

河道分流分沙计算模式研究进展

余新明, 谈广鸣, 张悦

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:根据分流河道的水沙特性,对现有的分流分沙计算模式进行了分类。总结河道分流分沙计算模式在国内外研究发展的现状并进行了简要的分析评论,指出计算模式的发展在充分考虑分流门口附近水流结构和含沙量沿垂线分布等特性的前提下,还应借助原型资料与理论分析、室内试验及数值模拟等多种手段综合研究分流河道分流分沙的变化规律,才能为分流河道的合理整治提供科学的依据。最后就分流分沙计算模式研究的几个亟待深入的课题略陈管见。

关键词:分流河道;分流分沙;环流;含沙量

中图分类号:TV143 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7647(2006)03-0067-05

Advances in research of computational models for flow and sediment diversion in river channels//YU Xin-ming, TAN Guang-ming, ZHANG Yue(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: Based on the water-sediment characteristics in braided channels, the computational models current used for flow and sediment diversion were classified, and their development at home and aboard was briefly summarized. It is pointed out that, in addition to full consideration of the characteristics of flow structures and vertical distribution of the sediment concentration near the diversion entrance, the development of the computational models should take the results of prototype observation, theoretical analysis, laboratory test, and numerical simulation, etc. into account for comprehensive study of the regularity of flow and sediment diversion in river channels, so that the result can provide a scientific basis for reasonable regulation of braided channels. Finally, some ideas about problems to be further studied were presented.

Key words:braided channel; flow and sediment diversion; circulation; sediment concentration

冲积性平原河流中,河道分流现象较为普遍,如汉道分流、河道的自然分流以及渠道分流等。在天然情况下,河道分汊是河流演变过程中经常出现的一种现象^[1],许多江河的局部河段存在洲滩分流,此外,由于上游洪水期来水超出河道的安全泄量,一些江河在历史上自然溃口,形成了河道分流,其中较为典型的有 1860 年、1870 年长江大水形成的荆江松滋口、太平口、藕池口和调弦口(已于 1959 年建闸控制)四口分流入洞庭湖。目前,在对河道分流的认识与治理开发上虽然取得了不少成绩,但随着社会经济的发展,人们对分流河道演变规律的认识与治理要求越来越高,随着人类对河流改造活动的加剧,河道的水沙条件可能发生急剧的改变,这些变化有可能使分流分沙的缓慢变化加剧,甚至改变原来的规律^[2],如在 1998 年、1999 年大洪水的作用下,沙市河段的局部河势发生剧烈变化,原三八滩被水流冲刷解体,原设计的主通航孔进口过渡段淤积严重,给航运带来了很大的影响^[3]。此外,自 20 世纪 50 年代以来三口入湖水沙量的大幅度减少,使荆江特别是下荆江水沙量出现了相应的大幅度增加,使江湖关系发生了大幅度变化,同时导致长江中游出现了新的防洪形势^[4~7]。以上情况表明,研究分流河道的演变规律和特性不仅在理论上而且在实际工程中都具有十分重要的意义,而分流分沙模式的研究尤其重要,因为随着河道变形,各汉道水沙量的分配也随之改变,这种改变又反作用于分汊河道的演变。本文首先回顾了分流河道的水沙运动特性,继而对分流分沙模式研究进展进行了简单的总结和对对比分析,最后就分流分沙模式研究的几个亟待深入的课题略陈管见。

