

# 过去 50 年中国西部气候和径流变化的区域差异

丁永建\* 叶柏生 韩添丁 刘时银 沈永平 谢昌卫

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要** 通过对过去 50 年中国西部降水和主要河流径流变化的对比分析, 研究降水和径流的区域变化差异, 结果表明, 黄河上游径流和降水与新疆北部和青藏高原南部雅鲁藏布江流域径流、降水呈显著的反相关关系. 中国西部降水变化大体上以青藏高原唐古拉山和天山为界, 表现出南北一致, 中部(西部的喀喇昆仑山除外)相反, 即从南到北呈现出干-湿-干或湿-干-湿的区域变化差异; 在河流径流上表现为北部伊犁河流域和南部雅鲁藏布江流域径流变化的一致性, 而与黄河上游径流变化呈反位相变化; 同时, 新疆和黄河径流的反位相变化表现在年代际上, 而黄河和雅鲁藏布江径流变化表现在年际变化上. 黄河上游径流的变化与西北太平洋季风指数的变化比较一致, 这表明黄河上游径流变化受到较强的东亚季风的影响; 新疆总径流分别与西北太平洋季风指数和西风指数存在显著的正负相关关系, 寻找不同地区径流变化异同对于认识和预测径流未来变化具有重要的指导意义.

**关键词** 径流变化 降水 中国西部 亚洲季风

在中国西北内陆干旱区, 水资源是社会经济发展的关键制约因素, 而干旱区水资源主要来源于周围的山地, 山区径流变化将直接影响其社会经济活动. 另一方面径流变化是全球变化的一个重要部分, 全球气候变暖的必然结果是全球总降水的增加, 就全球而言, 在 20 世纪, 陆地降水增加了约 2%<sup>[1,2]</sup>. 这种增加在统计上具有显著性, 但在空间和时间上则缺乏一致性<sup>[3,4]</sup>. 在长期径流观测资料的基础上, 已经有众多有关区域以至全球径流变化的研究成果, 径流资料的观测时段长达近 200 年(最早始于 1807 年). 诸多研究<sup>[5-10]</sup>表明, 全球径流随全球温度升高而增加, 增加幅度在 4%/°C<sup>[5]</sup>, 亚洲和美洲的河流径流波动比较一致, 而与欧洲河流的径流变化相反, 亚洲河流径流在 1925~1994 年表现为增加. 在最近 70 年(1934~2000), 北极圈主要河流的径流表现为增加趋

势<sup>[6]</sup>. 近 50 年来中国北部的河流如黄河、松花江等河流径流表现为减少趋势, 而长江上游和珠江河流径流也表现为减少趋势, 但长江下游则为增加趋势<sup>[7]</sup>. 刘春蓁等<sup>[8]</sup>等利用 100 多年的径流观测资料从水资源利用和管理角度研究了珠江和长江上游年径流的变异和变化趋势, 结果表明 20 世纪 50 年代以前为丰水期, 之后为少水期. 西北地区河流径流主要表现为增加趋势<sup>[9,10]</sup>. 近十几年来西北大部分地区气候环境悄然发生重大变化, 出现了降水与径流增加, 冰川消融加速, 湖泊水位上升, 大风与沙尘暴日数减少, 植被有所改善等现象, 表明西北地区气候可能正由暖干向暖湿转型, 并存在显著转型区、轻度转型区和未转型区<sup>[10]</sup>. 最近 50 年和 100 年降水变化结果已经表明了西北地区东西部表现为相反的变化趋势<sup>[7,11-13]</sup>, 但缺乏区域内径流变化过程差异性的系统比较. 本文

收稿日期: 2006-06-22; 接受日期: 2006-12-06

中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号: KZCX3-SW-345)、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所人才基金项目(批准号: 2004116)和国家自然科学基金项目(批准号: 40671041)资助

\* E-mail: [dyj@lzb.ac.cn](mailto:dyj@lzb.ac.cn)

在上述关于西北地区气候转型的研究结果基础上, 探讨中国西部径流和降水的区域变化差异以及其气候成因。

## 1 资料和研究方法

### 1.1 研究方法

首先通过比较中国西部典型河流径流变化的差异性, 主要是通过50年来年径流系列和距平累积曲线, 比较新疆主要河流、黄河、长江和雅鲁藏布江三大河流上游50年来径流变化的差异, 了解中国西部地区径流的丰枯变化和区域差异。其次, 以黄河上游唐乃亥站以上流域降水量和径流为基准, 分析西北河流径流和降水与黄河上游径流和降水的关系, 寻找径流和降水的区域变化差异性。为揭示降水和径流变化的这种区域差异的成因, 分析了径流与影响中国西部降水的东亚、南亚季风指数<sup>[14]</sup>以及西风指数<sup>[15]</sup>的关系, 进一步了解降水和径流变化区域差异的气候背景。

