

缴锡云,虞晓彬,郭思怡. SWAP 模型在稻田水分运移模拟中的应用[J]. 江苏农业科学,2013,41(10):369-372.

SWAP 模型在稻田水分运移模拟中的应用

缴锡云,虞晓彬,郭思怡

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室/河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:针对稻田的水分运移,研究了 SWAP 模型的应用条件并进行了效果验证。在格田尺度上,对土壤在垂直深度上划分为 40 个单元,确定了 SWAP 模型的边界条件和初始条件,估算给出模型参数,通过比较田间土层深度模拟值与实测值的吻合程度。结果表明,田间土层深度模拟值与实测值吻合较好,SWAP 模型可用于模拟稻田的水分运移和相对产量,为稻田水分运移和水稻产量研究提供了方便可行的方法。

关键词:SWAP 模型;稻田;田间土层深度;模型效率系数

中图分类号:S274 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2013)10-0369-04

SWAP(Soil-Water-Atmosphere-Plant)是瓦赫宁根大学集成当今 SPAC 系统水分运移的最新研究成果,是宏观系统 SPAC 系统水分运移模拟模型的典型代表,主要用于田间尺度下土壤-植物-大气环境中水分运动、溶质运移、热量传输及作物生长的模拟^[1]。模型在国内外得到了应用,并取得了较好效果,受到了较广泛接受和认可。近年来,SWAP 模型在黄河流域大型灌区农田水盐动态变化规律^[2-3]、灌溉水管理方案评价^[3-4]、地下水位的控制^[5]等方面得到了广泛的应用。

罗智勇以 SWAP 模型为平台分析了栾城县不同灌溉制度下 0~2 m 土壤水分的动态变化过程,初步得出了农作物的生

长与地下水水位动态的关系,农作物生长季节与地下水位的关 系^[6]。孔繁瑞利用 SWAP 模型对不同地下水埋深下土壤水肥利用效率进行了模拟^[7]。李小梅等以 SWAP 模型为工具,应用不同灌溉制度下灌水水平、土壤水势、旱稻叶面积指数、干物质量及产量等试验资料,研究了旱稻灌溉模式^[8]。van Dam 等应用 SWAP 模型研究农业用水效率和区域养分管理。他指出在未来 5~10 年内,像 SWAP 这种模型在教育和研究中依然十分重要^[9]。姚本智、丛振涛等利用山东位山灌区冬小麦监测资料对 SWAP 模型进行率定,在此基础上,考虑冬小麦产量与蒸腾量的关系,利用 SWAP 模型进行灌溉制度优化分析^[10]。

综上所述,SWAP 模型多用于旱田水盐运移和灌溉制度优化研究,水稻田中节水减污方面研究较少。对 SWAP 模型进行空间单元划分,并确定模型的边界条件和初始条件,通过计算求出模型所需参数,以模型效率系数和相关系数为分析标准,检验田间土层深度模拟值与实测值的吻合程度,验证 SWAP 模型在稻田的适用性,为稻田水分运移和水稻产量的研究提供方便可行的方法。

机构的检测与作业试验可知,其主要技术指标均符合设计要求,而且整体性能优于 4UMS-390 II 型木薯收获机,进而在此基础上完善设计,实现推广应用。

参考文献:

- [1]蒋志国,黄晖,李明,等.我国研发木薯收获机械的必要性[J].中国热带农业,2008(6):34-35.
- [2]孙佑攀,廖宇兰,陈丹萍.4UMS-1 型木薯收获机的设计[J].农机化研究,2012,34(2):89-92.
- [3]廖宇兰,孙佑攀,林大春,等.木薯收获机械研究进展[J].热带农业工程,2009,33(1):54-56,60.
- [4]李整民. II 型单行木薯收获机[J].热带作物机械化,1993(1):45-47.
- [5]中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册:下[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:1111-1503.
- [6]薛忠,黄晖,李明,等.4UMS-390 II 型木薯收获机的研制[J].农机化研究,2010,32(8):79-81,85.

