

doi: 10.12029/gc20210406

郭晓东, 王晓光, 刘强, 王长琪, 肖长来, 程旭学. 2021. 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, 48(4): 1062–1074.

Guo Xiaodong, Wang Xiaoguang, Liu Qiang, Wang Changqi, Xiao Changlai, Cheng Xuxue. 2021. Groundwater resources and ecological environment in Songhua River–Liaohe River Basin[J]. *Geology in China*, 48(4): 1062–1074(in Chinese with English abstract).

松花江—辽河流域地下水资源及其生态环境问题

郭晓东^{1,2}, 王晓光¹, 刘强¹, 王长琪¹, 肖长来², 程旭学³

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130026;
3. 中国地质调查局水文地质环境调查中心, 河北 保定 071051)

摘要: 松花江—辽河流域(简称松辽流域)是中国重要的商品粮基地, 地下水资源对维护中国粮食安全具有重要作用。2019年松辽流域地下水资源量为 $797.31 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 地下水开发利用量为 $276.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。松辽流域地下水面临着水资源局部短缺, 局部水位持续下降, “三氮”污染加剧, 以及湿地萎缩、土地荒漠化、盐渍化等资源、环境与生态问题。本文对这些问题进行驱动因素分析, 主要是气温升高导致水稻适宜区扩大, 土地利用方式改变, 耕地面积特别是水田面积大幅增加, 造成地下水过量开采、地下水面源污染加剧; 水库的大量修建加剧干旱缺水地区河道径流减少, 地下水补给来源不足, 造成地下水供水能力下降, 地下水位下降。针对这些问题, 提出了加强水资源调查监测, 开展水资源合理配置研究, 实行地表水和地下水联合调度; 加强水资源管理制度建设, 强化制度刚性约束; 调整农业种植结构, 推进节水灌溉, 提高水资源利用效率等建议措施。

关键词: 地下水; 降落漏斗; 生态; 环境; 土地利用; 种植结构; 松辽流域; 水文地质调查工程; 辽宁; 吉林; 黑龙江; 内蒙古
中图分类号: X171.1; P641.8 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2021)04–1062–13

Groundwater resources and ecological environment in Songhua River–Liaohe River Basin

GUO Xiaodong^{1,2}, WANG Xiaoguang¹, LIU Qiang¹,
WANG Changqi¹, XIAO Changlai², CHENG Xuxue³

(1. *Shenyang Geological Survey Center, CGS, Shenyang 110034, Liaoning, China*; 2. *College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China*; 3. *Hydrogeological Environmental Survey Center, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China*)

Abstract: The Songhua River-Liaohe River Basin is an important commodity grain base in China, and groundwater resources play an important role in maintaining China's food security. In 2019, the amount of groundwater resources in Songliao Basin was $797.31 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the exploitation amount of groundwater was $276.4 \times 10^8 \text{ m}^3$. Groundwater in Songliao River Basin is faced with resource, environmental and ecological problems such as local shortage of water resources, continuous decline of local water level,

收稿日期: 2021–03–25; 改回日期: 2021–07–08

基金项目: 中国地质调查局项目“松嫩平原水文地质调查”(DD20190340)资助。

作者简介: 郭晓东, 男, 1981年生, 高级工程师, 主要从事地下水调查评价研究; E-mail: 287684839@qq.com。

通讯作者: 王晓光, 男, 1961年生, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质环境地质调查评价研究; E-mail: 1594493635@qq.com。

aggravation of "three nitrogen" pollution, and wetland shrinkage, land desertification, salinization etc. Based on the analysis of the driving factors of these problems, the main driving force is summarized as the increase of temperature leading to the expansion of rice suitable area, the change of land use pattern, and the substantial increase of cultivated land area, especially paddy field area, resulting in excessive exploitation of groundwater and aggravation of groundwater surface source pollution. The construction of a large number of reservoirs led to the reduction of river runoff in arid and water shortage areas, the lack of groundwater recharge sources, the decline of groundwater supply capacity and the decline of groundwater level. In view of these problems, some suggestions are put forward, including investigation and monitoring of water resources, research on the rational allocation of water resources, joint dispatching of surface water and groundwater, construction of water resources management system, rigid restriction of the system, and adjusting the agricultural planting structure, promoting water-saving irrigation and improving water resources utilization efficiency.

Key words: groundwater; falling funnel; ecology; environment; land use; planting structure; Songliao Basin; hydrogeological survey engineering; Liaoning Province, Jilin Province and Heilongjiang Province; Inner Mongolia Autonomous region

About the first author: GUO Xiaodong, born in 1981, senior engineer, engaged in groundwater investigation and evaluation; E-mail: 287684839@qq.com.

About the corresponding author: WANG Xiaoguang, male, born in 1961, professor, mainly engaged in hydrogeological and environmental investigation and evaluation; E-mail: 1594493635@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey "Hydrogeological Survey Project of Songnen Plain" (No. DD20190340).

1 引言

松花江—辽河流域(松辽流域)位于中国东北地区,包括辽宁、吉林、黑龙江三省和内蒙古自治区东部的呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市,以及河北省承德市部分地区,总面积 $124.89 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

松辽流域为寒带—温带大陆季风型气候(马驰, 2017),季节分明,春季多风干燥,夏季温热多雨,冬季寒冷干燥。多年平均气温 $-4 \sim 10^\circ\text{C}$,多年平均降水量 514 mm ,由东南向西北变化区间 $1130 \sim 250 \text{ mm}$ (Rutledge, 2020)。蒸发量为 $900 \sim 2000 \text{ mm}$,自东向西呈递减趋势(Gou et al., 2020)。松辽流域的地表水系可以分黑龙江水系、松花江水系、辽河水系、鸭绿江水系、图们江水系、绥芬河水系、入海诸河流独立水系。多年平均河川径流量 $1497.50 \times 10^8 \text{ m}^3$,折合径流深度 120 mm 。松辽流域是中国重要的粮食产地,2019年全年粮食产量 $16542.86 \times 10^4 \text{ t}$,占中国粮食产量24.91%。

松辽流域水文地质工作开始于20世纪50年代,至80年代完成了132幅1:20万水文地质普查工作,加上1:50万和1:100万水文地质普查,普查面积基本上覆盖了全区,查明了区内地下水赋存状况。20世纪80—90年代,完成了区内65个县市1:5万~1:10万农业供水水文地质勘察和74个县市

行政区的1:10万水文地质调查。21世纪前十年开展了松嫩平原、三江平原、西辽河平原和下辽河平原等地下水资源、环境问题及地下水污染状况调查,查明了平原区地下水赋存条件、水量和水质及污染状况。自20世纪70年代末开始组建省级监测网,2019年建成国家地下水动态监测工程一期,共建设2158眼地下水自动监测井(Hao et al., 2018)。2019年开始平原盆地的地下水位统测,完成4798点地下水统测点。20世纪80年代初和21世纪初分别完成了两轮地下水资源评价(陈梦熊等, 2002),2020年开展了年度地下水资源评价工作。

松辽流域地下水研究工作由以往的地下水资源现状、动态特征(张振权, 1982)的研究,转变为开发利用及其环境问题(翟金良等, 2003)、地下水污染与地下水化学(章光新等, 2006)的研究,近年来研究人员围绕地下水与地表水相互转化(贾思达, 2019)、地下水补径排的识别(卫文等, 2017)、地下水资源承载力与合理配置(齐学斌等, 2015)、地下水污染来源及健康风险(方敏, 2019)等方向开展研究(胡魁, 1999)。

