

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.012

库区交汇河段水动力特性试验

闫涛^{1,2}, 陈立¹, 徐敏¹, 平妍容¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

摘要:以辽宁大凌河白石水库库区交汇河段为研究对象,通过模型试验,研究不同因素影响下其水动力特性的变化。结果表明:库区交汇流河段水深沿程增加,过流面积沿程加大,交汇口以上干支流流速沿程增加,而交汇口以下流速呈现沿程减小的显著特征;在入汇口下游的支流同侧必然存在回流区,随着汇流比的增加,回流区范围增大;坝前水位升高时,交汇区内流速绝对值减小,沿程变化率减小,主流线弯曲程度加大,回流区范围增大。

关键词:库区交汇流河段;水动力特性;模型试验;坝前水位;流速衰减;白石水库;大凌河—牯牛河交汇河段

中图分类号:TV143 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2015)01-0060-06

Experimental study of hydrodynamic characteristics at confluence reach in reservoir area

YAN Tao^{1, 2}, CHEN Li¹, XU Min¹, PING Yanrong¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: This study investigated the change hydrodynamic characteristics at the confluence reach in BaiShi Reservoir area in the Daling River with different factors, based on model testing. The results show that the water depth and flow area increase along the channel, and the flow velocity in the mainstream and tributaries upstream of the confluence zone increases along the channel as well, while the flow velocity downstream of the confluence zone decreases significantly along the channel. The backflow region occurs in the tributaries downstream of the confluence zone, and its range increases with the confluence ratio. When the water level upstream of the dam increases, the absolute value of the velocity and its change rate along the channel decrease in the confluence zone, while the degree of curvature of the main stream line and the backflow region range increase.

Key words: confluence reach in reservoir area; hydrodynamic characteristic; model testing; water level upstream of dam; velocity attenuation; Baishi Reservoir; confluence reach of Daling River and Mangniu River

河道的交汇形态在河流系统中普遍存在,支流水流以一定角度入汇到干流,干支流互相顶托,产生剧烈的动量交换与能量耗散,改变了干流单一河段的水动力特性。汇流比、入汇角与比降等因素的改变,会影响交汇流河段的水动力特性。已有关于天然交汇流河段水流特征的研究开展较多,通过水槽试验与实测资料分析取得了丰富的成果。如王协康等^[1-2]通过水槽试验分别研究了30°和90°支流斜接干流的明渠交汇区水流特征;茅泽育等^[3-4]采用理论分析和变角交汇水槽试验对明渠交汇流的分离区进行探索;郭维东等^[5]、刘同宣等^[6-7]利用多普勒测速仪(ADV)研究了汇流区三维水流结构;兰波^[8]及许多国外研究者^[9-14]采用原型观测资料分析了交汇河口的综合特性。

收稿日期: 2014-02-15
基金项目: 国家自然科学基金(51209016);交通运输部重大科技专项(201132822430)
作者简介: 闫涛(1988—),男,山西吕梁人,博士研究生,主要从事水沙灾害防治研究。E-mail: yantao1988@gmail.com
通信作者: 陈立,教授。E-mail: chenliwuhee@263.net

显然,已有的研究大多数集中于天然交汇河段,而对于库区交汇河段研究则较少。所考虑交汇区流动影响因素主要集中于入汇角、汇流比、交汇形式和干支流河道高程差等方面,在关于汇流比影响的研究中,汇流比通常小于0.5;对于库区河段,由于坝前水位的抬升,流速必然出现沿程减小,而库区交汇流河段因为支流的入汇,又使其水动力条件的变化进一步复杂化^[15]。

笔者在分析白石水库库区牯牛河与大凌河交汇流河段的冲淤演变时,发现交汇流河段的泥沙淤积显著超过上下游河段,形成拦门沙坎^[15-16],这显然不能用坝前水位抬升、水深增加以及水深沿程增加来解释,也不能仅从牯牛河汇流比较大来解释,而是洪水遭遇的特殊性与坝前水位的抬升两方面共同作用形成交汇区的典型水动力条件。本文以辽宁大凌河白石水库为研究对象,基于模型试验成果,分析不同洪水遭遇以及坝前水位条件下交汇流河段的水动力特性及变化规律。

