

# 新疆白杨河流域水资源的优化配置

张桂林<sup>1</sup>, 马亮<sup>1</sup>, 唐晓宇<sup>1</sup>, 陈新全<sup>2</sup>, 吕倩<sup>2</sup>

(1.新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆白杨河流域管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** [目的] 针对新疆白杨河流域存在供需用水矛盾、地下水超采、生态用水量被挤占等问题, 对该流域进行水资源优化配置, 为新疆白杨河流域经济健康发展及水资源分配提供合理依据。[方法] 运用水资源综合评价模型对新疆白杨河流域、达坂城区、托克逊县水资源承载力进行分析, 建立以缺水量最小、经济效益最大、公平性最优为目标函数的多目标模型, 采用第二代非支配排序算法(NSGA-II)对多目标模型求解, 获得理论最优配水方案。[结果] 新疆白杨河流域综合评价指数为 1.0; 规划年(2030 年)水资源优化配置后, 相对于 ARIMA 模型预测结果和计划配水方案用水量分别减少 23.7% 和 9.9%, 而 GDP 分别增加 10.5% 和降低 1.4%, 流域配水公平性由差距悬殊到绝对平均。[结论] 新疆白杨河流域水资源目前处于濒临超载和轻度不协调状态; 水资源优化配置方案能够实现地区的水资源高效利用及合理配置。

**关键词:** 水资源; 综合评价模型; 多目标优化模型; 水资源规划; 白杨河流域

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2021)03-0173-08

**中图分类号:** TV213.9, TV213.4

**文献参数:** 张桂林, 马亮, 唐晓宇, 等. 新疆白杨河流域水资源的优化配置[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 173-180. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20210512.001; Zhang Guilin, Ma Liang, Tang Xiaoyu, et al. Optimal allocation of water resources in Baiyang River basin in Xinjiang Wei Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 173-180.

## Optimal Allocation of Water Resources in Baiyang River Basin in Xinjiang Wei Autonomous Region

Zhang Guilin<sup>1</sup>, Ma Liang<sup>1</sup>, Tang Xiaoyu<sup>1</sup>, Chen Xinquan<sup>2</sup>, Lü Qian<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Baiyanghe River Basin Management Bureau, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

**Abstract:** [Objective] The conflicts between water supply and demand, overexploitation of groundwater, and ecological water consumption in the Baiyang River basin in Xinjiang Wei Autonomous Region was evaluated, and the water supply areas of the basin were taken as the research objects to optimize the allocation of water resources for the basin in order to provide a reasonable basis for the healthy development of the economy and the allocation of water resources. [Methods] A comprehensive evaluation model of water resources was used to analyze the water resource carrying capacity of the Baiyang River basin, Daban District, and Tuokexun County. Thus, a multi-objective function model providing for the smallest water shortage, the largest economic benefit, and the best fairness was established. A second-generation non-dominated sorting algorithm (NSGA-II) was used to solve the problem. Through the optimization of the results, the optimal water distribution plan was obtained. [Results] The comprehensive evaluation index of the Baiyang River basin was 1.0. After the planning year (2030) when the allocation of water resources was optimized, water consumption decreased by 23.7% (compared with the predicted results of the ARIMA model) and 9.9% (compared with the planned water distribution plan), and GDP increased by 10.5% and decreased by 1.4% respectively. The fairness of water distribution in the basin changed from a wide variation to an absolute average. [Conclusion] The water resources of the Baiyang River basin are currently on the verge being

收稿日期: 2020-11-19

修回日期: 2021-01-19

资助项目: 新疆白杨河流域管理局“白杨河流域“河长制”工作制度及考核机制研究”

第一作者: 张桂林(1996—), 男(汉族), 河南省周口市扶沟县人, 硕士研究生, 研究方向为水资源管理。Email: 1651230641@qq.com。

通讯作者: 马亮(1980—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区石河子市人, 博士, 副教授, 主要从事农田节水灌溉研究工作。Email: xjmliang@xjau.edu.cn。

overloaded and slightly uncoordinated. Optimal allocation of water resources could produce the efficient use and reasonable allocation of regional water resources.

**Keywords:** water resource; comprehensive evaluation; multi-objective optimization; water resources planning; Baiyang River basin

水资源是区域人口、经济、资源和环境协调发展的重要支撑和保障<sup>[1]</sup>。随着社会经济的发展、人口的增加以及人们生活质量的不断提高,对水资源的需求逐渐增长,水资源短缺成为中国可持续发展的重要限制因素<sup>[2]</sup>。近年来新疆白杨河流域出现地下水超采、上下游用水矛盾、生态用水被挤占等现象,引起河流沿岸植被稀疏、形成局部地下水漏斗区、地面沉陷。如何实现新疆白杨河流域水资源的合理利用与社会经济发展需求相结合具有重要的现实意义。

