

黄土丘陵沟壑区 20 年龄期梯田果园对不同标准 极端降雨侵蚀调控作用

林廷武¹, 高建恩^{1,2}, 龙韶博¹, 窦少辉¹, 张昊晨¹, 李兴华³

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所水利部
水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:针对黄土丘陵沟壑区极端暴雨频发, 严重威胁梯田果园安全生产, 而梯田果园对不同标准的极端暴雨侵蚀调控研究薄弱这一科学问题, 在延安方塔 20 年龄期的梯田果园上进行野外模拟降雨试验, 对果树、坡面植被、坡面枯落物 3 种调控因子在降雨强度由百年一遇增大到万年一遇时的侵蚀调控效果开展研究。结果表明: (1) 相较于无调控措施, 枯落物的减水率由 44.11% 增大到 52.55%, 坡面植被的减水率由 22.81% 增大到 26.98%, 而果树对产流的消减作用存在阈值, 其对产流的消减量由 4.49~5.81 L/m²。(2) 相较于无调控措施, 果树、坡面植被和枯落物对侵蚀产沙的消减量都随雨强增大而增大, 但坡面植被的减沙率随暴雨标准提升而减小, 果树的减沙率随暴雨标准提升呈正相关, 当降雨标准超过千年一遇时, 果树对产沙调控效果超过坡面植被, 枯落物在减少侵蚀产沙中一直处于主导地位, 其减沙率在 60% 以上。(3) 梯田果园在 3 个调控因子综合作用下, 减水减沙效益超过 80%, 遭受万年一遇暴雨时, 次降雨侵蚀模数仅为 93.75 t/km², 低于容许土壤侵蚀量, 说明随梯田果园生产年限增加安全标准提高。本研究能为黄土丘陵沟壑区数百万亩梯田果园梯安全生产提供科技支撑。

关键词:梯田果园; 侵蚀调控因子; 极端降雨; 野外人工模拟降雨

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)06-0114-06

Regulation of Different Standard Extreme Rainfall Erosion in Loess Hilly and Gully Region

LIN Tingwu¹, GAO Jianen^{1,2}, LONG Shaobo¹, DOU Shaohui¹,
ZHANG Haochen¹, LI Xinghua³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Research Center on Soil & Water Conservation of Ministry of Water Resources, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, China; 3. College of Water Resources and Architectural Eng, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In view of the frequent occurrence of extreme rainstorms in the Loess Hilly and gully region, which seriously threatens the safety of terraced orchards, the research on the regulation and control of extreme rainstorm erosion with different standards weak. In this study, field simulated rainfall experiments were carried out on 20-year-old terraced orchards in Fangta, Yan'an. The effects of three control factors, fruit trees, slope vegetation and slope litter, on erosion control were studied rainfall intensity increases from once in a hundred years to once in ten thousand years. The results show that: (1) with no control measures, the water reduction rate of litter increased from 44.11% to 52.55%, the water reduction rate of vegetation on slope increased from 22.81% to 26.98%, and the effect of fruit trees on runoff reduction had threshold value, which was between 4.49 to 5.81 L/m²; (2) comparing with no control measures, the reduction of erosion and sediment yield by fruit trees, slope vegetation and litter increased with the increase of rainfall intensity. However, the sediment reduction rate of slope vegetation decreases with the increase of rainstorm standard, and the sediment reduction rate of fruit trees is positively correlated with the increase of rainstorm standard.

收稿日期: 2019-05-12

修回日期: 2019-06-13

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC0504703); 国家自然科学基金(41877078, 41371276); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2016ZDJC-20); 中国科学院重要方向项目“水土保持工程关键技术研发与集成示范”(A315021615)

第一作者: 林廷武(1994—), 男, 湖北十堰人, 硕士, 研究方向为土壤侵蚀研究。E-mail: 531561526@qq.com

通信作者: 高建恩(1962—), 男, 山西运城人, 博士, 研究员, 研究方向为水土资源高效利用。E-mail: gaojianen@126.com

When the rainfall standard exceeded once in a thousand years, the regulation effect of fruit trees on sediment production exceeded that of slope vegetation. Litter has always been dominant in reducing erosion and sediment yield, and its sediment reduction rate is over 60%. (3) the synthetical effect of three regulating factors, benefits of water and sediment reduction exceed 80%. The erosion modulus of terraced orchards only 93.75 t/km² in case of in ten thousand years, which lower than the allowable soil erosion amount that the safety standard of terraced orchards with the increase of the production life of terraced orchards. This study can provide scientific and technological support for the safety production of millionsof terraced orchard terraces in the and gully region.

