

# 南四湖流域平原区地下水位影响因子研究

付雅君, 曹升乐, 杨裕恒

(山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**以南四湖流域平原区3个监测点2000—2013年实测资料为基础,运用SPSS软件对影响地下水位变化的因素进行定量分析,利用主成分分析法找出影响地下水位变化的4个主要因子,并用人工神经网络模型模拟影响因子与地下水位之间的关系。结果表明:模型模拟结果与实际结果拟合较好,湖水位对平原区地下水位影响最大,其次为降水量和地下水开采量。针对研究结果,需对南四湖流域强化节水措施、提高当地再生水的利用率、科学合理配置有限的客水资源。

**关键词:**地下水位;影响因子;SPSS软件;南四湖流域

**中图分类号:**TV214

**文献标志码:**A

**文章编号:**1004-6933(2016)S1-0001-05

南四湖流域平原区地处半干旱半湿润气候带,地表水资源较为匮乏,地下水是该区主要供水水源。近年来,随着地下水资源过度开发利用,平原区地下水漏斗面积逐年增加,地下水水质恶化,同时也引起了地面沉降、海(咸)水入侵等环境问题。因此,研究地下水变化规律及其影响因子,对地下水的合理开发利用以及当地社会经济的可持续发展有着重要的意义。

## 1 研究区概况

南四湖流域平原区总面积23510 km<sup>2</sup>,地形由东西两侧向湖区微倾斜,地貌单元以南四湖—京杭运河为界,以东为山前冲洪积平原地貌,以西则为冲击湖积平原地貌。包气带岩性受第四季沉积环境影响,湖西平原古河道带区包气带岩性主要为粉细砂、黏质砂土、黏质砂土与砂质黏土互层结构;古河道间带则以黏质砂土、砂质黏土为主。湖东山前冲洪积平原区包气带岩性总体上较湖西平原区粗,以黏质砂土、细中砂、砂质黏土为主,在冲洪积扇中部以中粗砂、黏质砂土为主。平原区浅层孔隙含水层组底板埋深50~60 m,由于内部缺少连续弱透水层,水力联系较密切,为潜水—微承压水。浅层地下水位埋深湖东平原较湖西大,一般湖东区3~10 m,湖西区1~3 m,局部小于1 m。地下水总体径流方向与地形变化基本一致,由东西两侧向南四湖—京杭运河方

向径流<sup>[1]</sup>。本次研究选取紧邻南四湖上级湖的济宁市谷亭镇、王庙镇、清河镇3个监测站点,站点编号分别为M1160250、M1160060和M1160180,地理位置见图1。



号为1~14,样本数据的原始值见表1,南四湖流域平原区2000—2013年降水量变化、地表水入渗量变化、地下水开采量变化情况图2~4,南四湖水位变化情况见图5,研究区地下水位平均埋深变化情况见图6。

表 1 样本数据原始值

| 编号 | 年份   | 南四湖<br>水位/<br>m | 当年<br>降水量/<br>mm | 上一年<br>降水量/<br>mm | 地下水<br>开采量/<br>亿 m <sup>3</sup> | 地表水<br>入渗量/<br>亿 m <sup>3</sup> | 地下<br>水位/<br>m |
|----|------|-----------------|------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|
| 1  | 2000 | 34.28           | 604.6            | 550.4             | 20.15                           | 2.01                            | 33.26          |
| 2  | 2001 | 33.42           | 619.4            | 604.6             | 20.12                           | 1.75                            | 33.56          |
| 3  | 2002 | 32.98           | 389.6            | 619.4             | 18.67                           | 1.12                            | 30.47          |
| 4  | 2003 | 33.20           | 879.4            | 389.6             | 16.75                           | 2.58                            | 18.34          |
| 5  | 2004 | 34.28           | 859.8            | 879.4             | 16.39                           | 2.37                            | 35.35          |
| 6  | 2005 | 34.32           | 944.3            | 859.8             | 14.00                           | 2.43                            | 50.83          |
| 7  | 2006 | 34.28           | 762.6            | 944.3             | 15.25                           | 2.46                            | 35.00          |
| 8  | 2007 | 34.30           | 834.6            | 762.6             | 16.53                           | 2.59                            | 35.12          |
| 9  | 2008 | 34.25           | 692.3            | 834.6             | 16.84                           | 2.54                            | 34.65          |
| 10 | 2009 | 34.20           | 702.7            | 692.3             | 15.78                           | 2.63                            | 21.91          |
| 11 | 2010 | 34.32           | 737.7            | 702.7             | 11.68                           | 3.32                            | 16.80          |
| 12 | 2011 | 34.28           | 771.3            | 737.7             | 9.95                            | 3.41                            | 33.79          |
| 13 | 2012 | 34.35           | 516.9            | 771.3             | 9.49                            | 3.44                            | 33.74          |
| 14 | 2013 | 34.11           | 574.0            | 516.9             | 9.26                            | 3.45                            | 32.70          |

