基于人工模拟降雨试验的垄作区田水土保持效益的变化研究

刘雨鑫，谢 云，辛 艳，王文婷，张珊珊

（北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室 地理学与遥感科学学院，北京 100875）

摘 要：[目的] 研究垄作区田在不同降雨条件下发生溢流和损毁的情况和水土保持效益的变化，为实施垄作区田的适宜条件评价和水土保持效益的评价提供依据。[方法] 对垄作区田和顺垄耕作实施不同雨强的人工模拟降雨实验，分析二者的产流产沙过程和水土保持效益变化。[结果] 雨强大于 60 mm/h 时，区田有溢流产生，但土档不会损毁，水土保持效益略有降低；雨强大于 60 mm/h 时，区田土档在溢流后很快损毁，水土保持效益有明显的下降。区田未损毁情况下的蓄水效益为 87.5%，保土效益为 88.2%；区田损毁后的蓄水效益降至 34.1%，保土效益降至 21.0%。[结论] 垄作区田在 60 mm/h 雨强下具有良好的水土保持效益，超过 60 mm/h 时，由于土档在溢流后容易损毁，从而使其水土保持效益显著下降，丧失了拦蓄径流和泥沙的能力。

关键词：垄作区田；人工模拟降雨；水土保持耕作措施；水土保持效益

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)04-0227-05 **中图分类号**：S157.1

文献参数：刘雨鑫，谢云，辛艳，等. 基于人工模拟降雨试验的垄作区田水土保持效益的变化研究[J]. 水土保持通报，2016，36(4)：227-231. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.040

Variations of Soil and Water Conservation Efficiency for Basin Tillage Measurement Studied by Rainfall Simulation

LIU Yuxin, XIE Yun, XIN Yan, WANG Wenting, ZHANG Shanshan

(*School of Geography, State Key Laboratory of Earth Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of rainfall intensity on the happening of overflowing and breaking on basin tillage and the relevant variations of basin tillage's soil and water conservation efficiency were explored to provide references of suitable requirements for the application of basin tillage and for the evaluation of its soil and water conservation efficiency. [Methods] Simulated rainfall was applied on two tillage patterns of basin tillage and compared conventional tillage, and to analyze their processes of soil and water production and the variations of soil and water conservation efficiency. [Results] When rainfall intensity was under 60 mm/h, there was ridge overflowing occurrence but no damage or breaking for basin tillage, and the efficiency decreased slightly. When rainfall intensity was over 60 mm/h, damage and breaking occurred as soon as overflowing happened, whereafter the efficiency decreased remarkably. Average runoff conservation efficiency was 87.5% and the soil conservation efficiency was 88.2%. When basin tillage was damaged, the above two items decreased to 34.1% and 21.0%, respectively. [Conclusions] Basin tillage would remain good efforts on soil and water conservation when rainfall intensity under 60 mm/h. When it is over 60 mm/h, because dams of basin tillage might be broken down easily after overtopping, it would lost its ability of blocking water and soil, and hence relevant conservation efficiency decreased remarkably as well.

Keywords: **basin tillage; rainfall simulation; agricultural measures for soil and water conservation; soil and water conservation efficiency**

收稿日期：2015-01-25 **修回日期**：2015-03-16

资助项目：国家自然科学基金创新研究群体项目“地表过程模型与模拟”(41321001)；水利部公益性行业科研专项经费项目“典型黑土区坡耕地土壤侵蚀危险程度研究”(201501012)；水利部全国水土流失动态监测与公告项目(1261421610273)

第一作者：刘雨鑫(1989—)，男(汉族)，辽宁省鞍山市人，硕士研究生，研究方向为土壤侵蚀与土地生产力等。E-mail：1050434631@qq.com。

通讯作者：谢云(1964—)，女(回族)，辽宁省大连市人，博士，教授，主要从事土地生产力、土壤侵蚀、气候影响评价研究。E-mail：xieyun@bnu.edu.cn。

