DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.08.023 2013,30(08):108-112,116

水生植物、水流及底泥再悬浮耦合影响规律研究进展

郭 辉,黄国兵
(长江科学院 水力学研究所,武汉 430010)

摘要:完整的水体概念包括上覆水、底泥以及水生植物等各种环境条件,水生植物、水流和底泥再悬浮之间的相互影响规律是水体生态环境的重要耦合演变过程。从水生植物对水流的影响、水流对水生植物的影响、水生植物对底泥再悬浮的影响3个方面,分析了水生植物、水流及底泥再悬浮耦合影响规律方面的研究进展及需要进一步研究的内容,包括:①基于人工模拟水生植物影响下的水流特性研究成果较丰富,而天然水生植物生物形态特性与水流、底泥再悬浮之间的定量影响研究尚需深入开展;②常规或极端水文事件影响下的水生植物生长繁殖过程与水流、底泥再悬浮之间的定量影响研究成果较少;③多种天然水生植物群落生物特性与水流、底泥再悬浮之间的定量影响研究尚有待推进。

关 键 词:水生植物;水流;底泥再悬浮;相互影响
中图分类号:P343.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-5485(2013)08-0108-05

1 研究背景

完整的水体概念包括上覆水、底泥以及水生植物等各种环境条件。底泥是水生植物生长的基质,也是底栖动物繁衍的场所。自工业革命以来,底泥的形成越来越受到人类的影响,水体底泥污染是世界范围内一个重要环境问题,日益受到科学界的关注,即使外界污染源消除后,污染底泥仍可能在很长时间中对上覆水的水质产生影响。用水生植物修复污染底泥是目前比较理想的措施。水生植物作为水体生态系统中主要的初级生产者,其通过自身的生长代谢可以大量吸收底泥中的氮、磷等营养物质,其中一些种类的水生植物还可以富集不同类型的重金属或吸收降解某些有机污染物。另一方面,水生植物通过增加空间生态位、抑制生物性和非生物性悬浮物、消减底泥对水体的二次污染、改善水下光照和溶解氧条件,为形成复杂的食物链提供了食物、场所和其他必要条件,也间接支持了肉食和碎食食物链,是水体生物多样性赖以维持的基础[1-2]。

然而,水生态修复工程中,水生植物却经常难以大面积成活或形成稳定的种群或群落。影响水生植物生长的主要环境因素包括[3]:物理环境,如水位、流速、风浪、光照和透明度、悬浮物浓度等;化学环境,如营养盐浓度等;以及生物环境,如鱼的牧食,浮游植物浓度等。在绝大部分水生环境里,沉水植物的生长受光限制[4],水体浊度是限制光强的显著因素。一方面底泥再悬浮不仅导致水体光衰减,而且会因水体营养盐的提升造成浮游植物的爆发[5],最终使得沉水植物衰退,水体生态进一步恶化;另一方面沉水植物生长河床中会比无植物区沉积更多的有机质。有机质的持续沉积亦会导致水生植物的死亡,因此,适量的底泥再悬浮会移除部分沉积有机质,有利于水生植物的生长。沉积/冲蚀循环可能是水生植物河床健康所必需的[5]。

已有研究发现,水生植物区流速较无植物区有明显减小,造成湍流动能的减弱,同时提高了泥沙的沉降能力。密度[6]、高度[7]、形态[8-9]、柔性[10]等植物特性亦会影响泥沙沉降速度和悬浮物浓度的变化。水生植物、水流和底泥之间的相互作用规律是水体生态环境的重要耦合演变过程,水生植物与水流、底泥之间复杂规律的相关研究涉及水力学及河流动力学、环境科学及植物生态学等多学科交叉领域。水动力学领域研究者多侧重于植物影响下的水流特性分析,研究手段包括水槽试验、数学模型等,研究对象多采用刚性和柔性模拟植物,与实际植物特性差别较大,同时考虑底泥再悬浮规律的相关研究处于初步阶段。环境科学领域的研究者侧重于底

收稿日期:2013-05-03; **修回日期:**2013-06-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11202037);"十二五"国家科技支撑计划课题(2012BAK10B04);中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2012026SL);水利行业专项(201101005)
作者简介:郭 辉(1982-),男,安徽霍邱人,工程师,主要从事环境与生态水力学研究,(电话)027-82829761(电子信箱) huigcky@gmail.com。

