

降雨和水保措施对三峡库区坡地水土流失的协同影响

姚祖军¹ 王娜娜² 黄雪滢² 丁树文^{2*}

(1. 湖北省水利厅移民培训中心, 湖北武汉 430070;

2. 华中农业大学资源与环境学院, 湖北武汉 430070)

【摘要】:三峡区域丰沛降雨、人为扰动等对坡地水土流失有影响。在湖北省秭归县张家冲径流监测点选取不同土地利用和水土保持措施类型配套结合的径流小区(具体措施为植物篱+柑橘(土坎水平梯田), 植物篱+油菜、花生轮作, 植物篱+茶叶, 植物篱+柑橘, 油菜、花生轮作, 柑橘), 研究多年降雨(共13年)影响下坡面径流和泥沙的特征, 并获得水土流失对降雨和水保措施的响应规律。结果表明:暴雨发生场次位于第二位, 但却是坡面产生径流和泥沙的主要降雨类型, 特大暴雨虽然产流产沙最大但仅发生1次不具备代表性。在同种降雨类型下, 与裸地相比, 各种水土保持措施均能不同程度地减少径流量, 其中采用“植物篱+经济林+工程措施”减流率超过30%, “植物篱+农作物/经济林”的减流率在20%至30%, 而单一的植物措施只能减少径流10%左右。与此同时, 水保措施的减沙效果也是显著的, 减沙率依次为种植茶叶(超过50%)>种植柑橘(40%~50%)>种植农作物(30%~40%)。相关性分析进一步证明坡面径流泥沙与降雨侵蚀力呈现显著相关性($r>0.8$), 而降雨侵蚀力对径流泥沙的影响又受水保措施的调控。研究结果对三峡库区坡地水土保持措施配置有借鉴意义。

【关键词】:植物篱 柑橘 径流 土壤流失量 降雨侵蚀力

【中图分类号】:S157 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2022)10-2272-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj202210015

根据第三次全国水利普查数据显示,我国水土流失面积达271.08万 km^2 ,其中水蚀面积为129.1万 km^2 ,水土流失严重^[1]。湖北省是全国水土流失较为严重的省份之一,全省水土流失面积达3.20万 km^2 ^[2]。省内坡地水土流失尤为严重,是高强度土地利用、单一林分结构、丰富降水共同作用的结果^[3,4]。三峡库区是中国坡耕地分布最集中的地区之一(坡度 $7^\circ\sim 25^\circ$ 的坡耕地占80%以上),坡耕地同样是该区域土壤侵蚀的主要地类,年土壤侵蚀量高达9450万 t ^[5]。坡耕地水土流失,不仅易使土壤耕层变薄、肥力降低^[6],而且作为三峡库区泥沙的主要来源,侵蚀泥沙及携带的养分进入水库会导致泥沙淤积和水体恶化^[7,8]。影响三峡水库的使用寿命和综合效益的发挥^[9],危及当地生态环境安全。以秭归县为例,2002年卫星遥感观

¹收稿日期:2021-11-01;修回日期:2022-02-14

基金项目:湖北三峡移民培训中心互联网教育培训平台项目

作者简介:姚祖军(1970~),男,副教授,主要研究方向为湖北省水库移民培训、移民服务工作。E-mail:925239456@qq.com

*通讯作者 E-mail:dingshuwen@mail.hzau.edu.cn

测显示有 1253.51km² 的水土流失面积, 占版图面积的 51.6%, 水土流失较为严重。因此, 为减缓坡耕地水土流失状况, 需要采取符合可持续发展的水土流失综合防治措施^[10]。

国内外学者对水土保持进行了大量研究, 也论证了不同水保措施的作用^[11, 12]。柏勇等^[13]等研究了不同土地利用措施对石漠化地区水土流失的影响, 结果表明水保林减少径流泥沙量效果最好, 经果林次之。刘洪鸽等^[14]也证明了在秭归县的径流小区坡面设置紫穗槐植物篱, 对于种茶和种粮地块的水土流失有明显的抑制作用。香根草植物篱和新银合欢植物篱在紫色土坡耕地也发挥了提高表层土壤理化性质和减少产沙产流的作用(黄鑫等^[15], 马星等^[16])。这些植被措施对土壤保护的良好效益, 与植物保护土壤团聚结构、增加土壤水分入渗率、增加下垫面粗糙度, 减缓降雨对地面的直接击打和降雨侵蚀力密切相关。针对不同土壤类型, 不同土地利用和植被类型对降雨拦截和侵蚀力减缓的效果不同, 植物和降雨对土壤侵蚀的协同影响也十分复杂。

