

# 1956—2017 年黄河干流径流量时空变化新特征

李 勃<sup>1</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 高 鹏<sup>1,2</sup>, 赵广举<sup>1,2</sup>, 孙文义<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,  
陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 河川径流是组成水资源的重要部分,同时也是区域水资源开发利用的基础。为了探究整个黄河流域径流量时空变化新特征,基于黄河干流 9 个主要控制水文站(唐乃亥、兰州、河口镇、龙门、潼关、花园口、高村、艾山和利津站)的实测径流量资料,采用 Mann-Kendall 趋势检验法、Pettitt 突变检验和距平累积等方法,研究了 1956—2017 年黄河干流径流量时空变化规律。结果表明:黄河上、中、下游年径流量整体呈逐年减少趋势,区间年径流量减少的倾向率分别为 $-20.16$  亿  $\text{m}^3/10$  a,  $-30.23$  亿  $\text{m}^3/10$  a,  $-16.98$  亿  $\text{m}^3/10$  a。上、中、下游年径流量发生突变的临界年份分别为 1986 年、1990 年(1968 年)、1976 年(2002 年和 2010 年)。黄河干流径流量大致经历了丰水期、平水期和枯水期 3 个阶段的变化。上游唐乃亥站的年均径流量无长期变化趋势,而其余水文站的年径流量均呈现显著下降趋势,下降幅度基本沿程增加。年径流量临界年份除了唐乃亥站,其余站点主要集中在 1985 年、1990 年。黄河干流 9 个主要控制站不同年代平均径流量沿程分布特征基本一致,表现为先增加至花园口站达到最大值随后下降趋势,且代际间表现为逐阶段波动下降趋势。

**关键词:** 黄河; 上中下游; 径流量; 趋势分析; 突变分析

中图分类号: P333.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)06-0120-07

## New Characteristics of Temporal and Spatial Changes of Runoff in the Mainstream of Yellow River from 1956 to 2017

LI Bo<sup>1</sup>, MU Xingmin<sup>1,2</sup>, GAO Peng<sup>1,2</sup>, ZHAO Guangju<sup>1,2</sup>, SUN Wenyi<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,  
Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,  
China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Runoff is the important resource and basis for the utilization of regional water resources. Based on the data of yearly runoff of nine hydrological stations from 1956 to 2017, in order to explore the new characteristics of spatial and temporal changes of runoff in the Yellow River Basin, we used modern statistical analysis such as Mann-Kendall test, Pettitt mutation test, anomaly accumulation, to reveal the temporal and spatial variation of runoff. The results showed that the runoff of the upper, middle and lower reaches exhibited a significant decreasing trend with its propensity rates of  $-2.016$  billion  $\text{m}^3/\text{decade}$ ,  $-3.023$  billion  $\text{m}^3/\text{decade}$ ,  $-1.698$  billion  $\text{m}^3/\text{decade}$ , and its critical years are 1986, 1990 (1968), 1976 (2002, 2010); apparent periodicities can be observed in the variation of annual runoff. The runoff discharge shows the significant decreasing trend at main hydrological stations with exception of the Tangnaihai station, the decline level increases along the river from upper to lower reaches. The critical years of annual runoff mainly concentrated in 1985 and 1990 except Tangnaihai station. The distribution characteristics of the average runoff along the nine stations were basically the same, which performed increasing first and then decreasing. The inter-generational variation gradually increased, and the maximum value appeared at Huayuankou station.

**Keywords:** the Yellow River; upper, middle and lower reaches; streamflow; trend analysis; mutation analysis

缺水问题将严重制约 21 世纪经济和社会发展,  
并可能导致国家间的冲突。受气候变化和人类活动

的共同影响,全球许多河流的径流量发生了明显地改  
变,严重威胁着区域的水资源状况<sup>[1]</sup>。McMahon 等<sup>[2]</sup>分

收稿日期: 2018-12-10

修回日期: 2019-01-15

资助项目: 国家重点研发计划“黄河流域水沙多时空演变及其分异规律”(2016YFC0402401); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室  
专项经费“黄河水沙多时空演变及驱动机制”(A314021403-Q2)

第一作者: 李勃(1995—), 女, 陕西绥德人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持和生态水文。E-mail: 2498257968@qq.com

通信作者: 赵广举(1980—), 男, 河南驻马店人, 博士, 研究员, 主要从事流域水文过程与土壤侵蚀模拟研究。E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn

析了全球 1 221 条河流的至少 10 a 的年及月径流量,指出全球平均径流及储存层水量变化显著,尤其是南非洲及澳大利亚变化最为剧烈。Milly 等<sup>[3]</sup>、Pachauri<sup>[4]</sup>运用 12 个气候模型模拟显示,截至 2050 年,全球年平均径流量在高纬度地区预计将增加 10%~40%,中纬度地区的一些干旱地区将降低 10%~30%。Milliman 等<sup>[5]</sup>研究指出 20 世纪后期,由于人类活动的影响,全球大部分中纬度河流径流量减少了 60%。

黄河是世界上著名的含沙量高的大型河流,是我国第二条大河,世界第五大长河,作为中国西北和华北的重要水源,被喻为沿黄地区的生命线<sup>[6-7]</sup>。在流域内人类活动频繁和全球气候变暖的背景影响下,特别是近 20 多年内退耕还林及河道整治工程效果显著,各大江大河径流泥沙发生显著变化。Mu 等<sup>[8]</sup>研究指出黄河也是受人类活动影响剧烈导致径流急剧改变的河流之一。1972—1998 年的 27 a 中,黄河有 21 a 下游出现断流,累计断流 1 050 d<sup>[9]</sup>。在 20 世纪 90 年代,黄河下游频繁断流,且断流历时在延长,断流河段也在不断向河源区延伸<sup>[10-12]</sup>。关于黄河径流变化特征已有大量研究<sup>[13-17]</sup>,主要涉及到土地利用变化对径流的影响、人类活动对径流的影响、下游断流的径流序列分析等方面,且诸多研究集中在某一河段或区域<sup>[18-20]</sup>。然而,对于整个黄河流域径流量的综合性分析不够,难以系统深入认识全河径流时空变化的新特征。鉴于此,本文收集黄河干流 9 个主要控制站点 60 余年的实测径流序列资料,从整个流域尺度集成分析黄河径流量演变规律,以期全面认识黄河径流新变化,为区域水资源规划、水土保持措施优化配置等方面提供科学参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

