

基于作物需水的灌溉用水量核算方法及应用

温忠辉¹, 张刚¹, 鲁程鹏¹, 束龙仓¹, 阿依古丽·艾科拜尔¹, 李伟²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 南京水利科学研究所, 南京 210029)

摘要: 用水量核算方法是最严格水资源管理制度实施的一项技术支撑。以山东济宁市梁山县为研究区, 采用 FAO (国际粮农组织) 推荐的 Penman Monteith 公式, 计算了该县 3 种主要农作物的逐日作物需水量及净灌溉需水量。研究中考虑到研究区的作物种植面积、灌溉水利用系数等因素提出理论需水量和折算系数的概念, 通过推求理论需水量与实际用水量的折算系数, 对 2011 年和 2012 年梁山县灌溉用水量统计数据进行核算, 核算的相对误差分别为 0.08% 和 -1.52%, 核算结果较好。

关键词: 灌溉用水量; 作物需水量; 净灌溉需水量; 理论需水量; 折算系数

中图分类号: TV21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0370-04

Check method of irrigation water consumption and its application based on crop water requirement

WEN Zhong-hui¹, ZHANG Gang¹, LU Cheng-peng¹, SHU Long-cang¹, Ayiguli·Aikebaier¹, LI Wei²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The check method of water consumption is a technical support for the strictest water resources management system. In this paper, the Penman Monteith equation recommended by FAO was adopted to calculate the daily crop water requirement and net irrigation water demand for the three main crops in Liangshan County of Jinan City in Shandong Province. The factors such as crop planting area and irrigation water use coefficient were considered in this study and the concepts of theoretical water use and conversion coefficient were proposed. Through the calculation of the conversion coefficient between the theoretical and actual water use, the irrigation water consumption results were checked for 2011 and 2012 in Liangshan County. The relative errors were 0.08% and -1.52%, respectively, indicating that the check results are accurate.

Key words: irrigation water consumption; crop water requirement; net irrigation water demand; theoretical water use; conversion coefficient

2011 年中央 1 号文件明确提出实行最严格的水资源管理制度, 从配置、节约和保护三个方面进行最严格的水资源管理^[1], 实施水资源管理责任和考核制度需要建立统一的用水量核算方法。在国外, 关于灌溉用水量核算方法的研究较少, 但对灌溉用水量预测方法的研究较多。国内也尚无统一的灌溉用水量核算方法, 部分地区采用定额法、用水量抽样监测法、耗能测算法等。其中, 定额法较难确定一个地区作物实际的需水额度, 丰枯年来水变化也无法考虑; 抽样监测法耗时、耗力且不容易操作; 耗能测算法较为简单, 但由于各种能量损耗较难准确估计, 误差较大。甘泓等人^[2]认为用水量和降水量存在相对稳定的相关性, 并利用这一相关性建立

了用水量和降水量的关系曲线, 对用水总量进行核算。但用水量和降水量关系曲线的参数是基于线性回归得到的, 不具有物理意义。

实际上, 农业灌溉用水量核算可以通过推求净灌溉需水量来实现。以旬为单位计算作物需水量、有效降水量, 两者的差即净灌溉需水量。净灌溉需水是指必须通过灌溉补充的土壤储水量和有效降水量及地下水利用量不能满足作物需水以及其它方面要求的水量^[3]。作物需水量的计算方法主要分为直接计算法和基于参考作物蒸腾发量的方法两大类。直接计算法是根据作物需水量及主要影响因素的实际数据建立经验公式, 不能清楚表达作物需水的物理机理^[4]。

收稿日期: 2014-06-04 修回日期: 2015-01-30 网络出版时间: 2014-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.1625.019.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41172203; 41201029); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120094120019); 中国博士后科学基金面上资助(2013M540410)

作者简介: 温忠辉(1964-), 女, 江苏南京人, 副教授, 主要从事地下水水资源评价与管理方面的研究。E-mail: wenzh2812@sina.com

通讯作者: 张刚(1988-), 男, 山东济南人, 主要从事水水资源规划与管理方面研究。E-mail: 750506745@qq.com

参考作物蒸腾发量的概念是由彭曼(H. L. Penman) 1948年首先提出的。目前,计算作物需水量的首选方法就是FAO(国际粮农组织)推荐的Penman Monteith方法^[5],此方法便于实际操作应用,作物需水量完全可通过计算求得,而不必依赖于试验进行验证^[6-7]。Gunter Wriedt^[8]通过气象资料得到作物净灌溉需水量,对欧洲地区的灌溉用水量进行了预测,取得了较好的效果。付晓刚等^[9]也基于彭曼公式计算了马利沟小流域的作物灌溉需水量。

