

# 黄土高原沟壑区小流域水分环境演变研究\*

黄明斌\*\* 康绍忠 李玉山 (中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

【摘要】 以南小河口为例, 评价了水土保持工程措施、生物措施和生产力水平提高过程对流域水分环境条件的影响。结果发现南小河流域水环境在近 50 年内发生了很大变化, 坡面年总汇流量由治理前的 15.83mm 逐步减小为 5.16mm 和现在的 3.66mm, 未来 10 年可能减到 2.86mm; 塬面产流量却因庭院和道路面积增加以及建筑风格提高而逐步增大; 坡地和沟谷的产流量逐步减小。同时生产力水平的提高进一步加强了水分小循环, 削弱了水文大循环, 改变了流域水均衡要素的定量分配。

关键词 小流域 综合治理 水分效应

**Evolution of moisture environment of small watershed in gully region of Loess Plateau.** Huang Mingbin, Kang Shaozhong and Li Yushan (*Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica, Yangling 712100*). - *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1999, 10(4): 411~ 414.

Taken the Nanxiaohe watershed as a study case, the influence of engineering and biological measures for soil and water conservation and procedures for improving productivity level on the moisture environment was evaluated. During the past 50 years, the moisture environment of Nanxiaohe watershed was significantly changed. The total annual surface runoff decreased from 15.83mm before starting integrative controls to 3.66mm at present time, and would reduce to 2.86mm in the future 10 years. The plateau runoff increased, due to the increase of courtyard and road area and the improvement of building style, and the slope and gully runoff gradually decreased. Meanwhile, the increased productivity further reinforced the small cycle of water and weakened its big cycle, and changed the quantitative distribution of water balance elements in watershed.

**Key words** Watershed, Integrative controls, Moisture effect.

## 1 引言

所谓水分环境效应是指由于农业措施和工程措施导致降雨入渗关系发生变化、土壤储水改变以及流域径流发生相应变化。70 年代以来, 黄河水断流现象日益严重, 致使下游灌区农业、工业生产受到严重威胁。近年来降水偏少和黄河水高开发利用率是断流的主要原因。但黄河中游水土保持治理与开发产生何种影响尚难估计。从小流域尺度来讲, 在水土保持治理度、植被盖度和农田生产力日益提高的情况下, 水分小循环将大幅度增强, 可能导致水分循环和转化路径的改变, 从而引起中游径流量减少的结果<sup>[1,2]</sup>。然而减少的程度和趋势如何则需深入研究。为此, 我们选择了有长序列降雨产流观测资料和进行过系统的水土保持综合治理的西峰南小河流域作为研究对象, 通过对不同下垫面(包括水文-农田子单元、水文-坡地林、草子单元、水文-道路、庭院子单元以及不透水面)水量转化规律的分析, 来探讨水土保持治理度、土地生产力水平提高过程对水文小循环和大循环的影响, 提出区域水环境变化趋势预测, 为区域持续发展和生态系统良性循环提供理论依据。

## 2 自然概况与研究方法

### 2.1 小流域自然概况和综合治理情况

南小河口是泾河支流蒲河左岸的一条支沟, 位于 107°37'E, 35°42'N。海拔 1050~1423m。流域长 13.6km, 平均宽度 2.7km, 流域面积 36.6km<sup>2</sup>。干沟长 11.8km, 比降 2.8‰, 沟道密度 1.69km<sup>-1</sup>。按土壤侵蚀区划, 属黄土高原沟壑区典型。流域地貌总的来说有 3 种类型: 塬面、梁峁坡和沟谷。塬面地形宽广平坦, 坡度一般在 5°以下, 面积占流域总面积的 56.9%。梁峁坡为连接塬面的缓坡带, 坡度一般在 10°~20°之间, 面积占流域总面积的 15.7%。梁峁坡以下为沟谷, 其形状呈“V”字形。沟谷坡度一般在 25°以上, 沟谷面积占流域总面积的 27.4%<sup>[1]</sup>。流域年平均气温 9.3℃, 最高气温 39.6℃, 最低气温 -22.6℃, 最大日温差 23.7℃, 年温差 62.2℃, 无霜期 155d, 陆地 Φ20 型蒸发皿观测多年平均蒸发量 1503.5mm。年均降雨量为 556.5mm, 其中 6~9 月降雨量占全年降雨量的 67.3%。黄土是两流域主要覆盖性土壤, 粘土含量甚微, 土质松软。

