

旱地农田肥水协同效应与耦合模式

汪德水 主编

气象出版社

主 编:汪德水
副 主 编:高绪科 金轲
编 委 会 成 员(以姓氏笔画为序)

卢明远	吕殿青	汪德水	李生秀	李晓林
李世清	李秧秧	邹邦基	陈利军	陈新平
周 涌	金 轲	高绪科	张岁岐	戴万红

专题第一主持人:汪德水

专题第二主持人:邹邦基

专题技术负责人:汪德水

专题全程参加或部分参加人员有:

中国农业科学院土壤肥料研究所:	汪德水	曹 恭	程宪国	张美荣
	姚晓晔	周 涌	金 轲等	
中国科学院沈阳应用生态研究所:	邹邦基	史 奕	陈利军	朱 玺
	党连超	王 虹	莫润苍	李书鼎
	<u>周可林</u>	卢明远	杨玉兰	刘焕然
	唐英信	郭秀银	赫荣臻等	
陕西省土壤肥料研究所:	吕殿青	戴万红	张文孝	张 航
	谷 洁	方日尧	张立新	何绪生
	刘 军等			
西北农业大学:	李生秀	李世清	肖俊璋	高亚军
	杜建军	王喜庆	田霄鸿	巨孝堂
	吕家珑	王朝辉	贺海香等	
中国科学院西北水土保持研究所:	张岁岐	李秧秧	徐 萌	张春雷
	梁银丽	刘忠民	山 仑等	
中国农业大学:	李晓林	陈新平	易小琳	王沛芹等
河南洛阳农科所:	郭世昌	王书子	王自力	陈瑞玲等
河北省邢台地区土肥站:	杨晋臣	贾云翠等		

前 言

在人类即将步入21世纪的前夕,随着人口日益增多和经济的迅速发展,粮食紧缺、资源减少和环境污染已经成为最迫切需要解决的全球性重大问题。

粮食问题是人类永恒的主题。国内外不少专家提出:中国粮食供需前景不容乐观。工业化和城市化挤占了大片农田,农用水资源日趋紧张,与此同时人口对粮食的需求剧增,这种情况必然导致我国粮食供求关系日趋紧张。我国政府提出2000年粮食总产将达5亿吨。从潜力上看,实现这一目标是可能的,但难度很大。其中农用水资源的短缺是影响我国粮食持续增长的关键因素。所以,提高粮食生产,首先必须解决农用水的紧缺问题。目前我国的资源水问题是一方面数量不足,另一方面是用水浪费,利用效率和利用率低;肥料是粮食作物的粮食,近几年来化学肥料用量逐年增加,而肥料的增产效率却在下降。据有关文献报道,我国化学肥料用量增长了90%以上,而粮食产量却只增长了9.1%。产生这种结果的原因是复杂的。水分的有效性影响着整个土壤的微生物作用、物理化学作用和植物体内的生理生化过程,使得土壤养分和土壤水分密切而复杂地联系在一起。加之土壤本身又是一个相当复杂的多相体系,施入土壤中的营养物质,在多种因素的影响下并非全部有效。所以,在植物生长过程中,水和肥的关系是一个综合因素影响下的结果。

肥和水是旱区农业生产的重要物质资源,水是肥效发挥的关键,肥是打开水土系统生产效能的钥匙,肥水耦合效应是争取作物高产、优质、高效的必由之路,是在现有条件下不增加施肥数量获得最大经济效益的一门科学和实用技术。因而,是旱区农业综合发展和中低产田治理的关键要素。

这个问题的解决可使平衡施肥更加科学合理,在不增加施肥数量的前提下提高肥料的利用率和水分的利用效率以及防止不合理施肥造成的土壤和水体污染与肥料流失,使生态环境得到良性循环。

“八五”期间,国家旱农项目把“旱地农田水肥交互作用及耦合模式研究”作为攻关重点专题,由中国农业科学院土壤肥料研究所为第一主持单位和中国科学院沈阳应用生态研究所共同组织了中国农业大学、西北农业大学、中国科学院西北水土保持研究所、陕西农业科学院土壤肥料研究所以及河南洛阳农科所等7个单位,60余名科技人员,多学科、多专业联合攻关,五年来,在辽宁、北京、河北、河南、陕西、宁夏、内蒙古等7个省市自治区17个县进行了上百次实验,从土壤、作物、生理、生化、生态以及土壤—作物—大气连续体系统地从理论到实践取得了前所未有的成绩,在一些领域获得突破性的进展。已出版了《旱地农田肥水关系原理与调控技术》一书,已引起广大农业科学工作者的兴趣。为了进一步使攻关内容系统化、科学化,也为了满足不同层次读者的愿望,因此我们再出版一本较为系统的专著——《旱地农田肥水协同效应与耦合模式》。为了从科学上理论上阐明肥水耦合的机理,满足高层次的研究人员的需要,正在着手编写《旱地农田肥水耦合机理研究》一书。

本书所用材料,仅限于各承担单位 5 年来试验研究的内容总结,是来自实践的理论总结,具有可靠的科学性,对肥水关系的研究和专业教学均有重要的参考价值,也可供农业主管部门、生产部门制定农业生产中的肥水调控和推广应用的技术参考。

本研究内容是国家“八五”重点攻关《北方旱区农业综合发展研究》中的一个专题,在“七五”攻关研究中发现水肥关系问题不解决,合理施肥,提高资源利用效率,和环境的改善,高产优质高效是很难办到的。鉴于此,建议“八五”新增此专题,集中优势兵力,争取在 2~3 个 5 年计划中把这一世界科学前沿阵地攻下来。专题在立项和执行过程中得到中国农业科学院副院长陈万金、科技局信迺诤局长等有关领导和同志以及中国农业科学院土壤肥料研究所所长李家康研究员,副所长黄鸿翔研究员,科研处张树琴处长等人的支持和指导。中国工程院院士山仑先生自始至终都给予极大的关注。在此一并表示感谢!

