

半干旱黄土高原集水高效旱地农业的发展*

259-264

李凤民**

王静

赵松岭

S274

(兰州大学干旱农业生态国家重点实验室 兰州 730000)

摘要 黄土高原半干旱区传统水土保持型农业的发展已有数十年的历程,已基本趋于成熟,但对水肥热的调控能力很低,难于发展高附加值作物生产,因此生产效益低下,难以走上良性发展的轨道。不能解决目前遇到的实际问题。通过近几年来探索,认为,在传统水土保持农业的基础上,进一步发展雨养农业最有效的途径就是人工富集天然降水,将富集的降水用于农业生产,可以大大提高降水的利用效率和生产效益,这就是集水农业,是今后半干旱区雨养农业发展的一个重要方向。

关键词 黄土高原、降水利用、旱地农业、集水农业

THE RAINWATER HARVESTING TECHNOLOGY APPROACH FOR DRYLAND AGRICULTURE IN SEMI-ARID LOESS PLATEAU OF CHINA

LI Feng-Min WANG Jing

ZHAO Song-Ling

(State Key Laboratory of Agroecology, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China)

Abstract The traditional water-soil-conserving agriculture has been developed for several decades. However, its regulative roles in water, fertility and temperature, were very limited. We think that the practicable approach is to harvest and stored rainwater artificially, and to supply limited irrigation at the key stage in crop development. This paper reviewed the research progress in rainwater-harvesting technology applied in crop production. It is suggested that this technology will become one of the major directions of dryland agriculture in Northwest China.

Key words loess plateau, rain water use, dryland farming, rainwater harvesting technology.

1 传统旱地农业的分析

我国西北地区旱地农业曾经有过辉煌过去,今天的旱农技术渊源流长,与过去一脉相承。就建国以来,可以粗略地分为两个阶段。在50、60年代,旱农研究的中心议题是总结推广几千年来群众创造的旱地农业耕作经验,通过技术组合,提高土壤的蓄水保墒能力,建立旱农耕作制度。在70、80年代,以平田整地

* 国家“九五”科技攻关资助项目(96-020-01-02-02)

** 通讯联系人, Email: fml@lzu.edu.cn

收稿日期:1996-10-18; 修改稿收到日期:1997-07-03

为目标修筑梯田,随后又提出进行小流域综合治理。在这些工作中始终贯穿的一个基本思想就是接纳尽可能多的天然降水就地入渗,以此来提高天然降水的利用率和作物生产力。最近十多年来被农学家、土壤学家、生态学家和水土保持学家总结为“水土保持型农业”(简称水保型农业)。

建国40多年来,国家在以水土保持为中心的旱地农业中投入了巨大的人力和财力,但是“黄土高原水土流失状况并未根本好转,干旱风沙、暴雨洪水、水土流失仍然制约着经济发展和人民生活的改善。特别是黄河中游多粗沙区治理进展缓慢,水土流失严重,不少支流入黄泥沙并未减少”^[1],粮食生产水平的低而不稳也没有从根本上得到改善。

在半湿润的黄土高原旱农地区,年降水量一般都在550mm以上,如果能充分接纳天然降水,使其就地入渗,可以基本满足一年一熟作物的需水量^[2],在一年两熟的地区,由于降水量也有一定的增加,如果接纳天然降水和减少土壤表面蒸发的措施实施得好,即使有部分水分亏缺,也并不十分严重。这是传统水保型农业得以发展的基础。然而,在年均降水量400mm左右的半干旱地区,不但年降水量少,而且降水的年变率和季节变率增大,完全依靠接纳天然降水就地入渗的做法已经得不到所预期的效果。

