

冬小麦

水分关系与节水高产

马瑞崑 贾秀领 著

中国农业科学技术出版社

冬小麦水分关系 与节水高产

马瑞崑 贾秀领 著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

冬小麦水分关系与节水高产/马瑞崑, 贾秀领著.

北京: 中国农业科学技术出版社, 2005.1

ISBN 7-80167-687-4

I. 冬... II. ①马...②贾... III. 冬小麦—节约用水—灌溉—研究 IV. S512.107.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 080138 号

责任编辑
出版发行

鱼汲胜

中国农业科学技术出版社 邮编:100081

电话:(010)68919711;62145303

经 销
印 刷
开 本
印 数
版 次
定 价

新华书店北京发行所

北京市海淀海丰印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张:11.75

1~1000 册 字数:300 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

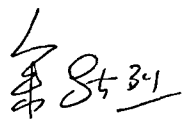
36.00 元

序

小麦作为我国主栽粮食作物,在我国粮食生产、粮食安全及农业的可持续发展中有着举足轻重的地位。毋庸置疑,水分不足一直是限制北方小麦生产的瓶颈因素。在北方小麦产区,灌溉的发展,大幅度提高了小麦产量和质量,但在有灌溉条件的高产麦区,由于历史上曾经地下水储量丰富,多年来在小麦生产中形成了足量、过量浇水的习惯。显然,这早已不能适应现在变化了的形势和生产条件。在这样的研究背景下,本书作者选择了在稳定小麦产量水平和小麦质量不下降的前提下,最大限度地减少小麦耗水的研究思路和途径,走节水与高产和优质并重的路子,是非常符合我国北方小麦生产实际的。本书作者持续不懈 20 余年潜心于该领域,围绕小麦水分关系这一主题,默默耕耘,终于取得了具有较高学术水平的研究成就。实践证明,这一研究思路不仅具有现实意义,而且在未来相当长的时间内,仍是小麦研究和生产的主流方向。

本书以小麦节水降耗、高产优质高效的生理机制作为出发点,从地下部土壤水库、不同类型根系发育和功能比较,到地上部群体个体协调发育和糖氮代谢,冠层光合速率与光能利用、植株水分状况以及节水高产基因型综合评判等多个角度,系统地阐述了小麦节水条件下达到高产、优质和高产条件下实现节水的补偿超补偿效应,为充实小麦节水高产栽培理论做出了突出贡献。本书以节水高产理论为指导所提出的一套卓有成效的节水高产栽培调控法,在多年的生产应用中已取得了良好的社会效益。而且,我相信还将在以后的小麦生产中继续发挥作用。

最后,我希望本书的出版能对相关研究工作和我国北方小麦生产起到借鉴和指导作用。



中国工程院院士、
山东农业大学教授
2003 年 11 月 20 日

前 言

冬小麦的水分关系与节水高产的研究最早应追溯到 1980 年,本书的第一作者在中国农业科学院研究生院师从已故著名小麦栽培专家张锦熙先生攻读硕士期间。硕士研究生论文“冬小麦蹲苗及其对光合特性效应的研究”的目的是根据小麦叶龄,提出推迟春季灌水的理论依据,论文的结论中特别提出了“蹲苗在北方水资源不足的情况下,对实行节水灌溉,降低成本,是一种值得探索的稳定高产的途径”。1984~1986 年在英国诺丁汉大学留学期间,完成了“Water stress in tall and dwarf cultivars of winter wheat”硕士论文,更加奠定了作者开展小麦水分生理和调控研究的理论基础和实验技能,明确了课题思路和研究方向。

1986 年 3 月,他放弃攻读博士的机会回国。回国后不久,面对我国北方,尤其是华北平原水资源日趋匮乏,而农业又急需增加灌溉来提高产量的实际状况,在单位领导的支持下,组成了以本书第二作者等参加的研究小组,启动了高产小麦节水栽培的生理基础研究工作,并于 1987 年获得国家自然科学基金项目“麦类作物水分生理节水栽培机理探讨及综合措施”(编号 3860492,1987~1991 年)的资助和国家人事部非教育系统留学回国人员项目资助,全面开展高产小麦节水的机理和技术研究。从此,矢志不移地沿着作物节水这条研究主线,锲而不舍地拼搏下去。

