

农田水量平衡模型对作物根系吸水函数 及蒸散公式的敏感性

龚元石 李保国

(北京农业大学土壤和水科学系·北京·100094)

摘 要 以田间试验资料为基础,建立了一个农田水量平衡模型,探讨了它对作物根系吸水函数和蒸散公式的敏感性。结果表明,不同的根系吸水函数和蒸散公式对农田水量平衡模型的响应程度差异较大,根据与田间土壤水分实测结果比较,认为用 Selim 根系吸水函数和 Penman-Monteith 蒸散公式的组合模式能较好地模拟土壤水分变化过程。

关键词 农田水量平衡 根系吸水函数 蒸散 敏感性

Sensibility of the Field Water Budget Model to Water Extraction Function by Roots and Evapotranspiration form

Gong Yuanshi Li Baoguo

(Department of Soil and Water Sciences, Beijing Agricultural University, Beijing, 100094)

Abstract Based on the field observing data, a field water budget model was developed in this paper, and its sensibility to the water extraction function by roots and evapotranspiration form were studied. The results showed that the responsiveness was quite differ, while the various extraction functions and evapotranspiration forms were applied. Model predictions were in good agreement with the measured water content in the soil profile, if the Selim-extraction function and Penman-Monteith form were used.

Key words field water budget water extraction function by roots evapotranspiration sensibility

1 引 言

农田土壤水分动态的模拟和预报是农田灌溉研究的一项重要课题,准确预测农田水分是制定合理灌溉方案的前提,对于作物有效地利用水分,节约水资源,提高作物产量等具有十分重要的意义。农田水量平衡模型是研究农田土壤水分动态变化最有效的方法之一^[1]。然而,农田水量平衡涉及土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 中水分物质循环的机理,尤其是蒸散以及决定蒸腾速率的根系吸水机理十分复杂,因此,它给农田水量平衡的研究带来了困难。虽然已有研究者应

用农田水量平衡模型成功地模拟了农田土壤水分动态变化^[2,3],但是,毫无疑问,正确估算农田水量平衡中的每一个分量,特别是蒸散量及吸水量,选择合适的根系吸水函数及蒸散公式是精确模拟和预报土壤水分的关键所在。本文旨在研究农田水量平衡模型对作物根系吸水函数及蒸散公式的敏感性,为正确选择根系吸水函数和蒸散公式,提高农田水量平衡模型模拟土壤水分的精度提供科学依据。

2 田间试验概述

试验地位于北京农业大学科学园内,属华北平原北部山前冲积平原区,土壤类型为草甸褐土,地下水埋深14m,1m土层土壤质地为轻壤土,土壤容重为 $1.32 \sim 1.50 \text{ g/cm}^3$,田间持水量为 $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$,萎蔫系数为 $0.125 \text{ m}^3/\text{m}^3$,风干土含水量为 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。试验地播种冬小麦,品种为农大015,播种日期1991年10月8日,冬灌水量76mm,1992年4月11日(拔节前),5月9日(抽穗),5月25日(灌浆)分别灌水60mm。试验小区有3个重复,小区面积 100 m^2 ,土壤含水量用土钻分层(20cm为一层)取土样,烘干称重而得。根系分布观测采用定期根钻分层(10cm为一层)取样,用交叉法测根长,最后求得各层的根密度(表1),小麦苗情调查包括株高和叶面积。气象资料从邻近的北京市海淀区气象站获得。1992年3月25日至6月15日的总降水量为64.5mm。

表1 冬小麦生长期实测根密度 (cm/cm³)

深度(cm)	3月31日	4月14日	5月28日	6月10日
0~10	2.81	3.60	3.00	2.80
10~20	1.84	2.39	1.82	2.30
20~30	1.06	1.98	1.91	1.53
30~40	0.37	0.88	1.43	1.34
40~50	0.31	0.32	0.99	0.98
50~60	—	0.51	0.75	0.32
60~80	—	0.15	0.29	0.10

