

DOI: 10.11766/trxb201704190031

# 基于重标极差 (R/S) 和小波分析的黄土坡耕地 产流产沙特征研究\*

张慧荟 章 慧 董 艳 张青峰<sup>†</sup>

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 为探明降雨条件下黄土坡耕地微地形径流和泥沙变化规律, 通过 5°、10°、15°、20°、25°坡和直线坡、人工耩耕、人工掏挖、等高耕作4种耕作方式组合条件下的室内模拟降雨试验, 应用基于分形理论的重标极差 (R/S) 分析法对径流和泥沙时间序列的变化趋势进行预测, 同时使用小波 (Morlet) 分析对各径流和产沙序列的变化主周期进行识别。结果表明: 径流序列的赫斯特指数变化区间为 [0.567, 0.798], 产沙量时间序列的赫斯特指数变化区间为 [0.632, 0.861], 两者均大于 0.5, 呈现长程正相关。因此, 坡耕地下一时段的径流量和产沙量时间序列与过去时段变化趋势相同; 4种耕作措施的径流量最大峰值均出现在28~29 min, 部分耕作措施的产沙量序列可能存在30 min以上的长周期, 需要更长的时间序列验证。用R/S分析法结合小波分析, 预测未来的产流产沙趋势, 结果具有可靠性。该研究丰富了径流和泥沙输移理论, 对农业生产和水土保持等方面研究具有指导意义。

**关键词** 径流; 产沙; R/S分析; Morlet小波分析; Hurst指数

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

作为黄土高原的主要侵蚀类型和一种非线性多重尺度地理过程, 水蚀主要发生在坡耕地, 其侵蚀产沙量约占黄土高原水蚀总量的50%~60%<sup>[1-3]</sup>, 对农业生产造成了巨大危害。国内外诸多学者从流域或坡面的角度对侵蚀产沙关系进行了较为系统的研究<sup>[4-6]</sup>。研究表明, 连续降雨条件下径流和泥沙的形成与演变是一个受内外众多因素影响的复杂过程, 具有复杂的随机性和波动性<sup>[7-9]</sup>。若仅从线性或近似线性角度去研究本质上是非线性的水沙变化过程, 必然存在局限性。用于辨识多尺度变异和非线性问题的分形方法特别是R/S分析法是分析时间序列“持久性”的有力工具, 无论时间序列是否符合正态分布, 其分析结果的稳定性均不受影响, 在地下水位、滑坡、年径流序列及气候变化的趋势分析等水文水资源相关研究中得到了广泛应用<sup>[10-12]</sup>。

小波分析法是一种多分辨率分析方法, 能识别出序列中隐含的主周期, 通常被应用到水文(气象)的相关研究<sup>[13-15]</sup>。为此, 本文运用重标极差 (R/S) 和Morlet小波分析法对黄土坡耕地水沙时间序列变异特征进行分析, 研究径流和产沙的长程效应及变化周期, 以期为坡耕地水保措施配置和水蚀治理提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

杨陵区位于黄土高原南部的陕西省咸阳市, 属半湿润大陆性季风气候, 年均气温13℃, 年均降水量为637 mm, 集中在7—9月份, 年蒸发量为降水量的2倍左右。供试土壤类型为壤土, 其基本理化

\* 国家自然科学基金项目 (41371273) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41371273)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, 张青峰 (1974—), 男, 山西孝义人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事GIS设计与应用研究。E-mail: zhqf@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 张慧荟 (1991—), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向为GIS设计与应用。E-mail: zhanghuihui@nwfafu.edu.cn

收稿日期: 2017-04-19; 收到修改稿日期: 2017-07-08; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-07-25

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of the test soil (0~20 cm)

土壤 类型 Soil type	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	质地 Texture	容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	含水量 Soil moisture content (%)	2mm 岩石含量 Rock content above 2mm (%)	有机质含量 Organic matter content (g kg <sup>-1</sup> )	阳离子交换量 CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )
壤土 Lou soil	2.82	55.74	41.44	粉砂壤土 Silt loam	1.30	10	0	16.66	18.47

性质见表1。

## 1.2 试验设计

将杨凌区坡耕地表层土(0~20cm)自然风干后过1cm筛,分层填充于2m×1m×0.5m的土槽中,每层容重约控制在1.30 g cm<sup>-3</sup>。在坡面上布设4种常见的农业耕作措施:人工锄耕(AB)、人工掏挖(AD)、等高耕作(CT)、直线坡(CK),具体配置方式参见文献[16-17]。

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行,设置5个典型坡度(5°、10°、15°、20°、25°),依据黄土高原侵蚀性降雨的分布规律,以日降水量≥12mm为侵蚀性降水划分标准,选用黄土高原常见的90 mm h<sup>-1</sup>雨强为实验所用雨强,喷头距地面垂直高度为18m,保证降雨均匀度大于80%。对土槽进行历时90min连续降雨。从产流开始每隔2min收集径流泥沙样。为确保试验准确性,降雨试验在同种条件下设2次重复。

## 1.3 重标极差分析

重标极差分析法(R/S分析法)对具有时间序列属性的数据具有预测功能,用于辨识具有分形布朗运动特征的一维时间序列数据是否具有长程性。该方法将N个观测数据划分为A个连续区间D<sub>a</sub>(a=1, 2, ..., A),每个区间的元素为X<sub>k,a</sub>(k=1, 2, ..., n; n=integer(N/A))。

R/S统计量计算式如下:

$$Q_n = R_n / S_n \quad (1)$$

式中, R<sub>n</sub>为极差, S<sub>n</sub>为标准差。根据统计学的结果有下式成立:

$$Q_n = C \times n^H \quad (2)$$

式中, C为常数; H为赫斯特指数,是尺度参数,其变化区间为[0, 1]。将式(2)两边分别取对数,用最小二乘法回归并作双对数图,其直线斜率即为H值。

$$\log Q_n = \log C + H \log(n) \quad (3)$$

用自相关系数B来测试时间序列的相关性,用分形维数值D来评估时间序列的连续性<sup>[18]</sup>。

$$B = 2^{2H-1} - 1; B \in [-0.5, 1] \quad (4)$$

$$D = 2 - H; D \in [1, 2] \quad (5)$$

对于相互独立的随机变量, H=0.5, B=0, D=1.5。当H≠0.5时,说明时间序列数据变量并非随机独立的,而是具有长期相关性(或称长程相关性),并可用分形布朗运动来描述:①当0≤H<0.5时, -0.5≤B<0且1.5<D≤2,表明未来整体变化趋势与过去相反,数据存在逆状态持续性(负相关性),且随着H逼近0这种逆持续性逐步增强;②当0.5<H≤1时, 0<B≤1且1≤D<1.5,表明未来整体变化趋势与过去一致,数据存在状态持续性(正相关性),且H越逼近1时这种状态持续性越强。

