

黄土区小流域水沙对降雨及土地利用变化响应研究

刘卉芳, 曹文洪, 张晓明, 秦伟

(中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 降雨和土地利用/覆被变化是流域径流、泥沙的两个主要影响因子。本研究采用 SWAT 模型, 用固定其中一个影响因子而改变另一个影响因子的方法, 对研究区降雨变化与土地利用/覆被变化对径流泥沙影响进行估算, 目的在于从年月不同时间尺度上确定黄土高原小流域水沙对降雨和土地利用变化的响应状况。结果表明, 在年尺度上降雨变化对径流影响的贡献率为 84.20%, 土地利用变化对径流影响的贡献率为 28.63%; 在月尺度上, 降雨对径流贡献率也大于土地利用对径流的贡献率, 尤其在雨季降雨对径流的影响程度和土地利用对径流影响程度的比值最大可以达到 4.5。因此, 不论在年尺度还是月尺度上, 降雨对径流的贡献率都远远大于土地利用对径流的贡献率。此外, 研究结果也表明流域年降水量和流域森林植被盖度均与流域径流模数或输沙模数呈指数关系。

关键词: 黄土区; 小流域; 降水; 径流量; 产沙量; SWAT 模型

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)02-0237-06

水土流失是黄土高原的主要环境问题, 尽管影响水土流失的因素有气候、地形、土壤、生物、人为活动等, 但黄土高原水土流失加重的主要原因是短历时高强度的降水和人类对土地的不合理利用。因此, 研究黄土高原降水和土地利用方式与产流产沙的关系对治理水土流失十分重要。近年来, 土地利用/覆被变化(LUCC)的环境效应研究成为 LUCC 领域的热点之一。国内外较早的研究主要集中在区域土地利用/土地覆被变化的气候和水文效应方面^[1-3]。

王礼先等^[4]对森林与流域径流关系进行研究后指出, 在干旱地区随森林植被覆盖率的增加, 流域径流量和洪峰流量减少, 枯水径流量增加。卫伟^[5]利用径流小区方法对黄土区不同下垫面的水土流失进行研究, 结果表明受干扰最严重的农田和人工草地产生了较严重的水土流失, 而灌丛和荒草地的保水、保土效果最佳。近年来, 国内外专家对流域降雨产流、产沙展开了一系列研究, H. w. Anderson 等^[6]、M. Dieterich^[7]认为, 土地利用状况特别是植被状况与产沙之间存在相关关系, 不同植被状况下的泥沙输移过程不同。

尽管几十年来许多研究者在这方面已经作了大量的工作, 但是对降水和土地利用的耦合作用对产

流产沙规律影响注意不多, 而在进行流域降水和土地利用对水土资源的影响评价时, 有必要把握降水和土地利用分别对径流、泥沙的贡献情况, 以提高评价土地利用对水资源的影响精度。本研究以整个马家沟流域为研究对象, 开展降水和土地利用/覆被变化对流域主要生态水文过程研究。

1 研究区概况

马家沟流域位于延安市安塞县内, 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。地貌由峁、梁、坡、沟组成, 以梁为主。马家沟流域沟道呈“Y”字形, 主沟道长 17.5 km, 沟道平均比降 6.5‰, 沟道底平均宽度 13 m。流域平均沟壑密度 3.2 km/km², 沟道断面形状多呈“U”; 流域内梁峁顶部较缓, 一般在 5°~15°之间, 沟坡陡, 一般在 45°~60°之间。

马家沟流域属暖温带半干旱大陆性季风气候, 具有春季干旱多风沙, 夏季温热多雷雨, 秋季晴朗降雨快, 冬季干冷雨雪少的特点, 气温日差较大。多年平均气温 8.8℃, ≥10℃的年积温为 3 703℃。多年平均降水量为 503.6 mm(1975~2006 年), 年际变化大, 年内分配不均, 汛期 6~9 月占全年降水量的

收稿日期: 2009-08-15

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAD09B02); 青年基金(泥集 QN-0707)