半干旱地区土壤无效蒸发量增大。在典型半干旱地区的甘肃农业科学院定西试验站所做试验表明^[2],在0~200cm土壤中全年休闲地块只比豌豆地块多贮水7.7mm。宁夏盐池年降水量为291.5mm,由于接近沙漠边缘而风沙很大,在土壤表面覆盖有一个细沙层可以抑制土壤表面的蒸发,剪去所有地被物,阻断植物蒸腾,1988年5月1日到10月31日0~200cm土壤中的水分仅仅增加75.3mm,只占同期降水量的29%^[1]。在半干旱地区,休闲期土壤蒸发可占到同期降水量的60%~80%,半干旱偏旱地区达到72%~98%,在半湿润地区为最低,但也要达到60%^[3]。在作物生长季节,裸地和种植作物地的年耗水量基本相同。甘肃定西属于典型的半干旱地区,年均降水量420mm左右,其降水总量已经超过本地区主要粮食作物春小麦的需水量^[4]。但是,小麦生长季的实际降水量一般只占全年降水量的一半左右,在有较好的蓄水耕作措施保证时,非生长季节降水的有效利用率只能达到40%左右^[1]。即每年平均供给小麦的可接纳降水量是 $420 \times 50\% + 420 \times 50\% \times 40\% = 294\text{mm}$,这就是本地区传统水保型农业理论上所能达到的极限。全年降水中有约30%属完全无效,无论如何都不能为小麦所利用,致使春小麦每年平均水分亏缺达到24%。再加上降水的年变率和季节变率都较大的不利因素,产量的低而不稳就成为必然。

培肥地力可以提高产量已成为人们的共识。但培肥地力又是以土壤水分状况的改善和第一性生产力的提高为基础的。在干旱土壤中团粒结构较差,营养成分直接和空气接触,很快氧化损失。有机质是肥力的重要基础和指示剂,但是,如果没有第一性生产力的显著提高,不仅不会有更多的有机质投入,就连最起码的草根也会被拔出来当柴烧掉,不会有能力提高土地的有机质含量。而提高第一性生产力首先需要解决的就是水的问题。然而,传统水土保持型农业虽然可以在一定范围内控制降水的无效径流,但在半干旱地区即使这种措施非常有效,土壤水分状况的改善仍然非常有限。因此,在这种背景下培肥地力只能是一句空话,在小范围内的样板田示范尚可,而在大范围内用于开发和稳定提高粮食生产水平却是很困难的。

在干旱年份,梯田水分状况的恶化同时也导致土壤肥力的迅速下降,对梯田的增产作用产生重要影响。从定西水土保持站60年代的测定结果可以看出(表2)^[4],1962~1965年的降水量为中等偏上,梯田的增产作用很明显,而1966年为一个严重干旱年份,梯田的增产作用基本为零,1967年又是一个少有的丰水年份,但其增产作用却不高,而耗水系数却达到了最高峰(甚至高于严重干旱的1966年)。一个合乎逻辑的推论就是,由于前一年的严重干旱,梯田水分状况严重恶化,导致肥力水平也迅速下降,以致于在1967年这样少有的丰水年份肥力水平也难于迅速恢复和提高,最终导致增产幅度较低的结果。由于梯田存在这样的水肥协同作用,产量的波动就变得更为剧烈。在本例中,梯田产量的变异系数是108.5%,而坡耕地的变异系数为40.8%。

梯田对水肥的保持能力和增产作用在正常或较高降水量水平上,一般是比较明显的。但在降水量较少的干旱年份,这种作用很低甚至还有负作用。正常年份梯田的水分状况一般优于坡耕地,1963年(降水量530mm)6月4日至9月12日在定西安家坡9次测定,有8次梯田土壤水分高于坡耕地。而在干旱年份如1960年(降水量396.8mm)5月12日至10月5日10次测定平均坡耕地优于梯田^[2]。梯田是在山坡上由多

个小面积的水平地块组成的,每个水平地块都相应有一个垂直壁,水平地块和垂直壁以及山坡共同形成一个直角三角形。因为三角形任何两边之和都大于第三边,所以,梯田的蒸发面积必然大于坡耕地。在正常年份,坡耕地上的无效径流较多,梯田将这些无效径流拦蓄后就可以明显改善土壤水分状况,而在干旱年份,坡耕地的无效径流较少,梯田通过拦蓄径流来改善土壤水分状况的作用很低,再加上干旱年份一般都伴随着更为严重的空气干旱,蒸发力高,梯田又具有较大的蒸发表面积。所以,在这种情况下出现梯田水分状况次于坡耕地的现象是正常的,但对作物生产却构成了更为严重的威胁。

