

三江平原沼泽湿地和农田的演替过程对地下水的影

崔虎群, 吴庭雯, 刘江涛, 刘伟坡, 李志红, 程旭学, 刘伟朋

Effects of succession processes of marsh wetland and farmland on groundwater in the Sanjiang Plain

CUI Huqun, WU Tingwen, LIU Jiangtao, LIU Weipo, LI Zhihong, CHENG Xuxue, and LIU Weipeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

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

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 10-17

西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制

Co-evolution mechanism of groundwater and wetland ecosystem in a typical inland watershed in northwest China

胡顺, 凌抗, 王俊友, 乔树锋, 葛孟琰, 孙自永, 马瑞 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 22-31

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

何剑波, 李玉山, 胡立堂, 尹政, 胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43

桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对降水的响应

Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin

卢丽, 邹胜章, 赵一, 樊连杰, 林永生, 王 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 63-72

潮白河再生水补给河道对周边浅层地下水影响的数值模拟研究

Numerical modeling of the impacts of reclaimed water recharge to the Chaobai River channel on the ambient shallow groundwater

姜瑞雪, 韩冬梅, 宋献方, 李炳华 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 43-54

保定平原区地下水生态水位阈值的探讨

Discussion on ecological water level threshold of groundwater in Baoding Plain area

靳博文, 王文科, 段磊, 马稚桐, 王一, 黄鑫慧 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 166-175



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306022

崔虎群, 吴庭雯, 刘江涛, 等. 三江平原沼泽湿地和农田的演替过程对地下水的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 51-58.
CUI Huqun, WU Tingwen, LIU Jiangtao, *et al.* Effects of succession processes of marsh wetland and farmland on groundwater in the Sanjiang Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 51-58.

三江平原沼泽湿地和农田的演替过程对 地下水的影响

崔虎群, 吴庭雯, 刘江涛, 刘伟坡, 李志红, 程旭学, 刘伟朋
(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: 三江平原是我国重要的商品粮基地和沼泽湿地集中分布区。60 a 来, 随着农田面积持续增加和种植结构调整, 湿地退减和地下水水位下降备受关注, 地下水是否超采争议不断。文章选取 1956—2019 年 7 期遥感影像数据, 采用单一土地利用动态度进行沼泽湿地和农田的演变进程特征分析; 以 1980 年、2019—2021 年 4 期同期统测数据和国家地下水监测工程数据为基础, 探讨了湿地农田化对地下水水位的影响。结果表明: (1) 1956—2019 年沼泽湿地呈现减少态势, 旱田呈现先增加后减少的态势, 水田呈现先增加后稳定的态势, 在 1956—1996 年具有“沼泽湿地变旱田”的特征, $2.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的沼泽湿地变成旱田, 在 1996—2019 年具有“旱田改水田”的特征, $1.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的旱田变成水田; (2) 三江平原 1980—2021 年 $36\,546 \text{ km}^2$ 的区域地下水水位降幅小于 5 m, $3\,669 \text{ km}^2$ 的区域地下水水位降幅大于 10 m, 建三江垦区存在超采地下水现象; (3) 与 1980 年枯水期地下水水位相比, 以降深 10 m 计算, 2021 年地下水降落漏斗面积为 $3\,669 \text{ km}^2$, 较 2019 年面积增大 269 km^2 , 向北东方向略有扩张; (4) 2019 年建三江垦区在强降水的条件下地下水仍难以实现“以丰补欠”的自然调节, 地下水储量减少 $5.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。此研究成果为区域水平衡研究奠定了基础, 对科学认识水土资源合理开发利用具有重要意义。

关键词: 湿地; 农田; 地下水水位; 地下水降落漏斗; 三江平原

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0051-08

Effects of succession processes of marsh wetland and farmland on groundwater in the Sanjiang Plain

CUI Huqun, WU Tingwen, LIU Jiangtao, LIU Weipo, LI Zhihong, CHENG Xuxue, LIU Weipeng
(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, Baoding, Hebei 071051, China)

