

内蒙古东部干旱年份玉米需水规律 及灌溉制度优化

王颖辉¹, 汤鹏程², 李曙光³, 田雨春⁴, 李嘉琪³

(1. 通辽市水利规划设计研究院, 内蒙古 通辽 028000;
2. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010018;
3. 内蒙古通辽市水利技术推广站, 内蒙古 通辽 028000; 4. 科尔沁区丰田灌溉试验站, 内蒙古 通辽 028000)

摘要: 基于通辽市丰田灌溉试验站 3 年野外实测试验, 对该地区干旱年份玉米需水规律开展研究, 结果表明: 研究区干旱年份玉米拔节期与抽雄期耗水量占玉米整个生育期的 50% 以上, 耗水强度依次表现为抽雄期 > 拔节期 > 灌浆期 > 苗期, 各生育阶段日耗水强度介于 0.79 ~ 6.50 mm·d⁻¹ 之间; 玉米干旱年份苗期、拔节期水分胁迫处理减产率较小, 均未达到显著水平, 抽雄期水分胁迫造成的减产最大, 多年平均达 10% 以上。干旱年份随着玉米耗水量的增加, 产量持续增加, 而水分生产率先升后降, 合理的水分胁迫有利于提高干旱年份水资源的利用效率; 同时通过数学模型与动态规划, 提出了干旱年份玉米不同灌溉定额条件下的非充分优化灌溉制度, 干旱年份应首先保证玉米抽雄期、灌浆期各灌水 1 次的要求, 每次灌水约 600 m³·hm⁻²。

关键词: 内蒙古东部; 干旱年份; 玉米; 需水规律; 水分利用率; 灌溉制度
中图分类号: S274; S513 **文献标志码:** A

The water demand and optimal irrigation schedule of maize in drought years at eastern area of Inner Mongolia

WANG Ying-hui¹, TANG Peng-cheng², LI Shu-guang³, TIAN Yu-chun⁴, LI Jia-qi³

(1. Tongliao Academy of Water Planning and Design, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China;
2. Hydraulic Research Institute of Ministry of Water Resources Pastoral, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;
3. Tongliao Water Technology Promotion Stations, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China;
4. Horqin District Toyota Irrigation Experimental Station, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China)

Abstract: In order to highly utilize the limited water resources of eastern Inner Mongolia in drought years, a three – year (2009—2011) test was carried out in Tongliao city Korqin district to analyze the law of water requirement of maize in drought years. The results showed that the water consumption was high at elongation stage and tasseling stage and low in seedling stage and postulation stage. Furthermore, the water consumption of elongation stage and tasseling stage accounts for more than half of that during the whole growth period of maize. The water consumption intensity was diminishing in the order of tasseling, elongation, postulation and seedling. A reduction in yield was caused by different water stress for each growth period of maize in a certain range. The yield reduction by low irrigation at tasseling stage was the most serious. Water productivity and yield was not corresponding to the requirement of water consumption. The productivity of water resources could be enhanced by the effective water stress. At the same time, the insufficient irrigation in drought years under different irrigation quota of corn is emphasized by this study.

Keywords: eastern Inner Mongolia; drought years; maize; water demand regulation; efficiency of water application; optimal irrigation schedule

收稿日期:2016-10-11 修回日期:2016-12-22
基金项目:内蒙古东部节水增粮高效灌溉技术集成研究与规模化示范(2014BAD12B03);通辽平原玉米喷灌水肥一体化技术研究(NSK2016 – S3)
作者简介:王颖辉(1974—),女,内蒙古通辽人,高级工程师,主要从事灌溉排水研究。E-mail: 543077207@qq.com。
通信作者:汤鹏程(1988—),男,河北石家庄人,工程师,主要从事农田水运移方面研究。E-mail: tangpc1988@163.com。

内蒙古东部土地资源丰富,光热资源较好,是我国最重要的粮食主产区之一。近年来,在全球气候变暖的大背景下,内蒙古东部区的气候出现显著变化,总体表现为降水量逐年减少,平均气温逐年提高,干旱年份出现频率增多^[1]。各地春旱频率高达 70% 以上,特别是近十年来春旱频率已达 90% 以上,夏、秋连旱频率 50% ~ 60%。农业灌溉用水量过大,农业灌溉水利用系数低,水分生产率低,水资源短缺已经成为阻碍当地发展的主要因素之一^[2-3]。