当时间序列包含短期记忆、异质性或者非平稳时,由经典R/S分析法计算的赫斯特指数H值存在一定的偏性,宋耀和田华<sup>[19]</sup>对其进行修正,计算公式为:

$$V_n = (R_n / S_n) / \sqrt{n} \quad (6)$$

式中, V<sub>n</sub>为统计量,该统计量用于确定序列是否存在周期循环及估计周期长度。根据V<sub>n</sub>-log(n)曲线,如果V<sub>n</sub>-log(n)图呈趋势向上,表明0.5<H≤1;若趋势向下,则表明0≤H<0.5。

## 1.4 Morlet小波分析

小波变换是20世纪80年代发展起来的一种时频联合分析方法,是一种信号的时间—尺度分析方法,能判别出序列变化的显著周期<sup>[20]</sup>。小波分析为分析非线性的复杂水文水资源系统提供了可能, Morlet小波分析复数小波的虚部和实部相差2/π,能够揭示隐藏在时间序列中的多种变化周期,反映系统在不同时间尺度的变化趋势,并能对系统未来

发展趋势进行预测<sup>[21-22]</sup>。

在一定尺度下, 小波变换系数随时间变化过程反映变量在该尺度下的变化特征为: 小波变化系数正值对应于偏多期, 反之则对应于偏少期, 小波变化系数为零对应突变点; 小波变化系数绝对值越大, 说明该时间尺度变化越显著。

小波变换得到的时间尺度函数, 需要通过小波方差来进行小波分析检验, 从而确定显著周期, 在小波方差图中, 对应峰值的尺度即为该序列的主要尺度, 即主周期。本文用Matlab软件对时间序列进行小波分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 径流量长程性

径流量R/S特征参数的计算结果见表2。由表2可知,  $H \in [0.567, 0.798]$ ,  $0 < B \leq 1$ 且 $1 \leq D < 1.5$ , 说明降雨径流序列存在状态持续性即正相关性。经检验, 修正量 $V_n - \log(n)$ 曲线均呈上升趋势, 说明4种耕作方式5种坡度下的径流序列均具有正的长程相关性。同时,  $H > 0.5$ 且趋近于0.5, 这表明在未来一段时间内, 径流量随着降雨历时的

表2 径流量R/S特征参数

Table 2 R/S characteristic parameters of runoff

耕作措施 Treatment	坡度 Slope (°)	赫斯特指数 Hurst index $H$	自相关系数 Autocorrelation coefficient $B$	分形维数 Fractal dimension $D$
人工锄耕 Artificial backhoe (AB)	5	0.675	0.275	1.325
	10	0.695	0.310	1.305
	15	0.720	0.357	1.280
	20	0.674	0.273	1.326
	25	0.654	0.238	1.346
人工掏挖 Artificial digging (AD)	5	0.718	0.353	1.282
	10	0.700	0.320	1.300
	15	0.606	0.158	1.394
	20	0.646	0.224	1.354
	25	0.665	0.257	1.335
等高耕作 Contour tillage (CT)	5	0.721	0.358	1.279
	10	0.626	0.191	1.374
	15	0.798	0.512	1.202
	20	0.700	0.320	1.300
	25	0.722	0.360	1.278
直线坡 No treatment (CK)	5	0.567	0.097	1.433
	10	0.671	0.268	1.329
	15	0.632	0.201	1.368
	20	0.644	0.221	1.356
	25	0.699	0.318	1.301

增加呈现增加趋势, 但该趋势持续性较弱。

不同坡度和耕作措施的坡面产流时间和径流系数见表3。由表3可知, 所有坡面在3~17 min范围内开始产流, 在耕作方式相同的情况下, 坡度越大, 产流时间越早。同一坡度下, 直线坡最先产流, 各人为耕作措施产流时间由小到大: 人工锄耕 < 人工掏挖 < 等高耕作, 等高耕作措施最不容易产

流。而直线坡坡度在5°~25°变化时, 产流时间在3.3~4.7 min范围内变化, 坡度对产流时间的影响不大。直线坡的径流系数最大, 人为耕作措施的径流系数均小于直线坡, 各坡度下直线坡、人工锄耕和人工掏挖的径流系数均超过50%, 等高耕作的径流系数最小。这主要是因为降雨过程的溅蚀作用, 堵塞土壤空隙, 减小径流入渗, 增加地表径流。相

较于直线坡，等高耕作、人工锄耕和人工掏挖等人为耕作措施拦蓄了雨水，延长了径流时间，增加了土壤入渗，减小了径流。

表3 坡面产流时间

**Table 3** Time of runoff yielding on slopes

坡度 Slope (°)	耕作措施 Treatment	产流时间 Runoff yielding time (min)	径流系数 Runoff coefficient (%)
5	人工锄耕 (AB)	6.6	59.0
	人工掏挖 (AD)	6.7	57.4
	等高耕作 (CT)	17	40.6
	直线坡 (CK)	4.7	68.4
10	人工锄耕 (AB)	5.4	60.2
	人工掏挖 (AD)	5.9	63.7
	等高耕作 (CT)	11.9	51.4
	直线坡 (CK)	4.6	64.9
15	人工锄耕 (AB)	5.2	57.8
	人工掏挖 (AD)	5.5	58.2
	等高耕作 (CT)	8.2	47.8
	直线坡 (CK)	3.9	61.1
20	人工锄耕 (AB)	4.6	56.5
	人工掏挖 (AD)	5.2	61.9
	等高耕作 (CT)	5.3	52.7
	直线坡 (CK)	3.7	68.8
25	人工锄耕 (AB)	4.1	59.0
	人工掏挖 (AD)	4.6	56.1
	等高耕作 (CT)	4.8	52.6
	直线坡 (CK)	3.3	62.1

径流量随产流后降雨历时变化的关系见图1。坡度不但对产流时间有影响，对径流量也有影响。由图1可知，径流量在产流开始后的10 min内迅速增大，产流开始后的几分钟内径流量迅速增加，可能是由于其有机质、黏粒含量高，加之土壤表面结皮的形成，导致降雨开始后，径流量迅速增加。随后呈现波动性的增加趋势，且这种增加并不是杂乱无章的，具有一定的规律性，这可能与降雨过程中不同侵蚀阶段有关，侵蚀越发育，越容易产流。各实验坡度下，直线坡的径流量最大，人为耕作措施的径流量均小于直线坡，其中等高耕作方式的径流量最小，人工掏挖和人工锄耕两种耕作方式的径流

