

赵然杭, 储燕, 瞿潇, 等. 南水北调东线梁济运河段输水流量损失的经验估算方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 48-55. ZHAO R H, CHU Y, QU X, et al. Empirical estimation of water conveyance flow loss in Liangji canal section of the South-to-North Water Transfer Eastern Route Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 48-55. (in Chinese)

南水北调东线梁济运河段输水流量 损失的经验估算方法

赵然杭¹, 储燕¹, 瞿潇², 王兴菊¹, 李典基²

(1. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061; 2. 南水北调东线山东干线有限责任公司, 济南 253000)

摘要:传统 Kostiakov 经验公式计算结果为一定值, 在未衬砌的沿程地质变化较大的河段应用时不能充分体现输水损失沿程变化的动态特点。为克服原公式局限性, 采用积分学方法及广义简约梯度法对 Kostiakov 经验公式进行改进, 形成改进 Kostiakov 经验公式法, 并以南水北调东线梁济运河段为例, 利用 2013—2019 年实测数据, 对改进 Kostiakov 经验公式中的参数进行率定。考虑梁济运河段运行期间易受春灌影响, 分别利用受春灌影响显著的 2019—2020 年和影响一般的 2020—2021 年实测数据对改进 Kostiakov 经验公式进行验证。结果表明: 改进 Kostiakov 经验公式法可克服原公式应用时的局限性, 有效提升输水损失计算精度, 扩大原公式的应用范围; 改进后计算结果与两个时段实测数据的平均相对误差分别由原来的 27.26% 和 11.72% 降低为 7.9% 和 6.84%, 对调水工程运行调度具有重要意义。

关键词:南水北调东线; 输水损失; Kostiakov 经验公式; 广义简约梯度法; 积分学方法

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbqk.2023.0006

南水北调工程是实现水资源合理配置, 增加水资源承载能力, 提高水资源配置效率, 保障经济社会可持续发展的重大基础设施, 有利于缓解水资源短缺对北方地区城市化发展的制约^[1-3]。减少输水损失、提高输水效率是调水工程运行管理的关键^[4], 而输水损失是反映输水效率的重要指标, 因此准确计算输水损失对提高输水效率和工程效益具有重要意义^[5-6]。

针对调水工程输水线路长且复杂的特点, 国内外学者主要基于现场测定及统计分析得出经验公式来估算输水损失, 如美国的 Davis-Wilson 公式^[7]、印度的 Ingham 公式^[8]、俄罗斯的 Kostiakov 公式^[9]、埃及的 Molesworth 公式^[10]等。其中, Kostiakov 经验公式具有形式简单、应用方便的特点, 在我国不同地区被广泛应用^[11], 如: 周玉琴等^[12]基于 Kostiakov

经验公式法计算了湖北省石门水库灌区衬砌渠道的输水损失; 肖雪等^[13]利用 Kostiakov 经验公式计算了新疆伊犁喀什河下游灌区渠道的输水损失, 并把结果与其他经验公式进行了对比分析, 表明在计算典型渠道单位渠长输水损失时 Kostiakov 经验公式计算结果较优。但在实际应用中, Kostiakov 经验公式难以适用于较为复杂的地质情况。因此, 有学者开展了 Kostiakov 经验公式改进研究, 如: 钟玲等^[14]针对同一灌区内渠床土壤条件存在差异的情况, 采用加权平均法对 Kostiakov 经验公式加以改进; 谭丹^[15]考虑运行年限对输水损失的影响, 利用动水测流法和回归分析法对 Kostiakov 经验公式进行改进; 谢亨旺等^[16]以江西省赣抚平原灌区为研究对象, 针对 Kostiakov 经验公式计算误差随渠道长度增加而增大的问题, 利用渠道连续渗漏理论进行改进。以上

收稿日期: 2022-05-16 修回日期: 2022-09-30 网络出版时间: 2022-11-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221115.1944.006.html>

基金项目: 山东省水利科研与技术推广项目 (SDSLKY201807; SDSLKY201902); 山东省利用亚行贷款项目

作者简介: 赵然杭(1969—), 男, 山东沂水人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源利用与管理、湿地水文生态环境管理与工程模糊集理论与应用方面研究。E-mail: ranhang-z@sdu.edu.cn

通信作者: 王兴菊(1967—), 女, 山东邹城人, 教授, 硕士生导师, 主要从事水资源开发利用与水生态环境管理研究。E-mail: xjw@sdu.edu.cn