通辽市是内蒙古“节水增粮”计划实施的重点地区,为此,以通辽市丰田试验站 3 a(2009—2011 年)的试验观测为例开展研究。根据通辽市水资源公报,2011 年全市用水量 29.29 亿 m³,第一产业农业用水量高达 24.56 亿 m³,占全市总用水量的 83.87%,远高于全国农业用水占总用水量 65% 的水平^[4]。在可开发利用水资源总量一定的前提下,农业用水只能是零增长或负增长。因此,全面了解该地区作物需、耗水规律对于发展高效节水农业,提高作物的水分利用效率,制定合理的灌溉制度具有重要的意义^[5]。针对当地广泛种植的作物——玉米在干旱年份的需水规律开展研究,为内蒙古东部地区有限水资源的合理配置提供理论依据^[6]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验选址在通辽市科尔沁区,属北温带大陆性季风气候区,为干旱、半干旱性气候,平均海拔为 186 m,四季分明,春季多风少雨,夏季炎热,秋季凉爽,冬季干燥寒冷。年平均气温为 6.2℃,境内光能资源充足,年日照总时数为 2 967 h,多年平均降雨量为 382.1 mm,降雨量年内分配很不均匀,春季 4—5 月份降雨量占全年的 13%,夏季降雨集中在 6—8 月份,占全年的 69%。多年平均风速为 3.9 m·s⁻¹,春季风大,最大瞬时风速达 29 m·s⁻¹。

1.2 试验处理及方法

供试玉米品种为郑单 958,种植模式均垄种植,垄间距 60 cm,株距 24 cm,种植密度在 $6.3 \times 10^4 \sim 6.6 \times 10^4$ 株·hm⁻²。试验共设 6 个处理,每个处理 3 个重复,共 18 个小区,每个小区面积为 3.6 m × 50 m = 180 m²,试验区外围设有 3.6 m 宽保护区,试验区总面积 0.45 hm²。试验处理按土壤水分加以控制,灌水下限通过土壤墒情监测设备(TDR)进行观测,2 d 观测一次,降雨或灌溉后加测一次,并以不灌溉为对照(CK)(表 1)。

试验田耕作层 0 ~ 25 cm 为壤土,25 ~ 80 cm 为粘土,80 ~ 100 cm 为粘土含砂层;耕作层土壤容重 1.24 g·cm⁻³,孔隙度 55%,田间持水率 33.3%。

表 1 玉米试验处理设计
Table 1 Design of experimental treatments of corn

处理 Treatments	各阶段水分条件 The moisture conditions of each stage/%			
	苗期 Seedling stage	拔节期 Elongation stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Filling stage
充分灌溉(W ₁) Full irrigation	70	70	70	65
苗期低水处理(W ₂) Seedling stage low water treatment	50	70	70	65
拔节期低水处理(W ₃) Elongation stage low water treatment	70	50	70	65
抽雄期低水处理(W ₄) Tasseling stage low water treatment	70	70	50	65
灌浆期低水处理(W ₅) Filling stage low water treatment	70	70	70	50
对照区 CK	自然降水 Natural rainfall			

注:表中所列含水率均为下限值,其上限为田间持水量的 90%;各阶段水分条件指占田间持水量的百分比。
Nota:moisture content listed in the table are the lower limit value; each stage of the moisture conditions refers to the percentage of field capacity.

表 2 各年度玉米不同生育阶段降雨分布
Table 2 The annual rainfall distribution at different stage of corn

年份 Year	降雨量/mm Rainfall	降雨量分布/mm Rainfall distribution			
		苗期 Seedling stage	拔节期 Elongation stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Filling stage
2009	212.9	70.2	67.4	40.1	35.2
2010	242.3	84.1	71.4	66.3	20.5
2011	209.0	42.2	75.5	72.8	18.5

1.3 玉米生育期内灌溉定额及生育阶段划分

内蒙古东部区玉米在 5 月初播种,9 月下旬收获,全生育期约 135 d,具体播种、收获时间视当年实际生产情况而定。2009—2011 年玉米生育阶段划分具体见表 3。

