

黄土高原吕二沟流域侵蚀产沙对土地利用变化的响应^{*}

张志强^{1* * *} 王盛萍¹ 孙 阁² 张满良³ 李建劳³

(¹ 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; ² Southern Global Change Program, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, USA; ³ 水利部黄河水利委员会天水水土保持试验站, 天水 741000)

【摘要】 研究了甘肃天水黄土高原吕二沟流域土地利用变化对流域产沙的影响. 结果表明, 与 1982 年相比, 1989 年该流域林草面积增加约 5%, 梯田增加 2.09%, 裸地略有增加, 坡耕地减少约 1.5%, 灌木林略有减少. 1998~ 2000 年, 在植被覆被增加、陡坡坡耕地减少情况下, 随降水增多, 其减沙效应明显, 如 803 mm 和 786 mm 降雨条件下, 后期较前期(1982~ 1989 年)分别减少 85 326 t 和 52 937 t, 降水较少, 减沙效应较不明显; 从年内含沙量变化来看, 后期土地利用的减沙效应主要集中在 5~ 10 月, 与降水的季节分配一致, 各月降水越多, 月日均含沙量减少越多, 50 mm 的月降水月日均含沙量减少 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 100 mm 月降水月日均含沙量减少 $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 两期土地利用在重现期小于 5 年时, 后期土地利用洪水含沙量较前期稍大, 主要由于两期的降水频率分布曲线不一致; 若两期降水频率分布曲线一致, 则同一频率降水产洪的洪水含沙量后期将小于前期.

关键词 土地利用变化 产沙变化 黄土高原

文章编号 1001- 9332(2005)09- 1607- 06 中图分类号 S154.1 文献标识码 A

Response of sediment production to land use change in Luergou watershed of Loess Plateau. ZHANG Zhiqiang¹, WANG Shengping¹, SUN Ge², ZHANG Manliang³, LI Jianlao³ (¹ Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Education Ministry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ² Southern Global Change Program, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, USA; ³ Tianshui Soil and Water Conservation Experimental Station, Yellow River Water Resources Commission of Water Resources Ministry, Tianshui 741000, China). - Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(9): 1607~ 1612.

The study on the effects of different land use patterns on the sediment production in Luergou watershed of Loess Plateau indicated that in comparing with 1982, the areas of forest and grass and of terrace in 1989 increased by 5% and 2.09%, respectively, while that of slope plowland decreased by 1.5%, with the area of naked land and shrubbery respectively increased and decreased a little. During 1998~ 2000, with the increase of vegetation cover and the decrease of steep slope plow land, the sediment production reduced significantly under high precipitation, 85 326 and 52 937 t under the precipitation of 803 and 786 mm, respectively, and not distinguishable in dry years. The reduction effect had a strong seasonality, which consisted with rainfall distribution. For example, in a month with 50 mm precipitation, the mean daily sediment concentration was reduced by $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, while in a month with 100 mm precipitation, the reduction was $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Rainfall intensity also played an important role in soil erosion and sediment production, regardless of land use conditions.

Key words Land use change, Sediment production, Loess Plateau.

1 引 言

土壤侵蚀引起的土地退化和其他环境问题是目前各国研究的重要领域之一. 在影响土壤侵蚀和流域产沙的诸多因素(如气候、土壤、地形、植被、人为因素等)中,土地利用变化是十分重要的方面. 因此,土壤侵蚀和泥沙输移在坡面与流域尺度上对土地利用/地表覆盖变化的响应是水文学、土壤学、农学、地理学家共同关注的研究课题,合理的土地利用/土地覆被可以有效地减少流域土壤侵蚀和产沙^[5, 10, 13, 19]. 目前,有关侵蚀的研究多集中于坡面

尺度,流域尺度的研究多借助于各种模型进行情景模拟. 这需要提供足够的资料及参数,以保证模型的有效性. 由于土地覆被资料费时费力以及难以定量表达,因此,植被变化与流域侵蚀产沙关系的研究仍是流域土壤侵蚀产沙研究的薄弱环节^[13]. 高强度集中降雨,土壤疏松,加之土地利用不合理,导致我国黄土高原高地区水土流失十分严重. 本研究以位于黄土高原的甘肃省天水市吕二沟流域为例,通过回

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111502).

* * 通讯联系人.

2005- 04- 08 收稿, 2005- 05- 24 接受.

