

水源水体中仙女虫迁移规律研究

黄廷林¹, 丁立君¹, 聂小保^{1,2}, 张金松³, 刘丽君³, 张爽¹, 陈慧²

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410076; 3. 深圳市水务<集团>有限公司, 广东 深圳 518031)

摘要: 在实验室模拟水源水体中仙女虫的迁移运动,通过研究温度、溶解氧和预氯化等对仙女虫主动迁移和被动迁移的影响,探索仙女虫的迁移特性。结果表明,仙女虫在水体中的迁移方式可分为泥内迁移、附着迁移和浮游迁移三种,泥内迁移为主要迁移方式;温度和溶解氧均会明显影响仙女虫的迁移方式;当氯投量较低时,预氯化对仙女虫的主动迁移影响不明显,但当氯投量达到 0.4 mg/L 时,仙女虫的主动浮游迁移规模大幅降低;流速对仙女虫的被动浮游迁移影响较小。

关键词: 水源水体; 仙女虫; 迁移; 温度; 溶解氧; 预氯化

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2014)01-0056-05

Research on Migration Laws of *Naididae* in Source Water

HUANG Ting-lin¹, DING Li-jun¹, NIE Xiao-bao^{1,2}, ZHANG Jin-song³, LIU Li-jun³,
ZHANG Shuang¹, CHEN Hui²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; 3. Shenzhen Water <Group> Co. Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract: To investigate the migration characteristics of *Naididae* in source water, the influences of temperature, dissolved oxygen and pre-chlorination on active and passive migration of *Naididae* were studied by simulating the migration in the laboratory. The results showed that the migration patterns of *Naididae* in source water could be divided into mud migration, drift migration and adhesion migration, where mud migration was the main pattern. Both temperature and dissolved oxygen could fluctuate the migration efficiencies of each migration pattern. The active drift migration of *Naididae* was little affected by pre-chlorination with low chlorine dosage. While the chlorine dosage reached above 0.4 mg/L, the efficiency of active drift migration decreased significantly. Meanwhile, the velocity of water flow had little effect on passive drift migration.

Key words: source water; *Naididae*; migration; temperature; dissolved oxygen; pre-chlorination

仙女虫是自然水体中常见的一类底栖类寡毛纲动物,广泛分布在淡水水域内。由于仙女虫的迁移

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07423-003-01); 国家科技支撑计划项目(2006BAJ08B08-02)

能力较强,其能从底栖环境迁移至上覆水,继而随原水进入水厂,穿透净水工艺并最终到达供水管网^[1]。例如,在深圳的生物活性炭(BAC)滤池中发现的水生生物达40余种^[2],其中仙女虫、线虫、摇蚊幼虫等属于优势种属;加拿大某水厂BAC滤池出水中的仙女虫密度甚至高达20 ind./m³以上^[3]。尽管目前还没有研究表明仙女虫会对公众健康造成威胁^[4],但人们常常把这些生物的存在与饮用水不卫生联系起来,引起他们对水质安全的质疑。Wolmarans等^[5]指出,供水管网中每个蠕虫携带的细菌总数达10~4 000个,而这些细菌、病毒会给人类健康带来危害,因此必须严格控制供水系统蠕虫污染的暴发。

蠕虫在水源水体和水处理工艺中的迁移是净水工艺蠕虫污染暴发的重要原因之一,但目前以蠕虫迁移为指导进行风险控制的研究国内外尚未见有报道,只大量研究了蠕虫在底栖环境中的迁移运动^[6,7]。Duran^[8]提出,蠕虫迁移动力是否为水流,是划分其浮游迁移方式的标准。水流在静止状态下,由于温度和溶解氧等栖息环境的变化而造成蠕虫的浮游,称为主动迁移;底泥在水流剪切力或冲刷作用下再度悬浮导致蠕虫的浮游,称为被动迁移。笔者在实验室模拟水源水体中仙女虫的迁移运动,在静水条件下考察温度、溶解氧和氧化剂对仙女虫主动迁移的影响;然后制造动水条件,改变流速、温度、溶解氧等因素,研究仙女虫的被动迁移规律,从而探明仙女虫在水源水体中的迁移特性,旨在为仙女虫污染风险的控制提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

