

旱作农业的潜力 及其增产途径的系统分析

陈国良 刘笃慧

(中国科学院西北水土保持研究所) (宁夏固原地区气象局)

旱地占我国耕地(15亿亩)的52%左右,绝大部分位于我国北方半干旱及半湿润易旱区,年降水量在350—650毫米左右。西北又是我国旱地农业的集中分布区,旱地一般占耕地的70—80%以上。因此,提高旱地作物产量不仅对西北地区,而且对华北地区改变贫困面貌,实现粮食自给有余,迎接我国经济建设重点在本世纪末或下世纪初向西北转移、工农业总产值翻两番,都具有重要的战略意义。

西北半干旱地区是我国粮食低产区,目前大面积旱作产量仍在100斤/亩左右徘徊。对其低产原因,多年来一直存在着不少争论,有的说是旱、薄、粗,有的说是薄、粗、旱,等等。针对此问题,本文从气候——土壤生态系统的整体性出发,应用农业系统工程的生产函数模型,以宁夏固原县为重点个例,对西北半干旱黄土地区的旱作生态因子和生产潜力作一系统分析,从中找出其主要限制因子,为提高旱作产量及合理开发旱农地区生产潜力提供一些生态学依据。

一、作物生产潜力的估算模式

所谓作物生产潜力,是指作物在理想群体及一定生态环境的资源和约束条件下所能达到的最高产量。国内外许多学者从不同角度对此问题进行了长期研究,其总的趋势是:对作物与环境系统之间的物质、能量转换关系及过程分析得日益全面、深化,因而使对作物产量潜力的分析越来越接近实际。我国对作物生产潜力的研究工作,多着眼于太阳光能及温度因子,对水分影响的研究甚少,考虑光、温、水、肥的综合模式则更少见。光、温生产潜力是在水、肥因子充分满足条件下的理论最高产量,对于没有灌溉条件的旱地来说,光、温生产潜力则失之过大,为此有必要建立一个适于估算旱地作物生产潜力的模式,以全面评价光、温、水、肥的综合效应。

作物生产潜力的一般形式可用生产函数表示,即

$$Y = F(C, A, S) \quad (1)$$

式中: Y为作物产量潜力;

C是作物本身的状态变量集;

A为大气环境变量集;

S为土壤环境变量集。

作物状态变量集C主要包括作物发育期、叶面积系数及其它生物学特性；大气环境
变量集A主要考虑太阳光能、热量（温度）及降水资源；土壤环境S主要包括土壤肥力
及土壤水分。如只考虑光能生产潜力，按作物不同发育时段*i*计算光合生产潜力的公式
为：

$$Y_r = KE \sum_{i=0}^n Q_i \quad (2)$$

其中：Y_r为光合生产潜力；
K为物—能转换系数；
E为光能利用率；
Q_i为作物各发育时段内的太阳辐射能；
i为生物学时段序号；

$\sum_{i=0}^n$ 表示对各时段（0—n）求总和，实际上按旬逐段求和。

再进一步考虑热量及水分资源的影响，应该对Y_r加以温度和水分订正。由于不同发
育阶段热量与水分的影响系数不同，因此作物的光温生产潜力Y_r及气候生产潜力Y_A分
别为：

$$Y_r = Y_r \cdot K_t$$

$$Y_A = Y_r \cdot K_w$$

$$\text{即 } Y_A = KE \sum_{i=0}^n Q_i \cdot K_t \cdot K_w \quad (3)$$

式（3）中：K_t为作物、热量影响系数；

K_w为水分影响系数，它们分别用下式计算：

$$K_t = \frac{L_i}{L} \cdot \frac{t_i}{T}, \quad K_w = \frac{P_i}{E_p}$$

式中：L_i为各生物学时段理想群体下的叶面积系数；

L为光合最适叶面积系数；

t_i为环境温度；

T为光合最适温度区间；

P_i为可能供给作物的水分；

E_p为作物理想群体的潜在耗水量；

P_i要根据土壤水分平衡关系，用降水量，径流量及土壤有效含水量计算；

E_p用彭曼（Penman）公式计算的潜在蒸散量及作物系数估算。

土壤肥力对作物气候生产潜力Y_A的影响主要表现在土壤对作物需肥量的满足程
度，用下式表示：

$$Y_s = \frac{f}{N} \cdot Y_A = K_N \cdot Y_A \quad (4)$$

式中：Y_s为气候——土壤生潜潜力；

f为实际供肥量；

N为实现气候潜力的耗肥量，一般可用氮素表示；

K_N为土壤实际供肥系数。

综合式(3)和式(4)，即是根据利比希最小限制定律，并假定在适区以下的水、肥供应量与作物产量存在着近似线性关系而提出的，旱地作物生产潜力的估算模式，其中气候生产潜力Y_A就是在土壤肥力充足的条件下，旱地作物平均可能达到的最高产量，即旱作产量的理论平均上限。

