

气象行业标准《小麦干旱灾害等级》在莒县 实际生产中的订正应用

成 兆 金

(山东省日照市气象局, 山东 日照 276826)

摘 要:为探索定量评估干旱灾害对旱区冬小麦造成损失的方法,以山东省莒县为例,利用 1981—2010 年莒县三十年气候整编资料以及历年冬小麦生长发育期、土壤水分观测资料,运用 FAO PM 公式,对气象行业标准《小麦干旱灾害等级》中冬小麦不同生长发育阶段的可能蒸散量、需水量、水分亏缺率进行求算,对小麦不同生育阶段作物系数表(K_c)中后期阶段的发育期、 K_c 的界定取值以及有关计算公式等进行订正应用研究。结果表明:小麦生育期间各生育阶段总可能蒸散量 518.741 mm、不同作物系数小麦总需水量 466.393 mm,平均作物系数总需水量 440.93 mm,进而求算的阶段水分亏缺率符合实际,效果良好,用水分亏缺率作为评估干旱对冬小麦造成损失的方法可取,可以满足依据水分亏缺率对小麦产量的预报评估需要,可为基层和各级科研人员掌握和了解小麦干旱灾害评估方法提供切实可行的参照依据。

关键词: 冬小麦;干旱;PM 公式;灾评应用

中图分类号: S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)02-0007-07

Correction and Application of the meteorological standards as “The grade of drought disaster for wheat” into real production in Juxian County

CHENG Zhao-jin

(Rizhao City Meteorological Bureaus of Shandong Province, Rizhao, Shandong 276826, China)

Abstract: In order to search the method for quantitative assessment of drought disaster to the loss of winter wheat in arid region, taking the Juxian County in Shandong Province as the case study, using the thirty years' meteorological records (1981—2010) of Juxian County and yearly growth period of winter wheat and the observation data of soil moisture over the years, applied the FAO PM formula, have calculated the possible evapotranspiration, water requirements and soil water deficiency rate for the different growth stages of winter wheat based on the meteorological standards as “The Grade of Drought Disaster for Wheat”, also carried out the research of the correction and application for the crop coefficient (K_c) values in the middle and late stage of wheat and the relative calculation formula. The results showed that; The total potential evapotranspiration was 518.741 mm in whole growing period of wheat; The whole water requirements of wheat was 466.393 mm by the different crop coefficients and the whole water requirements of wheat was 440.93 mm by the average crop coefficient. Also calculated water deficiency was coincided to the reality with good effect. So the method that the water deficiency evaluate the loss of wheat in the arid region was available, and it can be met the requirement to forecast the wheat yield based on the water deficiency rates. It can be provided a practical reference for the basic level scientific researchers to master and understand this method.

Keywords: winter wheat; drought; PM formula; application of disaster assessment

莒县地处中纬度地区,属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候。干旱是莒县频发的农业气象灾害之一,素有十有九旱之说。通过对民政局、农业局、水利局等单位资料调查统计分析,1951—2005 年 55 年中共出现 22 次不同程度的旱灾,出现频率为 40%,两年半一遇。干旱灾害在 20 世纪 50、60 年代

收稿日期:2013-07-05
基金项目:山东省气象局气象科学技术研究项目—农业气象测报业务管理系统(2013sdqx10)
作者简介:成兆金(1971—),男,,山东菏泽人,高级工程师,学士,主要从事农业气象工作。E-mail: czjau@163.com。

和 70 年代上半期出现较少,出现频率为 28%,三年半一遇。1975 年以后,进入少雨周期,接连发生干旱,重早年出现频率为 50%,平均 2 年一遇。干旱年份中春旱最多,占 45%,平均 10 年中有 8 年春季无有效降水(日降水量 ≤ 5 mm)在 30 天以上,小麦抗旱灌溉一般 2~3 遍;夏旱占 36%,玉米拔节、花生下针需灌溉 1~2 遍;秋旱占 23%,秋种平均 10 年有 3~4 年靠抗旱造墒播种,最严重的为 8 个月连续干旱,即 1899 年 9 月至 1900 年 5 月不下雨,全年庄稼颗粒无收。其规律大约每隔 55 年左右即出现一次严重旱灾。干旱是制约当地农业发展的最主要农业气象灾害^[1-5],冬小麦产量和质量波动较大,本文从小麦生育阶段可能蒸散量^[6-9]、需水量、水分亏缺率^[10]等几方面评估了小麦不同生育期间的水分变化状况。

1 材料与方法

1.1 资料来源

1951—2005 年降水资料、1981—2010 年气候资料来源于莒县大监站实时观测并由山东省信息中心整编的资料;作物生育期间发育期常年值以及土壤水分测定资料来源于莒县国家农气基本站历年观测资料;干旱灾害调查资料来源于莒县民政局、农业局、水利局整编资料。

