

# 降水变化和人类活动对纸坊沟小流域年径流的影响

王明玉<sup>1</sup>, 王百田<sup>1</sup>, 赵铭军<sup>2</sup>, 任 焱<sup>3</sup>, 毛泽秦<sup>3</sup>

(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. 江苏省徐州市中国石化管道储运公司 徐州输油处, 江苏 徐州 221008; 3. 甘肃省平凉市水土保持科学研究所, 甘肃 平凉 744000)

**摘 要:** 为在小流域尺度上深入认识并定量区分人类活动和降水变化对黄土高原年径流变化的影响, 统计了甘肃省平凉市纸坊沟小流域 49 a 间(1955—2003 年)的年降水量和径流量实测数据。结果发现, 年降水量虽无明显变化, 但年径流深却呈显著减少趋势。从 20 世纪 50 年代的 59.1 mm 降到 21 世纪初的 12.2 mm, 相对降幅高达 72.4%。根据年降水量—年径流深双累积曲线, 划分出了 5 个降水—径流关系变化时段(1955—1964, 1965—1976, 1977—1985, 1986—1995, 1996—2003 年), 然后以 1955—1964 时段为基准期, 定量估算了各时段内人类活动和降水变化对年径流变化的贡献。结果表明, 除在干旱时段内降水对年径流减少有明显贡献外, 其他时段的径流变化主要是由人类活动引起的, 并且其绝对贡献量呈逐渐增大趋势。合理规划人类活动是解决黄土高原水问题的重要途径。

**关键词:** 黄土高原; 纸坊沟小流域; 径流; 降水; 人类活动

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0037-05

中图分类号: P426.615

## Effects of Precipitation Change and Human Activities on Annual Runoff from Small Watershed of Zhifanggou Watershed

WANG Ming-yu<sup>1</sup>, WANG Bai-tian<sup>1</sup>, ZHAO Ming-jun<sup>2</sup>, REN Ye<sup>3</sup>, MAO Ze-qin<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation of Beijing Forestry University,

Beijing 100083, China; 2. Sinopec Pipeline Storage and Transportation Company in

Xuzhou City, Jiangsu Province, Xuzhou Oil Transportation Department, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

3. Pingliang Research Institute of Soil and Water Conservation, Gansu Province, Pingliang, Gansu 744000, China)

**Abstract:** The measured data of annual precipitation and runoff during 49 years(1955—2003) for the small watershed of Zhifanggou located near Pingliang City, Gansu Province, were statistically analyzed in order to understand and quantify the contributions of human activities, and precipitation change to the variation of runoff on the Loess Plateau. It was found that although annual precipitation did not change significantly, annual runoff showed a tendency of significant reduction from 59.1 mm in the 1950's to 12.2 mm in the early of the 21th century, a relative reduction of 72.4%. Based on the double-mass-curve of accumulated annual precipitation and annual runoff, the variation of precipitation—runoff was divided into five stages: 1955—1964, 1965—1976, 1977—1985, 1986—1995 and 1996—2003. Then the stage of 1955—1964 was chosen as the base stage for comparisons, and the contributions of human activities and precipitation change to annual runoff variation were separated and quantified for each stage. Besides the obvious contribution of annual precipitation decrease to annual runoff reduction in dry stage, the variations of annual runoff in other stages were mainly caused by the human activities, and the absolute contribution of human activities showed an increasing tendency. All these indicate that a rational planning of human activities is an important approach to solve the water problems on the Loess Plateau.

**Keywords:** Loess Plateau; Zhifanggou watershed; runoff; precipitation; human activity

黄土高原地处内陆干旱地区。水资源不足, 植被覆盖缺乏, 土壤侵蚀严重, 是影响区域发展的重要环

境问题。几十年来, 为治理黄土高原的严重水土流失, 卓有成效地开展了大规模的修建梯田和植被恢

收稿日期: 2011-09-01

修回日期: 2011-10-20

资助项目: 十二五规划项目“近期黄土丘陵沟壑区节水防蚀水土保持林研究与示范”(2011BAB38B0602)

作者简介: 王明玉(1986—), 男(汉族), 河北省安平县人, 硕士研究生, 主要从事生态环境工程研究。E-mail: wangmingyu\_1986@163.com。

通信作者: 王百田(1958—), 男(汉族), 陕西省富平县人, 博士生导师, 教授, 主要从事生态环境工程研究。E-mail: wbaitian@yahoo.com.cn。

