

黄土区典型小流域降水变化下的水沙响应研究

刘卉芳, 鲁 婧, 王昭艳, 解 刚

(中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要:定量描述降雨变化规律是研究流域水文生态过程的基础,研究降水变化下的水沙响应,可为区域水土保持规划提供科学依据。本文以马家沟流域 1975–2006 年降雨过程资料为依托,分析了流域内降雨年际、年内分布规律、侵蚀性降雨量。流域径流量及产沙量采用目前国内外应用比较广泛的 SWAT 分布式水文模型模拟得出。结果表明,产生侵蚀降雨的次数占总降雨次数的 15%,侵蚀性降雨量占总降雨量的 62%,尽管产生侵蚀的降雨次数占总降雨次数的比例较小,但产生侵蚀的雨量占总降雨量却超过 50%,侵蚀性降雨的强度大。在年尺度上,马家沟流域的径流量和产沙量随着降雨量的增加有不同程度的增加。丰水年径流量和产沙量普遍较大,枯水年径流量和产沙量也普遍较小。产沙量主要集中在 6–9 月,以 7–8 月的产沙量最大,平均占年产沙量的 70% 左右,幅度变化大于径流量的变化。黄土高原生态建设及淤地坝建设工程的实施,增加了流域林草面积。通过林草拦截降雨、缓滞水流、保护地表,可在一定范围减少流域径流总量和泥沙量。

关键词:黄土区;小流域;降水;径流量;产沙量

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)04-0011-07

黄土高原地处我国腹地,土地资源辽阔,矿产资源丰富(刘广全,2005)。黄土高原也是我国水土流失最严重的地区和黄河泥沙的主要来源区,其水力侵蚀占整个黄土高原流失面积的 85% 以上,中度以上水土流失约占总流失面积的 70% (刘卉芳等,2016)。主要地貌特征为沟谷发育活跃、地形破碎、沟深坡陡,降水特征为年季分布极不均匀、暴雨集中、降雨强度大,降雨及径流是导致黄土高原土壤侵蚀的主要动力(王占礼和常庆瑞,1998);而黄土高原降雨局地性强、阵性和强度大,使得对降雨特征本身的定量描述就具有一定难度,特别是受地形起伏和高程的影响,降雨在流域的时空分布存在很大差异(张晓明,2007)。因此,定量描述降雨是研究流域水文生态过程的基础。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是美国农业部农业研究局开发的一个流域尺度模型(尹婧,2008;尹婧等,2008),用于模拟预测长期连续时段土地管理措施,适用于多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营

养物质流失方面的研究(Neitsch et al, 2002)。SWAT 模型自开发以来,在美国、欧洲、亚洲和澳洲等地区有许多应用实例,并在应用中得到了不断发展,该模型对径流和泥沙负荷的预测能力在美国已经得到广泛的验证(Arnold et al, 1999)。有学者应用 SWAT 模型研究了气候变化的水文效应(Cruise et al, 1999; Stone et al, 2001; Eckhardt & Ulbrich, 2003);还有学者采用 SWAT 模型分析了芦溪小流域水文过程(胡远安等,2003)。

本文以马家沟流域 1975–2006 年降雨过程资料为依托,采用 SWAT 模型分析流域内降雨年际、年内分布规律,为流域内水文生态过程对降水的响应研究积累数据。在此基础上,分析了降水变化下的水沙响应,由于马家沟流域缺少实测径流资料对模拟数据进行验证,因此,选用泾河流域控制水文站张家山 1971–1990 年模拟年、月径流与实测年、月径流进行验证而得到的参数(尹婧,2008;尹婧等,2008)。

1 区域概况

马家沟流域位于陕西省延安市安塞县境内(图 1 为研究流域地理及 DEM 图),距安塞县城约 1 km,是延河的一级支流,位于延河中下游,流域面积 77.5 km²,属黄土丘陵沟壑区第二副区,水土流失十分严重;多年平均气温 8.8℃,平均降水量为 503.6 mm,降水年际变化大,年内分配不均。土壤

