

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 06. 12

气象因素作用下于桥水库悬浮物对总磷的影响

果有娜¹,张 晨²

(1. 中水北方勘测设计研究有限责任公司,天津 300222; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要:为揭示天津市水源地于桥水库气候变化对水质的潜在影响,采用广义可加模型(generalized additive model,GAM)对 2000—2011 年的气象数据及水质数据进行非参数回归分析,研究降雨量、最大风速和太阳辐射与悬浮物(SS)、总磷(TP)之间的相关关系。结果表明,3 种气象要素均对 SS 浓度具有一定影响,最大风速与 SS 在春季表现出显著的正相关关系,太阳辐射与 SS 在全年样本中同样表现为良好的正相关;由于 SS 的吸附性及再悬浮作用,TP 与 SS 间也表现出显著的正相关关系。

关键词:气象因素;悬浮物;总磷;广义可加模型;于桥水库

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1004 - 6933(2018)06 - 0071 - 05

Effects of suspended solids on total phosphorus in Yuqiao Reservoir under meteorological conditions

GUO Youna¹,ZHANG Chen²

(1. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to reveal the potential impacts of climate change on water quality in Yuqiao Reservoir, Tianjin water source area, the generalized additive model (GAM) was used to analyze the non-parametric regression of meteorological data and water quality data from 2000 to 2011. The correlation between rainfall, maximum wind speed, solar radiation, suspended solids (SS) and total phosphorus (TP) were studied. The results show that the three meteorological factors have certain effects on SS concentration. The maximum wind speed has a significant positive correlation with SS in spring, and the solar radiation and SS also have a good positive correlation in annual samples. Due to the adsorption and resuspension effect of SS, TP and SS also show a significant positive correlation.

Key words: meteorological factor; suspended solids; total phosphorus; generalized additive model; Yuqiao Reservoir

悬浮物(SS)是衡量水污染程度的重要指标,它的存在会影响湖泊水色,降低水体透明度和溶解氧含量,降低水生植物、无脊椎动物以及鱼群数量,从而使水质变差^[1-2]。SS 由水体中无生命颗粒物及浮游生物组成,其中无生命颗粒物主要为颗粒有机碎屑^[3]。已有的研究表明,SS 的种类和浓度同时受内部过程(如沉降、再悬浮、微生物生长、生物过滤等)及外部过程(如大气沉降、岸坡侵蚀、陆地径流等)所影响^[4-5]。SS 还可能随着生活用水、工农业用水以及城市面积的增加而增加^[6]。同时,SS 也会对水质产生一定的直接影响,如 SS 会增加细菌与氮的接触机会,加速硝化与反硝化过程^[7-8]。SS 具有一定的吸附能力,因此常常是水生生物污染物及毒性物质的来源^[9]。张海威等^[10]利用遥感技术探究艾比湖流域地表水水体 SS 及营养物的空间分布特征,发现 SS 与总氮、总磷(TP)均存在着显著的相关关系。

基金项目:国家自然科学基金(51679160);天津市自然科学基金(16YFXTSF00310)
作者简介:果有娜(1979—),女,高级工程师,主要从事流域综合规划工作。E-mail:nayouguo@163.com
通信作者:张晨,副教授。E-mail:emil@tju.edu.cn

周舟等^[11]利用 MODIS 卫星遥感数据探究渤海 SS 浓度的长期变化趋势及其影响机制,发现 SS 浓度的变化可能与风速有关。

于桥水库是天津市饮用水供水水源地,探究其水质变化的影响因素和机制十分必要。气象因素通过对 SS 的影响,进而对水质有着间接的影响^[5],利用于桥水库 2000—2011 的气象数据和水质数据,通过广义可加模型 (generalized additive model, GAM) 探究气象要素对 SS 的影响以及 SS 与 TP 浓度的相关性。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

于桥水库又名翠屏湖,位于天津市蓟州区 (117°34'E,40°02'N),属温带季风气候,最大水深 12.16 m,平均水深 4.74 m。水库流域面积为 2060 km²,总库容为 15.59 亿 m³,正常蓄水位时水域面积 86.8 km²。沙河、淋河、黎河为流域内的三大支流,汇流入于桥水库,出流至州河。于桥水库为引滦入津工程中的重要调蓄水库,南水北调通水前是天津市唯一水源地,长期向天津市区供水,通水后主要向天津市滨海新区等地供水。农业用地占地面积 721.8 km²,约占整个流域面积的 35%。流域年平均水资源量为 1.9 亿 m³,蒸发量 6000 万 m³。已有研究成果表明,于桥水库氮磷比较高,为磷限环境,且处于沉水植物占优的清水状态^[12-13]。