泥再悬浮造成的化学污染物释放过程,分析水生植物吸收污染物及改善水质的能力,研究手段多采用野外采样分析及室内环境化学分析,缺少完整水动力特性影响的考量。植物生态学领域研究者大都侧重植物自身的生物生态特性研究,缺少植物生物形态特性对水体紊流特性乃至底泥再悬浮特性的影响规律方面的基础研究。

本文总结了以下 3 个方面研究成果:①水生植物对水流的影响;②水流对水生植物的影响;③水生植物对底泥再悬浮的影响。分析了水生植物、水流及底泥再悬浮耦合影响规律方面的研究进展及需要进一步研究的内容。

2　水生植物对水流的影响

自上世纪 80—90 年代开始,已有学者利用室内水槽试验和现场观测等手段研究了挺水植物[11-12]和沉水植物[13-14]影响下的水流特性,主要研究成果显示水生植物可以降低流速、改变水流方向或者造成阻流效应、具有消波作用。

MIT 的 Nepf 研究小组以刚性圆柱或柔性条状物模拟水生植物,进行了一系列的研究,包括不同来流及排列方式下水流的纵向耗散特性[15]、垂向二次流特性[16]、水生植物影响下的水流结构[7]、相干结构[17]、水生植物群落内水体停留时间及耗散特性[18]、水生植物随机密集排列方式下水流的横向耗散特性[19]等众多方面,其研究成果是植物影响下水流特性相关研究的前沿。

植物影响下,水流垂向流速分布不再完全服从对数分布规律。部分研究者将水生植物影响下水流垂向流速分布划分为 2 层[20],即满足流速对数分布的非植物层以及植物层;另有研究将水生植物影响下水流垂向流速分布划分为 3 层[21-22],基于植物冠层附近区域的水流复杂性,将该区域单独划分,但具体划分原则目前尚不统一。不同类型的天然水生植物影响下水流垂向流速分布特性差异明显,采用单一的垂向流速划分方法很难进行描述。

从根本上说,植物对水域中泥沙、污染物的影响,直接取决于水体紊流结构[23],底泥再悬浮的原动力是水流紊动特性。紊动强度是反映紊流结构的一个重要参数。与无植物情况相比,含植物水流紊动强度分布明显不同。Ikeda[24]等发现紊动强度的最大值出现在植物顶部,Nepf[7]等指出紊动强度的最大值位于植物顶部与非植物区域的交界带。朱红钧[25]等研究了不同布置方式的漂移植物凤眼莲的紊动特性,研究结果表明凤眼莲对相对紊动强度分布影响明显,且不同种植方式的影响程度也不相同,实际河道治理工程中需要考虑其带来的影响。

目前,定量试验研究的对象多为刚性[19,21,26]或半刚性[17,27-30]的人工模拟植物,基于数学模型的含植被水流特性研究亦取得一定进展[31-32]。近年有少数研究者直接分析天然植物[33-35]对水流的影响规律。相对于简单的人工模拟植物,不同类型的天然植物呈现出多种多样的形态和柔性[36],天然植物影响下水流结构将更加复杂,相关系统研究很少。

3　水流对水生植物的影响

相对于水生植物影响下的水动力特性,水流对水生植物影响的研究成果较少。水流对水生植物的作用包括直接作用(拉伸、应力破坏等)和间接作用(改变气体交换、河床质分布、底泥再悬浮程度等)。水生植物受水流作用后亦会反过来影响水动力特性及底泥再悬浮特性,形成复杂的耦合响应过程。

水生植物倒伏方向和角度、弯曲摆动特性是决定施加在植物茎叶上水流应力程度的主要影响因素。基于人工模拟植物的试验研究发现,当植物与河床间角度在 40°~70°时,植物所受水流应力将会最少减小一半[5];水流可以提升 CO_2 和营养盐供给,有利于水生植物的生长,另一方面,水生植物的代谢和吸收过程也会受到水流的影响。Madsen 等[37]研究发现当流速自0.01 m/s 增大到0.086 m/s 时,8 种淡水植物的净光合作用均在减弱,水流物理应力(摆动或拉伸)可能对光合作用具有一定不利影响;水流还可以通过影响河床质的粒径分布而间接影响水生植物的生长。较粗底质的河床水流强度较大,一般缺少有机质和营养盐,很可能会限制水生植物的生长[4]。另外底质粒径较粗,水生植物也很难扎根。一般认为在生长季节,水流流速超过 0.9 m/s会导致水生植物生物量和种群丰富度的显著萎缩[38]。目前,风浪、洪水等常规或极端水文事件的程度和发生时期对水生植物的生长繁殖的影响仍有待深入探索。例如,发生在水生植物生长繁殖季节之前的洪水很可能推迟水生植物的萌发,发生在水生植物生长繁殖季节之后的洪水则很可能大幅减少水生植物的生物量[5]。