作者简介: 刘卉芳(1977—), 女, 山西柳林人, 博士生, 主要从事淤地坝规划与河流动力学及林业生态工程研究。E-mail: lhf623@sohu.com。

69.5%。

流域内植被稀少,主要以乔木林和灌木林为主,乔木主要是刺槐(*Robinia pseudoscacia*)、山杨(*Populus davidiana* Dode.)、白桦(*Betula platyphalla* Sak.)、山杏(*Prunus armeniaca* L.)、枣树(*Zizyphus jujuba*.)、柳树(*Salix spp*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)、侧柏(*Platycladus orientalis*),灌木主要为柠条(*Caragana microphylla*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、酸枣(*Zizyphus jujuba* Mill.)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decne.)等。野生草本植物主要有白草(*pennisetumflacidum*)、鹅冠草(*Roegneria kanoji*)及青蒿(*Artemisia apiacea* Hance)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii* Wedex Steehm)、艾蒿(*Artemisia argyi* Levl.)等。流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。

2 方法及资料

2.1 降雨量

安塞县气象站提供的 1975~2006 年降水资料。

2.2 DEM 图

本研究以 1:10 000 比例尺的地形图为数据源,对研究流域进行数字化制图,建立等高线矢量图。通过空间分析模块(Spatial Analyst)建立了马家沟流域数字高程模型。图 1 为马家沟流域 DEM 图。

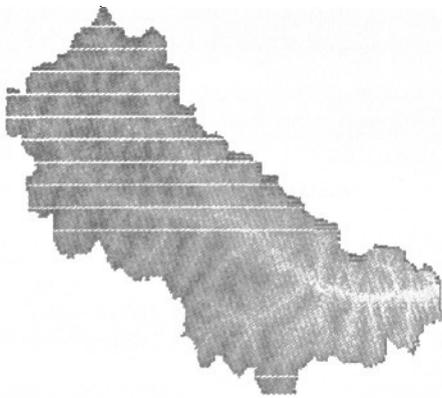


图 1 马家沟流域 DEM

Fig.1 The DEM of Majiagou basin

2.3 土地利用影响图

先根据 1990 年和 2000 年的 Landsat ETM+ 影像数据,以 1:10000 地形图为依据,按标准分幅应用二次多项式分别进行几何校正,控制点中误差在 1 个像元以内。再根据所获得的统计资料、地形图及各

种专题图件,结合野外调查资料,建立该区域解译标志;应用图像处理软件,采用人机交互的监督分类方法进行解译,并通过野外验证对其精度进行评价。在 Arc-GIS 软件的支持下,统计生成 1990 年和 2000 年的土地利用/覆被数据,同时结合 2007 年人工调绘处理所得土地利用现状,经过空间叠加分析,得到马家沟流域 3 期土地利用与覆被变化的动态变化信息,生成相关专题图。图 2 为马家沟流域三期土地利用类型图。

2.4 模型校准和验证

该研究采用 SWAT 分布式水文模型模拟流域径流量和泥沙量,通过模拟数据来分析马家沟流域近年来降水和土地利用/覆被变化对流域生态水文过程的影响。该研究采用 SWAT 模型模拟马家沟流域径流量时,由于马家沟流域径流数据的缺失,因此难以采用本流域的实测径流资料对模拟数据进行验证。本论文采用的径流参数引自尹婧博士论文《气候变化和土地利用/覆被变化对径河流域生态水文过程的影响研究》^[8]中的参数。采用的参数在尹婧博士论文中对径河流域控制水文站张家山 1971~1990 年模拟年、月径流与实测年、月径流已经进行验证。

SWAT 模型在马家沟流域对泥沙的模拟时,通过马家沟流域各类坝系实际拦泥量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,从而确定了模型参数。限于篇幅原因,本文不再详述参数的验证过程。

3 径流对土地利用和降雨的响应

关于土地利用和降雨对径流的影响,传统的分析考虑的是降雨、土地利用分别和径流的关系,但没有区别降雨变化及土地利用/覆被变化对径流变化的耦合作用,也没有客观地反映降雨变化和土地利用对流域降雨径流的贡献。因而很难将二者的贡献量化,更难以反映二者的空间演变特征对水文系统的影响,需寻求新的方法加以解决,如借助有物理机理的流域分布式水文模型。

