

水丝蚓捕食污泥影响因素及其特性

张晓琦¹, 田禹^{1,2}, 王强³

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨; 3. 黑龙江省环境保护科学研究院, 150056 哈尔滨)

摘要: 为解析水生寡毛纲颤蚓科水丝蚓的生长特性和污泥捕食效能, 围绕 pH、温度、载体厚度和光照 4 个污泥捕食过程的主要环境因子, 以水丝蚓的生长、呼吸速率和捕食污泥效率等为评估指标开展研究. 结果表明: 水丝蚓适宜生存的 pH 范围为 4~8, 对污水污泥中的 pH 变化具有较强的适应能力; 在 25 °C 下呼吸速率最高, 表现出较高的生物活性; 适合水丝蚓稳定附着和高效捕食污泥的载体厚度为 1 cm, 游离水丝蚓比例为 3.8%; 自然光照不会对水丝蚓捕食污泥存在较大干扰, 而强光的刺激会引起其遁逃和藏匿行为; 污泥减量效率可达 27% 以上.

关键词: 污泥减量; 捕食; 蠕虫; 生长; 环境因子

中图分类号: X506

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)10-0025-05

Influencing factors and characteristics of tubificid worms for excess sludge reduction

ZHANG Xiaoqi¹, TIAN Yu^{1,2}, WANG Qiang³

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
3. Heilongjiang Provincial Research Institute of Environmental Sciences, 150056 Harbin, China)

Abstract: To analyze the growth characteristics and predation potential of tubificid worms as the predator for excess sludge, the variations in the growth, respiratory rate and sludge reduction efficiency of such worms under different pH value, temperature, carrier thickness and light intensity were investigated. The results showed that the worms could live in a pH range from 4 to 8, and therefore might have adaptability to the pH change in practical sewage sludge. The respiratory rate of worms reached the maximum at 25 °C, indicating the higher biological activity at this temperature. The worm immobilization and performance for sludge reduction were improved by the carrier with 1 cm of thickness, where only 3.8% of the total worms left. Natural light had no significant effect on the sludge predation by worms. But strong light was not recommended by which the escape and hiding behavior of worms had been caused. The optimal sludge reduction efficiency was above 27%.

Key words: sludge reduction; predation; worms; growth; environmental factor

污泥是污水生物处理过程中的必然产物^[1]. 传统的污泥处理处置技术如填埋、焚烧等均存在不同程度的占地、二次污染或能源耗费等局限^[2], 而利

用微型动物的捕食来削减污泥量具有降低污泥减量的能耗和减少二次污染的优点^[3-4]. 水生寡毛纲的微型动物(如颤蚓科、带丝蚓科的相关种类)在污水处理行业俗称蠕虫, 具有吞食污泥絮体的天然潜能^[5]. Hendrickx 等^[6]利用夹杂带丝蚓作为污泥捕食者研发了高效的生物捕食反应器. 借鉴国外学者的研究思路和方法, 黄霞、田禹和魏源送等^[7-9]选择国内普遍存在的颤蚓科蠕虫用于污泥捕食, 设计了多种新型的污泥减量反应器, 探讨了反应器的

收稿日期: 2012-12-06.

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07201007); 城市水资源与水环境国家重点实验室基金项目(2011DX01); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20112302110060).

作者简介: 张晓琦(1982—), 女, 博士研究生;

田禹(1968—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 田禹, hitianyu@163.com; ciciliar@163.com.