1 研究区概况

本文以山东省济宁市梁山县作为研究区。梁山县地处鲁中南山地与鲁西平原交接地带,位于济宁市的西北方向,濒临黄河(图1)。研究区属暖温带季风型大陆性气候区,四季分明,暖湿交替;多年平均气温为13.40℃,最高气温为7月份(多年月平均气温33.40℃),最低为1月份(多年月平均气温-1.90℃);多年平均降水量595mm,汛期6月-9月份降水量占年降水量的70%以上;多年平均水面蒸发量1000mm。作为济宁市的农业大县,梁山县也是主要的引黄灌溉区,灌区配套工程完善,管理水平高,取水监测资料完整。农作物种植以冬小麦、夏玉米、棉花为主,其中,小麦、玉米轮作种植,一年两熟,小麦、玉米、棉花的种植比例分别为87%、87%、13%,复种指数1.87。



图1 梁山县地理位置图

Fig. 1 Location of Liangshan County

2 农业灌溉用水量核算方法

2.1 作物需水量

作物需水量受土壤、作物、气候等多种因素影响,确定作物需水量的方法可以通过田间测定,也可以利用公式计算。目前,基于参考作物蒸腾发量的计算方法应用最为广泛,且计算精度较高^[10]。计算公式为:

表1 小麦的作物需水量(ET_c)计算参数及结果

Tab. 1 Calculated parameters and results of water demand of wheat

饱和水汽压与气温曲线的斜率 Δ /(kPa·°C ⁻¹)	净辐射量 R_n /(MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	土壤热通量 G /(MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	湿度计常数 γ /(kPa·°C ⁻¹)	平均气温 T (°C)	平均风速 u_2 /(m·s ⁻¹)
0.053	2.55	0	0.067	2.8	1.58
饱和水汽压 e_s /kPa	实际水汽压 e_a /kPa	参考作物需水量 ET_0 /mm	作物系数 K_c	作物需水量 ET_c /mm	
0.78	0.62	0.77	0.4	0.31	

2.2 净灌溉需水量

据研究,以旬为单位时段计算净灌溉需水量是比较合理的^[11]。计算时忽略降水过程中的损失,假设有效降水量等于

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

式中: ET_c 为作物需水量(mm); ET_0 为参考作物蒸腾发量(mm); K_c 为作物系数。

参考作物蒸腾发量 ET_0 采用FAO推荐的Penman Monteith公式计算,计算公式^[11-12]为:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸腾发量(mm); Δ 为饱和水汽压与气温曲线的斜率(kPa/°C); R_n 为冠层表面净辐射(MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量(MJ/(m²·d)); γ 为湿度计常数(kPa/°C); T 为平均气温(°C); u_2 为2m高处的风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa)。

从国际粮农组织FAO 56^[12]中可查出作物在标准条件下的作物系数 K_c 及修正公式,并根据当地的气候、灌溉和作物条件进行修正。修正公式为

$$K_c = K_{c,ab} + [0.04(u_2 - 2) - 0.04(RH_{min} - 45)](h/3)^{0.3} \quad (3)$$

式中: $K_{c,ab}$ 为不同生育阶段标准条件下的作物系数; u_2 为该生育阶段灌区内2m处的平均风速,m/s; RH_{min} 为该生育阶段灌区内日最低相对湿度的平均值,%; h 为该生育阶段灌区内作物的平均高度,m。

用上述方法计算得到的三种作物的作物系数计算值及灌溉试验实测值(图2)。

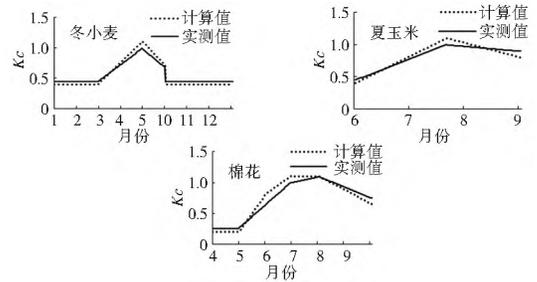


图2 主要作物的作物系数计算值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of calculated and measured values of crop coefficient for the main crops

