

# 渭河源区 1970 - 2006 年梯田开发对水文产流的影响

王辉,张钰,刘光生,唐颖丰,赵力强

(兰州大学 资源环境学院,兰州 730000)

**摘要:**渭河源区自 70 年代以来持续进行大规模梯田建设,该文对土地覆盖变化、降水条件和梯田面积变化 3 个因素进行分析,从年、最丰 3 个月(7 - 9 月)、最枯 3 个月(12 月至次年 2 月)3 个不同时段探讨研究区产流效率持续递减的根本原因。基于流域降水 - 产流 - 梯田面积的变化趋势分析和显著的统计回归关系,建立了基于降水和梯田面积两种因素的产流统计模拟模型,研究结果表明:大规模梯田开发是造成渭河源区产流效率降低的根本原因,并且随着梯田面积的增加对枯水期产流影响最为剧烈、对丰水期产流影响相对较弱。对于合理规划开发利用土地,流域水资源的可持续利用和生态环境平衡具有重要的指导意义。

**关键词:**渭河;土地利用;梯田;水文过程

**中图分类号:** P333 ; S157.31

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2009)02-0220-07

## Influence of Terrace Development on Hydrological Runoff Process in the Source Region of Wei River from 1970 to 2006

WANG Hui, ZHANG Yu, LIU Guang-sheng, TANG Yin-feng, ZHAO Li-qiang

(Resource and Environment Institute, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Large-scale of terrace development had been carried out continuously since 1970s in the source region of Wei river. Three factors of land cover change, precipitation condition and terrace area change had been analyzed on three different stages, which were annually stage and three wet months stage from July to September, three dry months stage from December to February, to obtain the basis reason of runoff efficiency sustainably decrease. Based on the analysis of changing trends and statistical regression relationships between basin precipitation, runoff and terrace area, statistical simulation model of runoff process which was on the basis of precipitation and terrace area had been established. The results show that the main cause of runoff efficiency decrease was large-scale terrace development in the region of Wei River. Meanwhile, there was an intense influence on dry stage runoff and a relative weak influence on wet stage runoff with the increase of terrace area. In summary, this paper may have great guiding significance on reasonably land planning, developing and using, basin water resources sustainable utilization and ecological environment balance.

**Key words:** Wei river; land use; terrace; hydrological process

随着人类社会的发展进步,土地覆盖与土地利用格局在流域到全球的多种尺度上都发生了显著变化,并由此不断改变着地球表面的生物、能量和水分等多种过程,使之成为最为关注的科学问题之一,关注的焦点在于土地利用变化对区域资源、环境和可持续发展的可能影响。在流域尺度上,土地利用变化对水文过程影响的结果,就是直接导致水资源供

需关系发生变化,从而对流域生态、环境以及经济发展等多方面具有显著影响,因此对土地利用变化如何影响流域水文过程的认识和掌握,就成为广泛涉及流域水资源规划、管理以及可持续发展等领域的核心问题<sup>[1]</sup>。

渭河源区近 40 年来土地利用格局发生了巨大变化,多年遥感资料显示渭河源区植被覆盖情况变

\* 收稿日期:2008-10-11

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 40730634)

作者简介:王辉(1982 - ),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为生态水文,水资源规划配制。E-mail:wanghui1982@163.com

通信作者:张钰(1963 - ),男,甘肃平凉人,博士,教授级高工,主要研究方向流域生态水文、水资源调查评价、水资源配置。E-mail:zhan-gyu@lzu.edu.cn

化微弱,但研究区梯田面积从 1960 年的 0.519 万  $\text{hm}^2$  增长至 2007 年 1.505 万  $\text{hm}^2$ ,涨幅达到了 289.86%。根据多年来渭源水文站的径流资料,渭河源区产流效率呈逐年递减的变化趋势。为制定流域可持续的水土资源合理利用规划与政策,迫切需要研究流域水文过程与土地利用格局的关系。国内具体定量研究梯田开发与径流过程间耦合的工作相对较少,本文以渭河渭源站以上 114  $\text{km}^2$  流域为例,就梯田建设对河流径流影响作初步探索。

### 1 研究区概况

渭河发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,长 818 km,流域面积 6.25 万  $\text{km}^2$ 。河源至宝鸡峡河道长 430 km。研究区域为渭河干流渭源水文站以上区域,地理坐标东经 104°12' - 104°13',北纬 35°08' - 35°10'。渭源县总面积 2 065  $\text{km}^2$ ,研究区面积 114  $\text{km}^2$ 。渭河自鸟鼠山南的壑壑山发源后经众多泉水汇合形成清源河,其上建有渭源水文站,以渭源水文站的径流资料作为研究区的出口地表河流水文状况。(图 1)研究区域属大陆性气候,多年平均温 6~13℃,年降水量 500~800 mm,主要集中在 7-9 月,年蒸发量 1 000~1 200 mm,多为短时暴雨,冬春降水较少,春旱、伏旱频繁。渭源水文站多年平均径流量 0.19  $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。

