

黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/ 土地覆被变化水文动态响应

张晓明¹, 余新晓^{1,*}, 武思宏¹, 张满良², 李建劳²

(1. 水土保持与荒漠化教育部重点实验室, 北京林业大学, 北京 100083 2. 水利部黄河水利委员会天水水土保持实验站, 天水 741000)

摘要 :以黄土高原第三副区桥子东、西沟流域为例,分析了土地利用/土地覆被变化的水文动态响应。研究结果表明:土地利用/土地覆被对年径流有显著影响,治理流域较未治理流域在丰水年、平水年和枯水年的径流系数分别减少约 50%、85% 和 90%;流域土地利用后期(1995~2004 年)较前期(1986~1994 年)多年平均径流系数下降 73.6%,且随降雨增多,土地利用与植被变化对径流的响应增强。土地利用/土地覆被变化对径流量的影响具有季节性特征,治理与非治理流域多年平均最大月径流系数减少时期与流域最大地表覆盖期具有一致性,即 5 月份径流系数减少值最大,同一降水条件下流域两期土地利用的产流量仅在生长季具有明显的差异。流域洪水径流量与场降雨量和 30 min 最大雨强有较好的相关关系,场降雨量与 30min 雨强对治理流域洪水流量的影响要强于非治理流域,暴雨在达到一定强度后,对比流域的洪峰流量差异减小,即森林植被对洪水的影响减弱。经洪水频率分析,认为流域前后两期土地利用若具有相同频率的降雨强度,则一定频率范围内洪峰流量对土地利用与植被变化产生明显响应。

关键词 :土地利用/土地覆被,水文动态,黄土丘陵沟壑区

文章编号 :1000-0933 (2007)02-0414-10 中图分类号 :P941.74,Q149,S157,X171 文献标识码 :A

Response of land use/land cover change to hydrological dynamics in typical watershed in Loess gullied-hilly region of China

ZHANG Xiao-Ming¹, YU Xin-Xiao^{1,*}, WU Si-Hong¹, ZHANG Man-Liang², LI Jian-Lao²

1 Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forest University, Beijing 100083, China

2 Tianshui Soil and Water Conservation Experiment Station, the Yellow River Water Conservancy Committee, Ministry of Water Resources, Tianshui, Gansu Province, 741000, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (2) 0414 ~ 0423.

Abstract :Qiaozidong watershed and Qiaozixi watershed in third sub-region of Loess Plateau were selected as the case to investigate the effects of landuse/landcover change on hydrological dynamics at watershed scale. The results showed that the impact of land use/land cover on annual runoff yield was significant. The runoff coefficient of controlled watershed reduced about 50%, 85% and 90% respectively in wet, normal and dry year in comparison with the runoff coefficient of uncontrolled watershed. The average runoff coefficient reduced 73.6% during the period of 1995—2004 compared to that in the previous period of 1986—1994 for land use in controlled watershed. And the impact of land use and vegetation changes on runoff strengthened in response to the increasing rainfall. In addition, the impacts of land use/land cover on

基金项目 :国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB111502)

收稿日期 :2006-06-21;修订日期 :2006-11-29

作者简介 :张晓明 (1979~) 男,山西偏关人,博士,主要从事水土保持研究. E-mail :zxmwq@126.com

* 通讯作者 Corresponding author.

Foundation item :This work was financially supported by National Key Basic Research Special Funding Project of China (No. 2002CB111502)

Received date 2006-06-21; **Accepted date** 2006-11-29

Biography ZHANG Xiao-Ming, Ph. D., mainly engaged in soil and water conservation. E-mail :zxmwq@126.com

runoff yield are characterized by seasonal fluctuation. The maximum monthly runoff reduction in both controlled watershed and uncontrolled watershed occurred in May ,when was consistent with the period of the maximum land coverage appeared. And only in growing season obvious runoff yield difference was observed between the two land-use periods of controlled Qiaozidong watershed. Finally , the rainfall amount and rainfall intensity in 30min had significant correlation with flood volume , and had greater impacts on flood volume in uncontrolled watershed than that in controlled watershed. When the rainfall intensity reached a certain threshold ,the variance of flood peak in two paired watershed reduced ,which showed that the effects of forest on flood weakened. At the same time ,flood peak discharge frequencies indicated that peak discharge would respond to the land use and vegetation change obviously on condition that there were the same frequencies of rainfall intensity in the earlier and later periods.

Key Words land use / land cover ; hydrological dynamics ; Loess gullied-hilly region

土地利用与覆被变化是陆地生态系统变化的主要表现。土地利用变化的重要环境反应是水文行为的变化,而水文行为变化又会影响环境反应并反作用于土地利用,由此交织形成一个复杂并相互作用的系统。目前,土地利用强度与水资源利用率的关系^[1,2],土地利用变化而引起的沉积物运移规律^[2,3]以及土地利用格局与水文过程响应关系^[4,5]是水文学研究的热点。Bronstert等^[6,7]总结了可能影响地面及近地表水文过程的土地利用变化及与之相关的水文循环要素,其中影响水文过程最显著的土地利用变化是植被变化、农作物耕种和管理实践等。国内也开展了类似研究,基本结论是流域产水量随植被覆被的减少而增大^[8]。

黄土高原是我国生态环境建设的重点地区,黄河流域水资源强度开发与水资源短缺已制约了该流域的可持续发展。关于黄土高原大面积植被重建对流域水资源将会造成的可能影响的研究结果仍不尽一致,有的研究认为林果面积增加、农田草地面积减少使产水量减少^[9],有的研究则认为森林的存在增加了径流量^[10]。形成不同观点的原因主要是由于影响森林植被生态功能的环境异质性的普遍存在,不同自然条件、不同尺度流域森林植被变化导致径流和洪水过程等的时空格局与过程差异较大。本研究以黄土高原桥子东、西沟流域多年降雨径流观测资料,分别分析了不同土地覆被的东、西沟对比流域和东沟不同土地利用时期流域水文动态变化规律,旨在为该区土地利用管理和生态恢复提供依据。