由图2可知,根据FAO 56^[12]推荐的标准作物系数及修正公式得到的作物系数计算值与灌区实测值比较接近,说明该方法确定的作物系数可用于作物需水量计算。

根据公式(1)–公式(3),参考FAO 56中^[12]参数的详细计算过程,采用梁山气象站气象资料,计算研究区三种作物2001年–2012年逐日作物需水量,表1是2001年1月1日冬小麦需水量(ET_c)计算参数和结果。

降水量,用 p 代表降水量, h 代表净灌溉需水量,则当 $ET_c > p$ 时, $h = ET_c - p$;当 $ET_c \leq p$ 时, $h = 0$ 。

对于旱作物,有效降水量指总降水量中能够保存在作物

根系层中用于满足作物蒸发蒸腾需要的那部分水量^[14],应根据土壤的蓄水能力对 h 进行修正。根据周景春等(2007)^[15]对土壤含水量蒸减速率变化的研究,耕层相对含水量达到 80% 以上的一次降水过程过后,在连续 10.7~38.3 d 无降水的情况下,耕层相对含水量尚可维持在 60% 以上。因此,假定在发生强降水的条件下,土壤蓄水可以持续提供作物需水 20 d 左右。表 2 是 2004 年冬小麦、夏玉米(轮作种植)逐旬需水量(ET_c)、降水量(p)和净灌溉需水量(h)。冬小麦的生长期为 1 月-5 月、10 月-12 月份,夏玉米生长期为 6 月中旬-9 月上旬。

表 2 小麦、夏玉米逐旬需水量(ET_c)、降水量(p)和净灌溉需水(h)

Tab. 2 Ten day crop water requirement(ET_c), precipitation(p), and net irrigation demand(h) of wheat and corn (unit: mm)

月份	上旬			中旬			下旬		
	ET_c	p	h	ET_c	p	h	ET_c	p	h
1 月	3.8	0	3.8	3.65	1.8	1.85	5.14	0	5.14
2 月	6.22	0	6.22	9.06	1.05	8.01	7.92	9.2	0
3 月	12.05	0	12.05	15.13	4.45	10.68	16.97	0.55	16.42
4 月	30.04	5.8	24.24	35.26	0.4	34.86	39.47	11.5	27.97
5 月	42.15	1275	30.15	38.27	28.7	9.57	38.64	24.45	14.19
6 月				18.87	30.4	0	30.96	12.15	7.28
7 月	37.49	3905	0	27.36	135	0	50.65	55.35	0
8 月	45.49	7495	0	33.35	75.45	0	30.37	64.65	0
9 月	30.93	0.95	0						
10 月	10.78	0.7	10.08	7.8	0.35	7.45	7.62	3.45	4.17
11 月	7.43	8.25	0	4.96	2.4	1.74	3.96	12.1	0
12 月	4.57	1.65	2.97	2.99	0.25	2.74	2.78	10.7	0

将逐旬净灌溉需水量累加得到全年净灌溉需水量,用 $h_{总}$ 表示。图 3 为研究区 2001 年-2012 年作物净灌溉需水量,可以看出,冬小麦和棉花净灌溉需水量较大,夏玉米最小;夏玉米和棉花需水量年际变化较大,冬小麦最小。原因可能是冬小麦整个生长期处于枯水季节,蒸发蒸腾量大且降水少,净灌溉需水量大而且稳定;玉米生长期处于丰水季节,降水充沛,净灌溉需水量小,但若遇枯水年,净灌溉需水量会急剧增加,如 2001 年和 2002 年;棉花生长期较长,经历枯水和丰水季,因此,净灌溉需水量大且年际变化较大。净灌溉需水综合反映了自然因子、作物特性对灌溉用水量的影响,是计算灌溉用水量的重要的参考依据。

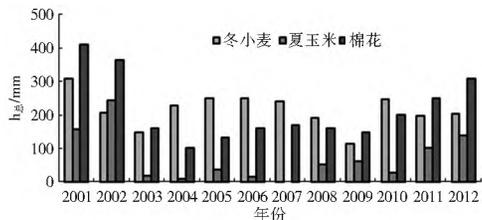


图 3 2001 年-2012 年作物净灌溉需水量

Fig. 3 Net irrigation water demand in 2001 and 2012

2.3 折算系数

不同作物的净灌溉需水 $h_{总}$ 乘以种植面积 A 得全年净

灌溉需水总量,用 Q_1 表示, Q_1 除以灌溉水利用系数 η 得到理论需水量,用 Q_2 表示,即 $Q_2 = h_{总} \times A / \eta$ 。以 Q_3 表示实际用水量,用理论需水量除以实际用水量得到折算系数,用 α 表示。表 3 为折算系数 α 的计算结果,其中 $h_{综}$ 是作物净灌溉需水量的加权和(以种植面积为权重),与 α 建立拟合模型。除 2001 年和 2002 年两个特枯年份折算系数较大外,其它值多处于 0.7~1.5 之间。

