

薄土坡耕地石坎反坡水平阶水沙调控效果

田 飞¹, 谢永生^{1,2}, 陈 磊², 索改弟¹, 丁亚东²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为研究石坎反坡水平阶对于薄土坡耕地的水沙调控效果, 设置了两个标准天然降雨径流小区 (措施小区和对照小区) 分别对次降雨径流和泥沙进行了观测, 结果表明: 石坎反坡水平阶措施能够有效地调控坡耕地地表径流, 年均径流削减率为 22.5%, 且在短历时、大雨强降雨条件下的调控效果好于长历时、小雨强降雨; 该措施对于坡耕地泥沙调控效果显著且稳定, 年均泥沙削减率 95.5%, 措施小区的坡面产沙量随降雨特征值变化的波动幅度远远小于对照小区; 石坎反坡水平阶措施通过减少坡面侵蚀, 间接提高了坡耕地作物产量, 春玉米年均增产 6.2%。

关键词: 薄土坡耕地; 石坎反坡水平阶; 泥沙调控; 径流调控

中图分类号: S157.9 **文献标志码:** A

Sediment and water control effects by stone sill reverse-slope level terrace in slope farmland with thin soil layer

TIAN Fei¹, XIE Yong-sheng^{1,2}, CHEN Lei², SUO Gai-di¹, DING Ya-dong²

(1. College of Resource and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to research the sediment and water control effects by stone sill reverse-slope level terrace in slope farmland with thin soil layer, two standard natural rainfall runoff plots (measure and control plots) were set up and carried out the observation to the rainfall runoff and sediment respectively. The results showed that: The stone sill reverse-slope level terrace could effectively controlled the surface runoff on the slope farmland. The mean yearly runoff could be reduced by 22.5% and under the condition of short duration and high intensity rainfall, the control effects were better than the long duration and low intensity rainfall. The sediment control effects by this measure on slope farmland were notable and stable. The yearly mean sediment reduced rate was 95.5%. The fluctuation range of sediment with change of rainfall characteristic in the measure plot was far smaller than the control plot. Through the measure of stone sill reverse-slope level terrace to reduce the slope erosion, indirectly increase the crop yield in slope farmland, so the yield of spring maize had been increased by 6.2% each year.

Keywords: slope farmland with thin soil layer; stone sill reverse-slope level terrace; sediment control; runoff control

我国是世界上水土流失最严重的国家之一, 水土流失主要分布于西北黄土高原、西南云贵高原、北方高原山地区、南方山地丘陵区 and 东北半湿润平原区等五大水土流失区^[1]。据水利部第一次全国水利普查 (2010—2012 年) 数据, 我国水土流失面积达 294.91 万 km², 约占国土面积的 31%。全国几乎每个省都有不同程度的水土流失, 其分布之广、强度之大、危害之重在全球屈指可数。

坡耕地是水土流失的主要策源地之一, 我国有 3 513 万 hm² 坡耕地, 其中 > 25° 的坡耕地 520 万 hm², 占坡耕地面积的 14.5%^[2]。坡耕地水土流失量一般占到流域水土流失总量的 40% ~ 60%^[3-4],

收稿日期: 2015-02-23
基金项目: 水利部公益性行业科研专项“工程开挖面与堆积体水土流失测算技术研究”(201201048); “风力作用下扰动地表侵蚀预报关键技术研究”(201201047); 国家科技支撑计划课题“农田水土保持工程与耕作关键技术研究”(2011BAD31B01)
作者简介: 田 飞 (1990—), 男, 湖北麻城人, 硕士, 研究方向为农田水土保持。E-mail: 1004479180@qq.com。
通信作者: 谢永生 (1960—), 男, 河南开封人, 博士, 主要从事农田水土保持及环境监测评价等研究。E-mail: ysxie@ms.iswc.ac.cn。

坡耕地面积大、坡度较陡的地区高达 70% ~ 80%，海河流域年平均土壤侵蚀总量 4 亿 t，25% 来源于坡耕地。三峡库区每年坡耕地产生的土壤流失量占库区总流失量的 73%^[5]，陕西省每年流入黄河泥沙的 40% ~ 60% 来自坡耕地^[6]，贵州省珠江流域坡耕地侵蚀量占流域总侵蚀量的 60% 以上。坡耕地水土流失的特点是：坡度越陡，土壤流失越严重；以水力侵蚀类型为主；土壤质地疏松、可蚀性大、养分流失严重。薄土坡耕地土层较薄，土壤侵蚀极易导致坡耕地的退化，针对这一类坡耕地水土流失治理措施的研究逐渐受到人们的重视。

