

开孔促淤板周围水流紊动特性试验研究

范甜甜¹,程永舟^{1,2},黄伊偲¹,徐立君³

(1.长沙理工大学水利与环境工程学院,湖南长沙 410114;
2.水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室,湖南长沙 410114;
3.湖南水利水电职业技术学院,湖南长沙 410100)

摘要:为深入了解开孔促淤板周围的水流特性,通过室内概化水槽试验分析了开孔促淤板前后的水流紊动特性,采用声学多普勒流速仪(ADV)测量了开孔促淤板前后典型断面上的三维瞬时流速,分析了典型断面上的时均流速、紊动强度、雷诺切应力和紊动能的分布规律。试验结果表明:板后近板区出现回流区,且回流区与开孔促淤板格栅位置相对应;板后水流相对紊动强度、雷诺切应力及相对紊动能明显大于板前,开孔促淤板对板后近板区水流影响较大;随着与开孔促淤板距离的增大,回流现象消失,流速变化趋于稳定,水流相对紊动强度减小且最终趋于稳定,相对紊动能出现折减且折减率逐渐降低;靠近近板区 xOy 面雷诺切应力大于 yOz 面雷诺切应力,靠近下游 xOy 面雷诺切应力与 yOz 面雷诺切应力相差较小。

关键词:开孔促淤板;紊动特性;紊动强度;雷诺切应力;紊动能

中图分类号:TV863;TV131.2⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0068-09

Experimental study on turbulence characteristics of water flow around a perforated siltation-promoting plate//
FAN Tiantian¹, CHENG Yongzhou^{1,2}, HUANG Yicai¹, XU Lijun³ (1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Hunan Polytechnic of Water Resources and Electric Power, Changsha 410100, China)

Abstract: To have a deep insight into the turbulence characteristics of water flow around a perforated siltation-promoting plate, the change law of the turbulence characteristics before and after the plate was analyzed through an indoor generalized water tank test. The three-dimensional instantaneous flow velocity on the typical sections before and after the perforated silting-promoting plate was measured by acoustic Doppler velocimetry (ADV), and the distribution law of time-averaged flow velocity, turbulence intensity, Reynolds shear stress and turbulent kinetic energy at typical sections were also analyzed. The test results show that there is a recirculation zone in the area near the plate back, and the recirculation zone corresponds to the position of the grille of the perforated siltation-promoting plate. The relative turbulent intensity, Reynolds shear stress and relative turbulent kinetic energy behind the plate are significantly larger than those in front of the plate. The plate has a great influence on the flow in the area near the plate back. With the increase of the distance from the perforated siltation-promoting plate, the recirculation phenomenon disappears. The change of the flow velocity tends to be steady, the relative turbulent intensity decreases and finally tends to be stable, and the relative turbulent kinetic energy decreases with a decreased reduction rate. The Reynolds shear stress at the xOy plane close to the near-plate area is greater than that at the yOz plane, and the Reynolds shear stress at the xOy plane adjacent to downstream is close to that at the yOz plane.

Key words: perforated siltation-promoting plate; turbulence characteristics; turbulence intensity; Reynolds shear stress; turbulent kinetic energy

近年来河道岸滩普遍遭到侵蚀,为减缓岸滩侵蚀造成的危害,可修建整治建筑物用于调整水流及护岸。丁坝作为一种河道整治建筑物,具有护岸、防冲、促淤等作用,被广泛运用于航道整治及河道生态

修复等工程建设中^[1]。许百强等^[2]指出透水丁坝可增加坝前壅水及坝后水深。徐锡荣等^[3]分析了透水框架四面体的护岸机理,指出其具有防冲护岸效果。刘易庄等^[4]采用粒子图像测速 (particle

image velocimetry, PIV) 技术研究了丁坝间距、长度对流场和涡量的影响。韩晗等^[5]基于物理模型试验模拟了水流在连续丁坝区的回流形态。任志等^[6]通过物理模型试验研究了透水率对水力插板透水丁坝促淤效果的影响。魏文礼等^[7]指出 T 型丁坝比直丁坝更有益于改善弯道水流流态。王文森等^[8]研究了透水潜坝附近水流变化规律,指出透空率愈大,潜坝附近壅水及水跌高度愈小。毛亮等^[9]指出插板透水丁坝在减少河道主流区泥沙淤积方面有显著效果。廖艺康等^[10]提出了一种新型的固结桩式薄板丁坝,相较于传统插板丁坝,新型固结桩式薄板丁坝稳定性更好。武永新等^[11]指出主动防护类丁坝防护效果较好,但水流情况超过设定范围时,效果较差。

近年来,许多透水结构也被广泛应用于保滩护岸工程中,与实体结构会引起局部水流剧烈变化不同,透水结构对水流能量的消减较为缓和,且维护成本也相对较小^[12],如四面六边透水框架群护岸有很好的消能、减速、缓冲、促淤作用^[13],三角锥透空圆孔礁坝有良好的保滩促淤效果^[14],栅格式透空板防波堤在消减波浪能量、维护港池稳定方面有良好的应用前景^[15]。此外,张为等^[16]提出了一种可抛投的柔性透水型促淤结构;常留红等^[17]提出了一种新型四棱台透水框架结构并开展系列水槽试验研究了其防护效果。

已有研究证明水流紊动特性是影响整治建筑物稳定性的重要因素,目前关于丁坝以及透水结构周围水流紊动特性的研究较多,例如:王小明等^[18]研究了不同透空率潜坝周围的水流特性,指出透空率越大,坝后回流越小,坝后透水孔周围紊动能越大;Shampa 等^[19]分析了不同布置方式下透水丁坝的适用性,指出透水丁坝可以减小纵向速度及湍流强度;Iqbal 等^[20]指出透水丁坝周围紊动强度较不透水丁坝要小;杨中华等^[21]分析了框架后方典型断面上的流速、紊动强度、雷诺切应力及减速率的变化规律,得到了透水框架的防冲促淤机理;张婧等^[22]对比分析了 3 种不同绕流结构体对河道水流的影响,指出当纵向长度一样时,堆积体纵向、横向和垂向流速均最小;吕升奇等^[23]通过对比分析有无植物干扰下明渠均匀水流的紊动特性,得出在有植物条件下,水流脉动强度及雷诺应力均在植物顶部出现最大值;张少济等^[24]指出透水底板与不透水底板相比整体荷载较小;胡杰龙^[25]指出丁坝透水孔能够降低坝头水流流速和紊动强度;张凯等^[26]指出多孔板下游雷诺切应力、时均流速等紊动参数均呈现出锯齿状分布;文华东等^[27]研究表明,圆形与正方形开孔形式的多孔板用于浮式防波堤底部减速效果更好。此外,周珏

