

我国旱区作物根域微集水种植技术研究进展及展望

任小龙, 贾志宽*, 丁瑞霞, 韩清芳

(西北农林科技大学干旱半干旱农业研究中心, 农业部旱地作物生产与生态重点开放实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 概述了我国旱区作物根域微集水种植技术的增产机理与效果, 在总结现有研究基础上, 指出了目前根域微集水种植技术研究中存在的若干问题, 并提出针对该技术的完善与深化应加强其影响作物生产力机制及水肥耦合机理方面的研究, 科学评价在不同雨量区根域微集水种植的应用效果和水保效应, 同时应进一步规范根域微集水种植技术的相关技术标准和操作规程。作者认为该技术在深化试验研究与广泛示范的基础上, 在旱农区有十分广阔的应用前景, 是提高旱区降水资源化效率及作物增产的重要技术途径。

关键词: 根域微集水种植; 研究现状; 发展前景; 旱农区

中图分类号: S318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)03-0083-07

我国是一个旱区农业比重很大的国家, 旱区面积约占国土陆地总面积的 56%, 其中半干旱偏旱区、半干旱区、半湿润偏旱区是旱作农业的主体区域, 在我国农业生产中占有极其重要的战略地位^[1]。旱区旱作耕地约占全国耕地面积的 38%, 雨水的 70%~80% 以径流及土壤无效蒸发形式损失, 仅有 20%~30% 被作物利用, 作物生产潜力由于水分的限制衰减了 67%~75%^[2,3]。旱作农区年降水量为 250~600 mm, 降雨形式以小雨或暴雨为主^[4], 降水稀少且相对集中, 年降水的 60% 多集中在 7、8、9 三个月^[5], 降雨年际及季节变率均较大, 水资源严重短缺, 粮食生产水平低下, 农业生产的主要制约因素表现在两个方面: 一是水资源从数量上不能满足作物需水量的要求, 二是由于水资源年内时空分布极不均匀, 从时间上不能满足作物需水的要求。多年的旱农研究表明, 该地区发展集水农业是一条重要的技术途径。集水农业一方面注重集水、储水和补灌技术的研究, 另一方面更注重雨水就地富集利用技术的研究。

农田根域微集水种植是集雨农业的一种技术模式, 该技术不但能够收集降雨所产生的地表径流, 还可以降低无效蒸发^[4,6-11], 增加种植区土壤含水量^[12], 同时可以显著地降低风蚀^[13], 有效地减少表面径流和土壤侵蚀^[14], 显著提高肥料利用率^[15,16]。研究表明, 该技术可显著促进年降雨量只有 300 mm 的印度沙漠中树木的生长^[17], 可以增加小麦生物量及籽粒产量, 有效降低水分损耗, 提高水分利用效率^[6,18], 还可以显著提高玉米和马铃薯的生产

力^[8,10], 能增加作物根域土壤含水量, 延长水分利用期, 还可提高园艺和森林植物的生产力^[19,20]; 其种植方式结合漫灌可以提高灌溉水利用效率, 降低生产成本^[21]。由此可见, 深入开展农田根域微集水种植技术的研究对于提高旱作农田降水利用率、完善集水种植技术、充分利用自然降水有非常重要的意义; 本文是对旱区根域微集水种植技术近期研究的概括和总结, 可为该技术进一步完善和改进提供一定的参考, 并为其大田推广提供依据。

1 根域微集水种植技术的概念及农田水分调控的基本原理

农田根域微集水种植技术基于雨水就地利用的理念, 通过改变农田地表微地形, 使降雨在农田内就地实现空间再分配, 最大限度地降低农田内的蒸发面积, 将有限的降水尽量保留和集中到沟内种植区, 达到雨水农田内富集利用的目的。微集水种植田间、沟垄相间排列, 垄上覆膜集雨, 沟内种植作物, “沟”与“垄”相互联系, 相互作用, 共同构成微集雨种植作物水分环境系统, 称为沟垄系统, 是微集水种植特有的内涵和农田水分调控方式, 亦是其增进降水生产潜力的关键所在^[22]。该系统水分调控作用如图 1 所示, 降落在垄面的雨水除了少部分留在垄面外, 多数形成径流汇集到沟中, 连同沟中降雨共同入渗, 其主要部分形成下渗流, 另有相当可观的一部分形成侧渗流, 因为土壤物理因素及作物根系因素, 垄下的水分可以形成逆流反补到沟中。棵间土壤蒸发、作物蒸腾及垄面残留雨水的蒸发共同构成了微

