

植被对河道水流影响的研究进展 *

徐卫刚 张化永 ** 王中玉 黄文沛

(华北电力大学工程生态学与非线性科学研究中心, 北京 102206)

摘要 植被是自然河流的组成部分。明确植被与水流的相互影响,对于动植物栖息地的保护、水体富营养化的控制、河流和湖泊的生态修复,以及河道整治等方面均具有重要的科学和实践意义。本文回顾了国内外对河道植被与水流相互作用的研究状况,综述了植被对阻力系数、水流结构影响的研究,介绍了数值模拟在该领域的应用进展;基于文献资料,分析了河道断面形状、植株个体形态、植被分布格局等诸多因素对含植被水流流态的影响,阐述了在河流形态、时空尺度上植被变化、植被段内部水流分布、三维紊动模拟等方面深入研究河道植被水力学机制的重要性。

关键词 生态河流 植被 生态水力学 阻力系数 数值模拟

文章编号 1001-9332(2013)01-0251-09 **中图分类号** Q178.1; TV143 **文献标识码** A

Effects of vegetation on river flow: A review. XU Wei-gang, ZHANG Hua-yong, WANG Zhong-yu, HUANG Wen-pei (*Research Center for Ecological Engineering and Nonlinear Science, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, **24** (1): 251–259.

Abstract: Vegetation is a component of the natural river. To understand the interaction between vegetation and water flow is of scientific and practical significance for the protection of wildlife habitats, the control of water body eutrophication, the ecological restoration of rivers and lakes, and the management of riverways. This paper reviewed the researches about the interaction between vegetation and water flow in riverways, summarized the research progress in the effects of the vegetation on the resistance coefficient and water flow structure, and introduced the applications of numerical simulation in this research field. Based on the previous studies, the effects of river section shape, plant individual form, and vegetation distribution pattern on the flow regime of water flow in vegetation section were analyzed. For further study, the importance of deeply understanding the hydraulics mechanisms of the interaction between vegetation and water flow in terms of the diversity of river morphology, the vegetation variation at different spatiotemporal scales, the water flow distribution in vegetation section, and the three dimensional turbulent simulation was expatiated.

Key words: ecological river; vegetation; eco-hydraulics; resistance coefficient; numerical simulation.

植被是自然河流的组成部分,它为水生生物提供了栖息地和食物来源,净化了河水水质,在防止水流对河岸侵蚀以及维持河床稳定方面起着重要作用^[1-2]。近年来,随着河流水污染问题的日益严重,引发了人们对近代水资源工程学理念的重新思考,恢复河流的生态属性、重建河道水生植被已为专家学者和公众所关注^[3]。瑞士、德国等早在 20 世纪 80

年代末就提出亲近自然河流概念和自然型护岸技术,日本也很早就开始学习欧洲的河道治理经验,并在理论、施工及高新技术的各个领域丰富发展了“多自然型河道生态修复技术”,由此诞生了生态学与土木工程学有机融合的“应用生态工学”及其理论。

然而,水生植物群落在改善水质、减轻侵蚀的同时,也增加了其对水流的阻力,减小了河道流速,提高了水位,减小了河流的过流能力,从而增大了洪涝灾害的风险^[4-5]。因此,恢复河流的生态功能、保证

* “十一五”国家重大科技支撑计划项目(2006BAC10B03)和国家水体污染防治与治理专项(2009ZX07210-009)资助。

** 通讯作者. E-mail: bjecology@gmail.com

2012-04-13 收稿, 2012-10-17 接受。

河道输水与行洪能力,使水利建设既能维持传统的防洪、排涝功能,又具有生态学功能,已成为当代生态水资源工程学的焦点问题^[6]。目前,国内外在植被河道的阻力特性、水流结构和数值模拟三方面开展了大量研究,试图确立植被与河道水流的相互作用关系、理解水生植物的阻水特性、把握植被与水流之间相互作用的机制,以利于工程师对生态工程学中植被种植格局的合理配置^[7]。探讨植被与水流的相互影响,深入理解植被与水流之间的作用机理及生长有植被的河流的水力环境,在动植物栖息地的保护、水体富营养化控制、河流及湖泊的生态修复、管理和河道整治等方面都有重要的科学和实践意义^[8]。本文从阻力系数、水流结构和数值模拟三方面对于植被对河道水流影响进行了综述,分析并总结了该领域的主要研究方法及进展。

1 植被的阻力特性

当前,河道中植被对水流阻力影响的研究主要集中在两方面:通过表征河道粗糙程度的糙率系数(如曼宁系数n、达西-魏斯巴赫系数f、谢才系数C)研究,揭示河道中植被对水流阻力影响;通过植被受力分析得出植被阻力特性,基于此概括出植被的阻力系数。

1.1 植被糙率系数

天然河道的糙率系数是衡量河床及边壁形状不规则和粗糙程度对水流阻力影响的一个综合性系数。由于河道植被的存在,糙率系数更加复杂多变,难以准确求得。糙率系数的确定通常是基于水动力学模型^[9],得到基本水力参数,如水深和流速等,然后利用流动阻力因素和阻力方程,对河道糙率系数决定参数进行讨论,进而得到在不同水力条件下的糙率系数,通过达西-魏斯巴赫系数f、谢才系数C、曼宁系数n来描述与各水力参数之间的关系。目前,国内外学者已对植物的糙率系数进行了大量研究,研究的立足点主要集中在河道糙率系数的估算、对n-VR曲线的修正以及糙率系数与植被属性关系的研究。

在20世纪50年代,Ree^[10]和Chow^[11]对存在植被河道的水流阻力系数进行研究,以n-VR关系曲线的形式总结了以往的研究结果。Kouwen等^[12]、Findlay和Ellul^[13]和Green^[14]也相继对这一曲线在特定状况下的规律进行了补充和修正,使其有了更广泛的应用范围。但n-VR曲线实际上反映了曼宁系数与雷诺数的关系,并没有揭示出植被与水流关

