

柔性植物影响下水沙运动及物质输运研究进展

周峰¹, 娄厦^{1,2}, RADNAEVA Dorzhievna Larisa³,
NIKITINA Elena³, FEDOROVA Viktorovna Irina⁴, 周晓声¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092;
3. Laboratory of Chemistry of Natural Systems, Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude 670047, Russia;
4. Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia)

摘要:水生植物是河流、湖泊、滨海湿地环境中不可缺少的一部分,植物的存在使水动力条件发生了改变,进而影响了泥沙悬浮和污染物的输运。从恒定流和波浪两种水动力条件出发,针对柔性植物影响下的水流阻力、水流结构、紊动特性、特征流速、消波系数、泥沙运动、污染物输运等方面,综述了国内外的主要成果,并指出复杂水动力条件下的植物-水流-泥沙-污染物之间的相互作用规律是今后研究的重点和难点。

关键词:柔性植物;水流阻力;紊动特性;泥沙运动;物质输运

中图分类号:TV143 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0107-10

Research progress on sediment movement and substance transport in flows with flexible vegetation//ZHOU Feng¹, LOU Sha^{1,2}, RADNAEVA Dorzhievna Larisa³, NIKITINA Elena³, FEDOROVA Viktorovna Irina⁴, ZHOU Xiaosheng¹
(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Laboratory of Chemistry of Natural Systems, Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude 670047, Russia; 4. Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia)

Abstract: Aquatic plants are an indispensable part of the environment of rivers, lakes and coastal wetlands. The existence of plants changes the hydrodynamic conditions, thus affecting the suspension of sediment and the transport of pollutants. Starting from two hydrodynamic conditions of steady flow and wave, aiming at the flow resistance, flow structure, turbulent characteristics, characteristic velocity, wave attenuation coefficient, sediment movement and pollutant transport under the influence of flexible plants, the main domestic and foreign literatures are reviewed. The interaction mechanisms of vegetation-flow-sediment-pollutant under complex hydrodynamic conditions are proposed as the research focus and difficulty in the future.

Key words: flexible vegetation; flow resistance; turbulent characteristics; sediment movement; substance transport

自然湿地与人工修复工程中的植物均具有重要的环境保护功能和经济效益,在减轻水土流失、控制污染、净化环境等方面发挥着不可替代的作用。湿地中广泛分布的水生植物可以增大水流阻力,耗散波浪能量,改变水流结构、泥沙运动以及物质输运^[1]。水生植物为鱼类和浮游生物提供食物和栖息地,能储存蓝碳^[2],使海岸和滨海地区在一定程度上免受海水侵蚀以及风暴潮和小型海啸的影响^[3],因此被广泛用于人工修复工程中。与刚性植物相比,柔性植物,如生长于淡水环境的金鱼藻、苦草以及生长于滨海湿地的芦苇、蘆草、大叶藻、日本鳶草^[4],在水流和波浪作用下会发生不同程度的弯曲、倾斜和摆动,进而影响水流流速与紊动特性、泥沙起动与沉降^[5]、物质输运^[6]以及污染物的吸附与解吸过程。因此,柔性植物对水流结构的影响一直受到国内外研究者的关注^[6]。在前人研究的基础

响^[3],因此被广泛用于人工修复工程中。与刚性植物相比,柔性植物,如生长于淡水环境的金鱼藻、苦草以及生长于滨海湿地的芦苇、蘆草、大叶藻、日本鳶草^[4],在水流和波浪作用下会发生不同程度的弯曲、倾斜和摆动,进而影响水流流速与紊动特性、泥沙起动与沉降^[5]、物质输运^[6]以及污染物的吸附与解吸过程。因此,柔性植物对水流结构的影响一直受到国内外研究者的关注^[6]。在前人研究的基础

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42072281);上海市创新行动计划(22230712900,22ZR1464200,20230742500);上海市土木工程I类高峰学科建设项目(2022-3-YB-03);中央高校基本科研业务费专项(22120210576)

作者简介:周峰(1996—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力与水环境研究。E-mail:2132436@tongji.edu.cn

通信作者:娄厦(1986—),女,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力与水环境研究。E-mail:lousha@tongji.edu.cn

上,本文总结了国内外关于柔性植物影响下的水动力学特征、泥沙运动和物质输运方面的研究,归纳了现有研究的主要方法和主要结论,并展望了今后研究的重点。

1 柔性植物对恒定流水流特性的影响

1.1 柔性植物引起的阻力系数

1939 年, Cook 等^[7]指出,与刚性植物不同,柔性植物在水流作用下会发生一定程度的弯曲、倾伏和一定范围内的随流摆动。因此,研究影响柔性植物水流的水动力因素会更加复杂。

现有研究主要使用谢才系数、曼宁系数 n 、尼古拉兹粗糙高度 k_s 和达西-维斯巴赫系数 f 来描述水流阻力。这些参数可以通过水流平均流速相互转换^[8]。在这些阻力参数中,含植物水流中使用最广泛的主要是曼宁系数和达西-维斯巴赫系数。

1.1.1 曼宁系数

20 世纪早期,对含植物河道曼宁系数的研究主要为农业灌溉服务,大多基于野外实地测量数据得出经验公式。Chow^[9]在综合前人大量实测数据的基础上,考虑了影响含植物河道曼宁系数的多种因素,绘制了 $n-uR$ (u 为断面平均流速; R 为水力半径) 经验曲线,根据植物的类型、高度以及生长状态、河道的表面粗糙度、平均流速和水力半径等因素,可在曲线上查出相应的 n 值。然而, Kouwen 等^[10]通过水槽试验得出的数据指出: $n-uR$ 曲线不适用于小坡度的河道,尤其当河道坡度小、植物矮小、植物刚度大时会出现较大的误差,同时也不适合用来验证试验得出的数据,仅适用于河道坡度不小于 3% 的含植物河道。

Righetti 等^[11]采用塑料毛球模拟柔性植物进行水槽试验,并通过数学模型验证了 Petryk 等^[12]提出的含刚性植物河道曼宁系数的经验公式能够应用于含柔性植物河道:

$$n_v = n \sqrt{1 + \frac{C_{DB} \sum_{i=1}^N A_i}{2gAL} \left(\frac{1.49}{n} \right)^2 R^{4/3}} \quad (1)$$

式中: n_v 为含植物河道曼宁系数; C_{DB} 为河道平均拖曳力系数; A_i 为第 i 根植物的迎水面积; g 为重力加速度; N 为植物数量; A 为河道过流断面面积; L 为植物区长度。该公式在非淹没的植被水流中得到了较好的验证,但其中的关键参数 C_{DB} 需要考虑河道的平均流速以及植物密度等参数综合获得。