Abstract: The Sanjiang Plain is an important base of commodity grain production and contains lots of marsh wetlands in China. In the past 60 years, with the continuous increase of farmland area and the adjustment of planting structure, the decline of wetland and groundwater level has attracted great attention, whether the over-exploited groundwater is controversial. The remote sensing image data from 1956 to 2019 were selected to analyze the evolution process characteristics of wetland and farmland using single land use dynamic degree. Based on the simultaneous measurement data in 1980 and 2019–2021 and the national groundwater monitoring project data, the influence of wetland reclamation on the groundwater level was explored. The results show that: (1) From 1956 to 2019, the marsh wetland presented a decreasing trend, while the dry land showed a trend of increasing first

收稿日期: 2023-06-10; 修订日期: 2023-07-19

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190339; DD20230429)

第一作者: 崔虎群(1986-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地下水资源与环境研究。E-mail: cuihuqun@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 程旭学(1969-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质研究。E-mail: chengxuxue@mail.cgs.gov.cn

and then decreasing, and the paddy field had a trend of increasing first and then stabilizing. Sanjiang Plain was characterized by “wetland turning into dry land” with the area of $2.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ from 1956 to 1996, while it presented “dry land turning into paddy field” with the area of $1.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ from 1996 to 2019. (2) The decrease in groundwater level in the area of $36\,546 \text{ km}^2$ in the Sanjiang Plain from 1980 to 2021 was less than 5 m, and more than 10 m in the eastern area with $3\,669 \text{ km}^2$. The groundwater in the Jiansanjiang area is being over-exploited. (3) Compared with the groundwater level in the dry season in 1980, the groundwater depression cone area was $3\,669 \text{ km}^2$ in 2021 with the depth of 10 m as the standard, which was 269 km^2 larger than that in 2019, and slightly expanded to the northeast direction. (4) In 2019, it was difficult to reach the natural regulation of “abundance to make up for deficiency” under the condition of heavy rainfall in the Jiansanjiang reclamation area, and the groundwater storage decreased by $5.81 \times 10^8 \text{ m}^3$. The results of this study provide a foundation for the study on regional water balance and are of great significance to the scientific understanding of the rational development and utilization of water and soil resources.

Keywords: wetland; farmland; groundwater level; groundwater depression cone; the Sanjiang Plain

三江平原是我国重要的商品粮基地和沼泽湿地分布区,在保障国家粮食安全和生态环境方面具有极其重要的战略地位。伴随着 20 世纪 50 年代以来的大规模农垦进程,昔日的“北大荒”变成如今的“北大仓”,但也引发了沼泽湿地面积骤减,局部地下水水位持续下降。如何统筹水资源、粮食和湿地之间的关系,成为三江平原智慧农业和生态文明的重大战略需求。

60 a 来,国内相关学者对三江平原沼泽湿地演变过程及影响因素^[1-4]和湿地农田化^[5-9]做了相应的研究。成果表明三江平原经历了 4 次大规模农业开发^[10],沼泽湿地面积呈现减少态势,耕地面积急剧增加,人类活动是导致沼泽湿地退减的最主要因素。前人在湿地农田化过程对三江平原地下水水位的影响方面开展大量研究,主要涉及地下水超采问题^[11-12]、地下水资源潜力^[13]、水安全和湿地安全^[14]、地下水资源合理开发模式^[15]、地下水水流场演变^[16-17]、水平衡^[18-19]、地下水动态^[20-21]等方面,但三江平原地下水是否超采,存在争议。关于三江平原大规模农垦过程中地下水是否超采的研究主要集中在水稻种植的前中期(2012 年以前),而经过 25 a 的水田开发,特别是 2012—2021 年水稻种植面积处于相对稳定的态势下,探究三江平原地下水与人类活动的内在联系及其对气候变化的响应,是该地区的一个热点科学问题。