### 1.2 资料

本文主要研究中国西部主要河流, 包括内陆河、北部的额尔齐斯河以及发源于青藏高原的长江、黄河以及雅鲁藏布江等河流。对于大江大河, 主要选取流域的控制站, 而对于一些较小的内陆河(新疆, 甘肃河西走廊等), 河流台站的选择主要考虑资料的长度和径流受人类活动的扰动程度, 对于西北地区内陆河主要选取河流出口之上受人类活动影响较小、径流主要反映自然变化特征的水文站, 最后选取西部99个水文站, 资料时段为1951~2000年(部分径流资料开始时间晚于1951年)。此外, 由于新疆在地理上是一个相对独立的区域, 区内河流众多, 大多为相对独立且流域面积较小的内陆河, 缺少代表性的大河, 为此将新疆主要河流出口水文站径流之和作为新疆地区的总径流<sup>[9]</sup>, 代表这一地区径流。

在中国西部, 大多河流有冰川融水补给, 尤其是新疆塔里木盆地的河流, 冰川径流补给比例较大, 气候变暖必然引起冰川补给的加大。就目前已有的研究表明, 即使冰川补给比例较大的西北地区河流, 径流的变化也仍然主要取决于降水的变化<sup>[16]</sup>。施雅风等<sup>[10]</sup>依据气温、降水、径流、湖泊等资料提出西北地区气候在暖湿转型中, 径流变化基本上也与区域降水变化一致, 这也表明了西北地区径流主要受

降水变化的影响。而冰川径流变化没有能够得到反映的原因包括两个方面: 一是大多数河流冰川径流补给比例较小, 河流径流主要还是降水补给; 二是中国西部冰川退缩的开始时间(小冰期以来)远远早于径流观测开始时间(大多为20世纪50年代), 因此径流资料不能反映这种早已开始的冰川退缩引起的径流增大。这部分增大的径流量在实测的河流径流中只是表现为河流基流, 径流资料只能反映径流观测期以来冰川加速退缩引起的径流增加部分<sup>[16]</sup>, 而这种加速退缩也主要是在1996年以来比较明显<sup>[17]</sup>。当然, 对个别的冰川径流比例较高的河流可能会有较大的影响。

降水资料主要是由国家气候中心提供的1951~2003年670个站的年降水资料。东亚夏季季风指数则取自文献<sup>[14]</sup>的研究成果。西风指数由NCEP资料用文献<sup>[15]</sup>给出的方法计算得到。青藏高原季风指数则依据汤懋苍等<sup>[18]</sup>提出的方法, 直接由NCEP资料600hPa高度资料计算, 由高原地形中心点(90°E, 32.5°N)和周围4点(80°E, 32.5°N; 90°E, 25°N; 100°E, 32.5°N; 90°E, 40°N)高度距平值计算, 青藏高原季风指数为周围4点高度距平值之和与4倍高原中心点高度距平值之差。

## 2 年径流变化的区域差异

首先通过比较典型河流如黄河上游、长江上游、雅鲁藏布江上游以及新疆河流的年径流系列及其距平累积曲线, 初步认识径流变化的差异性。其次, 以黄河上游降水和径流为基准通过相关分析了解区域性的变化差异。

### 2.1 主要河流之间的差异

(1) 黄河上游与新疆地区。图1给出了黄河上游唐乃亥站和新疆河流总径流量<sup>[9]</sup>及其距平累积曲线, 距平累积曲线更清楚地表现了黄河上游径流与新疆径流的反位相变化。新疆总径流约在1987年开始转向正距平<sup>[10]</sup>, 而黄河则在1989年开始转向负距平, 从年际变化看, 两者缺乏年际丰枯的对应变化关系, 但统计结果显示它们具有显著的负相关关系(相关系数 $R=-0.31$ ,  $\alpha>95\%$ ), 而距平累积曲线表现的这种反位相变化主要表现在年代际变化上。

(2) 长江与黄河上游。长江上游寸滩站与黄河上游唐乃亥站年径流变化总体上丰枯变化具有一致

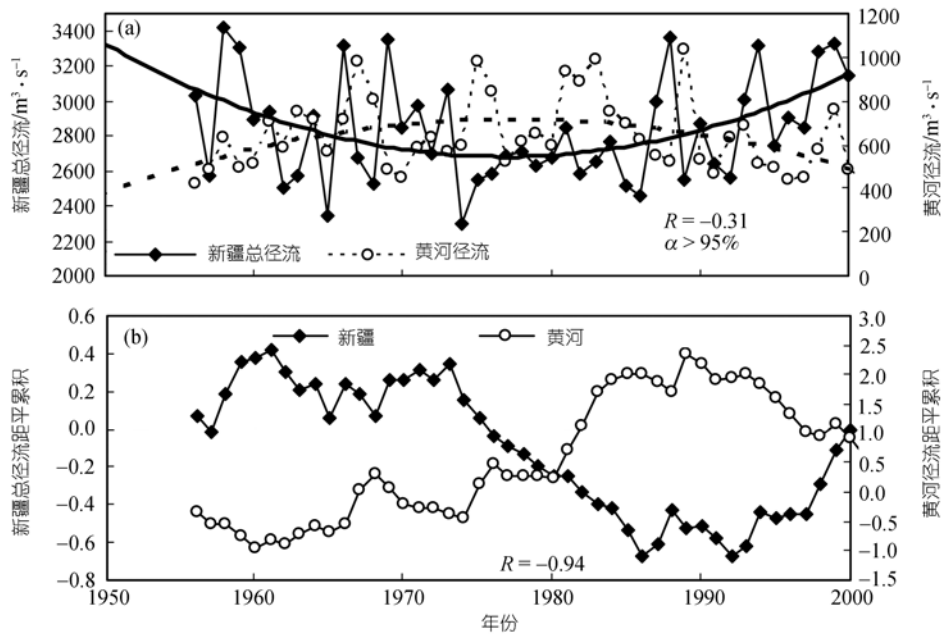


图 1 1956~2000 年黄河上游唐乃亥站和新疆河流年径流(a)和距平累积曲线(b)

