

■ 李建民 周殿玺 王 璞 兰林旺 等著

冬小麦水肥高效利用 栽培技术原理

DONG XIAO MAI
SHUI FEI GAO XIAO
LI YONG
ZAI PEI JI SHU YUAN LI

■ 中国农业大学出版社



冬小麦水肥高效利用栽培技术原理

李建民 周殿玺 王 璞 兰林旺 等 著

中国农业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

冬小麦水肥高效利用栽培技术原理/李建民, 周殿玺等著. —北京: 中国农业大学出版社, 2000. 10

ISBN 7-81066-299-6

I. 冬… II. ①李… ②周… III. 冬小麦-栽培 IV. S512.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 54647 号

出 版 中国农业大学出版社
发 行
经 销 新华书店
印 刷 北京丰华印刷厂
版 次 2000 年 11 月第 1 版
印 次 2000 年 11 月第 1 次印刷
开 本 16 印张 16.75 千字 410
规 格 787×1 092
印 数 1~1 050
定 价 36.00 元

内 容 提 要

本书是中国农业大学在河北省沧州市吴桥试验站执行国家“八五”、“九五”科技攻关研究的主要成果汇编。本书从冬小麦生长发育、物质积累与分配、群体结构与产量形成等角度,研究分析了提高冬小麦水分利用效率和氮素利用效率的关键技术及其基本原理。本书可供从事农学、土壤、植物营养等方面研究的科技工作者和大专院校师生参考。

序 言

目前,我国大部分集约农区,都不同程度地存在着水资源不足和氮素污染的问题,如不加以重视任其发展,不仅将影响到种植业的持续发展,也必将影响到当地的经济发展和人民安康。

在华北平原,冬小麦种植面积最大,消耗灌溉水和氮肥最多。冬小麦能否节水、省肥,对合理利用资源和保护环境具有决定性的影响。

传统的高产栽培,通常是以满足作物的水、肥需求为基础的。在冬小麦高产区,经常出现灌水4次、5次,灌水量超过300 mm,施肥3次、4次,施氮量超过300 kg/hm²的情况。能否在实现冬小麦高产的同时,做到既节水又省肥,已成为农学学科的重要课题。

中国农业大学在河北省沧州市吴桥试验站,经过“八五”、“九五”10年的攻关试验研究,圆满地完成了这一课题的研究,并创立了冬小麦节水省肥高产栽培技术体系。采用这一技术体系,冬小麦只要灌水2次,灌水量不超过150 mm,施肥1次,施氮量不超过225 kg/hm²,产量就能基本稳定在7 500 kg/hm²以上。

冬小麦节水省肥高产的实现,就技术而言是优化和完善各项农艺措施的结果,就原理而言是控制麦田生态系统资源损失、提高资源利用效率的结果。本书以论文集的方式,从多个角度对上述技术和原理进行了分析和总结。

借本书出版之际,衷心感谢沧州市和吴桥县政府对本项研究的支持,感谢吴桥试验站全体工作人员为研究工作提供的方便。同时,在历经10年的攻关研究中,除中国农业大学作物学院的有关师生外,本校资源与环境学院等单位的多位师生参与了本项研究,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,书中错误和不当之处实属难免,恳请读者不吝批评指正。

著 者

2000年10月

目 录

第一部分 节水技术原理

冬小麦节水高产栽培技术及其生理基础的研究

..... 李建民 王璞 周殿玺 兰林旺 王树安 (8)
冬小麦灌溉制度对土壤贮水利用的影响 李建民 王璞 周殿玺 兰林旺 (17)
灌溉制度对冬小麦耗水与物质积累的影响 王树安 李建民 周殿玺 李绪厚 (24)
灌溉制度对冬小麦库容量与产量物质来源的影响 兰林旺 李建民 周殿玺 鲁来清 (32)
灌溉制度对冬小麦耗水和产量的影响 李建民 王璞 周殿玺 兰林旺 (39)
限水条件下小麦根系发育对土壤水分吸收利用的影响

..... 王璞 周殿玺 李建民 兰林旺 (45)

不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究

..... 居辉 兰霞 李建民 周殿玺 苏宝林 (50)
不同灌溉制度对冬小麦花后叶片光合特性的影响 ... 居辉 戴惠君 梁振兴 周殿玺 (57)
不同时期低额灌溉的冬小麦耗水规律研究 居辉 戴惠君 周殿玺 苏宝林 (62)
不同时期灌溉对冬小麦物质积累与分配的影响 居辉 兰霞 周殿玺 兰林旺 (69)
冬小麦节水高产栽培技术途径及其分析 李建民 王璞 周殿玺 (75)
冬小麦节水高产栽培的生理基础 李建民 王璞 周殿玺 兰林旺 (80)
不同类型土壤对冬小麦耗水特征的影响 郭启太 李建民 苏宝林 秦耀东 周殿玺 (88)
土壤质地对冬小麦生长发育与水分利用效率的影响

..... 李建民 郭启太 苏宝林 秦耀东 周殿玺 (93)