二、半干旱地区作物生产潜力的系统分析

以宁夏固原县为例，用式(3)和式(4)对半干旱气候区旱地作物的生产潜力进行了估算(见表1。详细运算过程从略)。

固原县位于黄土高原西部，宁夏南部六盘山东侧，总面积6,413平方公里，总耕地400万亩左右，90%以上为旱地。该县属于半干旱气候类型，年降水量在350—600毫米之间，年平均气温4—8℃。这里降水量主要集中在7—9月(占全年的60%以上)，且年际变化大，年降水量相对变率达25—30%，故干旱频繁，以春夏旱危害最重。最大可能蒸发量(即潜在蒸散量)为年降水量的1.5—2.5倍，因此降水远远不能满足作物需要，是限制光合生产潜力的关键气候因子。由于无霜期短(5月中旬至9月中旬)，气候温凉(最热月7月平均气温17—19℃)，故作物只能一年一熟，主要作物有春小麦、冬小麦、糜子、谷子、玉米、马铃薯及胡麻等二十多种。该县主要地貌为黄土丘陵，间有河谷、盆、塬，自然植被以灌丛草原为主，也有从森林向干草原的过渡分布。总之，固原在西北黄土丘陵及早塬区具有一定代表性。故通过对该县的典型分析，足可窥视黄土高原旱作生产潜力之一斑。

对固原主要作物的生产潜力分析如表1、表2所示(光能利用率按生理辐射量的

表1 固原旱地作物气候土壤—生产潜力(斤/亩)

作物	光合生产潜力 (Y _r)	光温生产潜力 (Y _T)	气候生产潜力 (Y _A)	气候—土壤生产潜力 (Y _s)
春小麦	1,800	960	516	90
糜子	1,638	747	648	104
谷子	2,310	1,082	756	104
玉米	2,196	1,202	900	104
平均	1,986	984	705	101

表2 固原旱地作物各生态因子的产量效应 (%)

作物	温度效应 (Y_T/Y_e)	水分效应 (Y_A/Y_T)	肥力效应 (Y_B/Y_A)
春小麦	53.3	53.8	17.4
糜子	45.6	86.7	16.0
谷子	46.8	69.9	13.8
玉米	54.7	71.6	11.6
平均	50.1	70.5	14.7

6%计算)。

固原地区光能资源比较丰富,年辐射总量为127.6千卡/平方厘米,作物生长季为81千卡/平方厘米,光能生产潜力本身很大,夏、秋粮平均为1,986斤/亩。但由于热量不足,一年只能一熟,最热月平均气温 $<20^{\circ}\text{C}$,因此使光能生产潜力大受限制。由表2可见,温度影响平均占光合生产潜力的50.1%,即使光合生产潜力下降约50%;由于水分不足而使光温生产潜力下降约30%,其中水分对春小麦限制最大,下降约46%,而对糜谷及玉米限制性较小,下降约14—30%。这反映了当地春、夏两季频繁的干旱对小麦等夏作物影响较大,对秋作物影响较小。

由于土壤肥力贫瘠而使光能生产潜力下降最多,肥力限制就使可能实现的气候生产潜力下降约85%。这是由于该地区长期广种薄收,林草稀少(林地占2.1%,人工草地占4%),水土流失严重(年水土流失量5,000—7,500吨/平方公里),土壤肥力很低的结果。以分布面积最大的细黄土为例,其有机质含量仅为0.5—0.7%,全氮为0.05%以下,速效磷在0.001%左右,且施用化肥量很少,平均每亩1斤,近几年只增加到3斤/亩。根据目前土壤肥力计算,作物的气候—土壤生产潜力平均约90—100斤/亩,而该县多年平均亩产仅76斤(见图1)。这证明,当前限制气候生产潜力的主要因子是肥,因此说黄土高原旱作低产的原因是“薄、粗、旱”是有首理的。另一方面,从气候生产潜力来看,平均最高产量可达500—900斤/亩,因此只要解决好薄、粗问题,在半干旱地区的旱作产量完全有可能实现成倍增长。

旱作生产潜力估算方法的可靠性,可用固原高产典型及平均产量加以验证。此外,这一方法曾在湖南双峰县应用过(梁荣欣等,1982年),也取得比较接近实际的结果(详见表3)。