2 区域水文地质条件及地下水资源分布

2.1 区域水文地质条件

按照地下水水流系统特征,在松花江区和辽河

区地下水系统的基础上,以大型平原盆地为中心,将地下水的补给、径流及汇集区域划分为一个地下水系统(刘畅等,2011),共划分为海拉尔、松嫩、三江、绥芬河—图们江、辽河—浑太河、辽西沿渤海诸河、鸭绿江—沿黄渤海诸河7个二级地下水系统,各系统地下水类型及富水性见表1和图1。

2.2 地下水资源量

2020年中国地质调查局沈阳地质调查中心组织开展了2019年松辽流域地下水资源评价。根据评价结果(表2),松辽流域地下水资源量为 $797.31 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,松花江区 $596.81 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,辽河区 $200.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。按照二级地下水系统,松嫩地下水系统地下水资源量为 $287.21 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,占松辽流域地下水资源量的36.03%。三江地下水系统地下水资源量为 $242.84 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,占松辽流域地下水资源量的30.46%。辽河—浑太河地下水系统地下水资源量为 $156.88 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,占松辽流域地下水资源量的19.68%。其余地下水系统占比较少。

松辽流域地下水资源分布不均,三江、辽河等地下水系统分区资源模数高,海拉尔区、辽西沿渤

海诸河区资源模数低,主要受降水量影响。松辽流域2019年降水量为592.0 mm,降水量空间分布特征明显,表现出东多西少,南多北少的特点,降水量范围在200~1100 mm,呼伦贝尔西部和赤峰大部分地区降水量 $< 400 \text{ mm}$,辽宁西部、白城、齐齐哈尔、黑河一带降水量在400~800 mm,辽阳、哈尔滨、伊春以及三江平原一带降水量在800 mm以上,通化至牡丹江一带降水量在600~700 mm。

3 地下水资源与生态环境问题及其驱动因素

受水文地质条件、水文气候、土地利用、人类工程活动的影响,松辽流域地下水资源存在着数量分布不均、局部短缺、地下水位下降、水质恶化等问题(李景春等,2005; Muhammad et al., 2020; 陈飞等,2020; 刘国栋等,2021)。

3.1 地下水资源短缺与水位下降

松辽流域水资源受蓄水构造、气候条件等的影响和控制(Chen et al., 2019),水资源人均占有量、耕地亩均占有量均较低,用水结构不合理,地下水开

表1 松辽流域地下水类型及富水性
Table 1 Types and water abundance of groundwater in the Songliao Basin

一级地下水系统	二级地下水系统	地下水类型	富水性
松花江区地下水系统	海拉尔地下水系统	第四系松散岩类孔隙潜水	河谷区单井涌水量100~3000 m ³ /d 其他区单井涌水量小于100 m ³ /d
		基岩裂隙水	泉流量小于1 L/s
	松嫩地下水系统	第四系松散岩类孔隙潜水	河谷及冲洪积扇单井涌水量大于3000 m ³ /d; 其他地区单井涌水量小于1000 m ³ /d
		第四系松散岩类孔隙承压水	单井涌水量1000~3000 m ³ /d
		新近系碎屑岩类孔隙裂隙水	单井涌水量1000~3000 m ³ /d
		基岩裂隙水	泉流量小于1 L/s,局部大于1 L/s
	三江地下水系统	玄武岩孔洞裂隙水	泉流量大于1 L/s,靖宇、敦化地区泉流量大于10 L/s
		第四系松散岩类孔隙潜水	单井涌水量1000~3000 m ³ /d
		基岩裂隙水	泉流量小于1 L/s
		玄武岩孔洞裂隙水	泉流量大于1 L/s
绥芬河—图们江地下水系统	基岩裂隙水	泉流量小于1 L/s	
	玄武岩孔洞裂隙水	泉流量大于1 L/s	
辽河区地下水系统	辽河—浑太河地下水系统	第四系松散岩类孔隙潜水	单井涌水量大于1000 m ³ /d
		第四系松散岩类孔隙承压水	单井涌水量100~1000 m ³ /d
	辽西沿渤海诸河地下水系统	基岩裂隙水	泉流量小于1 L/s
		碳酸盐岩裂隙溶洞水	泉流量大于5 L/s
鸭绿江—沿黄渤海诸河地下水系统	基岩裂隙水	泉流量小于1 L/s	
	碳酸盐岩裂隙溶洞水	泉流量大于5 L/s	

表2 松辽流域地下水资源量
Table 2 Groundwater resources in the Songliao Basin

一级区	二级地下水系统分区	山丘区地下水 资源量 / (10 ⁸ m ³ /a)	平原区浅层地下水 资源量/(10 ⁸ m ³ /a)	地下水资源 量/ (10 ⁸ m ³ /a)	地下水资源模数/ (10 ⁴ m ³ /(km ² ·a))
松花江区	松嫩地下水系统	90.34	200.38	287.21	6.46
	三江地下水系统	109.07	133.77	242.84	8.42
	海拉尔地下水系统	27.71	18.74	45.72	2.91
	绥芬河—图们江地下水系统	21.04	0.00	21.04	6.38
	合计	248.15	352.90	596.81	6.46
辽河区	辽河—浑太河地下水系统	36.75	131.06	156.88	7.23
	辽西沿渤海诸河地下水系统	9.74	0.00	9.74	2.74
	鸭绿江—沿黄渤海诸河地下水系统	33.88	0.00	33.88	5.91
	合计	80.37	131.06	200.50	6.47
松辽流域		328.53	483.95	797.31	6.46

