

Meteorological Grading Indexes of Water-saving Irrigation for Corn

Jingjing Xiao

Zhejiang Climate Center, Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou, 310017, China

Zhiguo Huo

Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China

Dapeng Huang

National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China

Fenfen Guo

The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou, 310012, China

Yan Jiang

Department of Emergency Response, Disaster Mitigation and Public Services, China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China

Gaofeng Fan

Zhejiang Climate Center, Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou, 310017, China

Youhao E, Caixia YU

Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China

Received 20 May 2013; accepted 27 June 2013

Abstract

To optimize irrigation and provide a technical guide on agricultural production, the water-saving irrigation meteorological grading indexes of different development stages of maize were built in this paper, based on the principle of farmland water balance, the theories of insufficient irrigation and regulated deficit irrigation, and by using multidimensional information including day-by-day meteorological data in 1961–2008 from 500 meteorological stations, soil moisture data in ten-day periods in 1993–2008 from 239 agro-meteorological stations (of which, the data in 1980–2008 came from 68 agro-meteorological stations), irrigation amount and yield data were collected to analyze the relationship between the moisture deficiency rates, the quantity of water deficit and yield reduction rates at sowing-jointing stage, jointing-heading stage, heading-mature stage and the whole growth stage of maize referring to the product-water function (FAO-1979). Results indicated that water-saving irrigation meteorological grading indexes from I – III levels of moisture deficiency rate and the quantity of water deficit (secondary indicators) were [10%, 25%), [25%, 40%) and $\geq 40\%$, corresponding to 1 – 2 irrigations ($600\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ each time), 2–3 irrigations and >3 irrigations for the whole growth stage of maize, respectively. For sowing-jointing stage, the indicators were [15%, 30%), [30%, 45%) and $\geq 45\%$, corresponding to 0.5 irrigation, 1 irrigation and >1 irrigation, respectively. For jointing-heading stage, the indicators were [15%, 30%), [30%, 45%) and $\geq 45\%$, corresponding to 0.5 irrigation, 1 irrigation and >1 irrigation, respectively. For heading-mature stage, the indicators were [15%, 30%), [30%, 50%) and $\geq 50\%$, corresponding to 1 irrigation, 1 – 2 irrigations and >2 irrigations, respectively. These indices could supply scientific support for the optimization of irrigation, and give guidance to agricultural production.

Key words: maize, water-saving irrigation, Meteorological index

玉米节水灌溉气象等级指标研究

肖晶晶¹, 霍治国^{2*}, 黄大鹏³, 郭芬芬⁴, 姜燕⁵, 樊高峰¹, 俄有浩², 于彩霞²

1.浙江省气候中心, 杭州 310017

Corresponding author: huozhigg@cma.gov.cn

基金项目：“十二五”国家科技支撑计划课题“重大农业气象灾害预测预警关键技术研究（2011BAD32B02）”、国家标准项目（20083116-T-416）

2.中国气象科学研究院,北京 100081

3.国家气候中心,北京 100081

4.国家海洋局杭州海洋工程勘测设计研究中心,杭州 310012

5.中国气象局应急减灾与公共服务司,北京 100081

摘要: 基于农田水分平衡原理、非充分灌溉理论和调亏灌溉理论,利用全国 500 个地面气象观测站 1961—2008 年逐日气象资料、239 个农业气象观测站 1993—2008 年(其中 68 个站为 1980—2008 年)逐旬土壤湿度,以及实际灌溉量、逐年作物产量等资料,结合 FAO-1979 作物水分-产量关系函数,分析全国玉米种植区播种-拔节、拔节-抽穗、抽穗-成熟和全生育期的水分亏缺率、水分亏缺量与减产率之间的关系,构建玉米不同发育期和全生育期节水灌溉气象等级指标。结果表明:玉米全生育期节水灌溉气象 I—III 级水分亏缺率和水分亏缺量(辅助指标)指标分别为[10%, 25%)、[25%, 40%)、 $\geq 40\%$ 和 1—2 水、2—3 水、 > 3 水;播种-拔节为[15%, 30%)、[30%, 45%)、 $\geq 45\%$ 和 0.5 水、1 水、 > 1 水;拔节-抽穗为[10%, 20%)、[20%, 35%)、 $\geq 35\%$ 和 1 水、1—2 水、 > 2 水;抽穗-成熟为[10%, 25%)、[35%, 40%)、 $\geq 40\%$ 和 0.5 水、1 水、 > 1 水。指标体系可以为优化农业灌溉、指导农业生产提供科学支撑。

关键词: 玉米;节水灌溉;气象指标

1. 引言

玉米是中国重要的粮食作物和饲料作物,其生育期耗水多且产量对水分亏缺的敏感指数较大。中国 95% 以上的玉米种植在华北、东北、西北等干旱和半干旱地区,水分不足一直是玉米高产、稳产的限制因素¹。干旱是目前影响中国玉米生产最主要的农业气象灾害,其发生的频率、强度都有增大的趋势,1997、1999 和 2000 年中国玉米因旱减产分别为 20.6%、11.4% 和 27.5%²。