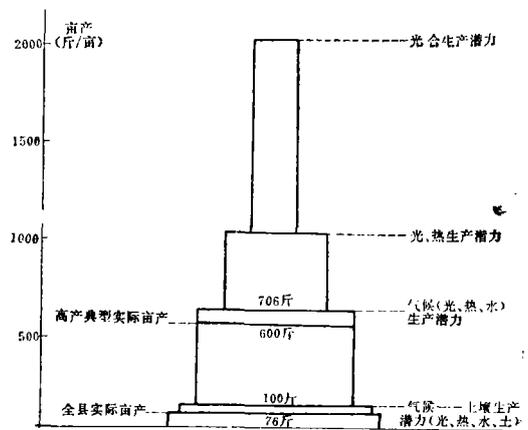


图1 固原县主要作物各因子生产潜力与实际产量比较

表3 作物气候—土壤生产潜力估算的验证

地 点	作物	气候生产潜力 Y_A (斤/亩)	高产典型 (斤/亩)	土壤生产潜力 Y_B (斤/亩)	实际平均产量 (斤/亩)
宁夏(旱地) 固原	玉米	900	484	104	95
	谷子	756	404	104	72
	糜子	648	600	104	87
	春小麦	516	500	90	79
湖南(水田) 双峰	早稻	1,769	1,080	906	828
	晚稻	1,226	1,032	711	682
	合计	2,995	2,112	1,617	1,510

三、关键在水，出路在肥

上述分析，按不同层次揭示了光、热、水、肥四个主要因子对作物产量潜力的贡献，但在不同地区这四个因子的可变性是不同的：在灌溉地区，光、温是难变因子，水肥是易变因子；而在旱作地区，光、温、水则是难变因子，肥是易变因子。这样，它们就构成了不同的潜力数值。首先，光是作物的最根本的能源，它所显示的只是作物的理论最高产量，往往是不能变为现实的；热量是重要的环境因子，由于它的难变性，它所显示最高产量的潜力也只是水肥条件能够保证的情况下才能实现的，这已为水田和灌溉地区的个别高产典型所证实。但在旱作和水源不足的灌溉地区，这一潜力也只能是一个理论上的数值，也难于变为现实。例如，固原地区光、温生产潜力可达1,000斤，而旱地作物高产典型与这一数值就存在着很大的差距，如果用大面积多年的年均产量100斤左右与之相比，那更相差甚远。在这种情况下，自然降水的最大生产潜力，就成了这一地区的现实潜力了。因此，从潜力的角度分析，旱作地区产量之所以比水田与灌溉地区低，水是关键因子；同时由于对水难于调控，半干旱地区的自然降水又存在不匀不足，水分因子必然影响到作物产量的起伏波动。就是在灌溉地区，降水波动对产量的影响也还是不能忽视的，只不过程度比之旱作地区较轻罢了。这一点已为国外许多学者早已注意到，他们认为，所谓气候异常，主要是降水的异常；世界粮食的波动，也主要是降水波动影响的结果。比如生产水平较高的美国，它的作物产量变动中，农业技术措施占到70—80%，而天气影响约占12—18%，随机噪音的影响约占5—10%。在“天下黄河富宁夏”的银川平原灌区，由于水分条件能得到保证，肥力条件也有较大提高，其产量变动中，农业技术措施所占的比例为64%，天气所占的比例为36%。在固原旱作地区，由于作物需水主要靠自然降水供给，不断培肥地力的农田在其产量变动中，农业技术措施占47%，天气占53%；而长期广种薄收、进行掠夺式经营的农田，则农业技术措施只占到15%，天气的影响则占到85%。由此足见，水分在不同地区，都是影响产量的重要因子，而且越是干旱地区，这种影响程度越大（见表4）。

如果将旱作地区历年产量与历年关键时期(经分析,固原为上年8月和当年5月降水

表4 不同地区气候变异对粮食产量变化影响比例 (%)

项 目	宁夏引黄灌区春麦	固原旱地粮食		湖南双峰县稻水	美 国 (粮食)
		高肥队	低肥队		
农业技术措施	64	47	15	89	70—80
气 候	36	53	85	11	12—18

