

黄土高原旱作农区非耕地径流高效利用研究

王淑英

(甘肃省农业科学院科管处, 兰州 730070)

摘要: 提出了黄土高原旱作地区非耕地径流高效利用的基本原则, 研究了径流补灌水在果树、温室蔬菜、大田粮食上的补灌效应和效益, 认为非耕地径流水应优先用来补灌价值较高的经济作物, 其次是大株稀植作物的点浇抗旱保苗。

关键词: 黄土高原; 旱作; 非耕地; 径流高效利用

中图分类号: S273.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)01-0127-03

Research of Runoff High Efficient and Effective Use in Dryland on Loess Plateau

WANG Shu-ying

(Scientific Management Department of Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The fundamental principle of runoff high efficiency use in dryland on Loess Plateau is presented, and the effect and benefit of supplemental irrigation of runoff water on the fruit tree, greenhouse vegetation, field-grain were studied. The limited runoff water stored in water tank should irrigate the crops with high economic value at first, and then to field crops.

Key words: Loess Plateau; dryland; non-tillage; runoff high efficiency use

黄土高原旱作地区径流集蓄工程集蓄的水量是有限的, 合理设计以生物和配套用水技术为主的高效用水系统, 提高有限径流水的利用效率和水分效益, 是非耕地径流集蓄高效利用的核心问题。

1 非耕地径流高效利用的基本原则

1.1 资源经济学原则

鉴于非耕地径流工程富集的降水资源是属于高原旱作农区的稀缺资源, 因此应依据单位水资源经济产出量的大小, 确定资源在产出间的优先分配顺序, 即资源高效利用的比较经济学原则, 并充分考虑水资源要素投入成本和边际产出, 把边际经济产出和边际水分利用效率结合起来, 即兼顾经济效益和生态效益的相互统一, 确定高效用水分配方案, 应是工程集蓄径流水高效利用的经济学基本原则。

1.2 土壤水分阈值原则

非耕地径流水向农田的富集利用包括两个方面, 一是径流场产生的径流直接向农田富集, 关键是要在不同降水量条件下, 根据作物需水量、径流场产流系数等因素, 设计径流场面积与种植面积之比例, 让更多的径流流向种植区, 提高作物产量; 二是通过贮水容器暂时把径流场产流贮存起来, 到干旱或作物需水临界期再补给。

由于径流集蓄工程储存的水量十分有限, 补给量不可能

达到作物特定生长发育阶段所要求的生理需水量。从作物本身的生长来看, 径流水的补给效果主要取决于作物的生长状况和土壤水分基础。因此, 径流水补给应建立在一定底墒基础和苗期不受严重损伤的基础之上, 否则需水临界期或生育关键期的补灌将起不到预期的效果, 有限补灌存在着水分阈值, 作物不同生育期的水分阈值不同。

1.3 覆盖抑蒸原则

旱农地区的土壤蒸发量很大, 有限水分的补给只有与覆盖措施尤其是地膜覆盖结合起来, 才能达到高效用水的目的。大田作物补灌往往在晴天进行, 边补灌边蒸发的问题比较突出, 覆盖就显得特别重要。

1.4 作物对缺水的反应及有限补灌原则

水分亏缺并不总是降低作物产量, 关键在于水分亏缺的时间及允许程度^[1]。一定时期的有限水分亏缺可能对节水和增产都有利, 只要不超过适应范围的缺水, 往往在复水后, 可产生生理上水分利用和生长上的“补偿”效应, 对形成最终产量有利或无害。国内已有的作物补灌试验表明, 作物的有限缺水效应在作物之间存在差异, 已确认营养生长与生殖生长在时间上相对分离的作物类型多数具有超补偿效应, 如玉米、高粱、谷子等作物的蹲苗措施, 即苗期干旱锻炼有积极作用。禾谷类作物营养生长与生殖生长相对重叠, 拔节期是需水临界期。冬小麦苗期供水虽然生物量明显增加, 而籽粒无

