

黄土高原沟壑区砚瓦川流域水沙关系及其对流域治理的响应

王芸¹, 刘文兆^{2*}, 李怀有³, 张晓萍²

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 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;
3. 黄河水利委员会 西峰水土保持科学试验站, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 选取黄土高原沟壑区砚瓦川流域作为研究对象, 分析综合治理前后年水沙关系及次降雨水沙关系变化及其对流域治理的响应, 研究表明: 1997年为砚瓦川流域减水减沙作用明显生效的转折年。治理期(1998—2009年)与基准期(1981—1997年)相比, 无论年尺度还是次降雨尺度上, 径流深与输沙模数间的关系均发生显著变化, 其单位径流输沙量显著降低。其中在次降雨尺度上水沙关系趋于稳定的临界径流深为3 mm; 当降雨量<50 mm、雨强<4 mm/h或历时>3 h时, 治理期较基准期水沙关系变化显著。水土保持综合治理是造成年尺度和次降雨尺度上水沙关系变化显著的原因, 并且可以显著降低中低降雨量、中低雨强和中长历时降雨的单位径流输沙量。

关键词: 黄土高原沟壑区; 砚瓦川流域; 水沙关系

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2015)08-1403-11

DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.08.014

水沙关系是反映河流径流量与泥沙含量关系的指标, 受多种自然与人为因素的影响, 如土壤、地形、降水、下垫面状况等^[1-2], 其中, 大规模的人类活动, 如土地利用/覆被变化、水土保持生物措施和工程措施的实施、农业灌溉、工业和生活用水的增加等, 对流域径流、泥沙的水文过程都产生了重要的影响。目前, 流域尺度上水沙关系特征与变化的研究引起了越来越多学者的关注。

在水沙关系特征方面国内外做了大量的工作, 国外学者研究发现^[3-5], 在次暴雨和次暴雨过程尺度上, 水沙关系都呈现滞后环特征(Hysteresis loops), 我国学者对黄土高原丘陵沟壑区的水沙关系特征研究发现, 当流量达到某一临界值时, 含沙量趋于稳定^[6-7], 尽管径流深与输沙模数间的关系采用线性函数^[8]或幂函数^[9]都有较好的拟合效果, 但郑明国等^[10-11]研究表明, 由于一次洪水过程中水和沙主要集中在含沙量稳定的大流量时段, 导致不同洪水事件的平均含沙量变异不大, 因此两者间的关系可以用比例函数来表示。相对来说, 针对水沙关系变化方面的研究还较少, 在我国多集中在黄土丘陵沟壑区, 且已取得了一些成果: 赵文武等^[2]在年尺度上采用双累积曲线法研究表明综合治理措施改变了流域水沙关系; 郑明国等^[12]研究表明, 在坡面小区尺度上, 植被通过减水及改变水沙关系

收稿日期: 2014-03-19; 修订日期: 2015-03-30。

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001); “十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAD09B09)。

第一作者简介: 王芸(1980-), 女, 河北定州人, 博士, 主要从事3S技术与流域水文学研究。E-mail: bingyu698@163.com

*通信作者简介: 刘文兆(1960-), 男, 陕西乾县人, 研究员, 主要从事水文生态与流域管理研究。E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

来减沙,而在全坡面和流域尺度上,植被和坡面水保措施不能改变水沙关系,仅通过减水来减沙;原翠萍等^[13]研究表明水土保持综合治理没有改变流域水沙关系呈比例函数的形式,只降低了比例函数的系数,即单位径流含沙量;晏清洪等^[14]在年尺度上采用双累积曲线法研究认为淤地坝是影响水沙关系变化的原因,而植被和坡面措施通过减水来减沙,未改变水沙关系;刘淑燕等^[15]在不同降雨条件下研究认为次降雨量和次降雨强度较大、土地利用变化明显时,流域水沙关系变化显著。而目前对黄土高原沟壑区的水沙关系变化的特征和原因研究还很少。

黄土高原沟壑区是我国水土流失最严重的地区之一,也是治理的重点区域,位于该区的砚瓦川流域自开展大规模综合治理以来,下垫面发生了重大变化,这些变化直接或间接地影响着地表径流与侵蚀过程。因此,本文的研究目的就是位于黄土高原沟壑区具有代表性的砚瓦川流域为研究对象,分析在不同时间尺度(年尺度和次降雨尺度)及不同次降雨条件(不同降雨量、雨强和降雨历时)下水沙关系特征,以及在径流泥沙突变点前后的水沙关系变化,并分析水土保持综合治理对水沙关系的影响。

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

砚瓦川流域位于甘肃省庆阳市西峰区及宁县境内(图1),是泾河的二级支流,马莲河的一级支流,总面积为366.28 km²。该流域属典型的黄土高原沟壑区,地处董志塬腹地,地貌主要有3种类型:塬面、梁峁坡和沟谷^[16]。该区属半湿润偏旱季风气候区,据西峰站1937—2009年的数据,年平均气温9.3℃,多年平均降水量542.1 mm。据砚瓦川水文站1981—2009年数据,流域多年平均径流深22.6 mm,多年平均输沙量61.10×10⁴ t。

1.2 流域综合治理概况

砚瓦川流域从20世纪50年代开始有零星治理,较为集中的治理工作始于1975年,至1977年修建水平梯田2.73 km²,造林18.68 km²,种草14.47 km²,至70年代末修建2座淤地坝。进入20世纪80年代,随着农村实行包产到户,土地使用权归农民所有,流域治