注：(1) 固原高肥队以城郊鸦儿沟队为代表，低肥队系与鸦儿沟队毗邻的饮马河队为代表；

(2) 美国粮食波动分析资料引自W·贝尔等著：《作物——天气模式及其在产量预测中的应用》，科学出版社，1980年第75页。

的影响——正效应最为显著)的降水总量点绘相关图，则更为直观。其产量变动与降水变动的关系，几乎是形影相随，趋势一致(见图2)。

虽然水分是影响产量的关键因子，然而由于在旱作地区改变水分因子的难度极大，即使人们经过艰巨的努力，也常常是费宏而效微，难于改变整个农业的面貌。如：延安地区解放以来花了2.5亿元，总共增加了50万亩水地，平均1亩水地约需500元；固原县解放后30多年，国家农业总投资1.1亿元，其中94%用于水利、农机上，结果只增加了水地22万亩，旱作土地仍然占95%，并且这些灌溉地区由于缺乏肥料投资，大面积平均亩产也不过100—200斤。因此，从生态学的角度和发挥主观能动性的实际效果考虑，改变旱作地区低产面貌的根本出路还在于肥，因为肥力因子是易变的。如果把着眼点放在肥上，就会产生一改带多改的根本转变。譬如，必须合理调整农业结构，积极增加林草比例，开辟有机肥源；合理调整投资方向，提高林、草、畜、肥的投资比重，增加农田的能量输入；合理调整作物布局，增加养地作物等。随之而来的，不仅能达到以肥调水，减轻干旱威胁，提高降水利用率，大幅度增加旱地作物产量的目的，而且在干旱地区通过多途径抓肥，可以找到农业建设的主攻方向，大力抓好林草建设，从而有利于改善生态环境，有效地防止水土流失，减轻旱、风(沙)、冰雹等多种灾害，解决燃料、饲料、肥料俱缺问题，发挥林牧优势，达到尽快治穷致富的目的。

大量的实践证明，无论通过何种方法(增施有机肥和无机肥，实行草田轮作、豆粮轮作等)提高土壤肥力，对旱地作物增产都是极为有效的。如上述固原城郊相邻两队的

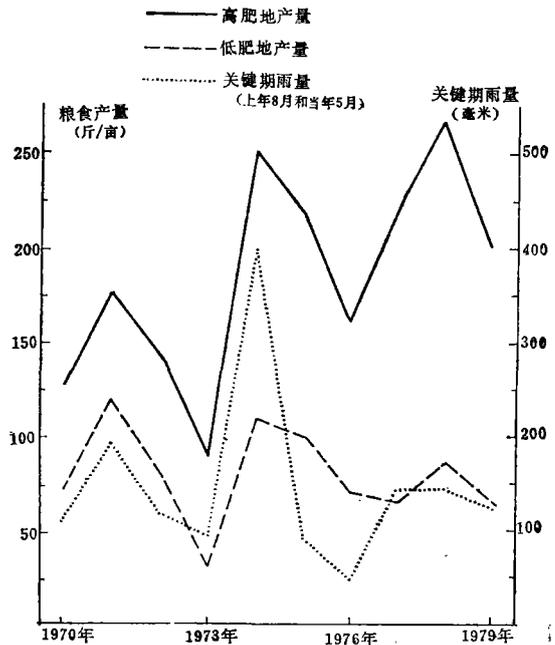


图2 固原县不同肥力旱地产量与降水量的关系

历年产量变化图(见图2),可见重视利用有机肥(城粪和绿肥)培养地力的鸡儿沟队,其多年平均亩产要比广种薄收的低肥队(饮马河队)高出一倍以上,前者为194斤,后者仅为82斤;在大丰大旱的1978年和1979年相差则更悬殊,前者分别为269斤和89斤,后者仅为87斤和29斤。

但是在林草稀少的地区要马上增加较多的有机肥是不现实的,因此在肥力建设上绝不能“守株待兔”,就是有了较多的有机肥投入以后也还不能轻视无机肥的作用。因为有机肥转化肥效慢,仅靠有机肥也只是一种传统的封闭式农业,很难满足旱作高产再高产的要求。因此要实现现代农业,必须有机与无机结合,以无机促有机。而且只要合理组织,使用得当,旱地施用化肥不仅效果极为明显,而且数量不多,每亩不过20—30斤,每斤化肥可获8—10斤粮食。这比我国南方地区每亩施用200斤来说,只要国家适当调整各地化肥供量,是不难办到又是非常实惠的。关于化肥在旱作地的施用方法及其效果,中国科学院西北水土保持研究所辛业全等同志作过一些试验,其结果如下:

由表5可以看出,在一般肥力水平下,旱地施用化肥都有明显的增产效果,深施增产幅度更大。在不改变施肥量和其它措施的情况下,深施化肥的增产幅度比浅施的要提高23.4—58.3%,用水效率提高12—90%,接近每毫米耗水量生产1斤粮食的水平。尤其是糜子和谷子,在深施化肥的条件下,吸收养分的能力更强,单产近乎春小麦的两倍,相比之下,旱作糜子和谷子生产潜力最大。

