

不同氮磷营养及光温条件对蓝藻水华生消的影响

黄钰铃^{1,2}, 陈明曦², 刘德富², 李靖¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002)

[摘要] **【目的】**蓝藻水华暴发后消耗大量溶解氧,使水体透明度降低,某些藻类甚至产生有毒有害物质,影响其他水生生物的生长和繁殖,破坏水域生态系统的动态平衡,是水环境恶化的表征之一。探讨氮磷营养、水温 and 光照等环境条件对蓝藻水华生消的综合影响,可以为河湖蓝藻水华防治提供参考。**【方法】**构建物理模型,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验,模拟研究氮磷营养、水温和光照等因素复合作用下,单一铜绿微囊藻水华生消的过程。**【结果】**在正交试验中,当磷营养为 0.8 mg/L、氮营养为 3.6 mg/L、水温为 29~30 ℃、光照强度为 3 300~3 400 lx 时,水华暴发强烈,此时藻类比增长率为 1.129;营养盐含量随藻类生长和水华暴发逐渐降低;水体 pH 值随时间的变化与叶绿素 a 基本吻合,电导率与试验设置的初始营养盐浓度直接相关;对氮磷营养、水温和光照强度与藻类比增长率之间的关系进行灰色关联分析发现,光照强度与藻类比增长率之间的关联系数最大。**【结论】**氮磷营养、水温及光照综合作用共同影响着蓝藻的生长和水华的暴发,但以光照对水华生消的影响最大,是蓝藻生长和水华暴发的主导性因子。

[关键词] 蓝藻水华;水华生消;水华防治;氮磷营养;光温条件

[中图分类号] X52 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2008)09-0093-08

Effect of nitrogen,phosphor,light and water temperature on the formation and disappearance of blue-green algae bloom

HUANG Yu-ling^{1,2},CHEN Ming-xi²,LIU De-fu²,LI Jing¹

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering ,Northwest A&F University ,Yangling ,Shaanxi 712100,China;
2 College of Civil and Hydraulic Engineering ,China Three Gorges University ,Yichang ,Hubei 443002,China)

Abstracts:**【Objective】**Blue-green algae bloom will consume plenty of dissolved oxygen,which leads to reduction of water transparency. Some species of algae will produce toxic and harmful substance,which has impact on the growth and reproduction of other aquatic organisms,even to imbalance the aquatic ecosystem. The formation of blue-green algae bloom is one of the token of water environment deteioraion. **【Method】**To discuss the effect of nitrogen,phosphor,light and water temperature on the formation and disappearance of blue-green algae bloom,through constructing the physical model,the paper simulated the formation and disappearing of single cyanobacteria algae bloom with orthogonal experiment of four factors and three ranks. **【Result】**When the concentration of nitrogen and phosphor were 3.6 and 0.8 mg/L separately,the irradiation and water temperature were 3 300—3 400 lx and 29—30 ℃ separately,the blue-green algae grew rapidly and the bloom broke out strongly. Under this condition,the growth rate of blue-green algae rose to 1.129. The gray correlation analysis of nitrogen,phosphor,light and water temperature with the growth rate of blue-green algae showed that correlation coefficient of light with the growth rate was the biggest. **【Conclusion】**Nitrogen,phosphor,light and water temperature have comprehensive impact on the

* [收稿日期] 2007-09-11
[基金项目] 国家自然科学基金项目(50679038);三峡开发总公司资助项目(DHZ2006031)
[作者简介] 黄钰铃(1978—),女,湖北荆门人,讲师,在读博士,主要从事水土环境保护和生态水工学研究。

growth of blue-green algae and formation of bloom together. Moreover, light is the most important among them, and the dominant factor for the growth of blue-green algae and the formation of bloom.

Key words: blue-green algae bloom; formation and disappearance; prevention; nitrogen and phosphor; light and water temperature

随着工农业发展和人口的迅速增加,许多河湖水体遭到污染。据统计,目前全国已有 60% 的水体发生了富营养化^[1]。这些富营养化水体接纳了过多的氮磷营养,导致水生生物如藻类异常增殖,水体溶解氧含量降低,一旦遇到适宜光温条件及缓慢的水动力条件,就会导致水华暴发。水华发生时,由于藻类的大量繁殖和腐烂,导致水味腥臭,降低水体透明度,影响水中溶解氧;同时,部分藻类还向水体中释放有毒物质,严重破坏水域生态系统,直接影响工农业生产及生活用水的供水质量,从而直接威胁流域生态环境安全及社会经济可持续发展。

