

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2016.01.02

# 基于Penman-Monteith模型的冬小麦灌溉需水量估算

(1.江西省灌溉排水发展中心,江西 南昌 330013;2.扬州大学,江苏 扬州 225009;3.江西水利职业学院,江西 南昌 330013)

**摘要:** 为估算冬小麦灌溉需水量,选取淮河流域片淮地区为研究对象,研究冬小麦在灌溉中的节水空间,为节水灌溉制度的制定和高效灌溉管理提供科学参考,同时为实际灌溉创造节水效益。基于Penman-Monteith模型,结合当地气象数据,对冬小麦灌溉需水量进行了估算,并与实际灌溉需水量进行了对比分析。结果表明,Penman-Monteith模型估算的冬小麦灌溉需水量与实际灌溉需水量具有较高的相关性,且模型估算结果更准确、更合理。该模型可为冬小麦灌溉需水量的估算提供科学依据。

**关键词:** Penman-Monteith模型;冬小麦;灌溉需水量

**中图分类号:** TV93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2016)01-0011-04

## 0 引言

淮河流域片淮地区位于安徽省北部,区位优势明显,在我国国民经济中占有十分重要的战略地位。然而,淮河流域人均水资源占有量却不足 500 m<sup>3</sup>,仅占我国人均水资源的 1/5,属于水资源紧缺地区。水资源时空分布不均、农业用水浪费严重、农业灌溉水有效利用系数低等问题一直是困扰淮河流域水资源供求矛盾的因素。

作物需水量作为农业用水的重要组成部分,是整个国民经济中消耗水分的主要部分,是确定作物灌溉制度以及地区灌溉用水量的基础,是流域规划、地区水利规划、灌排工程规划、设计和管理的基本依据<sup>[1]</sup>。作物需水量的研究有助于分析灌溉用水量,依据作物对水的需求量合理科学的进行灌溉,节约水资源,调度富余水资源。合理统筹安排淮河水资源,不仅是缓解当前淮河流域用水紧张局势的有效措施,也是目前我国农业可持续发展的一项长期战略目标,符合我国节水灌溉和节水农业的发展形势。

长期以来作物需水量及其变化规律的研究一直受到国内外许多学者的重视<sup>[2]</sup>,但很少从节水角度对作物需水量的研究,本文基于水利部 2011 年水利部公益性行业《淮河流域片淮地区浅层地下水高效利用关键技术研究》

课题,选取淮河流域片淮地区冬小麦为研究对象,研究冬小麦在灌溉中的节水空间,为节水灌溉制度的制定和高效灌溉管理提供科学参考,同时为实际灌溉创造节水效益。

## 1 研究对象与方法

作物需水量指作物在土壤水分和养分适宜、管理良好、生长正常、大面积高产条件下的棵间土面(或水面)蒸发量与植株蒸腾量之和。作物需水量受气候状况、土壤特性等多种因素影响<sup>[3]</sup>。

五道沟试验站 2010~2011 年地中蒸渗仪测筒中冬小麦于 2010 年 10 月 23 日适时播种,2011 年 6 月 2 日收割,小麦品种为皖麦 24。同时利用试验站气象观测场等条件,观测记录平均饱和差、平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、平均相对湿度、平均风速、降水量、蒸发量等气象环境要素的实测数据,搜集试验站地理位置、海拔高度等物理要素。

### 1.1 作物需水量计算

作物需水量的计算最主要的因素之一就是参考作物需水量  $ET_0$ ,英国学者 Penman 于 1948 年首次提出以空气动力学与能量平衡联立的、具有坚实理论基础的综合方法,用于计算湿润下垫面的蒸发潜力。经过前人一系列研究探索,Allen 等(1989)提出了计算  $ET_0$  的修正

收稿日期:2016-01-19  
基金项目:国家自然科学基金项目(201101010101)资助  
作者简介:李俊,男,1988年生,硕士,助理研究员,主要从事农业节水灌溉工程设计与管理工作。

Penman-Monteith 模型,其被广泛接受并用于计算不同时间段的  $ET_0$ ,FAO(1998)进一步发展成全球非常适用的  $ET_0$  计算方法,也就是目前最常用的彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith)公式 4(Valentijn and Roeland.2006;Allen et al.1998)<sup>[4-5]</sup>,并被编入我国《灌溉试验规范》(SL13-2004)。

在不受水分限制条件下,作物需水量只与作物本身的生理特性和外界蒸发条件如气象因子等因素有关,全面查阅国内外有关课题方向的研究现状、方法和技术,本文作物需水量  $ET_c$  的计算采用 FAO 灌溉排水丛书第 56 分册推荐的单作物系数法。可用以下公式计算<sup>[6]</sup>:

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

式中: $ET_c$  为作物供水充足条件下的蒸发蒸腾量,mm/d; $K_c$  为作物系数; $ET_0$  为参考作物需水量,mm/d。

### 1.2 参考作物需水量计算

参考作物需水量( $ET_0$ )指高度一致(8~15 cm)、水分充足、生长旺盛、完全覆盖地面的绿色草丛植被(苜蓿或禾草)的蒸散蒸腾量,即参考作物需水量<sup>[7]</sup>。严格的限定了地表植物,因此其变化只与气象环境因素有关。

目前,用来估算参考作物需水量  $ET_0$  的方法大约有 50 种<sup>[8]</sup>。为了对其中的一些方法进行全面比较和评价,Jensen 等分别对不同气候条件下计算参考作物需水量的主要方法进行了比较研究。结果表明,不论在湿润或干旱半干旱地区,Penman Monteith 公式计算参考作物需水量最准确<sup>[9]</sup>。本文采用 FAO 灌溉排水丛书第 56 分

册推荐的 Penman-Monteith 公式计算五道沟试验站作物生长期内的  $ET_0$ <sup>[10-13]</sup>。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273.3} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中: $R_n$  为植被表面净辐射量, MJ/m<sup>2</sup>d;  $G$  为增热土壤所消耗的热量, MJ/m<sup>2</sup>d;  $\Delta$  为饱和水汽压-温度关系曲线在  $T$  处的切线斜率, kPa/°C;  $\gamma$  为湿度计常数, kPa/°C;  $T$  为空气平均温度, °C;  $u_2$  为在地面以上 2m 高处的风速, m/s;  $e_s$  为空气饱和水汽压, kPa;  $e_a$  为空气实际水汽压, kPa。

### 1.3 作物系数 $K_c$

作物系数  $K_c$  是作物种类、土壤类型、气候环境、作物生长状况等多种因素对土壤蒸发、作物蒸腾的综合效应的反映,是作物蒸发蒸腾量的重要影响因素之一。国内外研究将作物系数  $K_c$  统一定义为:将实际蒸发蒸腾量  $ET_c$  与参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  之比<sup>[14]</sup>。

对于冬小麦的作物系数,本文直接采用前人学者对淮河流域冬小麦作物系数的研究成果,根据五道沟试验站所在的区域位置,处于中部和西部及沿淮冬麦区,选定所需小麦逐月作物系数  $K_c$  (见表 1)<sup>[15]</sup>。

## 2 作物需水量计算

### 2.1 作物需水量计算

采用 Penman-Monteith 公式计算的 2010 年 10 月~

表 1 冬小麦逐月平均作物系数  $K_c$

月份	10	11	12	1	2	3	4	5	6
冬小麦	0.71	0.94	0.89	0.8	0.92	1.06	1.41	1.3	0.63

2011 年 6 月日均参考作物需水量( $ET_0$ ),先划定实验区冬小麦的生长发育阶段及各发育阶段的计算日期,选定小麦相应阶段的作物系数  $K_c$ ,依据作物需水量  $ET_c$  单作物系数计算公式(式 1),对冬小麦作物需水量进行逐日计算,累加得到冬小麦在各生育阶段内需水量值  $ET_c$ 。将计算结果列于表 2,2010~2011 年冬小麦生长期 223 天需

水总量为 343.50 mm。

### 2.2 作物需水量分析

如图 1 中显示冬小麦全生育期逐日作物需水量变化过程和需水量累积变化过程。作物需水量的大小随生物学特性、生长发育状况和品种以及气候条件、生长季节等而异,冬小麦每日需水量不同。图中累积曲线为一

表 2 2010~2011 年冬小麦各生育期  $ET_c$  计算成果表

生育阶段 起讫时间(月·日)	播种-出苗 10.23~12.20	出苗-返青 12.21~2.10	返青-拔节 2.11~3.20	拔节-抽穗 3.21~4.20	抽穗-灌浆 4.21~5.15	灌浆-成熟 5.16~6.2	合计
参考作物需水量	49.58	24.99	38.14	59.31	75.27	51.31	298.60
冬小麦需水量	43.06	21.17	38.69	78.02	100.60	61.96	343.50

呈增长趋势的凹曲线,凹曲线的特性就是先缓再急,冬小麦需水量随时间的推移其增速越来越大,生长前期(拔节期)以前需水平缓;生长盛期为冬小麦需水量最多的时段,曲线最陡、斜率最大、增速最大。