1 试验设计

1.1 交汇流河段概况

白石水库位于辽西大凌河干流上,控制流域面积为17 649 km²,占大凌河流域面积的76%。大凌河的支流多集于左岸,其中凉水河与牯牛河属于库区内的支流。大凌河与牯牛河交汇段位于坝址上游16 km,从平面形态上看,支流牯牛河以90°入汇角自左岸汇入干流大凌河,属非对称型交汇。交汇流河段附近,大凌河河道比降约为0.067%,年平均流量为386 m³/s;牯牛河河道比降为0.137%,年平均流量为366 m³/s。水库正常蓄水位下,交汇区上游干流河宽约为2.46 km,支流河宽约为1.39 km,交汇区下游河段的平均河宽约为1.45 km。白石水库库区交汇流河段平面形态见图1。

1.2 模型布置及试验方案

1.2.1 模型布置

按照弗劳德相似准则与惯性力阻力比相似准则设计制作了牯牛河—大凌河交汇流河段的河工模型,水平比尺为300,垂向比尺为100,变率为3。模拟范围:上边界牯牛河口以上3.5 km、大凌河交汇断面以上4 km;下边界为牯牛河口下游5~6 km处。模型布置见图2。模型水面线与原型资料验证结果表明,制模精度满足试验规程。

模型试验系统由模型、供回水系统、流量测控系统、流速与水位量测系统组成。模型共设7个测流断面,其中1号断面位于汇流口上游干流河道内,2号、3号断面位于汇流口上游支流河道内,4~6号断面位于汇流区内,7号断面位于汇流区下游。断面形态参数见表1。7个测流断面处设有水位测针。采用光电旋桨式流速仪对断面测点的垂线平均流速进行测量。

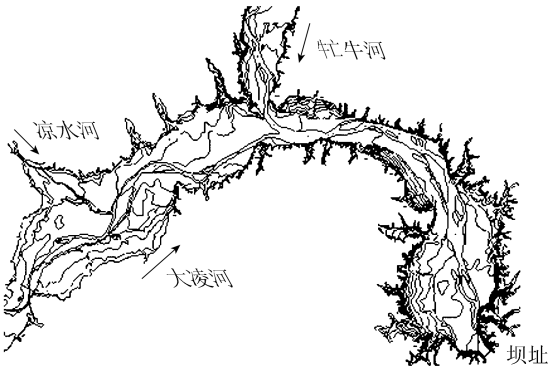


图1 库区交汇流河段平面形态
Fig. 1 Plane graph of confluence reach in reservoir area

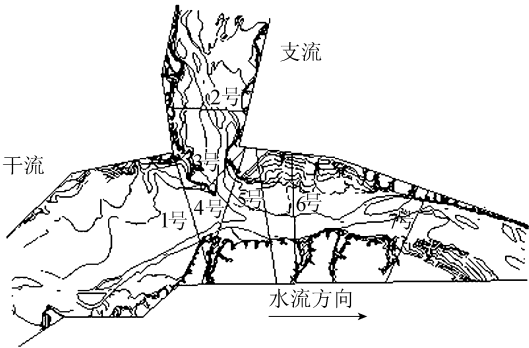


图2 交汇河段模型平面布置示意图
Fig. 2 Sketch of model arrangement of confluence reach

表1 正常蓄水位下各测流断面横向形态特征值统计

Table 1 Transverse morphological characteristic values of each cross section under normal water level									
断面	B/km	H/m	ζ	A/10 ⁴ m ²	断面	B/km	H/m	ζ	A/10 ⁴ m ²
1号	1.85	10.26	4.19	1.89	5号	1.59	11.38	3.50	1.81
2号	1.34	9.47	3.86	1.27	6号	1.68	9.44	4.34	1.58
3号	0.56	9.10	2.59	0.51	7号	0.85	14.10	2.07	1.20
4号	1.45	10.23	3.72	1.48					

注:B为河宽,H为水深,ζ为河相系数,A为过流断面面积。

1.2.2 试验方案

以 Q_1 、 Q_2 、 Q 分别表示干流流量、支流流量及总流量, $Q=Q_1+Q_2$, 汇流比 $R=Q_2/Q$, Z 表示水库运行所对应的模型出口水位。考虑到牯牛河与大凌河洪水遭遇几率较小的实际情况, 按照干流和支流来流条件分别为年平均流量和 $P=10\%$ 洪峰流量进行组合, 即干流发生 10% 洪水遭遇支流多年平均流量、干支流同时发生 10% 洪水以及支流发生 10% 洪水遭遇支流多年平均流量 3 种组合, 对每一种组合, Z 取 115 m 、 118 m , 试验方案见表 2。

