

黄河下游近 50 年径流量变化特征及影响因素

潘彬¹, 韩美¹, 倪娟²

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250014; 2. 山东城建学院, 济南 250014)

摘要:应用 Mann-Kendall 趋势性检验和突变性检验法、双累积曲线法、GM(1,1)模型等方法,对黄河下游 1962—2012 年径流量和降水量的变化特征及规律进行了深入探讨,以期对黄河下游水资源调配,防洪减灾提供科技支撑。结果表明:降水量减少趋势不显著,突变时间为 1964 年,径流量减少趋势显著,突变时间为 1979 年。降水量和径流量变化具有明显的阶段性,降水量以 1986 年为界,分为丰水期、枯水期两个阶段,径流量以 1979 年、1985 年为界,分为枯—丰—枯 3 个阶段,黄河目前处于枯水期。采用双累积曲线法定量分析了降水量和人类活动对径流量的影响程度。结果表明:突变时刻前,降水量和径流量同步变化,呈现正相关,突变时刻后,人类活动是影响径流量变化的主要因素,人类活动和降水量对径流量的作用比例分别为 68% 和 32%。利用 GM(1,1)模型预测了未来 5 年降水量和径流量的变化趋势,表明未来 5 年降水量和径流量将会有所增加。

关键词:黄河下游; 降水量; 径流量; 人类活动

中图分类号: P333.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0122-06

Characteristics and Influence Factors of Runoff Variation in the Lower Reaches of the Yellow River in the Last 50 Years

PAN Bin¹, HAN Mei¹, NI Juan²

(1. School of geography and environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China;

2. Shandong Urban Construction Vocational College, Ji'nan 250014, China)

Abstract: In order to provide scientific support for the development of water resources allocation and flood control in the lower reaches of Yellow River, the characteristics and patterns of the precipitation and runoff had been discussed. The results showed that the decrease of precipitation was not significant, and the year of abrupt change was 1964 while the runoff decreased significantly, and the year of abrupt change was 1979. The changes of precipitation and runoff have obvious stage. The precipitation can be divided into two stages as the boundary of 1986, the abundant water period and the low water period. The runoff can be divided into dry-wet-dry three stages as the boundary of 1979, 1985, respectively; the Yellow River is still in the dry season, too. The effects of precipitation and human activities on runoff were quantitatively analyzed by using double cumulative curve method. The results showed that the changes of precipitation and runoff were synchronized with the change of time. The impacts of human activities and precipitation on the runoff are 68% and 32%, respectively, and the human activity is the key factor affecting the runoff in the lower reaches of Yellow River. Finally, the precipitation and runoff change trend of the lower reaches of Yellow River has been analyzed and predicted in the next five years by using the GM (1,1) model. The results show that the precipitation and runoff will slowly increase in the next five years.

Keywords: the lower reaches of Yellow River; precipitation; runoff; human activity;

河川径流是十分重要的水资源,径流量变化直接影响水资源的开发和利用,进而影响人类生产生活活动。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)^[1]第 4 次评估报告指出,在 21 世纪中叶,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%。因此,探究径流量变化的原因成了各国学者研究的热点问题, Sajikumar 等^[2]用 SWAT 模型研究喀拉拉邦和印度

收稿日期:2015-12-06

修回日期:2016-03-18

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41371517);山东省科技计划(2013GSF11706)

