

## 刚性植物对污染物输移扩散规律的研究

郝文龙, 朱长军, 常向萍

(河北工程大学 城市建设学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 在矩形平底水槽中, 用 PVC 圆柱棒模拟了刚性植物, 用罗丹明溶液作为指示剂模拟了植物对污染物的输移扩散的影响。结果表明: 污染物浓度垂向分布的最大值随时间的增加向水槽底部移动。这是因为植物的存在使水流的形态发生了改变, 植物层水流的流速降低而滞留了水中的污染物质。污染物浓度梯度随时间的增加越来越小, 浓度沿水深分布趋于均匀。这是因为植物增强了水流的紊动特性, 污染物的垂向扩散作用增大, 降低了下游水体污染物的浓度, 控制了下游水体的污染状况。

**关键词:** 植物; 罗丹明; 污染物

**中图分类号:** TV8

**文献标识码:** A

### Study on the effect of rigid vegetation on the pollutant transport in open channels

HAO Wen-long, ZHU Chang-jun, CHANG Xiang-ping

(College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** In the study of the effects of vegetation on the pollutant transport, PVC cylindrical rods are simulated as rigid plants and Rhodamine is adopted as tracer substance. The experiments were conducted on a rectangular flume. The result shows that the maximum of concentration of contaminants in vertical direction moves to the bottom of the tank with the time goes on. Because of the plants, the flow structure change and the velocity in the plant layer decrease. So contaminants can be detained in the areas of vegetation. Concentration gradient becomes smaller and smaller with the time goes on and the distribution of concentration is uniform. Turbulent flow effect will be enhanced under the conditions of vegetation, increasing the vertical diffusion of pollutants, decreasing the concentration of downstream contaminants. So the downstream water pollution is under control.

**Key words:** vegetation; Rhodamine; pollutant

在天然河道中, 由于植物的存在, 水流流速在时间和空间上的不确定性增强, 紊动强度和雷诺应力的空间分布也发生了变化, 而且由于植物的存在, 改变了水体的紊动能和耗散率, 进而改变了污染物的扩散系数。这些因素都影响着污染物在植物河道中的输移扩散。开展植物明渠污染物输移扩散规律的研究对水环境、水动力学以及水土保持都有很重要的意义。

目前, 国内外对植物河道对污染物的输移扩散的研究还处于需进一步研究阶段。Nepf 等人<sup>[1]</sup>

建立了挺水植物条件下被动标量的扩散模型, 他们认为挺水植物水流的紊动主要由植物后部的尾流产生。随后, Nepf 又进一步对不同植物雷诺数下的扩散系数进行了研究, 提出了污染物的扩散模型。研究结果表明, 挺水植物下的扩散主要由下列因素共同决定: ①植物尾流引起的紊动扩散; ②植物的物理阻挡改变了污染物的输移路径, 进而形成的机械扩散。为了研究植物对纵向离散的影响, Nepf<sup>[2]</sup>又以罗丹明为示踪剂进行了试验, 实验结果表明, 由于植物的存在, 垂向剪切减弱, 而

水流紊动和垂向扩散加强,这整体削弱了纵向离散;植物后部的“死区”一定程度上提高了纵向离散。Tanino 和 Nepf<sup>[3-4]</sup>又进一步对不同雷诺数植物横向离散进行了集中研究,并得出了植物雷诺数、植物体积分数和横向离散系数之间的关系。并建立了植物条件下污染物横向离散模型,通过实验的验证,证明了模型的可靠性。姜新佩<sup>[5]</sup>在研究人工湿地中植物对河流净化效果时发现,对 TP、COD<sub>Mn</sub> 等指标进行测量,出水水质均能达到 II 类水甚至 I 类水标准,说明在河流浅滩中种植植物对河流中污染物的吸收具有促进作用。

## 1 试验概况

本试验是在河北工程大学水利馆内的水槽中进行的。水槽布置如图 1 所示。水槽长 7 m,宽 0.5 m,高 0.5 m。两边为玻璃壁面,中间为铺满小石子的底面,纵向底坡坡度可以利用升降螺杆进行调节。槽首设有进水阀门,水流经过消能栅,稳定后进入水槽,水槽上设有活动支架,以固定测速设备。槽尾设有平板闸门,调节平板闸门开度可控制水槽水位。为了严格控制水位,在水槽沿程布置了 2 个水位计。

