

doi: 10.12029/gc20220603001

卢丽,樊连杰,裴丽欣,邹胜章,林永生,邓日欣,王喆. 2024. 海南岛地下水资源状况及其环境地质问题[J]. 中国地质, 51(2): 499–510.

Lu Li, Fan Lianjie, Pei Lixin, Zou Shengzhang, Lin Yongsheng, Deng Rixin, Wang Zhe. 2024. Groundwater resources and environmental geologic problems on Hainan Island[J]. Geology in China, 51(2): 499–510(in Chinese with English abstract).

海南岛地下水资源状况及其环境地质问题

卢丽^{1,2,3,4}, 樊连杰^{1,2,3}, 裴丽欣⁵, 邹胜章^{1,2,3}, 林永生^{1,2,3}, 邓日欣^{1,2,3}, 王喆^{1,2,3,6}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2. 广西岩溶资源环境工程技术研究中心, 广西 桂林 541004; 3. 自然资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 4. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006; 5. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海南 海口 571127; 6. 东华理工大学化学与材料科学学院, 江西 南昌 330013)

摘要:【研究目的】海南既是中国最大的经济特区, 又是“一带一路”战略中的重要支点, 揭示海南岛地下水资源禀赋, 探究地下水资源分布特征及存在的环境地质问题, 可以为海南生态保护和高质量发展提供重要支撑。【研究方法】本文以海南岛为研究区, 划分评价单元, 分析地下水流场特征, 评价地下水资源量及水质情况, 探究地下水开发利用状况, 查明主要环境地质问题。【研究结果】海南岛多年平均地下水资源量约为 $132.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 在行政区中, 海口市的地下水资源量最大, 多年均值为 $11.33 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 昌江县的最小, 多年均值为 $0.07 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。海南岛地下水水质整体较差, 水质较差区分布在滨海平原区和山前地带, 超标因子主要为 pH、Al、Mn。岛内存在一系列的环境地质问题, 包括琼北盆地的区域性水位下降问题、三亚市海棠湾和榆林湾、东方市板桥镇等地区的海水入侵和土壤盐渍化问题、东方市、昌江县和乐东县等地区的土地沙漠化问题、矿山开采产生的地质环境问题。【结论】海南岛地下水资源量较为丰富, 分布差异大, 地下水水质较差, 环境地质问题突出, 应进一步加强水文地质与水资源调查监测工作, 加快构建水资源节约集约利用新格局, 推进地下水生态环境保护。

关键词: 地下水资源; 地下水位; 生态; 环境; 水文地质调查工程; 海南岛; 海南省

创新点: 重新构建海南岛地下水资源评价分区, 提出最新评价成果; 系统分析地下水资源分布特征及开发利用状况, 查明岛内存在的主要环境地质问题, 为区域地下水资源合理利用及生态环境保护提供重要参考。

中图分类号: P641.8; X171.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)02-0499-12

Groundwater resources and environmental geologic problems on Hainan Island

LU Li^{1,2,3,4}, FAN Lianjie^{1,2,3}, PEI Lixin⁵, ZOU Shengzhang^{1,2,3}, LIN Yongsheng^{1,2,3}, DENG Rixin^{1,2,3}, WANG Zhe^{1,2,3,6}

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Guangxi Karst Resources and Environment Research Center of Engineering Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 541004, Guangxi, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China; 5. Haikou Marine

收稿日期: 2022-06-03; 改回日期: 2022-07-19

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB22080070)、中国地质调查局项目(DD20221758, DD20243174)及国家自然科学基金项目(41807218, 41602277)联合资助。

作者简介: 卢丽, 女, 1985 年生, 副研究员, 主要从事岩溶水文地质环境地质调查评价研究; E-mail: luli@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 邹胜章, 男, 1969 年生, 研究员, 主要从事岩溶水文地质环境地质调查评价研究; E-mail: zshengzhang@mail.cgs.gov.cn。

王喆, 男, 1985 年生, 副研究员, 主要从事岩溶地下水模拟与水资源评价; E-mail: wzhe@mail.cgs.gov.cn。

Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, Hainan, China; 6. School of Chemistry, Biology and Material Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] Hainan Island serves as the largest special economic zone in China and plays a crucial role in the "One Belt and One Road" strategy. Unveiling the groundwater resource endowment of Hainan Island, exploring the distribution characteristics of groundwater resources, and addressing existing environmental geological issues can provide vital support for ecological protection and sustainable development on the island. **[Methods]** This study focuses on Hainan Island as its research area. It divides the evaluation units, analyzes the characteristics of groundwater flow fields, evaluates both quantity and quality of groundwater resources, explores their development and utilization prospects while identifying key environmental geological problems. **[Results]** The average annual groundwater resource quantity on Hainan Island is approximately $132.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. Haikou City possesses the highest amount with an average of $11.33 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ among all administrative areas, whereas Changjiang County has only $0.07 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ annually which is significantly lower than other regions. Overall, there is poor groundwater quality across Hainan Island with superstandard factors mainly being pH, Al and Mn distributed in coastal plain area and piedmont area. A series of environmental geological problems exist including regional water level decline in Qiongbei Basin, seawater intrusion and soil salinization in Haitang Bay and Yulin Bay (Sanya City) and Banqiao Town (Dongfang City), land desertification in Dongfang City, Changjiang County and Ledong County, geological environmental problems caused by mining. **[Conclusions]** Despite rich groundwater resources with large distribution differences on Hainan Island, poor water quality remains a prominent issue along with various environmental geological challenges that need to be addressed for sustainable development purposes. It is imperative to further enhance the investigation and monitoring of hydrogeology and water resources, accelerate the establishment of a new paradigm for conserving and intensively utilizing water resources, as well as promote safeguarding the ecological environment of groundwater.

Key words: groundwater resources; groundwater level; ecology; environment; hydrogeological survey engineering; Hainan Island; Hainan Province

Highlights: The evaluation zone for groundwater resources on Hainan Island has been reconstructed with updated assessment results presented. The distribution characteristics and development and utilization of groundwater resources were systematically analyzed, while identifying key environmental geological issues on the island that provide crucial references for rational utilization of regional groundwater resources and ecological environment protection.

About the first author: LU Li, female, born in 1985, associate researcher, engaged in the investigation and evaluation of karst hydrogeology and environmental geology; E-mail: luli@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: ZOU Shengzhang, male, born in 1969, researcher, mainly engaged in the investigation and evaluation of karst hydrogeology and environmental geology; E-mail: zshengzhang@mail.cgs.gov.cn. WANG Zhe, male, born in 1985, associate researcher, mainly engaged in the karst groundwater simulation and water resources evaluation; E-mail: wzhe@mail.cgs.gov.cn

Fund support: Supported by the projects of Guangxi Key Research and Development (No.Gui Ke AB22080070), China Geological Survey (No.DD20221758, No.DD20243174), National Natural Science Foundation of China (No.41807218, No.41602277).

