

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.05.010

影响长江口深水航道骤淤的非常态天气过程

Ⅱ:台风要素敏感性分析及典型台风路径

贾晓^{1,2},路川藤³,黄华聪¹

(1.上海河口海岸科学研究中心,上海 201201; 2.上海交通大学水动力学教育部重点实验室,上海 200240;
3.南京水利科学研究院河流海岸研究所,江苏 南京 210029)

摘要:为进一步研究台风中心气压、台风距离长江口距离(简称距离)、最大风速半径和移动风速4个典型参数对长江口航道骤淤的影响水平,采用正交试验方法,设计了64组典型试验工况,选择藤田-高桥圆形风场经验公式架构了台风场,然后采用SWAN模型模拟不同台风工况的波况,并计算牛皮礁站的波能。据波能的极差分析和方差分析,得出台风要素的敏感性次序。研究表明,长江口过境台风中,距离最敏感,而最大风速半径为较不敏感因素。选取主要的敏感性参数(距离、中心气压)为代表参数,概化移动风速和最大风速半径。在合理选取能够引起骤淤的临界波能的标准下,给出较易引发骤淤的典型包络线范围,为骤淤的预报提供了新的参考指标。

关键词:长江口深水航道;骤淤;台风参数;敏感性分析;正交试验;极差分析;方差分析;台风典型路径

中图分类号:TV148;P732 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2017)05-0439-06

The extraordinary weather process inducing sudden siltation in deepwater navigation channel of Yangtze Estuary

Ⅱ:sensitivity analysis of typhoon parameters and its typical tracks

JIA Xiao^{1,2}, LU Chuanteng³, HUANG Huacong¹

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China;
2. MOE Key Laboratory of Hydrodynamics, School of NAOCE, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: To further identify the effects of four typical typhoon parameters, namely, central atmospheric pressure, distance from typhoon center to Yangtze Estuary, maximum wind radius and moving wind velocity on the sudden siltation of navigation channel in Yangzi Estuary, the orthogonal experimental design (OED) method is used to design 64 groups of typical working conditions. The wind filed is established with the empirical formula of Fujita-Takahashi circular wind filed, and SWAN model is used to simulate the wave conditions under different typhoon working conditions, by which the wave energy at NPJ station is calculated. The sensitivity sequence of the four parameters is then deduced according to the RA (Range Analysis) and VA (variance analysis) of wave energy. The study shows that in the typhoon passing through Yangtze Estuary, the distance is the most sensitive parameter and maximum wind radius is less sensitive. In this case, the two major sensitive parameters (distance and central pressure) are taken as representative parameters, while moving wind speed and maximum wind radius are generalized. A typical envelope line is proposed based on a reasonable selection of the critical wave energy which is likely to cause sudden siltation, hence providing a novel reference to predict the sudden siltation.

Key words: sudden siltation; typhoon parameters; sensitivity analysis; orthogonal test; range analysis; variance analysis; typical typhoon track

根据统计分析资料,以及文献[1]的数学模型证明,台风路径自东侧过境,在长江口水域较易引起较大的风浪,且发生骤淤的概率很大。

通常认为,台风级别越高,台风中心离深水航道越近,对深水航道的影响越大^[2]。但对于距离与台风级别的定量判别指标没有研究。即在实际中也发现部分台风(或热带风暴)行走路径在上海东侧海域但没有发生骤淤,从骤淤的提前预警角度,需要对发生骤淤的典型路径,或者可能引发骤淤的参数特征进行分析。

对于长江口而言,台风包含4个主要参数,中心气压、距长江口(以牛皮礁站为例)的距离(后文简称距离)、最大风速半径和移动风速,4个参数总体呈独立分布。

为了分析长江口发生骤淤的临界情况及牛皮礁站出现较大波能的台风,首先需要分析台风的几个参数的敏感性。因为统计样本数量较少,无法从实测的台风过程、波能和相应的骤淤量数据分析各参数的敏感性,因此,需要开展系列数值计算,模拟概化的台风风场以及波浪场,计算牛皮礁站的波能,并做对比分析。

合理的试验设计是统计分析的前提,本文选择正交试验方法^[3],有效地缩减了试验组次,计算了不同工况牛皮礁站的波能,并通过概率统计的方差分析和极差分析方法分析各个要素的敏感性。