1.2 分析方法

利用 FAO Penman - Monteith 公式,求算小麦不同生育阶段可能蒸散量^[11-15],对气象行业标准《小麦干旱灾害等级》水分亏缺率 G 进行订正应用。

2 结果与分析

2.1 致灾因子

对于干旱灾害,一般选取小麦自播种至成熟不同生育阶段的水分亏缺率、降水量负距平百分率作为冬小麦干旱灾害的致灾因子^[16]。本文选取小麦自出苗至成熟不同生育阶段的水分亏缺率作为冬小麦干旱灾害的致灾因子。

2.2 可能蒸散量(ET_0)

依据联合国粮农组织推荐的 FAO Penman - Monteith 公式求算冬小麦生育期间可能蒸散量,该方法计算误差小,是对大监站农业气象观测资料的综合应用,是计算作物可能蒸散量的最新方法,其计算公式为:

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

式中, ET_0 为可能蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n 为地表净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T_{mean} 为日平均气温($^\circ\text{C}$); u_2 为 2 m 高处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 实际水汽压(kPa)。

2.2.1 2 m 高处的风速(u_2)

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} = 0.735u_z \quad (2)$$

式中, u_2 为 2 m 高处的风速,莒县的风杯距地面高度为 11.2 m, z 修正为 11.2 m, u_z 为 1981—2010 年三十年实测的逐日平均风速资料。

2.2.2 干湿表常数(γ)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P$$

$$P = 101.3 \times \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$$

式中, P 为大气压,整编材料没有日平均大气压数据,用上述公式求算, z 为大气观测场海拔高度,取 107.4 m。

$$\text{代入,得 } \gamma = 0.0665 \quad (3)$$

2.2.3 土壤热通量(G)

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z$$

用日或一句作为时间尺度,参考草地的土壤热通量非常小,可以忽略不计。

$$G_{\text{day}} \approx 0 \quad (4)$$

如果用月为时间尺度,假设在适当的土壤深度、土壤热容量为常数 2.1 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) 时:

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z = \frac{c_s \Delta z}{\Delta t} (T_{\text{month}, i} - T_{\text{month}, i-1}) = 0.14(T_{\text{month}, i} - T_{\text{month}, i-1})$$

式中, $T_{\text{month}, i}$ 为第 i 月时的平均气温($^\circ\text{C}$); $T_{\text{month}, i-1}$ 为第 i 上月时的平均气温($^\circ\text{C}$)。

2.2.4 日地球外辐射(R_a)

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

式中, R_a 为地球外辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G_{sc} 为太阳常数,取 0.0820 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)。

$$R_a = 37.6051 d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (5)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) = 1 + 0.033 \cos(0.0172 J)$$

$$\delta = 0.409 \sin(0.0172 J - 1.39)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

$= \arccos\{-0.7151\tan[0.409\sin(0.0172J - 1.39)]\}$
式中, d_r 为日地平均距离; ω_s 为日出时角, 取弧度 (rad); J 为日序, 取值 1 ~ 365 (或 366); φ 为台站所处纬度, 取弧度 (rad), 莒县 35°34' 换算成弧度为 0.6208; δ 为太阳磁偏角, 取弧度 (rad)。

将 d_r 、 δ 、 ω_s 代入 (5), 可得关于日序 J 的一元一次数值函数求得 R_a 。

2.2.5 晴空太阳辐射 (R_{so})

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a$$

式中, R_{so} 为晴空太阳辐射; a_s 为回归常数; b_s 为回归系数; a_s 、 b_s 随大气状况 (湿度、尘埃) 和太阳磁偏角 (纬度和月份) 的变化而变化。如果没有实际的太阳辐射资料和经验参数, a_s 取 0.25、 b_s 取 0.50 使用, z 为台站海拔高度 107.4 m。

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) \times R_a = 0.7521 R_a$$

即: $R_{so} = 0.7521 R_a$ (6)

将式 (5) 代入式 (6) 得:

$$R_{so} = 28.2828[1 + 0.033\cos(0.0172J)][\omega_s\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)]$$
 (7)

2.2.6 太阳辐射 (R_s)

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N}) \times R_a = (0.25 + 0.50 \frac{n}{N}) R_a$$

$$R_s = (0.25 + 0.50 \frac{n}{N}) 37.6051[1 + 0.033\cos(0.0172J)][\omega_s\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)]$$
 (8)

式中: n/N 为日照百分率, 取 1981—2010 年三十年平均日照百分率。

2.2.7 长波净辐射 (R_{nl})

$$R_{nl} = \sigma[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2}](0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \times (1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)$$

