

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.003

# 基于多尺度熵理论的葛洲坝水库对 长江干流径流影响研究

王远坤<sup>1</sup>, 李 建<sup>2</sup>, 王 栋<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051)

**摘要:** 为研究葛洲坝水库对长江水文系统复杂性的影响, 采用多尺度熵理论对长江干流宜昌、汉口、大通3个主要控制水文站的径流量序列进行分析。结果表明: 长江干流径流序列复杂度从上游到下游表现为逐渐增加趋势; 葛洲坝水库蓄水对长江干流径流序列结构复杂性产生了一定的影响, 改变了天然条件下的系统复杂度, 改变程度随距离的增大而减弱。

**关键词:** 多尺度熵理论; 径流; 葛洲坝水库; 长江干流

中图分类号: P343.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)05-0014-05

## Research on impacts of Gezhouba Reservoir on Yangtze River main stream runoff based on multi-scale entropy theory

WANG Yuankun<sup>1</sup>, LI Jian<sup>2</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;  
2. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China)

**Abstract:** In order to ascertain impacts of Gezhouba Reservoir on the complexity of the Yangtze River system, multi-scale entropy theory was applied to analyze the runoff series of main stream of Yangtze River at the three main hydrological stations, which are Yichang, Hankou and Datong. The results show that the complexity of the runoff series of main stream of Yangtze River show increasing trend from upstream to downstream; Gezhouba Reservoir has certain impact on the complexity of the runoff series of main stream of Yangtze River. It changes the level of the complexity of the system under natural conditions, which decreases with the distance getting further.

**Key words:** multi-scale entropy theory; runoff; Gezhouba Reservoir; Yangtze River main stream

河流系统是地球上的大动脉, 在维系地球的水循环、能量平衡、气候变化和生态发展中具有极其重要的作用<sup>[1]</sup>。水库修建和河道整治工程等人类活动改变了河流水文情势, 对河流生态系统产生不利影响。由于径流在维护河流地貌环境、生态系统健康等方面具有不可忽视的作用, 径流序列的扰动会使流域生态系统受到影响<sup>[2]</sup>。

水利工程对水文情势的改变具有非线性与复杂性<sup>[3]</sup>。熵的概念起源于热力学, 是量化系统复杂性

的有效方法, 熵值越大对应的复杂性越高。然而, 传统熵分析主要集中于定尺度或者单尺度<sup>[4-6]</sup>。Costa等<sup>[7]</sup>2002年开创性地提出了多尺度熵的方法, 结果显示健康信号的熵值高于病理信号的熵值。该方法克服了单尺度熵的缺点, 适用于评价系统多尺度的复杂性。Li等<sup>[8]</sup>应用多尺度熵理论评价了大坝影响下密西西比河径流序列的复杂性变化规律。Zhou等<sup>[9]</sup>则利用多尺度熵分析理论评估了新丰江水库和枫树坝等水利工程对我国东江流域径流序列的复

基金项目: 国家自然科学基金(51309131); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100091120059)

作者简介: 王远坤(1981—), 男, 讲师, 博士, 主要从事水文学水资源及生态水文研究。E-mail: yuankunw@nju.edu.cn

杂性的影响。

从20世纪60年代开始,长江流域大量修建水库,在一定程度上改变了长江的径流特性。随着经济社会的发展,人类对长江水资源的消耗进一步增大,对径流过程的干扰也逐渐增强。径流的变化使得长江流域内的生态系统进而受到影响,生态系统服务功能减弱<sup>[2,10]</sup>,对长江流域水资源的变化趋势及归因研究是目前水文研究领域的热点之一<sup>[11-13]</sup>。为评价长江流域第一个大型水利枢纽工程葛洲坝水库对长江干流径流的多尺度影响,采用多尺度熵理论,通过分析不同时间序列的多尺度熵值,评价流域系统复杂性的变化程度。