运行和污泥捕食效能。

蠕虫的稳定生长是其发挥污泥捕食效能的前提,但由于反应器尺寸和复杂的内部结构所限,及时探察和测定蠕虫的生长状况不易操作,并可能对系统的运行造成破坏。Hendrickx 等^[6, 10-13]和 Elissen 等^[14-15]曾利用分批实验、小试等方法,对夹杂带丝蚓生长和捕食污泥的特性等进行了研究。但带丝蚓科蠕虫与颤蚓科蠕虫(如正颤蚓、霍夫水丝蚓和苏氏尾腮蚓)分属不同的分类学上的科属,二者尺寸大小、表观特征、环境习性和生物活力等生物学特性不尽相同。而在当前的污泥捕食研究领域中,对颤蚓科蠕虫生长特性的关注不多,尤其是蠕虫生存能力和污泥捕食环境之间的内在关系尚不明确。为此,以水生寡毛纲颤蚓科蠕虫——水丝蚓作为污泥捕食者,探讨 pH、温度、载体厚度和光照等与水丝蚓生长和捕食污泥的内在关联,为进一步完善微型动物捕食污泥技术提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验所用的水生寡毛纲蠕虫具有淡黄绿色的尾部,符合颤蚓科水丝蚓属的分类学特征。挑取个体强壮、颜色鲜红并且活性较好(在水体中尾部摆动活跃、触碰后收缩反应灵敏)的虫体待用。由于水丝蚓取自自然环境,实验前以自来水进行温和冲洗,并置于室温自来水中过夜,以清除虫体表面和肠胃中的泥土、枯叶等杂质。

实验所用污泥取自哈尔滨市太平污水处理厂的污泥回流泵房,原污泥质量浓度(SS)为 $7\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。取回的污泥采用 SBR 方法进行培养,培养采用人工模拟污水。正式实验时调节污泥质量浓度(SS)为 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.2 实验方法

pH 实验分为预实验和正式实验,通过改变水

体的 pH 来调节水丝蚓所处的酸碱环境。预实验中,设置 3~9 的 pH 梯度,观察水丝蚓的表观活性和生存状况,初步获得水丝蚓能够生存的 pH 范围;在此 pH 范围内进行正式实验,以捕食污泥过程中水丝蚓的密度变化作为其适应性生长的评价指标。温度实验中,在 10、20、25、30、35、40 °C 分别培养水丝蚓,观察其表观活性,考察不同温度下水丝蚓在污泥捕食过程中的呼吸速率,用以表征其生物活性,测定方法为改进的 OUR 法^[16]。在载体厚度实验中,选用根据 Elissen 等^[6]研究确定的多孔性聚酰胺纤维布作为蠕虫附着的载体,设置载体厚度梯度为 0.5、1.0、1.5 cm,比较捕食周期结束后各厚度载体的游离和固着水丝蚓比例、载体内部存留的污泥比例以及污泥减量效率。在光照实验中,采用黑色遮光布营造水丝蚓捕食的黑暗环境(光照强度为 0.001 lx),采用灯泡直射制造水丝蚓捕食的强光环境(光照强度为 14 000 lx),以晴好天气的自然光线(光照强度为 2 000 lx)作为水丝蚓捕食的自然光环境,比较不同光照条件下的污泥减量效率,并分析其差异统计学意义。

水丝蚓捕食装置如图 1 所示。以压缩空气曝气机对污水污泥液面以下部位进行温和曝气供氧,以降低对水丝蚓的振动干扰,污泥进入捕食装置后自然沉积,在载体上形成污泥层供水丝蚓取食。以不接种水丝蚓的同样装置作为水丝蚓捕食装置的对照组,捕食和对照装置以序批式同步运行,每个污泥捕食周期为 3 d,共运行 14 个周期。

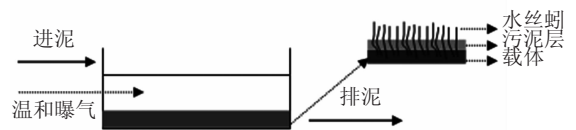


图 1 水丝蚓捕食装置示意图

1.3 计算方法

各载体的游离和固着水丝蚓比例计算式为

$$\text{游离(或附着)水丝蚓比例} = \frac{\text{游离(或附着)水丝蚓湿质量}}{\text{全部水丝蚓湿质量}} \times 100\% \quad (1)$$

污泥减量效率的计算式

$$\text{污泥减量效率} = \frac{\text{捕食结束后水丝蚓捕食装置的污泥浓度减少值} - \text{捕食结束后对照组污泥浓度减少值}}{\text{捕食前污泥浓度}} \times 100\%$$

采用 SPSS v18.0 软件进行光照实验中各条件下污泥减量效率的差异统计学意义分析($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 pH 的影响