1 引 言

海南岛地处中国大陆的最南端,地理位置介于 $18^{\circ}10' \text{ N} \sim 20^{\circ}10' \text{ N}$, $108^{\circ}37' \text{ E} \sim 111^{\circ}03' \text{ E}$, 岛屿轮廓形似椭圆形雪梨,东北至西南向长约 290 km,西北至东南宽约 180 km,总面积约为 3.39 万 km^2 (高燕等, 2013; 雷金睿等, 2020)。整体地势为四周低平,中间高耸,以五指山、鹦哥岭为隆起核心,向外围逐

级下降,由山地、丘陵、台地、平原等地貌构成。属热带季风气候,全年暖热,雨量充沛,年平均降水量为 1639 mm,每年 5—10 月是雨季。至 2019 年末,海南岛下辖 3 个地级市、5 个县级市、4 个县和 6 个自治县,常住人口 1008.12 万人(Che et al., 2022)。

海南作为中国最大的经济特区、唯一的热带省,不仅是自由贸易试验区,也是海上丝绸之路的战略支点,在“一带一路”国家战略中有着举足轻重

的地位(徐磊磊等, 2017; 全长亮等, 2020)。其中, 地下水资源的开发利用以及生态环境保护等问题直接影响当地社会稳定和经济发展(Chen et al., 2021a; Li et al., 2021), 也是推动海南可持续发展的关键因素(Jie et al., 2011; 牛方曲等, 2020)。前人针对上述问题, 已在水文地球化学成因机理分析(王文梅等, 2017; 习龙等, 2021; 齐信等, 2021)、水资源管理与保护(刘阳生, 2006; 周祖光, 2013; Feng et al., 2021a)、水资源评价与方法研究(赵旭升等, 2003; 王文国等, 2015; Tao et al., 2017; Wen et al., 2019; 陈伊郴等, 2019)、地下水污染评价与防治(常春荣, 2006; 王秀杰等, 2015; 杨坤等, 2019; Zhao et al., 2020)、环境地质问题探究(Su et al., 2011; 吴恒, 2014; 符广卷等, 2021; Feng et al., 2021b)等方面取得了一些研究进展, 但多数研究只局限于某些城市或部分地区(流域)(Yang et al., 2011; 谭冬飞等, 2018), 针对整个海南岛的地下水资源和主要环境地质问题的研究尚未见报道。因此, 本论文拟解决

的科学问题包括两个, 第一是如何量化评价海南岛地下水资源量, 第二是海南岛环境地质问题成因解析及分布厘定。

因此, 本文在水文地质与水资源调查、地下水统测、地下水资源评价、综合研究等工作基础上, 分析海南岛的地下水资源分布及开发利用状况, 探讨岛内存在的主要环境地质问题, 为海南岛的水资源可持续利用、生态保护和经济社会高质量发展提供科学依据。

2 研究区水文地质概况

2.1 水文地质条件

根据岛内地下水的赋存特征与含水介质之间的关系, 海南岛地下水类型可划分为松散岩类孔隙潜水、松散—半固结岩类孔隙承压水、火山岩类裂隙孔隙潜水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水、基岩裂隙水等 5 类(图 1), 主要含水层地层时代为第四纪、新近纪、白垩纪和三叠纪。松散岩类孔隙潜水分布于海

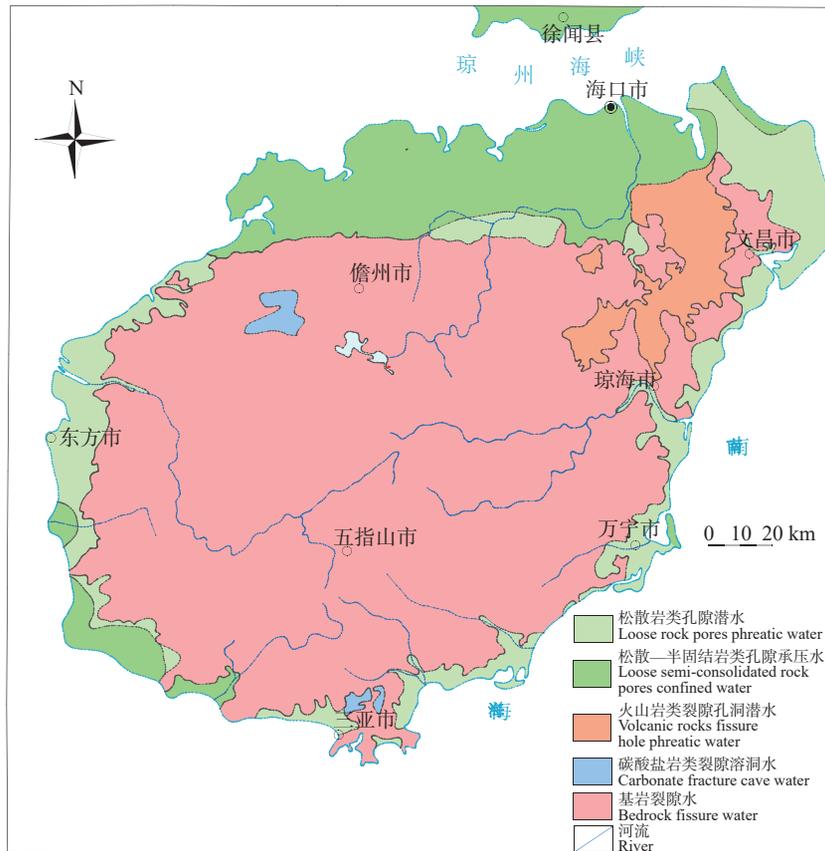


图 1 海南岛地下水型分区图

Fig.1 Division of groundwater types of Hainan Island

南岛沿海一带,含水层以粉土质砂、中粗砂、中细砂为主,地下水水量丰富,含水层渗透性强。松散—固结岩类孔隙承压水分布在琼北自流盆地和西南自流盆地斜地内,主要赋存在海口组贝壳碎屑固结岩类和长流组砂砾石松散岩类中,琼北自流盆地的各含水层组顶板均有隔水层,西南自流盆地斜地为一套多个松散岩类含水层,被第四系覆盖。火山岩类裂隙孔洞潜水分布于琼北王五—文教大断裂带以北地区、琼海大路至文昌蓬莱和定安龙塘至龙门—岭口等地,含水层以气孔状玄武岩、火山碎屑岩为主,无明显的隔水层,含水层内地下水渗透性变化较大。碳酸盐岩类裂隙溶洞水分布于儋州八一农场、三亚大茅、红花等地,含水层以灰岩、白云岩、角砾状灰岩为主,透水性和富水性较强。基岩裂隙水分布于岛中南部山地丘陵和山前剥蚀平原丘陵区,分为红层、层状岩类、块状岩类含水层(体)3类,除构造裂隙发育的破碎带内地下水较为丰富外,其他地区的地下水较为贫乏。

不同类型地下水的补径排条件各不相同。松散岩类孔隙潜水的补给来源是大气降雨,地下水径流、排泄受地形控制,主要以蒸发、泉等方式排泄。松散—固结岩类孔隙承压水主要接受基岩裂隙水的侧渗补给和火山岩潜水的下渗补给,由盆地前缘向海区方向径流,以泉或越流方式向河流或海区排泄。火山岩类裂隙孔洞潜水主要接受大气降水的人渗补给,其次为山塘和水库水的人渗补给,部分火山岩潜水以火山口为中心,呈放射状向四周径流,大部分在火山岩台地前缘以泉水形式排入沟河或以片流的方式直接排入大海。碳酸盐岩类裂隙溶洞水直接受大气降雨补给,地下水经短距离径流后,以泉的形式排泄于溪沟中。基岩裂隙水主要接受大气降雨入渗补给,在岛中部低山丘陵区,以山顶为中心向四周径流,以山泉方式排泄于沟谷或山涧小溪;在山间盆地区,主要沿构造破碎带径流,以泉的方式排泄于沟谷或低洼地区。

2.2 地下水资源分区

本次地下水资源区划分在水利部《全国水资源综合区划导则》(2011年)的基础上,充分吸收《新一轮全国地下水资源评价》项目(2000—2002年)中水文地质单元划分结果,以及海南岛地区1:20万、1:5万水文地质调查等成果,并综合考虑含水岩组

类型,地下水赋存特征、地下水补径排条件等因素,在与水利部同一尺度及精度上重新构建了海南岛地下水资源分区。海南岛共划分为地下水资源五级区7个、六级区25个(图2,表1)。

