

# 大尺度流域不同地貌类型区水土保持减水效益分析

刘贤赵, 黄明斌

(中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 趋势分析结果显示, 河源沟区、风沙区、丘陵区各代表流域年径流量均在 1970 年前后发生一致性改变, 即从 1970 年以来开始有明显的减少趋势, 平均减流幅度(与 1959~1969 年径流相比)以河源沟区(大理河)和丘陵区(小理河)最大, 分别为 36.33% 和 36.21%, 风沙区(海流兔河)最小(20.61%)。减流幅度的大小是各类型区下垫面状况、水土保持措施和治理程度、降雨量变化等多种因素综合作用的结果。借助适合于黄土高原降雨-产流特性的月水量平衡改进模型, 计算天然状态下降雨应有的产流量与同期实测径流量求得减水效果。结果表明, 3 个地貌类型区 70 年代的减水效益没有明显差异, 而在 80 年代减水效果差异显著, 丘陵区(小理河, 24.99%) > 风沙区(海流兔河, 17.28%) > 河源沟区(大理河, 13.13%)。上述结论为定量评价黄土高原生态环境建设对黄河水资源及水环境演变的影响提供了数据基础。

**关键词:** 大尺度流域; 地貌类型区; 水土保持; 减水效益

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2001)01-0090-05

## Benefits of Water Reduction by Soil and Water Conservation in Different Physiognomy Type Areas of Big Scale Watershed

LIU Xian-zhao, HUANG Ming-bin

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** Tendency analysis indicate that the yearly runoff of three typical basins (Dali river, Hailiutu river and Xiaoli river), which belong to riverhead gully section, sand and wind section and hill section respectively changed consistently in 1970, namely the annual runoff has showed decreasing tendency since 1970. Compared with the runoff in 1959~1969, the average extents of water reduction in riverhead gully section (Dali river) and hill section (Xiaoli river) are maximal, namely 36.33% and 36.21%, respectively, and the one of water reduction in sand and wind section (Hailiutu river) is the least, namely 20.61%. The variation of the extents of water reduction is mostly caused by integrated results of different underlying surface status, soil and water conservation measures and controlling degree, rainfall variation in different physiognomy type areas. The monthly water balance model for calculating runoff on loess plateau has been used in analyzing the benefits of water reduction by soil and water conservation. The results indicated that the benefits of three typical basins water reduction in 1970's didn't show significant difference, but the benefits of water reduction in 1980's are very significant difference. The benefit of water reduction in hill section (Xiaoli river, 24.99%) is greater than that in sand and wind section (Hailiutu river, 17.28%) and in riverhead gully section (Dali river, 13.13%). Results above are the basis of evaluating the effect of eco-environment of the Loess Plateau on the water resources and the evolvement of water environment of Yellow River.

**Key words:** big scale watershed; physiognomy type areas; soil and water conservation; benefit of water reduction

黄河断流与黄土高原水土流失成为全国上下普遍关注而又亟待整治的我国最大的生态环境问题, 许多专家学者纷纷对此发表专文论述, 并献计献策, 谋求缓解黄土区水土流失并整治生态环境。最近朱显谟院士撰文指出<sup>[1]</sup>, 抢救“土壤水库”是黄土高原生态环境综合治理与可持续发展的关键, 其目的是要通过各种水土保持措施维护住黄土高原高入渗“土壤水库”的存在, 确保全部降水就地入渗的顺利实现。然而以流域为单元的水土保

持综合治理, 虽然减少了地表径流, 但同时也因植被蒸散量的增加而促成土壤干层的形成。长期以来, 众多部门对黄土高原水土保持减水作用进行了大量的研究, 取得了许多有价值的结论, 但研究结果差异较大<sup>[2,3]</sup>。原因之一一是计算方法不尽合理, 大多数研究者多借助于传统的水文法和水保法, 采用具有明确物理意义的模型法相对较少; 二是对大尺度流域未能区分出不同地貌类型区水土保持的减流作用, 结果使流域计算的减水程度差异很大, 从而给定量评价大尺度流域乃至整个黄土高原, 以及以人工林草植被建设为主的生态环境治理对黄河水资源的潜在影响带来一定的困难。为此, 本文以实测水文气象资料为基础, 选取具有典型地貌类型区的无定河流域, 结合趋势分析和月水量平衡改进模型, 定量评价不同地貌类型区水土保持的减流作用, 以期对黄土区水土流失综合治理、生态环境建设与预测黄河水资源演变提供科学依据。

