

有限供水条件下确定玉米灌水时间方法的研究

王乐天, 李炎*, 齐彦辉, 魏子棚, 冯思然, 李鑫哲, 杨林

天津农学院水利工程学院, 天津

收稿日期: 2023年3月29日; 录用日期: 2023年5月15日; 发布日期: 2023年5月26日

摘要

合理确定灌水时间是提高有限灌溉供水量利用效率的重要措施。本研究确定灌水时间的方法简称为K-M法与经验灌水法进行比较, 结果表明: 冬小麦复播玉米10年产量与效益的模拟结果表明, K-M法增产、增收效果具有波动性; 总体上来看, 灌水一次时, 增产、增收效果不明显, 二-四次灌水具有明显的增产、增收效果, 平均增产0.21%~10.08%, 平均增效1.95%~20.01%。夏玉米10年平均增产0.72%。K-M法具有一定的增产、增收效果。

关键词

灌水时间, 玉米, 增产

Study on Method of Determining Irrigation Time of Maize under Condition of Limited Water Supply

Letian Wang, Yan Li, Yanhui Qi, Zipen Wei, Siran Feng, Xinzhe Li, Lin Yang

College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin

Received: Mar. 29th, 2023; accepted: May 15th, 2023; published: May 26th, 2023

Abstract

The reasonable determination of the irrigation time is an important measure to improve the utilization efficiency of the limited irrigation water supply. The method of determining the irrigation time in this paper is abbreviated as K-M method and compared with the empirical irrigation method. The results show that the simulation results of the yield and benefit of the winter wheat and

*通讯作者。

the maize in 10 years show that the effect of the increasing production and income by K-M method is fluctuating. On the whole, the effect of the increasing production and income is not obvious when irrigation once. Two to four times of the irrigation has obvious effect on the increasing production and income. The average yield increase is 0.21%~10.08%, and the average efficiency increase is 1.95%~20.01%. The average yield of the summer corn increased by 0.72% in 10 years. K-M method has a certain effect of the increasing production and income.

Keywords

Irrigation Time, Maize, Increase Production

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

农业是我国用水最多的产业, 2017 年全国农业用水 3766.4 亿 m^3 , 占用水总量的 62.3%, 而农业灌溉水利用系数只有 0.54, 水资源的效率还很低, 不利于可持续发展[1] [2] [3] [4]。我国在相当长一段时间内, 水资源的供需矛盾尖锐, 农业可持续发展面临着严重的缺水危机。为了水资源的高效、可持续利用, 促进环境的发展, 发展节水灌溉和精准灌溉势在必行[5]。灌水方法和技术的选择, 以及合理灌水时间的确定是实现有限灌溉供水量高效利用的关键技术。

