

治黄基金项目

1990—003

黄河下游引黄灌区冬小麦 节水优化灌溉与增产效益分析

黄委会引黄灌溉局

一九九二年八月

治黄基金项目

1990—003

黄河下游引黄灌区冬小麦节水 优化灌溉与增产效益分析

黄委会引黄灌溉局

一九九二年八月

黄委会治黄技术开发基金项目
黄河下游引黄灌区冬小麦节水
优化灌溉与增产效益分析

项目负责人：周振民

报告编写：周振民

主要研究人员：周振民 占子胜 李强坤 程广瑜

崔淑芳

**黄河下游引黄灌区冬小麦
节水优化灌溉与增产效益分析**

目 录

一、引言.....	(1)
二、方法原理.....	(1)
三、土壤水分有效控制条件下冬小麦 节水灌溉与引黄用水量分析.....	(7)
四、节水增产效益分析.....	(9)
五、结论.....	(10)
六、参考文献.....	(11)

一、引言

黄河下游引黄灌区涉及河南、山东两省十五个地市,控制总土地面积7490万亩,耕地面积4513万亩,设计灌溉面积4254万亩,近年来实灌面积已达3000万亩。随着下游两岸工农业生产的发展,黄河水资源供需矛盾日益激化,直接威胁到下游两岸工农业生产的发展。而引黄灌区中农业灌溉是引黄用水的大户,约占总引黄用水量的百分之九十以上。因此,提高引黄灌区农业用水的生产效率,实行节水灌溉,是解决引黄灌区水资源缺乏和提高农作物产量的重要途径。而下游农业种植作物又以冬小麦为主,所以,解决好冬小麦的节水灌溉,是实现引黄灌区节水的关健。实现农业节水灌溉的措施与方法,主要可归纳为工程措施和软措施两大类,工程措施耗资巨大,难以大面积付诸实施,而软措施省钱且见效快,适宜广大引黄灌区推广应用。因此,本文结合下游引黄灌区实际条件,采用农田土壤水分的有效控制方法,对黄河下游冬小麦节水灌溉与增产效益进行了分析研究。所得结论可供下游广大引黄灌区规划建设发展中参考应用。

二、方法原理

本方法的基本原理是通过通过对麦田土壤水分生长状况及气象条件同步监测,根据小麦最佳耗水量、不同生长阶段耗水量的差异、小麦不同等级干旱的土壤水分指标、适宜的土壤水分指标、麦田水分动态平衡模型和干旱预报模型确定小麦的适宜灌溉期和灌溉水量。应用这种方法可充分利用土壤储水和自然降水,减少灌水次数。降低麦田水分的无效消耗,提高土壤水利用率,它既能保证小麦不受干旱影响,又能避免

滥灌造成的浪费,从而达到节水高产的目的。

1. 麦田土壤水分动态平衡方程

依据水分平衡原理,可得冬小麦土壤非胁迫水分储存量的动态方程为:

$$W(t) = W_0 + \sum_{i=1}^{t-1} P_i - 330 \int_0^{t-1} R_c(t) dt \quad (2-1)$$

式中: $W(t)$ 为 t 日土壤非胁迫水分储存量 (mm);

W_0 为初始水分储存量 (mm);

$\sum_{i=1}^{t-1} P_i$ 为第 t 日以前累积有效降水量 (mm);

$R_c(t)$ 为生育期内日耗水量比 (%);

$$R_c(t) = \frac{W_c(t)}{W} \quad (2-2)$$

式中: W_c 为全生育期耗水量 (mm);

$W_c(t)$ 为生育期内某一日耗水量 (mm);

公式 (2-1) 中的 330 (mm) 为正常年冬小麦耗水量。

为应用方便,公式 (2-1) 可变为递推形式

$$W(t) = W(t-1) + P(t-1) - 330R_c(t-1) \quad (2-3)$$

式中: $W(t)$ 和 $W(t-1)$ 分别为第 t 日和前一日的土壤非胁迫水分储存量 (mm);