地区水资源优化配置是解决水资源问题的主要途径,当下主要通过多目标模型进行水资源优化配置,它遵循可持续性、公平性、优先保证生态和生活用水、用水效益最大化、开源与节流并重原则,其目标是追求整体效益最优<sup>[3-6]</sup>。贺北方等<sup>[7]</sup>建立供水效益最大、污染排放量最小、缺水最小的区域多目标水资源优化配置模型。王宏伟<sup>[8]</sup>构建以经济、社会、生态环境为目标函数的多目标水资源优化配置模型用来解决西宁市用水效率问题。徐光泉等<sup>[9]</sup>建立资源、经济、环境多目标地下水管理模型,主要从经济效益、环境污染等角度得到适合地区发展的配水方案。以上 3 个水资源优化配置方案缺乏对地区配水公平性的考虑,容易造成不同地区间的引水矛盾。武鹏飞<sup>[10]</sup>将经济效益、社会效益、环境效益 3 个目标函数转换为单目标的形式,计算邯郸市最优配水方案。丁超等<sup>[11]</sup>为实现包头市的经济规模最大、用水量最小化以及 COD 排放的最小化为目标进行水资源优化配置,通过对当地 GDP 分析,选取最优配水方案。于凤存等<sup>[12]</sup>建立以缺水量最小与抽水量最小为目标函数的多目标优化调度模型,通过主观权重和客观权重相结合的方式,得到南水北调东线工程调水方案。现有的多目标水资源优化配置方案大多是选择多目标解集中的一个解或者通过加权的方式把多目标模型转为单目标形式,这种水资源优化方案受初始值和主观因素的影响,存在一定的局限性。

本文以缺水量最小、经济效益最大、公平性最优 3 个目标函数建立水资源多目标优化配置模型,采用 NSGA-II 算法对多目标模型进行求解,把缺水量根据每种配水方案对应的不同万元产值用水量这个指标换算成 GDP<sub>缺</sub>,寻找新疆白杨河流域整体 GDP<sub>总</sub> 的增长率大于公平性增长率临界点,从客观的角度得到该流域水资源最优配水方案,避免受初始值和主观因

素的影响,这对新疆白杨河流域的社会发展和地区稳定具有重要的意义。

## 1 新疆白杨河水资源现状分析

### 1.1 数据来源

本研究以 2018 年为现状年,对新疆白杨河流域规划年进行水资源优化配置。该流域的经济、用水量、耕地面积等各项有关数据来源于历年乌鲁木齐年鉴、新疆年鉴、吐鲁番年鉴、新疆白杨河流域规划。

### 1.2 新疆白杨河流域水资源概述

新疆白杨河流域发源于东天山支脉博格达山南坡,系阿拉沟支流,属艾丁湖水系,由上游乌鲁木齐市达坂城区的黑沟、阿克苏河、高崖子河等山沟汇集而成,从北向南依次经过上游达坂城区和下游托克逊县,同时也是两地主要的地表水来源。图 1 为新疆白杨河流域主要河流水系分布。

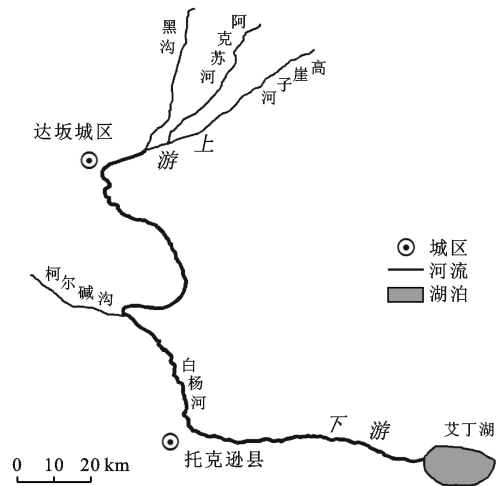


图 1 新疆白杨河流域水系分布

根据新疆白杨河流域水资源规划,2018 年新疆白杨河流域地表水资源量为  $2.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,地下水资源可开采量为  $9.55 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,第一产业用水量为  $3.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,第二产业用水量为  $2.01 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,第三产业用水量为  $3.01 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,生活用水量为  $4.75 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,生态用水量为  $3.45 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,地下水开采量为  $1.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,开采系数为 1.4,大于允许开采系数上限 1.2,属于严重超采<sup>[13]</sup>。

### 1.3 流域水资源承载力分析

水资源承载力作为流域水资源的基本度量,是衡量一个地区可持续发展的决定性指标<sup>[14]</sup>,有助于水

资源的合理利用,并促进地区的可持续发展<sup>[15]</sup>。从宏观、综合两个方面构建水资源承载力综合评价模型,选择:人均用水量,供水模数,产水模数,水资源开发利用效率,人口密度,城镇化水平,人口自然增长率,生活用水定额,人均GDP,GDP增长率,第三产业比重,农业产值密度,农田灌溉用水率,工业用水率,生态环境用水率,人均用水量,万元GDP用水量,单位

面积粮食产量,万元农业增加值用水量共19个评价指标,通过熵权法计算指标权重,运用水资源综合评价模型对地区承载力进行计算,得到新疆白杨河流域和达坂城区水资源承载力处于濒临超载,且水资源利用处于轻度不协调,托克逊县水资源处于轻度超载和水资源短缺状态。新疆白杨河流域、达坂城区、托克逊县水资源承载力评价结果见表1。

表1 新疆白杨河流域水资源承载力评价结果

区域	人口压力指数	经济压力指数	承载压力指数	协调指数	综合评价指数	承载等级	承载状态
白杨河流域	0.4	0.9	3.1	0.5	1.0	濒临超载	水资源轻度不协调
达坂城区	0.3	0.7	3.3	0.5	0.9	濒临超载	水资源轻度不协调
托克逊县	0.5	1.0	4.2	0.5	1.2	轻度超载	水资源短缺

