

基于 WEPP 的砒砂岩坡面复合侵蚀治理生态水文效应评价

胡剑汝^{1,2}, 饶良懿^{1,2}, 申震洲³

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2.水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 3.黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: 基于 2014—2016 年二老虎沟小流域坡面径流小区的 7 场野外降雨下径流泥沙监测数据, 在砒砂岩区表土(0—20 cm)条件下, 通过累积误差法率定模型土壤参数; 同时采用模型有效性系数(ME)和决定系数(R^2)对模型有效性进行验证, 并利用 WEPP 模型对不同侵蚀治理措施坡面径流泥沙情况进行了模拟预测, 对其减流减沙生态水文效应进行了比较分析。结果表明: (1) 当模型有效水力传导系数为 4.73 mm/h、临界剪切力为 1 Pa 和细沟土壤可蚀性为 0.01 s/m 时, 模型模拟效果最佳。 (2) WEPP 模型模拟无措施(裸地)小区径流量和侵蚀量的 R^2 分别为 0.722 3 和 0.702 5, ME 分别为 0.616 0 和 0.616 7, WEPP 模型模拟措施(草地)小区径流量和侵蚀量的 R^2 分别为 0.711 6 和 0.844 7, ME 分别为 0.674 1 和 0.690 3; 措施小区的模型效果比无措施小区的模拟效果好。 (3) 不同降雨类型下, 情景 a(阳坡低盖度草本)、情景 b(阳坡低盖度灌丛)、情景 c(阳坡中盖度灌丛)、情景 d(阴坡灌木林)、情景 e(阴坡高盖度灌丛)、情景 f(阴坡低盖度灌丛)的植物措施减流效应为 13.04%~91.28%, 减沙效应为 44.46%~99.98%。总体来看, 不同情景的减流减沙效应为情景 d>情景 e>情景 c>情景 f>情景 b>情景 a。

关键词: 砒砂岩; WEPP 模型; 径流泥沙模拟; 生态水文效应评价

中图分类号: S157; TU45

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0123-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.018

Evaluation of Eco-hydrological Effect of Composite Erosion Control of Pisha Sandstone Slope Based on WEPP Model

HU Jianru^{1,2}, RAO Liangyi^{1,2}, SHEN Zhenzhou³

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

3.Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Water Conservancy Commission, Zhengzhou 450003)

Abstract: Based on the field monitoring data of runoff plot in erhugou small watershed from 2014 to 2016, under the condition of the surface soil (0—20 cm) in the pisha sandstone area, the soil parameters of the model were calibrated by the cumulative error method; at the same time, the model validity coefficient (ME) and the decision coefficient (R^2) were used to verify the model validity, and WEPP model was used to simulate the runoff and sediment conditions of different erosion control measures. The ecohydrological effects of runoff and sediment reduction were compared and analyzed. The results showed that: (1) When the effective hydraulic conductivity, critical shear force, and erodibility of rill soil are 4.73 mm/h, 1 Pa and 0.01 m/s respectively, the simulation effect of the model is the best. (2) The R^2 and ME of WEPP model to simulate runoff and erosion of no measure (bare land) plot were 0.722 3 and 0.616 0, 0.702 5 and 0.616 7 respectively, and the runoff and erosion of WEPP model to simulate measure (grassland) plot were 0.711 6 and 0.674 1, 0.844 7 and 0.690 3, respectively, and the simulation effect of the model with measures was better than that without measures. (3) Under different rainfall types, the effects of scenario a (herbage with low coverage on sunny slope), scenario b (shrub with low coverage on sunny slope), scenario c (shrub with medium coverage on sunny slope), scenario d (shrub with high coverage on cloudy slope), scenario e (shrub with high coverage on cloudy slope), and scenario f (shrub with low coverage on cloudy slope) on runoff reduction were 13.04%~91.28%, and the effects of sediment reduction were 44.46%~99.98%. In general, the effects of

收稿日期: 2019-08-13

资助项目: 国家重点研发计划项目“砒砂岩区复合土壤侵蚀综合治理技术”(2017YFC0504503)

第一作者: 胡剑汝(1994—), 女, 云南保山人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态水文效应评价研究。E-mail: 542241205@qq.com

通信作者: 饶良懿(1976—), 女, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态水文效应评价研究。E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

(CEC)^[17]。经测定二老虎沟的砂粒(2 mm~50 μm)含量 68.06%,粉粒(50~2 μm)含量 23.68%,黏粒(2 mm~50 μm)含量 8.26%,有机质含量 0.71%,阳离子交换量(CEC)15.19 cmol/kg。

2.3 WEPP 模型基本理论

WEPP 模拟计算过程主要包括细沟间侵蚀和细沟侵蚀^[18]。当水流剪切力大于土壤临界剪切力,沉积能力小于输沙能力时,细沟内的水流由输沙过程决定^[19]。当输沙量大于泥沙输移能力时,以沉积过程为主。

