

近50年来黄河入海水沙通量变化的多尺度分析*

王海龙^{1,2} 李国胜¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 基于利津站近50年来的水沙通量资料, 利用功率谱、交叉谱和小波分析对黄河入海水沙通量的多尺度变化特征进行了研究. 谱分析结果显示, 黄河入海水沙通量呈现明显的年际和年代际变化特征. 径流量和输沙量在2.11, 2.53, 4.75和12.67a的时间尺度上具有显著的相关关系, 年代际变化尺度上输沙量滞后于径流量1.76a左右. 通过小波分析发现: 20世纪70年代之前黄河入海水沙通量强度大且年际与年代际变化特征明显, 而其后各种时间尺度的变化呈减弱趋势; 水沙通量多尺度振荡的直接原因是黄河上中游流域降水量的周期性变化, 而根本原因是西太平洋副热带高压的年际(准两年)和年代际振荡, 且流域降水量多尺度振荡的递减特征导致了黄河入海水沙通量多尺度变化幅度的减弱趋势. 黄河入海泥沙通量多尺度变化的强弱与三角洲淤进速率的快慢基本吻合.

关键词 水沙通量 尺度分析 小波变换 黄河 渤海

黄河是季节性多泥沙河流. 据利津站统计, 黄河年平均入海输沙量(1950—1985)高达1.049 Gt, 占汇入渤海泥沙总量的90%以上^[1], 成为黄河三角洲迅速建造的主要物质基础, 影响着黄河三角洲及其周边海岸的发育^[2,3]. 黄河三角洲、渤海湾与莱州湾的海岸演变, 以及渤海的生态环境的变化是河-海体系相互作用达到动态平衡的结果^[4]. 然而, 20世纪70年代以来由于流域因素和人类活动的影响, 使得黄河下游河道连年断流、入海水沙通量持续锐减^[5], 对渤海的海陆相互作用、动力环境以及生态环境造成了很大的影响^[6,7]. 迄今为止, 大部分研究工作侧重于分析黄河入海水沙通量变化的影响因素^[5], 关于这种变化的规律以及成因尚无探讨. 为了科学地研究渤海海域陆海相互作用, 必须对黄河入海水沙通量的多时间尺度变化特征以及变化趋势进行深入研究.

1 数据分析方法和资料来源

尺度分析一般都是利用快速 Fourier 变换将时间信号在谱空间展开, 将时间序列的总能量分解为不同频率的分量, 根据不同频率分量的方差贡献来确定时间序列的主要周期, 即时间序列隐含的显著周期, 比如功率谱分析, 交叉谱分析等. 而交叉谱分析还可以确定两个样本序列在频率上的相关关系, 即在哪个频率分量上具有最大的交叉能量.

小波变换(wavelet transform^[8])是一种窗口大小固定但其形状可改变, 时间窗和频率窗都可改变的时-频局域化分析方法, 即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率. 反之, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率, 所以被誉为数学显微镜. 正是小波变换的这种特性, 使得它对信号具有自适应性. 小波分析除了可以实现多分辨分析之外, 在地球物理资料的处理中还可以提取具有物理意义的最缓慢的变化部分, 即信号

2005-12-02 收稿, 2006-05-08 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40271020, 40571020)

E-mail: wanghl@igsrr.ac.cn

的趋势性分析. 小波分析在降水^[9]和水文资料^[10]的多时间尺度变化研究中得到广泛的应用与证明.

文中所讨论的黄河入海水沙通量均指黄河入海口口门区的水沙通量. 所获取的原始资料为利津站水沙观测资料, 主要来源于水文统计年鉴. 由于受资料来源的限制, 文中资料主要由两部分组成: 一部分是年平均水沙资料, 时间跨度为1950—1997年; 另一部分是月平均资料, 径流量资料时段为1950年7月—1997年12月, 而泥沙通量资料时段为1950年7月—1985年6月. 通过对利津站和口门区这两个位置上近年来输沙量资料的对比分析^[11], 本文将利津站的观测资料乘一系数(相应时段内口门区输沙量与利津站输沙量的比值)进行调整作为入海泥沙通量. 而径流量数据采用利津站观测值. 然后计算口门区水沙资料的距平标准化值, 以此作为讨论分析的对象.

