

# 不同降雨强度下小球藻纵向沉降研究

卢金锁<sup>1,2</sup>, 张 博<sup>1</sup>, 张 旭<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 为了解小球藻在不同降雨强度下纵向沉降规律, 在自制沉降柱中模拟降雨条件下小球藻纵向迁移, 其实验结果如下: 小球藻在表层聚集时, 干扰深度随降雨强度增加而增大, 干扰深度与降雨强度呈线性关系, 且各降雨持续时间下的干扰深度变化较小, 小球藻沉速随粒径减小、降雨强度减弱而变慢, 沉速范围为  $34.7 \sim 194.3 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 粒径较小的小球藻更容易受降雨的影响而增大其沉速; 小球藻在纵向均匀分布时, 干扰深度同样随降雨强度增加而增大, 但干扰深度与降雨强度呈指数分布, 同时干扰深度随降雨持续时间的延长而增加, 沉速随降雨强度的增加而增大, 沉速范围为  $16.7 \sim 27.0 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 分析自然界降雨对小球藻干扰深度影响时, 应按小球藻纵向均匀分布考虑, 短时间降雨对湖库表层中小球藻的干扰深度影响甚小, 长时间持续降雨对小球藻的干扰深度影响较大, 在降雨时间相同时各降雨强度等级的干扰深度变化不大。

**关键词:** 降雨强度; 小球藻; 纵向沉降; 叶绿素; 沉速

**中图分类号:** X 524

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)05-0705-07

湖库中藻类纵向沉降是由风、温度、营养物质、光强以及光照周期等多重环境因素和藻类自身特性所决定的<sup>[1-3]</sup>。藻类在外界环境条件变化时, 通过改变其自身结构、形状、大小, 产生纵向沉降现象。如鱼腥藻(*Anabaena*)和微囊藻(*Microcystis*)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发生迁移<sup>[4]</sup>。目前关于藻类纵向沉降研究主要集中在蓝藻门(Cyanophyta)、甲藻门(Pyrrhotata)和隐藻门(Cryptophyta)中可自由游动的藻类<sup>[5-7]</sup>, 而关于不法自助游动的绿藻研究较少<sup>[8]</sup>。

据报道, 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, 其中小球藻占有一定比例, 金盆水库中藻类在水深 5 m 上下较为密集<sup>[9]</sup>, 并且不能自由游动的小球藻(*Chlorella vulgaris*)主要集中于水库

10 m 以上, 所以, 探讨自然因素作用下水库表层中小球藻的迁移规律对于选择性取水有重要意义; 目前, 国内外学者对于各诱导条件下藻类纵向沉降的研究众多, 大部分侧重于研究风、水动力和光照强度等环境条件变化时藻类纵向沉降<sup>[10-12]</sup>, 以及降雨引发水体富营养化致使湖库水华, 但对于降雨条件下藻类纵向迁移规律的研究偏少<sup>[13]</sup>。

笔者对西安石砭峪水库在降雨前后各水层的叶绿素 a 浓度监测发现, 降雨前水库表层的叶绿素 a 浓度较高, 且叶绿素 a 浓度随水深增加而减小, 经过 24 h 持续暴雨, 叶绿素 a 浓度纵向分布发生变化, 其浓度随水深增加, 先变大后变小, 水深 4.7 m 处叶绿素 a 浓度最大。因此, 降雨对藻类纵向分布有一定干扰, 降雨后上层水体的叶绿素 a 浓度减小, 而中下层叶绿素 a 浓度有所增加, 在叶绿素 a 浓度减少水层与浓度增加水层之间存在一个浓度不变或变化极小的水层, 将该水层的水深深度定义为干扰深度。经计算, 西安石砭峪水库在此次降雨中的干扰深度为 2.9 m。基于以上讨论, 笔者通过对小球藻在不同降雨强度下纵向沉降研究, 为金盆水库有效规避表层藻类的选择性取水装置设计和水库管理调度提供数据支持。