2.4 WEPP 模型数据库建立

WEPP 模型正常运行需要先建立 4 个数据库文件,包括气象、地形、土壤和管理措施。

气象数据库文件源于 2014—2016 年自计雨量计和自动气象站的实测数据。根据二老虎沟小流域年降雨量的±5%为范围选择美国的参考站点^[20]。资料^[20]表明,二老虎沟小流域年平均降水量为 400 mm,因此,年降水量可选择为 380~420 mm。根据研究站与参考站月降水量数据最大相似度原则,选择科罗拉多州 ALAMOSA WB AP 站作为参考站;选择参考站后,运行 WEPP 模型。首先,调用科罗拉多州站的相关数据,根据参考站历史数据,分别用 2014—2016 年二老虎沟小流域月降雨量、平均最高气温和平均最低气温代替参考站相关变量。通过 CLIGEN Generated 的方式建立气候参数数据库并创建“准格尔旗.PAR FILE”。利用 Single Storm 的方法输入单次降雨数据。地形文件根据试验区实际情况获取,管理措施选取裸地形式和草地模式下的默认值“多年生五芒雀麦草”进行模拟。土壤数据库文件包括土壤反照率、初始饱和导水率、细沟间侵蚀值、土壤临界剪切力和有效水力传导系数 6 大土壤参数。根据土壤理化性质数值手动计算出的数值为基值,模型土壤参数的基值为土壤反照率 0.6,初始饱和导水率为 57.06%,细沟土壤侵蚀值为 0.06 s/m,细沟间侵蚀值为 1 596 227.05 kg/(s·m⁴),土壤临界剪切力为 0.8 Pa,有效水力传导系数为 1.23 mm/h。并通过累积误差法^[12]率定得到最终参数。

2.5 模型评价方法

通过模型有效性系数(ME)和决定系数(R²)对 WEPP 模型模拟值和试验站实测值的接近程度进行评价。有效性系数(ME)具体的计算公式为:

ME=1- \frac{\sum(Y_e-Y_f)^2}{\sum(Y_e-Y_{ave})^2} \tag{1}

式中:Y_e为实测值;Y_f模拟值;Y_{ave}为实测值的平均值。当 ME>0.5 时,模型的模拟效果较好^[21]。

决定系数 R²表示模拟结果与实测值的拟合关系,通过 EXCEL 表中线性回归求得,其值越接近 1 时,表示模拟结果与实测值吻合。

2.6 砒砂岩区坡面复合侵蚀治理措施情景建立

2018 年 7 月对二老虎沟坡面措施的实际调查可知,其坡面侵蚀治理措施主要为植物措施,采用 EN-VI 对无人机影像进行解译,再用支持向量机(support vector machine, SVM)方法对二老虎沟小流域植被覆盖度类型进行划分,以 20%为间隔划分植被覆盖度等级(图 2)。以坡面为单元,采用样方法对二老虎沟小流域砒砂岩坡面进行详细的植物调查,根据各坡面情况,划分砒砂岩坡面措施类型(表 1)。

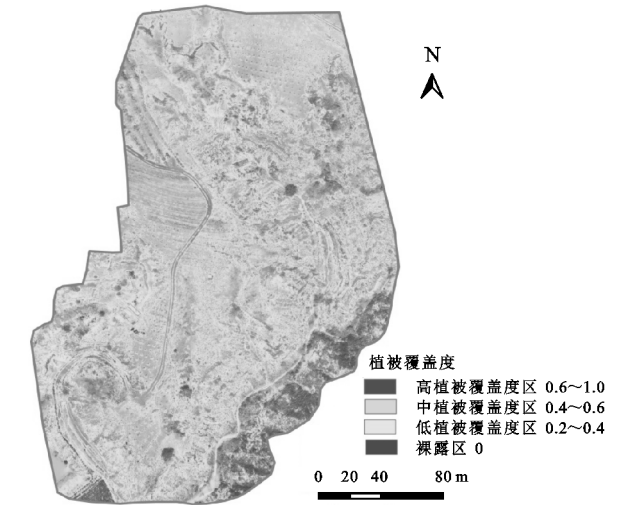


图 2 2018 年二老虎沟小流域植被覆盖情况

表 1 二老虎沟小流域坡面不同侵蚀治理措施类型

坡向	措施情景	措施类型	植物	植物覆盖度/%
阳坡	a	低盖度草本	冰草、百里香	25
	b	低盖度灌丛	披碱草、冰草+蒙古菰	20
	c	中盖度灌丛	蒙古菰、沙棘+冰草	40
	d	灌木林	沙棘	75
阴坡	e	高盖度灌丛	沙棘、冰草、百里香	60
	f	低盖度灌丛	沙棘、冰草、百里香	30

3 结果与分析

3.1 WEPP 模型土壤参数率定与有效性验证

通过相关学者^[22] WEPP 模型土壤参数的敏感性分析结果表明,需率定的土壤参数为有效水力传导系数、土壤临界剪切力和细沟土壤可蚀性,通过计算得到参数的基值,采用累积误差法对敏感性参数进行率定,得到与实测值拟合程度最高的最优参数。参照已有研究^[12]采用随机数字法选取无措施(裸地)径流小区 2014—2016 年 7—9 月的 5 次侵蚀性降雨为降雨数据,所对应的坡面产流产沙数据为率定组;随机选取措施小区(草地)的 4 次侵蚀性降雨为降雨数据,所对应的坡面产流产沙数据为验证数据。

从图 3 可知,最后率定的有效水力传导系数、临界剪切力和细沟可蚀性分别为 4.73 mm、1 Pa、0.01 s/m。由图 4 可知,率定小区的径流量 ME 为 0.812 0, R²为 0.997 5,侵蚀量的 ME 为 0.912 8, R²为 0.978 8;验

