

西辽河平原地下水失衡及其与土地利用的互馈关系

郭晓东, 刘 强, 李文鹏, 张慧荣, 熊海钦, 王长琪, 陈 麟

Groundwater imbalance and its mutual feedback relationship with land use in West Liaohe Plain

GUO Xiaodong, LIU Qiang, LI Wenpeng, ZHANG Huirong, XIONG Haiqin, WANG Changqi, and CHEN Lin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202310001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究

Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia

高萌萌, 刘琼, 王轶, 李小磊, 石鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 175–182

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

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

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

基于地质建造探索承德市土地利用优化路径

Exploration of land use optimization path based on geological formation in Chengde City

卫晓峰, 王京彬, 孙厚云, 殷志强, 何泽新, 贾凤超, 李霞, 刘宏伟, 张竞 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 15–25

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202310001

郭晓东, 刘强, 李文鹏, 等. 西辽河平原地下水失衡及其与土地利用的互馈关系 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 77-87.
GUO Xiaodong, LIU Qiang, LI Wenpeng, et al. Groundwater imbalance and its mutual feedback relationship with land use in West Liaohe Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 77-87.

西辽河平原地下水失衡及其与土地利用的互馈关系

郭晓东¹, 刘 强¹, 李文鹏², 张慧荣¹, 熊海钦³, 王长琪¹, 陈 麟¹

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
3. 内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 西辽河平原是我国北方重要的生态屏障, 但是生态环境脆弱。2004 年以来农田灌溉用水增加, 地下水水位持续下降。为查明区域地下水失衡、生态效应及其影响因素, 开展了西辽河平原地下水水位统测和长期监测, 采用空间相关性分析、水均衡分析、土地利用转移矩阵、对地下水水位变化贡献度分析等方法, 分析了区域地下水均衡状况及其与土地利用的互馈关系。结果表明: 西辽河平原 2020 年地下水水位比 2004 年平均下降 2.23 m, 地下水储存量年均减少 $10.90 \times 10^8 \text{ m}^3$; 平原中部农业集中灌溉区地下水水位下降幅度较大, 尤其通辽科尔沁区地下水水位下降最为明显; 西辽河平原地下水开采量对地下水水位下降的贡献度为 33%, 科尔沁区超过 50%; 地下水水位下降区水位埋深从 4.71 m 下降至 8.34 m, 导致草地退化, 面积减少, 覆盖度下降; 西辽河平原地下水可持续开采量为 $24.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。用于农业灌溉的地下水开采量增大是造成地下水水位下降的主要原因, 为防止地下水水位持续下降, 提出了提高节水灌溉能力, 调整种植结构、引入外源水及压缩地下水开采量等综合治理建议。该研究成果可为区域农业种植规划、地下水管理与保护提供技术支撑。

关键词: 西辽河平原; 地下水水位; 地下水开采; 耕地; 生态问题; 土地利用转移矩阵

中图分类号: P641.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0077-11

Groundwater imbalance and its mutual feedback relationship with land use in West Liaohe Plain

GUO Xiaodong¹, LIU Qiang¹, LI Wenpeng², ZHANG Huirong¹, XIONG Haiqin³,
WANG Changqi¹, CHEN Lin¹

(1. *Shenyang Geological Survey Center, CGS, Shenyang, Liaoning 110034, China*; 2. *China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China*; 3. *Inner Mongol Autonomous Region Geology Survey & Research Institute, Huhehot, Inner Mongolia 010010, China*)

Abstract: The West Liaohe Plain (WLP) is an important ecological barrier in northern China. Due to the increase in irrigation water since 2004, the groundwater level has continued to decline in the WLP. To investigate the regional groundwater imbalance, ecological effects, and their influence factors, the regional groundwater balance and its mutual feedback relationship with land use in the WLP were analyzed by using the methods of groundwater level measurement and long-term monitoring, the spatial correlation analysis, water balance analysis, land use transfer matrix, and contribution to groundwater level change. The results show that the groundwater level in the

收稿日期: 2023-10-01; 修订日期: 2024-01-19

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221753); 中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目 (QCJJ2022-35)

第一作者: 郭晓东 (1981—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究工作。E-mail: 287684839@qq.com

通讯作者: 刘强 (1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究工作。E-mail: 94778933@qq.com

WLP in 2020 decreased by an average of 2.23 m compared with that in 2004, with a groundwater storage decrease rate of $10.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ per year (average value). The large decline of groundwater level occurs in the centralized irrigated area in the central part, in particular in the Keerqin District, Tongliao City. The contribution of groundwater extraction to the groundwater level decrease is 33% in the WLP and more than 50% in the Keerqin district. In the area with a groundwater level decrease, the groundwater level depth increases from 4.71 m to 8.34 m, resulting in grassland degradation and coverage reduction. The sustainable extraction of groundwater in WLP is $24.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. Increased groundwater extraction for agricultural irrigation is the main reason for the groundwater level decrease. To prevent the continuous groundwater level decline, comprehensive management methods, such as improving the capacity of water-saving irrigation, adjusting the planting structure, introducing water from the outer watershed, and reducing the amount of groundwater extraction are suggested. This study can provide technical support for regional agricultural cultivation planning and groundwater management and protection.

Keywords: West Liaohe Plain; groundwater level; groundwater exploitation; cultivated land; ecological problems; land use transfer matrix

西辽河平原是我国重要的农牧业基地和东北地区重要的生态屏障,科尔沁沙地位于此地,属于干旱半干旱区,降水量少,水资源匮乏,生态环境脆弱^[1-5]。近几十年来,西辽河平原人类活动加剧,耕地面积不断扩大,农牧业用水量持续增加^[6-8]。由于地表水资源少,加之大型水利工程的修建,水资源收支平衡被打破,造成区内大部分河流干涸,局部地下水水位下降^[9-12]。在通辽科尔沁区、开鲁县等地,地下水开采量居高不下,形成地下水降落漏斗^[13-16]。西辽河平原的生态环境由降水和地下水支撑型演变为降水支撑型,草地覆盖度降低^[15-17]。虽然 2000 年以来生态修复力度增强,林地等面积增加,但生态脆弱的本底仍然存在,生态保护与修复的任务依然艰巨^[18-21]。

