

多维度指标下灌区灌溉用水动态测算方法研究

马建强

新疆维吾尔自治区白杨河流域水利管理中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年4月9日; 录用日期: 2026年4月22日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

为实现灌区水资源总量控制与定额管理精细化、智慧化, 提升农业灌溉用水管理水平, 本文以新疆典型灌区为研究对象, 构建基于毛灌溉引用水量、毛灌溉用水定额、灌溉面积与累计灌溉面积、累计轮灌水次数、引用毛水量计量水费、灌溉水利用系数6个核心维度的灌溉用水测算体系。通过梳理灌区各级输水(渠或管)层级关系, 融合量测水监测设施与灌溉用水智能算法, 建立灌区各级(渠或管)输水及灌溉用水动态调控计算公式, 并以代表性灌区为案例开展了实证分析。结果表明, 该测算体系可实时表征灌区灌溉用水进度, 精准识别超量引水与节水运行状态, 超引水情景下灌溉水利用系数较目标值下降0.47个百分点, 节水情景下提升0.32个百分点。研究构建的量化表征方案与动态调控方法, 可为灌区灌溉水资源科学配置、高效利用与精细化管理提供技术支撑。

关键词

灌区, 总量控制, 定额管理, 灌溉指标, 测算方法, 用水管理方案

Research on Dynamic Measurement Methods for Irrigation Water in Irrigation Districts under Multi-Dimensional Indicators

Jianqiang Ma

White Poplar River Basin Water Resources Management Center, Urumqi Xinjiang

Received: April 9, 2026; accepted: April 22, 2026; published: June 29, 2026

Abstract

To achieve refined and intelligent management of water resource quotas and total control in irrigation districts, and to enhance the level of agricultural irrigation water management, this study focuses on a typical irrigation district in Xinjiang. It establishes an irrigation water measurement system based on

作者简介: 马建强(1988-), 男, 工程师, 主要从事水利工程及水文水资源管理工作, Email: 945799472@qq.com

文章引用: 马建强. 多维度指标下灌区灌溉用水动态测算方法研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(3): 295-305.

DOI: 10.12677/jwrr.2026.153033

six core dimensions: gross irrigation water intake, gross irrigation water quota, irrigation area and cumulative irrigation area, cumulative rotation irrigation times, water fee calculation based on gross water intake, and irrigation water utilization coefficient. By analyzing the hierarchical relationships of water conveyance (canals or pipelines) at various levels in the irrigation district, and integrating water monitoring facilities with intelligent irrigation algorithms, the study develops dynamic regulation calculation formulas for water conveyance and irrigation water usage at all levels (canals or pipelines). A case study was conducted in a representative irrigation district. The results show that this measurement system can characterize the progress of irrigation water usage in real time and accurately identify over-irrigation and water-saving operational states. Under over-irrigation scenarios, the irrigation water utilization coefficient decreases by 0.47 percentage points compared to the target value, while it increases by 0.32 percentage points under water-saving scenarios. The quantitative characterization approach and dynamic regulation methods developed in this study provide technical support for the scientific allocation, efficient utilization, and refined management of irrigation water resources in irrigation districts.

Keywords

Irrigation District, Total Quantity Control, Quota Management, Irrigation Indicators, Calculation Method, Water Management Plan

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源短缺与利用效率提升是影响区域农业高质量发展的重要因素[1], 新疆灌区降水稀少、蒸发强烈, 农业用水量占总用水量 90%以上, 灌溉用水科学管理利用关系到区域水生态安全可持续发展[2] [3]。随着实施最严格水资源管理制度的深入推进, 以总量控制、定额管理为核心的灌溉用水管控模式成为灌区智慧水利建设的重要方向[4]。当前灌区用水管理存在指标体系不够健全、水量测算精度不足、动态调控能力薄弱等问题, 传统灌溉用水管理难以满足实时监测、精准计量、量化考核的需求。近年来, 基于量测水智能化、灌溉水利用效率精准计算等智慧灌区技术为灌区用水全过程管理提供了技术基础[5] [6]。诸多研究围绕灌溉定额制定、渠系水利用系数测算、灌溉制度优化等展开, 但多聚焦单一指标或局部环节, 缺乏多维度指标耦合与全流程动态测算方法[7]-[10]。本文基于新疆灌区地理与农业用水特征, 构建涵盖 6 项核心指标的灌溉用水测算体系, 融合智能监测数据与算法, 建立可量化、可操作、可动态调控的用水管理方案, 并通过典型灌区算例验证方法适用性, 为智慧灌溉、水资源优化配置与高效利用提供技术参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

新疆地处我国西部[11]东经 73°40'~96°23', 北纬 34°25'~49°10', 具有“三山夹二盆”、洪积冲积平原、山间盆地、荒漠戈壁等广泛多样性地理环境特征。全区年均气温 10.4℃, 年均降水 150 mm, 潜在蒸发量 1500~3000 mm, 降水稀少、蒸发强烈、气候干旱、生态脆弱, 是典型的干旱灌溉农业区[12]。农业用水量占用水总量的 91%以上, 其中 95%为农业灌溉用水[13]; 耕地园林灌溉面积 810.87 万 hm^2 , 已占可开垦土地面积[14] 883.73 万 hm^2 的 91.8%。农业灌溉是新疆各业用水大户, 推进灌区用水总量控制定额管理优化配置、农业高效节水灌溉技术发展、提升灌区智慧灌溉用水管理水平是新疆农业高质量发展的必由之路。

