

黄土高原流域土地利用变化水文动态响应

——以甘肃天水吕二沟流域为例

王盛萍¹ 张志强¹ 孙 阁² 张满良³ 余新晓¹

(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 2 美国农业部林务局南方全球变化研究所

3 黄河水利委员会天水水土保持科学实验站)

摘要:黄土高原是我国水资源短缺以及土地利用变化水文影响敏感区域,为正确认识土地利用变化对水资源的影响,并为今后该地区土地利用规划、管理提供依据,该研究以黄土高原吕二沟流域为例,分析了 1982 和 1989 年两期土地利用变化的水文动态响应。经剔除不同时期降水因素对径流的影响后,研究结果表明:土地利用变化对年径流有显著影响,后期土地利用较前期土地利用径流系数下降 57%,林地面积较多、植被条件较好的后期土地利用总体年产流减少 27.09%~100%,且随着降雨的增多,土地利用与植被变化对径流的影响效应增强;土地利用变化对径流产量的影响表现为季节性,在同一降水条件下两期土地利用的产流量仅在生长季具有明显差异。虽然不同土地利用时期枯水季节径流系数具有不同表现,但作者认为此时的径流系数并不代表实际的降雨-产流能力,推断这种分布可能与降水的丰、枯情况有关;经洪水频率分析,认为若前后两期土地利用具有相同频率的降水,则一定频率范围内的洪峰流量将可能对土地利用与植被变化产生明显响应。

关键词:土地利用,产流变化,黄土高原

中图分类号:S715-3 文献标识码:A 文章编号:1000-1522(2006)01-0048-07

WANG Sheng-ping¹; ZHANG Zhi-qiang¹; SUN Ge²; ZHANG Man-liang³; YU Xin-xiao¹. **Effects of land use change on hydrological dynamics at watershed scale in the Loess Plateau—A case study in the Lüergou watershed, Gansu Province.** *Journal of Beijing Forestry University* (2006)28(1)48-54[Ch., 11 ref.]

¹ Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

² Southern Global Change Program, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, USA;

³ Tianshui Soil and Water Conservation Experimental Station, the Yellow River Water Conservancy Committee, Ministry of Water Resources, Tianshui, Gansu Province, 741000, P. R. China.

Predicting hydrological effects of land use change is a currently focus in the field of hydrology. Land use change impacts the water resources available to watershed by changing the runoff process. As we all know, the Loess Plateau is limited in water resources, and sensitive to hydrological environment. In order to understand the effects of the change in land use on water resources and provide planners and managers with theoretical bases, this study compared the runoff production during two periods of 1982-1988 and 1989-2000 in the Lüergou watershed in the Loess Plateau. The results showed that land use change had effects on annual runoff production, which decreased by 27% to 100% during land use period with more forest land or good land cover, and runoff coefficient decreased by 57%. The effects of land use on runoff production had been found to be seasonal, *i. e.* the significant differences between the good land cover and the poor one only could be found in growth season. Although the runoff coefficients of the previous and the later land use periods had demonstrated different trends in low water season, it should be noted that it did not represent the runoff

收稿日期:2005-01-22

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:“973”国家重大基础研究计划项目(2002CB111502).

第一作者:王盛萍,博士生.主要研究方向:森林水文.电话:010-62349287 Email:wangshp418@yahoo.com.cn 地址:100083 北京林业大学水土保持学院.

责任作者:张志强,博士,副教授.主要研究方向:森林水文、侵蚀控制与流域管理.电话:010-62338097 Email:zhqzhang@bjfu.edu.cn 地址:同上.

production capacity for low water season. The authors deduced that this difference was to some extent relevant to the amount of precipitation. Flood peak discharge frequencies had indicated that peak discharge would response to the land use and vegetation change obviously, provided the same frequencies of rainfall intensity of the earlier and later periods existed.

