

黄土高原南部作物水肥产量 效应的田间研究

李玉山 张孝中 郭民航

(中国科学院西北水土保持研究所)

摘 要

本文采用田间试验和统计分析方法定量地研究了黄土高原南部典型旱作农田的水肥效应, 得出了小麦和玉米在试验年份的水分满足程度和农田水分供需平衡过程。指出, 影响该区当前作物产量提高的主要限制因素是肥力, 而不是水分。

本文再次明确指出土壤水库在旱农条件下作物供水调节中的不可替代作用。根据全生育期中土水势剖面的变化再次提出低土水势水分的较高有效性问题。本工作所取得的结论对发展黄土高原南部旱作农业是极为重要的。

黄土高原南部高原沟壑区和台塬区横贯晋陕甘三省, 是我国以生产小麦为主的古老旱作农区, 也是各所在省的粮仓。这个地区海拔 600—1200 米, 年降水量 540—600 毫米, 干燥度 1.3—1.5, 气候上属于半湿润易旱类型。直到 70 年代以前, 这个地区粮食单位面积产量仍处于 100—200 斤的低水平。普遍认为, 造成低产的主要原因是干旱。通过多年来对农田水量平衡、作物丰产水分条件的研究, 以及近年来单产大幅度增长的生产实践, 人们普遍产生了新的认识, 即影响本区当前产量的首要的限制因素是肥, 而不是旱^①。并且认为, 本区农田水分条件尚具有很大增产潜力。80 年代以来, 不少县小麦单产已达到 350 斤以上。旱农地区作物产量进一步增长受水分条件限制的程度如何, 以及当前旱作产量主要影响因素的进一步明确都需要田间试验资料的证实。本文即是采用水肥产量效应田间试验的方法, 来研究并回答上述提出的问题。

一、研究方法和试区自然条件

在黄土高原南部典型旱农区——长武高塬设置不同水分水平和不同施肥水平的双因子田间试验, 并连续进行。作物采用冬小麦和春玉米, 二者占本区耕地面积达 70—80%。田间试验的水分处理, 分为 3—4 个水平: 一端为充分供水水平, 要求生长期土壤湿度处于适宜水平, 通过每亩人工灌水 120—150 立方达到; 另一端为旱作, 即仅依赖播前土壤贮水和生育期降水做为供水源。二者之间插入 1—2 个水分水平。肥力处理设置两个施肥水平, 高肥处理即充分供肥水平, 亩施 N、P、O, 纯量 16—20 斤, 有者再施土粪一万斤; 低肥处理施肥量为前者的四分之一。田间试验小区面积均为 0.1 亩, 重复 3 次。

试验地区为中壤质黑垆土, 田间持水容量为 20.8—22.4%, 蓄水能力平均为 290 毫米/1 米土层。

萎蔫湿度为 9—11.6%，无效蓄水量平均为 150 毫米/1 米土层。

该区每年平均年降水量 584.1 毫米。试验的 1985 和 1986 年，小麦生育期降水量近似常年，但都遇春旱。1985 年春旱持续短，抽穗期后降水丰盛；1986 年春旱持续长，直到 6 月中旬灌浆中期，属严重春旱年。春玉米生育期降水量较常年少 19—23%，而且都遇到伏秋连旱，一直持续到成熟期。春玉米试验结果，代表偏早年份类型。

二、试验结果和讨论

(一) 不同供水水平下的产量反应

田间试验结果采用下述三个水分水平进行分析：(1) 旱作，(2) 中等供水，亩灌水 75—104 毫米(中水)，(3) 充分供水，亩灌水量 150—220 毫米(高水)。

试验籽实产量结果列于表 1。包括旱作处理在内，试验的产量水平是相当高的。小麦 1985 年为 408—456 斤/亩；1986 年种植新培育的高产品系 131，亩产达到 752.6—806.6 斤；春玉米亩产均在千斤以上。对两年完成的 8 组田间试验结果进行了方差分析，表 1 所列的 F 值检验结果表明，各水分水平处理之间的产量差异均未达到显著水平。考虑到某些处理之间产量差异量较大，又进一步对 8 组试验中的 24 对处理对比之间，进行了差异显著性的 t 检验，结果检出了 4 对，其产量差异达到 5% 显著水平，占 24 对总数的 16.7%。试验结果表明，本区实行一年一作种植制度的小麦和玉米，在旱作条件下，其产量接近充分供水处理产量水平，显示了旱作农田对作物供水能力接近充分水平，有很大的增产潜力。但尚有 16.7% 的处理，旱作产量降低达显著水平，说明供水仍有一定程度亏缺。显然这和比较干旱的地区所获得的结果完全不同^[3]。