适宜的气温、水温、风速、光照时间和光照强度等环境条件,充足的氮磷营养条件和缓慢的水流条件是水华发生的三大基本要素。在湖泊水华生消过程中,水流条件的影响较小,主要是营养条件和环境条件起作用。大量的观测发现,气温、水温、光照和氮磷营养等单因子与藻类生长率之间存在一定关系^[2-6]。目前,针对不同环境条件对水华生消的室内单因子模拟试验较多,研究结果发现,水温为 25~30 ℃、光照强度为 3 000~4 000 lx 是水华藻类生长的适宜环境条件^[7-12];氮磷营养的单因子试验更多^[13-15]。但由于藻类生长过程中的影响因子是多方面的,在遵从最小因子定律的同时,各因子之间存在一定的综合作用和相互补偿作用,因此有必要研究不同因子共同作用下藻类生长及水华暴发的过程。本研究以河湖常见的水华优势藻铜绿微囊藻为研究对象,采用 L₉(3⁴) 正交试验,重点探讨了在不同氮磷营养及光温综合作用下,该蓝藻生长和水华生消

过程,寻找水华生消的最佳条件,以期为河湖蓝藻水华防治提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 材 料

1.1.1 供试材料 铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*),购自中国科学院武汉水生生物研究所,采用 BG-11 培养基(由中国科学院武汉水生生物研究所提供配方)进行培养。

1.1.2 仪器和设备 TES-1339 照度计(台湾泰仕)、UV1800A 紫外分光光度计(上海美谱达)、LDZ4-1.2 离心机(北京医用离心机厂)、Multi340i 手提式多参数仪(德国 WTW)、AP-01P 和 AP-9908S 真空抽滤装置(天津奥特恩斯)等。

1.2 模型模拟与控制

模型装置为长×宽×高=60 cm×40 cm×24 cm 的塑料水箱,以放置 2 d 的自来水为供试水体,收集对数生长期的藻细胞,在 3 500~4 000 r/min 下离心 10 min,用 15 mg/L NaHCO₃ 溶液离心洗涤藻细胞 2 次,除去附着在藻细胞上的营养盐后投入供试水体,用 0.1 mol/L NaOH 溶液调节 pH 值至 8.6 左右。

以 KNO₃ 溶液和 KH₂PO₄ 溶液作为氮源和磷源,调节初始氮磷营养浓度,以可调式电热棒控制模型水温,人工光源连续光照。根据作者单因子试验结果,本试验采用 L₉(3⁴) 正交表,主要研究磷营养、氮营养、水温和光照对水华生消的影响。正交试验因素水平设置见表 1。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and rank of orthogonal experiment

水平	因素 Factor			
	磷营养(A)/(mg·L ⁻¹)	氮营养(B)/(mg·L ⁻¹)	水温(C)/℃	光照强度(D)/lx
	Phosphor	Nitrogen	Water temperature	Irradiance
1	0.1	1.0	21~22	1 600~1 700
2	0.4	3.6	25~26	2 200~2 300
3	0.8	10.0	29~30	3 300~3 400

1.3 取样分析

试验开始后,每天上午 9:00 左右测定水体水温(WT)、电导率(Cond)、pH 值、溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)以及叶绿素 a(Chl-a)。其中,前

3 个指标以多参数仪测定;DTN 测定:将水样预先经直径为 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后,以碱性过硫酸钾氧化,分光光度法测定;DTP 测定:将水样经直径为 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后,以过硫酸钾氧化,氯化

亚锡还原法测定;叶绿素 a 以丙酮抽提法测定^[6]。同时,每隔 2 d 测 1 次各模型中的光照强度(I)。

2 结果与分析

2.1 正交试验结果及其方差分析

藻类生长遵循微生物生长的一般规律,在营养和环境条件不适时生长缓慢,表现为迟滞期;当营养充足、环境条件适宜时迅速生长,由于其繁殖能力强、世代较短,藻类生物量剧增,进入对数生长期;随后相当一段时间内藻类生物量处于稳定状态,藻体死亡率和新生率相当,此时为稳定期,随着营养大量消耗、呈匮乏状态时,藻类开始大量死亡,整个种群生长呈衰退趋势,即进入衰退期。经过此 4 个过程即为藻类的一个生长周期,本试验发现藻类生长周期大约为 15 d。

根据试验测得的叶绿素 a 含量,计算每组试验藻类的比增长率 u ,公式如下:

$$u=\frac{\ln B_t-\ln B_0}{t}。$$

(1)