* 收稿日期: 2002-11-25

基金项目: 国家科技攻关项目(2001BA508B18)。

作者简介: 王淑英(1969—), 女, 甘肃临洮人, 助理研究员, 主要从事科研管理工作。

显著提高,表明苗期对生物学产量来说为水分补偿有效期,但对经济学产量来说却是迟钝期,这主要是因为苗期是营养生长阶段,水分主要用于苗体营养生长;拔节期对缺水极为敏感,供水后生物学产量和经济学产量显著增加,为水分补偿有效期和水分高效期;灌浆期对生物学产量来说为水分补偿迟钝期,但对经济学产量则为补偿有效期^[2]。

甘肃农科院在陇东对冬小麦控制供水的盆栽模拟试验结果表明,拔节期土壤干旱持续时间对小麦产量的影响要远远大于抽穗期。拔节期 8 3%、9 5%、10 7%、12 0% 的土壤水分供给控制持续 10 d 后,补偿供水使土壤水分恢复到 17.3% 的水平,收获的籽粒产量较未进行干旱处理的对照(土壤水分保持在 17.3% 左右)分别降低 30 3%、30 8%、30 1%、14 1%;拔节期上述处理的土壤水分持续 20 d 后各处理恢复供水达到 17.3%,8 3% 土壤水分处理的产量降低 90 8%,9 5% 土壤水分处理产量降低 65 1%,补偿供水效果均很差,10 7% 土壤水分处理产量降低 31 9%,12 0% 土壤水分处理产量降低 17 4%,同土壤水分持续 10 d 供水的效果相近,补偿供水效果明显;拔节期这些处理土壤水分保持 30 d 后再恢复供水达到 17.3%,只有 10 7%、12 0% 土壤水分处理的产量可恢复到正常供水(17.3%)产量的 61 3%、75 9%,8 3%、9 5% 土壤水分处理的产量是正常供水产量的 6 2%、20 1%,供水作用不大。因此,冬小麦拔节期土壤水分降为 10 7% 后 10 d 恢复供水,产量能恢复到正常水平的 70%,土壤水分降为 12% 后 20 d 恢复供水,产量恢复到正常水平的 83%。

集雨补灌在旱作农田上的应用应充分体现大株稀植作物的抗旱播种保苗、干早期或关键需水期的有限补灌原则。充分灌溉地区要进行灌溉制度优化节水,而旱农地区的径流水补灌还谈不上补灌制度问题,重要的是强调少量水分的补灌技术。因此,径流水补灌的灌水次数原则上以 1~2 次为主,不强调多次供水,补灌量应体现少量水分的旱后补偿效应和超补偿效应。作物旱后补偿效应是建立在水分亏缺条件下实施补偿供水措施的基础上,即在作物经历一定时期和一定程度水分亏缺后,供水后所表现的生产力(籽粒产量)显著提高的超常效应,称之为作物旱后补偿或超补偿效应。甘肃农科院高世铭研究提出按供水生产效率(WSE)和水分生产效率(WUE)来度量补偿效应,若 $WSE/WUE > 1$,为超补偿效应; $WSE/WUE = 1$;等量补偿; $WSE/WUE < 1$,低补偿; $WSE/WUE = 0.1 \sim 0.99$,部分补偿。

2 非耕地径流补灌效应

2.1 旱地果园补灌技术的水分效益

甘肃农科院在陇东对 7 年生红元帅苹果树的补灌效应进行了研究,试验在果树萌动期、新梢迅速生长期、生理落果期、果实膨大期 4 个补灌时期,分别采用滴灌、穴灌和树盘漫灌 4 种供水方式进行。试验结果表明:采用地下加压滴灌技术产果量和供水效率最高,平均单株产量 16 0 kg,比对照增产 39 1%,比穴灌处理单株产量 14 3 kg,增产 11 9%,比树盘漫灌处理平均单株产量 12 7 kg,增产 26 0%;穴灌处理