西等^[28]通过物理试验研究了堆积体对河道水流紊动特性的影响;唐彬欣^[29]研究分析了在不同流场参数下开孔板周围流场、床面剪切力以及减速率的变化特征,拟合了最优开孔率和开孔面积的公式。然而,关于开孔板周围紊流特性影响的研究成果较少,更缺乏对开孔板周围水流紊动特性的精细测量。

本文介绍了一种新型保滩护岸结构——开孔促淤板,并通过室内概化模型试验研究开孔促淤板的紊动特性,以为开孔促淤板在工程中的应用提供参考依据。

1 试验装置与方案

1.1 水槽系统与测量系统

试验在长沙理工大学水利实验中心的水槽中进行。水槽总长 45 m、宽 0.8 m、高 1.0 m,水槽用水来自地下水库,循环使用,采用自循环造流系统造流。水槽壁由透明有机钢化玻璃制成,水流出口布置整流栅用于调整水流,整流栅角度为 30°。开孔促淤板布置在水槽中段,距入水口 21 m,距出水口 24 m,来流视为均匀流。开孔促淤板长 0.78 m、宽 0.02 m、高 0.24 m,开孔率 $\xi = 40\%$,采用 PVC 板制作,如图 1、图 2 所示。三维流速采用 NorTek 公司生产的剖面流速仪 Vetrino Profiler 测量,采样频率为 50 Hz,每次测量时间为 60 s。根据声学多普勒流速仪 (ADV) 测量最佳范围,从水槽底端位置测至水面线以下 4 cm,具体试验布置如图 3、图 4 所示。水槽流速方向设为 y 轴,宽度方向设为 x 轴,水深方向设为 z 轴,水深为 H 。开孔促淤板底边中点为 y 轴坐标原点,上游为正向,下游为负向。

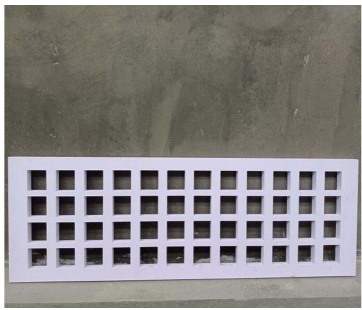


图 1 开孔促淤板结构

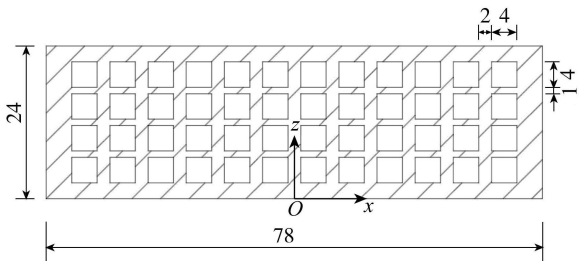


图 2 开孔促淤板结构模型(单位:cm)



图3 试验布置

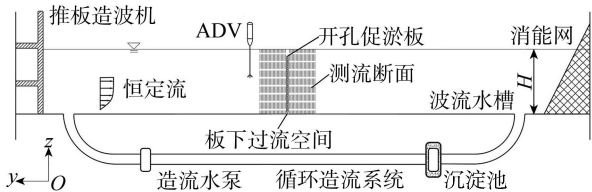


图4 试验平面布置示意图

1.2 试验方案

在开孔促淤板的板前和板后 1 m 范围内进行密集流速垂线测量,在板前和板后 1 m 内每隔 5 cm 布置 1 个测流断面,总共 40 个测流断面。沿水深方向测量时每隔 1 mm 进行断面流速采集,测流断面布置如图 4、图 5 所示。

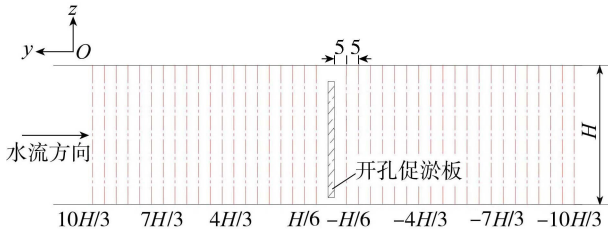


图5 测流断面布置示意图(单位:cm)

试验采用恒定流,水深为 0.30 m,开孔促淤板用卡槽固定在水槽中,与槽底保持 2 cm 的距离。以 Y 作为测流断面与开孔促淤板之间的距离,以距离 Y 与水深 H 比表示测流断面所在位置,则 40 个测流断面位置分别为板前 $Y = H/6 \sim 10H/3$ 和板后 $Y = -H/6 \sim -10H/3$ 。试验工况如表 1 所示。

表1 试验工况

工况编号	开孔率/%	布置高度/m	水深/m	来流流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	40	0.02	0.30	0.2
2	40	0.02	0.30	0.3
3	40	0.02	0.30	0.4
4	40	0.02	0.30	0.5
5	40	0.02	0.30	0.6

1.3 试验数据处理方法

为减少干扰数据,试验中过滤掉信噪比低于 15 dB、相关系数小于 85% 的数据,设置加速度阈值为 1g,进一步筛选从而得到最终可用数据。通过

MATLAB 进行数据提取分析。

2 板周围流场分布规律

2.1 板周围的流场分区

水流结构在开孔促淤板周围流态分布较复杂,结合试验现场观测,将板周围流场进行分区,如图 6 所示。开孔促淤板上游段水面壅高,形成上游壅水区(区域 1),区域 2 为板前回流区,区域 3 为板后水流引起的紊动区域,区域 4 为板后回流区。

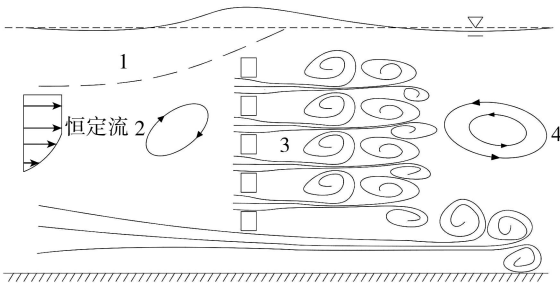


图6 开孔促淤板周围的流场分布示意图

2.2 板周围水流时均流速分布规律

通过测量得到瞬时流场分布,在此基础上进行时间平均,得到流场的时均流速($\bar{v}$)分布,进而研究开孔促淤板对流场分布产生的影响。

因开孔促淤板对上游段水流影响较小,上游水流流速沿程分布较均匀,因此只选取上游两个典型断面($H/6$ 断面、 $H/3$ 断面)进行流速分布规律分析;开孔促淤板对下游段水流影响较大,下游段水流流速沿程变化幅度大,故下游选取 4 个典型断面($-H/6$ 断面、 $-H/3$ 断面、 $-5H/3$ 断面、 $-10H/3$ 断面)进行分析。