1 研究区概况

桥子沟流域位于甘肃省天水市秦城区北郊(105°43'E,34°34'N),属黄土丘陵沟壑区第三副区,流域地表主要以黄土质黑褐土分布最广,约占流域面积60%,其次为红色黄土质黑褐土型粗骨土,约占流域面积20%。流域面积2.45km²,按地形可分为桥子东、西两条独立的支毛沟。桥子东沟流域面积1.36km²,桥子西沟流域面积1.09km²,主要地理特征见表1。桥子东、西沟两流域自然条件基本相似,其中东沟为治理流域,在流域主要沟坡和部分坡面上有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杨(*Populus davidiana*)、榆(*Ulmus pumila*)、山杏(*Prunus sibirica*)林地和人工草地,流域内修有梯田,西沟为对比试验小流域,无水土保持措施。桥子东西沟野生草本植物主要有白草(*Pennisetum flaccidum*)、鹅冠草(*Roegneria kanoji*)、硷草(*Elymus dahuricus*)、蒿类(*Pedicularis*)等。

表1 桥子东、西沟流域主要地理特征值表
Table 1 The main geography character in Qiaozidong and Qiaozixi

流域名称 Watershed	面积 Area (km ²)	流域形状 Shape	流域长度 Length (km)	平均宽度 Width (km)	形状系数 Shape factor	沟道比降 Channel gradient (%)	相对高差 Relative difference in elevation (m)	沟壑密度 Gully density (km/km ²)
桥子东沟 Qiaozidong	1.36	半扇形 Half-sallop	2.00	0.68	0.34	8.0	377	5.13
桥子西沟 Qiaozixi	1.09	羽状 Fearthing	2.18	0.50	0.23	8.0	377	5.09

本区属于干燥少雨的大陆性气候,多年平均降水量 526.1 mm,降水年际变幅大,年内分配不均,5~10 月份降水量占全年降水量的 83.5%,汛期多以暴雨形式出现,土壤侵蚀严重。经统计,1986~2004 年,桥子东沟年侵蚀模数 2310.4 t/km²,桥子西沟年侵蚀模数 4270.6 t/km²,两流域汛期输沙量占年输沙总量的 98%。图 1 为桥子东西沟流域地形图。

2 研究方法

2.1 数据采集

数据来源于黄河水利委员会甘肃天水水土保持试验站。流域内均匀布设 4 个雨量站(图 1),以泰森三角形面积权重值计算获得降雨量平均值。桥子东沟径流站测流建筑物为三角形测流槽,桥子西沟为梯形测流槽,径流测定在小水时用接流筒按体积法施测,洪水时用率定水位流量关系曲线和浮标法测速计算流量两种方法同步进行,对照检查。

2.2 土地利用变化

自天水水土保持试验站建站以来,桥子东、西沟即作为对比试验流域,其中西沟一直未进行治理,而东沟间断性的实施了水土保持措施。

土地利用数据利用 1985、1995、2004 年 3 期遥感影像处理及人工调查补充、校正获得。桥子西沟土地利用类型自 1985 年至 2004 年保持一致。桥子东沟 1995 年与 2004 年两期的土地利用分类及各类型面积比例相差不大,但与 1985 年的相差较远,因此选择 1985 年和 1995 年两期分析。表 2 为桥子东、西沟 1985 年、1995 年各土地利用类型占流域总面积的比例。

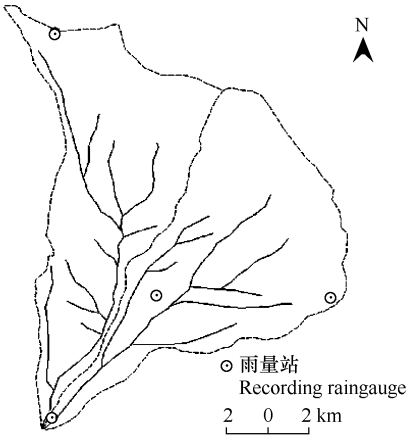


图 1 桥子沟水系图

Fig. 1 The branches distribution of Qiaozigou watershed

表 2 桥子东、西沟流域土地利用类型占流域面积比例(%)

Table 2 Area proportions of different land use types in Qiaozigou

流域名称 Watershed	土地利用类型 Land use type		有林地 Forest	草地 Grasses	梯田 Terrace	坡耕地 Slope farmland	灌木林地 Shrub	疏林地 Sparse forest	果园 Orchard	裸地 Barren	居民用地 Resident land
桥子西沟 Qiaozixi	面积比率 Ratio of area	1985 年	0.9	0.5	2.8	77.5	1.1	0.0	0.6	14.5	2.1
桥子东沟 Qiaozidong	面积比率 Ratio of area	1985 年	14.0	2.4	16.1	54.2	1.5	9.2	1.6	0.8	1.2
		1995 年	18.6	0.6	27.0	18.0	1.3	17.3	15.9	1.2	0.0
	变化率 Variance ratio		4.6	-1.8	10.9	-36.2	-0.2	8.1	14.3	0.4	-1.2
桥子东沟较西沟面 积比率的变化率 Variance ratio of Qiaozidong comparing to Qiaozixi		1985	13.1	1.9	13.3	-23.3	0.4	9.2	1.1	-13.7	-0.9
		1995	17.7	0.2	24.1	-59.4	0.2	17.3	15.4	-13.4	-2.1