又比树盘漫灌处理平均单株产量增加 12 6%。无论何种补灌方式,果品产量总是随着供水量的增加而提高,提高幅度以地下滴灌最高,其次是穴灌,树盘漫灌最低。果树每株滴灌 60 kg 水的单株产量(16 1 kg)与穴播 100 kg 水的产量(15 9 kg)相当,说明滴灌每株省水 40 kg。从供水效率的变化来看,无论采取那一种供水方式,随着供水量的增加供水效率降低,但不同供水方式之间供水效率差异很大,滴灌 $586.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^2)$,穴灌 $364.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^2)$,漫灌只有 $283.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^2)$,前者较后两者提高 60 9%、106 9%。

甘肃农科院在陇中对 5 年生三个梨树优良品种的补灌效应进行了研究,试验分简易滴灌(塑料桶盛水,安装滴水管于地下 40 cm 处)、地孔供水(打孔 40 cm 深,直径 20 cm,充填小麦秸秆)两种方法,将水直接供到土壤 40 cm 深的根层,在果树生长期分 4 次供水,每株每次 15 kg,每株总供水 60 kg。结果表明,旱地梨树根层有限补充供水具有极显著的增产效果,增产率为 31.44%~78.66%,滴灌或地孔灌增产幅度最大,较地表供水增产率提高 1.5 倍左右;滴灌供水效率平均 $3150 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^2)$,地孔灌 $2850 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^2)$,而地表供水近 $1050 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^2)$,前两种供水方法的供水效率较后者提高 1.7~2.0 倍。另外,供水后,不同梨树品种之间的增产幅度和供水效率存在较大差异,表明选择高用水的生物及品种是提高用水效益的一个重要方面。

2.2 旱地日光温室蔬菜补灌的水分效益

甘肃农科院在陇东研究结果是,采取棚面集水技术,棚面平均集水 55.4 m^3 ,对日光温室年生产周期果菜和叶菜的水分自给率为 52.8%,3 年平均日光温室蔬菜生产产值 4 314 元,每 1 m^3 水产值 41.4 元,1997 年、1998 年、1999 年,棚面实际集水 46.77、6.39、8 m^3 ,水分自给率 41.5%、69.9%、45.8%,产值 4 567.2 元、4 734 元、3 472.5 元,每方水产值 40 6 元、42 6 元、40 1 元,有效提高了旱塬地区雨水资源利用效益和商品价值。并且采取膜下管道滴灌供水技术,较漫灌节约用水 42%,棚内湿度 74%,较漫灌的 90% 降低 16%,病害少而轻,农药投资减少 2 250 元/ hm^2 左右。

2.3 旱地粮食作物补灌的水分效益

甘肃农科院在陇东的试验结果表明,旱地冬小麦以拔节期补灌效果最明显,增产幅度最大,增产率 27.7%,供水效率 $49.5 \text{ kg}/\text{m}^3$,其次是孕穗、起身、抽穗期,增产率分别为 18.5%、16.5%、14.7%,供水有随生育期后推而效果减少的趋势。1996 年、1997 年、1998 年拔节期供水的平均产量和供水效率是 $3100.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $3.62 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $4.845.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $69.8 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $5.388.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $24.8 \text{ kg}/\text{m}^3$,其产量较相应年份的对照增加 57.1%、29.2%、9.0%。拔节期一次供水 8、16、24、32 m^3 时,干旱年份冬小麦产量分别较对照增加 18.2%、47.9%、62.1%、99.9%,平水年份提高 20.0%、27.1%、43.3%、48.4%,丰水年份提高 2.6%、9.7%、13.1%、17.6%。随着降水量的增加增产幅度降低,表明一定量的水分在旱地冬小麦拔节期具有较高的用水效果。

