

不同光强下小球藻纵向沉降及悬浮特性研究

卢金锁, 张 博, 张 旭

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过用自制沉降柱研究小球藻(*Chlorella vulgaris*)在表层不同光强作用下纵向沉降特性以及分布规律, 为进一步了解水库中小球藻的纵向分布提供参考。实验室培养的小球藻按其直径可分为小于 4.5 μm 、4.5~5.5 μm 、大于 5.5 μm 3 个等级, 不同粒径的小球藻在不同光强的作用下沉速不同; 实验条件下小球藻的沉速分布在 0.1~468.2 $\mu\text{m/s}$, 均值为 32.8 $\mu\text{m/s}$; 小球藻的沉降速度随沉降柱表层光强增强而降低, 无光状态下沉速是表层光强为 10 000 lx 的 2~3 倍; 小球藻直径大小与沉速呈正相关, 直径 4.5~5.5 μm 的小球藻沉速是 3.5~4.5 μm 的 5~6 倍; 沉降稳定后实验柱中小球藻从表层至底层粒径逐渐变大, 除底层外小球藻在纵向峰值随光强增加而向下延伸, 如实验柱表层光强为 1 000 lx 和 4 000 lx 时小球藻峰值出现实验柱表层, 而表层光强为 7 000 lx 和 10 000 lx 的实验峰值分别出现在水下 300 mm 和 600 mm 处。

关键词: 小球藻(*Chlorella vulgaris*); 纵向沉降; 光照强度; 叶绿素; 沉速

中图分类号: X17

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2013)09-0054-07

浮游藻类纵向沉降现象普遍存在于湖库生态系统中, 其机理涉及自然环境、水体水动力和藻类自身特性等多重因素, 其中藻类细胞自身的生理、形态特性在纵向沉降过程中起到重要作用。对于不能自由游动的小球藻, 其纵向沉降与自身结构、形状、直径、密度以及水体密度、黏滞系数相关。在静止水体中, 浮游植物的纵向沉降速度遵守 Stokes 理论^[1], 但由于密度、阻力系数等多个参数无法直接得到, Stokes 公式使用受限。国外学者通过实验或仪器得出一些藻类的纵向沉降速度范围, 如冠盘藻属 0.03~83 $\mu\text{m/s}$ 、水华束丝藻 111~764 $\mu\text{m/s}$ 、直链藻 9~80 $\mu\text{m/s}$ 、脆杆藻 19~118 $\mu\text{m/s}$ ^[2], 目前国内外没有关于小球藻纵向沉降速度的研究和研究藻类沉降速度的精确方法。

小球藻(*Chlorella vulgaris*)是单细胞藻, 分类学上属于绿藻门(chlorophyta)、绿藻纲(Chlorophyceae)、绿球藻目(Chlorococcale)、小球藻科(Chlorellaceae)、小球藻属(*Chlorella* Beijerinck)^[3]。在夏季, 绿藻作为金盆水库的优势种群, 数量占总数的 80%左右, 小球藻占有一定比例^[4], 因此, 研究不能自由游动的具有代表性的小球藻纵向沉降规律对水库规避藻类取优质水有重要意义。

小球藻由于受到外界环境影响, 使自身结构、形状、大小发生改变, 产生纵向沉降现象。研究发现, 风、温度、营养物质、水质分层、太阳辐射、浮游

动物、光强以及光照周期等环境因素会影响藻类自身的物理化学特性, 从而诱导藻类纵向沉降, 特别是在光照驱动条件下, 小球藻自身结构会产生复杂变化引起细胞密度改变^[5-7], 如鱼腥藻和微囊藻会因光强的变化, 改变细胞内伪空胞的大小和碳水化合物含量, 从而调节其浮力大小^[8]。从微观个体行为发生机制来讲, 小球藻的粒径较小, 细胞的主要组成成分如蛋白质、糖类、糖脂、核酸密度均大于水, 但总密度接近于水, 光强变化可引起其生理结构和细胞组成成分比例的改变, 进而改变其纵向沉降特性。所以, 光照强度变化对小球藻纵向沉降影响甚大。本研究通过实验计算小球藻在各光照强度下的下沉速度, 为金盆水库取水塔取水时有效规避藻类提供数据支持。

1 材料和方法

1.1 藻种来源与培养条件

小球藻从中国淡水藻种库(FACHB-Collection)购买, 置于光照培养箱中用 BG11 培养基将小球藻培养到稳定期, 温度控制在 25℃±1℃, 光强 3 000 lx,

