

# $\Delta$ DO 单一指标评价景观水体富营养化的研究

王 怡, 杨亮亮, 李 智, 王文怀, 韦存智  
(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 提出了采用水中溶解氧昼夜浓度最大差值( $\Delta$ DO)单一指标来及时评价景观水体富营养化程度的方法。在光暗比为1:1、温度为25℃、光照强度为2 000 lx条件下,通过测定不同纯藻的光合产氧速率和叶绿素a(Chl-a)浓度,以及实际混合藻群的DO、 $\Delta$ DO和Chl-a浓度,建立了不同藻种及混合藻群 $\Delta$ DO与Chl-a浓度的关系,探讨了采用 $\Delta$ DO单因素评价景观水体富营养化程度的可能性。结果表明,在含铜绿微囊藻、小球藻、伪鱼腥藻、混合藻群的实际景观水体中, $\Delta$ DO与Chl-a浓度的Pearson相关系数分别为0.95、0.96、0.97和0.93,相关性显著。因此,采用 $\Delta$ DO作为富营养化程度单因素评价指标有一定的可行性。此外,还确定了不同 $\Delta$ DO对应的水体富营养化程度范围,可为景观水体富营养化程度评价提供有效、快捷的方法。

**关键词:** 景观水体; 富营养化; 溶解氧; 溶解氧昼夜浓度最大差值; 光合产氧速率; 评价方法

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)23-0064-05

## Evaluating Eutrophication of Landscape Water by Single Index of $\Delta$ DO

WANG Yi, YANG Liang-liang, LI Zhi, WANG Wen-huai, WEI Cun-zhi  
(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** A method was proposed to timely evaluate the degree of eutrophication of landscape water by using a single index of the day and night maximum concentration difference of dissolved oxygen ( $\Delta$ DO) in water. The correlations between  $\Delta$ DO and chlorophyll a (Chl-a) concentration of different algal species and mixed algal species were established, through measuring the photosynthetic oxygen production rate and Chl-a concentration of different pure algae and DO,  $\Delta$ DO and Chl-a concentration of actual mixed algal group, under the condition of light to dark ratio of 1:1, temperature of 25℃ and light intensity of 2 000 lx. The experimental results showed that the Pearson correlation coefficients between  $\Delta$ DO and Chl-a concentration in the actual landscape water containing *Microcystis aeruginosa*, *Chlorella*, *Pseudomonas* sp. and mixed algae were 0.95, 0.96, 0.97 and 0.93 respectively, which showed a significant positive correlation. Therefore, it was feasible to use  $\Delta$ DO as a single index to evaluate the degree of eutrophication. In addition, the degree of eutrophication could be determined according to the range of  $\Delta$ DO, which provided an efficient and quick method for the evaluation of eutrophication degree of landscape water.

**Key words:** landscape water; eutrophication; dissolved oxygen; day and night maximum

concentration difference of dissolved oxygen; photosynthetic oxygen production rate; evaluation method

工业化和城镇化的快速发展加重了氮、磷等营养物质向环境的排放情况,进而加快了河流、湖泊等景观水体的富营养化进程。卡尔森认为水体营养状态主要由氧曲线形状、浮游植物种群组成、营养物浓度及底栖动物量决定。事实上,水生态环境与水体中浮游植物的群落结构和生物量关系最为紧密,因此浮游植物的丰度或生物量被很多学者作为划分水体富营养化程度等级的依据<sup>[1,2]</sup>。由于叶绿素 a (Chl - a) 通常作为水体中浮游植物量的综合指标,因此在修正的卡尔森指数法和综合营养指数法中,Chl - a 常被作为富营养化状态评价的重要指标。与此同时,水体富营养化程度与 DO 浓度也有较强的相关性<sup>[3]</sup>。