在研究过程中,先后又得到如下资助,使得研究在不同的侧面持续地进行下去。以项目实施的时间顺序,所承担的课题还有:河北省自然科学基金课题“冬小麦叶片保水力机制及与抗旱关系的研究”(编号 393076,1993~1995 年);国家自然科学基金重大项目“华北平原节水农业的应用基础研究”专题“农业节水的生物学基础”中由北京农业大学王学臣承担的内容(编号 49391600-3-3,1993~1996 年);河北省自然科学基金课题“冬小麦初生根和次生根生长发育和功能比较学研究”(编号 3952889,1995~1997 年);河北省农科院基础研究课题“河北节水农业体系中小麦节水生理和遗传”(1996~1997 年);农业省校科技合作基金计划项目“河北省冬小麦超高产和水分高效利用优化耦合调控研究”(98Z1305,1998~2000 年)等。

在这些项目的支持以及各级领导的重视和鼓励下,室内同仁,发扬团队精神,精诚合作,刻苦攻关,在冬小麦节水(超)高产的理论和技术上取得了新的进展和突破。本书就是对 20 多年来冬小麦节水高产生理和调控研究的全面总结。

除本书作者外,为本书的数据的收集、整理、分析和总结做出实质性贡献的有刘淑贞、蹇家利和张全国;对研究进行指导和提出过建设性意见的有李晋生、赵微平和王学臣先生;在试验田辛勤耕耘多年的技术工人李建敏和田英才亦付出了艰苦的劳动。有了这些无私的帮助和支持,才使本书得以问世,在此,一并表示由衷的谢意。

马瑞崑 贾秀领

河北省农林科学院粮油作物研究所

2003 年 10 月于石家庄

目 录

1 水资源与冬小麦生产.....	(1)
2 土壤水库在节水高产中的作用	(5)
2.1 高产节水麦田的土壤水分动态消长	(5)
2.1.1 阶段耗水的比例关系	(5)
2.1.2 拔节前供水与作物和土壤水分消耗的关系	(5)
2.1.3 供水深度与土壤蒸发消耗	(7)
2.1.4 土壤水分垂直分布动态及深层水作用	(8)
2.2 供水、总耗水、土壤耗水的关系	(10)
2.3 高产节水小麦灌前土壤水分下限指标	(12)
2.3.1 生育前期(播种至拔节)的土壤水分变化	(12)
2.3.2 生育中期(拔节至开花)的土壤水分变化	(13)
2.3.3 生育后期(开花至成熟)的土壤水分变化	(13)
2.3.4 灌前土壤水分下限指标	(14)
3 根系生长和功能与节水高产	(15)
3.1 初生根和次生根生长及功能	(15)
3.1.1 供水深度与初生根和总根系发育和功能	(15)
3.1.2 分别调控供水的初生根和次生根生长与功能	(18)
3.1.3 初生根和次生根单独生长的效应	(19)
3.2 初生根、次生根和总根系生长与功能的基因型差异	(21)
3.2.1 不同基因型的初生根和次生根生长发育和功能	(21)
3.2.2 不同类型品种根系生长对节水的反应	(23)
3.2.3 结论	(24)
3.3 总根系的生长与冠层发育的关系	(24)
3.3.1 前控节水和拔节追氮与根系和冠层发育	(24)
3.3.2 供水和品种对总根系生长和生理的作用	(26)
3.3.3 供水方式和种植密度与根系发育	(29)
3.4 结论	(31)
4 小麦节水高产的植物水分关系特点	(32)
4.1 小麦叶水势的动态变化特点	(32)
4.1.1 叶水势日变化	(32)
4.1.2 Ψ_l 随生育时期的变化	(33)
4.1.3 盆栽试验各阶段水分胁迫与叶水势	(36)
4.2 Ψ_T 的组分分析	(39)

4.3	Ψ_T 与土壤水分的关系	(39)
4.4	节水高产的 Ψ_T 指标	(40)
4.5	结论	(40)
5	光合作用、糖氮代谢与节水高产	(41)
5.1	叶片光合速率	(41)
5.1.1	前期控水蹲苗与叶片光合速率和植株呼吸强度	(41)
5.1.2	追肥、播期和密度与叶片光合速率	(43)
5.1.3	供水与旗叶光合作用	(47)
5.2	群体光合率	(48)
5.2.1	前期控水蹲苗与群体光合率	(48)
5.2.2	品种、供水和拔节追氮三因素对群体光合作用的影响	(48)
5.2.3	供水、品种和密度三因素与群体光合	(50)
5.3	植株糖代谢与节水	(52)
5.3.1	前期控水蹲苗与植株器官可溶性糖的动态变化	(52)
5.3.2	灌水追肥与产量形成阶段的糖氮代谢	(53)
5.4	结论	(55)
6	植株水分生理及节水高产基因型综合评判	(57)
6.1	冬小麦基因型幼苗对水分胁迫反应的生理差异	(57)
6.1.1	冬小麦基因型对单次水分胁迫处理的生理反应	(57)
6.1.2	反复干旱处理的基因型生理反应	(60)
6.1.3	小结	(62)
6.2	田间成株小麦对水分胁迫反应的基因型生理差异	(62)
6.2.1	叶水势(Ψ_t)	(62)
6.2.2	膨压(Ψ_p)	(63)
6.2.3	渗透调节能力的基因型差异及变化	(63)
6.2.4	相对电导率、自由水和束缚水含量	(65)
6.2.5	叶片气孔阻力和蒸腾	(67)
6.2.6	叶片残留蒸腾(离体叶片失水速率, RWL)	(71)
6.2.7	少水/足水产量比	(77)
6.3	节水高产小麦基因型的综合评判	(78)
6.4	节水高产小麦基因型选育实例	(79)
6.4.1	选育过程	(79)
6.4.2	选育结果	(80)
6.4.3	结论	(82)
7	个体和群体发育与光能利用动态	(83)
7.1	生育期	(83)
7.2	分蘖和植株高度的变化动态	(83)
7.3	叶面积及田间光照条件	(85)