2.2. 研究方法

2.2.1. 技术路径

本研究依据灌区各节点布设的量测水监测传感器关键参数，基于灌区用水管理技术指标结合内嵌智能分析算法(图 1)，统筹实现农业灌区智慧灌溉用水管理。

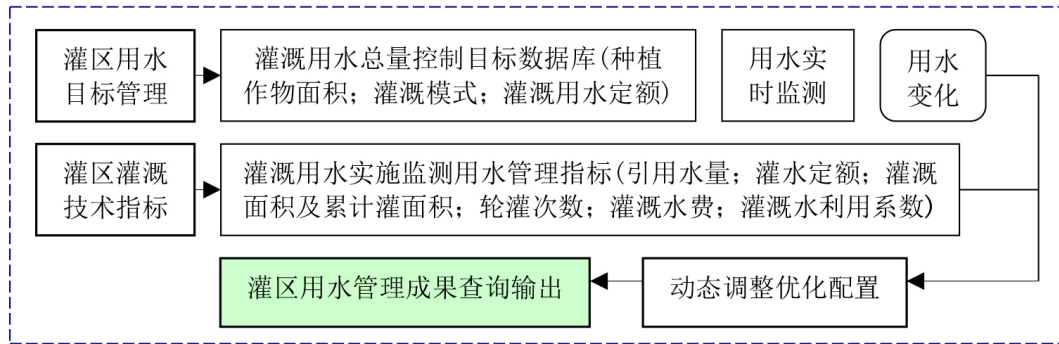


图 1. 灌区智慧灌溉用水技术路径

2.2.2. 灌区灌溉信息建立

灌区灌溉用水工程主要为干、支、斗、农(渠或管道)供水及其关联的灌溉面积、作物种类、不同灌溉模式(自流灌或滴灌或喷灌)，渠首引水、水库水、扬水站、井水、井渠混合多种引输水方式构成灌区。灌溉信息系统主要内容为：1) 灌溉系统要素：水源工程类型位置及供水方式；各级输水工程分布长度、分水节点、分水节点量水设施及地理坐标位置；不同灌溉模式(自流灌或滴灌或喷灌等)。2) 灌溉系统数据：灌区总灌溉面积及各级输水工程分布的灌溉面积；灌区总播种作物面积及各级输水工程分布的播种作物面积。灌溉面积与播种作物面积关系(图 2)：当年灌区所有灌溉面积均已播种，播种作物面积等于灌区总灌溉面积。灌区播种作物面积小于灌区总灌溉面积，说明灌区存在未种植农田(可能为：弃耕地、休耕地、其它)。灌区播种作物面积大于灌区总灌溉面积，说明灌区统计面积存在错误。

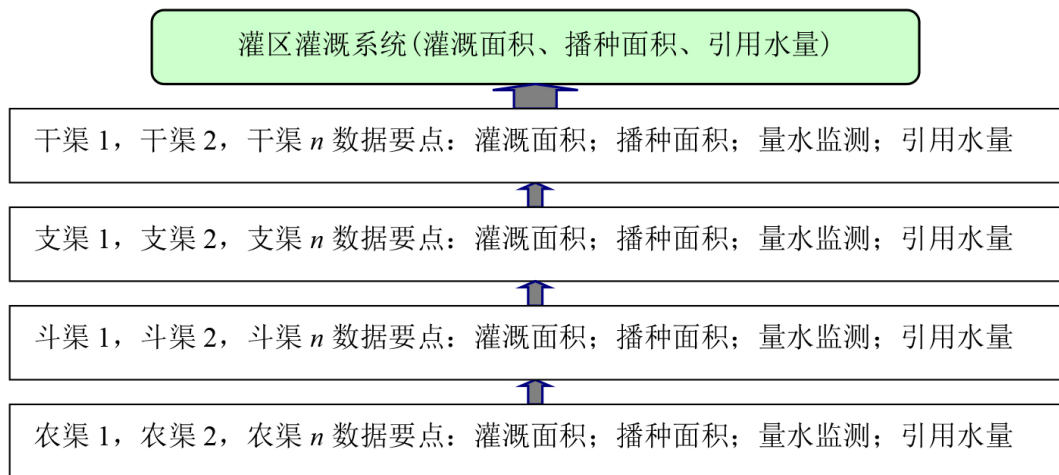


图 2. 灌区地理信息要素层级关系

2.2.3. 灌区智慧用水管理建设

基于智能化量水监测技术，构建灌区智慧用水管理系统，实现灌区水资源“总量控制、定额管理”目标下，灌溉制度、用水指标、动态调度、合理配置用水管理技术路径(图 3)。灌区水源有河道渠首引水、水库引水、泵

