



ISSN 0496-3490

CODEN TSHPA9

# 作物学报

## ACTA AGRONOMICA SINICA

第33卷

第4期

Vol.33

No.4

中国作物学会 中国农业科学院作物科学研究所 主办  
Sponsored by Crop Science Society of China and  
Institute of Crop Sciences, CAAS

科学出版社出版  
Published by Science Press

# 4

# 2007

## 利用 ORYZA2000 模型分析北京地区旱稻产量潜力及需水特征

薛昌颖<sup>1</sup> 杨晓光<sup>1,\*</sup> 邓伟<sup>2</sup> 张天一<sup>1</sup> 闫伟兄<sup>1</sup> 张秋平<sup>1</sup> 肉孜阿基<sup>1</sup>  
赵俊芳<sup>1</sup> 杨婕<sup>1</sup> Bouman B A M<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; <sup>2</sup> 河南省气象科学研究所, 河南郑州 450003; <sup>3</sup> 国际水稻研究所, Los Baños, 菲律宾)

**摘要:** 在模型验证的基础上, 利用 ORYZA2000 模型分析表明, 北京地区旱稻产量潜力 30 年平均为 8 573 kg hm<sup>-2</sup>, 变化范围为 6 747 ~ 11 278 kg hm<sup>-2</sup>, 年际间变异系数为 16.3%。而雨养产量的多年平均值为 4 084 kg hm<sup>-2</sup>, 变化范围 223 ~ 8 018 kg hm<sup>-2</sup>, 年际间的变异系数高达 51.1%。产量潜力与雨养产量之差表明北京地区旱稻尚有一定的增产潜力。旱稻全生育期需水量的多年平均值为 713 mm, 年际间变异为 8.5%。其中, 出苗—穗分化阶段由于持续时间长, 需水量最大, 占全生育期的 49.7%。全生育期的平均需水强度为 5.3 mm d<sup>-1</sup>, 需水强度最大的时期为穗分化—开花阶段, 平均为 5.5 mm d<sup>-1</sup>。北京地区生育期内的降水量不能完全满足旱稻的需水要求, 50% 的年份水分亏缺量在 250 mm 以上, 水分亏缺量多年平均值为 226 mm, 年际间变异较大, 变异系数高达 81.4%。

**关键词:** 旱稻; ORYZA2000 模型; 产量潜力; 需水量

## Yield Potential and Water Requirement of Aerobic Rice in Beijing Analyzed by ORYZA2000 Model

XUE Chang-Ying<sup>1</sup>, YANG Xiao-Guang<sup>1,\*</sup>, DENG Wei<sup>2</sup>, ZHANG Tian-Yi<sup>1</sup>, YAN Wei-Xiong<sup>1</sup>, ZHANG Qiu-Ping<sup>1</sup>, ROUZI Aji<sup>1</sup>, ZHAO Jun-Fang<sup>1</sup>, YANF Jie<sup>1</sup>, and Bouman B A M<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China; <sup>2</sup> Henan Institute of Meteorology, Zhengzhou 450003, Henan, China; <sup>3</sup> International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines)

**Abstract:** With the decreasing of available water in agriculture, water consumption in rice production has to be reduced and water utilization efficiency increased. Irrigated aerobic rice is a new system being developed in lowland areas with water shortage and in favorable upland areas with access to supplementary irrigation. Domestic and foreign researchers have started studying this new aerobic rice system. In this study, yield potential and water requirement of aerobic rice in Beijing region were obtained by using ORYZA2000 model as well as historical weather data from 1971 to 2000. ORYZA2000 model for simulating the growth of aerobic rice were validated by using field experiment results in Beijing. In this study, ORYZA2000 model was evaluated once more for simulating water requirement of aerobic rice. Results showed that ORYZA2000 model could present water requirements of aerobic rice for the whole growth season satisfactorily with RE (relative error) ranging from 13.0% to 21.5%, which mainly resulted from simulation inaccuracy at the stage of emergence to PI. For the 30 years, averaged yield potential was 8 573 kg ha<sup>-1</sup> shifting from 6 747 to 11 278 kg ha<sup>-1</sup>, interannual variation coefficient of yield potential was 16.3%, while averaged rainfed yield was only 4 048 kg ha<sup>-1</sup> varying from a very low level of 223 kg ha<sup>-1</sup> to even 8 018 kg ha<sup>-1</sup>. Therefore, the variation among years was very large with the coefficient of 51.1%. The variations of rainfed yield were mostly related to the rainfall among years. The gap between rainfed yield and yield potential indicated that yield of aerobic rice in Beijing region still could be increased to some extent by supplementary irrigation. Averaged rainfall of the 30 years during the growth season was 486 mm, and it was not enough to meet the water requirement of aerobic rice, which is 712.7 mm with 8.5% variance calculated from ORYZA2000 model. Water shortage was serious in most years, and there were 15 years from 1971 to 2000 in which water shortage was higher than 250 mm, indicating the yield of aerobic rice could be increased by supplementary irrigation. Most of water was consumed at the stage from emergence to panicle initiation, which is the longest duration in the whole life of rice; so much

