

洮儿河流域地表水与地下水多目标联合调控

王明君¹, 彭 勇^{1,2}, 徐 博¹, 李 昱^{1,2}, 张 弛¹

(1. 大连理工大学建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学宁波研究院, 浙江 宁波 315000)

摘要:为恢复洮儿河下游地下水位和河道径流,设计了 4 种水资源管理调控措施:调整水库泄流过程、调整地表-地下水供水比例、实施引水补给地下水工程、优化灌溉制度,利用 SWAT-MODFLOW 模型模拟单一措施及不同措施组合方案下的流域水资源状况,分析了地下水位恢复程度、生态流量满意度、农业供水保证率对调控措施的响应特征,探索适合洮儿河流域的地表水与地下水联合调控方案。结果表明:单一措施侧重于提升某一指标,难以兼顾其他两项指标;不同措施组合方案能够在保障河道生态流量和农业供水不受影响的基础上,有效减少丰水期的径流损失,进而促进地下水水位的恢复;1969—2016 年历史情景模拟中,相比流域当前的管理方案,不同措施组合方案实现了超采区多年平均地下水位抬升 0.82 m,流域出口生态流量满意度提升 4.5%,同时农业供水保证率保持在 97.7% 以上。

关键词:联合调控;水资源管理;地下水位;生态流量满意度;农业供水保证率;洮儿河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0186-12

Multi-objective joint operation of surface water and groundwater in the Tao'er River Basin//WANG Mingjun¹, PENG Yong^{1,2}, XU Bo¹, LI Yu^{1,2}, ZHANG Chi¹(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. NingBo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315000, China)

Abstract: To restore groundwater levels and streamflow in the lower reach of the Tao'er River Basin, four water resources management measures were designed, including adjusting the reservoir discharge process, adjusting the surface-groundwater water supply ratio, implementing water diversion projects for groundwater recharge, and optimizing irrigation scheduling. The SWAT-MODFLOW model was used to simulate the water resources status of the watershed under single measures and different combinations of measures, analyze the response characteristics of groundwater level recovery degree, ecological flow satisfaction, and agricultural water supply guarantee rate to operation measures, and explore a suitable joint operation scheme for surface water and groundwater in the Tao'er River Basin. The results indicate that a single measure generally focuses on improving one indicator and is difficult to balance the other two. Different combinations of measures can effectively reduce runoff losses during the flood season while ensuring the ecological flow of rivers and agricultural water supply are not affected, thereby promoting the restoration of groundwater levels. In the historical scenario simulation from 1969 to 2016, compared with the current management plan of the basin, different combinations of measures achieved a 0.82 m increase in the average groundwater level of the overexploited area over the years, a 4.5% increase in ecological flow satisfaction at the outlet of the basin, and maintained an agricultural water supply guarantee rate of over 97.7%.

Key words: joint operation; water resources management; groundwater level; ecological flow satisfaction; agricultural water supply guarantee rate; the Tao'er River Basin

在干旱半干旱地区,地表水资源相对匮乏,地下水往往成为主要的水源。过度开采地下水容易引发地下水位下降,进而导致地下水资源枯竭^[1]、河道断流^[2]、植被退化^[3]等一系列生态环境问题。有研究表明,全球范围内地下水资源枯竭量从 1960 年的 1 260 亿 m³ 增加到 2000 年的 2 830 亿 m³^[4],约 60%

的河流都出现过断流现象^[2]。20 世纪 90 年代以来,我国的一些干旱、半干旱流域也普遍呈现出不同程度的地下水位下降和河道断流现象。例如,西辽河流域平原区地下水位平均下降了 2 m,局部地区下降超过 5 m^[5];洮儿河下游的地下水位下降了 2~4 m,枯水期河道断流现象频发^[6]。这些问题不仅威

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202803);国家自然科学基金项目(52309008)
作者简介:王明君(1993—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:1751595274@qq.com
通信作者:彭勇(1979—),男,教授,博士,主要从事水资源系统分析研究。E-mail:pengyong@dlut.edu.cn

胁生态系统的稳定,还对人类社会的可持续发展构成了严峻挑战^[7-8]。从水量平衡的角度来看,干旱半干旱地区水资源总量有限,在满足生活、生产、生态用水的前提下,需要避免无效的蒸发或径流损失^[9]。这就需要对地表水与地下水进行联合调控,以合理地分配供水任务^[10-11]。相比单独管理地表水或地下水资源,地表水与地下水联合调控为流域水资源管理提供了灵活的调配策略,能够使得供水系统获取更多可利用的水资源,不仅有助于缓解流域面临的水资源短缺问题,还能够有效恢复地下水位,保障河道生态流量^[12-13]。

从 20 世纪 50 年代开始,国内外学者逐步开展了地表水与地下水联合调控的相关实践与研究,美国、俄罗斯和日本等国家先后建立了地下水库实现水资源时空的调配^[14],例如,美国南部佛罗里达州等地区在丰水期将地表水注入地下水库,在枯水期进行供水^[15]。我国华北地区也开展了大规模人工回灌工程,进行地表水与地下水联合调控的探索实践^[16]。最初调控目标主要聚焦于满足用水户需水与水量均衡分配等单一目标,应用的模型方法主要有线性规划、动态规划、非线性规划等^[17-18]。随着水利基础设施的建设,河库水网之间的联系日益紧密,水资源配置涉及范围更广、调控空间更大、调度目标更多。系统分析理论^[19-20]以及地表水与地下水耦合模拟与调配模型^[21-22]开始被应用于地表水与地下水联合调控领域;调控目标从满足用水户需水的单目标向水资源、经济、农业、生态等多目标转变^[23-25]。例如,Aliyaria 等^[26]基于 SWAT-MODFLOW 耦合模型,研究了半干旱地区农业活动密集型流域中农业灌溉与城市供水水源分配问题;Sun 等^[9]通过建立流域尺度综合生态水文模型 HEIFLOW,对中国黑河流域地表水与地下水进行耦合模拟和联合调控,系统分析了流域内水资源-农业-生态关系;杨明智等^[27]基于 WEAP 构建了叶尔羌河流域水资源配置模型,以社会、经济、生态环境的协调发展为目标,确定了叶尔羌流域的最优发展方案。然而,先前的研究多聚焦于改变水库调度方式^[28]、调整地表水和地下水灌溉比例^[9]、利用洪水资源补给地下水^[29]等单一调控措施。在农业-生态用水矛盾严重的流域,单一水资源管理措施往往难以达到预期的综合调控效果,无法实现水资源、农业、生态目标的综合提升。因此,在充分考虑经济、社会与生态等多重因素的基础上,实施多种调控措施的有机结合,成为实现水资源高效联合利用、恢复地下水位、改善区域生态环境并保障粮食安全的重要途径^[30-32]。

本文以洮儿河流域为研究区,开展地表水与地

下水多目标联合调控的研究。农业作为洮儿河流域内最大的用水户,其持续增长的用水需求挤占了其他用水户的供水量,而流域内干旱的气候条件使得可开发利用的水资源有限,造成地下水位持续下降和河道长期断流,进而加剧了地下水资源保护、生态流量维护与农业供水之间的紧张竞争态势。针对洮儿河流域的特点,设计了一系列调控措施,包括调整察尔森水库的泄流策略、调整地表水与地下水供水比例、实施引水补给地下水工程以及优化灌溉制度等,旨在平衡地下水保护、生态流量保障与农业供水 3 大目标之间的用水冲突。通过广泛的情景模拟与分析,确定适合洮儿河流域的地表水与地下水联合调控方案,以期为类似的干旱半干旱流域的水资源综合管理提供决策支持和科学依据。

1 研究区概况

洮儿河是松辽流域嫩江下游右侧支流,流经内蒙古自治区兴安盟和吉林省白城市,于月亮泡汇入嫩江,地处 45. 08°N~47. 17°N、119. 80°E~124. 03°E 之间,全长 563 km,流域面积 3. 2 万 km²(图 1)。洮儿河流域处于半干旱地区,多年平均降水量为 430. 5 mm,仅为全国平均降水量的 67%。流域多年平均水资源总量为 32. 63 亿 m³,其中地表水资源量为 21. 50 亿 m³,地下水资源量为 11. 13 亿 m³。目前,洮儿河流域内年均用水量为 19. 05 亿 m³,其中地下水占 66%。流域内水资源总量开发利用程度为 53%,其中地表水开发利用程度为 30%,地下水开发利用程度为 98%。总体来看,流域内地下水开发利用程度较高,导致在灌区附近形成了一个浅碟形的地下水降落漏斗;同时,由于河流与地下水脱节,河道渗漏严重,下游河道频繁出现断流现象,2001—2016 年断流频率高达 72%,断流最长持续时间长达 54 月,严重影响了河滨生态环境健康发展。

