

# 渠道水利用系数经验公式改进研究

薛天柱, 王茹雪, 白晶

(宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司, 银川 750004)

**摘要:** 分析渠道长度与渠道水利用系数的关系, 发现考斯加科夫公式存在明显的缺陷。对于一条均质渠道, 渠道全段水利用系数应该等于分段水利用系数的乘积, 考斯加科夫公式计算结果表明二者并不相等。针对这一情况, 本文讨论了渠道水利用系数和渠道长度的关系, 推导出新的计算公式, 并将其应用于固海扬水工程设计。实践表明改进公式物理意义明确、计算成果精确, 具有一定的实用价值。

**关键词:** 渠道水利用系数; 考斯加科夫公式; 每千米输水损失率; 固海扬水工程

中图分类号: TV91

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023461

薛天柱, 王茹雪, 白晶. 渠道水利用系数经验公式改进研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 156-159.

XUE Tianzhu, WANG Ruxue, BAI Jing. Study on Improvement of Empirical Formula of Channel Water Use Coefficient[J].

Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 156-159.

## 0 引言

渠道输水损失包括渠道水面蒸发损失、渠床渗漏损失、闸门漏水和渠道退水。通常情况下, 渠道水面蒸发损失、闸门漏水和渠道退水损失较小, 在计算渠道流量时, 渠床渗漏损失近似计为总输水损失量<sup>[1]</sup>。其计算方法主要有现场、研究试验法、经验公式法和解析法。理论公式所需的资料往往难以收集, 研究试验法常用于评价已建渠道。

在实际应用中, 广泛采用经验公式, 通过选取主要影响因素作为变量来计算渠道渗漏量。现行的经验公式主要有前苏联考斯加科夫(Kostiakov)公式<sup>[1]</sup>、戴维斯-威尔逊公式、美国垦务局莫里兹公式、印度的Ingham公式、埃及的Molesworth公式<sup>[2]</sup>。

## 1 考斯加科夫公式

### 1.1 数学表达式

考斯加科夫公式<sup>[1]</sup>在我国被广泛应用, 其数学形式如下:

$$Q_1 = \frac{\sigma}{100} L Q_n, \quad (1)$$

其中:

$$\sigma = \frac{A}{Q_n^m}, \quad (2)$$

$$\eta_c = \frac{Q_n}{Q_g}, \quad (3)$$

$$Q_g = Q_n + Q_1, \quad (4)$$

式中:  $\eta_c$  为渠道水利用系数, 渠道的净流量与毛流量比值;  $Q_n$  为渠道净流量, 分配给下级渠道的总和为该渠道的净流量;  $Q_g$  为渠道毛流量, 从水源或者上级渠道引入的流量为该渠道的毛流量;  $Q_1$  为渠道输水损失流量;  $\sigma$  为渠道每千米输水损失率 (%/km);  $L$  为渠道长度 (km);  $A$  为土壤透水性系数;  $m$  为土壤透水性指数。渠道输水损失流量  $Q_1$  等于渠道毛流量减去净流量。于是得出:

$$Q_g = Q_n (1 + \sigma L / 100), \quad (5)$$

$$\eta_c = \frac{1}{1 + \sigma L / 100}. \quad (6)$$

汪志农先生编著的《灌溉排水工程学》介绍了考斯加科夫公式, 并给出了不同防渗措施的折减系数和地下水顶托影响的修正系数。许多学者和水利工作者结合我国输水渠道的实际情况, 进行了一系列实践和探索, 取得了丰富的研究成果。陈亚新<sup>[3]</sup>以考斯加科夫公式为基础推导出无泄水损失、非恒定输水渠道输水效率的计算公式; 门宝辉<sup>[4]</sup>在渠道流量损失及水利用系数公式的探讨中, 用积分的方法, 推导出渠道渗漏损失量与毛流量之间的关系式; 白美健等<sup>[5]</sup>认为考斯加科夫公式适用于渠道规划设计, 建成渠道中由于净流量很难得到, 应用该公式估算输水渗漏损失需要先求得净流量。张霞等<sup>[6]</sup>提出在监测资料短缺地区, 以渠道首端流量、单公里长度渗漏损失流量和渠道总长度为参数的计算公式, 优点不需要通过试算求净流量。总的来说, 这些经验公式大都具有形式简单、应用方便的特点, 但是在实际应用时公式中各种系数取值的任意性较大, 且不考虑渗漏随时间和空间的变

收稿日期: 2023-10-08 修回日期: 2023-10-17

作者简介: 薛天柱(1987-), 工程师, 硕士, 研究方向为水资源调查评价、水利规划。E-mail: xuetzh@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