在分析得到各个要素敏感性的基础上,选取最敏感的台风参数作为台风的代表参数,概化其他不敏感的参数取值,则可以构筑典型的台风工况。然后通过藤田-高桥圆形风场经验公式,计算得到相应工况下台风的风场,并进一步计算得到波浪场以及牛皮礁站的波能。参考发生骤淤期间的临界波能值,可以得到台风的典型路径范围。

1 正交试验设计及分析方法

正交试验法是一种科学地安排多因素、多水平试验,它是在试验因素的全部水平组合中,挑选部分有代表性的水平组合进行试验,通过对这部分试验结果的分析了解全面试验的情况,并采用统计学方法分析试验结果的一种试验设计方法^[4-6]。

试验因素和因素水平较低的试验可以通过查阅特定的正交试验表设计试验。本次试验以长江口中的牛皮礁站为参考点,考虑中心气压、距离、最大风速半径、移动速度4个台风因素,每个因素取8个水平,全部开展计算,则试验组次达到 8^4 ,采用SPSS软件,利用正交表设计4因素8水平试验^[7](表1),组次安排见表2。正交试验的数据分析方法分为极差分析法(又称直观分析法)和方差分析法(又称统计分析法)两种^[4,6]。

2 试验结果分析

以根据正交试验设计确定的64个计算组次中的台风要素为标准,采用藤田-高桥经验公式进行台风风场模拟^[8-9],并采用SWAN模型计算得到台风期间牛皮礁站的波况参数^[10-13],最后由波能计算公式得到牛皮礁站的总波能(表2)。

绘制牛皮礁站点在台风期间总波能随各因素水平变化的趋势(图1),图1中 k_1 至 k_8 分别表示每个因素列上水平号为1至8时所对应的牛皮礁总波能之和的算术平均值。由图1可得,中心气压、距离、最大风速半径、移动速度的极差 R 分别为 $267.49\text{ kW}\cdot\text{h}$ 、 $324.74\text{ kW}\cdot\text{h}$ 、 $36.10\text{ kW}\cdot\text{h}$ 、 $273.88\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

由图1可以看出,牛皮礁站的波能随着中心气压、距离和移动速度的增大呈现显著减小趋势,而最大风速半径的变化对牛皮礁站点的波能变化影响不大。另由极差分析,可以

表1 台风4个因素的各水平值

Table 1 Different level values for the four parameters of Typhoon

水平	中心气压/ hPa	距离/ km	最大风速 半径/km	移动速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
1	920	0	30	10
2	930	100	45	15
3	940	200	60	20
4	950	300	75	25
5	960	400	90	30
6	970	500	105	35
7	980	600	120	40
8	990	700	135	45