黄河发源地有 3 处,北源发源于青海省青藏高原

的巴颜喀拉山脉支脉查哈西拉山南麓的扎曲,南源发源于巴颜喀拉山支脉各姿各雅山北麓的卡日曲,西源发源于星宿海西的约古宗列曲。自西向东流经 9 省(区),横跨中国青藏高原、内蒙古高原、黄土高原、华北平原,以及干旱、半干旱、半湿润区,于山东省东营市垦利区黄河口镇流入渤海,全长 5 500 km,流域面积 75 万多 km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。黄河上游年径流量占全河的 54%,但其年来沙量只占全河年来沙量的 8%。中游地区主要包括河龙区间的支流和泾洛渭汾等河流,其入黄泥沙量、输沙量占全河的 90%以上,特别是河龙区间产流量不足全流域的 14%,但输沙量占 60%以上<sup>[22-23]</sup>。



图 1 研究区地理位置及水文站点分布

根据黄河流域不同区域的特点、干流水文站的分布情况以及数据的完整性,本文选择黄河流域干流的唐乃亥、兰州、河口镇、龙门、潼关、花园口、高村、艾山和利津 9 个代表水文站 1956—2017 年观测数据(图 1),研究黄河上游、中游和下游 3 个区间径流量变化特征。本文将河口镇水文站实测径流量作为黄河干流上游的来水量,将河口镇至花园口站区间径流量作为中游来水量,将花园口以下径流量作为下游来水量,即上游径流量用河口镇的径流量表示,中游径流量由花园口站与河口镇站径流量之差表示,而下游径流量则用利津站与花园口站径流量之差表示<sup>[18]</sup>。数据下载自中国科学院水利部水土保持研究所“地球科学数据共享平台(www.geodata.cn)——黄土高原数据共享运行服务中心”。所选代表水文站的基本情况见表 1。

表 1 黄河干流主要代表水文控制站基本情况

| 水文控制站                  | 唐乃亥     | 兰州      | 河口镇     | 龙门      | 潼关      | 花园口     | 高村      | 艾山      | 利津      |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 流域面积/万 km <sup>2</sup> | 12.20   | 22.26   | 36.79   | 49.76   | 68.22   | 73.00   | 73.41   | 74.91   | 75.19   |
| 占利津的比例/%               | 16.22   | 29.61   | 48.93   | 66.18   | 90.73   | 97.08   | 97.63   | 99.63   | 100     |
| 经度(E)                  | 100°03′ | 103°49′ | 111°04′ | 110°33′ | 110°18′ | 113°40′ | 115°05′ | 116°17′ | 118°18′ |
| 纬度(N)                  | 35°24′  | 36°03′  | 40°16′  | 35°40′  | 34°37′  | 34°54′  | 35°23′  | 36°16′  | 37°32′  |
| 至河口距离/km               | 3911    | 3345    | 2002    | 1269    | 1134    | 768     | 579     | 384     | 104     |

1.2 研究方法

1.2.1 径流年际变化趋势检验方法 采用 Mann-Kendall 检验法(M-K 法)分析径流量的年际变化趋势。M-K 法是当前在气象水文文中广泛使用的一种非参数统计检验的方法<sup>[14]</sup>。该方法不要求数据样本遵

从一定的分布,用数据序列的秩序来对两个变量的相关程度进行判断,少量的异常值对其结果不会造成干扰,是十分有效的一种趋势检测方法。M-K 方法检验的统计量 Z 值如果为正,表示序列呈增加趋势,为负则呈减小趋势。检验临界值分别为显著性水平 0.05 时为

±1.96,显著性水平 0.01 时为±2.58<sup>[24-25]</sup>。

1.2.2 径流年际突变临界点分析 Pettitt 突变检验是 1979 年建立的一种非参数检验方法,主要是依据长时间序列趋势性的变化,通过检验时间序列要素均

值变化的确切时间来确定跃变变化的确切时间<sup>[26]</sup>。

1.2.3 径流量年际阶段性分析 采用“距平累积法”判别径流量年际变化的阶段性特征,该法先计算每年的径流量距平,然后按年序累加,得到距平累积序列<sup>[27]</sup>。即

$$LP_i = \sum_i^N (R_i - \overline{R})$$

(1)

式中:LP<sub>*i*</sub>为第*i*年的距平累积值;R<sub>*i*</sub>为第*i*年的径流量;  
 $\overline{R}$ 为径流量序列的多年平均。根据距平有正有负的特点(持续期为 5 a),当距平累积持续增大时,表明该时段内径流量距平持续为正。当距平累积持续不变,表明该时段距平持续为 0 即保持平均。当距平累积持续减小时,表明时段内径流量距平持续为负。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河上中下游不同区间入黄径流量时间变化特征

2.1.1 黄河上中下游年际径流量变化的趋势性及突变性 黄河各区间年汇入黄河的径流量整体呈逐年减少趋势。黄河干流上、中、下游年径流量随时间变化过程及其滑动平均如图 2A,C,E 所示。分析表明:年径流量的 5 年滑动平均曲线均呈下降趋势。上、中、下游年径流量 M-K 检验统计量为负且均达到 0.01 极显著水平,尤以中游最为显著(表 2)。线性拟合显示上、中、下游区间年径流量减少率分别为-20.16 亿 m<sup>3</sup>/10 a,-30.23 亿 m<sup>3</sup>/10 a,-16.98 亿 m<sup>3</sup>/10 a。

