

文章编号: 1001-6791(2001)03-0343-07

## 钉螺流场实验模拟及其应用

李大美<sup>1</sup>, 王祥三<sup>1</sup>, 赖永根<sup>2</sup>

(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 依阿华大学水力学研究所, Iowa 美国)

**摘要:** 血吸虫病是长江流域最严重的寄生虫病之一。钉螺是其唯一的中间寄主, 钉螺的扩散将导致血吸虫病的蔓延。控制钉螺随水流扩散就能从根本上控制血吸虫病在灌区或居民点流行。本文介绍一种新的无螺取水方法, 该方法已在实验室研究中取得了成功。这种无螺取水新方法是根据钉螺的生态水力学特性的系列试验研究和流场的计算水动力学数值模拟结果得到的。

**关键词:** 生态水力学; 无螺取水; 计算水动力学

**中图分类号:** R 383.2<sup>+</sup> TV 131.4      **文献标识码:** A

根据血吸虫的生活史<sup>[1]</sup>, 可见钉螺是血吸虫的唯一中间宿主, 钉螺扩散是造成血吸虫病蔓延的主要原因。钉螺属水陆两栖淡水螺, 个体很小(0.5~9.0 mm)。其自身爬行能力很弱。大量钉螺的远距离输移, 主要是借助水流完成的。如灌渠就是钉螺扩散的一种重要途径。

长期以来, 防治方法限药物灭螺为主。由于钉螺面积分布广, 药物灭螺不仅费用高, 同时, 反复使用, 钉螺必产生抗药性, 因此必须不断研制新药。更重要的是灭螺药物带来的环境污染, 以及对人畜健康的危害, 并不亚于血吸虫病本身。另外, 影响钉螺扩散的因素十分复杂, 如河道水位上涨、地下水位变动, 泥沙冲淤规律的演变以及人类活动的影响, 还有各种取水、灌溉、分洪、发电、通航等水利工程, 都是钉螺扩散的重要途径。使得局部地区的彻底灭螺成果, 很难长期巩固。

无螺灌溉取水新技术<sup>[2,3]</sup>是在对钉螺的生态水力学特性进行了系统试验研究的基础上提出来的。该技术不需要任何灭螺药物, 不需拦网, 无任何阻水现象, 除螺率达100%; 不会引起任何、哪怕是局部范围钉螺扩散; 钉螺完全按人为给定通道, 爬到允许它们去的地方, 并进行收集, 经粉碎加工成鸡鸭优质饲料。该技术原理简单, 易于操作管理, 可与任何灌溉引水工程配套。具有推广应用价值和明显的社会效益。

### 1 钉螺的生态水力学特性

关于钉螺生态水力学特性的研究, 采用河流动力学的研究方法, 分钉螺的水动力学特性、钉螺对水深及流速改变的敏感性、钉螺的自控能力及失控条件等几个方面, 进行了系统的模型实验研究。

实验用钉螺是湖北黄陂县野外钉螺经人工繁殖培育出的阴性钉螺(未感染血吸虫病)。实验地点为武汉水利电力大学水力学实验室, 时间1995年6月至1999年11月。

收稿日期: 2000-07-27; 修订日期: 2000-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59779020)

作者简介: 李大美(1946-), 女, 湖北武汉人, 武汉大学教授, 主要从事生态水力学方面的研究。

## 1.1 钉螺静水沉降规律及水深敏感性的实验研究

### 1.1.1 钉螺的静水沉降规律

为了探索钉螺的静水沉降规律,需测定钉螺的几何形状、体积、容重等基本力学特征。

(1) 几何形状 钉螺的几何形状近似呈圆锥形(图1)。其基本几何尺寸为螺长  $h_s$  和最大直径  $d_s$ 。因钉螺生长环境不同,螺长  $h_s$  和螺径  $d_s$  各不相同,径长比  $d_s/h_s$  也有差别。