式中: B_t 为叶绿素 a 峰值, mg/m^3 ; B_0 为对数期初始

时叶绿素 a 含量, mg/m^3 ; t 为峰值时间,d。

藻类比增长率计算结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,不同因素、不同水平组合下藻类比增长率有一定差异,处理 8 对藻类生长较为有利,比增长率为 1.081,而处理 1 藻类比增长率最低,仅为 0.489。前者磷营养和光照条件水平最高,尽管水温较低,但由于各因子之间具有一定的补偿作用,故藻类生长较好;后者的各因素均在最低水平,对藻类生长的促进作用不大。

比增长率反映了各因子综合作用下藻类生物量的增加速度。由表 2 可以看出,处理 7 的比增长率仅次于处理 8,可见当氮营养含量较低时,其他因素可以在一定程度上补偿氮营养的不足;处理 2 在试验过程中藻类生长状况较差,经较短时间即进入衰退期,但比增长率较高;处理 9 的比增长率较低,可能是由于光照水平很低,从而影响了藻类的光合作用和生物量合成,故藻类生长遵循 Liebig 最小因子定律,反映了因子之间的补偿是有限度的,且因子之间不可替代。

表 2 正交试验结果及方差分析

Table 2 Results of orthogonal experiment and the variance analysis

处理 Treatment	磷营养(A) Phosphor	氮营养(B) Nitrogen	水温(C) Water temperature	光照强度(D) Irradiance	比增长率 u Algae growth rate
1	1	1	1	1	0.489
2	1	2	2	2	0.778
3	1	3	3	3	0.767
4	2	1	2	3	0.675
5	2	2	3	1	0.534
6	2	3	1	2	0.601
7	3	1	3	2	1.011
8	3	2	1	3	1.081
9	3	3	2	1	0.582
K_{1j}	2.035	2.176	2.171	1.605	
K_{2j}	1.810	2.393	2.036	2.390	
K_{3j}	2.674	1.950	2.312	2.523	
$\bar{K}_{1j}$	0.678	0.725	0.724	0.535	
$\bar{K}_{2j}$	0.603	0.798	0.679	0.797	
$\bar{K}_{3j}$	0.891	0.650	0.771	0.841	
R_j	0.864	0.443	0.276	0.918	
因素主→次 Factor major-minor	D→ A→ B→ C				
最优方案 Optimization	$A_3B_2C_3D_3$				
各因素效应 Factorial effect	-0.046	0.001	0.000	-0.189	
	-0.121	0.074	-0.045	0.073	
	0.167	-0.074	0.047	0.117	
u 优= $u+a_3+b_2+c_3+d_3=1.129$					

由表 2 还可以看出,在氮营养、磷营养、水温和光照 4 个因素中,对藻类生长影响最大的是光照强

度,其次是磷营养和氮营养,影响最小的是水温。各因素不同水平下藻类生长的最佳组合是 $A_3B_2C_3D_3$,

即磷营养为 0.8 mg/L、氮营养为 3.6 mg/L、水温为 29~30 ℃、光照强度为 3 300~3 400 lx,此时藻类的比增长率可达 1.129。由于蓝藻在光合作用中利用 CO₂ 和水合成有机物,将光能转化成化学能;另外,氮磷营养参与细胞的合成,故光照和氮磷营养因子是藻类生长和水华暴发的直接作用因子,相对来说水温只是在一定程度上影响了胞内酶的反应速率,是间接作用因子。另外,在本试验条件下,模型中的水体会有一定复氮,由此可见,光照和磷营养对铜绿微囊藻引起的水华暴发具有决定性作用。

2.2 水华生消过程中 DTP 和 DTN 的变化

随着水华的强烈暴发,藻类迅速增殖,在此过程中消耗了大量氮磷营养,导致其含量迅速降低。由图 1 和图 2 可见,由于氮、磷初始质量浓度设置均为 3 个水平,故各水平差异明显,DTN 和 DTP 的曲线

分为 3 组。在同一水平内,营养物质消耗率也有一定差异。从图 1 可见,处理 8 和处理 9 的磷营养消耗很快,分别在第 5 天和第 8 天即降至 0.1 mg/L 以下;处理 1~3 的磷营养消耗很少;处理 4~6 的磷营养消耗分别经 3,4 和 5 d 降至 0.1 mg/L 以下。图 2 表明,处理 6 和 9 的氮营养消耗较快,曲线下降趋势明显,而同水平内的处理 3 变化不大;处理 2 的氮营养消耗较少,DTN 含量几乎呈直线,同水平内的处理 5 和 8 分别在第 8 天和第 6 天降至接近 0。实际上,氮磷营养消耗程度与藻类生物量增加和水华暴发程度密切相关,直接表现为水体叶绿素 a 含量增加,当同种营养含量相当时,藻类生长叶绿素 a 含量也可能不同,这一方面是由于生物生长繁殖的随机性,另一方面也可能是受其他营养和因素的限制所致。