系的本质^[12],也没有与植物的特性建立联系。因此,很多学者试图通过统计学方法,建立一些植物学属性与水力学参数之间的联系。Plate和Quraishi^[15]较早地将密度引入到水力学研究,并建立了水草密度与曼宁系数的回归方程。更多的学者则把密度当作参照变量,将植被密度作为组别差异进行分析^[16]。Green和Richards^[17]基于植物群落的空间特性,分析了植物群落所占的河流表面积比例、体积比例对曼宁系数影响的差异,提出河流表面积比例更易于实际应用。Green^[7]基于对35条英国天然河流的野外调查,研究了植物所占的横截面积比例与曼宁系数的关系。倪汉根和顾峰峰^[18]对芦苇在模拟非淹没流条件下的阻力特性进行水槽试验,利用恒定非均匀流水力参数的基本关系,由实测水面线计算芦苇阻力的渠底等效剪应力,进而确定等效曼宁系数,结果表明非淹没芦苇的等效曼宁系数与水深基本上呈线性关系,与流速基本无关(在紊流范围内),单株芦苇的综合阻力系数(C_D)与植株密度基本无关。此外,还有一些学者对植物的柔韧性与阻力系数的关系进行研究,如Wilson等^[19]列举若干植物的刚度数据,并分析了其与阻力系数的关系。但这些植物生物特性对阻力的影响研究在具体实施和操作时非常困难和繁琐,并不能很好地在实际工况中应用。

近年来,野外大尺度植被糙率系数的变化成为河道植被阻力系数研究的一个重点。de Doncker等^[20]通过长期监测比利时和波兰的两条典型野外河流发现,其曼宁系数是随着时间、位置和生物量变化的函数,与时间变化的相关性明显,呈季节性变化,且年际变化较小,生物量较高时曼宁系数也较大,曼宁系数的季节变化由植物生长、消亡所引起。O'Hare等^[21]认为,植被的季节生长是引起苏格兰和英格兰地区有植被河道糙率系数变化的主要因素,将生物量模型纳入输水/汇流估算系统(CES/AES)中,可减小对含植被河道糙率系数预测的不确定性。在实践中,曼宁系数的值主要由试验数据拟合得出,与试验材料和环境的关联性较大,对植物的实际生物学特性考虑较少,故试验所得公式的应用具有一定局限性。但目前,曼宁系数经验性n-VR曲线在实际工程水力计算中的应用仍相当广泛。

1.2 植被受力分析

在估算曼宁系数的基础上,许多学者试图通过研究植被在水流中的受力情况,给出植被与水流之间的相互作用关系。因阻力系数的计算公式为 $C_D = 2F/\rho ALV^2$ (式中, C_D 为阻力系数, F 为植被阻力, ρ

为水体密度, A 为植被迎水面积, L 为植被段长度, V 为流速), 所以相关研究的重点就在于植被在水流中的受力情况。主要的研究方法是通过水槽试验求得植被对水流的阻力和植被的迎水面积, 进而根据前文中的算式得出植被在水流中的阻力系数。目前, 明确植被在水流中阻力的方法主要有两种。一种是间接测量, 通过建立力学平衡模型以及水流中植被的受力情况, 得出植被的阻力系数^[22]。如 Petryk 和 Bosmajian^[23] 提出了含植被水流的力学平衡公式 $n_{\text{veg}} = K_n R^{2/3} \sqrt{(C_D \sum A_i) / (2gAL)}$ (式中, n_{veg} 为糙率系数, K_n 为无量纲系数, R 为水力学半径, C_D 为阻力系数, $\sum A_i$ 为植物迎水面积之和, L 为植被段长度), 从而建立了曼宁系数与拖曳系数之间的简单转化关系。Stone 和 Shen^[24] 选用圆柱型木钉作为试验材料, 将其交错排列于水槽底部, 测定圆柱型物体的糙率; 在进行力学分析时, 将茎秆面积与试验段面积的比值(λ)纳入到力学分析中; 在计算绕流阻力时, 流速采用茎间流速, 而非断面平均流速; 通过对非淹没状态下圆柱体流速、水深、茎面积比、圆柱个数等参数的测定, 即可确定绕流阻力系数。该方法被 Wu 和 He^[25] 应用于计算植被曼宁系数, 并与其他计算方法进行比较, 验证结果较好。Li 和 Xie^[26] 建立数学模型研究淹没状态下柔性植被的水流特性, 认为柔性植被叶子的影响可以采用有效面积和拖曳系数的变化来反映, 柔性植被相对于刚性植被会减小植被所引起的水流阻力和垂向雷诺应力, 并且植被的叶子会加强这种减轻作用。拾兵和付强^[27] 在矩型变坡水槽内, 采用羽毛模拟天然灌木, 进行不同植被密度与不同水流条件的试验, 然后基于一定的假设条件对植被受力进行简化处理, 结合试验资料的回归分析结果建立了明渠种植树木后床面相对切应力、糙率与树木因子 F 之间的理论关系表达式: $\frac{n'}{n} = \frac{v}{v'} \left(\frac{R'}{R} \right)^{1/6}$

$$\left[\frac{(1-\eta_b) z_0' - r\eta' F_v}{(1-f_v) z_0} \right]^{1/2} \quad (\text{式中: } n \text{ 为无树时糙率}; n' \text{ 为有树时糙率}; v \text{ 为无树时流速}; v' \text{ 为有树时流速}; R \text{ 为无树时水力半径}; R' \text{ 为有树时水力半径}; \eta_b \text{ 为树底面积与河床面积的比值}; z_0 \text{ 为无树时河床切应力}; z_0' \text{ 为有树时河床切应力}; r \text{ 为水的比重}; \eta' \text{ 为无树时阻水面积与有树时阻水面积的比值}; F_v \text{ 为单行树木阻水率})$$