1.2 数据来源

采用于桥水库库中心站的监测数据,该测站自 2000 年以来每半月对水质进行一次监测,依据

《水和废水监测分析方法》^[14]采集、保存、分析水质。采用 2000—2011 年的 TP 和 SS 的质量浓度数据进行分析。

气象数据通过中国气象科学数据共享服务系统 (<http://data.cma.cn/>) 获取,选取水库流域内气象站 (117°57'E, 40°12'N) 的降水量、平均风速、太阳辐射日值数据进行研究。月累积降水量、月最大风速及太阳辐射的月均值由每日监测值计算得出。

1.3 研究方法

GAM 模型是广义线性模型的半参数扩展模型,其假设函数是相加的,函数的组成成分是光滑函数^[15]。基本模型为

$$G[E(Y)] = b_0 + s_1(X_1) + \cdots + s_m(X_m) \quad (1)$$

式中: $E(Y)$ 为因变量的数学期望值; G 为连接函数; b_0 为截距; $s_1, s_2, \cdots, s_m$ 为自变量 $X_1, X_2, \cdots, X_m$ 的平滑函数。

GAM 模型既可进行参数回归拟合,也可进行半参数及非参数回归拟合,因此其拟合方式更为自由灵活^[16],具体应用 R 语言软件实现统计分析^[17]。

将数据按照季节划分,即 12 月、1 月、2 月为冬季;3 月、4 月、5 月为春季;6 月、7 月、8 月为夏季,9 月、10 月、11 月为秋季。针对每个季节,利用广义可加模型分别拟合 SS 与气象因素及 TP 与 SS 质量浓度的相关关系,利用交叉验证方法来确定平滑参数。

2 结果分析

2.1 气象要素、SS 和 TP 质量浓度的季节分布

表 1 为于桥水库不同季节气象要素、SS 和 TP 质

表 1 于桥水库气象要素、SS 和 TP 质量浓度统计情况

指 标	春季					夏季				
	降水量/mm	最大风速/ (m·s ⁻¹)	太阳辐射/ (MJ·m ⁻²)	ρ (SS)/ (mg·L ⁻¹)	ρ (TP)/ (mg·L ⁻¹)	降水量/ mm	最大风速/ (m·s ⁻¹)	太阳辐射/ (MJ·m ⁻²)	ρ (SS)/ (mg·L ⁻¹)	ρ (TP)/ (mg·L ⁻¹)
最小值	0	6.70	365.91	1.00	0.015	31.30	5.00	456.42	1.50	0.020
下四分位数	7.85	7.75	471.58	2.50	0.020	72.95	6.08	497.29	4.00	0.030
中位数	24.25	8.25	533.75	4.00	0.025	119.20	7.65	536.79	6.00	0.035
上四分位数	37.80	9.00	575.75	9.25	0.035	163.10	8.85	561.07	12.00	0.045
最大值(去除 偏离值)	84.80	11.70	678.57	16.00	0.048	278.70	12.40	633.41	21.00	0.065
均 值	23.10	8.53	533.57	4.92	0.027	123.47	7.74	530.85	7.57	0.039

指 标	秋季					冬季				
	降水量/mm	最大风速/ (m·s ⁻¹)	太阳辐射/ (MJ·m ⁻²)	ρ (SS)/ (mg·L ⁻¹)	ρ (TP)/ (mg·L ⁻¹)	降水量/ mm	最大风速/ (m·s ⁻¹)	太阳辐射/ (MJ·m ⁻²)	ρ (SS)/ (mg·L ⁻¹)	ρ (TP)/ (mg·L ⁻¹)
最小值	0.20	4.50	179.95	2.00	0.017	0	5.50	152.57	1.00	0.006
下四分位数	8.25	6.00	265.53	4.00	0.030	0.10	6.15	211.10	2.50	0.020
中位数	23.80	6.65	342.02	6.00	0.040	1.60	7.00	244.44	3.50	0.025
上四分位数	49.80	7.78	392.31	9.00	0.047	5.05	7.73	270.19	5.63	0.030
最大值(去除 偏离值)	116.60	9.70	484.08	18.00	0.059	9.60	9.60	355.30	9.00	0.035
均 值	30.33	6.85	330.64	6.90	0.038	2.51	7.08	243.58	3.70	0.023

