

集雨农业雨水利用转化效率及其提高途径分析

张建新¹, 郑大玮², 李 芬¹, 段 玉³

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094;
3. 内蒙古农牧业科学院, 呼和浩特 010030.)

摘 要: 集雨农业是指收集、存储雨水径流并将其作为农村家庭人畜饮用水、环境卫生用水和农业补充灌溉用水的农业生产活动, 包括收集、存储、输送、利用等多个过程, 但目前各地的集雨农业技术研究多注重单项技术研究, 而没有把它们当作一个整体来进行研究, 导致许多地方出现收集与存储、收集与利用、存储与输送、存储与利用等脱节的现象, 使各个环节的雨水利用转化效率普遍偏低。本文首先比较系统完整地提出了集雨农业雨水利用转化效率的概念, 将集雨农业的雨水收集、雨水存储、雨水输送和雨水利用等各个过程看作一个整体进行研究分析, 然后结合有关试验资料提出了提高集雨农业雨水利用转化效率的途径。

关键词: 集雨农业; 雨水利用转化效率; 提高途径

中图分类号: S 273.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)03-0198-07

集雨农业是指收集、存储雨水径流并将其作为农村家庭人畜饮用水、环境卫生用水和农业补充灌溉用水的农业生产活动, 在世界范围内已有几千年的历史^{1~4}。近几十年来, 特别是 20 世纪 70 年代以来, 随着世界人口的不断增加和大范围干旱灾害的频繁发生, 人类对水的需求量的增大和水资源紧缺的矛盾日益突出, 使得世界上许多国家对集雨农业这项古老的技术越来越重视, 试验研究大量增加, 研究内容涉及集雨面处理、集雨系统设计、集雨模型和收集雨水的高效利用等⁵。到 2005 年, 国际上共召开了 12 届雨水集流系统会议, 收集的雨水已成为许多国家农业、畜牧、家庭用水等的主要补充来源。

集雨农业是一项复杂的系统工程, 包括收集、存储、输送、利用等多个环节, 但目前各地的集雨农业技术研究多注重单项技术研究, 如雨水汇集技术、雨水存储技术、雨水净化技术、雨水利用技术等, 而没有把它们当作一个整体来进行研究, 对这些技术的集成研究很不够, 导致许多地方出现收集与存储、收集与利用、存储与输送、存储与利用等脱节的现象, 使各个环节的雨水转化效率普遍偏低。本文将比较系统地提出集雨农业雨水利用转化效率的概念, 并利用设在内蒙古自治区准格尔旗的水利部集雨节水灌溉试验站的试验资料来分析提高集雨农业雨水利用转化效率的途径。

1 集雨农业雨水利用转化效率的概念

1.1 几个相近的概念

1.1.1 植物水分利用效率 植物水分利用效率 (Water Use Efficiency, 简称 WUE) 指植物消耗单位水分所生产的同化物质的量, 是评价植物对水分环境适应能力的综合生理生态指标。不同植物种间的 WUE 有较大的差异, 同一植物的不同品种 WUE 也有明显的区别, 同一品种的不同发育期和一天内不同时段 WUE 也有不同。此外, 外界因素如光照、温度、水分及土壤性状等对 WUE 也有影响。WUE 可分为三个层次: 对植物叶片来说, $WUE = \text{光合速率} / \text{蒸腾速率}$; 对植物个体, $WUE = \text{干物质量} / \text{蒸腾量}$; 对植物群体来说, $WUE = \text{干物质量} / (\text{蒸腾量} + \text{蒸发量})$ ^[6,7]。

1.1.2 作物雨水利用效率 作物产量可以表示为作物品种、土地状况、土壤条件、降水量和其它气象因素等的函数, 所谓作物雨水利用效率 (Rain water Use Efficiency, 简称 RUE) 是指作物产量与生长季降水量的比值, 即 $RUE = \text{作物产量} / \text{降水量}$ 。

当生长季降水量一定时, 旱作产量随作物品种、土地状况、土壤条件和降水量的时间分布等因子的变化而变化, RUE 亦随之而变。提高 RUE 的途径主要有: ①改良作物品种以提高抗旱能力; ②调整种植业结构以充分利用气候资源; ③改善土壤耕作制

