

# 黄土高原集水农业研究进展

肖国举<sup>1,2</sup>, 王 静<sup>1\*</sup>

(1. 兰州大学 干旱农业生态国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 宁夏大学 生物工程研究所, 银川 750021)

**摘要:**回顾了黄土高原集水农业理论与技术体系的研究成果,分析评价了集水农业的研究进展。随着黄土高原集水农业研究方法的改进、研究内容的深入、研究领域的扩充,提出了广义性集水农业研究范畴。在黄土高原集水农业理论研究的基础上,应加强微集雨微灌溉应用技术、现代集雨技术、计算机控制技术与集雨网络等高新技术手段的技术集成,以提高雨水汇集与利用效率。同时,黄土高原集水农业的研究已经从微生境条件下的农业生态系统延伸至区域生态环境保育。利用汇集雨水合理调配生态用水,进行小流域综合治理,农林牧综合发展,生态环境重建的集水型生态农业是黄土高原集水农业的发展趋势。

**关键词:**黄土高原;集水农业;技术体系;技术集成;发展模式

## Research on progress of rainwater harvesting agriculture on the Loess Plateau of China

XIAO Guo-Ju<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1\*</sup> (1. State Key Laboratory of Arid Agriculogy, Lanzhou 730000, China; 2. Bioengineering Institute of Ningxia University, Yingchuan 750021, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 1003~1011.

**Abstract:** The Loess Plateau of China is a central zone of Chinese rainfed farming. Over a long period of time, traditional technologies of dryland agriculture have improved rainwater utilization and played a positive role for development of dryland agriculture in this area. But, problems of agriculture production are still going on, such as low productivity, instable agro-ecosystem, low of yield-investment ratio.

In 1980s, specialists who are engaged in arid ecology, arid meteorology and dryland agriculture found the limitations of traditional dryland farming. The theory of rainwater harvesting agriculture was raised. In recent twenty years, with the experiment and demonstration and popularization of rainwater harvesting agriculture, they have made a great progress and gave impetus to dryland agricultural production on the Loess Plateau of China. Combined micro-rainwater harvesting technologies with modern dryland agriculture technologies, rainwater harvesting agriculture has been developed into a new and effective technological system of dryland agriculture with distinct Chinese characteristics.

All about research of rainwater harvesting agriculture has been involved in this article. The theoretical foundation includes rainwater distribution in time and space, limitation of modern dryland agriculture, multiple development of agriculture, forestry and animal husbandry and construction of eco-environment. Further, the rainwater harvesting agriculture developed the theory of modern dryland agriculture and established direction of modern dryland agriculture. Moreover, this paper summarized the

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(G200018603)

收稿日期:2002-03-18;修订日期:2003-04-02

作者简介:肖国举(1972~),男,博士,主要从事农业生态学研究。

\* 通信作者 Author for correspondence, E-mail: wangjing295@sina.com

Foundation item: Development programme on state key foundation research (No. G2000018603)

Received date: 2002-03-18; Accepted date: 2003-04-02

Biography: XIAO Guo-Ju, Ph. D. mainly engaged in the agricultural ecology.

technological systems of rainwater harvesting agriculture, which are consisted of engineering of rainwater harvesting, water saving irrigation, and physiological and ecological techniques of limited irrigation. In this case, modern dryland agriculture on the Loess Plateau of China would establish a new development model of rainwater harvesting agriculture that would be an objective demand to agricultural sustainable development. Following research method improvement, research content deepen, research field expansion of rainwater harvesting agriculture, the research of it would take aim to generalized direction.

On the basis of study of rainwater harvesting agriculture of the Loess Plateau of China, technological integration were reinforced, including limited irritation, non-full irrigation, precise irrigation, micro-rainwater harvesting technologies of dry farmland, network technologies of modern rainwater harvesting, and control technologies of computing system. So, harvesting rainwater use has been improved greatly. Research field of rainwater harvesting agriculture always has been expanded from agricultural ecosystem under micro-irrigation to ecological protection. Rainwater harvesting eco-agriculture should be the development trend of rainwater harvesting agriculture, in which harvesting rainwater would be rationally used, ecological water use of would be adjusted, small valley would be overall controlled, multiple development of agriculture and forestry harness and animal husbandry would be carried out.

**Key words:** Loess Plateau of China; rainwater harvesting agriculture; technological system; technological integration; development model

文章编号:1000-0933(2003)05-1003-09 中图分类号:S157,Q143,S181 文献标识码:A

黄土高原是我国旱地农业的中心地带。长期以来,现代旱地农业以传统旱地农业“耕作制、轮作制、施肥制、选用抗旱品种”为基础,进行土壤施肥(以肥调水),农田水分平衡(增加土壤蓄水、减少蒸发),农业自然资源容量有限性(自然降水的生产潜势),区域性小流域综合治理(径流土壤蓄积)等降水资源利用为目标的研究取得了巨大进展,为旱地农业的发展起了积极的推进作用。但是从农业生态系统可持续发展看,黄土高原农业生态系统仍未能摆脱生态系统生产力低、生态系统不稳定、投入效益差等问题的困扰,特别是在严重干旱面前显得尤为突出。进入 20 世纪 80 年代以来,旱区集水农业技术和现代农业技术手段相结合,形成了黄土高原旱作农区的现代集水农业技术,并发展成为富有我国特色的旱区农业技术体系。近 20a,集水农业理论和技术体系的研究取得显著进展,发展新型集雨农业生态系统模式是现代旱地农业可持续发展的客观要求。