研究在一定程度上提高了 Kostiakov 经验公式实际应用的适用性,但针对未衬砌、工程状况沿程变化不一的输水线路,该公式仍存在未考虑损失沿程动态变化和参数取值较困难^[17-19]的问题。因此,通过引入积分思想来表征输水损失沿程动态变化的特点,并利用广义简约梯度法率定公式参数,形成改进 Kostiakov 经验公式法,以提高输水流量损失的计算精度。

1 研究区概况

南水北调东线南四湖—东平湖段工程位于山东省南部,输水线路按途经湖泊、河流可分为3部分:南四湖湖内部分、梁济运河部分和柳长河部分。其中,梁济运河段南起南四湖湖口,北至邓楼泵站下,线路长为 58.252 km,采用梯形明渠输水断面,比降为 0,输水设计流量为 100 m³/s。根据地貌及地层岩性分布特征,梁济运河段划分为3个工程地质段,见表1。该地区浅层地下水为第四系孔隙潜水,局部微承压,地下水埋深较浅,主要含水层岩性为砂壤土、粉砂、粉细砂及裂隙黏土^[20]。

表1 梁济运河段工程地质
Tab. 1 Engineering geological of Liangji Canal section

工程地质段	桩号	地貌单元
I 段	0+000 ~ 12+350	冲积湖积平原
II 段	12+350 ~ 26+000	黄泛冲积平原与冲积湖积平原交互带
III 段	26+000 ~ 58+252	黄泛冲积平原

因梁济运河段为明渠输水河段,河底及两岸堤防边坡未做衬砌处理,仅对边坡进行护砌,且实际运行中由于运行情况复杂、输水损失设计值较为保守等原因,经过近 10 年的运行,实际输水损失量大于设计值。因此,为实现水资源精准调度,需准确计算输水损失。

2 Kostiakov 经验公式及改进

为克服 Kostiakov 经验公式参数适用范围不够精确及不能反映输水损失沿程动态变化特点的局限性,利用积分学方法和广义简约梯度法对 Kostiakov 经验公式进行改进,形成改进 Kostiakov 经验公式法。

2.1 Kostiakov 经验公式法

渠道输水损失的主要影响因素有土壤条件、断面形式、水力特性、地下水埋深、衬砌条件和流量等。^[21]

Kostiakov 经验公式考虑了流量和土壤条件对于损失的影响,其表达式^[22]为

$$S = 0.01AQ^{1-m} \quad (1)$$

式中: S 为单位渠长渗漏损失, m³/(s·km); Q 为流量, m³/s; A 、 m 为经验常数,视土壤的渗透性而定,根据不同土壤类型,其经验取值见表2^[23]。式(1)可改写为

$$S = \sigma Q = \frac{A}{100Q^m} Q \quad (2)$$

式中: σ 为单位渠长流量损失率, %/km, A 、 m 、 Q 、 S 物理意义及单位同式(1)。

表2 土壤透水性参数
Tab. 2 Soil permeability parameters

渠床土壤	A	m
沙壤土黏土	3.40	0.50
轻壤土	2.65	0.45
中壤土	1.90	0.40
重壤土	1.30	0.35
黏土	0.70	0.30

考虑到地下水顶托和渠道衬砌的影响,式(1)^[23-24]可修正为

$$S = 0.01\beta\gamma AQ^{1-m} \quad (3)$$

式中: γ 为地下水顶托系数,经验值见表3^[23]; β 为采取防渗措施后的渠床渗漏折减系数。

表3 地下水顶托系数
Tab. 3 Groundwater jacking coefficient

地下水埋深/m	渠道净流量/(m ³ ·s ⁻¹)						
	1	3	10	20	30	50	100
<3	0.63	0.50	0.41	0.36	0.35	0.32	0.28
3	0.79	0.63	0.50	0.45	0.42	0.37	0.33
5		0.82	0.65	0.57	0.54	0.49	0.42
10			0.91	0.82	0.77	0.69	0.58
15					0.94	0.84	0.73
20						0.97	0.84
25							0.94

2.2 Kostiakov 经验公式改进

2.2.1 构建改进 Kostiakov 经验公式基本形式
根据式(1)可以看出,在渠道土壤条件相同即 A 、 m 相同的情况下, Kostiakov 经验公式所求单位

