

# 基于水汽扩散理论的水稻需水量数学模型

戚颖<sup>1,2</sup>, 赵雨森<sup>1</sup>, 王斌<sup>2</sup>, 朱士江<sup>2</sup>

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 东北农业大学水利与建筑学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

**摘要** 首先分析了气象要素包括气温、风速、空气饱和差、日照时数及蒸发量对水稻需水量的影响。然后, 根据水汽扩散理论建立需水量基本方程, 考虑气象要素对水汽交换系数的影响, 建立水汽交换系数公式, 从而导出计算水稻需水量的五因素数学模型。将该数学模型 FAO56 Penman-Monteith 公式需水量模型在寒地稻区进行对比分析。结果表明, 该模型比 Penman-Monteith 公式具有较高的精度, 可以作为区域性计算公式在稻作灌区中应用。

**关键词** 需水量; 扩散理论; 节水灌溉; PM 公式

**中图分类号** TV 122 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)12-03473-03

## Crop Water Requirement Mathematical Model Based on Vapor Diffusion Theory

QI Ying, ZHAO Yu-sen et al (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040; College of Water Conservancy and Building Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030)

**Abstract** The effects of meteorological factors including temperature, wind velocity, air saturation deficit, sunshine hours and evaporation on rice water requirement were analyzed. And then, according to vapor diffusion theory, the basic equation for rice water requirement was established. Considering influences of meteorological factors on exchange coefficient of vapor, the equation for exchange coefficient of vapor was established. At last, the final mathematical model for crop water requirement was got. This model and FAO56 Penman-Monteith equation were used to calculate rice water requirement in cold area. The results showed that this model has a more accuracy, compared with Penman-Monteith equation. As a regional empirical equation, it can be applied in cold area.

**Key words** Water requirement; Vapor diffusion theory; Water-saving irrigation; Penman-Monteith equation

水稻需水量由水稻蒸腾量与棵间蒸发量组成, 属于生理需水, 是水稻水分消耗中主要影响产量的部分, 是水稻实行节水灌溉优化农田水资源配置的理论基础。因此, 研究水稻需水量数学模型, 准确计算水稻需水量, 不仅具有理论意义, 而且具有实用价值。

水稻需水量的数学模型按照建立的途径不同, 可分为 3 种类型。一是以概率论为基础, 通过对大量统计数据的回归分析建立的经验公式如 Blaney-Criddle 公式、Thornthwaite 公式<sup>[1-2]</sup>。该类数学模型主要取决于大量的、完整的、长序列的统计资料, 经验性强, 对数据的准确性要求较高, 基本数据获取的难易以及数据的准确度问题直接影响该类数学模型的应用。二是以微分、偏微分方程为基础, 结合能量平衡原理、空气动力学理论及其他相关理论, 通过分析水稻蒸腾与棵间蒸发的物理过程而建立的理论公式。Penman-Monteith 公式<sup>[3]</sup>、Shuttleworth-Wallace 公式<sup>[4]</sup>等机理性数学模型<sup>[5]</sup>可被归为此类。该类数学模型主要取决于成熟的相关基本理论。这方面相关基本理论的成熟与否制约了该类数学模型精度的提高。三是以相关基本理论为依据, 辅之以足够的统计资料建立的半经验半理论公式。该类数学模型依据现有的理论公式进行推导, 结合特定区域的统计资料确定适宜的应用形式, 既有一定的理论依据, 又有较高的精度。

目前, Penman-Monteith 公式是联合国粮农组织 (FAO) 推荐使用的计算参考作物需水量的公式, 在世界各国得到广泛使用。该研究以水汽扩散理论为基础建立需水量方程。考

虑气象要素对水汽交换系数的影响建立水汽交换系数的经验公式, 导出计算水稻需水量的数学模型, 利用实测的寒区水稻需水量进行验证, 并与 Penman-Monteith 公式计算结果进行对比分析。

## 1 气象要素对水稻需水量的影响

相关研究表明, 诸多气象因子中以气温、饱和差、日照时数、蒸发量和风速对水稻需水量的影响最大<sup>[6]</sup>。太阳辐射是地球上一切能量的来源, 与作物需水量密切相关。依据辐射定律, 太阳辐射越大, 地表的长波辐射随之增大, 大气吸收的能量就越多, 气温升高。因此, 气温与大气辐射紧密相关, 与腾发量即需水量紧密相关。