为了揭示三峡库区土壤侵蚀程度和退耕还林效果, 以期对三峡库区水土流失规律研究和水土保持生态建设提供参考依据。本文以秭归县张家冲径流为研究区域, 探讨降雨在不同土地利用和水土保持措施配置下的径流小区的侵蚀作用、水保措施对降雨引起的侵蚀产流产沙规律的影响, 进而揭示降雨和水保措施对坡面水土流失发生过程和机制的协同影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省秭归县(110° 57' 20" E, 30° 46' 51" N), 属典型的长江三峡山地地貌, 最高海拔 2047m, 最低海拔 40m。属亚热带大陆性季风气候, 盛夏日均气温在 27℃ 以上, 年平均降水量为 1321.0mm。区域属花岗岩出露区域, 岩性易风化, 土壤为黄棕壤。植被类型以针、阔叶混交为主, 主要有柏树(*Cupressus funebris*)、柑橘(*Citrus reticulata*)、茶(*Camellia sinensis*(L.) O. Kuntze)、油茶(*Camellia oleifera*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等, 林草覆盖率达 62.6%。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择和径流小区水保措施设置

选择具有严重水土流失问题的秭归县张家冲流域作为研究地点, 该流域水土流失面积达到 0.97km², 占土地总面积的 60%。在张家冲径流监测点设置了不同径流小区, 小区投影面积为 20m²(长 10m, 宽 2m), 小区坡度均为 25°, 小区四周用水泥墙隔开。径流小区布设了不同的处理, 具体处理为植物篱+柑橘(土坎水平梯田), 植物篱+油菜、花生轮作, 植物篱+茶叶, 植物篱+柑橘, 油菜、花生轮作、柑橘。囊括了不同的土地利用类型(果园、茶园、旱地和裸地)和水保措施(植物篱和土坎), 并且裸地作为对照, 具体处理情况见表 1。径流小区示意图见下图 1。种植作物的小区按同一密度进行作物种植, 且耕作和施肥均进行统一管理。

表 1 径流小区土地利用和水土保持措施基本情况

小区编土地利用类			
号	型	水土保持措施	基本情况
1	果园	植物篱+柑橘（土坎水平梯田）	紫穗槐植物篱，覆盖率为 70%，柑橘株 x 行距 (cm):200x200
2	旱地	植物篱+油（、花生（油菜和紫穗槐植物篱，油（、花生轮作，花生轮作）	油（密度：15 株/hm ² ，花生密度：25 株/hm ²
3	茶园	植物篱+茶叶	紫穗槐植物篱，覆盖率为 80%，茶叶株 x 行距 (cm):200x200
4	果园	植物篱+柑橘	紫穗槐植物篱，覆盖率为 65%，柑橘株 x 行距 (cm):200x200
5	旱地	油（、花生（轮作）	轮作，油（密度：15 株/hm ² ，花生密度：25 株/hm ²
6	果园	柑橘	覆盖率为 60%，株 x 行距 (cm):200x200
7	裸地		无任何植物覆盖

