

三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红

An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain

LIU Weipeng, CUI Huqun, LIU Weipo, CHENG Xuxue, and LI Zhihong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望

Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain

郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 陈晔, 臧西胜, 王云龙, 朱菊艳, 卞跃跃 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 162-171

鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估

Health risk assessment of groundwater heavy metal pollution in the Poyang Lake Plain

饶志, 储小东, 吴代赦, 颜春, 陈婷, 何景媛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 31-37

漳滏平原漏斗区地下水溶解性总固体演变特征研究

Evolution characteristics of total dissolved solids in the groundwater level funnel area in the Hufu piedmont plain

张希雨, 张光辉, 严明疆 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 72-81

甘肃北山区域地下水流数值模拟研究

Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu

曹潇元, 侯德义, 胡立堂 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 9-16

基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

塔城盆地地下水“三氮”污染特征及成因

Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater in the Tacheng Basin

吕晓立, 刘景涛, 周冰, 朱亮 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 42-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008044

三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要: 近年来, 三江平原部分区域地下水位呈持续下降的态势, 引起广大学者和相关部门的高度关注, 为了查明三江平原地下水流场时空演化规律, 揭示其主要影响因素, 以三江平原 1980 年 72 组及 2019、2020 年同期 1 092 组地下水位统测数据和 44 组国家地下水监测数据为基础, 应用 ArcGIS 插值分析、栅格代数运算、对比分析等方法, 查明了三江平原地下水流场时空演化特征, 阐明了不同影响因素对地下水流场演化的控制作用。结果表明: 与 1980 年相比, 三江平原地下水位整体呈下降趋势。西部平原区地下水位累计降幅 1~5 m 的区域面积 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$; 东部建三江垦区累计降幅大于 5 m 的区域面积为 $1.17 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中, 累计降幅大于 10 m 的区域面积为 3 400 km^2 , 地下水位年均降幅约 0.29 m。地下水开采引起地下水流场变化, “西砂、东黏”的水文地质条件促使区域地下水降幅的时空演化差异; 水田种植规模的不断扩大引起地下水超采, 浅地表黏土层阻挡降水入渗补给, 地下水无法实现以丰补欠自平衡, 造成了建三江垦区地下水位的持续下降。本研究成果为进一步查清三江平原地下水变化规律和现状特征奠定了基础, 为科学指导地下水资源合理开发利用和管理提供了技术支持。

关键词: 三江平原; 地下水流场; 建三江垦区; 地下水降幅; 黏土层

中图分类号: P641.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0010-08

An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain

LIU Weipeng, CUI Huqun, LIU Weipo, CHENG Xuxue, LI Zhihong

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, Baoding, Hebei 071051, China)

Abstract: In recent years, groundwater levels in parts of the Sanjiang Plain has continuously decreased, which attracts great attention from scholars and related departments. In order to find out the temporal and spatial evolution of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain and reveal its main influencing factors, in this paper the ArcGIS interpolation analysis, grid algebraic operations, comparative analysis and other methods are used to analyze the 72 groups of data in the Sanjiang Plain in 1980 and 1 092 groups of groundwater level data and 44 groups of national groundwater monitoring data in the same period in 2019 and 2020. The spatio-temporal evolution characteristics of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain are ascertained, and the control effects of different influencing factors on the smooth evolution of groundwater are clarified. The results show that, compared with 1980, the groundwater levels of the Sanjiang Plain showed an overall decreasing trend. The groundwater levels of the western plain area cumulatively decreased by 1 to 5 m, with an area of $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, and most areas of the eastern Jiansanjiang reclamation area fell greater than 5 m with an area of $1.17 \times 10^4 \text{ km}^2$. Among them, the area where the cumulative drop of groundwater levels is greater than 10 m is as high as 3 400 km^2 , and the average annual drop of groundwater levels is about 0.29 m. Groundwater exploitation causes the changes in the

收稿日期: 2020-08-14; 修订日期: 2020-10-14

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190339)

第一作者: 刘伟朋(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质、环境地质研究。E-mail: 370648332@qq.com

通讯作者: 程旭学(1969-), 男, 教授级高工, 主要从事水文地质研究。E-mail: 373799287@qq.com

groundwater flow field, and the hydrogeological conditions of "West Sand and East Stick" promote the temporal and spatial evolution of the regional groundwater level decline. The continuous expansion of the scale of paddy fields has caused over-exploitation of groundwater. The shallow surficial clay layer blocks replenishment from rainfall infiltration, and the groundwater cannot achieve self-balance with abundance to compensate for the shortage, resulting in the continuous decline in groundwater levels in the Jiansanjiang Reclamation Area. The results of this research lay a foundation for further investigation of the groundwater change laws and current characteristics of the Sanjiang Plain, and also provide technical support for scientifically guiding the rational development, utilization and management of groundwater resources.