站引提水、电井提水、井渠混合等单一或多引水工程并存灌区。对于直接引用水源,无论灌溉工程引用水量大小,均认为是引用毛水量,例如,单纯井灌虽然提水量小,井出水节点即为灌区首部引用毛水量。对于灌区井渠混合抽水注入斗渠(一般为斗渠)补充灌溉,则该井抽水量是斗渠水量,并非渠首毛水量。对于水源工程同时存在,河道渠首、水库放水、客水水源等引用水现象,本灌区毛引用水量包括:河道渠首引水量 + 水库坝后放水量 + 客水水源引水。灌区引用毛水量的监测水量、灌区面积,是灌区运行过程总水量和总灌溉面积,即各分灌区水量和灌溉面积累计。不可重复或减少计算。

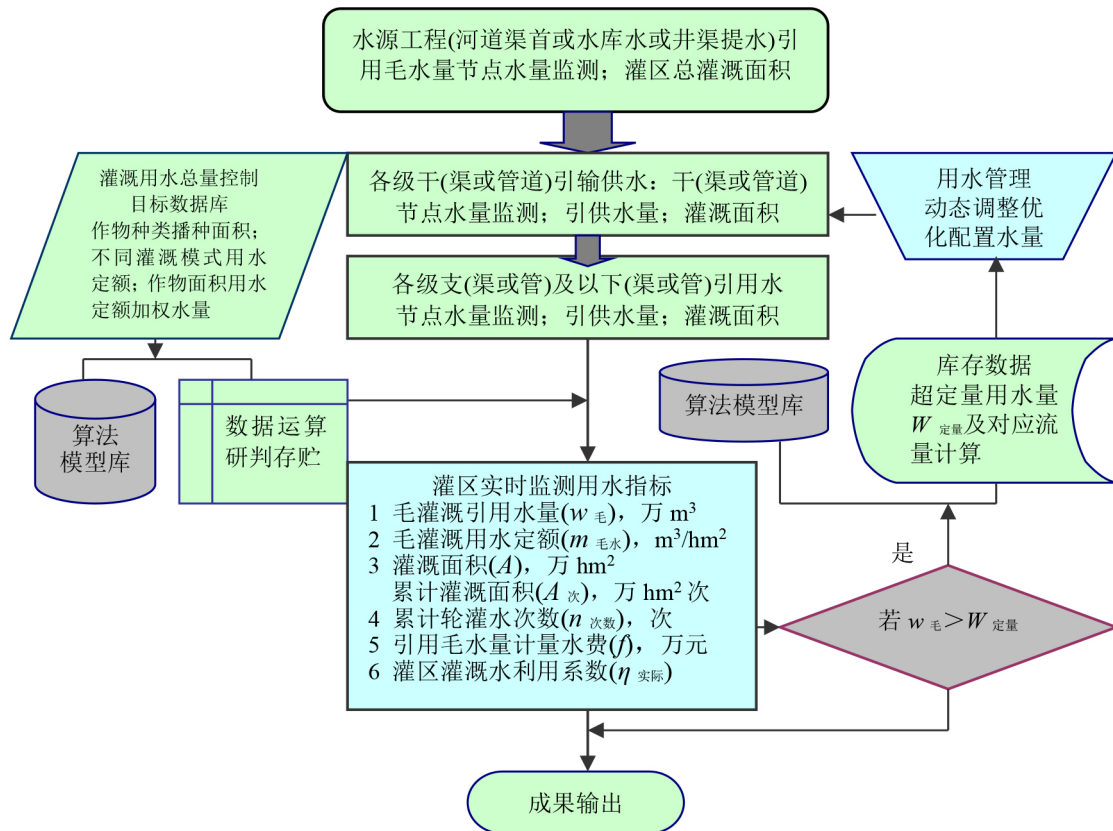


图 3. 灌区智慧用水管理技术路径

2.2.4. 灌溉量水监测分布及其用水关系算法

灌区各级(渠或管道)和量水监测分布,包括多水源工程取水(渠首引水、库水引水、泵站提水、区域外客水引水)直接引入各级干(渠或管道),也有位于灌区内干支(渠或管道)以下斗(渠或管道)部位的机电井作为水源,抽取井水直接注入斗渠(“井渠混合”),进入农田灌溉用水。按照各级引输水(渠或管道)及各分水节点安装布设量水设施(自动发送监测参数信息),研究分析基于智慧灌区的用水管理指标算法。

1、引供配水节点水量计算

灌区各级(渠或管道)供配分水节点安装智能量水设施,自动生成输水过程过水断面单位时间流量及水量算式:

$$w = QT/10000 \tag{1}$$

式中, w ——输水各节点首部、干、支、斗、农(渠或管道)供配水量, 万 m^3 ;

Q ——输水各节点首部、干、支、斗、农(渠或管道)平均流量, m^3/s ;

T ——输水各节点首部、干、支、斗、农(渠或管道)供配水时间, s 。

2、各级(渠或管道)输水利用系数

灌区各级不同(渠或管道)输水利用系数算式:

$$\eta_{干\sim农} = Q_x / Q = \omega / w \quad (2)$$

式中, $\eta_{干\sim农}$ 为干、支、斗、农(渠或管道)各级输水利用系数; Q_x 、 ω 分别为该级输水(渠或管道)下游节点过水断面流量或水量, m^3/s 、 $万 m^3$; Q 、 w 分别为该级输水(渠或管道)上游节点过水断面流量或水量, m^3/s 、 $万 m^3$ 。