4　水生植物对底泥再悬浮的影响

底泥再悬浮的前提条件是有局地侵蚀现象的存在,当水流施加的拖曳应力克服了底泥重力和摩擦

阻力时,侵蚀就会发生,已有研究者对无水生植物条件下的底泥临界启动特性进行了研究[39-41]。

与无植物区相比,水生植物区水体底泥悬浮沉降特性取决于沉水植物减速和消波能力,呈现不同的动力特性。Horppila[42]通过现场监测发现:在83 d的监测周期内,沉水植物区内底泥再悬浮通量总和为793 g/ m^{-2}(干重),而沉水植物区外同时刻底泥再悬浮量可达1 701 g/m^{-2}(干重),植物区水体浊度和悬浮固体浓度明显低于周围水体。Houwing等[43]通过现场监测指出水体局部浊度水平由局部波动程度决定,局部瞬时波高与悬浮浓度具有一定相关性;Li等[44]的现场试验发现,不同类型的沉水植物抑制底泥再悬浮能力各不相同,可能存在一个生物量阈值,当生物量高于这一阈值时,沉水植物抑制底泥再悬浮的能力将没有明显提升。由此可见,水生植物对局部底泥的冲蚀和沉积作用是非线性的,在不同的条件下,水生植物可以增强,亦可以减弱冲蚀作用[11]。研究发现当植物茎间距和茎形态在某一范围内时,植物阻力占主导作用,底泥冲蚀作用较无植被区相对减弱[45];当超出这一范围时,茎尾流形成的湍流占主导作用,提升了近底动量交换[46],底泥冲蚀作用增强[11]。

近年,部分学者基于定量试验手段对水生植物影响下的泥沙传输沉降特性[47-49]、水生植物对悬浮固体的去除能力[50-51]、水生植物对底泥再悬浮的影响特性[43,52]进行了初步探索研究。研究发现,一般情况下水生植物区可以加速泥沙的沉积,沉水植物和挺水植物均能抑制底泥再悬浮,并能抑制底泥中NH_4-N等营养盐的释放,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及NH_4-N等营养盐的释放[52-53];然而也有研究指出,相较于水生植物对水体紊流特性的改变,其消波效应更具有抑制底泥再悬浮的作用[43]。作为水体生态管理的需要,针对不同形态特性天然水生植物对底泥再悬浮的系统定量的研究仍然十分缺乏。

5 结 语

目前,沉水植物影响下水流特性的研究成果较丰富,水流对底泥再悬浮的影响规律的研究也取得一定进展,然而水生植物、水流和底泥三相间的耦合作用规律研究涉及到水力学、生态学、环境科学等学科,问题非常复杂,相关研究尚处于探索阶段,是未来生态与环境水力学领域的一个研究热点和难点。基于国内外研究进展的分析,今后需进一步开展研究的内容包括:①综合运用现场观测、水槽试验、环境化学实验分析和数学模型等多种研究手段对不同类型天然水生植物影响下的水动力特性进行定量研究,提升研究成果的实际应用价值;②基于植物生态学理论及实验,加强天然水生植物茎叶形态特性及受力运动特性与水流特性、底泥再悬浮特性之间耦合影响规律的定量研究;③探索常规或极端水文事件影响下水生植物的生长繁殖规律与水流特性、底泥再悬浮特性之间的长期耦合影响规律;④逐步开展多种类型水生植物组成的植物群落生物特性与水流特性、底泥再悬浮特性之间的耦合规律的定量研究,将具有更大的实际应用意义。

参考文献:

[1] VAN DONK E, VAN DE BUND W J. Impact of Submerged Macrophytes Including Charophytes on Phyto- and Zooplankton Communities: Allelopathy Versus Other Mechanisms[J]. Aquatic Botany, 2002, 72(3/4):261-274.

[2] THOMAS G. Nutrient Removal Processes in Freshwater Submersed Macrophyte Systems[J]. Ecological Engineering, 1993, 2(1): 1-30.