收稿日期: 2013-01-26; 修回日期: 2013-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008242); 陕西省科技发展项目(2012KJXX-32)

作者简介: 卢金锁(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为水环境修复与净水处理, 电话: 13991126672, E-mail: lujinsuo@163.com

按 $L:D=12:12$ 控制光照^[9]。用尼康 50i 显微镜观测稳定期的小球藻(原藻), 测得单细胞直径为 $3\sim6\ \mu\text{m}$ 。各直径小球藻所占总数比例分别为: 粒径小于 $4.5\ \mu\text{m}$ 的小球藻占总数 $65\%\sim79\%$ 、粒径 $4.5\sim5.5\ \mu\text{m}$ 的小球藻占总数 $20\%\sim28\%$ 、粒径大于 $5.5\ \mu\text{m}$ 的小球藻占总数 $1\%\sim7\%$ 。

1.2 实验装置

实验装置为一个自制的圆柱形有机玻璃沉降柱。沉降柱壁厚 $15\ \text{mm}$, 高 $4\ 300\ \text{mm}$, 直径 $150\ \text{mm}$, 在侧壁外从上至下设置 17 个直径为 $8\ \text{mm}$ 的取样口, 取样口引管向内伸入 $10\ \text{mm}$, 避免小球藻在内壁附集造成取样浓度偏高及取水时内壁摩擦阻力对藻密度的干扰; 沉降柱上端安置多级可控灯箱, 距沉降柱顶端 $150\ \text{mm}$, 可调等级为水体表面光强 $1\ 000\ \text{lx}$ 、 $4\ 000\ \text{lx}$ 、 $7\ 000\ \text{lx}$ 和 $10\ 000\ \text{lx}$; 在灯箱内侧安置两台电风扇, 防止灯放散造成表层水体水温升高; 沉降柱上端 $300\ \text{mm}$ 为隔热区域, 下部 $4\ 000\ \text{mm}$ 为实验水体区域, 并用 $5\ \text{mm}$ 厚黑色保温膜包裹实验水体区域, 起到遮光保温的作用, 据报道, 小球藻生长的适宜水温是 $10\sim33\ ^\circ\text{C}$, 最适温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ 左右^[10], 因此水体温度保持在 $23\sim30\ ^\circ\text{C}$ 。

1.3 测定方法

沉降柱上方和实验水体中的光强由光照计测量; 小球藻的形态和大小用尼康 50i 显微镜观测。

实验前配制若干个小球藻密度梯度, 用多参数水质监测仪(HydrolabDS5)测定其叶绿素 *a*, 并用丙酮萃取-紫外分光光度法进行校核^[11], 小球藻在 $680\ \text{nm}$ 波长处最为灵敏^[12], 同时使用可见紫外分光光度计(HydrolabDR5000)测 $680\ \text{nm}$ 吸光值, 得到叶绿素 *a* 与吸光值的线性方程^[13], 即: $y=3596x-2.3117(R^2=0.999)$, 之后实验只需取少量水监测吸光值, 通过上述线性方程计算其叶绿素 *a*。

1.4 实验设置

实验水体为 $0.45\ \mu\text{m}$ 微孔纤维滤膜过滤后的金盆水库原水, 滤膜经煮沸处理, 避免滤膜中的有机物影响原水水质。实验前 $12\ \text{h}$ 向沉降柱中注入原水约 $70.65\ \text{L}$ 至 1 号取样口, 使原水均匀混合并沉淀杂质。将已培养至稳定期的小球藻缓慢加在原水表层, 其叶绿素 *a* 总量控制在 $2\ 000\sim5\ 000\ \mu\text{g}$, 沉降稳定后平均质量浓度为 $30\sim80\ \mu\text{g/L}$ 。实验分五组进行, 分别为无光、水体表面光强 $1\ 000\ \text{lx}$ 、 $4\ 000\ \text{lx}$ 、 $7\ 000\ \text{lx}$ 和 $10\ 000\ \text{lx}$, 水质指标均不变, 每组实验沉降 $4\ \text{d}$,

取样间隔从 $1\ \text{h}$ 到 $8\ \text{h}$ 逐渐延长。测量所取水样吸光值并计算叶绿素 *a* 浓度, 同时用显微镜观测小球藻的形态和大小。

1.5 数据处理

Stokes 法则把藻类细胞视为球形颗粒, 从理论上可以计算验证细胞沉降速率, 但忽略了细胞黏性、结构变化等因素, 且密度、阻力系数等参数无法直接得到。图 1 为沉降柱计算单元示意图, 通过图 1 推导出本实验的迁移速度计算式^[14-15]。

