

# 黄河入海径流变化及影响因素

孔 岩<sup>1</sup>, 王 红<sup>1</sup>, 任立良<sup>2</sup>

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 210098; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:** 黄河入海径流是黄河水循环的重要分量, 涉及整个流域, 它的变化是流域气候与人类活动的综合体现。以黄河入海口利津水文站 1963~2009 年实测径流量年均值为基础, 采用随机水文学方法, 对入海径流动态变化进行了分析; 结合流域内 7 个径流来源区的 78 个气象站同时段月均降水和气温数据及流域内取水量和水利工程等资料, 探讨了不同径流来源区的气候因素和人类活动对入海径流量的影响。结果表明: 近 50 年来入海实测径流量呈显著下降趋势, 且存在 1968 年、1985 年、1996 年与 2002 年这四个突变点; 入海天然径流量同样呈显著下降趋势, 只有 1985 年一个突变点。唐乃亥以上区间的降水量、兰州至龙门区间的气温以及龙门至三门峡区间的降水和气温是引起入海天然径流量变化主要因素; 气温因素的季节性变化对入海天然径流量也有影响, 其中夏季降水与冬季气温是重要的因素。自 20 世纪 70 年代以来, 人类活动对入海径流量的影响不断加强, 且在耗水量、水土保持及水利工程等方面表现出明显的空间差异。取水量、降水、气温对黄河入海实测径流量变化的贡献率分别为 42.2%、39.2%、18.6%。

**关键词:** 径流量; 降水; 气温; 人类活动; 径流来源区间

文章编号: 1000-0585(2012)11-1981-10

## 1 引言

大江大河入海径流量是全球尺度水循环的重要分量, 也是陆地水循环与海洋水循环耦合的重要环节<sup>[1]</sup>。黄河作为中国第二大河, 是西北、华北大部分地区的主要水源。近年来在全球气候变化和人类活动的双重影响下, 黄河流域水资源状况日趋恶化, 黄河下游频繁断流, 三角洲湿地萎缩, 对流域生态环境的安全和社会经济的可持续发展构成了威胁<sup>[2]</sup>。对流域水循环过程及影响因素的分析与认识是缓解黄河流域水资源危机的科学依据<sup>[2]</sup>, 而黄河入海径流量是流域内复杂水循环过程的最终结果<sup>[3]</sup>, 涉及整个黄河流域, 它的变化是流域气候与人类活动的综合体现。因此, 研究黄河入海径流量的演变及其影响因素, 有助于探索流域水循环演化规律, 并对寻找协调黄河流域人水关系的适应性对策<sup>[2]</sup>以及河口生态与经济发展具有重要意义。

纵观已有对黄河入海径流量的研究主要从两个方面进行, 一是对入海径流的变异特征及变化规律的分析, 如对黄河入海径流量变化的趋势性、阶段性以及变化波动的周期性等变异特征进行研究<sup>[4~7]</sup>。二是对黄河入海径流量影响因素的分析, 有采用线性回归方法定

收稿日期: 2011-10-15; 修订日期: 2012-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871230); 国家重点基础研究发展计划 (2006CB400502)

作者简介: 孔岩 (1986-), 女, 山东济宁人, 硕士, 从事湿地水文研究。E-mail: kongyandream@163.com

通讯作者: 王红 (1968-), 女, 江苏南通人, 博士, 副教授, 主要从事湿地水文研究。

E-mail: hongwang@hhu.edu.cn

量评估气候变化和人类活动对黄河入海径流的影响<sup>[1,4,8]</sup>；Wang 等<sup>[9]</sup>认为厄尔尼诺现象直接影响黄河流域降水量变化，并最终导致入海径流量减少 51%。上述研究虽对径流影响因素进行了年际分析，但对年内季节性变化的成因分析不够深入，尤其没有考虑不同径流源区自然环境的空间差异。由于黄河入海径流量涉及的流域地理跨度大（经度跨度约 10°，纬度跨度约 23°），地形地貌差别大，从西到东由海拔 4000m 以上的青藏高原降至 100m 以下的华北平原；气候条件也存在明显的差异，自西向东大致可分为干旱、半干旱和半湿润气候，温度带分为青藏高寒气候、中温带和暖温带，呈现西部干冷，东部暖湿的现象。这些地形和气候的差异性使得不同径流源区对入海径流量的影响也不尽相同。目前，国内已经注意到了径流影响因素的时空分布不均匀性，如张士峰等<sup>[10]</sup>以 1983 年与 1985 年为典型年份，分析了降水不均匀性对黄河流域天然径流量的影响，但研究没有涉及气温和人类活动的空间差异。本文拟在黄河实测入海径流量、流域内降水和气温数据，以及流域人类活动取水量与水利工程建设等资料的基础上，采用数理统计方法，分析入海径流量的变化特征以及不同径流来源区的气候因素和人类活动对入海径流量的影响程度。