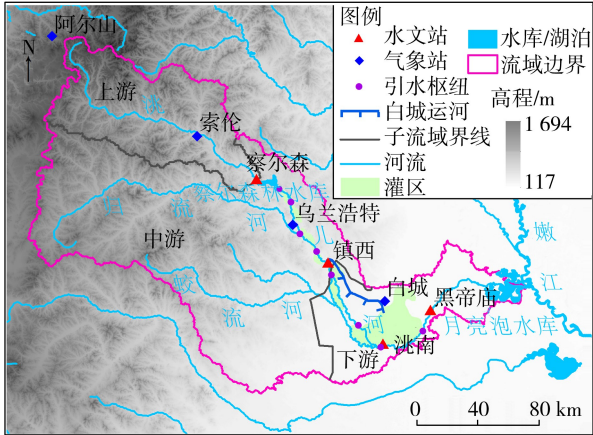


图 1 洮儿河流域概况

Fig. 1 Overview of the Tao'er River Basin

洮儿河流域内地下水供水工程(机电井)现有规模以上约4万眼,规模以下32万眼。流域内现有8处中型引水枢纽,用于从河道引水进行灌溉。察尔森水库是洮儿河干流上唯一的大型控制性水利工程,控制流域面积7780 km²,多年平均入库径流量7.63 亿 m³,水库总库容12.53 亿 m³,兴利库容10.33 亿 m³。察尔森水库的调度能够改变下游河道径流的年内分布,可在一定程度上满足下游灌区用水需求。此外,流域内曾设计用于引水的白城运河,由于严重渗漏,导致引水效益低下,现已转为地下水补给的重要工程措施。若在水量充沛的时段,合理地运用白城运河将地表水回补至含水层,可有效地恢复下游灌区附近的地下水位。

2 研究方法

本文根据洮儿河流域的特点,设计了4类地表水-地下水调控措施:调整水库泄流方式(A)、改变地表水-地下水灌溉比例(B)、人工引水补给地下水(C)、优化灌溉制度(D)。在此基础上,对这些措施进行组合,共构建了128个流域调控方案。通过对比不同调控方案下流域内的地下水位变化趋势、流域出口生态流量指标以及农业供水保证率,系统地评估各方案的调控效果。其中,方案A0B0C0D0为流域管理者当前所采用的调控方案,被用作对比分析的基准。为准确捕捉不同方案下的地表水、地下水资源动态特征,本研究利用SWAT-MODFLOW耦合模型,以1969—2016年的历史气象序列数据作为气象输入,在每一种调控方案下进行地表水与地下水耦合模拟。

2.1 地表水与地下水联合调控方案设计

2.1.1 调整水库泄流方式

察尔森水库供水主要用于水库以下灌区的农业灌溉、兴安盟和白城市部分工业和生态用水。水库当前的调度方式是标准调度策略,其调度目标是缺水量最小,按照“有水就供”的原则,以最大供水能力满足上述用水户当前的用水需求。该调度方式未充分考虑水库下游至镇西站的区间径流和河道渗漏的影响。在汛期,水库下游区域地表产流汇入河道后,并未优先利用河道水量满足供水需求,而是水库在未蓄满的情况下进行泄流供水,导致多余的水量可能会流出流域外,造成径流浪费。此外,镇西水文站为洮儿河干流上内蒙古自治区和吉林省的区省界断面,是洮儿河生态流量保障的主要控制断面。然而,管理部门在设置镇西站生态流量时,并未考虑下游河道渗漏的影响。即使镇西站达到断面生态流量目标,由于下游河道渗漏严重,枯水季节河道径流几

乎全部渗漏补给地下水,极易造成河道断流。镇西站径流量作为下游河道径流的主要来源,是控制下游是否发生断流的关键因素,以往的研究已经计算了确保下游河道(黑帝庙站)不断流的镇西站生态流量阈值,见表1^[6]。基于以上分析,设置了4个不同水库泄流方式调整措施(表2):A0表示仅考虑水库以下农业、工业、生态等供水任务;A1表示在A0的基础上,考虑水库至镇西站的区间径流和河道渗漏;A2表示在A1的基础上,考虑管理部门设置的镇西站生态流量;A3表示在A2的基础上,考虑确保下游河道不断流的镇西站流量阈值。

表1 镇西站生态流量阈值

Table 1 Ecological flow threshold of Zhenxi Station		
月份	管理部门设置的生态流量/(m ³ /s)	确保下游河道不断流的生态流量阈值/(m ³ /s)
1	2.53	19.10
2	2.53	17.60
3	2.53	12.60
4	5.00	13.70
5	5.00	30.20
6	7.50	26.30
7	7.50	21.10
8	7.50	8.70
9	7.50	11.30
10	5.00	16.90
11	5.00	12.90
12	2.53	15.00

表2 水库泄流方式调整措施

Table 2 Measures of reservoir discharge adjustment				
月份	水库月均泄流量/万 m ³			
	A0	A1	A2	A3
1	865	984	1196	2970
2	509	632	961	2349
3	358	557	975	1861
4	1412	1680	2316	2592
5	12837	13061	11635	10481
6	10355	10093	9393	8991
7	12312	11311	11589	10684
8	11662	11362	11311	9972
9	5979	6162	6792	5599
10	3884	4083	4163	4911
11	2615	2778	2994	3497
12	1380	1538	1582	2787

2.1.2 改变地下水灌溉比例

目前,洮儿河流域农业需水量为15.42 亿 m³,地下水的灌溉比例为67%,其中兴安盟农业需水量为6.17 亿 m³,地下水的灌溉比例为42%,白城市农业需水量为9.25 亿 m³,地下水的灌溉比例为84%。由于白城市地下水灌溉比例较高,改变地下水灌溉比例的措施只涉及白城市,共设置了4个不同灌溉水源比例(表3)。

表3 白城市灌溉水源比例

Table 3 Ratio irrigation water in Baicheng City		
措施编号	灌溉水源比例/%	
	地下水	地表水
B0	84	16
B1	90	10
B2	80	20
B3	70	30

2.1.3 人工引水补给地下水措施

人工引水补给地下水是地下水位抬升最直接有效的措施之一,洮儿河下游有多种方式进行人工补给,例如白城运河、渗水坑等。白城运河工程原设计为引水供水,由于该运河河床下的砂砾卵石层渗漏严重,引水的经济效益不佳。虽然白城运河供水效益不足,却是一个人工补给地下水的有效途径。渠道建设初期引水表明,每天渗漏量可达100万m³[33]。为提高补给效率,在白城运河两岸沿运河方向每隔10km左右设置一个渗水坑,渗水坑距离运河2~3km,共计10个渗水坑(图2)。从白城运河引水至渗水坑,进而补给地下水,每个渗水坑面积1万m²,该区域渗水坑的补给模数为0.5m/d[33],一个渗水坑的渗漏量为5000m³/d。由此可知,利用运河和渗水坑可实现每月引水补给量的上限为3015万m³。然而,在引水过程中,运河及渗水坑底部会沉积细颗粒物质,降低其渗透性,从而影响补给效率[34]。此外,水流在渗漏过程中会湿润包气带,并伴随着蒸发损失[35],并非所有水流都能有效渗漏补给地下水。因此,模型中每月人工引水补给地下水量设置为2500万m³。

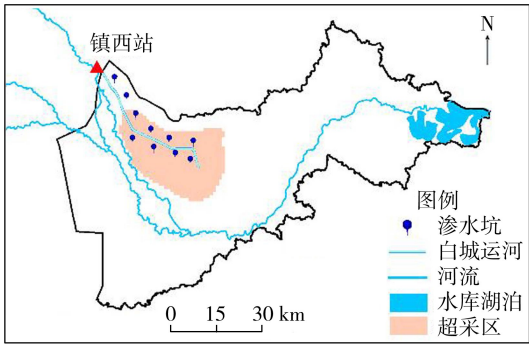


图2 白城运河及渗水坑位置

Fig. 2 Locations of Baicheng Canal and soakaway pits

白城运河起于镇西水文站附近,为保障镇西站及下游河道生态流量,需要设置引水阈值。当镇西站达到某一流速时,才会进行人工引水补给地下水,否则无法保障下游的农业供水和生态流量。基于此,设置了4种人工引水补给地下水的镇西站流量阈值(表4)。