旱地玉米的供水效果有随生育期后推而增加的趋势,大喇叭口期达到最大,3 年平均增产 42.5%,拔节期、苗期、播

前供水分别增产 37.6%、27.2%、24.6%。旱年(1997 年)、平水年(1996 年)、丰水年(1998 年)大喇叭口期供水平均较对照增产 95.7%、26.2%、15.3%，供水效率达到 1898 kg/m³、162 kg/m³、111 kg/m³，旱年虽然产量绝对值较低，但供水表现出几乎近一倍的增产幅度。随着生育期降雨量的增加供水效果降低，但随着供水量的增加供水效果提高。1996 年在玉米大喇叭口期供水 8、16、24 m³ 时，产量为 10 774.5、10 947.0、12 051.0 kg/hm²，增产 20.8%、28.1%、31.7%；1997 年同期供同等量水时，产量 4 905.0、5 457.0、6 382.5 kg/hm²，增产 79.7%、99.9%、133.8%；1998 年产量 10 833 kg/hm²、11 277.0 kg/hm²、12 004.5 kg/hm²，增产 11.4%、16.0%、23.5%。然而引人注意的是，1997 年严重旱灾年份，大喇叭口期供水 4 m³，产量高达 4 630.5 kg/hm²，增产 69.6%，供水效率高达 31.8 kg/m³。

总之，黄土高原旱作地区作物补灌均具有显著的水分效益，供水技术和供水对象明显影响水分效益的高低。就本文研究结果而言，采用微灌供水技术的水分效益最大，果树和蔬菜补灌的水分效益显著高于禾谷类作物，玉米补灌的水分效益又高于小麦。

3 非耕地径流补灌效益分析

黄土高原旱作农区，耕地缺水 and 作物缺水是一个非常普遍的问题，实施径流的空间富集并用限量补灌技术，将有助于高原旱作农区农业的可持续发展。非耕地径流集蓄工程集贮的径流水分是有限的，径流集聚的投资成本不算低，需要按照资源经济学原理和水分高效利用原则，进行效益判断，确定高效利用方式。

3.1 补灌成本

高原旱作农区径流集蓄工程集存的径流是一种稀缺水资源，它的利用必须进行资源要素投入与产出的经济效益核算，技术上可行，经济上高效，才能可持续发展。补灌成本包括径流场构建、径流水导引设施、贮水窖及附属设施、补灌手段等。

3.1.1 径流场构建成本 目前使用的主要径流场有沥青路面、屋面、庭院、塑料棚膜、土路等，其中沥青路面和屋面是产流效率较高的现成径流场，庭院要进行混凝土防渗处理，庭院和屋面径流场产流主要用于人畜饮水。以农田补灌为目的的径流场主要是沥青路面、部分混凝土硬化场面、塑料棚面和土路等。1 m² 混凝土硬化径流场成本 1.4 元，1 m² 塑料棚膜径流场成本 2 元。在年降水量 400 mm 地区，年降水保证率为 75% 时，混凝土径流场的年产流效率 78%，则年产流深度 312 mm，100 m² 混凝土硬化径流场可集水 31.2 m³。即在年降水 400 mm 地区，容器 30、40、50 m³ 水窖的对应混凝土径流场面积为 100、130、160 m²，相应的径流场构建成本为 140 元、182 元、224 元，如果径流场使用寿命按 20 年计，则年成本 7 元、9.1 元、11 元。年降水量 500 mm 地区，容器 30、40、50 m³ 水窖的对应混凝土径流场面积为 75、100、130 m²，相应的构建成本是 105 元、140 元、182 元，如果使用寿命按 20 年计，则年成本 5.75 元、7 元、9.1 元。