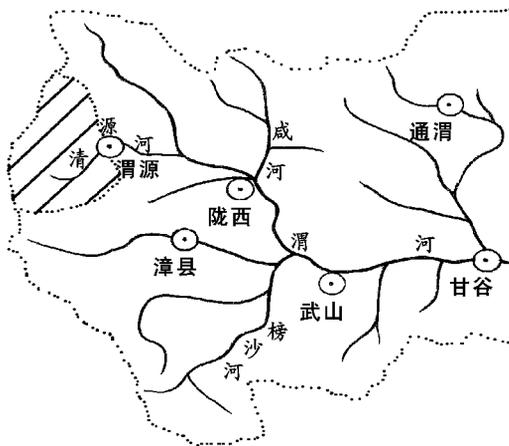


图 1 渭河源区水系测站布置图及研究区示意图

### 2 研究方法

#### 2.1 研究的总体思路

目前用来分析土地利用变化对水文过程影响的方法主要有两种:基于土地利用变化和天文数据的统计分析方法(rational method);基于大量实地土地利用数据与水文数据的土水耦合模拟模型和分布式水文模型模拟方法<sup>[2]</sup>。由于大多数情况下,缺乏利用后者或者其他水文模型进行模拟分析所需的大量数据,而且后者详细到各块梯田的土壤组

成、结构、坡向等,尤其是梯田对降水径流过程的影响参数化存在诸多方法和标定手段的困难,后者虽然具有明确的物理机理和较高的模拟精度,但实践应用受到很大局限<sup>[1]</sup>。因此基于流域水文过程长期观测数据和土地利用变化数据,利用统计分析中的多种趋势分析方法和回归拟合方法进行土地利用对水文过程的影响研究,仍然是目前进行土地利用与覆盖变化对水文过程影响问题研究中采用最多的研究手段,这也是本次研究所选择的方法。

本文在研究中分别选用了年均降雨、丰水期降雨、枯水期降雨-梯田面积-年径流效率、丰水期径流效率、枯水期径流效率,从 3 个不同时间段的降雨-径流关系来尽可能准确的探讨由于梯田建设对此带来的影响<sup>[3]</sup>。

#### 2.2 数据的收集

为了探索研究区域的径流情势变化起因,分别从 3 个方向着手,首先是研究区域的地表覆盖度和覆盖类型的变化对径流的影响,这也是目前研究较多的方向之一;其次是随着梯田化建设,梯田面积增加对径流过程的影响;最后是径流产生的根本来源降雨对径流过程的影响。

采用 1975 航片、1995 年和 2005 年卫星遥感 TM 数据,在 ERDAS IMAGE 和 ARC/INFO 软件支持下,以 1:100 000 地形图为依据,对上述 3 期遥感数据进行图像处理。利用全国土地利用现状分类系统,并结合渭河源区土地利用具体情况,将流域土地利用类型划分为 13 个类型:有林地、灌木林地、疏林地、高覆盖度地、草地、中覆盖度地、滩地、城镇用地、农村居民地、沙地、旱地山地、旱地丘陵、旱地平原。最后根据分析结果利用土地利用变化幅度来揭示土地利用变化的基本特征和空间变化格局。

$$P_i = (LU_{it} - LU_{i0}) / LU_{i0} \times 100\%$$

式中:  $P_i$  ——土地利用变化幅度;  $LU_{i0}$ ,  $LU_{it}$  ——研究区第  $i$  种土地覆被类型在研究初期和研究时间  $t$  末的面积。

研究区梯田变化过程通过地方年鉴和实地调查取得,研究区的水文过程以流域出口的渭源水文站实测资料为依据,资料短缺部分用下游武山水文站资料进行相关插补延长。

### 3 数据处理与分析

#### 3.1 渭河源区土地覆盖类型变化

根据渭河源区 1975 年航片、1995 年和 2005 年 3 个时间点的卫星遥感 TM 数据,通过 ERDAS IMAGE 和 ARC/INFO 软件对上述 3 期遥感数据进行图像处理,将流域土地利用类型划分为 13 个类型,各年各类型土地面积及变化幅度如下(表 1)。

1975 - 2005 年 30 a 间各覆盖类型变化幅度从 99.34 % ~ 105.55 %。其中变幅最小的是高覆盖度土地为 99.34 % ,面积减小 0.173 万 km<sup>2</sup> ;其中变幅最大的为农村居民用地为 105.55 % ,面积增加

0.002 万 km<sup>2</sup> ;研究区 13 种土地覆盖类型中,有 10 种类型覆盖面积几乎没有任何变化。研究区面积 114 km<sup>2</sup> ,土地覆盖度及覆盖类型变化微弱,对研究区径流过程不会产生根本的影响。