水稻水分腾发以植株蒸腾和棵间蒸发的形式完成。水分子在饱和差作用下由蒸发面 (叶面和棵间水面) 扩散到空气中, 故需水量受空气饱和差的影响。许多学者研究表明, 水稻腾发量与空气饱和差呈正比的线性关系<sup>[7-9]</sup>。

在一定的范围内, 水稻光合作用随日照的增加而加强, 随之包括植物根系吸水、体内输水和叶气孔开放的植物新陈代谢过程也加强, 从而蒸腾加强; 叶片气孔的开闭也受光照的影响, 有光则气孔张开, 无光则关闭, 而气孔是水稻蒸腾作用的主要通道, 日照时间越长腾发量就越大。已有研究表明, 日照与水稻需水量呈线性关系。从水稻植株腾发出来的水汽, 需借助于水汽梯度和风的流动传送到大气中去。风可以使作物和水面上方的水汽梯度增大。另外, 风还会使水稻叶温和气温的温差加大, 从而使水稻腾发量加大。

除了上述几项外, 气象因素中其他因素如降雨量、相对湿度等也会对水稻需水量产生影响。这些因素虽然复杂, 但是影响比较小。由于作物需水量也是一种蒸发<sup>[10]</sup>, 它与气象监测中的水面蒸发量本质上一样。研究表明, 蒸发量与需

**基金项目** 国家科技支撑计划项目 (2009BADB3B04); 国家自然科学基金资助项目 (51009026, 41271046)。

**作者简介** 戚颖 (1979 - ), 女, 山东威海人, 讲师, 博士, 从事水土保持及生态安全等方面的研究。

**收稿日期** 2014-04-08

水量之间存在着显著的线性相关<sup>[11]</sup>。所以,可用蒸发量( $E$ )的函数 $f(E) = f_0 + f_5 E$ 表示其他因素对需水量的影响。

## 2 基于水汽扩散理论的需水量数学模型

**2.1 水汽扩散基本方程** 从能量的观点分析,需水量的大小主要受空气饱和差的影响。根据水汽扩散原理,在无风的条件下,由分子扩散所引起的水汽通量(需水量)与比湿的垂直梯度呈比例,即

$$ET = -D_0 \frac{dq}{dh} \quad (1)$$

式中, $D_0$ 为静风水汽扩散系数; $dq$ 为空气比湿差; $dh$ 为水汽扩散的垂直距离; $\frac{dq}{dh}$ 为比湿的垂直梯度。

方程(1)的定解条件为:饱和面即蒸发面(水分蒸发蒸腾处)高程为 $h_1$ ,气象观测高度为 $h_2$ ,得

$$ET = \frac{D_0}{h} (q_s - q) \quad (2)$$

式中, $q_s$ 为饱和面比湿; $q$ 为空气实际比湿; $h$ 为 $(h_2 - h_1)$ 。

$$\text{结合湿度公式: } q = 0.622 e_a / p_1 \quad (3)$$

式中, $e_a$ 为空气实际水汽压; $p_1$ 为大气压。

$$ET = C(e_s - e_a) \quad (4)$$

式中, $e_s$ 为饱和水汽压; $C$ 为常数。

方程(4)即为根据水汽扩散原理建立的基本方程。它只考虑饱和差对需水量的影响,利用能量观点在无风的情况下求得。

**2.2 多因素影响的水汽交换系数** 在水汽扩散基本方程(4)中, $C$ 为与静风水汽扩散系数( $D_0$ )有关的常数项。该方程是在只考虑饱和差对需水量的影响,无风条件下求得的。如前所述,影响需水量的气象因素不止饱和差一项,为此需要对方程(4)进行完善,得

$$ET = K(e_s - e_a) = K\Delta e \quad (5)$$

式中, $K$ 为考虑其他气象因素影响的水汽交换系数; $\Delta e$ 为饱和差。

$K$ 的计算比较复杂。国内外有很多学者曾经进行过研究。布迪科给出计算 $k$ 值的半经验公式,需观测2个高度上的气温与风速。

$$K = \frac{0.14\Delta u}{\ln \frac{z_1}{z_2}} \left(1 + \ln \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta v^2}\right) \quad (6)$$

式中, $z_1$ 为较低层的观测气象因素的高度; $z_2$ 为较高层的观测气象因素的高度; $\Delta T$ 为2个观测高度的温度差; $\Delta u$ 为2个观测高度的风速差。

考虑水汽扩散系数与风速及日照的关系,可以建立的计算公式为:

$$K = a_0 + a_1 u + a_2 h \quad (7)$$

式中, $v$ 为风速; $h$ 为日照时数; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 为常数。