水平阶措施作为一项简单易行的水土保持工程措施已被广泛应用于造林整地和坡面治理。该措施通过对坡面径流的调控，在减少坡面水土流失的同时蓄积水分，减少了坡面土壤养分的流失，从而改善坡面土壤的养分和水分状况，有利于坡面植被的生长^[7-9]。经过多年的研究与实践，在印证反坡水平阶的水土保持效果的同时，对于其作用原理和机理的研究也取得了大量的成果。孙浩峰等^[10]研究了半干旱区 5 种不同下垫面条件下的径流小区，确定了该区域水平阶埂高与最大坡长的关系；肖雨琳等^[11]通过测定¹³⁷Cs 面积活度换算土壤侵蚀速率，估算了北京山区坡地果园水平阶整地措施的水土保持效益，结果表明：水平阶整地措施减少 50% 左右的土壤侵蚀量，可起到降低土壤侵蚀的作用；景维杰等^[12]对不同间距水平阶集水和所造幼林生长状况进行研究，结果表明：水平阶较荒坡有明显的保水、集水效果。水平阶的集水、保水效果和造林成活率及幼林生长效果与其间距的增加呈反向变化；李苗苗等^[13]研究了反坡水平阶不同坡度下坡耕地的蓄水减沙效益，结果表明：坡度越小，反坡水平阶对径流和泥沙的拦截效果越明显，反坡水平阶有直接蓄水减沙的水土保持功效；邢鹏远等^[14]在昆明市松华坝水源区牧羊河中游坡耕地布设反坡水平阶与对照径流小区，观测 2 种径流小区的径流量、泥沙量、总氮及总磷输出浓度和输出量，结果表明：与对照相比，反坡水平阶径流量减少 34.14%，土壤流失量减少 57.17%，总氮和总磷输出量分别减少 33.32% 和 33.82%。坡耕地修反坡水平阶起到了较明显的保水、保土、保肥作用，对控制面源污染物具有重要意义。

水平阶措施多应用于坡面植被恢复和整地造林方面，且一般采用的是普通土坎水平阶，在坡耕地应用方面的相关研究相对较少。为了将水平阶措施应用于冀北土石山区薄土坡耕地，本研究在常规的水

平阶措施上进行了改进，用干砌石坎代替常规土坎，并通过对野外标准径流小区的观测，研究了石坎反坡水平阶对薄土坡耕地坡面水沙调控效果，为薄土坡耕地的治理提供了新的途径和方法。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于河北省平泉县西部东北沟小流域 (118°33'9"E ~ 118°37'9"E, 41°3'7"N ~ 41°6'19"N)，属燕山山脉中低区，海拔在 593 ~ 1 179 m，属于流入潘家口水库的滦河水系。该流域地貌类型为土石低山，气候类型为暖温带大陆性季风气候，年平均气温 7.1℃，无霜期 135 d，多年平均降雨量为 540.8 mm，年均蒸发量为 1 670 mm，有记录最大年降水量 771.4 mm，最小年降水量为 336.9 mm，降水约 80% 集中在 6—9 月，10 年一遇大暴雨 6 h 降雨量为 72 mm，20 年一遇大暴雨 6 h 降雨量为 83 mm。土壤类型主要为棕壤、褐土、黄绵土、粗骨土、石质土以及新积土等；所属的侵蚀类型区为北方土石山区，流域多年平均侵蚀模数为 $2\,356\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，属轻度侵蚀，坡耕地平均侵蚀模数为 $6\,122\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，属强度侵蚀，其中 15° ~ 25° 坡耕地平均侵蚀模数达到 $9\,550\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，属极强度侵蚀。东北沟小流域在地貌、气候、土壤、植被类型等方面在冀北山区具有广泛代表性，并于 1991 年被列为滦河重点治理工程项目区。该流域于 20 世纪 90 年代初开始实施封山禁牧，位于该流域的居民的养殖业规模逐渐减小，主要以种植业为主。

1.2 径流小区的布设

在阳坡选择较为平直的地块设置垂直投影面积为 $20\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的标准径流小区两个，分别为对照小区 (CK) 和石坎反坡水平阶措施小区 (MP)。小区土壤为新积土，土层厚度为 1 m，均用不透水的浆砌水泥墙圈起，上方设排水沟减少坡顶来水对小区的影响，每个径流小区底端设置两个纵向连通的 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的方形集流池来收集降雨产生的径流和泥沙。两小区均种植春玉米，品种为“雅玉 27”，在坡面均采用等高耕作，在玉米生长期对于土壤及玉米的管理均不采用大型机械，操作工具主要为锄头、铁锹、镐头等小型农具，两小区的作物管理保持一致。石坎反坡水平阶阶宽 2.0 m，坎高 0.6 m，反坡坡度为 3°。阶间距的确定按照抵御 20 年一遇大暴雨的降雨标准进行计算：