2.2.1 板前流速分布

板前断面流速如图 7 所示,板前整体流速变化规律基本一致,这是由于上游水体主要受开孔促淤板的阻水作用影响。上游断面垂线流速均在 $0.07H$ 、 $0.26H$ 、 $0.52H$ 、 $0.76H$ 处减小,并趋向于 0,在不同来流流速(v)下,各断面减速区域分布范围基本相同,且减速区域与格栅位置相对应。

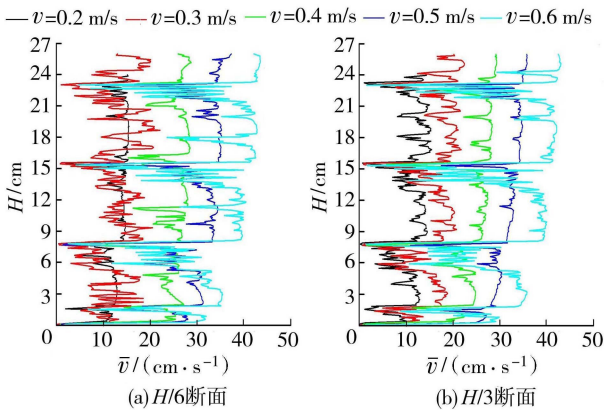


图7 板前断面流速分布

2.2.2 板后流速分布

板后流速出现不同程度的降低,如图8(a)所示,板后 $-H/6$ 断面出现流速负值区和回流区,回流区域与格栅位置相对应,且来流流速越大,回流区域越大。板后 $-H/6$ 断面流速小于板前是因为板后回流抵消掉一部分水流的流速。槽底近壁区($<0.07H$)流速突增,这是因为槽底近壁区不受开孔促淤板阻挡,水流较集中。如图8(b)所示,在板后 $-H/3$ 断面处,来流流速较低时,断面流速都为正值,且在格栅附近有趋近0的点,当来流流速为0.5 m/s或0.6 m/s时,断面偶尔出现流速负值区,槽底近壁区流速仍大于断面平均流速,但相较于 $-H/6$ 断面槽底近壁区流速要小,这是因为板后 $-H/3$ 断面受板后回流影响较小。如图8(c)(d)所示,下游 $-5H/3$ 断面和 $-10H/3$ 断面受开孔促淤板影响流速明显减小, $-5H/3$ 断面回流现象消失,整体流速变化规律基本一致且趋于稳定,在 $0.07H$ 、 $0.26H$ 、 $0.52H$ 、 $0.76H$ 处流速减小,并趋向于0,对应格栅位置处出现减速区域。随来流流速的增大, $-10H/3$ 断面对应格栅区域出现流速锐减的点,但不再趋向于0,槽底近壁区流速明显降低,且小于断面平均流速。

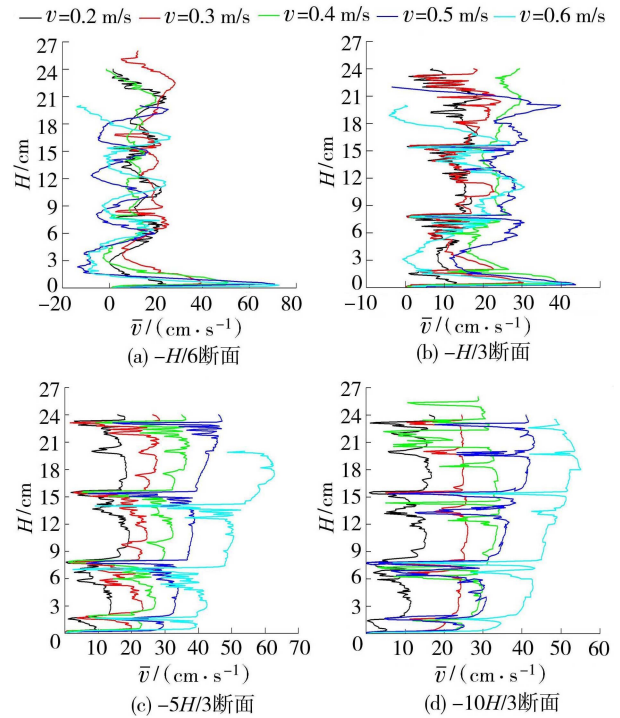


图8 板后断面流速分布

3 板周围水流紊动特性

3.1 水流紊动强度

紊动强度是水流紊动性能的基本参数,常表示为瞬时流速的波动强度,用脉动流速的均方根来表示:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2}{N}} \tag{1}$$

式中: σ_u 为纵向紊动强度; u_i 为纵向瞬时流速; $\bar{u}$ 为纵向时均流速; N 为采样数。

引入各来流流速下未放置开孔促淤板时水槽断面的平均紊动强度 $\bar{\sigma}$ 作为基础量,对周围各断面上的紊动强度进行无量纲处理,记为 $\sigma_u/\bar{\sigma}$ (相对紊动强度)。选取水流紊动较剧烈的板前 $H/6$ 断面、板后 $-H/6$ 断面,以及水流紊动较平缓的板前 $10H/3$ 断面、板后 $-10H/3$ 断面共4个典型断面进行水流相对紊动强度分布规律及来流流速为0.2 m/s和0.5 m/s时水槽沿程断面相对紊动强度分布规律分析。

3.1.1 板前水流紊动强度

板前断面水流相对紊动强度如图9和图10所示,板前断面水流相对稳定,由图9(a)可见,沿水深方向在 $0 \sim 0.06H$ 、 $0.15H \sim 0.28H$ 、 $0.30H \sim 0.45H$ 、 $0.47H \sim 0.53H$ 、 $0.66H \sim 0.76H$ (对应开孔位置)区域相对紊动强度增大,各来流流速下板前水体相对紊动强度主要位于1~2之间。结合图9(b),板前 $10H/3$ 断面相对紊动强度变化规律与 $H/6$ 断面趋于一致。由图10(a)(b)可见,在来流流速为0.2 m/s和0.5 m/s时,板前各断面的相对紊动强度分布趋于一致且接近1,说明开孔促淤板结构对板前水流紊动强度影响相对较小。