式中, R_{nl} 为长波辐射净支出 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, 取 $4.903 \times 10^{-9} (\text{MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$; $T_{\max,K}$ 为一日中最高绝对温度 (K); $T_{\min,K}$ 为一日中最低绝对温度 (K), 换算为 $1^\circ\text{C} = 273.15\text{K}$; e_a 为实际水汽压 (kPa), 换算为 $1 \text{ kPa} = 10 \text{ hPa}$ 。

$$R_{nl} = 4.903 \times 10^{-9}[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2}](0.34 - 0.14\sqrt{e_a})[1.7950 \times (0.25 + 0.50 \frac{n}{N}) - 0.35]$$
 (9)

2.2.8 地表短波净辐射 (R_{ns})

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

式中, R_{ns} 为地表短波净辐射, α 为反照率, 取绿色草地参考作物的反照率 0.23, 将 (8) 代入得:

$$R_{ns} = 28.9559(0.25 + 0.50 \frac{n}{N})[1 + 0.033\cos(0.0172J)][\omega_s\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)]$$
 (10)

2.2.9 净辐射 R_n

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

式中, R_n 为净辐射, 将 (10)、(9) 代入得:

$$R_n = 28.9559(0.25 + 0.50 \frac{n}{N})[1 + 0.033\cos(0.0172J)][\omega_s\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)] - 4.903 \times 10^{-9}[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2}](0.34 - 0.14\sqrt{e_a})[1.7950 \times (0.25 + 0.50 \frac{n}{N}) - 0.35]$$
 (11)

2.2.10 饱和水汽压斜率 (Δ)

$$\Delta = \frac{4098 \times \{0.6108 \times \exp[17.27/(T + 237.3)]\}}{(T + 237.3)^2}$$

即: $\Delta = \frac{2503.0584\exp[17.27/(T + 237.3)]}{(T + 237.3)^2}$ (12)

式中, T 为空气温度 ($^\circ\text{C}$), 取莒县 1981—2010 年三十年逐日平均温度。

2.2.11 饱和水汽压 (e_s)

$$e_s = e(T) = 0.6108 \times \exp(\frac{17.27T}{T + 237.3})$$

考虑到 e_s 公式的非线性, 日饱和水汽压 e_s 采用当日的日最高气温和日最低气温计算出来的饱和水汽压的平均值:

$$e_s = \frac{e(T_{\max}) + e(T_{\min})}{2}$$

$$e_s = 0.3054\left[\exp(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 237.3}) + \exp(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3})\right]$$
 (13)

如果用平均气温代替日最高气温和日最低气温会偏低估计饱和水汽压 e_s 的值, 相应的饱和水汽压与实际水汽压的差减少, 导致最终可能蒸散量减少。

2.2.12 实际水汽压 (e_a)

$$e_a = e(T_{\text{dew}}) = 0.6108 \times \exp(\frac{17.27T_{\text{dew}}}{T_{\text{dew}} + 237.3})$$
 (14)
式中, e_a 为实际水汽压, 即露点温度 T_{dew} ($^\circ\text{C}$) 下的饱和水汽压 (kPa)。本文 e_a 取莒县 1981—2010 年三十年日平均实际水汽压。

2.2.13 日平均气温 T_{mean}

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$
 (15)

式中, T_{mean} 为日平均气温, 考虑到 FAO PM 公式中湿度资料的非线性分布, T_{mean} 取莒县 1981—2010 年三十年日平均最高气温和最低气温的平均值。

将(2)、(3)、(4)、(11)、(12)、(13)、(14)、(15) 代入(1) 得到莒县冬小麦生育期间可能蒸散量计算公式。

2.3 需水量

$$E = K_c \times ET_0 \tag{16}$$

式中, E 为小麦生育阶段的需水量(mm); K_c 为作物系数,播种出苗后到分蘖,麦苗覆盖率小,气温降低,日耗水量逐渐下降, K_c 最小,归到初期阶段;分蘖到返青,气温低,生长缓慢,耗水较少, K_c 较大,归到前

期阶段;返青到乳熟,随着气温的逐渐升高,小麦由营养生长转为营养和生殖生长,水分消耗越来越大, K_c 最大,归到中期阶段;乳熟到成熟,小麦籽粒灌浆完毕,逐渐脱水,植株由绿变黄,耗水逐渐变少, K_c 变小,归到后期阶段^[17]。 K_c 取值于标准中各阶段 K_c 值的平均值,也就是在通常气温和湿度状况下的作物系数,利于实际应用和计算。具体见表 1(K_c 引自《小麦干旱灾害等级》)。

表 1 小麦不同生育阶段作物系数表(K_c)
Table 1 The crop coefficient (K_c) in different growth stages of wheat