黄河各区间年汇入黄河的径流量年际过程也具有突变特点。不同区间年径流量发生趋势性跃变的临界年份如图 2B,D,F 所示。分析表明:在 99% 信度水平下,上、中、下游径流量的统计检验指标分别为 1986 年、1990 年、1976 年出现最低点并超出临界水平线,为突变年份。再以突变点为界,将序列划分为前后两个序列,分别对其进行检验,结果显示中游在 1968 年发生二次突变,下游在 2002 年、2010 年分别发生二次突变,而上游区间仅存在上述一个突变点。

2.1.2 黄河上中下游径流量代际间变化特征 黄河干流上、中及下游径流量年代差异明显,且自 20 世纪 80 年代以来呈下降趋势。黄河干流上、中、下游不同年代水文要素特征值见表 3。上中下游多年平均径流量分别为 205.29 亿 m<sup>3</sup>,147.28 亿 m<sup>3</sup>, -80.51 亿 m<sup>3</sup>,上中游不同年代最大平均径流量均出现在 20 世纪 60 年代,21 世纪初最小,仅分别占 20 世纪 60 年

代的 54%,36%,而下游区间径流量均为负值。20 世纪 60 年代以来,黄河上中下游代际径流量出现波动下降趋势,且下游区间流量始终处于负值水平,表示经由中游流经下游的径流量显著减少,仅在 20 世纪 50—60 年代出现部分正值。

表 2 黄河上中下游径流量变化趋势检验

| 区间                             | 上游     | 中游     | 下游     |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| 检验统计量                          | -3.88  | -5.81  | -4.22  |
| 显著性水平                          | **     | **     | **     |
| 变化倾向率/(亿 m <sup>3</sup> /10 a) | -20.16 | -30.23 | -16.98 |

注:\*\*表示达到 0.01 显著性水平。

分析各年代径流量变差系数,上中下游区间变动范围分别为 0.18~0.36,0.28~0.50,-0.11~-12.74,变差系数(Cv)最大值均发生在 20 世纪 60 年代,其中,下游区间年际径流量变化波动更更剧烈,Cv 最大值达到-12.74。进入 21 世纪以来,黄河中游径流量年际变化较上下游更为剧烈。

### 2.1.3 黄河上中下游径流量年际变化的阶段性分析

黄河上中下游径流量变化具有显著的丰平枯等阶段性特征。不同区间径流量距平累积曲线见图 3,分析可将黄河上中下游径流量变化过程可划分为丰水期、平水期和枯水期 3 个阶段。上游径流量累积距平值在 1985 年前后表现出先增后减的趋势,年径流量枯水期较丰水期减少 35%。中游径流量距平值在 1970 年、1985 年前后表现为明显的丰水期—平水期—枯水期阶段,1956—1970 年丰水期年段(累积斜率变化为 92.59 亿 m<sup>3</sup>/a),1971—1985 年为平水期年段(累积斜率变化为 12.38 亿 m<sup>3</sup>/a),1986—2017 年为枯水期年段(累积斜率变化为-54.45 亿 m<sup>3</sup>/a)。下游年径流量距平累积表现丰水期—平水期—枯水期,1956—1970 年丰水期年段(累积斜率变化为 73.45 亿 m<sup>3</sup>/a),1971—1979 年平水期年段(累积斜率变化为-0.03 亿 m<sup>3</sup>/a),1980—2002 年强枯水期年段(累积斜率变化为-41.79 亿 m<sup>3</sup>/a),2003—2017 年弱枯水期(累积斜率变化为-11.91 亿 m<sup>3</sup>/a)。

上、中、下游各阶段径流量统计特征见表 4。分析得出不同阶段黄河上中下游径流量差异较大,丰水年极值比枯水年大,说明在丰水年期间流域年径流量变化幅度更大。中游径流量最后一个枯水期的变差系数为 0.40,明显高于上下游径流量的变差系数 0.28,-0.25,表明最后一个枯水期黄河中游径流量变化相对上下游变化剧烈。20 世纪 70 年代中下游枯水期的开始时间与流域内大规模水保措施的实施相对应,特别是 21 世纪以来大规模植被恢复,入黄径流泥沙显著减少。