3、首部引水至田间灌溉水利用系数

灌区灌溉水利用系数, 表征从灌区首部引输水经各级输配水(渠或管道)至田间, 为作物利用水量的程度, 算式:

$$\begin{aligned} \eta_{灌溉} &= \eta_{干} \cdot \eta_{支} \cdot \eta_{斗} \cdot \eta_{农} \cdot \eta_{田} \\ &= w_{净} / w_{毛} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)灌区净灌溉用水量 $w_{净}$, 先计算灌区单位面积综合净灌溉定额 $M_{综}$:

$$M_{综} = \frac{\sum_i^N M_i \cdot A_i}{A} \quad (4)$$

$$w_{净} = M_{综} \cdot A \quad (5)$$

式中, $\eta_{干}$ 、 $\eta_{支}$ 、 $\eta_{斗}$ 、 $\eta_{农}$ 、 $\eta_{田}$ 分别为干、支、斗、农(渠或管道)输水和田间水利用系数; $w_{净}$ 、 $w_{毛}$ 分别为净灌溉用水量、毛灌溉用水量, $万 m^3$; $M_{综}$ 、 M_i 分别为综合净灌溉定额及第 i 种作物净灌溉定额 m^3/hm^2 ; A_i 为灌区种植的第 i 种作物实灌面积, $万 hm^2$; $W_{定量} = M_{综} \cdot A / \eta_{目标}$ 为灌区作物种类数; A 为灌区实际灌溉面积, $万 hm^2$ 。

4、灌区用水目标管理动态调整配置

以灌区灌溉水利用系数($\eta_{目标}$)为考核目标, 采用灌溉用水定额标准, 形成灌区定量控制引用毛灌溉水量($W_{定量}$), 因此, 灌区用水过程之中, 超量引用毛水量($W_{超量}$)或节省引用毛水量($W_{节省}$), 关联灌区的流量($Q_{超量}$ 或 $Q_{节省}$)、灌区实际灌溉水利用系数($\eta_{实际}$), 计算式:

$$W_{定量} = M_{综} \cdot A / \eta_{目标} \quad (6)$$

当灌区灌溉用水

$$w_{毛} > W_{定量} \quad (7)$$

表明灌区多引用了毛水量 $W_{超量}$:

$$W_{超量} = w_{毛} - W_{定量} \quad (7-1)$$

多引用的毛流量 $Q_{超量}$:

$$Q_{超量} = W_{超量} / 8.64 \quad (7-2)$$

当灌区灌溉用水

$$w_{毛} < W_{定量} \quad (8)$$

表明灌区节省引用了毛水量 $W_{节省}$:

$$W_{节省} = w_{毛} - W_{定量} \quad (8-1)$$

节省引用的毛流量 $Q_{节省}$:

$$Q_{节省} = W_{节省} / 8.64 \quad (8-2)$$

灌区实际灌溉水利用系数状态, 算式:

$$\eta_{\text{实际}} = w_{\text{净水量}} / W_{\text{毛水量}} \quad (9)$$

由于灌区田间净灌溉用水量难以实时监测，本文采用目标定额反算法估算实时的灌溉水利用系数，算式：

$$\eta_{\text{实际}} = W_{\text{定量}} \cdot \eta_{\text{目标}} / W_{\text{毛水量}} \quad (9-1)$$

式中， $\eta_{\text{目标}}$ 为灌区农田灌溉水利用系数考核目标值； $\eta_{\text{实际}}$ 为灌区灌溉水利用系数状态； $W_{\text{超量}}$ 、 $W_{\text{节省}}$ 分别为灌区多引用或节省引用毛水量，万 m^3 ； $Q_{\text{超量}}$ 、 $Q_{\text{节省}}$ 分别为灌区多引用或节省引用流量， m^3/s ；其它符号意义同上。

2.2.5. 灌区用水动态管理 6 项技术指标分析算式

1、累计毛灌溉引用水量($w_{\text{毛}}$)

由灌区渠首或干(渠或管道)智能量测水设备实时监测传送引输水量，获取累计毛灌溉用水量，万 m^3 。灌区定量控制引用毛灌溉水量($W_{\text{定量}}$)，按式(6)~(8)计算。

控制额度，定量控制引用毛灌溉水量的毛灌溉用水量占比，计算式：

$$k_{\text{毛灌}} (\pm\%) = \frac{w_{\text{毛}}}{W_{\text{定量}}} \cdot 100 \quad (10)$$

2、毛灌溉用水定额($m_{\text{毛水}}$)，计算式：

$$m_{\text{毛水}} = \frac{k_{\text{毛灌}}}{100} \cdot \frac{M_{\text{综}}}{\eta_{\text{目标}}} \quad (11)$$

3、灌溉面积(A)、累计灌溉面积($A_{\text{亩次}}$)，计算式：

$$A_{\text{次}} = \frac{k_{\text{毛灌}}}{100} \cdot N_{\text{综}} \cdot A \quad (12)$$