注:①人均水资源下限取 $1\ 000\ \text{m}^3$ <sup>[2]</sup>;②濒临超载、水资源轻度不协调(0.8~1.2),轻度超载、水资源短缺(1.2~1.5)<sup>[15]</sup>。

#### 1.4 流域水资源利用存在的问题

新疆白杨河流域虽然在加强节水设施的建设,但是长期形成的用水结构性矛盾和粗放型用水方式还没有得到根本转变<sup>[11]</sup>,依然存在地下水超采、生态用水被挤占等现象,其主要原因如下。

(1) 农业用水比例过大,灌溉水利用效率低。2018年流域农业用水 $3.11 \times 10^8\ \text{m}^3$ ,占流域总用水量的87.4%,流域灌水利用系数为0.53,低于全疆平均灌溉水利用系数0.55<sup>[16]</sup>。

(2) 新疆白杨河流域存在严重的用水矛盾。上游达坂城区引用地表水过多,导致下游托克逊县大量开采地下水和挤占生态用水,托克逊地区生态用水占地区供水量的3.1%,远低于生态最佳需水量16%<sup>[17]</sup>。

## 2 水资源多目标优化配置模型

### 2.1 构建模型

多目标规划是数学规划的一个分支,用于研究多个目标函数在给定区域上的最优化<sup>[18]</sup>,主要研究在一定区域范围内多个目标的最优方案,广泛用于解决社会经济快速发展与资源短缺之间的矛盾。

2.1.1 决策变量 为反应新疆白杨河流域总用水量、经济效益、配水公平性的情况。本文选择第一产业、第二产业、第三产业、生活及生态的用水量作为决策变量。

2.1.2 建立目标函数 新疆白杨河流域水资源优化配置要兼顾资源、经济、社会、生态等多个属性,由于该流域出现水资源承载力濒临超载,因此,以缺水最小作为流域水资源优化配置的一个目标。经济效益是保证该地区可持续发展的基本条件,用来指导水资源优化配置。目前流域水资源分配处于差距悬殊

状态,配水公平性也是该流域水资源优化配置的主要指标,流域配水公平性计算常用基尼系数(CINI)表示。因此,建立以缺水量最小、经济效益最大、配水公平性最优3个目标函数的多目标优化配置模型。

(1) 缺水量最小。

$$\min f_{1(x)} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^5 x_{ij} - Q_3 \quad (1)$$

式中: $x_{ij}$ 为第*i*个区(县)第*j*个部门的用水量;*i*为区县,取值1及2分别表示达坂城区和托克逊县,*j*取值1—5分别表示第一产业、第二产业、第三产业、生活、生态(全文*i*和*j*意义相同); $Q_3$ 为流域供水量。

(2) 经济效益最大。

$$\max f_{2(x)} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \text{GDP}_{ij} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 (x_{ij}/w_{ij}) \quad (2)$$

式中: $\text{GDP}_{ij}$ 为第*i*个区(县)第*j*个部门产值; $w_{ij}$ 为第*i*个区(县)第*j*个部门万元产值用水量。

(3) 公平性最优。

$$\begin{cases} \min f_{3(x)} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^5 \frac{|x_{ij} - x_{i'j}|}{2n^2 \mu_i} \\ \min f_{3(x)} = m + f + l + t + s \end{cases} \quad (3)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{i'=1}^2 \left| \frac{x_{i1}}{A_{i1}} - \frac{x_{i'1}}{A_{i'1}} \right|}{2n^2 \times \frac{x_{11} + x_{21}}{A_{11} + A_{21}}}$$

$$f = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{i'=1}^2 \left| \frac{x_{i2}}{\text{GDP}_{i2}} - \frac{x_{i'2}}{\text{GDP}_{i'2}} \right|}{2n^2 \times \frac{x_{12} + x_{22}}{\text{GDP}_{12} + \text{GDP}_{22}}}$$

$$l = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{i'=1}^2 \left| \frac{x_{i3}}{\text{GDP}_{i3}} - \frac{x_{i'3}}{\text{GDP}_{i'3}} \right|}{2n^2 \times \frac{x_{13} + x_{23}}{\text{GDP}_{13} + \text{GDP}_{23}}}$$

$$t = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{i'=1}^2 \left| \frac{x_{i4} - x_{i'4}}{P_i - P_{i'}} \right|}{2n^2 \times \frac{x_{14} + x_{24}}{P_1 + P_2}}$$

$$s = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{i'=1}^2 \left| \frac{x_{i5} - x_{i'5}}{A_{i5} - A_{i'5}} \right|}{2n^2 \times \frac{x_{15} + x_{25}}{A_{15} + A_{25}}}$$

部门间配水公平性系数:0 表示绝对公平;0.2 以下视为绝对平均;0.2~0.3 视为比较平均;0.3~0.4 视为收入相对合理;0.4~0.5 视为差距较大;0.5 以上视为差距悬殊;1 表示绝对不公平<sup>[19]</sup>。

$$\text{GDP}_{11\min}^{2030} + \text{GDP}_{21\min}^{2030} \leq \text{GDP}_{11} + \text{GDP}_{21} \leq \text{GDP}_{11\max}^{2030} + \text{GDP}_{21\max}^{2030}$$

$$\text{GDP}_{12\min}^{2030} + \text{GDP}_{22\min}^{2030} \leq \text{GDP}_{12} + \text{GDP}_{22} \leq \text{GDP}_{12\max}^{2030} + \text{GDP}_{22\max}^{2030} \quad (6)$$

$$\text{GDP}_{13\min}^{2030} + \text{GDP}_{23\min}^{2030} \leq \text{GDP}_{13} + \text{GDP}_{23} \leq \text{GDP}_{13\max}^{2030} + \text{GDP}_{23\max}^{2030}$$