收稿日期:2016-07-20

基金项目:水利部公益性行业科研专项“水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045);国家重点研发计划“沟道工程对流域水沙变化影响及其贡献率”(2016YFC0402404)。

作者简介:刘卉芳,1977 年生,女,博士,高级工程师,主要从事水土保持与生态修复工程研究。E-mail:liuhf@iwhr.com

主要是黄绵土、黑垆土和红胶土,其中以黄绵土为主,约占流域内耕地土壤的80%,抗蚀性极差;其次还有褐土、红粘土、水稻土。流域植被稀少,主要以乔木林和灌木林为主。乔木主要有刺槐、山杨、白桦、侧柏等,灌木主要为柠条、沙打旺、沙棘等。区域内土地利用类型有林地、草地、坡耕地、裸地、梯田、居民用地等。

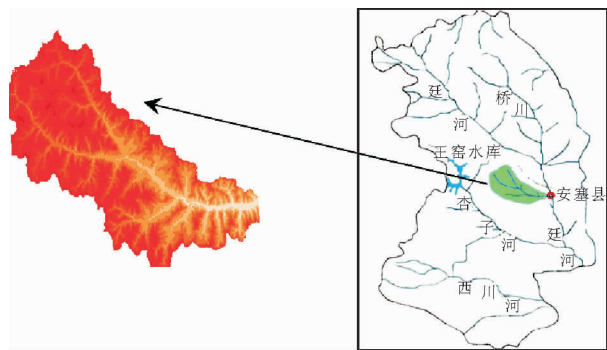


图1 研究流域地理位置及DEM图

Fig.1 Location and DEM image of the study watershed

2 流域降水情况

基于马家沟流域实测降雨资料,分析流域降雨年际、年内分布特性,为流域土地利用/覆被变化对水文生态过程响应研究积累基础数据。径流是导致土壤侵蚀的主要动力,但并不是所有的降雨都能够引起土壤侵蚀,能够导致土壤侵蚀的那部分降雨被称为侵蚀性降雨。

2.1 降雨量分布

图2为马家沟流域降雨量年际变化。由图2可以看出,降雨量年际变化较大,多年平均降雨量为503.6 mm,最大年降雨量666.1 mm(1983年),最小年降雨量为275.0 mm(1997年)。图3为流域内各月降雨量占年降雨量的比例,可以看出,在32年的降雨统计资料中,21年的降雨量高于平均值,11年的降雨量低于平均值。降雨量季节分配不均匀,年降雨量主要集中在6-9月,雨季降雨量占到年总降雨量的72%,8月的降雨量占年降雨量比例最大,达到了22.90%。

2.2 侵蚀性降雨

降雨是造成水土流失的最直接因子,但并不是每一次降雨都产生侵蚀;也就是说,侵蚀主要是由发生在某一临界点以上的降雨强度或降雨量所引起。侵蚀性降雨是指能够引起土壤流失的降雨,标准是指能够引起土壤流失的最小降雨强度和在该强度范围内的降雨量。参考 Wischmeier 等(1978)侵蚀性

降雨的标准,确定为一次降雨总量不小于12.7 mm或以一次降雨中的15 min雨量超过6.4 mm;根据马家沟流域32年的降雨资料,以12 mm作为侵蚀性降雨的最低标准,小于12 mm的次降雨按0处理,对马家沟1975-2006年的侵蚀性降雨进行了统计分析,详见图4。