垄作区田(简称"区田")是指在坡耕地上犁出的沟垄内每隔一定距离修筑一个略低于垄台的横土档,将垄沟隔成一个个土坑,通过改变微地形起到拦截降水、蓄水留肥的水土保持作用,是一种重要的水土保持耕作措施[1]。由于区田的横档起着拦截径流的作用,要想充分发挥其水土保持效果,修建时需要考虑如降雨、坡度、区田规格、配套耕作措施等诸多因素。蒋德麒[1]研究认为区田适用15°以下坡,坡度愈缓愈好。杨爱民[2]和沈昌蒲[3]认为实施坡度一般应小于8°,给出了0.5～15°内区田的实施规格和最佳档距,并检验了天然降雨和模拟降雨条件下档距的可靠性,也有人研究了区田对水分入渗的影响[4],与配套措施实施的增产效果[5-8]等。《黑土区水土流失综合防治技术》指出垄向区田适用于小于5°的坡,并规定了筑档规格,但未考虑降雨条件[9]。有学者[10-11]提出区田在大雨条件下会因为土档损毁产生更严重的侵蚀,很多学者[5-8]在研究区田产流产沙特征及其保水带来的增产效益时,没有考虑降雨的损毁影响。在进行区田人工模拟降雨试验也是主要检验区田浅穴的承雨性,仅观测到溢流为止[2-3,12-13],缺少损毁研究。基于此,本试验通过人工模拟降雨试验研究降雨强度的变化对区田的溢流与损毁的影响,及其造成的水土保持效益的变化,期望为进行垄作区田的适宜条件评价和降雨导致的区田效益变化评价提供参考。

1 材料与方法

人工模拟降雨试验在北京师范大学地表过程与生态资源国家重点实验室房山试验基地的人工降雨大厅进行,采用槽式下喷型人工降雨机[14]。该降雨机每单机配备5个喷头,间距1.1 m,单机有效降雨宽度为4.4 m,每两台降雨机的间距为1.5 m,可多个降雨单机组合使用形成4.4 m宽、长度可变的不同有效降雨面积:$(n-1)\times1.5\times4.4$ m^2(n为同时使用的降雨机个数)。喷头为美国制的Spray V-jet型降雨喷头,水压0.04 MPa,可模拟20～200 mm/h内共10个档的雨强。试验对象为变坡土槽,长2 m,宽1 m,深0.5 m,坡度可在0～40°间调整,本试验选取2°。一次同时对2个土槽进行人工降雨,分别是作为对照的顺垄和垄作区田,结合土槽规格和降雨机有效降雨面积确定3个单机组合使用。采用顺垄为区田水土保持效益对照主要基于以下考虑:土壤侵蚀模型中定量评价水土保持耕作措施效益时,采用传统的顺坡耕作为对照,由于区田的蓄水保土效益是在起垄基础上增加横档的作用所致,因此采用顺坡起垄进行对照以消除起垄的影响。试验所用土壤为北京市延庆县上辛庄表层0—20 cm的普通褐土,黄土母质。土壤有机质含量为0.4%,机械组成为砂粒39.2%,粉粒43.7%,黏粒17.1%。槽内先填土30 cm深,容重控制在1.3 g/cm^3,在此基础上对每个土槽修筑顺垄和区田,修筑规格参照了《黑土区水土流失综合防治技术标准》中关于垄向区田的相关规定。顺垄修筑方式如下:水槽横断面中心挖成V形垄沟,上口宽30 cm,底部与水槽出水口持平,两侧为平整垄台,宽度均为35 cm,较垄沟底部高出15 cm,与水槽挡板相接。区田则首先起垄,规格与顺垄相同,在垄沟中设立4个横档形成3个区田,横档在土槽中的位置从下坡至上坡方向依次为:出水口沿坡面向上0—40 cm为下横档,60—100 cm为中横档,120—160 cm为上横档,180～200再设半个横档与土槽顶部挡板相接。区田的档距为60 cm,横档上宽10 cm,下宽40 cm,较垄沟底部高10 cm(较垄台低5 cm),与垄台自然相接。