合理确定灌水时间是提高有限灌溉供水量利用效率的重要措施[6] [7]。依据作物生长过程和实时天气因素变化, 实时地、动态地确定灌水定额和灌水时间, 称为实时灌溉预报, 是确定灌水时间的重要方法。其中灌水定额主要依赖于灌水方法和田间灌水技术, 可以预先确定。灌水时间则更多地依赖于作物生长过程和实时的天气变化以及土壤含水率的预报, 充分灌溉条件下灌水时间确定的依据是通过大量试验和生产实践确定的以土壤含水率(或土壤水势)表示的适宜灌水下限值, 当作物根系层土壤含水率低于灌水下限值时即预报灌水。但是, 在有限供水条件下, 仍然采用传统的适宜灌水下限确定灌水时间, 可能使有限灌溉水量过多地集中于作物生长前期, 导致作物生长后期因缺水而严重减产。为此提出了动态灌水下限的概念, 认为灌水下限值不仅随作物生长发育时间变化, 还随可供灌溉水量变化, 据此建立了灌水下限值与作物生长时间和可供灌溉水量的关系[8] [9] [10] [11] [12]。荣丰涛(1986 年)利用作物水分生产函数和基于产量最大, 对于给定的灌溉供水量, 通过优化灌溉制度确定灌水时间[13]。崔远来等(1999 年)基于水分敏感指数累积函数方法, 以降雨量为随机变量, 灌水定额和灌水时间为决策变量, 采用随机动态规划的方法确定了水稻的优化灌溉制度[14]。王仰仁(2016 年)提出了动态灌水下限方法, 按照该方法确定的时间灌水[15]。但是基于土壤水分的方法往往需要大量传感器, 且由于年际间降雨量强烈随机变化特性, 有限灌溉供水量条件下, 干旱年份难以维持既定的灌水下限值。针对以上问题, 本研究依据作物蒸散量随灌溉供水量变化规律, 通过典型年灌溉制度优化, 给出不同灌水定额不同灌水次数条件下的优化灌水时间; 以优化灌水时间为依据, 分析确定相邻两次灌水之间(对于第 1 次灌水是指播种日到第 1 次灌水日之间)的累计蒸散量和累计有效降雨量的关系。基于该关系构建提出了灌水时间的方法, 称为蒸散量法(也称 K-M 法)。K-M 法优势在于考虑了年际间天气因素变化对作物生长及灌水时间的影响, 因此比经验法有显著的增产增收效果, 且本研究更好地提高蒸发蒸腾量与有效降雨量之间的关系精度, 从而更精准的确定灌水时间。研究表明, 采用动态灌水下限确定灌水时间较采用经验灌水时间有明显的增产增收效果,

平均增加产量 8%以上, 增加效益 12%以上。

2. 材料与方法

2.1. 试验区概况

霍泉试验站位于山西省临汾市洪洞县广胜寺镇东安村, 地理位置东经 111°46', 北纬 36°17', 海拔高程为 529 m。试验田面积 0.45 公顷, 井水灌溉, 试验田地面平整, 肥力均匀。该地所属气候为暖温带大陆性气候, 年平均气温 12.4℃, 年平均降雨量 439.3 mm, 年平均蒸发量 1420.5 mm, 年累计日照时数 1982.3 小时, 无霜天数为 204 天, 土壤质地为轻壤土, 土壤容重 1.46 t/m³, 田间持水量 24.6% (重量%), 地面纵坡 1/300, 孔隙率 46%, 地下水埋深为 4.0 m~5.0 m。

2.2. 研究方法

2.2.1. 典型年的选取

由于降雨量年际间和年内分布不均, 每年的灌溉需水量差异较大, 所以在进行灌溉制度设计的时候, 需确定一个特定的水文年作为规划设计的依据, 即: 典型年。根据历年灌溉需水量(作物潜在最大蒸发蒸腾量与降雨量的差值)从小到大进行排序, 做频率分析, 选择与频率 5%、25%、50%、75%、95%相同或相近的年份作为典型年。

2.2.2. 灌水时间的优化

灌溉制度优化是指在空间和时间上将有限的水量进行合理分配, 以实现最大的灌溉效益, 从而在有限供水条件下, 提高水资源的利用效率, 使农作物的产量最大化。作物水分生产函数是灌溉制度优化的核心, 本研究主要对灌溉时间进行优化, 因而针对不同的典型年给定了灌水次数与灌水定额, 采用规划求解的方法优化灌水时间。给定的灌水定额参照了田间经验, 选定 45 mm、75 mm 和 105 mm 三种, 规划求解时对于一种灌水定额分别在每一种典型年下逐次增加灌水次数, 当作物效益不再增大时, 停止优化计算。

目标函数:

$$\max B = p_{c1}y_1 + p_{c2}y_2 - \frac{10p_w mJ}{\eta} - p_3z_1 - p_4z_2 - p_5z_3 - C_1 \quad (1)$$

