

# 石羊河中游径流损耗特征及其影响因素

刘海猛, 石培基, 周俊菊, 刘海龙, 孙会慧

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘 要:**以石羊河中游为研究区域, 分析了1956-2009年的径流损耗特征, 通过相对损耗率和Fisher最优分割法确定了人类活动对径流损耗的显著影响拐点为1975年, 明确了人类活动影响下的径流突变点, 修正了当前研究的不足。根据人类活动对径流影响的方式及强度, 将近50多年的径流损耗划分为4个阶段, 定量与定性相结合分析了1956-2009年不同代际的自然因素和人文因素对径流损耗的影响量和贡献率。结果表明: 人类活动对石羊河中游径流损耗的影响于20世纪70年代中期以后显著增加; 2000年之前人文因素贡献率不断增加, 自然因素贡献率相应减少, 且自然因素影响量与出山径流显著相关。20世纪90年代以来, 人类活动与自然过程导致的径流损耗贡献率持平, 1995-1999年人类活动影响量达到6.33亿 $\text{m}^3/\text{a}$ , 上游来水量的62.31%被人类直接消耗, 此时径流损耗的人文因素贡献率达最大值71.52%; 之后开始逐渐降低, 表明近年来石羊河中游人水系统矛盾有趋于缓和的迹象。

**关 键 词:** 径流损耗; 突变点; 相对损耗率; 影响因素; 石羊河中游

doi: 10.3724/SP.J.1033.2013.00087

## 1 引言

河川径流受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的耦合作用, 其演变过程既表现出确定性的规律, 同时也有强烈的随机性(姚治君等, 2003)。全球水系统计划(GWSP)将全球变化和剧烈人类活动对区域水循环与水安全影响作为重点研究的问题之一, 人类活动引起的水文循环状况和水量平衡要素在时间、空间和数量上发生着不可忽视的变化(Vörösmarty et al, 2004; 董磊华等, 2012)。由于人类活动对径流影响具有双向性(人类活动导致径流变化, 径流变化反过来又影响人类的治水和用水)、正负性(不同的人类活动方式及其强度对径流的作用力方向有正负之分)及不确定性, 正确区分并定量计算自然因素和人文因素对径流的影响成为目前研究的热点。

关于径流变化的人类活动响应的定量分析, 当前国内外主要从土地利用/覆被变化(森林、草地、耕地的转换, 耕地种植制度转变等)、人口增长、水工设施建设、流域引水用水、农田灌溉等方面进行了大量研究(Avril et al, 2007; Chaves et al, 2008; Mar-

tin et al, 2010; Xu et al, 2010; 薛丽芳等, 2011)。由于人类活动对于干旱半干旱地区的径流影响比湿润地区的径流影响要严重得多(任立良等, 2001), 针对中国干旱半干旱区内陆河流, 近年来相关学者也做了较多研究(Huo et al, 2008; Tao et al, 2011; 黄领梅等, 2010; 李丽娜等, 2012)。但总体来说, 目前对径流变化的人文机制研究还处于探索阶段, 并存在若干不足: ①用土地利用/覆被变化定量描述人类活动虽能一定程度上反映人类对农地、建设用地的影响, 但并不能充分体现政策制度、技术观念等重要人文机制, 同时土地利用/覆被变化也受自然因素的驱动; ②人类活动对径流的影响有正、负两方面, 目前研究大多只关注不合理的人类活动对径流的负面影响, 对正面影响讨论较少; ③很少考虑气候自然变异波动的影响(刘艳丽等, 2012), 经常混淆径流突变点和人类活动影响下的径流突变点(Jiang et al, 2012; 栾兆擎等, 2007)。在一定时期内径流发生突变受气候自然波动和人类活动两方面共同作用, 本文认为人类活动影响下的径流突变点是指在剔除气候自然波动的影响后, 由于人类活动的剧烈振荡而引起径流时间序列上出现的显著拐点。

收稿日期: 2012-08; 修订日期: 2012-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971078, 41271133); 甘肃省自然科学基金项目(1107RJZA104)。

作者简介: 刘海猛(1989-), 男, 山东淄博人, 硕士生, 主要研究资源环境与区域可持续发展。E-mail: smartjingfeng@163.com

通讯作者: 石培基(1961-), 男, 甘肃临洮人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向城市与区域发展。E-mail: shipj@nwnu.edu.cn

为进一步探索河川径流量变化的影响因素,本文以人水矛盾突出的石羊河中游为研究区域,针对目前研究的不足,从径流损耗量的视角切入,定义了相对损耗率的概念,在分析 1956-2009 年径流损耗特征及确定变异点的基础上,分别量化了自然因素和人文因素对径流损耗的影响量和贡献率。该研究对认识内陆河流域径流演变与人类社会的复杂关系和流域水资源的综合开发管理及可持续利用具有理论和实践意义。