表 3 玉米不同年份生育期(M-d)					
Table 3 The corn growth stage of different years					
年份 Year	出苗前 Pre-emergence	苗期 Seedling stage	拔节期 Elongation stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Filling stage
2009	05-07— 05-25	05-25— 06-28	06-29— 07-28	07-29— 08-16	08-17— 09-28
2010	05-01— 05-25	05-25— 06-26	06-27— 07-26	07-27— 08-15	08-16— 09-27
2011	05-04— 05-25	05-25— 06-27	06-28— 07-27	07-27— 08-16	08-16— 09-27

田间试验采用水表记录灌溉水量。针对实测含水率,计算各小区具体灌水定额,对不同小区同时灌水。不同年份各处理实际灌水数据详见表 4。

2009—2011 各年度玉米生育期气候资料见表 5。气象资料采用当地气象站的数据,包括 2009—2011 年 5—9 月逐日温度、蒸发、日照、最高温度、最

低温度、2 m 高处风速、相对湿度和日照时数等。降雨数据见表 6。

表 4 各年实际灌水量/(m³·hm⁻²)							
Table 4 The actual irrigation of different years							
生育阶段 Growth stage	年份 Year	处理 Treatment					
		W1	W2	W3	W4	W5	CK
苗期 Seedling	2009	0	0	0	0	0	0
	2010	671	672	672	652	617	0
	2011	0	0	0	0	0	0
拔节期 Elongation	2009	682	578	0	661	719	0
	2010	478	0	0	545	515	0
	2011	626	401	0	620	498	0
抽雄期 Tasseling	2009	824	756	756	0	472	0
	2010	0	0	0	0	0	0
	2011	0	0	0	0	0	0
灌浆期 Filling	2009	0	0	646	839	0	0
	2010	267	270	813	214	0	0
	2011	817	813	848	759	0	0
合计 Total	2009	1506	1334	1402	1500	1191	0
	2010	1416	942	1485	1411	1132	0
	2011	1443	1214	848	1380	498	0

表 5 2009—2011 年的气候数据							
Table 5 The climate data of the year from 2009 to 2011							
年份 Year	月份 Month	最高气温/℃ Maximum temperature	最低气温/℃ Minimum temperature	平均气温/℃ Average temperature	相对湿度/% Relative humidity	风速/(m·s⁻¹) Wind speed	日照时数/h Sunshine duration
2009	5	26.5	12.1	19.2	37.0	3.8	10.3
	6	26.1	15.5	20.8	57.0	3.4	9.6
	7	29.2	18.8	23.9	65.6	2.9	10.5
	8	30.4	18.0	23.9	58.0	2.6	10.5
	9	24.1	11.0	17.3	48.6	3.0	9.6
2010	5	22.0	11.4	16.5	59.5	3.3	6.4
	6	31.1	17.5	24.5	49.0	3.1	8.8
	7	29.3	20.6	24.6	74.4	2.6	5.5
	8	28.8	17.9	23.1	67.7	2.6	7.6
	9	25.0	11.6	18.1	51.8	2.6	7.9
2011	5	22.6	10.9	16.7	46.3	3.6	8.2
	6	28.0	16.7	22.2	59.3	3.0	7.6
	7	30.2	20.5	24.8	71.4	2.4	4.1
	8	29.5	19.0	23.9	68.6	2.1	6.6
	9	23.3	9.2	15.7	51.5	2.5	8.5

2 结果与分析

2.1 降雨频率分析及水文年划分

依降水保证率的不同,将通辽地区不同年份划

分为干旱水文年、正常水文年和湿润水文年(一般把保证率小于 37.5%的降雨年份作为湿润水文年,保证率介于 37.5%~62.5%之间的降雨年份作为中等水文年,保证率大于 62.5%的降雨年份作为干旱

年,而把接近 95%保证率的年份作为特别干旱年)。

根据作物生育期内有效降雨量,采用多年降雨资料排频,通过对该地区 1980—2011 年作物生育期内降雨资料分析划分不同水文年份:作物生育期有效降雨量 327 mm 以上为湿润年;介于 259 ~ 327 mm 为一般年;259 mm 以下为干旱年。2009—2011 年,玉米生育期内有效降雨量分别为 212.9、242.3、209.0 mm,均属于干旱年份。由各年度水文年划分(表 6)可知,近 30 a 内(1980—2011 年)枯水年占总年份的 37.5%,近 20 a 内(1992—2011 年)枯水年占总年份的 50%,近 10 a 来(2002—2011 年)玉米枯水年占到 70%;降水量逐年减少趋势明显,干旱年份频率显著增多^[4]。