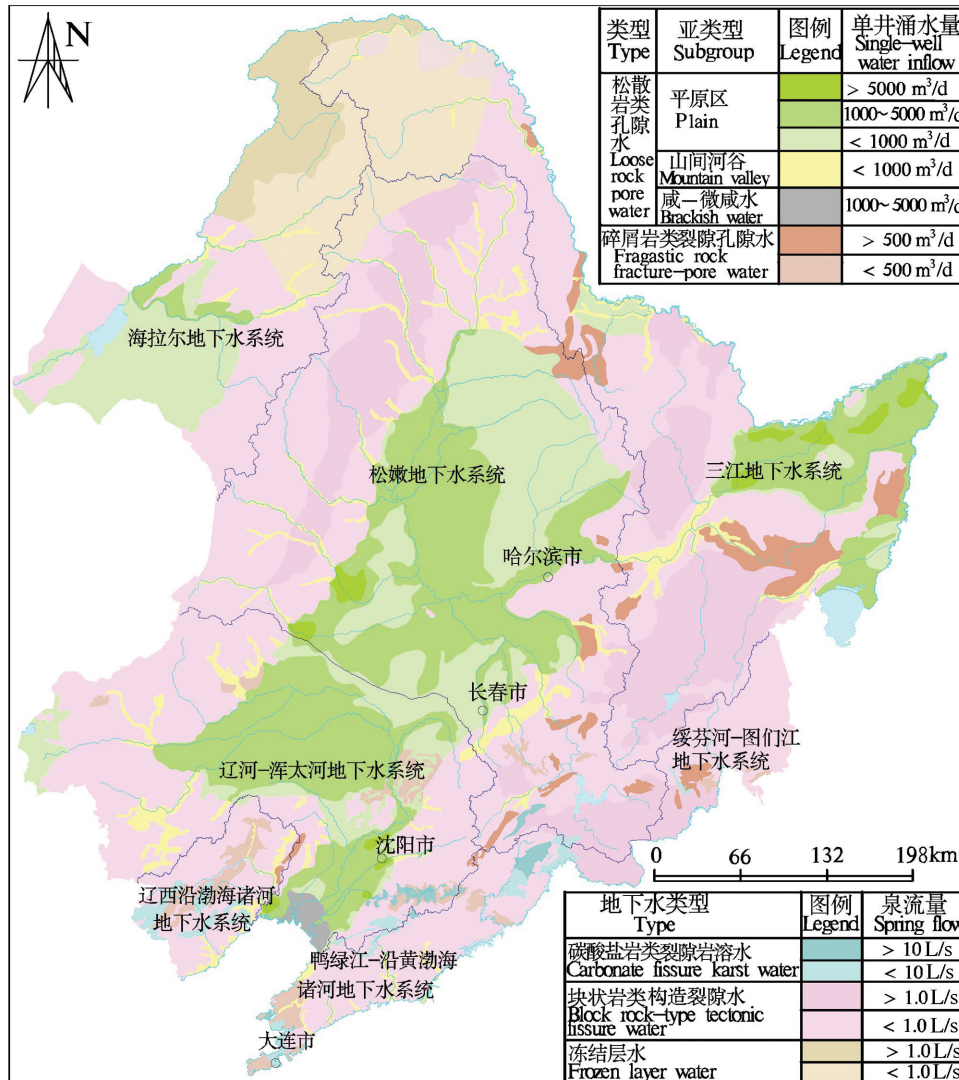


图1 松辽流域水文地质简图
Fig.1 Hydrogeological map of the Songliao Basin

发利用程度较高,地下水位持续性下降,局部形成降落漏斗(于丽丽等,2019)。

3.1.1 水资源分布不均,部分地区短缺严重

松辽流域2019年人均水资源总量2210.68 m³,高于全国2074.35 m³,其中地下水人均资源量670 m³,高于全国585 m³,但是区域水资源分布严重不均,人口稠密和经济发达的辽河流域水资源不足,辽河流域人均水资源总量407.56 m³,仅为全国人均水资源量的19.65%(图2)。按照联合国人口行动组织(PLA)1993年提出的人均水资源量的评价标准,<3000 m³/a为轻度缺水,500~1000 m³/a为重度缺水,<500 m³/a为极度缺水(吴爱民等,2016)。辽河流域水资源量极度短缺,其中长春、沈阳、大连、鞍山、营口、阜新、朝阳、盘锦等城市人均水资源量都小于

500 m³,属于极度缺水(孙才志等,2007)。水资源分布不均,局部严重短缺成为社会经济发展和人民生活水平提高的重要限制因素(李伟丽等,2016)。

3.1.2 地下开发利用率高、用水结构不合理

松辽流域地下水可开采资源量为365.7×10⁸ m³,近20年来,地下水开采程度在68.97%~88.11%,已经逼近地下水可开采量,地下水开发利用处于较高水平。从松辽流域地下水资源开发利用现状图(图3)可看出,区内地市行政区中,鹤岗、佳木斯、四平、辽源四市2019年地下水开采量超过多年平均地下水可开采量,处于超采状态。双鸭山、鸡西、长春、吉林市、通辽、铁岭、沈阳、鞍山、大连地下水开采程度在70%~100%,哈尔滨、绥化、白城、营口地下水开采程度在50%~70%(周浩等,2011;卞玉梅等,

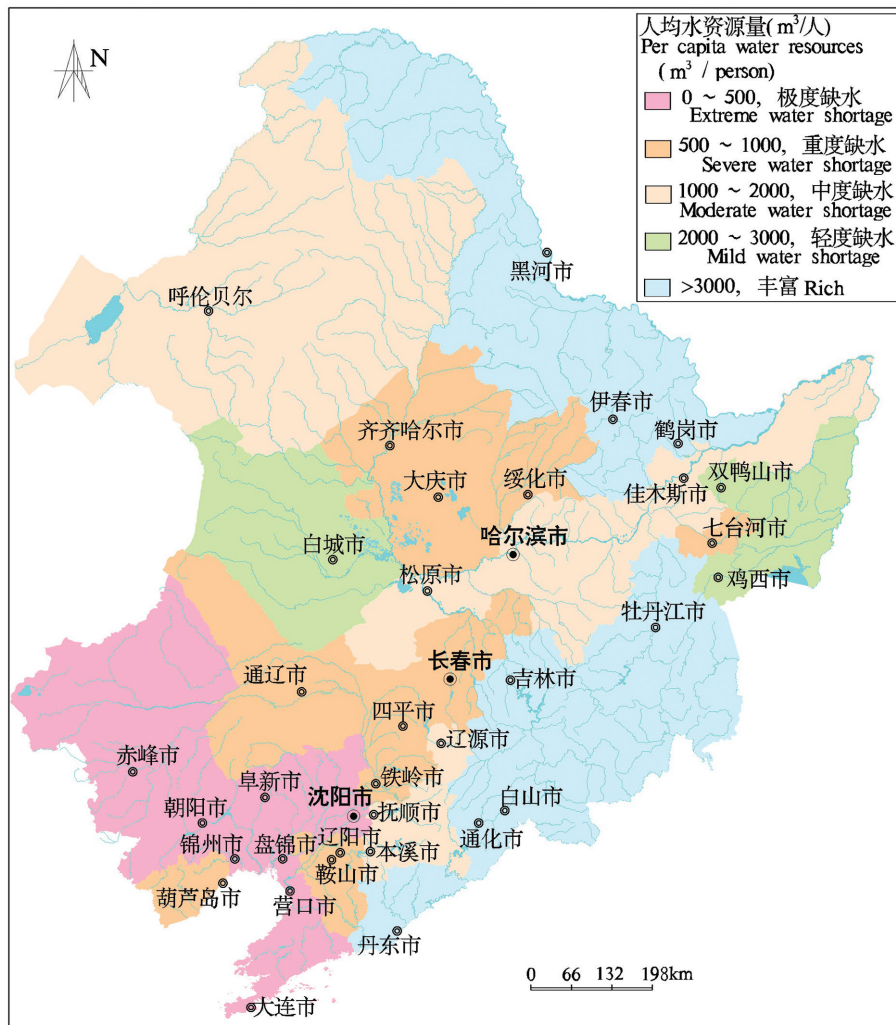


图2 东北地区人均水资源量图
Fig.2 Per capita water resources in Northeast China

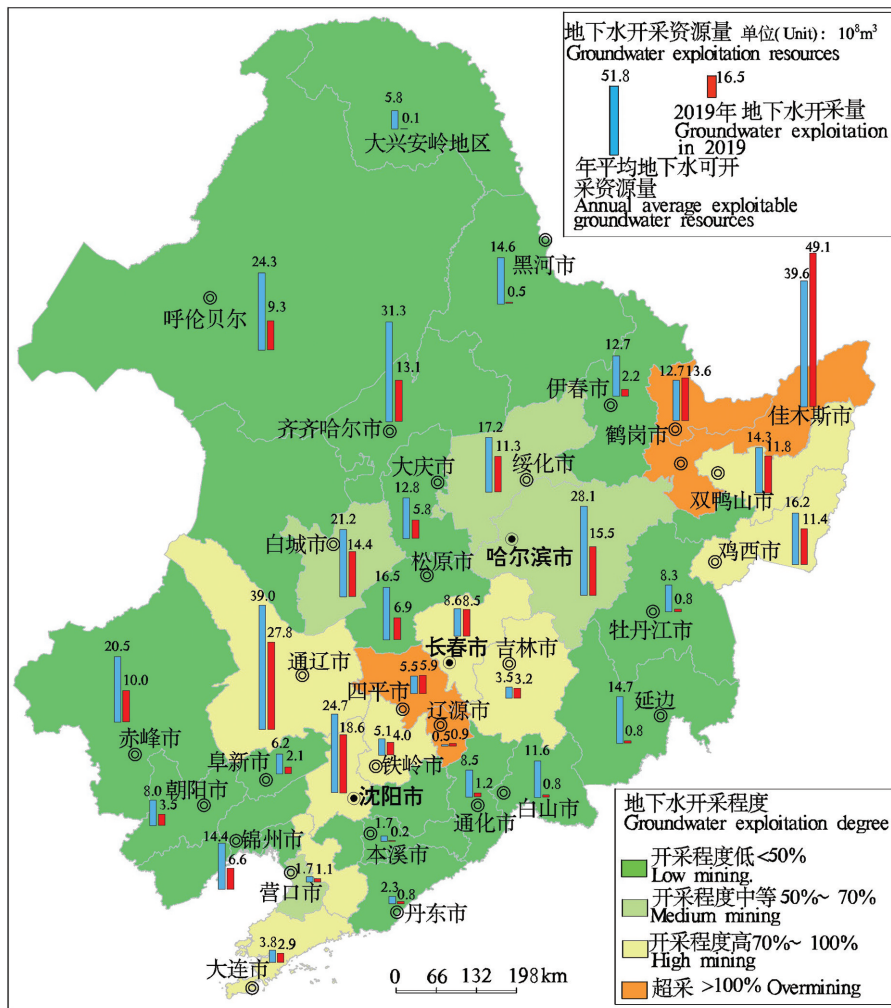


图3 松辽流域地下水资源开发利用现状图

Fig.3 Current situation of groundwater resources development and utilization in Songliao Basin