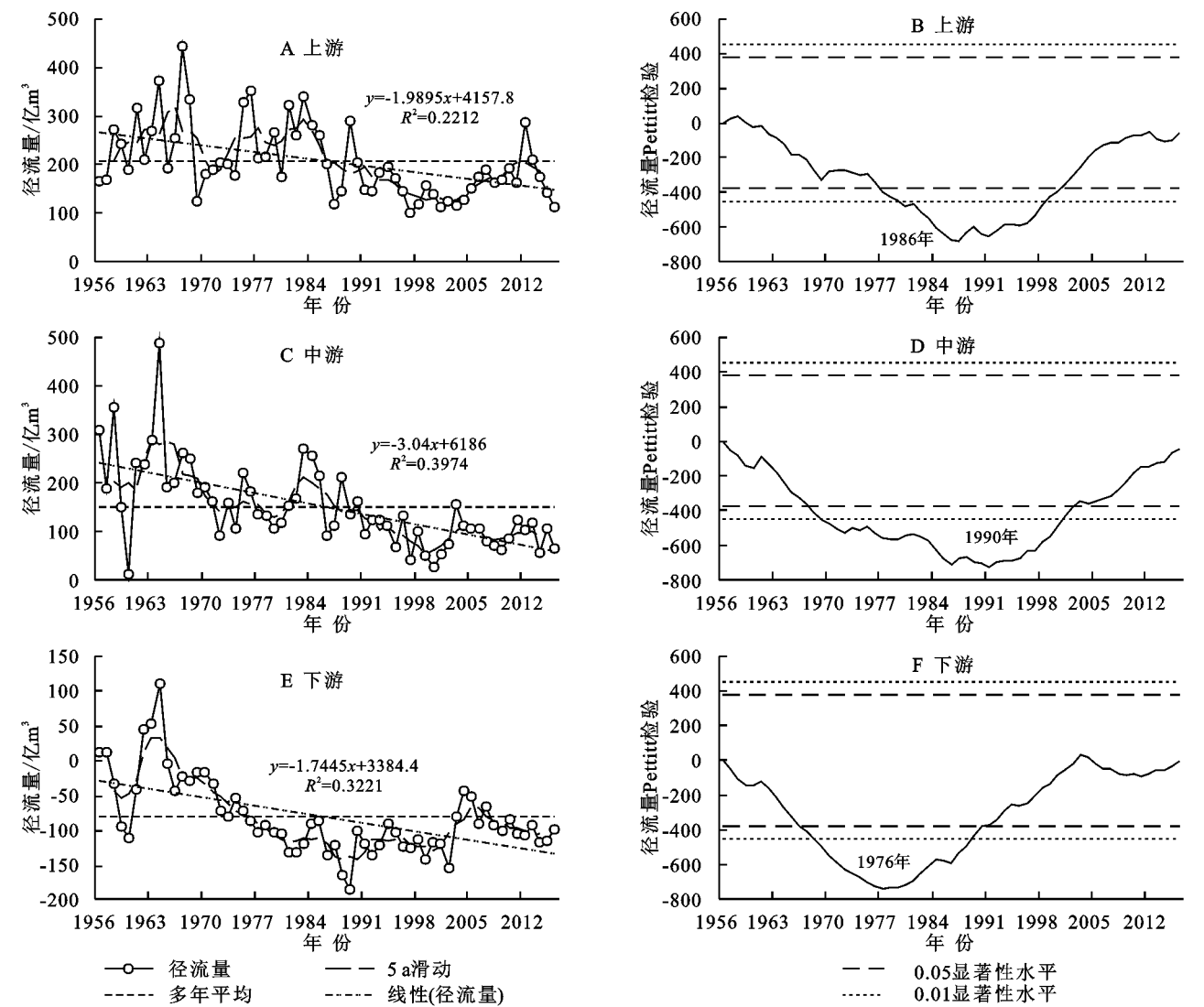


图 2 黄河上中下游多年平均径流量年际过程线

表 3 黄河干流上中下游不同年代区间来水量特征分析

| 时间段                 | 上游区间径流量                  |                                  |                                  |      |          | 中游区间径流量                  |                                  |                                  |       |          | 下游区间径流量                  |                                  |                                  |      |          |
|---------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------|----------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|----------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------|----------|
|                     | 平均值/<br>亿 m <sup>3</sup> | 最大值/<br>亿 m <sup>3</sup><br>(年份) | 最小值/<br>亿 m <sup>3</sup><br>(年份) | 极值比  | 变差<br>系数 | 平均值/<br>亿 m <sup>3</sup> | 最大值/<br>亿 m <sup>3</sup><br>(年份) | 最小值/<br>亿 m <sup>3</sup><br>(年份) | 极值比   | 变差<br>系数 | 平均值/<br>亿 m <sup>3</sup> | 最大值/<br>亿 m <sup>3</sup><br>(年份) | 最小值/<br>亿 m <sup>3</sup><br>(年份) | 极值比  | 变差<br>系数 |
| 1956—1959           | 212.83                   | 273.40<br>(1958)                 | 166.40<br>(1956)                 | 1.64 | 0.25     | 250.30                   | 356.40<br>(1958)                 | 148.60<br>(1959)                 | 2.40  | 0.39     | -25.25                   | 13.00<br>(1957)                  | -93.20<br>(1959)                 | —    | -1.99    |
| 1960—1969           | 271.03                   | 444.90<br>(1967)                 | 125.00<br>(1969)                 | 3.56 | 0.36     | 234.97                   | 488.20<br>(1964)                 | 13.20<br>(1960)                  | 36.98 | 0.50     | -4.84                    | 112.00<br>(1964)                 | -109.73<br>(1960)                | —    | -12.74   |
| 1970—1979           | 233.15                   | 351.40<br>(1976)                 | 178.40<br>(1974)                 | 1.97 | 0.27     | 148.38                   | 219.60<br>(1975)                 | 90.40<br>(1972)                  | 2.43  | 0.28     | -70.31                   | -16.80<br>(1970)                 | -102.00<br>(1979)                | 0.16 | -0.40    |
| 1980—1989           | 239.11                   | 339.00<br>(1983)                 | 117.00<br>(1987)                 | 2.90 | 0.32     | 172.62                   | 271.00<br>(1983)                 | 90.00<br>(1986)                  | 3.01  | 0.36     | -125.76                  | -85.00<br>(1985)                 | -183.60<br>(1989)                | 0.46 | -0.24    |
| 1990—1999           | 156.60                   | 203.50<br>(1990)                 | 101.80<br>(1997)                 | 2.00 | 0.21     | 105.64                   | 161.30<br>(1990)                 | 40.80<br>(1997)                  | 3.95  | 0.36     | -113.45                  | -88.50<br>(1994)                 | -140.14<br>(1999)                | 0.63 | -0.14    |
| 2000—2009           | 146.76                   | 189.30<br>(2007)                 | 113.30<br>(2001)                 | 1.67 | 0.18     | 84.81                    | 157.10<br>(2003)                 | 25.10<br>(2000)                  | 6.26  | 0.44     | -90.63                   | -41.70<br>(2004)                 | -153.70<br>(2002)                | 0.27 | -0.37    |
| 2010—2017           | 176.11                   | 286.20<br>(2012)                 | 113.10<br>(2016)                 | 2.53 | 0.31     | 90.11                    | 124.20<br>(2011)                 | 55.20<br>(2014)                  | 2.25  | 0.29     | -101.73                  | -83.30<br>(2010)                 | -116.70<br>(2014)                | 0.71 | -0.11    |
| 多年平均<br>(1956—2017) | 205.29                   | 444.90<br>(1967)                 | 101.80<br>(1997)                 | 4.37 | 0.37     | 147.28                   | 488.20<br>(1964)                 | 13.20<br>(1960)                  | 36.98 | 0.58     | -80.51                   | 112.00<br>(1964)                 | -183.60<br>(1989)                | —    | -0.67    |

