

植物条件下明渠紊流 KH 涡相关问题研究进展

闫 静,刘杰夫,陈 红,王晓丽

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:植物是生态功能完备的河流的重要特征,淹没植物条件下产生的特殊紊流拟序结构——KH 涡,对水-沙-污染物运动具有直接影响。从 KH 涡的发现、形成条件、特征参数(形态特征参数和运动周期)三方面,回顾了国内外植物条件下明渠紊流 KH 涡相关问题的研究进展,总结了植物密度和淹没度对 KH 涡的影响规律,提出结合紊流不稳定性理论、紊流拟序结构分析方法、流动显示、图像技术来研究 KH 涡的形成条件(临界密度或临界淹没度)、沿程发展过程、影响因素(如植物密度、刚度、几何形态、淹没度、水流强度)的具体影响,是下一步需要探索的关键。

关键词:植物;明渠紊流;KH 涡;研究进展

中图分类号:TV143 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)02-0090-05

Advances in related issues on KH vortex in vegetated open channel flows//YAN Jing, LIU Jiefu, CHEN Hong, WANG Xiaoli (*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Vegetation is an important feature of a fully functioning river ecosystem. The KH vortex, a special coherent structure generated in submerged vegetated flows, has direct influence on the flow-sediment-contaminant transport. Advances in related issues on KH vortex in vegetated turbulent flows were reviewed from the aspects of the discovery, the formation conditions, the parameter characteristics of the geometrical form and the period of KH vortices. The main effects of vegetation density and submergence on KH vortices were summarized. It is suggested that the key issues to be further explored should be focused on the critical conditions for the KH vortex formation such as the critical density or the submergence, the development progress along the streamwise direction and the specific influence of the factors (such as density, rigidity and geometry of vegetation, submergence and flow intensity) by coupling the turbulence instability theory, spectrum analysis, flow visualization and image technique.

Key words: vegetation; open channel turbulence; KH vortex; research progress

植物作为河流生态系统的重要组成部分,为其他水生生物提供了栖息地和食物来源,维护着河流、湿地生物多样性;直接参与着河流的物质交换,净化了河水水质;影响着水沙运动和河流演变,在防止河岸侵蚀及维护河床稳定方面起着重要作用,是维持河流生态系统健康和动态平衡不可替代的重要因素^[1-4]。

植物的存在改变了河道的水流阻力^[5-6],使得平均流速、紊动强度、雷诺应力及紊动能等水力参数的分布发生了明显的变化^[7-9],同时它引起了不同涡结构的形成、发展,使得紊流拟序结构运动变得更为复杂。例如,植物杆茎周围的尾涡直接影响着物质的横向扩散输移路径^[10];植物顶部的猝发现象对植物顶部附近一定范围内的物质交换和输移有着直接的

影响^[1,11-14];植物后部自底部向上的二次流能够将床面的物质带到距离床面较高的区域^[15]。此外,研究者较早地发现植物顶部和自由水面以下一定区域存在一种特殊的大尺度涡旋^[16-19],开尔文-亥姆霍兹涡(Kelvin-Helmholtz vortex, KH 涡),它由于流动的不稳定性而产生,能够加剧流动的垂向交换,对重塑水流条件、改变物质输运规律(如泥沙运动和污染物扩散)具有显著影响^[20-23]。国内外学者对这种直接影响水流结构、泥沙和污染物输移的 KH 涡的形成条件、形态及周期特点进行了一定的研究。

1 植物条件下明渠中 KH 涡的发现

KH 涡由 KH 不稳定性诱发。KH 不稳定性是一种在有剪切速度的连续流体内部或有速度差的两

种不同流体的交界面之间发生的不稳定性现象。这种不稳定性及涡结构经常发生在流体具有强剪切的边界上,如云层(波浪云)、海洋以及磁流体力学领域中。当理查逊数 $R_i < 0.25$ 时,具有强剪切的界面发生运动失稳^[24]。植物水流混合层失稳属于自由剪切流的无黏不稳定性,失稳的必要条件是流速存在拐点^[25]。

