

黄土高原半干旱区集雨补灌生态农业研究进展

赵西宁, 吴普特, 冯浩, 汪有科

(西北农林科技大学/中国科学院水利部水土保持研究所国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘要: 黄土高原半干旱地区在中国旱作农业生产中占有重要地位。干旱缺水与水土流失并存是制约该区域经济发展的两大瓶颈因素。水保农业和径流农业两种旱作农业生产方式已趋于成熟, 但对天然降水调控利用能力低下, 难于实现农业生产的优质高产高效。集雨补灌生态农业是在继承水保农业和径流农业成功技术基础上, 对降雨调控利用方式的进一步发展, 它能在时间和空间两个方面实现降雨径流的富集叠加, 能充分发挥环境资源与水土肥光热因子的协同增效作用, 大幅度提高农业生产力, 实现同步缓解干旱缺水与水土流失双重目标。集雨补灌是黄土高原半干旱区农业可持续发展的一种综合模式和战略性措施, 对黄土高原半干旱区生态型现代农业发展具有重要推动作用。

关键词: 黄土高原半干旱区; 集雨补灌; 生态农业

Advance in Research of Supplemental Irrigation of Collected Rain Water for Eco- Agriculture in Semi-Arid Loess Plateau of China

ZHAO Xi-ning, WU Pu-te, FENG Hao, WANG You-ke

(Northwest Agricultural and Forestry University / National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: The semi-arid Loess Plateau is a central zone of Chinese rainfed farming. Drought and soil erosion are the two major obstacles to economic development in the semi-arid Loess Plateau. The conservation agriculture and runoff agriculture has been developed for several decades here. However, its regulative role in rain water was very limited, and the problems of agriculture production are still going on, such as severe seasonal drought and water shortage, low agriculture productivity, fragile ecological environment, low yield-invest ratio. Supplemental irrigation of collected rain water is an important form of rainfall regulation and utilization on the basis of sophisticated technologies and theories of conservation agriculture and runoff agriculture, which not only come to fulfillment rainfall collecting in spatial location like the conservation agriculture and runoff agriculture measure, but also come to true rainfall collecting in time distribution by principle of superposition. Agricultural productivity will be highly increased by using rain water collecting for supplemental irrigation. It not only brings about the integration of ecological reconstruction with economic development, but also provides a new approach to the sustainable development of agriculture and removing two biggest stumbling blocks, drought and soil erosion. It is suggested that this technology will become a strategic measure and comprehensive development model in semi-arid Loess Plateau of China.

Key words: the semi-arid Loess Plateau; rainwater harvesting for supplemental irrigation; eco-agriculture

0 引言

黄土高原半干旱地区作为一个特定生态类型, 在

中国旱作农业生产中占有重要地位, 但由于水土流失和干旱缺水两大瓶颈因素的制约, 该区域已成为中国生态最为脆弱和农村经济最为贫困的地区之一, 统筹

收稿日期: 2008-12-10; 接受日期: 2009-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40701092)、国家科技支撑计划 (2007BAD88B10)、教育部重点项目 (108182)、西北农林科技大学青年学术骨干支持计划

作者简介: 赵西宁 (1976—), 男, 陕西渭南人, 助理研究员, 博士, 研究方向为水土资源高效利用及其效益评价。Tel: 13319241600; E-mail: zxnsbs@yahoo.com.cn。通信作者吴普特 (1963—), 男, 陕西武功人, 研究员, 博士, 研究方向为水土保持与节水农业。Tel: 13709124995; E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

解决这两大瓶颈是实现黄土高原半干旱区生态健康和农村经济发展的根本所在^[1-6]。从 20 世纪 50 年代开始,国家在黄土高原综合治理与开发中投入了巨大的人力和财力,但是黄土高原半干旱区的水土流失与干旱缺水状况并未得到根本好转,特别是黄河中游多粗沙区水土流失严重,不少支流入黄泥沙并未减少。国家实施退耕还林(草)工程以来,黄土高原半干旱区生态建设已取得重大成效,但在一些地方却出现了常年不长的“老头树”,或开始几年以消耗深层土壤储水为代价获得一定物质生产而造成严重的土壤“干层”,植被因水分限制而退化或死亡其“土壤水库”多年难以恢复的状况;黄土高原半干旱区粮食生产水平低而不稳、投入产出效益差等问题也没有从根本上得到改善,特别在严重干旱面前显得尤为突出^[7-8]。20 世纪 80 年代以来,以降径流调控为技术手段,以提高天然降水利用率和利用效率为核心的雨水利用技术,逐渐受到关注与重视。1988 年以来,甘肃省在中东部干旱缺水地区率先开展了作物集雨补灌试验研究;1997 年制定并出版了《甘肃省雨水集蓄利用工程技术标准》;几乎同一时期,地处黄土高原半干旱区的宁夏、内蒙、陕西、山西等省(区)也相继开展了该项研究^[9-11]。尤其是“九五”以来,国家在科技攻关项目“节水农业技术与示范”中将“人工汇集雨水利用技术研究”列为攻关专题,又在“十五”重大科技专项(“863”计划)“现代节水农业技术体系及新产品研究与开发”中将“新型雨水高效集蓄利用技术”列为前沿与关键创新课题;将“北方半干旱集雨补灌旱作区节水农业综合技术体系集成与示范”列为技术集成与示范类课题;“十一五”“863”计划节水农业重点项目和科技支撑计划节水农业重点项目中也都设立了雨水利用相关课题,使集雨补灌农业研究在深度和广度以及实现产业化方面都有了进一步发展。