冬小麦需水规律是由其本身的生物学特性及其生长发育状况和土壤条件、气候、土壤深层渗透、地下水

供给等外部因素共同作用的结果。本文主要考虑气候作为主要的影响因素,冬小麦需水量随气候的变化而显示出较大变化,其值在 0.10~6.00 mm/d 范围内波动。另外,不同气象站点冬小麦播种、收获日期不同,这也可能是导致冬小麦生育期理论需水量与多年平均值存在差异的原因之一。

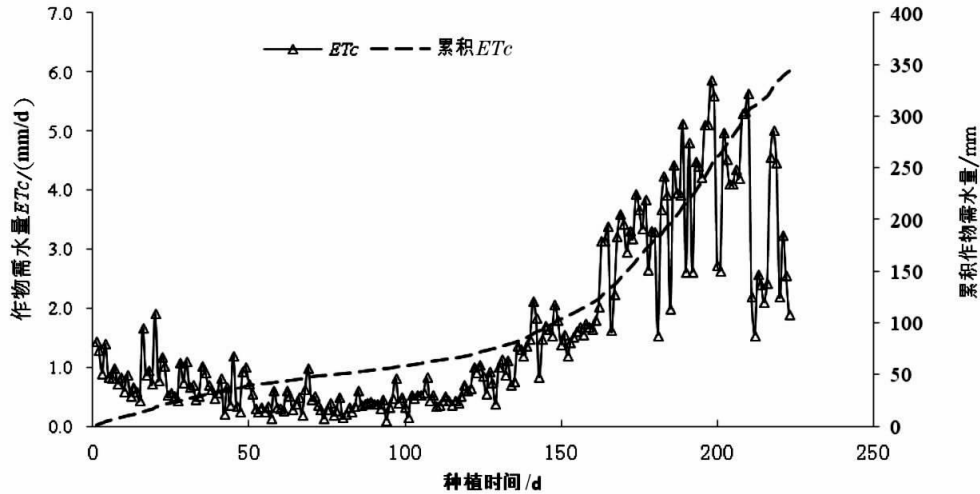


图 1 2010~2011 年冬小麦全生育期作物需水量变化过程

根据安徽省水利科学研究院重点实验室实验资料,淮北地区小麦多年平均全生长期需水量 449.90 mm, 6 个生育阶段:播种~出苗,出苗~返青、返青~拔节、拔节~抽穗、抽穗~灌浆、灌浆~成熟期,其多年平均需水量分别为 91.30 mm、33.70 mm、43.20 mm、135.00 mm、112.50 mm、34.20 mm。通过作物系数法计算 2010~2011 年冬小麦,各生育阶段需水量为:43.10 mm、21.20 mm、38.70 mm、78.10 mm、100.60 mm、62.00 mm。通过表 3 显示,以计算值减多年平均值,其差异值分别为-48.24 mm、-12.53 mm、-4.52 mm、-56.98 mm、-11.90 mm、27.76 mm,全生育期需水量的差异高达-106.40 mm,可知冬小麦生长过程中有巨大的节水空间。

通过图 2 显示,可进一步了解到冬小麦不同生长时间的需水过程,公式计算得出的需水量与多年平均需水

量进行拟合对比,其变化规律呈现出较好的一致性,越冬前期偏大,越冬时期最小,越冬期由于小麦生长缓慢或停止,气温低,需水强度最小<sup>[6]</sup>。春季返青后,随着气温逐渐回升,小麦生长加快,随着返青拔节期的到来,需水量呈现大幅度的上升,在拔节至灌浆最大,后期再逐渐减少。抽穗~灌浆阶段的需水量一般要占总需水量的 1/2 以上,需水强度平均达到 3.30 mm/d,是冬小麦的需水最为关键的时期。然而,其计算值在前 5 个生长阶段均比多年平均值少,仅在灌浆~成熟期比多年平均值高。

### 3 拟合对比

通过拟合对比,计算需水量总体比多年平均需水量少,然而其变化规律呈现出较好的一致性。说明本文所

表 3 2010~2011 年冬小麦各生育期 ETc 计算成果表

mm/d

生育阶段 起讫时间(月·日)	播种~出苗 10.23~12.20	出苗~返青 12.21~2.10	返青~拔节 2.11~3.20	拔节~抽穗 3.21~4.20	抽穗~灌浆 4.21~5.15	灌浆~成熟 5.16~6.2	合计
需水量计算值	43.06	21.17	38.69	78.02	100.60	61.96	343.50
冬小麦多年平均需水量	91.30	33.70	43.20	135.00	112.50	34.20	449.90
需水量差值	-48.24	-12.53	-4.52	-56.98	-11.90	27.76	-106.40