式(12)灌区综合作物轮灌水次数 $N_{\text{综}}$ ：

$$N_{\text{综}} = \frac{\sum_i^n N_i \cdot A_i}{A} \quad (12-1)$$

4、累计轮灌水次数($n_{\text{次数}}$)，计算式：

$$n_{\text{次数}} = \frac{k_{\text{毛灌}}}{100} \cdot N_{\text{综}} \quad (13)$$

5、引用毛水量计量水费($f_{\text{水费}}$)，计算式：

$$f_{\text{水费}} = w_{\text{毛}} F_{\text{水价}} \quad (14)$$

式中， $k_{\text{毛灌}}$ 为定量控制毛灌溉用水量占比，%； $N_{\text{综}}$ 、 N_i 分别为灌区综合作物轮灌水次数、第 i 种作物全生长期灌水次数[15]，次； A_i 为灌区种植的第 i 种作物实灌面积，万 hm^2 ； n 为灌区作物种类数； A 为灌区实际灌溉面积，万 hm^2 ； $F_{\text{水价}}$ 为统一折算至引水首部或干(渠或管道)进口计量点单方水价，元/ m^3 ；其它符号意义同前。

6、灌区灌溉水利用系数($\eta_{\text{实际}}$)

灌区用水运行灌溉水利用系数状态，按式(9-1)计算。

3. 结果与分析

3.1. 灌区灌溉用水指标动态分析布设

监测灌区灌溉用水过程 6 项技术指标分析内容，主要基于灌区定量控制目标，以实时进度、超引用水量和节省用水量反映灌区水资源合理配置用水效果(图 4)。

用水管理技术指标	定量控制目标	实时进度		超引用水量			节省引用水		
		数量	定量控制指标占比 k (%)	水量 $W_{\text{超量}}$ (万 m^3)	流量 $Q_{\text{超量}}$ (m^3/s)	标 向 $\uparrow$	水量 $W_{\text{超量}}$ (万 m^3)	流量 $Q_{\text{超量}}$ (m^3/s)	标 向 $\downarrow$
用水起止时间(年-月-日)		1 毛灌溉引用水量($w_{\text{毛}}$), 万 m^3 ; 2 毛灌溉用水定额($m_{\text{毛水}}$), m^3/hm^2 ; 3 灌溉面积(A), 万 hm^2 累计灌溉面积($A_{\text{次}}$), 万 hm^2 次; 4 累计轮灌水次数($n_{\text{次数}}$), 次; 5 引用毛水量计量水费(f), 万元; 6 灌区灌溉水利用系数($\eta_{\text{实际}}$)							

图 4. 灌区用水技术指标动态显示格式

3.2. 灌区灌溉用水管理分析算例

3.2.1. 基础数字信息

1、灌区规模作物面积

新疆三屯河流域某灌区由河流渠首引水、库水干渠引输水灌溉工程，灌溉面积 1.243 万 hm^2 (灌区内有井提水注入斗渠补充灌溉)。其中：渠首引水干渠控灌面积 0.882 万 hm^2 ，库水引水干渠控灌面积 0.361 万 hm^2 。据水利农业部门资料，河流渠首引水灌区滴灌面积 98.11%，仅有 1.89% 林地为畦灌。灌区种植 11 种作物：冬小麦、春小麦、玉米、棉花、葵花、籽用葫芦、番茄、西甜瓜、苜蓿、葡萄、林地。库水灌区灌溉面积均为多种作物滴灌无林地。

2、灌区定量控制目标

当灌区种植作物和灌溉面积以及灌溉水利用系数目标值 $\eta_{\text{目标}}$ 已确定情况下，则灌区全年灌溉用水定量控制指标从当地农业灌溉用水定额标准经相关计算获得，遵循“水资源总量控制定额管理”目标，对灌区用水管理各项指标实时动态判别优化配置。对定量控制目标计算赋值为：灌区灌溉面积 $A=1.243$ (渠首引水控灌 0.882 万 hm^2 ，库水控灌 0.361 万 hm^2)。灌区灌溉水利用系数考核目标 $\eta_{\text{目标}}=0.7035$ 。依据新疆农业灌溉定额(DB65/T 3611-2023)，由式(4)、式(5)、式(6)、式(12-1)计算，可以得到单位面积综合净灌溉定额 $M_{\text{综}}$ 、综合作物轮灌水次数 $N_{\text{综}}$ 参数(表 1)，河流渠首、库水引水干渠技术指标分别为：河流渠首引水干渠种植面积 0.882 万 hm^2 ，净灌溉定额 $M_{\text{综}}=3709 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，田间净灌溉用水量 $w_{\text{净}}=3270.950$ 万 m^3 ，轮灌水次数 $n_{\text{次数}}=8.76$ 次。库水引水干渠种植面积 0.361 万 hm^2 ，净灌溉定额 $M_{\text{综}}=3656 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，田间净灌溉用水量 $w_{\text{净}}=1321.038$ 万 m^3 ，轮灌水次数 $n_{\text{次数}}=8.84$ 次。