## 2 资料来源及流域分区

黄河发源于青藏高原，流经西北、华北大部分地区，集水面积 79.5 万 km<sup>2</sup>。流域水文特征明显，流域降水分布由东南向西北递减，年内分配不均匀，径流量年际变化也较大。

本文以利津水文站实测径流量代表黄河入海实测径流量，利津站是黄河入海前的最后一个重要的水文站（图 1），利津站以下引水量相对较小，因此一般以利津站径流量作为黄河入海通量。利津站 1963~2009 年实测径流量来自于黄河水利委员会编制的《黄河流域水文资料》和《黄河水资源公报》。流域 78 个气象站点（图 1）降水和气温数据来自中国气象局网站的《中国地面气候资料数据集》。流域同时段取水量来自于文献 [8] 和《黄河水资源公报》。

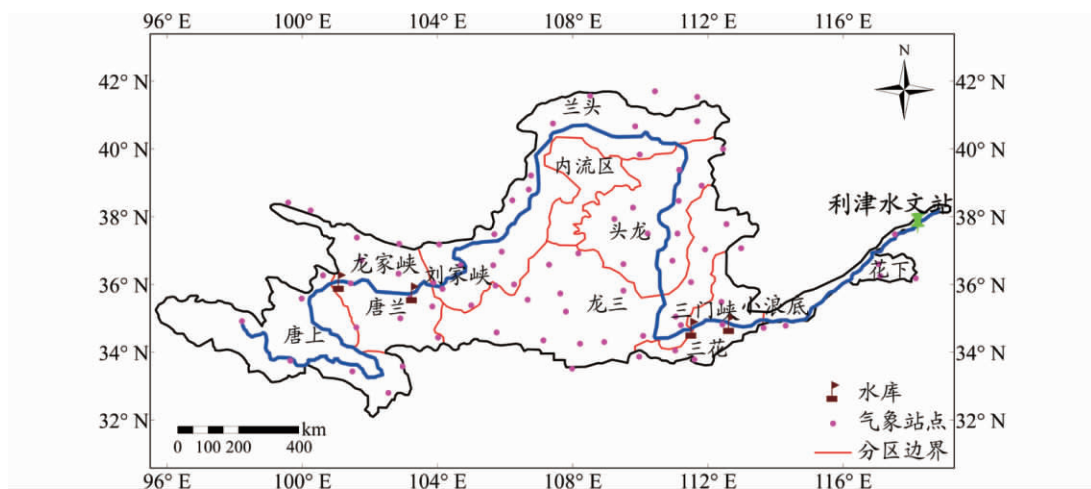


图 1 黄河流域二级分区图及主要大型水库和气象站点分布图

Fig 1 The map of secondary partition and the distribution map of main large reservoirs and meteorological sites in the Yellow River Basin

为了研究气候对入海径流量的影响, 参照国家水资源利用二级划分标准以及已有对黄河流域空间尺度划分的研究<sup>[10]</sup>, 将流域划分为七个区域 (内流区除外): 唐乃亥以上 (简称唐上)、唐乃亥~兰州 (唐兰)、兰州~头道拐 (兰头)、头道拐~龙门 (头龙)、龙门~三门峡 (龙三)、三门峡~花园口 (三花)、花园口以下 (花下) (图 1)。年内四季: 春 (3~5 月)、夏 (6~9 月)、秋 (10~11 月) 和冬 (12~次年 2 月)。

### 3 结果分析

#### 3.1 黄河入海径流量变化特征与规律

采用 Mann—Kendall 趋势检验法<sup>[11,12]</sup>、有序聚类方法<sup>[13]</sup> 分别对 1963~2009 年黄河入海径流量的年际变化趋势性与阶段性作定量分析。结果显示入海实测径流量的 Mann—Kendall 检验值为 $-5.52$ , 通过了 $\alpha=0.01$ 的检验, 说明近 50 年来实测径流量呈显著下降趋势。对 1963~2009 年的入海实测径流序列做阶段性分析, 结果检测出 1968 年、1985 年、1996 年与 2002 年四个跳跃点, 采用秩和检验法评价上述四个跳跃点的显著性水平, 其正态检验统计量分别为 3.62、5.46、4.03 和 3.56, 均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平。根据跳跃点分析, 入海实测径流量具有明显的阶段性变化特征 (图 2), 上述四个跳跃点将径流序列划分为 5 个阶段, 分别为 I: 1963~1968, II: 1969~1985, III: 1986~1996, IV: 1997~2002, V: 2003~2009, 5 个阶段的平均径流量分别为 593.8 亿  $\text{m}^3$ 、327.0 亿  $\text{m}^3$ 、175.2 亿  $\text{m}^3$ 、55.1 亿  $\text{m}^3$  和 181.8 亿  $\text{m}^3$ 。从该数值可看出, 阶段之间的跳跃度非常大, 均到达 100 亿  $\text{m}^3$  以上。