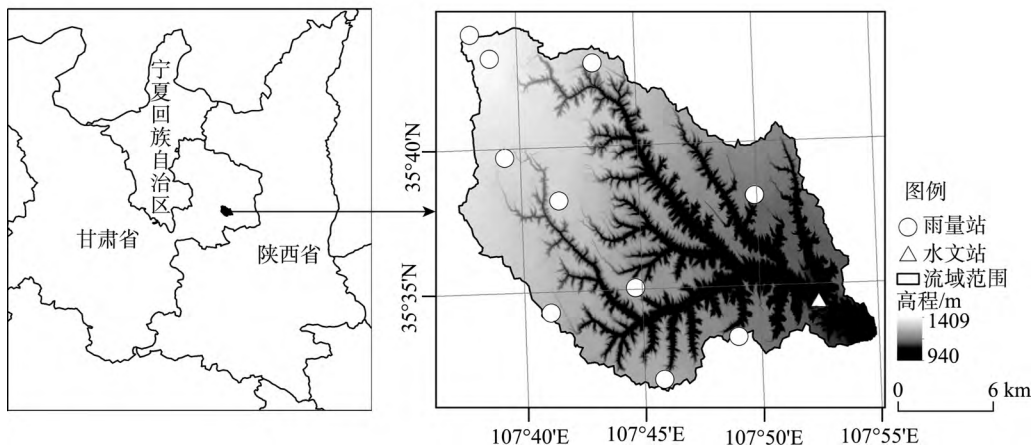


图1 砚瓦川流域位置示意图

Fig. 1 The geographical position of Yanwachuan watershed

理面积变化不大,有的地方甚至有所减少,至80年代末增加3座淤地坝。从90年代中期开始治理工作进展迅速,进入分流域分片治理的阶段:有1994年马莲河流域水土保持世界银行贷款项目,1997—2000年西峰市重点小流域治理项目,1999年退耕还林工程;1994—2001年增加梯田面积3.16 km²,林地10.81 km²,人工草地4.94 km²,至90年代末增加淤地坝2座。21世纪主要有两大项目实施:2001—2005年的黄河水土保持生态工程齐家川示范区项目(面积166.57 km²)和2006—2010年的砚瓦川示范区项目(面积236.68 km²)。项目期末增加梯田面积13.23 km²,林地58.79 km²,人工草地12.91 km²,淤地坝10座,涝池120座,水窖3 444眼,沟头防护117处,谷坊1 957道。

2 资料与方法

2.1 资料

在年尺度上分析采用的是年降水、径流泥沙数据、植被与工程措施数据、植被覆盖数据等,其中,降水数据包括西峰站、9个雨量站和砚瓦川水文站共11个站点;径流泥沙数据来自流域把口站砚瓦川水文站;在次降雨尺度上分析采用在地形地貌上具有代表性的砚瓦川测站实测的216场次降雨的降雨径流泥沙数据;数据年限均为1981—2009年。

西峰气象站的数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do/>);9个雨量站和水文站数据、植被与工程措施数据均由黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站提供;植被覆盖数据主要是归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据,来自SPOT VEGETATION的官方网站(<http://free.vgt.vito.be/>)和中国科学院寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),本文选取4—10月砚瓦川流域植被NDVI的平均值作为该流域生长季NDVI进行分析。

2.2 方法

本研究首先采用泰森多边形法,用各站点降水量与该站所占面积权重相乘后累加计算得到流域面降水量^[17]。在此基础上分析水沙关系变化。

2.2.1 突变点的确定

较大尺度的流域降雨与径流、输沙间的关系较为离散,采用双累积曲线法(Double mass analysis)将自变量和因变量各自累加后再统计分析,能排除多余因素干扰,提高结果可靠性^[18]。其基本原理^[19]是两个变量按照同一时间长度逐步累加,一个作为横坐标,另一个作为纵坐标,其拐点可以作为分析变量阶段性变化的依据。在流域径流/泥沙与降水的双累积曲线中,影响径流/泥沙变化的因素若只有降水一项,双累积曲线应呈一条直线;当受到人类活动等因素影响,下垫面的产流产沙水平发生变化时,其斜率就会发生变化^[20],曲线向上偏转说明人类活动使径流量和输沙量增大,向下偏转则反之^[21],斜率发生变化的突变点即为人类活动使径流量或输沙量发生突变的时间。由于水文数据固有的易变性可能导致某些假象的突变点,因此连续5 a以上曲线斜率发生偏移才予以采用^[21]。以该突变点为分界,将研究时段分为基准期(突变点之前)和治理期(突变点之后)。

基准期与治理期的双累积曲线斜率的变化是否显著需进行统计检验,本文采用Kolmogorov-Smirnov(K-S)法检验,其检验统计量为^[22]:

$$D = \max |F_x - F_y| \quad (1)$$

其中:

$$F_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(x_i) \quad (2)$$

$$I(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i > x) \\ 1 & (x_i \leq x) \end{cases}$$

式中: D 是 F_x 和 F_y 之间的最大偏差, x 和 y 分别是突变点之前与之后的数据集, n 是数据集 x 的数目, x_i 为 x 的第 i 个观测值, F_x 和 F_y 是 x 和 y 的经验分布函数, F_y 的定义与 F_x 相同。