2.3 区域地下水场特征

海南岛地下水水位整体表现为中间高,四周低,近似成环形层状分布,有明显的阶梯形态(图3)。地下水水位最高处位于五指山地区,是海南岛主要的补给区,水位高程范围为200~600m。地下水径流区位于五指山以外的环形带内,水位高程范围为50~200m。地下水排泄区位于海南岛沿海平原地区,水位高程范围为0~50m,水位最低处位于海口市南部城区附近。在海口市、洋浦经济开发区、东方市板桥镇、三亚市和万宁市等地区均出现水位低于海平面的区域,平均低于海平面1~10m。

3 地下水资源分布及开发利用状况

3.1 地下水资源量及其分布特征

依据中国地质调查局《全国地下水资源评价技术要求(试行稿)》(祁泽学等,2022;马涛等,2023;李文鹏,2023),采用水均衡法、补给量法、可开采系数法等多种方法开展海南岛2000—2021年度地下水资源量和地下水可开采量评价,本次评价的地下水资源量为 $TDS \leq 2 \text{ g/L}$ 的地下水天然补给量。

根据海南省国家基准气象站点监测数据,结合上述方法计算出海南岛多年平均地下水资源量约为132.05亿 m^3/a (图4)。最小值出现在2004年,地下水资源量约为89.03亿 m^3 ,最大值出现在2009年,地下水资源量约为166.57亿 m^3 。

对比各地下水系统的地下水资源量(图5),显示南渡江裂隙地下水系统(1号分区)的地下水资源量最大,多年平均地下水资源量约为17.85亿 m^3/a ;昌化江沿海地区裂隙地下水系统(6号分区)的地下水资源总量最小,多年平均地下水资源量约为0.07亿 m^3/a 。

对比各行政区的地下水资源量(表2),显示海口市的地下水资源量最大,多年平均地下水资源量约为11.33亿 m^3/a ;昌江黎族自治县的地下水资源量最小,多年平均地下水资源量约为2.15亿 m^3/a 。从地下水资源模数角度来看,大部分行政区的地下

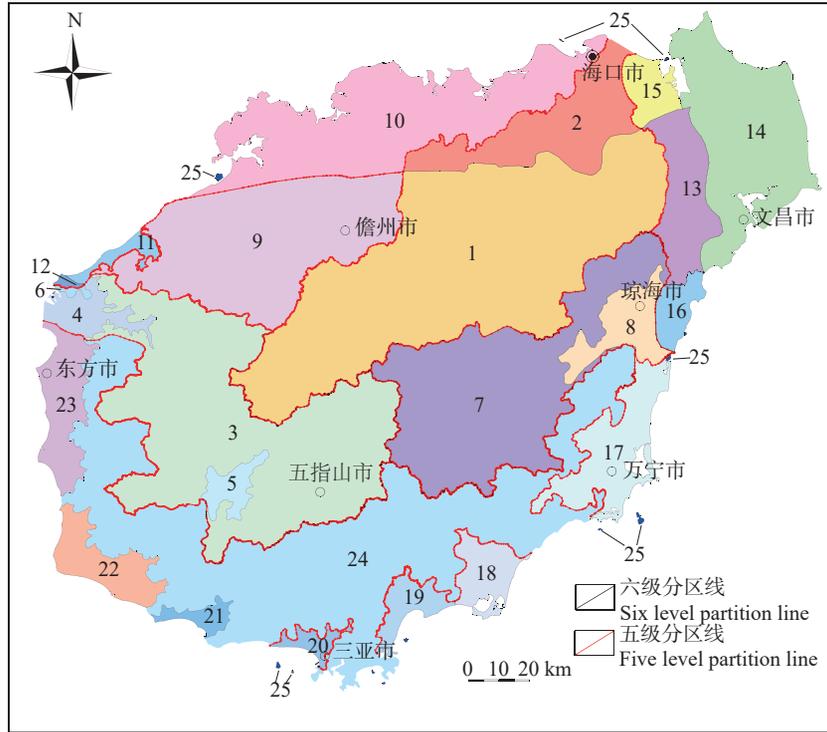


图 2 海南岛地下水资源分区图
(六级分区名称及序号见表 1)

Fig.2 Division of groundwater resources of Hainan Island
(Table 1 shows the zone name corresponding to the sixth level zone serial number)

表 1 海南岛地下水资源分区

Table 1 Groundwater resources division of Hainan Island

四级分区	五级分区	六级分区及序号
海南岛及沿海诸岛区	南渡江	南渡江裂隙地下水系统(1)、南渡江琼北盆地地下水系统(2)
	昌化江	昌化江裂隙地下水系统(3)、昌化江昌江平原地下水系统(4)
		昌化江乐东间山平原地下水系统(5)、昌化江沿海地区裂隙地下水系统(6)
	万泉河	万泉河裂隙地下水系统(7)、万泉河琼海平原地下水系统(8)
	海南岛西北部	海南岛西北部裂隙地下水系统(9)、海南岛西北部琼北盆地地下水系统(10)
		海南岛西北部昌江平原地下水系统(11)、海南岛西北部沿海地区裂隙地下水系统(12)
	海南岛东北部	海南岛东北部裂隙地下水系统(13)、海南岛东北部文昌平原地下水系统(14)
		海南岛东北部琼北盆地地下水系统(15)、海南岛东北部琼海盆地地下水系统(16)
	海南岛南部	海南岛南部万宁平原地下水系统(17)、海南岛南部陵水平原地下水系统(18)
		海南岛南部藤桥林旺盆地地下水系统(19)、海南岛南部三亚盆地地下水系统(20)
海南岛南部崖城盆地地下水系统(21)、海南岛南部九所莺歌海盆地地下水系统(22)		
海南岛南部八所斜地地下水系统(23)、海南岛南部裂隙地下水系统(24)		
沿海诸岛	沿海诸岛地下水系统(25)	

水资源模数均超过了 30 万 $m^3/(km^2 \cdot a)$, 其中临高县的地下水资源模数最大, 约为 57.07 万 $m^3/(km^2 \cdot a)$, 少数行政区(如白沙县、保亭县等)的地下水资源模数偏小, 低于 30 万 $m^3/(km^2 \cdot a)$ 。

利用可开采系数法计算出海南岛多年平均地

下水可开采量约为 46.96 亿 m^3 。最小值出现在 2004 年, 地下水可开采量约为 31.07 亿 m^3/a , 最大值出现在 2009 年, 地下水可开采量约为 59.60 亿 m^3/a 。对比各行政区地下水可开采量(图 6), 发现海口市的地下水可开采量最大, 多年平均地下水可开采量约

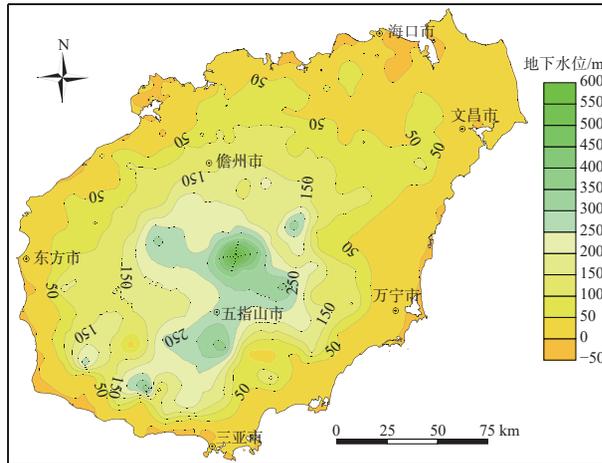


图3 海南岛多年地下水位等值线图

Fig.3 Perennial groundwater level contour map of Hainan Island

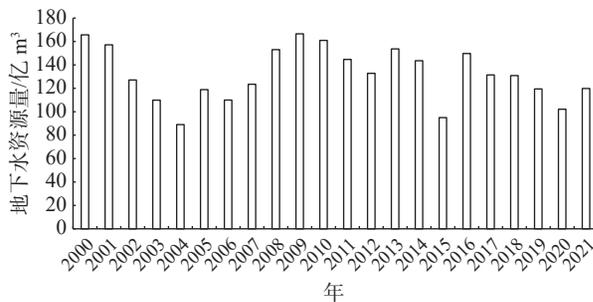
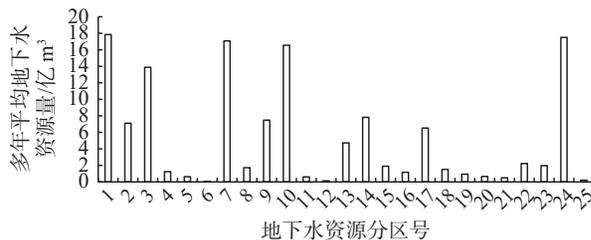


