

太行山前平原区作物-水分模型^[20]

孙振山^{1,3}, 刘昌明², 张喜英¹, 陈素英¹

(1. 中国科学院石家庄农业现代化研究所, 河北 石家庄 050021; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院研究生院, 北京 10039)

摘要: 依据田间试验数据, 采用Jensen模型, 研究了太行山前平原区冬小麦、夏玉米的作物-水分模型。结果表明, 小麦在拔节期缺水敏感指数(λ)最大, 对缺水最为敏感; 其次是孕穗至灌浆前期; 而返青起身期间和灌浆后期 λ 是负值, 在这些生育期适当控制水分供应对产量更有利。对于夏玉米, 每个生育期 λ 均为正值, 说明玉米任何生育期的水分亏缺最终均会对产量产生影响, 特别是抽雄至灌浆前期, 是对水分最敏感的时期。

关键词: 作物-水分模型; 水分敏感性; 冬小麦; 夏玉米; 华北平原

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)01-0154-04

作物-水分模型是进行限水灌溉和有限水资源优化调配的基础。目前采用的作物-水分模型有两大类: 一是建立在作物产量与全生育期总蒸发蒸腾量的关系基础上; 二是建立在作物产量与各生育阶段蒸发蒸腾量的关系基础上。由于在作物不同生育阶段缺水对产量的影响不同, 因此, 第一类模型不能反映这一事实。第二类模型不仅表明了水分供应量, 而且表明了水分供应时间对作物产量的影响。在我国, 这类模型最常用的形式主要有相加(Blank)模型和相乘(Jensen)模型2种。一般认为相乘模型对构成产量的目标反应比相加模型更敏感、更符合实际。所以, 在本研究中采用了相乘模型。其表达式为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_i^{\lambda_i} \quad (1)$$

式中: ET_a 、 ET_m 分别为特定气候条件下作物某阶段的实际蒸发蒸腾量和充分供水条件下的最大蒸发蒸腾量(mm); Y_a 和 Y_m 分别为缺水和充分供水条件下的作物产量(kg/hm^2); i 为生育阶段序号, $i=1, 2, \dots, n$, 为划分的作物生育阶段数。 λ 为第 i 阶段的作物缺水敏感指数(幂指数型), 它是表明第 i 阶段作物因缺水而影响产量的敏感程度指标。对于Jensen模型中的 λ , 大者为敏感性大, 表示该阶段缺水后减产率愈大, 小者为敏感性小, 表示该阶段缺水后减产率愈小, 因此, λ 成为乘法模型的关键性参数。

1 太行山前平原区作物水分生产函数的确定

1.1 试验地概况

试验地选择在中国科学院栾城农业生态系统试验站。本站位于 $37^{\circ}50'N$, $114^{\circ}40'E$, 海拔50.1 m, 属暖温带半湿润半干旱季风气候, 由于处在太行山山前平原的中部位置, 可代表整个山前平原高产农区。此区北起拒马河, 南至卫河, 沿太行山东麓分布。本站为中国科学院29个网络台站之一, 具有良好的田间试验条件。

栾城站多年平均降水量480.7 mm, 降水主要集中在7、8、9三个月, 达325.9 mm, 占年总量的67.8%, 具有雨热同期的特点, 有利于夏播作物生长。冬小麦生长期平均降水量为129.8 mm, 仅占年总量的27%, 易受干旱威胁, 尤其在小麦返青旺盛生长季节, 仅占年总量的12.1%, 更易受旱。

本站地势开阔平坦, 土层深厚, 土壤为褐土类灰黄土种, 质地为壤土, 随深度变化依次为: 沙壤、中壤和粘壤; 有机质含量1%~1.2%, 全氮含量0.07%~0.08%, 速效磷含量15~20 mg/kg, 速效钾含量150~170 mg/kg, 土壤容重1.53 g/cm³, 饱和土壤含水量为44.1%, 田间持水量35.4%, 凋萎湿度13.2%。

