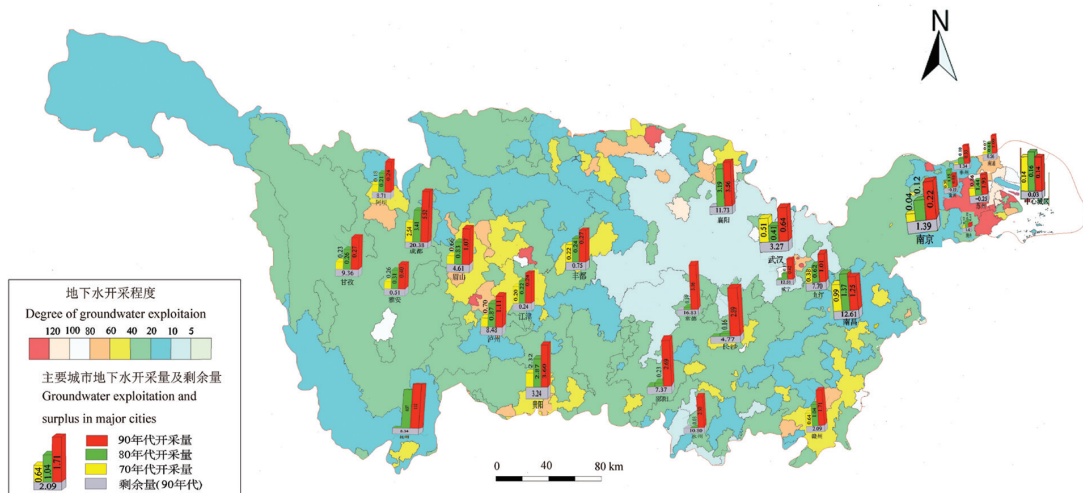


图17 长江流域地下水开发利用现状

Fig.17 Current groundwater development and utilization in Yangtze River Basin

超过了平均水平。2020年,长江流域人均地下水拥有量排名前三的分别是四川省、青海省、湖南省,分别为723.21 m³、644.43 m³、659.98 m³;万元产值地下水用水量排名前三的分别是青海省、四川省、贵州省,分别为130.31 m³、125.15 m³、114.67 m³(图18),广东、福建在长江流域所占面积较小,故未纳入地下水资源配置的计算。

长江流域水资源总量虽较丰沛,但时空分布不均,供水工程不足,水资源开发利用仍存在一系列问题。局部地区供用水矛盾较为突出。根据长江流域综合规划现状供需平衡分析结果表明,50%、75%、90%保证率情况下全流域分别缺水14亿m³、38

亿m³和101亿m³,主要集中在四川盆地腹地、滇中高原、黔中、湘南湘中、赣南、唐白河、鄂北岗地等地区;工程性、资源性和水质性缺水并存。长江流域以工程性缺水为主,上游和河源的局部地区存在资源性缺水问题,中游地区人类活动是造成下游地区地下水补给能力减弱、地下水水位持续下降和生态环境退化的重要因素(张光辉等,2004)。下游地区特别是一些沿江城市和部分湖泊存在水质性缺水情况,局部地区存在深层承压水利用量较大的现象;农村饮水安全缺乏保障。部分农村地区高氟水、高砷水、苦咸水分布区及血吸虫病疫区严重;用水效率不高。部分地区水资源利用方式还很粗放,节水管理与节水技术还比较落