7.4 干物质积累和运转分配	(87)
7.4.1 生物量生产模式	(87)
7.4.2 阶段水分胁迫与生物量积累动态差异	(89)
7.4.3 生育后期的生物量再运转与分配动态差异	(91)
7.5 光能吸收和利用	(93)
7.5.1 生物量与光辐射关系模式	(93)
7.5.2 水分胁迫对生物量与光辐射关系影响	(94)
7.6 结论	(95)
8 冬小麦的水分——产量关系与水分利用效率	(96)
8.1 综合调控对节水高产的作用	(96)
8.1.1 品种、供水量和种植密度对产量的综合效应	(96)
8.1.2 前期、中期和后期水分胁迫的产量效应	(99)
8.1.3 供水、播期和种植密度对产量的综合效应	(102)
8.1.4 品种和春季首次灌水时间对产量的综合效应	(103)
8.1.5 品种、供水量和供水方式的综合效应	(104)
8.1.6 高产小麦进一步节水的产量效应	(106)
8.1.7 冬小麦的节水超高产	(107)
8.2 产量及产量构成因素	(109)
8.2.1 供水—产量量化渐变复合模式	(109)
8.2.2 密度—产量模型	(112)
8.3 水分利用效率(WUE)	(115)
8.3.1 计算分析	(115)
8.3.2 WUE的基因型差异	(115)
8.3.3 密度对WUE的效应	(117)
8.3.4 供水对WUE的效应	(118)
8.3.5 产量(Y)及总耗水(WU)对WUE的效应	(119)
8.3.6 WUE与蒸散效率(ETE)和收获系数(HI)	(120)
8.4 结论	(121)
8.4.1 冬小麦的水分—产量关系	(121)
8.4.2 水分利用效率	(121)
9 冬小麦节水调控的补偿超补偿效应	(123)
9.1 拔节前水分胁迫,拔节后优化供水可实现节水高产	(123)
9.2 土壤水库在节水高产中的作用	(123)
9.2.1 节水高产麦田的土壤耗水和土壤水分动态	(123)
9.2.2 供水、总耗水和土壤耗水的关系	(124)
9.2.3 节水高产小麦灌前土壤水分下限指标	(125)
9.3 小麦根系与节水高产	(125)
9.3.1 根系生长的一般特点	(125)

9.3.2	初生根、次生根生长及功能与控水调节	(126)
9.3.3	基因型的根系生长和功能差异	(126)
9.3.4	前控节水与根系生长发育动态	(126)
9.4	节水高产小麦的植株水分关系特点	(129)
9.4.1	叶水势变化特点	(129)
9.4.2	节水高产的 Ψ_t 指标	(129)
9.5	叶片和群体光合作用与小麦节水高产	(130)
9.5.1	叶片光合速率	(130)
9.5.2	群体光合率	(131)
9.6	节水高产基因型水分生理特点及综合评判	(131)
9.6.1	节水高产基因型幼苗期的生理特性	(131)
9.6.2	节水高产基因型长成植株的生理特性	(132)
9.6.3	少水/足水产量比	(134)
9.6.4	节水高产基因型的综合评判及应用	(134)
9.7	节水高产小麦的个体和群体发育动态	(135)
9.7.1	生育期、株高和分蘖动态	(135)
9.7.2	叶面积动态及田间透光条件	(135)
9.7.3	干物质积累及运转分配动态	(135)
9.8	水分利用效率与节水高产	(136)
9.8.1	水分利用效率(WUE)的基因型差异	(136)
9.8.2	供水和密度效应	(137)
9.8.3	产量(Y)及总耗水量(WU)对 WUE 的效应	(137)
9.9	超补偿机制与节水高产	(137)
9.9.1	叶片和群体光合速率的增强对叶面积系数降低的超补偿效应	(138)
9.9.2	营养器官物质向籽粒运输再分配的增强对生物量积累降低的超补偿 效应实现较高经济系数对略低生物量的超补偿	(138)
9.9.3	个体增壮对群体减小的超补偿效应实现穗粒重增加对亩穗数降低的 超补偿	(138)
9.9.4	根系发育增多和功能增强对供水量减少的超补偿效应	(138)
9.9.5	植株渗透调节和膨压维持的增强对叶水势降低的超补偿效应	(140)
9.9.6	水分利用效率的提高对总耗水量降低的超补偿效应	(140)
9.10	冬小麦前控节水高产超高产机理模式	(140)
10	抗蒸腾剂的应用与节水	(142)
10.1	抗蒸腾剂的类型及特点	(142)
10.1.1	抗蒸腾剂的类型	(142)
10.1.2	几种抗蒸腾剂的作用特点	(142)
10.2	黄腐酸的生理作用与小麦节水	(142)
10.2.1	叶面喷施的生理节水和产量效应	(143)