我国黄土高原旱地农业的发展,可以粗略地分为以下几个阶段:在 20 世纪 50~60 年代,旱农研究的中心议题是总结推广旱地耕作经验,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,以平田整地为目标修筑梯田,随后提出小流域综合治理<sup>[1,2]</sup>。同期,一些专家提出,解决旱作问题的最佳方案是推行灌溉农业,而这种意义上的灌溉指“大水漫灌”模式<sup>[3]</sup>。在这种背景下,水坝、水库、塘坝得以很快发展;进入 80 年代末至 90 年代初,限于当时灌溉技术的滞后性,80%以上坡耕地的实际情况,同时大面积、远距离调水的可能性很小,支离破碎的地貌特征也不允许通过调水发展灌溉农业,地表水和地下水又十分贫乏<sup>[4]</sup>,这样旱区灌溉农业仍未能摆脱“大水漫灌”的困扰。山仑《对提高黄土丘陵干旱地区旱地粮食生产的建议》一文中,在分析了黄土丘陵干旱半干旱地区固原县农业生产现状后提出“由于绝大部分的农田是旱地,加之水资源贫乏,因此从总体上看实现本世纪粮食自给,若发展水利灌溉(指大型水利农田灌溉)不行,而主要必须在旱作农业有所突破,认真抓好大面积旱作农业增产。”“无疑在可能的条件下,本地区的水利建设还应当积极发展,但必须从实际出发,不要只着眼于建设‘水库’和‘灌区’而应重视径流农业,解决农作物生长关键时期的少量用水问题<sup>[5]</sup>”。在此之后,随着传统栽培耕作技术的改进和创新,出现了以垄沟为典型的微集水栽培技术。从径流农业到微集水栽培,在一定程度上加强了人类对自然降水的调控措施,开始彻底改变自然降水的时空分配。20 世纪 80 年代后期,甘肃省水利部门开展了以解决人畜饮水为主要目标的集水技术研究。同期,从事干旱生态、干旱气象、旱地农业研究方面的专家在分析以

往旱农研究生产成效和局限的基础上,指出了旱农地区集水农业的研究和发展思路,联合提出了“集水农业”命题<sup>[6,7]</sup>。1996年,赵松岭编著《集水农业引论》<sup>[6]</sup>,从而确立了集水农业思想。可以认为《集水农业引论》一书出版,发展了传统旱地农业思想,确立了现代旱地农业新的研究方向。

## 1 集水农业理论

### 1.1 自然降水资源的时间空间分配

我国干旱半干旱地区,进入20世纪80年代以来,由于三水(地表水、地下水、大气水)循环障碍,全球气候变暖,明显感受到旱区范围扩大,旱情加剧。进入90年代,每年受旱面积扩大到2667万hm<sup>2</sup>,比50年代增加1.5倍以上<sup>[8]</sup>,每年年均降水量呈递减趋势。50年代华北地区年降水量750mm左右,1965年连续减少,80年代只有560mm。黄河流域多属于干旱半干旱地区,20世纪90年代以来,黄河流域干旱加剧,降水量减少,大气干旱直接胁迫旱作农业生产。宁夏南部山区年平均降水量90年代较60年代减少56.29mm,年平均温度升高0.89℃,干燥度升高0.2363,温度升高加速了土壤水分的蒸发,干旱化趋势明显加剧(表1)。从自然降水分布和利用看,干旱半干旱地区一方面缺水,另一方面存在降水资源的浪费。我国北方旱区,在农作物生长时期,对降水的有效利用率低,年自然降水的60%~70%集中在秋季,造成农作物生长期需水与自然降水供需错位。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<sup>[9]</sup>。在这里形成径流和无效蒸发的水分实际就是集水农业的主要利用对象,年集水量丰富<sup>[9,10]</sup>。从自然降水总量看(表2),甘肃中部年均降水量367mm,其年降水总量200亿m<sup>3</sup>,甘肃东部年均降水521mm,年均降水总量也有200亿m<sup>3</sup>,数量超过当地河川径流量的10倍<sup>[10]</sup>。甘肃河东地区年降水量185.7~1200.0mm,降水资源总量年均可达500~600亿m<sup>3</sup>,相当于约10个刘家峡的容量<sup>[4]</sup>。宁夏南部山区年降水量在277.1~650.8mm,年均降水资源总量110亿m<sup>3</sup>;陕西渭北旱塬年降水量在533~709mm,年均降水资源总量787.8亿m<sup>3</sup>。黄土高原年平均降水量443mm,年均降水资源总量2757亿m<sup>3</sup>,降水利用率30%~40%<sup>[11]</sup>。因而解决自然降水与农作物需水的供需错位,解决大气干旱与降水资源浪费的矛盾,挖掘自然降水资源潜力,实现降水资源的时空调配,提高农业生态系统生产力,这正是集水农业思想理论的精髓之一。

表1 宁夏南部山区20世纪60~90年代年平均降水量,温度,干燥度变化

Table 1 Changes of rainfall, temperature, dryness in the mountain areas of south Ningxia

气候因子 Climate factor changes	20世纪60年代	20世纪70年代	20世纪80年代	20世纪90年代
	1960s	1970s	1980s	1990s
年平均降水量(mm) Annual mean rainfall	426.82	368.28	363.73	370.53
年平均温度(℃) Annual mean temperature	6.89	7.00	7.10	7.78
年平均土壤表面温度(℃) Annual mean surface soil temperature	8.26	8.19	8.53	9.03
年平均积温(≥10℃) Annual accumulated temperature	2469.65	2291.10	2442.98	2599.80
年平均积温(≥0℃) Annual accumulated temperature	3074.92	3098.03	3134.84	3392.38
年平均蒸发量(mm) Annual evaporation	2151.72	2088.05	1747.22	1658.53
年平均干燥度 Annual mean dryness	0.9258	0.9942	1.0746	1.1621