2 结果分析

不同方案的垂线平均流速横向分布见图 3 (图中虚线为主流线, k 表示交汇区主流线曲率半径)。图 4 为各断面最大流速与平均流速的沿程变化。

表 2 各个试验方案的流量组合及水位

Table 2 Discharge and water level of each experimental scheme

组次	$Q_1/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q_2/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q_1+Q_2/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	R	Z/m
a	3 620	366	3 986	0.09	115
b	3 620	366	3 986	0.09	118
c	3 620	4 790	8 410	0.56	115
d	3 620	4 790	8 410	0.56	118
e	386	4 790	5 176	0.92	115
f	386	4 790	5 176	0.92	118

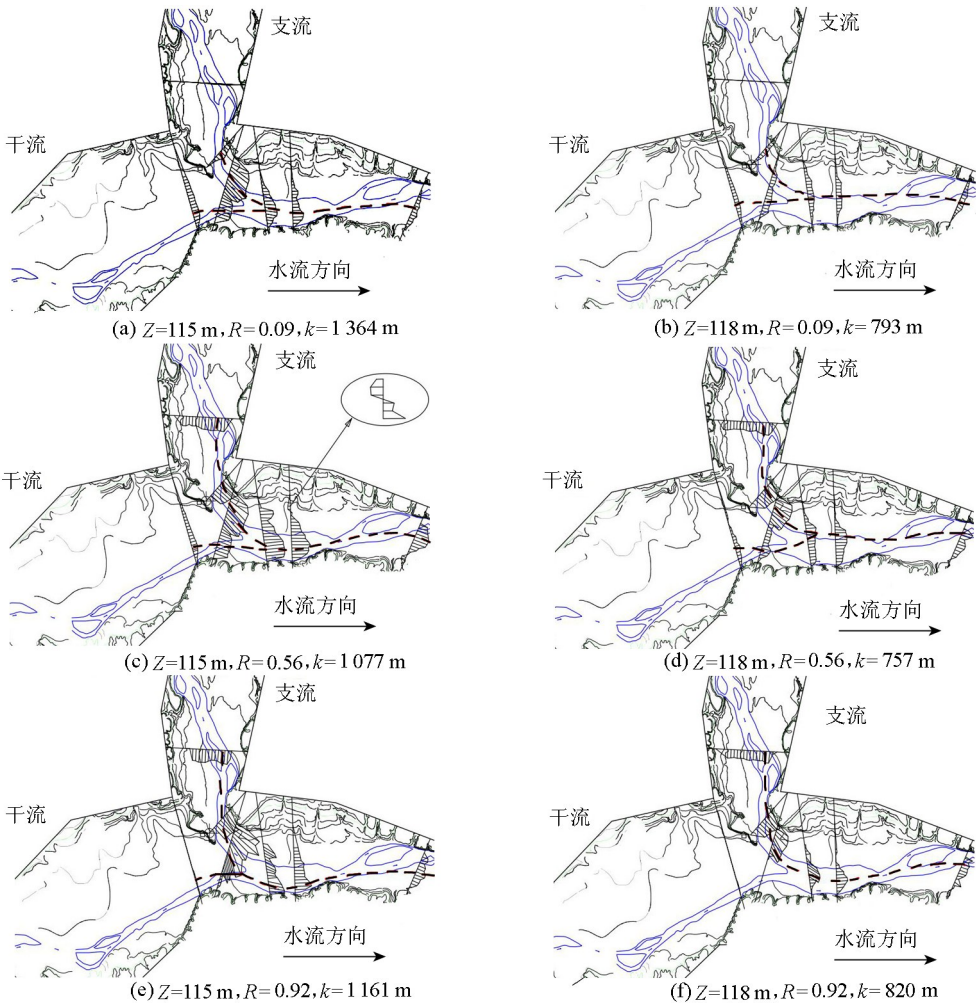


图 3 不同方案交汇流河段平面流速分布

Fig. 3 Time-averaged velocity distribution at confluence reach under different schemes

