

不同时间尺度下流域径流侵蚀功率 输沙模型模拟精度

张译心¹, 徐国策¹, 李占斌^{1,2}, 李鹏¹, 贾路¹, 王斌¹

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室 710048; 2.中国科学院 水利部
水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:流域不同时间尺度下的水沙关系及其模拟预测是国内外水土流失研究的热点问题,基于水蚀动力过程的径流侵蚀功率理论,建立了径流侵蚀功率输沙模型,选取黄河一级支流无定河流域的实测径流泥沙资料,系统研究了年、月和次暴雨 3 种不同时间尺度下的径流侵蚀功率和输沙量之间的相关关系,对比分析了径流侵蚀功率输沙模型与径流—输沙模型在表征流域径流侵蚀输沙上的优劣。结果表明:1975—2010 年,无定河流域径流、输沙和径流侵蚀功率在不同时间尺度下均呈下降趋势;不同时间尺度下的径流侵蚀功率输沙模型的 R^2 相对于径流—输沙均较高,表明基于径流侵蚀功率的流域径流侵蚀功率输沙模型在不同时间尺度上均能够更准确地表征径流侵蚀输沙关系。

关键词:无定河; 侵蚀产沙; 径流侵蚀功率; 尺度效应

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0001-07

Simulation Accuracy of Runoff Erosion Power-Sediment Transfer Model at Different Time Scales

ZHANG Yixin¹, XU Guoce¹, LI Zhanbin^{1,2}, LI Peng¹, JIA Lu¹, WANG Bin¹

(1.State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The relationship between runoff and sediment and its simulation prediction at different time scales in the basin is a hotspot in soil erosion research at home and abroad. Based on the theory of runoff erosion power of runoff erosion dynamic process, the runoff erosion power-sediment transfer model is established. The correlation between runoff erosion power and sediment transfer at three different time scales of year, month and individual rainstorm event were studied by selecting runoff and sediment data from the Wudinghe basin, the first tributary of the Yellow River. We compared and analyzed the advantages and disadvantages of the runoff erosion power-sediment transfer model and the runoff-sediment transfer model characterizing runoff erosion and sediment transfer. The results show that runoff, sediment and runoff erosion power in the Wudinghe basin presented the decreasing trend at different time scales from 1975 to 2010. R^2 of the runoff erosion power-sediment model at different time scales was higher than that of the runoff-sediment model, indicating that the runoff erosion power-sediment transfer model can more accurately characterize the relationship between runoff erosion and sediment transfer on different time scales.

Keywords: Wudinghe basin; soil erosion and sediment yield; runoff erosion power; spatial scale effect

收稿日期:2019-01-30

修回日期:2019-07-30

资助项目:国家“十三五”科技支撑计划资助项目(2016YFC0402404);国家自然科学基金“基于能量过程的沟道工程侵蚀阻控机理研究”(51779204)

第一作者:张译心(1996—),女,陕西西安人,硕士生,主要从事流域水土资源调控的研究。E-mail:leslie_cheung0707@163.com

通信作者:徐国策(1985—)男,河南洛阳人,博士,副教授,主要从事流域水土资源调控与遥感研究。E-mail:xuguoce_x@163.com

径流是水力侵蚀的重要动力因子,其变化对流域的侵蚀产沙具有显著影响,径流不仅是泥沙输移的媒介,也是能量传递和转化的载体。由于坡面系统与沟道系统具有一定比降,径流在产汇流过程中具有较大的能量^[1-2],径流深和洪峰流量等参数能够反映流域径流的某些水文特性,但不能较好的反映下垫面条件与径流过程共同作用,而径流侵蚀功率则兼备这两个优点,能够更加准确的反映出水力侵蚀的动力过程^[3-4]。黄土高原地区多年来实施了大量的水土保持措施,使得黄河流域的水沙情势发生了较大变化,水土保持措施通过改变流域的下垫面条件,进而改变侵蚀产沙能力,最终通过输沙量的变化而体现^[5-7],因此,研究径流的侵蚀功率变化特征对于表征水沙响应关系具有重要的理论意义。Yang 等^[8]审查了常规泥沙输送方程推导中所用的基本假设,提出径流功率理论。为了进一步确定总含沙量,杨志达^[9]从能量的角度系统的研究了泥沙输送原理,并提出了全沙输送的函数。崔文滨等^[10]应用泥沙输送原理对冲刷试验中不同流量和坡度下的坡面侵蚀产沙特征进行了分析和比较,发现径流功率理论能够较好地应用于坡面单宽径流的侵蚀产沙过程。以上研究表明,径流侵蚀能量理论能够较好的表征土壤侵蚀的物理过程,随后,一些研究人员采用径流能量理论对小流域的侵蚀产沙过程进行了模拟,均得到了较好的结果。李占斌等^[11-12]提出了径流侵蚀功率理论,建立了次暴雨尺度的幂函数型产沙模型,鲁克新等^[13-15]将其应用于黄土高原小流域次暴雨侵蚀产沙过程,发现该模型能够较好的反应流域次暴雨的侵蚀产沙情况。孙倩等^[16]将次暴雨尺度的幂函数型产沙模型应用于黄土丘陵区 6 个典型小流域,根据水沙突变情况对该模型的幂指数参数进行了调整和优化。程圣东^[17]基于植被格局对坡沟—流域侵蚀产沙过程的影响机理,首次提出了计算年功率、月功率的理论和计算方法并应用于大理河流域,得到了较好的模拟结果。龚珺夫等^[18]使用 SWAT 水文模型研究了延河流域年尺度的径流侵蚀功率空间变化特征,发现了“支流大,干流小”的特点。Wang^[19]等将径流侵蚀功率等计算方法应用于黄土高原桥沟小流域,并提出了预测黄土丘陵沟壑区泥沙输移比的动态指标。然而,径流侵蚀能量的传递过程、尺度效应及其与输沙之间的响应关系目前仍是流域侵蚀产沙研究的薄弱环节,特别是不同时间尺度上的侵蚀能量理论和相关模型的应用研究成果较少,制约了流域侵蚀产沙量的合理估算及预报^[20-21],因此,基于事件的流域径流侵蚀输沙模型亟待深入研究。