表 1 渭源水文站以上不同年代各类土地面积变化统计

| 地类代码 | 名称    | 不同年代各类土地面积/ km <sup>2</sup> |        |        | 土地变化率/ %      |               |               |
|------|-------|-----------------------------|--------|--------|---------------|---------------|---------------|
|      |       | 1980 年                      | 1995 年 | 2000 年 | 1980 - 1995 年 | 1995 - 2000 年 | 1980 - 2000 年 |
| 21   | 有林地   | 3.585                       | 3.55   | 3.585  | 99.02         | 100.99        | 100.00        |
| 22   | 灌木林   | 15.844                      | 15.884 | 15.842 | 100.25        | 99.74         | 99.99         |
| 23   | 疏林地   | 3.319                       | 3.318  | 3.319  | 99.97         | 100.03        | 100.00        |
| 31   | 高覆盖度  | 26.386                      | 26.442 | 26.213 | 100.21        | 99.13         | 99.34         |
| 32   | 草地    | 6.295                       | 6.309  | 6.3    | 100.22        | 99.86         | 100.08        |
| 33   | 中覆盖度  | 6.665                       | 6.665  | 6.666  | 100.00        | 100.02        | 100.02        |
| 46   | 滩地    | 2.25                        | 2.245  | 2.247  | 99.78         | 100.09        | 99.87         |
| 51   | 城镇用地  | 1.379                       | 1.381  | 1.448  | 100.15        | 104.85        | 105.00        |
| 52   | 农村居民点 | 2.109                       | 2.107  | 2.226  | 99.91         | 105.65        | 105.55        |
| 61   | 沙地    | 0.04                        | 0.04   | 0.04   | 100.00        | 100.00        | 100.00        |
| 121  | 旱地 山地 | 32.133                      | 32.062 | 32.125 | 99.78         | 100.20        | 99.98         |
| 122  | 旱地 丘陵 | 10.675                      | 10.676 | 10.76  | 100.01        | 100.79        | 100.80        |
| 123  | 旱地 平原 | 3.32                        | 3.321  | 3.229  | 100.03        | 97.23         | 97.26         |
| 总面积  |       | 114                         | 114    | 114    | 100           | 100           | 100           |

### 3.2 研究区降雨及径流变化

渭河源区的水文动态变化是利用渭源水文站的实测数据进行分析。研究中选择年均产流系数、最丰 3 个月产流系数 (7 - 9 月) 和最枯 3 个月产流系

数 (12 月至次年 2 月) 三个参变量,将各年研究段的流量减去当年的基流量后通过降雨径流的产流系数来揭示水文现象的动态变化趋势,其中基流量是利用单站径流过程线的直线斜割法获得。

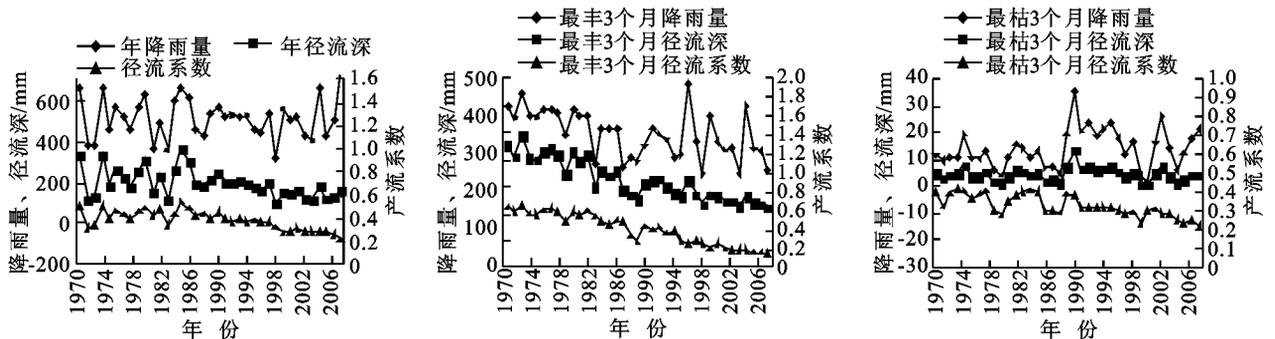


图 2 研究区年、最丰 3 个月、最枯 3 个月降雨、径流及产流系数变化趋势

据图 2,在 1970 - 2006 年间年、最丰 3 个月、最枯 3 个月的降雨径流变化趋势。研究区年降雨量多年平均值稳定在 512 mm 左右;最丰 3 个月降雨量从 1980 年出现递减趋势;最枯 3 个月降雨量 1988 年后呈现上升趋势,1970 - 1988 年平均降雨量为 11.8 mm,1970 - 2006 年平均降雨上升至 14.07 mm。而研究区在 3 个不同时期的径流深度上,年和最丰 3 个月径流均出现了下降趋势,最枯 3 个月径流深度则保持相对稳定。从研究区 3 个不同时期多年来的产流系数可以看出,3 个时段多年来的产流系数不约而同的呈现递减趋势,其中年径流系数