1 集雨补灌生态农业内涵

中国黄土高原半干旱地区有着悠久的雨水利用历史,但限于过去经济和技术条件,传统雨水利用效率很低,蓄水存储工程渗漏大,集蓄的雨水连饮用也难以满足,更谈不上解决农业生产用水。近年来,随着雨水利用工程技术水平的提高,尤其是新型集流材料、存贮设施和现代微灌工程技术的发展,使通过集雨补灌解决农业生产用水成为可能^[9,12]。集雨补灌生态农业是指经过一定的人工措施,对坡面产生水土流失的原动力——降雨径流进行科学调控汇集,使其蓄存在

各种存贮设施中(水窖、蓄水池),以在作物需水关键时期进行补充灌溉,或将降雨径流引向一定的作物种植区,使径流在一定面积内富集叠加,大幅度改善作物种植区内的水分状况,降低作物耗水系数,充分发挥环境资源和水肥光热生态因子的协同增效作用,提高农业生产水平。集雨补灌生态农业强调了从时间上和空间上对正常水文循环的干预,并主动使用了灌溉手段,使作物不完全依赖于降水,从而提高了雨水利用的可控性。

按照联合国粮农组织(FAO)分类,从全球范围,农业可分为雨养农业和灌溉农业两种^[13]。在半干旱地区实施的雨养农业可称为旱作农业,黄土高原半干旱区属于旱作农业范畴。从农业生产用水方式分析,黄土高原旱作农业发展大体经历了水保农业、径流农业和集雨补灌生态农业 3 个阶段。这 3 个阶段划分是相对的,而且互为条件,紧密结合,目前水保农业仍然是黄土高原半干旱区农业增产的主要方式。水保农业是依靠修筑梯田、水平沟和耕作措施等来接纳尽可能多的天然降水,使之就地入渗,以此来提高天然降水的利用率和作物生产力。水保农业对降水拦截利用是就地和当时的,在时间和空间上缺少主动调节能力,降水转化为有效土壤水及其土壤有效水转化为产出的效率都较为低下;径流农业是指当作物生长期有效降水不能满足作物需水要求时,将非耕作区降雨产生的径流,集中引到种植区,储存在土壤中,改善土壤水分状况以提高作物产量,其实质除了采用和水保农业相同的措施来提高降水利用率外,还采取了从空间上对天然降水进行富集利用的措施,是一种增加了水源的外延措施,代表性措施有反坡梯田、小区集水等^[14-16]。在降雨量 300~500 mm 的黄土高原半干旱区,全年降水量已经相当或者接近于作物需水量,但是由于天然降雨与作物需水在时间上的供需错位矛盾,导致农作物仍然频繁受旱减产,多年平均产量低于 2 250 kg·hm⁻²,不少地方仍在 1 500 kg·hm⁻² 以下^[17]。集雨补灌生态农业的出现为解决上述作物需水供需错位矛盾提供了一种有效手段,它所突出的是从空间和时间两方面对坡面产生的降雨径流进行富集利用。空间上的富集与径流农业相同,即把非种植区的径流富集到种植区,并采用人工措施提高集流面的集流效率,增加集流量。时间上的富集是把暴雨季节通过集流面汇集的降雨径流蓄存在存贮设施中,在作物需水关键时期进行补充灌溉。

集雨补灌生态农业在继承水保农业和径流农业成

功技术基础上, 更加强调了水分利用的主动性, 其不仅提高了降水的空间富集效率, 更主要的是叠加了降雨从时间方面的富集措施, 使降雨利用效率进一步提高, 能有效解决普遍存在的天然降水和作物需水严重错位而导致的作物受旱减产难题, 实现农业增产目标。另一方面, 通过实施集雨补灌, 也在一定程度上消除了坡面产生水土流失的原动力——降雨径流, 有效减少坡面水土流失, 实现生态健康目标^[18-20]。集雨补灌生态农业是对径流农业中调控利用降雨方式的进一步发展, 这种发展既是继承, 又是创新。集雨补灌生态农业不仅是黄土高原半干旱区农业可持续发展的一种综合模式和战略性措施, 也是现代节水农业技术体系的重要组成部分, 更是水土保持生态环境建设技术体系的重要组成部分。