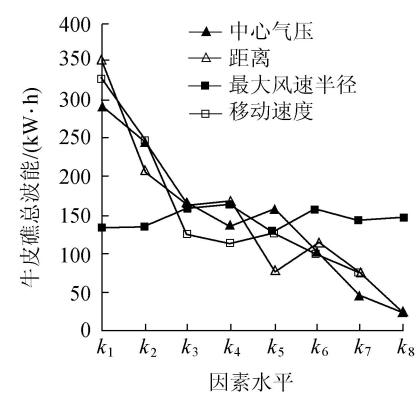


图1 牛皮礁波能随各因素水平变化趋势

Fig.1 Wave energy changing with different parameters in NPJ Station

表 2 正交试验的组次设计及计算结果

Table 2 The group design and computing results of orthogonal test

组次	中心气压/ hPa	距离/ km	最大风速 半径/km	移动速度/ (km·h ⁻¹)	牛皮礁站总 波能/(kW·h)	组次	中心气压/ hPa	距离/ km	最大风速 半径/km	移动速度/ (km·h ⁻¹)	牛皮礁站总 波能/(kW·h)
1	920	200	60	35	216.43	33	920	700	135	40	59.32
2	970	0	105	35	184.12	34	950	400	135	30	125.46
3	930	300	60	10	501.88	35	990	600	45	35	0.09
4	970	600	75	45	2.24	36	930	500	90	20	166.77
5	990	300	90	40	8.97	37	930	400	105	40	131.42
6	960	700	75	20	16.49	38	990	100	120	25	34.88
7	940	500	135	15	269.31	39	970	100	90	15	225.22
8	980	0	120	40	127.51	40	980	400	60	15	26.16
9	930	200	75	30	253.70	41	990	700	30	15	0.00
10	930	600	135	25	133.03	42	940	0	60	20	387.48
11	980	100	135	20	111.17	43	950	700	90	35	12.43
12	940	600	90	10	162.18	44	970	200	135	10	300.14
13	940	700	105	30	32.94	45	930	0	45	15	592.05
14	970	400	45	20	23.98	46	940	100	75	40	179.05
15	990	500	60	30	2.51	47	960	200	120	15	290.30
16	950	200	45	40	78.74	48	970	300	120	30	69.57
17	960	0	90	30	256.48	49	960	300	135	35	97.96
18	940	300	45	25	103.44	50	980	600	30	30	0.97
19	980	300	105	45	19.64	51	950	100	60	45	113.81
20	950	0	75	25	342.41	52	920	400	90	45	121.82
21	920	0	30	10	795.42	53	930	100	30	35	136.95
22	950	500	120	10	264.12	54	980	700	45	10	11.92
23	930	700	120	45	29.73	55	970	700	60	25	5.14
24	980	200	90	25	59.43	56	950	300	30	20	53.30
25	940	200	30	45	54.50	57	920	600	120	20	195.87
26	990	200	105	20	30.37	58	990	400	75	10	22.02
27	920	500	105	25	196.68	59	950	600	105	15	92.41
28	970	500	30	40	1.50	60	920	300	75	15	480.09
29	980	500	75	35	6.05	61	960	500	45	45	4.74
30	960	400	30	25	16.76	62	940	400	120	35	132.04
31	990	0	135	45	80.50	63	960	600	60	40	5.74
32	960	100	105	10	560.33	64	920	100	45	30	253.68

判断距离对牛皮礁站点的波能变化影响最大,其次是移动速度和中心气压,这 2 个因素对波能的影响相差不大,而最大风速半径对牛皮礁波能的影响最小。

在极差分析的基础上,运用方差分析法对牛皮礁站波能指标进行分析,结果见表 3。

选择 2 个置信度作为判别区间,0.25 和 0.001。通过查 F 分布表可知, $F_{0.25}(7,35)=1.37$, $F_{0.001}(7,35)=4.59$ 。

由表 3 可知,中心气压、距离和移动风速的 F 均大于 $F_{0.001}(7,35)$,说明这 3 个因素均有较为显著的影响,其中距离的影响最大。而最大风速半径的 F 小于 $F_{0.25}(7,35)$,说明台风最大风速半径为不显著影响因素。

3 典型路径的包络线

骤淤对距离和中心气压变化最敏感,移动风速次之,而对最大风速半径不敏感。故选择距离和中心气压表达可能引起骤淤的台风,其他 2 个参数在计算中选取有统计代表性的取值。选取的原则是较易在长江口区域形成波能较大、持续时间较长的波浪。根据上述原则,最大风速半径取合理范围内的最大值,移动风速取可能范围内的最小值。

表 3 正交试验方差分析结果

Table 3 Variance analysis results of orthogonal test

方差来源因素	偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	F
中心气压	357 473.63	7	51 067.66	9.36
距 离	493 165.20	7	70 452.17	12.92
最大风速半径	14 924.00	7	2 132.00	0.39
移动风速	287 906.34	7	41 129.48	7.54
误 差	190 907.18	35	5 454.49	

注: F 为方差检验(又称 F 检验)的判别参数,与给定显著水平的标准 F 值相比较, F 值越大,说明因素之间效果越明显。

3.1 移动风速和最大风速半径的概化

台风移动风速通常与台风所在的中尺度气流槽的速度相关性较大,但台风形成后且行进过程中不受陆地影响,气压和移动风速总体也呈现一定的规律,即台风中心气压越低,则移动风速越快。长江口同纬度台风移动风速与中心气压的关系见图2。

若假定移动风速选取图2所示的下包络线,基本可涵盖所有的东侧过境台风的移动风速,即移动风速满足下式:

$$V_{el} = -0.33P_{re} + 339$$

(1)