人工模拟降雨强度设计4个水平:30,60,90和120 mm/h,降雨历时均为1 h,每个雨强共进行3次重复。降雨过程中记录降雨开始和产流开始时间,产流后立刻开始取样。考虑到产流过程中含沙量会有变化,全部采样测量含沙量又导致烘干数量和时间大大增加,可操作性差,因此采用5 min等间隔取样,即用塑料桶取5 min间隔内的径流样,如果该间隔内的径流量超过塑料桶体积,则记录桶满时的时间,不再采集多余的径流样,待下一个5 min开始时重新放置塑料桶采样,如此循环直至降雨结束。为了测量每个5 min间隔内的含沙量,在每次5 min间隔采样开始时,先用两个塑料瓶采集用来测量含沙量的样本,代表5 min间隔的平均含沙量。降雨过程中记录区田发生溢流、开始损毁和被冲毁的时间。溢流是指开始有径流漫过区田横档,直至横档出现损毁;损毁是指区田横档上出现明显的细沟侵蚀,直至冲毁;冲毁是指横档被径流完全冲开,直至产流结束。降雨结束后,用量筒分别测定两个塑料瓶及塑料桶内径流样的体积,然后用烘干法测定两个塑料瓶内径流样的含沙量。根据测量到的塑料瓶和塑料桶的体积或记录桶接满的时间,即可求出每个时间间隔的径流量,累加得到该次降雨的总径流量。根据测定的每一时间间隔的含沙量乘以对应间隔的径流量,得到每一时间间隔的产沙量,再累加得到该次降雨的总产沙量。最后根据水槽面积计算径流深和土壤侵蚀模数。区田的蓄水保土效益计算为:

蓄水或保土效益=(1－区田径流深或土壤侵蚀模数/顺垄径流深或土壤侵蚀模数)×100%。

2　结果与讨论

2.1　区田的溢流、损毁和冲毁及其产流产沙过程的变化

表 1 为区田在 4 个雨强下的溢流、损毁和冲毁情况。由表 1 可以看出,当雨强在 30 mm/h 时,区田既无溢流也无损毁;60 mm/h 时,区田在降雨 39 min 开始溢流,对应雨量 39 mm,但无损毁;90 mm/h 时,降雨 24 min 开始溢流,对应雨量 36 mm,33 min 出现损毁,对应雨量 50 mm;120 mm/h 时,降雨 15 min 开始溢流,对应雨量 30 mm,23 min 出现损毁,对应雨量 46 mm。杨爱民[2]研究认为雨强 216 mm/h 时,降雨 7.4～15.8 min 开始溢流。沈昌蒲[13]认为雨强 174 mm/h 时,降雨 15.8 min 开始溢流,与本研究结果类似。

综合来看,雨强 30 mm/h 时既无溢流也无损毁;雨强 60 mm/h 时,只有溢流而无损毁,雨强大于 90 mm/h以后,会发生损毁,且随着雨强增大,溢流和损毁时间缩短,说明区田损毁需要冲刷土档的径流达到一定动能才行,并非仅是雨量的累计。

表 1　区田横档在不同雨强下的溢流、损毁和冲毁情况

阶 段	30 mm/h		60 mm/h		90 mm/h		120 mm/h	
	降雨历时/min	降雨量/mm	降雨历时/min	降雨量/mm	降雨历时/min	降雨量/mm	降雨历时/min	降雨量/mm
开始溢流	—	—	39	39	24	36	15	30
开始损毁	—	—	—	—	33	50	23	46
开始冲毁	—	—	—	—	42	63	29	58
总 计	60	30	60	60	60	90	60	120
区田最终状况	未溢流		溢流但未损毁		损毁后被冲毁		损毁后被冲毁	

雨强大于 90 mm/h 后,区田状况变化可分为 4 个阶段:溢流前,溢流至损毁前,损毁至冲毁前以及冲毁后。溢流前区田产流产沙很小,大部分降水汇入区田横档之间的浅穴内。溢流至损毁前浅穴已蓄满径流并漫过横档,但横档尚未出现细沟,此时产流产沙略有增加。损毁至冲毁前横档出现细沟侵蚀,径流在细沟处汇集并继续下切土档,直到横档被完全冲垮,形成连接两个浅穴的通道。该阶段产流产沙量急剧增加(图 1)。如 90 mm/h 雨强下产流和产沙速率分别较前一阶段增加 1.7 和 2.7 倍。120 mm/h 雨强下产流产沙速率分别较前一阶段增加 1.9 倍和 3.8 倍。冲毁后浅穴开始被堆积,细沟侵蚀停止,产流变化不大且趋于平稳,产沙则由于浅穴的沉积作用而明显减少,如 90 和 120 mm/h 雨强产流速率分别较冲毁前仅下降 0.1 和 0.2 L/(m^2 · min),而产沙速率与冲毁前相比分别下降 10.8 和 27.2 g/(m^2 · min)。4 个阶段平均产流量分别占总量的 2%,17%,39%和 42%,产沙量分别占总量的 2%,12%,55%和 31%。与区田相比,顺垄的产流产沙速率在降雨初期呈持续上升,然后趋于平稳(图 2)。降雨强度在 30～60 mm/h 时顺垄的产流速率最大值分别是区田的 7 和 1.8 倍,产沙速率最大值分别是区田的 2.3 和 1.5 倍;而 90～120 mm/h 时顺垄的产流速率最大值分别为区田的 99%和 97%,产沙速率最大值分别为区田的 79%和 61%。