表 1. 灌区净灌溉定额、田间净灌溉用水量、综合轮灌水次数结果

作物种类	渠首引水干渠				库水引水干渠				灌溉 方式
	种植面积 $A/\text{万 hm}^2$	净灌溉定额 $M_{\text{综}}$ /(m^3/hm^2)	田间净灌溉用水 量 $w_{\text{净}}/\text{万 m}^3$	轮灌水次 数 $n_{\text{次数}}$	种植面积 A /万 hm^2	净灌溉定额 $M_{\text{综}}$ /(m^3/hm^2)	田间净灌溉用 水量 $w_{\text{净}}/\text{万 m}^3$	轮灌水 次数 $n_{\text{次数}}$	
冬小麦	0.233	3900	910.000	8.7	0.090	3900	350.220	8.7	滴灌
春小麦	0.107	3000	320.000	6.7	0.037	3000	112.000	6.7	滴灌
玉米	0.067	3900	260.000	8.7	0.030	3900	117.000	8.7	滴灌
棉花	0.100	3900	390.000	8.7	0.041	3900	161.200	8.7	滴灌
葵花	0.153	3600	552.000	9.6	0.043	3600	156.000	9.6	滴灌
籽用葫芦	0.074	3450	255.300	9.2	0.062	3450	213.900	9.2	滴灌
番茄	0.058	3750	217.500	10.0	0.022	3750	82.500	10.0	滴灌
西甜瓜	0.022	3525	77.550	9.4	0.023	3525	82.250	9.4	滴灌
苜蓿	0.037	3690	135.300	9.8	0.009	3690	32.718	9.8	滴灌

续表

葡萄	0.015	3975	58.300	8.8	0.003	3975	13.250	8.8	滴灌
林地	0.017	5700	95.000	6.3					畦灌
各灌区	0.882	3709	3270.950	8.76	0.361	3656	1321.038	8.84	
全灌区	1.243	3693	4591.988	8.78					

全灌区灌溉面积 1.243 万 hm^2 ，净灌溉定额 $M_{\text{综}} = 3693 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ；田间净灌溉用水量 $w_{\text{净}} = 4591.988 \text{ 万 m}^3$ ；轮灌水次数 $N_{\text{次数}} = 8.78 \text{ 次}$ 。由此获得灌区灌溉用水 6 项技术指标的定量控制目标参数(表 2)。

表 2. 灌区灌溉用水定量控制目标参数

用水管理技术指标	定量控制目标	算法
1、毛灌溉引用水量($w_{\text{毛}}$)	6525.088 (万 m^3)	式(6)计算: $W_{\text{定量}} = M_{\text{综}} \cdot A / \eta_{\text{目标}}$ $3693 \times 1.243 / 0.7035$
2、毛灌溉用水定额($m_{\text{毛水}}$)	5249.467 (m^3/hm^2)	计算式: $m_{\text{毛水}} = M_{\text{综}} / \eta_{\text{目标}}$ $3693 / 0.7035$
3、灌溉面积(A)累计灌溉面积($A_{\text{次}}$)	1.243 (万 hm^2)	当年灌区确认作物种植及灌溉面积
	10.913 (万 $\text{hm}^2 \text{ 次}$)	计算式: $A_{\text{次}} = N_{\text{综}} A 8.78 \times 1.243$
4、累计轮灌水次数($n_{\text{次数}}$)	8.78 (次)	由表 1 中计算得
5、引用毛水量计量水费($f_{\text{水费}}$)	326.254 (万元)	式(14)计算: $f_{\text{水费}} = w_{\text{毛}} F_{\text{水价}}$ 干渠计量点水价 0.05 元/ m^3 , $6525.088 \times 0.05 \text{ 元}/\text{m}^3$
6、灌区灌溉水利用系数(η)	0.7035	灌区灌溉水利用系数考核目标

3.2.2. 灌区用水指标实时动态信息表征

1、用水实时动态进度

由灌区用水实时进度指标(表 3)分析，可以通过技术指标实时把握灌区 2025 年 04 月 25 日至 05 月 15 日用水时段灌溉用水运行状态。

表 3. 灌区用水实时动态进度

灌溉用水起始时间：2025 年 04 月 25 日；截止时间：2025 年 05 月 15 日					
用水管理技术指标	定量控制目标	实时进度		算法	
		数量	定量控制指标占比 k (%)		
编号		(2)	(3)		
1、毛灌溉引用水量(万 m^3)	6525.088	1045.333	16.02	(2) = 灌区引输水(渠首、干渠)智能量测水设备实时监测传送累计毛用水量。 (3)采用式(10)计算: $k_{\text{毛灌}}(\pm\%) = \frac{w_{\text{毛}}}{W_{\text{定量}}} \cdot 100$ $(1045.333 / 6525.088) \times 100$ (2)采用式(11)计算: $m_{\text{毛水}} = \frac{k_{\text{毛灌}}}{100} \cdot \frac{M_{\text{综}}}{\eta_{\text{目标}}}$ $5249.467 \times (16.02 / 100)$	
2、毛灌溉用水定额(m^3/hm^2)	5249.467	840.96	-		

