

北方旱区农田水肥效应分析

高亚军, 李生秀

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

[摘要] 结合多年的田间试验研究, 对前人诸多研究结果进行了总结和深入分析。结果表明: 农田水肥效应大小与试验方法有关, 田间试验与模拟试验得到的结论相反。主要原因在于研究中“水”的概念各不相同, 从旱棚试验或盆栽试验的结果推断水肥效应与实际情况相距较大。多数情况下, 养分亏缺仍是北方旱区作物增产的主要限制因子。灌水的效果取决于土壤底墒、生育期降水、土壤肥力及灌水时期等各种因素。在现有的水资源条件下, 提高养分供应水平是北方旱区大部分农田作物增产的主要途径。加强夏闲期降水的蓄积、提高土壤底墒是冬麦区作物高产的重要条件。

[关键词] 水肥效应; 北方旱区; 田间试验; 模拟试验

[中图分类号] S155.4⁺3.062.071 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)07-0074-06

北方旱区是指沿昆仑山—秦岭—淮河一线以北的广大地区, 包括16个省(市)的965个县, 面积占国土总面积的56%, 耕地占全国总耕地面积的51%, 其中没有灌溉条件的旱田占65%。本区地域辽阔, 地形复杂, 气候类型多样, 适于农林牧综合发展。制约这一地区农业生产持续发展的因素很多, 水资源不足和土地退化是其中两个重要的方面。如何科学地进行农田水肥管理是大家关注的焦点, 而且灌水和施肥对作物增产作用的大小也一直是人们讨论的一个问题。

1 农田水肥效应研究的历史、现状及存在问题

水肥效应的研究由来已久, 近20年在北方旱区也进行了大量试验, 但关于决定作物产量高低的主要因素是水还是肥并无一致结论。以黄土高原为例, 过去人们认为旱地作物生产力不高的主要的原因是“旱”。20世纪80年代初的研究表明, 当时生产力水平低下, 限制黄土高原地区粮食增产的首

要因子是肥而不是水^[1~4]。90年代, 随着干旱气候的频繁出现及投肥强度提高, 又使得越来越多的人认为水的作用更大。90年代中后期国家实行西部大开发政策后, 越来越多的人将目光转向西北地区, 而干旱是大多数人对这一地区自然条件的第一印象, 许多研究结果也都显示出水分供应对作物产量有决定作用^[5~18]。

为了对这一问题有一个明确的认识, 笔者对前人的资料进行了总结和分析。结果表明, 近20年关于水肥对作物产量的效果研究涉及陕西、山西、宁夏、甘肃、辽宁、河北、河南、内蒙及山东等北方的大部分旱区; 供试土壤包括垆土^[18,19]、黑垆土^[1,6,20~22]、褐土^[7,12,15,16,23]、黄绵土^[24]、(沙)潮土^[25]、绵黄土^[26]、风沙土^[17]和栗钙土^[16]等北方旱区主要的几个土壤类型; 供试作物以(冬、春)小麦和(春、夏)玉米为主, 兼有谷子^[16,27]、莜麦^[28]、马铃薯^[11,21]、甘薯^[16]及沙打旺^[26]和杨树^[11]等林草。养分以施氮和施磷为主, 水分多是在自然降水基础上补充灌水, 或是模拟降水量, 有

[收稿日期] 2002-01-04; **修回日期** 2002-03-18

[基金项目] 国家自然科学基金重大项目(49890330)、面上项目(39770425)、农业倾斜项目(30070429)和国家重点基础研究项目(G1999011707)资助

[作者简介] 高亚军(1968-), 男, 陕西岐山县人, 博士, 西北农林科技大学资源环境学院副教授

些还以土壤相对含水量^[25]或绝对含水量^[6,26]为指标。研究方法除采用田间试验,使作物完全在自然条件下生长以外,更多的研究则采用早棚或盆栽,对水分进行严格的控制,以便得到更精确的结果。为了比较水肥两个因子对作物产量的贡献,通常以作物产量为应变变量,以各种水肥因子的组合为自变量进行回归建模,经过无量纲线性代换,将模型中的偏回归系数标准化,然后根据各因子偏回归系数的正负和大小判断其效应。