本文选取三江平原 1956 年、1976 年、1986 年、1996 年、2006 年、2016 年和 2019 年 7 期的遥感影像数据进行沼泽湿地和农田面积动态分析,揭示该地区 60 a 来沼泽湿地和农田的演替进程,探究 25 a 来水稻种植对地下水水位的影响,为保障水安全、粮食安全以及生态安全提供有力支撑。

1 研究区概况

三江平原是黑龙江、松花江和乌苏里江冲洪积而成的泥质低平原。地形平坦,地势由西南向东北缓缓倾斜。1951—2021 年多年平均降水量为 560.07 mm(图 1),6—8 月份降水量占全年降水量的 59.8%,12 月至翌年 2 月份降水量仅占全年降水量的 3.7%。

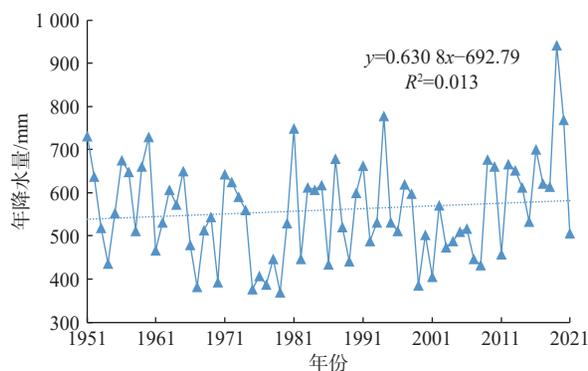


图 1 三江平原降水量年际变化

Fig. 1 Annual variation of precipitation in the Sanjiang Plain

三江平原属于断陷盆地,含水层均为第四系冲积、冲洪积、冲-湖积的松散沉积物,厚度一般为 120~200 m,最厚可达 350 m。地表沉积具有东黏西砂的特点。勤得利—建三江—宝清以西,近地表为砂土,厚度较小,一般厚 1~4 m,透水性好,保水性差;勤得利—建三江—宝清以东为黏土,厚度较大,一般厚 3~20 m,且连续分布,透水性差,保水性好^[17]。地下水由西南向东北方向径流。

三江平原种植作物以玉米、大豆和水稻为主,2020 年粮食总产量为 $283.6 \times 10^8 \text{ kg}$,占黑龙江省粮食总产量的 38%。其中水稻产量为 $169.58 \times 10^8 \text{ kg}$,占三江平原

粮食总产量的 60%, 水稻种植以地下水灌溉为主。2020 年三江平原总用水量为 $147.19 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中地表水用水量为 $66.67 \times 10^8 \text{ m}^3$, 地下水用水量为 $80.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文数据源包括遥感解译数据和地下水水位数据:

(1) 1956—2019 年 7 期遥感解译数据。1956 年、1976 年、1986 年、1996 年、2006 年和 2016 年遥感解译数据来自中国科学院东北地理与农业生态研究所; 2019 采用 Landsat ETM 卫星遥感影像, 分辨率为 30 m, 获取数据方法见文献 [22]。

(2) 地下水水位数据包括 2019—2021 年 3 期各 1 092 点次统测数据 (统测期为每年 3—4 月份)、149 组国家地下水监测工程数据、1980 年 72 组统测数据以及建三江垦区提供的 1997—2021 年地下水动态监测数据。

2.2 研究方法

(1) 单一土地利用动态度

单一土地利用动态度反映的是在一定时期内, 研究区某种土地利用类型面积变化的速率, 侧重于分析各土地利用类型的变化情况 [23]。其计算公式为:

$$K = \frac{U_i - U_j}{U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K ——研究期内某种土地利用类型的动态度, 即年变化率/%;

U_i 、 U_j ——研究初期及末期某种土地利用类型的面积/ km^2 ;

T ——研究时段长度/a。

(2) 地下水动态分析

在 ArcGIS 软件中采用克里金插值生成 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的地下水水位等值线栅格图, 将不同年份同一时期的地下水水位等值线栅格图进行代数运算, 生成不同年份地下水水位变差图, 结合三江平原给水度分区, 计算出三江平原储存量变化量, 分析三江平原年际间的地下水变化。