2019)。地下水开采程度按照<50%开采程度低, 50%~70%开采程度中等, 70%~100%开采程度高, > 100%超采进行评价。东北地区42个城市中, 9.52%的城市地下水超采, 21.43%的城市地下水开采程度高(刘琼等, 2020)。

作为全国粮食基地, 农田灌溉用水一直是松辽流域主要用水类型。2019年松辽流域农田灌溉用水占总用水量的比重为74.84%, 而全国农田灌溉用水量占总用水量的62.3%, 松辽流域灌溉用水比重比全国高出了12.54%, 用水结构比较单一(付玉娟等, 2016; 李成振等, 2017)。

3.1.3 地下水位持续性下降, 局部形成降落漏斗

由于地下水开采量的增加以及降雨量减少等原因, 松辽流域多处地区地下水位持续下降, 局部

形成地下水降落漏斗(方燕娜等, 2005; 周浩等, 2011; 温传磊等, 2017)。根据2019年统测结果与20世纪80年代相比, 松辽流域主要的水位下降区有8个, 分别位于三江平原建三江垦区, 松嫩平原绥棱—庆安、白城、榆树、通榆—乾安, 辽河平原通辽、盘锦、锦州凌海, 总面积18351 km^2 , 经估算地下水超采 $150 \times 10^8 \text{m}^3$ 。最大水位埋深位于盘锦市, 为65 m。地下水下降区详情见统计表(表3)。

根据松辽流域近40年地下水流场变化情况, 圈定地下水降落漏斗6个, 其中第四系潜水降落漏斗3个, 分别为黑龙江建三江垦区、内蒙古通辽市区、辽宁凌海地区; 第四系承压水降落漏斗2个, 分别为黑龙江大庆市和哈尔滨松北区, 新近系馆陶组降落漏斗1个, 位于为辽宁盘锦市(邱磊等, 2019)。漏斗区

表3 松辽流域地下水下降区特征一览

Table 3 Characteristics of groundwater drop area in Songliao Basin

下降区名称	下降原因	生态影响	水位下降 \geq	水位下降 \geq	水位下降 \geq	水位升降 值/m	盈亏量/(10 ⁸ m ³) 盈正亏负	水位 埋深/m
			20 m 面积/km ²	10 m 面积/km ²	5 m 面积/km ²			
建三江垦区	水稻灌溉开采地下水	目前无影响		3400	11660	-13	-150	17~18
绥棱—庆安	水稻田	目前无影响		481	1062	-20	-2.65	26.82
白城	水稻种植/城市生活	枯水期水量不足		6	437	-5	-4.37	17.54
榆树市	水稻种植/城市生活	目前无影响		624	1093	-15	-5.46	31.14
通榆—乾安	农业种植	土地沙化		50	1956	-7.5	-9.78	24
通辽	城市生活/农田灌溉	土地沙化			1911	-5	-19	17.72
盘锦	城市生活/油田开发	持续下降	424	1252		-20	-6.26	65
锦州凌海	水稻田灌溉/城市生活	海水入侵			232	-5	-1.16	15

总面积约 6334.76 km²。松辽流域地下水降落漏斗情况见表 4。

地下水降落漏斗是否形成地面沉降等地质灾害,需要加强监测并开展调查研究。从目前的情况看,松辽流域漏斗区未形成因地下水开采造成的地面沉降。地下水降落漏斗是地下水开发利用形成的自然现象,具有实时变化及可恢复性,地下水位的升降变化是地下水发挥水资源调蓄能力的表现,应该在合理的地下水位范围内充分运用地下水的水资源调蓄能力,科学合理开发利用地下水资源。

3.2 地下水生态环境问题

根据 2009—2014 中国地质调查局沈阳地质调查中心组织开展的松辽流域主要平原区地下水污染调查,工作区地下水水质问题主要是地下水中原生铁、锰含量较高,以硝酸盐、亚硝酸盐和铵离子为代表的“三氮”污染问题突出,部分地区地下水中原生氟、砷含量高(左锐等,2015)。

3.2.1 原生地下水环境问题

松辽流域主要平原区地下水中铁、锰、氟、砷含

量较高,按照《地下水质量标准(GB/T14848 2017)》Ⅲ类水标准,浅层水中铁、锰、氟、砷的超标率分别为 55.40%、55.83%、19.69%和 10.61%。深层水中铁、锰、氟、砷的超标率分别为 54.77%、65.49%、18.69%和 15.16%。深浅层地下水原生组分超标情况大致相当,深层水中铁、锰超标程度还略高于浅层水,说明原生组分来源于原生地质环境中水岩的相互作用。除下辽河平原地区外,松嫩平原、三江平原、西辽河平原、海拉尔盆地地下水中原生组分超标情况都较为严重,其中海拉尔盆地地下水中铁、锰组分超标率超过 80%。氟超标区域主要集中在松嫩平原中部低平原区,海拉尔盆地、西辽河平原和下辽河平原边缘地带也比较发育。砷由于原生地质环境和水岩交换作用的影响,主要存在于松嫩平原西部肇东、肇州、肇源、洮南、通榆一线的山前倾斜平原含水层中以及三江平原中部地区(Wang et al., 2018)。

3.2.2 地下水“三氮”污染

东北地区地下水“三氮”污染物普遍检出(郭涛

表4 松辽流域地下水降落漏斗一览

Table 4 Groundwater depression funnel in Songliao Basin

序号	漏斗名称	2019 漏斗面积/km ²	漏斗边界	中心区水位最大埋深/m	2019 漏斗变化情况及发展趋势	漏斗成因
1	建三江垦区漏斗	3400	与 1980 年对比 10 m 水位变差	18.15	中心水位下降,漏斗面积扩大	水稻种植
2	哈尔滨松北漏斗	278	116 m 水位标高	10.28	中心水位回升,漏斗面积缩小	城市生活
3	大庆漏斗	254	136 m 水位标高	17.51	中心水位回升,漏斗面积缩小	城市生活/油田开发
4	通辽漏斗	1911	10 m 水位埋深	17.72	中心水位下降,漏斗面积扩大	城市生活/农田灌溉
5	盘锦漏斗	424.76	40 m 埋深	65	中心水位下降,漏斗面积扩大	城市生活/油田开发
6	锦州凌海地区降落漏斗	67	(-2 m 水位标高)	15.07	缓慢扩大	水稻种植/城市生活