第一作者:潘彬(1991—),男,陕西安康人,硕士研究生,研究方向为环境演变与区域可持续发展。E-mail:849599377@qq.com

通信作者:韩美(1963—),女,山东寿光人,教授,博士生导师,主要从事环境演变与可持续发展和流域水资源与湿地生态评价研究。

E-mail:hanmei568568@126.com

流域径流量变化,指出森林覆盖度的减少会使流域径流量增加。Khadka 等^[3]对 TAMAKOSHI 流域的径流量变化做了分析,结果表明,该流域径流量的大小主要受季风降水的影响,并且径流量以每年 5.5 m^3 的速度增加。刘伟等^[4]利用浑河流域 56 a 的逐月降水和径流资料,研究了浑河流域降水与径流的变化特征,结果表明,浑河流域径流量和降水量的相关系数为 0.682,二者具有较高的相关性,变化趋势一致。热孜燕等^[5]利用乌鲁木齐河 1957—2009 年径流量、气温和降水量等数据,探究了乌鲁木齐河径流与气候变化的对应关系,通过相关性和灰色关联度分析表明,乌鲁木齐河径流量的变化主要受降水的影响。刘鑫^[6]利用大凌河流域 7 个主要水文站资料研究了大凌河近 50 a 径流年内、年际变化规律,指出大凌河 7 月、8 月径流比例为全年最大,年内分配不均是在 20 世纪 60 年代。据此,可以看出影响径流量变化的主要因素为气候变化和人类活动两个方面。

黄河是中国的母亲河,孕育出光辉灿烂的文明,其多年平均径流量占全国的 2%,为全国 12% 的人口提供生活生产用水,但由于近年来气候变化以及过度开发利用,导致黄河径流量不断减少,因此,探究黄河径流量变化的原因成了我国地理学者研究的热门话题。李夫星等^[7]研究表明,黄河径流量的变化与东亚夏季风关系密切。李二辉等^[8]对黄河上游和中游的径流量变化进行了分析,表明水利水保工程、生产生活用水等人类活动是引起黄河径流量减少的主要因素。付永锋等^[9]研究表明,黄河源区径流量减少是下垫面蒸发能力增强、下渗量增大和降水量减少共同作用的结果。张翠等^[10]研究指出,黄河入海径流量与气温呈显著的负相关关系,与降水量呈显著的正相关关系,气温与入海径流量的关系更为密切,以上研究均取得了显著的成果,但是大多数学者的研究区域主要集中在黄河源区及中上游,而对黄河下游的径流变化分析较少。本文则以黄河下游花园口、利津水文站作为代表站,研究黄河下游径流量变化的特征及其规律性,以期对黄河下游水资源调配、防洪减灾提供科技支撑,为社会生产实践服务。

1 试验材料与方法

1.1 试验资料

以黄河下游花园口水文站($113^{\circ}75'E, 34^{\circ}65'N$)、滨州水文站($118^{\circ}E, 37^{\circ}35'N$)、垦利水文站($118^{\circ}55'E, 37^{\circ}58'N$)和利津水文站($118^{\circ}13'E, 37^{\circ}29'N$)为代表站,探究黄河下游近 50 a 径流量和降水量的变化特征。其中,花园口是黄河下游的第一个水文站,始建

于 1938 年 7 月,集水面积为 73 万 km^2 。利津水文站是黄河下游最后一个水文控制站,始建于 1934 年 6 月,集水面积为 75.2 万 km^2 。1962—2012 年的径流量数据来自于《东营市水利志(2002 年)》、《东营市统计年鉴》、《山东省统计年鉴》、2001—2013 年《黄河泥沙公报》和《黄河水资源公报》以及花园口、利津水文站。1962—2012 年降水量数据来源于滨州、利津、垦利水文站以及中国气象局网站《中国地面气候资料数据集》。

1.2 方法

1.2.1 Mann-Kendall 趋势检验法和突变检验法 Mann-Kendall 检验法^[11-12]是一种非参数统计检验方法,常用于评估有关气候要素的时间序列变化,与参数统计检验方法相比,此方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,而且计算简单,是目前较为常用的趋势诊断方法。本文主要应用此方法对黄河下游径流量和降水量进行趋势性和突变性检验。

1.2.2 GM(1,1)模型 GM(1,1)模型^[13]是将无规律的原始数据进行累加,得到规律性较强的序列后进行建模,由生成模型得到的数据进行累减得到原始数据的预测值,然后再进行预测。本文利用该方法来预测黄河下游利津水文站未来 5 a 的径流量和降水量。