由于直接在污泥中调节 pH 不易稳定,采用

了在水中调节 pH 并间歇投加少量污泥饲喂水丝蚓的方法。在 pH3~9 的范围进行预实验,结果表明,在过酸(pH=3)或过碱(pH=9)的条件下,水丝蚓不再相互聚集,不能正常摆动尾部进行呼吸,在 24 h 内全部死亡。而在 pH 4~8 的条件下,水丝蚓在实验结束仍然能够存活。因此,设置 pH 梯

度为 4、5、6 和 8 进行正式实验, 并以自然 pH 6.5 作为对照, 结果如图 2 所示. 可以看出, 当 pH 为 4、5 和 6 时, 蠕虫密度呈现从缓慢下降到稳定的趋势, 表明水丝蚓能够逐渐适应其所处的酸性环境. 但当 pH 为 4 时, 水丝蚓密度损失过大, 最终稳定的密度约为初始时的一半. 当 pH 为弱酸性 6.5 时, 水丝蚓生长稳定. 当 pH 为 8 时, 水丝蚓也能够经历 20 余天的适应期后渐近稳定, 其最终密度比初始密度略低. 比较水丝蚓在酸性条件和碱性条件下的表现和最终稳定密度可以得出, 水丝蚓对酸性环境的耐受能力大于其对碱性环境的耐受能力, 这一现象可能与水丝蚓通常喜食酸性食物有关.

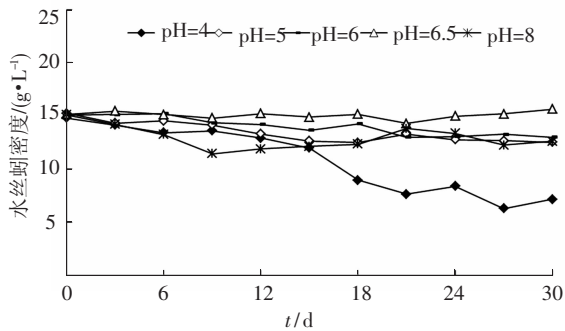


图 2 水丝蚓在不同 pH 下的生长

基于上述研究, 推断在 pH 为 4~8 的环境中水丝蚓的生长能够经过适应期后趋于稳定, 对酸性条件更为耐受. 实际市政污泥的自然 pH 通常为 6.5 左右, 在被捕食后略有变化, 可以认为污泥捕食过程的自然 pH 不会影响蠕虫的生长. 市政污水的进水 pH 标准为 6~9^[17], 因此, 水丝蚓可以抵御污水污泥环境中的大部分 pH 波动, 这一特性有利于污泥捕食系统的稳定运行.

2.2 温度的影响

温度对生物体的新陈代谢产生重要的影响^[18]. 在不同温度下, 水丝蚓表现出不同的表观活性. 当温度为 35 °C 以上时, 水丝蚓的活性逐渐降低, 尾部摆动迟滞. 在低温的情况下 (10 °C), 水丝蚓尾部的摆动停止、趋于休眠, 虫体匍匐于底部, 甚至收缩抱团. 相比之下, 当温度为 20~25 °C 时, 水丝蚓的尾部摆动较为活跃. 进一步测定了水丝蚓的呼吸速率以表征其生物活性, 结果如图 3 所示.

水丝蚓在不同温度下的呼吸速率变化与其表观活性变化类似. 当温度由 10 °C 升高至 25 °C 时, 水丝蚓在污泥中的呼吸速率相应增大; 25 °C 时呼吸速率最大; 当温度进一步升高时, 水丝蚓在污泥中的呼吸速率逐渐降低. 动物的呼吸速率体现其

新陈代谢的活性, 当水丝蚓逐渐接近适宜的温度时, 其生理活动渐近最佳状态; 当超越了最适宜温度时, 其生理活动明显降低^[19]. 25 °C 时水丝蚓的呼吸速率最高, 认为 25 °C 是保障水丝蚓生长活性的适宜温度. 由于 25 °C 时水丝蚓呼吸速率大, 对溶解氧的需求较高, 在利用其捕食污泥时应密切注意水中的溶解氧质量浓度, 确保水丝蚓能够正常呼吸和生长.