归模型展延不同时期的资料数据,比较分析了不同土地利用/土地覆被对流域产沙的影响,旨在以简便有效的方法探讨土地利用/土地覆被变化与流域侵蚀产沙的关系,为今后的流域土地利用规划、管理以及生态环境建设提供依据.

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

实验流域位于甘肃省天水市南郊(105°43'E, 34°34'N),是渭河支流藉河右岸的一级支沟.流域地势南高北低,相对高差 532 m,流域面积 12.01 km²,其中坡面占 80.7%,大部分在 5°~20°左右,沟壑 2.33 km²,占 19.3%.流域内沟壑纵横,沟壑密度 3.8 km·km⁻²,溯源侵蚀严重,地质结构属陇西盆地东边缘地带,上游系白垩纪红色沙砾层,下游显现甘肃系红层及局部漂白层,岩石多为红色沙砾岩,分水梁黄土地覆盖,低山坡脚为青土与红土露头,土层薄厚不等,色调不一,在土壤侵蚀类型上可作为黄土丘陵沟壑区第三副区的典型代表.流域年平均降水 574.1 mm,年际变幅大,年内分布不均,5~10 月份降水量占全年降水量的 83.3%,年均径流模数 30 260 m³·km⁻²,年均侵蚀模数 2 577.4 t·km⁻².流域上游农田较少,植被较好;下游覆盖度较差,主要农作物有小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、洋芋(*Solanum tuberosum*)等,无原生林木,现人工林多为中龄林,主要林分为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等.此外,分布有山杏(*Prunus armeniaca*)、核桃(*Juglans regia*)等经济林;野生草本植物主要有白草(*Pennisetum flaccidum*)、鹅冠草(*Roegneria kanoji*)、碱草(*Elymus dahuricus*)、蒿类(*Pedicularis*)等,因过度放牧生长不良.

2.2 研究方法

2.2.1 数据采集与处理 数据来源于黄河水利委员会甘肃天水水土保持试验站.分别在流域内上、中、下游布设降雨观测站,流域出口设径流、泥沙观测站.降雨采用 SL1 遥测雨量器观测,一般按两段制观测,5~10 月份按四段制观测;流域沟口为自然断面,因城市修建沟道两岸形成较高河堤,断面呈梯形,中小水时采用浮标法测速,浮标系数采用 0.85,测杆测量水深,皮尺测量岸边距.中大水时采用浮标法测速,标系数采用 0.65,并记水位,根据洪前所测断面图确定洪水水深和岸边距.每天 8:00 和 20:00 观测 2 次,洪水期视水情增加测次,每天 5~10 次.流量计算见公式(1).流经流域测站水流紊动扩散作用强,悬移质含沙量一般呈均匀分布,因此泥沙观测采用水边一点法取样,每天取样次数与测流次数基本相同,采用置换法获取含沙量,经推导得到式(2),观测时距相等时,逐日平均流量及逐日平均含沙量采用算术平均法计算,观测时距不等或部分时段内河干时采用面积包围法计算.

$$Q = a \times F \times V \quad (1)$$

式中, Q 为流量(m³·s⁻¹); V 为流速(m·s⁻¹); F 为过流断面面积(m²); a 为浮标系数.

$$W_s = \frac{r_s}{r_s - r_w} (W_{ws} - W_2) \quad (2)$$

取 $r_s = 2.65$, $r_w = 1.0$, 得到

$$W_s = 1.6 \times (W_{ws} - W_2) \quad (3)$$

$$S = \frac{W_s}{V} \times 1000 \quad (4)$$

式中, W_{ws} 为取样瓶及浑水重(g); W_2 为与样品同体积的清水重及瓶重(g); W_s 为净沙重(g); r_s 、 r_w 分别为沙和水的容重; V 为样品体积(ml), S 为含沙量(kg·m⁻³).

2.2.2 土地利用分类标准 该流域 20 世纪 80 年代以前修建了大量水土保持工程,80 年代以后开展了水文泥沙气候观测.1989 年与 2000 年相比流域土地利用未发生明显变化,因此,以 1982 年和 1989 年两期土地利用资料为依据分为两个时段进行分析,即 1982~1988 为前期,1989~2000 为后期.由于两期土地利用分类稍有出入,采用统一分类标准重新划分:有林地、草地、果园、灌木林、疏林地、裸地、坡耕地、居民占地和梯田.