注：—代表未发现，下表同。



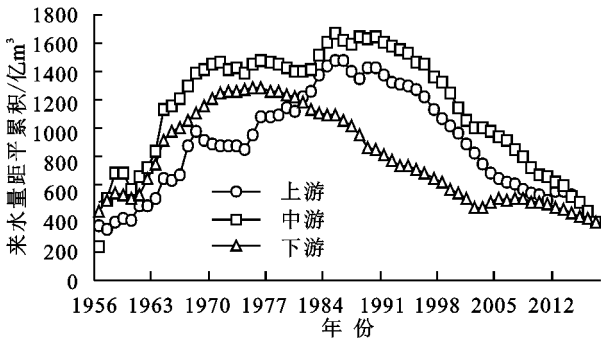


图3 黄河上中下游年径流量距平累积变化

2.2 黄河干流径流量时空分布基本特点

2.2.1 黄河干流各站年径流量趋势性特征及突变年份 黄河干流各站(唐乃亥站除外)年径流量整体表现为趋势性减少并出现突变年份。黄河干流 9 个断

面水文站的多年实测径流量变化趋势和突变性检验见表 5。唐乃亥站年径流量没有显著的增加或减小的趋势,而其余 8 个站径流量的秩次相关系数均为负值,表现出显著减小趋势。黄河干流除唐乃亥站外各站径流量的秩次相关系数均为负值,而且自河口镇及其以下各站都通过了 0.01 的极显著性检验,说明兰州及以下各站的年径流量均呈现下降趋势。上游 3 站及龙门站年径流量降低速度小于 3.0 亿 m<sup>3</sup>/a,中游潼关站、花园口站及下游 3 站年径流量降低速度均介于(4.0~7.0)亿 m<sup>3</sup>/a,整体而言,自上游至下游各站径流量降低速度逐渐增大。除唐乃亥站没有出现明显的突变年,其余各站发生突变的年份主要集中在 1985 年、1990 年。

表 4 黄河上中下游径流量阶段性特征

| 站点 | 时间段         | 阶段   | 平均值/(亿 m <sup>3</sup> ) | 极大值(年份)      | 极小值(年份)       | 极值比   | 变差系数  |
|----|-------------|------|-------------------------|--------------|---------------|-------|-------|
| 上游 | 1956—1986 年 | 丰水期  | 250.97                  | 444.90(1967) | 125.00(1969)  | 3.56  | 0.30  |
|    | 1987—2017 年 | 枯水期  | 162.47                  | 291.10(1989) | 101.80(1997)  | 2.86  | 0.28  |
| 中游 | 1956—1970 年 | 丰水期  | 236.09                  | 488.20(1964) | 13.20(1960)   | 36.98 | 0.45  |
|    | 1971—1985 年 | 平水期  | 164.82                  | 271.00(1983) | 90.40(1972)   | 3.00  | 0.33  |
|    | 1986—2017 年 | 枯水期  | 97.43                   | 212.00(1988) | 25.10(2000)   | 8.45  | 0.40  |
| 下游 | 1956—1970 年 | 丰水期  | -11.08                  | 112.00(1964) | -109.73(1960) | —     | -5.00 |
|    | 1971—1979 年 | 平水期  | -76.26                  | -32.60(1971) | -102.00(1979) | 0.32  | -0.30 |
|    | 1980—2002 年 | 强枯水期 | -122.10                 | -85.00(1985) | -183.60(1989) | 0.46  | -0.19 |
|    | 2003—2017 年 | 弱枯水期 | -88.72                  | -41.70(2004) | -116.70(2014) | 0.36  | -0.25 |

表 5 黄河干流主要控制水文站径流量变化趋势

| 站名  | 线性斜率/<br>(亿 m <sup>3</sup> · a <sup>-1</sup> ) | M-K 趋势检验 |       |    | 突变年份检验         |            |
|-----|--|----------|-------|----|----------------|------------|
|     |  | Z 值      | 显著性水平 | 趋势 | M-K 检验         | Pettitt 检验 |
| 唐乃亥 | -0.35  | -0.99    | —     | ↓  | 1993,2007,2014 | —          |
| 兰州  | -1.18  | -1.94    | 0.05  | ↓  | 1986,2013      | 1986,2004  |
| 河口镇 | -2.02  | -3.88    | 0.01  | ↓  | 1990           | 1986       |
| 龙门  | -2.97  | -5.28    | 0.01  | ↓  | 1990           | 1986       |
| 潼关  | -4.40  | -5.74    | 0.01  | ↓  | 1989           | 1990       |
| 花园口 | -5.04  | -5.48    | 0.01  | ↓  | 1985           | 1990       |
| 高村  | -5.22  | -5.44    | 0.01  | ↓  | 1985           | 1985       |
| 艾山  | -5.80  | -5.55    | 0.01  | ↓  | 1984           | 1985       |
| 利津  | -6.74  | -5.95    | 0.01  | ↓  | —              | 1968,1985  |

注:显著性水平为 0.1 时,统计检验临界值为±1.96;显著性水平为 0.05 时,统计检验临界值为±1.96;显著性水平为 0.01 时,统计检验临界值为±2.58。