性( $\alpha > 95\%$ )(图 2(a)), 从两站与新疆总径流的距平累积曲线比较可以看出(图 2(b)), 约在 1975 年以前和 1985 年以后长江径流变化与黄河相似, 而在 1975~1985 年间则与新疆总径流变化一致, 而与黄河的变化相反。

(3) 雅鲁藏布江与新疆伊犁河. 尽管新疆伊犁

河流域和雅鲁藏布江分别处在中国西部的南北边界处, 但两者年径流变化则表现出较好的一致性(图 3), 不仅径流距平累积曲线表现出较好的一致性, 年径流亦表现出显著的相关关系. 其主要原因可能是同受西风带影响的结果, 西风带在遇到青藏高原后分为南北两支, 其中新疆伊犁河主要受北支的影响, 而

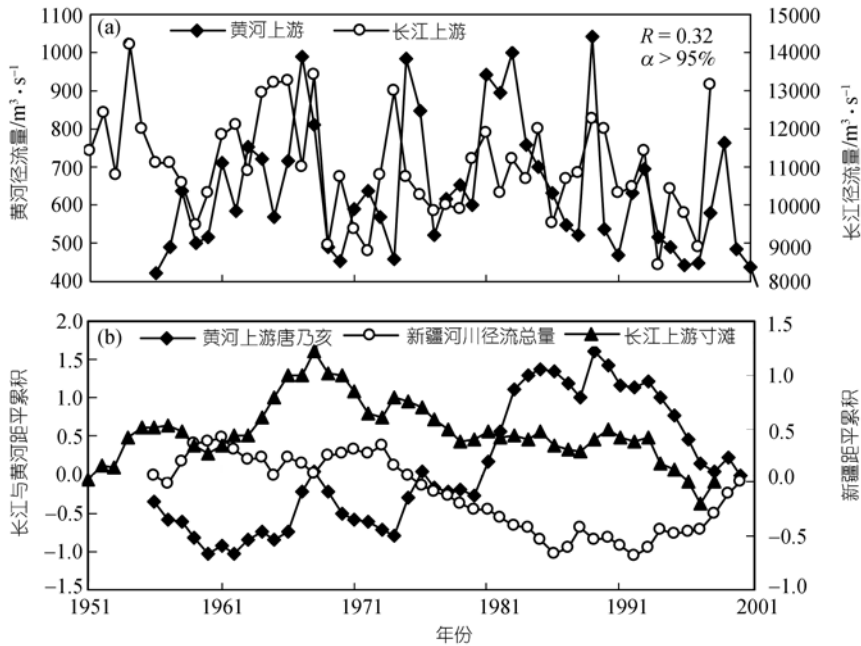


图 2

(a) 黄河上游唐乃亥站、长江上游寸滩站年径流变化曲线; (b) 黄河上游、长江上游和新疆总径流距平累积曲线比较

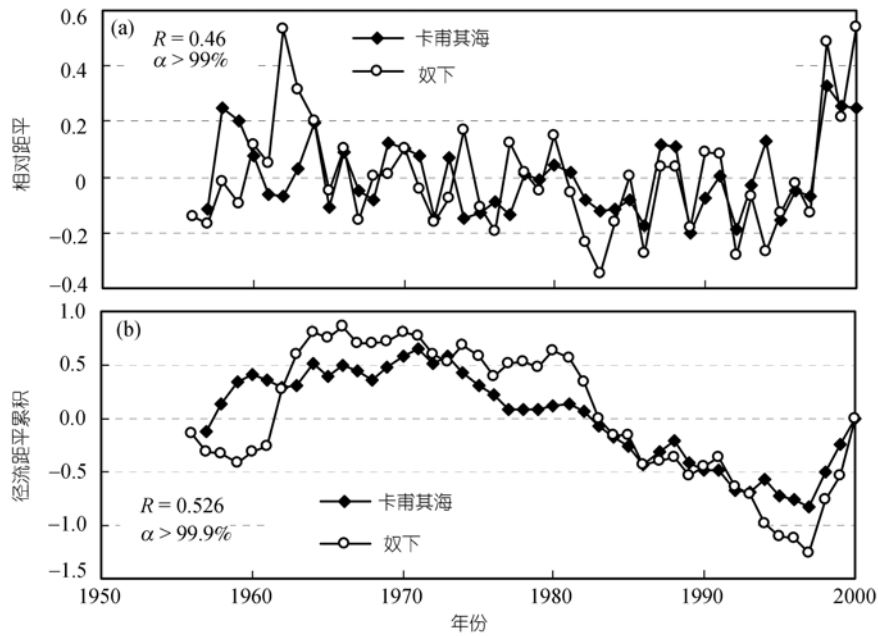


图 3 伊犁河卡甫其海站和雅鲁藏布江奴下站年径流距平(a)及其距平累积曲线(b)比较

雅鲁藏布江则受到南支的影响。

(4) 雅鲁藏布江与黄河上游. 由于新疆总径流与黄河上游径流的反位相变化以及与雅鲁藏布江径流的同位相变化, 因而黄河上游径流与雅鲁藏布江

径流亦可能表现出反位相变化. 图 4 给出了两者年径流距平及其距平累积曲线, 除 1962 年雅鲁藏布江的特大丰水年没有对应黄河上游的枯水年外, 大部分年份两者径流丰枯变化相反( $R=-0.269$ , 超过 90%的

