

doi: 10.12029/gc20210301

马震,夏雨波,李海涛,韩博,余学中,周亚龙,王雨山,郭旭,李洪强,裴艳东. 2021. 雄安新区自然资源与环境—生态地质条件分析[J]. 中国地质, 48(3): 677–696.

Ma Zhen, Xia Yubo, Li Haitao, Han Bo, Yu Xuezhong, Zhou Yalong, Wang Yushan, Guo Xu, Li Hongqiang, Pei Yandong. 2021. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 48(3):677–696(in Chinese with English abstract).

雄安新区自然资源与环境—生态地质条件分析

马震^{1,2,3}, 夏雨波^{1,2,3}, 李海涛^{3,4}, 韩博^{1,2,3}, 余学中^{3,5},
周亚龙^{3,6}, 王雨山^{3,7}, 郭旭^{1,2,3}, 李洪强^{3,8}, 裴艳东^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170; 3. 中国地质调查局雄安城市地质研究中心, 天津 300170; 4. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 5. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 6. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 7. 中国地质调查局水文地质环境地质中心, 河北 保定 071051; 8. 中国地质科学院, 北京 100037)

提要: 自然资源、环境本底及生态地质条件调查是城市地质调查的基础, 可为城市国土空间规划、建设及精细化管理提供有效的基础地质支撑。随着雄安新区城市进程的加快, 使得其自然资源与生态环境发生了翻天覆地的变化。本文基于雄安新区综合地质调查成果, 明确了雄安新区自然资源与生态环境本底条件, 分析了建设周期内自然资源变化趋势, 探讨了未来城市建设应关注的自然资源与生态地质问题。结果表明, 雄安新区设立后, 土地利用类型发生了巨大改变, 林地面积增加约 58.1 km², 草地面积增加约 2.0 km², 耕地面积减少 68.8 km², 建设用地增加 7.2 km², 土壤质量以优质和良好为主; 雄安新区浅层与深层地下水水位总体呈现从西北部往东南部流动, 水位逐渐降低, 局部存在地下水降落漏斗, 浅层地下水水位埋深一般为 5~20 m, 以企稳回升为主, 深层地下水水位一般为 25~35 m, 水位下降区占比仍较高; 白洋淀湿地动植物资源丰富, 水质逐渐好转; 地热资源开采利用条件好, 全区地热流体可开采热量为 10.10×10¹⁶ J/a, 折合标准煤 346.03 万 t/a; 应重点关注新区存在的生态环境地质问题如地面沉降及地裂缝、地下水水位变化、砂土液化、坑塘、软弱土等, 避免因生态环境地质问题引发工程事故, 必要时应采取有效的预防措施。

关键词: 雄安新区; 自然资源; 生态地质; 地质调查工程; 城市建设

中图分类号: P642 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)03-0677-20

Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area

MA Zhen^{1,2,3}, XIA Yubo^{1,2,3}, LI Haitao^{3,4}, HAN Bo^{1,2,3}, YU Xuezhong^{3,5}, ZHOU Yalong^{3,6},
WANG Yushan^{3,7}, GUO Xu^{1,2,3}, LI Hongqiang^{3,8}, PEI Yandong^{1,2,3}

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. North China Center of Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China; 3. Xiongan Urban Geological Research Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. China Institute

收稿日期: 2021-03-05; 改回日期: 2021-04-20

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20189122、DD20189142、DD20189132、DD20190300、DD20211292)资助。

作者简介: 马震, 男, 1966 生, 教授级高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究工作; E-mail: tjmazhen@126.com。

通讯作者: 韩博, 男, 1984 生, 博士, 工程师, 主要从事水工环地质与城市地质调查与研究工作; E-mail: hanbo1984@126.com。

of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 5. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 6. Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China; 7. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei China; 8. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China)

Abstract: The investigation of natural resources, environmental background and ecological geological conditions is the basis of urban geological survey, which can provide effective basic geological support for urban land spatial planning, construction and delicacy management. With the acceleration of urban development in Xiongan New Area, earth-shaking changes have taken place in its natural resources and ecological environment. Based on the comprehensive geological survey results of Xiongan New Area, the background conditions of natural resources and ecological environment are defined in Xiongan New Area, the variation trend of natural resources is analyzed in the construction cycle, and the natural resources and ecological issues are discussed that should be paid attention to in future urban construction. The results show that the type of land use has been changed dramatically after the establishment of Xiongan New Area. Woods land area increased by about 58.1km², grass land area increased by about 2.0 km², cultivated land decreased by 68.8km², and construction land increased by 7.2 km². The soil quality is mainly superior and good. The water table of shallow and deep groundwater generally flows from northwest to southeast in Xiongan New Area and gradually decreases, and depression cones of groundwater exit locally. The depth to ground water in shallow aquifers, mainly stabilizing and rising, is generally 5~20 meters. The depth to ground water in deep aquifers is generally 25~35 meters, and the area of water table decline is still relatively high. The wetland of Baiyangdian is rich in animal and plant resources and its water quality is improving gradually. The exploitation and utilization conditions of geothermal resources are good, and the recoverable heat of geothermal fluid is 10.10×10^{16} J/a, equivalent to 3.4603 million tons/year of standard coal. The ecological environment geological problems should be focused, such as land subsidence and ground cracks, changes of groundwater table, sand liquefaction, potholders and soft soil, etc. existing in the New Area. The effective preventive measures should be taken when necessary to avoid engineering accidents caused by ecological environment geological problems.

Key words: Xiong'an New Area; natural resources; ecological geology; geological survey engineering; urban construction

About the first author: MA Zhen, male, born in 1966, professor, engaged in hydrogeology, engineering geology, environmental geology survey work; E-mail: tjmazhen@126.com.

Fund support: Funded by China Geological Survey Project (No. DD20189122, No. DD20189142, No. DD20189132, No. DD20190300, No. DD20211292).

1 引 言

设立河北雄安新区,是以习近平同志为核心的党中央深入推进京津冀协同发展作出的一项重大决策部署,是疏解北京非首都功能的集中承载地,是一项重大历史性战略选择,是千年大计、国家大事。习近平总书记指出:“建设雄安新区,要顺应自然、尊重规律,构建合理城市空间布局;要坚持生态优先,绿色发展,努力建设绿色低碳新区。”而雄安新区的城市化进程必将促使其自然资源环境与生态地质条件发生改变(荣月静等,2020),因此,在大规模建设雄安新区之前,必须摸清雄安新区自然资源环境与生态地质本底条件,在建设过程中,应以高度关注高质量发展的生态保障作用。

雄安新区综合地质调查工程是中国地质调查局组织实施的一项系统的城市地质调查工作(林良俊等,2017),获取了一批工程建设前唯一的、全面的、高精度的自然资源与环境调查数据(郝爱兵等,2018;马震等,2019;袁路朋等,2019;韩博等,2020;周亚龙等,2021),为服务雄安新区城市规划、建设及运行管理与雄安城市地质标准体系构建(林良俊等,2021)的需求提供了精准的基础自然资源与生态地质资料。

本文在梳理已有地质成果资料基础上,系统总结了雄安新区自然资源环境与生态地质本底条件,分析了雄安新区成立以来自然资源环境与生态地质条件变化趋势,提出了雄安新区未来建成与运行阶段需关注的主要环境地质问题,为雄安新区长期

稳定运营提供地球系统科学解决方案,旨在支撑京津冀一体化协同发展与疏解非首都功能提供地质科学依据(马震等,2017)。

2 雄安新区概况

雄安新区位于河北平原中部,地处北京、天津、保定腹地,距北京、天津均为105 km,距石家庄155 km,距保定30 km,距北京大兴新机场55 km(图1)。规划范围涉及河北省雄县、容城、安新3县及周边部分区域,规划面积1770 km²,雄安新区区位优势明显、交通便捷通畅、生态环境优良、资源环境承载能力较强,现有开发程度较低,发展空间充裕,具备“高起点规划、高标准建设”的基本条件。

雄安新区位于太行山东麓、河北平原中部。地势西部和北部略高、东部和南部稍低,地面高程5~20 m,坡降0.2‰~0.7‰,地势相对平坦。容城—雄县一线以北为冲(湖)积微倾斜平原,上部为近代河流冲积层或扇前洼地堆积物,下覆冲洪积层;容城—雄县一线以南为冲(湖)积低平原,由近代河流冲

积和湖沼沉积形成(马岩等,2020)。

雄安新区属暖温带季风型大陆性半湿润半干旱气候,春季干旱多风、夏季高温多雨、秋季天高气爽、冬季寒冷干燥。年平均气温12.7℃,多年平均降水量478 mm,多年平均最大蒸发量1761.7 mm。

3 自然资源环境与生态地质本底条件

3.1 土地资源

3.1.1 土地利用类型

根据雄安新区2019年第四季度自然资源遥感调查数据(图2),可以直观地总结出雄安新区各类土地资源数量、用地类型、空间分布等土地资源状况(田俏,2019;侯春飞等,2021)。2019年,雄安新区共有耕地、林地、草地、建设用地、地表水体、其他等6种土地利用类型(表1),分别是831.2 km²、335.2 km²、18.6 km²、305.1 km²、274.1 km²、5.8 km²,分别占新区面积的46.96%、18.94%、1.05%、17.24%、15.48%、0.33%。雄安新区的林地类型包括林地和其他林地,均为人工林;草地类型包括人工草地和其他草地。

3.1.2 土壤环境质量

根据雄安新区表层土壤质量地球化学综合等级评价结果(表2,图3),调查区土壤质量以优质和良好为主,其中:一等优质土地面积为43058.60 hm²,表明土壤环境清洁无污染风险,土壤养分丰富至较丰富,占调查区总面积的35.31%;二等良好土地面积为53338.73 hm²,表明土壤环境清洁无污染风险,土壤养分中等,占调查区总面积的43.74%;三等中等地块面积为25111.80 hm²,表明土壤环境清洁无污染风险,土壤养分较缺乏或者土壤环境污染可控,占调查区总面积的20.59%;四等差等土地面积为294.47 hm²,表明土壤环境清洁无污染风险或污染可控,土壤养分缺乏,占调查区总面积的0.24%;五等劣等土地面积为146.93 hm²,表明土壤环境污染风险较高,土壤养分缺乏,占调查区总面积的0.12%,五等劣等土地主要零星分布于安新县老河头镇、安州镇等地。