关于水肥对作物产量的贡献,这些研究资料并无一致结论。其主要原因可能是研究方法和试验条件不同,可比性不强。比如,穆兴民发现^[11],常规对比试验的结果是施肥的增产作用大于水分;而水肥正交组合试验结果与之相反。另外,利用产量结果建立模型时水肥因子的设计水平及间距都不完全一样,因此,利用其比较水肥效应大小只具有相对性。

2 养分亏缺仍是北方旱区作物增产的主要限制因子

水和肥是相当笼统的概念。在众多研究中,“肥”一般是施肥量,肥效大小主要决定于土壤基础肥力:土壤越肥沃,肥效则越小^[29,30],此时水的效应相应的就更显著。“水”可以是灌水量、降水量、播前土壤贮水量(即底墒),或这三者之和,即作物生育期间总的土壤供水量。没有灌水的条件下,降水的效应大小决定于土壤底墒:底墒充足,降水的增产效果就不甚明显;补充灌水的效应与土壤底墒和生育期间的降水量有关:底墒和降水丰富,灌水效应则小。水的效应减小,肥的效应相应突出。因此,水与肥效应的大小受土壤底墒、基础肥力和生育期降水等各种因素的制约,不能一概而论。

虽然众多研究资料结论不一,但笔者仍从中发现了一个规律:凡认为肥是作物增产主要因子的大多是田间试验结果^[11,12,15,24,31],张和平等^[32]在河北黑龙港地区进行的3年田间试验中,有两年结果显示肥料效应大于水分效应,另一年属大旱年,小麦生育期间只有50 mm的降水量,水分的作用才显得更突出一些。而大多数早棚试验和盆栽试验的资料都表明,水分是旱地农作物增产的第一限制因子^[5-18,33-35]。盆栽条件下沙打旺^[26]和杨树^[11]水肥效应的研究结果也表明水分的增产作用大于肥

料。在有些发表的文献中,只提供了产量结果而没有建立数学模型,或者在建模过程中没有进行无量纲线性编码代换。笔者通过对这些资料的处理,得到了同样的结论:来自田间试验的结果表明肥料效应大于水分^[25,29,30,36,37],模拟试验的结果是水分效应大于肥料效应^[21,28,38,39]。李玉山^[1]、孙志强^[22]、王小彬^[23]、李开元^[40]和李向民^[41]等,对田间试验结果进行方差分析或其他途径的处理后,也认为肥料对作物产量的贡献大于水分。

这些文献中田间试验大多是研究补充灌水的效应,灌水效应的大小与土壤基础水分供应状况(即底墒和生育期间降水)有关。对于大部分半湿润地区来说,正常年份都有可观的底墒和生育期降水,因此补充灌水的作用较小。大多数早棚试验中都没有提供土壤底墒的信息,其研究因素“水”多是模拟降水量^[5,8-10,12,14-16,18,35,39],亦即其土壤基础水分供应量较小(最多只有土壤底墒部分),因此“水”的效应就要大一些;盆栽试验中的“水”则是土壤总供水量,它与作物产量紧密相关:有“水”则有产量,无“水”则无产量。这是田间试验结果多为“肥效大于水效”,而模拟试验结果多为“水效大于肥效”的主要原因。模拟试验的条件与实际情况有较大差距,简单地用模拟试验结果定性农田水肥效应的大小是不合适的。