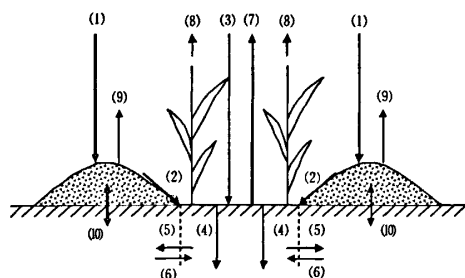
收稿日期: 2009-09-24

基金项目: “十一五”旱地农业支撑计划(2006BAD29B03)部分内容

作者简介: 任小龙(1981—), 男, 甘肃正宁人, 博士, 主要从事旱地农业方面的研究。E-mail: rxlxl@yahoo.com.cn。

* 通讯作者: 贾志宽(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱地农业方面研究。E-mail: zhikuan@tom.com。

集水种植农田水分的支出;同时,因垄面覆膜,侧渗至垄下的土壤水分蒸发受到抑制。



注:(1)降落在垄面的雨水;(2)垄面形成的径流;(3)沟中的降雨;(4)沟中形成的下渗流;(5)沟中部分水分向垄下的侧渗流;(6)垄下部分水分向沟中的侧渗流;(7)行间土壤蒸发;(8)作物蒸腾;(9)垄面残留雨水的蒸发;(10)垄下蒸发受到抑制的土壤水分。

Note: (1) Rainfall falling in the ridge; (2) Runoff forming in the ridge; (3) Rainfall in the furrow; (4) Percolation forming in the furrow; (5) Side seepage from furrow to ridge; (6) Side seepage from ridge to furrow; (7) Soil evaporation between trees; (8) Crop transpiration; (9) Rainfall evaporation residues in the ridge; (10) Soil moisture inhibited under the ridge.

图 1 根域微集水种植农田水分调控图

Fig. 1 The diagram of farmland water regulation of water micro-collecting farming

微集水种植田间的水分按运动特性的不同可分为自然降水和土壤水两种。自然降水流动的方向是由重力势较高的地方流向重力势较低的地方,遵从该规律,降落到垄面上的雨水汇集成流,聚到沟内,实现“雨量增值”。土壤水势差是土壤水运动的原动力,土壤水在田间由土水势较高的位点向土水势较低的位点运动,但其方向不定,具体情况为:(1)“沟水”补给“垄水”。这种情况经常发生,特别是在降雨入渗过程中,沟中“多余”的水分会向垄中侧渗,并因地膜覆盖而存贮起来;(2)“垄水”反补“沟水”。即垄下土壤水分通过水体运动或根系转移、补充沟内水分的不足,同前种情形一样,这种反补作用对作物的生长具有积极意义。反补作用存在的依据有:其一,土壤物理因素,即土壤水由土水势高处向低处运动的规律使然。在一定时期内,垄中土壤水势较沟内高是可能的。如作物苗期连遇干旱,沟内土壤水分因蒸发强烈而大量散失,但垄中则因地膜覆盖而水分保持良好。根据土壤水分运动规律,此时,垄下的土壤水分通过水体运动补给到沟内。但依相关研究试验,这种补给作用相对较弱。其二,作物根系因素。作物的根系能从处于湿润区域的土壤中吸取水分并把水分转移到处于干燥区域的根部然后释放到干土中,这种现象叫水分倒流^[23]。水分倒流的原动

力仍是土壤水势差。如作物生育期内连遇干旱,沟内土壤日趋“干化”而垄中则水分保持良好,那么“水分倒流”现象就很可能发生。

微集水种植田间,由于作物根系多密集于沟内,肥料也多集中施于此处,“水分倒流”不仅可以避免处在沟内干土层的根干枯死亡,以便在下次降水湿润沟土后迅速利用水分,而且也有利于利用沟内干土层中的养分,这对增强作物的抗旱性,稳定产量尤为重要,因而,在探讨微集水种植农田水分调控及增产机理时,沟垄间这种特殊的水分关系也很重要。

2 农田根域微集水种植技术的类型

在不同的旱农地区,农田根域微集水种植技术的开发和设计因集水时间、种植模式、覆盖措施、技术组合方式等的不同而呈现多样化的表现形式^[24-35]。近年来各地出现的与农田根域微集水栽培有关的技术可作如下分类^[36]:

A. 按集水时间的不同,可分为休闲期集水保墒技术和作物生育期集水保墒技术。

B. 按种植模式的不同,可分为微集水单作和间作套种技术。

C. 按覆盖方式的不同,可分为一元覆盖微集水种植技术(如“膜盖垄、不盖沟”及“膜盖垄、半盖沟”)和二元覆盖微集水种植技术(如“膜盖垄,秸秆盖沟”)。

D. 按技术组合形式的不同,可分为微集水种植单一技术和组合技术(如全程地膜覆盖高产栽培技术及覆膜沟穴播集雨增产技术等)。

上述技术虽形式各异,但本质相同,均可概括为通过以集雨、蓄水、保墒为核心内容的农田水分调控实现作物稳产高产的田间集水农业技术。

3 我国旱区根域微集水种植技术研究进展

近年来,人们对田间沟垄微型集雨种植技术的一些技术指标的研究日益增多,国内开展了许多研究,主要集中在以下几个方面:

3.1 根域微集水种植产量效果研究

20 世纪 80 年代,随着国内外集雨农业系统研究的快速发展以及地表水的匮乏,地下水水位下降,水质变坏,土壤的盐渍化和沙漠化等环境问题的加剧,人们对雨水资源的合理利用有了更深刻的认识。80 年代后期,我国的旱农工作者在总结了国内外集雨农业早期研究成果和经验的基础上,在黄土高原干旱半干旱旱作农区做了大量的试验,发现在田间

修筑沟垄,垄上覆膜,通过改变田间微地形,可以有效收集该区 5mm 以下微效降雨,使该区的微效降雨资源化,发挥小雨量的叠加增值效应,缓解作物需水期和降雨时间错位的矛盾,明显改善了作物需水状况,最终使作物增产增收,该技术即为农田根域微集水种植技术,有的资料上称为沟垄微集水种植或者垄膜沟种微集水种植^[37-40]。

20 世纪 90 年代,在半干旱偏旱区的很多研究表明,根域微集水种植技术可以有效提高作物产量。胡希远等在宁南半干旱偏旱区对糜子试验表明,该技术可明显改善作物根际水分状况,显著促进作物生长,并指出,该种植方式影响作物生产力和农田水分效应大小与覆膜垄的宽度有关^[41]。王俊鹏等在宁南通过两年的定位试验研究表明,在 60 cm:60 cm 和 75 cm:75 cm 两种沟垄比带型中种植的冬小麦、春玉米、谷子、豌豆和糜子均表现出了较明显的增产效应,并通过分析表明,根域微集水种植能够充分利用土壤水分和当季降水,提高土地生产能力^[42-44]。同时,通过在定西半干旱地区雨养农业区的定位试验表明:采用根域微集水种植技术,可有效地改善土壤供水能力,促苗早发,提高小麦产量和水分利用率。可使出苗提前 2~6d,出苗率提高 11.0~17.9 个百分点;土壤供水能力提高 46.3%~158.0%;使春小麦产量提高 34.4%~58.8%;水分利用率提高 2.07~3.38 kg/(mm·hm²)^[45,46]。王彩绒等采用垄上覆膜集雨保墒、沟内种植的栽培方法,在半湿润易旱的关中红油土上进行了冬小麦田间试验,探讨覆膜集雨栽培对冬小麦产量及氮磷钾养分携出量的影响。结果表明,覆膜集雨的增产效果明显。覆膜条件下,高氮处理(225 kg/hm²)的生物产量与籽粒产量比低氮处理(75 kg/hm²)分别增加 15.9%、22.6%;高氮高密度(280 万株/hm²)条件下,覆膜的生物产量与籽粒产量比不覆膜分别提高 39.5%、28.9%,其中,高氮低密度(230 万株/hm²)(即高氮宽垄覆膜集雨)处理的籽粒产量和生物产量最高,产量可达 7 898 kg/hm²,覆膜集雨种植可协调土壤水分和养分的关系,促进了地上部的养分携出量,有利于植株的协调生长,最终获得高产^[47]。大田试验表明,田间根域微集水与覆盖相结合技术可有效利用膜垄的集水和沟覆盖的蓄水保墒功能,改变降雨的时空分布,显著地提高降水利用率,特别是小雨的利用率,可使玉米产量比传统平作提高 44%~143%^[48]。李志军等针对陇东旱作农业区年降水量少、季节分布不均,特别是玉米生产中干旱和苗期低温等问题,从改善旱地玉米生长环境和栽培条

件、提高降水利用率入手,将小垄沟集水和覆膜增温保墒技术有机地结合在一起,进行了旱地玉米垄沟周年覆膜栽培新模式试验研究。结果使旱地玉米水热条件明显改善,增产效果显著,是陇东旱地玉米自然降水高效利用,实现高产稳产的最佳栽培方式^[49]。而且微集水种植使作物增产的幅度大小与降雨量有关^[50-54]。

近年来,农田根域微集水种植技术逐渐发展成熟,并且在我国的北方旱区逐步进行推广,特别是在一些主要粮食作物生产上取得了较大的成功。在甘肃省榆中县东部半干旱区的推广试验结果表明,旱作玉米双垄全膜覆盖集雨沟播集成技术模式可使旱地玉米平均单产比半膜覆盖增产 30.4%,增加产值 2345.4 元/hm²,小麦垄膜集雨集成技术模式可使旱作小麦的平均产量比露地常规种植增产 25.2%,增加产值 758.25 元/hm²^[55]。其中的一些研究也涉及到了非粮食作物,比如,王丽萍等采用田间试验研究了覆盖集水栽培措施对烟田土壤含水量、烤烟产量及水分利用效率的影响,其结果表明,垄下栽烟、垄上覆盖地膜、烟行覆盖秸秆与传统的垄上栽烟方式相比较,能显著增加烟株生长不同时期烟田 0~100 cm 土层土壤贮水量和各土层土壤含水量,降低烟田土壤水分蒸散量,提高烟叶产量、上等烟比例和水分利用效率,是适宜于干旱地区烤烟生产的集水覆盖栽培技术^[56]。