**基金项目:** 中国农业大学与国际水稻研究所合作项目 (IRRC/2001-2004 及 CP-STAR/2005-2007); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 重大节水专项 (2002AA2Z4021)

**作者简介:** 薛昌颖 (1979) 女, 汉, 辽宁喀左县人, 在读博士研究生。\* 通讯作者 (Corresponding author): 杨晓光, 女, 教授, 主要从事农业气象和农业节水研究。Tel: 010-62733939; E-mail: yangxg@cau.edu.cn

Received (收稿日期): 2006-01-19; Accepted (接受日期): 2006-07-08.

water could be saved if some measures were taken to reduce soil evaporation at this stage. Mean water requirement density for the whole season was  $5.3 \text{ mm d}^{-1}$ , while the highest value,  $5.5 \text{ mm d}^{-1}$ , occurred at the stage from panicle initiation to flowering.

**Key words:** Aerobic rice; ORYZA2000 model; Yield potential; Water requirement

旱稻是一种新型的节水型稻作,适于在缺水的低洼地区或者有一定灌溉条件的地区种植,其种植和管理方式与小麦、玉米相同<sup>[1-3]</sup>。为了节约用水,发挥水资源特别是灌溉水资源的最大效益,国内外相继开展了旱稻研究<sup>[4-6]</sup>。至2002年,我国旱稻种植面积已达19万 $\text{hm}^2$ ,其中,东北地区约6万 $\text{hm}^2$ ,占31.6%,黄淮海地区约为8万 $\text{hm}^2$ ,占42.1%,华南和西南地区约5万 $\text{hm}^2$ ,占26.3%<sup>[7]</sup>。2001—2004年,国际水稻研究所(IRRI)与中国农业大学合作,通过田间试验研究了华北地区旱稻的产量潜力和水分利用,结果表明,总耗水量为650 $\text{mm}$ 时,旱稻297的产量可以达到4.7~5.3 $\text{t hm}^{-2}$ ,水分利用效率为0.62~0.82 $\text{g kg}^{-1}$ <sup>[8]</sup>。

随着旱稻种植面积的不不断扩大,确定旱稻的产量水平、需水特征,以及二者之间的关系,对于充分利用水资源,提高旱稻的产量具有重要的意义。作物生长模型是进行产量预测、灌溉需求分析等研究有利的工具<sup>[9]</sup>。在模型参数调试和验证的基础上<sup>[10]</sup>,本文以北京地区1971—2000年的气候资料为基础,利用ORYZA2000模型研究北京地区旱稻(品种为旱稻297)的产量潜力、雨养条件下的产量水平及自然降水对其需水的满足程度,以明确旱稻生育期间的水分亏缺状况和灌溉需求,为旱稻的生产实践提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 产量和需水量的模拟方法

ORYZA2000模型是国际水稻研究所与荷兰瓦赫宁根大学联合研制的ORYZA系列模型的最新版本<sup>[11]</sup>,可以模拟潜在生产水平、水分限制和氮素限制生产水平下的作物产量。

一般计算作物田间需水量时,主要考虑作物实际蒸腾和土壤蒸发之和,即实际蒸散量。作物需水量及其变化规律,主要决定于气象条件、作物特性、土壤性质和农业技术措施等,并非一个固定值。作物在正常生长条件下,水肥供应及时,达到最高产量时,植株蒸腾、株间蒸发及构成植物体所需要的水量

称为最大需水量。作物需水量一般是通过计算参考蒸散量获得的。在ORYZA2000模型中,有3种计算参考蒸散量的方法,包括Penman修正式(1948)、Makkink和Priestley-Taylor。本文选用Penman修正式(1948),即

$$ET = ET_{rd} + ET_{ae} = \frac{1}{\left[ \frac{R_n}{+} + \frac{f(u_2)(e_s - e_a)}{+} \right]} \quad (1)$$

式中, $ET$ 为参考蒸散量; $ET_{ae}$ 为参考蒸散量中的空气动力学项; $ET_{rd}$ 为辐射项; $R_n$ 为净辐射; $e_s$ 为饱和水汽压; $e_a$ 为实际水汽压; $\lambda$ 为水的汽化潜热; $\gamma$ 为饱和水汽压温度曲线函数; $\gamma_0$ 为干湿球常数; $f(u_2)$ 为风速修正函数。