表 6 玉米生育期内降雨分析及水文年划分

Table 6 Rainfall analysis and hydrological year divided in maize growth period

年 Year	5—9 月降水/mm Precipitation in 5—9 month	水文年 Hydrologic year	年 Year	5—9 月降水/mm Precipitation in 5—9 month	水文年 Hydrologic year	年 Year	5—9 月降水/mm Precipitation in 5—9 month	水文年 Hydrologic year
1980	145	枯 Dry year	1991	492	丰 Wet year	2002	191	枯 Dry year
1981	360	丰 Wet year	1992	441	丰 Wet year	2003	246	枯 Dry year
1982	209	枯 Dry year	1993	368	丰 Wet year	2004	245	枯 Dry year
1983	368	丰 Dry year	1994	530	丰 Wet year	2005	362	丰 Wet year
1984	318	平 Normal year	1995	348	丰 Wet year	2006	373	丰 Wet year
1985	362	丰 Wet year	1996	226	枯 Dry year	2007	137	枯 Dry year
1986	408	丰 Wet year	1997	319	平 Normal year	2008	305	平 Normal year
1987	291	平 Normal year	1998	494	丰 Wet year	2009	213	枯 Dry year
1988	342	丰 Wet year	1999	286	平 Normal year	2010	242	枯 Dry year
1989	328	丰 Wet year	2000	202	枯 Dry year	2011	209	枯 Dry year
1990	278	平 Normal year	2001	210	枯 Dry year			

2.2 不同处理各生育阶段耗水量与耗水强度分析

作物田间耗水量是指作物从播种至收获整个生育期内消耗的水量。由表 7 可知,内蒙古东部干旱年份玉米全生育期耗水量介于 246 ~ 410 mm 之间,充分灌溉条件下玉米在干旱年份耗水量为 400 mm 左右。分析玉米各处理不同生育阶段的耗水量得出,玉米各生育阶段耗水量在 33 ~ 158 mm 之间,变幅较大。且各生育阶段耗水量总体变化呈拔节期、抽雄期较高,苗期、灌浆期较低的趋势。说明在拔节期、抽雄期作物生长速度快,叶面蒸腾增大,耗水量大。

耗水强度是指作物在单位时间内的耗水量,掌握作物不同生育阶段的耗水强度即可求出作物全生育期内的需水量,而作物需水量是制定灌排工程规划、设计、管理和农田灌排实施的基本依据,可见耗水强度的重要性^[7-9]。虽然 2009—2011 年均是干旱年份,但不同年份间耗水强度略有区别。2009 年日耗水强度介于 1.20 ~ 6.60 mm·d⁻¹之间,耗水强度整体呈生育中期高,生育前、后期较低的趋势,该趋势与生育期内耗水量变化趋势具有一致性。2010 年日耗水强度介于 0.90 ~ 4.30 mm·d⁻¹之间,与 2009 年相比,日耗水强度变化趋势近似,个别处理变化有所不同,与该处理生育期内遭受水分胁迫有

直接关系。2011 年日耗水强度在 0.79 ~ 4.95 mm·d⁻¹之间,其变化趋势与 2009、2010 年相似。综上可得,内蒙古东部区干旱年玉米各生育阶段耗水强度从大到小的顺序为抽雄期、拔节期、灌浆期、苗期。

2.3 玉米产量及水分生产率

水分胁迫对作物的新陈代谢、生理生长等均会产生一定影响。水分胁迫的程度、阶段不同,产生结果不同;水分胁迫也将使作物产生抗逆性,迫使作物根系向深层生长,增强土壤水分的利用率。分析不同处理玉米产量、减产率、水分生产率,结果表明,玉米不同生育阶段水分胁迫条件下均会造成一定幅度的减产。作物水分生产率(WP)计算公式如下:

$$WP = Y/ET \tag{1}$$

式中,Y 为作物产量(kg·hm⁻²);ET 为作物耗水量(作物蒸发蒸腾量,m³·hm⁻²)。

造成的减产程度取决于水分胁迫阶段。玉米在自然状态下(CK)减产率高达 16.9%以上;苗期水分胁迫处理(W2 处理)减产率最低,介于 0% ~ 3.7%之间;拔节期水分胁迫处理(W3 处理)减产率 4% ~ 5%;抽雄期水分胁迫处理(W4 处理)减产率 8% ~ 15%;灌浆期水分胁迫处理(W5 处理)减产率 4% ~ 11%。可见抽雄期干旱对玉米产量影响最大,其次是拔节期、灌浆期、苗期。