农业干旱是指由于外界环境造成作物体内水分失去平衡而发生水分亏缺,影响作物正常生长发育,进而导致减产甚至绝收的一种农业气象灾害³。如何准确、定量评估农业干旱对产量的影响、农业措施的增产效应及投入产出成本优化配置,提升农田水分利用效率,对实现农业可持续发展,开展实时、有针对性的农业节水灌溉对策和措施的制定具有积极意义。中国气象、农业、水利部门对农业干旱的防灾减灾工作一直高度重视,但受国情因素限制,农业靠天吃饭的局面依然没有得到根本改变,干旱依然是制约中国粮食安全生产的最大自然灾害。目前中国农田灌溉水的有效利用系数仅为 0.5,远不及发达国家的 0.7—0.8⁴。如何提高农田水分利用效率,即探寻适宜灌溉时间、灌溉量的节水灌溉指标成为节水灌溉的关键问题。节水灌溉以非充分灌溉理论和调亏灌溉理论为依据⁵,其指标构建以土壤-植物-大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere Continuum,简称 SPAC)中的水分运移机理为基础,主要包括土壤水分指标、植物生理指标、综合效应评价指标等⁶⁻⁸,其中土壤含水率是节水灌溉最常用的指标之一,即基于土壤供水量来判定作物是否发生水分亏缺,通过土壤水分上、下限指标值合理安排灌溉时间和灌溉量来实现节水⁹⁻¹⁰。然而,由于资料获取难易程度、土壤水分参数差异,且现有的节水灌溉指标一般是通过田间试验得到,局地性较强。该类指标不仅推广应用难度较大,且难以与实时降水监测、未来降水预报进行耦合集成应用。目前试验获取指标主要针对作物全生育期,实际上不同发育期干旱对作物产量的影响不同,相同的旱情在不同时期进行灌溉的增产效应也有所差别。

本文在当前大田生产现状下,以农田水分平衡原

理、节水灌溉理论和水分敏感系数为基础,耦合地面气象观测、农业气象观测、作物产量、统计年鉴等多元信息资料,分析气象条件对玉米不同发育阶段水分亏缺率及其对减产率影响的量化关系,筛选导致玉米不同减产程度的水分亏缺临界指标、变化范围,构建节水灌溉气象等级指标。为通过对玉米不同发育阶段的需水规律及其当前时段作物水分亏缺率、亏缺量等的实时分析,结合未来 3 天的降水定量预报,进行区域节水灌溉气象等级预报,开展实时、有针对性地玉米节水灌溉气象服务提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1 资料来源

图 1 是论文气象与棉花研究站点分布图。

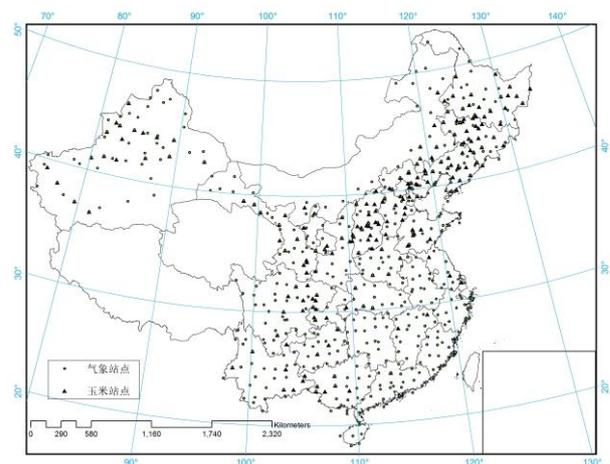


图 1 气象与玉米研究站点分布

气象资料、土壤湿度资料和作物发育期资料取自国家气象信息中心,气象资料包括 500 个站点 1961—2008 年逐日的气压(hPa)、降水量(mm)、最高温

度(°C)、最低温度(°C)、水汽压(hPa)、风速(m·s⁻¹)、日照时数(h)等,个别资料缺失值采用多年平均值代替。土壤湿度资料为239个农业气象观测站1993—2008年(其中68个站为1980—2008年)的逐旬土壤相对湿度、土壤水分常数等。作物发育期资料取自各地农业气象观测站,产量资料来自各地的统计年鉴。干旱资料来自《中国气象灾害大典·北京卷》和《中国气象灾害大典·天津卷》^{11,12}。

2.2 研究方法

论文从当前大田生产水平和管理水平出发,依据农田水分平衡和作物水分敏感系数,耦合气象、产量和灾情历史资料,分析不同年份下作物产量与水分的关系。计算玉米种植区不同年份下玉米播种—拔节、拔节—抽雄、抽雄—成熟和全生育期水分亏缺率、水分亏缺量及对应年份的减产率,按照自然灾害等级划分方法¹³,以减产率5%、10%和20%为界限点筛选导致玉米不同减产程度的水分亏缺临界指标、变化范围,构建玉米节水灌溉气象等级指标。囿于篇幅,论文以玉米全生育期的指标构建为例,具体说明玉米节水灌溉气象等级指标的构建和验证情况。

2.2.1 研究区域、样本的选择

选取站点遵循以下原则:①选取发生干旱、减产的年份,且减产率不少于3%;②选取灌溉能力有限的区域;因为灌溉能力强的区域,作物减产往往是由于病虫害、田间管理、其他气象灾害等多方面因素造成,干旱不是主要的减产因素;③选取灌溉能力强、干旱严重、有灌溉量记载的地区年份进行指标验证。

2.2.2 干旱减产致灾因子的识别

干旱减产是多个因子共同影响的结果,干旱减产致灾因子的识别是本论文首先要解决的问题。论文涉及灌溉资料、未灌溉或者少量灌溉资料和噪音资料等三部分资料。分析过程中须剔除噪音资料,分离灌溉资料,剔除涝渍害和干热风等非干旱原因为主而减产的噪音资料。灌溉资料即有记录的干旱年份资料,该部分资料作为验证资料单独处理。为此论文引入FAO-1979作物水分—产量关系函数式¹⁴和先验知识判断对数据进行初步识别。