$P(t-1)$ 和 $330R_c(t-1)$ 分别为前一日的有效降水量和作物耗水量 (mm);

如果 $W(t) > I_d$, (I_d 为干旱指标), 则说明土壤湿度为干旱指标以上, 不出现干旱; 如果 $W(t) < I_d$, 则出现干旱。

应用公式 (2-1) 和连续土壤水分资料, 可以计算出小麦生长期内逐日的麦田土壤非胁迫水分储存量, 并用以确定合理灌水方案。

2. 土壤水分干旱预报模型

应用麦田水分动态平衡方程计算麦田土壤非胁迫水分变化情况,需要连续的逐日土壤水分资料。但是,在生产实践中,如果采取先观测土壤水分,再利用公式计算非胁迫土壤水分含量,再依据干旱程度制定灌水方案,不仅费工费时耗资,而且有时往往会错过了灌溉的最佳时机,所以,生产中在某一时间内需要了解未来一段时间的土壤水分变化情况和干旱程度,即干旱预报。

(1) 潜在蒸散发量计算。

本项目采用了1979年经联合国粮农组织 (FAO) 修订过的彭曼 (Penman) 公式计算潜在蒸散量

$$E_{ro} = \frac{\frac{P_o}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} \cdot R_n + E_a}{\frac{P_o}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} + 1.00} \quad (2-4)$$

其中辐射差额项 R_n 的表达式为:

$$R_n = 0.75R_A \left(a + b \frac{n}{N} \right) - \sigma T_k^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_1}) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (2-5)$$

空气动力学项 E_a 的表达式为:

$$E_a = 0.26 (e_a - e_d) (1.00 + 0.54u) \quad (2-6)$$

式中:

E_{ro} —某个时段的 (通常为旬) 平均潜在蒸散
(mm/d);

P_o —海平面平均气压 (hPa);

P —台站平均气压 (hPa);

Δ —饱和水汽压在气温 T_a 时的斜率 (hPa/°C)

γ —干湿球湿度公式常数, 0.66;

R_A —大气边沿的短波辐射（以mm水计）；

n —时段内平均日照时间；

N —同期可照时间；

a, b —系数，在温带地区 $a = 0.18$, $b = 0.55$ ；

σT_K^4 —黑体辐射，以mm水计；

e_a —饱和水汽压（ $h p_a$ ）；

e_d —实际水汽压（ $h p_a$ ）；

u —2米高平均风速（ m/s ）；

本项目预报期间各参量的取值如下： Δ 、 σT_K^4 和 e_a 根据长期天气预报的旬平均温度决定， R_A 和 N 查表确定， n 、 e_d 根据未来降水过程对历年平均值进行订正， P 变化不大，可用历年值代替， u 可用历年风标高度风速 u_z 进行换算，公式为：

$$u = u_z \left(\frac{2}{Z} \right)^{0.2} \quad (2-7)$$

Penman公式比较完整的揭示了气象因子的综合作用，但由于它是在特定条件下（供水充足和浅草覆盖）建立起来的，所计算的潜在蒸散与农田实际蒸散有一定差距，通常需要订正，可用下式：

$$E_T = K \cdot E_{T0} \quad (2-8)$$

式中 E_T 为农田实际蒸散或称为作物耗水量（ mm/d ）， k 为订正系数，当下垫面完全符合Penmen公式所规定的条件时， $K = 1$ ，但实际上，一般农田不可能完全符合，其主要原因是植物覆盖度不同和土壤湿度不同，因而， K 值在不同土壤湿度，不同作物或不同发育期数值各不相同，覆盖度反映作物群体的大小，对蒸散影响很大，一般可用叶面积系数表示（ LAI ），根据试验资料，相对蒸散数值 K 与土壤实际水分储存量和叶面积系数的关系为：

$$K = -4.6708 + 0.9462 \ln W_a + 0.3351 \ln (LAI + 1) \quad (2-9)$$

式中 W_a 为土壤实际水分储存量 (mm), 如果用土壤非胁迫水分储存量 $W(t)$ 表示, 则:

$$K = -4.6708 + 0.9462 \ln (W_{(t)} + I_d) + 0.3351 \ln (LAI + 1) \quad (2-10)$$

式中 I_d 为干旱指标, 抽穗前为 167.4mm, 抽穗后为 160.2mm, 根据试验, LAI 随生长日数而变化:

$$LAI = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 + C_4 t^4 + C_5 t^5 \quad (2-11)$$