表 7 玉米不同处理各生育阶段耗水量/mm
Table 7 The water consumption on different growth stage of corn

年份 Year	处理 Treatments	苗期 Seedling stage	拔节期 Elongation stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Filling stage	全生育期 Growth stage
2009	W1	82	147	125	57	410
	W2	78	135	120	67	400
	W3	79	96	106	115	396
	W4	90	140	66	118	413
	W5	70	150	78	65	364
	CK	72	92	58	50	272
2010	W1	121	106	85	63	375
	W2	158	52	79	68	357
	W3	152	65	72	109	398
	W4	118	124	71	62	376
	W5	121	110	82	42	355
	CK	85	48	74	38	246
2011	W1	89	123	91	94	397
	W2	76	100	99	80	356
	W3	76	57	99	87	319
	W4	69	125	98	86	378
	W5	77	106	95	33	311
	CK	78	54	94	38	264

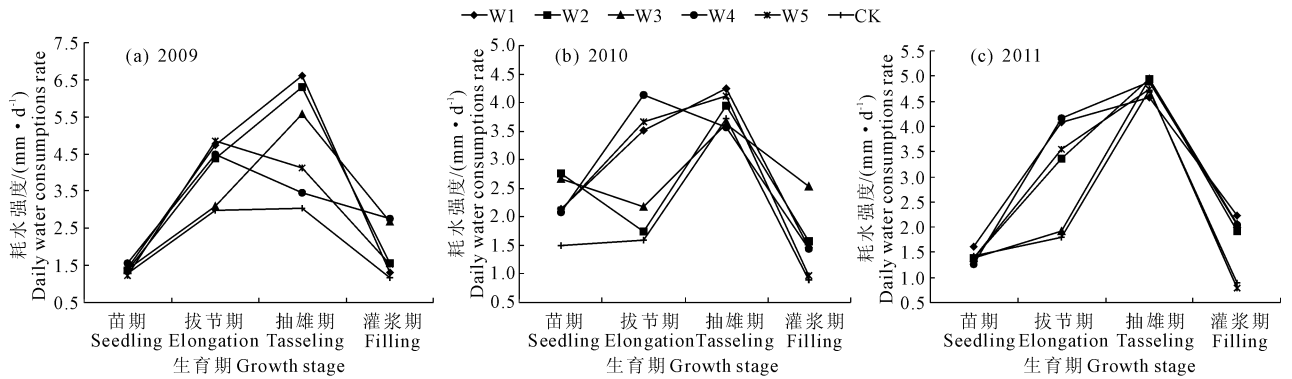


图 1 2009—2011 年玉米不同处理各生育阶段耗水强度

Fig.1 Different water consumption of corn on various growing stages in the year of 2009—2011

分析 2009—2011 年各处理水分生产率可得(表 8),每年对照处理(CK)水分生产率最高。由于 CK 为雨养农业,干旱年份耗水量较小,水分生产率较高,但是与充分灌溉(W1 处理)相比,CK 减产幅度特别明显,严重水分亏缺会导致大幅减产。各处理中,抽雄期水分胁迫(W4 处理)导致水分生产率不高,故认为该生育阶段水分胁迫会对最终产量产生重大影响。苗期水分胁迫(W2 处理)的水分生产率高于或接近无水分胁迫(W1 处理)的水分生产率,拔节期与灌浆期水分胁迫处理(W3、W4 处理)的水分生产率略低于 W1 处理。综上所述,对不同生育阶段有效的水分胁迫可提高水分生产率,个别时期水分

胁迫不会造成减产。随着玉米耗水量的增加,产量持续增加,而水分生产率先升后降,因此实际生产中不能盲目追求产量最大,在获得较高产量的同时,也需兼顾水分生产率的提高,寻求两者之间的平衡点,使内蒙古东部区干旱年份有限的水资源得以发挥最大效益。

2.4 玉米干旱年份非充分灌溉制度优化

2.4.1 作物—水模型选择 当分配给区域上某种作物的总灌溉水量(灌溉定额)小于该作物整个生育期的总灌溉需水量时,如何将总灌溉水量分配到作物的各生长阶段,使得供水不足时获得最好的产量,这就是在一定的总灌溉定额(非充分灌溉)下最优灌