表 2 2 种机型试验对比结果

机型	平均耕深 (mm)	生产率 (hm ² /h)	耗油量 (kg/h)	幅宽 (mm)
4UMS-900 型	340	0.42	2.4	910
4UMS-390 II 型	320	0.31	1.9	605

4 结论

通过改进设计方案,研制了新型的木薯收获机械,其工作总幅宽可达 1 500 mm,机具入土深度可达 315 mm。经过检测

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2009—2010 年的 6—10 月在江苏省高邮市卸甲镇周庄村(119°11'E,32°35'N)进行。试验区属北亚热带季风气候区,全年平均气温为 14.6℃,常年降雨量 1 037 mm,多年年平均蒸发量 1 060 mm。无霜期 242 d,最高气温 38.5℃,最低气温-18.5℃,相对湿度 75%左右,寒暑显著,易旱易涝。受海洋季风的影响,6—9 月份降雨偏多,多年平均汛期降雨量占多年平均雨量的 59.5%。浅层地下水埋深 0.5~1.2 m,0~40 cm 田间土壤全氮含量 0.73 g/kg,全磷含量 0.88 g/kg,pH 值 7.4,土壤容重 1.17 g/cm³。土壤耕层质地为黏壤土,适宜水稻、小麦、棉花、油菜等多种粮经作物生长。

选取高邮灌区的水稻控制灌溉格田 A2、B4 的实测资料对模型进行检验。田块长 90 m×宽 30 m,2 块格田西侧均为相同田块,东侧为排水毛沟,北侧为排水农沟,南侧为灌水农渠。利用 2010 年度的数据率定模型参数,利用 2009 年度的试验数据进行模型验证。

1.2 数据处理方法

将气象资料、作物参数、土壤参数按要求输入 SWAP 模型,并分别将 A2、B4 格田的灌溉资料、地下水位等资料输入模型进行模拟,根据模拟的各平衡分量分别计算出 A2、B4 格田的田间水层深度,将 A2、B4 格田的田间水层深度的模拟值与实际观测值比较进行模型验证。

2 SWAP 模型

土壤-水-大气-植物整合模型(Soil-Water-Atmosphere-Plant)简称 SWAP,是荷兰瓦赫宁根大学开发的用于模拟农田尺度上水盐运移的专业软件^[1]。该模型由完善的土壤水运移、溶质迁移、热量传输、土壤蒸发、植物蒸腾、作物生长等子模型组成^[12],主要用于田间尺度下土壤-植物-大气环境中水分运动、溶质运移、热量传输及作物生长的模拟^[1]。SWAP 模型的上边界位于植物冠层上方,下边界位于非饱和带和地下水系统的上部,其间分别考虑大气环境因素和区域地下水动态变化的影响。在上下边界之间,水流运动主要按垂向考虑,将垂向土柱划分为若干层,每 1 层划分为若干个单元,运用有限差分的方法求解水分、溶质和热量运动方程。SWAP 模型在水盐运移和灌溉制度优化方面的应用已很成熟,在节水减污研究方面有很大的应用价值。

2.1 空间单元划分

根据当地水稻根系活动层深度取模拟土柱为 100 cm,水稻田田间大多数时候有水层,根系活动层深度的土壤含水率差别不大,根据当地土壤质地实际情况,将试验区 0~100 cm 土层划分为 1 层。SWAP 模型对土壤水流的计算要求将土层再细分为若干单元。整个土壤层面最大可划分为 60 个单元,单元数越多计算精度越高,但计算耗时也相应增大。将试验区土层划分为 40 个单元。为了能精确计算土壤上层的土壤水流,接近土壤表面的单元格设为 1 cm 厚度,下层设为 2 cm 厚度。

2.2 边界条件及初始条件

2.2.1 上边界条件 上边界受气象条件(降雨、蒸发)的控制,边界条件根据土壤表面的具体水分状况决定是采用已知水头(水势) h_{sur} (cm)边界(一类边界)还是采用已知流量 q_{sur} (cm/d)边界(二类边界),根据模拟需要选择一类边界条件。

2.2.2 下边界条件 对应于实际中存在的下边界情况,SWAP 提供了 8 种不同的方案可供选择。根据模拟需要及试验数据选择给定地下水位随时间的变化过程 φ_{gw} (cm)为下边界条件,且土壤下边界设在地表以下 100 cm 处。