量浓度统计情况。由表 1 可见,于桥水库所在区域全年降水量主要集中在夏季,最大值达 278.70 mm,均值 123.47 mm,秋季其次,春季较少,冬季干燥,冬季降雨量均值仅 2.51 mm。最大风速春季高于其他季节,均值达到 8.53 m/s,其次夏季,秋冬季较低。太阳辐射春夏季远高于秋冬季,且夏季分布较为集中,冬季辐射最低。SS 质量浓度夏秋季较高,春冬季较低,夏季平均值高达 7.57 mg/L,冬季平均值仅为 3.70 mg/L。TP 质量浓度最大值也出现在夏季,为 0.065 mg/L,且夏季 TP 质量浓度平均值高于其他季节,其次为秋季,春冬季较小。可见,由于夏季雨量充沛,径流量较大,冲刷作用增强,增加了将颗粒物带入湖泊的可能,因此夏季出现了较高的 SS 浓度。此外,较大的径流易将营养物带入湖泊,且 SS 具有一定的吸附性,二者为夏季较高的 TP 浓度提供了可能。

2.2 气象要素、SS 及 TP 之间的相关关系

利用 GAM 模型对 2000—2011 年不同季节 SS 质量浓度与各气象要素的相关性进行分析(表 2)。由表 2 可见,SS 质量浓度与各气象要素间均在某季节或全年样本中存在相关关系。其中,具有显著相关性且有明显正负趋势的关系有 SS 质量浓度与最大风速全年样本、最大风速春季样本、降水量冬季样本和太阳辐射全年样本。利用 GAM 模型对这些关

表 2 不同季节 SS 质量浓度与各气象要素的相关性

季节	相关系数		
	降水量	最大风速	太阳辐射
春季	0.424	0.012 *	0.073
夏季	0.519	0.844	0.542
秋季	0.914	0.297	0.072
冬季	0.003 *	0.782	0.514
年均	0.081	0.000 *	0.021 *

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关。

系进行分析,得到不同季节 SS 质量浓度与气象要素相关性分析回归曲线见图 1,图中横坐标为各气象因素实测值,纵坐标为自变量的平滑函数 s_{ss} ,阴影部分代表 95% 置信区间。由图 1 可见,春季 SS 随最大风速的增加而增加($p = 0.012$),在全年样本中,当最大风速较高时,也出现了相同的趋势($p = 0.000$),该现象说明了风的扰动对 SS 具有很大的影响。风会造成沉积物再悬浮,从而导致 SS 浓度增大。于桥水库中 SS 质量浓度与最大风速之间表现出的正相关与 Tammeorg 等^[18]的观点一致。冬季 SS 质量浓度与降水量之间表现出显著的相关关系,在降雨量较高时,二者表现为正相关,造成该正相关现象的可能原因有两点:①降水冲刷颗粒物并将其带入湖泊;②水流增大引起再悬浮。窦月芹等^[19]研究表明降雨径流会将 SS 带入巢湖水体;边博等^[20]在对镇江城市降雨径流中悬浮物浓度的研究中也得