从 1970 年的 0.502 下降至 2006 年的 0.221,下降幅度达到 55.98 %;最丰 3 个月的径流系数从初始的 0.645 下降至 2006 年的 0.156,下降幅度达到 75.71 %;最枯 3 个月的径流系数从初始的 0.396 下降至 2006 年的 0.214,下降幅度达到 46 %。据图 2 中的降雨 - 径流变化曲线经综合以后可以发现,研究区 3 个时期的降雨 - 径流在 1984 年前后开始发生偏离,3 个研究时段的产流系数开始呈现递减。

### 3.3 渭源站以上流域梯田开发变化

研究中由于土地利用资料和径流早期资料的缺乏,研究选择时段为 1970 - 2006 年。根据渭源县县

历史资料,1960 年研究区梯田面积仅为 0.519 万  $\text{hm}^2$ ;1970 年研究区梯田面积 0.747 万  $\text{hm}^2$ ,当年研究区耕地面积 2.533 万  $\text{hm}^2$ ,梯田率为 29.49%;2007 年梯田面积上升到 1.505 万  $\text{hm}^2$ ,当年耕地面积 2.674 万  $\text{hm}^2$ ,梯田率上升为 56.31%。从 1960 - 2006 年 46 a 间,研究区梯田面积增加了 0.986 万  $\text{hm}^2$ ,梯田面积递增幅度为 289.86%。

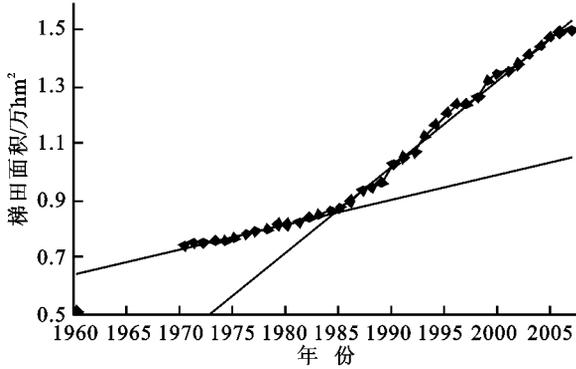


图 3 研究区梯田历年面积统计

据图 3,在 1970 - 2006 年,1984 年之前研究区梯田面积增加缓和,相对稳定;而 1984 年之后梯田开发持续进行,梯田大幅上升,年均增幅达到 0.027 万  $\text{hm}^2$ ,属于研究区梯田面积相对波动期。这与降雨 - 径流变化曲线中出现的以 1984 年为转折点的情况从表象上出现了一定的关联。所以下面在探讨梯田 - 水文作用过程中,考虑以 1984 年为界,作为研究的切入点。

### 4 径流过程影响因素分析

通过遥感图片分析研究区地表覆盖类型变化极其微弱,对径流过程不会造成根本的影响,研究中猜测产流效率的递减是梯田大规模开发造成。根据获得的梯田开发变化数据系列,利用回归分析手段,分析梯田面积变化与年产流系数、最丰 3 个月产

流系数和最枯 3 个月产流系数 3 个参变量之间的统计关系,判断是否存在显著性的相互关系,并建立显著性的径流过程随梯田利用变化的数学模型。

为了区分径流过程变化中的降雨因素,以 1984 年为界,利用 1970 - 1984 年间降雨和径流数据,建立相关回归方程,分析其显著性和拟合误差,确定产流系数随降水变化的模拟模型。利用该模型获得 1984 年以后假定无大规模梯田开发变化的产流系数  $\hat{C}_2$ ,评价实际产流系数  $C$  与模拟径流系数  $\hat{C}_2$  之间的降雨校准残差  $R_2$ ,如式(1)。

$$R_2 = C - \hat{C}_2, \quad R_1 = C - \hat{C}_1 \quad (1)$$

同样的办法,利用 1984 年以后的梯田开发利用变化与径流系数间的模拟模型,计算不考虑降雨因素下的径流系数  $\hat{C}_1$ ,并计算出梯田利用校准残差  $R_1$ 。并比较  $R_1$  和  $R_2$ ,评价降雨变化与梯田利用变化分别对产流系数的影响程度<sup>[3]</sup>。

#### 4.1 降雨与产流过程变化分析

根据前面的分析和猜测,利用 1970 - 1984 年 15 a 间的降水和径流数据,降水与研究区各研究时段之间产流系数的统计关系如图 4 所示,表明研究流域降水与产流系数之间存在一定的统计关系。利用回归分析,获得进行定量分析的降水与产流系数之间的统计方程列于表 2。

根据表 2 方程,进行误差校核以后,对整个研究时段的降雨与产流进行模拟,对比模拟结果和实测结果,分析拟合的 RMSE 和 RE(相对误差)分布情况如表 3。在 1970 - 1979 年之间,产流的降水模型模拟结果的 RMSE 较小,相对误差均在 5%左右,显示了 70 年代降雨与产流之间具有较好的相关关系,在本文分析模拟中可以用于在降雨的单因素下进行产流趋势的预测。