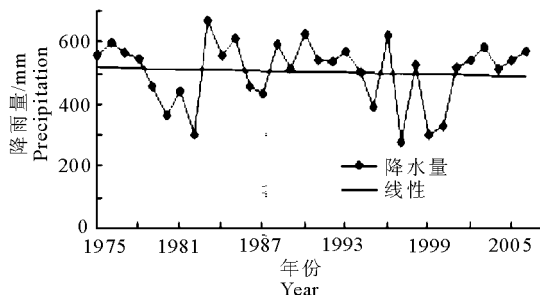


图2 流域降雨量的年际变化

Fig.2 Variation of annual precipitation in the study watershed

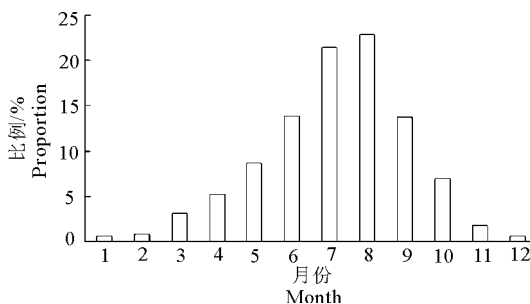


图3 流域内各月降雨量占年降雨量的比例

Fig.3 Monthly rainfall as a fraction of the annual rainfall

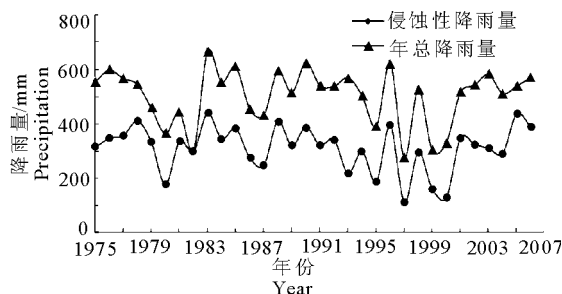


图4 流域侵蚀性降雨量

Fig.4 Erosive rainfall in the watershed by year

通过对马家沟流域32年的侵蚀性降雨量分析,在2599次降雨中,产生侵蚀的降雨为399次,占总降雨次数的15%。32年的总降雨量为16116 mm,侵蚀性降雨总量为9918 mm,占总降雨量的62%,表明尽管产生侵蚀的降雨次数占总降雨次数的比例较小,但其产生侵蚀的雨水量占总降雨量的比例却超过50%,侵蚀性降雨的强度大。由图4可以看出,侵蚀性降雨量和年降雨总量的变化趋势基本保持一

致,即在降雨总量多的年份,侵蚀性降雨总量相应也比较大。1983 年是侵蚀性降雨量最大的一年,侵蚀性降雨总量达到了 439.0 mm;同时也是降雨总量最大的年份,降雨总量为 666.4 mm。

3 基于 SWAT 模型的流域减沙理水效应

3.1 SWAT 模型参数的率定、校准和验证

SWAT 模型模拟马家沟流域径流量时,由于缺少其实测径流资料对模拟数据进行验证。因此,选用泾河流域控制水文站张家山 1971 - 1990 年模拟年、月径流与实测年、月径流进行验证而得到的参数(尹婧,2008;尹婧等,2008)。选用的泾河流域出口张家山站 1971 - 1980 年的径流资料对模型进行校准,并采用模型校准过程中所得到的参数,应用该站点 1981 - 1990 年观测到的径流资料对模型进行验证。

在对马家沟流域进行泥沙模拟时,通过该流域各类坝系实际拦泥量与初期拦泥量的差值,得到了相应子流域的年实际产沙量,通过模型模拟得到了子流域的泥沙模拟值,并对模拟值进行验证,从而校准模型参数。实际产沙量采用的是 2005 - 2006 年

各类型淤地坝的实际拦泥库容量,各淤地坝产沙量模拟值采用的是 SWAT 模型中 Watershed 界面下所划分的 39 个子流域的模拟年产沙量。选用 2005 年各类型淤地坝的实际拦泥库容资料对模型进行校准,并采用模型校准过程中所得到的参数,应用 2006 年淤地坝的实际拦泥库容量资料进行验证。