Keywords: Sanjiang Plain; groundwater flow field; Jiansanjiang; groundwater level drop; clay layer

三江平原位于黑龙江东北部,由黑龙江、乌苏里江和松花江冲、洪积形成,土地肥沃,是我国重要的商品粮基地^[1-2]。农田灌溉用水占地下水总开采量的90%以上。随着社会经济的发展和水稻种植面积的扩大,昔日“北大荒”变为今日“北大仓”。地下水的需水量显著增加,部分地区地下水位持续下降,有些专家提出防止该区成为“第二个华北平原”^[3]。

近年来,已有不少学者对该地区的地下水动态进行了研究和预测^[4-7]。赵永清等^[8]提出三江平原地下水自开采以来(至2001年)平均总下降约4.0 m,每年下降速率约0.2~0.3 m;徐梦瑶等^[9]认为三江平原形成西部、中部和东部3个地下水超采区;梁勇^[10]认为地下水位下降较大的区域主要分布在同江市和抚远县,且5年累计降幅小于1 m;杨湘奎等^[11-13]认为在松花江北部区域及建三江垦区部分农场存在超采区。刘东等^[4,14]预测八五三农场地下水位未来4年平均年降幅约为0.9 m;梁勇^[10]认为三江平原地区的地下水没有明显下降,仅是随着降水的丰平枯年份动态变化。综上,受数据量、资料和时间限制,三江平原超采区的分布位置不统一,未能确定超采区的范围及形态,由于对地下水动态的影响因素认识不同,预测的水位结果也是升降各异。

为落实中央领导关于东北地区地下水超采的重要批示,查清三江平原地下水流场现状及形成原因,2018年中国地质调查局把东北地区水文地质与水资源调查列入2019—2021年重点地质调查计划,2019年着力加强了三江平原地下水位统测及超采研究。笔者基于GIS技术,对三江平原地区1100余组地下水统测数据、国家地下水监测工程数据及地方水务局长期地下水动态观测数据进行插值及对比分析。查明了三江平原地下水的空间分布特征,首次高精度确定了超采区范围及形态,分析了其影响因素,为水资源的合理开发利用与保护提供了新视角,为国家及相关

部门农业结构调整及水利基础设施建设发展决策,维护国家粮食安全的压舱石提供可靠数据支撑。

1 研究区概况

三江平原北起黑龙江、南至完达山、西邻小兴安岭、东抵乌苏里江,地形平坦,西部、南部地势较高,东部、东北部较低。本文研究区为三江平原的小三江平原区(图1),面积 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。年均降水量为550 mm,蒸发量为(E601)700 mm^[15]。

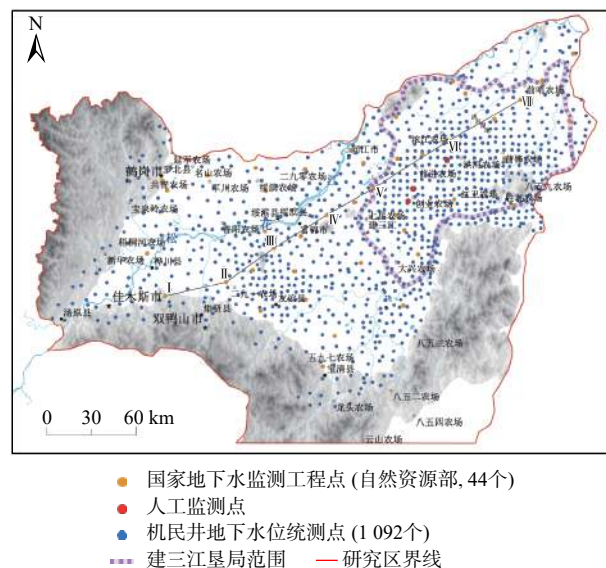


图1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

广大平原中部,自中生代以来始终处于以下沉为主的间歇性沉降运动中^[16],所以巨厚的新生界松散堆积,层层迭复,构成两级上迭阶地,与高低河漫滩组成平原区地貌的主体。平原区地层可概化为二元结构,上部浅地表地层为砂土、黏性土,下部为大厚度含砾中、粗砂。

三江平原农作物包括大豆、玉米等旱田作物,主

要依靠雨水自然滋养,水田作物水稻种植需要人工灌溉,以抽取地下水为主。

2 资料来源与研究方法

本文数据源包括 2019—2020 年 1 092 个统测点 2 期地下水位 3—4 月份统测数据、44 组国家地下水监测工程 2019 年数据、1980 年 72 组地下水统测数据及建三江水务局提供 1997—2019 年地下水长期动态观测数据。

利用克里金插值法^[17-19],生成 50 m×50 m 的地下水位分布栅格图,将不同时期地下水位栅格图进行代数运算,生成不同年份水位变幅图,以获取年际的地下水位变化情况。

3 结果与分析

3.1 地下水流场时空分布特征

3.1.1 1980 年地下水流场特征

20 世纪 80 年代,三江平原以开垦旱田为主,水田面积很少。1986 年水田面积 $5.7 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占总平原区面积的 10%, 该时期地下水的开采量远低于可开采量,地下水流场基本处于天然状态。对收集到的 72 组 1980 年地下水位数据进行插值,绘制了天然流场状态下地下水位等值线图(图 2a)。从图中可以看出 1980 年地下水整体流向为北东向、南北向,以北东向为主,最终排泄于乌苏里江和黑龙江流出区外。以松花江为界,北部地下水由西向东分别向南北两侧的松花江和黑龙江排泄;南部地下水由西、南山区向平原