本书是在各承担单位 5 年攻关总结的基础上由汪德水、高绪科、金轲统编整理的。鉴于我国旱农地区地域辽阔,类型复杂,气候多样和编著者知识与经验所限,在编著过程中一定有一些错误和不足之处,敬请读者批评指正,并向广大读者表示诚挚的谢意。

汪德水

1998. 10

目 录

前 言	(1)
1 总论	(1)
1.1 立题依据	(1)
1.2 总体设计	(2)
1.3 试验设计与研究方法	(3)
1.4 主要研究结果	(4)
1.5 结论与设想	(44)
2 陕西省杨陵、澄城地区水肥耦合效应研究	(50)
2.1 以肥调水的机理	(50)
2.2 以水调肥的机理	(58)
2.3 小麦的水肥耦合效应研究	(62)
2.4 旱地土壤的养分管理	(66)
3 渭北旱塬地区水分对养分利用及产量的影响	(71)
3.1 农田肥水效应	(71)
3.2 肥水交互效应	(76)
3.3 肥水效应耦合模型及应用	(82)
4 半湿润偏旱区施肥促进作物水分利用的机理及对产量的影响	(84)
4.1 施肥与土壤水分的关系	(84)
4.2 结论	(97)
5 半湿润偏旱区水分对养分利用及产量的影响	(98)
5.1 结果与分析	(98)
5.2 结论与问题讨论	(112)
6 宁夏固原地区施肥促进水分利用机理及对产量影响的研究	(115)
6.1 旱地施肥增产的生理生态依据	(115)
6.2 不同营养元素对作物抗旱性和水分利用的影响及作用机理	(118)
7 内蒙古武川试区旱地农田肥水效应研究	(129)
7.1 内蒙古武川试区春小麦在灌水条件下氮磷肥施用效应研究	(129)
7.2 土壤水分含量对磷钾养分移动性的影响	(130)
7.3 离子交换膜法在土壤养分有效性研究中的应用	(132)
7.4 水分胁迫条件下小麦根际钾素状况	(134)
7.5 不同水分条件下表层施磷水平对小麦吸收下层养分的影响	(136)

8	辽宁喀左地区施肥与根系活力、水分利用的关系·····	(141)
8.1	试验研究结果·····	(141)
8.2	结论·····	(152)
9	东北半干旱地区(喀左)不同量的水、肥对比对春小麦生育的影响·····	(154)
9.1	试验研究结果·····	(154)
9.2	结论·····	(161)
	参考文献·····	(163)

1 总 论

1.1 立题依据

1.1.1 生产发展的需要

世界上旱农地区均是粮食生产的低产区,同时又是提高生产潜力的关键地区。联合国粮农组织(FAO)博默教授就曾指出:“公元 2000 年时,非灌溉农业将生产半数的农产品,以满足世界人口对粮食的需求”。前苏联植物生理学家马克西莫夫警告说:“只扩大灌溉面积而不对非灌溉地区农业生产的提高加以注意,这恐怕是一个很大的错误。”顾名思义,旱农是利用天然降水为主的农业,水分和土壤肥力成为农业生产的最大障碍因素。旱农地区降雨量偏低且季节间、年度间差异大,分配不均,感到水分缺乏;土壤肥力低,使水分的生产潜力不能充分发挥出来;由于水分不足,肥料的增产效果也忽高忽低。在同一类型区的试验中发现,施用肥料,有的年份增产,有的年份减产;此地增产,彼地减产。不同类型的旱农地区,出现的差异就更大,令人觉得旱地施用化肥无章可循。在风调雨顺年份就多收点,碰上旱年,产量很低。但旱地并不是注定要低产的。肥与水的协调供应,照样能利用较低的投入获得较大的经济效益。

生产实践也证实了不同的降水年型下,水分与肥料的作用效果不同,作物生长在干旱年份,主要是受水分的限制;而在湿润年份,则主要受肥料的制约。特别是北方麦类作物,种在旱季,长在旱季,在整个生长季节水分不足。在这种水分缺乏的情况下,如何充分发挥有限土壤水分的生产潜力?科学施肥是充分利用有效水分,促进小麦生产提高的关键措施,但必须将土壤水分状况与科学施肥有机结合起来,才能发挥水分、养分的生产潜力和效益。生产资料的上涨、肥料价格升高,农民要增产增收,就急需知道如何提高有限投入而获取最大收益。

1.1.2 科学发展的需要

在早期研究中,人们对水分和产量,或肥料与产量的相互关系进行了很多研究,得出了不少正确的理论。毫无疑问,在水分不足的情况下,补充水分能增加产量;肥力低的土壤,施肥无疑有增产作用。近几年来,我国开展配方施肥的研究,得到很多施肥效益方程,但在推广过程中出现很多不同的结果,究其原因就是没有把水分和养分有机的结合起来,特别是旱地水分和养分间有更为复杂的关系。Viets(1972)指出:尽管根系吸水 and 吸收养分是两个独立的过程,然而由于水分的有效性影响着整个土壤微生物、物理以及植物生理过程,使得土壤水分和养分密切而复杂地联系在一起。这种密切的关系很难说清干旱对养分的影响。1981 年国际干旱研究中心把“土壤水分和养分”列入农作制度研究项目,并指出:在雨养农业中,气候、土壤养分和土壤水分作为农业生产力的决定性因素,已广泛为人们所重视。然而,这些因素间的相互关系及其对作物生产和产量的影响是复杂的,因此,搞清它们之间的相互关系,对于干旱地区农业生产力的提高是极其重要的。然而在旱农地区,降雨较少、干旱又频繁,在这样的条件下施用肥料是否有利还是一个有争议的问题。Arnon 认为,在土壤水分有限的情况下,营养亏缺对植物有不利的影响,添加某些肥料是有好处的。Lahiri 认为,施用肥料能提高作物对干旱的忍受能力。