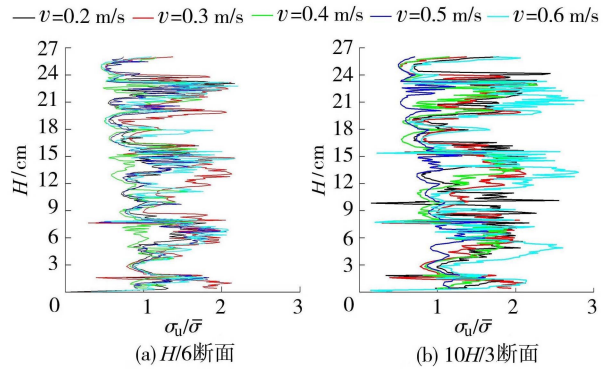


图9 不同来流流速下板前断面水流相对紊动强度分布

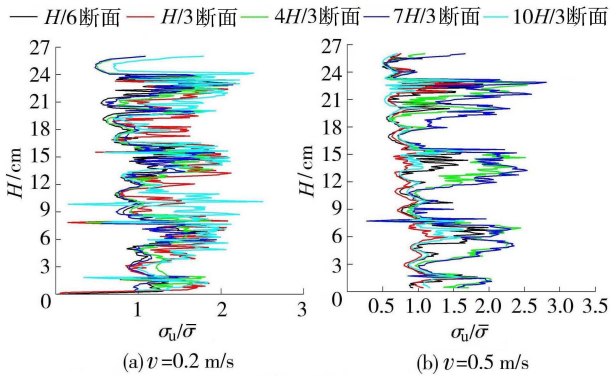


图10 板前不同断面水流相对紊动强度分布

3.1.2 板后水流紊动强度

开孔促淤板的透水性使得板后紊动强度的变化更为复杂。如图 11(a)所示,板后 $-H/6$ 断面水流紊动剧烈,相对紊动强度最大值常在槽底近壁区出现,沿水深方向变化较弱,整体波动较强。来流流速为 0.2 m/s 、 0.3 m/s 、 0.4 m/s 、 0.5 m/s 、 0.6 m/s 所对应的断面平均相对紊动强度分别为 7.80 、 9.44 、 10.86 、 13.24 和 14.07 ,来流流速越大,紊动越剧烈。板后 $-H/6$ 断面相对紊动强度显著大于板前,是因为流经透水孔处的水流在板后扩散产生水跃现象,漫过开孔促淤板上部的水流产生水跌现象,两种现象相互作用故使板后相对紊动强度显著增大。如图 11(b)所示,板后 $-10H/3$ 断面和各来流流速下相对紊动强度分布规律趋于一致,在距槽底高度小于 $0.2H$ 处水体相对紊动强度较小并保持相对稳定,随着水深增大,相对紊动强度整体呈现增大的趋势,且格栅处对应相对紊动强度明显小于断面整体平均紊动强度,板后 $-10H/3$ 断面水体相对紊动强度远小于板后 $-H/6$ 断面水体的相对紊动强度,这是因为下游水流受开孔促淤板的影响随距离增大而逐渐减小。

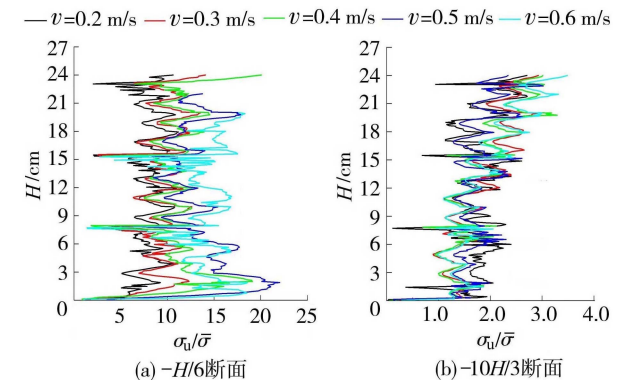


图 11 不同来流流速下板后断面水流相对紊动强度分布

如图 12(a)所示,下游 $-H/6$ 、 $-H/3$ 、 $-4H/3$ 、 $-7H/3$ 、 $-10H/3$ 断面平均相对紊动强度分别为 7.80 、 5.81 、 2.59 、 1.75 和 1.76 ,板后 $-H/6$ 断面和 $-H/3$ 断面相对紊动强度较大,折减率低, $-H/3$ 断面至

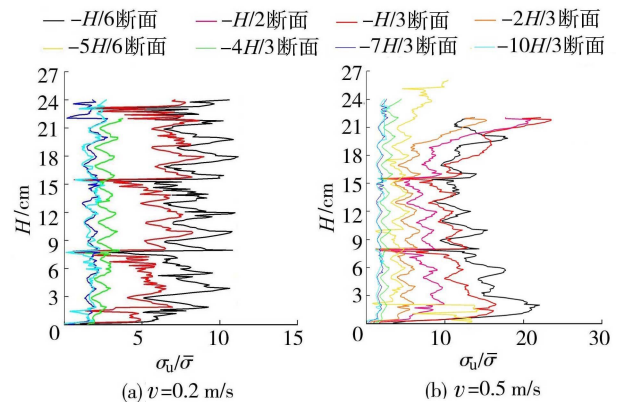


图 12 板后不同断面水流相对紊动强度分布

$-4H/3$ 断面相对紊动强度锐减,折减率较高,下游 $-7H/3$ 断面及 $-10H/3$ 断面相对紊动强度变化较小且逐渐趋于一致,沿水深方向,各断面相对紊动强度变化规律基本相同。如图 12(b)所示,来流流速增大为 0.5 m/s 时,板后 $-H/6$ 断面相对紊动强度最大值在槽底近壁区出现, $-H/3$ 断面至 $-2H/3$ 断面相对紊动强度最大值在 $0.7H$ 左右处出现,说明来流流速越大,板下过流空间对 $-H/6$ 断面相对紊动强度影响较大,开孔促淤板对下游 $-2H/3$ 断面内整体相对紊动强度影响相对较大。水流通过开孔促淤板时,受开孔促淤板的阻挡,过水断面面积缩小,甚至有轻微水跌现象,板后附近甚至出现回流区,使得水流紊动剧烈,随着水流流向出口,紊动逐渐降低。