有树时糙率; v 为无树时流速; v' 为有树时流速; R 为无树时水力半径; R' 为有树时水力半径; η_b 为树底面积与河床面积的比值; z_0 为无树时河床切应力; z_0' 为有树时河床切应力; r 为水的比重; η' 为无树时阻水面积与有树时阻水面积的比值; F_v 为单行树木阻水率), 但该式中的树木因子较难确定, 且各参数之间的定量关系仍需进一步验证。上述研究主要是基于均匀流情况下的力学平衡分析, 用传统的测试

手段将植物简化成刚性圆柱体(类似树干)来研究其受力情况和阻力特性, 其模拟材料可用黄铜棒、青铜棒和木棒等。近年来,许多学者逐渐采用真实植物进行试验,研究植物茎杆和冠层的受力情况,通过力学分析最终计算出植被对水流的阻力系数。但这些研究大都采用室内水槽试验验证,然而野外植被在水流中大多为非均匀流,其水力状态与均匀流有很大区别,直接简化为均匀流进行处理不能完整表现植被在水流中的受力情况。也有部分学者已进行非均匀流情况下的研究,如 Wu^[28] 采用分段积分方法,研究了非均匀流下挺水植物对水流的阻力影响。非均匀流情况下的植被受力分析研究是今后的研究重点之一。

另一种方法是直接测量法,主要是利用特制仪器或装置对水流中单株植被的受力进行测量,从而计算出植被的阻力系数。如 Fathi-Maghdam 和 Kouwen^[29] 利用单株松树和杉树树苗模拟非淹没柔性植被,通过一种特制的测力仪器测量其在水槽中的阻力,然后通过量纲分析确定出阻力系数的函数表达式,从而确定植被的阻力系数和动量吸收面积,得出自然河道中粗糙度(植被密度、刚度)与水流条件(流速、水深)的关系,但所得的阻力系数函数表达式只是给出了植物产生阻力与植株参数、水流参数之间的定性关系,各量之间的定量关系仍需进一步研究。Tanaka 和 Yagisawa^[30] 研究了簇状植被在水流中的阻力系数,通过改变植株相对间距(G/D)和相对高度分析了阻力系数的变化规律,结果表明, G/D 较大时对阻力系数的影响明显,流场结构的改变发生在 $G/D > 1$;当植被密度较低(如密集的水草等)时 ($G/D < 0.5 \sim 1$),沉积现象出现在植被段下游区域;当植被密度较高(如种植刺槐或芦苇等)时 ($G/D > 1$),沉积发生在植被区域内部。这种方法测力比较准确,能够给出植被在水流中的实时受力变化,但该方法比较适合于测量单株或几株植物的受力特性,对于植物种群整体受力情况的测量比较困难。

植被阻力系数与雷诺数的关系也是研究热点之一。Wu 等^[31] 利用马鬃毛作为试验材料研究非淹没状态下草本植被的阻力系数,得出了挺水植物拖曳系数的计算公式,结果表明拖曳系数与雷诺数的相关性较高。Tsihrintzis^[32] 对此进行了更深入的讨论,并对前人在多种流态下植被阻力系数的试验数据进行了归纳总结,据此给出了阻力系数-植物密度的关系图。

2 植被水流结构

植被的存在很大程度上改变了河道的床面形态和水流的内部结构。许多学者基于植被对流速分布的影响、植被对紊动结构及能量的影响两方面,在水工实验室、漫滩河流等进行了流速或流场的试验测量。试验过程中的测量技术由最初的毕托管、旋桨流速仪、压力传感器,向声学多普勒流速仪(ADV)、激光多谱勒流速仪(LDV)、激光诱导荧光仪(LIF)、粒子影像测速仪(PIV)等新测量技术发展。

2.1 植被对流速分布的影响

目前,河道的流速分布公式主要有对数形式、指数形式、抛物线形式、椭圆形式和反双曲线正切形式等几大类。其中,应用较多的为对数律公式和指数律公式^[33]。有研究根据水深与植物的相对淹没度(H/h_v ,其中, H 为水深, h_v 为植物高度),将植物水流分为非淹没流和淹没流;也有研究根据植被刚度将植被分为柔性和刚性植物。

对于刚性植被的研究开展较早,因刚性植被在水流中流速特性类似于传统水利学中的圆柱绕流,许多学者直接借用圆柱绕流的研究方法分析流速分布。Prandtl^[34]认为,明渠流最主要的阻力产生于渠道边界,并根据动量传递理论和掺长假说推导出著名的明渠流对数流速公式,该式主要适用于自由明渠流而不能直接用于有植被的河道,原因在于有植被河道中除了边界粘性剪切力外,植被单元还产生形态阻力,阻碍水流,并引起局部流速亏损。因此,在Prandtl明渠流对数流速公式的基础上,许多学者将沉水植物看作运动的河床,对该公式做了相应的修正从而可应用于含植被水流。Carollo等^[35]分析了不同植生密度、流量和坡度等因素对流速剖面的影响,并利用Prandtl混台长度法推导出理论的流速剖面。Yagci等^[36]采用松柏枝作为试验材料,研究非淹没植物对水流结构和动能特性的影响,推导出一个反映动能组成关系的经验公式,认为刚性植被比其他类型的植被对时均流速的影响更大。Chen等^[37]模拟了不同植被格局下沿程、横向和纵向的流速特性,认为流速的垂向分布可以分为上部无植被区、中部植被区和下部底层区。罗宪等^[38]选用竹签作为试验材料模拟乔木,探讨了不同滩地植被密度、植被高度对复式河槽流速分布的影响,结果表明滩地无植被情况下,流速分布满足对数分布;滩地种树后,主槽流速明显增大,滩地流速减小,流速呈S型分布,不同植物密度的S型分布形式有所差异;植被密度对