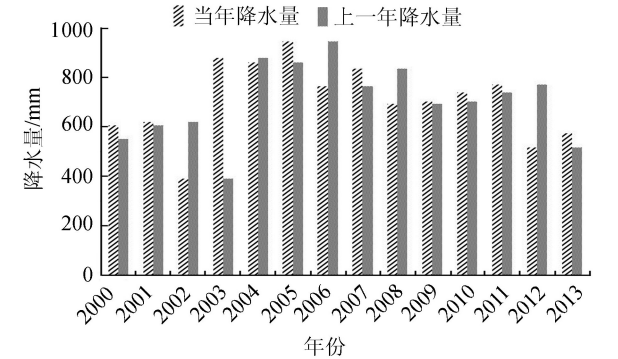


图 2 研究区降水量变化

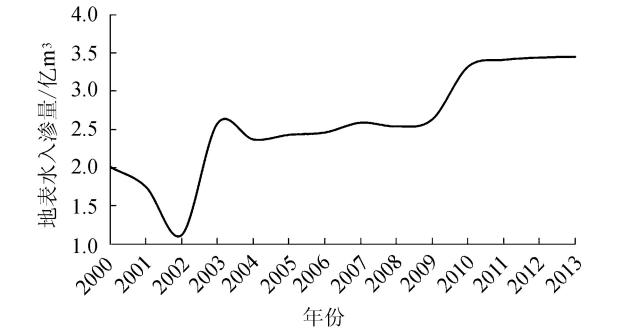


图 3 研究区地表水入渗量变化

从图2~6可以看出,地下水位变化趋势与降水量、南四湖水位、地下水开采量及地表水入渗量变化关系明显。2000—2002年南四湖流域连续3年干旱,南四湖水位持续下降,加之地下水大量超采,导致这段时期内地下水位下降;2003—2005年随着降水增多、南四湖水位上升、地表水入渗补给以及地下水开采量的减少,地下水位逐渐上升;2006—2010年南四湖水位基本不变,但由于地下水开采量的增