表 1 定西水保站梯田与坡耕地产量与耗水的比较^[4]

Table 1 A comparison in yields and water use between terraced fields and sloping fields in Dingxi, Gansu

年 份	降雨量	梯田 Terraced fields		坡耕地 Sloping fields		梯田增产
Year	Rainfall	Yield(kg/mu)	R/W ratio	Yield(kg/mu)	R/W ratio	Yield incr. (%)
1962	454.6	232.6	1.95	135.3	3.36	72
1963	454.9	237.0	1.92	140.0	3.23	70
1964	515.7	222.3	2.32	139.6	3.69	59
1965	415.1	268.1	1.55	202.0	2.05	33
1966	380.0	123.6	3.07	121.6	3.13	2
1967	719.0	219.0	3.28	147.4	4.88	49
平均 Average	489.9	223.8	2.19	147.8	3.31	51

R/W:为降水量同产量之比,类似于耗水系数。The ratio of rainfall to yield, similar with water use index.

总之,在传统水保型农业的背景下,半干旱地区土壤水分和肥力的改善还远远不能满足主要大田作物的需求,同时,一些耗水型或要求有稳定水分供应的经济植物由于缺水而无法得到发展,经济效益低,农民向农业的主动投入较少,很多水土保持措施难以有效推广,反过来又严重限制了其自身的发展。传统水保型农业在建国后已经发展了几十年,其理论和实践都已经趋于成熟。要改变这一地区的贫穷落后面貌,雨养农业的继续发展必须变革旧的指导思想,寻找新的生长点。

黄土高原半干旱区缺水是根本问题。土壤侵蚀、生产力低而不稳等一系列问题的最终原因都是缺水,要想使这一地区农业生产力提高和稳定必须解决水的问题。黄土高原大面积远距离调水的可能性很小,地表水资源和地下水资源又十分贫乏,这就决定了发展雨养农业的必然性。通过近年来的探索,在现有条件下,本地区进一步发展雨养农业最有效的途径就是:就地人工富集天然降水,将富集的降水用于农业生产。^[4,5]这就是集水农业^[10,6]。

所谓集水农业,即利用人工集水面或天然集水面形成径流,将径流储存在一定的储水设施中以供必要时的有限灌溉,或者将径流引向一定的作物种植区,使降水在一定面积内富集叠加,大幅度改善植物种植区的水分状况,降低作物耗水系数,充分发挥环境资源和水肥生态因子的协同增效作用,提高农业生产力水平。

集水农业中的土地利用基本上可分为两部分,即集水面区和作物种植区。集水面的目的就是产生最大径流和最小入渗。在特殊处理过的集水面上土壤侵蚀极小,即使不对土壤表面进行任何处理,因为径流要充分利用,所以,它所携带的土壤仍然不会流失,其中的营养成分也会得到重新利用。作物种植区为水肥富集区,集约程度高,管理完善,更不会出现无效径流。因此,它可以更为严格地控制水土流失。另外,由于种植区水分资源富集,可以有效地减少土壤表面蒸发和作物耗水系数,提高水分利用效率。在干旱年份,这种措施可以有效地防治土壤水分的严重亏缺,保持土壤肥力,为获得较高产量创造条件。因此,集水农业完全可以在水土保持和获得高产稳产方面发挥重要作用。

2 关于集水农业的构思

集水农业仍然属于雨养农业的范畴,它与传统水土保持型农业的根本区别就在于后者主要是被动地接纳天然降水,使其就地入渗,在时间和空间上缺少主动调节能力,在以高降水变率著称的半干旱地区,遇到干旱季节和干旱年份(即天然降水与作物需水严重错位的情况下)就显得无能为力,而这种情况几乎年

年出现^[8],集水农业所突出的就是降水在时间和空间上的可调性,强调水分利用的主动性,以主动抗旱策略解决降水供需错位和提高有限环境中的资源丰度问题,实现环境效益、经济效益和社会效益综合提高。