南小河流域是综合治理取得显著成效的一条小流域, 早

1) 西峰水保站。1983. 1954~1980 年黄河中游水土保持径流泥沙观测资料。郑州。水利水电部黄河水利委员会。

\* 国家自然科学基金重大项目(49890330)、国家“七五”科技攻关和中国科学院“西部之光”资助项目。

\*\* 通讯联系人。

1998-09-03 收稿, 1998-12-10 接受。

在 1952 年就被确定为黄河中游黄土高原沟壑区水土保持综合治理示范典型。截止到 1980 年底,大规模的水土保持治理工作就基本完成;1980 年以后,工作重点主要用于农林草结构调整和生产力水平提高上;到目前为止,南小河流域已建成为农林草果业综合发展的复合生态系统,生产力也处于较高水平。水土保持综合治理减沙效益达 99%,蓄水效益也达 80% 以上。流域综合治理措施具体表现在如下几方面:塬面布设“三道防线”;沟坡修水平梯田,建山地果园、护坡林、苜蓿坡等;沟谷打柳谷坊、土谷坊,沟底建防冲林、淤地坝和小水库。基本达到水不下塬,泥不出沟,农林牧全面发展。

## 2.2 研究方法

影响小流域水分环境条件的因素是多方面的,概括起来可分为:气候变化,例如温度和降水的改变;工程措施,例如修水平梯田、淤地坝和涝池等;生态措施,例如农林草业调整、中低产田改造和生产力水平提高等都可以引起水量转化的路径和各部分分配比例的变化。但是本文主要讨论的是小流域综合治理的水分环境效应,不涉及气候因素,包括降雨的年度变化。然而,降雨是水量转化的主要输入项,是推动系统循环的源动力,如何正确处理降雨事件,一方面决定了研究结果的准确性;另一方面也决定了研究工作的繁易程度和结论的合理性。为此,在技术处理上,首先利用 GIS,考虑植被类型、盖度和坡形等要素将小流域格划分 478 个不同的水文-生态子单元;然后利用数理统计理论建立该地区之降雨事件各特征参数的概率分布函数,计算各特征参数的数学期望,这些特征参数(降雨历时、降雨强度、降雨时间间隔和降雨频度)可以反映特定区域的降雨事件。在此基础上再利用水量转化理论和水平衡原理,分别建立各子单元的蒸散速率、入渗速率和产流速率等要素的概率分布函数和数学期望子模型,并引入一些反映土壤、植被性质的特征参数。忽略各子单元间的水量交换,子单元下垫面条件视为均匀,而整个小流域水量转化关系经各子单元复合而成,这种方法得出的小流域或者子单元水量转化的定量关系反映了特定地区一定下垫面条件的一般特征。

## 2.3 模型介绍

**2.3.1 小流域水量转化的特点** 黄土高原沟壑区由于独特的地貌形态,小流域水量转化表现出如下特点:(1) 河川径流对地下水无侧向补给,地下水的唯一补给来源只能是大气降雨的垂直渗入<sup>[4]</sup>。(2) 地下不直接参与土壤水分的垂直循环,黄土高原具有深厚的黄土性土壤,其土壤水库具有陆地表面水库同样的功能,能够截留并保持大部分乃至全部入渗水量,减弱了入渗降雨转化为地下径流的可能性。(3) 土壤水分在长期循环过程中产生明显的层次:地表活动层,该层土壤含水量变化较为剧烈,受蒸散发影响较大,活动层的深度决定于下垫面的状况;土壤含水量相对稳定层。(4) 降雨有明显的季节性,雨季(6~9月)的降雨,多为阵性降雨,历时短,雨强大,是产流的主要时期。其它月份的降雨,雨强小,历时长,产流的可能性小。(5) 地形复杂,下垫面空间变异性大,小气候气候条件对水量转化的影响较大。

**2.3.2 水文-生态单元水量转化模型结构** 小流域内任一子单

元瞬态水量转化关系和概化后的水量转化关系如图 1 所示<sup>[3,6]</sup>。其中, $i(t)$ 是降雨强度, $e_t(t)$ 是总蒸散速率; $e_s(t)$ 是裸间土壤蒸发速率; $e_v(t)$ 是植物蒸腾速率; $v(t)$ 是植被截流、地表蓄水速率; $r_s(t)$ 是地表产流速率; $r_g(t)$ 是指塬面径流量中的部分雨量汇集到积水洼地由裂隙对地下水的补给速率,在沟坡是指降雨通过入渗补给地下水的速率; $r_{sv}(t)$ 是地表径流对河川径流的补给速率; $f_i(t)$ 是土壤入渗速率; $u(t)$ 是活动层向相对稳定层的入渗补给速率, $w(t)$ 是稳定层土壤水分在水势梯度的作用下克服重力向活动层的补给速率,二者之和的数学期望近似为零; $r_{gv}(t)$ 是地下径流速率(泉水涌流); $y_i(t)$ 是子单元对河川径流的总供水速率。上述参数大都通过实际测定而得。