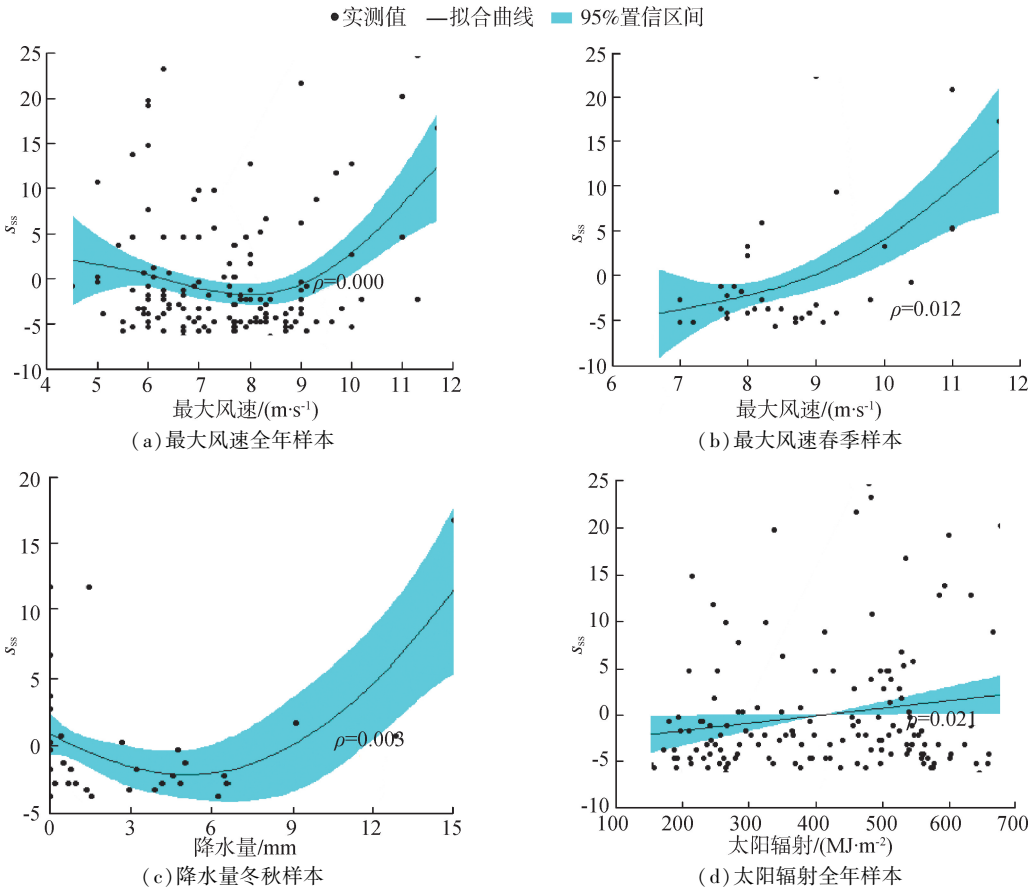


图 1 不同季节 SS 质量浓度与气象要素相关性分析回归曲线

出了相似的结论。此外,在全年样本中,SS 质量浓度与太阳辐射之间也表现为显著正相关。正如 Lagomarsino 等^[21]所述,太阳辐射通过控制供给浮游生物群落的辐射能从而影响 SS。光照在限制浮游植物初级生产力中起到了重要的作用,而 SS 很可能受藻类光合作用的影响^[18]。

对不同季节 TP 与 SS 质量浓度进行相关性分析,结果表明,除冬季外,二者均呈现出显著相关性($p < 0.050$),但仅在夏季呈现出显著的正相关趋势。图 2 为夏季 TP 与 SS 质量浓度相关性分析回归曲线。由图 2 可见,夏季雨量充沛,径流量大,河道及湖泊中的冲刷作用加大,再悬浮将进一步将富含磷元素的沉积颗粒卷入水体,从而导致磷源释放,加之 SS 自身的吸附性,二者表现出显著的正相关关系,Tammeorg 等^[18]在研究中得出了同样的结论。因此降低 SS 质量浓度可能会有效降低颗粒态磷含量,从而有助于水质的改善。

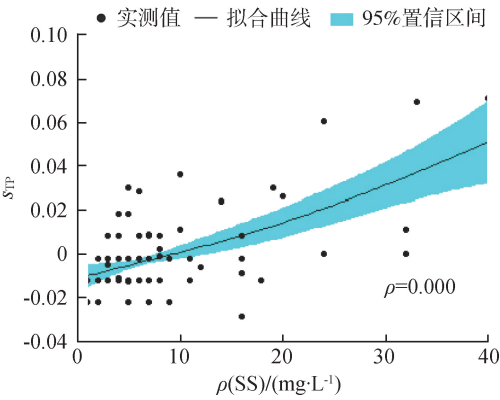


图 2 夏季 TP 与 SS 质量浓度相关性分析回归曲线

从上述气象要素、SS 及 TP 质量浓度间的相关性分析可以看出,在一定程度上,气象要素通过影响湖泊中 SS 质量浓度间接地影响着 TP 质量浓度。降水量大时,增加径流引起的冲刷作用将更多的颗粒物带入水体,增加水体中 SS 质量浓度;而 SS 具有吸附性,这也可能导致水体中 TP 质量浓度的升高。此外,风扰动及较大的径流均会造成再悬浮,不仅增加了水体中的 SS 浓度,也会促进沉积物中营养物质的释放。