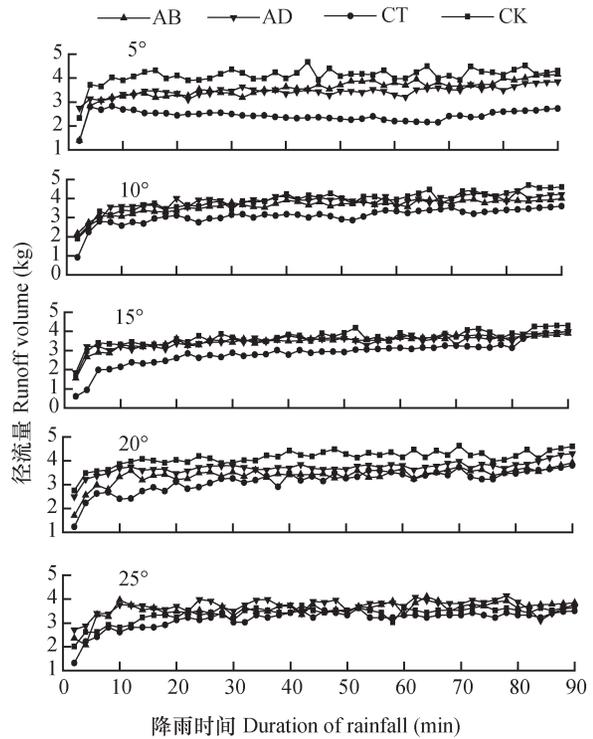


图1 不同坡度下坡耕地径流量

Fig. 1 Runoff volume on slope farmlands relative to slope gradient

量差别不大，说明等高耕作方式更具有良好的水土保持效应。

将径流量-产流后的降雨历时进行拟合，结果见表4。对数拟合方程式的表4拟合优度 $R^2$ 均大于0.5，拟合优度最高，拟合效果最好，说明径流量和降雨历时呈现对数相关性。

2.2 径流量小波系数

基于各耕作坡面径流量的距平处理结果，进行连续Morlet小波变换，图2绘制了径流量距平序列Morlet小波变换实部的时频变化，清晰地显示了径流量时间尺度变化及其位相结构，X轴表示时间，而Y轴表示尺度。它显示了随着时间的推移，径流量序列在不用时间尺度上的位相结构呈现正负变化，正值代表该段时期内径流量增大，负值代表该段时期内径流量减小。由于小波的实部可以显示不同时间尺度上径流量序列波峰和波谷的结构，等直线的密度反映了波动的强度，因而可以初步推测各耕作坡面径流量的变化周期。以5°坡各耕作方式为例，由图2a和图2b可知，人工锄耕和人工掏挖的小波系数图均在28 min处信号震荡最剧烈，故初步推断两种耕作措施径流量变化存在28 min的周期。

表4 径流量预测方程

**Table 4** Equation for prediction of runoff volume

坡度 Slope (°)	耕作措施 Treatment	预测方程 Prediction equation	拟合 优度 $R^2$
5	人工锄耕 (AB)	$S=0.4482 \ln t+2.256$	0.79
	人工掏挖 (AD)	$S=0.1878 \ln t+2.9072$	0.61
	等高耕作 (CT)	$S=0.0087 \ln t+2.4107$	0.70
	直线坡 (CK)	$S=0.2586 \ln t+3.3613$	0.55
10	人工锄耕 (AB)	$S=0.3872 \ln t+2.5023$	0.90
	人工掏挖 (AD)	$S=0.4241 \ln t+2.6081$	0.74
	等高耕作 (CT)	$S=0.4303 \ln t+1.8481$	0.76
	直线坡 (CK)	$S=0.552 \ln t+2.3129$	0.85
15	人工锄耕 (AB)	$S=0.3988 \ln t+2.3265$	0.82
	人工掏挖 (AD)	$S=0.3324 \ln t+2.5404$	0.70
	等高耕作 (CT)	$S=0.6947 \ln t+0.8729$	0.90
	直线坡 (CK)	$S=0.4077 \ln t+2.4947$	0.69
20	人工锄耕 (AB)	$S=0.3235 \ln t+2.4593$	0.65
	人工掏挖 (AD)	$S=0.2448 \ln t+3.0126$	0.65
	等高耕作 (CT)	$S=0.4965 \ln t+1.7403$	0.85
	直线坡 (CK)	$S=0.319 \ln t+3.21$	0.73
25	人工锄耕 (AB)	$S=0.2493 \ln t+2.8269$	0.68
	人工掏挖 (AD)	$S=0.3379 \ln t+2.3978$	0.78
	等高耕作 (CT)	$S=0.4011 \ln t+2.0026$	0.78
	直线坡 (CK)	$S=0.2247 \ln t+3.0834$	0.53

图2c中, 小波系数图显示其能量中心的频域尺度主要集中在28 min, 可初步推断等高耕作径流量变化存在28 min的准周期。由图2d可知, 小波系数图显示其能量中心的频域尺度主要集中在28~29 min尺度上, 此时信号震荡最剧烈, 故可初步推断直线坡径流量变化可能存在28~29 min的准周期; 同时在22~23 min处也出现比较强烈的震荡, 暗示径流量出现比较明显的变化。小波分析的结果表明, 5°坡下, 人工锄耕、人工掏挖和等高耕作等人为耕作措施的径流量序列均存在28 min的准周期, 表明坡度较平缓时, 各耕作措施径流变化主周期相差不大, 而直线坡在22~23 min处已经出现强震荡, 且据各耕作措施28 min周期处的小波系数图显示, 直线坡的等值线最密集, 表明直线坡径流量相对周期波动性更强, 总量较大。

### 2.3 径流量小波方差检验

通过小波方差检验, 可以进一步准确地检验小波系数得到的径流序列周期, 根据各个耕作坡面计算出的小波方差绘制出小波方差图 (图3)。

以5°坡各耕作方式为例, 由图3可知, 人工锄耕有尺度为11 min和28 min两个波峰, 28 min为人工锄耕径流序列的主周期。人工掏挖径流序列的主周期为28 min。等高耕作有两个波峰, 尺度为9 min和28 min两个波峰, 其中最大波峰对应着28 min的时间尺度, 表明28 min左右的周期震荡最强, 为等高耕作径流序列的主要周期, 9 min为第二周期。直线坡有两个波峰, 尺度为22 min和29 min, 其中最大峰值对应着29 min的时间尺度, 表明29 min左右的周期震荡最强, 为直线坡径流量序列的主周期, 22 min左右为第二周期。径流量序列的主周期与图2中的波动中心周期相一致。

从图3可以看出, 不同坡度各耕作方式均在28~29 min出现最大峰值, 其他时间尺度上波动性较弱, 因而可以表明90 mm h<sup>-1</sup>的雨强降雨径流序列的主周期为28~29 min。

### 2.4 产沙量长程性

产沙量R/S特征参数和变异系数计算结果见表5。由表5可知,  $H \in [0.632, 0.861]$ ,  $0 < B \leq 1$ , 表明降雨产沙序列存在状态持续性即正相关。经检验, 修正量 $V_n - \log(n)$ 曲线均呈上升趋势, 说明4种耕作方式5种坡度下的产沙量序列均具有正的长程相关性。产沙量曲线整体呈减少趋势, 且 $H$ 大部分均大于0.7, 趋近于1, 这表明在未来一段时间内, 产沙量延续过去趋势的可能性很大, 随着降雨历时的增加而继续呈现减少趋势, 且该趋势持续性较强。利用变异系数方法分析不同坡耕地的产沙变异系数, 变异系数相差明显, 表明各降雨条件下不同坡耕地间的泥沙流失量差异明显, 直线坡的变异系数最大, 等高耕作的变异系数相对较小。