**2.3 多因素影响的水汽扩散方程** 将方程(7)代入方程(5),得

$$ET = (a_0 + a_1 u + a_2 h)(e_s - e_a) \quad (8)$$

饱和水汽压( $e_s$ )与温度( $t$ )关系为:

$$e_s = 0.6108 e^{\left(\frac{17.62}{t} + 8.313\right)} \quad (9)$$

在同一生育期内,不考虑其他气象因素影响作用的温度( $t$ )变化很小,此时可用线性方程代替方程(9)。

$$e_s = b_0 + b_1 T \quad (10)$$

式中, $b_0$ 、 $b_1$ 均为常数。

将方程(10)代入方程(8),由于在相同地点,水稻同一生育期内,不考虑其他气象因素影响作用的饱和水汽压变幅很大,而实际水汽压变幅比较小,与饱和水汽压相比可以视为常数( $b_2 = b_0 - e_a$ ,为常数),则

$$ET = (a_0 + a_1 u + a_2 h)(b_1 T + b_2) \quad (11)$$

将方程(11)进一步整理,得

$$ET = (a_0 + a_1 u + a_2 h)(b_1 T + b_2) = a_0(b_1 T + b_2) + (a_1 u + a_2 h)b_1 T + a_1 b_2 u + a_2 b_2 h \quad (12)$$

式中, $(b_1 T + b_2)$ 为饱和差,即 $\Delta e = (e_s - e_a) = (b_1 T + b_2)$ ;  $(a_1 u + a_2 h)b_1$ 为 $T$ 的影响系数。研究表明,在同一区域,水稻相同生育期内是常数,可用 $a_4 b_1$ 表示。

整理后,方程(12)为:

$$ET = a_0 \Delta e + a_4 b_1 T + a_1 b_2 u + a_2 b_2 h \quad (13)$$

将方程(13)中的常数项重新编写,得

$$ET = f_1 \Delta e + f_2 T + f_3 u + f_4 h \quad (14)$$

考虑到其他气象因素的影响 $f(E) = f_0 + f_5 E$ ,根据叠加原理,得

$$ET = f_0 + f_1 \Delta e + f_2 T + f_3 u + f_4 h + f_5 E \quad (15)$$

该方程即是基于水汽扩散方程的五元线性数学模型。根据当地试验资料,采用回归分析的方法求解。

## 3 FAO56 Penman-Monteith 公式

研究发现,不论在干旱还是在湿润地区, Penman-Monteith 公式都是一种准确的计算方法<sup>[12-15]</sup>。1990年,FAO在意大利召开的蒸发蒸腾量计算专题国际会议推荐用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量。1998年,FAO给出 Penman-Monteith 公式的最新修正式,以下简称 FAO56 Penman-Monteith 公式<sup>[16]</sup>。

FAO56 Penman-Monteith 公式基本方程为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (16)$$

式中, $ET_0$ 为应用 Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量,mm/d; $T$ 为2 m 高处平均气温,℃; $\Delta$ 为温度-饱和水汽压关系曲线在 $T$ 处的斜率,kPa/℃; $R_n$ 为作物表面净辐射,MJ/(m<sup>2</sup>·d); $G$ 为土壤热通量,MJ/(m<sup>2</sup>·d); $\gamma$ 为湿度表常数,kPa/℃; $u_2$ 为2 m 高处风速,m/s; $e_s$ 为饱和水汽压,kPa; $e_a$ 为实际水汽压,kPa。

作物需水量计算公式为:

$$ET = k_c ET_0 \quad (17)$$

式中, $k_c$ 为作物系数,视作物类型而定。

## 4 需水量计算

为验证多因素需水量数学模型的正确性和计算精度,将上述2种模型用于富锦试验站。该试验站灌溉资料为1985

~1999 年。气象资料由试验站附近气象台提供。

根据试验站历年灌溉资料,采用回归分析的方法求出多因素需水量数学模型中的经验系数,再利用模型计算水稻需水量,将其与实测水稻需水量进行比较。采用联合国粮农组织推荐的 FAO56 Penman-Monteith 公式,根据气象站提供的相应年份气象资料计算水稻需水量,将其与实测水稻需水量进行比较。

富锦试验站历年水稻需水量实测值见表 1。富锦试验站水稻需水量多因素数学模型见表 2。根据五元线性数学模型得到的富锦试验站水稻需水量计算值见表 3。采用 FAO56 Penman-Monteith 公式计算的富锦试验站水稻需水量见表 4。根据水稻需水量实测值、计算值,可分别得到 2 种计算方法的计算误差,见表 5。