Keywords:orchards; erosion control factors; extreme rainfall; simulatedrainfall in the field

自 2000 年以来,随着人工汇集雨水技术的成熟^[1],山地果树水分匮乏得到解决,有利于高品质苹果生产的光热水土资源得到高效耦合,梯田果园这一水土保持高效农业生产形式在黄土丘陵沟壑区迅速发展,并成为当地经济发展的支柱。仅延安市梯田果园面积近 16.67 万 hm²,产值超过 100 亿元,是“绿水青山就是金山银山”在黄土高原生态产业发展的重要体现形式。但进入新世纪以来,黄土高原极端天气频发,特别是 2013 年出现的百年不遇的特大暴雨,对梯田果园的安全生产造成重大威胁^[2]。

近年来,学者们对梯田果园侵蚀调控方面的研究取得了一定的进展^[3-6]。Sang-Arun 等^[7]研究了梯田的结构和地表覆盖对梯田侵蚀的影响,随梯田级数增多,由上级田面到下级田面的过程中,其侵蚀形态由细沟侵蚀发展为冲沟;郝连安^[8]、贾立志^[9]、白先发^[10]等在对安塞方塔梯田果园进行野外长期观测的基础上,采用数学模型和室内外试验相结合的方法,研究了梯田果园果树的水肥匮乏、水窖配置、集雨补灌制度与方法等,分析了 2013 年百年不遇暴雨对梯田果园的侵蚀规律;刘士余等^[11]通过对红壤区坡地果园研究,得到在梯田果园裸露的梯壁上植草后,其拦蓄地表径流和控制土壤侵蚀的能力分别提高 22.5、30.62 倍;李晶晶等^[12]研究了高分子材料聚丙烯酰胺对黄土丘陵沟壑区坡地果园径流产沙的影响,认为随撒施量的增加,果园侵蚀泥沙量降低。但以往研究对黄土丘陵沟壑区梯田果园在不同标准极端降雨条件下的安全生产和侵蚀调控研究较为薄弱,为此,本研究在方塔果园布设野外径流小区进行人工降雨试验,分析梯田果园对不同标准极端暴雨的调控响应机制,以便为黄土高原果园的安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

径流小区位于安塞县沿河湾镇方塔村(108°50′—109°26′E,36°30′—37°19′N),地貌属黄土丘陵沟壑区,海拔 1 012.1~1 731.7 m。安塞县气候属中温带大陆性半干旱季风气候,四季长短不等,干湿分明,

年平均气温 8.8℃(极端最高温 36.8℃,极端最低温 -23.6℃),年平均降水量 505.3 mm,降水主要分布在 6—9 月。方塔梯田果园使用年限超过 20 a,边坡有较好的覆盖条件,有长茅草、匍匐冰草、铁杆蒿等多种杂草生长,盖度达 60%~65%,杂草高度主要在 20~80 cm 之间,坡面有丰富枯落物层,主要由枯枝落叶及腐殖质组成,厚度 6~10 cm,储量 3.5~9.6 kg/m²,土壤基本性质见表 1。

表 1 研究区土壤基本性质

| 指标 | 土壤容重/ (g·cm ⁻³) | 土壤有机质含量/ (g·kg ⁻¹) | 颗粒分级 | | |
|----|--------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| | | | 黏粒/% | 粉粒/% | 砂粒/% |
| 数值 | 1.38 | 8.55 | 16.82 | 63.04 | 20.14 |

1.2 径流小区布置

人工模拟降雨径流小区布设于安塞方塔梯田苹果园,由田面和隔坡两部分组成,田面部分为 2 m×2 m,田坎部分投影面积为 2 m×2 m。方塔梯田果园使用年限超过 20 a,受长期人为扰动,梯田边坡不平整,实地测量田面边缘部分有一定坡度(0°~1°),边坡坡度为 37°。其中一个小区有果树生长,果树株高 3 m,冠幅 1.6 m,郁闭度 0.6。每个小区投影面积约 8 m²(2 m×4 m),小区由高 0.3 m 铁皮围成,铁皮插入土层深度为 0.2 m,以消除侧向入渗的影响。小区下方安放集流装置,用塑料桶收集小区内降雨各时段的径流泥沙。

1.3 调控因子定义

梯田果园是由平坡段的田面及隔坡段两部分组成。在方塔梯田果园调查显示:当地果园管理条件较好,田面基本无杂草,主要为果树生长。因此,在梯田果园中,直接起调控作用的因子主要有果树、坡面植被、坡面枯落物。

1.4 试验设计

降雨模拟试验采用便携式侧喷降雨器,分别设置在小区的左右两侧。结合野外人工降雨的经验^[13],试验开始前测定径流小区土壤前期平均含水率,之后将径流小区用塑料布遮盖,进行降雨强度率定,当稳定到设计雨强后,迅速将塑料布揭开并开始计时。研究中分析了安塞地区多年降雨资料,参考《水土保持工程设计

规范》中的相关要求,认为高建恩等^[14]在黄土高原小流域水力侵蚀模拟试验设计与验证研究中,进行降雨当量分析中给出的相关资料,与本研究区降雨情况一致,可作为暴雨标准的划分依据。降雨设计见表 2。