三种小麦节水高产灌溉模式多年产量结构的分析

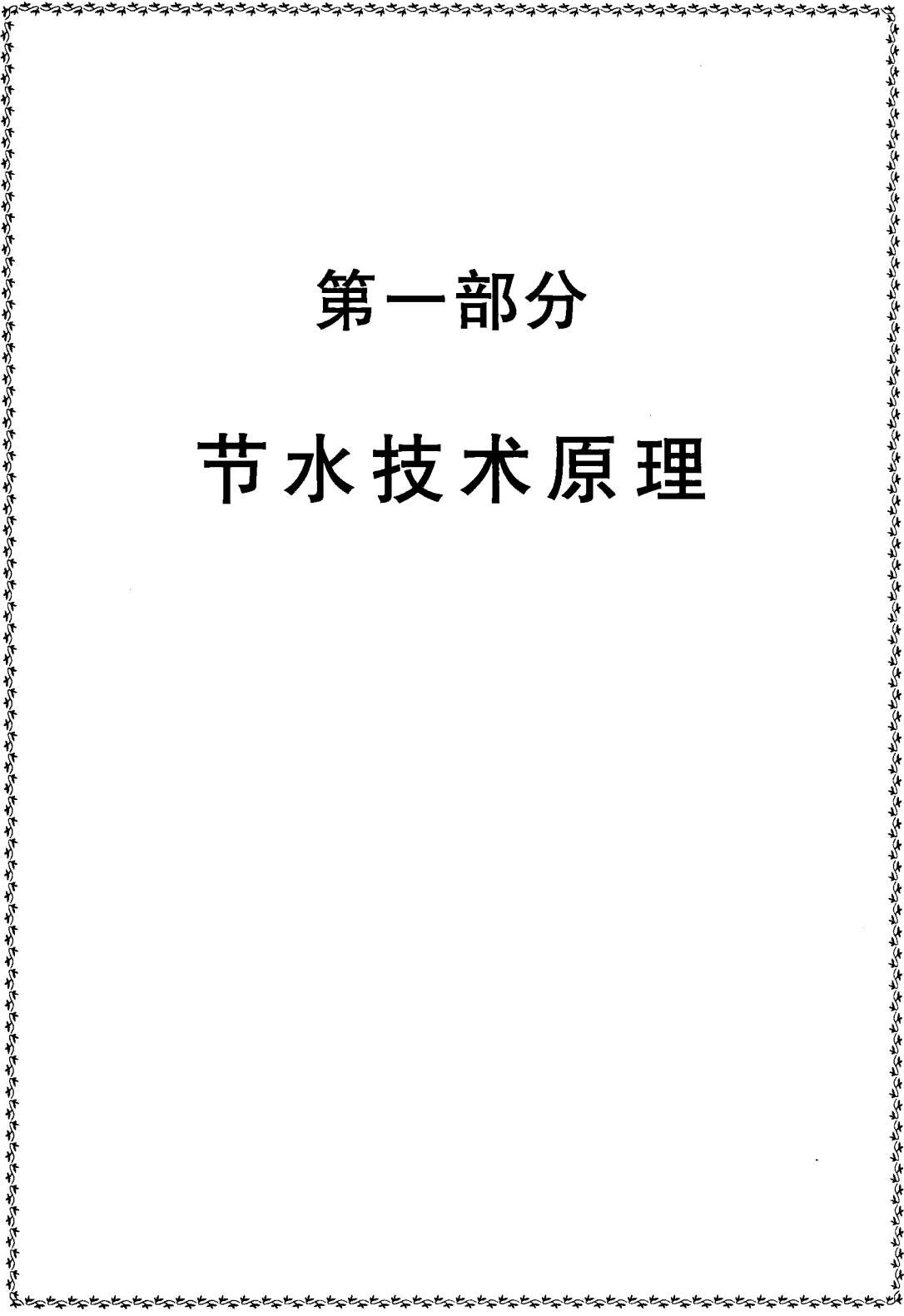
..... 薛绪掌 于国建 王润正 鲁来清 (101)
吴桥节水高产模式中全年土体水分的动态观测 薛绪掌 秦耀东 王坚 (106)
Study on Sustainable Production System with High-yielding and Water-saving Cultural Practice Wang Pu Li Jianmin Zhou Dianxi Lan Linwang (112)
An Improved Water-use Efficiency for Winter Wheat Grown Under Reduced Irrigation ... Jianhua Zhang Xiangzhen Sui Bin Li Baolin Su Jianmin Li Dianxi Zhou (116)

第二部分 节水条件下的省肥技术原理

节水条件下提高冬小麦氮素利用效率的研究——冬小麦节水省肥

研究技术报告 李建民 周殿玺 兰林旺 李绪厚 鲁来清 (131)
冬小麦限水灌溉条件下氮肥施用制度的研究 I. 氮素的积累与 分配 李建民 李世娟 周殿玺 兰林旺 (159)