表 3 折算系数 α 计算参数及结果

Tab. 3 Calculated parameters and results of α

年份	净灌溉需水量 h/mm	净灌溉需水总量 $Q_1/万 m^3$	灌溉水利用系数 η	理论需水量 $Q_2/万 m^3$	实际用水量 $Q_3/万 m^3$	折算系数 α
2001	458	19 334	0.35	55 241.57	24 867	2.22
2002	439	18 811	0.44	42 751.40	17 800	2.40
2003	166	7 263	0.45	16 140.96	16 984	0.95
2004	219	9 759	0.49	19 916.93	14 429	1.38
2005	265	11 832	0.49	24 146.88	16 337	1.48
2006	253	12 559	0.5	25117.63	17 840	1.41
2007	232	11 542	0.5	23 084.24	19 579	1.18
2008	231	9 907	0.5	19 814.64	18 634	1.06
2009	172	7 385	0.51	14 480.44	21 018	0.69
2010	262	11 189	0.51	21 939.12	24 461	0.90

利用 2001 年-2010 年净灌溉需水 $h_{综}$ 和折算系数 α ,得到净灌溉需水量与 α 的拟合曲线(图 4)以及计算折算系数 α 的经验公式:

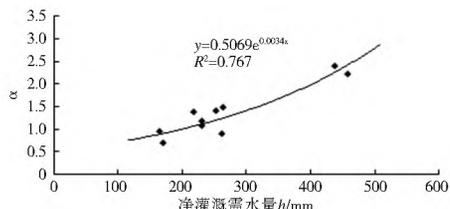


图 4 折算系数 α 与净灌溉需水量的拟合关系

Fig. 4 Relationship between α and net irrigation water demand

$$\alpha = 0.5069e^{0.0034h} \quad (4)$$

可见,理论需水量与实际用水量之间的比值,即折算系数与净灌溉需水量之间存在较好的非线性正相关关系。分析发现,这种正相关关系在灌区具有重要的实践意义,它与灌区民众的灌溉习惯相一致。例如,当遇到枯水年时,净灌溉需水量变大,折算系数也变大,原因是灌区民众更倾向于传统的灌溉习惯,并没有因为降水减少而大幅度增加灌溉用水,此时,理论需水大于实际用水;当遇到丰水年时,净灌溉需水量变小,折算系数也变小,原因是灌区民众没有因为降水增加而大幅度减少灌溉用水,此时,实际用水大于理论需水。

2.4 核算结果

由公式(4)计算 2011 年和 2012 年净灌溉需水量所对应的 α 值,用 2011 年和 2012 年的理论需水量除以对应的 α ,得到用水量核算值(Q_4),据此对用水量统计数据(Q_3)进行核算,结果见表 4。

表4 灌溉用水核算结果

Tab. 4 Check results of agricultural water demand

年份	净灌溉 需水量 h/mm	折算 系数 α	理论 需水量 $Q_2/万m^3$	用水量 核算值 $Q_4/万m^3$	用水量 统计值 $Q_3/万m^3$	相对 误差 (%)
2011年	292.39	1.3698	30745.03	22444.24	22426	0.08
2012年	338.97	1.6049	35629.6	22200.67	22543	-1.52

表4显示,核算的相对误差分别为0.08%和-1.52%,效果较好。相对误差较小的原因可能是2011年和2012年的净灌溉需水量正好处于多年平均水平300mm左右,说明此核算方法在平水年时核算结果是较理想的。而对于净灌溉需水量小于200mm、大于400mm的丰水年和枯水年的情况,由于本文核算年份有限,没有这两种情况下的核算结果。根据净灌溉需水和折算系数的拟合结果,在出现枯水年或丰水年时,净灌溉需水量变化较大,核算误差可能会有所增加,但不会太大。

