

# 1766-2000年黄河上中游汛期径流量波动特征 及其与PDO关系

潘 威<sup>1,2</sup>, 郑景云<sup>2</sup>, 满志敏<sup>3</sup>

(1. 云南大学历史地理研究所, 昆明 650091; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院  
陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 复旦大学历史地理研究中心, 上海 200433)

**摘要:** 利用清代黄河上中游3个站点的志桩尺寸记录, 通过建立回归模型反演了1766-1911年的逐年径流量, 重建了兰州、青铜峡和三门峡1766-2000年的逐年汛期径流量序列, 再结合河源段唐乃亥站1766-2000年的逐年径流量, 构建了河源—上游—中游4个站点的径流量序列, 这是目前利用历史文献记录能够获得的最为清晰的黄河径流量曲线。研究显示, 19世纪中期出现在黄河下游的沉重“河患”是由青铜峡—三门峡河段内的径流量突变所致, 而20世纪20年代的枯水时段从河源段到中游段都存在, 但其不是突变造成。同时, 研究也揭示出太平洋年代际振荡(PDO)与黄河上中游径流量在年代际尺度上存在着阶段性的反相位关系, 20世纪前期和中期, 8~16年尺度上在4个站点的径流量都有反相位关系出现; 在19世纪30-50年代, PDO与流量在4~6年尺度上的反相位关系在兰州和三门峡断面都较为明显。交互小波分析显示, PDO与黄河上中游汛期水量在8~16年尺度上存在着较为明显的反相关关系, 但只存在于三门峡和兰州断面。这一关系也许表明, 黄河上中游产流区的夏季降雨量与PDO的关系具有较为明显的时间和空间差异性。

**关键词:** 黄河; 气候变化; PDO; 径流量

DOI: 10.11821/dlxb201811001

## 1 引言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次气候变化评估报告中特别强调了海洋变化对于全球气候系统的重大作用, 海洋温度波动会驱动全球环境变化<sup>[1]</sup>。海洋温度波动目前存在着多种指标, 其中太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)指的是中北太平洋海温存在的年代际波动现象, 其本身也是气候系统内部变率的指标<sup>[2-4]</sup>。关于海温变化对气候影响的研究已经开展多年, 但相对气候系统而言, 厄尔尼诺与南方涛动(El Nino-Southern Oscillation, ENSO)和PDO等海温指标与水文变化关系的成果较少, 尤其在区域层面上PDO与河流水文关系, 目前学界对其认识仍旧有待深入<sup>[3-5]</sup>, 特别是在长时段背景下, 大型河流不同河段对于PDO的响应方式仍旧缺乏深入讨论, 这限制了学界对于“气候变化与水资源”关系的认识<sup>[5-7]</sup>。

目前河流古径流量(或历史径流量)的重建主要依靠树轮宽度进行, 这就将几乎所

收稿日期: 2017-11-07; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0605601); 国家自然科学基金项目(41401223) [Foundation: National Key Research & Development Program of China, No.2018YFA0605601; National Natural Science Foundation of China, No.41401223]

作者简介: 潘威(1981-), 男, 上海宝山人, 副研究员, 中国地理学会会员(S110008506M), 研究方向为历史自然地理、历史地理信息化。E-mail: panwei@snnu.edu.cn

有过去时代的流量重建结果限制在河源段,而中下游存在大规模人类活动的地区,缺乏进行历史径流量重建的代用资料<sup>[8-10]</sup>,因此有必要探索新的代用资料体系。以志桩尺寸记录 and 雨分寸记录为代表的清代档案资料能够弥补现有资料不足。其中,黄河志桩尺寸记录已经在多个研究中被使用,为系统研究近300年黄河上中游年际径流量变化过程打下了基础<sup>[11]</sup>。本文研究区域如图1所示。黄河作为中国北方最重要的地表径流系统,是中国西北和华北地区的经济社会得以发展的重要水资源<sup>[12]</sup>。对其长时段径流量的重建有助于了解黄河水文变化规律,为国家治黄战略提供长时段的水文变化数据。

