水　利　学　报

2017年3月　　SHUILI　XUEBAO　　第48卷　第3期

文章编号:0559-9350(2017)03-0341-10

模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程及特征研究

孙佳美，余新晓，李瀚之，樊登星

（北京林业大学 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室，北京　100083）

摘要：本研究采用模拟降雨实验的方法，研究了30、60和90 mm/h降雨强度下，5种枯落物覆盖坡面径流的水动力学特征，以期揭示枯落物覆盖条件对坡面产流产沙过程及其径流水动力学特征影响。研究结果表明：坡面平均产流率和产沙率随降雨强度增大而增大，随枯落物生物量增加而减小，并且与降雨强度和枯落物生物量之间均为指数函数关系；坡面流量-历时曲线稳定流量值主要受降雨强度的影响；产沙率-历时曲线稳定产沙率受降雨强度和枯落物生物量等多种因素的影响；枯落物覆盖对坡面径流水动力学特性有显著影响，相比于裸坡覆盖有50、100、150、200 g/m^{2}枯落物坡面径流平均流速相比裸坡减少率分别在17.7 %、26.8 %、37.9 %、53.7 %；雷诺数减少率分别在11.2 %、18.7 %、26.3 %、33.4 %左右；弗劳德数减少率在21.3 %、30.3 %、42.9 %、61.2 %左右，Darcy-Weisbach阻力系数增大了0.5~5.6倍；产沙率与Darcy-Weisbach阻力系数呈对数关系，与剪切力和径流功率呈线性关系，枯落物能显著增大径流临界剪切力和功率；产沙率(D_r)和各水动力学因子间有良好的相关关系，相关程度顺序为：$Re > w > V > P > Fr > f > t$。

关键词：枯落物；模拟降雨；产流；产沙；水动力学

中图分类号：S715　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20160568

1　研究背景

土壤侵蚀是指在水力、风力、冻融、重力等外营力作用下，土壤及其母质被破坏、剥蚀、搬运、沉积的全部过程[1]。土壤侵蚀是世界陆地生态系统的一个严重的环境问题，会对生态和环境造成严重的危害，极大地限制着土壤侵蚀地区的经济发展[2]。枯落物层是森林生态系统的重要组成层，对调蓄土壤侵蚀过程能发挥重要的功能[3-6]，在拦蓄降雨、保护地表土壤、防治水土流失等方面都具有重要意义，是一种重要的坡面防护措施[7]。为研究枯落物在森林水文和土壤侵蚀过程中的作用，众多国内外学者开展了大量的科学研究[8]，对不同类型枯落物的生态水文效应[9]、枯落物分解对森林生态系统的物质和能量循环的影响[10-15]、枯落物的持水性等做了大量的野外实验，使读者对枯落物的作用有了较为全面的认识[16-18]。这其中赵骅等[2]、赵艳云等[9]分别对不同乔木类型枯落物覆盖的持水特性进行了研究[2]，曹建生等对不同类型覆盖物对降雨再分配特征进行了研究[3]；这些研究集中在枯落物本身的持水特性研究[19-21]，何常清等进行了枯落物对地表径流的拦阻效应进行研究[5]，但是关于不同枯落物量对侵蚀过程以及坡面径流水动力学特性的研究鲜见报导[11,22-24]，对这一科学问题进行研究不仅能够解释枯落物调控坡面侵蚀过程的机理，并且能够探讨覆被坡面径流水动力学过程，能够对枯落物覆盖坡面侵蚀防治提供科学依据和技术支持。

在众多学者研究的基础上，为研究华北土石山区枯落物调控坡面侵蚀及其机理，本试验采取人工模拟降雨实验的方法，在北京林业大学鹫峰林场人工模拟降雨大厅进行试验，选取的实验土壤为北京山区的典型土壤褐土，通过对不同降雨强度和不同枯落物生物量条件下坡面侵蚀过程的观测，

收稿日期：2016-05-30；网络出版日期：2016-08-19

网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20160819.0825.002.html

基金项目：十二五林业生态科技工程项目(2015BAD07B0302)

作者简介：孙佳美(1990-)，女，河北人，博士生，主要从事水土保持研究。E-mail：sunkami@yeah.net

分析不同枯落物生物量的减流减沙效应；分析不同枯落物覆盖下坡面径流的水动力学特性，揭示枯落物覆盖对坡面侵蚀产沙机理的影响，能够为森林枯落物层调控坡面水土流失过程提供理论基础和技术支持。

2 试验材料与方法

2.1 试验装置与材料 试验进行于北京林业大学鹫峰实验基地的人工模拟降雨实验大厅，该设备采用西安清远测控技术有限公司研发的QYJY-503T型模拟降雨系统，设备规格参数参照常玉于2014年发表的论文[7]。经过调查北京山区常见阔叶树种为栓皮栎(*Quercusvariabilis*)，因此将其选为本研究的研究对象，为减少叶片表面携带泥沙、水分的不同所造成的试验误差，将收集的枯落物用清水洗净表面泥沙，在80 ℃下烘干至恒质量后备用，作为坡面枯落物层，本实验方法适用于各类型覆盖坡面径流特性研究，实验结果应用适用条件为各类型枯落物以及相似覆盖(秸秆等)坡面径流水动力学特征。

2.2 试验过程 本试验通过每平方米覆盖不同的枯落物生物量来设置各处理组，按照调查的天然栓皮栎林枯落物量设置枯落物实验梯度，共设计6个枯落物生物量等级(0、50、100、150、200、250 g/m^2)，搭配30、60、90 mm/h三个降雨强度处理，坡度为10°，为保证试验精度，每个处理均进行重复试验取平均值分析。