2.2.2 黄河干流各站不同年代径流量时空分布特征

黄河干流各站不同年代同多年径流量沿程分布特征大致相似,且整体呈现出逐年代波动递减趋势。黄河干流径流量主要来自于上游区域,表现在唐乃亥、兰州和河口镇站多年平均径流量占利津站的比例较高。从各站多年平均径流量来看(图 4),黄河上游 3 站和龙门站的数值较小,多年平均值处于(200~300)亿 m<sup>3</sup>的水平;中游潼关站、花园口站和下游各站数值

较高,多年平均值达到(300~400)亿 m<sup>3</sup>。近 10 a 平均值(Q<sub>10</sub>)较多年平均值(Q)降低,除了唐乃亥站和兰州站近 10 a 平均值降低不大外(为多年平均值的 96%),河口镇站及其以下各站的降低幅度均较大,为多年平均值的 54%~81%,下降幅度最大的为利津站,较多年平均减少 46%。黄河干流自上而下 9 个主要控制站不同年代径流量沿程分布近似相同(图 5),表现为先增加至花园口站达到最大值随后下降趋

势,在 7 个时间段上呈现出逐阶段波动下降趋势。其中上游 3 站径流量代际间差异稳定,而中下游各站径流量代际差异逐渐明显,尤其是下游 3 站下降趋势更为突出,各站于 20 世纪 80 年代下降幅度达到最大为 22%~51%,这主要是流域引水量的增加和水土保持措施发挥效益引起的。

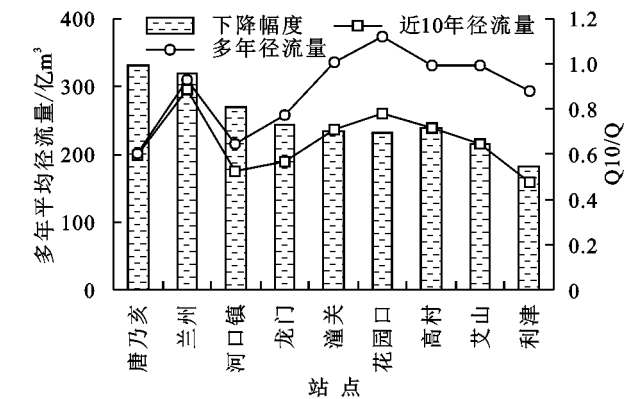


图 4 各站多年平均和近 10 年平均径流量

河口镇、花园口和利津站 3 站历年实测径流量差值逐年代呈不同程度的下降趋势(图 6)。自 20 世纪 60 年代开始,河口镇和花园口来水量的实测差值越来越小,尤其是 1995 年以后,两站差由 60 年代的 246.2 亿  $\text{m}^3$  减为 86.8 亿  $\text{m}^3$ ,减少约 65%。花园口站和利津站来水量的实测差值越来越大,尤其是 20 世纪 90 年代达到差值最大为 -126.5 亿  $\text{m}^3$ ,之后两站差逐渐减少至 -96.6 亿  $\text{m}^3$ ,减少约 24%。年径流量的这种时空变化,一方面反映出黄河水量主要来源于上游,另一方面反映出黄河愈向下游水量下降幅度愈大。

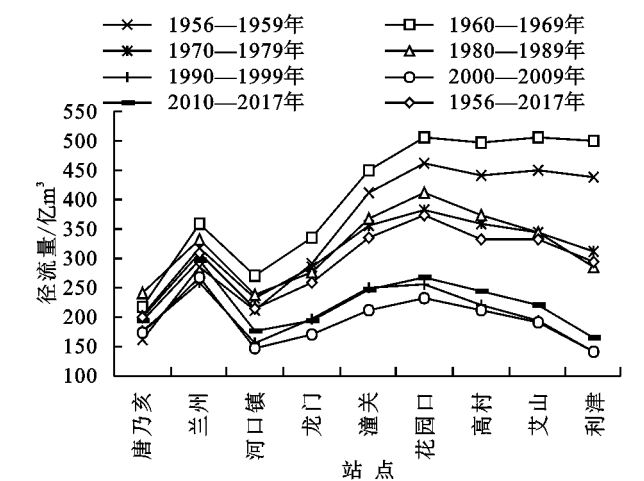


图 5 不同年代各站多年平均径流量沿程变化

3 讨论

气候变化是影响河流水沙变化的自然因素,其中降水量、降水强度和降水时间以及气温的变化将直接影响天然径流量;引起黄河来水量变化的人类活动主要包括水利工程建设、水土保持措施建设以及河道两岸引水引沙等。上游人类活动影响较少的地区出现

了径流量减少的趋势,主要是气候变化的影响,其比重约占 75%,人类活动影响作用仅占 25%<sup>[10,12]</sup>。研究表明气温升高没有直接导致黄河流域来水量减少,或者影响很小<sup>[28]</sup>。黄河流域各年代降水量见表 6<sup>[7]</sup>,与 20 世纪 60 年代相比,上游 70—90 年代降水量分别偏多 0.3%,4.1%,16.0%,中游分别偏少 10.0%,5.9%,14.85,下游分别偏多 5.5%,14.2%,8.8%,90 年代降水量偏枯较多,加剧农田引水量。20 世纪 90 年代以来黄河径流的长期演变刚好处于近 300 年来一个 135 年长周期持续偏枯时段的低谷阶段,因此目前还不能过分夸大气候回暖对径流减少的影响<sup>[29]</sup>。位于中游的黄土高原经过大量水土流失治理(1999 年国家实施“退耕还林草”),河流径流量显著减少。花园口站以上取水量增大是形成 1968 年跳跃点的重要原因,同时降水量减少和两岸引水量增大(主要是灌溉用水量)已经成为影响黄河中下游径流量急剧减少的主要因素<sup>[28]</sup>。