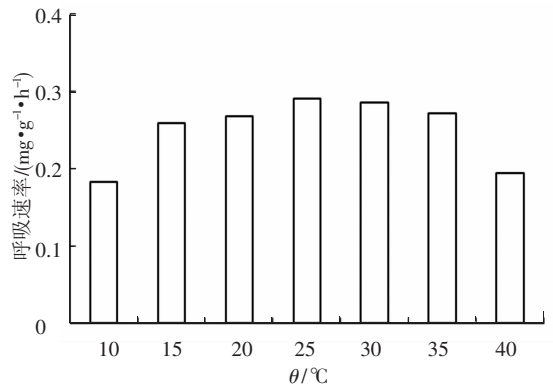


图 3 水丝蚓在不同温度下的呼吸速率

2.3 载体厚度的影响

水丝蚓在自然水体中属于底栖动物, 头部钻入江河底泥, 尾部摆动. 在污泥捕食系统中, 为模拟其自然生长环境, 采用了 Elissen 等^[6]建议的多孔性聚酰胺纤维布作为载体材料, 利用交错的细密空隙作为蠕虫穿行和缠绕的空间, 以实现蠕虫固着. 由于前人研究中未对载体的厚度进行讨论, 本实验针对这种载体, 比较了水丝蚓在 3 种不同厚度载体上的附着生长情况, 结果如图 4 所示. 可以看出, 载体越厚, 对水丝蚓的固着效果越好. 当载体为 0.5、1.0 和 1.5 cm 时, 载体的蠕虫流失率分别为 5.4%、3.8% 和 1.4%. 根据 Elissen 等的研究, 使用载体后, 从载体中脱离的蠕虫比例为 5%^[6], 本研究的结果与其基本一致. 然而, 通过观察发现, 过厚的载体 (1.5 cm) 也会对水丝蚓的生存和捕食存在不利影响. 在过厚的载体 (1.5 cm) 内部, 水丝蚓为灰白颜色, 呈缺氧状态, 说明载体的厚度阻碍了溶解氧的传递, 影响了水丝蚓的呼吸 (由于检测设备的局限, 无法测定载体内部的溶解氧质量浓度). 虽然水丝蚓能够利用皮肤呼吸, 一定程度上抵御较低的溶解氧质量浓度, 但过低的溶解氧会影响其捕食食物的活力^[10].

进一步对比了载体厚度对水丝蚓污泥减量的影响, 如图 5 所示. 可以看出, 当载体厚度为 0.5 和 1.0 cm 时, 水丝蚓的污泥减量效果基本接近. 当载体厚度为 1.5 cm 时, 其污泥减量效果明显降低. 比较不同厚度的载体本身空隙存留的污泥量

发现,载体越厚,载体空隙里存留的污泥越多.厚度为1.5 cm的载体中,载体本身存留的污泥和水丝蚓捕食的污泥比例接近.因此推断,除了过厚的载体对溶解氧传输造成影响,进而影响污泥捕食效能之外,载体的厚度也直接影响蠕虫对污泥的取食.当载体较薄时,载体内部污泥较少,水丝蚓与载体外污泥层的接触也相对容易.当载体内食物不足时,水丝蚓更倾向于向载体表面的污泥层取食,因此,实现了更高的污泥减量效率.相反,当载体较厚时,载体内部污泥较多,水丝蚓与载体外污泥层的接触也相对困难,水丝蚓主要捕食载体内部的污泥,因此,污泥减量效率不高.综合考虑载体厚度对水丝蚓的固着情况和捕食污泥效能的影响,认为1.0 cm为适宜的载体厚度.