公式(4)~(6)中: $Q_{1\text{redline}}$  为达坂城区供水总量红线; $Q_{2\text{redline}}$  为托克逊县供水总量红线; $x_{5\text{redline}}$  为流域生态供水下限; $x_{4\text{redline}}$  为流域生活供水下限; $\text{GDP}_{\min}$  为产值下限; $\text{GDP}_{\max}$  为产值上限。

## 2.2 参数计算方法

(1) 生活用水下限  $x_{i4\text{redline}}$ 。

$$x_{i4\text{redline}} = p^{i1} \cdot q_1 + p^{i2} \cdot q_2 \quad (7)$$

式中: $P^{i1}, P^{i2}$  为第  $i$  个区(县)的城镇和农村人口; $q_1, q_2$  为城镇和农村人口单日用水量[L/(人·d)]。

(2) 产值上下限的确定  $\text{GDP}_{ij\max}, \text{GDP}_{ij\min}$  和  $\text{GDP}_{ij}$ 。

ARIMA 模型对地区产值的预测已经得到广泛的应用,如赵莉等<sup>[20]</sup>运用 ARIMA 模型对梅龙镇未来 3 a 的生产总值进行预测,预测结果与梅龙镇经济现状趋势相符。龚国勇<sup>[21]</sup>运用 ARIMA 模型对深圳生产总值进行预测,发现 ARIMA 模型对非平稳时间序列具有很好的预测效果。因此,本文选择 ARIMA 模型对流域各地区产值进行预测,通过查阅年鉴得到长序列达坂城区和托克逊县各产业产值,选择 95% 的置信区间对各个行业产值进行预测得到规划年的  $\text{GDP}_{ij\min}, \text{GDP}_{ij\max}$  和  $\text{GDP}_{ij}$ 。

(3) 万元产值的确定  $\omega_{ij}$ 。

第一产业万元产值

$$\omega_{i1} = \frac{10\ 000}{[\text{GDP}_{i1}/(x_{i1} \times \eta_0) \times (1 + R_{i1})^m] \times \eta_m} \quad (8)$$

式中: $\text{GDP}_{i1}/(x_{i1} \times \eta_0)$  为第  $i$  个区(县)第一产业  $1\ \text{m}^3$  净用水量的产值; $\eta_0$  为现状年灌溉水利用系数; $\eta_m$  为规划年灌溉水利用系数; $R_{i1}$  为  $\text{GDP}_{i1}/(x_{i1} \times \eta_0)$  平均每年增长率; $m$  为规划年据现状年年限。

式中: $m, f, l, t, s$  分别表示为第一产业、第二产业、第三产业、生活、生态 GINI 系数; $i, i'$  代表达坂城区和托克逊县; $A_{i1}$  为第  $i$  个区(县)农业灌溉面积; $A_{i2}$  为第  $i$  个区(县)生态灌溉面积; $P_1$  为达坂城区人口; $P_2$  为托克逊县人口; $n$  为地区个数。

### 2.1.3 约束条件

(1) 水量约束。

$$\sum_{j=1}^5 x_{1j} \leq Q_{1\text{redline}}^{2030}, \quad \sum_{j=1}^5 x_{2j} \leq Q_{2\text{redline}}^{2030} \quad (4)$$

$$x_{15} + x_{25} \geq x_{5\text{redline}}^{2030}, \quad x_{14} + x_{24} \geq x_{4\text{redline}}^{2030} \quad (5)$$

(2) 经济约束。

第二、三产业万元产值

$$\omega_{ij} = \frac{10\ 000}{\text{GDP}_{ij}/x_{ij} \times (1 + R_{ij})^m} \quad (9)$$

式中: $\text{GDP}_{ij}/x_{ij}$  为第  $i$  个区(县)第二或第三产业  $1\ \text{m}^3$  净用水量的产值; $R_{ij}$  为  $\text{GDP}_{ij}/x_{ij}$  平均每年增长率; $m$  为规划年据现状年的年限。

### 2.3 求解方法

(1) 运用 NSGA-II 对多目标模型求解。传统的多目标选用评价函数法、互交法等进行求解<sup>[22]</sup>,易陷入局部最优,而不能达到全局最优,因此,本研究引入 NSGA-II 算法对优化模型进行求解。1994 年 Deb 和 Srinivas<sup>[23]</sup>提出非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA),该算法解决了早熟收敛的问题。2002 年 Deb 等<sup>[24]</sup>提出快速非支配排序算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II),该算法在原 NSGA 算法的基础上引入精英策略,提高算法速度。本文选择运用 NSGA-II 算法对缺水量最小、经济效益最大、公平性最优 3 个目标函数求解。

(2) 结果优化。计算出  $n$  个非劣解方案得  $n$  个万元产值用水量  $\omega_a$ 。

$$\omega_a = Q_a / \text{GDP}_a \quad (a = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

