

南水北调西线引水区和黄河上游径流及气候变化特征

李锁锁¹, 吕世华¹, 韦志刚¹, 文莉娟¹, 李振朝¹, 高治定²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;
2. 黄河水利委员会勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要 利用南水北调西线一期工程引水区和黄河上游地区近 40 年的径流量、降水、气温资料, 分析了各个流域径流量、降水、气温的年代际变化、周期, 以及变化的原因。结果表明: 南水北调西线一期工程引水区 3 个流域径流量的变化大体相似, 经历了 3 个主要变化阶段, 存在 2~6 年的周期。降水量变化幅度不是很大。降水量和径流量的变化趋势很一致, 二者相关系数均达到 0.80 以上。温度表现出明显波动升高的趋势。黄河上游地区的径流量大体经历了 4 个变化阶段, 存在 2~8 年的周期, 有很明显波动减小的趋势。降水总体表现为没有大幅度的变化, 流量和降水的相关系数在 0.69 以上。气温总体表现为波动变暖的趋势。两区的河流均以降水补给为主。黄河上游地区自 1990 年以后径流量明显减小, 尤以黄河唐乃亥到兰州段之间最为严重, 这可能与人为影响和温度升高蒸散量变大有很大的关系, 所以南水北调西线引水工程是很有必要的。

关键词 南水北调西线工程 黄河上游 模比系数 小波分析 径流量 降水 气温

中图分类号 :TV121+.4 ;P423.3+4 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2006)S1-0010-04

南水北调西线第一期工程引水区(以下简称引水区)位于川西北地区, 平均海拔约 3500 m, 年均降水 400~800 mm, 年均气温 10℃ 以下, 引水区主要涉及道孚以上鲜水河及大渡河绰斯甲站、足木足站以上地区, 包括鲜水河支流达曲和泥曲以及大渡河支流色曲、杜柯河、玛柯河和阿柯河共 6 条支流流域, 面积约 5 万 km²。黄河上游地区系指兰州以上黄河地区, 该地区涉及范围较广, 年平均降水量 200~600 mm, 年平均温度 0℃ 左右。

研究这两区水量丰枯关系是跨流域大型工程水文分析计算的一个重要课题, 也直接关系到工程建设规模。高治定等^[1] 分析了南水北调西线工程调水地区水文特征, 蓝永超等^[2]、韩添丁等^[3] 分析了黄河上游径流长期变化特征, 并且建立了趋势预测模型, 张娟等^[4] 分析了黄河唐乃亥以上地区径流量的变化, Li Chun-hui 等^[5] 分析了黄河流域径流量的变化。

小波分析(wavelet analysis)也称为多分辨率分析, 是近年来比较热门的一个前沿领域, 它可以反映出变量在多层次时间尺度机构和局部变化特征, 可以详细而准确地揭示出时间序列中瞬时频率结构随

时间的变化。即小波变化不仅可以给出序列变化的尺度, 还可以显示出变化的时间位置, 它还具有数学意义上的严格的突变点诊断能力^[9], 目前在气候序列的时频结构分析中已广泛应用^[6-8]。本文选用墨西哥帽函数(Mexican Hat Function, 简称 MHF)小波分析各流域流量多时间尺度变化特征。

本文在前人研究的基础上, 通过统计分析方法利用 5 个水文站资料分多个流域(段)分析引水区和黄河上游地区流量丰枯年代际变化和各个流域气温、降水的气象条件, 以及他们之间的相互关系和原因。

1 资料选取和处理方法

所选用资料为引水区和黄河上游地区道孚、绰斯甲、足木足、唐乃亥、兰州 5 个水文站年径流量和各个水文站流域 15 个气象站月、年降水和气温资料。水文站与相应气象站对应情况如表 1 所示。利用这些水文站和气象站的资料, 建立一套反映引水区各个流域和黄河上游径流量、降水、气温的标准化序列。由于各站资料序列长度不一致, 在平均计算时, 采用同期最多站。