式中: V_{el} ——移动风速; P_{re} ——台风中心气压。

最大风速半径是风场计算的难题,近年来有诸多文献做过讨论,根据文献[11, 14-15]中公式,计算风圈明显小于影响长江口区域台风的最大风圈。

台风后报中,通常能够给出十级风圈半径,可以近似地认为在该风圈半径下风圈附近风速可以达到十级风速下限(24.5~28.4 m/s)。因风圈半径在计算中属于不敏感参数,选取十级风圈的拟合值作为最大风圈的计算取值。在通常情况下,最大风速半径是小于十级风圈半径的,故采用该种概化方式得到的最大风速半径计算得到的风场会强于实际风场,计算偏于保守。计算采用的“中心气压-风圈半径”拟合曲线见图3。

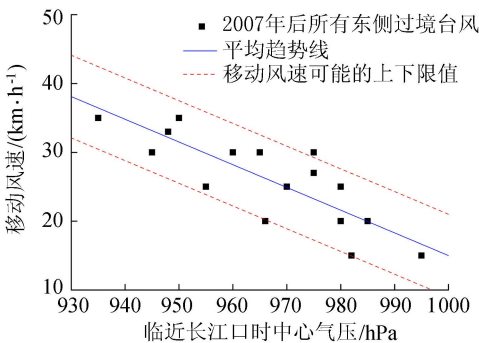


图2 长江口附近东侧过境台风的移动风速及其包络线

Fig.2 Moving wind velocities and related envelopes of typhoons passing through the eastern part of Yangtze Estuary

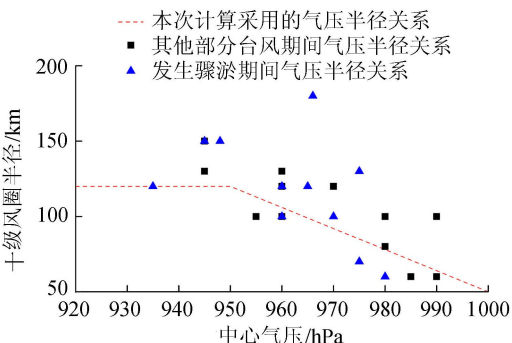


图3 最大风速半径的取值

Fig.3 Evaluation of the maximum typhoon radius

根据式(1),可得到在计算的气压范围内最大风圈在51~55 km,该计算风圈明显小于影响长江口区域台风的最大风圈。

台风后报中,通常能够给出十级风圈半径,可以近似地认为在该风圈半径下风圈附近风速可以达到十级风速下限(24.5~28.4 m/s)。因最大风速半径属于不敏感参数,选取十级风圈的拟合值作为最大风速半径的计算取值。在通常情况下,最大风速半径是小于十级风圈半径的,故采用该种概化方式得到的最大风速半径计算得到的风场会强于实际风场,计算偏于保守。计算采用的“中心气压-风圈半径”拟合曲线见图3。

3.2 引发骤淤的临界波能取值

为得到影响骤淤台风的典型路径及包络线,首先需要确定骤淤期间的波能,并选取临界波能指标作为判断指标。根据实测统计,2010—2015年所有发生骤淤与波能的对应情况见表4。

表4 历次骤淤期间内波能值与统计骤淤量的对应关系
Table 4 Relationship between the cumulative wave energy and statistic siltation volume during every sudden siltation

骤淤期间天气过程	牛皮礁实测波能/ (kW·h)	统计骤淤量/ 10 ⁴ m ³
201007 圆规、201009 玛瑙联合作用		92
2010 年 10 月寒潮		882
201105 米雷		484
201109 梅花	372.2	727
201209 苏拉、201210 达维、201211 海葵 联合作用	405	413
201215 布拉万、201214 天秤		
201216 三巴、2012 年 10 月寒潮 联合作用	578.9	1042
201323 菲特、201324 丹纳斯联合作用	315.3	201
201408 浣熊	242.8	223
201412 娜基莉	314.7	248
201418 巴蓬、201419 黄蜂	649.5	582
201509 灿鸿	385.3	799

注:其中2012年布拉万、天秤、三巴及寒潮合计波能为578.9,其中三巴台风的波能为166 kW·h,2012年10月寒潮的波能为71.4 kW·h;2014年巴蓬和黄蜂台风的合计波能为649.5 kW·h,其中巴蓬台风的波能为190.3 kW·h。