2.1 流速的沿程变化

2.1.1 交汇口以上干支流的流速沿程变化

交汇口上游干流河道内的 1 号断面流速很小, 靠近右岸流速略大于左岸侧, 干流洪水进入汇流区后在

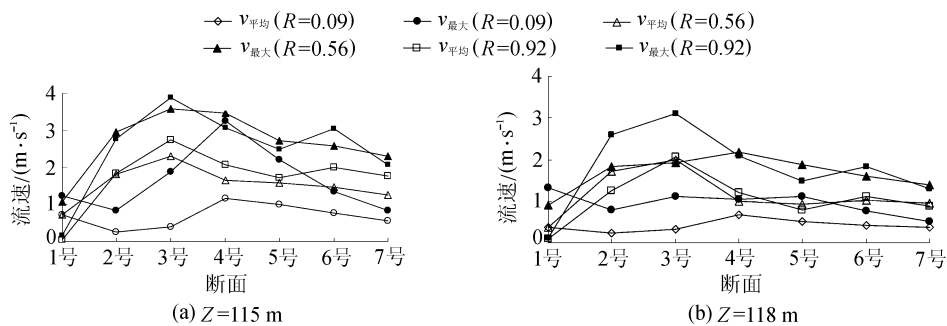


图 4 不同坝前水位断面平均流速 $v_{平均}$ 与最大流速 $v_{最大}$ 沿程变化

Fig. 4 Variation of average and maximum velocities along the channel under different water levels upstream of dam

4 号断面与支流水流叠加,4 号断面流速显著大于 1 号断面;2 号、3 号断面位于交汇口上游支流河道,从 2 号断面到 4 号断面流速显著增大。其中 3 号断面由于宽度明显收缩,其流速不但大于 2 号断面,在支流发生洪水时流速甚至大于 4 号断面。也就是说,在进入汇流区之前,无论干流河道内是否发生洪水,1~4 号断面流速均表现为增加,而支流河道内若发生洪水则 2~4 号断面流速先增大、后减小,若支流为年平均流量则 2~4 号断面流速表现为沿程增加。流速的最大峰值出现在 3 号、4 号断面附近。

交汇口上游干支流河道流速小于汇流区流速的原因有二:一是干支流交汇后,汇流区流量增加,使得流速增大;二是交汇区水流对上游水流的顶托作用,例如图 3(e)(f) 中 1 号断面受到支流洪水的顶托作用导致流速整体极小,几乎接近于零。

2.1.2 交汇口以下流速的沿程变化

不同方案下,交汇口以下断面流速呈减小的趋势,即从 4 号断面开始流速逐渐减小。从图 4 给出的库区交汇流河段的断面平均流速和断面最大流速也可以看出,从 4 号断面开始,断面平均流速和最大流速均呈沿程减小趋势。

交汇口以下流速减小的主要原因是:因水库蓄水,坝前水位抬升,产生壅水,交汇流河段的水位抬升、水深增加,而且交汇流河段与库区河段一样,水深沿程增大,即相比蓄水前,交汇流河段水深沿程增加,过流面积沿程增大,流速沿程减小;当干支流洪水不遭遇时,流速的沿程减小较洪水遭遇情形更甚,原因是交汇口以下河道原本能适应干支流洪水遭遇情形的过流需求,一旦干支流洪水未遭遇,则交汇口以下的河道过水面积超过干流洪水或者支流洪水的过流需求,流速也会减小。

坝前水位的变化对交汇流河段的影响是:当坝前水位升高时,流速的沿程衰减速率变缓。当坝前水位由 115 m 升高到 118 m,过流面积进一步增大,比降更为平缓,干支流入汇水流流速减小,因此汇流区及下游流速衰减的速率也随之减小。随着汇流比的增大,水位变化引起的差距越明显。

流速沿程变化的上述特征,使交汇流河段具备了泥沙大量淤积的水动力条件,由于支流牯牛河来水含沙量很高,一旦进入交汇流河段,特别是进入大凌河干流交汇区内,必然产生大量淤积;而且由于交汇口以下流速沿程衰减,泥沙沿程落淤,最终在干流大凌河上淤积形成较大的淤积体,淤积体累积发展的结果即拦门沙坎。

2.2 主流线及其变化

从图 3 中不同方案的主流线可以看出:(a) 干流的主流线相对顺直,而支流的主流线则较为弯曲。(b) 当汇流比较小,即干流发生洪水、支流为多年平均流量时,干流主流线顺直。随着汇流比增大,即干支流同时发生洪水或者支流发生洪水情形下,支流主流线向汇流区右岸侧偏移,干流主流线受到支流水流的挤压作用增强,逐渐弯曲并偏向右岸。