10.2.2	FA 种子处理对小麦的生理和产量效应	(147)
10.2.3	结论	(149)
10.3	高脂膜的节水效应	(150)
10.4	抗蒸腾剂的应用及前景	(152)
11	冬小麦节水高产超高产栽培法	(153)
11.1	以播前造足底墒为主的灌底墒水施足底肥和精细整地技术	(153)
11.2	节水高产优良品种选用技术	(153)
11.3	优化播种技术	(154)
11.4	以控制拔节前灌水为前提以中后期肥水运筹为核心的管理技术	(154)
11.5	防治病虫害和抗蒸腾降低水分消耗技术	(155)
11.6	综合调控技术体系的构建和应用	(155)
12	小麦水分关系研究法	(157)
12.1	试验设计及方法	(157)
12.2	土壤水分测定及水分利用效率的计算	(157)
12.3	植株水分关系研究法	(158)
12.3.1	改进的压力室技术测定叶水势	(158)
12.3.2	应用改进的压力室技术进行 PV 曲线分析	(160)
12.3.3	应用改良印迹法测定叶片气孔开度	(165)
12.3.4	多种方法测定蒸散作用、蒸腾速率和气孔阻力(气孔导度)	(165)
12.3.5	由离体叶片失水速率测定残留蒸腾	(166)
12.3.6	相对电导率测定	(168)
12.3.7	自由水和束缚水含量测定	(168)
12.4	单叶和群体光合作用研究法	(168)
12.5	根系试验及生长和生理指标测定法	(168)
12.5.1	根系试验研究方法	(168)
12.5.2	根系取样方法	(168)
12.5.3	根系生长和生理指标测定方法	(169)
13	发表论文目录	(170)

1 水资源与冬小麦生产

生命起源于水,水是人类生存发展的最重要最基本条件,是水孕育着地球上的绿色植物,并维系着物种的多样性和包括人类在内的自然界生物的繁荣。古往今来的人类文明兴衰无不与水相关。考古学发现,很多文明古城的衰落和消亡直接起源于水资源的枯竭。灌溉的发展对现代农业的进步发挥了重大推动作用,贡献率达到 20%。

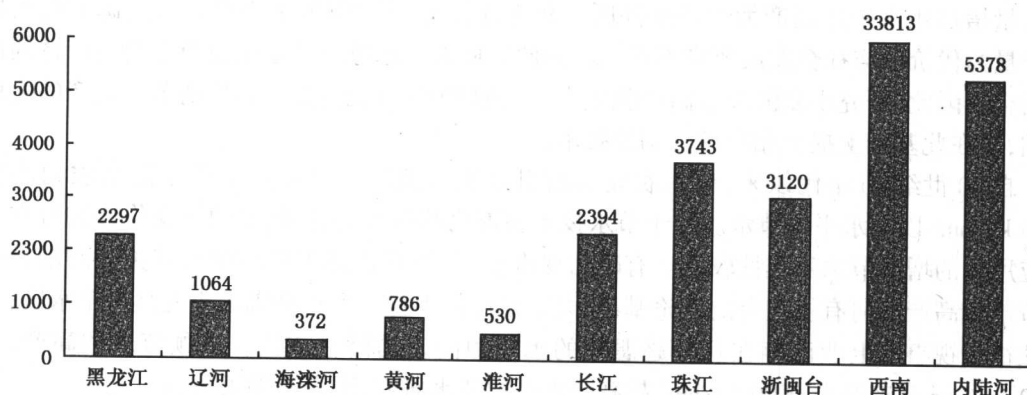
我国水资源十分短缺,以占世界的 8% 的总量维持世界 21.5% 人口的生存,人均水资源仅占世界平均水平的 1/4。预测到 2030 年,人均水资源将下降 25% ~ 30%,供需矛盾将更加突出。