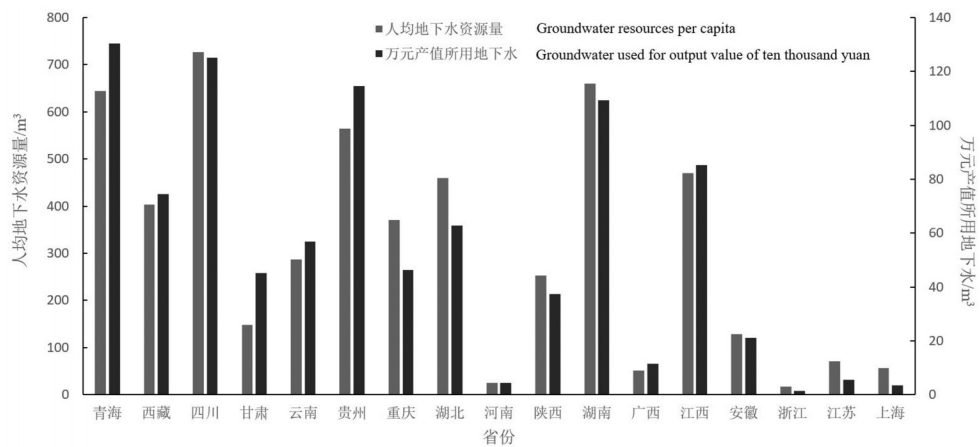


图18 长江流域人均用水量和万元产值用水量

Fig.18 Per capita water consumption and water consumption per 10,000 yuan of output value in the Yangtze River Basin

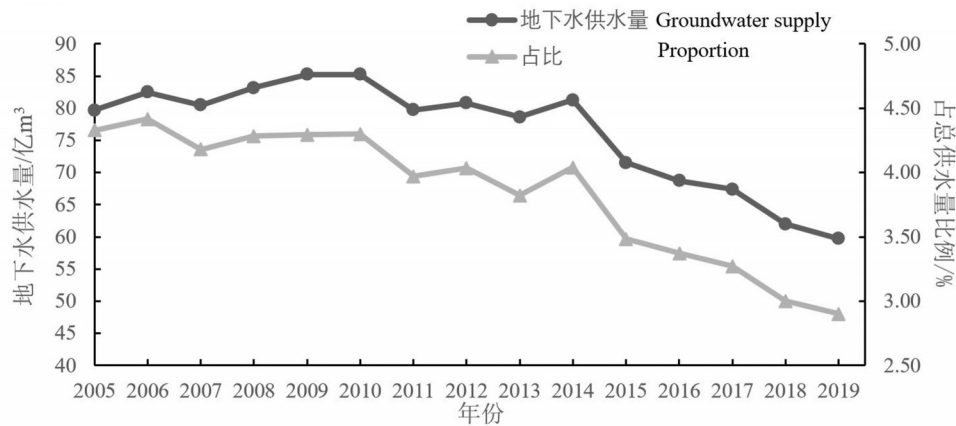


图 19 2005—2019 年长江流域地下水供水量及所占比例变化图

Fig.19 Groundwater supply and its proportion in Yangtze River Basin from 2005 to 2019

后,用水浪费现象仍较严重。

分析地下水供水量数据表明:长江流域地下水供水量总体呈下降趋势,开发利用程度逐年降低。地下水供水量的变化分为两个阶段,第一阶段:2005—2014年,地下水供水量总体保持稳定;第二阶段:2014—2019年,地下水供水量显著减少,由81.28亿m³降至59.7亿m³。原环境保护部2011年发布的《全国地下水污染防治规划》要求到2015年初步遏制地下水水质恶化趋势。在此背景下,长江流域自2014年起,地下水供水量显著减小。地下水供水量在总供水量中的占比也呈下降趋势,2005年为4.33%,2014年降至4.04%,2019年占比2.9%,2020年仅占2.6%(图19)。

长江流域地下水类型复杂且分布不均,含水岩组及富水性的空间分布差异很大,各地区地下水开发利用潜力也不均衡。长江三角洲及河谷平原区松散岩类孔隙水水量丰富,但由于历史原因,深层承压水利用量较大且水质较差,不易大规模开发地下水;红层孔隙裂隙水地区水资源总体匮乏但局部存在富水地段(带),贫中有富。其富水规律较强。在这些富水地段,开采地下水可以解决或部分解决红层孔隙裂隙水地区的人畜饮水困难和灌溉用水问题,具有较好的开发利用前景。长江流域基岩裂隙水广泛分布,水质相对较好,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。