3.2 板周围水流雷诺切应力

雷诺切应力是由紊流的液体质点相互混掺而引起的附加切应力,其分布及大小影响着岸坡冲刷。研究开孔促淤板周围水体雷诺切应力分布对研究开孔促淤板对岸坡冲刷有重要意义。雷诺切应力可分别表示为

$$\tau_{uw} = -\rho \overline{u'w'} \quad \tau_{uw} = -\rho \overline{u'v'} \quad \tau_{vw} = -\rho \overline{v'w'} \quad (2)$$

式中: τ_{uw} 、 τ_{uv} 、 τ_{vw} 分别为 xOz 面、 xOy 面和 yOz 面雷诺切应力; u' 、 v' 、 w' 分别为 x 、 y 、 z 向的脉动流速; ρ 为水的密度。

分析发现, τ_{uw} 值非常小且沿程变化也小,所以只对 xOy 面雷诺切应力 τ_{uv} 和 yOz 面雷诺切应力 τ_{vw} 进行分析。试验中,密度 ρ 为常数,且雷诺切应力值为正数,故使用 $|\overline{u'v'}|$ 及 $|\overline{v'w'}|$ 垂线分布分别表示 xOy 面和 yOz 面雷诺切应力 τ_{uv} 和 τ_{vw} 的垂线分布。

3.2.1 板前水流雷诺切应力

选取板前 $H/6$ 断面进行雷诺切应力分布规律分析。如图 13所示,可以发现各来流流速下板前 $H/6$ 断面雷诺切应力较小,说明开孔促淤板对板前水体雷诺切应力影响较小。

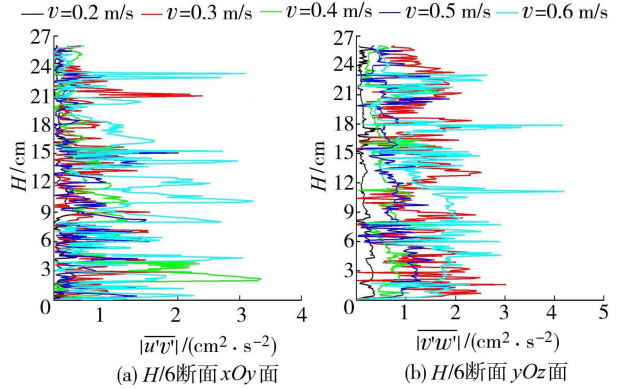


图 13 板前断面水流雷诺切应力分布

3.2.2 板后水流雷诺切应力

板后水流雷诺切应力明显大于板前水流雷诺切

应力。先选取来流流速为 0.4 m/s 分析板后各断面 xOy 面和 yOz 面雷诺切应力分布规律,由图 14 可见,板后 $-H/6$ 断面雷诺切应力较大,且波动较大,沿水深垂向方向无明显变化规律。 $-5H/6$ 断面到 $-10H/3$ 断面的雷诺切应力相差很小, $-H/6$ 断面到 $-5H/3$ 断面雷诺切应力与其他 3 个断面相比明显较大,这是因为 $-H/6$ 断面到 $-5H/3$ 断面距离开孔促淤板较近,受开孔促淤板的阻水、透水作用影响更大。 xOy 面最大雷诺切应力在板后 $-H/6$ 断面产生。

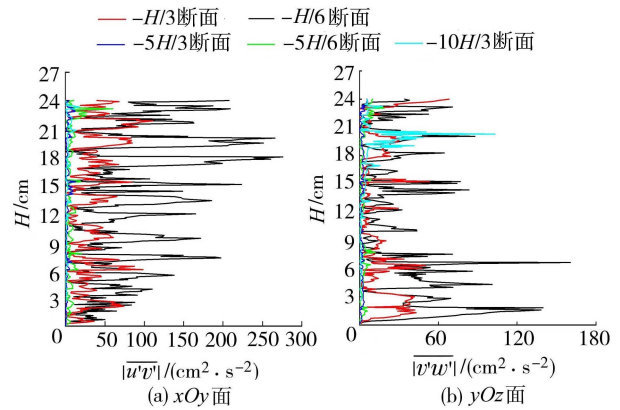


图 14 板后断面水流雷诺切应力分布 ($v=0.4\text{ m/s}$)

为了进一步分析雷诺切应力变化规律,选取板后 $-H/6$ 断面和 $-5H/6$ 断面进行不同来流流速下雷诺切应力变化规律分析,结果如图 15 所示。由图 15(a) 可知,随着来流流速的增大,板后 $-H/6$ 断面雷诺切应力增大,且来流流速越大,增幅越大,开孔促淤板格栅位置对应雷诺切应力相较于透水孔处明显较大。如图 15(b) 所示,来流流速较小 ($0.2 \sim v=0.2\text{ m/s}$ $v=0.3\text{ m/s}$ $v=0.4\text{ m/s}$ $v=0.5\text{ m/s}$ $v=0.6\text{ m/s}$

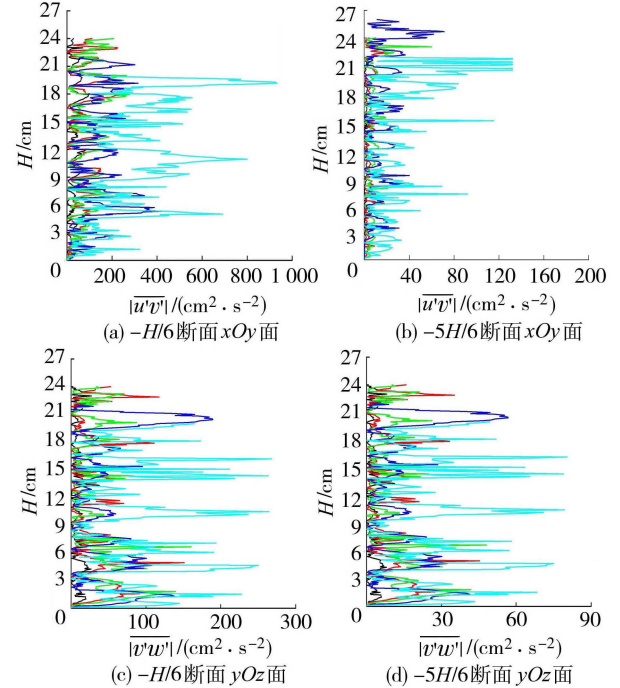


图 15 不同来流流速下板后断面水流雷诺切应力分布

0.4 m/s) 时,板后 $-5H/6$ 断面 xOy 面雷诺切应力较小,趋近于 0,来流流速较大 ($0.5 \sim 0.6\text{ m/s}$) 时,板后 $-5H/6$ 断面在 $0.5H$ 以上区域 xOy 面雷诺切应力相对较大,来流流速越大,开孔促淤板对水流雷诺切应力影响越大。