2 集雨补灌生态农业基础及原理

2.1 集雨补灌生态农业的基础

集雨补灌生态农业为黄土高原严重水土流失与干旱缺水两大瓶颈因素的解决找出了一个非常好的结合点, 完全有可能在获得良好水土保持效果的同时, 有效缓解干旱缺水, 使农业生产达到高产高效, 实现生态健康与农民增收的双赢。水保农业和径流农业各种措施目前已基本完善, 理论和实践也趋于成熟, 所有这些都为集雨补灌生态农业的发展奠定了良好的基础。在典型黄土高原半干旱地区, 天然降水在下垫面的分配比例大致是 30%~40%用于第一性生产, 10%形成径流或其它损失, 50%~60%为无效蒸发, 在此, 形成的径流和无效蒸的发水分实际就是集雨补灌生态农业利用的主要对象, 表明有充足水量可以利用^[17,21]。黄土高原年平均降水量 443 mm, 年均降水资源总量 $2\ 757 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[22]。以严重缺水的甘肃黄土丘陵沟壑区为例, 多年平均降水总量 $410 \times 10^8 \text{ m}^3$, 75%保证率的年降水量也达到 $330 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相当于黄河在兰州全年径流量, 开发利用潜力巨大^[23]。黄土高原半干旱区年降水 60%~80%集中在 6—9 月份, 造成作物生长期需水与自然降水供需严重错位, 但相对集中及频率较高的大(暴)雨又可大大提高降水的时空富集效率, 作物生长期需水不足矛盾可通过雨水相对富集集中中得到补偿。

黄土高原半干旱地区虽然降水量有限, 但光热资源比较丰富, 蕴藏着很大的生产潜力。目前黄土高原半干旱地区自然降水的生产潜力开发程度较低, 现实生产力产量只有旱作物农田水分生产潜力理论值的

45.9%, 降水资源还有 1 倍以上的潜力可以开发。从降水利用效率来看, 不同种类作物理论平均值为 $17.27 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而现实降水利用效率为 $7.72 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 仅为理论平均值 44.7%, 潜力巨大^[24]。黄土高原半干旱区相对地广人稀, 人均耕地远远高于全国平均水平, 主要问题是粮食单产低而不稳。该区大量缓坡丘陵地形是大自然赐予的天然集水面, 稍加修整即可集水, 较大地势高差又为自流灌溉提供了可能, 深厚黄土母质也为集雨补灌创造了良好条件, 点上雨量不足可通过面上富集集中得到补充。通过降雨径流调控利用, 解决自然降水与农作物需水供需错位, 实现降水资源时空配置, 是黄土高原半干旱区集雨补灌生态农业的重要理论基础。

2.2 集雨补灌生态农业的原理

雨养农业始终贯穿一个基本思想就是接纳尽可能多的天然降水就地拦蓄入渗, 以此来提高天然降水利用率和利用效率。水保农业和径流农业虽可在一定范围内调控利用无效的降水, 减少水土流失, 但土壤水分状况改善非常有限。据赵松岭在甘肃半干旱地区研究表明, 最好的水保型工程措施(梯田化)仅能多接纳 10%~15%的天然降水, 假设降水量 100%就地拦蓄入渗利用, 也只能达到 465.3~486.5 mm, 尚不能改变水分特征和水分困扰的胁迫, 农业生产力仍受水分亏缺的制约^[25]。集雨补灌生态农业则以工程措施存贮雨水, 在作物需水关键期进行补充灌溉, 解决作物干旱缺水问题。

集雨补灌水量非常有限, 如何利用有限雨水提高农作物生产力显得尤为重要。现代节水灌溉技术和有限灌溉微环境下农作物生理生态方面研究, 为该问题解决提供了重要理论依据^[26-27]。山仑等^[28]在宁夏固原试验表明, 拔节期给予春小麦每 $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 补充供水, 产量可达到 $3\ 915 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高出对照 76%, 供水量只相当于充足灌溉处理的 1/4, 但产量却相当于其 3/4, 灌溉水利用效率达到 $2.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$, 作物水分利用效率为 $0.788 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ 。对黄土高原半干旱区农业生产潜力进行分析, 发现水分亏缺限制了光、热、肥等生态因子作用发挥, 是“箍桶效应”中的短板, 如果解除水分胁迫, 初级生产力可提高 4~5 倍。若能将多余雨水收集用来缓解春旱、夏初旱, 将大大提高作物产量, 实际上就是“箍桶效应”中的取长补短, 从时间和空间上调节雨水分配, 使水分供给与作物关键需水期吻合。不少作物在中等水分亏缺条件下, 有利于水分利用效率的提高, 而且在作物发育的特定阶段