式(10)中: $\omega_a, Q_a, \text{GDP}_a$  分别表示流域第  $a$  种配水方案整体万元产值用水量、总用水量、总产值。

把每个方案的缺水量  $Q_{a\text{缺}}$  换算成 GDP,计算每个公平性对应得整个流域得  $\text{GDP}_{a\text{总}}$ 。

$$\text{GDP}_{a\text{总}} = \text{GDP}_a - Q_{a\text{缺}} / \omega_a \quad (11)$$

式中: $\text{GDP}_{a\text{总}}$  为在用水总量确定条件下,流域第  $a$  种

配水方案总产值;  $Q_{a缺}$  为流域第  $a$  种配水方案水量。

把每个方案中的流域总资产  $GDP_{总}$  和公平性做成散点图,选择一个主观认为的最优点,我们记为  $B_1$ ,将点  $B_1$  与散点图上所有的点连接形成  $(B_{x2} - B_{x1}) / (B_{y2} - B_{y1})$ ,  $(B_{x3} - B_{x1}) / (B_{y3} - B_{y1})$ , ...,  $(B_{xn} - B_{x1}) / (B_{yn} - B_{y1})$  (只分析大于 0) 的斜率,寻找与  $B_1$  连接斜率最小的点,我们记为第 2 个最优点  $B_2$ ,然后再让  $B_2$  重复  $B_1$  的步骤,一次类推,最终找出一个最优点,它的前一个最优点斜率小于 1,后一个最优点斜率大于 1,此点代表 GDP 的增长率大于公平性增长率临界点,我们记做  $B_x$ ,通过此点的公平性系数找到 NSGA-II 解集中的最优配水方案。

### 3 结果与分析

#### 3.1 确定各项指标参数

(1) 确定规划年流域各产业 GDP 范围。以 1978—2018 年达坂城区和托克逊县的第一产业、第二产业、第三产业为基础数据,运用 ARIMA 模型,取 95% 的置信区间对规划年的各产业 GDP 进行预测,确定规划年流域各产业产值的上下限:第一产业产值 [12.2, 23.4], 第二产业产值 [170.3, 224.6], 第三产业产值 [59.9, 82.4]。

(2) 水资源多目标优化配置模型中的主要变量和相关数据估计。根据上文计算方法和相关资料的查阅,确定各产业用水量指标。详细数据见表 2。

表 2 新疆白杨河流域现状年和规划年各产业用水量指标

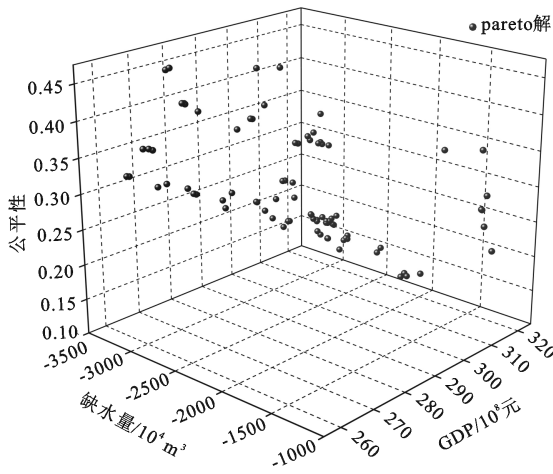
用水量指标	现状年		规划年计划方案		
	达坂城	托克逊	用水量指标	达坂城	托克逊
第一产业用水/ $10^4 m^3$	9 346.0	21 742.0	第一产业用水/ $10^4 m^3$	6 808.8	13 557.7
第二产业用水/ $10^4 m^3$	284.0	1 721.0	第二产业用水/ $10^4 m^3$	870	1 913.6
第三产业用水/ $10^4 m^3$	125.0	176.0	第三产业用水/ $10^4 m^3$	249.9	421.9
生活用水/ $10^4 m^3$	132.0	343.0	生活用水/ $10^4 m^3$	256.6	538.6
生态用水/ $10^4 m^3$	2 750.0	697.0	生态用水/ $10^4 m^3$	2 159.7	2 085.2
耕地面积/ $hm^2$	7 666.7	17 733.4	供水量/ $10^4 m^3$	10 345	18 517
生态面积/ $hm^2$	2 866.7	4 666.69	城市人口数/ $10^8$	7.7	5.9
供水量/ $10^4 m^3$	9 945.0	22 910.0	农村人口数/ $10^8$	1.0	4.8
第一产业产值/ $10^8$ 元	1.7	10.4	灌溉水利用系数	0.5	0.7
第二产业产值/ $10^8$ 元	14.7	56.7	规划年预测结果		
第三产业产值/ $10^8$ 元	10.1	17.0	第一产业万元用水量/ $m^3$	3 087.2	1 143.0
城市人口数/ $10^8$	1.1	4.8	第二产业万元用水量/ $m^3$	8.3	20.5
农村人口数/ $10^8$	2.2	7.2	第三产业万元用水量/ $m^3$	7.4	5.0
城市人口用水定额[L/(人·d)]	120.0		第一产业产值/ $10^8$ 元	1.5	10.6
农村人口用水定额[L/(人·d)]	80.0		第二产业产值/ $10^8$ 元	95.4	128.3
灌溉水利用系数	0.4	0.6	第三产业产值/ $10^8$ 元	39.1	41.4