表 1 引水区和黄河上游各个流域(段)水文站和气象站

流域(段)	水文站	气象站
达曲和泥曲流域	道 孚 炉霍、道孚	
色曲和杜柯河流域	绰斯甲 色达、壤塘、绰斯甲	
玛柯河和阿柯河流域	足木足 班玛、阿坝、足木足	
黄河唐乃亥段	唐乃亥 红原、若尔盖、玛多、达日、兴海	
黄河兰州段	兰 州 红原、若尔盖、玛多、达日、兴海、贵德、兰州	

2 引水区和黄河上游径流量、降水量、气温的年代际变化

2.1 径流量的变化

2.1.1 径流量的年代际变化

引水区所涉及的 6 条支流,若按照流域来分,为 3 个流域 达曲和泥曲流域、色曲和杜柯河流域、玛柯河和阿柯河流域,因此我们分为 3 个流域来分析。

表 2 列出了引水区和黄河上游各个水文站 20 世纪 60~90 年代径流量距平百分率年代平均值。总体来看,引水区 3 个水文站径流量与黄河上游相比变化幅度小,不超过 7.3%,引水区足木足站和绰斯甲站的变化幅度比道孚站的更小,黄河唐乃亥站和兰州站径流量 80 年代最大,分别偏多 17.4% 和 11.7% 90 年代最小,分别偏少 14% 和 15.3%。从近 40 年来引水区和黄河上游径流量年代变化来看,一定程度上证实了引水的可行性,如 60,70,90 年代引水区跟黄河上游径流量的变化基本相反,引水区径流量总体表现出枯—丰式的变化,黄河上游径流量表现出丰—枯式的变化。

表 2 引水区和黄河上游 20 世纪 60~90 年代径流量距平百分率年代平均 %

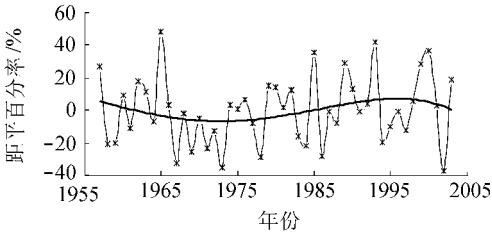
水文站	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代
道 孚	-0.2	-6.7	1.8	7.3
绰斯甲	-0.2	1.7	0.4	2.8
足木足	3.1	-0.8	3.4	-0.6
唐乃亥	5.5	2.5	17.4	-14.0
兰 州	12.0	1.5	11.7	-15.3

注 道孚站 60 年代的为 1963~1970 年的资料。

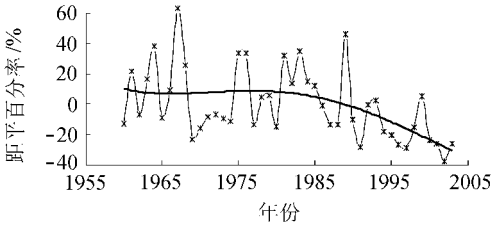
图 1 给出了引水区和黄河上游径流量距平百分率演变曲线,其中粗黑实线为 4 次多项式拟合曲线。由图中可以看出近 40 年来各个站径流量的变化趋势,道孚站和绰斯甲站(图略)基本呈现波动不变的趋势,足木足站(图略)表现出波动略下降的趋势,唐乃亥站(图略)和兰州站表现出明显下降的趋势,尤其是 20 世纪 90 年代开始表现得很明显。小波分析显示各个站的径流量存在一个准 3 年和 6~8 年的显著性周期。

2.1.2 径流量的丰枯指数分析

计算引水区和黄河上游各个水文站的径流量的



(a) 道孚站



(b) 兰州站

图 1 引水区和黄河上游径流量距平百分率演变曲线 模比系数 K_p ($K_p = \text{某一年的年径流量} / \text{多年平均径流量}$),将 K_p 值分成 5 种年别(统一比较年份为 1966~2000 年),并用 5 个整数(2~-2)代表不同丰枯年的年径流量(表 3),分析多年模比系数过程的丰、平、枯水段。

表 3 引水地区和黄河上游各流域年径流量丰枯水年的分类定级

年 别	标准	K_p	年 别	标准	K_p
特丰年	2	≥ 1.3	偏枯年	-1	0.9~0.7
偏丰年	1	1.3~1.1	特枯年	-2	≤ 0.7
平水年	0	1.1~0.9			