产沙量随降雨历时变化的关系见图4。由图4可知, 随着降雨历时的增加, 泥沙量在产流后的10 min迅速增加, 随后呈波动性的减少趋势。在未来一段时间内, 泥沙量将维持与过去相同的变化趋势, 总体上产沙量随侵蚀发育过程先迅速增加, 后逐渐下降并趋于平稳。产沙量的迅速增加与降雨初期, 地表颗粒受雨滴击溅而分散有关<sup>[23-24]</sup>。产沙曲线的波动与汇流过程中径流搬运能力的瞬时增

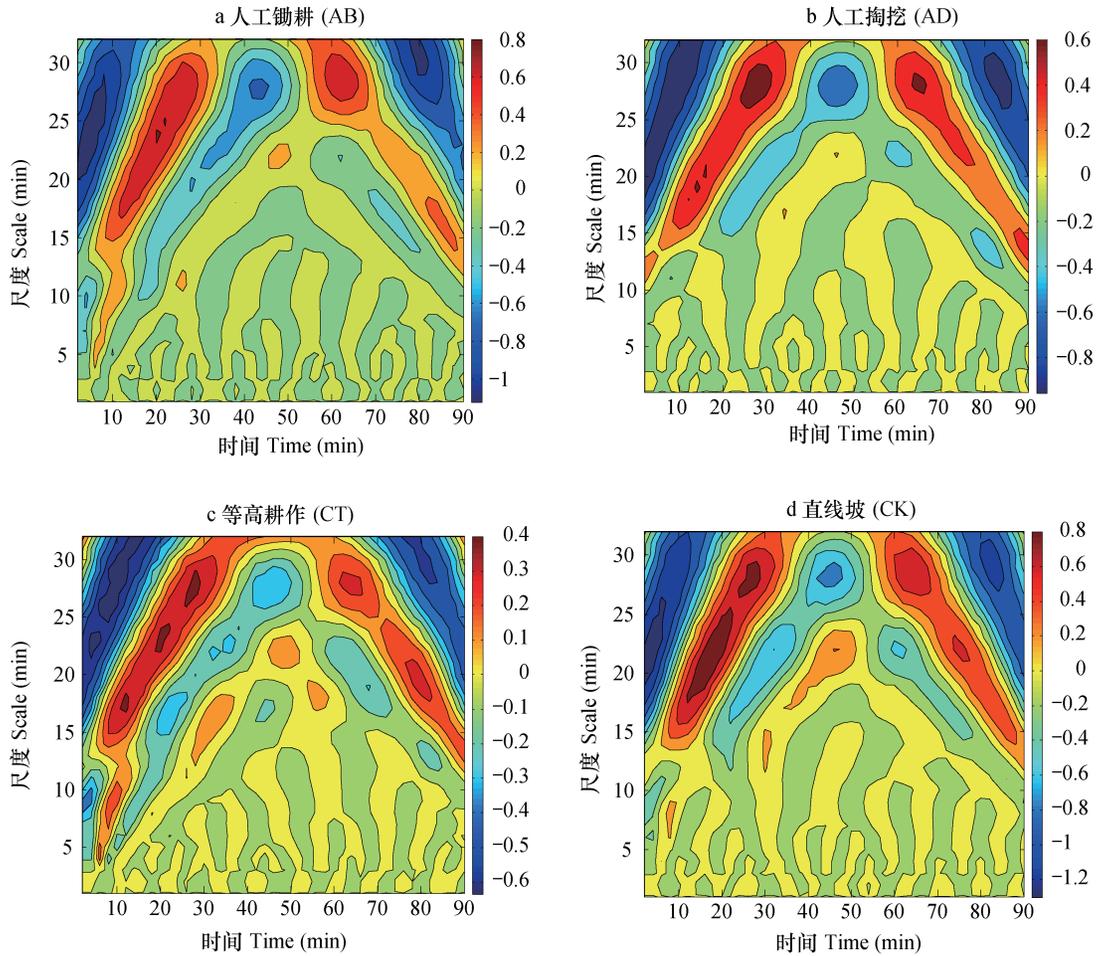


图2 5°坡4种坡耕地径流量的Morlet小波变换实部时频分布

Fig. 2 Time-frequency distribution of real part transformed with Morlet wavelet of runoff volume on loess slope farmlands 5° in gradient relative to tillage

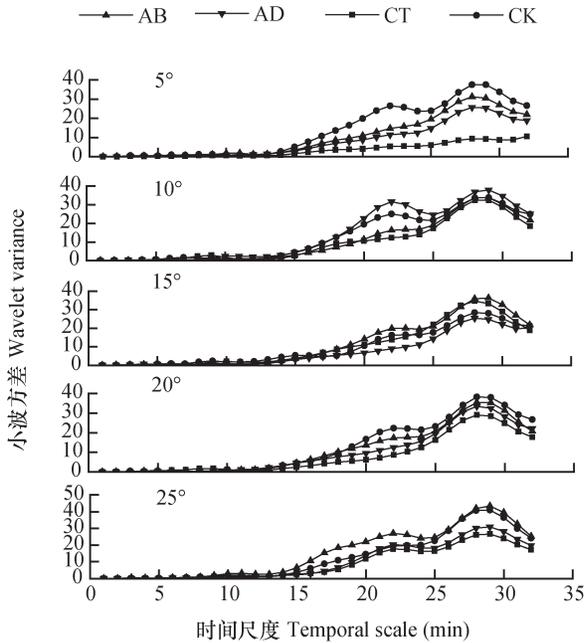


图3 4种坡耕地径流量系列的小波方差变化

Fig. 3 Wavelet variances diagram of runoff volume series on slope farmlands relative to tillage

减有关。这可能是由于降雨刚开始，主要表现为降雨击溅，地表土体被击溅分散，松散颗粒比较多<sup>[25-26]</sup>；随着产流（径流）的开始，表现为降雨搬运，地表松散颗粒被搬运；随着降雨的持续，降雨对坡面侵蚀作用逐渐从溅蚀转为薄层水流冲刷，由于水流冲刷可以对坡面土壤颗粒产生迁移和沉积作用，正是由于对泥沙颗粒的再分配，减小了泥沙输出坡面的机会。同时，溅蚀作用破坏了表层土壤颗粒结构，造成了土壤结皮，使得土壤表面和土壤颗粒粘结力的增强，阻碍坡面土壤侵蚀强度继续发展，因而径流含沙量逐渐降低<sup>[27]</sup>。

产沙过程与径流过程变化特征基本吻合，直线坡的产沙量最大，人为耕作方式产沙量顺序为：锄耕=掏挖>等高，不同坡度下，等高耕作方式的产沙量最小，人工掏挖和人工锄耕两种耕作方式的产沙量差别不大，直线坡的产沙量在降雨刚开始时达到峰值，随后迅速减小。这同样说明耕作方式具有