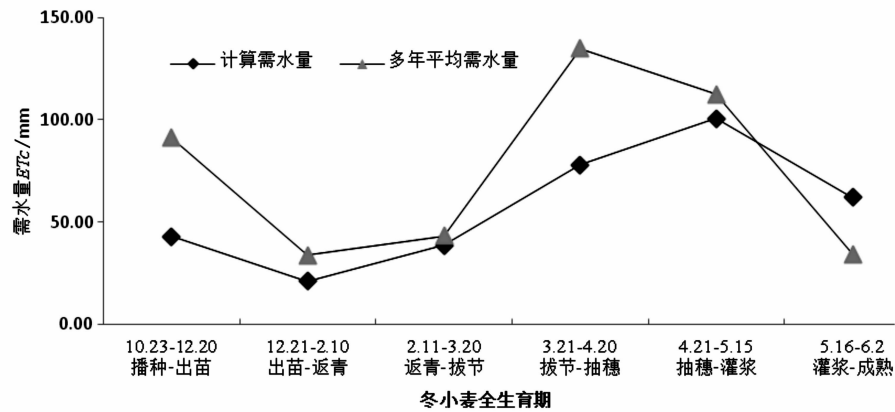


图2 冬小麦生育阶段需水量变化比较

提出的作物需水量计算方法,经对小麦作物需水量和需水规律的计算分析,与农业生产实践比较相符,具有一定的实用性。应用本方法计算作物需水量,基本可以满足指导生产和科研工作参考的需要。计算需水量可作为冬小麦生育期的理论需水量,此结果可作为相近水平年灌溉制度制定的重要参考依据。

理想状态下冬小麦的需水量,基本可以维持冬小麦自身生长,实际灌溉中,灌溉水量对作物需水量的大小影响非常大,对作物供给的水量越多,通过蒸发蒸腾的水也越多,作物消耗的水量就越多。而在土壤含水量高于临界含水量时,作物生长状况和产量形成基本不受水分条件的影响,多余消耗的水对作物的生长起着微乎其微的作用。相反,过量的灌溉很有可能会导致土壤含水量长期维持在较高的状态,通气性差,恶化了根际微循环环境,影响作物的正常生产,甚至造成作物根系腐烂。所以,在实际灌溉中,这部分超出实际需水量的用水量即为节水空间;经研究,相较于多年平均需水量,在冬小麦的前5个生长阶段均存在节水空间,可适当减少灌溉量。

因此,在灌溉过程中,应遵循作物自身特性的需水规律,科学的进行人工灌溉补水,在满足作物正常生长生产所需水量情况下,不仅可使作物充分利用根系区积蓄的有效水分,加快作物生理成熟,提高地下水利用率,减少人工灌溉补水,节约水资源。

#### 参考文献:

- [1] 房军,方小宇,吕东玉,等.丘陵半干旱区作物需水规律的研究进展[J].安徽农业科学,2006,34(19):4847-4849.
- [2] 李远华,张明注,等.非充分灌溉条件旱作物需水量分析计算研究[J].武汉水利电力大学学报,1994,27(5):506-512.
- [3] 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(12):6-12.

- [4] Valentijn R.N.Pauwels, Roeland Samson. Comparison of different methods to measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland[J]. Agricultural Water Management, 2006. 82:1-24.
- [5] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and Drain Paper 56 [M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.56.
- [6] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J].农业工程学报, 2000, 16(5):26-30.
- [7] Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements[A]. Food and Organization United Nations, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd edition [C]. Rome, 1977.
- [8] M.E.Grismer, M.Orang, R.Snyder et al. 2002. Pan Evaporation to Reference Evapotranspiration Conversion Methods. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 128 (3): 180-184.
- [9] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements [R]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990, 70 :332.
- [10] Allen R G, Pruitt W O, Wright J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference  $ET_0$  by the FAO 56 Pen man -Monteith method [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81:1-22.
- [11] 雷志栋主编.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1987,196.
- [12] 张和喜. 阜新地区参考作物需水量计算与非充分灌溉预报研究[D].辽宁沈阳:沈阳农业大学,2007:17-22.
- [13] 刘倪,夏伟,丁杰,等.几种参考作物蒸散量计算方法的比较[J].河北科技大学学报,2009,30(1):17-24.
- [14] 梁文清.冬小麦、夏玉米蒸发蒸腾及作物系数的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012:35.
- [15] 王晓东.淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析[J].资源科学,2013,35(3):665-672.
- [16] 钟兆站,赵聚宝,等.中国北方主要旱地作物需水量的计算与分析[J].中国农业气象,2000,21(2):1-5.