收稿日期: 2007-10-15

基金项目: 国家“十五”重大科技专项“现代节水农业技术体系与新产品研究与开发”专题“北方半干旱集雨补灌旱作区(内蒙古准格尔旗)节水农业综合技术集成与示范”(2002AA24221)

作者简介: 张建新(1963-), 男, 山西太原人, 博士, 高级工程师, 主要从事旱作农业与应用气象方面的研究。E-mail: Zhangjianxin@yahoo.com

度;④合理施肥,以肥调水^{8,9}。

1.2 集雨农业的雨水利用转化效率

集雨农业有两种主要类型:一种是修建专用集雨面或利用天然集雨面收集雨水并将其蓄存于水窖、旱井等储水设施中,然后应用于农业补充灌溉和农民日常生活中,可称为集雨面工程集雨农业;另一种是通过修筑水平梯田、隔坡梯田、鱼鳞坑、水平沟等水保工程拦蓄径流或采用带状间作、等高种植、沟垄种植、蓄水聚肥耕作等技术使降雨就地入渗,可称为农田就地集雨农业。对第一种类型,由于雨水经过集流、存储、输送到达田间、土壤和被作物吸收,经历了一系列过程,包括收集过程(降水—径流)、储蓄过程(径流—储水设施)、输水过程(储水设施—田间)、灌溉过程(田间—土壤)、作物水分生理过程(土壤—作物)和效益产出过程(作物—产量或其价值),发生了不同状态的转化,相应地集雨农业的雨水利用转化效率就定义为上述各个过程之间雨水的利用或转化效率之积,即集雨农业的雨水利用转化效率=雨水收集效率×雨水存储效率×蓄水有效利用率×农田水分利用率×作物水分利用效率×作物经济转化效率;对第二种类型,则相对简单一些,主要是提高农田的雨水保存率。提高集雨农业的雨水利用转化效率就是要在上述各个过程中,提高各种状态水转化的效率,转化效率可概化为过程末产出与过程初投入之比。

1.2.1 雨水收集效率

$$K_1 = H/R_1 \quad (1)$$

式中, K_1 为雨水收集效率; H 为集雨面上的有效收集雨水量; R_1 为集雨面总降水量。

1.2.2 雨水存储效率

$$K_2 = S/H \quad (2)$$

式中, K_2 为雨水存储效率; S 为水窖或旱井有效存储水量。

1.2.3 蓄水有效利用率

$$K_3 = I/S \quad (3)$$

式中, K_3 为蓄水有效利用率; I 为人畜饮用或作物灌溉水量。

1.2.4 农田水分利用率

$$K_4 = U/(I + R_2) \quad (4)$$

式中, K_4 为农田水分利用率; R_2 为农田接受的自然降水量; $(I + R_2)$ 为农田实际利用水量; U 为渗入并保持在土壤中的水量; $(I + R_2) - U$ 为田间径流和蒸发损失。对于第二种类型的集雨农业,由于没有 I ,所以 $K_4 = U/R_2$,称为农田雨水保存率。

1.2.5 作物水分利用效率

$$K_5 = Y/U \quad (5)$$

式中, K_5 为作物水分利用效率; Y 为作物产量。 U 只有很小部分转化为干物质,绝大部分通过棵间蒸发和植株蒸腾散失了。

1.2.6 作物经济转化效率

$$K_6 = B/Y \quad (6)$$

式中, K_6 为作物经济转化效率; B 为单位面积农产品产出的经济效益。

总体的雨水利用转化效率即单位水量的最终经济产出为: $K = (K_1 \times K_2 \times K_3 \times R_1 + R_2) \times K_4 \times K_5 \times K_6$

2 提高集雨农业各级雨水利用转化效率的试验研究结果分析

2.1 提高雨水收集效率 K_1 的试验研究结果

集雨面是雨水集流系统的源头部分,它决定集雨产流的数量和质量。增大地表径流的基本途径是降低地表水分入渗率,进而增加集雨效率。Oweis等¹⁰将国际上集雨面处理方法总结为下列6个方面:

第一,清除集雨坡面上的植被,移走能截留和阻碍雨水流动的石块及其它物质,以使集雨坡面在下降雨滴的不断敲击作用下形成紧实连续的表面硬壳。

第二,对集雨坡面进行平整压实处理,能减小土壤的渗透性,提高集雨效率,注意要在适宜的土壤湿度条件下进行土壤压实处理。

第三,应用化学物质(主要是钠盐)疏松土壤胶体,使其充塞土壤孔隙,减低土壤渗水能力。

第四,应用化学物质(主要是石蜡和沥青)充塞土壤孔隙,使土壤表面形成致密层,增大径流率。

第五,在集雨坡面上平铺混凝土板、木板或金属片等刚性材料,这种方法成本高,但使用寿命长(可用20年以上)。

第六,在集雨坡面上覆盖塑料膜、橡胶布和用沥青处理过的玻璃纤维等软性材料,这种方法的成本也比较高。

水利部集雨节水灌溉试验站于2003~2004年采用混凝土、塑料膜料、水泥土、原土夯实、自然坡面、土壤固化剂、地衣、土壤固化剂与有机硅高分子材料复合等不同集雨面材料,进行了2年的天然降雨集雨观测,各种材料的集雨效率、抗冻指标、经济指标、寿命等参数如下¹¹:

表 1 各种集雨面材料的性能比较

Table 1 Characters comparison of different materials for rain water collection

编号 No.	材料类型 Material types	集雨效率 Rain collection rate (%)	造价 Cost (Yuan/m ²)	使用寿命 Service life (a)	抗冻及抗破坏能力 Capability of anti freezing and fighting destruction
1	混凝土(C15) Concrete	71.3	14.60	>10	很强 Better
2	固化土(1:8) Solidified soil(1:8)	73.6	8.26	>10	很强 Better
3	固化土(1:10) Solidified soil(1:10)	60.0	7.34	>10	很强 Better
4	原土夯实+防水剂 Original soil tamped + Waterproof preparation	55.7	3.60	1	差 Not good
5	固化土(1:8)+防水剂 Solidified soil(1:8)+ Waterproof preparation	85.8	10.06	>10	很强 Better
6	固化土(1:10)+防水剂 Solidified soil(1:10)+ Waterproof preparation	73.8	9.14	>10	很强 Better
7	原土夯实 Original soil tamped	36.5	2.00	1	差 Not good
8	塑膜 Plastic film	77.5	1.30	1	很差 Bad
9	天然坡面 Natural slope	6.6	0.20	Long	—
10	地衣 Lichen	43.7	2.00	1	差 Not good
11	水泥土 Cement soil	69.5	9.00	>10	较强 Good

2.2 提高雨水存储效率 K_2 的试验研究结果分析

目前,由于各地对某一区域究竟有多少雨水可以收集和局部地区到底有多大的径流汇集能力这两个关键问题的评估与计算研究不够,使一些地区的雨水收集利用工程做不到科学的规划与设计,往往盲目建设,出现了有的蓄水设施无水可蓄和有的蓄水设施经常溢流两种情况,导致雨水存储效率不高。张建新等(2006)将地理信息系统(GIS)、遥感(RS)、全球定位系统(GPS)技术与径流系数、降水资料及实地考察调查相结合,提出了一套能较准确估算评价区域可收集雨水资源潜力和局地径流汇集能力的可操作性强的方法,并应用此方法计算了水利部集雨节水灌溉试验站周围区域不同类型下垫面的可收集雨水资源潜力和局地径流汇集能力,分别给出了少雨、平常、多雨三种年型下该区域局部地区径流汇集能力的分布状况图,编制了区域集雨工程合理布局规划,可用于指导雨水收集利用工程的设计与建设,避免盲目建设所造成的浪费和损失^[13]。

水利部集雨节水灌溉试验站针对本地区以黄土为主的特点,以水窖和旱井等方式蓄水并加盖,底部夯实,窖壁或井壁抹平,渗漏和蒸发损失极小。抹水泥的可基本防止集水的损失,但不宜作为饮用水。

