

再生水灌区水资源联合调度研究

徐小元¹, 方卫民¹, 黄 强¹, 王义民¹, 吴文勇², 刘洪禄²

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 北京市水利科学研究所, 北京 100048)

摘 要: 以北京市再生水灌区为研究对象, 灌区再生水、地表水以及地下水的联合调度为研究内容, 结合系统分析的思想, 提出了再生水灌区水资源联合调度的数学模型。采用逐时段动态分析的方法, 得出典型年北京市再生水灌区水资源的配置方案, 其中特枯年、枯水年、平水年和丰水年地下水开采量为 21 626.08、14 616.39、11 928.83 和 7 262.05 万 m³, 分别仅占全年总灌溉需水量的 44.35%、37.61%、41.09% 和 34.04%。研究表明, 通过联合调度有效缓解了灌区地下水过量开采的问题, 同时提高了灌区的灌溉保证率, 优化了供水结构, 是一种科学可行的再生水灌区水资源联合调度方法。

关键词: 再生水; 灌区; 联合调度; 地下水; 灌溉保证率

中图分类号: TV93; TV213.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)04-0228-05

随着社会经济的发展, 灌区地表水和地下水资源紧缺的问题日益突出, 开发利用新型农业灌溉水源意义重大。近些年, 北京市在经过充分研究论证的基础上, 利用经污水处理厂处理后, 达到一定的水质指标, 可以进行有益使用的水, 即再生水, 用于农业灌溉^[1,2], 解决了灌区用水紧张问题的同时, 也缓解了地下水位不断下降的严峻形势。利用再生水用于农业灌溉将会成为解决灌区水资源紧缺的主要手段之一, 此类型灌区的数量会不断增加。届时, 再生水将成为灌区的主要农业灌溉水源, 如何对此类型灌区的水资源进行科学合理的联合调度, 将是非常值得研究的问题。

本研究针对北京市主要的再生水灌区, 以系统分析的思想为基础, 主要研究在不同典型年如何对再生水灌区内的水资源进行科学合理的调度, 并最终提出联合调度的数学模型和不同供水保证率下的灌区多水源联合调度方案。通过联合调度实现灌区水资源的科学利用以及管理水平的提高, 同时将灌区灌溉保证率提高到 95%, 保障并促进了农业的发展。

1 研究背景

北京市农业灌区在发展再生水灌溉之前, 基本采用地下水进行农业灌溉, 地下水开采量大, 地下水位不断下降, 地下水位的下降导致灌区土壤条件恶化。与此同时灌区的生态环境也受其影响, 这种

与生态环境的不利影响对作物的安全生长构成威胁, 也对灌区内的社会和经济发展产生阻碍。

为了缓解北京市灌区用水紧张的形势, 减少地下水资源量的开采, 遏制地下水位不断下降的情况。灌区灌溉用水开始考虑引进污水, 同时利用雨水等其他水源, 再生水灌溉利用成为解决北京市水资源危机的重要途径之一^[3,4]。

2008 年大兴区、通州区农业再生水灌溉用水量达到为 1.08 亿 m³ 和 1.35 亿 m³, 再生水利用量占全市农业再生水利用量的 92.4%。再生水等水源大规模利用缓解了该地区地下水资源严重超采的形势, 促进了水资源的供需平衡, 但是, 不合理的调度利用会导致水资源的浪费, 并且影响灌区的生态环境和作物的安全生长^[5-7], 影响灌区的发展。如何合理利用包括大量再生水在内的灌区农业用水水源, 优化灌区的供水结构, 在不造成灌区生态环境恶化的基础上实现最大程度地利用再生水, 尽量减少地下水的开采量, 回蓄剩余再生水以补给地下水源等目标^[8], 是此类型灌区亟需解决的问题。

