

太湖水体中碱性磷酸酶的空间分布及生态意义

路娜^{1,2}, 胡维平², 邓建才^{2*}, 翟淑华³, 陈效民¹, 周小平³

(1. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 太湖流域水资源保护局, 上海 200434)

摘要:在对太湖生态湖区进行分区的基础上, 监测各湖区水体碱性磷酸酶活性、动力学参数以及常规水环境化学指标, 探讨水体碱性磷酸酶活性的空间分布特征及其环境影响因素. 结果表明, 太湖水体碱性磷酸酶活性(APA)、最大反应速率($V_{\max}$)值及碱性磷酸酶反应米氏常数(K_m)值分布均呈空间异质性; APA与 $V_{\max}$ 值具有相似性的空间分布规律, 即西岸河口区水体中APA值与 $V_{\max}$ 值最大, 分别为 $(9.43 \pm 5.30) \text{ nmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $(13.70 \pm 7.42) \text{ nmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$, 在其他湖区依次为湖心区 > 草型湖区 > 梅梁湾区 > 竺山湖区 > 贡湖区; 草型湖区 K_m 值 $(20.50 \pm 11.30) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ > 贡湖区 > 竺山湖区 > 梅梁湾区 > 湖心区 > 西岸河口区 $(9.17 \pm 3.46) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 太湖水体中 $V_{\max}$ 与pH、总磷(TP)、叶绿素a(Chla)之间均存在显著的线性正相关, 其相关系数分别为 $r_{\text{pH}} = 0.6512^{**}$ ($p < 0.01$)、 $r_{\text{TP}} = 0.4885^{**}$ ($p < 0.01$)、 $r_{\text{Chla}} = 0.7656^{**}$ ($p < 0.01$), 但与水温、溶解性总磷(DTP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)无显著的相关性; K_m 值与TP浓度间呈显著的线性负相关性, 相关系数为 $r_{\text{TP}} = -0.3834^*$ ($p = 0.048$), 与水温、pH、DTP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 以及Chla浓度的相关性不显著.

关键词:太湖; 碱性磷酸酶活性(APA); 最大反应速率 $V_{\max}$; 米氏常数 K_m ; 空间分布特征

中图分类号: X131.2; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2898-06

Spatial Distribution Characteristics and Ecological Significance of Alkaline Phosphatase in Water Column of Taihu Lake

LU Na^{1,2}, HU Wei-ping², DENG Jian-cai², ZHAI Shu-hua³, CHEN Xiao-min¹, ZHOU Xiao-ping³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Taihu Basin Water Resources Protection Bureau, Shanghai 200434, China)

Abstract: Based on different ecological zone of Taihu Lake, alkaline phosphatase activity (APA), the kinetic parameters and the chemical parameters in water column from different zone of Taihu Lake were monitored, and the spatial distribution characteristics and the effects of environmental factors on the values of APA, $V_{\max}$ and K_m were studied. The results showed that the values of APA, $V_{\max}$ and K_m in water column from Taihu Lake had a spatial heterogeneous distribution. The spatial distribution characteristic of APA values was the same as that of $V_{\max}$ ones in water from different zones of Taihu Lake, namely, the maximal values of APA $(9.43 \pm 5.30) \text{ nmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ and $V_{\max}$ $(13.70 \pm 7.42) \text{ nmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ occurred in water from estuary zone in western bank of Taihu Lake. The value distribution of APA and $V_{\max}$ in other zone of Taihu Lake followed as: the central zone of Taihu Lake > the grass type zone of Taihu Lake > the Meiliang Bay zone of Taihu Lake > the Zhushan Bay zone of Taihu Lake > the Gonghu Bay zone of Taihu Lake. The value of K_m from the grass type zone of Taihu Lake was the highest $(20.50 \pm 11.30) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, and the one from estuary zone in western bank of Taihu Lake was the lowest $(9.17 \pm 3.46) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. The value of kinetic parameter $V_{\max}$ was significantly positively correlated with the values of pH, total phosphorus (TP) and the chlorophyll a (Chla), with $r_{\text{pH}} = 0.6512^{**}$ ($p < 0.01$), $r_{\text{TP}} = 0.4885^{**}$ ($p < 0.01$) and $r_{\text{Chla}} = 0.7656^{**}$ ($p < 0.01$), respectively. However, the effects of hydro-temperature, dissolved total phosphorus (DTP) and orthophosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) on $V_{\max}$ values were negligible. There was no significant influence of the hydro-temperature, pH, DTP, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and Chla concentrations on the K_m values, nevertheless significant negative relationship between the K_m value and TP content was found with $r = -0.3834^*$ ($p = 0.048$).