2 黄河入海水沙通量的功率谱分析和交叉谱分析

功率谱和交叉谱分析分别可以得到每个时间序列的主要变化周期以及两个时间序列之间显著相关的变化周期. 径流量和输沙量功率谱分析的结果显示于图1, 两者谱峰值所对应的变化周期基本上相近, 都存在明显的年代际和年际变化特征. 具体而言, 径流量的显著变化周期是8.00和2.91a; 输沙量的显著变化周期是10.67, 4.57和2.66a, 这些变化尺度都通过了显著性水平为0.05的红噪声检验.

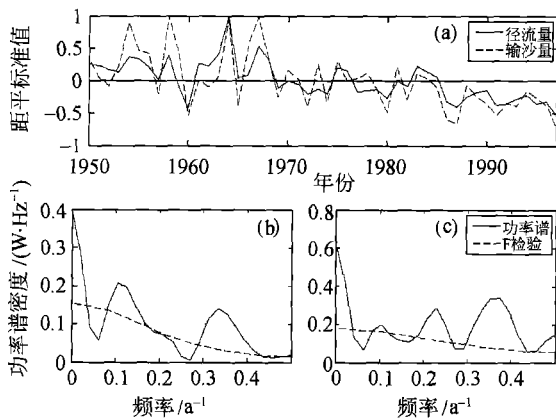


图1 径流量和输沙量功率谱分析的结果

(a) 年平均水沙通量时变图; (b) 径流量的功率谱分析;
(c) 输沙量的功率谱分析

径流量和输沙量功率谱之间的显著区别是, 径流量功率谱峰值的极大值位于年代际变化尺度上, 而输沙量功率谱峰值的极大值位于2.66a的年际变化尺度上.

对年平均水沙资料序列进行交叉谱分析, 样本总体数量为48, 选取20a作为最大落后长度, 自由度 $\nu=4.55$, 显著性水平 $\alpha=0.05$. 表1中列出了凝聚谱的几个峰值, 对应的时间变化尺度分别是2.11, 2.53, 4.75, 12.67a, 即这几个变化尺度上径流量和输沙量相关程度比较高. 根据交叉谱分析过程中的参数设定, 上述几个显著周期所对应的 F 检验值分别是34.62, 95.00, 15.85, 20.77, 而 $F_{0.05}=4.74$, 满足显著性检验的要求. 因此上述几个振动周期上的凝聚是显著的, 即径流量和输沙量在上述几个振动周期上具有显著的相关关系.

表1 黄河入海水沙通量的交叉谱分析

波数 k	周期 $T(k)/a$	凝聚谱 $R_{xy}^2(k)$	位相谱 $\Theta_{xy}(k)$	落后时间长度谱 $L(k)/a$
3	12.67	0.86	-0.87	-1.76
8	4.75	0.82	0.07	0.05
15	2.53	0.97	0.03	0.01
18	2.11	0.91	-0.32	-0.11

表1中给出的位相谱和落后时间长度谱分别对应各个波动周期上径流量和输沙量之间的位相差和时间长度差. 在年代际变化尺度(12.67a)上, 输沙量落后径流量1.76a左右. 而2.11a变化尺度上, 输沙量落后于径流量0.11a左右, 在2.53和4.75a变化尺度上, 径流量落后于输沙量0.01和0.05a. 总体而言, 在年际变化尺度上, 径流量变化的位相与输沙量变化的位相相差不大; 而年代际变化尺度上, 径流量要比输沙量提前1.76a.

3 黄河入海水沙通量的小波分析

为了提取更为详细的时-频空间的变化信息, 对黄河入海水沙月平均资料进行小波分析, 从而研究水沙通量的多时间尺度变化特征. 小波函数有多种形式, 这里采用地球物理领域中常用的Morlet小波对水沙通量资料进行分析^[8].

图2(a)是黄河入海径流量的小波变换系数在时间和周期上的分布, 反映了不同时间上同一周期振荡以及同一时间上不同周期振荡的强弱程度. 由图2(a)可以看出, 黄河入海径流量存在3种明显的时

间变化尺度: 1.17, 4.20 和 14.80a, 由于资料长度的限制, 没有考虑周期大于 20a 的变化. 另外在 1953—1970 年、1975 年以及 1983 年这 3 段时间里, 年变化信号显著, 其他时期年变化相对较弱. 1955—1966 期间年际变化较大, 而其他时间段内年际变化较弱. 年代际变化在 20 世纪 70 年代之前比较显著, 而其后呈明显的减弱趋势. 综合分析图 2(a) 所反映出的各种变化尺度, 可以看出 1976 年前后是黄河入海径流量变化的一个分水岭, 之前 3 种时间尺度的变化都比较明显, 之后都呈明显减弱趋势.

