

基于 GAMS 的内蒙古河套灌区水资源联合利用分析

岳卫峰^{1,2}, 高鸿永³, 陈爱萍³, 陈 隽⁴

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 内蒙古河套灌区义长灌域管理局义长试验站, 内蒙古 五原 015100; 4. 环境保护部 华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 根据国家和地方对黄河水量的分配比例, 未来内蒙河套灌区引黄水量为 40 亿 m^3/a , 而目前河套灌区多年平均引黄水量为 52 亿 m^3/a 。随着引黄水量的逐年减少和灌区经济的快速发展, 本地区水资源供需矛盾更加突出, 合理利用有限水资源成为灌区的首要任务。通过灌区现状水资源供需平衡分析, 并根据河套灌区中长期规划和水资源利用特点, 设计了 2 种引黄水和地下水联合利用方案, 同时对规划年水资源联合利用情况进行了优化分析, 并对不同方案下的地下水动态变化进行了模拟。结果表明, 通过优化产业结构、增加井渠结合灌溉面积, 有效利用地下水资源包括微咸水, 可以在 40 亿 m^3/a 引黄水量下维持灌区可持续发展。

关键词: 河套灌区; 水资源; 联合利用; GAMS

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0012-05

Study on Conjunctive Use of Water Resources in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia Based on GAMS Simulation and Optimization

YUE Wei feng^{1,2}, GAO Hong yong³, CHEN Ai ping³, CHEN Juan⁴

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875, China;

3. Yichang Experimental Station of Inner Mongolia Hetao Irrigation District, Wuyuan 015100, China;

4. South China Institute of Environmental Science, MEP, Guangzhou 510655, China)

Abstract: According to the national and local allocation proportions of water resources in the Yellow River, the irrigation water amount drawn from the Yellow River will be limited to less than $4.0 \times 10^9 m^3$ per year in the future for the Hetao Irrigation District while the current irrigation water amount is about $5.2 \times 10^9 m^3$ per year. With the decreasing of the irrigation water amount and rapid economic development, the conflict between the supply and demand of water resources can be more serious, therefore the reasonable utilization of the limited water resources is the primary task faced by the local authority in the Hetao Irrigation District. Based on the analysis of current supply and demand balance of water resources and the long term plans and water resources utilization in the irrigation district, two schemes of conjunctive use of irrigation water from the Yellow River and groundwater are developed. Moreover, the optimization analysis is conducted on the conjunctive use of water resources in the planning year and the dynamic variations of groundwater under different schemes are simulated. The results show that the irrigation water of $4.0 \times 10^9 m^3$ per year can maintain the sustainable development of the irrigation district under the conditions of optimizing the industrial structure, enlarging the combined well canal irrigation areas, and using the groundwater resources including brackish water effectively.

Key words: Hetao Irrigation District; water resources; conjunctive use; GAMS

内蒙河套灌区是黄河流域特大型灌区之一, 降水稀少、蒸发强烈, 属于干旱、半干旱地区。灌区现有灌溉面积 57.4 万 hm^2 , 多年平均引黄水量 51.8 亿 m^3/a 。作为工业、生活重

要水源的地下水主要靠引黄灌溉入渗补给, 浅层地下水属于典型的入渗蒸发型, 水分以垂直运动为主。随着节水改造工程的逐步落实, 内蒙河套灌区的引黄指标将限定为 40 亿

收稿日期: 2012-11-23 修回日期: 2013-02-25 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1744.029.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41001318); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介: 岳卫峰(1978-), 男, 河南辉县人, 讲师, 博士, 主要从事地下水资源与水环境研究。E-mail: yuewf@bnu.edu.cn

m^3/a 。在引黄水量的日益减少和人口、经济不断增长的情况下,灌区水资源供需矛盾更加突出。同时,由于地下水资源利用率较低,造成了区域土壤次生盐渍化,影响了灌区经济社会的可持续发展。因此,如何有效利用有限的水资源,改善区域生态环境,成为内蒙河套灌区亟待解决的首要问题^[1]。

本文首先对灌区现状水资源供需进行了平衡分析,并根据河套灌区中长期规划和水资源利用特点,建立了适合河套灌区的水资源联合利用优化模型,选择 2030 年作为规划年,对两种情景下的水资源联合利用方案进行了分析,并模拟了规划年的地下水埋深动态变化。