复,但却发现在土壤侵蚀显著减少的同时流域产流也显著减少。这种现象引起了各界广泛关注。人们担心这可能成为限制区域发展的新的重大问题<sup>[1-2]</sup>。同时,过去几十年内黄土高原的气候在经历着主体表现为干热化的明显变化趋势,这也可能是造成流域径流减少的原因。为了制定正确的区域生态环境治理和发展规划决策,需定量区分降水变化和人类活动对径流变化的贡献。

国内学者已在坡面尺度通过径流场观测深入研究了黄土高原植被覆盖和修建梯田对地面径流的影响,表明增加植被覆盖和修建梯田都会减少地表径流<sup>[3]</sup>。个别学者近些年来在黄土高原的中大流域尺度上对一些河流的径流变化原因进行了统计分析,表明土地利用变化和气候变化尤其是降水变化都是引起流域径流变化的重要原因<sup>[4]</sup>。但是,由于缺少多年实测资料,对小流域尺度上径流变化原因的定量研究却一直不足。纸坊沟小流域位于陇东黄土高原沟壑区,属黄河流域水土保持重点治理区。自 1955 年以来,平凉市水土保持研究所进行了近 49 a 的降水、径流和泥沙观测,积累了相对丰富完整的实测资料系列,为开展黄土高原小流域径流变化原因研究提供了宝贵的基础数据。本文拟利用这些历史数据,对纸坊沟小流域年径流深的变化趋势进行研究,并定量估算降水变化和人类活动对径流变化的贡献。

## 1 研究区概况

纸坊沟小流域地处甘肃省平凉市城南郊区,地理坐标为东经  $106^{\circ}37'$ — $106^{\circ}42'$ ,北纬  $35^{\circ}26'$ — $35^{\circ}33'$ 。属泾河干流一级支沟,海拔高程 1 365~2 104 m,相对高差 739 m,主沟道长 15.77 km,沟道平均坡降 4.69%,总面积 18.98 km<sup>2</sup>。地形地貌上呈黄土高原丘陵沟壑状。南高北低,平面形状上呈柳叶形,形状系数为 0.076。流域内的土壤在大格局上属于塬边及山坡黄绵土类,在小范围上从流域东南分水岭到西北主沟道出口依次分布有黑垆土、草甸土、红黏土、黄绵土、新积土 5 类土壤。该小流域属北温带半湿润大陆性气候区,年均日照时数 2 381 h,年均气温 8.8℃,年均降水量 548.5 mm,最大年 1975 年为 867.0 mm,最小年 1995 年为 328.1 mm。

纸坊沟小流域的植被状况总体上表现为上游最好,中游次之,下游较差。阴坡较好,阳坡较差。村庄稀少地方较好,村庄集中地方较差。上游植被覆盖率为 70%左右,以杂草为主,乔灌木成点片分布;中游植被覆盖率为 40%~50%,也以杂草为主,两沟阴坡地带局部点片有灌丛;下游为人口聚居区和主要农业

生产区,植被覆盖率在 20%~40%,主要以杂草和人工林草为主。流域内森林较少,主要是零散分布的人工林,其覆盖率为 5%左右。

该流域内有平凉市崆峒区的崆峒、峡门、柳湖 3 个乡镇 8 个行政村的 24 个社及 7 个企事业单位,截止到 2004 年,总人口 8 798 人,其中农业人口 1 245 户 7 010 口人,农村劳动力 4 199 个;城市人口 1 788 人;总的人口密度为 464 人/km<sup>2</sup>。

## 2 资料整理与研究方法

### 2.1 降水和径流数据的收集与整理

在研究数据系列中采用的是纸坊沟小流域面上年降水量,它是基于该流域的一坝、二坝及马家新庄、石窑硷 4 个雨量点 1955—2003 年实测年降水资料(部分缺失数据是利用与平凉气象站资料关系的插补值),根据各站点控制的流域面积用泰森多边形法加权平均而得出的。流域年径流深的数据系列是一坝水文站在 1955—2003 年的实测径流量资料(部分缺失数据是利用与同站降水资料关系的插补值)推算得出的小流域各年径流深。年均径流深相对变化率则是各时段径流深均值减去总径流深均值所得数据与总径流深均值的比值。同理,年均降水量相对变化率也是如此算出。相对变化率的提出可以更直接地反映降水和径流的关系。