计算时将阶面入渗速率与顺坡坡面入渗率近似看作相同 (按最不利情况进行考虑)，则阶间总产

流量 Q 的计算公式为:

$$Q = \frac{kH_{\rho}}{1000}(B + L\cos\alpha)^{[10]}$$

(1)

反坡容积 C 计算公式为:

$$C = \frac{1}{2}B^2\tan\beta$$

(2)

式中, Q 为阶间总产流量(m^3); C 为反坡容积(m^3); L 为阶间距(m); B 为阶面宽度; k 为径流系数; H_{ρ} 为降雨量(mm); α 为顺坡坡度; β 为反坡坡度。

按反坡阶面能全拦全蓄坡面全部径流来计算则 $Q = C$, 由此可以计算出阶间距为

$$L = \frac{500B^2\tan\beta}{k\cos\alpha H_{\rho}} - \frac{B}{\cos\alpha}$$

(3)

径流小区顺坡坡度为 17° , 该地区径流系数取 0.2(北方地区降雨地表径流系数为 0.05 ~ 0.3), 由公式(3)可计算出石坎反坡水平阶小区的理论阶间距为 4.5 m, 实际设置时为保证小区阶间距的均匀, 设置阶间距为 4.2 m, 石坎反坡水平阶设计见图 1。

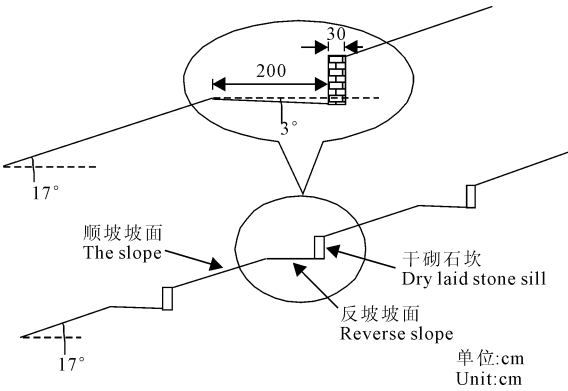


图 1 石坎反坡水平阶设计示意图

Fig.1 Designing schematic diagram of stone sill reverse-slope level terrace

1.3 数据处理

本文涉及到的气象数据均由设置在径流小区附近的小型气象站提供, 若单日出现多场降雨则按照次降雨量进行加权平均, 以多次降雨强度的加权平

均值作为该日的平均雨强。

根据集流池收集到的径流和泥沙来测定并计算出坡面的产流产沙量, 径流体积根据集流池标出的刻度线直接读取, 泥沙的测定方法采用取样法进行测定, 取样前将集流池内的水沙充分搅匀, 快速舀取 1 000 mL 左右的混合样(重复取样 3 次), 先将混合样全部转移到量筒中测量样品体积, 体积测定完毕后转移到铝盒中静置 24 h, 待泥沙完全沉淀去除上层清液, 再将铝盒放入烘箱中在 105°C 条件下烘干, 称重后计算烘干泥沙的重量; 若集流池内径流体积小于 3 000 mL, 则将池内径流全部收集进行测量。通过取样体积计算出单位体积泥沙含量, 由单位体积含沙量及集流池径流总量即可计算出小区降雨产沙总量。

本文采用 SPSS 10.0 进行数据的相关性分析, 利用 Excel 2003 进行作图。

2 结果与分析

2.1 坡面降雨的侵蚀特征值及其相关性

试验区多年平均降雨量为 530 mm, 2012 年累计降雨量为 432.1 mm, 属枯水年, 2013 年降雨量为 553.4 mm, 属平水年。从表 1 中调控率来看, 反坡水平阶对于薄土坡耕地的径流和产沙均有一定的调控作用, 反坡水平阶可减少坡耕地坡面产流次数、径流量和侵蚀量。2012 年和 2013 年的坡面侵蚀总量调控率分别达到了 94% 和 97%, 该措施对于坡面产沙的调控作用十分明显, 相对于该措施显著的坡面产沙调控作用, 其径流调控效果不及产沙调控作用, 2012 年、2013 年的调控率分别为 28% 和 17%。