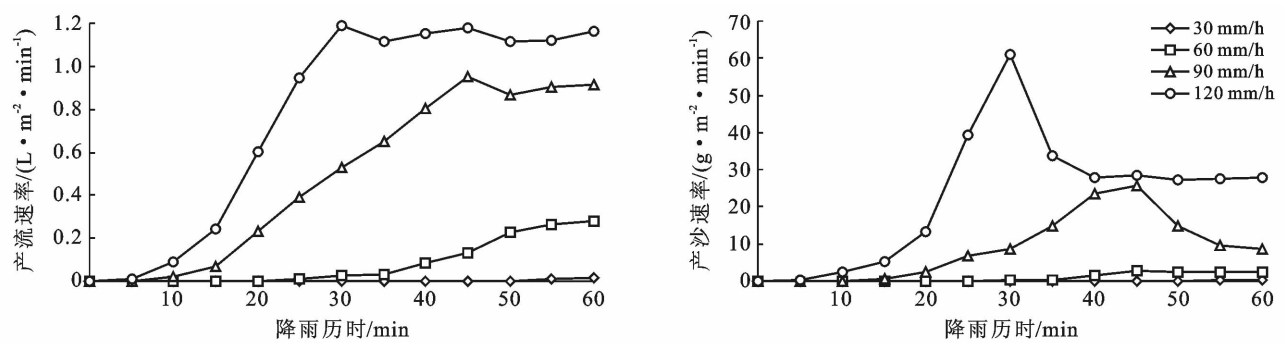


图 1　不同降雨条件下区田的产流产沙过程曲线

从径流深和土壤侵蚀模数来看,30～120 mm/h 雨强下,区田的径流深分别为 0.2,5.3,31.6,50.1 mm,顺垄分别为 4.6,15.2,42.5,61.6 mm。区田的土壤流失量分别为 0.1,0.6,5.8,14.7 t/hm^2,顺垄分别

为0.3,1.2,8.0,15.5 t/hm^2。由此可见,区田在横档损毁前因为一直有浅穴拦蓄降水和径流,产流产沙速率都小于顺垄,且产流产沙量只占总量的19%和14%。但损毁后产流速率与顺垄持平,产沙速率在大雨强下甚至大于顺垄,产流产沙量占总量的81%和86%。