6.2 与地下水开发利用相关的地质环境问题状况

在长江流域地下水资源开发利用水平整体较低

的情况下,局部地区不合理开发利用地下水引发了一系列生态环境和地质问题(张光辉等,2008),主要包括:岩溶塌陷、地面沉降、海水入侵和咸水上溯。

长江流域上游云、贵、渝和湘西、鄂西等地区处于中国西南岩溶石山地区,山区多为裸露型岩溶,谷地为覆盖型岩溶,碳酸岩中岩溶发育,多形成较大规模溶洞和地下河管道,是地下水赋存和运移的主要场所。在自然及不合理的人为工程活动影响下,易在浅埋藏的洞穴分布地带发生地面岩溶塌陷,主要发生于云贵高原的六盘水、织金市、安顺市等岩溶石山区和重庆市万盛、三汇、青木关槽谷等地区。长江流域中下游岩溶塌陷主要分布于湖北省的武汉市、黄石、鄂州沿江地区,江西省瑞昌—九江—彭泽沿江地区及乐平—丰城—萍乡一带,安徽省的铜陵、安庆、池州、东至及宣城宣州区等地(铜陵、安庆地区最为严重,因铜矿、煤矿开采或供水,大量疏干和抽取岩溶水),湖南省湘中,以及湘东、湘南等地的覆盖岩溶水发育地段。上述岩溶塌陷区,应慎重开发岩溶地下水,必须开发利用时,要科学控制采水量,做好水量、水位、地面塌陷监测。在岩溶地面塌陷高易发区应禁止开发。

地面沉降主要是由于地下水水位下降,导致地层内部压力失衡,含水层本身及顶、底板黏性土层失水压密而引起的。长江流域的地下水水位降落漏斗分布地区大多发生了不同程度的地面沉降,地面沉降区的范围与地下水水位降落漏斗的分布范围基本一致。对比2019年与2020年地下水统测结果,在长三角地区现有的709个统测点中,水位不变

及上升的点634个,占比89.4%,水位下降的点75个,占比10.6%。区域性地下水位持续下降的趋势得到了缓解,2020年苏锡常地区深层地下水漏斗面积达512.7 km²,相比2019年面积减少32.8 km²,水位上升0.7 m。上海第一承压含水层水位稳中有升,第二及以下的承压含水层水位呈缓步回升,降落漏斗分布与2019年相同,其中第五承压含水层降落漏斗面积减少了119 km²,水位上升1.01 m。杭嘉湖地区除杭州城区附近,湖州南浔,海盐县等局部区域地下水位呈下降趋势外,其他区域均为上升趋势。本世纪初以来,长江三角洲地区通过压缩地下水开采量、调整地下水开采层次、实施地下水人工回灌等一系列措施,地面沉降速率逐年减缓,地面沉降得到了有效控制。目前年均地面沉降量持续保持在6 mm以内,区域性水位持续下降的局面得到了有效控制,水位呈现上升的态势(姜月华等, 2017, 2019)。

海水入侵是中国沿海地区开采地下水普遍存在的一个环境地质问题。长江流域的苏锡常、杭嘉湖和上海地区由于属沿海地区,且经济发达,早年地下水开采量大,地下水位下降后,淡水、海水间的平衡遭到破坏,海水入侵,导致地下水水质恶化。咸水上溯是河-海作用的集中体现,由于沿江用水量增加和枯季入海流量减少,导致咸水入侵不断增强,河口地区咸水入侵日趋严重,已影响到三角洲地区的经济发展。随着全球气候的变化,海平面上升,南水北调等长江调水工程的实施,河-海作用将进一步复杂化,河口地区咸潮入侵将加剧,极端干旱事件发生的频率和范围可能增加,水资源安全保障存在很多不确定性因素。在枯水时段应采取联合调度措施,当长江下游干流及河口地区供水紧张和咸潮入侵严重时,跨流域调水工程应采取避让措施,保障长江下游干流及河口地区供水安全。

