

\*\*\*\*  
综合  
治理  
\*\*\*\*

# 变化环境下黄河中下游洪涝灾害发展新趋势

耿思敏<sup>1,2</sup>, 严登华<sup>2</sup>, 罗先香<sup>1,3</sup>, 郑晓东<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中水水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 在自然与人类活动共同影响下, 黄河中下游流域水循环多过程发生变化, 影响了洪涝灾害的成灾模式和发展趋势。采用 Morlet 小波分析和趋势分析方法, 对黄河中下游流域洪涝灾害现状、降水丰枯周期变化、降水强度和频率等进行了分析。结合社会经济发展、水沙关系和凌汛形成机制, 剖析了黄河流域洪涝灾害的孕灾环境、致灾因子强度和承灾体脆弱性变化特征。结果发现, 黄河流域洪涝灾害发展有如下新形势: 黄河流域洪涝灾害整体呈现加重态势; 支流和小流域洪涝灾害态势严峻; “小水大灾”频繁发生, 损失惨重; 凌汛灾情趋于缓和。

**关键词:** 黄河中下游流域; 洪涝灾害; 水沙关系; 凌汛

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0188-04

中图分类号: TV122

## New Evolution Tendencies of Flood Disasters Under Changing Environment in Middle and Lower Reaches of the Yellow River

GENG Si-min<sup>1,2</sup>, YAN Deng-hua<sup>2</sup>, LUO Xian-xiang<sup>1,3</sup>, ZHENG Xiao-dong<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100038, China; 3. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology of the Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract:** The processes of water cycle in the middle and lower reaches of the Yellow River change under the combined effects of climate change and human activities, which impacts flood disaster modes and evolution tendencies. Status of flood disasters, as well as wet and dry cycle, frequency and intensity of precipitation in the area are analyzed using Morlet wavelet and trend analysis. The variations of hazard inducing environment, disaster causing factors and vulnerability of hazard bearing body are analyzed in combination with social and economic development, relations between water and sediment and mechanisms of ice floods. Finally, new evolution tendencies of floods are identified; floods in the area will be more serious on the whole, especially in tributaries and small watersheds; floods with low peak discharge may result in heavy losses; and ice floods tend toward mitigation.

**Keywords:** middle and lower reaches of the Yellow River; flood disaster; water and sediment relation; ice flood

洪涝灾害在世界范围内是各种自然灾害中造成损失最大的自然灾害之一, 全球每年洪涝灾害损失占灾害总损失的 40%<sup>[1]</sup>。我国由于独特的地理和气候条件, 人口大部分集中在江河中下游平原易受洪涝灾害威胁的地区, 这些地区工农业总产值占全国的 70%<sup>[2]</sup>, 每年因洪涝灾害造成的经济损失占国民经济总产值的 3.5%左右<sup>[3]</sup>, 并且还在不断扩大<sup>[4]</sup>。

黄河流域上中游地区的水能资源、中游地区的煤炭资源、中下游地区的石油和天然气资源都十分丰

富, 在全国占有极其重要的地位, 被誉为我国的“能源流域”, 同时也是我国重要的农业生产基地。然而, 流域的社会经济和生态环境安全一直以来深受洪涝灾害的威胁; 随着黄河流域经济的迅速发展和城市化进程加剧, 洪涝灾害的致灾特性和承灾体脆弱性变化迅速, 对国民生产生活 and 生命财产的危害不断增加。

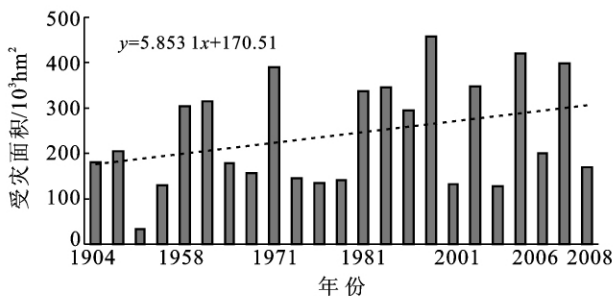
洪涝灾害是在孕灾环境、致灾因子和承灾体相互作用下形成的。气候变化包括气候的自然节律和人类活动的影响两部分。气候变化和人类活动推动成

灾模式发生变化,导致洪涝灾害呈现出新的发展形势。黄淮海流域洪涝灾害问题是我国洪涝灾害问题的集中体现,研究它们的趋势变化,对我国防洪除涝有很大的借鉴意义。本文以1900年以来黄河流域洪涝灾害特征的变化趋势为基础,分析了中下游39个气象站点1951—2009年的降水变化,结合Morlet小波分析对未来降水的丰枯情况进行预测,总结了成灾模式的变化趋势,得出气候变化和人类活动共同影响下洪涝灾害发展新形势,并提出相应的应对措施。