关于降雨和土地利用对径流量的耦合效应,以前也有过学者作过研究,有学者认为,降雨量增大弱化了下垫面条件对降雨-产流关系的影响^[9,10],部分研究^[11]则认为退耕还林还草在多雨和多暴雨年份减沙减水效应最强。

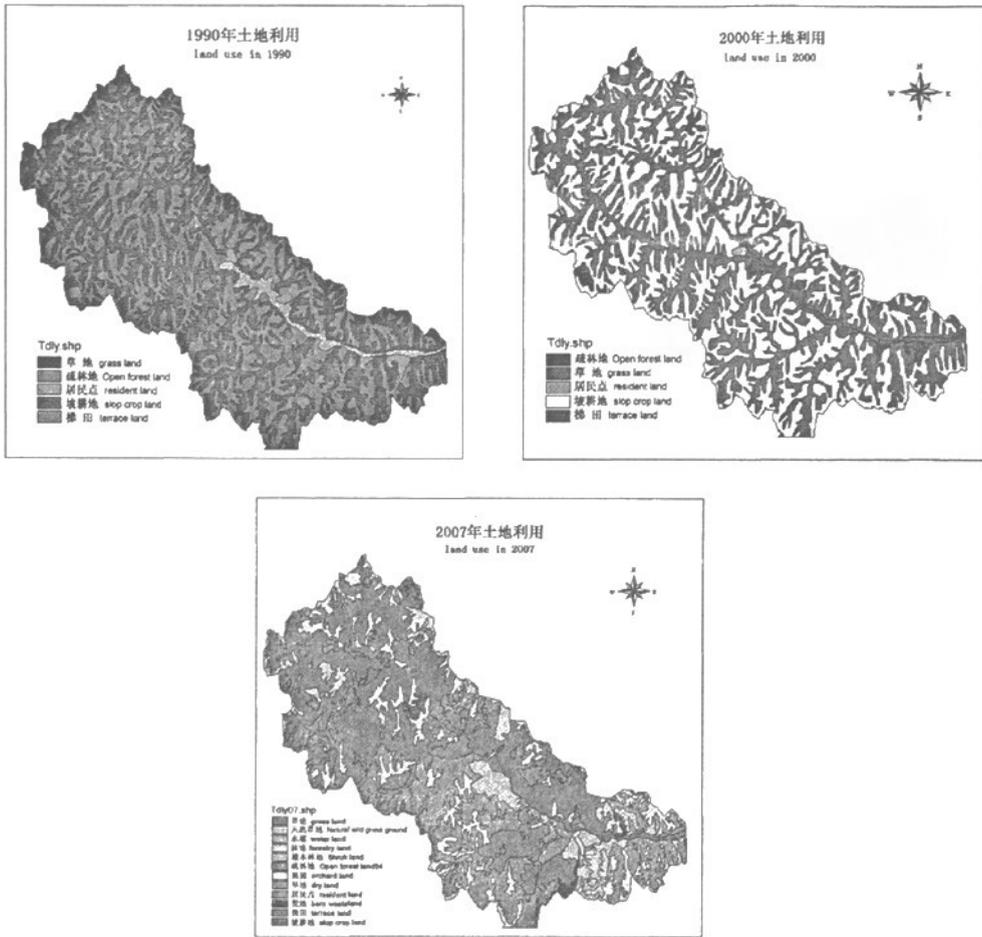


图 2 马家沟流域 3 期土地利用图

Fig.2 The three period land use of Majiagou basin

3.1 年尺度的相应研究

将第一阶段(1981~1990年)作为基准期,第二阶段(1991~2000年)作为变化期,基准期在实际降雨与土地利用状况下(实际情景1)模拟的径流与变化期在实际降雨与土地利用状况下(实际情景2)模拟的径流相比较,二者之间的差值可看作是由降雨变化与土地利用共同作用对径流产生的影响;变化期在实际降雨状况和基准期土地利用状况下(S-a模拟情景)模拟的径流,与实际情景1情形下模拟的径流相比较,二者之间的差值可看作是降雨变化对径流的影响;变化期的实际土地利用状况和基准期的降雨状况下(S-b模拟情景)模拟的径流,与实际情景1情形下模拟的径流相比较,二者之间的差值可看作是土地利用对径流的影响。由此,可以计算出气候变化和土地利用变化分别对径流影响的贡献率。20世纪80~90年代马家沟流域降雨和土地利