采用分层填土的方式进行填土，每5cm一层，每层填装完毕充分压实，保证土壤容重为1.34 g/cm^{3}左右，填土时注意土面保持平整，每层填装完压实后注意刮毛，制造一定的地表糙度，防止土层间的相互滑动。正式降雨前，将相应干质量的枯落物均匀铺在试验土体上，保证厚度均一。总实验时间为产流开始后的1 h，由于产流初期产流率变化较大，因此前10 min每2 min取1次径流泥沙样，产流10 min以后每5 min取1次径流泥沙样，径流样品测量体积后静置烘干测量产沙量。

降雨过程中使用EM50数据采集器及探头测量径流温度，使用染色剂法测定坡面径流流速，测定流速时，由于径流在坡面中上部产生，流至坡面下部趋于稳定，所以坡面流速测定断面选在从坡底20 cm开始向坡上1 m，沿径流流经方向水平布设5个测量断面，分别测量各断面流速，考虑到染色剂示踪法测定的径流流速为坡面优势流流速，将5个流速值的平均值乘以修正系数0.75，作为坡面流速[5]。

2.3 数据分析 文中各水动力学参数采用Microsoft Excel软件进行数据统计，采用SPSS进行显著性分析，采用Sigma Plot进行绘图。

雷诺数、水深和阻力系数的计算公式参考李勉于2007年发表论文中的2.2节[21]；弗劳德数的计算公式参考李天阳于2014年发表论文的2.4节[22]；径流剪切力和径流功率的计算参考肖培青于2011年发表论文的2.3节[25]。

文中径流减少率为枯落物覆盖条件下的总径流量相比裸坡的减少量与裸坡总径流量的比值，计算公式为：

$$L_p = \left(S_f - S_p\right)/S_f \times 100\% \tag{1}$$

文中产沙减少率为枯落物覆盖条件下坡面产沙率相比裸坡的减少值与裸坡产沙率的比值，计算公式为：

$$N_p = \left(R_f - R_p\right)/R_f \times 100\% \tag{2}$$

式中：L_p为径流减少率；S_f为裸地产流量，L·min^{-1}·m^{-2}；S_p为覆盖坡面产流量，L·min^{-1}·m^2；N_p为产沙减少率；R_f为裸地产沙量，g·min^{-1}·m^{-2}；R_p为覆盖坡面产沙量，g·min^{-1}·m^{-2}。

3 结果与分析

3.1 径流和泥沙量 不同试验条件下坡面平均产流产沙率见下表1。从表1可以看出不同条件下坡面

产流率变化趋势基本相同，即随降雨强度增大而增大，随枯落物生物量增加而减小，当枯落物生物量达到250 g/m^{2}时产流率最小。在30、60、90 mm/h降雨强度下，枯落物生物量为50 g/m^{2}时总径流量相比裸坡分别平均减少0.089、0.056、0.059 L·min^{-1}·m^{-2}，径流减少率平均为18.78 %、5.75 %和4.13 %左右；当生物量达到250 g/m^{2}时，总径流量相比裸坡平均减少0.232、0.255、0.314 L·min^{-1}·m^{-2}，径流减少率分别为48.95 %、26.18 %和22.00 %左右。在本研究中250 g/m^{2}的坡面减少产流效果十分显著，随着降雨强度增大，不同生物量坡面随着枯落物生物量的减小而减小的产流率增大，但径流减少率降低[7]。

从表1可以看出，不同降雨条件下坡面产沙率的变化趋势大体相同，即产沙率随降雨强度的增大而增大，随枯落物生物量的增加而减小。30 mm/h降雨强度下，50 g/m^{2}枯落物覆盖坡面的产沙减少率在67.32 %左右，枯落物生物量达到250 g/m^{2}时减少率平均为97.67 %，基本上可消除溅蚀产生。60 mm/h降雨强度下，坡面覆盖枯落物50 g/m^{2}时的产沙减少率平均为47.92 %，枯落物生物量为250 g/m^{2}时减少率约为83.62%；90 mm/h降雨强度下，坡面覆盖枯落物生物量为50和250 g/m^{2}时坡面产沙减少率分别为26.71 %和73.04 %。由此可见，枯落物生物量为50 g/m^{2}时其减沙作用已初见功效，当枯落物生物量达到250 g/m^{2}时，即使是90 mm/h降雨强度也能减少73.04 %左右的产沙量，枯落物减沙效果明显，这与张芝萍等[19]、焦平金等[26]的研究得出的结论相似，众多学者的研究均能体现枯落物在降低雨滴动能、增加入渗和减弱侵蚀方面的效果。

表1　不同试验条件下坡面产流产沙率

降雨强度/(mm/h)	枯落物量/(g/m^2)	枯落物持水能力/g	产流率/(L·min^{-1}·m^{-2})	产沙率/(g·min^{-1}·m^{-2})
30	0		0.474±0.068a	1.368±0.487a
	50	57.8	0.385±0.079b	0.447±0.100b
	100	111.2	0.340±0.086c	0.222±0.194c
	150	199.8	0.325±0.070c	0.172±0.105c
	200	246.6	0.296±0.066c	0.123±0.080c
	250	364.6	0.242±0.050c	0.032±0.029c
60	0		0.974±0.062NS	3.781±2.378a
	50	53	0.918±0.064NS	1.969±1.086ab
	100	118.7	0.834±0.116NS	1.683±0.837b
	150	185.4	0.796±0.133NS	0.909±0.114c
	200	246.7	0.770±0.152NS	0.755±0.154d
	250	328.4	0.719±0.178NS	0.619±0.136e
90	0		1.427±0.146NS	8.305±6.301NS
	50	59.8	1.368±0.166NS	6.087±4.328NS
	100	124.5	1.303±0.239NS	4.627±3.004NS
	150	200.5	1.240±0.217NS	3.985±2.054NS
	200	254.4	1.165±0.218NS	3.256±1.498NS
	250	326.3	1.113±0.259NS	2.239±0.921NS