化, 所以只适合特定的条件<sup>[7]</sup>。近年来, 随着高效节水灌溉的大力发展和渠道管道化推进, 渠道水利用系数研究主要集中在灌区灌溉水利用测算与评价、渠道砌护渗漏损失和节水量计算等方面, 渠道水利用系数计算方法研究较少。

## 1.2 存在的问题

渠道水利用系数分析示意如图 1 所示, 假定渠道 OAB 为均质土渠, 渠道每千米损失流量与净流量的比值即为每千米渠道损失率  $\sigma$ ; 同时, 将渠道 OAB 看作渠道 OA 与渠道 AB 组成的串联渠道, 不考虑有支渠分水, 设 B 点处净流量为  $Q_B$ , A 点处毛流量为  $Q_A$ , 水源 O 点处毛流量  $Q_O$ 。

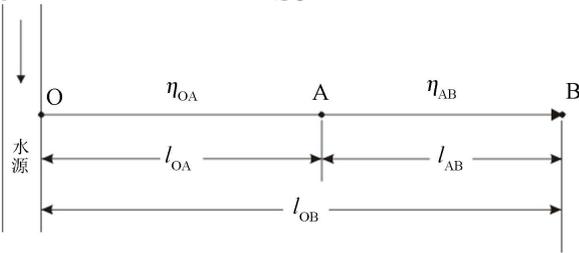


图 1 渠道水利用系数分析示意

Fig.1 Channel water utilization coefficient analysis

根据渠道水利用系数的定义, 有:

$$\eta_{OA} = \frac{Q_A}{Q_O}, \quad \eta_{AB} = \frac{Q_B}{Q_A}, \quad \eta_{OB} = \frac{Q_B}{Q_O},$$

$$\text{得出: } \eta_{OB} = \frac{Q_A}{Q_O} \times \frac{Q_B}{Q_A} = \eta_{OA} \eta_{AB}, \quad (7)$$

按照式 (7), 串联渠道水利用系数等于各渠段水利用系数的乘积。但是, 按照考斯加科夫公式 (6), 渠道分段计算渠道水利用系数:

$$\eta_{OA} = \frac{1}{(1+\sigma l_{OA}/100)}, \quad \eta_{AB} = \frac{1}{(1+\sigma l_{AB}/100)}, \quad (8)$$

得出:

$$\eta_{OB} = \eta_{OA} \eta_{AB} = \frac{1}{(1+\sigma l_{OA}/100)(1+\sigma l_{AB}/100)}, \quad (9)$$

同时, 渠道按整体计算渠首流量和渠道水利用系数:

$$\eta_{OB} = \frac{1}{(1+\sigma l_{OB}/100)} = \frac{1}{1+\sigma(l_{OA}+l_{AB})/100}, \quad (10)$$

显然,  $\eta_{OB} \neq \eta_{OA} \eta_{AB}$ 。即: 分段计算的渠段水利用系数的乘积不等于渠道水利用系数, 这就与式 (7) 存在矛盾。可以看出, 我们常用的考斯加科夫公式存在缺陷。

## 2 改进公式

对于一条渠道, 可以认为是由若干渠段串联而成。假定每千米输水损失率  $\sigma$  为常数, 渠道水利用系

数  $\eta$  看做渠道长  $l$  的函数, 这样将公式 (7) 归纳为我们熟悉的数学形式:

$$\eta(l_1+l_2) = \eta(l_1)\eta(l_2), \quad (11)$$

对等式取自然对数有:

$$\ln[\eta(l_1+l_2)] = \ln[\eta(l_1)] + \ln[\eta(l_2)], \quad (12)$$

设  $f(l) = \ln[\eta(l)]$ , 则有:

$$f(l_1+l_2) = f(l_1) + f(l_2), \quad (13)$$

由柯西定理可知:  $f(l) = kl$  ( $k$  为常数), 故:

$$f(l) = kl = \ln[\eta(l)], \quad (14)$$

可以得出:

$$\eta(l) = e^{kl}, \quad (15)$$

$\sigma$  为每千米渠道损失流量与净流量的比值。假设渠道净流量为  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、渠道长  $l$  为  $1 \text{ km}$ , 那么渠道毛流量等于净流量加损失水流量, 即  $1+\sigma/100$ ; 同时, 渠道毛流量也等于净流量除以渠道水利用系数, 即  $1/\eta$ , 则有:

$$1/\eta = 1+\sigma/100 \text{ 或 } \eta = (1+\sigma/100)^{-1}. \quad (16)$$

代入式 (15) 中, 确定参数  $k$ :

$$\eta(1) = e^k = (1+\sigma/100)^{-1} \text{ 或 } k = -\ln(1+\sigma/100), \quad (17)$$