2 研究区概况

石羊河流域位于河西走廊东段,降水量少且年内分配不均、降水变率大、蒸发量大、干旱时段明显,是我国水资源开发程度最高的内陆河流域之一。地势南高北低,河流补给主要来源于山区降水和高山冰雪融水,南部祁连山区为径流形成区,山前洪积平原和中北部平原区为径流耗散区,河水出山后基本上全部被水库拦蓄和引入渠道灌溉。到达蔡旗站的年径流量由 20 世纪 50 年代的 5 亿 m<sup>3</sup>锐减到目前只有 1.2 亿 m<sup>3</sup>,直接导致了下游民勤地区严重的水危机,引起政府和社会的广泛关注(Kahn, 2006)。因此本文的研究区重点放在人类活动强度较大、径流损耗最严重的石羊河中游地区,该区年降水量 150~300 mm,年蒸发量 1300~2000 mm,干旱指数 5~15,年平均气温 7.8℃。由于石羊河流域中的西大河和大靖河为相对独立的河流系统,故本文只研究与石羊大河关系紧密的“六河”系统,即由东向西排列的古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河 6 条支流,它们流经武威绿洲后汇于石羊河干流,进入民勤地区。石羊河流域的水系组成及研究区内各水文测站的空间分布如图 1 所示。

3 数据与方法

3.1 数据说明

本文所使用的各站点水文数据来源于石羊河流域管理局,古浪、黄羊河、杂木寺、南营、沙沟寺、蔡旗 6 个水文站为 1956-2009 年共 54 年的实测数据,其中蔡旗站 2001-2009 年的径流数据为扣除景电二期工程调水量后的还原数据,九条岭站 1972 年之前数据采用原有四沟咀站(1972 年因西营水库

建成,上迁九条岭观测)数据代替。根据各站点的相对位置,本文在研究中选取古浪、黄羊河、杂木寺、南营、九条岭、沙沟寺 6 个站点的出山径流总量作为石羊河中游来水量,蔡旗站的径流量作为去水量,来水量和去水量之差即径流损耗量。

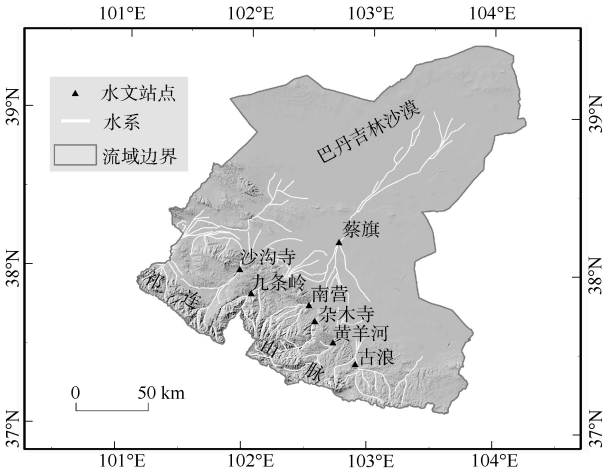


图 1 研究区及水文站位置示意

Fig.1 Location of the study area and hydrologic stations

3.2 研究方法

(1) Kendall 秩次相关法。作为一种非参数统计检验方法,变量可以不具有正态分布特征,检测范围宽、人为影响小、定量化程度高,因此适用于水文变量的趋势分析(郭巧玲等, 2011)。

(2) 灰色关联分析。考虑到回归分析方法的种种不足,采用灰色关联度进行系统分析,可以对一个系统的发展变化态势提供量化度量,非常适合动态历程分析。根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,通过计算关联系数和关联度可以衡量两个变量的关联程度。

(3) 相对损耗率。为确定人类活动影响下的径流序列突变点,尽量减少因不同丰枯年份出山径流量变化对径流损耗量的影响,本文定义了相对损耗率(Relativistic Consumption Rate, RCR)的概念,即相对耗损率=径流耗损量/来水量。因石羊河中游气温、降水等气候要素的变化对径流蒸散发年际变化的影响很小(李洋等, 2007; 王宝鉴等, 2007),中游损耗量的年际变化主要受人文要素影响,故相对损耗率(RCR)可用来近似描述受人类活动影响下的径流损耗变化趋势,用  $RC$  表示径流损耗量,  $IF$  表示来水量,其公式为:

$$RCR=RC/IF\times100\%$$
 (1)

(4) Fisher 最优分割法。这是一种应用广泛的对有序样本进行分类的统计方法,具有多指标聚类、时序性划分以及能任意指定分类数等特点。该方法对任意指定的分类数  $K$ , 总能将  $N$  个样本分为  $K$  类, 且使各类直径总和达到最小, 总离差平方和最小, 从而使各类内部样本之间差异最小, 而类与类之间的差异最大(刘克林等, 2007)。