国内外众多学者对西辽河平原的水资源及其生态问题进行了大量研究。一些学者采用供需平衡、相关分析等方法评价了西辽河流域地下水平衡状况。李成振等^[6]基于 MIKE BASIN 建立了水资源管理模型,基于 3 次平衡理论对西辽河的水资源供需状况进行了分析,结果表明西辽河流域缺水 24.7%,需要节水和跨流域调水。付玉娟等^[22]对西辽河平原 1980—2009 年的地下水埋深与降水和农田灌溉的关系进行了对比分析,认为 2000 年以前地下水能够补排平衡,2000 年后补给量减少,开采量增加,地下水失衡。严聆嘉等^[13]对西辽河平原地下水埋深变化趋势和超采情况进行了分析,认为通辽市 2019 年超采了 $6.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。陈志云等^[23]分析了地下水水位埋深对林草等植被的影响,认为 20 世纪 90 年代植被覆盖度受地下水埋深的影响较大,1999—2010 年受降水的影响大。Deng 等^[24]对科尔沁草原中草地与地下水的关系进行了分析,认

为随着地下水埋深的增加,植被指数先增大后减小,但物种多样性降低,3.5 m 是维持草原物种多样性的合理水位。上述研究初步揭示了西辽河流域地下水平衡状态及其对生态环境的影响,但是受限于地下水统测数据不足,未做系统性的地下水资源评价,对生态与地下水的互馈关系研究不够深入。

本文在开展大量地下水水位统测和监测的基础上,分析西辽河平原 2004—2020 年地下水水位变化及地下水平衡状态,评价了地下水可持续开采量,研究了地下水水位变化与土地利用的互馈作用,评价了地下水水位变化影响因素的贡献度,研究成果可以为区域水资源管理提供服务。

1 研究区概况

西辽河平原位于东北地区西北部,包括内蒙古自治区通辽市、赤峰市部分地区,吉林省通榆县、长岭县和双辽市等地区,面积 $4.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地势西高东低,以沙丘、沙地、漫滩阶地和起伏平地为主,北部西部山前地带有冲洪积倾斜平原和波状台地^[25-26](图 1)。

研究区为中温带半干旱季风气候区,多年平均气温 $6.54 \text{ }^\circ\text{C}$;多年平均降水量 401 mm,年内分配不均,6—8 月占全年 70% 左右;年蒸发量为 $1\,700 \sim 2\,000 \text{ mm}$ ^[27]。

区内主要河流有西拉木伦河、老哈河、教来河、新开河和乌尔吉木伦河等河流,最后汇入西辽河,在研究区东南部流出区外。由于降水量减少、上游水利工程拦河蓄水和水资源开发利用增加等原因,河流干涸断流,多数为季节性河流^[28-29]。

西辽河平原区发育较厚的第四系含水层,从周边

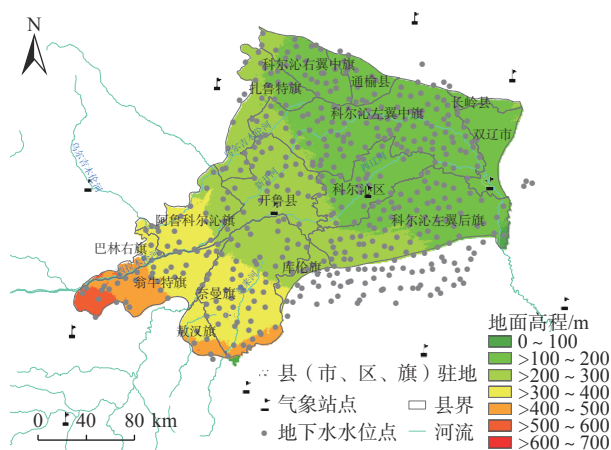


图1 研究区气象、地下水监测点分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological and groundwater monitoring points in the study area

到中心逐渐变厚,平原中部最厚可达 200 m 以上。岩性从山前到中心由薄层砂砾石、中粗砂逐渐变为厚层的细砂、粉砂,黏土夹层增多。地下水径流由畅通变为滞缓,富水性从周边的小于 100 m³/d 增加到中部的大于 3 000 m³/d,整个平原区形成大厚度的第四系松散岩类孔隙潜水含水岩组(图 2)。

2 研究方法

2.1 水平衡分析法

采用水平衡法评价 2004—2020 年多年平均地下水补给量和排泄量。地下水均衡方程为:

$$Q_{tr} - Q_{td} = \Delta Q \quad (1)$$

$$Q_{tr} = Q_{pr} + Q_{lr} + Q_{sr} + Q_{ir} + Q_{wr} \quad (2)$$

$$Q_{td} = Q_e + Q_{rd} + Q_{ld} + Q_p \quad (3)$$

$$\Delta Q = \mu F \Delta H \quad (4)$$

式中: Q_{tr} ——总补给量/(m³·a⁻¹);

Q_{td} ——总排泄量/(m³·a⁻¹);

Q_{pr} ——降水入渗补给量/(m³·a⁻¹);

Q_{lr} ——侧向径流补给量/(m³·a⁻¹);

Q_{sr} ——河道渗漏补给量/(m³·a⁻¹);

Q_{ir} 、 Q_{wr} ——渠灌、井灌的回归补给量/(m³·a⁻¹);

Q_e ——潜水蒸发量/(m³·a⁻¹);

Q_{rd} ——河道排泄量/(m³·a⁻¹);

Q_{ld} ——侧向流出量/(m³·a⁻¹);

Q_p ——地下水开采量/(m³·a⁻¹);

ΔQ ——地下水储存量变化量/(m³·a⁻¹),增加为正,减少为负;

μ ——水位变动带给水度;

F ——研究区面积/m²;

ΔH ——均衡期水位变化量/m,上升为正,下降为负。

降水入渗补给量采用入渗系数法,降水入渗系数采用次降水量法计算获得,并对以往调查成果做校核,降水量来自中国气象数据共享网。侧向径流补给量和侧向流出量采用达西定律计算。河道渗漏补给量根据搜集和实测水文数据,采用上下游流量差计算。渠灌和井灌的回归补给量根据调查和搜集灌溉量,采用回归补给系数法计算。潜水蒸发量采用蒸发系数法,地表水面蒸发量数据来自中国气象数据共享网。河道排泄量采用断面测流法或地下水动力学法确定。农业用水根据遥感解译耕地面积定额法计算,工业生活用水采用水资源公报数据。2020 年地下水水位数据源自沈阳地质调查中心枯水期实测,2004 年地下水水位数据源自以往统测成果。分别做反距离插值后形成水位差值。地下水水位监测点分布情况见图 1。