\* 宁夏南部山区海原县气象资料 Meteorological data of Haiyuan County in the mountain areas of south Ningxia

### 1.2 雨水利用潜力

以平整地为目标修筑梯田,进行小流域综合治理的现代旱地农业,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入渗,以此来提高天然降水的利用率和作物生产力<sup>[1,6,7]</sup>。现代旱地农业虽然在一定范围内调控降水的无效利用,对提高降水利用率起到了一定作用,但土壤水分状况的改善仍然非常有限。根据赵松岭在陇中半干旱地区研究表明,最好的水保型农业工程措施(梯田化)只可能多接纳10%~15%的天然降水,假设100%就地入渗,“吃干喝尽”,降水量只能达到465.3~486.5mm,相应粮食产量可增加25%<sup>[6]</sup>。这就是说即使全部梯田化,多接纳降水也不能改变半干旱地区水分特征和水分困扰的胁迫,单位面积农作物产量仍然受水分亏缺的制约,平均生产力水平并未能有重大突破。特别在400mm以下的降水区,由于土壤贮水蒸发和旱段长度、强度的影响,很难解决水分亏缺问题。在决定农业生产力水平的

光、热、水、肥四大生态因子中,水分成为制约农业生态系统生产力水平的瓶颈,这就是现代旱地农业思想亟待发展的基本原因。因而在传统旱地农业的基础上,集水农业思想则是以自然降水的时空调配为手段,提高雨水利用潜力,发展集水型生态农业<sup>[4]</sup>。这是集水农业思想确立以来,在思想理论方面研究的一个重大进展,集水型生态农业继承传统旱地农业技术措施,发展了现代旱地农业思想,将集水技术与生态农业有机结合,成为现代黄土高原农业可持续发展的方向<sup>[12,13]</sup>。

表 2 中国半干旱地区自然降水的分布、利用及无效蒸发

Table 2 Distribution, use and evaporation of annual rainfall in the semiarid areas of China

地区 Areas	年降水量 Annual rainfall (mm)	7~9月降水量 Rainfall in Jul. ~Sep. (mm)	降水总量 Total rainfall (亿 m <sup>3</sup> )	降水利用 Rainfall use (mm)	形成径流 Rainfall run-off(mm)	无效蒸发 Non-effective evaporation(mm)
甘肃中部 Center area of Gansu	367	238	200	73	55	239
甘肃东部 East area of Gansu	521	353	200	114	78	329
甘肃河东 Hedong in Gansu	185.7~1200.0	110~780	500~600	37~300	20~180	128.7~722
宁南山区 South area of Ningxia	277.1~650.8	180~432	110	56~182	41~97	180.1~371.8
陕西渭北 Weibe in Shannxi	533~709	360~498	787.8	135~177	63~85	335~447
黄土高原(平均) Loess Plateau of China	443	265~310	2757	132~176	44~66	201~267

### 1.3 集水农业的发展模式研究

集水农业思想率先解决了农作物(种植业)需水与自然降水的供需错位,但同时也看到,集水农业的内容也包含了养殖业和林业。长期以来解决“人畜饮水”工程也是利用汇集自然降水发展养殖业的实例,并在干旱半干旱地区有了长足的发展,为维护该地区农业的可持续发展起着重要作用。利用水平条田,水平沟汇集雨水栽培林业,已历史悠久,尤其是近 10a 来,采用节水灌溉技术与集水技术有机结合,发展经果林取得了显著的经济效益,生态效益和社会效益<sup>[14~17]</sup>。在 20 世纪 80 年代中期,以种草为纽带的退耕还草模式为干旱半干旱地区农林牧综合发展从理论上起到了积极推动作用。然而以解决水资源问题为核心的集水农业的确立,有力地推动了以草为纽带的退耕还林还草,农林牧综合发展的生态型农业建设。特别是旱地集水技术与小流域综合治理,农林牧综合发展结合起来,将会实现旱地农业区域性建设的更高层次或更高形式,为未来旱地农业发展找出了一条有效途径<sup>[14]</sup>。小流域综合治理是黄土高原旱地生态农业区域性建设的有效形式<sup>[6]</sup>。从农业生态环境来看,小流域综合治理仍是利用集水技术,拦截自然降水,防止水土流失,进行区域性生态环境建设的有效措施。治理荒漠化土地,完善防护林体系,可利用风障、雪棚,灌木林带,集中飘雪,蓄积雨水。沙漠化治理中的草方格技术也是蓄积雨雪,减少水分蒸发的典型集水技术应用。甘肃榆中、定西,宁夏海原、固原,河南卫辉等集雨农业试验区多年来通过修建小型集水场、微型蓄水池,或利用荒山、荒坡汇集坡面雨水,把水利建设、基本农田建设和水土保持工作结合起来,利用生物措施、工程措施、耕作措施建立起良性的人工生态系统,取得了显著的经济效益、社会效益和生态效益,区域性生态环境得到改善,推动了农业可持续发展。因而从大农业和生态环境建设来看,集水农业技术正在由“解决农作物需水与降水供需错位”扩充至农林牧综合发展,小流域综合治理,生态环境建设等研究领域,这正是集水农业广义性研究的一面。可以预见,集水技术的引进作为旱地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个方面协调发展,对黄土高原半干旱区农业和农林发展起到重要推动作用<sup>[18~20]</sup>。