2.2.3 初始条件 初始条件包括初始时刻水层深度和初始地下水位,从实际观测资料获得。

3 模型参数

3.1 作物参数

3.1.1 作物株高及根深 由于试验未测水稻株高,根据姚克敏论文中提出的株高有效积温模型进行求解^[13]。姚克敏指出温度(积温)是影响水稻株高的主要因素,因此建立了与积温有关的水稻株高模型

$$y = \frac{150.568}{1 + e^{2.078 - 0.002x}} \tag{1}$$

式中: y 代表株高,cm; x 代表从播种日开始的大于 13℃的有效积温,℃。

由于在水稻生育期内未测定根深,根据水稻根长增长模型计算根深

$$L(t) = \frac{1}{2}l_0t^2(1 - \frac{2t}{3T}) \tag{2}$$

式中: $L(t)$ 指的是在时间 t 时的根长,cm/株; t 是水稻生长时间,从移栽开始计算,d; T 是供试植物最大根长出现时的时间,d; l_0 是根的内在增长率,cm/(d·株)。模拟取 $l_0 = 0.09$ cm/(d·株), $T = 80$ d。水稻株高及根深结果见表 1。

表 1 水稻株高及根深(2010 年)

日期(月-日)	株高(cm)	根深(cm)
07-01	22.82	2.08
07-13	30.97	13.67
07-17	33.68	19.24
07-20	36.34	23.83
07-25	40.73	32.07
07-30	45.81	40.82
08-04	52.21	49.80
08-15	66.26	68.95
08-25	78.33	83.61
09-02	85.70	91.88
09-11	94.39	95.96
09-23	103.75	90.06
10-10	110.78	52.89

3.1.2 作物参数求解 表 2 给出了模拟所需水稻作物参数。其中作物生长阶段(Ds)定义为作物生长日期的线性函数,起止范围为 0~2。作物移栽的前 1 d 定义为 0,开花期为 1,成熟期为 2。其间的数据根据作物生长所处的时间在 0~2 之间线性插值得出。根据实际观测资料和计算所得数据分别建立与作物叶面积指数、作物株高和作物根深的关系(表 2)。其中根长密度分别假定沿土层垂向呈直线性下降。用于计算

水分胁迫折减系数的个临界压力水头按 Wesssling 等建议选取(表 3),在模型中不考虑盐分对根系吸水的影响。

表 2 作物参数

作物生长阶段 (Ds)	叶面积指数	作物高度 (cm)	作物根深 (cm)
0.08	0.08	22.82	2.08
0.25	0.58	30.97	13.67
0.31	1.21	33.68	19.24
0.35	2.15	36.34	23.83
0.42	2.90	40.73	32.07
0.49	4.64	45.81	40.82
0.56	6.11	52.21	49.80
0.71	6.44	66.26	68.95
0.85	8.56	78.33	83.61
1.00	6.83	85.70	91.88
1.23	6.38	94.39	95.96
1.52	7.84	103.75	90.06
2.00	7.55	110.78	52.89

表 3 作物模型中输入的其他参数

参数	数值 (cm)
根系可以从土壤中吸水时的土壤水压的上限	-10.0
根系可以从土壤中吸水时的土壤水压的上限	-25.0
所有上层根系吸水项不受水应力影响的土壤水压力下限	-25.0
在高大气下根系吸水项不受应力影响的土壤水压力下限	-300.0
在低大气下根系吸水项不受应力影响的土壤水压力下限	-600.0
根系不在吸水的土壤水压力(凋萎点)	-10 000.0
作物冠层阻力	70.0

3.2 土壤水力参数

水稻田大多数时候有水层,根系活动层深度的土壤含水率差别不大,根据当地土壤质地实际情况,模拟计算将研究区域内的土壤视为均质土进行简化处理,取 0~100 cm 深土壤的混合样进行土壤颗粒分析和土壤容重测定。

采用烘干法测定土壤容重。使用 LS 13 320 全自动激光粒度分析仪获得土壤颗粒分析数据。土壤容重和土壤颗粒分析结果见表 4。按美国制的土壤质地三角形土壤类型划分为粉壤土。