实验开始时, 从沉降柱顶部缓慢加入原藻, 小球藻集中于沉降柱表层, 即水柱表层计算微元深度内, 如图 1 a, 此时表层叶绿素 *a* 浓度为 $d_{A\text{表层}}$, 中间层叶绿素 *a* 浓度为 $d_{A\text{mid}}$, 经过 t 小时沉降, 粒径较大的小球藻迅速迁移至中间层计算断面, 水柱表层则停留着粒径较小的小球藻, 两层之间的小球藻按粒径大小在纵向上依次分布, 如图 b, 此时表层叶绿素 *a* 浓度为 $d_{B\text{表层}}$, 中层叶绿素 *a* 浓度为 $d_{B\text{mid}}$ 。

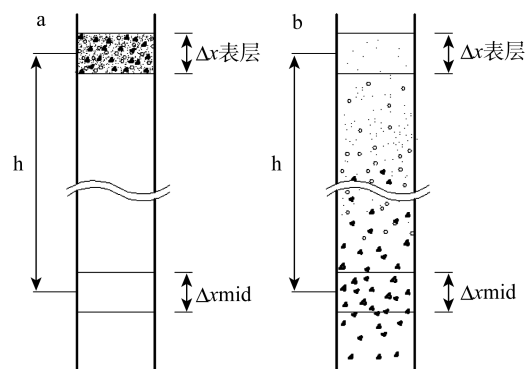


图 1 沉降柱计算单元示意图

Fig.1 Settling column computing element schematic diagram

a. 实验开始时小球藻分布; b. t 小时后小球藻分布

a. Chlorella distribution at the beginning of experiment; b. Chlorella distribution after t hours

$$d_{\text{表层}} = d_{A\text{表层}} - d_{B\text{表层}} \quad (1)$$

$$d_{\text{mid}} = d_{B\text{mid}} - d_{A\text{mid}} \quad (2)$$

$$M_{\text{表层}} = d_{\text{表层}} A_{\text{表层}} \Delta x_{\text{表层}} \quad (3)$$

$$M_{\text{mid}} = d_{\text{mid}} A_{\text{mid}} \Delta x_{\text{mid}} \quad (4)$$

式中, $d_{\text{表层}}(\mu\text{g/L})$ 为表层减少的叶绿素 *a* 浓度, $d_{\text{mid}}(\mu\text{g/L})$ 为中间层增加的叶绿素 *a* 浓度, $M_{\text{表层}}(\mu\text{g})$ 为计算微元体积中表层减少叶绿素 *a* 总量, $M_{\text{mid}}(\mu\text{g})$ 为计算微元体积中中间层增加叶绿素 *a* 总量, $A_{\text{表层}}$ 、 $A_{\text{mid}}(\text{m}^2)$ 分别为表层水柱和中间层水质的截面积, $\Delta x_{\text{表层}}$ 、 $\Delta x_{\text{mid}}(\text{m})$ 分别为水柱表层和中层的计算微元深度。

实验中迁移速度 $V(\text{m/h})$ 是通过到达水柱中层的粒径较大小球藻的总迁移距离(即 $M_{\text{mid}}h$) 计算出水柱表层所有参与沉降的不同粒径小球藻的平均迁移速度, 是计算时间段内所有参与沉降的一类小球藻总体的平均迁移速度, 利用迁移速度 $V(\text{m/h})$ 来确定小球藻平均下沉运动强度, 公式如下:

$$V = \frac{M_{\text{mid}}h}{M_{\text{表层}}t} \quad (5)$$

式中, $t(\text{h})$ 为沉降时间, $h(\text{m})$ 为水柱表层距中层的深度。

实验中所用沉降柱为圆柱体, 则 $A_{\text{表层}}$ 与 A_{mid} 相等, 计算出的微元体积 $A_{\text{表层}} \cdot \Delta x_{\text{表层}}$ 与 $A_{\text{mid}} \cdot \Delta x_{\text{mid}}$ 相等。将(1)、(2)式分别代入(3)、(4)式, (3)、(4)式代入(5)式, 最终得出本实验的公式如下:

$$V = \frac{(d_{B\text{mid}} - d_{A\text{mid}})h}{(d_{A\text{表层}} - d_{B\text{表层}})t} \quad (6)$$

利用公式(6)对 5 次光强梯度沉降实验所得数据进行处理, 在不同时间阶段, 得出实验沉降柱各取样口的平均沉速。计算结果单位转换为 $\mu\text{m/s}$ 。