以降雨强度I和枯落物生物量G为自变量，覆盖有枯落物坡面的总径流量Q为因变量，运用SPSS18.0软件进行回归分析，得到如下多元回归方程式：

$$Q = 1.514\, I^{1.010} G^{-0.239} \qquad R^2 = 0.917 \quad (Sig < 0.05,\ n = 45) \tag{3}$$

$$W = 1.514\, I^{2.380} G^{-0.794} \qquad R^2 = 0.879 \quad (Sig < 0.05,\ n = 45) \tag{4}$$

式中：Q为坡面总径流量，L；W为坡面总产沙量，g；I为降雨强度，mm/h；G为枯落物生物量，g/m^2。

由式(3)可以看出，坡面总径流量与降雨强度和枯落物生物量之间均为指数函数关系。观察各自变量的指数可以得出，影响总径流量的主要因素是降雨强度，其次是枯落物生物量。从式(4)可以看出，坡面总产沙量与降雨强度和枯落物生物量之间均为指数函数关系。

3.2 产流产沙过程

3.2.1 *产流过程* 不同实验条件下坡面产流率–历时曲线图绘于下图1，图中的降雨历时均从产流后开始计算。坡面产流率–历时曲线图呈先快速增加，后逐渐稳定趋势，降雨强度越大，产流越快达到产流稳定状态；同时，随枯落物生物量增加，流量总体上呈现降低的趋势，枯落物生物量为250 g/m^{2}覆盖坡面的稳定流量值最小。在相同降雨强度条件下，随枯落物生物量增加，流量整体上有减小的趋势，枯落物生物量越大，稳定后的流量值越小。30 mm/h降雨强度下裸坡流量最终稳定在0.51 L·min^{-1}·m^{-2}左右，50~250 g/m^{2}枯落物覆盖的坡面流量最终分别稳定在0.44、0.38、0.37、0.34和0.32 L·min^{-1}·m^{-2}左右，相比裸坡流量最大可降低0.19 L·min^{-1}·m^{-2}。60、90 mm/h降雨强度下裸坡流量最终分别稳定在1.01和1.46 L·min^{-1}·m^{-2}左右，250 g/m^{2}枯落物覆盖的坡面流量最终分别稳定在0.83和1.26 L·min^{-1}·m^{-2}左右，分别降低0.18和0.20 L·min^{-1}·m^{-2}。可见大降雨强度下枯落物仍有减小流量的作用，而且降雨强度越大流量相比裸坡的减少值越大。这是因为枯落物盖度与结皮盖度的分布密切相关，枯落物通过影响光热水条件和分泌分解物抑制结皮的生长发育[16,27]，从而增大了土壤入渗速率，减小了地表径流量，并且降雨强度越大这种效应越明显[5]。

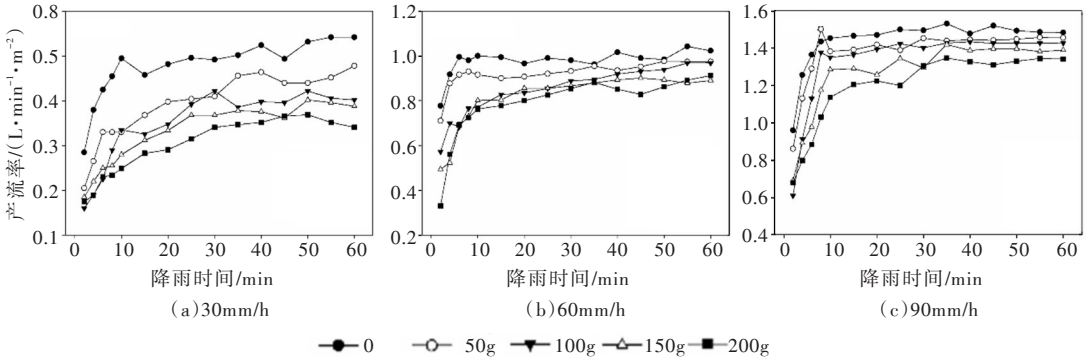


图1 不同试验条件下坡面产流过程

3.2.2 *产沙过程* 图2为不同试验条件下坡面产沙率–历时曲线图。从图2可见，各实验条件下坡面产沙率–历时曲线趋势相似，即坡面产流开始后，产沙率在极短时间内迅速增加，达到最大值后逐渐降低而后趋于相对稳定状态，稳定产沙率受降雨强度和枯落物生物量等多种因素的影响[7]；在降雨强度为30 mm/h时，最少的枯落物覆盖，50 g/m^{2}枯落物即能明显地减小低坡面产沙率，250 g/m^{2}枯落物坡面降雨后期产沙率几乎为零。相比于裸坡，在30、60 mm/h降雨强度下，50和250 g/m^{2}枯落物覆盖坡面稳定产沙率分别降低0.66和1.38 g·min^{-1}·m^{-2}；90 mm/h降雨强度下，50和250 g/m^{2}枯落物坡面稳定产沙率分别降低1.07 g·min^{-1}·m^{-2}和3.65 g·min^{-1}·m^{-2}。90 mm/h降雨强度下产沙率减少的幅度比30、60 mm/h降雨强度大，这主要是因为降雨强度是影响侵蚀过程最主要的因素，90 mm/h降雨强度的产沙率相比30、60 mm/h大很多。枯落物覆盖能够有效降低产沙率，一方面是因为覆盖枯落物可以避免雨滴直接打击土壤表面、分散地表土粒，起到缓冲雨滴动能的作用，基本上消除了雨滴溅蚀的发生[4]；另一方面，覆盖枯落物增大了地表粗糙度，降低了地表流速，从而减弱了径流携带泥沙的能力[5]。