本文分析年、月和次暴雨 3 种不同时间尺度下的

径流、输沙和径流侵蚀功率的变化趋势,基于水蚀动力过程的径流侵蚀能量理论,针对不同时间尺度建立对应的径流侵蚀功率输沙模型和径流输沙模型,对比分析两种模型在表征流域径流侵蚀输沙上的优劣和差异。研究不同时间尺度的径流过程、输沙过程及其与侵蚀能量间内在联系,有助于进一步揭示径流调控的水土保持作用机制,对于提高黄土高原水土流失预报精度和科学布设水土流失综合治理措施具有重要的理论意义和实践价值。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

无定河是黄河的一级支流,发源于陕西白于山,横跨陕西和内蒙两省(37°00′00″—39°0′0″N, 107°47′48″—110°24′21″E),流域面积 30 261 km²,干流全长 491 km,流域整体地形呈现出西高东低的特征,主河道平均比降为 1.97%。流域处于两大气候带的交界区,年平均气温约为 8~12℃,北部为温带大陆性气候的风沙区,夏季高温,多短历时暴雨,南部为温带大陆性气候,夏季多暴雨、冰雹,山洪灾害频发,降雨年际变化较大,年内分布不均;流域平均植被覆盖率低于 30%,西北部向东南部由荒漠草原向森林草原过渡,呈现出明显的水平地带性;流域主要土壤为黄绵土、风沙土和新积土,黄绵土有机质含量低,水蚀严重,主要分布在流域西北部,东南部风沙土风蚀严重,河道附近分布肥力强且易于耕种的新积土,流域总体水土流失情况严重^[22]。

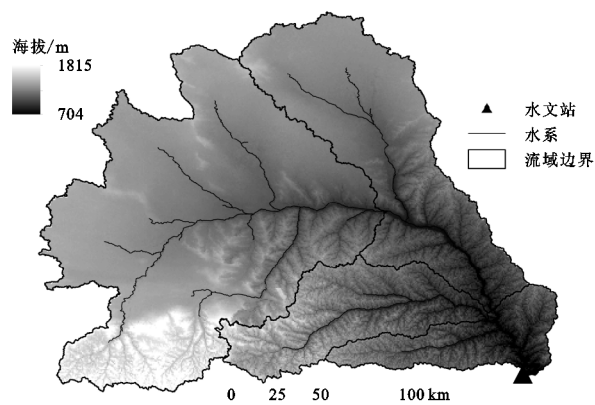


图 1 无定河流域位置

1.2 数据来源

1975—2010 年水文资料来源于黄河水文年鉴,选取白家川水文测站为无定河流域出口控制水文站(图 1),控制流域面积为 29 662 km²。

1.3 径流侵蚀功率理论

流域径流侵蚀输沙过程是一个复杂的物理过程,它是降水与流域下垫面相互作用的结果。本文计算

了次暴雨尺度、月尺度和年尺度的径流侵蚀功率,计算公式如下:

$$E=Q'_mH=\frac{WQ_m}{A\ A}=\frac{W}{A^2}A'\frac{Q_m}{A'}=\frac{A'}{A^2}$$

$$WV=\frac{A'}{\rho gA^2}\cdot\rho gWV=\frac{A'}{\rho gA^2}FV\tag{1}$$

令 $Con=\frac{A'}{\rho gA^2}$ 则:

$$E=Con\cdot FV\tag{2}$$

推广后的公式分别如下:

$$E=Q'_{year}H_{year}\tag{3}$$
$$E=Q'_{month}H_{month}\tag{4}$$

式中: E 为径流侵蚀功率[$m^4/(s\cdot km^2)$]; W 为径流总量(m^3); A 为流域面积(m^2); Q_m 为洪峰流量(m^3/s); A' 为与 Q_m 对应的流域出口断面的过水面积(m^2); V 为流域出口断面与 Q_m 对应的平均流速(m/s); ρ 为水的密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); F 为作用力(N); H 为径流深(m); Q'_m 为洪峰流量模数[$m^3/(s\cdot km^2)$]; Q'_{month} 为月最大日平均流量模数[$m^3/(s\cdot km^2)$]; Q'_{year} 为年最大月平均流量模数[$m^3/(s\cdot km^2)$].

1.4 线性回归法

线性回归法通过建立年径流序列 y_t 与相应的时序 t 之间的线性回归方程来检验时间序列的线性变化趋势^[23]. 线性回归方程为:

$$y_t=at+b\tag{5}$$

式中: y_t 为实测流量序列; t 为时序($t=1,2,\cdots,n$); a 为斜率,表征时间序列的平均趋势变化率; b 为截距.