将同时段的流域取水量叠加到入海实测径流量中, 作为黄河入海天然径流量, 并采用上述同样的方法对其进行分析。结果显示天然径流量的 Mann—Kendall 检验值为 $-3.54$ , 通过了 $\alpha=0.01$ 的检验, 说明入海天然径流量也呈显著下降趋势。天然径流量 MK 值小于实测径流量的值, 说明其下降幅度比实测径流量小。天然径流量的阶段性分析仅检测出 1985 年一个跳跃点, 跳跃点将径流序列分为两个阶段, 平均径流量分别为 633 亿  $\text{m}^3$ 、480 亿  $\text{m}^3$  (图 2)。

#### 3.2 气候因素

由于入海实测径流量的减少中, 包含了人类取水的影响, 因此选择入海天然径流, 分析降水 and 气温的时空差异对其的影响, 可以在一定程度上消除人类取水的影响。为探究降水和气温的时空差异对入海天然径流的影响, 仍采用 Mann—Kendall 趋势检验与有序聚类方法对每个径流来源区间 1963~2009 年的降水和气温因素的趋势性与年代际变化进行分析, 采用 spearman 相关性检验和多元回归方法分析不同区间、不同季节的气候因素与入海天然径流变化的相关程度。

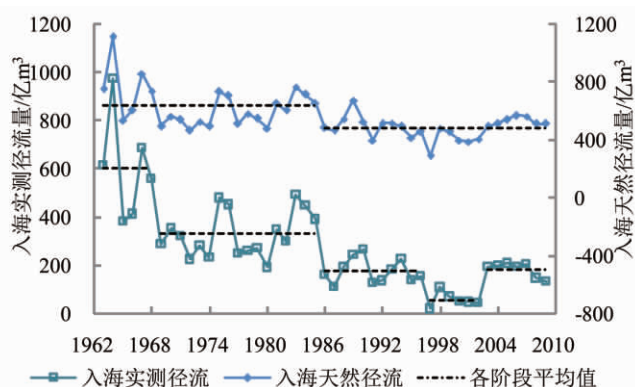


图 2 黄河入海径流量近 50 年来阶段变化图

Fig. 2 The variation diagram of the annual runoff of the Yellow River to the sea

3.2.1 降水 降水是径流最主要的来源，也是导致径流变化的主导因子。由于黄河流域地理跨度大，降水量存在着很大的空间变异。流域年均降水量最大处位于流域南部即唐上区间南部一带，均达到 750mm，逐渐向北递减至兰头区间北部一带，降水量最小，为 200m<sup>[14]</sup>。七个区间中三花降水量年均值最大，为 728mm，其次是花下区间，为 670mm，唐上、唐兰、头龙与龙三区间分别为 534mm、433mm、447mm 和 556mm，最少的是兰头区间仅有 292mm。

七个区间年降水量与入海天然径流量在不同年代的平均值列于表 1 中，不同区间年代际变化不同。入海天然径流量在 70 年代减少，80 年代相当于 70 年代有所增加，90 年代后大幅度减少，而 2000 年后相对于 90 年代有小幅度的增加，总的年代际变化趋势是减少、增加、减少和增加。如表中所示，七个区间中与入海天然径流量年代际变化始终一致的是唐上、龙三和三花区间。

表 1 七个区间年降水量 (mm) 与入海天然径流量 (亿 m<sup>3</sup>) 在不同年代的平均值

Tah 1 The average of the precipitation and the natural runoff to the sea in different decades

	1963~1969	1970~1979	1980~1989	1990~1999	2000~2009
唐上	543	531	558	517	525
唐兰	437	442	428	420	441
兰头	309	305	277	298	277
头龙	513	449	438	418	436
龙三	619	569	591	518	543
三花	710	655	695	620	684
花下	717	739	642	768	750
天然径流量	725	563	600	451	486

对七个区间 1963~1985 年均降水量的 MK 趋势检验分析显示，除唐兰 和花下区间略有小幅度上升，其他区间均有不同程度的下降，其中龙三区间年降水量呈显著下降趋势（通过  $\alpha=0.01$  检验）。七个区间四季降水量 MK 趋势检验分析显示，七个区间夏季降水均呈下降趋势，与入海天然径流量变化趋势一致；而花园口以上冬季降水均有不同程度的上升趋势。对龙三区间年降水量阶段性检验，结果显示 1985 年为突变点，这与入海天然径流量在 1985 年存在突变点一致，说明龙三区间年降水量对入海天然径流量在 1985 年产生波动具有重要影响。

采用 spearman 相关性检验，分别对每个区间的年和四季 5 个降水因素与入海天然径流量作相关性分析，并按每个区间统计，与其呈显著相关（通过  $\alpha=0.01$  检验）的降水因素的个数（表 2）。结果表明，与入海天然径流量相关性较高的区间是龙三区间、唐上区间、唐兰区间和三花区间。区间年降水量与入海天然径流量的相关系数（表 3）也表明这四个区间与入海天然径流量的相关性高于其他三个区间。