3.2 水资源

3.2.1 水资源量

雄安新区3县多年平均降水516 mm,水资源总量 1.2×10^8 m³,其中91%为地下水(表3)。雄安新区

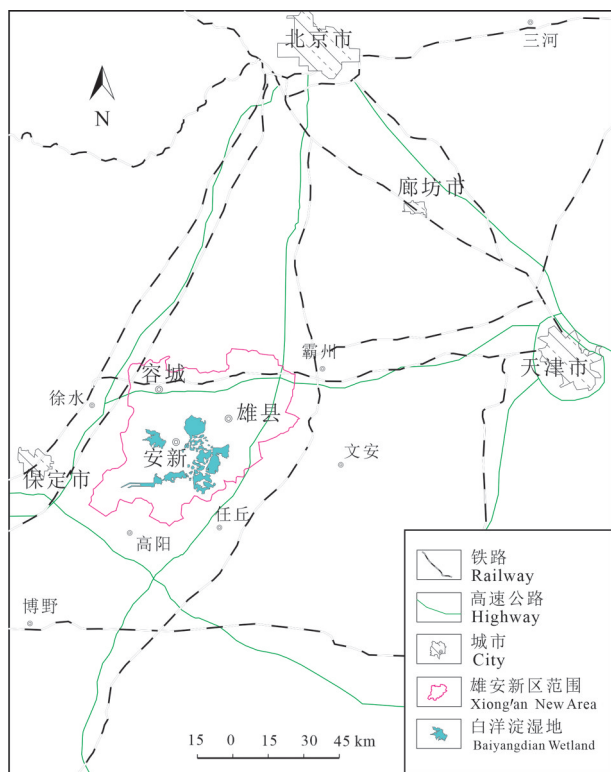


图1 雄安新区地理位置示意图

Fig. 1 Geographical location of the Xiong'an New Area

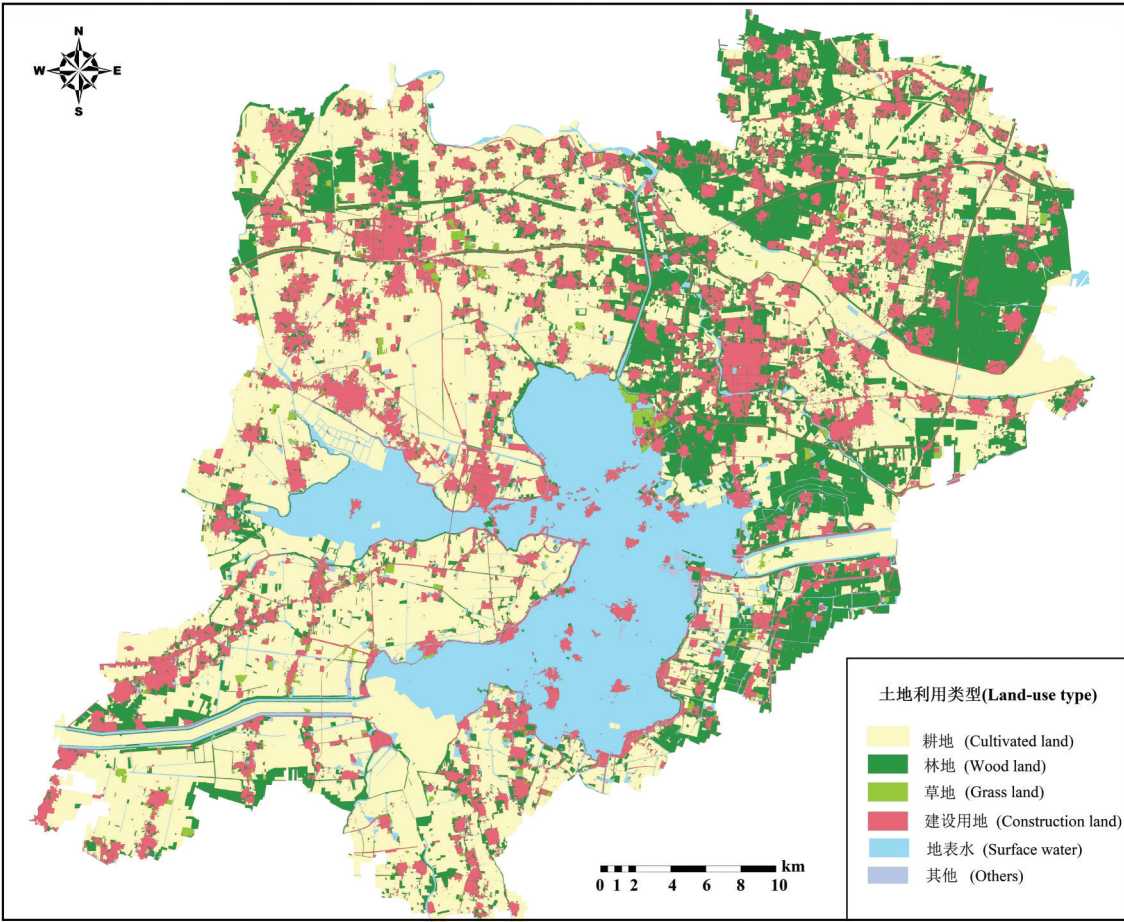


图2 雄安新区土地利用类型现状图(2019年第四季度自然资源遥感数据)

Fig.2 The current situation of land use types in the Xiong'an New Area (remote sensing data of natural resources in 4th quarter of 2019)

及周边区域地下水类型主要为松散岩类孔隙水,含水层以第四系中、细砂为主,该区域富水性受地貌条件和沉积物成因类型控制明显,且富水性与含水层岩性、厚度及地下水的补给条件密切相关(凤蔚等,2017)。雄安新区的水资源承载能力已经较低,水资源开发潜力较弱(王树强等,2017;董卫爽等,2018)。

雄安新区浅层地下水水位埋深一般为5~20 m,最大水位埋深为47 m(雄县米家务镇)(图4a)。浅

层地下水沿白洋淀淀区周边水位最高,从淀区往容城县、雄县米家务乡和新区西南部三个方向流动,水位逐渐降低。深层地下水水位埋深一般为25~35 m,最大水位埋深为58 m(雄县龙湾镇)(图4b)。深层地下水水位从西北部容城方向往东南部任丘文安方向流动,水位逐渐降低。

3.2.2 水环境

(1)地表水环境

表1 雄安新区土地利用类型一览

Table 1 The list of land use types in the Xiong'an New Area

土地利用类型	总面积/km ²	比例/%
耕地	831.1	46.96
林地	335.2	18.94
草地	18.6	1.05
地表水体	274.1	15.48
建设用地	305.1	17.24
其它用地	5.8	0.33
合计	1770	100.00

表2 雄安新区优质耕地和污染土地统计

Table 2 Statistics of high quality cultivated land and polluted land in the Xiong'an New Area

土壤质量 综合等级	调查区土地		调查区耕(园)地	
	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%
一等 优质	43058.60	35.31	34423.07	42.99
二等 良好	53338.73	43.74	33122.53	41.37
三等 中等	25111.80	20.59	12412.73	15.50
四等 差等	294.47	0.24	84.33	0.11
五等 劣等	146.93	0.12	22.73	0.03

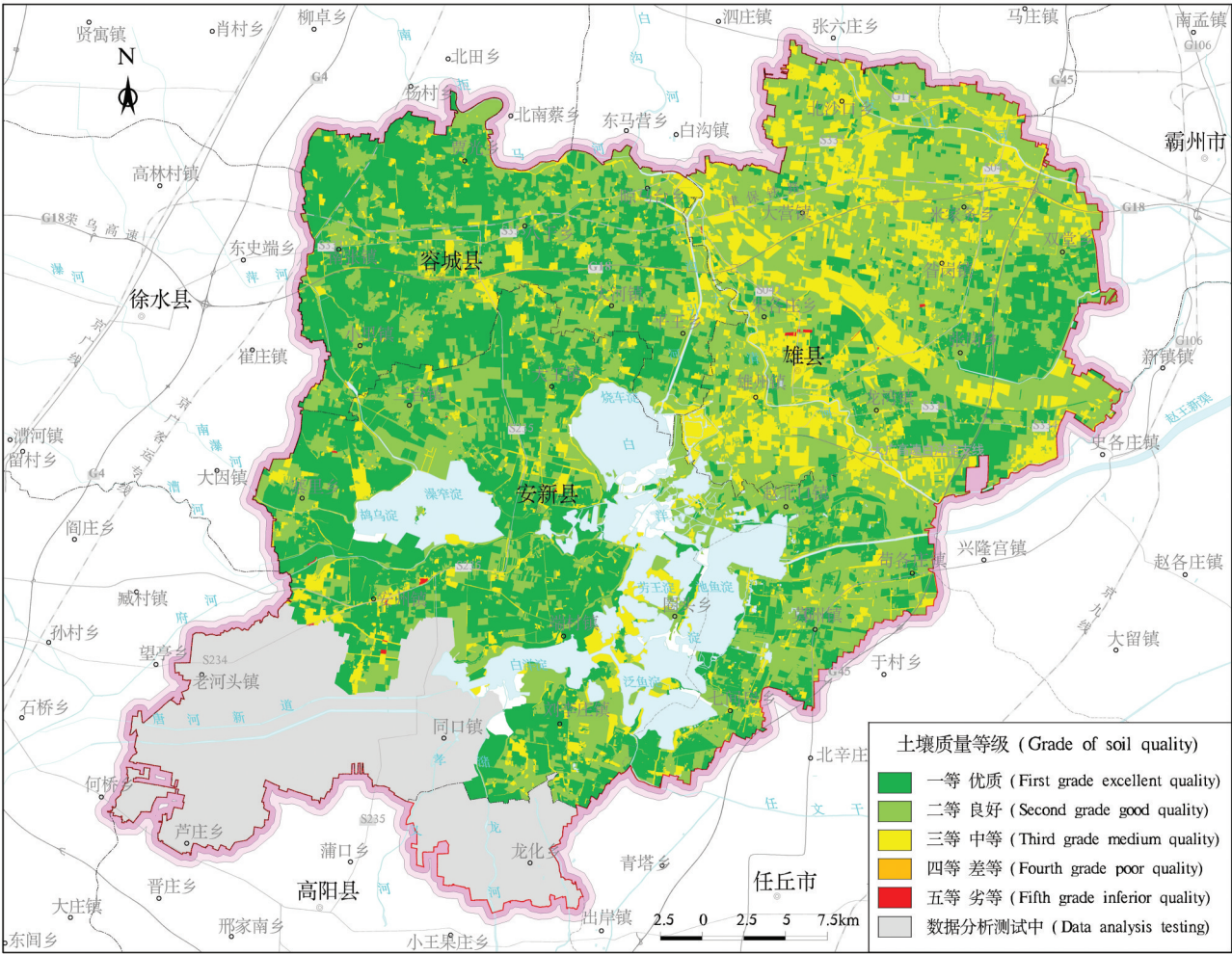


图3 雄安新区2018—2020调查区土壤质量地球化学综合等级评价图
Fig.3 Comprehensive evaluation map of soil quality geochemistry in 2018—2020 in the Xiong'an New Area

雄安新区境内多数河流已断流,现只有府河、白沟引河、孝义河、瀑河4条河流承接城市(镇)生活污水和工业废水后入淀。据水利部部门发布的国省控断面监测数据水质评价结果,2016年拒马河新盖房断面水质明显好转由劣V类变为Ⅳ类,轻度污染,主要污染物为化学需氧量;府河安州断面水质为劣V类,重度污染,主要污染为总磷;府河望亭断面水质为

劣V类,重度污染,主要污染物为氨氮和总磷。
(2)地下水环境
地下水是雄安新区重要的饮用水源和工农业供水水源。根据2019年采集的360个地下水样品测试数据分析评价(其中浅层170个,深层190个),结果表明该区浅层地下水总体质量较好,深层地下水质量优良。

表3 雄安新区3县多年平均水资源状况
Table 3 Average water resources in three counties of the Xiong'an New Area over the years

县名	降雨量 /(mm/a)	地表水资源量 /(10 ⁸ m ³ /a)	地下水资源量 /(10 ⁸ m ³ /a)	水资源总量 /(10 ⁸ m ³ /a)
容城县	518	0.0232	0.3613	0.3522
安新县	514	0.0569	0.4797	0.4200
雄县	517	0.0282	0.4667	0.4546
合计	516	0.1083	1.3077	1.2268

32%的浅层地下水可作为饮用水供水水源,主要分布在容城县大部及雄县西北部地区。37%的浅层地下水简单处理后可作为饮用水供水水源。31%的浅层地下水不宜作为饮用水供水水源(但可作为工农业供水水源),主要分布在白洋淀周边的容城县东南部、雄县东部、安新县南部等地区。浅层地下水质量主要影响指标为硫酸盐、锰、溶解性总固体、氟化物、铁等。其中,硫酸盐超标区域主要集中