[3] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866. (QIN Bo-qiang, YANG Liu-yan, CHEN Fei-zhou, *et al.* Mechanisms and Control Technique of Lake Eutrophication and Application [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 1857-1866. (in Chinese))

[4] BARKO J W, ADAMS M S, CLESCERI N S. Environmental Factors and Their Consideration in the Management of Submersed Aquatic Vegetation: A Review[J]. Journal of Aquatic Plant Management, 1986, 24: 1-10.

[5] MADSEN J D, CHAMBERS P A, JAMES W F, *et al.* The Interaction between Water Movement, Sediment Dynamics and Submersed Macrophytes[J]. Hydrobiologia, 2001, 444(1/3): 71-84.

[6] BOUMA T, VANDUREN L, TEMMERMAN S, *et al.* Spatial Flow and Sedimentation Patterns within Patches of Epibenthic Structures: Combining Field, Flume and Modelling Experiments [J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(8): 1020-1045.

[7] NEPF H M, VIVONI E R. Flow Structure in Depth-Limited, Vegetated Flow[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C12): 28547-28557.

[8] LEONARD L A, REED D J. Hydrodynamics and Sediment Transport through Tidal Marsh Canopies[J]. Journal of Coastal Research, 2002, 36: 459-469.

[9] MORRIS E P, PERALTA G, BRUN F G, *et al.* Interaction between Hydrodynamics and Seagrass Canopy Structure: Spatially Explicit Effects on Ammonium Uptake Rates[J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(4): 1531-1539.

[10] PERALTA G L, VAN DUREN A, MORRIS E P, *et al.* Consequences of Shoot Density and Stiffness for Ecosystem

Engineering by Benthic Macrophytes in Flow Dominated Areas: A Hydrodynamic Flume Study[J]. Marine Ecology Progress Series, 2008, 368: 103 – 115.

[11] NEPF H M. Drag, Turbulence, and Diffusion in Flow through Emergent Vegetation[J]. Water Resources Research, 1999, 35(2): 479 – 489.

[12] SERRA T, FERNANDO H J, RODRIGUEZ R V. Effects of Emergent Vegetation on Lateral Diffusion in Wetlands [J]. Water Research, 2004, 38(1): 139 – 47.

[13] PETTICREW E L, KALFF J. Water Flow and Clay Retention in Submerged Macrophyte Beds[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1992, 49 (12): 2483 – 2489.

[14] SAND-JENSEN K, PEDERSEN O. Velocity Gradients and Turbulence around Macrophyte Stands in Streams [J]. Freshwater Biology, 1999, 42(2): 315 – 328.

[15] NEPF H, MUGNIER C G, ZAVISTOSKI R A. The Effects of Vegetation on Longitudinal Dispersion[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, 44(6): 675 – 684.

[16] NEPF H, KOCH E W. Vertical Secondary Flows in Submersed Plant-Like Arrays[J]. Limnology and Oceanography, 1999, 44(4): 1072 – 1080.

[17] GHISALBERTI M, NEPF H . Mixing Layers and Coherent Structures in Vegetated Aquatic Flow[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(C2): 1 – 11.

[18] NEPF H , GHISALBERTI M, WHITE B, *et al.* Retention Time and Dispersion Associated with Submerged Aquatic Canopies[J]. Water Resources Research, 2007, 43(4): 1-10

[19] TANINO Y, NEPF H. Laboratory Investigation of Lateral Dispersion within Dense Arrays of Randomly Distributed Cylinders at Transitional Reynolds Number[J]. Physics of Fluids, doi:10.1063/1.3119862.

[20] LÓPEZ F, GARCÍA M. Open-Channel Flow through Simulated Vegetation: Suspended Sediment Transport Modeling [J]. Water Resources Research, 1998, 34(9): 2341 – 2352.

[21] HUAI W X, ZENG Y H, XU Z G, *et al.* Three-Layer Model for Vertical Velocity Distribution in Open Channel Flow with Submerged Rigid Vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2009, 32(4): 487 – 492.

[22] CAROLLO F G, FERRO V, TERMINI D. Flow Velocity Measurements in Vegetated Channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 664 – 673.

[23] 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): 785 – 792. (TANG Hong-wu, YAN Jing, LV Sheng-qi. Advances in Research on Flows with Vegetation in River Management [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 785 – 792. (in Chinese))

[24] IKEDA S, KANAZAWA M. Three-Dimensional Organized Vortices above Flexible Water Plants[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(11): 634 – 640.