Penman修正式在计算参考蒸散量时根据不同的地表状况分别计算冠层对太阳辐射的反射系数和风速修正函数。冠层对太阳辐射的反射系数由地表反射系数 $s$ 和作物反射系数 $c$ 组成,

$$= s \times \exp(-k \times LAI) + c \times (1 - \exp(-k \times LAI)) \quad (2)$$

在模型中 $c = 0.25$ ,而地表反射系数 $s$ ,如果地表存在水层则为水面反射系数0.05;如果不存在水层则由土壤表面反射系数( $s_s$ )和土壤含水量( $\theta / \theta_s$ )决定。

$$s = s_s \times (1 - 0.5 \times \theta / \theta_s) \quad (3)$$

式中, $\theta$ 为土壤实际含水量; $\theta_s$ 为土壤饱和含水量; $k$ 为消光系数; $LAI$ 为叶面积指数。模型中土壤表面反射系数 $s_s = 0.25$ 。

开阔水面和土壤表面的风速修正函数

$$f(u_2) = 2.63 \times (0.5 + 0.54 u_2) \quad (4)$$

低矮绿色植物的风速修正函数

$$f(u_2) = 2.63 \times (1.0 + 0.54 u_2) \quad (5)$$

因此在模拟旱稻时,模型选择的地表反射系数和风速修正函数分别为公式(3)和(5)。在参考蒸散量的基础上,潜在土壤蒸发( $E_p$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ )和潜在作物蒸腾( $T_p$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ )根据叶面积指数和消光系数计算<sup>[11-12]</sup>。

$$E_p = (ET_{rd} + ET_{ae}) \exp(-k \times LAI) \quad (6)$$

$$T_p = ET_{rd} [1 - \exp(-k \times LAI)] + ET_{ae} \times LAI \quad (7)$$

式中, $LAI$ 为叶面积指数, $k$ 为消光系数。因此需水量即为潜在生产水平下的土壤蒸发量与作物蒸腾量

之和。

### 1.2 模型参数设置

在参考文献[10]中,利用 2002—2004 年 3 年的田间试验数据对 ORYZA2000 模型进行参数调试和验证,得到了相关的作物参数。在利用模型进行分析中,模拟的旱稻品种即为田间试验所用的品种旱稻 297。模型模拟的起始点为出苗,北京地区旱稻 297 的适宜播种日期一般为 5 月 10~20 日,播种到出苗一般需要 10 d 左右的时间,即出苗日期在 5 月 20~30 日之间,出苗日序为第 146 天(每年的 5 月 25 日或 26 日),播种量为 120 kg hm<sup>-2</sup>,行距 30 cm。

旱稻生长期氮肥供应充足,不受氮素限制。

旱稻需水量的实测数据为本研究小组于 2001—2004 年在中国农业大学昌平试验站的田间试验结果,根据水量平衡方程计算得到,详细介绍见参考文献[13],利用 4 年的实测结果对模型模拟旱稻需水进行检验。土壤背景资料和参数取自本研究小组在中国农业大学北京昌平试验站田间试验结果。气象资料来自本研究组的“农业气候信息系统”,包括北京 1971—2000 年 30 年逐日最高气温、最低气温、降水、日照时数、水汽压、风速。

## 2 结果与分析

### 2.1 北京地区旱稻生育期内的气象条件

气象因子中对作物影响最大的是光照、温度和降雨。北京地区年降水量的多年平均值为 616 mm,其中 7~9 月是降水集中的时段,3 个月降水量的多年平均值为 436 mm,占全年总降水量的 70.8%。年平均气温多年平均值为 11.9℃,年最高气温多年平均为 37.1℃,年最低气温多年平均为 -15.3℃,0℃积温为 4 670.4℃,无霜期 197 d。年日照时数 2 661.5 h,是全国年日照时数比较长和太阳辐射比较丰富的地区之一。

图 1 显示了北京地区 1971—2000 年旱稻生长季节内(5 月中旬—10 月中旬)的降雨量、日照时数及 0℃积温。可以看出,3 个气象因子中年际间变异最大的是降水量,生育期内降水量最大的年份为 1994 年,为 712 mm,降水量最小的年份为 1999 年,仅 193 mm,相差 519 mm,其次是日照时数,积温的年际变异最小。降水量、日照时数和积温的多年平均值分别为 486 mm、1 041 h 和 3 150℃;相应的变异系数分别为 28.5%、12.4%和 2.02%。

