

2004 年夏季太湖梅梁湾席状漂浮水华风力漂移入湾量计算

白晓华^{1,2}, 胡维平^{1*}, 胡志新^{1,2}, 李香华¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 太湖北部重度水华暴发时, 在夏季盛行风推动下, 漂浮的席状水华可由大太湖漂移进入位于太湖北部的梅梁湾, 使湾内的水华加剧. 本文通过室内风箱水槽实验和野外观测, 对水华的风力漂移作了定量研究, 建立了风速与水华漂移速度的指数相关方程. 并据此对 2004 年夏季太湖北部发生席状水华的 6d 分别计算了水华风力漂移入湾量. 6d 中, 只有 2004-07-31 水华漂移是由湾内向大太湖输出, 且量很小, 只有 0.05 km^2 ; 其余 5d 水华漂移进入梅梁湾的面积占整个梅梁湾面积的 $3.7\% \sim 13.3\%$, 进入量最大的是 2004-06-11, 达 17.4 km^2 , 最少的是 2004-07-30, 为 4.8 km^2 .

关键词: 太湖梅梁湾; 席状水华; 风力漂移; 漂移速度; 风速

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)06-0057-04

Importation of Wind Driven Drift of Mat-Like Algae Bloom into Meiliang Bay of Taihu Lake in 2004 Summer

BAI Xiao-hua^{1,2}, HU Wei-ping¹, HU Zhi-xin^{1,2}, LI Xiang-hua¹

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: Driven by the prevailing south wind in summer, floating mat-like algal blooms in the open area of Taihu Lake would drift into Meiliang Bay located in the northern part of Taihu Lake. An exponential relationship between wind speed and algal drift velocity was found through controlled flume experiments and field observations. Then the relationship was applied to compute drift importation into Meiliang Bay in six dates when mat-like algal blooms were happening. During the six dates, except on 2004-07-31 the algal boom drifted outwards from Meiliang Bay with slight amounts of 0.05 km^2 ; for the rest of dates, the importations were inwards positive, the maximum importation occurred on 2004-06-11, being 17.4 km^2 , and the minimum importation on 2004-07-30, being 4.8 km^2 . The results indicated importation of wind-driven algae drift during 24 hours accounts for $3.7\% \sim 13.3\%$ of the area of Meiliang Bay.

Key words: Meiliang Bay of Taihu Lake; floating mat-like algal bloom; wind-driven algae drift; algal drift velocity; wind speed

近年来, 太湖北部梅梁湾在夏季会暴发严重的蓝藻水华. 梅梁湾作为无锡市的主要水源地和著名的风景区, 水华的暴发严重影响了当地的经济发展和市民生活. 因此太湖梅梁湾水华的发生机理成为研究热点之一.

已有研究表明, 由于风引起的藻类聚集, 可能是梅梁湾水华暴发的主要原因之一. 范成新^[1]等发现季节性盛行风场与太湖夏季水华暴发具有一定的相关性. 杨清心^[2]认为风集作用是影响太湖水藻空间分布的主要因素, 是太湖西北部水华严重的主要原因, 所谓的风集作用系指风场形成的表层风生流携带藻类向对岸移动. 风对藻类水平迁移的作用可以分为 2 种情况: ①水藻随风生流运动, 运动速度即水的流速, 水藻在水中呈颗粒态; ②漂浮在水面上的大片席状水藻聚集体, 其水平运动的主要动力是风, 运动速度要大于湖流流速.

关于水藻随风生流运动, 朱永春等在对湖流模

拟的基础上建立了一个三维藻类迁移模型, 藻类的水平迁移被认为是与湖流同步的^[3]. 但关于藻类直接在风力作用下的漂移运动, 未见有关文献报道.

为量化藻类水华的风力漂移运动, 进行了室内水槽试验研究和野外观测, 建立了风速与水华藻类漂移速度的指数相关方程. 据此计算了 2004 年夏季太湖梅梁湾席状漂浮水华风力漂移入湾量, 有助于进一步揭示太湖梅梁湾蓝藻水华的暴发机理.