3.2 年际尺度径流和泥沙对降雨的响应

研究基于 SWAT 模型在分析年降雨对水沙资源的影响时,假定土地利用没有发生任何变化,分别采用了 3 个时间段进行模拟;另外,由于马家沟流域年内降水量分配不均,有枯季和洪季的特点,本文分析了 1 年内各月不同降水条件的水文响应状况。图 5 为年际尺度的马家沟流域径流量、泥沙量变化情况(SWAT 模拟的径流量,单位 m^3/s ,依据时间步长,在计算中换算为 mm)。

情景模拟 1:1981 - 1990 年逐年降雨量数据,土地利用采用 1990 年遥感影响图;

情景模拟 2:1991 - 2000 年逐年降雨量数据,土地利用采用 2000 年遥感影响图;

情景模拟 3:2001 - 2007 年逐年降雨量数据,土地利用采用 2007 年遥感影响图。

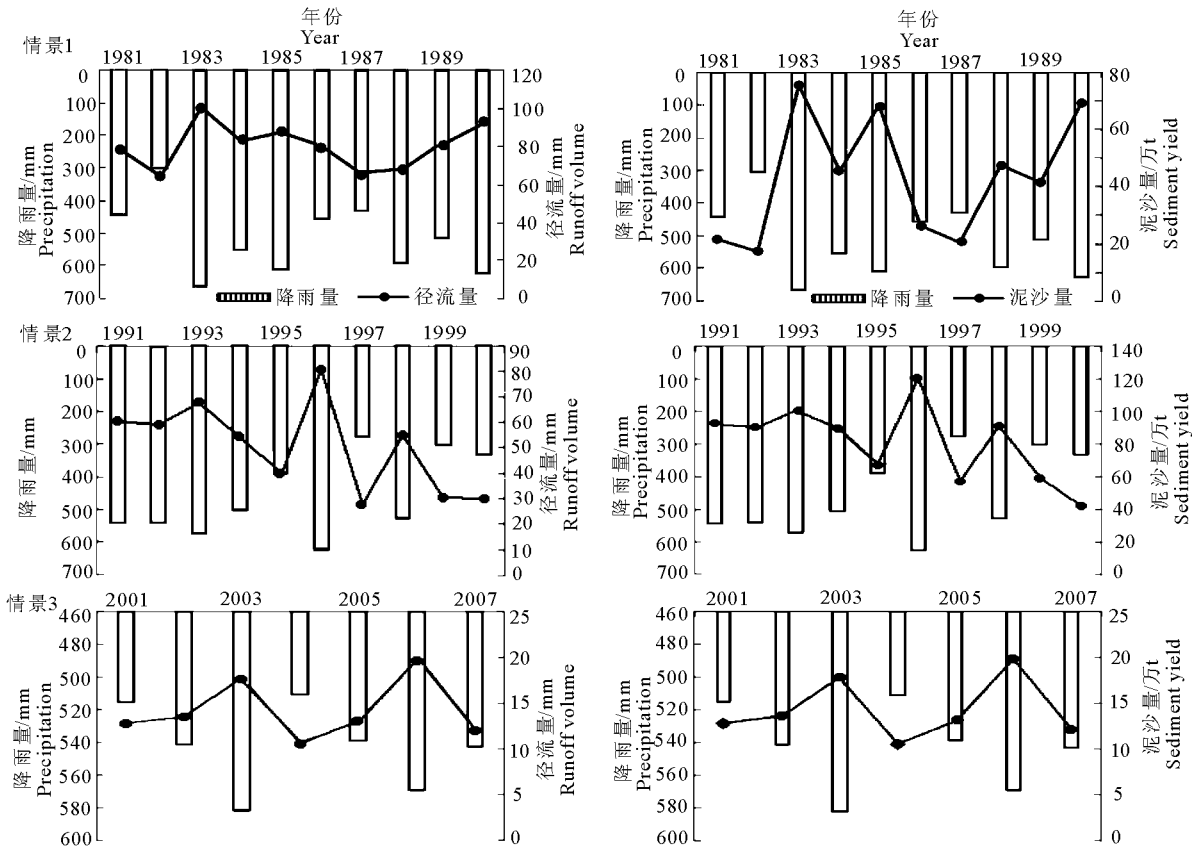


图 5 年际尺度的径流量与泥沙量变化情景模拟

Fig.5 Variation of annual runoff and sediment yield for three periods

情景模拟 1:在土地利用不变的情况下,受降雨量影响,径流量和产沙量也相应变化。1981 - 1990 年,平均降水量为 518.9 mm,流域年降水量变化幅度较大,从枯水年 1982 年的 302.0 mm 到丰水年 1983 年的 666.4 mm。径流量也由 1982 年的 21.5 mm 变化为 1983 年的 75.2 mm,泥沙量由 1982 年的 18.4 万 t 增加到 1983 年的 99.5 万 t;年均径流量为 43.2 mm,年均产沙量为 79.6 万 t。

情景模拟 2:1991 - 2000 年,流域年降水量变化幅度较大,平均降水量为 459.0 mm。从枯水年 1997 年的 275.0 mm 到丰水年 1996 年的 622.1 mm;径流量由 27.5 mm 变化为 80.5 mm,泥沙量由 56.7 万 t 增加到 120.5 万 t;平均径流量为 50.3 mm,平均产沙量为 80.8 万 t。