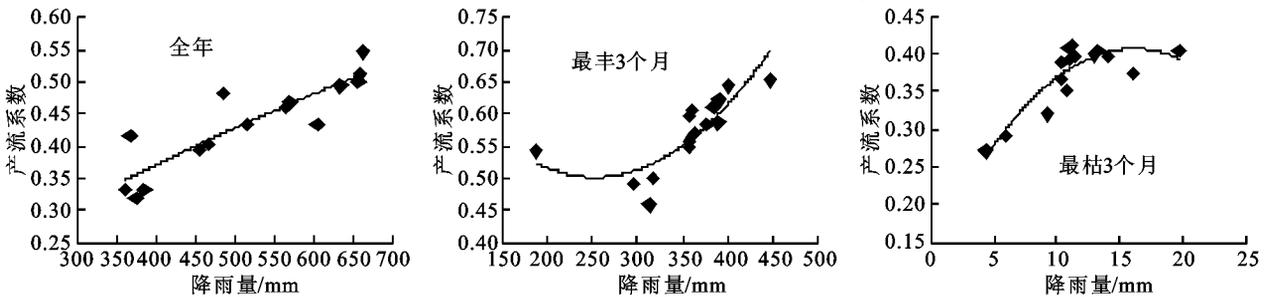


图 4 年、最丰 3 个月、最枯 3 个月(1970 - 1984 年)降雨与产流系数变化关系

表 2 1970 - 1984 年降雨与产流系数回归统计方程

| 水文参量        | 回归方程                                    | 变量解释                      | 决定系数   | RMSE   |
|-------------|---|---------------------------|--------|--------|
| 年径流系数       | $C_n = -2E-07P_n^2 + 0.008P_n + 0.953$  | $C_n, P_n$ 为年降雨量和年产流系数    | 0.7857 | 0.0362 |
| 最丰 3 个月径流系数 | $C_f = 5E-06P_f^2 - 0.0026P_f + 0.8318$ | $C_f, P_f$ 为最丰三个月降雨量和产流系数 | 0.7096 | 0.0326 |
| 最枯 3 个月径流系数 | $C_k = -0.001P_k^2 + 0.032P_k + 0.1399$ | $C_k, P_k$ 为最枯三个月降雨量和产流系数 | 0.7877 | 0.0205 |

表 3 降雨模型在各研究时段不同时期的模拟误差

| 水文参量        | 1970 - 1979 年 |        | 1980 - 1989 年 |        | 1990 - 1999 年 |        | 2000 - 2006 年 |        |
|-------------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
|             | RMSE          | RE/ %  |
| 年径流系数       | 0.0292        | 0.0676 | 0.0443        | 0.1005 | 0.1008        | 0.2841 | 0.2040        | 0.7386 |
| 最丰 3 个月径流系数 | 0.0338        | 0.0571 | 0.0991        | 0.2106 | 0.2549        | 0.8164 | 0.3518        | 2.0009 |
| 最枯 3 个月径流系数 | 0.0170        | 0.0468 | 0.1072        | 0.3001 | 0.0904        | 0.3055 | 0.1342        | 0.5239 |

从 1980 以后 3 个研究时段模拟的相对误差急剧增加。1980 - 1989 年时段, 年产流系数模拟的相对误差从 6.76% 增至 10.75%、最丰 3 个月产流系数相对误差从 5.71% 激增至 21.06%、最枯 3 个月产流系数相对误差从 4.68% 激增为 30.01%。这与渭河源区的气候与土地开发利用是紧密相关的, 定西市属于干旱地区, 多年蒸发量远大于降雨量, 土壤以沙壤土为主。随着梯田从 1980 年开始大规模开发以后, 大面积的坡地改梯田, 降雨产流过程中大量的雨水遭到梯田的截留下渗, 导致了产流系数的递减。从表 3 统计中可以看出, 到了 21 世纪以后, 由

降水模型的模拟结果近乎完全失效, 年产流系数的相对误差达到 73.86%、最丰 3 个月产流系数相对误差达到 200%、最枯 3 个月产流系数相对误差达到 52.39%, 在进入 2000 以后降水与产流的关系已经变得及其微弱。

4.2 梯田开发与产流过程变化分析

根据前面的分析, 同样利用 1985 - 2006 年 22 年间的梯田开发和径流数据, 梯田面积与研究区各研究时段之间产流系数的统计关系如图 5 表 4 所示, 决定系数分别为 0.9006, 0.8111, 0.5568, 表明研究流域梯田面积与产流系数之间具有一定的相关关系。