Key words: Taihu Lake; alkaline phosphatase activity(APA); $V_{\max}$; K_m ; spatial distribution characteristics

太湖是我国东部的大型浅水湖泊, 面积约2338 km², 平均水深1.9 m, 最大水深约3.4 m, 流域面积达3.65万 km², 是沿湖众多城镇乃至上海的重要水源地, 也是维系区域生态平衡的重要保障^[1]. 但是, 由于太湖流域正处在工业化和城市化高速发展时期, 大量的工业和城镇污水未经或来不及处理就排入流域河网内, 加之面广量大的农村面源污染, 流域

收稿日期: 2008-11-20; 修订日期: 2009-02-16

基金项目: 水利部太湖流域管理局流域与区域水资源调度方案的优化整合研究基金项目; 国家自然科学基金项目(30670351); 中国科学院南京地理与湖泊研究所所长科研专项基金项目(NIGLAS2007-01); 世界自然基金项目(01661989)

作者简介: 路娜(1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境化学与污染控制技术, E-mail: luna2007@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jcdeng@niglas.ac.cn

内的各类污染物,尤其是含氮、磷化合物,在河流水体的承载下进入太湖,致使太湖水质持续恶化和水体富营养化日益加重.2007年5月,无锡市贡湖水厂取水口出现的“黑水团”引发的城市水荒事件,影响到沿湖区域供水安全和湖泊生态服务功能的正常发挥,也严重威胁到人民身体健康和社会稳定^[2].

大量的研究表明^[3-6],碱性磷酸酶是一种诱导酶,在贫营养或富营养的湖泊中,当水体中无机磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)含量较低时,藻类^[3]、浮游植物^[4]、浮游动物^[5]、细菌^[6]等诱导产生大量碱性磷酸酶,促进水体可溶性有机磷水解,释放无机磷,供水体中生物吸收利用;当水体生物可利用磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)含量较高时,碱性磷酸酶活性受到抑制,有机磷水解速率降低,水体生物可利用磷不至于快速升高.许多学者认为水体生物诱导产生的碱性磷酸酶是水体生物可利用磷来源的主要补偿机制之一^[7-10].因此,本研究选择太湖不同典型的生态湖区,监测水体碱性磷酸酶活性、动力学参数以及常规水环境化学指标,分析太湖水体碱性磷酸酶活性的空间分布特征及其环境影响因素.此项研究有助于揭示湖泊营养盐的循环过程及内源磷营养的释放机制,以期为深入认识湖泊水体中磷的生物地球化学循环过程及藻类水华形成过程中水体磷营养盐补偿机制提供重要的科学意义.

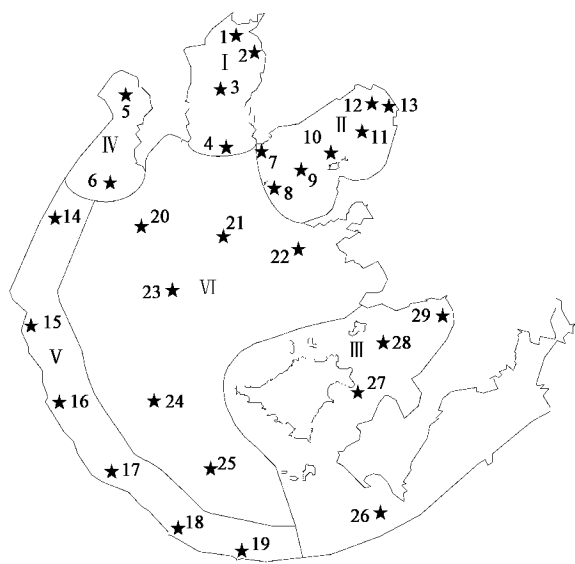
1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

根据太湖形状特征、流域内出入湖河流、入湖污染物的来源类型、水生植物的覆盖以及生态系统类型的差异,将太湖划分为6大湖区共29个监测点(如图1),其中,梅梁湾区有4个(1, 2, 3, 4)、贡湖湾有7个(7, 8, 9, 10, 11, 12, 13)、草型湖区有4个(26, 27, 28, 29)、竺山湖有2个(5, 6)、西岸河口区有6个(14, 15, 16, 17, 18, 19)和湖心区有6个(20, 21, 22, 23, 24, 25).2008年4月对全太湖29个监测点水面以下10、30和50 cm处水样进行采集,混合均匀后取2.5 L,置于低温下避光保存.采样结束后,立即对样品进行处理.用部分原水样测定碱性磷酸酶活性、总氮、总磷等;水样经1.2 μm GF/C膜过滤,滤液用来分析可溶性氮、磷,滤膜残留物供叶绿素的测定.