情景模拟 3:2001 - 2007 年,流域年降水量变化不大,平均降水量为 542.6 mm。产流量变化为 10.5 ~ 19.8 mm,产沙量为 21.5 ~ 32.8 万 t;平均径流量为 14.2 mm,平均产沙量为 27.1 万 t。

可见在 3 个模拟情景下,总体上看马家沟流域的径流量和产沙量随着降雨量的增加均有不同程度的增加。丰水年,径流量和产沙量普遍较大;枯水年,径流量和产沙量也普遍较小。也有个别年份尽管降水量最小,但径流量并不是最小的,比如情景模拟 2,1997 年降水量最小,仅为 215.0 mm,但径流量并不是最小的,这与模型精度有关系。表 1 更清楚地反映 3 种模拟情景下径流产沙量的平均状态。由表 1 也可以看出,3 个情景下平均径流量和产沙量与降雨量变化并不一致,情景模拟 2 的降雨量虽然最小,但其径流量与泥沙量却最大,这是由于土地利用变化而造成的。

表 1 3 种情景模拟的径流量和产沙量

Tab.1 Average annual runoff and sediment yield for each of the three periods

情景设定	情景模拟 1	情景模拟 2	情景模拟 3
平均降雨量/mm	518.9	459.0	542.6
平均径流量/mm	43.2	50.3	14.2
平均泥沙量/万 t	79.6	80.8	27.1

为了更加有效地分析降雨对水文动态的影响,分别利用了 3 期土地利用遥感影响图模拟了径流量、泥沙量。图 6 和图 7 分别是采用线性回归得到的降雨 - 径流关系和降雨 - 泥沙关系,并拟合其关系式。

1981 - 1990 年:
 $Y_1 = 0.1409X_1 - 14.342 \quad (R^2 = 0.8586; n = 10)$

1991 - 2000 年:
 $Y_2 = 0.1829X_2 - 51.676 \quad (R^2 = 0.8683; n = 10)$
2001 - 2007 年:
 $Y_3 = 0.1124X_3 - 46.756 \quad (R^2 = 0.7627; n = 7)$
式中: Y_1 、 Y_2 、 Y_3 为年均径流量(mm); X_1 、 X_2 、 X_3 为年均降雨量(mm); n 为样本数。