2.2.2 水沙关系变异的显著性检验

研究采用带指示变量 (indicator or dummy variable) 的回归分析法检验突变点前后次降雨水沙关系斜率 (即回归系数 C 值) 间的差异是否显著。建立带指示变量的回归方程 $y = ax_1 + bx_2$ [23], y 由基准期和治理期的输沙模数数据集合并得到, x_1 由两个时期的径流深数据集合并得到, x_2 构建方法是: 对应基准期的输沙模数取其相应的径流深值, 对应治理期的径流深值全部取 0。由此得到的 b 值反映了两个时段回归系数之差, 若其水沙关系相同, 则 b 越趋近于 0, 即自变量 x_2 对 y 线性作用不显著, 并采用 t 检验法进行检验。

2.2.3 变化趋势的显著性检验

研究采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势 [24] 检验 1981—2009 年的降水量、径流量、输沙量和 NDVI 值的变化趋势是否显著。原假设 H_0 表示数据集 X 的数据样本独立同分布, 没有趋势存在, 计算统计量 Z_c , 并由此判断序列的趋势变化:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

式中: x_j 和 x_i 为样本数据值, n 为数据集长度。当 $x_j - x_i$ 大于、等于和小于 0 时, $\text{sgn}(x_j - x_i)$ 分别等于 1、0、-1。在显著性水平为 0.05 时, 若 $|Z_c| > 1.96$ 则趋势显著。若 $Z_c > 0$ 表明序列呈上升趋势; 反之呈下降趋势。 $|Z_c|$ 越大序列的趋势性变化越显著。

3 结果与分析

3.1 水沙变化时段确定

采用累积降水量 (p) 与累积年径流深 (h)、累积降水量与累积年输沙模数 (M) 分别绘制双累积曲线 (图 2), 根据突变点确定原则, 可以看到径流和输沙的双累积曲线发生偏转的年份一致, 都是 1997 年。对 1981—1997 年和 1998—2009 年的 h/p 和 M/p 进行 K-S 检验, 结果显示 1997 年之后 h/p 和 M/p 双累积曲线的斜率较 1997 年之前显著降低 ($P < 0.05$)。说明硯瓦川流域的径流深和输沙模数有一致且显著的突变点, 即 1997 年。突变点之后双累积曲线斜率较之前降低, 是由于流域下垫面条件的改变而引起的产流产沙量减少引起的。前已述及, 硯瓦川流域从 1994 年开始有一定规模的综合治理开展且进展迅速, 蓄水减沙效益一般在造林初期效益较低, 随植被的生长而逐渐增大, 另外 1997 年修建了堡子沟骨干坝, 因此 1997 年为减水减沙作用明显生效的年份是合理的。以此为界, 把 1981—1997 年定为基准期, 是水土保持治理较少的时期, 1998—2009 年为治理期, 是大

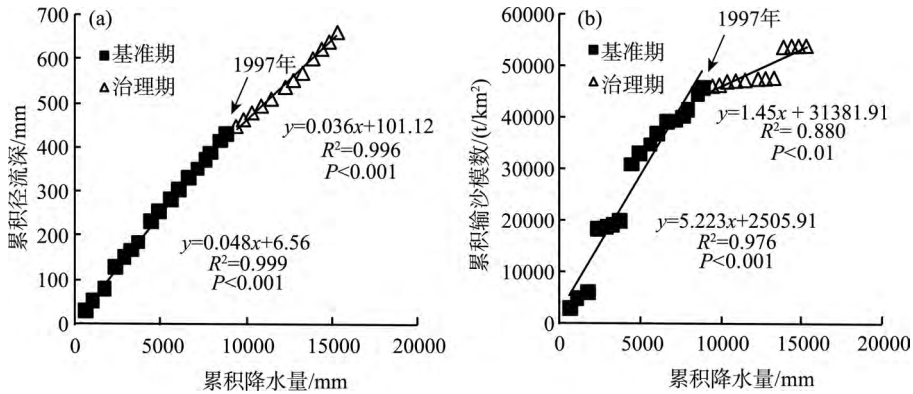


图2 年降水量与年径流深/输沙模数的双累积曲线图

Fig. 2 Double accumulative curves of annual precipitation and runoff depth/sediment transport modulus

面积实施了综合治理措施的时期。根据对本流域综合治理减水减沙效益的计算结果^[25], 治理期径流量减少率为27.33%, 输沙量减少率为76.14%, 减沙率大于减水率。

3.2 年水沙关系变化

径流深与输沙模数的双累积曲线(图3)是描述两者间关系是否具有趋势性变化的一种方法, 双累积曲线斜率的变化反映单位径流深输沙量的变化, 如果其斜率发生显著变化, 则认为人类活动改变了下垫面的单位径流输沙水平。由图3可以看出, 治理期双累积曲线的斜率较基准期发生明显偏转, 经K-S检验, 结果显示治理期的双累积曲线斜率较基准期显著下降(P<0.05), 说明在年时间尺度上, 治理期的水沙关系变化显著。

3.3 次降雨水沙关系变化

在水沙关系的研究中, 若只分析年尺度水沙关系变化, 由于其采用的是径流深和输沙模数在空间和时间上的平均值, 其结果不足以揭示流域产沙时空变异的真正原因^[26], 因此需要通过对次降雨径流深和输沙模数间的关系进行研究来更全面地理解流域的产沙过程和分析影响因素。