1.2.2 降雨量的监测

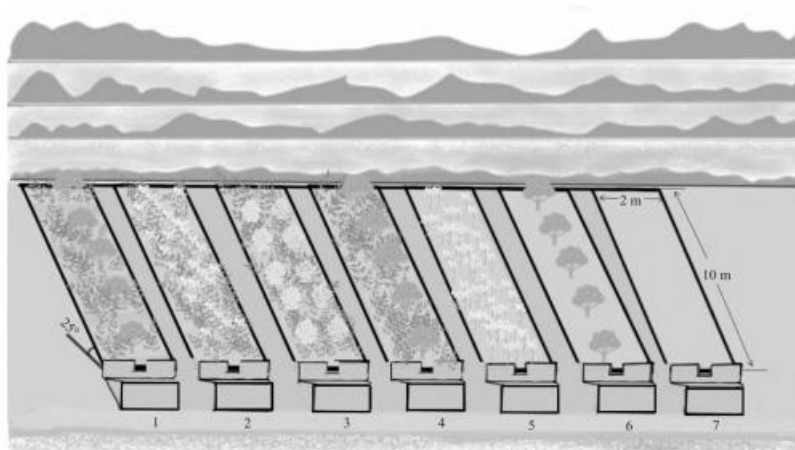
在距离径流场附近的裸地设置称重式自计雨量器，每次降雨后获取径流小区的降雨历时和降雨量。根据《降水量等级划分标准》GB/T25892—2002，将 2005~2017 年的侵蚀性降雨按降雨强度划分为 4 种类型，同时分析 13 年中的降雨天数、历时、降雨强度以及根据次降雨利用水利部研发的 RainRecord 软件所计算的降雨侵蚀力。

1.2.3 径流量及泥沙量的测定

每次降雨后通过集流池面积和水位计算径流量，径流量除以小区面积，得到径流深。同时降雨后，将汇流槽中的泥沙全部冲入集流池后进行搅拌取样，量取泥沙采样体积，过滤后测烘干土重。干土重除以体积为含沙量，取样所测含沙量乘以径流量即为总泥沙量。土壤流失量为泥沙总量除以小区面积。

1.3 数据处理

所有数据采用 SPSS22.0 软件进行处理，包括对降雨特征参数、径流深和土壤流失量进行相关性分析，对降雨侵蚀力、径流深和土壤流失量进行回归分析。文中所有数据采用 Origin2018 进行绘图。



注: 本示意图中径流小区处理编号与表1中小区编号一致。

图1 径流小区示意图

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

将2005~2017共13年中的侵蚀性降雨按照降雨强度划分为4个类型。其中，I型中雨发生频率最高，降雨场次为76场，占64.4%，II型暴雨次之，降雨场次为35场，占29.7%，其次为III型大暴雨和IV型特大暴雨，降雨场次分别为6场和1场，所占比例分别为5.1%和0.8%，而相应的平均降雨侵蚀力按照降雨等级从IV型到I型逐次降低(表2)。综合比较2005~2017年的降雨历时、降雨天数和降雨强度，显示2016年降雨天数最多且降雨雨强最大，平均降雨强度为5.9mm/h(图2)。

表2 多年不同降雨等级的降雨侵蚀力统计

降雨类型	降雨量 (mm) —— 降雨等级		降雨场次	所占比例 (%)	平均降雨侵蚀力 [MJ·mm/(hm ² ·h)]
	24h				
I型	25.00~49.90	中雨	76	64.4	63.47
II型	50.00~99.90	暴雨	35	29.7	164.66
III型	100.00~249.90	大暴雨	6	5.1	511.19
IV型	≥250.00	特大暴雨	1	0.8	2493.11

2.2 不同雨型下水土流失情况

首先，不同降雨类型在同一水保措施的小区引起显著的径流和土壤流失量差异，其数值受平均降雨侵蚀力影响。其中，中雨由于平均降雨侵蚀力最小引起的产流和土壤流失量最低，暴雨平均降雨侵蚀力居中所引起的土壤流失量位于第二位，特大暴雨引起的径流和土壤流失量最高但是仅发生1次不具备代表性。因此推测在一般的年份(缺乏特大暴雨情况)，暴雨是引起水土流失的主要类型。其次，在同一降雨类型下，与裸地相比，旱地农作物径流深高于裸地，而其他水保措施小区径流深均低于裸地(图3a)。以特大暴雨为例，径流深在裸地小区为53.62mm，旱地农作物下为80.12mm，旱地植物篱+农作物下为40.75mm，果园柑橘为26.12mm，植物篱+柑橘(土坎水平梯田)、植物篱+柑橘、植物篱+茶叶下数值近似约为17.91mm。而土壤流失量在所有的的水保措施小区均低于裸地小区，同样以果园和茶园数值最小(图3b)。值得注意的是虽然旱地农作物小区径流深高于裸地，但是土壤流失量却低于裸地，这预示着降雨侵蚀不是单一的冲刷，而是