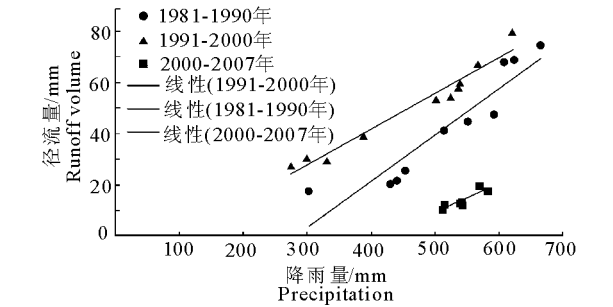


图 6 降雨量与径流量的关系

Fig. 6 Relationship of precipitation and runoff
1981 - 1990 年:
 $S_1 = 0.1827 X_1 - 40.23 \quad (R^2 = 0.8966; n = 10)$
1991 - 2000 年:
 $S_2 = 0.0751 X_2 - 13.258 \quad (R^2 = 0.7434; n = 10)$
2001 - 2007 年:
 $S_3 = 0.1324 X_3 - 44.738 \quad (R^2 = 0.8467; n = 7)$
式中: S_1 、 S_2 、 S_3 为年均泥沙量(万 t); X_1 、 X_2 、 X_3 为年均降雨量(mm); n 为样本数。

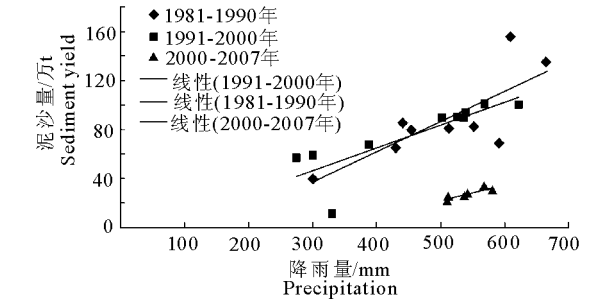


图 7 降雨量与泥沙量的关系

Fig. 7 Relationship of precipitation and sediment yield
由图 6 和图 7 可以看出,年降雨量和年径流量、泥沙量具有很好的线性相关关系,并且呈明显的正相关关系,回归模型的相关系数都较高。由此可见,黄土高原地区在土地利用不变的情况下,流域产流、产沙的大小取决于流域内降水量的多少。降水量多,流域产流产沙越多;降水量越少,流域产流产沙也越少。
不论降雨 - 径流曲线还是降雨 - 泥沙量曲线,3 期数据的斜率均不相同,这是由于马家沟流域土地利用格局发生变化而造成的;其中 1981 - 1990 年

和 1991 – 2000 年的斜率明显比 2001 – 2007 年的斜率要大;这是因为随着退耕还林政策的实施,2000 – 2007 年马家沟流域林草地面积有了大幅度的增加,林地面积从 190.78 hm² 增加到 1 702.83 hm²。森林作为一个复杂的生态系统,对降雨有 3 个作用层,即林冠、枯枝落叶层和林地土壤层。通过 3 个作用层提高了林地的渗透能力和土壤蓄水能力。森林由此起到了缓滞水流和保护地面的作用,可以在一定范围内减少径流总量和泥沙量。因此,2001 年以后,径流量和泥沙量尽管随着降雨量的增大也在增大,但增幅与 2000 年前相比有所减小。

3.3 月度径流和泥沙对降雨的响应

从图 8 的月度降雨对产流影响可以看出,随着月均降雨量的增加,产流量也随降雨量发生一致的波动。1981 – 1990 年、1991 – 2000 年和 2001 – 2007 年的 3 个时间段内,7 月的平均降雨量均为最大,分别是 95.8 mm、87.9 mm 和 110.2 mm;径流量也为最大值,分别是 15.4 mm、16.8 mm 和 5.1 mm。在降雨量少的枯水季节,径流量也相当少,尤其在 1 – 4 月和 10 – 12 月的个别枯水月份,流域内几乎不产生径流量。