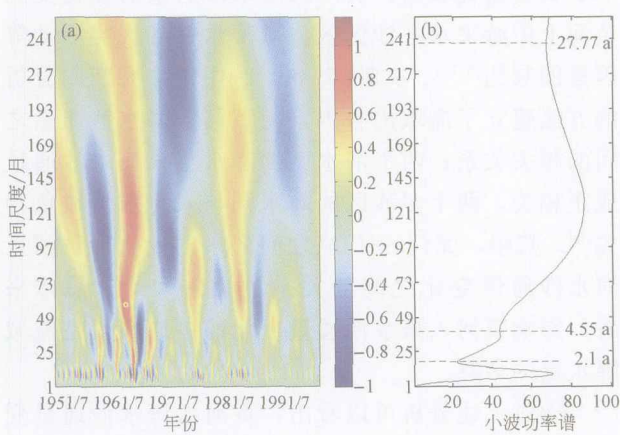


图 2 月平均径流量的小波分析结果
(a) 小波变换系数的时-频分布图;
(b) 小波功率谱随时间尺度变化示意图

图 2(b) 表示径流量的小波功率谱在时间尺度上的分布, 表示不同时间尺度上小波方差贡献的大小. 年代际变化的小波方差最大, 因此年代际变化是径流量最主要的变化特征. 年际变化的中心尺度为 4.2a, 年代际变化的中心尺度为 14.8a. 根据图 2 (b) 来重构径流量 3 种时间尺度的变化信号: 利用时间尺度为 0.08—2.1a 的变化成分来重构径流量的年变化, 利用 2.1—4.55a 的变化成分来重构径流量的年际变化, 利用 4.55—27.77a 的变化成分来重构径流量的年代际变化. 通过对重构信号的分析可以看出(图 3), 黄河入海径流量的年际和年代际变化在 20 世纪 70 年代前比较显著, 黄河入海径流量在 1956—1971 期间比较强. 重构的 3 种尺度波动的波形中, 波峰和波谷分别代表相应时段内该尺度上信号正负位相的大小. 小波趋势分析的结果显示黄河入海径流量总体上呈降低趋势(图 3(e)).

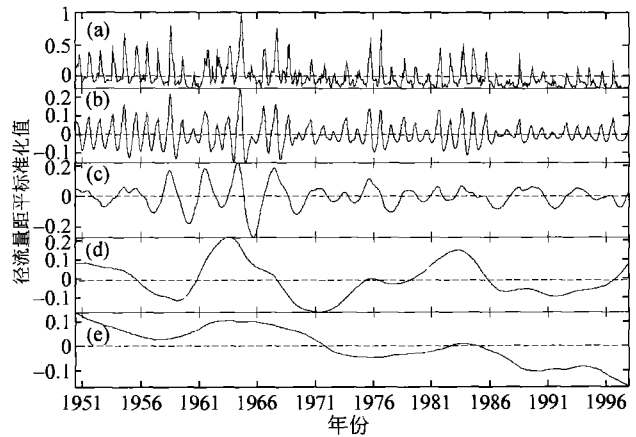


图 3 月平均径流量的时变图
(a) 标准化时间序列; (b) 重构的年变化信号; (c) 重构的年际变化信号; (d) 重构的年代际变化信号; (e) 趋势性分析信号

图 4(a) 是黄河入海泥沙通量的小波变换系数在时间域和频率域上的分布, 反映了不同时间和不同周期上泥沙通量变化的强弱程度. 与径流量的结果相比, 其变化强度明显弱了许多. 由图 4(a) 可以看出, 黄河入海泥沙通量的变化主要位于 3 种时间尺度上: 1.17, 3.85, 12.25a. 由于资料长度的限制, 没有考虑周期大于 20a 的变化. 黄河入海泥沙通量的年代际变化呈减弱趋势, 20 世纪 70 年代后这个周期的振荡变得越来越弱(图 4(a)). 另外在 20 世纪 50—70 年代期间, 还存在比较明显的 5a 周期的变化信号. 年变化在 1953—1961 和 1963—1968 这两个时段内较强.