缩短集雨面到储水设施间距离及对引流沟渠采取防渗措施可减少途中渗漏与蒸发损失。

2.3 提高蓄水有效利用率 K_3 的试验研究结果分析

根据周围区域集雨工程建设的实际以及国内现有的取水提水设备状况,水利部集雨节水灌溉试验

站引进试验了微型电潜泵、手压泵、虹吸式自压取水、风力提水和太阳能提水五种提水设备,并进行了适用性和经济技术测试比较。结果如下:微型电潜泵可用于庭院和道路附近有可接电源的旱井或水窖;手压泵主要是在无电源可用的旱井或水窖上使用;虹吸式自压取水是在位置较高的集雨工程上使用,主要用于人畜饮水、集雨补灌和其他用水;风力提水、太阳能提水可用于田间无电区集雨工程的提水,但投资相对较高,推广普及有困难。

输水补灌方法主要采用了坐水种补灌技术(即在农作物播种时期,采取人工、机械或专用设备供水形式,用较少的水量浇灌并湿润籽种周围的土壤,以保证在干旱情况下作物能够发芽、出苗,群众习惯称其为坐水种,实际上就是针对播种期土壤墒情不足所采取的一种补墒灌溉技术)、膜下滴灌技术和微喷技术。通过实践和试验示范比较,在目前广大农村经济条件不发达情况下,可大面积推广应用的集雨补灌技术是:春季播种期采用坐水种补灌技术,适用于各种农作物;生长关键期采用半固定膜下滴灌技术,适用于瓜果、蔬菜、玉米等宽行穴播地膜覆盖作物;移动微喷灌带适用于人工牧草等矮秆条播作物前期补灌。

2.4 提高农田水分利用率 K_4 的试验研究结果分析

水利部集雨节水灌溉试验站于2004~2005年采用了等高沟垄种植、渐进式等高梯田两项措施拦蓄径流、提高农田保水率,取得了较好的效果。

表 2 给出了整个作物生长季两种措施和对照田 0~50cm 土壤水分贮存量平均值,从表中可以看出:采取这两种措施后,农田保水率比对照田提高 10%以上^[13]。

2.5 提高作物水分利用效率 K_5 的试验研究结果分析

水利部集雨节水灌溉试验站于 2003~2005 年开展了提高作物水分利用效率试验,采用了品种更新、关键期补灌、土壤水肥耦合和施用腐植酸生物肥料、节水生化制剂等多项措施。主要试验结果列于表 3 中,其中作物水分利用效率 $K_5 = \text{作物产量 } Y / (\text{作物生长期期间渗入土壤中的降水量 } U + \text{补灌量 } I)$ ^[13]。

表 2 作物生长季 0~50cm 土壤水分贮存量平均值(mm)

Table 2 Average reserved soil moisture in depth 0~50cm during crop growing season

项目 Item	2004	2005
渐进式等高梯田 Gradually constructed contour terrace	82.3	82.6
等高沟垄种植 Contour ridge and furrow planting	82.3	80.4
对照田 Control	73.1	72.9
渐进式等高梯田一对对照田 Gradually constructed contour terrace minus Control	9.2	9.7
等高沟垄种植田一对对照田 Contour ridge and furrow planting minus Control	9.2	7.5

表 3 几种试验措施下作物的水分利用效率 K_5 (kg/(hm²·mm))

Table 3 Water use efficiency (K_5) of several crops under different experimental methods

提高 K_5 措施 Measures to increase K_5	玉米 Maize		谷子 Millet		西瓜 Water melon		向日葵 Sunflower		马铃薯 Potato	
	K_5	比对照高 Higher than control	K_5	比对照高 Higher than control	K_5	比对照高 Higher than control	K_5	比对照高 Higher than control	K_5	比对照高 Higher than control
品种更新 Variety update	12.6~24.4	1.5~13.3	10.7~12.1	1.8~3.2	137.7	32.4	4.4	—	—	—
关键期补灌 Supplemental irrigation in key stage	17.0~23.5	2.9~4.6	6.9~12.6	3.7~7.1	143.0~166.5	33.8~64.3	—	—	—	—
土壤水肥耦合 Water and fertilizer coupling	25.6	16.1	—	—	—	—	5.1	—	—	—
腐植酸生物肥料 Biological fertilizer	—	—	—	—	—	—	—	—	58.0	9.1
节水生化制剂 Biological and chemical preparation for water saving	—	—	10.4~12.1	1.1~2.8	—	—	—	—	—	—