2.2.3 发育期水分亏缺量/率的计算

基于实际生产的玉米不同发育期水分亏缺量/率的计算,采用参考文献15给出的综合考虑自然供水量、灌溉量和作物需水量的算法,计算公式如下:

$$Dz_j = W_{01} + \sum_{j=1}^m P_j + G_{Lj} - \sum_{j=1}^m E_j \quad (1)$$

$$D_j = \left(W_{01} + \sum_{j=1}^m P_j + G_{Lj} - \sum_{j=1}^m E_j \right) / \sum_{j=1}^m E_j \times 100\% \quad (2)$$

式中: D_z/D 为作物某发育期的农田水分盈亏量/率(mm%)。当 $D_z/D > 0$ 时,农田水分盈余,称为农田水分盈余量/率;当 $D_z/D < 0$ 时,农田水分亏缺,称为农田水分亏缺量/率。 W_{01} 为时段始第一天的土壤

有效底墒量(mm)。 P 为时段内的日降水量(mm)。 G_L 为当前发育期内的灌溉量。 E 为时段内的作物日需水量(mm),结合FAO-56推荐系数计算¹⁶,如表1。 j 为时段日数序号, $j=1,2,\dots,m$, m 为时段日数。

季初	发育	季中	季末	收获	生育期
0.3-0.5	0.7-0.85	1.05-1.2	0.8-0.95	0.55-0.6	0.75-0.9

表中:季初阶段为从发芽到覆盖10%的土地;作物发育阶段为从覆盖土地10%到覆盖土地80%;季中阶段为从覆盖土地80%到开始成熟;季末阶段为从开始成熟到收获。

2.2.4 水分亏缺率与减产率理论关系式的引入

FAO-1979年提出关系式¹⁴:

$$(1 - y / y_{max}) = k \cdot (1 - W / W_{max}) \quad (3)$$

式中: y 为作物实际产量; y_{max} 为作物最高产量; W 为作物实际水分供给量; W_{max} 为作物理论需水量; k 为产量反应系数。由于玉米全生育期的水分—产量响应系数为“1.25”¹⁷,当 $k=1.25$ 时,其水分—产量关系函数为一条斜率1.25的直线,则(3)式可变换为:

$$(1 - y / y_{max}) = 1.25 \times (1 - W / W_{max}) \quad (4)$$

在作物干旱减产年,作物实际产量低于其趋势产量,作物实际水分供给量低于其理论需水量;因此,可近似地取作物趋势产量为最高产量,作物需水量为理论需水量。则(4)式可变换为:

$$(y_{max} - y) / y_{max} = 1.25 \times (W_{max} - W) / W_{max} \quad (5)$$

(5)式左边为作物减产率,右边则为作物水分亏缺率。理论上可以认为在一定范围内二者近似存在上式的关系。通过比较二者的实际值与理论值的相似关系,可进行作物干旱减产年验证站点的合理选择、剔除非主要由干旱导致作物减产的异常站点,以及进行等级指标确定的合理性分析等。

需要说明的是,直线模型理论存在一定的缺陷,即在水分亏缺率超过作物忍受的范围时,也会获得相应的减产率。因此,在实际验证时,主要将其作为指标合理性的参照进行评价。

3. 结果与分析

3.1 玉米水分亏缺率等级指标

基于全国玉米产区逐站、逐年的水分亏缺率、减产率计算结果,筛选由干旱导致玉米减产且灌溉能力有限的站点和年份,表2和表3按照不同减产率等级给出了不同站点、不同年份春玉米和夏玉米全生育期水分亏缺率与减产率的对应情况。

玉米不同生育期水分亏缺敏感系数变化范围为[0.07, 0.55]¹⁸,不同发育期对水分亏缺反应不同,相同的水分亏缺造成减产率大小顺序为抽雄吐丝期>拔节期>苗期¹⁹,玉米高产节水试验也得到类似的结论⁶。

适宜的水分亏缺可增加玉米抵御干旱的能力。田间试验表明，苗期中度调亏、关键期轻度调亏下玉米产量和水分利用效率最高²⁰，而不适当灌溉甚至可能导致减产²¹。玉米耗水量与产量关系的研究表明，春玉米和夏玉米产量与生育期耗水量呈良好的二次抛物线关系（ $R=0.9277$ 和 $R=0.9479$ ）^{22,23}，表2、3数据二次函数拟合通过显著性检验（ $R=0.893$ 和 $R=0.834$ ），与该结论相符。由表2、3可以看出，减产率 $>20\%$ 、 $10\% - 20\%$ 和 $5\% - 10\%$ 对应春玉米和夏玉米样本水分亏缺率（ D ）的平均值分别为 50.28% 、 33.85% 、 16.79% 和 49.87% 、