1 水华风力漂移的风箱水槽实验及野外观测

1.1 风箱水槽实验

藻类漂浮在湖面水平运动时, 其所受主要作用

收稿日期: 2004-11-06; 修订日期: 2005-01-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601011-01); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX-SW-12-II-01)

作者简介: 白晓华(1968~), 男, 博士研究生, 研究方向为物理湖泊学.

* 通讯联系人: E-mail: wphu@niglas.ac.cn

力是风力和湖水的摩擦力.根据物理模型力相似的原理,以水槽和风箱(图1)模拟太湖上风力对水藻水华的水平推动作用.以平均风速近似表达风力作用的强弱,以平均运动速度近似描述水华水藻的水平运动状态.作为初步研究,实验设计时在以下5个方面作了简化处理:

(1)湖面上的风,速度和方向是脉动的,随时间地点变化,因此风作用于漂浮水藻上的力也是随时变化的,仅以平均风速来表示风的力学特征虽然较为方便但较为粗略.

(2)水藻在持续风力的作用下,藻类的水平运动是一个持续加速过程,但本实验以平均速度来描述藻类运动.

(3)水藻水华在物理性质,如密度,厚度,覆盖面积大小等方面存在差异,会在不同程度上影响藻的漂移运动.以水华水藻不同聚集特点分类加以研究,比较困难,暂作同一处理.

(4)湖水对漂移水藻的摩擦阻力是藻类漂移的主要作用力之一,其大小随水华藻类物理特征的不同,漂移速度的变化而变化.本文未考虑湖水的摩擦阻力,视风力是水藻水平运动的决定作用力.

(5)未考虑波浪,藻自身的运动对其漂移运动的影响.

1.1.1 实验材料

藻类取自太湖近岸已形成的水华.在采集时,藻类受扰动而分散;在盆中放置一段时间后,表面会形成较为致密的一层.

1.1.2 试验设施及方法

为了研究风速与藻类水平漂移速度的关系,建造了长方体有机玻璃风箱,长宽高分别为300cm、59cm和19cm.底部设带有刻度的水槽,长宽深分别为150cm、30cm和10cm.在有机玻璃风箱的一端安装带有变频器的鼓风机,通过管道形成平行水槽水面的稳定气流,如图1.风箱内风速以风箱中部最大,上下与两边风速均略低于中部.

试验中,在风箱内风速稳定后,在风箱出口用手持风向仪测定风箱中部平均风速;在水槽一端加入藻类,藻类浮在水面,用秒表记录水藻大斑块的漂移时间,目视读取漂移距离.

1.2 野外观测方法

在中科院太湖生态系统研究站的栈桥远离岸的一端(距岸约100m)选择10m长的一段,安装刻度尺,目测水华藻斑块沿刻度漂移的距离,再根据漂移方向与栈桥的夹角,计算漂移距离.同时用秒表记录

时间,如图2.栈桥上常年安装有自记风速仪.

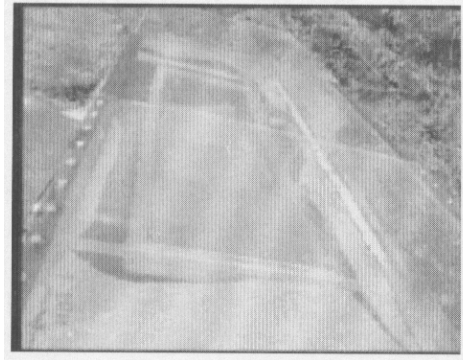


图1 风箱水槽

Fig.1 Flume and swallow

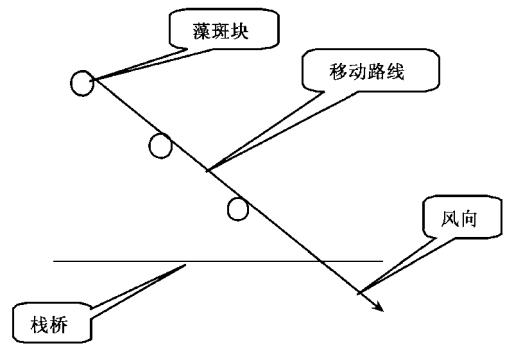


图2 野外观测示意图

Fig.2 Sketch of field observation

2 结果与讨论

2.1 风箱水槽实验结果

实验中,风速小于2.0m/s时,水槽水面没有明显波浪,水藻斑块沿水面平稳移动.随风速的增加,漂移速度增加.风速大于3.2m/s时,水槽内形成较大波浪,直至槽底部,水藻作剧烈垂向运动,水藻斑块快速分散,整个水槽很快充满水藻.不同风速条件下,测得藻类漂移速度见表1.