表 1 不同水分处理作物产量反应和 F 值检验

Table 1 Yield response of crops and F test for different treatments of water supply

肥力组别 Levels of fertility	供水处理 Treatment of water supply	冬小麦 Winter wheat		春玉米 Spring corn	
		1985	1986	1985	1986
高肥组 High fertilizer rate	高水	456.0±37.2	806.6±71.0	1156.0±96.1	1138.5±56.5
	中水	452.0±12.9	752.6±62.8	1093.0±111.0	1189.2±24.5
	低水	408.0±10.6	786.0±18.5	1010.0±85.5	1123.1±110.1
	F 值	3.23	1.11	4.24	0.97
低肥组 Low fertilizer rate	高水	383.0±21.0	649.7±55.6	900.0±29.9	829.4±72.6
	中水	374.0±5.5	677.6±38.1	850.0±47.6	812.1±39.4
	低水	338.0±45.7	556.0±34.6	851.0±52.6	746.7±71.8
	F 值	3.25	5.06	0.97	1.56

注：(1) 5% F 值=6.94, $n=9$; (2) 1986 年小麦产量高，系采用新品系“131”，1985 年品种为“72-11-4”。

(二) 不同供肥水平下的产量反应

不同水分水平产量反应结果是完全不同的，不同供肥水平产量结果出现极为一致的显著差异。而且，不论冬小麦和春玉米，不论高、中、低各类水分条件，无一例外。表 2 列出了两类肥力水平下产量差值及差异%。在两年 12 对处理中，低肥处理小麦减产幅度

表 2 不同肥力处理的产量差异(斤/亩)
Table 2 Yield difference for different treatment of fertility (jin/mu)

供水组别 Groups of water supply	冬 小 麦				春 玉 米			
	高肥 Rich fertility	低肥 Poor fertility	差值 Differ- ence	减产% Reduction of yield	高肥 Rich fertility	低肥 Poor fertility	差值 Differ- ence	减产% Reduction of yield
1985 年								
高水组	456.0	383.0	73.0	16.0	1156.0	900.0	256.0	22.2
中水组	452.0	374.0	78.0	17.3	1093.0	850.0	247.0	22.6
低水组	408.0	338.0	70.0	17.2	1010.0	851.0	159.0	15.7
平 均	438.7	365.0	73.7	16.8	1086.3	867.0	219.3	20.2
1986 年								
高水组	806.6	649.7	156.9	19.5	1138.5	829.4	309.1	27.2
中水组	752.6	677.6	75.0	10.0	1189.5	812.1	377.4	31.7
低水组	786.0	556.0	230.0	29.3	1123.1	746.7	376.4	33.5
平 均	781.7	628.0	153.7	19.7	1150.4	796.1	354.1	30.8

为 16.8—19.7%，玉米为 20.2—30.8%。小麦减产绝对量为每亩 73.7—153.7 斤，玉米为 219.3—354.1 斤。在同一年份，同一种作物在各类供水水平条件下，由于低肥导致的减产幅度非常近似，这一方面说明，提高肥力是提高作物产量的普遍性因素；同时说明，在不同水分背景条件下，作物对肥力的敏感程度总的来讲是近似的。

对水肥双因子田间试验结果进行了方差分析，表 3 所列 F 值表明，肥力水平的产量反应在所有情况下均达到极显著水平。水分水平的影响只在一个情况下达到显著水平。水分和肥力的连应作用没有显示。

表 3 水肥田间试验产量差异的 F 值检验
Table 3 F test of yield difference for the field experiment of water supply \times fertility

变异来源 Source of variation	冬 小 麦 Winter wheat		春 玉 米 Spring corn	
	1985 年	1986 年	1985 年	1986 年
肥力水平	22.71**	48.27**	36.29**	169.00**
水分水平	4.81*	2.41	2.37	2.02
肥力 \times 水分	0.37	4.06	0.69	0.78