施加一定水分胁迫,可产生生理、生态、生长、水分利用上的补偿效应,有利于作物抗旱^[29-31]。

与灌溉农业追求最高作物产量的目标不同,集雨补灌生态农业的目标是追求天然降水的利用效率最高,即要求灌溉的投入产出比最大。在黄土高原半干旱区,集雨补灌往往只占到作物耗水量的 10%~20%,作物耗水主要还是依赖于天然降水。集雨补灌主要作用在于使作物在需水关键时期渡过缺水难关,以便在后期降雨季节到来之时,能更好利用天然降水,提高降水利用率,这也正是集雨补灌生态农业以极少量的供水使作物获得较高增产效果的原理所在。在黄土高原半干旱区,由于集雨水量的有限,需水关键期一般只选择 1~2 个,最多 3 个,对于不同作物,需要通过田间试验研究来确定需水关键期。黄占斌等对春小麦、春玉米不同生育期有限供水的产量与水分利用效率的试验表明,拔节期补充灌溉是黄土高原半干旱区春小麦和春玉米生长的最佳时期,对于旱地品种,灌浆期限量供水同拔节期补充限量水有同样的增产效果^[9,32]。有限的集雨补灌水量增产效果十分显著,根据一些地方试验示范和调查,集雨补灌作物增产率在 40%左右,最高达到 100%以上,与不进行补充灌溉的旱作农业相比,水分利用效率从 4~10 kg·mm⁻¹·hm⁻² 提高到 6~20 kg·mm⁻¹·hm⁻²;供水效率达到 13~56 kg·mm⁻¹·hm⁻²,远远超过了常规灌溉达到的水平^[33-34]。

3 集雨补灌生态农业技术体系

从总体技术体系来分析,集雨补灌生态农业可由 3 部分组成:集雨工程子系统、农艺工程子系统和管子系统。集雨工程子系统包括雨水汇集技术、存储技术和灌溉技术。该子系统主要功能是如何以较低的成本获得质量较高的水,包括把降水转化为径流的集流过程,径流储存在存贮设施中成为人工供水的蓄水过程,水源水转化为田间水的输水过程,田间水转化为土壤有效水的灌溉过程。农艺工程子系统所要完成的就是把集雨工程子系统所得到的水资源迅速增值,变成优质高产的农产品,包括有效土壤水转化为作物水的水分生理过程,以及最后作物水转化为实物或价值的过程。管子系统是指集雨补灌生态农业作为一个相对高投入高产出的农业,不可能以生产出丰富的农产品作为最终目标,而是要在保障生态健康前提下,以发展高收益且具有市场竞争力的农产品为最终目标。

集雨材料选择是集雨工程子系统中的关键环节。

在黄土高原半干旱区,常见雨水集流材料有混凝土、塑料薄膜等,其主要问题是价格高昂、使用成本高。近年来,土壤固化剂集流材料、高分子面喷涂集流材料、以及新型生物集雨等绿色环保集雨材料已开始陆续应用于雨水集流面的处理。开发出的新型土壤固化剂材料(MBER)与传统混凝土材料相比,投资减少 30%~40%,但其集流效率和使用寿命与混凝土相近;筛选出的面喷涂有机硅集流材料单位面积造价仅为 1~3 元/m²,集流效率高达 60%;筛选出的地衣生物固化表面可使 0.5 cm 的水层在其上面停留 6 h 不渗漏^[35-37]。雨水存储设施也是实现集雨补灌的一个重要环节,黄土高原半干旱区常见雨水存贮形式有水窖和蓄水池等,且多为黏土、混凝土防渗。针对传统存贮设施施工工艺落后,利用形式单一等问题,国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心根据黄土高原半干旱区的不同条件,提出了雨水存贮设施各部件的组装配套技术,开发出了可一次成型、性能优良、运输方便、便于规模化生产的柔性橡塑水窖,与传统混凝土水窖相比,单方容积造价降低了 20%,已在黄土高原半干旱地区进行了示范应用^[38]。