从表中可看出,桥子东沟两期土地利用均以有林地、梯田、坡耕地和疏林地为主,前后两期各约占流域面积 80% 以上,其中有林地、梯田和疏林地占流域面积比例后期较前期增加约 5%、11% 和 8%,而坡耕地后期较前期减少了约 36%。果园占流域面积比例后期较前期有大幅增长,增长了约 14%。灌木林地和草地后期较前期有所减少,裸地略有所增加。

比较桥子东沟和桥子西沟土地利用,无论前、后期,东沟的林草地和梯田占流域面积的比例远大于西沟林草地和梯田所占比例。其中东沟 1985、1995 年林草、灌木林地所占流域面积比例分别比桥子西沟的高约

25%、51%。特别东沟 1995 年坡耕地所占流域面积比例比西沟 1985 年坡耕地所占流域面积比例减少近 60% ,且裸地也减少约 13%。

3 结果与分析

3.1 径流年变化

3.1.1 对比试验流域径流年变化

桥子东、西沟流域的土地利用格局存在较大差异 ,东沟两期土地利用的植被覆盖面积比率分别较西沟高约 26% 和 51% ,坡耕地和裸地减少约 37% 和 73%。图 2、图 3 分别为桥子东、西沟流域 1986 ~ 2004 年降雨量和年径流系数随时间的变化曲线。从图可看出 ,两流域径流系数与降雨量的变化趋势一致 ,且 1986 ~ 2004 年 桥子西沟各年径流系数都远大于当年东沟的年径流系数。为揭示不同降雨条件下 ,东沟径流系数较西沟减少的程度 ,对 1986 ~ 2004 年的降水进行频率统计 ,得到降水频率为 10%、50%、90% 的丰、平、枯水年降水量。经研究分析 ,在丰水年 (降雨量大于 630mm) ,前者的径流系数比后者减少约 50% ;平水年 (降雨量 450 ~ 630mm)前者比后者减少约 85% ,枯水年前者比后者减少约 90% ,但实际枯水年东、西沟的产流都极少。

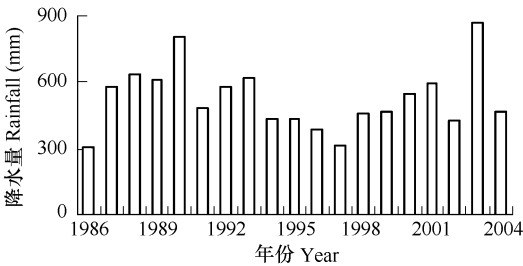


图 2 流域年降水量
Fig. 2 Annual rainfall of research watershed

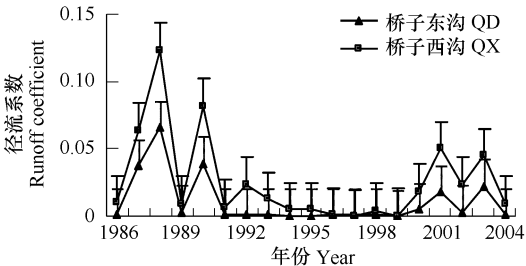


图 3 径流系数变化曲线
Fig. 3 Variation of runoff coefficients over years

3.1.2 流域土地利用变化对年径流的影响

桥子东沟观测年份径流系数波动较大 ,推断主要与各年降水量不同有关 (图 3)。从总体看径流系数呈下降趋势 :1986 ~ 1994 年年平均径流系数为 (0.019 ± 0.019) ,而 1995 ~ 2004 年仅为 0.005 ,多年平均径流系数后期较前期减少 73.6%。为了进一步揭示平水年、丰水年和枯水年土地利用变化对流域产流是否有一致的影响 ,对观测年份 1986 ~ 1994 年、1995 ~ 2004 年的降水分别进行频率统计 ,得到降水频率为 10%、50%、90% 的丰、平、枯水年降水量 ,分别对东沟两期土地利用丰、平、枯水年进行统计 ,结果如表 3 所示。从表中可以看出 ,在观测年限内无论丰、枯或平水年 ,尽管两期土地利用期间降雨有所差异 ,但在降雨量变幅较小的情况下 ,后期土地利用各种降雨年份产流量均有较大幅度的减少。因此 ,认为后期植被条件较好的土地利用较前期产流能力有所下降。

表 3 桥子东沟不同土地利用各降水年份平均降雨、产流比较 (mm)

	枯水年 Dry year		平水年 Normal year		丰水年 Wet year	
	平均降水	平均径流深	平均降水	平均径流深	平均降水	平均径流深
	Average rainfall	Average runoff	Average rainfall	Average runoff	Average rainfall	Average runoff
1986 ~ 1994	369.5 (n = 2)	0.15	561.7 (n = 4)	6.1	687.0 (n = 3)	24.6
1995 ~ 2005	350.2 (n = 2)	0.04	557.9 (n = 6)	0.9	729.6 (n = 2)	14.8
变化率						
Variance	-5.2	-73.3	-6.8	-85.2	6.2	-39.8
ration (%)						