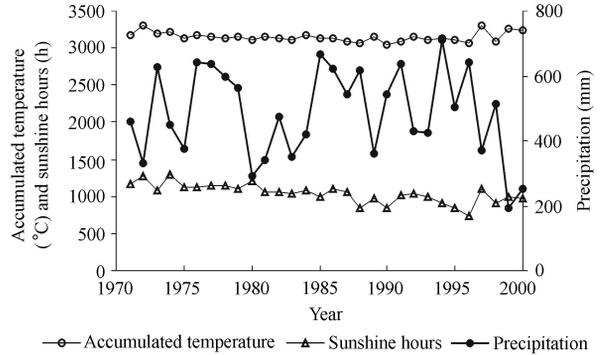


图 1 1971—2000 年北京地区旱稻生长期间的积温、日照时数和降水量

Fig. 1 Accumulated temperature, sunshine hours and precipitation in aerobic rice growth season in Beijing from 1971 to 2000

### 2.2 ORYZA2000 模型模拟北京地区旱稻需水量检验

图 2 为模型模拟的 2001—2004 年旱稻各生育阶段以及全生育期需水量与实测结果的比较,图中的虚线为 1:1 直线。从图中可以看出,在旱稻 3 个生育阶段中,模型对出苗—穗分化阶段的需水量的模拟误差较大,相对误差为 18.8%~38.4%,而对穗分化—开花和开花—成熟这 2 个生育阶段的需水量的模拟比较准确,除 2001 年穗分化—开花这一阶段外,其他年份各生育阶段的需水量的模拟误差均在 10%以下。因此,模型模拟的全生育期需水量与实测结果相比也有些偏高,4 个年份全生育期需水量模拟的相对误差分别为 21.5%、21.0%、13.0%和 13.5%。

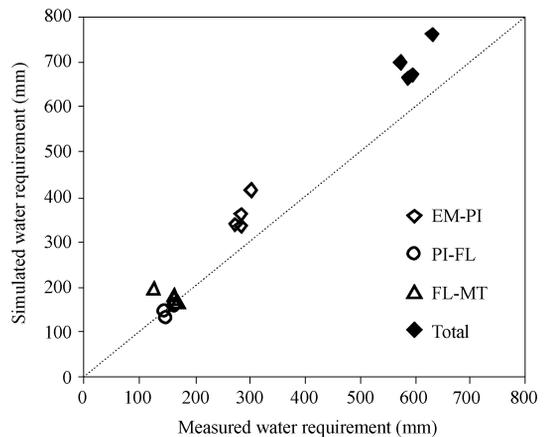


图 2 2001—2004 年模型模拟的旱稻不同生育阶段的需水量与实测结果的比较

Fig. 2 Comparison of water requirements at different stages of aerobic rice between simulations and measurements in 2004

EM: 出苗; PI: 穗分化; FL: 开花; MT: 成熟; Total: 全生育期。  
EM: emergence; PI: panicle initiation; FL: flowering;  
MT: maturity; Total: whole growth duration.

模型对出苗—穗分化这一阶段的需水量与实测结果相比偏高,主要是由于模型在模拟需水量时土壤水分处于充分满足的情况下,而这一阶段植株较小,模拟的土壤蒸发比较大,在实际情况下,土壤水分很难达到理想的充分满足的状况,所以与实测数据相比,模拟的土壤蒸发偏高,因此也造成这一阶段模型模拟的需水量结果高于实测结果。而在旱稻生长的后期,地表被完全覆盖的情况下,土壤蒸发占需水量的比例很小,模型则能比较准确地模拟旱稻对水分的需求。因此,可以认为 ORYZA2000 模型能够反映北京地区旱稻生育期内的水分需求量。

### 2.3 北京地区旱稻 297 产量潜力和雨养条件下的产量

产量潜力是田间理想条件下可获得的最高生产潜力,其限制条件仅为普通生产者无法消除的温光因子,如环境温度、太阳辐射等。此时水分、肥力、病虫害控制等其他所有条件均为最优。雨养条件下的产量是在当地的自然降水条件下所能获得的水分限制条件下的生产潜力。二者间的差别反映了自然降雨条件下的水分供应条件对产量的影响。