Key words land use, runoff production change, the Loess Plateau

土地利用与植被变化对流域水文环境、水文过程、水文通量、水量平衡、水文化学以及流域生态系统动态都会产生十分重要的影响^[1-2]。土地利用与植被变化一方面影响流域的蒸发散性能,另一方面通过地表覆被类型及程度的改变显著影响地表径流的产生,影响土壤的入渗特征,进而影响流域地下水形成,从而使流域产汇流量与过程发生改变。因此,土地利用变化如造林或毁林、森林火灾、城市化等对水文动态变化的影响已成为全球变化研究的热点。1995年,IGBP和IHDP共同推出了LUCC研究计划,世界范围内开展了大量关于土地利用变化影响的研究,如土地利用变化对地表径流响应的模拟^[3]、土地利用变化对淡水资源的影响^[4]、土地利用变化对洪水特性的影响等^[5]。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经制约了该流域的可持续发展。黄土高原大面积退耕还林还草工程的实施对流域水资源将会造成的可能影响仍是我国学术界争论的焦点之一。其原因在于国内部分学者对黄土高原土地利用变化生态水文特性影响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^[6],另外的研究则认为森林的存在增加径流量^[7]。本研究以位于甘肃天水黄土高原沟壑区第三副区内的吕二沟流域多年降雨径流观测资料,分析不同土地利用时期流域水文动态变化规律,以期为该区土地利用规划、管理和生态恢复提供依据。

1 流域概况

吕二沟位于甘肃省天水市南郊,约东经 $105^{\circ}41'$ ~ $105^{\circ}45'$,北纬 $34^{\circ}30'$ ~ $34^{\circ}35'$,是渭河支流藉河右岸的一级支沟,地势南高北低,地质构造上属陇中盆地东南边缘地带,地层微向北倾斜,单斜构造,局部地方有断层。其地层结构由老到新依次为第三纪红色及紫色砂砾岩,红色、青灰色粘土和第四纪马兰黄土。此外,在沟谷中有近代沉积层和坡积物。沟壑为底部切沟,溯源侵蚀严重,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。流域内有多种土壤分布,以梁坡的黄土质灰褐土分布最广(俗称鸡粪土,中壤),厚度在50 cm以上,其余土种分布较少。主要农作物有小麦、玉米、土豆等,无原生林木。人工林多系幼林,郁闭度低。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,因过度放牧生长不良。本区属于干燥少雨的大陆性气候,年降水量少,多年平均降水量574.1 mm,降水年际变幅大,年内分配不均,图1为流域多年平均降水年内分布情况,5—10月份降水量占全年降水量的80.1%,汛期多以暴雨形式出现,土壤侵蚀严重。经统计,1982—2000年间,年均侵蚀模数达 $2\ 577.4\ t/km^2$,汛期输沙量占年输沙总量的99.2%。图2为吕二沟流域地形图。

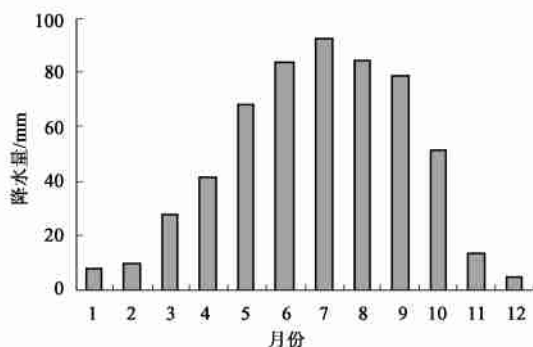


图1 流域多年平均降水年内分布图

FIGURE 1 Mean annual precipitation distribution in research watershed

2 研究方法

2.1 数据观测及收集

分别在流域上、中、下游布设降水观测站,采用SL1遥测雨量器记录降水过程。在流域出口布设径流观测站。沟口径流站为自然断面,但因城市修建,沟道两岸均修建较高河堤,形成梯形断面,中小水时采用浮标法测速,测杆测量水深,并用皮尺测量岸边距。大水时采用浮标法测速,并记水位,根据洪前所测得的大断面图,来确定洪水水深和岸边距。洪水时以草把作浮标,平水时用木片、高粱杆作浮标。浮标系数平水时采用0.85,大洪水时采用中泓一点法施测,采用0.65。最终根据公式(1)计算流量。每天8:00和20:00进行径流观测,洪水期视水情增加测次,每天5~10次。平水时期每日观测时距相等,日平均流量采用算术平均法计算;观测时距不等或部分时段河干时,采用面积包围法计算,即将该日24 h内观测到的流量过程线与横轴所包围的面积除以24 h;洪水时期采用面积包围法计算。

