

城市河流对城市热气候影响的研究进展

刘 京¹ 朱岳梅² 郭 亮¹ 高 军³

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090 ;

2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090 ; 3. 同济大学暖通空调及燃气研究所, 上海 200092)

摘要 :介绍河流与城市大气间的热与水分收支理论基础,从现场实测、模型试验和数值模拟研究等方面系统地归纳了近年来国内外关于城市河流对城市热气候影响的相关研究成果。指出由于目前相关研究还非常缺乏,导致不能为城市河流合理规划与利用提供理论支持。认为加大力度研究城市河流对城市热气候的影响,对于更好地发挥我国城市河流的生态功能潜力、合理开发利用城市河流资源、维持城市生态系统的可持续发展具有重要意义。

关键词 城市河流 城市热气候 热与水分收支 综述

中图分类号 :TV213.9 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2010)06-0090-05

Research advances in effect of urban rivers on urban thermal climate//LIU Jing¹, ZHU Yue-mei², GUO Liang¹, GAO Jun³

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China ;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China ; 3. Department

of HVAC & Gas Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract :The fundamentals of the heat and moisture budget between rivers and urban atmosphere were introduced. The worldwide research advances in the effect of urban rivers on urban thermal climate in recent years were systematically summarized from the viewpoints of field tests, model tests and numerical simulations. The current relative researches were pointed out to be insufficient, resulting in incapable theoretical support for the planning and rational utilization of urban rivers. A conclusion is drawn that a greater understanding of the effect of urban rivers on urban thermal climate is very important to give full play of the ecological potential of urban rivers in China, to improve the development and utilization of urban rivers and to maintain the sustainable development of urban eco-system.

Key words :urban river ; urban thermal climate ; heat and moisture budget ; review

城市热气候特指由于城市特殊的下垫面构成和排热特点形成的城市大气温度时空变化。近年来我国部分城市,特别是南方地区和北方大城市气温逐年升高。从 1999 年至今,高于 35℃ 的高温日数,特别是高于 38℃ 的强高温日数逐渐增多^[1]。高温酷暑除了直接影响人体热舒适性,造成工作效率和生产效率下降,严重时引发中暑、肠胃疾病、高血压和冠心病等疾病外^[2],还会导致人工排热量的大幅度增加,造成能源短缺和环境恶化。研究表明,由于城市热岛效应,大城市的年空调冷负荷将增加 22%^[3]。由此可见,深入研究城市热气候对提高人们的生活质量和维持城市可持续发展具有重要的意义。

城市河流是指流经城区的河流或河段,也包括一些虽属人工开挖但经过多年演化已具有自然河流

特点的运河、渠系。作为城市水资源最重要的组成部分^[4],与一般河流相比,城市河流与人类活动的相互作用更加密切。城市河流作为地表水的主要存在方式之一,除了其特有的人文景观内涵外,主要具有城市用水、交通运输、水产养殖、城市防洪排涝等经济功能以及净化环境、维持生态系统平衡等生态环境功能。城市河流是城市形成和发展中最关键的资源载体^[5]。

作为生态环境功能的重要部分,城市河流在解决城市热气候方面具有极大的优越性:①水体自身的热容量是土壤或混凝土的 2~3 倍,蓄热能力强;②水体可通过透射作用吸收太阳辐射热量,同时表面蒸发还可吸收大量汽化潜热(约 2 500 kJ/kg);③河流一般具有较大的径流量,与小型的人工湖或

水体景观相比,还可以通过流体流动来传输热量,自身温度容易保持在较低的水平;④河流表面平展,有利于“风道”的形成等。例如韩国首尔市清溪川改造工程,将封盖河流表面的水泥板拆除,重新实现河流和大气之间的热湿交换,在使河流的生态功能得到恢复的同时,也改善了周边的热气候。改造后的夏季平均温度下降 0.4℃,平均风速提高 0.2 m/s^[6]。需要指出的是,由于我国一直以来过多地强调城市河流的经济功能,将河道人为硬化和渠化,大量采用混凝土或砖石材料加固岸堤和防洪墙将河道和滩地分开,阻隔了河流和城市内部的水蒸气及热量交换;同时,在城市建设中,迫于人口压力及经济发展需要,不得不挤占河道以获取更多的土地(如上海市近 20 年的河道面积就减少了 25%^[7]),使城市水面被人为侵占或缩窄。由于两侧布置拥挤的建筑群,使城市河流的热气候调节功能弱化甚至衰退。