我们不难看出,随着科技手段的进步和耕作栽培实践的不断深入以及人们对传统耕作集水技术的不断改进和创新,根域微集水种植技术必将成为缓解旱区农作物需水与降水供需错位及生育期水分亏缺状况的有效途径。

3.2 根域微集水种植带型及集水效果研究

带型的优化设计是农田根域微集水种植技术开发和研究中所面临的首要问题,不同垄沟形式将直接影响沟中径流量和土壤水分状况。为此,胡希远^[57]、陶士珩^[58]、刘正辉^[59]等曾对其优化的方法进行过一些探索。后来,在总结前人研究结果的基础上,通过模拟试验和数学方法,在特定的气象、土壤条件下,得出了一些有关微集水种植农田蓄水、保墒效果与带型关系的经验性结论,在此基础上,提出了宁南旱农区 4 县(同心、盐池、海原、固原)春谷子微集水种植带型优化值。

较早时的研究认为,在雨水集流设计中,渗漏面与集雨面之比通常在 1:1^[60]到 1:6^[61]之间。以后研究表明,产生最佳集雨效果的渗漏面与集雨面之比与气候条件、土壤状况和作物水分需求有关^[62];Li

& Gong^[4]通过对沟垄微集水系统中沟(渗漏面)垄(集雨面)比的研究表明,在年降雨量分别为 300、400 和 500 mm 的地区,玉米和冬小麦最适合的沟垄比可能分别是 1:1, 1:2 和 1:4; 300 mm 降雨量地区,最佳的沟垄比可能是 1:3; 黄土高原适合作物生产最有效的垄尺寸为 60 cm。

近几年,在我国微集水种植技术带型的优化和集水效果一直是该研究领域的热点。王琦等于 2001~2002 年在兰州大学干旱农业生态榆中试验站,采用平均产流率法分析了不同垄型对集水面集水效率的影响,结果表明,膜垄的平均集水效率为 90.0%,土垄的平均集水效率为 16.8%;并通过对不同带型下的马铃薯产量和水分利用效率对比,进行直线回归分析,提出当沟垄比为 60 cm:40 cm 时马铃薯产量的期望值可以达到最大,在半干旱地区膜垄种植马铃薯最佳沟垄比为 60 cm:40 cm^[63,64],通过对膜垄和土垄的降雨量和径流量进行直线回归分析,提出粘土夯集雨垄临界产流降雨量为 2.83 mm,产流后的平均集水效率为 24.6%,地膜覆盖集雨垄临界产流降雨量为 0.23 mm,产流后的平均集水效率为 91.1%^[65]。而 Li 等^[66]研究表明,根域微集水种植中,覆膜垄的年平均径流效率(径流量/降雨量)为 87%,并结合数学方法,得出膜垄能产生径流的最小降雨量为 0.8 mm,不覆膜垄的年径流效率只有 7%。孙玉泉等通过设计不同垄上覆盖材料和不同垄沟比试验,发现覆膜垄沟的临界产流降雨量约为不覆膜垄沟的 1/10,覆膜垄沟与土垄的平均径流效率分别在 45%~70%与 5%~6%之间变化^[67]。丁瑞霞等在宁南旱区对不同带型(沟:垄分为 30 cm:30 cm、45 cm:45 cm、60 cm:60 cm、75 cm:75 cm)沟垄集水种植条件下谷子边际效应的研究表明,随着沟和垄的宽度变大,不同带型谷子的边行优势增强,产量边际效应指数和边际效应均增大,边行的增产作用呈上升趋势;而中行的增产作用呈下降趋势^[68]。

3.3 关于根域微集水种植影响作物生产力与降雨量关系的探索

关于根域微集水种植适宜区域的研究显示,适于雨水集流的区域标准是一个相对的概念,它与降雨特征、地表组成(下垫面状况)、缺水程度等有关,即使在干旱地区也可以发展雨水集流,该技术对于缺乏灌溉和灌溉成本高的干旱半干旱区非常适用^[8,69,70]。Pacey & Cullis^[71]指出在冬季降雨区(例如以色列 Negev 荒漠区),适合于雨水集流的最低年平均降雨量为 100 mm;在热带夏季降雨区,适合于