引水区和黄河上游各流域年径流量分级统计结果见表 4,由表中可以看出引水区各流域以平水年为主,其余依次为偏枯水年、偏丰水年、特丰年、特枯年。黄河上游和引水区不同,黄河上游以偏枯水年为主,其余依次为平水年、特丰水年、偏丰水年、特枯水年。总的来讲,引水区以正常偏丰年为多,黄河上游以正常偏枯年为多。

表 4 引水区和黄河上游各流域的年径流量丰枯分级统计

流 域	总年数	2 级	1 级	0 级	-1 级	-2 级
道 孚	47	4	10	18	12	3
绰斯甲	41	3	11	13	13	1
足木足	44	2	13	16	12	1
唐乃亥	44	7	7	12	14	4
兰 州	44	7	6	13	17	1

引水区和黄河上游各流域之间年径流量分级对比统计结果见表 5,由表中可以看出引水区各流域之间具有较好的一致性,其中一致性最好的是绰斯甲和足木足,其次是道孚和绰斯甲,最后是足木足和道孚。黄河上游唐乃亥段和兰州段的一致性也很好。但引水区和黄河上游年径流量的差异就比较大。

表 5 引水区和黄河上游各流域之间年径流量
丰枯分级对比统计

流 域	相同级	相差 1 级	相差 2 级	相差 3 级	相差 4 级
道孚和绰斯甲	22	19	0	0	0
道孚和足木足	18	19	4	0	0
道孚和唐乃亥	8	19	10	3	1
道孚和兰州	8	20	10	2	1
绰斯甲和足木足	23	16	2	0	0
绰斯甲和唐乃亥	8	24	7	2	0
绰斯甲和兰州	10	24	4	3	0
足木足和唐乃亥	17	20	4	0	0
足木足和兰州	15	21	5	0	0
唐乃亥和兰州	27	14	0	0	0

注 表中所比较的时间段为 1963 ~ 2003 年。

2.2 降水的变化

表 6 列出了引水区和黄河上游 20 世纪 60 ~ 90 年代降水量距平百分率年代平均值。总体来看,60 年代和 70 年代降水相对偏少,80 年代降水相对偏多,90 年代引水区降水相对偏多,黄河上游降水偏少,最大可偏少 6.2%,最大可偏多 5.1%。两区域相比较,60 和 70 年代引水区降水量变化较黄河上游更明显,但 80 年代却恰恰相反。图 2 给出了引水区和黄河上游降水量距平百分率演变曲线。从图中可以看出引水区 3 个流域表现出较相似的变化,呈现出波动减少的趋势,以 1983 左右年为界限,1983 年以前降水较少,1983 年以后降水较多;而黄河唐乃亥段(图略)表现出略为波动增加的趋势,兰州段表现出先减少后增多又减少的趋势。

表 6 引水区和黄河上游 20 世纪 60 ~ 90 年代 降水量距平百分率年代平均					%
水文站	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代	
道 孚 站	- 6.2	- 2.8	3.4	5.1	
绰斯甲站	- 0.4	- 1.2	0.8	3.3	
足木足站	- 1.7	- 0.5	2.4	1.8	
唐乃亥站	- 0.8	- 1.2	4.7	- 0.8	
兰 州 站	- 0.3	- 0.4	4.0	- 2.0	

2.3 气温的变化

引水区和黄河上游各个流域的气温均表现出明显波动升高的趋势,现以变化最明显的玛柯河和阿柯河流域及其黄河兰州段为例来分析。

玛柯河和阿柯河流域的气温距平演变如图 3 (a)所示,从图中的 4 次多项式拟合曲线(粗线)可以看出,气温表现出连续升高的趋势。1999 年是近 35 年来最暖的一年,气温偏高 1.01℃,1977 年是最冷的一年,气温偏低 0.63℃。黄河兰州段近 40 年来气温同样连续升高,1998 年是近 40 年来气温最高的一年,气温偏高 1.41℃,1967 年是气温最低的一年,气温偏低 0.85℃。分析比较这两个流域气温与其他几个流域气温的变化,发现 1998 年和 1999 年是近 40 年来