项目 Item	初期阶段 Initial stage	前期阶段 Early stage	中期阶段 Middle stage	后期阶段 Late stage	全生育期 The whole growing period
界定 Define	发芽到覆盖率 10% Germination to cover 10%	覆盖率 10% ~ 80% Coverage rate of 10% ~ 80%	覆盖率 80% ~ 乳熟 Coverage rate of 80% ~ milky	乳熟 ~ 成熟 Milky to maturity	发芽 ~ 成熟 The germination to maturity
生育期 Growth period	出苗 ~ 分蘖 Emergence to tillering (10 月 20 日 ~ 11 月 10 日)	分蘖 ~ 返青 The tillering to turning green (11 月 11 日 ~ 3 月 24 日)	返青 ~ 乳熟 Turning green to milk (3 月 25 日 ~ 6 月 4 日)	乳熟 ~ 成熟 Milky to maturity (6 月 5 日 ~ 6 月 17 日)	出苗 ~ 成熟 Emergence to maturity (10 月 20 日 ~ 6 月 17 日)
K_c	0.35	0.75	1.13	0.70	0.85

将莒县 1981—2010 年三十年平均气候资料代入公式(1)得到冬小麦自出苗到成熟生育期间逐日

可能蒸散量,以及由(16)式计算的小麦生育阶段需水量,将逐日计算数据按月汇总,见表 2。

表 2 冬小麦生育期间可能蒸散量、参数、需水量计算表
Table 2 Calculation table of possible evapotranspiration, parameter and water requirements in each growth stage of winter wheat

小麦生育阶段 Wheat growth stage (M - d ~ M - d)	T_{mean}	e_a	e_s	$\triangle$	R_n	G_{day}	U_2	γ	ET_0	$E(k_c)$	E ($k_c = 0.85$)
出苗 ~ 分蘖 Emergence to tillering (10 - 20 ~ 11 - 10)	11.2	0.938	1.430	0.044	4.885	0	1.537	0.067	37.185	13.015	31.607
分蘖 ~ 返青 The tillering to turning green (11 - 11 ~ 03 - 24)	2.1	0.464	0.773	0.047	3.986	0	1.786	0.067	171.813	128.860	146.041
返青 ~ 乳熟 Turning to milk (03 - 25 ~ 06 - 04)	15.9	1.169	1.986	0.042	11.372	0	2.128	0.067	253.408	285.084	215.397
乳熟 ~ 成熟 Milky to maturity (06 - 05 ~ 06 - 17)	23.0	1.853	2.959	0.040	12.724	0	2.024	0.067	56.335	39.435	47.885
出苗 ~ 成熟 Emergence to maturity (10 - 20 ~ 06 - 17)	8.2	0.793	1.313	0.045	6.746	0	1.878	0.067	518.741	466.393	440.930

从表 2 可看出,小麦从出苗到成熟生育期间可能蒸散量 518.7 mm,不同生育期不同作物系数下需水量累计值 466.4 mm,全生育期平均作物系数 0.85 情况下需水量累计值 440.9 mm,二者相差 25.5 mm,误差很小,数值理想。

2.4 自然供水量

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \tag{17}$$

式中, W 为小麦生育阶段的自然供水量(mm); W_1 为小麦生育阶段的土壤有效底墒(mm); W_2 为小麦生育阶段的有效降水量(mm); W_3 为小麦生育阶段的地下水供给量(mm)。

2.4.1 土壤有效底墒 (W_1)

$$W_1 = (W_t - W_k) \times \rho \times h \times 0.1$$

式中, W_t 为小麦生育阶段开始时的实际土壤湿度(%); W_k 为凋萎湿度(%); ρ 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为土层厚度; 0.1 为单位换算系数。

考虑到土壤水分变化较为缓慢, 本文 W_t 就取用各个时段初始最近的时间点: 1995—2010 年历年(10 月 18 日、11 月 8 日、3 月 28 日、6 月 8 日) 0 ~ 50 cm、5 个层次的实际测墒数据, W_1 就是该时间点 0 ~ 50 cm、5 个层次的有效贮存量之和。

考虑到小麦不同生育阶段根系的伸展深度情况, 出苗 ~ 分蘖(10 月 20 日 ~ 11 月 10 日): W_1 为 0 ~ 10 cm 土壤层的有效水分贮存量; 分蘖 ~ 返青(11 月 11 日 ~ 3 月 24 日): W_1 为 0 ~ 20 cm 土壤层的有效水分贮存量; 返青 ~ 乳熟(3 月 25 日 ~ 6 月 4 日)、乳熟 ~ 成熟(6 月 5 日 ~ 6 月 17 日): W_1 为 0 ~ 50 cm 土壤层的有效水分贮存量。

$$W_1 = \sum_{i=1}^5 (W_{ti} - W_{ki}) \times \rho \times 10 \times 0.1 \quad (i \text{ 为 } 0 \sim 50 \text{ cm } 5 \text{ 个层次})$$

$$W_1 = \sum_{i=1}^5 (W_{ti} - W_{ki}) \times \rho \tag{18}$$

2.4.2 有效降水量 (W_2)