2 结果与分析

2.1 小球藻宏观沉降特性

根据底层取样孔镜检结果, 将每组沉降实验分为三期, 即实验 I、II 和 III 期。其中, 实验 I 期为实验开始至除底层外镜检中鲜见直径大于 $5.5 \mu\text{m}$ 小球藻, 实验 II 期为实验 I 期结束至除底层外镜检中鲜见 $4.5 \mu\text{m}$ 的小球藻; 实验 III 期为实验 II 期结束至实验水体中小球藻稳定、无明显迁移运动。因此, 实验

I 期沉降为所有粒径小球藻参与沉降呈现的宏观沉降特性, 实验 II 期为所有直径小于 $5.5 \mu\text{m}$ 的小球藻参与沉降的特性, 实验 III 期为所有直径小于 $4.5 \mu\text{m}$ 的小球藻参与沉降的特性。尽管在不同实验期所得沉速为参与沉降小球藻的宏观沉速, 但在不同沉降期的沉降距离主要由该期间粒径相对较大的小球藻完成, 而粒径较小的小球藻在此沉降期中所贡献的沉降距离较短, 在计算此沉降期的沉速时影响较小, 可忽略不计, 从图 1 中所示的沉降过程可直观看出。如实验 I 期时, 所有不同粒径小球藻都从表层开始沉降, 但直径大于 $5.5 \mu\text{m}$ 小球藻比小粒径小球藻的沉速大且沉降距离最长, 直径大于 $5.5 \mu\text{m}$ 小球藻在计算沉速时占主导因素。所以, 在实验 I 期所得沉速主要体现了直径大于 $5.5 \mu\text{m}$ 小球藻沉降特性, 在实验 II 期所得沉速主要体现了直径在 $4.5 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 小球

藻沉降特性, 而在实验 III 期沉速为直径小于 $4.5 \mu\text{m}$ 小球藻沉降速度。

将各光照强度下实验中所得不同沉速进行统计分析, 其各沉速范围的数量分布如图 2 所示。在实验 I 和 II 期, 表层无光条件下沉速份额最大, 呈现随光强增加沉速份额先降低后增加的趋势, 在表层光强为 $4\ 000 \text{ lx}$ 时沉速份额达到最低, 说明在无光和 $10\ 000 \text{ lx}$ 时大粒径小球藻可较长时间悬浮, 而在其他光强条件下大粒径小球藻沉降特性表现较强。

在实验 III 期, 各光照条件下沉速份额占总数的 63% 以上, 这与实验前原藻中直径小于 $4.5 \mu\text{m}$ 的小球藻超过半数比例相吻合, 说明在该期实验所得沉速主要为该粒径范围小球藻沉速; 进一步观察在表层无光条件下, 沉速份额最小, 仅为 63%, 而在表层光强为 $4\ 000 \text{ lx}$ 时沉速份额最大, 达到 93%, 呈现随光强增加沉速份额先增加后降低的趋势, 说明小粒径小球藻沉降特性随光强增加而降低, 在表层光强为 $4\ 000 \text{ lx}$ 时沉降特性最弱, 随后随光强增加沉降特性略有增加; 同时在表层光强在 $4\ 000 \text{ lx}$ 和 $7\ 000 \text{ lx}$ 时, 沉速所占份额超过原藻中该粒径范围所占比例, 说明在该光强条件下, 使得部分沉降较快藻类沉速降低, 两种光强降低沉降特性, 增强了悬浮特性, 反之, 在无光条件下, 小球藻沉速份额小于原藻中小于 $4.5 \mu\text{m}$ 的小球藻所占比例, 说明无光条件能降低小球藻的悬浮特性, 因此, 表层光强为 $4\ 000 \text{ lx}$ 和 $7\ 000 \text{ lx}$ 时, 小粒径小球藻悬浮特性较强、沉降特性较弱, 其余光强条件下小粒径小球藻表现出较强的沉降特性而悬浮特性较弱。

已有研究表明, 小球藻单位细胞叶绿素 a 的变化随光强增加呈现出低-高-低趋势(光抑制作用), 且光强在 $5\ 000 \text{ lx}$ 时小球藻生长速率和单位水体叶绿素 a 含量最高^[16]。而在静水条件下, 大多数非浮游藻类会下沉, 但藻类为了能够更多的吸收可见光进行光合作用、生长繁殖, 利用自身重量调节机理, 减少其重力, 使之保持悬浮或上浮, 以获得最大生长机会^[17]。所以, 小球藻在光强 $5\ 000 \text{ lx}$ 的水体中可较好的生长, 其悬浮特性较强, 在过低或过高光强水体中会表现出较强的沉降特性。