## 1 气候变化对洪涝灾害成灾模式的影响

### 1.1 黄河流域洪涝灾害损失现状

洪涝灾害损失数据来源于“全国灾情信息”,“全



国水情年报”,“水旱灾害公报”和“中国洪涝灾害统计年鉴”<sup>[5-12]</sup>。

从1900—2009年黄河流域洪涝灾害受灾面积变化趋势图(图1)可以看出,黄河流域洪涝灾害受灾面积以及洪涝灾害造成的经济损失都呈增加趋势。承灾体对洪涝灾情的响应程度反映在价值总量和承灾能力两方面。一方面,随着社会经济的快速发展,承灾体的价值总量大大提高(2000—2006年,黄河流域GDP增长了24.6%<sup>[13]</sup>),受灾基数增大,各类资产的经济损失增长速度与资产增长速度基本同步;另一方面,部分水利工程老化现象严重,设备陈旧,其中不乏已超期,超负荷运行现象,承灾能力下降。承灾体特性的变化导致黄河流域洪涝灾害损失愈加严重。

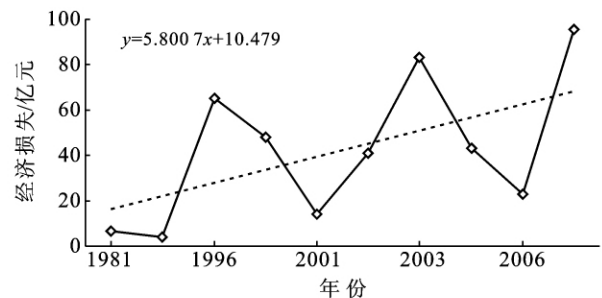


图1 洪涝灾害受灾面积和经济损失变化趋势

### 1.2 气候变化对致灾因子——降水的影响

气候变化使降水过程发生变化,降水异常并不一定引起洪涝灾害,年降水量变化与受灾面积变化趋势也不一定相同<sup>[14-15]</sup>;洪涝灾害的损失情况,除与降水有关外,还受其他因素的影响。但是降水异常却是促使洪涝灾害成灾模式发生变化的重要因素。以下采用泰森多边形的方法,将黄河流域中下游各站点的日降水量转换为流域的面降水量,基于此,对中下游流域的年降雨量、降雨周期及丰枯预测、降雨日数、降雨强度、极端降雨事件发生频率进行趋势分析。

数据来源于“中国气象数据共享服务网”的日降水量数据集,并通过Fortran程序进行处理。

1.2.1 降水丰枯周期及突变分析 对黄河中下游流域年降水距平序列做Morlet小波变换,图2清晰地显示了年降雨量的时间尺度变化和突变点分布。黄河中下游流域降水存在4a左右、6a左右、18a左右、48a左右为中心的丰枯变化周期,由18a尺度的小波变换系数变化过程可以看出,1950—2009年存在3个正位相,分别为1957—1969,1981—1991,2003年至今,表示降雨量偏多;3个负位相,分别为1950—1956,1970—1980,1992—2002年,表示降雨量变少;旱涝突变点在1957,1969,1981,1991和2003年。2010年

以后在18a尺度上中下游流域降水将偏多。由48a尺度的小波变换系数变化过程可知,存在1953—1983年的多雨期和1984—2009年的少雨期,突变点为1983年。2010年以后在48a尺度上降雨量偏多,进入丰水期。

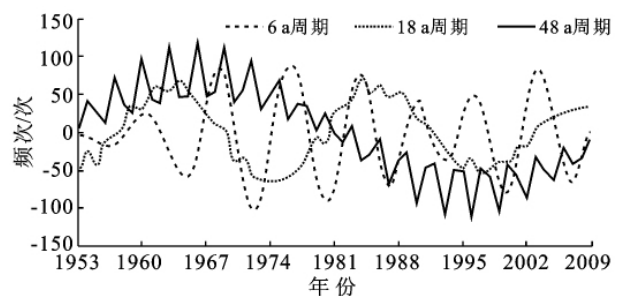


图2 年降水量Morlet小波变换实部的变化过程

1.2.2 降水频率和强度变化 24h降雨量大于250mm的降雨过程称为特大暴雨。从图3看出,黄河中下游流域有雨日呈显著减少态势,而特大暴雨日数和24h最大降雨量呈增加趋势明显。雨日的减少使年内降水更加集中,极端降雨事件频率和强度的增加导致降水过程线更加陡峭,使发生洪涝灾害的风险加大,致灾因子加强,洪涝灾害更加严重。