3 结果

3.1 沼泽湿地和农田的演替进程

三江平原 1956—2019 年沼泽湿地与农田演替过程见图 2。分析不同阶段不同用地类型变化情况 (表 1) 可知, 沼泽湿地动态度在 $-7.51\% \sim -1.80\%$ 之间, 各个阶段均为负值, 表明沼泽湿地面积 60 a 来呈现减少趋势。1956—1986 年减幅最大, 面积减少了 $2.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 年均减少 $0.07 \times 10^4 \text{ km}^2$; 1986—2019 年减幅变缓, 面积减少了 $0.94 \times 10^4 \text{ km}^2$, 年均减少 $0.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

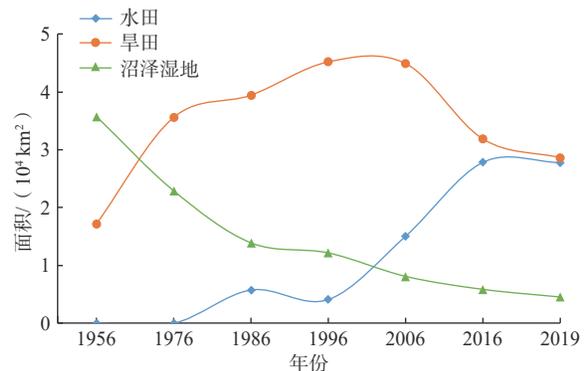


图 2 三江平原 1956—2019 年沼泽湿地和农田面积变化
Fig. 2 Changes in the area of wetland and farmland in the Sanjiang Plain from 1956—2019

表 1 三江平原 1956—2019 年湿地和农田阶段面积变化

Table 1 Changes in the area of wetland and farmland in the Sanjiang Plain from 1956—2019

阶段	沼泽湿地面积变化/ (10^4 km^2)	沼泽湿地动态度/%	农田面积变化/ (10^4 km^2)		农田动态度/%	
			旱田	水田	旱田	水田
1956—1976年	-1.29	-1.80	1.85	0	5.38	
1976—1986年	-0.90	-3.93	0.39	0.58	1.08	
1986—1996年	-0.17	-1.25	0.58	-0.17	1.46	-2.86
1996—2006年	-0.41	-3.33	-0.03	1.10	-0.07	26.63
2006—2016年	-0.22	-2.77	-1.31	1.28	-2.91	8.47
2016—2019年	-0.13	-7.51	-0.32	-0.01	-3.37	-0.08

注: 负值表示面积减少, 正值表示面积增加。

旱田 60 a 来呈现先增加后减少的趋势, 1956—1996 年处于增加阶段, 动态度为 $1.08\% \sim 5.38\%$, 均为正值, 面积增加了 $2.81 \times 10^4 \text{ km}^2$, 年均增加 $0.07 \times 10^4 \text{ km}^2$; 1996—

2019 年处在减少阶段, 动态度为 $-3.37\% \sim -0.07\%$, 均为负值, 面积减少了 $1.66 \times 10^4 \text{ km}^2$, 年均减少 $0.07 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。水田 60 a 来呈现先增加后稳定的态势, 1996—2016 年

表 3 建三江垦区 3 月地下水水位多年平均降幅

Table 3 Average annual decline of groundwater level in March in the Jiansanjiang area

阶段	监测井降幅/m			监测井平均降幅 /m	监测井平均下降速率 / $(\text{m}\cdot\text{a}^{-1})$
	创业监测井	前进监测井	洪河监测井		
1997—2003	3.96	4.28	2.40	3.55	0.59
2003—2012	4.02	3.37	3.88	3.75	0.41
2012—2021	2.87	2.45	3.66	2.99	0.32
1997—2021	10.85	10.10	9.94	10.30	0.43