由于在计算过程产生误差,为确定计算精度并进行误差校核,绝对均衡差和相对均衡差为:

$$Q_{tr} - Q_{td} - \Delta Q = X \quad (5)$$

$$\frac{X}{Q_{tr}} \times 100\% = \delta \quad (6)$$

式中: X ——绝对均衡差/(m³·a⁻¹);

δ ——相对均衡差/%,要求小于 15%。

2.2 土地利用类型转移矩阵分析

对中国科学院资源环境科学与数据中心的土地利用遥感解译数据进行统计分析,获得西辽河平原 2000、2010 和 2020 年土地类型及面积,采用转移矩阵方法分析了土地利用类型变化,分析了 20 年地下水水位升降区内的土地利用变化情况,以及地下水水位与土地利用的相关关系。

2.3 地下水水位变化影响贡献度

地下水水位变化的贡献度反映控制性因素对地下水升降幅度的贡献大小^[30-31]:

$$N_i = \frac{|Q_i|}{\sum_{i=1}^n |Q_i|} \quad (7)$$

式中: N_i ——第 i 个地下水补排项的贡献度;

Q_i ——第 i 个地下水补排项的补给量或排泄量/(10⁸ m³);

n ——地下水补排项的项数。

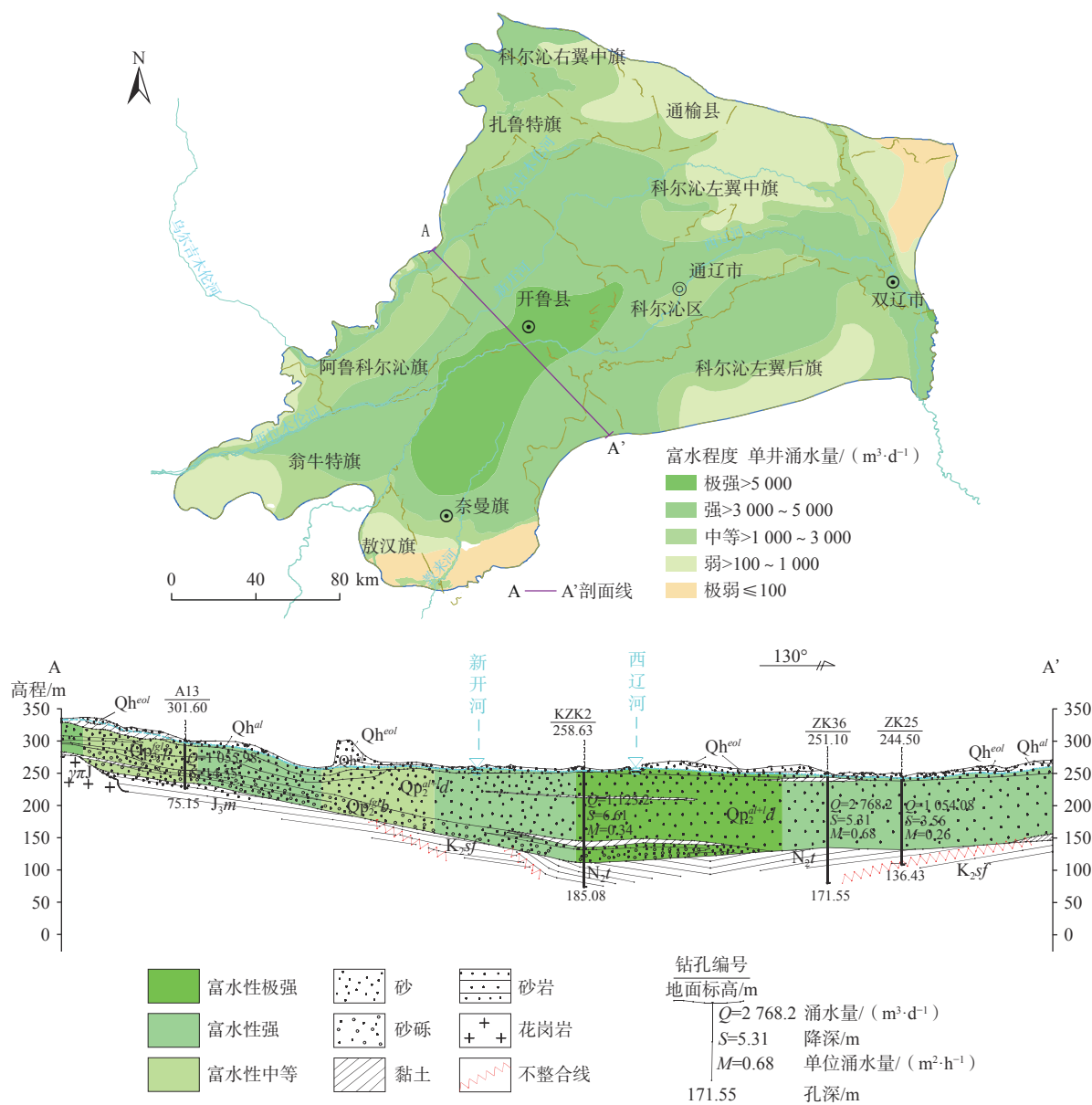


图 2 研究区水文地质示意图
Fig. 2 Hydrogeological diagram of the study area

3 结果

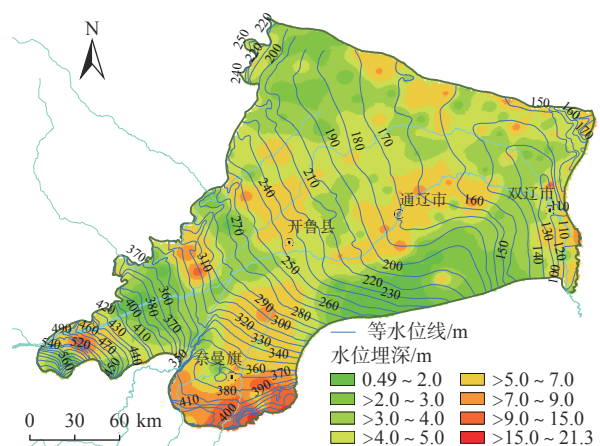
3.1 地下水水位变化

根据地下水水位统测结果分别绘制了 2004 年和 2020 年地下水水位埋深以及地下水水位变差图, 见图 3。2004 年西辽河平原地下水埋深平均为 4.47 m^[32], 普遍在 0~7 m 范围内, 2020 年地下水平均埋深为 6.69 m, 总体上下降了 2.22 m。中部的科尔沁、开鲁及阿鲁科尔沁等地区下降超过 5 m; 科尔沁右翼中旗至通榆, 长岭、双辽至科尔沁左翼后旗以及翁牛特旗等地水位上升; 其余地区不同程度下降 0~5 m。经过计算, 2020 年西辽河平原地下水储存量比 2004 年减少了 174.45×