2.2 不同粒径的小球藻宏观沉速分析

将不同光强下的五组实验中 I、II、III 实验期所得多个沉速统计分析绘制各期沉速分布箱形图(图 3)。

实验 I 期为全部粒径小球藻参与沉降时的宏观沉降特性, 实验 II 期为粒径小于 $5.5 \mu\text{m}$ 小球藻的宏观沉降特性, 实验 III 期

为粒径小于 $4.5\ \mu\text{m}$ 小球藻的宏观沉降特性; 如前所述, 计算沉速所用沉降距离主要由较大粒径小球藻沉降完成, 因此, 上述三个实验期的沉速分别主要表征了粒径大于 $5.5\ \mu\text{m}$ 、粒径在 $4.5\sim 5.5\ \mu\text{m}$ 和粒径

小于 $4.5\ \mu\text{m}$ 小球藻的沉速。

由图 3 可知, 小球藻的沉速为 $0.1\sim 468.2\ \mu\text{m/s}$, 平均值为 $32.8\ \mu\text{m/s}$, 五组实验的平均沉速分别为 $74.7\ \mu\text{m/s}$ 、 $45.7\ \mu\text{m/s}$ 、 $18.8\ \mu\text{m/s}$ 、 $16.8\ \mu\text{m/s}$ 、 $29.6\ \mu\text{m/s}$ 。

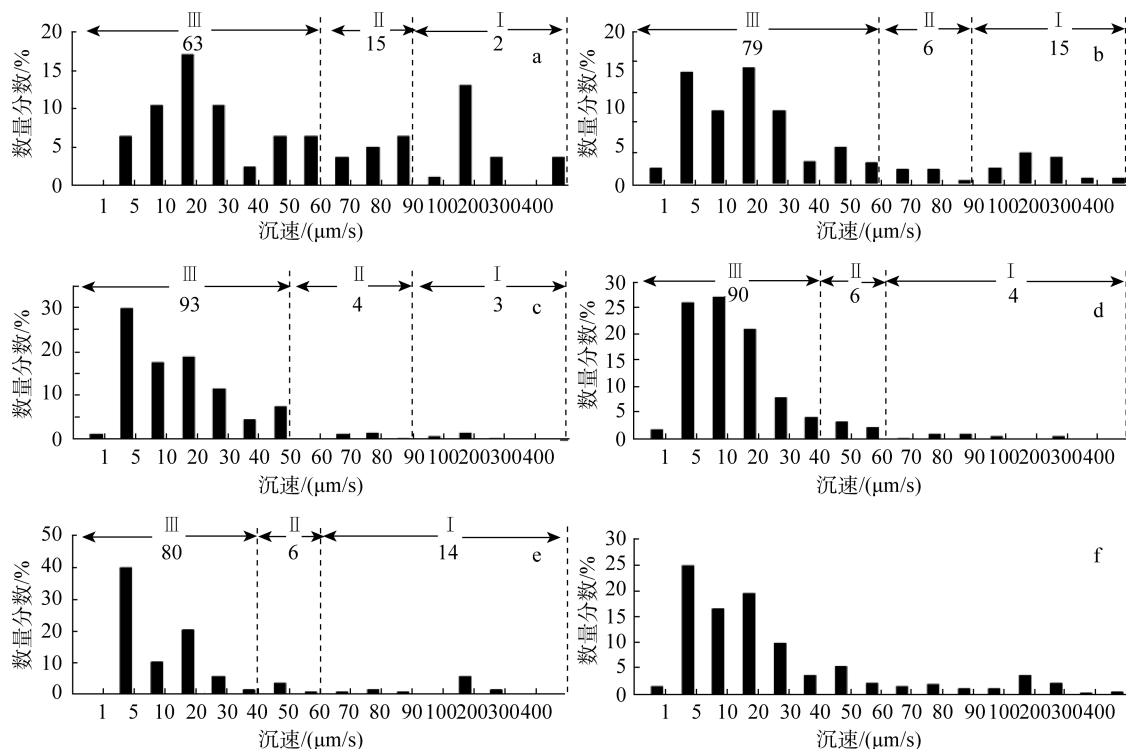


图 2 沉速数量分布

Fig. 2 Number distribution of settling velocity

a. 无光实验; b. 1000lx实验; c. 4000lx实验; d. 7000lx实验; e. 10000lx实验; f. 五组实验平均值

a. matt experiment; b. 1000lx experiment; c. 4000lx experiment; d. 7000lx experiment; e. 10000lx experiment; f. average of five experiments