证小区径流量的 ME 为 0.714 4, R^2 为 0.973 8, 土壤侵蚀量的 ME 为 0.861 8, R^2 为 0.981 5。验证结果说明

无措施径流小区对模型土壤参数进行率定的结果是合理并可用的。

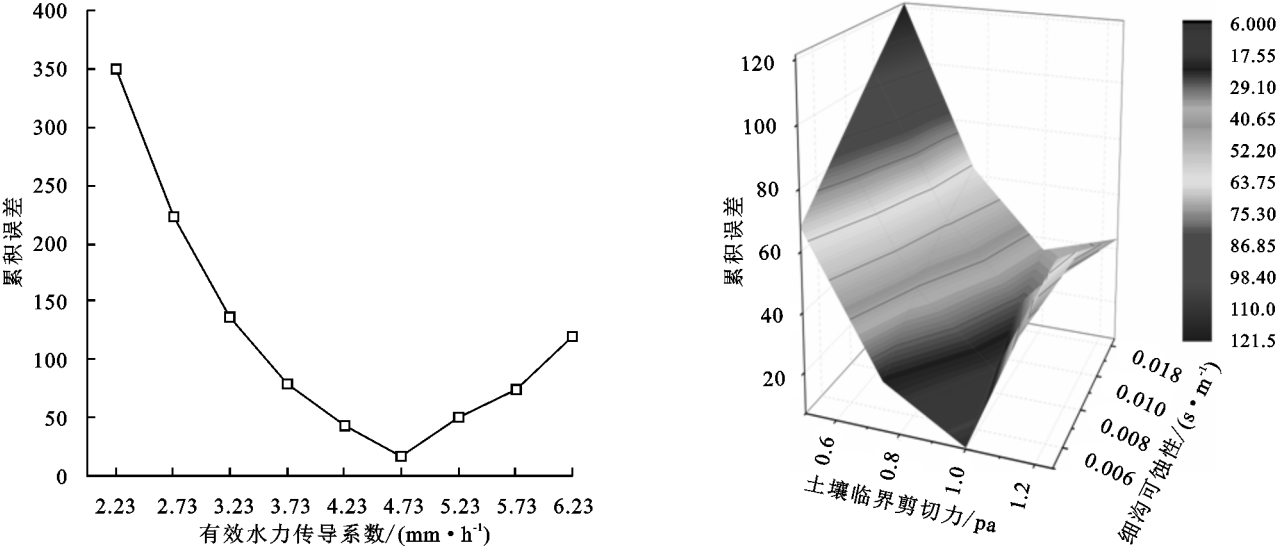
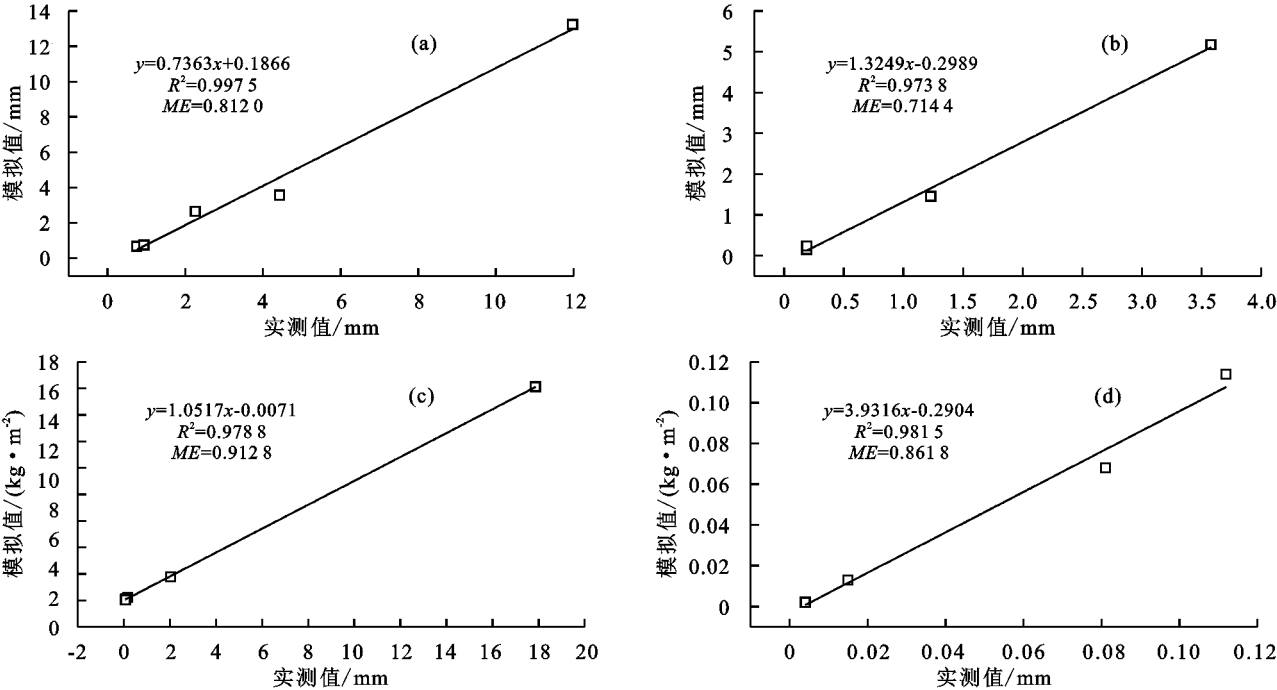