雨水集流的最低年平均降雨量为 150 mm。Boers 等^[72]指出,微集雨推广的地区,年降雨量应当至少在 250 mm 左右。可见年平均降雨 100 mm 地区可作为雨水集流的最低年均降雨量下限。尽管如此,从资源利用的有效性和经济的可行性角度考虑,年平均降雨量在 250 mm 以上的半干旱地区(包括半湿润易旱区),属最适宜发展集雨农业的地区^[73]。近几年,在人工模拟条件下对该问题进行了探索,得出了一些经验性的结论^[74,75],但是,微集水种植作为雨水集流的一种重要方式,关于其作物生育期雨量与生产力关系及其适宜范围的研究尚不多见。

4 存在问题

作物根域微集水种植技术作为调控旱区水分亏缺的农作物栽培模式,取决于区域自然降水量、农作物种类等。微集水的垄上集雨、沟中种植的模式对于栽培小株作物减少了播种面积,在降雨极其偏少,甚至无雨可集,投资无法回收的条件下,无法补偿由于种植面积减少引起的农作物减产;在降雨比较充沛的地区,水分亏缺不再是限制农作物生长的因子,采用微集水种植的必要性则会消失。然而,关于此种种植方式对同一年际不同降雨量地区作物生产力影响的横向比较研究却很少见,关于该种植方式影响作物生产力形成机制也没有比较系统的阐述,而此方面的研究不仅为确定合理的微集水种植模式提供一定的理论依据,而且还可为该技术的推广和应用提供重要参考。

从前面分析可以看出,国内当前的研究重点主要集中在对沟垄微集雨系统本身技术指标(比如垄的集水效率、最佳沟垄比的确定及其和覆盖措施相结合的集水节水系统等)以及对作物产量、土壤水、温、肥影响方面的研究,并取得了卓有成效的结果,但仍有很多问题亟待进一步研究:

(1) 过去对雨水集流所适宜的年降雨量范围是否也同样适合于沟垄系统种植作物,对某种具体作物而言,是否有最适宜的生育期雨量范围,这方面的研究相对较少。因此,以前所获得的结果是否具有普遍性,需进一步确证。

(2) 降雨量的多少是微集水种植技术采用与否的关键,也是不同生态类型区微集水种植模拟优化的重要决定因素,因此,不同雨量区微集水种植效果对比以及种植模式的确定,对明确该模式的推广区域具有重要的科学意义。然而,过去的研究主要侧重于一种或类似降雨量下作物增产效应的研究,得出的结果也比较单一,没有对不同雨量梯度下作物

增产效应进行比较,今后应加强不同雨量区微集水种植影响作物生产力机制方面的对比研究,为不同降雨量生态类型区微集水推广模式的优化提供理论指导。

(3) 水、肥为农作物生产的基本物质条件,对解决旱区农业生产问题来说,不能单一笼统地强调某一方面的重要性,应该考虑水肥之间的相互作用,努力实现以水促肥,以肥提水的重要目标,对于微集水种植亦是如此。然而,近年来,对于微集水种植水肥互作的研究还不多见,特别是不同雨量区根域微集水种植使作物增产的水肥耦合机制还不明确。

(4) 技术标准和操作规程是一项技术从试验走向成熟推广的技术性标志,从农田微集水种植技术提出至今,已有多年的历史,并且在北方黄土高原一些地区已经逐步推广,然而关于该种植技术的一些关键的技术指标和相应的操作规程至今也没有比较完善的表述,所以,根据现有的研究基础和成果,制定相应的操作规程和标准指导农民进行科学的农事操作,对该项技术的大面积推广意义重大,这是当前农业标准化生产和该项技术被合理使用的保证。

(5) 农田根域微集水种植技术通过农田就地集雨、半覆盖保护性耕作,以提高旱地生产力水平为主要目的,兼顾旱作节水农业的生态环境效应,抑制田间无效蒸发,以最大限度地开发利用旱区有限的自然降水,提高农田水分利用效率,有效控制水土流失,促进旱作生态型集雨节水农业的发展为主旨。因此,进行农田微集水种植模式的“集水-防蚀-抑蒸”一体化系统研究,就显得尤为重要,所以,在今后的研究中,该方面研究应予以重视,研究结果将为半干旱地区微集水种植对控制区域水土流失、环境保护提供一定的依据。

5 根域微集水种植技术发展前景展望

在我国半干旱旱作农业区,降水稀少且相对集中,0~10 mm的无、微效降雨居多,降雨年际及季节分配不均且变率较大,主要作物全生育期的农田水分满足率仅80%左右,水资源严重短缺,干旱严重,粮食生产水平低下。然而,该区有限的降水并未被农作物充分利用,目前尚有很大部分的降水潜力未能转化为现实生产力^[1]。所以,提高旱农区降水资源利用率成为该区可持续发展的关键所在。通过农田微集水种植技术,在田间构筑沟垄相间的微地形,并人工辅助以覆盖设施,将水保措施与集水技术有效结合,使降雨在农田内就地实现空间再分配,使无效或微效降雨充分有效化,最大限度地降低农田内

的蒸发面积,将有限的降水尽量保留和集中到沟内种植区,供农作物生长发育之需,可使作物供水状况得到显著改善,达到提高降水资源利用率和农田水分利用效率的目的。

自20世纪80年代以来,随着集水农业思想的确立,根域微集水种植技术在我国旱农区传统栽培耕作集水技术的基础上不断改进和完善,取得了很大的发展,显著提高了旱农区农业生产力。同时,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。农田微集水保水关键技术研究项目已列为国家“十一五”旱地农业支撑计划项目的重要内容,在宁夏、陕西、甘肃等地开展示范模式研究。并且随着研究手段的不断改进和人们认识的不断提高,旱地根域微集水种植模式必将被人们不断补充并完善,在将来会得到更深入的研究、示范并推广,为缓解我国旱区农业水分短缺问题提供重要的技术保障。在此背景下,创建适合不同生态类型区的农田根域微集水种植模式也成为现代旱地农业发展的客观要求。

总之,在我国干旱半干旱地区以降水资源化与高效利用为突破口,兼顾生态环境的保护,通过“集雨-防蚀-抑蒸”一体化微集水种植技术的研究,发展旱区节水型生态农业,是我国旱区农业生产中亟需解决的重大课题,具有重大的理论与实践价值。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,微集水种植的研究内容会不断深入,微集水种植模式也会日趋完善,根域微集水种植体系也会向更为合理的方向发展。

参考文献:

- [1] 信乃谕,王立祥.中国北方旱区农业[M].南京:江苏科学技术出版社,1998.
- [2] 程序,曾晓光,王尔大.可持续农业导论[M].北京:中国农业出版社,1997.
- [3] 山仑.山仑论文集[C].西安:陕西科学技术出版社,2003.
- [4] Li Xiaoyan, Gong Jiadong. Effects of different ridge/furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agric water Manage, 2002, 54: 243—254.
- [5] Li Fengmin, Zhao Songling, Geballe G T. Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China[J]. Agric Ecosyst Environ, 2000, 79: 129—142.
- [6] Zhang Jiyang, Sun Jingsheng, Duan Aiwen, et al. Effects of different planting patterns on water use and yield performance of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Agric water Manage, 2007, 92: 41—47.