中心区径流,在富锦东侧区域分支,主干地下水继续向东流经建三江垦区流入乌苏里江,分支水流经富锦—街津口断面向北汇入黑龙江。在富锦东南侧,大兴—七星农场区域为沼泽湿地,水力梯度较小,地下水径流缓慢,地下水以蒸发排泄为主;其余地区地下水水力梯度较大,地下水以径流排泄为主。结合地面高程,1980 年地下水位埋深在勤得利、八五九农场等山前一带和前哨农场台地区一般大于 10 m,西部平原区小于 5 m,东部建三江垦区一般为 5~10 m。

3.1.2 2019 年地下水流场特征

2019 年 3—4 月份,在水稻灌溉(泡田期)地下水开采前期,采用 1985 国家高程基准测量了研究区 1 092 个机民井水位,利用克里金插值,绘制了地下水流场。图 2(b)中可以看出,研究区内除沿黑龙江南岸一定范围内地下水向东北排泄于黑龙江外,区域地下水整体由西向东径流,最终排泄于乌苏里江流出区外。在建三江垦区西边界,地下水水力梯度明显增大,在前进、浓江、洪河农场中心区域地下水流平缓,41 m 等值线近似闭合,外围地下水流网呈现由西北、西南、东北向中心区域汇流的特征,改变了天然流网的形态,形成了一定区域的地下水降落漏斗。目前,区域地下水位埋深在勤得利、八五九农场等山前一带和前哨农场台地区一般大于 20 m,西部平原区小于 5 m,东部建三江垦区一般为 10~20 m。

3.1.3 1980—2019 年地下水时空异变特征

(1) 流场演化特征

与 1980 年地下水等水位线图对比分析发现,潜水

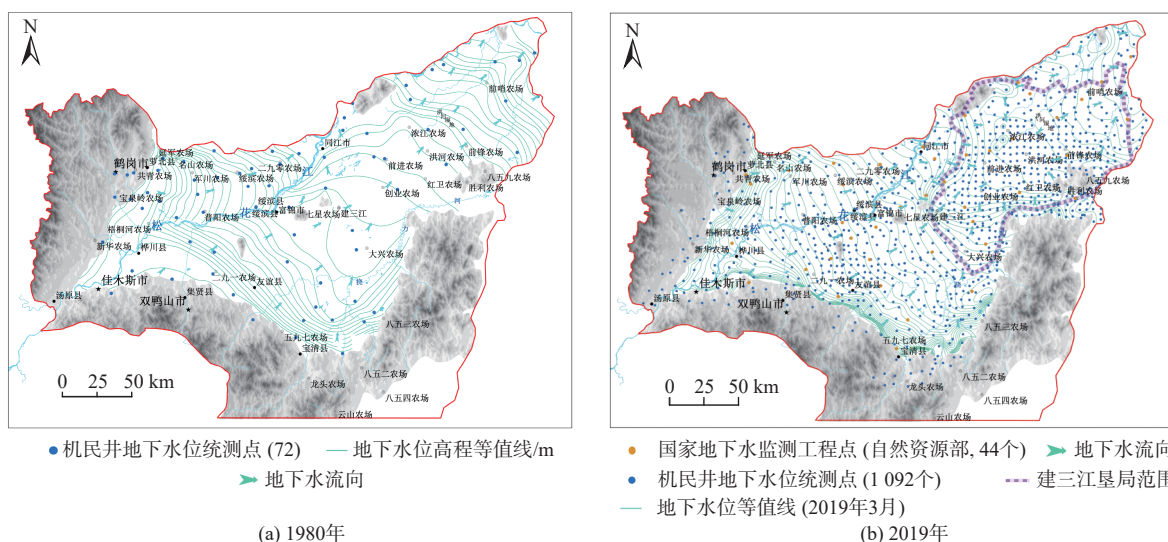


图 2 1980 年和 2019 年地下水位等值线图

Fig. 2 Contour map of groundwater levels in 1980 and 2019

面形态发生明显变化。在佳木斯至富锦段、洪河湿地至乌苏里江段地下水水力坡度较 1980 年小, 说明受人工开采影响该段地下水径流排泄减少; 在富锦东南侧大兴、七星农场等沼泽湿地区域, 平缓潜水面区域消失并形成滑梯式潜水面, 水力坡度向建三江垦区中心区域方向增加至 0.44‰。同时沿富锦—街津山断面地下水流场发生逆转, 说明在建三江垦区中部区域存在地下水超采。超采引起地下水流场、循环路径变化, 地下水处于负均衡状态, 在地下水自平衡调节过程中, 边界水力梯度增大以加大对超采区地下水的侧向补给。