将  $k$  值再次代入式 (15):

$$\eta = e^{[-\ln(1+\sigma/100)]l} = e^{\ln(1+\sigma/100)^{-1}l} = (1+\sigma/100)^{-l}, \quad (18)$$

于是得到:

$$\eta = (1+\sigma/100)^{-l}, \quad (19)$$

$$Q_B = Q_n (1+\sigma/100)^l, \quad (20)$$

改进公式由式 (7) 数理推导而来, 渠道全段水利用系数等于分段后各渠段水利用系数的乘积, 符合渠道水利用系数的定义, 式中每千米输水损失率  $\sigma$  为常数, 为渠道每千米输水损失与渠道净流量的比值, 要求计算渠道土壤均质、各向同性、砌护形式相同, 本式适用于串联渠道。

## 3 实例分析

固海扬水工程是宁夏建设最早、规模较大的生态扶贫性质的公益性扬水工程, 位于宁夏清水河中下游河谷。工程始建于 1978 年, 1986 年全部建成并投入运行, 设计流量  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 。工程从黄河干流取水, 分八级泵站及干渠, 渠首位于宁夏中宁县泉眼山黄河右岸, 一泵站从黄河取水后接入固海扬水一干渠, 在一干渠末端布设二泵站接入二干渠, 以此类推串联至八干渠, 扬水工程净扬程  $256.7 \text{ m}$ , 干渠总长度达  $116.03 \text{ km}$ <sup>[8]</sup>, 灌溉面积  $57.73$  万亩, 固海扬水工程现状总体布置示意图 2, 基本参数见表 1。

脱贫攻坚等项目规划在固海灌区新增中宁县喊叫水灌区和海原县西安灌区, 总灌溉面积  $37$  万亩, 需水量约  $6000$  万  $\text{m}^3$ , 固海扬水工程供水能力不足, 规划对其扩建改造。为此, 需要对固海灌区各级灌域

需水量进行预测, 并科学确定各级干渠流量, 需水量预测在调查清楚各级干渠灌域种植面积, 确定种植结构、灌溉定额、灌溉制度的基础上, 可确定净需水量和需水流量。固海扬水工程干渠输水距离长, 若干渠全程采用固定渠道水利用系数, 会导致各级干渠计算流量和实际需水流量之间误差较大, 须分段分析干渠水利用系数, 准确计算各级干渠输水损失, 为工程设计提供更科学的技术依据。

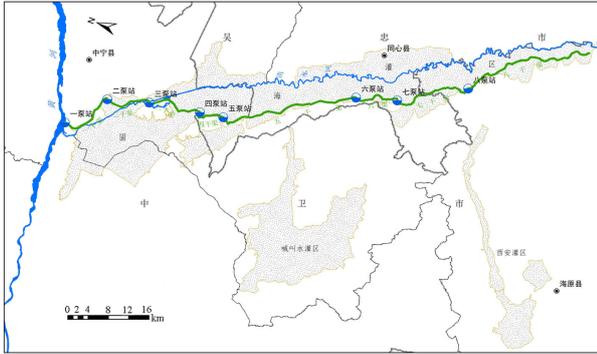


图 2 固海扬水工程现状总体布置示意

Fig.2 The general layout of the current situation of Guhai water raising project

表 1 固海扬水工程基本参数

Table 1 Basic parameters of Guhai water raising project

泵站	干渠	设计流量/(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	渠长/km	控制面积/万亩
一泵站	一干渠	20.0	11.45	0.67
二泵站	二干渠	19.4	8.96	8.58
三泵站	三干渠	18.7	10.99	14.26
四泵站	四干渠	16.0	5.95	10.89
五泵站	五干渠	10.4	28.48	1.88
六泵站	六干渠	7.9	9.15	14.50
七泵站	七干渠	5.4	16.52	6.95
八泵站	八干渠	3.5	24.53	57.73
合计	-	-	116.03	0.67

根据宁夏水科院研究成果, 固海扬水工程干渠水利用系数测定值为 0.883<sup>[9]</sup>, 每千米渠道输水损失  $\sigma$  为 0.184%, 按考斯加科夫公式和改进公式计算的渠道水利用系数成果见表 2。分析可知: 式 (5) 和式 (15) 2 种方法计算的各渠段水利用系数非常接近, 但由于干渠延伸长, 考斯加科夫公式计算的干渠末端水利用系数为 0.824, 而各渠段乘积为 0.811, 误差