32.84% 、 19.06% 。落在 $D \geq 40\%$ 、 $25\% - 40\%$ 和 $10\% - 25\%$ 区间内的样本分别占三个减产率区间内所有样本的 91.18% 、 64.29% 、 100% 和 77.78% 、 81.82% 、 75.00% ，落在对应 D 区间 $\pm 2.5\%$ 所占比率分别达 87.80% 、 52.63% 、 100% 和 63.64% 、 73.33% 、 75.00% 。按表2、3给出的玉米水分亏缺率等级区间，对全部站点、区间站点分别进行直线拟合（ $R=0.938$ 和 $R=0.980$ ），比较拟合直线与1.25理论线的平行关系，区间站点与理论线几近平行，表明构建的等级指标具有较好的合理性。因此，将指标阈值分别设定于 10% 、 25% 和 40% 。

表2 春玉米全生育期水分亏缺率与减产率的对应关系

减产率/%	站名	年份	亏缺率/%	减产率/%	站名	年份	亏缺率/%	减产率/%	站名	年份	亏缺率/%	减产率/%
5 - 10	白城	1980	17.53	7.63	沈阳	1972	15.99	6.59	营口	1965	10.69	5.83
	白城	1977	16.11	9.57	通辽	1995	14.11	7.40	右玉	1975	13.55	6.83
	朝阳	1999	29.33	5.69	通辽	1967	23.47	9.09	右玉	1994	14.08	8.30
	东胜	1979	14.16	6.41	围场	1980	20.29	5.54	原平	1970	11.15	8.27
	东胜	1989	21	9.05	围场	1981	21.9	6.63	彰武	1968	29.94	5.60
	河曲	1970	25.36	8.27	围场	1963	19.82	6.72	彰武	1973	10.11	7.79
	黄骅	1983	21.74	5.43	翁牛特	1995	15.13	9.85	彰武	1963	22.48	8.86
	泸西	1992	11.24	7.24	西峰镇	2005	12.28	5.30	隰县	2001	22.6	5.04
	洛川	2007	15.87	5.74	叶柏寿	1999	29.62	5.69	隰县	1971	16.67	7.65
	平凉	2006	13.36	5.57	叶柏寿	1988	19.46	8.42	延安	1986	17.47	6.97
	前郭	1973	17.51	6.13	扎赉特	2007	19.19	6.63	延安	2001	13.34	7.75
	前郭	1980	11.08	8.42	扎赉特	1977	22.72	7.11	延安	1995	28.73	9.78
	前郭	1992	21.26	8.84	扎赉特	1975	16.75	9.98				
	安达	1982	33.08	18.07	平凉	2000	36.28	12.72	阜新	1968	31.4	16.33
	10 - 20	白城	1968	35.51	12.86	泰来	1975	41.33	16.07	阜新	1981	35.63
朝阳		1980	30.26	13.23	泰来	1977	34.74	16.80	黄骅	1986	29.92	13.61
大同		1962	37.62	15.48	西峰镇	1969	35.62	19.16	介休	2000	35.15	15.05
右玉		1986	38.77	11.88	西峰镇	2000	29.14	12.38	开原	2000	28.93	16.84
彰武		2001	40.76	18.54	隰县	1994	29.4	12.14	临汾	1986	36.99	15.75
中卫		1976	42.63	16.90	叶柏寿	1961	36.72	16.42	平凉	1991	36.29	19.34
安达		2000	38.3	34.99	泰来	1968	54.53	37.94	阜新	2000	50.97	73.06
安达		2001	41.68	23.37	泰来	1972	56.02	39.77	阜新	2006	47.12	28.66
白城		1972	51.74	62.75	泰来	1982	44.27	31.75	河曲	1962	55.59	51.54
白城		1995	44.58	27.22	泰来	1995	44.11	23.53	河曲	1968	54	46.58
>20	白城	2000	42.49	41.66	泰来	2001	65.41	49.50	河曲	1974	50.65	29.67
	白城	2004	58.34	66.68	泰来	2004	60.32	23.89	河曲	2000	52.94	54.47
	大同	1972	50.24	24.16	焉耆	1967	76.22	86.47	黄骅	1997	46.4	31.74
	大同	1984	43.13	43.75	焉耆	1972	77.26	87.30	洛川	1997	58.78	27.52
	榆林	2006	46.23	24.38	延安	1997	39.1	21.49	前郭	1982	44.23	31.82
	榆社	1986	40.84	33.73	叶柏寿	1972	40.8	49.65	前郭	2004	38.14	24.62
	原平	1968	39.1	46.58	叶柏寿	1981	42.38	29.20	彰武	1982	45.73	37.40
	原平	1974	38.66	29.67	叶柏寿	2000	49.77	60.14	彰武	2000	47.96	63.32

表3 夏玉米全生育期水分亏缺率与减产率的对应关系

减产率/%	站名	年份	亏缺率/%	减产率/%	站名	年份	亏缺率/%	减产率/%	站名	年份	亏缺率/%	减产率/%
5 - 10	唐河	2001	22.44	9.53	房县	1997	13.62	7.99	唐河	1988	12.63	7.23
	西平	1992	31.17	9.16	正阳	1988	19.22	7.24	兖州	1997	27.6	8.76
	阆中	1997	14.35	6.13								
10 - 20	郑州	1997	49.57	19.85	通县	2003	39.69	13.79	黄骅	1999	31.03	15.00
	景县	1997	35.73	19.51	易县	2003	39.66	13.73	通县	2000	23.78	14.48
	静海	1999	50.82	19.48	黄骅	1992	29.45	12.24	唐河	1997	28.19	14.10
	三台	2006	28.38	18.47	隰县	1994	35.70	12.14	香河	2000	34.66	11.92
	正阳	1994	23.75	11.22								
>20	唐河	2001	22.44	9.53	正阳	1988	19.22	7.24	房县	1997	13.62	7.99
	西平	1992	31.17	9.16	唐河	1988	12.63	7.23	唐河	1992	22.70	4.30
	兖州	1997	27.60	8.76	阆中	1997	14.35	6.13				