3 结 语

通过广义可加模型分析气象因素作用下于桥水库 SS 对 TP 质量浓度的影响,结果表明 SS 质量浓度与最大风速、降水量、及太阳辐射之间存在着显著的相关性,TP 与 SS 质量浓度之间也存在显著的相关性。春季风扰动、冬季降水及全年太阳辐射均会导致 SS 质量浓度升高,而由于 SS 的吸附性及再悬浮作用,又会导致 TP 质量浓度的升高。

参考文献:

[1] 黄宜凯,濮培民,胡春华,等. 湖泊水体中悬浮物降解的实验研究[J]. 水资源保护,1998(4):27-31. (HUANG Yikai, PU Peimin, HU Chunhua, et al. Experimental study on degradation of suspended substance in lake water[J]. Water Resources Protection,1998(4):27-31. (in Chinese)).

[2] 王书航,姜霞,王雯雯,等. 蠡湖水体悬浮物的时空变化及其影响因素[J]. 中国环境科学,2014,34(6):1548-1555. (WANG Shuhang, JIANG Xia, WANG Wenwen, et al. Spatial-temporal dynamic changes of the water suspended matter and its influencing factors in Lihu Lake [J]. China Environmental Science, 2014, 34(6):1548-1555. (in Chinese))

[3] 常秀岭,刘家寿,胡传林,等. 湖北浮桥河水库悬浮物的季节变化[J]. 湖泊科学,2010,22(2):300-306. (CHANG Xiuling, LIU Jiashou, HU Chuanlin et al. Seasonal variation of suspended solids in Fuqiaohe Reservoir, Hubei[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(2):300-306. (in Chinese))

[4] MULLING B T M, BOOMEN R M, CLAASSEN T H L, et al. Physical and biological changes of suspended particles in a free surface flow constructed wetland[J]. Ecological Engineering, 2013, 60(11):10-18.

[5] HUR J, JUNG M C. The effects of soil properties on the turbidity of catchment soils from the Yongdam dam basin in Korea [J]. Environmental Geochemistry & Health, 2009, 31(3):365-377.

[6] 冯麒麟,胡海英,黄国如. 潭江泗合水流域降雨径流非点源污染特征分析[J]. 水资源保护,2016,32(3):143-148. (FENG Qiyu, HU Haiying, HUANG Guoru. Analysis of characteristics of non-point source pollution in rainfall-runoff process in Siheshui Watershed of Tanjiang Valley [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3):143-148. (in Chinese))

[7] 叶许春,孟元可,张永生,等. 三峡库区香溪河回水区营养状态变化特征与驱动因子[J]. 水资源保护,2018,34(4):80-85. (YE Xuchun, MENG Yuanke, ZHANG Yongsheng, et al. Variation characteristics of trophic states of Xiangxi River backwater area in Three Gorges Reservoir and its driving factors [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4):80-85. (in Chinese))

[8] 姚晓龙,徐会显,唐陈杰. 鄱阳湖水体悬浮物反硝化潜力模拟研究[J]. 中国环境科学,2015,35(3):846-855. (YAO Xiaolong, XU Huixian, TANG Chenjie. Denitrification potential of high suspend sediments in Poyang Lake, China [J]. China Environmental Science, 2015, 35(3):846-855. (in Chinese))

[9] 李云峰,袁旭音,李兵,等. 长江下游重金属在水相:悬浮物中的分布与输移[J]. 安徽农业科学,2010,38

(6);3098-3101. (LI Yunfeng, YUAN Xuyin, LI Bing et al. Distribution and transport of heavy metals in water phase and suspended matter in lower Yangtze River[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38 (6): 3098-3101. (in Chinese))

[10] 张海威,张飞,李哲,等. 艾比湖流域地表水水体悬浮物、总氮与总磷光谱诊断及空间分布特征[J]. 生态环境学报, 2017, 26 (6): 1042-1050. (ZHANG Haiwei, ZHANG Fei, LI Zhe et al. Spectral diagnosis and spatial distribution of SS, TN and TP in surface water in Ebinur Lake watershed[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(6): 1042-1050. (in Chinese))

[11] 周舟,张万磊,江文胜,等. 渤海表层悬浮物浓度长期变化(2003-2014 年)的卫星反演研究[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47 (3): 10-18. (ZHOU Zhou, ZHANG Wanlei, JIANG Wensheng, et al. Long-term variation of suspended sediment concentration in the Bohai Sea based on retrieved satellite data [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(3): 10-18. (in Chinese))

[12] CHEN Y Y, ZHANG C, GAO X P. Long-term variations of water quality in a reservoir in China[J]. Water Science & Technology, 2012, 65(8): 1454-1460.