### 2.2 相关因素对径流变化贡献的定量估算

降水—径流的双累积曲线常被用于进行降水—径流关系的阶段性分析和转折年份的判断。若流域内下垫面特性保持不变,则径流量主要受到降水量大小的影响(极端降水事件除外),这时双累积曲线基本上呈一条直线;若双累积曲线发生偏转,就说明流域下垫面状况发生了变化,可以确定此时为降水—径流关系受人类活动影响而发生突变的时间,这可为定量评价人类活动的径流影响,进行时段划分,以及为确定基准期的截止年份提供依据。

本文在绘制纸坊沟流域 1955—2003 年的实测年降水量—年径流深的双累积曲线的基础上划分降水—径流关系的变化时段。并假设第一次突变前的时段为基准期,这时的降水—径流关系为用于比较的基准关系(自然状态)。以后的每次径流突变都为相关因素影响加剧的结果。进一步假定,引起小流域年径流变化的因素分为两类,即气候变化(主要是年降水量)和人类活动(包括修建梯田、淤地坝等水土保持工程措施和造林种草等植被恢复措施)。

为定量区分不同因素在不同时段对小流域年径流深变化的贡献,首先依据基准期的实测年降水量—

年径流深序列数据,建立年降水—年径流关系的基准关系式。然后,将发生关系突变后的某时段的年均降水量数据带入该基准关系式,得到该时段的年均径流深回归序列。表示如仅有降水量变化而无下垫面变化情况下对应该时段真实降水量应有的年均径流深,记为 $Y'_2$ 。突变后某时段的年径流深的总变化量 $\Delta R$ 为该时段实测年均径流深 $Y_2$ 与基准期年均径流深 $Y_1$ 的差值( $\Delta R = Y_2 - Y_1 = \Delta R_1 + \Delta R_2$ ),它包括年降水量变化的贡献 $\Delta R_1$ 和人类活动加剧的贡献 $\Delta R_2$ 。某时段内年降水量变化对年径流深变化的贡献 $\Delta R_1$ 为回归推算的年均径流深 $Y'_2$ 与基准期年均径流深 $Y_1$ 的差值( $\Delta R_1 = Y'_2 - Y_1$ );则人类活动加剧对年径流深变化的贡献 $\Delta R_2$ 为总径流变化量减去降水变化的贡献( $\Delta R_2 = \Delta R - \Delta R_1 = Y_2 - Y'_2$ )<sup>[5]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 年径流深变化

将纸坊沟小流域 1955—2003 年的年径流深实测数据序列人为地按照年代不同划分为 6 个时段(表 1),即 1955—1960,1961—1970,1971—1980,1981—1990,1991—2000,2001—2003 年,然后得到了不同年代的年均径流深和相对于整个系列均值的变化率。由表 1 可以看出,在 1955—1960,1961—1970,1971—1980 年 3 个时段,年均径流深都高于整个序列均值,其中在 1955—1960 年间刚开始进行小流域水土保持治理,且治理程度不高,因此年径流深偏高;在 1961—1970 年的年径流深均值最大,为 67.5 mm,其相对变化率为 52.71%,这可能得益于期间的年均降水量最高和水土流失治理率还较低。自 1971—1980 时段起,年均径流深开始持续逐渐减少,其中在 1980 年后的 3 个时段的年均径流深都小于整个序列的均值,至 2001—2003 时段时减幅达到了 72.4%<sup>[6]</sup>,虽然此时年均降水量高于整个序列的平均值。

表 1 纸坊沟小流域各时段的年均径流深和降水量变化

时段/年	年均径流深		年均降水量	
	实测均值/mm	相对变化率/%	实测均值/mm	相对变化率/%
1955—1960	59.1	33.71	528.9	-4.05
1961—1970	67.5	52.71	602.9	9.38
1971—1980	55.5	25.57	570.8	3.56
1981—1990	36.5	-17.42	550.9	-0.05
1991—2000	17.8	-59.73	482.3	-12.50
2001—2003	12.2	-72.40	588.9	6.84
1955—2003	44.2	—	551.2	—

