

云南高原湖库浮游细菌的生态分布及其影响因素

胡明明^{1,2}, 王英才^{1,2}, 李艳晖^{1,2}, 汪 贞^{1,2}, 胡春香¹, 沈银武¹, 刘永定¹, 李根保¹, 李敦海¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 2009年秋季, 对我国西南云贵高原8个处于不同营养水平的湖泊和水库的浮游细菌进行了调查, 分析了浮游细菌的分布特征及其与温度、总氮(TN)、总磷(TP)、正磷酸盐(PO_4 -P)、氨氮(NH_4 -N)、硝氮(NO_3 -N)、化学需氧量(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chl. a)的相关性。结果表明, 8个湖库的浮游细菌数量存在明显差异, 异龙湖最高, 平均值为 5.66×10^9 个/L, 阳宗海最低, 平均值为 2.25×10^9 个/L, 从大到小依次为: 异龙湖 > 草甸海 > 松花坝水库 > 白沙河水库 > 月湖 > 松茂水库 > 石龙坝 > 阳宗海。对阳宗海4个点位的研究发现, 同一湖泊内浮游细菌的数量存在空间异质性, 沿岸带明显大于湖心区。浮游细菌数量与水温、总氮、总磷、叶绿素 a 均呈极显著性相关 ($P < 0.01$), 表明上述因子可能是浮游细菌分布的主要限制因子。

关键词: 浮游细菌; 高原湖库; 生态分布

中图分类号: Q178.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2011)03-0021-05

微生物是湖泊中有机物的首要分解者, 并能把有机物矿化, 最终变成能被浮游植物用来进行初级生产的无机化合物 (Azam et al, 1983); 同时, 微生物也可吸收溶解有机碳合成自身物质, 被浮游动物摄食, 进入上一营养级; 可见既是营养物的分解者和转化者, 又是物质和能量贮存者的微生物, 对生态系统的生源要素的循环起到重要作用。许多学者对浮游细菌的分布与环境因子(如温度、pH、溶解性有机物和无机盐等)以及生物因子(病毒、浮游植物和浮游动物)的关系进行了研究(张喆等, 2008; Bzcelar-Nicolau et al, 2003)。Sherr等(2006)和Tammert等(2008)近年来分别对北巴伦支海和东北太平洋海域的浮游细菌生物量等生态分布特征进行了研究; 国内近年来也有学者对渤海、东海、黄海、南海和太湖等细菌生物量、生产力的分布及其影响因素进行了描述, 但这些研究多数集中在海洋或河口区域(赵三军等, 2003; 白洁等, 2003; 冯胜等, 2006; 白洁等, 2009)。

由于人类活动的影响, 大量的营养盐输入水体, 导致湖泊和水库富营养化, 由此引起的环境问题越

来越突出。在探索此类环境问题的症结和解决办法的过程中, 浮游细菌在湖库生态系统中的作用研究愈来愈受到重视。进行富营养湖泊水体细菌分布规律及影响因素的研究, 有利于进一步了解微生物在物质和能量转化过程中的作用机理以及对食物链的实际贡献, 为阐明湖泊富营养发生机理具有极为重要的意义(冯胜等, 2006)。海拔的不同会导致湖泊的环境有很大差别, 高海拔的湖泊生态系统对气候的变化更敏感, 因此进行浮游细菌的研究对物种保护和生态平衡也有至关重要的作用(Xing et al, 2009)。

本研究选取的8个湖泊和水库均位于我国西南云贵高原的云南省境内, 其大部分地区海拔1500~2000 m, 年均气温15~18℃, 各地气温年均差在12~16℃, 年均降水量1000~1200 mm, 西南和东南较多, 自此向东北递减, 而这8个湖库的营养水平呈梯度分布。本文对不同营养水平水体中浮游细菌的变化规律及其与水温、总氮(TN)、总磷(TP)和叶绿素 a(Chl. a)等生态环境因子的关系进行研究, 旨在探讨高原湖库浮游细菌的生态分布及其影响因子。