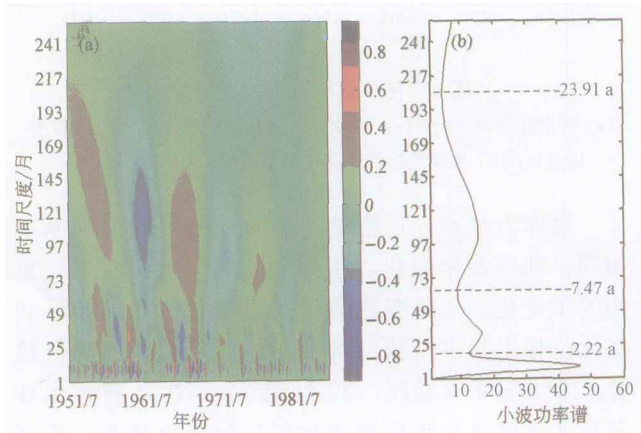


图 4 月平均输沙量的小波变换结果
(a) 小波变换系数的时-频分布图;
(b) 小波功率谱随时间尺度变化示意图

图4(b)是输沙量的小波功率谱在时间尺度上的分布,表示不同时间尺度上小波能谱的大小.输沙量最主要的变化周期是年际变化,它所对应的小波能谱的谱值最大.输沙量年际变化的中心尺度为3.85a,年代际变化的中心尺度为12.25a.根据图4(b)的结果来重构输沙量3种时间尺度的变化信号:利用时间尺度为0.08—2.22a的变化成分来重构年变化信号,利用2.22—7.47a的变化成分来重构年际变化,利用7.47—23.92a的变化成分来重构输沙量的年代际变化.重构的年际和年代际变化信号显示于图5(c), (d), 1976前后是黄河入海泥沙通量变化的一个分水岭.20世纪70年代之前黄河入海泥沙通量在这3个时间尺度上的变化都很显著,改道清水沟流路之后黄河入海泥沙通量的年际和年代际变化趋缓,这种变化规律在图4(a)中也非常明显.小波趋势分析显示该时段内黄河入海泥沙通量呈明显的降低趋势(图5(e)).

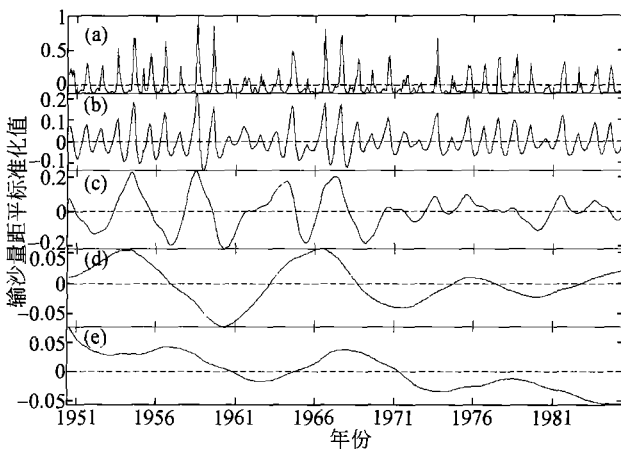


图5 月平均输沙量的时变图

(a) 标准化时间序列; (b) 重构的年变化信号; (c) 重构的年际变化信号; (d) 重构的年代际变化信号; (e) 趋势性分析信号

总体上来看,径流量和输沙量的变化周期基本相同,都存在年变化、年际变化和年代际变化.重构的年变化、年际变化和年代际变化信号的波形和变化位相也基本一致,水沙通量都呈明显的降低趋势.此外还可以发现,20世纪70年代之前的水沙通量的强度大且年际变化和年代际变化显著,而其后水沙通量及其各种尺度的变化信号都逐渐减弱.径流量变化中小波系数和小波功率谱的极值均集中在年代际变化上,而输沙量的中心变化尺度集中在

年际变化上,这与功率谱分析结果基本一致.

4 讨论

通过上述分析,初步得到了黄河入海水沙通量的多尺度变化特征.然而与此密切相关的两个科学问题还需要进行探讨:这种多尺度变化,尤其是年际变化和年代际变化的成因是什么,这种变化对黄河三角洲附近海岸线的冲淤有何影响.

4.1 黄河入海水沙通量多尺度变化成因

大量研究表明,黄河入海水沙通量的变化受到黄河上中游来水来沙源区流域降水量和人类活动等因素的制约^[5,12].文献[5]和[12]中用多元回归分析的方法建立了流域内各因素与黄河入海水沙通量之间的相关关系:两个清水区的降水与入海水沙通量成正相关,两个多沙区的降水则与入海水沙成负相关^[5].其中,龙门-三门峡之间降水的变化与黄河入海水沙通量变化之间的关系最为密切^[12].总体来看,影响黄河入海水沙通量变化的主要因素是流域降水量的多寡.