#### 3.2 年均降水量变化及其对径流深的影响

根据纸坊沟小流域 1955—2003 年的实测年降水量资料,将不同年代的平均降水量和相对变化率列于表 1 中。可以看到,不同年代的年降水量存在较大波动,其中 1961—1970 年的降水量明显高于整个序列均值,为各年代中最大值,高出整个序列平均值 9.38%。其次是 2001—2003 年,1971—1980 年的降水量也高于整个序列均值,分别高出 6.84%,3.56%。整体来看,在年降水量相对变化率高的年代其所对应的年径流深的相对变化率也相应变高,因此年降水量和年径流深仍具有一定的相关性,说明年降水量是影响年径流深的一个主要气象指标。

从整个观测序列的小流域年降水量来看,几十年内的变化趋势并不很明显,只是略微有些下降(图 1)。根据计算,年降水量平均每年减少 0.3%,最大时期年减少 0.73%,最小时期年减少 0.22%<sup>[7]</sup>,但在 2000 年以后降水量呈现恢复性的增多趋势。

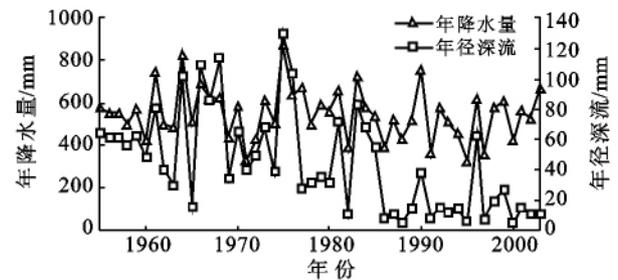


图 1 纸坊沟小流域年降水量和年径流深的变化过程

对整个观测序列的小流域年径流深变化过程进行线性分析(图 1)发现,年径流深呈一直下降趋势,且非常显著,虽然期间多雨年的径流也可能很高。若仅观察具有完整 10 a 观测的 4 个年代(60,70,80,90 年代)时,年均径流深从 67.5 mm 降至 17.8 mm,相对降幅为 67.2%,而相应的年降水量虽也在降低,但其相对降幅仅为 21.8%,即降水量的降幅远小于年径流深的降幅。另外,2000 年后的年径流深仍在减少,虽然年降水量有恢复性的增加,说明年径流深变化在很大程度上还受人类活动影响,尤其 2000 年后。

#### 3.3 人类活动和降水变化对径流变化贡献的定量区分

##### 3.3.1 降水—径流关系的突变点和时段划分

对纸坊沟小流域的年降水量和年径流深作双累积曲线(图 2),发现 49 a 间出现了 4 次关系突变,因此将整个观测序列划分为 5 个时段,分别为 1955—1964,1965—1976,1977—1985,1986—1995,1996—2003 年。

据观测记录,纸坊沟小流域在 20 世纪 50 年代中期开始以小型水保工程措施和荒坡造林为主的初步综合治理。具体措施包括兴建地埂、软堰、水簸箕、

土柳谷坊、涝池和小型水库等,以及采用水平沟、鱼鳞坑等措施的人工造林。但是当时机械落后,主要以人工修建为主,其完工工程量很少,而且由于造林后水土保持功能的滞后性,使得在 1955—1964 年的年降水量—年径流深关系受到的现代人类活动影响还比较小,也相对稳定,可作为以后各个时段比较的基准期的基准关系。

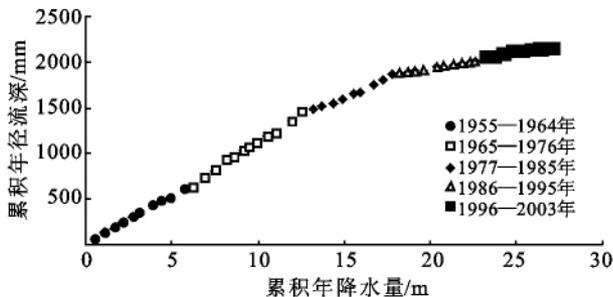


图 2 纸坊沟小流域 1955—2003 年的年降水量与年径流深双累积曲线

1965—1976 年,受 20 世纪 60 年代后期的“农业学大寨”号召影响,流域水土保持治理从荒山荒坡治理转入以坡耕地的梯田化改造为重点的治理阶段。这时的修建梯田还是以人力常年修建为主,一些坡耕地变成了水平梯田,坡面拦蓄体系开始形成。由于该时段处于丰水期,加之小流域的治理面积百分率还不高,使该时段的径流深加大,表现为图 2 中看到的双累积曲线稍微向上偏转。