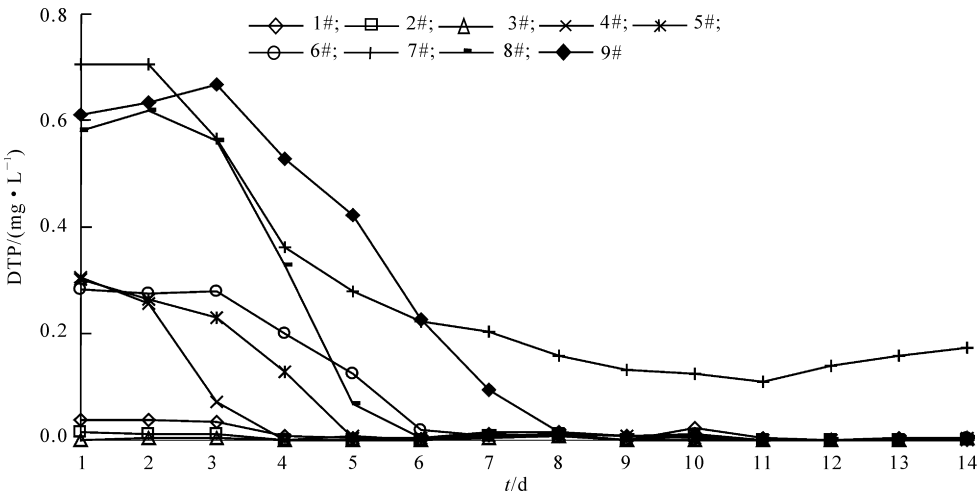


图 1 不同处理对水华生消过程中 DTP 含量的影响

Fig. 1 Variances of DTP with the formation and disappearance of algae bloom under different treatment

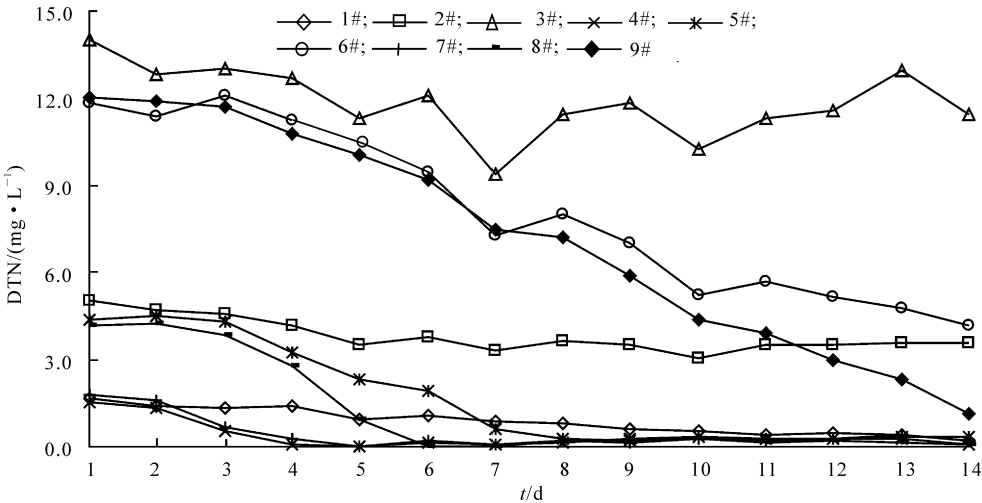


图 2 不同处理对水华生消过程中 DTN 含量的影响

Fig. 2 Variances of DTN with the formation and disappearance of algae bloom under different treatment

2.3 水华生消过程中叶绿素 a(Chl-a)的变化

图 3 反映了在水华生消过程中藻类叶绿素 a 含量随时间的变化趋势。由图 3 可见,在试验的第 12 天,处理 6 和 9 的叶绿素 a 含量出现峰值,但处理 6 的峰值较处理 9 高出许多。由前面分析可知,处理 6 的磷营养消耗呈中等强度,但对氮营养的消耗较多,而处理 9 的氮磷营养消耗均较强烈,峰值反而较低,这可能与该处理的光照水平较低有关,可以推测与水温的影响大小相比,光照强度对水华生消的影

响更大。

由图 3 还可以看出,处理 5 和 8 分别在第 11 天和第 6 天出现叶绿素 a 峰值,且峰值均较处理 6 和 9 低,与比增长率的结果并不一致,原因是影响比增长率的除叶绿素 a 含量外,还有出现峰值的时间。处理 8 的藻类在经过较短时间即达到生长旺盛、叶绿素 a 含量最高的稳定期后,逐渐出现衰退趋势。其他处理的叶绿素 a 含量峰值较低,出现的时间并不一致,与各自的条件密切相关。