收稿日期: 2013-01-14 修改稿日期: 2013-09-29

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

作者简介: 卢金锁(1977-), 男, 甘肃会宁人, 副教授, 博士, 主要研究方向为水环境修复与净水处理。

## 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 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,光照度 $3\,000\text{lx}$ ,昼夜比为 $12\text{h}:12\text{h}$ <sup>[14]</sup>.用尼康50i显微镜观测稳定期的小球藻(原藻),测得单细胞直径范围为 $3\sim 6\,\mu\text{m}$ .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 $65\%\sim 79\%$ 、粒径 $4.5\sim 5.5\,\mu\text{m}$ 的小球藻占总数 $20\%\sim 28\%$ 、粒径大于 $5.5\,\mu\text{m}$ 的小球藻占总数 $1\%\sim 7\%$ .

### 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;沉降柱上端安置模拟降雨喷头,用水泵供水,并使用多级可控灯箱,将水体表面光强调至 $1000\text{lx}$ ;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 $10\sim 33^{\circ}\text{C}$ ,最适温度为 $25^{\circ}\text{C}$ 左右<sup>[15]</sup>,因此水体温度保持在 $23\sim 30^{\circ}\text{C}$ .

### 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<sup>[16]</sup>,小球藻在 $680\text{nm}$ 波长处最为灵敏<sup>[17]</sup>,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( $y$ )与吸光值( $x$ )的线性方程<sup>[18]</sup>,即: $y=3\,596x-2.311\,7(R^2=0.999)$ ,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

沉降柱中水体和雨水为 $0.45\,\mu\text{m}$ 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,使用水库原水作为降雨雨水,可避免雨水中营养盐对小球藻纵向迁移产生影响.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,即实验开始.

由于沉降柱截面积较小,无法准确模拟自然界实际降雨,本研究通过增大降雨强度,增加模拟降雨准确度.实验分六组进行,降雨强度分别为 $0$ (对比实验)、 $1.67\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $8.33\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $11.67\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $15\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,降雨产生的多余水体由溢流孔排出,避免水位上涨对实验的影响.光强、温度、营养盐浓度等指标均不变,每组实验做两次降雨,第一次降雨在实验开始 $1\text{h}$ 后进行,第二次降雨在第一次降雨结束 $4.5\text{h}$ 后进行,即小球藻在沉降柱中纵向均匀分布.每次降雨持续 $45\text{min}$ ,降雨期间取样间隔 $15\text{min}$ ,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,但忽略了细胞粘性、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<sup>[19-20]</sup>.

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1a,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 $d_{A\text{中层}}$ ,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1b,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 $d_{B\text{中层}}$ .

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

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

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

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

式中:  $d_{\text{表层}} (\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$  为表层减少的叶绿素  $a$  浓度,  $d_{\text{中层}} (\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$  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,  $M_{\text{中层}} (\mu\text{g})$  为计算微元体积中中间层增加叶绿素  $a$  总量,  $A_{\text{表层}}、A_{\text{中层}} (\text{m}^2)$  分别为表层水柱和中间层水质的截面积,  $\Delta x_{\text{表层}}、\Delta x_{\text{中层}} (\text{m})$  分别为水柱表层和中层的计算微元深度。

实验中迁移速度  $V (\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$  是通过到达水柱中层的粒径较大小球藻的总迁移距离(即  $M_{\text{中层}} \cdot h$ ) 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  $V (\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$  来确定小球藻平均下沉运动强度, 具体公式(5) 如下:

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

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  $A_{\text{mid}}$  相等, 计算出的微元体积  $A_{\text{表层}} \cdot \Delta x_{\text{表层}}$  与  $A_{\text{中层}} \cdot \Delta x_{\text{中层}}$  相等. 将 1、2 式分别带入 3、4 式, 3、4 式带入 5 式, 最终得出本实验的公式(6), 如下:

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

利用公式(6)对六次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  $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 实验降雨对小球藻纵向分布干扰深度分析

在不考虑小球藻生长的影响下, 降雨产生的冲击使沉降柱中小球藻的纵向分布发生改变. 从纵向上看, 当降雨作用于水体时, 表层中小球藻叶绿素  $a$  浓度的减少量增大, 之后随水深增加而其减少量变小, 直至某一水层的叶绿素  $a$  浓度增加. 在降雨过程中, 与降雨前各水层小球藻叶绿素  $a$  浓度相比, 浓度减少的区域与浓度增加区域之间存在一个浓度不变或变化极小的水层, 本研究中将这一水层的水深称为干扰深度. 用干扰深度间接表征降雨对水中小球藻纵向分布影响的深度, 但实际影响深度比计算所得干扰深度稍深.