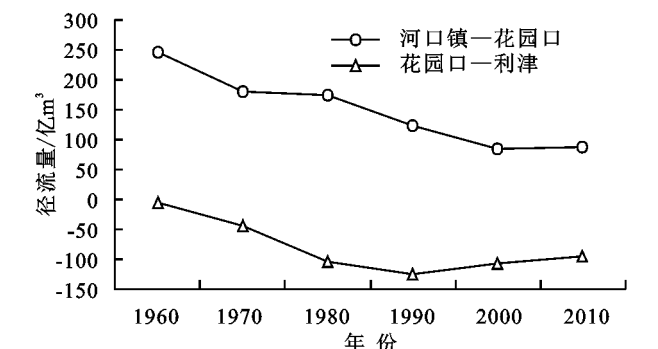


图 6 河口镇、花园口和利津 3 站历年实测径流差值变化情况

截至 2002 年,黄河干支流已建成大中小型水库 136 座(大型水库 18 座,中型水库 118 座)。其中位于上游上段龙羊峡(1986 年建成)、刘家峡水库(1968 年建成)对上游下段的河段具有较好的“蓄余补亏”的调节作用,中游的三门峡、小浪底水库对水沙的调节作用也尤为显著。截至 2000 年,黄河中上游共有集雨工程 250 万余处。至于黄河中游过去 50 年来,气候因素影响作用约占来水量减少的 43%;人类活动影响作用约占来水量减少的 57%,与上游情况相反,人类活动的影响明显加大<sup>[12,30]</sup>。黄河流域不同年代引黄耗水量见表 6<sup>[7]</sup>,与 60 年代相比,70—90 年代上中游区引黄耗水量增加(7.7~36.5)亿  $\text{m}^3$ ,下游区间增加显著达到(50.4~74.4)亿  $\text{m}^3$ ,全流域引黄耗水量 90 年代是 60 年代的 1.7 倍。水利工程建设和工农业耗水量的不断增加致使人类活动对黄河流域径流的影响越来越强烈,导致径流量不断减少。全面而确切地收集影响来水量的各种因子的资料在客观上尚十分困难<sup>[12]</sup>,仍需要进一步深入研究。

表 6 20 世纪黄河流域各年代降水量和引黄耗水量

| 区间   | 50 年代 |                  | 60 年代 |                  | 70 年代 |                  | 80 年代 |                  | 90 年代 |                  |
|------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|
|      | 降水量/  | 耗水量/             | 降水量/  | 耗水量/             | 降水量/  | 耗水量/             | 降水量/  | 耗水量/             | 降水量/  | 耗水量/             |
|      | mm    | 亿 m <sup>3</sup> | mm    | 亿 m <sup>3</sup> | mm    | 亿 m <sup>3</sup> | mm    | 亿 m <sup>3</sup> | mm    | 亿 m <sup>3</sup> |
| 上游   | 364   | 73.4             | 362   | 95.2             | 363   | 102.9            | 347   | 121.1            | 304   | 131.7            |
| 中游   | 573   | 30.0             | 580   | 49.4             | 522   | 63.4             | 546   | 62.1             | 494   | 60.2             |
| 下游   | 684   | 18.9             | 696   | 33.1             | 658   | 83.5             | 597   | 112.9            | 635   | 107.8            |
| 流域合计 | 1621  | 122.3            | 1638  | 177.7            | 1543  | 249.8            | 1491  | 296.0            | 1433  | 299.6            |

注:90 年代指 1990—1995 年。

4 结 论

(1) 黄河上、中、下游年径流量整体呈逐年减少趋势,区间年径流量减少的倾向率分别为−20.16 亿 m<sup>3</sup>/10 a,−30.23 亿 m<sup>3</sup>/10 a,−16.98 亿 m<sup>3</sup>/10 a,发生突变的临界年份分别为 1986 年、1990 年(1968 年),1976 年(2002 年、2010 年)。受气候及人类活动的共同作用下,不同年代径流量差异明显。近 60 年内,20 世纪 60 年代径流量最大,20 世纪 80 年代最小。

(2) 黄河干流多年实测径流量变化具有明显的丰平枯等阶段性特征。其中,上游径流量变化经历了 1956—1986 年的丰水期和 1987—2017 年的枯水期;中游径流量变化经历了 1956—1970 年的丰水期、1971—1985 年的平水期和 1986—2017 年的枯水期;下游径流量变化经历了 1956—1970 年的丰水期、1971—1979 年的平水期和 1980—2017 年的枯水期。

(3) 黄河干流自兰州站以下各站的径流量均超出检验标准,呈显著下降趋势,下降幅度基本沿程增加。年际径流量临界年份除了唐乃亥站,其余站点主要集中在 1985 年、1990 年。黄河干流自上而下 9 个主要控制站不同年代径流量沿程分布近似相同,表现为先增至花园口站达到最大值随后下降趋势,在 7 个时间段上呈现出逐阶段波动下降趋势,于 20 世纪 80 年代下降幅度达到最大为 22%~51%。

参考文献:

[1] Zhang Q, Singh V P, Sun P, et al. Precipitation and stream-flow changes in China: Changing patterns, causes and implications[J]. Journal of Hydrology, 2011, 410(3/4): 204-216.

[2] McMahon T A, Vogel R M, Peel M C, et al. Global stream-flows. Part 1: Characteristics of annual streamflows[J]. Journal of Hydrology, 2007, 347(3): 243-259.

[3] Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate[J]. Nature, 2005, 438(7066): 347-350.

[4] Pachauri R K. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report[J]. Speculum, 2007, 77(2): 586-588.

[5] Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge

to the global ocean, 1951—2000[J]. Global & Planetary Change, 2008, 62(3): 187-194.