2 多水源联合调度计算

2.1 供水分析

2.1.1 再生水 北京市近年来不断扩大再生水灌溉面积, 大兴、通州再生水灌区是再生水灌溉利用的重点区域。2008 年两个灌区灌溉面积达到 4 万 hm², 其中通州灌区再生水灌溉面积约 2.7 万 hm²,

收稿日期: 2009-08-27

基金项目: 国家“863”计划项目 (2006AA100205)

作者简介: 徐小元 (1969—), 男, 湖北红安人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水资源系统工程的研究。E-mail: fangweiming2005@163.com。

通讯作者: 黄 强, 教授, 博士生导师。E-mail: wresh@xaut.edu.cn。

此灌区的再生水来水主要是高碑店污水处理厂的出水,再生水通过通惠干渠注入凉水河,再通过沿河的渠首引水,实现再生水用于农业灌溉。大兴灌区灌溉面积约为 1.33 万 hm^2 ,灌区再生水主要由小红门污水处理厂回水提供,通过凉凤灌渠注入新风河,再通过沿河的渠首引水,进行灌区农业灌溉。

2.1.2 地表水、地下水 灌区内渠系发达,河流众多,调蓄能力较大,2008 年统计的再生水灌区总调蓄能力约为 2 100 万 m^3 ,灌区内发达的水网及调蓄能力对灌区灌溉起到了重要的作用。一方面,大量再生水可以通过灌区内渠系直接用于农业灌溉,同时通过灌区调蓄作用,可以有效地贮存再生水资源及雨水资源,达到蓄丰补枯的目的。另一方面,可将一部分再生水通过土壤的渗漏作用进入地下水库,通过土壤的自净作用改善再生水水质,补充地下水资源,维持地下水资源量,防止地下水位过度下降以及由此引起的地面沉降和环境恶化问题。

2.2 多水源联合调度计算

多水源的联合调度不仅关系到灌区水资源的合理开发利用,甚至影响到灌区农业的产业结构和生态环境安全,需要以水资源的可持续利用及良性循环为指导思想^[9,10],提出多水源的合理配置方案,为同类型灌区的调度运行提供参考。

2.2.1 供需平衡模型 灌区水资源供需平衡分析是指对灌区内部某一时期水资源的供给与需求,以及它们之间的余缺关系进行分析的过程^[11],主要研究内容有需水计算和供水计算,目的是明确灌区的余缺水、缺水性质、缺水原因及缺水对灌区的影响^[12],并提出解决问题的方案,保证灌区的用水安全。

2.2.2 供水秩序模型 模型优先利用灌区内的地表水,其次是再生水和地下水,被取水之后的地表坑塘用于再生水的回蓄,数学描述为:

$$W_{\text{地表}}(i, j, t) \geq W_{\text{再生}}(i, j, t) \geq W_{\text{地下}}(i, j, t)$$

且满足条件:

$$\sum_{i=1}^T W_{\text{地表}}(i, j, t) + \sum_{i=1}^T W_{\text{再生}}(i, j, t) + \sum_{i=1}^T W_{\text{地下}}(i, j, t) = \sum_{i=1}^T W_{\text{需}}(i, j, t)$$

式中, $W_{\text{地表}}(i, j, t)$ 、 $W_{\text{再生}}(i, j, t)$ 、 $W_{\text{地下}}(i, j, t)$ 和 $W_{\text{需}}(i, j, t)$ 分别为第 i 条干渠第 j 条支渠控制区域内在第 t 时段的地表水利用量、再生水供水量、地下水供水量和该支渠在该时段的灌溉毛需水量。

2.2.3 再生水水资源公平分配模型 再生水是再生水灌区的主要供水水源,应根据各支渠控制区域

内取用地表水后的缺水情况对其进行公平分配^[13],其数学函数为:

$$W_{\text{再生}}(i, j, t) = \frac{W_{\text{缺}}(i, j, t)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W_{\text{缺}}(i, j, t)} \times W_{\text{再生}}(t)$$

$$W_{\text{缺}}(i, j, t) = W_{\text{需}}(i, j, t) - W_{\text{地表}}(i, j, t)$$

式中, $W_{\text{再生}}(t)$ 为 t 时段再生水来水量; $W_{\text{缺}}(i, j, t)$ 为第 i 条干渠第 j 条支渠在第 t 时刻利用地表水后的缺水量。