就我国而言,社会经济用水安全保障已成为制约我国社会经济发展的重要因素。一些国际组织甚至将中国的水资源供应能力和粮食安全自给能力联系起来,认为中国水资源短缺将超越洪涝灾害而成为最大和最难解决的问题,甚至会引发全球粮食市场的变化和其他国际问题。我认为这不是危言耸听,是在给我们敲警钟。如 1997 年我国华北地区,因缺水造成工农业损失达 2000 亿元,相当于当地当年 GDP 的 3%;当年全国水旱灾害 2667 万 hm^2 ,其中旱灾 2000 万 hm^2 。

随着灌溉农业的发展,水资源的供需矛盾日益恶化,北方地区尤甚。由于未能科学利用,水资源短缺已成为农业发展的主要限制因素之一。黄河断流、淮河污染、耕地减少、草场退化、环境破坏、森林过度开采、土地荒漠化等问题日益突出,也是水资源过度开采造成的恶果。

比如,西北部约占国土总面积 47%,水资源量只占全国的 7% 左右,水资源短缺是该地区工农业生产水平低下,经济发展滞后的主要原因,甚至出现人畜饮水困难。

而从人均、地均来看,水资源匮乏该属海滦河流域为最(图 1 和图 2)。



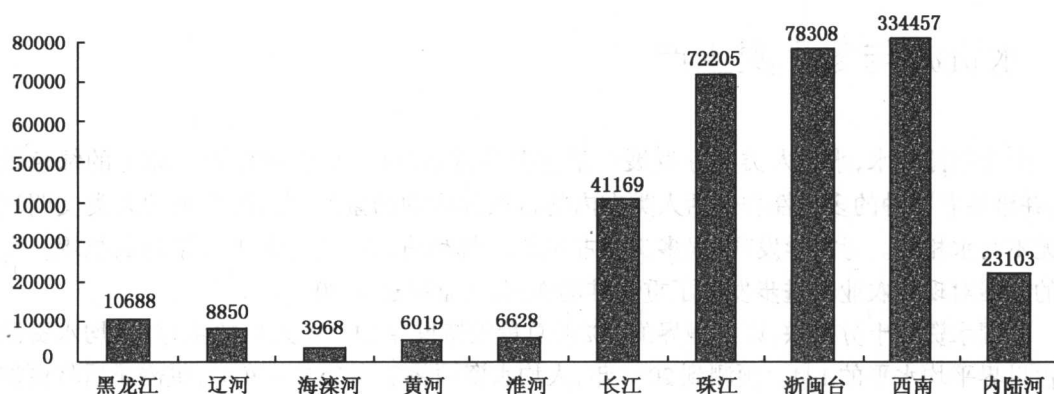


图2 中国不同流域地均水资源量(m^3/hm^2)

此区内,人口 1.13 亿,耕地 1061 万 hm^2 ,人均水资源量仅 372 m^3 ,远在“绝对贫水”线 (500 $\text{m}^3/\text{人}$) 以下,地均水量 3968 m^3/hm^2 ,仅为全国平均的 13.7%。而该区包括京、津两大都市,又是我国主要灌溉农业区域,交通便利,工业及人口密集,经济发展较快,文化发达,水资源的匮乏势必影响区域经济良性发展,生态环境恶化。

大量数据表明,由于地上水资源的不足甚至枯竭,北方地区地下水超量开采,导致地下水位持续下降,已形成大范围的地下水漏斗。水资源的补给量远远低于开采利用量,当代人正在毫无节制地喝着应该留给子孙后代的水。因此,节水型社会→节水型农业→作物节水栽培是北方作物种植业的发展必然,必须引起全社会的注意,要倡导人人关注节水,人人关爱自己的生存环境。

水资源日益匮乏,供求矛盾日益紧张愈来愈成为小麦生产的主要限制因素之一。社会发展、人口增长及生活水平的提高又对小麦生产提出了更高要求,即在不断缩减的可耕地上生产更多粮食。冬小麦生长期干旱少雨,需要灌溉来提高单产。不考虑水资源有限性,通过大量增加用水来达高产为生产条件所不允许;同时,只求以节水来维持水资源平衡而牺牲产量为代价也与社会发展要求不适应。为此促使人们思考怎样才能使节水与高产达到最佳结合。因此,研究小麦的节水高产就成为时代的要求,这就需要首先搞清节水高产的生理基础,并在此基础上提出相应综合调控技术。