4 结果与分析

4.1 石羊河中游来水和损耗变化特征

图2给出了上游来水的6条支流出山径流量的变化和中游损耗量的变化, 用Kendall 秩次相关法检验, 在显著水平  $\alpha=0.05$  下, 相应的临界值  $M_a=1.96$ , 此时来水量和损耗量的标准化变量为分别为-1.91和2.12, 其绝对值后者大于临界值, 前者略小于临界值, 故从较长时间尺度看, 出山径流量递减趋势不显著, 中游损耗量增加趋势显著。但小尺度上又有不同, 出山径流2001年后有上升趋势, 中游损耗在1975年之前呈下降态势。目前对石羊河流域出山径流量的研究表明, 其年际变幅对气候变化响应明显, 周期变化与乌鞘岭站年降水量和气温周期基本上在同一周期上下浮动(Lan et al, 2002; 周俊菊等, 2012)。由于上游山区地理环境特殊, 降水丰富、气温低且年际变化小, 在大的时间尺度上气候变化对出山径流影响并不明显(康尔泗等, 2002)。但近50年上游山区降水量的减少和潜在蒸发量的增加是出山径流减少的主要因素, 人类活动导致下垫面改变是次要因素(Ma et al, 2008; 张晓伟等, 2008)。中游径流损耗量的增加主要是由于武威绿洲人类活动加剧, 人文驱动力的变化导致。

由图2可见, 出山径流和损耗量之间的升降波动具有显著的一致性, 但在较长的时间序列上, 两者的变化趋势却恰恰相反, 故线性相关性并不高(Pearson 相关系数仅为0.412)。用灰色关联进行分析, 当分辨系数取0.5时, 两者的灰色关联度达到0.937, 而通常认为关联度在0.6以上即达到满意, 故径流损耗量的年际波动与来水量具有很高的关联性, 即某年出山径流的多少直接影响中游径流的损耗量。

4.2 径流损耗突变点分析及损耗时段划分

随着经济和城镇化快速发展, 中游灌溉规模越

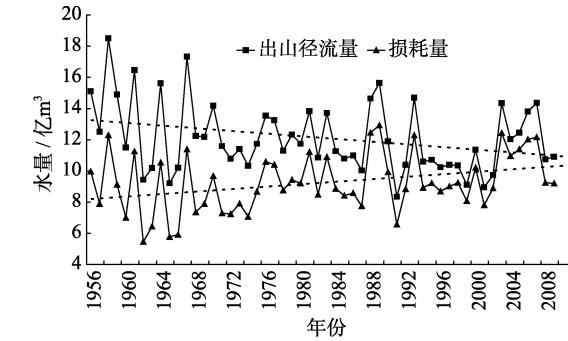


图2 1956-2009年石羊河出山径流量和  
中游损耗量变化  
Fig. 2 Changes of annual mountainous runoff and  
consumption during 1956-2009

来越大, 地下水超采严重, 水资源利用率高达154%, 绿洲中心形成巨型地下水漏斗, 人水关系趋于紧张。研究时段内人类活动对径流过程的干扰逐步增强并具有一定阶段性。通过Fisher 最优分割法分别计算径流损耗突变点和人类活动影响下的径流损耗突变点, 后者通过相对损耗率的时间序列来分析。在最小误差函数下, 计算结果见表1。分类数设定为2时, 径流损耗和相对损耗率在1975年均发生突变, 说明在此时间点径流受到人类活动影响而急剧变化; 分类数设定为3时, 除1975这一突变年份外, 径流损耗的次显著的突变发生在2002年, 相对损耗率突变年份则为1988年。这说明2002年的次显著突变点并不是由于人类活动剧烈变动所致, 而是由于出山径流量的增加所致, 但1988年的次显著突变点则是由人类活动再次加剧引起。

表1 Fisher最优分割法计算结果				
Tab. 1 Calculation results by Fisher classification method				
分类数	径流损耗		相对损耗率	
	分割区间	突变年份	分割区间	突变年份
2	1~19, 20~54	1975	1~19, 20~54	1975
3	1~19, 20~47, 48~54	1975, 2002	1~19, 20~32, 33~54	1975, 1988

综合Fisher最优分割法计算结果, 可以确定石羊河中游径流损耗的最显著变异点发生在1975年, 主要是人类活动影响导致。结合以上突变点的分析、相对损耗率的变化(图3)以及流域实际情况, 可将近50多年的径流损耗划分为4个阶段: ①1975年之前, 人类影响微弱阶段, 相对损耗率在57%~70%之间波动, 主要受河道的渗漏、蒸发、漫溢等自然因素影响; ②1975-1988年, 人类活动对径流的影