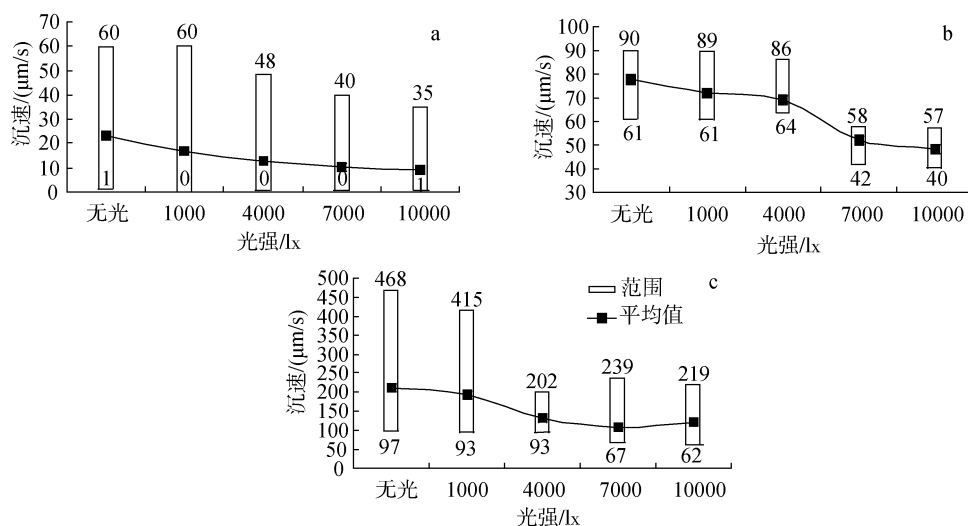


图 3 小球藻沉速范围与平均值

Fig. 3 Chlorella settling velocity range and average value

a. 直径小于 $4.5\ \mu\text{m}$; b. 直径 $4.5\sim 5.5\ \mu\text{m}$; c. 直径大于 $5.5\ \mu\text{m}$

a. less than $4.5\ \mu\text{m}$; b. diameter of $4.5\sim 5.5\ \mu\text{m}$; c. more than $5.5\ \mu\text{m}$

各粒径小球藻平均沉速总体随沉降柱表层光强增强而降低, 整个实验中最小沉速出现在 10 000 lx 实验中直径小于 4.5 μm 的小球藻, 最大沉速为无光实验中直径大于 5.5 μm 小球藻的沉速。各粒径的小球藻在表层无光状态下沉速是表层光强为 10 000 lx 的 2~3 倍; 小球藻直径大小与平均沉速呈正相关(相关系数达到 0.98), 直径 4.5~5.5 μm 小球藻沉速是小于直径 4.5 μm 小球藻沉速的 5~6 倍, 直径大于 5.5 μm 小球藻沉速是直径 4.5~5.5 μm 小球藻沉速的 2~3 倍, 这与 Stokes 关于颗粒在水中沉降理论一致。

2.3 悬浮小球藻纵向形态差异与分布分析

当沉降柱中小球藻稳定、无明显迁移运动时, 实验结束。通过高倍显微镜对其水样中小球藻观测得出表层、中层和底层不同粒径小球藻所占比例, 其结果如表 1 所示, 其中水体表层为 1 号取样口、中层为距表层 1 950 mm 的 11 号取样口, 底层为距表层 3 650 mm 处的 16 号取样口。由表 1 可知, 沉降稳定后, 小球藻在沉降柱中纵向形态差异明显。实验结束后, 大部分直径小于 3.5 μm 的小球藻出现在表层, 大部分直径大于 5.5 μm 的小球藻出现在底层; 而在

表层中直径小于 4.5 μm 的小球藻超过 85%, 中层中 3.5~4.5 μm 的小球藻占了 70%以上。说明大粒径小球藻多数存在于深水中, 而粒径小于 4.5 μm 小球藻可在中上层水体中悬浮生长。因此, 对湖泊和水库等静止性水体, 直径小于 3.5 μm 的小球藻会停留在水库表层, 随着小球藻的生长, 较大直径的小球藻会逐渐下沉而分布在不同水层。

2.4 悬浮小球藻纵向数量差异分析

实验结束后, 即实验 期末, 由于各实验组叶绿素 a 浓度不同, 因此对每组实验的纵向叶绿素 a 浓度实测值进行归一化处理, 所谓归一化处理就是将该组实测值除以该组最大值与最小值之差, 使其变为(0, 1)之间的无量纲小数, 其中所得数据“1”代表该组叶绿素 a 浓度的最大值, “0”代表该组叶绿素 a 浓度的最小值, 并分析每组实验的纵向叶绿素 a 浓度差异, 其结果如表 2 所示。7 000 lx 和 10 000 lx 实验组在水表以下 300 mm、600 mm 处可达 5 000 lx, 小球藻在光照强度为 5 000 lx 时, 其生长速率和叶绿素含量最大, 将此层定义为 7 000 lx、1 0000 lx 实验组的最适光强水层。