其中, a 和 b 的估计如下式所示:

$$a=\frac{\sum_{t=1}^n(y_t-\bar{y})(t-\bar{t})}{\sum_{t=1}^n(t-\bar{t})^2}\tag{6}$$

$$b=\bar{y}-a\bar{t}\tag{7}$$

式中: \bar{y} 和 \bar{t} 分别为 y_t 和 t 的均值.

1.5 Mann-Kendall 检验法

采用 Mann-Kendall 非参数统计检验法进行水沙变化趋势分析^[24]. 构造统计量:

$$U=\frac{\tau}{\sqrt{\text{var}}}\tag{8}$$

$$\tau=\frac{4\sum P_i}{n(n-1)}\tag{9}$$

$$\text{var}(\tau)=\frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}\tag{10}$$

式中:统计量 U 称为 Kendall 秩次相关系数,当 n 增加时, U 将很快收敛于标准正态分布. 给定显著性水平 α ,其双尾检验临界值为 $U_{\alpha/2}$,当 $|U|\leq U_{\alpha/2}$ 时,系列趋势不

显著,资料一致性较好;当 $|U|>U_{\alpha/2}$ 时,系列趋势显著,如 $U>0$,系列呈上升趋势,如 $U\leq 0$,系列呈下降趋势.

2 结果与分析

2.1 流域水沙趋势分析

按照次洪发生的时间顺序,通过线性回归法分析无定河流域次暴雨尺度的径流与输沙趋势,见图 2A—B 所示,次暴雨尺度径流与输沙的线性回归系数均为负值,径流线性回归系数的绝对值大于输沙量线性回归系数绝对值,次暴雨尺度径流的下降趋势大于输沙. 月尺度流域的径流与输沙变化趋势如图 2C—D 所示,月尺度径流与输沙的线性回归系数均为负值,且径流线性回归系数绝对值大于输沙线性回归系数绝对值,月尺度径流下降趋势大于输沙. 年尺度径流与输沙变化趋势如图 2E—F 所示,年尺度径流与输沙的线性回归系数均为负值,且径流线性回归系数绝对值大于输沙线性回归系数绝对值,年尺度径流的下降趋势大于输沙. 以上分析表明,流域径流与输沙变化趋势具有一致性,径流的下降趋势在不同时间尺度上均大于输沙量的下降趋势,且径流与输沙量的下降程度表现为年尺度>次暴雨尺度>月尺度的特征.

不同时间尺度的径流与输沙变化趋势特征见表 1,无定河流域在月尺度和年尺度上的径流与输沙的 M-K 秩相关系数均为负值,呈下降趋势;次暴雨尺度径流 M-K 秩相关系数为 0,变化趋势水平不显著($p>0.1$),次暴雨尺度输沙量的下降趋势不显著($p>0.1$);月尺度和年尺度径流均呈现出极显著下降趋势($p<0.001$),同时,月尺度和年尺度输沙也呈现出显著下降趋势($p<0.05$),径流与输沙的 M-K 秩相关系数绝对值在月尺度上表现为最大,在不同时间尺度下,径流与输沙下降趋势具有一致性.

表 1 不同时间尺度径流与输沙 Mann-Kendall 趋势检验

时间尺度	时间	径流量/亿 m^3		输沙量/亿 t	
		系数	显著水平	系数	显著水平
次暴雨尺度	1975—1995	0.00	+	-0.77	+
月尺度	1975—2010	-4.45	***	-2.17	*
年尺度	1975—2010	-0.13	***	-0.01	*

注:*** 双尾检测变化趋势为 0.001 水平显著;* 双尾检测变化趋势为 0.05 水平显著;+ 双尾检测变化趋势大于 0.1 水平显著,下同.

2.2 流域径流侵蚀功率趋势分析

通过线性回归法分析不同时间尺度下流域径流侵蚀功率的变化趋势(图 3),无定河流域不同尺度径流侵蚀功率的线性回归系数均为负值,且径流侵蚀功率下降趋势呈现出次暴雨洪水>年尺度>月尺度的特征.

无定河流域次暴雨尺度、月尺度和年尺度径流侵蚀功率的 M-K 秩相关系数均为负值,并且随着时间尺度的增大,径流侵蚀功率 M-K 秩相关系数的绝对值也逐渐增大,总体呈现出:次暴雨尺度<月尺度<年尺度;次暴雨尺度径流侵蚀功率下降趋势不显著($p>0.1$),年尺

度径流侵蚀功率下降趋势极显著($p<0.001$);随着时间尺度的增大,径流侵蚀功率下降趋势的显著水平逐渐增加,显著水平呈现:次暴雨尺度<月尺度<年尺度,不同时间尺度径流侵蚀功率的 M-K 秩相关系数绝对值变化趋势与显著水平变化趋势具有一致性(表 2)。