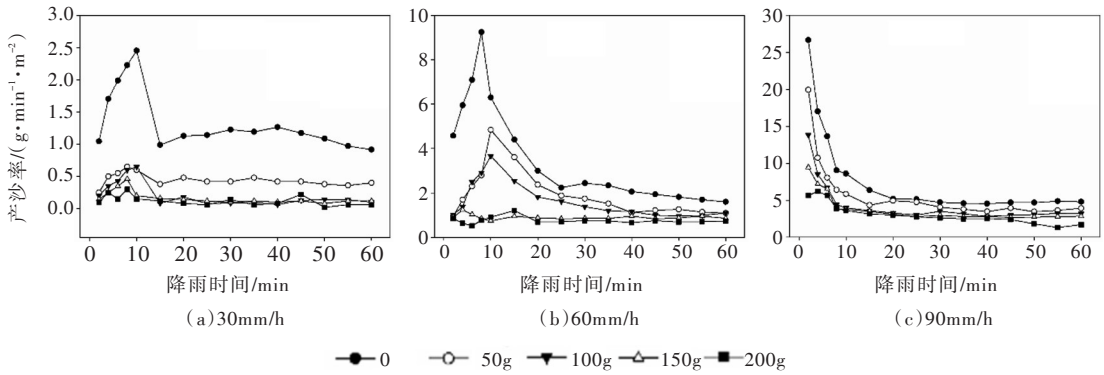


图2 不同试验条件下坡面产沙过程

坡面产沙率随降雨强度增大而显著增大，降雨强度越大，产沙率峰值越大，达到峰值所需时间越短，稳定后的产沙率也越大。30、60、90 mm/h降雨强度下，裸坡坡面的稳定产沙率分别约为1.17、1.99、5.04 g·min^{-1}·m^{-2}，250 g/m^{2}枯落物覆盖坡面的产沙率分别稳定在0.12、0.67、2.46 g·min^{-1}·m^{-2}左右。

3.3 径流水动力学特性和调控机理

3.3.1 *径流水动力学特性* 表2所示为不同降雨强度和枯落物生物量覆盖下坡面径流水动力学参数的平均值。由表2可以得知坡面径流流速随枯落物生物量增大而减小，随降雨强度增大而增大，枯落物具有显著的减缓流速作用，相比于裸坡，覆盖生物量分别为50、100、150和200 g/m^{2}的枯落物坡面流速减少了17.7 %、26.8 %、37.9 %和53.7 %，枯落物的存在使地表粗糙度增加，从而增大了地表对径流的阻力，减缓了流速；相同降雨强度条件下，雷诺数和弗劳德数随枯落物生物量增加而减小，枯落物生物量越大雷诺数和弗劳德数越小。坡面覆盖有50、100、150和200 g/m^{2}枯落物时的雷诺数相比裸坡分别减少3.54、5.75、8.18和10.30左右，减少率分别在11.2 %、18.7 %、26.3 %和33.4 %左右；坡面径流弗劳德数相比裸坡分别减少0.11、0.16、0.23和0.32左右，减少率在21.3 %、30.3 %、42.9 %和61.2 %左右。相同降雨强度条件下，Darcy-Weisbach阻力系数随枯落物生物量的增加明显增大，相比于裸坡，坡面枯落物生物量为50、100、150和200 g/m^{2}时坡面径流Darcy-Weisbach阻力系数增大了0.5~5.6倍。

表2 不同试验条件各水动力学因子值

降雨强度/(mm/h)	枯落物量/(g/m^2)	流速/(cm/s)	雷诺数	弗劳德数	阻力系数	径流剪切力/(N/s^2)	径流功率/(N·m^{-1}·s^{-1})	单位径流功率/(m/s)
30	0	2.712±0.485a	16.733	0.368	10.441	1.358	0.026	0.005
	50	2.254±0.501ab	14.929	0.295	16.216	1.139	0.023	0.004
	100	1.887±0.356b	13.336	0.239	24.675	1.099	0.021	0.003
	150	1.729±0.354bc	12.664	0.215	30.487	1.030	0.020	0.003
	200	1.319±0.230c	11.515	0.150	62.436	0.960	0.018	0.002
60	0	3.756±0.220a	32.304	0.431	7.588	1.797	0.050	0.007
	50	3.161±0.434b	28.878	0.352	11.380	1.581	0.045	0.006
	100	3.039±0.432b	26.396	0.347	11.702	1.421	0.041	0.005
	150	2.356±0.255c	23.960	0.249	22.786	1.351	0.037	0.004
	200	1.838±0.207d	21.238	0.182	42.575	1.338	0.033	0.003
90	0	4.897±0.625a	49.164	0.520	5.209	2.381	0.076	0.009
	50	3.690±0.411b	43.293	0.363	10.724	1.871	0.067	0.007
	100	3.467±0.684bc	40.278	0.342	12.028	1.807	0.063	0.006
	150	3.044±0.585c	36.633	0.295	16.156	1.825	0.057	0.005
	200	2.173±0.249d	33.271	0.187	40.316	1.561	0.052	0.004

3.3.2 *侵蚀动力学机理* 各实验条件下坡面Darcy-Weisbach阻力系数(f)与径流产沙率(D_r)关系见下图3。从图3可以看出坡面产沙率随Darcy-Weisbach阻力系数增大而减小， Darcy-Weisbach阻力系数越大，径流所受阻力越大，坡面径流被拦蓄入渗的量越大，径流量越小，径流所携带泥沙随之减少，从而导致径流产沙率降低，坡面产沙量也就越小。二者具有良好的相关关系，对径流产沙率与Darcy-Weisbach阻力系数进行拟合可得二者呈对数关系，将各降雨强度下产沙率(D_r)与阻力系数(f)的方程式列于表3。