表 1 悬浮小球藻各粒径占总数比例

Tab. 1 Proportion of chlorella with different particle sizes

项目	直径			
	<3.5 μm	3.5~4.5 μm	4.5~5.5 μm	>5.5 μm
表层	5%~10%	80%~90%	5%~10%	极少
中层	极少	70%~80%	20%~30%	极少
底层	极少	45%~55%	35%~45%	5%~10%

表 2 悬浮小球藻叶绿素 a 浓度纵向差异

Tab. 2 Longitudinal differences of chlorophyll a concentration in chlorella

项目	光强				
	无光	1 000 lx	4 000 lx	7 000 lx	10 000 lx
最适光强水层	0.31(表层)	0.27(表层)	1.00(表层)	1.00	0.96
中层	0.44	0.21	0.23	0.44	0.50
底层	0.81	1.00	0.34	0.32	0.17

由表 2 可知, 在无光条件下, 从表层到底层叶绿素 a 浓度逐渐增大, 其底层浓度最高; 在表层光强为 1 000 lx 和 4 000 lx 的实验中, 从最适光强水层到底层叶绿素 a 浓度呈先减后增的趋势, 其中 1 000 lx 实验底层和 4 000 lx 实验表层的叶绿素 a 浓度最高; 在表层光强为 7 000 lx 和 10 000 lx 的实验中, 从最适光强水层到底层叶绿素 a 浓度逐渐减小, 其表层浓度

较高; 除无光组外其余实验组的最适光强水层和中层叶绿素 a 浓度随光强的增加而增加, 底层叶绿素 a 浓度随光强增加而减小, 其中最适光强水层中叶绿素 a 含量比除底层外其他水层分别平均高出 23%、21%、29%、28%。

无光条件和 1000 lx 实验时底层浓度最高, 其原因是在无关或弱光条件下, 大部分小球藻的活性较

低甚至死亡,其自身重量调节功能降低或丧失,沉速加大,这些小球藻具备较强的沉降特性,形成大致“上少下多”的现象,而在 1 000 lx、4 000 lx 实验的表层水体以及 7 000 lx 和 10 000 lx 实验的最适光强水层中,小球藻为了能够生长繁殖,争取生存条件,一些悬浮特性较强的小球藻通过自身重量调节功能集中在此区域,形成大致“上少下多”的现象^[17-18]。

实验结束后,除无光组外其余每组的各层叶绿素 a 含量与光强成正相关。1 000 lx 实验相关系数为 0.43,4 000 lx 实验相关系数为 0.76,7 000 lx 实验相关系数为 0.67,10 000 lx 实验相关系数为 0.86,其中 1 000 lx 实验相关系数最小,可能由于弱光条件下,小球藻大量下沉,其重力作用大于光调节作用,而其余三组实验相关系数较高。

3 结论

(1) 在实验 和 期,沉速份额随光强增加呈现出先降低后增加的趋势,而在实验 期,规律与之相反。

(2) 本实验中小球藻的沉速为 0.1~468.2 $\mu\text{m/s}$,均值为 32.8 $\mu\text{m/s}$,5 组实验的沉速平均值分别为 74.7 $\mu\text{m/s}$ 、45.7 $\mu\text{m/s}$ 、18.8 $\mu\text{m/s}$ 、16.8 $\mu\text{m/s}$ 、29.6 $\mu\text{m/s}$;沉降速度随光强的增强而变慢,且小球藻直径大小与沉速呈正相关;实验结束后除无光组外其余每组的各层叶绿素 a 含量与光强成正相关。

(3) 沉降实验结束后,小球藻的粒径分布从表层至底层逐渐变大,表层中直径小于 3.5 μm 的小球藻几乎未参与沉降,中层全部为直径 3.5~5.5 μm 的小球藻,直径大于 5.5 μm 的小球藻大部分沉降在底层。对于水库来说,直径小于 3.5 μm 的小球藻会停留在表层,不易进入引水塔。

(4) 悬浮小球藻纵向分布随光强增加由上低下高逐渐转变为上高下低的分布形态,除底层外,1 000 lx、4 000 lx、7 000 lx 和 10 000 lx 实验中最适光强水层的叶绿素 a 含量出现最高值,比其他水层分别高出 23%、21%、29%、28%。