流速分布的影响非常明显。

当水流流经柔性植物时,植物沿流向发生弯曲和摆动,柔性植被流速垂向分布分层比较明显。Eastgate^[39]研究表明,含狼尾草明渠的流速与距底距离基本上呈对数关系。Gourlay^[40]认为,当明渠底面坡度<0.05时,流速分布可分为3层:植被内部基本呈固定流速,可用剪切流速表示,植被层顶部区域流速迅速增加,植被层之上流速缓慢增加并逐步稳定;当明渠底面坡度>0.05时,流速第2层和第3层重合,整个流速可分为2层。Kouwen等^[12]测定含人工植被水槽的试验流速分布曲线时发现,植被层上方流速可用对数曲线表示。Temple^[41]根据植被的淹没程度将流速分布分为2层:当水深小于弯曲的植被高度时,植被区域的流速被认为是常数,其大小取决于植被的特征和能量底坡;当水深大于植被高度时,流速分布取决于紊流剪切层的动量交换。Järvelä^[42]对剪切流速的4种计算方法进行比较:1) $u_* = \sqrt{ghS}$; 2) $u_* = \sqrt{g(h-h_{p,m})S}$; 3) $u_* = \sqrt{g(h-h^*)S}$; 4) $u_* = \sqrt{-u'w'}$ 。式中, u_* 为剪切流速, $h_{p,m}$ 为弯曲植物高度的平均值, $-u'w'$ 为雷诺剪切数, h^* 为雷诺剪切数最大处的距渠底距离,结果表明紊流强度在水草顶部达到最大值,方法2)计算的剪切流速与试验结果吻合最好,且该方法避开了复杂的紊流强度计算,更便于实际工程应用。Stephan和Gutknecht^[43]通过大量试验提出,可将植物层等效成沙粒层,以当量沙粒糙率的形式来表示水流阻力,不过该方法仅局限于淹没状态下的柔性植物,当流速不符合对数分布时,该方法失效。Afzalimehr等^[44-45]和Dehsorkhi等^[46]研究植被对流速和雷诺应力分布的影响,并对流速垂向分布进行对数曲线拟合,结果表明,由于河岸植被的存在,最大流速差异可达35%;植被高度与水深比值(y/h)在0.02~0.15时,流速沿水深分布的对数曲线并不依赖于距河底的距离。时钟^[47]测量了不同种属、不同密度的海岸盐沼植物冠层水流的平均流速分布,对植物冠层的湍流结构进行分析,并探讨了冠层植物水流结构对粘性泥沙运动的可能影响。随后时钟和李艳红^[48]还对两种植物存在的河流环境进行了室内水槽模拟试验,得出了水流平均流速垂线分布区域。

淹没柔性植被的垂向流速分布一般可分为3个分区:植物区域内、植物冠层区和上层无植物区。其中,植物冠层区流速波动最剧烈,上层植物区流速分布仍符合对数分布形式。目前,如何对种类繁多、

形态多样的植物进行模拟仍然是一个难题;研究植被枝叶的自相似特性可能成为一个新的研究方向;对于自然界中普遍存在的刚性与柔性植被相间的情况尚有待进一步研究。

2.2 植被对紊动结构和能量的影响

在河道中,植被的存在不仅对流速分布有影响,而且对水流紊流结构和扩散也有很大的影响^[49]。主要体现在水流的雷诺应力分布、二次流和水流植物交界处的水平涡等方面^[50]。明确含植物水流的紊流结构可为河流的管理与生态修复提供基础性依据,所以研究者们愈来愈注重含植物水流的紊流机理研究,现代先进测试手段的出现也为该项研究提供了有力的保证。

与流速的研究类似,紊动结构的研究也始于刚性植被。Nepf^[51]利用木棒模拟植物,将其视为刚性体,用 ADV 和 LDV 进行测量,同时用罗丹明作为示踪剂显示植物区紊流扩散的形态,研究了圆柱阵列内的紊动和扩散特性,得出了阻力系数与植物密度的关系曲线和植物区紊动能的特性,结果表明紊动强度主要取决于植被阻力,平均能量分配到紊动能的比例取决于茎的形状阻力与粘滞阻力之比,即取决于茎的形态、柔韧性和茎雷诺数。Cardoso 等^[52]根据试验数据得到了不同流态下平均相对紊动强度分布曲线,发现有植被时,该曲线接近于一条直线。这进一步说明河床植被对糙率的速度脉动有干扰和削弱作用,且紊动强度沿水深方向趋于平均。Nezu 和 Onitsuka^[53]在变底坡玻璃水槽中采用 LDV 和 PIV 两种方法研究了刚性植物的紊流特性,并对植物区和无植物区的紊流特性进行对比,但忽视了植物边界效应对无植物区内紊流特性的影响,以及由此造成的植被区与无植被区间的相互影响。

近年来,柔性植被特别是枝叶对紊流的影响越来越被人们所重视。Ikeda 和 Kanazawa^[54]用尼龙纤维模型模拟柔性植被,发现水流在植被附近产生涡旋,在植被顶端时均流速变化显著,而且紊动强度和雷诺应力都在该处达到最大。Wilson 等^[19]研究表明,植被无叶杆时,内部水流的紊动强度、紊动剪切层渗透比例大于有叶杆植被;植被无叶杆时,水流紊动强度、雷诺应力的峰值出现在杆顶,有叶杆植被水流紊动强度、雷诺应力的峰值位置高于叶层顶部;在植被完全淹没的情况下,植被无叶杆时产生的雷诺应力大于有叶杆时。王忖和王超^[55]采用天然沉水植物和挺水植物的水槽试验研究了含挺水植物和沉水植物的水流紊动特性,发现挺水植物段的紊动强度

