

基于 SHAW 模型对拉萨河谷冬小麦农田 生态系统水分传输特征的模拟研究

尹志芳^{1,2}, 欧阳华^{1,*}, 徐兴良¹, 张宪洲¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以青藏高原的拉萨河谷下游的农田为研究对象,利用中国科学院拉萨高原生态试验站的观测数据,通过模型模拟的方法分析了高原冬小麦农田生态系统水分传输的主要特征并结合当地的气象条件和灌溉情况对当地制定适宜的冬小麦农田灌溉制度进行了初步探讨。采用 2004 年 5~10 月的土壤水分观测数据对 SHAW 模型进行参数率定,然后,利用 2004 年 10 月~2005 年 10 月的土壤水分观测数据对率定的参数进行验证并评价 SHAW 模型的在该地区的模拟性能。通过分析 2004~2005 年冬小麦农田水分传输过程的模拟结果,得出该地区农田生态系统水分传输的主要特征:①拔节-灌浆期是冬小麦耗水旺期,水分主要在土壤-植物间传输。②冬小麦生长期耗水量为 826mm,是华北平原的 1.7~1.9 倍,其中土壤蒸发占了 37.5%。③冬小麦根系吸水主要集中于 10~40cm 土层,在浅层土壤水分供应不足时,冬小麦才倾向于利用深层土壤水分(40cm 以下)。④整个冬小麦生长期农田的总深层渗漏量达到约占总灌溉量的 50%。其中,播种-返青期间灌溉量的 72% 渗漏到 70cm 土层以下。最后,基于研究得出的冬小麦农田生态系统水分传输特征,对该地区适宜的灌溉制度进行了分析探讨。

关键词:拉萨河谷;冬小麦;水分传输;SHAW 模型

文章编号:1000-0933(2009)04-2010-10 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Simulation of the water transfer processes of winter wheat field ecosystem using SHAW in Lhasa river valley

YIN Zhi-Fang^{1,2}, OUYANG Hua^{1,*}, XU Xing-Liang¹, ZHANG Xian-Zhou¹

1 Institute of Geographical Sciences and National Resources Research of CAS, Beijing 100101, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2010~2019.

Abstract: Water transfer among atmosphere, vegetation, and soil ecosystems is very important in hydrology and ecology; However, there is very few study on this aspect for high land. Based on the experiments and climatic data of Lhasa Plateau Ecosystem Research Station, this paper used SHAW model to investigate the mechanism and characteristic of water transfer in Lhasa river valley on the Tibetan Plateau. The data from May to Oct. in 2004 were used to calibrate the parameters of SHAW model. Then, the calibrated parameters were used to validate the model. Finally, the model was evaluated by estimating soil moisture using the data from Oct. 2004 to Oct. 2005.

Seasonal variations of evaporation, transpiration, soil water content, root extraction and deep percolation during the whole winter wheat growth period of 2004—2005 were analyzed. Major results are reported as follows: ①Shooting-Grain filling is the key water consumed stage during the course of winter wheat growth. Water transfer mainly occurred between soil and roots. ②The total water-consumption of winter wheat is estimated to be 826 mm, it is about 1.7—1.9 times more than those reported in North China Plain. Hereinto, soil evaporation accounts for 37.5%. ③The roots of winter wheat in this region mainly extract water from 10 to 40cm soil depth, only when 10—40cm soil water is deficiency, winter wheat

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2005CB422005);国家重大基础研究前期研究专项资助项目(2005CCA05500)

收稿日期:2007-12-04; **修订日期:**2008-04-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ohua@igsrr.ac.cn

tends to extract water from deeper soil water (below 40cm). ④During the course of winter wheat growth, total water seepage accounts for 50% of the total irrigation. In particular, two times irrigation in seed-Reviving stage, about 72% irrigation seeped down to 70cm soil.

At the end, this paper also discussed the prospective of the suitable irrigation scheduling based on the results of this research on water transfer character.

Key Words: Lhasa river valley; winter wheat; water transfer; SHAW model

生态系统的水热问题是生态学在环境方面的研究核心,同时,水分在土壤-植被-大气系统中的迁移和转换又是陆面能量平衡和水分循环的重要组成部分。生态系统中水分传输研究对于研究陆地-大气相互作用,地球气候与水圈的相互作用以及全球水量平衡与能量平衡等均具有重要作用。IGBP 核心计划之一的 BAHG (biosphere aspect of hydrology cycle) 研究就是以此为重点,在田间尺度和区域尺度上研究植被对水分循环的控制。

青藏高原是一个独特的地理单元,平均海拔 4000m 以上,号称地球的“第三极”,拥有丰富的生态系统类型,在全球变化研究中具有重要的地位。我国的科学家已经在青藏高原开展了一系列的研究工作,取得了不少研究成果,但是,由于高原气候条件的恶劣、研究数据的缺乏和研究基础的薄弱,人们对相应的物理过程机理的认识还很有限;其中,高原上农田生态系统的水分传输机理、水量平衡规律的研究几乎还未开展。由于生态系统中的水分传输过程较为复杂,水分过程和环境因子之间的交互作用很难通过实验测得;土壤-植被-大气水分传输(SVAT)模型的建立和发展为研究生态系统水分过程及其与环境因子之间的作用提供了强有力的工具,其中,SHAW 模型是最具代表性的模型之一。因此,本研究以青藏高原拉萨河谷下游的农田为研究对象,利用中国科学院拉萨高原生态试验站的观测数据,通过模型模拟的方法探讨高原冬小麦农田生态系统水分传输的主要机理和特征,为进一步从机理上探寻气候变化对青藏高原生态系统的影响奠定基础,同时也为当地制定适宜的冬小麦农田灌溉制度提供科学依据与初步建议。