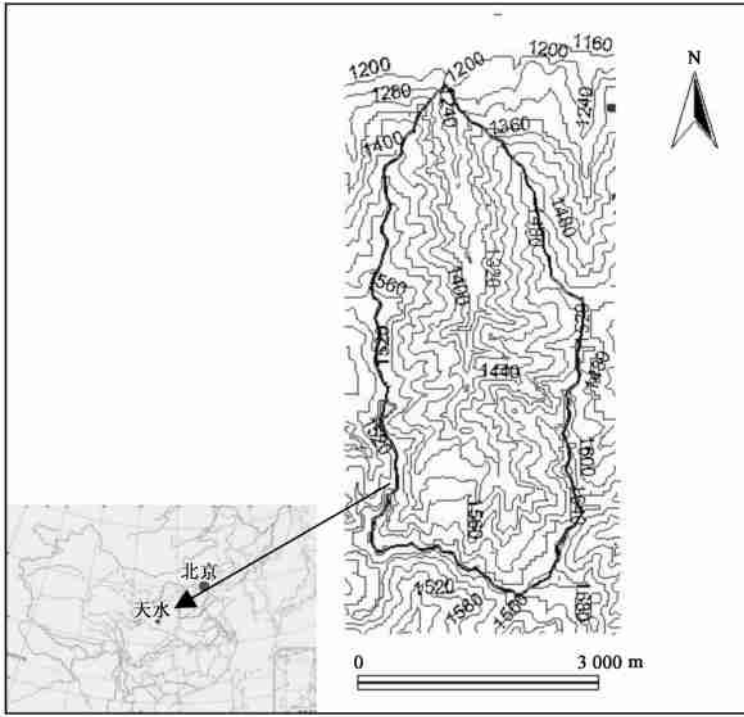


图2 吕二沟流域地形图
FIGURE 2 Topography of Lü'ergou watershed

$$Q = V \cdot H \cdot L \cdot a \quad (1)$$

式中, Q 为流量(m^3/s), V 为流速(m/s), H 为水深(m), L 为岸边距(m), a 为浮标系数.

2.2 土地利用变化

土地利用数据采用人工调查获得, 包括 1982、1989、2000 三期. 其中 1989 与 2000 年两期的土地利用分类及各类型面积比例几乎一致, 因此选择 1982 和 1989 年两期进行分析. 由于两期土地利用类型分类稍有出入, 为有效比较土地利用变化, 采用统一土地利用类型分类统计. 土地利用类型分为: 居民用地、有林地、梯田、坡耕地、果园、未成林地、草地、裸地和灌木林 9 类. 表 1 为流域 1982、1989 年各土地利用类型占流域总面积比例. 从表中可以看出: 两期土地利用均主要以草地、林地、坡耕地和梯田为主,

前后两期共占流域面积达 80% 以上, 其中草地、林地占流域面积比例, 后期较前期分别增加 4%、1%, 坡耕地后期较前期减少近 2%, 而梯田后期较前期增加 2%. 果园、疏林地虽占流域面积比例较少, 但后期较前期有所增加, 分别增加 0.4%、2%. 表中具有重要水保效益的灌木林后期较前期减少, 且裸地较前期有所增加, 但认为二者均占流域面积比例甚小, 后期分别约占流域面积 1.1%、0.4%, 产生的负面影响较小. 此外, 流域中居民占地实际指村庄、厂矿占地, 以及非农业生产用地, 由于厂矿搬迁等原因后期土地利用居民占地面积比例减少. 总体来看, 认为后期土地利用林草面积增加, 坡耕地减少, 植被条件较前期有所改善.