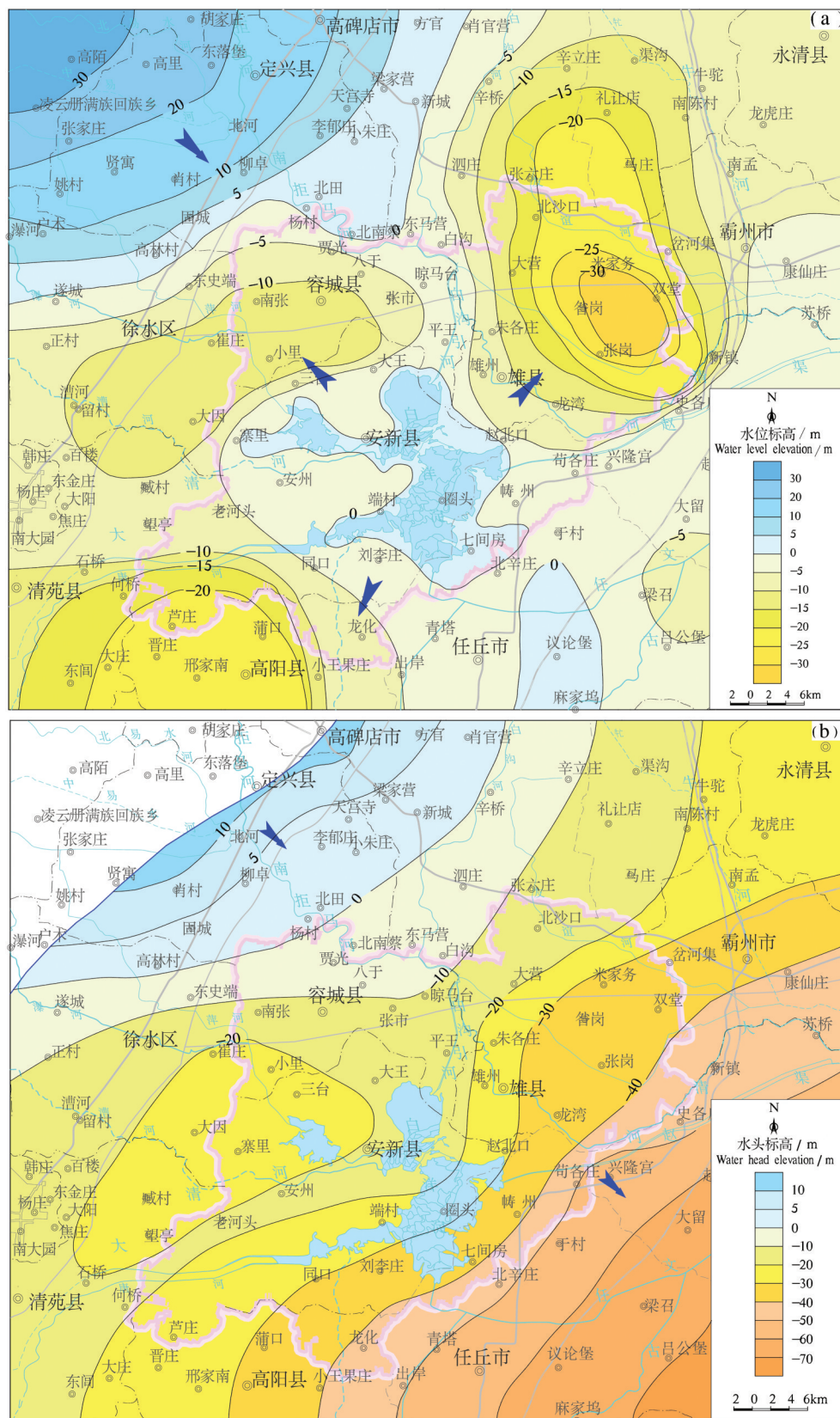


图4 雄安新区浅层地下水(a)和深层地下水(b)等水位(头)线图(2019.6)

Fig.4 Diagram of isowater level (head) of shallow groundwater (a) and deep groundwater (b) in the Xiong'an New Area (2019.6)

在雄县东部和安新西南部地区,雄县东部局部地区硫酸盐含量达 1800 mg/L。锰超标区分布较为广泛,除容城县大部及雄县北部区域外,均存在锰超标问题,最高浓度为 0.9 mg/L。

69%的深层地下水可作为饮用水供水水源,30%的深层地下水处理后可作为饮用水供水水源,主要分布在容城县东部、雄县南部等部分地区。深层地下水质量主要影响指标为氟化物和六价铬,主要分布在雄县东部地区,最高浓度为 1.7 mg/L。个别深层地下水样品中,存在重金属六价铬超标问题,主要分布在容城东南部与安新县交界处。

3.3 湿地资源

3.3.1 白洋淀湿地资源

白洋淀湿地是河北平原上最大的淡水湿地,主体位于安新县境内,总面积约 366 km²,东西长 39 km,南北宽 28 km,由 143 个淀泊、3700 多条沟壕组成,自然景观以水、沼泽、芦苇为主,水体面积占白洋淀总面积的 50%左右。

白洋淀湿地常见的大型水生植物有 47 种,包括 21 种挺水植物,7 种浮叶植物,4 种漂浮植物,15 种沉水植物。淀区主要包括莲花、芦苇、芡实、菱角等水生植物群。其中,芦苇是淀区分布最广的植物,现有芦苇 8000 hm²,年产量 7500 万 kg。另外,分布藻类植物共 9 门,11 纲,26 目,55 科,142 属,406 种,27 变种。优势科包括鼓藻科、舟形藻科、色球藻科等 13 个科,包括了 70 属 292 种。

白洋淀动物资源丰富,盛产鲑鱼、鲤鱼、青鱼、虾、河蟹等 40 多种鱼虾。白洋淀还是候鸟迁徙内陆通道途中的重要食物与能量补充栖息地。区内有鸟类 197 种,其中国家一级保护鸟类 4 种(大鸨、白鹤、丹顶鹤、东方白鹳),国家二级保护鸟类 26 种(灰鹤、大天鹅、鹰科、隼科等),有重要科研、经济和社会价值的 158 种,河北省有重要科研、经济和社会价值的 52 种,有野生两栖爬行动物 3 种,哺乳类 14 种,鱼类 54 种。

3.3.2 湿地生态地质条件

淀区内湿地现状景观主要由湿地植被(156.4 km²)和水域(50.9 km²)组成,景观破碎化程度较高,淀区内现有的旱地(87.2 km²)和水田(17.2 km²),主要分布于藻苈淀的北侧、南侧及南部的马棚淀和小白洋淀淀区内(图 5)。

在地貌上,白洋淀处于太行山东麓的滹沱河冲积扇平原和永定河冲积扇平原夹持的低洼地区,由于河流的差异堆积作用,在冲积扇或古河道高地之间逐步形成了一系列扇间洼地和河间洼地,构成了白洋淀湖盆。

白洋淀底泥岩性为黑色、灰黑色淤泥,含水率较高,呈流塑—软塑状,下部岩性为灰黑—土黄色粉质黏土。烧车淀底泥厚度 0.04~0.49 m,均值 0.21 m;藻苈淀底泥厚度 0.04~0.27 m,均值 0.09 m,在北何庄周边和留村南存在 2 个明显的底泥蓄积带,蓄积带底泥厚度一般超过 0.1 m,泥量占到总底泥量的三分之一;小白洋淀底泥厚度 0.04~0.60 m,均值 0.16 m,在端村镇东南和高楼村西北存在 2 个底泥蓄积带,蓄积带底泥厚度一般超过 0.2 m,泥量占到总底泥量的四分之一。此外,小白洋淀各码头及村庄附近底泥厚度较大。

2017 年对白洋淀淀水采样分析表明,超 V 类占比样品总数 91.78%,在全淀水域广泛分布;V 类占比 2.74%,分布于藻苈淀东部水域;IV 类 4 组,占比 5.48%,分布于白洋淀中东部与藻苈淀东部。超标组分主要包括高锰酸盐指数、COD、总氮、总磷、石油类、挥发酚、氟化物(以 F⁻ 计算)、硫化物和 BOD₅。

3.4 地热资源

雄安新区的能源资源主要为地热资源,包括浅层地热能 and 深部地下热水资源。

浅层地热能开发利用条件较好,但利用量低。全区浅层地热能开发利用的总能量折合标准煤 400 万 t,可满足约 1 亿 m² 建筑物供暖、制冷需要,在开发利用效率为 35% 条件下每年可减排二氧化碳 300 万 t。

深部地下热水资源主要分布在雄县、容城、高

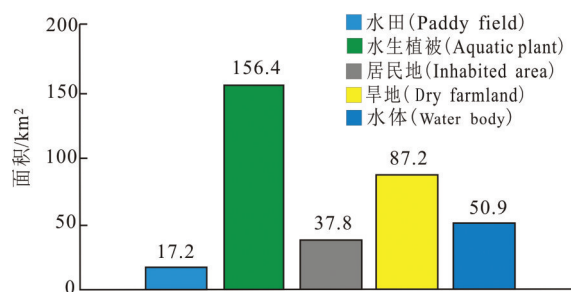


图 5 白洋淀淀区景观分布面积统计

Fig.5 Statistics of landscape distribution area in the Baiyangdian Area

阳 3 个大中型地热田,具有热储埋藏浅、水温较高、水质好、易回灌的特点。资源类型分为孔隙型热储(即古近-新近系热储)和构造裂隙型热储(即基岩热储)。

目前,4000 m 以浅可开采热储层为新近系明化镇组、馆陶组孔隙热储与基岩热储。经初步计算,雄安新区评价总面积 1637.12 km²,全区雾迷山组、高于庄组、寒武奥陶以及馆陶组 4 个热储层地热资源量 5928.66×10^{16} J,地热流体储存量 376.69×10^8 m³。采灌均衡条件下全区地热流体可开采资源量为 4.00×10^8 m³/a,地热流体可开采热量为 10.10×10^{16} J/a,折合标准煤 346.03 万 t/a。

3.5 地质环境

3.5.1 水文地质

(1) 主要含水层水文地质特征

雄安新区主要含水层为第四系含水层,分为 4 个含水层组。第 I 含水层组和第 II 含水层组地下水称为浅层地下水,第 III 含水层组和第 IV 含水层组地下水称为深层地下水。

浅层地下水可分为潜水和浅层承压水,含水层岩性主要以粉细砂、细砂为主,厚度一般小于 40 m,底界深度一般 120~200 m。浅层地下水水位埋深一般在 5~20 m,白洋淀周边区域地下水水位埋深较浅。雄安新区大部分地区属于中等富水区;唐河两侧相对较大,属于较强富水区;雄县东南部一带相对较小,属于弱富水区。

深层地下水为承压水,含水层岩性主要以粗、中、细砂为主。厚度一般在 100~180 m,底板深度一般在 385~550 m。深层地下水水位埋深一般为 25~35 m,在靠近白洋淀区域埋深较小。雄安新区大部分属于较强富水区;雄县东南部一带及安新县西部局部地区属于中等富水区。

(2) 地下水补给径流排泄条件

浅层地下水主要接受大气降水补给,同时接受农业灌溉、地表水入渗补给及侧向径流补给。地下水主要排泄方式为人工开采,其次为径流和蒸发排泄。现状条件下,浅层地下水总体由西北向东南方向流动。在白洋淀附近形成局部水丘,地下水向周边径流。

深层地下水主要接受侧向径流补给,垂向补给较少。排泄方式以人工开采为主,其次是向下游径

流排泄。现状条件下,深层地下水总体由西北向东南径流。

3.5.2 工程地质

根据工程地质条件,可将雄安新区分为两个工程地质区。容城县三台镇—大王镇—雄县—双堂乡以北为冲洪积平原工程地质区,从地表至地下 50 m 深度,土体承载力由 130~160 kPa 增加到 300 kPa 左右,在东部和中部地区存在砂土液化与地下水腐蚀性问题;容城县三台镇—大王镇—雄县—双堂乡以南为冲湖积平原工程地质区,从地表至地下 50 m 深度,土体承载力由小于 130 kPa 增加到 200 kPa 左右,在该区普遍存在软弱黏土层与地下水腐蚀性问题。

3.5.3 主要环境地质问题

(1) 地面沉降与地裂缝

雄安新区位于雄县—固安沉降区南部及高阳—任丘沉降区北部,受两个沉降中心的影响,新区地面沉降主要发育南北两个区域,北部分布在雄县大营镇—北沙口一带,呈北东向展布,与霸州、固安沉降区连成一片;南部分布在安新县芦庄乡—老河头镇及龙化乡—刘李庄镇一带,与高阳沉降区连成一片。2017 年以来沉降发育有逐渐减小的趋势,截止 2019 年底,雄安新区地面沉降区面积约 1536 km²、占 87%,最大年沉降量为 168.9 mm。其中,地面沉降轻微区(年地面沉降量介于 0~10 mm)面积约 620 km²、占 35%,地面沉降一般区(年地面沉降量介于 10~30 mm)面积约 634 km²、占 36%,地面沉降较严重区(年地面沉降量介于 30~50 mm)面积约 154 km²、占 9%,地面沉降严重区(年地面沉降量大于 50 mm)面积约 128 km²、占 7%。