该站所在地区地下水资源较为丰富, 然而随着工农业生产的发展, 特别是20世纪80年代以来, 粮食产量迅速提高, 为追求高产, 灌溉量增加, 由于灌

溉方式落后,浪费严重,致使地下水连年超采,地下水位逐年下降,且下降速度有越来越快的趋势。水资源过度损耗使农田生态系统失去良性运转的基础,水资源已成为农业持续高效发展的主要限制因子,珍惜现有资源,极大限度地提高水资源的利用效率是今后农业发展的方向。

栾城站所在地区主要栽培作物为冬小麦和夏玉米,还有冬小麦-夏大豆等其他两熟作物的小面积种植。冬小麦10月初播种,播种前翻耕施肥,翌年3月酌情浇起身水,浇拔节水时施肥,4月底到5月初浇孕穗-开花水。6月上旬收获,夏玉米在5月下旬套种于冬小麦田。小麦收获后留茬覆盖,拔节-大喇叭口期施肥。在9月下旬收获,秸秆粉碎还田,翻耕和播种小麦。

1.2 试验设计

通过大田和盆栽试验研究冬小麦不同生育时期水分亏缺对产量的影响;夏玉米主要通过大田试验进行研究。盆栽试验所用盆的直径25 cm,高50 cm,在小麦返青时,选择在大田中生长一致的小麦,取原状土移栽至盆中,置于田间,设有防雨棚。根据大田密度,每个盆留苗70茎。在不同生育时期分3个调亏水平:重度(田间持水量的55%)、中度(田间持水量的65%)和轻度(田间持水量的75%)水分亏缺,田间持水量为23.4%。设有整个生长期不发生水分亏缺的处理作为对照。

大田试验小区面积40~50 m²,每个处理重复3次,随机排列。各处理灌水次数和灌水时间不同,形成不同的灌溉制度,同时根据当地农民的灌水习惯,设立一个大田水平处理的灌水次数和时间。灌水定额根据本地大田水平,小畦灌溉的次灌水量一般为600 m³/hm²,相当于60 mm。灌溉通过地下管道输水,塑料软管输送到小区,用水表计量各小区的灌水量。小区之间设有2 m宽的保护行,其它田间管理措施与当地大田水平一致。

受旱阶段因作物种类而异。将小麦划分为6个阶段:苗期(10月上旬~3月上旬)、返青期(3月上旬~4月上旬)、拔节期(4月上旬~4月下旬)、孕穗期(4月下旬~5月上旬)、抽穗期(5月上旬~5月中旬)、灌浆期(5月中旬~5月下旬)。夏玉米设4个受旱阶段,分别为:播种-拔节期(6月中旬~7月中旬)、拔节-抽雄期(7月中旬~8月上旬)、抽雄-灌浆期(8月上旬~8月下旬)、灌浆-成熟期(8月下旬~9月中旬),12个处理,随机区组排列,重复3次。由于在每个受旱阶段均设有高、中、低三种水分处理,故在不同的生育阶段就有不同水分处理的选

加。在作物生长发育过程中,根据不同小区土壤含水量适时予以补充灌溉。

1.3 测试项目及方法

(1) 灌水量与降水量

盆栽试验采用精度为25 g的机械称重,每日称重加水至所要求的含水量水平。大田试验采用地面闸管结合水表计量灌溉。冬小麦和夏玉米全生育期降水量数据来自栾城试验站气象场。

(2) 土壤水分测定与计算

在播种前、不同生育期和成熟收获后进行土壤含水量的测定。测定方法采用烘干称重法。即用土钻取土至1.8 m深,每20 cm一层,将土样装入铝盒中,用烘箱105℃烘至恒重,用精度为0.01 g的电子天平称湿土重、干土重和铝盒重。

(3) 测产

每小区收获9 m²,脱粒测产。

根据1996~2000年中国科学院栾城农业生态系统试验站的田间试验资料,求出不同生育阶段各种水分处理的相对蒸发蒸腾量和相对产量,然后用式(1)进行拟合。经过计算,得到的冬小麦水分生产函数为:

$$Y_a/Y_m = (ET_{a1}/ET_{m1})^{0.0712} \times (ET_{a2}/ET_{m2})^{-0.1213} \\ \times (ET_{a3}/ET_{m3})^{0.3145} \times (ET_{a4}/ET_{m4})^{0.2721} \\ \times (ET_{a5}/ET_{m5})^{0.1016} \times (ET_{a6}/ET_{m6})^{-0.087} \quad (2)$$

玉米水分生产函数为:

$$Y_a/Y_m = (ET_{a1}/ET_{m1})^{0.1496} \times (ET_{a2}/ET_{m2})^{0.2061} \\ \times (ET_{a3}/ET_{m3})^{0.3645} \times (ET_{a4}/ET_{m4})^{0.1116} \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 阶段缺水敏感指数及其变化规律

根据Jensen相乘模型的意义, λ 大者称敏感性大,表示该阶段缺水后减产率越大; λ 小者称敏感性小,表示该阶段缺水后减产率减小。

由式(2)可以看出,冬小麦各生育阶段对水分的敏感性有很大差别。对水分最敏感的时期是拔节期,其次是孕穗至灌浆前期,而返青起身期和灌浆后期 λ 是负值,在这些生育期适当控制水分供应对产量更有利。特别是返青起身期, λ 的负值较大,原因可能是由于一般年份试验所在的太行山前平原冬小麦大多进行过冬前灌溉,再加上春季土壤处于消融阶段,利于土壤水分向土壤上层运动,土壤水分含量较高,使春季无效分蘖增加,而削弱了后期的养分供应,最终影响产量,故 λ 的负值偏大。孕穗期小麦迅速生长发育,此时属于营养生长与生殖生长并进阶

段,而且此时气温升高,叶面积迅速增大,叶面蒸腾强度大,要求有充足的水分供应,水分亏缺对籽粒产量的形成有很大影响,因此 λ 值也大。抽穗期是形成小麦籽粒产量的关键时期,这一时期如果水分不足会使生殖生长受到显著抑制,所以 λ 值也高。进入灌浆期,小麦叶片开始衰老,蒸腾降低,水分亏缺对产量形成的影响减小,此时如果水分过多,会延长成熟期,这一时期的 λ 值很小。由此表明,得到的冬小麦缺水敏感指数在生育期的变化是合理的。

由式(3)可以看出,玉米不同生育阶段的水分敏感性指数差别也较大,拔节以前正处于营养生长的初期,植株矮小、叶面积小,水分亏缺对玉米籽粒产量的形成影响不大,作物缺水敏感指数 λ 较小。进入拔节期以后,植株茎叶生长迅速,幼穗迅速发育,开始由营养生长向生殖生长阶段过渡,而且此时气温较高,叶面蒸腾强度大,要求有充足的水分供应,水分亏缺对籽粒产量的形成有很大影响,因此 λ 值也大。从抽雄到灌浆是形成玉米籽粒产量的关键时期,这一时期如果水分不足会使生殖生长受到显著抑制,所以 λ 值最高。进入灌浆—成熟期,玉米叶片开始衰老,气温下降,蒸腾降低,水分亏缺对籽粒产量的形成影响减小,此时期如果水分过多,会延长玉米的成熟期,因此这一时期的 λ 值很小。综上所述,对于夏玉米,每个生育期 λ 均为正值,说明玉米任何生育期的水分亏缺最终均会对产量产生影响,抽雄—灌浆期对缺水最为敏感,拔节—抽雄期次之,然后是播种—拔节期,灌浆—成熟期的敏感性最小。由此表明,得到的夏玉米缺水敏感指数在生育期的变化是符合实际的。

2.2 阶段水分亏缺允许程度

不同生育时期水分亏缺及其亏缺程度对作物产量均有明显影响,因此在作物的不同生育时期有其不等的土壤水分适宜范围和最大可能的亏缺程度,如果低于这个极限,将造成显著减产。

对于冬小麦,根据多年的试验结果,不同生育时期土壤水分的适宜下限指标分别是:越冬前0~50 cm土壤含水量不低于田间持水量的60%;返青一起身期间0~50 cm土壤含水量不低于田间持水量的55%,但高于80%~85%时,会随着土壤含水量的增加,产量反而降低;拔节期间0~50 cm土壤含水量应高于田间持水量的65%;孕穗期间0~80 cm土壤含水量应不低于田间持水量的60%;抽穗~灌浆前期应维持0~100 cm土壤含水量高于田间持水量的60%;而灌浆后期低于50%~55%将不会造成冬小麦明显减产。根据多年观测结果,不灌水处理冬小麦

利用土壤储水大于200 mm,即使是灌水最多处理的冬小麦,其对土壤水分的利用也超过了100 mm。因此,冬小麦播前良好的底墒条件对维持冬小麦高产有重要意义。根据多年的试验,冬小麦播种时的土壤水分条件是1 m土体土壤含水量应不低于75%~80%的田间持水量。

对于夏玉米,其苗期较耐旱,0~60 cm土壤含水量可以维持较低的含水量,但不应低于田间持水量的55%;拔节期对水分较敏感,0~60 cm土壤含水量应保持在田间持水量的65%以上;抽雄吐丝期间因为是夏玉米对水分最敏感的生育时期,0~80 cm土壤含水量应高于田间持水量的70%~75%;灌浆前期0~100 cm土壤含水量应不低于田间持水量的65%~70%;灌浆后期0~100 cm土壤含水量可以降低到田间持水量的60%。玉米对水分亏缺比小麦更敏感,要求的土壤水分条件高于冬小麦。

2.3 冬小麦和夏玉米的优化灌溉制度

对于冬小麦,其生长期间的多年平均降水量在126 mm,多雨年平均达到145 mm以上,而干旱年只有50~80 mm。最高产量时的耗水量多数年份大于450 mm,缺水量在300 mm以上。根据栾城站的多年观测结果,冬小麦利用2 m土体的储水量平均大于150 mm,还需要150 mm左右的灌水量。考虑到本区灌溉水分的严重亏缺状态,在制定灌溉制度时,除了产量,水分利用效率也是要考虑的因素。根据试验结果和降水的多少,冬小麦优化灌溉制度见表1,即干旱年3水,平水年2水和多雨年1水,每次灌水定额60~70 mm,这种制度下产量基本最高,水分利用效率也可维持在较高的水平。这种供水制度要求的条件是冬小麦播前墒情要好。

夏玉米不同于冬小麦。其生长期是降水量最集中的时期,但因为降水变率大,不同年份降水差异显著。多雨年份平均467 mm(降水保证率 $P=25%$);常年平均334 mm($P=50%$);少雨年份237 mm($P=25%$)。而夏玉米生长期间的平均耗水量在400 mm左右,特别是在河北平原,因为冬小麦秸秆覆盖夏玉米,可以减少棵间蒸发40~50 mm,因此夏玉米生长期间在有秸秆覆盖的条件下,其总蒸散量在350~360 mm。多雨年份的降水量能满足其需水要求,常年的降水条件也基本能满足夏玉米的需水要求。但由于大多年份,小麦收获后,土壤干旱,而6月份降水少,玉米出苗时必须灌溉。无论多雨还是少雨年份,玉米的苗期必须灌溉。在少雨年份除了苗期的灌水,还需要灌1~2水,根据实际情况应选择在大喇叭口期和吐丝灌浆前期。夏玉米是对水分较敏

感的作物,其生长期间多灌的水分还能储存在土壤中,为冬小麦所利用。

表1 太行山前平原冬小麦优化供水制度

Table 1 High-efficiency irrigation system of winter wheat in the piedmont of MT· Taihang