表4 人工引水补给地下水的镇西站径流量阈值

Table 4 Streamflow threshold of Zhenxi Station for groundwater recharge by artificial diversion		
措施编号	河道径流量/(亿m ³ /月)	人工引水补给地下水量/(万m ³ /月)
C0		0
C1	>0.5	2500
C2	>1.0	2500
C3	>1.5	2500

2.1.4 优化灌溉制度

目前,洮儿河流域内水稻的灌溉制度如表5所示。水稻的整个生育期为124d,总灌溉水量为612mm。Zhai等[36]依据水稻各生育期的需水量及耗水量,通过AquaCrop作物生长模型,建立不同降水典型年下灌溉制度优化模型,分析了不同灌溉制度情景下枯水年、平水年及丰水年水稻各生育期内灌溉水量、灌溉次数及灌水时间对水稻产量的影响,并对水田灌溉制度进行优化,最终得出了3种水文典型年下水稻的灌溉水量,即枯水年为600mm,平水年为500mm,丰水年为430mm。由此可见,流域内目前的灌溉制度容易造成过度灌溉,增加田间蒸发量,引发水资源浪费。基于此,设置了2个灌溉制度措施:①延续目前的灌溉制度(措施D0);②采用优化后的灌溉制度(措施D1),优化后的灌溉制度只改变了总灌溉水量,灌溉过程并没有变化。

表5 研究区内水稻的灌溉制度

Table 5 Irrigation schedule of paddy in study area			
水稻生育期	起止日期	时间/d	灌溉量/(mm/d)
泡田期	05-20—05-28	9	6.46
插秧	05-29—06-03	6	1.66
返青	06-04—06-10	7	6.66
分蘖	06-11—07-12	32	3.94
拔节孕穗	07-13—08-08	27	6.49
抽穗开花	08-09—08-17	9	7.04
乳熟	08-18—09-04	18	4.30
黄熟	09-05—09-20	16	3.46
全生育期	05-20—09-20	124	

2.2 地表水-地下水联合调控目标

洮儿河流域面临地下水位持续下降和流域出口频繁断流的严峻挑战,如何在保障农业供水和河道生态流量的基础上,恢复地下水位,是洮儿河流域水资源管理中亟须解决的问题。因此,本文结合洮儿河流域的实际情况,构建了地下水指标、生态流量指标与农业指标,将改善上述3类指标作为地表水与地下水联合调控的目标。

2.2.1 地下水指标

本文将洮儿河流域下游超采区(图2)的地下水位恢复程度作为地下水指标。需要说明的是,洮儿河流域地下水超采较为严重的区域为下游灌区附

近,因此地下水指标计算仅针对该区域的 667 个网格进行分析,计算公式为

$$\Delta H_{j,k} = H_{j,k} - H_{0,k} \quad (1)$$

其中

$$H_{j,k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{i,k}$$

式中: $\Delta H_{j,k}$ 为调控方案 j 相对于现状方案 A0B0C0D0 网格 k 地下水位的变化, m; $H_{j,k}$ 为调控方案 j 下网格 k 地下水位多年平均值, m; $H_{0,k}$ 为现状方案下网格 k 地下水位的多年平均值, m; N 为总模拟时段, 本文以月尺度进行计算, 模拟期为 1969—2016 年, 因此 $N=576$; $H_{i,k}$ 为时段 i 网格 k 地下水位的多年平均值, m。

2.2.2 生态流量指标

由于气候变化和人类活动的耦合影响, 洮儿河已成为季节性河流, 下游经常发生断流。因此, 本研究将洮儿河流域出口生态流量满意度作为生态流量指标, 计算公式为

$$S_{EF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \times 100\% \quad (2)$$

其中

$$S_i = \begin{cases} 0 & R_{out} < R_0 \\ 1 & R_{out} \geq R_0 \end{cases}$$

式中: S_{EF} 为生态流量满意度, %; S_i 为流域出口径流量状态; R_{out} 为流域出口流量, m^3/s ; R_0 为流域出口生态流量, m^3/s 。

本文采用 Texas 法^[37] 计算流域出口河道生态流量, 该方法考虑了河流季节变化因素、不同的生物特性和区域水文特征条件下的月需水量, 将特定保证率下月流量的特定百分比流量作为生态流量。本文特定保证率取 50%^[38], 特定百分比取 20%^[39], 将全年划分为枯水期(12 月至次年 3 月)、平水期(4—5 月、10—11 月)和丰水期(6—9 月)来计算, 得出洮儿河流域出口河道生态流量, 枯水期为 $1.13 m^3/s$, 平水期为 $6.19 m^3/s$, 丰水期为 $10.39 m^3/s$ 。

2.2.3 农业指标

由于洮儿河流域为我国东北地区重要的商品粮生产基地之一, 本文将农业供水保证率作为农业指标, 计算公式为

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{W_{i,S}}{W_{i,D}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P 为农业供水保证率, %; $W_{i,S}$ 为时段 i 的农业供水量, 万 m^3 ; $W_{i,D}$ 为时段 i 的农业需水量, 万 m^3 。

2.3 SWAT-MODFLOW 耦合模型

本文采用 SWAT-MODFLOW 耦合模型对洮儿河流域水文循环和取用水过程进行模拟, 主要有以下两个原因: ①本文中 SWAT 模型的模拟区域为洮儿河流域, 而 MODFLOW 模型聚焦于洮儿河下游,

SWAT-MODFLOW 耦合模型适用于地表水和地下水模拟区域不重合的研究^[40]; ②洮儿河下游经常出现河道断流现象, SWAT-MODFLOW 模型在低流量和河道断流的模拟方面具有显著优势^[41]。

SWAT 模型通过 DEM、土地利用类型、土壤类型等数据将模拟区域划分为 14 个子流域(图 3), 2003 个水文响应单元(hydrologic response unit, HRU)。其中, 土地利用类型按照 SWAT 模型对土地利用类型的划分标准进行重分类, 得到水田、旱田、林地、草地、湿地、水域、城镇用地、农村用地、建设用地和未利用土地 10 种土地利用类型; 通过 SPAW 软件计算获得不同土壤类型的各个参数(土壤湿密度、土壤层有效持水量、饱和导水率等), 然后利用 ArcGIS 对土壤类型进行重分类, 共将土壤分为 26 个类型。SWAT 模型由阿尔山、索伦、乌兰浩特和白城 4 个气象站(图 1)的日尺度气象数据进行驱动, 包括降水、最高温度和最低温度、风速和太阳辐射; 采用察尔森、镇西、洮南、黑帝庙 4 个水文站(图 1)的河道径流进行校准。SWAT 模型的模拟期为 1990—2016 年, 预热期为 1990—1992 年, 验证期为 1993—2004 年, 率定期为 2005—2016 年。

MODFLOW 模型模拟的目标含水层为第四系孔隙潜水含水层, 将其概化为一层不等厚、各向均质二维非稳定流含水层。在河谷地区, 该含水层岩性为全新统冲积的卵砾石和砂砾石; 在扇形地区, 岩性主要为冲洪积砾卵石和中粗砂; 在洮南以东的低平原区, 岩性主要为冲积湖积的粉细砂及细砂^[42]。模拟区域外部边界均可概化为流量边界, 其中模拟区域西部和北部扇形地区边缘与地下水等水位线垂直的地方概化为零流量边界, 即隔水边界(图 4); 洮儿河、蛟流河与潜水含水层存在密切的水力联系, 将其概化为河流边界; 垂向上, 上部边界为潜水含水层自由水面, 与外界进行水量交换, 下部边界为隔水层顶板, 将其视为隔水边界。

地下水模拟的参数包括渗透系数、给水度、降水入渗系数、河床渗透系数、蒸发系数、灌溉回渗系数等。本文采用 SWAT 模型模拟的降水入渗补给量、河道渗漏量和潜水蒸发量结果输入到 MODFLOW 模型中参与地下水流的模拟, 灌溉回渗系数参考《吉林省西部半干旱地区水资源综合评价及合理开发利用研究报告》。因此, 只对渗透系数和给水度进行参数分区和校准。结合已有研究成果^[33,42] 和水文地质条件, 将模拟区划分为 6 个参数分区(图 4)。