用对年径流影响的贡献率见表1。

从不同情形模拟的结果可以看出:实际情景1下模拟的径流量为43.24mm,实际情景2下模拟的径流量为50.33mm,二者相差7.09mm,说明相对基准期,变化期的径流量增加了7.09mm。

模拟情景S-a下模拟的径流量为49.21,与实际情景1下模拟的径流量相比,变化了5.97mm,说明降雨变化使得年均径流增加了5.97mm,占径流变化总量(7.09)的84.20%,即降雨变化对径流影响的贡献率为84.20%。

模拟情景S-b下模拟的径流量为45.27mm,与实际情景1下模拟的径流量相比,径流量变化了2.03mm,说明因为土地利用变化的作用,使得年径流增加了2.03mm,占径流变化总量(7.09mm)的28.63%,即土地利用变化对径流影响的贡献率为28.63%。降雨对径流的贡献率和土地利用对径流

的贡献率之和不等于 100%，其原因可能在于模型下降或流域内水土保持工程措施的实施造成的。误差或其他条件如林草地等土地利用类型的质量

表 1 1980~1990 年降雨与土地利用对流域年径流量影响的贡献

Table 1 The contribution of rainfall and land use to the variation of annual runoff in 1980~1990

项目 Item	实际情景 1 Real scene 1	模拟情景 Simulation scene (S-a)	模拟情景 Simulation scene (S-b)	实际情景 2 Real scene 2
降雨 Rainfall	80 年代	90 年代	80 年代	90 年代
土地利用/覆被变化 Land use/cover change	80 年代	80 年代	90 年代	90 年代
径流量变化(mm) Change of runoff	43.24	49.21	45.27	50.33
径流量变化量(mm) Change of runoff amount	—	+ 5.97	+ 2.03	+ 7.09
变化百分比(%) Percent of change	—	+ 84.20	+ 28.63	—

3.2 月尺度的响应研究

图 3 为 1980~1990 年降雨与 LUCC 共同作用对月径流量的影响,由图可以看出,在降雨和土地利用共同作用下,不论 80 年代还是 90 年代,5~9 月径流量都是最大的,尤其是降雨量相对较充沛的 7 月份径流量达到了峰值。

模拟情景(s-a)下与实际情景 1 模拟的各月平均径流的比较,揭示了降雨变化对月径流产生的影响。因此,图 4 可以反映 1980~1990 年降雨对月径流量的影响。模拟情景(s-b)下与实际情景 1 模拟的各月平均径流的比较,说明了土地利用对月径流的影响,图 5 可以表达 1980~1990 年土地利用对月径流量的影响。

从图 3 可以看出,马家沟流域雨季 5、6、7、8、9 月份,在 1991~2000 年较 1981~1990 年径流量分别增加了 1.2、1.4、1.4、0.76、1.1 mm;而模拟情景(s-a)与实际情景 1 的径流量分别增加了 0.9、0.9、1.2、0.56、1 mm;模拟情景(s-b)下与实际情景 1 模拟的平均径流增加量分别为 0.2、0.4、0.5、0.26、0.3 mm。以上数据也表明模拟情景(s-a)与实际情景 1 的径流变化量较模拟情景(s-b)与实际情景 1 的径流变化量大得多,尤其在雨季降雨对径流的影响程度和土地利用对径流影响程度的比值最大可以达到 4.5。因此得出,降雨对径流影响较土地利用对径流的影响要大。