式中: B 为冬小麦复播玉米纯收益, 元/hm²; p_{c1} 为冬小麦价格, 取 2.26 元/kg; p_{c2} 为夏玉米价格, 取 1.7 元/kg; y_1 为冬小麦产量, t/hm²; y_2 为夏玉米产量, t/hm²; m 为全生育期灌水次数; J 为灌水定额, mm; η 为灌溉水利用系数, 取 0.5; p_w 为灌溉水价格, 取 0.6 元/m³; p_3 为冬小麦底肥的价格, 取 3.45 元/kg; p_4 为冬小麦追肥的价格, 取 2.97 元/kg; p_5 为夏玉米底肥的价格, 取 3.5 元/kg; z_1 为冬小麦生育期施底肥的数量, 施底肥 1050 kg/hm²; z_2 冬小麦生育期追肥的数量, 追肥 300 kg/hm²; z_3 夏玉米生育期底肥的数量, 施底肥 600 kg/hm²。冬小麦复播玉米整个生育期内其他成本包括机械费、种子费、投工费、收打费, $C_1 = 5550$ 元/hm²。

规划求解可变参数为灌水时间, 这里灌水时间以播种日算起的天数表示, 优化灌水时间选定了 7 组初始值, 包括经验灌水时间, 以及较经验灌水时间分别提前 10 天、20 天、30 天和推后 10 天、20 天、30 天灌水。

约束条件: 灌水时间变化上限为冬小麦复播夏玉米的生长天数之和(取为 355 天), 变化下限为在冬小麦种植后 15 天, 即

$$15 \leq t \leq 355 \quad (2)$$

而经验灌水法是指按照生产实践与许多的试验研究确定的灌水时间来进行灌溉的一种方法。本研究是以经验灌水法的灌溉时间段中的中间日作为经验灌水时间[1]。

2.2.3. K-M 法的构建

相对于以土壤含水率为指标的灌水下限，作物蒸散量是一个随供水量(降水量+灌溉水量)变化的值。根据农田水量平衡原理，在忽略根系层下界面水分通量的条件下，使时段末的土壤储水量等于时段初的土壤储水量，则该时段内作物累计蒸散量($\sum ET_i$)和累计有效降水量($\sum P_{fi}$)之间存在如下关系，

$$\sum ET_i - \sum P_{fi} = M \quad (3)$$

分析表明，在式(3)中引入可供灌溉水次数 J 的幂函数以及与 $\sum ET_i$ 同期参照作物蒸散量平均值(ET_0)的幂函数，可以显著提高式(3)的拟合精度(R^2)。这样式(3)可变为，

$$k \frac{J^{c1}}{ET_0^{c2}} \sum ET_i - \sum P_{fi} = M \quad (4)$$

式中， k 、 M 、 $c1$ 和 $c2$ 均为待定参数。

令， $KH^S = k \frac{J^{c1}}{ET_0^{c2}}$ ，并将式(4)中的“=”改写为“>”，可得[16]，

$$KH^S \sum_{i_{j-1}}^{i_j} ET_i - \sum_{i_{j-1}}^{i_j} P_{fi} > M \quad (5)$$

式中， $\sum_{i_{j-1}}^{i_j} ET_i$ 为相邻两次灌水期间(对于第 1 次灌水，是指播种日到第 1 次灌水)作物累计蒸散量(mm)， $\sum_{i_{j-1}}^{i_j} P_{fi}$ 为与 $\sum_{i_{j-1}}^{i_j} ET_i$ 同期的累计有效降水量(mm)，可通过玉米根系层水量平衡方程计算求得。 i_{j-1} 为第 $J-1$ 次灌水对应的灌水时间(d)，对于第一次灌水， $i_{j-1} = i_0$ ，表示播种日； H 为给定灌水定额条件下的可供灌水次数； K 、 M 、 s 为待定参数。