1.2 常规水质指标及测定方法

分析项目包括碱性磷酸酶活性、总磷(TP)、总可溶态磷(DTP)、可利用磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、叶绿素a(Chla)、pH等,测定方法按照文献^[11]进行.



I. 梅梁湾区; II. 贡湖区; III. 草型湖区;
IV. 竺山湖区; V. 西岸河口区; VI. 湖心区

图1 采样点分布示意

Fig.1 Schematic of the distribution of sampling sites

1.3 碱性磷酸酶活性监测及 $V_{\max}$ 和 K_m 测算^[12-14]

采集水样,利用碱性磷酸酶能催化水解对硝基苯磷酸二钠($p\text{-NPP}$, Sigma公司),产生具有稳定的黄色的对硝基苯酚(PNP)特性,通过比色法测定PNP的产生速率,确定碱性磷酸酶活性(APA).由于影响酶促反应的主要因素有pH值、温度、反应时间及反应物体积.经预实验确定的反应条件为:pH为8.4(用Tris缓冲溶液调)、温度30℃、反应物体积5 mL、反应时间6 h、波长410 nm,岛津UV-2401分光光度计测定.在测定 $V_{\max}$ 和 K_m 时,在0.01~3.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度范围内,取10个不同底物浓度,分别测定碱性磷酸酶的活性(APA).Michaelis-Menten方程为:

$$V = V_{\max} [S] / (K_m + [S])$$

式中, V 为碱性磷酸酶活性的反应速率,单位为 $\text{nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$; $[S]$ 为底物浓度,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

对上式两边取倒数可得线性方程(Lineweaver-Burk转换式),该线性方程在纵轴上的截距为 $1/V_{\max}$,横轴上的截距为 $1/K_m$,依测定的不同底物浓度的碱性磷酸酶的反应速率,用最小二乘法便可求出 $V_{\max}$ 和 K_m .

1.4 原始数据处理

原始数据处理采用DPS数据处理系统格拉布斯法(Grubbs)进行异常值检验,检验出3号采样点数值异常,进行删除处理.

2 结果与讨论

2.1 碱性磷酸酶活性的空间分布

通常,水体正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)含量不足总磷的5%,浮游生物为维持正常生长,需将其他形态的磷矿化成其可利用态磷,磷酸酶在这一过程中起到了至关重要的作用^[15, 16].对于碱性的大型浅水湖泊——太湖,弄清楚水体碱性磷酸酶活性高低有助于了解浮游生物的分布特征、水体磷形态的转化途径以及蓝藻水华的暴发潜在性.太湖水体碱性磷酸酶活性 APA 的空间分布呈现非均一性的特征(如图2),西岸河口区水体中碱性磷酸酶活性 APA 值在 $4.2 \sim 16.4 \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 之间变化,且均值为 $(9.43 \pm 5.30) \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$,显著高于其他湖区水体;贡湖区水体碱性磷酸酶活性 APA 值在 $2.8 \sim 5.0 \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 之间变化,且均值为 $(3.67 \pm 0.70) \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$,显著低于其他湖区水体.太湖水体碱性磷酸酶活性 APA 值在各湖区的总体分布趋势为:西岸河口区 > 湖心区 > 草型湖区 > 梅梁湾区 > 竺山湖区 > 贡湖区.这可能与太湖各湖区水体中细菌、浮游动植物等数量有关.周易勇等^[17]研究表明,武汉东湖表层水体中碱性磷酸酶活性也呈现出非均一性分布特征,这与本研究的结论是一致的.他们认为东湖表层水体碱性磷酸酶活性的非均一性分布是不同来源且具不同动力学特征的酶循不同的反应机制共同作用所致,但太湖水体的污染程度、营养水平、水动力活动以及蓝藻暴发频率明显高于武汉东湖的.宋炜等^[18]研究表明太湖水体中碱性磷酸酶活性范围为 $0.001 \sim 0.006 \text{ mmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$,酶活性呈现较为明显的季节变动,不同采样点间酶活性差异较大,随深度的增加,碱性磷酸酶活性逐渐降低.章婷曦等^[19]的研究表明太湖沉积物中碱性磷酸酶活力在不同点位其大小不同,且分布具有一定的规律性,表现出与沉积物的污染程度和沉积环境有关.污染程度高,水动力条件差,水体交换能力弱的点位碱性磷酸酶活力高.Kalinowska^[20]研究发现波兰 Łuknajno 湖水体碱性磷酸酶活性 APA 值在空间分布上存在差异,且均值在 $0.100 \sim 8.33 \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 范围内变化.