表 1 各土地利用类型占流域面积比例
TABLE 1 Proportional land use for different land use types

土地利用类型	有林地	草地	梯田	坡耕地	灌木林地	疏林地	果园	裸地	居民用地	%
面积比率										
1982 年	23.97	24.32	13.09	23.41	1.66	2.74	1.45	0.24	9.12	
1989 年	24.92	28.35	15.18	21.89	1.05	4.64	1.85	0.35	1.77	
变化率	0.96	4.03	2.09	-1.52	-0.61	1.90	0.40	0.11	-7.35	

注: 总面积为 12.01 km^2 .

3 结果与分析

3.1 径流年变化分析

图 3 为年径流系数随时间的变化曲线. 分别累积流域上、中、下游各测站的日均降水量, 进行算术

平均得到各年降水量. 从图中可以看出, 虽然径流系数波动较大, 推断主要与各降水年份不同有关. 但从 1982—2000 年, 径流系数总体呈下降的趋势: 1982—1988 年年平均径流系数为 $0.07 (\pm 0.05)$, 而 1989—2000 年仅为 $0.03 (\pm 0.03)$. 径流系数在一定程度上

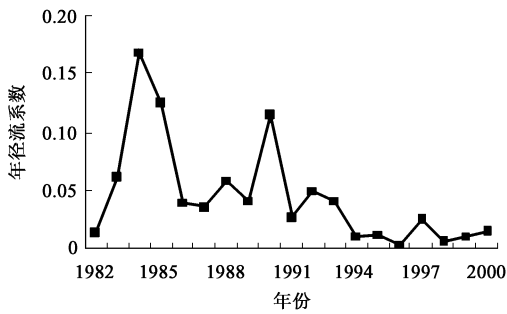


图3 径流系数变化曲线

FIGURE 3 Variation of runoff coefficients over years

是反映流域产流能力的一项重要指标,因此研究首先采用径流系数初步分析不同土地利用和不同降水年际的流域产流情况.为进一步揭示平水年、丰水年或枯水年土地利用变化对流域产流是否有一致的影响,对观测年份的降水进行频率统计,得到降水频率

表2 不同土地利用各种降水年份降雨、产流比较

TABLE 2 Comparison of average rainfall-runoff among wet year, dry year and normal year

	枯水年		平水年		丰水年	
	平均降水/mm	平均产流/mm	平均降水/mm	平均产流/mm	平均降水/mm	平均产流/mm
1982—1988年	410 ($n=2$)	11	548 ($n=1$)	19.29	737 ($n=4$)	77
1989—2000年	452 ($n=3$)	7	513 ($n=3$)	5	688 ($n=3$)	49
变化率/%	10.41	-37.28	-6.39	-72.90	-6.62	-36.30

注:括号中 n 为统计年数.

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直线($P < 0.05$).拟合1982—1988年降雨-径流关系数据得到式(2),拟合1989—2000年降雨-径流关系数据得到式(3).

$$Y_1 = 0.230X_1 - 91.8 \quad (R^2 = 0.646) \quad (2)$$

$$Y_2 = 0.184X_2 - 80.041 \quad (R^2 = 0.759) \quad (3)$$

式中: X_1 、 X_2 为年均降雨量(mm), Y_1 、 Y_2 为年均径流量(mm).

从图4中可以看出后期土地利用总体较前期土地利用的径流产量减少,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3为根据回归方程计算得到的同一降水条件的不同径流产量.其中第3列为根据式(2)得到的预测值,第4列为根据式(3)得到的预测值.表中径流减少率在27.4%~100%的变化范围内.与有关学者的研究结果相比,本研究的年减少量较高,如Anderson^[1]等对美国17个森林流域研究得到减少率为20%~40%;Huang等^[9]根据黄土高原西峰站资料研究得到减少率约为32%.比较前后两期土地利用径流随降雨的变化率,前期土地利用随降雨增多而径流增长率较快,而后期则较慢,如图中非平行直线所示,直线将在较小雨量值小于400mm处相交,

为10%、50%、90%的丰、平、枯水年降水量,分别对两期土地利用丰、平、枯水年进行统计,结果如表2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,或增或减,但后期土地利用各种降雨年份产流量均有不同程度的减少.因此,经初步比较分析,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.