1 水面-大气热与水分收支关系

研究河流对周围气候的影响,首先必须理解水面-大气之间的热与水分收支关系。根据大量的实测数据,假定在上游没有大型水力发电设施的情况下,在一定时间、一定流程范围内河流流量不变,水温不随时间变化^[8],则水面-大气的热收支可表示为

$$R_{net} = S_{R\downarrow} - S_{R\uparrow} + L_{R\downarrow} - L_{R\uparrow} = H + LE + G + R_i - R_o \quad (1)$$

式中: R_{net} 为水面处净辐射量; $S_{R\downarrow}$ 和 $S_{R\uparrow}$ 分别为透过大气到达水面和从水面反射到大气短波辐射量; $L_{R\downarrow}$ 和 $L_{R\uparrow}$ 分别为从大气向下和从水面向上的长波辐射量; H 和 LE 分别为水面和大气之间的显热和潜热通量,其中 l 为水的蒸发潜热散热量, $l = 25 \times 10^6$ J/kg, E 为水面蒸发量 kg/(m²·s); G 为水面和水体内部的传热通量; R_i 和 R_o 分别为流入和流出水体带入和排走的热量。上述物理量(除 l 和 E)单位均为 W/m²。

$S_{R\downarrow}$ 和 $L_{R\downarrow}$ 可以利用太阳辐射仪直接测量,而 $S_{R\uparrow}$ 和 $L_{R\uparrow}$ 可分别采用式(2)和式(3)计算:

$$S_{R\uparrow} = \alpha S_{R\downarrow} \quad (2)$$

$$L_{R\uparrow} = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

式中: α 为水面反射率, α 为太阳光线入射角的函数(当入射角较小时 α 约为 0.06~0.08,当入射角较大时 α 可近似取值 0.15),另外,实际的河流水面波动也会对 α 取值有一定的影响; ϵ 为水面长波放射率,一般为 0.96; σ 为 Stefan-Boltzman 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$; T_s 为水表面绝对温度, K。

水面和大气之间的显热通量和水面蒸发量是影

响周围区域热气候的最重要因素。其中,水面蒸发的水分不仅增加了大气湿度,蒸发时发生的汽化潜热还可吸收水体热量,维持水面低温。常用的测量显热和潜热通量以及蒸发量的方法包括涡旋相关法、梯度法、热平衡法和 bulk 传输法等。

a. 涡旋相关法。该方法是气象学用于测量和计算地表湍流通量的重要方法之一,属于直接测量方法。其原理为:如不计平流、辐射的因素,只考虑平面热通量垂直变化,且忽略温度变化时的浮力作用以及分子扩散系数随温度的变化特性,并考虑到分子扩散作用在湍流中影响很小,可得

$$H = -\rho c_p \theta' w' \quad (4)$$

$$LE = -l \rho q' w' \quad (5)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m³; c_p 为比热容, J/(kg·℃); θ' 为温度脉动值,℃; q' 为含湿量脉动值, kg/kg(干空气); w' 为垂直风速脉动值, m/s; * 表示时间平均。

b. 梯度法。基于大气湍动和扩散 K 理论, E 可通过测量水面附近两点处的风速、含湿量并利用风速对数法整理可得

$$E = \frac{K_w \kappa^2 \rho (q_1 - q_2) (u_2 - u_1)}{K_m \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \right]^2} \quad (6)$$

式中: κ 为 Karman 常数,一般取 0.4; K_w , K_m 分别为水蒸气和动量湍动扩散系数; q_1 和 q_2 分别为距水面高度为 z_1 和 z_2 处的含湿量, kg/kg(干空气); u_1 和 u_2 分别为距水面高度为 z_1 和 z_2 处的风速, m/s。

由于水面显热和潜热通量都可以看作是大气湍动现象的作用效果,故显热通量可利用 Bowen 比计算:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\gamma (T_2 - T_1)}{e_2 - e_1} \quad (7)$$