表 2 降雨设计及暴雨标准划分

| 降雨强度/ (mm·min ⁻¹) | 降雨 历时/min | 降雨量/ mm | 暴雨标准 |
|----------------------------------|--------------|------------|-------------|
| 1 | 90 | 90 | 100 年一遇暴雨 |
| 1.5 | 60 | 90 | 1000 年一遇暴雨 |
| 2 | 45 | 90 | 5000 年一遇暴雨 |
| 2.5 | 36 | 90 | 10000 年一遇暴雨 |

小区坡面处理:(1) 保持坡面自然植被;(2) 对坡面植被进行去除,只保留枯落物层;(3) 清除枯枝落叶及松散腐殖质,达到基本裸坡。本次降雨模拟试验中,径流小区下垫面类型有 4 种:裸地+裸坡(LL)、果地+裸坡(GL)、果地+枯落物(GK)、果地+自然植被(GZ)(图 1)。因此,果树效益=GL-LL,枯落物效益=GK-GL,植被效益=GZ-GK,3 个因子总效益=GZ-LL。

1.5 样品采集及处理

径流样收集:模拟降雨过程中,坡面产流后,在接样口用塑料桶接收径流泥沙,每桶接满后记录时间,再收集下一个径流泥沙样,并对样品进行编号,依次进行直至降雨结束。

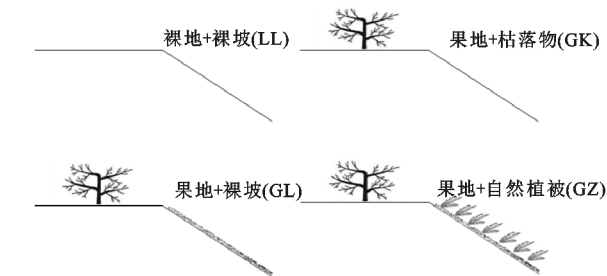
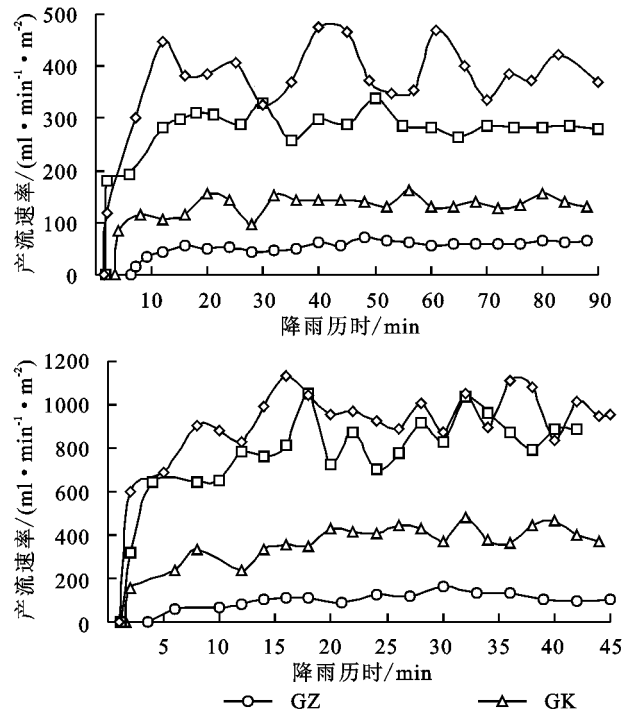


图 1 小区下垫面情况示意图

径流样处理:每个径流样收集后进行称重记录,然后将径流样静置,6 个小时后倒去上层清液,用烘干法(105°)将样品烘干后称量泥沙重量。

1.6 数据统计与分析

采用 Excel,SPSS 21.0 对数据进行统计与分析,Origin 9.0,Excel 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同侵蚀调控因子作用下产流特征

2.1.1 不同调控因子对产流过程的影响 在不同标准暴雨下,产流速率的时间变化规律都表现为先增大后在一定区间内波动稳定。果树、枯落物、坡面植被对径流过程的影响程度有明显差异,分析其产流动态变化过程(图 2),可以得出果树对产流速率的调控作用随降雨强度增大而减小,枯落物及坡面植被的调控作用随降雨强度增大而增大。