实验通过放大镜,用游标卡尺,对200只不同螺龄、不同大小的钉螺进行逐个测量。刚孵化的幼螺,长约0.5 mm (1.5旋),最大的成年钉螺长达9.78 mm,径长比  $d_s/h_s = 1/1.2 \sim 1/3.2$ 。即使同样都是成年钉螺,其长度和径长比也有很大差别,  $h_s = 4.01 \sim 9.78\text{mm}$ ,  $d_s/h_s = 1/2.1 \sim 1/3.2$ 。

(2) 体积与当量直径 选择具有相同螺长  $h_s$  和螺径  $d_s$  的钉螺编为一组,每组50~100只不等,共9组。用体积排水法测量体积  $V_s$ ,并与理论圆锥体积  $V_{s0}$  进行比较(表1)。

钉螺的体积可近似按正圆锥体进行计算:

$$V_{s0} = \frac{\pi}{12} h_s d_s^2$$

表1 实测和计算的钉螺体积比较

Table 1. Comparison of measured and calculated oncomelania volume

$H_s$	0.5~1.4	1.5~2.4	2.5~3.4	3.5~4.4	4.5~5.4	5.5~5.4	6.5~7.4	7.5~8.4	8.5~9.8
$d_s/h_s$	1/1.2	1/1.4	1/1.6	1/1.8	1/2.12	1/2.24	1/2.38	1/2.5	1/2.7
$A'$	1.51	1.00	1.00	1.01	1.01	1.03	1.01	1.01	1.01

(3) 容重 容重  $\gamma_s$  为单位体积钉螺的重力,  $\gamma_s = \frac{G}{V} \rho_s g$  式中  $\rho_s$  为钉螺的密度(单位体积的质量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\text{g}/\text{cm}^3$  等);  $\gamma_s$  的单位为  $\text{N}/\text{m}^3$ ,  $\text{N}/\text{cm}^3$  等;将鲜活螺放在铺有吸水纸的托盘中,经1 h室内自然干燥(室温  $25^\circ\text{C}$ )。然后用精密电子天平(感量  $0.1\text{mg}$ ),按钉螺大小分组,分别称出每组钉螺质量,用10 mL精密量筒和自来水按体积排水法测量钉螺体积,并计算其密度  $\rho_s$  和容重  $\gamma_s$  (表2)。

根据曲线拟合,得

$$\gamma_s = \gamma \left[ a \left( \frac{h_s}{b_s} \right)^2 + b \left( \frac{h_s}{b_s} \right)^2 + c \right] \quad (1)$$

式中  $a = 0.03$ ;  $b = 0.06$ ;  $c = 1.07$ 。

表2 实测鲜活钉螺的密度

Table 2. Density measurement of live oncomelaina

$h_s/\text{mm}$	0.5~1.4	1.5~2.4	2.5~3.4	3.5~4.4	4.5~5.4	5.5~5.4	6.5~7.4	7.5~8.4	8.5~9.8
$\rho_s/\text{g}/\text{cm}^3$	1.233	1.283	1.303	1.317	1.364	1.535	1.514	1.545	1.606

(4) 钉螺静水沉降规律 通过钉螺在静水中的受力分析,钉螺的静水沉降速度由两部分构成:

①垂向自由沉降速度  $\omega_1$ , 主要由重力和浮力之差,与阻力平衡得到。

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\pi}{3C_D} \frac{\gamma_s - \gamma}{\rho_s} d_s} \quad (2)$$

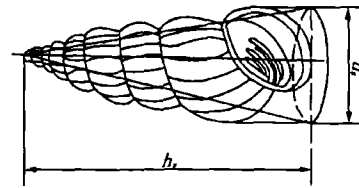


图1 钉螺示意图

Fig.1. Typical oncomelania shape

式中  $C_D$  为垂直阻力系数,  $C_D = 0.48 \sim 7.2$

②水平圆周运动线速度  $\omega_2$ , 主要由重力与浮力之差沿钉螺的轴向分量引起。

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{m_0 g d_s}{\left[4 + \left(\frac{d_s}{h_s}\right)^2\right]^{1/2}} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} \quad (3)$$