式中: β 为 Bowen 比,反映了显热通量和潜热通量之间的关系; γ 为系数,一般可取 0.61; T_1 和 T_2 分别为距水面高度为 z_1 和 z_2 处的绝对温度, K; e_1 和 e_2 分别为距水面高度为 z_1 和 z_2 处的水蒸气分压强, Pa,由当地含湿量和温度决定。

c. bulk 传输法。通过测量水面和水面上方某一高度处的气温、风速和水蒸气含量来计算 H 和 E :

$$H = \rho c_p C_H u (T_s - T) \quad (8)$$

$$E = \rho C_E u (q_s - q) \quad (9)$$

式中: u 为某一观测高度处的风速, m/s; T 为某一观测高度处的温度,℃; q 为某一观测高度处的含湿量, kg/kg(干空气); q_s 为对应于水面温度的饱和含湿量, kg/kg(干空气); C_H 和 C_E 分别为显热和蒸发

量的 bulk 输送系数,总结大量的实测数据,一般可按式(10)取值^[9]:

$$C_H \approx C_E \approx \begin{cases} (1.1 \sim 1.2) \times 10^{-3} & (1\text{ m/s} < u_{10} \leq 5\text{ m/s}) \\ (1.2 \sim 1.3) \times 10^{-3} & (5\text{ m/s} < u_{10} \leq 30\text{ m/s}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: u_{10} 为观测高度为10m处的风速。当为其他观测高度时,需结合当地风速分布进行修正。另外, C_H 还与自由水面面积及大气稳定度有关。当自由水面面积较大时,上游较为干燥的来流空气在通过水面时会被逐步加湿,这样单位面积平均水分传输通量就会下降,当大气不稳定时,水面附近热水分交换加剧, C_H 和 C_E 值也需要修正^[10]。需要指出的是,式(8)和式(9)还有其他不同的表现形式^[11],但基本思路都属于 bulk 传输法。

从目前的应用情况看,涡旋相关法和梯度法对试验器材以及试验地点的要求较高(如需要超声波风速仪等相对灵敏的仪器,试验地点尽量水平开敞等),bulk 传输法是具有代表性的实测方法,但 C_H 和 C_E 根据实测条件的不同有多种不同的取值,直接关系到通量实测值的大小,尚有待于进一步的研究^[12]。

2 城市河流对城市热气候的影响研究

近年来国内外关于城市河流资源的开发利用与保护的研究很多,主要集中在河流自身的环境改善、生态修复、洪水治理以及景观建设等方面,而对如何改善城市热气候的研究较少。实际上,城市河流对城市热气候的影响与河道水体面积、水深、径流量、河道两侧岸堤形式、周边建筑密度和布局、城市大气本身的特征等因素强相关,是非常复杂的。迄今为止,相关研究根据研究手段可分为实测研究、模型试验研究和数值模拟研究3种。

2.1 实测研究

所谓实测研究,即选择城市河流水体表面或外围有代表性的测点,直接测量风速、温度、湿度等大气参数值,从而分析出河流对城市热气候的影响。从研究内容看又可细分为以下3部分:

a. 城市河流-大气热与水分收支特性。这部分属于相对基础性研究,国内外均已有很多研究成果,一些综述文章对此进行了专门的讨论^[13-14]。必须指出的是,这方面的绝大多数研究的目的并不是针对河流对大气的影 响,恰恰相反,大气因素往往只作为边界条件,用以研究河流区域内水温变化对水中生物、植被、农作物、污染扩散等的影响。因此河流表面发生的热与水分传递对大气的影 响并没有得到

充分的体现。成田健一等^[15]利用闪烁仪测量光在大气中传输时受湍动影响发生的强度波动来换算出河流表面的感热通量。研究发现由于水体自身的蓄热能力强,河流表面的热收支特点与其他下垫面(如绿地等)的热收支特点有很大区别。这种方法最大的问题是在水蒸气含量较大的情况下测量会出现很大误差^[16],毫无疑问,这会对实测精度产生不利影响。