(2) 水位埋深演化特征

利用栅格运算, 生成 2019 年与 1980 年地下水位变幅图。由图 3(a) 可知, 以建三江垦区西边界为界, 地下水位埋深差异明显, 建三江垦区地下水位累计降幅大于 5 m 的面积为 $1.17 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中在建三江垦区的创业、前进、洪河、浓江农场等中心区域地下水位降幅大于 10 m 的面积为 $3\,400 \text{ km}^2$; 西部平原区及建三江垦区东部外围区域地下水位累计降幅 1~5 m 的面积为 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

(3) 超采区地下水位演化态势及其形态特征

为揭示三江平原建三江垦区降幅较大区域地下水年际动态变化特征, 以建三江垦区中心区域的创业、前进及洪河 3 个农场的人工监测井点 23 a (1997—2019 年) 地下水动态监测数据为基础 (图 1), 编制了地下水位及水稻种植面积动态曲线 (图 4)。由图 4 可知, 垦区水稻种植规模主要分为 3 个阶段: 第一阶段 (1997—2002 年) 水稻小规模种植, 水稻田面积维持

在 $1\,467 \sim 2\,000 \text{ km}^2$, 地下水开采以浅部土层弹性释水为主, 漏斗区地下水位年均降幅 0.59 m; 第二阶段 (2003—2012 年), 水稻种植快速扩张, 水稻田面积由 $1\,467 \text{ km}^2$ 增加至 $6\,694 \text{ km}^2$, 地下水开采以砂砾石层重力释水为主, 漏斗区地下水位年均降幅 0.41 m; 第三阶段 (2012—现在), 水稻种植面积维持在约 $6\,667 \text{ km}^2$, 漏斗区地下水位年均降幅 0.29 m, 趋于平缓。

根据《地下水超采区评价导则》(GB/T 34 968-2017) 标准, 地下水开采造成地下水水位呈持续下降趋势条件界定, 对比 20 世纪 80 年代近似天然流场的地下水位, 按照水位降深 10 m, 圈定漏斗中心区面积 $3\,400 \text{ km}^2$ 。平面范围为以七星农场、浓江农场、胜利农场为顶角, 底边朝向东北、尖角朝向西南的“似三角形”, 其底边长 66 km、尖角高 103 km。剖面形态为“平底锅”状, 锅底到锅沿深 5~6 m, 锅底到地面深 15~16 m。

3.1.4 2019—2020 年地下水位时空异变特征

沿袭 2019 年统测点, 2020 年 3—4 月同期完成研究区水位统测工作, 据佳木斯气象站观测数据, 2019 年降水量达 858.1 mm, 为 69 a (1951—2019 年) 来最大值, 保证率 1.4%, 是多年平均降水量 549.4 mm 的 1.6 倍, 为典型丰水年。

对比分析 2019 年和 2020 年同期水位统测数据, 绘制 2019—2020 年地下水位变幅图 (图 3b)。由图可知, 除大兴农场, 以建三江垦区边界为界, 西部平原及建三江垦区外围区域地下水位上升, 对比统测数据分析, 集贤—友谊—宝清山前地段以及绥滨北部绥滨农场等地, 升幅达 1.5 m, 松花江下游富锦至同江段两岸影响条带, 地下水位上升幅度最大接近 2 m, 挠力河下

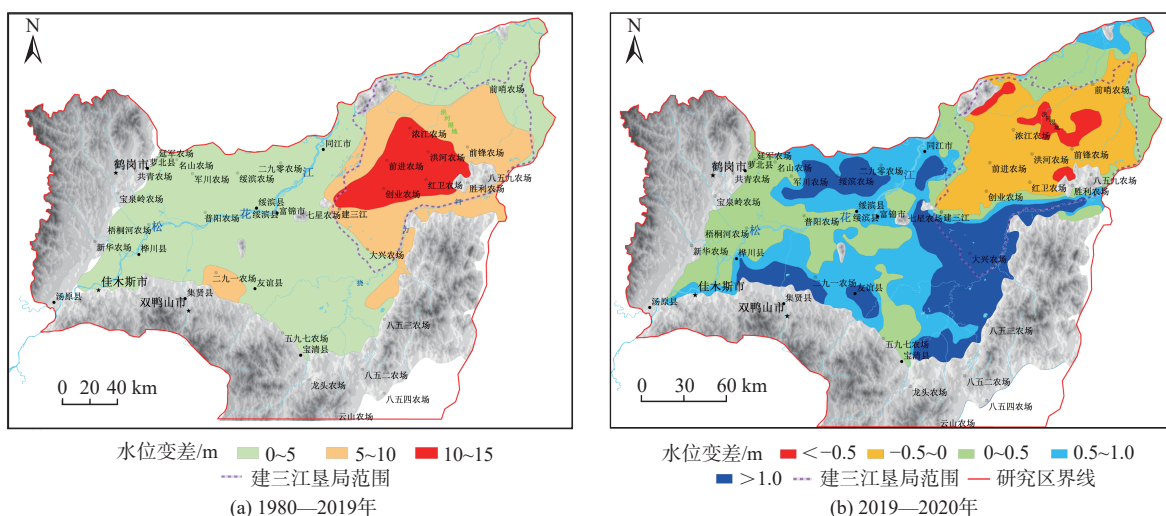


图 3 1980—2019 年 (a) 和 2019—2020 年 (b) 地下水位变幅图

Fig. 3 A map of changes in groundwater levels (a) from 1980 to 2019 and (b) from 2019 to 2020