因此,可以看出不论在年尺度还是月尺度,土地利用的变化对径流量的贡献率都大于降雨对径流量的贡献率。

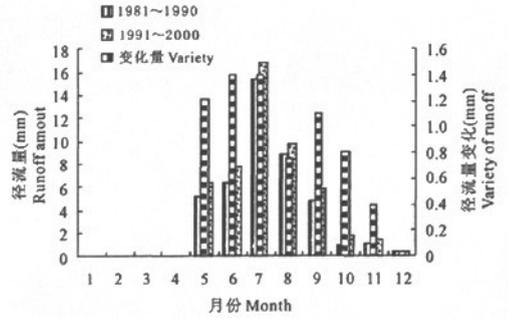


图 3 1980s~1990s 降雨与 LUCC 对月径流量的影响

Fig.3 The effect of precipitation change and LUCC to monthly runoff in 1980s~1990s

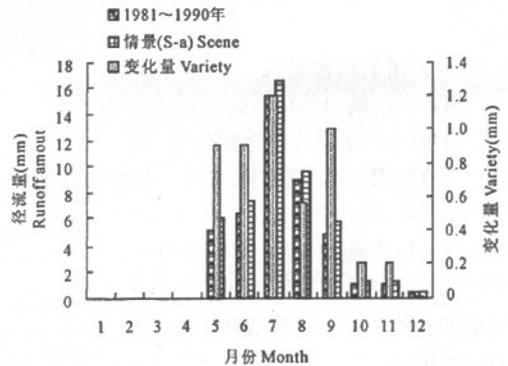


图 4 1980s~1990s 降雨对月径流量的影响

Fig.4 The effect of precipitation change to monthly runoff in 1980s~1990s

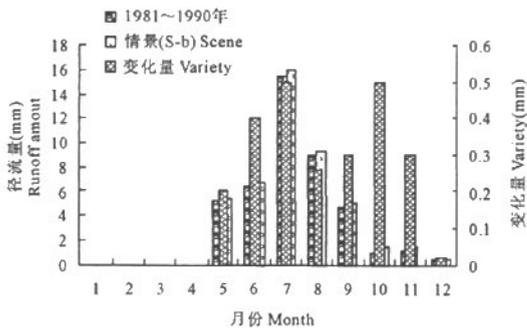


图5 1980s~1990s LUCU对月径流量的影响

Fig.5 The effect of LUCU to monthly runoff in 1980s~1990s

4 土地利用及降雨对径流泥沙的耦合效应

为了进一步分析土地利用及降雨对径流泥沙的耦合效应,本研究以马家沟流域为研究对象,分析其在1981~2007年森林植被面积比例与年降水、径流模数的关系,可建立流域年降水量、森林植被覆盖率和年径流模数的回归关系。

$$W = 984e^{0.002P-0.121L} \quad R^2 = 0.910$$

式中: W 为流域年径流模数 [$m^3/(km^2 \cdot a)$]; P 为流域年降水量(mm); L 为森林植被覆盖率(%)。

由此可见,流域年径流量随着流域年降水量的增加而增加,随着流域森林植被覆盖率的增加而减少。

径流既是产生土壤侵蚀的主要动力,也是输送泥沙的主要载体^[12]。综合前面分析可知,流域径流是一个受降雨、植被等因素影响的过程,因此,侵蚀产沙也受森林植被及降雨影响。径流作为挟沙的主要动力,降水量增多,不同土地利用的降雨—产流差异增大,产沙、输沙差异随之增大,反之亦然。为了分析森林植被和降水对流域产沙的影响。本研究进而分析了马家沟流域在1981~2007年森林植被面积比例与年降水、输沙模数的关系,可建立流域年降水量、森林植被覆盖率和年输沙模数的回归关系。

$$W = 34.25e^{0.004P-0.091L} \quad R^2 = 0.870$$

式中: W 为流域年径流模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]; P 为流域年降水量(mm); L 为森林植被覆盖率(%)。

由上式可以看出,尽管流域所得到的降雨、森林覆盖率和年径流模数的模型和降雨、森林覆盖率和年输沙模数并不完全相同,但流域年降水量和流域森林植被盖度均与流域径流模数或输沙模数呈指数关系的结论是一致的,流域年径流量和泥沙量随着流域年降水量的增加而增加,随着流域森林植被覆