表5 固原旱地深施化肥的增产效果

作物	处 理	耗水量 (毫米)	生物学 产 量 (斤/亩)	籽 粒 产 量		用 水 效 率	
				斤/亩	增产%	斤/毫米	提高%
春 小 麦	深 施 肥 (20厘米)	304.9	412.4	158.6	81.7	0.52	67.7
	浅 施 肥	287.3	347.0	128.5	47.2	0.46	48.4
	对 照	284.5	261.9	87.3	0	0.31	0
糜 子	深 施 肥 (20厘米)	331.9	687.7	303.5	71.3	0.91	56.9
	浅 施 肥	312.1	452.1	203.7	15.0	0.65	12.1
	对 照	304.1	401.5	177.2	0	0.58	0
谷 子	深 施 肥 (20厘米)	374.8	994.1	356.3	117.1	0.95	90
	浅 施 肥	318.3	849.5	225.1	37.2	0.71	41.4
	对 照	328.1	514.4	164.1	0	0.51	0

注: (1) 各处理亩施农家肥1,000斤; (2) 深施肥和浅施肥均为亩施氮素4斤、磷4斤,对照不施化肥。

四、结 语

根据系统工程原理,一切开放系统都具有“多途径,等结局”的协同、转换特点,农业大系统也同样具有这一特点,即对环境的多种输入(有资源和约 (下转第36页)

效果与启示

在过去的10年里，神堂沟大队在治山治水方面虽然经过曲折和反复，但是他们在生态与经济等方面都取得了明显的效益。10年来，全大队共修浆砌护河石坝2,120米，垒地埂干石坝1.32万米，建设高标准的沟滩坝地620亩，每人平均达到1.9亩。历年退耕山坡地2,680亩，其中还林2,062亩，还草350亩，零星栽树2.3万株，每人平均达到了6.3亩林，1亩草，70株树，还封山育林育草2,328亩。现在，全大队治理面积达到5,360亩，占到流失总面积的57%；林草覆盖率由原来的21%，提高到46.3%；泥沙流失量由过去年平均4.9万吨，减到3.2万吨，减少了35%；洪峰减少了43%，基本上控制了洪水灾害。由于林草覆盖率的提高，自然生态有了明显好转，农、林、牧、副业生产得到全面迅速发展。1982年，全大队粮食总产量达33万斤，比治理前的1973年翻了一番多，每人平均占有粮食达到1,100斤。现在，全大队有大牲畜172头，每户平均达到2头半，有羊1,160只，每户平均14.5只；养猪78口，每户平均1口。1982年，全大队农、林、牧、副总收入达到7万元，比1973年的1.4万元增加了4倍；每人平均分配收入达到150元，比1973年的30元增长了4倍。1973年全大队每人平均欠国家和信用社贷款92元，到去年除还清外债外，每人平均在信用社存款30.6元。还出现户产万斤粮的5户，户养大畜7头以上的5户，户养羊30只以上的10户。

神堂沟是吕梁山区社队的缩影。在当前大力推广社员以户承包治理小流域的经验中，只要象神堂沟大队那样，抓住修地、植树、拦水、筑坝，坚持综合治理，连续治理，我们相信不要很长时间，在吕梁山上就会出现千千万万个神堂沟。

（上接第46页）束的两重性），可以通过内部各单元之间的协调、转化关系，得到相同的结果（对环境的反响或输出）。反之，如果只靠单一途径、独木之桥，那就不能使系统内部结构协调，因而也不能从环境中吸取多种丰富的营养，提高系统功能。胡耀邦总书记最近在北方旱地农业工作会议上关于种树种草、发展旱作农业的讲话中用“反弹琵琶”这个生动而形象的比喻，从哲学高度概括了改变西北农业面貌的根本途径，而且完全符合系统工程关于开放系统“多途径，等结局”的科学原理，这一战略必将为振兴大西北、开创旱作农业新局面产生深远影响！

在旱作农业生态系统中，影响系统功能的生态环境因子关键在于水，这是客观条件，必须充分认识掌握水分在旱作农业生态系统中的分布、循环、平衡关系，并正确运用这些规律，使半干旱区的有限降水资源得以充分利用。但是，还应该看到，降水的多少及变化是人们难以改变的，因此只从“水”入手，单向进攻，“正弹琵琶”，那是收效甚微的。如前所述，要适应干旱的生态环境，提高旱作生产水平，还必须从“肥”上找出路，下功夫，这就是“反弹琵琶”的辩证法。