7 结论与建议

7.1 结论

(1)长江流域降水的地区分布不均,总体上东部大于西部,南部大于北部,中游大于上游;长江流域蒸发空间分布大体上呈现东部高于西部,低海拔高于高海拔,干流附近高于其他地区的特征;长江

流域径流量年际变化较大,年内分配与降水相同,主要集中在夏季。

(2)2020年度长江流域地下水水位总体保持稳定,丰枯季水位变化总体不大,局部地区地下水降落漏斗面积减小,地下水位呈回升趋势。长江流域地下水储变量较去年整体上呈增加趋势,但是在乌江流域呈轻微减少状态,四川盆地增加最为明显,共增加23.72亿m³。

(3)长江流域总体地下水资源量丰富,2020年地下水资源总量为2421.7亿m³。其中,山丘区地下水资源量为2092.79亿m³,平原区为331.32亿m³。长江中上游地区地下水资源量丰富,在整个长江流域地下水资源量占比较高,长江下游地区单位面积地下水资源量丰富,但流域面积较小,地下水资源总量有限。

(4)长江流域水环境总体优良,长江流域的水质上游优于中下游,云贵渝等岩溶水分布区的水质明显好于其他地区。部分地区锰、铝含量偏高的原因是降水量的减少和原生劣质水的广泛分布。

(5)长江流域地下水开发利用水平整体很低,地下水资源开发利用潜力大,局部地区由于以往不合理的开发所引发的环境地质问题已大为改善,岩溶塌陷、地面沉降等问题得到了较好的控制。

7.2 建议

(1)地下水资源开发利用:一是发挥地下水资源的补充调节作用,在四川盆地、衡邵盆地、吉泰盆地和赣南地区等季节性缺水地区,充分开发利用地下水资源;二是统筹规划,科学开发利用赣南地区和大别山南麓一带优质的基岩裂隙水,发展矿泉水产业,支撑乡村振兴。

(2)地下水资源环境保护:控制湿地及其周边地区地下水开发利用,保护湿地环境;继续控制区域地面沉降、岩溶地面塌陷易发区地下水开采,限制海水入侵区地下水开采。

(3)水资源调查监测工作:进一步完善地表水和地下水监测站点等基础设施建设,完善长江流域地表水-地下水一体化监测体系;加强全球变化条件下和人类活动影响下的水量、水质、水生态变化的研究,重点关注厄尔尼诺、水利工程活动影响下的水资源变化分析,采矿活动、隧道工程等地下工程