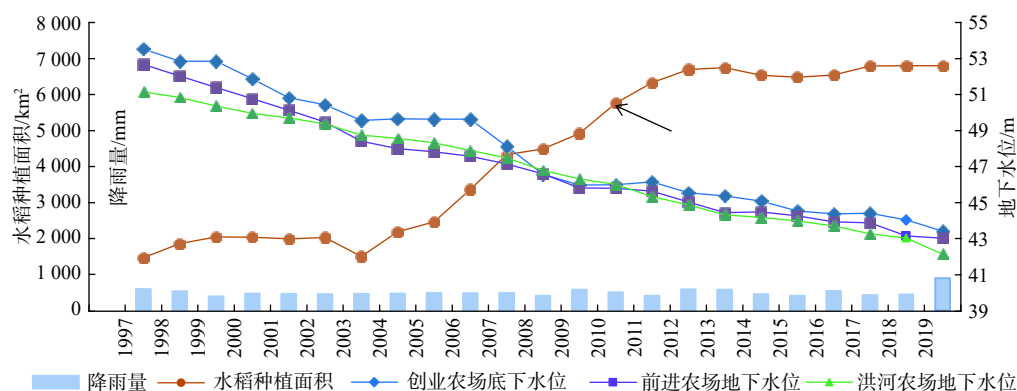


图 4 建三江垦区漏斗中心区地下水位多年动态曲线

Fig. 4 Multi-year dynamic curve of groundwater levels in the central area of the Jiansanjiang groundwater level funnel

游北岸地表水影响条带, 地下水位上升幅度最大接近 3 m, 反映出该地区地下水位对丰水年的响应较明显, 降水可有效增加补给地下水。东部建三江垦区大部分区域地下水位以下降为主, 降幅在 0.2 ~ 0.6 m, 平均降幅 0.3 m。对比 20 世纪 80 年代近似天然流场的地下水位, 按照水位降深 10 m, 圈定 2020 年漏斗中心区, 面积为 3 518 km², 与 2019 年(漏斗中心区面积 3 400 km²)相比, 形态基本一致, 面积增大 118 km²。

3.2 原因分析

3.2.1 降水量影响分析

降水通过非饱和带垂向入渗进入含水层的过程属于地下水的直接补给, 是大多数地区地下水资源的重要组成部分^[20-21]。本文利用三江平原代表西、东部的 2 个气象站 1951—2019 年年降水量资料, 绘制了全年降水量、多年平均值及线性趋势线(图 5)。由图可以看出, 佳木斯站的多年平均降水量略大于建三江

站多年平均降水量, 2009 年以后, 多数年降水量大于多年平均值, 属于偏丰年; 建三江雨量站自 1999 年以后, 多数年降水量小于多年平均值, 属于偏枯年。章光新等^[22]多年季节性降雨分析, 三江平原地区的佳木斯站、富锦站及抚远站各站的雨季(5—10 月)降雨量呈显著下降趋势, 旱季(11—翌年 4 月)都呈上升趋势, 说明旱季降水量增加, 雨季减少。三江平原的水稻种植季节正好在雨季, 地下水开采是水稻种植的主要水源, 因此, 地下水的开采强度必然随气候干旱的加剧而增大, 一旦雨、旱季地下水受地层影响补给不畅, 无法满足采补平衡, 地下水位必然连续下降。