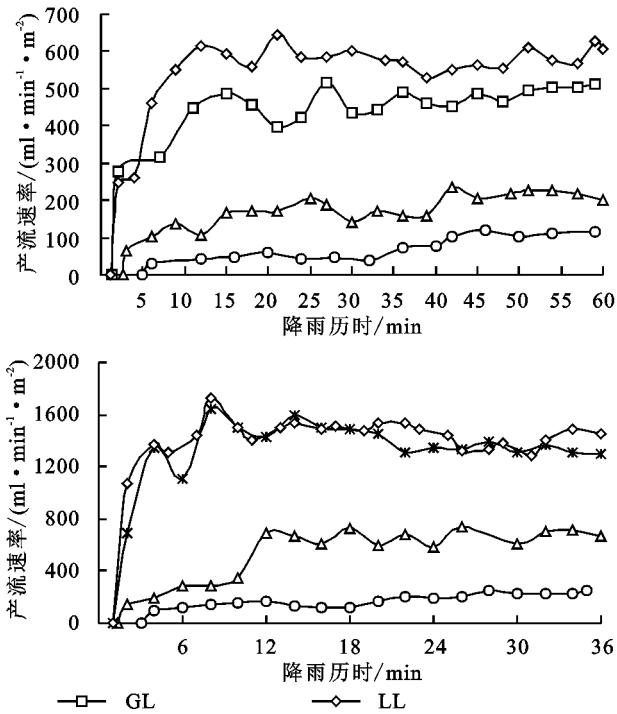


图 2 不同下垫面产流速率的时间变化曲线

同一雨强条件下,各调控因子对产流速率的消减能力随降雨强度的变化差异性明显。在百年一遇暴雨下,果树对产流速率的消减量 89.44 ml/(min·m²),

是坡面植被调控效益的 1.19 倍,是枯落物调控效益的 63.67%;在千年一遇暴雨下,果树对产流速率的消减量为 91.07 ml/(min·m²),是坡面植被和枯落物

调控效益的 93.54% 和 34.51%; 在 5000 年一遇暴雨下, 枯落物对产流速率的消减量达到了 407.3 ml/(min · m²), 是果树和坡面植被的 3.05, 1.61 倍; 在万年一遇暴雨下, 枯落物对产流速率的消减作用显著提升, 达到 767.31 ml/(min · m²), 是果树和坡面植被的 8.25, 2.21 倍。果树对产流速率的调控作用在雨强增大过程中较为稳定, 枯落物及坡面植被对产流速率的调控作用随降雨强度而增大, 坡面枯落物对梯田果园产流速率的调控起主导作用。

2.1.2 不同调控因子对产流总量的影响 降雨径流是土壤侵蚀发生的动力来源, 次降雨的产流总量可以反映侵蚀量的大小。4 种下垫面条件下, 小区产流总量随暴雨等级的提升呈增加趋势, 而且与果树对次降

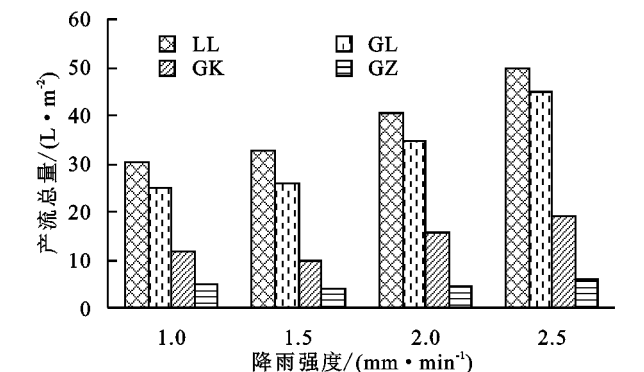


图 3 不同下垫面条件下小区产流总量

2.2 不同侵蚀调控因子作用下产沙特征

2.2.1 不同侵蚀调控因子对侵蚀产沙过程的影响 同一下垫面条件下, 随着降雨强度的增大, 小区侵蚀强度明显增强, 产沙峰值增大, 且产沙峰值出现的时间随降雨强度的增大而提前。不同调控因子对产沙速率的影响差异明显, LL 和 GL 条件下, 在 1 mm/min 和 1.5 mm/min 雨强时, 产沙速率表现为先陡增后趋于稳定, 再达到峰值后减小趋于稳定, 在 2 mm/min 和 2.5 mm/min 雨强时, 产沙速率表现为陡增达到峰值, 而后减小趋于稳定, 主要与侵蚀沟的发育有关; GK 和 GZ 条件下, 产沙速率表现为缓增而后趋于稳定(图 5)。

通过对不同等级暴雨条件下, 各小区侵蚀产沙过程的综合分析可得, 在百年一遇暴雨下, 枯落物对产沙速率的消减量为 3.38 g/(min · m²), 是果树及坡面植被调控效益的 7.69 倍及 3.96 倍; 在千年一遇暴雨下, 枯落物对产沙速率的消减量为 6.14 g/(min · m²), 是坡面植被和枯落物调控效益的 4.66 倍和 4.74 倍; 在 5000 年一遇暴雨下, 枯落物对产沙速率的消减量为 9.98 g/(min · m²), 是坡面植被和枯落物调控效益的 3.42 倍和 3.82 倍; 在万年一遇暴雨下, 枯落物对产沙速率的消减量陡增, 达到 21.01 g/(min · m²), 是