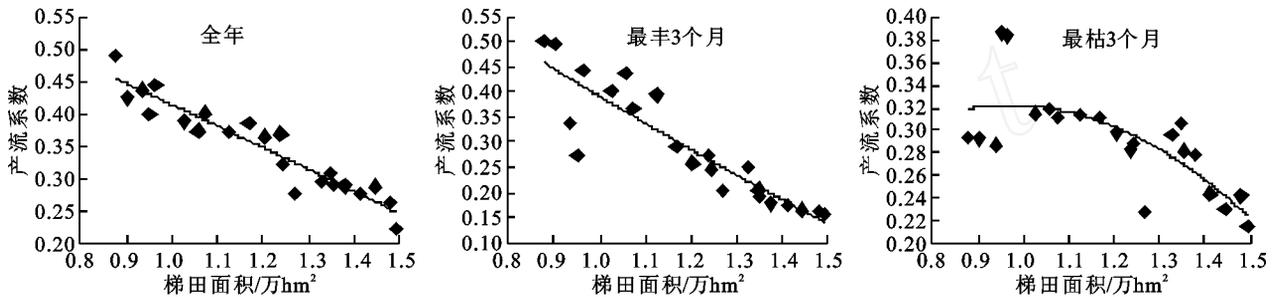


图 5 年、最丰 3 个月、最枯 3 个月(1985 - 2006 年)梯田面积与产流系数变化关系

表 4 1985 - 2006 年降雨与产流系数回归统计方程

| 水文参量        | 回归方程                                  | 变量解释                         | 决定系数   | RMSE   |
|-------------|---------------------------------------|------------------------------|--------|--------|
| 年径流系数       | $C_n = -0.0188S^2 - 0.2922S + 0.7253$ | $C_n, S$ 为年产流系数和当时梯田面积       | 0.9006 | 0.0208 |
| 最丰 3 个月径流系数 | $C_f = 0.0687S^2 - 0.677S + 0.9988$   | $C_f, S$ 为最丰 3 个月产流系数和当时梯田面积 | 0.8110 | 0.0479 |
| 最枯 3 个月径流系数 | $C_k = -0.3557S^2 + 0.6883S - 0.0107$ | $C_k, S$ 为最枯 3 个月产流系数和当时梯田面积 | 0.5568 | 0.0290 |

表 5 降雨模型在各研究时段不同时期的模拟误差

| 水文参量        | 1970 - 1979 年 |        | 1980 - 1989 年 |        | 1990 - 1999 年 |        | 2000 - 2006 年 |        |
|-------------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
|             | RMSE          | RE/ %  |
| 年径流系数       | 0.0878        | 0.2034 | 0.0577        | 0.1309 | 0.0239        | 0.0674 | 0.0145        | 0.0526 |
| 最丰 3 个月径流系数 | 0.0861        | 0.1454 | 0.0756        | 0.1607 | 0.0399        | 0.1278 | 0.0127        | 0.0723 |
| 最枯 3 个月径流系数 | 0.0766        | 0.2103 | 0.0623        | 0.1744 | 0.0204        | 0.0991 | 0.0215        | 0.0840 |

根据表 4 方程, 进行误差校核以后, 对整个研究时段梯田面积与产流进行模拟, 对比模拟结果和实测结果, 分析拟合的 RMSE 和 RE(相对误差) 分布情况如表 5。

从表 5 可以发现, 在以梯田面积为单因素相关下, 年、最丰 3 个月、最枯 3 个月产流系数模拟误差, 从 1970 - 2006 年不约而同的出现了递减。年产流系数模拟误差从 1970 - 1979 年间的 20.34% 下降至 2000 - 2006 年间的 5.26%、最丰 3 个月的产流

系数模拟误差从 1970 - 1979 年间的 14.54% 下降至 2000 - 2006 年间的 7.23%、最枯 3 个月的的产流系数模拟误差从 1970 - 1979 年间的 21.03% 下降至 2000 - 2006 年间的 8.4%。模拟的逐渐递减说明了研究区产流系数随着梯田开发而与梯田面积的相关逐渐增强。进入到 21 世纪以后, 研究区产流系数与梯田面积的进一步相关增强模拟误差达到 7% 左右, 梯田模型已具备一定的精度可以用对产流作趋势性的预测分析。

### 4.3 梯田开发、降雨双重因素下对产流过程的分析 和反推模拟

基于梯田开发利用的产流系数过程模型和气候变化的产流系数过程模型,建立考虑降雨变化影响的流域产流过程在土地利用变化下的动态变化过程模拟模型如式(2)。

$$\hat{Q} = \hat{Q}_1 + \hat{Q}_2 \quad (2)$$

式中:、分别代表梯田开发利用变化和降雨变化的影响权重函数,是依据校准残差  $R_1$  和  $R_2$  和最小二乘法来确定(表 6)。根据上式和模拟误差大小(表 7),定量评价研究流域水文过程随梯田开发利用变化的动态过程。

表 6 降雨和梯田开发双重因素对产流系数回归系数

| 水文参量        | 1970 - 1979 年 |        | 1980 - 1989 年 |        | 1990 - 1999 年 |        | 2000 - 2006 年 |        |
|-------------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
|             | 年径流系数         | 0.5286 | 0.2457        | 0.3470 | 0.3699        | 0.0457 | 0.5249        | 0.0712 |
| 最丰 3 个月径流系数 | 0.1990        | 0.2335 | 0.0877        | 0.2717 | 0.0490        | 0.3362 | 0.0226        | 0.3924 |
| 最枯 3 个月径流系数 | 0.6425        | 0.2102 | 0.0724        | 0.8260 | 0.0157        | 0.4888 | 0.1047        | 0.8304 |