由表 4 可知历次台风引起的骤淤,波能最小值为 $166\text{ kW}\cdot\text{h}$ (三巴台风),计算保守取 $150\text{ kW}\cdot\text{h}$ 作为能够引起骤淤的波能临界值。

3.3 包络线范围及讨论

选取 120 km 的最大计算风圈半径以及式 (1) 给定的移动风速,可以在不同中心气压、不同距离的工况下,通过如上文所示的方法构建风场,并采用 SWAN 模型计算得到牛皮礁站的波浪过程,然后采用计算得到相应的波浪场。

在确定的中心气压下,可以试算得到波能达到 $150\text{ kW}\cdot\text{h}$ 时刻的距离参数。二者绘图可以得到包络线范围,见图 4。

根据图 4 所示,历史上发生的骤淤中,仅有玛瑙台风和黄蜂台风没有在包络线范围内。鉴于骤淤统计是一个较为复杂的步骤,采用的骤淤统计方法、船方量源数据、统计时间区间乃至疏浚工作时间等均可能对航道的骤淤量有一定的影响。根据分析,2010 年玛瑙台风与圆规台风合计的骤淤量仅 92 万 m^3 ,扣除圆规台风影响,其骤淤量可能在数据统计误差范围内。2014 年黄蜂台风同样与巴蓬台风联合影响长江口,其单独对长江口的骤淤影响,也可能存在一定的统计误差。

2015 年 2 次东侧过境台风哈罗拉及天鹅均未能进入计算得到的包络线范围,同样也没有在长江口引发骤淤。

该包络线给出的是可能引发台风的典型台风路径,即预报东侧过境台风临近长江口时,根据预报的距离和中心气压,可以在一定程度上预知骤淤发生的可能性,如“距离-中心气压”参数在包络线范围内,则有较大可能发生骤淤。

4 结 语

为了研究能导致长江口水深航道产生明显骤淤台风的参数敏感性,采用正交试验的方法构造典型台风组次,选择藤田-高桥圆形风场公式和 SWAN 模型分别计算风场和波浪场,最后根据牛皮礁站波能的极差分析和方差分析,得出了台风要素的敏感性次序。研究结果表明台风中心气压和距离为显著影响因素,移动速度显著影响次之,台风最大风圈为不显著影响因素。

选取距离与中心气压为代表参数,概化移动风速和最大风速半径,选取统计得到的 $150\text{ kW}\cdot\text{h}$ 作为能够引起骤淤的临界波能标准,给出了较易引发骤淤的典型包络线范围,该包络线可以依据台风预报过程中的气压和路线参数为骤淤预报及疏浚工作提供参考。

参考文献:

[1] 黄华聪,贾晓,路川藤. 影响长江口深水航道骤淤的非常态天气过程 I : 台风的路径特征及数值验证[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2017, 45 (5) : 432-438. (HUANG Huacong, JIA Xiao, LU Chuanteng . The extraordinary weather process inducing sudden siltation in deepwater navigation channel of Yangtze Estuary I: the typhoon path characteristics and numerical verification[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45 (5) : 432-438. (in Chinese))

[2] 赵德招,刘杰,吴华林. 近十年来台风诱发长江口航道骤淤的初步分析[J]. 泥沙研究, 2012 (2) : 54-60. (ZHAO Dezhaoh, LIU Jie, WU Hualin. Preliminary analysis of typhoon-induced sudden sedimentation in navigation channel in Yangtze Estuary over last decade[J]. Journal of Sediment Research, 2012 (2) : 54-60. (in Chinese))

[3] 徐仲安,王天保,李常英,等. 正交试验设计法简介[J]. 科技情报开发与经济, 2002, 12 (5) : 148-150. (XU Zhongan, WANG Tianbao, LI Changying, et al. Brief introduction to the orthogonal test design[J]. Sci/tech Information Development & Economy, 2002, 12 (5) : 148-150. (in Chinese))

[4] 董如何,肖必华,方永水. 正交试验设计的理论分析方法及应用[J]. 安徽建筑工业学院学报 (自然科学版), 2004, 12 (6) : 103-106. (DONG Ruhe, XIAO Bihua, FANG Yongshui. The theoretical analysis of orthogonal test designs[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry (Natural Science), 2004, 12 (6) : 103-106. (in Chinese))