3.3.1 次降雨水沙关系确定

将1981—2009年5—10月观测的216场次降雨的降雨径流泥沙数据, 分别采用线性函数、幂函数和比例函数对径流深(h)和输沙模数(M)间的关系进行拟合[图4(a)]。可以看出, 对于较大的洪水, 比例函数和截距非0的线性函数的拟合效果明显好于幂函数, 且线性函数的截距很小, 忽略之不会影响计算精度, 因此h-M关系可以用比例函数来拟合:

M = C h (5)

式中: 回归系数C表示流域单位径流的输沙量。平均含沙量是输沙模数与径流深的比

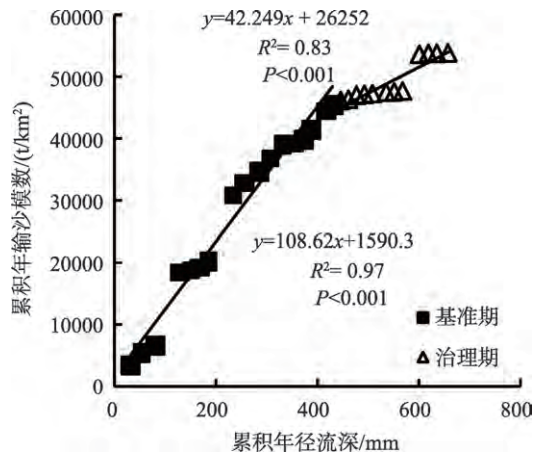


图3 年径流深与输沙模数的双累积曲线

Fig. 3 Double accumulative curve of runoff depth and sediment transport modulus

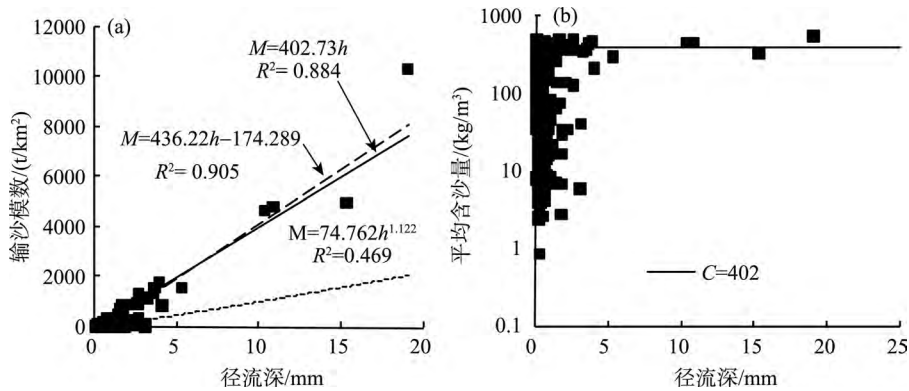


图4 次降雨径流深和输沙模数/平均含沙量的关系

Fig. 4 The relationship between runoff depth and sediment transport modulus/sediment concentration

值，因此径流深与平均含沙量间的关系中，平均含沙量达到稳定值时应与C值接近。

为验证比例函数在黄土高原沟壑区砚瓦川流域的适用性，绘制次降雨径流深与平均含沙量之间的关系图[图4(b)]，计算得到径流深<3 mm时，径流深和平均含沙量的变差系数C_v值都较大，分别为1.00和1.01，水沙关系离散程度较大；径流深>3 mm后，两者的C_v值分别为0.71和0.25，相对径流变化，平均含沙量的离散程度很小，即水沙关系离散程度较小。因此次降雨径流深与平均含沙量之间表现出的水沙关系特征为小于临界径流深（3 mm）时，水沙关系离散程度较大，超过临界径流深之后离散程度较小，该特征与郑明国等^[12]的研究结果相似。并得到该流域达到临界径流深的洪水事件都是平均含沙量大于300 kg/m³的高含沙洪水事件，且这些高含沙洪水事件平均含沙量的C_v值较小，为0.16，因此高含沙洪水事件的平均含沙量趋于稳定值，且与回归系数C值接近。基于以上分析得到，在本流域可以采用比例函数对水沙关系进行拟合。

3.3.2 次降雨水沙关系变化

为分析基准期和治理期次降雨水沙关系变化是否显著，分别绘制两个时期的次降雨径流深与输沙模数间的关系图（图5）。

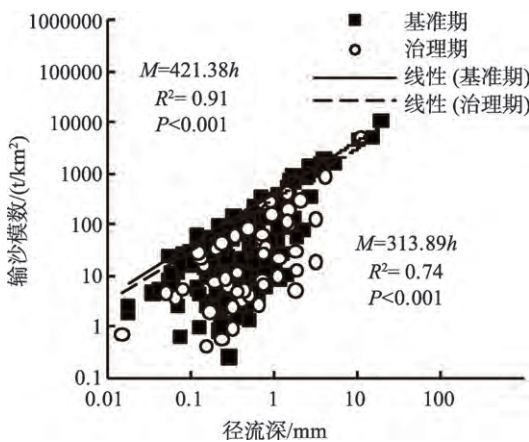


图5 不同时段次降雨水沙关系

Fig. 5 The relationship between runoff depth and sediment transport modulus in different periods

采用比例函数分别进行拟合，得到基准期和治理期径流深与输沙模数的关系式分别为 $M=421.38h$ 和 $M=313.89h$ 。利用带指示变量的回归分析法检验得到治理期较基准期单位径流输沙量显著降低（ $P<0.01$ ），即治理期稳定平均含沙量较基准期显著降低，治理期较基准期水沙关系变化显著。