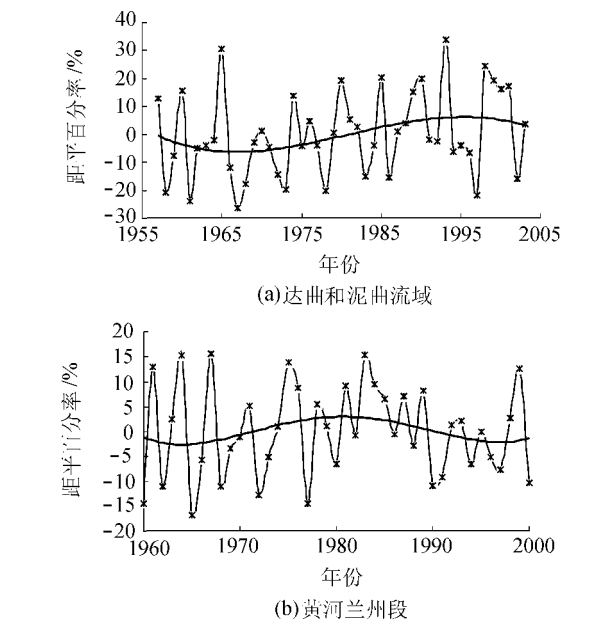


图 2 引水区和黄河上游降水量距平百分率演变曲线

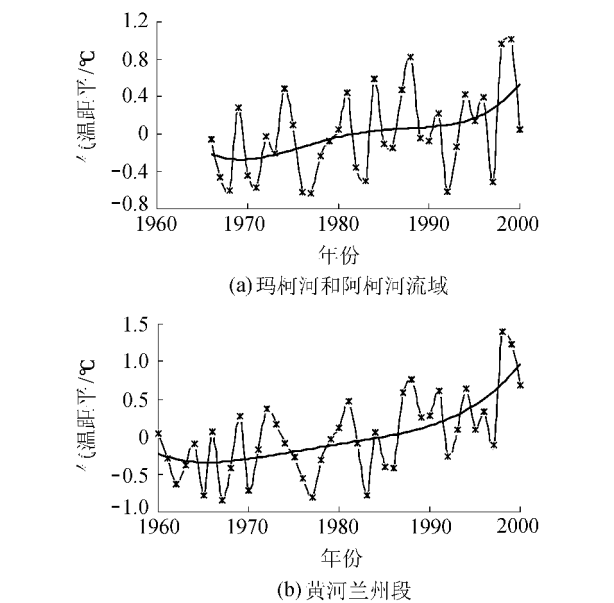


图 3 引水区和黄河上游气温距平演变曲线
最暖的,这与全球气候变暖的大背景很一致。

2.4 径流量、降水、气温的相互关系

按水源的补给,河流可以分为两种类型的河流:一种是以降水补给为主的河流;另一种是以冰雪融水补给为主的河流^[9]。本文所分析的河流基本都是以降水补给方式为主的河流(分析研究表明冰雪融水补给所占比例仅约 13%),计算各个流域径流量和降水的相关系数如表 7 所示,从表中可以看出径流量和降水的相关性很好,均通过了 99%显著性检验。

表 7 各个流域水文站径流量与降水的相关系数			水文站	资料长度	相关系数
道 孚	1957 ~ 2003 年	0.80	唐乃亥	1960 ~ 2000 年	0.75
绰斯甲	1963 ~ 2003 年	0.86	兰 州	1960 ~ 2000 年	0.69
足木足	1960 ~ 2003 年	0.84			

引水区径流来源于降水和少量地下水。一般 11 月至次年 3 月为枯水期,降水较少,且以降雪形式为主,径流来源主要由地下水补给。4~5 月份为枯、丰过渡期,径流为融雪及春雨补给,6~10 月份为丰水期(汛期),该期以降雨为主,径流量主要集中在本段,该期间径流量占年径流量 75%。最大月径流量一般出现在 7 月,约占年径流量的 26%。最小月径流量一般出现在 2 月,约占年径流量的 1.6%,比较分析可以看出引水区径流量和降水的一致性都很好。

黄河唐乃亥以上地区属高寒草原地貌,该地区植被好,多数为草地和沼泽地,有非常强的蓄水和产流功能,是受影响较小的地区,也是黄河径流的主要来源地,其径流量的多少及变化对黄河流域的水量调度具有一定的影响。分析比较可以看出径流量和降水的变化趋势很一致,对比降水与气温的变化曲线(图略),关系就不是很一致。