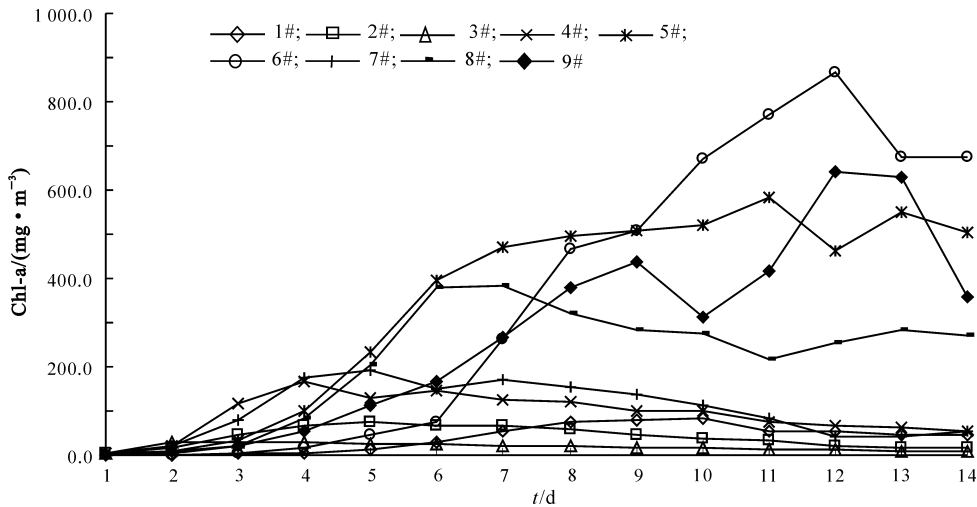


图 3 不同处理对水华生消过程中 Chl-a 含量的影响

Fig. 3 Variances of Chl-a with the formation and disappearance of algae bloom under different treatment

2.4 水华生消过程中 pH 值和电导率(Cond)的变化

在水华暴发过程中,水体 pH 值的变化与藻类光合作用密切相关。由图 4 可见,随试验时间的延

长,多数处理的水体 pH 值呈先升后降趋势,如处理 1,2,4~8,其中处理 6 的 pH 值升高最大,于试验的第 12 天开始下降。

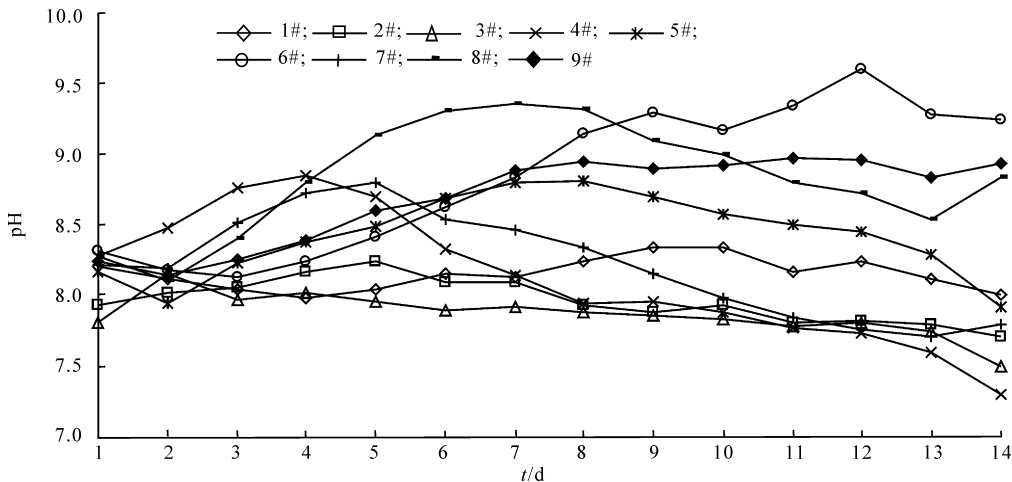


图 4 不同处理对水华生消过程中 pH 值的影响

Fig. 4 Variances of pH value with the formation and disappearance of algae bloom under different treatment

比较图 3 和图 4 可见,pH 值变化与叶绿素 a 变化基本吻合,这主要是由于光合作用消耗水体中 CO₂,致使水中氢离子减少,pH 值升高^[16]。据报道,当 pH>9 时,铜绿微囊藻可借助悬浮机制在水

体表面形成水华,以利于吸收“空气-水”界面的 CO₂^[17]。相对来说,处理 3 的 pH 值保持较低水平且基本不变,这可能与调节磷营养的 KH₂PO₄ 有关;而处理 9 的 pH 值上升到 9 左右后保持不变。