表 7 降雨、梯田两种因素回归拟合与实测值的误差

| 水文参量        | 拟合方程   | RMSE      |           |           |           | RMSE   | RE/ %  |
|-------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|
|             |  | 70 - 79 年 | 80 - 89 年 | 90 - 99 年 | 00 - 06 年 |        |        |
| 年径流系数       | $C_n = (-2E-07P_n^2 + 0.0008P_n + 0.0953) + (-0.0188S^2 - 0.2922S + 0.7253)$ | 0.0072    | 0.0364    | 0.0235    | 0.0113    | 0.0233 | 0.0608 |
| 最丰 3 个月径流系数 | $C_f = (5E-06P_f^2 - 0.0026P_f + 0.8318) + (0.0687S^2 - 0.677S + 0.9988)$    | 0.0201    | 0.0540    | 0.0286    | 0.0051    | 0.0335 | 0.0828 |
| 最枯 3 个月径流系数 | $C_k = (-0.001P_k^2 + 0.0332P_k + 0.1399) + (-0.3557S^2 + 0.6883S - 0.0107)$ | 0.0247    | 0.0465    | 0.0202    | 0.0090    | 0.0296 | 0.0915 |

从前面分析可知,1970 - 1984 年研究区产流系数与降雨之间存在较好的相关关系,而在 1985 - 2006 年之间,时间越向后,研究区的产流系数与梯田面积的相关关系越密切。以 1984 年为界,在梯田面积相对稳定期研究区的产流主要与降雨有关,而随着梯田开发面积的增加,梯田面积又逐渐成为控制研究区产流的主要因素,在研究区没有其他大的土地利用变化和大的气象条件变动下,研究认为渭河源区的产流过程主要受降雨因素和梯田开发因素影响。根据最小二乘法,对研究区的产流利用降雨和梯田面积两个主要因素进行模拟,各研究时段不同时期的数学模型如表 6、表 7 所示。根据模拟误

差(表 7),可以发现,在降雨和梯田面积两个主要控制因素下,模拟达到了较高的精度,年产流系数在 1970 - 1979 年模拟相对误差达到了 0.72%,在 1980 - 1989 年模拟相对误差达到了 3.64%,在 1990 - 1999 年模拟相对误差达到 2.35%,在 2000 年以后相对误差达到 1.13%。最丰 3 个月产流系数和最枯 3 个月产流系数的左右分期模拟误差都小于 5%。数学模型达到了较高的精度,进一步说明了控制研究区的产流过程的主要因素就是降雨和梯田面积,也就彻底印证了研究中关于研究区产流系数降低是由于梯田开发造成的推断。模拟和实测产流系数对比见图 6。

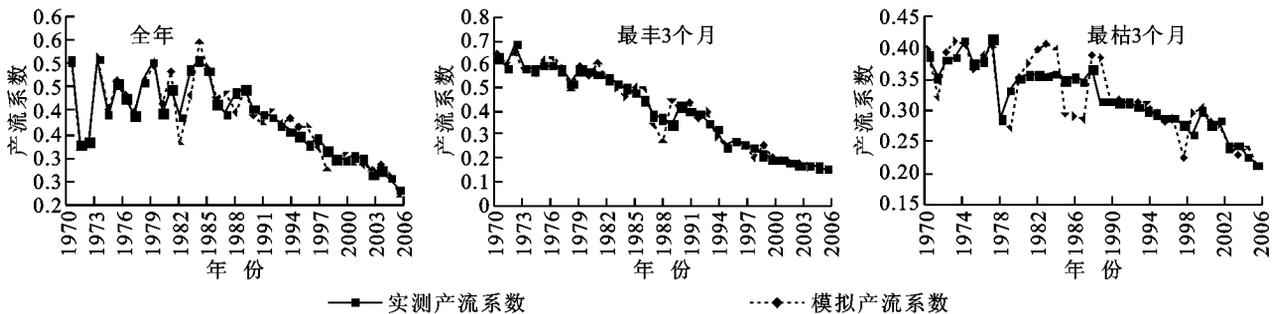


图 6 基于降雨和梯田开发两种因素下 3 个不同研究时段的实测与模拟的产流系数对比

## 5 结论与讨论

渭河源区河道径流主要是由山区融雪(基流)和降雨产流形成,稳定的降水和良好的源区土地利用

条件,是渭河源区地表径流形成并保持稳定的重要条件。随着经济和社会的发展渭河源区渭源站以上土地利用发生了显著变化,在过去的近 40 a 中,渭河源区大规模的进行梯田建设,梯田开发增长幅度