式中  $m_0$  为钉螺形状系数, 本实验测得  $m_0 = 1.0 \sim 6.5$ 。

③钉螺的静水沉降速度  $\bar{\omega} = \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2$ 。

④计算值与实测值比较见表3。

表3 钉螺静水沉降计算值与实测值的比较

Table 3. Comparison of measured and calculated sinking velocity in still water

$h_s/\text{mm}$	5.93	4.20	9.13	3.25	6.44	8.56	7.50
$d_s/\text{mm}$	2.67	2.05	3.60	1.62	2.68	3.24	3.07
$w_c/\text{mm}$	13.14	11.69	16.30	9.7	15.0	16.30	16.90
$w_m/\text{cm/s}$	13.33	11.29	16.65	9.83	14.78	16.07	17.49
误差/%	-1.4	3.5	-2.1	-0.6	1.5	1.4	-3.4

### 1.1.2 钉螺的水深敏感性

沉入筒底的钉螺, 都不能自己浮上来(包括幼螺), 只能借助于固体边壁爬上水面。

虽然实验钉螺来自同一地方, 实验水的水质和水温也完全相同, 但沉入不同水深筒底的钉螺上爬的“欲望”却有很大的差别。

三只沉降筒的水深分别是: 1# 2.90 m, 2# 1.70 m, 3# 0.85 m, 每只沉降筒各做了200次投放实验。上爬情况摘要记录如表4:

表4 在静水中钉螺对水深和水温的敏感性

Table 4. *Oncomelania's* sensitivity to water depths and temperatures in still water

项 目	水深/m	水 温				
		12℃	16℃	18℃	22℃	25℃
首次爬行的启动时间/min	0.85	148	42	38	17	8
	1.70	60	37	32	12	7
	2.90	56	35	21	11	6
最大爬行速度/m/h	0.85	0.06	0.30	0.35	0.50	0.47
	1.70	0.12	0.40	0.41	0.62	0.87
	2.90	0.22	0.46	0.47	0.62	0.87
最后一只附壁时间/h	0.85	8.5	10	2.4	1.0	1.0
	1.70	7.7	3.2	2.0	1.0	1.0
	2.90	6.0	1.0	1.1	1.0	1.0
最后一只出水时间/h	0.85	750	400	199	96	54
	1.70	250	170	132	50	12
	2.90	29	17	14	7	4.5

## 1.2 钉螺动水沉降规律及流速敏感性的实验研究

研究钉螺动水沉降规律, 是研究钉螺输移规律及水流拽螺力的重要依据。近年来多数学者限在直水槽中研究钉螺的沉速, 取得了不少成果。但对于天然河道, 特别是近岸水流, 实际并不顺直, 为了更好地模拟自然界钉螺生活的真实水域的水流条件, 我们刻意探讨弯道水流中钉螺的动水沉降规律。

(1) 实验装置 钉螺的动水沉降实验是在环形水槽中进行的。为避免实验过程中因钉螺遗失,造成不必要的环境污染,我们设计并制作了如图2所示的环形水槽装置。环槽直径1 m,深0.5 m。