雄安新区共发现地裂缝 78 处(图 6),大致以三台镇—大王镇—赵口镇为界线,以北广泛发育,以南零星分布,且主要集中于容城县城附近,容城与定兴、高碑店、雄县交界区域,雄县与任丘交界区域,及在清河县、南拒马河两侧。主要表现为线性和片状塌坑两种形式。其中,线性地裂缝共计 47 处,均为小型地裂缝,开裂长度多不足 100 m,仅有两处地裂缝长度大于 100 m(雄县雄州镇半庄村地裂缝、雄县张岗乡方庄村东地裂缝),宽度范围 0.2~6.7 m,延伸方向无明显规律性;片状塌坑地裂缝共计 31 处,一般无方向性,塌坑长度范围 1.3~11.9 m,宽度范围 0.3~5.2 m。

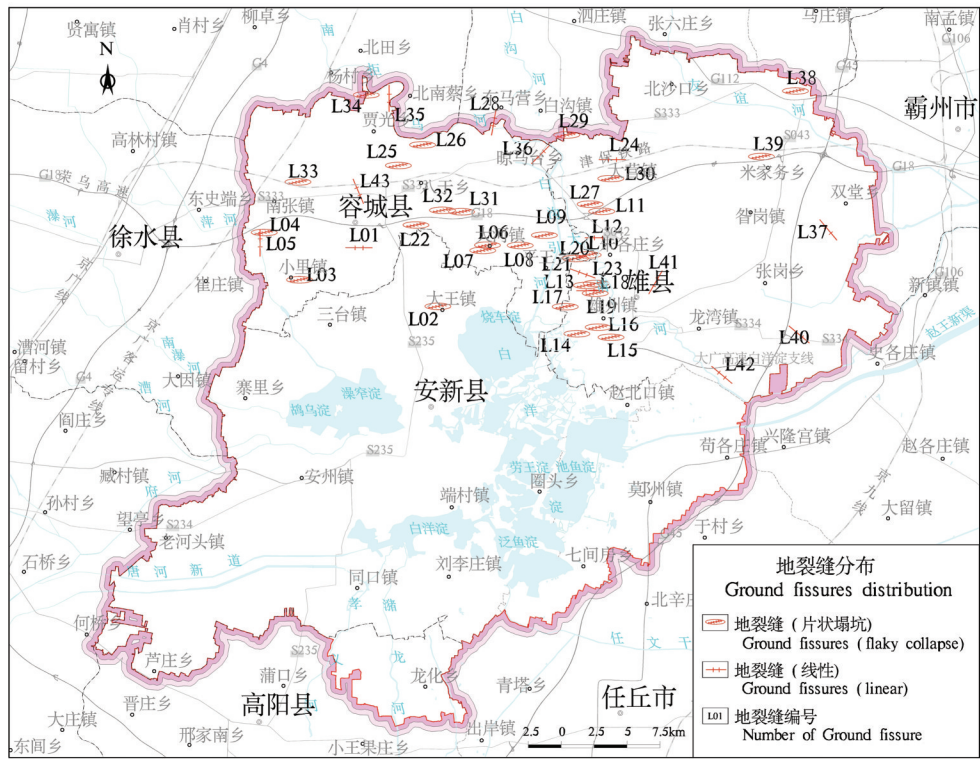


图6 雄安新区地裂缝现状分布示意图
Fig.6 Current distribution diagram of ground fissures in the Xiong'an New Area

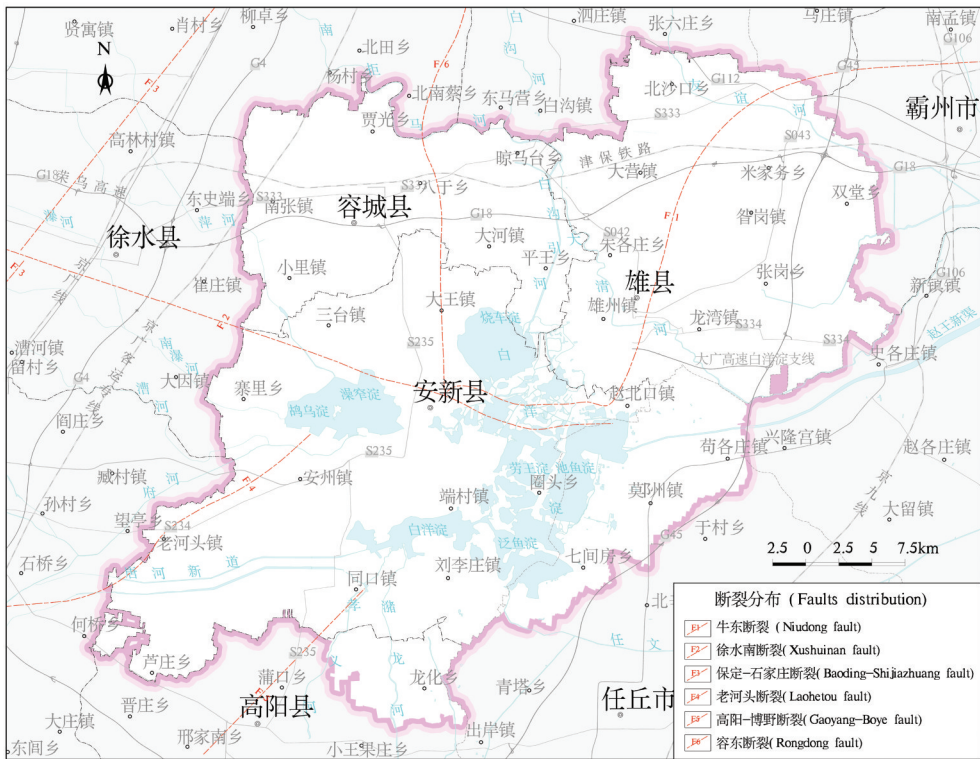


图7 雄安新区断裂分布图
Fig.7 Fault distribution map of the Xiong'an New Area

(2)活动断裂与地震

雄安新区及其邻区断裂和地震现今活动微弱,从已有地震活动角度看,雄安新区整体处于构造稳定区。雄安新区及周边主要发育牛东断裂(F1)、徐水—安新断裂(又称徐水南断裂)(F2)、保定—石家庄断裂(F3)、老河头断裂(F4)、高阳—博野断裂(F5)和容东断裂(F6)等6条断裂(图7),均为不活动断裂。据历史地震资料统计,雄县、安新、容城三县境内历史上没有发生过6级以上破坏性地震。

(3)砂土液化

雄安新区内地表以下20 m深度范围内广泛分布有粉土、粉细砂层,存在地震砂土液化的可能。根据现状水位条件下的砂土液化判别结果(图8),砂土液化区主要分布在安新一赵北口片区和南部的安州—七间房片区,以轻微液化为主;在郑州、刘李庄、安新县城等极小部分地区分布中等—严重液化区。

(4)坑塘

雄安新区共有坑塘720个,其中土坑608个,水塘112个,坑塘深度范围为1~30 m,土坑长度范围为1~1300 m,以80~300 m为主,所占土方体积范围为

0.24万 m^3 至512万 m^3 ,坑塘总开挖土方体积为19593万 m^3 。

根据坑塘土方数将坑塘分为3个等级,分别为大型、中型、小型(表4),发现有大型坑塘共238个,中型坑塘共263个,小型坑塘共206个,已填埋坑塘共13个,具体见表5。这些坑塘中有286个坑塘堆放有垃圾,146个坑塘存有污水,其中109个为垃圾、污水复合型坑塘,这些都是地下水潜在污染源。

(5)软弱土

雄安新区内未发现严格意义的软土。本次工作将孔隙比接近1.0、含水量大于或接近30%、压缩系数大于0.4的黏性土称为软弱土。软弱土以淤泥质粘土为主,分布在冲湖积区的张岗乡—雄县县城以东、鄭州镇、刘李庄镇、安州镇西部以及安新县县城西部地带,面积193 km^2 ,占工作区面积10.9%(图9)。主要分布于地下1.4~10.0 m,厚度在0.3~1.8 m。天然密度1.67~1.90 g/cm^3 ,平均值为1.80 g/cm^3 ;天然含水量为24.9%~51.4%,平均值为34.2%;孔隙比为0.870~1.366,平均值1.037;压缩系数为0.40~0.93,平均值为0.57。

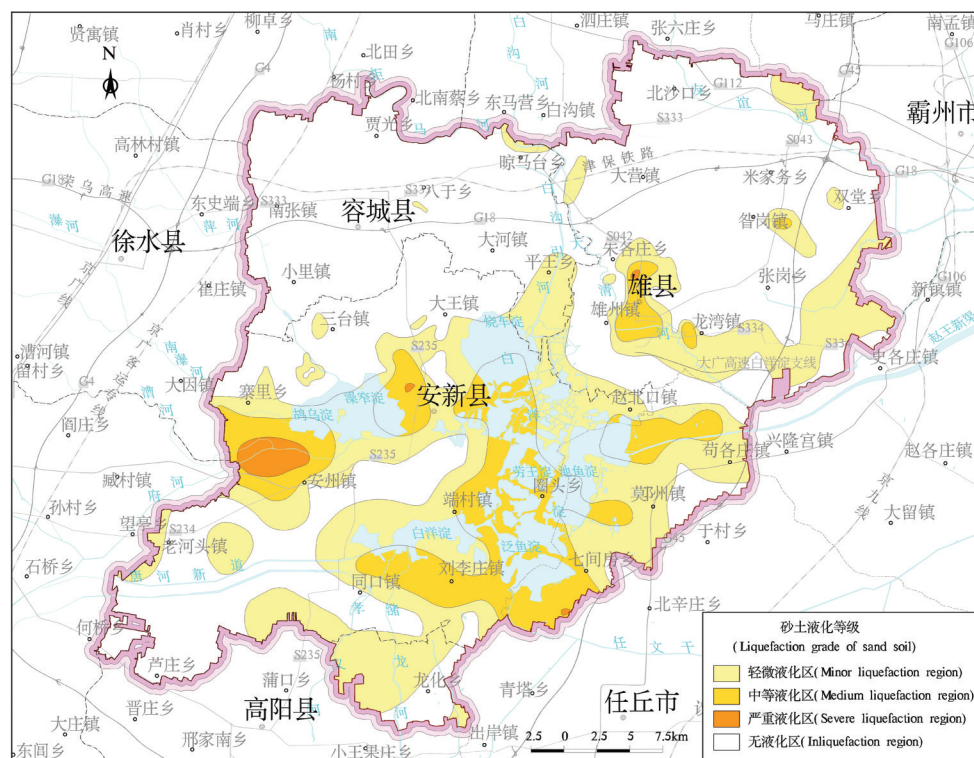


图8 雄安新区现状地下水位条件下砂土液化分布图

Fig.8 Distribution map of sand liquefaction under current groundwater level in the Xiong'an New Area

表4 坑塘等级划分依据

Table 4 Basis of potholes grading

坑塘等级	坑塘所占土方数	坑塘深度等级
大型	>20万m ³	以8m为界
中型	5~20万m ³	以8m为界
小型	<5万m ³	以8m为界

软弱土埋深在0.4~11.0 m,地基承载力 70~90 kPa,加荷后变形量大,易产生滑动破坏,造成地基失稳,使建筑物沉降过大或不均匀沉降,对建筑物造成不同程度的破坏。

4 建设周期内自然资源变化趋势

4.1 土地资源

雄安新区林草资源总体呈增加趋势,耕地资源有所减少。2019年,雄安新区有耕地面积 831.1 km²,林地面积 335.2 km²,草地面积 18.6 km²。受新区开始大规模建设、“千年秀林”植树造林系列工程活动等影响,与2018年同期解译数据(3月)相比,雄安新区林地面积增加约 58.1 km²,草地面积增加约 2.0 km²,耕地面积减少 68.8 km²,建设用地增加 7.2 km²。随着新区大规模建设以及生态保护措施的不断完善,土地利用类型变化趋