用两次降雨中各降雨强度下不同时刻的各水层小球藻叶绿素  $a$  浓度计算降雨干扰深度, 并对其统计分析, 如图 2 所示. 图 2(a) 为第一次实验干扰深度分析, 第一次实验在加入原藻 1 h 后进行, 此时镜检中鲜见细胞群体, 因此, 图 2(a) 具体为单细胞小球藻在表层聚集时降雨对小球藻纵向分布干扰深度分析; 图 2(b) 为第二次实验干扰深度分析, 第二次实验开始时镜检鲜见直径大于  $4.5 \mu\text{m}$  小球藻, 则图 2(b) 为直径小于  $4.5 \mu\text{m}$  小球藻纵向均匀分布时降雨对小球藻纵向分布干扰深度分析.

由图 2 可知, 两次实验中, 降雨对小球藻纵向分布干扰深度随降雨强度增加而增加. 有所不同的是第一次实验中干扰深度与降雨强度呈线性关系, 第二次实验中干扰深度与降雨强度呈指数分布. 第一次实验中, 干扰深度随降雨持续时间变化不大, 各降雨强度下 15 min 与 45 min 时干扰深度相差 0~60 mm, 其中仅降雨强度为  $11.67 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时各降雨持续时间的干扰深度相差 60 mm, 其余降雨强度下降雨过程中干扰深度无明显变化; 第二次实验中, 干扰深度随降雨持续时间变化较大, 各降雨强度下 15 min 与 45 min 时干扰深度相差 0~195 mm, 其中仅降雨强度为  $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时各降雨持续时间的干

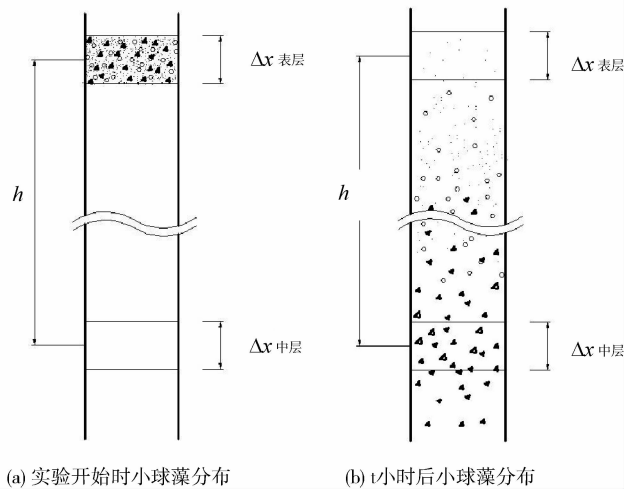


图 1 沉降柱计算单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram for settling column computing element