表3 坡面径流产沙率(D_r)与阻力系数(f)的方程式

降雨强度/(mm/h)	方程式	R^2
30	D_r=−0.821ln$f$+3.599	0.511
60	D_r=−1.398ln$f$+6.598	0.504
90	D_r=−2.373ln$f$+12.409	0.562

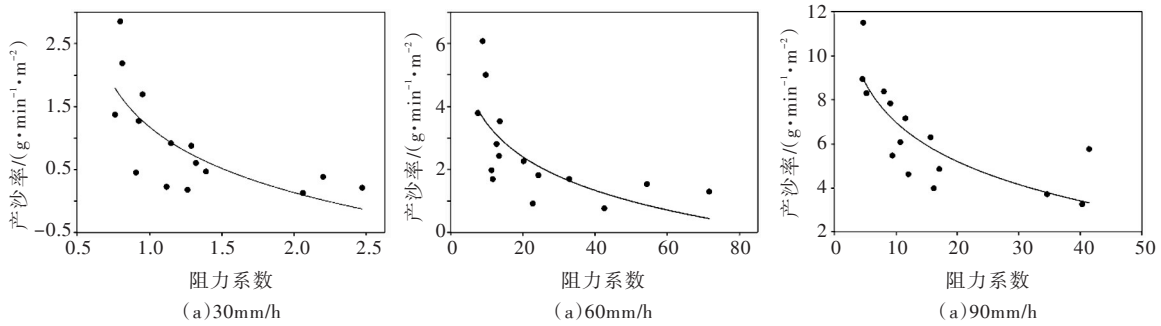


图3　坡面流阻力系数与径流产沙率的关系

为了更好的说明枯落物覆盖对坡面侵蚀产沙的影响，进一步分析径流剪切力与坡面输沙率的关系，土壤颗粒的启动取决于径流冲刷能够分散的土壤颗粒大小和重量，而只有径流作用于土壤颗粒的剪切力大于土壤颗粒的黏结强度时，土壤颗粒之间的黏结力才会破坏，从而发生位移，产生土壤侵蚀[13]，从而引出坡面径流临界剪切力(t_0)，当径流剪切力大于临界剪切力时坡面开始产沙；当剪切力小于临界剪切力时坡面不产沙。不同枯落物生物量覆盖条件下坡面输沙率与径流剪切力的关系如图4所示。观察图4可以发现，在枯落物生物量一定的情况下，径流剪切力与坡面产沙率的关系有相似的规律，即坡面产沙率随径流剪切力的增大而增大。对不同试验条件下的剪切力与产沙率做回归分析，得到剪切力与产沙率的相关方程，并求出不同枯落物生物量条件下的临界剪切力，将结果列于表4。

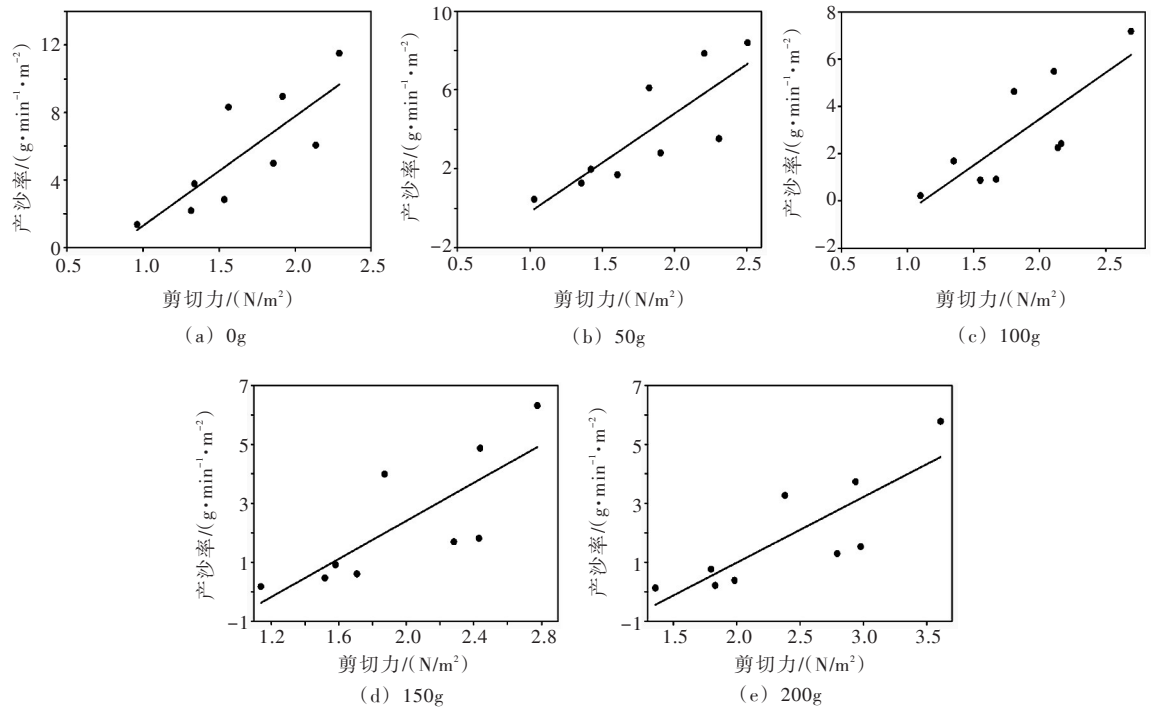


图4　不同枯落物覆盖条件下径流剪切力与产沙率的关系

表4　不同枯落物覆盖下产沙率(D_r)与剪切力(t)的相关方程

枯落物生物量/(g/m²)	相关方程	临界剪切力/(N/m²)	R^2
0	D_r=4.62τ−2.22	0.48	0.527
50	D_r=3.61τ−2.81	0.78	0.548
100	D_r=2.79τ−2.38	0.85	0.517
150	D_r=2.22τ−2.16	0.97	0.482
200	D_r=1.62τ−2.10	1.30	0.562