然而,在对西安市某景观水体连续数年的水质监测中屡次发现,水体中 DO 浓度与富营养化程度并不总是相关的,而水体中溶解氧昼夜浓度最大差值( $\Delta DO$ )却与富营养化程度有一定的相关性。因此,笔者以综合营养状态指数法为基础,通过纯藻及混合藻种培养中  $\Delta DO$  与 Chl - a 浓度的关系,建立  $\Delta DO$  浓度与富营养化程度的联系,以期能及时评价景观水体的富营养化程度提供有效而快捷的方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 藻种的来源、培养及预处理

铜绿微囊藻、伪鱼腥藻和小球藻购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库(FACHB),试验采用 BG - 11 培养基,培养基在灭菌前使用 0.01 mol/L 的 HCl 或 NaOH 调节 pH 值为  $7.16 \pm 0.03$ 。以上 3 种纯藻均在温度为 25 ℃、光照强度为 2 000 lx、光暗比为 1 : 1 的条件下进行培养,培养期间定时摇动培养基以避免发生器壁效应,并调换培养基位置 3 次以保证藻类得到充足的光照。

取对数生长期的纯藻液,离心(4 000 r/min) 10 min,然后采用  $\text{NaHCO}_3$  溶液(15 mg/L)洗涤两次后备用。纯藻培养采用 BG1 - 1 培养基,其氮、磷浓度分别为 5 和 0.3 mg/L,其余组分与 BG - 11 培养基相同。

### 1.2 纯藻呼吸速率和光合速率的测定

取已预处理的铜绿微囊藻分别接种于两个装有已灭菌的 BG1 - 1 培养基的锥形瓶中,使铜绿微囊

藻溶液的初始 Chl - a 浓度均为 50  $\mu\text{g/L}$ 。充分曝气 1 min 后,一个锥形瓶采用锡箔纸遮光作为黑瓶,另一个无任何遮挡的作为白瓶。两藻液瓶同时在温度为 25 ℃、光照强度为 2 000 lx、光暗比为 1 : 1 的条件下培养,并监测溶液中 DO 浓度的历时变化,按照文献[4]计算铜绿微囊藻的净产氧速率、呼吸速率和产氧速率。

伪鱼腥藻和小球藻的接种、培养,DO 浓度的测定,净产氧速率、呼吸速率和产氧速率的计算与铜绿微囊藻相同。

### 1.3 纯藻培养中 $\Delta DO$ 和 Chl - a 浓度相关性试验

取一定量已预处理的铜绿微囊藻分别接种于 7 个装有已灭菌的 BG1 - 1 培养液的锥形瓶中,使每个锥形瓶中 300 mL 藻液的 Chl - a 初始浓度分别为 5、15、30、50、70、90 和 110  $\mu\text{g/L}$ 。所有锥形瓶同时在温度为 25 ℃、光照强度为 2 000 lx、光暗比为 1 : 1 条件下培养,并监测 DO 浓度的历时变化,24 h 内 DO 最大浓度和最小浓度的差值为  $\Delta DO$ ,并绘制  $\Delta DO$  与 Chl - a 浓度的关系曲线。伪鱼腥藻和小球藻的相应试验与铜绿微囊藻的完全相同。

### 1.4 混合藻群中 $\Delta DO$ 和 Chl - a 浓度相关性试验

采集西安市富含混合藻群的某景观水体,稀释成不同 Chl - a 浓度的水样,将 300 mL 不同 Chl - a 浓度的实际水样加入锥形瓶中,然后在温度为 25 ℃、光照强度为 2 000 lx、光暗比为 1 : 1 条件下培养,监测 DO 浓度的历时变化,24 h 内监测的 DO 浓度均值作为对应水样的 DO 值,DO 最大浓度和最小浓度的差值作为  $\Delta DO$ ,并绘制 DO、 $\Delta DO$  浓度与 Chl - a 浓度的关系曲线。