和雷诺应力明显高于沉水植物段,一定条件下沉水植物和挺水植物均能抑制底泥再悬浮,但当雷诺数达到一定数值时,水生植物的存在反而加剧了底泥的再悬浮,且沉水植物对底泥再悬浮的抑制效果好于挺水植物。

Nepf 和 Vivoni^[56]及 Tanino 和 Nepf^[57]研究了有限水深下植被水流流场特性,以及水生植物在淹没和非淹没情况下的平均动量、紊流和交换动力学特性,结果表明含植物水流分为两部分:一是位于植物上方的垂直交换区,紊流在此进行垂向交换,维持动量平衡,植物顶部流速突变产生剪切应力,导致紊流发生;二是植物内部的纵向交换区,该区水流运动以纵向对流为主,该区紊流主要由植物扰动、阻力与压力梯度产生。当植物处于非淹没状态时,紊流以纵向交换为主;当植物处于淹没状态时,植物内部出现垂向紊动交换,且随着水深增加,垂向动量交换范围加大,愈来愈深入到植被群落内部^[58]。

水流能量的耗散可以反映出渠底糙率、结构糙率以及由植物引起糙率的水力阻力,但目前在植被区能量传递方面的研究相对较少。Temple^[41]研究发现,植被在边界区域流速波动加大,导致动量和能量系数较大。Huai 等^[59]研究了淹没植被对水流能量损失和能量传递特性的影响,指出植被会增大水流能量的损失,植被顶部的能量损失最大,并且能量会从无植被区域向有植被区域传递。这些研究表明,基于能量守恒和动量守恒的研究比基于力学平衡的研究能更好地解决植物所造成的一部分连续空间的问题,并且从能量传递的角度进行研究可以避开植物与水流相互作用的机理研究,避免了对尾流、涡旋之类复杂问题的处理。

3 植被水流的数值模拟

在试验研究植被与水流相互作用的同时,许多学者尝试通过求解含植被水流运动的微分方程,从数值模拟的角度来研究植被对水流的影响。主要研究思路是在连续方程、动量方程和紊动能量方程的基础上,运用不同的离散方法迭代求解。实际工程建设中,更多地采用数值模拟方法进行方案认证,所以建立更符合实际的含植被水流的数值模型是亟待解决的问题^[60]。

目前,对于含植被水流的数值模拟研究集中于双方程湍流模型,其中,最有代表性的为非线性 $k-\varepsilon$ 模型和代数应力模型(ASM)。涡流粘度使标准的 $k-\varepsilon$ 模型不能用于模拟二次流,所以非线性 $k-\varepsilon$ 模

型逐渐替代了标准 $k-\varepsilon$ 模型^[61]. Fischer-Antze 等^[62]对淹没植被情况下的明渠水流进行三维数值模型研究,将明渠分解成若干个子区域,联立连续方程、动量方程和紊动能量方程,提出植被相关系数,并推导出植被阻力的表达式,结果表明,淹没植被不仅可以起到生态保护的作用而且可以营造蓄洪空间. 刘诚和沈永明^[63]建立三维湍流模型研究水生植物对水沙运动的影响,系统分析了淹没植被对水流水平时均流速垂向分布的影响,以及复式明渠边滩栽种挺水植物对水流深度、平均流速分布和植被岛周围泥沙床面的冲淤变形的影响. Nadaoka 和 Yagi^[64]研究植被生长对河道水流的影响,提出了二维沿水深积分的浅水方程模型,结果表明,河道横断面流速分布的模拟结果与试验结果基本吻合,且自由水面的波动频率与试验结果基本相似;但该模型在求解二维平均浅水方程和紊流脉动动能输运方程时仅可得出沿水深的平均流速和紊流分布,因此该模型只适用于植被处于非淹没状态下浅水河道的模拟^[65].

也有学者利用两相流(VOF)方法或引入植被阻力模型与 $k-\varepsilon$ 湍流模型的耦合模型对含植被水流进行数值模拟^[66]. 如黄本胜等^[67]采用 VOF 方法和重组化群(RNG) $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型,利用多孔介质对有水葫芦覆盖的河道水流进行数值模拟,结果表明,水面雍高值和流速分布与实测结果的吻合性较好. 罗晶等^[68]基于 VOF 方法、RNG $k-\varepsilon$ 模型、有限体积法和 PISO 算法,通过对同一来流情况下 3 种不同株径的刚性植物群的数值计算,分析了植物带前、带中、带后典型断面的纵、横向水面线变化和流场,结果表明,随着植物的生长,不同断面水流的水位、平均流速与植物株径均有密切关系. Wang 和 Wang^[69]引入植被水力阻力建立三维水动力模型分析了水生植被对流速的影响,并预测南水北调过程中南四湖水流流速的垂向分布,同时与增加河床糙率系数的方法比对,结果表明,通过增加植被水力阻力的方法研究植被对流速的影响是可行的,模型计算结果与现场观测数据误差<15%,而采用其他简化方法所得计算结果的误差可达 35%.