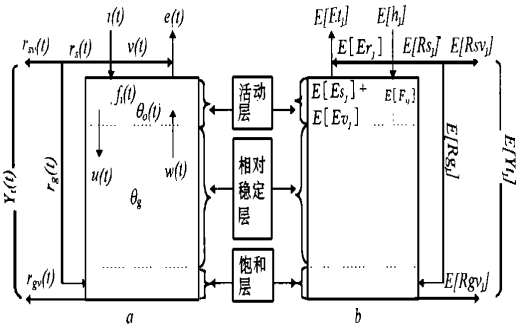


图 1 任一时段  $j$  次降雨事件子单元水量转化的瞬态(a)和概化模型(b)

Fig. 1 Instantaneous water amount transformation (a) and statistical dynamic model (b) during a rainy event.

A: Moving layer, B: Relative stable layer, C: Saturated layer.

$E[h_j]$  是一次降雨深的数学期望;  $E[E_{ij}]$  是总蒸散量的数学期望;  $E[E_{sj}]$  是蒸发量的数学期望;  $E[E_{vj}]$  是蒸腾量的数学期望;  $E[E_{vj}]$  是截流量和蓄水量的数学期望;  $E[R_{sj}]$  是子单元产流量的数学期望;  $E[R_{gj}]$  是补给量的数学期望;  $E[R_{svj}]$  是一次降雨地表径流的总补给量的数学期望;  $E[F_{ij}]$  是一次降雨入渗量的数学期望;  $E[R_{gvj}]$  是地下径流量的数学期望;  $E[Y_{ij}]$  是总供水量的数学期望;  $\theta_0(t)$  是活动层土壤初始含水量;  $\theta_g(t)$  是相对稳定层的土壤含水量。上述参数都是根据物理过程由相应的公式或者模型计算出来的。

由于篇幅所限,以上各式的数学推导和计算方法略,详细材料可见文献[4,5]。对任一时段而言,以上各式分别乘以各时段的降雨频数  $m_{ij}$  则变为时段水量转化关系;而各时段相加,则成为全年水量转化模型。在进行全年水量平衡运算时,各时段初的土壤含水量将根据水量转化关系逐时段确定,并且满足第一时段初的土壤平均含水量等于最后时段末的土壤平均含水量。这样活动层多年平均水量平衡方程:

$$P_A = R_{SA} + E_{TA} + \Delta S_{SA} + U_{TA} + W_{TA} \quad (1)$$

其数学期望

$$E[P_A] = E[R_{SA}] + E[E_{TA}] \quad (2)$$

式中,  $P_A$  是年总降雨量,  $R_{SA}$  是年总径流量,  $E_{TA}$  是年总蒸散量,  $S_{SA}$  是年总土壤水分改变量,  $U_{TA} + W_{TA}$  是活动层与相对稳定层之间的年总水分交换量,  $E[ ]$  为数学期望, 而且有  $E[\Delta S_{SA}] = 0$ ,  $E[U_{TA}] + E[W_{TA}] = 0$ 。

3 结果与讨论

3.1 水土保持工程措施对流域水分环境的影响

表1为南小河流域十八亩台以上塬、坡和沟各部位在水土保持治理前和治理期间水量转化各要素的定量关系及其对出境径流的贡献。表2是农林草生态系统总蒸散量、土壤活动层平均含水量随时间的变化情况。治理前,由于当时生产力水平低下,农田、人工草地和自然草地年均郁闭度小,降雨产流的可能性大,生态系统的蒸散强度相对较弱,土壤年均含水量较高。由表1可知,治理前十八亩台以上单位面积年总坡面径流为15.83mm,年总出境径流量为25.13mm,深层地下径流贡献9.3mm。其中塬面单位面积年总径流量为14.8mm,主要来自庭院、道路和农田;坡地单位面积年总径流量为13.06mm,主要来自荒坡草地;沟谷单位面积年总径流量为19.62mm,主要来自沟床、陡坡