1 材料与方法

1.1 位点设置

2009年秋季, 对我国西南高原湖泊-阳宗海、草甸海、月湖、松茂水库、松花坝水库、白沙河水库、石龙坝和异龙湖的细菌丰度进行了生态调查, 共设置了17个点位, 点位设计见表1。

收稿日期: 2011-01-11

基金项目: 2008ZX07105-006; 2008ZX07102-005; 2009ZX07101-011-03。

通讯作者: 刘永定。E-mail: liuyd@ihb.ac.cn; 李根保。E-mail: ligb@ihb.ac.cn

作者简介: 胡明明, 1983年生, 女, 博士研究生, 主要从事藻类环境生物学研究。E-mail: hmmkeke@163.com

表1 采样点位坐标

Tab.1 Coordinates of sampling sites

编号	对应点位	北纬	东经
1	阳宗海	24°51'41.2"	102°59'42.2"
2	阳宗海	24°52'5.6"	103°00'15.6"
3	阳宗海	24°52'12.4"	102°59'53.1"
4	阳宗海	24°51'52.7"	102°58'54.8"
5	草甸海	24°53'45"	103°2'35.9"
6	草甸海	24°53'31.6"	103°02'35.3"
7	月湖	24°50'27"	103°27'18.2"
8	月湖	24°50'27.7"	103°27'14.7"
9	月湖	24°50'6.8"	103°26'5.6"
10	松茂水库	24°52'55.6"	103°53'13"
11	松花坝水库	24°09'35.8"	103°47'2.1"
12	松花坝水库	24°09'20.3"	103°47'4.9"
13	松花坝水库	24°09'52.1"	103°46'56.5"
15	白沙河水库	24°02'7.8"	102°55'33.7"
17	石龙坝	24°55'24.4"	102°50'6.3"
18	异龙湖	23°41'8.9"	102°31'6.9"
19	异龙湖	23°41'8.5"	102°30'41.5"

1.2 样品处理

用5L有机玻璃采水器采集表层(0.5 m)水样,一部分水样立即注入灭过菌的10 mL离心管,使用戊二醛溶液(0.2 μm膜过滤,终浓度为1%)固定,4℃黑暗保存;一部分水样用于分析总氮(TN)、总磷(TP)、正磷酸盐(PO₄-P)、氨氮(NH₄-N)、硝氮(NO₃-N)、化学需氧量(COD_{Mn})和叶绿素a(Chl. a);同时现场测定透明度,并用溶氧仪(YSI550A)和pH(YSI63)计测定溶氧(DO)、pH和水温。总氮、总磷、可溶性总磷、氨氮、硝氮、化学需氧量、叶绿素a

表2 各采样点的基本理化因子

Tab.2 Physical and chemical parameters of the sampling sites

名称	总氮/mg·L ⁻¹		总磷/mg·L ⁻¹		水温/℃	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
阳宗海	0.283~0.507	0.357	0.041~0.061	0.053	24.5~24.7	24.6
草甸海	1.215~1.230	1.223	0.088~0.104	0.096	26.3~26.9	26.6
月湖	0.298~0.559	0.417	0.026~0.060	0.040	24.0~24.9	24.5
松茂水库	1.275~1.275	1.275	0.053~0.053	0.053	22.7~22.7	22.7
松花坝水库	0.208~0.482	0.357	0.041~0.088	0.059	23.5~23.5	23.5
白沙河水库	0.790~0.790	0.790	0.057~0.057	0.057	24.2~24.2	24.2
石龙坝	0.745~0.745	0.745	0.162~0.162	0.162	24.1~24.1	24.1
异龙湖	3.535~3.699	3.617	0.158~0.182	0.170	26.1~26.5	26.3

2.2 浮游细菌丰度分布

在调查的8个高原湖库中,异龙湖表层水体浮游细菌丰度最高,为 5.66×10^9 个/L;阳宗海最低,为 2.25×10^9 个/L(见图1)。草甸海的细菌丰度仅次于异龙湖,为 5.50×10^9 个/L。在这8个湖库中,细菌丰度由小到大的顺序为:阳宗海<石龙坝<松茂水库<月湖<白沙河水库<松花坝水库<草甸海