模型分析结果表明,北京地区旱稻 297 产量潜力变化范围为 6 747 ~ 11 278 kg hm<sup>-2</sup>,而且有逐渐降低的趋势,1971—1980 年、1981—1990 年和 1991—2000 年 3 个 10 年期间的平均产量潜力分别为 10 055 kg hm<sup>-2</sup>、8 148 kg hm<sup>-2</sup>和 7 518 kg hm<sup>-2</sup>。产量潜力降低的原因主要是温度的升高引起生育期的缩短。产量潜力在 9 000 kg hm<sup>-2</sup>以上的年份有 12 年,占 40%,其中 70 年代就有 8 年;在 8 000 ~ 9 000 kg hm<sup>-2</sup>之间的年份有 4 年,占 13.3%;在 7 000 ~ 8 000 kg hm<sup>-2</sup>之间的年份有 10 年,占 33.3%;7 000 kg hm<sup>-2</sup>以下的年份有 4 年,占 13.3%。其中 1974 年产量潜力最高,1994 年产量潜力最低。多年平均的产量潜力为 8 573 kg hm<sup>-2</sup>,多年平均的 90% 产量潜力水平为 7 716 kg hm<sup>-2</sup>,变异系数为 16.3%。

由于降水年际间变化,在雨养条件下,产量的波动范围明显高于潜在条件下的产量波动。多年平均的雨养产量为 4 084 kg hm<sup>-2</sup>,年际间的变异系数高达 51.1%,产量最高的年份(1973 年)达到 8 018 kg hm<sup>-2</sup>,产量最低的年份(1999 年)只有 223 kg hm<sup>-2</sup>,相差 7 795 kg hm<sup>-2</sup>。

北京地区雨养条件下的旱稻产量达到 7 000 kg hm<sup>-2</sup>以上的年份只有 4 年,占 13.3%,生育期降水量为 597 ~ 655 mm;在 5 000 ~ 7 000 kg hm<sup>-2</sup>范围内

的年份有 6 年,占 20%,生育期降水为 505 ~ 669 mm;在 4 000 ~ 5 000 kg hm<sup>-2</sup>范围内的年份有 3 年,占 10%,生育期降水量为 351 ~ 618 mm;2 000 ~ 4 000 kg hm<sup>-2</sup>范围内的年份为 13 年,占 43.3%,生育期降水量为 332 ~ 712 mm;2 000 kg hm<sup>-2</sup>以下的年份有 4 年,占 13.3%,生育期降水量为 193 ~ 343 mm。

30 年中,雨养条件下的产量与产量潜力最接近的年份为 1995 年,二者相差 1 190.6 kg hm<sup>-2</sup>。生育期内的降水量为 505 mm,雨养产量达到了产量潜力的 84.3%;产量差相对值最大的年份为 1999 年,二者相差 6 845.2 kg hm<sup>-2</sup>,生育期降水量为 253 mm,雨养产量只有产量潜力的 3.1%,产量差绝对值最大的年份为 1980 年,二者相差 8 817.3 kg hm<sup>-2</sup>,生育期降水量为 294 mm,雨养产量为产量潜力的 14.3%。可见产量(潜力与雨养产量间)差年际间的波动很大,雨养产量的多年平均值为 4 083.6 kg hm<sup>-2</sup>。

30 年中,雨养产量达到产量潜力 70% 以上的年份只有 8 年,占有所有年份的 26.7%,相应的生育期降水量范围为 505 ~ 669 mm;达到 50% ~ 70% 水平之间的 5 年,占有所有年份的 16.7%,生育期降水量为 351 ~ 655 mm;而 56.7% 的年份雨养产量均在 50% 产量潜力水平以下,这些年份的生育期降水量为 193 ~ 712 mm,其中有 4 年的降水量在 500 mm 以上。

从多年的雨养产量与降水量数据可以看出,由于受其他因素(如温度、日照等)以及降水在时间上的分布的影响,降水总量最多的年份并不一定对应最高的产量,但总体上体现了产量随着生育期降水量的增多而增加的趋势,图 3 也说明雨养产量与生育期内降水量之间存在较好的相关性。

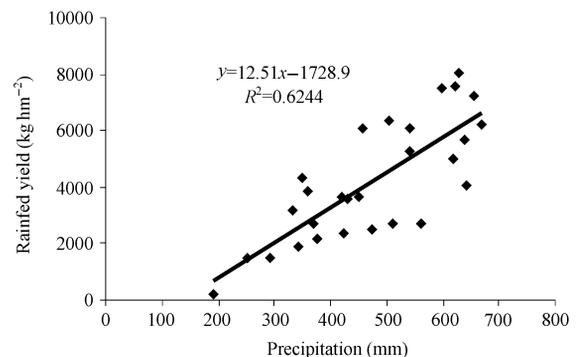


图 3 雨养条件下的产量与生育期降水量的关系  
Fig. 3 Relationship between rainfed yields and rainfalls in the growth season of aerobic rice