在处理 MODFLOW 模型中的地下水开采数据时, 由于只收集到了模拟区内各市县的农业灌溉、城

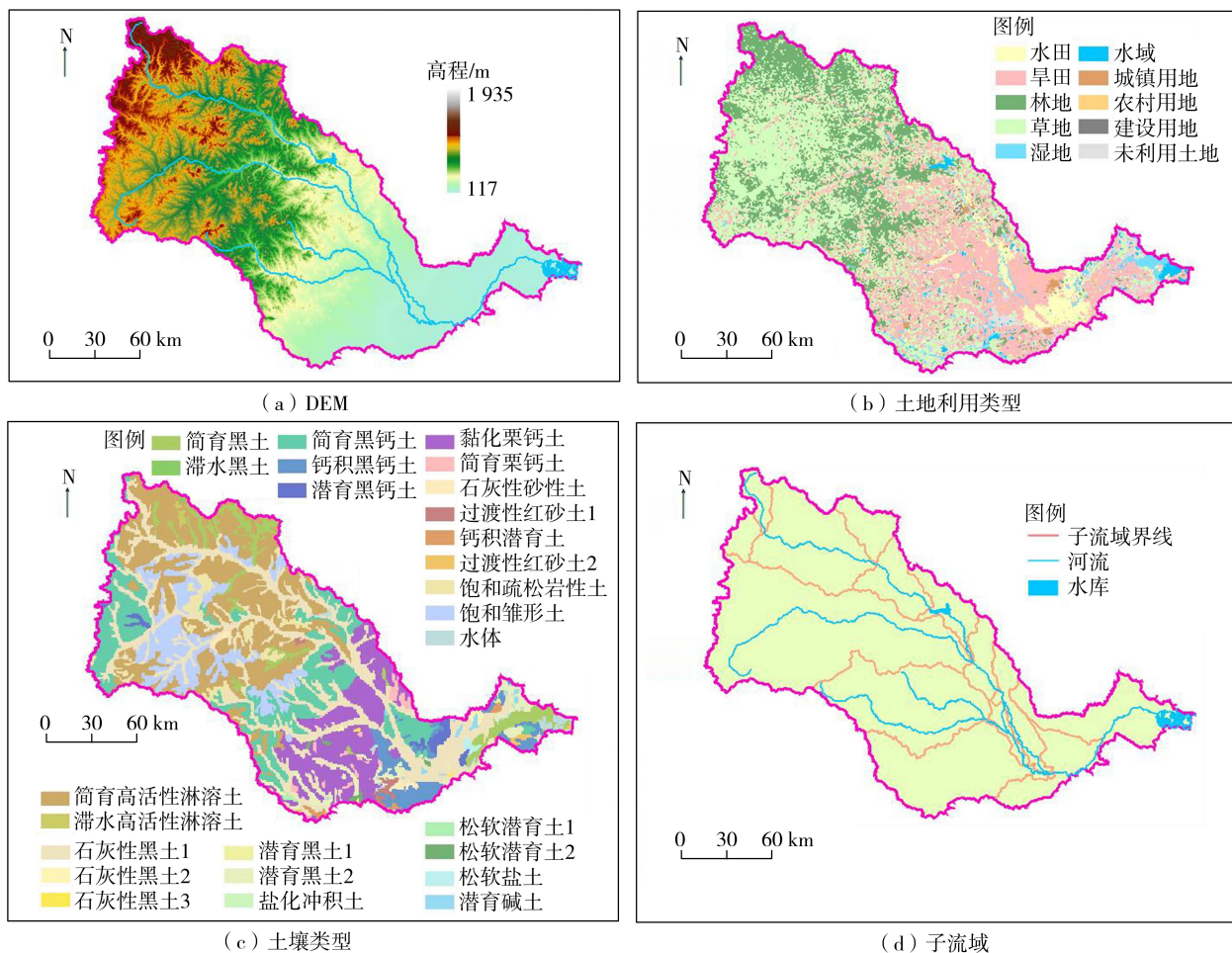


图 3 洮儿河流域 DEM、土地利用类型、土壤类型和子流域的划分
Fig. 3 DEM, land-use types, soil types, and sub-basin division of the Tao'er River Basin

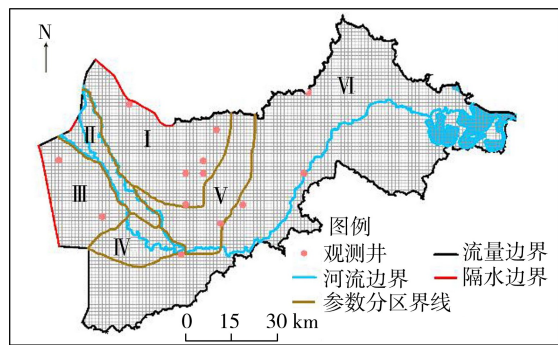


图 4 MODFLOW 模型边界条件设置、参数分区及网格剖分
Fig. 4 Boundary conditions, hydrogeological parameters partitions, and discretization of MODFLOW model

镇生活和工业的年地下水开采量,数据精度不能满足地下水模型的模拟,需要对地下水年开采量进行时间和空间降尺度处理。首先,将农业灌溉、城镇生活和工业的地下水开采量分别除以对应土地利用类型的面积,得到单位面积上的地下水年开采量;然后,根据《吉林省西部半干旱地区水资源综合评价及合理开发利用研究报告》中水田的灌溉制度,将年度灌溉开采量分配到灌溉周期内的每一天;最后,由于城镇生活和工业用水量在年内分布波动较小,

每天用水量较为稳定,因此,将城镇生活和工业地下水供水量均匀分布在年内每一天。

MODFLOW 模型采用 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的网格对模拟区域进行剖分,共剖分为 5 903 个网格;将 2001 年 1 月 1 日地下水等水位线作为模拟的初始水位;采用 13 眼观测井(图 4)的地下水位进行校准;以旬为一个应力期进行模拟,模拟期为 2001—2016 年,率定期为 2001—2008 年,验证期为 2009—2016 年。

SWAT 模型中最小的计算单元为 HRU,HRU 是根据 DEM、土壤类型、土地利用类型等数据划分的,不具备空间属性^[43],而 MODFLOW 模型中最小计算单元是具有空间信息的网格,因此 HRU 无法与 MODFLOW 模型中的网格一一对应,需要进行 HRU 与网格的转换,将 HRU 的计算结果映射到相应的网格上。本文通过 ArcGIS 软件,将 SWAT 模型中的 HRU 转化为 ASCII 文件,以赋予其空间属性,进而建立其与网格之间的对应关系^[44](图 5),并将 SWAT 模型模拟的降水入渗量、河道渗漏量和潜水蒸发量的结果输入地下水模型中参与地下水流的模拟,以此实现 SWAT 与 MODFLOW 模型的耦合。

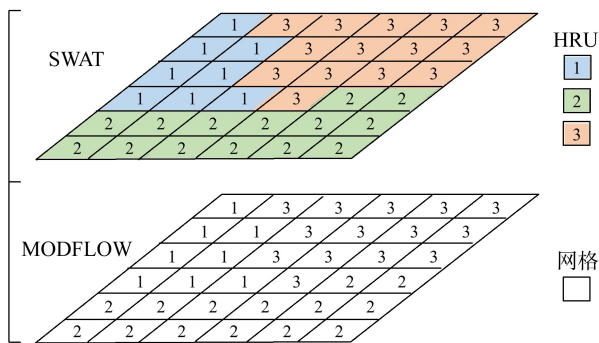


图5 SWAT与MODFLOW模型的耦合

Fig.5 Coupling of SWAT and MODFLOW models

除了采用河道径流和地下水位对 SWAT-MODFLOW 耦合模型进行率定和验证,本文还提取了1990—2016年全球土地蒸发阿姆斯特丹模型中的实际蒸散发数据^[45]对模型进行交叉验证,进一步证明模型的合理性和可靠性。SWAT-MODFLOW 耦合模型构建所采用的数据、模型参数识别结果、率定和验证结果等信息详见文献[6,46]。

在利用校准好的 SWAT-MODFLOW 耦合模型对128个流域调控方案进行模拟时,气象数据时间序列为1969—2016年。在涉及调整察尔森水库泄流方式的方案中,察尔森水库的泄流过程通过 SWAT 模型中的水库模块进行设置;在涉及人工引水补给地下水的方案中,将白城运河和渗水坑概化为注水井,在 MODFLOW 模型中以注水井的形式对地下水进行补给。

3 结果与分析

3.1 单一调控措施结果分析

实施不同的水资源管理措施会对地下水、生态流量和农业指标产生不同程度的影响(图6)。对比察尔森水库多种泄流方式(措施A)下的模拟结果可知,地下水指标变化不大,生态流量指标的变化范围为37.9%~46.9%,农业指标达到了94.4%(图6)。与目前的调度方式相比,本文所提出的察