1 研究区概况

本研究在位于拉萨河下游河谷的中国科学院拉萨高原生态试验站所在的达孜农场开展。研究区位于西藏自治区拉萨市达孜县,地处 29°41'N, 91°20'E;地貌属于拉萨河下游宽谷地段,海拔 3680 ~ 3690m。气候属于高原温带半干旱季风气候,年降水 425mm,90% 以上集中在 6 ~ 9 月份。年均温 7.5℃,日温差大;最热月 7 月份平均气温 15.4℃,最冷月 1 月份平均气温为 1.7℃,极端最高和极端最低气温分别为 29.6℃和 -14.6℃,分别出现在 6 月和 1 月份;太阳辐射强,日照时间长,年日照时数在 3000h 以上;大于 0℃积温 2900℃,持续日数 289d;大于 10℃积温 2200℃,持续日数 153d;无霜期 136d。

拉萨河谷土壤为发育在洪积扇上的灌丛草原土,土壤较为浅薄,土壤深度为 40 ~ 100cm。农田土壤属于潮土,是在草甸土发育的基础之上,经过培土和长期耕作熟化形成的土壤,由于耕作原因,草毡层已经被耕作层替代。生态试验站土壤为冲洪积物母质;土壤质地为粉砂壤土或轻度砂壤土;土层较薄,约为 40 ~ 90cm,多砂石,粘土含量为 15% ~ 20%;有机质含量较低,一般在 0.76% ~ 1.56%。

受水热条件的制约,该地区农田主要种植小麦、青稞、油菜等,冬小麦和青稞种植面积较广;因此,本研究以种植冬小麦的农田为研究对象。

2 材料与方法

本研究以拉萨站长期观测数据(气象、农田水分等)为基础,用 SHAW 模型模拟土壤-植物-大气的水分传输过程。

2.1 田间实验

中国科学院拉萨高原生态试验站在距气象场约 15m 处设有长期观测样地,样地的种植方式以及灌溉施

肥等管理措施都与当地农户基本上保持一致。2003 ~ 2004 年, 2004 ~ 2005 年该样地种植当地广泛种植的冬小麦。

(1) 土壤水分观测 样地内不同地点埋设有 3 根 70cm 深的中子管, 在作物生长期, 每周使用中子仪每隔 10cm 观测一次土壤体积含水量。

(2) 生物指标观测 在冬小麦生长期, 每隔 20d 观测一次叶面积指数和生物量。

(3) 土壤参数测定 2006 年 6 月, 在长期观测样地旁的休耕地挖取土壤剖面, 划分土壤层次, 测定各层的机械组成、土壤容重等参数。

2.2 模型介绍

SHAW (simultaneous heat and water) 模型是一维的多层水热耦合模型, 由美国农业部西北流域研究中心的 Flerchinger 等^[1,2]于 1989 年开发的。它较详细地描述了土壤-植被-大气一维垂向的水热传输过程。驱动模型运行的基本气象资料包括日降水量、最高和最低气温、太阳辐射以及风速。根据 Flerchinger 等人^[1~4]对 SHAW 模型描述, 本文对土壤蒸发、植被蒸腾、根系吸水、土壤水运动、深层渗漏等关键过程的模拟做简单的说明。

(1) 土壤与冠面蒸发

SHAW 模型对地表面蒸散发模拟的特点之一就是将植被蒸腾与土壤蒸发分隔开来, 根据蒸发与蒸腾的不同机理建立了相应的计算公式。其中, 土壤表面的蒸发及植被冠层表面的蒸发是根据交换面到大气的水汽梯度来计算的, 见公式(1):

$$E = \frac{(\rho_{vs} - \rho_{va})}{r_v} \quad (1)$$

式中, ρ_{vs} , ρ_{va} 分别是交换面和参考高度的水汽密度, r_v 为水汽传输阻抗。

(2) 植物蒸腾与根系吸水过程

SHAW 模型中植被蒸腾的模拟是和根系吸水作为一个连续的整体过程同时模拟的。模型根据 Van-den Honert 的假设, 来模拟土壤-植被-大气连续体内的水分传输过程。如公式(2)的前 3 个等式, 该公式假设植物体内的水流是连续的稳定的, 遵循类似于欧姆定律的水流通量与水流阻力的反比函数关系。蒸腾拉力是水分从根系上升的主要动力, 水流从土壤到根部、到植物体内木质部再到叶片, 从叶片到植被冠层空气:

$$q = \frac{\psi_s - \psi_r}{R_{sr}} = \frac{\psi_r - \psi_l}{R_{rl}} = \frac{\psi_l - \psi_a}{R_{la}} = L \frac{\rho_{vs} - \rho_v}{r_s + r_h} \quad (2)$$

式中, q 为植物体内的水分通量, 即蒸腾水分和根系所吸收的水分; ψ_s, ψ_r, ψ_l 分别为土壤、根系和叶片水势; R_{sr}, R_{rl}, R_{la} 分别为土壤、根系和叶片阻力; L 为叶面积指数; ρ_{vs}, ρ_v 分别是冠层气孔内水汽密度 (相当于饱和水汽密度) 和冠层内空气的水汽密度, r_s 为气孔阻力, r_h 为对流传输阻力。

(3) 土壤中的水分传输

SHAW 模型是一水热耦合模型, 在模拟土壤中水热传输时考虑了温度对液态水和气态水运动的影响。模型基于饱和土壤水分传输的达西定律和非饱和土壤内水分传输的 Richard 方程, 并考虑了土壤内气态水分的迁移来模拟各层土壤中的水分传输, 见公式(3):

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial q_v}{\partial z} + U \quad (3)$$

式中, θ_i 为土壤体积含水量, K 为土壤的非饱和导水率 (m s^{-1}), ψ 为土壤基质势 (m), q_v 为水汽通量, U 为水通量的源或汇项 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), 在这里指根系吸水引起的变化量。