## 1 研究区域概况

长江发源于青藏高原地区,流经11个省、市(自治区),全长约6300 km,总落差约5400 m,流域面积180万 km<sup>2</sup>,为我国第一大河,世界第三大河。长江干流宜昌以上为上游,长约4500 km,流域面积100万 km<sup>2</sup>。宜昌以下,干流河道进入中下游冲积平原,宜昌至湖口为中游,长约950 km,流域面积68万 km<sup>2</sup>。湖口以下为下游,长约900 km,流域面积12万 km<sup>2</sup>。长江流域水能资源丰富,已经建设了4万多座水库,其中大型水库约120座,中型水库900多座,小型水库44550座,总库容达到2000多亿 m<sup>3</sup>,而且新建大中型水库还在迅速增加<sup>[14]</sup>。葛洲坝水库是长江流域第一个大型水利枢纽工程,于1970年12月动工兴建,后停建,于1974年底重新动工,1981年完成大江截流,5月开始蓄水,1986年5月投入正式运行,1988年所有工程完工,水库总库容为15.8亿 m<sup>3</sup>。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料选取

选取宜昌、汉口和大通3个控制水文站点作为代表站。宜昌水文站是长江上游的主要控制站,葛洲坝水电站位于其上游6 km处;汉口水文站为中游的主要控制站;大通水文站位于长江河口湖区界附近,是长江入海沙量的控制站。选取1954—2008年3个水文站径流量资料为基础数据,以1974年葛洲坝水库开始修建和1988年水库工程完成成为时间节点,对研究时段进行划分,1954—1973年为工程兴建前阶段,1989—2008年为工程运行后阶段。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 样本熵理论

样本熵在计算时不包含自身匹配,计算条件概率时需要一个长度为 $m$ 的模板向量,然后通过寻找

$m+1$ 长度匹配的方法来计算熵值。样本熵的具体计算方法<sup>[5-6]</sup>为:

对于一个 $N$ 点的时间序列 $\{u(j):1 \leq j \leq N\}$ ,可得到 $M-m+1$ 个矢量 $\mathbf{X}_m(i) \{i|1 \leq i \leq N-m+1\}$ 。两个矢量对应标量之间的最大距离定义为

$$d[u(i), u(j)] = \max \{ |u(i+k) - u(j+k)| \mid 0 \leq k \leq m-1 \} \quad (1)$$

定义 $B$ 为矢量 $\mathbf{X}_m(j)$ 与矢量 $\mathbf{X}_m(i)$ 距离在容限 $r$ 范围内的个数, $A$ 为矢量 $\mathbf{X}_{m+1}(j)$ 与矢量 $\mathbf{X}_{m+1}(i)$ 距离在容限 $r$ 范围内的个数。则样本熵的计算公式为

$$S_{\text{samplen}} = -\ln(A/B) \quad (2)$$

#### 2.2.2 多尺度熵方法

Costa等<sup>[7]</sup>于2002年基于样本熵,提出了一种分析多尺度的时间序列方法—多尺度熵方法,该方法可用于刻画时间序列在不同时间尺度上的无规则和复杂程度,已得到广泛应用<sup>[8-9]</sup>。笔者采用多尺度熵方法分析人类活动对长江流域干流径流特性的影响。

多尺度熵的计算步骤如下:

a. 给定一个一维离散时间序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ,构建连续粗粒化的时间序列 $\{y^{(\tau)}\}$ ,新序列的长度由尺度因子 $\tau$  ( $\tau=1, 2, \dots, N$ )决定。粗粒化时间序列的计算公式为

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} q_i \quad 1 \leq j \leq N/\tau \quad (3)$$

尺度因子 $\tau=1$ 时,时间序列 $\{y^{(\tau)}\}$ 变为原始时间序列。每个粗粒化的时间序列的长度等于原始时间序列长度的 $1/\tau$ 。

b. 容限 $r$ 取原时间序列标准差( $S_D$ )的10%~25%,计算粗粒化后各个尺度对应时间序列的样本熵值,即为多尺度熵。按参考文献<sup>[8-9]</sup>中 $m$ 和 $r$ 的选取原则,本文 $m$ 取值为2, $r$ 取值为 $0.15S_D$ 。