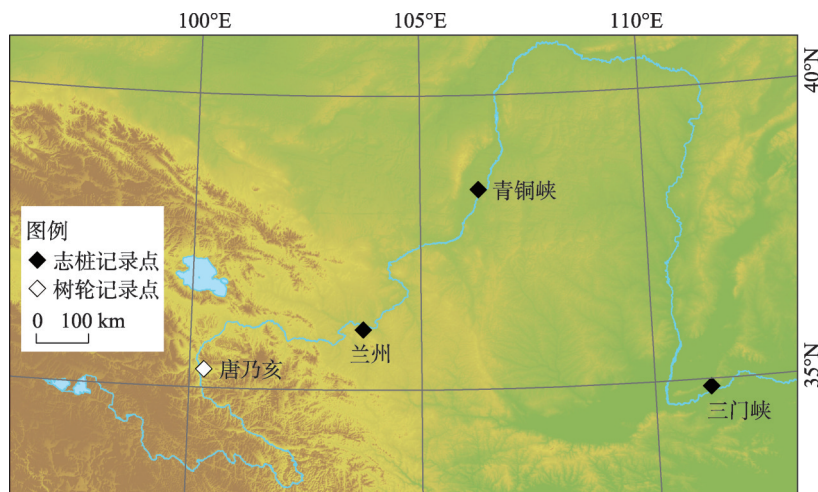


图1 研究区范围及数据来源

Fig. 1 Location of the research area and runoff control points

## 2 资料与方法

### 2.1 资料简介

**志桩尺寸记录:**明代水利学家万恭所著《治水筌蹄》中最早提出了布设黄河报汛站点的设想,清康熙年间开始在黄河沿岸的兰州、青铜峡、陕县和徐州等多处设置报汛站点。1766年(乾隆三十一年)之后,在江南河道总督李宏的主持下,每年汛期记录涨水高度,此类记录保留在清代河道总督及地方督抚奏报中,成为重建过去河流水文的宝贵资料<sup>[11]</sup>。目前,水位志桩的原始记录已经难以获得,所能见的记录主要保留在清代河道总督、直隶总督、两江总督以及河南、山东、江苏等地方官员的奏报中<sup>[13]</sup>(图2)。本文中需要强调的是兰州府城志桩记录的发现,这在之前的研究中都未被使用过,本套资料的整编复印件保存在甘肃省水利厅中。而其他站点的记录基本保存在黄河水利委员会档案室中。志桩分布如图1所示。

**雨分寸:**6-10月是华北各河流的主汛期时间,流域内雨量的多寡将直接影响到黄河中游流量的丰枯状况,黄河流域清代降雨量重建以“雨分寸”记录为最理想资料。“雨分寸”是清代地方官员向皇帝呈报的降雨情况,记载了雨水在农田中的入渗深度,由地方官员测量后通过奏折上报中央政府。1736年(乾隆元年)之后的记录最为系统。本区“雨分寸”以西安、太原、运城、临汾、洛阳5点的资料最为理想,郑景云等已经得出了1736年以来黄河中下游地区的逐年降水量序列<sup>[14]</sup>。本文特别使用了各站点夏秋两季(6-10月)的降雨量数据。重建的降雨量数据可以用来补充志桩记录的缺漏年份,具体研究

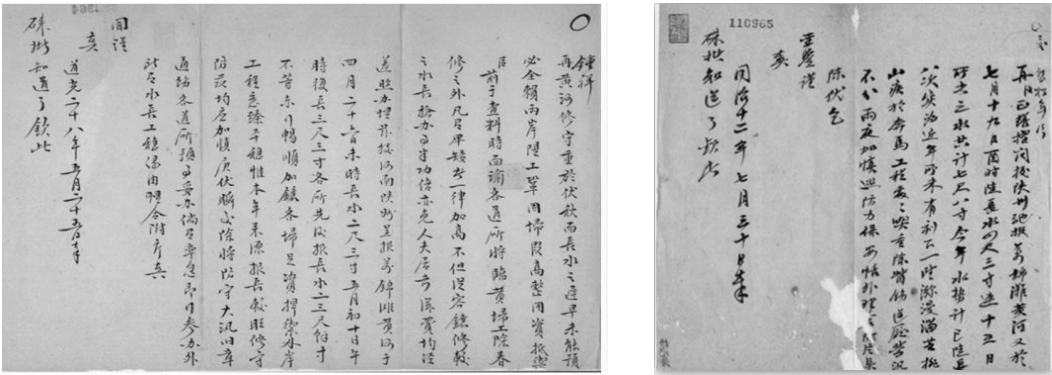


图2 保留在清代奏折中的志桩尺寸记录

Fig. 2 The 2 copies of Zhi-Zhuang-Chi-Cun reports

方法可参见潘威等<sup>[1]</sup>。

近现代器测水文记录：黄河上中游的现代水文器测记录开始于20世纪10年代，本文中使用了黄河上中游共65个站点（名称略）的水文记录，包括了水位、流量、流速、含沙量、降雨量等多种指标。由于这一阶段黄河上中游没有大型水利工程的扰动，故而是建立天然状态下径流量（m<sup>3</sup>/s）—累积涨水高度（m）、径流量（m<sup>3</sup>/s）—降雨量（mm）回归方程最主要的资料。

PDO指数序列：本文使用的PDO指数序列来源为Gedalof等利用北美太平洋区域的树木年轮重建的1600-1997年的PDO序列<sup>[14]</sup>。1998-2000年数据则采用了Mantua等<sup>[2]</sup>提出的指数，数据来源为<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>。

2.2 重建方法

本文所采用的4站点数据中，唐乃亥断面1766-2000年时段数据来自于勾晓华等<sup>[8]</sup>，该研究利用青海省阿尼玛卿山区祁连圆柏重建了过去1200余年的年际径流量序列。该序列与黄河河源段的唐乃亥水文站流量具有很好的对应关系，可以很好满足本文研究时段内河源段的径流量数据需求。

兰州、青铜峡径流量主要依靠其汛期径流量—累积涨水高度关系进行重建，将清代志桩尺寸记录的汛期涨水高度换算为汛期径流量，潘威等<sup>[1]</sup>运用这一方法进行三门峡的历史径流量重建，获得了比较好的效果。兰州断面则使用了1930-1958年间的水文记录，用以表现未明显受人工水利工程影响下，黄河上游河段的径流量—水位关系（图3a）。青铜峡在清代称为峡口，史辅成等<sup>[16-17]</sup>曾经根据累积涨水高度—径流量的回归关系重建过其