活动和农耕活动对水循环、水环境的影响。

References

- 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).
- Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources. 2018. Water resources bulletin of Yangtze River Basin and Southwest Rivers (1998– 2018). Wuhan: Changjiang Water Resources Commission(in Chinese).
- Chen Fan, Chen Li, Zhang Wei, Han Jianqiao, Wang Junzhou. 2019. Responses of channel morphology to flow– sediment variations after dam construction: A case study of the Shashi Reach, middle Yangtze River [J]. *Hydrology Research*, 50(5): 1359–1375.
- Fan Kexu, Xu Changjiang, Zhang Jing. 2011. Evaluation of Water Resources Quality in Yangtze River Basin[J]. *Yangtze River*, 42(18): 62–64,72 (in Chinese).
- Gao Yu, Chen Li, Zhang Wei, Li Xin, Xu Quanxi. 2021. Spatiotemporal variations in characteristic discharge in the Yangtze River downstream of the Three Gorges Dam[J]. *The Science of the Total Environment*, 785: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147343>.
- Ge Jianzhong, Zhang Jingsi, Chen Changsheng, Ding Pingxing. 2021. Impacts of fluvial flood on physical and biogeochemical environments in estuary– shelf continuum in the East China Sea [J]. *Journal of Hydrology*, 598: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126441>.
- Gong Lei, Wang Xinfeng, Song Mian, Li Hongyan, Xiao Zeyou, Hu Qifeng, Wang Jin, Wu Linwei, Wang Lei, Miu Sai. 2019. 1:50000 hydrogeological survey data set of Xingguo and Ningdu in Southern Jiangxi[J]. *Geology in China*, 46(S1): 11–17 (in Chinese).
- Han Yufang, Lu Chuanteng. 2019. Characteristics of water and sediment changes and riverbed evolution in the Yangtze River after the Three Gorges Project[C]//The 19th China Symposium on Ocean (Shore) Engineering, Chongqing, China (in Chinese with English abstract).
- Hu Baoyi, Wang Lei. 2021. Terrestrial water storage change and its attribution: A review and perspective[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 52(5): 13–25(in Chinese with English abstract).
- Hu Peng, Tao Junyu, Ji Aofei, Li Wei, He Zhiguo. 2021. A computationally efficient shallow water model for mixed cohesive and non– cohesive sediment transport in the Yangtze Estuary [J]. *Water*, 13(10): <https://doi.org/10.3390/w13101435>.
- Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Yi Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yizhong, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Cheng. 2017. Research on conditions of resources and environment and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Geology in China*, 44(6): 1045–1061(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuehua, Zhou Quanping, Chen Lide, Ni Huayong, Lei Mingtang, Cheng Heqin, Shi Bin, Ma Teng, Ge Weiya, Su Jingwen, Li Yun, Tan Jianming. 2019. Progress and main achievements of geological environment comprehensive investigation project in Yangtze River Economic Belt[J]. *Geological Survey of China*, 6(5): 1–20 (in Chinese with English abstract).
- Jing Jiajun, Guan Zhen, Shan Yuyang, Jing Jiayuan. 2019. Present situation of groundwater exploitation and utilization and analysis of potential water sources in abundant plain area[J]. *Geological Survey of China*, 6(3): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- Li Haitao, Feng Wei, Wang Kailin, Zhao Kai, Li Gang, Zhang Yuan, Li Muzi, Sun Lu, Chen Yichao, You Bing. 2021. Background, characteristics, and exploitation potential of groundwater resources in Xiong’an New Area[J]. *Geology in China*, 48(4):1112–1126(in Chinese with English abstract).
- Li Shengpin, Li Wenpeng, Yin Xiulan. 2019. Distribution and evolution characteristics of national groundwater quality from 2013 to 2017[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 46(6): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoqian, Gan Yiqun, Zhou Aiguo, Liu Yunde. 2015. Relationship between water discharge and sulfate sources of the Yangtze River inferred from seasonal variations of sulfur and oxygen isotopic compositions [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 153: 30–39.
- Meng Xianmeng, Zhang Pengju, Leng Ao, Zhou Bo, Liu Dengfeng. 2019. Fractal structure characteristics and development stage division of water system in Yangtze River basin[J]. *Yangtze River*, 50(3): 94–100 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yang, Li Jingyi, Gong Kangjia, Wu Zhijun, Chen Mindong, Qin Momei, Huang Lin, Hu Jianlin. 2021. Double high pollution events in the Yangtze River Delta from 2015 to 2019: Characteristics, trends, and meteorological situations [J]. *The Science of The Total Environment*, 792(12): DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.148349
- Qi Jia, Wang Lei, Zhou Jing, Song Lei, Li Xiuping, Zeng Tian. 2019. Coupled snow and frozen ground physics improves cold region hydrological simulations: An evaluation at the upper Yangtze River Basin (Tibetan Plateau) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 124(23): 12985–13004.
- Tang Jianhua, Liu Weiyi, Zhao Shengwei. 2011. Discussion on the relationship between Xuliujing discharge and Datong discharge in the Yangtze River estuary[J]. *Water Resources and Power*, 29(7): 4–7(in Chinese with English abstract).
- Wang Jielong, Chen Yi, Wang Zhanghui, Shang Pengfei. 2020. Drought evaluation over Yangtze River basin based on weighted water storage deficit [J]. *Journal of Hydrology*, 591: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125283>.
- Wang Jun. 2018. Status and its research on water resources in the

