J. Lake Sci.(湖泊科学), 2009, **21**(5):682-686
http://www.jlakes.org. E-mail: jlakes@niglas.ac.cn
©2009 by *Journal of Lake Sciences*

凤眼莲凋落物及其残体的沉降*

葛绪广[1], 王国祥[2**], 李振国[3], 王文林[2], 潘国权[2]
(1: 湖北师范学院地理科学系, 黄石 435002)
(2: 南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210046)
(3: 湖南科技大学, 湘潭 411201)00

摘　要: 水生植物凋落物和残体的沉降在水体生态系统物质循环和能量流动中具有重要作用. 在有凤眼莲生长的自然水体中, 利用沉降物捕获器原位采集凤眼莲生长、衰亡及腐烂分解等不同阶段的沉降物, 分析测定其沉降量、沉降通量、有机碳、总氮和总磷的动态变化, 结果显示: 自凤眼莲死亡至残体从水面消失的4个月中, 沉降瓶内的沉降量呈明显上升趋势, 在残体从水面完全消失时(4月中旬)沉降量达到最大值579.59g/m^2, 同时, 沉降通量亦达到最高值7.54g/(m^2·d), 二者与水温呈极显著正相关(P<0.01); 在凤眼莲生长期, 沉降物的有机碳、总氮、总磷含量较低, 而随着凤眼莲衰亡, 残体的不断沉降, 至次年 4 月中旬残体基本沉降进入水体底部时, 沉积物的有机碳、总氮、总磷含量达到最大值, 分别为40.29%、3.66%、0.90%, 之后逐渐下降, 并趋于稳定.
关键词: 凤眼莲; 凋落物; 残体; 沉降物

The litter and residue of *Eichhornia crassipes*(Mart.) Solms

GE Xuguang[1], WANG Guoxiang[2], LI Zhenguo[3], WANG Wenlin[2] & PAN Guoquan[2]
(1: *Department of Geographical Science*, *Hubei Normal University*, *Huangshi* 435002, *P.R.China*)
(2: *College of Geographic Science*, *Nanjing Normal University*, *Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction*, *Nanjing* 210046, *P.R.China*)
(3: *Hunan University of Science and Technology*, *Xiangtan* 411201, *P.R.China*)

Abstract: The litter and the residue of the aquatic plants play an important role in the nutrient cycle and energy flow. Under natural conditions, the sediment was collected in situ at different stages of *Eichhornia crassipes*, and its changes of the litter and residue were studied. The weight of sediment had an obviously increasing trend from waterhycinth death to its disappearance from water surface. When the litter and residue disappeared completely from water surface, the weight of sediment and the downward fluxes reached the maximum value 579.59g/m^2, 7.54g/(m^2·d) respectively. Both of them had a significantly positive correlation with the water temperature. When the litter and residue disappeared completely from water surface, the organic carbon, total nitrogen and total phosphorus were low in the growth but high in the floating, and reached the maximum values 40.29%, 3.66%, 0.90% respectively, then they gradually decreased, and tended to be stable.
Keywords: *Eichhornia crassipes*(Mart.) Solms; litter; residue; sediment

凤眼莲(*Eichhornia crassipes* Solms)又称水葫芦, 是雨久花科、凤眼莲属的一种大型水生维管束植物, 在生长期能够富集大量的营养物质以及有毒有害的物质[1-3], 对水体净化效果明显[4-7], 但其死亡后腐烂分解会对水质产生影响[8-9], 进而引起水环境质量下降[10-12], 同时, 作为外来物种对生态环境的影响也引起

* 国家自然科学基金项目(40873057)资助. 2008−12−22 收稿; 2009−04−24 收修改稿. 葛绪广, 男, 1976 年生, 博士; E-mail: gxg76@126.com.
** 通讯作者; E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn.

了许多“争议”[13-14]. 因此, 对凤眼莲的利用和控制一直存在争议, 研究也不断深入. 然而, 就凤眼莲危害的定量研究以及对水生生态系统的影响, 尤其对其凋落物和残体沉降与分解的研究多集中于分解速率、营养盐的释放及影响因子的相互关系[15-20], 而对凤眼莲在生长、衰亡等过程中凋落物及残体的动态变化规律尚缺乏深入系统的研究. 本文在凤眼莲生长的自然水体中, 布设系列沉降物捕获器, 定量研究凤眼莲凋落物和残体沉降的动态变化, 以揭示凤眼莲凋落物及残体的环境影响.

