



旱地农业 高效节水与灌溉技术

马耀光 张保军 主编

翟惠平 丁瑞霞 李援农 副主编



化学工业出版社

旱地农业

高效节水与灌溉技术

马耀光 张保军 主编

翟惠平 丁瑞霞 李援农 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书系统地介绍了旱地农田水分、养分的相互作用,旱地土壤保墒技术,保护性节水覆盖栽培技术,旱地农业集雨利用工程技术,旱地农业补充节水灌溉技术,旱地农田提高土壤水分生产率途径,作物品种资源节水途径与技术,地下水资源的开发与利用等旱地农业节水技术。本着理论联系实际的原则,结合最新的理论和应用技术设计实例,对各种旱地农业节水的新理论、新方法和新技术进行了详尽的论述。

本书可供水资源利用、农业规划与管理、设施农业建设与管理、农田水利工程建设与运用等方面的科技工作者、广大的农业生产者和高等学校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

旱地农业高效节水与灌溉技术/马耀光,张保军主编.
北京:化学工业出版社,2012.3
ISBN 978-7-122-13321-2

I. 旱… II. ①马…②张… III. 旱地-农业灌溉-节约用水 IV. S275.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第015613号

责任编辑:李丽
责任校对:郑捷

文字编辑:刘砚哲
装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张19 字数383千字 2012年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:59.00元

版权所有 违者必究

前 言

中国是一个人口和农业大国，农业作为最重要的基础产业，其现代化和生产力水平相对较低，其中主要的制约因素是水资源短缺，尤其是在水资源严重不足和开发利用条件较差的中国北方地区以及更为广泛分布的雨养农业和旱作农业地区，有限降水资源的合理利用、可调蓄水资源的科学调控就成为旱地农业发展的生命线。因此，采取各种综合措施实行旱地农业高效节水技术，科学地利用有限的区域水资源，提高旱地农业区的水分生产效率，促进旱地农业、雨养农业和设施农业的健康发展，是现代旱地农业发展的必由之路。

旱地农业节水技术主要包括工程节水措施、农艺节水措施、管理节水措施和补充灌溉节水措施四个方面。前三种节水措施主要是充分利用区内降水资源、土地资源、种质资源及农业水肥管理与技术管理提高农田和作物水分生产率，后者主要是区外引水和区内集雨、蓄泉及地下水资源开发与调蓄利用的补充灌溉节水措施。工程节水措施是指通过在田间修筑各种辅助工程设施，如土地平整、坑垄、集水工程、截流或防渗工程等，减少地表径流和增加降水入渗、阻止土壤水分向超根层排泄及降水集蓄利用等节水措施；农艺节水措施是指通过各种耕作栽培方法保墒，提高作物光合效率和水利用效率的节水措施，如覆盖、培肥、良种选配及化学农业措施等；管理节水措施指通过各种科学经济的农业和农田管理措施优化各种农业生产环节和生产要素，促进节约用水和水分生产效率的提高；补充灌溉节水措施是在区内降水资源严重不足或无法利用的旱地区进行区外调水或区内可调控的雨水、泉流及分散的小型地下水资源的开发利用作为补充水源的节水灌溉利用措施。旱地农业节水技术的应用和发展，已经和必将产生巨大的农业经济效益和生态环境效益，为农业的粮食安全和生态环境保育作出应有的贡献。

本书的规划和编写大纲的制订由化学工业出版社编辑与西北农林科技大学马耀光、张保军等共同完成。编撰工作的分工如下：第1章由翟丙年、李世清、李紫燕执笔；第2章由张保军、丁瑞霞执笔；第3章由张保军、丁瑞霞、马林执笔；第4章由娄宗科、翟惠平、陈萍、李援农、阎宁霞执笔；第5章由李援农、翟惠平、阎宁霞、程冬玲、马耀光执笔；第6章由张保军、张正茂、马林执笔；第7章由张保军、张正茂、王新中执笔；第8章由蔡明科、程冬玲、马耀光执笔。马耀光、张保军担任主编，负责全书的统编定稿工作；翟惠平、丁瑞霞、李援农担任副主编，负责编写的组织协调、文稿的组织、编辑与勘订等工作，柴洁负责全书的外文资料和文献的整编与勘订工作。

本书的出版得到了西北农林科技大学水利与建筑工程学院、农学院、资源环境学院和西北农林科技大学图书馆的大力支持，编写工作还得到了山仑院士、李佩成院士、王立祥教授、蔡焕杰教授、刘俊民教授、魏晓妹教授和马孝义教授等的关心和帮助，在此，谨致以我们崇高的敬意和诚挚的感谢。

由于我们的学识水平所限，书中的缺点和错误在所难免，敬请专家和读者批评指正。

编著者

2011年1月

目 录

第 1 章 旱地农田水分、养分的相互作用	1
1.1 水分与养分的相互作用及机理	1
1.1.1 以水调肥的效应及机理	1
1.1.2 以肥调水的效应及机理	3
1.2 旱地农田水肥的相互作用	7
1.2.1 在低肥力土壤上水肥相互作用	7
1.2.2 在中肥力土壤上水肥相互作用	8
1.2.3 在高肥力土壤上水肥相互作用	8
1.3 水肥相互作用模型及其应用	9
参考文献	15
第 2 章 旱地土壤保墒技术	17
2.1 农业蓄水保墒机制	17
2.1.1 农田土壤水分状态	17
2.1.2 农业蓄水保墒机制	18
2.2 旱地土壤的蓄水技术	19
2.2.1 翻耕法	20
2.2.2 深松耕	21
2.2.3 水平等高耕作	22
2.2.4 修建梯田	22
2.2.5 等高垄沟耕种法	23
2.2.6 蓄水聚肥改土耕作法	24
2.2.7 川台地垄沟种植法	24
2.2.8 少耕免耕技术	25
2.2.9 轮作及种植结构调整技术	27
2.3 旱地土壤的保水技术	28
2.3.1 耙耱保墒	28
2.3.2 镇压保墒及提墒	29
2.3.3 中耕保墒	30
2.3.4 覆盖保墒	31
2.3.5 保水剂保墒	37
2.3.6 抗蒸腾剂保墒	39

2.3.7 土面保墒增温剂保墒（土壤结构改良剂保墒）	40
2.3.8 钙-赤合剂保墒	42
参考文献	43
第3章 保护性节水覆盖栽培技术	45
3.1 覆盖栽培技术	45
3.2 秸秆覆盖栽培技术	45
3.2.1 秸秆覆盖及其方法	45
3.2.2 秸秆覆盖对土壤含水量的影响	47
3.2.3 秸秆覆盖对土壤温度的调控作用	48
3.2.4 秸秆覆盖对土壤湿度剖面的影响	48
3.2.5 秸秆覆盖对土壤的培肥作用	49
3.2.6 秸秆覆盖的节水增产作用	50
3.3 塑料薄膜覆盖技术	52
3.3.1 地膜覆盖栽培的原理	52
3.3.2 地膜覆盖栽培的生物学效应	56
3.3.3 地膜覆盖栽培的增产效果	57
3.3.4 地膜覆盖栽培的方法	57
3.4 砂石覆盖栽培技术	65
3.4.1 砂石覆盖的作用	65
3.4.2 砂田的种类和建设	66
3.5 土表化学覆盖剂	68
参考文献	68
第4章 旱地农业集雨利用工程技术	70
4.1 集雨保水工程在旱地农业中的地位	70
4.1.1 雨水农业利用的主要途径	70
4.1.2 集水保水技术在旱地农业生产中的地位和发展前景	71
4.2 雨水集蓄利用工程规划	72
4.2.1 基本资料的收集	73
4.2.2 需水计划	73
4.2.3 集流面规划	76
4.2.4 蓄水工程规划	77
4.2.5 供水用水规划设计	77
4.2.6 工程建设投入产出分析	77
4.2.7 工程实施的规划	77
4.3 雨水集蓄利用工程设计与施工	77
4.3.1 集流工程	77

4.3.2	截流输水工程	84
4.3.3	蓄水工程	85
4.3.4	水窖辅助工程	100
4.4	集水工程管理	100
4.4.1	水质管理	100
4.4.2	工程管护	103
	参考文献	103

第5章 旱地农业补充节水灌溉技术 105

5.1	旱地农业节水的主要特点和增产机理	105
5.1.1	旱作物对农田水分的基本要求	105
5.1.2	旱作物生长对地面灌溉节水技术的基本要求	108
5.2	地面节水灌溉技术	108
5.2.1	地面灌水方法简介	108
5.2.2	评估地面灌溉节水技术的主要指标	109
5.2.3	畦灌技术及其改进	112
5.2.4	沟灌技术	121
5.2.5	涌流灌溉	126
5.2.6	节水型沟灌技术	128
5.2.7	果园地面灌溉	128
5.2.8	地膜覆盖灌水技术	132
5.3	管道输水灌溉技术	136
5.3.1	管道输水灌溉系统的类型与组成	137
5.3.2	系统规划与布置	138
5.3.3	管网规划布置	140
5.3.4	田间灌水系统布置	143
5.4	喷灌技术	145
5.4.1	喷灌的特点	145
5.4.2	喷灌系统的组成和分类	145
5.4.3	规划设计基本资料	146
5.4.4	喷灌工程规划设计	147
5.5	微灌技术	153
5.5.1	微灌技术及特点	153
5.5.2	微灌系统设计	154
5.5.3	设计实例	158
5.6	渠道防渗工程技术	169
5.6.1	概述	169

5.6.2	渠道防渗工程设计和施工的基本规定	171
5.6.3	砌石防渗	179
5.6.4	混凝土防渗	180
5.6.5	沥青混凝土防渗	186
5.6.6	膜料防渗	190
	参考文献	202
第6章	旱地农田提高土壤水分生产率的途径	204
6.1	旱地农田土壤水分动态	204
6.1.1	裸地土壤水分动态	204
6.1.2	非裸地土壤水分动态	208
6.2	旱地农田土壤水平衡	216
6.2.1	主要农作物耗水规律	216
6.2.2	影响土壤水分利用率提高的主要限制因子	217
6.3	提高土壤水分生产率的途径	219
6.3.1	选用抗旱节水优良品种, 改善种植结构	219
6.3.2	保护性耕作提高土壤储水能力	219
6.3.3	覆盖保墒技术	220
6.3.4	化学调控技术	221
6.3.5	水肥耦合技术与水肥一体化技术	222
6.3.6	节水灌溉技术	222
6.4	旱地耕作改制与农林牧综合发展	223
6.4.1	旱地农业区农业结构分析	224
6.4.2	旱作农业区农业结构调整的基本原则和技术途径	228
6.5	耐旱节水高产良种的选用及品种搭配	233
6.5.1	选用与当地自然和生产条件相适应的品种	233
6.5.2	注意提纯复壮当地品种	233
6.5.3	制定适应的种植制度	233
6.5.4	注意开发和利用水资源	233
6.5.5	合理配置作物品种	233
6.5.6	提高作物播种质量	234
6.5.7	及时管理、适时收获	234
	参考文献	234
第7章	作物品种资源节水途径与技术	236
7.1	作物抗旱的基本机理与类型	236
7.2	耐旱作物品种资源与节水栽培途径	237
7.2.1	小麦	237

7.2.2	谷子与糜子	241
7.2.3	甘薯与马铃薯	243
7.2.4	高粱	247
7.2.5	荞麦	249
7.2.6	大豆与杂豆	253
参考文献		260
第8章 地下水源的开发与利用		261
8.1	地下水分类、分布与富集规律	261
8.1.1	地下水的分类	261
8.1.2	地下水的基本类型与富集规律	261
8.1.3	地下水分布及富集规律	268
8.2	地下水资源的调查与评价	270
8.2.1	地下水资源的调查手段与方法	270
8.2.2	地下水资源的概略评价	273
8.3	地下水源的开发规划	277
8.3.1	规划原则	277
8.3.2	规划分区	278
8.4	小型地下水源利用工程	279
8.4.1	泉水的利用工程	279
8.4.2	井的设计、施工	280
8.4.3	地下水截流工程	287
8.4.4	小型地下水库	289
8.5	地下水资源保护	290
8.5.1	地下水超采区治理	291
8.5.2	地下水水源地保护	292
8.5.3	地下水污染防治	293
8.5.4	地下水人工补给	294
参考文献		296

第 1 章 旱地农田水分、养分的相互作用

水分和养分既是影响旱地农业生产的主要胁迫因子，也是一对联因互补、互相作用的因子。它们既有自己特殊的作用，又互相作用，影响着彼此的效果和作物产量，形成了一条水分-养分-作物产量相互作用的链条。

本章重点论述水分和养分的相互作用，阐明其相互作用的效应及机理，以便充分揭示和利用水分和养分之间的耦合效应，使其发挥最大的增产效果，从而提高旱地水分和养分的利用效率，达到高产、高效、保护环境之目的，真正做到旱地农业的可持续发展。

1.1 水分与养分的相互作用及机理

1.1.1 以水调肥的效应及机理

以水调肥的效应及机理主要表现在以下 5 个方面。

(1) 增加土壤养分有效性

在影响土壤养分有效性的所有因子中，水分起着极其重要的作用。土壤水分状况通过影响土壤和肥料不同位点无效养分（包括作物残留物）向作物可利用的有效养分的转化及其转化速率，从而影响着作物对养分的吸收和肥料效果。

Stanford 等（1974）在不同水分条件下，对土壤中有机氮矿化进行了研究。结果表明，2 周时矿化出的氮量随土壤水分成比例增长。国内一些研究者也对土壤进行长期培养试验以研究有机氮矿化与土壤水分的关系，发现这种线性相关关系不仅适用于短期试验 [2 周，相关方程为 $y = -3.68 + 1.06x$ ($r = 0.99$)]，同时也适用于长期培养试验 [21 周，相关方程为 $y = 9.59 + 0.90x$ ($r = 0.99$)]。

Marschner（1986）认为，水分供应的变化，既能改变根系分布情况，也能改变从不同深度土壤吸收养分的情况。Grimme 等人（1981）的试验表明，生长在黄士类土壤上的春小麦，生长后期吸收的钾量平均约有 50% 来自底土，而生育期降雨量不同，作物对底土养分吸收数量不同，早年约有 60% 来自于底土，湿润年则为 30%。

Vig. A. C. 发现，土壤水分状况可提高磷肥撒施的效果。在土壤较湿润情况下，小麦吸收磷更多。当小麦吸收土壤磷随灌水而增加时，吸收肥料磷随即下降。小麦吸收土壤磷与土壤水分状况呈线性关系。Qiupeng Zeng 对钾的研究发现，在壤土上种植玉米，若土壤水分干湿交替，尤其是水分缺乏状况下，会增强土壤钾素

的固定,降低土壤钾的移动性,而且抑制植物生长,从而减少了植物对钾离子的吸收。

水分不仅影响土壤有机氮的矿化,还影响着铵态氮在土壤中的硝化。李生秀等(1995a)采用氯化铵、尿素和碳酸氢铵3种氮肥进行的硝化试验表明,3种肥料第3天的平均硝化速率和含水量之间的相关系数为0.975 ($n=6$, $p<0.01$);土壤含水量每增加1%,硝化速率增加 $0.625\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 。在试验的水分范围内(12%~27%),土壤水分含量越高,硝化速率越快,铵态氮就越容易向旱地作物易于吸收的硝态氮转化。

(2) 促进养分迁移

土壤中的养分只有溶解在水中才能通过流动或扩散到达根系表面而被植物吸收,养分在土壤中移动的速度和距离与土壤含水量密切相关。随着土壤含水量的降低,离子的扩散速度也会变慢。

矿质养分由土壤向根表的迁移分为两种主要形式,即质流和扩散。Ca、Mg、N等养分离子大多是通过质流迁移的;而P、K等养分离子则更多地是通过扩散迁移的。有研究表明,旱地小麦由质流和扩散供给的氮素分别占82%和7%(史瑞和,1989)。Reager等人(1981)用甜菜、春小麦和春大麦进行的试验结果表明,以质流供给作物的硝态氮所占比例最高。质流是水分驱动的物质转移,扩散是水介质中的离子行为,因而充分的水分供应,有利于养分在土壤中的迁移。

(3) 提高养分吸收

土壤水分供应是否适宜,直接影响到作物的长势,决定着作物的物质合成及其生命进程,决定着作物根系的活力,从而影响到作物对养分的吸收与利用。

据研究,水分亏缺除影响养分运输外,还影响植物代谢。代谢功能紊乱,有机物质降解,光合速率下降,抑制根系生长,降低根系的吸收面积和吸收能力,木质部质流黏滞性增大,最终导致养分的吸收和运输能力下降。Makarov(1969)研究表明,在湿润年份氮肥利用率为43%~53%,而在干旱年份仅为34%左右。赵振达和张金盛(1979)的研究结果表明,当盆栽土壤水分状况在萎蔫系数($pF=4.1$)以下时,氮肥几乎不能被小麦吸收利用,利用率仅1.93%;而当土壤湿度在 pF 为2.7~3.1时,利用率高达35.3%~38.7%。王小彬等(1988)研究发现,地上部和地下部干物重量和P、K的吸收量均随着土壤水分含量增加而增加。当土壤含水量为12.1%时,植株地上部干重2.2g,含磷0.13%,含钾2.6%;当含水量为20.8%时,植株地上部干物质重2.9g,磷、钾含量分别为0.21%和3.8%。当然,过高的土壤水分对作物吸收养分也有不利影响。Torbert等人(1992)发现,土壤含水量过高时,氮肥的利用率反而降低,而且还常因某些离子(如 Fe^{2+} 和 Mn^{2+})浓度过高,造成植物吸收过量而中毒。

水分对作物吸收养分的影响也可从伤流液中养分数量予以说明。李生秀等

(1995) 对伤流液的测定表明, 伤流液中的铵态氮、硝态氮和氨基酸与伤流量的变化一致, 此高彼高, 此低彼低, 相依相存, 均随土壤含水量而变化。土壤水分供应情况好时 (如覆膜或灌水), 均高; 反之, 均低。

(4) 促进养分向籽实体分配

水分不仅影响着根系对养分的吸收, 而且还影响其在作物体内的分布, 促进养分向籽粒和果实转移和分配。

Singandhupe 等人 (1990) 报道, 延长水分胁迫时间, 会使水稻吸收的氮素分配模式发生变化, 向籽粒中分配的氮素减少 16.5%。王小彬等 (1993) 分别给冬小麦和夏玉米灌水 70mm 和 60mm 后发现, 在平均施氮量为 $112.5\text{kg}/\text{hm}^2$ 时冬小麦和夏玉米籽粒中的氮素分别增加 0.07% 和 0.03%, 而茎叶中减少 0.12% 和 0.14%。李世清等 (1994) 的试验也得到了类似结论。Campbell 与 Paw 的研究也表明, 水分充足条件下, 春小麦籽粒中分布的氮素提高了 7%, 茎叶和根部的氮素分别减少了 4% 和 5%。可见, 水分能突出促进氮素向经济产物中的转运与积累, 在产量提高的同时, 保证了产品的养分含量维持在一定水平, 使作物品质不至严重下降。

(5) 提高肥料效果

水分能促使土壤养分矿化, 土壤养分向根表运移, 促进养分的吸收和转运, 因而能显著提高肥料效果, 但水分对肥料效果的影响与土壤水分状况有密切关系。水分胁迫条件下, 施肥有时不但没有良好效果, 反而还有危害; 水分过多, 有些养分会被淋失, 也不利肥料作用的发挥; 只有在合适的水分供应条件下, 才能充分发挥营养物质的功能。

1.1.2 以肥调水的效应及机理

以肥调水的效应及机理主要反映在以下七个方面。

(1) 增加土壤蓄水保水能力

培肥农田, 特别是增加有机质含量, 改善土壤结构, 能增加土壤的蓄水保水能力。李玉山对渭北旱源不同地带小麦水分利用效率进行的分析表明, 水分利用效率的高低和土壤肥力的高低分布相一致, 同一地区水分生产效率之所以相差很大主要在于土壤肥力高低的不同 (李玉山, 1983)。Jamison (1953) 发现, 砂质土的保水能力与土壤有机质含量间存在高度正相关关系。张绍元等 (1982) 报道, 每公顷施 75t 有机肥的旱地麦田, 比同类瘠薄地 2m 土层中多储 44.7mm 的降水。程素云 (1987) 报道, 施有机肥可使红油土 2m 土层中的储水量增加 30mm。马耀华等 (1984) 的研究表明, 有机肥和化肥合理配施, 能提高土壤有机碳含量, 促进土壤有机无机复合胶体的形成, 有助于改良土壤结构, 增大土壤保水能力; 增加土壤养分, 改善作物营养状况, 增强作物对深层土壤水分的利用, 提高作物的水分生产效率。

施肥还可提高土壤水势，特别是在低含水量和作物生育中前期的土壤水势，使原来一部分对植物“无效”的水变得“有效”（赵立新等，1991）。Unger（1975）用多元回归方法证明，土壤有机质含量每增加1%，植物可利用的土壤水分（体积含水量）增加1.8%。

（2）促进根系生长发育

施肥对作物根系生长发育的影响已有许多研究。Smith（1954）指出，旱作农田施肥可较早地促进植物生长，使根系较快进入深层，从而有效地吸收休闲期储积在深层土壤中的水分。Brown（1972）发现，小麦植株对土壤水分的吸取深度，不施氮时仅局限在91cm土层以内，施用氮肥后，深度增加一倍，水分利用率显著提高。李立科等（1983）在渭北旱原进行的试验表明，磷肥可促进小麦根系发育，加强对深层土壤水分的吸收利用。不施肥、施氮、施磷时的根系深度分别为1.4m，1.45m和2.7m；不施肥和施氮者，收获前8天140~200cm土层含水量分别为17.4%和18.2%；施磷者，0~200cm土层几乎已无可被小麦吸收利用的水分。磷肥虽然可增加根系长度，但如氮素不足，根系的生长量增加并不明显（王同朝和李凤民，1998）。合适的氮、磷配合，既能促进根系延伸，也能增加根系的密度和生长量，特别有利于作物吸收利用深层土壤水分（Gregory，1988），这已为大量的试验所证明。Gregory（1988）在叙利亚北部进行的试验显示，施磷仅能增加表层土壤中的根长，而氮、磷配合施用会增加整个土壤剖面内的根系。Brown等人（1987）的试验结果也同样表明，氮、磷混施能增加整个生根深度内的根长，特别是表层和深层土壤中的根系生长量。李生秀等（1994）研究了氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果后认为，根系的发育程度对于作物的生产力，尤其对旱地作物的生产力，有着特别重大的意义。根系不仅在吸收养分中有着巨大的不可替代的作用，而且在吸收可移动的水分中也有巨大的作用。施肥促使作物根系发育，扩大作物利用土壤水分范围，是其提高作物利用土壤水分和养分的前提。杜建军等（1995）研究表明，合理施用氮肥和磷肥能促进作物根系发育，扩大作物觅取水分和养分的土壤空间，从而促进作物对土壤水分和养分的利用。赵立新等（1991）认为施肥可以改善土壤养分状况，促进根系发育，提高根系从深层吸收水分的能力。史奕和邹邦基等（1995）的研究表明，不同施肥处理使小麦根系的长度，重量和体积均有不同程度的增加，并使小麦根系活力增强，同时，也加大了小麦对土壤水分的利用，提高了水分利用效率，显示了以肥调水的效果。

（3）提高作物摄取和转运土壤水分的能力

施肥的一个主要作用是提高作物吸取、转运、利用土壤水分的能力。与不施氮相比，施氮后不但根系发达，而且具有较强的吸收和转运水分和养分的能力。这可以从作物的蒸腾强度、伤留量和叶水势说明。

蒸腾作用是作物吸收和运输水分的动力之一，它的大小反映着作物生长势的强

弱,也反映着作物吸取水分和养分能力的大小。蒸腾强度越大,作物根部吸收的水分越多,养分通过质流到达根系表面的数量也就越多,就越有利于作物对水分和养分的吸收。同时,蒸腾量增加会促进木质部水分和矿质元素向地上部转运,既增强了作物对水分的吸收,也增强了作物向上转运水分的能力。

伤流量和蒸腾量相似,既是作物生长强弱的反映,也是作物吸收转运水分和养分能力的标志。在相同的水分条件下,伤流量的大小反映了根压的大小和主动吸水过程的强弱。春玉米和冬小麦的田间测定结果表明,施氮后伤流量增加,伤液液中的硝、铵态氮和氨基酸含量也明显提高。氨基酸氮含量提高表明了根系活性增强,有利于作物吸取和运转土壤水分。

叶水势的高低既可反映土壤供水能力的大小和作物缺水的程度,也可反映叶片从其他器官中吸取水分的能力,叶水势越小,吸水力越高。叶水势降低和蒸腾强度增高有利于水分向地上部分迁移。

(4) 改善作物水分状况

据研究,氮、磷、钾营养可增加作物细胞原生质胶体水合度,提高原生质的保水能力,增加束缚水含量。李英(1991,1992)和张岁岐等(1995)在冬小麦和春小麦上的试验结果表明,正常供水条件下,春小麦叶片水势 Ψ_w 和相对含水量 RWC 在不同施肥处理间变化不大;中度干旱情况下, Ψ_w 虽无明显变化,但 RWC 在不施肥处理上则明显提高;严重干旱情况下,施肥处理的 Ψ_w 明显降低,而 RWC 则升高。这说明不同干旱下,施氮对春小麦水分状况有明显影响,施氮改变了春小麦受到水分胁迫的进程,严重干旱情况下,施氮具有增加叶片“水容”的作用(RWC 升高),提高了叶片的保水能力,在一定程度上提高了其耐旱性。

渗透调节是作物适应干旱逆境的一种重要的生理机制,它是通过细胞溶质的大量自动累积以降低渗透势从而维持叶片膨压和细胞体积的有效方式(王韶唐,1983)。薛青武(1990),李秧秧等人(1993)的研究表明,在 N、P、K 亏缺的土壤上单施 N、P、K 或三者配合均可提高小麦叶片的渗透调节能力。如在严重土壤水分胁迫下,高 N、中 N 和低 N 小麦叶片的渗透调节能力分别为 0.43、0.38 和 0.07MPa;在土壤含水量分别为田间持水量的 30% 和 50% 时,施 P 春小麦叶片的渗透调节能力分别较相应的不施 P 处理高 0.03MPa 和 0.12MPa,表现出随营养水平的提高渗透调节能力增强的趋势;K 素营养也表现出相同的作用。张岁岐,山仑等(1995)的研究也表明,不论是施肥处理还是不施肥处理,在干旱情况下,春小麦都产生了渗透调节,但施氮处理的渗透调节能力要明显大于不施氮处理,而且在同等干旱情况下,施氮越高,渗透调节能力越强,这说明干旱情况下,施氮处理由于渗透调节作用对膨压和生长的维持要大于不施氮处理。据李秧秧等(1993)的研究,无机营养提高作物渗透调节能力的作用与土壤水分胁迫状况有关,如 N、P、K 配合时,在土壤含水量为毛管持水量 40%~70% 范围内,不施肥与施肥处理

叶片的渗透调节能力基本相同，而在相对含水量为 20%~40% 范围内，施肥叶片的渗透调节能力明显大于不施肥处理，且随土壤含水量的下降，渗透调节能力的差异增大。

(5) 提高作物蒸腾，减少蒸发

蒸腾作用的强弱是植物水分代谢的重要生理指标。干物质的形成，作物产量的高低都与蒸腾量和蒸腾效率有关，与蒸腾相反，蒸发却是水分的无效消耗。因此，提高作物的蒸腾量和蒸腾效率，尽量减少水分的无效损耗在旱地农业生产中更有着特别的意义。

李世清等（1995）的研究表明，施肥以后蒸腾损失的水分增加，而蒸发损失的水分减少，蒸腾与蒸散（ T/ET ）所消耗的水分比值明显提高。蒸发减少程度和蒸腾蒸散比值提高程度均与施氮量有明显的线性关系。原因在于施肥后，作物长势强，能较多地利用土壤水分，使蒸发损失的机会减少，同时较大的叶面荫蔽地面，又降低了土壤温度，降低了蒸发速率。不仅如此，施肥还提高了作物的蒸腾效率，从而也增强了作物的光合能力。施肥促进作物对水分的吸收、转运和利用，因而一方面作物生长健壮，茎叶增加，扩大了光合作用场地，另一方面原料充分，形成了更多的光合产物。

(6) 增强光合作用，提高光合效率

许多研究表明，施肥可以提高作物的光合作用能力，从而促进干物质的形成和积累，增加产量。杨建昌等（1996）的研究表明，不同土壤水分状况下氮素对作物光合速率和气孔导度的影响不尽相同。在土水势为 0 和 -30kPa 两种土壤水分状况下，中氮和高氮处理的叶片光合速率均较低氮处理有显著增加；当土水势为 -60KPa 时，中氮处理显著提高了叶片的光合速率，高氮处理则降低了叶片的光合速率，气孔导度与光合速率的趋势一致。

李秧秧等研究表明，施肥有助于提高作物的净光合速率，N、P、K 均有此作用，但施肥提高作物净光合速率的程度依赖于作物受到土壤水胁迫的程度。如在轻度和中度水分胁迫下，N 水平较高的叶片其光合速率也较高；但在严重水分胁迫下，不同 N 水平之间的光合速率差异不大，在 25% 的土壤相对含水量下，低 N 叶片的光合速率甚至高于高 N 叶片。当土壤含水量为持水量的 75%、50% 和 30%，施 P 春小麦叶片的净光合速率分别为 9.52、6.31 和 4.19mg (CO_2)/(dm²·h)，而相应的缺 P 处理则分别为 6.89、5.49 和 3.00mg (CO_2)/(dm²·h)。在相同的土壤水分胁迫程度下，缺 K 玉米叶片的光合速率为 2.80μmol/(m²·s)，而施 K 处理的则为 5.35μmol/(m²·s)。由于在缺肥情况下，N、P、K 单施均有提高受旱作物叶片净光合速率的作用，因而混施情况下，施肥也明显提高了受旱作物叶片的净光合速率（穆兴民，1999）。杜建军等（1995）的研究结果表明，水分供应比较充分的条件下，施用氮肥能明显地增大冬小麦的叶面积，提高了净光合速率和叶片糖分浓度；水分供应不足，作物受到水分胁迫时，施肥处理的叶片气孔阻力较未施肥

处理的增大，对光合作用有不利影响，但由于叶肉细胞的光合活性增强，净光合速率仍然提高，糖分浓度依然增加。

(7) 提高作物水分利用效率

施肥显著增加了作物产量，因而也显著提高了水分利用效率。李世清等(1995)在低肥力田块的玉米试验表明，无论是籽粒还是干物质，施氮区与不施氮区相比，水分利用效率明显提高，用蒸散量计算出的水分利用效率 WUE_{ET} 均随施氮量增加而增加。未覆膜时施肥比未施肥籽粒增加 $7.3\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ (增加效率为 59.5%)，干物质增加 $7.8\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ (24.3%)；覆膜时，籽粒增加 $5.4\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ (103.6%)，干物质增加 $68.1\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ (54.3%)。小麦试验表明，在高肥力土壤上施肥对提高水分利用效率的作用不大，而在低肥力土壤上特别突出。低肥力田块，不论灌水与否，水分利用效率随施肥水平提高而显著提高，直到最高氮磷组合。平均每毫米水分利用效率比不施肥处理 (N_0P_0) 增加籽粒 $3.8\text{kg}/\text{hm}^2$ ；在高肥力田块，不灌水时， WUE_{ET} 随施肥水平的提高忽高忽低，无明显规律；灌水后 WUE_{ET} 随肥水平提高呈增加趋势，但增加幅度不大，仅比不施肥增加 $1.4\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 。显然，施肥对高肥力土壤的水分利用效率影响不大(李生秀等，1995；高亚军等，1995)。这一事实充分说明在低肥力土壤上施肥才可以充分发挥“以肥调水”的作用。试验还表明，用蒸腾量计算，玉米的水分利用效率 (WUE_{ET})，因产物不同而异；籽粒的 WUE_{ET} 与施氮量成直线关系 (相关系数 $r=0.955^{**}$ ， $n=5$ ，**表示相关系数达极显著水平。)，而干物质的 WUE_{ET} 不随施氮量而变化 (相关系数仅为 0.192， $n=5$)，这表明施肥对提高经济产物的水分利用率更为有利。