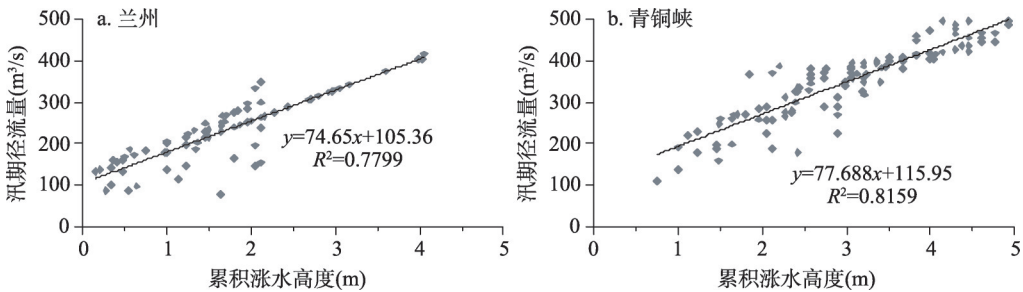


图3 兰州和青铜峡断面涨水高度和径流量关系

Fig. 3 The relationship between the flood height accumulation and runoffs in Lanzhou (a) & Qingtongxia (b)



清代部分年份的径流量数值,其通过建立涨水高度和汛期径流量的思想在本文中被继承。利用近期收集的志桩尺寸记录弥补了之前研究中由于资料缺失造成的数据缺失年份,修正了因为记录缺失造成的数据不全;同时,本文进一步确认了史辅成等<sup>[16-17]</sup>所提出模型的正确性。

三门峡站点的重建方法则来自于潘威等<sup>[11]</sup>。其中本断面使用了降雨量—径流量模型对序列进行了插补,其中降雨量数据来源于文献<sup>[15]</sup>,其具体操作方法可参考潘威等<sup>[11]</sup>。需要说明的是,潘威等<sup>[11]</sup>提出了利用兰州断面流量对三门峡断面4 m以下累积涨水高度数据的重建方法,这部分数据在整个三门峡的志桩记录中占比为7%左右。本文中继续使用了兰州断面与兰州—三门峡断面产流量求和,用此进行三门峡断面数据插补。兰州断面径流量是本文重建结果。

### 2.3 分析方法

本文中使用了Mann-Kendall (M-K) 检验、小波和交互小波等分析方法。

**M-K 检验:** M-K 检验方法的优点在于计算时不需要样本遵循一定的分布规律,也不受少数异常值的干扰。在给定的 $\alpha$ 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计量 $Z > 0$ 表示上升趋势; $Z < 0$ 表示下降趋势。双边检验中,在给定的 $\alpha$ 置信水平上,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ ,则表明序列存在明显的趋势变化,本文选择的置信水平是 $\alpha = 0.05$ 。Z值的计算是按照顺时间序列和逆时间序列分别计算 $Z_1$ 和 $Z_2$ 。若此两条曲线出现交点,且交点在临界直线之间,那么交点对应的的时间就是突变开始的时间<sup>[6]</sup>。

**小波分析:** 本方法目前广泛应用于序列周期性的检验,小波是一种特殊的长度有限、平均值为0的波形,倾向于不规则和不对称。小波分析中的时间尺度因子可反映小波的周期长度;而时间位置因子可反映时间上的平移。利用连续小波变换系数可以求得小波功率谱(global wavelet spectrum, GWS),用于描述序列在多时间尺度上的能量分布<sup>[7]</sup>。

**交互小波:** 小波互相关分析方法(wavelet cross-correlation, WCC)能够实现在特定时间尺度和指定时滞下对两个非平稳时间序列互相关关系的定量描述,可以很好地用于研究和揭示各水文要素的相互关系<sup>[7]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 径流量重建结果

根据以上步骤,本文获得了1766-2000年黄河上中游4个站点的径流量序列(图4)。各站点在资料上相互独立,基本不存在记录之间的相互影响<sup>[11]</sup>,所以,各序列具有较好的可比性,这为揭示黄河上中游水量的分段变化格局提供了良好的基础数据。

图4是各站点径流量与PDO的比较。从图4反映的情况来看,本文可以得到以下几点认识:

(1) 研究时段内,唐乃亥、兰州、青铜峡和三门峡汛期径流量平均值分别为199.38  $\text{m}^3/\text{s}$ 、268.32  $\text{m}^3/\text{s}$ 、333.26  $\text{m}^3/\text{s}$ 和533.30  $\text{m}^3/\text{s}$ 。变差系数Cv揭示出各站点径流量数值变化的稳定程度,Cv值分别为0.219、0.175、0.199和0.213(通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验),可以发现唐乃亥和三门峡具有相对较高的不稳定性,这可能说明黄河河源段和黄土高原段对于气候变化具有更强的敏感性。唐乃亥由于位处黄河河源段,其汛期水量补给包括冰雪融水和降雨,因此,温度和降雨的改变都会影响本断面的汛期水量大小<sup>[8]</sup>;而三门峡断面,特别是青铜峡—三门峡区间,其水量主要来源于黄土高原汾河、渭河两大水系的补给,此区域降雨具有较大的年际差异,由此导致三门峡断面水量的不稳定。