[25] 朱红钧, 赵振兴. 有漂移植物河道水流的紊动特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, (10): 18 – 21,25. (ZHU Hong-jun, ZHAO Zhen-xing. The Turbulence Characteristics of River Flow with Floating Vegetation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, (10): 18 – 21,25. (in Chinese))

[26] 吴福生, 姜树海, 杨雪林. 河道含淹没刚性植物二维涡量场特性[J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(1): 8 – 15. (WU Fu-sheng, JIANG Shu-hai, YANG Xue-lin. Characteristics of 2D-vortex Field in Open Channel Flow with Submerged Rigid Vegetation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics , 2010, 25(1): 8 – 15. (in Chinese))

[27] 吴福生. 河道漫滩及湿地上淹没柔性植物水流的紊流特性[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1301 – 1305. (WU Fu-sheng. Turbulent Characteristics of Flow on Floodplains and Wetlands with Flexible Vegetations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (11): 1301 – 1305. (in Chinese))

[28] 槐文信, 韩　杰, 曾玉红, 等. 淹没柔性植被明渠恒定水流水力特性的试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40 (7): 791 – 797. (HUAI Wen-xin, HAN Jie, ZENG Yu-hong, *et al.* Experimental Study on Hydraulic Behaviors of Steady Uniform Flow in Open Channel with Submerged Flexible Vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 791 – 797. (in Chinese))

[29] 杨克君, 刘兴年, 曹叔尤, 等. 植被作用下的复式河槽漫滩水流紊动特性[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1263 – 1268. (YANG Ke-jun, LIU Xing-nian, CAO Shu-you, *et al.* Turbulence Characteristics of Overbank Flow in Compound River Channel with Vegetated Floodplain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1263 – 1268. (in Chinese))

[30] 拾　兵, 王川源, 尹则高, 等. 淹没植物对河道糙率的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(2): 295 – 298. (SHI Bing, WANG Chuan-yuan, YIN Ze-gao, *et al.* Effect of Vegetation Submerged in River on the Roughness Coefficient [J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(2): 295 – 298. (in Chinese))

[31] 李艳红, 李　栋, 范静磊. 含淹没植物河流水流紊动强度最大值及其影响因素[J]. 水科学进展, 2007, 18 (5): 706 – 710. (LI Yan-hong, LI Dong, FAN Jing-lei. Turbulence Intensity Maximum and Its Influence Factors in Submerged River Flow with Plant [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 706 – 710. (in Chinese))

[32] 刘昭伟, 陈永灿, 朱德军, 等. 灌木植被水流的流速垂向分布[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 237 – 241. (LIU Zhao-ei, CHEN Yong-can, ZHU De-jun, *et al.* Vertical Profile of Horizontal Velocity of Flow Through Shrubs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 237 – 241. (in Chinese))

[33] JÄRVELÄ J. Flow Resistance of Flexible and Stiff Vegetation: A Flume Study with Natural Plants[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(1/2): 44 – 54.

[34] WANG C, YU J Y, WANG P F, *et al.* Flow Structure of Partly Vegetated Open-Channel Flows with Eelgrass[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2009, 21(3):301 – 307.

[35] 王　忖. 含双重植物明渠水流特性研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(9): 70 – 72, 33. (WANG Cun. Study on Flow Characteristics of Open Channels with Double Vegetation [J]. Water Resources and Power, 2010, 28 (9):70 – 72, 33. (in Chinese))

[36] JÄRVELÄ J. Effect of Submerged Flexible Vegetation on

Flow Structure and Resistance[J]. Journal of Hydrology, 2005, 307(1/4): 233 – 241.

[37] MADSEN T V, ENEVOLDSEN H O, JØRGENSEN T B. Effects of Water Velocity on Photosynthesis and Dark Respiration in Submerged Stream Macrophytes [J]. Plant, Cell & Environment, 1993, 16(3): 317 – 322.

[38] BIGGS B J F. Hydraulic Habitat of Plants in Streams[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1996, 12(2/3): 131 – 144.

[39] QIAN J, ZHENG S. S, WANG P F, *et al.* Experimental Study on Sediment Resuspension in Taihu Lake under Different Hydrodynamic Disturbances[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2011, 23(6): 826 – 833.