Kouwen 等^[13]采用苯乙烯条模拟柔性植物进行水槽试验,考虑柔性植物的偏转效应,引入了植物淹没度 h_v/h (h_v 为柔性植物的偏转高度,可采用 Kutija

等^[14]提出的分段荷载作用下的悬臂梁计算模型计算; h 为水深), 得出了含植物河道曼宁系数的计算公式。该公式将柔性植物类比悬臂梁来考虑其偏转效应,在一定程度上提高了计算的准确性,但若应用在实际工程中会过于复杂。

姬昌辉等^[15]通过塑料草水槽试验发现,有植物情况下的曼宁系数是无植物情况下的 1.17 ~ 3.65 倍。在相同水深且淹没条件下,曼宁系数随着植物间距的减小而增大;当水流流速增大时,曼宁系数变化幅度很小。他们根据试验数据拟定了含植物河道曼宁系数的计算公式,该公式没有复杂的水力参数,在应用上较为简便,但忽略了流速等水力参数的影响,存在一定局限性。

1.1.2 达西-维斯巴赫系数

自然界中的水生植物并不是完全刚性或完全柔性的,许多水生植物具有刚性的杆茎和柔性的叶片,其整体刚度为介于刚性和柔性之间的半刚性。Kouwen 等^[13]通过引入植物密度 M , 植物的杨氏模量 E 和植物截面的惯性矩 I , 使用含植物河道的粗糙高度 k_{sv} 来描述柔性植物弯曲后对水流引起的平均阻力,并通过 k_{sv} 与含植物河道的达西-维斯巴赫系数 f_v 之间的关系获得 f_v 。该方法能够很好地反映植物偏转效应的影响,提高了阻力计算的精度。在此基础上, Velasco 等^[16]在试验中采用塑料模拟柔性植物,通过分析发现若用 h_v/S (S 为植物的间距) 代替 M , 则 $[h_v EI / (S \tau)]^{0.25}$ (τ 为河床剪切力) 与 h_v 有更强的线性关系,进一步提高了阻力计算的准确性。

Kouwen 等^[17]提出了含淹没植物河道的阻力系数 f_v 的计算公式,并采用 4 种真实植物白松、云杉、雪松、奥地利松树进行水槽试验和野外实测 ($0 \text{ m/s} < u < 2 \text{ m/s}$), 验证了其精度。该公式适用于多种植物混合以及不同密度的植物,但应用时需要采集大量植物数据。

Västilä 等^[18]采用真实植物黑杨进行水槽试验 ($0 \text{ m/s} < u < 0.8 \text{ m/s}$, $0.3 < h_v/h < 1$), 提出了一种考虑淹没状态下柔性植物弯曲的计算 f_v 的方法, 计算公式为

$$f_v = 4C_{Dx} \frac{A_L}{A_b} \left(\frac{u}{u_{\chi}} \right)^{\chi} \quad (2)$$

式中: χ 为考虑了植物偏转效应的参数; C_{Dx} 为特定物种的拖曳力系数; A_L 为叶片面积; A_b 为植物占地面积; u_{χ} 为用于决定 χ 的最低流速。该模型采用与 Vogel 系数 v 类似的植物参数 χ 来描述柔性植物的偏转效应,采用植物的面积参数来描述植物阻力。在此基础上, Jalonen 等^[19]开展水槽试验 ($0 \text{ m/s} < u < 2.5 \text{ m/s}$), 考虑了真实植物的叶片和杆茎对水流阻

力的影响,建立了受真实带叶植物影响的 f_v 的计算公式,与 Västila 等^[18]提出的公式相比,该公式不仅考虑了叶片引起的阻力,还考虑了植物杆茎引起的阻力。

贾凤聪等^[20]采用理论分析和遗传算法相结合的方法,考虑了柔性植物在水流作用下产生的弯曲特性。通过 Eureka 软件,基于遗传算法将大量前人的柔性植物有关试验数据进行训练,求解阻力系数 f_v 与淹没度、阻力长度、相对高度之间的定量关系,公式相对简洁,没有复杂的水力参数。

上述关于曼宁系数和达西-维斯巴赫系数计算的理论和方法,对含柔性植物的水流阻力计算有重要的借鉴意义,完善了含植物水流的阻力计算体系。

1.2 恒定流作用下柔性植物阻力计算

早期研究认为刚性植物引起的阻力与水流速度的平方成正比^[21],但这一规律对柔性植物并不适用。Vogel^[22]将柔性植物引起的水流阻力与流速之间的关系表达为 $F \propto u^{2+v}$,其中 v 为 Vogel 系数,用来衡量植物的柔韧程度。Harder 等^[23]测量了不同植物的 Vogel 系数,并总结了 Vogel 系数的范围为 $-1.3 \leq v \leq -0.1$ 。

Zhang 等^[24]在前人的基础上,考虑了柔性植物多片叶子间引起的遮蔽效应,采用改善的柯西数 Ca 来考虑柔性植物偏转的影响。当 $Ca \leq 1$ 时,植物的刚度能够抵抗弯曲变形;当 $Ca > 1$ 时,就要采用区别于刚性植物的模型和计算公式来考虑柔性植物引起的摆动。根据水槽试验结果提出了带叶柔性植物阻力计算公式,公式考虑了柔性植物偏转和带叶植物间叶片的遮蔽效应,提高了含植物水流阻力计算公式的精确度。

1.3 柔性植物影响下恒定流流速垂向分布

与无植物水流不同,植物影响下的垂向流速分布不再遵循对数分布。特别是对于淹没植物的顶冠层处,植物区阻力作用和植物层以上自由水体存在明显的流速梯度。对于淹没植物来说,由于植物上层 Kelvin-Helmholtz 涡的存在,涡流的紊动效应会穿透植物层一定区域,因此国内外学者在两层划分的基础上增加了植物顶冠层附近的过渡层。Ghisalberti 等^[25]在柔性植物的模型中观测到了稳定尺度的剪切涡流。槐文信等^[26]认为,非植物层水流在植物形成的新河床上流动,原来的河道好像被压缩了,并假设了一种新的混合长度来反映河道压缩的情况,根据水槽试验($5 \text{ cm/s} < u < 25 \text{ cm/s}$)数据得出了植物过渡层($0.5h_v < z \leq h_v$)(z 为垂向坐标)和植物上层($z > h_v$)的经验公式,与前人成果相比,该公式具有参数简单、计算方便和适用性强等特点。