续表

3、灌溉面积(万 hm ²)累计灌溉面积(万 hm ² 次)	1.243	1.243	-	(2)采用式(12)计算:
	10.913	1.748	-	$A_{\text{次}} = \frac{k_{\text{毛灌}}}{100} \cdot N_{\text{综}} \cdot A$ $10.913 \times (16.02/100)$
4、累计轮灌水次数(次)	8.78	1.41	-	(2)采用式(14)计算:
				$n_{\text{次数}} = \frac{k_{\text{毛灌}}}{100} \cdot N_{\text{综}}$ $8.78 \times (16.02/100)$
5、引用毛水量计量水费(万元)	326.254	52.267	-	(2)计算式:
				$\frac{k_{\text{毛灌}}}{100} \cdot f_{\text{水费}}$ $326.254 \times (16.02/100)$
6、灌区灌溉水利用系数	0.7035	-	-	

2、灌区用水目标管理动态

灌溉用水运行过程中,若实际引用毛灌溉水量 $w_{\text{毛}}$ 大于定量控制毛灌溉水量($W_{\text{定量}}$),表明超引用毛水量($W_{\text{超量}}$);当灌区某次或全年灌溉用水结束,实际引用毛灌溉水量 $w_{\text{毛}}$ 小于定量控制毛水量($W_{\text{定量}}$),表明节省引用毛灌溉水量($W_{\text{节省}}$)。由此可见灌区用水目标管理存在动态优化调控问题。灌区用水目标管理指标调控配置会出现二种情形:

一是灌区用水过程超量用水($W_{\text{超量}}$)情况 $w_{\text{毛}} > W_{\text{定量}}$, 由 2025 年 04 月 25 日至 10 月 25 日用水时段(表 4)看出,灌溉用水运行 6 项技术指标,均一定程度偏离定量控制目标状态,出现超引用水量 44.025 万 m³,灌溉水利用系数 0.6988 比较目标 0.7035,下降了 0.47 个百分点。这一用水管理状态,可为判别分析调整不同节点灌溉水量合理配置提供依据。

表 4. 灌区用水目标管理指标调控配置算法(超引用水量 $W_{\text{超量}}$)

灌溉用水起始时间: 2025 年 04 月 25 日; 截止时间: 2025 年 10 月 25 日							
用水管理技术指标	定量控制目标	实时进度		超引用水量		标向	算法
		数量	定量控制指标占比 k (%)	水量 $W_{\text{超量}}$ (万 m ³)	流量 $Q_{\text{超量}}$ (m ³ /s)		
编号		(2)	(3)	(4)	(5)		
1、毛灌溉引用水量 (万 m ³)	6525.088	6569.113	100.67	44.025	5.095	↑	一、“实时进度”计算: “用水管理技术指标” 中 1、2、3、4、5 项算法同表 3。 指标 6 项(2)采用式(9-1)算式: $\eta_{\text{实际}} = W_{\text{定量}} \cdot \eta_{\text{目标}} / W_{\text{毛水量}}$ $= 6525.088 \times 0.7035 / 6569.113$ $= 0.6988$ 二、“超引用水量”计算: (4)采用式(7-1) (7-2)计算: $W_{\text{超量}} = w_{\text{毛}} - W_{\text{定量}}$ $= 6569.113 - 6525.088$ (5) 计算式: $Q_{\text{超量}} = W_{\text{超量}} / 8.64$ $= 44.025 / 8.64$
2、毛灌溉用水定额 (m ³ /hm ²)	5249.467	5284.638	—	—	—	—	
3、灌溉面积(万 hm ²) 累计灌溉面积 (万 hm ² 次)	1.243 10.913	1.243 10.986	—	—	—	—	
4、累计轮灌水次数 (次)	8.78	8.84	—	—	—	—	
5、引用毛水量计量水费(万元)	326.254	328.440	—	—	—	—	
6、灌区灌溉水利用系数	0.7035	0.6988	—	—	—	—	

二是灌区用水过程节省用水($W_{\text{节省}}$)情况 $w_{\text{毛}} < W_{\text{定量}}$ 。由 2025 年 04 月 25 日至 10 月 25 日用水时段(表 5)看出,灌溉用水运行 6 项技术指标,均一定程度略好于定量控制目标状态,灌区出现了节省引用水量 29.863 万 m^3 ,灌溉水利用系数 0.7067 比较目标 0.7035,增加了 0.32 个百分点。这一实时用水管理状态表明,灌区灌溉水量配置尚处合理正常运行管理态势。

表 5. 灌区用水目标管理指标调控配置算法(节省引用水 $W_{\text{节省}}$)