与实测数据相比,非线性 $k-\varepsilon$ 模型在平均湍流的统计数据上不能得到很好重现. 代数应力模型(ASM)常被用于含植被水流的数值模拟. Naot 等^[70-71]为研究河岸有植被的宽矩形复式断面河道的水流动力特性,发展了 ASM 三维紊流代数应力模型,通过经验分析与 ASM 的结合模拟了植被对水流的阻碍效应,以及滩地植被密度对水流的影响. 与

传统的 $k-\varepsilon$ 统计模型相似,这种 ASM 模型也不能模拟水平大尺度涡旋连续结构和动态发展. 由于 ASM 低估了自由表面处各向异性湍流强度, Kang 和 Choi^[72-73]为此模拟三维漫滩水流时建立了考虑自由表面水流各向异性的雷诺应力模型,该模型由 3 个子模型(Speziale 模型、Mellor-Herring 模型和 Rotta 模型)组成,这 3 个子模型分别对应压力-应变关联项、湍流耗散项和耗散项.

4 研究展望

近几十年来,河道生态修复工程逐渐得到重视,河道植被对水流影响已经引起人们的广泛关注^[74]. 目前,相关研究主要集中在植被河道的阻力特性研究、水流结构和数值模拟等方面,且大部分研究着重于单一植被、顺直河流等条件下植被与水流的关系,对不同工况下植被在水流中力学特性的研究相对较少. 由于河道和漫滩中蜿蜒变化、泥沙运动、河床演变的复杂性^[7],研究河道生态修复工程中植被对水流的影响存在诸多困难^[75]. 由于受到植株个体特性^[76-77]、分布格局形式^[78-79]等诸多因素的影响,河流引入植被后水流形态的变化比较复杂,导致植被在河流中的力学特性迄今为止尚未得到明确解释. 引入植被后,如何在河道管理、防洪治洪等方面同时满足多个目标,将水力学、景观美学和生态学观点结合起来,是河道环境工程中最难解决的问题. 解决好不同工况下植被在水流中力学特性问题对水利生态工程的规划与设计具有重大的工程意义.

当前许多研究把河道植物种群看作一个整体,仅给出概化的植物种群阻力系数,缺乏对植物种群内部水流变化和植物个体之间水流运动的研究. 明晰植物个体的水力学特性有利于对河道冲淤演变、水质净化中营养盐释放^[80]等机制的研究.

目前,大部分研究在恒定均匀流顺直河道中进行,但实际工程中的河道蜿蜒、旁侧入流、支流回水、复式漫滩等情况都影响植被的力学特性,尤其是需要加强复式河道漫滩中滩地植物种群对水流的阻滞影响及滩槽水流能量交换的研究,以利于滩地合理开发、防洪水位预测和河道整治规划等问题的解决.

随季节变化,植被空间分布格局有着明显改变^[81-82],植被格局的改变使河道阻力系数有较大的变化. 可以结合生态学建立完善的糙率修正方法,确定整个河流生态系统中糙率时空变化规律,为进一步嵌套水动力学模型提供参数^[83].

国内外在植被对河道水流影响的研究上已取得

了显著进展,通过这些研究能够提高人们对河流、湿地保护过程中与生态环境有关现象的理解^[84],进而预测人类活动对自然生态的影响以及修复工作是否能达到预想的状态,进而维持可持续的水体质量和良性河流湿地的生态恢复^[85].

参考文献

- [1] Chen SC, Chan HC, Li YH. Observations on flow and local scour around submerged flexible vegetation. *Advances in Water Resources*, 2012, **43**: 28–37
- [2] Zeng L, Chen GQ, Wu Z, et al. Flow distribution and environmental dispersivity in a tidal wetland channel of rectangular cross-section. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, **17**: 4192–4209
- [3] Cai Q-H (蔡庆华), Tang T (唐 涛), Liu J-K (刘建康). Several research hotspots in river ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(9): 1573–1577 (in Chinese)
- [4] Osterkamp WR, Hupp CR. Fluvial processes and vegetation: Glimpses of the past, the present, and perhaps the future. *Geomorphology*, 2010, **116**: 274–285
- [5] Zhang HY, Dai LM. Surface runoff and its erosion energy in a partially continuous system: An ecological hydraulic model. ASME Conference Proceedings, Florida, USA, 2009: 575–583
- [6] McBride M, Hession WC, Rizzo DM. Riparian reforestation and channel change: How long does it take? *Geomorphology*, 2010, **116**: 330–340
- [7] Green JC. Comparison of blockage factors in modelling the resistance of channels containing submerged macrophytes. *River Research and Applications*, 2005, **21**: 671–686
- [8] Luhar M, Nepf HM. From the Blade Scale to the Reach Scale: A Characterization of Aquatic Vegetative Drag [EB/OL]. (2012-02-14) [2012-06-27]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.002>
- [9] Rai RK, Upadhyay A, Singh VP. Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology*, 2010, **382**: 115–127
- [10] Ree WO. Retardation coefficients for row crops in diversion terraces. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1958, **1**: 78–80
- [11] Chow VT. Open-Channel Hydraulics. New York: McGraw-Hill College, 1959
- [12] Kouwen N, Unny TE, Hill HM. Flow retardance in vegetated channels. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1969, **95**: 329–342
- [13] Findlay GH, Ellul GA. The application of computers to prepare design tables for grasses waterways and flumes. *Agricultural Engineering*, 1976, **5**: 20–24
- [14] Green JC. Modelling flow resistance in vegetated streams: Review and development of new theory. *Hydrological Processes*, 2005, **19**: 1245–1259
- [15] Plate EJ, Quraishi AA. Modeling of velocity distributions inside and above tall crops. *Journal of Applied Meteorology*, 1965, **4**: 400–408
- [16] Carollo FG, Ferro V, Termini D. Flow resistance law in channels with flexible submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, **131**: 554–564
- [17] Green JC, Richards KS. Investigation into the validity of resistance-discharge relationships for trailing aquatic plants// Wheater H, Kirby C, eds. *Hydrology in a Changing Environment*. Chichester: John Wiley and Sons, 1998: 413–420
- [18] Ni H-G (倪汉根), Gu F-F (顾峰峰). Roughness coefficient of non-submerged reed. *Chinese Journal of Hydrodynamics* (水动力学研究与进展A辑), 2005, **20**(2): 167–173 (in Chinese)
- [19] Wilson C, Stoesser T, Bates PD, et al. Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, **129**: 847–853
- [20] de Doncker L, Troch P, Verhoeven R, et al. Determination of the Manning roughness coefficient influenced by vegetation in the river Aa and Biebrza river. *Environmental Fluid Mechanics*, 2009, **9**: 549–567
- [21] O’Hare MT, McGahey C, Bissett N, et al. Variability in roughness measurements for vegetated rivers near base flow, in England and Scotland. *Journal of Hydrology*, 2010, **385**: 361–370
- [22] Hui EQ, Hu XE. A study of drag coefficient related with vegetation based on the flume experiment. *Journal of Hydrodynamics Series B*, 2010, **22**: 329–337
- [23] Petryk S, Bosmajian G. Analysis of flow through vegetation. *Journal of the Hydraulics Division*, 1975, **101**: 871–884
- [24] Stone BM, Shen HT. Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, **128**: 500–506
- [25] Wu WM, He ZG. Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity. *International Journal of Sediment Research*, 2009, **24**: 247–259
- [26] Li CW, Xie JF. Numerical modeling of free surface flow over submerged and highly flexible vegetation. *Advances in Water Resources*, 2011, **34**: 468–477
- [27] Shi B (拾 兵), Fu Q (付 强). Effects of vegetation on flow of open channel. *Journal of Southwest Nationalities College* (Natural Science) (西南民族学院学报·自然科学版), 1998, **24**(4): 354–357 (in Chinese)
- [28] Wu FS. Characteristics of flow resistance in open channels with non-submerged rigid vegetation. *Journal of Hydrodynamics Series B*, 2008, **20**: 239–245
- [29] Fathi-Maghadam M, Kouwen N. Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, **123**: 51–57
- [30] Tanaka N, Yagisawa J. Flow structures and sedimentation characteristics around clump-type vegetation. *Journal of Hydro-environment Research*, 2010, **4**: 15–25
- [31] Wu FC, Shen HW, Chou YJ. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation.

- Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, **125**: 934–942
- [32] Tsihrintzis VA. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, **127**: 241–245
- [33] She W-W (余伟伟), Li Y-H (李艳红), Yu G-L (喻国良). Experimental study on resistance to flow through submerged vegetation. *Water Resources and Hydropower Engineering* (水利水电技术), 2010, **41**(3): 24–28 (in Chinese)
- [34] Prandtl L. The Essentials of Fluid Dynamics. London: Blackwell, 1963
- [35] Carollo FG, Ferro V, Termini D. Flow velocity measurements in vegetated channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, **128**: 664–673
- [36] Yagci O, Tschesche U, Kabdasli MS. The role of different forms of natural riparian vegetation on turbulence and kinetic energy characteristics. *Advances in Water Resources*, 2010, **33**: 601–614
- [37] Chen SC, Kuo YM, Li YS. Flow characteristics within different configurations of submerged flexible vegetation. *Journal of Hydrology*, 2011, **398**: 124–134
- [38] Luo X (罗 宪), Fang C-Y (房春艳), Shan Y-Q (单钰淇), et al. Influence of vegetation characteristics on velocity distribution of compound channel. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)* (重庆交通大学学报·自然科学版), 2010, **29**(3): 466–469 (in Chinese)
- [39] Eastgate WI. Vegetated Stabilization of Grassed Waterways and Dam Bywashes. Master Thesis. Queensland: University of Queensland, 1966
- [40] Gourlay MR. Discussion of ‘flow resistance in vegetated channels’ by Kouwen N, Unny TE, and Hill HM. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1970, **96**: 351–357
- [41] Temple DM. Velocity distribution coefficients for grass-lined channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1986, **112**: 193–205
- [42] Järvelä J. Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance. *Journal of Hydrology*, 2005, **307**: 233–241
- [43] Stephan U, Gutknecht D. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation. *Journal of Hydrology*, 2002, **269**: 27–43
- [44] Afzalimehr H, Dey S. Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and Reynolds stress distributions. *International Journal of Sediment Research*, 2009, **24**: 236–246
- [45] Afzalimehr H, Moghbel R, Gallichand J, et al. Investigation of turbulence characteristics in channel with dense vegetation. *International Journal of Sediment Research*, 2011, **26**: 269–282
- [46] Dehsorkhi NE, Afzalimehr H, Sui JY. Effects of vegetation channel banks and gravel size on flow structure. *International Journal of Sediment Research*, 2010, **25**: 110–118
- [47] Shi Z (时 钟). A flume study on mean velocity profiles of flow in a coastal saltmarsh canopy. *Ocean Engineering* (海洋工程), 2001, **19**(3): 51–59 (in Chinese)
- [48] Shi Z (时 钟), Li Y-H (李艳红). Experimental studies of mean velocity profiles in vegetated river flow. *Journal of Shanghai Jiaotong University* (上海交通大学学报), 2003, **37**(8): 1254–1260 (in Chinese)
- [49] Moradi Larvae M, Mahdi TF. Depth-averaged turbulent heat and fluid flow in a vegetated porous medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, **55**: 848–863
- [50] Nepf HM, Sullivan JA, Zavistoski RA. A model for diffusion within emergent vegetation. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**: 1735–1745
- [51] Nepf HM. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research*, 1999, **35**: 479–489
- [52] Cardoso AH, Graf WH, Gust G. Uniform flow in a smooth open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 1989, **27**: 603–616
- [53] Nezu I, Onitsuka K. Turbulent structures in partly vegetated open-channel flows with LDA and PIV measurements. *Journal of Hydraulic Research*, 2001, **39**: 629–642
- [54] Ikeda S, Kanazawa M. Three-dimensional organized vortices above flexible water plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, **122**: 634–640
- [55] Wang C (王 村), Wang C (王 超). Turbulent characteristics in open-channel flow with emergent and submerged macrophytes. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2010, **21**(6): 816–822 (in Chinese)
- [56] Nepf HM, Vivoni ER. Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**: 28547–28557
- [57] Tanino Y, Nepf HM. Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, **134**: 34–41
- [58] Liu Y (刘 云). The Experimental Study on the Flow Characteristics of Open Channel with the Flexible Vegetation. Master Thesis. Nanjing: Hohai University, 2006 (in Chinese)
- [59] Huai WX, Han J, Geng C, et al. The mechanism of energy loss and transition in a flow with submerged vegetation. *Advances in Water Resources*, 2010, **33**: 635–639
- [60] Nmira F, Consalvi JL, Boulet P, et al. Numerical study of wind effects on the characteristics of flames from non-propagating vegetation fires. *Fire Safety Journal*, 2010, **45**: 129–141
- [61] Zhang ML, Li CW, Shen YM. A 3D non-linear k- ϵ turbulent model for prediction of flow and mass transport in channel with vegetation. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, **34**: 1021–1031
- [62] Fischer-Antze T, Stoesser T, Bates P, et al. 3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 2001, **39**: 303–310
- [63] Liu C (刘 诚), Shen Y-M (沈永明). 3D turbulence model for the flow and sediment transport with aquatic