表5 产沙量R/S特征值和变异系数

Table 5 R/S characteristic parameters of sediment yield and coefficient of variation

耕作措施 Treatment	坡度 Slope (°)	赫斯特指数 Hurst index $H$	自相关系数 Autocorrelation coefficient $B$	分形维数 Fractal dimension $D$	变异系数 CV (%)
人工锄耕 Artificial backhoe (AB)	5	0.805	0.526	1.195	45.89
	10	0.646	0.224	1.354	48.28
	15	0.861	0.649	1.139	68.52
	20	0.799	0.514	1.201	89.95
	25	0.723	0.362	1.277	61.60
人工掏挖 Artificial digging (AD)	5	0.632	0.201	1.368	47.14
	10	0.854	0.634	1.146	33.70
	15	0.702	0.323	1.298	32.37
	20	0.833	0.587	1.167	63.95
	25	0.830	0.580	1.170	91.75
等高耕作 Contour tillage (CT)	5	0.706	0.331	1.294	56.82
	10	0.714	0.345	1.286	61.85
	15	0.784	0.482	1.216	43.56
	20	0.807	0.530	1.193	27.87
	25	0.809	0.535	1.191	42.99
直线坡 No treatment (CK)	5	0.740	0.395	1.260	74.68
	10	0.759	0.432	1.241	137.9
	15	0.679	0.282	1.321	107.3
	20	0.755	0.422	1.245	117.1
	25	0.721	0.358	1.279	137.8

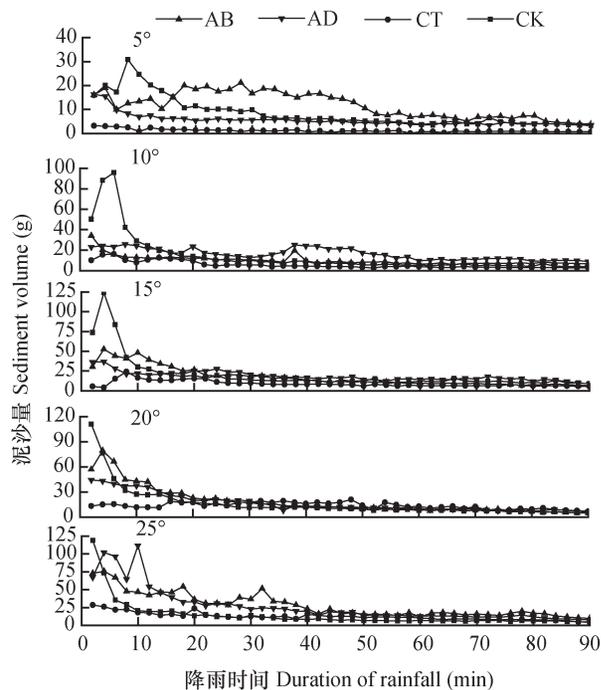


图4 不同坡度下坡耕地产沙量

Fig. 4 Sediment yield on slope farmlands relative to slope gradient

一定的水土保持效应。相同耕作方式下, 10°坡的产沙量较5°坡增加了一倍, 随着坡度的增加, 单位时间内的产沙量逐渐增大, 在25°达到最大, 表明随坡度的增加, 产沙量呈增大趋势。

将产沙量-降雨历时进行拟合, 结果见表6。泥沙数据同径流数据, 具有非线性的特点。泥沙量和降雨历时呈现对数相关性。

由表6的预测方程只能推断出泥沙量的大致范围, 不适用于降雨开始10 min内变化较大的情况, 而且在降雨时间足够长时, 产沙量会稳定在一定范围内。数据精度有待后续验证和完善。

## 2.5 产沙量小波系数

基于各耕作坡面产沙量的距平处理结果, 进行连续Morlet小波变换, 图5绘制了产沙量距平序列Morlet小波变换实部的时频变化, 清晰地显示了产沙量时间尺度变化及其位相结构, 可以初步推测各耕作坡面产沙量的变化周期。

以5°坡各耕作方式为例, 由图5a可知, 人工锄耕小波系数图显示其能量中心的频域尺度主要集

表6 产沙量预测方程

Table 6 Equation for prediction of sediment yield

坡度 Slope (°)	耕作措施 Treatment	预测方程 Prediction equation	拟合优度 $R^2$
5	人工锄耕 (AB)	$V=-3.725 \ln t+22.372$	0.57
	人工掏挖 (AD)	$V=-2.697 \ln t+13.286$	0.83
	等高耕作 (CT)	$V=-0.658 \ln t+3.074$	0.74
	直线坡 (CK)	$V=-6.141 \ln t+26.049$	0.74
10	人工锄耕 (AB)	$V=-4.74 \ln t+13.778$	0.72
	人工掏挖 (AD)	$V=-4.512 \ln t+29.121$	0.53
	等高耕作 (CT)	$V=-3.523 \ln t+15.815$	0.78
	直线坡 (CK)	$V=-18.1 \ln t+66.075$	0.67
15	人工锄耕 (AB)	$V=-12.48 \ln t+53.401$	0.83
	人工掏挖 (AD)	$V=-6.087 \ln t+35.959$	0.80
	等高耕作 (CT)	$V=-2.462 \ln t+16.169$	0.59
	直线坡 (CK)	$V=-19.56 \ln t+76.212$	0.64
20	人工锄耕 (AB)	$V=-17.79 \ln t+69.56$	0.89
	人工掏挖 (AD)	$V=-11.75 \ln t+50.381$	0.94
	等高耕作 (CT)	$V=-1.56 \ln t+18.09$	0.63
	直线坡 (CK)	$V=-19.04 \ln t+70.954$	0.77
25	人工锄耕 (AB)	$V=-18.34 \ln t+80.609$	0.88
	人工掏挖 (AD)	$V=-25.04 \ln t+99.007$	0.79
	等高耕作 (CT)	$V=-5.568 \ln t+28.377$	0.85
	直线坡 (CK)	$V=-18.47 \ln t+67.237$	0.69