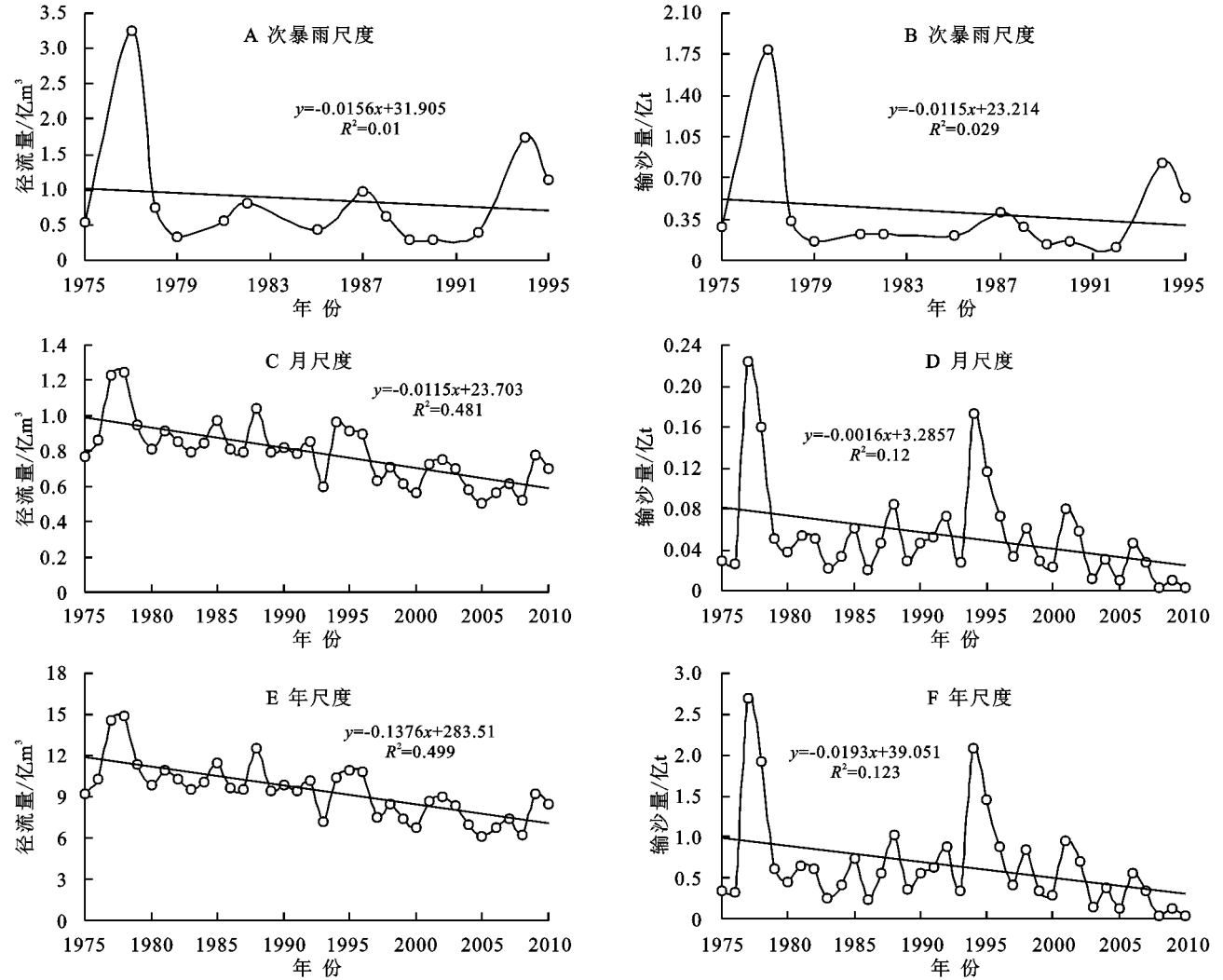


图 2 不同尺度下的流域径流与输沙变化

表 2 不同时间尺度流域径流侵蚀功率的 Mann-Kendall 趋势检验

时间尺度	时间	系数	显著水平
次暴雨尺度	1975—1995	-0.77	+
月尺度	1975—2010	-2.06	*
年尺度	1975—2010	-3.53	***

2.3 流域径流侵蚀功率输沙模型与径流输沙模型对比分析

2.3.1 流域次暴雨尺度 通过对无定河流域白家川水文站 1975—1995 年 24 场次洪流量及其含沙量的计算,得出该站的次洪输沙量、次洪径流量及次洪径流侵蚀功率。对次暴雨洪水径流侵蚀功率与输沙、径流与输沙进行线性拟合,结果见图 4,次暴雨洪水径流侵蚀功率输沙

和径流输沙的相关系数分别为 0.989,0.977;对无定河流域次暴雨洪水径流侵蚀功率与输沙、径流与输沙进行皮尔逊相关性检验,得到次暴雨洪水径流侵蚀功率输沙皮尔逊相关性系数为 0.995($p<0.01$),次暴雨洪水径流输沙皮尔逊相关性系数为 0.988($p<0.01$)。以上分析表明,与径流量相比,径流侵蚀功率能更准确的反映流域次暴雨尺度的输沙量变化。

2.3.2 流域月尺度

(1) 年际月变化。通过对 1975—2010 年日流量和日含沙量的计算,得到白家川站的月平均输沙量、月平均径流量及月平均径流侵蚀功率。对月尺度年际径流侵蚀功率与输沙、径流与输沙进行线性拟合,结果如图 5 所示,月尺度年际径流侵蚀功率输沙和径

流输沙的相关系数分别为 0.906,0.576;对无定河流域月尺度年际径流侵蚀功率与输沙、径流与输沙进行线皮尔逊相关性检验,得到月尺度年际径流侵蚀功率输沙皮尔逊相关系数为 0.948($p<0.01$),月尺度年际径流输沙皮尔逊相关系数为 0.756($p<0.01$),月尺度年际径流侵蚀功率输沙皮尔逊相关性优于月尺度年际径流输沙皮尔逊相关性。以上分析表明,与径流量相比,径流侵蚀功率能更准确的反映出月尺度年际的流域输沙量变化。