2.2 碱性磷酸酶特征参数 $V_{\max}$ 及 K_m 的空间变化

从动力学上讲, $V_{\max}$ 为酶反应特征参数,表征酶内在催化速率,即最大反应速率.通常, $V_{\max}$ 值愈大,酶的催化能力越强^[21].从图 3(a)可以看出,太湖水体中碱性磷酸酶最大反应速率 $V_{\max}$ 值在各湖区呈非

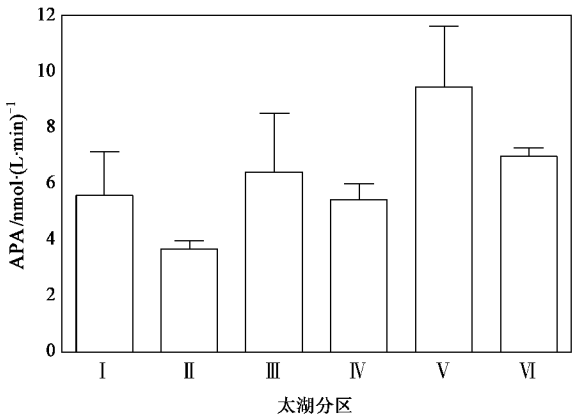


图2 太湖水体碱性磷酸酶活性的空间变异
Fig.2 Spatial change of alkaline phosphatase activity in water column from Taihu Lake

均一分布特征,西岸河口区水体中碱性磷酸酶最大反应速率在 $7.7 \sim 26.9 \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 之间变化,且均值为 $(13.70 \pm 7.42) \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 高于其他湖区水体;贡湖湾水体碱性磷酸酶最大反应速率在 $5.8 \sim 9.70 \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 之间变化,且均值为 $(7.59 \pm 1.32) \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 低于其他湖区水体.太湖水体碱性磷酸酶最大反应速率 $V_{\max}$ 值在各湖区的总体分布趋势为:西岸河口区 > 湖心区 > 草型湖区 > 梅梁湾区 > 竺山湖区 > 贡湖区.杜虹等^[22]研究发现粤东饶平县柘林湾水体中碱性磷酸酶 $V_{\max}$ 值在 $2.23 \sim 7.11 \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 范围内变化, $V_{\max}$ 均值为 $(3.67 \pm 0.99) \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$,其空间分布特征为大规模养殖区水体 $V_{\max}$ 值较小,非养殖区水体 $V_{\max}$ 值较大,总体呈非均一性分布.1998 年 5 月 ~ 1999 年 5 月,高光等^[23]研究了梅梁湾底部梁溪河口至太湖湖心水体碱性磷酸酶最大反应速率,结果表明,1999 年 4 月太湖湖心水体 $V_{\max}$ 值高达 $494 \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$,研究期间,水体 $V_{\max}$ 均值为 $191 \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$.本研究太湖水体碱性磷酸酶最大反应速率均值为 $10.39 \text{ nmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$,比高光等研究获得的 $V_{\max}$ 值低了一个数量级,这可能是由于太湖中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度较高(采样期间 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均值为 $0.015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),接近激发浮游动植物体中碱性磷酸酶活性的阈值浓度^[13],换言之,太湖水体 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度能基本满足浮游动植物、细菌等水生生物的生长,因此,这些浮游生物体内的碱性磷酸酶被抑制,从而使得水体中碱性磷酸酶的数量、活性及 $V_{\max}$ 值维持在相对较低水平.