迁移试验装置材质为有机玻璃,其结构如图1所示。

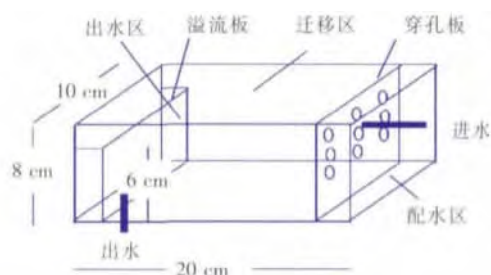


图1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

试验用仙女虫取自深圳笔架山水厂的BAC滤

池,采用300目筛网在现场进行直接采捞,之后在实验室对筛网进行反复冲洗,收集冲洗液,目视挑选长度为3~6 mm的仙女虫作为试验虫源。试验用原水亦取自笔架山水厂,泥样采用深圳西丽水库底泥。迁移试验中温度由数显加热棒控制,溶解氧通过曝气和投加NaHSO₃控制,采用氯气作为氧化剂。

1.2 试验方法

1.2.1 主动浮游迁移

在迁移装置中均匀铺设3 cm厚底泥,并在泥面水平放置沉水植物(沉水植物覆盖面积约占底泥总表面积的1/4),缓缓加入水厂原水至溢流板高度,静置,待上覆水清澈后,加入200条仙女虫,在设定的各试验条件下静沉24 h,实现仙女虫的自主迁移。待静沉结束后,缓慢将装置上覆水倒至500 mL烧杯中,然后将沉水植物转移至另一500 mL烧杯中,并用蒸馏水冲洗沉水植物数遍。用300目筛网分别过滤上覆水和冲洗液,拦截的仙女虫数量即视为分别发生了浮游迁移和附着迁移的数量。泥内迁移量则为投放总数减去浮游和附着迁移量,由此得到仙女虫的浮游、附着和泥内迁移率。

1.2.2 被动浮游迁移

在迁移装置中均匀铺设3 cm厚底泥,缓缓加入水厂原水至溢流板高度,静置,待上覆水清澈后,加入3 000条仙女虫,再次静置3 h以便仙女虫实现自主迁移,之后制造动水条件,通过调节流量控制流速至设定值;在装置出水口用300目筛网拦截,每0.5 h更换1次,拦截的仙女虫数量即视为发生浮游迁移的数量。每次迁移试验均持续3 h。

2 结果与分析

2.1 仙女虫的主动迁移

2.1.1 温度对仙女虫主动迁移的影响

在DO浓度为8 mg/L的条件下,调节温度依次为10、20和30℃,考察温度对仙女虫主动迁移的影响,结果如图2所示。可知,泥内迁移为仙女虫的主要迁移方式,各试验条件下泥内迁移率均在70%以上,10℃时甚至接近100%。相比之下附着迁移受温度的影响较小,20℃时附着迁移率最高,也仅为7.5%。各温度条件下均观察到仙女虫附着在沉水植物表面,这表明着生也是仙女虫的一种栖息方式。较前两种迁移方式,温度对仙女虫浮游迁移的影响更为明显,20℃时迁移率最大,达到18.5%,而10℃时最小,只有1%,说明低温条件不利于仙女虫主

动浮游迁移。

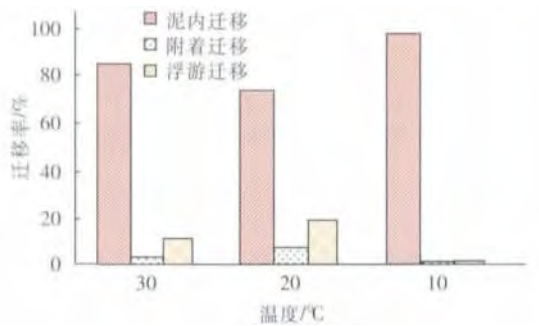


图2 温度对仙女虫主动迁移的影响

Fig. 2 Effect of temperature on active drift migration of *Naididae*

2.1.2 溶解氧对仙女虫主动迁移的影响

当温度为 20 °C 时,调节 DO 浓度依次为 3、5 和 8 mg/L,考察溶解氧对仙女虫主动迁移的影响。结果表明,随着 DO 浓度的增大,泥内迁移率逐渐降低,浮游迁移率逐渐升高,附着迁移率无明显变化。当 DO 浓度分别为 3、5 和 8 mg/L 时,对应的泥内迁移率分别为 90.5%、82%、79%,浮游迁移率分别为 4.5%、13.5% 和 18.5%,说明增加溶解氧浓度能使部分仙女虫由底栖环境迁移至上覆水。