#### 2.2.3 多尺度熵的应用原理

多尺度熵计算时间序列在多个尺度上的样本熵值,体现了时间序列在尺度上的无规则性。若熵值在尺度上单调递减,则序列在尺度上自相似性较低,说明系统复杂度较小;若熵值在尺度上单调递增,则序列自相似性较大,相应系统复杂度较大。若一个时间序列的熵值在绝大部分尺度上大于另一个时间序列的熵值,则说明前者比后者复杂。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 葛洲坝水库对径流时间分布特性的影响

分别计算长江干流宜昌、汉口和大通3个站的径流序列的多尺度样本熵值。宜昌站径流序列多尺度熵分布见图1。由图1可知,葛洲坝修建后,宜昌站径流序列样本熵值在不同尺度上均明显增大,相

表1 长江干流主要控制水文站序列多尺度熵值统计特征值

时间尺度/d	宜昌站		汉口站		大通站	
	绝对变化幅度	相对变化幅度/%	绝对变化幅度	相对变化幅度/%	绝对变化幅度	相对变化幅度/%
1	0.02	21.06	-0.01	8.79	0.00	0.28
2	0.02	16.01	0.00	0.44	0.00	0.73
3	0.03	15.99	0.01	2.93	0.00	0.76
4	0.03	16.11	0.02	4.25	0.01	1.52
5	0.04	18.84	0.02	5.29	0.01	1.12
6	0.06	23.24	0.03	6.44	0.01	1.24
7	0.06	21.72	0.04	6.80	0.03	4.27
8	0.06	20.07	0.03	5.83	0.02	3.20
9	0.06	19.20	0.03	5.13	0.01	1.14
10	0.06	19.57	0.06	8.99	0.03	4.17
11	0.06	17.78	0.03	4.85	0.02	2.61
12	0.06	17.66	0.06	7.79	0.01	1.21
13	0.05	13.73	0.05	7.31	-0.02	2.21
14	0.05	11.99	0.07	8.68	0.02	2.50
15	0.04	10.28	0.08	9.43	0.03	2.80
16	0.06	13.24	0.04	4.57	0.05	5.34
17	0.05	12.01	0.03	3.76	0.03	2.79
18	0.02	3.27	0.07	7.38	0.07	6.60
19	0.03	6.58	0.06	6.28	0.00	0.04
20	0.03	5.38	0.04	4.15	0.06	5.91
21	0.03	5.75	0.08	8.36	0.03	2.76
22	0.02	3.26	0.02	2.30	0.05	4.52
23	-0.01	1.29	0.03	3.09	-0.03	2.67
24	0.04	6.39	0.01	0.66	-0.01	0.87
25	0.01	2.00	-0.04	4.01	-0.03	2.26
26	0.03	5.55	0.09	8.70	0.10	8.41
27	0.06	9.82	0.05	4.55	-0.01	0.65
28	0.03	5.59	0.05	4.84	0.09	7.79
29	0.04	5.81	0.16	15.90	0.03	2.44
30	-0.02	2.25	0.12	11.61	0.06	5.14
均值	0.04	11.71	0.04	6.10	0.02	2.54

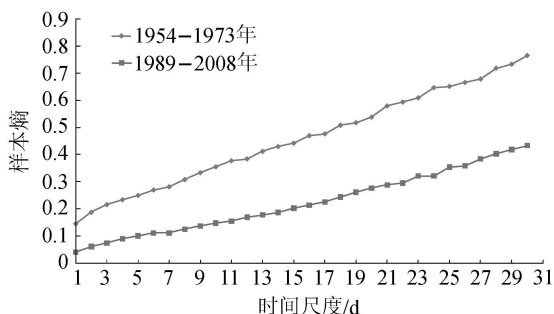


图1 宜昌站径流序列多尺度样本熵值

图2所示为长江干流中游汉口站径流序列多尺度熵值分布。由图2可知,在时间尺度小于或等于3d的情况下,葛洲坝修建前后汉口站多尺度熵值并未明显变化。在时间尺度大于3d时的对应各尺度样本熵值,葛洲坝修建后的值增大,相对变化幅度比宜昌站小,相对变化幅度为0.4%~16.0%(表1)。不同尺度下样本熵值的增加幅度大都在0.1以下,只有在时间尺度为29d和30d时大于0.1。而径流序列样本熵值在时间尺度为28d和29d出现了最大和最小值情况,这说明葛洲坝水库对汉口站的径流序列结构在此时间尺度下造成了明显的扰动。