3 结语

基于作物需水的灌溉用水量核算方法具有一定的理论基础及物理意义,此方法根据实测的气象数据及灌区实际情况计算净灌溉需水,提出理论需水量和折算系数的概念,通过推求理论需水量与实际用水量之间的折算系数,据此进行的核算能够客观地反映灌区民众的灌溉习惯,核算结果相对误差合理。因此,该方法可以尝试应用于部分灌区的用水量核算工作中。由于核算年份较少,在枯水、丰水年情况下的核算还需继续研究。此方法的不足之处在于未考虑种植结构调整带来的节水效应和多重灌溉水源条件下的用水量核算,因此,在今后的研究中,需增加不同情景下的核算方法研究。

参考文献(References):

[1] 刘淋淋,曹升乐,于翠松,等.用水总量控制指标的确定方法研究[J].南水北调与水利科技,2013,11(5):159-163. (LIU Linlin, CAO Shengle, YU Cuisong, et al. Research on determination of the control index of total water use[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 159-163. (in Chinese))

[2] 甘泓,游进军,张海涛.年度用水总量考核评估技术方法探讨[J].中国水利,2013(17):25-28. (GAN Hong, YOU Jirjun, ZHANG Haitao. The technical approach of annual gross water usage evaluation[J]. China Water Resources, 2013(17): 25-28. (in Chinese))

[3] DENG Xiping, SHAN Lun, ZHANG Heping, et al. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 80(1/3): 23-40.

[4] 马海燕,缴锡云.作物需水量计算研究进展[J].水科学与工程,2006(5):5-7. (MA Haiyan, JIAO Xiyun. Research progress of the crop water demand calculation[J]. Water science and engineering technology, 2006(5): 5-7. (in Chinese))

[5] 顾世祥,李远华,何大明,等.参考作物需水量计算方法在纵向岭谷区的应用对比[J].灌溉排水学报,2007,26(4):21-26. (GU Shirxiang, LI Yuanhua, HE Daming, et al. The application contrast of Reference crop water requirement calculation methods in the area of LRGR[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(4): 21-26. (in Chinese))

[6] 罗金耀.节水灌溉理论与技术[M].武汉:武汉大学出版社,2003. (LUO Jinyao. Water saving irrigation theory and technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. (in Chinese))

[7] 王仰仁,孙小平.山西农业节水理论与作物高效用水模式[M].北京:中国科学技术出版社,2003. (WANG Yangren, SUN Xiaoping. Agricultural water saving theory and efficient crop water use model in Shanxi[M]. Beijing: Science and Technology Press of China, 2003. (in Chinese))

[8] Gunter Wriedt, Marijn Van der Velde, Alberto Aloe, et al. Estimating irrigation water requirements in Europe[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373: 527-544.

[9] 付晓刚,周亚红,毕攀,等.基于彭曼公式的作物灌溉需水量确定方法研究[J].人民黄河,2009,31(5):85-88. (FU Xiaogang, ZHOU Yahong, BI Pan, et al. Determination method research of crop irrigation requirement based on Penman Monteith equation[J]. Yellow River, 2009, 31(5): 85-88. (in Chinese))

[10] 李彩霞,陈晓飞,韩国松,等.沈阳地区作物需水量的预测研究[J].中国农村水利水电,2007(5):61-64. (LI Caixia, CHEN Xiaofei, HAN Guosong, et al. Research on crop water requirement prediction in Shenyang Region[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(5): 61-64. (in Chinese))

[11] 刘钰, L S Pereira, J L Teixeira. 参照蒸发量的新定义及计算方法对比[J].水利学报,1997(6):27-33. (LIU Yu, L S Pereira, J L Teixeira. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. Journal of Water Conservancy, 1997(6): 27-33. (in Chinese))

[12] R G Allen, L S Pereira, Dirk Raes et al. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome, 1998.

[13] 刘钰,汪林,倪广恒,等.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J].农业工程学报,2009,25(2):6-12. (LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25, (2): 6-12. (in Chinese))

[14] 许迪,蔡林根,王少丽,等.农业持续发展的农田水土管理研究[M].北京:中国水利水电出版社,2000. (XU Di, CAI Lingen, WANG Shaoli, et al. Farmland soil and water management research of agricultural sustainable development[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))

[15] 周景春,苏玉杰,张怀念,等.0~50cm土壤含水量与降水和蒸发的关系分析[J].中国土壤与肥料,2007,6:23-27. (ZHOU Jingchun, SU Yujie, ZHANG Huainian, et al. Analysis on 0~50cm soil moisture content and precipitation and evaporation relationship[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2007, 6: 23-27. (in Chinese))