受水保措施和土壤等因素共同影响^[17]。这与邓龙洲^[18]研究发现的土壤含沙量对产沙量的影响权重较高其次是雨强的结果一致。农作物翻耕扰动破坏表层土壤结构，使大团聚体结构破碎甚至释放黏粒颗粒堵塞土壤孔隙，减少降雨入渗^[19]，甚至在一定时间后黏粒颗粒在地表形成结皮，增加地表径流，这也解释了为什么农田的径流量甚至大于裸地。但是同时，农作物的叶片对雨水有截留效果根系对土壤有穿插固结作用，一定程度可能解释了比裸地土壤流失量低^[20]。在一些研究中也发现农作物的覆盖度低于柑橘和茶园，截留效果低^[21]。可见降雨对土壤的侵蚀受水保措施影响显著。

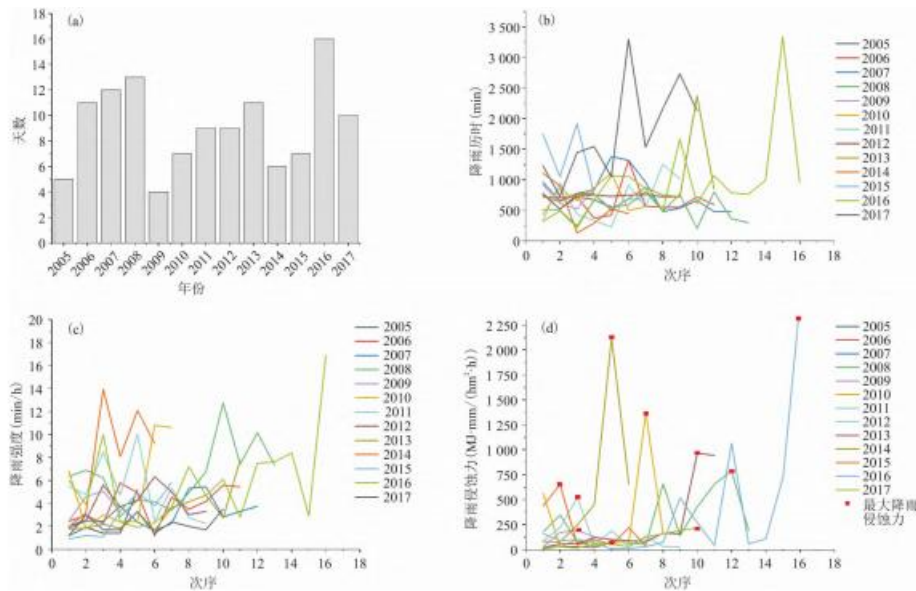


图2 降雨过程统计分析 (a) 降雨天数变化, (b) 降雨历时变化, (c) 降雨强度变化, (d) 降雨侵蚀力变化及各年最大降雨侵蚀力

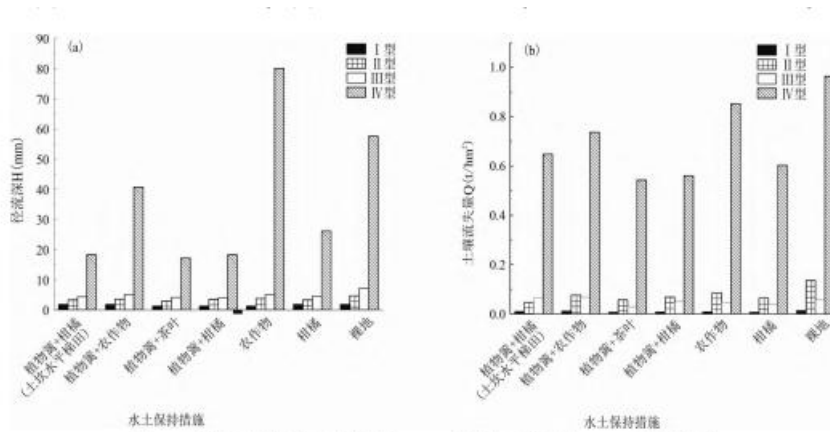


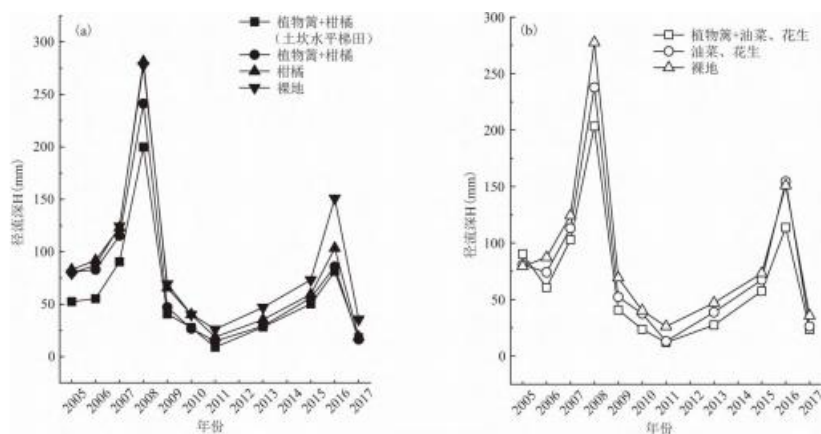
图3 不同雨型下的水土流失情况, (a) 径流小区径流深, (b) 土壤流失量

2.3 不同水土保持措施坡面的多年径流特征

2005~2017年, 水保措施对径流深的影响效果随年际时间发生变化, 基本与年总降雨量的年际规律保持一致。