表5 坑塘分级统计

Table 5 Statistical table of pit and pond classification

等级	点数	含大于8m深度	含小于8m深度
大型	238	157	81
中型	263	98	165
小型	206	36	170
已填埋	13	-	-

势将继续增加。

4.2 水资源

4.2.1 地表水

雄安新区地表水资源主要集中在白洋淀湿地。白洋淀主要淀泊地表水位变化特征基本一致,主要受大气降水、人工补水以及蒸散发影响。由2019年6—11月白洋淀地表水位变化(图10)可以看出,2019年7月1日至20日,水位呈波动中下降趋势,至7月20日水位降至最低,为6.71 m;7月21—31日,受白洋淀地区两次强降雨影响,水位呈上升趋势;8月1日至10月2日,白洋淀地表水位除局部时段受降雨影响略微增高外,大部分时段水位持续下降。10月3日以后,引黄济淀水源到达淀区,所有监测站点水位均逐渐上升。

4.2.2 地下水

(1)地下水位(头)长时间序列动态变化特征

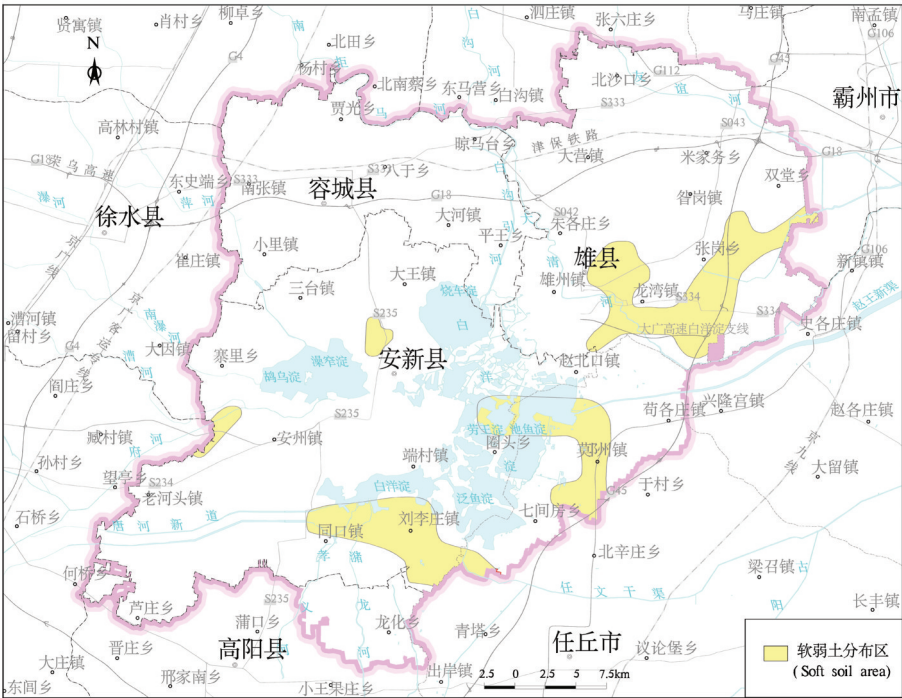


图9 雄安新区软弱土分布图

Fig.9 The distribution map of soft soil in the Xiong'an New Area

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2021, 48(3)

雄安新区浅层地下水水位与深层地下水水头变化趋势基本一致。由雄安新区地下水水位(头)历时曲线(图11)可知,20世纪80年代到90年代中期,地下水水位缓慢下降,浅层地下水水位年内变化主要受降雨和农业灌溉的影响,而深层地下水头则主要受人工开采的影响。1996—2014年,地下水水位持续较快下降,浅层地下水头下降约15 m,平均每年下降约0.83 m;深层地下水头下降约20 m,平均每年下降1.11 m。2014年禁(限)采以来,浅层地下水

位下降速率变缓,年下降速率约0.50 m;深层地下水头2014—2016年期间年均降幅为0.77 m,2016—2019年水头年均降速达1.83 m。

(2)区域地下水水位(头)年际变化特征

根据2019年12月雄安新区地下水监测数据可知,雄安新区浅层地下水呈稳定及回升态势,深层地下水下降比例仍然较高。浅层地下水水位稳定和上升区面积占新区面积65%以上。受降水量增加、南水北调补水、引黄济淀和种植结构调整等因

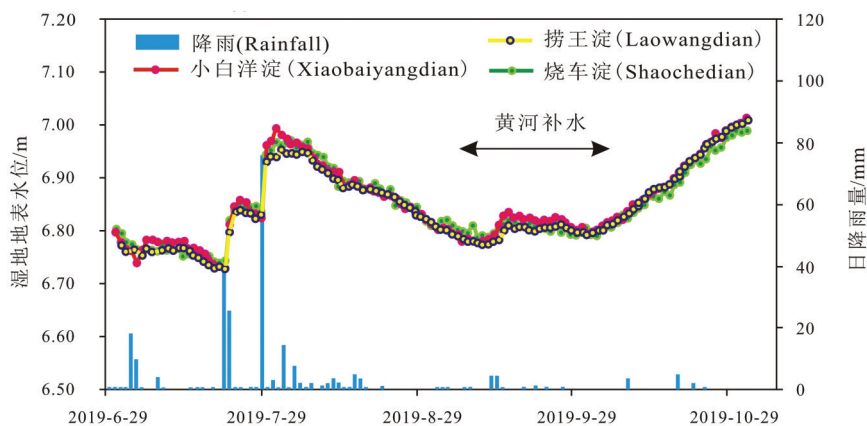


图10 2019年6—11月白洋淀地表水位变化

Fig.10 Changes of surface water level in the Baiyangdian Lake from June to November 2019

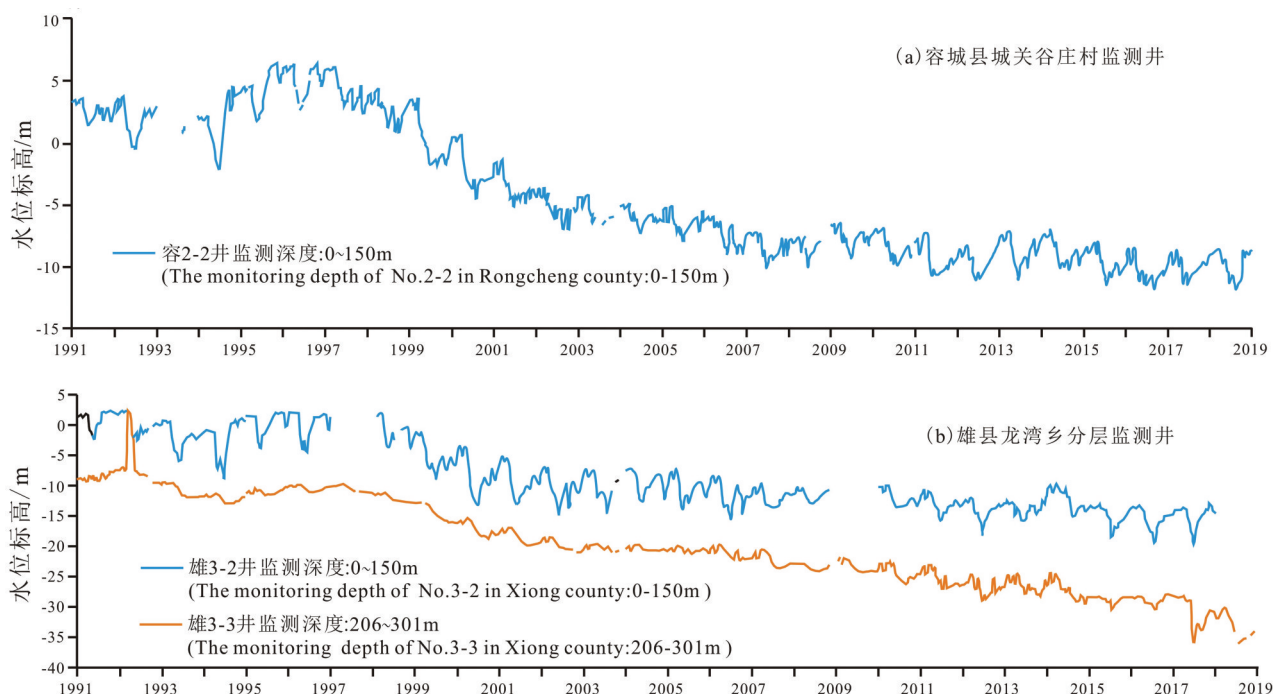


图11 雄安新区地下水水位(头)历时曲线(1991—2019)

Fig.11 Diachronic curve of groundwater level (head) in the Xiong'an New Area (1991—2019)

素影响,容城县城、晾马台乡、贾光乡等地区浅层地下水水位明显上升。深层地下水水位下降区面积占新区面积近50%。由于大部分地区生活供水仍采用深层地下水,导致深层地下水水位持续下降,其中芦庄—端村—赵北口—胥岗沿线东南地区深层地下水水位下降明显。

4.3 湿地

近45年来,由于入淀水量减少,白洋淀湿地水位总体呈下降趋势,其中1984—1988年连续5年干淀。水位下降对白洋淀湿地生态系统的组成、结构和功能均产生了一定影响,尤其是发生的连续干淀,给白洋淀湿地生态系统造成了非常严重的破坏,水生动植物大量灭绝,湿地生物多样性急剧减少。至1988年,由于白洋淀流域发生洪水,使得白洋淀湿地得以恢复。此后,由于加大了对白洋淀湿地的生态补水的力度,使得白洋淀水位得以恢复并维持在6.6~8.6 m。

白洋淀湿地的开阔水域面积与水位呈较好的相关性(图12)。当地表水位低于通常认定的干淀水位条件下(小于5.05 m),烧车淀、藻荇淀、小白洋淀等大部分淀泊的水域消失,整个淀区仅有少量的孤立淀洼表面残存积水,淀洼之间表面无水力联系;随着水位的上涨,淀区内湿地植被和开阔水域面积增长,淀泊间地表水力联系也逐渐恢复,当水位达到6.5 m后,白洋淀湿地的大部分淀泊水域和湿地植被基本恢复。

白洋淀水质在20世纪50年代多为Ⅲ类,1964年以后白洋淀水质恶化为Ⅳ类或Ⅴ类,20世纪70—90年代,水质进一步下降,到90年代白洋淀污染程度急剧增加,水质多为Ⅴ类或者劣Ⅴ类。90年代以后,污染程度有所降低,但水质仍以Ⅴ类或劣Ⅴ类为主。2001—2009年,水质有所好转,多为Ⅳ类或者Ⅴ类,主要超标组分为高锰酸钾指数和氨氮。2017年雄安新区成立以来,白洋淀水质持续改善,湖心区水质已提升到Ⅳ类,超标组分主要为COD、总氮和总磷。

4.4 地热资源

雄安新区碳酸盐岩热储水位呈逐年下降趋势,漏斗中心部位地下水承压水头下降速率达到2~6 m/a;出水温度稳定,目前为止未监测到下降。2019年监测结果显示,雄安新区碳酸盐岩热储层地下水

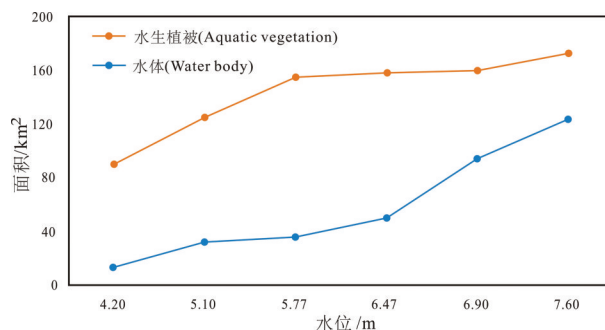


图12 白洋淀开阔水域及水生植被分布面积与地表水位关系曲线

Fig.12 Water-vegetation change characteristics at different water levels

位埋深为80~130 m,集中开采区地下水位埋深普遍大于100 m,雄县水位埋深大于容城;井口水温为51~109℃,雄县凸起高于容城凸起。最新钻探结果显示,高阳地热田深部碳酸盐岩热储出水温度超过100℃。地热资源开发利用潜力巨大。

4.5 地质环境

4.5.1 地下水降落漏斗

(1) 浅层地下水降落漏斗

根据2019年6月浅层地下水统测数据分析(图13a),新区范围内分布有3个浅层地下水降落漏斗,与2018年度漏斗位置基本保持一致。雄县浅层地下水降落漏斗面积约500 km²,较2018年减少1 km²,漏斗中心水位埋深为50 m;容城县浅层地下水降落漏斗面积约262 km²,较2018年减少38 km²,漏斗中心水位埋深24 m;安新县西南部浅层地下水降落漏斗面积约261 km²,较上年增加了37 km²。