图 4 为两期土地利用的降雨-径流关系图 ,采用线性回归分析得到如图所示的拟合曲线。拟合 1986 ~

1994 年降雨-径流关系数据得到式 (1),拟合 1995 ~ 2004 降雨-径流关系数据得到式 (2)。

$$Y_1 = 3 \times 10^{-17} \cdot X_1^{6.1667} \quad (R^2 = 0.657) \quad (1)$$

$$Y_2 = 8 \times 10^{-21} \cdot X_2^{7.358} \quad (R^2 = 0.668) \quad (2)$$

式中 X_1 、 X_2 为年均降雨量 (mm), Y_1 、 Y_2 为年均径流深 (mm)。

从图 4 可以看出桥子东沟土地利用后期总体较前期径流产沙量减少,即林地面积较多、植被条件较好的土地利用较植被条件较差的土地利用年产流量减少。表 4 为根据回归方程计算得到的同一降水条件下的不同径流产沙量。其中第 3 列为根据式 (1) 得到的预测值,第 4 列为根据式 (2) 得到的预测值。表中年径流减少率在 16% ~ 96% 的变化范围内,从表可看出,随着随着降雨量增加,特别在丰水年,后期土地利用相对于前期的年径流减少率在降低。

同时,由图 4 知,在降雨量小于 450mm 处,两曲线相交,随降雨量增大,两曲线分离越远。认为前期土地利用的径流随降雨增多而增长率较快,后期则较慢。因此黄土高原随降水的增多,土地利用与植被变化对径流的影响效应增强。

3.2 径流月变化

3.2.1 不同土地覆盖的对比流域月径流分析

图 5、图 6 分别为桥子东、西沟流域多年平均各月降雨量分布图和多年平均各月径流系数变化图。由图 6 知,3 ~ 11 月份桥子西沟流域的径流系数较桥子东沟高,其中,两流域相对减少量的最大值出现在降雨量和径流量相对较低的 5 月份,前者约是后者的 24 倍;而其余月份前者约是后者的 3 ~ 5 倍。结合图 5 可发现,无论流域土地覆被如何,降雨量最大的月份径流系数并非最大,6 ~ 9 月份各月份多年平均降雨量相差不大,但 6 月多年平均径流系数最大,约是 7 月经流系数得的 4 倍。出现此现象可认为:研究区树种为落叶植物,在 6 月份具有较小的叶面积和较少的林下灌草,且农作物长势较差,因此流域地表覆盖对降雨的截留和径流的拦截较 7 ~ 10 月份差。当然,这种现象也与雨季各月降雨雨型和降雨过程不同有关。可见流域多年平均最大月经流系数减少时期与流域最大地表覆盖期具有一致性;落叶植物对径流的影响存在季节性变化,在落叶期两对比流域的径流差异很小。

为进一步分析桥子东、西沟降雨产流能力,将 1986 ~ 2004 年观测到的各月降雨-径流关系数据作散点图,如图 7 所示。图中两流域降雨-径流数据均分布较散,但仍然存在一定的趋势,如图中趋势所示。其中图中趋势线斜率表示产流能力的大小。可见在同样降雨条件下桥子西沟各月降雨产沙能力远较桥子东沟大。

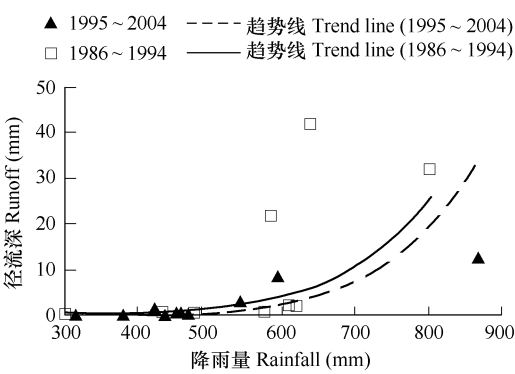


图 4 不同土地利用降雨-径流关系图
Fig. 4 Scatter plot of annual rainfall and runoff

表 4 桥子东沟不同土地利用预测径流产量

Table 4 Estimated annual runoff from 1986 to 2004 in Qiaozidong

年份 Year	降雨量 Rainfall (mm)	产流量 Runoff yield (mm)		减少率 Reduction rate (%)
		预测 1 Pre. 1	预测 2 Pre. 2	
1986	302	0.06	0.01	76
1987	582	3.37	1.77	48
1988	638	5.94	3.47	42
1989	608	4.41	2.44	45
1990	804	24.72	19.05	23
1991	483	10.67	0.45	96
1992	575	3.13	1.62	48
1993	619	4.93	2.78	44
1994	437	0.58	0.21	63
1995	436	0.57	0.21	63
1996	384	0.26	0.08	68
1997	315	0.07	0.02	72
1998	454	0.73	0.28	61
1999	470	0.90	0.37	59
2000	543	2.20	1.06	52
2001	593	3.78	2.03	46
2002	426	0.49	0.18	64
2003	867	39.36	33.19	16
2004	463	0.82	0.33	60