- vegetation. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2008, **19**(6): 851–856 (in Chinese)
- [64] Nadaoka K, Yagi H. Shallow-water turbulence modeling and horizontal large-eddy computation of river flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, **124**: 493–500
- [65] Wang Y-Y (王莹莹). Experiment Research on Hydraulic Characteristics of the Channel with Double Vegetations. Master Thesis. Nanjing: Hohai University, 2007 (in Chinese)
- [66] Mattis SA, Dawson CN, Kees CE, et al. Numerical modeling of drag for flow through vegetated domains and porous structures. *Advances in Water Resources*, 2012, **39**: 44–59
- [67] Huang B-S (黄本胜), Yuan M (袁梦), Qiu X-Y (邱秀云). Numerical simulation for open channel flow with water hyacinth. *Guangdong Water Resources and Hydropower* (广东水利水电), 2008, **11**(8): 1–3 (in Chinese)
- [68] Luo J (罗晶), Yang J-R (杨具瑞), Tan Y-Y (谭毅源), et al. Three dimensional numerical simulation of flow structure effect of wetland rigid plant growth. *Water Resources and Power* (水电能源科学), 2010, **28**(1): 86–88 (in Chinese)
- [69] Wang PF, Wang C. Numerical model for flow through submerged vegetation regions in a shallow lake. *Journal of Hydrodynamics Series B*, 2011, **23**: 170–178
- [70] Naot D, Nezu I, Nakagawa H. Hydrodynamic behavior of partly vegetated open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, **122**: 625–633
- [71] Naot D, Nezu I, Nakagawa H. Unstable patterns in partly vegetated channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, **122**: 671–673
- [72] Kang H, Choi SU. 3D numerical simulation of compound open-channel flow with vegetated floodplains by reynolds stress model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2005, **9**: 7–11
- [73] Kang H, Choi SU. Turbulence modeling of compound open-channel flows with and without vegetation on the floodplain using the Reynolds stress model. *Advances in Water Resources*, 2006, **29**: 1650–1664
- [74] Dong Z-R (董哲仁). Theoretical framework for eco-hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering* (水力学报), 2003(1): 1–6 (in Chinese)
- [75] Zeng L, Chen GQ, Tang HS, et al. Environmental dispersion in wetland flow. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, **16**: 206–215
- [76] Kouwen N, Fathi-Moghadam M. Friction factors for coniferous trees along rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, **126**: 732–740
- [77] Randlkofer B, Obermaier E, Hilker M, et al. Vegetation complexity: The influence of plant species diversity and plant structures on plant chemical complexity and arthropods. *Basic and Applied Ecology*, 2010, **11**: 383–395
- [78] Järvelä J. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: A flume study with natural plants. *Journal of Hydrology*, 2002, **269**: 44–54
- [79] Vásquez-Méndez R, Ventura-Ramos E, Oleschko K, et al. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *Catena*, 2010, **80**: 162–169
- [80] Yang L-R (杨丽蓉), Chen L-D (陈利顶), Sun R-H (孙然好). River ecosystems and their self-purification capability: Research status and challenges. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(9): 5066–5075 (in Chinese)
- [81] Morin J, Leclerc M, Secretan Y, et al. Integrated two-dimensional macrophytes-hydrodynamic modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 2000, **38**: 163–172
- [82] Kelly M, Tuxen KA, Stralberg D. Mapping changes to vegetation pattern in a restoring wetland: Finding pattern metrics that are consistent across spatial scale and time. *Ecological Indicators*, 2011, **11**: 263–273
- [83] Ye F, Chen QW, Li RN. Modelling the riparian vegetation evolution due to flow regulation of Lijiang River by unstructured cellular automata. *Ecological Informatics*, 2010, **5**: 108–114
- [84] Yang K (杨昆). Impacts of hydroelectric cascade exploitation on river ecosystem and landscape: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(5): 1359–1367 (in Chinese)
- [85] Li Y-L (李玉梁), Li L (李玲). Advances and trends of development in research of environmental hydraulics. *Water Resources Protection* (水资源保护), 2002(1): 1–6 (in Chinese)

作者简介 徐卫刚,男,1983年生,博士研究生。主要从事生态水力学研究。E-mail: xuweigang@foxmail.com

责任编辑 杨弘