3.1.2 集贮雨水成本 黄土高原的工程集流主要通过水窖来存贮，目前的水窖是水泥防渗薄壁水窖。水窖建造预算成本包括钢筋、水泥、石子、沙子、挖土方、人工等项目。各地水窖修建成本差异较大，主要是由于有些地方石子和沙子少，运输成本高，一般每 1 m³ 沙石成本至少 40 元，有些偏远山区高达 80 元。陇东地区不同容积水窖建造成本，容积 30、40、50 m³ 水窖的修建成本分别为 939 元、1 090 元、1 313 元。如果水窖使用年限以 20 年计，则年成本 47 元、55 元、66 元。如果水窖复蓄率按 1.2 计算，则每 1 m³ 水造价依次为 1.31、1.15、1.1 元。

3.1.3 补灌设施成本 按各种补灌设施的实际可操作性，工程集蓄的径流水在大田作物上应用以抗旱保苗为主，只需简单的点浇器具，如在作物关键需水期补灌(采用微喷灌)，需投入抽水泵和微喷设施 8 595.0 元/hm²，使用寿命按 7 年计，年投入约 1 230 元/hm²。在果园和温室蔬菜上的应用，须采用微灌设施，果园和日光温室需分别按装 10 350 元/hm² 和 18 900 元/hm² 的滴灌管网，使用寿命分别按 10 年、7 年计算，折合成本 69 元/a、180 元/a。

3.2 补灌水的边际效益

边际分析方法是经济学中研究资源投入是否合理的一个重要内容，其基本意义在考察资源变量间的关系，对边际经济产值进行比较和选择，从各种选择用途的稀缺资源中找到最有效的配置方案。边际产量(MPP)指投入要素(X)递增变化的产出(Y)变化^[3]，可用下式表示：

$$MPP = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

据此，引入边际水分利用效率(MWUE)和边际水分利用产值(MWUP)的概念，来评价径流水利用的产出效果，MWUE、MWUP 指有限补灌量(X)递增变化的水分利用率(WUE)变化、经济产值(WUP)变化，因果树和大田作物试验均在自然降水条件下进行，不补灌为对照，补灌量就等于补灌增量，即 X = ΔX，而日光温室蔬菜是以灌溉为主的环境控制农业，靠径流水补灌仅能解决温室蔬菜的部分需水问题，为了能正确评价径流补灌的作用，认为在温室蔬菜生产中径流水和其它水同等有效，用补灌的径流水占温室总用水的比例(λ)乘以温室产出表示径流补灌水的作用，这样补灌量 X = ΔX。因此，MWUE、MWUP 表示为：

$$MWUE = \frac{\Delta Y_1}{\Delta X} = \frac{\Delta Y_1}{X} \quad MWUP = \frac{\Delta Y_2}{\Delta X} = \frac{\Delta Y_2}{X}$$

表 1 径流水补灌的边际水分利用效率和边际产值

	地膜小麦		地膜春玉米		果 树		温 室 蔬 菜	
	定西	陇东	定西	陇东	定西	陇东	定西	陇东
MWUE/(kg·m ⁻³ ·hm ⁻²)	67.1	49.8	48.5	158.3	225.0	220.5	178.4	326.3
MWUP/(元·m ⁻³ ·hm ⁻²)	60.3	44.9	50.4	163.2	270.0	264.6	213.3	440.4

注：在果树项目计算中，定西为早酥梨，陇东为苹果；温室蔬菜中，定西为塑料大棚黄瓜，陇东为温室各类蔬菜总计；地膜小麦中，定西为春小麦，陇东为冬小麦。

3 结 论

(1) 聚氨酯膜、渗水布膜覆盖后土壤蒸发可分为二个明显的阶段: 覆盖物特性控制阶段和土壤含水量控制阶段, 与对照土壤有明显的区别。从日蒸发量看, 前期, 对照最大, 渗水布膜次之, 聚氨酯膜最小; 中期, 渗水布膜最大, 对照居中, 聚氨酯膜最小; 后期, 聚氨酯膜最大, 渗水布膜次之, 对照最小。