- Yangtze River Basin [J]. *Journal of Water Resources Research*, 7 (1): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Wang Qi, Yu Shi, Jiang Pingping, Sun Pingan. 2021. Water chemical characteristics and influence of exogenous acids in the Yangtze River Basin[J]. *Environmental Science*: 1– 17. [2021– 07– 10]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202012040> (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengxiang, Guo Haijin, Ding Zhili. 2008. Analysis of water resources and utilization status of Yangtze River and Southwest Rivers in recent 10 years[J]. *Yangtze River*, (17): 85–87 (in Chinese).
- Wang Zhengxiang, Xu Gaohong, Ding Zhili. 2011. Evaluation of water resources in Yangtze River Basin [J]. *Yangtze River*, 42(18):58–61 (in Chinese).
- Wu Shuqi, Hu Zhuowei, Wang Zhiheng, Cao Shisong, Yang Yang, Qu Xinyuan, Zhao Wenji. 2021. Spatiotemporal variations in extreme precipitation on the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin (1970–2018)[J]. *Quaternary International*, 592(10): 80–96.
- Xia Jun, Chen Jin. 2021. Viewing flood control strategy in the new era from defending the Yangtze River flood in 2020[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 51(1): 27–34(in Chinese).
- Xia Xuejin, Xu Jian, Feng Wenjing. 2016. Discussion on the trend of Yangtze River discharge into the sea and the relationship between Datong and Xuliujing discharge [J]. *China Water Transport*, (6): 71–73(in Chinese with English abstract).
- Xu Jing, Wang Yonggui, Chen Yan, Tong Hongjin, Wei Yao, Bai Hui. 2020. Characteristics on spatiotemporal variations of surface water environmental quality in Tuojiang River in Upper Reaches of Yangtze River Basin[J]. *Earth Science*, 45(6): 1937– 1947(in Chinese with English abstract).
- Yan Jiabao, Jia Shaofeng, Lu Aifeng. 2016. Changes of land water reserves and their temporal and spatial distribution in China in recent ten years[J]. *South– to– North Water Transfers and Water Science and Technology*, 14(4): 21–28 (in Chinese).
- Yang Chengfan, Yang Shouye, Song Jiaze, Vigier Nathalie. 2019. Progressive evolution of the Changjiang (Yangtze River) sediment weathering intensity since the three gorges dam operation [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(10): 2402.
- Yang Hui Feng, Meng Ruifang, Li Wenpeng, Li Zeyan, Zhi Chuanshun, Bao Xilin, Li Changqing, Liu Haifu, Wu Haiping, Ren Yu. 2021. Characteristics and utilization potential of groundwater resources in the Haihe River Basin[J]. *Geology in China*, 48(4):1032– 1051 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuandong. 1984. Analysis of three elements of water balance in Yangtze River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, (4): 312–320. (in Chinese).
- Yin Jian, Qiu Yuanhong, Ou Zhaofan. 2020. Remote sensing estimation and temporal and spatial distribution of actual evapotranspiration in Yangtze River Basin[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 56(1): 86– 95.(in Chinese with English abstract).
- Yin Lichang, Tao Fulu, Chen Yi, Liu Fengshan, Hu Jian. 2021. Improving terrestrial evapotranspiration estimation across China during 2000–2018 with machine learning methods [J]. *Journal of Hydrology*, 600: DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.126538.
- Zha Gang, Zhou Jianzhong, Yang Xin, Fang Wei, Dai Ling, Wang Quansen, Ding Xiaoling. 2020. Modeling and solving of joint flood control operation of large– scale reservoirs: A case study in the Middle and Upper Yangtze River in China [J]. *Water*, 13(1).
- Zhang Guanghui, Liu Shaoyu, Zhang Cuiyun, Chen Zongyu, Lie Zhenlong, Shen Jianmei, Wang Jinzhe, Wang Zhao. 2004. Study on the regularity of groundwater circulation and evolution in Heihe River Basin[J]. *Geology in China*, (3): 289–293 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guanghui, Yan Mingjiang, Yang Lizhi, Liu Zhongpei. 2008. Relationship between sustainable exploitation of groundwater and evaluation of groundwater function[J]. *Geological Bulletin of China*, (6): 875–81 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Zhan Mingyue, Wang Guojie, Lu Jiao, Chen Liqin, Zhu Chenxia, Jiang Tong, Wang Yanjun. 2020. Evapotranspiration prediction and influencing factors in Yangtze River Basin based on CMIP6 multi– model[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 43(6): 1115– 26 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Yunjun, Zhang Wen, Yan Yan, Wang Chenxing, Rong Yuejing, Zhu Jieyuan, Zheng Tianchen. 2021. Analysis of actual evapotranspiration evolution and influencing factors in the Yangtze River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 17: 1– 12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongqiang, Kong Dongdong, Gan Rong, Chiew Francis H S, McVicar Tim R, Zhang Qiang, Yang Yuting. 2019. Coupled estimation of 500 m and 8– day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 222:165–182.
- Zeng Zhaohua. 1994. Formation and distribution of iron and manganese in groundwater in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, (4): 326–329 (in Chinese).