图 3 WEPP 模型土壤参数率定



注:a 为率定小区径流量对比;b 为验证小区径流量对比;c 为率定小区土壤侵蚀量对比;d 为验证小区土壤侵蚀量对比。

图 4 土壤参数率定结果验

为验证 WEPP 模型模拟砒砂岩区的有效性,对该区的径流小区进行模拟验证。由图 5 可知,无措施小区径流量和侵蚀量的模型有效性系数分别为 0.616 0 和 0.616 7,决定系数分别为 0.722 3 和 0.702 5;措施小区径流量和侵蚀量的模型有效性系数分别为 0.614 0 和 0.674 1,决定系数分别为 0.616 7 和 0.690 3,表明 WEPP 模型对侵蚀量的模拟效果明显好于径流量的模拟效果,这与刘远利等^[21]的结论一致。2 个小区径流量和侵蚀量的 ME 值均 >0.5 ,表明 WEPP 模型能模拟不同水保措施下砒砂岩区坡面的次降雨径流量和土壤侵蚀量,也可以模拟砒砂岩裸地的次降雨径流量和土壤侵

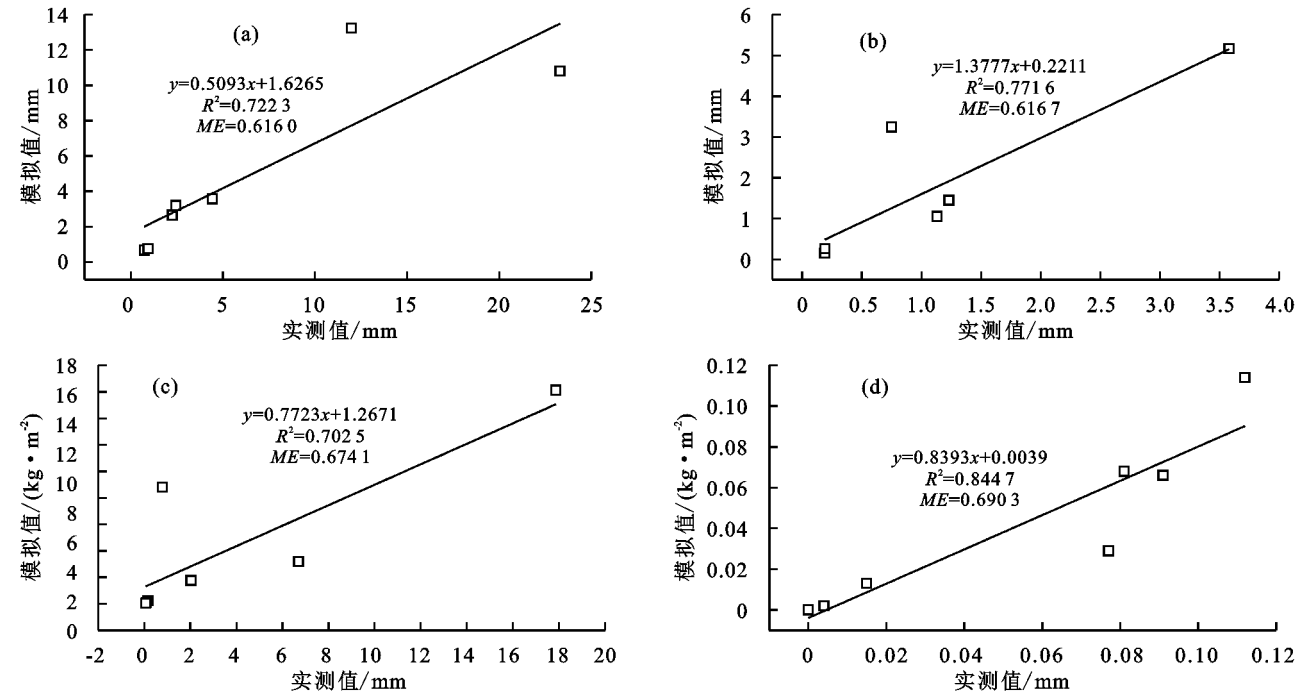
蚀量,且措施小区的模拟效果优于无措施小区的模拟效果,这与叶俊道等^[15]对于 WEPP 模型在砒砂岩区适用性的研究结果相符。

3.2 基于 WEPP 的砒砂岩复合侵蚀治理坡面生态水文效应评价

3.2.1 基于 WEPP 模型模拟径流泥沙对植被的响应
根据董荣万等^[21]提出的以坡面为尺度,通过降雨与坡面水土流失的关系式对覆盖沙棘坡面径流量和侵蚀量的实测值进行计算,运用 WEPP 模型进行模拟后,计算得到沙棘坡面径流量和侵蚀量的模拟值和实测值之间 ME 为 0.780 0,这表明该模型能较好地

模拟预测覆盖沙棘坡面的产流产沙情况。为了揭示植被措施对产流产沙的影响,以 2014—2016 年 7—9 月次降雨为降雨数据,以无措施小区地形参数为地形数据,通过野外植被调查,以沙棘、蒙古莠和冰草为植

被数据,模型植物参数包括植物生长环境(温度和辐射)、冠幅和根系等参数,利用文献参照、模型数据库中的同类植物进行确定(表 2),对各植物措施情景下的坡面产流产沙情况进行模拟。