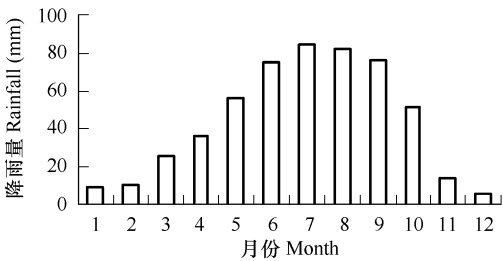


图5 流域多年平均降水年内分布图

Fig. 5 Average annual precipitation distribution in watershed

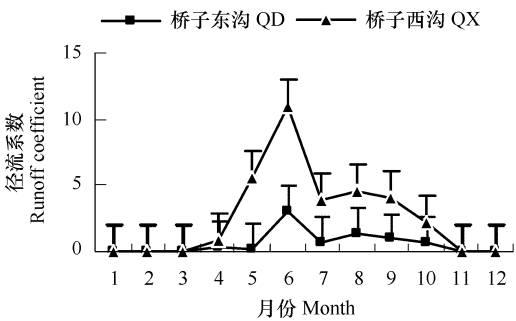


图6 桥子东、西沟径流系数月变化

Fig. 6 Variation of monthly runoff coefficients of Qiaozigou

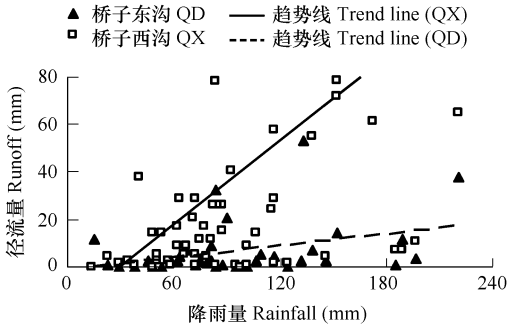


图7 桥子东、西沟降雨-径流散点图

Fig. 7 Scatter plot of monthly rainfall-runoff in Qiaozidong and Qiaozixi

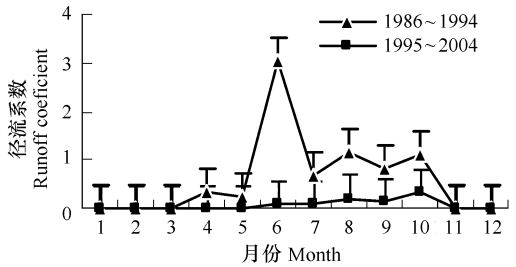


图8 桥子东沟不同土地利用径流系数月变化

Fig. 8 Variation of monthly runoff coefficients of two periods for land use in Qiaozidong

3.2.2 不同土地利用期的月径流对比分析

桥子东沟 1995 ~ 2004 年土地利用时期的各月径流系数比 1986 ~ 1994 年对应的各月径流系数小 , 且两期土地利用径流系数年内分布显著不同 (图 8)。结合图 5 , 对于前期土地利用 , 随着降雨量各月的变化 , 径流系数变化剧烈 , 而后期土地利用的径流系数变化相对平缓。现将不同土地利用时期的各月降雨 - 径流数据进行多年平均并作回归分析 , 其中 1986 ~ 1994 年的数据较集中 , 拟合的方程见式 (3) ; 而 1995 ~ 2004 年的数据较分散 , 不具规律性。

$$Y = 7 \times 10^{-5} \cdot X^{3.0468} \quad (R^2 = 0.7527)$$

(3)

式中 , Y 为多年平均月径流量 (mm) , X 为多年平均月降水量 (mm)。

采用式 (3) , 计算了 1995 ~ 2004 年各月降水相应的径流产量预测值 , 发现实测值较预测值减少 66% ~ 100%。图 9 为 1995 ~ 2004 年多年平均月均降雨、径流累积分布图。从图可看出 , 径流与降雨的变化趋势一致 , 降水增加 , 径流增加 ; 比较预测值和实际观测值 , 各月产流量在 1 ~ 3 月份无显著差别 , 曲线基本重合 , 而 4 ~ 10 月份预测值比观测值显著增加 , 曲线上升较快 , 说明土地利用变化对径流产量有一定影响 ; 10 月份以后曲线基本平行 , 说明该阶段在降雨量很小时土地利用变化对径流影响很小。

综合上面分析 , 无论相同气候条件的桥子东、西沟产流比较 , 还是同一集水区域特征的桥子东沟不同土地利用时期的产流比较 , 森林植被对径流的影响是季节性的 , 认为土地利用 / 土地覆被对径流的影响仅在生长季有明显的表现。

3.3 土地利用/土地覆被变化对洪水径流的影响

3.3.1 不同土地覆被的对比流域洪水径流分析

本研究选取 1986 ~ 2004 年桥子东、西沟流域洪峰流量大于 $1\text{m}^3/\text{s}$ 的洪水资料进行分析。如图 10 , 桥子东、西沟降雨量和洪水径流量存在较好的相关性 , 且桥子东沟降雨 - 洪水径流趋势线斜率要小于西沟的 , 说明西沟洪水产流能力要大于东沟洪水产流能力。

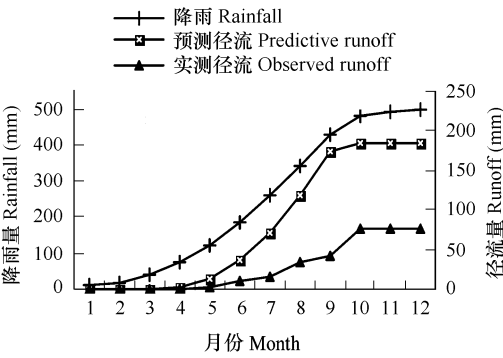


图9 桥子东沟累积降雨-径流年内分布

Fig. 9 Mean cumulative curves of rainfall and runoff in Qiaozidong

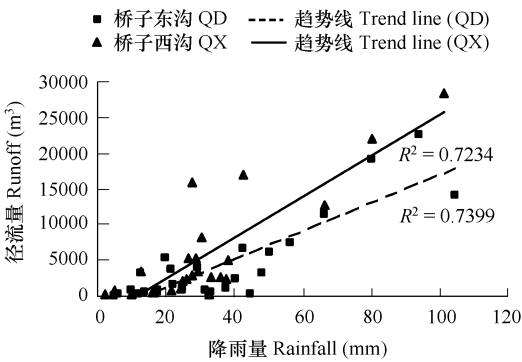


图10 桥子东、西沟洪水径流和降雨散点图

Fig. 10 Scatter plot of flood runoff and rainfall in Qiaozigou

对产生洪水的场降雨产流量 (Q)、场降雨总量 (P)和雨强 (I)进行多元线性回归,分析发现洪水流量与降雨总量和 30min 雨强具有较为显著的相关性,回归方程见式 (4)、(5):