b. 城市河流的热气候影响。这方面的研究一般采用定点观测的方法,即在河流内部或周边区域选定合适的测点,并固定实测仪器进行测量。如杨凯等^[17]对上海地区包括河流在内的水体周边温度、湿度进行了定点观测,初步验证了河流对热气候的冷却效果,但缺乏深入的机理分析;日本的相关研究多一些,如武若等^[18]利用探空气球观测了城市河道上空的温度、湿度垂直分布,进而得到:当风呈正交方向通过河流进入周围街区时,其冷却效果所达距离为150m左右;深川健太等^[19]利用长期多点观测数据对包括自由水面在内的城市下垫面对应的风速和温度、湿度进行分析,发现在气温较高的春夏季,河面作为白天城市冷源的重要性。另外,近年来出现了采用汽车进行移动测量的方法,即利用车载测试工具沿事先设计的路线布置大量测点,进行沿程大气参数测试,然后利用该路线上同时进行的定点测量结果进行时间校正。只需配备适量的交通工具,利用较少的测量器材就可以较完整地反映出特定时间段内各物理量的空间分布关系。相关研究包括村川三郎等^[20]利用该方法研究了夏季某典型日不同宽度的河道内部及周边区域在不同时刻的温度分布特征;桥本刚等^[21]利用该方法实测分析了海风沿运河深入城市内部的过程,发现夏季凉爽的海风可沿运河深入到城市内部8~10km。利用该方法既可以在预定的地点停车进行定点测量,也可以在匀速行驶过程中直接测量。

c. 城市河流附近人体热舒适性。城市河流由于其空间开放性和特有的景观特点使人产生心理上的愉悦,从人体热平衡方程(式(11))可以看出,由于河流对城市气候的调节作用,会间接影响到人体的热舒适感。

$$M - W - C - R - E_{\text{va}} = S \quad (11)$$

式中: M 为人体代谢率; W 为人体对外做功量; C 为人体与大气之间的显热交换通量; R 为人体与大气之间的辐射交换通量; E_{va} 为人体与大气的潜热交换通量(呼吸、汗液蒸发等); S 为人体蓄热率。各变量单位均为 W/m^2 。

到目前为止,国内外有关人体室外舒适性的研

究工作开展得较少,用于讨论城市河流对人体热舒适性影响的就更少。木内豪等^[22]利用脑电波和心电图测试人体在河流附近的生理反应。该研究需要较专业的仪器设备和操作技能。另外,很多常用的热舒适性指标如 PMV 等只针对温度、湿度大体处于稳态的人工室内环境,对于时间上非稳态特征明显、空间上太阳辐射等影响作用强烈的室外环境并不适用。神田学等^[23]利用人体热平衡方程提出一个“假想热负荷”的热舒适性指标用以评价河流对人体舒适性的影响。结果发现在河流周边区域,由客观的大气参数计算得到的热舒适性指标值与人体的热感觉值相差很大。近年来以人体生理反应模型为基础,通过分析人体自身蓄热以及与周围空气间的传热过程导出的 SET* 指标^[24]逐渐得到关注,被认为是进行室外动态热舒适性评价的有效指标^[25]。

2.2 模型试验研究

所谓模型试验研究,是将实际的城市河流及周边区域按特定比例缩小为模型,将模型设置在风洞或室外进行测量研究。山本诚司等^[26]、成田健一^[27]利用风洞试验重点讨论了城市河流两岸岸堤、周围建筑物的密度和布局等情况下河流热气候微冷却效果。研究得出当岸堤高度达到周围建筑物平均高度的 1/3 以上时,河流表面的冷空气就将被遮挡而无法充分进入周围街区。总的看来利用模型试验进行相关研究较少,主要原因在于模型试验中很难将河流表面温度和散湿量与实际情况对应;另外,如何使试验满足相似准则也非常困难。实际上,上述试验都回避了水面的热扩散,而只讨论湿气传输,这必然造成与实际情况的偏差。

2.3 数值模拟研究

所谓数值模拟研究,是指在一些基本假定的基础上对城市河流和周边城市的大气空间建立数学物理模型,通过计算求解获得河流对热气候影响的相关信息。张洪涛等^[28]利用中尺度三维准静力模型对长江三峡库区建成前后的温度、湿度场进行了对比研究,颜金凤等^[29]、黄荣辉等^[30]利用数学模型讨论了湖泊以及三峡某河段内河面对大气的显热和潜热输送。这些研究主要针对较大尺度的静止水体,与城市河流的情况不尽相同。近年来出现利用计算流体力学(CFD)技术研究河流问题的趋势。这些研究主要讨论包括河流在内的具有自由水面的流体自身流动问题^[31]或水质问题^[32],很少涉及河流与热气候的关系。由于河流可看作是边界条件复杂的具有自由水面的三维流动,与其他流体现象相比有其独特之处,Ma 等^[33]、Rüther 等^[34]分别讨论了在进行 CFD 模拟时遇到的自由水面与空气侧的边界设定问