### 1.5 分析方法

TN 采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  采用纳氏试剂比色法测定,TP 采用过硫酸钾氧化分光光度法测定, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  采用钼酸铵分光光度法测定,Chl - a 浓度采用丙酮提取 - 分光光度法测定,藻细胞密度采用显微计数法测定,DO 采用膜电极法测定,pH 值采用玻璃电极法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同藻的呼吸速率和光合速率

试验结果表明,铜绿微囊藻、小球藻和伪鱼腥藻

的净产氧速率分别为 192.26、302.58 和 266.05  $\mu\text{mol}/(\text{mg} \cdot \text{h})$ , 耗氧速率分别为 55.6、51.26 和 84.27  $\mu\text{mol}/(\text{mg} \cdot \text{h})$ , 产氧速率分别为 247.86、353.84 和 350.32  $\mu\text{mol}/(\text{mg} \cdot \text{h})$ 。可见, 伪鱼腥藻和小球藻的产氧速率分别为铜绿微囊藻的 1.41 倍和 1.43 倍, 表明伪鱼腥藻和小球藻的光合作用能力较强。此外, 伪鱼腥藻的耗氧速率分别为铜绿微囊藻和小球藻的 1.52 倍和 1.64 倍。因此, 从对水体 DO 的影响分析, 伪鱼腥藻是一种高产氧高耗氧的藻种, 这可能与藻体尺寸较大有关, 而小球藻是一种高产氧低耗氧的藻种, 铜绿微囊藻则属于低产氧低耗氧的藻种。

## 2.2 不同藻液中 DO 浓度的历时变化

水体中 DO 浓度的变化主要取决于藻类的光合作用、呼吸作用、大气复氧和耗氧物浓度, 本试验采用的培养基中耗氧物浓度相同, 环境条件导致的大气复氧也非常接近, 因此 DO 浓度的差异主要来源于前两个因素。图 1 为不同藻液中 DO 浓度的历时变化。可知, 光照 12 h 后, 小球藻藻液中 DO 浓度增加最快, 伪鱼腥藻次之, 铜绿微囊藻最低, 3 种藻液的 DO 浓度最大值依次为 16.71、14.08 和 11.44  $\text{mg}/\text{L}$ 。3 种藻液达到最大值的时间并不相同, 小球藻藻液在光照 12 h 后 DO 浓度最大, 而铜绿微囊藻和伪鱼腥藻藻液则均在 9 h 时 DO 浓度达到最大。

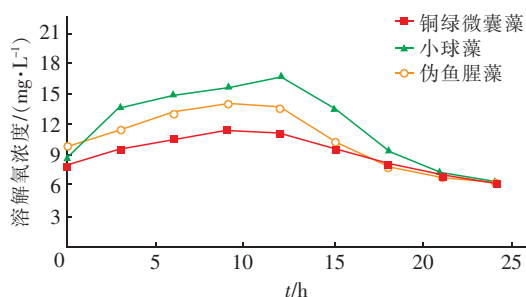


图 1 不同藻液中 DO 浓度的历时变化

Fig. 1 Change of DO concentration in different algal solution

从图 1 还可以看出, 在 12~24 h 的光暗阶段, 尽管小球藻藻液中 DO 浓度在前 9 h 维持较高水平, 但 3 种藻液的最终 DO 浓度下降为同一值, 从平均耗氧速率来看, 该阶段小球藻 > 伪鱼腥藻 > 铜绿微囊藻, 这似乎与 2.1 节的结果矛盾。事实上, 由于小球藻和伪鱼腥藻藻体尺寸的不同, 以及单位生物量所含 Chl-a 的差异, 即使在相同 Chl-a 浓度条件

下接种, 小球藻和伪鱼腥藻的密度必然有差异, 再加上增殖速率的不同, 24 h 后伪鱼腥藻和小球藻藻液的 Chl-a 浓度分别为 44.86 和 70.11  $\mu\text{g}/\text{L}$ , 表明伪鱼腥藻密度降低而小球藻密度增加, 这就导致了小球藻藻液总体耗氧速率增大。