注:a 为无措施小区径流量对比;b 为措施小区径流量对比;c 为无措施小区土壤侵蚀量对比;d 为措施小区土壤侵蚀量对比。

图 5 WEPP 模型有效性验证

表 2 砒砂岩植物生物学特性模型参数

参数	沙棘	来源	冰草	来源
植物生长最佳温度	16	王怀智 ^[23]	20	云锦凤等 ^[28]
植被停止生长的最高温度	50	王怀智 ^[23]	40	模型中同类植物
消光系数	0.49	刘胜等 ^[24]	0.65	模型中同类植物
径粗	3	植被调查	0.2	植被调查
株高	120	植被调查	80	植被调查
植被调查最大叶面积指数	1.123	尹婧等 ^[25] 等	1.23	模型中同类植物
收获指数	42	模型中同类植物	1	模型中同类植物
根深	30	王浩等 ^[26]	20	云锦凤等 ^[28]
根冠比	0.5148	王浩等 ^[26]	42	模型中同类植物
最大根系生物量	1.5017	刘广全等 ^[27]	0.2	模型中同类植物

3.2.2 坡面产流产沙场次侵蚀降雨分类 根据砒砂岩区的生态水文特征分析可知,该区具有水沙同源的特征,该区域坡面的产流产沙是由几场强降雨引起的。为了深入了解不同降雨类型下各植物措施的减水减沙效益,以 2014—2016 年间 7 场产流产沙侵蚀性降雨作为统计样本,以各次降雨的降雨量 P 和最大 30 min 降雨强度 I_{30} 作为分类因子,用 SPSS 软件进行 K—均值聚类分析,将侵蚀降雨分为 3 类(表 3、表 4)。

由表 3 可知,不同类型的侵蚀性降雨特点为:A 雨型为小雨量、中雨强,降雨量范围为 16.4~22.6 mm, I_{30} 范围为 20~26 mm/h;B 雨型为中雨量、大雨强,降雨量范围为 34.2~35.6 mm, I_{30} 范围为 21.4 mm/h;C 雨型为

大雨量、中雨强,降雨量范围为 16.4~52.8 mm, I_{30} 范围为 9.5~22.8 mm/h。由表 4 可知,3 种不同降雨类型的降雨量、降雨强度间的差异性显著。

表 3 场次侵蚀性降雨的 K—均值聚类分析

降雨类型	A	B	C
样本数	2	2	3
降雨量/mm	19.5	34.9	45.8
降雨量变幅/mm	16.4~22.6	34.2~35.6	16.4~52.8
标准差	4.38	0.98	6.06
$I_{30}/(mm \cdot h^{-1})$	23	47.8	18
I_{30} 变幅/(mm · h ⁻¹)	20~26	41.2~54.4	9.5~22.8
标准差	4.24	9.33	7.36
降雨总量/mm	46.0	95.6	32.3

表 4 3 种类型降雨的降雨量、最大 30 min 降雨强度 (I_{30}) 方差矩阵

降雨类型	降雨量		I_{30}	
	A	B	A	B
B	0.033 *	—	0.027 *	—
C	0.004 *	0.069	0.492	0.011 *

注：* 表示显著性水平为 0.05。

3.2.3 不同类型侵蚀性降雨下各侵蚀治理措施的减流效应 植被措施可以有效增加地表摩擦力,降低雨滴对地表的冲刷能力,改善土壤,减小径流量,增加入渗量,延长产流时间,减少地表径流的产生^[29],是砒砂岩区侵蚀治理的主要措施之一。采用 WEPP 模型模拟各侵蚀措施坡面产流状况及各侵蚀治理措施在不同降雨类型下的减流效应变化见图 6。