(4) 渗漏与补给

SHAW 模型根据 Green-Ampt 方程计算土壤水下渗过程, 并将下边界处邻近的两层土壤间的水分交换作为水分的深层渗漏和补给。Preston^[5]对 SHAW 模型植物蒸腾、深层渗漏等方面的模拟做了详细的验证和评价, 并将它用于分析评价植被覆盖对固体垃圾的防渗作用, 是 SHAW 模型模拟深层渗漏的一个成功案例。

本研究将 70cm 处土层设定为模型模拟的农田生态系统的下边界,这样,模型就将 70cm 土层与相邻土层间的水分交换作为整个系统的水分渗漏与补给。

3 模型参数率定

SHAW 模型需要输入的参数较多,一些参数可以通过实验测得,而另一些参数必须通过多次调试才能确定。本研究以 2004 年(5 月 7 日~10 月 8 日)实测的各层土壤含水量为基础,以模拟的同期的土壤水分为目标函数,通过反复试错法使模型的模拟结果与实测结果相匹配来率定参数。由于本研究土壤水分是用中子仪测定的,所以表层土壤水分的测定由于中子的逸散作用而存在一定的误差。因此,本研究使用 15、25、35、45、55cm 共 5 层的土壤水分来率定模型参数。最终确定模型各项参数时的模拟结果,如图 1。

通过对模型参数的多次调试,最终确定 SHAW 模型在拉萨农田的各项参数。其中,植物性状参数见表 1,土壤性状参数见表 2。

表 1 植物性状参数
Table 1 Plant parameters

参数名称 Parameters	参数值 Value of parameters
植被反照率 Albedo of plant α	0.25
植物蒸腾的最低温度 Temperature above which plant will transpire T_c	8℃
植物叶片阻力 Resistance of leaves r_l	$1 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$
植物根系阻力 Resistance of roots r_r	$2 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$
无水分胁迫下的气孔阻力 Stomatal resistance of plant with no water stress r_{s0}	100s/m
联系实际气孔阻力和叶水势的经验指数 Empirical exponent relating actual stomatal resistance to leaf potential n	3
临界叶水势(此时气孔阻力为最小时的两倍) Critical leaf water potential ψ_c	-200m

表 2 土壤性状参数
Table 2 Soil parameters

土壤深度 Soil depth(m)	0	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.7
孔径分布指数 Cambell's pore-size distribution index	2.5	3.5	4.4	4.6	4.4	5.5	5.1	5.1
进气势 Air-entry potential (m)	-0.22	-0.22	-0.2	-0.2	-0.35	-0.35	-0.4	-0.49
饱和导水率 Saturated conductivity (cm/h)	9.99	5.99	5.27	2.22	2.09	1.07	0.77	0.32
容重 Bulk density (kg/m ³)	1190	1260	1270	1420	1490	1570	1550	1540
饱和含水量 Saturated volumetric water content	0.46	0.46	0.46	0.46	0.44	0.42	0.42	0.42
砂粒 Sand(%)	61	62	65	69	69	70	72	75
粉粒 Silt(%)	29	28	25	21	23	22	20	20
粘粒 Clay(%)	8	8	8	8	8	8	8	5
有机质 Organic matter(%)	4	3	2	1.5	1	0.5	0	0

* 孔径分布指数指 Campbell 公式 $\psi = \psi_e [\theta/\theta_s]^{-b}$ 中 b

4 模型验证与结果分析

4.1 模型验证

本研究采用 2004 年 10 月 13 日至 2005 年 10 月 12 日这一水文年的冬小麦生长期间实测的土壤水分来验证上述模型参数,并对模型的模拟性能做出评价。

如图 2 分别为 2004~2005 年冬小麦生长期间的 15、25、35、45、55、65cm 的土壤水分模拟值和实测值的对比。可以看出,模拟值基本上反映了土壤水分的变化趋势,并且,随着土层的加深,模拟值与实测值的差距减小。这是因为,在整个模型运行期间,模型根据输入的下边界(70cm)处的土壤含水量,用线性插值法预测其余各层的瞬时含水量。因此,在土壤下层,模型模拟精度较高。

本研究用模型效率(model efficiency, ME),标准偏差(root mean square error, $RMSE$)和平均偏差(mean

bias error, *MBE*) 来描述模型的模拟效果, 分别表示如下:

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i) \quad (4)$$

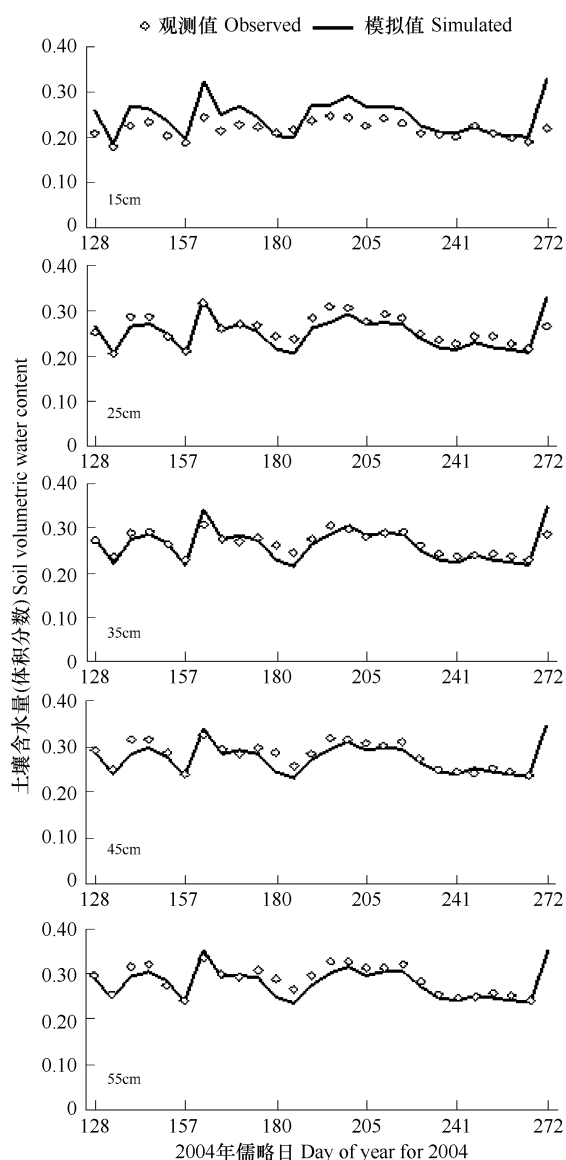


图1 2004年各层土壤水分模拟值与实测值对比

Fig. 1 Comparison between the estimated soil water content with SHAW and field measurements in different soil layers for 2004

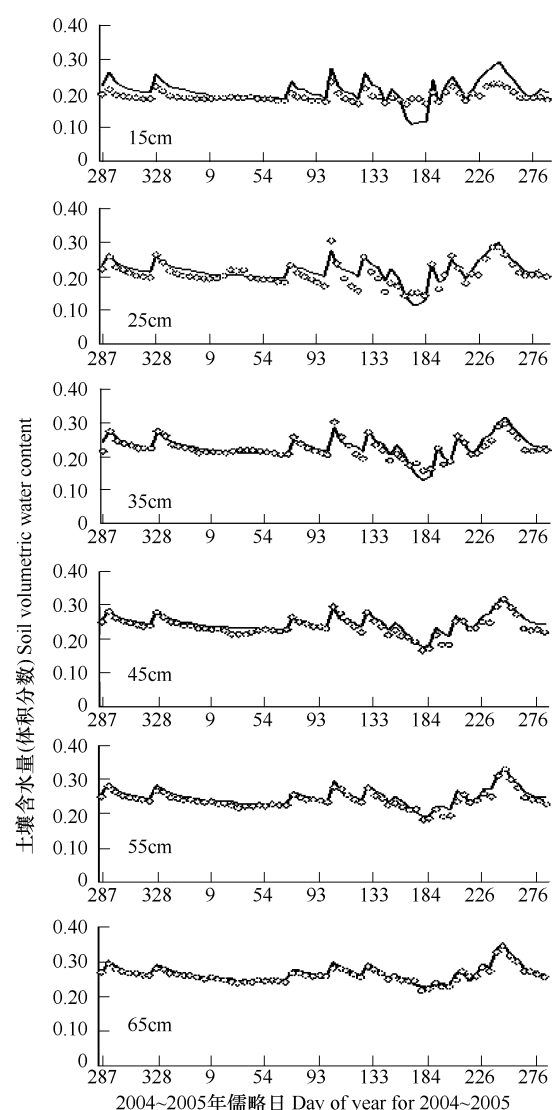


图2 2004年10月~2005年10月各层土壤水分模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison between the estimated soil water content with SHAW and field measurements in different soil layers for 2004~2005

65cm处(表3), 模型效率高达0.916, 越接近地表, 模型效率越低; 在15cm处, 模型效率为0.575, 模型模拟出了土壤表层含水量的变化趋势, 但比实测值偏高。值得一提的是, 由于本研究中, 土壤含水量是由中子仪测得

的,因此,在测定浅层土壤含水量时,会有部分中子逃逸到大气中而导致实测值比实际偏低^[6]。所以,土壤浅层含水量的测量误差也是造成模拟平均偏差较大的原因之一。

表3 SHAW 模型对拉萨农田土壤水分模拟的 ME, RMSE, MBE

Table 3 The ME, RMSE and MBE of the estimated soil water content with SHAW in Lhasa crop field

土层深度 Soil depths (cm)	模型效率 ME	标准差 RMSE (m^3/m^3)	平均偏差 MBE (m^3/m^3)
15	0.575	0.030	0.017
25	0.674	0.020	0.010
35	0.775	0.014	0.005
45	0.760	0.014	0.010
55	0.803	0.012	0.009
65	0.916	0.006	0.004

从上述分析来看,模型对各层土壤水分的动态变化过程的模拟是合理可靠的,说明模型对各层土壤间的水分通量模拟是可信的,这也从侧面验证了与土壤水分变化密切相关的蒸散发与土壤水渗漏等过程模拟的可靠性。

4.2 结果分析

(1) 土壤水动态变化

从图2模型模拟的各层土壤水动态变化过程可以看出,①各层土壤对降水和灌溉都有一个响应过程;表层土壤对降水和灌溉最为敏感,变化幅度最大,越往深层,土壤水分对降水和灌溉的响应越滞后,变化幅度越小,土壤水分越稳定。②每层土壤在对灌溉和降水响应后土壤水分都有一个消退的过程,这主要是由于土壤蒸发与作物蒸腾散失水分造成的。45cm以上土层的土壤水分的最低值出现在2005年第169天至184天(6月中旬至7月初),这是因为该时期太阳辐射较强,降水较少,使得土壤蒸发强烈;而冬小麦也正处于拔节-抽穗后期至开花-灌浆前期,蒸腾作用最强,致使该阶段的土壤水消退速度较快。越往深层,土壤受蒸发蒸腾影响越小,土壤水到达最低值的时间越滞后,说明深层土壤水对冬小麦耗水的贡献较小。