2.2.4 蓄水均衡模型 若时段内再生水总量能满足时段内利用地表水后的灌溉缺水量,则剩余的再生水经渠系由控制区域内调蓄工程进行回蓄,回蓄目标为各控制区域蓄水率均衡,数学表达式为:

$$f(\eta, t) = \min | \max(\eta, t) - \min(\eta, t) | \leq \epsilon$$

$$\max(\eta, t) = \max \left| \frac{W_{\text{地表存水}}(i, j, t)}{W_{\text{max}}(i, j)} \right|$$

$$\min(\eta, t) = \min \left| \frac{W_{\text{地表存水}}(i, j, t)}{W_{\text{max}}(i, j)} \right|$$

式中, $W_{\text{地表存水}}(i, j, t)$ 为第 i 条干渠中第 j 条支渠 t 时段末的地表存水量; $W_{\text{max}}(i, j)$ 为第 i 条干渠中第 j 条支渠的蓄水能力; $\max(\eta, t)$ 、 $\min(\eta, t)$ 为控制区域最大、最小蓄水率; $f(\eta, t)$ 为目标函数; ϵ 为精度。

2.2.5 约束条件 可从水资源配置系统的各个环节来考虑约束条件。

(1) 供需平衡约束

$$W_{\text{总供}}(t) = W_{\text{毛总需}}(t)$$

(2) 供水水源的供水能力约束

$$\begin{cases} W_{\text{地下}}(i, j, t) \leq D \\ W_{\text{再生}}(i, j, t) \leq W_{\text{再生}}(t) \\ W_{\text{地表}}(i, j, t) \leq W_{\text{地表存水}}(i, j, t) \end{cases}$$

式中, $W_{\text{再生}}(t)$ 、 $W_{\text{地表存水}}(i, j, t)$ 、 D 分别表示再生水、地表水和地下水的时段供水能力。

(3) 灌区输水系统的输水能力约束

$$\sum_{i=1}^n \{ W_{\text{再生}}(i, j, t) + W_{\text{地表}}(i, j, t) + W_{\text{地下}}(i, j, t) \} \leq W(i, t)$$

式中, $W(i, t)$ 表示子区 i 在 t 时段的输水能力。

(4) 用水系统的需水约束

$$D_{\min}(i, j) \leq xx(i, j) + xy(i, j) + xz(i, j) \leq D_{\max}(i, j)$$

式中, $D_{\min}(i, j)$ 、 $D_{\max}(i, j)$ 表示 i 子区内第 j 处用水单元的最小和最大需水量。

(5) 蓄水约束

回蓄的再生水量不得超过该时段此支渠控制区

域内蓄水坑塘的调蓄能力。

(6) 地下水位变化约束

$$H_{\min} \leq \Delta H + H \leq H_{\max}$$

式中, $H_{\min}$, $H_{\max}$ 表示地下水水位的下限和上限值。

(7) 其他约束

如各变量非负约束、弃水量非负约束等。

2.2.6 模型求解 已知多种水源的来水过程, 结合

对历史资料的调查分析, 给灌区内各种参数赋值, 采用基于云推理^[14]的灌区灌溉制度制定模型计算出不同典型年的灌溉制度, 以灌区现状年的种植类型作为各典型年的种植结构, 通过计算得出灌区不同典型年逐时段的需水^[15,16], 其中 50% 平水年、75% 枯水年和 95% 特枯水年的年内逐月需水过程如图 1 所示。