## 2.3 不同藻液中 $\Delta\text{DO}$ 与 Chl-a 浓度的相关性

图 2 为不同浓度梯度的铜绿微囊藻、小球藻和伪鱼腥藻藻液中  $\Delta\text{DO}$  与 Chl-a 浓度之间的相关性。可以看出, 3 种藻液中  $\Delta\text{DO}$  与 Chl-a 浓度均具有较好的相关性, 且相关显著性检验  $P < 0.01$ 。此外, 不同藻液中  $\Delta\text{DO}$  与 Chl-a 浓度线性拟合的斜率不同, 斜率从大到小依次为小球藻 > 伪鱼腥藻 > 铜绿微囊藻, 表明在相同 Chl-a 浓度条件下, 小球藻对水中 DO 浓度的影响最大, 伪鱼腥藻次之, 铜绿微囊藻最小, 该结论与 2.2 节一致。

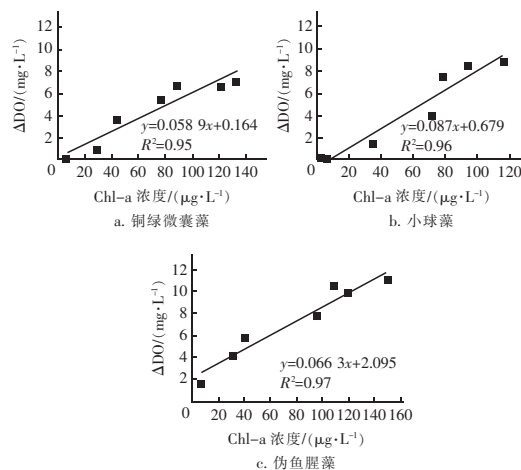


图 2 不同藻液中  $\Delta\text{DO}$  和 Chl-a 浓度的相关性

Fig. 2 Correlation between  $\Delta\text{DO}$  and Chl-a concentration in different algal solution

## 2.4 混合藻群中 $\Delta\text{DO}$ 与 Chl-a 浓度的相关性

图 3 为实际景观水体中 DO、 $\Delta\text{DO}$  与 Chl-a 浓度的相关性。

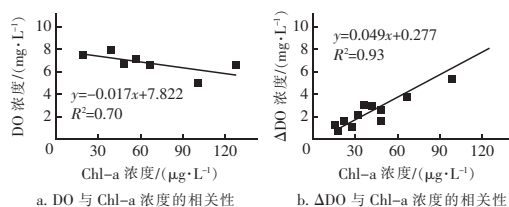


图 3 实际景观水体中 DO、 $\Delta\text{DO}$  与 Chl-a 浓度的相关性

Fig. 3 Correlation between DO,  $\Delta\text{DO}$  and Chl-a concentration in actual landscape water

从图3可知,实际景观水体中DO与Chl-a浓度呈负相关关系,相关系数为0.70,相关显著性检验 $P=0.08>0.05$ ,即相关性并不明显。而 $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a浓度呈正相关关系,相关系数为0.93,且相关显著性检验 $P<0.01$ ,表明实际水体中 $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a浓度具有极为显著的相关性,这一结果与2.3节基本一致。因此可以认为,相对于DO, $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a浓度的相关性更为显著。

## 2.5 $\Delta\text{DO}$ 评价景观水体的富营养化程度

单因素评价法和综合营养状态指数法是目前水质评价的主要方法,前者计算过程简单,但较片面,后者计算过程繁琐,因而应用并不广泛。在单因素评价法中,已有学者提出利用水体中DO浓度来评价水体的富营养化状态<sup>[4,5]</sup>,但藻类光合作用影响下的DO浓度往往呈现一定的周期性变化,这给水体的水质评价带来一定困难。Chl-a浓度作为反映藻生物量的重要指标,常常作为评价水体富营养化程度的主要因子,但由于其测定程序复杂且耗时长,在实际应用中受到限制。本研究基于综合营养状态指数法,利用 $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a浓度的相关性,提出了通过 $\Delta\text{DO}$ 单一因素来评价水体富营养化程度的方法。在综合营养状态指数法中,一般采用以下计算公式<sup>[6]</sup>:

$$\text{TLI}(\text{Chl}-a) = 10[2.5 + 1.086\ln(\text{Chl}-a)] \quad (1)$$

$$\text{TLI}(\text{TP}) = 10[9.436 + 1.624\ln(\text{TP})] \quad (2)$$

$$\text{TLI}(\text{TN}) = 10[5.453 + 1.694\ln(\text{TN})] \quad (3)$$

$$\text{TLI}(\text{SD}) = 10[5.118 - 1.94\ln(\text{SD})] \quad (4)$$

$$\text{TLI}(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10[0.109 + 2.66\ln(\text{COD}_{\text{Mn}})] \quad (5)$$

式中,TLI( $j$ )为参数 $j$ 的营养状态指数。富营养化分级状况:TLI $\leq 30$ 时为贫营养;30<TLI $\leq 50$ 时为中营养;TLI>50时为富营养。其中,50<TLI $\leq 60$ 时为轻度富营养,60<TLI $\leq 70$ 时为中度富营养,70<TLI $\leq 80$ 时为重度富营养,TLI>80时为极度富营养。

根据2.4节中 $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a浓度的函数关系,并结合式(1)可得式(6)。

$$\text{TLI}(\Delta\text{DO}) = 57.75 + 10.86\ln(\Delta\text{DO} - 0.277) \quad (6)$$

结合富营养化分级状况数值范围,可求得以 $\Delta\text{DO}$ 为单一指标的富营养化状态指标评分标准,如

表1所示。可以看出, $\Delta\text{DO} \leq 0.35$  mg/L时,水体为贫营养; $0.35$  mg/L< $\Delta\text{DO} \leq 0.77$  mg/L时,水体为中营养; $0.77$  mg/L< $\Delta\text{DO} \leq 1.5$  mg/L时,水体为轻度富营养; $1.5$  mg/L< $\Delta\text{DO} \leq 3.37$  mg/L时,水体为中度富营养; $3.37$  mg/L< $\Delta\text{DO} \leq 8$  mg/L时,水体为重度富营养; $\Delta\text{DO} > 8$  mg/L时,水体为极度富营养。赵珊等人<sup>[7]</sup>发现,水体的藻密度与 $\Delta\text{DO}$ 存在相对稳定的关系,当 $\Delta\text{DO} < 4$  mg/L时,水体藻密度较小,短期内很难出现水华现象,当 $\Delta\text{DO}$ 介于4~8 mg/L之间时,藻密度中等,易产生水华现象,当 $\Delta\text{DO} > 8$  mg/L时,水体极易发生水华现象。这与本文的结果类似。由于本指标评分标准是基于25℃条件下实际景观水体中 $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a的函数关系获得的,所以该方法对于夏季景观水体的评价判断准确性较高,也适合于春季和冬季景观水体富营养化的初步判断。

表1  $\Delta\text{DO}$ 富营养化状态指标评分标准

Tab.1 Eutrophication status level scoring criteria of  $\Delta\text{DO}$

mg·L<sup>-1</sup>

项 目	营养类型				
	贫营养	中营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养
$\Delta\text{DO}$	0.35	0.77	1.5	3.37	8

## 3 结论

① 通过对常见的铜绿微囊藻、小球藻和伪鱼腥藻纯种培养发现,伪鱼腥藻是一种高产氧高耗氧藻种,小球藻是一种高产氧低耗氧藻种,铜绿微囊藻则属于低产氧低耗氧藻种。但是,在相同Chl-a浓度条件下,小球藻对水体中DO浓度的变化影响最大,伪鱼腥藻次之,铜绿微囊藻的影响最小。