地和荒坡草地。治理期间,十八亩台以上土地利用结构有所调整,主要表现为梁峁坡大量改为水平梯田,沟谷一部分荒坡草地种林,与此同时大搞蓄水保土工程拦截塬面径流,并发展生产力。结果流域单位面积产生的年总坡面径流减小为13.48mm,其中工程拦蓄8.32mm,只有5.16mm构成出境径流,再加上地下径流的9.3mm,年总出境径流量减小为14.46mm。治理期间产流量和出境径流量减少的主要原因是塬面蓄水工程拦截了塬面全部径流量,坡地梯田化减小了坡地产流量,治理前坡地产流量为13.06mm,坡改梯田后产流量减小为7.54mm,平均减少5.52mm。另外,治理后农业生产水平的小幅度提高对削弱流域水文大循环过程亦起到一定的辅助作用。因此,水土保持工程对流域水量转化的影响在于削弱水文大循环过程,强化降雨就地入渗量,在一定程度上也增加了塬面降雨对地下水的补给。

表1 不同治理阶段南小河流域土地利用及多年平均坡面产流量的变化过程

利用方式 Use style		治理前 Before starting control		50年代中~70年代 The middle of fifties~seventies		80~90年代 Eighties~nineties		未来10年 In the future ten years	
		面积 Area	径流深 Runoff depth	面积 Area	径流深 Runoff depth	面积 Area	径流深 Runoff depth	面积 Area	径流深 Runoff depth
塬面 Plateau	农田 Farmland	13.89	6.6	16.89	4.15	13.512	0.9	12.604	0
	果园 Orchard	—	—	—	—	3.378	0	3.378	0
	人工草地 Marr made grassland	1.009	0.2	1.009	0.2	1.009	0.2	1.009	0
	庭院 Courtyard	0.888	104.0	0.888	104.0	0.888	170.2	1.332	300.7
	道路 Road	0.928	97.9	0.928	97.9	0.928	149.3	1.392	285.6
	其他 Others	0.425	2.7	0.425	2.7	0.425	2.7	0.425	2.7
	小计 Total	20.14	14.7	20.14	12.64	20.14	15.05	20.14	39.7
坡 Slope	农田 Farmland	0.2	10.6	—	—	—	—	—	—
	荒坡草地 Grassland	2.505	10.9	—	—	—	—	—	—
	梯田果园 Orchard in terrace	—	—	2.705	4.95	2.705	0	2.705	0
	其他 Others	0.195	43.4	0.195	43.4	0.195	43.4	0.195	43.4
	小计 Total	2.9	13.06	2.9	7.54	2.9	2.9	2.9	2.9
沟 Gully	林地 Forest	—	—	1.30	8.3	5.275	8.3	5.275	3.8
	荒坡草地 Grassland	5.275	16.5	3.975	16.5	—	—	—	—
	坝地农田 Dam land	0.254	8.6	0.254	2.1	0.254	2.1	0.254	0
	陡坡地 Sharp slope	1.846	21.7	1.846	21.7	1.846	21.7	1.846	21.7
	沟床 Gully bed	0.185	102.8	0.185	102.8	0.185	102.8	0.185	102.8
	小计 Total	7.56	19.62	7.56	17.99	7.56	13.68	7.56	10.5
	总计 Total	30.6	15.76	30.6	13.48	30.6	13.56	30.6	28.99
实际流域出境的坡面径流深 Actual depth of surface runoff in watershed			15.76	5.16	3.66	2.86			

表2 不同阶段农林草生态系统总蒸散量E<sub>T</sub>(mm)和年均土壤含水量θ(cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>)变化情况

类型 Types		治理前 Before starting control	50年代中~70年代 The middle of fifties~seventies	80~90年代 Eighties~nineties	未来10年 In the future 10 years
农田(塬面) Farmland(Plateau)	郁闭度 Canopy density(%)	40	50	60	80
	E <sub>T</sub> (mm)	558.7	561.1	564.4	565.3
	θ(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.219	0.204	0.194	0.187
人工草地(塬面) Marr made grassland(Plateau)	郁闭度 Canopy density(%)	60	70	70	80
	E <sub>T</sub> (mm)	563.0	565.1	565.1	565.3
	θ(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.194	0.189	0.189	0.178
林地(沟谷) Forest(Gully)	郁闭度 Canopy density(%)	—	60	70	80
	E <sub>T</sub> (mm)	—	557.0	560.0	565.3
	θ(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	—	0.193	0.181	0.173