3 模型概述

3.1 农田水量平衡模型

农田水量平衡是指一定时间内,作物根系层范围一定深度内得到的水分和损失的水分之间的平衡关系。对于平坦的农田,水量交换主要在垂直方向上,而在水平方向上的交换很少^[4]。由于地下水位很深,因此,忽略地下水对根系层的补给作用,考虑时段初根系层土壤贮水量为 W ,时段末为 W_2 ,则根系层土壤贮水量的变化用下式表示:

$$W_2 - W_1 = (R + I + D) \quad (1)$$

式中: R ——期内降水量; I ——灌水量; E ——土壤裸间蒸发量, T ——作物蒸腾量, D ——根系层向下渗漏量。若将土壤根系区分为若干层次,则降水量和灌水量转变为各层水分增量 AD ^[5],同时不考虑层间水分向上运动,则分层土壤水分平衡方程表示为:

$$W_i^{t+1} = W_i^t + AD_i^t - E^j - S_i^t \quad (2)$$

$$W_i^{t+1} = W_i^t + AD_i^t - S_i^t \quad (i > 1)$$

式中: i ——土壤层次; j ——时序; AD_i ——降水及灌水后第 i 层土壤水分增量。 S_i ——第 i 层作物根系的吸水量。若模型所考虑的最大层次为 N ,当降水或灌水后最大入渗深度超过 N 层

时,渗漏量按下式计算:

$$D = R + I - \sum_{i=1}^N AD_i \quad (3)$$

本模型中 $N = 10$, 土壤根层深度为 1m。

3.2 蒸散公式

农田实际蒸散量 (ETa) 取决于农田潜在蒸散量 (ETp) 以及制约蒸散过程的土壤水分胁迫系数 (Ks), 农田潜在蒸散量也称作物需水量, 由大气蒸发力决定, 联合国粮农组织^[6]建议用参考作物蒸散量 (ETo) 和作物特性对作物需水量的影响即作物系数 (Kc) 来计算农田潜在蒸散量。因此, 农田实际蒸散量和农田潜在蒸散量可表示为:

$$ETa = Ks \cdot ETp \quad (4)$$

$$ETp = Kc \cdot ETo \quad (5)$$

Jensen^[7]的研究结果表明, 土壤水分胁迫系数 Ks 用下式表示:

$$Ks = \ln(Av + 1) / \ln(101) \quad (6)$$

式中: $Av = [(W - Wm) / (Wf - Wm)] \cdot 100\%$, W —— 根区实际贮水量, Wm —— 萎蔫系数, Wf —— 田间持水量。冬小麦作物系数 Kc 引自文献^[8]。因为实际蒸散量 (ETa) 由土表实际棵间蒸发量 (Ea) 和作物实际蒸腾量 (Ta) 组成, 农田潜在蒸散量 (ETp) 由土表潜在棵间蒸发量 (Ep) 和作物潜在蒸腾量 (Tp) 组成, 则(4)式也可改写成:

$$Ea = Ks \cdot Ep \quad (7)$$

$$Ta = Ks \cdot Tp$$

对于土壤棵间蒸发, 水分胁迫系数 Ks 也由(6)式计算, 但此处 $Wm = Wa$, Wa 为风干土含水量, 土表潜在棵间蒸发量 (Ep) 由 Ritchie 公式求得^[9]:

$$Ep = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Rn e^{-0.398LAI} \quad (8)$$

式中: Δ —— 饱和水汽压与温度关系曲线斜率 ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$), γ —— 干湿表常数 ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$), Rn —— 净辐射通量 ($mm \cdot d^{-1}$, $1mm \cdot d^{-1}$ 相当于 $2.45MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), LAI —— 作物叶面积系数 (—), 作物潜在蒸腾量 (Tp) 表示为:

$$Tp = ETp - Ep \quad (9)$$

参考作物蒸散量 (ETo) 由 Penman-Monteith 公式 (PM 法)^[10] 以及联合国粮农组织公布的 Penman 修正式 (FAO 法)^[11], 已有的研究成果表明^[12], PM 法及 FAO 法都可用来估算参考作物蒸散量。

Penman-Monteith 公式估算参考作物蒸散量:

$$ETo = [0.408\Delta Rn + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)] / [\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)] \quad (10)$$

联合国粮农组织公布的 Penman 修正式估算参考作物蒸散量:

$$ETo = [\frac{P_o}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} Rn + 0.26(e_s - e_a)(1 + 0.54U_2)] / [\frac{P_o}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} + 1] \quad (11)$$

上两式中: T —— 日平均气温 ($^\circ C$); U_2 —— 2m 高度处的风速 ($m \cdot s^{-1}$), e_s —— 空气饱和水汽压 (kPa); e_a —— 实际水汽压 (kPa); P_o 和 P 分别为海平面及测站的平均气压 (kPa), 式(10)中 Rn 的单位为 $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 式(11)中 Rn 的单位为 $mm \cdot d^{-1}$, e_s 和 e_a 的单位为 hPa 。由于试验地海拔高度为 50m, 因此, 假定 $P_o = P$ 。

3.3 根系吸水函数

有关作物根系吸水函数的研究较多,但许多模型的形式复杂,需要许多参数,难以直接应用到农田水量平衡模型中,因此,本研究采用较简单的 Selim 函数^[13]及 Dejong 函数^[14],并加以比较。