响发生突变,相对损耗率先由不到 70%激增至 80%,而后 20 世纪 80 年代基本维持在 80%的水平;  
③1989-2004 年相对损耗率不断上升,最高达到 94.6%,人类活动对径流的负向减量影响不断增强;  
④2005 年至今,人类活动开始对径流施加更多的正向影响,相对损耗率有所下降,径流损耗程度有趋于缓和迹象。这与 2005 年以来政府加大了对石羊河流域的治理密切相关。至于该年是否会成为新的因人类活动正向影响增强而产生的径流损耗突变点,还有待今后更长径流序列的检验。

4.3 径流损耗的人文和自然因素影响分析

4.3.1 径流损耗影响的定量计算

如图 4 所示,出山径流与径流损耗的双累积曲线在 1975 年发生了一次明显偏移,1988 年再次偏移,这与前文对径流损耗突变点的分析相吻合。受人类活动显著影响的水文序列在某种意义上异于先前序列,若将基准期(1975 年之前的近天然序列)

和人类活动影响期的序列视为两个阶段,通过 1975 年之前的累积曲线,可以还原出 1975 年之后去除人类活动干扰的累积曲线方程:

$$y = 0.5101x - 0.5587 \tag{2}$$

式中: $y$  是还原的径流累积损耗量; $x$  是累积来水量。影响径流损耗的因素由自然和人文两方面构成,人文因素包括生活生产活动、政策法规、节水技术、用水观念等,自然因素包括径流蒸发、河道渗漏、出山径流的变化、地表水地下水的相互转换等。若以 1956-1974 年出山径流的平均值作为人类活动显著影响期的天然出山径流量,并假定各年代的实测径流损耗量与还原径流损耗量的差值是人类活动和出山径流两者的影响之和,则出山径流的变化、人文因素和自然因素对径流损耗的影响量,以及人文因素和自然因素各自对径流损耗的贡献率有以下关系:

出山径流影响量=实测出山径流量-天然出山径流量;

自然因素影响量=还原损耗量+出山径流影响量;

人文因素影响量=实测损耗量-自然因素影响量;

自然因素贡献率=自然因素影响量/实测径流损耗量 $\times 100\%$ ;

人文因素贡献率=人文因素影响量/实测径流损耗量 $\times 100\%$

以 5 年作为一个代际,表 2 展示了各变量 5 年平均的计算结果。径流损耗的还原值代表出山径流以外的所有自然因素所导致的径流损耗量,将它与出山径流实测值作 Pearson 相关性分析,相关系数为 1.000,表明两者相关性极强,也就是说径流蒸发、河道渗漏、地下水转换等径流损耗自然影响因素随来水量的变化而变化,倘若气候条件稳定的情况下,影响量也会保持稳定。将相对损耗率与计算出的人文因素影响做 Pearson 相关性分析,相关系数为 0.871,  $P=0.005<0.01$ ,表明两者线性相关性非常显著,从而很大程度上验证了上文用相对损耗率的变化来近似代替人类活动对径流损耗影响变化的正确性。

4.3.2 径流损耗影响的定性分析

对径流损耗变化影响最大的自然因素是气候变化,气候对径流的影响是宏观的、连续性的,反馈

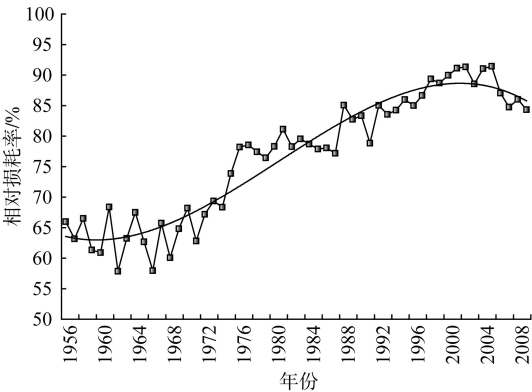


图 3 1956-2009 年石羊河中游相对损耗率变化  
Fig. 3 Trend of the relativistic consumption rate in the midstream of Shiyang river during 1956-2009

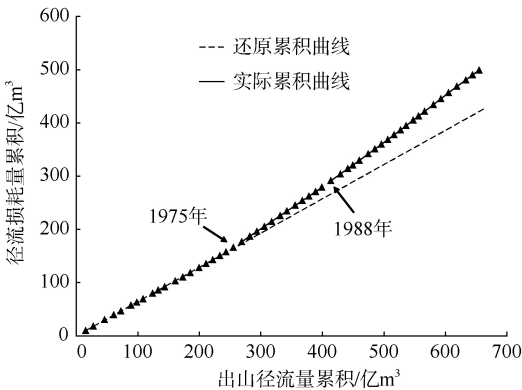


图 4 出山径流与径流损耗的双累积曲线  
Fig. 4 Double mass curve of runoff consumption and inflow

作用相对较慢,而人类活动对径流的影响是局部的、阶段性的,正负反馈快且剧烈。图5从水量平衡角度反映了石羊河中游来水量的最终去向和年代际变化。1975年以来石羊河中游的去水量呈递减趋势,且皆在25%的水平之下,由此可见,在人文和自然共同作用下中游径流的水损耗相当剧烈。表2中显示,自然因素对径流损耗的影响量在2000年之前呈递减趋势,2000年之后又开始增加,结合上文的分析,由于中游气温、降水等气候要素对径流蒸散发年际变化的影响很小,故出山径流量的年际变化是其主要原因。