### 3.2 农林草种植结构调整和生产水平提高过程对流域水分环境的影响

1980年后大规模的水土保持工程基本结束,小流域综合治理改为以生态措施为主.生物措施主要为调整种植结构、提高生产力水平.在南小河流域具体表现为塬面划出20%的农田种植果树,坡地梯田改为山地果园,沟谷缓坡荒草地造林,同时植被覆盖度和郁闭度以及农业生产水平也有一定程度的提高.因此,塬面 $13.512\text{km}^2$ 的农田单位面积产流量仅为 $0.9\text{mm}$ , $0.378\text{km}^2$ 的果园产流量为零;坡地 $2.705\text{km}^2$ 山地梯田果园产流量也为零;沟谷由于林地面积扩大,单位面积的产流量也由原来的 $17.99\text{mm}$ 减为 $13.68\text{mm}$ .但是由于庭院、道路建筑水平提高,单位面积产流量有较大幅度的增加,致使塬面总径流量较治理前和治理过程中都有不同程度的增大.然而塬面径流对流域总出境径流量的贡献很小,因此十八亩台出境径流量减为 $12.96\text{mm}$ ,其中年总坡面产流为 $13.56\text{mm}$ ,工程拦蓄 $9.9\text{mm}$ ,对出境径流的贡献仅为 $3.66\text{mm}$ .另外,由于植被郁闭度和生产力水平的提高,农、林、草和果园单位面积的蒸散量有所增加, $3\text{m}$ 土层年平均土壤含水量有所减小,土壤水分环境有趋于干燥化的倾向.例如,治理前塬面农田年总蒸散量为 $558.7\text{mm}$ , $3\text{m}$ 土层年平均含水量为 $0.219\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ;治理后年总蒸散量为 $564.4\text{mm}$ ,土壤平均含水量为 $0.194\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ .

总之,由于农林草种植结构调整和生产水平提高,小流域水分小循环有所加强,水文大循环有所削弱,植物赖以生成的土壤水分环境趋于一定程度的干燥化.

### 3.3 小流域水环境变化趋势预测

未来的南小河流域农业生产水平将继续提高,伴随人口增加,土地利用方式将进一步调整,小流域水量转化关系也会发生相应变化.我们对未来南小河流域十八亩台以上不同部位水量转化关系及总的坡面流和出境径流量作出的预测,其中塬面道路和庭院面积分别增加 $1/2$ 倍,植被郁闭度均增大到80%.由表1可见,塬面由于庭院、道路面积增加和产

流系数提高,单位面积年总径流量增大,塬面汇流对地下水的补给量也可能增大,高度治理的坡地产流量变化很小,沟谷产流量减小 $3.18\text{mm}$ ,坡面流对出境径流的贡献也减小,仅有 $2.86\text{mm}$ ,年总出境径流减小到 $12.16\text{mm}$ .同时由于生产力水平进一步提高,生态系统单位面积的蒸散量增大,活动层年均土壤含水量进一步降低.因此,在大力提高土地生产力水平的过程中应注意水分生态环境的维护,以保持生态系统持续健康发展<sup>[5]</sup>.

## 4 结 论

通过分析,发现南小河流域水环境在近50年内发生了很大变化,坡面年总汇流量由治理前的 $15.83\text{mm}$ ,逐步减小为 $5.16\text{mm}$ 和现在的 $3.66\text{mm}$ ,未来10年可能减到 $2.86\text{mm}$ ;塬面产流量却因庭院和道路面积增加以及建筑风格提高而逐步增大;坡地和沟谷的产流量逐步减小.同时生产力水平的提高进一步加强了水分小循环过程,削弱了水文大循环过程,导致活动层土壤含水量降低.另外,也发现水土保持工程措施对流域水量转化的影响程度较生物措施和生产力水平提高过程的影响程度要大,前者使流域坡面汇流减小了 $10.67\text{mm}$ ,后两者的综合作用减小 $1.5\text{mm}$ .

## 参考文献

- 1 李玉山. 1983. 黄土区土壤水分循环及其对陆地水文循环的影响. 生态学报, 3: 91~101.
- 2 李玉山. 1997. 黄土高原治理开发与黄河断流的关系. 水土保持通报, 17(6): 41~45.
- 3 黄明斌. 1998. 小流域综合治理的水分环境效应[博士学位论文]. 陕西杨陵: 中国科学院水土保持研究所.
- 4 薛根良. 1995. 黄土地下水的补给与赋存形式探讨. 水文地质与工程地质, 1: 38~39.
- 5 董全. 1999. 生态效益: 自然生态过程对人类的贡献. 应用生态学报, 10(2): 233~240.
- 6 Eagleson, P. S. 1978. Climate, soil and vegetation I. Introduction to water balance dynamics. Water Resources Res., 14(5): 705~712.

作者简介 黄明斌,男,1968年生,助理研究员,博士,主要从事土壤物理、农业水分生态等方面的研究工作,公开发表论著20余篇部. E-mail: HMBD@public.xa.sn.cn