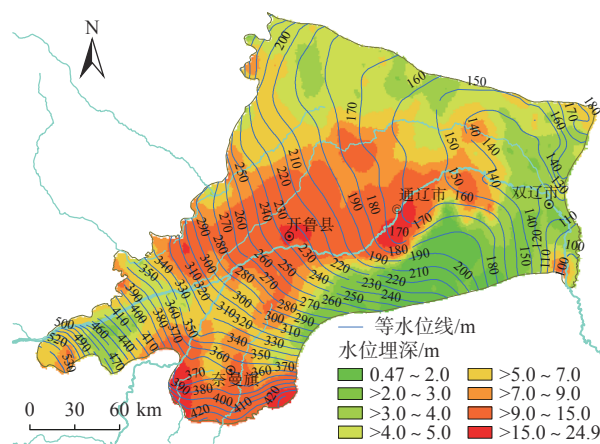
10⁸ m³, 年均减少 10.90×10⁸ m³。

3.2 地下水平衡

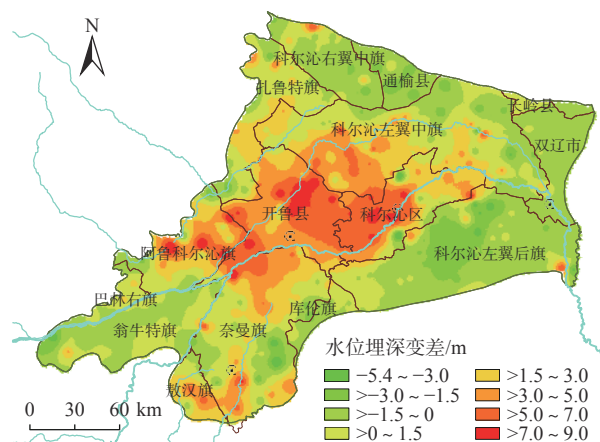
对西辽河平原地下水 2004—2020 年平均补给量和排泄量进行了计算, 均衡分析表明: 绝对均衡差为 3.81×10⁸ m³, 相对均衡差为 7%, 误差符合要求, 均衡计算结果见表 1。西辽河平原地下水总补给量为 54.81×10⁸ m³/a, 其中降水入渗量为 46.18×10⁸ m³/a, 是主要补给项, 占总补给量的 84.25%; 总排泄量为 61.90×10⁸ m³/a, 其中潜水蒸发和地下水开采量分别为 24.93×10⁸, 35.20×10⁸ m³/a, 分别占总排泄量的 40.27% 和 56.87%。地下水均衡状态为负, 地下水储存量年均减少 10.90×10⁸ m³。



(a) 2004年地下水水位埋深



(b) 2020年地下水水位埋深



(c) 2004—2020年地下水水位变差

图3 西辽河平原 2004、2020 年地下水水位埋深和水位变化图

Fig. 3 Groundwater level depth and water level variation from 2004 to 2020 in West Liaohe Plain

3.3 可持续开采量

西辽河平原区地表水资源匮乏,地下水资源是工农业生产和居民生活的主要水源,要保证水资源的可持续利用,必须合理开发。为防止地下水过量开采造

成草地退化等生态问题,根据西辽河平原区地下水开采现状及其对地下水水位变化的影响,计算地下水可持续开采量。

地下水可持续开采量的计算是在查明地下水开采量和地下水储量变化量的基础上,根据地下水盈亏状况计算得到。在地下水储量变化量为负,处于亏损状况的地区,水位持续下降,则需要基于水位约束进行地下水可持续开采量评价。以年均地下水开采量为基准,减去年均亏损量作为地下水可持续开采量,以此保证地下水水位不再持续下降,保持地下水水位的稳定。对于地下水储量盈余的地区,如双辽市、长岭县和通榆县,以年均开采量加年均盈余量为可持续开采量。西辽河平原地下水可持续开采量见表2。

西辽河平原地下水可持续开采量为 $24.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其中阿鲁科尔沁旗、巴林右旗、翁牛特旗、敖汉旗、科尔沁区、科尔沁左翼中旗、开鲁县、奈曼旗、扎鲁特旗、科尔沁右翼中旗等旗县需要压缩开采量,可通过提高灌溉节水能力,调整种植结构和外源引水工程等方式解决。

4 讨论

4.1 西辽河平原土地利用类型对地下水水位变化的影响

西辽河平原土地利用情况见图4。西辽河平原土地利用类型以草地和耕地为主(表3),2020年耕地面积占比为32.95%,草地占比为38.05%,沙地占比为10.02%,其他占比为18.98%。

通过土地利用转移矩阵可看出(表3),2020年与2000年相比,西辽河平原耕地、林地、沙地、建筑用地和沼泽湿地面积分别增加了5.57%、1.54%、1.53%、11.00%和30.14%,草地、水域分别减少了4.90%和8.21%。耕地面积的增加主要是通过开垦草地和沙地完成;草地的减少主要是由于耕地开垦和土地沙化造成;沙地略有增加,其中有 $2\,554.39 \text{ km}^2$ 的草地转变为沙地, $1\,042 \text{ km}^2$ 的耕地沙化。说明虽然生态修复力度不断加大,但生态本底脆弱,西辽河平原沙地在增加,草地在减少。

将土地利用转移类型中面积小于 20 km^2 的转移类别忽略,制作土地利用转移类型图,并与地下水水位变化程度相叠加,得到西辽河平原区土地利用转移与地下水水位关系图(图5)。西辽河平原中部农田区地下水水位下降明显,多超过 5 m 。在西部局部草地

表 1 西辽河平原多年平均地下水补给项、排泄项及储变量

Table 1 Groundwater recharge, discharge, and storage variation in West Liaohe Plain							/ (10 ⁸ m ³ ·a ⁻¹)	
地下水补给项	降水入渗量	河道渗漏量	渠灌渗漏量	井灌回归量	侧向补给量	总补给量		
	46.18	4.00	0.42	3.46	0.75	54.81		
排泄项	潜水蒸发量	向河流排泄量	地下水开采量	侧向流出量	总排泄量			
	24.93	1.20	35.20	0.57	61.90			
						地下水储变量	绝对均衡差	
						-10.90	3.81	