从表 1 中可以看出, 2013 年试验区的年降雨量明显大于 2012 年, 随着降雨量的增大, 由于试验坡耕地的土层较薄, 反坡水平阶措施的径流调控作用受到土壤蓄渗总量的限制, 导致该措施的径流调控率有所下降, 产沙调控效果则比较稳定, 变化不大, 两年的调控率都保持在 90% 以上。

表 1 径流小区侵蚀总体情况

Table 1 General situation of erosion state in runoff plots

年份 Year	处理 Treatment	年累计降雨量/mm Total rainfall of the year	径流总量 / m^3 Total runoff	径流调控率/% Controlling rate of runoff	侵蚀总量/kg Total sediment amount	侵蚀调控率/% Controlling rate of sediment
2012	CK	432.1	0.88	28	67.26	94
	MP	432.1	0.64		4.13	
2013	CK	553.4	1.16	17	1055.99	97
	MP	553.4	0.96		31.12	

本文选取了 2012 年和 2013 年汛期(6—10 月)两小区有坡面径流产生的 17 场降雨的坡面产沙和径流数据,对两小区 4 组侵蚀特征值(CK 径流量、CK 产沙量、MP 径流量、MP 产沙量)和 3 组降雨特征

值(次降雨量、平均雨强、 I_{60})两两进行相关性分析,为提高分析的准确性,在分析过程中,剔除侵蚀特征值为 0 的数据组,得到相关性分析结果见表 2。

表 2 次降雨侵蚀特征值与降雨特征值相关性					
Table 2 Correlation between erosion characteristic value and individual rainfall characteristic value					
次降雨特征值 Individual rainfall characteristic value	相关性指标 Related indices	径流量 Runoff		产沙量 Sediment amount	
		CK	MP	CK	MP
次降雨量 Individual rainfall	Pearson correlation	0.391	0.533 *	0.113	0.316
	Sig(2 - tailed)	0.134	0.049	0.677	0.317
	N	16.000	14.000	16.000	12.000
平均雨强 Average rain intensity	Pearson correlation	0.069	0.602 *	0.699 * *	0.526
	Sig(2 - tailed)	0.798	0.03	0.003	0.079
	N	16.000	14.000	16.000	12.000
I_{60}	Pearson correlation	0.254	0.552 *	0.761 * *	0.691 *
	Sig(2 - tailed)	0.343	0.041	0.010	0.013
	N	16.000	14.000	16.000	12.000

注: * 表示在 0.05 水平相关; * * 表示在 0.01 水平相关。
Note: * indicates the relevant at 0.05 level; * * indicate the relevant at 0.01 level.

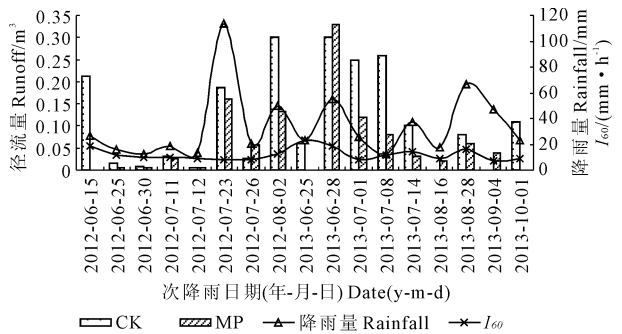
由表 2 可以看出,对照小区(CK)次降雨径流量与次降雨量、平均雨强、 I_{60} 之间都无显著相关性,而措施小区次降雨径流量与次降雨量、平均雨强、 I_{60} 之间均呈现出显著相关性(0.05 水平),其 Pearson 相关系数分别为 0.533、0.602 和 0.552,相关程度相近,由此可以看出,无论是对照小区(CK)还是措施小区(MP),坡面径流量均不是由某一个单独的降雨特征值所决定的,任何一个降雨因子都不能主导坡面径流的产生,坡面径流量受各降雨因子的综合影响。

对照小区(CK)次降雨产沙量与平均雨强、 I_{60} 均呈现出极显著相关性(0.01 水平),Pearson 相关系数分别为 0.699 和 0.761,与次降雨量间无显著相关性;措施小区(MP)产沙量只与 I_{60} 呈现显著相关性(0.05 水平),与降雨量和平均雨强相关性不显著。由此可见,该区域坡耕地坡面产沙量主要是由降雨强度来决定,且相对于平均雨强,其与 I_{60} 的相关性更好。相对于对照小区(CK),措施小区(MP)次降雨产沙量与雨强之间的相关性被弱化,这是由于石坎反坡水平阶措施的设置有效地减少了大暴雨(降雨集中、强度大)对于坡面土壤的侵蚀,从而使得坡面产沙量对雨强的响应减弱,这是石坎反坡水平阶效果的体现。