图4 海南岛2000—2021年度地下水资源量

Fig.4 Groundwater resources of Hainan Island from 2000 to 2021

图5 海南岛不同地下水资源分区多年平均地下水资源量
Fig.5 Perennial average groundwater resources of different groundwater resource zones in Hainan Island

为5.66亿 m^3/a ;昌江黎族自治县的地下水可开采总量最小,多年平均地下水可开采量约为0.82亿 m^3/a 。

3.2 地下水质量及其分布特征

地下水质与人类活动密切相关,对人类健康和生态环境均有重要影响(Liu et al., 2021; 蒋万军等, 2022)。根据2021年低水位期(4月份)采集的157组地下水样的35项指标测试数据,根据《地下

表2 海南岛不同行政区多年平均地下水资源量

Table 2 Perennial average groundwater resources of different administrative regions of Hainan Island

行政区名称	评价面积/ km ²	多年平均地下水 资源量/亿m ³	地下水资源模数/ (万m ³ /(km ² ·a))
白沙黎族自治县	3649.30	10.85	29.73
保亭黎族苗族自治县	1271.22	3.73	29.34
昌江黎族自治县	612.47	2.15	35.10
澄迈县	1609.15	7.49	46.55
儋州市	3038.29	11.16	36.73
定安县	1470.64	6.65	45.22
东方市	3375.29	10.39	30.78
海口市	2088.31	11.33	54.25
乐东黎族自治县	1716.47	5.75	33.50
临高县	1259.87	7.19	57.07
陵水黎族自治县	996.61	3.32	33.31
琼海市	1972.91	8.95	45.36
琼中黎族苗族自治县	1780.21	5.40	30.33
三亚市	1988.60	6.35	31.93
屯昌县	2037.05	9.45	46.39
万宁市	1608.45	8.38	52.10
文昌市	2354.61	10.05	42.68
五指山市	1144.00	3.47	30.33

水质量标准》(GB/T14848-2017),采用多指标综合评价方法开展海南岛地下水质量评价。

海南岛地下水化学类型较多,以 $HCO_3^- \cdot Cl^- \cdot Ca \cdot Na$ 型和 $HCO_3^- \cdot Ca \cdot Na$ 型为主,占比分别为21.4%和20.1%,其次为 $HCO_3^- \cdot Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3^- \cdot Ca \cdot Mg \cdot Na$ 、 $HCO_3^- \cdot Ca$ 和 $HCO_3^- \cdot Cl^- \cdot Ca \cdot Mg \cdot Na$ 型。根据特征离子比值结果,显示出由于经历阳离子交替吸附作用,使地下水中的 Na^+ 浓度增加, Ca^{2+} 浓度减少,岩盐的溶解或人为活动的影响也引起地下水中的 Cl^- 浓度增加。另外,含钠矿物、含钾矿物、石膏等的风化溶解(如钠长石($Na_2Al_2Si_6O_{16}$))也对地下水化学组分有影响。

从海南岛地下水质量评价结果(图7)可以看出,海南岛内IV~V类水占比约为56.69%,整体水质较差。其中IV类水质影响因子主要为Mn、pH、 F^- 和Pb,V类水质影响因子主要为pH、Al、 F^- 和 NO_3^- ,其次是Hg、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、Mn和 NH_4^+ 。从IV~V类水点的分布位置来看,IV~V类水点具有环岛型分布特征,且主要集中在滨海平原区和山前地带。超标原因有两方面,一方面是所在区域人口密集,人类活动强烈,污染源较多,人为污染指标为pH、Pb、F、 NO_3^- ;第二方面是由原生性环境造成的,超标指标为Mn、Al。同时,在局部地区存在海水入侵

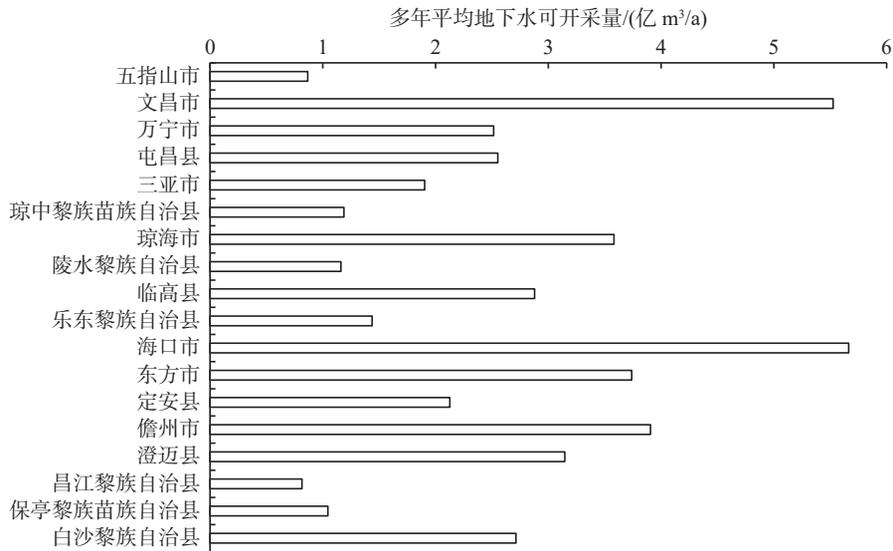


图 6 海南岛不同行政区多年平均地下水可开采量

Fig.6 Perennial annual groundwater recoverable capacity of different administrative regions of Hainan Island

现象,导致地下水中 Cl⁻ 含量较高(如东方市板桥镇)。

对不同类型地下水水质评价结果进行分类整理,显示出碳酸盐岩类裂隙溶洞水的水质最好,IV~V类水比例仅为 25.00%,火山岩类裂隙孔洞潜水次之,IV~V类水比例为 35.71%,基岩裂隙水的污染比例将近 50%,松散岩类孔隙潜水和松散—半固结岩类孔隙承压水的污染比例均超过 50%,其中松散岩类孔隙潜水的水质最差,IV~V类水比例高达 69.39%。

3.3 地下水开发利用状况

20 世纪 70 年代末,海南岛地下水开采量仅为 2.90 亿 m³/a;80 年代没有开展系统的地下水开采量调查,但根据海南省的发展情况,建省前地下水开采量与 70 年代末相比变化不大。建省后由于海南省经济的快速发展和开采技术的提高,地下水开采量逐渐增大,到 2004 年地下水开采量增至 5.15 亿 m³,导致部分地区如琼北盆地存在地下水超采现象。此后随着对地表水开发利用能力的增强,地下水开采量逐渐下降(图 8)。