## 1 不同地貌类型区及其水土流失治理概况

(1) 河源涧区。河源涧区位于无定河流域的西南部, 大理河的发源地, 面积 3 454 km<sup>2</sup>, 占全流域面积的 11.4%, 其中水土流失面积占区内面积的 92.3%。地表覆盖着更新世厚层黄土及洪积冲积物, 梁峁状丘陵地形, 梁长峁大, 涧地平坦, 沟深岸陡, 沟蚀和重力侵蚀严重。年均径流模数 42 300 m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·a), 侵蚀模数 9 680 ~ 16 500 t/(km<sup>2</sup>·a)。针对河源涧区地貌、地形及土壤侵蚀特点, 治理重点是固沟保涧。主要措施是在涧地上修地坝, 拦蓄坡面径流, 引洪漫涧, 把涧地变成高产稳产的农田区; 在沟头修围埂, 做到水不下沟, 制止沟头前进; 在沟谷修大坝, 拦泥淤地, 防止沟床下切; 同时在坡地上修梯田、造林、种草。经过几十年的连续治理, 整个河源涧区共计修地坝 0.3 万 hm<sup>2</sup>, 水地、梯田各 0.2 万 hm<sup>2</sup>, 造林 3.3 万 hm<sup>2</sup>, 种草 1.6 万 hm<sup>2</sup>, 累计治理面积 5.8 万 hm<sup>2</sup>, 约占本区水土流失面积的 18.0%。本区选取的代表流域为大理河, 其代表水文站为青阳岔(表 1)。

(2) 风沙区。风沙区位于无定河流域的西北部, 面积 16 446 km<sup>2</sup>, 占全流域面积的 54.3%, 其中水土流失面积占区内面积的 62.0%。区内地势平坦, 沙丘广布, 河流稀少, 间有草原、海子、滩地, 风蚀严重, 水蚀轻微。侵蚀模数为 200 ~ 900 t/(km<sup>2</sup>·a), 年径流模数 54 000 m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·a)。该区治理的重点是防风固沙。综合治理措施主要是在沙丘移动方向营造防风固沙林带, 制止沙丘流动; 在耕地四周营造农田防护林, 保护农业生产; 在有水源的地方, 引水拉沙, 变沙漠为良田。经过多年的综合治理, 许多小流域风蚀基本被控制, 生态环境已进入良性循环轨道, 整个风沙区已造林 24.0 万 hm<sup>2</sup>, 种草 3.5 万 hm<sup>2</sup>, 发展水地 2.5 万 hm<sup>2</sup>, 总计达 30.0 万 hm<sup>2</sup>, 治理度达 29.0%。本区代表流域是海流兔河, 韩家峁为其水文总站(表 1)。

(3) 黄土丘陵沟壑区。黄土丘陵沟壑区位于无定河流域的东南部, 面积 10 361 km<sup>2</sup>, 占全流域面积的 34.3%, 其中水土流失面积占区内面积的 92.6%。区内梁峁起伏, 沟壑纵横, 植被稀少, 土壤侵蚀剧烈, 年均径流模数 48 500 m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·a), 侵蚀模数 17 130 ~ 26 120 t/(km<sup>2</sup>·a)。基于丘陵密集、地形破碎、沟蚀面蚀都很严重的特点, 本区采取以小流域为单元, 沟坡兼治、综合治理的方式进行。主要治理措施是在缓坡耕地修水平梯田, 实现坡地梯田化; 荒坡陡坡造林种草建果园, 实现荒山陡坡果园化; 在沟道内打地坝, 实现沟壑川台化。经过数年的努力, 整个丘陵沟壑区已修梯田 21.4 万 hm<sup>2</sup>, 种草 13.8 万 hm<sup>2</sup>, 发展坝地 1.87 万 hm<sup>2</sup>, 水地 1.8 万 hm<sup>2</sup>, 合计 48 万 hm<sup>2</sup>, 约占水土流失面积的 46.3%, 同河源涧区和风沙区相比, 治理程度较高。本区代表流域为小理河, 水文测站为李家河(表 1)。

表 1 无定河流域不同地貌类型区代表流域年均降雨情况

类型区	代表流域	控制站及其面积(km <sup>2</sup> )	年均降雨量(mm)			年均流量( $\times 10^4$ m <sup>3</sup> )	资料年限
			1959 ~ 1969 年	1970 ~ 1979 年	1980 ~ 1989 年		
河源涧区	大理河	青阳岔(662)	453.0a	338.3b	362.5b	3535	1959 ~ 1989
风沙区	海流兔河	韩家峁(2452)	392.0a	322.0a	323.2a	10470	1959 ~ 1989
丘陵区	小理河	李家河(807)	454.4a	446.6a	406.2a	3647	1959 ~ 1989