Viets、山仑认为施用肥料能促进根系生长,使之能从土壤的深处吸收水分。这些研究支持了在水分有限的条件下,肥料应当高些。但是,Bhan观察到,施肥引起植物在较早的营养生长阶段水分用量增加,引起生育后期水分胁迫加重,反而有不利的影响。同时,在土壤水分很低的情况下,养分的有效性及其利用率都大大降低(Viets、Begg)。在旱农地区进行的肥料试验,其结果也往往是矛盾的,如Eck与Stewart在美国俄克拉荷马州对小麦施用肥料,第一年在8个点上,有7个显著增产。但下一季中,气候更加干旱了,在这8处中,只有一处增加了产量。国内有些专家认为在旱农地区水是主要的。另外一些专家则说解决旱农地区农业生产的关键非肥莫属。针对这些错综复杂的情况,很有必要对旱地农业中肥料施用问题进行深入细致的研究和探索。

农业生物产量的形成,是农作物本身的遗传特性和生理机能的内在因素以及光、热、水、土、肥等外在环境因素综合作用的结果。但在一定条件下,这些因素中,水分和养分是最易人为调控的。但由于水分的有效性影响着整个土壤的微生物、物理化学及植物体内的生理生化过程,使得土壤养分和水分的关系更加密切和复杂。特别是在旱地农业中,植物营养的基本问题是如何在水分胁迫下,合理地使用肥料,充分发挥肥和水的激励机制和协同效应,提高水分的利用效率和在不增加施肥数量的情况下,获得最大的经济效益,减少肥料对土壤、地下水、大气的污染,节约水、肥资源,改善生态环境。这也是以后获得高产、优质、高效农业的必由之路。然而,通过CAB、AGRICOLA和AGRIS数据库检索,至今未见到国外有关系统的深入研究。国内在生产实践中认识到水肥关系的重要性,做了一些零星的试验,但没有统一的组织、统一的方案、统一的标准,可比性不强。因此,以肥调水、以水促肥的原理至今也说不清楚,仍停留在施肥量、施肥时期与产量关系;浇水量、浇水时期与产量关系上。合理施用化肥,提高肥料和水分利用效率问题仍是北方旱农地区农业生产中有待进一步研究和探讨的问题。也没见到有关肥料对旱地作物各种水分指标影响的报告。因此,旱地施肥的理论问题也是当前需要解决的重要问题。

1.2 总体设计

在粮食、能源和水资源三大挑战面前,国内外农业科学家正在积极地研究对策。筛选品种和生物改良、科学施肥和土壤改良、科学用水和水土保持技术的应用,推动了农业生产的发展。但要走出“人增一地减一粮紧”的困境,必须要有一定的土地资源,特别是耕地资源作为保障。作为农业三大要素的土地、劳动、资本,唯有土地不能替代,无法补充。因此要在保护好耕地的前提下,将光、热、水、肥等外界因素中可以调控的水分和养分分割出来加以研究。突出解决旱地水分和养分的不协调性。在同一地区,作物生产潜力不能充分发挥的根本原因主要是水分和养分逆境的影响。水分的逆境主要是水分不足,分配不均,影响到营养物质的输送和传递,降低产量和品质。肥力不足影响到水分的吸收和利用,而施肥使水分的生产潜力大大提高。水分和养分成了旱农地区农业生产力发挥的决定性因素,其缘由:一是数量不足,二是水分和养分不能协调。因此,充分有效地发挥水分和养分的生产潜力是旱地农业研究的核心。探讨施肥促进作物水分利用的机理,不同氮、磷用量和组合对作物水分吸收利用特点的影响及有关机制;探求不同水分状况和不同肥料配合下的养分吸收和产量,研究提出水分、养分的相互作用及耦合效应模式,建立依据土壤水分状况的科学施肥体系是旱农研究的主攻目标之一,也是本专题研究的基本内容。所以提高旱地作物产量的根本途径,关键在水,出路在肥,以肥调水,提高天然降水的利用效率。针对旱农地区降雨分布不均,地力瘠薄的特点,考虑到旱农类型的多样性和研究结果的实用性,在内蒙古后山半干旱偏旱区(武川)、宁夏宁南半干旱偏旱区(固原)、辽西

低山丘陵半干旱区(喀左)、河北黑龙港半干旱区(威县、隆尧)、华北低平原半湿润偏旱区(北京)、豫西北半湿润偏旱区(洛阳)、渭北旱塬半湿润偏旱区(合阳、澄城、武功等)等7省、市、自治区的13个县市组织了多点、多年的定位观测和田间试验,同时,在半湿润地区的眉县、宝鸡、耀县、宜君等县布置田间试验。各试验点的基本情况见表(表1.1),从表1.1可见,各实验点主要分布在半干旱偏旱、半干旱、半湿润偏旱三个旱农类型区,年降雨量350~600mm,土壤和主要栽培作物多种多样,有较好的代表性,本专题研究结果具有广泛的示范推广前景。在统一设计,统一标准、统一要求的基础上,把旱地农田的土壤—作物—大气作为统一系统,以协调水分、养分关系为核心,以小麦作物为主要研究对象,开展旱地农田水肥交互作用及耦合模式研究,中心点是充分发挥水分、养分的生产潜力,建立耦合模式,服务于生产,促进旱地施肥理论的发展。