$$W_2 = P - V - Q - F$$

式中, P 为实际降水量(mm); V 为植被截留量(mm); Q 为径流量(mm); F 为深层渗漏量(mm)。

在微雨的情况下, 植物截流量可达 3 mm 左右, 考虑到莒县小麦种植区地势平坦, 生育期内尚未进入主汛期(7—8 月), 降水量较少, 强度也不大, 小麦的根系又可达 240 cm^[18], 所以可忽略径流量、深层渗漏量和植被截留量, 可近似把小麦全生育期的降水量作为有效降水量。即:

$$W_2 \approx P \tag{19}$$

2.4.3 地下水供给量 (W_b)

$$W_b = (W_x \times \rho_x - W_s \times \rho_s) \times h \times 0.1$$

式中, W_b 为小麦根层底部界面下层与上层土壤含水量的差值(mm); ρ_x 为该界面下层的土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); W_x 为该界面下层的土壤湿度(%); W_s 为小麦根层底部界面上层的土壤湿度(%); ρ_s 为该界面上层的土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为土层厚度(cm) 一般取 10; W_i 为第 i 时刻小麦根层底部界面上层的土壤湿度(%); W_{i+1} 为第 $i + 1$ 时刻小麦根层底部界面上层的土壤湿度(%)。

当 $W_b < 0$ 时, $W_3 = 0$

当 $W_b > 0$ 时, $W_3 = (W_{i+1} - W_i) \times \rho_s \times h \times 0.1$

对于北方麦区, 地下水位常年一般大于两米, 地下水很难对小麦根系实施实际意义上的供水, 地下水供水量可忽略不计, 即:

$$W_3 \approx 0 \tag{20}$$

把(18)、(19)、(20) 代入(17) 得:

$$W \approx \sum_{i=1}^5 (W_{ti} - W_{ki}) \times \rho \times 10 \times 0.1 + P + 0$$

$$\text{即: } W \approx \sum_{i=1}^5 (W_{ti} - W_{ki}) \times \rho + P \tag{21}$$

计算结果见表 3。

表 3 小麦生育阶段自然供水量计算表
Table 3 Calculation table for the natural water supply in growth stage of wheat

小麦生育阶段 Wheat growth stage (M - d ~ M - d)	W_1	W_2	W
出苗 ~ 分蘖(10 - 20 ~ 11 - 10) Emergence to tillering	18.8	16.0	34.8
分蘖 ~ 返青(11 - 11 ~ 03 - 24) The tillering to turning green	37.2	66.0	103.2
返青 ~ 乳熟(03 - 25 ~ 06 - 04) Turning to milk	91.5	103.8	195.3
乳熟 ~ 成熟(06 - 05 ~ 06 - 17) Milky to maturity	81.3	37.4	118.7
出苗 ~ 成熟(10 - 20 ~ 06 - 17) Emergence to maturity	228.8	223.2	452.0

2.5 水分亏缺率 (G)

依据农田水分平衡原理, 农田土壤水分以及小麦植株本身水分构成主要来自于降水和灌溉, 作为灌溉量, 人为影响因素较大, 个人掌握的计算、记载方法不一致, 有的甚至为估量值, 因此对于灌溉的水分量, 本文采用有效水分贮存量进行表示。冬小麦生育阶段的水分亏缺率就可以描述为自然降水量与需水量的差值占需水量的百分比的负值, 其计算公式为:

$$G = - \frac{W - E}{E} \times 100\% \text{ (一般 } W < E \text{)} \tag{22}$$

式中, G 为小麦生育阶段的水分亏缺率(%)。

把(16)、(21) 代入(22) 得:

$$G = - \frac{\sum_{i=1}^5 (W_{ti} - W_{ki}) \times \rho + P - K_c \times ET}{K_c \times ET} \times 100\% \tag{23}$$

具体计算见表 4。

表 4 小麦生育阶段水分亏缺率计算表

Table 4 Calculation table for the water deficit rate in growth stage of wheat

小麦生育阶段(M - d ~ M - d) Wheat growth stage	$E(k_c)/\text{mm}$	$E(k_c = 0.85)/\text{mm}$	W/mm	$G(\text{阶段 Stage})/\%$	$G(0.85)/\%$
出苗 ~ 分蘖(10 - 20 ~ 11 - 10) Emergence to tillering	13.015	31.607	34.8	- 167.4	- 10.1
分蘖 ~ 返青(11 - 11 ~ 03 - 24) The tillering to turning green	128.86	146.041	103.2	19.9	29.3
返青 ~ 乳熟(03 - 25 ~ 06 - 04) Turning to milk	285.084	215.397	195.3	31.5	9.3
乳熟 ~ 成熟(06 - 05 ~ 06 - 17) Milky to maturity	39.435	47.885	118.7	- 201.0	- 147.9
出苗 ~ 成熟(10 - 20 ~ 06 - 17) Emergence to maturity	466.393	440.930	452.0	3.1	- 2.5