石羊河流域属于绿洲农业经济,国民经济和生态用水均靠河道径流来维持。由于特殊的串珠状水文地质盆地构造,使地表水与地下水在山前平原存在多次转化过程,且地表水是地下水的主要补给

来源,约占58.4%(张济世等,2001)。因此地下水的过度提取也是导致石羊河径流损耗量增加的重要人为原因。1970-1976年石羊河流域进入打井高潮,配套机井由1965年的156眼猛增到1976年底的3000多眼,西营水库和南营水库也在此期间相继建成;在“农业学大寨”运动中,田间渠系的建设投入剧增,农灌用水量10年间增加近1倍。故石羊河中游径流损耗量的第一个突变点发生在1975年,符合区域历史事实。

分析20世纪80年代和90年代的径流损耗特征,从表2和图5中可以看出,90年代的人类活动影响明显增强,1995-1999年其影响量达到6.33亿m<sup>3</sup>/a,来水量的62.31%被中游人类所消耗,这表明90年代中游绿洲农业和城市经济的快速发展带来更大的径流损耗。王杰等(2008)通过分析石羊河流域

表2 1975-2009年石羊河中游径流损耗影响计算结果

Tab. 2 Quantification of runoff consumption in the midstream of Shiyang river during 1975-2009

时间段	出山径流量/亿m <sup>3</sup>		损耗量/亿m <sup>3</sup>		相对损耗率/%	人文因素		自然因素	
	实测值	天然值	实测值	还原值		影响量/亿m <sup>3</sup>	贡献率/%	影响量/亿m <sup>3</sup>	贡献率/%
1975-1979	12.43	12.82	9.57	6.34	76.97	3.62	37.82	5.95	62.18
1980-1984	12.28	12.82	9.74	6.26	79.30	4.01	41.22	5.72	58.78
1985-1989	12.42	12.82	10.02	6.33	80.71	4.09	40.80	5.93	59.20
1990-1994	11.19	12.82	9.31	5.71	83.21	5.24	56.27	4.07	43.73
1995-1999	10.16	12.82	8.85	5.18	87.10	6.33	71.52	2.52	28.48
2000-2004	11.28	12.82	10.28	5.75	91.15	6.07	59.01	4.22	40.99
2005-2009	12.45	12.82	11.26	6.35	90.40	5.27	46.83	5.99	53.17
1975-2009	11.74	12.82	9.86	5.99	83.96	4.95	50.50	4.91	49.50

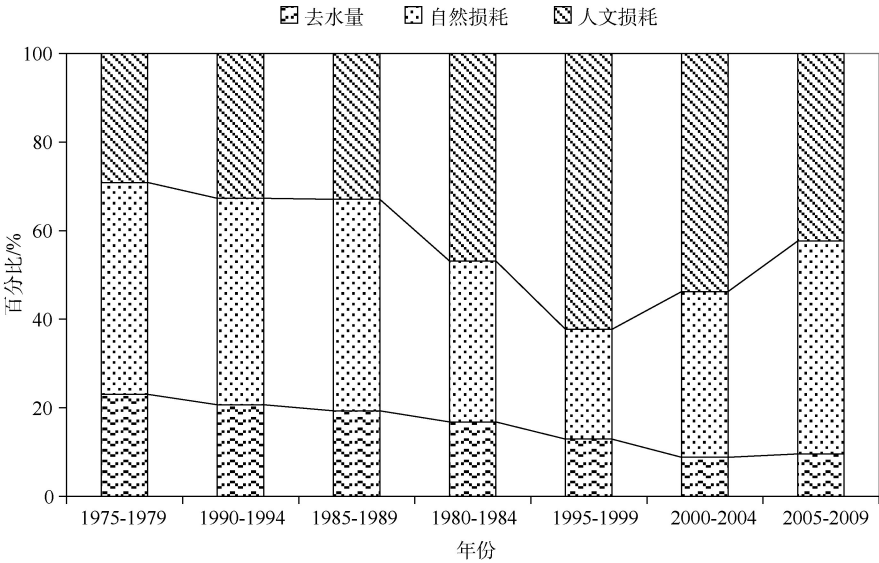


图5 1975-2009年石羊河中游来水量分解

Fig. 5 Distribution of inflow in the midstream of Shiyang river during 1975-2009

1981-2003年径流与绿洲NDVI数据,表明1992年以后人类活动对径流的影响明显增强,中游人工绿洲NDVI累积与上下游径流差呈正相关;中游人类活动直接导致下游径流量的减少,一定程度上可作为本文的佐证。