米氏常数 K_m 的物理意义为酶反应速度达到最

大反应速度一半时的底物浓度. $1/K_m$ 表示酶和底物的亲合力. $1/K_m$ 越大, K_m 值越小,表明达到最大反应速度一半所需要底物浓度越小,则酶对底物的亲合力就越大;反之,酶对底物的亲合力越小^[17,21].从图 3(b)可以看出,太湖水体中碱性磷酸酶反应米氏常数 K_m 值在各湖区的分布存在差异性,草型湖区水体碱性磷酸酶反应米氏常数 K_m 值在 $8.69 \sim 43.10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内变化,且均值高于其他湖区水体;西岸河口区水体碱性磷酸酶反应米氏常数 K_m 值则在 $2.00 \sim 24.80 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,且均值低于其他湖区水体.太湖水体碱性磷酸酶反应米氏常数 K_m 值在各湖区的总体分布趋势为:草型湖区 > 贡湖

区 > 竺山湖区 > 梅梁湾区 > 湖心区 > 西岸河口区,对应的 K_m 均值依次为 (20.50 ± 11.30) 、 (20.11 ± 10.34) 、 (15.70 ± 11.90) 、 (13.34 ± 4.94) 、 (11.75 ± 5.52) 和 $(9.17 \pm 3.46) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Labry 等^[24] 对法国 Biscay 海湾水体碱性磷酸酶反应动力学参数的研究表明,酶反应动力学参数 K_m 值在空间分布上存在异质性,其值在 $0.43 \sim 9.72 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内变化.武汉东湖表层水体 K_m 值空间分布也存在差异,且均值为 $134.71 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,比太湖高一个数量级^[17],这表明太湖水体的碱性磷酸酶具有比武汉东湖更高的催化效率.

本研究进一步验证了碱性磷酸酶反应动力学参

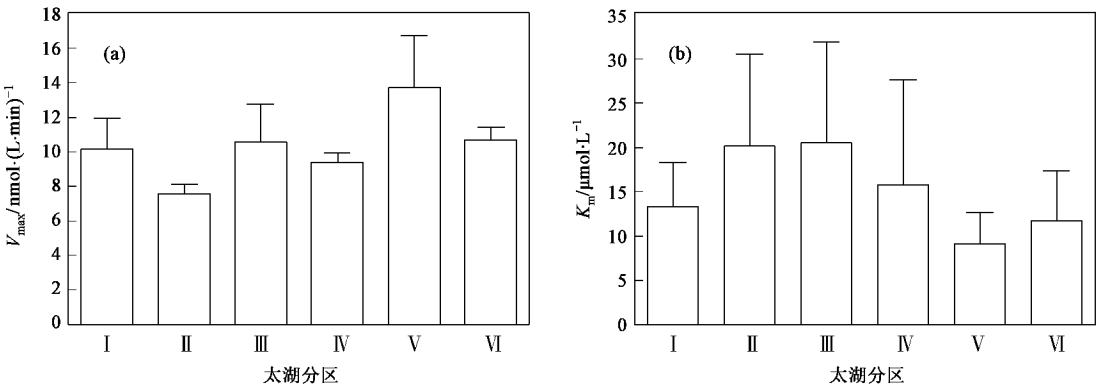


图 3 碱性磷酸酶特征参数的空间分布

Fig.3 Spatial distributions of characteristic parameters of alkaline phosphatase

数空间分布的异质性.太湖水体碱性磷酸酶反应特征参数 V_{max} 和 K_m 的空间差异分布表明,西岸河口区水体碱性磷酸酶的催化效率较高(该区水体具有比其他湖区大的 V_{max} 值和低的 K_m 值),将更易使可溶性有机磷水解成无机磷,弥补该区水体中浮游生物可利用磷含量的不足($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度仅为 $0.009 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),为藻类生长提供了充足的活性磷,同时也为水华的形成创造了条件.因此,浮游生物可能从增加碱性磷酸酶的反应速率(增加 V_{max} 值)和改善对底物的亲合能力(减小 K_m 值)这两方面不提高利用有机磷的效率.

2.3 碱性磷酸酶的生态学意义

水体碱性磷酸酶具有多重的外部功能,其外在表现为向生物细胞提供磷营养,指示水体磷浓度的丰缺,介导磷的循环等^[25].太湖水体碱性磷酸酶的合成有赖于环境中生物可用性磷的浓度以及水生生物的多样性.本研究将从酶动力学参数方面进一步探讨太湖水体中碱性磷酸酶的生态学意义.