雨产流总量的消减作用相比, 枯落物及坡面植被对产流总量的调控效果明显高于果树(图 3)。

与 LL 相比, 不同等级暴雨下 GL, GK 和 GZ 的平均减水率分别为 14.23%, 63.14% 和 87.56%, 因此, 果树、枯落物和坡面植被的减水率分别为 14.23%, 49.96% 和 24.24%。可见, 各调控因子减水贡献率随降雨强度的变化而变化, 枯落物的减水贡献率远大于果树及坡面植被。由图 4 可以看出, 随暴雨等级提升, 枯落物的减水贡献率呈增大趋势, 由百年一遇时的 52.09% 增加到万年一遇时的 59.32%, 平均减水贡献率为 55.82%, 坡面植被的减水贡献率总体呈增大趋势, 平均减水贡献率为 27.85%, 而果树的减水贡献率呈减小的趋势, 由 20.89% 减小到 10.23%, 平均减水贡献率为 16.32%。

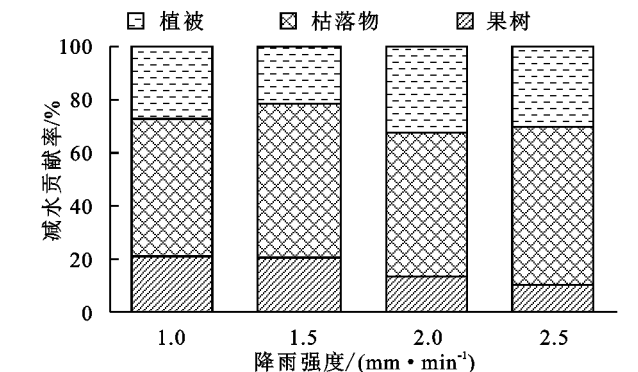


图 4 不同雨强下调控因子的减水贡献率

果树和坡面植被的 3.13, 4.58 倍。3 种调控因子对产沙速率的调控作用都随降雨强度的增大而增大, 果树对产沙速率的调控作用随降雨强度增大超过坡面植被, 枯落物对产沙速率的调控作用在任意等级暴雨下都远高于其他两个调控因子。

2.2.2 不同侵蚀调控因子对侵蚀产沙总量的影响 不同下垫面和不等级暴雨条件下, 侵蚀产沙总量随时间的变化曲线见图 6。LL 与 GL 下垫面条件下, 产沙总量曲线随降雨强度增大, 曲线由相交到分离, 说明果树对侵蚀产沙的调控作用随雨强增大显著增加。对不同下垫面条件下, 小区侵蚀产沙状况进行综合分析, 不考虑雨强影响, 果树减沙率为 14.25%, 枯落物减沙率为 60%, 坡面植被的减沙率为 15.95%。

各调控因子减沙贡献率如图 7 所示。果树的减沙贡献率与雨强呈正相关, 由 1 mm/min 时的 9.35% 增加到 2.5 mm/min 时的 19.4%, 平均减水贡献率为 15.7%, 与其减水贡献率表现出相反的结果。枯落物的减沙贡献率随雨强先略微减小后稳定, 平均减沙贡献率为 66.6%, 而坡面植被的减沙贡献率随降雨强度的增大呈减小趋势, 由 18.15% 减小到 14.71%, 平均减水贡献率为 17.7%。