表 2 西辽河平原县旗可持续开采量

Table 2 Annual sustainable exploitation of counties in West Liaohe Plain				/ (10 ⁸ m ³ ·a ⁻¹)	
区域	开采量	地下水储量变化量	可持续开采量		
阿鲁科尔沁旗	1.47	-1.16	0.31		
巴林右旗	0.28	-0.14	0.14		
翁牛特旗	0.86	-0.62	0.24		
敖汉旗	1.08	-0.51	0.57		
科尔沁区	4.55	-1.95	2.60		
科尔沁左翼中旗	8.17	-1.40	6.77		
科尔沁左翼后旗	4.26	0.15	4.41		
开鲁县	4.49	-3.14	1.35		
库伦旗	0.11	0.03	0.14		
奈曼旗	4.44	-1.55	2.89		
扎鲁特旗	1.32	-0.61	0.71		
科尔沁右翼中旗	1.18	-0.22	0.96		
双辽市	2.08	0.11	2.19		
长岭县	0.44	0	0.44		
通榆县	0.47	0.09	0.56		
西辽河平原	35.20	-10.90	24.28		

转化为耕地的地区和西南农田区存在水位下降超过 3 m 的区域。

4.2 西辽河平原农田灌溉对地下水的影响

西辽河平原区为农牧交错地带,随着人口增加和社会经济发展,区内耕地面积呈现不断增加的趋势。经过 20 世纪 60—70 年代的大规模开垦,到 1980 年,西辽河平原耕地面积达到 1.33×10⁴ km²,之后耕地面积

继续增加,到了 2000 年,耕地面积达到 1.53×10⁴ km²,20 年间增加了 0.20×10⁴ km²,增幅达到 15.53%。2000 年之后,国家生态修复力度增加,耕地增加速度减缓,到 2020 年耕地面积达到 1.62×10⁴ km²,与 2000 年相比增加了 6.24%。

依据《内蒙古自治区行业用水定额》(DB15/T 385—2015)中玉米等农作物用水定额^[33],根据西辽河平原各年份耕地面积,计算了农业灌溉用地下水量。2000 年灌溉用地下水 36.75×10⁸ m³,2010 年为 37.77×10⁸ m³,有所增加,到了 2020 年下降为 31.08×10⁸ m³,主要是由于 2010 年以后,膜下滴灌等节水灌溉措施在研究区大规模应用,灌溉定额减少造成灌溉用水减少,灌溉水利用系数不断提高^[34]。根据《通辽市“十四五”水安全保障规划》,通辽市农田灌溉水利用系数已从 2016 年的 0.607,提高至 2020 年的 0.675。提高用水效率有利于控制和减少地下水开采量,但是也造成了灌溉水对地下水的渗漏补给量减少。

通辽市科尔沁区位于西辽河平原中部,为地下水降落漏斗的中心区。以该行政区为例,分析地下水水位变化与降水量、耕地面积的相关关系(图 6)。地下水埋深值为科尔沁区 6 眼地下水水位长期观测并年均值的算术平均值。从图中可以看出,2005—2020 年地下水水位埋深大幅增加,从 2005 年的 9 m 降低到 2018 年的 15 m 左右,2019—2020 年稳中有升。同期

表 3 西辽河平原土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix in West Liaohe Plain										/km ²	
2020年											
		草地	耕地	建筑用地	林地	沙地	水域	沼泽湿地	总计		
2000年	草地	12 010.51	3 557.71	294.11	431.03	2 554.39	288.63	474.29	19 610.67		
	耕地	2 808.53	9 599.06	592.69	737.78	1 042.40	252.27	194.29	15 227.02		
	建筑用地	246.11	536.56	217.61	51.15	113.15	14.33	24.01	1 202.91		
	林地	422.59	688.37	47.21	444.53	191.85	41.64	22.17	1 858.37		
	沙地	2 418.76	1 116.12	130.06	167.43	4 057.68	103.91	228.12	8 222.08		
	水域	249.31	322.95	21.65	32.43	128.26	410.78	104.33	1 269.72		
	沼泽湿地	482.59	253.79	32.47	22.65	260.16	53.60	605.23	1 710.50		
	总计	18 638.41	16 074.56	1 335.81	1 887.01	8 347.89	1 165.15	1 652.45	49 101.27		

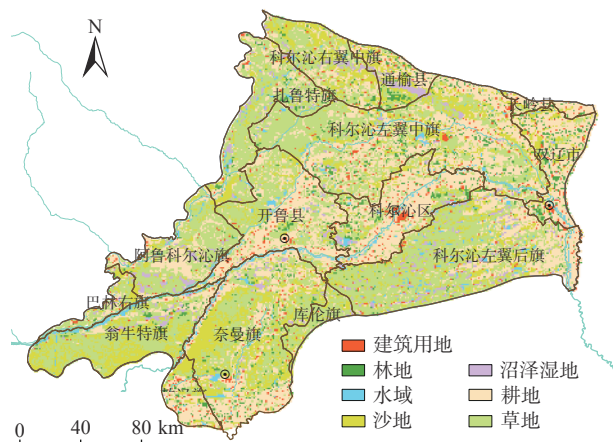


图 4 西辽河平原 2020 年土地利用图

Fig. 4 Land use map of West Liaohe Plain in 2020

的通辽站降水量并没有持续减少, 降水量呈略微上升趋势。根据图 6, 科尔沁区耕地面积呈现稳步上升的趋势, 2005 年耕地面积为 $13.84 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 2020 年增加为 $16.79 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 增加了 $2.95 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 增加 21.32%。科尔沁区地下水开采量由 2005 年的 $3.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2010 年的 $3.59 \times 10^8 \text{ m}^3$, 增加了 9.12%, 到 2020 年, 开采量增加至 $3.99 \times 10^8 \text{ m}^3$, 比 2010 年增加了 11.14%。

对科尔沁区地下水均衡项进行计算, 结果见表 4。通过对比 2005—2010 年和 2011—2020 年 2 个时间段

的均衡项变化可知, 2 个时间段农田灌溉用水量分别为 3.53×10^8 , $3.80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 呈现增加趋势。加之工业生活开采量, 科尔沁区地下水排泄量超过了补给量, 均衡量分别为 -1.21×10^8 , $-1.41 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 均衡差有所扩大。2 个时期降水入渗补给量并没有减少, 而且有所增加。可以看出, 科尔沁区地下水水位下降主要是由于地下水开采量过大, 排泄量超过补给量, 地下水超采, 且超采量增加。

