杭州西湖水域可培养异养细菌的群落多样性

吴根福¹ 虞左明² 吴洁³ 周雪平⁴

1(浙江大学生命科学院, 杭州 310012)

2(杭州市环境保护科学研究所, 杭州 310005)

3(杭州市环境监测中心站, 杭州 310007)

4(浙江大学生物技术研究所, 杭州 310029)

摘要 : 自 2001 年 10 月 ~ 2002 年 10 月对杭州西湖水域可培养异养细菌的群落结构和多样性进行了为期 1 年的调查。水体中可培养异养细菌的年平均值只有 510 CFU/mL。从季节变化来看, 温度较低的 12 月和 3 月其数量相对较多, 分别为 809 和 757 CFU/mL, 而温度较高的 5 月和 10 月只有 327 和 330 CFU/mL。表层底泥中可培养异养细菌的数量平均为 2.27×10^5 CFU/g (以干泥计), 其中长桥湾相对较多, 为 3.06×10^5 CFU/g, 而湖心泥中只有 1.70×10^5 CFU/g。从季节的变化看, 也是冬季的数量比夏季高。调查还发现西湖水域优势菌的优势度高, 多样性指数低。在三个湖区连续 1 年的测定中总共只出现 14 种类型的菌落, 优势菌为假单胞菌属、肠杆菌科和气单胞菌属。水体中优势菌的优势度为 36.8% ~ 80.4%, 平均 54.5%; 多样性指数 H 介于 0.682 ~ 1.787 之间, 平均 1.160。底泥中优势菌的优势度为 27.7% ~ 72.7%, 平均 51.7%; 多样性指数 H 介于 0.809 ~ 1.774 之间, 平均 1.309。水体中的细菌有 95% 为革兰氏阴性杆菌, 革兰氏阳性菌很少; 产色素菌的比例相对较高, 其中以产黄色素菌落为主, 平均达 20.1%; 芽孢杆菌所占的比例较低, 只有 4.24%。而表层沉积物中产黄色素的菌落较少, 只有 2.07%; 芽孢杆菌的比例则相对较高, 为 14.1%。

关键词 : Simpson 指数, Shannon-Wiener 指数, 细菌丰度, 水体, 底泥, 生态分布

中图分类号 : Q938.1 文献标识码 : A 文章编号 : 1005 - 0094(2003)06 - 0467 - 08

Community diversity of cultivable heterotrophic bacteria in West Lake , Hangzhou

WU Gen-Fu¹ , YU Zuo-Ming² , WU Jie³ , ZHOU Xue-Ping⁴

1 College of Life Sciences , Zhejiang University , Hangzhou 310012

2 Hangzhou Municipal Research Institute of Environmental Protection , Hangzhou 310005

3 Hangzhou Municipal Environmental Monitoring Center , Hangzhou 310007

4 Institute of Biotechnology , Zhejiang University , Hangzhou 310029

Abstract : We studied the community structure and diversity of cultivable heterotrophic bacteria in West Lake , Hangzhou from October 2001 to October 2002. Results showed that there were 510 CFU of bacteria per mL water and 2.27×10^5 CFU per gram of dry sediment. The bacterial population in water was higher in cold seasons than in hot seasons. In sediments , the bacterial population varied not only with seasons but also with dredging of the mud. Soon after dredging of mud in Changqiao , bacterial counts were about 0.81×10^5 CFU per gram in the new sediment. After three months , the bacterial population had increased to 4.60×10^5 CFU per gram. There were 14 types of cultivable heterotrophic bacteria in the West Lake ecosystem. The dominant types were *Pseudomonas* , Enterobacteriaceae or *Aeromonas* , which accounted for 36.8% ~ 80.4% of the total bacterial population in water column ; and 27.7% ~ 72.7% of those in sediments. Analysis of Shannon-Wiener index (H) and Simpson index (L) indicated that the Lake had low bacterial diversity. The index H was between 0.682 and 1.787 in water columns ; and between 0.809 and 1.774 in sediments , and the index L was between 0.196 and 0.662 in the water col-

基金项目 : 本研究受杭州市政府资助(课题号 2000-1)

收稿日期 : 2003 - 01 - 23 ; 接受日期 : 2003 - 04 - 05

作者简介 : 吴根福, 男, 1965 年出生, 副教授, 主要从事环境微生物学和应用微生物学的研究工作。E-mail : wugenfu@zju.edu.cn

umn , and between 0.179 and 0.572 in sediments. Among the bacteria from water column , 95% were Gram negative rods , and 20.1% produced yellow pigments. In sediments , about 85% of the bacteria were Gram negative rods and only 2.07% produced yellow pigments. Furthermore , the population of *Bacillus* was much higher in sediments than in the water column , suggesting that there are different niches in water column and sediments in West Lake despite the frequency of water-mud exchange.