不同坝前水位主流线的弯曲程度不同:水位升高后,支流对干流挤压作用减弱,支流主流线的偏移幅度明显减小,即使支流洪水遭遇干流年平均流量时也不会发生水动力轴线顶冲汇流区右岸的情况;与此同时,汇流区内的主流线弯曲程度增大。

2.3 回流区及其变化

交汇口以下的 5 号、6 号断面左侧可以观察到有明显的回流区存在,如图 3(c) 所示。原因是支流入汇角较大,当进入干流大凌河以后水流向右弯曲,会在左侧回流,且汇流比越大其回流范围越大。水位抬升使

回流范围有所增大。

回流区内输沙动力条件较弱,洪水期进入该区域的泥沙落淤于此并发生累积。库区河道的实际淤积发展过程也证实了这一点。图5为6号断面1998—2008年期间地形变化,在此10a期间库区来水来沙条件稳定,各年径流量与来沙总量相差不大。由于6号断面左岸侧存在回流区,因此断面深槽淤平后并未出现全断面水平淤积抬高的一般特征,而是左侧淤积面高于右侧,就是回流区累积淤积的特点造成的。

3 结 论

a. 库区交汇流河段流速沿程变化特点为:交汇口门以上的干支流河段流速均呈增加特点,交汇口门以下,流速呈显著沿程减小规律。这一沿程变化特点解释了牯牛河与大凌河交汇区大凌河干流上淤积形成拦门沙坎的水动力学机制。

b. 由于支流呈90°入汇干流,主流互相作用显著,从而支流出口段的主流线弯曲明显。入汇口下游的支流同侧存在回流区,且随着汇流比的增加,回流区范围增大。回流区的存在使库区交汇流河段入汇口门下游产生累积性淤积。

c. 水库运行水位对交汇河段流速沿程变化、主流线和回流区范围产生影响。坝前水位升高则流速绝对值减小,沿程变化率减小,主流线弯曲程度加大,回流区范围增大。

参考文献:

[1] 王协康,王宪业,卢伟真,等. 明渠水流交汇区流动特征试验研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2006,38(2):1-5. (WANG Xiekang,WANG Xianye,LU Weizhen,et al. Experimental study on flow structure at open channel confluence[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2006,38(2):1-5. (in Chinese))

[2] 王协康,杨青远,卢伟真,等. 交汇水流分离区特征研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2008,40(6):1-6. (WANG Xiekang,YANG Qingyuan,LU Weizhen,et al. Study on characteristics of separation zone in confluence river[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008,40(6):1-6(in Chinese))

[3] 茅泽育,赵升伟,罗昇,等. 明渠交汇口水流分离区研究[J]. 水科学进展,2005,16(1):7-12. (MAO Zeyu,ZHAO Shengwei,LUO Sheng,et al. Study on separation zone in open channel junction[J]. Advances in Water Science,2005,16(1):7-12. (in Chinese))

[4] 茅泽育,赵升伟,张磊,等. 明渠交汇口三维水力特性试验研究[J]. 水利学报,2004,35(2):1-7. (MAO Zeyu,ZHAO Shengwei,ZHANG Lei,et al. Experimental study on 3D flow characteristics at the confluence of open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(2):1-7(in Chinese))

[5] 郭维东,王晓刚,曹继文,等. Y形汇流口水流水力特征试验研究[J]. 水电能源科学,2005,23(3):53-56. (GUO Weidong,WANG Xiaogang,CAO Jiwen,et al. Experimental research on flow hydraulic character at Y confluence type[J]. Water Resources and Power,2005,23(3):53-56. (in Chinese))

[6] 刘同宦,郭炜,詹磊. 90°支流入汇区域时均流速分布特征试验研究[J]. 水科学进展,2009,20(4):485-488. (LIU Tonghuan,GUO Wei,ZHAN Lei. Experimental study of the velocity profile at 90°open channel confluence [J]. Advances in Water Science, 2009,20(4):485-488. (in Chinese))

[7] 刘同宦. 主支汇流比对交汇区域水流脉动特性影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2009,29(3):6-8. (LIU Tonghuan. Experiment on the influence of discharge ratio of main flow of tributary on flow fluctuation characteristic in confluence area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(3):6-8 (in Chinese))

[8] 兰波. 山区河流交汇河口的综合特性分析[J]. 重庆交通学院学报,1998,17(4):91-96. (LAN Bo. The comprehensive analysis of the special property at the tributary junction of mountain river[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute,1998,17(4):91-96. (in Chinese))

[9] PASCALE B, ANTOINE R, ALISTAIR K, et al. Spatial patterns of water surface topography at a river confluence [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27:913-928.