表 3 不分段与改进公式分段各级干渠水量对比

Table 3 Comparison of water quantity of all levels of trunk channel between unsegmented and improved formula 万 m<sup>3</sup>

干渠	直开口需水量	全程采用相系数		各干渠水利用系数	改进公式分段计算		干渠损失对比	
		本级干渠需水量	各级泵站需水量		本级干渠需水量	各级泵站需水量	全程采用相系数	利用改进公式分段
一干渠	-	0	25 057	0.979	522	25 057	0	522
二干渠	197	224	25 057	0.984	598	24 535	26	401
三干渠	2 520	2 854	24 834	0.980	2 999	23 938	334	478
四干渠	4 189	4 744	21 979	0.989	4 416	20 939	555	228
五干渠	7 124	8 068	17 236	0.949	7 966	16 523	944	842
六干渠	664	752	9 168	0.983	806	8 557	88	143
七干渠	5 542	6 277	8 416	0.970	5 774	7 750	734	232
八干渠	1 889	2 140	2 140	0.956	1 976	1 976	250	87
合计	22 125	25 057			25 057		2 932	2932

2 种方法计算的各级干渠需水流量见表 4。由表 4

1.6%, 干渠水利用系数平均值为 0.889, 大于测定值 0.883, 考斯加科夫公式计算的干渠水利用系数与实际不符, 因此其不宜直接用于长距离输水渠道分段计算。改进公式计算的干渠末端干渠水利用系数为 0.808, 各渠段乘积亦为 0.808, 二者一致, 干渠水利用系数平均值为 0.883, 与测定值相同, 说明改进公式的逻辑性严密, 更具科学性。

表 2 改进公式和考斯加科夫公式计算各渠段渠道水利用系数对比

Table 2 The improved formula and Kostiakov formula are used to calculate the water utilization system of each channel section

干渠	长度/km	考斯加科夫公式		改进公式	
		各渠段	至一泵站	各渠段	至一泵站
一干渠	11.45	0.979	0.979	0.979	0.979
二干渠	8.96	0.984	0.964	0.984	0.963
三干渠	10.99	0.980	0.945	0.980	0.944
四干渠	5.95	0.989	0.936	0.989	0.934
五干渠	28.48	0.950	0.892	0.949	0.886
六干渠	9.15	0.983	0.879	0.983	0.871
七干渠	16.52	0.971	0.856	0.970	0.845
八干渠	24.53	0.957	0.824	0.956	0.808
合计	116.03	0.811	-	0.808	-

为确定固海扬水工程各级干渠需水量和需水流量, 首先确定各级干渠直开口 (干渠分水口) 的需水量和需水流量, 然后采用不分段和本次改进公式方法分段计算渠道水利用系数, 分别推求各级干渠需水流量和需水量, 2 种方法计算的各级干渠需水量见表 3。分析可知: 固海灌区干渠直开口需水量 22 125 万 m<sup>3</sup>, 不分段和改进公式方法分段的一泵站取水量均为 25 057 万 m<sup>3</sup>, 干渠水利用系数平均值均为 0.883, 干渠损失水量 2 932 万 m<sup>3</sup>。但干渠损失水量在各干渠的分配差距悬殊, 不分段的各干渠损失由本级干渠需水量和干渠平均水利用系数确定, 不能反映干渠流量和干渠长度的影响, 如一干渠无灌溉面积和用水户, 无直接用水, 则一干渠无干渠输水损失, 显然与实际情况不符。改进公式各级干渠输水损失水量由干渠输水量和干渠长度决定, 能够正确反映干渠输水损失的分配, 符合现状实际运行情况。

可知, 干渠直开口需水量为 20.77 m<sup>3</sup>/s, 不分段 (干渠

水利用系数采用平均值, 0.883) 计算的一干渠流量 23.52 m<sup>3</sup>/s, 改进公式计算的一干渠流量 23.51 m<sup>3</sup>/s, 二者基本一致; 但随着干渠延伸, 四干渠不分段时计算的流量为 20.46 m<sup>3</sup>/s, 改进公式计算的流量为 19.49 m<sup>3</sup>/s, 计算流量相差 0.97 m<sup>3</sup>/s, 占不分时段法的 4.8%; 八干渠不分段时计算的流量为 2.11 m<sup>3</sup>/s, 改进公式计算的流量为 1.75 m<sup>3</sup>/s, 计算流量相差 0.16 m<sup>3</sup>/s, 占不分时段法的 7.6%。不分段方法计算的干渠流量均大于改进公式, 干渠输水损失分配不符合实际, 若以不分段的成果作为干渠及泵站工程设计流量的依据, 必将对工程设计工作产生误导。