期间所有水保措施小区的平均径流深依次表现为: 裸露小区 (77.77mm) > 柑橘 (70.80mm) > 农作物 (68.87mm) > 植物篱+柑橘 (61.12mm) > 植物篱+农作物 (58.14mm) > 植物篱+茶叶 (59.98mm) > 植物篱+柑橘 (土坎水平梯田) (50.24mm), 各种措施相比裸地减少径流损失分别为 9%、11%、21%、25%、25%、35%。对柑橘园不同措施对比发现, 柑橘园在植物篱+柑橘(土坎水平梯田)结合下的径流深最小, 其次为植物篱+柑橘,

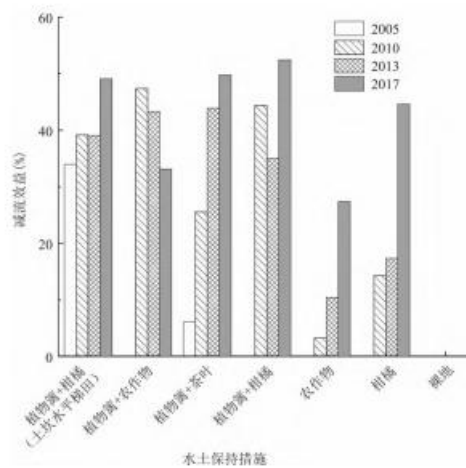
纯柑橘的径流深与裸地相近(图 4a)。在农作物小区, 植物篱对径流影响起到了类似柑橘地的效果(图 4b)。这与王晓荣等在三峡库区坡耕地土壤的研究规律一致, 采用黄花菜植物篱与经济林结合显著减少了径流和土壤 NP 损失。这可能与植物篱通过阻挡改变局部径流及根系固持土壤有效减少地表径流有关^[22]。植物篱的合理运用以及与其他工程、耕作措施的综合配置才能让水土保持效益达到最大。

以 2005、2010、2013、2017 年的水保措施减流效益比较为例, 发现在 2005 年当年, 植物篱+柑橘、植物篱+农作物、农作物、柑橘这四个小区的径流量比裸地不减反增, 可能是因为径流小区刚建立采取措施布设后, 由于翻挖条播农作物, 大窝定植柑橘, 幼苗移栽茶叶等人为活动对地表土壤扰动剧烈, 导致减流效益为零(图 5)。2005 年之后, 随着柑橘和茶树的生长, 水保措施的减流效果逐年提升(图 5)。植物篱+柑橘(土坎水平梯田)的减流效果始终最高(34.0%~49.1%), 这与柑橘林冠幅逐年增大高覆盖度拦截部分降雨和高土坎改变坡耕地微地形削减径流有关^[23, 24]。