桥子东沟
$$Q = 188.3P + 42.5I_{30} \quad (R^2 = 0.765 \quad n = 25)$$
 (4)

桥子西沟
$$Q' = 259.5P' + 72.6I'_{30} - 4218.9 \quad (R^2 = 0.753 \quad n = 28)$$
 (5)

式中 Q 、 Q' 为洪水流量 (m^3) P 、 P' 为降雨量 (mm) I_{30} 、 I'_{30} 为 30min 最大雨强 (mm/min)。

由上式可看出,场降雨量与 30min 雨强对桥子西沟洪水流量的影响要强于东沟。因此,黄土高原高强度、短历时的暴雨是影响其水土流失的重要因子,特别植被条件越差的流域影响越大。

场降雨洪水过程线对于研究不同土地利用的地表径流响应具有重要意义,分析比较洪水过程线的涨落变化能直接反映土地利用与植被变化对洪水的影响。选取 1986 ~ 2004 年该流域洪峰流量最大的一次暴雨洪水进行过程分析 (图 11)。降雨从 8 月 7 日 14:58 到 8 日 13:00 结束,降雨量 94.2mm,60min 最大雨强 0.85mm/min,30min 最大雨强 1.3mm/min。由图中可看出,桥子东、西沟在降雨初期并没产流,随着降雨的增加,西沟洪水流量逐渐在增加,其中东、西沟产流的初损历时分别为 335 min 和 55 min,东沟由于植被条件较好而产流滞后于西沟 280min。自降雨 85 min 后,降雨强度迅速增大,在短短 50min 里降雨量达到 50.3 mm,此时东、西沟的洪峰流量也同时达到最大,分别为 12 m^3/s 和 15 m^3/s ,东沟最大洪峰流量略小于西沟最大洪峰流量。随降雨强度减小,东、西沟洪峰流量逐渐减小,且洪水过程中东沟洪峰流量随降雨量增减的起伏变化要比西沟的平缓很多。在降雨持续 1015 min 结束后,东沟也在自降雨 1054 min 后停止产流,而西沟的洪流一直持续到自降雨 1258 min 后才结束。

可见,植被覆盖较好的东沟较西沟在调节暴雨洪流过程的作用更大,在随着暴雨强度增大到某一值后,植被对洪流的调节作用在减弱,比较不同流域,此时其地形、地貌的影响作用在增强。

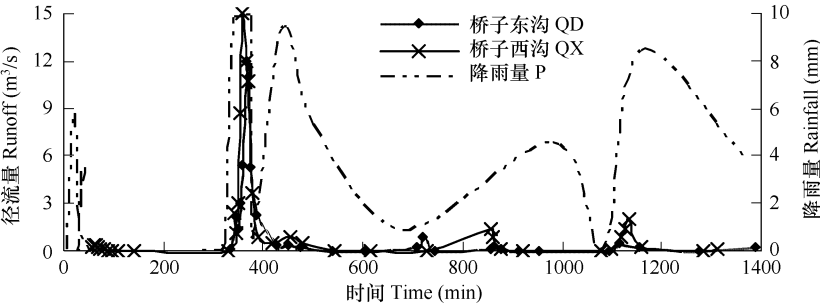


图11 1988年8月7~8日桥子东、西沟降雨洪水过程线

Fig. 11 Runoff process of Qiaozidong and Qiaozixi on 7-8, Aug. 1988

3.3.2 土地利用变化对洪水的影响

频率分布曲线是较小时间尺度上研究土地利用变化对地表径流影响的一种重要方法^[11],本研究采用频率分布曲线分析不同土地利用时期的洪水变化。其中采用的洪水资料仍以洪峰流量大于1 m³/s 为标准进行摘录。图 12 显示了桥子东沟两期土地利用洪峰流量的频率分布曲线,从中可看出前后两期土地利用的洪水频率曲线差异较为显著,在频率小于 75% 时,同一频率后期土地利用洪峰流量小于前期。洪水频率曲线受多种因素影响,如气候、地表覆盖或土地利用、土壤类型、地形、河流形态等。对于本流域两期土地利用,降雨是影响洪水频率的主要因子。经分析两期土地利用的暴雨-径流相关关系,结果显示:洪峰流量与 60 min 最大降雨强度存在显著的相关关系,而降雨量则与产流总量相关(如表 5)。因此,结合雨强这一气候因素有助于进一步揭示不同时期土地利用与植被变化下洪峰流量的响应。图中不同时期的降雨强度并不具有同样的频率分布曲线。同一频率对应的降雨强度后期大雨前期,而此时洪峰流量频率曲线在大部分频率范围内后期比前期小。因此,洪峰流量对土地利用与植被变化产生明显的响应。

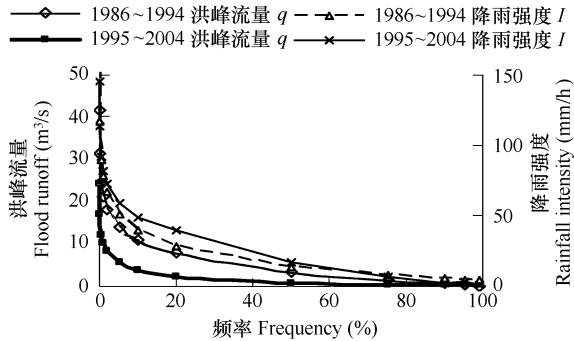


图 12 降雨、洪峰流量频率分布曲线
Fig. 12 Duration curves of rainfall and peak flow for both periods