1 分流河道水沙运动特性

分流河道(图 1)由于水流分成两股或多股,泥

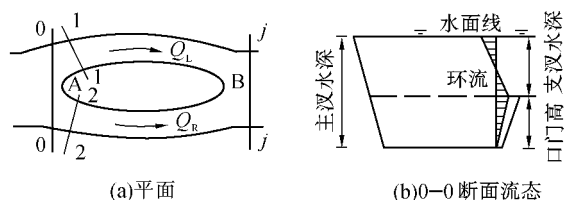


图1 分流河道示意图

沙也随之分股输移,这样的水沙状况往往是难于稳定的。分流河道水沙运动特性的研究历来为中外学者所重视。早期对分流河道水沙运动特性的研究主要为分流口门处的回流特征和能量损失情况,其中有代表性的有 Taylor^[8]通过试验研究分流比和水深比的关系, Grace^等^[9]考虑不同主支汉宽度比和不同分汉角度的情况下来研究分流量的变化规律,此外还有 Law^等^[10], Ramamurthy^等^[11]通过分汉水槽从能量的角度对分流分沙比进行了一定的研究,这些研究主要是针对分流口门处二维水流特性。对于其三维特性的研究自 20 世纪 90 年代以来才逐渐开展, Neary^等^[12], Barkdoll^等^[13]以及我国学者罗福安^等^[14]对分汉河道分流处的水沙运动三维特性进行了较深入的研究,研究结果和野外实测资料均表明:分流河道分流处的水流结构具有较强的三维特性,主要体现在表层流场与底层流场存在较大差异,具有明显二次流,结构与弯曲河道的水流结构相似(见图 1(b)口门处流态示意图),由于河道分流时流线弯曲方向、水流量强弱及沿程变化不同,其环流组成远比弯道单一环流复杂得多,这样复杂环流的存在,直接影响分流河道的水沙输移。

复杂的水沙条件对分汉河道演变起着重要的作用,主要有以下演变特点^[1]:洲滩的移动和分合,江心洲滩的洲头在水流的顶冲作用下不断地坍塌后退,而洲尾则因汇流引起的两股螺旋流作用,使泥沙在汇流区不断地沉积,洲尾向下游延伸,有时候由于大水切割、流路改变的作用,还会使江心洲发生合而分或分而合的变化;此外,汉道还会发生一定的兴衰与交替情况。而影响分汉河道演变的主要因素是分流比和分沙比的变化,随着河道的变形,各汉道的分流分沙比也随之改变,而分流分沙比的改变,又反作用于分汉河道的演变。

2 河道分流分沙模式研究现状

许多研究者对河道分流分沙模式进行了较深入的研究,得出很好的规律和结论。其中有代表性的如丁君松^等^[15]、韩其为^等^[16]、余文畴^等^[17]、秦文凯^等^[18-19]。丁君松等根据对大量分汉河道的主支汉纵剖面分析,提出在支汉口门后存在一鞍点来研究支汉的分流分沙;韩其为等引入由分汉河道分流比

决定的当量水深作为引水深,根据流速和含沙量沿垂线分布来研究河道分流分沙之间的关系;余文畴主要是根据大量实测资料为依据,分析分流比的变化特性和影响因素,强调了挟沙力和含沙量对比计算是确定汉道兴衰的基本方法;秦文凯等对上述模式进行了改进,充分考虑了分流口门处的环流作用,建立了较为完善的分沙模式。

2.1 分流比计算模式

天然河道分流比的确定有多种方法,比较准确的是利用数学模型进行计算,但需要详细准确的地形和水文资料,而很多分流比计算公式是在利用有限资料的基础上建立的。河道左汉分流比 η_L 可根据其定义得到^[15]:

$$\eta_L = \frac{Q_L}{Q_L + Q_R} \quad (1)$$

式中: Q_L 和 Q_R 分别为进入左、右汉道的流量。根据公式,计算每汉的分流比,以水下地形图和计算水位为依据,在二汉(图 1(a))内选取具有相对代表性的断面,计算其过水断面面积 A 和平均水深 h ,同时从分流点 A 至汇流点 B 沿二汉的深泓线分别取长度 L ,由分流比定义,应用曼宁公式得

$$\eta_L = \frac{1}{1 + \frac{A_R \left(\frac{h_R}{h_L} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{n_L \left(\frac{J_R}{J_L} \right)^{\frac{1}{2}}}{A_L}} \quad (2)$$

式中: n , J 为糙率和比降。公式右侧各项数值均为相对值,除糙率外,均可自水下地形图取得。

式(2)中要注意以下情况:①断面的选取除了对本汉具有代表性外,对各汉道还应有相对代表性,宜选在对应的部位,如汉道的进口段、出口段或中间段。这样,对同一因素的影响,如河床形态、糙率、比降等,可以有某种程度的消除,另考虑到主、支汉的面积、平均水深一般相差较远,相对值一般较大,它们的大小对分流比的大小起着主要作用,甚至是关键性作用。②关于糙率问题,如有实测 $Q \sim n$ 资料,可根据不同的流量级去选定。在天然河道中,糙率的相对值一般变幅不大,它对分流比的大小所起的作用较小,因此可令其比值为 1。③对于比降问题,可以用二汉深泓线的长度比来表示,因从分流点到汇流点的水位落差相同,所以能够确定其各自的比降。