## 2 集水农业技术体系

### 2.1 雨水汇集、存贮、利用技术

20 世纪 80 年代以后,随着集水农业思想的确立,雨水汇集工程技术在沿袭已久的旱区微集水农业技术的基础上,广泛开展了栽培集水工程和集水场集水工程的研究。以垄沟为典型的现代旱地农田栽培集水技术,在传统栽培耕作集水技术的基础上加以改进和创新,并利用地膜覆盖材料实现了降水在空间上的叠加<sup>[21,22]</sup>。水窖、水窖等蓄水容器在原有基础上加以改进或改造,与天然集水场(荒山、荒坡、路面)与人工集水场(庭院集水)联筑构建,形成独具特色的中国集水农业典范。

黄土高原人工汇集雨水利用技术,主要包括雨水汇集,存贮与净化,雨水高效利用及配套技术等方面的内容<sup>[23]</sup>,其具体的内容有:农田集水区与种植区面积比例的确定;人工雨水汇集工程设计的基本参数确定,集水场的规则设计,集雨场地表处理技术,集水工程系统的管理与维护技术;雨水存贮设施设计与施工技术<sup>[24]</sup>,雨水存贮设施防渗防冻技术<sup>[25]</sup>,存贮雨水保鲜净化技术;存贮雨水合理调配技术,提高雨水利用效率的综合技术<sup>[26]</sup>,适用于汇集雨水灌溉的小型农机具及配套灌溉机具<sup>[27]</sup>。在合理利用天然集水场的基础上,随着新型材料的出现,集水场汇集雨水工程将向多元化方向发展。

黄土高原半干旱区的降水为集水农业发展提供了条件,但是集水不仅取决于降水,还受地貌、地表组成物质、土地利用等因素的制约。通过分析地貌条件对集水效应的影响,提出集水适合度指标体系。同时在综合分析影响集水的自然因素的基础上,划分出各集水地域类型,为确定集水有效区、集水工程规模及布局提供了理论依据<sup>[28]</sup>。同时建立起了旱地集水农业技术系统工程区域性发展模式,确立了旱地集水农业发展的适应区、次适应区<sup>[29, 30]</sup>,以及不同类型集水场集水效果的研究<sup>[20, 28~30]</sup>。

关于黄土高原汇集雨水工程技术体系的研究,最有代表性的有:人工汇集雨水利用技术体系包括集水工程子系统、农艺工程子系统、社会经济管理子系统<sup>[31]</sup>;集水农业系统景观与可持续发展模式包括社会效益、生态效益、经济效益,系统稳定<sup>[32]</sup>;旱地集水农业技术体系包括栽培集水和工程集水两个方面,并依据工程集水的产流、收集,贮存及对雨水的利用分为集水系统、蓄水系统、输水系统、灌溉系统、栽培与集水补灌<sup>[33]</sup>。笔者在多年研究汇集雨水工程技术体系方面认识到,应用于农业生产的汇集雨水容器的大小,从小至土壤“水库”,到传统水平栽培耕作,现代垄沟栽培集水,水窖、水窑,涝池、塘坝、水库,大至河流。从这个意义上看,应拓宽集水农业内容,进行广义性研究。集水农业技术是在传统水保型农业的基础上,受干旱严重胁迫建立起来的“开源节流,提高自然降水利用率”为核心的新型的现代旱作农业技术。

## 2.2 节水灌溉技术与限量灌溉研究

有限水资源控制下的节水灌溉技术是集水农业技术体系中的重要内容,这是因为以解决水资源的有限性和旱地农业对水需求之间的矛盾要凭借节水灌溉技术得以实现。现阶段节水灌溉技术主要采用小畦灌、膜下灌、膜上灌、滴灌、渗灌、喷灌、交替灌溉<sup>[34]</sup>等。旱区利用集水技术的集水工程—日光温室—沼气池联体构筑中,种植蔬菜采用膜下滴灌技术,一个 330 m<sup>2</sup> 左右的日光温室仅需 93 m<sup>3</sup> 的水,比传统漫灌方式节水近 56%<sup>[35]</sup>。林业(主要经果林)的节水补灌技术也取得主要进展。

节水灌溉的定性定量研究已为大田集水农业的生产提供了理论依据。对农作物在不同生育时期进行定量灌溉,特别是农作物生长发育临界期的补充灌溉指标研究,确立了干旱半干旱地区发展集水农业的可行性研究。

## 2.3 有限灌溉下的作物生理生态研究

节水灌溉技术的应用有力地推动了集水农业的研究、应用、推广,与之相伴随的有限灌溉微环境下的农作物生理生态方面的研究也取得主要进展,为农作物的节水灌溉指标研究提供了理论依据。近年来,黄土高原半干旱区集水农业的发展为旱区提供了一定的补充灌溉条件,如何充分利用有限水量,提高水分利用率是一个重要的技术发展方向<sup>[36~38]</sup>。