溉制度,即一定的总灌溉水量在农作物生长期的最优分配。已有研究认为 Stewart 模型较适合内蒙古东部地区的玉米生长特点,对总产量反映灵敏度高,能体现作物各阶段水量对产量的影响^[10]。故采用 Stewart 模型,表达式为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left[- \sum_{i=1}^n K'_i - \frac{ET_a}{ET_m} \right] \quad (2)$$

式中, Y_a 为作物实际产量; Y_m 为作物最大产量; ET_a 为全生育期实际蒸发量; ET_m 为全生育期最大蒸发量; K'_i 为作物不同阶段(i) 缺水对产量的敏感系数。

表 8 各处理需水量、产量及水分生产率

Table 8 The computation of water demand, yield and water productivity

处理 Treatments	产量/(kg·hm ⁻²) Yield			与 W1 处理相比减产率/% Yield reduction rate			水分生产率/(kg·m ⁻³) Water productivity		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
W1	14145	13440	10530	0.0	0.0	0.0	3.45	3.58	2.65
W2	13620	13110	10560	3.7	2.5	0.0	3.41	3.68	2.96
W3	13575	12885	10005	4.0	4.1	5.0	3.43	3.23	3.14
W4	13005	12555	8940	8.1	6.6	15.1	3.15	3.34	2.37
W5	13575	12900	9345	4.0	4.0	11.3	3.73	3.63	3.01
CK	11760	10860	8715	16.9	19.2	17.2	4.32	4.42	3.3

2.4.2 动态规划的数学模型 某种作物最优灌溉制度的设计过程,可以看成是一个多阶段决策过程,用动态规划的数学模型描述。根据玉米生长过程,将其生育期划分为 i 个阶段。决策变量取为各阶段灌水量 m_i ,根据玉米生育期的不同需水量要求,确定玉米灌溉定额,玉米灌溉制度设计基本资料详见表 9。

表 9 玉米灌溉制度设计基本资料

Table 9 The basic information of corn on irrigation system design

时段 Stage	玉米生长阶段 Corn growth stage		敏感 指标 Sensitive index	阶段需水量 m_i Water demand /(m ³ ·hm ⁻²)
	日期 Date	生育阶段 Growth stage		
1	05-25~06-28	苗期 Seedling stage	0.1804	1459
2	06-28~07-26	拔节期 Elongation stage	0.2472	1874
3	07-26~08-16	抽雄期 Tasseling stage	0.3173	1509
4	08-16~09-28	灌浆期 Filling stage	0.2551	1066

在可分配水量一定情况下,采用 Blank 模型,以追求单位面积的产量最大为目标,即:

$$F = \max\left(\frac{Y_a}{Y_m}\right) = \max\left[1 - \sum_{i=1}^n K_i\left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right)\right] \quad (3)$$

约束条件包括灌水量约束、土壤含水率约束和边界约束。

灌水量约束:

$$0 \leq m_i \leq \sum_{i=1}^n q_i = Q \leq ET_i \leq ET_{mi} \quad (4)$$

计划湿润层土壤含水率约束:

$$\theta_w \leq \theta_i \leq \theta_f, i = 1, 2, \cdots, n \quad (5)$$

式中, θ_i 为计划湿润层土壤平均含水率(占干土质量的百分比)(%); θ_f 为田间持水率(占干土质量的百分比)(%)。

边界约束:

$$\theta \leq \theta_0 \quad (6)$$

式中, θ_0 为土壤初始含水率(占干土质量的百分比)(%)。

逆序递推,顺序决策,其递推方程为:

$$f_i^*(q_i) = \max\{R_i(q_i, m_i) + f_{i+1}^*\}(q_{i+1}),$$
$$i = 1, 2, \cdots, n - 1 \quad (7)$$

式中, $R_i(q_i, W_i)$ 为在 q_i 状态下,所得的本阶段(i) 效益; $f_n^*(q_n)$ 为余留阶段的总效益。

利用前述递推方程式,采用拟序递推法,从 n 阶段开始算起,逐渐推至阶段 1,然后在正向逐段决策,可得玉米的最优化灌溉制度,详见表 10。在干旱年,当 $M \leq 1\,200\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,灌溉水量应首先保证玉米抽雄期、灌浆期需水要求;当 $1\,200\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \leq M \leq 1\,800\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米的灌水量应依次保证拔节期、抽雄期、灌浆期需水要求;当 $1\,800\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \leq M \leq 2\,400\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,灌溉的水量应依次保证苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期需水要求;当 $2\,400\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \leq M \leq 3\,000\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米生育期灌水 5 次,抽雄期灌水 2 次;当 $2\,400\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \leq M \leq 3\,600\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米生育期灌水 6 次,抽雄期、灌浆期灌水各 2 次。