集雨补灌途径主要体现在 3 个方面,一是采用非充分灌溉的原理和方法,在作物关键需水期补充水分;二是现代节水灌溉技术的发展,为集雨灌溉提供了重要途径。采取节水高效的局部灌溉方法,补充的灌水只湿润作物根系土壤,使棵间蒸发降低到最大。通过这一措施可使每次灌水量降到最低,仅相当于常规地面灌溉中灌水定额的 1/5~1/10。2007 年,笔者等在陕西米脂黄土高原丘陵沟壑区进行的坡地 5 年生山地红枣集雨微灌工程技术研究表明(表),集雨工程技术与现代微灌工程技术的结合,尤其是与现代滴灌技术和涌泉根灌技术的有机结合,使山地红枣在总灌水次数仅为 3 次,灌溉定额约为 795 m³·hm⁻² 的条件下,实现了红枣产量从无灌溉 4 650 kg·hm⁻² 到 19 800 kg·hm⁻² 的跨越,水分利用效率实现了由 1.17 kg·m⁻³ 到 4.21 kg·m⁻³ 的跨越,经济效益实现了由 18 600 元/hm² 到 77 895 元/hm² 的跨越^[39],结合上述研究,建立了约 300 hm² 的陕北山地红枣集雨微灌工程技术示范区(核心区 39 hm²,示范区 260 hm²),形成了以红枣种植为代表的“陕北山地生态型现代农业发展模式”,成功实现了科技要素、经济投入与土地经营权流转机制的有机结合,提高了山地土地流转后综合效益。另外,集雨微灌对红枣品质也有很大提高,易于形成商品化生产,利于实现黄土高原半干旱区生态建设与农民增收

收的双赢; 三是采用简单易行而又高度节水方法, 如坐水种、人工点灌、膜上点灌、注水灌溉等。李兴等^[40]在内蒙古准格尔旗 2005 年玉米集雨补灌结果表明, 没有采用坐水种和覆膜补灌的玉米出苗率为 65%,

产量为 5 510.53 kg·hm⁻², 水分利用效率为 1.83 kg·m⁻³; 采用坐水种和覆膜补灌的玉米出苗率在 90% 以上, 产量达到 8 092.33 kg·hm⁻², 水分利用效率达到 2.25 kg·m⁻³, 坐水种与覆膜补灌相结合效益显著。

表 山地红枣集雨微灌工程效益比较

Table Jujube benefit analysis of micro-irrigation technology with harvested rainwater in hilly area

灌溉与栽培方式 Irrigation ways and cultivation ways	生育期降水量 Rainfall at reproductive stage(m ³ ·hm ⁻²)	灌溉水量 Irrigation amount (m ³ ·hm ⁻²)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency (kg·m ⁻³)	经济效益 Economic effects (RMB yuan/hm ²)
无灌溉、传统栽培(密度 < 750 株/hm ²) No-irrigation/traditional cultivation(density < 750 plant/hm ²)	3972	0	2010	0.51	7860
无灌溉、矮化密植(密度 1665 株/hm ²) No-irrigation/dwarf and close planting(density: 1665 plant/hm ²)	3972	0	4650	1.17	18600
管灌、矮化密植(密度 1665 株/hm ²) Tubular irrigation/dwarf and close planting(density: 1665 plant/hm ²)	3972	2535	11700	1.79	45225
滴灌、矮化密植(密度 1665 株/hm ²) Drip-irrigation/dwarf and close planting (density: 1665 plant/hm ²)	3972	750	17175	3.64	66735
涌泉根灌、矮化密植(密度 1665 株/hm ²) Estavel-root-irrigation/dwarf and close planting (density: 1665 plant/hm ²)	3972	750	16725	3.54	66435
涌泉根灌+雾喷、矮化密植(密度 1665 株/hm ²) Estavel-root-irrigation+spraying/dwarf and close planting (density: 1665 plant/hm ²)	3972	795	19800	4.21	77895

红枣价格以 4.0 元/kg 计算 Jujube price is calculated at 4.0 RMB yuan/kg

4 存在问题与展望

黄土高原半干旱区集雨补灌生态农业理论研究已取得较大进展, 集雨补灌技术体系已初步形成, 技术示范与推广应用效果也已显现出集雨补灌的巨大潜力。应用基础研究是支撑集雨补灌技术目标实现的重要课题, 研究主要集中在雨水资源化潜力、雨水资源优化配置、集雨补灌环境效应及集雨补灌节水机理等几个方面。雨水资源化潜力在一定程度上决定集雨措施的数量和规模及其实施集雨补灌的可行性。以往多简单用降水量代替潜力, 计算方法也多采用统计方法建立集总式模型, 缺乏系统的、定量的、动态的和多因素的考虑^[27,37,41]。雨水资源化潜力是降雨、地形地貌、土壤、植被及人为因素等共同影响的结果, 今后研究有待进一步借鉴分布式水文模型有效结构和较为成熟的“3S”技术, 考虑下垫面空间变异性与非均匀性, 通过空间分析与尺度转换, 构建雨水资源化潜力计算模型, 并对未来动态变化趋势做出科学评价; 如何协调和解决各单项集雨措施的科学组装和对位配置, 是面向生态的集雨补灌需要重点研究的关键问题。目前黄土高原半干旱区各单项集雨技术已相对成熟,