(1) Selim 根系吸水函数:

$$Sm_i = Tp \cdot KD_i \cdot K(\theta)_i / \int_1^N RD_i \cdot K(\theta)_i \cdot dz \quad (12)$$

式中: Sm_i ——第 i 层根系最大吸水量(mm); RD_i ——第 i 层的根密度(cm/cm^3); $K(\theta)_i$ ——第 i 层的土壤非饱和导水率(表 2),式(12)的含义是:第 i 层内作物根系吸收的水分与根密度及非饱和导水率乘积的相对百分数成正比,土壤含水量与非饱和导水率的关系见表 2。

(2) Dejong 根系吸水函数:

$$Sm_i = Tp \cdot RD_i / \int_1^N RD_i \cdot dz \quad (13)$$

式(13)的含义是:第 i 层内作物根系吸收的水分与相应的相对根密度成正比。

作物根系实际吸水量与根层土壤含水量有关,因此,第 i 层作物根系实际吸水量:

$$S_i = Ks_i \cdot Sm_i \quad (14)$$

Ks_i ——第 i 层土壤水分胁迫系数,由(6)式计算而得。

在模型实施过程中,把根系吸水函数(12)与(13)分别和蒸散公式(10)与(11)进行组合处理,共有 PM-selim,FAO-Selim,PM-Dejong 和 FAO-Dejong 四种组合模式应用于农田水量平衡模型,并求出任一种组合模式情形下的分层土壤含水量以及 1m 土层贮水量的动态变化。

表 2 土壤含水量 (θ) 与非饱和导水率 $K(\theta)$ 的关系

θ (m^3/m^3)	$K(\theta)$ (cm/d)	θ (m^3/m^3)	$K(\theta)$ (cm/d)
0.42	1.61	0.26	4.90×10^{-2}
0.40	1.01	0.24	3.25×10^{-2}
0.38	6.40×10^{-1}	0.22	2.10×10^{-2}
0.36	4.04×10^{-1}	0.20	1.28×10^{-2}
0.34	2.58×10^{-1}	0.18	7.21×10^{-3}
0.32	1.67×10^{-1}	0.16	3.56×10^{-3}
0.30	1.10×10^{-1}	0.14	1.41×10^{-3}
0.28	7.31×10^{-2}	0.12	3.58×10^{-4}

4 结果与讨论

4.1 不同组合处理情形下根层土壤含水量随时间变化

当用 Dejong 根系吸水函数时,将 PM 及 FAO 蒸散公式应用于农田水量平衡模型,冬小麦返青至收获期 0~20cm 和 20~40cm 根层土壤含水量模拟值与实测值的比较结果表明(图 1a 和 1b),用 PM-Dejong 组合模式和用 FAO-Dejong 组合模式模拟的土壤水变化过程不尽相同,对于 0~20cm 土层,两种方法的模拟值与实测值相比没有明显差别,但对 20~40cm 土层,两种方法的模拟结果已显差异,当用 Selim 根系吸水函数时(图 1c 和 1d),PM-Selim 组合模式和 FAO-Selim 组合模式应用于农田水量平衡型的模拟结果也有一定差异,不同土层内土壤水分模拟值与实测值的比较与图 1a 及 1b 有类似特点,不论采取哪种根系吸水函数,农田水量平衡模型对蒸散公式在土表层 0~20cm 不太敏感,而在根系层的 20cm 以下,应用 PM 模式 FAO 模式模拟的土壤水分差异明显,从图 1 中可看出,用 FAO-Dejong 组合模式或 PM-Selim 组合模式能较好地模