3.2.2 降水入渗影响分析

(1) 地层空间差异分析

三江平原近地表土层结构性差异明显, 具有“西砂、东黏”特点。受古地理环境和地质作用影响, 三江平原近地表土层结构差异明显, 土层性质截然不

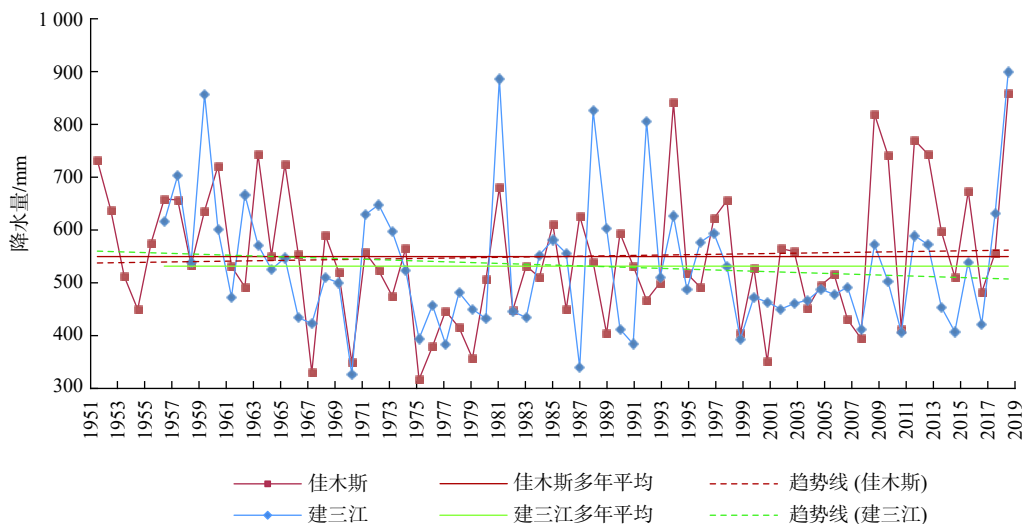


图 5 年降雨量变化特征曲线

Fig. 5 Characteristic curve of the annual precipitation change

同。同江—富锦—宝清以西, 近地表为砂土, 厚度较小, 透水性好, 保水性差, 雨水和地表水可直接下渗到地下水, 地下水补给有利, 工农业开采地下水未引起水位明显下降。说明其开采量与补给量处于平衡状态, 即采补平衡。目前, 砂土层结构区的地下水位埋深, 依然保持在 3~5 m; 以东为黏土, 厚度较大, 3~20 m, 且连续分布, 透水性差, 保水性好, 阻碍雨水和地表水下渗^[23-24], 不利于地下水补给, 当地下水开采量超过其补给量时, 必然形成地下水亏损, 引起地下水位下降。这是建三江垦区地下水位下降 10 m, 形成地下水漏斗的基本原理。

(2)年内地下水时空动态分析

为揭示三江平原不同地层结构区地下水动态空间变化规律, 选用三江平原东西向 7 个典型国家地下水监测点 2019 年 1—10 月逐天动态监测数据, 动态监测点空间分布(图 1), 编制了三江平原地下水埋深动态变化曲线图(图 6)。可以明显看出, 以建三江垦区西部边界线为界, 东部地区监测点地下水埋深介于 15~25 m, 西部地区地下水埋深介于 0~10 m, 东部地下水埋深年内动态变化幅度较西部地区明显偏小, 结合区域地层分布特点, 说明东部地区地层降水入渗系数较小, 地下水受大气降水影响程度偏小, 地下水补给量小于开采量, 地下水位在丰水期处于波动下降状态。

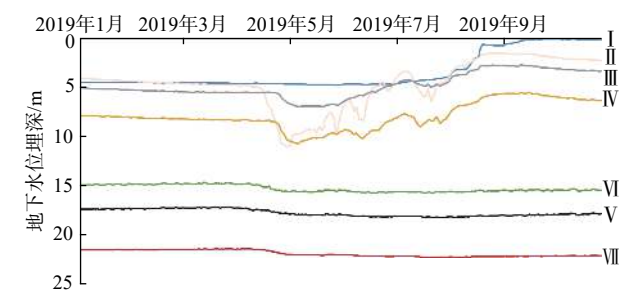


图 6 地下水埋深动态变化曲线
Fig. 6 Dynamic variation curve of groundwater depth

4—5 月地下水集中开采期间, 除山前监测点 I 周围为旱田, 地下水埋深动态保持相对稳定, 其他监测点地下水埋深均呈不等幅度增大。地下水埋深增大幅度为 0.57~6.03 m, 西部平均增幅为 3.19 m, 最大增幅为 6.03 m, 东部平均增幅为 0.67 m, 最大增幅为 0.72 m, 西部地下水埋深增幅较东部整体偏大。

6—8 月集中降雨期间, 受降水入渗空间差异影响, 西部地区地下水埋深波动呈减小趋势, 东部地区呈平缓增大趋势(表 1), 可以看出, 西部平均减小幅度为 4.002 m, 东部平均增大幅度为 0.055 m。

表 1 6—8 月地下水埋深增大幅度
Table 1 Depth of groundwater increased significantly from June to August

空间位置	编号	地下水埋深减小幅度/m	平均减小幅度/m
西部	I	4.077	4.002
	II	4.847	
	III	3.444	
	IV	3.641	
东部	V	-0.061	-0.055
	VI	0.034	
	VII	-0.138	

9—10 月, 随着降水量的减少, 西部地下水埋深呈平缓增大趋势, 平均增幅为 0.61 m; 随着建三江垦区地下水开采量的减少及地下水侧向补给的影响, 东部地下水埋深呈平缓减小趋势, 平均减小 0.16 m。

(3)年际地下水空间动态分析

在 2019 年特丰水年影响下, 2020 年同期地下水水位除三江平原东部建三江垦区大面积区域外, 其余地区地下水均回升并超过 2019 年同期水位, 从区域分布上看, 升幅大于 0.5 m 区域, 主要分布在河流影响带地表水补给地下水区域和浅部砂土地层区域, 地下水接受降水垂向入渗和河流侧向径流双向补给; 在地下水回升 0~0.5 m 区域, 主要分布在西部砂土地层受垂向入渗补给区和建三江垦区外围受侧向径流补给区; 在建三江垦区超采区, 垂向上受表层厚黏土层影响, 降水垂向入渗受阻; 平面上距河流侧向影响带较远, 地下水侧向径流补给迟缓; 加之地下水人工超采, 因此, 造成了即使在近 70 a 一遇的特丰水年, 该区地下水仍然无法实现以丰补欠自平衡状态, 年际地下水位仍处于下降趋势。