(2) 过水断面流速分布测定 槽底及各过水断面按柱坐标布置测点网格,用微型自动显示旋浆流速仪测出各过水断面流速分布。

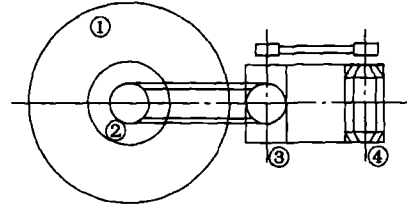


图2 环形水槽示意图

Fig.2. Sketch of circular channel

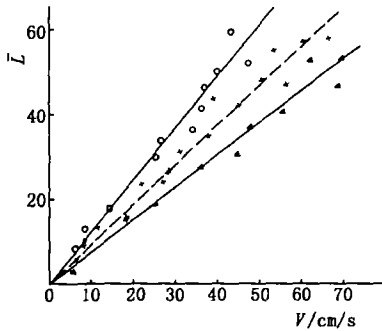


图3 水平悬移距离与流场速度关系

Fig.3. Sinking velocity and the horizontal travel distance

环槽水深24.5 cm,在各级流速分

布条件下,按规定的径向位置投放钉螺,钉螺按大小分组。每次一只,记录每只钉螺沉至槽底的时间及相应位置,并记录沉底后的继续运行状态。计算钉螺动水垂直沉降速度及被水流拖拽的水平距离(悬移距离)。研究动水垂直沉速与流场速度的关系,并与静水沉速进行比较。每种状态均作150次以上投放。然后取均值进行比较。其结果如图3所示。

由图3可以看出,钉螺作为悬移质随水流的水平悬移距离  $L$ ,就其平均状态而言,与流场垂线平均速度  $U$  呈线性关系,可表达为

$$\frac{L}{d_c} = k_0 \frac{\gamma}{\gamma_s} \frac{U}{U_*}$$

$k_0$  由实验确定,本实验  $k_0 = 2.0 \sim 2.3$ 。

(3) 沉底钉螺的运动状态 通过大量、反复的沉降实验发现,无论是静水沉降还是动水沉降,钉螺在整个沉降过程中,始终呈闭扉状态。

根据钉螺动水沉降实验观测,可把沉入槽底钉螺的继续运动状态分为三种:

①在流速较小的情况下( $U < U_1$ ),沉入槽底的钉螺便停止不动,既不滚动,也不开扉吸附。一直到实验结束(每次实验约4 h),槽中水流完全静止后约2 h,这部分钉螺才开扉吸附,并缓慢向边壁爬行。

②当流速较大( $U > U_1$ ),沉底钉螺能在槽底滚动一段距离(称为推移质运动),滚动距离随流场速度增大而增大。在滚动中,如遇静止垂直壁面,它们便立即吸附不动,似乎“不愿”再随水流前进,表现了钉螺的求生本能。

③当流速继续增大( $U > U_2$ ),钉螺滚动的距离更远。即使为它们提供同样的垂直壁面(该壁面必须不改变流场速度——顺水流放置),也不是每只钉螺都能立即吸附。而且流速愈大,能吸附的钉螺愈少。当流速增大到约1.5 m/s,几乎全部钉螺都只能随水流在环槽中转圈,一直到实验结束,流速渐慢,它们才重重叠叠地吸附在固壁上。当槽中水体完全静止下来约40 min,钉螺开始纷纷爬出水面,最大爬地速度达0.67 m/h。

(4) 钉螺的流速敏感性分析 由上述实验可以看出,水中钉螺具有流速敏感性。其表现状态可用两个界限流速划分成三种:

①当流场流速  $U < U_1$ , 沉底钉螺既不滚动, 也不立即吸附。表现为任其自然。这说明较小的流速对钉螺生存不会构成威胁。

②当流速度  $U_1 < U < U_2$ , 该流场已给钉螺生存构成一定威胁, 出于求生本能, 钉螺表现为立即吸附于可逃避水流的静止固壁。

③当流场速度  $U > U_2$ , 虽然该流场对钉螺生存已极为不利, 但钉螺的求生本能毕竟有限, 即使为它们提供同样的静止固壁(以不改变流场为前提), 它们却无力附壁自救。

划分水中钉螺三种状态的两个界限流速  $U_1$  和  $U_2$ , 因钉螺能力大小及水温高低而异。对于较强壮的钉螺且水温较高时,  $U_1$ 、 $U_2$  的数值较大; 反之则较小。尽管如此, 每只在动水中的钉螺, 都一定存在上述三种状态。而且当水流速度由小到大增加愈迅速, 这三种状态表现得愈明显。与成年钉螺相比, 幼螺的三种状态表现得更加明显, 只是相应的  $U_1$  和  $U_2$  都较小。当水流速度由很高再慢下来时(即由  $U > U_2$  变成  $U < U_2$ ), 钉螺的吸附率可达 100%。