2.1.3 预氯化对仙女虫主动迁移的影响

在温度为 20 °C、DO 浓度为 8 mg/L 时,采用液氯作为氧化剂,调节氯投加量依次为 0.1、0.2 和 0.4 mg/L,考察预氯化对仙女虫主动迁移的影响,结果如图 3 所示。

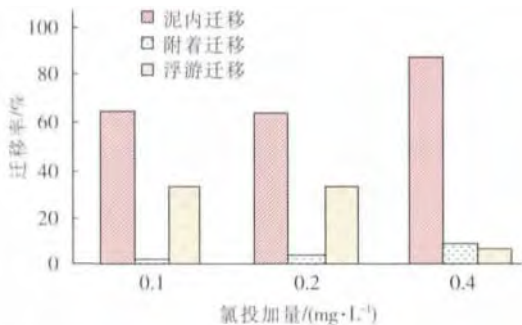


图3 预氯化对仙女虫主动迁移的影响

Fig. 3 Effect of pre-chlorination on active drift migration of *Naididae*

由图 3 可知,氯浓度较低时对仙女虫主动迁移的影响较小。当氯投量为 0.1 和 0.2 mg/L 时,仙女虫的浮游迁移率分别为 33% 和 32%,无明显差别;继续增加氯投量至 0.4 mg/L 时,浮游迁移率明显降低,仅为 4%,同时泥内迁移率显著升高。而附着迁

移率则随氯投量的增大而逐渐升高,当氯投量为 0.1、0.2 和 0.4 mg/L 时,对应的附着迁移率分别为 1%、4% 和 8%。

2.2 仙女虫的被动浮游迁移

2.2.1 流速对被动浮游迁移的影响

在温度为 20 °C、DO 浓度为 8 mg/L 时,控制流速依次为 2、4、8 和 12 mm/s,考察不同流速对仙女虫被动浮游迁移的影响。结果表明,随着流速的增加,仙女虫的被动浮游迁移量并无明显变化规律,当流速分别为 2、4、8 和 12 mm/s 时,仙女虫的平均被动浮游迁移量分别为 255、705、256 和 69 条/m³。在整个迁移期间,除流速为 2 mm/s 时在第 1~1.5 小时期间无浮游迁移量外,其他时间段均有迁移发生;并且,只有在流速为 4 mm/s 时的前 1.5 h 仙女虫浮游迁移量随时间的变化较大,其余各流速下的浮游迁移量随时间无明显变化,出水仙女虫数量基本在 100~400 条/m³ 之间。

2.2.2 温度对被动浮游迁移的影响

在流速为 4 mm/s、DO 浓度为 8 mg/L 时,控制进水温度依次为 10、20 和 30 °C,考察温度对仙女虫被动浮游迁移的影响。结果表明,在各温度条件下,仙女虫的被动浮游迁移量随时间的延长均呈现出先递减后趋于稳定的趋势。不同温度下,仙女虫的被动浮游迁移率也有所不同,30 °C 时被动浮游迁移量最大,其次是 10 °C,20 °C 时迁移量最小,10、20 和 30 °C 时平均出水仙女虫量分别为 1 000、528 和 1 931 条/m³。

2.2.3 溶解氧对被动浮游迁移的影响

在温度为 20 °C、流速为 4 mm/s 时,控制 DO 浓度依次为 3、5 和 8 mg/L,考察溶解氧对仙女虫被动浮游迁移的影响,结果如图 4 所示。

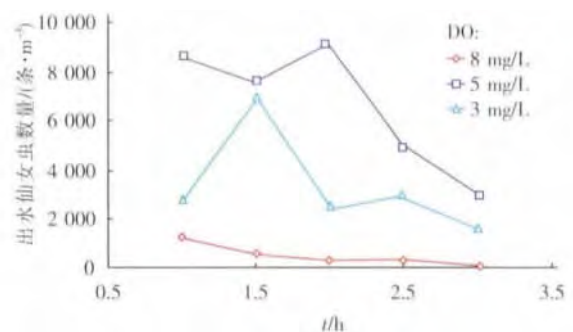


图4 溶解氧对仙女虫被动浮游迁移的影响

Fig. 4 Effect of DO on passive drift migration of *Naididae*

由图 4 可知,随着时间的延长,当 DO 浓度分别

为3和5 mg/L时,仙女虫被动浮游迁移量先增加后减小;当DO浓度为8 mg/L时则表现为缓慢降低。DO浓度对仙女虫被动浮游迁移量的影响明显,当DO为5 mg/L时被动浮游迁移量最大,升高或降低DO浓度都会减小仙女虫的被动浮游迁移规模。DO浓度为3、5和8 mg/L时,平均出水仙女虫数量分别为3 306、6 680和528条/m³。