冬小麦限水灌溉条件下氮肥施用制度的研究 II. 土壤硝态氮变化与氮素平衡	李建民	李世娟	曾长立	李绪厚	王润正	(168)
冬小麦限水灌溉条件下氮肥施用制度的研究 III. 产量形成与资源利用效率	李建民	李世娟	周殿玺	鲁来清	于国建	(175)
不同施氮水平对土壤无机氮变化的影响	曾长立	李建民	李世娟	王兴仁	张福锁	周殿玺 (183)
不同施氮水平对冬小麦氮素积累、分配与利用的影响	李世娟	李建民	曾长立	周殿玺	王润正	于国建 (191)
节水灌溉条件下冬小麦氮肥施用量及运筹方法研究	李世娟	李建民	周殿玺	兰林旺		(197)
不同小麦品种产量及氮素利用的差异	李世娟	鲁来清				(203)
限水灌溉条件下不同氮肥用量对小麦产量及氮素分配利用的影响	李世娟	李建民	周殿玺			(207)
限水灌溉条件下冬小麦肥料氮利用研究	李世娟	李建民	王璞	李绪厚		(214)
灌水处理对物质生产与氮素积累的影响	李建民	彭根元	李冰	周殿玺		(221)
限水灌溉和不同施肥方式对冬小麦旗叶某些光合功能的影响	张其德	张建华	刘合芹	李建民		(227)
不同基因型冬小麦氮磷钾吸收利用差异及其水分效应	王璞	戴惠君	李建民	周殿玺	兰林旺	(235)
冬小麦限水灌溉条件下磷肥补偿效应的研究	李建民	兰霞	王璞	周殿玺	张建华	(244)
不同灌溉制度下磷肥效应的研究	周殿玺	李建民	王璞	兰林旺		(249)
灌水与施磷对冬小麦物质积累和产量形成的影响	兰霞	李建民	王润正	周殿玺		(254)



第一部分

节水技术原理

冬小麦节水高产栽培技术及其生理基础研究

李建民 王璞 周殿玺 兰林旺 王树安

(中国农业大学, 北京 100094)

摘 要 中国农业大学在严重缺水地区河北省沧州地区吴桥实验站, 通过多年的试验研究, 形成了一套冬小麦节水高产栽培技术体系。其主要特点是: 适时晚播、增加密度、集中施磷、控制作物前期耗水, 建立个体小、群体大、种子根数多、单穗根量大的冬小麦合理群体, 提高植株利用土壤贮水、特别是深层土壤水分的能力, 生育中后期限量灌溉增加光合产物积累, 提高经济系数和水分利用效率。以本套技术为依托, 不仅水分利用效率可提高到 1.5 kg/m^3 以上, 而且在灌足底墒水的基础上, 春后不灌水、灌一水和灌二水的三种模式, 产量分别可达 $5\,250 \sim 6\,000 \text{ kg/hm}^2$, $6\,000 \sim 6\,750 \text{ kg/hm}^2$ 和 $6\,750 \sim 7\,500 \text{ kg/hm}^2$, 至少可较现行的灌水制度节约灌溉水 $75 \sim 150 \text{ mm}$ 以上。

关键词 冬小麦 节水 高产 栽培 生理基础

1 引言

我国是一个水资源紧缺的人口大国, 人均占有 $2\,627 \text{ m}^3$, 亩均占有 $1\,378 \text{ m}^3$, 分别为世界平均水平的 $1/5$ 和 $2/3$ ^[1]。我国旱区面积约占总国土面积的 74% , 其中东北、华北、西北的旱区面积约占总国土面积的 47% , 都超过了各区土地面积的 80% ; 特别是华北这一比例达到了 94% , 是我国旱区面积比重最大的地区^[14]。加上受季风气候的影响, 我国北方的降水主要集中在夏季, 如华北平原 $6 \sim 8$ 月份的降水量为 $350 \sim 500 \text{ mm}$, 占到年降水量的 70% , 而冬春两季干旱少雨, 这样就进一步加剧了水资源的紧张状态。据统计, 我国有 7 亿亩农田受到旱灾威胁^[27], 北方旱灾面积每年都有 2 亿 ~ 4 亿亩, 其中成灾面积达 1 亿亩左右^[14]。总之, 水资源紧缺已严重威胁着我国旱区农业的持续发展, 因此加强节水农业的研究, 发展节水型农业, 既是一项长期的、重要的战略任务, 又是一个刻不容缓的问题。

节水农业是一项农业、水利技术紧密结合, 水、土、作物资源综合开发的庞大的系统工程。农业用水的水源有降水和灌水, 从水源到形成作物产量, 在降水、地下水、地上水、土壤水、作物水转换和运行中有三个环节: 第一, 灌水或降水转化为土壤水; 第二, 土壤水转化为作物水; 第三, 作物在形成经济产量过程中的作物水利用效率^[15]。农业用水效率低, 原因是上述三个环节无效消耗大。因此, 减少输水损失, 提高水源转化为田间土壤水的比例; 减少稗间蒸发, 提高土壤水转化为作物水的比例; 和减少无效蒸腾、提高作物水利用效率就成了发展节水农业的关键。

减少输水损失依赖于改善工程、设施条件和提高管理水平, 而减少田间蒸发和提高作物水利用效率依赖于发展节水农业技术。在华北平原等浅层水灌溉区, 通过推广“小白龙”等

管道灌溉技术,输水过程中的损失已经非常有限,因此节水的潜力主要在节水农业技术方面。节水的农业技术可包括适水种植、抗旱育种、节水灌溉制度和蓄水保墒等多个方面^[15],其中适水种植受到农业结构和作物布局的制约,抗旱育种受到产量指标的限制,因此可以说研究发展节水灌溉制度和蓄水保墒技术是发展节水农业的关键。在华北平原,小麦是主要的粮食作物,且又生长在旱季,是需要灌溉水最多的作物,约占到总灌溉用水的70%^[10]。因此,小麦能否节水是华北平原农业节水成败的关键。