在黄土高原干旱区,解决好植物需水规律与农业环境之间的统一关系是实现有限水资源高效利用的关键。“多变低水”是半干旱区田间小环境的重要特征,进行作物对多变低水环境适应与调节研究,实践上是有紧迫性,理论上带有开拓性。研究发现多种作物在一定生育阶段适应干旱后可产生生理、生长、水分利用上的补偿效应,节水和增产可以同时实现,这从理论上为半干旱地区的农业高效利用提供了生物学基础<sup>[36, 39~43]</sup>。近年来,对植物根信号的研究结果为作物水分利用效率的研究提供了一个新途径。从植物非水力根信号的生理调节和生活史进化角度看,提出了在黄土高原农田环境下,麦类作物根系的理想分布应当是深而窄幅的形式<sup>[44]</sup>。在农田有限灌溉下,土壤表层多次频繁灌溉,水的利用效率较低;在播前相同水量在土壤深层灌溉,能提高土壤水分利用率,但产量不会降低。干旱受阻时,根层分布和根水力信号受到影响,对提高深层土壤水分利用效率具有重要作用<sup>[45, 46]</sup>。

## 3 黄土高原集水农业发展趋势



近 20a 来,黄土高原集水农业理论研究取得了显著进展,集水农业技术体系已初步形成,集水农业技术试验、示范、推广为黄土高原旱地农业发展起到了巨大的推动作用。人工汇集雨水与高效利用技术是 21 世纪解决降水量在 250~500 mm 左右的半干旱地区旱作农业发展的重要途径<sup>[47~49]</sup>。具有中国特色的人工汇集雨水利用技术 21 世纪将会得到更深入研究、示范、推广<sup>[50,51]</sup>。随着全球变暖与干旱化加剧,雨水利用已成为全球 21 世纪的研究热点。1991 年国际雨水收集利用协会(IRCSA)成立,1996 年我国也成立中国雨水利用协会(CRCSA)<sup>[49]</sup>。集雨农业技术示范项目已列为国家“十五”节水农业重大建设项目的重要内容,已批准在内蒙古、宁夏、河南、山西等地进行示范模式研究。在国际 12 届水保大会和 10 届雨水收集利用大会上,具有中国特色的集雨农业研究已引起国际界的广泛关注。在此背景下,组建以现代旱地农业为基础的集雨型农业生态系统发展模式是现代旱地农业发展的客观要求。

黄土高原集水农业技术应用于作物补充灌溉下的微生境生态系统,解决好降雨(微集水与微灌溉)-土-作物-环境之间统一关系的最优调控,是实现雨水高效利用的关键。因而在集水农业研究进展的基础上,加强水、肥、环境与作物产量的函数关系和作物水肥管理模式,降雨-作物水-光合作用-经济产量转化效率之间的计算模式,作物的“水、肥、气、热、光”全方位最优调控模式<sup>[52]</sup>,微生境(微干旱逆境)条件下作物生长和产量之间的定量评价方法<sup>[53~55]</sup>,土壤-作物-大气界面间关系及土壤动力学问题等基础理论方面的研究;有限灌溉(Limited Irrigation)、非充分灌溉(Non-full Irrigation)、精确灌溉(Precise Irrigation)与现代集雨技术、计算机控制系统、集雨网络等高新技术手段的技术集成研究,以提高雨水汇集的利用率。

黄土高原集水农业已经从微生境条件下的农业生态系统研究延伸到生态环境保育的研究。黄土高原雨水资源是生态环境保育的瓶颈所在。从黄土高原生态环境保护和可持续发展来看<sup>[56~60]</sup>,进行小流域综合治理,农林牧综合发展,生态环境重建面临水资源的不足和调配格局问题。人工汇集雨水解决生态用水成为集水农业发展一个方向。因而加强以集水技术为核心,种草为纽带,农林牧综合发展和改善生态环境为主题的集水型生态农业,成为 21 世纪黄土高原集水农业的发展趋势。可以预见随着现代科学技术的进步,研究方法的改进和交叉学科的发展,集水农业的研究内容的会不断深入,研究领域的会不断扩充,集水农业范畴向更为广义性的方向发展。

## References:

- [1] Zhao S L, Li F M, Wang J. On the development of water harvesting agriculture in the semi-arid area of northwest China. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 1995, **15**(8):9~12.
- [2] 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):259~260.
- [3] Xiao G J, Li Y C, Li W J, et al. Formation of water harvesting agriculture in arid areas. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1999, **17**(Supp.):6~11.
- [4] Li F M, Xu J Z. Rainwater collecting eco-agriculture in semi-arid region of loess plateau. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2002, **10**(1):101~103.
- [5] Shan L. Writings of agricultural science and technology in arid and semi-arid areas of China. Yangli: Wugong agriculture science committee, 1983.
- [6] Zhao S L. Introduction of rainwater harvesting agriculture. Xian: Shanxi Scientific & Technological Press, 1996.
- [7] Ma T G, Gao S M. Rainwater harvesting high-efficiency agriculture. Lanzhou: Gansu Scientific & Technological Press, 1997.
- [8] Kang S Z. New agricultural technological revolution and development of Chinese water saving agriculture in 21st century. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1998, **16**(1):11~17.
- [9] Zhao S L, Li F M, Wang J. A study on the limitation of agriculture development by conserving soil and water in semi-arid regions of loess plateau. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 1995, **15**(8):13~18.
- [10] Ziu X, Qing F H, Quan J M. Rainwater harvesting is an effective way to develop productive potential of raised farming. *Gansu Agriculture Science and Technology*, 1996, **1**:2~4.
- [11] 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.
- [12] Liou G C. Combination of water conservation style farming and rainwater harvesting agriculture is basic way to develop rainfed farming. *Gansu Agriculture Science and Technology*, 2001, **11**: 23~24.
- [13] Xiao G J, He X C, Tai H J. Strategy and countermeasure of sustainable agriculture development in mountainous areas of south-eastern Ningxia. In: Chinese Agronomy Committee. Chinese agriculture sustainable development. Beijing: Chinese Scientific & Technological Press, 1997.