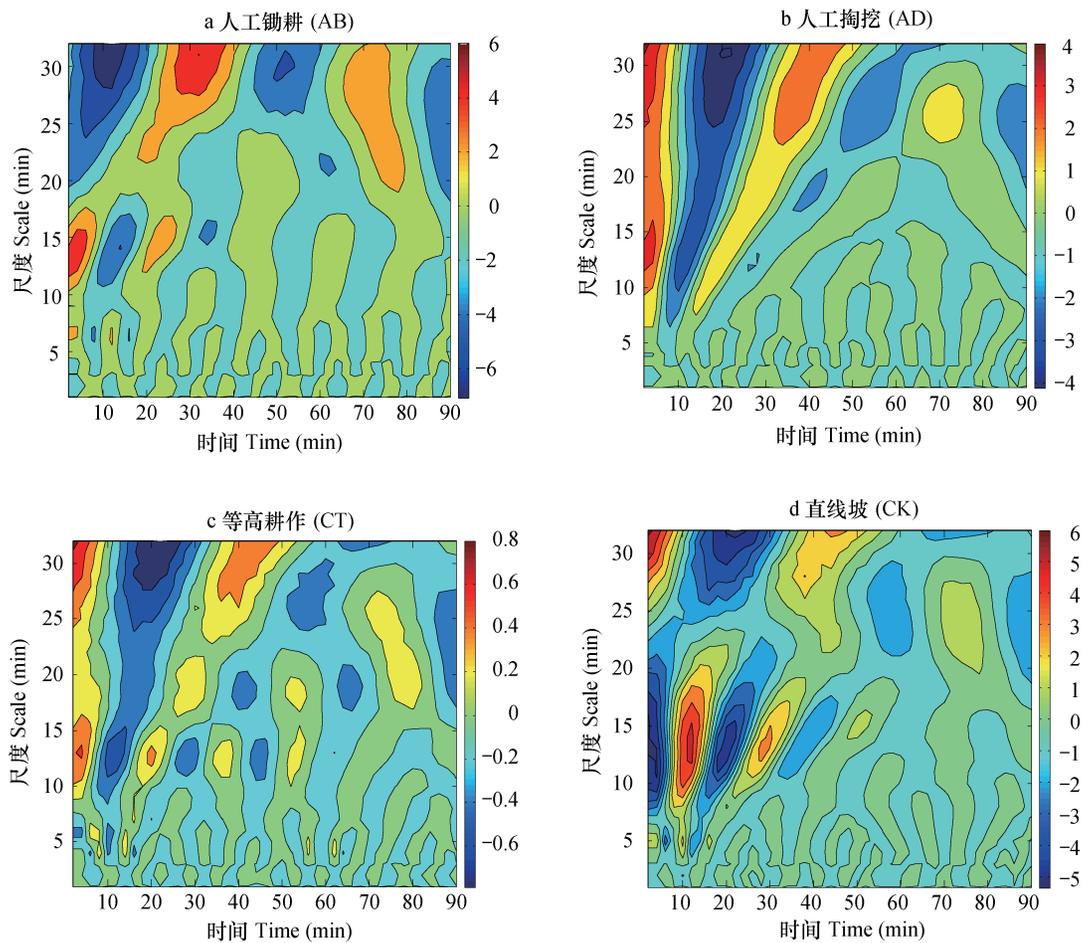


图5 5°坡4种坡耕地产沙量的Morlet小波变换实部时频分布

Fig. 5 Time-frequency distribution of real part transformed with Morlet wavelet of sediment yield on slope farmlands 5° in gradient relative to tillage

中在 14 min, 可初步推断人工锄耕产沙量变化存在 14 min 的周期, 同样在 30 min 尺度上可能出现强震荡; 图 5b 中, 人工掏挖小波系数图在 13~14 min 尺度上信号震荡比较剧烈, 可能在 32 min 以上尺度出现强震荡, 故初步推断人工掏挖耕作措施产沙量变化存在 14 min 左右的周期; 图 5c 中, 小波系数图显示其能量中心的频域尺度主要集中在 14 min, 此时信号震荡比较剧烈, 其次在 30 min 尺度以上, 可能出现一个强震荡, 故可初步推断等高耕作坡产沙量变化可能存在 14 min 的周期, 是否存在 30 min 以上的周期, 需要更长的时间序列去验证; 直线坡在 5 min 尺度上出现小震荡, 14 min 左右的震荡频率比较剧烈, 30 min 以上可能出现一个强震荡, 有待更长的时间序列去验证。5° 坡下, 4 种耕作措施均在 30 min 以上可能出现主周期, 表明坡度较平缓时, 各耕作措施产沙主周期相差不大, 且 30 min 的产沙主周期和 28 min 的径流主周期相吻合, 符合产流产沙的实际规律。各耕作措施同一周期处的小波系数图显示, 14 min 震荡处直线坡的等值线较人为耕作措施更密集, 同样在 30 min 周期处直线坡的等值线最密集, 表明直线坡产沙量相对周期波动性更强。

## 2.6 产沙量小波方差

通过小波方差检验, 可以进一步准确地检验小波系数得到的产沙序列周期, 根据各个耕作坡面计算出的小波方差绘制出小波方差图 (图 6)。

以 5° 坡各耕作方式为例, 由图 6 可知, 人工锄耕有尺度为 6 min 和 14 min 两个波峰, 而在 30~35 min 尺度上, 小波方差曲线未形成一个完整波形, 故不能确定 30~35 min 尺度的周期, 但从方差大小比较, 如果 30~35 min 的长尺度周期存在, 那么这个周期更有可能是人工锄耕产沙量序列的主周期。人工掏挖产沙量序列的主周期为 28 min。等高耕作有三个波峰, 尺度为 4 min、14 min 和 19 min, 其中最大波峰对应着 14 min 的时间尺度, 表明 14 min 左右的周期震荡最强, 为等高耕作产沙量序列的主周期。直线坡有三个波峰, 尺度分别为 3 min、5 min 和 14 min, 其中最大峰值对应着 14 min 的时间尺度, 表明 14 min 左右的周期震荡最强, 为直线坡产沙量序列的主周期。产沙量序列的主周期与图 5 中的波动中心周期相一致。

分析各耕作措施下产沙量的小波方差, 其结果表明, 不同于径流量出现稳定的周期。产沙量系列

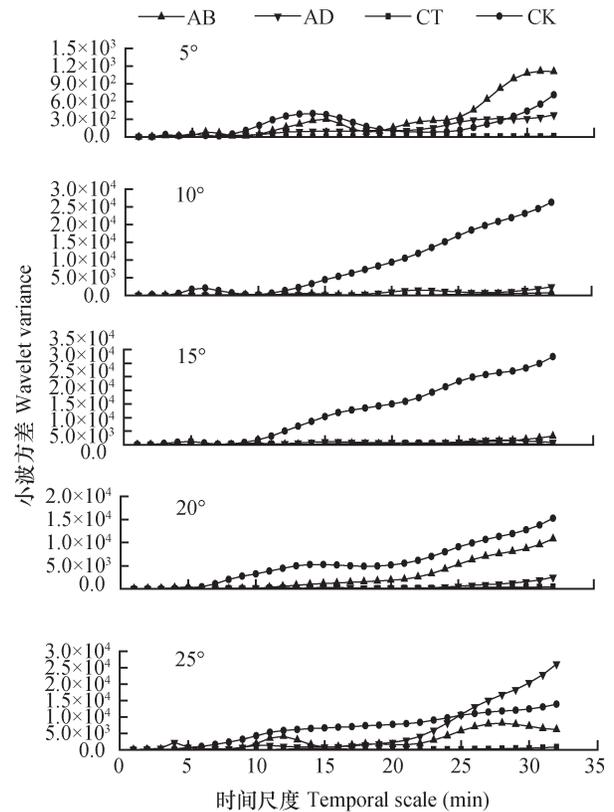


图 6 4 种坡耕地产沙量系列的小波方差变化

Fig. 6 Wavelet variance diagram of sediment yield series on slope farmlands relative to tillage