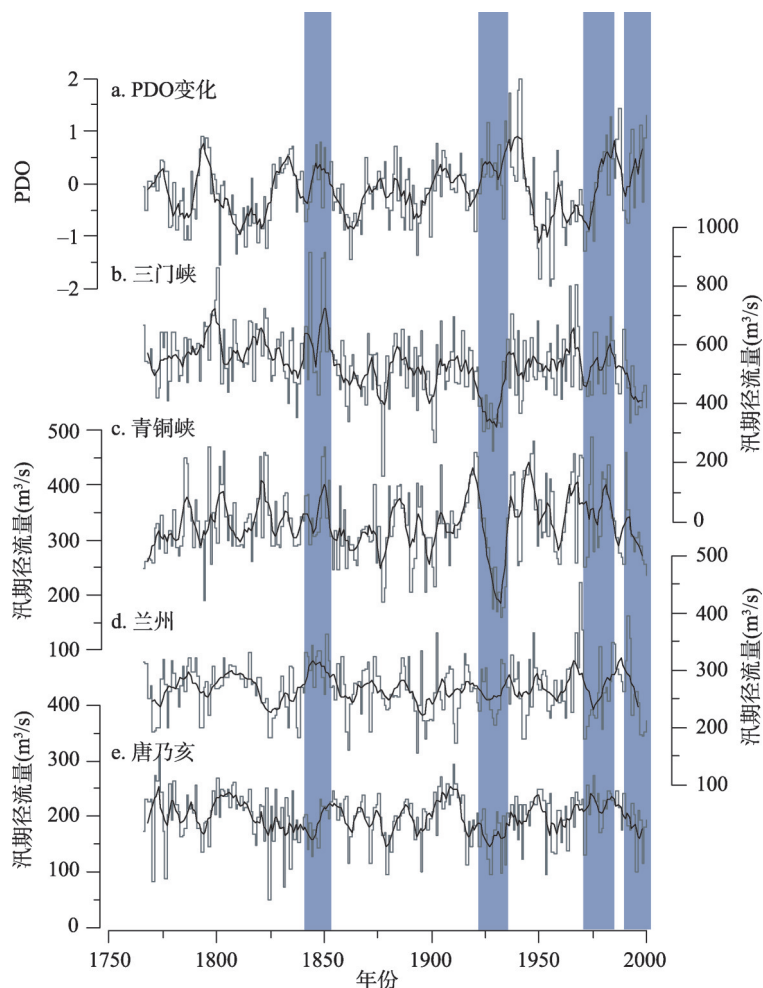


图4 1766-2000年黄河上中游4站点汛期径流量与PDO变化(细线为年际波动,粗线则为9a滑动平均)

Fig. 4 The runoffs over the upper-middle reaches of the Yellow River and PDO, AD1766-2000

(The gray slim line means annual data, the black thick line means 9-year moving average)

(2) 19世纪40-50年代,青铜峡到三门峡之间的黄河区段流量突然增大(其原因很可能是黄土高原地区暴雨增多),由此导致了三门峡以下河段遭遇了大规模的连续洪峰,这一阶段是19世纪20-50年代(大致相当于清道光时期),这一时期的历史文献记录大量出现了黄河洪灾的记录,比如1842年的祥符大水、1843年的中牟大水等,致使豫东皖北等地区出现严重洪涝灾害(《清宣宗实录》)。观察图4和图5可以发现,这几次水灾都是黄河三门峡站点汛期流量的峰值。但这次突变在其他站点中并未被发现,因此,可以推断,在19世纪中期,黄河在青铜峡—三门峡区间很可能有一次突然的暴雨增多过程,导致三门峡断面出现异常的大规模洪峰。可以认为道光时期的“河患”首先是黄土高原暴雨量突然增大的结果;黄河上中游河段水量的突变时间是关系河流水文变化的关键性时间节点,在大概近300年中,三门峡以上3个站点都显示出18世纪中后期是一个上游径流量普遍存在突变的时段(图5),而这一变化应该并未影响到三门峡断面;而唐乃亥和兰州在20世纪60年代和90年代的突变在青铜峡和三门峡河段都没有反映出来;而19世纪40年代中期出现在三门峡断面上突变点在以上河段也不存在,Liu等<sup>[12]</sup>在2012年