4.3 地下水水位变化贡献度

地下水水位的变动主要受到补给量和排泄量的影响, 以所有补排项多年平均值的绝对值之和作为总贡献, 按照式(7)计算研究区 2004—2020 年降水入渗量、潜水蒸发量和地下水开采量等主要因子的贡献度(图 7)。结果表明: 西辽河平原地下水水位变化各因子的总贡献度中, 降水入渗量占 41%, 潜水蒸发量占 21%, 地下水开采量 33%。各行政区中地下水开采量贡献度超过 40% 的县旗有科尔沁区、开鲁县、敖汉旗、双辽市和长岭市, 其中科尔沁区超过 50%。

4.4 地下水水位变化对林草覆盖度的影响

为了分析地下水水位变化对林地和草地覆盖度的影响, 对地下水水位升降区的多年林草覆盖情况进行了分析(表 5)。结果表明: 西辽河平原水位下降区, 2020 年水位埋深下降至 8.34 m, 草地面积从 2000 年的

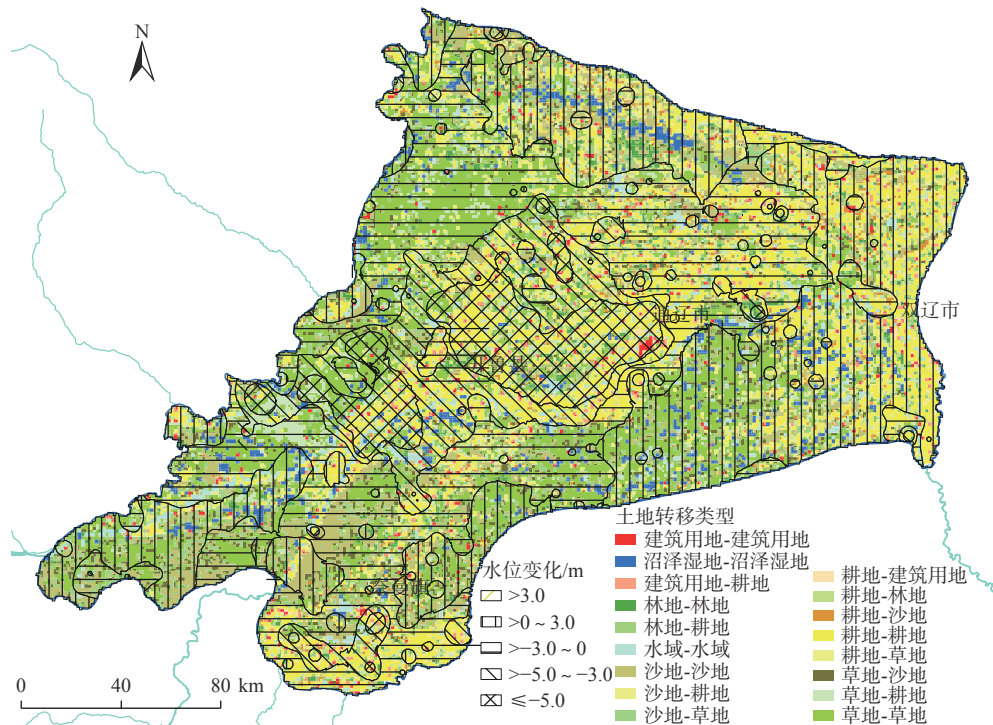


图 5 西辽河平原区土地转移与地下水水位变化关系图

Fig. 5 Relationship between land transfer and groundwater level change in West Liaohe Plain

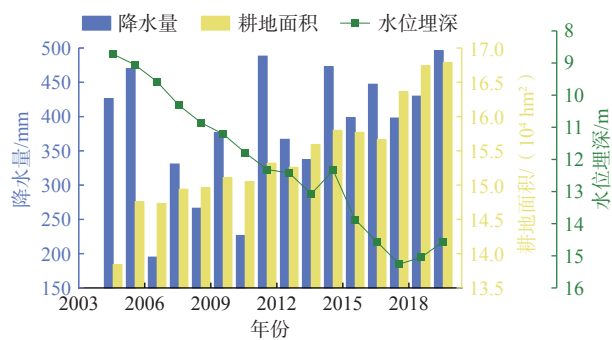


图 6 通辽科尔沁区地下水水位与降水量和耕地面积对比图

Fig. 6 Comparison of groundwater level with precipitation and grain yield in Horqin District, Tongliao

12 487.26×10⁴ hm² 减少到 2020 年的 11 721.37×10⁴ hm², 减少了 765.89×10⁴ hm²。高覆盖草地面积从 2000 年的 5 804.77×10⁴ hm² 减少为 2020 年的 5 144.80×10⁴ hm², 减少了 659.97×10⁴ hm²。而水位上升区, 草地面积从 7 004.74×10⁴ hm² 增加至 7 030.66×10⁴ hm², 基本保持稳定。西辽河平原水位下降区, 草地面积减少且主要为高覆盖草地面积减少, 说明水位埋深下降造成草地退化。

地下水水位上升区林地面积从 2004 年的 686.91×10⁴ hm² 增加至 2020 年的 808.60×10⁴ hm², 增加了 121.69×10⁴ hm², 其中有林地面积增加了 131.65×10⁴ hm², 成为

表 4 科尔沁区地下水均衡项及变化情况

Table 4 The items of groundwater balance and changes in the Horqin District / (10⁸ m³·a⁻¹)

时间	补给量			排泄量				均衡差
	降水入渗量	井灌回归量	总补给量	蒸发量	农田灌溉量	工业生活开采量	总排泄量	
2005—2010年	3.10	1.06	4.16	0.79	3.53	1.05	5.37	-1.21
2011—2020年	3.63	0.76	4.39	0.70	3.80	1.30	5.80	-1.41
变化量	0.53	-0.30	0.23	-0.09	0.27	0.25	0.43	

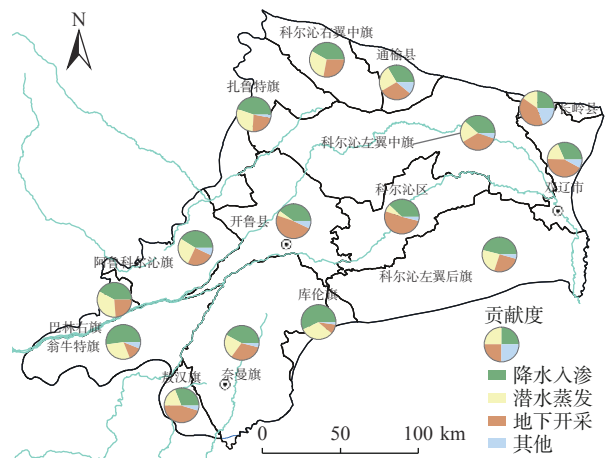


图 7 研究区地下水水位变化影响因素贡献度分布图

Fig. 7 Distribution of contribution degree of influence factors of groundwater level change in the study area