题以及任意弯曲边界形状问题。

3 结 语

由于城市和河流自身的复杂性、跨学科性以及技术手段的局限性,到目前为止研究成果不多,且缺乏系统的整理和归纳。城市规划专业已经意识到城市河流可能对热气候产生积极作用,但由于没有定量的理论分析基础,在具体规划实施中无法充分体现其价值^[35-36],而水力学、河流动力学专业主要关心河流自身流动机理。从研究内容上看,现场实测结果最具可信性,国外开展的研究较多,但需要指出的是这些现场实测均是在特定的地理条件下进行的,以这方面工作开展较好的日本为例,其河流一般水面狭窄且流速湍急,如文献[14]中提到的日本一级河流其水面宽度把两侧的阶地算上也只有 200 m 左右,岸堤和周围建筑分布情况也与中国有很大区别,这使得其结论的普适性受到限制。模型试验的优点是可以随意改变河流流动、周边环境布局,以及温度、风速、风向等外部条件,便于进行感度测试分析,但由于实际情况与模型之间相差很大,无因次相似准则很难成立;另外,在风洞中进行的模型试验,由于室外湍动状态下的风速风向与风洞中固定的风速风向有本质区别,模型试验结果能否准确反映实际情况尚存疑问。随着计算机功能的日益强大,数值模拟正有望成为该方向研究的重要手段。但现有研究大多利用的中尺度气象模式由于空间精度的限制,无法对城市河流及其流域范围内的建筑或街道周围的空气流动和能量交换问题进行细节性研究。

到目前为止我国关于水体气候效应的研究很少,其中又以中尺度的大型水库或湖泊研究为主。近年来城市河道的建设力度越来越大,已从单纯的水利治水扩展到景观绿化、防污治污的综合治理。但由于长期以来对城市河流开发利用理念上的偏差以及我国城市化进程的相对滞后,使河流对城市热气候影响的研究基本停留在定性分析阶段,还没有系统深入地开展这方面的研究工作。通过水利、规划、生态环境等多学科的交叉,加大力度研究城市河流对城市热气候的影响,对于更好地发挥我国城市河流的生态功能潜力、合理开发利用城市河流资源、维持城市生态系统的可持续发展具有重要意义。

参考文献:

[1] 谈建国,郑有飞,彭丽,等.城市热岛对上海夏季高温热浪的影响[J].高原气象,2008,27(B12):144-149.
[2] 中井诚一.热中症死亡数と気象条件-日本における21年間の 変遷[J].日生気論,1994,30(4):169-177.