长度下的输水损失为定值,但实际输水过程中,每公里渠长上的损失流量随流量的变化而变化,输水损失具有沿程变化的动态特点,因此通过积分思想表征其动态变化特点。

引入积分学方法^[20]构建改进 Kostiakov 经验公式基本形式。令渠首毛流量为 $Q_{\text{毛}}$,经过流程 L 后的流量为 Q_n 。设渠道流量 Q 在经过渠段 dL 后的流量损失为 dQ ,输水损失量为 S' 。在 dL 渠段内,单位流量在单位流程上的损失量 $\frac{dQ}{QdL}$ 即为单位渠长流量损失率,联立式(2)可得:

$$\frac{dQ}{QdL} = \frac{A}{100Q^m} \quad (4)$$

对式(4)在渠长 L 范围内积分可得:

$$\int_{Q_n}^{Q_{\text{毛}}} Q^{m-1} dQ = \int_0^L A dL \quad (5)$$

$$Q_{\text{毛}} = (Q_n^m + 0.01\beta\gamma ALm)^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

令 $A_0 = 0.01\beta\gamma A$,则式(6)可改写为以毛流量为因变量,净流量为自变量的非线性方程:

$$Q_{\text{毛}} = (Q_n^m + A_0 Lm)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

$$S' = Q_{\text{毛}} - Q_n = (Q_n^m + A_0 Lm)^{\frac{1}{m}} - Q_n \quad (8)$$

对公式(7)改写,改进经验公式基本形式为

$$y = (x^a + abL)^{\frac{1}{a}} \quad (9)$$

式中: y 为非线性回归方程求出的毛流量; x 为自变量净流量; a 、 b 为改进经验公式的参数。

2.2.2 改进 Kostiakov 经验公式参数率定方法

Kostiakov 经验公式的估算精度与参数 A 、 m 、 β 、 γ 的取值紧密相关,参数取值直接影响输水损失计算结果的精度。广义简约梯度法^[25](GRG法)的核心思想是用等式约束来减少优化变量的个数,在经验参数的基础上寻求最优参数解,从而提高计算精度,因此采用广义简约梯度法进行参数率定。

为确定改进经验公式的参数,需要研究 y 值的变差,即回归平方和与总离差平方和的比值。假设数据集共包含 n 个实测值 f_1, \dots, f_n , \bar{f} 为实测值的平均值,经过回归方程计算后的预测值将分别为 y_1, \dots, y_n ,残差值 $e_i = f_i - y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。判定系数 R^2 越接近 1,模型的拟合优度越好。其求解流程图见 图 1。

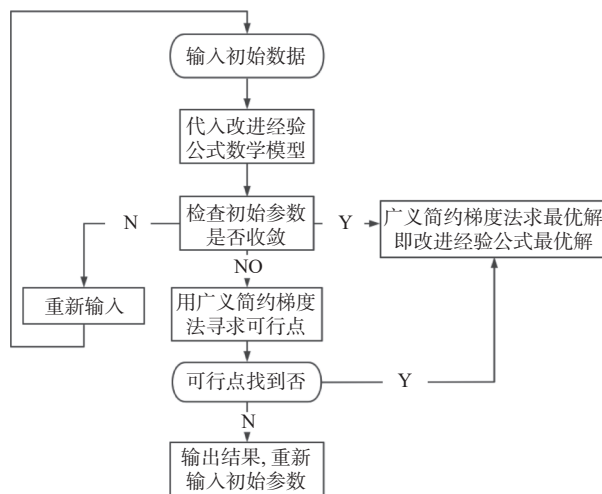


图 1 广义简约梯度法流程

Fig. 1 Generalized reduced gradient method flow chart

$$R^2 = \frac{E_s}{T_s} = 1 - \frac{R_s}{T_s} \quad (10)$$

式中: E_s 为回归平方和; T_s 为总离差平方和, $T_s = \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2$; R_s 为残差平方和, $R_s = \sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2$ 。式(10)可改写为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2} \quad (11)$$

令 $g(x)$ 为残差平方和与总离差平方和比值,目标函数为

$$\min[g(x)] = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2} \quad (12)$$

约束条件为

$$\begin{cases} 0 < R^2 \leq 1 \\ 0 < a < 1 \\ b > 0 \end{cases} \quad (13)$$

3 改进 Kostiakov 经验公式应用

3.1 数据来源

分别在南水北调东线梁济运河段桩号 0+000、25+500 与 58+000 处设置监测断面,数据采集装置为多声道超声波流量计,采集调水期每日 8 时的流量、水位等数据。调水期为每年的 10 月至翌年 6 月,2013—2021 年日实测流量数据见图 2。月、年平均流量损失见图 3,图中毛流量为渠首(桩号 0+000)处的观测流量。受观测条件限制将桩号 58+000 处观测流量视为净流量,毛流量与净流量之间差值为流量损失。^[26]