如图 15(c) 所示,下游 $-H/6$ 断面 yOz 面雷诺切应力平均值在来流流速为 0.2 m/s 、 0.3 m/s 、 0.4 m/s 、 0.5 m/s 、 0.6 m/s 时分别为 7.68 、 23.41 、 28.68 、 43.30 、 76.42 。来流流速越大,板后 $-H/6$ 断面雷诺切应力越大。如图 15(d) 所示,来流流速较小 ($0.2 \sim 0.4\text{ m/s}$) 时,板后 $-5H/6$ 断面 yOz 面雷诺切应力平均值均小于 1,来流流速较大 ($0.5 \sim 0.6\text{ m/s}$) 时,板后 $-5H/6$ 断面 yOz 面雷诺切应力受开孔促淤板影响变大。在板后区域,板后 $-H/6$ 断面 xOy 面雷诺切应力大于 yOz 面雷诺切应力,而随着与开孔促淤板距离的增大,板后 $-5H/6$ 断面 xOy 面雷诺切应力稍大于 yOz 面雷诺切应力。这是因为当水流流经透水孔时会产生扩散或射流现象从而形成二次流,使得水流雷诺切应力增大,随水流逐渐恢复到天然流态时,雷诺切应力逐渐减小。

3.3 板周围水流紊动能

紊动能可以较为直观地反映出水流整体的紊动状况,同时在能量转换和传递中起重要作用。紊动能 T_{KE} 表达式为

$$T_{KE} = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2 \tag{3}$$

引入各来流流速下未放置开孔促淤板时水槽断面的平均紊动能 T_{KE0} 作为基础量,对周围各断面上的紊动能进行无量纲处理,记为 T_{KE}/T_{KE0} 。

由于板前水流紊动能相比板后水流紊动能较小,且分布均匀,所以本文只讨论板后水流紊动能分布。

先选取来流流速为 0.2 m/s 和 0.6 m/s 分析板后沿程断面相对紊动能变化规律。如图 16(a) 所示,可以发现 $-H/6$ 断面相对紊动能明显较大,且相

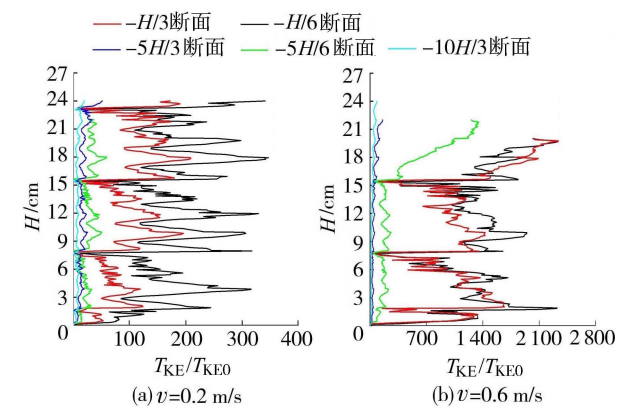


图 16 板后不同断面水流相对紊动能分布

对紊动能最大值出现在板后 $-H/6$ 断面处,而在下游断面($-10H/3$ 断面)相对紊动能较小。随着与开孔促淤板距离的增大,相对紊动能出现折减,且折减率逐渐降低,最终随水流恢复到平稳状态时,相对紊动强度显著降低。随着与槽底距离不断增大,相对紊动能波动幅度增大。如图16(b)所示,当来流流速增大至 0.6 m/s 时,板后 $-H/6$ 断面和 $-H/3$ 断面相对紊动能明显较大,相对紊动能折减率随着与开孔促淤板距离的增大呈现先增大后减小的趋势,且相对紊动能折减率最大值出现在板后 $-H/3$ 断面至 $-5H/6$ 断面内,板后 $-5H/6$ 断面至 $-10H/3$ 断面内相对紊动能折减率减小。且来流流速越大,水体紊动越大,开孔促淤板对水体紊动影响越大。在下游,各断面紊动能最大值几乎都出现在接近自由水面处,这是因为在靠近自由水面区域水流流速较大,动量剧烈交换从而产生较大的能量。

为了进一步了解紊动能变化规律,选取板后 $-H/6$ 断面和 $-10H/3$ 断面进行不同来流流速下相对紊动能变化规律分析。从单个断面上分析,如图17(a)所示,板后 $-H/6$ 断面在不同来流流速下相对紊动能分布趋于一致,且来流流速越大,相对紊动能越大。板后 $-10H/3$ 断面水流相对紊动能明显小于板后 $-H/6$ 断面水流的相对紊动能(图17(b)),这是因为下游水流受到开孔促淤板的影响随距离增大而逐渐减小。在距槽底高度小于 $0.2H$ 处相对紊动能大小基本一致,而在水槽的核心区域($>0.2H$)相对紊动能逐渐增大。

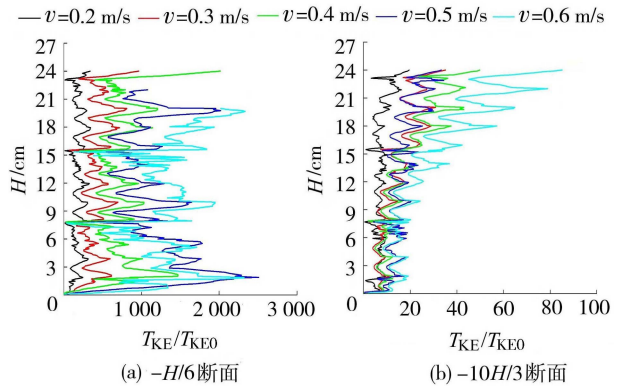


图17 不同来流流速下板后断面水流相对紊动能分布

从上述开孔促淤板周围水流紊动特性的影响分析可以发现,开孔促淤板前后水流紊动发生剧烈变化,这是由于开孔促淤板的阻水和透水作用导致水流流态发生变化,进而导致开孔促淤板与水流交界处发生紊动特性变化。因开孔促淤板具有阻水作用,导致板上游水面壅高,形成壅水区,减缓上游流速,所以当开孔促淤板上游水流流速小于河床及岸坡泥沙起沙起冲流速时,开孔促淤板上游将会有一