表 2 每个区间的年和四季降水、气温因素与入海天然径流的相关性统计

Tah 2 The correlation between the natural runoff to the sea and the precipitation and temperature of the annual and four seasons in each runoff source area

	唐上	唐兰	兰头	头龙	龙三	三花	花下
降水	2	2		1	3	2	
气温		1	3	3	4	1	1

表 3 七个区间年均降水量与入海天然径流量的相关系数  
Tab 3 The correlation coefficient between the natural runoff to the sea  
and the annual precipitation of the seven runoff source areas

	唐上	唐兰	兰头	头龙	龙三	三花	花下
降水	0.613	0.588	0.464	0.508	0.711	0.613	0.200
气温	-0.296	-0.454	-0.528	-0.495	-0.609	-0.452	-0.372

为了综合表达各区间降水量对黄河入海天然径流量的影响，采用多元回归法，以入海天然径流量  $R_{\text{天然}}$  作为因变量，采用逐步回归的方法，得到方程（1）如下：

$$R_{\text{天然}} = 308.178 + 0.713P_{\text{唐上}} + 0.283P_{\text{唐兰}} + 0.439P_{\text{龙三}} + 0.151P_{\text{三花}} - 81.008T \quad (1)$$
式中， $P_{\text{唐上}}$ 、 $P_{\text{唐兰}}$ 、 $P_{\text{龙三}}$  和  $P_{\text{三花}}$  分别表示唐上、唐兰、龙三和三花区间的年降水量， $T$  表示流域内年均气温。方程复相关系数  $R^2=0.714$ ，拟合较好。式（1）选入了唐上区间、唐兰区间、龙三区间和三花区间的年均降水量，说明这四个区间的年降水量与入海天然径流量密切相关。由于上式中各变量的数量级相差很大，不能直接根据回归系数的大小来判定各变量贡献的大小<sup>[1]</sup>。为此对数据进行标准化，使之变化为 0~1，然后建立常数项为 0 的回归方程（2）如下：

$$R_{\text{天然}} = 0.282P_{\text{唐上}} + 0.110P_{\text{唐兰}} + 0.299P_{\text{龙三}} + 0.132P_{\text{三花}} - 0.345T \quad (2)$$

上式中各变量的系数绝对值大小反映该变量对因变量的贡献率大小<sup>[1]</sup>，唐上区间、唐兰区间、龙三区间和三花区间的年均降水量对天然径流量贡献率分别为 24.1%、9.4%、35.6%和 11.3%，可见龙三区间和唐上区间的贡献率最大。

综上分析显示，对入海天然径流量贡献最大的唐上区间与龙三区间，其次是三花区间与唐兰区间。唐上区间与龙三区间降水丰沛，产流量大，是黄河主要来水源区，对入海天然径流量具有最重要影响，对黄河径流的影响并不因跨越多个省份而分异，相反表现了中上游来水与下游水量一致性的特点<sup>[15]</sup>。唐兰区间与唐上区间的气候和地形相似，但唐兰区间的年降水比唐上区间少 33.1%，因此后者的产流量大于前者；兰头区间和头龙区间降水偏少，气候干燥，蒸发量大，生态环境脆弱，是黄河流域泥沙的主要来源区，但对入海径流的变化影响不大；三花区间的降水量虽然大于龙三区间，但前者面积小，仅为后者的五分之一<sup>[8]</sup>，因此对入海天然径流量的贡献后者大于前者；花下区间的面积最小，仅占流域的 2.9%，对入海径流的贡献最小。

七个区间四季的降水量与入海天然径流量的相关分析结果显示，入海天然径流与夏季降水相关性最高，夏季降水多是集中分布的暴雨，而集中分布的暴雨是地表产流的有利条件，且上述趋势分析表明夏季降水与入海径流的变化趋势一致，因此夏季降雨对入海天然径流的贡献相对较大。

3.2.2 气温因素 在全球变暖的趋势下，气温同样也是影响黄河流域径流变化的主要因素。气温升高不仅导致地表蒸散的增加，还与高原冰川和积雪融化等有关。

七个区间年平均气温表现出明显的空间差异性，气温大致由西向东呈递增的分布，其中三花区间气温最高（图 3）。黄河流域各区间的气温 80 年代以前比较稳定，80 年代以后均出现上升趋势，90 年代以后升温明显加快。各区间出现明显升温的年份有所差异，其中三花区间与花下区间明显升温年份出现较早，第一次出现在 1983 年，第二次在 1993 年，其次是龙三区间、头龙区间和兰头区间，第一次和第二次升温分别出现在 1985 年和