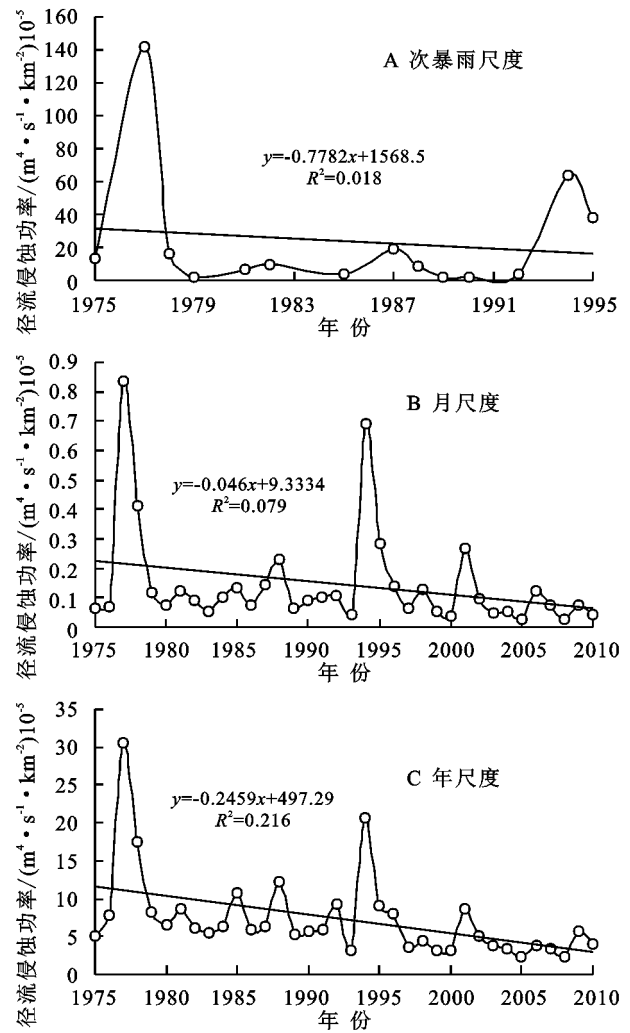


图3 流域径流侵蚀功率趋势

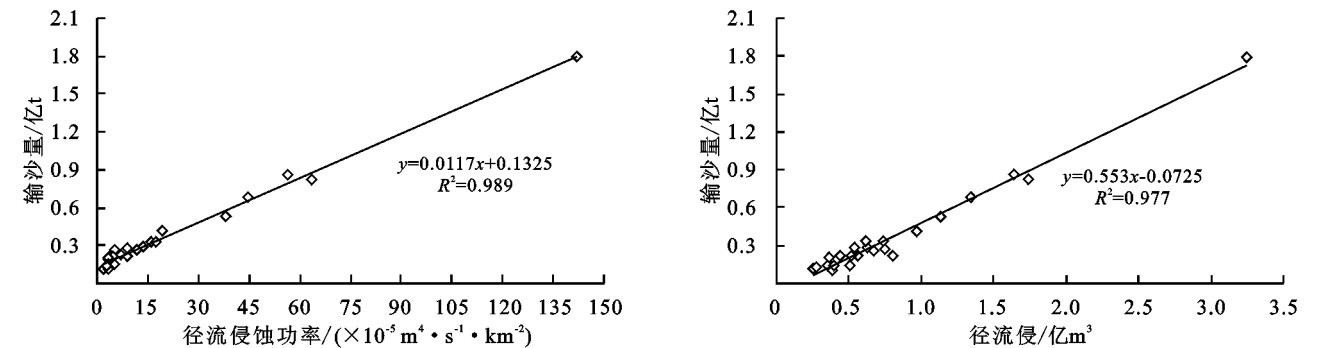


图4 次暴雨洪水径流侵蚀功率输沙相关模型与径流输沙相关模型

表3 流域月尺度年内径流、径流侵蚀功率、输沙统计

月份	月输沙量/ 10 ⁴ t	月径流侵蚀功率/10 ⁻⁶ (m ⁴ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	月径流量/ 亿 m ³
1	2.76	2.30	0.64
2	10.33	4.41	0.80
3	84.24	9.51	1.14
4	67.77	3.25	0.60
5	62.33	2.45	0.43
6	477.56	7.33	0.47
7	2073.87	30.75	0.88
8	2891.97	83.88	1.32
9	599.90	16.86	0.91
10	57.99	4.52	0.82
11	53.62	3.67	0.79
12	15.41	3.00	0.67

(2) 年内月变化。白家川站多年各月平均输沙量、平均径流侵蚀功率及平均径流量见表 3,通过对径流侵蚀功率与输沙、径流与输沙进行线性拟合,结果见图 6,月尺度年内径流侵蚀功率输沙和径流输沙的相关系数分别为 0.890,0.375。

对无定河流域月尺度年内径流侵蚀功率与输沙、径流与输沙进行线皮尔逊相关性检验,得到月尺度年内径流侵蚀功率输沙皮尔逊相关性为 0.943($p<0.01$),月尺度年内径流输沙皮尔逊相关性为 0.613($p<0.05$),以上分析表明,月尺度年内径流侵蚀功率输沙模型比径流输沙模型的模拟精度更高。

2.3.3 流域年尺度 通过对无定河流域白家川水文站 1975—2010 年日流量和日含沙量的计算,得到该站的年径流量、年径流侵蚀功率及年输沙量;对年尺度径流侵蚀功率与输沙、径流与输沙进行线性拟合(图 7),年尺度径流侵蚀功率输沙和径流输沙的相关系数分别为 0.854,0.523。