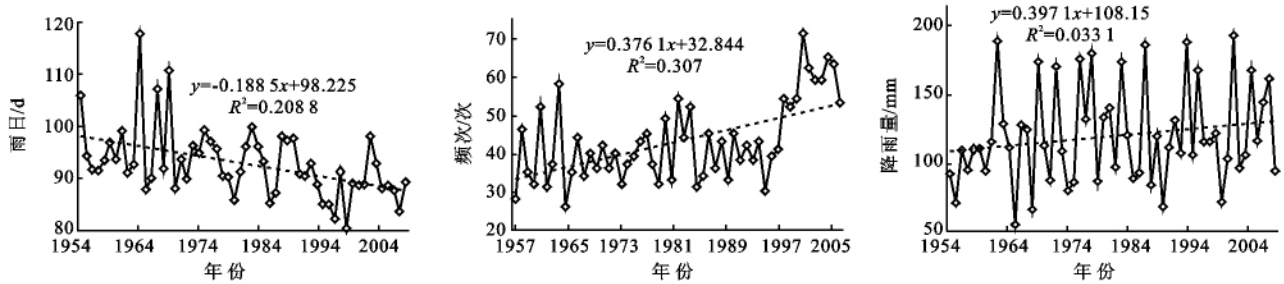


图 3 有雨日、特大暴雨频率和 24 h 最大降雨量变化趋势

### 1.3 气候变化对黄河下游凌汛形成的影响

黄河中下游凌汛具有突发性、难预测、难防治的特点。凌汛的形成受 3 大因素控制：热力、动力和河势。黄河下游河道由北纬  $35^{\circ}$  左右过渡到北纬  $38^{\circ}$  左右，由于其纬度差异大，日均温上下河段差异  $3 \sim 4^{\circ}\text{C}$ ，上段气温高，回升早且快，下段气温低、回升晚且慢，是凌汛形成的热力因素；水位抬升、水流速度和水沙蓄泄等水流作用，是黄河中下游凌汛形成的动力因素；黄河流经中游携带大量泥沙，河床抬升，形成悬河；河道海拔落差小，比降只有  $0.1\%$ ，中游龙门至潼关段和下游河道由窄深逐渐变为宽浅，浅滩弯道较多。这些河道特征为卡冰、形成冰坝、淌凌等的发生创造了有利的河势条件。在气候变化下，黄河中下游流域的热力、动力和河势 3 大因素相互制约，相互转化，共同影响凌汛的形成过程、淌凌密度和流量大小。

以黄河下游的济南天桥段为例，在气候变化的大背景下，河道下段济南市近 10 a 呈现冷湿趋势，河道上段郑州市呈现暖湿趋势，并且温差逐渐增大，使得黄河下游凌汛呈现新的特点和趋势：封河日期提前，1999 年以前封河日期主要在 1 月，而 2000 年以后封河日期一般在 12 月；2000 年以来，下游河道首次封河时间提前 5 d 左右，最迟开河时间提前 14 d 左右，平均封冻时间缩短了 4 d，凌汛总体上呈现缓和态势<sup>[16]</sup>。

## 2 黄河水沙关系变化对洪涝灾害成灾模式的影响

就较短时间尺度而言，气候变化对大流域的水沙关系产生的影响是有限的，而人类活动对流域下垫面侵蚀、产沙、输沙环境的改变，是河流水沙关系变化的主要原因。1980 年气候变化明显以来至 2002 年，渭河年均泥沙含量增加了 90 多倍，汉江的减少趋势，说明气候变化对秦岭山脉南北地质水文气候环境影响很大，秦岭南北两区在全球气候变化中表现出明显的区域响应性<sup>[17]</sup>。