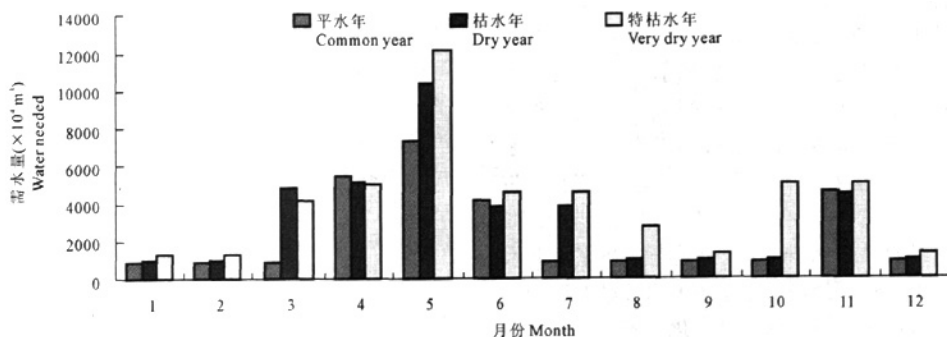


图 1 再生水灌区不同典型年需水过程

Fig. 1 Process of water needed for recycled water irrigation district

根据上文制定的供需平衡模型、供水秩序模型以及水资源公平分配模型, 通过计算机模拟技术^[17,18]构建调度计算模拟系统^[19], 见图 2。首先读取灌区信息及决策目标, 再根据制定的运行规则进行模拟计算, 计算以计算机为主要工具, 对计算结果的合理性进行识别判断以决定是否输出。以枯水年灌区水资源的调度研究为例, 通过制定的枯水年灌溉制度计算出枯水年逐时段的需水过程, 根据以上

配水模型通过计算机模拟计算得出多水源的调度结果。程序计算以旬为单位时段, 表 1、2 中以月为单位进行结果统计, 但地表总存水如果能以一个月中三个旬的地表总存水量叠加后的结果给出就明显是错误的, 为反映全年调度计算中地表水的变化过程, 故以每月的下旬地表总存水量作为显示结果, 75% 枯水年与 95% 特枯水年调度结果如表 1、表 2 所示。

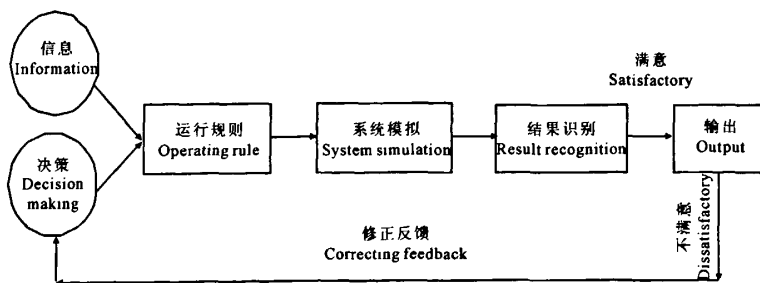


图 2 系统模拟模型

Fig. 2 The simulate model of system

其中在灌区现状种植结构和蓄水能力条件下, 不同典型年在对再生水的利用过程中均出现了不同程度的弃水。特枯水年全调度期内没有弃水, 枯水年在 9 月下旬以及 10 月上、中、下旬产生弃水, 平水年在 8 月下旬、9 月、10 月上、中、下旬产生弃水, 丰

水年在 2 月、7 月、8 月、9 月和 10 月的上、中、下旬以及 11 月上旬产生弃水, 联合调度结果比较切合实际, 反映了灌区的实际情况。4 个典型年主要调度结果如表 3 所示。

表 1 枯水年再生水灌区水资源联合调度方案(×10⁴ m³)

Table 1 The united dispatching scheme for reclaimed water irrigation district at dry year