2.3.1 碱性磷酸酶 V_{max} 与环境因子的关系

在不同底物浓度下,碱性磷酸酶反应速率不同,当底物浓度达到饱和状态时,酶反应速率趋向一最大值 V_{max} ,此后增加底物浓度,酶反应速率也不再增加.因此, V_{max} 值是酶内在催化速率的表征^[21].对太湖碱性磷酸酶 V_{max} 值与环境因子进行相关性分析,结果表明, V_{max} 值分别与水温、pH、TP 和 Chla 之间呈线性正相关关系[如图 4(a)、4(b)、4(c)、4(f)],其中,除与水温线性正相关没有达到显著水平外,与 pH、TP 和 Chla 之间均达到极显著水平(如表 1); V_{max} 与 DTP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度之间分别呈线性负相关关系[如图 4(d)、4(e)],但均未达到显著水平(如表 1).这与其他研究结果是一致的.有研究者发现,瑞典 Erken 湖水体中细菌的生物量极低,水体磷酸酶 V_{max} 与叶绿素含量具有相似的空间变化趋势^[26];碱性磷酸酶 V_{max} 的峰值出现在蓝藻(*Cyanobacteria*)水华暴发期间^[27];韩国 Soyang 湖中碱性磷酸酶 V_{max} 值与叶绿素含量间呈极显著的线性正相关关系^[28].水体碱

性磷酸酶作为专一水解磷酸单酯的诱导酶类,与水体中 TP、DTP 以及 PO_4^{3-} -P 浓度波动密切相关,杜虹等^[22]的研究表明,柘林湾水体中碱性磷酸酶 $V_{\max}$ 与无机磷酸盐的含量呈显著的线性负相关关系;高光等^[23]的研究也认为水体中碱性磷酸酶 $V_{\max}$ 与水体中 PO_4^{3-} -P 浓度之间呈负相关,但在本研究中,这种线性负相关并未达到显著水平.当水体中的 PO_4^{3-} -P 浓度较低、不足以维持藻类、细菌生长时,碱性磷酸酶得以激发、诱导,部分 DTP 被水解,释放出 PO_4^{3-} -P,使得水体中生物可利用磷浓度增加,随着 PO_4^{3-} -P 浓度的升高,水中的碱性磷酸酶受到抑制,磷分解、释放速率减缓,再加上浮游动植物、细菌等吸收利用,导致 PO_4^{3-} -P 浓度减少,最终又使得水体中碱性磷酸酶逐渐增加.可见,水体中 PO_4^{3-} -P 的浓度是碱性磷酸酶的重要调控因子.

2.3.2 碱性磷酸酶特征参数 K_m 与环境因子的

关系

碱性磷酸酶米氏常数 K_m 是酶对底物亲和力大小的量度, K_m 值越小,酶对底物的亲和力就越大;反之,酶对底物的亲和力越小.对 K_m 值与环境因子进行相关性分析,结果表明,碱性磷酸酶 K_m 值随水温、pH、TP、DTP、 PO_4^{3-} -P 以及 Chla 浓度增加而降低(如图 4).除 TP 浓度外,其他环境因子对碱性磷酸酶 K_m 值的影响均不显著(如表 1).有研究者发现水体碱性磷酸酶 K_m 值波动较大,最低值恰与 PO_4^{3-} -P 最低浓度相对应, K_m 值的变幅与磷的营养状态有关^[26, 29].正磷酸盐的加入致使芬兰湖泊未过滤水中磷酸酶 K_m 值增加,从动力学方面分析,这种抑制属竞争性的类型^[30].尽管太湖水体碱性磷酸酶 K_m 值有较大波动($2.00 \sim 79.73 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),但似乎与磷营养状态无关, K_m 值波动更可能是受到反应底物结构变化的影响.