1996 年, 而唐上区间与唐兰区间则分别在 1986 年和 1997 年。气温不仅表现出区间差异性, 且不同季节也呈现出明显变异 (图 4)。从图 4 可看出, 在 1985 年, 冬季升温明显, 由此可见上述 1985 年的第一次明显升温应是由冬季升温引起的, 而且对入海天然径流量在 1985 年出现突变点也具有一定的影响; 其他季节在 1996 年后升温明显。

采用 spearman 相关性检验, 分别对每个区间的年和四季 5 个气温因素与入海天然径流量作相关性分析, 并按每个区间统计, 与其呈显著相关 (通过  $\alpha=0.01$  检验) 的气温因素的个数 (表 2)。结果表明, 与入海天然径流相关性较高的主要集中在兰头、头龙和龙三区间。表 3 中, 这三个区间年均气温与入海天然径流量的相关系数高于其他区间, 且上述分析中这三个区间第一次明显升温的 1985 年与入海天然径流量的突变点吻合, 说明这三个区间的气温升高对入海天然径流量减少的影响较大。由于这三个区间位于黄土高原地带, 地域辽阔, 气候干燥, 气温升高加剧了地表蒸发, 从而引起地表径流减少。

七个区间四季的气温与入海天然径流量的相关分析结果显示, 入海天然径流与冬季气温相关性最高, 表明冬季气温对入海天然径流量的影响最大。据统计冬季是黄河流域气温升幅最大的季节, 2000 年以后的冬季平均气温比 20 世纪 60 年代普遍升高  $2^{\circ}\text{C}$  以上, 冬季气温的大幅升高会对黄河流域凌情变化造成影响, 同时还会引起高原冰川和积雪融化, 造成上游径流来水量增加, 在一定时期增加了径流量, 但其后所引起的高原生态恶化会加速高原水塔储水能力的下降, 令流域内长期供水能力下降<sup>[16]</sup>, 最终导致入海径流量的减少。

### 3.3 人类活动因素

在过去 50 年, 伴随着经济和人口的快速发展, 黄河流域受到了人类活动强烈的影响, 生产生活需水量急剧增加, 大中型水库及淤地坝大量修建, 使得流域水资源供需矛盾日趋严峻。由于区域的差异, 人口分布不均, 人类活动对入海径流的影响也存在着时空差异。分析人类活动时空差异对径流的影响, 对水资源系统配置具有重要意义。