Inoue 较早地关注到麦田和草地里的植物被风吹而呈现波浪摆动现象,发现该现象是有序的、周期性的运动,把它定义为“Honami”现象^[26](该现象在植物水流中被定义为“Monami”现象)。

Finnigan 等^[27-29]分别进行麦田实地测量和风洞试验,使用热线热膜测速仪测量空气流场,指出当空气流过庄稼表面时,庄稼受力发生弯曲,并以其天然固有频率振荡,植物摆动的频率和植物的弹性特性(刚度)有关。Finnigan^[30]对单点测量结果进行紊流统计,根据平均流速存在拐点,紊流统计二阶矩(紊动强度、雷诺应力、紊动能等)沿水深具有较强的不均匀性,提出了植物层上部的混合层流动假设,认为沿下游发展的 KH 涡伴随着混合层沿程发展。随着非接触式测量仪器的兴起,如超声波多普勒测速仪(ADV)、激光多普勒测速仪(LDV)和粒子图像测速仪(PIV),植物水流的紊流结构研究才陆续开展起来。

Ikeda 等^[16]较早地运用了 LDV(采样频率 20 Hz)研究植物条件下明渠紊流结构,采用尼龙丝模拟柔性植物,发现流速分布在植物层顶部存在拐点,植物顶部附近区域紊流频谱曲线斜率为 $-7/5$,不同于普通明渠流动的 $-5/3$;同时他们还进行了流动显示实验,发现植物顶部附近区域存在大尺度椭圆形有序涡旋,观察到柔性植物的周期性摆动现象,指出这种摆动即是被有序大尺度涡所驱动。

Wallace 等^[17]使用 ADV(采样频率 25 Hz)频谱数据,发现植物顶部附近区域紊流频谱曲线与近床面和近自由水面区域明显不同,认为这一特殊区域存在一种特殊的涡,涡的高度范围大致与植物高度尺度同一个数量级。这一研究为使用频谱信息对涡结构进行判断提供了良好的思路和借鉴。

Ghisalberti 等^[19]由植物条件下水流流速垂向分

布存在拐点出发,认为具备了产生 KH 涡的条件,将植物水流剪切层发展的本质过程描述为:由于阻力在垂向的不连续,使得速度分布在垂向产生了弯曲,从而引起了 KH 不稳定性,在这种不稳定性的作用下,形成了不断向下游发展的涡街——KH 涡,见图 1(图中 x 方向为顺水流方向, u 为纵向时均流速, H 为水深, δ_v 是 KH 涡的垂向尺度, y_v 是 KH 涡中心沿程运动发展的垂向高度)。流速振荡的表现现象即为植物的周期性摆动——“Monami”现象^[17, 19, 31],植物的摆动即是水流周期运动的流动显示。

2 植物条件下明渠中 KH 涡的形成条件

有研究指出^[12, 18, 20],只有在植物密度大到一定程度时,KH 涡才有可能产生。将 Nezu 等^[12]、Poggi 等^[18]和 Nepf 等^[20]的研究成果进行了对比分析,总结植物密度变化下紊流结构变化的过程:植物很稀疏条件下,植物对水流结构扰动较小,流动类型仍为壁面边界层流动;随着植物密度增大,植物影响增大,伴随着 KH 涡的逐渐发展,流动类型完成了从边界层到混合层的过渡;而植物密度再增大到一定程度时,极密的植物层形成了新的壁面边界,新的边界层流动形成,KH 涡消失。

定义植物密度为单位床面面积上的植物迎流面积,即 $\lambda = (d_v h_v)/(S_x S_z)$,其中 d_v 为植物杆径, h_v 为植物高度, S_x 为植物沿流向的间距, S_z 为植物沿横断面方向的间距。将开始产生 KH 涡的临界植物密度定义为 λ_{KH} ,尚未见关于 λ_{KH} 的研究。通过相关文献分析,对存在或不存在 KH 涡的实验工况进行总结,列举如下:

Belcher 等^[32]和 Coceal 等^[33]指出,在陆生植物空气流动中, $\lambda = 0.1$ 条件下存在 KH 涡结构,则可推断陆生植物空气流动中 $\lambda_{KH} \leq 0.1$ 。Nepf 等^[20-21]认为, $\lambda = 0.04$ 时存在床面剪切涡作用, $\lambda = 0.1$ 时床面剪切涡作用消失并出现 KH 涡作用,且 $\lambda > 0.23$ 时,KH 涡不能渗透到床面处,则在植物水流中,也有 $\lambda_{KH} \leq 0.1$ 。Nezu 等^[12]发现, $\lambda = 0.039$ 时植物层内部的猝发现象以清扫为主,也存在自由剪切混合层流动,则 $\lambda_{KH} \leq 0.039$ 。

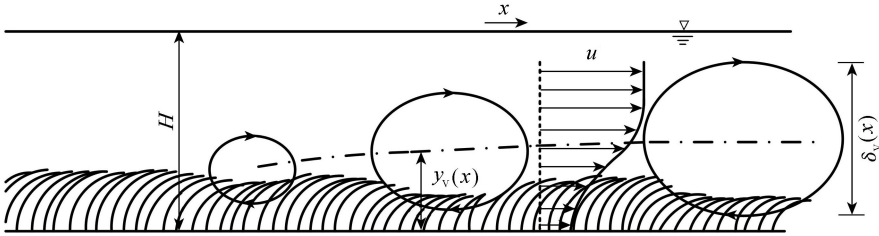


图 1 流经柔性植物的 KH 涡的沿程发展^[19]

同时,自由水面限制 KH 涡的形成^[34-35]。Nezu 等^[12]指出限制 KH 涡形成的临界淹没度(淹没度为水深与植物高度的比值,即 $S_{ub}=H/h_v$) 在 1.5~2.0 之间。Nepf 等^[36]在建立 KH 涡渗透厚度公式时,指出公式的使用条件是 $S_{ub}>2$,因此此条件下 KH 涡才有可能生成。Cheng 等^[35]也同样指出, $S_{ub}<2$ 时,水深限制了 KH 不稳定性的垂向发展,无法形成 KH 涡。

从上述研究可以看出,对于 KH 涡的形成条件,尚未有明确的结论,需要进行系列实验或者理论分析(基于流速分布存在拐点)对临界条件进行专门系统的研究。

3 植物条件下明渠中 KH 涡的特征参数

一般情况下,植物顶部水流剧烈剪切产生的 KH 涡以及植物后方的绕流尾涡作用范围较广,是含淹没植物明渠水流中两种常见的涡结构。依据 KH 涡和尾涡的作用范围,流动沿垂向可大致分为 3 个区域^[12, 20, 37](图 2):①类非淹没区($0<y\leq h_p$, 其中 h_p 为 KH 涡在植物层的渗透高度,即 KH 涡下边界),即下部植物层或低冠层区^[20]。该范围内的流动主要受尾涡影响,相应的物质交换以纵向对流传递为主。②外区($h_o\leq y\leq H$, 其中 h_o 为 KH 涡的上边界),即上部自由流动层,也称为自由水面区^[21]或对数层区^[12]。该范围内的流动既不受尾涡作用,也不受 KH 涡直接影响,同时存在纵向对流和垂向紊动交换。③混合层区($h_p<y<h_o$),即 KH 涡垂向作用的范围,包括上部植物层($h_p<y\leq h_v$, 也被称为渗透层,渗透厚度 $\delta=h_v-h_p$)和下部自由流动(或剪切)层($h_v<y<h_o$)。其中,上部植物层(植物内层上部区域)的流动受 KH 涡和尾涡共同作用,下部自由流动层(植物层顶部以上一定范围)的流动只受 KH 涡作用,两者存在纵向对流和垂向紊动物质交换。