可能存在一个 30 min 以上的长周期, 部分耕作坡面产沙量的小波系数在 30 min 尺度上出现较明显的上浮, 但均未出现完整的周期曲线, 小波分析用于预测产沙量周期, 结果是否具有可靠性, 仍有待于进一步考证。

## 3 结论

Morlet 小波分析和 R/S 分析法, 通常用于预测宏观径流量的变化, 本文将其用于分析微地形径流序列的周期和预测其未来变化趋势, 可以丰富小波分析方法在微地形领域的应用研究。90 mm h<sup>-1</sup> 的雨强连续降雨条件下, 各耕作措施径流量时间序列呈现长程正相关, 径流有继续上升的趋势。Morlet 小波分析的结果表明, 各耕作措施下的径流量序列均存在 28~29 min 的主周期, 直线坡相较于人为耕作措施, 周期波动性更强, 径流总量较大。有助于在连续降雨条件下, 通过定点采取合理的预防措施, 削弱径流的影响, 提高水土保持效应, 为强降雨条件下农业生产的灾害预防提供了理论依据。从产沙

量时间序列的R/S分析结果来看, 输沙量序列存在一定的长程相关性, 具有持续下降的趋势, 且持续性很强, 预测不会无限下降, 最终会稳定到一定水平。部分耕作措施的产沙量序列可能存在30 min以上的长周期, 直线坡相较于人为耕作措施, 周期波动性更强, 但该周期是否存在需要更长的时间序列去验证。产沙量相较于径流序列并未出现稳定的周期, 表明波动性强于径流量序列。Morlet小波分析用于预测产沙量序列, 结果是否具有可靠性, 也有待进一步验证。通过R/S分析法可以从整体上把握连续降雨条件下, 微地形坡面径流和产沙的变化情况, 小波分析是分析径流量变化周期的有效手段。因此, 两种方法的有效结合、相互补充, 有利于监测降雨对农业生产和水土保持的影响。研究采用黄土高原常见雨强, 较短的降雨历时, 最大限度地模拟真实情况。但野外实际无论雨强还是降雨时间均是变化的, 因此本实验所得的结论还需在野外条件下进一步论证。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 王兵, 张光辉, 刘国彬, 等. 黄土高原丘陵区水土流失综合治理生态环境效应评价. 农业工程学报, 2012, 28 ( 20 ) : 150—161  
Wang B, Zhang G H, Liu G B, et al. Ecological and environmental evaluation for water and soil loss comprehensive harness in Loess Hilly Region ( In Chinese ). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 ( 20 ) : 150—161
- [ 2 ] 汤姗姗, 李鹏, 任宗萍, 等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究. 土壤学报, 2016, 53 ( 1 ) : 39—47  
Tang S S, Li P, Ren Z P, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 ( 1 ) : 39—47
- [ 3 ] 秦伟, 曹文洪, 左长青, 等. 考虑沟-坡分异的黄土高原大中流域侵蚀产沙模型. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23 ( 1 ) : 12—29  
Qin W, Cao W H, Zuo C Q, et al. Erosion and sediment yield model of big and middle scale watershed in Loess Plateau considering differentiation between upper and lower of the shoulder line of valleys ( In Chinese ). Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23 ( 1 ) : 12—29
- [ 4 ] 谢林好, 白玉洁, 张凤宝, 等. 沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响. 土壤学报, 2017, 54 ( 1 ) : 60—72  
Xie L Y, Bai Y J, Zhang F B, et al. Effects of thickness and particle size composition of overlying sand layer on runoff and sediment yield on sand-covered loess slopes ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 ( 1 ) : 60—72
- [ 5 ] 原翠萍, 雷廷武, 张满良, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域治理对侵蚀产沙特征的影响. 农业机械学报, 2011, 42 ( 3 ) : 36—43  
Yuan C P, Lei T W, Zhang M L, et al. Sediment yields from the parallel watersheds in the hilly-gully regions of Loess Plateau ( In Chinese ). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42 ( 3 ) : 36—43
- [ 6 ] Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Effect of rainfall regime and slope on runoff in a gullied loess region on the Loess Plateau in China. Environmental Management, 2008, 42 ( 3 ) : 402—411
- [ 7 ] 王光谦, 李铁键, 薛海, 等. 流域泥沙过程机理分析. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14 ( 4 ) : 455—462  
Wang G Q, Li T J, Xue H, et al. Mechanism analysis of watershed sediment processes ( In Chinese ). Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14 ( 4 ) : 455—462
- [ 8 ] 王文圣, 金菊良, 李跃清. 水文随机模拟进展. 水科学进展, 2007, 18 ( 5 ) : 768—775  
Wang W S, Jin J L, Li Y Q. Advances in stochastic simulation of hydrology ( In Chinese ). Advances in Water Science, 2007, 18 ( 5 ) : 768—775
- [ 9 ] 范琳琳, 王红瑞, 来文立, 等. 基于HHT的径流变化特征分析及验证. 水力发电学报, 2015, 34 ( 5 ) : 10—19  
Fan LL, Wang H R, Lai WL, et al. Analysis and verification of runoff variation characteristics based on HHT method ( In Chinese ). Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34 ( 5 ) : 10—19
- [ 10 ] 张殷钦, 胡伟, 刘俊民. 基于R/S分析法的地下水动态变化趋势分析. 中南大学学报, 2012, 43 ( 12 ) : 4912—4916  
Zhang Y Q, Hu W, Liu J M. Ground water level regime variation trend on basis of rescaled range analysis ( In Chinese ). Journal of Central South University, 2012, 43 ( 12 ) : 4912—4916
- [ 11 ] 李业学, 刘建锋. 基于R/S分析法与分形理论的围岩变形特征研究. 四川大学学报 ( 工程科学版 ), 2010, 42 ( 3 ) : 43—48  
Li Y X, Liu J F. Study on deformation characteristic of surrounding rock by R/S method and fractal theory ( In Chinese ). Journal of Sichuan University ( Engineering