- [3] DAVIES M ,STEADMAN P , ORESZCZYN T. Strategies for the modification of the urban climate and the consequent impact on building energy use[J]. Energy Policy , 2008 ,36 (12) 4548-4551 .
- [4] 岳隽.城市河流的景观生态学研究:概念框架[J].生态学报, 2005 , 25(6): 1422-1429 .
- [5] 张颂军.浅谈城市河流治理与健康对城市生态环境的影响[J].水科学与工程技术, 2007(3): 52-54 .
- [6] 曹相生 林齐 孟雪征,等.韩国首尔市清溪川水质恢复的经验与启示[J].给水排水动态, 2007(6): 8-10 .
- [7] 汪松年 阮仁良.上海市水资源普查报告[M].上海:上海市科学技术出版社, 2001 .
- [8] CAISSIE D , SATISH M G , EL-JABI N. Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick , Canada) [J]. Hydrological Processes , 2005 ,19 (11) 2137-2159 .
- [9] 近藤纯正.水面のベルク輸送 数[J].水文・水資源学会誌, 1992 , 5 50-55 .
- [10] EVANS E C , MCGREGOR G R , PETTS G E. River energy budgets with special reference to river bed processes[J]. Hydrological Processes , 1998 , 12(4): 575-595 .
- [11] WEBB B W , ZHANG Y. Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget [J]. Hydrological Processes , 1997 , 11(1) 79-101 .
- [12] PAAIJMAN K P , TAKKEN W , GITHEKO A K , et al. The effect of water turbidity on the near-surface water temperature of larval habitats of the malaria mosquito anopheles gambiae [J]. International Journal of Biometeorology , 2008 , 52(8): 747-753 .
- [13] WEBB B W , HANNAH D M , MOORE R D , et al. Recent advances in stream and river temperature research [J]. Hydrological Processes , 2008 , 22(7) 902-918 .
- [14] CAISSIE D. The thermal regime of rivers : a review [J]. Freshwater Biology , 2006 , 51(8): 1389-1406 .
- [15] 成田健一,植村明子,三坂育正.都市気候に及ぼす河川水の熱的影響に関する予測研究[J].日本建築学会計画系論文集, 2001(7): 71-78 .
- [16] GREEN A E , HAYASHI Y. Use of the scintillometer technique over a rice paddy [J]. Journal of Agricultural Meteorology , 1998 , 54(3) 225-234 .
- [17] 杨凯 唐敏 刘源,等.上海中心城区河流及水体周边小气候效应分析[J].华东师范大学学报:自然科学版, 2004(3): 105-114 .
- [18] 武若 池田俊介,平山孝浩,等.都市内河川による大気冷却 果[J].土木学会論文集, 1993(11): 11-20 .
- [19] 深川健太 峠泽贵大 村川三郎,等.開 が進む地方都市の田園・ため池周 と市街地の四季を通じた気温形成状況の比較[J].日本建築学会環境系論文集, 2006 (7) 95-102 .
- [20] 村川三郎 関根毅 成田健一,等.都市内河川が周 の温熱環境に及ぼす影響に関する研究(報)水平及び鉛直の影響範囲[J].日本建築学会計画系論文集, 1990 (9) 9-19 .
- [21] 橋本剛 舩橋恭子 堀越哲美.海風の运河湖上による都市暑熱の緩和 果[J].日本建築学会計画系論文集, 2001(7): 65-70 .
- [22] 木内豪 小林裕明 神田学,等.胸波計測と官能試験による河川空間等の快适性の定量化[J].水工学論文集, 1996 , 40(2) 383-388 .
- [23] 神田学 木内豪 小林裕明,等.新しい屋外用温熱感指標による河川の熱環境評価[J].水工学論文集, 1996 , 40(2) 237-242 .
- [24] GAGGE A P , FOBELETS A , BERGLUND L G. A standard predictive index of human response to the thermal environment [J]. Ashrae Transactions , 1986 , 92(2): 709-731 .
- [25] CHEN H , OOKA R , HARAYAMA K , et al. Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen , China with coupled simulation of convection , radiation and conduction[J]. Energy and Buildings , 2004 , 36(12): 1247-1258 .
- [26] 山本誠司 中村安弘 水野稔,等.都市微気象に及ぼす水系の影響に関する研究 C]/空気調和・衛生工学会学术講演会論文集, 東京:日本空気調和・衛生工学会, 1988 :1081-1084 .
- [27] 成田健一.都市内河川の微気象の影響範囲に及ぼす周 建物配列の影響に関する風洞実験[J].日本建築学会計画系論文報告集, 1992(12) 27-35 .
- [28] 张洪涛 祝昌汉 张强.长江三峡水库气候效应数值模拟[J].长江流域资源与环境, 2004 , 13(2): 133-137 .
- [29] 颜金凤 孙菽芬 夏南,等.湖-气水热传输模型的研究和数值模拟[J].上海大学学报:自然科学版, 2007 , 13 (3): 308-313 .
- [30] 黄荣辉 严邦良.一个描述河陆风变化的数值模式及其数值实验[J].大气科学, 1989 , 13(1): 11-21 .
- [31] OLSEN N R B. Three-dimensional CFD modeling of self-forming meandering channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2003 , 129(5): 366-372 .
- [32] DARGAHI B. Three-dimensional flow modeling and sediment transport in the river Klarälven[J]. Earth Surface Processes and Landforms , 2004 , 29(7): 821-852 .
- [33] MA L , ASHWORTH P J , BEST J L , et al. Computational fluid dynamics and the physical modeling of an upland urban river [J]. Geomorphology , 2002 , 44(3): 375-391 .
- [34] RÜTHER N , OLSEN N R B. Modelling free-forming meander evolution in a laboratory channel using three-dimensional computational fluid dynamics[J]. Geomorphology , 2007 , 89 (3): 308-319 .
- [35] EVANS M J , SCHILLER S. Application of microclimate studies in town planning : a new capital city , an existing urban district and urban river front development [J]. Atmospheric Environment , 1996 , 30(3) 361-364 .
- [36] 刘幻雯.城市河流景观现状分析及综合规划[J].云南环境科学, 2005 , 24(增刊): 53-56 .

(收稿日期 2010-01-24 编辑 骆超)