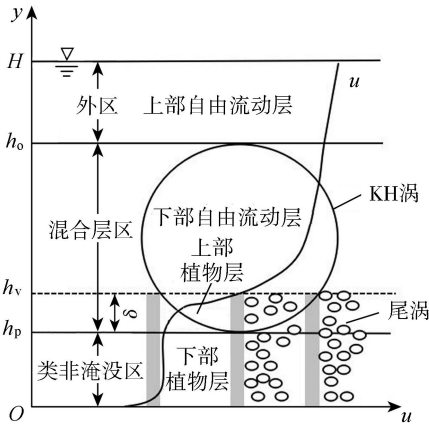


图 2 含淹没植物的明渠紊流涡结构及流动分区示意图

3.1 KH 涡的上边界 h_o

Nezu 等^[12]认为 KH 涡上边界到自由水面的区域($h_o<y<H$)内流动与边界层外区类似,流速应该满足对数分布,定义 h_o 为 h_{log} ,即为自由水面向下流速分布偏离对数律的临界位置。Wallace 等^[17]的 ADV 频谱数据表明,能谱分布曲线在 $y/h_v=0.82\sim 2.0$ 范围内数据比较集中,认为这一范围内存在特殊的涡结构,根据该范围的上下边界指出 $h_o=2.0h_v$, $h_p=0.82h_v$ 。Okamoto 等^[38]的多组 PIV 流场实验结果表明,柔性植物水流 KH 涡的平均垂向范围为 $0.7h_v\sim 1.3h_v$,该范围低于 Wallace 等^[17]的结果,这可能与两者的淹没度不同有关,较小的淹没度($S_{ub}=3.0$)下自由水面对 KH 涡的压制作用大于 Wallace 等^[17]研究中 $S_{ub}=4.0$ 的情况。

3.2 KH 涡的下边界 h_p

Nepf 等^[20, 36]建立了半经验半理论的渗透厚度 δ (由 $\delta=h_v-h_p$ 可换算渗透高度)的公式,认为渗透厚度 δ 与植物整体阻力系数和植物密度的乘积成反比,由此可以看出植物密度越大, KH 涡渗透厚度越小,下边界位置越高,植物有将 KH 涡“抬高”的趋势。

陈扬^[39]和闫静等^[40]对比了由 ADV 流场测量结果分析得到的流速特征高度、雷诺应力特征高度、局部阻力系数特征高度^[41]和由 Nepf 等^[20, 36]建立的渗透高度公式计算值,认为局部阻力系数特征高度和渗透高度公式计算值最为接近。同时,渗透高度随植物密度或淹没度的增大而增大,与理论床面高度 d 之间存在线性关系(理论床面的物理意义为植物阻力作用的平均高度,可以取植物耗散水流动量的平均高度)。Nikora 等^[42]认为理论床面高度即为 KH 涡的渗透高度,即 $h_p=d$ 。

上述边界的确定方法和结论,大多基于一定的假设,或具有较强的经验性,不同方法得到的结果存在一定差别。有必要在系统实验和理论分析基础上,确定可靠的 KH 涡上下边界和作用范围。

3.3 KH 涡的运动频率

淹没植物条件下产生的 KH 涡是周期性的、有序的紊流拟序结构。研究者认为陆生植物上部发生的“Honami”现象和植物水流中的“Monami”现象是 KH 涡的流动显示,这两种现象的频率和 KH 涡的频率一致^[17, 19, 27]。

Finnigan 等^[27]的风洞实验结果表明大气流过陆生植物时,植物摆动的频率和植物的弹性特性(刚度)有关。Luhar 等^[43]在野外实地测量了海草的波动、河道水面波动和植物上方区域流速振荡,发现三者的波动过程近似一致。Okamoto 等^[38]分别

采用 PIV 和粒子追踪测速技术(PTV),同步测量柔性植物的流场流动特性和植物波动特性,使用相关分析和拟序函数进行分析,发现 PIV 测量的流速振荡频率和 PTV 测量的柔性植物波动频率高度一致,相位差很小,认为流速的振荡和植物的波动是同步的。他们的研究证实了使用“Monami”现象作为流动显示来研究 KH 涡运动特性的合理性。目前,尚未对不会发生摆动的刚性植物上方的 KH 涡运动周期进行研究和分析。