1 材料与方法

1.1 实验设计

实验区位于南京市仙林大学城的三用河, 该河主要污染源为生活污水和极少量的工业废水. 水面宽15m, 平均水深 1.4m, 河道平直, 水泥护岸, 河流底质基本一致. 用不透水材料围隔成 10m×5m 的实验区, 实验区与河流水体完全隔离.

2004 年 8 月, 从三用河捞取适量凤眼莲, 挑选健壮的植株, 清除植株上的异物, 清洗干净, 称取鲜重 80kg, 并记录相关指标如株数、叶数、株高等, 投放到实验区. 在水深 1.4m 处布设 9 组沉降物捕获器(沉降瓶), 每组 3 个沉降瓶. 根据凤眼莲的生长特点分次取出, 每次取 1 组, 测量凤眼莲凋落物和残体沉降物的质量, 分析其组成成分、并计算沉降通量的变化. 同时, 定期与不定期相结合观察凤眼莲的生长状况的变化, 并作记录.

1.2 监测指标及分析方法

监测指标主要是凤眼莲凋落物和残体沉降物的总有机碳(TOC)、总磷(TP)、总氮(TN)等. 其中 TOC 用重铬酸钾–外加热法测定; TP 用高氯酸–硫酸消化法测定; TN 用重铬酸钾–硫酸消化法测定.

凤眼莲凋落物和残体沉降量和沉降通量按(1)和(2)计算:

$$W=(G_1-G_2)/S \tag{1}$$

$$F=W/T \tag{2}$$

式中, F 是沉降通量(g/(m^2·d)); W 是沉降量(g/m^2); G_1 是过滤后的质量(g); G_2 是过滤前的质量(g); S 是沉降物捕获器的采样面积(m^2); T 是收集沉降物的时间(d).

2 结果与讨论

2.1 凤眼莲凋落物和残体沉降物的动态变化

监测调查结果显示(图 1), 凤眼莲生长、衰亡至水面残体消失可分为 3 个阶段: 生长期即从引种到绝大部分死亡(8 月底至 12 月底)、残体漂浮期即凤眼莲死亡至漂浮的凤眼莲残体完全消失(12 月底至次年的 4 月中旬)和残体消失期即凤眼莲凋落物和残体从水面完全消失后(4 月中旬以后).

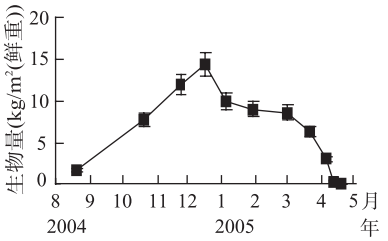

图 1 凤眼莲生物量(鲜重)变化

Fig.1 Biomass change of *Eichhornia crassipes*

自凤眼莲死亡至残体从水面消失的 4 个月中, 凤眼莲凋落物和残体沉降物呈明显上升趋势(图 2a), 不同阶段沉降物有着较大差异, 生长期结束(12 月底)时为 33.93g/m^2; 残体漂浮期末(4 月中旬)为 575.59g/m^2, 是生长期末的 17 倍. 沉降通量的平均值为 1.69g/(m^2·d), 最高值为 7.54g/(m^2·d), 出现在分解期末(图 2b). 沉降量、沉降通量和水体温度、凤眼莲生物量呈极显著正相关(P<0.01)(图 2c). 凤眼莲在生长、衰亡过程中会产生枯死的叶、茎、根等凋落物和死亡残体, 由于凤眼莲植株气囊[21]里有封闭的气体, 其残体可能不会立即沉降消失, 而会在水面上漂浮一段时间, 有的沉降到水底. 沉降到水底的凤眼莲残体凋落物和残体沉降物主要是未完全腐烂的茎、叶和根的纤维质碎片, 在湖底缺氧和中性 pH(测定的 pH 为 7.0±0.5)环境条件下, 难以完全降解, 于是以残体的形式沉积下来[22]. 随凤眼莲所处的阶段不同和水体温度的变化, 沉降量和沉降通量有着较大差异, 在生长期沉降物主要是凋落的枯死的叶、茎和根, 且水温相对较高, 分解得比较充分, 二者处于较低水平; 随着水温的降低, 凤眼莲成体的增多, 密度的增加, 凤眼莲凋落物和残体增多, 沉降通量开始增加, 尤其是残体漂浮期的后期; 在残体消失期, 二者趋于稳定. 这些规律对于凤眼莲的利用及生态管理具有重要的意义.