- [14] Xiao G J, Geng Y D, Li W Y, *et al.* Progress of research on dryland agriculture and limitation of agriculture for soil and water conservation. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1999, **17**(Supp.):1~5.
- [15] Shong H X. Afforestation in arid areas. Beijing: Chinese Forestry Press, 1991. 125~126.
- [16] Zhu X S. Eco-agriculture construction on loess hilly plateau of Shanxi. *Acta Agriculture Boreal-Occidentalis Sinica*, 1999, **8**(Supp.):12~14.
- [17] Wang Y P, Li P, Gao P C, *et al.* Efficiency of apricot tree culture on sloping fields. *Acta Agriculture Boreal-Occidentalis Sinica*, 1999, **8**(Supp.):77~81.
- [18] Lu Z L, Niu P. Intensifying rainfed agriculture construction to promote rainwater agriculture development. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1996, **14**(4):79~82.
- [19] Wei H, Lin K, Li F M. Effects of limited irrigation on the root development of spring wheat in a semi-arid region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(1):106~110.
- [20] Wang K Q, Meng J L. Advances in water harvesting technology for agriculture and forestry in the world. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1996, **14**(4):109~114.
- [21] Li J, Wang L C, Sun X W, *et al.* The effect of water harvesting with ridge building on semi-arid fields in south Ningxia. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1997, **15**(1):16~20.
- [22] Xiao G J, Wang Z P, Wu J M, *et al.* Effect of harvesting runoff water in furrow on maintaining soil moisture and increasing crop yield. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1999, **17**(Supp.):62~68.
- [23] Cui L Z, Li Z B, Li M. Technological approach of rainwater harvesting use on loess plateau. *China Water Resources*, 2001, **4**:70~71.
- [24] Yang X, Liu Y F, Zhang C X. Design and construction techniques of water kiln in rained areas. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1997, **15**(2):89~93.
- [25] Duan X M, Wang Z G, Hu Z H. Study on the excellent structure of deposit pool in the system of well storing rainfall. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, **7**(4):29~31.
- [26] Kang S Z, Ma X Y, Han K M. Agricultural soil and water engineering in the 21st century. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1999, **17**(1):1~6.
- [27] Dong L, Su Y J, Xiao G J, *et al.* Field experiment of the saving water supplement irrigation machinery. *Journal of Ningxia University*(Natural Science Edition), 2002, **23**(1):94~96.
- [28] Wang J, Ding Q T, Wu G H, *et al.* Natural foundation of rainfall harvesting agriculture and division of region types most suitable for rainwater harvesting in the semi-arid region on loess plateau. *Journal of Desert Research*, 1999, **19**(4):384~398.
- [29] Xiao G J, Reng W H, Li S S, *et al.* Designing principle for systematical engineering of water harvesting agriculture and developing mode in certain areas. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1999, **17**(Supp.):22~27.
- [30] Xiao G J, Ma J L, Tian F H, *et al.* Designing of water harvesting system and its effect in different kinds of ground. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1999, **17**(Supp.):38~41.
- [31] Wang J, Shi Z X. Rainwater harvesting agriculture engineering in semi-arid areas of China. In: Gan S J, Wang R S. *Adaptive technologies of town sustainable development*. Beijing: Chinese Scientific & Technological Press, 1998, 53~62.
- [32] 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):152~157.
- [33] Xiao G J, Reng W H, Zhang S X, *et al.* Structural framework and development of technical system for water harvesting agriculture in arid areas. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1999, **17**(Supp.):12~17.
- [34] Huang Z B. A study on drought-wet changing environment and compensative effect rules of crops. *Eco-agriculture Research*, 2000, **8**(1):30~34.
- [35] Wang J, Li Z X, Wang Z Z, *et al.* The composite construction of rainwater catchment techniques and biogas pool with greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **12**(1):51~54.
- [36] Shan L, Deng X P. Physiological ecology of crops high-efficiency water use in semi-arid area of China. Paper writings of Chinese agriculture seminar, 2000, **7**: 2~3.
- [37] Shan L, Xu M. Water-saving agriculture and its physio-ecological bases. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, **2**(1):70~76.
- [38] Zhang S Q, Shan L. The analysis on technical approaches to raise rainfall use potential in Weibei dry plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, **6**(1):47~50.
- [39] Deng X P, Shan L. High efficient use of limited irrigation water by semiarid zone spring wheat. *Research of Soil and Water Conservation*, 1998, **5**(1):65~69.
- [40] Shan L. Technical strategies to develop sustainable agriculture in semiarid region northwestern China. *Chinese Science Fund*, 1999, **1**:13~15.
- [41] Zhang Z B, Shan L. Progress on research on water use efficiency of wheat. *Eco-agriculture Research*, 1997, **5**(3):28~32.
- [42] Zhang Z B, Shan L. Research development in estimation models of crop water use efficiency and transpiration and evaporation. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, **15**(1):73~78.
- [43] Shan L. The study on high efficient utilization of limited water in dry land. *Research of Soil Water Conservation*, 1996, **3**(1):8~10.
- [44] Li F M, Wang J, Guo A H, *et al.* The effect of water supply patterns on non-hydraulic root signal and water use