黄河流域尽管在水土保持等措施的影响下，来沙

量大量减少，但河槽淤积速率并没有降低，洪水水位抬高的速率加快。尤其是 1987 年以来黄河下游出现连续枯水现象，加上三门峡、小浪底等水库的调节作用，洪峰与洪量减小，泥沙的输送动力减弱导致泥沙在下游河道大量淤积。水流挟带的泥沙含量较高，会明显加大洪峰流量，而且高含沙水流不稳定，使洪峰陡涨陡落，对防洪十分不利<sup>[17]</sup>。泥沙淤积导致河道防洪排涝能力降低，水库和湖泊调洪能力下降，增加洪涝灾害风险水平。泥沙在河道淤积降低了河道的泄洪能力，抬高洪峰水位，靠加高堤防来保持一定的防洪标准，但不断加高堤防，又使致灾能量不断积累，若决堤，灾情更加严重；另一方面，不断累加的河床与周围地面高差，造成排洪除涝沟渠入河困难<sup>[14]</sup>。如金堤河，由于河床淤积和堤防不断加高，河道之间发育大片的易涝洼地<sup>[18]</sup>。流域的平原湖泊多为外流型淡水湖<sup>[19]</sup>，由于湖泊水动力条件较河流小得多，河流带来的泥沙大部分堆积下来，降低湖泊调蓄能力。黄河中游水库淤积严重<sup>[20]</sup>，黄河干流刘家峡以下 7 座大型水库库容损失  $48.5\%$ <sup>[17]</sup>，与库容和年均入库沙量体积之比有显著正相关关系。黄河下游泥沙淤积不仅取决于中游泥沙的数量，而且取决于泥沙的粒径组成<sup>[21]</sup>。造成黄河下游淤积的泥沙，主要是粒径大于  $0.05\text{ mm}$  的粗质泥沙<sup>[22]</sup>；来自粗沙区的泥沙，每吨淤积量为  $0.455\text{ t}$ ，而来自细沙区的泥沙，每吨淤积量仅为  $0.154\text{ t}$ ，是粗沙的  $1/3$ <sup>[23]</sup>。随着黄河中游降雨量的减少和风沙活动的减弱，河流全沙输沙量和粗沙比有不同程度的减少。输沙量减沙比在  $50\% \sim 70\%$ ，而粗沙比减少量只有  $10\% \sim 20\%$ <sup>[24]</sup>。

一方面，降雨模式的变化，导致中下游径流过程、由中游进入下游的泥沙量及粒径组成改变，从而使河道淤积及河道形态随之改变，影响河道泄洪蓄洪能力及水利工程的防洪除涝功能；另一方面，下游河道逐渐适应日益减少的径流量和减弱的蓄泄能力，不断进行自我调整，导致河床萎缩，输沙功能衰退，反过来加剧了泥沙的淤积。泥沙淤积与防蓄功能相互影响相互减弱，形成恶性循环。

### 3 气候变化下洪涝灾害发展新形势

黄河中下游流域有雨日呈显著减少态势,而特大暴雨日数和24 h最大降雨量呈增加趋势明显。雨日的减少使年内降水更加集中,极端降雨事件频率和强度的增加导致降水过程线更加陡峭,使发生洪涝灾害的风险加大;致灾因子加强,洪涝灾害更加严重。

自然和人类双重作用下,黄河中下游流域降水格局表现出新的特征,降水量、降水强度和降水频率发生较大变化;社会经济的发展、水沙关系的演变,使洪涝灾害承灾体脆弱性和致灾因子强度增加。黄河中下游流域洪涝灾害呈现新的发展形势:

(1) 黄河中下游流域降有雨日呈减少趋势,而特大暴雨频率增加,未来几年又要迎来丰水期,黄河流域洪涝灾害的致灾因子整体上将呈现加重态势。

(2) 尽管来沙量大量减少,黄河下游河槽的淤积速度并没有降低,甚至部分淤平。泥沙淤积与防蓄洪能力相互减弱,导致洪峰流量并不大时,洪峰水位异常抬高,表现为“小水大灾”,损失惨重。

(3) 黄河下游河道上河段呈现暖湿趋势,下河段呈冷湿趋势,河流封河时间和开河时间提前,平均封冻天数缩短,总体上黄河凌情趋于缓和。

(4) 支流、小流域、河渠等防洪基础工程建设薄弱,防洪能力低;另外,由于黄河流域流经水土流失严重的黄土高原,泥沙淤积抬高河床,洪水倒灌回支流,使支流洪水态势更加严峻。

针对以上洪涝灾害新形势,应以工程措施与非工程措施相结合为基本思路,“上中下游协调、左右岸兼顾”为基本原则,应急管理 with 常态管理相统筹为指导思想,以合理的土地利用规划为政治保障,以洪涝灾害管理法规为平衡工程措施与非工程措施的法律保障,以遥感、统一机制的物理模型等“天地一体化”监测预警技术为支撑,以面向极值过程的综合水资源调控为实现方法,形成洪涝灾害规避—消减—控制一体化保障体系,降低洪涝灾害造成的损失。