从表 4 可知,出苗 ~ 分蘖(10 月 20 日 ~ 11 月 10 日)生育阶段水分亏缺率为 - 167.4%,表示该阶段水分供应充足,原因是该地段处于莒县农科所试验田,灌溉条件优越,往往小麦播种后进行灌溉,土壤有效底墒充足, W 值较大,加上苗小蒸散小,水分不亏而盈;乳熟 ~ 成熟(6 月 5 日 ~ 6 月 17 日)生育阶段水分亏缺率为 - 201.0%,表示该阶段水分供应充足,此阶段小麦灌浆结束,籽粒慢慢脱水,植株由绿变黄,耗水逐渐变小,而降水较多,加上有效底墒,水分充盈;分蘖 ~ 返青(11 月 11 日 ~ 3 月 24 日)、返青 ~ 乳熟(3 月 25 日 ~ 6 月 4 日)两个时段,植株生长加快,生殖生长迅速,需水较多,温度高,蒸散大,加上莒县春旱时常发生,5 月份降水较少,灌溉又不及时,土壤有效底墒减少, W 值偏小,出现水分亏缺。

从图 1 可以看出,小麦生育阶段从出苗到乳熟阶段,需水量缓慢上升,这与小麦逐渐长高,生殖生长逐渐发育成熟,蒸散由少变多一致,小麦抽穗前后作为水分临界期需水量达到极大值;乳熟后,小麦籽粒脱水,茎秆由绿变黄,耗水逐渐变少,蒸散量迅速

变小,整个需水曲线呈现偏态性。

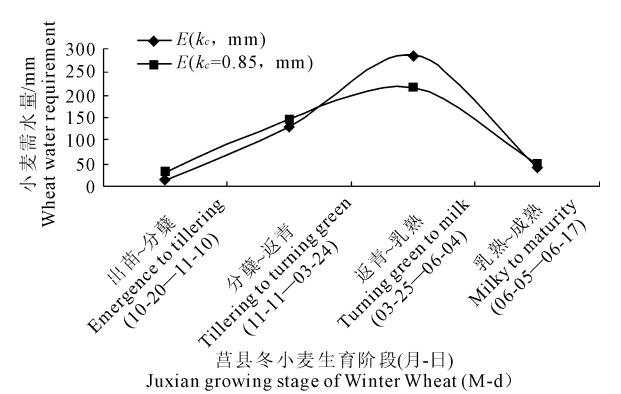


图 1 不同生育阶段的不同作物系数、平均作物系数小麦需水量

Fig. 1 The average crop coefficient and water requirements of wheat in different growth stages

如果不考虑灌溉和土壤有效底墒情况,针对纯粹自然降水情况下冬小麦的水分亏缺情况(对于部分丘陵山地来说存在此种情况),其水分亏缺率计算表见表 5。

表 5 不考虑灌溉和土壤有效底墒小麦不同生育阶段水分亏缺率计算表

Table 5 Calculation table for the water deficite do not consider the computation rate of irrigation and effective soil moisture of wheat growth stages of water deficit

小麦生育阶段(M - d ~ M - d) Wheat growth stage	$E(k_c)/\text{mm}$	$E(k_c = 0.85)/\text{mm}$	W/mm	$G(\text{阶段 Stage})/\%$	$G(0.85)/\%$
出苗 ~ 分蘖(10 - 20 ~ 11 - 10) Emergence to tillering	13.015	31.607	16.0	- 22.9	49.4
分蘖 ~ 返青(11 - 11 ~ 03 - 24) The tillering to turning green	128.86	146.041	66.0	48.8	54.8
返青 ~ 乳熟(03 - 25 ~ 06 - 04) Turning to milk	285.084	215.397	103.8	63.6	51.8
乳熟 ~ 成熟(06 - 05 ~ 06 - 17) Milky to maturity	39.435	47.885	37.4	5.2	21.9
出苗 ~ 成熟(10 - 20 ~ 06 - 17) Emergence to maturity	466.393	440.930	223.2	52.1	49.4

从表 5 可知,冬小麦除了出苗~分蘖(10 月 20 日~11 月 10 日)阶段,其他生育阶段小麦水分均呈现亏缺状态,原因就是小麦出苗到分蘖,温度低,土壤蒸发小,小麦苗小,蒸腾小,蒸散较小,小麦需水量较小,小麦水分不亏缺;分蘖后,小麦开始营养生长和生殖生长阶段,需水逐渐增多,莒县处于半干旱地区,降水偏少,不能满足小麦的耗水量,显示水分亏缺。

在图 2 中,上面的曲线为不考虑土壤有效底墒水分亏缺率曲线,下面的曲线为考虑土壤有效底墒水分亏缺率曲线,不难看出,土壤有效底墒的贡献非常明显,不考虑土壤有效底墒的水分亏缺率始终要比考虑土壤有效底墒的水分亏缺率大,不考虑土壤有效底墒曲线除了出苗后短短数天时间,曲线在 0 线以下呈现水分充盈不亏,其余时间曲线均在 0 线以上,呈现水分严重亏缺;而考虑了土壤有效底墒曲线则不同,约有三分之一的时间曲线在 0 线以上,呈现水分较大亏缺,出现在小麦的中期阶段,其余曲线均在 0 线以下,呈现水分充盈不亏缺,出现在小麦的初期和后期阶段。