表 1 富锦试验站水稻需水量实测值

年份	返青期	分蘖期	拔孕期	抽开期	乳熟期	黄熟期
1985	4.86	7.32	8.18	9.54	8.34	5.71
1986	5.28	7.62	9.88	9.20	12.89	5.93
1987	4.10	5.93	9.77	10.03	11.35	5.08
1988	5.44	5.85	10.02	11.52	12.45	6.05
1989	4.90	5.16	7.77	9.42	8.26	7.28
1990	4.60	5.55	8.53	12.78	9.97	5.99
1991	5.48	5.14	7.55	5.85	7.14	5.50
1992	4.25	5.14	7.64	12.06	9.83	6.04
1993	4.87	4.12	7.06	12.23	6.80	4.90
1994	4.88	5.29	6.72	11.21	10.30	6.26
1995	3.53	5.60	8.27	10.21	8.70	5.52
1996	4.58	6.20	6.90	10.25	9.88	5.65
1997	5.18	6.12	9.06	10.05	11.46	6.90
1998	4.50	6.53	8.35	12.96	9.46	5.72
1999	4.59	5.15	8.90	12.64	10.27	7.54

表 2 富锦试验站水稻需水量五元线性数学模型

时期	数学模型
返青期	$ET = -0.016 6T + 0.267 9h + 0.180 8u + 0.017 4\Delta\theta + 0.054 5E + 0.060 6$
分蘖期	$ET = 0.436 6T + 0.156 4h - 0.316 1u - 0.419 1\Delta\theta - 0.367 5E + 5.872 5$
拔孕期	$ET = 0.380 8T + 0.514 6h + 0.275 3u - 0.151 4\Delta\theta + 0.011 7E - 1.388 4$
抽开期	$ET = 0.366 4T + 0.681 8h + 0.310 1u - 0.116 7\Delta\theta + 0.060 4e - 1.366 3$
乳熟期	$ET = -0.179 7T + 0.428 4h + 0.312 7u + 0.270 9\Delta\theta + 0.841 5E + 0.504 8$
黄熟期	$ET = 0.342 2T + 0.549 2h - 0.154 2u - 0.136 1\Delta\theta - 0.637 3E + 1.680 1$

从表 5 可以看出,采用 FAO56 Penman-Monteith 公式计算所得的返青期、分蘖期、拔孕期、抽开期、乳熟期、黄熟期水稻需水量与实测值误差多年平均值分别为 7.866%、9.626%、2.848%、3.475%、4.374%、6.655%,达到较高的计算精度。采用五元线性数学模型计算所得的返青期、分蘖期、拔孕期、抽开期、乳熟期、黄熟期水稻需水量与实测值误差多年平均值分别为 2.295%、4.736%、0.197%、0.392%、5.446%、5.514%,整体误差较小。这说明采用五元线性数学模型计算所得的水稻需水量是可行的,且具有较高的计算精度。在 15 个年份的水稻需水量计算中,采用五元线性数学模型计算所得的水稻需水量精度普遍高于 FAO56 Penman-Monteith 公式,在乳熟期前者略高。与 FAO56 Penman-

Monteith 公式相比,该研究导出的五元线性数学模型在计算水稻需水量时具有较高的可信度与计算精度。

表 3 富锦试验站水稻需水量计算值(五元线性数学模型) mm/d

年份	返青期	分蘖期	拔孕期	抽开期	乳熟期	黄熟期
1985	4.94	7.28	8.22	9.54	8.96	5.86
1986	5.21	7.01	9.89	9.22	12.81	5.96
1987	4.19	5.79	9.77	10.03	10.87	5.80
1988	5.45	6.01	9.99	11.58	12.11	5.74
1989	4.63	5.24	7.75	9.49	8.58	7.41
1990	4.46	5.37	8.54	12.71	9.92	6.18
1991	5.57	5.17	7.57	5.78	7.57	5.31
1992	4.56	5.28	7.63	12.09	10.20	6.11
1993	4.93	4.41	7.05	12.21	7.89	5.14
1994	4.76	5.93	6.74	11.17	10.25	6.55
1995	3.54	5.84	8.28	10.18	8.835	5.73
1996	4.54	6.16	6.87	10.32	7.76	6.09
1997	5.08	5.31	9.06	10.07	11.39	6.43
1998	4.64	6.99	8.35	12.97	8.964	5.10
1999	4.52	4.93	8.89	12.57	10.99	6.65