1 现状水资源供需平衡

根据灌区多年的引黄资料统计,河套灌区总干渠首多年

平均引黄能力达到 54.7 亿 m^3/a ,干渠实际引水能力为 51.8 亿 m^3/a ,而分配到各灌域总的引水量为 48.2 亿 m^3/a 。河套灌区现有灌溉面积为 57.4 万 hm^2 ,按河套灌区总干渠续灌、干渠及以下渠道轮灌的实际情况以及灌区实测渠道水利用系数,各级渠道按面积加权得出的现状渠系水利用系数为 $0.42\sim 0.46$,灌溉水利用系数为 $0.30\sim 0.36$,引黄水量全部用于灌溉。灌区多年平均地下水开采水平较低,除了城镇生活、农村生活、牲畜饮用水和工业用水之外,在灌区小片分布有井灌区。根据表 1 多年平均供需平衡分析结果,灌区地表水全部用于灌溉,灌区多年平均地下水开采量为 1.48 亿 m^3/a ,地下水利用率仅为 14% 。

另外,根据国家和地方的黄河水资源分配方案,初步确定内蒙河套灌区节水改造工程实施后,引黄水量指标为 40 亿 m^3/a 。

表 1 灌区水资源多年平均供用平衡分析结果

Table 1 The annual average supply and demand balance of water resources in the irrigation district (unit: 10^8 m^3) 亿 m^3

灌域	可供水量		农业用水		工业用水 (地下水)	生活用水 (地下水)	平衡分析	
	地下水	地表水	地下水	地表水			地表水	地下水
一干	6.012	1.285	6.012	0.084	0.043	0.058	0.000	1.099
解放闸	13.067	2.617	13.067	0.063	0.062	0.146	0.000	2.346
永济	9.278	1.842	9.278	0.119	0.202	0.236	0.000	1.285
义长	14.405	3.169	14.405	0.092	0.050	0.140	0.000	2.887
乌拉特	5.436	1.403	5.436	0.118	0.032	0.035	0.000	1.217
合计	48.198	10.316	48.198	0.476	0.390	0.616	0.000	8.834

注:平衡分析正值表示供水量大于用水量。

而现状条件下灌区农业需水量约 48 亿 m^3/a ,这样将形成 8 亿 m^3/a 的灌溉用水缺口。引黄水量的减少意味着与之密切相关的地下水资源也将受到影响。然而随着经济社会的发展,各行业的需水量仍在增加。1980 年-2010 年各行业用水量变化情况详见图 1-图 4。