时段 Month	总需水 Total water requirement	再生水供水 Reclaimed water supply	地表水供水 Surface water supply	地下水供水 Groundwater supply	再生、地表和 地下总供水 Total water supply	地表总存水 (每月下旬) Surface water storage	总弃水 Total surplus water
1 月 Jan.	1032.24	1032.24	0	0	1032.24	1668.97	0
2 月 Feb.	1032.24	1032.24	0	0	1032.24	1769.67	0
3 月 Mar.	4772.86	4772.86	0	0	4772.86	26.92	0
4 月 Apr.	5240.44	1150.16	145.64	3934.64	5240.44	127.92	0
5 月 May	10383.79	2354.78	789.2	7239.81	10383.79	0	0
6 月 June	3837.70	1452.02	419.79	1965.89	3837.70	419.79	0
7 月 July	3837.70	3837.70	0	0	3837.70	35.75	0
8 月 Aug.	1032.24	1032.24	0	0	1032.24	1437.69	0
9 月 Sep.	1032.24	1032.24	0	0	1032.24	1938.90	437.60
10 月 Oct.	1032.24	1032.24	0	0	1032.24	1940	576.76
11 月 Nov.	4772.86	1636.88	1659.93	1476.05	4772.86	639.16	0
12 月 Dec.	1032.24	1032.24	0	0	1032.24	1092.03	0

表 2 特枯水年再生水灌区水资源联合调度方案(×10⁴ m³)

Table 2 The united dispatching scheme for reclaimed water irrigation district at special dry year

时段 Month	总需水 Total water requirement	再生水供水 Reclaimed water supply	地表水供水 Surface water supply	地下水供水 Groundwater supply	再生、地表和 地下总供水 Total water supply	地表总存水 (每月下旬) Surface water storage	总弃水 Total surplus water
1 月 Jan.	1335.66	1335.66	0	0	1335.66	1455.67	0
2 月 Feb.	1335.66	1335.66	0	0	1335.66	1482.11	0
3 月 Mar.	4141.13	1450.24	861.71	1829.18	4141.13	10.94	0
4 月 Apr.	5076.28	1282.52	63.57	3730.19	5076.28	54.96	0
5 月 May	12089.95	2440.43	607.34	9042.18	12089.95	0	0
6 月 June	4608.71	1639.28	303.61	2665.82	4608.71	303.61	0
7 月 July	4608.71	1758.82	834.78	2015.11	4608.71	11.24	0
8 月 Aug.	2738.39	1895.97	11.24	831.18	2738.39	941.33	0
9 月 Sep.	1335.66	1335.66	0	0	1335.66	1605.77	0
10 月 Oct.	5076.28	1990.57	1665.95	1419.76	5076.28	680.8	0
11 月 Nov.	5076.28	1845.95	1122.56	2107.77	5076.28	29.48	0
12 月 Dec.	1335.66	1335.66	0	0	1335.66	689.76	0

表 3 典型年调度结果(×10⁴ m³)

Table 3 The dispatching results of typical years

年型 Type of year	总需水 Total water requirement	再生水供水 Reclaimed water supply	地下水供水 Groundwater supply	地表水供水 Surface water supply	弃水量 Quantity of surplus water
95%特枯水年 Very dry year	48758.37	19646.42	21626.08	7485.87	0
75%枯水年 Dry year	38859.08	21397.84	14616.39	2844.85	1014.36
50%平水年 Common year	29029.40	13461.25	11928.83	3639.32	1777.80
25%丰水年 Wet year	21336.72	10154.99	7262.05	3919.68	3235.10

3 结 论

1) 本论文提出了再生水灌区水资源联合调度

的数学模型,通过计算机模拟技术得出了典型年再生水灌区水资源联合调度方案。其中,地下水开采量最低只占灌溉总需水的 34.04%,有效缓解地下

水过量开采的严峻形势,灌区水资源实现可持续利用。同时通过联合调度,将灌区灌溉保证率提高到了 95%,进一步保障了农业生产需水,这种多水源联合调度方法对同类型灌区的生产运行具有参考价值。