2.2 石坎反坡水平阶对坡耕地径流调控

坡面径流产生的方式主要有两种,蓄满径流和超渗径流^[15-16]。有统计表明:降雨强度对土壤流

失量的影响程度北方明显高于南方^[17],尤以西北黄土地区最为显著;然而降雨量对土壤流失的影响程度南方却明显高于北方^[18-19]。本文选取了 2012 年和 2013 年汛期(6—10 月)两小区产生坡面径流的 17 场降雨,对其坡面径流特征进行了对比分析(图 2)。通过对小区次降雨径流量和降雨特征值(次降雨量、平均雨强和 I_{60})进行相关性分析(表 2),对照小区(CK)次降雨坡面径流量与降雨特征值之间均没有显著的相关性,而措施小区(MP)次降雨坡面径流量与降雨特征值均显著相关,说明降雨量和雨强任何一个独立因素对坡面次降雨径流量都没有明显的主导作用,小区地表径流受到降雨量和雨强二者的综合影响。



I_{60} :最大 60 min 降雨强度 Maximal rainfall intensity in 60 minutes.

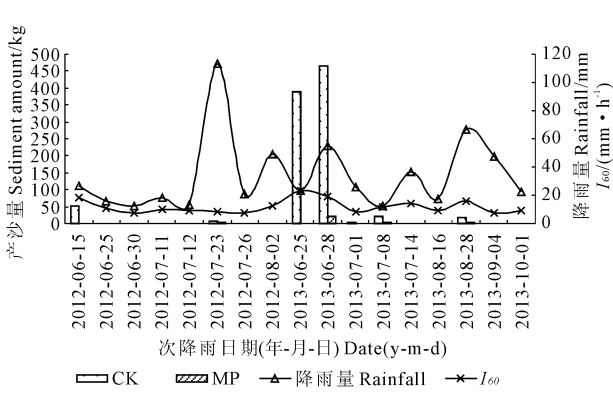
图 2 小区次降雨坡面径流量
Fig.2 The runoff amount of slope surface in plots for each rain

总体来看,措施小区(MP)的径流量要小于对照小区(CK)的径流量,在统计的 17 次降雨过程中,措施小区(MP)径流量小于对照小区(CK)径流量的共有 14 次,大于对照小区(CK)的只有 3 次,说明该措施对于坡面径流调控有一定的效果。从小区次降雨径流量随降雨特征的变化趋势来看,措施小区(MP)和对照小区(CK)随降雨特征的变化趋势并不一致,对照小区(CK)径流量最大的 2012 年 8 月 2 日,措施小区(MP)径流量仅有 0.13 m³,远低于该小区的次降雨径流最大值 0.33 m³,说明措施小区(MP)与对照小区(CK)在次降雨产流过程及产流方式上存在较大差异。通过对 4 次措施小区径流大于对照小区(CK)降雨特征进行分析发现,这几次降雨出现前的较短时间(3 日内)均出现过不同程度的降雨,石坎水平阶措施使得大部分降雨就地入渗,坡面土体的水分含量要远远大于对照坡面,因此当连续降雨出现时,土体水分逐渐趋于饱和,出现蓄满产流的情况,而对照小区(CK)由于降雨入渗的较少,其产流方式仍旧以超渗径流为主,此时便出现措施小区(MP)坡面径流量大于对照小区(CK)的情况。

由图 2 可以看出,在统计的 17 场降雨中,2012 年 7 月 23 日次降雨量最大,单日降雨量达到 113.5 mm,但该次降雨的最大 60 min 雨强只有 8.1 mm·h⁻¹,在这次降雨过程中,对照小区(CK)的径流量为 0.186 m³,措施小区(MP)径流量为 0.16 m³,径流调控率为 14%;2013 年 6 月 25 日最大 60 min 雨强达到最大,达到了 23.4 mm·h⁻¹,该次降雨量为 23.7 mm,此次降雨过程中对照小区(CK)径流量为 0.06 m³,措施小区(MP)径流量为 0,径流调控率为 100%,表明石坎反坡水平阶措施在大暴雨(雨强较大)条件下对于薄土坡耕地的径流调控效果显著,在降雨量较大但雨强较小的情况下的坡面径流调控效果不及大暴雨的调控效果。