的测定方法参见国家环境保护总局(2002)。

1.3 细菌计数

采用荧光显微镜的方法进行细菌计数(Porter et al, 1980),将水样稀释一定倍数后加入DAPI(终浓度1 mg/mL)染色,然后用手持真空泵在较低压力下(<267Pa)过滤到孔径为0.2 μm的黑色核孔滤膜上。在Nikon Eclipse E600荧光显微镜下,使用波长330~380 nm的紫外激发光进行计数,每个样品计数10个视野,每个视野不少于40个菌体。

1.4 相关分析

使用SPSS13.0软件中的Correlate程序,对浮游细菌的丰度和环境因子之间的相关性进行分析。

2 结果与分析

2.1 水环境状况

表2是8个湖库的基本理化因子的分布状况。可以看出,各个湖库的水温(T)有一定差异,变动范围22.7~26.6℃。总氮(TN)和总磷(TP)含量的差异较大,其中总氮含量最低的是阳宗海和松花坝水库,平均值均为0.357 mg/L,最高的是异龙湖,平均值为3.617 mg/L,几乎是最低值的10倍。总磷含量最低的是阳宗海,平均值为0.053 mg/L,最高的也是异龙湖,平均值为0.170 mg/L。按照综合富营养化指数(金相灿和屠清英,1990),富营养化水平从低到高依次为:阳宗海、松花坝水库、松茂水库、月湖、白沙河、石龙坝、草甸海和异龙湖。

<异龙湖;结果表明,在不同营养水平的湖库水体中,浮游细菌的丰度表现出差异,其变化趋势与富营养化水平变化基本一致。

在同一湖泊或水库中,细菌丰度的分布也呈现空间异质性(见图2)。如在阳宗海的4个点位中,1、2、4号均位于沿岸带,3号比较靠近湖心区;其中,1号和4号又比较靠近村庄,细菌丰度的顺序依次

为:1号>4号>2号>3号。

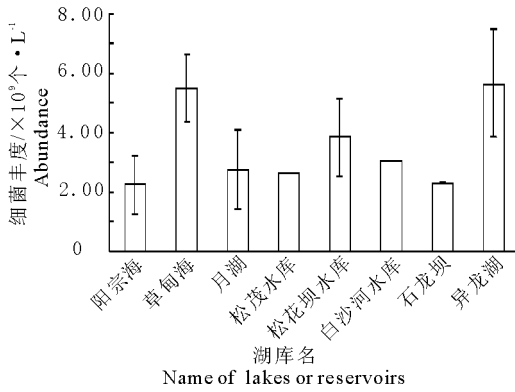


图1 8个湖库的浮游细菌平均丰度

Fig.1 Average abundance of bacterioplankton in eight lakes

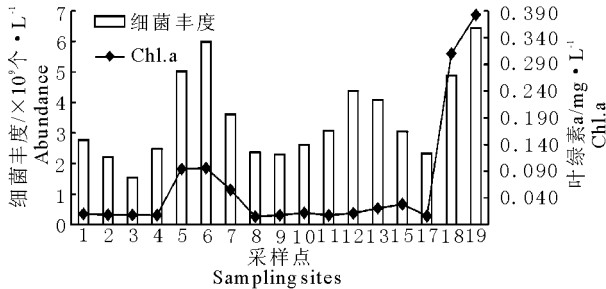


图2 各采样点浮游细菌丰度与叶绿素 a 的分布

Fig.2 Distribution of bacterioplankton and Chl. a in sampling sites

2.3 浮游细菌丰度与环境生态因子的相关性

应用 SPSS13.0 软件中 Correlate 程序对各个点位浮游细菌的数量与温度 (T)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、正磷酸盐 (PO₄-P)、氨氮 (NH₄-N)、硝氮 (NO₃-N)、化学需氧量 (COD) 和叶绿素 a (Chl. a) 各生态环境因子之间的相关性进行了分析 (见表 3)。结果表明,浮游细菌丰度水平分别与温度、总氮、总磷和叶绿素 a 呈极显著的正相关 ($P < 0.01$)。