对比 1980 年近似天然流场的地下水水位, 按照水位降深 10 m 计算, 2019 年建三江垦区漏斗面积为 3 400 km^2 ; 2021 年漏斗面积为 3 669 km^2 , 较 2020 年和

2019 年, 面积分别增大 151, 269 km^2 , 向北东方向略有扩张(图 3)。

根据 2019—2021 年 3 月地下水水位变差, 见图 5(a), 将建三江地区浅层地下水划分为上升区(0.20 ~ 3.22 m)、相对稳定区(-0.20 ~ <0.20 m)和下降区(-1.97 ~ <-0.20 m)。下降区分布于垦区腹地, 面积为 0.72 $\times 10^4 \text{ km}^2$, 占建三江垦区总面积的 58%; 上升区主要分布于建三江临河区域, 面积为 0.29 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 占比 24%; 相对稳定区呈条带状分布于两者之间, 面积为 0.15 $\times 10^4 \text{ km}^2$, 占比 12%。建三江垦区 2019 年 3 月—2021 年 3 月下降区地下水储量减少 9.57 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 即年均超采 4.78 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。

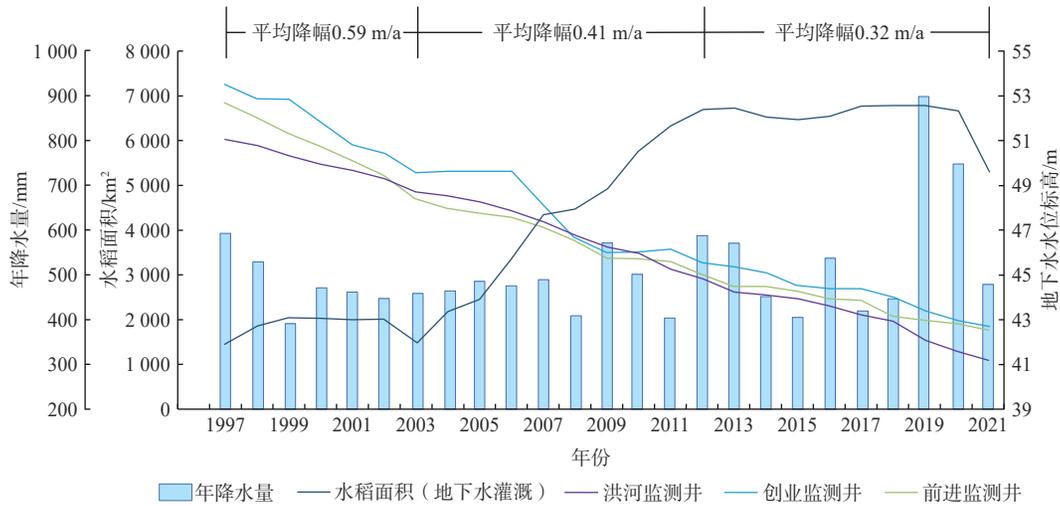


图 4 建三江垦区年降水量、水稻面积和典型监测井地下水水位多年动态曲线

Fig. 4 The dynamic curves of precipitation, rice planting area and groundwater level of monitoring wells in the Jiansanjiang area