2000-2009年,石羊河中游径流损耗量继续增加,自然损耗重新超过人为损耗,人类活动对径流损耗的影响量和贡献率均有所回落。究其原因,人类活动的规模虽继续增加,但随着人们对可持续的人水系统的反思和政策、技术、观念提升,人类活动对地表水资源的利用方式、目标开始转变,对径流的正向作用力开始增强。从2001年成立石羊河流域管理局以来,陆续出台了《石羊河流域水资源管理条例》、《石羊河流域重点治理规划》等规范性文件,建立了流域地表水量调度和地下水削减开采量地方行政首长责任制,安排专项资金用于关闭机井补助,先后投资50多亿用于流域专项治理。包括从强化节水、减少地下水开采、合理配水、改革水价、调整产业结构等方面对流域水资源进行综合保护整治,从而逐渐扭转人水系统失衡的局面。

## 5 结论及讨论

### 5.1 结论

(1) Kendall秩次相关检验表明,近50多年来石羊河出山径流量总体呈减少趋势,而中游的径流损耗量增加趋势显著,且两者间存在显著的关联性,即出山径流量的波动变化会直接影响中游的径流损耗量。

(2) 石羊河中游径流损耗最显著突变点出现在1975年,主要由人文因素造成,打井提水、农田灌溉、水工设施建设等人类活动是其主要原因。1988年出现相对损耗率的次显著突变点,这与用径流损耗测得的次显著突变点2002年不同。由此将人类活动影响下的径流损耗划为了4个阶段,这恰恰反映了人类活动以不同的作用方式和强度对径流损耗量表现出正负两方面影响,1975年的变异点是人类活动导致人水系统失衡的开始,2005年之后人水系统则开始趋于向稳态转变。

(3) 对石羊河中游来水量分解结果显示,自然因素和人文因素共同导致了径流损耗,流入下游的水量总体上不断减少。人类活动对石羊河中游径流损耗的影响于20世纪70年代中期以后显著增

加。2000年之前人文因素贡献率不断增加,自然因素贡献率相应减少,且自然因素影响量与出山径流显著相关。20世纪90年代,与自然过程导致的径流损耗贡献率持平,1995-1999年人类活动影响量达到6.33亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ,上游来水量的62.31%被人类直接消耗,即此时径流损耗的人文因素贡献率达最大值71.52%,之后开始逐渐降低,表明近年石羊河中游人水系统矛盾有趋于缓和的迹象。

### 5.2 讨论

(1) 为研究方便,本文假设1975年之前的基准期人类活动对径流影响量为零,然而这并不符合实际,若考虑基准期的人类活动,则之后各个时期推算的人文因素影响量应均有所增加。另外,各种自然因素和人文因素在地表系统中存在复杂的相互作用与影响,很难绝对分离,从这个意义上来说,定量区分两者对径流的影响始终会存在一定的不确定性。

(2) 在涉及河川径流演变的人文机制分析时,常规方法是直接分析径流量的变化与人类活动的关系,但这一视角在定量分析人类活动的影响时,不管是分析突变点还是建立水文模型都还存在一定缺陷。而近年国内学者从流域不同区段径流损耗的视角来进行分析(陈忠升等,2011;奚秀梅等,2009),这对人文因素的定量剖析具有较强的针对性,但其并不适合单纯研究自然因素(如气候变化)对径流的影响。同时,本文基于相对损耗率概念的研究思路与方法在应用于其他流域时应根据不同流域的实际情况进行相应调整。

### 参考文献(References)

- Avril L, DelaCrétaz, Paul K, et al. 2007. Land Use Effects on Streamflow and Water Quality in the Northeastern United States. Washington, D. C: CRC Press.
- Chaves J, Neill C, Gemer S. 2008. Land management impacts on runoff sources in small Amazon watersheds. *Hydrological Processes*, 22(12): 1766-1775.
- Chen Z S, Chen Y N, Li W H, et al. 2011. Changes of runoff consumption and its human influence intensity in the mainstream of Tarim river. *Acta Geographica Sinica*, 66(1): 89-98.[陈忠升, 陈亚宁, 李卫红, 等. 2011. 塔里木河干流径流损耗及其人类活动影响强度变化. *地理学报*, 66(1): 89-98.]
- Dong L H, Xiong L H, Yu K X, et al. 2012. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology. *Advances in Water Science*, 23(2): 278-285. [董