2 冬小麦节水高产栽培技术

在华北平原,冬小麦生长期内的降水量均不能满足其生长发育的需要^[17],因此灌溉补水是保证冬小麦高产的重要基础。传统的小麦高产栽培技术,通常是以满足小麦各生育期的肥水需求为基础的,因此生产中常见到冬小麦生育期内灌4水、5水甚至6水、7水以上的情況^[30,37]。灌溉次数多、灌水量大,就难以诱发作物产生利用土壤贮水、特别是深层土壤水的能力^[2,20,32],从而造成水资源的浪费。因此,冬小麦要节水,必须首先确立灌溉标准,建立节水灌溉制度,减少灌溉次数,提高土壤贮水的利用效率^[20,30,32,36,37]。

要发挥冬小麦利用土壤贮水的能力,就必须给作物提供一个水分胁迫的土壤环境^[32],而水分胁迫又往往会造成一定程度的减产,成为冬小麦高产的重要障碍^[8,17,30]。因此,在研究节水高产时,往往会面临一些具体的目标问题^[33],即是追求最高产量还是最高边际效应(灌水的增产效应),是追求最小耗水量还是最高水分利用效率(WUE)的问题。作者认为:节水高产的研究应该以提高水分利用效率为最终目标,水分利用效率的高低是比较研究水平的主要指标。但这必须有一个前提或原则,即在一些水资源、特别是冬小麦可用水资源不太明确的地区,水分利用效率应该建立在完成某个产量指标之上;而在一些水资源比较明确的地区,水分利用效率则应该建立在某一耗水量指标之上。尽管是从理论上还是从实践上大都可证明节水和高产是一对矛盾,但在上述前提下两者应该是能达到统一的。

在以往的节水研究中,节水灌溉制度一直是研究的主要内容。在河南偃师、新乡进行的节水灌溉试验^[26]表明:在降雨87.9~167.7 mm的基础上,于小麦越冬前和孕穗期前或后各灌一水(每次灌水量为45~51 m³/亩),平均单产达到411.18 kg,仅较灌四水的对照减产2.4%,而平均耗水量为376.7 mm,较对照节约130.2 mm,水分利用效率为1.09 kg/mm·亩。山东农业大学通过试验,提出冬小麦灌水2~3次,灌水量低限80~115 mm,高限125~180 mm的节水灌溉方案,试验中450 kg/亩以上的高产小麦水分利用效率也达到了1.01 kg/mm·亩^[19]。除了节水灌溉制度的研究外,在农田蓄水保墒技术^[11,38],如秸秆覆盖、地膜覆盖、深耕免耕、抗旱剂和以肥调水技术^[4,24,53]等方面也有一些研究,并有一些提高产量和水分利用效率的报道。另外在国外,较多的研究主要集中于两个方面,一是根据小麦耗水量来研究确定喷灌次数和灌溉量^[48],二是根据作物和土壤的水分状况等,利用计算机建立模型来研究确定灌溉时期和灌溉量^[51],而国内尚未见类似研究报道。

从冬小麦产量形成的角度看,提高作物蒸腾效率和经济系数也是提高水分利用效率的一个重要方面^[5]。因此,节水高产栽培技术除了节水灌溉、蓄水保墒和以肥调水等技术外,还应包括建立节水高产冬小麦群体和个体机制的栽培技术。据于上述认识,中国农业大学经过在河北沧州地区吴桥实验站的多年研究,形成了一套冬小麦节水高产的技术体系。这套技术主

要包括以下内容：①足墒播种，通过灌底墒水把土壤贮水调整到田间持水量的 90% 左右，一般年份每亩灌水 50 m^3 (75 mm) 左右；②选用早熟耐旱多花中粒型品种，提高小麦生长后期条件不良时的高产稳产性；③适时晚播，以利于减少小麦冬前耗水量，保证夏玉米充分成熟；④增加基本苗，用以弥补因晚播和拔节前上层土壤水分亏缺对穗数的不利影响；⑤集中施用磷肥，提高植株吸收深层土壤水分的能力；⑥播后暄土，春后灌水后及时松土，以利于减少稗间蒸发耗水；⑦春后灌水时间，春后一水制从起身期至孕穗期，二水制以起身水配孕穗水或拔节水配开花水；⑧土壤类型，适于砂壤、轻壤和中壤等贮水量大、供水性好的土壤。有关节水高产的其它方面与常规栽培技术基本一致，产量目标的制定和实现决定于经济投入和土壤肥力水平。以这套技术体系为依托，吴桥实验站形成了三个节水高产推广模式，即春后不灌水亩产 350~400 kg 模式，春后灌一水亩产 400~450 kg 模式和春后灌二水亩产 450~500 kg 模式。

多年的试验结果 (表 1) 表明：春后灌一水较不灌水对照具有明显的增产效益，不但水分利用效率较高，而且边际效应明显；春后灌二水较一水处理高产，但水分利用效率较一水处理为低，边际效益已明显下降；春后灌三水与二水处理产量相当，而水分利用效率已明显下降，边际效应已小于零。另外，个别年份的试验结果表明：传统的春后灌四水、五水的高产技术不但无增产作用，而且水资源浪费严重。因此，通过减少灌水次数和灌水量，提高作物对水分胁迫的适应性，利用其它农艺措施的补偿效应，转变以利用灌溉水为主的观念，树立充分利用土壤贮水的观念，应成为冬小麦节水高产栽培的主要研究方向。