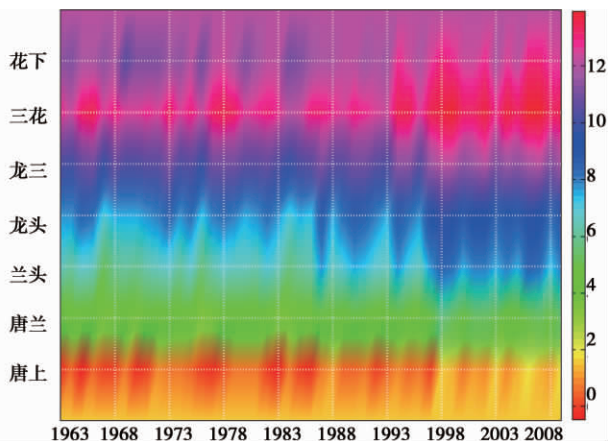


图 3 七个区间年平均气温变化图

Fig. 3 The annual temperature variation diagram of 7 runoff source areas

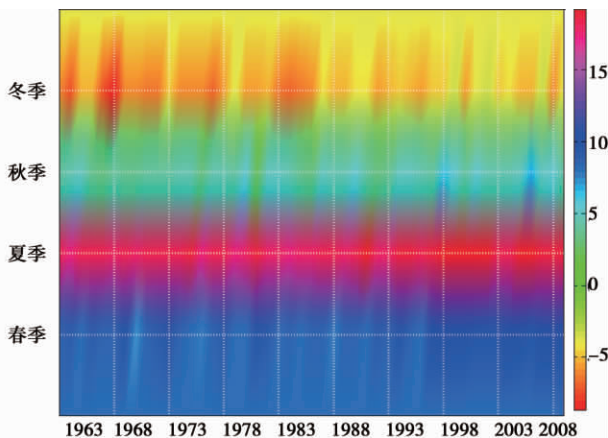


图 4 流域内四季平均气温变化图

Fig. 4 The temperature variation diagram of 4 seasons in the basin



**3.3.1 流域取水量** 50 年代后人口与灌溉面积急剧增长, 人口由 1953 年的 4.1 千万增长至 1982 年的 8.4 千万, 再到 1997 年的 10.7 千万, 灌溉面积由 1949 年的  $0.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$  增长至 1997 年的  $7.51 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 人口与灌溉面积的增加直接导致取水量增加。整个黄河流域 1963~2009 年取水量 (图 5) 在 80 年代前呈持续增加, 80 年代后呈波动式增加。流域取水量在 1963~1968 年 160.7 亿  $\text{m}^3$ , 1968~1985 年达到 259.3 亿  $\text{m}^3$ , 1986~1996 年为 320.6 亿  $\text{m}^3$ , 1997~2002 年 343.9 亿  $\text{m}^3$ , 2003~2009 年 343 亿  $\text{m}^3$ 。相对于第一个阶段, 1968 年后四个阶段的取水量分别增长了 61.4%、99.6%、114%、114%, 相应地黄河入海实测径流量分别减少了 45.8%、70.9%、90.8%、69.8%, 可见流域取水量剧增与入海实测径流量的急剧减少几乎同步。1999 年后, 黄河水利委员会实施黄河水量的统一调度和分配, 在水资源需求不断加大的情况下, 有效控制了黄河沿线的取水量, 使入海实测径流量在第五个时间段有所增加。取水量占天然入海径流量比例由 1963~1968 年的 22.5% 上升为 1997~2009 年的 75.3%, 可见, 流域取水量增加已成为影响入海径流大幅度减少的重要原因。

根据刘昌明等<sup>[17,18]</sup>统计的不同区间耗水量年代数据及《黄河水资源公报》统计的最新耗水量资料, 绘制不同区间耗水量年际变化图 (图 6)。由于唐乃亥以上区间耗水量较少, 多年平均耗水量约为 1.67 亿  $\text{m}^3$ , 故本研究中只统计了兰州以上区间耗水量。图 6 显示区间耗水量较大是兰头区间与花下区间, 80 年代后年均耗水量达到了 100 亿  $\text{m}^3$  左右。不同区间耗水量年际变化也存在明显差异, 除三花区间耗水量呈下降趋势外, 其余区间的耗水量均有不同程度的增加, 兰上、龙三和花下区间的耗水量在 70 年代增幅较大, 兰头区间在 80 年代增幅较大。由于黄委自 1999 年对整个黄河水资源统一调配, 兰头、三花和花下区间的耗水量在 2000 年后出现了明显的降低, 可见中下游区间的耗水量受到控制, 开始出现减少的趋势, 入海实测径流量也在 2003 年后出现了小幅度回升。

**3.3.2 水土保持与水利工程** 黄土高原大规模的水土保持始于 60 年代末, 实施了梯田、林、草、淤地坝四大水土保持措施, 初步治理水土流失面积 18.45 万  $\text{km}^2$ <sup>[17]</sup>。然而水土保持措施改变了黄河中上游尤其是中游的下垫面条件<sup>[17]</sup>, 梯田的修建以及林草的种植增加了地表入渗, 入渗的水分除一部分补给地下水, 其余消耗在地表蒸发和植物蒸腾中<sup>[1]</sup>。

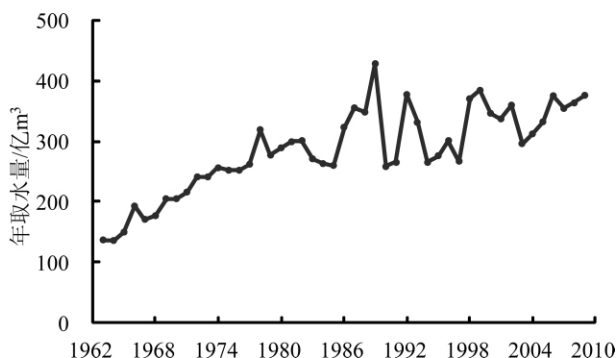


图 5 黄河流域年取水量

Fig 5 The water withdrawal in the Yellow River Basin

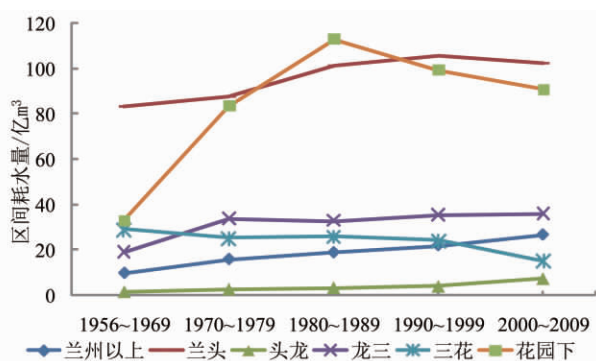


图 6 七个区间耗水量年代变化图

Fig 6 The variation diagram of water consumption in seven runoff source areas

黄河中游被深厚的黄土覆盖,地下水位较低,入渗的水分少部分进去地下水,大部分则通过蒸发被损耗<sup>[8]</sup>。70年代以后由于水土保持措施,黄河中游来水量每年减少约 34 亿  $\text{m}^3$ <sup>[17]</sup>,一定程度上减少了入海实测径流量。