附中文参考文献

- 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.
- 范可旭, 徐长江, 张晶. 2011. 长江流域水资源质量评价[J]. *人民长江*, 42(18): 62–64,72.
- 龚磊, 王新峰, 宋绵, 李红燕, 肖则佑, 胡啟锋, 王进, 吴琳伟, 王磊, 缪

- 赛. 2019. 赣南兴国和宁都脱贫攻坚 1:50000 水文地质调查数据集[J]. 中国地质, 46(S1): 11-17.
- 韩玉芳, 路川藤. 2019. 三峡工程后长江口水沙变化及河床演变特征[C]//第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会(重庆).
- 胡宝怡, 王磊. 2021. 陆地水储量变化及其归因:研究综述及展望[J]. 水利水电技术(中英文), 52(5): 13-25.
- 姜月华, 林良俊, 陈立德, 倪化勇, 葛伟亚, 成杭新, 翟刚毅, 王贵玲, 班宜忠, 李媛, 雷明堂, 谭成轩, 苏晶文, 周权平, 张泰丽, 李云, 刘红樱, 彭柯, 王寒梅. 2017. 长江经济带资源环境条件与重大地质问题[J]. 中国地质, 44(6): 1045-1061.
- 姜月华, 周权平, 陈立德, 倪化勇, 雷明堂, 程和琴, 施斌, 马腾, 葛伟亚, 苏晶文, 李云, 谭建民. 2019. 长江经济带地质环境综合调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查, 6(5): 1-20.
- 景佳俊, 管祯, 单雨阳, 景佳媛. 2019. 丰沛平原区地下水开采利用现状及潜在水源地分析[J]. 中国地质调查, 6(3): 87-91.
- 李海涛, 风蔚, 王凯霖, 赵凯, 李刚, 张源, 李木子, 孙璐, 陈一超, 尤冰. 2021. 雄安新区地下水资源概况、特征及可开采潜力[J]. 中国地质, 48(4): 1112-1126.
- 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.
- 孟宪萌, 张鹏举, 冷傲, 周波, 刘登峰. 2019. 长江流域水系分形结构特征及发育阶段划分[J]. 人民长江, 50(3): 94-100.
- 水利部长江水利委员会. 2018. 长江流域及西南诸河水资源公报(1998-2018) [Z]. 武汉: 长江水利委员会.
- 唐建华, 刘玮玮, 赵升伟. 2011. 长江口徐六泾流量与大通流量间关系的探讨[J]. 水电能源科学, 29(7): 4-7.
- 王俊. 2018. 长江流域水资源现状及其研究[J]. 水资源研究, 7: 1-9.
- 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安. 2021. 长江流域主要干/支流水化学特征及外源酸的影响[J]. 环境科学: 1-17[2021-07-10]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202012040>.
- 王政祥, 郭海晋, 丁志立. 2008. 长江和西南诸河近 10 年水资源及利用状况分析[J]. 人民长江, 39(17): 85-87.