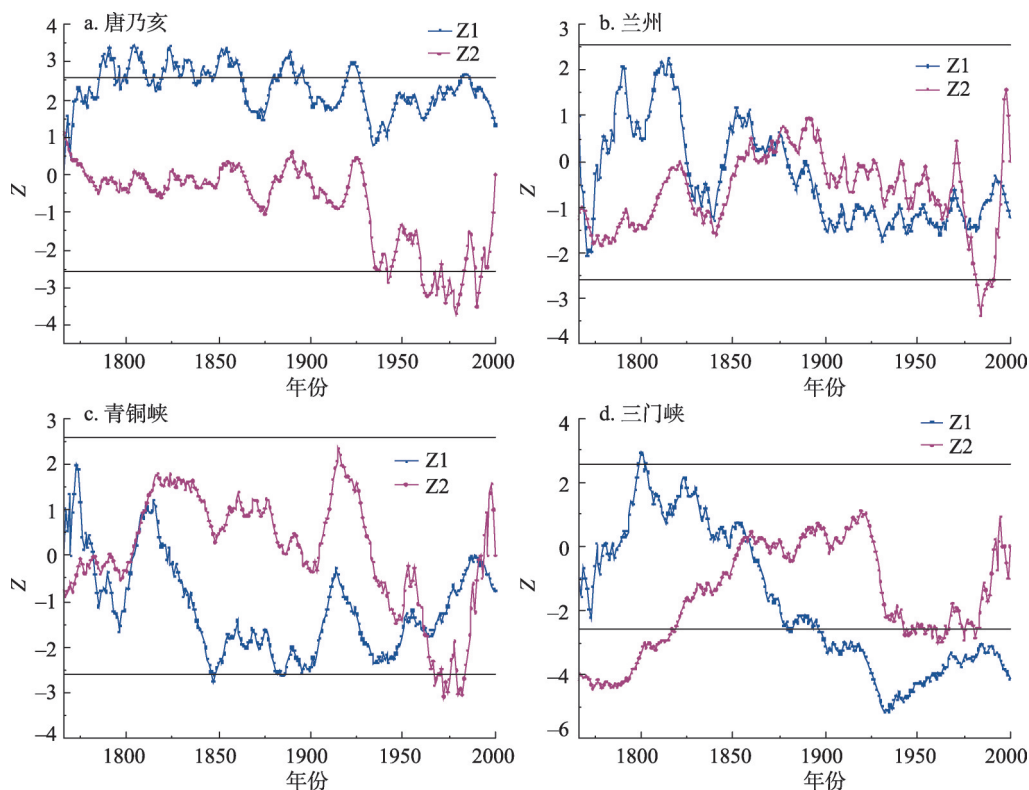


图5 针对径流量序列和PDO的M-K检验结果

Fig. 5 The M-K of discharge at various stations (a. Tangnaihai; b. Lanzhou; c. Qingtongxia; d. Sanmenxia)

的研究中使用M-K方法分析了20世纪50年代以来黄河上中下游6个站点的流量突变情况,其中认为唐乃亥在1993-1994年存在流量的突然减少(变幅为-17%),这一点在本文中被证实,1993-1994年不仅在近60年中是一次突变,在近240年中同样是一次重要的突变。Liu的研究还识别出1985-1987年存在着从兰州到利津多个站点的突变现象,平均变幅达到-40.72%<sup>[12]</sup>,本文中可以发现,这段时间的突变放在1766年以来的黄河上中游变化中,只有唐乃亥和兰州还存在突变。青铜峡和三门峡断面在这一阶段虽然都出现了流量减少的现象,但并不是突变现象。

### 3.2 径流量与PDO关系

图6a和6b是针对4站点径流量序列和PDO序列进行小波分析的结果,从中可以发现上中游径流量波动和PDO普遍存在着4~6年周期,但其时间分布情况并不一致,两者并非完全同步,19世纪50年代前后,PDO与三门峡都有4~6年周期,其他时段对应关系并不明显,因此,径流量的4~6年周期并不是对应于PDO的4~6年波动。这一点和M-K检验的结果具有一定的一致性。一些研究在判断PDO与径流量关系时,似乎没有特别关注两者周期在分布时间段上的不一致性,这很可能在一定程度上影响了前人的研究结论<sup>[18]</sup>。

为了进一步明确PDO与上中游径流量之间在不同时间尺度上的关系,本文使用了交互小波分析,试图揭示两者之间的关系。

通过图7可以发现,PDO与黄河上中游不同站点的径流量之间的关系是具有阶段性,虽然在逐年尺度上两者的关系不明显,但通过交互小波分析可以发现,在2~4年的多年尺度和8~16年的年代际尺度上两者的反相关关系最为明显。PDO与径流量的年代际



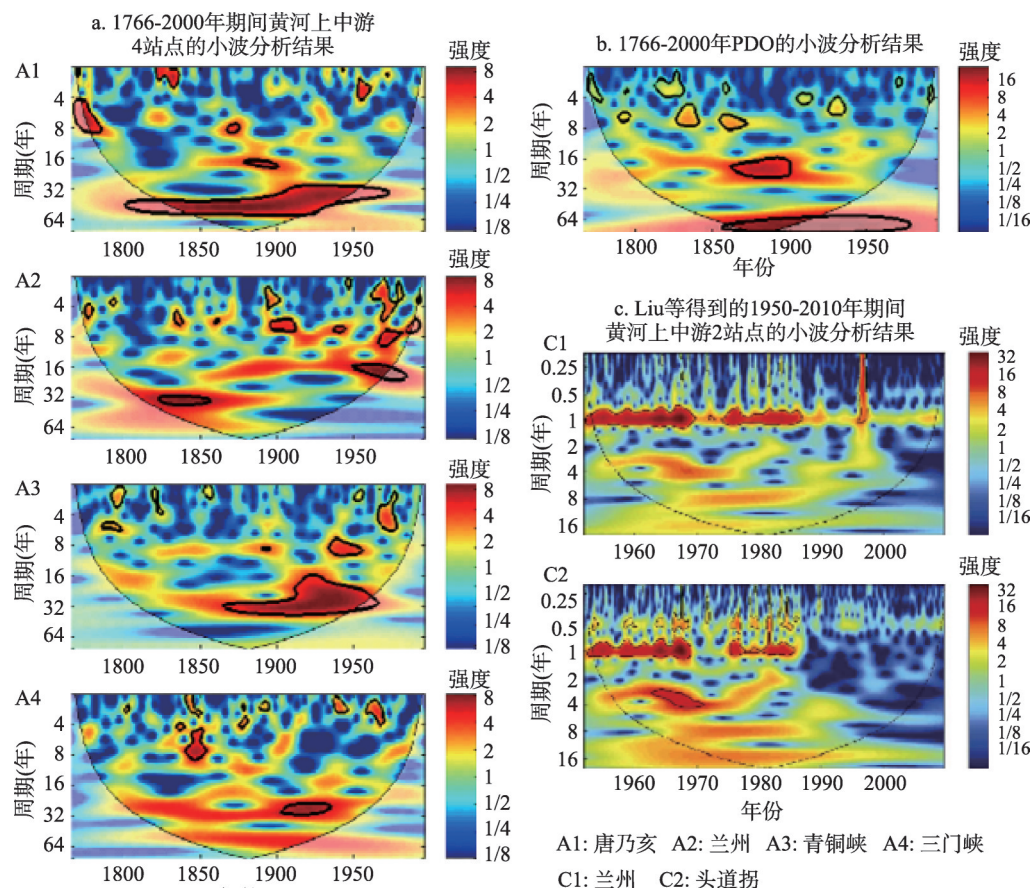


图6 黄河中上游小波分析显示的周期特征

Fig. 6 The cycling by Wavelet analysis (a: The runoffs of 4 stations since 1766, A1: Tangnaihai, A2: Lanzhou, A3: Qingtongxia Gorge, A4: Sanmenxia Gorge; b: PDO; c: The runoffs of 2 stations during 1950-2010 by Liu, C1: Lanzhou, C2: Toudaoguai)