- efficiency of spring wheat. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, **1**:23~27.
- [45] Li F M, Yan X, Guo A H. A discussion on the non-hydraulic root-sourced signals and life history strategy of wheat crops. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(3): 510~513.
- [46] LI F M, Yan X, Li F R, *et al.* Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 2000, **46**(2): 46~55.
- [47] He J A. Rainwater use and its development trend in arid area. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1998, **16**(3): 84~88.
- [48] Huang Z B. Rainwater harvesting agriculture in arid area and new technological revolution. *Research of Agricultural Modernization*, 1998, **19**(6):384~387.
- [49] Huang Z B. Survey of the 8th international conference of rainwater catchment system. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, **17**(4): 42~45.
- [50] Huang Z B. Effect of limited water supply on water use efficiency of crops and its mechanism. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, **4**(3):92~94.
- [51] Huang Z B, Shan L, Zhang S Q, *et al.* Action of rainwater use on soil and water conservation and agriculture sustainable development. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, **17**(1): 54~56.
- [52] Wang L F. *Agriculture ecology*. Xian: Shanxi Scientific & Technological Press, 1994.
- [53] Li J S, Rao M J. Effects of sprinkler uniformity on spatial variability of soil moisture and winter wheat yield. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, **1**:15~18.
- [54] Wang K, Shen R K, Huang J S. Field experiment study on calculating transpiration and evaporation of winter wheat under transparent polyethylene condition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, **10**:87~91.
- [55] Huang J L. A methods studied rainwater agricultural benefit. *Gansu Water and Electricity Technology*, 2001, **37**: 41~42.
- [56] Zhang L X, Geng Z C, Tong Y A, *et al.* Discussion on construction model of water saving agriculture demonstration zone in Weibei dry plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, **1**:26~29.
- [57] Han J G, Gao S M. Research and application of high-benefit eco-agriculture in the Loess Plateau of China. *Gansu Agriculture Science and Technology*, 1996, **247**(7): 1~3.
- [58] Dai R L, Liang T G, Xu Y Q, *et al.* Research on the estimation methods of precipitation resource for rain harvesting agriculture. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 1999, **35**(1):165~171.
- [59] Feng H, Shao M A, Wu P T. Calculation and assessment of developing potential for converting rainwater to resources in small watershed on the loess plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(2):140~145.
- [60] Yu F W, Shang J. Study on rainwater utilization and agricultural sustainable development in semiarid region of loess plateau. *China Population, Resources and Environment*, 2002, **12**(2):87~90.

## 参考文献:

- [1] 赵松岭, 李凤民, 王静. 半干旱地区集水农业的可行性. *西北植物学报*, 1995, **15**(8):9~12.
- [2] 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):259~260.
- [3] 肖国举, 李有成, 李万军. 干旱地区集水农业技术体系的形成——三环交织. *干旱地区农业研究*, 1999, **17** (Supp.):6~11.
- [4] 李凤民, 徐进章. 黄土高原半干旱区集水型生态农业分析. *中国生态农业学报*, 2002, **10**(1):101~103.
- [5] 山仑. 中国干旱半干旱农业科技资料选集. 杨陵:武功农业科学技术委员会, 1983.
- [6] 赵松岭. 集水农业引论. 西安:陕西科学技术出版社, 1996.
- [7] 马天恩, 高世铭. 集水高效农业. 兰州:甘肃科学技术出版社, 1997.
- [8] 康绍忠. 新的农业技术革命与 21 世纪我国节水农业的发展. *干旱地区农业研究*, 1998, **16**(1):11~17.
- [9] 赵松岭, 李凤民, 王静. 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.
- [10] 周侃, 秦富华, 权建民. 雨水集流补偿是开发旱作农业生产潜力的有效途径. *甘肃农业科技*, 1996, **1**:2~4.
- [11] 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.
- [12] 刘广才. 水保型农业与集雨农业的有机结合是发展旱作农业的根本途径. *甘肃农业科技*, 2001, **11**:23~24.
- [13] 肖国举, 何耀祖, 太红杰. 宁南山区农业可持续发展的战略与对策. 见:中国农学会编著. 中国农业可持续发展研究. 北京:中国科学技术出版社, 1997.
- [14] 肖国举, 耿耀东, 李武玉. 论现代旱作农业研究进展及水保型农业的有限性. *干旱地区农业研究*, 1999, **17** (Supp):1~5
- [15] 孙洪祥. 干旱区造林. 北京:中国科学技术出版社, 1991. 125~126
- [16] 朱象山. 浅谈陕西黄土高原区生态农业建设. *西北农业学报*, 1999, **8**(Supp.):12~14.
- [17] 王延平, 李平, 高鹏程. 陡坡地杏树栽培与技术效益研究. *西北农业学报*, 1999, **8**(Supp.):77~81.
- [18] 卢增兰. 万方数据 雨养农业建设, 促进旱区农业发展. *干旱地区农业研究*, 1996, **14**(4):79~82.
- [19] 魏虹, 林魁, 李凤民. 有限灌溉对半干旱区春小麦根系发育的影响. *植物生理学报*, 2000, **24**(1):106~110.