主要增加类型, 说明水位上升, 林地覆盖度增加。水位下降区, 水位埋深从平均 4.71 m 下降到 8.34 m, 林地面积从 1 125.06×10⁴ hm² 略微减少至 1 115.31×10⁴ hm², 基本保持不变, 各类型林地面积变化不大。说明平均水位埋深下降至 8.34 m 时, 尚未对林地造成影响。

5 结论

(1) 西辽河平原区 2020 年地下水水位比 2004 年平均下降 2.23 m, 地下水储量年均减少 10.90×10⁸ m³, 水位下降区主要位于西辽河平原中部。耕地集中区水位下降明显, 主要是由于地下水的长期大量开采造成的。

(2) 影响西辽河平原地下水水位变化的因子中, 地下水开采量贡献度占 33%, 其中科尔沁区、开鲁

表 5 西辽河平原地下水水位埋深变化区林地、草地面积

Table 5 Different types of woodland and grassland areas in the study area / (10⁴ hm²)

土地类型		地下水水位上升区			地下水水位下降区		
		2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年
林地	有林地	440.98	426.84	572.63	643.09	610.58	640.45
	灌木林	130.03	127.20	107.84	137.10	130.03	124.90
	疏林地	115.90	113.07	128.13	344.87	323.67	349.96
草地	高覆盖	2 804.16	2 773.06	2 708.65	5 804.77	5 578.63	5 144.80
	中覆盖	3 228.17	3 236.65	3 280.59	4 575.13	4 575.13	4 534.38
	低覆盖	972.41	1 006.33	1 041.42	2 107.36	2 128.56	2 042.19

县、敖汉旗、双辽市和长岭市等县旗地下水开采量贡献度超 40%。

(3)西辽河平原下降区平均水位埋深从 4.71 m 下降至 8.34 m,草地面积减少 $765.89 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中高覆盖草地面积减少 $659.97 \times 10^4 \text{ hm}^2$,草地呈退化现象。

(4)西辽河平原地下水可持续开采量为 $24.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,为防止地下水水位持续下降,建议对西辽河平原部分旗县地下水开采量进行严格控制,通过引入外源水、提高节水灌溉能力和调整种植结构等方式压缩开采量。

参考文献 (References):

- [1] 梁团豪,谢新民,崔新颖,等.西辽河流域水资源合理配置研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2009,7(4):291-295. [LIANG Tuanhao, XIE Xinmin, CUI Xinying, et al. Study on water resources rational allocation in West Liao River Basin[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009, 7(4): 291-295. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈军,周丽,于孟文.内蒙古西辽河平原地质环境问题及地下水资源合理开发利用研究[J].水文地质工程地质,2008,35(3):123-125. [CHEN Jun, ZHOU Li, YU Mengwen. Ecological environmental problems and suggestion of scientific exploitation and utilization of groundwater resource in the west of Liaohe Plain Inner Mongolia[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 123-125. (in Chinese with English abstract)]
- [3] SONG Ge, HUANG Jinting, NING Bohan, et al. Effects of groundwater level on vegetation in the arid area of Western China[J]. China Geology, 2021, 4(3): 527-535.
- [4] DANG Xueya, LU Na, GU Xiaofan, et al. The relationship between groundwater and natural vegetation in Qaidam Basin[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2021, 9(4): 341-349.
- [5] ZHU Liang, LIU Jingtao, YANG Mingnan, et al. Evolutionary trend of water cycle in Beichuan River Basin of China under the influence of vegetation restoration[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2021, 9(3): 202-211.
- [6] 李成振,孙万光.西辽河平原区水资源供需平衡分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(1):56-61. [LI Chengzhen, SUN Wanguang. Analysis of water resources supply-demand balance in the plain of West Liaohe River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(1): 56-61. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 于成龙,王志春,刘丹,等.基于 SWAT 模型的西辽河流域自然湿地演变过程及驱动力分析[J].农业工程学报,2020,36(22):286-297. [YU Chenglong, WANG Zhichun, LIU Dan, et al. Evolution process and driving force analysis of natural wetlands in Xiliao River Basin based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 286-297. (in Chinese with English abstract)]
- [8] KARKI R, SRIVASTAVA P, KALIN L, et al. Assessment of impact in groundwater levels and stream-aquifer interaction due to increased groundwater withdrawal in the lower Apalachicola-Chattahoochee-Flint (ACF) River Basin using MODFLOW[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 34: 100802.
- [9] 刘宇慧.内蒙古东部响水河沿岸河流—沙丘相互作用研究[D].长沙:湖南师范大学,2017. [LIU Yuhui. A Study on the Interactions between Riverine Dunes and the Xiangshui River, East Inner Mongolia[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赵珍珍,冯建迪.基于多源数据的科尔沁沙地陆地水及地下水储量变化研究[J].水土保持通报,2019,39(3):119-125. [ZHAO Zhenzhen, FENG Jiandi. Investigation of water storage variation in horqin sandy land based on multi-source data[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 119-125. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郭晓东,王晓光,刘强,等.松花江—辽河流域地下水资源及其生态环境问题[J].中国地质,2021,48(4):1062-1074. [GUO Xiaodong, WANG Xiaoguang, LIU Qiang, et al. Groundwater resources and ecological environment in Songhua River-Liaohe River Basin[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1062-1074. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 束龙仓,张彤豪,澈丽木格,等.降水和地下水开采对通辽市科尔沁区潜水位的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):954-966. [SHU Longcang, ZHANG Tonghao, CHE Limuge, et al. Effects of precipitation and groundwater exploitation on the phreatic water table in Khorqin District, Tongliao City[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3): 954-966. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 严聆嘉,何鑫,陆垂裕,等.西辽河平原区地下水埋深