对无定河流域年尺度径流侵蚀功率与输沙、径流与输沙进行线皮尔逊相关性检验,得到年尺度径流侵蚀功率输沙皮尔逊相关性为 0.925($p<0.01$),年尺度径流输沙皮尔逊相关性为 0.724($p<0.05$),以上分析表明,年尺度径流侵蚀功率输沙模型比径流输沙模型的模拟精度更高。

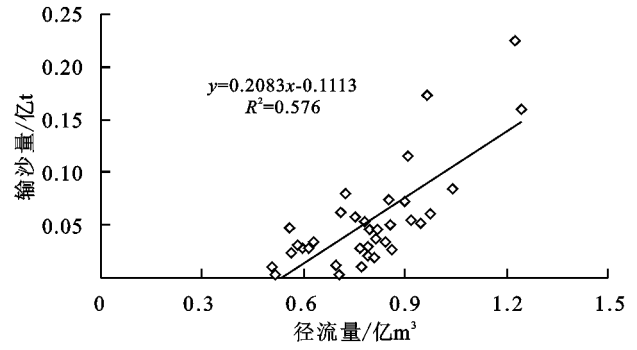
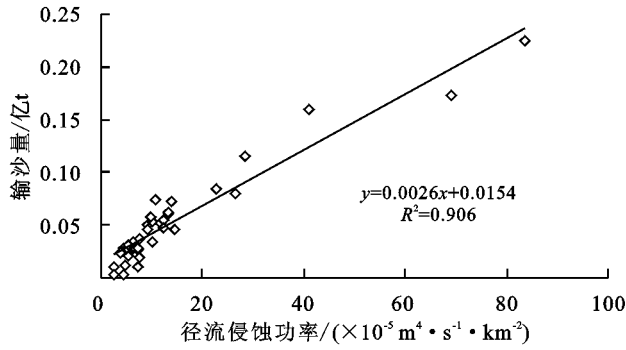


图 5 月尺度年际径流侵蚀功输沙相关模型与径流输沙相关模型

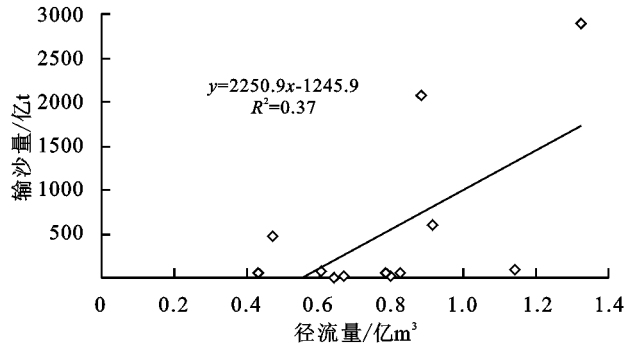
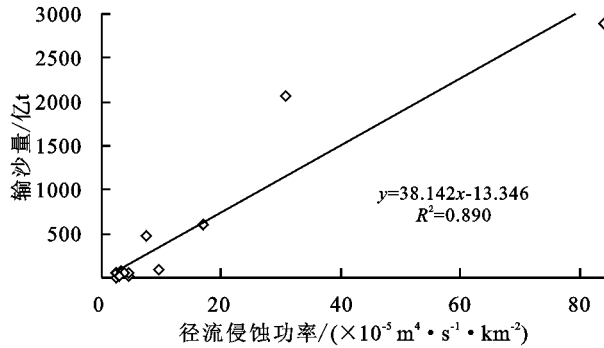


图 6 月尺度年内径流侵蚀功率输沙相关模型与径流输沙相关模型

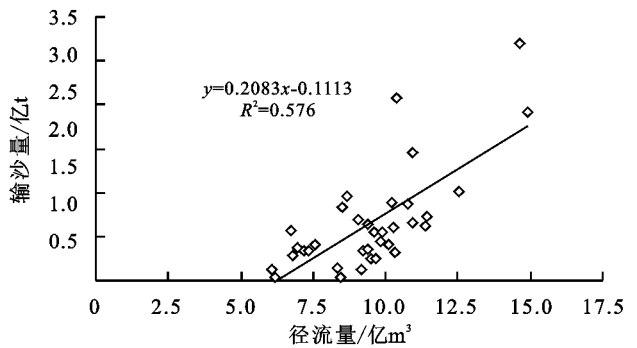
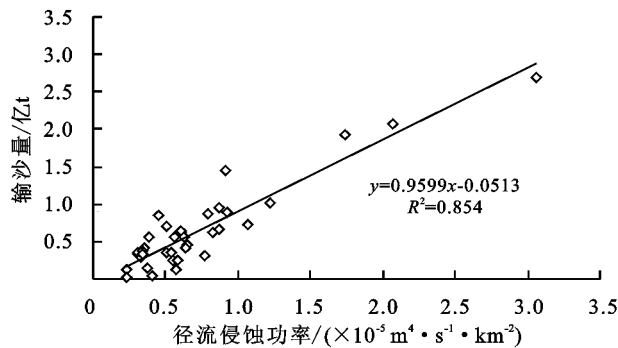