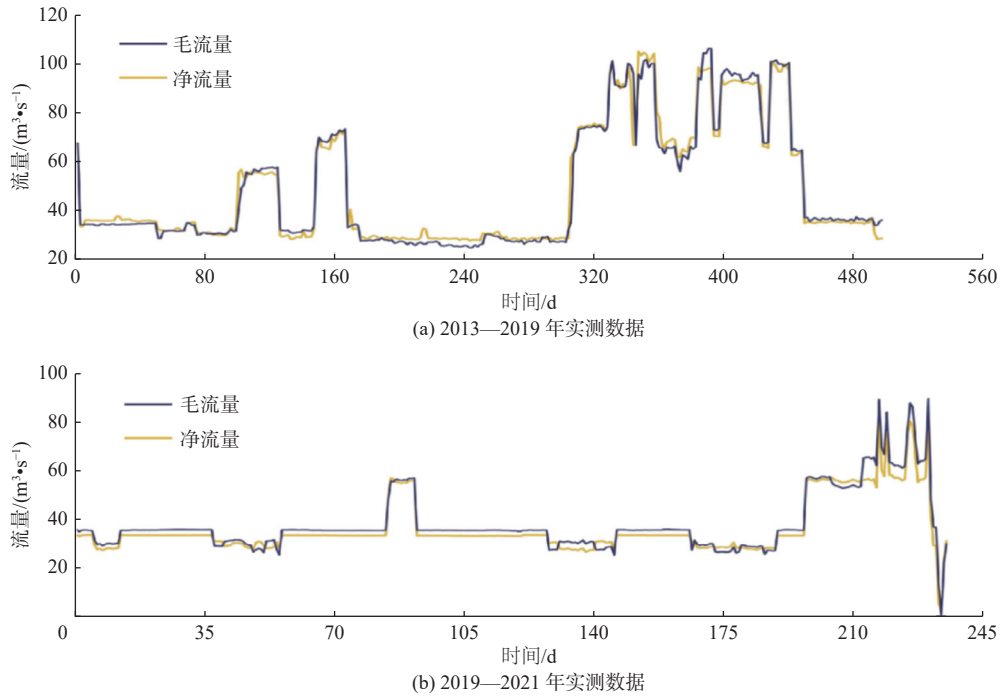


图2 2013—2021年日实测流量数据
Fig. 2 Daily measured data maps from 2013 to 2021

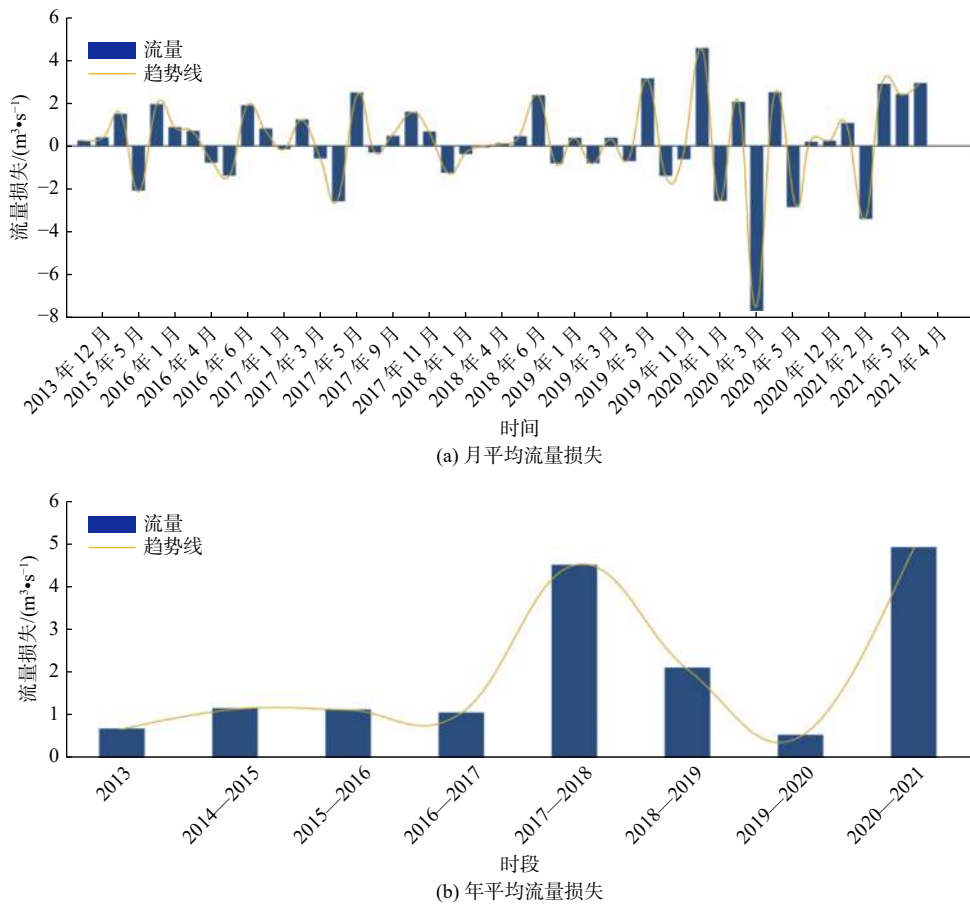


图3 2013—2021年输水流量损失变化

Fig. 3 Changes of water transmission flow loss from 2013 to 2021

图3中部分月份流量损失为负值,即流量增加,其主要是受春灌及地下水顶托影响所导致,这些因素对该研究区域的补给较为稳定,且近十年梁

济运河段未出现极端干旱和极端洪涝情况,因此,利用年全部流量损失数据(包含正值、负值)进行计算。

3.2 改进 Kostiakov 经验公式输水损失计算

3.2.1 数据时间序列长度敏感性分析

为了分析实测数据时间序列的长度变化对计算误差的影响,利用 2013—2021 年实测数据分别计算数据时间序列长度为 3、4、5 和 6 a 等不同序列长度时计算误差的变化,见图 4。

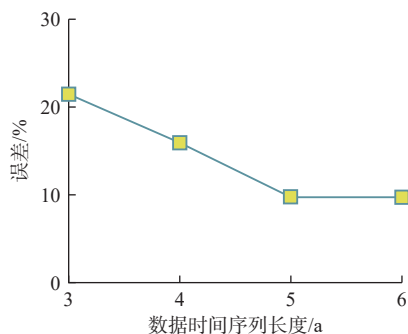


图 4 不同数据时间序列长度的计算误差

Fig. 4 Computational error plot for different data time series lengths

图 4 表明,误差随数据时间序列长度增加而减小,在长度大于 5 a 时,误差变化相对稳定且误差降低至 10% 以下。因此,对改进 Kostiakov 经验公式进行率定时,数据时间序列长度大于 5 a 时,应用效果具有可靠性。