1977—1985 年,流域继续进行坡耕地改梯田等坡面治理,由于采用机械化修建,梯田面积比率大幅提高,而且此时展开了大范围沟道治理,集中在小流域的中下游筑起了 14 座淤地坝,并重视植被恢复,这些人类活动使径流深显著变小,双累积曲线开始明显向下偏转。

1986—1995 年,受到 80 年代后期开展的梯田重修提高质量和义务种树种草运动的影响,加之小流域的水土调控体系全面形成,尤其是年降水量明显减少,使得双累积曲线明显向下大幅偏转。

1996—2003 年,纸坊沟小流域和整个黄土高原一样,开始进行了大规模的退耕还林还草,同时开展以生态建设为主题的综合开发。种种人为活动的加强让该时段的径流深进一步显著减少,仅是由于 2000 年以后年降水量的恢复性增加才使得双累积曲线继续向下偏转的幅度得到了遏制。

3.3.2 年降水量—年径流量的关系在不同时段的变化 径流形成主要受到下垫面条件和降水的影响,但从图 1 可看出,年降水量在几十年内的变化并不明显,而径流深却变化突出,说明在纸坊沟小流域的径

流形成更多受到下垫面条件的作用。在纸坊沟小流域内工业很少,农业耕地从 1985 年的 859.8  $\text{hm}^2$  增到 2004 年的 905.6  $\text{hm}^2$ ,增加比例不大,仅为 5.1%。而且坡耕地一般无灌溉,所以耕地灌水对小流域的径流数量并无太大影响。因此人类活动对下垫面的改变应该是径流变化的主因。

点绘了各时段的年降水量( $X$ , mm)和年径流深( $Y$ , mm)的关系(图 3),各时段的对应线性关系如下:  
1955—1964 年: $Y=0.1484X-24.3$ ;  $R^2=0.8280$   
1965—1976 年: $Y=0.2217X-55.8$ ;  $R^2=0.7090$   
1977—1985 年: $Y=0.1643X-49.2$ ;  $R^2=0.4695$   
1986—1995 年: $Y=0.0673X-19.3$ ;  $R^2=0.8055$   
1996—2003 年: $Y=0.0855X-26.7$ ;  $R^2=0.2300$

其回归关系式的确定系数  $R^2$  均通过了 0.01 的显著性检验。

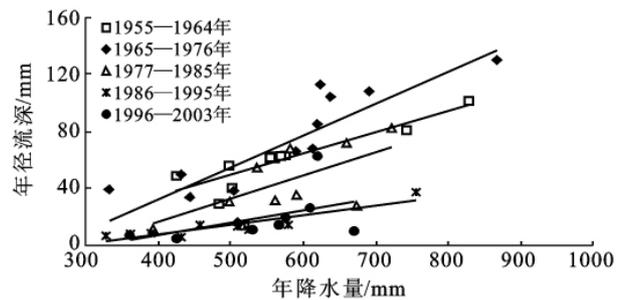


图 3 纸坊沟小流域年降水量与年径流深的关系

由图 3 可以看出,1976 年以后的径流量—降水量关系明显弱于以前,说明人类活动对径流形成的影响得到了增强。另外,在正好处于“文革”期间的 1965—1976 年的径流形成量明显高于 1955—1964 年和其他各时段,由此认为该时段的治理模式转变及森林植被破坏可能是增大径流的重要原因,该时段的较高年降水量也可能是一个因素。

1977—1985 年,年径流深较 1965—1976 年显著减少,表明高质量水平梯田的修建,植被恢复和各项水利工程措施的建设都产生了一定的减少径流作用。自 1986—1995 年以后,由各项措施组合形成的水土保持体系的全面形成及先前恢复的森林植被效益的发挥,使年径流深大幅降低,下垫面的稳定状态也使得降水量与径流深的关系变得密切。1996—2003 年,虽然 2000 年以后的年降水量有恢复性增加,使得年径流深也略微提高,但是提升幅度非常小,表明人类活动改变下垫面所造成的径流影响起着主导性的作用。

3.3.3 人类活动和降水变化对径流变化贡献的区分为进一步区分人类活动和降水变化对纸坊沟小流

域年径流变化的贡献,假定受到人类活动影响较小的1955—1964年为基准期,利用该时段的年降水—年径流的基准关系( $Y=0.1484X-24.3$ ),带入其他时段的年均降水量,计算得到其他时段在假设人类活动影响不变化情况下的年径流深,用于定量区分不同时段的人类活动及降水变化对年径流变化的贡献。由于气候因子不会在较短时间内有明显变化,因此该方法的运用具有其合理性。