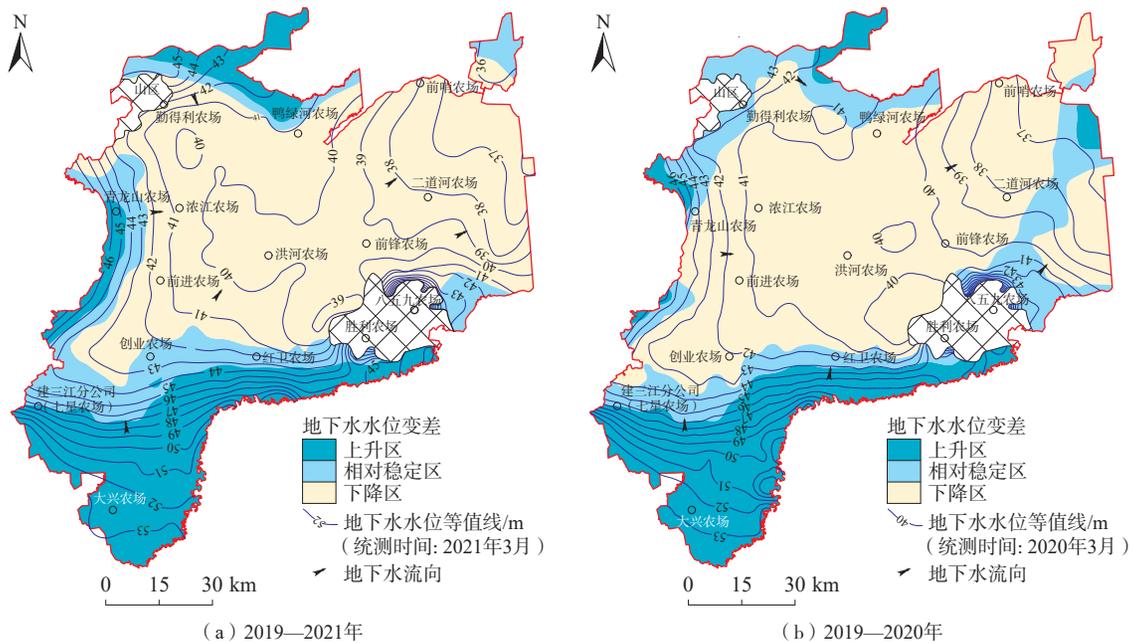


图 5 建三江 2019—2021 年 3 月和 2019—2020 年 3 月地下水水位变差

Fig. 5 The variation of groundwater level in March in Jiansanjiang during 2019—2020 and 2019—2021

4 讨论

4.1 建三江垦区丰水年降水与地下水水位的关系

建三江垦区 2019 年降水量为 899.1 mm, 为 66 a (1956—2021 年) 的最大值, 保证率 1.5%, 是多年平均降水量 531.2 mm 的 1.7 倍。根据 2019—2020 年 3 月地下水水位变差, 见图 5(b), 建三江垦区浅层地下水划分为上升区(0.20 ~ 3.70 m)、相对稳定区(-0.20 ~ <0.20 m) 和下降区(-0.98 ~ <-0.20 m)。下降区分布于垦区腹地, 面积为 $0.73 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占建三江垦区总面积的 59%, 地下水储量减少 $5.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与 1980 年同期地下水水位对比, 按照水位降幅 10 m 计算, 2020 年面积为 $3\,518 \text{ km}^2$, 与 2019 年(面积 $3\,400 \text{ km}^2$) 相比, 形态基本一致, 面积增大 118 km^2 , 地下水储存量减少 $1.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。丰水年垦区地下水水位仍难以实现“以丰补欠”的自然调节, 腹地地下水水位下降的趋势没有改变。

4.2 建三江水资源合理开发问题

目前建三江地区平均地下水埋深达到 15 ~ 16 m, 与华北、西北等主要地下水开采区相比, 依然处于较浅水平。而该地区含水层厚度一般为 150 ~ 240 m, 在前进农场一带可达 300 m。按照维持现状开采规模和开采深度, 地下水水位将以目前 0.3 m/a 的速率下降, 10 a 内水位埋深不会超过 20 m, 地下水超采处于可控态势。随着建三江青龙山、勤得利和八五九灌区水利工程的运行, 2021 年地表水灌溉面积达到 $1\,466.67 \text{ km}^2$, 可缓解建三江地下水超采问题。未来建三江垦区地表水和地下水的合理开发问题成为该区水资源安全研究的重点。

5 结论

本文基于三江平原 1956—2019 年间 7 期遥感解译数据以及 2019—2021 年的 3 月统测数据和国家地下水监测井数据, 分析三江平原沼泽湿地和农田的演变特征, 探讨农业化进程对三江平原地下水水位的影响。得出以下结论:

(1) 三江平原 1956—2019 年沼泽湿地呈现减少的态势, 旱田呈现先增加后减少的态势, 水田呈现先增加后稳定的态势。沼泽湿地和农田演替过程 1956—1996 年具有“沼泽湿地变旱田”的特点, 1996—2019 年具有“旱田改水田”的特点。

(2) 三江平原 1990—2020 年用水量和用水结构发生了较大的变化。总水量和地下水用水量呈现快速增长的态势, 地表水用水量呈现缓慢增长的态势。

2000 年以后, 用水结构由以地表水为主, 地下水为辅变为以地下水为主, 地表水为辅。

(3) 1980—2021 年三江平原 76.2% 的区域地下水水位降幅小于 5 m, 东部建三江垦区地下水存在持续下降趋势。与 1980 年地下水水位相比, 以降深 10 m 计算, 2021 年面积为 $3\,669 \text{ km}^2$, 较 2019 年面积增大 269 km^2 , 向北东方向略有扩张。

(4) 建三江垦区存在地下水超采现象, 2019 年 3 月—2021 年 3 月年均超采 $4.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前地下水超采处于可控态势。但是, 即使在丰水年, 建三江垦区地下水也无法实现“以丰补欠”的自然调节。建议加大地表水置换地下水的力度, 采取“春采夏补”的地下水利用方式。

参考文献 (References):

- [1] 刘吉平, 高佳, 董春月. 1954—2015 年三江平原沼泽湿地变化的区域分异及影响因素 [J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4821 - 4831. [LIU Jiping, GAO Jia, DONG Chunyue. Regional differentiation and factors influencing changes in swamps in the Sanjiang Plain from 1954 to 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4821 - 4831. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 刘吉平, 杜保佳, 盛连喜, 等. 三江平原沼泽湿地格局变化及影响因素分析 [J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 22 - 31. [LIU Jiping, DU Baojia, SHENG Lianxi, et al. Dynamic patterns of change in marshes in the Sanjiang Plain and their influential factors [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 22 - 31. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 郭雷, 马克明, 张易. 三江平原建三江地区 30 年湿地景观退化评价 [J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3126 - 3135. [GUO Lei, MA Keming, ZHANG Yi. Landscape assessment on wetland degradation during thirty years in Jiansanjiang region of Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3126 - 3135. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 魏强, 杨丽花, 刘永, 等. 三江平原湿地面积减少的驱动因素分析 [J]. 湿地科学, 2014, 12(6): 766 - 771. [WEI Qiang, YANG Lihua, LIU Yong, et al. Driving factors of shrinkage of wetlands in the Sanjiang Plain [J]. Wetland Science, 2014, 12(6): 766 - 771. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王宗明, 宋开山, 刘殿伟, 等. 1954—2005 年三江平原沼泽湿地农田化过程研究 [J]. 湿地科学, 2009, 7(3): 208 - 217. [WANG Zongming, SONG Kaishan, LIU