### 2.4 北京地区旱稻需水特性及水分亏缺分析

表 1 为模型模拟的旱稻出苗—穗分化、穗分

化—开花和开花—成熟3个生育阶段的需水量,表中的数值为30年的平均值。在3个生育阶段中,出苗—穗分化阶段持续的时间较长,平均为66 d。在这期间由于植株较小,不能完全覆盖地面,因此土壤蒸发较大,为196 mm,占49.7%,蒸腾量为198 mm,占50.3%;穗分化—开花和开花—成熟两个阶段的

持续时间分别为31和39 d,这两个阶段主要以作物蒸腾为主,蒸腾量分别为148和169 mm,分别占总蒸散量的99.7%和95.9%。3个阶段的需水强度分别为5.2、5.5和5.0 mm d<sup>-1</sup>,全生育期的需水强度为5.3 mm d<sup>-1</sup>。

表1 旱稻不同生育阶段的需水特性分析

Table 1 Characteristics of water requirement in different stages of aerobic rice

发育阶段 Development stage	天数 Days of the duration (d)	蒸腾量 Transpiration (mm)	蒸发量 Evaporation (mm)	总蒸散量 Total ET (mm)	蒸腾百分比 Percentage of T to ET (%)	蒸发百分比 Percentage of E to ET (%)	需水强度 Density of daily water requirement (mm d <sup>-1</sup> )
出苗—穗分化 Emergence Panicle initiation	66	198	196	394	50.3	49.7	5.2
穗分化—开花 Panicle initiation Flowering	31	148	0.4	148	99.7	0.3	5.5
开花—成熟 Flowering Maturity	39	168	7.2	176	95.9	4.1	5.0

降水量与潜在条件下作物需水量之差为旱稻生育期内的水分亏缺量,在一定程度上反映了特定气候年型下要达到产量潜力需要补充灌溉的水分,对指导制定合理的灌溉方案具有十分重要的理论和实践意义。

北京地区旱稻的生长季恰为一年中降水集中分布的季节,但是由于受季风气候的影响,降水年际间变化大,大多数年份仅靠自然降水难以满足旱稻对水分的要求,旱稻生长季内的水分亏缺状况严重。利用模型分析了北京地区1971—2000年旱稻297生育期间的最大需水量、降水量和水分亏缺状况。1972年的最大需水量最高,为888 mm,1990年的最大需水量最小,为611 mm,相差277 mm。最大需水量的多年平均值为713 mm,其年际间的变异较小,变异系数为8.5%。不考虑降水量在生育期内的分配,仅考虑降水总量的情况下,1971—2000年的30年中,50%年份水分亏缺率在30%以上,水分亏缺量都在250 mm以上。其中1972、1999和2000年3个年份的水分亏缺量都在500 mm以上,分别为556、579和523 mm,此外水分亏缺量在300 mm以上的年份还有10年;在200~300 mm之间的年份为2年,在100~200 mm之间的年份有5年,有8年的水分亏缺量在100 mm以下;1976年和1985年生育期降水量分别高出最大需水量14和28 mm。由于降水量年际间变异较大,使得各年的水分亏缺量的变异高达81.4%,多年平均的水分亏缺量为226 mm。

除不同年份气候条件引起作物生长季最大需水

量的变化外,因作物生长的动态变化,特别是参与蒸腾作用的叶面积的动态变化,使作物生长季内不同时期的水分消耗也存在较大的差异。因此,作物需水量不仅在不同年份之间存在差异,在作物的不同生育阶段也不同。图4是模型模拟的1985和1999两个年份的雨养条件下旱稻生长季土壤蒸发和作物蒸腾及其潜在最大值的变化。由图4可以看出,旱稻生长的前期,由于植株很小,土壤裸露表面较大,主要的水分消耗为裸间土壤蒸发,显然这部分水分消耗对作物生长没有明显的作用,属于无效水分消耗,在灌溉管理上应尽量控制减少这部分水分消耗。随着作物的生长,叶面积逐渐增大,分蘖后作物蒸腾迅速增强,占据主导地位,在穗分化至开花期间(DVS,0.65~1.00)达到最大值,以后随着叶面积的减小而逐渐降低。作物蒸腾量这部分水分消耗是作物生理活动所必需的,它的降低将直接造成作物的减产,是灌溉管理上应尽量满足的水分需求。

此外,从2个图的比较中也可以看出,1985和1999两个年型条件下旱稻生育期内的降水对需水的满足情况。1999年旱稻生育期内的降水少,前期的裸间土壤蒸发明显低于潜在的最大值,随着叶面积的增大,雨养条件下的实际蒸腾也逐渐低于潜在的最大值,表明自然降水不能满足作物的蒸腾需水要求,使雨养条件下的产量很低;而1985年,由于生育期内的降水丰富,基本上可以满足全生育期内作物的蒸腾需水量,因此在雨养的条件下就可以获得较高的产量。