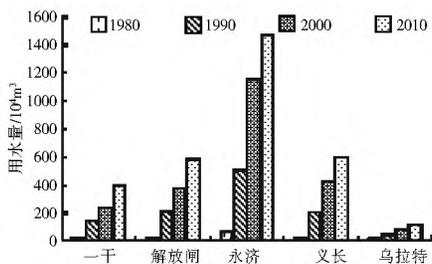


图 1 城镇生活用水量变化

Fig. 1 Variation of urban domestic water use

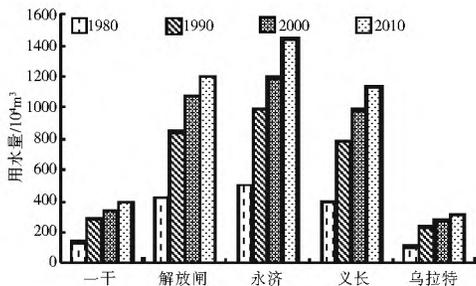


图 2 农村生活用水量变化

Fig. 2 Variation of rural domestic water use

从图中可以看出,各灌域农业用水量稳中有降,而生活用水量和工业用水量都不同程度地有所增长,尤其是永济灌域的城镇生活用水量和工业用水量增长趋势更为明显。就

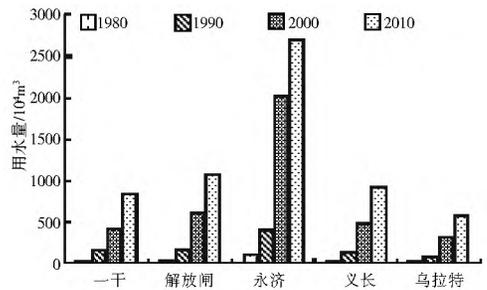


图 3 工业用水量变化

Fig. 3 Variation of industrial water use

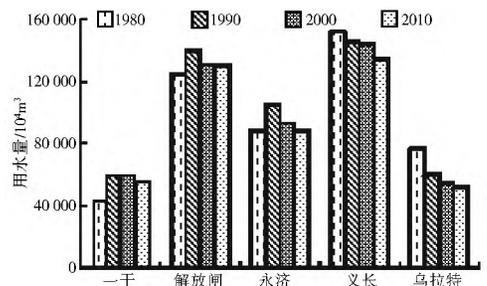


图 4 农业用水量变化

Fig. 4 Variation of agricultural water use

整个河套灌区而言,生活用水量(包括城镇生活用水和农村生活用水)从 1980 年的 1746 万 m^3 增加到 2010 年的 7600 万 m^3 ,增长了 3 倍多;工业用水量从 1980 年的 270 万 m^3 增加到 2010 年的 6200 万 m^3 ,增长了 20 多倍。由此可见,引黄水量减少与工农业、生活用水量增加的矛盾将愈演愈烈,水资源严重短缺的问题必将成为河套灌区经济快速发展的制约因素。

2 灌区水资源联合利用模型

河套灌区主要靠引用黄河水进行农业灌溉,随着黄河水资源的日益减少,再加上分配给灌区的引黄水量将限制在 40 亿 m^3/a ,其势必影响灌区经济的快速发展。另外,灌区地表水和地下水水力联系密切,且相互影响,灌区地下水主要靠引水渠系渗漏和田间灌溉入渗补给,因此,引黄水量的多少直接影响地下水的补给量,进而影响地下水的可开采量及地下水埋深;而在需水量一定的情况下,地下水可供水量同时也决定着引水量的多少。因此本文从河套灌区的实际出发,通过建立的优化模型对各个分区各个时段的地表水和地下水进行统一调配^[2,9],使得在既能满足各行业需水量又能充分利用地下水的前提下,总的引用黄河水量最小。

2.1 变量设置

灌区内工业、生活及牲畜用水以开采地下水为主,引用的黄河水主要是进行农业灌溉,生态用水包括城镇绿化、生活服务用水和淋盐保墒用水,在计算时城镇绿化、生活服务用水归入到城镇生活用水里,而淋盐保墒用水属于秋浇水被分配给农业用水。因此,各灌域的用水行业包括城镇生活用水、农村生活用水、牲畜用水、工业用水及农业用水,分别用 XT 、 XV 、 XL 、 XI 和 XA 表示。后缀 GW 表示使用地下水源, SW 表示使用地表水源,下标 i, t 表示第 i 分区 t 时段上述各用水行业分配的水量($i=1, 2, 3, 4, 5$, 分别代表一干灌域、解放闸灌域、永济灌域、义长灌域和乌拉特灌域; $t=1, 2, \dots, 12$, 代表月份)。

2.2 目标函数

在满足各约束条件下,目标函数即为引水量最小,用公式表示为:

$$\min f(x) = \min \sum_{i=1}^5 \sum_{t=1}^{12} XASW_{i,t} \quad (1)$$

式中: $XASW_{i,t}$ 为第 i 分区 t 时段引黄水量(万 m^3);

2.3 约束条件

(1) 供水约束。

a. 地表水可供水量约束。计算中各分区内地表用水量不能超过优化水平年可供地表水量,因而形成如下约束条件:

$$\sum_{i=1}^5 XASW_{i,t} \leq SW_i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^5 SW_i \leq SQW \quad (3)$$

式中: SW_i 为第 i 分区地表水可供水量(万 m^3); SQW 为灌区总的引水量(万 m^3)。

b. 地下水可供水量约束。要求地下水开采量不能超过各分区地下水可开采量。而地下水可开采量可由地下水补给量乘以开采系数确定。另外,根据地下水矿化度的不同每个分区又分成 k 个小区:

$$XTGW_{i,t} + XVGW_{i,t} + XLGW_{i,t} + XIGW_{i,t} + XAGW_{i,t} \leq GW_{i,t} \quad (4)$$

$$GW_{i,t} = \sum_{k=1}^k (100\alpha_i P_{i,t} + \frac{XASW_{i,t}\beta_i + XASW_{i,t}\eta_i\gamma_i + Q_{mi,t} + Q_{ni,t}}{F_i}) \cdot F_{i,k} C_{i,k} \quad (5)$$

式中: $XTGW_{i,t}$ 为第 i 分区 t 时段城镇生活用水量(万 m^3); $XVGW_{i,t}$ 为第 i 分区 t 时段农村生活用水量(万 m^3);