3 结果与分析

3.1 吕二沟流域土地利用变化

表 1 对比了吕二沟流域两期土地利用变化:后期土地利用植被覆被面积较前期有所增加,有林地、疏林地、草地和果园分别增加了 0.96%、1.9%、0.4% 和 0.4%,其中有林地增加的百分比较小,但其所占流域面积比例较大;流域内坡耕地及梯田均占流域较大面积,后期较前期坡耕地减少 1.52%,而梯田增加了 2.09%;灌木林具有较强的水土保持效益,虽然后期较前期有所减少,但其所占面积较小,对流域侵蚀产沙的影响作用较小.流域侵蚀产沙不仅与植被覆被密切相关,还受坡度的影响,而土地利用变化既指植被覆被的变化,也是土地格局的变化,缓坡裸地面积的增加对侵蚀产沙的影响与陡坡裸地明显不同,因此,进一步比较两期土地利用各级坡度的裸地、坡耕地面积变化(图 1):前、后两期土地利用的裸地、坡耕地占流域面积分别达 23.65% 和 22.24%,而图中两期土地利用的裸地、坡耕地几乎均位于黄土高原面蚀与沟蚀的临界侵蚀坡度 5°^[24] 以上,其中 25° 以上的裸地、坡耕地占流域面积分别为 3.41% 和 3.54%,与灌木林、果园等地类相比,其面积比例仍不容忽视,流域内土壤侵蚀以细沟侵蚀、浅沟以及切沟侵蚀为主.比较两期土地利用,后期较前期裸地、坡耕地减少 6%,且主要集中在坡度 15°~25° 的区域内,有助于减小流域产沙.表中居民占地实际包括村庄、厂矿占地,以及非农业生产用地,土地利用后期厂矿用地及非农业生产用地有所减少,因此居民占地面积比例减少.

表 1 吕二沟流域两期土地利用对比
Table 1 Comparison of land use between two periods in Luergou watershed(total area: 12. 01 km²)

土地利用 Land use period	灌木林 Shrub	果园 Orchard	草地 Grassland	裸土地 Bare soil	居民占地 Habitation occupation	坡耕地 Sloping farmland	疏林地 Sparse wood	梯田 Terrace	有林地 Forested land
1982~ 1988	面积 Area(km ²)	0. 200	0. 174	2. 921	0. 029	1. 096	2. 811	0. 329	1. 572
	占流域 Percent of area(%)	1. 66	1. 45	24. 32	0. 24	9. 12	23. 41	2. 74	13. 09
1989~ 2000	面积 Area(km ²)	0. 126	0. 222	3. 405	0. 042	0. 212	2. 629	0. 557	1. 823
	占流域 Percent of area(%)	1. 05	1. 85	28. 35	0. 35	1. 77	21. 89	4. 64	15. 18
	变化 Change(%)	- 0. 61	+ 0. 40	+ 4. 03	+ 0. 11	- 7. 35	- 1. 52	+ 1. 90	+ 2. 09
								+ 0. 96	

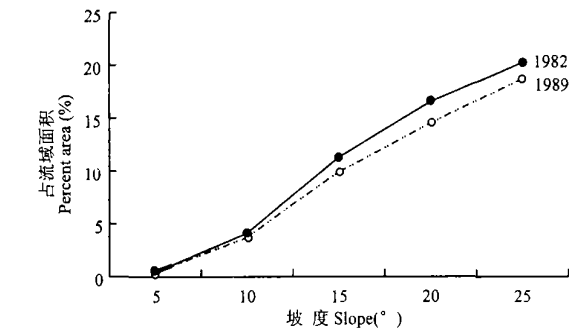


图 1 吕二沟流域两期土地利用各级坡度裸地、坡耕地累积面积比
Fig. 1 Cumulative percent area of bare soil together with sloping farmland

3. 2 土地利用变化对流域年产沙量的影响

建立年产沙量与年降水、年径流的回归方程可揭示 1982~ 1988、1989~ 2000 年前后两期土地利用的降水、产流和产沙规律,但由此产生的回归模型未达显著水平,因此改用逐步回归分别建立回归方程.

1982 ~ 1988: $S_1 = - 8502. 351 + 1346. 455 Q_1$
($R^2 = 0. 694, n = 7$) (5)

1989 ~ 2000: $S_2 = 2568. 224 + 633. 884 Q_2$
($R^2 = 0. 767, n = 12$) (6)

式中, S_1 、 S_2 为年输沙量(t); Q_1 、 Q_2 为年径流量(mm); n 为样本数.