1.2.3 双累积曲线法 双累积曲线法^[14]是检验两个参数间关系一致性及其变化的常用方法。双累积曲线是在直角坐标系中绘制同期内一个变量的连续累积值与另一个变量连续累积值的关系线,它可用于水文气象要素一致性的检验、缺值的插补或资料校正,以及水文气象要素的趋势性变化及其强度分析。本文利用该方法探究黄河下游利津站降水与径流的定量关系。

2 结果与分析

2.1 降水量、径流量变化的基本特征

由图 1A 可以看出,黄河下游年径流量的总体变化是呈下降趋势,表明径流量在逐年减少,年平均值为 315.42 亿 m^3 。在 1997 年达到了历史最低值,为 91.28 亿 m^3 ,与黄河在这段时期内多次出现断流^[15-16]有关。在 1964 年达到最高值 905.55 亿 m^3 ,极值比为 8.92,可见黄河径流量在近 50 a 变化十分剧烈。

由图 1B 可以得出,黄河下游年降水量的总体变化趋势不明显,仅在均值上下波动,多年平均值为 564.09 mm 。在 1992 年达到最低值 322.03 mm ,1990 年达到最大值 $1\,042.70 \text{ mm}$,极值比为 2.24,与径流量的剧烈变化相比,降水量变化相对较为平缓。

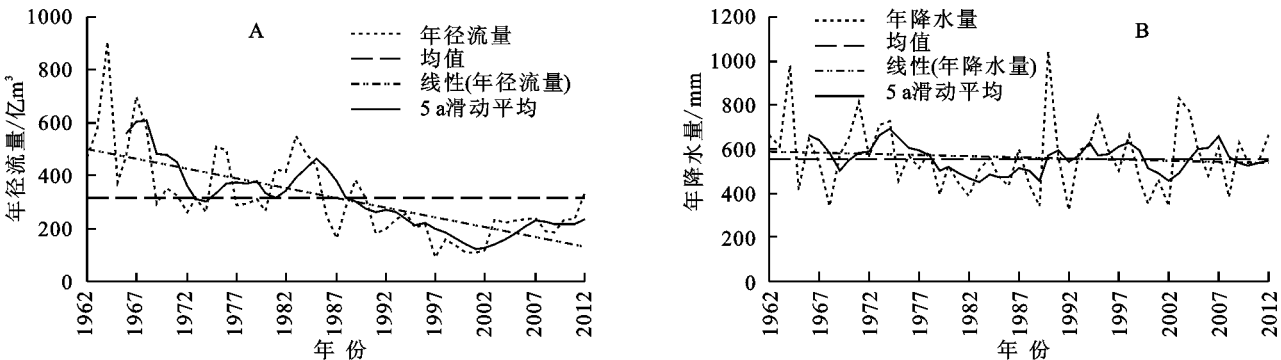


图 1 黄河下游近 50 a 径流量、降水量变化及 5 a 滑动平均

从表 1 可以看出,1962—1966 年径流量的平均值最大,为 559.93 亿 m³,其次是 1967—1971 年 449.70 亿 m³,容易得出,在 20 世纪 60 年代径流量的平均值最大,流量较为丰富。而在 1997—2001 年,径流量的平均值最小,为 119.48 亿 m³,在 1992—1996 年,极值比与变差系数分别为 0.28,0.11,均为最小值,表明该时期径流量的变化较小,较为稳定。在降水量变化上,1962—1966 年的年降水量为最大,达到了 663.64 mm,最小值出现在 1977—1981 年,其值为 60.10 mm,极值比较小,为 0.50,变差系数却最大,为 1.27。在 1982—1986 年,极值比与变差系数同步变化,均为最小值,分别为 0.45,0.14。