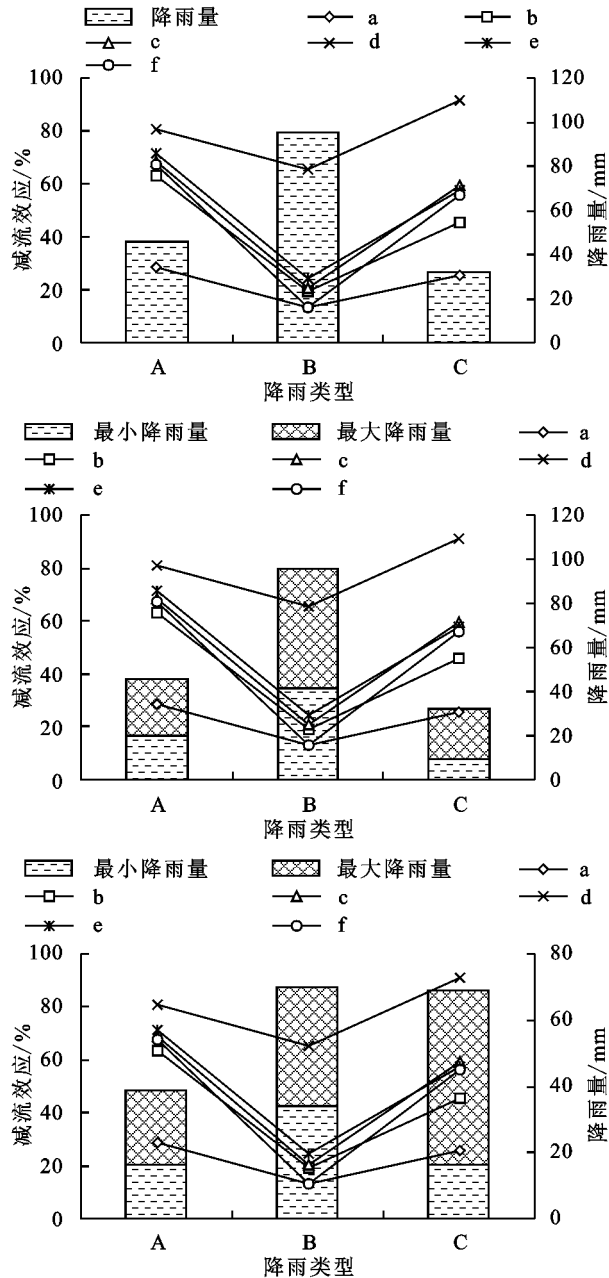


图 6 植物措施减流效应随侵蚀性降雨类型的变化

由图 6 可知,在不同类型降雨下,各侵蚀治理措施

施坡面产流量与无措施小区(裸地)产流量相比呈明显减少的趋势,减流效益明显^[30]。在 A 类型降雨(小雨量、中雨强)条件下,各侵蚀治理措施的减流效应分别是情景 a(阳坡低盖度草本)28.50%、情景 b(阳坡低盖度灌丛)68.28%、情景 c(阳坡中盖度灌丛)68.72%、情景 d(阴坡灌木林)80.65%、情景 e(阴坡高盖度灌丛)71.50%、情景 f(阴坡低盖度灌丛)67.49%。可见,在降雨量为小雨量时,植被可有效阻止降雨对坡面的直接冲刷,增加水分入渗,使降雨对坡面的影响程度明显减小;在 B 类型降雨(中雨量、大雨强)条件下,各侵蚀治理措施对减少径流量的影响均有不同程度的降低,其减流效应分别是情景 a(阳坡低盖度草本)13.04%、情景 b(阳坡低盖度灌丛)19.20%、情景 c(阳坡中盖度灌丛)20.64%、情景 d(阴坡灌木林)65.18%、情景 e(阴坡高盖度灌丛)24.45%、情景 f(阴坡低盖度灌丛)13.28%。可知在中雨量、大雨强的条件下,最大 30 min 降雨强度 I_{30} 对 6 种植物措施的减流效应影响显著;C 类型降雨(大雨量、中雨强)虽然降雨量增大,但降雨强度较小,并且在 3 种降雨类型中最小,各措施的减流效应有一定的增加,其减流效应分别是情景 a(阳坡低盖度草本)25.56%、情景 b(阳坡低盖度灌丛)45.53%、情景 c(阳坡中盖度灌丛)59.27%、情景 d(阴坡灌木林)91.28%、情景 e(阴坡高盖度灌丛)57.75%、情景 f(阴坡低盖度灌丛)56.04%,情景 d(阴坡灌木林)的减流效应达到 90% 以上,在 C 类型降雨(大雨量、中雨强)灌木林措施的减流效应更明显。

3.2.4 不同类型侵蚀性降雨下各侵蚀治理措施的减沙效应 侵蚀治理植物措施可以拦截降雨,增加地面粗糙度,降低水流的泥沙携带能力。同时,植被土壤中的根系可以发挥固土作用,提高土壤本身的耐蚀性,减少土壤侵蚀^[31]。使用 WEPP 模型模拟各措施坡面产沙状况及各植物措施在不同降雨类型下的减沙效应变化见图 7。

由图 7 可知,在不同类型降雨下,各侵蚀治理措施坡面产沙量与无措施小区(裸地)产流量相比呈明显的减少趋势,在 A 类型降雨(小雨量、中雨强)条件下,各措施的减沙效应差异明显,除情景 a(阳坡低盖度草本)减流效应为 64.19% 以外,其余 5 种措施的减沙效应均在 95% 以上。可见,在降雨量为小雨量时植被能增加地面粗糙度,有效降低水流流速,从而减弱径流的挟沙能力,各措施的减沙效应均最大;在 B 类型降雨(中雨量、大雨强)条件下,各措施的减沙效应均有一定程度减小,各措施减沙效应分别为情景 a(阳坡低盖度草本)44.46%、情景 b(阳坡低盖度灌丛)43.53%、情景 c(阳坡中盖度灌丛)58.66%、情景 d(阴坡灌木林)93.35%、情景 e(阴坡高盖度灌丛)85.34%、情景 f(阴坡低盖度灌丛)51.23%。可知,在中雨量、大雨强条

件下,最大 30 min 降雨强度 I_{30} 对 6 种植物措施的减沙效应影响显著;在 C 类型降雨(大雨量、中雨强)条件下,虽然降雨量增大,但降雨强度有明显的减小,并且在 3 种降雨类型中达到最小,6 种措施的减沙效应有一定的增加,各措施的减沙效应分别是情景 a(阳坡中盖度草本)61.95%、情景 b(阳坡低盖度灌丛)75.19%、情景 c(阳坡中盖度灌丛)88.63%、情景 d(阴坡灌木林)98.30%、情景 e(阴坡高盖度灌丛)99.60%、情景 f(阴坡低盖度灌丛)86.51%。