关于流域产沙、输沙的研究,多数学者以径流为主要预测因子^[6, 20, 21]. Fitzgerald^[2]认为,在多元回归模型中,降水可作为一个潜在的预测因子; Lemke^[12]等曾以降水为预测因子之一研究流域产沙、输沙. 本研究回归模型仅包括径流预测因子. 由于植被等地表物质的作用,降水将通过地表径流间接影响流域产沙. 与农业流域相比,当流域植被覆盖增加时,降水对流域产沙的影响将由直接影响转为以间接影响为主,因此可能得到仅有径流预测因子的回归模型. 模型本身不仅体现了径流对产沙的影响,还间接地反映了降水对产沙的影响.

由于本研究基于单个流域不同土地利用时期的水文资料,因此必须剔除降水的影响才能分析土地利用变化对流域产沙的影响. 根据式(5)、(6) 分别计算 1982~ 2000 年各年降水-径流条件下的产沙量,得到相同降雨、径流条件下不同土地利用状况的预

测径流. 由图 2 可以看出,在相同降水-径流条件下,当降水较多时,后期植被覆盖度较多,裸地、坡耕地减少,其土地利用较前期产沙量显著减小;当平水年或降水较少时,同一降水-径流条件下后期土地利用较前期年产沙量减少较小或有所增加. 有学者认为,降雨量增大弱化了下垫面条件对降雨-产沙关系的影响^[5, 27],而部分研究^[17]则认为退耕还林还草在多雨和暴雨多年份减沙减水效应最强,与本研究结论相似. 经初步分析得到流域随着降水增多,土地利用/植被变化对降水产流的影响作用增强. 径流作为水流挟沙的主要动力,降水量较多,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. 可见黄土高原地区植被覆盖率增加、坡耕地减少在一定程度上可以减少小流域产沙、输沙,但其作用程度取决于降水量的大小,降水量越多,其减沙效应越明显;降水量越少,则土地利用变化对产沙的影响越小.

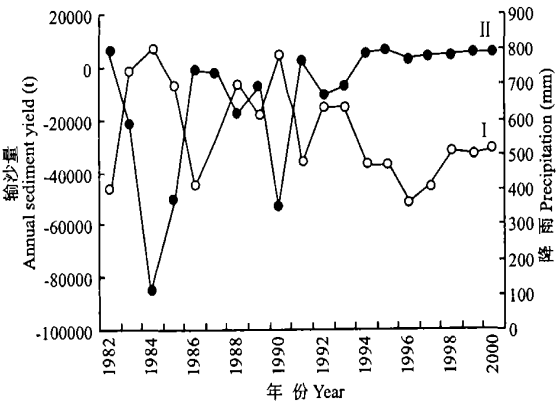


图 2 降雨(I)与流域输沙量(II)年变化
Fig. 2 Variation of annual sediment yield change(II) and precipitation over time(I).

3. 3 土地利用变化对流域产沙季节性变化的影响

为避免极值影响,以月日均含沙量为对象探讨土地利用变化对流域产沙的季节性影响. 概括两期土地利用的各月降水、径流及含沙量多年平均值,建立三者之间的回归方程:

1982 ~ 1988:
 $S_{c1} = - 1. 116 + 0. 154 \times P_{1m} - 0. 042 \times Q_{1m}$
($R^2 = 0. 981, n = 12$) (7)

1989 ~ 2000:

$$S_{c2} = -0.886 + 0.047 \times P_{2m} + 0.975 \times Q_{2m}$$
$$(R^2 = 0.917, n = 12)$$

式中, S_{c1} 、 S_{c2} 为月日均含沙量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), P_{1m} 、 P_{2m} 为月均降水量(mm), Q_{1m} 、 Q_{2m} 为月均径流量(mm). 为有效地比较不同时期土地利用变化对产沙的季节性影响, 仍根据回归模型计算多年平均各月降水、径流条件下的产沙量, 旨在剔除降水、径流的影响.

由图 3 可见, 后期各月日均含沙量较前期减小. 含沙量并不等同于输沙量, 但含沙量大, 意味着同一流域内单位面积上的土壤流失量较大, 反之亦然. 由于该流域后期土地利用条件的各月产流较前期减少, 因此从月的水平来看, 含沙量减小, 其输沙量也势必减小.