反相位关系在很多研究中都有所揭示,在中国包括石羊河上游、长江下游和海河上游等河段,根据树轮、文献和器测记录在不同的气候区都得到了PDO与径流量具有年代际尺度上的反相位关系<sup>[18-21]</sup>。从本文研究来看,至少在黄河上中游,这一反相位关系也是存在的,但是具有时间上的阶段性,在空间上也存在差异性。

在本研究区内,兰州和三门峡断面的反相位关系相对唐乃亥与青铜峡断面更为明显。20世纪前期和中期,8~16年尺度上在4个站点的径流量都有反相位关系出现;在19世纪30-50年代, PDO与流量在4~6年尺度上的反相位关系在兰州和三门峡断面都较为明显,这一情况较为特殊。在三门峡断面出现的PDO与径流量在多年尺度上的反向关系也许说明PDO参与了这段时间黄河中游洪峰的频繁出现。而同样位于黄土高原地区的永定河卢沟桥以上河段,其汛期流量与PDO的年代际尺度上的反相位关系在过去250年中是持续且稳定的,至少在时间上没有明显的阶段性。当然,目前对于海温与径流量关系的机制解释还较为薄弱,很难构建两者之间的关系链条,这一点需要更多实证性的研究揭示两者的关系<sup>[3, 22-23]</sup>。

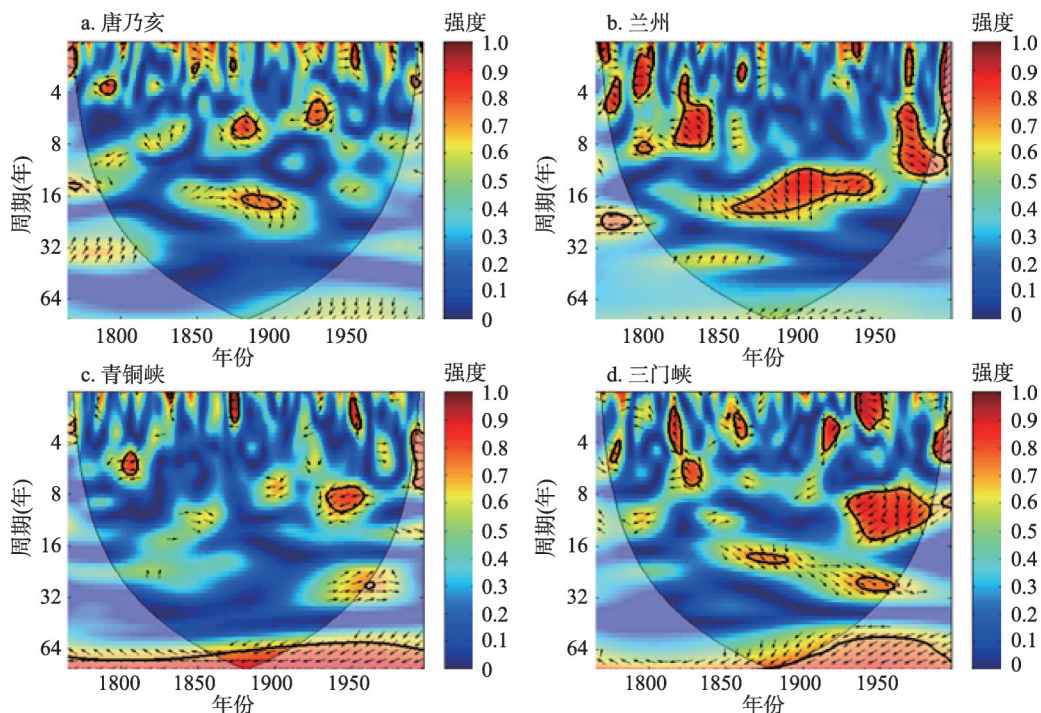


图7 1766年以来黄河上中游径流量与PDO的交互小波分析结果

Fig. 7 The wavelet power spectrum of discharge at various stations of Yellow River since 1766

## 4 结论与展望

(1) 研究时段内, 黄河上中游径流量变化具有较明显的差异性; 天然状态下, 上中游流量变化不存在较为明显的一致性。突变时间点的出现在历史上就不是同步的, 从长时段来看黄河上中游的径流量变化存在着各自独立的现象, 20世纪70年代以来各河段流量同时减少是非常特殊的现象, 至少在本文讨论的时间范围内是唯一现象。

(2) 从本文研究所得结论来看, PDO与黄河上中游径流量的相关性是阶段性的, 不存在特别明显的线性关系, 但区域差异性较为明显, PDO与黄河上中游径流量的反相位关系主要体现在年代际尺度上, 兰州和三门峡断面对PDO的变化在年代际尺度上相对敏感。制定黄河水资源战略时, 应该注意到黄河不同区段对同一环境背景的响应方式所存在的差异。