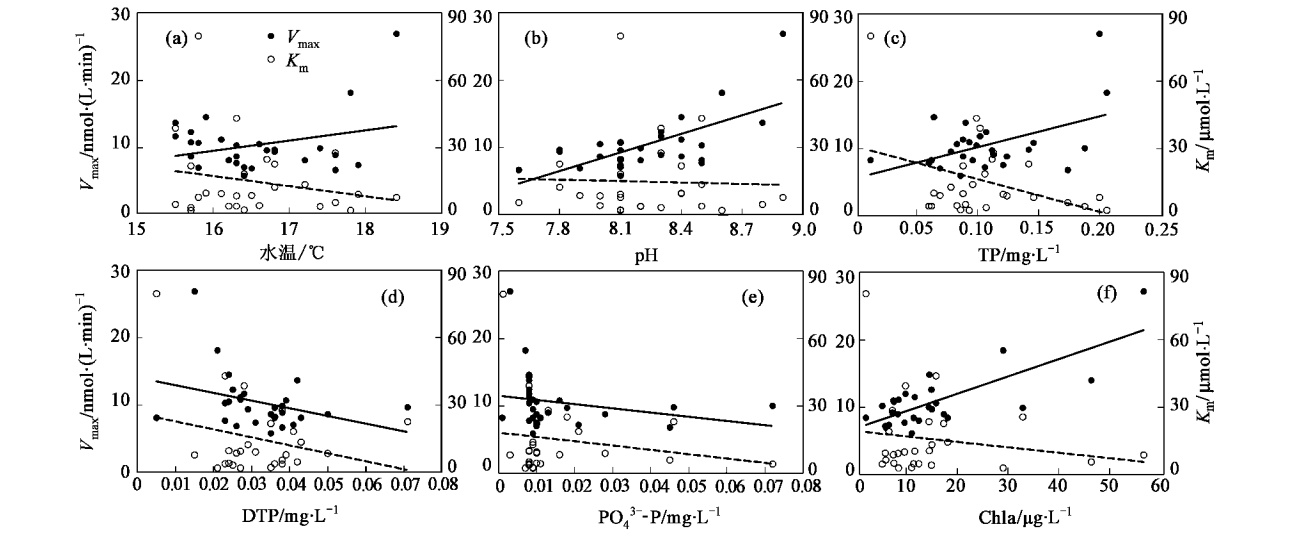


图 4 水环境因子对碱性磷酸酶动力学参数的影响

Fig. 4 Effects of environmental factors on the kinetics parameters of alkaline phosphatase

表 1 $V_{\max}$ 及 K_m 与环境因子的相关性

环境因子	and $V_{\max}$ as well as K_m			
	最大反应速率 $V_{\max}$		米氏常数 K_m	
	r ($n = 28$)	p	r ($n = 28$)	p
水温	0.285 6	0.148 7	- 0.215 6	0.287 1
pH	0.651 2	0.000 2	- 0.036 5	0.856 6
TP	0.488 5	0.009 7	- 0.383 4	0.048 4
DTP	- 0.333 8	0.088 8	- 0.257 4	0.194 9
PO_4^{3-} -P	- 0.230 1	0.248 2	- 0.176 2	0.379 2
Chla	0.765 6	0.000 1	- 0.179 4	0.370 5

3 结论

- (1) 太湖水体碱性磷酸酶活性大小、 $V_{\max}$ 值及 K_m 值的空间分布存在异质性,太湖西部河口区水体的 APA 与 $V_{\max}$ 值最高,贡湖区最小;草型湖区水体 K_m 值最大,太湖西部河口区最小.
- (2) 与水温、DTP 和 PO_4^{3-} -P 相比,太湖水体 pH、TP 和 Chla 对碱性磷酸酶 $V_{\max}$ 的影响较显著;水温、pH、DTP、 PO_4^{3-} -P 以及 Chla 浓度对 K_m 值无明显影响,但 TP 浓度 K_m 值之间有显著的线性负相关.

参考文献:

[1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[2] 邓建才, 陈桥, 翟水晶, 等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3382-3386.

[3] Huber A L, Hamel K S. Phosphatase activities in relation to phosphorus nutrition in *Nodularia spumigena* (Cyanobacteriaceae). 2. Laboratory studies[J]. Hydrobiol, 1985, **123**: 81-88.

[4] Wynne D, Rhee G Y. Changes in alkaline phosphatase activity and phosphate uptake in P-limited phytoplankton, induced by light intensity and spectral quality[J]. Hydrobiol, 1998, **160**: 173-178.

[5] Jean N, Bogé G, Jamet J, *et al.* Seasonal changes in zooplanktonic alkaline phosphatase activity in Toulon Bay (France): the role of *Cypris larvae*[J]. Mar Pollut Bull, 2003, **46**: 346-352.

[6] Rahebe J, Naghdi S, Flint K P. Alkaline phosphatase activity of *Flexibacter chinensis* under starvation stress in water microcosms[J]. Enzyme Microb Technol, 2006, **40**: 13-16.

[7] 高光, 朱广伟, 秦伯强, 等. 太湖水体中碱性磷酸酶的活性及磷的矿化速率[J]. 中国科学(D辑) 地球化学, 2005, **35** (增刊 II): 157-165.