提高 K_5 措施 Measures to increase K_5	糜子 Broomcorn millet		南瓜 Pumpkin		苜蓿 Clover		饲草高粱 Gross broomcorn		饲草玉米 Gross maize	
	K_5	比对照高 Higher than control	K_5	比对照高 Higher than control	K_5	比对照高 Higher than control	K_5	比对照高 Higher than control	K_5	比对照高 Higher than control
品种更新 Variety update	10.0~11.7	0.5~2.2	48.0~56.0	23.9~31.9	24.2~37.7	3.5~17.0	144.2	—	162.1~225.1	—
关键期补灌 Supplemental irrigation in key stage	—	—	—	—	22.1~47.4	14.1~24.1	—	—	—	—
土壤水肥耦合 Water and fertilizer coupling	—	—	—	—	—	—	151.0	—	—	—

从表 3 可以看出,所采用的几种措施对提高作物水分利用效率均有一定的促进作用;几种措施相互比较,土壤水肥耦合技术对提高作物水分利用效率的促进作用最大,这是因为土壤水肥耦合技术已综合了施肥、集雨补灌等多项技术。

2.6 提高作物经济转化效率 K_6 的试验研究结果

2003~2005 年,水利部集雨节水灌溉试验站引进了多个作物品种,并于 2004 年和 2005 年进行了小区对比试验以了解其经济转化效率情况,具体试验、计算结果见表 4^[13]。

表 4 主要作物品种经济效益和经济转化效率比较

Table 4 Economic benefits and rain water economically transforming efficiency of main crop varieties

作物品种 Crop varieties	2004				2005				平均纯收入 Average net income (yuan /hm ²)
	产量 Output (kg /hm ²)	毛收入 Gross income (yuan /hm ²)	成本 Cost (yuan /hm ²)	纯收入 Net Income (yuan /hm ²)	产量 Output (kg /hm ²)	毛收入 Gross income (yuan /hm ²)	成本 Cost (yuan /hm ²)	纯收入 Net Income (yuan /hm ²)	
哲单 7 号 Zhedan 7	9778.5	9778.5	3437.3	6341.2	7812.0	7812.0	3437.3	4374.7	5358.0
内单 205 Neidan 205	8797.5	8797.5	3437.3	5360.2	8767.5	8767.5	3437.3	5330.2	5345.2
向日葵 Sunflower	2077.5	4986.0	3212.3	1773.7	3622.5	8694.0	3212.3	5481.7	3627.7
东北千金豆	1594.5	4783.5	2609.3	2174.2	1689.0	5067.0	2609.3	2457.7	2316.0
中绿 1 号 Zhonglu 1	468.0	2340.0	2654.3	-314.3	1099.5	5497.5	2654.3	2843.2	1264.5
小香谷 Xiaoxiang millet	4405.5	6609.0	2399.3	4209.7	4081.5	6123.0	2399.3	3723.7	3966.7
黄金谷 Golden millet	4066.5	6100.5	2399.3	3701.2	3675.0	5512.5	2399.3	3113.2	3407.2
榆糜 2 号 Yuni 2	—	—	—	—	2889.0	4044.0	2406.8	1637.2	1637.2
榆糜 3 号 Yuni 3	—	—	—	—	2658.0	3721.5	2406.8	1314.7	1314.7
西瓜 Water melon	61447.5	24579.0	3737.3	20841.7	39652.5	15861.0	3737.3	12123.7	16482.7
南瓜 Pumpkin	21289.5	17031.0	3947.3	13083.7	18501.0	14800.5	3947.3	10853.2	11968.5
饲草玉米 Gross corn	59713.5	5971.5	3512.3	2459.2	57664.5	5766.0	3512.3	2253.7	2356.5
饲草高粱 Gross broomcorn	64120.5	6412.5	3512.3	2900.2	52092.0	5209.5	3512.3	1697.2	2298.7
马铃薯 Potato	19972.5	7989.0	4337.3	3651.7	17085.0	6834.0	4337.3	2496.7	3074.2