同时分析黄河兰州以上地区,可以发现在 1990 年之前径流量和降水的变化很一致,而在 1990 年之后,降水最多减少 5% 时,径流量减少 29%,可见径流量的变化远远大于降水的变化。为了进一步分析其中产生这种变化的原因,分析黄河兰州站径流量与唐乃亥站径流量系列及其两水文站之间的气温和降水,发现两水文站之间降水量多年的总体变化趋势幅度不大,但极端值降水年较少,径流量呈现出几乎直线下降的趋势,气温也呈现出很明显的上升趋势(图略)。分析其中的原因:其一可能与人为的影响有很大的关系,其二是温度升高,在较干旱的地区,用于蒸散的水分消耗增大,且比湿润地区要大得多,而且随着气温的升高而明显增大。

3 结 论

a. 引水区的 3 个流域 20 世纪 60 年代中期到 90 年代末期的流量大体经历了 3 个变化阶段,呈一种丰—枯—丰型变化。流量存在 2~6 年的显著性周期。降水和流量变化很一致,3 个流域二者的相关系数都高达 0.80 以上。气温变化总体表现为一种波动变暖的趋势,尤其是色曲和杜柯河流域、玛柯河和阿柯河流域的变暖趋势更为明显。

b. 黄河上游地区两个流域 20 世纪 60~90 年代末期的流量大体经历了 4 个变化阶段,呈一种丰—枯—丰—枯型变化。流量存在 2~8 年的显著性周期。降水和流量变化较一致,2 个流域二者的相关系数都在 0.65 以上。气温总体表现为一种波动变

暖的趋势。

c. 引水区各个流域具有一定的一致性,其中绰斯甲和足木足的一致性最好。黄河上游地区各个流域具有一定的一致性,唐乃亥段和兰州段的一致性也很好。

d. 引水区和黄河上游地区的河流均以降水补给为主。引水区 3 个流域径流量总体变化不是很大,而黄河上游地区自 1990 年以后径流量明显减小,尤以黄河唐乃亥到兰州段之间最为严重,所以南水北调西线引水工程是很有必要的。

参考文献:

[1] 高治定,王玉峰,张志红,等.南水北调西线工程调水地区水文气象特征[J].人民黄河,2001,23(3),9-10.
[2] 蓝永超,丁永建,康尔泗,等.黄河上游径流长期变化及趋势预测模型[J].冰川冻土,2003,25(3) 321-326.
[3] 韩添丁,也柏生,丁永建.近 40 a 来黄河上游径流变化特征研究[J].干旱区地理,2004,27(4) 553-557.
[4] 张娟,王幼慧,孙洪保.黄河唐乃亥以上地区径流量变化分析[J].水资源与水工程学报,2004,15(3) 68-70.
[5] LI Chun-hui, YANG Zhi-feng. Natural runoff changes in the Yellow River Basin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(4) 427-436.
[6] 刘德,李永华,何卷雄.重庆市夏季气温及降水变化的小波分析[J].高原气象,2003,22(2) 171-178.
[7] 邓自旺,林振山,周晓兰.西安市近 50 年来气候变化多时间尺度分析[J].高原气象,1997,16(1) 81-93.
[8] 姚建群.连续小波变化在上海近 100 年降水分析中的应用[J].气象,2001,27(2) 20-24.
[9] 杨针娘,王强,朱守森.祁连山北坡寒区水文对气候变化的响应[J].冰川冻土,1996,18(增刊) 305-313.

(收稿日期 2006-06-16 编辑 熊水斌)

·简讯·

2006 年水力发电学术研讨会将在昆明召开

2006 年水力发电学术研讨会将于 2006 年 11 月 22~25 日在昆明召开。会议由中国水电工程顾问集团公司、中国水利水电科学研究院、中国大坝委员会、中国水力发电工程学会和中国水利学会共同主办,中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院承办。会议的主要议题有:①高拱坝设计和施工中的问题;②大坝安全评估与加固技术;③大坝与环境(包括鱼道的设置、环境友好的坝工技术、考虑环境的大坝调度等);④水库泥沙淤积与下游河道的侵蚀。

(编辑部供稿)