从总体技术体系来看,集水农业可由3部分组成:集水工程子系统、农艺工程子系统和社会经济与管理子系统。集水工程子系统应包括降水的富集技术,存储技术,提灌技术以及大田就地富集叠加技术。该子系统的主要功能是如何以较低的成本得到质量较高的水。农艺工程子系统所要完成的就是要把集水工程子系统所得到的水资源迅速高效增值,变成农产品。在农艺工程子系统中,尽管它的内容和技术路线复杂多样,但归纳起来不外乎初级生产和次级生产两类技术系统,在水资源得到较大改善的前提下,结合其它资源的优化组合,大幅度提高农畜产品产量和质量是不难的。集水农业是一个相对高投入高产出的农业,这种生产系统决不可能以生产出丰富的农产品作为最终目标,而是要使农产品走向市场,发展商品经济,以最终推动整个社会经济的发展。因此,这就需要在现有条件并不好的地区培育市场,引导农民的生产,由小农经济向商品经济过渡。这就是社会经济与管理子系统。

富集天然降水在西北地区有着悠久的历史传统,技术途径也有多种^[1],但基本上可以归为两大类:一类是采取储水工程富集,即将集水面上的降水集中在一个储水容器中(我国西北黄土高原的水窖最为典型),在作物需水的关键期进行有限补充灌溉。这类方法可以大大提高水分利用中的时空可调性,特别有利于发展高附加值的经济作物生产;第二类途径是直接集集水面上的降水集流并存储到土壤中,而达到使降水就地富集叠加的目的。

集水农业背景下水肥热条件可以在很大程度上受人为控制,人们可以根据需要创造出多种不同的水肥热组合,这就为引入各种价值较高的经济植物创造了条件。黄土高原,特别是半干旱地区,由于昼夜温差大,光照条件好,有利于光合产物的积累,这是较大幅度地提高产品质量和产量的有利条件。因此,发展高价经济植物,提高整个农业生产过程的经济效益便由传统水保型农业的无能为力变为集水农业中的大有可为,为整个农业和农村发展注入新的活力。

黄土高原半干旱区畜牧业一直占有较强的优势,大量研究都已经指出应当发挥这种优势。然而,随着时间的推移和人口的增加,粮食生产和畜牧业生产争地的矛盾却日益突出,退耕还牧问题喊了十几年,但效果甚微。在集水农业中,由于粮食单产的大幅度提高,种植面积即可相应减少,又由于高价经济植物的引种栽培,较大幅度地提高经济效益,这就为退耕还牧、调整和优化产业结构创造了较为宽松的前提条件,在市场经济的推动下,农民可以自发地调整产业结构,使其趋于优化。可以预见,集水农业作为雨养农业一个新的生长点,将在经济效益、社会效益和生态效益三方面协调发展,对黄土高原半干旱区整个农业和农村发展起到重要的推动作用^[4,9]。

3 集水农业的发展

3.1 集水农业发展的基础

本地区相对地广人稀,人均耕地面积远高于全国水平,主要问题是单产低而不稳。利用一定的可耕地或荒地修筑集水面或田间微型集水工程,提高粮食单产是完全可以实现的。黄土高原缓坡丘陵的地形是大自然赐予的天然集水面,稍加修饰即可用来集水,较大的地势差可为自流灌溉提供可能。同时,还可利用道路、场院、庭院等场所进行集水。深厚的黄土母质为降水的集存创造了良好的条件。频率较高的大(暴)雨又可大大提高降水的富集效率,大范围的低产现状和很低的大气湿度有利于提高有限供水的增产效益和水分利用效率。