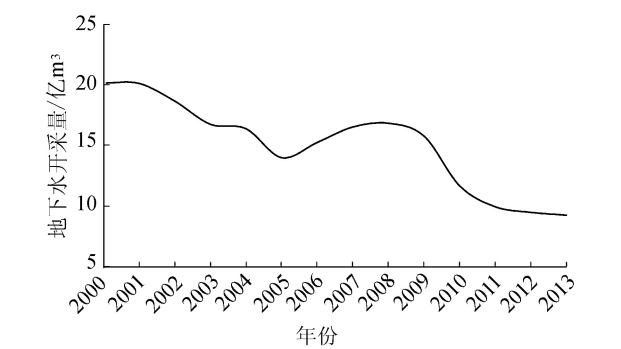


图 4 研究区地下水开采量变化

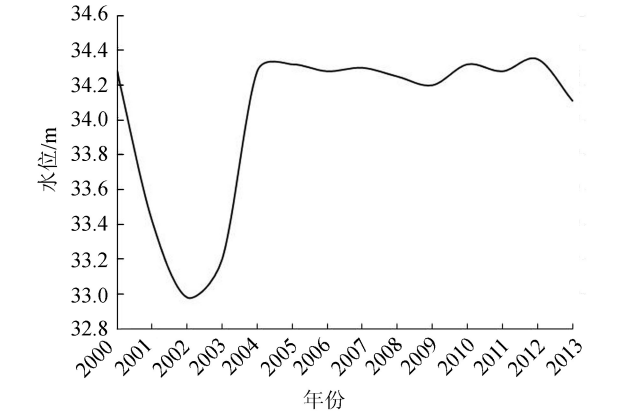


图 5 南四湖水位变化

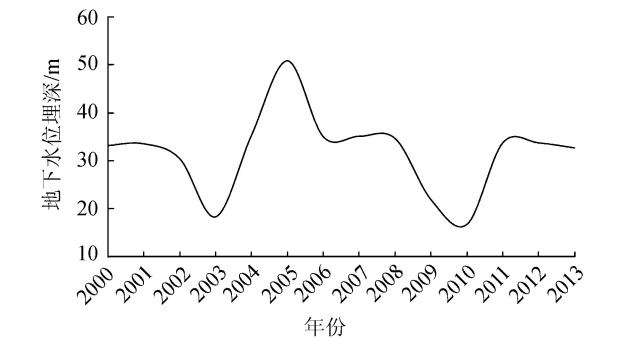


图 6 研究区地下水位平均埋深变化

加,使得地下水位有所下降;2011—2013年南四湖水位和地下水开采量均较为稳定,地下水位也趋于稳定。

### 3 基于 SPSS 的地下水位变化影响因子分析

#### 3.1 数据标准化处理

由于各影响因子的数值单位不统一,为了避免大数值因子弱化小数值因子,要对其进行归一化,本文采用调整标准化方法<sup>[3]</sup>,其计算公式为

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{1}$$

式中: $x'$ 为归一化后的数据; $x$ 为原始数据; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为原始数据的最大值和最小值。

调整的标准化值介于0和1之间,将表1进行标准化后的值见表2。

表 2 样本数据标准化值

| 编号 | 年份   | 南四湖<br>水位 | 当年<br>降水量 | 上一年<br>降水量 | 地下水<br>开采量 | 地表水入<br>渗补给量 | 地下水<br>水位 |
|----|------|-----------|-----------|------------|------------|--------------|-----------|
| 1  | 2000 | 0.95      | 0.39      | 0.29       | 1.00       | 0.38         | 0.48      |
| 2  | 2001 | 0.32      | 0.41      | 0.39       | 1.00       | 0.27         | 0.49      |
| 3  | 2002 | 0.00      | 0.00      | 0.41       | 0.86       | 0.00         | 0.40      |
| 4  | 2003 | 0.16      | 0.88      | 0.00       | 0.69       | 0.63         | 0.05      |
| 5  | 2004 | 0.95      | 0.85      | 0.88       | 0.65       | 0.54         | 0.55      |
| 6  | 2005 | 0.98      | 1.00      | 0.85       | 0.44       | 0.56         | 1.00      |
| 7  | 2006 | 0.95      | 0.67      | 1.00       | 0.55       | 0.58         | 0.53      |
| 8  | 2007 | 0.96      | 0.80      | 0.67       | 0.67       | 0.63         | 0.54      |
| 9  | 2008 | 0.93      | 0.55      | 0.80       | 0.70       | 0.61         | 0.52      |
| 10 | 2009 | 0.89      | 0.56      | 0.55       | 0.60       | 0.65         | 0.15      |
| 11 | 2010 | 0.98      | 0.63      | 0.56       | 0.22       | 0.94         | 0.00      |
| 12 | 2011 | 0.95      | 0.69      | 0.63       | 0.06       | 0.98         | 0.50      |
| 13 | 2012 | 1.00      | 0.23      | 0.69       | 0.02       | 1.00         | 0.50      |
| 14 | 2013 | 0.82      | 0.33      | 0.23       | 0.00       | 1.00         | 0.47      |