通过上述分析可以看出,黄河入海水沙通量变化主要包含两种时间尺度的显著周期:年代际变化(12.67a)和年际变化(如2.11, 2.53, 4.75a).西太平洋副热带高压是影响我国夏季降水的最重要的大气环流系统之一,我国夏季降水的3种类型与西太平洋副热带高压环流形势和东亚西风带环流形势关系密切^[13].对20世纪后半期降水量资料的分析表明我国降水量存在比较强烈的年代际变化特征^[14],变化周期基本上介于11—22a之间,这与太阳活动、西太平洋副热带高压活动的周期基本一致^[15].由此可判断,太阳活动和西太平洋副热带高压的年代际振荡控制了黄河流域降水量的年代际变化,从而形成了黄河入海水沙通量的年代际变化特征.

西太平洋副热带高压的形态、南北位置和东西位置具有不同的组合,所以夏季降水的年际变化呈现不同的周期^[13].研究表明,20世纪后半期西太平洋副热带高压的位置呈现准两年振荡的特点,因此黄河部分流域的降水也呈现准两年的振荡周期^[16].另外,西太平洋副热带高压对我国西部高原地区的降水变化具有重要影响,对青藏高原东部北侧降水变化也具有较大贡献,西太平洋副热带高压西伸

时,冷暖气流在黄河长江上游交汇,形成多雨年^[17].由此可见,西太平洋副热带高压的准两年振荡控制了黄河流域降水量的年际变化,从而导致黄河入海水沙通量呈现不同时间长度的年际变化特征.

要探究水沙通量多尺度振荡幅度减弱的原因,参考青藏高原北部青海区1962—1999年降水资料的小波分析结果^[14]与1951—1995年青藏高原季风指数序列和降水距平资料的小波分析结果^[15],计算结果均显示20世纪70年代之后青藏高原降水和季风指数的多层次振荡都呈逐渐减弱的趋势,因此导致了黄河入海水沙通量多尺度振荡的强度呈递减趋势.此外,由于黄河上中游降水等因素的变化以及人类活动的影响,20世纪70年代之后黄河入海水沙通量呈逐年递减的趋势,原始信号的衰减使得水沙通量信号多尺度振荡的幅度也呈减弱趋势.

4.2 黄河入海泥沙通量与三角洲岸线淤进之间的关系

黄河三角洲海岸线的蚀淤是一个具有现实意义的科学问题.过去几十年中,基于水深测量和遥感反演等方法,地貌学家已经对这个问题开展了大量的研究工作.然而,对蚀淤速率变化的分析以及解释尚属空缺.本文通过上述尺度分析可知,黄河入海泥沙通量具有年代际和年际变化周期,这种变化

必然会对黄河三角洲附近的造陆运动产生周期性影响.因此,借用输沙量小波分析的结果对相应时段内黄河三角洲海岸线淤进速率的变化进行分析讨论.

因为无法得到1976年前黄河行钩口河入海时段内的钩口河口附近的海岸线变迁;而黄河改道清水沟流路之后,钩口河附近的岸线蚀退无法反映黄河入海泥沙通量的变化情况,所以这里只讨论1976—1995之间入海泥沙通量的尺度变化与现行黄河三角洲附近岸线变迁之间的关系.海岸线信息提取采用的是一般高潮线法,它可以清晰地反映出黄河三角洲地区海岸线的演变过程(图6(b))^[3].

分析的5个时间在小波系数时-频图(图6(a))中做了标记,图6(b)中也标注了相应时间的海岸线位置.可以看出,1976—1985年,黄河入海泥沙通量基本上处于年代际变化的正位相区间,而在1985—1995年处于年代际变化的负位相区间.这说明在前一个时段内,黄河入海泥沙相对多年平均值而言有盈余;反之,在后一个时段内泥沙通量小于多年平均值.反映在海岸线变迁上,可以发现在1976—1981—1985时段内,黄河三角洲迅速向海突进;而在1985—1989—1995期间,黄河三角洲缓慢淤进.小波分析得到的黄河入海泥沙通量多尺度变化与海岸线淤进速率的快慢基本吻合.