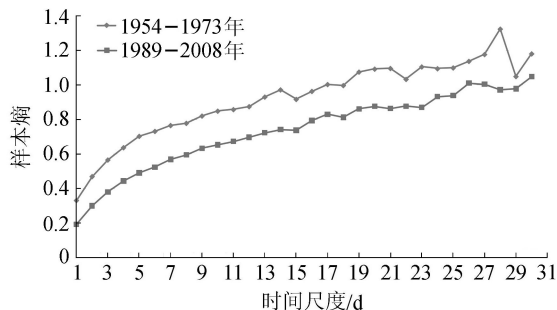


图2 汉口站径流序列多尺度样本熵值

由汉口站径流序列多尺度熵分析可知,在时间尺度为1d的情况下,即对应传统的不考虑时间尺度的样本熵,葛洲坝水库修建前后,样本熵值无明显变化,不能评估葛洲坝水库对下游径流序列复杂度的影响程度。多尺度熵分析反映的是不同时间尺度下熵信息的变化情况,由图2可知,随着时间尺度的增大,葛洲坝修建前后径流序列的样本熵值之差逐渐增大。

大通站是长江下游的入海控制站,距离葛洲坝水库较远。径流序列除了上游来水外,同时接纳洞

庭湖、鄱阳湖及其他支流等区间入流。由此可知,大通站的径流序列受影响因素较多,葛洲坝水库的径流调节对其影响程度较小。由图3可知,整体上葛洲坝水库修建前后多尺度熵值无明显变化。

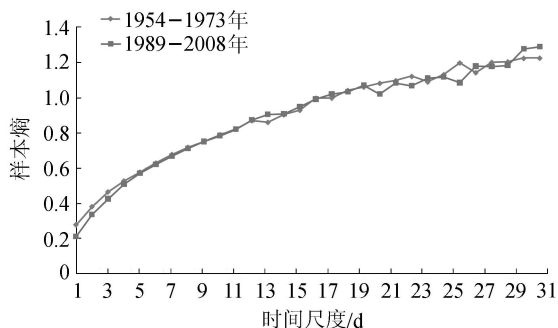


图3 大通站径流序列多尺度样本熵值

### 3.2 葛洲坝水库对径流空间分布特性的影响

对葛洲坝水库修建前宜昌、汉口和大通等3站多尺度熵值进行对比(图4)。在未受葛洲坝水库影响前,从1~30d的不同尺度上,下游大通站样本熵

值大于中游汉口站值,汉口站样本熵值大于宜昌站。由于在长江干流上下游所处位置不同,以及控制流域面积的不同使得3站的多尺度熵值不同,即径流序列的复杂度不同,随控制流域面积的增大而增大。径流序列复杂度总体上从上游到下游表现为增大趋势。

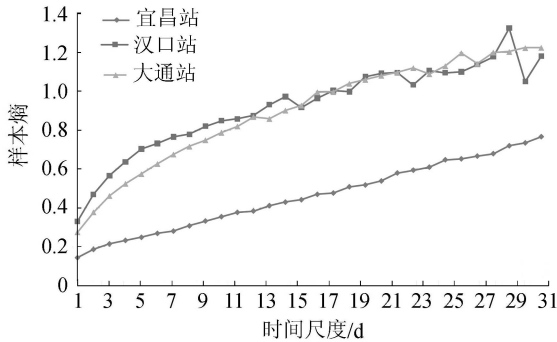


图4 葛洲坝水库修建前宜昌、汉口、大通水文站径流序列的多尺度熵值对比

图5所示为葛洲坝水库修建后宜昌站、汉口站和大通站多尺度熵值对比。在时间尺度为1d的情况下,3站之间的样本熵值无明显差别,不能判断葛洲坝水库蓄水对下游径流序列的影响。随着时间尺度的增加,各个站之间的样本熵值差异性明显变大。与汉口站相比,宜昌站明显小于大通站样本熵值。