表1 风箱水槽实验结果

Table 1 Results of flume experiment

平均风速 / $m \cdot s^{-1}$	藻平均漂移 速度/ $m \cdot s^{-1}$	藻最大漂移 速度/ $m \cdot s^{-1}$	藻最小漂移 速度/ $m \cdot s^{-1}$	标准误差
0.7	0.039	0.046	0.026	0.0074
1.3	0.047	0.059	0.032	0.0086
2.0	0.052	0.070	0.039	0.016
2.8	0.086	0.110	0.070	0.017
3.0	0.098	0.118	0.085	0.013
3.2	0.123	0.136	0.099	0.014

用最小二乘法拟合平均风速与水华藻漂移速度点据(图3),两者呈良好的指数关系, R^2 为0.9581,故风速与藻类水华水平漂移速度的普遍关系可用方

程(1)表示: $\ln V_{藻} = C_1 + C_2 V_{风}$ (1)

其中, C_1, C_2 为系数.

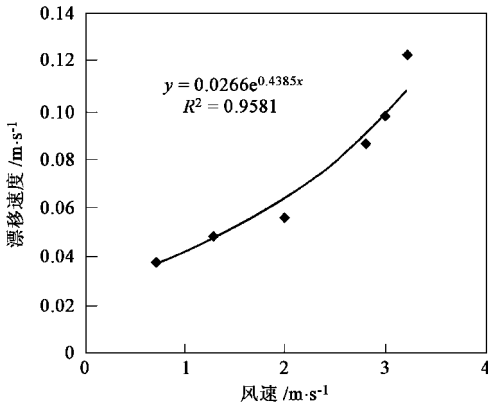


图 3 风箱水槽数据拟合图

Fig. 3 Relation equation in flume and swallows

在风速为 0 时,藻类仍有漂移速度,此速度为扩散速度,即水华由高浓度到低浓度的自由扩散,水槽中约为 0.03 m/s.

水槽实验是在室内环境下,对太湖湖面风推动水华水藻移动的物理模拟.因为水华藻漂移的控制性动力是风力,因此太湖与水槽尽管存在尺度上的巨大差异,从物理模型力相似原理的角度,水槽风箱还是可以较好地表达太湖漂浮水华的风力漂移运动.由此建立的相关关系具有一定的普遍意义,是进一步研究太湖原型关系方程的基础.

2.2 野外观测结果

水槽实验所用藻取自太湖水华,不可避免地对其结构产生扰动,而且由于是放在清水中观测,因此水藻自由扩散运动对观测的影响较大.鼓风机产生的风与太湖湖面风在均值、脉动等方面也会有差异.另外,水槽的边界条件也与太湖开阔水面的情况有相当大的不同.因此,尽管水槽实验确立了两者存在的指数相关关系,但是必须用野外观测数据来确定关系方程(1)的系数 C_1, C_2 ,才符合较为复杂的实际环境.不同风速条件下,测得湖面藻类漂移速度见表 2.

野外观测数据的最小二乘拟合结果见图 4,拟合结果很好, R^2 达 0.9956, C_1, C_2 分别为 1.2056 和 1.4055.经野外观测确定的梅梁湾风速与藻类水华漂移速度关系方程如方程(2).

$$\ln(1000 \times v_{藻}) = 1.2056 v_{风} + 1.4055 \quad (2)$$

$$v_{风} \leq 2.8 \text{ m/s}$$

风速为 0 时的自由扩散速度为 0.004 m/s,远小

于水槽扩散速度.原因是野外开阔水面上的水华藻聚集的面积很大,扩散受到制约,而水槽实验是在清水中加入藻,因此扩散速度要快得多.