由表4可以看出春玉米和夏玉米全生育期水分亏缺率指标阈值相同，播种-拔节、拔节-抽雄、抽雄-成

熟等发育阶段的指标构建也得到了同样的结论。因此，后文的辅助指标构建即论证将不再分开讨论。

表4 玉米全生育期水分亏缺率等级指标的回代验证情况

	水分亏缺率 (D) /%	减产率 /%	验证样本					
			D 区间			D 区间±2.5		
			吻合率 /%	亏缺率 平均值/%	减产率 平均值/%	吻合率 /%	亏缺率 平均值/%	减产率 平均值/%
春玉米	10≤D<25	5-10	100	16.79	7.35	100	17.04	7.38
	25≤D<40	10-20	64.29	33.85	16.54	52.63	34.39	18.33
	D≥40	>20	91.18	50.28	41.00	87.80	48.27	38.51
夏玉米	10≤D<25	5-10	75.00	19.06	8.52	75.00	19.06	8.52
	25≤D<40	10-20	81.82	32.84	13.53	73.33	31.50	13.55
	D≥40	>20	77.78	49.87	29.81	63.64	48.02	26.89

3.2 水分亏缺量等级辅助指标

玉米节水田间试验表明，在中等干旱或者水文年为75%的年份下，华北地区灌溉2水可以实现经济用水^{6,24}。由于灌溉定额与当地的土壤类型、水文情况等密切相关，故本文以灌水次数来表征灌溉量。参考华北地区的灌溉制度，按灌溉1水为600m³·hm⁻²，即每单位面积60mm计算¹⁸。

选取玉米生育期有旱情记录的京、津干旱较严重的年份（27个数据）。灌溉次数通过田间土壤水分平衡计算得到。参考国家标准《气象干旱等级GB/T 20481-2006》²⁵，季尺度降水距平25%—50%为轻旱，50%—70%为中旱，>70%为重旱。研究1982—2007

年的干旱、农田灌溉与减产率的对应关系发现重旱年份没有充分灌溉时减产率一般大于20%，中旱年份灌2—3水，轻旱年份灌溉1—2水。按照站点选取原则统计有灌溉记录的玉米站点如表5。由表5可以看出，水分亏缺1—2水、2—3水和>3水分别占3个减产率等级站点的80%、23.81%和75%。不同减产率等级对应的水分亏缺率平均值分别为55.90%、40.22%和19.62%，落在上文设定的D等级指标阈值范围内。对应等级区间缺水量的平均值分别为93、150和193mm。综上分析结果确定水分亏缺量等级辅助指标为轻旱1—2水、中旱2—3水、重旱>3水。

表5 玉米全生育期水分亏缺量等级回代验证情况

缺水量 /mm	缺水次数 /次	减产率 /%	资料样本			
			所占比率/%	平均值/mm	最小值/mm	最大值/mm
60-120	1-2	5-10	80	93	51	138
120-180	2-3	10-20	23.81	150	66	206
>180	>3	>20	75	193	148	236

3.3 基于实际灌溉的间接验证

为了验证上文得到指标的可行性，选取没有参与指标构建、灌溉条件好、有灌溉记载的地区的独立样本，通过计算无灌溉时的玉米生育期水分亏缺率和水

分亏缺量、统计对应年份的实际灌溉量与减产率样本（表6），进行实际生产验证。

表6 玉米全生育期水分亏缺率/量与实际灌溉量、减产率的验证样本

地区	年份	亏缺量/mm	亏缺率/%	灌溉量/mm	减产率/%	地区	年份	亏缺量/mm	亏缺率/%	灌溉量/mm	减产率/%
原阳	1997	315.97	72.43	240	-5.89	三台	2002	185.68	48.90	180	-3.96
夏县	2006	206.86	46.00	180*	6.48	静海	2007	122.34	33.32	120	0.430
夏县	2005	204.45	47.19	180*	14.54	静海	1999	186.46	50.82	120	19.480
夏县	2001	192.52	46.45	180*	11.70	黄骅	1993	113.17	30.45	120	5.85
夏县	2000	183.56	43.47	180*	7.83	岱岳区	2002	221.10	45.98	120	5.63
隰县	1997	386.77	70.94	180*	14.17	宝坻	1997	95.61	24.73	60	2.100
宝坻	1992	63.15	17.34	180	-0.530	原阳	1986	191.29	47.74	90	12.75
宝坻	1989	115.23	31.74	180	1.720	虞城	1997	203.85	50.24	60*	14.88
通县	1997	147.11	38.54	180	-2.17						

表6给出了玉米全生育期水分亏缺率、灌溉量与减产率的验证样本，按前文给出的玉米全生育期水分亏缺率等级指标，分等级统计落在不同灌水次数区间中

的样本数、以及灌溉后增减产的样本数。由表7可以看出：全生育期水分亏缺率等级为I级时，灌溉样本数2个；其中落在灌1—2水区间1个（吻合率50%）、灌2

-3水区间1个；灌溉后增产的1个、减产在5%以下的1个；灌溉减灾效果较好。全生育期水分亏缺率等级为II级时，灌溉样本数4个；全部落在灌2-3水区间（吻合率100%）；灌溉后增产的1个、减产在5%以下的2个、减产在5%以上的1个；灌溉减灾效果总体较好。全生育期水分亏缺率等级为III级时，灌溉样本数11个；其中落在灌1-2水区间2个、灌2-3水区间8个、灌>3水区间1个（吻合率9.09%）；灌溉后增产的2个、减产在5%以上的9个；灌溉减灾效果总体较差。其中1个灌>3水的样本，虽然水分亏缺率高达72.43%，灌溉后在