- 磊华,熊立华,于坤霞,等.2012.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展.水科学进展,23(2):278-285.]
- Guo Q L, Yang Y S, Chang X S, et al. 2011. Annual variation of Heihe river runoff during 1957-2008. Progress in Geography, 30(5): 550-556.[郭巧玲,杨云松,畅祥生,等.2011.1957-2008年黑河流域径流年内分配变化.地理科学进展,30(5):550-556.]
- Huang L M, Shen B. 2010. Impacts of Human Activities on River Flow Regime in Arid Zones. Beijing, China: China Water Power Press. [黄领梅,沈冰.2010.人类活动对旱区流域水文情势影响研究:以新疆和田河流域为例.北京:中国水利水电出版社.]
- Huo Z L, Feng S Y, Kang S Z, et al. 2007. Effect of climate changes and water-related human activities on annual stream flows of the Shiyang river basin in arid north-west China. Hydrol Process, 22(16): 3155-3167.
- Jiang S H, Ren L L, Yong B, et al. 2012. Analyzing the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China. Hydrology Research, 43(1-2): 3-13.
- Kahn J. A sea of sand is threatening China's heart [N/OL]. New York: New York Times, 2006(2006-06-08) [2012-07-01]. <http://www.nytimes.com/2006/06/08/world/asia/08desert.html>.
- Kang E S, Cheng G D, Dong Z C. 2002. Glacier-snow water resources and mountain runoff in the arid area of North-west China. Beijing, China: Science Press. [康尔泗,程国栋,董增川.2002.中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流.北京:科学出版社.]
- Lan Y C, Kang E S, Zhang J S, et al. 2002. Trends and characteristics on mountainous runoff in Hexi inland arid region. Journal of Desert Research, 22(2): 135-141.
- Li L N, Shi P J, Dong H R, et al. 2012. Progress on water resources research in Shiyang river basin. Research of Soil and Water Conservation, 19(2): 280-284. [李丽娜,石培基,董翰蓉,等.2012.干旱区石羊河流域水资源研究进展.水土保持研究,19(2):280-284.]
- Li Y, Wei X M, Sun Y W. 2007. Analysis of the variety characteristics of hydrologic factors in Shiyang river basin. Journal of China Hydrology, 27(3): 85-88. [李洋,魏晓妹,孙艳伟.2007.石羊河流域水文要素变化特征分析.水文,27(3):85-88.]
- Liu K L, Wang Y T, Hu S Y. 2007. Application of Fisher optimal dissection method to flood season division. Advances in Science and Technology of Water Resources, 27(3): 14-37. [刘克琳,王银堂,胡四一.2007. Fisher最优分割法在汛期分期中的应用.水利水电科技进展,27(3):14-37.]
- Liu Y L, Zhang J Y, Wang G Q, et al. 2012. Evaluation on the influence of natural climate variability in assessing climate change impacts on water resources: I. Model and methodology in baseline period. Advances in Water Science, 23(2): 147-155. [刘艳丽,张建云,王国庆,等.2012.气候自然变异在气候变化对水资源影响评价中的贡献分析: I. 基准期的模型与方法.水科学进展,23(2):147-155.]
- Luan Z Q, Hu J M, Deng W, et al. 2007. The influence of human activities on the runoff regime of Naolihe river. Resources Science, 29(2): 46-51. [栾兆擎,胡金明,邓伟,等.2007.人类活动对挠力河流域径流情势的影响.资源科学,29(2):46-51.]
- Ma Z M, Kang S Z, Zhang L, et al. 2008. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China. Journal of Hydrology, 352(3-4): 239-249.
- Martin P, Joannon A, Piskiewicz N. 2010. Temporal variability of surface runoff due to cropping systems in cultivated catchment areas: Use of the DIAR model for the assessment of environmental public policies in the Pays de Caux (France). Journal of Environmental Management, 91(4): 869-878.
- Ren L L, Zhang W, Li C H, et al. 2001. Impacts of human activities on river runoff in north China. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 29(4): 13-18. [任立良,张炜,李春红,等.2001.中国北方地区人类活动对地表水资源的影响研究.河海大学学报:自然科学版,29(4):13-18.]
- Tao H, Gemmer M, Bai Y G, et al. 2011. Trends of streamflow in the Tarim river basin during the past 50 years: Human impact or climate change. Journal of Hydrology, 400(1-2): 1-9.
- Vörösmarty C, Lettenmaier D, Leveque C, et al. 2004. Humans transforming the global water system. Eos Transactions(AGU), 85(48): 509.
- Wang B J, Song L C, Zhang Q, et al. 2007. The response of water resource to climate change and its impact on ecological environment in Shiyang river basin. Advances in Earth Science, 22(7): 730-737. [王宝鉴,宋连春,张强,等.2007.石羊河流域水资源对气候变暖的响应及对生态环境的影响.地球科学进展,22(7):730-737.]
- Wang J, Ye B S, Wu J K, et al. 2008. Human activity impact on runoff of Shiyang river basin in the last 20 years based on remote sensing data. Journal of Glaciology and Geocryology, 30(1): 87-92. [王杰,叶柏生,吴锦奎,等.2008.基于遥感分析的近20a来人类活动对石羊河流域地表径流的影响研究.冰川冻土,30(1):87-92.]
- Xi X M, Duan S G. 2009. Runoff consumption characteristics and causes analysis of the middle reaches in Tarim river. Research of Soil and Water Conservation, 16(3): 34-37. [奚秀梅,段树国.2009.塔里木河中游径流量损耗特征