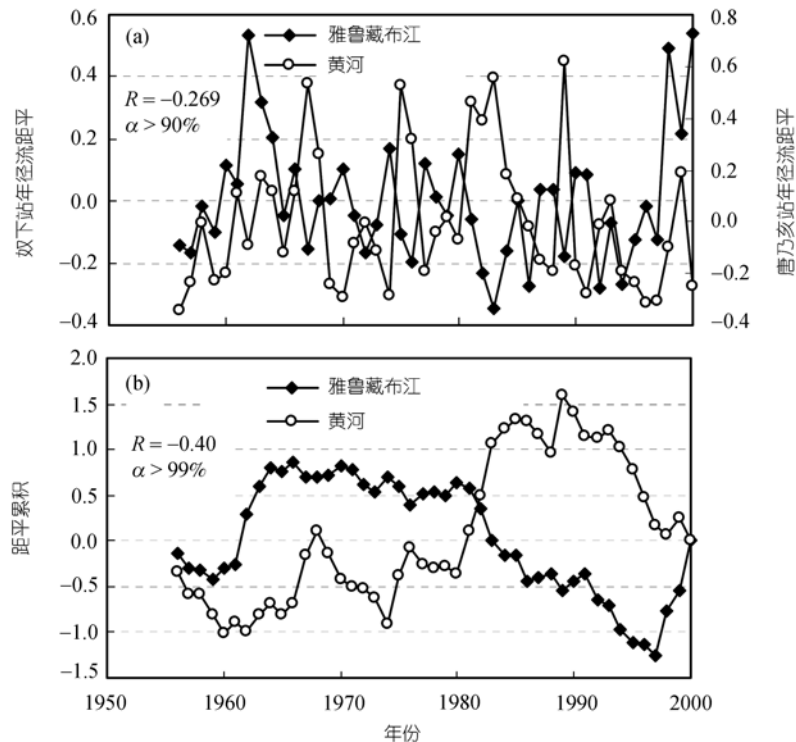


图 4 1956~2000 年黄河上游唐乃亥站和雅鲁藏布江奴下站径流距平(a)和距平累积曲线(b)

信度检验). 相比新疆与黄河上游径流累积距平显著的反相位变化, 黄河与雅鲁藏布江径流距平累积曲线的反位相变化不甚明显, 但统计上仍具有显著的负相关关系( $R=-0.40$ , 超过 99% 的信度检验), 这是否意味着新疆和黄河径流的反位相变化表现在年代际上, 而黄河上游和雅鲁藏布江径流变化差异性不仅表现在年代际上, 而且在年际上.

### 2.2 黄河上游与中国西部其他区域径流、降水的关系

西部地区不同区域年径流变化具有较大差异性, 研究区域差异性对于认识和预测径流未来变化具有重要的指导意义. 为了解整个西部径流和降水变化的区域差异性, 通过分析代表性流域的年降水与全国气象站年降水以及代表性流域径流量与西部主要水文站径流量的关系, 寻找降水和径流变化的区域差异. 在降水系列的选取上, 由于单站降水对一个区域的代表性较差, 或有较大的随机性, 本研究选择一个区域的平均降水量. 为了与径流分析保持一致性, 本文选取西北地区受人类活动较少, 且具有代表性的黄河上游唐乃亥站径流量和唐乃亥站以上流域平均降水量, 来研究与其他区域河流径流和降水变化的差异性.

图 5 给出了黄河上游唐乃亥站年径流与其他河流径流的相关系数, 并标出信度超过 95% 的河流水

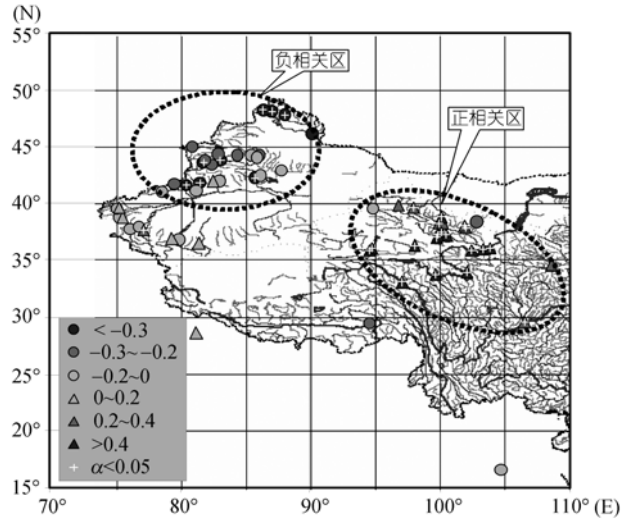


图 5 1951~2000 年间黄河上游唐乃亥站年径流与中国西部河流年径流量之间的相关系数  
图中+表示 $\alpha$ 通过 95% 信度

文站. 结果表明, 黄河、长江上游以及河西走廊中东部地区为显著的正相关区, 即这一地区径流变化具有一致性, 而新疆北部和天山地区的河流则为显著的负相关区, 表明了西北地区东西部径流反位相的变化特征, 这与已有的研究结果一致 [11]. 此外, 黄河上游与雅鲁藏布江径流亦表现出不显著的负相关关系.