目前,海南岛内不同地下水类型区的地下水开采方式各不相同,其中松散岩类孔隙水和基岩裂隙水的开采方式以民井开采为主,其次为机井;火山岩类裂隙孔洞潜水以民井开采为主,以引泉灌溉和机井为辅;碳酸盐岩类裂隙溶洞水和松散—半固结岩类孔隙承压水则以机井开采为主。

4 主要环境地质问题

4.1 区域性水位下降

强烈的人类活动往往会改变地下水流场,并可能伴随产生一定的环境地质问题(Chen et al., 2021b; 张康等, 2023),海南岛琼北盆地内就因地下水开采而存在区域性水位下降问题。20 世纪 70 年代前,盆地内地下水开采量较小;但 80 年代以来,特别是海南建省后,随着经济发展岛内大量开采地下水,形成了一定范围的地下水位下降区域。

根据《海南省环境状况公报》、《珠江流域水资源公报》以及自然资源部的地下水位统测数据等资料,琼北盆地内地下水位下降区域的最低水位动态变化分为 5 个阶段:(1)1981—1989 年,水位变化平缓,小幅度逐年下降,由 -26.88 m 降至 -27.84 m;(2)1989—1995 年,水位逐年快速下降,最低水位是 -39 m;(3)1996—2008 年,水位快速回升,年平均水位回升 1.81 m;(4)2009—2015 年,水位又快速有降,年降幅 0.83 m;(5)2016—2021 年,中心区域最低水位由 -21.69 m 上升至 -20.81 m,最低水位呈缓慢波动上升趋势,年平均上升幅度 0.18 m。近些年来,海口市政府一直通过压采地下水应对区域性水位下降,已产生一定程度的积极效应。由于龙塘镇、灵山镇等地下水径流区依然存在地下水集中开采,加上海口组承压含水层补给不畅,导致海口市

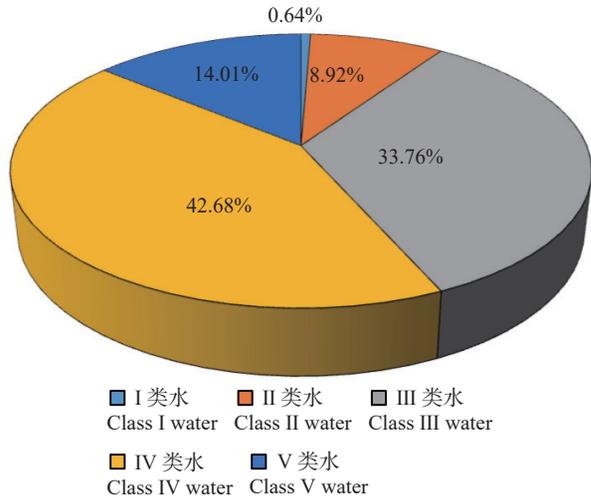


图7 海南岛地下水质量评价结果
Fig.7 Evaluation results of groundwater quality in Hainan Island

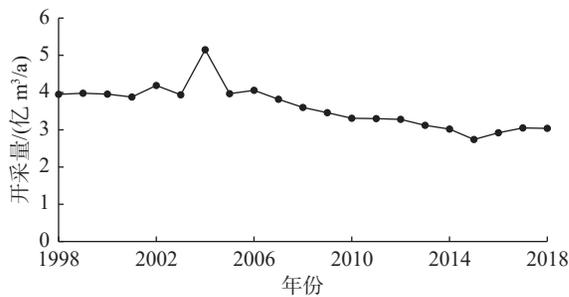


图8 1998—2018年地下水开采量变化
Fig.8 Variation of groundwater exploitation from 1998 to 2018
区海口组含水层水位恢复速度仍然缓慢。

从图9中可以看出,最低水位与水位下降区域

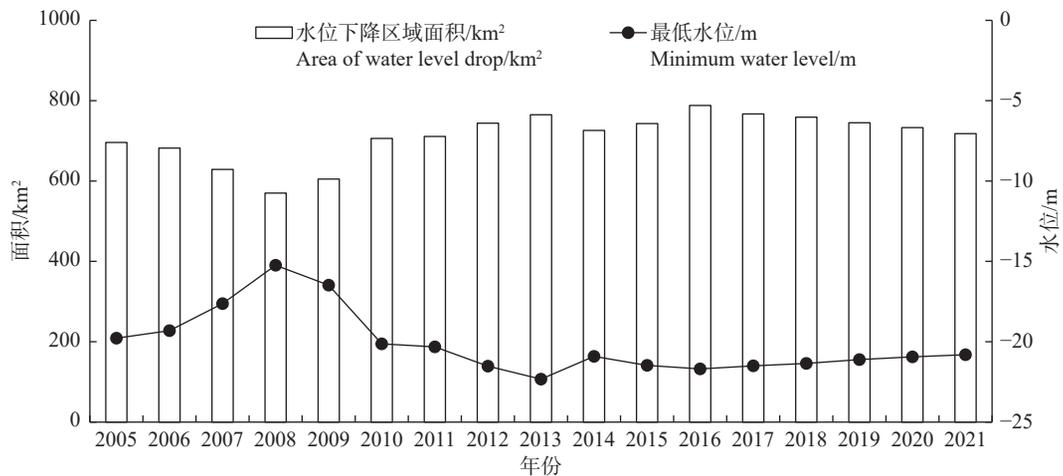


图9 2005—2021年地下水水位下降区域面积及最低水位变化
Fig.9 Variation of groundwater level decreasing area and lowest water level from 2005 to 2021

面积呈反比关系,即最低水位越低时,水位下降区域的面积越大,反之亦然。在2005—2021年内,水位下降区域的最大面积出现在2016年,约为788 km²,其最低水位约为-21.69 m;水位下降区域的最小面积出现在2008年约为570 km²,其最低水位约为-15.24 m。

据以往的地下水开采量与水位下降区最低水位埋深等数据(表3),对其开展线性回归分析,得出水位下降区域最低水位埋深(S)与地下水开采量(Q)的回归方程为 $Q = -1.997 + 0.899S$, 相关系数 $r = 0.996$, 分析结果显示出地下水开采量与水位下降区最低水位埋深有较强的对应关系。

4.2 海水入侵及其造成的土壤盐渍化

海水入侵是由于自然或人为原因,使海滨地区含水层中的淡水与海水之间的平衡状态遭到破坏,导致海水或与海水有水力联系的高矿化地下咸水沿含水层向陆地方向扩侵的现象。土壤盐渍化是土壤中积聚盐分形成盐渍土的过程,这里专指由于海水入侵造成的土壤盐渍化。

根据2014—2020年《海南省海洋环境状况公报》数据,海南省三亚市的海棠湾和榆林湾地区存在海水入侵和土壤盐渍化现象,近十年来整体情况较为稳定。对比海水入侵情况,榆林湾监测区域海水入侵情况较严重,海水入侵范围在距岸0.5~0.55 km以内,水质为酸性,且呈现出咸水、微咸水和淡水的明显变化;但海棠湾监测区域的海水入侵程度

表 3 历年开采量与水位下降区最低水位埋深统计

年份	1965	1975	1979	1983	1986	1989	1995	2011
地下水开采量 Q /(万 m^3/d)	1.90	4.45	6.27	10.43	13.18	19.29	38.25	20.15
水位下降区最低水位埋深 S/m	2.83	6.68	8.94	14.86	18.21	24.71	43.34	25.32

较低,范围较小,仅在距岸 0.32 km 以内监测到轻微入侵,为微咸水。

对比土壤盐渍化状况,榆林湾和海棠湾监测区域均存在土壤盐渍化现象,但入侵范围较小,榆林湾入侵范围在距岸 0.5 km 以内,海棠湾入侵范围在距岸 0.6 km 以内。榆林湾盐渍化类型主要为硫酸盐-氯化物型盐土、氯化物-硫酸盐型中盐渍化土;海棠湾盐渍化类型主要为氯化物-硫酸盐型盐土、硫酸型中盐渍化土和轻盐渍化土。