表 1 不同灌水处理的耗水量组成、产量、WUE 及边际效应
(1990~1996 年 6 年度平均，吴桥)

处理	总耗水 (mm)	灌溉水		降水		土壤水		产量 (kg/hm ²)	WUE (kg/m ³)	MU (kg/m ³)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)			
对照	357	0	0	117	33	240	67	393	1.65	—
一水	405	75	18	117	27	213	55	458	1.70	1.31
二水	434	150	35	117	25	167	40	471	1.62	0.26
三水	498	225	45	129	26	144	29	468	1.41	-0.06

注 1 一水包括春后起身期、拔节期或孕穗期灌一次水的三种方式；二水包括春后起身期和孕穗期、拔节期和开花期或起身期和灌浆期灌二次水的三种方式；三水包括春后起身期、孕穗期和灌浆期，或拔节期、开花期和灌浆期灌三次水的二种方式。

注 2 吴桥试验区的地下水位一般在 6~9 m，地下水的补给量和渗漏量可忽略不计，且小麦生长季内雨雪稀少无地表径流，因此冬小麦某一时段内的耗水量可假定为该时段内的灌水量、降水量及土壤水消耗量之和。

3 冬小麦节水高产栽培的生理基础

不同的地区和作物，作物节水高产的主要途径应该是有区别的；不同的学科和研究人员，对作物节水高产的生理基础也会有不同的观点和见解。通过吴桥实验站的多年实践，我们认为从栽培技术的角度出发，冬小麦节水高产研究应以合理调配各生育期水资源，建立合理群体，提高单位水分生产率和增加物质生产，提高经济系数为目标。因此，本文主要从冬小麦的耗水规律、群体特征和物质生产三个方面来分析节水高产的生理基础。

3.1 根系生长特点与耗水规律

小麦根系的生长和分布与土壤水分密切相关^[3]。水分胁迫会导致土壤表层根量减少,促进根系向深层土壤生长^[45],使深层根量所占比例增大^[25]。冬小麦根系有冬前和冬后两个生长高峰,黄土高原旱地冬小麦的最大根深可达5 m左右^[18]。根系的生长和分布是一个动态变化的过程,作物主要吸水区域会随根系下扎而不断下移^[3]。在冀东南平原地区,冬小麦的耗水深度苗期为80~100 cm,拔节期为140~160 cm,灌浆期为180~200 cm^[35]。山东农业大学的研究^[19]也表明:冬小麦苗期(播种至起身)约59%的水分来自0~40 cm土层;中期(起身至孕穗)约58%的水分来自40~100 cm土层;后期(孕穗至成熟)约48%的水分来自40~100 cm土层,38%的水分来自100~140 cm的土层。小麦是能忍耐低水势的耐旱性作物^[57],水分胁迫会提高根系的渗透调节能力^[48],从而提高根系的吸水能力。据研究,砂壤土上小麦根系的吸水能力可使土壤剖面水势降到-4.0 MPa以下^[49]。所以,有人认为在有水分胁迫存在时,作物的吸水量往往与根量关系不大,而更受制于扎根深度^[43],根区土壤的干旱程度,主要与植株体内的水势梯度有关,而与根密度的关系不大^[44]。

从吴桥实验站的多年结果来看,拔节期的根系已伸展到110 cm以下,开花期的最大根深可达200 cm以上。灌水与否对次生根数和根量影响明显,孕穗期测定,对照单株次生根数为7.8条,而拔节期灌水处理为18.1条;开花期测定,对照每亩总根量为80.8 kg(1993年数据),而一水(拔节期灌水)、二水(拔节期和开花期灌水)和三水(拔节期、开花期和灌浆期灌水)处理分别为283.1 kg、323.2 kg和367.8 kg(1994年数据)。灌水与否对根量分布的影响表现为:0~40 cm土层,对照为63.2%,一水、二水和三水分别为80.4%、85.6%和83.3%;40~80 cm土层,对照为27.3%,灌水处理分别为11.3%、8.5%和6.9%;80 cm以下土层,对照为9.5%,灌水处理分别为8.4%、6.0%和9.8%。因此,灌水对根系分布的影响主要在0~80 cm土层内。上述根量及其分布除与灌水与否有关外,也可能与年际间的降水量有一定关系,即1992~1993年度属少雨年份,冬小麦生长季内共降水65.8 mm,而1993~1994年度属平水年份,共降水121.3 mm。

表2为不同灌水处理的耗水量及其组成。其总的趋势是总耗水量随灌水次数的增加而增加,土壤水的消耗量随灌水次数的增加而减少。从各生育阶段耗水量来看,前期(播种至拔节)灌水与否对耗水量的影响不大,最大仅增加10 mm,中期(拔节至开花)除灌四水的处理以外,其它处理之间差异也不大,最大为10.7 mm,处理间的耗水量的差异主要表现在后期(开花至成熟),即随着灌水次数的增加,后期的耗水量也明显增加。上述结果表明:冬小麦在灌足底墒水的基础上,一般年份至开花期基本上不会发生严重的水分亏缺,水分亏缺主要发生在生育后期。因此,吴桥冬小麦节水高产技术体系提倡不灌越冬水和返青水(特殊干旱年份除外),把第一水推迟到起身期以后,以此在保证作物正常生长发育的条件下,造成土壤相对缺水的生长环境,使作物得到一定的干旱锻炼,建立起群体和个体的抗旱机制。冬小麦生育中期是决定穗数和穗粒数的关键时期,此时确保土壤水分充足,有利于增加穗数和穗粒数。所以,春后灌一水时,应在起身期至孕穗期进行;春后灌二水以上时,第一水不应晚于拔节期。冬小麦生育后期是决定产量高低的关键时期,此时土壤水分充足有利于增加穗粒数和千粒重。因此,春后灌二水以上时,第二水或第三水应在开花期或灌浆期前后。