定程度的泥沙淤积。

4 结 论

a. 板后近板区($-H/6$ 断面与 $-H/3$ 断面)出现回流区,且回流区与开孔促淤板格栅位置相对应,随着与开孔促淤板距离的增大,回流现象消失,各断面出现减速区域且与开孔促淤板格栅位置相对应,流速变化规律趋于一致。

b. 板后近板区水流相对紊动强度明显大于板前,开孔促淤板对板后近板区水流相对紊动强度影响较大,随着与开孔促淤板距离的增大,相对紊动强度减小且趋于一致。

c. 板后 $-H/6$ 断面 xOy 面水流雷诺切应力大于 yOz 面雷诺切应力,随着与开孔促淤板距离的增大,板后水流雷诺切应力减小,板后 $-5H/6$ 断面 xOy 面水流雷诺切应力与 yOz 面雷诺切应力相差较小。

d. 板后 $-H/6$ 断面处产生较大相对紊动能,随着与开孔促淤板距离的增大相对紊动能逐渐减小,沿水深方向各断面相对紊动能最大值几乎都在接近自由水面处产生。

参考文献:

[1] 常留红,王瀚锐,章富君,等. 梯形透空丁坝局部水动力特性对底栖动物生境演替的影响机制[J]. 水资源保护,2023,39(1):216-224. (CHANG Lihong, WANG Hanrui, ZHANG Fujun, et al. Influence mechanism of local hydrodynamic characteristics of trapezoidal hollow spur dike on benthos habitat succession[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):216-224. (in Chinese))

[2] 许百强,喻涛,王平义,等. 长江上游透水丁坝水面线分布试验研究[J]. 水利水运工程学报,2019(5):62-68. (XU Baiqiang, YU Tao, WANG Pingyi, et al. Experimental studies on flow profile of permeable spur dikes in upper reaches of Yangtze River [J]. Hydro-Science and Engineering,2019(5):62-68. (in Chinese))

[3] 徐锡荣,刘刚,徐松年,等. 透水框架四面体防洪护岸试验研究[J]. 水利水电科技进展,2007,27(5):65-68. (XU Xirong, LIU Gang, XU Songnian, et al. Experimental study on flood control and bank protection by tetrahedron permeable frames [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(5):65-68. (in Chinese))

[4] 刘易庄,蒋昌波,邓斌,等. 淹没双丁坝间水流结构特性PIV试验[J]. 水利水电科技进展,2015,35(6):26-30. (LIU Yizhuang, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. PIV experiment on flow characteristics between submerged double spur dikes [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(6):26-30. (in Chinese))

- [5] 韩晗,张曼,林斌良,等. 连续丁坝回流特性实验研究[J]. 水力发电学报,2017,36(10):84-92. (HAN Han, ZHANG Man, LIN Binliang, et al. Experiment on flow circulations behind spur dikes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (10) : 84-92. (in Chinese))
- [6] 任志,李玉建,侍克斌,等. 不同透水率对水力插板透水丁坝防冲促淤效果的试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):172-174. (REN Zhi, LI Yujian, SHI Kebin, et al. Experiment of scour prevention and sedimentation promotion effect for hydraulic flashboard permeable spur dike in different water permeability rates [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016,27(1):172-174. (in Chinese))
- [7] 魏文礼,郭扬扬,张泽伟,等. 60°弯道丁坝水流水力特性数值模拟研究[J]. 水力发电学报,2017,36(9):91-99. (WEI Wenli, GUO Yangyang, ZHANG Zewei, et al. Hydraulic characteristics of straight and T-shape spur dikes in 60° channel bend by numerical simulation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (9) : 91-99. (in Chinese))
- [8] 王文森,程永舟,王小明,等. 梯形透水潜坝附近水面线及透水率[J]. 水利水电科技进展,2019,39(2):66-71. (WANG Wensen, CHENG Yongzhou, WANG Xiaoming, et al. Water surface profile and permeable rate near a trapezoidal permeable submerged dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (2) : 66-71. (in Chinese))
- [9] 毛亮,李玉建,李鹤,等. 插板透水丁坝对河道输水输沙能力的影响[J]. 水电能源科学,2021,39(12):89-92. (MAO Liang, LI Yujian, LI He, et al. Influence of permeable sheet piling spur dike on water and sediment transport capacity of river [J]. Water Resources and Power, 2021, 39 (12) : 89-92. (in Chinese))
- [10] 廖艺康,李富春,黄本胜,等. 一种固结桩式薄板丁坝及其桩体的抗倾覆能力[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):82-88. (LIAO Yikang, LI Fuchun, HUANG Bensheng, et al. A flashboard spur dike with consolidation pile and its anti-overturning ability [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2) : 82-88. (in Chinese))
- [11] 武永新,王建家,苑希民. 丁坝工程冲刷与防护措施研究综述[J]. 自然灾害学报,2020,29(1):1-10. (WU Yongxin, WANG Jianjia, YUAN Ximin. Research summary on scouring and protection safety of spur dike [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29 (1) : 1-10. (in Chinese))
- [12] 尚倩倩,许慧,李国斌,等. 刚性透水结构作用下水流泥沙特性研究综述[J]. 水运工程,2016(3):95-101. (SHANG Qianqian, XU Hui, LI Guobin, et al. Flow and sediment characteristics near rigid permeable structures [J]. Port & Waterway Engineering, 2016 (3) : 95-101. (in Chinese))
- [13] 王南海,张文捷,王玢. 新型护岸技术:四面六边透水框架群在长江护岸工程中的应用[J]. 长江科学院院报,1999,16(2):11-16. (WANG Nanhai, ZHANG Wenjie, WANG Bin, et al. Application of a new technology of bank protection employing tetrahedron-like penetrating frame groups in Yangtze River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16 (2) : 11-16. (in Chinese))
- [14] 张志涛,拾兵,王俊杰. 单排三角锥透空圆孔礁坝保滩促淤的试验研究[J]. 水利水运工程学报,2020(3):61-67. (ZHANG Zhitao, SHI Bing, WANG Junjie. Experimental study on the silting and shoal protection of single row triangular cone perforated circular-hole reef dam [J]. Hydro-Science and Engineering, 2020 (3) : 61-67. (in Chinese))
- [15] 程永舟,常佳夫,杨小桦,等. 规则波作用下透空格栅板式防波堤波浪力试验研究[J]. 海洋通报,2016,35(6):641-648. (CHENG Yongzhou, CHANG Jiafu, YANG Xiaohua, et al. Experimental research of the wave force on the grille plate breakwater under the regular wave action [J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35 (6) : 641-648. (in Chinese))
- [16] 张为,李义天,王秀英,等. 透水结构促淤试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2005,37(6):31-37. (ZHANG Wei, LI Yitian, WANG Xiying, et al. Experimental study on deposition promotion of permeable structure [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2005, 37 (6) : 31-37. (in Chinese))
- [17] 常留红,杨思宇,徐斌,等. 四棱台透水框架水动力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):482-486. (CHANG LiuHong, YANG Siyu, XU Bin, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of tetrahedron permeable frames [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (5) : 482-486. (in Chinese))
- [18] 王小明,程永舟,常留红,等. 梯形透水潜坝三维水流特性的数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):51-56. (WANG Xiaoming, CHENG Yongzhou, CHANG LiuHong, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow characteristics of trapezoidal permeable submerged dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (5) : 51-56. (in Chinese))
- [19] SHAMPA, HASEGAWA Y, NAKAGAWA H, et al. Three-dimensional flow characteristics in slit-type permeable spur dike fields: efficacy in riverbank protection [J]. Water, 2020, 12 (4) : w12040964
- [20] IQBAL S, PASHA G A, GHANI U, et al. Flow dynamics around permeable spur dike in a rectangular channel [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46 (5) : 4999-5011.
- [21] 杨中华,白凤鹏,胡朝阳. 两种布置方式下的四面六边透水框架周边流场的PIV试验研究[J]. 应用基础与工