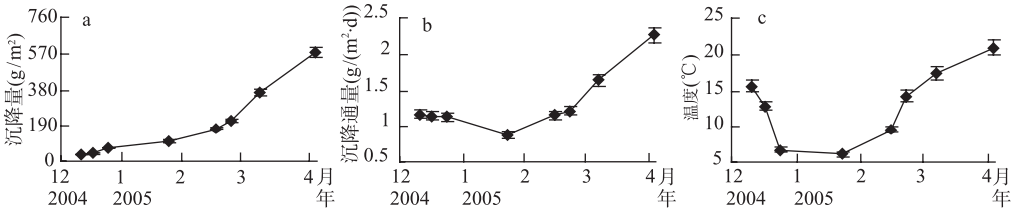

图 2 沉降量(a)、沉降通量(b)和水体温度(c)的变化

Fig.2 Changes of litter and residue(a), trend of downward fluxes(b) and temperature(c)

对沉降通量进行非线性回归方程拟合可得到如表 1 的方程, 从凤眼莲引入到漂浮凤眼莲完全沉降达到最大沉降通量期间, 沉降通量与时间呈抛物线关系; 而漂浮凤眼莲消失后, 二者呈指数关系.

表 1 不同时期沉降通量的拟合数学表达式*

Tab.1 Formula of the trend of downward fluxes in different phases

T(d)	拟合数学表达式	R^2
$T \leqslant 253$	$F=6E-05T^2-0.0117T+1.533$	0.9520
$T > 253$	$F=3.8308e^{-0.0021T}$	0.9851

* *F* 为沉降通量(g/(m²·d)); *T* 为时间(d).

2.2 凤眼莲凋落物和残体沉降物中有机碳含量的动态变化

凤眼莲凋落物和残体沉降物的有机碳含量大小顺序为生长期＜残体消失期＜残体漂浮期, 平均值分别为 18.33%、20.23%、30.77%, 峰值为 40.29%, 出现在 4 月初(图 3), 峰值过后, 有机碳含量迅速下降, 于 5 月初趋于稳定. 在生长期, 凤眼莲凋落物和残体的产生量较少, 而此时的水体温度相对较高(图 2c), 有机物分解得比较充分, 沉降物中的有机碳含量较稳定, 保持在较低水平. 在残体漂浮期, 随水体温度的降低, 微生物活动减弱, 凋落物和残体分解不充分, 沉降物中的有机碳呈现增加趋势. 而春季水温的升高, 凤眼莲气囊的破裂, 浮力减小, 不完全分解的物质沉降量增加, 使沉积物中的有机碳含量进一步增加, 并于 4 月初达到最大值. 漂浮的凤眼莲凋落物和残体消失后, 沉降量减少, 沉降物中有机碳的增加小于分解, 导致沉降物中无机物质增加, 而有机碳含量迅速降低, 并于 30d 后趋于平衡, 这与杨丽霞等研究的结果前期分解速度快, 后期速度变慢基本一致[23]. 进一步比较不同阶段有机碳含量可知, 残体消失期比生长期高 1.90%, 而峰值较生长期高 21.96%, 因此, 用凤眼莲治理富营养化水体时, 应在生长期末将其打捞, 已达到净化的目的.