3.3.3 不同降雨条件下水沙关系变化

降雨量、雨强和历时等特征对径流输沙的形成有重要影响。参考气象学分级标准^[27]，本研究将降雨量整合为3个等级，即<10 mm、10~50 mm、>50 mm。按平均雨强分为3个等级^[28]，即低雨强（<1.5 mm/h）、中雨强（1.5~4 mm/h）和高雨强（>4 mm/h）。按

降雨历时分为3个类型^[29], 短历时 (<3 h)、中历时 (3~24 h) 和长历时 (>24 h)。并分析在相同降雨条件下, 基准期与治理期的水沙关系的变化 (图6)。

图6显示了在降水可比的条件下, 基准期和治理期的径流深与输沙模数间的水沙关系特征和水沙关系变化。从水沙关系特征上看, 当降雨量<10 mm和10~50 mm、雨强<1.5 mm/h、历时>24 h时, 治理期的径流深基本都在3 mm以内, 计算其径流深和平均含沙量的 C_v 值分别为1.32和0.68、1.06和1.08、0.90和1.49、1.40和1.34, 即经过综合治理之后, 径流深控制在临界径流深 (3 mm) 以内, 水沙关系较为离散。当降雨量>50 mm、雨强1.5~4 mm/h、雨强>4 mm/h、历时<3 h和历时3~24 h时, 分别在径流深>3 mm、>3 mm、>1 mm、>0.5 mm和>1 mm之后, 输沙模数趋于稳定, 稳定后的径流深和平均含沙量的 C_v 值分别为0.69和0.27、0.81和0.20、1.13和0.13、0.37和0.23、1.21和0.36, 即相对于径流深的变化, 平均含沙量的离散程度很小。

从水沙关系变化上采用带指示变量的回归分析法检验得到, 当降雨量<10 mm、10~50 mm时, 治理期较基准期的单位径流输沙量显著降低, 径流深与输沙模数间的关系变化显著 ($P<0.01$), 当降雨量>50 mm时, 水沙关系变化不显著 ($P>0.05$); 当雨强<1.5 mm/h、1.5~4 mm/h时, 水沙关系变化显著 ($P<0.01$), 当雨强>4 mm/h时, 水沙关系变

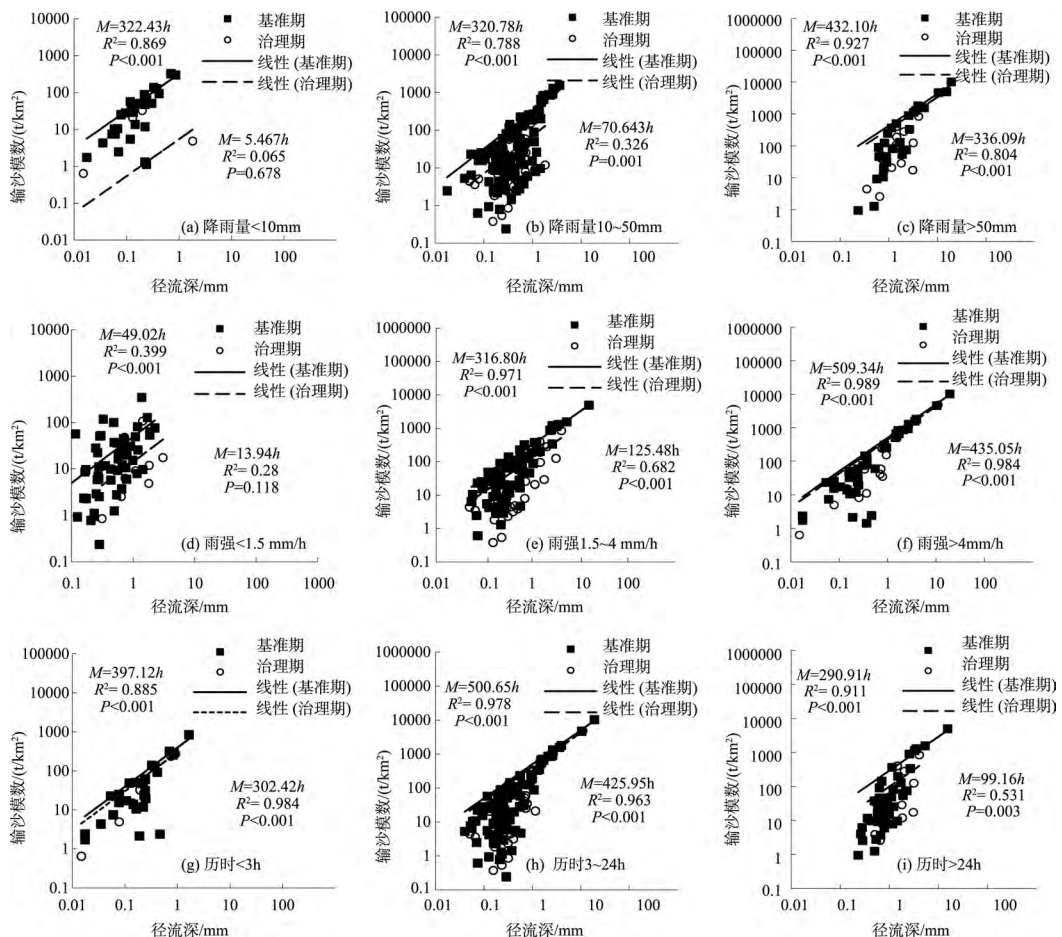


图6 不同降雨条件下径流深与输沙模数关系

Fig. 6 The relationship between runoff depth and sediment transport modulus under different precipitation conditions