针对表 6(引自《小麦干旱灾害等级》“表 3 小麦干旱灾害等级指标”)小麦不同生育期干旱灾害指标,对应图 2 中两条水分亏缺率曲线,考虑土壤有效

底墒的情况下,对不同生育阶段采用不同作物系数时,分蘖~返青、返青~乳熟两个阶段均达到中旱级别,出苗~分蘖、乳熟~成熟两个阶段水分充盈;不考虑土壤有效底墒的情况下,对不同生育阶段采用不同作物系数时,出苗~分蘖阶段水分充盈、分蘖~返青阶段达到重旱级别、返青~乳熟阶段达到严重干旱级别、乳熟~成熟阶段为轻旱级别。由此可见,在日照市莒县、五莲县的丘陵、山区在正常年景下,紧靠自然降水是很难获得小麦丰收的,由于旱灾会造成大幅减产,甚至绝产。

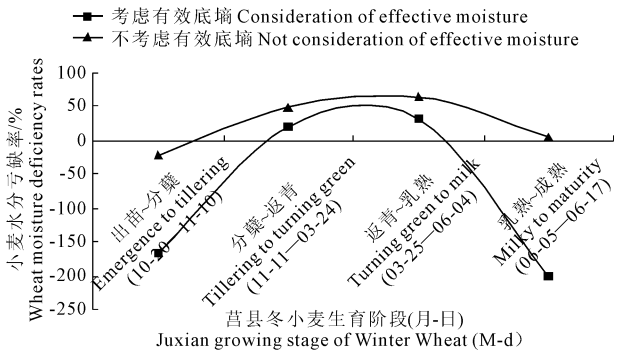


图 2 考虑和不考虑土壤有效底墒时水分亏缺率曲线图
Fig.2 considerations, not considering the effective soil moisture moisture deficit rate curve

表 6 小麦干旱灾害等级指标

Table 6 wheat drought disaster grade index table

因子 Factor	生育阶段 Growing stage	等级 Grade			
		轻旱 Light drought	中旱 Moderate drought	重旱 Heavy drought	严重干旱 Severe drought
作物水分 亏缺率/% Crop water deficit rate	全生育期 The whole growth period	$G < 15$	$15 \leq G < 30$	$30 \leq G < 50$	$G \geq 50$
	拔节~抽穗期 Jointing stage~Heading stage	$G < 15$	$15 \leq G < 45$	$45 \leq G < 70$	$G \geq 70$
	灌浆~成熟期 Grain filling period~mature period	$G < 20$	$20 \leq G < 35$	$35 \leq G < 45$	$G \geq 45$

3 结论与讨论

从上述理论分析结果可知:

1) 利用 FAO PM 计算公式计算小麦生育期间各生育阶段不同作物系数和平均作物系数 0.85 的需水量为 466.393 mm 和 440.93 mm,与以往相关科研成果相比,尤其是由《小麦干旱灾害等级》给出的冬小麦华东区小麦全生育期需水量干旱年 375~675 mm、平水年 330~525 mm 来看,数值接近,效果比较理想。本文计算土壤热通量 G 采用的时间尺度为日, $G_{\text{day}} \approx 0$,作为整个生育阶段来说,其计算结果势必偏小了一些;由于没有得到相关整编资料,太阳辐射 R_s 没有采用实际观测值,是通过经验公式来计

算,效果应该没有实际观测值理想些。
2) 从图 1 小麦不同生育阶段的需水量和图 2 土壤水分亏缺率曲线可看出,小麦的需水变化规律和水分亏缺率变化规律非常符合小麦实际生产自然变化规律,模拟效果非常理想。
3) 本文利用大气观测和农业气象实时观测资料,利用 FAO PM 计算公式计算小麦生育期间各生育阶段可能蒸散量,进而计算小麦各生育阶段需水量、以及各生育阶段水分亏缺率,从实例出发对中国气象局发布的《小麦干旱灾害等级》有关内容进行订正和求算,为基层以及各层科研人员从事相关研究和服务应用提供了切实可行的资料分析方法。
(下转第 39 页)

应对并主动适应气候变化,对促进县域绿洲农业生产的可持续发展和生态安全建设有重要的指导作用。

参 考 文 献:

[1] 李书严,马京津,轩春怡,等. 1951—2008 年北京极端天气事件分析[J]. 气候与环境研究,2012,17(3):244-250.

[2] IPCC. Climate Change 2001: syn-thesis report – contribution of working group I, II, III to the third assessment report of the Intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2001.