注: 表中同一行中不同字母表示差异显著性( $P < 0.05$ )。

## 2 研究方法

本文采用趋势分析和模型法定量评价不同类型区水土保持措施的减水效果。基本思路是: (1) 利用 1959 ~ 1989 年各地貌类型区典型流域水文站的实测径流资料, 以 5 年滑动平均进行趋势分析, 利用开展水土保持工作以前(即 1970 年以前)和水土保持工作全面展开后(即 1970 年后)的流域实测水文资料进行对比分析, 以揭示流域水土保持的减流效果。(2) 借助适用于黄土区产流特征的月水量平衡改进模型, 利用不同地貌类型区代

表流域治理前(1970年前)的水文气象资料率定模型参数,用率定后的模型模拟70年代和80年代流域天然状态下降雨应有的产流量,根据模拟的径流量与同期实测径流值计算减水效果。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同地貌类型区水土保持对径流影响趋势分析

趋势分析的结果如图1。图1表明,3个地貌类型区代表站年径流量均在1970年前后发生明显的一致性改变,即从1970年以后开始有明显的减少趋势。河源涧区大理河流域(青阳岔)1970~1979年与1980~1989年实测平均径流分别比1959~1969年减少38.67%和33.99%;风沙区海流兔河(韩家崓)1970~1979年与1980~1989年实测平均径流比1959~1969年分别减少12.65%和28.56%;丘陵区小理河(李家河)1970~1979年与1980~1989年实测年均径流比1959~1969年分别减少30.51%和41.90%。径流量减少幅度因不同地貌类型区而表现出明显差异,河源涧区青阳岔站年均减少幅度为36.33%,丘陵区李家河站为36.21%,风沙区韩家崓站最小(20.61%)。径流减少幅度不一致的原因可能有3个:一是不同地貌类型区下垫面状况不同而导致水流来源特性存在差异。无定河流域水量主要来自风沙区,占57.8%,丘陵区 and 河源涧区分别占32.7%和9.5%,加上风沙区土壤入渗性能好,地下径流所占比例约90%,从而对降雨产流具有较好的缓冲调蓄作用;二是水土保持措施和治理程度不同。治理程度以丘陵区李家河最高(46.3%),尽管风沙区(29%)治理程度高于河源涧区(18%),但风沙区以造林种草的生物措施为主,其水土保持功效不如工程措施明显,结果使以林草措施为主的风沙区减流幅度小于以工程措施为主的河源涧区和丘陵区。三是降雨量的变化。风沙区海流兔河韩家崓站各年代平均降雨量并未表现出明显差异,而青阳岔站70年代和80年代的平均降雨量明显小于60年代(表1)。当然,人工林草植被蒸散量与流域工农业生产、生活用水程度也是影响减流幅度不可忽视的原因。

#### 3.2 不同地貌类型区代表流域径流量的计算模式

由于降雨与产流的关系极其复杂,产流的形成既受降雨的影响,又受下垫面的制约。这样使得许多物理概念模型用于流域尺度长序列的降雨产流分析受到一定程度的限制。因此,如何有效地计算流域产流量成为准确评价水土保持减水效益的前提。为此,本文将适合于黄土高原产流特征的月水量平衡模型<sup>[4]</sup>引入于水保效益评估之中。该模型由地面径流子模型、地下径流子模型和流域蒸散发子模型组成。

3.2.1 地面径流子模型 根据黄土区降雨特性及霍顿产流理论,地面产流属于超渗径流,即由降水超渗直接形成径流,用式表示为

$$Q_s = \alpha \cdot H \cdot p \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为雨量级系数;  $H$  为超渗径流系数;  $p$  为月降水量。

为克服流域降雨入渗的不均匀性对产流计算的影响,对于不同雨量级的降水应赋予不同的径流系数,于是引入变径流系数  $H_s$ <sup>[5]</sup>:

$$H_s = (1 - \frac{f_c}{p_m}) (1 - k \frac{w_m - w}{w_m}) \frac{p}{p_m} \quad (2)$$