化不显著 ($P>0.05$); 当历时 <3 h时, 水沙关系变化不显著 ($P>0.05$), 当历时 $3\sim 24$ h和 >24 h时, 水沙关系变化显著 ($P<0.01$)。综上所述, 说明综合治理对强降雨量、高雨强和短历时降雨的单位径流输沙量影响不大, 但可以显著降低中低降雨量、中低雨强和中长历时降雨的单位径流输沙量。

3.4 流域治理对水沙关系的影响

硃瓦川流域的水土保持综合治理一方面通过改变土地利用结构和提高植被覆盖度来改善下垫面条件。尤其是近十几年的土地利用活动强烈改变了下垫面条件, 林地和人工草地面积大幅增加, 荒坡地大量减少。20世纪80年代各土地利用类型所占面积大小排序为耕地 $>$ 草地 $>$ 居民地 $>$ 林地 $>$ 水域, 目前林地面积已超过居民地, 位列第三位, 土地利用结构发生重大调整。另外, 植被覆盖度也得到显著提高, 采用M-K趋势分析得到29 a生长季NDVI呈显著增长趋势 ($P<0.05$), 基准期生长季NDVI平均值为0.34, 治理期达到0.41, 根据泾河流域植被盖度分类^[30], 得到该流域的植被覆盖度由基准期的低植被覆盖增长到治理期的中植被覆盖。大量试验已证明植被措施具明显的减水减沙效益, 但受植被类型、覆盖度、林地凋落物等多因素的影响, 以及计算方法的限制和计算过程中诸多不确定因素的影响, 较难甄别植被措施对流域减水减沙效益的大小^[31]。

另一方面是工程措施建设。塬水下沟和沟谷重力侵蚀是黄土高原沟壑区水土流失的主要特征。本研究流域是董志塬沟头侵蚀比较严重的地区^[32], 沟头侵蚀增加了沟道输沙量, 塬水下沟可使沟谷侵蚀泥沙增加76%以上^[33], 针对该侵蚀主要采取沟头防护措施, 其保土效益为 $2.025\text{ t/km}^{[34]}$ 。而淤地坝是治理沟谷侵蚀的重要沟道工程措施, 通过缩短沟道、改变沟道地形条件, 减少沟道侵蚀, 使单位径流输沙水平显著降低, 且其运行初期的减沙效益显著高于减水效益^[35], 这与本流域的减沙效益远高于减水效益的特征相符, 最有可能影响水沙关系的淤地坝工程是1997年建成的堡子沟骨干坝。

该流域的水土保持综合治理无论从年尺度还是次降雨尺度上, 都显著降低了治理期的单位径流输沙量, 是造成治理期水沙关系较基准期变化显著的原因。由于基准期和治理期都有植被措施和工程措施的实施, 且治理期两种措施的实施强度和取得的效果都较为显著, 因此较难区分不同措施对水沙关系变化的影响程度, 这部分有待进一步研究。

4 结论

利用黄土高原沟壑区硃瓦川流域1981—2009年降水、径流和泥沙等数据, 研究了该流域水沙关系特征与变化及其对流域治理的响应, 得到以下结论:

1) 1997年为硃瓦川流域减水减沙作用明显生效的转折点, 1981—1997年为基准期, 1998—2009年为治理期。在年尺度上, 治理期该流域的径流深与输沙模数间的关系较基准期变化显著 ($P<0.05$)。

2) 1981—2009年间硃瓦川流域次降雨的径流深与输沙模数/平均含沙量间关系特征为: 低于临界径流深(3 mm)时, 水沙关系离散程度较大, 超过临界径流深后, 水沙关系离散程度较小。在次降雨尺度上, 治理期水沙关系变化显著 ($P<0.05$), 单位径流输沙量显著低于基准期。

3) 在降雨条件可比的情况下, 当降雨量 >50 mm、雨强 >4 mm/h或历时 <3 h时, 治理期较基准期的径流深与输沙模数间的关系变化不显著 ($P>0.05$), 当降雨量 <50 mm、

雨强 $<4\text{ mm/h}$ 或历时 $>3\text{ h}$ 时,治理期较基准期水沙关系变化显著($P<0.01$),即综合治理对强降雨量、高雨强和短历时降雨的单位径流输沙量影响不大,但可以显著降低中低降雨量、中低雨强和中长历时降雨的单位径流输沙量。

4) 水土保持综合治理改变了砚瓦川流域下垫面的单位径流输沙量,是造成年尺度和次降雨尺度上治理期水沙关系较基准期发生显著变化的原因。

参考文献(References):