3.2.2 率定改进 Kostiakov 经验公式参数

研究区段穿越 3 段不同地貌单元,第 I 段河底坐落在壤土上,局部夹有砂壤土透镜体;第 II 段河底坐落在壤土上,局部夹有粉砂、中细砂、中粗砂、砂壤土透镜体;第 III 段河底坐落在壤土上,局部夹有姜石。整体均坐落在壤土上,因此梁济运河段采用统一估算公式。

结合表 2,根据 A 、 m 、 γ 经验值赋予参数 a 、 b 初值,选择经验值作为初值可有效避免计算结果不收敛问题。 A 、 m 、 γ 经验值和 a 、 b 初值分别为 2.65、0.45、0.37 和 0.45、 9.805×10^{-3} 。利用广义简约梯度法(GRG 法),根据 2013—2019 年的实测数据及式(9)可初步计算出预测值序列,并设定判定系数 R^2 接近 1 为计算目标,解得预测方程中参数 a 和 b 。

参数 a 、 b 率定结果分别为 0.310 348 226 和 0.001 147 775。为分析参数的不同有效位数对预测结果的敏感性,分别保留 3 位、4 位、5 位至 9 位有效位数,通过式(14)计算其对应的平均相对误差,结果见表 4。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_{act,i} - S_{pre,i}}{S_{act,i}} \right| \quad (14)$$

式中: E 为平均相对误差; $S_{pre,i}$ 为第 i 个预测值; $S_{act,i}$ 为第 i 个实际值。

表 4 参数的不同有效位数对应的平均相对误差
Tab. 4 Average relative errors for different significant digits of the parameter