- Dianwei, et al. Process of land conversion from marsh into cropland in the Sanjiang Plain during 1954—2005[J]. *Wetland Science*, 2009, 7(3): 208 - 217. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈铭, 张柏, 王宗明, 等. 三江平原别拉洪河流域湿地农田化过程研究 [J]. *湿地科学*, 2007, 5(1): 69 - 75. [CHEN Ming, ZHANG Bai, WANG Zongming, et al. Process of wetland reclamation in the Bielalong river basin of the Sanjiang Plain[J]. *Wetland Science*, 2007, 5(1): 69 - 75. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘吉平, 董春月, 盛连喜, 等. 1955—2010 年小三江平原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应 [J]. *地理科学*, 2016, 36(6): 879 - 887. [LIU Jiping, DONG Chunyue, SHENG Lianxi, et al. Landscape pattern change of marsh and its response to human disturbance in the small Sanjiang Plain, 1955—2010[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(6): 879 - 887. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 三江平原自然湿地与人工湿地双向演替动态过程研究 [J]. *生态科学*, 2009, 28(6): 481 - 486. [ZHANG Sumei, WANG Zongming, ZHANG Bai, et al. Dynamic processes of two-way succession of natural and man-made wetlands in Sanjiang Plain[J]. *Ecological Science*, 2009, 28(6): 481 - 486. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 金晓敏, 李颖, 付波霖, 等. 1954—2015 年不同地貌分区下湿地农田化过程的时空特征——以完达山以北三江平原为例 [J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3286 - 3294. [JIN Xiaomin, LI Ying, FU Bolin, et al. Spatiotemporal characteristics of wetland to farmland conversion processes in different geomorphological divisions during 1954—2015: A case study in the Sanjiang Plain north of the Wanda Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3286 - 3294. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘兴土, 马学慧. 三江平原大面积开荒对自然环境影响及区域生态环境保护 [J]. *地理科学*, 2000, 20(1): 14 - 19. [LIU Xingtu, MA Xuehui. Influence of large-scale reclamation on natural environment and regional environmental protection in the Sanjiang Plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(1): 14 - 19. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 高洋, 杜绍敏, 金志钢, 等. 三江平原浅层地下水超采问题探讨(一)[J]. *黑龙江水专学报*, 2007(4): 24 - 27. [GAO Yang, DU Shaomin, JIN Zhigang, et al. Status overdraft of groundwater on Sanjiang Plain(1)[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2007(4): 24 - 27. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 袁斌, 杜绍敏, 杨伟清, 等. 三江平原浅层地下水超采问题探讨(二)[J]. *黑龙江水专学报*, 2008(1): 18 - 21. [YUAN Bin, DU Shaomin, YANG Weiqing, et al. Status overdraft of groundwater on Sanjiang Plain(2)[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2008(1): 18 - 21. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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)]
- [14] 章光新. 东北粮食主产区水安全与湿地生态安全保障的对策 [J]. *中国水利*, 2012(15): 9 - 11. [ZHANG Guangxin. Measures for securing water safety of main grain production base and wetland ecological safety in Northeast China[J]. *China Water Resources*, 2012(15): 9 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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)]
- [16] 束龙仓, 徐丽丽, 袁亚杰, 等. 三江平原典型区地下水流场变化及主要影响因素分析 [J]. *水利学报*, 2022, 53(6): 644 - 654. [SHU Longcang, XU Lili, YUAN Yajie, et al. Analysis on variation of groundwater flow field and its main influencing factors in the typical district of Sanjiang Plain[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(6): 644 - 654. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 等. 三江平原地下水流场演化趋势及影响因素 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 10 - 17. [LIU Weipeng, CUI Huqun, LIU Weipo, et al. An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 10 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 束龙仓, 王哲, 袁亚杰, 等. 近 40 年三江平原典型区土地利用变化及其对地下水的影响 [J]. *水利学报*,

- 2021, 52(8): 896 – 906. [SHU Longcang, WANG Zhe, YUAN Yajie, et al. Land use change and its impact on groundwater in the typical district of Sanjiang Plain during the past 40 years[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(8): 896 – 906. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 孙青言, 陆垂裕, 郭辉, 等. 三江平原土地利用变化对水量平衡的影响 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(5): 694 – 706. [SUN Qingyan, LU Chuiyu, GUO Hui, et al. Effects of land use change on water balance in the Sanjiang Plain[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 694 – 706. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 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)]
- [21] 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 Runchu, XIAO Changlai, 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)]
- [22] 张树文, 张养贞, 李颖. 东北地区土地利用/覆被时空特征分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. [ZHANG Shuwen, ZHANG Yangzhen, LI Ying. Temporal and spatial characteristics of land use/cover in northeast China[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张建, 雷刚, 漆良华, 等. 2003—2018 年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响 [J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1280 – 1290. [ZHANG Jian, LEI Gang, QI Lianghua, et al. The landscape pattern and ecological service value in Danjiangkou City under land use change from 2003 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1280 – 1290. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