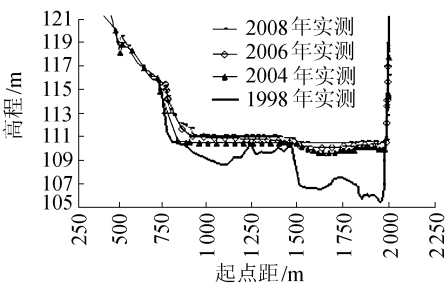


图5 6号断面1998—2008年地形变化
Fig. 5 Terrain variation of
No. 6 cross section from 1998 to 2008

[10] CLAUDINE B, ANDRE G R, JAMES L B. Dynamic of a river channel confluence with discordant beds; flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology[J]. Journal of Geophysical Research, 2006,111:1-22.

[11] BRUCE L R, ALEXANDER N S. Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. Thermal mixing and time-averaged velocities[J]. Water Resources Research, 2001, 37(9): 2393-2410.

[12] BRUCE L R, STEPHEN T K. Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 171-191.

[13] JAMES L B. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences[J]. Sedimentology, 1988, 35: 481-498.

[14] ALEXANDER N S, BRUCE L R. Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 2. turbulence [J]. Water Resources Research, 2001, 37(9): 2411-2424.

[15] 陈立,段涛,闫涛,等. 库区交汇河段泥沙淤积特性研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2013, 45(3):57-62. (CHEN Li, DUAN Tao, YAN Tao, et al. Study on sediment deposition characteristics at river confluence in reservoir area [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(3):57-62. (in Chinese))

[16] 王晓刚. 汇流口水流水力特性研究综述[J]. 中国农村水利水电,2007(10):82-85. (WANG Xiaogang. Summary of study on hydraulic characteristics of channel confluences[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(10):82-85. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学新增一支江苏省“双创计划”团队

2014 年 9 月 24 日公布了江苏省“双创计划”资助对象名单,由河海大学特聘教授邵建富领衔,“青年千人计划”入选者朱其志、河海特聘教授钱卫、青年学者顾水涛为核心成员组建的团队成功入选教育类“双创计划”团队项目。

该团队领军人才邵建富教授是国际著名的岩石力学与工程专家,2010 年入选中央组织部“海外高层次人才引进计划”(简称“千人计划”)。他领衔的团队将以提升基础理论创新和自主技术集成能力为主线,紧密围绕我国大型水利水电、国家石油战略储备、地下水封洞库与页岩气能源高效开发等重大能源工程设计与运行中的安全与稳定问题,深入开展岩石力学试验技术与系统设备研发、多尺度岩石力学基础理论、先进工程数值方法和工程应用专家系统等方向的研究工作,力争为重大能源工程的安全性和长期稳定性分析提供坚实的理论基础和必要的技术支持。“双创计划”团队是由江苏省委组织部、省教育厅、省科技厅等 11 个部门统筹合作、联合发力,重点面向新材料、新能源、新医药、节能环保、网络信息、现代装备以及未来具有重要战略意义的新兴发展需求,在高端发展领域已取得杰出成绩或具有显著创新潜力,有望突破核心技术和产业技术跨越的优秀创新团队进行重点引进和支持,实现人才资金和项目资金、产业资金的合作,保证“有人才、有项目、有平台”,形成“引进一个团队、带动一个重点实验室、发展一个优势学科、催生一个高新企业”的产出效应。

经过申报初审、资格审查、技术评审、综合评审和现场答辩等环节,此次共有 12 支团队入选江苏省“双创计划”(教育类)。最终入选的团队可获得 300 万~800 万元的经费支持。此外,入选团队及团队成员还将在项目申请、人才工程申报等方面获得江苏省特殊政策扶持。

至此,河海大学已成功入选 2 支江苏省“双创计划”团队。另一支团队于 2013 年获批入选,由“千人计划”特聘教授、水文水资源学院院长余钟波领衔组建。

(本刊编辑部供稿)