2.3 石坎反坡水平阶对坡耕地产沙的影响

由图 3 可以看出,2012 年和 2013 年汛期(6—10 月)措施小区(MP)次降雨坡面产沙量均小于对照小区(CK),对照小区(CK)在该时期内累计产沙 959.94 kg,措施小区为 26.41 kg,措施小区产沙量远远小于对照小区(CK),说明石坎反坡水平阶对于薄土坡耕地坡面产沙调控效果十分显著。对照小区(CK)与措施小区(MP)次降雨坡面产沙量随降雨情况的变化趋势基本一致,由表 2 可知,两小区次降雨坡面产沙量均与 I₆₀具有显著相关性,而两小区坡面产沙量与次降雨量之间均无显著相关性,由此表明,该区域坡耕地土壤侵蚀的主导因素为降雨强度,坡面水蚀主要发生在雨强较大的降雨条件下。



I₆₀:最大 60 min 降雨强度 Maximal rainfall intensity in 60 minutes.

图 3 小区次降雨产沙量

Fig.3 The sediment amount of different plots for each rain

由表 1 可算出对照小区(CK)在 2012 和 2013 两年坡面累计产沙量为 1123.25 kg,汛期产沙量占到累计产沙总量的 85.5%,而 2013 年 6 月 25 日和 28 日两场暴雨的总产沙量为 854.40 kg,占到两年累计总产沙量的 76.1%,说明该地区的土壤侵蚀主要是由几场大暴雨引起的,而这两场大暴雨石坎反坡水平阶小区坡面产沙量分别只有 0 kg 和 19.35 kg,泥沙调控率分别达到了 100%和 95.8%,表明石坎反坡水平阶措施在大暴雨情况下亦有显著的减蚀效果。从统计的 17 场降雨来看,措施小区(MP)产沙量随降雨特征变化波动远远小于对照小区(CK),泥沙调控率均保持在 95%左右,效果十分稳定。

2.4 石坎反坡水平阶对玉米产量的影响

从 2012 年和 2013 年两年的玉米产量来看,措施小区(MP)的玉米产量均高于对照小区(CK),分别比对照小区(CK)高出 7.8%和 4.6%,且两小区 2013 年的玉米产量均高于 2012 年,而从年降雨量来看,2012 年降雨量只有 432.1 mm,属于枯水年,2013 年的全年降雨量为 553.4 mm,比 2012 年高出 121.3 mm,属平水年,说明该地区玉米产量在施肥相同的情况下受降水的影响较为明显,坡面土壤水分的调控对玉米产量有着重要影响,石坎反坡水平阶措施在枯水年型对于玉米产量的影响要大于平水年型,即该措施有助于干旱条件下的作物增产。

石坎反坡水平阶措施通过强化降雨入渗,提高了坡耕地土壤含水量,在干旱半干旱地区无灌溉条件下能够缓解土壤的缺水状况,从而促进作物的生长。褚利平^[20]等人通过对红壤坡耕地水平阶措施的研究表明,水平阶措施能够显著降低坡耕地养分的流失,具有保土、保水、保肥的作用。因此,石坎反坡水平阶措施通过减少耕地水分和养分的流失,提高了坡面水肥利用效率,从而促进坡耕地玉米的生长。

表 3 不同年份径流小区玉米生长量统计

Table 3 Statistic of maize growth in runoff plots for different years

年份 Year	处理 Treatment	面积 Area /m ²	年降雨量 Yearly rainfall /mm	玉米子粒重 Weight of maize kernel/kg			产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
				湿重 Wet weight	样本湿重 Wet weight of the sample	样本干重 Dry weight of the sample	
2012	CK	100	432.1	214	0.41	0.16	84.14
	MP	100	432.1	222	0.42	0.17	90.70
2013	CK	100	553.4	226	2.35	0.93	89.34
	MP	100	553.4	232	2.35	0.95	93.49

3 结论与讨论

该区域坡耕地坡面径流量受各降雨特征因子的综合影响,单独的降雨因子未表现出对于坡面径流的主导性;坡面产沙量则主要受到降雨强度的影响,无论是措施小区还是对照小区,坡面次降雨产沙量都与 I_{60} 呈显著正相关,但相对于对照小区,措施小区次降雨产沙量与雨强间的相关性被弱化。这是由于该小区土层较薄(设计厚度为 100 cm),在次降雨量较大而雨强较小的情况下坡面产流以蓄满产流为主,而当雨强较大时坡面则出现超渗产流,因此小区径流产生的原因兼有蓄满产流和超渗产流两种情况,受各降雨因子的综合影响。而坡面侵蚀主要来源于大暴雨形成的坡面细沟和切沟,雨强成为坡面产沙形成的主导因素。这与王万忠^[21]的研究结果一致,王万忠在对我国各地区降雨单因子与土壤流失关系的统计分析中得出:与土壤流失量关系最为密切的降雨特性因子为最大时段降雨强度(I_{30} 、 I_{60} 等),其次为降雨动能,再次为降雨量。