3.2 数据降维分析

在实际研究中往往希望尽可能多地收集相关数据,以期能对问题做比较全面、完整的把握和认识。但是,变量较多时会增加分析问题的复杂性,因为变

量之间可能存在一定的相关性,从而导致多变量之间信息出现重叠现象。为了克服这种相关性、重叠性,通常采用较少的变量来代替原来较多的变量,而这种代替可以反映原来多个变量的大部分信息,这就是“降维”的思想<sup>[4]</sup>。

本次研究选取南四湖水位、当年降水量、上一年降水量、地下水开采量和地表水入渗补给量 5 个输入变量为研究对象,运用 SPSS 软件中的“主成分分析法”对其进行降维处理,得到相关矩阵的特征值、方差贡献率等数据,见表 3 ~4 和图 7。

表 3 相关矩阵

| 影响因子   | 南四湖<br>水位 | 当年<br>降水量 | 上一年<br>降水量 | 地下水<br>开采量 | 地表水<br>补给量 |
|--------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 南四湖水位  | 1.000     | 0.351     | 0.617      | -0.465     | 0.615      |
| 当年降水量  | 0.351     | 1.000     | 0.308      | -0.390     | 0.237      |
| 上一年降水量 | 0.617     | 0.308     | 1.000      | -1.560     | 0.093      |
| 地下水开采量 | -0.456    | -0.390    | -0.156     | 1.000      | -0.891     |
| 地表水补给量 | 0.615     | 0.237     | 0.093      | -0.891     | 1.000      |

表 4 总方差解释结果

| 成分编号 | 初始特征值 |        |         | 提取平方和载入 |        |        | 旋转平方和载入 |        |        |
|------|-------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
|      | 特征值   | 方差/%   | 累加值/%   | 特征值     | 方差/%   | 累加值/%  | 特征值     | 方差/%   | 累加值/%  |
| 1    | 2.608 | 52.163 | 52.163  | 2.608   | 52.163 | 52.163 | 1.916   | 38.317 | 38.317 |
| 2    | 1.298 | 25.959 | 78.122  | 1.298   | 25.959 | 78.122 | 1.124   | 22.477 | 60.794 |
| 3    | 0.761 | 15.229 | 93.351  | 0.761   | 15.229 | 93.351 | 1.043   | 20.859 | 81.653 |
| 4    | 0.294 | 5.870  | 99.221  | 0.294   | 5.870  | 99.221 | 0.878   | 17.568 | 99.221 |
| 5    | 0.039 | 0.779  | 100.000 |         |        |        |         |        |        |

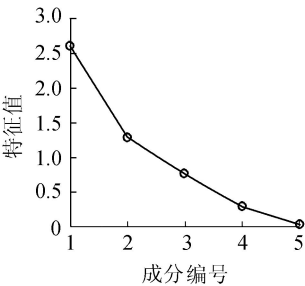


图 7 主成分碎石

表 3 中第一行为相关系数,可以看出,各主成分之间概率均大于 0.05,因此可以认为各主成分两两之间是不相关的。

表 4 中成分编号 1、2、3、4、5 依次代表南四湖水位、监测站点的当年降水量、上一年降水量、地下水开采量和地表水入渗补给量。特征值的大小反映了公因子的方差贡献,提取平方和载入栏为根据特征值大于 0.8 的原则提取的 4 个因子的特征值、占方差百分数及其累加值。这 4 个因子的方差占总方差的 99.221%,能比较全面地反映所有信息。