- [1] Zabaleta A, Martínez M, Uriarte J A, *et al.* Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country [J]. *Catena*, 2007, 71: 179-190.
- [2] Zhao W W, Fu B J, Meng Q H, *et al.* Effects of land-use pattern change on rainfall-runoff and runoff-sediment relations: A case study in Zichang watershed of the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(3): 436-442.
- [3] Walling D E, Teed A. A simple pumping sampler for research into suspended sediment transport in small catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 1971, 13: 325-337.
- [4] Williams G P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers [J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 111: 89-106.
- [5] Eder A, Strauss P, Krueger T, *et al.* Comparative calculation of suspended sediment loads with respect to hysteresis effects (in the Petzenkirchen catchment, Austria) [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 389(1/2): 168-176.
- [6] 龚时扬, 蒋德麒. 黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理 [J]. 中国科学, 1978(6): 671-678. [GONG Shi-yang, JIANG De-qi. The soil loss and treatment in a small watershed in loess area in the middle reaches of Yellow River. *Science in China*, 1978(6): 671-678.]
- [7] 王兴奎, 钱宁, 胡维德. 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程 [J]. 水利学报, 1982(7): 26-35. [WANG Xing-kui, QIAN Ning, HU Wei-de. The formation and process of confluence of the flow with hyperconcentration in the gullied-hilly loess areas of the Yellow River Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1982(7): 26-35.]
- [8] 王孟楼, 张仁. 陕北岔巴沟流域次暴雨产沙模型的研究 [J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 11-18. [WANG Meng-lou, ZHANG Ren. Study on the storm-sediment yield model of the Chaba gully basin. *Journal of Water and Soil Conservation*, 1990, 4(1): 11-18.]
- [9] 牟金泽, 孟庆枚. 陕北中小流域年产沙量计算 [C]// 黄土高原水土流失综合治理科学讨论会资料汇编. 杨凌: 中国科学院西北水土保持研究所, 1981: 251-253. [MOU Jin-ze, MENG Qing-mei. Calculation of annual sediment production on medium and small basin in Northern Shaanxi // The Information Compilation of Scientific Symposium on Water and Soil Loss Comprehensive Harness in Loess Plateau. Yangling: Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, 1981: 251-253.]
- [10] Zheng M G, Cai Q G, Cheng Q J. Modelling the runoff-sediment yield relationship using a proportional function in hilly areas of the Loess Plateau, North China [J]. *Geomorphology*, 2008, 93: 288-301.
- [11] Zheng M G, Yang J S, Qi D L, *et al.* Flow-sediment relationship as functions of spatial and temporal scales in hilly areas of the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2012, 98: 29-40.
- [12] 郑明国, 蔡强国, 陈浩. 黄土丘陵沟壑区植被对不同空间尺度水沙关系的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3572-3581. [ZHENG Ming-guo, CAI Qiang-guo, CHEN Hao. Effect of vegetation on runoff-sediment relationship at different spatial scale levels in gullied-hilly area of the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3572-3581.]
- [13] 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 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 36-43. [YUAN Cui-ping, LEI Ting-wu, ZHANG Man-liang, *et al.* Sediment yields from the parallel watersheds in the hilly-gully regions of Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(3): 36-43.]
- [14] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降水和水土保持对黄土区流域水沙关系的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 9-16. [YAN Qing-hong, YUAN Cui-ping, LEI Ting-wu, *et al.* Effects of precipitation and erosion control practices on the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of typical watersheds in the hilly-gully region on the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(4): 9-16.]
- [15] 刘淑燕, 余新晓, 信忠保, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用变化对水沙关系的影响 [J]. 地理科学进展, 2010,