表 2 不同灌水处理的耗水量及其组成

(1993~1994 年度, 吴桥)

(mm)

处理	总耗水量	水源组成			各生育阶段耗水量		
		降水	土壤水	灌水	前期	中期	后期
对照	370.0	121.3	248.7	0.0	156.4	116.8	96.8
一水	427.1	121.3	217.2	75.0	159.9	112.1	141.5
二水	451.6	121.3	194.6	150.0	163.4	122.8	179.8
三水	500.8	121.3	152.2	225.0	161.7	119.3	217.6
四水	557.0	121.3	135.7	300.0	166.4	155.1	235.5

注 1 一水、二水和三水同表 1 注 1; 四水为春后起身期、拔节期、开花期和灌浆期灌四次水; 以下同。

注 2 1993~1994 年度的降雨分布为, 播种至拔节期 73.0 mm, 拔节至开花期 45.9 mm, 开花至成熟期 2.4 mm。

从土壤水消耗量的结果(表 3)来看: 随着灌水次数的增加, 2 m 土体内的耗水量及其占土壤有效贮水量的比例明显下降, 表明灌水在一定程度上影响了土壤水的充分利用, 其程度为每多灌一次水(75 mm)约减少消耗 10% (30 mm)左右的土壤水。从土壤水消耗量的分布来看, 在 0~40 cm 的表层土壤内, 各处理的耗水量均要大于有效贮水量, 其幅度随灌溉次数的增加而减少。耗水量大于土壤有效贮水量的结果, 可能不仅与后期的土壤蒸发有关, 与土壤水分胁迫引起的小麦根系吸水能力的增加也有一定关系。在 40~80 cm 的中上层土壤内, 除了三水处理有若干和四水处理有较多的有效贮水外, 对照和一水、二水处理的土壤水消耗量也超过了土壤有效贮水量。因此, 在节水高产条件下, 冬小麦成熟时 0~80 cm 的有效贮水已经全部耗尽。在 80~130 cm 的中下层土壤内, 除了对照的有效贮水已耗尽外, 各灌水处理均剩余一部分或大部分有效贮水。而在 130~200 cm 的深层土壤内, 所有的处理均有大部分剩余。上述结果表明, 在平水年份春后灌一水或二水已经基本能满足冬小麦正常生长发育的需要; 同时也说明了提高冬小麦对深层土壤水分的利用率是节水高产的技术关键。

表 3 不同灌水处理的土壤水消耗量及其分布

(1993~1994 年度结果, 吴桥)

处理	2 m 土体总耗量		各层土壤消耗量 (mm)			
	(mm)	占有有效贮水 (%)	0~40 (cm)	40~80 (cm)	80~130 (cm)	130~200 (cm)
对照	248.7	85.1 (67.6)	87.4	67.5	58.9	34.8
一水	217.2	74.3 (54.8)	90.7	75.2	41.2	10.0
二水	194.6	66.6 (56.1)	80.3	60.0	39.5	15.6
三水	152.5	52.2 (49.7)	67.2	46.4	21.0	17.7
四水	135.7	46.4 (44.8)	63.5	37.7	18.1	14.3
有效贮水量		292.3	60.9	48.1	53.8	129.5

注 有效贮水量为播种前土壤含水量减去土壤达萎蔫水势 (-1.5 MPa) 时的含水量的计算值; 括号内数值为 2 m 土体内实际耗去的土壤有效水占有有效贮水量的百分比。

3.2 群体生长发育与产量构成因素

关于土壤水分条件与小麦生长发育及产量关系的研究很多。一般来说, 土壤水分胁迫均会影响小麦的株高、分蘖和叶面积等群体发育指标, 并通过对光合作用等作物生理过程的影响而限制小麦高产^[9,39,41,56]。因此, 怎样用栽培技术措施来补偿土壤水分胁迫对作物的不利影

响就成了节水高产栽培研究的重要内容。前人的研究表明,选育优良的抗旱品种^[47]、增施磷肥^[13,53]和在作物水分临界期灌水^[46,56]等农艺措施都有利于提高作物的抗旱能力,从而减小水分胁迫对产量的影响。