上述分析表明:45~65cm土壤水分较高而且较稳定,充分利用这一深层土壤水分,对于相对干旱的拉萨河谷地区具有十分重要的意义。

(2) 蒸发与蒸腾

本研究将2004年10月9日冬小麦种植日起开始到小麦收割(2005年8月12日)后的2005年10月9日一周年的蒸发蒸腾模拟值进行了分析。

如图3为2004年10月至2005年10月农田日蒸散发与小麦蒸腾的过程模拟,可以看出,冬季农田蒸散发较弱,主要来源于土壤蒸发,而冬小麦蒸腾几乎为零;春夏季农田蒸散发主要来源于小麦蒸腾,从144d至194d,即5月下旬至7月中旬,是农田蒸发蒸腾强度最大的时期,对照生育期记录可以发现这一时期正是冬小麦的拔节-抽穗后期与开花-灌浆前期,是冬小麦的生长旺期,这一时段的平均蒸腾速率为4.91mm/d。冬小麦蒸腾速率最大为7.56mm/d,发生在第162天即拔节-抽穗的孕穗期,此时的农田蒸散发速率为7.65mm/d,蒸腾占了99%,这是由于此时的叶面积指数达到最大,土壤完全被叶片遮挡,蒸发很弱。农田最大蒸散发速率发生在7月初的小麦灌浆初期(第184天)为8.09mm/d,相应的蒸腾速率为7.53mm/d,和最大速率相接近,是蒸散发速率的93%。

通过分析冬小麦生长期间农田蒸散发与小麦蒸腾的逐日过程模拟(图3)与整个生长期累积过程的模拟(图4)可以得出:①在冬小麦返青前蒸腾耗水很少,农田蒸散发主要表现为土壤蒸发。②拔节-抽穗后期(150~179d)与开花-灌浆的前期(180~195dd)总蒸散发与蒸腾的累积曲线斜率最大,说明该时期的蒸腾速率最快导致了蒸散发速率也最快,农田蒸散发主要表现为冬小麦蒸腾。③在灌浆后期到成熟(196~224d)这段时期,小麦的蒸腾速率明显降低,这时的蒸散发主要表现为土壤蒸发。这是因为在冬小麦生长后期,叶片开始枯

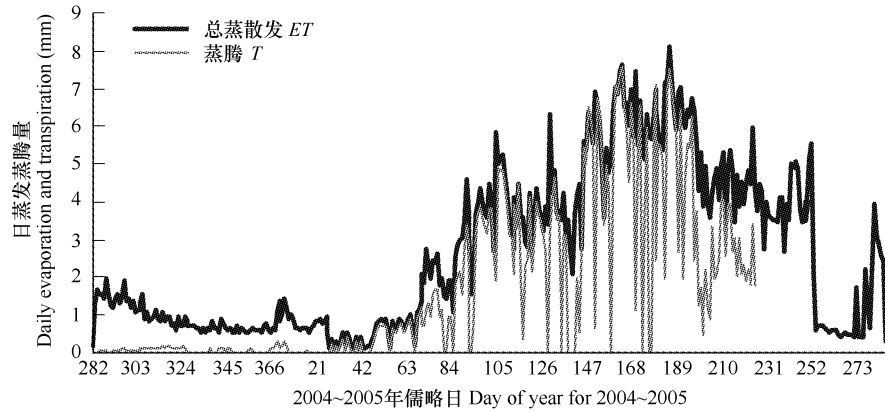


图3 2004~2005年冬小麦农田蒸发蒸腾季节动态变化

Fig. 3 Seasonal variation of daily evaporation and transpiration during 2004 to 2005

萎衰败,蒸腾作用急剧降低,同时,失去叶片遮挡的土壤表面蒸发作用增强。④在整个冬小麦生长期冬小麦蒸腾为516mm,占总蒸散发量的62.5%;土壤蒸发为310mm,占37.5%;这部分蒸发对纯属无益消耗,对水资源而言是一种浪费^[7]。

在农田生态系统中通常将作物生长期间的作物蒸腾与土壤蒸发(总称蒸散发)称为作物的耗水量。表4为冬小麦不同生育期的耗水量以及相应的降水与灌溉量,通过分析可以得出以下几点:①从冬小麦种植日起到返青前达5个月之久,但由于该阶段气温较低,生长缓慢,蒸腾作用很弱。其中,越冬前冬小麦耗水只有61mm,另外,根据图3与图4的分析可以得出,越冬前的耗水主要是土壤蒸发,但该时期的灌溉量却达192mm之多,因此,越冬前过多的灌溉水必然会使后期土壤蒸发增强,形成极大地浪费。②返青-拔节、拔节-抽穗、开花-灌浆期3个阶段耗水量较大,占整个生长期耗水总量的76%。其中,拔节-抽穗期是冬小麦的耗水旺期,占整个生长期耗水总量的32%。③返青-拔节期的耗水量为208mm,仅次于拔节-抽穗期,占整个生长期耗水的25%,但由于该时期降水只有21mm,降水远远不能满足小麦需水。因此,该时期是最需要灌溉的时期,本研究的实验中该时期共灌溉了3次,每次灌溉96mm使土壤达到饱和,共灌水288mm。④从冬小麦整个生长期来看,该地区冬小麦生长期较长(310d左

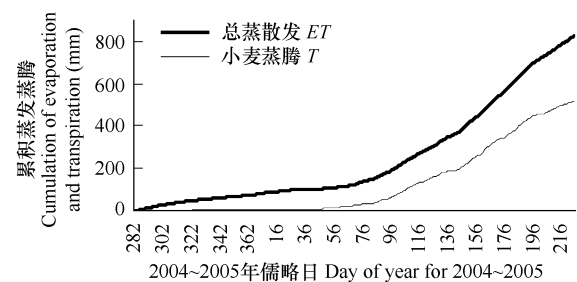


图4 2004~2005 农田蒸散发与小麦蒸腾累积过程模拟

Fig. 4 The cumulating process of evapotranspiration and wheat transpiration during 2004~2005

表4 冬小麦不同生育期的耗水以及降水和灌溉

Table 4 The water consumption of winter wheat, rainfall and irrigation in different growth stages