等, 2017), 浅层水中硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和氨氮的超标率分别为 30.18%、27.50% 和 21.06%。深层水中硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和氨氮的超标率分别为 16.34%、6.93% 和 13.73%。浅层地下水中辽河平原地区“三氮”超标最为严重, 其次为海拉尔盆地和三江平原; 深层地下水中海拉尔盆地地区“三氮”超标较为严重。三江平原地下水氨氮超标最为严重, 超标比例达到 35.38%, 与 20 世纪 70 年代相比明显恶化, 硝酸盐氮超标率从 1970 年的 2% 大幅增加到 2018 年的 15%, 氨氮由 20% 的超标率增加到 35.38%, 增加了 15.38%。

3.2.3 生态环境问题

随着气候变化和农田的大规模开发, 松辽流域地表形态发生了重大变化, 出现了明显的湿地萎缩、土地沙化、盐渍化等生态环境问题。

对东北地区的 21 个重要湿地 1990—2019 年面积变化情况研究发现(焦雯雯, 2020): 1990—2000 年东北地区湿地面积从 14059 km² 下降为 12805 km², 下降了 9%, 2000 年以后中国湿地保护力度加强, 2000—2019 年湿地小幅下降 10.18 km², 并趋于稳定。

松辽平原荒漠化区主要分布在黑龙江、吉林西部和内蒙古东部两省一区交接地带以西地区, 据不同时间遥感解译数据显示(方洪宾等, 2009): 1975 年区内荒漠化总面积 58891.49 km², 1990 年增加至 88603.53 km², 增加了 50.45%, 2006 年荒漠化总面积 43415.94 km², 与 1990 年相比大幅减少, 减少了 50.99%, 与 1970 年相比也减少了 26.27%。

松辽平原盐渍化区主要分布在吉林白城、松原和长春西部; 吉林与内蒙古交界的通辽东北部、兴安盟南部地区; 黑龙江的大庆、绥化和齐齐哈尔、哈尔滨的部分地区。据不同时期遥感解译数据显示(方洪宾等, 2009): 1975 年松辽平原盐渍化区面积 19042.13 km², 1990 年增加到 23825.87 km², 2006 年面积较 1990 年有所减少, 为 19863.32 km², 接近 1975 年的水平。

3.3 驱动因素分析

3.3.1 气候变化

松辽流域过去 40 年气候有明显变化, 气温升高与全球气候变暖趋势相一致。总体表现为气温跃升, 特别是在 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 气温有明显跃升。总体上松辽流域呈现暖干化的趋势, 大气

平均相对湿度明显减少(卢洪健等, 2015), 以三江平原佳木斯市气象站为例(图 4), 20 世纪 50 年代到 21 世纪 00 年代, 平均气温不断升高, 而大气相对湿度从 70.44% 下降到 64.80%。随着气温升高, 东北地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温区总体向高纬度区偏移, 加之种植技术水平的提升, 水稻适宜种植区同期向北部大面积扩展, 黑龙江的水稻种植面积从 20 世纪 80 年代的平均 $38.30 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到 21 世纪 10 年代的 $374.20 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。虽然干旱程度加剧, 但由于东北地区灌溉用水大部分为地下水, 降水量减少并没有显著影响水稻种植(陈浩等, 2016)。

3.3.2 土地利用变化

松辽流域土地利用变化是该地区水资源及其环境问题的一项重要驱动因素。近 40 年来, 松辽流域土地利用状况发生明显变化, 主要为: 耕地面积大幅增加, 建设用地等明显增加, 林地、草地、水体和沼泽面积减少(Liu et al., 2009; Fang et al., 2012; 谭永忠等, 2017)。根据多年遥感解译数据显示 1980 年松辽流域耕地面积 $32.03 \times 10^4 \text{ km}^2$, 到了 2015 年耕地面积增加为 $37.53 \times 10^4 \text{ km}^2$, 增加了 17.17%, 其中水田面积增加 $1.90 \times 10^4 \text{ km}^2$, 增加 53.97%(Zhang et al., 2017), 取而代之的是林地减少 $2.21 \times 10^4 \text{ km}^2$, 草地减少 $2.28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 沼泽湿地减少 $1.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

三江平原水稻种植面积的增加更加明显, 1976 年三江平原土地以旱田为主, 面积约 $356.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 沼泽湿地面积 $228.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (表 5)。20 世纪 70—80 年代, 随着北大荒的开发和现代化农场的建设, 农业种植技术水平提高, 水田被大规模开发出来, 到 2016 年三江平原水田面积达到 $278.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (表 5), 是 1986 年水田面积的 4.83 倍。随着水田种植面积的增加, 沼泽湿地急剧萎缩, 从 20 世纪 70 年代的 $228.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 到 2016 年 $58.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (表 5), 沼泽湿地面积不断减少, 减少了 74.38%(贾思达, 2019; 杨春霞等, 2020)。建三江垦区由于水稻种植面积的急剧增加, 垦区中的创业农场地下水水位出现持续性下降(图 5)。

随着土地利用状况的改变, 特别是耕地面积的增加, 松辽流域地下水开采量也发生明显增加, 从 1994 年的 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2017 年 $685.97 \times 10^8 \text{ m}^3$, 增加了 37.19%, 地下水开采量的增加造成了地下水的水位明显下降。由于耕地面积的增加, 农药化肥

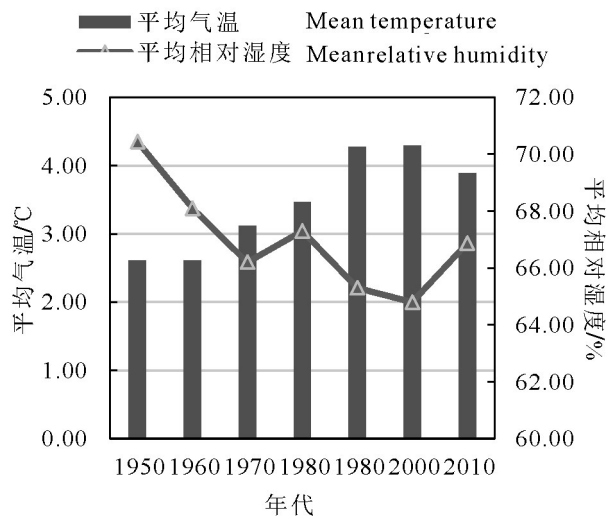


图4 佳木斯气象站平均气温和平均相对湿度
Fig.4 Mean temperature and mean relative humidity at Jiamusi Meteorological Station

的用量大幅增加,长期的不合理使用造成地下水“三氮”污染物含量增加(方敏, 2019)。

3.3.3 水资源的不合理开发利用

水库的大量修建也是造成区内地下水资源供需紧张的重要驱动因素。近几十年来,研究区内修建了大量水库,用于防洪、灌溉、发电,推动了社会经济发展,但是也带来众多生态环境问题。由于水库大量蓄水,加剧下游河流径流减少,对地下水的补给随之减少,同时水库下游地区的生产生活用水来源不得不转为地下水,造成水资源配置失衡,地

表5 三江平原不同时期土地利用状况 (10⁴ hm²)
Table 5 Land use status of Sanjiang Plain in different periods (10⁴ hm²)

类型	1976	1986	1996	2006	2016
水田	0	57.7	41.2	150.9	278.7
旱田	356.2	394.8	452.4	449.3	318.7
沼泽	228.8	138.9	121.5	81.0	58.6

下水供需矛盾更加突出,干旱缺水区尤为典型(陈军等, 2008)。

西辽河地区多年平均降水量为204 mm,多年平均蒸发量1700 mm(赵彦明等, 2020),新开河(西拉木伦河)、西辽河是流域内的主要地表河流。西辽河平原水资源总量72×10⁸ m³,其中地表水资源量38×10⁸ m³,地下水资源量55×10⁸ m³,重复资源量22×10⁸ m³,水资源开发利用量53×10⁸ m³,地下水开采量43×10⁸ m³。西辽河上游赤峰地区分布有台河口、海拉苏、红山水库等60多座水利工程,总库容33×10⁸ m³,由于上游水利工程的截留,下游河道几乎无地表径流(丁元芳等, 2020),根据西辽河麦新水文站数据显示,1991年径流量为20.79×10⁸ m³至2004年减少为零(李成振和孙万光, 2017)。西辽河中下游的通州市工农业用水几乎全部为地下水,开采量由1998年的20×10⁸ m³增加到2006年的30×10⁸ m³,之后保持在27×10⁸ m³左右;而通州市的地下水可开采资源量为39×10⁸ m³,开采程度达到70%,2019年漏斗面积1911 km²,漏斗范围还处于缓慢扩大的趋势(杨恒山等, 2009)。