式中: t 为生长日数, C_0, C_1, \dots, C_5 为系数:

$$C_0 = -6.04 \times 10^{-1}; \quad C_1 = 4.0353 \times 10^{-2};$$

$$C_2 = 7.087 \times 10^{-1}; \quad C_3 = -2.5231 \times 10^{-5}$$

$$C_4 = 2.0269 \times 10^{-7}; \quad C_5 = -4.7598 \times 10^{-10};$$

C 值根据实测资料, 用回归计算的办求法求得, 本次计算相关系数为 0.95。

K 值确定之后, 即可用式 (2-8) 计算未来农田耗水量, 连续计算, 可得出以旬为时段的土壤水分子报方程如下:

$$W_{(T)} = W_{(T-1)} + P_{(T-1)} - 10K_{(T-1)}E_{T_0(T-1)} \quad (2-12)$$

式中: $W_{(T)}$ 和 $W_{(T-1)}$ 一分别为予报旬和前一旬旬初的土壤非胁迫水分储存量 (mm);

$P_{(T-1)}$ —前一旬有效降水量 (mm);

$K_{(T-1)}$ —前一旬相对蒸散值, 可由前一旬土壤湿度 $W_{(T-1)}$ 和叶面系数 LAI 求得:

$E_{T_0(T-1)}$ —前一旬平均潜在蒸散量 (mm/日);

通过逐旬输入未来气象要素和 LAI 的数值, 就可以递推予报下一旬旬初的土壤非胁迫水分储存量, 当 $W_{(T)} < I_d$ 时, 则出现干旱, 应当根据其程度进行灌溉。

表 2—1

陈垓灌区1989年10月至1990

年5月土壤水分预报成果表(深度0.8m) 单位: mm

年	月	日	予 报 值	实 测 值	绝 对 误 差	相 对 误 差 %
89年	10	8	153.0	154.5	-1.5	-0.97
		18	194.3	190.3	4.0	2.1
		28	209.6	205.6	4.0	1.9
	11	8	200.4	187.3	13.1	7.0
		18	188.7	182.6	6.1	3.3
		28	184.0	173.3	10.7	6.2
	12	8	178.0	171.9	6.1	3.5
		18	179.0	171.4	7.6	4.4
		28	234.1	223.4	10.7	4.8
90年	1	8	234.0	229.4	4.6	2.0
		18	231.0	226.5	4.5	2.0
		28	224.9	228.0	-3.1	-1.4
	2	8	217.0	205.0	12.0	5.9
		18	209.6	225.4	-15.8	7.0
		28	207.0	203.9	3.1	1.5
	3	8	199.0	216.0	-17.0	-7.9
		18	199.0	215.8	-16.8	-7.8
		28	187.0	197.4	-10.4	-5.3
	4	8	179.0	168.3	10.7	6.4
		18	142.0	143.5	-1.5	-1.0
		28	122.0	120.5	1.5	1.2
	5	8	92.0	88.9	3.1	3.1
		18	157.6	169.8	-12.2	-7.2
		28	141.0	150.1	-9.1	-6.1
平	均			±7.8	±4.2	

本文利用了1988年以来,山东省陈垓引黄灌区的土壤水,地下水和气象同步连续监测资料,并参考应用了黄河下游不同代表性地区的典型资料(如地理位置,高度等)。应用麦田水分动态平衡模型和干旱预报