为有效分析土地利用变化与植被变化的水文动态响应,进一步进行了回归分析.研究土地利用变化对径流的影响通常采用对比实验流域的方法,本研究不具备对比实验流域的条件,因此,分别对两期土地利用降雨-径流回归,比较同一降水条件下的径流差异.Stanley^[8]认为当流域不受水库、坝、闸等水利设施的控制影响时,回归分析是检验造林对径流影响的有效工具.

这意味着在黄土高原,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.与有关研究相比,Stanley^[8]的研究呈现与此相反的结果:造林后随降雨增多径流增长率较造林前快.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.

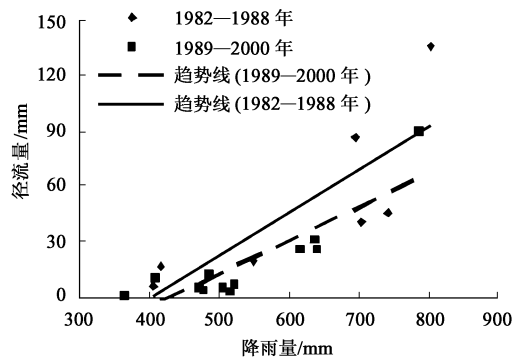


图4 不同土地利用降雨-径流关系图

FIGURE 4 Scatter plot of annual rainfall and runoff

3.2 径流月变化分析

将逐日平均降雨量及逐日径流量分别按月累加得到各月统计值.图5为不同土地利用时期多年平均的径流系数月变化图.图中同时显示了标准偏差

(S).从图中可以看出:1989—2000年土地利用时期各月径流系数比1982—1988年土地利用时期较小,且两期土地利用径流系数年内分布显著不同;对于前期土地利用,随着雨季来临,降水增多,径流系数增大,甚至枯水季节11月份径流系数仍较高;而对于后期土地利用,则随着雨季结束,径流系数逐渐减小.经进一步分析,1982—1988年土地利用时期丰水年较多(1983—1986年),丰水年年平均降水737mm,而枯水年年平均降水仅为409mm,丰水年内枯水季节虽然场降雨产生的径流较少,但降水季节的较多降水增加了枯水径流.图6为实际观测的1983年(丰水年)和1982年(枯水年)降雨-径流对比图.1982年几乎无枯水径流,而1983年11月份尽管径流过程线并非剧烈波动,表明场降雨产生的径流相对较少,但仍具有明显的枯水径流.图中11月份的标准偏差明显很大,反映了数据分布较离散.这正好说明了该土地利用时期由于降水年份的不同导致枯水季节的径流明显不同.因此,图5中显示的1982—1988年多年平均得到的11月份径流系数仍对应较高值.需要指出的是此时的径流系数并不代表11月份降雨的产流能力.后期土地利用虽然丰水年枯水径流也增多,但观测年份多为平水年或枯水年,因此多年平均后径流系数在枯水季节呈减小的趋势.

表3 不同土地利用预测降雨径流产量

TABLE 3 Estimated annual runoff production from 1982 to 2000

年份	降雨/mm	产流/mm		减少率/%
		预测1	预测2	
1982	404	1.14	0	100.00
1983	743	79.11	56.69	28.34
1984	804	93.09	67.87	27.09
1985	697	68.44	48.15	29.64
1986	415	3.68	0	100.00
1987	548	34.32	20.86	39.23
1988	704	70.07	49.45	29.42
1989	616	49.78	33.22	33.26
1990	787	89.13	64.71	27.41
1991	484	19.62	9.09	53.64
1992	637	54.79	37.23	32.05
1993	640	55.46	37.77	31.90
1994	478	18.03	7.82	56.62
1995	473	16.91	6.92	59.05
1996	364	0	0	—
1997	407	1.73	0	100.00
1998	515	26.65	14.72	44.77
1999	504	24.01	12.61	47.49
2000	521	28.12	15.90	43.47

注:产流量中负值用0代替.