表 4 不分段与改进公式分段各级干渠流量对比

干渠	直开口 需水 流量	全程采用 相系数		改进公式分段计算			各级干渠 计算流量对比	
		本级干 渠需水 流量	各级泵 站需水 流量	各干渠水 利用系数	本级干 渠流量	各级泵站 需水流量	流量差	占比/ %
一千渠	-	0.00	23.52	0.979	0.49	23.51	0.02	0.1
二千渠	0.20	0.22	23.52	0.984	0.57	23.02	0.51	2.2
三千渠	2.51	2.84	23.30	0.980	2.96	22.44	0.86	3.7
四千渠	4.17	4.72	20.46	0.989	4.38	19.49	0.97	4.8
五千渠	6.23	7.06	15.74	0.949	7.00	15.11	0.63	4.0
六千渠	0.65	0.74	8.68	0.983	0.79	8.10	0.58	6.6
七千渠	5.14	5.82	7.94	0.970	5.36	7.31	0.62	7.9
八千渠	1.86	2.11	2.11	0.956	1.95	1.95	0.16	7.6
合计	20.77	23.52	-	-	-	-	-	-

## 4 结论

研究发现考斯加科夫公式计算的渠道全段水利用系数不等于分段渠道水利用系数的乘积, 存在缺陷, 本文采用数理方法讨论了渠道长度与渠道水利用系数的关系, 得出了改进公式, 并用于宁夏固海扬水工程设计, 相较于考斯加科夫公式, 改进公式物理意义明确, 计算的干渠损失水量分配和各级干渠流量更

符合实际情况, 可替代考斯加科夫公式, 应用于渠道水利用系数测定、渠道流量设计、渠道改造节水效果评估等生产实践中, 具有一定的实用价值。

同时, 我们也应当看到, 改进公式为渠道长度的函数, 要求每千米输水损失率为常数, 在实际工作中, 每千米输水损失率往往不能直接获取, 一般需要通过实验确定, 且受渠道沿程土壤水力参数、地下水位、渠道砌护型式影响, 渠道每千米输水损失率可能存在变化, 因此, 采用改进公式计算渠道水利用系数仍会受到限制。为了更准确计算渠道灌溉水利用系数, 经验公式在使用之前应正确估计渠道渗漏, 只有将渠道输水损失和水利用系数有效衔接, 才能更加精确计量渠道输水效率, 促进灌溉系统水资源节约和高效运行调度。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- [1] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [2] SYED N S B, ZHAO S Q. The use of empirical equations for seepage estimation in comparison with observed losses from irrigation canals[J]. Journal of Water and Land Development, 2023: 21-29.
- [3] 陈亚新. 大型灌溉系统输水效率与配水效率的计算方法[J]. 灌溉排水, 1988, 7(4): 1-9.
- [4] 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.
- [5] 白美健, 谢崇宝, 许迪, 等. 渠道输水损失计算公式中用平均流量代替净流量的误差分析[J]. 中国农村水利水电, 2001(6): 12-13.
- [6] 张霞, 李新刚, 陈利利. 渠道水利用系数计算方法及误差分析[J]. 节水灌溉, 2009(4): 49-51.
- [7] 罗玉峰, 崔远来, 郑祖金. 河渠渗漏量计算方法研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 444-449.
- [8] 宁夏固海灌区续建配套与节水改造工程可行性研究报告[R]. 2013.
- [9] 2022 年宁夏回族自治区农田灌溉水有效利用系数测算分析成果报告[R]. 2023.

## Study on Improvement of Empirical Formula of Channel Water Use Coefficient

XUE Tianzhu, WANG Ruxue, BAI Jing

(Ningxia Water Conservancy and Hydropower Surveying and Design Research Institute Co., Ltd., Yinchuan 750004, China)

**Abstract:** By analyzing the relationship between channel length and channel water use coefficient, it is found that the Kostiakov formula has obvious theoretical defects: for a homogeneous channel, the water use coefficient of the whole channel should be equal to the product of the water use coefficient of the section, but the results showed that they two were not equal. In view of this paper, we discussed the relationship between channel water use coefficient and channel length, deduced a new calculation formula, and applied it to the design of Guhai pumping project. The practice showed that the physical meaning of the improved formula is clear, the calculation results were accurate, and it had certain practical value.

**Key words:** channel water use coefficient; the Kostiakov formula; rate of loss of water per kilometer; Guhai pumping project

责任编辑: 赵宇龙