3.3 水稻种植影响分析

自 20 世纪 80 年代, 随着三江平原农业种植结构的不断调整, 水稻种植面积由 1986 年的 $0.58\times10^8\text{ km}^2$ 发展到 2018 年的 $2.82\times10^8\text{ km}^2$, 地下水开采量从 1986 年的 $5.99\times10^8\text{ m}^3$ 增加至 2018 年的 $8.55\times10^9\text{ m}^3$ (据 2017 年水资源公报数据推算), 2018 年地下水开采量约为 1986 年的 14 倍。其中, 建三江垦区从 1996 年后开始大面积种植水稻, 当年种植 960 km^2 , 到 2018 年种植面积达 $6\,787\text{ km}^2$, 是三江平原最大的水稻连片种植区, 约占三江平原水稻种植面积的 36%, 其中, 93.2%($6\,327\text{ km}^2$) 为井灌水田。水资源实际利用量约为 $32.5\times10^8\text{ m}^3$, 农业用水量 $3.24\times10^9\text{ m}^3$, 占总用水量的 99.7%; 利用地下水 $2.824\times10^9\text{ m}^3$, 占总用水量的 88.49%。据文献[25], 当前建三江垦区地下水开采量超可开采量($11.08\times10^8\text{ m}^3$)

的 1.6 倍。依据现状下降速率估算, 目前建三江垦区每年超采地下水存储量 $5 \times 10^8 \sim 1.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。因此, 建三江垦区水稻的大面积连片种植, 地下水超采是形成建三江垦区地下水位连续下降的主导因素。

4 结论

(1) 近 20 余年来, 三江平原建三江垦区水稻面积的快速扩增、地下水超采是形成垦区地下水连续下降的主导因素。“西砂、东黏”的地层条件导致降雨入渗空间差异, 是东、西部平原区地下水位降幅演化差异的影响因素。

(2) 三江平原地下水超采集集中于建三江垦区, 水位降幅大于 5 m 的面积 $1.17 \times 10^4 \text{ km}^2$, 以降深 10 m, 圈定漏斗中心区面积 3 400 km^2 。

(3) 在建三江垦区超采区域, 即使在特丰水年, 地下水无法实现以丰补欠自平衡, 因此建议尽快实施灌渠工程, 充分利用灌渠直灌或蓄水补灌, 实现地表水置换地下水的目的, 同时开展地下水回灌与阈值研究, 探索“春采夏补”的地下水人工回补途径。

参考文献 (References) :

- [1] 付强, 佟兆生, 魏庆利. 建三江分局地下水资源计算与评价[J]. *农机化研究*, 2002, 24(1): 47 - 49. [FU Qiang, TONG Zhaosheng, WEI Qingli. Calculating and evaluating the groundwater resource of Jian San Jiang area[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2002, 24(1): 47 - 49. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 闫丹丹. 三江平原水资源时空变异特征分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. [YAN Dandan. The spatiotemporal variability analysis of water resources in Sanjiang plain[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 唐婷. 东北地下水超采严重专家呼吁勿蹈华北覆辙[N]. *科技日报*, 2018-3-22(8). [TANG Ting. The overexploitation of groundwater in Northeast China is serious, experts urge not to follow the mistakes of North China[N]. *Science and Technology Daily*, 2018-3-22(8). (in Chinese)]
- [4] 刘东. 三江平原农业水文系统复杂性测度方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 18-21. [LIU Dong. Computing methods and applications for complexity of agrohydrological system[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011: 18-21. (in Chinese)]
- [5] WANG X H, ZHANG G X, XU Y. Impacts of the 2013 extreme flood in northeast China on regional groundwater depth and quality[J]. *Water*, 2015, 7(12): 4575 - 4592.
- [6] WANG X H, ZHANG G X, XU Y J, et al. Identifying the regional-scale groundwater-surface water interaction on the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(21): 16951 - 16961.
- [7] 付强, 李国良. 三江平原地下水埋深时间序列的混沌研究[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(3): 31 - 34. [FU Qiang, LI Guoliang. Chaos studies on series of groundwater depth in Sanjiang Plain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(3): 31 - 34. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 赵永清, 姚景辉, 李丽娟, 等. 三江平原地下水位下降分析[J]. *黑龙江水专学报*, 2003, 30(3): 10 - 13. [ZHAO Yongqing, YAO Jinghui, LI Lijuan, et al. Analysis on underground water level descend in Sanjiang Plain[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2003, 30(3): 10 - 13. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 徐梦瑶, 梁秀娟, 王益良, 等. 三江平原地下水循环演化特征[J]. *人民黄河*, 2012, 34(2): 63 - 65. [XU Mengyao, LIANG Xiujuan, WANG Yiliang, et al. Evolution characteristics of groundwater circulation in Sanjiang Plain[J]. *Yellow River*, 2012, 34(2): 63 - 65. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 梁勇. 黑龙江省三江平原地下水动态变化原因分析[J]. *水利科技与经济*, 2015, 21(4): 97 - 98. [LIANG Yong. Analysis on the causes of groundwater dynamic changes in Sanjiang Plain in Heilongjiang Province[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2015, 21(4): 97 - 98. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 杨湘奎, 孔庆轩, 李晓抗. 三江平原地下水资源合理开发利用模式探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(3): 49 - 52. [YANG Xiangkui, KONG Qingxuan, LI Xiaokang. Discussion of reasonable exploration and use pattern of groundwater resources in the Sanjiang Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(3): 49 - 52. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 苏安玉, 濮励杰, 付强. 基于Kriging模型的三江平原地下水资源评价[J]. *经济地理*, 2007, 27(6): 1018 - 1020. [SU Anyu, PU Lijie, FU Qiang. Evaluation of groundwater resources based on kriging model in the Sanjiang plain[J]. *Economic Geography*, 2007, 27(6): 1018 - 1020. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 付强, 门宝辉, 王志良, 等. 非平稳时序模型在三江平原井灌水稻区地下水动态变化中的应用[J]. *系统工*