- 及原因分析. 水土保持研究, 16(3): 34-37.]
- Xu K H, Milliman J D, Xu H. 2010. Temporal trend of precipitation and runoff in major Chinese rivers since 1951. *Global and Planetary Change*, 73(3-4): 219-232.
- Xue L F, Tan H Q. 2011. Variations of the hydrological characteristics and driving factors in the Yihe river basin. *Progress in Geography*, 30(11): 1354-1360. [薛丽芳, 谭海樵. 2011. 沂河流域水文特征变化及其驱动因素. 地理科学进展, 30(11): 1354-1360.]
- Yao Z J, Guan Y P, Gao Y C. 2003. Analysis of distribution regulation of annual runoff and affection to annual runoff by human activity in the Chaobaihe river. *Progress in Geography*, 22(6): 599-606. [姚治君, 管彦平, 高迎春. 2003. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析. 地理科学进展, 22(6): 599-606.]
- Zhang J S, Kang E S, Lan Y C. 2001. Studies of the transformation between surface water and groundwater and the utilization ratio of water resources in Hexi region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 23(4): 375-382. [张济世, 康尔泗, 蓝永超. 2001. 河西内陆河地表水与地下水转化及水资源利用率研究. 冰川冻土, 23(4): 375-382.]
- Zhang X W, Shen B, Mo S H, et al. 2008. Runoff variation characteristics of Shiyang drainage basin. *Arid Land Geography*, 31(6): 836-842. [张晓伟, 沈冰, 莫淑红, 等. 2008. 石羊河流域出山口径流演变特征. 干旱区地理, 31(6): 836-842.]
- Zhou J J, Shi W, Shi P J, et al. 2012. Characteristics of mountainous runoff and its responses to climate change in the upper reaches of Shiyang river basin during 1956-2009. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 48(1): 27-34. [周俊菊, 师玮, 石培基, 等. 2012. 石羊河上游 1956-2009 年出山径流量特征及其对气候变化的响应. 兰州大学学报: 自然科学版, 48(1): 27-34.]

## Characteristics and influencing factors of runoff consumption in the midstream of Shiyang river

LIU Haimeng, SHI Peiji, ZHOU Junju, LIU Hailong, SUN Huihui

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The runoff of some rivers in the world, especially in the arid and semi-arid regions, has decreased remarkably with climate change and intensive human activities of the development of society and economy. This paper analyzes the characteristics of annual mountainous runoff and runoff consumption in the midstream of Shiyang river in the past 50 years. Using Fisher classification method and relativistic consumption rate, a major inflection point has been identified to be the year of 1975, during which human activities started to have significant influences on runoff consumption in the midstream of Shiyang river. The inflection point is clarified to be a point of significant change of runoff consumption caused by human activities, as opposed to the change of natural runoff, which is an improvement to the current research. Based on the types of human activities and the strength of the influences, the trend of runoff consumption in more than 50 years is divided into four stages; the contributions of human activities and natural changes on the influences on the runoff consumption in each stage from 1956-2009 are analyzed quantitatively and qualitatively. The results indicate that, generally speaking, prior to 2000 the contribution of human activities gradually increases; the contribution of natural changes decreases. Natural contribution is significantly correlated with mountainous runoff. Since mid-1970s, the contribution of human activities on the runoff consumption has increased significantly in the midstream of Shiyang river. In 1990s the influences of human activities and natural changes on the runoff consumption reach an equal level. Quantitatively speaking, from 1956 to 1999, the contribution of human activities is equivalent to 0.633 billion  $\text{m}^3/\text{a}$ , with 62.31% of water from upstream as directly artificial water consumption, accounting for 71.52% of overall results. After that, the contribution of human activities started to gradually decrease, indicating the sign of relief of the conflicts between water conservation and human activities in the midstream of Shiyang river.

**Key words:** runoff consumption; inflection point; relativistic consumption rate; influencing factors; midstream of Shiyang river