将观测到的所有各月降雨-径流关系数据作散点图,试图从月的水平揭示降雨-径流相关关系,如图7所示.图中两期土地利用的数据均分布较散,但仍然存在一定的趋势,如图中趋势线所示.斜率表示

了产流能力的大小.总体上,1982—1988年土地利用时期各月降雨产流能力较后期大.将不同土地利用时期的各月降雨-径流数据进行多年平均,同样以散点图表示,如图8所示.图中1982—1988年的数据分布较散,而1989—2000年数据则较集中,具有一定规律性.采用线性方程进行拟合, R^2 为0.877,拟合方程如下:

$$Y = 0.0387X - 0.2712 \quad (4)$$

式中, Y 为多年平均月径流量(mm), X 为多年平均月降水量(mm).

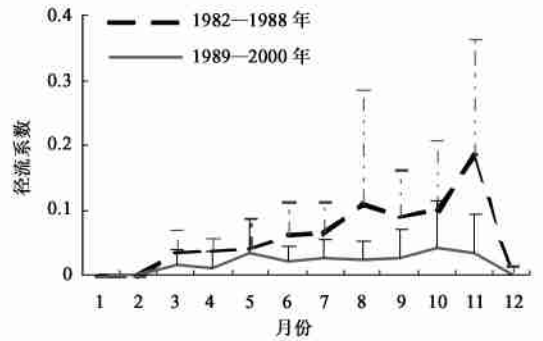


图5 径流系数月变化

FIGURE 5 Variation of monthly runoff coefficient

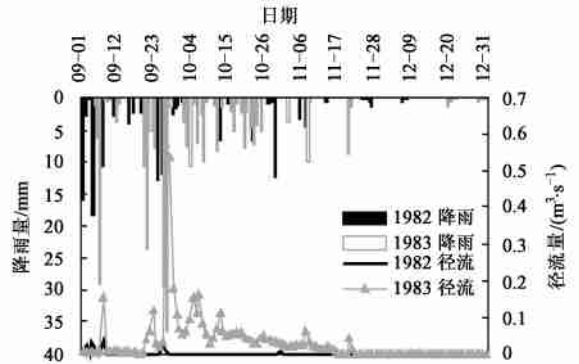


图6 丰、枯年9月1日—12月31日降雨-径流对比图

FIGURE 6 Plot of rainfall-runoff for the period from Sep. 1st to Nov. 31 for the wet year and drought year respectively

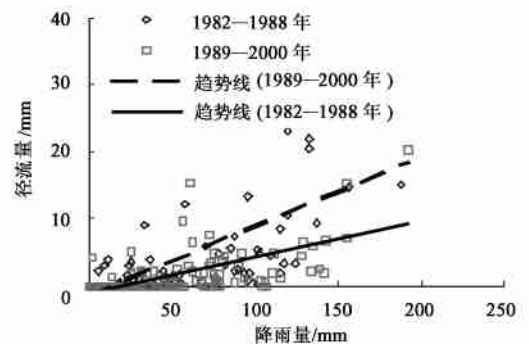


图7 不同土地利用月降雨-径流散点图

FIGURE 7 Scatter plot of monthly rainfall-runoff in two periods

采用式(4),计算了1982—1988年平均各月降水相应的径流产量.图9为1982—1988年年平均月

均降雨、径流累积分布图.从图中可以看出,总体上径流与降雨的变化趋势一致,降水增加,径流增加;比较预测值及观测值,各月产流量在 1—4 月份无显著差别,曲线基本重合;而 5—9 月份观测值比预测值显著增加,曲线上升较快,说明此间土地利用变化将对径流产量有一定影响;10 月份以后曲线基本平行,表明该阶段土地利用变化对径流影响较小.这与有关学者的研究结果相似:Hornbeck 等^[10]的研究认为全部皆伐后仅在生长季能观察到明显的径流增长,而在其他季节则皆伐前后产流量几乎无明显区别;Bosch 等^[11]在比较造林前后多年平均月径流变

化时也得到了相似的研究结果.林木对径流的影响是通过几个过程来实现的,包括林冠截留、入渗、蒸发散等,其控制程度取决于气候条件以及流域的土壤及地形条件.有研究认为常绿树种对地表径流的影响是季节性的^[9].本研究虽然得到不同土地利用枯水径流系数有所差异,但它并不代表场降雨的实际产流能力.另一方面,1982—1988 年土地利用 11 月份的多年平均降水量较小,为 15 mm,因此从降雨产流来看二者在该月份不会产生明显差异,认为土地利用变化对径流的影响仅在生长季有明显表现.