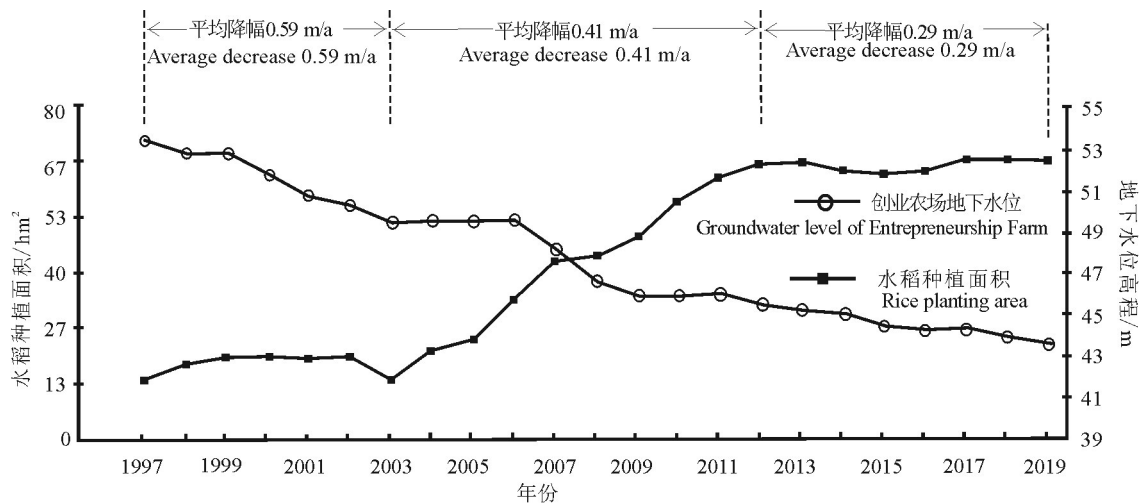


图5 建三江垦区不同时期水稻种植面积与水位对比图
Fig.5 Comparative map of rice planting area and water level in the Jiansanjiang Reclamation area in different periods

4 问题与建议

松辽流域地下水面临的资源与环境问题严重制约东北老工业基地的全面振兴,需要加强地下水资源管理,改变农业种植结构,开展水资源合理配置研究,合理开发利用地下水资源。

(1)加强水资源调查监测,开展水资源合理配置研究,实行地表水和地下水联合调度。从地球系统科学的理念出发,加强对地下水位下降区、超采区和地下水污染区的调查监测,加密监测网络,查明水资源数量质量和开发利用状况,加强对地下水过量开采造成的地面沉降研究。开展水资源合理配置研究,合理确定生产生活用水和生态用水配额,在维护好生态平衡的基础上,最大限度发挥水资源的调蓄功效。划定好水生态红线,为以水定产提供支持。加强地下水和地表水的联合调配,在地下水资源不足区,严格控制河流上游水利工程,确保河流生态流量。在三江平原等地下水过量开采区,加强地表水水利工程建设。

(2)加强水资源管理制度建设,强化制度刚性约束。细化水资源开采管理制度,出台有力措施,强化农业用地下水的总量控制和地下水位生态阈值管理。松辽流域将近70%的水资源用于农田灌溉,地下水的主要问题是农业用水造成的。要加强地下水开采管控,在地下水位下降区强化执法监察,彻底解决农村地下水的无序开采。强化打井队伍管理,对施工质量加强监控,严格含水层止水,坚决防止地下水串层污染。增加农业用水调控手段。强化水生态红线管控,坚决实施基于水资源承载能力的产业政策。

(3)调整农业种植结构,推进节水灌溉,提高水资源利用效率。调整农业种植结构,开展水稻种植区水资源承载能力研究,对于水稻种植超载区,严格控制新增面积,压缩已有种植面积。加大节水灌溉工程和节水技术研究,加大农业节水政策和财政支持,尽快推进一批节水灌溉设施改造项目,加大对节水技术的推广和应用。探索建立农村农业用水的有偿使用制度,提高政策的针对性和有效性。

5 结论

(1)松辽流域水资源分布不均,地下水开采程

度高。总体水资源量较为丰富,但是下辽河流域人均水资源不足,沈阳、鞍山、营口、大连、长春等城市人均小于 $500\text{ m}^3/\text{a}$,属于极度缺水。地下水开采程度在68.97%~88.11%,已经逼近地下水可开采量,松辽流域42个城市中,9.52%的城市地下水超采,21.43%的城市地下水开采程度高。

(2)与20世纪80年代相比,松辽流域形成了三江平原建三江垦区,松嫩平原绥化—庆安、白城、榆树、通榆—乾安,辽河平原通辽、盘锦、凌海等地下水下降区,总面积 18351 km^2 。形成建三江、哈尔滨松北、大庆、通辽、盘锦、凌海6个地下水降落漏斗,总面积 6334.76 km^2 。

(3)松辽流域地下水原生铁、锰、氟、砷等超标严重,浅层水中铁、锰、氟、砷的超标率分别为55.40%、55.83%、19.69%和10.61%。深层水中铁、锰、氟、砷的超标率分别为54.77%、65.49%、18.69%和15.16%。受农业种植规模的扩大,地下水“三氮”污染问题日益严重。

(4)松辽流域自20世纪70年代以来,由于气候变化和农田的大规模开发导致了湿地萎缩、土地荒漠化和盐渍化等生态环境问题,但是2000年以后,随着中国生态保护力度的加强,已经出现明显好转。

(5)松辽流域过去40年具有明显的暖干化趋势,造成水稻种植适宜区的扩大,助推高耗水农田的扩张。耕地面积扩大、林地、草地、湿地的减少等土地利用变化是区域水资源、水环境和生态问题的重要驱动力。水库等水利设施的大量修建,加剧河流生态流量不足,地下水补给来源减少,开采量加大,地下水水位下降。

References

- Bian Yumei, Jin Chen, Zhang Jing, Guo Jia. 2019. Evaluation and calculation of groundwater over-exploitation in Lower Liaohe Plain[J]. *Urban Geology*, 14(3): 64–73 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fei, Xu Xiangyu, Yang Yan, Ding Yueyuan, Li Jianqiang, Li Yuanyuan. 2020. Investigation on the evolution trends and influencing factors of groundwater resources in China[J]. *Advances in Water Science*, 31(6): 811–819(in Chinese with English abstract).
- Chen Hao, Li Zhengguo, Tang Pengqin, Hu Yanan, Tan Jieyang, Liu Zhenhuan, You Liangzhi, Yang Peng. 2016. Rice area change in Northeast China and its correlation with climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(8): 2571–2579(in Chinese with