生育期 Growth stages	日期 Date (month-day)	儒略日 Julian day (Day of year)	日数 Days (d)	耗水量 Water consumption (mm)	耗水比例 Percent of water- consumption (%)	降水量 Rainfall (mm)	灌溉量 Irrigation (mm)
越冬前 Before wintering	10-09 ~ 12-06	282 ~ 341	60	61	7.4	4.1	192
越冬期 Over wintering Period	12-07 ~ 03-08	342 ~ 67	92	58	7	1.3	0
返青-拔节 Reviving-Shooting	03-09 ~ 05-10	68 ~ 130	63	208	25.2	21	288
拔节-抽穗 Shooting-Tasseling	05-11 ~ 06-28	131 ~ 179	49	263	31.8	114.1	96
开花-灌浆 Flowering-Grain filling	06-29 ~ 07-26	180 ~ 207	28	158	19.1	117.6	78
腊熟-收获 Grain filling-Harvest	07-27 ~ 08-12	208 ~ 224	17	78	9.4	55.1	0
整个生长期 Whole growth period	10-09 ~ 08-12	282 ~ 224	309	826	100	313	654

右),总耗水量为 826mm,相对于平原地区来说,耗水量较大,是山东禹城地区冬小麦耗水量^[8,9](440 ~ 480mm)的 1.7 ~ 1.9 倍。

(3)根系吸水

如图 5 为 SHAW 模型模拟的冬小麦生长期,各层土壤的根系吸水动态过程。经过分析得出,①在播种到越冬期末(返青前),小麦的根系吸水很少,尽管这一阶段中灌溉了两次,每次灌溉 96mm 使土壤达到饱和。尤其是在 30cm 以下土层中的在这一时期内几乎不存在吸水现象。这是因为,小麦从出苗到返青前,生长缓慢,根系还未达到 30cm 土层以下;这同时也表明,在从播种到返青前,冬小麦需水很少,所以在播种初期(播种后 5 ~ 6d)只需为保证种子的发芽和出苗进行少量灌溉使 30cm 以上土壤保持湿润即可;在越冬前为了保护幼苗不受冻害安全过冬而进行的灌溉也完全没有必要将土壤灌溉至饱和。③在水分供应(降水或灌水)充足时,如降水或灌溉刚发生不久,浅层土壤水分充足,冬小麦主要依靠土壤浅层的根系吸水;在浅层土壤水分供应不足时,冬小麦才倾向于利用深层土壤水分(45cm 以下)。如,当冬小麦处于拔节-抽穗后期到开花-灌浆初期(160 ~ 190d)这一耗水旺期时,由于浅层土壤水分迅速消退(图 2),55cm 土层才发生明显的根系吸水现象。

图 6 为各层土壤根系吸水占总吸水量的百分比。可以看出,15cm 土层根系吸水最多,其次为 25、5、35cm 土层;45cm 与 55cm 土层根系吸水总和与 35cm 土层的吸水量相当,占总吸水量的 18%,60cm 以下土层没有发生根系吸水现象,82% 的根系吸水发生在 35cm 土层以上。

(4)土壤水深层渗漏与补给

深层渗漏是灌溉水或降水下渗到不能为作物利用的深层土壤的过程。本研究将 70cm 土层设为土壤下边界,下边界处的水分通量有向下的,也有向上的;将向下的水分通量看作是深层渗漏,将向上的水分通量看作深层补给。图 7 为 2004 年 10 月至 2005 年 9 月拉萨冬小麦农田深层渗漏和深层补给过程模拟,可以发现,70cm 土体与其下土层水分交换频繁。经分析,深层渗漏与补给过程分别存在以下特征:①渗漏过程主要发生在灌溉后不久,在冬小麦生长期期间的 7 次灌溉中前 6 次都发生了深层渗漏,尤其是出苗初期与越冬前的两次渗漏量较大。从表 5 所示的冬小麦农田每次灌溉的渗漏系数,可以发现,越冬前的灌溉渗漏系数最大,达到 0.82 即 82% 的灌溉水渗漏到 70cm 以下;而播种后的灌溉也有 75% 渗漏到 70cm 以下。整个冬小麦生长期期间灌溉 654mm,由灌溉引起的渗漏量却有 330mm 之多,是灌

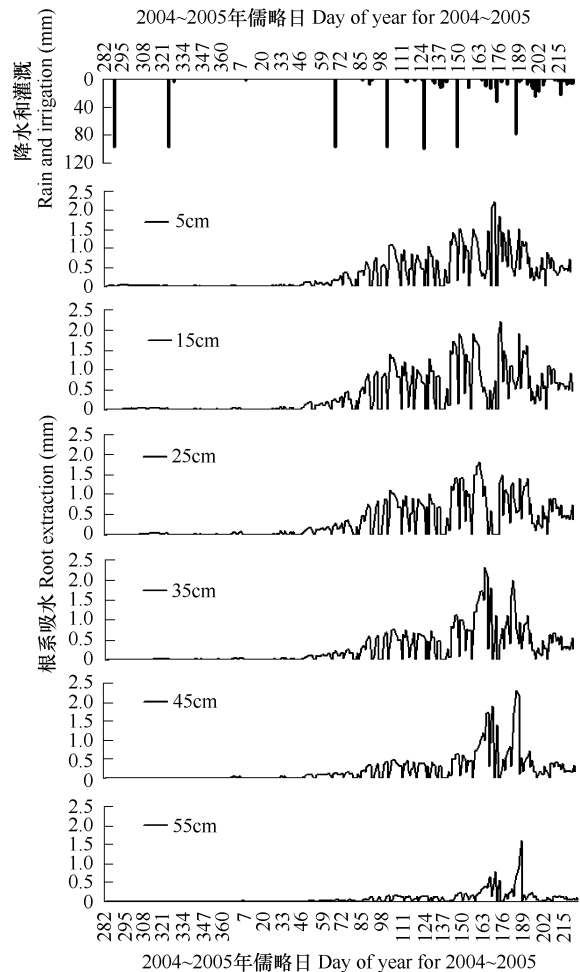


图 5 2004 ~ 2005 年冬小麦生长期各层土壤中根系吸水动态变化

Fig. 5 The process of root absorbing water during the growth of winter wheat in 2004 ~ 2005