Nepf^[27]假设植物的拖曳力远大于河床底部的紊动应力,利用动量守恒原理推导出植物冠层内的平均流速计算公式,该公式的优点是形式简单,水力参数较少,准确性高。张英豪等^[28]采用真实植物苦草进行水槽试验($4.8 \text{ cm/s} < u < 11.7 \text{ cm/s}$),观测到了植物冠层内部出现逆流速度梯度,并指出大流量会导致冠层底部的雷诺应力增加,Nepf^[27]的流速公式不能解释大流量工况中冠层内部出现逆流速度梯度的现象。

Pu 等^[29]沿植物与自由液面交界处将流速分布划分为两层,对植物拖曳力系数 C_D 和摩擦力系数 C_f 对水流流速的影响进行了敏感度分析。研究表明, C_D 和 C_f 并非常数,而是随着水深和植物密度的变化而变化, C_D 相较于 C_f 起着主导作用。对无叶的柔性植物模型进行受力分析,考虑了柔性植物的刚度、密度和摩擦力的影响,推导出了植物冠层内的流速分布公式。通过采用 Kubrak 等^[30]的数据($20 \text{ cm/s} < u < 80 \text{ cm/s}$)进行验证,发现符合度较高,但公式中涉及的参数过多,形式略显复杂,不便计算。

Lei 等^[31]采用模拟柔性植物进行水槽试验($5 \text{ cm/s} < u < 16.5 \text{ cm/s}$),建立了一个淹没柔性植物冠层内的平均流速计算模型,该模型计算结果与试验数据和野外测量数据相符。

对于非淹没植物,Xu 等^[32]描述了真实植物香蒲在垂直高度上紊动能的变化,并利用能量守恒定理推导出了非淹没状态下的纵向流速垂向分布:

$$\frac{u(z)}{\bar{u}_1} = \sqrt{\frac{\bar{a}}{a(z)}} \tag{3}$$

式中: $u(z)$ 为距离河床底部 z 处的水流速度; $\bar{u}_1$ 为植物冠层内平均流速; $\bar{a}$ 为深度平均的单位体积植物迎水面积; $a(z)$ 为 z 处的单位体积植物迎水面积。水槽试验($1 \text{ cm/s} < u < 18 \text{ cm/s}$)数据显示,该公式能很好地预测流速分布。从式(3)可以看出,对于淹没状态下的柔性植物影响下的水流速度可以通过计算植物单位体积上的迎水面积来进行估算,且 $a(z)$ 比较容易获得。对于理想的植物模型来说, $a(z)$ 在垂直方向上近似一个常数,所以对于非淹没植物而言,垂直方向上的流速近似一个常数。

尽管学者们采用的理论方法不同,但得出的植物影响下纵向水流的流速垂向分布的三层划分结果相近:在植物区域内部近似呈S形,在植物过渡层和植物层以上呈J形。

1.4 柔性植物影响下的紊动特性

水流的紊动特性是影响物质运输的关键因素,底床附近的紊动能对泥沙的起动和悬浮有着很大影响。与无植物条件相比,植物冠层内紊动能分布有

着较大的变化。

李艳红等^[33]利用 Wilson 等^[34]开展的含淹没柔性植物水流的水槽试验数据($1.5 < h/h_v < 3.4, 2 \text{ cm/s} < u < 23 \text{ cm/s}$)拟合得出柔性植物影响下的紊动强度 σ 的公式,当植物密度较小时,水流紊动强度最值随密度的增加而增大,但当植物密度增加至 60 株/m^2 时,由于高密度植物拖曳力耗散了紊动涡流,水流紊动强度反而随着植物密度的增大而减小。

Tanino 等^[35]利用能量守恒原理提出了由非淹没刚性植物尾流紊动引起的紊动能 k_t 的预测模型:

$$k_t = \gamma^2 \left[C_D \frac{a l_t}{2(1 - \varphi)} \right]^{\frac{2}{3}} u^2 \quad (4)$$

式中: γ 为与植物有关的经验参数; a 为单位体积内植物的迎水面积; l_t 为特征涡流长度尺度; φ 为植物体积分数。Xu 等^[32]基于真实植物香蒲的形态与体积在垂直方向上的变化,分别以 $\varphi(z)$ 、 $a(z)$ 、 $l_t(z)$ 和 $u(z)$ 代替式(4)中的 φ 、 a 、 l_t 和 u ,得出了适用于柔性植物影响下河道的紊动能计算公式,并通过水槽试验($1 \text{ cm/s} < u < 18 \text{ cm/s}$)测量了香蒲和节节菜冠层内紊动能,证明了该公式的准确性。

Zhang 等^[36]通过水槽试验($6 \text{ cm/s} < u < 22 \text{ cm/s}$)探究海草作用下紊动能对泥沙沉降的影响,引入植物层内和植物层以上的平均速度,考虑植物和河床的影响建立了植物区总紊动能计算公式。

2 柔性植物影响下的波浪传播

2.1 波浪作用下柔性植物引起的阻力

Lei 等^[37]采用聚乙烯材料来模拟海草,通过水槽试验研究了波浪条件下柔性植物的弯曲效应对水流阻力的影响。试验结果表明,当 $1 < Ca_w L' < 10\,000$ 时,柔性植物引起的阻力 F_e 与刚性植物引起的阻力 F_r 的比值为

$$\frac{F_e}{F_r} = (0.94 \pm 0.06) (Ca_w L')^{-0.25 \pm 0.02} \quad (5)$$

式中: Ca_w 为波浪柯西数; L' 为叶片长度比。该公式反映了在波浪作用下柔性植物弯曲后与弯曲前产生的阻力比值。

Jalonen 等^[38]通过试验水槽行车系统拖动倒挂在水面以下的真实植物赤杨、黄花柳和垂枝桦来研究植物引起的水流阻力($0.1 \text{ m/s} < u < 2.5 \text{ m/s}$)。结果表明:当流速为 0.1 m/s 时,叶片产生的拖曳力占整株植物拖曳力的 80% ,然而当流速超过 0.8 m/s 时,叶片产生的拖曳力仅占 40% 。Zhang 等^[1]指出,仅通过描述柔性植物杆茎的直径和长度并不能准确表述植物的性质和形态,因此,通过开展带叶的模拟植物和真实植物水槽试验,分析了带叶柔性植物的

受力情况,并提出了波浪影响下带叶柔性植物引起的阻力计算公式。研究表明,整株植物的叶片产生了大部分的拖曳力,但随着波浪强度的增加有所降低。该公式考虑了植物的真实形态以及叶片间的遮蔽效应和偏转效应,提高了波浪条件下带叶柔性植物引起的阻力的计算准确性。

2.2 柔性植物的消波系数

植物消波系数描述了波浪受到植物阻碍后波高沿传播方向的衰减程度。Dalrymple 等^[39]在线性波理论和波能的耗散仅由植物造成的前提下,使用细长刚性圆柱体模拟植物建立了规则波作用下植物的消波模型,并给出了衰减规律:

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{1 + k_D x} \quad (6)$$

式中: H 为植物区域沿程波高; H_0 为植物区域开端的波高; k_D 为植物消波系数。

大量学者对该模型进行了改进,使其能够应用于柔性植物的情况。Mendez 等^[40]采用人造的柔性叶子模拟巨藻进行了水槽试验,提出用基于邱卡数 KC 和植物相对高度拟合出的拖曳力系数 C_D^* 代替 C_D ,并用波高的均方根 H_{rms} 代替 H ,得出了新的消波系数的计算公式,可应用于柔性植物的消波计算。Sánchez-González 等^[41]用柔性植物进行水槽试验,探究海草对波浪消波的影响,在 C_D 计算中考虑了植物刚度引起的误差,并考虑了波浪的非线性,提高了计算的准确性。Zhu 等^[42]通过将柔性植物叶片的运动过程线性化,建立了柔性植物的消波模型,该模型考虑了植物叶片的摆动和遮蔽效应以及植物弯曲,充分体现了柔性植物的特性。van Veelen 等^[43]用模拟柔性植物进行水槽试验,忽略了植物叶片的影响、植物之间相互作用和波生流的影响,并将柔性植物的形态简化成拱形,提供了一种简化柔性植物模型的新思路,但未考虑叶片的作用。Losada 等^[44]进行水槽试验探究了波流耦合条件下柔性植物的消波情况,并以测量的柔性植物的弯曲高度代替植物高度来提高公式的准确性。Lei 等^[37]拟合出波浪影响下的植物有效高度的计算公式,并通过冠层内流速与植物河道流速的比值考虑了柔性植物摆动对波速的影响,比 Losada 等采用的实测高度更有科学性。

2.3 柔性植物影响下波浪特征流速

Luhar 等^[45-46]采用物理参数与真实海草相似的柔性模拟植物进行了水槽试验($T = 0.9 \sim 2.0 \text{ s}$, $H = 1.6 \sim 10.6 \text{ cm}$, $h = 16 \sim 39 \text{ cm}$,其中 T 为波浪周期),并基于线性波理论建立了预测淹没状态下植物冠层内波生流的流速模型,模型考虑了柔性植物偏转的影响,但未涉及植物的密度、高度和刚度等性质。

Abdolahpour 等^[47]分别用刚性和柔性模拟植物进行水槽试验 ($T=5 \sim 9 \text{ s}$, $h=0.76 \text{ m}$, $h_v=0.3 \text{ m}$), 认为冠层内最大时均流速 $\bar{u}_{\max} \sim f(u_{\infty}^{\text{rms}}, \xi_T, L_D)$ (u_{∞}^{rms} 为冠层以上的均方根时均流速; ξ_T 为冠层顶端处水质点的垂向轨道偏移; L_D 为冠层顶端处拖曳力长度尺度), 并通过试验数据拟合, 提出了淹没状态下植物冠层内波生流的最大时均流速公式。

2.4 柔性植物影响下的波浪紊动特性

Pujol 等^[48]研究发现, 浅水条件下破波引起的紊动能到达底床, 冠层破波后近床底处紊动能是无植物区域的 2 倍。Ros 等^[49]研究了波浪作用下刚性、柔性模拟植物和真实植物川蔓藻对紊动的影响, 研究表明, 刚性模拟植物在较低波浪频率下 ($0.6 \sim 1.2 \text{ Hz}$) 增加了紊动能, 而在较高频率下 ($1.4 \sim 1.6 \text{ Hz}$) 紊动能减小; 柔性模拟植物和真实植物在较低和较高频率下降低了紊动能。

波浪作用下柔性植物周围也有紊动尾流产生, Zhang 等^[50]用模拟柔性植物进行水槽试验, 指出 2 倍轨道半径与植物间距的比 $2A_w/S=1$ 是杆茎尾流产生与否的临界值。当 $2A_w/S<1$ 时, 紊动能与无植物河道相当; 当 $2A_w/S>1$ 时, 河床底部紊动能明显增加。

3 柔性植物影响下的泥沙运动

植物的存在改变了水流流速和紊动结构, 进而对泥沙运动和输运造成影响。Nepf 等^[51]指出水流绕过植物茎叶, 导致了河床剪切应力的改变和流场的空间不均匀性。Wan Mohtar 等^[52]指出植物杆茎引起的紊流会导致泥沙在更低的流速下起动。一方面, 植物的存在降低了流速, 促进了泥沙的淤积。另一方面, 当 $Re_d (=uD_v/\nu)>120$ 时 (D_v 为植物直径), 植物的后端出现紊动尾流^[53], 对泥沙的起动起着促进作用。相对于无植物河道, 有植物河道的泥沙运动更加复杂, 开展含植物河道泥沙起动研究对河流生态修复、预防侵蚀有着重要意义^[54]。

3.1 柔性植物影响下的泥沙起动流速

国内外学者对水流、植物和泥沙之间相互作用的机理进行了大量研究。Shahmohammadi 等^[55]收集天然植物的松针叶模拟天然柔性植物并采用梅花形排列进行水槽试验来探究柔性植物对泥沙起动的影响。试验结果表明, 植物冠层内平均流速减小了 20%, Shields 数是无植物区域的 1.5 倍左右。

现有研究中只有少部分学者进行了柔性植物对泥沙起动的影响。Wang 等^[56]用柔性橡胶棒模拟柔性植物, 研究了植物密度、水深和泥沙粒径对泥沙起动的影响。水槽试验 ($0.58 \text{ mm}<D_s<0.67 \text{ mm}$,

$15 \text{ cm/s}<u<25 \text{ cm/s}$, 其中 D_s 为泥沙粒径) 结果表明, 在柔性植物存在的情况下泥沙起动流速比无植物河道低, 但比刚性植物存在的情况下高。根据试验结果, 得出了一个适用于柔性植物影响下的泥沙起动流速的计算公式, 公式中引入了描述植物的几何参数, 但是未能反映柔性植物的阻力特性与摆动特性。

Yang 等^[57]用刚性木棒进行水槽试验 ($600<Re_d<2500$, $0.6 \text{ mm}<D_s<2 \text{ mm}$, $D_v/S\leq 0.25$ ($\varphi\leq 5\%$)), 并采用紊动能作为泥沙起动的临界指标, 推导并验证了泥沙起动流速的计算公式, 相关河床阻力参数可查阅文献 [58]。Yang 等^[57]指出, 该公式与 Widdows 等^[59]由真实植物大米草和天然泥沙获得的试验数据吻合, 说明该公式能够应用于柔性植物影响下的泥沙起动计算。与其他公式相比, 该公式描述了植物的阻力特性, 但未考虑植物的弯曲特性。