先令 $s = 0$ ，通过回归分析确定一组 K 和 M 的值，再以 $s = 0$ 和求得的 K 和 M 的值作为初始值，进行规划求解，即可得到待定参数 s 、 K 和 M 的值。然后根据式(5)确定灌水时间，即：当 $KH^S \sum_{i_{j-1}}^{i_j} ET_i - \sum_{i_{j-1}}^{i_j} P_{fi} \geq M$ 时，灌水，当 $KH^S \sum_{i_{j-1}}^{i_j} ET_i - \sum_{i_{j-1}}^{i_j} P_{fi} < M$ 时，不灌水。由于蒸散量是本方法中的主要驱动变量，因此，可将该方法称为蒸散量法。另外， K 和 M 为式(5)的两个核心参数，因此，本研究也将这一确定灌水时间的方法简称为 K-M 法。

3. 结果与分析

考虑到气象因素变化的随机性，选定了山西省临汾市 2009~2018 年 10 年的气象数据，采用 K-M 法确定灌水时间，模拟产量及效益，分析评价了相对于经验灌溉的增产增收效果。计算过程中，选定 45 mm、75 mm、105 mm 三种灌水定额，冬小麦复播夏玉米全生育期最多灌水 4 次。表 1~3 给出了 3 种灌水定额采用 K-M 法预测的灌水时间以及根据霍泉站多年试验资料统计确定的经验灌水时间。

Table 1. K-M method and empirical irrigation to determine irrigation timing (45 mm irrigation quotas) for winter wheat replanted summer maize fertility

表 1. K-M 法与经验灌溉确定冬小麦复播夏玉米生育期灌水时间(45 mm 灌水定额)

年份	灌水时间(以播种日算起的天数表示, d)			
	生育期灌水一次	生育期灌水二次	生育期灌水三次	生育期灌水四次
2009	70	61/189	52/180/200	45/176/197/213
2010	171	162/190	39/184/223	37/184/221

Continued

2011	57	49/163	45/162/194	43/162/193/210
2012	189	183/203	167/201/234	164/194/228
2013	158	158/194	55/162/193	50/158/186/207
2014	67	65/178	54/169/247	51/165/192/291
2015	162	50/162	46/162/212	44/162/210/240
2016	171	163/194	163/208/259	163/205/236/318
2017	80	69/162	163/193/304	163/192/226/328
2018	51	46/162	42/162/191	41/162/190/301

注：(1) 灌水时间为自冬小麦播种日开始的自然生长天数；(2) 经验灌水计划：1) 生育期灌水一次：195 天；2) 生育期灌水二次：55/218 天；3) 生育期灌水三次：55/195/298 天；4) 生育期灌水四次：55/165/218/298 天。

Table 2. K-M method and empirical irrigation to determine irrigation timing (75 mm irrigation quota) for winter wheat replanted summer maize fertility

表 2. K-M 法与经验灌溉确定冬小麦复播夏玉米生育期灌水时间(75 mm 灌水定额)

年份	灌水时间(以播种日算起的天数表示, d)			
	灌水一次	灌水二次	灌水三次	灌水四次
2009	199	70/208	61/198/207	61/196/213/312
2010	193	184/238	41/216/235	39/192/238
2011	68	56/196	51/182/201	47/168/198/216
2012	195	187/207	184/203/262	180/202/248
2013	182	162/197	158/193/209	158/186/201/221
2014	217	175/295	169/244/266	66/192/283
2015	197	162/232	52/179/232	48/164/218/263
2016	192	171/262	163/192/235	163/192/226/322
2017	162	162/241	162/225/301	162/221/277
2018	60	53/164	50/162/192	47/162/192/231

注：(1) 灌水时间为自冬小麦播种日开始的自然生长天数；(2) 经验灌水计划：1) 生育期灌水一次：195 天；2) 生育期灌水二次：55/218 天；3) 生育期灌水三次：55/195/298 天；4) 生育期灌水四次：55/165/218/298 天。

Table 3. K-M method and empirical irrigation to determine irrigation timing for winter wheat replanting summer maize fertility (105 mm irrigation quota)

表 3. K-M 法与经验灌溉确定冬小麦复播夏玉米生育期灌水时间(105 mm 灌水定额)