② 在光暗比为1:1、温度为25℃、光照强度为2000 lx条件下,铜绿微囊藻、小球藻和伪鱼腥藻藻液中 $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a浓度呈正相关,相关系数分别为0.95、0.96和0.97。相同条件下混合藻群的实际景观水体中 $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a浓度的相关系数为0.93。因此, $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a浓度的相关性极为显著。

③ 基于 $\Delta\text{DO}$ 与Chl-a浓度的相关性以及综合营养状态指数法,可以通过 $\Delta\text{DO}$ 评价景观水体的富营养化程度,以 $\Delta\text{DO}$ 为单一指标的富营养化状态指标评分标准如下: $\Delta\text{DO} \leq 0.35$  mg/L的水体为贫营养; $0.35$  mg/L< $\Delta\text{DO} \leq 0.77$  mg/L的水体为中营养; $0.77$  mg/L< $\Delta\text{DO} \leq 1.5$  mg/L的水体为轻度富



营养; $1.5 \text{ mg/L} < \Delta\text{DO} \leq 3.37 \text{ mg/L}$  的水体为中度富营养; $3.37 \text{ mg/L} < \Delta\text{DO} \leq 8 \text{ mg/L}$  的水体为重度富营养; $\Delta\text{DO} > 8 \text{ mg/L}$  的水体为极度富营养。

#### 参考文献:

- [1] 张德禄,刘永定,胡春香. 基于营养盐的中国湖泊生态分区框架与指标体系初探[J]. 湖泊科学,2011,23(6):821-827.  
Zhang Delu, Liu Yongding, Hu Chunxiang. Ecoregional frame and indices system based on nutrients in Chinese lakes[J]. Journal of Lake Sciences,2011,23(6):821-827(in Chinese).
- [2] 原居林,沈锦玉,尹文林,等. 应用浮游植物群落结构及富营养化指数评价南太湖底泥疏浚效果[J]. 水生生态学杂志,2010,3(1):14-17.  
Yuan Julin, Shen Jinyu, Yin Wenlin, et al. Evaluation of dredging effects at Southern Taihu Lake by phytoplankton community and trophic index[J]. Journal of Hydroecology,2010,3(1):14-17(in Chinese).
- [3] 王翠,姜鑫,刘佳. 尔王庄水库总磷、总氮、溶解氧与藻类计数相关性的研究[J]. 天津科技,2016,43(8):35-37.  
Wang Cui, Jiang Xin, Liu Jia. Correlation of total phosphorus, total nitrogen, dissolved oxygen with algae counts in Erwangzhuang Reservoir[J]. Tianjin Science & Technology,2016,43(8):35-37(in Chinese).
- [4] Zang C J, Huang S L, Wu M, et al. Comparison of relationships between pH, dissolved oxygen and chlorophyll a for aquaculture and non-aquaculture waters[J]. Water Air & Soil Pollution,2011,219(1):157-174.
- [5] Nezlin N P, Kamer K, Hyde J, et al. Dissolved oxygen dynamics in a eutrophic estuary, Upper Newport Bay, Cali-

fornia[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science,2009,82(1):139-151.

- [6] 王明翠,刘雪芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测,2002,18(5):47-49.  
Wang Mingcui, Liu Xueqin, Zhang Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. Environmental Monitoring in China,2002,18(5):47-49(in Chinese).
- [7] 赵珊,谢文征,周军,等. 城市再生水景观利用水华识别和预警方法探讨[J]. 环境工程,2012,30(S2):10-12.  
Zhao Shan, Xie Wenzheng, Zhou Jun, et al. Research on warning technology for municipal reclaimed water reused as scenic water[J]. Environmental Engineering,2012,30(S2):10-12(in Chinese).



作者简介:王怡(1971-),女,陕西蓝田人,博士,教授,主要研究方向为水环境修复理论与技术。

E-mail:wangyi1003@sina.com

收稿日期:2018-05-16

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福