黄河干流在 60 年代大型水利工程很少,其后发展很快,截止 2002 年,黄河干支流上已建成大中型水库 136 座(大型水库 18 座,中型水库 118 座)<sup>[17]</sup>,三门峡、刘家峡、龙羊峡和小浪底是干流中 4 个大型水库,对调节径流起着至关重要的作用<sup>[8]</sup>,其位置主要位于唐兰与三花区间(图 1)。三门峡于 1960 年 9 月蓄水,蓄水当年下游便出现断流。刘家峡蓄水时间为 1968 年 10 月,水库建成后,兰州站汛期径流出现了明显的下降<sup>[8]</sup>,刘家峡在 1969~1985 年汛期平均蓄水量为 26.9 亿  $\text{m}^3$ ,非汛期平均泄水量 24.7 亿  $\text{m}^3$ ,刘家峡单库调节对年入海径流量影响不大<sup>[4]</sup>。龙羊峡蓄水时间为 1986 年 10 月,到 1989 年 11 月共蓄水 160.3 亿  $\text{m}^3$ ,龙羊峡和刘家峡联合使用,这期间只蓄不泄,可以说,在这期间,龙羊峡和刘家峡直接导致入海径流量减少 160.3 亿  $\text{m}^3$ ,这对入海实测径流量在 1985 年发生突变,具有重要的影响。小浪底于 1999 年 10 月建成蓄水,1999 年到 2002 年期间,水库内蓄水量为 23.4 亿  $\text{m}^3$ ,进一步加剧了入海径流量的萎缩。刘家峡与龙羊峡起始蓄水时间是 1968 年与 1986 年,小浪底进行调水调沙试验在 2002 年,这些年份与入海实测径流量的突变点吻合,说明水利工程的修建对入海实测径流量的波动有着重要影响。

水利工程的修建主要是为了按季节分配水资源,以满足农业灌溉以及预防洪涝灾害。水库汛期蓄水,非汛期泄水,在足够长的时间尺度上,水库直接减少的入海径流量是很小的,但水库对入海径流量减少的间接影响还是较大的。主要表现在由于水库的调节,流域年取水量的增加和减少与降水量的丰枯不存在一致性,特别在 70 年代后,这种不一致的年份出现的次数越来越多<sup>[9]</sup>,说明水库的调节改变了原有的取水规律,水量由汛期向非汛期转移,增加了非汛期的潜在耗水量<sup>[4]</sup>;其二是由于水利工程的修建,增加了黄河河道水面积,据统计,中上游干流河道水面蒸发量较自然条件下增加了 4.23 亿  $\text{m}^3$ <sup>[17]</sup>。

### 3.4 多元回归分析

为了综合表达流域人类活动取水量与气候因素对黄河入海实测径流量的影响,采用多元回归法,以入海实测径流量  $R_{\text{实测}}$ ,作为因变量进行回归,得到方程(3)如下:

$$R_{\text{实测}} = 521.264 - 1.285W + 1.326P - 66.622T \quad (3)$$

式中,  $W$ 、 $P$  和  $T$  分别为全流域年取水量、流域年均降水量和为流域年均气温,方程复相关系数  $R^2=0.794$ ,拟合很好。运用公式,可以粗略估算未来降水、气温和取水量变化后,黄河入海径流量的变化<sup>[1]</sup>。数据进行标准化后建立回归方程(4)如下:

$$R_{\text{实测}} = -0.489W + 0.455P - 0.216T \quad (4)$$

根据上式中各变量的系数绝对值大小计算该变量对因变量的贡献率,取水量、降水、气温的贡献率分别为 42.2%、39.2%、18.6%,由此可知,取水量和降水对入海实测径流量的贡献较大且接近相等,气温的贡献较小。

## 4 结论与讨论

本文结合近 50 年来黄河入海实测径流量数据、降水和气温数据以及人类取水量等资料,分析了入海径流量的变化特征,并对引起径流量变化的气候和人类活动影响因素进行了分析,结论如下:

(1) 黄河入海实测径流量与入海天然径流量在近 50 年的演变过程中均呈现明显的下



降趋势与阶段性变化,不同的是入海实测径流量出现了四个跳跃点,分别 1968 年、1985 年、1996 年与 2002 年,入海天然径流量仅出现了一个跳跃点,即 1985 年。

(2) 气候因素的时空变异对黄河入海天然径流量的影响差异很大。从时间动态分析可以得出,夏季降水与入海天然径流量变化趋势一致,且与入海天然径流的相关性高;流域内升温明显,特别是冬季气温,是影响入海天然径流的主要因素之一。从空间上,龙门—三门峡区间和唐乃亥以上区间的降水量对入海天然径流量贡献率最大,且龙门—三门峡区间年均降水量序列的突变点 1985 年与入海天然径流量突变点一致;兰州至三门峡区间的气温与入海天然径流量相关性较大,且区间第一次明显升温的 1985 年与入海天然径流量的突变点吻合,说明这个区间气温升高是入海天然径流量减少的另一主要因素。