表 3 浮游细菌丰度与环境生态因子的相关性

Tab.3 Correlation between bacterioplankton abundance and environmental factors

环境生态因子	浮游细菌丰度	环境生态因子	浮游细菌丰度
TN	0.684 **	Chl. a	0.747 **
TP	0.738 **	PO ₄ -P	-0.470
DO	0.204	NH ₄ -N	0.355
T	0.634 **	NO ₃ -N	-0.211
pH	-0.229	COD	0.328

注: * 表示 $P < 0.05$ 水平下显著相关; ** 表示 $P < 0.01$ 水平下极显著相关。

Notes: * Correlation is significant at the 0.05 level. ** Correlation is significant at the 0.01 level.

3 讨论

3.1 浮游植物对浮游细菌数量的影响

研究表明,海洋异养细菌主要依靠浮游植物以及浮游动物捕食过程中溶出的溶解有机物作为碳源进行生长与增殖 (Cho & Azam, 1988; Furman & Azam, 1989; Ducklow, 1992; Jennifer et al, 1996)。浮游植物现存量与异养细菌现存量之间有较明显的相关性,并且把这种现象作为判断异养细菌控制机制的依据之一 (赵三军等, 2003; Shiah & Ducklow, 1994);另有研究表明,水体微生物与水华的形成有密切的关系,根据浮游细菌数量变化规律判断水质变化情况,可初步预测水华的发生 (David et al, 2002);可见浮游细菌的数量与浮游植物的生长密切相关 (冯胜等, 2006)。

本次对我国西南 8 个高原湖库的调查研究表明,浮游细菌的数量与叶绿素 a 的变化趋势基本一致,表现出极显著相关性 ($P < 0.01$)。这可能是因为富营养化湖泊中,浮游植物的大量繁殖为细菌生长提供了丰富的营养物质。在三亚湾和渤海也发现浮游细菌数量与浮游植物的生长关系密切 (白洁等, 2003; 周伟华等, 2006);浮游植物产生的可溶性有机碳 (DOC) 和固体有机碳 (POC) 是浮游细菌的主要营养来源之一。从图 2 看,异龙湖的叶绿素 a 水平是草甸海的 3 倍多,而浮游细菌的丰度却相差不大。有研究表明,在 Chl. a $< 50 \mu\text{g/L}$ 时,随着叶绿素 a 含量的增加,水体中浮游细菌也快速增加 (Del Gilgrio & Scaborough, 1995)。对于异龙湖来说,浮游细菌的营养可能处于过剩状态,所以即使叶绿素 a 比草甸海高很多,浮游细菌的数量也没有显著增加。由此可见,无论在海洋还是在淡水生态系统中,初级生产力都是影响浮游细菌分布的重要因素。

3.2 温度和营养盐对浮游细菌数量的影响

温度是影响细菌生长的重要环境因子。细菌新陈代谢能力主要取决于酶的活性,在一定温度范围内酶活性与温度成正比,海水温度与海洋浮游细菌的生物量和生产力呈正相关关系 (白洁等, 2004)。

本研究结果显示,浮游细菌丰度与温度呈极显著相关 ($P < 0.01$),尽管高原湖泊海拔高、昼夜温差大、环境条件特殊,温度对浮游细菌丰度的影响与位于平原的海洋和湖泊中浮游细菌的研究结果具有一致性 (冯胜等, 2006; 张喆等, 2008)。浮游细菌的数量分布与 TN、TP 呈显著的正相关。有研究表明,在

浅水湖泊从中营养状态向富营养状态或超富营养状态转变以及由清水态向浊水态的转变过程中,浮游细菌分布也会发生变化,高营养水平尤其是氮含量对浮游细菌的分布有重要的影响(Kairesalo et al, 2006)。氮磷等营养盐的含量过高,是水体富营养化的主要原因。一方面,营养盐是细菌生长繁殖不可缺少的营养成分;另一方面,还通过对浮游植物和浮游动物生物量以及种群组成的作用间接影响浮游细菌的变化。研究表明,在贫营养湖泊中,氮、磷等物质能单独或共同成为浮游细菌增值的限制因素(Morris & Lewis, 1992, Wang et al, 1992)。本文的研究结果也印证了这一观点,由此可见,氮磷是影响该区域浮游细菌数量的重要因素。另外,在淡水湖泊中,浮游细菌相对于附着细菌,数量要低很多,在营养盐循环过程中,可能不是占主要的,因此其重要性不如附着细菌重要;附着细菌比浮游细菌有着更多的生存优势,如有利于获取和储藏营养物质、避开不利的理化因子以及防止被其它动物的捕获等(Jefferson, 2004; Nichols et al, 2005);因此对于附着细菌的分布以及影响因素需要进一步的研究。