注: $n = 18$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

由上可以得出结论，增施肥料是提高本区当前产量水平的首要因素。水分条件虽有轻微亏缺，但尚未构成对当前产量提高的明显限制。

(三) 试区旱作农田水分供需平衡

长武旱农区进行的田间试验表明，旱地作物产量虽随不同供水条件表现有升降趋势，但多数情况下并无显著差异。这需从旱作水分供需平衡方面进一步分析。

作物水分供需平衡分析中，首要的是确定作物需水量。需水量决定于土壤-作物-大

气系统的性质,是该三个因素的函数。土壤干湿差异、作物株丛大小、大气干燥强弱都左右着作物需水量的增减,以致在田间测定中,往往出现令人难以把握的情况。一旦需水量测值偏高,则以此为基础所进行的一系列分析,如农田水分条件评价,产量预测预报都将带来偏差。

本文是以同一水平产量的各个处理,实际腾发量最小者视为该年份该作物的需水量。依此,1985年定为中水处理,1986年定为低水处理。旱作农田实际供水量和需水量之差,即为水分满足程度。表4列出1985、1986年旱作小麦、玉米水分供需平衡量。1985年旱作麦田供水满足程度为90.8%,旱作玉米田为83.7%。减产幅度相应为8.9%和12.6%。1986年旱作农田供水满足程度达到100%。

表4 长武旱地作物水分供需平衡

Table 4 Water balance of supply and demand for dryland crops in Changwu site

作物 Crops	需水量 (mm) Water requirement	旱作供水量 (mm) Water supply on dryland			产量 (jin/mu) Yield	水分满足程度 (%) Satisfing level of water supply
		降水 Precipitation	土壤水 Soil water	合计 Sum		
1985年						
小麦	515.4	272.6	195.3	467.9	408.0	90.8
玉米	475.7	352.2	45.8	398.0	1010.0	83.7
1986年						
小麦	515.4	285.4	230.0	515.4	786.0	100.0
玉米	451.9	326.7	125.2	451.9	1123.1	100.0

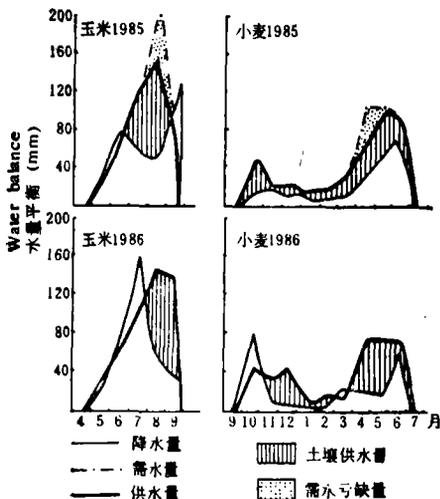


图1 长武高原旱地作物水分供需平衡月际分布
Fig. 1 The monthly distribution of water balance for dryland crops in Changwu high-land

生长于旱季的冬小麦和生长于雨季的春玉米,在农田供水结构上是不相同的,在常态年份,小麦生育期降水量为290毫米。占需水量的55—60%,土壤供水量为200毫米左右,占40—45%,本文试验占41.7—44.6%;而春玉米生育降水量为430毫米,占需水量90%以上,因而减少了对土壤供水量的依赖。但是,如就伏旱、秋旱期阶段供水组成来看,其作用仍然不小于生长于旱季的麦田。

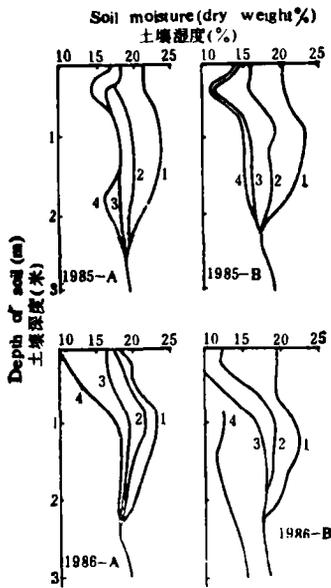
图1绘出旱作麦田和玉米田水分供需平衡月际分布的一般图式。在全生育内,春玉米需水动态是单峰式,顶峰偏向生育后期。冬麦是驼峰式,秋峰低,春夏峰高。图中需水量、供水量和降水量三条线(1986年需供水线合一),表明它们各自的月际分布,以及三者的关系。春玉米田1985年伏季土壤供水量合计为200.1毫米,占阶段耗水量的68%。1986年伏秋季土壤供水量达292.5毫米,占阶段