自 20 世纪 80 年代以来,节水农业逐渐引起世人关注。研究多侧重于限水农田小麦 6000 kg/hm^2 以下水平的节水。由于节水技术的理论基础不坚实,技术的可操作性和可靠性及应用后的增产节水稳定性较差。有时出现水省了、产量也降了的现象。其关键问题是缺乏节水和高产如何有机结合的理论基础,尤其是作物本身的生理基础。小麦高产丰水区,人们往往忽视事实上已存在且日趋恶化的水资源匮乏的潜在危机。兼顾节水和高产,在 7500 kg/hm^2 高产甚至 9000 kg/hm^2 超高产水平的节水研究,国内外都很薄弱。

以往植物生理学上或以充足供水为前提来研究作物水分关系和生理反应,或以严重干旱胁迫为前提来研究干旱对作物的伤害和作物对干旱的适应。两种研究结果都有一定局限性,难以从中得到用于指导我国北方冬小麦区小麦生产实践的最优化管理技术方案。

我们的研究则以节水为出发点,以高产为目标对高产小麦节水栽培的相关理论基础问题进行全面系统深入研究。通过整个土壤—品种—根系—植株—叶片—产量—水分利用效率有机联系系统的认识,明确小麦节水高产的深层次理论问题。并在此基础上研究构建节水高产综合调控技术体系。

为了冬小麦生产的可持续发展,必须探明节水高产的生理基础。从节水高产的目的出发,必须搞清以下几方面的理论基础问题:

一是小麦实现节水高产的水分生理基础、光合生理基础、生长发育生理基础和物质积累运转生理基础等。一般而言,节水的实施是一项抑制性措施,产生一定的负效应是很必然的。因此,必须明了作物通过发挥哪些生理机制的调节和补偿甚至超补偿,从而达到既降低水分消耗又保证高额产量的形成;

二是研究控水的数量、时间、方式和强度及供水的时间、数量和方式与解决节省用水和提高产量这对既相关又矛盾的问题的关系,达到节水高产;

三是探明以水分为核心的土壤—水分—作物之间的关系,明确供水、吸水和耗水的基本机理特征与节水高产的关系;

四是研究基因型的节水生理特性与高产生理特性的有机组合,从而达到建立模型进行节水高产小麦基因型的评判和选育。

通过对土壤—品种—根系—植株—叶片—产量—水分利用效率有机联系系统的整体认识,明确小麦节水高产的深层次理论问题。综合起来,理论上要探明土壤水库在小麦节水高产中的作用、小麦根系发育和功能、植株水分关系特点、叶片和群体光合作用、节水高产基因型生理特点及综合评判和个体和群体发育等方面问题。在此基础上研究以调控人工供水和利用自然降水为核心的播前准备技术、播种技术和生育期管理技术等,最终形成节水高产的综合调控技术。最后,将调控技术在生产实践应用过程中不断充实、完善,从而构建起综合栽培调控技术体系,为农业的可持续发展服务。

确切地说,我们对冬小麦节水高产的理论和技术的研究应起始于1980年本书第一作者在中国农业科学院研究生院攻读研究生期间。20多年来,在承担国家自然科学基金、河北省自然科学基金、河北省农业省校合作基金和河北省农林科学院项目等多项课题就冬小麦的水分关系与节水高产开展研究工作。应用现代作物生理试验手段,以大田试验为主,生理池、盆栽、管栽和工气候箱试验等为辅,以水分关系和产量形成为中心贯穿全线,进行细致系统全面的生理基础研究。一般每类试验都进行2~3年以上重复。通过综合运用各种试验方法及试验环境条件,相互补充和验证。田间试验均采用随机区组或裂区设计,阶段水分调控,系统地比较不同水分条件的土壤水分状况,叶水势、气孔阻力、蒸腾,根系生长和功能,光合性能,群体结构和产量构成等变化,进行不同基因型生理特点与综合评价。对前控式节水调控模式连续12年反复验证其科学性。大量应用数据采集器和电子表格技术进行数据采集、处理和分析。应用数理统计方法分析试验结果。

笔者研究的总体设计方案是通过运用各种试验方法,试验处理和手段及试验环境条件,探明下述几方面的理论和实践问题。

1. 土壤水库在冬小麦节水高产中的作用;
2. 冬小麦根系生长和功能及与节水高产的关系;

3. 冬小麦节水高产的植物水分关系特点;
 4. 冬小麦的光合作用、糖氮代谢与节水高产;
 5. 冬小麦植株水分生理及节水高产基因型综合评判;
 6. 节水高产小麦的个体和群体发育及光能利用动态;
 7. 冬小麦的水分—产量关系与水分利用效率;
 8. 冬小麦节水调控的补偿超补偿效应;
- 这些效应通过上述 7 方面的研究综合分析归纳而来。
9. 抗蒸腾剂的应用于冬小麦节水高产;
 10. 冬小麦节水高产超高产栽培法。