表 1.1 专题主要试验地点分布及特点

研究地点	类 型	海拔高度(m)	年平均气温(℃)	年降雨量(mm)			降水集中月份		主要土壤类型	无霜期(天)	代表区域
				平均	最大	最小	占年降水(%)				
武川	半干旱偏旱	1600	2.5	355	458.7	<200	7~9	72.3	栗钙土	113	内蒙古后山
喀左	半干旱东部	450	8.3	520.9	718.5	294.3	6~8	71.6	褐土	141	辽西
威县	半干旱中部	100	12.0	550	1296	219	6~8	70.0	潮褐土	200	河北中部
隆尧	半干旱中部	100	12.0	550	1296	219	6~8	70.0	潮褐土	200	河北中部
固原	半干旱偏旱	1700	6.5	470	990	132	7~9	62.0	黄绵土	155	宁南
北京	半湿润偏旱	50	11.0	600	1406	242	6~8	65.0	褐潮土	180	华北中北部
洛阳	半湿润偏旱	150	14.6	604.2	1047	355.3	6~9	67.0	褐土	218	豫西
孟津	半湿润偏旱	150	14.6	604.2	1047	355.3	6~9	67.0	褐土	218	豫西
澄城	半湿润偏旱西部	870	12.1	567.5	855.3	388.9	7~9	57.0	垆土	202	渭北旱塬
合阳	半湿润偏旱西部	900	11.5	563.6	835.1	332.9	7~9	54.0	垆土	191	渭北旱塬

1.3 试验设计与研究方法

1.3.1 攻关任务及研究内容

针对旱地农田存在的两个关键问题:水是农业的命脉,是肥效发挥的关键;肥是打开水土系统生产效能的钥匙。深入开展(1)施肥促进作物水分利用机理和对产量影响的研究。在主要旱农类型区设立定位试验点,主要研究不同氮、磷等肥料用量和配合对作物水分吸收利用的影响及水势、根系活力、作物抗旱性等有关机制,阐明施肥促进水分利用的机理及其对产量的影响。(2)水分对养分利用及产量影响的研究。利用防雨旱棚和模拟的方法,研究中等肥力,不同供水量、不同供水时期和不同施肥数量下,肥料的有效利用,探讨土壤水分和养分的相互关系,建立耦合效应模式,并结合不同降水年型的多点试验,求出降水、施肥等产量的回归模型,建立依据土壤水分状况科学施肥的体系。

1.3.2 设计与方法

1.3.2.1 试验设计

在横跨半干旱偏旱、半干旱、半湿润偏旱三种不同类型区的内蒙古后山、辽宁西部、河北中部、北京市、宁夏南部、河南西部、陕西渭北旱塬 7 省(市)17 县的栗钙土、潮土、褐土、塷土 4 种土壤类型上进行了统一设计、统一标准、统一要求的标准化试验,开展以盆栽、微区和田间相结合的水肥试验,并辅以人工控制条件下的旱棚精密模拟试验。

旱棚采用回归正交设计,设氮、磷、水三因素五水平,以“311—A”设计为主,盆栽以正交设计,微区为裂区试验;田间则在天然降水条件下,利用不同降水年型,按等高设计布置氮、磷肥料试验。

1.3.2.2 研究方法

旱棚精密试验 在不同肥料组合的基础上,以当地多年平均降雨概率和分布,根据不同降水年型,逐旬补充水分模拟降雨的数量和分配。土壤含水量采用土钻取土—烘干法测定,并配合应用中子仪、张力计和测水分能量的压力板仪、时域反射仪。用压力室法测定小麦叶片水势。每 10 天测定一次。土壤测量深度:表层 10cm 取一个土样(或读一个数);20cm 以下每隔 20cm 取一个土样(或读一个数),直至 2m。用中子仪测定时,0~30cm 土壤含水量仍用烘干法测定;田间水分收支用农田水分平衡方程:

$$\Delta W = P + I + U - R - F - ET_a$$

式中 ΔW 为土壤储水增量; P 为降水量; I 为地表水流入量; U 为地下水补给量; R 为迳流量; F 为渗漏量; ET_a 为农田实际蒸散量;单位均以 mm 表示。

根系测定:在拔节和开花期挖坑分层取样,测根系体积、鲜重和干重,根长用网格交叉法,用滴定法测根表面积和阳离子交换量(CEC);用 TTC(氯化三苯基四唑)法测根内酶活性。

土壤养分:除用常规分析一般元素的全量、有效成分外,利用同位素示踪法研究了不同水分条件下 ^{15}N 在小麦植株的分布情况;养分扩散移动采用有机玻璃制成的三室隔膜盒法;偏摩尔自由能的计算:

$$\Delta G = -V_0\psi_s$$

式中 ΔG 为相对偏摩尔自由能; V_0 为纯水的偏摩尔体积; ψ_s 为土壤吸力。

植物抗旱性测定采用西北农业大学生理教研室编写的《植物生理学实验指导》介绍的方法,用 L1-1600 型稳态气孔计测定叶片蒸腾速率、气孔阻力,计算出叶片气孔导度。用 FQW-4 型红外线 CO_2 分析仪测定整体叶片的光诱导。膜透性用 DDS-11A 型电导仪测定。

试验结果均采用 BASIC 语言程序经微机运算,并对其结果进行显著性检验。

1.4 主要研究结果

1.4.1 以肥调水的机理

在农业生产中,由于土壤中的养分不断被作物吸收,而作物产品大部分被人们所利用,土壤中的养分逐渐不足,因此,施肥就成为提高作物产量和质量的一个重要手段。要增产,不只要有足够的养料,而且还要合理施用。要合理施肥,就应该根据矿质元素对作物所起的生理功能,结合作物的需肥规律,适时、适量的施肥,做到少施高效。