所有样本中增产幅度最大，达5.89%；由于少灌1水而造成减产率超过5%的为90.01%，其中减产率超过10%的达到54.55%，从反面说明指标的可行性（表7）。

综上，全生育期水分亏缺率等级为I级、II级、III级时，灌水次数分别以1-2水、2-3水、>3水。综合实际灌溉样本完全落在指标区间的吻合率、完全落在指标区间样本实际灌水后玉米增产或减产在5%以下的验证结果，表明论文构建的玉米水分亏缺率等级指标是合理的、可行的。

表7 基于实际灌溉的玉米水分亏缺率等级指标的回代验证情况

水分亏缺率/%	灌溉样本数	落在不同灌水次数区间中的样本数						灌溉后增减产的样本数		
		1~2水		2~3水		>3水		增产	减产 5%以下	减产 5%以上
		样本数	吻合率	样本数	吻合率	样本数	吻合率			
10≤D<25	2	1	50%	1		0		1	1	0
25≤D<40	4	0		4	100%	0		1	2	1
D≥40	11	2		8		1	9.09%	2	0	9

3.4 玉米节水灌溉气象等级指标

采用同样的方法构建玉米播种-拔节、拔节-抽雄和抽雄-成熟等不同发育阶段节水灌溉气象等级指标，结果见如表8。表8中玉米全生育期与不同发育阶段的指标上下阈值并不完全一致，这主要是由于不同阶段的需水量、水分亏缺敏感指数和“补偿和超补偿效应”不同造成的²⁶。Jensen模型研究表明，玉米拔节前发生水分亏缺并不直接影响作物籽粒的形成，该阶段的产量对水分亏缺反应的敏感指数较小，苗期旱后拔节期复水对产量补偿效应显著；拔节期以后，水分亏缺敏感指数上升较快，抽雄到灌浆阶段，产量水分亏缺敏感指数达到最大，且该阶段干旱复水补偿效应较小，

因此随着干旱加剧，减产呈高次函数变化¹⁸。水分胁迫并非全是负效应，前期适量干旱有利于玉米根系深扎健壮，提高后期水肥利用率，只有当水分亏缺率超过一定限度时，尤其是苗期、拔节期连续干旱时，会导致严重减产²⁶。因此该发育期水分亏缺率指标值较其他发育期略大。拔节-抽雄为玉米的水分关键期，因此III级指标下限要低于其他发育阶段。全生育期综合了各发育期的水分敏感系数、需水量等因素，I级下限与拔节-抽穗、抽穗-成熟下限相同、III级下限值在播种-拔节和拔节-抽穗的下限值之间是符合实际的。

表8 玉米节水灌溉气象等级指标

	水分亏缺率/%			水分亏缺量（辅助指标）		
	I级	II级	III级	I级	II级	III级
播种-拔节	15≤D<30	30≤D<45	D≥45	0.5水	1水	>1水
拔节-抽雄	10≤D<20	20≤D<35	D≥35	1水	1-2水	≥2水
抽雄-成熟	10≤D<25	25≤D<40	D≥40	0.5水	1水	>1水
全生育期	10≤D<25	25≤D<40	D≥40	1-2水	2-3水	>3水

4. 结论与讨论

全球变暖已经成为不争的事实。当温度上升 1—4℃时，玉米生长期内需水量将增加 1.7%—18.1%²⁷。节水灌溉是在水分供求矛盾日益加剧的背景下提出的与传统丰水灌溉相对的一种经济、可持续的生产方式，节水条件下玉米需水量可减少13%左右²⁸。节水灌溉气象等级因子是通过气象、农业、生物等综合因素反映作物生长期的水分亏缺程度，耦合土壤、作物、气象信息，以水分亏缺-减产率对应关系反映不同水分亏缺程度对产量的影响，从作物角度揭示农业干旱。研究表明，玉米不同生育期不同干旱方式和干旱程度对玉米生长发育和产量影响不同，不同生育时段对水分亏缺的敏感度差异很大，导致的减产程度也明显不同³；前期适度的水分亏缺利于玉米根系深扎稳健生长，利

于提高后期水肥利用率；水分关键期的水分亏缺敏感指数大，较轻程度的干旱也可能造成作物减产，抽雄-乳熟期的旱灾致灾风险明显高于其他生育期²⁹，基于水分盈亏指数的玉米生育期干旱风险分析也得出了类似的结论³⁰。

本次研究首次构建了适用于大田生产的玉米不同发育期和全生育期玉米节水灌溉气象 I—III级等级指标。研究遵循科学性、针对性、适用性、可行性的原则，依据农田水分平衡原理，通过对前人相关研究成果的综合比较分析，在充分考虑计算因子所涉及的数据资料的易获取性、计算方法的可操作性、实用性及普适性等的基础上，确定计算方法，并对其涉及的模型、指标、因子进行筛选、修正和调整，构建基于农业、气象、水文等多元信息的玉米不同发育阶段的节水灌溉气象等级指标。研究结论具有一定的普适性、空间和时间可比较性，为有效缓解农用水资源的短缺、