Wang 等^[60]通过在受力平衡中引入植物阻力, 建立了新的泥沙起动模型, 并采用 Tang 等^[61]和 Yang 等^[57]未淹没植物影响下的试验数据以及薛万云等^[62]淹没植物影响下的泥沙起动试验数据 ($0.5 \text{ mm}<D_s<1 \text{ mm}$) 进行检验, 都有很好的准确度。

Wang 等^[63]通过引入植物的浸没度、紊动穿透层和基于流速分布的河床粗糙高度建立了淹没植物影响下的平均泥沙起动公式, 并采用 Yang 等^[57, 62]的数据进行检验, 证明了公式的适用性。Huai 等^[64]研究了含沙水流的悬移质输沙能力, 指出植物的直径、高度和密度都与该指数密切相关。Zhang 等^[36]研究发现, 在植物区域前端, 植物密度和水流速度相对大, 泥沙沉降相对于无植物河道要小; 在水流充分发育的植物区域后端, 植物密度和水流速度相对小, 泥沙沉降比无植物河道明显。Wu 等^[65]拟合了非均匀泥沙河床推移质输沙率公式, 并基于含刚性植物、柔性植物水槽试验数据和天然河道实测数据得出了较好的验证结果。Le Bouteiller 等^[66]研究发现柔性植物影响下, 植物区域的输沙率和床面摩擦力都有所减小, 植物越密处越明显。

3.2 柔性植物影响下的悬沙浓度垂向分布

Li 等^[67]采用柔性塑料模拟植物进行了水槽试验 ($h=0.2 \text{ m}$, $u=0.12 \text{ m/s}$, $D_s=36 \sim 80 \mu\text{m}$) 研究了完全淹没柔性植物影响下的悬沙浓度的垂向分布, 取 Prandtl-Schmidt 系数 β 为 1.25 时拟合最好, 推导出植物上层的悬沙分布计算公式, 同时指出 β 受到紊动结构和泥沙情况的影响, 目前没有方法可准确确定 β 值, β 的取值需要根据不同情况调整。Li 等^[68]进一步讨论了柔性植物影响下的悬沙浓度 ($h=0.102 \text{ m}$, $u=0.122 \text{ m/s}$, $D_s=40 \sim 90 \mu\text{m}$), 并取 β

为 1,得到了悬沙分布计算公式。

Zhang 等^[69]采用柔性模拟植物研究了波浪条件下柔性植物对泥沙起动的影响以及冠层中悬沙浓度的变化。其水槽试验 ($0.5\text{ cm/s} < u < 15.1\text{ cm/s}$, $D_s = 40\text{ }\mu\text{m}$) 结果表明,在同波速情况下有植物比无植物的近床悬沙浓度小,垂向平均浓度也相对减小。在此基础上,提出了基于线性扩散模型的含柔性植物河道波浪引起的悬沙浓度分布公式。

Wang 等^[56]采用柔性植物进行水槽试验,发现柔性植物影响下的泥沙起动流速比刚性植物影响下的大,因为柔性植物的摆动耗散了部分能量。Qu 等^[70]采用柔性模拟植物进行了水槽试验,对比分析了淹没、非淹没和无植物对泥沙起动和悬沙浓度的影响。结果表明,植物冠层内紊动能可以维持细悬沙浓度在一个常数范围内,然而水流阻力的增加会导致粗沙的悬沙浓度降低。

Zhang 等^[71]在洞庭湖河漫滩进行实地测量,探究了湿地植物对悬沙浓度的影响。试验结果表明,有着更大迎水面积的植物冠层使得冠层中的流速和紊动能减小更多,进而导致悬沙浓度降低 30% ~ 50%,有植物区域沉积物高度是无植物区域的 1.9 倍。一方面,植物冠层减缓了流速对泥沙起动的消极作用,另一方面,植物杆茎的紊动尾流对泥沙起动起积极作用。野外调查和室内试验尺度不同,以及天然状态下植物形态的多样化和试验室里的简单化都是得出相反结论的原因。

4 柔性植物影响下的物质输运

植物的存在改变了水流的流速和紊动特性,进而影响了物质的输运。与刚性植物相比,柔性植物在水流作用下的偏转使得水流-植物-污染物扩散间的耦合作用更加复杂。现有关于柔性植物影响下的物质输运计算公式大多由使用示踪剂进行的试验数据拟合得到。

Nepf 等^[72]对传统随机游动法加以改进,引进了尾流系数作为关键参数,建立了淹没刚性植物条件下污染物的横向扩散模型,指出该模型计算刚性植物影响下的横向扩散系数有很高精确度,但对于有复杂形态的柔性植物,该模型只能进行定性描述。如要进行定量描述,要考虑柔性植物的形态和运动轨迹建立新的模型。

Nepf^[73]考虑了紊动扩散和机械弥散的作用,建立了非淹没状态下刚性植物影响下的纵向扩散系数的计算模型。该模型先后通过采用刚性木棒进行水槽试验 ($Re_d = 400 \sim 2000$) 和长有互花米草的河流的野外实测数据 ($Re_d = 300 \sim 600$) 进行了验证,两者的

数据都证明了该模型的准确性。该模型参数简单,且有理论和多组数据支持,但野外的水动力条件较弱,不足以让互花米草摆动起来,公式未体现柔性植物摆动的特性。Wadzuk 等^[74]通过野外调查发现 Nepf^[73] 和 Serra 等^[75] 的试验数据以及他们的野外实测数据和植物雷诺数相关性不高,指出野外实测受一些额外因素的影响,如不均匀的水流,植物的碎屑和额外的床底摩擦力,还指出了适用于野外的侧向扩散系数应该考虑水流的侧向流速。惠二青^[76]利用单一有叶灌木群落、有叶灌木-草本混合群落和有叶灌木-芦苇混合群落等真实柔性植物开展试验研究,结果表明 Nepf^[73] 和 Serra 等^[75] 用刚性植物建立的模型并不能直接用于柔性植物。其采用多元回归分析方法拟合得到了污染物扩散系数与植物直径、水流阻力系数和植物直径雷诺数的表达式,该公式适用于柔性植物影响下的纵向扩散系数的计算,但未考虑柔性植物的摆动等因素。

滕素芬等^[77]采用尤加利草和宽叶草进行水槽试验,探究横向射流污染物的扩散特性,研究发现射流中心浓度迹线符合指数分布,宽叶草和尤加利草影响下的射流半宽分别符合指数和对数分布。Jamali 等^[78]建立了刚性植物影响下的物质扩散模型,并给出了侧向扩散系数的计算公式。Lou 等^[79]在此基础上开展水槽试验,采用柔性纤维材料模拟柔性植物,引入植物的相对高度,使公式能应用于含柔性植物水流的横向扩散系数的估算。