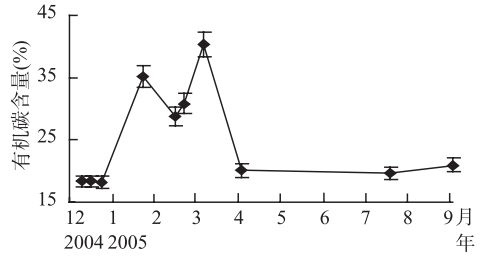

图 3 沉降物中有机碳含量(占干物质%)的变化

Fig.3 Change of the organic carbon in the sediment

2.3 凤眼莲凋落物和残体沉降物中总氮、总磷含量的动态变化

试验期间, 凤眼莲凋落物和残体沉降物中的总氮在生长期呈下降趋势, 平均值为 2.27%, 最低值出现在 2 月中旬, 残体漂浮期含量最高, 平均值为 3.24%, 峰值出现在 3 月中旬(3.66%), 而后下降至 8 月中旬趋于稳定(图 4a). 总磷在生长期变化不大, 在 0.32%–0.35%之间, 平均为 0.34%, 峰值出现在残体漂浮期(4 月初)为 0.90%, 而后迅速下降, 持续时间约 30d, 于 5 月初趋于稳定(图 4b). 在生长期后期, 凤眼莲趋于衰亡, 吸收氮、磷的能力降低, 植株中氮磷含量降低[18], 且此时水体温度相对较高(图 2c), 分解比较充分, 导致凋落物和残体沉降物中氮、磷含量较低. 而在残体漂浮期, 水面漂浮残体在短时间内的大量沉降[18], 凋落物和残体沉降物中氮、磷输入大于分解输出, 导致残体漂浮期沉降物中氮、磷含量升高,

并出现峰值. 峰值过后, 氮、磷含量下降较快, 大部分分解释放到水体中, 而水体中氮、磷含量的监测结果表明该阶段增长较快; 由于植物体的磷主要存在于一些生物活性物质中, 这些物质易于分解[24], 导致磷趋于平衡的时间短, 二者分别与 8 月、5 月趋于平衡. 此后, 剩下难分解物质木质素、纤维素等使分解受到抑制, 分解速率明显减慢[24], 并在 4 月底趋于稳定, 这与李文朝等研究的结果相近[25].

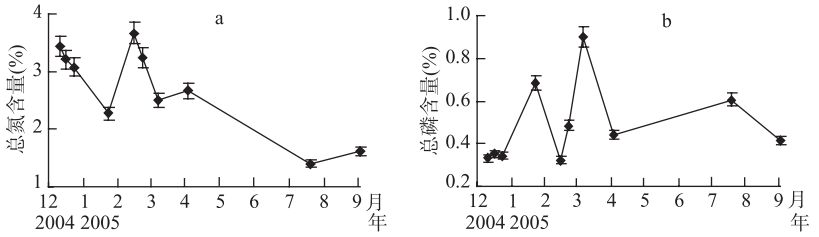

图 4 沉降物中总氮(a)和总磷(b)(占干物质%)的变化

Fig.4 Changes of the total nitrogen(a) and total phosphorus(b) (percentage of the dry substance)

凤眼莲从水体中吸收和富集碳、氮和磷[26], 又以凋落物和残体的方式沉积在底泥中, 或在较短的时间内释放大部分富集的碳、氮、磷, 成为水体碳、氮、磷的内源[27-30], 周而复始, 不断地进行着循环与转化. 由于受多种因子的影响, 凤眼莲凋落物和残体完全分解矿化和释放出全部的碳、氮、磷, 将是一个长期而缓慢的过程, 因而它们对抑制沉积物中营养盐的释放, 控制“内负荷”, 推迟湖泊的富营养化进程具有积极意义[31-33]. 然而, 凤眼莲在生长更替过程中会产生大量凋落物和残体沉降物, 且未分解矿化的残体量比较大[34], 其中生物有机物质还会引起较为显著的淤积物疏松效应[35], 会加快水体的沼泽化. 因此, 对于凤眼莲及其他水生植物凋落物和残体沉降物的定量及其管理研究显的尤为重要.

