

旱地农业中有限水高效利用的研究

山 仑

中国科学院
(水土保持研究所·陕西杨陵·712100)
水利部

摘 要 充分提高农田降水利用效率是旱地农业中有限水高效利用的基础。本文阐述了农田水分利用效率的概念及组分,根据实验结果,就宁南山区综合提高水分利用和生产力的技术途径进行了分析,认为采取宏观管理与微观调控相结合,传统技术与现代技术相结合的思路 and 做法,有可能大幅度提高该地区的粮食产量,实现有限水高效利用的目标。

关键词 旱地农业 高效利用 技术途径

The Study on High Efficient Utilization of Limited Water in Dry Land

Shan Lun

(Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences
and Ministry of Water Resources. Yangling. Shaanxi. 712100)

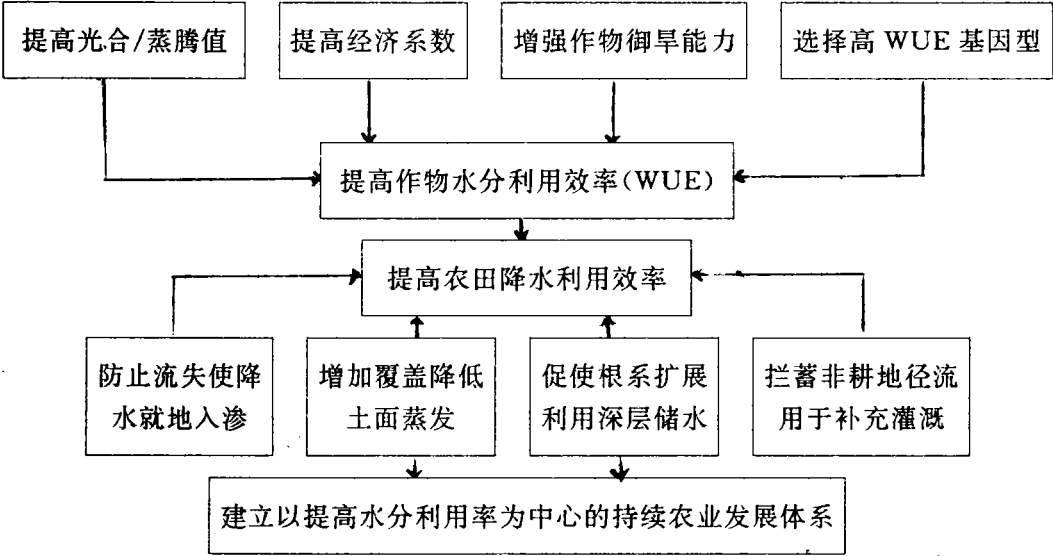
Abstract Fully raising rainfall use efficiency of farm—land is the basis of high efficient utilization to limited water in dry—land farming. The definition and component of rainfall use efficiency of farm—land were discussed in this paper. Based on the experimental result, comprehensive technical approaches to raise water use efficiency and productivity were analysed in south Ningxia hilly area. It was concluded that it is possible to raise largely crop yield and to realize the objective of high efficient utilization of limited water by using the strategy combined macromanagement with micro—adjustment and integrated traditional technique with new method.

Key word dry—land farming high efficient utilization comprehensive technical approaches

水分不足是限制半干旱地区农田生产力的主要因子,但在多数情况下有限降水并未得到充分有效的利用。我们已有的研究表明:在一般年份,黄土丘陵区旱地粮食产量低下(平均每公顷产900kg左右)的主要原因不是降水不足,而是对降水未能加以充分利用,这主要是由于水土流失(坡耕地年径流量20~60mm),土面强烈蒸发(夏闲期间降水量的50%~70%被蒸发掉),对土壤深层储水利用不足(仅利用到2m土层储水量的50%左右,剩余有效水量100~150mm),以及单位水量生产效能(作物水分利用效率, WUE)过低[一般为 $3.75 \sim 5.25 \text{ kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$]等原因所造成的。为此,必须采取综合技术全面解决上述四个方面的问题,以使有限降水得以高效的利用,从而为实现本地区粮食稳定自给和农业生产的持续发展提供依据。

为实现有限水高效利用的目标,从科学技术上要解决的主要问题是:如何最大限度地提高农田的水分利用效率。近年来,“水分利用效率”研究已成为国内外半干旱和半湿润地区农业和生物学研究的一个热点,但由于学科角度不同以及概念本身的多层次,致使这一研究的内涵不够清晰,且多半停留在一般性的分析和应用上,如国内多将“水分利用效率”作为农业生产合理性的一个指标简单加以运用,基础性研究不够,综合性研究尤为薄弱。根据我们的认识,水分利用效率研究属于从基础到应用的一个重要中间环节,通过对它的深入系统研究,有利于解决农业研究工作中长期存在的基础性工作与实际应用的衔接问题。水分利用效率研究包括了群体、个体、单叶、细胞等不同层次,以及自然降水,灌溉水,作物用水等不同范畴,而提高农田降水利用效率的研究带有综合性,在某种意义上是对上述层次和范畴的概括。

大家已经认识,肥料和品种对提高当前旱地农业生产起了关键作用,但要进一步增加单产,综合提高农田水分利用效率则成为一种必然的研究趋势。我们认为,提高农田水分利用效率的研究目标,应当是最大限度地提高下述比率,即:土壤储水/降水量,耗水量(ET)/土壤储水量,蒸腾量/蒸发量,经济产量/生物学产量。这一研究的全貌可用下面的框图示意:



据此总体构思,设计了本项试验,主要研究:采取强化降水就地入渗,有效防止土面蒸发,充分利用土壤储水和提高作物自身水分利用效率的单项技术和综合措施所能达到的对降水利用的程度和产量提高的程度,并探求提高农田降水利用效率的新途径。通过研究力求从基础与应用相结合上阐明问题,并预期实现以下目标:

1、明确宁南山区降水利用效率的现状 & 未来可能达到的高限,建立提高农田降水利用率的优化模式和技术体系。

2、提出提高降水利用率和作物水分利用效率(WUE)的生理生态依据。试验的基本设计方法:采取田间、控制条件和实验室研究相结合的技术路线。①单项研究:研究各单项技术对提高农田水分利用率和作物产量的作用及依据。②综合试验:进行多因素多水平的田间试验和室内分析,以求得各因素的交互作用及综合效益。③大田示范:根据单项和综合试验的结果建立一定面积的示范田进行实际验证。

本文主要是根据 1990~1993 年的试验结果编写的研究进展概况。

1 研究结果

1.1 耗水量(ET)、水分利用效率(WUE)、产量之间的关系

研究具体条件下三者之间的关系是采取适宜技术途径改善有限降水资源利用的基础。田间研究表明,在宁南半干旱气候下 ET 和产量之间呈线性关系: $Y = 117.47 + 1.33 X$ (台塬地), $Y = -51.07 + 0.63 X$ (山地)。研究还证实, WUE 高值一般不是在供水充足产量最高时获得,而 ET 的增加又往往引起 WUE 下降。又据盆栽试验结果:在渐进干旱过程中,轻度到中度干旱期间,春小麦单叶 WUE 较充足供水时增大,直到较严重干旱时才明显降低。对抗旱性强的谷子, WUE 在中等水分条件下比充足供水时高出 39%~73%。据此认为,高 WUE 虽是旱地和节水农业力求实现的目标,但在半干旱的黄土丘陵区,为使产量增加,一般应通过同时提高 ET 和 WUE 两个途径,而不单纯追求 WUE 提高。当然,ET 的增加应力求在增大蒸腾与蒸发比率的前提下实现。

1.2 无机营养对提高水分利用效率的作用

无机营养具有提高 WUE 和 ET 的双重作用,早在 1981~1983 年,利用多种作物在宁南山区所进行的系统田间试验表明:低肥力条件下,每增加 1mm 耗水生产粮食 0.32kg,而在高肥力条件下则可生产 0.66kg,与此同时,高肥农田耗水量也增加了,但低于 WUE 增加的比率。随后进行的 6 次田间试验和 4 次盆栽试验都取得了类似结果:在宁南丘陵区田间条件下,高肥处理与低肥处理相比, WUE 的提高范围为 35%~75%,而 ET 仅增加了 0%~17%。1990~1992 年以春小麦为材料进行的盆栽试验表明:在同样供水条件下的 WUE(g 籽粒/kg 水),高肥为 0.642,中肥为 0.482,低肥为 0.280。又据 1992 年田间试验,对产量(Y),施氮水平(X_1)和灌水水平(X_2)进行的二次曲线模拟结果: $Y = 92.21 + 17.16 X_1 - 0.60 X_1^2 + 1.13 X_2 - 0.002 X_2^2 + 0.008 X_1 \cdot X_2$,进一步说明在限量供水下增施肥料的重要性。

研究还表明,无机营养改善 WUE 的直接原因是:(1)营养对光合速率的促进远大于水分散失的增加,因而使蒸腾效率提高,即增大了单叶 WUE;(2)增加了叶面积系数,降低了蒸发/蒸腾比,使水分得到有效利用。关于无机营养对作物抗旱性的影响问题,通过多次试验证实,氮磷营养对小麦不同器官,不同生理功能并不都具有一致的作用。旱地施用氮肥利于吸收水分,维持较高的 WUE 和正常生理功能,但对于作物的生理耐旱性并没有产生显著的影响;增施磷肥则同时提高了作物的御旱性和耐旱性。

1.3 不同轮作制度下的农田水分平衡

调整作物布局和实行合理轮作是调节作物水分需求关系,提高区域水分利用效率以减轻干旱危害的一种重要手段,勿需大量投资便可以在较大范围内起到作用。通过 1985~1990 年系统田间试验取得如下主要结果:

1.3.1 主要作物的 ET 和 WUE 宁南山区当前主要作物平均 ET 依次为:豌豆 196mm,糜子 286mm,小麦 290mm,谷子 314mm,苜蓿 379mm; WUE[籽粒 kg/(mm·hm²)]依次为:小麦 4.80,糜子 5.1,谷子 5.25,豌豆 5.70。总的看,ET 和 WUE 均较低。

1.3.2 粮豆轮作的优越性 与小麦连作和其他轮作比较,粮豆轮作的产量较高,具有较强的调节土壤水分的能力,适应于本地区降水不均的气候条件,在粮豆轮作制中,由于豌豆耗水量低且有一定的固氮能力,因而为后作春小麦创造了良好的生长条件。从水分平衡看,粮豆轮作收获期 2m 土层内平均剩余水量为 292.9mm(合有效水量 152.3mm),作物水分利用效率为

5.10kg/(mm·hm²),而小麦连作则分别为260mm和4.65。根据另一9年轮作试验结果,粮豆4年轮作平均每公顷产1905kg,比小麦连作1530kg高出25.1%。

1.3.3 草粮轮作是可行的 苜蓿生育期耗水量显著高于粮食作物,6年平均379mm,不同生长年的变化范围为328~414mm,其生物量平均为5640kg/hm²(风干重,年变幅度4440~690kg/hm²)比粮食作物平均3870kg/hm²,高出45.7%。从水分平衡角度看,本地区能否大面积推行草粮轮作还存在不同看法。我们试验结果表明:苜蓿的耗水量虽然高,但经过雨季补偿,秋季刈割时2m土层平均土壤储水量仍可达280mm,来年播种谷子时为300mm,较粮豆轮作低52.8mm,第二年播种春小麦时可恢复到323mm,已接近正常。随种植年限的加长,苜蓿的主要吸水层逐渐下移,故土壤上层水分可逐渐得到恢复,当生长到5~6年时,4~5m的土壤含水量已达到凋萎湿度(6%),而0~1m土层的含水量刈割期较返青增加了36mm,平均达到占干土重的14%~15%,耕层则达到了16%~17%。苜蓿耕翻后已可以种植抗旱较强的谷类作物,故认为,苜蓿与粮食作物实行轮作是可行的,拟作为农田轮作制的一个组成部分加以提倡,但这种轮作方式不宜固定在同一地块上周而复始进行,为使土壤深层水分得以逐渐恢复,应在较大范围内与粮豆轮作制交替进行。

1.3.4 扩种绿肥,培肥土壤,有效利用秋季降水 据试验,本地区春播谷类作物收获后夏闲期间土壤物理蒸发强烈,蒸发量达105.3~160.5mm,占到全年降水量的26.7%~40.7%,同期降水量的52.1%~71.2%。如何降低土壤水的无效消耗?除了采取耕作,覆盖措施外,种植夏季绿肥也是一个有效的途径。据1989~1991年在降水量500mm左右,年平均气温7℃以上的彭阳县洞子硷村试验结果,麦收后种植绿肥箭舌豌豆可以有效地利用秋季充沛的降水,减少土面蒸发和水土流失。种植绿肥后土壤含水量虽较休闲地有所降低,但消耗的水分主要用于了绿肥的物质生产,而绿肥地后作的增产幅度也相当可观:绿肥后作谷子单产3180kg/hm²,较对照增产16%;后作胡麻单产2385kg/hm²,较对照增产21%。绿肥每公顷产鲜草8250~9000kg,刈割后一部分翻压培肥,一部分青贮发展畜牧业。另外种植绿肥后土壤全氮和速效磷含量也有了提高。

1.4 有限灌溉的效果及依据

充分利用降水和高效率利用有限灌溉水相结合是当前半干旱地区农业增产的一条新途径,也是旱农科研的一个趋向。以春小麦为主要试验材料,采用盆栽、防雨棚和现场田间试验相结合的方法,取得了以下研究结果:

1.4.1 限量供水的生理效应 春小麦拔节期供水30~60mm能明显改善其水分状况:提高叶水势并减少其剧变过程,维持较高的气孔开度、增大叶片蒸腾速率,提高单叶净光合速率及光合/蒸腾值,并在较长时间内保持较强的渗透调节能力。

1.4.2 限量供水对作物水分利用的影响 限量供水条件下春小麦产量与耗水量(ET)之间呈显著线性关系: $Y = 40.054 + 1.069X$,而水分利用效率(WUE)与ET之间呈双曲线关系: $WUE = 1.069 + 40.054/(ET)$ 。拔节期灌水处理根系下扎较不灌水的加深20cm以上,对土壤储水利用较对照增加了30.8%,较其它灌水处理增加了13%~48%,起到了“以水调水”的作用。

1.4.3 限量供水的增产作用明显 控制条件下试验表明:拔节期一次补充灌水30mm,较对照增产47%,较孕穗期同量水处理增产27.7%,是各生育期同样灌水量条件下增产节水效果最好的。1991~1992年宁夏固原大田现场试验表明:小麦拔节期灌水40m³(60mm),单产达3795~3960kg,较对照增产42%~48.8%,为充分灌溉处理(168m³)的70%左右,相当于1m³水增产粮食1.5kg左右。

1.5 钙—赤(Ca—GA)合剂处理种子抗旱节水效应及依据

这项技术是在多年试验基础上逐渐形成的。1986年我们在进行化学药物对逆境成苗作用的试验中曾发现,用 CaCl_2 和 GA_3 浸种对于干旱条件下成苗均有促进作用,但作用机理似有不同。据此,于1987年开始,采用两者的混合液处理小麦等作物的种子,结果证明:不仅能促进干旱环境下的成苗,而且具有提高叶片光合/蒸腾比及植株群体WUE的作用,并最终使产量增加8%~15%,效果优于 CaCl_2 或GA单独处理,现这一方法已在宁夏南部山区累计示范推广约6700万 hm^2 。经进一步研究发现,在水分条件较好时,Ca对出苗和生长的抑制作用,可因GA的调节而消除;干旱时,Ca对原生质的保护作用则有利于GA发挥其促进生长和代谢的功能。因此,Ca—GA合剂具有互补效应,可在较大水分变动范围内起作用。测定表明:Ca增大了GA诱导淀粉酶活力的效果,使Ca—GA处理的淀粉酶活力高于单独GA处理。在干旱条件下,植株保水力、膜透性、脯氨酸含量以及根系活力等测定结果也都表明Ca—GA混合处理具有良好效果。

1.6 提高农田降水利用效率的综合技术途径

基于强化降水就地入渗,有效防止土面蒸发,充分利用土壤储水和提高作物自身水分利用率等四个相互联系的环节,采用多因素(化肥、有机肥、耕深、耕作法、覆盖等)二水平(普通水平和优化水平)正交设计方法,于1990~1993年分别在上黄(春小麦)、洞子硷(谷子和冬麦)和定西水土保持站(春小麦)进行了田间试验。从9年的资料中初步看出:

1.6.1 谷子 1990年(丰水年、年降水量558mm)五因素交互作用最高单产5070 kg/hm^2 ,水分利用效率9.3 $\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$,土壤储水利用率为67%,较对照增产40%。1991年(干旱年、年降水量336mm)最高单产2190 kg/hm^2 ,水分利用效率达12.15,较对照增产54%。在五因素中,化肥、沟垄种植、深耕增产效果明显,分别达到了1%或5%显著点。

1.6.2 冬小麦 1991年试验结果表明,化肥、有机肥、耕深三因素组合产量最高,每公顷产2490 kg ,水分利用效率为11.10,土壤储水利用率56%,较对照增产一倍以上。化肥作用达1%显著点。在干旱年份,有机肥效果显著。

1.6.3 春小麦 1990年多因素组合最高单产2400 kg/hm^2 ,水分利用效率7.65,对土壤储水利用率为57%,施肥增产效果显著,施肥与品种连应效果达5%显著水平。1991年最高单产2805 kg/hm^2 ,水分利用效率9.75,土壤储水利用率59%,在各因素中,化肥与覆盖作用较为显著。

另外,于1988~1990年进行了春小麦产量与耕作、施肥相关性的研究,从三年平均看,按浅耕少肥、深耕少肥、浅耕多肥、深耕多肥的顺序,其单产分别为1048.5,1125.0,1459.5和1621.5 kg/hm^2 ,水分利用效率分别为4.20,4.65,5.70,21.30 $\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$,耗水量仅变化于245~255mm之间,差异很小。这一结果说明,肥料的作用是主要的,耕作的作用是次要的,两者结合可以取得更好的结果;水分利用状况看,无论是耗水量还是水分利用效率,都还存在着较大潜力,需要采取综合技术加以挖掘。

综上所述,不同技术措施在旱地春小麦增产和水分利用中的作用有很大不同,其中以化肥的作用最为显著,在从低产变中产的过程中化肥的作用可达到50%左右。

1.7 大田综合应用效果

上述各项试验结果已在宁夏彭阳县洞子硷试区(总耕地面积112 hm^2)得到一定程度的综合应用。在1986~1989年工作的基础上,该试区以节水增产为中心继续推行各项行之有效的技术措施。1990~1991年,试区粮食作物占总耕地面积的65%,油料占10%,人工草地占25%。粮田每年深翻碾压面积达43.3 hm^2 ;化肥投入量4000 kg ,每公顷平均79.5 kg ;豆类种植面积9.

7hm²,占粮田面积的20%,夏种绿肥面积21.3hm²;保水耕作面积30hm²,钙赤合剂面积40hm²,秋粮面积已扩大到16.7hm²,占粮田面积的34%。通过各项技术的贯彻实施,1990年降水量558mm,示范区粮食总产达17.9万kg,平均每公顷产2925kg,较1989年增产17.4%,较1985年增产2.9倍。按当年降水量计算,1mm降水生产粮食0.35kg,较1985年的0.10kg,较1986~1989年四年平均的0.30kg,均显著提高了对降水的利用。1991年降水量336mm,使夏秋作物遭受干旱危害,但41.7hm²冬小麦平均每公顷产仍达到2814kg,较临村地显著增产。秋作物受旱更为严重,平均每公顷产2745kg。1991年夏秋粮田共49.7hm²,平均每公顷产2925kg,与1990年持平。按当年降水量计算,每毫米降水生产粮食达0.58kg。1990~1991两年平均,每毫米降水生产粮食0.46kg,较前四年平均提高了53.3%,较开始试验的1985年提高了一倍以上。

2 研究结果的意义和应用前景

(1) 关于ET-WUE-产量之间的关系。文献中已有较多的报导,但一般强调提高WUE的重要性,我们针对宁南山区具体情况,通过研究明确指出,在当前生产水平下,为使旱地产量增加一倍左右(从100~200kg左右)应通过同时提高ET和WUE两个途径,而不单纯追求WUE的提高,并作出判断:ET从目前平均值280mm增加到320mm为宜。这一认识对于半干旱黄土丘陵区的农业发展具有一定的指导作用。

(2) 无机营养对作物水分利用和抗旱性的影响已有较多研究,并已肯定施肥是一项重要的旱农增产措施,但缺乏数量关系及作用机理方面的阐述。我们研究证实,旱地施肥的良好作用主要在于提高单叶WUE和群体蒸腾蒸发比的基础上增加了对水的有效利用,而对于作物本身抗旱性并未产生显著影响。另外明确了施肥与WUE和ET变化的一般数量关系,肯定了旱地合理施肥是一项可同时提高WUE和ET(主要指蒸腾部分)的有效措施。

(3) 从水分平衡角度研究了宁南山区的轮作制,明确了主要粮食作物的耗水量与水分利用效率的差别,特别是肯定了苜蓿与粮食作物实行轮作的可行性,以及粮豆轮作的优越性,指出调整作物布局,实行合理轮作是提高区域水分利用率的一种重要手段。

(4) 肯定了干旱缺水条件下拔节期一次供水60mm对春小麦的良好作用,同时发现:春小麦的缺水临界期和供水最佳期并非同一个发育时期,在其水分供需方面存在错位现象。以往研究虽已确定小麦孕穗期对干旱最为敏感,此期缺水产量下降最大,但却往往将缺水减产和供水增产作为同一概念加以理解。我们研究证实,在限量供水条件下在春小麦最佳供水时期为拔节初期(小穗原基分化期),并非孕穗后期(四分体形成期),这是对小麦水分关系已有研究的一个重要补充,为缺水地区发展限量(亏缺)灌溉农业提供了理论依据。

(5) 钙-赤合剂系首次提出的一项应用于节水增产的新配方,被列为全国52项先进适用的农业节水技术之一。专家评审认为:是一项成功的创新。示范推广后成效明显,其作用机理已初步得到阐明。应用这一化学制剂处理种子成本低,可促使种苗适应多变的干旱逆境条件,在半干旱地区农业增产中很有应用前途。

(6) 初步的田间试验表明,化肥、有机肥、深耕、沟垄种植、覆盖等项技术的组合应用,可使宁南地区旱地农田水分利用和生产力达到较高水平(春小麦每公顷产2700kg左右,WUE9.75;冬小麦每公顷产3750kg,WUE11.1),但随气候及其他条件的变化,各项技术措施的效应尚不够稳定,如要阐明其作用条件,并作出定量评价,需继续进行研究。

(7) 黄土丘陵半干旱区提高降水利用效率的综合技术途径及依据研究,是一个新的研究方

(下转第21页)

过年,养鸡下蛋换点盐”的传统落后的小农经济模式,树立“养畜为赚钱”的市场经济观念,发展适度规模的养殖专业户和重点户,大力推广氨化、青贮饲料和快速育肥技术,提高畜牧业的经济比重。林果业是集约化程度较高的产业。根据目前的经营管理水平,不宜发展过快过大,每户 0.2hm²~0.3hm² 即可,关键是加强管理,集中投入,达到早实丰产高效,逐步形成优势产业。工副业的发展关键在技术,其次是资金,这对远离中心城市和经济比较发达地区的内地山区来说,确实困难重重,还需探索和积累经验。有富裕劳动力的农户可通过劳务输出,外出学技术和积累资金,引进项目,闯出一条宁南山区发展工副业和村办企业的新路子。

参考文献

1 王先进. 涉及民族生存的大问题. 土地资源形势严峻. 中国科学报,1994. 9. 19
2 巨仁,陈国良. 固原上黄试验区农林牧最佳生态经济结构与设计方法. 中国科学院、水利部西北水土保持研究所集刊,1990, No. 11
3 宋桂琴,李领涛. 上黄村土地分类. 固原黄土丘陵区水土保持与农林牧优化结构试验专题研究报告集,1990
4 贾恒义等. 上黄试验区土地类型的土壤组合与不同利用方式的土地养分变化. 中国科学院、水利部西北水土保持研究所集刊,1990. No. 11
5 李壁成. 小流域水土流失与综合治理遥感监测. 科学出版社,1990

(上接第 13 页)

向,本课题作了初步探索。上述列举的研究结果表明,采取宏观管理与微观调控相结合,传统技术与新技术相结合的思路和做法,有可能大量节约农业用水,实现半干旱地区有限水高效利用的目标。

防止水土流失和充分利用降水是黄土高原综合治理的基础,也是水土保持科学研究的全面含义。本项目侧重于后一方面的研究。我们希望,在此基础上与防止水土流失方面的研究紧密结合,通过“水的充分保持与有效利用”这一结合点,共同努力解决本地区的这一重大科技难题,以期最终实现发展经济和根治黄河的战略目标。

参加本项研究人员: 刘忠民、邓西平、孙纪斌、张岁岐、郭礼坤、徐萌、黄占斌等。