但对于各单项措施的科学配置问题进展较小^[42-43], 建立基于水土资源同步高效安全利用为目标的雨水资源优化配置理论、方法及其相应集雨补灌利用模式是今后集雨补灌应用基础研究的重点; 集雨补灌必然会改变原有下垫面状况, 对生态环境产生影响。由于各地试验条件和评价方法差异等原因, 目前研究多是对集雨补灌所产生的环境效应进行初步优劣判断^[11,34], 缺乏定量评价指标分析; 非充分灌溉、有限灌溉等新的节水灌溉理论与方法已较为成熟, 但如何能更加有效地将其在集雨补灌中加以应用, 集雨补灌节水机理、不同作物集雨补灌制度, 特别是降水-土壤水-作物水-光合作用-经济产量之间水分转化效率的研究都是今后集雨补灌应用基础研究的主要方向。

集雨补灌技术研究主要集中在新型集流材料、存贮设施以及灌溉技术方面。在新型集雨材料方面, 应以高集流效率、低营造成本和绿色环保为目标, 重点研发适宜不同土质条件下雨水集流的新型土壤固化剂材料、高分子化学材料、新型生物集雨材料, 提出相应施工工艺和技术操作规程; 在雨水存贮设施方面, 应以降低现有存贮设施施工成本, 减少施工工序为目标, 开发新型可一次性拼接完成施工的新型存贮设施,

提出相应施工工艺与技术操作规程;在集雨灌溉技术方面,应重点加强有限灌溉、非充分灌溉、精确灌溉等先进节水灌溉技术与现代集雨工程技术、雨水智能决策等高新技术手段的技术集成研究,并深入探讨集雨补灌条件下,所采用节水灌溉技术的标准化、规范化,从而实现产业化,进一步降低集雨补灌技术成本。在宏观层面上,应积极探讨集雨补灌技术推广应用机制、农民经济承受能力以及现有生产力水平下的适宜推广应用模式问题,因地制宜建立具有区域特色的集雨补灌工程技术体系,不断提高集雨补灌综合效益。

在水土流失与干旱缺水并存的黄土高原半干旱地区,集雨补灌技术无疑是一项非常实用、效果明显,而且便于实施的绿色环保型水资源高效开发利用技术,更是一项多学科交叉的综合系统工程,具有鲜明的长期性和公益性特点,需要将水文学、水土保持学、土壤学、植物生理学、材料学、农业水土工程学等学科有机结合在一起,实行协同攻关,并大力倡导涉农企业、科研、管理、农户相结合,以形成集雨补灌技术的产业化和规模化,推动黄土高原半干旱区生态型现代农业的可持续发展。

References

- [1] 唐克丽. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004.
Tang K L. *Soil and Water Conservation of China*. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
Wu P T, Gao J E. *New Theory of Soil and Water Conservation in the Loess Plateau*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙. 北京: 科学出版社, 1996.
Wang W Z, Jiao J Y. *Rainfall Erosion and Sediment in the Loess Plateau and Sediment Transport in Yellow River*. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese)
- [4] 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): 13-18.
Zhao S L, Wang J, Li F M. On the limitation of agriculture development by conserving soil and water in semi-arid regions of Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1995, 15(8): 13-18. (in Chinese)
- [5] 朱显谟. 重建土壤水库是黄土高原治本之道. 中国科学院院刊, 2006, 21(4): 320-324.
Zhu X M. Rebuild soil reservoir is an rational approach for soil and water conservation on the Loess Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2006, 21(4): 320-324. (in Chinese)
- [6] 王光谦, 王思远, 张长春. 黄河流域生态环境变化与河道演变分析. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
Wang G Q, Wang S Y, Zhang C C. *River Evolution Analysis and Ecological Environment Change in the Yellow River Basin*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006. (in Chinese)
- [7] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420-427.
- [8] Zhao C Y, Nan Z R, Feng Z D. GIS-assisted spatially distributed modeling of the potential evapotranspiration in semi-arid climate of the Chinese Loess Plateau. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58: 387-403.
- [9] 吴普特, 黄占斌, 高建恩, 杨新民. 人工汇集雨水利用技术研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
Wu P T, Huang Z B, Gao J E, Yang X M. *Technique Research of Rainwater Harvesting and Utilization by Artificial Catchment*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002. (in Chinese)
- [10] Li X Y, Xie Z K, Yan X K. Runoff characteristics of artificial catchment materials for rainwater harvesting in the semiarid regions of China. *Agricultural Water Management*, 2004, 65: 211-224.
- [11] 赵西宁, 冯 浩, 吴普特, 王万忠. 黄土高原小流域雨水资源化综合效益评价体系研究. 自然资源学报, 2005, 20(3): 354-360.
Zhao X N, Feng H, Wu P T, Wang W Z. Study on integrated benefit of rainwater resources utilization in small watershed on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 354-360. (in Chinese)
- [12] Li X Y, Gong J D. Compacted microcatchments with local earth materials for rainwater harvesting in the semiarid region of China. *Journal of Hydrology*, 2002, 257: 134-144.
- [13] Zhu Q, Li Y H. Rainwater harvesting-an alternative for securing food production under climate variability. *Water Science & Technology*, 2004, 49(7): 157-163.
- [14] 朱 强, 李元红. 论雨水集蓄利用的理论和实用意义. 水利学报, 2004, (3): 60-64.
Zhu Q, Li Y H. On the theoretical and practical significant of rainwater harvesting and utilization. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (3): 60-64. (in Chinese)
- [15] 李凤民, 王 静, 赵松岭. 半干旱黄土高原集水高效旱地农业的发展. 生态学报, 1999, 19(2): 259-264.
Li F M, Wang J, Zhao S L. The rainwater harvesting technology