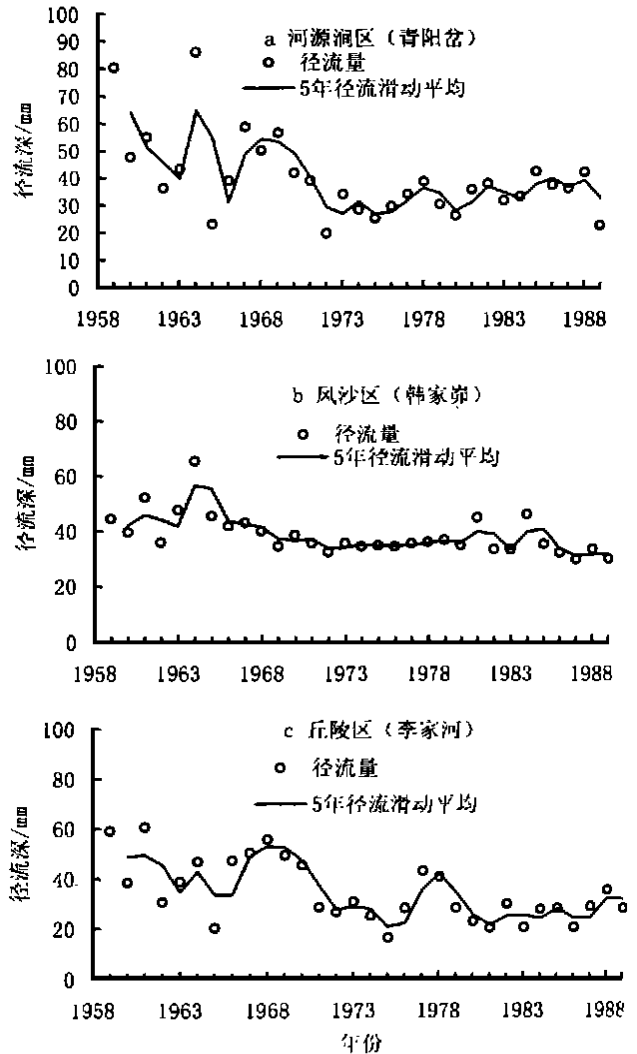


图1 不同地貌类型区代表流域年实测径流量变化趋势

式中:  $H_s$  为变径流系数;  $f_c$  为流域土壤达到饱和、供水充分条件下的入渗能力,  $f_c = (1 - \alpha_{\max})p_m$ , 其中  $\alpha_{\max}$  为饱和径流系数;  $w_m$  为土壤最大含水量;  $p_m$  为实测时段最大降水量, 一般选历史上最大的时段降水量;  $w$  为实际土壤含水量;  $k$  为经验系数。

3.2.2 地下径流子模型 月水量平衡模型中, 地下径流是一个不可忽视的因子, 它随流域尺度的增大而增加, 特别是治理流域, 由于水土保持的作用, 产流下垫面发生了改变, 使得产流机制有利于向地下径流产生的方向发展。为简化计算, 将地下径流、壤中流、裂隙流等统称为地下径流, 并假定为地下线性水库出流, 在时间上滞后一个计算时段。计算式为:

$$Q_g = k_g w_{i-1} + c \quad (w_{i-1} < w_m) \quad (3)$$

式中:  $k_g$  为时段出流系数;  $w_{i-1}$  为上一时段的土壤实际蓄水量;  $w_m$  为最大土壤蓄水量;  $c$  为基流量, 可通过对枯水期的径流分析确定。其中  $w_{i-1}$  可由下式确定

$$w_i = w_{i-1} + F \quad (4)$$

式中:  $F$  为总的下渗水量, 其值为降水量与地面径流量和蒸散量之差。

3.2.3 蒸散发子模型 流域蒸散发  $E_i$  可由流域蒸发能力进行计算:

$$E_i = \begin{cases} T_d \times ET_i & P - Q_s - E_i > 0 \\ ET_i \times w_i / w_m & P - Q_s - E_i < 0 \\ ET_i & w_i > w_m \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $ET_i$  为蒸发能力, 以当月 E601 型蒸发皿实测值代替;  $T_d$  为蒸发折减系数。