除了上述省级站点的海水入侵监测外,2021年7月,中国地质调查局岩溶地质研究所也对海南省东方市板桥镇开展了海水入侵调查。根据调查区域内 42 个水点的现场测试数据(包括了电导率、水温、pH 等指标,调查点距离海边距离范围约为 0.5~1.9 km),基于《海水入侵监测与评价技术规程》(HY/T 0314-2021)中的海水入侵的评价标准,对 42 个水点的电导率数据进行了评价,评价结果见表 4。

从表 4 可以看出,有 14 个水点达到了海水入侵的标准。海水入侵的范围主要分布在东方市板桥镇西北部地区,海水入侵的总面积约为 8.44 km^2 ,其中海水严重入侵面积约为 2.76 km^2 ,海水轻度入侵面积约为 5.68 km^2 。海水入侵区域内电导率平均超标 5.1 倍,最高超标 34 倍。根据野外调查情况,产生海水入侵的原因是该区域的海鲜养殖场存在人为抽取海水进行海鲜养殖的情况。

4.3 土地沙漠化

海南岛西部是中国唯一的热带稀树干草原沙漠化地区。20 世纪 30 年代,由于海南岛西部地区进行了大规模的土地开发和矿山开采,导致当地土地沙化规模迅速扩大;在 20 世纪 50—80 年代间,因为岛内实行了大规模的生态建设,使得西部沙化得到遏制;20 世纪 90 年代至今,由于岛内城市化进程加快以及人类活动增强,导致西部地区的生态环境再次造成破坏,部分地区土地再次沙化。目前,海南岛西部沙漠化土地面积约为 69.8 km^2 ,主要分

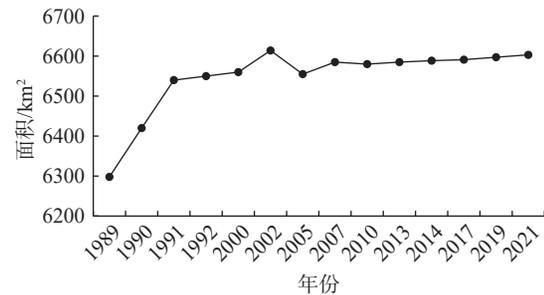


图 10 1989—2010 年海南岛西部非沙漠化土地面积变化趋势

Fig.10 Change trend of non-desertified land area in western Hainan Island from 1989 to 2010

表 4 东方市板桥镇海水入侵评价结果

Table 4 Evaluation results of seawater intrusion in Banqiao Town, Dongfang City

海水入侵等级	电导率范围/(mS/cm)	超标点数	海水入侵面积/ km^2
严重入侵	7.47~55.6	3	2.76
轻度入侵	1.63~3.12	11	5.68
合计	1.63~55.6	14	8.44

布在东方市、昌江县和乐东县等地区。

由海南岛西部 1989—2021 年的非沙漠化土地监测数据可知(图 10),非沙化土地面积呈上升趋势,总增长比例约为 4.78%,年增长率为 9.2 km^2 (倪向南和郭伟,2016)。其中非沙化面积的最小值出现在 1989 年,约为 6298 km^2 ,最大值出现在 2002 年,约为 6614 km^2 。除了 2005 年和 2010 年的非沙化面积略有下降外,其余年份西部非沙化面积基本呈持续上升趋势,这说明海南岛西部土地沙化现象得到明显控制。

该地区土地沙漠化的形成原因包括两个方面,一方面是自然原因,西部的东方、昌江等地,年降水量只有 1000 mm 甚至更少,但海南岛的气温却与降水量相反,呈现西高东低的特点,气温高导致蒸发量高,东方、昌江等地的年蒸发量可以达到 2000~2500 mm,使得海南岛西部的蒸发量大于降水量,气候比中部和东部更干旱,属于热带半干旱气候和热带稀树草原环境,存在形成沙漠化的自然基础(李森等,2005);另一方面是人为原因,城市化进程不断

加快,使得该区域生态环境逐渐遭受破坏,生态系统失衡,导致土地沙漠化加速。

4.4 矿山地质环境问题

海南拥有丰富的矿产资源,已探明储量的矿种为 56 种,产地 400 多处(薛桂澄等, 2011)。采矿业为海南带来了显著的社会效益,支撑了海南省国民经济的发展,但对生态环境也造成了一定程度的破坏,产生了地表植被破坏、地质灾害诱发、环境污染等一系列环境地质问题。

由于海南岛内采矿活动日趋强烈,加之矿山开采后复垦还林程度较低,导致众多矿区的生态环境,尤其是地表植被遭受破坏。如文昌、万宁琼海等东部滨海地区的锆钛砂矿,长期开采造成沿海沙堤沙地植被的严重破坏,仅龙马办事处的锆钛砂矿就侵占植被 130 多公顷,形成了十多个矿坑。同时,矿山开采也会诱发多种地质灾害。据统计,自 1996 年以来,海南省发生过地质灾害的矿山共有 67 座,发生地质灾害的数量有 91 处,涉及到了崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等多种类型,严重危害了当地人民群众的生命财产安全。

环境污染问题也在海南矿山开采中普遍存在。据统计,每年岛内矿山固体废弃物的产出量和累计积存量分别为 4827.41×10^4 t 和 37299.56×10^4 t。矿山冶炼直排的废气、粉尘、烟尘会降低空气质量,并产生空气污染。而矿山大量堆置的废渣和尾矿,在风化、淋滤、渗漏等作用下,会产生含有重金属离子的酸性污水,污染附近地表水体和地下水,直接威胁当地的饮用水安全。

5 结论

(1)海南岛多年平均地下水资源量约为 132.05 亿 m^3/a ,其中 2009 年的最大,2004 年的最小。在地下水系统中,南渡江裂隙地下水系统的地下水资源量最大,多年平均值为 17.85 亿 m^3/a ,昌化江沿海地区裂隙地下水系统的最小,多年平均值为 0.07 亿 m^3/a ;在行政区中,海口市的地下水资源量最大,多年平均值为 11.33 亿 m^3/a ,昌江县的最小,多年平均值为 2.15 亿 m^3/a 。

(2)海南岛地下水化学类型较多,以 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型为主。海南岛地下水水质以 IV~V 类水为主,占比约为 56.69%,整体水质

较差。IV~V 类水具有环岛型分布特征,且主要集中在滨海平原区和山前地带,水质影响因子主要为 pH、Al、Mn。

(3)海南岛内主要存在着区域性水位下降、海水入侵及土壤盐渍化、土地沙漠化、矿山地质环境问题等环境地质问题,其中区域性水位下降主要发生在琼北盆地内,三亚市的海棠湾和榆林湾以及东方市的板桥镇均出现了海水入侵及土壤盐渍化现象,土地沙漠化主要见于海南岛西部地区(分布在东方市、昌江县和乐东县等地区),矿山地质环境问题存在于岛内大型矿山中。

(4)岛内存在地下水资源时空分布不均、水质较差、区域性水位下降、海水入侵与土壤盐渍化、土地沙漠化等资源与环境问题,严重制约了自由贸易港和国家生态文明试验区建设。因此,以地球系统科学理论为指导,全面开展水文地质与水资源调查监测,尤其是地下水资源评价,以及重点城市、环境问题区的调查监测,是解决岛内水资源矛盾、提高水资源利用效率的重要手段。