传统水土保持农业所需要解决的是水土保持措施同粮食生产的高产高效找到一个结合点,促进良性循环的建立^[5]。集水农业的出现就是一个很好的结合点,完全有可能在获得良好的水土保持效果的同时使农业生产得到高产高效。同时,传统水土保持措施已经相当完善,为集水农业的发展奠定了良好的基础条件。在黄土高原典型半干旱地区,降水在下垫面的分配比例大致是20%~25%用于第一性生产,10%~15%形成径流,水土流失,60%~75%为无效蒸发^[9]。在这里,形成径流和无效蒸发水分实际上就是集水农业的主要利用对象,表明有充足的水量可用。在技术上西北老百姓有上千年的水窖集水经验,再加上现代科学技术,构筑速度加快,质量提高。节水灌溉措施的实用化,市场经济的活跃为实现商品利润奠定了基

础,为资源优化组合和市场发育的顺利完成创造了条件。

3.2 集水农业的田间试验

在粮食作物生产方面,作者在甘肃定西进行的有限灌溉试验表明^[10],在丰水的1993年春小麦孕穗期浇水1次,分蘖期和孕穗期浇水2次,以及分蘖期、拔节期和孕穗期浇水3次,每次浇水量均为34.6mm,籽粒产量分别比不浇水处理增产28.2%,36.8%,和49.7%,产量水平分别达到4703,5018和5490kg/hm²。1994年为干旱年份,于分蘖期浇水1次、分蘖期、拔节期和扬花期浇水3次以及分蘖期、拔节期、孕穗期和扬花期浇水4次,籽粒产量分别增加61.2%,72.2%和79.0%,产量水平分别为1080,1154和1199kg/hm²。同时,灌溉水的利用效率也有大幅度提高。1993年试验不浇水的处理水分利用效率为9.9kg/mm·hm²(以籽粒产量为基础),而在孕穗期浇水1次,分蘖期和孕穗期浇水2次,以及分蘖期、拔节期和孕穗期浇水3次,其灌溉水的利用效率分别为29.9kg/mm·hm²,19.5kg/mm·hm²和17.6kg/mm·hm²。该地区种植玉米由于积温较低不能正常成熟需要用地膜覆盖。1991年对地膜玉米灌溉^[3],在玉米生长的大喇叭口期灌水75mm,4个品种分别增产88.39%,31.34%,34.14%和19.57%,灌溉水的利用效率依次可达56.6,28.3,29.1和15.3kg/mm·hm²,产量水平依次达到9051,8901,8576,7001kg/hm²。尽管品种间存在明显差异,但补充灌溉的巨大增产效益是显而易见的。梅旭荣等在半干旱的东北辽西地区于1984年(干旱年份)对玉米进行了春灌和冬灌(灌水量均为90mm)的比较研究^[4],两个灌溉时间分别比不灌溉增产4.42倍和6.74倍,产量水平分别达到3900和5565kg/hm²。1994年在定西采用坑种玉米^[3],每坑直径约0.35~0.40m,坑深8~10cm,坑上用地膜覆盖,每坑种植3~4株,坑密度为每公顷18000个。坑种玉米的主要原理是坑周围的降水经过地膜流向坑内,使降水在坑内富集迭加。地膜兼有增温、保墒和增墒的三重作用。试验在坑种的基础上,还在玉米初花期补充一定的水量。试验结果表明,坑种不浇水、坑种浇水40mm和坑种浇水80mm比平地普通种植分别增产31.2%,40.8%和37.8%,产量水平分别达到6453,6925和6777kg/hm²,两个坑种浇水处理分别比平地等量浇水的处理增产36.7%和37.2%。

对经济类植物的集水补充灌溉试验以梨树为代表^[11],1992年在定西进行,5年生梨园3个种,3株为一小区,3次重复。在开花至果实迅速生长期分4次浇水,每次每株15kg,每株共60kg,用简易滴灌和地孔供水两种方法将水供应到地下40cm深的土壤中,试验结果表明3个品种的简易滴灌分别增产57.25%,82.69%和102.58%,每株的产量水平依次达到26.15,34.40和23.60kg;地孔供水分别增产27.6%,24.0%和38.65%,单株产量依次达到29.7kg,23.35kg和27.8kg。计算投入与产出比可知,简易滴灌和地孔供水的平均值分别为4.84和5.33。亦即,供给约5kg的水可以得到1kg的果品,这个效益是相当高的。同时,有限灌溉对果品的品质也有很大的提高,有利于形成商品生产,提高经济效益,推动集水农业的健康发展。