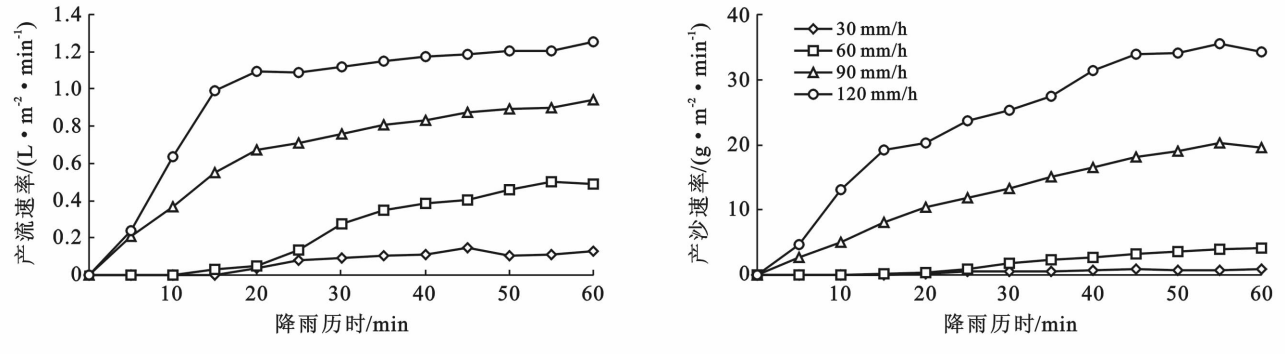


图2 不同降雨条件下顺垄的产流产沙过程曲线

2.2 雨强与区田的蓄水保土效益的关系

区田横档损毁前后的蓄水保土效益有显著差异(表2),30~120 mm/h降雨强度下,区田未损毁时的平均蓄水效益为87.5%,平均保土效益为88.2%,且各降雨强度下的蓄水保土效益相差不大。该结果与前人的研究类似:蒋德麒[1]对垄作区田在天然降雨下的观测数据得出区田可以减少径流70%~92%,减少冲刷84%~97%,杨爱民[2]对区田在天然降雨和人工降雨下的观测得出区田与不设档的对照相比减少径流85%~100%,减少冲刷90%~100%,郭乾坤[15]在整理分析大量已有文献的基础上指出区田的T值为0.161,即减少了84%的土壤流失。在横档损毁后,区田的蓄水保土效益明显降低,90 mm/h时的蓄水效益为37.0%,比损毁前降低47.2%;保土效益27.6%,比损毁前降低58.6%。120 mm/h时的蓄水效益为31.2%,比损毁前降低50.9%;保土效益14.3%,比损毁前降低66.9%。损毁后区田的平均蓄水效益是34.1%,平均保土效益是21.0%。

表2 不同雨强条件下,区田在损毁前后的水土保持效益

阶段	雨强/(mm·h^{-1})	蓄水效益/%			保土效益/%		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
区田土档无损毁	30	97.0	100.0	99.0	98.6	100.0	99.6
	60	69.7	100.0	84.7	65.8	100.0	85.9
	90	62.1	100.0	84.2	63.0	100.0	86.2
	120	67.9	91.0	82.1	66.7	93.6	81.2
	平均	74.2	97.8	87.5	73.5	98.4	88.3
区田土档有损毁	90	25.6	53.6	37.0	17.7	48.8	27.6
	120	20.9	53.9	31.2	3.4	34.8	14.3
	平均	23.3	53.8	34.1	10.6	41.8	21.0

综上所述,雨强的变化导致区田由溢流到损毁直至冲毁,而无损毁和有损毁相比,区田的产流量和产沙量显著增加,对应的水土保持效益也相应减少(表2)。将区田的蓄水保土效益分为无损毁时的效益、有损毁时的效益和平均效益(无损毁效益与有损毁效益的平均值),对三者进行单因素方差分析。结果表明,3种效益差异显著($F=86.38$, sig.$=0.000$)。评估实际降雨条件下的区田蓄水保土效益时,应考虑区田是否遭受了损毁。进一步对蓄水保土效益与雨强进行回归分析表明,蓄水保土效益与雨强呈显著线性相关(图3)。从蓄水效益看,未损毁时回归方程$R^2=0.73$,效益随雨强的降低速率为0.17%/(mm·h),有损毁时回归方程$R^2=0.99$,效益随雨强的降低速率增大至0.84%/(mm·h)。从保土效益看,未损毁时回归方程$R^2=0.68$,效益随雨强的降低速率是0.18%/(mm·h),有损毁时回归方程$R^2=0.99$,效益随雨强的降低速率增大至1.04%/(mm·h)。平均蓄水效益的回归方程$R^2=0.91$,效益随雨强的降低速率为0.56%/(mm·h),平均保土效益的回归方程$R^2=0.93$,效益随雨强的降低速率为0.68%/(mm·h)。