达到了 289.86%。利用流域出口水文站点的 37 a 水文与降水数据,通过建立基于统计回归分析方法的降雨-梯田-产流模型,获得如下结论。

(1) 流域年降水量保持稳定、最丰 3 个月降雨量略有递减、最枯 3 个月降雨量呈现上升的情况下,3 个研究时段的产流系数趋于减小,其中年径流系数从 0.502 下降至 2006 年的 0.221、最丰 3 个月的径流系数从初始的 0.645 下降至 2006 年的 0.156、最枯 3 个月的径流系数从初始的 0.396 下降至 2006 年的 0.214。在 20 世纪 70 年代研究区降雨-产流相关程度较高,随着研究时段的前进相关程度逐渐降低,到 90 以后关系已经及其微弱,而随着时间前进梯田面积与产流系数之间相关程度逐渐提高,2000 年以后已达到了较高的精度。这表明研究区产流系数的持续降低是梯田开发利用变化的结果,表明渭河源区“坡改梯”工程将导致流域产流量的减小。梯田开发,加大了雨水截留下渗和蒸发<sup>[4]</sup>,这是造成研究区产流效率降低的主要原因。

(2) 20 世纪 80 年代以来,梯田开发引起的产流系数减小对不同的研究时段的贡献不一,根据梯田面积、降雨因素回归统计(表 6),梯田对年产流系数的影响影响系数由初始的 0.245 7 上升至 2006 年的 0.449 5、对最丰 3 个月产流的影响回归系数则由初始的 0.233 5

上升至 2006 年的 0.392 4、对最枯 3 个月的影响由 0.210 2 上升至 2006 年的 0.830 4,从回归公式上梯田的影响系数可以得出梯田开发对产流的影响枯水期 > 年产流 > 丰水期,这也符合枯水期产降雨小产流少产流过程脆弱易受影响,而丰水期降水较多,梯田截留比例较小,对产流影响较弱的感性认识。

(3) 研究表明流域大规模进行梯田开发,极易造成流域产流量的锐减,这必然会影响到整个流域的生态环境平衡,合理规划利用土地对于流域水资源可持续利用、整个流域的生态经济平衡至关重要。

#### 参考文献:

- [1] WANG Gen xu, ZHANG Yu, LIU Gui min, et al. Impact of land-use change on hydrological processes in the Maying River basin[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(10): 1098-1110.
- [2] 李元寿, 王根绪, 沈永平, 等. 长江源区不同植被覆盖下产流产沙效应初步研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 869-876.
- [3] 冉大川, 赵力仪, 王宏, 等. 黄河中游地区梯田减洪减沙作用分析[J]. 人民黄河, 2005, 27(1): 51-53.
- [4] 马博虎, 薛学选, 刘毅, 等. 梯田、坝地在黄土高原生态恢复中的地位与作用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 27-33.

(上接第 219 页)

程,察汗乌苏绿洲逐渐形成人工绿洲的同时,人类对该区域水土资源的开发利用不断向外扩展。察汗乌苏绿洲土地覆盖分形的研究表明:虽然研究区域的土地利用趋于均匀化,但在开发利用程度较高的绿洲区内部,耕地和荒草地仍占了较大的比例。此外随着西部大开发的深入,城镇化速度加快,外来人口正不断涌入察汗乌苏绿洲,耕地的面积还有不断扩大的趋势。如何协调人地关系以及如何合理规划绿洲景观要素的比例问题正是目前察汗乌苏绿洲急需解决和攻关的难题;在荒草地景观中因自然因素和人为活动造成的退化景观类型如沙化土地、退化草场等退化类型土地占据相当比重。因此土地覆盖反映了高度发展的人工景观成为主要景观类型,但与耕地镶嵌分布的荒草地景观也反映了该区域生态退化趋势较为严重。各类斑块几何形状规则(尤其林地、耕地),随着人类活动的干扰,绿洲景观的多样性会逐步增强,景观更趋破碎,这也是人类改造与利用自然景观的趋势所在。

#### 参考文献:

- [1] 韩德麟. 关于绿洲若干问题的认识[J]. 干旱区资源与

境, 1995, 9(3): 13-31.

- [2] 左大康. 现代地理学辞典[M]. 北京: 商务印书馆, 1990: 585-585.
- [3] 刘灿然, 陈灵芝. 北京地区植被景观斑块形状的分形分析[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 129-134.
- [4] 肖笃宁. 土地变化研究中的景观生态学方法[C]//中国地理学会自然地理专业委员会. 土地变化科学与生态环境建设, 北京: 商务印书馆, 2004: 6-13.
- [5] 赵亚敏, 田国行, 何瑞珍, 等. 基于 RS 和 GIS 的开封市土地覆盖分形[J]. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1218-1222.
- [6] 傅伯杰, 陈利顶, 邱扬, 等. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M]. 北京: 商务印书馆, 2002.
- [7] 王桥, 毋河海. 地图信息的分形描述与自动综合研究[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998: 24-30.
- [8] 陈禹贡, 陈凌. 分形几何学[M]. 北京: 地震出版社, 1998: 5-7.
- [9] 李瑞, 张克斌, 杨晓晖, 等. 基于 RS 和 GIS 的青海香日德绿洲景观格局特征分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 129-131.
- [10] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. San Francisco: Freeman, 1983: 468.
- [11] Mandelbrot B B. Fractal: Form, Chance and Dimension [M]. San Francisco: Freeman, 1977: 365.