(2) 培养过程中累积蒸发量均表现为对照 > 渗水布膜 >

聚氨酯膜; 对黑垆土 1~ 15 d 累积蒸发量, 聚氨酯膜和渗水布膜、对照差异极显著, 渗水布膜和对照差异极显著; 对沙土 1~ 15 d 累积蒸发量, 聚氨酯膜和渗水布膜、对照差异极显著, 渗水布膜和对照差异不显著。

(3) 海泡石和草炭对沙土蒸发有抑制作用, 抑制剂和海泡石或草炭配合使用效果增强。

(4) 在试验条件下, 不同用量的保水剂效果表现为保水剂用量越大, 保水效果越好。

参考文献:

[1] 李开元, 李玉山, 邵明安, 等. 土壤保墒性能与土壤水分有效性综述[J]. 中国科学院水土保持研究所集刊, 1991, (13): 94 - 104

[2] 程学刚, 张红玉. 保水剂在农业中的应用[J]. 现代农业, 1993, (4): 9- 10

[3] 史兰波, 李云荫. 保水剂在节水农业中的应用[J]. 生态农业研究, 1993, (2): 89- 93

(上接第 129 页)

表 1 的试验计算结果表明, 温室蔬菜的边际水分利用效率最大(平均 252.0 kg/m³ · hm²), 果树次之(223.5 kg/m³ · hm²), 玉米第三(103.5 kg/m³ · hm²), 小麦最差(585 kg/m³ · hm²), 边际水分利用产值也是同样的顺序, 大小依次为 326.9 元/(m³ · hm²), 267.3 元/(m³ · hm²), 106.8 元/(m³ · hm²), 52.7 元/(m³ · hm²)。因此, 受制于现实条件和农产品价格效益低的限制, 按资源的高效性和经济学原理, 有限的径流水应优先安排在设施蔬菜和果树上。

3.3 补灌的投资效益

为了合理分析补灌的投资效益, 将径流场构建、径流水导引设施、贮水窖及附属设施、补灌手段等归为补灌成本, 作为新技术投入, 小麦、玉米的增产值指地上部收获的生物产

量乘以现行价格, 增产值计算中的增产量以田间试验多年平均增产量为准, 价格为目前现行价。

表 2 的计算结果表明, 不同作物之间径流补灌的产投比差异较大, 以日光温室设施蔬菜最高, 为 21.94 元/元, 果树次之(3.22 元/元), 玉米第三(1.07 元/元), 小麦最差, 为 0.59 元/元。

综上所述, 非耕地径流集蓄补灌的投资成本是较高的, 集蓄和存贮 1 m³ 水至少要投资 2.5 元, 有些边远山区高达 3~ 4 元。因此, 工程所集蓄的径流水在农业上, 应重点安排在设施蔬菜和果园上, 供水技术以滴灌、渗灌、管灌等为主, 其次是大株作物的点浇点种、坐水种、地膜穴灌等, 不提倡用稀缺的工程贮水和高投入的微灌设施补灌低值大田粮食作物。

表 2 集雨补灌投资效益的估算

元、元/元

成本预算项目	小麦			玉米			果树(苹果)			日光温室蔬菜		
	成本	1 hm ² 增产值	产投比率	成本	1 hm ² 增产值	产投比率	成本	果树产值	产投比率	成本	1 hm ² 增产值	产投比率
(1)	47			47			55			55		
(2)	0	1 447.5	0.59	0	2 070	1.07	9.0	6 480	3.22	9.0	80295	21.94
(3)	82			82			69			180		

注: 成本预算中(1)水窖成本; (2)径流场材料; (3)补灌设施。

参考文献:

[1] 王俊儒, 李生秀. 不同生育时期水分有限亏缺对冬小麦产量及其构成因素的影响[J]. 西北植物学报, 2000, 20(2): 193- 200

[2] 乔小林, 等. 陇东旱塬果树补灌技术及效益研究初探[A]. 见: 王吉庆. 陇东高原半湿润偏旱区农业综合发展研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995

[3] 邓振镛, 著. 陇东气候与农业开发[M]. 兰州: 甘肃科技出版社, 2000