图 7 年尺度径流侵蚀功率输沙相关模型与径流输沙相关模型

3 讨论与结论

目前在研究径流侵蚀方面主要有剪切力模型和侵蚀能量模型两大类^[25-26],与传统的水力学参数相比,能量参数可以更贴切的表征土壤侵蚀耗散、传递和再分配的各个环节^[27-28],仅以径流量变化来判断产沙量变化是不准确的,从能量守恒的角度,径流侵蚀功率代表了径流所携带的侵蚀能量进而对侵蚀发生的动力临界情况的解释度更高^[29],并且侵蚀功率兼具径流量与洪峰两个特征变量,可以更全面地反映枯水、中水和丰水时期流域的实际输沙情况,其中洪峰流量可以反映侵蚀链内的径流变化率,这是造成不同时间尺度下径流侵蚀输沙显著差异的重要因素^[30],径流侵蚀功率能准确把握黄土高原地区水蚀过程的主要动力特征,使得径流侵蚀功率输沙模型在黄土高原典型流域中的模拟精度普遍高于传统的径流输沙模型。黄土高原降雨集中在汛期,历时短且雨量大,

黄土层较厚,质地均匀,土壤极易受水流侵蚀,产沙与输沙量和大暴雨的关系十分密切^[31-32],时间尺度越小,径流其受到下垫面接触和传递的影响越小,径流侵蚀功率计算中的洪峰流量在整个研究时段中更具有代表性,对整个侵蚀输沙过程的有效贡献率高^[33-34],因此在黄土高原地区,时间尺度越小,径流侵蚀功率表征输沙之间的关系越准确。本文研究不同时间尺度的流域径流、输沙、径流侵蚀功率变化趋势时,使用了 M-K 趋势检验法和线性回归法,两种方法结果稍有差别,可能是样本数目较少造成的^[35-36],在今后的研究工作中,还需要利用更多不同时空尺度的径流泥沙资料,进一步验证本研究结果的合理性和普遍性;目前国内外在降雨侵蚀力理论上取得了丰富的研究成果^[37-40],可以结合降雨侵蚀力和径流侵蚀功率之间的关系,对侵蚀产沙模型行进一步的研究。

本文基于径流侵蚀功率的概念,在次暴雨尺度、月尺度和年尺度上分别建立了径流侵蚀功率输沙模

型和径流输沙模型,以无定河流域的实测径流泥沙资料为基础,对两种模型进行了对比分析,结果表明:无定河流域次暴雨尺度、月尺度和年尺度的径流、输沙以及径流侵蚀功率均呈现下降趋势;次暴雨尺度、月尺度和年尺度径流侵蚀功率输沙模型的 R^2 比径流输沙模型分别高0.01,0.51,0.33,即不同时间尺度下径流侵蚀功率输沙模型比径流输沙模型模拟精度更高;在次暴雨尺度下,径流侵蚀功率输沙模型的模拟精度最高;径流侵蚀功率理论可以更好的用以描述径流侵蚀输沙关系,更适宜于作为黄土高原地区流域尺度径流侵蚀输沙的数学预报模型。

参考文献:

- [1] Eekhout J P C, de Vente J. The implications of bias correction methods and climate model ensembles on soil erosion projections under climate change[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019,44(5):1137-1147.
- [2] 闫瑞,张晓萍,李够霞,等.基于RUSLE的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究[J].*水土保持学报*,2017,31(4):32-37.
- [3] 张乐涛,李占斌,王杉杉.坡面径流类型对侵蚀产沙及水沙传递关系的影响[J].*农业工程学报*,2015,31(20):124-131.
- [4] Zhao G, Mu X, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation, and Eco-environment changes in the Loess Plateau of China [J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5):499-510.
- [5] Deng L, Kim D G, Li M, et al. Land-use changes driven by 'Grain for Green' program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China[J]. *Global and Planetary Change*, 2019,177:101-115.
- [6] 任宗萍,马勇勇,王友胜,等.无定河流域不同地貌区径流变化归因分析[J].*生态学报*,2019,39(12):4309-4318.
- [7] 黄河上中游管理局.黄河流域水土保持概论[M].郑州:黄河水利出版社,2011.
- [8] YANG Z T. Incipient motion and sediment transport [J]. *Trans of Asae*, 1973,99(10):9198-9341.
- [9] 杨志达.泥沙输送:理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [10] 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.
- [11] Li Z B, Lu K X, Ding W F. Study on the dynamic process of rill erosion on loess slope surface[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2001,16(2):308-314.
- [12] 李占斌,鲁克新,李鹏,等.基于径流侵蚀功率的流域次暴雨产沙模型研究[M]//第六届全国泥沙基本理论学术讨论会论文集.郑川:黄河水利出版社,2005.
- [13] 鲁克新,李占斌,鞠花,等.不同空间尺度次暴雨径流侵蚀功率与降雨侵蚀力的对比研究[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2009,37(10):204-208.
- [14] 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*,2008,25(3):31-34.
- [15] 鲁克新,李占斌,鞠花.径流侵蚀功率理论在不同尺度坡面侵蚀产沙中的应用[J].*水资源与水工程学报*,2009,20(4):70-73.
- [16] 孙倩,李占斌,于坤霞,等.变化环境下黄土丘陵沟壑区次暴雨输沙模型参数[J].*中国水土保持科学*,2016,14(6):1-9.
- [17] 程圣东.黄土区植被格局对坡沟一流域侵蚀产沙的影响研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [18] 龚珥夫,李占斌,李鹏,等.基于SWAT模型的延河流域径流侵蚀能量空间分布[J].*农业工程学报*,2017,33(13):120-126.
- [19] Wang L, Yao W, Tang J, et al. Identifying the driving factors of sediment delivery ratio on individual flood events in a long-term monitoring headwater basin[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018,15(8):1825-1835.
- [20] Si W, Bao W, Jiang P, et al. A semi-physical sediment yield model for estimation of suspended sediment in loess region[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017,32(1):12-19.
- [21] 郑小路,霍艾迪,朱兴华,等.黄土高原土壤侵蚀预报模型研究进展[J].*应用化工*,2019,48(4):902-906,912.
- [22] 周海霞,朱永利,徐美存,等.无定河简述[J].*内蒙古水利*,2011(2):207-208.
- [23] 王小军,蔡焕杰,张鑫,等.皇甫川流域水沙变化特点及其趋势分析[J].*水土保持研究*,2009,16(1):222-226.
- [24] 钟永华,鲁帆,易忠,等.密云水库以上流域年径流变化趋势及周期分析[J].*水文*,2013,33(6):81-84.
- [25] 李鹏,李占斌,鲁克新,等.黄土坡面径流能耗与侵蚀产沙过程模拟研究[R].郑州:全国泥沙基本理论学术讨论会,2005.
- [26] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等.黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J].*土壤学报*,2010,47(2):223-228.
- [27] 杨春霞,王丹,王玲玲,等.草被覆盖度对坡面流水动力学参数的影响[J].*中国水土保持*,2008(9):40-42,64.
- [28] 吴卿,杨春霞,甄斌,等.草被覆盖度对黄土坡面径流产沙影响的试验研究[J].*中国水土保持*,2010(9):60-62.
- [29] 蔡强国.黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M].北京:科学出版社,1998.
- [30] 张乐涛.基于侵蚀能量的径流输沙尺度效应研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
- [31] 高海东,李占斌,李鹏,等.黄土高原暴雨产沙路径及防控:基于无定河流域 2017-07-26 暴雨认识[J].*中国水土保持科学*,2018,16(4):66-72.
- [32] 李慧娟.延安极端降雨成因分析及非常规比尺模拟试验研究[D].北京:中国科学院大学,2017.