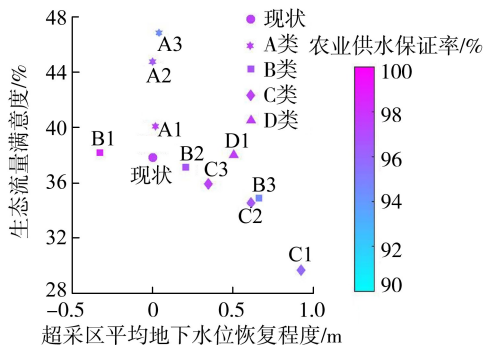


图6 各类水资源管理措施单调控结果

Fig.6 Individual regulation results of various water resources management measures

尔森水库泄流方式的泄流量在年内的分配更均匀,即水库泄流量在农业灌溉期(5—9月)更少,非灌溉期更多(表2)。这意味着将部分农业灌溉水量用于恢复非灌溉期的河道生态流量,在一定程度上会影响农业供水。在察尔森水库调度过程中考虑下游区间径流、河道渗漏以及河道生态流量需求或河道断流的触发条件,使得洮儿河流域出口生态流量满意度提升了2.3%~9.0%;农业供水保证率下降0.1%~3.0%,但仍然达到了94.4%。由此可见,合理地调整察尔森水库的年内泄流过程,能在轻微影响农业供水的基础上,有效恢复和维持下游河道生态流量。

在改变农业灌溉水源比例(措施B)的模拟结果中,地下水指标的变化范围为-0.33~0.66m,生态流量指标的变化范围为34.9%~38.2%,农业指标达到了94.5%(图6)。当白城市地下水灌溉比例从现状的84%增加到90%时(措施B1),流域出口生态流量满意度和农业供水保证率均增加了不到1.0%,而超采区多年平均地下水位下降了0.33m。与此对应的是,当白城市地下水灌溉比例降低14%时(措施B3),超采区多年平均地下水位抬升了0.66m,流域出口生态流量满意度和农业供水保证率均降低了3.0%左右。相比于前两种调整方式,当白城市地下水灌溉比例从现状的84%降到80%时(措施B2),超采区多年平均地下水位抬升了0.20m,但流域出口生态流量满意度和农业供水保证率仅降低了不足1.0%。由此可见,适当降低地下水的灌溉比例,能够在几乎不影响农业供水和河道生态流量的基础上,有效恢复地下水位。

在人工引水补给地下水(措施C)的模拟结果中,地下水指标的变化范围为0.00~0.92m,生态流量指标的变化范围为29.7%~37.9%,农业指标达到了95.9%(图6)。与不引水补给地下水(措施C0)相比,人工引水补给地下水能够提高地下水位,轻微影响农业供水,但会对河道生态流量产生显著的不利影响。镇西站的引水阈值越小,地下水位回升越明显,而生态流量保障状况则越差。例如,当镇西站引水阈值分别为0.5亿m³/月(措施C1)、1.0亿m³/月(措施C2)时,超采区多年平均地下水位回升分别达到了0.92、0.61m,农业供水保证率仅降低了不到2.0%,而流域出口生态流量满意度分别下降了8.2%、3.3%。然而,当镇西站引水阈值为1.5亿m³/月(措施C3)时,超采区多年平均地下水位回升了0.35m,流域出口生态流量满意度仅降低了2.0%,而且农业供水并没有受到影响。由此可见,通过设置镇西站合理的引水阈值,能够实现在对

农业供水和河道生态流量产生较小影响的情况下,有效恢复地下水位。

在优化灌溉制度(措施D)的模拟结果中,通过对枯水年、平水年及丰水年下水田灌溉制度进行优化,使得1969—2016年年均农业需水量减少1.58亿 m^3 ,减少了10%,地下水、生态流量和农业指标均有所改善(图6)。

对于单独改善地下水指标、生态流量指标和农业指标中某一指标而言,不同类型措施的侧重点不同:措施A侧重于改善流域出口生态流量满意度,措施A3对生态流量指标的改善效果最明显;措施B侧重于提升农业供水保证率,措施B1对农业指标的改善效果最明显;措施C侧重于抬升地下水位,措施C1对地下水指标的改善效果最明显。除了措施D,单独实施措施A、B和C均不能同时提升3类指标的表现。

3.2 多种措施组合调控结果分析

在延续目前灌溉制度的64个组合方案中,地下水指标的变化范围为-0.33~1.67 m,生态流量指标的变化范围为28.0%~49.0%,农业指标的变化范围为90.0%~98.4%(图7(a))。对比这些方案与现状方案,着重提升某一指标会对其他指标产生影响。在方案A3B3C1D0中,超采区多年平均地下水位回升最高,达到1.67 m。此方案中地表水供水比例为30%,比现状方案增加了14%,而且引水补给地下水量最大,导致河道径流量减少,流域出口生态流量满意度下降9.0%,农业供水保证率下降7.5%。在方案A3B1C0D0中,流域出口生态流量满意度表现最优,相比于现状提升了11.5%。此方案中地表水供水比例仅为10%,比现状方案减少了6%,导致河道径流量有所增加,但超采区多年平均地下水位下降了0.29 m。同时,该方案中察尔森水库泄流量在年内分配更加均匀,增加了非灌溉期的

河道径流量,减少了灌溉期的河道径流量,这导致农业供水保证率降低。在方案A1B1C0D0中,农业供水保证率最高,可达98.4%。此方案中察尔森水库减少了丰水期的径流损失,这部分水量用于农业灌溉和恢复河道生态流量,使得流域出口生态流量满意度提升了2.6%。此外,该方案中地下水供水比例为90%,比现状方案增加了6%,提高了农业供水的可靠性,但更多的地下水灌溉导致超采区多年平均地下水位下降了0.31 m。

在采用优化灌溉制度的64个组合方案中,地下水指标的变化范围为0.27~1.98 m,生态流量指标的变化范围为28.5%~49.7%,农业指标的变化范围为91.0%~98.4%(图7(b))。相比现状方案,超采区多年平均地下水位在方案A3B3C1D1中恢复程度最高,达到1.98 m;该方案中流域出口生态流量满意度下降7.3%,农业供水保证率下降6.9%。方案A3B1C0D1能够使得流域出口生态流量满意度提升幅度最大,达到11.8%;该方案中超采区多年平均地下水位抬升0.31 m,农业供水保证率下降1.5%。在方案A1B1C0D1中,农业供水保证率最高,可达98.5%;该方案中超采区多年平均地下水位抬升0.29 m,农业供水保证率提升2.6%。由此可见,相比延续目前的灌溉制度,采用优化后的灌溉制度能够使得地下水位恢复程度和生态流量满意度提升幅度更大的同时,其余指标的恶化程度有所减小。

从上述128个方案中筛选出了8个优选方案,筛选原则是地下水指标、生态流量指标和农业指标均优于现状方案(图8和表6)。其中,延续目前灌溉制度的方案组合有2个,采用优化后灌溉制度的方案组合有6个。在不影响其他两个指标的前提下,延续目前的灌溉制度能够使超采区多年平均地下水位最多抬升0.35 m(方案A1B0C3D0),流域出口生态流量满

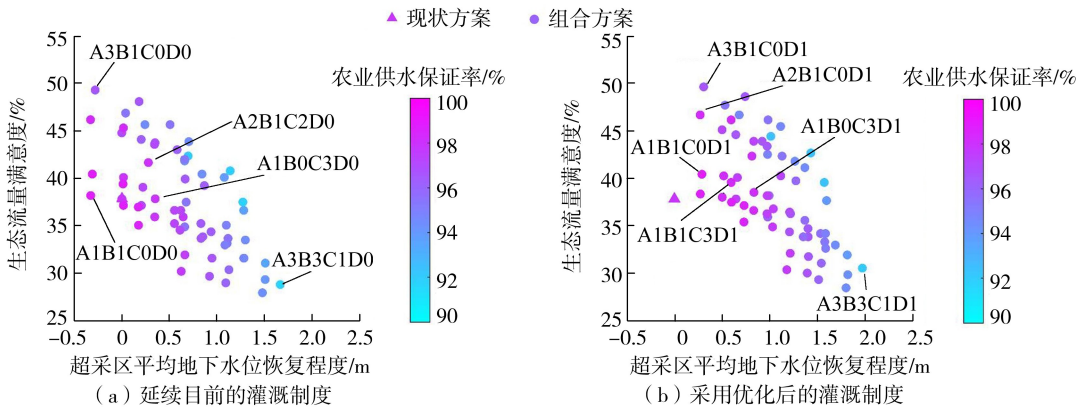


图7 不同水资源管理措施组合的调控结果

Fig. 7 Regulation results of different combinations of water resources management measures