- 程理论与实践, 2003, 23(1): 132 - 138. [FU Qiang, MEN Baohui, WANG Zhiliang, et al. Applying non-stable time series model to forecasting the groundwater dynamic varies in area of well irrigation rice in Sanjiang Plain[J]. *System Engineering Theory & Practice*, 2003, 23(1): 132 - 138. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘东, 马永胜, 付强. 三江平原井灌水稻区地下水动态变化规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(5): 42 - 46. [LIU Dong, MA Yongsheng, FU Qiang. Study on dynamic variation regularities of groundwater in area of well irrigation paddy in Sanjiang plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(5): 42 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨湘奎, 杨文, 张烽龙, 等. 三江平原地下水资源潜力与生态环境地质调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008. [YANG Xiangkui, YANG Wen, ZHANG Fenglong, et al. Investigation and evaluation of the potential of groundwater resources and ecological environment in Sanjiang Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008. (in Chinese)]
- [16] 尹喜霖, 柏钰春, 王勇, 等. 三江平原地下水资源潜力评价[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(6): 5 - 10. [YIN Xilin, BAI Yuchun, WANG Yong, et al. Potential evaluation of groundwater resources of Sanjiang Plain in Heilongjiang Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, 31(6): 5 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘玲玲, 吴剑锋, 吴吉春. 不同地质统计方法在确定渗透系数场中的对比研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 66 - 71. [LIU Lingling, WU Jianfeng, WU Jichun. A comparative study of four geostatistical methods for identifying the hydraulic conductivity fields based on test data[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(5): 66 - 71. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 雷能忠, 王心源, 蒋锦刚, 等. 不同地形与取样数的Kriging插值精度对比研究——以舒城县土壤全氮空间分异为例[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 86 - 91. [LEI Nengzhong, WANG Xinyuan, JIANG Jingang, et al. Comparison of Kriging interpolation precisions in different topographical units and number of samples: A case study of spatial distribution of soil total nitrogen in the Shucheng County[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(5): 86 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张涛, 吴剑锋, 林锦, 等. 变异函数模型对渗透系数克里格插值的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 1 - 7. [ZHANG Tao, WU Jianfeng, LIN Jin, et al. A comparative study of the ordinary kriging applied to hydraulic conductivity interpolation based on different variogram models[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李昊旭, 邵景力, 崔亚莉, 等. 不同作物覆盖对农业区地下水入渗补给的影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 57 - 65. [LI Haoxu, SHAO Jingli, CUI Yali, et al. Effects of different crop covers on vertical groundwater recharge[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 57 - 65. (in Chinese with English abstract)]
- [21] DE VRIES J J, SIMMERS I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 5 - 17.
- [22] 章光新, 王喜华, 齐鹏, 等. 三江平原水资源演变与适应性管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018. [ZHANG Guangxin, WANG Xihua, QI Peng, et al. The evolution and adaptive management of water resources in the Sanjiang Plain[M]. Beijing: China Water Power Press, 2018. (in Chinese)]
- [23] 刘伟坡, 沙娜, 程旭学. 三江平原建三江地下水动态变化特征[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 96 - 101. [LIU Weipo, SHA Na, CHENG Xuxue. Groundwater dynamics in catchment of Jiansanjiang in Sanjiang Plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(5): 96 - 101. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 危润初, 肖长来, 方樟. 黑龙江建三江地区地下水动态趋势突变点分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 202 - 210. [WEI Ruichu, XIAO Chonglai, FANG Zhang. Trends mutation nodes of groundwater dynamic in Jiansanjiang area of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(1): 202 - 210. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 翟志和, 王备麟. 黑龙江垦区建三江分局地下水资源开发利用规划报告[M]. 哈尔滨: 黑龙江农垦勘测设计研究院, 2000. [ZHAI Zhihe, WANG Beilin. Groundwater resources development and utilization planning report of Jiansanjiang Branch of Heilongjiang reclamation area[M]. Harbin: Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey, Design and Research Institute, 2000. (in Chinese)]

编辑: 张若琳