## 2 钉螺流场的数值模拟

根据钉螺生态水力学特性的研究结果, 设计了一种无螺取水装置。因为钉螺的行为与流速和压力密切相关, 可用三维水动力学计算模型(CFD)来模拟钉螺流场, 从中找出一种可以达到无螺取水目的流场。其目的是设计出一种取水方式——能取水而取不到钉螺。这种取水装置如图 4 所示, 其工作段三维示意图如图 5 所示。

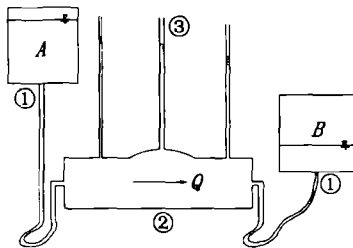


图4 无螺取水装置图

Fig.4. Sketch of the Oncomeania-Free

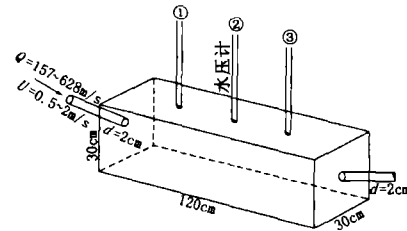


图5 工作段示意图

Fig.5. Perspective view of the prototype

该装置的主要原理是通过控制钉螺场的流速和压力, 利用钉螺的求生本能, 自己“逃离”水流, 从而达到无螺取水的目的。

本文使用了美国依阿华大学水力学研究所(IIHR)编写的多功能CFD计算软件—— $U^2$ RANS CFD软件, 计算结果陈述于后。 $U^2$ RANS软件已为许多流体力学问题所验证, 并应用于许多实际水力学问题。

在图5所示的流场中生成了79000个网格节点, 上游管流速为1.0 m/s, 作为流场进口边界条件, 上游管射流雷诺数约为2100, 因此其流态为紊流, 可使用 $K-\epsilon$ 紊流模型。由于对称性, 仅用一半的计算结果绘图和讨论。

在图6(a)等流速图上只选择了5 cm/s、20 cm/s和50 cm/s三条等流速线, 而5 cm/s和50 cm/s两条可与前面的实验观测值对应进行讨论。图6(b)表示的是三维水流通过中心纵断面质点轨迹图, 因此曲线不完全封闭。计算结果表明, 从上游管进来的流速相当高( $> 50$  cm/s), 并

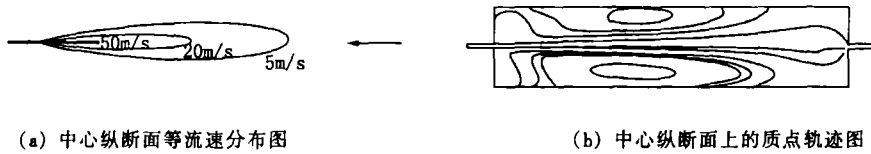


图6 流场计算结果

Fig.6. CFD results of the flow

在压力水道中迅速降低。在水道中部断面附近，流速已低于 5 cm/s。根据钉螺的沉降特性和对流速敏感性的实验研究结果，它们在到达水道中断面之前就已沉入水道底部。水道后半部分的流动将在下一节用试验来描述，还要注意，主流突然扩大处形成了一对巨大的旋涡(图 6b)。而底部的旋涡将有利于钉螺从水流中“逃离”。