为了补偿和避免节水高产条件下限水灌溉对冬小麦生长发育的不利影响、提高水分利用效率,经过多年的摸索和试验,吴桥冬小麦节水高产栽培技术体系采用了多项适用技术。

3.2.1 适时晚播、增加基本苗

足墒适时晚播,可以在保证全苗、齐苗的基础上,缩短冬小麦的苗期长度减少苗期的水分消耗;同时减小腾茬压力,延长前茬玉米的生育期,保证玉米高产;受晚播和水分胁迫影响的亩穗数则用增加基本苗的措施予以补偿。由于晚播和密度的增加,使冬小麦个体发育受到明显抑制,从而形成冬小麦小个体、大群体的形态特征。由于密度的加大,单位面积的初生根(种子根)数增多,而初生根纤细、分枝多,一般都倾向于垂直向下生长,下扎深度要较次生根深^[40,48],因此初生根比例越大,应越有利于吸收深层土壤水分。而且,由于分蘖成穗机会少,单穗(主茎)占有的根量,特别是初生根量大,因而也有利于抵御土壤水分胁迫。同为拔节期灌一水的结果(表4)表明,冬小麦适时晚播虽然会在一定程度上减少亩穗数和穗粒数,但由于缓和了籽粒灌浆期的水分胁迫,因此有利于千粒重的提高和稳定,从而在耗水量低于早播的条件下达到或超过早播的产量。从播种量来看,早播时选择幅度较大,而晚播时则必须增加密度。1994~1995年度的结果也表明了同样趋势。例如,一水灌溉的早播处理(10月1日播,基本苗20万/亩)从播种至拔节、拔节至开花和开花至成熟的耗水量分别为233.1 mm、151.6 mm和147.6 mm,晚播处理(10月17日播,基本苗35万/亩)分别为205.6 mm、147.8 mm和156.0 mm,总耗水量早播处理要多于晚播处理22.8 mm;从所耗土壤水来看,早播处理274.5 mm,0~80 cm土层占52.6%,80~200 cm土层占47.3%,晚播处理274.7 mm,各占50.9%和49.1%。但从产量结构来看,由于晚播处理穗数明显偏少,加上小麦灌浆期降雨量异常,达到了79.2 mm,因此早播处理也基本上没受到水分胁迫,产量要高于晚播处理,分别为561.7 kg/亩和507.0 kg/亩,要较常年增产10%以上。

表4 不同播种期、密度对产量、耗水量及水分利用效率的影响

(1993~1994年度结果,吴桥)

项目	播种期(月/日)					
	10/10			10/20		
密度(万苗/亩)	20	35	50	20	35	50
穗数(万/亩)	28.1	36.3	45.3	27.4	35.1	44.7
粒数(粒/穗)	38.9	35.2	31.0	35.7	32.4	28.8
千粒重(g)	36.8	34.3	32.4	38.8	37.0	35.9
产量(kg/亩)	402.3	438.3	455.0	379.5	420.8	462.2
播种至开花耗水量(mm)	270	301	317	248	274	297
开花至成熟耗水量(mm)	118	105	82	142	124	99
总耗水量(mm)	388	406	399	390	398	396
WUE(kg/m ³)	1.56	1.58	1.71	1.46	1.59	1.78

3.2.2 集中增施磷肥

由于磷肥具有提高根系比表面积、降低根系呼吸速率、提高根和冠层水势、增加叶面积、

促进根系生长等一系列作用^[13]，因此集中增施磷，有利于作物吸收土壤水分，特别是深层土壤水分；同时，增施磷肥能提高植株体内磷的积蓄，利用磷在植株体内的再分配来缓解因小麦生育后期表土层干旱、吸磷不足而影响灌浆的不利影响。例如，从拔节期灌一水的试验结果（表 5）来看，施用磷肥（磷 1： P_2O_5 8.05 kg/亩；磷 2：同 16.1 kg/亩）不但能明显增加次生根数、叶面积系数和亩穗数，并能明显降低比叶面积，增加群体生长率，最终明显提高产量。在节水高产条件下，小麦生育后期的限制因子主要是水分，因此可以认为磷肥的增产作用主要是依赖于提高作物生长后期的吸水能力或水分利用效率。

表 5 不同磷肥水平对小麦生长发育及其产量的影响
(1991~1992 年度结果，吴桥)

处理	次生根 (条/株)	叶面积 系数	比叶 面积	群体 生长率	生物量 (kg/亩)	穗数 (万/亩)	粒数 (粒/穗)	千粒重 (g)	实产 (kg/亩)
对照	11.2	2.86	229.5	10.2	805.2	36.5	23.2	47.2	371.2
磷 1	14.2	3.07	180.7	11.9	978.1	45.8	22.1	44.0	412.0
磷 2	14.3	2.97	183.8	15.4	1 070.2	46.5	22.2	44.9	449.0

注 叶面积系数为开花期测定值；比叶面积为开花期测定值，单位 cm^2/g ；群体生长率为开花期至成熟期的测定值，单位 $kg/日 \cdot 亩$ 。

3.2.3 灌溉模式

虽然采用整套技术后，春后一水从起身期至孕穗期、春后二水以起身期配孕穗期或拔节期配开花期均能达到相应的产量目标，但根据前期降水情况对灌溉时间作适当调整通常能获得更高的产量。从春后一水的结果（表 6）看，起身期和拔节期灌水有利于增加穗数，拔节期灌水有利于增加穗粒数，而孕穗期灌水有利于增加千粒重。因此在前期降水不足、穗数有限的情况下，应于拔节前灌水以利于确保亩穗数；而在亩穗数充足的情况下，即使前期降水偏少也可考虑推迟至拔节期灌水；当前期降水较多、亩穗数又足够的情况下，可考虑推迟至孕穗期灌水。虽然一般推迟灌水时期能节约一定的耗水量，但在灌水量相同的情况下，耗去的土壤水在汛期均能得到基本补偿，因此耗水量和水分利用效率在此的实际意义不大。春后二水的结果也表现出类似的趋势，如 1993~1994 年度的起身期配孕穗期灌水，产量结构为 46.8 万穗/亩、26.2 粒/穗和 37.5 g/千粒，产量为 453.2 kg/亩；拔节期配开花期灌水则分别为 45.0 万穗/亩、29.5 粒/穗、36.3 g/千粒和 479.4 kg/亩。