表 1 黄河下游不同年代降水、径流变化特征

年代	降水量			径流量		
	平均值/mm	极值比	变差系数	平均值/亿 m ³	极值比	变差系数
1962—1966 年	633.64	1.34	0.30	559.93	1.42	0.37
1967—1971 年	583.50	1.40	0.30	449.70	1.37	0.40
1972—1976 年	89.56	0.60	1.25	368.95	0.97	0.34
1977—1981 年	60.10	0.50	1.27	316.57	0.59	0.20
1982—1986 年	472.58	0.45	0.14	427.11	1.22	0.26
1987—1991 年	596.59	2.09	0.45	262.89	1.32	0.35
1992—1996 年	576.01	0.91	0.27	221.27	0.28	0.11
1997—2001 年	488.43	0.87	0.23	119.48	0.73	0.22
2002—2006 年	604.21	1.45	0.34	207.87	0.99	0.24
2007—2012 年	558.13	0.75	0.18	236.28	0.76	0.23
多年平均	564.09	2.24	0.27	315.42	8.92	0.51

2.2 降水量、径流量变化的阶段性特征

黄河径流量变化具有明显的阶段性特征,黄河下游径流量距平累积曲线和径流量阶段性变化特征分别见图 2A 和表 2,按照曲线连续 5 a 以上出现相同变化的趋势,可将黄河下游年径流量^[17]的变化过程分为枯—丰—枯 3 个阶段。第一个枯水期发生的阶段在 1962—1979 年,其径流量平均值为 432.46 亿 m³,变差系数为 0.40;第二个枯水期发生的时间开始于 1985 年,直至目前黄河径流量的累积距平曲线仍呈下降趋势,黄河处于枯水阶段,年径流量的平均值为 211.98 亿 m³。变差系数为 0.33,可见径流量在 1985 年以后变化的十分剧烈,特别是 1997—1998 年黄河多次出现断流现象;在 1980—1985 年,黄河处于丰水期,其年径流量的平均值为 429.81 亿 m³,变差系数也较小,为 0.22,黄河水量较为丰富。

黄河下游降水量累积距平曲线和降水量阶段性特征分别见图 2B 和表 3。同样,按照曲线连续 5 a 以上出

现相同变化的趋势,可将黄河下游降水量分为两个阶段。第一阶段是 1962—1986 年,该阶段降水量平均值为 563.75 mm,变差系数为 0.26;第二阶段 1987—2012 年,该阶段降水量平均值为 564.42 mm,变差系数为 0.30,其变差系数与标准差均大于第一阶段,说明第二阶段的降水量变化幅度更大,第一阶段降水量较为充分、丰富。

2.3 降水量、径流量变化的趋势性和突变性特征

采用 Mann-Kendall 趋势检验法和突变检验法对黄河下游 1962—2012 年降水量、径流量的时间变化序列进行检验分析,结果分别见表 4、图 3A 和图 3B。

从表 4 可以看出,降水量的趋势是在减少,平均值为 564.09 mm,标准差为 154.90 mm,检验统计量 $|Z_c|=0.58 < Z_{0.1}=1.28$,表明降水量的减少趋势不显著;径流量的趋势性也是在减少,平均值为 315.42 亿 m³,标准差为 161.29 亿 m³,检验统计量 $|Z_c|=5.25 > Z_{0.01}=2.32$,拒绝原假设,即在置信度 99% 的水平下,径流量的减少趋势是显著的。