提高农田水分利用效率、实现作物节水增产提供技术支撑。论文的指标体系采用作物水分亏缺率, 基于该指标体系, 通过对玉米不同发育阶段的需水规律及其当前时段作物水分亏缺率、亏缺量等的实时分析, 结合未来 3 天的降水的定量预报, 评估分析区域节水灌溉气象等级预报, 实现分时段和滚动干旱监测、预警和响应, 为开展实时、有针对性的玉米节水灌溉气象服务提供科学依据。

实际生产中, 农田用水并不完全按照可供水量来计算, 必须考虑用水存在风险, 过度开采地下水来满足作物灌溉的生产方式是不可持续的³¹。本次研究结论从农业生产出发, 基于作物 FAO-1979 水分-产量关系函数得到, 主要考虑自然供水、人工灌溉对作物产量的影响。但受资料可获得等因素限制, 分发育期指标构建仍不够精细。研究中未考虑不同地区间土壤类型、根系发育、品种等差异, 在计算作物耗水量时统一采用了 FAO-56 推荐作物系数值; 在计算土壤有效底墒时采用平均状态下的根系发育情况; 有效降水文中采用降水量来计算; FAO-1979 产量-水分关系函数本文取干旱年份下的趋势产量来代替最高产量。此外, 有关结合当地实际灌溉能力、用水风险分析和指标细化等问题有待下一步研究。

参考文献

- L. Y. Hu and Y. F. Ding, *Crop Cultivation*, Beijing, Higher Education Press, 2008.
胡立勇, 丁艳锋, *作物栽培学*, 北京, 高等教育出版社, 2008.
- C. Y. Wang, X. R. Lou, J. L. Wang, Influence of agricultural meteorological disasters on output of crop in China, *Journal of Natural Disasters*, 16(5)(2007)37-43.
王春乙, 娄秀荣, 王建林, 中国农业气象灾害对作物产量的影响, *自然灾害学报*, 16(5)(2007)37-43.
- Z. G. Huo and S. L. Wang, *Agricultural and biological meteorological disasters*, Beijing, China Meteorological Press, 2009.
霍治国, 王石立, *农业和生物气象灾害*, 北京, 气象出版社, 2009.
- S. Z. Peng and X. L. Gao, Discussion on improvement of irrigated water use coefficient, *China Water Resources*, (1) (2012)33-35.
彭世彰, 高晓丽, 提高灌溉水利用系数的探讨, *中国水利*, (1) (2012)33-35.
- Y. D. Du, L. L. Song, Z. X. Liu, An overview on theoretic research on high efficient water use in agriculture, *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(5)(2003)808-812.
杜尧东, 宋丽莉, 刘作新, 农业高用水理论综述, *应用生态学报*, 14(5)(2003)808-812.
- B. Z. Zhang, G. X. Yin, X. Zhang, Determination of several water-saving irrigation indicators for wheat and corn with high yield in Guanzhong Irrigated Region, *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 29(5)(2009)142-145.
张柏治, 殷格侠, 张学, 关中灌区小麦、玉米高产节水灌溉的几个指标确定, *水土保持通报*, 29(5)(2009)142-145.
- D. S. Intrigliolo and J. R. Castel, Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum, *Agricultural Water Management*, 83(1) (2006)173-180.
- J. S. Wu, S. Z. Kang, J. L. Wang, Study on selection and gradation of the evaluation index of comprehensive effects in the water-saving irrigation, *Journal of Irrigation and Drainage*, 23(5)(2004)17-19.
吴景社, 康绍忠, 王景雷, 节水灌溉综合效应评价指标的选取与分级研究, *灌溉排水学报*, 23(5)(2004)17-19.
- S. Z. Kang, W. J. Shi, X. T. Hu, et al, Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 14(4) (1998)82-87.
康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 等, 调亏灌溉对玉米生理指标及水分利用效率的影响, *农业工程学报*, 14(4) (1998)82-87.
- H. J. Cai, S. Z. Kang, Z. H. Zhang, et al, Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 16(3)(2000)24-27.
蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等, 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究, *农业工程学报*, 16(3)(2000)24-27.
- K. G. Wen, P. Xie, *Disasters in China-Beijing*, Beijing, China Meteorological Press, 2005.
温克刚, 谢璞, *中国气象灾害大典-北京卷*, 北京, 气象出版社, 2005.
- K. G. Wen and Z. X. Wang, *Disasters in China-Tianjing*, Beijing, China Meteorological Press, 2005.
温克刚, 王宗信, *中国气象灾害大典-天津卷*, 北京, 气象出版社, 2005.
- S. S. Yang, Study on the model of grade division of natural disaster and comparison of disastrous conditions, *Journal of Natural Disasters*, 6(1)(1997)8-13.
杨仕升, 自然灾害等级划分及灾情比较模型探讨, *自然灾害学报*, 6(1)(1997)8-13.
- J. Doorenbos, A. H. Kassam, *Yield response to water*, *FAO Irrigation and Drainage Paper 33*, Princeton, Rome, FAO, 1979.
- Z. G. Huo and Y. Jiang, Risk analysis of water demand and supply of winter wheat in north China on irrigation, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 22(11)(2006)79-84.
霍治国, 姜艳, 基于灌溉的北方冬小麦水分供需风险研究, *农业工程学报*, 22(11)(2006)79-84.
- R G Allen, L SPereira, D Raes, et al, *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and drainage paper 56*, Princeton, Rome, FAO, 1998.
- G. L. Hou and S. B. Chen, Estimating the maximum yield of main crops in Wageningen method in the Loess Plateau, *Resources Science*, 12(4)(1990)30-39.
侯光良, 陈沈斌, 根据瓦赫宁根方法估算黄土高原地区一些主要作物最大产量, *自然资源*, 12(4)(1990)30-39.