Nepf^[80]考虑了刚性植物的阻碍作用和植物尾流卷吸作用,从物理层面建立了刚性植物影响下纵向扩散系数的计算模型,该模型有很好的理论依据和数据支持,但并不能直接用于柔性植物影响下的扩散系数计算。Huang 等^[81]通过野外调查证明了该模型的可行性。Lou 等^[79]在该模型的基础上引入植物的相对高度,并通过水槽试验将模型扩展到柔性植物影响下的纵向系数的计算中。

任姗等^[82]利用柔性植物开展水槽试验,分析了淹没度和植物密度对污染物扩散的影响,结果表明,随着淹没度和植物密度的增加,污染物浓度的纵向下降速度有增大趋势,污染物在含植物水流中的扩散随淹没度的增加而增加,污染物分布和掺混都趋向均匀,在同一淹没度下,污染物的垂向扩散比横向扩散更快。

Xu 等^[83]用淹没状态下的宽叶香蒲进行水槽试验 ($4.8\text{ cm/s} < u < 18.5\text{ cm/s}$, $0.057 < \varphi < 0.065$),验证了 Tanino 等^[35]提出的基于植物形态的紊动能计算模型能够应用于紊动扩散模型,该模型的先进性在于考虑了植物的形态在垂直方向上的变化。

Sonnenwald 等^[84]采用两组不同的模拟植物和 3 种真实植物进行水槽试验探究污染物的扩散系数,试验指出 2017 年前绝大部分模型由于数据的分散和不确定性导致准确性差,只有 Nepf^[73]的横向扩散模型和 White 等^[85]的纵向扩散模型有比较好的准确性。造成模型不准确的原因是由于真实植物形态复杂性和多变的材料特性。

5 研究展望

柔性植物在水流作用下会发生偏转和摆动,植物的偏转和摆动会改变水流结构和紊动特性,揭示了柔性植物和水流之间的相互作用。自然状态下植物的形状各异,前人通过刚度、偏转高度、迎水面积、密度等对柔性植物进行了描述,但目前还没有统一的方法。在未来的含植物水流水动力与水环境研究中,需进一步探讨以下几个方面:

a. 目前的水槽试验中常用刚性木棒和柔性橡胶棒来模拟刚性植物和柔性植物,并不能完全反映真实水生植物的特性。在未来的研究中,应采用更贴近真实状态下的模拟植物,以反映真实水生植物的物理特性,为工程提供更可靠的理论支持。

b. 目前植物影响下污染物输运研究,大多采用无吸附性质的示踪剂,未考虑污染物随泥沙颗粒的悬浮、沉降、吸附、解吸附等物理化学过程。不同物理化学性质的污染物在植物影响下的扩散、底泥释放等动力学过程是今后研究的重点。

c. 由于真实湿地(尤其是滨海湿地)的水动力过程和水质理化性质均十分复杂,在未来的含植物水流研究中,应考虑不同波浪和水流耦合条件和不同的水质理化性质,为湿地环境保护和生态修复提供科学依据。

d. 柔性植物影响下的水沙运动与物质输运过程十分复杂,需要从理论和物理机制层面出发,建立适用范围更广、科学性更强的公式。

参考文献:

[1] ZHANG Xiaoxia, NEPF H. Wave-induced reconfiguration of and drag on marsh plants [J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 100: 103192.

[2] MCLEOD E, CHMURA G L, BOUILLON S, et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂ [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9(10): 552-560.

[3] GEDAN K B, KIRWAN M L, WOLANSKI E, et al. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the

paradigm [J]. Climatic Change, 2011, 106(1): 7-29.

[4] 张英豪, 赖锡军, 唐彩红. 单向明渠流与波浪作用下植被对水沙运动影响研究综述 [J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 309-319. (ZHANG Yinghao, LAI Xijun, TANG Caihong. Advances in studies on the influence of aquatic vegetation on flow-sediment movement under unidirectional open-channel flow and wave conditions [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 309-319. (in Chinese))

[5] HUI WENXIN, LI SHUOLIN, KATUL G G, et al. Flow dynamics and sediment transport in vegetated rivers: a review [J]. Journal of Hydrodynamics, 2021, 33(3): 400-420.

[6] 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 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))

[7] COOK H L, CAMPBELL F B. Characteristics of some meadow strip vegetation [J]. Agricultural Engineering, 1939, 20(9): 345-348.

[8] WANG Weijie, PENG Wenqi, HUI WENXIN, et al. Roughness height of submerged vegetation in flow based on spatial structure [J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(4): 754-757.

[9] CHOW T V. Open-channel hydraulics [M]. New York: McGraw-Hill, 1959.

[10] KOUWEN N, UNNY T E, HILL H M. Flow retardance in vegetated channels [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1969, 95(2): 329-342.

[11] RIGHETTI M, ARMANINI A, DITTRICH A. Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes [J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(1/2): 55-64.

[12] PETRYK S, BOSMAJIAN III G. Analysis of flow through vegetation [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1975, 101(7): 871-884.

[13] KOUWEN N, LI R M, SIMONS D B. Flow resistance in vegetated waterways [J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(3): 684-690.

[14] KUTIJA V, HONG H T M. A numerical model for assessing the additional resistance to flow introduced by flexible vegetation [J]. Journal of Hydraulic Research, 1996, 34(1): 99-114.

[15] 姬昌辉, 洪大林, 丁瑞, 等. 含淹没植被明渠水位及糙率变化试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2013(1): 60-65. (JI Changhui, HONG Dalin, DING Rui, et al. Variation characteristics of water level and roughness of an open channel with submerged vegetation [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(1): 60-65. (in Chinese))