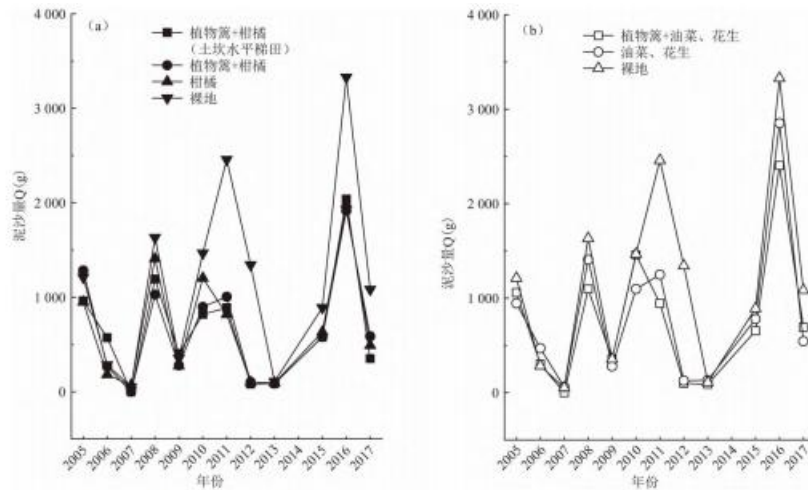
注: (a) 柑橘小区与裸露小区的径流深年变化, (b) 农作物小区与裸露小区的径流深年变化。

图 4 不同措施小区与裸露小区的径流深年际变化



注: 以 2005、2010、2013 和 2017 年为例。

图 5 水保措施减流率随年季时间变化



注: (a) 柑橘小区与裸露小区的产沙量年变化, (b) 农作物小区与裸露小区的产沙量年变化。
图 6 不同措施小区相比裸露小区的产沙年际变化

2.4 不同水土保持措施坡面的多年泥沙量特征

2005~2017 年, 水土保持措施对径流产沙量的影响效果同样随年际时间发生变化(图 6)期间水土保持小区的平均产沙量依次表现为: 裸露小区 (1093.57g) > 农作物 > 植物篱+农作物 > 柑橘 > 植物篱+柑橘 > 植物篱+柑橘(土坎水平梯田) > 植物篱+茶叶 (481.41g)。与裸露小区相比, 各种措施相比裸地减少泥沙损失分别为 30%、36%、42%、43%、44%、56%。与前面水土保持措施减流效益顺序略有不同, 种植茶叶的小区减沙率最高(超过 50%), 种植柑橘的小区减沙率次之(在 40%至 50%之间), 种植农作物(油菜、花生)的小区减沙率最低(在 30%至 40%之间)。

2.5 降雨和水土保持措施对径流和土壤流失量的协同影响

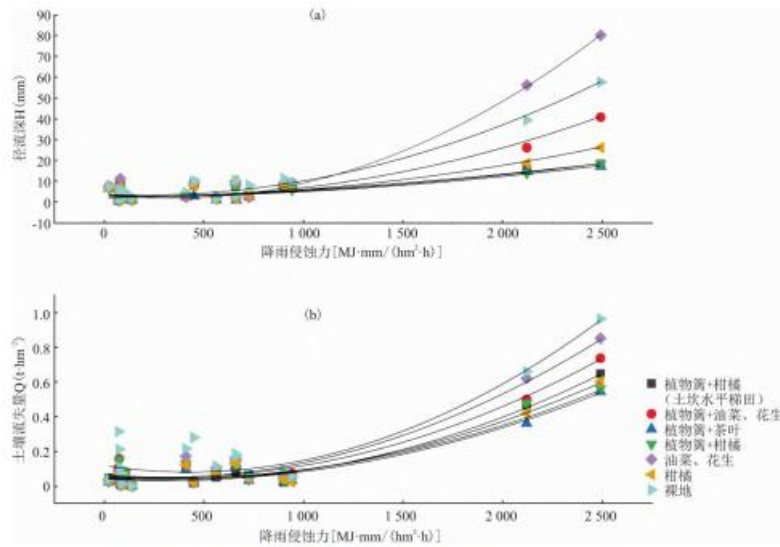
将降雨特征参数(降雨量、平均雨强和降雨侵蚀力)与径流过程径流总量特征(径流深)、土壤流失量结合起来分析, 发现降雨特征参数与径流深和土壤流失量呈现显著相关性(表 3)。其中, 降雨侵蚀力对径流深和土壤流失量的影响最大, 呈现极显著相关, 是引起水土流失的主导因子, 可以解释图 3 中的水土流失规律。因而降雨侵蚀力与产流产沙可以通过回归分析进一步建立联系, 发现径流量和土壤流失量随降雨侵蚀力的增大而增加(图 7)。且径流深、土壤流失量与降雨侵蚀力均呈二次函数关系($H=ax^2+bx+c$), 拟合度较好, 拟合区间分别为 [0.74, 0.98] 和 [0.84, 0.95]。