意度最多提升 3.8% (方案 A2B1C2D0), 农业供水保证率最高可达 97.5% (方案 A2B1C2D0); 采用优化后的灌溉制度能够使超采区多年平均地下水位最多抬升 0.84 m (方案 A1B0C3D1), 流域出口生态流量满意度最多提升 8.9% (方案 A2B1C0D1), 农业供水保证率最高可达 98.4% (方案 A1B1C3D1)。在后续分析中, 分别从上述两类灌溉制度下的方案中选择一个对 3 类指标综合提升幅度最大的方案 (方案 A1B0C3D0 和方案 A2B1C2D1), 用于与现状方案进行对比。为方便阐述与阅读, 在接下来的分析中, 方案 A1B0C3D0 记为优选方案 1, 方案 A2B1C2D1 记为优选方案 2。

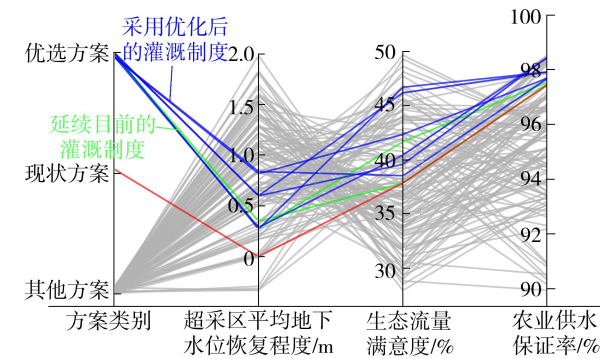


图 8 多种措施组合的调控结果

Fig. 8 Results of various combination measures

表 6 优选方案与现状方案地下水、生态流量和农业指标的对比

Table 6 Comparison of groundwater, ecological flow and agricultural indexes between preferred schemes and current scheme

方案类别	方案编号	超采区多年 平均地下水位 恢复程度/m	流域出口 生态流量满意 度/%	农业供水 保证率/%
现状方案	A0B0C0D0	0.00	37.8	97.4
	A2B1C2D0	0.28	41.7	97.5
	A1B0C3D0	0.35	37.8	97.5
	A1B1C0D1	0.29	40.4	98.4
优选方案	A2B1C0D1	0.27	46.7	97.9
	A2B1C2D1	0.82	42.4	97.7
	A1B0C3D1	0.84	38.5	97.7
	A1B1C3D1	0.60	39.6	98.4
	A2B1C3D1	0.60	46.2	97.9

3.3 优选方案与现状方案对比分析

与现状方案相比, 优选方案 1 通过组合各类措施, 可以适当地提升 3 类指标的表现 (图 9)。具体的改进措施为: 当镇西站的径流量大于 1.50 亿 m³ 时, 从河道引水补给地下水; 察尔森水库调度考虑水库至镇西站的区间径流和河道渗漏, 调整了年内泄流过程。在模拟期内共有 96 月引水进行地下水补给, 年均补给量为 5 000 万 m³, 不仅使得超采区地下水位平均抬升了 0.35 m, 而且在引水补给地下水期

间, 农业供水量并没有受到影响。此外, 通过考虑水库至镇西站的区间径流和河道渗漏, 察尔森水库减少了汛期的泄流量, 增加了非汛期的泄流量 (图 9(d)), 这种调度策略导致流域出口生态流量满意度在汛期降低了 6.3%, 而在非汛期则相应提高了 4.5%, 整体上流域出口生态流量满意度并没有受到影响。相比现状方案, 优选方案 1 通过调整察尔森水库年内泄流过程, 减少了汛期洪水资源的流出, 使得流域出口的年均径流量减少了 0.61 亿 m³, 减少的径流量被有效用于农业灌溉和补给地下水, 不仅保障了农业供水, 同时也有助于抬升地下水位。然而, 这些指标的改进程度比较有限, 这是由于研究区内粗放式灌溉制度存在过度灌溉、灌溉效率低下的问题, 容易造成水资源浪费。

当采用优化后的农业灌溉制度, 优选方案 2 与现状方案相比, 通过组合各类措施, 使得超采区地下水位平均抬升了 0.82 m, 流域出口生态流量满意度提高了 4.5%。这是由于改进了灌溉制度, 模拟期内年均农业需水量减少 1.55 亿 m³, 年均地下水开采量减少了 1.30 亿 m³, 而且流域出口的年均径流量减少了 0.39 亿 m³, 这些水量被有效用于恢复河道生态流量和地下水位。因此, 调整察尔森水库泄流和人工引水补给地下水的措施更加有效。一方面, 在优选方案 2 中, 察尔森水库除了考虑水库至镇西站的区间径流和河道渗漏, 还考虑了镇西站的生态流量需求, 使得察尔森水库进一步减少了汛期的泄流量, 增加了非汛期的泄流量, 进而有效提升了流域出口生态流量满意度; 另一方面, 在优选方案 2 中, 镇西站引水补给地下水的阈值为 1.0 亿 m³, 模拟期间共有 158 月引水进行地下水补给, 年均补给量为 8 229 万 m³, 加之地下水开采量的减少, 使得超采区地下水位平均抬升了 0.82 m。尽管优选方案 2 的农业供水保证率增幅不大, 但在保障农业供水方面, 该优选方案展现了积极的成效, 灌溉期每月的农业缺水量均有所减少, 年均农业缺水量减少了 1 440 万 m³。

值得注意的是, 在汛前的 5 月, 流域出口生态流量满意度和农业供水保证率最低, 这主要是因为此时是流域内最缺水的时期。一方面, 5 月降水量稀少, 河道径流量少, 河道生态流量无法保障; 另一方面, 5 月水田开始泡田, 农业用水需求大增, 这使得农业与生态流量之间的用水竞争关系最为显著。这一现象强调了农业用水管理与生态保护之间的紧密联系, 说明在特定时段内, 优化水资源的配置至关重要。合理的水库管理策略能够在不同季节间灵活调配水资源, 最大限度地满足农业用水需求, 尤其是在

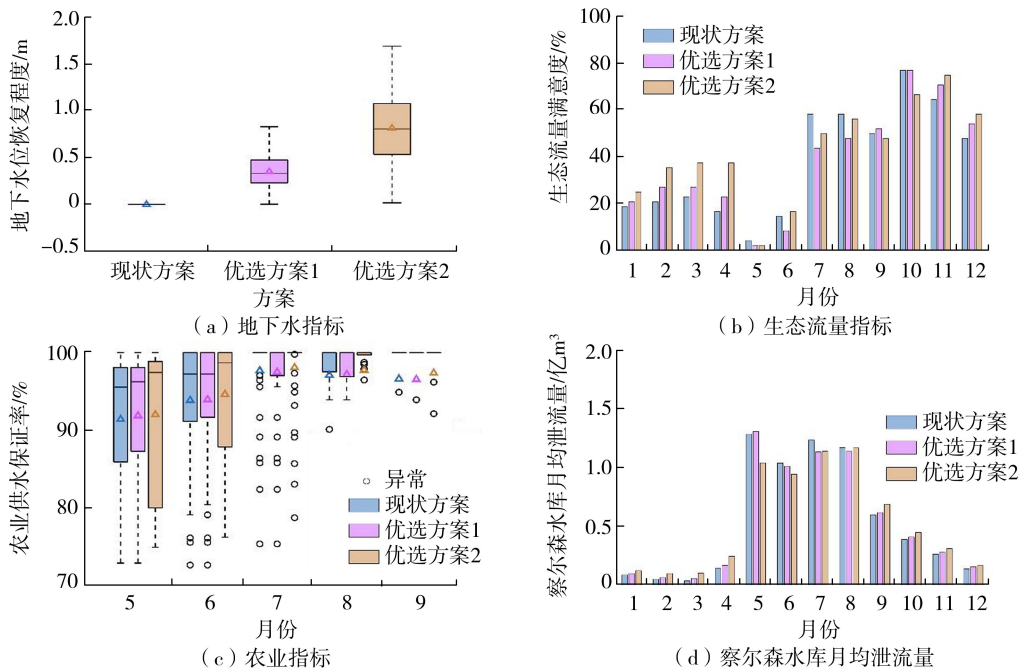


图9 优选方案与现状方案调控结果对比

Fig. 9 Comparisons of regulation results between preferred schemes and current scheme