年份	灌水时间(以播种日算起的天数表示, d)			
	生育期灌水一次	生育期灌水二次	生育期灌水三次	生育期灌水四次
2009	199	184/220	177/213/312	174/209/268/314
2010	192	180/224	173/216/249	170/213/236
2011	195	179/218	168/210/234	164/202/231/287
2012	195	186/224	181/218/257	178/206/248/302
2013	193	174/218	162/207/233	158/199/225/343

Continued

2014	192	173/252	167/222/296	163/217/264/304
2015	197	165/227	162/212/249	162/210/238/286
2016	191	168/218	163/208/259	163/205/236/318
2017	162	162/222	162/213/245	162/210/238/278
2018	162	162/217	162/213/244	162/211/240/312

注：(1) 灌水时间为自冬小麦播种日开始的自然生长天数；(2) 经验灌水计划：1) 生育期灌水一次：195 天；2) 生育期灌水二次：55/218 天；3) 生育期灌水三次：55/195/298 天；4) 生育期灌水四次：55/165/218/298 天。

冬小麦复播夏玉米生育期 K-M 法、经验灌溉时的产量与效益模拟结果，并计算了 K-M 法相对于经验灌溉的增产、增效情况，见表 4。

Table 4. Comparison of K-M method with empirical irrigation for yield increase and efficiency enhancement (10-year average)

表 4. K-M 法对比经验灌溉增产增效(10 年平均)

灌水次数	45 mm 灌水定额		75 mm 灌水定额		105 mm 灌水定额	
	增产/%	增效/%	增产/%	增效/%	增产/%	增效/%
一	-0.63	-6.24	-1.73	-6.24	0.37	-6.24
二	6.49	12.61	6.12	16.23	7.62	23.99
三	1.47	6.19	0.21	1.95	5.85	7.32
四	2.32	7.20	2.26	7.29	10.08	21.01

由上表可知，根据水量平衡原理构建了 K-M 法模型，以作物水分生产函数为依据进行灌溉制度优化，利用灌溉制度优化的结果，采用回归分析的方法确定了模型参数。应用 K-M 法确定灌水时间，较经验灌溉具有增产增收效果。

综合分析，可得到以下结果：

1) K-M 方法结合作物水分生产函数，在确定灌水次数后，可以预测灌水时间。通过改变灌水次数，可得到由小到大的效益模拟结果，即通过该方法可预测每年的最优灌溉定额。

2) 两种灌水定额条件下，10 年产量与效益的模拟结果表明，K-M 法增产、增收效果具有波动性；总体上来看，灌水一次时，增产、增收效果不明显，二~四次灌水具有明显的增产、增收效果，平均增产 0.21%~10.08%，平均增效 1.95%~20.01%。

3) K-M 法预测一次灌水时，灌水时间同经验灌水时间接近；3 种灌水定额均在夏玉米产量模拟中有一定的增产效果，105 mm 定额增产比较大，主要原因为灌水定额较大，使夏玉米生育期土壤含水量较高。

4) 对比不同灌水定额条件下灌水时间的情况表明，两种灌水定额确定的灌水时间大体在一定范围内变化，表明 K-M 法确定的灌水时间在不同灌水定额间的差异不明显，这与三种灌水定额参数相似有所关联。

5) 采用灌溉预报测试的产量结果，夏玉米 4 年平均增产 3.84%；采用 K-M 法时，夏玉米 10 年平均增产 0.72%；该结果表明，K-M 法具有一定的增产、增收效果。

4. 讨论

1) K-M 法与经验法相比较，优势在于考虑了年际间天气因素变化对作物生长及灌水时间的影响，因

而有显著的增产增收效果;K-M法避免了依赖于田间试验的弊端,且考虑了蒸散量随供水量减小的特性,因而描述K-M法的模型有更高的拟合精度,更适合于限量供水条件下灌水时间的确定。