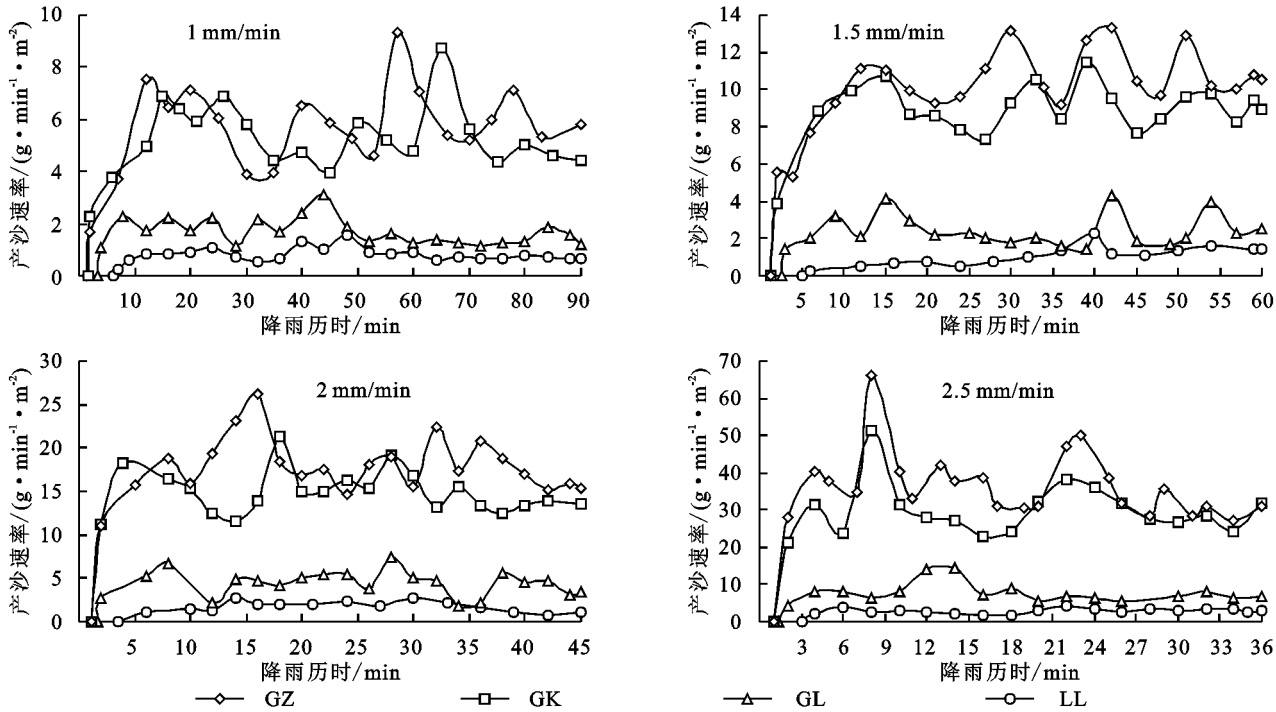


图 5 不同下垫面产沙速率的时间变化曲线

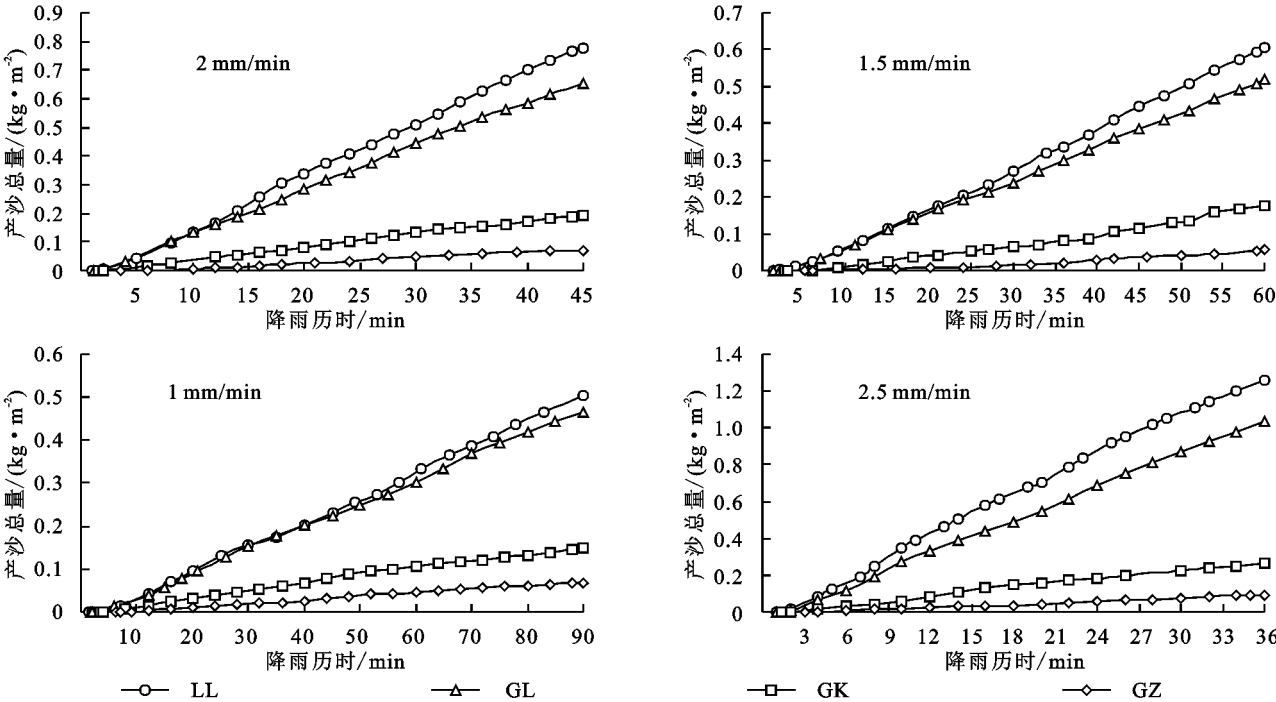


图 6 不同下垫面侵蚀产沙总量的时间变化曲线

在安塞方塔多年生梯田果园上,通过多个侵蚀调控因子的综合作用,其减沙效益可达 92.55%。在万年一遇的暴雨侵蚀冲刷下,其侵蚀模数仅为 93.75 t/km^2 ,远低于容许土壤流失量^[15],水土保持效益极高。在 2013 年 6—9 月,延安遭遇万年不遇暴雨灾害时,方塔梯田果园受灾害程度小,远低于其他梯田农业模式^[9-10],农业生产得到保障。因此,在果树、坡面植被、枯落物共同作用下,梯田抵抗暴雨的能力显著提升。

3 讨论

3.1 调控因子对产流的影响分析

各个调控因子对产流的调控作用一方面是自身的截留效果,另一方面是通过增加入渗来实现的。植物冠层叶片吸附截留降雨的能力是有限的,当截留量趋于稳定时,降雨量增大,截留量不变,截留率就会降低^[16]。果树冠层的截留能力有限,在模拟暴雨的过程中,截留量很容易达到饱和,而且果树根系较深,对表层土壤孔隙