将根据相关因素对径流变化贡献的定量估算中所述的计算方法计算的结果列于表2,可以看出,在刚开始进行小流域水土流失治理的1955—1964时段,年均降水量和径流深分别为572.9 mm和60.7 mm,由于主要治理措施是荒坡造林,加之植被恢复效益的时间滞后,所以该时段的人类活动影响相对轻微,作为基准阶段。1965—1976年,年均降水量和径流深分别为571.6 mm和71.0 mm;该时段的年降水量并没有增加,反而减少了1.3 mm,但年径流却增加了10.25 mm,这完全是由坡地改造,耕地开垦,植被破坏等人类活动引起的<sup>[8-9]</sup>,而降水减少的贡献是减少

了径流0.20 mm。1977—1985年,年均降水量和径流深分别为579.6 mm和46.0 mm,径流比基准期减少了14.69 mm。这主要是由于开始大量采用机械修建水平梯田,对沟道进行治理等人类活动的贡献<sup>[10]</sup>,其对径流减少的贡献达到15.68 mm,超过了总变化量。这是因为同期降水增加提高了径流0.99 mm。1986—1995年,年均降水量和径流深分别为485.2 mm和13.37 mm,年径流与基准期相比下降了34.31 mm。这主要是由于高质量的水平梯田继续增加,坡面和沟道的综合拦蓄体系已经形成<sup>[11]</sup>,对径流减少的贡献达到72.5%。但该时段的降水减少也是个主要原因,它对年径流减少的贡献率为27.5%。1996—2003年,年均降水量和径流深分别为544.1 mm和19.8 mm,因降水量有恢复性的增加,年均径流深也稍微有所增长,但比基准期仍然低了40.91 mm,对此人类活动的贡献为89.55%,而降水量偏少的贡献仅占10.45%。综合来看,不断增强的水土保持等人类活动对纸坊沟小流域的年径流不断减少起着极重要的主导作用。

表2 人类活动和降水量变化对纸坊沟流域年径流深变化的贡献

时段/年	时段平均 降水量/mm	基准期年均 径流深/mm	年均径流深及其变化/mm			人类活动影响		降水变化影响	
			突变后	突变后回归	总影响量	影响量/mm	贡献率/%	影响量/mm	贡献率/%
1955—1964	572.9	60.70	—	—	—	—	—	—	—
1965—1976	571.6	60.70	70.95	60.50	10.25	10.45	101.91	-0.20	-1.91
1977—1985	579.6	60.70	46.01	61.69	-14.69	-15.68	106.75	0.99	-6.75
1986—1995	485.2	60.70	13.37	47.68	-47.33	-34.31	72.50	-13.02	27.50
1996—2003	544.1	60.70	19.79	56.42	-40.91	-36.63	89.55	-4.28	10.45

## 4 结论

(1) 1955—2003年的近50 a中,纸坊沟小流域的年降水量平均为551.2 mm,在不同年代虽有一般不超过10%的上下波动,但几十年内只呈现为微弱降低。与此对应,年径流深却显著减少,从20世纪50年代的59.1 mm降到21世纪初的12.2 mm,相对降幅高达72.4%。

(2) 人类活动和降水变化是影响径流变化的主要原因,由于纸坊沟小流域几十年内的年降水量变化趋势不明显,水土保持治理的人类活动是最重要的影响因素。森林植被破坏会加大径流形成,坡面和沟道治理及森林植被恢复会减少径流形成。由于纸坊沟小流域的森林植被覆盖率相对较低且多年变化不大,坡面修建水平梯田,沟谷建造谷坊和淤地坝等水土保持工程措施是引起小流域径流减少的最重要的人类活动方式。

(3) 纸坊沟小流域1965—2003年的水土保持措施类型和强度的变化,导致了小流域的年径流以及年降水—年径流关系的显著改变,并由此划分出了5个时段。虽然各时段内的径流变化的主要贡献者均是人类活动,但各时段的贡献量有较大差别。和基准期(1955—1964年)相比,在1965—1976,1977—1985,1986—1995和1996—2003年的4个时段内,人类活动对径流变化的贡献量分别是10.45, -15.68, -34.31和-36.63 mm,占总变化量的比例均在72%以上。除了1965—1976年的人类活动(例如植被破坏、开垦坡耕地)导致了年径流量增加以外,以后的人类活动都是减少径流。与人类活动的贡献相比,降水变化对年径流变化的贡献要小很多,在各时段对径流变化的贡献分别为-0.20, 0.99, -13.02和-4.28 mm。综合来看,要维持黄土高原的水资源安全,需要合理规划水土保持等人类活动。