- [7] Li Xiaoyan, Gong Jiadong, Wei Xinghu. In situ rainwater harvesting and gravel mulch combination for corn production in the dry semi-arid region of China[J]. *J Arid Environ*, 2000, 46: 371—382.
- [8] Li Xiaoyan, Gong Jiadong, Gao Qianzhao, et al. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions[J]. *Agric water Manage*, 2001, 50(3): 173—183.
- [9] Xie Zhongkui, Wang Yajun, Li Fengmin. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of northwest China[J]. *Agric water Manage*, 2005, 75: 71—83.
- [10] Tian Yuan, Su Derong, Li Fengmin, et al. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas[J]. *Field Crop Res*, 2003, 84: 385—391.
- [11] Jia Yu, Li Fengmin, Wang Xiaoling, et al. Soil water and alfalfa yields as affected by alternating ridges and furrows in rainfall harvest in a semiarid environment[J]. *Field Crop Res*, 2006, 97: 167—175.
- [12] Wiyo K A, Kasomekera Z M, Feyen J. Variability in ridge and furrow size and shape and maize population density on small subsistence farms in Malawi[J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 51: 113—119.
- [13] 哈 斯, 陈渭南. 耕作方式对土壤侵蚀的影响——以河北坝上地区为例[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1): 10—16.
- [14] 王兴祥, 张桃林, 张 斌. 红壤旱坡地农田生态系统养分循环和平衡[J]. *生态学报*, 1999, 19(3): 225—341.
- [15] 魏以昕, 吴玉福, 温重阳, 等. 陇中贫水富集抗旱高产栽培试验研究[J]. *中国水土保持*, 2000, (2): 23—25.
- [16] Li Xiaoyan, Shi Peijun, Sun Yongliang, et al. Influence of various in situ rainwater harvesting methods on soil moisture and growth of *Tamarix ramosissima* in the semiarid loess region of China[J]. *Forest ecology management*, 2006, 233: 143—148.
- [17] Gupta G N. Rainwater management for tree planting in the desert[J]. *J Arid Environ*, 1995, 31: 219—235.
- [18] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(2): 208—214.
- [19] Vashistha R N, Pandita M L, Batra R P. Water harvesting studies under rainfed condition in relation to growth and yield of okra[J]. *Haryana J Hort Sci*, 1980, 9: 188—191.
- [20] Cater D C, Miller S. Three years experience with on-farm water catchments water harvesting system in Botswana[J]. *Agric water Manage*, 1991, 19: 191—203.
- [21] 杨素哲, 陈玉民. 软管涌流灌在大田垄膜沟作物的应用试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(4): 55—57.
- [22] 韩清芳, 李向拓, 王俊鹏, 等. 微集水种植技术的农田水分调控效果模拟研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 78—82.
- [23] 山 仑, 陈培元. 旱地农业生态生理生态基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [24] 杜守宇. 春小麦垄盖膜际条播栽培研究[J]. *宁夏农林科技*, 1999, (3): 1—6.
- [25] 洪晓强. 渭北旱塬垄沟集水及增产效应试验[J]. *陕西农业科学*, 1997, (6): 24—25.
- [26] 王虎全, 韩志明. 渭北旱塬冬小麦全程地膜覆盖超高产栽培技术研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1998, 16(1): 24—30.
- [27] 中国农业工程学会农业水土工程委员会. 农业高效用水与水土环境保护[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.
- [28] 刘和斌. 旱坡地集流沟种植技术效应研究初报[J]. *甘肃农业科技*, 1998, (3): 25—26.
- [29] 贾伟珑. 旱地玉米双向覆盖技术在太原地区的增产效果与机理[J]. *华北农学报*, 1996, 11(3): 82—86.
- [30] 殷海善. 渗水地膜覆盖玉米试验研究综述[J]. *水土保持研究*, 2000, (4): 47—49.
- [31] 郑 勤. 春小麦地膜覆盖穴播抗旱丰产栽培技术[J]. *甘肃农业科技*, 1997, (11): 9.
- [32] 王天华. 半干旱雨养农业区沟穴播抗旱丰产栽培技术[J]. *甘肃农业科技*, 1997, (11): 23—24.
- [33] 田晓峰. 天水山旱地冬小麦覆膜沟穴播技术生产示范初报[J]. *甘肃农业科技*, 1998, (1): 15—17.
- [34] 梁银丽. 黄土区地面覆盖的主要类型及其保水效应[J]. *水土保持通报*, 1997, (1): 27—31.
- [35] 张保军, 郭立宏. 浅谈我国地膜小麦的理论研究与实践应用[J]. *水土保持研究*, 2000, (1): 54—58.
- [36] 廖允成, 付增光, 韩思明. 黄土高原旱作农田的降水资源高效利用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003.
- [37] 曹玉琴, 刘彦明. 旱作农田沟垄覆盖集水栽培的试验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1994, 12(1): 74—78.
- [38] 何启明. 旱作沟垄地膜覆盖农田气候工程集水率的计算及效应评价[J]. *干旱地区农业研究*, 1992, 10(4): 62—67.
- [39] 王立祥. 论宁南旱区农业技术[J]. *干旱地区农业研究*, 1995, 13(4): 1—6.
- [40] 贾志宽, 王龙昌, 韩清芳, 等. 宁南半干旱旱区农业综合发展研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(4): 1—5.
- [41] 胡希远, 陶士珩, 王立祥. 半干旱旱区糜子沟垄径流栽培研究初报[J]. *干旱地区农业研究*, 1997, 15(1): 44—49.
- [42] 王俊鹏, 韩清芳, 王龙昌, 等. 宁南半干旱区农田微集水种植技术效果研究[J]. *西北农业大学学报*, 2000, 28(4): 16—20.
- [43] 王俊鹏, 马 林, 蒋 骏, 等. 宁南半干旱区农田微集水种植技术研究[J]. *西北农业大学学报*, 1999, 27(3): 22—26.
- [44] 李 军, 王龙昌, 孙小文, 等. 宁南半干旱旱区农田沟垄径流集蓄保墒效果与增产效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1997, 17.
- [45] 朱国庆, 史学贵, 李巧珍. 定西半干旱地区春小麦农田微集水种植技术研究[J]. *中国农业气象*, 2001, 22(3): 6—9.
- [46] 慕 松, 刘秉义, 方海军, 等. 旱地玉米覆膜沟穴播集雨增产技术试验结果[J]. *甘肃农业科技*, 2000, (9): 20—22.
- [47] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 覆膜集雨栽培对冬小麦产量及养分吸收的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(2): 108—111.
- [48] 李小雁, 张瑞玲. 旱作农田沟垄微型集雨结合覆盖玉米种植试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 45—52.
- [49] 李志军, 赵爱萍, 丁晖兵, 等. 旱地玉米垄沟周年覆膜栽培增产效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 12—17.
- [50] 任小龙, 贾志宽, 韩清芳, 等. 在半干旱区模拟降雨条件下沟垄集雨种植对玉米生长发育的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(12): 94—99.
- [51] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟降雨量下沟垄微型集雨种植对玉米根系生长及土壤速效养分的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(10): 45—50.
- [52] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟降雨量下沟垄微型集雨种植