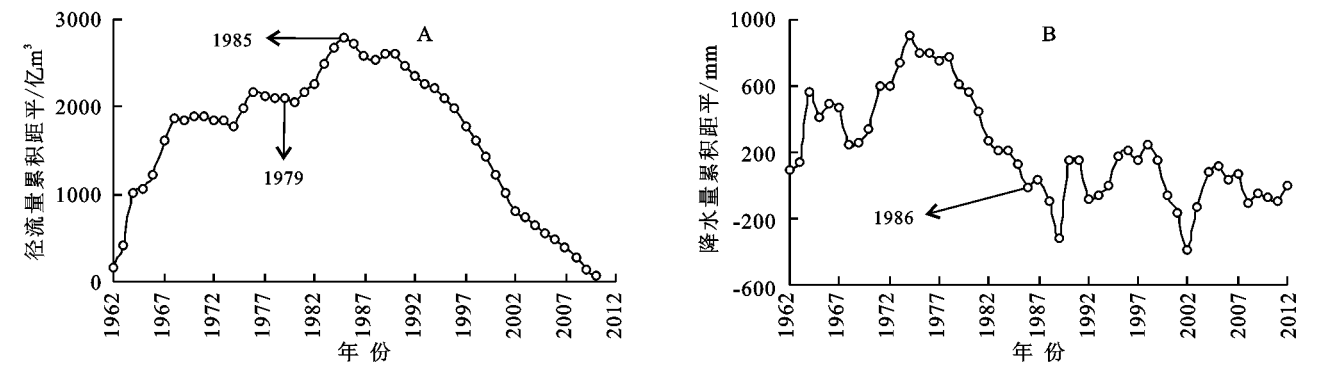


图 2 黄河下游径流量、降水量累积距平曲线

表 2 黄河下游径流量阶段性变化特征				
年代	平均 值/亿 m ³	标准 差	变差 系数	阶段 特征
1962—1979 年	432.46	174.55	0.40	枯水期
1980—1985 年	429.81	94.24	0.22	丰水期
1986—2012 年	211.98	69.14	0.33	枯水期

表 3 黄河下游降水量阶段性变化特征				
年代	平均 值/mm	标准 差	变差 系数	阶段 特征
1962—1986 年	563.75	144.44	0.26	丰水期
1987—2012 年	564.42	167.21	0.30	枯水期

表 4 Mann-Kendall 趋势检验结果				
因子	平均值	标准差	Z _c	显著性趋势
降水量	564.09	154.90	-0.58	不显著减少
径流量	315.42	161.29	-5.25	显著减少

注:降水量与径流量的平均值和标准差的单位分别为 mm 和亿 m³。

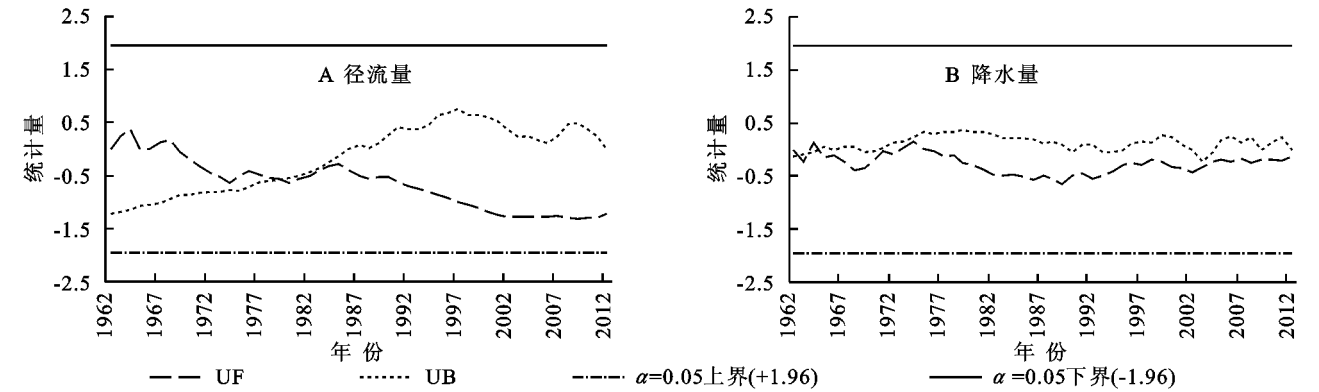


图 3 黄河下游径流量、降水量 M-K 曲线

表 5 黄河下游前后期径流量变化				
年代	时期	径流 总量/亿 m ³	平均值/ 亿 m ³	变差 系数
1962—1979 年	前期	7784.24	432.46	0.40
1980—2012 年	后期	8302.31	251.59	0.46