(2) 深层地下水降落漏斗

根据2019年6月深层地下水统测数据分析(图13b),雄安新区存在2个深层地下水降落漏斗,与2018年度漏斗位置基本保持一致。其中,安新县西部三台镇至寨里乡一带地下水降落漏斗面积约183 km²,较2018年减少6 km²,漏斗中心水位埋深49 m;安新县东南沿线连片地区地下水降落漏斗中心位于任丘县东部,漏斗面积约942 km²,较上年增加29 km²,漏斗中心水位埋深约78 m。

4.5.2 地面沉降

雄安新区分布4个地面沉降影响区,以轻微和一般区沉降区为主,近年来总体呈减缓趋势。

雄安新区大部分区域无地面沉降发育或沉降

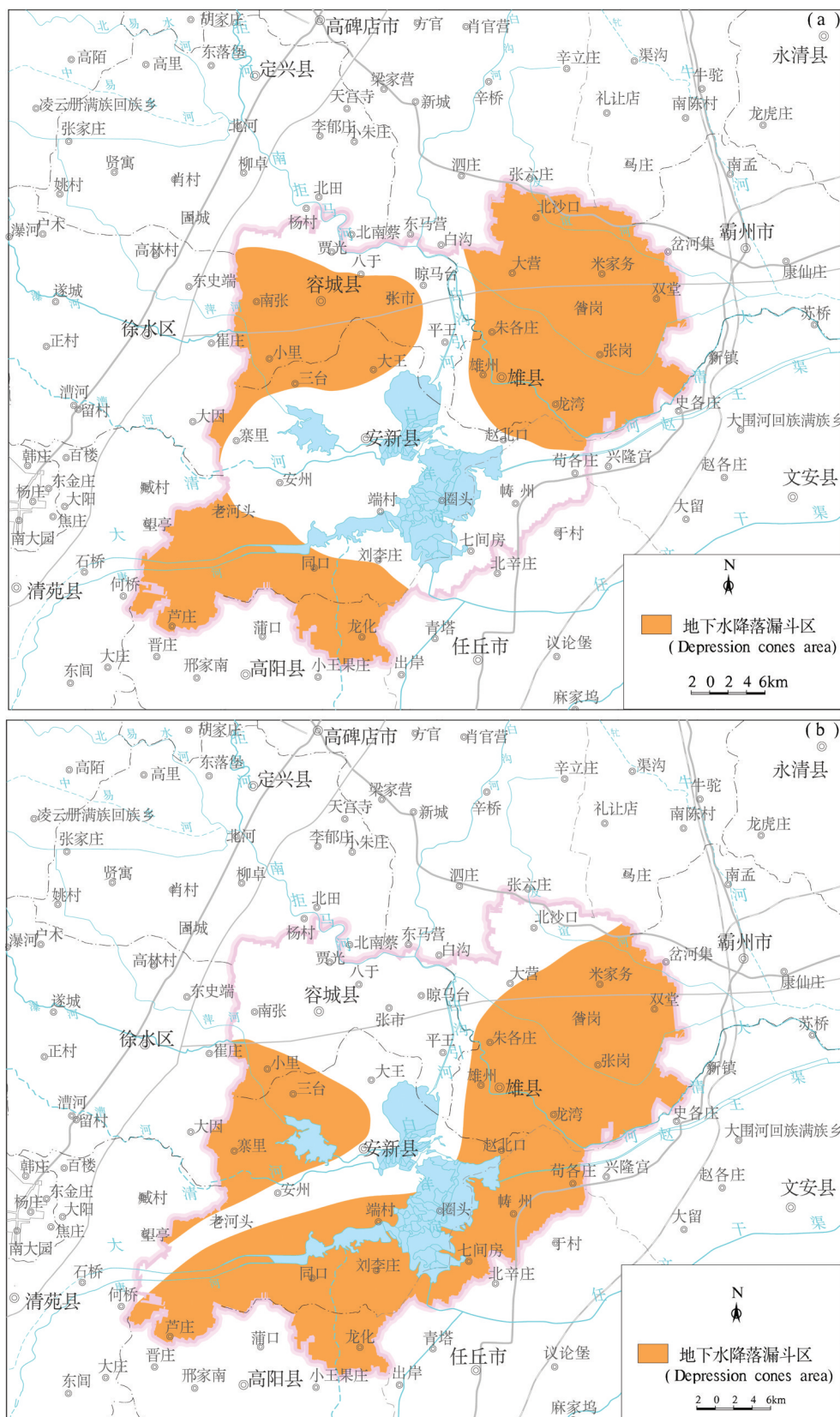


图13 雄安新区浅层(a)和深层(b)地下水降落漏斗分布图(2019-06)

Fig.13 The distribution map of groundwater depression cones area in shallow (a) and deep (b) layers in the Xiong'an New Area (2019-06)

速率较小。2015—2018年新区地面沉降发育逐渐减缓,沉降发育面积逐渐减缓较大,至2018年度沉降发育区域仅为595.58 km²。2018年沉降区面积较2017年减少约200 km²,轻微和一般区(年沉降速率 ≤ 30 mm/a)面积减少247.27 km²,值得注意的是,沉降速率大于30 mm/a的沉降面积都有所增加,其中,较严重沉降区(年沉降速率介于30 mm/a和50 mm/a)面积增加约31.29 km²,严重沉降区(年沉降速率小于等于介于50 mm/a和80 mm/a)面积增加约17.29 km²,特别严重区(年沉降速率大于80 mm/a)面积增加约14.52 km²,增加面积主要在雄县大营沉降区及南部安新芦庄—龙化沉降区,安新芦庄—龙化沉降区增大趋势较明显(表6)。

4.5.3 地裂缝

(1) 地裂缝分布发育特征

雄安新区地裂缝集中分布区,地貌上为冲洪积平原亚区与冲积平原亚区交接地带,多分布在古河道高地或微高地小区、河漫滩地小区,在本区河漫滩地小区更为集中发育。地裂缝还受微地貌控制,较多出现在河堤、塘坑边缘等地。地裂缝多数分布在亚砂土、粉质黏土中。雄安新区78处地裂缝中,有准确时间记录的地裂缝有26处,其中17处地裂缝发生于5—9月份,全年约65%的地裂缝发生在此时段,这说明降雨加重了地裂缝的形成,同时也使一些隐伏地裂缝显于地表。

(2) 地裂缝成因

根据地裂缝调查、物探、探槽及该区域的构造断裂情况分析,目前,雄安新区发现的地裂缝不是区内断裂直接引发的,不具备构造地裂缝的特征。雄安新区地裂缝主要是以人类活动影响或外营力地质作用为主形成的地裂缝,形成原因主要为近年来降雨量的持续减少和地下水超采,造成地下水位的大幅下降,使包气带加厚,改变了原来土体结构与应力状态,包气带土体因失水收缩产生裂隙,在有地表水渗入流动作用下,沿土体裂隙、树木根

系大空隙对浅部土层产生潜蚀,当产生侵蚀洞穴时上覆土层不能承受其自重或荷载时,便发生塌坑,形成地裂缝,为渗透潜蚀型地裂缝。

4.5.4 活动断裂与地震

雄安新区及周边区域地质构造稳定,基本不会对工程建设造成影响,但需关注基岩断裂未来活动和失稳风险,以及华北典型强震区断裂活动对新区的影响。

根据雄安新区周边活动断裂和地震调查监测结果,主要发育的石家庄—保定断裂、牛驼镇凸起东缘断裂以及向徐水—大城断裂3条隐伏基岩断裂,晚更新世以来活动微弱。在当前地应力环境下,三条主要隐伏基岩断裂均不存在滑动失稳风险,但仍需实时监测地应力动态变化,关注3条主要隐伏基岩断裂未来活动趋势和滑动失稳风险。

唐山、邢台和张北强震区内主要潜在震源区再次发生震级上限地震时产生的地震烈度衰减至雄安新区时分别为IV~VII度、IV~VI度和IV~VI度,建议将雄安新区及相关重大工程抗震设防烈度调整至VIII度。

4.5.5 砂土液化

考虑到地下水压采导致的水位上升,借鉴北京、石家庄和保定的抗浮水位经验值,按地下水位埋深10 m进行预估水位条件下的地震液化判别。地下水位埋深小于10 m时,按实际水位埋深考虑;地下水位大于10 m时,按10 m水位埋深考虑。

评价结果(图14)显示,砂土液化区主要分布在雄县县城—安新县县城—赵北口镇、安州镇—七间房乡、同口镇、大营镇西部一带,局部地区呈点状、岛状分布。砂土液化等级以轻微液化为主,局部为中等或严重液化。预测水位为5 m和2 m时,砂土液化区的面积明显增大。

砂土液化在震动后,会使地基失效,导致不同程度的沉陷,使地面建筑物倾斜、开裂、倾倒、下沉,道路的路基滑移,路面纵裂;在河流岸边,则表现为

表6 雄安新区2018年地面沉降情况统计
Table 6 Statistical table of land subsidence in Xiong'an New Area in 2018

沉降区	沉降中心	沉降区面积/km ²	年沉降速率>50 mm		最大年沉降 速率/mm
			面积/km ²		
雄县北部沉降区	大营镇	200.76	67.22		130~140
容城县沉降区	容城县城、小李镇	183.17	0		20~30
三台镇申明亭工业园区沉降区	申明亭工业园区	1.31	0	40~50(2015—2017年沉降速率较大)	
安新芦庄—龙化沉降区	龙化乡、芦庄乡	210.10	13.42		70~80

岸边滑坡、桥梁落架等。

砂土液化发育区建议采用振冲、夯实、爆炸、挤密桩等措施,提高砂土密度,排水降低砂土孔隙水压力,换土,板桩围封,或采用整体性较好的筏基、深桩基等方法进行处理。

5 未来城市建设应关注的问题

5.1 土地利用类型变化引起的问题

(1) 耕地

根据《雄安新区总体规划》,以2019年第四季度为现状年,雄安新区总体规划纲要规划期限截止年(2035年)为预测年。永久基本农田面积将由46.96%降低到10%,农田面积将减少654.2 km²。按照冬季种小麦、夏季种玉米的方式(现状主体方式),雄安新区农业灌溉每年将减少用水1.82亿t,考虑到部分利用南水北调用水,地下水开采量将进一步降低。《2019年河北省水资源公报》公布2019年河北省雄安新区地下水资源量为0.72亿m³(河北省水利局,2019),地下水处于超采状态,待雄安新区建成后,地下水资源将实现盈余,年开采量将小于0.49

亿m³,可适当开展棚室为条件的蔬菜及水果种植,构建新区农业现代化,推广节水灌溉技术,提升新区农业科技含量和农业种植文化。

(2) 林地、草地

以2019年第四季度为现状年,雄安新区总体规划纲要规划期限截止年(2035年)为预测年。林、草地等生态用地将由19.99%提高至40%,提升372.8 km²。温带针阔混交林平均蒸腾量约为1.46 mm/d(张彦群等,2008),年总蒸腾量约为3.77亿m³,雄安新区年降水量约为6.38亿m³(赵本龙等,2016),在纲要中起步区规划了多条人工河流,在雄安新区暴雨模式下(马丁,2019),可以促进地表径流的排泄,林带对地下水的吸收作用不可忽略。林草等生态用地面积的增加,对改善土壤性质(王红营等,2016;杨瑞祥等,2019)、促进生态恢复(Xin et al., 2020)起到积极作用,但在干旱半干旱地区植树造林会增加蒸腾作用,增大地表水和地下水的消耗(Luis et al., 2016; Torben et al., 2017; 殷志强等, 2020),导致浅层地下水水位在一定程度上的下降(Tóth et al., 2014)。树木吸收表层土壤中的水分,