图 7 中横坐标为成分编号,纵坐标为各成分对应的特征值。根据点间连线坡度的陡缓程度,可以比较清楚地看出各成分的重要程度。比较陡的直线

说明直线断点对应的成分的特征值差值较大,比较缓的直线则对应较小的特征值差值<sup>[5]</sup>。成分 1、2、3、4 之间连线的坡度相对较陡,说明前面 4 个成分是主要影响因子,即南四湖水位、监测站点的当年降水量、上一年降水量和地下水开采量,这和表 4 中的结论是吻合的。

因此,南四湖地下水位变化的主要影响因子为南四湖水位、监测站点的当年降水量、上一年降水量和地下水开采量。

3.3 地下水位影响因子模拟

利用 SPSS 软件建立人工神经网络模型,网络为 3 层结构:1 个输入层、1 个隐含层和 1 个输出层<sup>[6]</sup>。输入层节点数:取南四湖水位、当年降水量、上一年降水量和地下水开采量作为输入,故输入层节点数为 4,隐含层节点数未定,输出层只有一个节点,为监测站点地下水位。人工神经网络模型流程图见图 8。经过反复训练,最终得出理想的样本模拟效果见图 9 和表 5。

从表 5 可以看出,对南四湖周边地下水位影响最大的因子为南四湖水位,权重为 0.424,这是因为监测点位紧邻南四湖,地下含水层与南四湖水力联

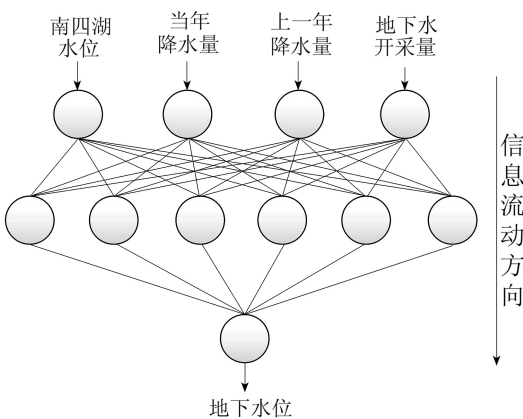


图8 人工神经网络模型流程

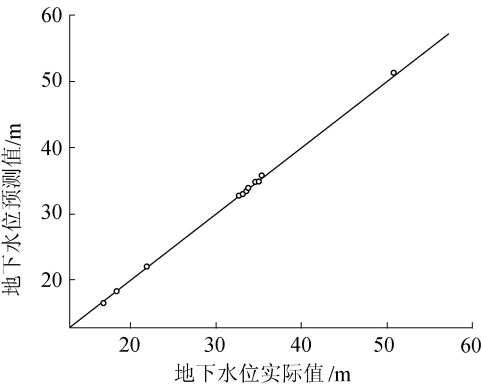


图9 地下水位模拟结果

表5 人工神经网络模型输入变量权重模拟结果

| 输入变量   | 重要性   | 标准化的重要性/% | 权重    |
|--------|-------|-----------|-------|
| 南四湖水位  | 0.405 | 100       | 0.405 |
| 当年降水量  | 0.262 | 64.8      | 0.262 |
| 上一年降水量 | 0.186 | 45.9      | 0.186 |
| 地下水开采量 | 0.148 | 36.5      | 0.148 |

系最为密切,因此南四湖成为周边地区地下水补给最重要的来源,它的变化直接影响周边地下水位的变化;当年降水量的权重仅次于南四湖水位,为0.262,这是因为落到地面的大气降水有4个去向:转化为地表径流、蒸散发返回大气圈、入渗补给包气带水分亏缺形成土壤水、继续下渗形成地下径流,其中转化的地表径流和入渗都可以补充地下含水层,从而影响地下水位的变化;上一年降水量的权重为0.186,这是因为地下水位对降水的反馈存在一定的滞后时间,上一年降水量经过地下汇流和渗漏,也会对当年地下水位产生影响;最后为地下水开采量,权重为0.148,这是因为南四湖浅层地下水主要用于农田灌溉及部分农村居民生活用水,而南四湖滨湖洼地及湖西洼地内城镇供水水源地主要开采深层地下水,由于长期开采形成深层地下水降落漏斗,局部地区发生地面沉降,可见地下水开采量已经成为影响南四湖地下水位变化的一个重要因素。