[13] ZHANG C, GAO X P, WANG L Y, et al. Modelling the role of epiphyton and water level for macrophyte development with a modified submerged aquatic vegetation model in a shallow reservoir in China [J]. Ecological Engineering, 2015, 81: 123-132.

[14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社, 2002: 39-47.

[15] 邓建明,秦伯强,王博雯. 广义可加模型在 R 中的快捷实现及蓝藻水华预测分析中的应用[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 835-842. (DENG Jianming, QIN Boqiang, WANG Bowen. Quick implementing of generalized additive models using R and its application in blue-green algal bloom forecasting[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3): 835-842. (in Chinese))

[16] 冯国双,陈景武,张国英. 用 GAM 程序拟合光滑样条非参数回归[J]. 数理医药学杂志, 2005, 18(5): 403-405. (FENG Guoshuang, CHEN Jingwu, ZHANG Guoying. Using GAM procedure to fit nonparametric regression of smoothing splines[J]. Journal of Mathematical Medicine, 2005, 18(5): 403-405. (in Chinese))

[17] WOOD S N. Generalized additive models: an introduction with R[M]. London: Chapman and Hall, 2006

[18] TAMMEORG O, NIEMISTO J, MOLS T, et al. Wind-induced sediment resuspension as a potential factor sustaining eutrophication in large and shallow Lake Peipsi [J]. Aquatic Sciences, 2013, 75(4): 559-570

[19] 窦月芹,吴涓,陈众,等. 合肥春季雨水径流污染过程及特征分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 86-90. (DOU Yueqin, WU Juan, CHEN Zhong, et al. Spring rain runoff pollution process and its characteristics analysis in Hefei City[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 86-90. (in Chinese))

[20] 边博,朱伟,黄峰,等. 镇江城市降雨径流营养盐污染特征研究[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 19-25. (BIAN Bo, ZHU Wei, HUANG Feng, et al. Characterizing Nutrients of Urban Stormwater Runoff in Zhenjiang[J]. Environmental Science, 2008, 29(1): 19-25. (in Chinese))

[21] LAGOMARSINO L, DIOVISALVI N, BUSTINGORRY J, et al. Diel patterns of total suspended solids, turbidity, and water transparency in a highly turbid, shallow lake(Laguna Chascomús, Argentina) [J]. Hydrobiologia, 2015, 752 (1): 21-31.

(收稿日期:2018-03-26 编辑:王 芳)

• 信息播报 •

“2018 中国水资源高效利用与节水技术论坛”将在广州举办

为贯彻落实新时期治水方针,坚持节水优先,实施国家节水行动,推动水资源高效利用和节水工作科学、高效、安全开展,提升水资源高效利用水平,由河海大学、中国水利学会共同主办的、以“跨界治水、融合与创新”为主题的“2018 中国水资源高效利用与节水技术论坛”将于 2018 年 12 月 21—23 日在广州举办。本次论坛旨在交流水资源高效利用与节水技术的先进适用技术和跨界治水经验,活跃学术气氛,激励广大水利科技工作者的积极性和创造性,与会者通过学习交流,促进产学研用深度合作,开阔视野,拓展思路,结合自己的工作实际,解决水资源高效利用科学研究和技术应用中的热点和难点问题,共同探讨解决方法和推动路径,加快节水型社会建设,推动水资源高效利用和可持续发展。

论坛面向全国征集论文,凡符合会议主题的、未在刊物或会议上公开发表的论文,均可投稿,投稿截止日期为 2018 年 12 月 15 日。经专家评审后,入选论文将收入《2018 中国水资源高效利用与节水技术论坛》论文集。本次论坛将进行优秀论文评选,将评选出一等奖 2 名、二等奖 3 名、三等奖 5 名、优秀奖 10 名,获奖论文将推荐给《水资源保护》择优刊出。

(本刊编辑部供稿)