从表4可以看出，不同降雨条件下坡面产沙率与径流剪切力呈良好的线性关系。本试验裸坡临界剪切力为0.48 N/m^2，覆盖有枯落物的坡面临界剪切力在0.78 ~ 1.30 N/m^{2}之间，其临界剪切力相比裸坡增大0.30 ~ 0.82 N/m^2，增长率为62.5 % ~ 170.8 %。Moor和Burch通过对坡面细沟进行调查得出裸坡产沙临界剪切力为0.12 N/m^2[11]，肖培青对苜蓿草地进行试验研究得出苜蓿调控坡面产沙临界剪切力为2.857 N/m^2[25]，可见枯落物覆盖能够显著增大坡面径流临界剪切力，临界剪切力增大说明土壤抗蚀性增强，抵御径流侵蚀的能力增强，从而说明枯落物覆盖能够有效阻止坡面产沙，减弱土壤侵蚀，具有良好的水土保持效益。

从能量角度分析，坡面径流对土壤的侵蚀过程是一个径流做功消耗能量的过程。水力学中用径流功率表征坡面径流沿坡面向下流动时所具有的势能大小。径流功率越大，说明土壤侵蚀能力越强，产沙量越大。不同枯落物生物量条件下径流功率与坡面产沙率的关系如下图5所示。从图5中可以看出，不枯落物生物量条件下，坡面产沙率均随径流功率的增大而增大。对不同降雨条件下的产沙率与径流功率进行相关分析，得到产沙率与径流功率的拟合方程，并求出不同枯落物生物量条件下的临界径流功率(w_0)，将结果列于表5。

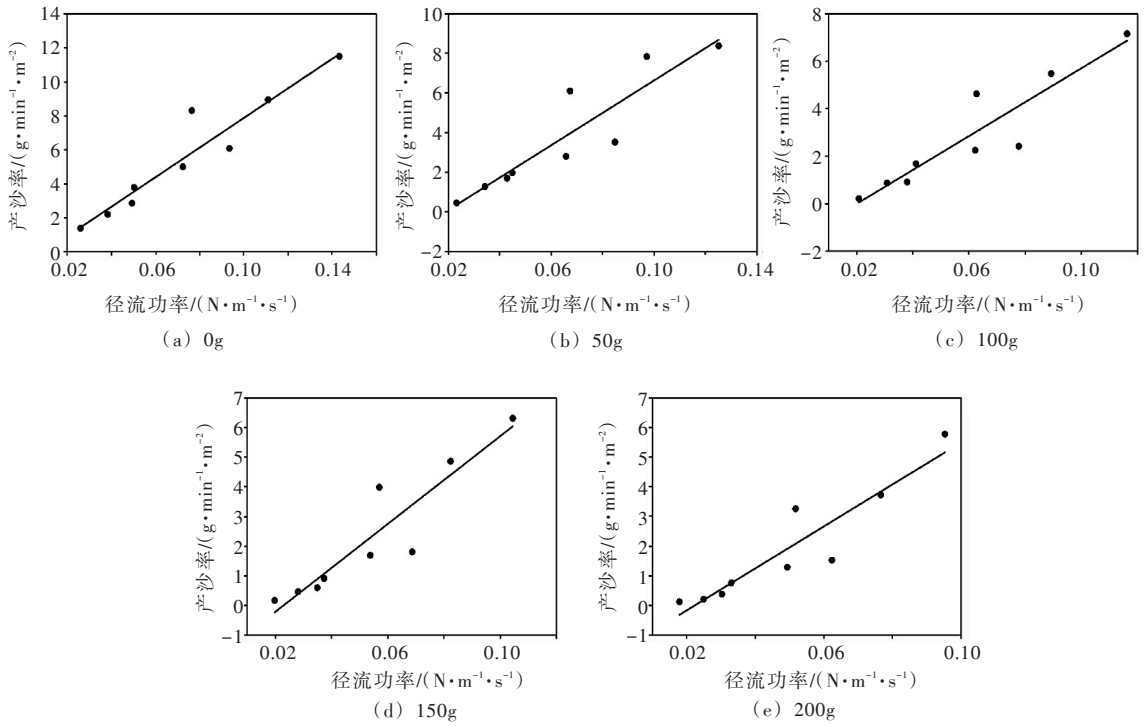


图5　不同枯落物覆盖下功率与产沙率的关系

表5　不同枯落物覆盖下产沙率(D_r)与径流功率(w)相关方程

枯落物生物量/(g/m^2)	相关方程	临界径流功率/(N·m^{-1}·s^{-1})	R^2
0	D_r=74.292ω−0.0201	0.0003	0.838
50	D_r=68.567ω−0.7851	0.0115	0.751
100	D_r=60.445ω−0.8559	0.0142	0.782
150	D_r=60.887ω−1.0730	0.0176	0.767
200	D_r=60.200ω−1.1445	0.0190	0.804

从表5可以看出，不同枯落物生物量条件下坡面产沙率与径流功率均呈良好的线性关系。与临界剪切力概念相似，坡面径流功率必须达到一定值后，泥沙才能被剥离、分散，该值称为临界径流功率。当径流功率大于临界径流功率时坡面将开始产沙，当径流功率小于临界径流功率时坡面不会产沙。由上表可知，本试验裸坡临界径流功率在0.0003 N·m^{-1}·s^{-1}左右，覆盖有枯落物时临界径流功率

在0.0115~0.0190 $N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$之间，相比裸坡增大0.0112~0.0187 $N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$，增大了3.7~6.2倍，此临界值大于Moor和Burch计算的裸坡临界功率0.0043 $N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$[11]，但是小于肖培青等计算的苜蓿草地临界功率0.0114 $N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$[25]，与分析坡面径流临界剪切力得出相同的结论，枯落物覆盖能显著增大临界径流功率，从而减少坡面水土流失，具有良好的水土保持效益。