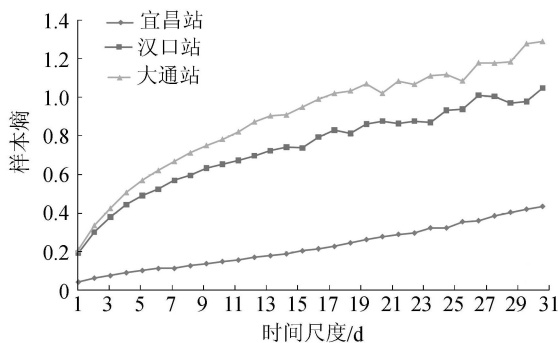


图5 葛洲坝水库修建后宜昌、汉口、大通水文站径流序列的多尺度熵值对比

由以上分析可知,径流序列复杂度在空间上表现出差异性,整体上表现为从上游到下游的增大趋势。评价结果显示葛洲坝水库在一定程度上改变了长江中下游干流径流序列的复杂度。长江干流径流序列除了受上游来水量的影响外,区间来水也占据重要作用,本文没有考虑区间入流的影响。近年来在全球气候变化大背景下,长江流域降水特性较原来发生了一定的改变<sup>[15]</sup>,在一定程度上影响了长江的径流序列。气候变化对长江径流的影响在本文中并没有考虑,气候变化和人类活动对长江径流序列复杂度改变的具体贡献有待于下一步的研究工作开展。

## 4 结论

利用多尺度熵理论分析了长江干流宜昌、汉口、大通3个主要水文站多年的径流序列,研究了葛洲坝水库修建前后长江流域径流序列复杂性的变化,分析了影响程度以及影响范围。结果表明,葛洲坝水库的修建对长江干流径流的系统内部复杂性产生了一定的影响,宜昌站影响最大,对中游的汉口影响中等,下游的大通站最小,表明葛洲坝水库对长江干流径流的辐射影响程度随着距离的增大而减小。在空间上,长江干流径流序列结构呈现差异性,从上游到下游表现为逐渐增加趋势。葛洲坝水库一定程度上改变了径流序列的复杂度。多尺度熵理论是一种适合评估大型流域水文系统复杂度的有效手段,可在其他流域推广试用。

三峡水库于2009完全投入正常运行,笔者对三峡水库的影响尚未考虑,为了进一步更准确评估三峡水库正常运行后带来的影响,需要进一步积累水文要素数据,开展后续研究工作。

### 参考文献:

- [1] 夏自强,李琼芳,姜翠玲. 河流自然功能的利用及保护研究[C]//高波. 河流生态修复技术研讨会论文集. 北京: 水利水电出版社,2005: 52-59.
- [2] 邹振华,李琼芳,夏自强,等. 人类活动对长江径流量特性的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版,2007, 35(6): 622-626. (ZOU Zhenhua, LI Qiongfang, XIA Ziangqiang, et al. Human-induced alterations in runoff of the Yangtze River [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2007,35(6): 622-626. (in Chinese))
- [3] ZOLEZZI G, BELLIN A, BRUNO M C, et al. Assessing hydrological alterations at multiple temporal scales: Adige River, Italy [J]. Water Resource Research, 2009, 45, W12421, DOI:10. 1029/2008WR007266.
- [4] MAYS D C, FAYBISHENKO B A, FINSTERLE S. Information entropy to measure temporal and spatial complexity of unsaturated flow in heterogeneous media [J]. Water Resource Research,2002,38(2): 1313-1323.
- [5] RICHMAN J S, MOORMAN J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy [J]. American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology,2000,278(6): 2039-2049.
- [6] HUANG F, XIA Z Q, ZHANG N. Flow-complexity analysis of the upper reaches of the Yangtze River, China [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16(11): 914-919.
- [7] COSTA M, GOLDBERGER A L, PENG C K. Multi-scale entropy analysis of complex physiologic time series [J].

Physical Review Letters,2002,89(6):1-4.