[3] 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等. 近 50a 新疆气候变化对环境影响评估[J]. 干旱区地理,2001,24(2):97-103.

[4] 黄建平,季明霞,刘玉芝. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展,2013,9(1):9-14.

[5] 陈 曦,罗格平. 干旱区绿洲生态研究及其进展[J]. 干旱区地理,2008,31(4):487-495.

[6] 杨金虎,江志红,魏 锋,等. 近 45a 来中国西北极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应[J]. 干旱区地理,2006,(5):625-631.

[7] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及

其影响[J]. 干旱区地理,2002,(3):194-200.

[8] 钱文新,阿不都克日木·阿巴斯,陈丛敏,等. 莎车县近 47 年来气候变化研究[J]. 新疆气象,2006,(3):15-17.

[9] 普宗朝,张山清,杨 琳,等. 1961—2008 年新疆克拉玛依市气候变化分析[J]. 新疆农业大学学报,2009,(4):55-56.

[10] 蒲云锦,韩春光. 干旱区绿洲气候变化及影响—以新疆石河子为例[J]. 内蒙古气象,2011,(2):23-26.

[11] 艾丽吉米丽·艾尼,迪丽努尔·阿吉,古丽巴哈尔·吾布力. 近 53 年吐鲁番地区气候变化研究分析[J]. 绵阳师范学院学报,2011,(8):109-113.

[12] 左洪超,吕世华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象,2004,23(2):238-244.

[13] 万红莲. 全球气候变化下西安地区的响应[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(1):102-106.

[14] 任朝霞,杨达源. 近 50a 西北干旱区气候变化对农业的影响[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(8):48-53.

[15] 黄显金,葛炳坤,刘志强,等. 鄯善县农业气候手册[M]. 吐鲁番:鄯善县农业局、鄯善县气象局,1983:66-67.

[16] 孙 杨,张雪芹,郑 度. 气候变暖对西北干旱区农业气候资源的影响[J]. 自然资源学报,25(7):1153-1162.

[17] 张 强,邓振镭,赵映东,等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J]. 生态学报,2008,28(3):1210-1218.

(上接第 13 页)

参 考 文 献:

[1] 刘 静,王连喜,马力文,等. 中国西北旱作小麦干旱灾害损失评估方法研究[J]. 中国农业科学,2004,37(2):201-207.

[2] 王素艳,霍治国,李世奎,等. 中国北方冬小麦水分亏缺与气候生产力—近 40 年的动态变化研究[J]. 自然灾害学报,2003,12(1):121-130.

[3] 王恩利,韩湘玲. 黄淮海地区冬小麦、夏玉米生产力评价及其应用[J]. 中国农业气象,1990,11(2):41-46.

[4] 郭建平. 华北农业干旱和东北作物冷害监测预报研究[J]. 中国气象科学研究院年报,2003,(1):35.

[5] 胡雪琼,吉文娟,张茂松,等. 云南省冬小麦干旱灾损风险区划[J]. 大气科学学报,2011,34(3):17-26.

[6] 霍治国,刘荣花,姜 燕,等. 小麦干旱灾害等级[M]. 北京:气象出版社,2007:19.

[7] 郭家选,李玉中,严昌荣,等. 华北平原冬小麦农田蒸散量[J]. 应用生态学报,2006,17(12):2357-2362.

[8] 莫兴国,林忠辉,李宏轩,等. 基于过程模型的河北平原冬小麦产量和蒸散量模拟[J]. 地理研究,2004,23(5):623-631.

[9] 李 新,周宏飞. 干旱农田蒸散量的日间变化分析[J]. 干旱区

资源与环境,2000,14(3):82-87.

[10] 张瑞英,彭世彰,徐俊增,等. 作物水分亏缺诊断研究进展[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):206-210.

[11] 张喜英,裴 冬,胡春胜. 太行山山前平原冬小麦和夏玉米灌溉指标研究[J]. 农业工程学报,2002,18(6):36-41.

[12] 霍治国,李世奎,王素艳,等. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究[J]. 自然资源学报,2003,18(6):692-702.

[13] 赵艳霞,王馥棠,裴国旺. 冬小麦干旱识别和预测模型研究[J]. 应用气象学报,2001,12(2):235-241.

[14] 王春乙,王石立,霍治国,等. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报,2005,63(5):659-671.

[15] 薛昌颖,霍治国,李世奎,等. 华北北部冬小麦干旱和产量灾损的风险评估[J]. 自然灾害学报,2003,12(1):131-139.

[16] 王素艳,霍治国,李世奎,等. 干旱对北方冬小麦产量影响的风险评估[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):118-125.

[17] 黄 建,成秀虎. 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,1993:84.

[18] 刘荣花,朱自玺,方文松,等. 冬小麦根系分布规律[J]. 生态学杂志,2008,27(11):2024-2027.