- [20] 王克勤, 孟菁玲. 国内外农林业集水技术的研究进展. 干旱地区农业研究, 1996, 14(4):109~114.
- [21] 李军, 王龙昌, 孙小文. 宁南半干旱偏旱区农田沟垄经流集水蓄墒效果与增产效应研究. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1):16~20.
- [22] 肖国举, 王子平, 吴金铭. 垄沟经流集水蓄墒与增产效应的探讨. 干旱地区农业研究, 1999, 17(Supp.):62~68.
- [23] 崔灵周, 李占斌, 李勉. 黄土高原雨水集蓄利用技术发展. 中国水利, 2001, 4:70~71.
- [24] 杨峡, 刘亚非, 张春贤. 旱地水窖的设计与施工技术. 干旱地区农业研究, 1997, 15(2):89~93.
- [25] 段喜明, 王治国, 胡振华. 旱井集雨系统中沉沙池结构优化研究. 水土保持研究, 2000, 7(4):29~31.
- [26] 康绍忠, 马孝义, 韩克敏. 21 世纪农业水土工程. 干旱地区农业研究, 1999, 17(1):1~6.
- [27] 董良, 苏宇静, 肖国举, 等. PYB1.6 型多功能移动节水补灌机田间试验. 宁夏大学学报, 2002, 23(1):94~96.
- [28] 王静, 丁其涛, 伍光和. 黄土高原半干旱区集水农业的自然基础及最适宜集水类型的划分. 中国沙漠, 1999, 19(4):384~398.
- [29] 肖国举, 任万海, 李树生, 等. 干旱地区集水农业系统工程设计的原则及区域性发展模式. 干旱地区农业研究, 1999, 17(Supp.):22~27.
- [30] 肖国举, 马建林, 田凤华等. 集水系统设计及不同类型集水场集水效果研究. 干旱地区农业研究, 1999, 17(Supp.):38~41.
- [31] 王静, 时正新. 半干旱地区集水农业工程. 见:甘师俊, 王如松. 中小城镇可持续发展先进适用技术指南. 北京:中国科学技术出版社, 1998. 53~62.
- [32] 李凤民, 王静, 赵松岭. 论半干旱区黄土高原集水高效农业的发展. 生态学报, 1999, 19(2):152~157.
- [33] 肖国举, 任万海, 张淑秀. 论干旱地区集水农业技术体系的结构框架及开发利用. 干旱地区农业研究, 1999, 17(Supp.):12~17.
- [34] 黄占斌. 干湿变化与作物补偿效应规律研究. 生态农业研究, 2000, 8(1):30~34.
- [35] 王静, 李召祥, 王自忠, 等. 集水工程、沼气池与日光温室联体构筑的研究. 应用生态学报, 2000, 12(1):51~54.
- [36] 山仑, 邓西平. 半干旱区作物高效用水的生理生态问题. 见:中国农业生态学会. 中国农业生态学研讨会论文集, 2000, 7:2~3.
- [37] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础. 应用生态学报, 1991, 2(1):70~76.
- [38] 张岁岐, 山仑. 提高渭北旱塬雨水利用潜力的技术途径分析. 水土保持研究, 1999, 6(1):47~50.
- [39] 邓西平, 山仑. 半干旱地区春小麦高效利用有限灌水的研究. 水土保持研究, 1998, 5(1):65~69.
- [40] 山仑. 我国西北半干旱地区农业可持续发展技术对策. 中国科学基金, 1999, 1:13~15.
- [41] 张正斌, 山仑. 小麦水分利用效率研究进展. 生态农业研究, 1997, 5(3):28~32.
- [42] 张正斌, 山仑. 作物水分利用效率和蒸发蒸腾估检模型的研究进展. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1):73~78.
- [43] 山仑. 旱地农业有限水高效利用的研究. 水土保持研究, 1996, 3(1):8~13.
- [44] 李凤民, 王俊, 郭安红, 等. 供水方式对春小麦根源信号和水分利用效率的影响. 水利学报, 2000, 1:23~27.
- [45] 李凤民, 鄢, 郭安红. 试论麦类作物非水力根信号与生活史对策. 生态学报, 2000, 20(3):510~513.
- [47] 何久安. 干旱地区雨水利用及发展方向. 干旱地区农业研究, 1998, 16(3):84~88.
- [48] 黄占斌. 旱区雨水农业与新技术革命. 农业现代化研究, 1998, 19(6):384~387.
- [49] 黄占斌. 第 8 届雨水收集利用国际学术会议概况. 水土保持通报, 1997, 17(4):42~45.
- [50] 黄占斌. 有限供水对作物水分利用效率的影响及其机理. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3):92~94.
- [51] 黄占斌, 山仑, 张岁岐, 等. 雨水利用与水土保持和农业持续发展. 水土保持通报, 1997, 17(1):54~56.
- [52] 王留芳. 农业生态学. 西安:陕西科学技术出版社, 1994.
- [53] 李久生, 饶敬敏. 喷灌均匀系数对土壤水分及冬小麦产量影响的试验研究. 水利学报, 2001, 1:15~18.
- [54] 王康, 沈荣开, 黄介生. 地膜覆盖条件下冬小麦耗水量计算及田间试验研究. 水利学报, 2000, 10:87~91.
- [55] 黄军兰. 集雨农业产出效益分析方法. 甘肃水利水电技术, 2001, 37:41~42.
- [56] 张立新, 耿增超, 同延安, 等. 渭北旱塬旱作节水农业示范区建设探讨. 水土保持研究, 2002, 1:26~29.
- [57] 韩靖国, 高世铭. 黄土高原丘陵沟壑区高效生态农业区建设的研究与实践. 甘肃农业科技, 1996, 247(7):1~3.
- [58] 戴若兰, 梁天刚, 徐雨清, 王兮之. 集雨农业降水资源评价方法的研究. 兰州大学学报(自然科学版), 2001, 35(1):165~171.
- [59] 冯浩, 邵明安, 吴普特. 黄土高原小流域雨水资源化潜力计算与评价初探. 自然资源学报, 2001, 16(2):140~145.
- [60] 于法稳, 尚杰. 黄土高原半干旱区雨水利用与可持续发展研究. 中国人口、资源与环境, 2002, 12(2):87~90.