### 3.4 模拟结果校验

将地下水位变化各影响因子标准化处理后的数

据,输入到前面建立的人工神经网络模型,得到研究区地下水位预测值与实测值进行比较,结果见图10,模拟值与实测值的误差见表6。

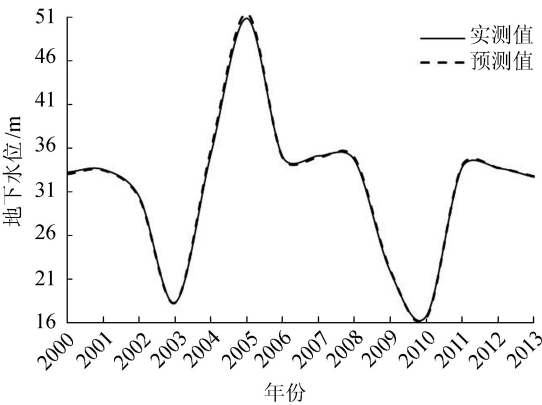


图10 研究区地下水位模拟结果与实测值对比

表6 地下水位模拟值与实测值误差情况

| 编号 | 年份   | 绝对误差/m | 相对误差/% |
|----|------|--------|--------|
| 1  | 2000 | -0.22  | 0.66   |
| 2  | 2001 | -0.08  | 0.24   |
| 3  | 2002 | -0.15  | 0.49   |
| 4  | 2003 | -0.01  | 0.05   |
| 5  | 2004 | 0.47   | 1.33   |
| 6  | 2005 | 0.56   | 1.10   |
| 7  | 2006 | -0.12  | 0.34   |
| 8  | 2007 | -0.16  | 0.46   |
| 9  | 2008 | 0.26   | 0.75   |
| 10 | 2009 | 0.15   | 0.68   |
| 11 | 2010 | -0.23  | 1.37   |
| 12 | 2011 | 0.21   | 0.62   |
| 13 | 2012 | 0.01   | 0.03   |
| 14 | 2013 | 0.08   | 0.24   |

从图10可以看出,所建立的人工神经网络模型的拟合精度较高,计算水位和实际观测水位拟合度很高,大部分点几乎重合在一起。绝对误差平均值为0.19 m,最大误差值为0.56 m,而最小误差值为0.01 m,相对误差小于1.37%。

## 4 南四湖平原区地下水保护建议

北方地区地表水源较为缺乏,地下水是该地区主要供水水源,但近年来,北方地区地下水超采现象严重,导致地下水资源日益匮乏,并带来了地面沉降、海水入侵、土地荒漠化等环境问题<sup>[7]</sup>。因此,对地下水提出有效保护措施至关重要。结合国家相关规范和研究区地下水的具体特点,对南四湖地下水保护提出以下建议:

**a. 保障南四湖水位。**由于南四湖流域平原区地下水位与南四湖水位具有直接的水力联系,所以为保障地下水资源的丰富,南四湖水位应保持在基本生态水位之上,在满足自身生态环境要求的前提下,充分涵养周边地区地下水。

b. 制定严格的地下水开采标准。地下水的开采应以水资源可持续利用为根本原则,相关标准条文中,将潜水地下水位低于开采含水层组厚度 4/5 的区域划为禁采区<sup>[8]</sup>,当地下水埋深超过禁采区时,需停止继续开采。

c. 建立健全地下水监测系统。在研究区调整优化地下水监测网络,实行全面监测与重点监测相结合,以便及时掌握地下水的动态变化,为地下水资源的开发与保护提供依据。

5 结 语

本文收集了 2000—2013 年南四湖流域水资源监测数据,分析了南四湖流域平原区地下水位动态变化规律,并利用 SPSS 软件建立人工神经网络模型,研究发现影响南四湖平原区地下水位变化的主要因子为:南四湖水位、当年降水量、上一年降水量和地下水开采量,对应的权重分别为 0.405、0.262、0.186 和 0.148。针对这些影响因子,提出南四湖流域平原区地下水保护建议,为实现含水层科学管理,促进当地水资源可持续利用提供了参考。