有效位数	3	4	5	6	7	8	9
平均相对误差	4.79	4.81	4.76	4.75	4.75	4.75	4.75

表 4 表明,有效位数保留至 6 位以后对误差的影响趋于稳定,因此梁济运河段输水损失模型为

$$S_{损} = (x^{0.310348} + 3.56209 \times 10^{-4} L)^{3.22218} - x \quad (15)$$

式中: $S_{损}$ 为输水损失量, m^3/s ; x 为净流量, m^3/s ; L 为渠段长度, m 。

设计流量下,改进 Kostiakov 经验公式法与原公式的输水损失计算结果见表 5。

表 5 南水北调东线梁济运河段输水损失计算结果

Tab. 5 Conveyance loss in the Liangji Canal section of the South-to-North Water Transfer Project

方法名称	设计流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	长度/ km	设计流量下水 损失量/($m^3 \cdot s^{-1}$)
Kostiakov 经验公式法	100	58.252	0.56
改进 Kostiakov 经验公式法	100	58.252	1.61

3.3 改进 Kostiakov 经验公式验证及分析

考虑梁济运河段输水工程运行期间受到春灌影响,为避免验证结果的偶然性,利用受春灌影响显著的 2019—2020 年和影响一般的 2020—2021 年实测数据进行验证,分别计算 Kostiakov 经验公式法改进前与改进后计算值与实测值之间的平均相对误差。验证结果见图 5。

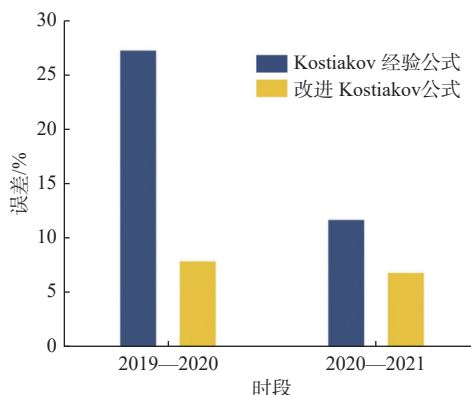


图 5 Kostiakov 经验公式法改进前后误差分析

Fig. 5 Error analysis diagram before and after improvement of Kostiakov empirical formula method

图 5 表明,经验公式改进前与改进后的计算结果和实测值之间的平均相对误差有较大变化。2019—2020 年,改进后的平均相对误差由原公式的 27.26%

降低为7.90%,2020—2021年由11.72%降低为6.84%。Kostiakov经验公式法在2019—2020年计算误差相对较大,原因是该调度期间梁济运河段受春灌影响较大,部分郟城新河引黄灌溉尾水进入渠道,导致河道内水位升高,流量增大,部分月份输水损失为负值,该年度总体流量损失偏小,而Kostiakov经验公式法的计算结果未能考虑到上述影响,计算出的输水损失高于实际损失。改进Kostiakov经验公式法在参数率定时考虑到输水损失为负值的情况,计算误差则相对稳定,克服了原公式在应用过程中的局限性,提高了输水损失计算精度,保证了计算结果的可靠性。

为进一步分析季节因素对改进Kostiakov经验公式应用时的影响,利用2019—2020年和2020—2021年实测数据分季节进行验证,由于梁济运河段汛期不调水,且运行以来秋季调水时间短或不调水,因此仅计算春季和冬季的平均相对误差。计算结果见表6。

表6 不同季节下改进Kostiakov经验公式法计算误差
Tab. 6 Calculation error of improved method under different seasons

时段	平均相对误差	
	春季	冬季
2019—2020	8.66	7.08
2020—2021	6.56	7.12

表6表明,2019—2020年春季计算误差最大,为8.66%;2020—2021年春季计算误差最小,为6.56%。2个年份,年内春季与冬季的计算结果分别相差1.58%和0.56%,年际春季与冬季的计算结果分别相差2.10%和0.04%。结合前文分析,说明Kostiakov经验公式法在实际应用时受季节影响相对较小,不同季节应用效果较为稳定。因此,针对未衬砌、工程状况沿程变化不一的输水线路,改进Kostiakov经验公式法提升了损失流量计算精度,具有较好的适用性。

4 结论

以南水北调东线山东干线梁济运河段为例,研究输水损失计算方法,对Kostiakov经验公式进行改进,主要结论如下:

利用积分学方法和广义简约梯度法对Kostiakov经验公式进行改进,改进后的方法克服了原公式在实际应用中单位长度下输水损失为一定值及原公

式中参数适用范围不够精确的局限性。

改进Kostiakov经验公式法较改进前提升了计算精度与可靠性。分别利用受春灌影响显著的2019—2020年和影响一般的2020—2021年的实测数据进行验证,结果表明,改进后的平均相对误差由原来的27.26%和11.72%分别降低为7.90%和6.84%。

改进Kostiakov经验公式法在实际应用时受季节因素影响相对较小,不同季节应用效果较为稳定。

参考文献:

- [1] LIU C, ZHENG H. South-to-North Water Transfer schemes for China[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2002, 18(3): 453-471. DOI: 10.1080/079006202200006934.
- [2] ZHANG Q. The South-to-North Water Transfer Project of China: Environmental implications and monitoring strategy[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45(5): 1238-1247. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2009.00357.x.
- [3] WILSON M C, LI X Y, MA Y J, et al. A review of the economic, social, and environmental impacts of China's South-North Water Transfer Project: A sustainability perspective[J]. *Sustainability*, 2017, 9(8): 1489. DOI: 10.3390/su9081489.
- [4] 廖相成, 胡铁松. 基于输水损失动态变化特性的渠系优化配水模型研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(7): 850-861. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200828.
- [5] ZHANG F, GUO S S, ZHANG C L, et al. An interval multiobjective approach considering irrigation canal system conditions for managing irrigation water[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 293-302. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.111.
- [6] 刘风华. 引黄济津应急调水工程河北段输水能力研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. DOI: 10.7666/d.y911736
- [7] 克拉茨. 灌溉渠道衬砌[M]. 何丕承, 译. 北京: 水利出版社, 1980.
- [8] AKKUZU E. Usefulness of empirical equations in assessing canal losses through seepage in concrete-lined canal[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2012, 1381(5): 455-460. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000960.
- [9] 考斯加可夫. 土壤改良原理[M]. 陈益秋, 译. 北京: 高等教育出版社, 1965.
- [10] SHAIKH I A, LEE T S. Estimating earthen tertiary water channel seepage losses as a function of soil texture[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 21(2): 06015012. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001292.

- [11] 张健. 基于渠床二维入渗参数的多因子数学模型及渠道水利用效率计算方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. DOI: [10.27229/d.cnki.gnmnu.2020.000982](https://doi.org/10.27229/d.cnki.gnmnu.2020.000982)
- [12] 周玉琴, 石佳, 万昕. 渠道衬砌状况对渠系水利用系数的影响分析[J]. *节水灌溉*, 2021(8): 52-55,61. DOI: [10.3969/j.issn.1007-4929.2021.08.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4929.2021.08.010)
- [13] 肖雪, 王修贵, 谭丹, 等. 几种计算渠道渗漏损失的经验公式比较[J]. *武汉大学学报*, 2016, 49(3): 365-371. DOI: [10.14188/J.1671-8844.2016-03-008](https://doi.org/10.14188/J.1671-8844.2016-03-008)
- [14] 钟玲, 安西良. 渠道流量损失及渠系水利用系数的计算方法[J]. *中国农村水利水电*, 2004(12): 27-28. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2004.12.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2004.12.011)
- [15] 谭丹. 渠道输水损失计算的回归分析方法研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(14): 95-97,112. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.14.022](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.14.022)
- [16] 谢亨旺, 罗云英, 靳伟荣. 渠系水利用系数测算方法研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(2): 128-133. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2020.02.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2020.02.026)
- [17] 荣丰涛. 议论考斯加可夫经验公式[J]. *山西水利科技*, 2004(1): 7-10. DOI: [10.3969/j.issn.1006-8139.2004.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8139.2004.01.003)
- [18] 冯志勇, 李立群, 吴永妍, 等. 南水北调中线一期工程总干渠输水损失变化规律[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(3): 600-609. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbddqk.2022.0061](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbddqk.2022.0061)
- [19] 张帆, 蔡宴朋, 郭萍, 等. 灌区干支渠渗漏估算方法及其在水资源优化配置中的应用[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 140-147. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2021.4.017](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.4.017)
- [20] 南水北调东线一期工程梁济运河、柳长河工程地质勘察报告[R]. 济南: 山东省水利勘测设计院, 2000.
- [21] 门宝辉. 渠道流量损失及水利用系数公式的探讨[J]. *中国农村水利水电*, 2000(2): 33-34. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2000.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2000.02.014)
- [22] 谢崇宝, LANCE J M, 崔远来, 等. 大中型灌区干渠输配水渗漏损失经验公式探讨[J]. *中国农村水利水电*, 2003(2): 20-22. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2003.02.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2003.02.009)
- [23] 中华人民共和国水利部. 灌溉与排水工程设计规范, GB 50288—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [24] 郭元裕. 农田水力学[M].3版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [25] 赵运德. 用广义简约梯度法求管网经济管径[J]. *水利学报*, 1999(6): 61-65. DOI: [10.3321/j.issn:0559-9350.1999.06.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:0559-9350.1999.06.012)
- [26] 南水北调东线山东干线济宁管理局运行资料统计报告[R]. 济宁: 南水北调东线山东干线济宁管理局, 2020.