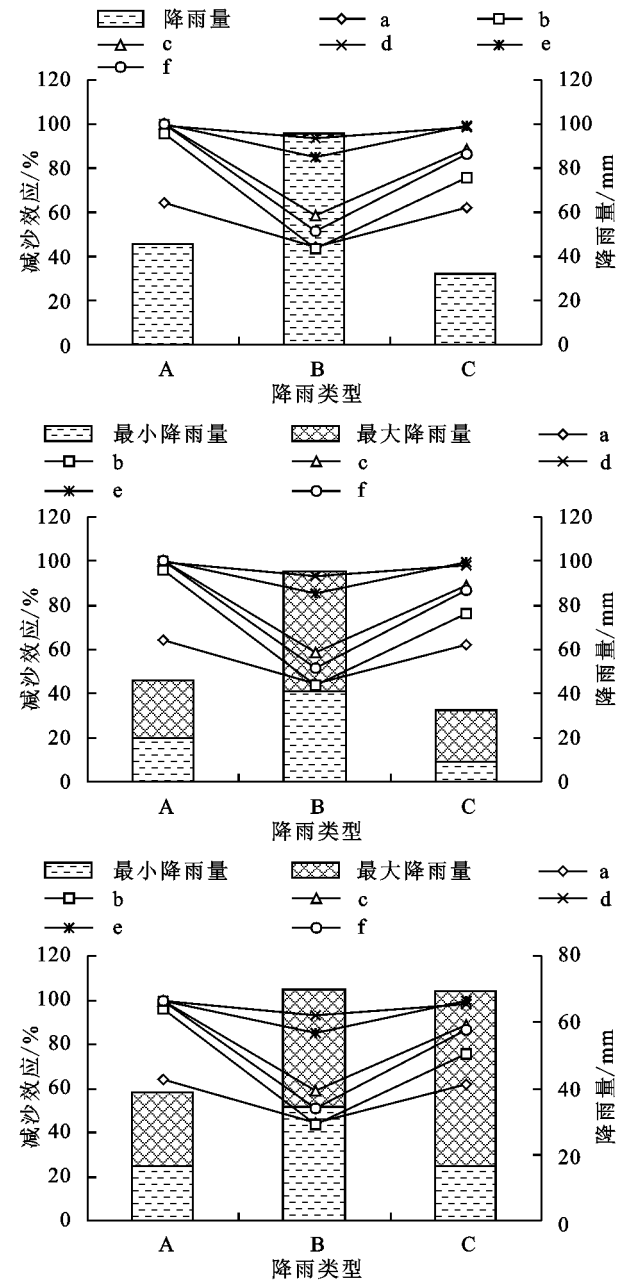


图7 植物措施减沙效应随侵蚀性降雨类型的变化

4 结论

(1) 基于径流量和土壤侵蚀量模拟值采用累积误差法对敏感性参数进行率定,得出有效水力传导系数为 4.73 mm/h,临界剪切力为 1 Pa,细沟土壤可蚀性参数为 0.01 s/m,其余参数采用公式计算得出的

基值。WEPP 模型模拟无措施(裸地)小区径流量和侵蚀量的 R^2 分别为 0.722 3 和 0.702 5, ME 分别为 0.616 0 和 0.616 7, WEPP 模型模拟措施(草地)小区径流量和侵蚀量的 R^2 分别为 0.711 6 和 0.844 7, ME 分别为 0.674 1 和 0.690 3;基于 2014—2016 年径流实测资料与模拟值对比得出的 ME 值表明 WEPP 模型在砒砂岩区坡面的适用性较好,侵蚀量的模拟效果优于径流量的模拟效果;措施小区的模型效果比无措施小区的模拟效果好,且在砒砂岩区 WEPP 模型更适用于措施小区的模拟。

(2) 基于实际调查情况构建了 6 种不同植物措施情景,运用 WEPP 模型对裸地坡面进行情景模拟,表明在不同降雨类型下,各植物措施减流效应为:情景 a 为 13.04%~28.50%、情景 b 为 19.20%~63.28%、情景 c 为 20.64%~68.72%、情景 d 为 65.18%~91.28%、情景 e 为 24.45%~71.50%、情景 f 为 13.28%~67.49%;各植物措施减沙效应为:情景 a 为 44.46%~64.19%、情景 b 为 43.53%~99.57%、情景 c 为 58.66%~95.78%、情景 d 为 93.35%~99.98%、情景 e 为 85.34%~99.94%、情景 f 为 51.23%~97.97%。总体来看,各植物措施坡面减流减沙效应表现为灌木林>高盖度灌丛>中盖度灌丛>低盖度灌丛>低盖度草地。

参考文献:

[1] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.

[2] 张金慧,徐雪良,张锐,等.砒砂岩类型区筑坝材料可行性分析[J].中国水土保持,1999(1):28-30.

[3] 王愿昌,吴永红,李敏.砒砂岩地区水土流失及其治理途径研究[M].郑州:黄河水利出版社,2007.

[4] 张德全.砒砂岩区的侵蚀及危害[A].中国水土保持学会.发展水土保持科技、实现人与自然和谐:中国水土保持学会第三次全国会员代表大会学术论文文集[C].中国水土保持学会:中国水土保持学会,2006:2.

[5] 姚文艺,李长明,张攀,等.砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J].人民黄河,2018,40(6):1-7.

[6] 王立久,李长明,董晶亮.砒砂岩分布及岩性特征[J].人民黄河,2013,35(12):91-93.