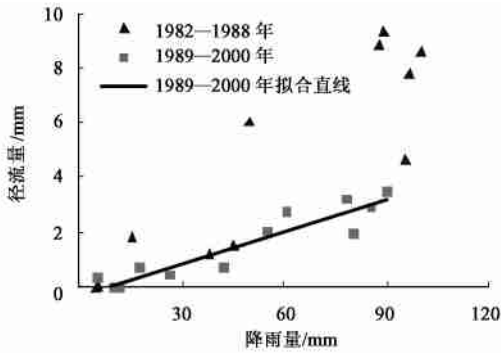


图 8 不同土地利用月均降雨-径流关系图

FIGURE 8 Scatter plot of mean monthly rainfall-runoff in both periods

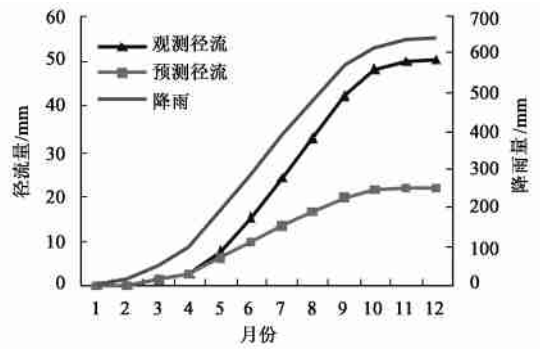


图 9 1982—1988 年土地利用累积降雨-径流年内分布图

FIGURE 9 Mean cumulative curves of rainfall and runoff of 1982-1988

3.3 洪水频率分析

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.然而,由于洪水过程分析研究的时间尺度较小,要求数据精度有一定保证,而本研究受观测方法限制,不能直接比较不同土地利用洪水过程线,因此采用频率分布曲线(又称 duration curves)分析不同土地利用时期的洪水变化.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^[9].研究中所采用的洪水资料以洪峰流量大于 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 为标准进行摘录.图 10 显示了根据 Person-III 计算得到的两期土地利用洪峰流量频率分布曲线.从图中可以看出前后两期土地利用的洪水频率曲线差异甚微,当频率约为 10% 时对应洪峰流量相同.洪水频率曲线受多种因素影响,如气候、地被覆盖或土地利用、土壤类型、地形、河流形态等.经分析两期土地利用的暴雨-径流相关关系,结果显示:洪峰流量与降雨强度存在显著相关关系(如表 4),前后两期相关系数分别为 0.637 和 0.530,而降雨量则与产流总量相关.因此,认为结合雨强这一气候因素将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于前期,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稍稍偏小.图中频率 60% 处可较明显地分辨出这种差异.这意味着若后期与前期具有一致的降雨强度频率曲线,则很可能呈现出洪峰流量对土地利用与植被变化产生明显响应,且仍然在大部分频率范围内洪峰流量后期将较前期减小.

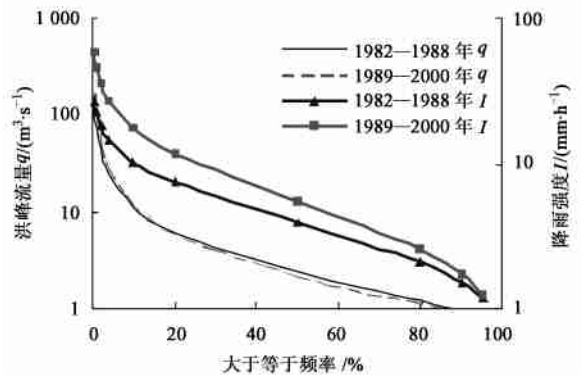


图 10 降雨、洪峰流量频率分布曲线

FIGURE 10 Duration curves of rainfall and peak flow for both periods

表4 场降雨-径流相关关系

TABLE 4 Correlation of event rainfall and runoff

土地利用时期		径流总量 Q/mm	洪峰流量 $q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1982—1988年	降雨 P/mm	0.528*	-0.079
	雨强 $I/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	-0.140	0.637**
1989—2000年	降雨 P/mm	0.652**	-0.133
	雨强 $I/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	-0.093	0.530*