研究技术路线是以高产小麦生育期水分关系和产量形成的基础性问题为中心,研究与小麦节水高产相关联的土壤、品种、植株、根系、产量形成和水分利用诸多特性,在理论研究基础上,着重提出以选用节水高产品种为前提的生态节水和生理节水并举的综合生理调控技术体系,并在生产实践中得到验证和广泛应用。

下面将分章节阐述笔者的研究结果与观点,以飨同行、农业科技教学人员和农民朋友。

2 土壤水库在节水高产中的作用

水是作物生长发育所必需的要素之一,作物通过根系从土壤中吸取水分,经由植株将水分运送到植株的各个部位,最后通过叶片的气孔和角质层向大气蒸腾失水。这一过程中,水分在作物的各种生理生化活动中起到举足轻重的作用。事实上,水在作物体内起到两种作用,一种直接是参与生长发育和生理代谢过程,这方面所消耗的水分占作物总吸水量的比例很小;另一种是作为物质运输、合成和转化的媒介物参与作物的生长过程。在土壤……作物……大气这一体系中,土壤水分居于牢固的支配地位,是植株水分的主要来源和保证。随着我国北方水资源匮乏的日益加剧,仅仅局限于水分充足条件下对作物需水和土壤水分关系的研究显然是不能满足生产的需求,因为不考虑水资源的有限性的大量增加用水以换取高产为生产条件所不允许。同时,社会的发展、人们生活水平的提高又对小麦产量提出了更高的要求,为此促使我们思考如何才能实现节水与高产的最佳结合和完美统一。其中,节水高产条件下的土壤水分运动特征和小麦的吸水、需水及耗水规律,供水量、耗水量灌水量与产量的量化关系模式必将成为研究的焦点之一。以此目的,我们运用各种试验处理和手段,以自然条件下的田间试验为主,盆栽、旱棚、生理池、管栽等试验为辅进行了多年的试验观测,主要研究结果汇总如下。

2.1 高产节水麦田的土壤水分动态消长

2.1.1 阶段耗水的比例关系

小麦的阶段耗水特征受其自身生长发育规律制约,同时受灌水、降雨、气候因子等因素影响。试验结果发现,不同阶段控水及充足供水具有不同的阶段耗水特征(表 2.1)。各年平均结果表现,充足供水的前、中、后耗水比例分别为 28%,35%,37%。前期控水平均使前期耗水减少到 21%,中期耗水比重增加到 46%。与传统阶段耗水比例(前期 30%~35%,中期 35%~40%,后期 30%~35%)及本研究的充足供水比较,前控、中控、后控及充足供水的拔节前后耗水比例分别为 1:3.8,1:1.9,1:1.8 和 1:2.6,前期控水明显减少了前期耗水,提高中后期尤其是中期的水分消耗。即高产节水小麦的水分消耗重心后移,从而进一步顺应小麦产量形成时期对水分的合理需求。

2.1.2 拔节前供水与作物和土壤水分消耗的关系

通过土壤水分的变化分析(表 2.2),前期供水增加了前期的水分消耗。小麦生育前期,植株个体小、生长发育缓慢、植株蒸腾低、土表的覆盖率小,地表蒸发剧烈。前期供水后形成的浅层高水分层使地表蒸发进一步加剧,增加了无效消耗。到返青期,冬前供水于越冬期的耗用率年度平均为 47%(36%~74%),越冬期雨雪较少,气温较高时,消耗率可达 74%。越冬期植株蒸腾仅为总耗水量的极少部分,即约 50%的冬灌水于越冬期通过土壤蒸发成为低效水。到拔节初期冬前供水已基本被耗尽,1989~1990 和 1991~1992 两年度平均耗用率为

97.5%,冬前供水与控水的土壤水分差别消失。若无冬前供水,返青水做为首次供水时,到拔节返青供水基本耗完。若将返青推迟到起身,拔节时的水分消耗率为46%。冬灌、返青2次灌水后,到拔节初期水分耗用率年均57.4%,实耗水量增加75 mm。小麦拔节前土壤蒸发约为同期总耗水量的89%,即前期两次供水后拔节前土壤蒸发消耗增加68 mm,前期供水增加了土壤耗水量。