18. Y. M. Chen, G. S. Guo, G. X. Wang, et al, *Mai crop water requirement and irrigation of China*, Beijing, China Water & Power Press, 1995.
陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等, *中国主要作物需水量与灌溉*, 北京, 水利电力出版社, 1995.
19. X. L. Bai, S. X. Sun, G. H. Yang, et al, Effect of water stress on maize yield during different growing stages, *Journal of Maize Sciences*, 17(2) (2009)60–63.
白向历, 孙世贤, 杨国航, 等, 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响, *玉米科学*, 17(2) (2009)60–63.
20. M. X. Wang, S. Z. Kang, H. J. Cai, et al, Study on the mechanism of saving water of regulated deficit irrigation in maize, *Journal of Northwest Science Technical University of Agricultural and Forum(Natural Science Edition)*, 32(12)(2004)87–90.
王密侠, 康绍忠, 蔡焕杰, 等, 玉米调亏灌溉节水调控机理研究, *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 32(12)(2004)87–90.
21. S. Q. Xu, J. Song, S. Y. Ning, Spring corn water requirement law and non–full irrigation sprinkler system exploration, *Saving Irrigation*, (3) (2002)11–12.
徐淑琴, 宋军, 宁少予, 春玉米需水规律及非充分灌溉条件下喷灌制度探索, *节水灌溉*, (3) (2002)11–12.
22. Q. Hou, J. G. Shen, Study on root development characteristics of spring maize and its relationships with canopy growth, *Act Ecological Sinica*, 21(9) (2001)1536–1542.
侯琼, 沈建国, 春玉米根系发育期特征与冠层关系的研究, *生态学报*, 21(9) (2001)1536–1542.
23. J. S. Sun, J. F. Xiao, J. Y. Zhang, et al, Yield–water relation and irrigation schedule of high efficient water use for summer maize, *Irrigation and drainage*, 17(3) (1998)17–21.孙景生, 肖俊夫, 张寄阳, 等, 夏玉米产量与水分关系及其高效用水灌溉制度, *灌溉排水*, 17(3) (1998)17–21.
24. Z. D. Liu, H. Z. Niu, Y. M. Jia, et al, Study on insufficient irrigation schedule of winter wheat and spring maize under different groundwater depth, *Water–Saving Irrigation*, (6)(2010)36–41.
刘战东, 牛豪震, 贾云茂, 等, 不同地下水埋深下冬小麦和春玉米非充分灌溉制度研究, *节水灌溉*, (6)(2010)36–41.
25. Q. Zhang, X. K. Zou, F. J. Xiao, et al. *Classification of meteorological drought GB/T20481–2006*, Beijing, Standards Press of China.2006.
张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等, *气象干旱等级 GB/T20481–2006*, 北京, 中国标准出版社, 2006.
26. F. Y. Li and Z. B. Huang, A study on compensatory effect on corn at different growth stages to water deficit change, *Chinese Journal of Eco–Agriculture*, 9(3)(2001)61–63.
李凤英, 黄占斌, 夏玉米不同生育阶段干湿变化的补偿效应研究, *中国生态农业学报*, 9(3)(2001)61–63.
27. X. Y. Liu and E. D. Lin, Impact of climate change on water requirement of main crops in north China, *Journal of Hydraulic Engineering*, 35(2)(2004)77–82.
刘晓英, 林而达, 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响, *水利学报*, 35(2)(2004)77–82.
28. S. Z. Peng and C. L. Zhu, Experimental research on crop water requirement under water–saving irrigation, *Journal of Irrigation and Drainage*, 22(2) (2003)21–25.
彭世彰, 朱成立, 节水灌溉的作物需水量试验研究, *灌溉排水学报*, 22(2) (2003)21–25.
29. H. C. Jia, J. A. Wang, D. H. Pan, et al, Maize drought disaster risk assessment based on EPIC model, A case study of maize region in Northern China, *Acta Geographica Sinica*, 66(5)(2011)643–652.
贾慧聪, 王静爱, 潘东华, 等, 基于EPIC模型的黄淮海夏玉米旱灾风险评估, *地理学报*, 66(5)(2011)643–652.
30. Y. F. Zhang, M. T. Wang, J. Liu, et al, Spatio-temporal characteristics of drought at different maize growth stages in Sichuan Province as determined by water budget index, *Chinese Journal of Eco–Agriculture*, 21(2)(2013)236–242
张玉芳, 王明田, 刘娟, 等, 基于水分盈亏指数的四川省玉米生育期干旱时空变化特征分析, *中国生态农业学报*, 21(2)(2013)236–242.
31. M. Li, P. Guo, Y. H. Yin, Optimization irrigation procedure and risk analysis of the main crops in Minqin Country, *Journal of Irrigation and Drainage*, 32(1)(2013)91–955.
李莱, 郭萍, 付银环, 民勤县主要作物优化灌溉制度制定及风险分析, *灌溉排水学报*, 32(1)(2013)91–955.