图 6 给出了黄河上游流域平均降水量与全国气象台站降水量的相关系数分布图, 结果表明, 黄河上

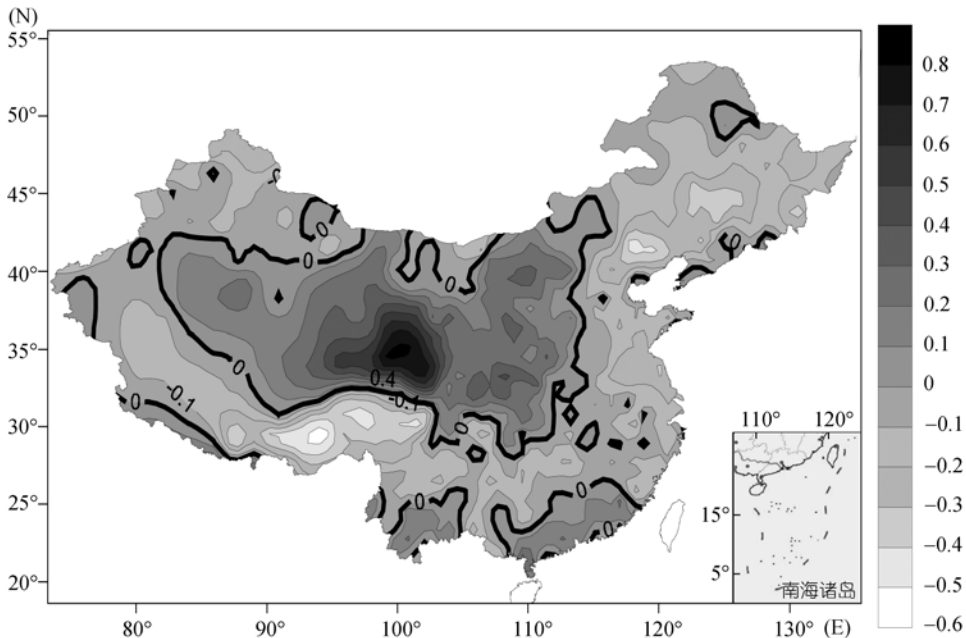


图 6 唐乃亥站以上流域平均年降水量与全国气象台站年降水量相关系数分布图

游年降水与新疆北部和青藏高原南部雅鲁藏布江流域降水呈显著的反相关关系(图中当相关系数 $R>0.3$ 时,即超过95%信度检验),并且在 $32^{\circ}\text{N}$ 左右,即唐古拉山脉为界,存在一个明显的与黄河上游降水由正相关关系转向负相关关系的分界线.实际上,这一界限不仅存在于降水变化,同时在气温变化、地质以及地球物理上都存在<sup>[19]</sup>.这表明中国西部降水变化南北一致,中部相反,也即从南到北呈现出干-湿-干或湿-干-湿区域变化差异,北部伊犁河流域和南部雅鲁藏布江流域径流变化的一致性可能就是这种降水变化差异性的反映.北部的负相关区与施雅风等提出的暖湿转型区基本一致,而西北地区东部的正相关的区域对应于东部的未转型区<sup>[10]</sup>.

西北地区降水反位相变化趋势主要表现在新疆中北部和西北地区东部,这与径流变化的区域差异完全一致(图5),表明了处在西风带影响范围的新疆北部和东亚季风边缘的黄河上游降水以及径流变化具有完全相反的变化趋势,表现了西风和东亚季风在这一地区处在的相互作用过程.这主要是由于受西风带影响地区和受东亚季风影响地区的降水具有年代际反相变化的特征<sup>[11,12]</sup>.这一结果也与NCEP资料显示的1951~2000年夏季(6~8月)600 mb平均风速的分布非常相似(图7),图6中西北地区北部的负相关区基本对应于600 mb的西风控制区(高值区),而南部的负相关区则对应于西风带南支的影响区,这一区域,特别是最南部区域还受到印度季风的影响.