参考文献:

- [1] Reynolds C S, Oliver R L, Walsby A E. Cyanobacterial dominance: the role of buoyancy regulation in dynamic lake environments[J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1987, 21: 379-390.
- [2] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 53-67.
- [3] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 602-605.
- [4] 邱二生. 黑河水库水质及藻类监测和水体分层研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010: 26-27.
- [5] Ha K, Kim H W, Jeong K S, et al. Vertical distribution of microcystis population in the regulated Nakdong River, Korea[J]. Limnology, 2000, 1: 225-230.
- [6] Porat R, Teltach B, Perelman A, et al. Diel buoyancy changes by the cyanobacterium *Aphanizomenon ovalisporum* from a shallow reservoir[J]. Journal of plankton research, 2001, 23(7): 753-763.
- [7] Rhode S C, Pawlowski M, Tollrian R. The impact of ultraviolet radiation on the vertical distribution of zooplankton of the genus *Daphnia*[J]. Nature, 2001, 412(6842): 69-72.
- [8] Bormans M, Sherman B S, Webster I T. Is buoyancy regulation in cyanobacteria an adaptation to exploit separation of light and nutrients[J]. Marine and Freshwater Research, 1999, 50: 897-906.
- [9] 欧阳峥嵘, 温小斌, 耿亚红, 等. 光照强度、温度、pH、盐度对小球藻(*Chlorella*)光合作用的影响[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(1): 49-55.
- [10] 吴松. 小球藻工厂化人工培育技术[J]. 海洋与渔业, 2008, (8): 34-35.
- [11] 王心芳, 魏复盛, 齐文启, 等. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 670-671.
- [12] 黄美玲, 何庆, 黄建荣, 等. 小球藻生物量的快速测定技术研究[J]. 河北渔业, 2010, 196(4): 1-4.
- [13] 董正臻, 董振芳, 丁德文. 快速测定藻类生物量的方法探讨[J]. 海洋科学, 2004, (11): 1-2, 5.
- [14] 周名江. 两种涡鞭毛藻的周日垂直迁移特性研究[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(2): 173-178.
- [15] 杨正健, 刘德富, 易仲强, 等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻的昼夜垂直迁移特性[J]. 环境科学研究, 2010, 23(1): 26-32.
- [16] 刘青, 张晓芳, 李太武, 等. 光照对 4 种单胞藻生长速率、叶绿素含量及细胞周期的影响[J]. 大连水产学院学报, 2006, (01): 24-30.
- [17] 丛海兵. 扬水曝气水源水质改善技术研究 [D]. 西安:

西安建筑科技大学, 2007: 28-30.

长速率及叶绿素含量的影响[J]. 安徽农学通报, 2007,

[18] 严美姣, 王银东, 胡贤江.光照对小球藻、斜生栅藻生

13(23): 27-29, 59.

***Chlorella vulgaris* vertical migration characteristics in different light intensity**

LU Jin-suo, ZHANG Bo, ZHANG Xu

(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Received: Jan.,26,2013

Key words: *Chlorella vulgaris*; vertical migration; light intensity; chlorophyll; settling velocity

Abstract: Vertical migration and distribution law in *Chlorella vulgaris* were observed and determined in inducing effect of different light intensity by homemade settling column, which provided support for comprehending longitudinal distribution of the reservoir *C.vulgaris*. *C.vulgaris* cultured in the laboratory was divided into three level in according with the particle diameter size: < 4.5 μm, 4.5~5.5 μm and > 5.5 μm . The settling velocity range of *C.vulgaris* which had different particle size was different in inducing effect of different light intensity. The settling velocity range of *C.vulgaris* was 0.1~468.2 μm/s with an average value of 32.8 μm/s under the experimental conditions. Settling velocity was getting slower with increase of light intensity. When light intensity reaches 10000 lx, the settling velocity and matt stated a difference of about 2 to 3 times. The particle size of *C.vulgaris* were positively correlated with settling velocity. The settling velocity of 4.5~5.5μm group was 5 to 6 times higher than 3.5~4.5μm groupbig; After settlement, The particle size distribution from the surface to the bottom became bigger gradually. The longitudinal peak of *C.vulgaris* are stretching downward with light intensity enhance except the bottom. For example, the maximum value was obtained at the surface when the light intensity was 1000 and 4000 lx., while maximum value was obtained 300 and 600 mm below the surface when the light intensity was 7000 and 10000 lx, respectively.

(本文编辑: 梁德海)