表 5 场降雨-径流相关关系
Table 5 Correlation of event rainfall and runoff

土地利用期 Period for land use	降雨强度-洪峰流量 Rainfall intensity-flood runoff	降雨量-径流量 Rainfall-runoff
1986 ~ 1994	$q = 0.264 I_{60} - 2.162$ $R^2 = 0.697$, $n = 12$	$Q = 265.1 P - 4079.5$ $R^2 = 0.851$, $n = 12$
1995 ~ 2004	$q = 0.068 I_{60} - 0.508$ $R^2 = 0.629$, $n = 16$	$Q = 147.3 P - 1760.8$ $R^2 = 0.772$, $n = 16$

* Q 径流量 Runoff yield (m³) ; P 降雨量 Rainfall (mm) ; q 洪峰流量 Flood runoff (m³) ; I_{60} 60min 最大降雨强度 the max rainfall intensity for 60min (mm·h⁻¹)

4 结论与讨论

(1)黄土高原土地利用/土地覆被对流域年径流有显著影响。对于不同土地覆被的对比流域,治理流域较未治理流域的降雨产流能力有所下降,丰水年、平水年和枯水年前者的径流系数比后者分别减少约 50%、85% 和 90%。Samraj^[12]和 Sharda^[13]在印度湿润区种植桉树后的径流量较种植前分别减少 16% 和 25% ;刘昌明等认为黄土高原林区的年径流深显著低于其外围的边缘地区,林区的径流系数较非林区小 40% ~ 60% ,周围非林区的年径流量为林区的 1.7 ~ 3.0 倍^[14]。

对于流域不同时期的土地利用变化,在增加植被覆盖以及减少坡耕地和裸地面积比例的后期土地利用,其产流能力较前期也有所下降,多年平均径流系数下降 73.6% ;而在同一降水条件下,植被较好的土地利用比植被较差的土地利用产流减少约 16% ~ 96% ,且随着降雨的增多,土地利用与植被变化对径流的响应增强。分析认为土地利用与植被变化前,降水增加即能增加地表径流量,而变化后土壤结构改善,降水越多,土壤入渗及林冠截留越多,因此,地表径流相对增加较少。

(2)土地利用/土地覆被对流域径流的影响表现为季节性。3 ~ 11 月份,未治理流域的多年月平均径流系数是治理流域的 3 ~ 24 倍,治理流域土地利用后期(1995 ~ 2004 年)各月径流系数较前期(1986 ~ 1994 年)显著降低,通过相同降水条件径流系数的预测,后期较前期减少 66% ~ 100%。治理与非治理流域多年平均最大月径流系数减少时期与流域最大地表覆盖期具有一致性,即 5 月份径流系数减少值最大。黄红闪^[15]对甘肃省西峰市南小河沟流域的森林流域和荒坡草地流域月径流研究也有类似结果,但有一点不同,即治理流域较非治理流域平均径流量减少的最大值出现在 5 月和 10 月份。

森林植被对径流的影响具有季节性特征,在落叶期,不同覆被的对比流域或流域土地利用前、后期的径流

差异都很小。这与 Hornbeck 等^[16]的研究结果相似。其对美国国家森林的一片试验林研究得出,当树木全部皆伐后仅在生长季能观测到明显的径流增长,而在休眠季节径流量不会增加,月平均径流的流量过程线几乎没有变化。

③不同土地覆被的对比流域,场降雨量和 30 min 最大雨强与洪水径流量有较好的相关关系,且场降雨量与 30min 雨强对治理流域洪水流量的影响要弱于非治理流域。比较两流域暴雨洪水过程线,治理流域洪水径流持续时间要远小于非治理流域,且前者洪峰流量最大值小于后者洪峰流量最大值,洪峰流量随降雨增减的起伏变化前者比后者平缓很多。通过两流域整个洪水过程分析,在暴雨强度达到某一程度后,两流域的洪峰流量差异减小,即森林植被对洪水的影响减弱。一些研究认为在降雨强度较小的情况下,森林对洪水的影响较大,长时间的大雨,其影响逐渐减弱,甚至接近于零^[17,18]。但也有学者认为森林覆盖率高的流域拦水能力较高,能显著地削减洪峰、延缓洪水过程^[19,20]。形成不同观点的原因主要是由于影响森林植被生态功能的环境异质性的普遍存在,不同地区、不同尺度流域森林植被变化对洪水过程的影响幅度相差较大。因此,不同的自然条件和尺度下,植被对径流的影响不尽相同,降雨量、土壤前期湿润状况、地理条件和森林覆盖率、植被群落结构都有可能占优势,并由此而导致径流的时空格局与过程上的差异,某一自然条件和不同尺度上得出的结论不能简单地外推^[21]。

采用频率分布曲线分析治理流域土地利用前后期的洪水过程,认为前后两期土地利用若具有相同频率的降雨强度,则相当频率范围内对应的洪峰流量很可能对土地利用与植被变化产生明显响应,呈减小的规律。

研究基于不同土地覆被的两对比流域和流域两期土地利用对流域径流的响应作了分析。两流域地形、地貌存在差异,因此对径流的响应不尽相同,这是对比试验流域研究^[18,22]都必然面对的问题。本研究的分析数据采用的是多年平均数据,且黄土区流域产流多是场降雨产流,因此减弱了地形、地貌因子对径流的影响差异,增强了两对比流域场降雨产流过程的可比性。对气候因素而言,地表径流不仅受降水的影响,同时还受蒸发散等因素的影响。本研究在探讨土地利用/森林植被变化对水文响应时,剔除了降水因素的干扰,同时结合黄土高原降雨特性,认为黄土高原暴雨-产流的特性使得强烈蒸发散对产流的影响相对较小,降水仍然是影响水文响应主要气候因子,而蒸发散影响较轻。因此,认为本研究中对对比流域或不同土地利用期径流的变化主要源于土地利用/土地覆被的变化。