2) 除特枯水年外,各典型年再生水的利用率均不足 100%,出现了不同程度的弃水,25% 丰水年弃水量更是达到 3 235.1 万 m^3 。说明如需充分利用再生水,应对灌区调蓄工程进行改造。

参考文献:

- [1] Jasem M Alhumoud, Haider S Behbehani, et al. Wastewater reuse practices in Kuwait[J]. The Environmentalist, 2003, 23: 117—126.
- [2] 吴文勇,刘洪禄,郝仲勇,等.再生水灌溉技术研究现状与展望[J].农业工程学报,2008,24(5):302—306.
- [3] Brenner A, Shandalov S, Messalem R, et al. Water[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2000, 123: 167—182.
- [4] 何星海,马世豪.再生水地下调蓄利用与准则研究[J].给水排水,2005,31(3):29—32.
- [5] 高鸿伟,伍靖伟,段小亮,等.地下水位对河套灌区生态环境的影响[J].干旱区资源与环境,2008,22(4):134—138.
- [6] 岳卫峰,杨金忠,童菊秀,等.干旱地区灌区水盐运移及平衡分析[J].水利学报,2008,39(5):623—626.
- [7] 姜开鹏.建设生态灌区的思考[J].中国农村水利水电,2004, (2): 4—10.
- [8] 张光连.北京市再生水综合利用规划研究[D].北京:中国农业大学,2005.
- [9] 宋松柏,蔡焕杰.区域水利院可持续利用的综合评价方法[J].水科学进展,2005,16(2):245—249.
- [10] 童昌华,马秋燕,魏昌华.水资源管理与可持续发展[J].水土保持学报,2003,17(6):100—105.
- [11] 谭乐彦.山东半岛水资源供需平衡及保障对策研究[D].南京:河海大学,2006.
- [12] 王少波.面向用水户的水资源合理配置研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [13] 赵丹,邵东国,刘丙军.灌区水资源优化配置方法及应用[J].农业工程学报,2004,20(4):96—100.
- [14] 柴福鑫,邱林,解新民.灌区水资源实时优化调度[J].水利学报,2007,33(6):710—716.
- [15] 张兵,袁寿其,成立,等.基于 L-M 优化算法的 BP 神经网络的作物需水量预测模型[J].农业工程学报,2004,20(6): 73—76.
- [16] 陈晓楠,段春青,邱林,等.基于云推理模型在灌区中长期灌溉制度制定中的应用[J].系统工程理论与实践,2008, 11: 610—616.
- [17] 张丽.基于供需平衡的灌区水资源合理配置研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [18] 叶瑜,陆继平.灌区信息管理系统解决方案初探[J].水利水文自动化,2008,(4):30—33.
- [19] 陈静,刘小学,魏晓妹,等.基于 GIS 的灌区水资源管理系统研发[J].水土保持研究,2007,14(4):69—73.

The research on rational distribution of water resources in reclaimed water irrigation district of Beijing

XU Xiao-yuan¹, FANG Wei-min¹, HUANG Qiang¹, WANG Yi-min¹, WU Wen-yong², LIU Hong-lu²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: Choosing reclaimed water irrigation district in Beijing as the researched object, the combined dispatching of reclaimed water, surface water and groundwater is studied. Binding with the theory of systematic analysis, it presents a mathematical model for united dispatching of multi water resources. Using the method of dynamic analysis, the distribution schemes are achieved for the water resources in the irrigation district of each typical year. The results show that the groundwater supply amounts to 216.1608 million m^3 in very dry year, 146.1639 million m^3 in dry year, 119.2883 million m^3 in common year and 72.6205 million m^3 in wet year, while the proportion of groundwater for total irrigation water is only 44.35%, 37.61%, 41.09% and 34.04%, respectively. It shows that through united dispatching we can effectively relieve the serious situation of over-exploitation of groundwater and improve the irrigation guarantee rate, and the dispatching model is scientific and feasible.

Keywords: reclaimed water; irrigation district; united dispatching; groundwater; irrigation guarantee rate