3 结论

在有凤眼莲生长的自然水体中: (1)自凤眼莲死亡至残体从水面消失的 4 个月中, 沉降瓶内的沉降量呈明显上升趋势, 残体漂浮期末(4 月中旬)是生长期末(12 月底)的 17 倍, 沉降通量的平均值为 1.69g/(m^2·d), 最高值为 7.54g/(m^2·d), 出现在残体漂浮期末. 沉降量、沉降通量与水温、生物量呈极显著正相关(P<0.01); (2)沉降物中有机碳含量在生长期处于较低水平, 平均为 18.33%, 残体消失期为 20.23%, 残体漂浮期最高为 30.77%, 峰值为 40.29%, 出现在 4 月初, 而后有机碳含量迅速下降, 并于 5 月初趋于稳定; (3)沉降物中的总氮在生长期降低, 平均值为 2.27%, 残体漂浮期含量最高, 平均值为 3.24%, 峰值(3.66%)出现在 3 月中旬, 而后下降至 8 月中旬趋于稳定. 总磷在生长期变化不大, 处于 0.32%–0.35%之间, 平均为 0.34%, 峰值(0.90%)出现在残体漂浮期(4 月初), 而后迅速下降, 于 5 月初趋于稳定.

凤眼莲凋落物和残体沉降物的产生与分解是一个复杂的动态变化过程, 既与自身的特点和组成有密切的关系, 如纤维素、碳、氮、磷等含量[36-37], 同时环境因素也有重要的影响[38-39], 其机理和过程及定量有待于进一步的研究.

致谢: 中国科学院南京地理与湖泊研究所濮培民研究员审阅本文初稿并提出修改建议, 特此致谢!

4 参考文献

[1] 戴全裕, 陈源高, 皮 宇等. 凤眼莲对含银废水中银的富集量及其应用研究. 应用生态学报, 1991, **2**(2): 159-167.

[2] 王崇效, 徐赛兰, 王志香等. 凤眼莲净化含酚污水的实验 I.盆栽和氧化塘实验及几种环境条件对除酚的影响. 环境科学学报, 1986, **6**(2): 207-215.

[3] 张志杰, 王志盈, 吕秋芬等. 凤眼莲对铅、镉废水净化能力的研究. 环境科学, 1988, **10**(5): 14-17.

[4] 刘灵芝. 污水净化过程中凤眼莲根区微生物的变化. 安徽农业科学, 2007, (2): 510.

[5] 王国祥, 濮培民, 张圣照等. 用镶嵌组合植物群落控制湖泊饮用水源区藻类及氮污染. 植物资源与环境, 1998, **7**(2): 35-41.

[6] 余远松, 润 坤. 凤眼莲水生生物系统处理大型养猪场废水的应用研究. 农业环境保护, 2000, **19**(5): 301-303.

[7] 成小英, 王国祥, 濮培民等. 凤眼莲腐烂分解对湖泊水质的影响. 中国环境科学, 2004, **24**(3): 303-306.

[8] 强蓉蓉, 王国祥, 张利民等. 凤眼莲死亡对湖泊水质的持续性影响分析. 中国环境监测, 2005, **21**(1): 24-27.

[9] Masifwa WF, Twongo T, Denny P. The impact of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart) solms on the abundance and diversity of aquatic macroinvertebrates along the shores of Northern Lake Victoria, Uganda, Fisheries Research Institute. *Springer Science & Business Media*, 2001, **452**(1-3): 79-88.

[10] 汪凤娣. 外来入侵物种凤眼莲的危害及防治对策. 黑龙江环境学报, 2003, **27**(3): 21-22.

[11] Kathiresan RM. Allelopathic potential of native plants against waterhyacinth. *Crop Protection*, 2000, **19**: 705-708.

[12] McVea C, Boyd CE. Effects of water hyacinth cover on water chemistry, phytoplankton, and fish in ponds. *Journal of Envirnomental Quality*, 1975, **4**(3): 375-378.

[13] 李 博. 入侵植物凤眼莲管理中的若干生态学问题. 复旦大学学报(自然科学版), 2004, **43**(2): 267-273.

[14] 杨凤辉, 马 涛, 陈家宽. 上海黄浦江凤眼莲灾害的发生机理及控制对策初探. 复旦大学学报(自然科学版), 2002, **42**(6): 599-603.

[15] 林 波, 刘 庆, 吴 彦等. 森林凋落物研究进展. 生态学杂志, 2004, **23**(1): 60-64.