3.2.4 模型参数率定 应用月水量平衡改进模型计算天然状况下当前降雨应产生的径流量, 最关键的是做好模型参数率定工作。根据不同地貌类型区代表流域水土保持治理情况, 认为模型参数可采用 1959 ~ 1969 年的资料进行率定。原因是 1970 年以前, 各代表流域水土保持措施相对单一, 人类活动影响较小, 治理程度低, 下垫面基本保持自然状态, 其产流过程与天然流域相似。率定的主要参数有  $p_m, w_m, w, \alpha_{\max}, k, T_d$  和  $k_g$ , 其方法是将参数引入模型, 模拟流域出流过程, 选取模型效率系数 ( $R^2$ ) 和径流总量相对误差  $RE$  做为目标函数。二者计算公式分别为式 (6) 和式 (7), 各地貌类型区代表流域参数率定结果如表 2。

$$R^2 = [1 - (\sum(Q_1 - Q_2)^2 / \sum(Q_1 - Q_0)^2)] \times 100\% \quad (6)$$

$$RE = [\sum(Q_1 - Q_2) / \sum Q_1] \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $Q_1, Q_2$  分别为实测和模拟的月径流量;  $Q_0$  为实测月径流量的平均值。

表 2 不同地貌类型区代表流域参数率定结果

地貌类型	测站名称	资料年限	模型参数							率定效率	
			$\alpha_{\max}$	$p_m$	$w_m$	$w$	$k$	$k_g$	$T_d$	$R^2$ (%)	$RE$ (%)
河源润区	青阳岔	1959 ~ 1969	0.25	200	450	100	0.10	0.002	0.75	84.21	9.07
风沙区	韩家砦	1959 ~ 1969	0.20	300	450	120	0.10	0.175	0.65	87.35	- 6.12
丘陵区	李家河	1959 ~ 1969	0.22	200	450	100	0.12	0.004	0.74	82.84	8.04

### 3.3 不同地貌类型区水土保持减水效益分析

以无定河流域 3 个不同地貌类型区代表流域实测水文气象资料为依据, 应用改进的月水量平衡模型及其率定的参数, 分别计算了 1970 ~ 1979 年、1980 ~ 1989 年和 1970 ~ 1989 年 3 个时段天然条件下当前降雨量应产生的径流量, 结合同期实测径流量, 计算水保措施产生的减水量和减水效果, 结果如图 2 和表 3。

表 3 不同地貌类型区代表流域水土保持减水效益

地貌类型区	流域名称	控制站	1970 ~ 1979 年			1980 ~ 1989 年			1970 ~ 1989 年		
			$Q$	$Q_c$	$\eta$ (%)	$Q$	$Q_c$	$\eta$ (%)	$Q$	$Q_c$	$\eta$ (%)
河源润区	大理河	青阳岔	32.2	38.1	14.99 <sub>a</sub>	34.7	40.2	13.13 <sub>b</sub>	33.4	39.2	14.07 <sub>a</sub>
风沙区	海流兔河	韩家砦	35.5	42.1	15.65 <sub>a</sub>	35.4	43.3	17.28 <sub>ab</sub>	35.5	42.7	16.46 <sub>a</sub>
丘陵区	小理河	李家河	31.5	34.3	14.00 <sub>a</sub>	26.3	35.3	24.99 <sub>a</sub>	28.9	35.8	19.49 <sub>a</sub>

注:  $Q$  为实测径流深;  $Q_c$  为计算径流深;  $\eta$  为减水效果; 表中同一列中不同字母表示减水效益差异显著 ( $P < 0.05$ )。

由图 2 和表 3 可知,在天然降雨条件下,不同地貌类型区代表流域 1970~1979 年年均减水效益没有显著差异,而在 1980~1989 年期间,年均减水效果差异显著 ( $P < 0.05$ ),其中丘陵区小理河流域减水效益最大(24.99%),风沙区海流兔河流域次之(17.28%),河源区大理河流域最差(13.13%)。原因是 1970~1979 年期间,各类型区代表流域水土保持综合治理还处在理顺关系阶段,水土保持措施相对单一,治理程度相对均匀,从 1982 年开始,国家对无定河流域开展了大规模的综合治理,特别是针对不同地貌类型区采取不同的治理措施并规划不同的年治理进度,治理程度以丘陵区最高,河源区最低,风沙区居中,从而表现出上述不同的减水效果。值得指出的是,上述得出的减水效益仅为 70 年代或 80 年代的平均情况。而对于降雨异常的一些年份,其减水效益差别是很大的。例如,暴雨较多、降雨强度较大的 1988 年,大理河(河源区)和小理河(丘陵区)两流域库坝损坏严重,来水量增加,使实测径流量偏大,结果使 1988 年的减水效益偏小,如青阳岔(大理河)减水效益仅为 1.99%,李家河(小理河)为 11.51%;而风沙区因土壤入渗能力大,对实测径流量的影响小,减水效益为 27.82%,为青阳岔的 13.98 倍,李家河的 2.42 倍;而对于暴雨少,降雨强度弱的年份,情况则刚好相反。