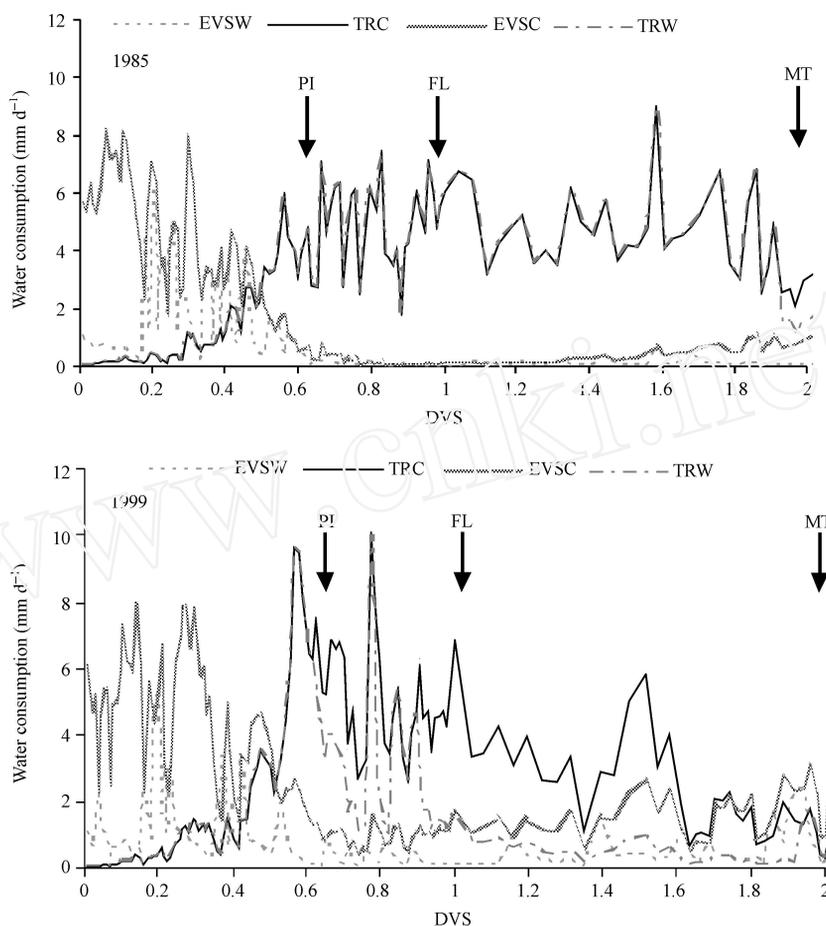


图4 雨养条件下的棵间土壤蒸发(EVSW)和作物蒸腾(TRW)及其相应的潜在最大值(EVSC、TRC)随发育阶段(DVS)的变化

Fig. 4 Variations of soil evaporation, crop transpiration and their potential values with development stage under rainfed condition

DVS为模型定义的发育阶段值(0:出苗, EM; 0.65:穗分化, PI; 1:开花, FL; 2:成熟, MT)。

DVS referred to the development stage in model (0: Emergence; 0.65: Panicle initiation; 1: Flowering; 2: Maturity).

### 3 讨论

许多的自然、生物、社会等因子相互影响与综合制约作物生长及产量形成过程,而目前的作物生长模型还不能考虑全部的限制因子<sup>[14]</sup>,因此本文以模型模拟的旱稻雨养产量比实际产量略有偏高。模型模拟的旱稻生育期内的需水量也比实测数据偏高,但偏高的部分主要是生育前期的无效土壤蒸发部分,今后可以在这方面对模型做进一步的改进模型对旱稻生理需水的模拟是比较准确的。

本文在计算降水对需水量的满足程度时只考虑生育期内的降水总量,没有考虑土壤深层渗漏和径流,因此本文给出的要达到产量潜力需补充灌溉的水量有些偏低。此外对降水量在不同生育阶段的分配未作详细的分析,实际上降水在时间上的分配也是影响水分亏缺的一个重要因素,因此旱稻生育期内的降水量在不同生育阶段的分配以及与不同阶段

需水量的耦合还需要进一步的分析和研究。

### 4 结论

通过 ORYZA2000 模型的模拟表明,在北京地区旱稻 297 尚有很大的产量潜力可被发掘,雨养产量与产量潜力之间的差值在一定程度上反映出可以通过灌溉提高的产量范围,一般在灌溉条件下达到 90% 产量潜力时认为是可达到的最高产量,因此在北京地区旱稻尚有  $3\ 000\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$  的产量可供挖掘。

北京地区多年旱稻生育期降水量与需水量的分析表明,降水量不能完全满足旱稻的需水要求,50% 的年份水分亏缺量在 250 mm 以上。要提高旱稻产量必须进行一定的补充灌溉,但补充灌溉量年际间的差异较大,应根据当年的降水条件进行合理的调节。

致谢:感谢中国农业大学农学与生物技术学院王化琪教授和王璞教授在田间试验方面给予的支持!

## References

- [1] Jiang J-A (江巨鳌), Wu K-B (邬克彬). Analysis on current production of aerobic rice and its development strategies. *Crop Res (作物研究)*, 2004, (1): 48-51 (in Chinese)
- [2] Bouman B A M, Yang X-G, Wang H-Q, Wang Z-M, Zhao J-F, Wang C-G, Chen B. Aerobic rice (Hán Dao): a new way of growing rice in water short areas. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Soil Conservation Organization Conference. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2002. pp 175-181
- [3] Bouman B A M, Peng S, Castaneda A R, Visperas R M. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. *Agric Water Manag*, 2005, 74: 87-105
- [4] Zhao J-F (赵俊芳), Yang X-G (杨晓光), Chen B (陈斌), Wang H-Q (王化琪), Wang Z-M (王志敏). Bouman B A M. Effects of different irrigation treatments on root growth and water use efficiency of upland rice. *Chin J Agrometeorol (中国农业气象)*, 2004, 25(4): 44-48 (in Chinese with English abstract)
- [5] Zhang Q-P (张秋平), Yang X-G (杨晓光), Yang J (杨婕), Wang H-Q (王化琪), Wang P (王璞), Wang Z-M (王志敏), Bouman B A M. Photosynthesis characteristics and water use efficiency of aerobic rice under different irrigation treatments. *Agric Res Arid Areas (干旱地区农业研究)*, 2005, 23(6): 67-72 (in Chinese with English abstract)
- [6] Belder P, Bouman B A M, Spiertz J H J, Peng S, Castaneda A R. Crop performance, nitrogen and water use in flooded and aerobic rice. *Plant Soil*, 2005, 273: 167-182
- [7] Wang H-Q, Bouman B A M, Zhao D-L, Wang C-G, Moya P F. Aerobic rice in northern China: opportunities and challenges. In: Bouman B A M, Hengsdijk H, Hardy B, Bindraban P S, Tuong T P, Ladha J K, eds. Water-Wise Rice Production: Proceedings of the International Workshop on Water-Wise Rice Production. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute, 2002. pp 143-154
- [8] Yang X-G, Bouman B A M, Wang H-Q, Wang Z-M, Zhao J-F, Chen B. Performance of temperate aerobic rice under different water regimes in North China. *Agric Water Manag*, 2005, 74: 107-122
- [9] Mao Z-Q (毛振强), Zhang Y-S (张银锁), Yu Z-R (宇振荣). Water requirement and irrigation scenarios of summer maize production aided by crop growth simulation model. *Acta Agron Sin (作物学报)*, 2003, 29(3): 419-426 (in Chinese with English abstract)
- [10] Xue C-Y (薛昌颖), Yang X-G (杨晓光), Bouman B A M, Feng L-P (冯利平), Van Laar H H, Wang H-Q (王化琪), Wang P (王璞), Wang Z-M (王志敏). Preliminary approach on adaptability of ORYZA2000 model for aerobic rice in Beijing region. *Acta Agron Sin (作物学报)*, 2005, 31(12): 1567-1571 (in Chinese with English abstract)
- [11] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P, Wopereis M C S, Ten Berge, H F M, Van Laar, H H. ORYZA2000: Modeling Lowland Rice. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, and Wageningen University and Research Centre, Wageningen, Netherlands, 2001
- [12] Van Laar, H H, Goudriaan J, Van Keulen H eds. SUCROS97: Simulation of Crop Growth for Potential and Water-Limited Production Situations. Quantitative Approaches in Systems Analysis, Vol. 14. C. T. de Wit Graduate School for Production Ecology and AB-DLO, Wageningen, Netherlands. 1997. p 52
- [13] Yang X-G (杨晓光), Bouman B A M, Zhang Q-P (张秋平), Xue C-Y (薛昌颖), Zhang T-Y (张天一), Xu J-Y (许剑勇), Wang P (王璞), Wang H-Q (王化琪). Crop coefficient of aerobic rice in North China. *Trans CSAE (农业工程学报)*, 2006, 22(2): 37-41 (in Chinese with English abstract)
- [14] Yang J-P (杨京平), Wang Z-Q (王兆骞). Crop growth simulation model and its application. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 1999, 10(4): 501-505 (in Chinese with English abstract)