注:**表示在0.01的水平显著相关;*表示在0.05的水平显著相关。

4 结论与讨论

1)黄土高原土地利用变化对年径流有显著影响。1989—2000年植被条件较好的土地利用较前期产流能力有所下降,多年平均径流系数下降57%;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27.09%~100%,且随着降雨的增多,土地利用与植被变化对径流的影响效应增强,这主要受土壤入渗特性及林冠截留影响。

2)不同土地利用在同一降水条件下的产流仅在生长季具有明显差异,认为土地利用变化对产流的影响具有季节性,在枯水季节无显著影响,这与有关研究结论相似。研究得到不同土地利用时期径流系数具有不同的年内分布情况,即植被较好的土地利用枯水季节径流系数逐渐减小,而植被条件较差的土地利用则枯水季节仍对应有较高的径流系数,但是,推断这种分布主要与各年降水丰、枯情况有关,认为此时的径流系数并不代表实际的降雨-产流能力。

3)为有效探讨不同时期土地利用与植被变化对洪水的影响,研究采用频率分布曲线分析洪水过程线,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。

研究基于不同土地利用时期的数据资料进行分析。从气候因素来考虑,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。本文在探讨不同时期土地利用/植被变化水文响应时,已尽可能剔除降水因素的干扰,虽然经进一步检验得到后期土地利用潜在蒸发散大于前期,但结合黄土高原的降雨特性,研究认为黄土高原暴雨-产流的特性使得强烈蒸发散对产流的影响相对较小,在考虑气候因素对植被变化水文响应的影响时降水仍是主要因素,而蒸发散在其中扮演的角色则相对较轻。因此,认为上述研究中径流的减少仍主要源于土地利用与植被

变化,当然,对此还需进一步分析研究。

致谢 本文数据由水利部黄河水利委员会天水水土保持试验站提供,深挚谢忱!

参考文献

- [1] BOOTH D B, KARR J R, SCHAUMAN S. *et al.* Reviving urban streams; land use, hydrology, biology, and human behavior [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(5): 1351-1364.
- [2] 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.
WANG L X, ZHANG Z Q. Impacts of forest vegetation on watershed runoff in dryland areas [J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 439-444.
- [3] MARIANO H, SCOTT N M, DAVID C G. Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 64: 285-298.
- [4] LEITCH C, HARBOR J. Impacts of land use change on freshwater runoff into the near-coastal zone, Holetown watershed, Barbados; comparisons of long term to single-storm effects [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 54(3): 584-592.
- [5] REYNARD N S, PRUDHOMME C, CROOKS S M. The flood characteristics of large U·K· rivers; potential effects of changing climate and land use [J]. *Climatic Change*, 2001, 48: 343-359.
- [6] 刘贤赵, 宿庆, 宋孝玉, 等. 黄土高原长武试区土地利用变化对产水量的影响 [J]. *农业现代化研究*, 2004, 25(1): 59-63.
LIU X Z, S Q, SONG X Y, *et al.* Impact of land use change on water yield of Changwu experimental area in Loess Plateau [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2004, 25(1): 59-63.
- [7] 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): 5-8.
HAO F H, CHEN L Q, LIU C M, *et al.* Impact of land use change on runoff and sediment yield [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 5-8.
- [8] STANLEY W T, FRANK H W. Reforestation and the reduction of water yield on the southern piedmont since circa 1940 [J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(3): 425-437.
- [9] HUANG M B, ZHANG L, Gallichand J. Runoff responses to afforestation in a watershed of the Loess Plateau, China [J]. *Hydrological Process*, 2003(17): 2599-2609.
- [10] HORNBECK J W, MARTIN C W, EAGAR C. Summary of water yield experiments at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire [J]. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1997(27): 2043-2052.
- [11] BOSCH J M, von GADOW K. Regulating afforestation for water conservation in South Africa [J]. *South African Forestry Journal*, 1990(153): 41-54.

(责任编辑 李文军 冯秀兰)