从图 3B 可以看出,UF 曲线中 Z 统计量从 1964 年开始变为负值,说明黄河下游降水量是从此时开始减少,呈下降趋势。同时,UF 和 UB 曲线在 1963 年和 1964 年均出现交点,表明降水量在这两年之间变化较大,1963—1964 年降水量增加了 60%,1964—1965 年降水量减少了 57.35%。突变开始的时刻为

综上,降水量和径流量的变化趋势均为减少,其中,降水量减少趋势不显著,径流量的减少趋势显著。

从图 3A 可以看出,UF 曲线中的 Z 统计量从 1969 年开始变为负值,即表明黄河下游径流量从此时开始呈下降趋势。在置信度 $\alpha=0.05$ 的临界直线下,两条曲线均未超出临界直线,并且在临界直线之间出现交点,按照 Mann-Kendall 突变检验确定突变时刻的原则,在临界直线之间两条曲线的交点即为突变开始的时刻,即发生突变的时间为 1979 年。据此,可将黄河下游径流量变化分为前、后两个时期。从表 5 可以看出,前期的水量与后期相比较为丰富,径流总量为 7784.24 亿 m³,平均径流量达到了 432.46 亿 m³,同时,变差系数小于后期,说明前期径流量变化幅度较小。

1964 年,据此可将黄河下游降水量分为前、后两个时期。从表 6 可以看出,前后期变差系数同为 0.26,前期降水量的平均值为 751.15 mm,大于后期,说明前期降水量较为丰富,降水量的变化程度趋于稳定。

2.4 降水量和人类活动对径流量的影响及作用比例

影响径流量的因素有很多,大致可分为自然因素和人为因素两大类^[18-19]。自然因素包括降水量、下垫面的性质、植被覆盖度和气候条件等,其中降水是径流形成的主要条件,降水的变化直接影响径流量的多少。人为因素则包括大型水利水保工程、工农业用水、土地利用类型变化等。因此,降水量和人类活动

是影响径流量变化的主要因素。

表 6 黄河下游前后期降水量变化

年代	时期	降水	平均值/	变差 系数
		总量/mm	mm	
1962—1964 年	前期	2253.45	751.15	0.26
1965—2012 年	后期	26515.25	553.61	0.26

从图 4 中可以看出,黄河下游累积降水量和累积径流量在 1979 年出现拐点,表现出两个阶段性特征。在 1979 年之前,累积降水量和累积径流量呈显著的线性关系。表明二者同步变化,在天然情况下,降水量与径流量的变化是正相关的,说明这一时期内的径流量并未受到人类的过度干扰。

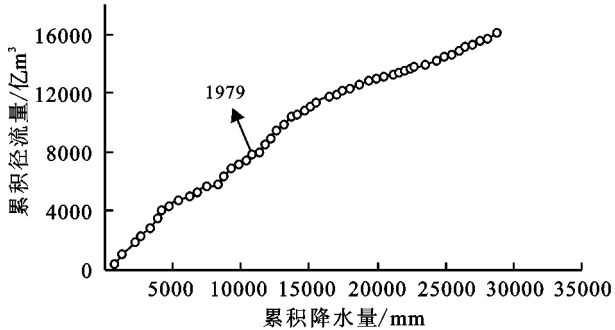


图 4 黄河下游降水量—径流量双累积曲线

为了进一步研究降水量和人类活动对径流量的影响大小,利用“水文法”中的经验公式法建立突变年份前的累积降水量和累积径流量的一元线性回归方程:

表 7 降水与人类活动对黄河下游径流量的影响

时间	实测值	理论值	实测径流变化	降水对径流的影响	人类活动对径流的影响
1962—1979 年	432.46	—	—	—	—
1980—1992 年	333.99	349.94	98.47	23	82.52
1993—2002 年	162.21	365.79	270.25	62	66.67
2003—2012 年	233.83	413.28	198.63	46	19.18
1980—2012 年	251.59	373.94	180.87	42	58.52