4 研究展望

综上所述,国内外学者对植物条件下明渠紊流 KH 涡的研究仍处在探索阶段,以下问题有待进一步研究:

a. KH 涡形成过程的理论分析。KH 涡是由紊流失稳引起,因此应该从紊流不稳定性理论出发,研究紊流失稳的机制和 KH 涡形成的临界条件的理论基础。

b. KH 涡结构直接的、定量的刻画。对于复杂的涡结构,可以运用现代流动测试技术(如流动显示和 PIV“场测量”技术),进行有效的“捕捉”和刻画,较为直观地获得 KH 涡的几何参数和运动参数(边界、作用范围、运动周期等)。将实验定量刻画结果和紊流不稳定性理论分析结果进行比较,是目前需要展开的研究。

c. KH 涡的影响因素及具体影响。已有研究表明,植物条件(密度、刚度、几何形态)和水流条件(淹没度、水流强度)对流场具有直接的影响,这些因素对 KH 涡的形成和发展的具体影响,能够更好地解释已有成果存在差异的原因,是值得深入研究的问题。相关研究成果有望丰富大尺度糙元下明渠紊流理论,为植物水生态修复中紊流控制和工程设计提供依据。

参考文献:

[1] 闫静. 含植物明渠水流阻力及紊流特性的实验研究 [D]. 南京:河海大学,2008.

[2] JORDANOVA A A, JAMES C S. Experimental study of bed load transport through emergent vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129 (6): 474-478.

[3] 唐洪武, 闫静, 吕升奇. 河流管理中含植物水流问题研究进展 [J]. 水科学进展, 2007, 18 (5): 85-792. (TANG Hongwu, YAN Jing, LYU Shengqi. Advances in research on flows with vegetation in river management [J]. Advances in Water Science, 2007, 18 (5): 785-792. (in Chinese))

[4] 刘宏哲, 娄厦, 刘曙光, 等. 含植物水流动力特性研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (4): 85-94. (LIU Hongzhe, LOU Sha, LIU Shuguang, et al. Advances in hydrodynamic characteristics of flows with vegetation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (4): 85-94. (in Chinese))

[5] KOUWEN N, UNNY T E, HILL H M. Flow retardance in vegetated channels [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1969, 95 (IR2): 329-342.

[6] LI S, SHI H, XIONG Z, et al. New formulation for the effective relative roughness height of open channel flows with submerged vegetation [J]. Advances in Water Resources, 2015, 86: 46-57.

[7] 闫静, 唐洪武, 田志军, 等. 植物对明渠流速分布影响的实验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2011, 32 (4): 138-142. (YAN Jing, TANG Hongwu, TIAN Zhijun, et al. Experimental study on the influence of vegetation on the velocity distribution of open channel flows [J]. Hydro-science and Engineering, 2011, 32 (4): 138-142. (in Chinese))

[8] LOPEZ F, GARCIA M H. Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 (5): 392-402.

[9] HUAI W X, HU Y, ZENG Y H, et al. Velocity distribution for open channel flows with suspended vegetation [J]. Advances in Water Resources, 2012, 49 (8): 56-61.

[10] WHITE B, NEPF H M. Scalar transport in random cylinder arrays at moderate Reynolds number [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 487: 43-79.

[11] NEZU I, OKAMOTO T A. The effect of coherent waving motion on turbulence structure in flexible vegetated open channel flows [J]. River Flow, 2010 (1): 429-436.

[12] NEZU I, SANJOU M. Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2008, 2 (2): 62-90.

[13] 闫静, 戴坤, 唐洪武, 等. 植物条件下明渠紊流拟序结构的可视化研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2016, 48 (2): 21-27. (YAN Jing, DAI Kun, TANG Hongwu, et al. Flow visualization experimental study on coherent structure in vegetated channel flow [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48 (2): 21-27. (in Chinese))

[14] 戴坤. 刚性植物条件下明渠紊流拟序结构的实验研究 [D]. 南京:河海大学, 2014.

[15] NEPF H M, KOCK E W. Vertical secondary flows in submersed plant-like arrays [J]. Limnology and Oceanography, 1999, 44 (4): 1072-1080.