- approach for dryland agriculture in semi-arid Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 259-264. (in Chinese)
- [16] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 韩清芳, 李 荣. 模拟不同雨量下沟垄集雨种植对春玉米生产力的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1006-1015.
- Ren X L, Jia Z K, Chen X L, Han Q F, Li R. Effects of rainwater-harvested furrow/ridge system on spring corn productivity under different simulated rainfalls. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1006-1015. (in Chinese)
- [17] 山 仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向. *水利学报*, 2002, (9): 27-31.
- Shan L, Deng X P, Kang S Z. Current situation and perspective of agricultural water used in semiarid area of China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (9): 27-31. (in Chinese)
- [18] 郭廷辅, 段巧甫. 水土保持径流调控理论与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- Guo T F, Duan Q F. *Theory and Practice of Runoff Regulation in Soil and Water Conservation*. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2004. (in Chinese)
- [19] 吴普特, 汪有科, 冯 浩, 范兴科, 高建恩. 21 世纪中国水土保持科学的创新与发展. *中国水土保持科学*, 2003, 1(2): 84-87.
- Wu P T, Wang Y K, Feng H, Fan X K, Gao J E. Innovation and development of soil and water conservation science of China in 21st century. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(2): 84-87. (in Chinese)
- [20] 赵西宁, 吴普特, 冯 浩, 王万忠. 小流域雨水资源化潜力及其可持续利用分析. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 38-41.
- Zhao X N, Wu P T, Feng H, Wang W Z. Analysis of potential and sustainable utilization of rainwater resources in small watershed. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 38-41. (in Chinese)
- [21] 黄占斌, 山 仑. 论我国旱地农业建设的技术路线与途径. *干旱地区农业研究*, 2000, 18(2): 1-6.
- Huang Z B, Shan L. A study on technology line and approaches of dryland farming construction in China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2000, 18(2): 1-6. (in Chinese)
- [22] Zhu K, Zhang L, Hart W, Liu M C, Chen H. Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. *Journal of Arid Environment*, 2004, 57: 487-505.
- [23] 冯 浩, 赵西宁, 吴普特. 黄土区农田作物降水利用效率影响因素及提高途径分析. *中国农业科技导报*, 2007, 9(5): 30-35.
- Feng H, Zhao X N, Wu P T. Analysis on influencing factors and improving approaches of crop utilization efficiency for rainfall in farmland at the Loess Plateau. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2007, 9(5): 30-35. (in Chinese)
- [24] 冷石林. 北方旱农地区自然降水生产潜力研究. *中国农业科学*, 1998, 31(6): 1-5.
- Leng S L. Potential precipitation productivity and its appropriate exploitation measures in dryland farming areas of Northern China. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(6): 1-5. (in Chinese)
- [25] 赵松岭. 集水农业引论. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.
- Zhao S L. *Introduction of Rainwater Harvesting Agriculture*. Xi'an: Shanxi Scientific & Technological Press, 1996. (in Chinese)
- [26] Wei H, Li J L, Liang T G. Study on the estimation of precipitation resources for rainwater harvesting agriculture in semi-arid land of China. *Agricultural Water Management*, 2005, 71: 33-45.
- [27] Tian Y, Li F M, Liu P H. Economic analysis of rainwater harvesting and irrigation methods, with an example from China. *Agricultural Water Management*, 2003, 60: 217-226.
- [28] 山 仑, 邓西平. 黄土高原半干旱地区的农业发展与高利用水. *中国农业科技导报*, 2000, 2(4): 34-38.
- Shan L, Deng X P. Agricultural development and water-use in high efficiency in the semi-arid area of Loess Plateau. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2000, 2(4): 34-38. (in Chinese)
- [29] 张正斌, 徐 萍, 周晓果, 董宝娣. 作物水分利用效率的遗传改良研究进展. *中国农业科学*, 2006, 39(2): 289-294.
- Zhang Z B, Xu P, Zhou X G, Dong B D. Advance in genetic improvement of water use efficiency in crops. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2): 289-294. (in Chinese)
- [30] 肖国举, 王 静. 黄土高原集水农业研究进展. *生态学报*, 2003, 23(5): 1003-1011.
- Xiao G J, Wang J. Research on progress of rainwater harvesting agriculture on the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 1003-1011. (in Chinese)
- [31] 孙惠民, 程满金, 郑大玮, 张建新. 北方半干旱集雨补灌旱作区节水农业发展模式. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1072-1076.
- Sun H M, Cheng M J, Zheng D W, Zhang J X. Development models on water-saving agriculture through rainwater harvesting for supplemental irrigation in northern China semi-arid region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6): 1072-1076. (in Chinese)
- [32] 黄占斌, 程积民, 赵世伟, 辛小桂, 刘学军. 半干旱地区集雨利用模式及其评价. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 301-304.
- Huang Z B, Cheng J M, Zhao S W, Xin X G, Liu X J. Models of rainwater harvesting system and their benefit evaluation in semi-arid areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(2): 301-304. (in Chinese)