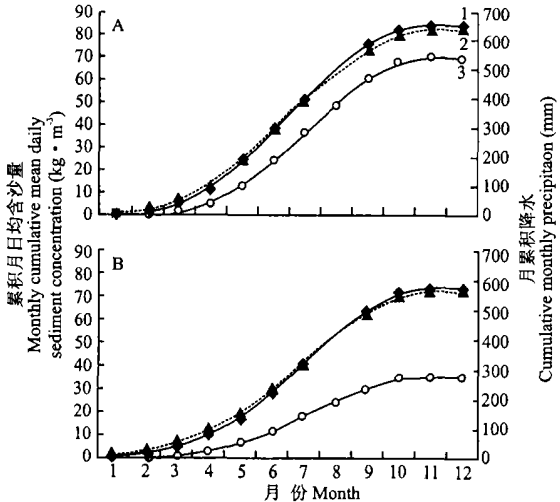


图 3 不同土地利用流域产沙累积比较
Fig. 3 Comparison of sediment yield distribution for different land use. A: 1982~ 1988 年降雨、径流条件 The case of precipitation and runoff for 1982~ 1988; B: 1989~ 2000 年降雨、径流条件 The case for 1989 ~ 2000; 1) 预测 1 Prediction 1; 2) 预测 2 Prediction 2; 3) 降雨量 Precipitation.

此外, 两期土地利用曲线均在 5~ 10 月增长较快, 10 月以后曲线基本平行, 说明流域侵蚀产沙主要集中在 5~ 10 月, 其它各月侵蚀较少或无侵蚀. 很明显, 5~ 10 月降水占全年降水 83.3%, 降水增大, 侵蚀也将增大. 彭文英等^[18] 也认为减流减沙效应在暴雨多的季节效应较强. 图 3 中 A 与 B 的后期土地利用日均含沙量曲线增长速率不同, 主要是由于两期土地利用总体降水不同, 后期较前期丰水年较多, 各月降水也较多, 侵蚀增多, 日均含沙量增大, 曲线上升较快. 根据式 (7)、式 (8) 分别计算了 1982~ 1988、1989~ 2000 年两期土地利用各月的日均含沙量, 并进行比较, 图 4 为后期土地利用较前期日均含沙量变化与各月降水的关系, 虽然部分散点仍远离

趋势, 但整体上月降水越多, 月日均含沙量减少越多, 增加植被覆盖、减少坡耕地的土地利用其减少侵蚀产沙的作用越明显, 如当月降水为 50 mm 时, 日均径流含沙量减少 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 而当月降水达 100 mm 时, 日均径流含沙量减少 $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

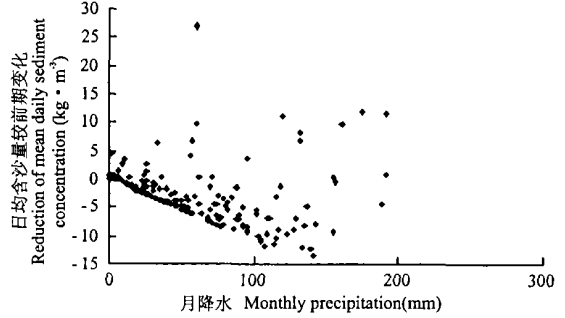


图 4 降水日均含沙量减少散点图
Fig. 4 Relationship between precipitation and reduction of daily sediment concentration relative to the earlier period.

3. 4 土地利用变化对洪水产沙的影响

黄土高原地区降雨产流以超渗产流为主, 土壤侵蚀与产流产沙多发生于短历时、高强度的降雨^[17], 土地利用变化对于小尺度的暴雨产流产沙将具有显著影响. 为此, 采用频率曲线(Duration curve) 首先分析了不同土地利用的降雨、产流, 而后依据各期土地利用洪水时间尺度上的降水-径流-产沙关系探讨土地利用变化对洪水产沙的影响. 图 5 为 Pearson II 计算得到两期土地利用降雨、洪水的频率分布, 其中洪水以平均流量大于 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 进行摘录. 相关分析表明, 洪水平均含沙量与雨强、洪峰流量均存在相关性, 因此, 以雨强、洪峰流量为预测因子, 分别对两期土地利用的洪水平均含沙量进行回归预测.