田间试验肥效大于水效,说明在现有的水资源条件下,北方旱区农田养分亏缺是作物增产的主要限制因子。

3 证明养分缺乏的典型试验结果

笔者1999年所做的两个田间试验结果也表明,氮肥对作物产量具有决定性的作用。

其中,冬小麦试验设在杨陵——地处黄土高原南部的渭河谷地,春玉米试验设在渭北旱塬的永寿县。两地均属半湿润易旱地区,冬春干旱,夏秋多雨,历年平均降水量600 mm左右。1999年冬小麦生育期间降水量贫乏,但播前土壤贮水量丰富;春玉米生育期间降水量中等,播前土壤贮水量中等。两个试验地土壤基础肥力均属中等。春玉米试验包括苗期灌水、拔节期灌水、喇叭口期灌水、灌浆期灌水和氮肥五个因素;冬小麦试验包括冬前灌水、冬季灌水、拔节期灌水、灌浆期灌水和氮肥五个因素。每个因素有五个水平,均采用二次通用旋转组合设计(1/2实施)。

对产量结果回归模拟后, 分别得到春玉米籽粒产量 (Y_{maize}) 与玉米苗期灌水量 (X_{m1})、拔节期灌水量 (X_{m2})、喇叭口期灌水量 (X_{m3})、灌浆期灌水量 (X_{m4}) 及施氮量 (X_{m5}) 五个因素之间的回归模型。小麦籽粒产量 (Y_{wheat}) 与冬前灌水量 (X_{w1})、冬季灌水量 (X_{w2})、拔节期灌水量 (X_{w3})、灌浆期灌水量 (X_{w4}) 及施氮量 (X_{w5}) 五个因素之间的回归模型。

$$Y_{\text{maize}} = 12\,473.4 + 278.6X_{m2} + 585.4 X_{m5} - 427.4X_{m4}X_{m5}$$

$$Y_{\text{wheat}} = 6\,855.8 + 139.0 X_{w1} + 196.7X_{w4} + 256.9 X_{w5} - 161.0 X_{w1} X_{w2} - 222.8 X_{w4} X_{w5}$$

经过无量纲线性代换, 偏回归系数标准化, 通过比较其绝对值大小来判断各因素的重要程度。就施氮量和灌水量而言, 本试验结果表明, 无论是春玉米还是冬小麦, 施氮量对籽粒产量的贡献都显著大于灌水量。因此, 养分亏缺是旱地作物增产的矛盾所在。

4 旱地养分缺乏的原因分析

水分胁迫导致了养分胁迫。有限的供水难以造成茂密的植物生长, 使土壤累积的有机物质和营养物质数量很少; 严重的水蚀和风蚀, 又造成了表层土壤的损失, 导致了土壤营养物质流失。这是旱区许多土壤营养物质缺乏的一个主要原因。

天然肥力耗竭导致了有效养分, 特别是氮素贫瘠。我国旱地农业与其他国家不同。美国在 19 世纪, 澳大利亚和前苏联在 20 世纪, 才逐渐把一些干旱草原垦作农田。利用时间较短, 有的国家还采取了一定培肥措施 (如澳大利亚用豆科轮作), 土壤仍有较高天然肥力。现有文献证明, 在我国距今五六千年的新石器时代, 人们就砍伐森林, 垦荒种地, 在黄土高原过着定居的农业生活; 从周朝算起也有三千多年历史。国外研究表明, 草地和草原垦作农田后, 有机质分解、氮素释放大加快速度。洛桑试验站把 100 多年的牧场开垦后, 1 hm^2 土地 12 年内释放出 2 000 kg 氮素, 相当于 20%~30% 的全氮被分解。大草原、干旱草原开垦后经过 30~40 年, 氮的释放才趋向稳定。不论按开垦后, 还是按稳定的分解速度计算, 经过这样长期耕作的旱地, 已把原来的天然肥力几乎消耗殆尽, 而只能靠每年遗留的残茬、投入的肥料或轮作倒茬而维持生产了^[42]。