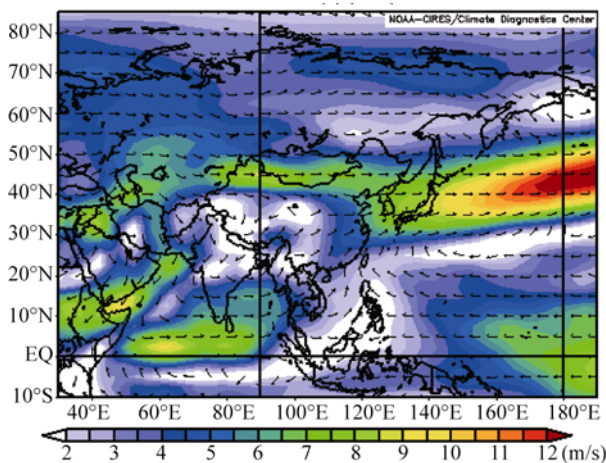


图7 1951~2000年夏季(6~8月)600 mb平均风速矢量图  
据NCEP资料

### 3 年径流变化的气候背景分析(与亚洲季风和西风变化的关系)

为寻找径流变化原因,选择亚洲季风指数以及西风带指数与径流进行对比.亚洲季风指数选用文献<sup>[14]</sup>的西北太平洋夏季季风指数,而西风带指数则由NCEP资料的纬向风速场直接计算<sup>[15]</sup>,青藏高原季风指数则依据文献<sup>[18]</sup>定义的方法由NCEP的600 mb高度再分析资料计算.图8给出了黄河上游年径流和西北太平洋季风指数,从年际关系看两者有显著的正相关关系(相关系数 $R=0.42$ , $\alpha>99\%$ ),而两者的距平累积曲线变化更为一致( $R=0.84$ , $\alpha>99.99\%$ ).相比较而言,黄河上游唐乃亥年径流量与青藏高原季风指数的相关性则较差(图9),年系列相关系数只有0.12,距平累积系列为0.50( $\alpha>99.9\%$ ),其原因可能是黄河上游径流变化主要是由上游的中下部区域(吉迈一唐乃亥站之间)控制.区间年径流占唐乃亥站的80%(对应流域面积占63%),这一区域受到东亚季风的影响更强一些,而地处青藏高原腹地的黄河源区的径流贡献只有20%,黄河上游年降水量与流域内气象站年降水的关系亦表明了这一点(图6).新疆年径流变化与西风带夏季西风指数和西北太平洋夏季季风指数均具有较好的对应关系(图10),这表明了尽管黄河上游主要处在青藏高原季风区,但径流变化主要受东亚季风的影响,同时由于东亚季风与西风在西北地区的相互作用,间接地影响到了新疆地区的降水和径流,这从一个侧面反映了西风带、东亚季风和青藏高原季风的相互作用.与西北太平洋和南亚夏季季风指数的变化相比,长江上游径流变化受到两种季风的共同影响,因而重庆寸滩站径流量缺乏与东亚和印度季风指数的直接对应关系(图11).在以后的工作中有必要进行进一步的分析研究.

### 4 结论与讨论

通过对过去50年中国西部降水和主要河流径流变化的对比分析,结果表明,降水和径流变化具有明显的区域差异,可划分为受西风带影响较大的新疆北部,受东亚季风影响的西北地区东部以及受南亚季风影响的青藏高原南部.其中,黄河、长江上游以及甘肃河西走廊东部径流与新疆北部和青藏高原南部雅鲁藏布江流域径流呈显著的反相关关系.青藏高原中东部地区降水变化在 $32^{\circ}\text{N}$ 附近存在明显的分

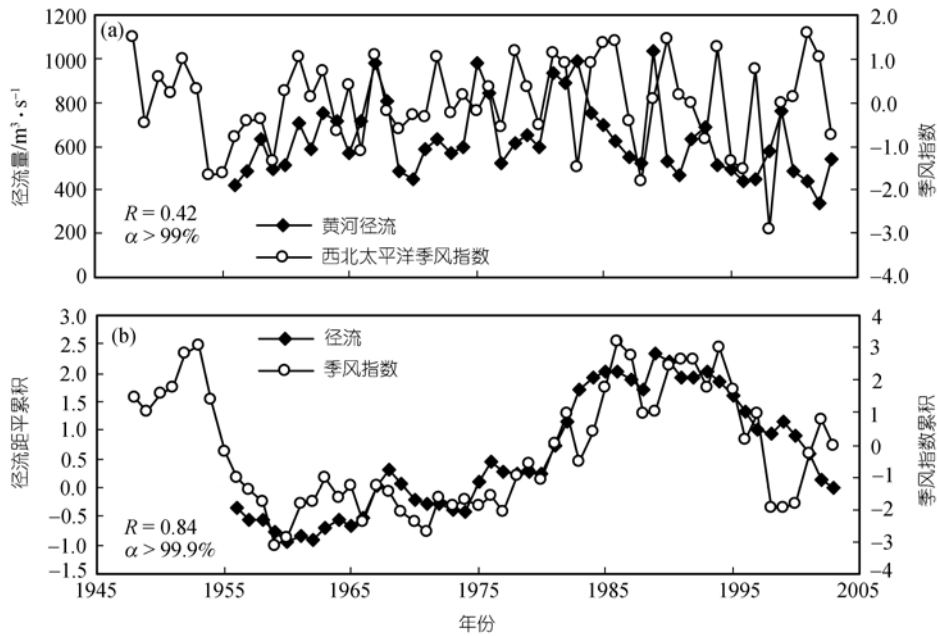


图 8 西北太平洋夏季季风指数和黄河上游唐乃亥站年径流量(a)及其距平累积曲线(b)