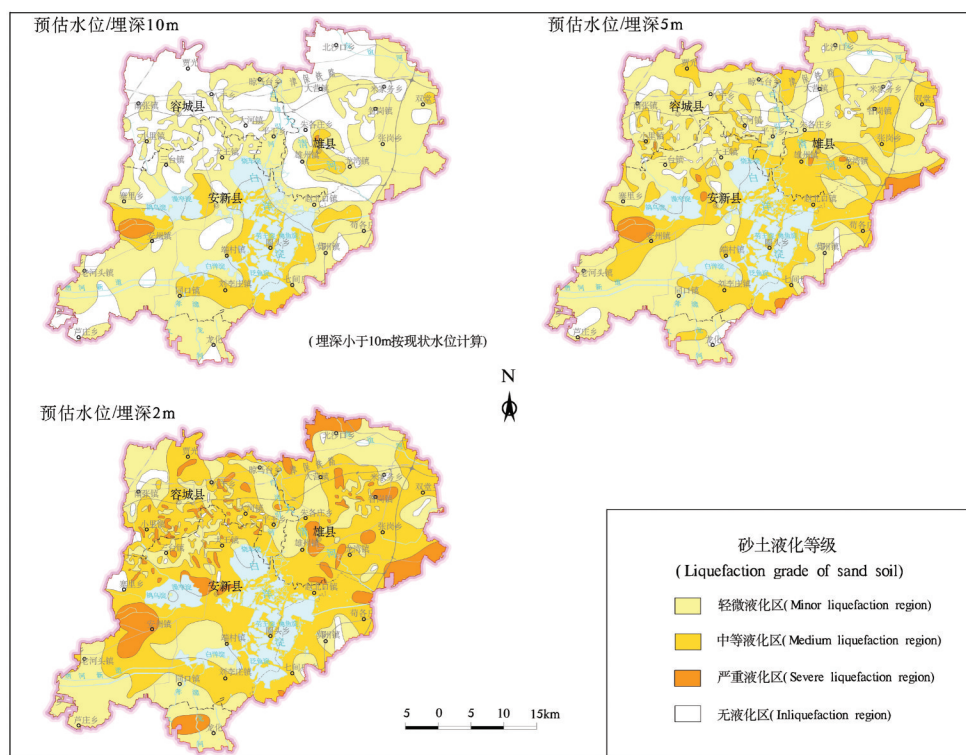


图14 雄安新区预估地下水位条件下砂土液化分布图

Fig. 14 Distribution map of sand liquefaction under estimated groundwater levels in the Xiong'an New Area

使细颗粒的土壤干裂,降雨入渗由活塞式变为捷径式,增加了产生局部小规模地裂缝的风险,雄安新区发现的地裂缝有很多都是发育在林地当中。不同种类的树木的蒸腾量不同,越是根系深大的树木对土壤水的吸收作用越强,同时人工林的种植也存在一定风险,地下水埋深与天然生态植被生长关系密切(曹乐等,2020),地下水位的下降会影响人工林的成活率,城市中的林带有利于减缓地下水水位上升增加地下构筑物浮力的风险。

(3)建设用地

雄安新区地表岩性以粉土为主,局部为粉质黏土。雄安新区天然状态下地表渗透系数约为0.5~2 m/d,根据新区总体规划中林地、公园绿地、居住及配套服务和道路等用地类型,其中居住及配套服务和道路比例将占据雄安新区面积的30%,这两种用地类型的平均渗透系数仅为0.012 m/d,这将大大降低地表的渗透量和对地下水的补给量,形成地表径流,由人工河流排入白洋淀区,这有利于减缓城区地下水水位上升增加地下构筑物浮力的风险。

综上,耕地的减少使得灌溉量减少,地下水开采量降低;林草地的增加将增大植物蒸腾作用,减少地下水的下渗;建筑用地的增加将导致有效入渗面积的减少;人工水系的增加与硬化路面将促进有效地表径流的产生和汇集,降低地表入渗量。因此,雄安新区地下水水位会在一定程度上上升,但受到蒸腾作用和入渗量降低的影响,不会产生较高的地下水水位。

5.2 地下水位上升引起的问题

采用GMS(Groundwater Modeling System)构建起步区100 m以浅地下水渗流场数值模拟模型,模拟限采条件下的地下水位图,模拟结果显示在停采后的15年内,地下水位持续上升。停采5年后(图15a)地下水位平均上升了0.68 m;在白洋淀的补给作用下,起步区南部-5 m水位范围明显增大。停采10年后(图15b)在持续的补给作用下地下水位持续上升,水位平均上升了3.44 m。停采15年后(图15c)地下水位平均上升了5.68 m。

近年来,由于雄安新区浅层地下水水位以企稳回升为主,地下水水位的上升将对地下基础设施施工和地下空间开发及安全运营产生重大影响,建议

加密地下水监测,并采取有效工程预防措施,防止因地下水上升导致的地下构筑物抗浮失稳、基坑突水、隧道涌水等工程事故。

5.3 白洋淀湿地生态保护问题

白洋淀曾一度干涸,给湿地生态系统造成了极大的破坏。随着白洋淀生态补水以及环境修复的开展,白洋淀湿地生态系统有待进一步改善。在进行城市建设的同时,应建立湿地保护制度、加大保护经费投入力度、完善生态监测体系,加强白洋淀湿地范围内自然资源(特别是动植物资源)和生态环境保护,防止湿地范围内动植物种类和数量减少、水质恶化以及生态系统崩溃等问题的发生。

5.4 开发利用地热面临的问题

雄安新区地热资源开发潜力巨大,但在开发利用过程中仍存在问题,比如地热资源勘查工作落后,雄安新区地热资源储量有待进一步查明,缺乏统一的标准和管理体系,资金投入力度不够,开发方式粗放、资源利用不足等。因此,在地热开发过程中,要使地热勘查与地热开发保持同步,综合利用地热资源,合理规划地热开发,提高地热能利用技术,加强地热开发的监管力度,使地热资源得到科学合理、持久有效的开发。

5.5 影响工程建设的环境地质问题

地下水、地面沉降、液化砂土、坑塘、软弱土等地质环境因素会严重影响场地稳定性及工程建设的施工质量及进程(房万领等,2016;杜东等,2019;谢海澜等,2019;柳富田等,2020)。因此,在进行工程建设之前,应查明雄安新区工程场地地下水、地面沉降、液化砂土、坑塘、软弱土等地质环境因素的分布状况,加强对地下水、地面沉降、坑塘等地质环境因素的监测。在施工过程中,必要时应采取相应的防护措施,预防因这些环境地质问题而引起工程事故的发生。

6 结 论

(1)雄安新区有耕地、林地、草地、建设用地、地表水体、其他等6种土地利用类型,分别占新区面积的46.96%、18.94%、1.05%、17.24%、15.48%、0.33%;雄安新区浅层与深层地下水水位总体呈现从西北部往东南部流动,水位逐渐降低,局部存在地下水降落漏斗;白洋淀湿地动植物资源丰富,劣V类水

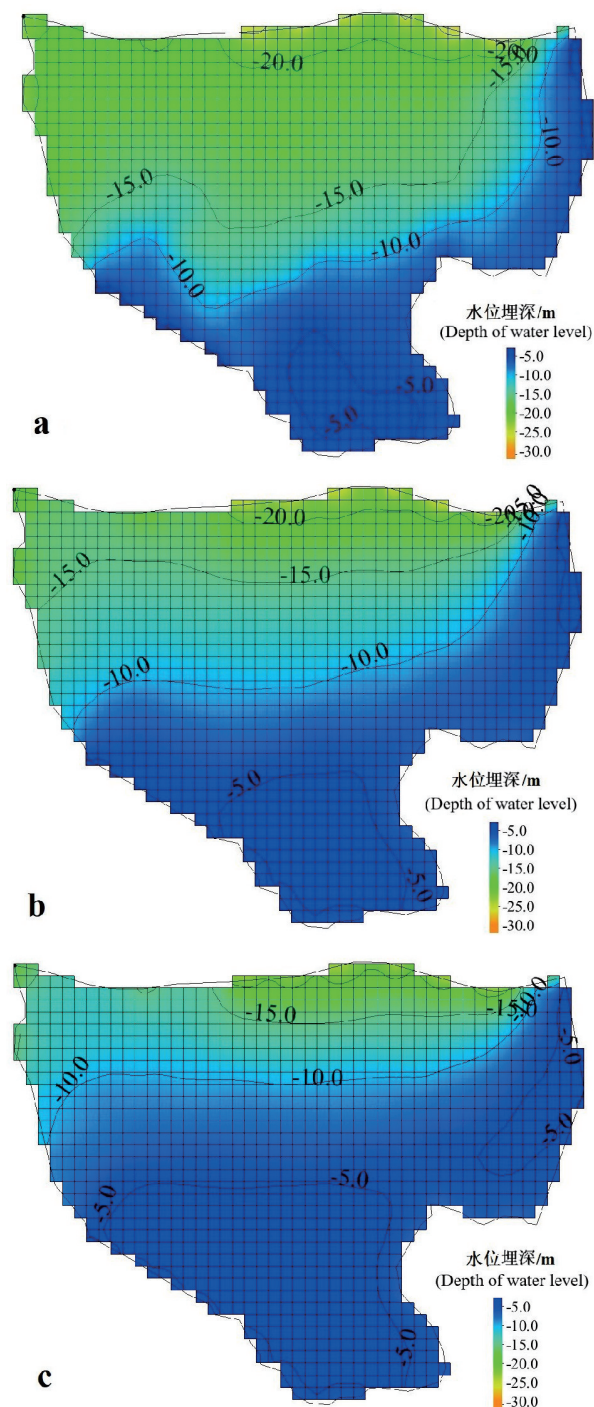


图15 现状水位条件下地下水停采后等水位线预测图
a—地下水停采后2025年等水位线图;b—地下水停采后2030年等水位线图;c—地下水停采后2035年等水位线图
Fig.15 Prediction contour of water table after stopping pumping under the condition of current groundwater table
a—The contour map of groundwater table in 2025 after stopping pumping; b— The contour map of groundwater table in 2030 after stopping pumping; c— The contour map of groundwater table in 2035 after stopping pumping

质占91.78%;地热资源丰富,全区地热流体可开采资源量为 $4.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,地热流体可开采热量为 $10.10 \times 10^{16} \text{ J/a}$,折合标准煤346.03万t/a;主要存在地面沉降及地裂缝、地下水降落漏斗、砂土液化、坑塘等环境地质问题。

(2)受新区开始大规模建设、“千年秀林”植树造林系列工程活动、白洋淀生态修复等影响,雄安新区林地、草地、建设用地面积呈增加趋势,耕地面积减少;浅层地下水水位以企稳回升为主,深层地下水下降区仍占比较高;白洋淀湿地动植物资源得到进一步保护,白洋淀水质逐步改善;地热资源储量更加明确,地热资源开发潜力巨大;地质环境监测网逐步完善。

(3)应加强雄安新区、白洋淀湿地自然资源及生态环境监测;开展地热资源监测工作,合理规划开发利用地热资源;完善雄安新区地面沉降及地裂缝、地下水、坑塘等地质环境监测系统;在工程建设时,应采取有效的防护措施,避免因环境地质问题引发工程事故。

References

- Cao Le, Nie Zhenlong, Liu Min, Lu Huixiong, Wang Lifang. 2020. Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 47(3):25–33(in Chinese with English abstract).
- Dong Weishuang, Yang Mingquan. 2018. Analysis on the carrying capacity of water resources in Xiongan New Area [J]. Inner Mongolia Ancient Water Resources, (2):57–59(in Chinese).
- Du Dong, Liu Futian, Liu Hongwei. 2019. Evaluation research of engineering geological environment stability in Caoheidian island area of Hebei province[J]. Geological Survey and Research, 42(4): 299–304(in Chinese with English abstract).
- Fang Wanling, Li Xueyun, Tian Depei, Wang Linhai. 2016. Comprehensive evaluation and analysis on the engineering geological stability of Tianjin urban construction [J]. Geological Survey and Research, 39(1):64–70 (in Chinese with English abstract).
- Feng Wei, Qi Xiaofan, Li Haitao, Li Wenpeng, Yin Xiulan. 2017. Wavelet analysis between groundwater level regimes and precipitation, North Pacific index in the Xiongan New Area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 44(6): 1–8(in Chinese with English abstract).
- Hao Aibing, Wu Aimin, Ma Zhen, Liu Futian, Xia Yubo, Xie Hailan, Lin Liangjun, Wang Tao, Bai Yaonan, Zhang Jing, Meng Qinghua.