- English abstract)
- Chen Hao, Zhang Wangchang, Nie Ning, Guo Yuedong. 2019. Long-term groundwater storage variations estimated in the Songhua River Basin by using GRACE products, land surface models, and in-situ observations [J]. *Science of the Total Environment*, 649: 372–387.
- Chen Jun, Zhou Li, Yu Mengwen. 2008. Geological environmental problems and suggestion of scientific exploitation and utilization of groundwater resource in the west of Liaohe Plain, Inner Mongolia[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 35(3): 123–125(in Chinese with English abstract)
- Chen Mengxiong, Ma Fengshan. 2002. *Groundwater Resources and Environment in China* [M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- Ding Yuanfang, Li Yuening, Wu Haochen, Fu Xinglong. 2020. Exploitation utilization problem and cause analysis of groundwater in Xiliaohe River Basin[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 38(5): 32–34, 39(in Chinese with English abstract).
- Fang Hongbin, Zhao Fuyue, Jiang Qigang. 2009. *Quaternary Geological Environment and Degradation of Black Soil in Songliao Plain* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Fang H, Ping W, Jingjing Z. 2012. Grasslands changes in the Northern Songnen Plain, China during 1954–2000[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(4): 2161–2175.
- Fang Min. 2019. Study on the Formation Process of "Three Nitrogen" Pollution of Shallow Groundwater in Songhua River – Naoli River Basin of Sanjiang Plain [D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- Fang Yanna, Lin Xueyu, Liao Zisheng. 2005. Analysis of dynamic variation of groundwater level and over-draft in the plain area of central Jilin[J]. *Hydrology*, 25(5): 19–22, 54(in Chinese with English abstract).
- Fu YuJuan, Zhang Yuqing, He Junshi, Zhang Chaolong. 2016. Influence of precipitation and agricultural of irrigation agriculture on groundwater depth in Xiliaohe River[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 47(3): 327–333(in Chinese with English abstract).
- Gou Jiao, Miao Chiyuan, Han Jingya. 2020. Spatiotemporal changes in temperature and precipitation over the Songhua River Basin between 1961 and 2014[J]. *Global Ecology and Conservation*, 24: e01261.
- Guo Tao, Chen Haiyang, Teng Yanguo, Li Jiao, Chen Ruihui. 2017. Pollution Assessment and source identification of basin groundwater in typical agricultural areas in Northeast China[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 53(3): 316–322(in Chinese with English abstract).
- Hao Aibing, Zhang Yilong, Zhang Eryong, Li Zhenghong, Yu Juan, Wang Huang. 2018. Review: Groundwater resources and related environmental issues in China[J]. *Hydrogeology Journal*, 26: 1325–1337.
- Hu Kui. 1999. Protection and reasonable development of groundwater resources in China [J]. *China Geology*, (1):23–26(in Chinese with English abstract).
- Jiao Wenwen. 2020. *Remote Sensing Monitoring of Dynamic Changes of Important Wetlands in Northeast China* [D]. Harbin: Harbin Normal University (in Chinese with English abstract).
- Jia Sida. 2019. *Groundwater– Surface Water Interaction in Songhuajiang– Naoli River Basin of Sanjiang Plain* [D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- Li Chengzhen, Sun Wanguang. 2017. Analysis of water resources supply– demand balance in the Plain of West Liaohe River [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 28(1): 56–61, 68 (in Chinese with English abstract).
- Li Jingchun, Jia Weiguang, Jin Hongtao. 2005. Environmental effects of groundwater system degradation in Northeast Economic Zone [J]. *Geology and Resources*, 14(4): 272–273, 278(in Chinese with English abstract).
- Liu Chang, Pan Jun, Li Yang, Meng Siqiao. 2011. Salt water occurrence condition and its distribution characteristics in the Minghuazhen of the Southern Xialiaohe Plain [J]. *Underground Water*, 33(3): 11–12, 76. (in Chinese with English abstract)
- Liu Dianwei, Wang Zongming, Song Kaishan, Zhang Bai, Hu Liangjun, Huang Ni, Zhang Sumei, Luo Ling, Zhang Chunhua, Jiang Guangjia. 2009. Land use/cover changes and environmental consequences in Songnen Plain, Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 19(4): 299.
- Liu Guodong, Zhang Li, Yang Ze, Dai Huimin, Zhao Chuandong. 2021. Distribution characteristics of heavy metals in the water and suspended substance of Nenjiang River Basin: Environmental implication[J]. *Geology and Resources*, 30(1): 53–61(in Chinese with English abstract).
- Liu Qiong, Li Ruimin, Wang Yi, Gao Mengmeng, Li Xiaolei, Sun Chao. 2020. Theory and methodology for evaluation of carrying capacity of regional groundwater resources in China[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 47(6): 173–183(in Chinese with English abstract).
- Li Weili, Zhang Weidong, Wang Lu. 2016. Rice layout adjustment based on ecological water restriction in the lower reach of the Liaohe River Plain[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 37(2): 161–167(in Chinese with English abstract).
- Lu Hongjian, Mo Xingguo, Meng Dejuan, Liu Suxia. 2015. Analyzing spatiotemporal patterns of meteorological drought and its responses to climate change across northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 35(8): 1051–1059(in Chinese with English abstract).
- Ma Chi. 2017. Remote sensing and landscape analysis of wetlands in Northeast China [J]. *Journal of Hydroecology*, 38(2): 10–16(in Chinese with English abstract).
- Muhammad Abrar Faiz, Dong Liu, Qiang Fu, Faisal Baig, Ahmad