Reference :

- [1] Bernt M, Robin L K, Iris A G, *et al.* Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada). *Hydrological Processes*, 2000, 14 (5) 867—885.
- [2] Schlesinger W H, Reynolds J F, Gunningham G L, *et al.* Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, 247: 1043—1048.
- [3] Bormann H, Dieck ruger B, Hauschild M. Impacts of landscape management on the hydrological behavior of small agricultural catchments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1999, 24 (4) 291—296.
- [4] Doerra S H, Shakesbya R A, Blakeb W H, Chafere C J. Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*, 2006, 319: 295—311.
- [5] Sandra van der Linden, Ming-ko Woo. Application of hydrological models with increasing complexity to subarctic catchments. *Journal of Hydrology*, 2003, 270: 145—157.
- [6] Bronstert A, Niehoff D, Burger G. Effects of climate and land use change on storm runoff generation: present knowledge and modeling capabilities. *Hydrological Process*, 2002, 16: 509—529.
- [7] Klocking B, Haberlandt U. Impact of land use changes on water dynamics—a case study in temperate meso and macroscale river basins. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27: 619—629.
- [8] Wang L X. The mountain watershed management towards 21 century. *Mountain Research*, 1998, 16 (1) 3—7.
- [9] Liu X Z, Su Q, Song X Y, *et al.* Impact of land use change on runoff yield of Changwu experimental area in Loess Plateau. *Research of Agricultural Modernization*, 2004, 25 (1) 59—63.
- [10] Hao F H, Chen L Q, Liu C M, *et al.* Impact of land use change on runoff and sediment yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (3) 5—8.

[11] Huang M B , Zhang L , Gallichand J. Runoff responses to afforestation in a watershed of the Loess Plateau , Chian. Hydrological Process , 2003 (17) 2599 — 2609.

[12] Sanraj P , Sharda V N , Chinnamani S , *et al.* Hydrological behavior of the Nilgiri sub-watersheds as affected by bluegum plantation , Part I . The annual water balance. Journal of Hydrology , 1998 , 103 335 — 345.

[13] Sharda V N , Sanraj P , Samra J S , *et al.* Hydrological behavior of first generation coppiced bluegum plantations in the Nilgiri sub-watersheds. Journal of Hydrology , 1998 211 50 — 60.

[14] Liu C M , Zhao J X. Analysis of the effect of afforestation on the annual runoff in the Loess Plateau. Acta Geographica Sinica , 1978 , 33 (2) 112 — 126.

[15] Huang H S , Huang M B , Zhang L. Impact of re-vegetation on water cycle in a small watershed of the Loess Plateau. Journal of Natural Resource , 2004 , 19 (3) 344 — 350 .

[16] Hornbeck J W , Martin C W , Eagar C. Summary of runoff yield experiments at Hubbard Brook experimental forest , new Hampshire. Canadian Journal of Forestry Research , 1997 27 : 2043 — 2052.

[17] Lu J F , Li X B. The impact of forest change on watershed hydrology-discussing some controversies on forest hydrology. Journal of Natural Resource , 2001 , 16 (5) 474 — 480.

[18] Fohrer N , Haverkamp S , Eckhardt K , *et al.* Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. Physics and Chemistry of the Earth (B) , 2001 , 26 (7-8) 577 — 582.

[19] Shi P L , Li W H. Influence of forest cover change on hydrology process and watershed runoff. Journal of Natural Resource , 2001 , 16 (5) 481 — 487.

[20] Wang Q H , Li H E , Lu K F , *et al.* Analysis of affect ion of forest vegetation change on watershed runoff and flood. Journal of Water Resources & Water Engineering , 2004 , 15 (2) 21 — 24.

[21] Sandstrom K. Forest can provide water : a widespread story or a science affect. American Biology , 1998 , 27 (2) : 132 — 138.

[22] Zang X M , Yu X X , Wu S H , *et al.* Effect of forest vegetation on runoff and sediment transportation in watersheds of Loess Plateau. Science of Soil and Water Conservation , 2006 , 4 (3) 41 — 46

参考文献：

[1] 陆军锋,李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论. 自然资源学报, 2001 , 16 (5) 474 ~ 480.

[2] 黄明斌,康绍忠,李玉山. 黄土高原沟壑区森林和草地小流域水文行为的比较研究. 自然资源学报, 1999 , 14 (3) : 226 ~ 231.

[3] 王礼先. 面向 21 世纪的山区流域经营. 山地研究, 1998 , 16 (1) : 3 ~ 7.

[4] 刘贤赵,宿庆,宋孝玉,等. 黄土高原长武试验区土地利用变化对产水量的影响. 农业现代化研究, 2004 25 (1) : 59 ~ 63.

[5] 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. 水土保持学报, 2004 , 18 (3) 5 ~ 8.

[6] 刘昌明,钟俊襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析. 地理学报, 1978 33 (2) : 112 ~ 126.

[7] 黄红闪,黄明斌,张櫓. 黄土高原植被重建对小流域水循环的影响. 自然资源学报, 2004 , 19 (3) 344 ~ 350.

[8] 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. 自然资源学报, 2001 , 16 (5) 481 ~ 487.

[9] 王清华,李怀恩,卢科峰,等. 森林植被变化对径流及洪水的影响分析. 水资源与水工程学报, 2004 , 15 (2) 21 ~ 24.

[10] 张晓明,余新晓,武思宏,等. 黄土区森林植被对流域径流和输沙的影响分析. 水土保持科学, 2006 , 4 (3) : 41 ~ 46.