- Science Edition), 2010, 42 (3): 43—48
- [12] 李远耀, 殷坤龙, 程温鸣, 等. R/S分析在滑坡变形趋势预测中的应用. 岩土工程学报, 2010, 32 (8): 1291—1296
- Li YY, Yin K L, Cheng W M, et al. Application of R/S method in forecast of landslide deformation trend (In Chinese). Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (8): 1291—1296
- [13] 张少文, 丁晶, 廖杰, 等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析. 四川大学学报 (工程科学版), 2004, 36 (3): 32—37
- Zhang S W, Ding J, Liao J, et al. Analysis of natural annual flow time series in the upper reach of the Yellow River based on wavelet transform (In Chinese). Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2004, 36 (3): 32—37
- [14] 李艳, 陈晓宏, 张鹏飞, 等. 北江流域径流序列年内分配特征及其趋势分析. 中山大学学报 (自然科学版), 2007, 46 (5): 113—116
- Li Y, Chen X H, Zhang P F, et al. Research on annual distribution and its trends of runoff in Beijiang River, Guangdong (In Chinese). Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46 (5): 113—116
- [15] 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 近50年嫩江流域径流变化及影响因素分析. 水科学进展, 2009, 20 (3): 416—421
- Xu D X, Zhang G X, Yin X R. Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956—2006 (In Chinese). Advances in Water Science, 2009, 20 (3): 416—421
- [16] 梁心蓝, 赵龙山, 吴佳, 等. 地表糙度与径流水力学参数响应规律模拟. 农业工程学报, 2014, 30 (19): 123—130
- Liang X L, Zhao L S, Wu J, et al. Simulation of response law for soil surface roughness and hydraulics parameters of runoff (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (19): 123—131
- [17] 赵龙山, 张青峰, 梁心蓝, 等. 基于GIS的坡耕地数字高程模型的建立与应用. 农业工程学报, 2010, 26 (11): 317—322
- Zhao L S, Zhang Q F, Liang X L, et al. Establishment and application of DEM for loess slope land based on GIS (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 (11): 317—322
- [18] Bassingthwaite JB, Raymond GM. Evaluating rescaled range analysis for time series. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1994, 22 (4): 432—444
- [19] 宋耀, 田华. 国际汇率分形特征的实证研究: 修正的R/S分析. 河北大学学报 (哲学社会科学版), 2004, 29 (4): 93—96
- Song Y, Tian H. Empirical research on the fractal of the foreign exchange: Modified R/S analysis method (In Chinese). Journal of Hebei University (Philosophy and Social Science), 2004, 29 (4): 93—96
- [20] 刘静静, 刘震, 齐宇, 等. 地震分频处理技术预测深水储集体. 石油学报, 2016, 37 (1): 80—87
- Liu J J, Liu Z, Qi Y, et al. Prediction of deep-water reservoir by seismic frequency division technology (In Chinese). Acta Petrolei Sinica, 2016, 37 (1): 80—87
- [21] 李海娟, 夏自强, 章洁, 等. 额尔齐斯河流域年降水量时间序列分析. 水资源保护, 2010, 26 (5): 29—32
- Li H J, Xia Z Q, Zhang J, et al. Analysis of time series of annual precipitation in Irtysh River Basin (In Chinese). Water Resources Protection, 2010, 26 (5): 29—32
- [22] 叶茂, 张鹏, 王玮, 等. 塔里木河流域上游三源径流变化趋势分析. 水资源与水工程学报, 2010, 21 (5): 10—14
- Ye M, Zhang P, Wang W, et al. Trend analysis of runoff variation in upper reaches of Train River Basin (In Chinese). Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21 (5): 10—14
- [23] Majid M, Sara A S. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on their contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion. Geomorphology, 2016, 253: 159—167
- [24] 赵龙山, 梁心蓝, 张青峰, 等. 裸地雨滴溅蚀对坡面微地形的影响与变化特征. 农业工程学报, 2012, 28 (19): 71—77
- Zhao L S, Liang X L, Zhang Q F, et al. Variation characteristics and effects of splash erosion on slope micro-relief in bare fields (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (19): 71—77
- [25] 杨春霞, 肖培青, 甄斌, 等. 野外不同被覆坡面产流产沙特征. 水土保持学报, 2012, 26 (4): 28—36
- Yang C X, Xiao P Q, Zhen B, et al. Characteristics on runoff and sediment yield in field prototype and different coverage slope (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 (4): 28—36
- [26] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响. 应用生态学报, 2013, 24 (1): 105—112
- Gao L Q, Zhao Y G, Qin N Q, et al. Effects of

biological soil crust on soil erodibility in hilly Loess Plateau region of Northwest China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 (1): 105—112

[27] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. Journal of Hydrology, 2012, 454: 123—130

## Characterization of Runoff and Sediment Yield in Farmlands on Loess Slopes Based on R/S and Wavelet Analysis

ZHANG Huihui ZHANG Hui DONG Yan ZHANG Qingfeng<sup>†</sup>

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract** 【Objective】 On the Loess Plateau of China, water erosion in slope farmlands is the major type of soil erosion. Knowledge about changes in runoff and sediment yield therein will sure contribute to understanding nature of the erosion on a microscopic scale. The objective of this study was to investigate temporal variation of runoff and sediment yield on microrelief like farmland on loess slope under rainfall. An in-lab experiment was designed to have slopes, 5°, 10°, 15°, 20°, and 25° in gradient, and four commonly adopted tillage patterns (flat slope, artificial digging plowing, artificial backhoe plowing, contour tillage) paired in combination. 【Method】 For the in-laboratory experiment, a steel trough (2.0 m long, 1.0 m wide and 1.0 m deep) filled with soil was set up with slope gradient adjustable in the range of 0 ~ 30°. Rainfall was simulated with downward sprinklers, 18 m high above the ground, which allows all the artificial raindrops to reach targeted terminal velocity and size of raindrops in natural rainfall and to distribute like a natural rainfall. Each artificial rainfall event lasted 90 minutes. Samples of runoff were collected every two minutes after the initiation of runoff for fractal-theory-based rescaled range analysis (R/S) to predict trend of the variation of temporal sequence of runoff and sediment and for Morlet wavelet analysis to identify principal cycles of the variation of each runoff and sediment yield sequence. 【Result】 Results show that Hurst index of the runoff sequence lies in the section between 0.567 and 0.798, while that of the sediment sequence in the section between 0.632 and 0.861, both being higher than 0.5, displaying a long-range positive correlation between the two. Hence the temporal sequence of runoff and sediment yield on loess slope farmlands in future will remain the same as that in the past. In addition, the volume of runoff and sediment yield displayed a positive and negative logarithmic relationship, respectively, with duration of rainfall, expressed by the equation of  $S=a+b\ln t$  ( $R^2 > 0.5$ ,  $a$  and  $b$  are constants). Generally, runoff peaked in volume 28 to 29 minutes after its initiation on the slope farmlands regardless of tillage pattern, while, sediment yield might have a long cycle of over 30 minutes in sequence on slope farmlands under certain tillage, indicating that the sediment yield on these slope farmlands might vary periodically every 30 minutes, which, however, needs to be validated by more detailed data of a longer time sequence. 【Conclusion】 All the findings in the study demonstrate that it is reliable to use R/S analysis combined with Morlet wavelet analysis in predicting temporal variation of runoff and sediment yield. This study also enriches the theory of run-off and sediment transfer, and lays a foundation for in-depth understanding of the runoff and sediment, which is of great significance to further researches on relationship between soil erosion and time sequence on a microtopographic scale.

**Key words** Runoff; Sediment; R/S analysis; Morlet wavelet method; Hurst index

(责任编辑: 檀满枝)