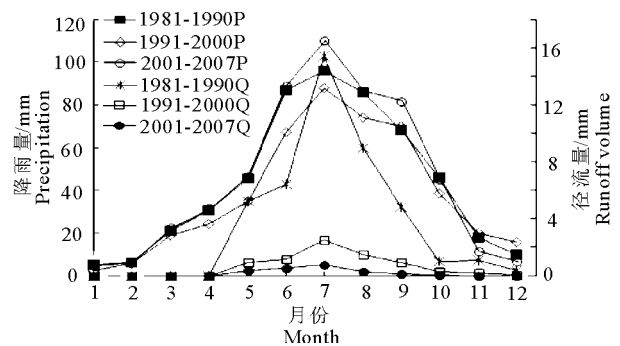


图 8 流域月降雨量与径流量变化

Fig. 8 Relationship of monthly rainfall and monthly runoff

图 9 表明了产沙量的峰值均出现在降雨量比较集中的汛期,特别是降雨量最多的 7 – 8 月。以 1981 – 1990 年为例,2 个月的产沙量峰值分别是 35.4 万 t 和 27.8 万 t,可见集中降雨是产沙的主要动力之源,随降雨量的减少,产沙量也随之减少;在枯水季节,流域产沙量也相当少。

由此可见,径流的变化在汛期主要受降雨量的控制,其变化幅度较大,枯水期降雨量小,径流不受降雨的影响,基本无径流;泥沙量的变化随径流量变化而变化,集中降雨产生的径流挟持大量的泥沙,其产沙量也主要集中在 6 – 9 月;而且 7 – 8 月的产沙量最大,平均占年产沙量的 70% 左右,幅度变化大

于径流量的变化。因此认为马家沟流域降雨对泥沙的影响程度大于降雨对径流的影响。

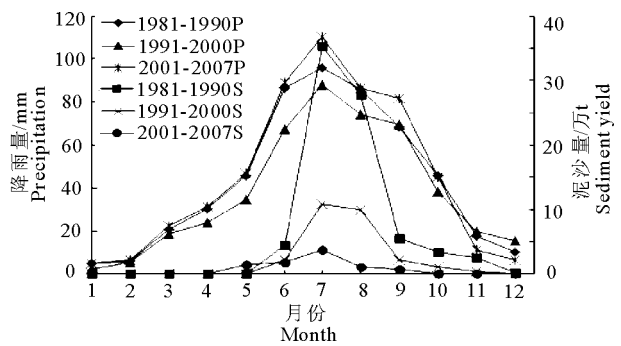


图 9 流域月降雨量与泥沙量变化

Fig. 9 Relationship of monthly rainfall and monthly sediment yield

4 小结

(1)通过对马家沟流域 32 年的侵蚀性降雨量分析,在 2 599 次降雨中,产生侵蚀的降雨为 399 次,占总降雨次数的 15%。32 年的总降雨量为 16 116 mm,侵蚀性降雨总量为 9 918 mm,占总降雨量的 62%,表明尽管产生侵蚀的降雨次数占总降雨次数的比例较小,但产生侵蚀的雨占总量却超过 50%,侵蚀性降雨的强度大。

(2)马家沟流域的径流量和产沙量随着降雨量的增加均有不同程度的增加。丰水年的径流量和产沙量普遍较大,枯水年普遍较小。年降雨量和年径流量、泥沙量具有很好的线性关系,且呈明显的正相关关系,回归模型的相关系数均较高。

(3)径流变化在汛期主要受降雨量控制,其变化幅度较大。枯水期降雨量小,径流不受降雨的影响,基本无径流;泥沙量的变化随径流量变化而变化,集中降雨产生的径流挟持大量的泥沙,其产沙量主要集中在 6 – 9 月,以 7 – 8 月的产沙量最大,平均占年产沙量的 70% 左右,幅度变化大于径流量的变化。马家沟流域降雨对泥沙的影响程度大于降雨对径流的影响。

(4)黄土高原生态建设及淤地坝建设工程的实施,增加了流域林草面积。通过林草拦截降雨、缓滞水流、保护地表,在一定范围减少了流域径流总量和泥沙量。

参考文献

胡运安,程声通,贾海峰,2003. 非点源模型中的水文模拟:以 SWAT 模型在芦溪小流域的应用为例[J]. 环境科学研究, 16(5):29 – 32,36.