(5)水资源节约集约利用和地下水生态环境保护也是海南岛面临的主要问题,建议在海口、三亚等人口密集城市落实最严格水资源管理制度,优化水资源配置和调度,科学划定和调整岛内饮用水水源保护区。同时,逐步推进岛内化工园区、垃圾填埋场、尾矿库、矿山开采区等地下水生态环境状况调查评估,科学划定地下水污染防治分区并强化污染源风险管控,严控生态脆弱区以及环境问题区的地下水取用水量。

References

- Chang Chunrong. 2006. Investigation of nitrate content in major rivers and underground water in Hainan province[J]. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 12(3): 20-24 (in Chinese with English abstract).
- Che Z W, Waqas A, Weng J H, Liu W J, Mohsin M, Alatalo J M, Ou W J, Mir M N, Wang L, Fu X X, Yang J, Wang Y T, Li W D, Sajid M. 2022. Distribution, pollution, and human health risks of persistent and potentially toxic elements in the sediments around Hainan Island, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 174: 113278.
- Chen Sheming, Liu Futian, Zhang Zhuo, Zhang Qian, Wang Wei. 2021a. Changes of groundwater flow field of Luanhe River Delta under the human activities and its impact on the ecological environment in the past 30 years[J]. *China Geology*, 4: 455-462.
- Chen Xijie, Wang Longfeng, Jia Liqiong, Jia Ting. 2021b. China's

- water resources in 2020[J]. *China Geology*, 4: 536–538.
- Chen Yichen, Li Shuo, Xu Huijun, Qiao Xue. 2019. Hydrogeochemistry and origin of groundwater in the south coast of Hainan[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 38(4): 1149–1156 (in Chinese with English abstract).
- Feng H L, Liu M, Xu M Y, Zhang M X, Mod L, Chen T, Tan X Y, Liu Z Y. 2021a. Study on the integrated protection strategy of water environment protection: The case of Hainan Province of China[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 24: 101990.
- Feng Y X, Yu X Z, Zhang H. 2021b. A modelling study of a buffer zone in abating heavy metal contamination from a gold mine of Hainan Province in nearby agricultural area[J]. *Journal of Environmental Management*, 287: 112299.
- Fu Guangjun, Zhang Hangfei, Wu Duoyu, Wang Xiaolin. 2021. Hydrogeological problems of primary environment and countermeasures in Sanya city[J]. *Ground Water*, 43(5): 5–10 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yan, Li Jiangfeng, Zhou Xuewu, Wang Min. 2013. The train of thought for coastal geotourism development in the perspective of Hainan international tourism island[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(7): 491–499 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Wanjun, Meng Lishan, Liu Futian, Liu Hongwei, Zhang Jing, Yu Hang. 2022. Research on exploitation, utilization and environmental quality of groundwater in Zhangjiakou area and suggestions on its utilization and protection[J]. *North China Geology*, 45(3): 44–54 (in Chinese with English abstract).
- Jie Q Y, Fu G J, Liu M L, Wang Y J, Xu J X. 2011. Research on tourism water resources carrying capacity engineering in Hainan Province[J]. *Systems Engineering Procedia*, 1: 384–391.
- Lei Jinrui, Chen Zhongzhu, Chen Yiqing, Chen Xiaohua, Li Yuanling, Wu Tingtian, Shen Yichun. 2020. Development and application of wetland ecosystem health evaluation system in Hainan Province[J]. *Wetland Science*, 18(5): 555–563 (in Chinese with English abstract).
- Li Haixue, Han Shuangbao, Wu Xi, Wang Sai, Liu Weipo, Ma Tao, Zhang Mengnan, Wei Yutao, Yuan Fuqiang, Yuan Lei, Li Fucheng, Wu Bin, Wang Yushan, Zhao Minmin, Yang Hanwen, Wei Shibo. 2021. Distribution, characteristics and influencing factors of fresh groundwater resources in the Loess Plateau, China[J]. *China Geology*, 4: 509–526.
- Li Sen, Sun Wu, Li Fan, Lin Peisong, Zheng Yinhua, Nie Lei. 2005. Study on the Characteristics and the Cause of Sandy Desertified Land in the West of Hainan Island[J]. *Acta Geographica Sinica*, 60(3): 433–444 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng. 2023. Understanding of surface water resources and groundwater resources repetition and discussion on the concept of water resources development and utilization[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 50(1): 1–2 (in Chinese).
- Liu Kun, Luo Xin, Jiao Jiu Jimmy, Gu Jidong, Ramon Aravena. 2021. Gene abundances of AOA, AOB, and anammox controlled by groundwater chemistry of the Pearl River Delta, China[J]. *China Geology*, 4: 463–475.
- Liu Yangsheng. 2006. Status of water resources and water environment in Hainan province and management strategy analyzin[J]. *Journal of China Hydrology*, 26(1): 89–91 (in Chinese with English abstract).
- Ma Tao, Li W L, Huan Shuangbao, Zhang Hongqiang, Wang Wenke, Li Pucheng, Li Haixue, He Xubo, Zhao Meimei. 2023. Distribution characteristics, influencing factors and development potential of groundwater resources in Shaanxi Province of the Yellow River Basin[J]. *China Geology*, 50(5): 1432–1445 (in Chinese with English abstract).
- Ni Xiangnan, Guo Wei. 2016. Spatial-temporal patterns of land desertification and their relationships with climate variations in the coastal region of western Hainan island[J]. *Quaternary Sciences*, 36(1): 144–153 (in Chinese with English abstract).
- Niu Fangqu, Yang Xinyu, Sun Dongqi. 2020. Water and soil carrying capacity and adjustment of industrial structure in Hainan province[J]. *Tropical Geography*, 40(6): 1109–1116 (in Chinese with English abstract).
- Qi Xin, Wang Antao, Li Huanqing, Wang Xianhan, Zhang Zaitian. 2021. Evaluation of groundwater quality in Qiongzong county of Hainan province[J]. *South China Geology*, 37(3): 339–347 (in Chinese with English abstract).
- Qi Xueze, Wang Shengbin, Wang Qiangmin, Xiao Yong, Wen Chuan. 2022. Evaluation and utilization value of groundwater resources in the alluvial pluvial fan of Golmud, Qinghai Province[J]. *China Geology*, 49(3): 967–978 (in Chinese with English abstract).
- Su N, Du J Z, Moore W S, Liu S M, Zhang J. 2011. An examination of groundwater discharge and the associated nutrient fluxes into the estuaries of eastern Hainan Island, China using ^{226}Ra [J]. *Science of the Total Environment*, 409: 3909–3918.
- Tan Dongfei, Zhang Yanwei, Wang Lu, Xu Yaping, Wang Jishi, Liu Xiaowei. 2018. Distribution and potential PFAA pollution sources in farmland groundwater from Hainan province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 37(2): 350–357 (in Chinese with English abstract).
- Tao H, Zheng M M, Fan L M, Li W L, Ding J, Li H, He X B, Tao F P. 2017. Research on quality changes and influencing factors of groundwater in the Guanzhong Basin[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 5(3): 296–302.
- Tong Changliang, Sun Longfei, Sun Shirui. 2020. Main progress and achievements of marine geological survey in Hainan Province[J]. *Geological Survey of China*, 7(1): 60–70 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenguo, Long Yinhui, Han Yue, Miao Taotian. 2015. Optimization allocation of water resources in Sanya based on cultural particle swarm optimization algorithm[J]. *Water Resources and Power*, 33(2): 33–36 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenmei, Xu Zidong, Ouyang Zhengping, Wang Sijiang. 2017. Analysis of geochemical characteristics and formation reasons of Yacheng geothermal field in Sanya of Hainan Province[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (10): 38–45 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiujie, Fengguimin, Wang Lina. 2015. Groundwater vulnerability assessment in plain area of Hainan Province[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 13(3): 548–552 (in Chinese with English abstract).
- Wen X R, Cheng Y P, Dong H, Wang C X, Zhang E Y, Liu K. 2019.