表 4 研究区域的土壤质地

土壤容重 (g/cm ³)	粒径颗粒分布(%)			土壤 类型
	小于 0.002 mm	0.002~0.050 mm	0.05~2.00 mm	
1.52	10.3	59.5	30.2	粉壤土

按土壤质地由 SWAP 模型的土壤传递函数计算的土壤水力函数有关参数见表 5。

表 5 土壤水力参数

深度 (cm)	θ_{res} (cm ³ /cm ³)	Q_{sat} (cm ³ /cm ³)	K_{sat} (cm/d)	∂ (cm ⁻¹)	λ	n
0~100	0.010 0	0.400 0	2.200 0	0.013 6	-0.802 0	1.2500

4 模型验证

4.1 输入数据

稻田灌溉排水系统水分运移模拟所需的资料如下:(1)气象资料。气象资料来源于高邮市气象站的实测资料,气象资料包括:最高温度、最低温度、日照时数、风速、降雨量及相对湿度等。(2)灌溉资料。见表 6。(3)作物参数。模拟所需作物参数见表 2 和表 3。(4)地下水位。每隔 5~10 d 测 1 次地下水埋深。(5)土壤水力参数。土壤水力参数见表 4、表 5。

表 6 2009 年水稻各生育阶段灌水量

日期 (月-日)	生育阶段	灌水量(m ³ /hm ²)		灌水量(mm)	
		控制灌溉	常规灌溉	控制灌溉	常规灌溉
06-17	返青期	393.15	393.15	39	39
06-21		504.30	655.65	50	66
06-25		393.15	511.05	39	51
07-01		468.00	608.40	47	61
07-05	分蘖期	451.50	586.95	45	59
07-12		241.95	314.55	24	31
07-15		351.60	457.05	35	46
07-20		360.60	468.75	36	47
08-19	拔节孕穗期	87.45	113.70	9	11
08-25		187.20	243.45	19	24
08-31	抽穗开花	209.85	272.85	21	27
09-06		276.30	359.25	28	36
09-12	乳熟期	588.30	764.85	59	76
09-25		116.85	151.80	12	15
合计		4 630.20	5 901.45	463	589

4.2 计算与检验

根据 2009 年高邮灌区的控制灌溉田块 A2、B4 的实测资料对模型进行检验。将气象资料、作物参数、土壤参数按要求输入模型,并分别将 A2、B4 格田的灌溉资料、地下水位等资料输入模型进行模拟,根据模拟的各平衡分量分别计算出 A2、B4 格田的田间水层深度,按 A2、B4 格田的田间水层深度的模拟值与实际观测值比较进行模型验证。模拟值与实际观测值的吻合度用模型效率系数 R^2 和相关系数表示。 R^2 越接近于 1 表明模型效率越高,相关系数越接近 1 表明模拟值与实测值相关性越高,模型越可靠。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \tag{3}$$