3 讨论

3.1 仙女虫的主动迁移

温度和溶解氧的变化均会影响仙女虫的主动迁移,从而改变仙女虫的迁移方式。图2表明,20℃时仙女虫的主动浮游迁移率最大,升高和降低温度都会减小浮游迁移率。温度降至10℃时,更多的仙女虫选择泥内迁移以躲避低温环境,原因在于浮游迁移运动需要消耗大量能量,为避免能量损耗,仙女虫可能选择生活在底栖环境;与之相比,30℃时仙女虫的浮游迁移率虽有所提高,但是仍低于20℃时的,这可能是因为30℃并非仙女虫生长的最适温度。20℃左右被认为是大部分底栖生物生长的最适温度,同样这也可能是仙女虫生长的最佳温度,所以仙女虫在20℃时达到最大主动浮游迁移率。另外,随溶解氧浓度的增加,仙女虫主动浮游迁移规模呈上升趋势,泥内迁移则反之。有研究表明,仙女虫是一种耐污性底栖生物^[8],因此,仙女虫并不会因为DO降低而试图逃离底栖环境,在低DO水平下,主动浮游率较低,而在较高水平下,由于生长繁殖速度较快,随机发生的主动浮游率可能更高。

本研究表明,预氯化也会对仙女虫的迁移产生影响。氯投量较低(<0.4 mg/L)时仙女虫主动浮游迁移率在33%左右,远高于未预氯化时的最大值(18.5%),说明预氯化促进了仙女虫的主动浮游迁移,此时仙女虫选择主动浮游迁移以避免氧化剂的毒害,浮游迁移量大大增加。但当氯投量增至0.4 mg/L时,浮游迁移量大幅降低,泥内迁移量明显增加,说明在此条件下,仙女虫受氯毒害作用影响显著,此时为躲避氯的毒害作用,更多的仙女虫选择钻入底泥。因此,为有效控制仙女虫进入净水工艺,必须适当加大氯投量,否则会导致大量仙女虫浮游迁移至沉淀池上覆水,增加其进入后续过滤工艺的风险。

3.2 仙女虫的被动迁移

虽然仙女虫的被动迁移是由水流冲刷直接导致

的,但本研究结果表明,被动迁移规模与流速并无明显关系,这可能是仙女虫的主动浮游能力较强所致。当无水流冲刷时,其主动浮游迁移率最高可以达到18.5%;但在水流冲刷作用下,被动浮游的仙女虫可能随水流漂流,也可能逆流迁移,从而造成水流冲刷对仙女虫被动迁移的影响无明显规律。李伟^[9]采用相同试验方法对颤蚓的被动浮游迁移进行了研究,结果显示,颤蚓的浮游迁移量随时间的延长呈明显递减趋势。虽然颤蚓和仙女虫同属寡毛纲颤蚓目,但两者体表刚毛数量差异较大,仙女虫表面有数量较多且较长的刚毛,因此其主动浮游能力较强,而颤蚓表面刚毛数量极少,从而导致其主动浮游能力较差,流速的增加会显著提高其被动迁移规模。

仙女虫的被动浮游迁移规模随溶解氧的改变而发生显著变化,这可能与仙女虫对溶解氧的喜好有关。有研究表明,仙女虫的最佳生长环境为含氧量不太丰富的水体,这一特点会影响仙女虫的被动浮游迁移。本研究中最大被动浮游迁移量发生在溶解氧浓度为5 mg/L时,这可能是仙女虫生长的最佳溶解氧浓度,此时摄食活动更加频繁,在水流作用下仙女虫容易被带出底泥,导致被动浮游迁移规模增大。此外,仙女虫的被动浮游迁移也会随温度的变化而改变。因为其较强的主动浮游能力可能在一定程度上削弱温度对被动浮游迁移的影响,所以20和10℃时仙女虫的被动浮游迁移规模较接近,但30℃时仙女虫的被动浮游迁移规模要明显强于20和10℃时,其原因还有待进一步深入研究。