培肥不力直接影响着土壤肥力提高, 是旱地土壤贫瘠的另一个重要原因。历史上, 旱地一般地多人少, 一直靠广种薄收, 甚至轮歇、撂荒种植而维生, 土壤一直未能得到培肥。当前, 旱区农民尚比较贫困, 在土地上投入的营养物质少。后者突出表现在有机肥多年内无明显增长, 化肥施用量低于水地。据调查, 西北旱地投入的氮素每公顷大多在 75 kg 以下, 而投入 22.5~37.5 kg/hm^2 者占相当大面积。

5 水分效果取决于土壤底墒、生育期降水、土壤肥力及灌水时间等因素

北方旱区水资源有限, 提高水分利用效率是农田水分管理的主要问题。虽然有灌溉条件的耕地只占 1/3 左右, 但近年来在半干旱和半湿润地区发展以积蓄雨季降水、在作物需水关键期进行有限补充灌溉的技术越来越受到人们重视^[43]。因此, 研究农田水分效应及其条件很有必要。

补充灌水的效应主要取决于土壤底墒和生育期间的降水量: 底墒和降水丰富, 灌水效应则小。新疆、柴达木盆地、河西走廊、甘肃中部、榆林长城沿线等地, 主要作物生育期间降水量较少, 水分均有较大亏缺。比如, 冬小麦生育期间水分亏缺一般为 300~400 mm; 春玉米生育期间亏缺额达 400 mm 以上^[44], 因而这些地区灌水或补充灌水的效果一般会较明显。对于北方旱区的其他地区, 只要作物播前土壤有 200~300 mm 的有效贮水, 基本就能抵消水分亏缺额, 因此补充灌水的增产效果就不会太显著。但在部分地区, 这也取决于种植制度。比如, 渭北旱塬地区其全年降水量并不少, 如果实行一年一作, 水分供应一般不会成为大问题, 若一年两熟, 土壤底墒欠佳, 只有补充灌溉才能获得可观的经济产量。

补充灌水的效果还与土壤肥力有关。如我们在渭北旱塬进行的一个田间试验表明, 在肥力较高的田块, 灌水表现正效应, 在低肥力田块, 灌水则表现出负效应^[29,30]。

灌水时期对灌水效果也有重要的影响。对大多数作物来说都有一个水分敏感期, 在这一时期灌水往往能达到事半功倍的效果, 而这一时期如果水分供应不足则会引起显著减产。因此, 找到作物的水分敏感期有助于确定作物的灌水高效利用时期, 这也是有限灌溉 (或称非充分灌溉) 的必要条件之

一。一些研究者认为, 冬小麦的水分敏感期为拔节孕穗期; 春玉米的水分敏感期为抽雄期^[45]。笔者通过 1999 年所做的田间试验对小麦和玉米的水分敏感期进行了研究, 发现冬小麦的水分敏感期是灌浆期, 春玉米的水分敏感期为拔节期。研究结果不一致, 这表明决定作物水分敏感期的因素除了作物本身的生长特性外, 还与其他因素有关, 尤其是作物生长期间的土壤供水状况, 包括土壤底墒、作物生育期降水量和降水的时间分布等。笔者的研究中, 冬小麦生育期间只有 87.9 mm 降水, 但由于底墒充足, 因此生长前期灌水的作用相对较小。春玉米播前土壤贮水量居中, 但生育期间的降水主要分布在后期, 因此灌水的敏感期就偏向前期。张岁岐等^[46]利用旱棚试验进行的研究表明, 没有充足的底墒, 春小麦的水分敏感期会出现在拔节期以前。