表 6 不同年度间一水灌水时期与产量及水分利用效率的关系（吴桥）

年度	降水量 (mm)		灌水 时期	穗数 万/亩	粒数 粒/穗	千粒重 (g)	产量 (kg/亩)	耗水量 (mm)	WUE (kg/m ³)
	全生育期	前期							
1991~1992	44.2	18.8	起身期	36.6	29.0	40.3	424.7	399.9	1.59
			拔节期	36.5	30.0	39.7	442.1	386.0	1.73
			孕穗期	34.6	29.0	42.2	429.8	381.0	1.70
1992~1993	65.8	20.0	起身期	46.1	23.4	38.7	412.6	370.7	1.67
			起身期	46.4	25.7	35.2	419.3	427.1	1.47
1993~1994	121.2	65.5	拔节期	44.2	28.6	33.1	420.5	406.0	1.56
			孕穗期	42.8	26.9	38.0	439.0	407.3	1.62
1994~1995	182.8	73.0	拔节期	45.6	31.0	40.5	561.7	532.3	1.59
			孕穗期	45.9	28.0	42.0	548.7	475.1	1.73

注 前期指播种至拔节期。

3.2.4 选用品种

黄淮海麦区小麦生育后期温度高、灌浆期短，且易遭到干热风危害，因此宜选用灌浆速度快、成熟期早的品种，这也有利于为下茬玉米尽早腾茬。而节水高产栽培主要以穗数取胜，密度高、群体大，因此必须是矮秆、株型好的品种。从试验结果（表 7）来看，目前生产上大部分高产品种都基本能达到节水高产的丰产指标，但鲁麦 13 成熟偏晚，叶面积大、株型差；邯 87 虽然早熟，但叶面积小、穗粒数少，产量潜力较低；河农花 84 则千粒重太低，也影响产量潜力。因此，在冀、鲁两省大面积推广的冀麦 26 和鲁麦 14 较适合在节水高产栽培中应用。

表 7 不同品种的生长发育特性及其水分利用效率的比较
(1993~1994 年度结果，吴桥)

项目	冀麦 26	鲁麦 14	鲁麦 13	邯 87	河农花 84
成熟期 (月/日)	6/6	6/7	6/9	6/3	6/8
春生叶面积 (cm ²)	74.9	71.5	93.0	52.5	69.2
穗数 (万/亩)	38.4	41.2	39.8	45.7	51.2
穗粒数 (粒/穗)	28.7	26.6	25.5	21.7	25.3
千粒重 (g)	36.4	40.5	38.9	42.2	31.3
产量 (kg/亩)	400.8	444.0	395.3	418.8	400.3
耗水量 (mm)	445.5	436.5	462.3	440.3	408.7
WUE (kg/m ³)	1.35	1.53	1.29	1.43	1.47

3.3 光合产物积累、转运与产量形成

土壤水分胁迫限制作物产量的途径是多方面的，首先是通过干物重分配向地下部倾斜而限制地上部冠层的生长^[16,54]。冠层叶面积的减小会导致光能截获量减少，这通常是水分胁迫影响光合产物生产和积累的主要原因^[52]。其次，由于土壤水分胁迫会导致光合器官内发生一系列的代谢和生理变化，如过氧化物酶活性和丙二醛含量增加，可溶性蛋白质、叶绿素含量和超氧化歧化酶活性的降低，加速膜脂过氧化作用和衰老^[34]等等，从而促使植株早衰、缩短光合器官的功能期。第三，土壤水分胁迫使植株水势降低膨压下降，诱导 ABA 合成增加，导致气孔关闭^[28]，直接降低作物的光合速率、影响光合产物的生产和积累。植株各部分对水分胁迫的敏感程度有一定差异^[12]，一般叶片最易受水分胁迫的影响，而穗具有较强的抗旱性，这主要与各器官维持膨压的能力有关^[58]。当植株处于水分胁迫状态或从根系接受到土壤干旱信号时，通常会表现出植株较矮、叶片小而直立、叶表面蜡质层加厚等适应性变化^[41,50]，以利于减少植株水分的蒸腾消耗。由于与蒸腾作用的水蒸气相比，空气通过气孔进入植株体内的扩散阻力要小得多，因此当气孔没有完全关闭时，通常对蒸腾作用的抑制程度要大于对光合作用的抑制程度，从而提高单位水分的光合效率^[22]。第四，小麦产量的物质来源，除了绝大部分直接来自于开花后光合器官合成的光合产物外，还有一部分是有贮藏于植株体内的光合产物转运而来^[23]，因此开花前植株体内的光合产物贮藏量和被转运的程度也会影响最终的产量，而土壤水分胁迫通常会促进贮藏同化物的转运^[21,29]。第五，库器官的大小也会在一定程度上影响光合产物从光合器官的输出^[6,31]，特别是小麦穗本身也是重要的光合器官，因此水分胁迫对库容量的影响也会间接和直接地影响光合产物的生产和积累。而从光合产物转运的角