$XLGW_{i,t}$ 为第 i 分区 t 时段牲畜用水量(万 m^3); $XIGW_{i,t}$ 为第 i 分区 t 时段工业用水量(万 m^3); $XAGW_{i,t}$ 为第 i 分区 t 时段井灌用水量(万 m^3); $GW_{i,t}$ 为第 i 分区 t 时段地下水可供水量(万 m^3); α_i 为第 i 分区降雨入渗补给系数; β_i 为第 i 分区渠系渗漏补给系数; η_i 为第 i 分区渠系水利用系数; γ_i 为第 i 分区田间入渗补给系数; $P_{i,t}$ 为第 i 分区 t 时段降雨量(m); $Q_{mi,t}$ 为第 i 分区 t 时段山前侧向补给量(万 m^3); $Q_{ni,t}$ 为第 i 分区 t 时段黄河侧向补给量(万 m^3); F_i 为第 i 分区面积(km^2); $F_{i,k}$ 为第 i 分区 k 小区面积(km^2); $C_{i,k}$ 为第 i 分区 k 小区地下水开采系数。

(2) 需求约束。

a. 生活用水约束。水资源的合理分配是在满足资源约束的条件下,首先要达到人民生活用水的要求。根据用水标准分为城镇生活用水、农村生活用水和牲畜用水:

$$\text{城镇 } XTGW_{i,t} \geq QTRGW_{i,t} \quad (6)$$

$$\text{农村 } XVGW_{i,t} \geq QVRGW_{i,t} \quad (7)$$

$$\text{牲畜 } XLGW_{i,t} \geq QLRGW_{i,t} \quad (8)$$

式中: $QTRGW_{i,t}$ 、 $QVRGW_{i,t}$ 、 $QLRGW_{i,t}$ 分别为第 i 分区 t 时段城镇生活需水量、农村生活需水量和牲畜需水量(万 m^3)。

b. 农业用水约束。为保证农作物生长需要,各分区抽取的地下水量和引地表水灌溉水量应最大程度地满足农作物需水量^[7]。因而形成如下约束条件:

$$M_{j,t,\min} \leq \frac{XAW_{i,j,t}}{A_j} \leq M_{j,t,\max} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J XAW_{i,j,t} = XASW_{i,t} + XAGW_{i,t} \quad (10)$$

式中: $XAW_{i,j,t}$ 为第 i 分区 t 时段 j 作物的用水量(万 m^3); A_j 为 j 作物的种植面积(km^2); $M_{j,t,\min}$ 、 $M_{j,t,\max}$ 为 j 作物 t 时段最小、最大灌水定额。

c. 工业用水约束。为了维持工业经济的不断发展,各分区工业供水量应满足下列约束条件:

$$QIRW_{i,t,\min} \leq XIGW_{i,t} \leq QIRW_{i,t,\max} \quad (11)$$

式中: $QIRW_{i,t,\min}$ 、 $QIRW_{i,t,\max}$ 为第 i 分区 t 时段工业最小、最大需水量(万 m^3)。

(3) 地下水位约束。

为防止由于地下水水位上升或地下水水位下降导致土壤盐渍化与沙漠化,必须将地下水水位调控在一定的范围内。根据河套灌区土壤、植被等状况,设定灌区地下水适宜埋深为 3 $\text{m}^{[1,8]}$ 。另外,河套灌区地下水交换以垂向为主。因此,在忽略分区之间水平方向水量交换的前提下,第 i 分区地下水水位约束可用如下不等式表示:

$$H_{i,\min} \leq H_{i,t+1} \leq H_{i,\max} \quad (12)$$

$$H_{i,t+1} = H_{i,t} + \frac{\alpha_i P_{i,t}}{\mu_i} +$$

$$\frac{XASW_{i,t}\beta_i + XASW_{i,t}\eta_i\gamma_i + XAGW_{i,t}\theta_i - \varepsilon_{i,t}}{100\eta_i F_i}$$

$$\frac{XTGW_{i,t} + XVGW_{i,t} + XLGW_{i,t} + XIGW_{i,t} + XAGW_{i,t}}{100\eta_i F_i} \quad (13)$$

式中: $H_{i,\min}$ 为第 i 分区允许最低水位值(m); $H_{i,\max}$ 为第 i 分区允许最高水位值(m); θ_i 为第 i 分区井灌回归系数; $\varepsilon_{i,t}$ 为第 i 分区 t 时段最低水位与最高水位之间蒸发强度(m^3/m^2); μ_i