式中: R^2 为模型效率系数(确定性系数); X_i 为模拟值; Y_i 为实测值; \bar{Y} 为实测值的平均值。

A2、B4 格田水层深度模拟值与实测值的相关系数和模型效率系数计算结果见表 7。

表 7 各田块水层深度模拟数学统计

田块编号	模型效率系数(R^2)	相关系数(r)
A2	0.90	0.93
B4	0.84	0.92

由表 7 看出,A2、B4 格田水层深度模拟值与实测值的相关系数较高,分别为 0.93、0.92,模型效率系数接近于 1,分别

为 0.90、0.84。可见田间水层深度模拟值与实测值吻合较好,模型参数设置合理,模型可靠。田间水层模拟值与实测值对比见图 1、图 2。

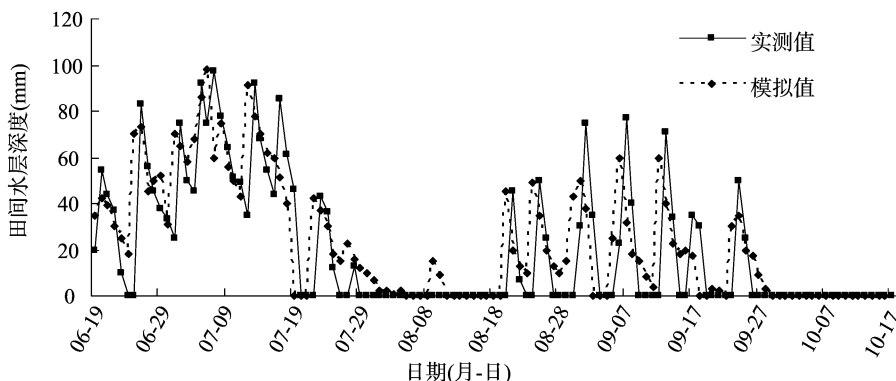


图1 2009年A2田块田间水层深度的实测值与模拟值对比

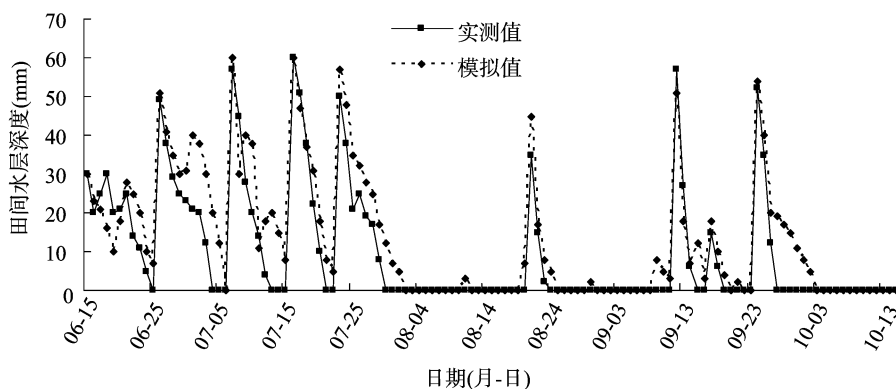


图2 2009年B4田块田间水层深度的实测值与模拟值对比

5 结论

对 SWAP 模型进行空间单元划分,并确定模型的边界条件和初始条件,通过计算求出模型所需参数,以模型效率系数和相关系数为分析标准,检验田间水层深度模拟值与实测值的吻合程度,分析模型的可靠性。结果表明,SWAP 模型可用于模拟稻田的水分运移和相对产量,为稻田水分运移和水稻产量的研究提供方便可行的方法。

参考文献:

- [1]何 锦. 基于 SWAP 模型的农田水分动态模拟研究[D]. 西安:长安大学,2006:18.
- [2]王卫光,王修贵,沈荣开,等. 微咸水灌溉研究进展[J]. 节水灌溉,2003(2):9-11,46.
- [3]王卫光,王修贵,沈荣开,等. 河套灌区咸水灌溉试验研究[J]. 农业工程学报,2004(5):92-96.
- [4]Wang X G, Hollanders P H J, Wang S L, et al. Effect of field groundwater table control on water and salinity balance and crop yield in the Qingtongxia Irrigation District, China[J]. Irrigation and Drainage, 2004, 53(3):263-275.
- [5]王少丽,许 迪,方树星,等. 水管理策略对土壤水盐动态和区域地下排水影响的模拟评价[J]. 水利学报,2005(7):799-805.
- [6]罗治勇. 农田水分动态模拟研究[D]. 西安:长安大学,2008:49.
- [7]孔繁瑞. 不同地下水埋深下土壤水肥利用效率试验与模拟评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [8]李小梅,崔远来,谢先红. 基于 SWAP 的早稻灌溉模式研究[J]. 中国科技论文在线,2008(7):530-535.
- [9]van Dam J C, Groenendijk P, Hendriks R F A, et al. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2):640-653.
- [10]姚本智,丛振涛,倪广恒. SWAP 模型在灌溉制度优化中的应用[J]. 现代农业水土资源高效利用理论与实践,2008:478-482.
- [11]van Dam J C, Wessling H J, Feddes J G, et al. Theory of SWAP Version 2.0[D]. Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Center, 1997.
- [12]van Dam J C, Wessling H J. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment[D]. DLO Winand Staring Centre, Wageningen: Wageningen Agriculture University, 1997.
- [13]姚克敏,邹江石,买 苗,等. 两系法杂交水稻株高变化规律及其与气象条件的关系[J]. 杂交水稻,1999,14(增刊):49-51.