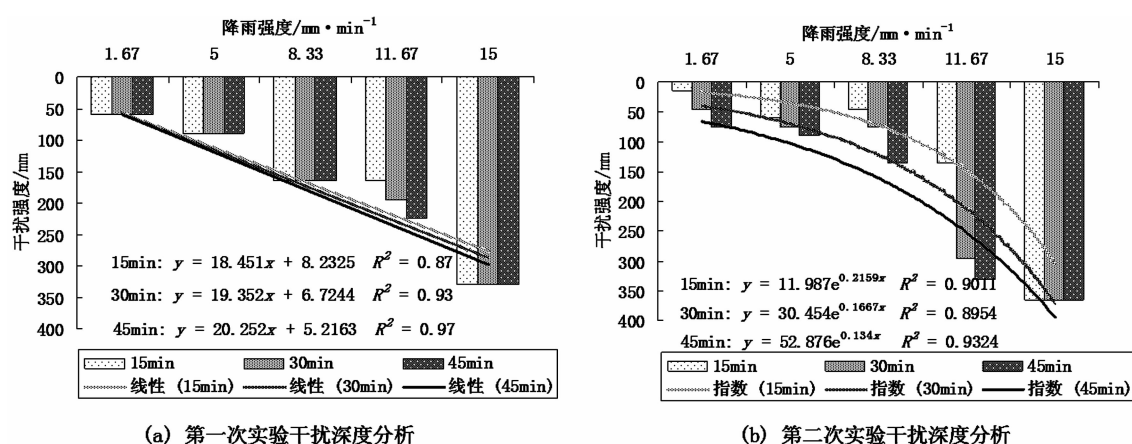


图2 降雨对小球藻纵向分布干扰深度分析

Fig. 2 Analysis of rainfall on chlorella longitudinal distribution interference depth

扰深度无明显变化,其余降雨强度下干扰深度变化较大.降雨15 min时,除降雨强度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 外,其余实验组第一次实验的干扰深度比第二次实验大,之后随着降雨持续,在降雨45 min时,第二次实验的干扰深度比第一次实验大,但在降雨强度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,两次实验在降雨过程中干扰深度相同.

因此,小球藻在表层聚集时,干扰深度受降雨持续时间长短的影响不大,各降雨持续时间下的干扰深度变化较小,而小球藻在纵向均匀分布时,降雨持续时间长短对干扰深度影响甚大,干扰深度随降雨持续时间的延长而增加;与表层聚集状态相比,在降雨前期纵向均匀分布状态时的干扰深度较小,而在后期干扰深度较大.

## 2.2 实际降雨强度下降雨对小球藻干扰深度推算

根据图2中所得的三个线性方程和三个指数方程,推导出小球藻在表层聚集时和在纵向均匀分布时两种情况的干扰深度公式.由于小球藻在表层聚集时,干扰深度受降雨持续时间影响不大,取三个线性方程中系数的平均值作为推导线性函数的系数,得出以干扰深度为因变量、以降雨强度为自变量的线性推导公式(7);而小球藻在纵向均匀分布时,干扰深度与降雨持续时间有一定相关性,通过对 $y = ae^{bx}$ 方程中系数线性拟合,得到以干扰深度为因变量、以降雨强度和降雨持续时间为自变量的指数推导公式(8).

$$y = 19.35x + 6.27 \quad (7)$$

$$y = 1.1025t \cdot e^{0.1722x} \quad (8)$$

式中: $y(\text{mm})$ 为干扰深度; $x(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$ 为降雨强度; $t(\text{min})$ 为降雨持续时间.

用公式(7)(8)计算自然界实际降雨强度下干扰深度,具体见表1.

表1 各实际降雨强度下干扰深度 / mm

Tab. 1 The actual rainfall intensity under interference depth / mm

降雨强度等级	小球藻在表层聚集时	小球藻纵向均匀分布时						
		15 min	30 min	45 min	2 h	6 h	12 h	24 h
小雨	<6.9	<16.5	<33.1	<49.6	<132.5	<397.4	<794.7	<1589.5
中雨	6.9~7.1	16.5~16.6	33.1~33.2	49.6~49.7	132.5~132.7	397.4~398.1	794.7~796.2	1589.5~1592.4
大雨	7.1~7.4	16.6~16.7	33.2~33.3	49.7~49.8	132.7~133.1	398.1~399.3	796.2~798.6	1592.4~1597.1
暴雨	7.4~8.1	16.7~16.8	33.3~33.5	49.8~50.1	133.1~133.9	399.3~401.7	798.6~803.3	1597.1~1606.7
大暴雨	8.1~9.4	16.8~17.0	33.5~33.9	50.1~50.5	133.9~135.5	401.7~406.5	803.3~813.0	1606.7~1626.0
特大暴雨	>9.4	>17.0	>33.9	>50.5	>135.50	>406.5	>813.0	>1626.0