表 4 富锦试验站水稻需水量计算值(Penman-Monteith) mm/d

年份	返青期	分蘖期	拔孕期	抽开期	乳熟期	黄熟期
1985	6.09	7.93	8.26	9.42	8.74	5.99
1986	4.95	7.85	9.49	9.29	12.47	6.15
1987	3.99	6.62	9.60	9.93	10.51	5.28
1988	4.77	5.76	9.49	10.73	12.07	6.58
1989	4.68	6.37	8.18	9.29	8.35	7.34
1990	4.47	5.61	8.26	12.33	10.32	6.21
1991	6.05	4.95	7.56	6.62	7.75	5.94
1992	3.94	5.89	7.79	12.07	9.88	6.24
1993	5.42	4.85	7.13	11.71	7.09	5.25
1994	4.59	5.12	7.11	10.88	9.96	6.24
1995	3.61	5.65	8.61	10.88	9.19	6.01
1996	4.53	6.62	7.09	10.69	8.62	5.79
1997	4.92	3.68	8.71	10.31	11.38	5.74
1998	5.24	6.24	8.31	12.87	9.92	4.94
1999	4.39	5.36	8.69	12.30	10.48	6.51

## 5 结论与讨论

通过对气象因素影响水稻需水量进行机理性分析,确定了气象因素中影响需水量的 4 个主要因素,即气温、饱和差、日照及风速,选用天然水面蒸发量代表其他气象因素的影响。根据水汽扩散基本方程,考虑上述 5 个因素的影响,建立了五元线性数学模型。该模型具有较强的理论基础。

将该数学模型与 FAO56 Penman-Monteith 公式需水量模型在富锦试验站进行水稻需水量计算。结果表明,与 FAO56 Penman-Monteith 公式相比,该模型具有较高的计算精度,可以作为区域性经验公式在寒区稻作需水量计算中应用。

以往水稻需水量线性数学模型有很多,涉及单因素、双因素及多因素。在多因素线性模型中,把天然水面蒸发量作为自变量的模型尚未见于报道,与以往多因素水稻需水量数学模型最大的不同之处在于,通过机理性分析,在确定主要影响因素之后,采用天然水面蒸发量代表其他气象因素的影响,考虑因素全面,因而得出的线性数学模型精度较高。

高穗部二次枝梗数及着生粒数,对一次枝梗数及着生粒数无明显影响,空秕率因品种有差别;直播方式造成空秕率提高,一、二次枝梗数降低。

(3) 空育 131 直播方式穗干重的主要分布区间较大棚盘育苗窄,叶干重的主要分布区间较大棚盘育苗宽,穗茎叶干物质总重集中区域直播处理较育苗处理有偏窄趋势,两处理谷草比数值无差异。龙粳 21 的直播、大棚户育苗、两段育苗穗干重主要分布区域幅度有逐渐加宽趋势;育苗处理,穗的空间分布较宽,也提高了谷草比,但是叶干重占总干重百分比呈下降趋势,而茎干重所占比例没有明显趋势。龙交 04-192 两段育苗处理干物质的积累明显高于大棚户育苗处理,最大

穗干重分布区间、叶干重占总干重百分比大棚户育苗处理优于两段育苗。龙稻 5 号两段育苗空间上部干物质分配幅度宽于大棚户育苗处理,大棚户育苗穗干重比和叶干重比高于两段育苗,茎干重比与之相反。

### 参考文献

- [1] 罗锡文,谢方平,区颖刚,等. 水稻生产不同栽植方式的比较试验[J]. 农业工程学报,2004,20(1):136-139.
- [2] 王成,石凤善,张敬涛,等. 寒地水稻折衷直播栽培技术研究[J]. 黑龙江农业科学,2004(6):10-12.
- [3] 李珣,苗立新,刘忠卓,等. 水稻直播技术的发展现状及研究进展[J]. 北方水稻,2013,4(1):78-80.
- [4] 聂春阳,柴楠,杜春影,等. 不同育苗方式对寒地水稻秧苗素质及产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2012,24(3):5-7.