4 结论

① 仙女虫的主动迁移分三种方式:泥内迁移、附着迁移和浮游迁移,其中以泥内迁移为主。仙女虫的主动迁移受温度和溶解氧的影响较大。当氯投量较低时,预氯化对仙女虫主动迁移的影响不明显,但氯投量达到0.4 mg/L时,仙女虫的主动浮游迁移规模显著下降,由0.2 mg/L时的33%降至4%。

② 仙女虫的被动浮游迁移规模随着时间的延长而大幅降低,但随流速的增加无明显变化规律;温度和溶解氧均对仙女虫的被动浮游迁移有显著影响,其中最大被动迁移规模分别发生在30℃和DO=5 mg/L时。

参考文献:

- [1] Beaudet J F, Prévost M, Niquette P, et al. Simple methods

- for evaluating the population of naids in drinking water treatment plants [J]. Can J Civil Eng, 2000, 27(4): 601 - 609.
- [2] 李小伟, 刘丽君, 杨宇峰, 等. BAC 滤池无脊椎动物滋生对饮用水安全性的影响 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(12): 64 - 69.
- [3] van Lieverloo J H M, Bosboom D W, Bakker G L, et al. Sampling and quantifying invertebrates from drinking water distribution mains [J]. Water Res, 2004, 38(5): 1101 - 1112.
- [4] Wolmarans E, du Preez H H, de Wet C M E, et al. Significance of bacteria associated with invertebrates in drinking water distribution networks [J]. Water Sci Technol, 2005, 52(8): 171 - 175.
- [5] Takamura N, Ito T, Ueno R, et al. Environmental gradients determining the distribution of benthic macroinvertebrates in Lake Takkobu, Kushiro wetland, northern Japan [J]. Ecol Res, 2009, 24(2): 371 - 381.
- [6] Singh R K, Chavan S L, Sapkale P H. Heavy metal concentrations in water, sediments and body tissues of red worm (*Tubifex* spp.) collected from natural habitats in Mumbai, India [J]. Environ Monit Assess, 2007, 129(1/3): 471 - 481.
- [7] Duran M. Field experiment on drift and colonization of benthic macroinvertebrate in Gokpinar stream (Denizli, E Turkey) [J]. Pak J Biol Sci, 2006, 9(3): 493 - 496.
- [8] Elissen H J H, Peeters E T H M, Buys B R, et al. Population dynamics of free-swimming Annelida in four Dutch wastewater treatment plants in relation to process characteristics [J]. Hydrobiologia, 2008, 605(1): 131 - 142.
- [9] 李伟. 净水工艺中颤蚓污染风险控制技术研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.



作者简介:黄廷林(1962 -), 男, 山东昌邑人, 博士, 教授, 研究方向包括水资源保护理论与技术、水源水质改善理论与技术、水环境修复、水质预测预警、城市供水系统的模拟与优化等。

E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

收稿日期: 2013 - 07 - 11

(上接第55页)

- [1] 周毅, 陈永祥. 给水管网优化设计目标的探讨 [J]. 中国给水排水, 2012, 28(20): 43 - 47.
- [2] 朱家松, 龚健雅, 郑皓. 遗传算法在管网优化设计中的应用 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(3): 364 - 367.
- [3] 蒋怀德. 给水管网多目标优化设计 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [4] Guria C, Bhattacharya P K, Gupta S K. Multi-objective optimization of reverse osmosis desalination units using different adaptations of the non-dominated sorting genetic algorithm [J]. Computer Chem Eng, 2005, 29(9): 1977 - 1995.
- [5] 金溪, 高金良, 张杰, 等. 利用 NSGA-II 算法求解供水管网优化改造模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(12): 1969 - 1976.
- [6] Dwb K, Agaiwal S, Megarivan T, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):

182 - 197.



作者简介:刘书明(1976 -), 男, 山东淄博人, 博士, 副教授, 主要从事给水信息学、给水管网水质保障、管网漏损控制等方面的研究。

E-mail: shumingliu@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2013 - 07 - 13