- Interpretation for technical requirements of mapping regional groundwater resources[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 7(3): 288–294.
- Wu Heng. 2014. Environmental geological problems and countermeasure advice in Qionghai, Hainan province[J]. *Territory & Natural Resources Study*, (4): 44–46 (in Chinese with English abstract).
- Xi Long, Chen Keheng, Huang Xiangqing, Gan Huayang, Xia Zheng, Tan Xiaoyu. 2021. Hydrogeochemistry and origin of groundwater in the south coast of Hainan[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(2/3): 350–363 (in Chinese with English abstract).
- Xu Leilei, Liu Haiqing, Jin Yan, Hou Yuanyuan, Zhao Yunlong. 2017. Characteristics of and problems from development and utilization of water resources in Hainan Province[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 37(9): 120–127 (in Chinese with English abstract).
- Xue Guicheng, Xia Nan, Liu Changzhu. 2011. Geological Environment Problems and Countermeasure of Mine in Hainan[J]. *Resources Environment & Engineering*, 25(6): 619–621 (in Chinese with English abstract).
- Yang Kun, Liu Wenquan, Xu Xingyong, Chen Guangquan, Liu Yanjun, Fu Tengfei, Wang Chuanjun, Fu Yunxia. 2019. Evaluation of seawater intrusion in typical coastal zones of Hainan Province[J]. *Marine Sciences*, 43(5): 57–63 (in Chinese with English abstract).
- Yang S T, Dong G T, Zheng D H, Xiao H L, Gao Y F, Lang Y. 2011. Coupling Xinanjiang model and SWAT to simulate agricultural non-point source pollution in Songtao watershed of Hainan, China[J]. *Ecological Modelling*, 222: 3701–3717.
- Zhang Kang, Han Dongmei, Cao Tianzheng, Song Xianfang, Wang Wei, Cao Yanling. 2023. Interaction between groundwater and seawater in bedrock islands[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 50(1): 3–12 (in Chinese with English abstract).
- Zhao L, Liu J Q, Cai G Q, Huang L, Luo WD. 2020. Distribution, source, and pollution assessment of heavy metals in Sanya offshore area, south Hainan Island of China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 160: 111561.
- Zhao Shengxu, Yang Tianxing, Wang Shanlin. 2003. Numerical modeling of flood prediction the Wanquan river basin in Hainan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4): 530–533 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guangzu. 2013. Research on the typical model of drinking water source protection in Hainan provincial rural areas[J]. *China Rural Water and Hydropower*, (7): 84–86 (in Chinese with English abstract).
- 蒋万军, 孟利山, 柳富田, 刘宏伟, 张竞, 宁航. 2022. 张家口地区地下水资源与环境质量现状及开发利用保护建议[J]. *华北地质*, 45(3): 44–54.
- 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天, 申益春. 2020. 海南省湿地生态系统健康评价体系构建与应用[J]. *湿地科学*, 18(5): 555–563.
- 李森, 孙武, 李凡, 林培松, 郑影华, 聂磊. 2005. 海南岛西部热带沙漠化土地特征与成因[J]. *地理学报*, 60(3): 433–444.
- 李文鹏. 2023. 对地表水与地下水重复量的认识与水资源开发利用理念探讨[J]. *水文地质工程地质*, 50(1): 1–2.
- 刘阳生. 2006. 海南省水资源与水环境现状分析及对策研究[J]. *水文*, 26(1): 89–91.
- 马涛, 李文莉, 韩双宝, 张红强, 王文科, 李甫成, 李海学, 贺旭波, 赵梅梅. 2023. 黄河流域陕西省地下水分布特征、影响因素及开发潜力[J]. *中国地质*, 50(5): 1432–1445.
- 倪向南, 郭伟. 2016. 海南岛西部沙化土地时空变化过程及其与气候因子的关系[J]. *第四纪研究*, 36(1): 144–153.
- 牛方曲, 杨欣雨, 孙东琪. 2020. 不同发展模式下水资源环境承载力评价—以海南省为例[J]. *热带地理*, 40(6): 1109–1116.
- 齐信, 王安涛, 黎清华, 王晓晗, 张再天. 2021. 海南省琼中县地下水质量评价研究[J]. *华南地质*, 37(3): 339–347.
- 祁泽学, 汪生斌, 王强民, 肖勇, 温川. 2022. 青海省格尔木冲洪积扇地下水资源评价及其开发利用价值[J]. *中国地质*, 49(3): 967–978.
- 谭冬飞, 张艳伟, 王璐, 徐亚平, 王济世, 刘潇威. 2018. 海南省部分区域农田地下水中全氟烷基酸类浓度水平和潜在污染源分析[J]. *农业环境科学学报*, 37(2): 350–357.
- 全长亮, 孙龙飞, 黄仕锐. 2020. 海南省海洋地质调查主要进展与成果[J]. *中国地质调查*, 7(1): 60–70.
- 王文国, 龙胤慧, 韩月, 苗涛田. 2015. 基于文化粒子群算法的三亚市水资源优化配置[J]. *水电能源科学*, 33(2): 33–36.
- 王文梅, 徐子东, 欧阳正平, 王江思. 2017. 海南省三亚市崖城地热田地球化学特征及成因分析[J]. *工程勘察*, (10): 38–45.
- 王秀杰, 封桂敏, 王丽娜. 2015. 海南省平原区浅层地下水脆弱性评价[J]. *南水北调与水利科技*, 13(3): 548–552.
- 吴恒. 2014. 海南省琼海市环境地质问题与防治对策建议[J]. *国土与自然资源研究*, (4): 44–46.
- 刁龙, 陈科衡, 黄向青, 甘华阳, 夏真, 谭晓煜. 2021. 海南南部沿海地下水水文地球化学及成因[J]. *地质通报*, 40(2/3): 350–363.
- 徐磊磊, 刘海清, 金琰, 侯媛媛, 赵云龙. 2017. 海南省水资源开发利用特点及主要水资源问题[J]. *热带农业科学*, 37(9): 120–127.
- 薛桂澄, 夏南, 柳长柱. 2011. 海南省矿山地质环境问题及防治对策[J]. *资源环境与工程*, 25(6): 619–621.
- 杨坤, 刘文全, 徐兴永, 陈广泉, 刘衍君, 付腾飞, 王传珺, 付云霞. 2019. 海南省海岸带典型区域海水入侵现状评价[J]. *海洋科学*, 43(5): 57–63.
- 张康, 韩冬梅, 曹天正, 宋献方, 王威, 曹艳玲. 2023. 基岩海岛地下水与海水相互作用研究[J]. *水文地质工程地质*, 50(1): 3–12.
- 赵旭升, 杨天行, 王珊珊. 2003. 海南万泉河流域洪水预报数值模拟[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 33(4): 530–533.
- 周祖光. 2013. 海南省典型乡村集中式饮用水源地保护研究[J]. *中国农村水利水电*, (7): 84–86.

附中文参考文献

- 常春荣. 2006. 海南省三大河流及地下水硝酸盐含量调查分析[J]. *华南热带农业大学学报*, 12(3): 20–24.
- 陈伊柳, 李硕, 徐慧珺, 乔雪. 2019. 海南中部生态核心区流域水资源横向生态补偿方法[J]. *生态学杂志*, 38(4): 1149–1156.
- 符广卷, 张航飞, 吴多誉, 王晓林. 2021. 三亚市原生环境水文地质问题与防治对策[J]. *地下水*, 43(5): 5–10.
- 高燕, 李江风, 周学武, 汪琨. 2013. 海南国际旅游岛视野下的滨海地