3.3 关于集水农业的发展途径

根据近年来的示范试验,集水途径可以概括为3个:1)公路集水,这是一个最方便,成本又低,集水效率极高的途径,而且潜力很大;2)自然集水面集水,利用黄土地区丘陵地貌特点,一般在川地和丘陵交接地带都是居民主要聚集点,而在这类地区,往往可以利用巨大的丘陵斜坡作为集水面,集水量极大,既方便集水,又与居民点接近,便于农田生产,这里的问题主要是如何释放洪水强大势能和减少泥沙沉积的问题;3)专用人工集水面,有很多优势,但成本较高。

根据集水农业的投入强度和发展规模,可以概括出3种发展模式,分别对应3种投入强度,以符合各地实际情况:1)温饱水平,以粮食作物为主,采用集水节灌技术,结合现代适用农艺措施,利用合理作物系统,在较低投入下解决温饱问题;2)中等水平,目标是小康,在原有基础较好或粮食生产状况较好的地区,在确保粮食生产的前提下,发展见效较快的种植业或养殖业,较快地增加农民收入,增大对农业再生产的主动投入;3)强度干预,高投入高产模式,多种产业综合发展,以商品生产和农业系统的可持续性为中心确定投资和发展方向。

3.4 集水农业有着广阔的开发前景

社会发展是财富的积累过程。集水农业在水分利用上的相对集约化使水土流失得到了有效控制,并使土壤表面的无效蒸发得到了有效抑制,作物可利用的有效水量大大增加,这对旱地农业来说就是一笔可观的资源财富,通过各种有效途径将资源财富转化为物质财富,就可为社会发展奠定物质基础。

半干旱地区光照充足,热量适中,大气湿度低,昼夜温差大均有利于光合产物的积累,减少呼吸损失,提高作物的产量和质量。西北地区瓜果甜香已是闻名遐迩,这里农产品的品质有着独到的优势。但是,这种优势多年来一直没有得到应有的发挥,主要原因还是干旱问题。由于缺水限制了它的发展,形不成规模,不能成为本地区的支柱产业,得不到较高的经济效益。在集水农业背景下,水肥热资源可以根据人们的需要进行组合,创造出各种资源组合类型,大大提高环境资源的丰度,为增加作物种类的丰度创造了十分有利的条件,在提高作物单产的前提下,大力发展高附加值的经济作物提高经济效益便由无能为力变为切实可行,为商品化生产奠定基础。

参 考 文 献

- 1 马世均主编. 旱农学. 北京:农业出版社,1991. 180~203
- 2 李玉山,郭明航,董大学,等. 渭北旱塬旱作水分产量潜势与水-肥-产量关系. 见:李玉山,苏陕民主编. 长武王东沟高效生态经济系统综合研究. 北京:科学技术文献出版社,1991. 115~125
- 3 赵松岭主编. 集水农业引论. 西安:陕西科学技术出版社,1996. 9~236
- 4 梅祖荣,陶毓汾. 旱地农业水分调控技术. 见:陶毓汾,王立祥,韩士峰,等著. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发. 北京:气象出版社,1993. 158~187
- 5 山 仑,陈国良主编. 黄土高原旱地农业的理论与实践. 北京:科学出版社,1993
- 6 陈玉民,郭国双. 中国主要农作物需水量等值线图研究. 北京:中国农业科技出版社,1993. 56~66
- 7 朱润身,高世铭,祁国元. 甘肃半干旱区农田土壤水分动态及储水效率分析. 水土保持通报,1990,10(6):26~30
- 8 赵松岭,王 静,李凤民. 黄土高原半干旱地区水土保持型农业的局限性. 西北植物学报,1995,15(8):13~81
- 9 赵松岭,李凤民,王 静. 半干旱地区集水农业的可行性. 西北植物报,1995,15(8):9~12
- 10 李凤民,赵松岭,段舜山,等. 黄土高原半干旱地区春小麦农田有限灌溉对策初探. 应用生态学报,1995,6(3):259~264