- 刘广全,2005. 黄土高原植被构建效应[M]. 北京:中国科学技术出版社:1-10.
- 刘卉芳,曹文洪,孙中峰,2016. 黄土区水土保持的水沙效应[M]. 北京:科学出版社.
- 王占礼,常庆瑞,1998. 黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), (4): 101-105.
- 尹婧,2008. 气候变化和土地利用/覆被变化对泾河流域生态水文过程的影响研究[D]. 北京:北京师范大学.
- 尹婧,邱国玉,熊育久,2008. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响[J]. 自然资源学报,13(2):211-218.
- 张晓明,2007. 黄土高原典型流域土地利用/森林植被演变的水文生态响应与尺度转换研究[D]. 北京:北京林业大学.
- Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al, 1999. Continental scale simulation of the hydrologic balance[J]. Journal of American Water Resources Association, 35(5):1037-1051.
- Cruise J F, Limaye A S, Al-Abed N, 1999. Assessment of impacts of climate change on water quality in the south-eastern United States[J]. Journal of the American Water Resources Association, 35(6):1539-1550.
- Eckhardt K, Ulbrich U, 2003. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range[J]. Journal of Hydrology, 284:244-252.
- Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al, 2002. Soil and water assessment tool theoretical manual[M]. Texas: Grassland Soil Water Research Laboratory.
- Stone M C, Hotchkiss R H, Hubbard C M, et al, 2001. Impacts of climate change on Missouri River Basin water yield[J]. Journal of the American Water Resources Association, 37(5):1119-1129.

(责任编辑 万月华)

Response of Water and Sediment to Rainfall in a Typical Watershed of the Loess Plateau

LIU Hui-fang, LU Jing, WANG Zhao-yan, JIE Gang

(Department of Sedimentation, China Institute of Water Resource and
Hydropower Research, Beijing 100048, P. R. China)

Abstract: Quantitating rainfall is the foundation for understanding hydrological process in watersheds. Based on rainfall data for Majiagou watershed from 1975 to 2006, we analyzed the distribution of annual and monthly rainfall, and the erosivity of rainfall in the area. Based on the results, runoff and sediment yields from precipitation events of different intensity were simulated using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. The Majiagou watershed is located in Ansai County of Yan'an City, Shannxi Province, with the catchment area of 77.5 km². Loessial soil is the primary soil type in Majiagou watershed, accounting for 80% of the total arable soil, and vegetation is scarce in the region, dominated by arbores and shrubs. Annual precipitation varies greatly in Majiagou watershed, from a high of 666.1 mm in 1983 to a low of 275 mm in 1997. Seasonal precipitation is uneven and precipitation during the wet season (June to September) accounted for 72% of the total. Although erosive rainfall occurs in only 15% of the total precipitation events, it accounts for 62% of the total rainfall. Over a year, runoff and sediment yield in the Majiagou watershed accumulates with rainfall and there is an obvious positive correlation between precipitation, runoff and sediment yield. Annual runoff and sediment yield were generally larger in wet years and smaller in dry years and the variation in sediment yield was larger than the variation in runoff. Sediment yield is generated primarily from June to September, particularly July and August, when approximate 70% of the annual yield is generated. We also found that the forest and grass area increased during these years due to ecological restoration efforts in the Loess Plateau and construction of a silt dam. Forest and grass cover reduces runoff and sediment yield by means of intercepting rainfall, slowing water flow and decreasing soil erosion. This study provides a reference for regional planning of water and soil conservation.

Key words: loess area; small watershed; rainfall; runoff quantity; sediment yield