度的改善较弱,因此,果树减水贡献率与降雨强度呈负相关。坡面植被种类多,草灌结构复杂,截留能力较强,同时草本植物根系较浅,对表层土壤结构有明显改良作用。枯落物层主要由枯枝落叶及腐殖质组成,蓄水保水能力强,既能改善表土层土壤结构,也能通过拦挡延长径流过程,增加入渗量。枯落物减水效益>坡面植被>果树,该结果与王红^[17]对不同水土保持措施的分析结果有较高的一致性。

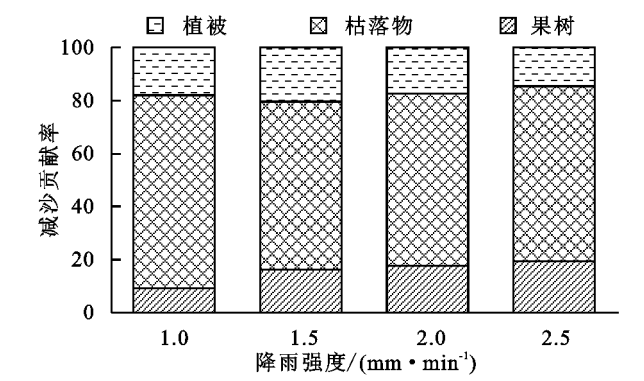


图 7 不同雨强下调控因子的减沙贡献率

3.2 调控因子对侵蚀产沙的影响分析

果树的减沙贡献率表现与其减水贡献率截然相反,分析认为:从能量角度来看,雨强越大,雨滴能量越大,通过树冠层的作用再到达地面时减少的能量越多^[18],对雨滴击溅侵蚀强度的消减越强,因此当雨强增大,侵蚀加剧时,果树减沙贡献率反而增大。坡面植被一方面通过覆盖,减小降雨对坡面击溅;另一方面,通过植物根系对土体固结及对坡面径流的减缓。枯落物的减沙能力从 3 个方面作用:一是可以减小雨滴对坡面的击溅侵蚀;二是可以通过机械作用阻挡坡面泥沙,有效降低坡面产沙量;三是可以减缓坡面径流,降低径流的携沙能力^[19-20]。

4 结论

(1) 枯落物及坡面植被对产流速率的调控作用,随暴雨标准提升呈增大趋势,而果树对产流速率的调控作用与暴雨标准呈负相关。对降雨产流总量的消减率表现为枯落物>坡面植被>果树,且枯落物减少率超过果树及坡面植被之和,在产流调控中占主导地位。果树受自身截留作用上限的影响,对产流量的消减作用存在阈值,其对产流总量的消减量稳定在 4.49~5.81 L/m²。

(2) 随暴雨标准提升,枯落物及坡面植被对产沙速率的调控作用呈减小趋势,稍有减小,但果树对产沙速率的调控作用明显增强。在百年一遇暴雨下,对产沙速率的调控作用为枯落物>坡面植被>果树,当暴雨标准提升到千年一遇以上时,对产沙速率的调控作用为枯落物>果树>坡面植被。枯落物在调控侵

蚀产沙中起主要作用,其减沙率在 60% 以上。

(3) 20 年 龄期的方塔梯田果园上,果树生长状况好,梯田隔坡上植被种类繁多,盖度高,且有着丰富的枯落物层,在各种调控因子综合作用下,在百年一遇到万年一遇的暴雨过程中,其减水效益为 84.68%~89.14%,减沙效益为 86.43%~92.56%。在万年一遇暴雨条件下,侵蚀模数仅为 93.75 t/km²,远低于容许土壤侵蚀量。说明目前方塔梯田果园可抵御万年一遇暴雨灾害,与 2013 年发生百年不遇暴雨的研究结果近似,因此延安方塔果园的综合调控模式可以作为黄土高原丘陵沟壑区梯田果园的示范样板。

参考文献:

[1] 高建恩.雨水利用技术研究进展与展望[C]//第四次全国雨水利用技术研究会暨学术年会专辑论文集.中国水利学会雨水利用专业委员会:《四川水利》编辑部,2004.

[2] 李慧娟,高建恩,张元星,等.延安极端降雨特性分析及对梯田侵蚀灾害影响[J].水土保持学报,2016,30(6):79-84.

[3] Zuazo V H D, Ruiz J A, Raya A M, et al. Impact of erosion in the taluses of subtropical orchard terraces[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 107(2):199-210.

[4] 焦菊英,王万中,李靖.黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J].水土保持学报,1999,5(3):59-63.

[5] 刘斌涛,宋春风,史展,等.西南土石山区水平梯田的水土保持措施因子[J].中国水土保持,2015(4):36-39.