### 3 无螺取水装置的定型试验

为了验证和完善无螺取水技术，其最后的定型试验是在实验室条件下进行的。试验按如下参数进行：两水箱水头差 0~6 m，进水管流速范围 0~10 m/s(图 4)。

开始，上游水箱提升至 5 m 高，随机取 800 只钉螺投放进 A 水箱，然后打开进水阀，有 7 只钉螺从上游进水管以 6 m/s 的速度进入压力水道。这 7 只钉螺随水流运动了 10~30 cm 后沉入水底。同样的实验进行了 120 次，累计有 822 只钉螺进入压力水槽，但没有一只钉螺随水流进入下游出水管和 B 水箱。在 20℃ 水温条件下，沉底钉螺经过 24 h，都能吸附于水槽壁面，约有 20% 的钉螺爬进压力水槽顶部的测压管，25% 的沉底钉螺死亡。

然后，又向 A 水箱投放 1 000 只钉螺，搅动 A 水箱的水，以便让更多的钉螺进入压力水槽，一次有 412 只钉螺进入压力水槽。同样没有钉螺进入 B 水箱。实验持续做了一周，累计有 1 488 只钉螺进入压力水槽，结果完全相同。

### 4 结 论

通过系统的实验研究和钉螺流场三维 CFD 数值计算结果，已对钉螺的生态水力学特性有了清楚的了解。

(1) 钉螺的上爬行为与水深(或水压力)密切相关。当水深大于 1 m，钉螺爬出水面的概率随水深增大。当水深小于 1 m，钉螺的爬行具有随机性，而且速度很慢。

(2) 水温对钉螺的水深(水压力)敏感性影响很大。高温下钉螺的水深敏感性要强得多。可能是钉螺在低温条件下有很强的耐压性，拟或是钉螺的上爬能力随温度降低。

(3) 流速  $U < U_1$ ，沉底钉螺自由地呆在水下。

(4) 当流速大于  $U_1$  而小于  $U_2$ ，沉底钉螺将在槽底滚动，其水平运动速度与流速相近，若它滚到垂直壁面附近，将吸附在该壁面上。

(5) 当流速大于  $U_2$ ，钉螺的滚动距离更远，即使为它们提供垂直壁面，几乎没有钉螺能够吸附。

(6) 无螺取水系统设有封闭压力池，不利于水体复氧，随压力池中溶解氧逐渐降低，对钉螺的生存构成威胁，由于钉螺具有求生本能，它将会沿设计的钉螺通道爬出，不能爬出的将窒

息而死亡。

(7) 该项技术除螺率 100%，无二次性污染，无阻水，投资省，沿通道爬出的钉螺收集后粉碎可作鸡鸭饲料，该项技术的推广应用具有很好的经济效益和社会效益。

(8) 钉螺是血吸虫的唯一中间宿主，有效控制钉螺随水流扩散可从根本上控制血吸虫病在灌区流行。

#### 参考文献:

- [1] 毛守白. 血吸虫生物学与血吸虫病防治[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1990.
- [2] Li Damei. *Oncomelania's hydraulic transport*[J], *Resources and Environment in the Yantze Basin*, 1990, 8(1):112 - 117.
- [3] Li Damei. *Oncomelania's eco - hydraulic property and its utilization*[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1999, 11(1):33 - 40.

## Experimental Simulation of *Oncomelania's* Flow Field and Its Application\*

LI Da-mei, WANG Xiang-san, LAI Yong-gen

(1. *Dept. of River Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*

*2. Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, IA, USA)*

**Abstract:** Schistosomiasis is a parasitic disease mostly found in areas along Yangtze River of China. The spread of the disease is solely through a middle-agent named *oncomelania* so the spread of schistosomiasis by *oncomelania* can be controlled by properly designing water intakes which prevent *oncomelania* from entering the farming land or residential areas. In this paper, a successful design process is reported and a new *oncomelania*-free intake device is demonstrated in the laboratory. The design on the new intake is based on a sound research program in which an extensive experimental studies have been carried out to gain knowledge of *oncomelania* ecohydraulic behaviors and a detailed flow field information is obtained through computation fluid dynamics simulation.

**Key Words:** ecological hydraulics; *oncomelania*-free water intake; computation fluid dynamics

---

\* The project is supported by National Natural Science Fund of China(No.59779020)