3.3.3 径流和侵蚀特性参数相关性分析 径流特性直接影响侵蚀程度，因此在实际生产生活中可通过径流特性预测与评估土壤侵蚀量，为研究各径流特性参数与侵蚀产沙量的相关关系，本实验进行了皮尔森相关分析，结果显示坡面产沙率(D_r)和各水动力学因子间有良好的相关关系，相关程度顺序为：$Re > w > V > P > Fr > f > t$(表6)。$Re$和$Fr$是衡量径流流态的参数，$w$，$P$和$t$是表现径流侵蚀能力的参数，$f$是反应径流阻力规律的参数，相关关系分析是为了比较不同参数对土壤产沙率的影响程度，但是每个参数都有对应的物理意义，并且都对土壤侵蚀过程与机理研究有重要贡献，是研究坡面侵蚀水动力学因子的必要参数。

表6 产沙率与水动力学因子相关分析

	D_r	V	Re	Fr	f	t	w	P
D_r	1	0.894**	0.955**	0.725**	−0.532*	0.481*	0.954**	0.888**
V	0.894**	1	0.865**	0.941**	−0.804**	0.172	0.862**	0.991**
Re	0.955**	0.865**	1	0.648**	−0.532*	0.631*	1.000**	0.851**
Fr	0.725**	0.941**	0.648**	1	−0.877**	−0.154	0.643**	0.941**
f	−0.532*	−0.804**	−0.532*	−0.877**	1	0.186	−0.529*	−0.798**
t	0.481*	0.172	0.631*	−0.154	0.186	1	0.635*	0.163
w	0.954**	0.862**	1.000**	0.643**	−0.529*	0.635*	1	0.847**
P	0.888**	0.991**	0.851**	0.941**	−0.798**	0.163	0.847**	1

注：$n = 30$；$^{**}p < 0.01$，$^{*}p < 0.05$；D_r为产沙率；V为径流流速；Re为雷诺数；Fr为弗劳德数；f为Darcy-Weisbach阻力系数；t为剪切力；w为径流功率；P为单位径流功率。

4 结论

(1)不同条件下坡面平均产流率和产沙率变化趋势基本相同，即随降雨强度增大而增大，随枯落物生物量增加而减小，并且与降雨强度和枯落物生物量之间均为指数函数关系。(2)不同降雨条件下流量-历时曲线为：坡面产流开始后，流量在短时间内迅速增加，随后逐渐趋于稳定，稳定流量值主要受降雨强度的影响；产沙率-历时曲线为：产流开始后，产沙率在极短时间内迅速增加，达到峰值后迅速降低而后趋于稳定，之后产沙率稳定在某一数值上下，且这一数值受降雨强度和枯落物生物量等多种因素的影响。(3)枯落物覆盖对坡面径流水动力学特性有显著影响。覆盖有50、100、150、200 g/m^2枯落物的坡面，径流平均流速相比于裸坡的减少率分别在17.7 %、26.8 %、37.9 %和53.7 %；雷诺数减少率分别在11.2 %、18.7 %、26.3 %和33.4 %左右；弗劳德数减少率在21.3 %、30.3 %、42.9 %和61.2 %左右，Darcy-Weisbach阻力系数增大了0.5~5.6倍。(4)由产沙率与水动力学参数的相关分析可知，产沙率与Darcy-Weisbach阻力系数呈对数关系，与剪切力和径流功率呈线性关系，枯落物能显著增大径流临界剪切力和功率。(5)根据皮尔森相关分析，产沙率(D_r)和各水动力学因子间有良好的相关关系，相关程度顺序为：$Re > w > V > P > Fr > f > t$。

参 考 文 献：

[1] 中国百科全书[M]. 北京：中国百科全书出版社，2009.

[2] 赵骅，赵陟峰. 关帝山两种典型乔木林枯落物持水性能初探[J]. 水土保持应用技术，2008(5)：11-13.