由表1可知,实际降雨干扰深度随降雨强度等级增加而增大,但干扰深度的变化不大.当小球藻在

表层聚集时,干扰深度的范围从小于 6.9 mm 到大于 9.4 mm,则小雨到特大暴雨的干扰深度跨度大于 2.5 mm. 因此,小球藻在较小深度范围内分布时可视为纵向均匀分布,在实际降雨条件下干扰深度分析应按小球藻纵向均匀分布情况考虑;小球藻纵向均匀分布时,干扰深度随降雨持续时间和降雨强度等级增加而增大,但在某一降雨时间内各降雨强度等级的干扰深度增幅不大,干扰深度的变化主要由降雨持续时间长短所决定,因此,短时间的自然降雨对湖库表层中小球藻的干扰深度影响甚小,在降雨时间相同时各降雨强度等级的干扰深度变化不大,但长时间持续降雨产生的干扰深度较大.

西安石砭峪水库持续 24 h 暴雨后计算出的干扰深度为 2.9 m,此干扰深度中包含有降雨、径流等因素使水库水位上涨的高度(约 1.1 m),因此实际干扰深度约为 1.8 m,这与表 1 中计算出的 24 h 暴雨的干扰深度(约 1.6 m)相差不大,而本实验通过溢流孔排水已经避免了水位上涨对实验的影响.

### 2.3 不同降雨强度下各粒径小球藻宏观沉速分析

根据对比实验和降雨过程中底层取样孔镜检结果,将每组实验分为三期,即实验 I、II 和 III 期. 其中,实验 I 期为实验(降雨)开始至除底层外镜检中鲜见直径大于  $5.5\ \mu\text{m}$  单细胞小球藻和细胞群体;实验 II 期为实验 I 期结束至除底层外镜检中鲜见直径大于  $4.5\ \mu\text{m}$  单细胞小球藻;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.

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相对较大的粒径完成. 因此,在实验 I 期所得沉速体现了直径大于  $5.5\ \mu\text{m}$  小球藻的沉降特性,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. 将六组实验中 I、II、III 实验期所得多个沉速计算其平均值,结果如表 2 所示.

由表 2 可知,在第一次降雨实验中,小球藻沉速随粒径减小而变慢,沉速范围为  $34.7\sim 194.3\ \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,降雨强度  $15\ \text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  时直径大于  $5.5\ \mu\text{m}$  小球藻的沉速最大( $194.3\ \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),降雨强度  $1.67\ \text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  时直径小于  $4.5\ \mu\text{m}$  小球藻的沉速最小( $34.7\ \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),直径  $4.5\sim 5.5\ \mu\text{m}$  小球藻沉速是直径小于  $4.5\ \mu\text{m}$  小球藻沉速的 2~3 倍. 与对比实验相比,降雨时直径小于  $4.5\ \mu\text{m}$  小球藻沉速的增加量是直径  $4.5\sim 5.5\ \mu\text{m}$  小球藻的 2~3 倍. 说明,粒径较小的小球藻更容易受降雨的影响而增大其沉速.

在第一次实验 I 期中,除对比实验外,直径大于  $5.5\ \mu\text{m}$  小球藻沉速随降雨强度的增加而增大,但对比实验所得沉速均比降雨时沉速大,这是由于细胞群体参与沉降的时间不同所致. 对比实验的 I 期是从加入原藻开始计算,而降雨实验的 I 期是从降雨开始计算,从加入原藻到开始降雨这一期间内,大量细胞群体参与沉降,影响 I 期中直径大于  $5.5\ \mu\text{m}$  单细胞小球藻沉速计算;在实验 II、III 期中,同样小球藻沉速随降雨强度的增加而增大.

在第二次降雨实验中,参与沉降的小球藻主要为直径小于  $4.5\ \mu\text{m}$  小球藻,且沉速随降雨强度的增加而增大,沉速范围为  $16.7\sim 27.0\ \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 与第一次实验 III 期中直径小于  $4.5\ \mu\text{m}$  小球藻的沉速相比,第二次实验所计算出的小球藻沉速较小,其原因为:沉降特性较强的小球藻在第一次实验中已经大量下沉,而第二次实验中剩余的悬浮特性较强、沉降特性较弱的小球藻在降雨的推动下加速下沉.