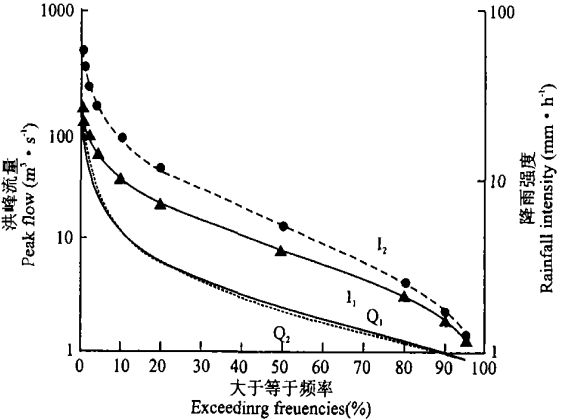


图 5 两期土地利用降水(I)、洪峰流量(Q) 频率分布
Fig. 5 Duration curves of precipitation(I) and peak flow(Q) for two periods.
1) 1982~ 1988; 2) 1989~ 2000. 下同 The same below.

1982 ~ 1988: $S_{cf1} = 46.381 + 1.214I_{h1} + 16.053Q_{p1}$

$$(R^2 = 0.884, n = 27) \tag{9}$$
$$1989 \sim 2000: S_{f2} = 85.945 + 1.901I_{h2} + 7.064Q_{p2}$$
$$(R^2 = 0.684, n = 17) \tag{10}$$

式中, S_{f1} 、 S_{f2} 为洪水平均含沙量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); I_{h1} 、 I_{h2} 为平均雨强 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); Q_{p1} 、 Q_{p2} 为洪峰流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。根据式 (9)、(10) 计算了两期土地利用条件下相同频率降雨、洪水的产沙量 (图 6)。由图 6 可见, 在相同频率的降水及洪水重现期条件下, 当重现期 < 5 年时, 后期土地利用洪水含沙量较前期大; 重现期 > 5 年时, 后期土地利用产沙量较前减小。结合降雨、洪水频率分析, 当降水及洪水频率分布在 20% ~ 100% 范围内 (重现期 ≥ 1.05 年而 < 5 年时, 相同频率下后期土地利用洪峰流量较前期偏小, 但降水强度显著大于前期。洪峰流量与雨强均为回归方程中预测因子, 因此此频率范围段内计算含沙量后期要大于前期。若两期土地利用雨强频率分布一致, 后期洪峰流量较前期减少, 则后期洪水含沙量将较前

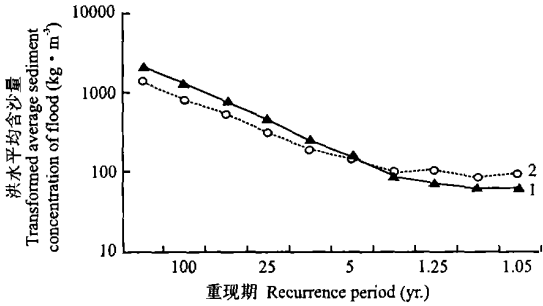


图 6 相同降水频率下两期土地利用洪水产沙量比较
Fig. 6 Comparison of sediment concentration corresponding to the same frequency of precipitation for two land use periods.

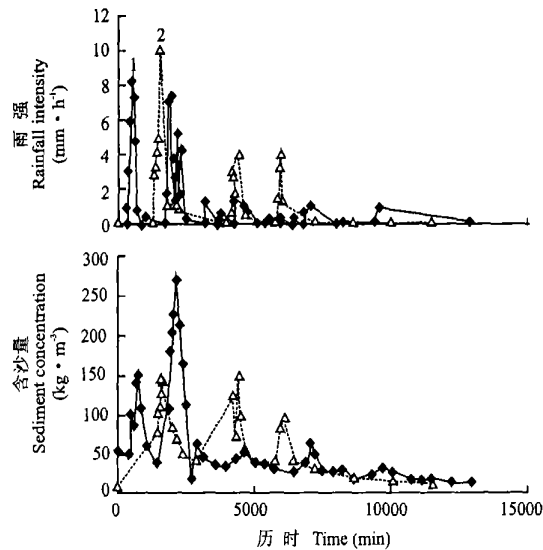


图 7 降水 (a) 和洪水输沙 (b) 过程线比较
Fig. 7 Comparison of precipitation (a) and sediment concentration (b) over time.
1) 1984-06-19; 2) 1990-09-07.