Empirical estimation of water conveyance flow loss in Liangji canal section of the South-to-North Water Transfer Eastern Route Project

ZHAO Ranhang¹, CHU Yan¹, QU Xiao², WANG Xingju¹, LI Dianji²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. South-to-North Water Diversion Dongxian Shandong Main Line Co., Jinan 253000, China)

Abstract: The South-to-North Water Transfer Project is the world's largest inter-basin water transfer project, and its main purpose is to alleviate the serious shortage of water resources in northern China. The main task is to reasonably determine the amount of water transfer, water transfer process and the scope of water transfer. Since its operation, the project has effectively alleviated the current situation of water shortage in northern China and promoted social and economic development. The accuracy of the water transfer efficiency affects the accuracy of the scheduling scheme, and the water transfer loss is an important index reflecting the water transfer efficiency. However, in the operation of the project, due to internal and external factors, there is a difference between the actual water transmission loss and the designed water transmission loss, so it is important to reasonably determine the water transmission loss to achieve accurate scheduling.

The calculation accuracy of water conveyance loss has an important impact on the scheduling and configuration of water transfer projects. The traditional Kostiakov empirical formula is of certain value, which can not fully reflect the dynamic characteristics of the change of water transmission loss along the river when it is applied to the unlined river reaches with large geological changes. To overcome the limitations of the traditional Kostiakov empirical formula, it was improved with the integral method and the generalized reduced gradient method. The Liangji canal section of the eastern route of the South-to-North Water Transfer Project was taken as an example, and the field data

from 2013 to 2019 were used to calibrate the parameters in the improved Kostiakov empirical formula. Considering that the Liangji canal section is susceptible to spring irrigation during the operation, the field data from 2019 to 2020 and 2020 to 2021 were used, which was significantly affected by spring irrigation to verify the improved Kostiakov empirical formula. To overcome the limitations of the traditional formula, the average relative error between the calculated results and the measured values before and after the empirical formula showed improvement and it varies greatly. From 2019 to 2020, the average relative error after improvement was reduced from 27.26% of the original formula to 7.9%, and from 11.72% to 6.84% in 2020-2021. The calculation error of Kostiakov's empirical formula method in 2019-2020 was relatively large because the Liangji canal section was greatly affected by spring irrigation and the water level was higher during the scheduling period. The calculation error was generally affected by spring irrigation from 2020 to 2021, and the calculation error was reduced. While the settlement result of the improved Kostiakov empirical formula was relatively stable, overcoming the limitation that the original formula was greatly affected by hydraulic factors in the application process, improving the calculation accuracy of water loss, and ensuring the reliability of the calculation results.

The improved method overcomes the limitations of the original formula in the actual application of the water transmission loss as a value per unit length and the application range of the parameters in the original formula is not accurate enough, improves the calculation accuracy of the water transmission loss, and fully reflects the superiority of the dynamic change characteristics of the water transmission loss along the course. Improving the Kostiakov empirical formula improves the accuracy and reliability of calculations before the improvement. For the unlined and large differences in engineering geology of the water transmission line, the improved Kostiakov empirical formula method has good applicability, according to the specific characteristics of the water transmission trunk configuration parameters, can be generalized and applied to other canal sections of the water transfer project, and can further study the water transmission loss under different seasons and different water transfer scenarios of the typical canal section, explore the mechanism and factors of dynamic change of multi-scenario water transport, which is conducive to accurate water transfer and improve the efficiency of the project.

Key words: eastern route of the South-to-North Water Transfer Project; water loss; Kostiakov empirical formula; generalized parsimonious gradient method; Integral method.