为第 i 分区含水层给水度。

(4) 渠沟过水能力约束。

a. 引水渠道过水能力约束。

$$XASW_{i,t} \leqslant CWB_{i,\max} \quad (14)$$

式中: $CWB_{i,\max}$ 为第 i 分区引水渠道最大过水能力(万 m^3)。

b. 总排干沟过水能力约束。

$$(XTGW_{i,t} + XVGW_{i,t} + XLGW_{i,t} + XIGW_{i,t} + XAGW_{i,t}) \cdot P_{dk} \leqslant DWB_{dc,\max} \quad (15)$$

式中: $DWB_{dc,\max}$ - 总排干沟最大过水能力(万 m^3); P_{dk} - 排水系数。

(5) 井灌开采能力约束。

$$XTGW_{i,t} + XVGW_{i,t} + XLGW_{i,t} + XIGW_{i,t} + XAGW_{i,t} \leqslant COW_i \quad (16)$$

式中: COW_i 为第 i 分区开采井开采能力总和。

(6) 非负性约束。

$$XTGW_{i,t}, XVGW_{i,t}, XLGW_{i,t}, XIGW_{i,t}, XAGW_{i,t} \geqslant 0 \quad (17)$$

2.4 模型求解

GAMS 通用数学模型系统是世界银行与美国 GAMS 开发公司在 20 世纪 90 年代初开发的一种旨在建立和解决大型复杂数学规划问题的高级计算机软件。它面向分析解决综合问题的计算机用户,巧妙地融合了关系数据技术与数学规划理论,使应用中相互关联的数学模型与数据彼此独立,从而为用户在模型、算法和数据之间提供了一个便捷的接口。另外,它不需花费太多时间和精力去研究模型的算法,从而避免了动态规划中“维数灾”的障碍。

任何一个 GAMS 程序都由集合、数据、模型、求解、报告 5 个部分,如表 2 所示。利用这些语句再与一般的算术运算内部函数、基本设置及用户界面环境相结合,便可构成一个完整的模型系统^[9-10]。

表 2 GAMS 语言基本语句

Table 2 Basic sentences of GAMS language

类型	命令	意义
集合	SETS	集合的定义与赋值
数据	SCALAR	单参数的定义与赋值
	PARAMETERS	多维参数组的定义与赋值
	TABLE	多维参数表的定义与赋值
模型	VARIABLES	变量定义
	EQUATION	方程定义
	MODEL	模型定义
求解	SOLVE	模型求解
报告	DISPLAY	数据输出
	FILE	数据输出路径及文件名定义
	PUT	数据输出至指定文件

3 水资源联合利用方案分析

针对灌区水资源利用特点及节水改造工程实施情况,本文设置了 2 种联合利用方案。第一种方案是考虑节水工程改造和配套设施完善等进展情况,尤其是井渠结合灌溉面积的增加速度不可能过快。在满足各行业需水(包括地表需水

和地下需水)条件下,河套灌区最小的引黄水量,本方案比较切合实际,命名为 G-1 联合利用方案。第二种方案是考虑引黄水量受到限制(甚至不足 40 亿 m^3/a)时,增加井渠结合灌溉区域的面积,通过抽取地下水灌溉,以弥补地表水不足。该情况需要调整地区的发展模式,提高地下水开采能力,实施周期较长,本方案命名为 G-2 联合利用方案。

另外,根据灌区中长期规划,设定 2030 年为规划年,规划年各部门需水量均根据当地相关部门发展规划计算得来。

3.1 G-1 联合利用方案分析

利用本文建立的灌区水资源联合利用模型,对 G-1 联合利用方案进行了水资源优化配置,供需平衡分析结果见表 3,地下水埋深模拟结果见图 5。

表 3 河套灌区 G-1 联合利用方案下 2030 年水资源供用平衡分析结果

Table 3 The results of supply and demand balance of water resources under the G-1 conjunctive use scheme in the Hetao Irrigation District in 2030 (unit: $10^8 m^3$)

灌域	供水量		需水量		供需平衡		合计
	地表水	地下水	地表水	地下水	地表水	地下水	
一干	3.136	1.251	2.839	1.052	0.297	0.199	0.496
解放闸	9.531	2.638	9.145	1.801	0.386	0.837	1.223
永济	9.122	3.145	6.082	2.964	3.040	0.181	3.221
义长	11.425	3.313	11.425	1.850	0.000	1.463	1.463
乌拉特	6.446	2.233	5.342	2.563	1.104	-0.330	0.774
全灌区	39.660	12.580	34.833	10.230	4.827	2.350	7.177