[16] VELASCO D, BATEMAN A, REDONDO J M, et al. An

- open channel flow experimental and theoretical study of resistance and turbulent characterization over flexible vegetated linings[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2003, 70(1/2/3/4): 69-88.
- [17] KOUWEN N, FATHI-MOGHADAM M. Friction factors for coniferous trees along rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(10): 732-740.
- [18] VÄSTILÄ K, JÄRVELÄ J, ABERLE J. Characteristic reference areas for estimating flow resistance of natural foliated vegetation [J]. Journal of Hydrology, 2013, 492: 49-60.
- [19] JALONEN J, JÄRVELÄ J. Estimation of drag forces caused by natural woody vegetation of different scales [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2014, 26(4): 608-623.
- [20] 贾凤聪, 王伟杰, 张晶, 等. 淹没柔性植被水流阻力特性研究 [C]//吴有生, 王本龙, 何春荣. 第十六届全国水动力学学术会议暨第三十二届全国水动力学研讨会论文集(下册). 北京: 海洋出版社, 2021.
- [21] MORISON J R, JOHNSON J W, SCHAAF S A. The force exerted by surface waves on piles [J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(5): 149-154.
- [22] VOGEL S. Drag and flexibility in sessile organisms [J]. American Zoologist, 1984, 24: 37-44.
- [23] HARDER D L, SPECK O, HURD C L, et al. Reconfiguration as a prerequisite for survival in highly unstable flow-dominated habitats [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2004, 23(2): 98-107.
- [24] ZHANG Xiaoxia, NEPF H. Flow-induced reconfiguration of aquatic plants, including the impact of leaf sheltering [J]. Limnology and Oceanography, 2020, 65(11): 2697-2712.
- [25] GHISALBERTI M, NEPF H M. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(C2): 3011.
- [26] 槐文信, 韩杰, 曾玉红, 等. 基于掺长理论的淹没柔性植被水流流速分布研究 [J]. 应用数学和力学, 2009, 30(3): 325-332. (HUAI Wenxin, HAN Jie, ZENG Yuhong, et al. Study on velocity distribution of flow with submerged flexible vegetations based on mixing-length approach [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2009, 30(3): 325-332. (in Chinese))
- [27] NEPF H M. Flow and transport in regions with aquatic vegetation [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2012, 44: 123-142.
- [28] 张英豪, 赖锡军. 苦草对水流结构的影响研究 [J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 99-106. (ZHANG Yinghao, LAI Xijun. Impact of *Vallisneria natans* on flow structure [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 99-106. (in Chinese))
- [29] PU J H, HUSSAIN A, GUO Yakun, et al. Submerged flexible vegetation impact on open channel flow velocity distribution: an analytical modelling study on drag and friction [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(2): 121-128.
- [30] KUBRAK E, KUBRAK J, ROWIŃSKI P M. Vertical velocity distributions through and above submerged, flexible vegetation [J]. Hydrological Sciences Journal, 2008, 53(4): 905-920.
- [31] LEI Jiarui, NEPF H. Evolution of flow velocity from the leading edge of 2-D and 3-D submerged canopies [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 916: A36.
- [32] XU Yuan, NEPF H. Measured and predicted turbulent kinetic energy in flow through emergent vegetation with real plant morphology [J]. Water Resources Research, 2020, 56(12): e2020WR027892.
- [33] 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 Yanhong, LI Dong, FAN Jinglei. 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))
- [34] WILSON C A M E, STOESSER T, BATES P D, et al. Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(11): 847-853.
- [35] TANINO Y, NEPF H M. Lateral dispersion in random cylinder arrays at high Reynolds number [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 600: 339-371.
- [36] ZHANG Jiao, LEI Jiarui, HUAI Wenxin, et al. Turbulence and particle deposition under steady flow along a submerged seagrass meadow [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125(5): e2019JC015985.
- [37] LEI Jiarui, NEPF H. Wave damping by flexible vegetation: connecting individual blade dynamics to the meadow scale [J]. Coastal Engineering, 2019, 147: 138-148.
- [38] JALONEN J, JÄRVELÄ J. Impact of tree scale on drag: experiments in a towing tank [C]//Proceedings of the 35th IAHR World Congress. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [39] DALRYMPLE R A, KIRBY J T, HWANG P A. Wave diffraction due to areas of energy dissipation [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1984, 110(1): 67-79.
- [40] MENDEZ F J, LOSADA I J. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields [J]. Coastal Engineering, 2004, 51(2): 103-118.
- [41] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ J F, SÁNCHEZ-ROJAS V, MEMOS C D. Wave attenuation due to *Posidonia oceanica* meadows [J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(4): 503-514.
- [42] ZHU Longhuan, HUGUENARD K, FREDRIKSSON D W, et al. Wave attenuation by flexible vegetation (and

- p>
suspended kelp) with blade motion; analytical solutions [J].
- Advances in Water Resources*
- , 2022, 162: 104148.
- [43] VAN VEELEN T J, KARUNARATHNA H, REEVE D E. Modelling wave attenuation by quasi-flexible coastal vegetation[J]. *Coastal Engineering*, 2021, 164: 103820.
- [44] LOSADA I J, MAZA M, LARA J L. A new formulation for vegetation-induced damping under combined waves and currents[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 107: 1-13.
- [45] LUHAR M, COUTU S, INFANTES E, et al. Wave-induced velocities inside a model seagrass bed [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115 (C12): C12005.
- [46] LUHAR M, INFANTES E, ORFILA A, et al. Field observations of wave-induced streaming through a submerged seagrass (*Posidonia oceanica*) meadow [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118 (4): 1955-1968.
- [47] ABDOLAHPOUR M, HAMBLETON M, GHISALBERTI M. The wave-driven current in coastal canopies [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122 (5): 3660-3674.
- [48] PUJOL D, NEPF H. Breaker-generated turbulence in and above a seagrass meadow[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 49: 1-9.
- [49] ROS À, COLOMER J, SERRA T, et al. Experimental observations on sediment resuspension within submerged model canopies under oscillatory flow [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 91: 220-231.
- [50] ZHANG Yinghao, TANG Caihong, NEPF H. Turbulent kinetic energy in submerged model canopies under oscillatory flow[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54 (3): 1734-1750.
- [51] NEPF H M. Hydrodynamics of vegetated channels [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50 (3): 262-279.
- [52] WAN MOHTAR W H M, LEE J W, MOHAMMAD AZHA N I, et al. Incipient sediment motion based on turbulent fluctuations [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2020, 35 (2): 125-133.
- [53] LIU Chao, NEPF H. Sediment deposition within and around a finite patch of model vegetation over a range of channel velocity[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52 (1): 600-612.
- [54] CHENG Niansheng, WEI Maoxing, LU Yesheng. Critical flow velocity for incipient sediment motion in open channel flow with rigid emergent vegetation [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146 (11): 4020123.
- [55] SHAHMOHAMMADI R, AFZALIMEHR H, SUI Jueyi. Impacts of turbulent flow over a channel bed with a vegetation patch on the incipient motion of sediment[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2018, 45 (9): 803-816.
- [56] WANG Hao, TANG Hongwu, ZHAO Hanqing, et al. Incipient motion of sediment in presence of submerged flexible vegetation [J]. *Water Science and Engineering*, 2015, 8 (1): 63-67.
- [57] YANG J Q, CHUNG H, NEPF H M. The onset of sediment transport in vegetated channels predicted by turbulent kinetic energy [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43 (21): 11261-11268.
- [58] CHENG Niansheng, NGUYEN H T. Hydraulic radius for evaluating resistance induced by simulated emergent vegetation in open-channel flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137 (9): 995-1004.
- [59] WIDDOWS J, POPE N D, BRINSLEY M D. Effect of *Spartina anglica* stems on near-bed hydrodynamics, sediment erodability and morphological changes on an intertidal mudflat [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 362: 45-57.
- [60] WANG Xiang, HUAI Wenxin, CAO Zhixian. An improved formula for incipient sediment motion in vegetated open channel flows [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2022, 37 (1): 47-53.
- [61] TANG Hongwu, WANG H, LIANG D F, et al. Incipient motion of sediment in the presence of emergent rigid vegetation [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2013, 7 (3): 202-208.
- [62] 薛万云, 吴时强, 吴修锋, 等. 刚性植被区域床面泥沙起动特性[J]. *水科学进展*, 2017, 28 (6): 849-857. (XUE Wanyun, WU Shiqiang, WU Xiufeng, et al. Sediment incipient motion on movable bed in rigid vegetation environment [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28 (6): 849-857. (in Chinese))
- [63] WANG Xiang, LI Shuolin, YANG Zhonghua, et al. Incipient sediment motion in vegetated open-channel flows predicted by critical flow velocity [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2022, 34 (1): 63-68.
- [64] HUAI Wenxin, WANG Xiang, GUO Yakun, et al. Investigation of the sediment transport capacity in vegetated open channel flow [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33 (2): 386-389.
- [65] WU Weiming, HE Zhiguo. Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24 (3): 247-259.
- [66] LE BOUTEILLER C, VENDITTI J G. Sediment transport and shear stress partitioning in a vegetated flow[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51 (4): 2901-2922.
- [67] LI Yanhong, XIE Liquan, SU T C. Vertical distribution of suspended sediments above dense plants in water flow [J]. *Water*, 2020, 12 (1): 12.
- [68] LI Y, XIE L, SU T C. Profile of suspended sediment concentration in submerged vegetated shallow water flow [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56 (4): 115-125.