拟土壤水分的变化过程。

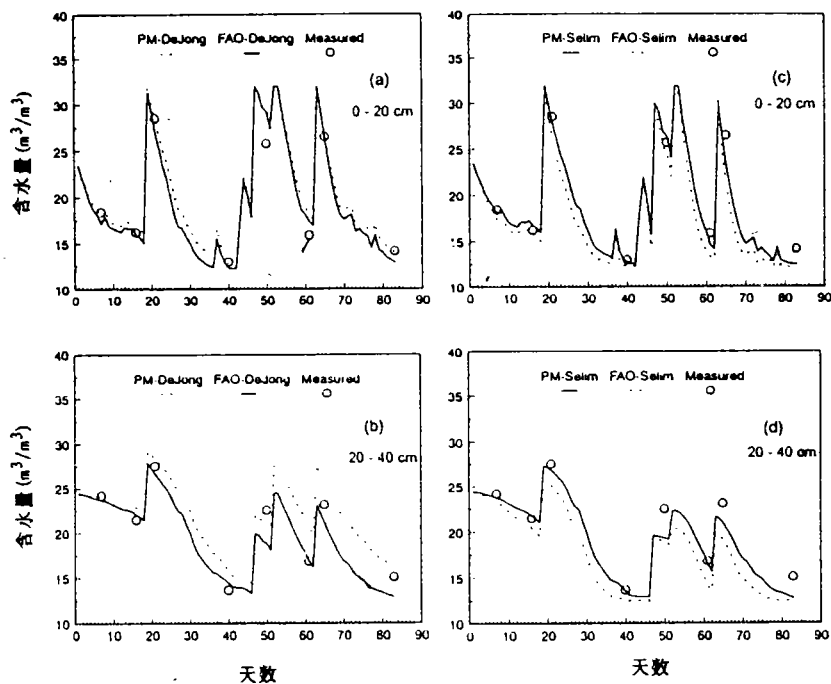


图1 土壤含水量模拟值与实测值的比较

4.2 不同组合处理情形下1m土层土壤贮水量变化

根据1m土层土壤贮水量模拟值与实测值(表3)的绝对偏差(绝对值)和相对偏差分析结果(表4),冬小麦返青至成熟期,用PM-Dejong组合模式模拟的1m土层贮水量与实测值的绝对偏差为2.10~22.30mm,相对偏差1.3%~13.1%;全期平均绝对偏差为10.90mm,平均相对偏差为5.4%,同期用FAO-Dejong组合模式模拟的1m土层贮水量与实测值的绝对偏差变化在4.67~18.04mm之间,相对偏差2.1%~10.9%,全期平均绝对偏差为9.90mm,平均相对偏差为4.8%。这说明当根系吸水函数采用Dejong模型时,FAO-Dejong组合模式应用于农田水量平衡模型的模拟效果略优于PM-Dejong组合模式。

表3 1m土层土壤贮水量模拟值和实测值

日期 月·日	PM-Dejong (mm)	FAO-Dejong (mm)	PM-Selim (mm)	FAO-Selim (mm)	实测值 (mm)
03·31	239.71	237.02	239.16	237.89	247.10
04·09	232.08	227.17	228.34	221.46	235.76
04·14	275.69	267.69	269.85	259.43	279.72
05·03	193.12	183.14	174.15	163.62	170.82
05·13	240.05	226.72	218.20	206.76	220.88
05·24	200.01	180.91	177.91	160.87	188.70
05·28	234.86	213.33	212.59	195.15	218.00
06·15	168.32	148.18	151.85	142.27	166.22

当根系吸水函数采用Selim模型时,1m土层贮水量模拟值与实测值的绝对偏差和相对偏差具有如下特征(表4):冬小麦返青至成熟期,用PM-Selin组合模式模拟的1m土层贮水量与实测

值的偏差变动在 2.68~14.37mm, 相对偏差 1.2%~8.6%, 全期平均绝对偏差 7.72mm, 平均相对偏差为 3.7%, 用 FAO-Selim 组合模式模拟的 1m 土层贮水量与实测值的绝对偏差为 7.2~26.83mm, 相对偏差为 4.2%~14.4%, 全期平均绝对偏差 17.60mm, 平均相对偏差 8.5%, 这表明当根系吸水函数采用 Selim 模型时, PM-Selim 组合模式应用于农田水量平衡模型的模拟效果优于 FAO-Selim 组合模式。

表 4 1m 土层土壤贮水量模拟值与实测值的绝对偏差(DA)和相对偏差(DR)

日期 月·日	PM-Dejong		FAO-Dejong		PM-Selim		AFO-Selim	
	DA(mm)	DR(%)	DA(mm)	DR(%)	DA(mm)	DR(%)	DA(mm)	DR(%)
03·31	7.9	3.0	10.08	4.1	7.94	3.2	11.21	4.5
04·09	8.68	1.6	8.59	3.6	7.42	3.2	14.30	6.1
04·14	4.03	1.4	12.03	4.3	9.87	3.5	20.29	7.3
05·03	22.30	13.1	12.32	7.2	3.33	1.9	7.20	4.2
05·13	19.17	8.7	5.84	2.6	2.68	1.2	14.12	6.4
05·24	11.31	6.0	7.79	4.1	10.79	5.7	26.83	14.2
05·28	16.86	7.7	4.67	2.1	5.41	2.5	22.85	10.5
06·15	2.10	1.3	18.04	10.9	14.37	8.6	23.95	14.4
平均	10.90	5.4	9.90	4.8	7.72	3.7	17.60	8.5