由供需平衡结果可知,就全灌区而言,无论地表水总量还是地下水总量均可以满足要求。具体到各灌域,除了乌拉特灌域地下水供水量不足外,其它灌域均能满足需水要求。乌拉特灌域主要是工业缺水,由于规划年的工业需水量比现状工业用水量增长了近 60 倍,而引黄水量的减少直接导致地下水补给量减少,从而使得可开采的地下水量无法满足急剧增长的工业需水量,此类缺水属于资源型缺水。

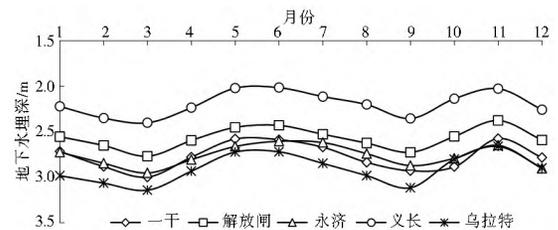


图 5 G-1 联合利用方案下河套灌区 2030 年各灌域地下水埋深

Fig. 5 The groundwater depths of each irrigation area under the G-1 conjunctive use scheme in the Hetao Irrigation District in 2030

由规划年各灌域地下水埋深可知,由于地下水利用率不同,导致各灌域间地下水埋深的变化也不尽相同。永济灌域和乌拉特灌域由于工业用水量比较大,导致地下水开采量增加,地下水利用率也随之增大,年平均地下水埋深也较深,分别为 2.76 m 和 2.91 m;一干灌域地下水利用率仅次于永济灌域,但地下水埋深较高,平均为 2.77 m,仅次于乌拉特灌域;解放闸灌域无论是地下水利用率还是地下水埋深都比较

小;最小为义长灌域,该灌域的引黄水量比较大,而地下水开采量较小,导致该灌域的地下水利用率非常低,年平均埋深为 2.19 m。

3.2 G-2 联合利用方案分析

G2 联合利用方案下 2030 年水资源供需平衡分析结果见表 4,各灌域规划年地下水埋深见图 6。

表 4 河套灌区 G-2 联合利用方案下 2030 年水资源供用平衡分析结果

Table 4 The results of supply and demand balance of water resources under the G2 conjunctive use scheme in the Hetao Irrigation District in 2030 (unit: 10⁸ m³)

灌域	供水量		需水量		供需平衡		合计
	地表水	地下水	地表水	地下水	地表水	地下水	
一干	2.871	1.190	2.839	1.052	0.032	0.138	0.170
解放闸	8.780	2.495	9.145	1.801	-0.365	0.694	0.329
永济	8.557	3.014	6.082	2.964	2.475	0.050	2.525
义长	10.226	3.055	11.425	1.850	-1.199	1.205	0.006
乌拉特	5.985	2.135	5.342	2.563	0.643	-0.428	0.215
全灌区	36.419	11.889	34.833	10.230	1.586	1.659	3.245

G-2 联合利用方案进一步增加了井渠结合灌溉面积,提高了地下水利用率。就整个灌区而言,该方案下地下水利用率为 86%,比 G1 方案下地下水利用率提高了 5%。尽管解放闸灌域和义长灌域地表水不足,但可以通过开采地下水进行弥补。因此,在未来引黄水量限定在或不足 40 亿 m³/a 情况下,通过水资源联合利用可以维持灌区的可持续发展。

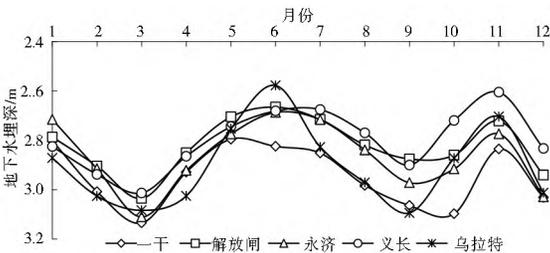


图 6 G-2 联合利用方案下河套灌区 2030 年各灌域地下水埋深

Fig. 6 The groundwater depths of each irrigation area under the G2 conjunctive use scheme in the Hetao Irrigation District in 2030