- Niaz, Tianxiao Li. 2020. Effects of land use and climate variability on the main stream of the Songhua River Basin, Northeast China[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 65(10):1752–1765.
- Qiu Lei, Sun Long, Yu Po, Wu Haocheng, Lu Chengpeng. 2019. Analysis of evolution and control factors of depression cone of shallow groundwater in Songliao Plain[J]. *Pearl River*, 40(8): 19–24.
- Qi Xuebin, Huang Zhongdong, Qiao Dongmei, Zhang Xianchao, Li Ping, Mathias N Andersen. 2015. Research advances on thereasonable water resources allocation in irrigation district[J]. *Advances in Water Science*, 26(2): 287–295(in Chinese with English abstract).
- Rutledge J C. 2020. Analyzing the muddles of analysis: (Some of) What analytic theologians can learn from the history of analytic feminism[J]. *Modern Theology*, 36(3): 569–581.
- Sun Caizhi, Liu Yulan, Yang Jun. 2007. Research on the ecological and sustainable groundwater table regulation in the lower Liaohe River Plain [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(2): 249–254(in Chinese with English abstract).
- Tan Yongzhong, He Ju, Yue Wenze, Zhang Liang, Wang Qingri. 2017. Spatial pattern change of the cultivated land before and after the second national land survey in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 32(2): 186–197(in Chinese with English abstract).
- Wang Yanxin, Zheng Chunmiao, Ma Rui. 2018. Review: Safe and sustainable groundwater supply in China[J]. *Hydrogeology Journal*, 26(5): 1301–1324.
- Wen Chuanlei, Dong Weihong, Cui Geng, Liu Yang, Su Xiaosi. 2017. Application of analytical methods to determination of the exploitation scheme of a wellfield at riverside[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 44(3): 19–26(in Chinese with English abstract).
- Wei Wen, Chen Zongyu. 2017. Identification of the origin of groundwater recharge using environmental isotopes in the southwest Songnen Plain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 31(1): 173–177.
- Wu Aimin, Jin Jihong, Song Bo. 2016. Water safety issues of China and ensuring roles of groundwater [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2939–2947(in Chinese with English abstract).
- Yang Chunxia, Zheng Hua, Ouyang Zhiyun. 2020. Changes, effect and driving forces of land use in Sanjiang Plain[J]. *Environmental Protection Science*, 46(5): 99–104(in Chinese with English abstract).
- Yang Hengshan, Liu Jiang, Liang Huaiyu. 2009. Change characteristics of climate and water resources in west Liaohe River Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20(1): 84–90(in Chinese with English abstract)
- Yu Lili, Tang Shinan, Ding Yuanfang, Chen Fei, Yang Yan, Ding Yueyuan, He Jun. 2019. Groundwater overdraft situation and countermeasures in Northeast China[J]. *Water Resources Planning and Design*, 186(4):37–40(in Chinese with English abstract).
- Zhai Jinliang, He Yan, Deng Wei. 2003. Municipal water resources and environment problems in the Northeast China and countermeasures[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 16(3): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yanming, Shi Gang, Zhang Qian. 2020. Causes and countermeasures of desertification in Xiliao River Basin of Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 209(1): 36–37(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangxin, Deng Wei, He Yan, Ramsis Salama. 2006. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, Northeast China[J]. *Advances in Water Science*, 17(1): 20–28(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lijuan, Jiang Lanqi, Zhang Xuezheng. 2017. Reconstruction of cropland spatial patterns and its spatiotemporal changes over the 20th century on the Songnen Plain, Northeast China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 27(10): 1209–1226.
- Zhang Zhenquan. 1982. Evaluation of groundwater resources in Xiliaohe Plain[J]. *Journal of China Hydrology*, (s1): 79–87(in Chinese with English abstract).
- Zhou Hao, Wang Dianwu, Sun Caizhi, Tian Wenying, Yang Peiqi, Teng Fanquan. 2011. Numeric simulation research on the recovery of groundwater funnel in core region of Shenyang City[J]. *Hydrology*, 31(5): 47–51(in Chinese with English abstract).
- Zuo Rui, Gu Peng, Teng Yanguo, Wang Qiang, Wang Jinsheng, Wang Bin. 2015. Spatial distribution and genesis of the high-fluorine groundwater in the lower Liaohe River Plain[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 42(3): 135–141(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 卞玉梅, 辰辰, 张静, 郭佳. 2019. 下辽河平原区地下水超采程度计算与评价[J]. *城市地质*, 14(3): 64–73.
- 陈飞, 徐翔宇, 羊艳, 丁跃元, 郦建强, 李原园. 2020. 中国地下水资源演变趋势及影响因素分析[J]. *水科学进展*, 31(6): 811–819.
- 陈浩, 李正国, 唐鹏钦, 胡亚南, 谭杰扬, 刘珍环, 游良志, 杨鹏. 2016. 气候变化背景下东北水稻的时空分布特征[J]. *应用生态学报*, 27(8): 2571–2579.
- 陈军, 周丽, 于孟文. 2008. 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*, 35(3): 123–125.
- 陈梦熊, 马凤山. 2002. 中国地下水资源与环境[M]. 北京: 地震出版社.
- 丁元芳, 李月宁, 吴昊晨, 付兴龙. 2020. 西辽河流域地下水开发利用及问题成因分析[J]. *东北水利水电*, 38(5): 32–34, 39.
- 方洪宾, 赵福岳, 姜琦刚. 2009. 松辽平原第四纪地质环境与黑土退化[M]. 北京: 地质出版社.
- 方敏. 2019. 三江平原松花江—挠力河流域浅层地下水“三氮”污染形成过程研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 方燕娜, 林学钰, 廖资生. 2005. 吉林中部平原区地下水动态变化特征和地下水超采状况的判定[J]. *水文*, 25(5): 19–22, 54.

- 付玉娟, 张玉清, 何俊仕, 张朝龙. 2016. 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, 47(3): 327-333.
- 郭涛, 陈海洋, 滕彦国, 李娇, 陈瑞晖. 2017. 东北典型农产区流域地下水水质评价与污染源识别[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 53(3): 316-322.
- 胡魁. 1999. 中国地下水资源保护与合理开发对策[J]. 中国地质, 36(1): 23-26.
- 焦雯雯. 2020. 东北地区重要湿地动态变化遥感监测[D]. 哈尔滨师范大学.
- 贾思达. 2019. 三江平原松花江一挠力河流域地下水与地表水转化关系研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 李成振, 孙万光. 2017. 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, 28(1): 56-61, 68.
- 李景春, 贾伟光, 金洪涛. 2005. 东北经济区地下水系统退化的环境效应[J]. 地质与资源, 14(4): 272-273, 278.
- 刘畅, 潘俊, 李洋, 孟思翹. 2011. 下辽河平原南部明化镇组咸水体赋存条件及分布特征[J]. 地下水, 33(3): 11-12, 76.
- 刘国栋, 张立, 杨泽, 戴慧敏, 赵传冬. 2021. 嫩江流域水体及悬浮物重金属元素分布特征及环境指示意义[J]. 地质与资源, 30(1): 53-61.
- 刘琼, 李瑞敏, 王轶, 高萌萌, 李小磊, 孙超. 2020. 区域地下水资源承载能力评价理论与方法研究[J]. 水文地质工程地质, 47(6): 173-183.
- 李伟丽, 张伟东, 王璐. 2016. 基于生态需水约束下辽河平原水稻布局调整[J]. 中国农业资源与区划, 37(2): 161-167.
- 卢洪健, 莫兴国, 孟德娟, 刘苏峡. 2015. 气候变化背景下东北地区气象干旱的时空演变特征[J]. 地理科学, 35(8): 1051-1059.
- 马驰. 2017. 东北地区湿地遥感监测与景观分析[J]. 水生态学杂志, 38(2): 10-16.
- 齐学斌, 黄仲冬, 乔冬梅, 张现超, 李平, Mathias N. Andersen. 2015. 灌区水资源合理配置研究进展[J]. 水科学进展, 26(2): 287-295.
- 邱磊, 孙龙, 于钊, 吴昊晨, 鲁程鹏. 2019. 松辽平原浅层地下水降落漏斗演变及控制因素分析[J]. 人民珠江, 40(8): 19-24.
- 孙才志, 刘玉兰, 杨俊. 2007. 下辽河平原地下水生态水位与可持续发展调控研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(2): 249-254.
- 谭永忠, 何巨, 岳文泽, 张亮, 王庆日. 2017. 全国第二次土地调查前后中国耕地面积变化的空间格局[J]. 自然资源学报, 32(2): 186-197.
- 卫文, 陈宗宇. 2017. 应用环境同位素识别松嫩平原西南部地下水的补给来源[J]. 干旱区资源与环境, 31(1): 173-177.
- 温传磊, 董维红, 崔庚, 刘洋, 苏小四. 2017. 应用解析法确定傍河水源地地下水开采方案[J]. 水文地质工程地质, 44(3): 19-26.
- 吴爱民, 荆继红, 宋博. 2016. 略论中国水安全问题与地下水的保障作用[J]. 地质学报, 90(10): 2939-2947.
- 杨春霞, 郑华, 欧阳志云. 2020. 三江平原土地利用变化、效应与驱动力[J]. 环境保护科学, 46(5): 99-104.
- 杨恒山, 刘江, 梁怀宇. 2009. 西辽河平原气候及水资源变化特征[J]. 应用生态学报, 20(1): 84-90.
- 于丽丽, 唐世南, 丁元芳, 陈飞, 羊艳, 丁跃元, 何君. 2019. 东北地区地下水超采情况及对策建议[J]. 水利规划与设计, 186(4): 37-40.
- 翟金良, 何岩, 邓伟. 2003. 东北地区城市水资源环境问题及其对策[J]. 城市环境与城市生态, 16(3): 8-10.
- 赵彦明, 石刚, 张倩. 2020. 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, 209(1): 36-37.
- 章光新, 邓伟, 何岩, Ramsis Salama. 2006. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, (1): 20-28.
- 张振权. 1982. 西辽河平原地下水资源评价[J]. 水文, (s1): 79-87.
- 周浩, 王殿武, 孙才志, 田文英, 杨培奇, 滕凡全. 2011. 沈阳中心城区水源地漏斗恢复调蓄模拟研究[J]. 水文, 31(5): 47-51.
- 左锐, 谷鹏, 滕彦国, 王强, 王金生, 王宾. 2015. 下辽河平原高氟地下水空间分布及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 42(3): 135-141.