#### 3.2 模型求解

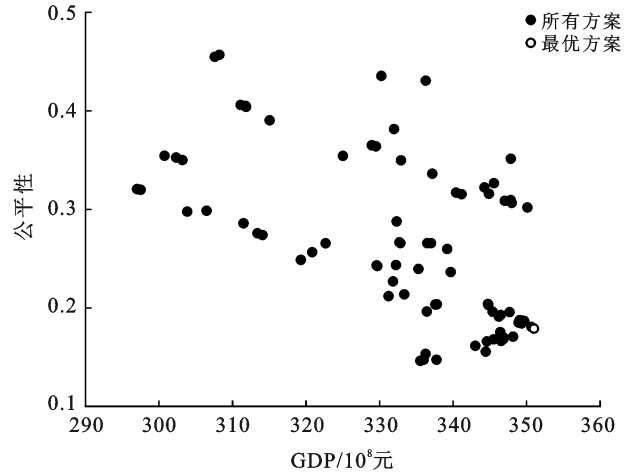
根据 ARIMA 模型对规划年第一、二、三产业 GDP 的预测,通过万元产值用水量计算各产业用水,计算结果见表 3。新疆白杨河流域配水处于差距悬殊状态,在规划年流域预测用水量与计划用水量相比增加  $5.23 \times 10^7 m^3$ , GDP 减少  $3.44 \times 10^9$  元,未来水资源将会严重影响新疆白杨河流域的经济发展和社会稳定,为使规划年能够达到原计划方案的经济效益,同时减少流域用水,增加地区配水公平性,现需要对规划年新疆白杨河流域水资源进行优化配置。

构建以缺水量最小、经济效益最大、公平性最优为目标函数的多目标模型,对新疆白杨河流域水资源进行优化配置,采用 NSGA-II 算法对多目标模型

进行求解,结果见图 2a,把缺水量根据每种配水方案对应的不同万元产值用水量这个指标换算成  $GDP_{缺}$ ,得到多组  $GDP_{总}$  和公平性的方案,运用 Origin 描绘散点图,见图 2b,寻找  $GDP_{总}$  增长率大于公平性系数增长率的临界点,最终确定规划年最佳配水方案为  $B_x$  点,根据得到的公平性系数结合 pareto 解集找到适合新疆白杨河流域发展的配水方案。多目标水资源优化配置后,流域用水量相对原计划方案减少  $2.84 \times 10^7 m^3$ , GDP 接近计划产值,配水公平性由差距悬殊提高到绝对平均,流域用水得到满足,用水结构均衡,提高了地区水资源利用效率,保证了生态用水。规划年新疆白杨河流域水资源预测结果和优化配置方案见表 3。



a 规划年多目标模型ASGA-II求解图



b 规划年公平性与GDP散点图

图 2 白杨河流域规划年多目标求解图

表 3 白杨河流域规划年 ARIMA 模型预测与多目标优化配置结果

地区	指标	用水量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )		GDP/(10 <sup>8</sup> 元)	
		预测配水方案	多目标优化配水方案	预测配水方案	多目标优化配水方案
达坂城区	第一产业	7 540.1	4 610.4	2.4	1.5
	第二产业	476.8	790.1	57.6	95.4
	第三产业	172.7	291.2	23.2	39.1
	生活	516.1	481.0	—	—
	生态	3 084.0	1 567.8	—	—
	小计	11 789.7	7 740.5	83.2	136.1
	计划	10 345	10 345	133.9	133.9
	余水量	-1 444.7	2 604.5	-50.7	2.2
托克逊县	第一产业	17 495.8	12 169.7	15.3	10.7
	第二产业	2 866.6	2 629.3	139.9	128.3
	第三产业	241.6	208.7	47.9	41.4
	生活	532.0	587.7	—	—
	生态	1 162.0	2 682.5	—	—
	小计	22 298.0	18 277.8	203.1	180.4
	计划	18 517.0	18 517	186.9	186.9
	余水量	-3 781.0	239.2	16.2	-6.5
白杨河流域	第一产业	25 035.9	12 169.7	17.7	10.7
	第二产业	3 343.4	2 629.3	197.5	128.3
	第三产业	414.3	208.7	71.1	41.4
	生活	1 048.1	587.7	—	—
	生态	4 246	2 682.5	—	—
	小计	34 087.7	26 018.3	286.3	316.4
	计划	28 862	28 862	320.8	320.8
	配水公平性	0.7	0.2	—	—
余水量	-5 225.7	2 843.7	-34.5	-4.4	

注:①小计表示白杨河流域、达坂城区、托克逊县各部门用水量或产值总和;②计划表示新疆白杨河流域规划年原计划方案的用水量和产值;③余水量表示预测方案或优化配置方案的用水量和产值减去计划配水方案的用水量和产值。

### 3.3 新疆白杨河流域水资源优化配置分析

本次研究包括流域规划年 ARIMA 模型预测配水方案和多目标模型优化配水方案以及原计划配水方案从用水量、经济效益和配水公平性进行对比分析,得到如下结果。

(1) 用水量分析。由图 3a 可知,多目标模型求解得到的水资源优化配置方案较于 ARIMA 模型,新疆白杨河流域、达坂城区、托克逊县用水总量减少  $8.07 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $4.05 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $4.02 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。其中流域第一产业用水量减少了  $8.26 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,第二产业