但是, 在施加水土保持措施后, 对降雨侵蚀力引起的土壤的破坏和水土流失有不同程度缓解作用^[25]。种植油菜、花生的农作物小区径流量随降雨侵蚀力的增加幅度最明显(甚至高于裸地), 植物篱+柑橘(土坎水平梯田)小区增加幅度最小, 暗示着单纯农作物轮作种植无法缓解降雨侵蚀力带来的负面作用, 而植物篱+果树+工程措施则与降雨协同对水土流失起到正面有效缓解作用。植物篱+工程措施对降雨侵蚀力的综合抑制作用效果最好, 可能与植物篱拦截坡面径流和改善土壤团聚体结构稳定性有关^[26]。据报道, 在植物篱存在的情况下, 土壤的入渗率可以提高, 允许更多的降水入渗, 减少地表径流和土壤表层遭受剥蚀, 从而达到控制土壤流失的目的^[27]。鲁克新等^[28]在黄土高原也证实了输沙模数与径流侵蚀功率之间的显著相关性并建立了基于径流侵蚀功率的流域次暴雨水沙响应模型。土坎工程措施减缓坡面径流速度, 因而也对抑制水土流失有积极作用。这些综合作用解释了为什么在秭归强降雨下, 植物篱+柑橘+土坎是抑制水土流失的最好措施^[29]。

表 3 降雨特征参数与径流深、土壤流失量的相关系数

	径流深 H(mm)							土壤流失量 Q(mm)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
降雨量(mm)	0.78**	0.67**	0.53**	0.50*	0.69**	0.59**	0.69**	0.69**	0.73**	0.73**	0.65**	0.73**	0.71**	0.74**
平均雨强(mm·h ⁻¹)	0.75*	0.53*	0.52*	0.58*	0.52*	0.51*	0.54*	0.55*	0.53*	0.51*	0.58*	0.50*	0.52*	0.56*
降雨侵蚀力 (MJ·mm/(hm ² ·h))	0.70**	0.87**	0.79**	0.77**	0.89**	0.83**	0.89**	0.87**	0.87**	0.88**	0.85**	0.90**	0.88**	0.82**

注:**降雨特征参数与 H、Q 在 P<0.01 水平极显著相关; *降雨特征参数与 H、Q 在 P<0.05 水平显著相关; 下划线表示相关系数最大; N=12.



注: (a) 径流深与降雨侵蚀力, (b) 土壤流失量与降雨侵蚀力。
图 7 径流深、土壤流失量与降雨侵蚀力的二次函数拟合曲线

3 结论

降雨类型和水土保持措施对坡面水土流失共同产生影响。降雨类型对径流和泥沙量影响差异较大,暴雨降雨侵蚀力较大是坡面产生径流和泥沙的主要类型(特大暴雨仅一次,除外)。在同种降雨类型下,不同水保措施对坡面降雨侵蚀影响显著不同。与裸地相比,运用“植物篱+柑橘(土坎水平梯田)”的减流效益最好,“植物篱+经济林”效益居中,农作物最差。水保措施的减沙效益与减流效益类似,唯一区别是“植物篱+茶叶”的减沙效益最好(56%)。水保措施对降雨引起的侵蚀的不同影响可以通过降雨和产流产沙的显著相关性和回归分析得以证实。

参考文献:

- [1] 李智广, 曹炜, 刘秉正, 等. 中国水土流失现状与动态变化 [J]. 中国水土保持, 2008(12):7-10, 72.
- [2] 湖北省水利厅. 2019 年湖北省水土保持公报 [N].
- [3] 何圣嘉, 谢锦升, 杨智杰, 等. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治 [J]. 中

国水土保持科学, 2011, 9(6):65—70.