- 变化趋势与超采分析[J]. 水文, 2021, 41(6): 96 – 102. [YAN Lingjia, HE Xin, LU Chuiyu, et al. Analysis of the groundwater depth variation and over-exploitation in the West Liaohe Plain[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(6): 96 – 102. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 赵彦明, 石刚, 张倩. 内蒙古西辽河流域荒漠化问题的形成原因及治理对策[J]. 内蒙古水利, 2020(1): 36 – 37. [ZHAO Yanming, SHI Gang, ZHANG Qian. Causes and countermeasures of desertification in Xiliao River Basin, Inner Mongolia[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2020(1): 36 – 37. (in Chinese)]
- [15] 于春娟, 于春莉, 邹艳福, 等. 西辽河平原地下水资源功能区划的初步探讨[J]. 西部资源, 2016(6): 112 – 114. [YU Chunjuan, YU Chunli, ZOU Yanfu, et al. Preliminary discussion on functional zoning of groundwater resources in West Liaohe Plain[J]. Western Resources, 2016(6): 112 – 114. (in Chinese)]
- [16] 高振东. 西辽河流域植被覆盖度时空演变规律及其影响因素研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015. [GAO Zhendong. Study of spatial temporal evolution rule and influential factors of vegetation coverage in West Liao river basin[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 于春娟, 于春莉. 内蒙古西辽河平原近 20 年来地下水动力场与化学场演化规律研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2009(21): 52 – 54. [YU Chunjuan, YU Chunli. Study on the evolution law of groundwater dynamic field and chemical field in Xiliaohe Plain of Inner Mongolia in recent 20 years[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2009(21): 52 – 54. (in Chinese)]
- [18] 樊红梅. 基于空间均衡的科尔沁区水资源合理配置研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [FAN Hongmei. Study on rational allocation of water resources in Horqin district based on spatial equilibrium[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 红梅, 银山, 包玉海, 等. 内蒙古西辽河流域荒漠化分析研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 324 – 328. [HONG Mei, YIN Shan, BAO Yuhai, et al. Research for desertification analysis of West Liaohe river basin of Inner Mongolia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(6): 324 – 328. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张伟科, 封志明, 杨艳昭, 等. 北方农牧交错带土地利用/覆被变化分析——以西辽河流域为例[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 573 – 579. [ZHANG Weike, FENG Zhiming, YANG Yanzhao, et al. Land use and cover change over the farming-pastoral zone of Northern China: A case study on the xiliaohe watershed[J]. Resources Science, 2010, 32(3): 573 – 579. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 丁宇雪, 毛龙, 周向斌, 等. 基于高分影像的松嫩低平原地区生态环境问题解析——以黑龙江省肇源县为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(4): 1240 – 1248. [DING Yuxue, MAO Long, ZHOU Xiangbin, et al. Analysis of eco-environmental problems in Songmen low plain based on high-score image: A case study of Zhaoyuan County of Heilongjiang Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(4): 1240 – 1248. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 付玉娟, 张玉清, 何俊仕, 等. 西辽河农灌区降雨及农业灌溉对地下水埋深的影响演变分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(3): 327 – 333. [FU Yujuan, ZHANG Yuqing, HE Junshi, et al. Influence of precipitation and agricultural of irrigation agriculture on groundwater depth in Xiliaohe River[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(3): 327 – 333. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 陈志云, 尹雄锐, 季叶飞, 等. 西辽河流域平原区植被与降水及地下水埋深的关系[J]. 东北水利水电, 2013, 31(11): 39 – 41. [CHEN Zhiyun, YIN Xiongrui, JI Yefei, et al. Relationship among vegetation and precipitation and groundwater depth in plain area of Xiliaohe River Basin[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2013, 31(11): 39 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [24] DENG Wei, CHEN Minjian, ZHAO Yong, et al. The role of groundwater depth in semiarid grassland restoration to increase the resilience to drought events: A lesson from Horqin Grassland, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109122.
- [25] 王树生. 气候变化对西辽河流域生态水文过程的影响[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(11): 41 – 44. [WANG Shusheng. Impact of climate change on eco-hydrological process in xiliaohe river basin[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2020, 26(11): 41 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 吴梦红, 杨长保, 林楠, 等. 西辽河流域湿地动态变化特征及影响因素分析[J]. 世界地质, 2016, 35(3): 902 – 908. [WU Menghong, YANG Changbao, LIN Nan, et al.

- Characteristics of wetland dynamic variations in western Liaohe River Basin and their influenced factors[J]. *Global Geology*, 2016, 35(3): 902 – 908. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 杨恒山, 刘江, 梁怀宇. 西辽河平原气候及水资源变化特征 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 84 – 90. [YANG Hengshan, LIU Jiang, LIANG Huaiyu. Change characteristics of climate and water resources in west Liaohe River Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 84 – 90. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 高永刚, 周永吉, 高峰, 等. 1961—2018 年西辽河流域气候干湿指数时空特征分析 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 2053 – 2059. [GAO Yonggang, ZHOU Yongji, GAO Feng, et al. Spatio-temporal characteristics of climatic dry-wet index in Xiliao River Basin from 1961 to 2018[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10): 2053 – 2059. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 王志春, 陈素华, 李超. 近 57 年西辽河流域气候变化特征分析 [J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(1): 42 – 48. [WANG Zhichun, CHEN Suhua, LI Chao. Analysis of the climatic change characteristics in the xiliao river basin in recent 57 years[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(1): 42 – 48. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 翟家齐, 曹继鹏, 刘宽, 等. 青铜峡灌区地下水埋深演变及驱动要素贡献率解析 [J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(9): 102 – 110. [ZHAI Jiaqi, CAO Jipeng, LIU Kuan, et al. Evolutionary change in groundwater table in Qingtongxia irrigation district and its determinants[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(9): 102 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 林若静, 孙从建, 高小鹏, 等. 汾河中下游地下水埋深变化及其控制因素分析 [J]. *地理科学*, 2022, 42(3): 527 – 535. [LIN Ruojing, SUN Congjian, GAO Xiaopeng, et al. Variation of groundwater depth and its controlling factors in the middle and lower reaches of the Fenhe River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(3): 527 – 535. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 李志. 西辽河平原地下水资源及其环境问题调查 [M]. 北京: 地质出版社, 2009. [LI Zhi. Investigation on groundwater resources and its environmental problems in West Liaohe Plain[M]. Beijing: Geological publishing house, 2009. (in Chinese)]
- [33] 内蒙古自治区质量技术监督局. 行业用水定额 [M]. 呼和浩特: 内蒙古自治区质量技术监督局, 2015. [Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Quality and Technical Supervision. Industrial water quota[M]. Hohhot: Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Quality and Technical Supervision, 2015. (in Chinese)]
- [34] 张卓. 西辽河井灌区不同灌溉方式条件下灌溉水利用系数应用与分析 [D]. 长春: 长春工程学院, 2020. [ZHANG Zhuo. Application and analysis of irrigation water utilization coefficient under different irrigation methods in Xiliaohe well irrigation area [D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2020(in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