用水量增加了  $7.60 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 第三产业用水量增加  $8.56 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。水资源优化配置后流域、达坂城区、托克逊县生态用水占比为 20.0%, 14.7%, 16.3%, 流域各地区生态用水得到了保证。由图 3b 可知, 流域、达坂城区、托克逊县的预测用水量在规划年超过原计划

用水量  $5.23 \times 10^7, 3.78 \times 10^7, 1.44 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 通过多目标模型水资源优化配置与计划配水方案相比, 用水量减少  $2.84 \times 10^7, 2.60 \times 10^7, 2.39 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 优化后的配水方案对新疆白杨河流域的水资源利用、减少地下水开采和保护生态环境具有重要的意义。

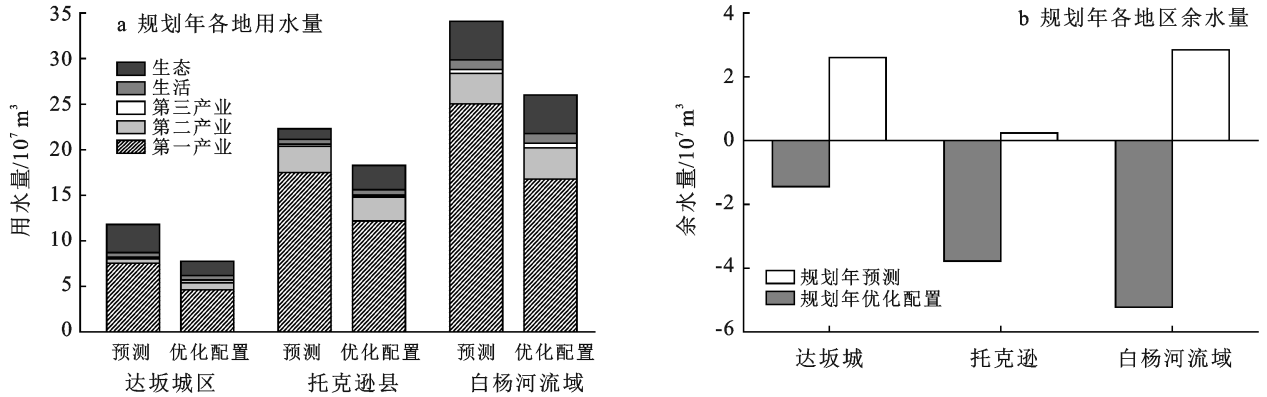


图 3 不同条件下各地区用水量变化特征

(2) 经济效益分析。由图 4a 可知, 规划年多目标水资源优化配置方案相对于 ARIMA 预测结果, 流域、达坂城区、托克逊县 GDP 增加  $3.00 \times 10^9$  元、增加  $5.28 \times 10^9$  元、减少  $2.28 \times 10^9$  元。预测结果显示第一产业 GDP 占比为 6.2%, 第二产业 GDP 占比为 69.0%, 结合图 3 发现第一产业用水占比为 73.4%, 第二产业用水占比为 9.8%, 表明流域在规划年可能出现水资源利用不协调的现象。

水资源优化配置后第一产业 GDP 占比 3.9%, 用水量占比 64.5%, 第二产业 GDP 占比 70.7%, 用水量占比 13.1%, 缓解了流域水资源利用不合理的现象。由图 4b 可知, 流域、达坂城区、托克逊县的预测 GDP 在规划年低于计划产值  $5.07 \times 10^9, 1.62 \times 10^9, 3.44 \times 10^9$  元。多目标模型水资源优化配置后, 流域 GDP 产值与计划产值的误差在 2% 范围内, 基本达到计划经济。

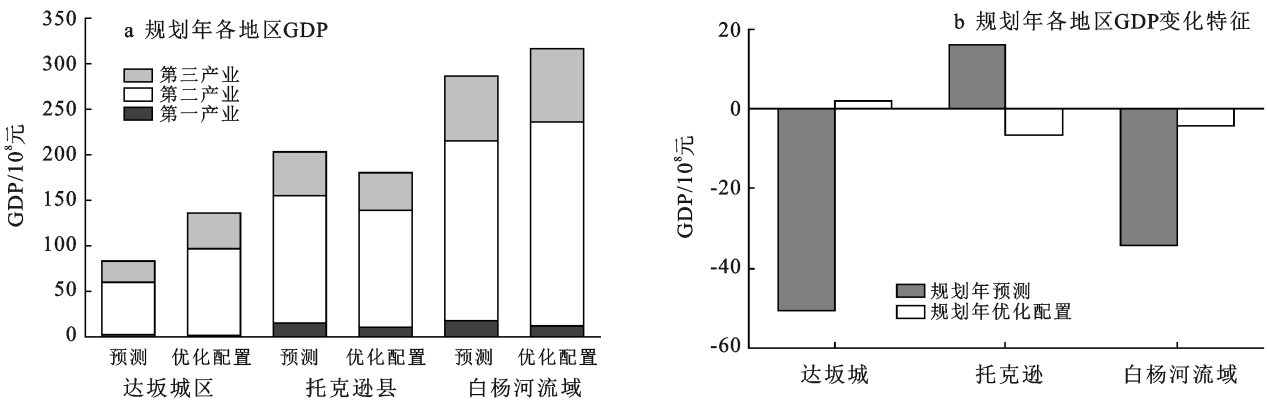


图 4 不同条件下各地区 GDP 变化特征

(3) 公平性。将各配水方案代入式(3)中, 计算流域配水公平性。结果显示: 2018 年流域实际配水方案、规划年原计划配水方案、预测配水方案公平性系数分别为 0.8, 0.6, 0.7, 远超过最大允许配水公平性