### 4 结论

气候变化改变了黄河流域水循环的大气过程,降水总量和降水的时空分布分异明显;人类活动的无序干扰改变了水循环的地表过程、土壤过程和地下过程,过度城市化、无节制的超采地下水和侵占蓄滞洪区,增加了防洪除涝的难度和成本,洪涝灾害的孕灾环境、致灾因子强度和承灾体特性发生改变。自然和人类活动双重影响下,黄河中下游流域洪涝灾害成灾模式的改变导致洪涝灾害呈现出新的发展形势:洪涝

灾害未来整体呈现加重态势;支流和小流域洪水加剧;“小水大灾”损失惨重;凌汛灾情趋于缓和。针对以上新形势,洪涝灾害的应对措施也应与时俱进:将工程措施与非工程措施有机结合,改善水利工程布局,使有限资源发挥最大的综合效益;制定并完善洪水风险图,并体现到土地利用规划中;建立“天地一体化”的监测—预警预报—评估网络;建立统一高效的指挥调度系统;将常态管理与风险管理相结合,进一步完善防洪除涝保障体系;实施面向极端过程的水资源综合调控。

本文研究了影响洪涝灾害成灾模式的部分因素,并不排除其他因素的影响。在以后的研究中,要深入考虑气象、水文、水利工程等因素的综合效应,进行各种情景的模拟分析。

#### [参 考 文 献]

- [1] Zhang Jiacheng. Preliminary analysis on natural disasters[C] // Liaison Group of Comprehensive Study of Cosmos, Earth, and Life, Society of Chinese Science and Technology. Progresses in Comprehensive Study of the Mutual Relations Among Cosmos, Earth, and life Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1989: 185-188.
- [2] 中国灾害防御协会,国家地震局震灾防御司. 中国减灾重大问题研究[M]. 北京:地震出版社,1992:15-17.
- [3] 张家诚,周魁一,马宗晋,等. 中国气象洪涝海洋灾害[M]. 长沙:湖南人民出版社,1998:151-200.
- [4] 张辉,许新宜,张磊,等. 2000—2010年我国洪涝灾害损失综合评估及其成因分析[J]. 水利学报,2011,29(5):5-9.
- [5] 骆承政. 中国历史大洪水:上、下卷[M]. 北京:中国书店,2006:87-106,399-421.
- [6] 许静. 2006年全国洪涝灾情[J]. 中国防汛抗旱,2007(1):46-53.
- [7] 张葆蔚. 2007年全国洪涝灾情[J]. 中国防汛抗旱,2008(1):59-65.
- [8] 闫淑春. 2008年全国洪涝灾情[J]. 中国防汛抗旱,2009(1):60-67.
- [9] 闫淑春. 2009年全国洪涝灾情[J]. 中国防汛抗旱,2010(1):68-75.
- [10] 水利部水文局. 2002年水情年报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009:20-63.
- [11] 水利部水文局. 2008年水情年报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009:41-59.
- [12] 丁一汇,张建云. 暴雨洪涝[M]. 北京:气象出版社,2009:259-270.
- [13] 马芳芳. 黄河流域经济空间开发[J]. 新西部:理论版,2008,35(8):45-46.

(下转第244页)