6 北方旱区农田水肥管理的重点

6.1 培肥土壤是提高旱地粮食产量和有限水资源利用率的重要途径

大量田间试验的结果表明, 在大多数情况下, 养分亏缺是作物增产的主要限制因子。以渭北旱塬为例, 在低肥力田块, 肥效显著大于灌水效果, 甚至水分表现出了负效应; 在肥力较高的田块, 灌水表现正效应, 但施肥的增产效应仍然大于灌水量^[29,30]。在平水年, 水分表现出了负效应; 在欠水年, 水分则表现出较大的正效应, 但仍小于磷肥的效应^[36]。黄土高原区域治理 11 个试区多年的生产实践也证明^[11], 渭北旱塬有 50 % 左右的年份有水分亏缺, 100 % 的年份肥料亏缺, 无论何种水文年型, 只要增加农田矿物元素的投入, 都可使产量显著提高。张福锁等通过试验研究和生产调查也发现, 只要年降水高于 400 mm, 旱地小麦生产的限制因子主要是土壤肥力^[47]。邓新民^[48]根据 6 年田间试验的研究结果得出“在年降水丰、平、歉及季节降水分布不同的条件下, 合理施肥是增产的关键”的结论。笔者 1999 年所做的试验中, 冬小麦生育期间降水量仅为 87.9 mm, 灌水效应仍小于施氮肥的效应。黄土高原地区有近一半的土壤肥力低下^[49], 其中相当一部分地区年降水量达到 400~600 mm。因此, 重视土壤培肥, 提高土壤供肥水平是解决北方旱区, 特别是有灌溉条件的地区农业持续发展的一条重要途径。对于雨养地区来说,

在积极发展集水农业, 争取有限灌溉的基础上增加投肥强度、培肥土壤对提高有限水资源利用率具有非常重要的作用。

6.2 加强冬小麦播前蓄水是提高产量及肥效的重要条件

农谚道“麦收隔年墒”, 说明冬小麦底墒在小麦生产中具有重要的贡献^[50]。李玉山等^[51]在渭北旱塬长武试验站进行的为期 5 年的试验结果也表明, 冬小麦的底墒与产量之间具有较高的相关性, 而生育期降水与产量没有明显的关系。这是因为冬小麦生育期处于旱季, 土壤供水量最高可占到耗水量的 50 % 左右。笔者 1999 年所做的试验中, 冬小麦生育期间降水量仅为 87.9 mm, 而灌水效应仍小于施氮肥的效应, 其主要原因就在于播前土壤贮水量高达 557.7 mm。根据产量模型模拟分析的结果表明, 冬前灌水 80 mm、其他时期均不灌水、施氮量 450 kg/hm² 时冬小麦籽粒产量最高, 冬前灌水实际上起了补充土壤底墒的作用。因此, 良好的土壤底墒是小麦取得高产的重要基础。土壤底墒的一部分来自休闲期——也是一年一作区的雨季 (7~9 月), 此期降雨量占全年降雨量的一半左右^[52]。大量研究表明, 北方旱区夏闲期土壤蓄墒率为 20 %~40 %, 平均约为 30 %, 即夏闲期 70 % 的降水被白白蒸发掉。所以, 充分开发利用夏闲期降水是目前提高旱地降水生产潜力的主要方向^[53]。

参考文献

- [1] 李玉山, 张孝中, 郭民航. 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 1~7
- [2] 李开元. 黄土高原南部农田水分条件及其产量效应[J]. 水土保持通报, 1995, 15(5): 6~10
- [3] 郝明德. 黄土高原沟壑区旱作粮食丰产抗旱技术体系研究[A]. 长武农业生态系统结构、功能及调控原理与技术[C]. 北京: 气象出版社, 1998. 3~13
- [4] 陕西省土壤学会. 渭北旱塬土壤培肥的途径和措施[J]. 陕西农业科学, 1983, (3): 1~4
- [5] 单玉珊, 慕美财, 韩守良, 等. 小麦-玉米一年二作土壤水综合效应数学模型研究[J]. 中国农业科学, 1996, 29(2): 34~44
- [6] 徐学选, 陈国良, 穆兴民. 春小麦水肥产出协同效应研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(4): 72~78
- [7] 金 轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研究 II 不同 N、P、水配合对旱地冬小麦产量的影响[J]. 植