- 程科学学报,2014,22(5):877-886. (YANG Zhonghua, BAI Fengpeng, HU Zhaoyang. PIV experiments of flow around the tetrahedron frame under two different arrangements [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2014,22(5):877-886. (in Chinese))
- [22] 张婧,王东,何岸霞,等.不同绕流结构对河道水流的影响[J].水利水电科技进展,2018,38(6):26-31. (ZHANG Jing,WANG Dong,HE Anxia,et al. Influence of different structures on channel flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(6):26-31. (in Chinese))
- [23] 吕升奇,唐洪武,闫静.有无植物条件下明渠水流紊动特性对比[J].水利水电科技进展,2007,27(6):64-68. (LYU Shengqi,TANG Hongwu,YAN Jing. Comparison of turbulence characteristics of water flow in open channels with and without vegetations [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(6):64-68. (in Chinese))
- [24] 张少济,杨敏.消力塘透水底板脉动压力特性试验研究[J].水力发电学报,2010,29(6):85-89. (ZHANG Shaoji,YANG Min. Experimental study on characteristics of pressure fluctuations on the pervious bottom slab of a plunge pool [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(6):85-89. (in Chinese))
- [25] 胡杰龙.新型透水丁坝水力特性及其对鱼类行为影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [26] 张凯,董志勇,赵文倩,等.三角孔多孔板下游空化流场的PIV剖析[J].水力发电学报,2017,36(10):56-64. (ZHANG Kai,DONG Zhiyong,ZHAO Wenqian,et al. PIV analysis of cavitating water flows behind triangular multi-orifice plates [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(10):56-64. (in Chinese))
- [27] 文华东,王彬,段文杰,等.基于单相流模型的水下多孔板减流特性影响因素数值仿真研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(1):121-125. (WEN Huadong,WANG Bin,DUAN Wenjie,et al. Numerical simulation research on influencing factors of underwater multi-orifice plate flow reduction characteristics based on single-phase flow model [J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering),2023,47(1):121-125. (in Chinese))
- [28] 周珏西,张婧,何岸霞.堆积体对近床面水流紊动强度试验研究[J].水力发电学报,2018,37(4):49-59. (ZHOU Juexi,ZHANG Jing,HE Anxia. Experimental study on turbulent intensity of near-bed flows in rivers affected by deposit [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2018,37(4):49-59. (in Chinese))
- [29] 唐彬欣.开孔促淤板水流特性研究[D].长沙:长沙理工大学,2021.

(收稿日期:2022-06-04 编辑:熊水斌)

(上接第54页)

- [25] 李波.水库生态需水计算方法对比浅析[J].治淮,2021(1):14-16. (LI Bo. Comparison of calculation methods for reservoir ecological water demand [J]. Governing Huai River,2021(1):14-16. (in Chinese))
- [26] 曹昀.江滩湿地植物恢复的影响因子与技术研究[D].南京:南京师范大学,2007.
- [27] 袁赛波,张晓可,刘学勤,等.长江中下游湖泊水生植被的生态水位管理策略[J].水生生物学报,2019,43(增刊1):104-109. (YUAN Saibo,ZHANG Xiaoke,LIU Xueqin,et al. Ecological water level management strategy for aquatic vegetation in the mid-lower Yangtze shallow lakes [J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2019(Sup1):104-109. (in Chinese))
- [28] 周楠楠,王赢,高顺峰,等.两种不同根系特征沉水植物对沉积物剖面不同形态磷的影响[J].环境科学学报,2021,41(6):2222-2228. (ZHOU Nannan,WANG Ying,GAO Shunfeng,et al. Effects of two submerged macrophytes with different root systems on different fractions of phosphorus in sediment profiles [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2021,41(6):2222-2228. (in Chinese))
- [29] 张嵘梅,马博馨,杨志杰,等.沉水植物苦草属在水体环境修复中的研究进展和应用现状[J].中国农学通报,2016,32(28):144-154. (ZHANG Rongmei,MA Boxin,YANG Zhijie,et al. Research advances and application situation of vallisneria in water environmental restoration [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2016,32(28):144-154. (in Chinese))
- [30] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志:第8卷[M].北京:科学出版社,1992:177-179.
- [31] 苏守德.南京玄武湖生态治理工程全面开工[J].湖泊科学,1998,10(1):96. (SU Shoude. Comprehensive construction of Nanjing Xuanwu Lake ecological control project [J]. Journal of Lake Sciences,1998,10(1):96. (in Chinese))
- [32] 王瑞,何亮,张萌,等.中国苦草属(*Vallisneria*)植物萌发与生长的影响因素[J].湖泊科学,2021,33(5):1315-1333. (WANG Rui,HE Liang,ZHANG Meng,et al. Factors on seed germination,tuber sprout and plant growth of *Vallisneria* species in China [J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(5):1315-1333. (in Chinese))
- [33] 陈昌才.巢湖水生植物对生态水位的需求研究[J].中国农村水利水电,2013(2):4-7. (CHEN Changcai. A study of ecological water level requirement of Chaohu aquatic plant [J]. China Rural Water and Hydropower,2013(2):4-7. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-27 编辑:俞云利)