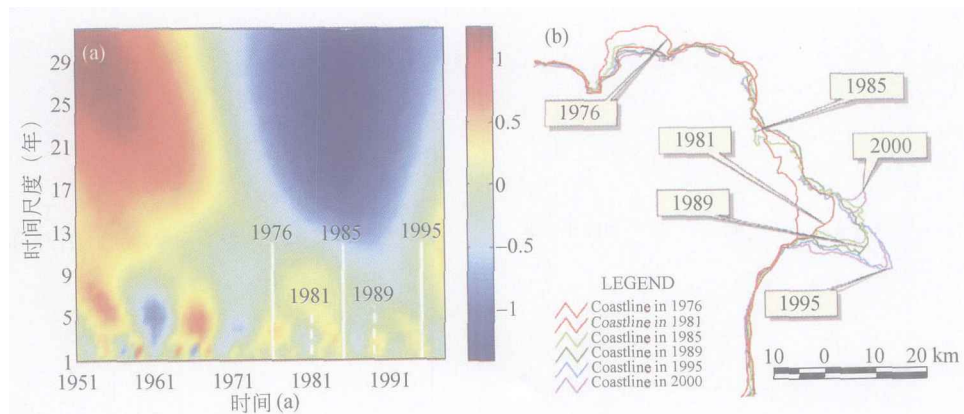


图6 小波系数时-频图及相应时间的海岸线位置

(a) 年平均输沙量小波变换系数的时-频分布图; (b) 1976—2000年期间黄河三角洲海岸线变迁示意图^[3]

5 结论

径流量和输沙量都具有明显的年际和年代际变

化周期.径流量的中心变化为年代际变化,而输沙量的中心变化为年际变化.径流量和输沙量在2.11, 2.53, 4.75和12.67a的时间尺度上具有显著相关

关系. 在年代际变化尺度上, 输沙量落后于径流量 1.76a 左右. 除了上述结论, 本文通过小波分析还发现 20 世纪 70 年代之前黄河入海水沙通量较强且多尺度变化特征显著, 而其后呈逐渐减弱趋势. 西太平洋副热带高压准两年周期的振荡和年代际振荡, 是黄河入海水沙通量呈现年际和年代际变化周期的根本原因, 而直接原因是黄河上中游流域降水量的变化, 且流域降水多尺度振荡的递减特征导致了黄河入海水沙通量多尺度变化也呈逐渐减弱的趋势. 小波分析得到的黄河入海泥沙通量的多尺度变化与海岸线淤进的速率的快慢基本吻合.

参 考 文 献

- 秦蕴珊. 渤海地质. 北京: 科学出版社, 1985, 50—115
- 叶青超. 黄河三角洲的形成与演变. 海岸工程学术会议论文集(上). 北京: 海洋出版社, 1982, 152—164
- 常 军. 基于 RS 和 GIS 的黄河三角洲海岸线动态变化监测与模拟预测研究. <http://www.yrdsd.com/habq/index.htm> [2004-08-20]
- 王 颖, 张永战. 人类活动与黄河断流及海岸环境影响. 南京大学学报, 1998, 34(3): 257—271
- 许炯心. 流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响. 中国科学, D 辑, 2004, 34(8): 775—781
- 吴德星, 牟 林, 李 强, 等. 渤海盐度长期变化特征及可能的主导因素. 自然科学进展, 2004, 14(2): 191—195
- 吴德星, 林霄沛, 鲍献文. 渤海动力环境研究应关注的新问题. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 685—688
- Emery W J, Thomson R E. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Natherland: Elsevier, 2001, 501—516
- 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究. 中国科学, D 辑, 2004, 34(12): 1176—1183
- 王文圣, 丁 晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望. 水科学进展, 2002, 13(4): 515—520
- 钱意颖, 叶青超, 周文浩. 黄河干流水沙变化与河床演变. 北京: 中国建材工业出版社, 1993, 160—202
- 许炯心, 孙 季. 近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响. 水科学进展, 2003, 14(6): 690—695
- 赵振国, 蒋伯仁, 陈国珍, 等. ENSO 事件与青藏高原积雪和东亚大气环流的可能联系. 山东气象, 1999, 19(4): 1—8
- 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. 大气科学, 2002, 27(2): 157—170
- 马振锋, 高文良. 青藏高原季风年际变化与长江上游气候变化的联系. 高原气象, 2003, 22(Suppl): 8—16
- 陈兴芳, 宋文玲. 近 10 年我国降水的 QBO 分析. 应用气象学报, 1997, 8(4): 469—476
- 王晓春, 吴国雄. 中国夏季降水异常空间模与副热带高压的关系. 大气科学, 1997, 21(2): 161—169