盖率的增加而减少。上述模型又可简化为下式:

$$M = ae^{bP-cl}$$

式中: M 为径流模数 [$m^3/(km^2 \cdot a)$] 或输沙模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]; a 、 b 、 c 为系数。

5 结论

1) 在年尺度上即降雨变化对径流影响的贡献率为84.20%,因为土地利用变化的作用,使得年径流增加了2.03 mm,占径流变化总量(7.09 mm)的28.63%,即土地利用变化对径流影响的贡献率为28.63%。在月尺度上,尤其在雨季降雨对径流的影响程度和土地利用对径流影响程度的比值最大可以达到4.5。因此,不论年尺度还是月尺度降雨对径流的影响均大于土地利用对径流的影响。

2) 尽管流域所得到的降雨、森林覆盖率和年径流模数的模型和降雨、森林覆盖率和年输沙模数并不完全相同,但流域年降水量和流域森林植被盖度均与流域径流模数或输沙模数呈指数关系的结论是一致的,流域年径流量和泥沙量随着流域年降水量的增加而增加,随着流域森林植被覆盖率的增加而减少。上述模型又可简化为下式:

$$M = ae^{bP-cl}$$

式中: M 为径流模数 [$m^3/(km^2 \cdot a)$] 或输沙模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]; a 、 b 、 c 为系数。

参考文献:

- [1] Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, et al. Hydromoo ~ Response to land use changes on the catchment scale[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2001, 26(7/8): 577—582.
- [2] Dagnachew L, Christine V C, Franoise G. Hydrological Response of a Catchment to climate and land use changes in tropical africa: case study south central ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2003, 275(1/2): 67—85.
- [3] 石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 481—487.
- [4] 王礼先, 张志强. 干旱地区森林对流域径流的影响[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 439—444.
- [5] 卫伟, 陈立顶, 傅伯杰, 等. 半干旱黄土丘陵区塬区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3847—3853.
- [6] Anderson H W, Trobitz H K. Influence of some watershed variables on a major flood[J]. Forestry, 1949, 47(5): 347—356.
- [7] Dietch M. Dynamics of a biotic parameters, solute removal and sediment retention in summer-dry headwater 8h' can s of western Oregon [J]. Hydrobiologia, 1998, 379: 1—15.
- [8] 尹婧. 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, 2008.

- [9] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 6—8.
- [10] 袁 艺, 史培军. 土地利用对流域降雨—径流关系的影响—SCS模型在深圳市的应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2001, 31(1): 134—136.
- [11] 彭文英, 张科利, 江忠善, 等. 黄土高原坡耕地退耕还草的水沙变化特征[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 397—402.
- [12] 余新晓, 秦富仓. 流域侵蚀动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

Response of water and sediment to land use in watershed of Losses plateau

LIU Hui-fang, CAO Wen-hong, WANG Xiang-dong, QIN Wen

(*Department of Sedimentation, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100048, China*)

Abstract: Rainfall and land use/covering change are two main affecting factors of runoff and sedimentation in a watershed. The study simulate runoff and sediment by SWAT model. This purpose is to study the response on water and sediment to rainfall and land-use change in watershed of Losses plateau in different time scales. The study estimate the effects of rainfall and land use/covering change to runoff and sediment by fixing one of the two factors and changing another method. In the scale of year that the impacts of rainfall on contribution rate of runoff is 84.20%, land-use impacts on contribution rate of runoff is 28.63%. In the month scale, the contribution of rainfall to the runoff is greater than the contribution of land use to runoff, especially in the rainy season, the largest contribution ratio of rainfall and land use to runoff can be 4.5. The results show that the contribution of rainfall to runoff are far greater than the land use to runoff regardless on the scale of year or the moon. In addition to, The results also show the runoff modulus, or sediment modulus are exponentially related to annual precipitation and forest vegetation cover.

Keywords: Loess area; watershed; rainfall; runoff quantity; sediment quantity; Soil and Water Assessment Tool model