[7] 王伟,张永波,叶浩,等.内蒙古砒砂岩的模糊聚类分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(6):1168-1172.

[8] 赵国际.内蒙古砒砂岩地区水土流失规律研究[J].水土保持研究,2001,8(4):158-160.

[9] 王伦江.砒砂岩风化物陡边坡水土流失规律研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.

[10] 肖培青,姚文艺,刘慧.砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J].人民黄河,2014,36(10):92-94.

[11] 张腾飞.砒砂岩侵蚀区水土流失治理新模式探讨[J].亚热带水土保持,2016,28(2):44-46.

[12] 歌丽巴,王玉杰,王云琦,等.WEPP 模型在北京山区的适用性评价[J].北京林业大学学报,2015,37(12):69-76.

- [19] 张敬昇,李冰,王昌全,等.控释掺混氮肥对稻麦作物生长和产量的影响[J].浙江农业学报,2016,28(8):1287-1296.
- [20] 李伟,李絮花,董静,等.冬小麦控释尿素与普通尿素的最佳配比研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):629-635.
- [21] 李酉开.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1989.
- [22] 焦如珍,董玉红,孙启武.LY/T 1228-2015 森林土壤氮的测定[S].北京:国家林业局,2015:1-16.
- [23] Guo J, Wang Y, Blaylock A D. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding ($>15\text{ Mg/hm}^2$) maize[J].Field Crops Research,2017,204:23-30.
- [24] 姬景红,李玉影,刘双全,等.控释掺混肥对春玉米产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J].土壤通报,2015,46(3):669-675.
- [25] 王寅,冯国忠,张天山,等.基于产量氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例[J].土壤学报,2015,52(5):1153-1164.
- [26] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等.控释尿素与尿素配施对油菜籽产量、经济效益和土壤无机氮含量的影响[J].中国油料作物学报,2013,35(3):295-300.
- [27] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等.连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J].中国农业科学,2012,45(9):1741-1749.
- [28] 刘飞,张民,诸葛玉平,等.马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1351-1358.
- [29] 张敬昇,李冰,王昌全,等.控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):110-118.
- [30] 胡晓航,周建朝,王秋红,等.温度、水分和施肥对甜菜黑土氮素迁移转化的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):82-88.
- [31] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等.施用控释尿素对油菜籽产量、氮肥利用率及土壤无机氮含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1449-1456.
- [32] 张敬昇,李冰,王昌全,等.不同控氮比掺混肥对土壤无机氮与脲酶及冬小麦产量的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):159-164.
- (上接第 129 页)
- [13] 谢炎敏.WEPP 与 RUSLE 在南方红壤丘陵区土壤侵蚀模拟中的应用对比研究[J].人民珠江,2018,39(10):34-38.
- [14] 朱韵峤.WEPP 模型在紫色土区域适用性研究[J].安徽农业科学,2017,45(23):106-108,113.
- [15] 叶俊道,秦富仓,岳永杰,等.WEPP 模型在砭砂岩地区土壤侵蚀模拟的适用性研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(7):132-135.
- [16] 常平.冲蚀条件下砭砂岩坡面水力侵蚀特性试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [17] 查同刚.土壤理化分析[M].北京:中国林业出版社,2017.
- [18] Foster G R, Lane L J. User requirements, USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP)[R].NSERL Report No.1, West Lafayette: USDA—ARS National Soil Erosion laboratory,1987.
- [19] 张晴雯,雷廷武,姚春梅,等.WEPP 细沟剥蚀率模型正确性的理论分析与实验验证机[J].农业工程学报,2004,20(1):35-39.
- [20] 余长洪,李就好,陈凯,等.砖红壤区 WEPP 模型土壤参数的率定[J].广东农业科学,2013,40(4):177-178,186.
- [21] 董荣万,朱兴平,何增化,等.定西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀规律研究[J].水土保持通报,1998,18(3):1-9.
- [22] 刘远利,郑粉莉,王彬,等.WEPP 模型在东北黑土区的适用性评价:以坡度和水保措施为例[J].水土保持通报,2010,30(1):139-145.
- [23] 王怀智.沙棘的生物学特征及生态作用[J].现代农业科技,2011(16):193-194.
- [24] 刘胜,贺康宁,王正宁,等.青海大通地区退耕地人工林分的消光特性[J].中国水土保持科学,2006,4(3):59-64.
- [25] 尹婧,邱国玉,何凡,等.半干旱黄土丘陵区人工林叶面积特征[J].植物生态学报,2008,32(2):440-447.
- [26] 王浩,黄晨璐,杨方社,等.砭砂岩区沙棘根系的生境适应性[J].应用生态学报,2019,30(1):157-164.
- [27] 刘广全,土小宁,王鸿哲,等.沙棘苗木根系生长发育特征研究[J].西北林学院学报,2005(3):26-30,52.
- [28] 云锦凤,米福贵.干旱地区一种优良禾草:蒙古冰草[J].内蒙古草业,1990(2):70-71,25.
- [29] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.
- [30] 秦隆宇.基于不同水土保持措施下径流小区降雨与产流产沙关系研究[J].黑龙江水利科技,2018,46(11):51-54.
- [31] Liu Z, Notaro M, Gallimore R. Indirect vegetation-soil moisture feedback with application to Holocene North Africa climate[J].Global Change Biology,2010,16:1733-1743.