2.5 降水量、径流量的分析与预测

利用 2007—2012 年黄河下游花园口、利津站的径流、降水数据,分别建立 GM(1,1)模型来分析和预测黄河下游 2020 年前的降水、径流情况。

径流量 GM(1,1)模型如下:

$$R^{(1)}(k+1)=2004.066e^{0.08795k}-1767.11$$
$$k=(0,1,2,\cdots)$$

(2)

式中: R 为径流量。经检验该模型平均相对误差为 0.000 4 小于 0.1,精度等级为“一级”,均方差比为 0.38,精度等级为“二级”,综上,该模型等级为“合格”。同时,根据灰色系统理论,当发展系数 $a\in(-1,2)$ 且 $a\geq-0.3$ 时,则所建 GM(1,1)模型则可用于中长期预测。本模型发展系数 $a=-0.087\ 95$,所以可用于径流量的分析和预测。计算结果如表 8 所示:未来 5 a

$$\Sigma R=0.6852\Sigma P+564.83$$

(1)

式中: R 为径流量; P 为降水量。

公式(1) R^2 为 0.979 5,表明拟合优度较好,可用于评估降水量和人类活动对径流量的影响强度。利用公式(1)及逐年累积降水量,可计算出突变年后逐年累积径流量,再通过差分得到逐年径流量,其值相当于天然降水量形成的径流量,将突变年份前的径流量作为背景值,计算不同时段实测径流量和理论径流量,不同时段理论值和实测值的差值即为人类活动对径流量的影响量,不同时段理论值和背景值的差值即为降水量对径流量的影响量。计算结果见表 7。从表 7 可以看出,黄河下游径流量的确有减少的趋势,特别是 1993—2002 年的平均径流量仅占 1962—1979 年的 38%,平均实测径流量减少了 365.79 亿 m^3 。不同时段降水和人类活动对径流量的影响程度也不同,1980—1992 年降水对径流的影响比例较大,占到了 84%,而在 1992 年以后,人类活动对径流量的影响占据绝对主导地位,2003—2012 年人类活动对径流的影响比例甚至达到 90%,这与人们在这一时期兴修水利,大量引用黄河水有关^[20],自从 1986 年 10 月—1989 年 11 月龙羊峡水库投入使用,并与刘家峡水库联合运用,年平均蓄水量为 50 亿 m^3 ,这期间只蓄不泻,导致黄河径流量出现较大转折,并且,1985 年后,年平均引用黄河水量为 327 亿 m^3 ,水土保持措施也导致径流量每年减少 35 亿 m^3 ^[21]。

黄河下游的流量较为丰富,平均值达到了 429.65 亿 m^3 ,每 1 年的径流量都有所增加,说明现阶段黄河虽处于枯水期,但其下游的径流量会缓慢增加,流量较为充足。

降水量 GM(1,1)如下:

$$P^{(1)}(k+1)=31784.40774e^{0.017955991k}-31405.7077\quad k=(0,1,2,\cdots)$$

(3)

式中: P 为降水量。经检验该模型平均相对误差为 0.000 7 小于 0.1,精度等级为“一级”,均方差比为 0.491 9,精度等级为“二级”,综上,该模型等级为“合格”。同时,该模型发展系数 $a=-0.017\ 955\ 991$,可用于降水量的分析和预测。从表 8 能够看出,降水量在未来 5 a 会呈缓慢上升趋势,其理论值均大于 1962—2012 年的均值。

表 8 黄河下游 2015—2020 年降水量、径流量预测情况				
年份	径流量/亿 m ³		降水量/mm	
	预测值	与多年均值的差值 (1962—2012 年)	预测值	与多年均值的差值 (1962—2012 年)
2015	340.99	25.57	653.00	88.91
2016	372.34	56.91	664.84	100.74
2017	406.56	91.14	676.84	112.79
2018	443.94	128.52	689.14	125.05
2019	484.75	169.33	701.63	137.54
2020	529.32	213.89	714.34	150.54
多年	429.65	114.23	683.31	119.21