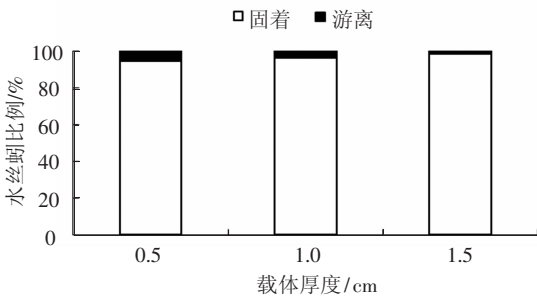


图4 不同载体厚度对水丝蚓附着的影响

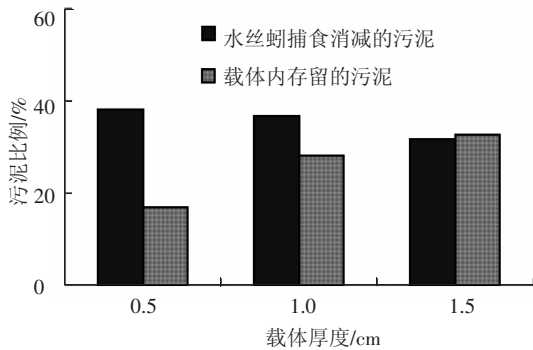


图5 不同载体厚度下的污泥减量效果

2.4 光照的影响

根据前期实验,由于水丝蚓畏惧物理振动,污泥捕食系统必须以温和曝气供氧,导致泥水混合物进入系统后,不能保持完全混合,很快呈现泥水分离的状态,因此,系统中水体透光率较高.水丝蚓具有畏光的特性.在天然水体(如江河)中生长时,水丝蚓位于水体底部,由于水深以及水丝蚓尾部对底泥挖掘导致的局部浑浊,其自然生存环境的光线较暗. Elissen^[15]在对夹杂带丝蚓研究后认为,黑暗条件更有利于这一种类的蠕虫捕食污泥.考虑到光线可能对水丝蚓存在影响,比较了不同光线下水丝蚓的捕食效能.

首先比较了水丝蚓在不同光照下的运动行

为.观察表明,在黑暗和自然光照下,水丝蚓将头部钻入污泥层,尾部有序摆动.而在强光照下,部分水丝蚓倾向于躲在载体内部,另有小部分水丝蚓游出载体之外,躲藏于载体背面的背光处.蠕虫在强烈光照下的藏匿和遁逃行为不利于在载体上的固着和对载体上污泥层的取食.

在前述实验优化的温度和载体厚度下,比较了不同光照条件下水丝蚓的污泥减量效果,如图6所示.可以看出,在黑暗光线下和自然光线下,水丝蚓的污泥捕食性能差异无统计学意义($P > 0.05$),在42 d的考察期内,分别削减进泥质量浓度(SS)为 $3\ 000\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的污泥捕食系统中27.9%~34.1%和27%~32.8%的污泥.而在强光照下,由于水丝蚓不再稳定附着于载体表面,污泥减量效果明显降低,为17.9%~24%,与其他两种光照条件下的污泥减量效率存在显著差异($P < 0.05$).结果表明,污泥捕食系统的正常光线对于水丝蚓的污泥捕食影响不大.为此,认为颤蚓科水丝蚓的污泥捕食在自然光线下进行即可.

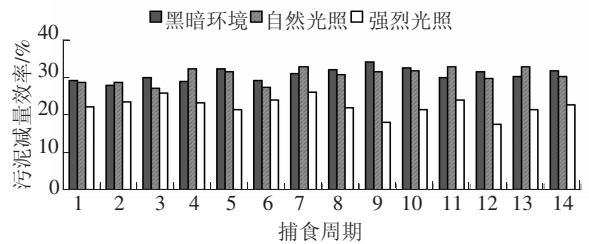


图6 光照对水丝蚓污泥捕食效能的影响

3 结论

- 1) 维持水丝蚓的生物活性需要适宜的温度条件.在 $25\ ^\circ\text{C}$ 的污泥中,水丝蚓的生长活性较高,具有较高的呼吸速率,为 $0.291\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 2) 水丝蚓的生长能够适应的pH范围为4~8,其密度呈现从下降到稳定的趋势,对污水污泥中的pH变化具有较强的适应能力.
- 3) 适合水丝蚓稳定附着和发挥最佳捕食污泥效果的载体厚度为1 cm.
- 4) 在黑暗光线下和自然光线下,水丝蚓的污泥捕食性能差异无统计学意义,而强光的刺激会引起水丝蚓的遁逃和在载体中的藏匿行为.
- 5) 水丝蚓在捕食污泥过程中对pH和光照的环境需求不高,在温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ 、pH为6.5、载体厚度为1 cm并提供自然光照的适宜环境中,污泥减量效率趋于稳定,可以有效削减系统中27%以上的污泥,具有较理想的污泥减量应用前景.