韩其为等引入河相系数和由分流比决定的当量水深作为相对引水深,同时提出了在分汉前干流断面上引水面的形态,从而建立了相对引水深与分流比的关系^[10]:

$$\eta_L = \frac{1}{2} \eta_h^2 \frac{\int_{1-\eta_h}^1 \left(\frac{u}{u_m} \right) d\left(\frac{y}{h_0} \right)}{\int_0^1 \left(\frac{u}{u_m} \right) d\left(\frac{y}{h_0} \right)} \quad (3)$$

式中: y 为纵坐标,从床面起算; u, u_m 为垂线流速及其平均流速; η_h 为相对引水深。

式(3)实际就是对分流河道进行某种概化,用其概化后的过水断面面积进行比较。此外,还有一些分流比计算式,如水面线试算法、水位差法、动量平衡法等,这些计算模式都是建立在一定的物理机理上,具有相似的公式结构,总的来说其差异性不大,因而不必一一论述。

2.2 分沙比计算模式

分沙问题是分流河道研究中的另一个重要课题,早在 20 世纪 40 年代就有学者开始对不同分水角度与泥沙分配关系进行了初步探讨,此后,许多研究者对不同边界条件和不同水流泥沙因子条件下的水沙分配关系进行了大量的研究。根据分沙比定义,丁君松等^[15]根据大量天然分汊河道地形资料,得出自分流点至洲头这一范围内支汊一侧的地形恒高于主汊一侧的结论。根据这一特征,反映到深泓线上,表现为自分流点起,两汊深泓线都具有马鞍形特征,在选定了主、支汊最高点后,根据含沙量沿垂线分布上稀下浓的规律,可以以主汊最高点处的含沙量分布为标准来确定主、支汊含沙量的比值,其中含沙量分布公式采用张瑞瑾公式^[20],则分沙比公式为^[15]

$$\xi_L = \frac{\beta + \xi}{\frac{\beta}{\xi} + \xi} \quad (4)$$

式中: β 为表示含沙量分布不均匀程度的参数值; ξ 为相对水深。

式(4)通过主支汊纵剖面对比说明进入支汊口门后存在一鞍点,相应地,主汊也存在某一鞍点,正是主支汊的这种几何引水深差,形成了支汊引水偏于水面,从而使其含沙量偏低、级配偏细。根据这种主支汊鞍点的水深差,按含沙量分布公式计算分沙比,其结果与长江中下游分汊河道的实际资料较为吻合。

余文畴等以大量实际资料为依据,分析了分汊河道进口段在不同的流量级和展宽率下水流和输沙沿程随河宽变化的关系,提出在河床演变中,中、枯水期汊道分流比代表了基本河槽的变化,提出分沙比计算公式为^[17]

$$\xi_L = \frac{1}{1 + \frac{\eta_L}{\eta_R} \left(\frac{1}{\xi_R} - 1 \right)} \quad (5)$$

公式(5)取决于分流比 η_L 和 η_R ,以及主、支流含沙量的比值 ξ_R ,这就要求有完整的水文地形资料。式(5)本质上与式(4)相同。

韩其为等引入当量水深作为引水深的概念,求

出悬沙分沙比与分流比的关系,避免了丁君松模式须给出主支汊鞍点处的高程的要求。先根据分组含沙量的比值,即可得到左汊的分沙比公式为^[16]

$$\xi_L = \frac{S_1}{S_0} = \sum_{L=1}^N P_{L,0} \xi_{s,L,1} \quad (6)$$

式中: P 为悬移质泥沙级配; $\xi_{s,L,1}$ 为分组泥沙分沙比,其值为左汊引进的平均含沙量与分流前的平均含沙量的比值; S 为含沙量,脚标 0 和 1 分别表示图 1(a)中 0—0 和 1—1 的断面值。 $P_{L,0}$ 和 $\xi_{s,L,1}$ 中脚标 L 表示第 L 组值。