模型,对黄河下游冬小麦的适宜灌溉期和合理灌水量进行了计算。

计算结果表明,预报值与实测值相比,绝对误差为 $\pm 7.8\text{mm}$,相对误差为 $\pm 4.2\%$,可见,其精度是可靠的,见表2—1。

三、土壤水分有效控制条件下冬小麦节水灌溉与引黄用水量分析

1. 灌水时期

(1) 冬小麦对水分反映的敏感时期

实验观测资料表明,小麦在抽穗至成熟阶段比拔节至抽穗阶段对水分的反应更敏感。即前者缺水减产的程度更大,例如在轻度干旱(40~55%)条件下,拔节—抽穗缺水减产8.4%,而抽穗—成熟缺水减产17.2%,当严重干旱条件下前者减产20.8%,后者减产34.4%,特别是在小麦开花期间对水分反应最为敏感,这时缺水会严重影响产量,水分轻度胁迫减产6%,严重胁迫减产63%,因此,抽穗开花期间一定要保证水分的充足供给,及时灌水。

(2) 灌水时期分析

小麦各个生育时期灌水,其效益的大小,往往受气候条件,灌水组合与灌水次数等因素影响,分析表明,小麦在足墒播种的条件下,土壤水分可以维持到翌年三月底至四月上旬不需灌水,土壤水分能保证小麦的正常生育,表现出缺水主要在抽穗到成熟阶段,陈垓引黄灌区观测资料表明,当播前底墒水为70mm时,9月上旬—12月上旬(冬前),降水为72.6mm,实际蒸散量83.8mm,土壤有效水分为58.8mm,此时不缺水,不需灌溉;12月中旬—2月下旬(越冬),降水为22.2mm,实际蒸散量38.9mm,土壤有效水42.1mm,此时不缺水,不需灌溉;3月上旬—3月下旬(返青);降水为15.7mm,实际蒸散量54.4mm,土壤有

效水3.4mm, 此时仍可不予灌溉, 4月上旬—4月下旬(拔节); 降水33.5mm, 实际蒸散量123.5mm, 此时缺水86.4mm, 应及时灌溉, 5月上旬—6月下旬(抽穗—成熟); 降雨55.2mm, 实际蒸散量155.5mm, 此时缺水100.5mm, 应及时灌溉。综上所述, 小麦全生育期内(9月下旬—6月下旬)如果降雨为199.2mm, 则应灌水量186.9mm, 折合每亩灌水量124.7立方米。

2. 麦田土壤水分有效控制条件下, 冬小麦节水灌溉引黄用水量分析。

根据黄河下游河南人民胜利渠、陈垓、泰安、章丘等灌区观测资料分析, 黄河下游冬小麦生长期, 可分三次灌水即播前水, 拔节—抽穗水, 抽穗—灌浆水, 每次灌水量60~75mm, 折合每亩灌水40~50立方米, 整个生育期内灌水量约为180/~225mm, 折合亩灌水量约为120~150立方米。

黄河下游现状小麦种植面积为2190.4万亩, 其中河南588.7万亩, 山东1601.7万亩, 按每亩灌水量150立方米, 水的利用系数0.4考虑, 则黄河下游以本方法为主要措施的节水条件下, 现状小麦引黄需水量为82.2亿立方米, 其中山东引黄需水量60.1亿立方米, 河南引黄需水量22.1亿立方米。也即自9月至翌年6月, 黄河下游小麦引黄灌溉需水量为82.2亿立方米, 其中河南22.1亿立方米, 山东60.1亿立方米, 灌水时间应为播前水, 拔节水与抽穗水。

同现状引黄灌区冬小麦灌溉用水量相比, 1989年黄河下游引黄灌区小麦种植面积2190.4万亩, 小麦生长期9月下旬—6月下旬实际引黄水量为109.5亿立方米, 由以上分析可知, 对农田土壤水分进行合理调控, 实现小麦优化灌溉, 可节水27.3亿立方米, 节水约25%。