农业需水高峰期。例如,在优选方案1中,察尔森水库通过增加非灌溉期和5月份的泄流量(图9(d)),不仅成功降低了农业供水破坏深度和总缺水量,而且保障了河道生态流量。

综上所述,察尔森水库的调度和地下水含水层的调蓄能力在洮儿河流域水资源管理中发挥着重要的作用。在未来水资源综合管理中,建议察尔森水库的调度过程考虑水库下游的区间径流、河道渗漏和河道生态流量目标,结合洪水期引水补给地下水等措施,能够有效恢复地下水位、缓解水资源短缺以及保障河道生态流量。此外,灌溉制度的优化是实现水资源精细化管理和高效利用的关键环节。根据水稻生长周期和需水特性,精准调控灌水次数与最佳灌水时间,科学制定灌溉计划,避免盲目灌溉和过量灌溉,在不影响水稻产量的基础上,可以显著减少农业需水量。这种优化策略无需大量增加额外的工程投入,实施成本较低,操作简便,应在流域内逐步推广。

4 结论与展望

4.1 结论

a. 实施不同类型的水资源管理措施会对地下水、生态流量和农业等指标产生不同程度的影响。相比现行的水资源管理措施,通过科学规划察尔森水库年内泄流过程,增加枯水期的泄流量,可有效提高流域出口生态流量满意度;降低地下水灌溉比例以及引水补给地下水,利用洮儿河冲洪积扇含水层储存雨洪资源,能够恢复超采区地下水位和保证枯

水年农业供水。实施上述单一措施能够使洮儿河下游超采区平均地下水位抬升0.20~0.92 m,流域出口生态流量满意度提升2.0%~9.0%,农业供水保证率维持在94.4%以上。然而,由于地下水、生态流量和农业3类指标之间存在用水竞争关系,实施单一水资源管理措施重在提升某一指标的表现,无法兼顾其他两个指标。单独实施节水灌溉制度,能够同时小幅提升3类指标的表现。

b. 通过不同类型水资源管理措施的组合,可实现地下水、生态流量和农业指标的全面提升。相比现行的水资源管理措施,在128个组合方案中,有8个优选方案可对地下水、生态流量、农业3类指标同时提升。这些优选方案通过调整察尔森水库年内泄流过程、利用洪水对地下水进行补给等水资源管理措施,并采用合理的地下水与地表水灌溉比例、优化后的灌溉制度,在维持河道生态流量的基础上,降低了丰水期的径流损失,进而减少了流域出口的径流量,减少的径流量被有效用于补给地下水和农业灌溉,不仅能够有效恢复地下水位,同时也有助于保障农业供水。在1969—2016年历史情景模拟中,相比流域当前的管理方案,不同水资源管理措施的组合(方案A2B1C2D1)可实现超采区多年平均地下水位抬升0.82 m,流域出口生态流量满意度提升4.5%,同时农业供水保证率保持在97.7%以上。

4.2 展望

在洮儿河流域未来水资源综合管理中,察尔森水库的灵活调度和地下水含水层的调蓄能力发挥着

重要的作用,建议在察尔森水库的调度过程中考虑水库下游的区间径流、河道渗漏和河道生态流量目标,以实现河道径流在时间上的精细调控,有效保障农业供水、恢复和维持河道生态流量。通过引水补给地下水,最大化利用洮儿河冲洪积扇区域含水层储存空间蓄存雨洪资源,不仅可以恢复地下水位,缓解地下水资源枯竭,而且能够保障农业用水安全。此外,灌溉制度的优化是实现水资源精细化管理和高效利用的关键环节,科学制定灌溉计划,避免盲目灌溉和过量灌溉,能够进一步提高水资源利用效率。

本文对地表水与地下水联合调控的研究主要集中在模拟层面,而洮儿河流域的水资源开发利用仍有很大的优化空间,包括察尔森水库调度过程的优化、地表水与地下水年内与年际供水比例的优化、农业种植结构优化、渠系空间布局优化、灌溉制度的优化等。未来研究通过系统性地探索上述优化策略,有望实现流域水资源在时空维度上的高效配置,从而显著提升水资源利用效率。这种优化配置方案的探索将有助于在保障流域供水安全、维持农业可持续发展和维护生态系统健康之间取得平衡,为洮儿河流域水资源可持续管理提供科学依据和实践指导。

参考文献:

[1] DANGAR S, AAOKA A, MISHRA V. Causes and implications of groundwater depletion in India: a review [J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: 126103.

[2] MESSENGER M L, LEHNER B, COCKBURN C, et al. Global prevalence of non-perennial rivers and streams [J]. Nature, 2021, 594(7863): 391-397.

[3] DURAN-LLACER I, ARUMI J L, ARRIAGADA L, et al. A new method to map groundwater-dependent ecosystem zones in semi-arid environments: a case study in Chile [J]. Science of the Total Environment, 2022, 816: 151528.

[4] WADA Y, VAN BEEK L P H, VAN KEMPEN C M. Global depletion of groundwater resources [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(20): L20402.

[5] 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. (in Chinese))

[6] WANG Mingjun, XU Bo, LI Yu, et al. A surface and ground-water integrated investigation of streamflow drying up in semi-arid regions [J]. Hydrological Processes, 2023,

37(6): e14903.

[7] 徐腾, 王以鹏, 叶逾, 等. 地下水超采管控体系及水量水位双控体系研究进展 [J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 27-35. (XU Teng, WANG Yipeng, YE Yu, et al. Research progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 27-35. (in Chinese))

[8] 谢新民, 李丽琴, 周翔南, 等. 基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用 [J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 6-12. (XIE Xinmin, LI Liqin, ZHOU Xiangnan, et al. Water resources allocation model based on “double control” of groundwater and its application [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 6-12. (in Chinese))

[9] SUN Zan, ZHENG Yi, LI Xi, et al. The nexus of water, ecosystems, and agriculture in endorheic river basins: a system analysis based on integrated ecohydrological modeling [J]. Water Resources Research, 2018, 54(10): 7534-7556.

[10] WU Xin, ZHENG Yi, WU Bin, et al. Optimizing conjunctive use of surface water and groundwater for irrigation to address human-nature water conflicts: a surrogate modeling approach [J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 380-392.

[11] 张弛, 王明君, 于冰, 等. 松辽流域水资源综合调控研究进展与四大难题探究 [J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1379-1388. (ZHANG Chi, WANG Mingjun, YU Bing, et al. Research progress of comprehensive water resources regulation and four major problems in Song-Liao River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1379-1388. (in Chinese))

[12] AFSHAR A, KHOSRAVI M, OSTADRAHIMI L, et al. Reliability-based multi-objective optimum design of nonlinear conjunctive use problem: cyclic storage system approach [J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125109.

[13] KHOSRAVI M, AFSHAR A, PERONA P. Stochastic optimization to maximize water supply index in conjunctive use of surface and groundwater [J]. Journal of Hydrology, 2025, 648: 132377.

[14] 焦佳敏. 乳山河流域地表水-地下水联合调控方案研究 [D]. 济南: 济南大学, 2023.

[15] GETCHELL F, WILEY D. Artificial recharge enhances aquifer capacity [J]. Water Engineering & Management, 1995, 142(11): 335-345.