- 玉米的水温效应[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 70—77.
- [53] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟不同降雨量条件下沟垄集雨种植对春玉米生产力的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1006—1015.
- [54] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟降雨条件下沟垄集水种植对玉米光合生理生态特性的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 838—845.
- [55] 牛建彪. 半干旱区小麦玉米雨水高效利用技术模式[J]. 甘肃农业科技, 2005, (5): 22—23.
- [56] 王丽萍, 汪耀富, 王伯武, 等. 覆盖集水措施对烟田土壤水分时空分布和利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 117—119.
- [57] 胡希远. 宁南旱平地沟垄径流种植技术研究[D]. 杨凌: 西北农业大学, 1997.
- [58] 陶士琦. 径流农业主要类型农田水分机理及生产力的研究[D]. 杨凌: 西北农业大学, 1998.
- [59] 刘正辉. 半干旱区农田微集水种植带型优化设计研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- [60] Luebs R E, Laag A E. Water harvesting for barley in a 30 cm winter rainfall area[R]. Water Harvesting Symp. Phoenix, AZ, ARSW - 22. USDA. 1975: 284—291.
- [61] Rawitz E, Hillel D. Water harvesting by runoff inducement for irrigation of an almond orchard in a semi-arid climate[R]. Water Harvesting Symp. Phoenix, AZ, ARSW - 22, USAD. 1975: 223—232.
- [62] Sharma K D. Runoff behavior of water harvesting micro catchments[J]. Agric Water Manage, 1986, 11: 137—144.
- [63] 王 琦, 张恩和, 李凤民. 半干旱地区膜垄和土垄的集雨效率和不同集雨时期土壤水分比较[J]. 生态学报, 2004, (8): 1820—1823.
- [64] 王 琦, 张恩和, 李凤民, 等. 半干旱地区沟垄微型集雨种植马铃薯最优沟垄比的确定[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 38—41.
- [65] 王 琦, 张恩和, 李凤民, 等. 半干旱黄土高原沟垄微型集雨产流特征与马铃薯种植技术[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1283—1286.
- [66] 李小雁, 张瑞玲. 旱作农田沟垄微型集雨结合覆盖玉米种植试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 45—52.
- [67] 孙玉泉, 田 媛, 苏德荣. 地面不同垄沟形式对径流调控机制的研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 911—915.
- [68] 丁瑞霞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 宁南旱区微集水种植条件下谷子边际效应和生理特性的响应[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 494—501.
- [69] Li Xiaoyan, Gao Qianzhao. Experimental study on rainfall harvesting and micro-catchment model for ecosystem rehabilitation in the transitional zone between arid and semiarid regions[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2004, 21(2): 282—287.
- [70] Tian Yuan, Derong S, Li Fengmin, et al. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas[J]. Field Crop Res, 2003, 84: 385—391.
- [71] Pacey A, Cullis A. Rainwater harvesting: the collection of rainfall and runoff in rural areas[R]. London: IT publication, UK, 1986.
- [72] Boers T M, De G M, Feddes R A, et al. A linear regression model combined with a soil water balance model to design micro-catchments for water harvesting in arid zones[J]. Agric Water Manage, 1986, 11: 187—206.
- [73] 李锋瑞. 干旱农业生态系统研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
- [74] Ren Xiaolong, Jia Zhikuan, Chen Xiaoli, et al. Effects of a rainwater-harvesting furrow/ridge system on spring corn productivity under simulated rainfalls[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1006—1015.
- [75] Ren Xiaolong, Jia Zhikuan, Chen Xiaoli. Effects of furrow/ridge system for rainwater concentration on corn productivity at different simulated rainfalls under field conditions in semi-arid region of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(12): 1293—1302.

Progress and prospect of research on root-zone water micro-collecting farming for crop in arid region of China

REN Xiao-long, JIA Zhi-kuan*, DING Rui-xia, HAN Qing-fang

(Research Center of Dryland Farming in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University,

Key Laboratory of Crop Production and Ecology in Dryland, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A comprehensive overview is made on the yield-increasing mechanism and effect of crop root-zone water micro-collecting farming in arid regions of China. Based on existing research, there still existed a number of issues in the current root-zone water micro-collecting farming technology research so the studies on improving and strengthening the technology's impact on crop productivity and water and fertilizer coupling mechanism were put forward. Moreover, we should make a scientific evaluation on the effect of application and water and soil conservation of root-zone water micro-collecting farming under different rainfall. And it is important to further standardize the related technical standards and procedures of root-zone water micro-collecting farming. On the basis of further experimental study and extensive demonstration, we concluded that the technology would be very widely used in arid areas, which would be an important way of improving resource efficiency for precipitation and increasing crop yield in arid areas.

Keywords: root-zone water micro-collecting farming; reasearch status; developing prospects; dryland farming region