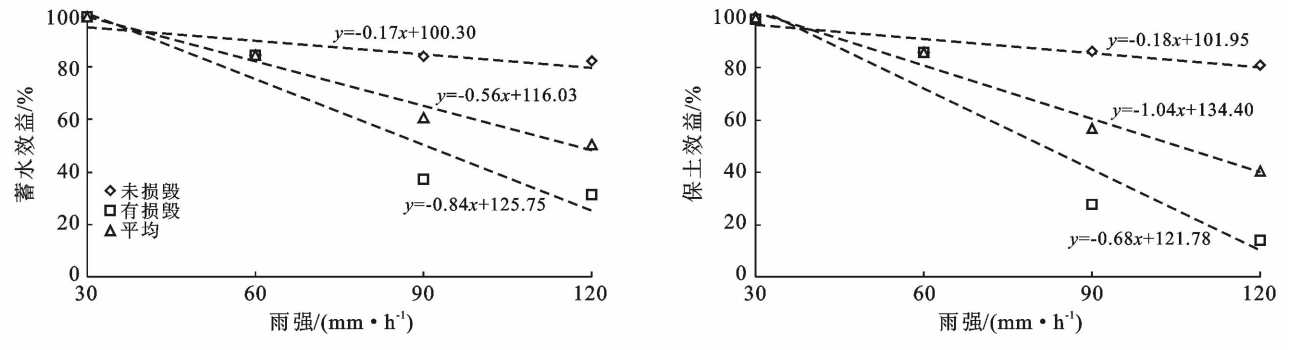


图 3　雨强与区田蓄水保土效益的关系

3　结 论

基于人工模拟降雨试验,分析了区田在不同降雨强度下的产流产沙过程,发生溢流、损毁和冲毁的情况,及由此带来的水土保持效益变化。结果表明,降雨强度小于 30 mm/h 时,不会导致溢流;60 mm/h 时,虽有溢流但不会损毁区田,蓄水保土效益略有降低;90 mm/h 以后,区田经历了溢流、损毁和最终冲毁的过程,产流产沙发生明显变化,蓄水保土效益明显下降。区田在未损毁的情况下,蓄水效益为 87.5%,保土效益为 88.2%;区田损毁后的蓄水效益降至 34.1%,保土效益降至 21.0%。区田蓄水和保土效益随雨强增大呈降低趋势,无损毁情况下的蓄水效益降低速率为0.17%/(mm·h),有损毁情况下为 0.84%/(mm·h)。无损毁情况下的保土效益降低速率为 0.18%/(mm·h),有损毁情况下为 1.04%/(mm·h)。如果不区分损毁前后的差异,平均蓄水效益随雨强的降低速率为 0.56%/(mm·h),平均保土效益随雨强的降低速率为 0.68%/(mm·h)。研究结果揭示了降雨强度对垄作区田的水土保持效益变化的影响,可为其实施的适宜条件评价和水土保持效益评价提供依据。

[参 考 文 献]

[1] 蒋德麒.我国的水土保持耕作措施[J].中国水土保持,1984(2):2-6.

[2] 杨爱民,沈昌蒲,刘福,等.坡耕地垄作区田水土保持效益的研究[J].水土保持学报,1994,8(3):52-58.

[3] 沈昌蒲,尹家峰.坡耕地垄作区田最佳挡距数学模型及其检验[J].水土保持通报,1997,17(3):1-5.

[4] 尹家峰.坡耕地垄向区田水分入渗规律及蓄水保土效果[J].水土保持应用技术,2009(5):4-5.

[5] 陈伟,魏永霞,王存国,等.不同水土保持技术模式的坡耕地产流、产沙特征[J].水土保持学报,2011,25(6):27-30.

[6] 齐智娟,张忠学,杨爱峥.黑土坡耕地不同水土保持措施的土壤水蚀特征研究[J].水土保持通报,2012,32(1):89-92.

[7] 赵雨森,魏永霞.坡耕地保护性耕作措施的水土保持效应[J].中国水土保持科学,2009,7(3):86-90.

[8] 魏永霞,李晓丹,胡婷婷.坡耕地保护性耕作技术模式的保水保土增产效应研究[J].东北农业大学学报,2013,44(5):51-55.

[9] 中华人民共和国水利部.黑土区水土流失综合防治技术标准[S].北京:中华人民共和国水利部,2009.

[10] Jones O R, Stewart B A. Basin tillage [J]. Soil and Tillage Research, 1990, 18(2/3):249-265.

[11] Jones O R, Clark R N. Effects of furrow dikes on water conservation and dryland crop yields[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5):1307-1314.

[12] 杨爱民,孙彦坤,孟莉,等.坡耕地垄作区田保水增产效益的研究[J].干旱地区农业研究,1997,15(4):6-9.

[13] 沈昌蒲,刘立意,王秋华,等.水土保持新技术:垄向区田的基本原理及运用[J].中国水土保持,2007(10):19-21.

[14] 张光辉,刘宝元,李平康.槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J].水土保持通报,2007,27(6):56-60.

[15] 郭乾坤,刘宝元,朱少波,等.中国主要水土保持耕作措施因子[J].中国水土保持,2013(10):22-26.