- [ 8 ] LI Z W, ZHANG Y K. Multi-scale entropy analysis of Mississippi River flow [ J ]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2008,22:507-512.
- [ 9 ] ZHOU Y, ZHANG Q, LI K, et al. Hydrological effects of water reservoirs on hydrological processes in the East River (China) basin: complexity evaluations based on the multi-scale entropy analysis [ J ]. Hydrological Processes, 2012,26(21):3253-3262.
- [10] 钱正英,陈家琦,冯杰. 人与河流和谐发展[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):1-5. ( QIAN Zhengying, CHEN Jiaqi, FENG Jie. Harmonious development of humanity and rivers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(1):1-5. (in Chinese))
- [11] 王雁,丁永建,叶柏生,等. 黄河与长江流域水资源变化原因[J]. 中国科学:地球科学,2013,43(7):1207-1219. ( WANG Yan, DING Yongjian, YE Boshen, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008 [J]. Science China: Earth Sciences,2013,43(7):1207-1219. (in Chinese))
- [12] 秦年秀,姜彤,许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境,2005,14:589-594.

( QIN Nianxiu, JIANG Tong, XU Chongyu. Trends and abrupt analysis on the discharge in the Yangtze basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005,14:589-594. (in Chinese))

- [13] 黄峰,夏自强,王远坤. 长江上游枯水期及10月径流形势分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(2):129-133. (HUANG Feng, XIA Ziqiang, WANG Yuankun. Runoff regimes of upstream Yangtze River in dry season and October [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2010,38(2):129-133. (in Chinese))
- [14] 陈进,黄薇. 梯级水库对长江水沙过程影响初探[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(6):786-791. ( CHEN Jin, HUANG Wei. Preliminary study on the change of water flow and sediment process in the Changjiang River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005,14(6):786-791. (in Chinese))
- [15] 白路遥,荣艳淑. 气候变化对长江、黄河源区水资源的影响[J]. 水资源保护,2012,28(1):46-50. ( BAI Luyao, RONG Yanshu. Impacts of climate change on water resources in source regions of Yangtze River and Yellow River [J]. Water Resources Protection,2012,28(1):46-50. (in Chinese))

(收稿日期:2015-01-10 编辑:徐娟)

· 简讯 ·

## 中国水利学会 2015 学术年会将于 10 月 26—28 日在河海大学召开

2015 年 10 月 26—28 日,由中国水利学会主办,河海大学、南京水利科学研究所、江苏省水利学会承办的中国水利学会 2015 学术年会将在河海大学召开。本次会议主题是水安全与水科技,将邀请水利部、中国科学院、中国工程院等有关方面的知名专家、院士主要围绕防洪安全、供水安全以及水与粮食安全、经济安全、生态安全、国家安全等方面作大会特邀报告。会议还将设置 5 个分会场:中国原水论坛分会场、跨流域调水分会场、地下水分会场、疏浚与泥处理利用分会场、国际分会场。

各分会场主要议题分别是:①中国原水论坛分会场主要议题:原水保护与饮水安全,水资源保护与水生态修复,水资源开发利用与管理,水文化研究与传播;②跨流域调水分会场主要议题:跨流域调水工程运行调度理论,跨流域调水工程运行调度关键技术,跨流域调水工程运行调度方案制定与实施,跨流域调水工程运行调度实践经验;③地下水分会场主要议题:地下水环境安全与对策(地下水环境安全现状、地下水污染理论、地下水污染数值仿真与物理模拟技术、地下水污染安全监测新技术、地下水污染修复),地下水资源理论与技术创新(地下水资源理论新趋向、地下水监测新技术、地下水科学中的同位素技术、地下水资源计算新理论方法、地下水资源评价与管理),地下水超采治理技术创新(地下水超采评估、地下水超采治理技术、地下水超采治理评估);④疏浚与泥处理利用分会场主要议题:河湖健康中的底泥污染及对策,河湖疏浚清淤技术与实践,淤泥处理技术与应用,淤泥资源化利用技术,其他水环境治理与生态修复的技术与应用实例;⑤国际分会场主要议题:气候变化与水安全,变化环境下的水文演变,变化环境下水科学的理论与实践,变化环境下的用水安全及水源保障,变化环境下的用水安全及水灾害应对,变化环境下的水能资源利用,变化环境下的水能资源优化配置及调度,变化环境下的水生态环境保护。

(本刊编辑部供稿)