2018. A study of engineering construction suitability integrated evaluation of surface-underground space in xiongan new area[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(5): 513–522 (in Chinese with English abstract).
- Han Bo, Xia Yubo, Pei Yandong, Ma Zhen, Guo Xu. 2020. Engineering geological characteristics and environmental geological effect of underground space in Xiongan New Area [J]. *Geotechnical Investigation & Survey*, 48(3): 1–8(in Chinese with English abstract).
- Hou Chunfei, Han Yongwei, Meng Xiaojie, Liu Lixiang. 2021. Effects of land-use change on ecosystem service values in Xiong'an New Area from 1995 to 2019[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 47(6):1668–1676(in Chinese with English abstract).
- Lin Liangjun, Hu Qiuyun. 2017. Localization of eight key tasks of geological survey in Xiongan New Area [J]. *Resources and Industry*,19(4): 5 (in Chinese).
- Lin Liangjun, Ma Zhen, Guo Xu, Zhenya Zhang, Li Yamin. 2020. Basic theories of urban geology research [J]. *Geology in China*, 47(6): 1668–1676 (in Chinese with English abstract).
- Lin Liangjun, Han Bo, Ma Zhen, Zhang Xi, Li Hongying, Xia Yubo, Guo Xu, Pei Yandong, Li Haitao, Li Hongqiang, Wang Yushan. 2021. A study of the multi-factor urban geology standard system in Xiongan New Area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(2): 152–156(in Chinese with English abstract).
- Liu Futian, Fang Cheng, Du Dong, Qin Yafei, Meng Lishan. 2019. Study on distribution characteristics of sand liquefaction in the Caoheidian coastal zone[J]. *Geological Survey and Research*, 42(1): 45–48(in Chinese with English abstract).
- Luis Silveira, Pablo Gamazo, Jimena Alonso, Leticia Martínez. 2016. Effects of afforestation on groundwater recharge and water budgets in the western region of Uruguay[J]. *Hydrological Processes*, 30(20): 3596–3608.
- Ma Ding. 2019. Analysis of rainstorm characteristics in Xiong'an New Area [J]. *Hebei Water Resources*, (5): 44–45(in Chinese).
- Ma Zhen, Xia Yubo, Wang Xiaodan, Han Bo, Gao Yihang. 2019. Integration of engineering geological investigation Data and Construction of a 3D Geological Structure Model in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 46(S2): 169–177 (in Chinese and in English).
- Ma Zhen, Xie Hailan, Lin Liangjun, Hu Qiuyun, Qian Yong, Zhang Surong, Wang Guiling, Li Jianguo, Tan Chengxuan, Guo Haipeng, Zhang Fucun, Zhao Changrong, Liu Hongwei. 2017. The environmental geological conditions of Land resources in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(5): 857–873(in Chinese with English abstract).
- Ma Yan, Li Hongqiang, Zhang Jie, Sun Sheng, Xia Yubo, Feng Jie, Long Hui, Zhang Jingmao. 2020. Research on urban underground space exploration technology in Xiong'an New Area [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(4): 535–542(in Chinese with English abstract).
- Rong Yuejing, Yan Yan, Wang Chenxing, Zhang Wen, Zhu Jieyuan, Lu Huiting, Zheng Tianchen. 2020. Construction and optimization of ecological network in Xiong'an New Area based on the supply and demand of ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(20): 7197–7206 (in Chinese with English abstract).
- Tian Qiao. 2019. Urban impervious land surface characteristics and ecological control in Xiongan New Area based on remote sensing technology [J]. *Hebei Agricultural Machinery*, (3): 92–94 (in Chinese).
- Torben O Sonnenborg, Jesper R Christiansen, Bo Pang, Antoine Bruge, Simon Stisen, Per Gundersen. 2017. Analyzing the hydrological impact of afforestation and tree species in two catchments with contrasting soil properties using the spatially distributed model MIKE SHE SWET[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239(28): 118–133.
- Tóth Tibor, Balog Kitti, Szabó András, Pásztor László, Jobbágy Esteban G, Nosetto Marcelo D, Gribovszki Zoltán. 2014. Influence of lowland forests on subsurface salt accumulation in shallow groundwater areas[J]. *AoB Plants*, 6: plu054.
- Water Resources Bureau of Hebei Province. 2019. *Hebei Water Resources Bulletin 2019* [R].
- Wang Hongying, Guo Zhongling, Wang Rende, Chang Chunping, Qiu Mengru, Hu Guoyun. 2016. Effects of vegetation restoration measures on soil properties in Bashang, Hebei Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(5): 74–79, 84.
- Wang Shuqiang, Xu Na. 2017. Comprehensive evaluation of eco-environment carrying capacity in Xiongan New Area [J]. *Research on Economics and Management*, 38(11): 31–38 (in Chinese with English abstract).
- Xie Hailan, Xia Yubo, Meng Qinghua, Zhao Changrong, Ma Zhen. 2019. Study on land subsidence assessment in evaluation of carrying capacity of geological environment[J]. *Geological Survey and Research*, 42(2): 104–108(in Chinese with English abstract).
- Xin Wen, Jérôme Théau. 2020. Spatiotemporal analysis of water-related ecosystem services under ecological restoration scenarios: A case study in northern Shaanxi, China[J]. *Science of the Total Environment*, 720: 1–13.
- Yang Ruixiang, Hou Baodeng, Lu Fan, Liang Chuan, Zhao Yong, Xiao Weihua. 2019. Preliminary analysis and promotion of water resources carrying capacity for Xiongan New Area[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 50(10): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Yin Zhiqiang, Zhao Lei, Liu Wenbo, Li Ruimin, Shao Hai, Peng Chao, Tian Yuchen. 2020. Shrinkage reasons and countermeasures of Moon Lake area in the eastern part of Bashang Plateau, Chengde City [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 47(6): 57–64 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Lupeng, Wang Yong, Yao Peiyi, Jiang Nan, Ding Jin, Tian Fei, Tang Wenkun. 2020. The discovery of Mid-Holocene transgressive strata in Xiongxian County, Hebei Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(6): 911–915(in Chinese with English abstract).

- Zhao Benlong, Ma Zhanhui, Zhao Jianyong. 2018. Analysis of the characteristics of hydrological factors in Xiongan New Area[J]. Water Science and Engineering Technology, (3): 47–49(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanqun, Wang Chuankuan. 2008. Transpiration and water consumption in boreal and temperate forest ecosystems [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 14(6): 838–845(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuan, Zhao Kai, Li Haitao, You Bing, Wang Yongbo, Wang Shixiong. 2018. Dataset of the 1: 50 000 hydrogeological map of the plain area of the Baiyangdian Lake Basin, Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 45(S2):1–17 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yalong, Yang Zhibin, Wang Qiaolin, Wang Chengwen, Liu Fei, Song Yuntao, Guo Zhijuan. 2021. Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil–crop system in Xiong'an New District [J/OL]. 1–20 [2021–01–08]. Environmental Science: <http://377.rm.cglhub.com/> 10.13227/j.hjxk. 202007253 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹乐, 聂振龙, 刘敏, 卢辉雄, 汪丽芳. 2020. 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系[J]. 水文地质工程地质, 47(3):25–33.
- 董卫爽, 杨明全. 2018. 浅析雄安新区水资源承载能力[J]. 内蒙古水利, (2):57–59.
- 杜东, 柳富田, 刘宏伟. 2019. 河北曹妃甸岛区工程地质环境稳定性评价研究[J]. 地质调查与研究, 42(4):299–304.
- 房万领, 李学云, 田德培, 王林海. 2016. 天津城市建设工程地质稳定性综合分析[J]. 地质调查与研究, 39(1): 64–70.
- 夙蔚, 祁晓凡, 李海涛, 李文鹏, 殷秀兰. 2017. 雄安新区地下水水位与降水及北太平洋指数的小波分析[J]. 水文地质工程地质, 44(6): 1–8.
- 郝爱兵, 吴爱民, 马震, 柳富田, 夏雨波, 谢海澜, 林良俊, 王涛, 白耀楠, 张竞, 孟庆华. 2018. 雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J]. 地球学报, 39(5):513–522.
- 韩博, 夏雨波, 裴艳东, 马震, 郭旭. 2020. 雄安新区地下空间工程地质特征及环境地质效应[J]. 工程勘察, 48(3):1–8.
- 河北省水利局. 2019年河北省水资源公报[M]. 2019.
- 侯春飞, 韩永伟, 孟晓杰, 刘丽香. 2021. 雄安新区1995—2019年土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 环境工程技术学报, 11(1):65–73.
- 林良俊, 胡秋韵. 2017. 雄安新区地质调查锁定八项重点工作[J]. 资源与产业, 19(4):5.
- 林良俊, 马震, 郭旭, Zhenya Zhang, 李亚民. 2020. 城市地质学基础理论探讨[J]. 中国地质, 47(6): 1668–1676.
- 林良俊, 韩博, 马震, 张曦, 李红英, 夏雨波, 郭旭, 裴艳东, 李海涛, 李洪强, 王雨山. 2021. 雄安多要素城市地质标准体系研究[J]. 水文地质工程地质, 48(2): 152–156.
- 柳富田, 方成, 杜东, 秦雅飞, 孟利山. 2019. 曹妃甸沿岸带砂土液化分布特征研究[J]. 地质调查与研究, 42(1):45–48.
- 马丁. 2019. 雄安新区暴雨特性分析[J]. 河北水利, (5): 44–45.
- 马岩, 李洪强, 张杰, 孙晟, 夏雨波, 冯杰, 龙慧, 张京卯. 2020. 雄安新区城市地下空间探测技术研究[J]. 地球学报, 41(4):535–542.
- 马震, 夏雨波, 王小丹, 韩博, 高伊航. 2019. 雄安新区工程地质勘查数据集成与三维地质结构模型构建[J]. 中国地质, 46(S2):123–138.
- 马震, 谢海澜, 林良俊, 胡秋韵, 钱永, 张素荣, 王贵玲, 李建国, 谭成轩, 郭海朋, 张福存, 赵长荣, 刘宏伟. 2017. 京津冀地区国土资源环境地质条件分析[J]. 中国地质, 44(5):857–873.
- 荣月静, 严岩, 王辰星, 章文, 朱婕缘, 卢慧婷, 郑天晨. 2020. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 40(20):7197–7206.
- 田俏. 2019. 基于遥感技术的雄安新区城市不透水地表特征与生态管控[J]. 河北农机, (3):92–94.
- 王树强, 徐娜. 2017. 雄安新区生态环境承载力综合评价[J]. 经济与管理研究, 38(11):31–38.
- 王红营, 郭中领, 王仁德, 常春平, 邱梦如, 胡国云. 2016. 河北坝上植被恢复措施对土壤性质的影响[J]. 水土保持研究, 23(5):74–79+84.
- 谢海澜, 夏雨波, 孟庆华, 赵长荣, 马震. 2019. 地质环境承载力评价中关于地面沉降的评估研究[J]. 地质调查与研究, 42(2):104–108.
- 杨瑞祥, 侯保灯, 鲁帆, 梁川, 赵勇, 肖伟华. 2019. 雄安新区水资源承载力分析及提升途径研究[J]. 水利水电技术, 50(10):1–9.
- 殷志强, 赵磊, 刘文波, 李瑞敏, 邵海, 彭超, 田钰琛. 2020. 承德坝上高原东部月亮湖湖面萎缩原因及应对建议[J]. 水文地质工程地质, 47(6):57–64.
- 袁路朋, 王永, 姚培毅, 江南, 董进, 田飞, 汤文坤. 2019. 河北雄县全新世中期海侵地层的发现[J]. 地质通报, 38(6):911–915.
- 赵本龙, 马占辉, 赵建永. 2018. 雄安新区水文要素特性分析[J]. 水科学与工程技术, (3):47–49.
- 张彦群, 王传宽. 2008. 北方和温带森林生态系统的蒸腾耗水[J]. 应用与环境生物学报, 14(6):838–845.
- 张源, 赵凯, 李海涛, 尤冰, 王永波, 王世雄. 2018. 雄安新区白洋淀流域平原区1:50 000水文地质数据集[J]. 中国地质, 45(S2):1–12.
- 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟. 2021. 雄安新区农田土壤–农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J/OL]. 环境科学:1–20 [2021–01–08].