- 29(5): 565-571. [LIU Shu-yan, YU Xin-xiao, XIN Zhong-bao, *et al.* Effects of land use change on runoff-sediment relationship at watershed in the loess hilly region. *Progress in Geography*, 2010, 29(5): 565-571.]
- [16] 蒋德麒, 赵诚信, 陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析 [J]. 地理学报, 1966, 32(1): 20-36. [JIANG De-qi, ZHAO Cheng-xin, CHEN Zhang-lin. A preliminary analysis on the source of runoff and sediment on small basin in middle reaches of Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 1966, 32(1): 20-36.]
- [17] 黄锡荃, 李惠明, 金伯欣. 水文学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 68-70. [HUANG Xi-quan, LI Hui-ming, JIN Bo-xin. *Hydrology*. Beijing: Higher Education Press, 2003: 68-70.]
- [18] 秦伟, 朱清科, 刘广全, 等. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应 [J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1325-1332. [QIN Wei, ZHU Qing-ke, LIU Guang-quan, *et al.* Regulation effects of runoff and sediment of ecological conservation in the upper reaches of Beiluo River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(11): 1325-1332.]
- [19] Wigbout M. Limitations in the use of double-mass curves [J]. *Journal of Hydrology*, 1973, 12(2): 132-138.
- [20] Searcy J K, Hardison C H. Double-mass Curves [M]. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 1960: 1541-B.
- [21] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题 [J]. 水文, 2010, 30(4): 47-51. [MU Xing-min, ZHANG Xiu-qin, GAO Peng, *et al.* Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 47-51.]
- [22] Zheng M G, Sun L Y, Yan M. Temporal change of runoff and sediment load and their differential response to human activities: A case study for a well-vegetated mountain watershed of southern China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(1): 73-85.
- [23] Zheng M G, Qin F, Yang J S, *et al.* The spatio-temporal invariability of sediment concentration and the flow-sediment relationship for hilly areas of the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2013, 109:164-176.
- [24] Libiseller C, Grimvall A. Performance of Partial Mann-Kendall test for trend detection in the presence of covariates [J]. *Environmetrics*, 2002, 13:71-84.
- [25] Wang Y, Liu W Z, Li Z, *et al.* Effect of comprehensive management on runoff and sediment reduction in Yanwachuan Watershed, Loess Tableland, China [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2014, 13(3): 457-464.
- [26] 郑明国, 蔡强国, 程琴娟. 一种新的流域水沙模型及其在年际时间尺度的应用 [J]. 地理研究, 2007, 26(4): 745-754. [ZHENG Ming-guo, CAI Guo-qiang, CHENG Qin-juan. One new sediment yield model for single storm events and its application at annual time scale. *Geographical Research*, 2007, 26(4): 745-754.]
- [27] 周璟, 张旭东, 何丹, 等. 武陵山区女儿寨小流域次降雨径流与产沙特征 [J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 33-38. [ZHOU Jing, ZHANG Xu-dong, HE Dan, *et al.* Characteristics of runoff and sediment yield for rainfall events in Nverzhai small watershed of Wuling Mountain area. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 33-38.]
- [28] 罗琳, 王忠静, 刘晓燕, 等. 黄河流域中游典型支流汛期降雨特性变化分析 [J]. 水利学报, 2013, 44(7):848-855. [LUO Lin, WANG Zhong-jing, LIU Xiao-yan, *et al.* Changes in characteristics of precipitation in flood season over five typical basins of middle reaches of the Yellow River in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 848-855.]
- [29] 焦菊英, 王万中, 郝小品. 黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征 [J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(1): 34-42. [JI-AO Ju-ying, WANG Wan-zhong, HAO Xiao-pin. Characteristics of rain-storm in different pattern on Loess Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(1): 34-42.]
- [30] 陈操操, 谢高地, 甄霖, 等. 泾河流域植被覆盖动态变化特征及其与降雨的关系 [J]. 生态学报, 2008, 28(3): 925-938. [CHEN Cao-cao, XIE Gao-di, ZHEN Lin, *et al.* Analysis of Jinghe watershed vegetation dynamics and evaluation of its relation to precipitation. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 925-938.]
- [31] 王光谦, 张长春, 刘家宏, 等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析 [J]. 泥沙研究, 2006(2):10-16. [WANG Guang-qian, ZHANG Chang-chun, LIU Jia-hong, *et al.* Analyses on the variation of vegetation coverage and water sediment reduction in the rich and coarse sediment area of the Yellow River basin. *Journal of Sediment Research*, 2006(2): 10-16.]
- [32] 车小力. 黄土高塬沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀分布特征及其演化 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009. [CHE Xiao-li. Study of the distribution characteristic and evolution of headward erosion on Dongzhiyuan of loess gully region. Yangling: Northwest A & F University, 2009.]
- [33] 吴永红, 寇权. 陇东黄土高塬沟壑区土壤侵蚀的¹³⁷Cs法研究 [J]. 水土保持通报, 1997, 17(5): 7-10. [WU Yong-hong, KOU Quan. The method of ¹³⁷Cs to study soil erosion in the loess gully area of east Gansu Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, 17(5): 7-10.]

- [34] 祁永新, 刘则荣, 王兴中. 黄土高原水土保持二期世行贷款项目蓄水保土效益分析 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 204-207. [QI Yong-xin, LIU Ze-rong, WANG Xing-zhong. Effect analysis of soil and water conservation from the Loess Plateau Watershed Rehabilitation Project (Phase II). *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(5): 204-207.]
- [35] 焦菊英, 王万忠, 李靖, 等. 黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的减水减沙效益分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(1): 78-83. [JIAO Ju-ying, WANG Wan-zhong, LI Jing, *et al.* Soil and water conservation benefit of warping dams in hilly and gully regions on the Loess Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, 15(1): 78-83.]

The Flow-sediment Relationship and Its Response to Watershed Management in Yanwachuan Watershed, Loess Plateau Gully Region, China

WANG Yun¹, LIU Wen-zhao², LI Huai-you³, ZHANG Xiao-ping²

(1. College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & Ministry of Water Resource, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China; 3. Xifeng Soil and Water Conservation Experimental Station, Yellow River Conservancy Commission, Qingyang 745000, China)

Abstract: In this study, we investigated the variation of flow-sediment relationship before and after comprehensive management and its response to the management in Yanwachuan Watershed of Loess Plateau gully region. Results showed that the runoff and sediment underwent a significant shift in 1997, and the human activities, which had positive influences on controlling soil erosion, were enhanced in the watershed after 1997. Thus, the whole period was divided into two sub-periods, the base period (1981–1997) and the management period (1998–2009). Whether at annual scale or single rainfall event scale, the flow-sediment relationship between runoff depth and sediment transport modulus varied significantly in the management period comparing with that in the base period. The sediment discharge at unit runoff depth in the management period was significantly lower than that in the base period. At single rainfall scale, the flow-sediment relationship tended to be stable when the flow discharge exceeded a critical value of 3 mm. When precipitation was less than 50 mm, rainfall intensity was lower than 4 mm/h or rainfall duration was longer than 3 h, the flow-sediment relationship in the management period showed significant variation. The comprehensive management of soil and water conservation had altered the flow-sediment relationship significantly at annual scale and single rainfall scale. The sediment discharge at unit runoff depth of individual rainfall under condition of medium-low precipitation, medium-low rainfall intensity or medium-long rainfall duration would be significantly decreased by the comprehensive control measures.

Key words: Loess Plateau gully region; Yanwachuan Watershed; flow-sediment relationship