[3] 曹建生，张万军，刘昌明，等. 石子和秸秆覆盖条件下降雨水量转化特征试验研究[J]. 水利学报，2007，

38(3)：378-382 .
[4] 郭剑芬，杨玉盛，陈光水，等 . 森林凋落物分解研究进展[J] . 林业科学，2006，42(4)：93-100 .
[5] 何常清，于澎涛，管伟，等 . 华北落叶松枯落物覆盖对地表径流的拦阻效应[J] . 林业科学研究，2006，19(5)：595-599 .
[6] 宋庆丰，杨新兵，张金柱，等 . 雾灵山典型林分枯落物和土壤水文效应[J] . 生态环境学报，2009，18(6)：2316-2320 .
[7] 常玉，余新晓，陈丽华，等 . 模拟降雨条件下林下枯落物层减流减沙效应[J] . 北京林业大学学报，2014，36(3)：69-74 .
[8] 张峰，彭祚登，安永兴，等 . 北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J] . 林业科学，2010，46(10)：6-14 .
[9] 赵艳云，程积民，万慧娥，等 . 林地枯落物层水文特征研究进展[J] . 中国水土保持科学，2007，5(2)：130-134 .
[10] MILLER J H，ALLEN H L，ZUTTER B R，et al. Soil and pine foliage nutrient responses 15 years after competing-vegetation control and their correlation with growth for 13 loblolly pine plantations in the southern United States[J] . Canadian Journal of Forest Research，2006，36(10)：2412-2425 .
[11] ANDERSON C J，LOCKABY B G . Research Gaps Related to Forest Management and Stream Sediment in the United States [J] . Environmental Management，2011，47(2)：303-313 .
[12] YOSHINOBU S，TOMOO K，ATSUSHI K，et al . Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers-the effects of rainfall conditions and leaf shapes[J] . Hydrol Process，2004(18)：3007-3018 .
[13] NAGASHIMA K，YOSHIDA S，HOSAKA T . Patterns and factors in early-stage vegetation recovery at abandoned plantation clearcut sites in Oita，Japan：possible indicators for evaluating vegetation status [J] . Journal of Forest Research，2009，14(3)：135-146 .
[14] MO J M，XUE J H，FANG Y T . The primary study on the effects of simulated N deposition on litter deco- mposition of the major forest plants in subtropical China [J] . Acta . Ecol . Sin . ，2004，24(7)：1413-1420 .
[15] QIN Y S，YU X X，WANG S Y . Water interception and retarding characteristics of forest litters in the upper streams of Miyun Reservoir，Beijing[J] . Forestry Studies in China，2000，2(1)：58-62 .
[16] 焦雯君，朱清科，张宇清，等 . 陕北黄土区退耕还林地生物结皮分布及其影响因子研究[J] . 北京林业大学学报，2007，29(1)：102-107 .
[17] 魏强，凌雷，张广忠，等 . 甘肃兴隆山主要森林类型到落网累积量及持水特性[J] . 应用生态学报，2011，22(10)：2589-2598 .
[18] 樊登星，余新晓，岳永杰，等 . 北京西山不同林分枯落物层持水特性研究[J] . 北京林业大学学报，2008，30(2)：177-180 .
[19] 张芝萍，杨均科，胡海波 . 人工降雨条件下毛竹林地表枯落物固土防蚀效应[J] . 林业科技开发，2012，26(2)：68-71 .
[20] 张振明，余新晓，牛健植，等 . 不同林分枯落物层的水文生态功能[J] . 水土保持学报，2005，19(3)：139-143 .
[21] 李勉，姚文艺，陈江南，等 . 草被覆盖下坡面—沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J] . 水利学报，2007，38(1)：112-119 .
[22] 李天阳，何丙辉，雷廷武，等 . 汶川震区滑坡堆积体土石混合坡面细沟水动力学特征室内试验[J] . 水利学报，2014，45(8)：892-901 .
[23] 杨大文，丛振涛，尚松浩，等 . 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J] . 水利学报，2016，47(3)：390-397 .
[24] 崔文滨，李鹏，李占斌，等 . 径流功率理论在黄土坡面侵蚀产沙计算中的应用[J] . 西北农林科技大学学报：自然科学版，2005，33(9)：103-107 .
[25] 肖培青，姚文艺，申震洲，等 . 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J] . 水利学报，2011，42(2)：232-237 .
[26] 焦平金，王少丽，许迪，等 . 次暴雨下作物植被类型对农田氮磷径流流失的影响[J] . 水利学报，2009，40(3)：296-302 .

[27] 张健，刘国彬，许明祥，等．黄土丘陵区影响生物结皮退化因素的初步研究[J]．中国水土保持科学，2008，6(6)：14-20

Runoff and sediment yield process and characteristics research on litter slopes in simulated rainfall

SUN Jiamei, YU Xinxiao, LI Hanzhi, FAN Dengxing

(*Key Lab. of Soil & Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Litter is a key factor for determining erosion rates, to provide quantitative information for hydrological soil processes in litter covered slopes, different rainfall intensities(30, 60, 90 mm/h)were conducted under different litter coverage(0, 50, 100, 150, 200, 250 g/m^2)with the method of artificial rainfall in laboratory. The results show that runoff and sediment yield rates increase with increasing rainfall intensity and decrease with increasing litter coverage, the correlation relationships are exponential function; relatively stable runoff in runoff-duration curve is mainly affected by rainfall intensity; relatively stable sediment in sediment-duration curve are affected by rainfall intensity, litter and other factors; litter has significant influence on runoff dynamic characteristics, compared with the bare land, runoff velocity of slopes covered with 50, 100, 150 and 200 g/m^2 litter decreased by 17.7%, 26.8%, 37.9% and 26.8%, respectively, decrement of Reynolds number are 11.2%, 18.7%, 26.3% and 18.7%, and decrement of Froude number are 21.3%, 30.3%, 42.9% and 30.3%, respectively. Darcy-Weisbach resistance coefficient increase by 0.5-5.6 times; there is a logarithmic relationship between Darcy-Weisbach resistance coefficient and sediment yield rate, a linear relationship between runoff shear stress, runoff power and sediment yield rate. The correlation coefficients between sediment yield rate and hydrodynamic parameters decrease in the following order: $Re > w > V > P > Fr > f > t$.

Keywords: litter; simulated rainfall; runoff; sediment; hydrodynamic

(责任编辑：祁　伟)

(上接第340页)

Vibration fault diagnosis of hydroelectric generating unit by using stochastic resonance and Empirical Mode Decomposition

JIA Rong[1], LI Taotao[1], XIA Zhou[2], MA Xiping[3]

(1. *Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*;
2. *State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing* 210003, *China*;
3. *Gansu Province Electric Power Research Institute, Lanzhou* 730050, *China*)

Abstract: Aiming at the low accuracy problems caused by the difficulty of weak signals detection in fault diagnosis for actual hydroelectric generating unit, this paper presents a weak signal detection method based on stochastic resonance (SR) and Empirical Mode Decomposition (EMD). This method first reduces noise signal of a vibration signal using stochastic resonance to enhance its stochastic resonance, then uses EMD to decompose its output signal and energy method to extract its feature vectors. Taking the feature vectors as input, a genetic algorithm optimization and support vector machine model is able to achieve identification and diagnosis of the signal faults. The simulation results show that this method can accurately identify the unit's abnormal situation with high accuracy in fault diagnosis.

Keywords: stochastic resonance; EMD; support vector machines; fault diagnosis; hydroelectric generating unit

(责任编辑：杨　虹)