[40] 李一平, 逄 勇, 陈克森, 等. 水动力作用下太湖底泥起动规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 770 – 774. (LI Yi-ping, PANG Yong, CHEN Ke-sen, *et al.* Study on the Starting Principles of Sediment by Water Force in Taihu Lake [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 770 – 774. (in Chinese))

[41] BOHLING B. Measurements of Threshold Values for Incipient Motion of Sediment Particles with Two Different Erosion Devices[J]. Journal of Marine Systems, 2009, 75 (3/4): 330 – 335.

[42] HORPPILA J. Effects of Submerged Macrophytes on Sediment Resuspension and Internal Phosphorus Loading in Lake Hiidenvesi (Southern Finland) [J]. Water Research, 2003, 37(18): 4468 – 4474.

[43] HOUWING E J, TÄNCZOS I C, KROON A, *et al.* Interaction of Submerged Vegetation, Hydrodynamics and Turbidity; Analysis of Field and Laboratory Studies [C] // Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment. Proceedings in Marine Science, 5. Elsevier: Amsterdam, 2002: 441 – 453.

[44] LI E H, LI W, LIU G H, *et al.* The Effect of Different Submerged Macrophyte Species and Biomass on Sediment Resuspension in a Shallow Freshwater Lake[J]. Aquatic Botany, 2008, 88(2): 121 – 126.

[45] JAMES W F, BARKO J W, BUTLER M G. Shear Stress and Sediment Resuspension in Relation to Submersed Macrophyte Biomass [J]. Hydrobiologia, 2004, 515 (1): 181 – 191.

[46] NEZU I, ONITSUKA K. Turbulent Structures in Partly Vegetated Open-Channel Flows with Lda and Piv Measurements[J]. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39(6): 629 – 642.

[47] WU W, HE Z. Effects of Vegetation on Flow Conveyance and Sediment Transport Capacity[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(3): 247 – 259.

[48] JAMES C S, JORDANOVA A A, NICOLSON C R. Flume Experiments and Modelling of Flow-Sediment-Vegetation Interactions[C] // The Structure, Function and Management Implications of Fluvial Sedimentary Systems. Alice Springs, Australia: IAHS Publication, 2002: 3 – 9.

[49] 唐洪武, 吕升奇, 龙涧川. 刚性植物条件下静水中粗颗粒泥沙沉速研究[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1214 – 1220. (TANG Hong-wu, LV Sheng-qi, LONG Jian-chuan. Settling Velocity of Coarse Sediment Particles in Still Water with Rigid Vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1214 – 1220. (in Chinese))

[50] 江亭桂, 王国祥, 郭长城, 等. 水生高等植物对水中悬浮固体去除效果的研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(1): 48 – 51. (JIANG Ting-gui, WANG Guo-xiang, GUO Chang-cheng, *et al.* Removing Suspended Solid in water by higher aquatic plants [J]. Environmental Science and Technology, 2009, 32(1): 48 – 51. (in Chinese))

[51] 郭长城, 喻国华, 王国祥. 高等水生植物对悬浮颗粒物再悬浮的影响[J]. 人民黄河, 2007, 29(4): 37 – 38. (GUO Chang-cheng, YU Guo-hua, WANG Guo-xiang. The Resuspended Capacity of Solid Influenced by Higher Aquatic Plants [J]. Yellow River, 2007, 29(4): 37 – 38. (in Chinese))

[52] 王 忖, 王 超. 含挺水植物和沉水植物水流紊动特性[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 816 – 822. (WANG Cun, WANG Chao. Turbulent Characteristics in Open-Channel Flow with Emergent and Submerged Macrophytes [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 816 – 822. (in Chinese))

[53] WANG C, WANG C, WANG Z. Effects of Submerged Macrophytes on Sediment Suspension and NH_4-N Release under Hydrodynamic Conditions[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(6): 810 – 815.

(编辑:赵卫兵)

Research Advances of the Interaction among Macrophytes, Water Flow and Sediment Resuspension

GUO Hui, HUANG Guo-bing

(Hydraulics Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The complete concept of water body includes surface water, bottom sediment, and other environmental conditions such as macrophytes. The interaction among macrophytes, water flow and sediment resuspension is an important process of water eco-environment's coupling evolution. In the present paper, the research advances and some topics requiring further research in these aspects are concluded as follows: ①there are rich reports on the flow

(下转第 116 页)