2) 以蒸散量为基础确定灌水时间的研究中,有只考虑蒸散量对灌溉的影响,忽略了土壤和作物本身因素的研究[11],有只适合于温室及膜下滴灌的研究[7][8],有以蒸发蒸腾量和土壤渗透系数来预测灌溉时间的研究[12]。以上方法均没有考虑有限供水对灌溉时间的影响。为了能更好地适用于限量灌溉,本研究引入可供灌溉水次数,更好地提高蒸发蒸腾量与有效降雨量之间的关系精度,从而更精准地确定灌水时间。

3) 基于确定K-M法参数的方法,提供了一种确定灌水时间的理论化方法,避免了传统灌水下限法单纯依赖田间试验的弊端,丰富了非充分灌溉理论。用K-M法代替以土壤含水率为指标的灌水下限法,可以适用于有限供水灌溉,也可用于充分供水灌溉,同时也可以将K-M法编程,植入灌溉控制器[10],实施自动化灌水。

5. 结论

由于降水量等气象因素变化的强烈随机性,在限量供水灌溉条件下,传统的确定灌水时间的灌水下限法不再适用。利用近十年气象资料做模拟计算,分析比较了本研究提出的确定灌水时间的K-M法较传统的经验法,具有增产增收效果。基于产量和效益等对两种确定灌水时间方法综合评价结果表明,K-M法确定灌水时间较更经验法为准确。

基金项目

天津市大学生创新创业训练计划项目。项目编号:202210061063。

参考文献

- [1] 王仰仁,孙小平. 山西农业节水理论与作物高效用水模式[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 杜娟娟,王仰仁,李粉婵. 基于动态灌水下限值的冬小麦非充分灌溉预报研究[J]. 节水灌溉, 2017(5): 93-97.
- [3] 赵颖,纪建伟,崔会坤,等. 基于作物蒸散量模型的新型滑盖温室智能灌溉系统设计[J]. 节水灌溉, 2017(8): 83-87, 91.
- [4] 张伶俐,王润涛,张长利,等. 基于调亏理论和模糊控制的寒地水稻智能灌溉策略[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 52-58.
- [5] 田强明,温宗周,李丽敏,等. 基于APSO-ELM和模糊逻辑的灌溉时间决策[J]. 中国农村水利水电, 2020(4): 124-128.
- [6] 张明岳,李丽敏,温宗周,等. 基于改进Elman神经网络和模糊控制的智能灌溉算法设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 155-160.
- [7] 顾哲,袁寿其,齐志明,等. 基于ET和水量平衡的日光温室实时精准灌溉决策及控制系统[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 101-108.
- [8] 杜江涛,张楠,龚珂宁,等. 基于DSSAT模型的南疆膜下滴灌棉花灌溉制度优化[J]. 生态学杂志, 2021(11): 3760-3768. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202111.030>
- [9] 王佳旭,王宏伟,姜文野,等. 不同种植方式对玉米干物质积累、分配和产量的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(5): 128-136.
- [10] 曲颂,刘玉敏,宋博,等. 自动灌溉控制器设计与实现[J]. 黑龙江大学工程学报, 2021, 12(4): 72-77.
- [11] Bartlett, A.C., Andales, A.A., Arabi, M. and Bauder, T.A. (2015) A Smartphone App to Extend Use of a Cloud-Based Irrigation Scheduling Tool. *Computers and Electronics in Agriculture*, **111**, 127-130. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.021>
- [12] 武开福. 基于调亏理论的小麦智能灌溉设计[J]. 水利技术监督, 2017, 25(3): 34-37.
- [13] 荣丰涛. 节水型农田灌溉度的初步研究[J]. 水利水电技术, 1986(7): 17-21.
- [14] 崔远来,袁宏源,李远华. 考虑随机降雨时稻田高效节水灌溉制度[J]. 水利学报, 1999(7): 40-45.

- [15] 王仰仁, 杜秀文, 张绍强. 限量供水条件下灌溉预报增产效益分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(12): 1-7.
- [16] 姚丽. 限量供水条件下精准灌溉技术集成效益分析[D]. [硕士学位论文]. 天津: 天津农学院, 2020.