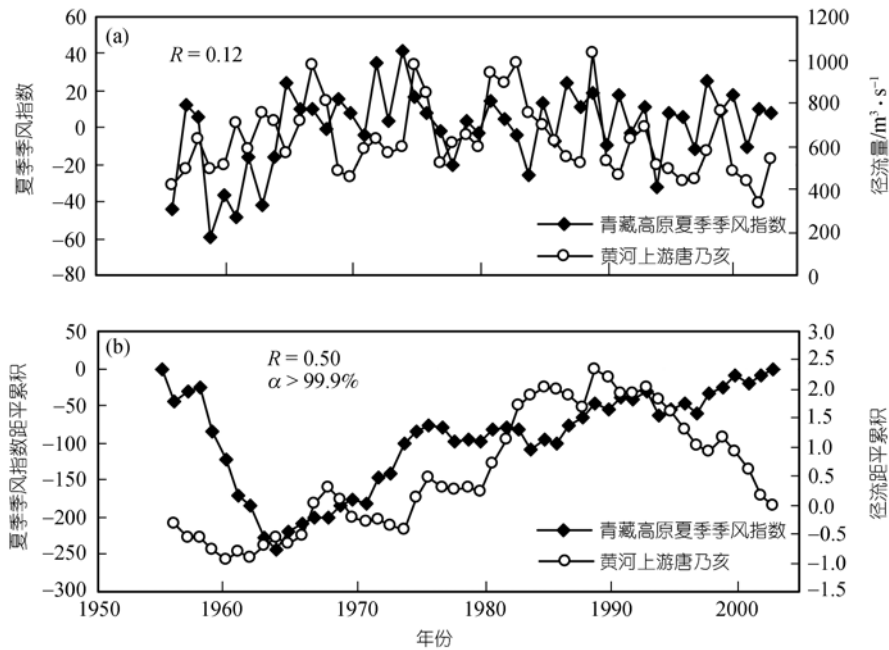


图 9 1955~2003 年青藏高原夏季季风指数和黄河上游唐乃亥站年径流量(a)及其距平累积曲线(b)

界线, 南北部降水变化呈反相变化, 在西北地区, 大体以天山为界, 西北地区北部和东部降水变化表现为反相变化, 降水的这一区域变化基本与径流的区域变化差异一致. 这表明中国西部降水变化大体上南北一致, 中部(西部的喀喇昆仑山除外)呈反相变化, 其中降水变化大体上以青藏高原唐古拉山和天

山作为明显的差异界线, 也即从南到北呈现出干-湿-干或湿-干-湿区域变化差异, 这在河流径流上表现为北部伊犁河流域和南部雅鲁藏布江流域径流变化的一致性, 而与黄河上游径流变化呈反位相变化. 新疆和黄河径流的反位相变化在年代际上表现更为明显, 而黄河和雅鲁藏布江径流变化不仅表现在年代际的