规划年各灌域的地下水埋深在部分月份已经超过了 3 m,但现象并不严重,各灌域平均埋深依然控制在 3 m 以内,但相比 G-1 方案,地下水埋深进一步变大,全灌区年平均埋深为 2.87 m,而 G-1 方案下全灌区年平均埋深为 2.64 m。

4 结论

(1) 两种联合利用方案下规划年 2030 年引黄水量分别为 39.66 亿 m³/a 和 36.42 亿 m³/a,比多年平均减少了约 18% 和 24%,而地下水利用率则分别提高了约 67% 和 72%。因此,在合理调整产业布局、优化作物种植结构、采用先进灌溉技术、加强井渠结合灌溉、提高地下水利用率、协调分配各灌域引黄水量,以及全面落实续建配套与节水改造工程等前提下,可以在引黄水量减少的情况下维持灌区经济社会

的可持续发展。

(2) 本文所计算的地下水供水量,不仅包括了矿化度 < 2 g/L 的淡水、矿化度 2~ 3 g/L 的微咸水,也考虑了部分矿化度 3~ 5 g/L 的半咸水。因此,如何提高微咸水和半咸水的利用率,也是今后灌区发展需要解决的难题。

(3) 从规划年供需平衡分析结果来看,部分灌域由于工业需水量的急剧增加,从而使得地表水有余,而地下水不足。因此,除了使用节水新技术和新设备、提高工业水的重复利用率外,也可以通过水权置换,把一部分地表水转让给用水量较大的工业,从而避免出现集中开采所导致的一系列生态环境问题。

参考文献(References):

- [1] 王伦平,陈亚新,曾国芳. 内蒙古河套灌区灌溉排水与盐碱化防治[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993. (WANG Lunping, CHEN Yaxin, ZENG Guofang. Irrigation, Drainage and Salinization Control in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia [M]. Beijing: China Water Power Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 马斌,解建仓,汪妮,等. 多水源引水灌区水资源调配模型及应用[J]. 水利学报, 2001, (9): 59-63. (MA Bin, XIE Jiancang, WANG Ni, et al. Optimal Operation Model for Multi-reservoir in Irrigation Area and Its Application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (9): 59-63. (in Chinese))
- [3] 杨庆娥,李恒太,王晓琳,等. 邯郸市南水北调供水区多水源联合调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(4): 37-39. (YANG Qinge, LI Hengtai, WANG Xiaolin, et al. Study on Joint Optimal Operation of Multi Source Water Supply of South to North Water Transfer Project in Handan [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(4): 37-39. (in Chinese))
- [4] Bharati L., Rodgers C., Erdenberger T., et al. Integration of Economic and Hydrologic Models: Exploring Conjunctive Irrigation Water Use Strategies in the Volta Basin [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(8): 925-936.
- [5] Safavi H. R., Darzi F., Marino M. A. Simulation-Optimization Modeling of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater [J]. Water Resources Management, 2010, (24): 1965-1988.
- [6] 吴丽,田俊峰. 区域产业结构与用水协调的优化模型及评价. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 51-54. (WU Li, TIAN Junfen. Optimal Model of Coordination between Industrial Structure and Water Resources Utilization as well as its Evaluation [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 51-54. (in Chinese))
- [7] Bogachan Benli, Suleyman Kodali. A Non-linear Model for Farm Optimization with Adequate and Limited Water Supplies Application to the Southeast Anatolian Project (GAP) Region [J]. Agricultural Water Management, 2003, 62: 187-203.
- [8] 赵锁志,孔凡吉,王喜宽,等. 地下水临界深度的确定及其意义探讨—以河套灌区为例 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2008, 29(4): 164-197. (ZHAO Suozhi, KONG Fanji, WANG Xikuan, et al. Confirming of Critical Depth of Groundwater Level and Discussion on its Significance Take Hetao Irrigation Area for Example [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2008, 29(4): 164-197. (in Chinese))
- [9] Brooke A., Kendrick D., Meeraus A., et al. GAMS: A User's Guide [K]. GAMS Development Corporation, Washington, DC, 1998.
- [10] 王晓峰,党志良. 西安城市供水多水源水量水质联合优化调度 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 1999, 29(5): 437-440. (WANG Xiaofeng, DANG Zhiliang. A Study on Multi-source of Water Quantity and Quality Union Optimal Dispatch of Xi'an City Water Supply [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1999, 29(5): 437-440. (in Chinese))