综上所述,浮游细菌的数量在8个湖库中存在显著差异,从大到小依次为:异龙湖>草甸海>松花坝水库>白沙河水库>月湖>松茂水库>石龙坝>阳宗海。对阳宗海4个点位的研究发现,沿岸带点位的浮游细菌数量明显大于靠近湖心区的点位,同一湖泊内分布存在空间异质性。温度、总氮、总磷以及叶绿素a与浮游细菌的数量具有显著的相关性,可能是该区域浮游细菌数量分布的主要限制因子。

参考文献

国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京:中国环境科学出版社.

白洁,李岍然,李正炎,等. 2003. 渤海春季浮游细菌分布与生态环境因子的关系[J]. 青岛海洋大学学报:自然科学版, 33(6): 81-84.

白洁,张昊飞,李岍然,等. 2004. 海洋异养浮游细菌生物量及生产力的制约因素[J]. 中国海洋大学学报, 4(4): 594-602.

白洁,时瑶,宋亮,等. 2009. 黄海西北部浮游细菌生物量分布特征及其与环境因子的关系[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 39(4): 592-596.

冯胜,高光,秦伯强,等. 2006. 太湖北部湖区水体中浮游细菌的动态变化[J]. 湖泊科学, 18(6): 636-642.

金相灿,屠清英. 1990. 湖泊富营养化调查规范(第2版)[M]. 北京:中国环境科学出版社: 286-302.

孙舰军,丁美丽. 1999. 氨氮对中国对虾抗病力的影响[J]. 海洋与湖沼, 30(3): 267-272.

吴维宁,郭履骥,林惠山,等. 1998. 应用因子分析法分析对虾养殖水质[J]. 中国环境监测, 14(2): 43-44.

张喆,孟祥红,肖慧,等. 2008. 青岛近岸水体夏冬季浮游病毒、细菌分布特征及其与环境因子的关系[J]. 武汉大学学报:理学版, 54(2): 209-214.

赵三军,肖天,岳海东. 2003. 秋季东、黄海异养细菌的分布特点[J]. 海洋与湖沼, 34(3): 295-305.

周伟华,王汉奎,董俊德,等. 2006. 三亚湾秋、冬季浮游植物和细菌的生物量分布特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 26(8): 2633-2639.

Azam F, Fenchel T, Field J G, et al. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea[J]. Mar Ecol Prog Ser, 10: 257-263.

Bzcelar-Nicolau P, Nicolau L B, Marques J C, et al. 2003. bacterioplankton dynamics in the Mondego estuary (Portugal) [J]. Acta Oecologica, 24: 76-75.

Cho B C, Azam F. 1988. Major role of bacteria in biogeochemical fluxes in the ocean's interior [J]. Nature (London), 332: 441-443.

David A, Caron E L, Robert W, et al. 2002. Responses of bacterioplankton and phytoplankton to organic carbon and inorganic nutrient additions in contrasting oceanic ecosystems [J]. Aquat Microb Ecol, 22: 175-184.

Del Gilgrio P A, Scaborough G. 1995. Increase in the proportion of metabolically active bacteria along gradients of enrichment in freshwater and marine plankton; implications for estimates of bacterial growth and production rates [J]. Plankton Res, 17: 1905-1924.

Ducklow H W. 1992. Factors regulating bottom-up control of bacteria biomass in open ocean plankton communities [J]. Arch Hydrobiol Beih, 37: 207-217.

Furman J A, Azam F. 1989. Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of Birth Columbia, Antarctica and Southern California [J]. Appl Environ Microbiol, 39: 1085-1095.