耗水量 77%。显然,伏旱、秋旱期间土壤供水量成为春玉米的主要供水源,而使水分供需趋于平衡。此种季节性供水调节作用常被秋季降水恢复土壤贮水过程所掩盖。

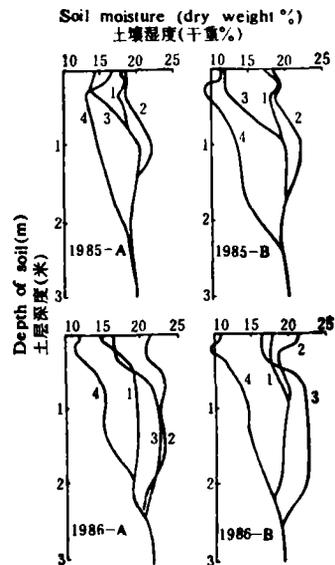
夏收作物小麦则和春玉米不同,土壤供水过程贯穿于全生长期始终。春夏之交是植株高生长和籽粒形成期间,土壤供水量一般成为主要供水源。播期土壤贮存水量可以决定翌年小麦产量的丰欠趋势。

(四) 旱作农田土壤供水过程和土水势分布剖面

目前还没有发现其它一种土壤,比黄土高原土壤有更大的作物供水库容。尽管某些土壤持水能力较大,但供水层深度远较黄土高原土壤为浅。而供水库容决定于土壤有效水容量和供水层深度两个因素。图 2 和图 3 提供了两种作物在两种水分水平下,全生育期中土壤水分剖面分布动态所展示的土壤供水过程。A 组为充分供水处理, B 组为旱作处理。播种期两组处于同一湿度剖面水平,至成熟期,旱作组湿度剖面变化幅度较大,土壤干燥程度较强,表明土壤供水数量较多。不同生育期湿度剖面分布线相交的位置即为作物用水深度。两年试验中小麦和玉米用水层深度皆为 2—2.5 米。只有 1986 年小麦在严重春旱条件下,旱作组用水深度超过 3 米。



A: 充分供水处理 B: 旱作处理
 1. 播种期, 2. 拔节期, 3. 抽穗期, 4. 成熟期
 图 2 长武高原麦田土壤供水过程
 Fig. 2 The process of water supply in soil for wheat field in Changwu high-land



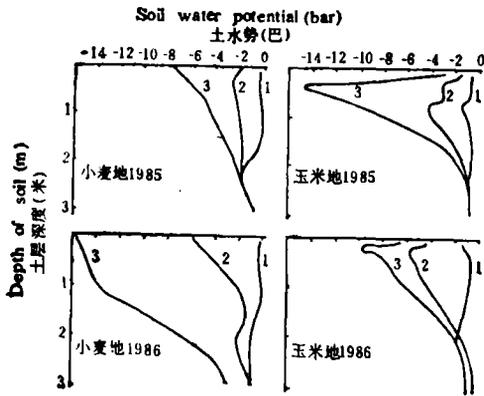
A: 充分供水处理 B: 旱作处理
 1. 播种期, 2. 拔节期, 3. 抽穗期, 4. 乳熟后期
 图 3 长武高原春玉米田土壤供水过程
 Fig. 3 The process of water supply in soil for spring corn in Changwu high-land

土壤湿度剖面分布线由地表至深层,随生育期向左移动的幅度近似,表明全层内作物的吸水强度近似,有效性充分程度近似。这和根系的深生长和分布密度密切相关^[2]。

不难看出,这种黄土性土壤供水性能的特征,决定了本区旱作农田作物需水有较高的满足程度,说明了补加水分的产量效应减弱的原因。

土水势分布剖面(图 4) 表明作物播种期至成熟期土水势的时空变化范围。显然,旱作

处理变化幅度要大得多,土水势严重下降。如1986年小麦田旱作处理2米土层土水势降低到-8至-16巴,充分供水处理区为-2至-6巴,但二者产量并无显著差异。前者亩产786斤,后者亩产806斤。表现出上述水势范围内土壤水分有效性和相似性。W. Ehlers关于植物与土壤中水流阻力的田间研究表明^[4],在所有作物生育期,水流植物阻力均较土壤阻力大得多,只有在土水势处于萎蔫湿度时,土壤阻力才成为主要的。我们的另一研究也表明,土壤水分从萎蔫湿度至80%田间持水容量,其有效性几乎是同等的。F. J. Veihmeyer进行了21年的果树水分产量效应田间试验,试验结果说明了高于萎蔫湿度的土壤水分对植物是易效的^[5]。在黄土高原南部高原区和中海拔台原区,小麦丰产往往是在灌浆期处于中等或低等土壤湿度条件下获得。高产田收获期往往留下一个接近或达到萎蔫湿度的土壤水分剖面。由此,又触及到一个古老的问题,即土壤湿度高低和植物有效性的关系问题。很难认为,土壤水分有效性是随土壤湿度降低而呈线性降低。特别是粮食作物生育后期,农田低土壤湿度并不必然和低产相联系。为什么土壤导水率随湿度减少急剧降低这一性质不能完全说明有效性的尺寸,土壤水分有效性又呈现出复杂性呢?我们考虑和以下两原因有关。