[16] IKEDA S, KANAZAWA M. Three-dimensional organized

- vortices above flexible water plants [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 122(11): 634-640.
- [17] WALLACE S, LUKETINA D, COX R. Large scale turbulence in seagrass canopies [C]//13th Australasian Fluid Mechanics Conference. Melbourne: Monash University Press, 1998: 973-976.
- [18] POGGI D, PORPOTATO A, RIDOLFI L. The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 111: 565-587.
- [19] GHISALBERTI M, NEPF H M. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C2): 3-1-3-11.
- [20] NEPF H M, GHISALBERTI M. Flow and transport in channels with submerged vegetation [J]. *Acta Geophysica*, 2008, 56(3): 753-777.
- [21] NEPF H M. Flow and transport in regions with aquatic vegetation [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, 44: 123-142.
- [22] OKAMOTO T A, NEZU I, IKEDA H. Vertical mass and momentum transport in open-channel flows with submerged vegetations [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2012, 6(4): 287-297.
- [23] WU D, HUA Z L. The effect of vegetation on sediment resuspension and phosphorus release under hydrodynamic disturbance in shallow lakes [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 69: 55-62.
- [24] 周恒, 赵耕夫. 流动稳定性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [25] 江春波, 张永良, 丁则平. 计算流体力学 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [26] RAUPACH M R. Turbulence in and above plant canopies [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1981, 13: 97-129.
- [27] FINNIGAN J J, MULHEARN P J. Modelling waving crops in a wind tunnel [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, 14: 253-77.
- [28] FINNIGAN J J. Turbulence in waving wheat part 1: mean statistics and honami [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1979, 16: 181-211.
- [29] FINNIGAN J J. Turbulence in waving wheat part 2: structure of momentum transfer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1979, 16: 213-236.
- [30] FINNIGAN J J. Turbulence in plant canopies [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2000, 32: 519-571.
- [31] OKAMOTO T A, NEZU I. Turbulence structure and “Monami” phenomena in flexible vegetated open-channel flows [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(6): 798-810.
- [32] BELCHER S, JERRAM N, HUNT J. Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 488: 369-398.
- [33] COCEAL O, BELCHER S E. A canopy model of mean winds through urban areas [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004, 130: 1349-1372.
- [34] GHISALBERTI M, NEPF H M. The limited growth of vegetated shear layers [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40: W07502.
- [35] CHENG N S, NGUYEN H T, TAN S K, et al. Scaling of velocity profiles for depth-limited open channel flows over simulated rigid vegetation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(8): 673-683.
- [36] NEPF H M, GHISALBERTI M, WHITE B, et al. Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(4): W04422.
- [37] 闫静, 陈扬, 唐洪武, 等. 含植物明渠流动分区和特征尺度研究进展 [J]. *中国水利科学研究院院报*, 2015, 13(6): 428-434. (YAN Jing, CHEN Yang, TANG Hongwu, et al. Advances in research on sub-division and characteristic scales of open channel flows with vegetation [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2015, 13(6): 428-434. (in Chinese))
- [38] OKAMOTO T A, NEZU I, SANJOU M. Flow-vegetation interactions: length-scale of the “monami” phenomenon [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2016, 54(3): 251-262.
- [39] 陈扬. 含植物明渠紊流特征高度和能量平衡实验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2016.
- [40] 闫静, 陈扬, 戴坤, 等. 含刚性淹没植物明渠紊流近床面区特征高度实验研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(5): 28-33. (YAN Jing, CHEN Yang, DAI Kun, et al. Experimental study on turbulence characteristic height near bed area in open channel flow with submerged rigid vegetation [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(5): 28-33. (in Chinese))
- [41] TANG Hongwu, TIAN Zhijun, YAN Jing, et al. Determining drag coefficients and their application in modelling of turbulent flow with submerged vegetation [J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 69: 134-145.
- [42] NIKORA V, KOLL K, MCLEAN S, et al. Zero plane displacement for rough-bed open-channel flows [C]// *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*. Rotterdam: Balkema Publisher, 2002: 83-91.
- [43] LUHAR M, INFANTES E, ORFILA A, et al. Field observations of wave-induced streaming through a submerged seagrass meadow [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118: 1955-1968.

(收稿日期: 2019-11-29 编辑: 雷燕)