[16] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲等. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机分解与碳、氮和磷释放的关系. 应用生态学报, 2008, **19**(2): 245-251.

[17] 厉恩华, 刘贵华, 李 伟等. 洪湖三种水生植物的分解速率及氮、磷动态. 中国环境科学, 2006, **26**(6): 667-671.

[18] 葛绪广, 王国祥, 李振国等. 凤眼莲植株碳、氮、磷含量的动态变化. 安徽农业科学, 2008, **36**(31): 13620-13621.

[19] 李志安, 邹 碧, 丁永祯等. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展. 生态学杂志, 2004, **23**(6): 77-83.

[20] 李海涛, 于贵瑞, 李家永等. 井冈山森林凋落物分解动态及磷、钾释放速率. 应用生态学报, 2007, **18**(2): 233-240.

[21] 颜素珠. 中国水生高等植物图说. 北京: 科学出版社, 1983: 309.

[22] 杨明生, 熊邦喜, 杨学芬等. 武汉南湖沉积物中水生植物残体及其氮磷分布. 生态学报, 2008, **28**(4): 1508-1513.

[23] 杨丽霞, 潘剑君, 苑韶峰. 黎平县森林土壤分解过程中有机碳的动态变化. 水土保持学报, 2004, **18**(6): 71-73.

[24] Corstanje R, Reddy KR, Portier KM. Typha latifolia and Cladium jamaicense litter decay in response to exogenous nutrient enrichment. *Aquatic Botany*, 2006, **84**(1):70-78.

[25] 李文朝. 东太湖沉积物中氮的积累与水生植物沉积. 中国环境科学, 1997, **17**(5): 418-421.

[26] 金送笛, 李永函, 倪彩虹等. 菹草(*Potamogeton crispus*)对水中氮、磷的吸收及若干影响因素. 生态学报, 1994, **14**(2): 168-173.

[27] Boers PCM, Raaphorst WV, Molen DTV. Phosphorus retention in sediments. *Wat Sci Tech*, 1998, **37**(3): 31-39.

[28] 吴根福, 吴雪昌, 金承涛等. 杭州西湖底泥释磷的初步研究. 中国环境科学, 1998, **18**(8): 107-110.

[29] 谢丽强, 谢 平, 唐汇娟. 武汉东湖不同湖区底泥总磷含量及变化的研究. 水生生物学报, 2001, **25**(4): 305-310.

[30] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究. 环境科学学报, 2002, **22**(6): 738-742.

[31] 黄清辉, 王东红, 王春霞等. 太湖梅梁湾和五里湖沉积物磷形态的垂向变化. 中国环境科学, 2004, **24**(2): 147-150.

[32] Jiang X, Jin XC, Yao Y *et al*. Effects of oxygen on the release and distribution of phosphorus in the sediments under the light condition. *Environmental Pollution*, 2006, **141**: 482-487.

[33] 吴丰昌, 万国江. 泸沽湖沉积物-水界面扩散作用对上覆水体基本化学组成的影响. 环境科学, 1996, **17**(1): 10-12.

[34] 易朝路, 吴显新, 刘会平等. 长江中游湖泊沉积微结构特征与沉积环境. 沉积学报, 2002, **20**(2): 293-302.

[35] 李文朝. 东太湖水生植物的促淤效应与磷的沉积. 环境科学, 1997, **18**(3): 9-12.

[36] Taylor BR, Parkinson D, Parsons WFJ. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates:a microcosm test. *Ecology*, 1989, **70**(1): 97-104.

[37] Swift MJ, Russell-Smith A, Perfect TJ *et al*. Decomposition and mineral-nutrient dynamics of plant litter in regenerating bush-fallow in sub-humid tropical Nigeria. *J Ecol*, 1981, **69**: 981-995.

[38] Shanks RE, Olson JS. First-year breakdown of leaf litter in southern Appalachian forests. *Science*, 1961, **134**: 194-195.

[39] Jenney HS, Gessel P, Bingham FT. Comparative study of decomposition rates of organic matter intemperate and tropical regions. *Soil Science*, 1949, **68**: 419-432.