## 3 结论与探讨

(1)实验降雨干扰深度随降雨强度增加而增大.

(2)小球藻在表层聚集时,干扰深度与降雨强度呈线性关系,且各降雨持续时间下的干扰深度变化

表 2 不同降雨强度下各粒径小球藻沉速表/ $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Tab. 2 Particle size chlorella settling velocity in different rainfall intensity /  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

降雨强度 / $\text{mm}\times\text{min}^{-1}$	小球藻在表层聚集时			小球藻纵向 均匀分布时
	I: 大于 $5.5\ \mu\text{m}$	II: $4.5\sim$ $5.5\ \mu\text{m}$	III: 小于 $4.5\ \mu\text{m}$	III: 小于 $4.5\ \mu\text{m}$
0(对比实验)	192.7	72.3	16.7	16.7
1.67	125.7	78.4	34.7	17.0
5.00	123.9	79.1	35.0	17.4
8.33	134.8	80.8	42.1	19.7
11.67	157.3	80.7	43.3	20.3
15.00	194.3	81.1	45.7	27.0

较小;沉速随粒径减小、降雨强度减弱而变慢,沉速范围为  $34.7 \sim 194.3 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(3)小球藻在纵向均匀分布时,干扰深度与降雨强度呈指数分布,同时干扰深度随降雨持续时间的延长而增加;沉速随降雨强度的增加而增大,沉速范围为  $16.7 \sim 27.0 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(4)自然降雨应按小球藻纵向均匀分布考虑,短时间降雨对湖库表层中小球藻的干扰深度影响甚小,长时间持续降雨对小球藻的干扰深度影响较大,在降雨时间相同时各降雨强度等级的干扰深度变化不大。

(5)小球藻在表层聚集时,粒径较小的小球藻更容易受降雨的影响而增大其沉速。

本研究仅考虑了降雨产生的冲击力对水体表层小球藻分布和沉速的影响,并没有加入降雨污染、水位上涨、雨后径流等因素。建议增加雨水中污染物,研究降雨后藻类沉降规律,更准确了解实际降雨时藻类分布规律;同时,实验中有些因素并没有考虑在内,如:实验初期投加原藻形成混合水层厚度对计算沉速的影响、实验期间小球藻的生长对其沉速的影响。

## 参考文献 References

- [1] KYONG Ha, 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.
- [2] PORAT R, TELTSCH 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.
- [3] 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):69-72.
- [4] 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.
- [5] KNAPP C W, DE Jr FN, GRAHAM D W, et al. Physical and chemical conditions surrounding the diurnal vertical migration of Cryptomonas spp. (Cryptophyceae) in a seasonally stratified midwestern reservoir(USA)[J]. *Journal of Phycology*, 2003(39): 855-861.
- [6] HAJDU S, HOGLANDER H, LARSSON U. Phytoplankton vertical distribution and composition in Baltic Sea cyanobacterial blooms[J]. *Harmful Algae*, 2007(6): 189-205.
- [7] OLSON P, Granéli E. Observations on diurnal migration and phased cell division for three coexisting marine dinoflagellates[J]. *Journal of Plankton Research*, 1991, 13 (6) : 1313-1324.
- [8] 吴生才,陈伟民. 微囊藻和栅列藻的垂直迁移及生态学意义[J]. *生态科学*, 2004 , 23(3): 244-248.  
WU Sheng-cai, CHEN Wei-min. Vertical migration of microcystis and scenedesmus and its ecological significance [J]. *Ecologic Science*, 2004 , 23(3): 244-248.
- [9] 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.  
QIU Er-sheng. Research on water quality, algae monitoring and thermal stratification in Heihe reservoir[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010: 26-27.
- [10] 张海春,陈雪初,李春杰. 光照度对蓝藻垂直迁移特性影响研究[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(5): 64-67.  
ZHANG Hai-chun, CHEN Xue-chu, LI Chun-jie. The effect of light intensity on Cyanophytes vertical distribution [J]. *Environmental Pollution And Control*, 2010, 32(5): 64-67.
- [11] VIDAL J, MORENO-OSTOS E, ESCOT C, et al. The effects of diel changes in circulation and mixing on the longitudinal distribution of phytoplankton in a cyao-shaped Mediterranean reservoir[J]. *Freshwater Biology*, 2010 (55): 1945-1957.
- [12] 孔令惠,蔡庆华,王 岚,等. 香溪河库湾春季水华期间浮游轮虫昼夜垂直分布及迁移的研究[J]. *湿地科学*, 2008,6(4):612-617.  
KONG Ling-hui, CAI Qing-hua, WANG Lan, et al. Day-night vertical distribution and migration of planktonic rotifers during spring water-bloom in Xiangxi Bay[J]. *Wetland Science*, 2008,6(4):612-617.
- [13] REICHWALDT E S, GHADOUANI Anas. Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: Between simplistic scenarios and complex dynamics[J]. *Water Research*, 2011, 46(5): 1372-1393.
- [14] 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.