[6] 严登峰.果园不同水土保持措施控制氮磷流失效果的研究[D].福州:福建农林大学,2007.

[7] Sang-Arun J, Mihara M, Horaguchi Y, et al. Soil erosion and participatory remediation strategy for bench terraces in northern Thailand[J]. Catena, 2006, 65(3):258-264.

[8] 郝连安,高建恩,张元星,等.基于土壤水分动态的梯田苹果园水窖配置[J].中国水土保持科学,2012,10(3):57-63.

[9] 贾立志,高建恩,张元星,等.黄土丘陵沟壑区梯田暴雨侵蚀状况及规律分析[J].水土保持研究,2014,21(4):7-11.

[10] 白先发,高建恩,贾立志,等.极端暴雨条件下黄土区典型梯田防蚀效果研究[J].水土保持研究,2015,22(3):10-15.

[11] 刘士余.红壤坡地果园水土保持效应的对比研究[J].水土保持通报,2006,26(4):7-10,78.

[12] 李晶晶,邹超煜,白岗栓.聚丙烯酰胺对坡地苹果园水土流失和土壤养分流失的影响[J].应用生态学报,2016,27(9):2991-2999.

[13] 温永福,高鹏,穆兴民,等.野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究[J].水土保持研究,2018,25(1):23-29.

- 114-120.
- [10] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [11] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):129-135.
- [12] 李玮,郑子成,李廷轩,等.不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].生态学报,2014,34(21):6326-6336.
- [13] 黄尚书,钟义军,叶川,等.深松与压实对红壤坡耕地土壤物理性质的影响[J].土壤通报,2017,48(6):1347-1353.
- [14] 刘志鹏,史东梅,金慧芳,等.红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究[J].中国土壤与肥料,2018(3):7-13.
- [15] 钟义军,黄欠如,武琳,等.水保措施对红壤旱地团聚体及其特性的影响[J].土壤通报,2014,45(4):961-965.
- [16] 安婉丽,高灯州,潘婷,等.水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J].环境科学学报,2016,36(5):1833-1840.
- [17] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation[J]. Physical Review Letters, 1985,54(12):1325-1328.
- [18] Turcotte D L. Fractals and Fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1986,91(B2):1921-1926.
- [19] 赵世伟,苏静,杨永辉,等.宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2005,12(3):27-28.
- [20] 黄尚书,武琳,叶川,等.耕作深度对红壤坡耕地花生根系生长及活力的影响[J].江西农业学报,2018,30(12):9-12.
- [21] 杨贺菲,赵静,张旭.免耕和稻草覆盖对红壤旱地土壤物理性质及玉米产量的影响[J].江西农业学报,2018,30(10):45-49.
- [22] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research, 2009,103(2):412-418.
- [23] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等.耕作对东北黑土团聚体粒级分布及其稳定性的短期影响[J].土壤学报,2009,46(1):154-158.
- [24] 张会慧,王世标,王均睿,等.三江平原湿地不同利用方式对土壤理化性质及团聚体组成的影响[J].生态学杂志,2019,38(6):1679-1687.

(上接第 119 页)

- [14] 高建恩,吴普特,牛文全,等.黄土高原小流域水力侵蚀模拟试验设计与验证[J].农业工程学报,2005(10):41-45.
- [15] 唐克丽,周佩华.黄土高原土壤侵蚀研究若干问题的讨论[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):1-4.
- [16] 宋丹丹.林冠对降雨截留作用的研究[D].山东泰安:山东农业大学,2015.
- [17] 王红.水土保持典型措施对地下水补给生态基流的影响研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.
- [18] Zhou Z C, Shangguan Z P. Effects of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. Original Research Article Pedosphere, 2008,18(1):131-136.
- [19] 朱高立,王雪琪,李发志,等.秸秆覆盖对崩积体坡面产流产沙影响的模拟试验[J].土壤,2017,49(3):601-607.
- [20] 周秋文,李璇,郭兴房.喀斯特地区枯落物层对地表径流和土壤侵蚀的影响研究[J].水文,2018,38(4):19-24.

(上接第 126 页)

- [22] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,等.渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(2):33-38.
- [23] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [24] 宋小燕.松花江流域水沙演变及其对人类活动的响应[D].陕西杨凌:中国科学院水土保持研究所,2010.
- [25] Gao P, Geissen V, Ritsema C J, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin, China [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2012,17(3):961-972.
- [26] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979,28(2):126-135.
- [27] 穆兴民,李靖,王飞,等.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].干旱区资源与环境,2003,17(2):1-5.
- [28] 史红玲,胡春宏,王延贵,等.黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J].人民黄河,2014,36(4):1-5.
- [29] 李伟珮,闫观清,李保国,等.黄河流域近 300 年来水文情势及其变化[J].人民黄河,2009,31(11):25-26.
- [30] 黄河水利科学研究院.黄河水沙变化趋势与水利枢纽工程建设对黄河健康的影响[R].郑州:黄河水利科学研究院,2007.