3 结 论

(1) 黄河下游径流量的变化具有明显减少的趋势,并且减少趋势显著,径流量从 1969 年开始逐渐减少。径流量还具有明显的阶段性特征,分 3 个阶段。第一阶段是 1962—1979 年的枯水期,第二阶段是 1979—1985 年的丰水期,第三阶段是 1986—2012 年的枯水期,而且黄河目前仍处于枯水期。同时,利用 Mann-Kendall 突变检验得出,黄河下游径流量发生突变的时间是 1979 年。

(2) 黄河下游降水量的变化具有减少的趋势,但是减少趋势不显著,降水量从 1964 年开始减少。降水量可分为两个阶段。第一阶段是 1962—1986 年的丰水期,第二阶段是 1987—2012 年的枯水期。同时,利用 Mann-Kendall 突变检验得出,黄河下游降水量发生突变的时间是 1964 年。

(3) 黄河下游降水量与径流量在突变时刻即 1979 年以前,同步变化,呈现正相关关系,降水量是影响径流量变化的主要因素。突变时刻后,人类活动对径流量的影响程度逐渐增加,成为影响径流量变化的主要因素,同时,人类活动和降水量对径流量的影响程度分别为 68%和 32%,人类活动的影响占主导地位。

本文分析了黄河下游近 50 a 降水量、径流量变化的基本特征、阶段性特征等,定量分析了人类活动和天然降水量对径流的影响程度,但是并未考虑温度、蒸发量、土地利用变化等方面的影响。

参考文献:

[1] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展,2009,20(2):153-158.

[2] Sajikumar N, Remya R S. Impact of land cover and land use change on runoff characteristics[J]. Journal of Environ-

mental Management, 2015,161:460-468.

[3] Khadka D, Babel M S, Shrestha S, et al. Climate change impact on glacier and snow melt and runoff in Tamakoshi basin in the Hindu Kush Himalayan (HKH) region[J]. Journal of Hydrology, 2014,511(4):49-60.

[4] 刘伟,何俊仕,陈杨. 浑河流域降水与径流变化特征及同步性分析[J]. 水土保持研究,2016,23(1):150-154.

[5] 热孜燕,阿不都,沙拉木. 1957—2009 年乌鲁木齐河径流与气候变化的对应关系[J]. 水土保持研究,2015,22(5):289-293.

[6] 刘鑫. 大凌河流域径流演变规律分析[J]. 水土保持研究,2015,22(2):165-170.

[7] 李夫星,陈东,汤秋鸿. 黄河流域水文气象要素变化及与东亚夏季风的关系[J]. 水科学进展,2015,26(4):481-490.

[8] 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.

[9] 张越,付永锋,侯保俭. 黄河源区径流量演变成因分析[J]. 人民黄河,2013,35(8):22-24.

[10] 张翠,韩美,史丽华. 黄河入海径流量变化特征及其对气候变化的响应[J]. 人民黄河,2015,37(5):10-14.

[11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999.

[12] 章诞武,丛振涛,倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展,2013,24(4):490-496.

[13] 朱晓华,杨秀春,蔡运龙. 基于灰色系统理论的旅游客源预测模型[J]. 经济地理,2005,25(2):232-235.

[14] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文,2010,30(4):47-51.

[15] 吴凯,谢贤群,刘恩民. 黄河断流概况、变化规律及其预测[J]. 地理研究,1998,17(2):125-130.

[16] 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.

[17] 王怀柏,赵淑饶,张家军,等. 1950—2010 年黄河径流情势变化特点[J]. 人民黄河,2011,33(12):16-18.

[18] 李春晖,郑小康,杨志峰,等. 黄河天然径流量变化趋势及其影响分析[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2009,45(1):80-85.

[19] 赵传晋,徐学选,陈天林,等. 关川河流域土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持研究,2015,22(3):83-87.

[20] 孔岩,王红,任立良. 黄河入海径流变化及影响因素[J]. 地理研究,2012,31(11):1981-1990.

[21] 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.