该分沙模式根据流速及含沙量沿垂线分布,求出了悬移质分组泥沙分沙比与分流比的关系,模式在应用于荆江裁弯河道新、老河演变计算中较好地反映了实际情况。

秦文凯等^[18]对上述模式进行了改进,考虑了分汊河道分流时横向环流的作用,同时引用公式(3)中引水体的概念,得出更加完善的汊道分沙比计算公式^[13]:

$$\xi_L = \eta_L A_0 \left(1 + C_1 \frac{H}{b_0'} \theta E_0 \right) \quad (7)$$

式中: η_L 为分流比; A_0 是与相对引水深有关的函数; C_1 为谢才系数; H 为主汊水深; b_0' 为支汊引水宽度; θ 为分流角; E_0 为与 E_1, E_2 和 A_0 有关的函数, $E_0 = \frac{E_1 + E_2}{A_0}$, E_1 和 E_2 分别是相对水深 η_h 和悬浮指标 z 的函数。

该改进的模式能够很好地反映由于分汊口门特殊的水沙特性导致分沙比的差异,当两汊水深差异不大时进入支汊的泥沙要比主汊多的特点。通过对荆江三口分流河道以及长江上的一些分汊河道进行定性分析和验证计算,所得结果与实际情况吻合较好。

2.3 各模式对比分析

上述几种分流分沙比计算模式各有其特点。各分流比计算公式的差异不大,而分沙比计算公式存在较大优劣。总的来说,公式(4)是建立在主、支汊河道资料较全的基础上的,这一点和分流比公式(2)的建立是一致的。公式(4)对复杂的分沙模式进行了简化,并和很多实际河道的情况相符。但由于对分汊河道存在的弯曲环流没有进行充分考虑,故得出的支汊含沙量不可能大于主汊,只有当分流比接近 50% 时二者的含沙量才可能相等^[18]。因此这种分沙模式不能反映许多天然实际情况的分流河段,如荆江三口的分流分沙规律,其支流的含沙量就有大于干流含沙量的可能。公式(6)是在考虑了含沙量分布特点基础上建立的,计算较公式(4)更为简单,且不需要纵剖面资料(从图 2 中可以看出计算值

能基本概括这些实测资料)。图 3 是公式 (6) 与公式 (4) 的计算值对比, 从中可以看出两者在长江中下游分汉河段吻合程度相近, 说明采用几何引水深法和当量引水深法达到同样的效果, 对于天然河道分汉情况, 在有较可靠的鞍点高程资料的情况下可采用丁君松等人提出的公式 (4) 求出引水形态, 然而采用韩其为等人提出的公式 (6) 模式确定引水形态更为简明且不失精度, 还不需要可靠的分汉口附近地形。但两者对于环流没有进行考虑。

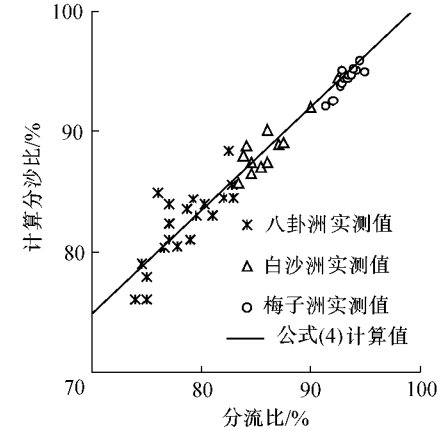


图 2 公式 (4) 计算值与实测值对比

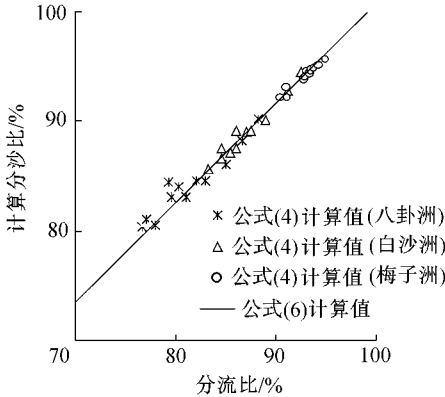


图 3 公式 (6) 计算值与公式 (4) 计算值对比

图 4 和图 5 中列出了分别用公式 (6) 和公式 (7) 计算的松滋河、藕池河以及八卦洲中的支汉分沙比, 通过与实测资料的对比分析, 可以看出, 对于长江八卦洲汉道, 两种模式计算所得结果相差不大, 且都能与实测资料大致吻合。对于松滋河及藕池河, 式 (7) 所得结果与实测资料符合较好, 而式 (6) 计算的结果与实测资料吻合较差, 其计算出的支汉分沙比明显偏小, 主汉分沙比偏大。究其原因, 就是公式 (6) 没有考虑支汉引水时环流的作用, 由于水流在分汉前由主汉流入支汉时必然在一定范围内发生一定程度的弯曲^[21], 如果主支汉夹角为零, 一般可以认为取水面以下的水体不进入支汉, 这时按上述两种模式计算分沙情况是可以的, 但天然情况下分汉口门附近的水流结构因支汉的引水而发生改变, 从而产生环流, 往往是