众所周知,旱地合理施肥可以增产。至于为什么会增产?它的生理基础何在?至今还没有一个系统的说明。通过“八五”攻关,初步明确了以肥调水的机理。

1.4.1.1 促根效应

施肥促进了根系的发育,扩大了作物觅取水分和养分的土壤空间。

根系是作物重要的吸收、合成、固定和支持器官。土壤中的水分和养分主要通过根系被吸收,以满足作物生长发育之需。根系在土壤中的广泛分布和不断生长,追逐着土壤中的水分和养分。这对满足自身和地上部生长非常重要。但旱农地区的水分胁迫和养分胁迫是经常发生的,因此,给根系的生长发育带来限制,影响到作物的健壮生长。根据根的趋水特性,施肥促进根系生长,增大了容根层,从而扩大根系觅取水分和养分的空间是具有现实生产意义和科学道理的。

1) 扎根深度和数量

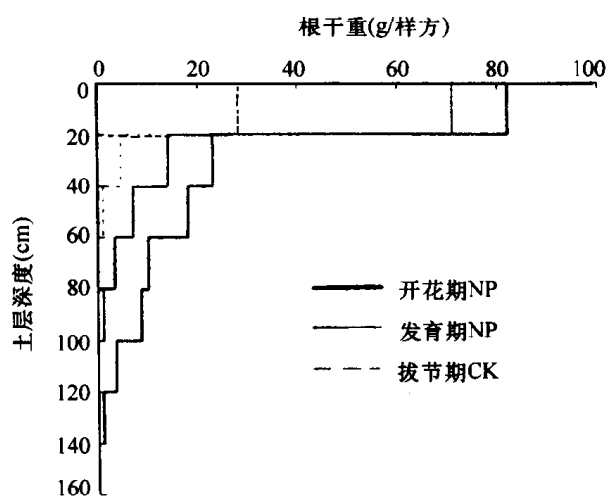


图 1.1 氮磷处理对小麦根系分布的影响

大多数作物只有在干旱条件下生长时,才施展它深扎根的本领。因为在这种情况下,作物只有通过根系汲取深层底土中的水分,才能满足蒸腾所需。然而决定土壤中根系生长速率的主要因素之一是土壤供给根部有效养分的数量和水分含量。据试验,在水分偏少的情况下,无肥区小麦在拔节期扎根深度为 60cm,中肥和高肥区分别扎根 80cm 和 100cm;开花期无肥区根深 120cm,高肥区则已扎根到 140cm 以下(图 1.1),土层中根系的总量也是施肥区高于对照区。证明氮、磷肥料的施用显著地促进了根系的发育。同时表明根系随施肥数量的增加其向下扎根深度也增加,特别是拔节期更为显著。

进一步分析探讨,发现氮、磷配合施用对小麦地上部生长量的促进强度大于对根系生长的强度,表现为根/冠比在拔节期和开花期都小于 1(表 1.2),并且施肥区低于无肥区;这可能是小麦为了籽实的形成通过内在调控,增加叶绿体,加强光合作用和物质转运的缘故。

表 1.2 施肥对小麦根系和地上部生长的影响(g/样方)

处理	拔节期			开花期		
	地上干重	根干重	根/冠	地上干重	根干重	根/冠
CK	8.79	7.38	0.84	29.3	13.82	0.47
MF	15.86	13.38	0.84	49.3	20.5	0.42
HF	24.21	10.88	0.45	80.7	14.72	0.18

* CK:对照值,MF:中肥,HF:高肥(表 1.3 下同)。

表 1.3 施肥对小麦根系生长的影响

处理	土层深度 (cm)	小麦拔节期			小麦灌浆期		
		根鲜重 (g/样方)	根干重 (g/样方)	根体积 (cm ³)	根鲜重 (g/样方)	根干重 (g/样方)	根体积 (cm ³)
CK	0~20	34.91	5.54	39	43.40	8.80	110
	20~40	11.44	1.73	11.5	9.90	1.75	15
	40~60	0.81	0.11	0.8	8.30	1.32	20
	60~80				10.20	1.24	30
	80~100				5.10	0.71	15
	100~120						
	120~140						
MF	0~20	61.89	11.12	69.0	78.80	14.16	145
	20~40	11.85	1.25	18.0	10.35	1.86	20
	40~60	5.48	0.36	5.8	13.35	2.00	25
	60~80	0.51	0.09	1.1	5.25	0.81	10
	80~100				2.00	0.38	5
	100~120				0.50	0.10	3
	120~140						
HF	0~20	46.70	8.23	47.0	81.70	9.60	110
	20~40	11.20	1.46	12.0	8.60	1.30	20
	40~60	4.35	0.54	4.9	9.50	1.33	15
	60~80	2.50	0.27	2.1	9.50	1.20	16
	80~100	1.20	0.13	1.4	6.90	0.63	14
	100~120				2.80	0.12	10
	120~140				0.70		0.4

从表 1.2 和表 1.3 看出施肥对根重、根体积的增加有明显作用。从整个根层来看,小麦拔节期,根的鲜重与对照相比,中肥增加 69.1%,高肥增加 39.8%;根的干重中肥增加 73.7%,高肥增加 44.0%;根的体积中肥增加 83.0%,高肥增加 31.4%;小麦开花期也有同样趋势,但鲜根重量增加明显,而根体积却没有明显增加,高肥处理的根体积还减少 2.4%,似与物质运输比例的不同有关。

为了揭示不同数量氮、磷肥相互配合对根系的影响,对表 1.4 数据进行了回归分析:

$N(X_1)$ 、 $P(X_2)$ 肥配合与根长(Y)的关系方程

0~60cm 土层

$$Y=198.8792+33.9392X_1-72.1795X_2-1.4946X_1^2+12.9476X_2^2+1.5887X_1X_2$$

($R^2=0.99$)