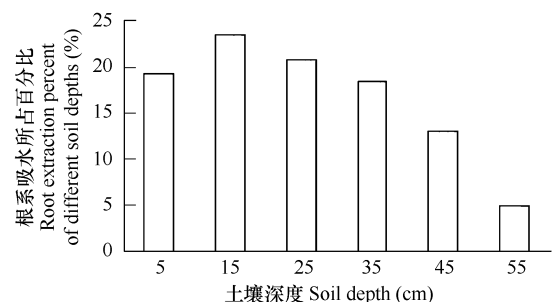


图 6 2004 ~ 2005 冬小麦农田各层土壤根系吸水所占的百分比

Fig. 6 The percent of root extraction of every depth soil in winter wheat land for 2004 ~ 2005

溉量的 50%。②几乎在全年时间内都存在着深层土壤水向上的补给,尤其是 3~8 月份深层土壤水向上的补给量较大,在整个冬小麦生长期,70cm 以下土壤水向上层补给了 199mm,是水分总输入的 21%。

表 5 2004~2005 年拉萨冬小麦农田灌溉的渗漏系数

Table 5 The percolation coefficient of Irrigation in Lhasa winter wheat land

日期 Date	生育期 Growth stages	灌溉量 Irrigation (mm)	渗漏量 Deep percolation (mm)	渗漏系数 Percolation coefficient
10-12	播种后 After planting	96	72	0.75
11-21	越冬前 Before wintering	96	78	0.82
03-10	返青期 Reviving	96	57	0.59
04-13	拔节前 Before shooting	96	37	0.38
05-07	拔节期 Shooting	96	44	0.45
05-29	孕穗期 Booting	96	43	0.44
07-07	灌浆期 Grain filling	78	0	0

(5) 水分利用效率

经测定,开展本研究的实验样地 2004~2005 年冬小麦籽粒产量为 9020kg/hm²,上述模拟计算出冬小麦生长期间耗水量为 826mm,这样就可以得出该地区冬小麦在现行的充分灌溉制度下的水分利用效率为 1.09kg/m³,这远远低于华北平原地区的冬小麦在充分灌溉制度下的水分利用效率 1.47 kg/m³(表 6)。结合上述几部分的分析得出,拉萨河谷地区的冬小麦水分利用效率还有很大的提升空间,现行的灌溉制度造成较为严重的地表水资源浪费,通过减少灌溉量来减少作物的耗水量是一可行的办法。由于实验条件的限制,本研究未能给出不同的灌溉量与水分利用效率的具体关系,要想进一步回答“该地区冬小麦水分利用效率与产量在何种灌溉制度下达到最优?”这一问题则还需要进一步开展不同水分处理对作物水分利用效率的影响研究。

5 总结与讨论

本文通过采用 2004~2005 年中国科学院拉萨高原生态试验站的实验数据与气象数据对 SHAW 模型的调试和验证得出,SHAW 这一机理型模型在高原农田生态系统中适用性较强,可以很好地模拟高原农田生态系统的水分传输过程。

表 6 拉萨河谷和华北平原冬小麦耗水量与水分利用效率比较

Table 6 Water consumption and water used efficiency of winter wheat in Lhasa river valley and North China Plain

项目 Item	灌溉量 Irrigation (mm)	耗水量 Water consumption (mm)	产量 Grain yield (kg/hm ²)	水分利用效率 Water used efficiency (kg/m ³)
拉萨河谷 Lhasa river valley	654	826	9020	1.092
华北平原 North China Plain	450	489	7203	1.474

综合分析 SHAW 模型模拟的拉萨河谷 2004~2005 年的冬小麦农田的蒸发蒸腾、根系吸水、深层渗漏等水分传输过程可以得出以下几点主要特征:(1)秋冬季即冬小麦播种至返青前这段时期农田蒸散发量很小,冬小麦蒸腾作用很弱,农田生态系统的水分传输速率很低,主要表现为微弱的土壤-大气间的传输。春夏之交

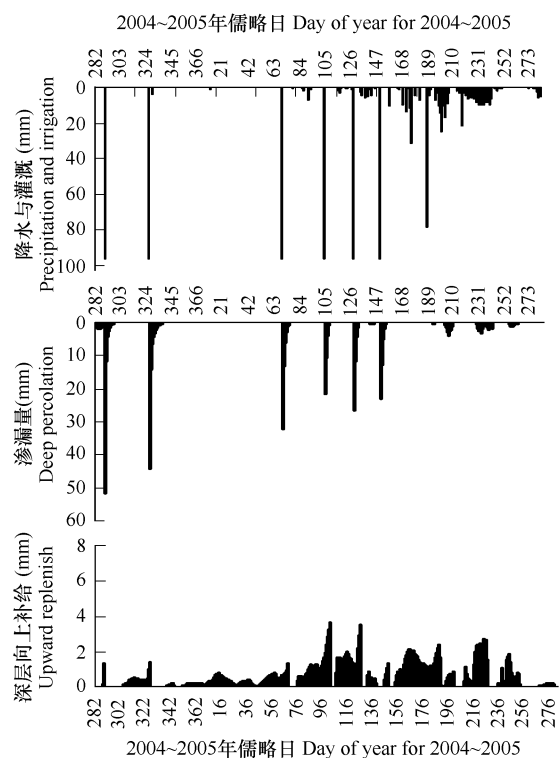


图 7 2004~2005 年冬小麦农田土壤水分深层渗漏与补给过程
Fig. 7 Soil water deep percolation and replenish from deep soil of winter wheat land in 2004~2005