期小。图 7 为降雨过程线及洪水过程线, 平均雨强为 $2.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 按雨量等级划分属于暴雨 ($50.0 \leq I_d \leq 99.9$)。虽然降水过程并不一致, 但比较主雨峰对应的主洪峰, 后期土地利用洪水含沙量相对前期要小。因此认为相同频率下, 若两期土地利用雨强分布一致, 则对于任意重现期的洪水, 后期植被增多、坡耕地减少的土地利用洪水平均含沙量将较前期减小, 在完全相同的降水下, 后期洪水产沙将较前期减小。

4 讨 论

植被增多, 流域产沙减小。研究中后期植被覆盖增加、坡耕地减少的土地利用较前期年产沙量减小, 但其减小的程度取决于年降水量的多少, 丰水年植被增多、坡耕地减少的土地利用变化对流域产沙量的减小影响显著, 如 803 mm、786 mm 的年降雨条件下后期较前期分别减少 85 326 t 和 52 937 t; 而平水年或降水较少年份, 土地利用变化对流域产沙量影响较小, 后期较前期产沙量减小不明显。从年内变化来看, 流域产沙主要集中在 5~10 月份, 与降水的季节分布一致。有降水, 且有一定挟沙能力的水流即可发生侵蚀, 研究结果中, 月降水量为 50 mm 时, 月日均含沙量后期较前期减少 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 而月降水量为 100 mm 时, 月日均含沙量后期较前期减少 $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。两期土地利用当洪水重现期 < 5 年时, 洪水平均含沙量后期较前期大。结合各期的降雨、洪水频率分布曲线分析, 若两期土地利用具有相同频率分布的雨强, 则任一重现期内后期土地利用的洪水平均含沙量也将小于前期。

有研究曾提出极限含沙量的理论^[24, 25], 认为黄土丘陵沟壑区土层深厚, 只要产流且水流具有一定挟沙能力就能获得足够的泥沙补给而达到其极限含沙量, 与该研究中提出的极限含沙量相比, 其毛沟、干沟、支沟极限含沙量分别高达 920、1 160 和 1 290 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 而本研究得到多年平均各月日均值, 最大值 $38.54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 二者相比显然很小, 并不否认后期植被增多、坡耕地减少的土地利用变化的显著减沙效应, 但若以极限含沙量为前提, 某种意义上仍存在很强的土壤侵蚀的必然性。结合流域土地利用情况, 流域内仍存在很大面积比例的坡耕地, 约占 20%, 而林草面积虽然后期较前期有所增加, 但后期较前期林、草面积也仅增加 5% 左右; 灌木林占流域面积较少, 且后期较前期减小。因此, 流域必须减少坡耕地, 增加林草面积, 并考虑受降水因素影响, 以

进一步发挥合理的土地利用的减沙效应.