年型 Year type	灌溉次数 Irrigation times	灌溉定额 Irrigation quota (mm)	灌溉定额 Irrigation amount (mm)	供水时间 Irrigation stage
多雨年(降水量大于130mm) Rainy year (rainfall >130mm)	1	60~70	60~70	拔节 Elongating
正常年(降水量在90~130mm) Normal year (rainfall is 90~130mm)	2	60~70	120~140	拔节、抽穗-扬花 Elongating, heading to blooming
少雨年(降水量小于80mm) Dry year (rainfall <80mm)	3	60~70	180~210	拔节、孕穗-抽穗、扬花-灌浆 Elongating, booting to heading, blooming to filling

3 结 论

提高自然降水和灌溉水利用效率是节水农业的中心,在这方面存在着巨大潜力。为实现这一目标,根据作物各生理过程和各生育阶段对水分亏缺的敏感程度,确定作物对土壤水分亏缺的下限指标,建立节水高效的灌溉制度是农田水分管理的重要手段。同时不同生育时期,冬小麦对土壤水分亏缺的敏感程度和允许亏缺的最大程度不同,因此制定作物的节水灌溉制度要依赖于作物的生理生态过程对土壤水分亏缺的反应,确定适宜于作物生长的土壤湿度下限和达到不同产量水平的土壤湿度变化范围指标,控制上层土壤含水量减少土壤棵间蒸发。从这种角度确定的不同作物不同供水条件下的最优供水模式,能达到节水增产的双重目标。

参 考 文 献:

[1] 梁银丽,山 仑,康绍忠.黄土旱区作物-水分模型[J].水利学

报,2000,(9):86-90.

- [2] 张喜英,由懋正,王新元.冬小麦调亏灌溉制度田间试验研究初报[J].生态农业研究,1998,6(3):33-36.
- [3] 张喜英.不同时期调亏及不同调亏程度对冬小麦产量的影响[J].华北农学报,1999,14(2):79-83.
- [4] 张喜英,裴 东,由懋正.太行山前平原冬小麦优化灌溉制度研究[J].水利学报,2001,(1):89-95.
- [5] 山 仑.植物水分利用效率和半干旱地区农业用水[J].植物生理学通讯,1994,30(1):61-66.
- [6] 康绍忠,党育红.作物水分生产函数与经济用水灌溉制度的研究[J].西北水利科学,1987,(1):1-11.
- [7] 陈亚新,康绍忠.非充分灌溉原理[M].北京:中国水利水电出版社,1995.
- [8] Blank H. Optimal irrigation decision [M]. Greeley: Colorado states university, 1975.
- [9] Jesen M E. Water consumption plants [A]. Kozlowski T. Water deficits and plant growth [C]. New York: Academic Press, 1986. 11-22.
- [10] English M, Raja S N. Perspectives on deficit irrigation [J]. Agricultural Water Management, 1996, 32: 1-14.

Model of crops response to water in the piedmont of MT· Taihang

SUN Zhen-shan^{1,3}, LIU Chang-ming², ZHANG Xi-ying¹, CHEN Su-ying¹

(¹. Shijiazhuang Institute of Agricultural Modernization, CAS, Shijiazhuang 050021, China;

². Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

³. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China)

Abstract: By using Jensen model, this paper studies the crop-water model of winter wheat and maize according to the experimental data in the field. The results show that the water-stress sensitivity index (λ) of winter wheat is the largest in jointing stage, the next are booting and heading to early filling stages, while λ is negative during turning green to lifting and late filling stages, during which the proper control of water supply is beneficial to the yield of winter wheat. As to maize, the water-stress sensitivity index (λ) is positive in every stages, showing that water stress in any stage can affect the yield of maize; The most sensitive stage of maize to water stress is heading to initial filling stage. The paper may provide important theoretical evidences for establishing water-saving and high-efficiency irrigation system in the piedmont of MT· Taihang.

Key words: crop-water model; water-stress sensitivity index; winter wheat; maize