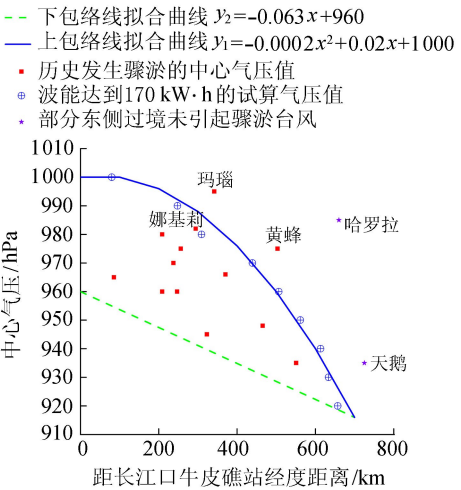


图 4 正交分析计算包络线
Fig. 4 The calculated envelope via orthogonal analysis

[5] 姜同川. 正交试验设计[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1985.

[6] 苑玉凤. 多指标正交试验分析[J]. 湖北汽车工业学院学报,2005, 19(4): 53-56. (YUAN Yufeng. Analysis of multi-target orthogonal experiment[J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2005, 19(4):53-56. (in Chinese))

[7] 邓振伟,于萍,陈玲. SPSS 软件在正交试验设计、结果分析中的应用[J]. 电脑学习, 2009(5): 15-17. (DENG Zhenwei, YU Ping, CHEN Ling. Application of SPSS software in orthogonal design and result analysis[J]. Computer Study, 2009(5): 15-17. (in Chinese))

[8] FUJITA T. Pressure distribution within typhoon[J]. Geophysical Magazine. 1952, 23(4): 437-451.

[9] 蒋小平,钟中,张金善,等. 台风浪模拟预报中的风场比较研究[J]. 海洋通报, 2007, 26(2): 11-19. (JIANG Xiaoping, ZHONG Zhong, ZHANG Jinshan, et al. Comparison study on the surface wind over ocean in typhoon waves simulation[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(2):11-19. (in Chinese))

[10] BOOIJ N, HOLTHUIJSEN L H, RIS R C. The “SWAN” wave model for shallow water[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1996, 1(25): 668-676.

[11] OU S, LIAU J, HSU T, et al. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(8): 947-971.

[12] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999, 104(C4): 7649-7666.

[13] ZIJLEMA M. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids[J]. Coastal Engineering, 2010, 57(3): 267-277.

[14] LAJOIE F, WALSH K. A technique to determine the radius of maximum wind of a tropical cyclone [J]. Weather and Forecasting, 2008, 23(5): 1007-1015.

[15] 徐福敏, 张长宽. 台风浪对长江口深水航道淤积的影响研究[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(2): 137-143. (XU Fumin, ZHANG Changkuan. Study of the effect of storm waves on the rapid deposition of the Yangtze River Estuary channel[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(2):137-143. (in Chinese))

+++++

· 简讯 ·

流域水资源管理与综合治理国际学术研讨会将在南京市召开

水问题是 21 世纪全世界面临的重大问题。在气候变化与高强度人类活动共同作用下,水问题正面临着新的挑战,在水灾害、水资源、水环境、水生态 4 个方面问题尤为突出:气候变化与城市化导致突发性极端洪涝事件的不确定性增加,洪涝防治面临新的挑战;全球变化背景下水资源禀赋和供需格局显著变化,水资源保障风险加剧;高强度人类活动影响下河流变化过程与生境演变驱动机制复合性加剧;城镇化和大规模开发出现的水环境污染问题凸显。随着经济社会的高速发展,以上问题相互影响、彼此叠加,越来越显示出全局性、系统性和综合性特点。

为探讨国内外流域水资源与综合治理等方面的最新研究进展,提高水资源利用、精细化管理及可持续发展能力,由河海大学、中国科学院南京地理与湖泊研究所、长安大学主办,北京师范大学协办的流域水资源管理与综合治理国际学术研讨会将于 2017 年 11 月 17—19 日在江苏省南京市召开。会议主题包括水信息技术与方法、流域水文与水资源管理、城市水环境与水生态、流域综合治理与创新管理。

会议网址:www.iwaterconference.org/

(本刊编辑部供稿)