系数  $0.5^{[19]}$ , 表明现状年和规划年该流域水资源分配差距悬殊, 容易引起地区用水矛盾。多目标水资源优化配置后, 规划年的公平性系数为 0.2, 流域水资源分配差距缩小, 达到绝对平均。配水公平性结果见表 4。

表 4 流域配水公平性评价结果

2018 年		规划年计划方案		规划年预测方案		规划年多目标优化方案	
公平性系数	配水公平程度	公平性系数	配水公平程度	公平性系数	配水公平程度	公平性系数	配水公平程度
0.8	差距悬殊	0.6	差距悬殊	0.7	差距悬殊	0.2	绝对平均

## 4 结论

以 2018 年新疆白杨河流域水资源数据为基础,对新疆白杨河流域进行水资源承载力评价及优化配置,得到如下结论。

(1) 当下新疆白杨河流域和达坂城区处于水资源濒临超载和轻度不协调,托克逊县水资源出现轻度超载和水资源短缺现象。

(2) 水资源优化配置后,流域用水量为  $2.60 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,GDP 为  $3.16 \times 10^{10}$  元,相较于 ARIMA 预测结果用水量减少  $8.07 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,GDP 增加  $3.00 \times 10^9$  元,配水公平性由差距悬殊提高到绝对平均。相较于原计划方案,用水量减少了  $2.84 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,经济效益基本相同,配水公平性由差距悬殊提高到绝对平均。

(3) 结合多目标水资源优化配置方案可得,未来达坂城区重在发展第二产业和第三产业,在保证农业产品需求的条件下,主要减少农业耕地面积的同时提高灌溉水利用系数。托克逊县重在发展第一、三产业,提高灌溉水利用系数的同时根据本地特色发展旅游业。

多目标水资源优化配水结果远优于预测和计划配水方案,将水资源合理均衡的分配与社会经济发展相结合,有利于流域各地区之间的稳定发展。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 朱法君, 邹扬明. 浙江省各地市水资源压力指数评价[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(9): 14-16, 28.
- [2] 夏富强, 唐宏, 杨德刚, 等. 绿洲城市水资源压力及其对城市发展的影响: 以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区地理, 2014, 37(2): 380-387.
- [3] 黄曼丽, 张健, 丁大发, 等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置研究[J]. 人民长江, 2008, 39(6): 29-32.
- [4] 雷霄. 基于多目标规划的杨凌示范区水资源优化配置[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(4): 96-100, 103.
- [5] 朱成涛. 区域多目标水资源优化配置研究[D]. 江苏南京: 河海大学, 2006.
- [6] 吴泽宁, 索丽生. 水资源优化配置研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 1-5.
- [7] 贺北方, 周丽, 马细霞, 等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置模型[J]. 水电能源科学, 2002(3): 10-12, 71.
- [8] 王宏伟, 张鑫, 邱俊楠, 等. 基于多目标遗传算法的西宁市

水资源优化配置研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 150-153.

- [9] 许光泉, 胡友彪, 邵景力, 等. 多目标规划在长垣西部地区水资源管理中应用[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 419-423.
- [10] 武鹏飞. 邯郸东部地区多水源优化配置研究[J]. 水利科技与经济, 2017, 23(2): 58-63.
- [11] 丁超, 胡永江, 王振华, 等. 水资源约束条件下包头市产业结构调整与水资源优化配置研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 674-684.
- [12] 于凤存, 方国华, 王文杰, 等. 基于多目标遗传算法的南水北调东线工程湖泊群优化调度研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 78-85.
- [13] 师幸生. 太原市地下水资源开发利用程度分析[J]. 中国水利, 2008(13): 33-34, 52.
- [14] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269.
- [15] 夏玮静, 王宁练, 沈月. 基于流域的陕西省水资源承载力研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 602-611.
- [16] 张娜. 提高新疆灌溉水利用系数的探讨[J]. 水资源开发与管理, 2020, 18(5): 65-69.
- [17] 占车生, 夏军, 丰华丽, 等. 河流生态系统合理生态用水比例的确定[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005(2): 121-124.
- [18] 张妍, 郭萍, 张帆. 黑河中游农业水资源多目标优化配置[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5): 185-192.
- [19] Yang Gaiqiang, Guo Ping, Huo Lijuan, et al. Optimization of the irrigation water resources for Shijin irrigation district in North China [J]. Agricultural Water Management, 2015, 158: 82-98.
- [20] 赵莉, 王广仲. 基于 ARIMA 模型的经济预测分析: 以梅龙镇为例[J]. 现代商业, 2018(31): 77-79.
- [21] 龚国勇. ARIMA 模型在深圳 GDP 预测中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(4): 53-57.
- [22] 乔辰, 张国立. 几何加权法求解多目标规划问题[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 107-110.
- [23] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [24] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.