表 2 野外观测结果

Table 2 Results of field observation

平均风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	藻漂移速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	藻最大漂移 速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	藻最小漂移 速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	标准误差
1.4	0.022	0.024	0.020	0.0020
1.9	0.029	0.034	0.026	0.0038
2.4	0.079	0.104	0.063	0.017
2.8	0.114	0.141	0.090	0.022

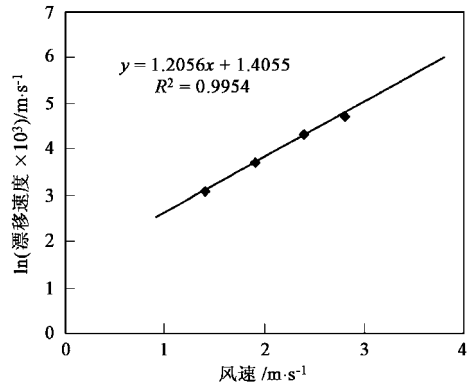


图 4 野外观测数据拟合图

Fig. 4 Relation equation in field

3 2004 年夏季梅梁湾水华风力漂移 24h 入湾量

太湖梅梁湾是无锡市水源地和主要的风景区.由于近年来夏季微囊藻水华的暴发,水质急剧恶化,导致城市取水和沿湖岸景观受到很大影响.关于梅梁湾水华暴发机制目前还未完全清楚.梅梁湾内的水华可能有 3 个来源,一是本地繁殖,微囊藻繁殖速度很高,应是水华藻的主要来源;另外 2 个来源分别是通过湖流和风力输移进入.本文研究的是以风力漂移形式出入梅梁湾的藻类水华量.

太湖夏季的主导风向 6、7 月份为东南风,8 月份为东、东偏南、东偏北^[4].由于梅梁湾位于太湖的正北位置,严重水华暴发时,南来风可将梅梁湾外大太湖的席状水华吹进梅梁湾,加剧梅梁湾的水华.

据梅梁湾风速与水华藻漂移的相关方程(2),以公式(3)计算了 2004 年夏季 6~8 月梅梁湾与大太湖之间的水华风力漂移量,计算结果见表 3.

$$S = \cos(\theta) \times v_{藻} \times t \times L \times 3.6 \quad (3)$$

式中, S 为漂移面积,单位 km^2 ; θ 为各风向矢量与正南(南风为 0°)矢量的夹角; t 为风的历时,单位

h ; $v_{藻}$ 为水华藻漂移速度,单位 m/s ; L 为梅梁湾口断面长度.

计算日期选择在梅梁湾口附近太湖站湖面观测到席状水华时,分别是 06-11、06-21、06-22、07-30、07-31 和 08-02.

表 3 2004 夏季席状水华梅梁湾风力漂移面积

Table 3 Wind-driven algae drift to Meiliang Bay of Lake Taihu in summer of 2004

日期 /月-日	平均风速 / $m \cdot s^{-1}$	风向夹角 / $(^\circ)$	漂移速度 / $m \cdot s^{-1}$	风历时 /h	输移面积 / km^2
06-11	1.33	0	0.0203	3	1.532
	1.15	67.5	0.0163	2	0.315
	2.54	22.5	0.0872	5	10.146
	2	45	0.0455	1	0.810
	2	22.5	0.0455	2	2.116
	2.35	45	0.0693	2	2.470
					17.389(合计)
06-21	2.17	0	0.0558	4	5.624
	2	22.5	0.0455	1	1.058
	2	45	0.0455	1	0.810
	1	67.5	0.0136	1	0.131
	2.57	90	0.0904	3	0.000
	1.3	135	0.0195	1	-0.348
					7.275(合计)
06-22	2.7	45	0.1057	1	1.884
	1.83	0	0.0370	4	3.733
	2	22.5	0.0455	2	2.116
					7.733(合计)
07-30	2.4	45	0.0736	4	5.247
	1.7	67.5	0.0317	1	0.305
	2.3	90	0.0653	1	0.000
	1.85	112.5	0.0379	2	-0.732
					4.821(合计)
07-31	1.3	45	0.0195	1	0.348
	2.35	90	0.0693	4	0.000
	1.5	135	0.0249	2	-0.887
	1.7	112.5	0.0317	1	-0.305
	1.7	0	0.0317	1	0.798
08-02	1.3	67.5	0.0195	1	0.188
	1.5	45	0.0249	2	0.887
	2.17	22.5	0.0558	4	5.196
	1.7	0	0.0317	1	0.798
					7.069(合计)