[4] 陈洋, 张海东, 于东升, 等. 南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(5):150—157.

[5] 王晖, 廖伟, 陈峰云, 等. 长江三峡库区水土流失现状及治理对策探讨 [J]. 人民长江, 2007(8):34—36, 50.

[6] 何丙辉, 郭甜, 姚军, 等. 紫色土坡耕地不同施肥水平下泥沙中氮、磷流失特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(7):1—8.

[7] 霍洪江, 汪涛, 魏世强, 等. 三峡库区紫色土坡耕地氮素流失特征及其坡度的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(11):112—117.

[8] 王晓荣, 万伏红, 崔鸿侠, 等. 三峡库区不同退耕还林模式水土保持效益定位监测 [J]. 湖北林业科技, 2014, 43(4):1—4, 86.

[9] 王甜, 黄志霖, 曾立雄, 等. 三峡库区退耕还林土壤侵蚀及养分流失控制——以兰陵溪小流域为例 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(5):83—88.

[10] 史志华, 王玲, 刘前进, 等. 土壤侵蚀:从综合治理到生态调控 [J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2):198—205.

[12] NIU Y H, WANG L, WAN X G, et al. A systematic review of soil erosion in citrus orchards worldwide [J]. Catena, 2021, 206.

[13] 柏勇, 杜静, 杨婷婷, 等. 不同水土保持措施对石漠化区水土流失的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(2):103—110.

[14] 刘洪鹤, 钱峰, 周祖新, 等. 三峡库区等高植物篱的防蚀减沙效益分析 [C]. 2014年海峡两岸水土保持学术研讨会论文集, 2014:115—119.

[15] 黄鑫, 蒲晓君, 郑江坤, 等. 不同植物篱对紫色土区坡耕地表层土壤理化性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(4):173—177, 215.

[16] 马星, 王文武, 郑江坤, 等. 植物篱措施对紫色土坡耕地产流产沙及微地形的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(6):85—89, 188.

[17] BAGARELLO V. , DI STEFANO C. , FERRO V. , et al. Using plot soil loss distribution for soil conservation design [J]. Catena, 2011, 86(3) .

[18] 邓龙洲, 张丽萍, 范晓娟, 等. 不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(17):143—150.

[19] 陈武荣, 叶莹莹, 陆珊, 等. 喀斯特地区翻耕和玉米种植对土壤团聚体、氮素及微生物量的影响 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2021, 16(2):25—31.

[20] C A ZOLIN, M V FOLEGATTI, R MINGOTI, J PAULINO, R M SNCHEZ—ROMN, A M O GONZLEZ. The first Brazilian municipal initiative of payments for environmental services and its potential for soil conservation [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 137.

[21] 曹媛, 孙鹏, 姚蕊, 等. 不同雨强条件下工程措施对坡地产流产沙影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(6):1—7.

[22] XIANG Q M, CHUN J L, HAN N I, et al. Biomass, Litter fall and the Nutrient Fluxes in Chinese Fir Stands of Different Age in Subtropical China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2002, 13(3).

[23] 刘目兴, 宋兴敏, 卢世国, 等. 三峡库区不同植被覆盖坡地的土壤优先流运动特征研究 [J/OL]. 土壤学报:1—18[2022—03—14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210928.0111.002.html>.

[24] 周洋, 姜敏, 李梦雨, 等. 湘中丘陵区紫色土坡耕地水土保持措施效益的试验研究 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(6):134—138.

[25] Woubet G. Alemu, Assefa M. Melesse. Impacts of long term conservation measures on ecosystem services in Northwest Ethiopia [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(1).

[26] 蒲玉琳, 林超文, 谢德体, 等. 植物篱—农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(1):122—128.

[27] 王恒松, 张芳美. 黔西北乡土植物篱对典型石漠化区石灰土侵蚀动力学过程的调控 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(4):16—23, 80.

[28] 鲁克新, 李占斌, 李鹏, 等. 基于径流侵蚀功率的流域次暴雨输沙模型研究——以岔巴沟流域为例 [J]. 长江科学院院报, 2008(3):31—34.

[29] SHI W H, HUANG M B, WU L H. Prediction of storm—based nutrient loss incorporating the estimated runoff and soil loss at aslope scale on the Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(9)