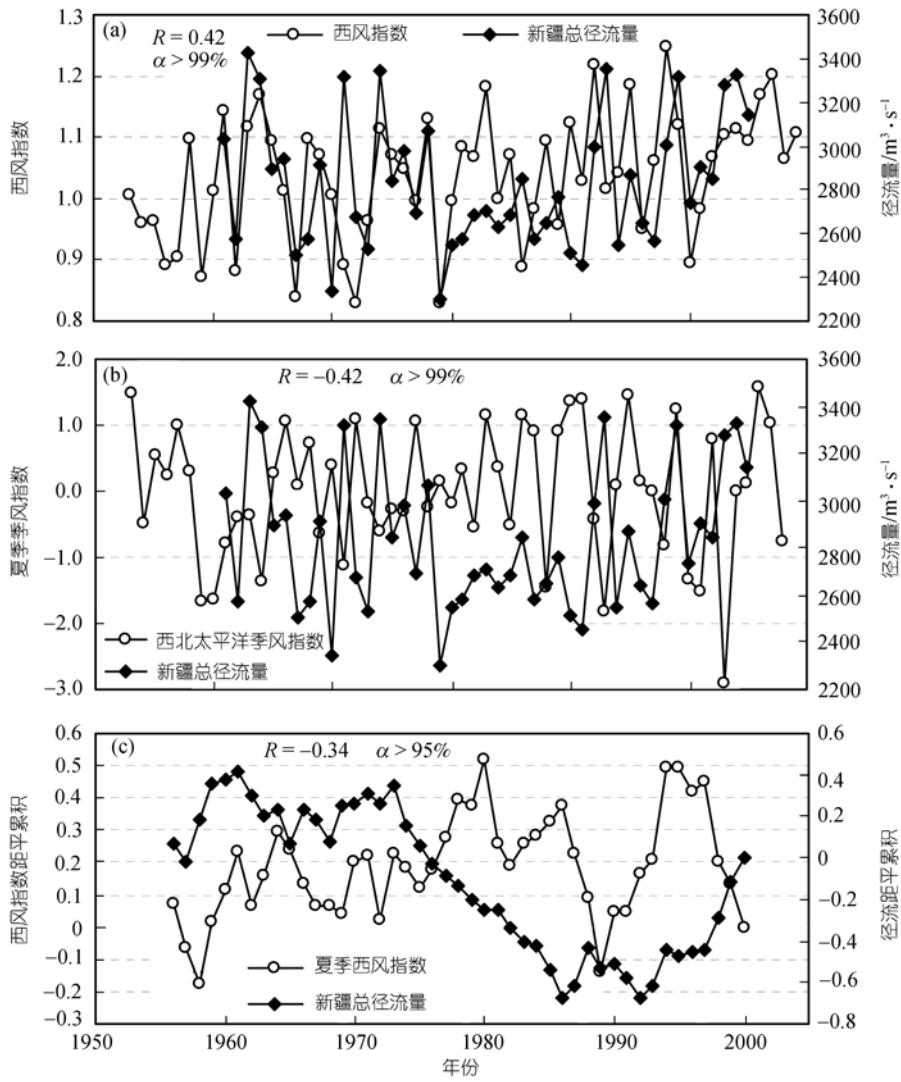


图 10

(a) 夏季西风带西风指数和新疆总径流量曲线; (b) 西北太平洋季风指数和新疆总径流量曲线; (c) 夏季西风指数和新疆总径流量距平累积曲线

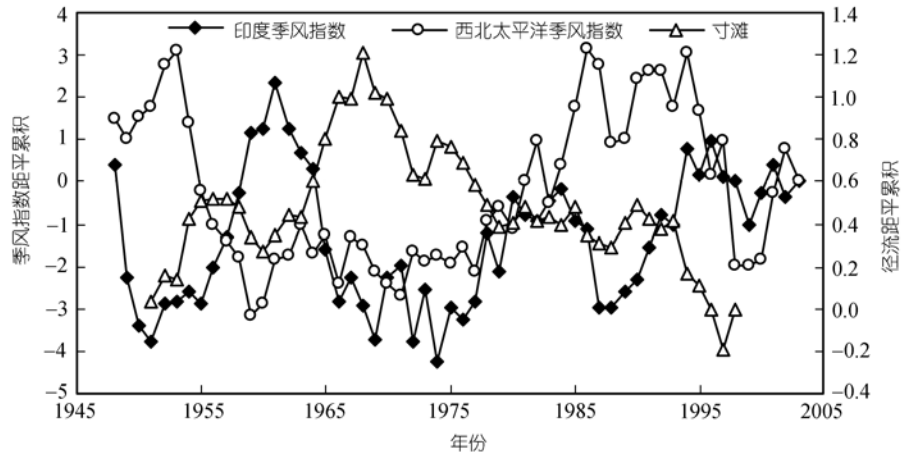


图 11 长江上游(寸滩站)年径流、西北太平洋和南亚夏季季风指数距平累积曲线比较



变化上,也表现在年际变化上.黄河径流的变化与西北太平洋季风指数的变化比较一致,表明黄河上游径流变化主要受东亚季风的影响,而新疆的径流同时受西风带和东亚季风的影响.新疆北部与雅鲁藏布江径流和降水变化的一致性意味着其同受西风带影响,西风带在遇到青藏高原后分为南北两支,其中新疆伊犁河主要受北支的影响,而雅鲁藏布江则受到南支的影响,这一推测有待今后的进一步论证.

### 参 考 文 献

- 1 Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *Int J Climatol*, 1996, 16: 361—377[DOI]
- 2 Hulme M, Osborn T J, Johns T C. Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observation with HadCM2 simulation. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 3379—3382[DOI]
- 3 Doherty R M, Hulme M, Jones C G. A gridded reconstruction of land and ocean precipitation for the extended Tropics from 1974—1994. *Int J Climatol*, 1999, 19: 119—142[DOI]
- 4 Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the USA. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1998, 79: 231—241[DOI]
- 5 Labat D, Godderiset Y, Probst J, et al. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Adv Water Resour*, 2004, 27: 631—642[DOI]
- 6 Peterson B, Holmes R, McClelland J, et al. Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *Science*, 2002, 298: 2171—2173[DOI]
- 7 叶柏生, 李翀, 杨大庆, 等. 我国过去 50 a 来降水变化趋势及其对水资源的影响(I): 年系列. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 587—594
- 8 刘春霖, 杨建青. 我国西南地区年径流变异及变化趋势研究. *气候与环境研究*, 2002, 7(4): 416—422
- 9 张国威, 吴素芬, 王志杰. 西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 183—187
- 10 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估. 北京: 气象出版社, 2003. 124
- 11 宋连春, 张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 143—148
- 12 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 157—164
- 13 叶柏生, 李翀, 杨大庆, 等. 我国过去 50 a 来降水变化趋势及其对水资源的影响(II): 月系列. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 100—105
- 14 Wang B, Wu R, Lau K M. Interannual variability of the Asian Summer Monsoon: contrasts between the Indian and the Western North Pacific-East Asian Monsoons. *J Clim*, 2001, 14(20): 4073—4090[DOI]
- 15 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送. *水科学进展*, 2005, 16(3): 432—438
- 16 叶柏生, 丁永建, 康尔泗, 等. 近 40 a 来新疆地区冰雪径流对气候变暖的响应. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29(增刊): 40—46
- 17 Ye B S, Yang D Q, Jiao K Q, et al. The Urumqi River Source Glacier No.1, Tianshan, China: changes over the past 45 years. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L21504, doi: 10.1029/2005GL024178
- 18 汤懋苍, 梁娟, 邵明镜, 等. 高原季风年际变化的初步分析. *高原气象*, 1984, 3(3): 76—82
- 19 王宁练. 青藏高原南部和北部暖季气温年代际变化差异的界限位置. *第四纪研究*, 2006, 20(2): 165—172