(3) 19世纪中期黄河下游的多次大规模洪涝灾害, 是中游径流量突然增大的结果。19世纪中期是道光皇帝执政, 清朝统治迅速衰败。这一时期, 中国东部多个地区出现了大规模洪涝灾害, 特别是人口众多的华北平原、太湖流域, 水灾带来了巨大的财政和社会损失。其中华北平原的豫东地区在1840年代连年受黄河决口引起大规模涝灾, 中央财政花费巨资解决黄河问题, 极大加剧了道光时期中央政府的财政困境。黄河下游的大规模泛滥成灾正对应于本文所揭示的三门峡断面径流量突变时期, 这表明在黄土高原出现了降雨量的突然增大。道光时期中国的衰落确实有气候变化因素的参与。

(4) 目前, 基于不同资料来源重建的黄河多站点长时段径流序列虽然取得了一定的进展, 但是在数据辨析方面还需要进行进一步的工作, 以明确各序列的不确定性, 由此



才能在将来实现数据的整合, 为深入研究黄河径流量的长时段时空变化特征提供基础的数据支持。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2014: The Scientific Basis, 2014.
- [2] Nathan J. Mantua, Steven R. Hare, Yuan Zhang, et al. A pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(6): 1069-1079.
- [3] Ren Guoyu, Jiang Tong, Li Weijing, et al. An integrated assessment of climate change impacts on China's water resources. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 772-779. [任国玉, 姜彤, 李维京, 等. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析. *水科学进展*, 2008, 19(6): 772-779.]
- [4] Li Fengping, Zhang Guangxin, Dong Liqin. Studies for impact of climate change on hydrology and water resources. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(4): 457-464. [李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述. *地理科学*, 2013, 33(4): 457-464.]
- [5] Xia Jun, Liu Chunzhen, Ren Guoyu. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China. *Advances in Earth Science*, 2010, 26(1): 1-12. [夏军, 刘春蓁, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战. *地球科学进展*, 2010, 26(1): 1-12.]
- [6] Wang Guoqing, Wang Yunzhang, Shi Zhonghai, et al. Analysis on water resources variation tendency in the Yellow River. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 25(5): 396-400. [王国庆, 王云璋, 史忠海, 等. 黄河流域水资源未来变化趋势分析. *地理科学*, 2001, 25(5): 396-400.]
- [7] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467: 43-51.
- [8] Gou Xiaohua, Deng Yang, Chen Fahu, et al. The reconstruction based on tree-rings and analysis of runoffs in the upper reaches of the Yellow River during the past 1234 years. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(33): 3236-3243. [勾晓华, 邓洋, 陈发虎, 等. 黄河上游过去 1234 年流量的树轮重建与变化特征分析. *科学通报*, 2010, 55(33): 3236-3243.]
- [9] Kang Lingling, Niu Yuexian, Wang Jinhua, et al. Rebuilding the natural runoff series in the nearly 500 years at the Lanzhou Station in up stream of Yellow River. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2007, 18(4): 5-8. [康玲玲, 牛越先, 王金花, 等. 黄河上游兰州站近 500 年天然径流量序列重建. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(4): 5-8.]
- [10] Wang Jinhua, Su Fuyan, Kang Lingling, et al. The changing characters and predating of the runoff over the upstream of the Yellow River at Lanzhou Station in the nearly 520 years. *Yellow River*, 2009, 31(10): 71-73. [王金花, 苏富岩, 康玲玲, 等. 黄河兰州站 520 年汛期径流变化规律及预测. *人民黄河*, 2009, 31(10): 71-73.]
- [11] Pan Wei, Zheng Jingyun, Xiao Lingbo, et al. The relationship of nature run-off changes in flood-season of middle Yellow River & Yongding River, 1766-2004. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 975-982. [潘威, 郑景云, 萧凌波, 等. 1766 年以来黄河中游与永定河汛期径流量的变化. *地理学报*, 2013, 68(7): 975-982.]
- [12] Liu F, Chen S L, Dong P, et al. Spatial and temporal variability of water discharge in the Yellow River Basin over the past 60 years. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(6): 1013-1033.
- [13] Zhuang Hongzhong, Pan Wei. The research of the flood-height recording by Qing government: Based on Wanjintan, Henan. *The Qing History Journal*, 2016(2): 87-99. [庄宏忠, 潘威. 清代志桩及黄河“水报”制度运作初探: 以陕西万锦滩为例. *清史研究*, 2016(2): 87-99.]
- [14] Ze'ev Gedalof, Dan J S. Interdecadal climate variability and regime-scale shifts in Pacific North America. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(8): 1515-1518.
- [15] Zheng Jingyun, Hao Zhixin, Ge Quansheng. The changes of precipitation over the middle and lower reaches of the Yellow River during the past 300 years. *Science in China: Series D*, 2005, 35(8): 765-774. [郑景云, 郝志新, 葛全胜. 黄河中下游地区过去 300 年降水变化. *中国科学: D 辑*, 2005, 35(8): 765-774.]
- [16] Shi Fucheng, Mu Ping, Gao Zhiding. The reconstruction of run-offs in Qingtongxia Gorge during 1736-1912 AD. *Yellow River*, 1990, 12(4): 27-29. [史辅成, 慕平, 高治定. 青铜峡志桩考证及历年水量估算. *人民黄河*, 1990, 12(4): 27-29.]
- [17] Shi Fucheng, Yi Yuanjun. The Survey and Study for the Flood of Yellow River in History Era. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2002. [史辅成, 易元俊. 黄河历史洪水调查, 考证和研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.]
- [18] Hou Ying. The reconstruction of climate and run-offs changing over the upper-reaches of Shiyanghe River in past 300