- 王政祥, 徐高洪, 丁志立. 2011. 长江流域水资源评价[J]. 人民长江, 42(18): 58-61.
- 夏军, 陈进. 2021. 从防御 2020 年长江洪水看新时代防洪战略[J]. 中国科学:地球科学, 51(1): 27-34.
- 夏雪瑾, 徐健, 冯文静, 李琦. 2016. 长江入海流量趋势及大通—徐六泾流量关系探讨[J]. 中国水运, (6):71-73.
- 许静, 王永桂, 陈岩, 佟洪金, 魏峣, 白辉. 2020. 长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征[J]. 地球科学, 45(6): 1937-1947.
- 严家宝, 贾绍凤, 吕爱锋, 朱文彬. 2016. 近十年中国陆地水储量变化及其时空分布规律[J]. 南水北调与水利科技, 14(4): 21-28.
- 杨会峰, 孟瑞芳, 李文鹏, 李泽岩, 支传顺, 包锡麟, 李长青, 柳富田, 吴海平, 任宇. 2021. 海河流域地下水资源特征和开发利用潜力[J]. 中国地质, 48(4): 1032-1051.
- 杨远东. 1984. 长江流域水平衡三要素分析[J]. 地理科学, (4): 312-320.
- 尹剑, 邱远宏, 欧照凡. 2020. 长江流域实际蒸散发的遥感估算及时空分布研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 56(1): 86-95.
- 詹明月, 王国杰, 陆姣, 陈丽琴, 朱晨霞, 姜彤, 王艳君. 2020. 基于 CMIP6 多模式的长江流域蒸散发预估及影响因素[J]. 大气科学学报, 43(6): 1115-1126.
- 詹云军, 章文, 严岩, 王辰星, 荣月静, 朱捷缘, 卢慧婷, 郑天晨. 2021. 长江流域实际蒸散发演变趋势及影响因素分析[J]. 生态学报, (17):1-12[2021-07-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.q.20210610.1550.050.html>.
- 张光辉, 刘少玉, 张翠云, 陈宗宇, 聂振龙, 申建梅, 王金哲. 2004. 黑河流域地下水循环演化规律研究[J]. 中国地质, (3):289-293.
- 张光辉, 严明疆, 杨丽芝, 刘中培. 2008. 地下水可持续开采量与地下水功能评价的关系[J]. 地质通报, (6): 875-881.
- 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.
- 曾昭华. 1994. 长江中下游地区地下水中铁锰元素的形成及其分布规律[J]. 长江流域资源与环境, (4): 326-329.

封面照片简介:甘肃张掖国家沙漠体育公园打出优质热水井

2020年,甘肃省地质矿产勘查开发局水文地质工程地质勘察院在甘肃省地勘基金项目的支持下,立项开展《张掖国家沙漠体育公园地热资源普查》工作。于2020年11月25日开钻施工,2021年5月3日终孔,完井深度2174.03 m。勘探井自流量6000 m³/d,温度78℃,井口水头压力1.5MPa,这是目前西北地区地热找矿的重要成果。该井热水中富含氟、锂、偏硅酸、偏硼酸、锶等多种对人体有益的元素和组分,并含有水溶性氦气。该地热水具有较高的医疗保健、供暖、养殖等综合开发利用价值,这对支撑地方经济发展具有重要的意义。