(下转第67页)

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 马雪华. 四川米亚罗地区高山冷杉林水文作用的研究[J]. 林业科学, 1987, 23(3): 253-265.
- [2] 刘世荣, 温远光, 王兵, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 300-710.
- [3] 时忠杰, 张宁南, 何常清. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1932-1939.
- [4] Fernández-Gálvez J, Barahona E, Mingorance M D. Measurement of infiltration in small field plots by a portable rainfall simulator: Application to trace-element mobility[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2008, 191(1/4): 257-264.
- [5] Shein E V. Soil hydrology: stages of development, current state, and nearest prospects [J]. Soil Physics, 2010, 43(2): 158-167.
- [6] Liu Shiyu, Chen Wenbo. Impacts of ground cover on Laws of temporal and spatial variation of soil moisture [J]. Original Article, 2009, 4(3): 271-275.
- [7] 霍小鹏, 李贤伟, 张健, 等. 川西亚高山暗针叶林土壤渗透性能研究[J]. 水土保持研究, 2009, 3(16): 192-195.
- [8] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 等. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 15-19.
- [9] 陈致富, 魏天兴, 赵健, 等. 陕北风蚀水蚀交错区不同植被下土壤入渗性能差异研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 232-235.
- [10] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 227-231.
- [11] 刘韶辉, 项文化, 方江平. 西藏南伊沟原始林芝云杉林土壤水文的物理特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(7): 15-18, 25.
- [12] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of soil water: 2. Simultaneous redistribution and evaporation[J]. Water Resources Research, 1970, 6(4): 1148-1153.
- [13] Van Genuehten M T H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [14] Kostiaikov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Soil Sci., 1932, 97(1): 17-21.
- [15] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil Sci. Soc. AM. J., 1940, 5(3): 399-417.
- [16] Philip J R. The theory of infiltration about sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Sci., 1957, 84(4): 257-264.
- [17] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 299-304.
- [18] 莫菲. 六盘山洪沟小流域森林植被的水文影响与模拟[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [19] 蒋定生, 黄国俊, 谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 7-9.
- [20] 田积莹. 黄土地区土壤的物理性质与黄土成因的关系[J]. 中国科学院西北水保所集刊, 1987(5): 1-12.

(上接第 41 页)

(4) 本文的研究仍属于在简单分析基础上的半定量研究, 还没有充足的生态水文过程基础, 也没有建立起小流域年径流变化和水土保持工程的种类、强度、质量的数量关系, 不利于对土地利用规划给出定量指导, 因此仍需进一步深入研究。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘卉芳, 朱清科, 魏天兴. 晋西黄土区森林植被对流域径流的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 5-9.
- [2] 穆兴民, 高鹏, 巴桑赤烈. 应用流量历时曲线分析黄土高原水土保持措施对河川径流的影响[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 382-389.
- [3] 穆兴民, 王文龙, 徐学选. 黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响[J]. 水利学报, 1999(2): 73-75.
- [4] 郭慕萍, 王志伟, 秦爱民, 等. 54 年来中国西北地区降水量的变化[J]. 干旱区研究, 2009, 26(1): 120-125.
- [5] 张淑兰, 王彦辉, 于彭涛, 等. 定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 53-58.
- [6] 毛泽秦. 纸坊沟流域近 50 年水沙特性及其变化研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 264-268.
- [7] 许炯心, 孙季. 近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 690-695.
- [8] 张鉴, 段义字. 平凉市纸坊沟流域 45 年降水变化特征初步分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 257-258.
- [9] 张淑兰, 王彦辉, 于彭涛, 等. 人类活动对泾河流域径流时空变化的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6): 66-72.
- [10] 毛泽秦. 纸坊沟小流域综合治理成效及水土资源高效开发利用模式[J]. 中国水土保持, 2008(6): 43-44.
- [11] 徐丽娟. 人类活动影响下大河流域降雨径流关系特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 73-76.