- 物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 8~13
- [8] 吕殿青, 张文孝, 谷洁, 等. 渭北东部旱塬氮磷水三因素交互作用与耦合模型研究[J]. 西北农业学报, 1994, 3(3): 27~32
- [9] 孟兆江, 刘安能, 吴海卿. 商丘试验区夏玉米节水高产水肥耦合数学模型与优化方案[J]. 灌溉排水, 1997, 16(4): 18~21
- [10] 孟兆江, 刘安能, 吴海卿, 等. 黄淮豫东平原冬小麦节水高产水肥耦合数学模型研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 86~90
- [11] 穆兴民. 水肥耦合效应与协同管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [12] 刘作新, 郑昭佩, 王建. 辽西半干旱区小麦、玉米水肥耦合效应研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 540~544
- [13] 宋耀选, 肖洪浪, 冯金朝. 土壤水肥交互作用与玉米的响应[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 23~24
- [14] 武天云, 王生录, 邓娟珍, 等. 陇东旱塬地区冬小麦田水肥耦合效应模拟研究和施肥咨询系统的建立[A]. 陇东高原半湿润偏旱区农业综合发展研究[C]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995. 176~182
- [15] 李法云, 宋丽, 官春云, 等. 辽西半干旱区农田水肥耦合作用对春小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 535~539
- [16] 王殿武, 周大迈, 张建平, 等. 太行山区旱作农田土壤水分动态及水肥产量效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(2): 32~39
- [17] 张铜会, 崔建垣, 赵哈林, 等. 沙地农田肥水因子对春玉米产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 21~22
- [18] 梁连友, 赵二龙, 李立科. 渭北旱地冬小麦不同降水年型栽培技术模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(2): 20~25
- [19] 吕殿青, 刘军, 李瑛, 等. 旱地水肥交互效应与耦合模型研究[A]. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995, 204~212
- [20] 党廷辉, 郝明德. 黄土塬区不同水分条件下冬小麦氮肥效应与土壤氮素调节[J]. 中国农业科学, 2000, 33(4): 62~67
- [21] 何华, 赵世伟, 陈国良. 不同水肥条件对马铃薯肥料氮利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 235~239
- [22] 孙志强. 陇东旱地水肥产量效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(4): 57~61
- [23] 王小彬, 高绪科, 蔡典雄. 土壤水肥条件与作物耗水的关系[A]. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 277~285
- [24] 刘文兆, 苏敏, 徐宣斌, 等. 养分优化管理条件下作物水分生产函数[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 37~39
- [25] 张镜清, 蔡典雄, 张美荣, 等. 冬小麦耗水强度与施肥灌溉关系[A]. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 253~258
- [26] 陈国良, 穆兴民, 贾恒义, 等. 水肥对沙打旺产草量协同效应的初步研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 73~78
- [27] 王渭玲, 徐福利, 张冀涛. 渭北旱塬夏播谷子水肥耦合模型研究[J]. 陕西农业科学, 1996, (4): 23~24
- [28] 王殿武, 张立峰, 文宏达, 等. 冀西北高原旱作农田土壤水分动态与提高水分作物生产力研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(1): 7~10
- [29] 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 澄城高肥力田块小麦的水肥耦合效应[A]. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 235~249
- [30] 李生秀, 高亚军, 李世清, 等. 澄城低肥力田块小麦的水肥耦合效应[A]. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 221~234
- [31] 王小彬, 高绪科, 蔡典雄, 等. 不同供水肥条件与作物生长的关系[A]. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 259~264
- [32] 张和平, 刘晓楠. 黑龙江地区冬小麦生产中水肥关系及其优化灌水施肥模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(1): 32~38
- [33] 翟丙年. 供水条件下施氮对作物产量及生理特性的影响[D]. 西北农林科技大学博士论文, 2001: 77~98
- [34] 王俊儒. 施氮条件下供水对作物产量及生理特性的影响. 西北农林科技大学博士论文, 2001. 69~79
- [35] 苗果园, 尹钧, 高志强, 等. 旱地小麦降水年型与氮素供应对产量的互作效应与土壤水分动态的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 263~270
- [36] 樊庭录, 王勇, 杜睿. 旱塬冬小麦旱作水分产量潜势与水肥产量效应研究[A]. 陇东高原半湿润偏旱区农业综合发展研究[C]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995. 117~120
- [37] 王小彬, 高绪科, 蔡典雄. 旱地农田水肥相互作用的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(3): 6~12
- [38] 唐拴虎, 杨改河, 申云霞. 旱地冬小麦产量与水分及施肥量关系的模拟研究[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(3): 69~73
- [39] 卢明远, 杨玉兰, 郭秀银, 等. 旱棚控制条件下水肥相互配合对春小麦的耦合效应[A]. 旱地农田肥水关