[6] 陈敏建,王浩,王芳.内陆干旱区水分驱动的生态演变机理[J].生态学报, 2004, 24(10): 2108-2114.

[7] 陈霁巍,穆兴民.黄河断流的态势、成因与科学对策[J].自然资源学报, 2000, 15(1): 31-35.

[8] Mu X M, Zhang L, McVicar T R. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(16): 2124-2134.

[9] 田景环,崔庆,徐建华,等.黄河流域大中型水库水面蒸发对水资源量的影响[J].山东农业大学学报:自然科学版, 2005, 36(3): 391-394.

[10] 张建云,章四龙,王金星,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展, 2007, 18(2): 230-234.

[11] 刘昌明,成立.黄河干流下游断流的径流序列分析[J].地理学报, 2000, 55(3): 257-265.

[12] 刘昌明,张学成.黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J].地理学报, 2004, 59(3): 323-330.

[13] 赵玉,穆兴民,何毅,等.1950—2011 年黄河干流水沙关系变化研究[J].泥沙研究, 2014(4): 32-38.

[14] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学, 2012, 34(6): 1070-1078.

[15] 孙洋洋,穆兴民,高鹏,等.黄河上中游区径流量格局长期变化过程[J].水土保持研究, 2017, 24(3): 59-64.

[16] 张晓萍,张槽,王勇,等.黄河中游地区年径流对土地利用变化时空响应分析[J].中国水土保持科学, 2009, 7(1): 19-26.

[17] 许炯心.人类活动对黄河河川径流的影响[J].水科学进展, 2007, 18(5): 648-655.

[18] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展, 2014, 25(2): 155-163.

[19] 穆兴民,高鹏,巴桑赤烈,等.应用流量历时曲线分析黄土高原水利水保措施对河川径流的影响[J].地球科学进展, 2008, 23(4): 382-389.

[20] 张小苗,穆兴民,赵广举,等.基于极端日流量的延河径流变化特征研究[J].人民黄河, 2018, 40(8): 12-18.

[21] 穆兴民.黄土高原生态水文研究[M].北京:中国林业出版社, 2001: 34-47.

114-120.

- [10] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [11] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):129-135.
- [12] 李玮,郑子成,李廷轩,等.不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].生态学报,2014,34(21):6326-6336.
- [13] 黄尚书,钟义军,叶川,等.深松与压实对红壤坡耕地土壤物理性质的影响[J].土壤通报,2017,48(6):1347-1353.
- [14] 刘志鹏,史东梅,金慧芳,等.红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究[J].中国土壤与肥料,2018(3):7-13.
- [15] 钟义军,黄欠如,武琳,等.水保措施对红壤旱地团聚体及其特性的影响[J].土壤通报,2014,45(4):961-965.
- [16] 安婉丽,高灯州,潘婷,等.水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J].环境科学学报,2016,36(5):1833-1840.
- [17] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation[J]. Physical Review Letters, 1985,54(12):1325-1328.
- [18] Turcotte D L. Fractals and Fragmentation[J]. Journal

of Geophysical Research Solid Earth, 1986,91(B2): 1921-1926.

- [19] 赵世伟,苏静,杨永辉,等.宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2005,12(3):27-28.
- [20] 黄尚书,武琳,叶川,等.耕作深度对红壤坡耕地花生根系生长及活力的影响[J].江西农业学报,2018,30(12):9-12.
- [21] 杨贺菲,赵静,张旭.免耕和稻草覆盖对红壤旱地土壤物理性质及玉米产量的影响[J].江西农业学报,2018,30(10):45-49.
- [22] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research, 2009,103(2):412-418.
- [23] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等.耕作对东北黑土团聚体粒级分布及其稳定性的短期影响[J].土壤学报,2009,46(1):154-158.
- [24] 张会慧,王世标,王均睿,等.三江平原湿地不同利用方式对土壤理化性质及团聚体组成的影响[J].生态学杂志,2019,38(6):1679-1687.

(上接第 119 页)

- [14] 高建恩,吴普特,牛文全,等.黄土高原小流域水力侵蚀模拟试验设计与验证[J].农业工程学报,2005(10):41-45.
- [15] 唐克丽,周佩华.黄土高原土壤侵蚀研究若干问题的讨论[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):1-4.
- [16] 宋丹丹.林冠对降雨截留作用的研究[D].山东泰安:山东农业大学,2015.
- [17] 王红.水土保持典型措施对地下水补给生态基流的影响研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.

响研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.

- [18] Zhou Z C, Shangguan Z P. Effects of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. Original Research Article Pedosphere, 2008,18(1):131-136.
- [19] 朱高立,王雪琪,李发志,等.秸秆覆盖对崩积体坡面产流产沙影响的模拟试验[J].土壤,2017,49(3):601-607.
- [20] 周秋文,李璇,郭兴房.喀斯特地区枯落物层对地表径流和土壤侵蚀的影响研究[J].水文,2018,38(4):19-24.

(上接第 126 页)

- [22] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,等.渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(2):33-38.
- [23] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [24] 宋小燕.松花江流域水沙演变及其对人类活动的响应[D].陕西杨凌:中国科学院水土保持研究所,2010.
- [25] Gao P, Geissen V, Ritsema C J, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin, China [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2012,17(3):961-972.

- [26] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979,28(2):126-135.
- [27] 穆兴民,李靖,王飞,等.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].干旱区资源与环境,2003,17(2):1-5.
- [28] 史红玲,胡春宏,王延贵,等.黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J].人民黄河,2014,36(4):1-5.
- [29] 李伟珮,闫观清,李保国,等.黄河流域近 300 年来水文情势及其变化[J].人民黄河,2009,31(11):25-26.
- [30] 黄河水利科学研究院.黄河水沙变化趋势与水利枢纽工程建设对黄河健康的影响[R].郑州:黄河水利科学研究院,2007.