(3) 70 年代后,不同径流来源区在耗水量、水土保持及水利工程等人类活动对入海径流量影响表现出明显的空间差异。耗水量最大的是兰州—头道拐区间与花园口以下区间,水土保持措施主要影响黄河中游的产流量,而水利工程的影响则主要是增加了唐乃亥—兰州区间与三门峡—花园口区间的河道水面蒸发量以及黄河沿线非汛期的潜在耗水量。

(4) 不同的影响因素对黄河入海实测径流量的贡献率不同,取水量、降水和气温的贡献率分别为 42.2%、39.2%、18.6%,说明取水量和降水对入海实测径流量的影响大于气温。

#### 参考文献:

- [1] 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.水科学进展,2003,14(6):690~695.
- [2] 刘昌明,郑红星.黄河流域水循环要素变化趋势分析.自然资源学报,2003,18(2):129~135.
- [3] 张二凤,陈西庆.人类活动对河流入海流量下降的影响.上海水利,2000,2(59):32~37.
- [4] 丁艳峰,潘少明.近 50 年黄河入海径流变化特征及影响因素分析.第四纪研究,2007,29(5):709~717.
- [5] 丁艳峰,潘少明.近 50 年来黄河入海径流量变化的初步分析.海洋开发与管理,2009,26(5):67~73.
- [6] 周晓霞,杨作升.48 年来黄河入海水沙过程及其对流域人类活动的响应.海岸工程,2002,21(1):6~15.
- [7] 刘勇胜,陈沈良,李九发.黄河入海水沙通量变化规律.海洋通报,2005,24(6):1~8.
- [8] Xu J X. The water fluxes of the Yellow River to the sea in the past 50 years, in response to climate change and human activities. Environmental management, 2005, 35(5): 620~631.
- [9] Wang H J, Zuosheng Yang. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: Connections to impacts from ENSO events and dams. Global and Planetary Change, 2006, 50: 212~225.
- [10] 张士锋,贾绍凤.降水不均匀性对黄河天然径流量的影响.地理科学进展,2001,20(4):355~363.
- [11] Fu G B, Chen S L. Hydro-climatic trends of the Yellow River Basin for the last 50 years. Climatic Change, 2004, 65: 149~178.
- [12] Khaled H Hamed. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. Journal of Hydrology, 2008, 349: 350~363.
- [13] 丁晶,邓育仁.随机水文学.成都:成都科技大学出版社,1988.
- [14] 徐宗学,张楠.黄河流域近 50 年降水变化趋势分析.地理研究,2006,25(1):27~34.
- [15] 刘昌明,成立.黄河干流下游断流的径流序列分析.地理学报,2000,55(3):257~265.
- [16] 饶素秋,杨特群,陈冬伶.黄河流域气候变化的影响及可能开展的水文研究.中国水利学会 2008 学术年会论文集(下集),北京:中国水利水电出版社,2008.
- [17] 刘昌明,张学成.北京:中国水利水电出版社,黄河干流实际来水量不断减少的成因分析.地理学报,2004,59(3):323~330.
- [18] 张学成,王玲.黄河河川径流耗水量预测分析.水利水电技术,2001,32(6):8~11.

## Analysis of the runoff variation of the Yellow River to the sea and its influencing factors

KONG Yan<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>, REN Li-liang<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,  
Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The runoff of the Yellow River to the sea is an important component of water cycle, which involves the entire basin, and its temporal and spatial changes are comprehensive reflection of climate and human activities in the basin. Based on the measured runoff data (1963–2009) from the Lijin hydrographic station at the Yellow River estuary, the evolutionary characteristics of runoff into the sea in the past 50 years were analyzed using stochastic hydrology methods. Combining average monthly precipitation and temperature data obtained from 78 weather stations in seven runoff source areas and water withdrawal and water conservancy projects, we explored the influence of climate change and human activities in different runoff source areas on the runoff to the sea.

The measured runoff to the sea showed a significant decreasing trend in the evolution of the past 50 years, and four hopping points were identified in the runoff sequence, and the natural runoff to the sea saw the same trend and had only one hopping point. The precipitation in the region above Tangnaihai, the temperature in Lanzhou-Longmen region and the precipitation and temperature in Longmen-Sanmenxia region were a principal factor affecting the change of natural runoff to the sea. Seasonal climatic factors had also influence on runoff to the sea, and summer precipitation and winter temperature were the important factors. The impact of human activities on runoff into the sea continued to increase after the 1970s. Different runoff source areas showed significant differences in water consumption, soil conservation and water conservancy projects. The contribution rates of different influencing factors to the measured runoff into the sea were different, and those of the water withdrawal, precipitation and temperature were 42.2%, 39.2%, and 18.6%, respectively.

**Key words:** runoff of Yellow River to the sea; precipitation; temperature; human activities; runoff source areas