表 10 干旱年玉米优化灌溉制度
Table 10 Optimize irrigation system of corn in dry years

灌水次数 Irrigation frequency	灌水量/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$) Irrigation amount				
	苗期 Seedling stage	拔节期 Elongation stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Filling stage	全生育期 Growth stage
2			600	600	1 200
3		600	600	600	1 800
4	600	600	600	600	2 400
5	600	600	600 + 600	600	3 000
6	600	900	600 + 600	450 + 450	3 600

3 结 论

1) 干旱年份玉米在拔节期、抽雄期耗水量较大,耗水高峰出现在拔节期至抽雄期,这 2 个阶段耗水量占全生育期的 44.78% ~ 60.57%。耗水强度总体呈抽雄期 > 拔节期 > 灌浆期 > 苗期,全生育期日耗水强度介于 0.79 ~ 6.5 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间。

2) 玉米各生育阶段产生不同程度的水分胁迫均会造成一定幅度的减产,水分胁迫阶段不同,减产幅度不同。玉米在自然状态下减产率达到 16% 以上,苗期、拔节期水分胁迫处理减产率较小,均未达到显著水平,而抽雄期水分胁迫导致平均减产 10% 以上。水分生产率与产量对耗水量的要求不具有—致性,合理的水分胁迫有利于提高干旱年份水资源的利用效率。

3) 通过数学模型与动态规划,得到在干旱年玉米的最优化灌溉制度。当灌水量 (M) $\leq 1\,200\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,灌溉水量应首先保证玉米抽雄期、灌浆期需水要求,全生育期灌水 2 次;当 $1\,200\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2} \leq M \leq 1\,800\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,玉米的灌水量应依次保证拔节期、抽雄期、灌浆期需水要求,全生育期灌水 3 次;当 $1\,800\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2} \leq M \leq 2\,400\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,灌溉的水量应依次保证苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期需水要求,全生育期灌水 4 次;当 $2\,400\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2} \leq M \leq 3\,000\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,玉米生育期灌水 5 次,抽雄期灌

水 2 次;当 $2\,400\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2} \leq M \leq 3\,600\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,玉米生育期灌水 6 次,抽雄期、灌浆期灌水各 2 次。

参 考 文 献:

[1] 彭世彰,朱成立.节水灌溉的作物需水量试验研究[J].灌溉排水学报,2003,22(2):21-25.

[2] 郑根昌,翟 祥,杨恒山,等.内蒙古西辽河平原农业气候资源持续利用途径研究[J].农业环境与发展,2001,4(70):31-33.

[3] 刘战东,肖俊夫,南纪琴,等.晋中地区不同灌水处理对春玉米形态指标、耗水量及产量的影响[J].西北农业学报,2011,20(10):43-48.

[4] 于 森,甄文超,王振宇,等.山前平原区夏玉米对水分和密度的响应[J].节水灌溉,2010,(9):11-14.

[5] 梁怀宇,杨恒山,刘 晶,等.1951—2008 年西辽河平原玉米气候生产潜力变化特征分析[J].中国农学通报,2011,27(30):16-20.

[6] 何俊仕,边晓东,付玉娟,等.西辽河平原主要作物耗水量及耗水规律研究[J].节水灌溉,2012,(11):1-4.

[7] 李淑文,于 森,杜建云,等.不同灌水处理下土壤水分动态及玉米水分利用效率研究[J].河北农业大学学报,2010,33(4):17-21.

[8] 田德龙,鹿海员,郭克贞,等.井渠双灌条件下玉米需水量研究[J].安徽农业科学,2013,41(9):3813-3816.

[9] 王仕新,刘作新,赵焕胤,等.辽西半干旱地区主要作物耗水规律的初步研究[J].生态学杂志,1997,16(3):11-18.

[10] 曹庆军,崔金虎,王洪预,等.玉米拔节后不同水分处理对植株性状和水分利用效率的影响[J].玉米科学,2011,19(3):105-109.