[69] ZHANG Yinghao, NEPF H. Wave-driven sediment resuspension within a model eelgrass meadow [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2019, 124 (4) : 1035-1053.

[70] QU Geng, PAN Shunqi, HU Chengwei, et al. Experimental study on the mechanisms of flow and sediment transport in a vegetated channel [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, 2020, 173 (5) : 249-264.

[71] ZHANG Yinghao, LAI Xijun, ZHANG Lin, et al. The influence of aquatic vegetation on flow structure and sediment deposition: a field study in Dongting Lake, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 584 : 124644.

[72] NEPF H M, SULLIVAN J A, ZAVISTOSKI R A. A model for diffusion within emergent vegetation [J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42 (8) : 1735-1745.

[73] NEPF H M. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation [J]. Water Resources Research, 1999, 35 (2) : 479-489.

[74] WADZUK B M, BURKE E. A diffusion model for low reynolds number flows through a constructed stormwater wetland [C] // Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering. Philadelphia: Drexel University, 2006.

[75] SERRA T, FERNANDO H F J, RODRÍGUEZ R V. Effects of emergent vegetation on lateral diffusion in wetlands [J]. Water Research, 2004, 38 (1) : 139-147.

[76] 惠二青. 植被之间水流特性及污染物扩散试验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.

[77] 滕素芬, 冯民权, 黄明海, 等. 柔性植被作用下横向射流污染物扩散特性研究 [C] // 汤鑫华. 中国水利学会 2019 学术年会论文集第一分册. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 6.

[78] JAMALI M, DAVARI H, SHOAEE F. Lateral dispersion in deflected emergent aquatic canopies [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2019, 19 (4) : 833-850.

[79] LOU Sha, WANG Hao, LIU Hongzhe, et al. Laboratory study of the effects of flexible vegetation on solute diffusion in unidirectional flow [J]. Environmental Sciences Europe, 2021, 33 (1) : 80.

[80] NEPF H M. Vegetated flow dynamics [M] // FAGHERAZZI S, MARANI M, BLUM L K. The Ecogeomorphology of Tidal Marshes. Washington: American Geophysical Union, 2004: 137-163.

[81] HUANG Y H, SAIERS J E, HARVEY J W, et al. Advection, dispersion, and filtration of fine particles within emergent vegetation of the Florida Everglades [J]. Water Resources Research, 2008, 44 (4) : W04408.

[82] 任珊, 冯民权. 含柔性植被明渠污染物浓度场分布规律试验研究 [J]. 环境科学学报, 2021, 41 (3) : 1011-1021. (REN Shan, FENG Minquan. Experimental study on the distribution of pollutant concentration field in open channel with flexible vegetation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41 (3) : 1011-1021. (in Chinese))

[83] XU Yuan, NEPF H. Suspended sediment concentration profile in a *Typha latifolia* canopy [J]. Water Resources Research, 2021, 57 (9) : e2021WR029902.

[84] SONNENWALD F, HART J R, WEST P, et al. Transverse and longitudinal mixing in real emergent vegetation at low velocities [J]. Water Resources Research, 2017, 53 (1) : 961-978.

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

(收稿日期: 2022 - 08 - 12 编辑: 俞云利)

(上接第 67 页)

[12] 祁媛媛, 李国栋, 李珊珊, 等. 琴键堰过流水力特性数值模拟 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16 (1) : 164-169, 175. (QI Yuanyuan, LI Guodong, LI Shanshan, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of piano-key weir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16 (1) : 164-169, 175. (in Chinese))

[13] 李珊珊. 琴键堰泄流水力特性与体型参数研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

[14] 姜铎. 琴键堰倒悬比参数优化及下游冲刷形态数值模拟研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.

[15] 章艳, 卞彬, 徐辉, 等. 配水井单侧过流下连续侧堰的过流特性 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (2) : 23-27. (ZHANG Yan, BIAN Bin, XU Hui, et al. Flow characteristics of serial side weirs with unilateral flow in a water distribution well [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2) : 23-27. (in Chinese))

[16] KWASNIEWSKI L. Application of grid convergence index in FE computation [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2013, 61 (1) : 123-128.

[17] 李国栋, 苗洲, 高蓓, 等. 琴键堰不同溢流前缘泄流特性的数值模拟研究 [J]. 水力发电学报, 2015, 34 (8) : 77-84. (LI Guodong, MIAO Zhou, GAO Bei, et al. Numerical study on discharge capacity of piano-key weir at its different overflow edges [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34 (8) : 77-84. (in Chinese))

(收稿日期: 2022 - 10 - 11 编辑: 俞云利)