表 2.1 阶段耗水比例

年度	处理	灌水量 mm	阶段耗水系数%			总耗水量 mm
			前期	中期	后期	
1986~1987	前后期控水	149	22.2	34.1	43.7	423
	中后期控水	102	36.2	30.1	33.7	379
	前中期控水	145	24.3	18.3	57.4	386
	充足供水	310	24.4	24.5	51.1	534
1987~1988	前期控水	216	15.9	58.8	25.3	433
	中期控水	225	33.5	18.1	48.4	394
	后期控水	220	34.2	34.9	30.9	484
	充足供水	343	26.8	32.9	40.3	537
1988~1989	前期控水	217	29.2	45.8	25.0	508
	中期控水	211	30.9	35.1	34.0	546
	后期控水	208	32.3	41.4	26.3	523
	充足供水	371	32.9	37.9	29.1	598
1989~1990 旱棚*	前期控水	250	22.3	41.2	36.5	402
	中期控水	250	39.7	31.2	29.1	406
	后期控水	270	41.9	49.2	8.8	432
	充足供水	510	28.7	38.7	32.7	653
1989~1990 田间	前期控水	111	17.0	50.5	32.5	450
	充足供水	224	26.0	41.1	32.9	558
年度平均	前期控水		21	46	33	448
	中期控水		35	29	36	449
	后期控水		36	42	22	480
	充足供水		28	35	37	596

*,因取土较浅,其中阶段耗水比例以80 cm土层内耗水量计算。

总耗水量年度平均为1987~1988、1988~1989和1989~1990旱棚三组数据结果。

拔节前控水的土壤水分状况受底墒、前期降水和气温等多种因素影响,以降水最为直接。相关分析表明播种至拔节0~40 cm土壤含水量的下降与拔节前降水量显著负相关($r=0.883^*$),40 cm以下土壤含水量变化趋势相同,但相关不显著。综合分析,可分为3种类型(表3.3):①拔节前降水>90 mm时,拔节初期0~40 cm含水量高于播种时值,前期土壤水分一直处于充足状态。6年试验中有1年属此类型;②前期降水在60~90 mm,拔节初期0~40 cm含水量明显低于播前值,40 cm以下和播前持平,没有明显水分胁迫,试验期间

亦出现 2 年;③拔节前降水 30~60 mm,1 m 内土壤水分显著降低,1~2 m 含水量也明显下降,土壤出现中度水分胁迫,3 年属此类型。年度平均播种至拔节 1~2 m 土壤含水量仅下降 9.7 mm,40~100 cm 降 12.6 mm。

表 2.2 前期供水的水分消耗

年度	处理	返青期 0~200 cm	播种- 前供处理	返青 前期供水	拔节期 0~200 cm	播种- 前供处理	拔节 前期供水
		含水量 mm	耗水增量 mm	消耗率 %	含水量 mm	耗水增量 mm	消耗率 %
1986~1987	冬前供水 58 mm	548	22.0	37.9			
	冬灌+返青 104 mm	548	22.0	37.9	580.0	48.0	46.2
	前期控水	512					
1987~1988	冬前供水 45 mm	433	16.1	35.8			
	返青水 62 mm				361.9	60.5	97.5
	冬灌+返青 128 mm	433	16.1	35.8	401.2	102.8	80.3
	前期控水	404			376.0		
1988~1989	冬前供水 60 mm	452	25.6	42.7			
	冬灌+返青 140 mm	452	25.6	42.7	425.3	70.5	50.4
	起身水 80 mm				399.0	36.8	46.0
	前期控水	418			355.8		
1989~1990	冬前供水 80 mm	214	59.3	74.1			
	旱棚* 冬灌+返青 150 mm	214	59.3	74.1	224.9	79.0	52.7
	前期控水	194			153.9		
1989~1990	冬前供水 70 mm	502	30.2	43.3	481.6	68.5	98.1
	田间 前期控水	462	...		482.9		
1992~1993**	冬灌 50 mm				327.5	48.5	97.0
	前期控水				326.0		

* ,旱棚取土深度为 80 cm; ** ,取土深度为 150 cm,其余均为 200 cm。

表 2.3 前期控水播种至拔节土壤含水量降低值(mm)

年度	土层 cm			降水 mm	
	0~40	40~100	100~200	拔节前	全生育期
1986~1987	35.5	5.4	7.4	59.8	147.0
1987~1988	7.1	-13.3	23.6	63.2	192.1
1988~1989	29.6	39.9	38.5	29.3	83.5
1989~1990	-18.3	-2.7	-23.7	121.0	257.3
1991~1992	59.8	31.8		29.8	108.2
1992~1993	35.8	14.7	2.7	41.2	70.5
平均	24.9	12.6	9.7	76.1	172.5

2.1.3 供水深度与土壤蒸发消耗

温室不同深度供水的管种试验证明:生育期地表供水造成表层湿润状态,随着土壤蒸