- on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 202-214.
- [21] Han G, Lan J, Chen Q, et al. Response of soil microbial community to application of biochar in cotton soils with different continuous cropping years[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10184.
- [22] 吴伟祥, 孙雪, 董达, 等. 生物质炭土壤环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [23] Stewart C E, Zhang J Y, Botte J, et al. Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 153-164.
- [24] Liu Y, Liu S, Wan S, et al. Differential responses of soil respiration to soil warming and experimental throughfall reduction in a transitional oak forest in central China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 226: 186-198.
- [25] Al-Wabel M I, Al-Omran A, El-Naggar A H, et al. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 374-379.
- [26] Sagrilo E, Jeffery S, Hoffland E, et al. Emission of CO₂ from biochar-amended soils and implications for soil organic carbon[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 7(6): 1294-1304.
- [27] 王颖, 娄运生, 石一凡, 等. 夜间增温对稻田甲烷排放的影响及其高光谱估算[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5099-5108.
- [28] Wu C, Gaumont-Guay D, Black T A, et al. Soil respiration mapped by exclusively use of MODIS data for forest landscapes of Saskatchewan, Canada[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 94: 80-90.
- [29] Huang N, He J S, Niu Z. Estimating the spatial pattern of soil respiration in Tibetan alpine grasslands using Landsat TM images and MODIS data[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 26: 117-125.

(上接第 7 页)

- [33] 王志杰. 延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [34] 赵春红. 坡面侵蚀性降雨径流水动力学特性及其对输沙的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [35] 许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施响应[J]. *地理学报*, 2004, 59(6): 972-981.
- [36] 张君茹. 基于尺度转换的黄土洼流域侵蚀产沙研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [37] 王万中, 张宪奎. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(D)[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(4): 7-18.
- [38] Foster G R, Lombardi F, Moldenhauer W C. Evaluation of rainfall-runoff erosivity factors for individual storms[J]. *Transactions of the Asae*, 1982, 25(1): 124-129.
- [39] Bagarello V, D'Asaro F. Estimating single storm erosion index[J]. *Transactions of the Asae*, 1994, 37(3): 785-791.
- [40] 李静, 刘志红, 李锐. 黄土高原不同地貌类型区降雨侵蚀力时空特征研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3): 124-127.

(上接第 15 页)

- [20] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1785-1792.
- [21] 朱永官, 沈仁芳, 贺纪正, 等. 中国土壤微生物组: 进展与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(6): 554-565.
- [22] 韩剑, 张静文, 徐文修, 等. 新疆连作, 轮作棉田可培养的土壤微生物区系及活性分析[J]. *棉花学报*, 2015, 23(1): 69-74.
- [23] 邹锋, 李金前, 韩丽丽, 等. 鄱阳湖湿地土壤微生物活性对年际水文变化的响应[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 551-559.
- [24] 张杰, 胡维, 刘以珍, 等. 鄱阳湖湿地不同土地利用方式下土壤微生物群落功能多样性[J]. *生态学报*, 2015, 35(4): 729-734.
- [25] 王娜, 高婕, 魏静, 等. 三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2019, 2(5): 321-329.
- [26] 刘亚军, 蔡润发, 李赟璟, 等. 湿地土壤微生物碳源代谢活性对不同水分条件的动态响应: 以鄱阳湖为例[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 8-13.
- [27] 青烨, 孙飞达, 李勇, 等. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析[J]. *草业学报*, 2015, 24(3): 38-45.
- [28] 肖烨, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(5): 1842-1848.