参考文献

- [1] DYTCHAK M A, LONARY K L, SIEGRIST H, *et al.* Ozonation reduces sludge production and improves denitrification [J]. *Water Research*, 2007, 41 (3): 543 - 550.
- [2] CANALES A, PAREILLEUX A, ROLS J L, *et al.* Decreased sludge production strategy for domestic wastewater treatment [J]. *Water Science Technology*, 1994, 30(8): 97 - 106.
- [3] RATSAK C H, KOIJMAN S A L M, KOOI B W. Modelling the growth of an oligochaete on activated sludge [J]. *Water Research*, 1993, 27(5): 739 - 747.
- [4] LEE N M, WELANDER T. Use of protozoa and metazoa for decreasing sludge production in aerobic wastewater treatment [J]. *Biotechnology Letters*, 1996, 18 (4): 429 - 434.
- [5] RENSINK J H, RULKENS W H. Using metazoa to reduce sludge production [J]. *Water Science Technology*, 1997, 36(11): 171 - 179.
- [6] ELISSEN H J H, HENDRICKX T L G, TEMMINK H, *et al.* A new reactor concept for sludge reduction using aquatic worms [J]. *Water Research*, 2006, 40: 3713 - 3718.
- [7] WEI Yuansong, LIN Junxin. Sludge reduction with a novel combined worm-reactor [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 564: 213 - 222.
- [8] HUANG Xia, LIANG Peng, QIAN Yi. Excess sludge reduction induced by *Tubifex tubifex* in a recycled sludge reactor [J]. *Journal of Biotechnology*, 2007, 127 (3): 443 - 451.
- [9] TIAN Yu, LU Yaobin, CHEN Lin, *et al.* Optimization of process conditions with attention to the sludge reduction and stable immobilization in a novel Tubificidae-reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(15): 6069 - 6076.
- [10] HENDRICKX T L G, TEMMINK H, ELISSEN H J H, *et al.* The effect of operating conditions on aquatic worms eating waste sludge [J]. *Water Research*, 2009, 43(4): 943 - 950.
- [11] HENDRICKX T L G, TEMMINK H, ELISSEN H J H, *et al.* Aquatic worms eating waste sludge in a continuous system [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(20): 4642 - 4648.
- [12] HENDRICKX T L G, TEMMINK H, ELISSEN H J H, *et al.* Aquatic worms eat sludge: mass balances and processing of worm faeces [J]. *Journal of Hazardous Material*, 2010, 177(1/2/3): 633 - 638.
- [13] HENDRICKX T L G, ELISSEN H J H, TEMMINK H, *et al.* Operation of an aquatic worm reactor suitable for sludge reduction at large scale [J]. *Water Research*, 2011, 45(16): 4923 - 4929.
- [14] BUYS B R, KLAPWIJK A, ELISSEN H, *et al.* Development of a test method to assess the sludge reduction potential of aquatic organisms in activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(17): 8360 - 8366.
- [15] ELISSEN H J H. Sludge reduction by aquatic worms in wastewater treatment: with emphasis on the potential application of *Lumbriculus variegatus* [D]. The Netherlands: Wageningen University, 2007.
- [16] 李冰, 孙英兰, 李玉瑛. 耗氧速率(OUR) 测量方法的实验研究 [J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(3): 456 - 460.
- [17] 张自杰, 符九龙, 李东林, 等. *水处理工程* [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 6.
- [18] 任南琪, 马放, 杨基先, 等. *污染控制微生物学* [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 2.
- [19] 杞桑, 梁轩, 李文珍. 温度对霍夫水丝蚓排粪的影响及其粪便的氨基酸分析 [J]. *暨南大学学报: 自然科学与医学版*, 1993, 11(3): 54 - 58.

(编辑 刘彤)