[16] 李璇, 束龙仓, 鲁程鹏, 等. 石川河地下水库建库条件分析及地下水位动态预测 [J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 13-18. (LI Xuan, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. Analysis of groundwater reservoir construction conditions and prediction of groundwater level variation in Shichuan River Groundwater Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 13-18. (in Chinese))

- [17] 李寿声,张展羽,徐国郎,等. 综合利用水资源工程的一种管理模型[J]. 河海大学学报,1989,17(1):13-22. (LI Shousheng, ZHANG Zhanyu, XU Guolang, et al. Dynamic nonlinear programming model for management of multipurpose water resources systems[J]. Journal of Hohai University,1989,17(1):13-22. (in Chinese))
- [18] MATSUKAWA J, FINNEY B A, WILLIS R. Conjunctive-use planning in Mad River Basin, California[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1992, 188 (2):115-132.
- [19] 赵建世. 基于复杂适应理论的水资源优化配置整体模型研究[D]. 北京:清华大学,2003.
- [20] FU Qiang, LI Linqi, LI Mo, et al. An interval parameter conditional value-at-risk two-stage stochastic programming model for sustainable regional water allocation under different representative concentration pathways scenarios [J]. Journal of Hydrology, 2018, 564:115-124.
- [21] 王蕊,王中根,夏军. 地表水和地下水耦合模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2008, 27 (4): 37-41. (WANG Rui, WANG Zhonggen, XIA Jun. Advances in the integrated surface water and groundwater model [J]. Progress in Geography, 2008, 27 (4): 37-41. (in Chinese))
- [22] 栾清华,高昊悦,刘红亮,等. 基于 GWAS 模型的武安市水资源优化配置[J]. 水资源保护,2023,39(3):32-42. (LUAN Qinghua, GAO Haoyue, LIU Hongliang, et al. Optimal allocation of water resources in Wu'an City on GWAS model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3):32-42. (in Chinese))
- [23] 王浩,王建华,秦大庸,等. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展,2004,15(1):123-128. (WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong, et al. Research advances and direction on the theory and practice of reasonable water resources allocation [J]. Advances in Water Science, 2004, 15 (1): 123-128. (in Chinese))
- [24] 方国华,王海政,吴承君,等. 考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度研究[J]. 水资源保护,2024,40(6):20-27. (FANG Guohua, WANG Haizheng, WU Chengjun, et al. Study on mid- and long-term multi-objective optimal operation of cascade reservoirs considering water abandonment risk[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):20-27. (in Chinese))
- [25] 钟加星,董增川,孟金玉,等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):30-37. (ZHONG Jiaxing, DONG Zengchuan, MENG Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(6):30-37. (in Chinese))
- [26] ALIYARIA F, BAILEYA R T, TASDIGHIA A, et al. Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins [J]. Environmental Modelling & Software,2019,115:200-210.
- [27] 杨明智,薛联青,郑刚,等. 基于 WEAP 的叶尔羌河流域水资源优化配置研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(6):493-499. (YANG Mingzhi, XUE Lianqing, ZHENG Gang, et al. Optimized allocation of water resources in Yarkand River Basin based on WEAP model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(6):493-499. (in Chinese))
- [28] TIAN Yong, XIONG Jianzhi, HE Xin, et al. Joint operation of surface water and groundwater reservoirs to address water conflicts in arid regions: an integrated modeling study[J]. Water,2018,10(8):1105.
- [29] 王坤,王宗志,王敏慎,等. 沿海中小河流域地表-地下水联合调控洪水资源利用研究: II. 实例应用[J]. 水资源保护,2024,40(2):55-63. (WANG Kun, WANG Zongzhi, WANG Minshen, et al. Research on floodwater resources utilization by conjunctive regulation of surface and underground reservoirs in coastal small- and medium-sized river basins: II. case study [J]. Water Resources Protection,2024,40(2):55-63. (in Chinese))
- [30] 常奂宇,赵勇,桑学锋,等. 京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究 I: 方法与模型[J]. 水利学报,2022,53(6):655-665. (CHANG Huanyu, ZHAO Yong, SANG Xuefeng, et al. Research on the coordinated regulation of water resources-food-energy-ecology in Beijing-Tianjin-Hebei region I: methods and model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (6): 655-665. (in Chinese))
- [31] 李丽琴,王志璋,贺华翔,等. 基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究[J]. 水利学报,2019,50(3):377-387. (LI Liqin, WANG Zhizhang, HE Huaxiang, et al. Research of water resources multi-dimensional equilibrium allocation based on eco-hydrological threshold regulation in inland arid region[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(3):377-387. (in Chinese))
- [32] BIERKENS M F P. Global hydrology 2015: state, trends, and directions [J]. Water Resources Research, 2015, 51 (7):4923-4947. (in Chinese))
- [33] 肖霄. 吉林省洮儿河扇形地地下水库人工调蓄理论与技术[D]. 长春:吉林大学,2017.
- [34] 张赫轩. 雄安新区地下水人工补给堵塞控制与模拟[D]. 长春:吉林大学,2022.
- [35] 王继玲. 石川河富平地下水水库渗透系数空间变异性及地下水人工补给研究[D]. 西安:长安大学,2023.

(下转第 208 页)

[26] 文韬,李雅雯,刘嘉豪,等. 玉溪海绵城市透水砖堵塞恢复方法研究[J]. 中国给水排水,2019,35(12):28-32. (WEN Tao, LI Yawen, LIU Jiahao, et al. Research on recovery method of permeable bricks in Yuxi sponge city [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(12):28-32. (in Chinese))

[27] LI Hengzhen, XU Huining, CHEN Fengchen, et al. Evolution of water migration in porous asphalt due to clogging[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 330: 129823.

[28] ZHANG Jiong, SHE Rui, DAI Zhaoxia, et al. Experimental simulation study on pore clogging mechanism of porous pavement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187:803-818.

[29] LIU Quan, LIU Sufang, HU Gaohui, et al. Infiltration capacity and structural analysis of permeable pavements for sustainable urban: a full-scale case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 288: 125111.

[30] 杜晓丽,郑泽东,尹子杰,等. 透水砖堵塞程度对径流颗粒物冲刷规律的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 73-81. (DU Xiaoli, ZHENG Zedong, YIN Zijie, et al. Influence of blockage degree of permeable brick on scouring law of runoff particles [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):73-81. (in Chinese))

[31] YANG Jingyu, GUO Yinchuan, TAM V W Y, et al. Research on pore-clogging behavior and mechanism in pervious concrete prepared with recycled aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2023, 384: 131420.

[32] 成智文,耿康,陈晓薇,等. 雨水径流条件对陶瓷透水砖快速堵塞的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(5): 116-120. (CHENG Zhiwen, GENG Kang, CHEN Xiaowei, et al. Effect of stormwater runoff conditions on rapid clogging of ceramic permeable brick [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5):116-120. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-08 编辑:徐娟)

(上接第 197 页)

[36] ZHAI Biying, FU Qiang, LI Tianxiao, et al. Rice irrigation schedule optimization based on the AquaCrop model: study of the Longtougiao irrigation district [J]. Water, 2019, 11(9):1799.

[37] 钟华平,刘恒,耿雷华,等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 2006, 17(3):430-434. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3):430-434. (in Chinese))

[38] 李强,王俏俏,陈红丽,等. 生态流量方法应用现状研究[J]. 生态学报, 2024, 44(1):36-46. (LI Qiang, WANG Qiaoqiao, CHEN Hongli, et al. Progress and perspectives on ecological flow assessment methods in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1):36-46. (in Chinese))

[39] 林诗隽,张红艳,莫建英,等. 基于水文学法的漓江生态流量研究[J]. 人民长江, 2023, 54(9):76-81. (LIN Shijun, ZHANG Hongyan, MO Jianying, et al. Ecological flow of Lijiang River based on hydrological method [J]. Yangtze River, 2023, 54(9):76-81. (in Chinese))

[40] LIU Wei, PARK S, BAILEY R T, et al. Quantifying the streamflow response to groundwater abstractions for irrigation or drinking water at catchment scale using SWAT and SWAT-MODFLOW [J]. Environmental Sciences Europe, 2020, 32(1):113.

[41] OCHOA C G, SIERRA A M, VIVES L, et al. Spatio-temporal patterns of the interaction between groundwater and surface water in plains [J]. Hydrological Processes, 2020, 34(6):1371-1392.

[42] 李鸿雁,王凡,刘莹莹,等. 洮儿河流域平原区气候变化情景下浅层地下水水位动态响应分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(3):345-352. (LI Hongyan, WANG Fan, LIU Yingying, et al. Shallow groundwater level under climate change conditions in the Tao'er River plain [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(3):345-352. (in Chinese))

[43] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions [J]. Transaction of the ASABE, 2007, 50(4):1211-1250.

[44] 初京刚,张弛,周惠成. SWAT 与 MODFLOW 模型耦合的接口及框架结构研究及应用[J]. 地理科学进展, 2011, 30(3):335-342. (CHU Jinggang, ZHANG Chi, ZHOU Huicheng, et al. Research and application of interface and frame structure of SWAT and MODFLOW models coupling [J]. Progress in Geography, 2011, 30(3):335-342. (in Chinese))

[45] MARTENS B, MIRALLES D G, LIEVENS H, et al. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(5):1903-1925.

[46] 王明君,彭勇,徐博,等. 变化环境下洮儿河下游地下水位变化趋势[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(4):806-819. (WANG Mingjun, PENG Yong, XU Bo, et al. Variation trend of the groundwater level in the lower reach of Tao'er River under changing conditions [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(4):806-819. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-22 编辑:徐娟)