水槽试验的结果表明存在一个临界风速 $3.2 m/s$, 小于临界风速时,藻类在水面平稳漂移,大于临界风速时,波浪作用使藻类作强烈垂向运动,上下混合趋于均匀.在中科院太湖生态系统研究站附近湖面上观测到的临界风速约为 $3.0 m/s$,与朱永春等在太湖梅梁湾的研究成果相近^[3].计算中使用的风速资料为相应日期太湖站栈桥自记风速仪实测小于 $3.0 m/s$ 的风速及其历时,大于 $3.0 m/s$ 的风速略去,再据不同风向计算平均风速和累计历时.

梅梁湾 2004 年夏季,小于 $3.0 m/s$ 的风向以东

南风最多,历时占 51% ,其次是西南风,占 22% ,南风占 18% ,三者合计占 91% ,而北来风仅占 9% ,由此可知,夏季水华输移以入湾为主.表 3 中 6 个席状水华暴发日中,只有 07-30 输移出入平衡值为负,即水华漂出湾的多于入湾的,但数量极小,基本可认为进出相等.水华漂入梅梁湾最多的是 6 月 11 日,漂入面积达 $17.4 km^2$.

4 结论

风力对藻类水华的水平输移,主要是对席状、条带状的重度水华,这类水华会覆盖较大面积的水面,风力可以推动其在水面上移动.轻度水华的藻类聚集体呈颗粒态,风力对其运动影响较小,它们一般随水流运动.风力驱动的水华漂移运动,在风速与漂移速度之间存在明显的指数相关关系.

梅梁湾面积约 $131 km^2$.当太湖站湖面观测到席状水华时,梅梁湾几乎完全被水华所覆盖.以 24 h 的时间尺度衡量,由风力漂移进入梅梁湾的水华可占整个水华面积的 $3.7\% \sim 13.3\%$.

国内外在湖泊水库水华的研究中,建立了一些数学模型来模拟湖泊物理过程和生物过程,包括藻类生长繁殖过程^[5-8],但是对风力驱动下的藻类漂移没有涉及.本文对风速与水华漂移速度的定量化研究,将有助于提高此类模型模拟的精度,有助于对水华暴发机理的研究.

参考文献:

- [1] 范成新,陈宇炜,吴庆龙.夏季盛行风对太湖北部藻类水华分布的影响[J].上海环境科学,1998,17(8):4~11.
- [2] 杨清心.太湖水华成因及控制途径初探[J].湖泊科学,1996,8(1):67~74.
- [3] 朱永春,蔡启铭.风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究[J].湖泊科学,1997,9(2):152~158.
- [4] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等.太湖水环境演化过程与机理[M].北京:科学出版社,2004.107~108.
- [5] 胡维平,秦伯强.太湖水动力学三维数值实验研究——4.保守物质输移扩散[J].湖泊科学,2002,14(4):310~316.
- [6] Chen C S, Ji R, Schwab D, et al. A model study of the coupled biological and physical dynamics in Lake Michigan[J]. Ecological Modelling, 2002, 152:145~168.
- [7] Dubnyak S, Timchenko V. Ecological role of hydrodynamic processes in the Dnieper reservoirs[J]. Ecological Engineering, 2000, 16:181~188.
- [8] Bonnet M P, Wessen K. ELMO, a 3-D water quality model for nutrients and chlorophyll: first application on a lacustrine ecosystem[J]. Ecological Modelling, 2001, 141:19~33.