一般来说,生物体具有自适应,在不利条件下,藻类可通过复杂的生理调节,使得水体 pH 值向有利于自身生长的方向改变并保持下来。

由图 5 可见,电导率高低与调节营养的 KNO_3

和 KH_2PO_4 用量密切相关,处理 3,6 和 9 在试验设置中的用盐量较其他处理高,其电导率也较高;总的来说,随着藻类生长,营养盐呈减少趋势,故电导率也逐渐降低。

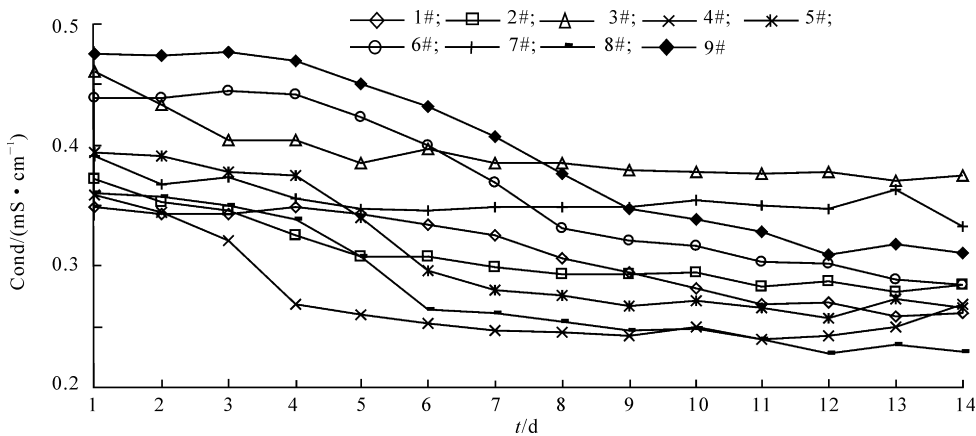


图 5 不同处理对水华生消过程中 Cond 的影响

Fig. 5 Variances of conductivity with the formation and disappearance of algae bloom under different treatment

3 水华生消与各因素的灰色关联分析

水华生消过程中 DTP 和 DTN 的损耗率分别定义为:

$$\lambda_P=\frac{\ln P_0-\ln P_{t'}}{t'};\tag{2}$$

$$\lambda_N=\frac{\ln N_0-\ln N_{t'}}{t'};\tag{3}$$

$$\lambda_{WT}=\frac{\ln(WT)}{10};\tag{4}$$

$$\lambda_I=\frac{\ln I}{10}.\tag{5}$$

式中: λ_P 和 λ_N 分别为 DTP 和 DTN 的损耗率; P_0 和 $P_{t'}$ 、 N_0 和 $N_{t'}$ 分别为试验开始、结束时的 DTP 和 DTN,mg/L; t' 为试验周期,d; λ_{WT} 和 λ_I 分别为水华生消过程中藻类对水温和光照强度的利用程度。

以藻类的比增长率 u 为参考数列 $X_0(k)$,以 λ_P 、 λ_N 、 λ_{WT} 、 λ_I 为比较数列 $X_i(k)$ (下角标 i 分别代表 P 、 N 、 WT 和 I),作灰色关联分析,数列表示如表 3。

表 3 灰色关联分析的参考数列和比较数列

Table 3 Value of reference sequence and comparison sequence

项目 Item	处理 Treatment								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$X_0(k)$	0.489	0.778	0.767	0.675	0.534	0.601	1.011	1.081	0.582
$X_P(k)$	0.306	0.306	0.178	0.337	0.440	0.332	0.104	0.348	0.345
$X_N(k)$	0.142	0.025	0.010	0.214	0.185	0.070	0.173	0.278	0.157
$X_{WT}(k)$	0.303	0.327	0.345	0.326	0.345	0.307	0.347	0.317	0.326
$X_I(k)$	0.739	0.776	0.809	0.812	0.743	0.771	0.771	0.809	0.734

按灰色关联分析定义^[18],有:

$$\Delta_i(k)=|X_0(k)-X_i(k)|;(k=1,2,\cdots,9)\tag{6}$$

$$\xi_i(k)=\frac{\min\min\Delta_i(k)+\max\max\Delta_i(k)}{\Delta_i(k)+\rho\max\max\Delta_i(k)};\tag{7}$$

$$\gamma=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\xi_i(k)。(n=1,2,\cdots,9)\tag{8}$$

式中: $\Delta_i(k)$ 为参考数列和比较数列的绝对差; $\xi_i(k)$ 为参考数列和比较数列的关联系数; ρ 为分辨系数,其范围为 $(0,+\infty)$,通常取值区间为 $[0,1]$; γ 为参考数列和比较数列的关联度。

本文取 $\rho=0.5$,计算比较数列和参考数列的绝对差、关联系数和关联度,结果如表 4 和表 5 所示。

由表 5 可知, $\gamma_I>\gamma_P>\gamma_{WT}>\gamma_N$,可见在磷营养、氮营养、水温和光照 4 个因素中,光照对水华生消影响最大,其余 3 因素差异不大。灰色关联分析结果与正交试验方差分析结果有一定出入,但均揭示了光照对水华暴发的重要性。本试验采用的人工光源为 40 W 日光灯连续光照,发射约 500 nm 左右的黄绿光和蓝绿光,此波长下的色光易被蓝藻叶绿素 a、类胡萝卜素、藻胆素和藻胆蛋白体等吸收,对光合作

用十分有利,由此也可说明光照是藻类生长和水华 暴发的主导性因子。

表 4 参考数列和比较数列的绝对差

Table 4 Absolute difference of reference sequence and comparison sequence

项目 Item	处理 Treatment									min $\Delta_i(k)$	max $\Delta_i(k)$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
$\Delta_P(k)$	0.183	0.472	0.589	0.339	0.094	0.269	0.907	0.733	0.238	0.094	0.907
$\Delta_N(k)$	0.348	0.754	0.757	0.461	0.349	0.531	0.838	0.803	0.425	0.348	0.838
$\Delta_{WT}(k)$	0.187	0.451	0.422	0.349	0.189	0.294	0.664	0.764	0.256	0.187	0.764
$\Delta_I(k)$	0.249	0.003	0.042	0.137	0.209	0.170	0.240	0.272	0.152	0.003	0.272

表 5 参考数列和比较数列的关联系数和关联度

Table 5 Correlation coefficient and association degree of reference sequence and comparison sequence

项目 Item	处理 Treatment									关联度 γ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\xi_P(k)$	0.717	0.493	0.438	0.576	0.834	0.632	0.335	0.385	0.661	0.563
$\xi_N(k)$	0.570	0.378	0.377	0.499	0.569	0.464	0.353	0.363	0.519	0.455
$\xi_{WT}(k)$	0.713	0.505	0.521	0.569	0.711	0.611	0.408	0.375	0.643	0.562
$\xi_I(k)$	0.649	1.001	0.921	0.773	0.689	0.732	0.658	0.629	0.754	0.756

4 结 论

(1)本试验结果表明,藻类比增长率大小依次为处理 8>处理 7>处理 2>处理 3>处理 4>处理 6>处理 9>处理 5>处理 1。

(2)正交试验方差分析结果表明,在磷营养、氮营养、水温和光照 4 个因素中,光照对藻类生长和水华暴发的影响最大;根据比增长率的计算,当磷营养为 0.8 mg/L、氮营养为 3.6 mg/L、水温和光照强度分别为 29~30 ℃ 和 3 300~3 400 lx 时,有利于藻类生长,是水华暴发的最适宜条件,此时藻类比增长率为 1.129。

(3)各因子共同作用、综合影响藻类生长,当某因子缺乏时,其他因子可以在一定程度上补偿,但不能替代,藻类生长遵循最小因子定律;光照和营养因子是藻类生长的直接作用因子,水温是间接作用因子。

(4)试验过程中,藻类生长经迟滞期、对数生长期到稳定期,最后进入衰退期,完成整个生命周期,消耗大量的氮磷营养。营养盐含量随藻类生长和水华暴发逐渐降低;水体 pH 值随时间的变化趋势与叶绿素 a 基本吻合,电导率与试验设置的初始营养盐浓度直接相关。

(5)灰色关联分析结果表明,在本试验设置的水平下,光照与藻类比增长率关系最密切,是藻类生长和水华暴发的主导性因子。

[参考文献]

[1] 张维昊,徐小清,丘昌强.水环境中微囊藻毒素研究进展[J].环境科学研究,2001,14(2):57-61.

Zhang W H,Xu X Q,Qiu C Q. Advance in study on *Microcystis* in aquatic environment [J]. Research of Environmental Sciences,2001,14(2):57-61. (in Chinese)

[2] Hecky R E,Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments;a review of recent evidence on the effects of enrichment [J]. Limnol Oceanogr,1988,33:796-822.

[3] Xie L,Xie P,Li S,et al. The low TN : TP ratio,a cause or a result of *Microcystis* blooms [J]. Water Res,2003,37:2073-2080.

[4] DiToro D M,Matystik W F. Mathematical models of water quality in large lakes. Part I: Lake Huron and Saginaw Bay [M]. EPA 600/3-80-56 Duluth,MI,USA,1980.

[5] Eppley R W. Temperature and phytoplank to growth in the sea [J]. Fish Bull,1972,70:1063-1085.

[6] 钟 远,金相灿,孙 凌,等. 磷及环境因子对太湖梅梁湾藻类生长及其群落影响 [J]. 城市环境与城市生态,2005,18(6):32-34.

Zhong Y,Jin X C,Sun L,et al. Influence of phosphorus and environmental factors on algae growth and algal community structures in Taihu Lake [J]. Urban Environment &. Urban Ecology,2005,18(6):32-34. (in Chinese)

[7] 高月香,张永春. 水文气象因子对藻华暴发的影响 [J]. 水科学与工程技术,2006(2):10-12.

Gao Y X,Zhang Y C. Influence of hydrometeorologic factors on algae bloom [J]. Water Science and Water Environment,2006(2):10-12. (in Chinese)

[8] 陈宇炜,高锡云. 西太湖北部微囊藻时空分布及其与光温等环境因子关系的研究[C]//蔡启铭. 太湖环境生态研究(I). 北京:气象出版社,1998:142-148.

Chen Y W,Gao X Y. Spatial distribution of *Microcystins* and the relation of light and temperature and the algae in West of Tai Lake [C]// Cai Q M. The research of ecology and environment in Tai Lake (I). Beijing: Meteorology Publishing House,1998:142-148. (in Chinese)

- [9] 华锦彪,宗志祥. 洋河水库“水华”发生的实验研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,1994,30(4):476-484.
- Hua J B,Zong Z X. Experimental research on formation of algal bloom in Yanghe Reservoir [J]. Universitatis Pekinensis: Acta Scientiarum Naturalium, 1994, 30(4): 476-484. (in Chinese)
- [10] 林毅雄,韩梅. 滇池富营养化的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* Kütz.)生长因素的研究[J]. 环境污染治理技术与设备,1998,6(3):82-87.
- Lin Y X,Han M. The study growth factors of the *Microcystis aeruginosa* Kütz during eutrophication of Dianchi Lake [J]. Techniques and Equipment for Environment Pollutant Control,1998,6(3):82-87. (in Chinese)
- [11] 沈东升. 平原水网水体富营养化的限制因子研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2002,28(1):94-97.
- Shen D S. Study on limiting factors of water eutrophication of the network of rivers in plain [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2002, 28(1): 94-97. (in Chinese)
- [12] 牛晓君. 富营养化发生机理及水华暴发研究进展[J]. 四川环境,2006,25(3):73-76.
- Niu X J. Research progress of eutrophication mechanism and breakout of water bloom [J]. Sichuan Environment, 2006, 25(3): 73-76. (in Chinese)
- [13] 徐宁,陈菊芳,王朝晖,等. 广东大亚湾藻类水华的动力学分析Ⅱ. 藻类水华与营养元素的关系研究[J]. 环境科学学报,2001,21(4):400-404.
- Xu N,Chen J F,Wang C H, et al. Dynamic analyses on algal bloom events in Daya Bay of Guangdong Province Ⅱ. A study of relationship between algal bloom and nutrients [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(4): 400-404. (in Chinese)
- [14] 陈琼. 氮磷对水华发生的影响[J]. 生物学通报,2006,41(5):12-15.
- Chen Q. Influence of nitrogen and phosphorus on the formation of algae bloom [J]. Bulletin of Biology, 2006, 41(5): 12-15. (in Chinese)
- [15] 刘信安,湛敏,罗彦凤,等. 三峡水域氮磷污染对水华暴发/消涨行为的协同影响[J]. 环境科学,2006,27(8):1554-1559.
- Liu X A,Zhan M,Luo Y F, et al. Synergistic effects by P and N pollution to fluctuation behavior/bloom of algae along the Three Gorges Valley [J]. Environmental Science, 2006, 27(8): 1554-1559. (in Chinese)
- [16] 赵孟绪,韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析[J]. 生态学报,2005,25(7):1554-1561.
- Zhao M X,Han B P. Analysis of factors affecting *Cyanobacteria* bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1554-1561. (in Chinese)
- [17] Oliver R, Ganf G. Freshwater blooms [C]// Whitton B A, Potts M. The ecology of *Cyanobacteria*. Netherlands: The Kluwer Academic Publishers, 2000: 149-194.
- [18] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.
- Fu L. Mechanism and application of gray system [M]. Beijing: Document of Science and Technique Publishing House, 1992. (in Chinese)