有利于底部较多较粗的泥沙分入支汉, 通过图 4 和图 5 的对比验证, 说明公式 (7) 较为合理。由于分流河道的水沙运动及其演变规律复杂, 今后还应借助原型资料与理论分析、室内试验及数值模拟等多种手段综合研究分流河道的水沙分配特性。

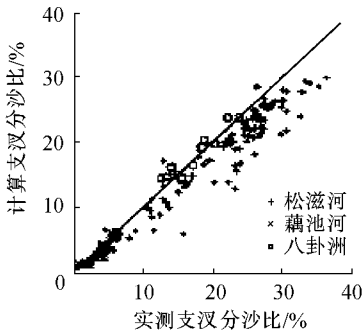


图 4 公式 (6) 计算值与实测值对比

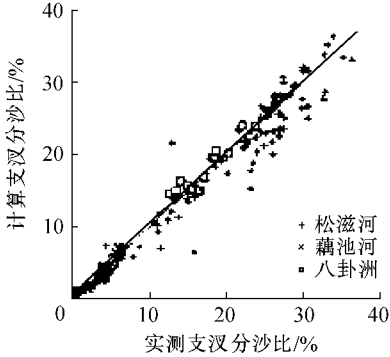


图 5 公式 (7) 计算值与实测值对比

3 河道分流分沙模式研究展望

冲积河流的塑造是水、沙、河床边界在长时期内相互制约、相互协调的结果, 天然情况下, 影响河道分流分沙的因素很多, 如干流来水来沙条件、干流及支流河道的冲淤变化、支流分流角、分流口口门形状和口门水力要素等, 此外, 随着人类对河流改造活动的加剧, 河道的水沙条件可能发生急剧变化, 这些变化有可能使分流分沙的缓慢变化加剧, 甚至改变原来的分流规律。河道分流分沙比正是诸多因素间相互影响、相互调整结果的综合反映^[22]。因此, 研究分流分沙的各种影响因素, 分析各个因素变化对分流分沙比的影响程度具有重要的理论和实践意义。

以往的研究对有支流入汇的分汉情况没有进行考虑, 由于支流入汇, 不同频率的水沙条件使得原来复杂的三维特征的水流结构更为复杂化, 同时, 由于不同来流和汇流的相互顶托, 使该处的水流结构极为混乱。如汉江中游地处襄樊市的叫驴滩, 水流分南北两汉, 20 世纪 60 年代以前, 主流流经北汉, 至 1964 年汉江洪水以后, 由于南汉进口段河床边界条件改变, 两汉分流分沙比发生剧烈变化, 主流从南汉而下, 北

汉日益减少且与支流唐白河相汇,加上其上游丹江口水库的人工调节,从而改变了上游来水来沙条件及过去支流入汇同步涨落的规律,水沙组合更加趋于复杂,给航道维护、河道整治带来了一定的困难,并直接影响到襄樊市的物资集散和中转运输^[22]。因此,研究有支流入汇的分汉河道的分流分沙比规律在理论和实际工程中均具有十分重要的意义。

由于分流河道的水沙运动、分流分沙及其河道演变规律复杂,计算模式的发展方面在充分考虑分流口口门附近的水流结构和含沙量沿垂线分布等特性的前提下,今后还需要借助原型资料与理论分析、室内试验及数值模拟^[23]等多种手段综合研究分流河道的水沙运动特性及分流分沙变化规律,为分流河道的合理整治提供科学依据。随着各种研究手段的发展,将会推动分汉河道演变机理的研究,而分流分沙问题的进一步解决,也必须依靠对它内在运动规律的进一步探索,但要真正达到这一目的还存在很多的困难。

参考文献:

[1] 谢鉴衡.河床演变及整治[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1987:83-85.