60~140cm 土层

$$Y=16.2508+2.8488X_1+10.8445X_2-0.1467X_1^2-1.3296X_2^2+0.4697X_1X_2$$

($R^2=0.99$)

看出氮、磷肥料大大增加了 0~140cm 土层中根系的长度。氮、磷配合有明显的相互促进作用,根据方程推算,在 0~60cm 土层,获得最大根长的肥料用量氮为 15kg/亩^①, P_2O_5 为 6.55kg/亩。60~140cm 土层,最大根长度出现在试验中最大肥料用量点,说明对于下层根系长度来说氮、磷肥的试验用量在适当配合情况下未达到过量水平。

^① 1 亩=0.0667ha,下同。

表 1.4 不同处理上下土层中根系发育的数量与活力

项目	土层 cm	处理编号					
		N ₀ P ₀	N ₂₀ P ₀	N ₀ P _{6.5}	N _{8.7} P _{2.8}	N ₂₀ P _{4.6}	N ₁₄ P _{6.55}
根重	0~60	5.83	8.47	9.95	9.17	10.52	16.32
g/样方	60~140	0.52	0.29	0.95	1.71	2.27	2.52
根长	0~60	198.9	279.9	281.6	319.6	365.3	609.5
m/样方	60~140	16.2	14.5	30.2	61.6	79.2	84.3
根体积	0~60	26.1	42.0	40.2	38.4	48.0	72.0
cm ³ /样方	60~140	5.1	3.8	6.6	13.8	13.5	18.0
根酶活力	0~60	0.1497	0.1001	0.1232	0.1257	0.1462	0.1688
mg/(g·h)	60~140	0.089	0.1007	0.1295	0.0742	0.0791	0.1529
根 CEC	0~60	15.37	15.83	19.70	19.18	17.86	18.59
cmol(+)kg ⁻¹	60~140	13.47	19.77	16.88	16.68	20.01	17.43

由于根系长度与根体积有一定的相关性,根系的表面积与根系长度、体积密切相关,因此回归分析表明,根体积、根表面积与氮、磷肥料的关系十分类似。这里不再赘述。

2) 提高根系的生理功能

表 1.4 看出,根系重量这个表征根系生长发育的数量指标,一方面和上述其他数量指标(长度、体积、表面积)相关,其回归分析所示的施肥对其影响的规律性和其他数量指标相类似;另一方面它是观察根系酶活性和阳离子交换量(CEC)的基础,各土层根系总的酶活性和 CEC 决定于该土层中根系重量。因此,把根系重量(W)、酶活性(A)和 CEC 三个指标组合成一个代表生态土层中根系总体活力的综合指标(以下称根活力综合指标)“ I ”即:

$$I = \sqrt{W(CEC + A)}$$

再来探讨 $I(Y)$ 和 $N(X_1)$ 、 $P(X_2)$ 肥料的关系。

0~60cm 土层:

$$Y = 9.51018 + 0.55043X_1 - 0.12279X_2 - 0.02225X_1^2 + 0.12431X_2^2 + 0.00120X_1X_2$$

$$(R^2 = 0.99)$$

方程拟合程度很高。该方程的曲面示于表 1.5。

表 1.5 氮、磷肥配合对 0~60cm 土层中根系活力 (I) 的影响

项 目		含氮量(kg/亩)				
		0	5	10	15	20
P 量 (kg/亩)	0	9.51	11.71	12.79	12.76	11.62
	2	9.76	11.97	13.07	13.05	11.92
	3.5	10.60	12.82	13.92	13.92	12.80
	5	12.00	14.23	15.34	15.34	14.23
	6.5	13.96	16.20	17.32	17.33	16.23

从表 1.5 可以看出,单施氮肥是 10kg/亩的用量已达最佳效果,比无肥区根活力增加 34.5%;单施磷肥时最佳效果在 6.5kg/亩附近,比无肥区根活力增加 46.8%;10kg/亩氮和 6.5kg/亩磷配合施用使根活力增加 82.1%。因此,氮、磷肥料对增加 0~60cm 土层根系总活力均有显著效果,其中磷肥效果大于氮肥,氮、磷配合仅有微小的相互促进作用。

60~140cm 土层:

$$Y = 2.66029 + 0.07598X_1 + 0.89868X_2 - 0.00445X_1^2 - 0.10552X_2^2 + 0.02678X_1X_2$$

$$(R^2 = 0.99)$$

该方程拟合程度很高。其曲面示于图 1.2。

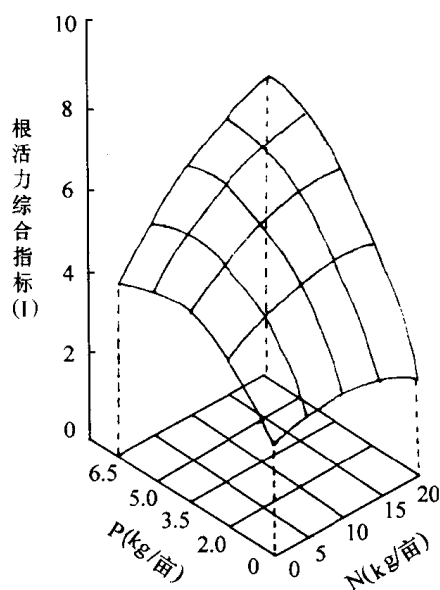


图 1.2 氮磷配合对 60~140cm

土层根系活力的影响

水分和磷素营养水平都对根系呼吸强度影响显著,而且其中一个因素的作用明显受到另一个因素的制约。在磷素水平为 3kg/亩上下时,土壤水分的改变对根呼吸作用无明显影响,当土壤含水量在田间持水量的 70% 时,随着磷水平的提高,小麦根系呼吸作用增强,当田间持水量 55% 以下时,随着磷水平的提高,根呼吸作用明显降低。

1.4.1.2 水分的补偿效应

1) 土壤水分的有效性增加

土壤有效水分一般泛指田间持水量与凋萎湿度之差。饱和含水量、田间持水量和凋萎湿度是常用的土壤水分常数。对自然土壤而言,它们各有其固定的数值。但施肥后土壤的水分常数发生变化,有效水分增加,由盆栽实验结果可以看出,饱和含水量、田间持水量随施肥水平的提高而提高。但凋萎湿度并不因施肥水平而变化。土壤有效水分得到提高,中肥区比对照提高 8.16%,高肥区比中肥区提高 17.45%,比对照提高 27.05%。

2) 活化土壤深层水分

在能形成经济产量的水分条件下,施肥水平越高,冬小麦利用深层水的能力越强。试验结果表明, $N_{10}P_{10}$ 和 $N_{20}P_{20}$ 处理小麦多利用 0~150cm 土壤水分 59.1mm 和 106.8mm,利用能力分别比对照提高 26.1% 和 45.5%;对 100cm 以下土壤水分利用能力分别比对照提高 84.2% 和 159.6%,多利用水分 36.7mm 和 69.6mm。可见,施肥可明显提高小麦对土壤贮水、尤其是

从图 1.2 可以看出,磷肥对提高 60~140cm 土层根系活力的效果显著高于氮肥,氮、磷肥料配合施用有明显的相互促进作用。10kg/亩氮或 5kg/亩磷单独施用分别对根活力增加 12.0% 和 69.9%,二者配合施用则增加 132.0%,大大高于二者单施效果的总和。最高效果出现在本试验范围内的最高肥料用量,说明在土壤含水量 14%~20% 的条件下,高量用肥有利于提高下层土壤中根系的活力。

在评价根系活性吸收面积时还广泛采用根系比表面积的大小作为一个指标。在不施磷的条件下,根系比表面积在田间持水量的 57% 时达到高峰,施磷 6kg/亩,田间持水量 54% 达到高峰,当施磷量 12kg/亩时根系比表面积在田间持水量 51% 时达最大值。这表明干旱条件下,磷肥可以明显提高根系的活性吸收面积。

从图 1.3

看出,土壤水

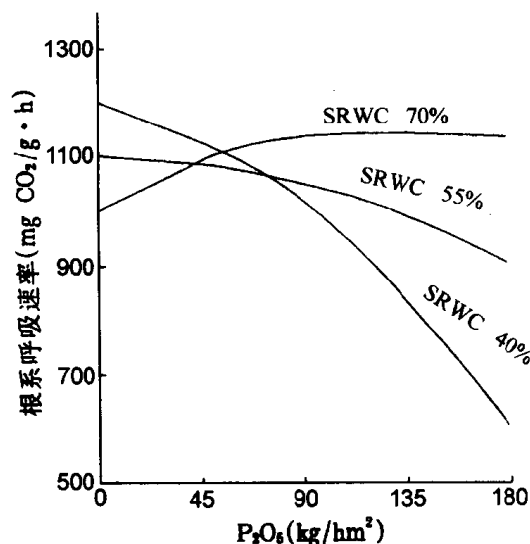


图 1.3 土壤水分和磷营养对根系呼吸速率的影响

深层贮水的利用。随施肥水平的提高,小麦利用土壤水分能力增强。特别是增施磷肥的处理,冬小麦利用100~150cm和150~200cm土层水分的能力提高8.5%和12.9%。在1991~1993年的试验,施磷对深层水分的吸收能力明显提高(表1.6),尤其是100cm以下。氮磷配合比对照提高31.0%,有机无机配合比对照提高59.0%,使原先不易被作物吸收的土壤水分变成了有效水,从而大大提高了水分的利用效率。同时,在相同气温条件下,施肥可以使土壤水分的有效性提高一个档次(表1.7)。可以这样说,旱地农业中的水分问题是一把锁,土壤培肥则是打开这把锁的钥匙。

表 1.6 冬小麦对土壤水分的利用能力(mm)

土层深度(cm)	有效水	CK	N ₆	N ₆ P ₂ O ₅ ₅	有机肥 5000P ₂ O ₅ ₅ N ₆ (kg/亩)
0~50	96.7	49.2	50.2	51.4	68.7
50~100	91.4	47.6	49.1	43.8	46.2
100~150	94.6	26.8	28.9	35.3	38.4
150~200	88.8	19.7	26.9	32.5	86.0
100~200	183.4	46.5	55.8	67.8	74.4
0~200	371.5	143.3	155.1	163.0	189.3

随着深层水分的利用,土壤中残留的水分减少。使土壤水的“浅库”、“死库容”变成“深库”、“活库容”。麦收后,雨季来临,正是土壤墒情恢复时期,再结合蓄水耕作措施,可以更多的蓄纳雨水,扩大了作物觅取水分和养分的土壤空间。

表 1.7 施肥对土壤水分有效性的影响(1994年盆栽试验)(g)

土壤水分 %	10	9	8	7	6
肥 力					
高	26.43	8.5	2.8	2.5	0
中	10.18	3.62	0.84	0	0
低	1.26	0.6	0	0	0

1.4.1.3 水分、养分的输导效应

1) 不同施肥水平对土壤水势的影响

根据冬小麦不同生育期土水势的测定结果,0~150cm土壤水势(每20cm加权平均值)随时间的变化趋势(图1.4)可以看出,冬小麦生育前期(分蘖盘根期),不同处理土水势基本一致;冬小麦生育中期(拔节前后),施肥处理土壤水势高于对照,且高肥处理大于中肥处理,N₁₀

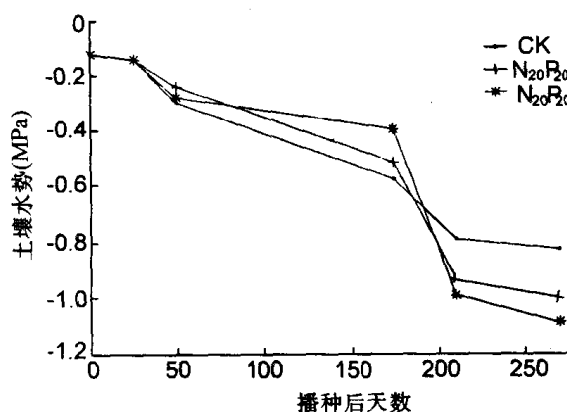


图 1.4 施肥水平对 0~150cm 土壤水势的影响

P_{10} 和 $N_{20}P_{20}$ 分别比对照提高 0.07 和 0.20MPa; 冬小麦生育后期(抽穗成熟), 施肥处理土水势低于对照, 高、中肥区比对照减少 0.3 和 0.1MPa。

由冬小麦各生育期不同层次土水势的大小(图 1.5) 可以看出, 不同施肥处理, 苗期各层土水势差异不显著; 拔节期主要影响 0~100 土层水势, 对 100cm 以下土水势基本无影响, 随施肥水平的提高, 0~100cm 土层水势明显提高; 抽穗期施肥表现在 0~100cm, 尤其是 50~100cm, 施肥处理土水势明显低于对照, 但高、中肥处理差异不显著; 小麦成熟期, 施肥所引起的土水势差异主要表现在 50cm 以下, 随施肥水平的提高, 土水势依次降低。

形成以上结果的原因是, 越冬前麦苗小, 气温低, 耗水强度小, 施肥所造成的差异不明显; 到了返青拔节期, 气温回升, 降雨稀少, 地面蒸发量增加, 由于施肥处理增加了小麦分蘖数, 使麦田保持较高覆盖度, 相对减少了这一时期土壤水分的蒸发损失, 相应提高了土水势。这方面的研究, 尚需继续进行; 在生育后期, 施肥促进小麦营养体生长, 加剧了植株的蒸腾耗水强度, 致使土水势低于对照, 从而使原来深层不易被利用的水分, 变成有效水。

2) 对根水势 (R_w) 的影响

表 1.8 表明, 磷营养对小麦根水势的影响极为显著, 施磷量增加, (R_w) 提高。磷增效作用的大小因土壤水分状况而异: 土壤相对含水量 (SRWC) 在 40%~70% 范围内, 磷对根系水分状况的改善, 对根水势的提高均有良好的作用; 在土壤严重水分胁迫条件下增施磷肥, 对根水势提高的作用更大。土壤水分含量提高, 磷的效应降低; 同理土壤水分对根水势的效应也因土壤磷营养状况而别。不施磷肥时, 土壤水分对根水势的效应相对较大; 随着磷营养水平提高, 土壤水分对根水势的作用相对降低。相关分析结果表明, 磷营养水平与根水势之间的相关性均达极显著水平 ($r^2=0.986-0.997^{**}$)。

表 1.8 P_2O_5 水平和 SRWC 与根水势 (R_w) 之间的关系

X_i	X_i 水平		Y (R_w), kPa)	r^2
X_2 (SRWC)	X_1	P_2O_5 0kg/ha	$Y = -897 + 311X_2 - 68X_2^2$	0.998
		P_2O_5 90kg/ha	$Y = -750 + 240X_2 - 68X_2^2$	0.960
		P_2O_5 180kg/ha	$Y = -577 + 169X_2 - 68X_2^2$	0.929
X_1 (P_2O_5)	X_2	SRWC 40%	$Y = -1058 + 231X_1 + 13X_1^2$	0.996
		SRWC 55%	$Y = -750 + 160X_1 + 13X_1^2$	0.997
		SRWC 70%	$Y = -578 + 89X_1 + 13X_1^2$	0.986

磷除了作为一种营养物质能促进作物根苗生长发育外, 它在增强作物抗旱性方面的作用不可忽视; 促进根苗生长, 提高水分利用率的有效方法是根据土壤水分状况调节磷的用量。至于磷通过怎样的途径而改变 (R_w) 的, 还有待进行深入研究。

3) 施肥对小麦叶水势的影响

叶水势的高低是作物水分状况的度量指标, 也可反映叶片从其它器官中吸取水分的能力。叶水势越小, 其吸取力越大。我们在北京的试验结果, 小麦孕穗期旗叶的叶水势: 对照为一

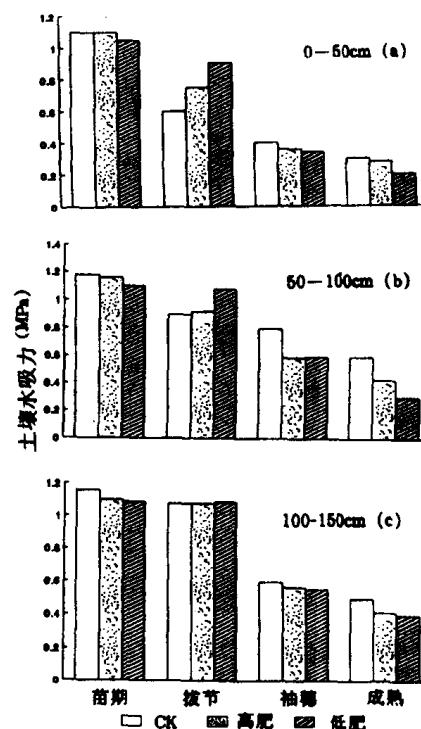


图 1.5 不同施肥处理对冬小麦生育期不同土层水吸力的影响