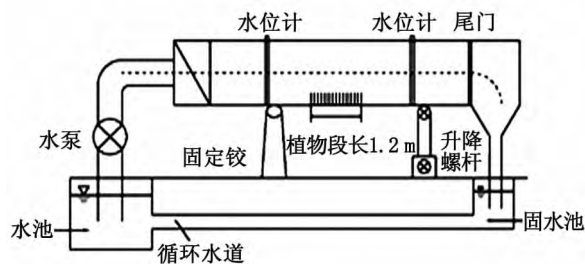


图1 试验循环矩形水槽布置图

Fig.1 The experimental re-circulating open-channel rectangle flume setup

天然植物自然特性非常复杂且不易固定,不适合在水槽中进行试验测量。因此,本文用 PVC 圆棒来模拟刚性植物,圆棒直径  $D = 1 \text{ cm}$ ,高  $h_v = 8 \text{ cm}$ 。试验将模拟植物固定在 PVC 板上,无需其他固定设备。固定后放水进行测量发现,植物底部稳定性较好,没有出现滑落。试验中,圆棒在水槽中的布置示意图如图 2 所示。

试验中采用罗丹明溶液作为示踪剂,植物密度为  $101.62 \text{ 株}/\text{m}^2$ ,试验入流流量为  $12 \text{ L/s}$ ,水深  $10 \text{ cm}$ ,水力坡降为  $0.001$ 。植物种植带长  $1.2 \text{ m}$ ,示踪剂入射处在植物种植带前  $2 \text{ m}$  处,试验开始

前向水槽中注射示踪剂,3 根针管横向平行排列,示踪剂以相同的速度平行射出进入水槽。试验在示踪剂释放的下游选取了一个断面作为观测面,植被带最前端设为坐标 0 点,下游断面坐标分别为  $X_1 = 60 \text{ cm}$ 。试验示意如图 3 所示。试验中示踪剂浓度的测量是在水槽中种有植物部分的侧面摄取示踪剂浓度图片,通过图片的光亮度来反应示踪剂浓度,因此实验数据反应的是断面的横向平均值。

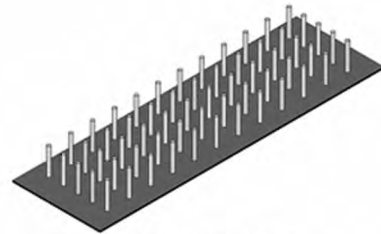


图2 圆棒布置示意图

Fig.2 The arrangement of rods

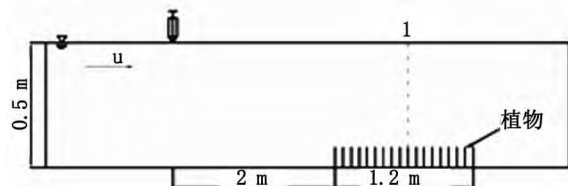


图3 试验示意图

Fig.3 The arrangement of tracer experiment

## 2 试验结果与分析

利用 MATLAB 软件,把摄取的每张图片进行处理,每张图片都能得到一组在垂向上的有关浓度的数据,然后把数据进行处理,进行无量纲化, $C/C_{\text{max}}$  为横坐标, $y/H$  为纵坐标作图。图 4 是断面 2 随时间的增加污染物浓度垂向分布图。

从图 4 可以看出,污染物浓度在垂向上的最大值随着时间的增加向水槽底部移动,浓度梯度随时间增加越来越小,浓度沿水深分布趋于均匀。这是因为植物的存在使水流的形态发生了改变,植物层的水流速度减小,水中的污染物质被截留。同时,植物的存在使水流的紊动特性增强,污染物的垂向扩散作用增大,从而使污染物的垂向混合时间变少。因此,污染物排放后在植物作用下更快地完成初始稀释过程,降低了下游水体的污染物浓度,有效地抑制了下游水体的污染状况。

(下转第 45 页)

2) 聚类分析方法, 得出 8101 工作涌水水源与本矿 10 煤砂岩水质类型一致。

3) 因子分析方法, 得出卧龙湖矿各层地下水水质的首要因子为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ , 体现太灰水的外来补给; 第二因子是阳离子交替吸附作用, 其涌水体现了地下水静储量消耗。