- ling biodiversity and land use: Urban growth, agriculture and nature in a wetland area[J]. *Ecological Economics*, 2004, 51(3/4): 201-216.
- [5] Byoung-Hwa Lee, Miklas Scholz. What is the role of *Phragmites australis* in experimental constructed wetland filters treating urban run off[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(1): 87-95.
- [6] 王建华, 吕宪国. 城市湿地概念和功能及中国城市湿地保护[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(4): 555-560.
- [7] 潮洛蒙, 李小凌, 俞孔坚. 城市湿地的生态功能[J]. *城市问题*, 2003(3): 9-12.
- [8] 王晓文, 曾从盛. 城市湿地景观生态建设的价值取向[J]. *福建师范大学学报: 哲学社会科学版*, 2006(5): 162-166.
- [9] 曹新向, 瞿秋敏, 郭志永. 城市湿地生态系统服务功能及其保护[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 145-148.
- [10] 王亚男, 冯长春. 银川城市湿地的保护与合理开发利用探讨[J]. *地域研究与开发*, 2007, 26(1): 99-103.
- [11] 崔丽娟, 张曼胤. 人类干扰对安庆沿江湿地植物多样性的影响[J]. *林业科学研究*, 2005, 18(4): 441-445.
- [12] 王世新, 许正强, 杨永花, 等. 黄河兰州(市区)段河道湿地资源概况及保护建议[J]. *甘肃科技纵横*, 2007, 36(1): 52-53.
- [13] 杨民, 王锡稳, 李文莉, 等. 兰州市气象与污染环境背景综述[J]. *甘肃气象*, 2001, 19(4): 11-15.
- [14] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity[J]. *Taxon*, 1972, 21: 213-251.
- [15] 马克平, 刘灿然, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 II:  $\beta$ 多样性的测度方法[J]. *生物多样性*, 1995, 3(1): 38-43.
- [16] 周国英, 陈桂琛, 赵以莲, 等. 海湖地区芨芨草群落特征及其物种多样性研究[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(11): 1956-1962.
- [17] 郭正刚, 刘慧霞, 王根绪, 等. 人类工程对青藏高原北部草地群落  $\beta$ 多样性的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(2): 384-388.
- [18] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. *景观生态学原理及应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [19] 彭少麟, 周厚诚, 陈天杏, 等. 广东森林群落的组成结构数量特征[J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1989, 13(1): 10-17.
- [20] 蒋有绪, 王作荪, 藏润国, 等. 海南热带林生物多样性及其形成机制[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 217-233.

(上接第 191 页)

- [14] 师长兴, 章典. 中国洪涝灾害与泥沙关系[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 627-636.
- [15] 叶笃正, 黄荣辉. 长江黄河流域旱涝规律和成因分析[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1996: 15-16.
- [16] 闫娜, 延军平, 杜继稳, 等. 黄河下游凌汛变化趋势与气候变化关系分析: 以济南天桥河段为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(8): 45-48.
- [17] 查小春, 延军平. 全球变化下秦岭南北河流径流泥沙比较分析[J]. *地理科学*, 2002, 22(4): 403-407.
- [18] 赵文林, 张红武, 潘贤娣, 等. 黄河泥沙[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996: 267-268, 237-244, 595-615.
- [19] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 水利部南京水文水资源研究所. 中国水旱灾害[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 55-275.
- [20] 施成熙, 汪宪臣, 窦鸿身, 等. 中国湖泊概论[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-12.
- [21] Philips J M, Walling D E. The particle size characteristics of fine-grained channel deposits in the River Exe Basin, Devon, UK[J]. *Hydrol Process*, 1999, 13(1): 1-19.
- [22] 钱宁, 王可钦, 阎林德, 等. 黄河中游粗泥沙来源区对黄河下游冲淤的影响[C]// 第一次河流泥沙国际学术会议论文集. 北京: 光华出版社, 1980: 2-10.
- [23] 许炯心. 黄河上中游产产沙系统与下游河道沉积系统的耦合关系[J]. *地理学报*, 1997, 52(5): 421-429.
- [24] 颜明, 张守红, 许炯心, 等. 风水两相变化对黄河中游支流粗泥沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 25-29.

(上接第 202 页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 麻泽龙, 程根伟. 河流梯级开发对生态环境影响的研究进展[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5): 748-753.
- [2] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. *统计与决策*, 2004, 8(11): 119-121.
- [3] 钟华平, 刘恒, 耿雷华. 澜沧江流域梯级开发的生态环境累积效应[J]. *水利学报*, 2007(S): 577-581.
- [4] 陈凯麒, 王东胜, 刘兰芬, 等. 流域梯级规划环境影响评价的特征及研究方向[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2005, 3(2): 79-84.
- [5] 王波, 黄薇, 杨丽虎. 梯级水电开发对水生境累积影响的方法研究[J]. *中国农村水利水电*, 2007(4): 127-130.
- [6] 陈长兵, 李惠强, 郑视国. 核电项目管理成熟度模型初探[J]. *中国核电*, 2009, 2(1): 77-84.
- [7] 李海生, 王辉民, 杜蕴慧, 等. 将 ISO14000 纳入建设项目环境保护管理程序[J]. *环境科学*, 2000, 21(2): 110-112.
- [8] 张鹏, 党延忠. 企业知识管理成熟度模型研究[J]. *科学与科学技术管理*, 2010, 30(8): 102-106.
- [9] 张骏, 张伟. 基于决策者理性行为下的群体决策评判方法[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(9): 147-150.
- [10] 蒋洪强, 马向春, 杨玲玲. 基于 GIOWA 算子的大型水利水电工程项目环境管理成熟度评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(S1): 172-177.