- 系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 213~219
- [40] 李开元, 邵明安, 李玉山. 不同水文年型作物的水肥产量效应与水分利用[A]. 土壤物理与农业持续发展[C]. 北京: 科学出版社, 1995. 49~58
- [41] 李向民, 许春霞, 李开元. 黄土高原沟壑区水肥因子对冬小麦经济性状的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 309~311
- [42] 李生秀, 赵伯善. 我国旱地土壤合理施肥之刍议[J]. 土壤通报, 22(4): 145~148
- [43] 李凤民, 王静, 赵松岭. 初论半干旱黄土高原集水高效旱地农业的发展[A]. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业[C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. 204~211
- [44] 闵瑾如, 贺菊美, 梁红. 北方旱区主要农作物水分供需状况分析[J]. 干旱地区农业研究, 1987, (1): 30~41
- [45] 沈振荣, 汪林, 于福亮, 等. 节水新概念[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. 105~106
- [46] 张岁岐, 山仑. 有限供水对春小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 1990, 5(增刊): 69~75
- [47] 张福锁, 朱耀瑄. 旱地小麦生产第一因素[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(1): 39~42
- [48] 邓新民. 降水施肥与前茬对旱地玉米丰歉之研究[J]. 干旱地区农业研究, 1991, (4): 10~18
- [49] 贾恒义, 彭琳, 彭祥林, 等. 黄土高原地区土壤养分资源分区及其评价[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 22~28
- [50] 徐学选, 穆兴民. 小麦水肥产量效应研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(3): 6~12
- [51] 李玉山, 苏陕民. 长武王东沟高效生态经济系统的综合研究[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1991.
- [52] 杨文治, 绍明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 252
- [53] 李军, 王立祥, 蒋骏. 西北黄土高原夏闲期农业气候资源状况及其评价[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(4): 9~14

Analysis of the Effect of Water and Fertilizer on Crop Production in Farmland of Arid Zone in Northern China

Gao Yajun, Li Shengxiu

(Resource and Environments College, North-West Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

[Abstract] On the basis of field experiments conducted by authors for a few years, the research results published by many others were collected and analyzed. It was showed that the water effect and fertilizer effect on crop production were related to experiment method. The result obtained from field experiments was opposite to that from simulated experiments because the concept of "water" in the experiments was not the same. The result of rainproof-shed experiments or pot experiments didn't coincide with the field situation. In many cases, nutrient shortage was still the limit factor to increase crop yield in arid zones in Northern China. The effect of irrigation water on crop production depended on the soil water content before sowing, precipitation during crop growing, soil fertility and irrigation time, etc. At the present water resources situation, the main way to increase crop yield in most farmland of arid zone in Northern China was increasing nutrients supply. Enhancing the storage of rainfall during summer fallow period and raising soil water content before sowing were important for winter wheat production.

[Key words] effect of water and N fertilizer; arid area in Northern China; field experiment; simulated experiment