石坎反坡水平阶对于薄土坡耕地坡面径流有一定的调控效果,年均减少约 20%的坡面径流,其效果虽然不及泥沙调控效果显著,但是由于该措施对于径流的调控主要是通过强化降雨入渗来完成,因此该措施能够在一定程度上提高坡面土壤水分含量,其径流调控作用对于坡耕地作物的生长有着重要的影响。石坎反坡水平阶的径流调控机理为强化降雨入渗:通过反坡的拦蓄将地表径流汇集于反坡阶面,一方面由于水平阶的反坡的构造使得径流能够更长时间地停留在阶面上,增加了入渗的时间,另一方面反坡的蓄积作用使得阶面上有一定厚度的水层出现,增大了水分向下的渗透压。这两方面的作用使得降雨能够最大限度地向下入渗,从而减少地表径流的产生,既能减少径流对坡面度土壤的冲刷,又能增加坡面土壤的水分含量,这对于北方干旱、半干旱无灌溉条件地区的作物生长有一定的促进作用。

石坎反坡水平阶对薄土坡耕地坡面泥沙调控作用十分显著,年均泥沙调控率在 90%以上,这与王萍等^[22]的研究结果较为一致。石坎反坡水平阶的泥沙调控机理在于截短坡长、降低径流速度,减少沟蚀的形成,根据已有的研究可知:沟蚀为坡面侵蚀的主要方式,一般占到流域侵蚀总量的 10% ~ 94%^[23]。石坎反坡水平阶一方面截断了坡面连续的地表径流,有效地控制了面蚀、细沟向切沟、冲沟的发育,另一方面,该措施在坡面形成的反坡有一定反坡库容,能够蓄积一定量的地表径流,减缓了地表径流速度,降低了地表径流的侵蚀力,并且由于反坡具有强化入渗的作用,从总体上减少了坡面径流总量,从而起到了坡面减蚀的作用。

石坎反坡水平阶通过对坡面径流、泥沙的调控,减少了坡面养分的流失、提高了坡面土壤水分含量,从而提高了坡耕地的生产力,对于提高农作物产量也有一定的作用。由水平阶措施能够有效减少土壤养分的流失,其在控制农业面源污染方面发挥了重要作用,因此其生态效应远远大于其直接经济效益。

参 考 文 献:

[1] 付 斌.不同农作处理对坡耕地水土流失和养分流失的影响研究—以云南红壤为例[D].重庆:西南大学,2009.

[2] 汪亚峰,李茂松,卢玉东,等.试论退耕还林中对坡度标准的界定[J].水土保持科技情报,2004,(6):25-27.

[3] 王馨凤,王丽华.大力推进我国水土流失的综合防治[J].今日国土,2008,(3):17-19.

[4] 潘竟虎,张伟强,秦晓娟.陇东黄土高原土壤侵蚀的人文因素及经济损失分析[J].中国水利,2008,(12):37-39.

[5] 周其坤,徐深伶,韦忠阳,等.织金县坡耕地水土流失治理探析[J].现代农业科技,2010,(17):315-316.

[6] 倪文进,杨竹霜.实施“坡改梯”的政策初探[J].中国水土保持,1999,(10):34-35.

[7] Gupta G N. Rain-water management for tree planting in the Indian Desert[J]. Journal of Arid Environments, 1995,31:219-235.

[8] Ojasvi P R, Goyal R K, Gupta J P. The micro-catchment water har-

vesting technique for the plantation of jujube (*Zizyphus mauritiana*) in an agroforestry system under arid conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 41: 139-147.

[9] Gupta G N, Limba N K, Mutha S. Growth of prosopis cineraria on microcatchments in an arid region[J]. *Annals of Arid Zone*, 1999, 38: 37-44.

[10] 孙浩峰,陈天林.半干旱黄土丘陵区水平阶整地规格与降雨量的关系[J].*水土保持通报*,2013,33(6):28-31.

[11] 肖雨琳,魏 欣,刘宝元,等.北京山区果园水平阶整地措施的水土保持效益[J].*中国水土保持科学*,2013,11(6):81-86.

[12] 景维杰,韩蕊莲,侯庆春,等.不同间距水平阶集水及造林效果的研究[J].*西北林学院学报*,2004,19(3):38-40.