### 3 结 语

无定河流域是国家水土流失 8 大重点治理区之一,经过多年的治理,流域蓄水保土效益明显提高,水土流失危害程度大大降低,生态环境转向良性循环方向发展。本文以实测水文气象资料为基础,借助趋势分析和月水量平衡改进模型,首次分析了大尺度流域不同地貌类型区水土保持的减水效果,为定量评价黄土高原生态环境建设对黄河流域水资源及水环境演变的影响提供了基础数据。趋势分析表明,不同地貌类型区代表流域年实测径流量均在 1970 年前后发生一致性改变,即从 1970 年以来开始有明显的减少趋势,但减流幅度因地貌类型区不同而表现出明显差异,平均减流幅度(与 1959~1969 年径流相比)以河源区和丘陵区最大,分别为 36.33% 和 36.21%,风沙区最小(20.61%)。借助适合黄土高原降雨-产流特征的月水量平衡改进模型,通过计算的径流量与同期实测的径流量求得减水效果。结果表明:天然降雨条件下,3 个地貌类型区 70 年代的减水效益没有明显差异,而在 80 年代减水效果差异显著,即丘陵区(李家河, 24.99%) > 风沙区(韩家峁, 17.28%) > 河源区(青阳岔, 13.13%)。这与不同地貌类型区水土保持历史背景、水土保持措施和治理程度密切相关。此外,将月水量平衡改进模型引入水土保持减水效益评估之中只是做了初步的尝试,如何提高模型计算精度使之更好地应用于水保效益评价之中,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 朱显谟. 抢救“土壤水库”实为黄土高原生态环境综合治理与可持续发展的关键[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 1-6.
- [2] 汤立群, 陈国祥. 水土保持减水减沙效益计算方法研究[J]. 河海大学学报, 1999, (1): 18-24.
- [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): 71-75.
- [4] 郭生练, 王国庆. 半干旱地区月水量平衡模型[J]. 人民黄河, 1994, (12): 13-16.
- [5] 汤立群, 陈国祥. 大中流域长系列径流泥沙模拟[J]. 水利学报, 1997, (6): 19-26.

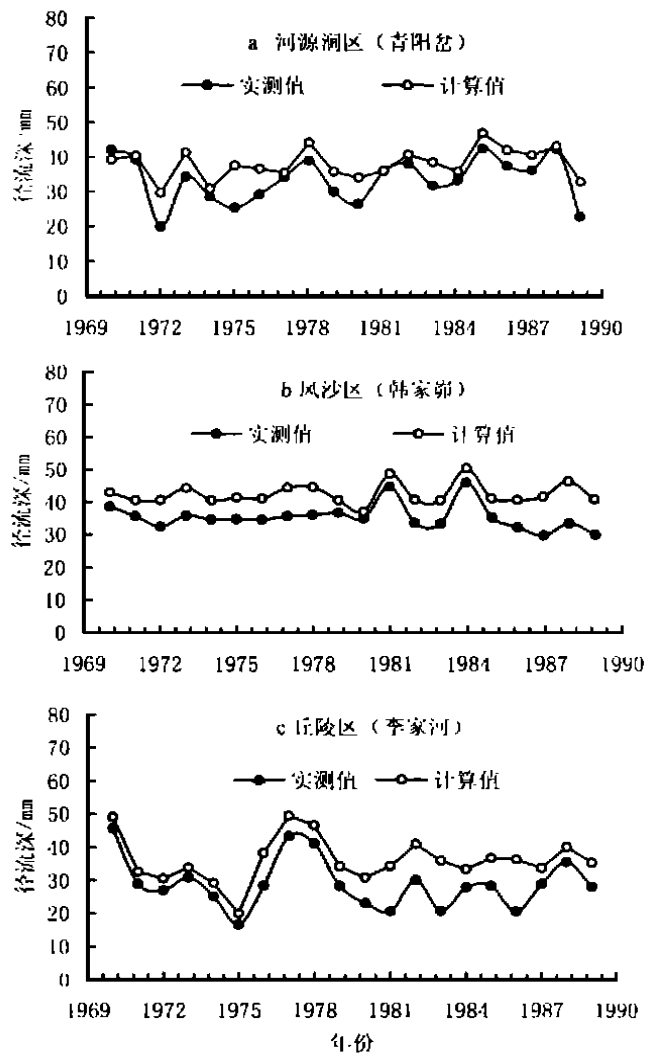


图 2 不同地貌类型区代表流域水土保持减水效益