Jennifer C, James A A E, Ellen T M. 1996. Utilization and turnover of labile dissolved organic matter by bacterial heterotrophs in eastern North Pacific surface waters [J]. Mar Ecol Prog Ser, 139: 267-279.

Jefferson, K K. 2004. What drives bacteria to produce a biofilm [J]. FEMS microbiology letters, 236: 163-173.

Kairesalo T, Haari H, Sivonen K. 2006. Effect of nutrient loading on bacterioplankton community composition in Lake, Mesocosms [J]. Microb Ecol, 51: 137-146.

Morris D P, Lewis W M Jr. 1992. Nutrient limitation of bacterioplankton growth in Lake Dillo, Colorado [J]. Limnol

- Oceanogr, 37:1179 – 1192.
- Nichols C A, Guezennec J, Bowman J P. 2005. Bacterial exopolysaccharides from extreme marine environments with special consideration of the Southern Ocean, sea ice, and deep-sea hydrothermal vents: A review[J]. Marine biotechnology, 7: 253 – 271.
- Porter K G, Feig Y S. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora [J]. Limnology and Oceanography, 25(5): 943 – 948.
- Sherr E B, Sherr B F, Longnecker K. 2006. Distribution of bacterial abundance and cell-specific nucleic acid content in the Northeast Pacific Ocean [J]. Deep Sea Res I, 53:713 – 725.
- Shiah F-K, Ducklow H W. 1994. Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production and specific growth rate in Chesapeake Bay [J]. Limnol Oceanogr, 39:1243 – 1258.
- Tammer H, Olli K, Sturluson M, et al. 2008. Bacterial biomass and activity in the marginal ice zone of the northern Barents Sea [C]. Deep Sea Res II: 1 – 11.
- Wang L, Miller T D, Prisco J C. 1992. Bacterioplankton nutrient deficiency in a eutrophic lake [J]. Arch Hydrobiol, 125:423 – 439.
- Xing P, Hahn M W, Wu Q L. 2009. Low Taxon Richness of Bacterioplankton in High-Altitude Lakes of the Eastern Tibetan Plateau, with a Predominance of *Bacteroidetes* and *Synechococcus* spp. [J]. Applied and Environmental Microbiology, 75:7017 – 7025.

(责任编辑 万月华)

The Ecological Distribution of Bacterioplankton and Its Influencing Factors in the Yunnan Plateau Lakes

HU Ming-ming^{1,2}, WANG Ying-cai^{1,2}, LI Yan-hui^{1,2}, WANG Zhen^{1,2}, HU Chun-xiang¹, SHEN Yin-wu¹, LIU Yong-ding¹, LI Gen-bao¹, LI Dun-hai¹

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430073, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: The distributions of bacterioplankton from eight lakes and reservoirs in Yunnan plateau southwest China were investigated in autumn 2009. Synchronously, authors analyzed the correlation between the abundance of bacterioplankton and ecological factors including temperature (T), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), orthophosphate (PO₄-P), ammonia (NH₄-N), nitrate (NO₃-N), chemical oxygen demand (COD_{Mn}) and chlorophyll a (Chl. a). The results showed that the abundances of bacterioplankton were significantly different in the eight lakes and reservoirs. The highest abundance of bacterioplankton was detected in lake Yilong with average abundance 5.66×10^9 cells/L; the lowest was in lake Yangzonghai and its average abundance of bacteria was 2.25×10^9 cells/L. The bacteria abundances of other lakes were decreasing in the order of lake Caodianhai, Songhuaba reservoir, Baishahe reservoir, lake Yuehu, Songmao reservoir, lake Shilongba. The abundance of bacterioplankton from Lake Yangzonghai in costal location was significantly higher than that in the central zone, and this result suggested that the distribution of bacterioplankton had spatial heterogeneity in the same lake. This study also indicated that bacterioplankton abundance showed a significant positive correlation ($P < 0.01$) with temperature, total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll, which suggested that these factors might be the main limiting factors of bacterioplankton in this region.

Key words: bacterioplankton; plateau lake and reservoir; ecological distribution