(上接第 3475 页)

表 5 富锦试验站水稻需水量计算值误差对比

年份	返青期		分蘖期		拔孕期		抽开期		乳熟期		黄熟期	
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
1985	1.63	25.29	0.56	8.33	0.49	0.96	0.01	1.21	7.44	4.79	2.66	4.88
1986	1.30	6.25	8.07	2.96	0.09	3.93	0.24	1.02	0.64	3.28	0.42	3.68
1987	2.40	2.59	2.38	11.58	0.04	1.69	0.05	1.01	4.26	7.42	14.20	3.77
1988	0.24	12.38	2.81	1.55	0.27	5.23	0.56	6.83	2.74	3.07	5.20	8.71
1989	5.49	4.40	1.56	23.53	0.32	5.31	0.78	1.29	3.93	1.03	1.85	0.78
1990	3.01	2.77	3.32	0.99	0.10	3.12	0.57	3.52	0.51	3.48	3.18	3.73
1991	1.73	10.45	0.63	3.72	0.19	0.12	1.19	13.14	6.08	8.51	3.37	8.03
1992	7.25	7.36	2.75	14.63	0.16	1.94	0.23	0.09	3.81	0.52	1.22	3.31
1993	1.13	11.35	7.08	17.63	0.12	1.06	0.15	4.23	15.97	4.23	4.93	7.10
1994	2.50	6.00	12.17	3.24	0.34	5.85	0.34	2.98	0.45	3.30	4.69	0.38
1995	0.36	2.28	4.36	0.88	0.17	4.15	0.28	6.57	1.42	5.65	3.74	8.82
1996	0.95	1.05	0.66	6.77	0.47	2.80	0.73	4.26	21.45	12.79	7.78	2.57
1997	1.84	5.05	13.29	39.93	0.03	3.82	0.16	2.57	0.59	0.67	6.75	16.77
1998	3.15	16.42	7.06	4.50	0.03	0.45	0.08	0.72	5.29	4.84	10.92	13.56
1999	1.44	4.36	4.35	4.16	0.13	2.27	0.52	2.67	7.10	2.03	11.79	13.71
平均误差	2.29	7.87	4.74	9.60	0.19	2.85	0.39	3.48	5.45	4.37	5.51	6.66

注:①代表采用五元线性数学模型计算水稻需水量的误差;②代表采用基于 FAO56 Penman-Monteith 公式的作物系数法计算水稻需水量的误差。

在五元线性数学模型推导过程中,做了大量的简化。这些简化使得数学模型由非线性方程变成线性方程,实际上使得本质上以微分、偏微分方程为基础的机理性数学模型变成形式上以概率论为基础的回归方程,虽然求解变得容易,但是增加了模型计算带来的误差。与 FAO56 Penman-Monteith 公式相比,该模型不仅需要大量的气象资料,而且需要长序列的需水量实测资料。因而,在实际应用时,需要有较长期期的水稻需水量试验资料。

### 参考文献

- [1] 汪明霞,陈晓飞,王铁梁,等. 腾发量的测定和计算方法研究综述[J]. 中国农村水利水电,2006(12):9-12.
- [2] 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京:水利水电出版社,1994.
- [3] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. CROP Evapotranspiration guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization, 1998.
- [4] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops: an energy combination theory[J]. Q J R Meteorol Soc, 1985, 111: 839-855.
- [5] 丛振涛,雷志栋,杨诗秀. 基于 SPAC 理论的田间腾发量计算模式[J]. 农业工程学报,2004,20(2):6-9.

- [6] 许志方,茆智,赵玲爽. 计算稻田腾发量的数学模型研究[J]. 水利学报, 1982(5):1-10.
- [7] 迟道才. 气象因素对水稻腾发量影响的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1996, 27(专辑):63-66.
- [8] 程维新等. 农田蒸发与作物耗水量研究[M]. 北京:气象出版社,1994:4-19.
- [9] 栗宗嵩. 灌溉原理与应用[M]. 北京:科学普及出版社,1980:18-21.
- [10] 茆智. 水稻需水量的计算[J]. 农田水利与小水电,1981(4):9-16.
- [11] 杨政,孙西欢. 参考作物腾发量计算方法在玛纳斯河流域的应用比较[J]. 灌溉排水学报,2011,30(1):125-129.
- [12] JENSEN M E, BURMAN R D, ALLEN R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements[K]. New York: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, ASCE, 1990:360.
- [13] ALLEN R G, JENSEN M E, WRIGHT J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration[J]. Agronomy Journal, 1989, 81(4):650-662.
- [14] 胡顺军,潘渝,康绍忠,等. Penman-Monteith 与 Penman 修正式计算塔里木盆地参考作物潜在腾发量比较[J]. 农业工程学报,2005,21(6):30-35.
- [15] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [C]//Proceedings. Royal Society, London, United Kingdom. Series, 1948: 120-146.
- [16] 王斌,王贵作,黄金柏,等. 农业旱情评估模型及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011:56-58.