4) 建立的 Bayes 线性判别模型, 具有计算简便、误判率低、稳定性高等特点。同时运用 Matlab 程序, 解释的结果与多元统计模型研究结果总体上一致, 且与该矿区水文地质条件相吻合。

模型的建立依赖于水样的数量、变量的选择、总溶解固体物、硬度、碱度等, 建议今后采集更多的地下水样品, 从中选择时间跨度较小且空间分布均匀的水样作为样本, 模型需不断调整和完善。

#### 参考文献:

[1] 尹国勋, 杨娜, 贺玉晓, 等. 焦作市市区地下水水质现

状评价[J]. 环境工程, 2004, 22(4): 66 - 69.

[2] 贲旭东, 郭黄海, 解奕伟, 等. 模糊综合评判在矿井突水水源判别中的应用及探讨[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(3): 57 - 59.

[3] 王广才, 王秀辉, 李竞生, 等. 平顶山矿区矿井突(涌)水水源判别模式[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(3): 47 - 50.

[4] 闫志刚, 杜培军, 郭达志. 矿井涌水水源分析的支持向量机模型[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 842 - 847.

[5] 陈桂明. MATLAB 数理统计(6. x) [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[6] 刘则毅. 科学计算技术与 Matlab [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[7] 李涛. Matlab 工具箱应用指南—应用数学篇 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.

(责任编辑 王利君)

(上接第 39 页)

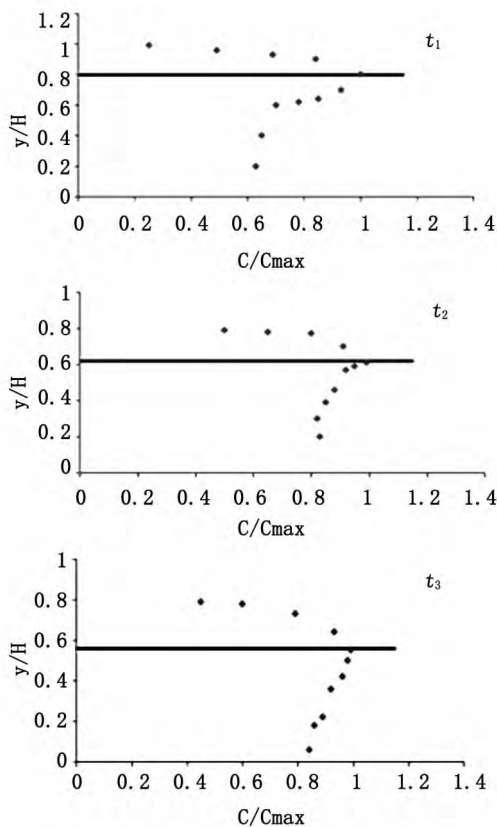


图4 随时间的增加污染物浓度垂向分布图

Fig.4 The vertical distribution of pollutant concentration as time goes on

### 3 结论

在植物的作用下, 水流的紊动特性增强, 增加了污染物的垂向扩散作用。而且, 水流流速减慢, 污染物的浓度在植物的作用下能更快的趋于均匀, 缩短了污染物的垂向混合时间, 截留了部分污染物质, 使下游水体的污染物浓度降低, 从而有效控制了下游水体的污染程度。

#### 参考文献:

[1] NEPF H M, SULLIVAN J A, ZAVISTOSKIV R A. A model for diffusion within emergent vegetation [J]. Limnol Oceanogr, 1997, 42(8): 1735 - 1745.

[2] NEPF H M, MUGNIER C G, ZAVISTOSKI R A. The effects of vegetation on longitudinal dispersion [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, 44: 675 - 684.

[3] TANINO Y, NEPF H M. Lateral dispersion in random cylinder arrays at high reynolds number [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 600: 339 - 371.

[4] TANINO Y, NEPF H M. Laboratory investigation of lateral dispersion within dense arrays of randomly distributed cylinders at transitional reynolds number [J]. Physics of Fluids. 2009, 21(4): doi: 10.1063/1.161.3119862.

[5] 姜新佩, 张欢, 李莹. 人工湿地中植物对生活污水的净化研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(2): 59 - 63.

(责任编辑 刘存英)