即冬小麦的拔节-灌浆期是农田蒸散发强度最大的时期,同时也是冬小麦的生长与耗水旺期,该时期水分传输主要表现为土壤-植物间的传输。从冬小麦灌浆后期至成熟,蒸腾作用迅速减弱,水分传输主要表现为土壤蒸发。(2)在整个冬小麦生长期,拉萨河谷农田蒸散发为 826mm,是华北平原的 1.7~1.9 倍;其中土壤蒸发占了 37.5%。(3)冬小麦根系吸水主要集中于 10~40cm 土层,在浅层土壤水分供应不足时,冬小麦才倾向于利用深层土壤水分(40cm 以下)。(4)灌溉引起的深层渗漏较为严重,整个冬小麦生长期农田的总渗漏量达到 330mm,约占总灌溉量的 50%。秋冬季(冬小麦播种至返青前)农田蒸散发较弱,灌溉水的 72% 渗漏到 70cm 土层以下。

基于上述拉萨河谷地区冬小麦农田生态系统水分传输的特征,结合当地的气象条件和灌溉情况进行分析,为当地制定适宜的冬小麦农田灌溉制度进行初步探讨:(1)由于该地区冬小麦生长期较长和较强的太阳辐射等气象条件,造成农田总蒸散发量即农田耗水量较高,冬小麦在该地区属于高耗水型作物,要保证冬小麦的正常生长需要一定的适时灌溉。(2)该地区冬小麦根系吸水主要集中于 40cm 以上土层。现行灌溉制度下,二分之一的灌溉水渗漏到不能被作物利用的 70cm 土层以下,造成较大的地表水资源浪费;另外,由于灌溉次数和灌溉量较大,土壤的无效蒸发也随之增加,这也造成一定的水资源浪费。因此,应对现行灌溉制度进行调整,以减少灌溉的渗漏损失和土壤的无效蒸发为目的,减少灌溉次数和灌溉量。首先,冬小麦播种至返青前灌溉水的 72% 渗漏到 70cm 土层以下,而该段时期作物的需水量很少,该时期的灌溉水应该大幅减少,能保证小麦出苗和防冻、保墒就足够了。其次,在返青-拔节期适当减少灌溉量,一是为了减少渗漏损失,二是使土壤形成一定的水分胁迫促使作物根系下扎,这样可以使根系吸收利用到较高且稳定的深层土壤水分,既可以节约用水,又可以为生长后期根系从深层土壤吸水奠定基础。(3)在现行的灌溉制度下,该地区冬小麦水分利用效率很低,有很大的提升空间,通过减少灌溉量来减少作物的耗水量是提高水分利用效率的一个可行办法,另外,在该地区对小麦进行调亏灌溉,促使作物对深层水分进行利用也是提高水分利用效率的有效途径之一;为了制定精准的灌溉制度,还应该进一步开展不同水分处理对水分利用效率及产量的影响研究。

References:

- [1] Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous heat and water model of freezing snow-residue-soil system I. Theory and Development. Trans ASAE, 1989, 32: 565—571.
- [2] Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous heat and water model of freezing snow-residue-soil system II. field verification. Trans ASAE, 1989, 32: 573—578.
- [3] Flerchinger G N, Pierson F B. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 56: 227—246.
- [4] Flerchinger G N, Pierson F B. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water: Model calibration and validation. Journal of Arid Environments, 1997, 35: 641—653.
- [5] Preston G M. An analysis of SHAW model water budget estimations for municipal solid waste landfill covers planted with poplar tree systems in southern Ontario. Master of Science. Thesis. University of Guelph, Canada. 2002.
- [6] Yin Z F, Liu E M, Chen B X, *et al.* Studies on the calibration experiments and methods of time domain reflectometry and neutron probe. Agriculture Research in the Arid Area, 2005, 23 (6): 161—165
- [7] Cheng W X, Hu Z B, Zhang X Q. Research on the Evapotranspiration of Crop land and Water consumption of crops. Beijing: China Meteorological Press, 1994. 91—105
- [8] Wu K, Xie X Q, Liu E M. Schedules and managements of irrigation in the high-yielding cultivation of winter wheat and summer maize in Yucheng City of Shandong Province. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2): 138—142
- [9] Zhao Q J, Luo Y, Ouyang Z, *et al.* Water use and irrigation management of winter wheat in the North-western Plain of Shandong Province. Progress in Geography, 2002, 21(6): 600—608
- [10] Ren S X, Zhao H R, Jiang Z Y, *et al.* The Influence of different irrigation schedule on factors composing grain yield and water use efficiency (WUE) on Winter Wheat. Acta Agriculture Boreali-Sinica, 2007, 22 (Supplement): 169—174.

参考文献:

- [6] 尹志芳,刘恩民,陈炳新,等. 时域反射仪与中子仪测定土壤含水量标定试验研究. 干旱地区农业研究,2005,23(6): 161~165
- [7] 程维新,胡朝炳,张兴权. 农田蒸发与作物耗水量研究. 北京:气象出版社,1994. 91~105
- [8] 吴凯,谢贤群,刘恩民. 山东省禹城市冬小麦夏玉米高产灌溉制度及其管理. 农业工程学报,1998,14(2): 138~142
- [9] 赵千钧,罗毅,欧阳竹,等. 鲁西北平原冬小麦耗水过程与节水灌溉管理模式讨论. 地理科学进展,2002,21(6): 600~608
- [10] 任三学,赵花荣,姜朝阳,等. 不同灌水次数对冬小麦产量构成因素及水分利用效率的影响. 华北农学报,2007,22(增刊): 169~174.