四、节水增产效益分析

黄河下游泰安、章丘、陈垓等地灌水实验资料表明(观测实验时间为1988、1989、1990年),灌一次水的平均增产效果为74.2kg/亩,灌二次水的平均增产效果为89.1kg/亩,灌三次水的平均增产效果为99.9kg/亩,灌四次水的平均增产效果为87.1kg/亩,灌五次水的平均增产效果为63.6kg/亩,因而,从增加一次水的效果看,当浇水次数增加到4~5次时,浇一次水的增产效果显著降低。所以,以灌2~3次水的增产效果较好。

另外,根据山东省农业气象试验研究中心进行的小麦产量与耗水量关系分析结果如下:

产量 (kg/亩)	200~300	300~400	400~500	>500
耗水量 (mm)	240~280	280~350	350~460	>460

前面分析可知,小麦生育期内以灌三次水增产效果最佳,三次灌水总量为225mm。另外,据小麦生育期内有效降水和土壤有效水分分析结果,黄河下游平均土壤有效可供水分约为150mm,因此,加上灌水总量,小麦生育期内可供耗水量为375mm,由小麦产量与耗水量关系分析可知,此时,小麦亩产量可达400公斤以上,则黄河下游小麦总产可达87.6亿公斤以上。

同传统灌溉方法相比,1989年黄河下游小麦总产为57.7亿公斤,平均亩产为263.4kg/亩,实行优化灌溉后的小麦亩产比传统灌水方法增加136.6kg/亩,而总产可增加29.9亿公斤,若按每公斤小麦0.6元计,则可增加小麦产值17.9亿元。节水优化灌溉的小麦产量比传统灌溉方法

的小麦产量可增加51.8%，可节水24.8%，若将节水量用以扩大引黄灌溉，可增加引黄灌溉面积1820万亩，（按补源灌溉 $150\text{m}^3/\text{亩}$ 用水量计）若按1989年引黄量水平考虑，则可实现年引黄灌溉面积4800万亩以上，由此可见其社会效益是十分显著的。

五、结论

黄河下游引黄灌区小麦节水灌溉是实现旱作农业节水灌溉与增产，提高引黄灌溉的社会经济效益的重要内容。

本文通过对黄河下游人民胜利渠、泰安、陈垓、章丘、平原等地的麦田土壤水分、地下水、小麦生长状况以及气象情况同步监测资料，应用麦田水分动态平衡模型和干旱预报模型计算小麦的适宜灌溉期和灌溉水量，在对小麦需水量与产量的实际观测资料分析的基础上，对小麦节水灌溉与增产的效益进行了分析。应用这种节水灌溉技术，可充分利用土壤储水和自然降水，减少灌水次数，降低麦田水分的无效消耗，提高土壤水利用率，达到节水增产之目的。分析研究表明，在下游引黄灌区的小麦需水关键期灌1~2次水即可获得亩产300~350公斤，灌3次水可获亩产400公斤以上，本方法同其它传统方法相比，具有投资少，灌水合理，及时准确地发现旱情和早期预报旱情，适时适量地灌水，节水高产，适合大面积推广，效益规模大，对促进下游引黄灌区农业节水增产具有十分重要的意义。

本方法可以说是农业节水增产的软技术措施，且以农业气象的方法手段为途径。当然，要进一步提高农业产量，还要有水利工程措施，灌溉技术，农业措施（如种子、施肥、植保）等与之配合，实行系统性节水灌溉措施。但在目前工程建设资金投入尚难以达到要求的条件下，推广应用该项技术，无疑对提高引黄灌区旱作农业节水增产效益有着重要

的作用。

六、参考文献

1. 高产小麦的节水优化灌溉
山东农业大学副教授亓新华
2. 小麦优化灌溉技术特点及推广情况
中国气象科学院农业气象研究中心
3. 陈垓引黄灌区土壤水分观测资料汇编
陈垓引黄灌区节水研究课题组
4. 河南省冬小麦优化灌溉技术推广应用
河南省冬小麦优化灌溉协作组