[8] Berman T. Alkaline phosphatases and phosphorus availability in Lake Kinneret[J]. Limnol Oceanogr, 1970, **15**(5): 663-674.

[9] Rose I C, Axler R P. Uses of alkaline phosphatase activity in evaluating phytoplankton community phosphorus deficiency [J]. Hydrobiol, 1998, **361**: 145-156.

[10] Healey F P, Hendzel L L. Physiological indicators of nutrient deficiency in lake phytoplankton[J]. Can Fish Aquat Sci, 1980, **37**: 442-453.

[11] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[12] Chrost R J, Overback J. Kinetics of alkaline phosphatase activity and phosphorus availability for phytoplankton and bacterioplankton in Lake Plubsee(Noseth German Eutrophic Lake)[J]. Microb Ecol, 1987, **13**: 229-248.

[13] 高光, 高锡芸, 秦伯强, 等. 太湖水体碱性磷酸酶的作用阈值[J]. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 353-358.

[14] 周易勇, 李建秋, 张敏, 等. 浅水湖泊中沉积物碱性磷酸酶动力学参数的分布[J]. 湖泊科学, 2001, **13**(3): 261-265.

[15] Zhou Y Y, Cao X Y, Song C L, *et al.* Variations in kinetics of alkaline phosphatase in sediments of eutrophic, shallow, Chinese lakes[J]. Hydrobiol, 2007, **581**: 109-116.

[16] Zhang T X, Wang X R, Jin X C. Variations of alkaline phosphatase activity and P fractions in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake (Lake Taihu)[J]. Environ Pollut, 2007, **150**: 288-294.

[17] 周易勇, 李建秋, 陈旭东, 等. 东湖溶解态磷酸酶的活性、动力学特征及其空间分布[J]. 环境科学, 1997, **18**(5): 37-40.

[18] 宋炜, 袁丽娜, 肖琳, 等. 太湖沉积物中解磷细菌分布及其与碱性磷酸酶活性的关系[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2355-2360.

[19] 章婷曦, 王晓蓉, 金相灿. 太湖沉积物中碱性磷酸酶活力(APA)和磷形态的垂向特征及相关性[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 36-40.

[20] Kalinowska K. Eutrophication processes in a shallow, macrophyte dominated lake-alkaline phosphatase activity in Lake Luknajno (Poland)[J]. Hydrobiol, 1997, **342/343**: 395-399.

[21] 李香华, 胡维平, 翟淑华, 等. 引江济太对太湖水体碱性磷酸酶活性的影响[J]. 水利学报, 2005, **36**(4): 478-483.

[22] 杜虹, 黄文魁, 陈旭明, 等. 柘林湾水体中碱性磷酸酶的活力分布及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2005, **24**(2): 29-31.

[23] 高光, 秦伯强, 朱广伟, 等. 太湖梅梁湾中碱性磷酸酶的活性及其与藻类生长的关系[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(3): 245-251.

[24] Labry C, Delmas D, Herbland A. Phytoplankton and bacterial alkaline phosphatase activities in relation to phosphate and DOP availability within the Gironde plume waters (Bay of Biscay)[J]. J Exp Marine Biol Ecol, 2005, **318**: 213-225.

[25] 周易勇, 付永清. 水体磷酸酶: 来源、特征及其生态学意义[J]. 湖泊科学, 1999, **11**(3): 274-282.

[26] Pettersson K. Alkaline phosphatase activity and agal surplus phosphorus as phosphorus-deficiency indicator in Lake Erken[J]. Arch Hydrobiol, 1980, **89**: 54-87.

[27] Heath R T, Cooke G D. The significance of alkaline phosphatase in an eutrophic lake[J]. Verh Int Ver Limnol, 1975, **19**: 959-965.

[28] Tae-Seok A, Seung L K C, Ki-Secong J. Phosphatase activity in Lake Soyang, Korea[J]. Vreh Int Ver Limnol, 1993, **25**: 183-186.

[29] Zhou Y Y, Zhou X Y. Seasonal variation in kinetic parameters of alkaline phosphatase activity in a shallow Chinese fresh water lake (Donghu Lake)[J]. Water Res, 1997, **31**: 1232-1235.

[30] Munster U. Studies on phosphatase activities in humic lakes[J]. Environ International, 1994, **20**: 49-59.