1. 播种期; 2. 充分供水处理收获期;
3. 旱作处理收获期

图4 作物种、收期土壤水势分布剖面

Fig. 4 The distribution profile of soil water potentials for seeding and harvesting period of crops

到萎蔫湿度的土壤水分剖面。由此,又触及到一个古老的问题,即土壤湿度高低和植物有效性的关系问题。很难认为,土壤水分有效性是随土壤湿度降低而呈线性降低。特别是粮食作物生育后期,农田低土壤湿度并不必然和低产相联系。为什么土壤导水率随湿度减少急剧降低这一性质不能完全说明有效性的尺寸,土壤水分有效性又呈现出复杂性呢?我们考虑和以下两原因有关。

1. 土壤水分有效性最终是以生物反应为指标。生物本身有调节水分平衡的能力,而且不同生物对水分反应敏感性也不同。例如,著名的 F. J. Veihmeyer 试验是以果树为对象,以果子品质和产量来衡量土壤水分有效性。我们是以禾本科粮食作物为试验作物,以籽实产量为根据。而适当的土壤干燥反而有利于糖类向果实运输,显然这和以营养器官为产品的蔬菜作物不同。

2. 试验中根系供水容积不同。根系供水容积决定于与根系分布有关的土壤性质和体积。F. J. Veihmeyer 和我们均以壤质均一土壤的田间试验为基础,根系与分布深度均超过2米。植物水量平衡决定于吸水总量。较大的吸水库容可以补偿较小的吸水强度而使水分供需趋于平衡。上述试验显然与根系不易深扎的粘质间层土壤或盆栽方法有重大区别。后者根系供水容积要小得多。

试验地区深厚黄土性土壤拥有较好的供水性能,低湿度含水量表现了较大的有效性,无疑这对提高本区旱作产量带来了潜力条件。

参 考 文 献

- [1] 陕西省土壤学会,1983: 渭北旱原土壤培肥的途径和措施。陕西农业科学,第3期,1—4页。
- [2] 陈培元等,1980: 冬小麦根系的研究。陕西农业科学,第6期,1—4页。
- [3] Misra R. K. et al, 1985: Effect of a limited water input on root growth, water use and grain yield of wheat.

Field Crops Research, 10: 125—134.

- [4] Ehlers W. et al. 1981: Flow resistance in soil and plant during field growth of oats, *Geoderma*, 25:1—12
- [5] Veihmeyer F. J., 1972: The availability of soil moisture to plants: Results of empirical experiments with fruit trees, *Soil Sci.*, 114 (4): 268—294.

THE FIELD EXPERIMENTS ON THE FIELD-RESPONSE OF CROPS TO WATER AND FERTILITY IN THE SOUTH OF THE LOESS PLATEAU

Li Yushan, Zhang Xiaozhong and Guo Minhang

(*Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica*)

Summary

The field experiments were conducted on dryland of Changwu high-land in 1985 and 1986. Grain yield, water requirements and consumptions for wheat and corn, the changes in moisture storage down to a depth of 2—3m. were measured. Data of field experiments showed that there was insignificant difference at 5 per cent level for grain yield among different treatments of water supply and there was extreme significance at 1 per cent level among different treatments of fertilization under any level of water supply. It can be concluded that the balance between requirement and supply of water has been approximately reached in the experimental region and the primary constraint for crop yield at present is poor fertility, not water deficit. Analysis of water balance on cropland showed that satisfaction ratio of water supply was 90.4—100% for wheat and 83.7—100% for corn in experimental years. Water supply of 200 mm to wheat was from soil water storage over whole growing period and more than 200 mm to corn in the period of summer drought or autumn drought.

The change of soil moisture in soil profile down to a depth of 3 m. at harvesting period were studied. It seems that soil moisture higher than permanent wilting percentage is readily available.