参考文献:

[1] 鲁孟胜. 山东西南部南四湖流域环境地质综合调查[J]. 中国地质,2003,11(4):424-426.  
[2] 山东省水文局. 山东省水资源公报[M]. 济南:山东水利出版社,2000—2013.  
[3] 卢真建. 广东省中山市水利现代化评价指标体系研究[J]. 中国农村水利水电,2012(12):93.  
[4] 吴晓婷,闫德勤. 数据降维方法分析与研究[J]. 计算机应用研究,2009,8(8):2832-2833.  
[5] 周维博. 人工神经网络理论在井渠结合灌区地下水动态预报中的应用[J]. 西北水资源与水工程,2003,6(2):6-9.  
[6] 杨国栋,王肖娟,尹向辉. 人工神经网络在水环境质量评价和预测中的应用[J]. 干旱区资源与环境,2004,6(11):10-14.  
[7] 李伟,钟华平. 华北地下水位大降深区水位保护目标划定研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,10(38):161.  
[8] 王小军,赵辉,耿直. 我国地下水开发利用现状与保护对策[J]. 中国水利,2010(13):38-40.

(收稿日期:2016-07-24 编辑:王 芳)

+++++

· 简讯 ·

2017 年(第五届)中国水利信息技术论坛将在河海大学召开

2017 年(第五届)中国水利信息技术论坛将于 2017 年 3 月 29—31 日在河海大学召开。本次会议主题是探索“智慧水利” 推动科技创新。会议将邀请水利行业主管部门、科研院所及高校的相关领导、专家和学者做特邀报告,组织水利信息化技术持有单位开展技术(产品)交流与现场咨询活动,旨在探讨水利现代化的发展趋势,活跃学术气氛,激励广大水利信息化科技工作者的积极性和创造性,推动全国水利现代化事业不断向前发展。

本次会议还开展论文征集,征文内容为会议主要议题涉及的内容,截稿日期为 2017 年 3 月 10 日。应征论文请提交大会秘书处论文邮箱:lunwen@sinowbs.org,并注明详细的联系方式(联系人、联系电话、传真、E-mail、通讯地址、邮政编码)和“水利信息化技术论坛征文”字样。论文经专家审查后,将于 2017 年 3 月 15 日前向作者发出是否接受的通知,入选论文将收录到《2017(第五届)中国水利信息化技术论坛》论文集中。优秀获奖论文将推荐到《水资源保护》正式发表。

论坛期间将结合学术交流、专题研讨等内容,通过网站宣传、会场展览展示、宣传资料入册等宣传方式,为广大单位及有关企事业单位推介展示国内外水利信息化、水文监测先进技术、适用技术、新产品等搭建一个展示平台,诚邀有关单位积极参加。

联系方式如下:

(一)论坛联系人

联系人:安世侠、张新伟、董立波 电话:010-6320 3403/3233/3104/3049 传真:010-6320/3745

邮箱:szsl@sinowbs.org

(二)论坛秘书处

联系人:石朋、刘庆、安世侠 电话:025-8378 6621/7361 邮箱:guangwenluntan@sina.com

(三)《水资源保护》编辑部

联系人:彭桃英、徐娟、王芳 电话:025-8378 6642 邮箱:bh1985@vip.163.com

了解论坛最新资讯或网上申请参会,请登录论坛官网 www.sinowbs.org,或查阅微信公众号“水务论坛在线”更多信息将在河海大学网站上公布。

本刊编辑部供稿