- years [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. [侯迎. 基于树轮资料重建石羊河上游历史时期气候与径流量变化 [D]. 兰州: 兰州大学, 2011.]
- [19] Hamlet A F, Lettenmaier D P. Columbia River streamflow forecasting based on ENSO and PDO climate signals. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 1999, 125(6): 333-341.
- [20] Zhang Rui, Wang Yaping, Pan Shaoming. Response of discharges from Changjiang River on Pacific decadal oscillation in the past 50 years. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(5): 572-577. [张瑞, 汪亚平, 潘少明. 近 50 年来长江入海径流量对太平洋年代际震荡变化的响应. *海洋通报*, 2011, 30(5): 572-577.]
- [21] Pan Wei, Xiao Lingbo, Yan Fangfang. The study for relationship between PDO and the streamflow of Yongdinghe River (Lugouqiao) since 1766 AD. *Journal of Chinese Historical Geography*, 2013, 28(1): 127-133. [潘威, 萧凌波, 闫芳芳. 1766 年以来永定河汛期径流量与太平洋年代际振荡. *中国历史地理论丛*, 2013, 28(1): 127-133.]
- [22] Verdon D C, Franks S W. Long-term behaviour of ENSO: Interactions with the PDO over the past 400 years inferred from paleoclimate records. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(6): 272-288.
- [23] Liu Xiaodong, An Zhisheng, Fang Jiangang, et al. Possible variations of precipitation over the Yellow River Valley under the global-warming conditions. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(5): 513-519. [刘晓东, 安芷生, 方建刚, 等. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化. *地理科学*, 2002, 22(5): 513-519.]

## Reconstruction of runoffs over Upper-Middle Reaches of Yellow River and its relationship between PDO since AD 1766

PAN Wei<sup>1,2</sup>, ZHENG Jingyun<sup>2</sup>, MAN Zhimin<sup>3</sup>

(1. Institute of Historical Geography, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Center for Historical Geographical Studies, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** This study, through establishing the regression model, inverts the annual runoff of 1766-1911 AD, builds up and improves the annual runoff series of 1766-2000 AD in flood season in Lanzhou, Qingtongxia and Sanmenxia by using the records of water level stake of three gauge stations in the Upper-Middle Yellow River (UMYR) in the Qing Dynasty. Combining the annual runoff of 1766-1911 AD at Tangnaihai Station in riverhead reach, the study builds the runoff series of four stations at the riverhead and UMYR, which is presently the clearest runoff curve of the Yellow River by historical records. According to the research, the heavy "river disaster" that appeared in the lower Yellow River in the mid-19th century was caused by sudden changes of the runoff at the Qingtongxia-Sanmenxia section. Drought period of the river in the 1920s existed from the riverhead to the middle reach, but it was not caused by sudden changes. Meanwhile, the study also reveals that PDO and the runoff of the UMYR had a periodic inverse phase relationship on the interdecadal scale. In the early and mid-20th century, the runoff of the four stations had an inverse phase relationship on the scale of 8-16 years. In the 1830-1850s, the inverse phase relationship between PDO and flow on the scale of 4-6 years was more obvious at Lanzhou-Sanmenxia section. According to the interactive wavelet analysis, there is a significant inverse correlation between PDO and the amount of water in the UMYR on a scale of 8-16 years, but only at the Sanmenxia-Lanzhou section, suggesting that the relationship between summer rainfall in the UMYR and PDO had obvious temporal and spatial differences. (1) During the study period, the change of runoff flow in the UMYR had obvious differences; On the natural state, there was no obvious consistency in the

flow change of the UMYR. The occurrence of sudden change time point was not synchronous in history. In the long term, the runoff change of the UMYR had a unique phenomenon. The simultaneous reduction of flows of each reach since the 1970s is a special phenomenon, at least it is the only phenomenon discussed in this study within this time range. (2) It is concluded that the correlation between the PDO and runoff in the UMYR is periodic and there is no special obvious linear relationship, but regional differences are more obvious. The inverse correlation between PDO and runoff in the study reaches is mainly on a decadal scale. The Lanzhou-Sanmenxia section is relatively sensitive in the face of the change of the PDO on the decadal scale. When formulating the water resources strategy of the Yellow River, we should notice the differences in the response of different sections to the same environmental background. (3) In the mid-19th century, many large-scale floods in the lower reach resulted from the sudden increase of runoff in the middle reach. In the reign of Emperor Daoguang of the mid-19th century, the Qing Dynasty declined rapidly. During this period, large-scale flood disasters occurred in many parts of eastern China, especially in the populous North China Plain and Taihu Basin. The flood brought huge financial and social losses. Among them, eastern Henan of North China Plain suffered from the flood disaster in successive years by burst of the Yellow River in the 1840s, and the central government spent a huge amount of money to solve the problem of the river, which greatly aggravated the financial difficulties in that period. The large-scale flood in the lower Yellow River corresponds to the period of sudden change of runoff flow in Sanmenxia section revealed by this research, which indicates the sudden increase of rainfall in the Loess Plateau. Climate change was deeply involved in China's decline and depression during the reign of Daoguang. (4) Although some progress has been made in reconstruction of multi-site and long-time runoff series of the Yellow River based on different materials, further work is needed in data analysis so as to make clear the sequences of uncertainty, thus enabling the integration of data in the future to provide basic data for further research on long-time spatial and temporal change of runoff of the Yellow River.

**Keywords:** Yellow River; climate change; PDO; runoffs