参考文献

- Carroll C, Merton L, Burger P. 2000. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil material on central Queensland Coal Mines. *J Soil Res*, **38**: 313~ 327
- Fitzgerald MG, Karlinger MR. 1983. Daily water and sediment discharges from selected rivers of the Eastern United States: A time series Modeling Approach. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2216. Reston, VA.
- Gao J X (高军侠), Dang H B (党宏斌), Liu Z X (刘作新), et al. 2004. Research of soil and water loss law in uncovered sloping field of Loess Plateau. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **23**(3): 138~ 140 (in Chinese)
- Grace JM. 2004. Soil erosion following forest operations in the Southern Piedmont of central Alabama. *J Soil Water Cons*, **59**(4): 160~ 166
- Hao F H (郝芳华), Chen L Q (陈利群), Liu G M (刘昌明). 2004. Impact of land use change on runoff and sediment yield. *J Soil Water Cons* (水土保持学报), **18**(3): 5~ 8 (in Chinese)
- Harned D, Meyer D. 1983. Water quality of North Carolina streams. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2185-E. Raleigh NC.
- Huang MB, Zhang L, Gallichand J. 2003. Runoff responses to afforestation in a watershed of the Loess Plateau, China. *Hydrol Processes*, **17**: 2599~ 2609
- Kosmas C, Danalatos N, Cammeraat LH, et al. 1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*, **29**: 45~ 59
- Kumar K, Deep P, Panda YS, et al. 2002. Runoff and soil loss from steep slopes treated with low cost bioengineering measures. *Environmentalist*, **22**: 133~ 141
- Kusumandari A, Mitchell B. 1997. Soil erosion and sediment yield in forest agroforestry areas in West Java, Indonesia. *J Soil Water Cons*, **52**(5): 376~ 380
- Laffin JM, Flanagan DC, Engel BA. 2004. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP1. *J Amer Water Resour Assoc*, **40**(2): 289~ 297
- Lemke KA. 1991. Transfer function models of suspended sediment concentration. *Water Resour Res*, **27**(3): 293~ 305
- Lu J F (卢金发), Huang X H (黄秀华). 2003. Effect of land cover on sediment yield in the middle Yellow River basin. *Geol Res*, **22**(5): 571~ 578 (in Chinese)
- Mabi L, Bernard C, Laverdi MR, et al. 1999. Assessment of soil erosion in a small agricultural basin of the St. Lawrence River watershed. *Hydrobiologia*, **410**: 263~ 268
- Ming-Ko Woo, Fang GX, Diczko PD. 1997. The role of vegetation in the retardation of rill erosion. *Catena*, **29**: 145~ 159
- Ni JR, Li Y K. 2003. Approach to soil erosion assessment in terms of land use structure changes. *J Soil Water Cons*, **58**(3): 158~ 169
- Peng W-Y (彭文英), Zhang K-L (张科利), Jiang Z-S (江忠善), et al. 2002. Runoff and sediment change characteristics after returning crop land to grass on the Loess Plateau. *Sci Geogr Sin* (地理科学), **22**(4): 397~ 402 (in Chinese)
- Peng W-Y (彭文英), Zhang K-L (张科利). 2002. Relationship of runoff and sediment with rainfall characteristics in different land use. *Bull Soil Water Cons* (水土保持通报), **21**(4): 25~ 29 (in Chinese)
- Sanchez LA, Ataroff M, Lopez R. 2002. Soil erosion under different vegetation covers in the Venezuelan Andes. *Environmentalist*, **22**: 161~ 172
- Sharma TC, Dickerson WT. 1980. System model of daily sediment yield. *Water Resour Res*, **16**(3): 501~ 506
- Simmons CE. 1988. Sediment characteristics of North Carolina streams, 1970~ 1979. U. S. Geological Survey Open File Report 87~ 701. Raleigh NC.
- Verstraeten G, Van Rompaey A, Poesen J. 2003. Evaluating the impact of watershed management scenarios on changes in sediment delivery to rivers? *Hydrobiologia*, **494**: 153~ 158
- Walling DE. 1999. Linking land use, erosion and sediment yield in river basins. *Hydrobiologia*, **410**: 223~ 240
- Wang X-K (王兴奎), Qian N (钱宁), Hu W-D (胡维德). 1982. The formation and process of confluence of the flow at hyperconcentration in the gullied hilly loess areas of the Yellow River Basin. *J Hydr Eng* (水利学报), (7): 26~ 35 (in Chinese)
- Wang X-K (王兴奎), Xu S-T (徐世涛), Li D-X (李丹勋). 2001. Characteristics of runoff and sediment yield in gullied hilly loess areas and soil conservation measures. *J Tsinghua Univ* (Sci & Tech) (清华大学学报·自然科学版), **41**(8): 107~ 109 (in Chinese)
- Wei T-X (魏天兴). 2002. Sediment source and effects of vegetation on erosion control in the gully hilly loess area in north China. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), **24**(5/6): 19~ 24 (in Chinese)
- Yuan Y (袁艺), Shi P-J (史培军). 2001. Effect to land use on the rainfall runoff relationship in a basin—SCS model applied in Shenzhen city. *J Beijing Normal Univ* (Nat Sci) (北京师范大学学报·自然科学版), **31**(1): 131~ 136 (in Chinese)
- Zhang Y (张翼). 2000. A study on soil erosion in Loess Hilly-gully Region. *Res Soil Water Cons* (水土保持研究), **7**(2): 39~ 47 (in Chinese)
- Zuazo VHD, Martinez JRF, Raya AM. 2004. Impact of vegetation cover on runoff and soil erosion at hillslope scale in Lanjaron, Spain. *Environmentalist*, **24**: 39~ 48

作者简介 张志强,男,1967年生,博士,副教授.主要从事生态水文、侵蚀控制与流域管理研究,发表论文40余篇. Tel: 010-62338097; E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn