生态环境 2005, 14(1): 10-15 http://www.jeesci.com
Ecology and Environment E-mail: editor@jeesci.com

水温与营养值对水库藻华态势的影响

王志红[1]，崔福义[2]，安全[3]

1. 广东工业大学建设学院，广东 广州 510643；2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院，哈尔滨 黑龙江 150090；
3. 盘锦市兴隆台区经贸局，辽宁 盘锦 124010

摘要：主要研究了水温和营养值在大沙河水库绿藻、硅藻藻华生物量的影响；提出了用营养值来定量描述水体的富营养状态；通过构筑一定形式的辅助变量，分别提出了在水温 20 ℃和 30 ℃条件下藻华生物量的预测模型；进一步阐述了水温对藻生长态势的影响原理。研究表明水温一方面影响藻生命活动的活性、速率，另一方面影响藻对水中营养物的利用率和自身代谢率。在水温 20 ℃和 30 ℃时，两方面的总体作用结果有所不同。对营养物的利用率和自身代谢率方面更大程度上影响藻华生物量的多少。

关键词：藻华；生物量；水温；营养值
中图分类号：X171.5 文献标识码：A 文章编号：1672-2175（2005）01-0010-06

随着我国社会和经济水平的不断发展，湖泊水库的富营养化具有越来越广泛、越来越严重的趋势，给各种藻类水华的暴发提供了营养基础。对于以湖泊水库水为水源的给水处理厂，最大的困难在于如何对藻类“水华”的暴发时间、类型和危害程度等进行预测，使水厂可以及时调整处理流程，保证供水水质。因此，课题在一系列试验的基础上，力求寻找营养因子、生态因子等与藻类“水华”的相关性，以期可以建立“水华”现象的预测模型，为水厂的生产运行起一定的指导作用。

绝大多数藻类是中温性的。温度对藻类的生命活动有重要的影响，通过控制光合作用的酶促反应或呼吸作用强度，直接影响藻类的增殖。并且可通过控制水体中的各类营养物的溶解度、离解度或分解率等理化过程间接影响藻类的生长。温度对藻类在水体中的分布和数量也起一定的作用。在风力比较小和水体比较平静的状态，温度沿水体深度分布存在着温跃现象，水体呈现分层，垂直方向的传质受到限制。水体的分层会加速藻类的繁殖生长[1]。

大部分藻类的光合作用、呼吸强度与水温、光强关系密切。其代谢活动强度与温度符合一般生理学规律：在其他环境条件适合的情况下，在一定的温度范围内，温度上升 10 ℃，藻类代谢活动增加 2 倍。水温一方面对影响藻类的生理生化活动，另一方面对藻类的生物量和种类也有一定的决定作用。例如，Cairns 研究美国宾西法尼亚小河中藻类与温度的关系发现 20 ℃左右时硅藻为主，30 ℃绿藻为主，40 ℃蓝藻为主[2]。

因此，本文将重点探讨在水温在藻华形成和暴发期间与藻生物量、藻生长速率之间的相关性。

1 试验设计

试验主要在开平振华水厂进行。日处理水量 60 000 m^3/d。水厂原水为大沙河水库中层水，平均浊度为 3～12 NTU，总氮质量浓度平均值 0.4 mg/L，总磷质量浓度平均值 0.018 mg/L，氮磷质量比约为 22∶1。由于地处南方，夏季高温持续时间长，光照强烈，水库较容易出现藻类“暴发”。例如在 2000 年 9 月至 10 月间，由于持续高温晴天，水库水位大幅度下降，大沙河水库暴发了一次藻类“水华”，短短几天藻类含量高达数百万至数千万个/L[3]。

试验在人工藻类培养环境中进行。设计正交试验，控制培养的初始营养因子、生态因子，考察不同初始条件下的藻种群生长过程，根据藻种群的生长规律和检测指标的变化规律，寻找两者之间的相关性。

人工培养环境为微宇宙系统，培养水体容量介于 0.05～1 m^3，日交换容量约为 2%。以水厂原水（大沙河水库中层水）作为培养原水，加入培养液，间歇培养，控制培养过程的光暗比 12∶12。定时每天人工摇动 2～4 次。试验分成两个阶段，第一阶段在夏季高温季节，水温 30 ℃左右，日照强烈，持续时间长，培养液选用朱氏（改良）10 号[4]。第二阶段在 11 月～次年 1 月，水温 20 ℃左右，日照相对较弱，需要人工增加光源，选用 HGZ（改良）培养液[4]。

2 试验结果分析

2.1 20 ℃和 30 ℃时的藻生物量

考察两种水温条件下，藻生物量与不同的初始

基金项目：国家“十五”科技攻关项目（2002BA806B04）
作者简介：王志红（1975－），女，讲师，博士，研究方向为水处理和环境污染控制。E-mail: gdwzhihong@21cn.com
收稿日期：2004-07-29

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

营养条件之间的变化关系，结果如图 1 所示，图中藻生物量是指藻生长周期内稳定期的高峰值。

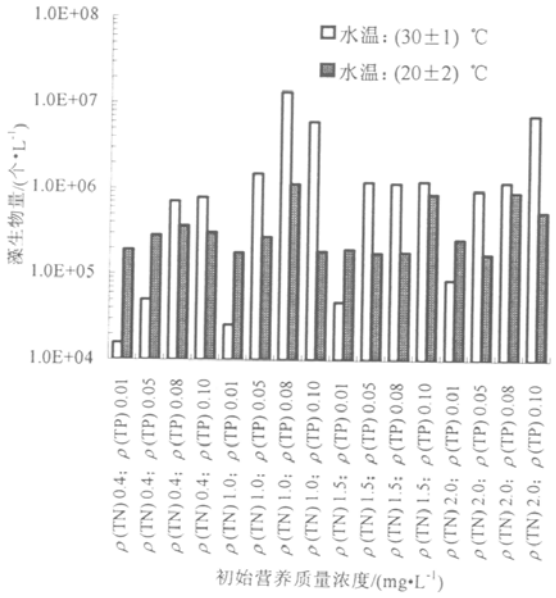

图 1 水温与藻生物量

Fig. 1 Temperature and algae biomass

从图中可以看出，对同样的初始营养条件下的藻生物量进行对比，水温(30±1) ℃条件下的藻生物量和水温(20±2) ℃条件下的藻生物量之间难以发现明显的绝对多或少的关系。可以直观看到的是，当水温为(30±1) ℃时，藻生物量随营养条件的波动较大，而水温为(20±2) ℃时，藻生物量的变化幅度相对比较小。

这说明，当水温较高时，不同营养状态下藻类的生长对水温的要求都已经满足，水温对藻生长态势的制约作用较小，营养状态成为制约藻生物量的主要因素。但水温较低时，水温对藻类生长的制约作用仍然较大，与初始营养状态的制约作用同时并存，因此单纯看藻生物量随营养状态而变化的幅度较小。

水温作为重要的生态因子，直接影响藻细胞的生命活性和繁殖速率，当水温是藻生活所需的适宜温度时，藻类的生命活性高，对水体营养物质的利用率也高，代谢速率快，增殖速率也快。而藻生物量的多少与水体的初始营养状态密切相关。初始营养状态反映了藻生长所需营养物质的可利用量，但藻类生长对营养物质的利用率受实际生长条件的限制。作者认为，水温对藻生物量的影响同样表现在影响营养物质的利用率方面。因此，考察水温对藻生物量的影响，需要综合考虑初始营养状态的因素。

水体的营养物质主要由 N、P 等元素构成，其营养程度是 N、P 等综合作用的结果。因此，构造营养值（Trophic value，TV，计算符号暂记为 V_T）参数：营养值是一种营养状态的相对描述，是指水体 ρ(TN)、ρ(TP)值与重富营养状态的 ρ(TN)、ρ(TP)临界值之间的比值，是一个无量纲的量。按照 OECD 的营养状态分类[5]，以总氮作为氮评价指标，当 ρ(TN)≥2.7 mg/L，ρ(TP)≥0.1 mg/L 时为重富营养。因此将 ρ(TN)、ρ(TP)重富营养状态的临界值分别确定为 2.7 mg/L、0.1 mg/L。则水体的营养值可采用式（1）计算：

$$V_T=[\rho(TN)\div 2.7]\times[\rho(TP)\div 0.1] \quad (1)$$

分别计算临界营养值和试验中的营养值分布情况，如表 1、表 2 所示。

表 1 湖泊营养状态与氮、磷元素的关系(OECD)*

Table 1 Relationship between ρ(N)/ρ(P) and trophic state in lakes

营养状态	ρ(无机氮) /(mg·L^{-1})	ρ(有机氮) /(mg·L^{-1})	ρ(总磷) /(mg·L^{-1})	临界营养值 V_T
极贫营养	＜0.2	＜0.2	＜0.005	≤0.007 4
中-贫营养	0.2~0.4	0.2~0.4	0.005~0.01	0.007 4~0.026
中-富营养	0.3~0.65	0.4~0.7	0.01~0.03	0.026~0.133
富营养	0.5~1.5	0.~1.2	0.03~0.1	0.133~1
重富营养	＞1.5	＞1.2	＞0.1	≥1

*OECD 是联合国经济合作和开发组织的缩写

表 2 试验营养值

Table 2 Trophic values of the experiment

ρ(TP)/(mg·L^{-1})	ρ(TN)/(mg·L^{-1})			
	0.4	1.0	1.5	2.0
0.01	0.015	0.037	0.056	0.074
0.05	0.074	0.185	0.278	0.370
0.08	0.119	0.296	0.444	0.593
0.1	0.148	0.370	0.556	0.741

如表 1 所示，以 V_T 作为水体的营养状态评价指标，则有：当 V_T≥1 时，为重富营养水体；当 0.133≤V_T＜1 时，为富营养水体；当 0.026≤V_T＜0.133 时，为中-富营养水体；当 0.007 4≤V_T＜0.026 时，为中-贫营养水体；当 V_T≤0.007 4 时，为贫营养水体；营养值越小，水体的营养程度越低。

考察不同营养值条件下水温对藻生物量的影响，如图 2 所示。从图中可以看出，在水温 30 ℃和水温 20 ℃时，藻生物量都随着营养值的增加表现出类似的变化规律：增加→极大值→减少→极小值→增加。在 V_T = 0.3 左右时，藻生物量高峰值达到一个极大值；在 V_T = 0.4 左右时，藻生物量高峰值为极小值。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

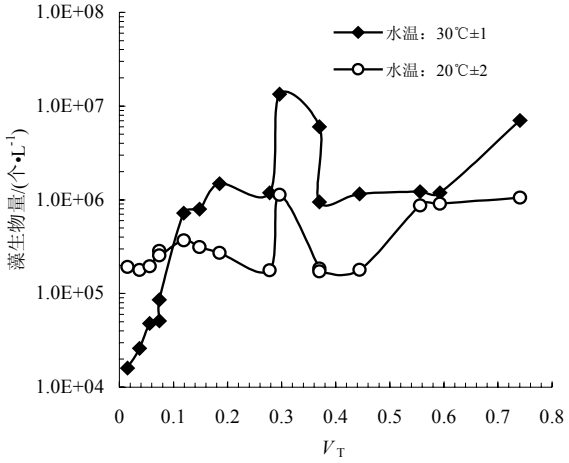

图 2 营养值（V_T）与藻生物量

Fig. 2 Trophic values vs. algae biomass

分析图中数据点，有如下结论：

（1）当营养值 V_T＜0.1 时，水温 20 ℃的藻生物量大于水温 30 ℃的藻生物量，即此时水温稍低有利于藻的生长；

（2）当营养值 V_T＞0.1 时，水体处于中-富以上营养水平，水温 20 ℃的藻生物量小于水温 30 ℃的藻生物量，即此时水温高的季节藻生物量高峰值大。

建立藻生物量 D 与营养值 V_T 之间的回归模型，则有：

I．水温 30 ℃时，如图 3 所示。由于 V_T 与 D 之间的统计规律相对不明显，构筑最优化建模辅助变量，令

$$S_{TV}=(e^{V_T}+e^{-V_T})\div 2, \quad \text{则}$$

$$\lg D = 36.571 S_{TV}^{3} - 51.214 S_{TV}^{2} + 21.389 S_{TV} + 3.706\,5 \qquad (2)$$

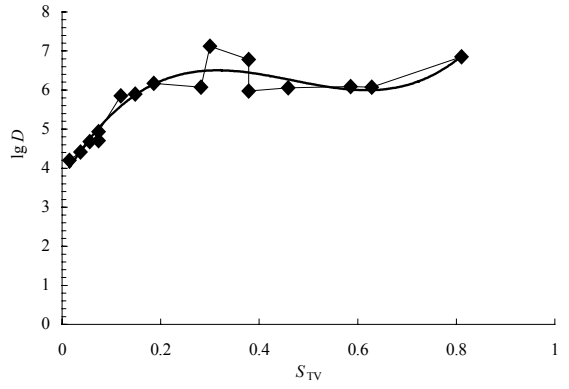

图 3 水温 30 ℃时 S_{TV} 和 lg$D$ 的回归关系

Fig. 3 Regression relationship between S_{TV} and lg$D$ at water temperature 30 ℃

相关系数 R = 0.950。

II．水温 20 ℃时，需要分段进行回归拟合，如图 4 所示。图 4(a)图反映的是 V_T＜0.3 时的回归关系；图 4(b)图反映的是 V_T≥0.3 的回归关系。构筑最优化建模辅助变量，令 $F = V_T^{1.62}$，则模型如下：

当 V_T＜0.3 时，

$$\lg D = 1\,486 F^{3} - 336.07 F^{2} + 19.103 F + 5.205\,5 \qquad (3)$$

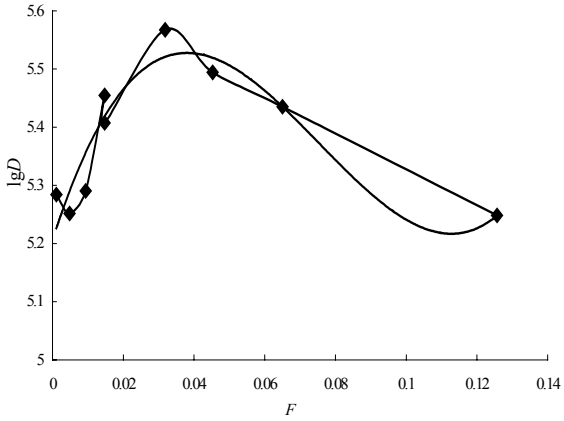

图 4（a） 水温 20 ℃时 F 与 lg$D$ 的回归关系

Fig. 4 Regression relationship between F and lg$D$ at water temperature 20 ℃

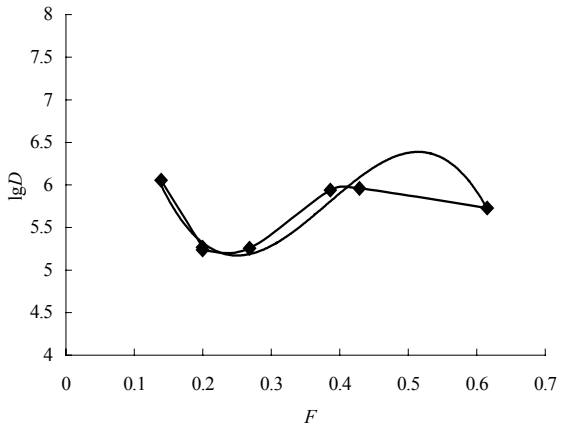

图 4（b） 水温 20℃时 F 与 lg$D$ 的回归关系

Fig. 4 Regression relationship between F and lg$D$ at water temperature 20 ℃

即：$\lg D = 1\,486 (V_T)^{4.86} - 336.07 (V_T)^{3.24} + 19.103 (V_T)^{1.62} + 5.205\,5$ （4）

相关系数 R = 0.937。

当 V_T≥0.3 时，

$$\lg D = -131.86 F^{3} + 151.22 F^{2} - 50.896 F + 10.504 \qquad (5)$$

即：$\lg D = -131.86 (V_T)^{4.86} + 151.22 (V_T)^{3.24} - 50.896 (V_T)^{1.62} + 10.504$ （6）

相关系数 R = 0.968。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上述回归模型都具有良好的相关性，可看出，TV 值与藻生物量之间通过一定的变量转化后，通过相应的回归模型，可以对水温 20 ℃和 30 ℃时的藻生物量进行预测。模型反映了水温对藻生物量有着重要的影响，对于藻生物量的预测建模，水温是个不可忽视的因素。

2.2 水温对藻生长态势的影响

选择初始营养状态不同的 4 种情况，考察水温对藻生长态势的影响，试验结果如图 5、6、7、8、9 所示。

从图 5～9 可以看出，水温对藻的生长态势有明显的影响，而且相对不同初始营养状态，影响规律有所不同，具体阐述如下：

（1）从藻生长的周期性来看，当水温为(30±1) ℃时，藻生长表现出明显的迟滞期、对数期、稳定期和衰亡期特征，阶段性明显。而水温为(20±2) ℃时，藻生长也表现出阶段性，但各阶段的时间与水温(30±1) ℃时有所不同，迟滞期持续时间较长，对数期短，稳定期持续时间也比较短。例如，图 5 反映的富营养状态下（TN 2.0 mg/L，TP 0.1 mg/L，V_T为 0.741），水温为(30±1) ℃时，迟滞期为第 1～4 天，对数期第 5～8 天，稳定期为第 9～14 天。水温为(20±2) ℃时，迟滞期为第 1～8 天，对数期为第 9～10 天，稳定期为第 11～13 天。图 6、7 也反映了类似的规律。

图 8、图 9 反映的规律有所不同。例如，图 8 反映的在初始总氮 0.4 mg/L，总磷 0.01 mg/L 的中-贫营养状态下，营养值为 0.015，藻生长周期明显缩短，20 ℃和 30 ℃水温下的藻生长周期均为 8～9 天。图 9 反映的规律与图 8 类似，是营养值为 0.037 的中-富营养等级水平的情况。

（2）从藻生物量高峰值来看，正如已在 2.1 中解释过的，在图 5、图 6 和图 7 的富营养状态下，水温(30±1) ℃和(20±2) ℃的两种情况的藻生物量高峰值相差不大，水温低时的高峰值略小于水温高时的高峰值。这说明当水体的初始营养状态在富营养水平时，水温的变化对藻生物量高峰值影响不大。此时藻生物量主要取决于水体营养状态。

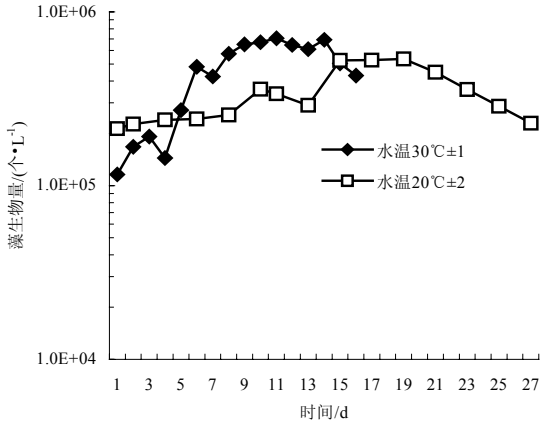

图 5 初始 TN 2.0 mg/L；初始 TP 0.1 mg/L 时水温对藻生长速率的影响

Fig. 5 Influence of temperature on algae growth velocity

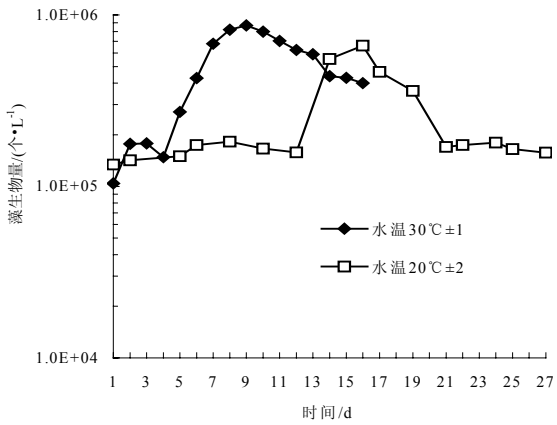

图 6 初始 TN 1.5 mg/L；初始 TP 0.08 mg/L 时水温对藻生长速率的影响

Fig. 6 Influence of temperature on algae growth velocity

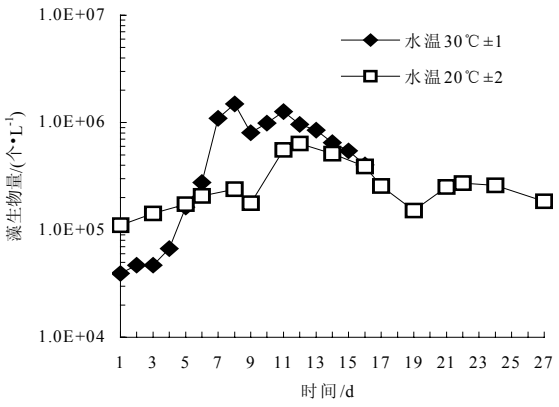

图 7 初始 TN 1.0 mg/L；初始 TP 0.05 mg/L 时水温对藻生长速率的影响

Fig. 7 Influence of temperature on algae growth velocity

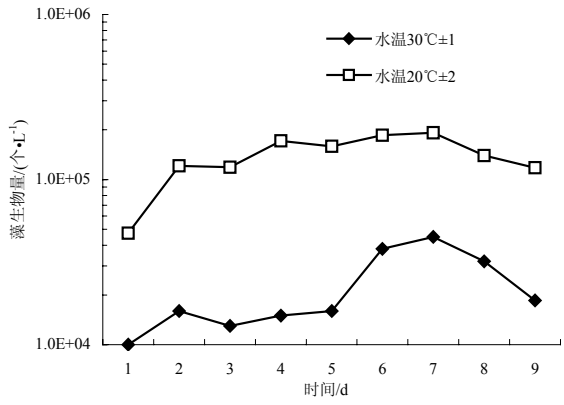

图 8 初始 TN 0.4 mg/L; 初始 TP 0.01 mg/L 时水温对藻生长速率的影响

Fig. 8 Influence of temperature on algae growth velocity

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

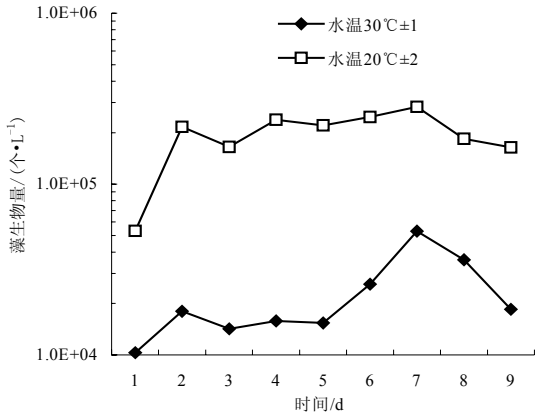

图 9 初始 TN 1.0 mg/L；初始 TP 0.01 mg/L 时水温对藻生长速率的影响

Fig. 9 Influence of temperature on algae growth velocity

在图 8、图 9 的营养状态条件下，由于营养水平相对较低，两种水温条件下的藻生物量绝对值都不大，但水温(20±2) ℃的藻生物量反而大于水温(30±1) ℃时的生物量。

对于图 5～9 表现出来的规律，作者认为水温对藻生长态势的影响主要有两种方式，一是影响藻生理活动的活性，另一方式是指影响藻吸收利用水体营养物质的效率和程度，即营养物的利用率。这两种影响方式是并存的，属于共同作用又相互竞争的关系。

具体可作如下的解释：

（1）水温对藻生长态势的影响首先表现在藻的生命活性上。藻生理活动所需的酶在适宜的温度范围内，随着水温的升高其活性增加，因此藻的代谢速率快。表现出水温高时藻能够比较快的适应新环境，迟滞期较短。而对数期是藻类快速增长的时期，稳定期是藻类生长速率和死亡速率基本持平的时期，在这两个阶段中藻细胞的生命活动旺盛，代谢率高，因此对数期和稳定期持续的时间较长。

（2）藻类细胞利用水中营养物质的过程是十分复杂的。涉及水体中营养物质的释放转移，营养物质通过藻细胞膜的迁移进入，藻细胞利用营养物质合成自身物质等过程，至今还缺乏严谨的机理解释。但可作定性描述，当水体环境温度高时，一方面能促进氮、磷等营养盐在水体中的迁移转化过程；另一方面水中溶解氧减少，藻类呼吸量增加，这两方面都有利于藻细胞对水体中营养物的吸收，促进各种生物化学作用的进行，使藻细胞完成自身成长增殖。因此，水温高时对营养物的利用率提高。

（3）水温对藻类生长态势的影响包括对生理活性的影响和对营养物利用率的影响。试验表明，就藻生物量而言，水温对营养物利用率的影响起主要作用。

在中-富以上营养水平时，水温升高，藻生理活性和营养物利用率都升高，水中可利用的营养物质丰富，因此能达到的藻生物量高峰值也越大。但在中-贫营养水平的水体中，水温升高时，营养物利用率虽然升高，可以促进对营养物质的吸收。但此时藻细胞生命活动的活性也升高，代谢速率较快，代谢量大，需要消耗的营养物质也多。由于总体上水体中可利用的营养物较少，营养因子成了限制因素，所以藻生物量反而更小。

综上所述，水温对绿藻、硅藻藻华的生长态势有着重要的影响。在中-富以上营养状态的水体中，水温高，将导致藻生物量高峰值的增加，且藻生长周期延长，藻生物量高峰值持续时间也较长。

3 结论

对大沙河水库绿藻硅藻藻华的试验，研究了水温和营养值对藻华态势的影响，可得到以下结论：

（1）水温对藻华生物量的影响规律与水体的营养状态有着密切的关系。在中-贫以下营养状态时，水温低时的藻生物量大于水温较高时的藻生物量；在中等以上的营养状态下，水温高时的藻生物量较大。

（2）水温对藻生长态势的影响主要分为生理活性影响和营养物利用率影响两个方面。在水温 20~30 ℃时，营养物利用率影响起主要作用。

（3）提出了营养值的概念，可以定量描述水体的营养状态。

（4）在水温 20 ℃时，营养值与藻生物量之间的相关模型为（F 为建模辅助变量）：

（a）当 $V_T<0.3$ 时，$\lg D=1486F^3-336.07F^2+19.103F+5.2055$；

（b）当 $V_T\geq 0.3$ 时，$\lg D=-131.86F^3+151.22F^2-50.896F+10.504$

（5）在水温 30 ℃时，营养值与藻生物量之间的相关模型为（S_{TV} 为建模辅助变量）：

$$\lg D = 36.571S_{TV}^3-51.214S_{TV}^2+21.389S_{TV}+3.7065$$

参考文献：

[1] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
LIU JIAN-KANG. Senior Hydrobiology[M]. Beijing: Science Press, 2000.

[2] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学: 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
HUANG YU-YAO. Pollution Ecology of Inland Waters: Principles

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2001.

[3] 王志红, 崔福义, 安全, 等. pH 值与水库富营养化进程的相关性研究[J]. 给水排水, 2004, 30(5): 37-41.
WANG ZHI-HONG, CUI FU-YI, AN QUAN, *et al*. Research on the influence of ph on eutrophication in reservoir[J]. Water and Wastewater, 2004, 30(5): 37-41.

[4] 沈锞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
SHEN YUN-FEN, ZHANG ZONG-SHE, GONG XUN-JU, *et al*. New technology of microorganism monitor[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1990.

[5] 张锡辉. 水环境修复工程学原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
ZHANG XI-HUI. Principles and Applications of Water Environment Restoration[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.

Influence of water temperature and trophic value on algae blooming in reservoirs

WANG Zhi-hong[1], CUI Fu-yi[2], AN Quan[3]

1. Faculty of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510643, China;
2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin University of Technology, Harbin 150090, China;
3. Economy and Trade Bureau of Xinglong District, Panjin, Liaoning 124010, China

Abstract: This paper reports the influence of water temperature and trophic value on algae biomass of green algae and diatom blooming in Dashahe Reservoir. It proposes trophic value as a quantitative index of eutrophic state of water body. Through establishing some auxiliary parameters, models are also proposed to predicate algae biomass at water temperature 20 ℃ and 30 ℃ accordingly. It is observed that algae growth period is longer at water temperature 30 ℃ than it is at 20 ℃. Concretely, lag phase is shorter, log phase and stationary phase both stretch longer. Furthermore influencing theory is proved to divide into two ways. One way is to influence the intensity and velocity of algae growing activities. And the other way is to influence algae utilizing efficiency of nutrients in water body outside and metabolizing efficiency itself. There are cooperation and competition between these two ways. It propones utilizing and metabolizing efficiency dominate algae biomass more greatly.

Key words: algae blooming; biomass; water temperature; trophic value

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net