灌溉用水起始时间：2025 年 04 月 25 日；截止时间：2025 年 10 月 25 日							
用水管理技术指标	定量 控制 目标	实时进度		节省引用水			算法
		数量	定量控制指 标占比 k (%)	水量 $W_{\text{节省}}$ (万 m^3)	流量 $Q_{\text{节省}}$ (m^3/s)	标向	
1、毛灌溉引用水量(万 m^3)	6525.088	6495.225	99.54	29.863	3.456	↓	表中各项指 标内容基本 算法同表 4。
2、毛灌溉用水定额(m^3/hm^2)	5249.467	5225.319	—	—	—	—	
3、灌溉面积(万 hm^2)累计灌溉面积(万 hm^2 次)	1.243	1.243	—	—	—	—	
	10.913	10.863					
4、累计轮灌水次数(次)	8.78	8.74	—	—	—	—	
5、引用毛水量计量水费(万元)	326.254	324.753	—	—	—	—	
6、灌区灌溉水利用系数	0.7035	0.7067	—	—	—	—	

4. 讨论

本研究构建的 6 维度灌区灌溉用水测算方法,实现了总量控制与定额管理目标下灌溉用水指标的定量化、动态化表征,较好解决了传统灌区管理中水量核算模糊、指标关联度弱、调控依据不足等问题。通过对灌区各级输水系统层级水量统一核算,避免灌溉面积与引水量重复计算,提升了测算结果的准确性。算例分析表明,超量引水与节省水量关联灌溉水利用系数为灌区灌溉水调度管理提供直观依据。本方法依托智能量测水设施实现数据自动采集与实时计算,具备工程实用性,适用不同水源灌区类型。基于案例结合实际应用问题,由于农田监测设备功能有限性、作物种植结构动态变化因素影响,难以直接准确实时监测田间净灌溉用水量信息,本文采用目标定额反算法估算田间单位面积净灌溉用水量,对枯水年或丰水年灌区作物需水变化会产生一定误差。灌溉用水过程中的毛灌溉用水定额、累计灌溉面积、累计轮灌水次数实时指标采用定量控制引用毛灌溉水量的毛灌溉用水量占比 $k_{\text{毛灌}}$ 近似线性化推演分析获得,虽然总体可反映灌区用水管理状态,但对于农田作物前期灌水定额大、后期小或前期灌白地后期灌作物等用水不均变化较大情形会影响指标稳定准确性。因此,可进一步结合遥感、物联网与大数据技术,提升指标动态更新频率与区域适配性,推动灌区灌溉用水管理向更加智能化、精细化方向发展。

5. 结论

本文基于 6 项核心技术指标的灌溉用水动态测算方法,明确了毛灌溉引用水量、用水定额、灌溉面积与累计灌溉面积、轮灌水次数、计量水费及灌溉水利用系数的耦合关系,建立了灌区各级输水系统水量、水利用系数及超、节水量算式,形成了可量化实时监测的灌区用水管理表征方案,并通过典型灌区算例验证方法适用性,可为智慧灌区灌溉水资源科学配置、高效利用高质量管理提供支持。

参考文献

[1] 中华人民共和国水利部. 2022 年《中国水资源公报》发布[R]. 2023-06-30.

- https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/content_6889175.htm
- [2] 新疆维吾尔自治区水利厅. 2023 年新疆水资源公报[R]. 2026-01-04.
<https://slt.xinjiang.gov.cn/xjslt/c114491/202601/dbb884aebf7642bdacb0ccc53c465a71.shtml>
- [3] 韩振中, 冯保清, 田雨, 等. 我国灌溉用水效率提升潜力与实现路径[J]. 中国水利, 2025(11): 28-33.
- [4] 水利部关于印发水稻等七项农业灌溉用水定额的通知[EB/OL]. 2020-10-27.
http://swj.sz.gov.cn/zfw/bmxx/pshjs/csjhysgl/content/post_8206499.html
- [5] 杨秋宇, 关全力. 新疆农业水价综合改革对农业用水效率的影响[J]. 水利经济, 2025, 43(1): 56-68.
- [6] 吴彩丽, 白美健, 张宝忠, 等. 基于水动力学模拟的灌区输配水系统优化调控模式研究[J]. 节水灌溉, 2023(4): 87-95.
- [7] 徐淑琴, 高凯茹, 乐静, 等. 基于 NSGA-II 灌区两级渠道输配水优化调度[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(3): 71-78.
- [8] 肖梦君. 灌区渠系实时多目标优化配水模型研究及应用[J]. 农业与技术, 2022, 42(3): 38-40.
- [9] 王君. 南疆某灌区灌溉水有效利用系数测算及合理性分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(1): 40-42.
- [10] 倪深海, 周凌辉, 华幸超, 等. 平原水网地区农田灌溉水有效利用系数测算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 28-30.
- [11] 新疆维吾尔自治区统计局, 编. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [12] 周和平, 王忠. 新疆地区作物耗水时空多样性特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(6): 15-19.
- [13] 新疆维吾尔自治区自然资源厅. 新疆维吾尔自治区第三次全国国土调查主要数据公报[EB/OL]. 2022-01-12.
<https://zrzyt.xinjiang.gov.cn/xjgtzy/gzdt/202201/c7061f858692402da4f7b65e376cd2fb.shtml>
- [14] 李和平, 樊自立, 刘校明, 等. 新疆宜农后备土地资源划分与评价[J]. 干旱区地理, 2000, 23(4): 338-343.
- [15] 新疆维吾尔自治区市场监督管理局. DB65/T 3611-2023 农业用水定额[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.