- OUYANG Zheng-rong, WEN Xiao-bin, GENG Ya-hong, et al. The effects of light intensities, temperatures, pH and salinities on Photosynthesis of Chlorella[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2010, 28(1): 49-55.
- [15] 吴 松. 小球藻工厂化人工培育技术[J]. 海洋与渔业, 2008(8): 34-35.  
WU Song. Chlorella factory artificial cultivation technology[J]. Ocean And Fishery, 2008(8): 34-35.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 670-671.  
State Environmental Protection Agency. Water and waste-water monitoring methods[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2007: 670-671.
- [17] 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.  
HUANG Mei-ling, HE Qing, HUANG Jian-rong, et al. A rapid determination of Chlorella biomass[J]. Hebei Fisheries, 2010, 196(4): 1-4.
- [18] 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.  
DONG Zheng-zhen, DONG Zhen-fang, DING De-wen. A method of quick determination of algal biomass[J]. Marine Sciences, 2004(11): 1-2, 5.
- [19] 周名江. 两种渦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.  
ZHOU Ming-jiang. Diurnal vertical migrations of two Dinoflagellates[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1994, 25(2): 173-178.
- [20] 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.  
YANG Zheng-jian, LIU De-fu, YI Zhong-qiang, et al. Diurnal vertical migration of Peridiniopsis sp. in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(1): 26-32.

## Research on vertical migration of the chlorella vulgaris in different rainfall intensity

LU Jin-suo<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture and Technology in Western China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to understand the longitudinal settlement law of chlorella in different rainfall intensities, The vertical migration of chlorella is simulated in the selfmade settling column under rainfall conditions. The experimental results are as follows: When the chlorella at surface aggregation, interference depth increased with rainfall intensity and, interference depth and rainfall intensity were in linear relationship; the interference depth changed less in each rainfall duration, the chlorella settling velocity changed slower as particle size decreased and rainfall intensity receded, settling velocity range was  $34.7 \sim 194.3 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the smaller the particle size of chlorella, more susceptible to the impact of rainfall increasing its settling velocity. When the chlorella was at the vertical uniform distribution, interference depth increased with rainfall intensity, but the interference depth and rainfall intensity was of an exponential distribution. At the same time interfering depth increased as the rainfall duration lengthens, and the chlorella settling velocity increased with rainfall intensity. The settling velocity range was  $16.7 \sim 27.0 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . In analysis of the nature of rainfall influence on chlorella interference depth, we should consider chlorella vertical uniform distribution, and the rainfall exerted very small influence on the chlorella interference depth which was on the surface layer of the lakes and reservoirs in the short time. However the rainfall influence was very big in the long time and the interference depth in each rainfall intensity level changed little at the same rainfall time.

**Key words:** rainfall intensity; chlorella vulgaris; vertical migration; chlorophyll; settling velocity