[2] TAN Guang-ming, YU Xin-ming. Diversion model of flow and sediment transport with erosion and deposition in river[C]//HU Chun-hong, TANG Ying. The 9th International Symposium on River Sedimentation. 北京:清华大学出版社,2004:1571-1573.

[3] 许足怀,赵志舟,陈健强,等.弯曲河道桥区河段航道整治研究[J].水运工程,2004(9):52-54.

[4] 李学山,王翠平.荆江与洞庭湖水沙关系演变及对城陵河段水情影响分析[J].人民长江,1997(8):6-9.

[5] 李景保,刘晓清,潘安敏.荆江南岸主要河流入湖水沙及其对洞庭湖的影响[J].热带地理,1995(12):312-318.

[6] 李义天,孙昭华,邓金运.论三峡水库下游的河床冲淤变化[J].应用基础与工程科学学报,2003(9):283-294.

[7] 曾涛,郝振纯,刘晓群.洞庭湖洪水及其出路问题[J].水利水电科技进展,2004,24(2):7-10.

[8] TAYLOR E H. Flow characteristics at rectangular open-channel junction[J]. Trans. ASCE, 1944, 109:893-912.

[9] GRACE J L, PRIEST M S. Division of flow in open channel junctions[R]. Alabama: Bulletin No. 31, Engineering Experiment Station, Alabama Polytechnic Institute, 1958.

[10] LAW S W, REYNOLDS A J. Diversion flow in an open channel[J]. Journal of Hydraulics Engineering, 1966(3):207-221.

[11] RAMAMURTHY A S, CARBALLADA D M T B. Diversion flow in an open channel[J]. Journal of Hydraulics Engineering,

1990(3):450-455.

[12] NEARY V S, ODGAARD A J. Three dimensional flow structure at open channel division[J]. Journal of Hydraulics Engineering, 1993(11):1223-1226.

[13] BARKDOLL B D, HAGEN B L, ODGAARD A J. Experimental compassion of division open channel with duct flow in T-junction[J]. Journal of Hydraulics Engineering, 1998(1):92-94.

[14] 罗福安,梁志勇,张德茹.直角分水水流形态的实验研究[J].水科学进展,1995,6(3):71-74.

[15] 丁君松,丘凤莲.汉道分流分沙计算[J].泥沙研究,1981(1):3-5.

[16] 韩其为,何明民,陈显维.汉道悬移质分沙模型[J].泥沙研究,1992(1):44-52.

[17] 余文畴.长江分汉河道口门水流及输沙特性[J].长江科学院院报,1987(1):16-22.

[18] 秦文凯,府仁寿,韩其为.汉道悬移质分沙模型[J].泥沙研究,1996(3):22-27.

[19] 谈广鸣,陈立.引黄渠系干支分水分沙特性试验研究[C]//第二届全国泥沙基本理论研究学术论文集.北京:中国建材出版社,1995.

[20] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1987:158-160.

[21] 余新明,谈广鸣.河道冲淤变化对分流分沙比的影响[J].武汉大学学报:工学版,2005(1):44-45.

[22] 宋力行.汉江中游重点浅滩整治的回顾[J].中国水运,1996(11):26-28.

[23] 谈广鸣,陈立.河床变形混交模型预测技术及其进展[J].水利水电科技进展,2001,21(4):14-16.

(收稿日期:2005-04-16 编辑:高建群)

• 简讯 •

首届全国水工抗震防灾学术会议
将在河海大学举行

首届全国水工抗震防灾学术会议将于 2006 年 10 月 28~30 日在河海大学举行,会议将就水工建筑物与地基材料动态特性、水工建筑物抗震分析与设计、水工结构现场检测与监测、健康诊断与鉴定、水工建筑物抗震防灾与加固改造及水工结构工程振动、爆炸与冲击等专题,结合国内外近年来的发展和研究工作进行广泛的学术交流。欢迎从事水工抗震、结构动力学与地震工程研究的设计、科研、施工人员投稿,投稿截止日期为 2006 年 7 月 30 日。请将投稿论文寄会议组委会或以电子邮件形式传给组委会。联系地址:210098 南京市西康路 1 号河海大学水工结构研究所。联系人:张燎军 E-mail:ljzhang@hhu.edu.cn。

(本刊编辑部供稿)