1.2 旱地农田水肥的相互作用

在水资源有限的条件下，旱农地区农业生产的关键是水、肥的合理配合。拦蓄雨季地表径流或利用地下水，进行节水灌溉，配合施肥 (特别是氮肥)，充分发挥水肥的协同作用是近年来旱农地区研究的热点。不少研究表明，水肥交互作用与土壤肥力有密切关系。现以西北农业大学植物营养研究所在半干旱偏旱区澄城县高、低肥力红垆土 (李生秀等，1995f；高亚军等，1995a) 及杨陵中等肥力红油土 (李世清等，1995) 以冬小麦为对象所进行的试验资料为例，对此进行详细分析。

1.2.1 在低肥力土壤上水肥相互作用

在旱薄红垆土上研究表明，水肥皆有增产效果，肥料效果更突出，可使产量提高 2.16 倍，而灌水效果远较此逊色。两种肥料中，氮肥效果更引人注目，作物产量随施氮量增加而显著增高，而磷肥效果的大小则和氮肥配合、灌水与否则有

密切关系。灌水和施肥均提高了作物产量，其间有明显的正交互作用，它们之间的交互作用值为 $157.4\text{kg}/\text{hm}^2$ ；不同用量的 N、P 配合也有明显交互作用，大小因灌水而不同。施入的肥料有一定后效，后效大小取决于肥料用量及前作产量。第二作持续施肥，肥效降低。灌水和施肥都提高了作物吸收 N、P 的数量，两者配合，吸收的数量更多。不同肥料组合对作物吸收 N、P 养分有不同效果，吸收氮量最高的肥料组合与产量最高的肥料组合不一致，表明了利于作物吸收养分的肥料组合不一定利于促进作物生长。氮磷肥料用量对作物吸收这两种养分的交互作用因灌水、前后作而不同，但两作吸收养分的多少有互补作用。在灌水情况下，氮素利用率随肥料增高而上升；未灌水时，则由低量到中量时上升，然后下降。第二作继续施肥时，利用率下降。土壤储水随产量升高而下降，作物耗水量则随产量上升而上升，耗水多者夏季休闲蓄水多，休闲效率高；反之则低。水分利用效率随 N、P 用量配合的升高而升高，耗水系数呈相反趋势。灌水与降水的水分利用效率基本等同。施肥后土壤的有效 N、P 有一定变化。表层 $0\sim 20\text{cm}$ 土壤有效磷有随施氮、施磷水平提高而提高的趋势，而 $0\sim 100\text{cm}$ 的硝态氮含量显然和原来施用氮肥的水平有关。

1.2.2 在中肥力土壤上水肥相互作用

在杨凌中等肥力的红油土上进行的玉米水肥配合试验（李世清等，1994）表明，施肥有明显的调水作用，灌水也有显著的调肥作用。灌水量少时，水肥的交互作用随肥料用量增加而增加；灌水量多则有相反趋势。灌水提高了当季作物产量和肥料利用率，却降低了后作产量及肥料效果。但从总体来看，灌水提高产量，增加肥效的作用仍然突出。不管灌水与否，当季作物的肥料利用率均随用量增加而降低，而两季作物的肥效却随用量增加而升高。水肥配合可改变籽粒和茎叶的构成，改变两者间的养分分配比例，有利于形成更多的经济产物。

中等肥力红油土上的试验表明（李世清等，1995），降水较丰的年份，灌水无效果；而合适的肥料配合则有突出的增产作用。在供试土壤矿质氮较高，有效磷较缺的情况下，最佳的肥料配合是 $\text{N } 45\text{kg}/\text{hm}^2$ ， $\text{P } 29.4\text{kg}/\text{hm}^2$ 。当季作物收获后，施磷土壤有效磷变动不一；而施氮土壤剖面累积有大量硝态氮。土壤在休闲期间矿化出的无机氮素较高，休闲期间和后续作物生长期间的降水量又较少，肥料中残留的氮素虽使作物的吸氮量提高，但并未明显地提高作物产量。

1.2.3 在高肥力土壤上水肥相互作用

旱地红垆土上的试验结果表明，灌水效果特别突出，肥料效果相对逊色。不施肥时，灌水增产效果是旱薄地的 3.3 倍；施肥时，是 1.7 倍。虽然该土壤上的肥效