从表 4 可以看出,按纯收入高低排序依次为:西瓜>南瓜>玉米>谷子>向日葵>马铃薯>饲草玉米>大豆>饲草高粱>糜子>绿豆,且西瓜和南瓜的纯收入要高出其它作物很多。但当地农民习惯种植糜子和豆类,从两年的试验结果来看,生产糜子和豆类的经济效益较差。所以,为了提高集雨农业的雨水利用转化效率,应该在满足生活需要的情况下,适当压缩糜子、豆类的播种面积,增大经济作物西瓜、南瓜、向日葵、马铃薯和生产能力较大的玉米、谷子、饲草玉米的播种面积,以满足农民增加收入和农牧业生产发展的需要。

3 结论与讨论

3.1 集雨农业各个环节提高雨水利用效率的途径与关键技术

提高 K_1 的关键技术是选择适宜的集雨地形和

筛选高效集雨面材料,尽量减少集雨面的径流损失与蒸发损失量 ($R_1 - H$)。

提高 K_2 的关键是水窖和旱井的合理布局和尽量避免从集雨面到水窖或旱井的渗漏与蒸发等输水损失 ($H - S$)。

提高 K_3 的关键技术是经济适用的提水工具和避免水窖、旱井到庭院、畜舍或农田渗漏损失 ($S - I$) 的输水补灌方法。

提高 K_4 的关键技术是平整土地以减小降雨径流、进行覆盖以减小蒸发。对于坡耕地,则应采用修筑水平梯田、隔坡梯田、鱼鳞坑、水平沟等水保工程拦蓄径流或采用带状间作、等高种植、沟垄种植、蓄水聚肥耕作等技术使降雨就地入渗。

提高 K_5 的相应技术是调整种植结构,采用耐旱优种,水肥耦合、化学抗旱、覆盖、耕作保墒等节水农艺技术,同时采用滴灌、管灌、涌流灌、调亏灌溉、

关键期补灌等节水灌溉技术等,尽量抑制棵间蒸发与过度的蒸腾。

提高 K_6 的途径为:通过调整结构适应市场需求和生态环境以减少风险;通过引进推广优种提高单产和经济系数;通过深加工实现增值提高单价;通过科技服务和市场信息服务以降低成本,增强竞争力。

3.2 提高雨水利用效率综合技术体系的普适性与区域针对性

本项研究是在黄土高原北部进行的,通过上述六个环节分别提高雨水的收集、存储、蓄水利用、农田利用、作用利用和经济转化效率,从而提高集雨农业整体的雨水利用效率,这一基本模式虽然具有普适性,但对于不同类型和不同地区,模式的具体应用又有所不同。如农田就地集雨可省略 K_1 、 K_2 、 K_3 等,直接从 K_4 开始。不同地区的工程型集雨由于地形、土壤、气候及作物不同,各个环节提高效率的具体技术也有一定差异。如对于 K_1 ,南方季节性干旱地区既要考虑在旱季最大限度截获雨水并产流,又要考虑雨季能够经受洪水冲刷而不被破坏。高寒地区要考虑冬季土壤冻融对于 K_1 、 K_2 和 K_3 的影响,土质偏沙地区要对储水设施表面进行防渗处理。提高 K_4 的水土保持或耕作措施与所在地区的侵蚀强度有很大关系,通常水平梯田适宜在坡度较小侵蚀强度不很大的坡地上修建,反之应采取隔坡梯田、鱼鳞坑、水平沟等方式。提高 K_5 的技术中,各种节水灌溉方式,西北等多风和风大地区不宜发展喷灌;抑制土壤蒸发的措施,北方强调耕作保墒,南方因土质较粘适耕期短,生物覆盖措施的效果更好。种植结构调整是提高 K_5 与 K_6 的关键,本项研究以西瓜和南瓜效益最好,但远离市场,运输不便的深山区应发展经济价值较高同时又耐贮运的作物。

3.3 未来研究的展望

本项研究目前还处于半定量模式阶段,未来拟

进一步细化和量化,构筑完整的数学模式,并结合各地集雨农业的不同条件开展调研,形成以提高雨水综合利用效率为核心的区域技术体系。

参考文献:

- [1] Evenari M, Shanan L, Tadmor N, et al. Ancient agriculture in the Negev[J]. Science, 1961, 133(3457): 979-996.
- [2] 赵松岭. 集雨农业引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.
- [3] Wesemael B V, et al. Collection and storage of runoff from hill slopes in a semi-arid environment: geomorphic and hydrologic aspects of the aljibe system in Almeria Province, Spain[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 40: 1-14.
- [4] Scott C A, Silva-Ochoa P. Collective action for water harvesting irrigation in the Lerma Chapala Basin, Mexico[J]. Water Policy, 2001, 3: 555-572.
- [5] 张建新, 郑大玮. 国内外集雨农业研究进展与展望[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 223-229.
- [6] 张岁岐, 山仓. 植物水分利用效率及其研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1-5.
- [7] 刘文兆. 旱地作物雨水利用效率统一性表达式的构造及其意义[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 62-66.
- [8] 龚绍先, 郑剑非, 王砚田. 内蒙古后山地区旱地农业降水利用效率提高途径的探讨[J]. 北京农业大学学报, 1990, 16(2): 221-227.
- [9] 龚绍先. 粮食作物与气象[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1988.
- [10] Oweis T, Hachum A, Kijne J. Water harvesting and supplementary irrigation for improved water use efficiency in dry areas [M]. S W I M Paper 7. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 1999.
- [11] 李少斌, 冯浩, 郭来广, 等. 雨水高效存贮技术的筛选与集成[R]. 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课题成果报告, 2005. 152-186.
- [12] 张建新, 郑大玮, 武永利. 基于 3S 技术的可收集雨水资源潜力的计算与分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 40-44.
- [13] 张建新. 黄土丘陵区集雨农业技术集成研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.

Water using and transforming efficiency of rainwater harvesting : concept and ways of enhancing

ZHANG Jianxin¹, ZHENG Dawei², LI Fen¹, DUAN Yu³

(1. Institute of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

3. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010030, China)

Abstract : Rainwater harvesting for agriculture is the agricultural activity which collects, stores runoff and uses it for drinking, sanitation and supplemental irrigation. It includes several interrelated processes: rainwater collecting, rainwater storing, rainwater transporting and rainwater utilizing. Previous researches of rainwater harvesting focused more on each individual process or technique and did not concern the processes or techniques as a whole. This resulted in a loose relationship of above processes and low water transforming efficiency from one process to another. In this paper, the concept of Water Using and Transforming Efficiency of rainwater harvesting is put forward systematically. The sub processes of rainwater harvesting rainwater collecting, rainwater reserving, rainwater transporting and rainwater using are studied and analyzed as a whole. Then combining some experimental data, several ways to enhance rainwater using and transforming efficiency are provided.

Key words : rainwater harvesting; water using and transforming efficiency; enhancing way

(上接第 150 页)

Free proline trends during seedling stage of ten staple alfalfa varieties in Ningxia with NaCl and water compound stress

LI U Genhong, XIE Yingzhong, LAN Jian, YANG Rui, ZHAO Gongqiang

(Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract : An experiment was conducted to study the free proline trends during seedling stage and give tentative evaluation about their capability to resist water and NaCl stress of ten staple alfalfa varieties in Ningxia with NaCl and water compound stress by using quadratic general spinning design. The results showed dominant effect of free proline variation on all alfalfa varieties displayed positive effect except Longdong and Algonquin with negative effect in the case of NaCl stress, which displayed negative effect in the case of water stress; Single effect displayed in all varieties free proline content increased at first and then, decreased in serious NaCl stress, and increased in serious drought; As for the interaction effect of water and NaCl on free proline variation, five varieties such as CW³⁰¹, Sanditi, Longdong, Zhaoyang and CW²⁰⁰ displayed negative effect significantly with the order as $Y_{CW^{301}} = Y_{Longdong} > Y_{CW^{200}} = Y_{Sanditi} > Y_{Zhaoyang}$, while the other varieties such as Algonquin, Xinjiang, Ningmu No 1, Neimeng and Golden Empress displayed no significant to evaluate the resistance of ten staple alfalfa varieties to NaCl and drought according to their free proline content from high to low, the following order may be drawn: $CW^{301} > CW^{200} > Zhaoyang > Golden Empress > Ningmu No 1 > Algonquin > Neimeng > Longdong > Sanditi > Xinjiang$.

Key words : NaCl; water; compound stress; proline content; alfalfa