[13] 李苗苗,王克勤,陈志中,等.不同坡度下反坡水平阶的蓄水减沙效益[J].*水土保持研究*,2011,18(6):100-104.

[14] 邢鹏远,王克勤,杨绍兵,等.反坡水平阶水土保持效益观测[J].*中国水土保持科学*,2011,8(2):119-124.

[15] 王万忠,焦菊英.黄土高原降雨侵蚀与黄河产沙[M].北京:科学出版社,1996.

[16] 王万忠,焦菊英.中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J].*水土保持通报*,1996,16(5):1-9.

[17] 卢 瑛,龚子同,张甘霖.城市土壤的特性及其管理[J].*土壤与环境*,2002,11(2):206-209.

[18] 刘国华,傅伯杰,方精云.中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J].*生态学报*,2000,20(5):733-740.

[19] 刘纪远,于贵瑞,王绍强,等.陆地生态系统碳循环及其机理研究的地球信息科学方法初探[J].*地理研究*,2003,22(4):397-405.

[20] 褚利平,王克勤,白文忠,等.水平阶影响坡地产流产沙及氮磷流失的试验研究[J].*水土保持学报*,2010,24(4):1-6.

[21] 王万忠,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布[J].*水土保持学报*,1995,9(4):5-16.

[22] 王 萍,王克勤,李太兴,等.反坡水平阶对坡耕地径流和泥沙的调控作用[J].*应用生态学报*,2011,22(5):1261-1267.

[23] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. *Catena*, 2003, 50: 91-133.

(上接第 233 页)

3 结 论

蒸发过程中,由于盐分溶于水分,水分既是盐分的溶剂也是盐分运移的载体。土壤表层在蒸发拉力作用下土壤盐分离子会随着水分离子的移动而发生向上的迁移,导致下层土壤的盐分不断向上聚集至表层。同时,在蒸发作用中,温度梯度下的水分运移同时决定了盐分迁移的主要变化趋势。距地表 30 cm 以下土体本身盐分并未增加,仅作为一个通道起到盐分的传递作用,表层盐分聚集明显。 K^{+} 、 Na^{+} 和 Mg^{2+} 的含量从纵剖面分析都呈现自下而上 50 ~ 25 cm 逐渐减小,25 ~ 0 cm 逐渐升高的趋势,并且三种离子都在 25 cm 埋深即土柱的 1/2 处产生一个最小值;除去表层由于反盐堆积的离子外, CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 在蒸发过程中无太大波动。蒸发结束后,四种阴离子除 HCO_3^{-} 含量大于初始值外,其它三种离子均小于初始值。主要因为在积盐过程中,由于碳酸钙($CaCO_3$)发生了水解 $CaCO_3 + H_2O = Ca^{2+} + HCO_3^{-} + OH^{-}$ 。 Ca^{2+} 与 HCO_3^{-} 有着相互制约的作用。蒸发结束后除 CO_3^{2-} 外, HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 七种离子均表现与总盐一致“表聚”的分布特征。

参 考 文 献:

[1] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.

[2] 寇建平,毕于云,赵立欣,等.中国宜能荒地资源调查与评价[J].*可再生能源*,2008,26(6):3-9.

[3] 贡 路,刘曾媛,塔西甫拉提·特依拜.极端干旱区绿洲土壤盐分特征及影响因素[J].*干旱区研究*,2015,(4):657-662.

[4] 王全九,王文焰,吕殿青,等.膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J].*农业工程学报*,2000,16(4):54-57.

[5] 樊自立,陈亚宁,李和平,等.中国西北干旱区生态地下水埋深适宜深度的确定[J].*干旱区资源与环境*,2008,22(2):1-5.

[6] Zhang R. Modeling flood and drip irrigations[J]. *ICID Journal*, 1996, 45 (2): 81-92.

[7] 赵成义,王玉潮,李子良,等.田块尺度下土壤水分和盐分的空间变异性[J].*干旱区研究*,2003,(4):252-256.

[8] 吕殿青,王全九.土壤盐分分布特征评价[J].*土壤学报*,2002,39(5):720-725.

[9] 王全九.非饱和土壤水与溶质迁移规律研究[D].西安:西安理工大学博士后出站报告,1999.

[10] 张学英.潜水蒸发与土质及地下水埋深关系[J].*地下水*, 2002,14(1):8-9.

[11] 王全九.土壤溶质迁移特性的研究[J].*水土保持学报*,1993,7(2):10-15.

[12] 苏里坦,阿不都·沙拉木,宋有陈.膜下滴灌水量对土壤水盐运移及再分布的影响[J].*干旱区研究*,2011,(1):79-84.