- [33] 刘布春, 梅旭荣, 李玉中, 杨有禄. 农业水资源安全的定义及其内涵和外延. 中国农业科学, 2006, 39(5): 947-951.
Liu B C, Mei X R, Li Y Z, Yang Y L. The connotation and extension of agricultural water resources security. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(5): 947-951. (in Chinese)
- [34] 赵西宁, 冯浩, 吴普特, 王万忠. 黄土高原小流域雨水资源承载力综合评价. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 33-35.
Zhao X N, Feng H, Wu P T, Wang W Z. Comprehensive evaluation of the rainwater resources carrying capacity of small watershed of Loess Plateau. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 33-35. (in Chinese)
- [35] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持与雨水资源化. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 107-111.
Wu P T, Gao J E. Soil and water conservation and rainwater resource utilization in the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 107-111. (in Chinese)
- [36] 吴普特. 雨水资源化与现代节水农业. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 15-20.
Wu P T. Rainwater harvesting and modern water saving agriculture. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2007, 9(1): 15-20. (in Chinese)
- [37] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 王万忠. 基于 GIS 的区域雨水资源化潜力评价模型研究. 农业工程学报, 2007, 23(2): 6-10.
Zhao X N, Wu P T, Feng H, Wang W Z. Regional rainwater harvesting potential assessment model based on GIS. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 6-10. (in Chinese)
- [38] 王广周, 高建恩, 肖克飙, 樊恒辉, 杨世伟. 一种新型橡塑水窖的水质变化监测分析. 干旱地区农业研究, 2008, 26(2): 150-153.
Wang G Z, Gao J E, Xiao K B, Fan H H, Yang S W. Monitoring analysis on water quality change of a new kind rubber-plastic cellar. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(2): 150-153. (in Chinese)
- [39] 吴普特, 汪有科, 辛小桂, 朱德兰. 陕北山地红枣集雨微灌技术集成与示范. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 1-6.
Wu P T, Wang Y K, Xin X G, Zhu D L. Integration and demonstration of the date micro-irrigation technology in the hilly of Shanbei. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 1-6. (in Chinese)
- [40] 李兴, 史海滨, 程满金, 马兰忠, 李彬. 集雨补灌对玉米生长及产量的影响. 农业工程学报, 2007, 23(4): 34-38.
Li X, Shi H B, Cheng M J, Ma L Z, Li B. Effects of the supplemental irrigation of harvested rainwater on the growth and yield of maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(4): 34-38. (in Chinese)
- [41] Satti R S, Jacobs J M. A GIS-based model to estimate the regionally distributed drought water demand. *Agricultural Water Management*, 2004, 66: 1-13.
- [42] 张长江, 徐征和, 员汝安. 应用大系统递阶模型优化配置区域农业水资源. 水利学报, 2005, 36(12): 1480-1485.
Zhang C J, Xu Z H, Yun R A. Optimal allocation of regional agricultural water resources based on large system level transfer model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(12): 1480-1485. (in Chinese)
- [43] 张富, 余新晓, 景亚安, 石观海. 黄土高原水土保持防治措施对位配置研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2007.
Zhang F, Yu X X, Jing Y A, Shi G H. *Study on Para Position Allocation of Soil and Water Conservation Measures in the Loess Plateau*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2007. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)