对表 3 和表 4 进一步分析可得出, 在农田水量平衡模型中, 当采用相同的根系吸水函数时, 选用 FAO 蒸散公式的相对偏差一般比选用 PM 蒸散公式时大, 这说明在农田水量平衡模型中用 PM 蒸散公式略优于 FAO 蒸散公式, 当根系吸水函数不同时, FAO 蒸散公式对农田水量平衡模型的响应比 PM 蒸散公式敏感, 具体表现为应用 FAO 蒸散公式时的相对误差为 4.8%~8.5%, 应用 PM 蒸散公式时的相对误差为 3.7%~5.4%, 当选用不同的蒸散公式时, 农田水量平衡模型对 Selim 吸水函数较 Dejong 吸水函数敏感, 因为应用 Selim 吸水函数时的相对误差为 3.7%~8.5%, 应用 Dejong 吸水函数时的相对误差为 4.8%~5.4%, 用 PM-Selim 组合模拟土壤水分变化的绝对偏差和相对偏差都最小, 也即模拟效果最佳。

4 结 语

FAO-Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸散量 ET_0 应用于农田水量平衡模型模拟的根层土壤水分有明显差异, 当选用不同的根系吸水函数时, 农田水量平衡模型对 FAO 公式较 PM 公式敏感, 分层土壤含水量及 1m 土层贮水量模拟值与实测值对比表明, PM-Selim 模式优于 FAO-Selim 模式, FAO-Dejong 模式优于 PM-aDejong 模式, 用 PM-Selim 模式模拟的 1m 层贮水量与实测值间的绝对偏差和相对偏差为最小。

不同根系吸水函数应用于农田水量平衡模型的模拟结果也有较大差异, 当选用不同的蒸散公式时, 农田水量平衡模型对 Selim 吸水函数较 Dejong 吸水函数敏感, 由于根系吸水函数和蒸散公式相互制约, 因此, 选择合适的根系吸水函数与蒸散公式是准确模拟土壤水分的关键之一, 根据本项研究的结果, 用 PM-Selim 模式模拟的根层土壤水分及分层土壤含水量的动态变化结果最佳。

本文建立的农田水量平衡模型仅模拟了冬小麦主要生长期(3月~6月)的农田水分动态变化过程。对于地下水位高的地方, 农田水量平衡模型中还应加上地下水对根系层的补给作用, 另外, 分层农田水量平衡模型中的下层水对上层的补给作用也值得进一步研究。

参考文献

- 1 龚元石. 冬小麦和夏玉米农田土壤分层水分平衡模型. 北京农业大学学报, 1995, 21(1): 61~67
- 2 Gong YS. Abschaetzung des Bewaesserungsbedarfs fuer landwirtschaftliche Nutzflaechen in der Huabei-Ebene der VR China. 1993, ISSN 0942~0754, Heft 8
- 3 Smittle DA, Dickens WL, stansell JR. An irrigation Scheduling model for snap bean. J Amer Soc Hort Sci, 1990, 115(2): 226~230
- 4 石元春, 辛德惠. 黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理. 河北人民出版社, 1983, 16~20
- 5 申双和, 欧阳海. 运用信息熵理论建立土壤剖面雨水分配模型的探讨. 南京气象学院学报, 1992, 15(3): 305~314
- 6 联合国粮食及农业组织. 作物需水量(中译本). 1977
- 7 Jensen ME, Wright JL, Pratt BS. Estimation soil moisture depletion from climate, crop and soil data. Trans Amer Agr Eng, 1971, (14): 954~959
- 8 鹿洁忠等. 河北省邯郸地区农田(小麦、玉米、棉花田)水分收支状况. 见: 石元春等著, 盐渍土的水盐运动, 北京农业大学出版社, 1986, 225~240
- 9 Ritchie JT. Model for predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. Water Resources Research, 1972, 8(5): 1204~1212
- 10 Allen RG, Jensen ME, Wright JL et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron J 1989, 81: 650~662
- 11 Frere M, Pruitt WO. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, 1979, 41~45
- 12 Jensen ME, Burman RD, Allen RG. Evapotranspiration and irrigation water requirement. ASCE Manual No. 70, 1990, 234~251
- 13 Selim HM, Iskandar IK. Nitrogen behavior in land treatment of wastewater: A simplified model. In: State of Knowledge in Land Treatment of Wastewater. Proceedings International Symposium, Hanover, New Hampshire, August 1987(91): 171~179
- 14 Dejong R, Cameron DR. Computer simulation model for predicting soil water content profiles. Soil Science. 1979, 128(1): 41~48