Key words : Simpson index , Shannon-Wiener index , bacterial abundance , water body , sediment , ecological distribution

异养细菌在湖泊的物质循环和能量流动中起着十分重要的作用。对异养细菌结构、功能及其多样性的认识有助于了解湖泊生态系的特性 ,并借以评价水体受污染的程度。但是由于细菌个体微小、鉴定步骤繁杂 ,长期以来其多样性的研究一直没有得到很好的开展(Gasol & Darte , 2000)。随机挑取单菌落 ,经分类鉴定后分析得出结论 ,是研究细菌群落多样性的方法之一。Borsodi *et al.* (1998)随机挑取了 296 个菌株 ,通过形态观察和生理生化试验来分析湖泊细菌的群落结构 ,工作量非常大。鉴于目前对细菌种的定义还不十分明确 ,而且不同的细菌有其特定的菌落形态 ,许多学者建议用菌落特征为指标来进行分析。最近 ,随着分子生物学技术在微生物生态领域的应用 ,还发展出了用 16S rDNA 技术来分析细菌(包括不可培养细菌)多样性的方法(Glockner *et al.* , 2000)。

杭州西湖是我国著名的风景旅游湖泊 ,也是一个典型的富营养化水体 ,沼泽化倾向十分严重。为了改善西湖水质 ,当地政府自 2001 年开始对西湖实施了疏浚工程。本文报道疏浚过程中西湖水体和底泥中可培养异养细菌的生态分布及其多样性变化 ,以期为西湖水环境的综合评价及进一步治理提供参考。

1 实验方法

1.1 概况

杭州西湖是一个小型浅水湖泊 ,流域面积 21.22 km² ,水域面积 5.6 km² ,平均水深仅 1.56 m。由于城市化进程的加速 ,西湖逐渐演变成富营养化水体 ,至目前水体中 BOD₅、COD_{Mn}、TN、TP 含量的年平均值分别达 5.37、6.95、2.209、0.125 mg/L ,藻类大量繁殖 ,水体透明度只有 45.3 cm ,严重影响了西湖的旅游价值。尽管有关部门采取了截污、引水等多种措施 ,但由于底泥中营养物质的不断释放 ,水质并没有得到根本好转。为了进一步改善城市景观 ,杭州

市政府决定对西湖实施疏浚工程 ,于 2001 年秋季从长桥湾开始 ,2002 年 5 月完成湖心疏浚 ,至 2002 年 9 月结束了整个外湖的疏浚工作 ,水深由原来的 1.56 m 提高到 2 m 以上。而白堤、苏堤以西的四个湖区(包括西里湖)尚未疏浚。

1.2 样品采集

分别于 2001 年 10 月 29 日、12 月 24 日、2002 年 3 月 25 日、5 月 27 日、10 月 21 日进行采样 ,采样点选在长桥湾(调查前已疏浚)、外湖湖心(调查过程中疏浚)和里西湖(未疏浚)三处。水样在水面下 30 cm 处采集 ,表层泥样用日产 Ekman-Birge 采泥器采集。

1.3 异养细菌的计数和鉴定

样品经稀释后涂布在营养琼脂平板上 ,30℃ 培养 ,逐日观察菌落形态并进行群落统计 ,即根据菌落的色泽、表面形状、隆起状况、边缘形状、透明感来判断菌落类型 ,结合细胞形态、革兰氏染色及接触酶和氧化酶反应特性进行生物多样性的分析。选择具有独特形态的优势菌落 ,纯化后进行生理生化试验 ,按《常见细菌系统鉴定手册》(东秀珠 ,蔡妙英 ,2001) ,并参照 Bergey 氏细菌鉴定手册(Bergey *et al.* ,1994)进行鉴定。粪大肠菌群的测定用最大或然数法(魏复盛 ,2002)。

1.4 群落多样性分析

群落多样性用丰度(*S*)、优势度(*P*)、Simpson 指数(*L*)和 Shannon-Wiener 指数(*H*)来表示(Edwards *et al.* , 2001)。具体计算方式如下 :

S :用样品中所含的不同形态特征的菌落种类数来表示。

P :用某一类型的菌落数所占的比例来表示 ,即 $P_i = n_i / N$ 。

L :指样品中随机得到的两个分离物为同一类型菌落的概率 :*L* 越小 ,表示种群越丰富 ,种群分布越均匀。

$$L = \sum_{i=1}^s [n_i(n_i - 1) / (N(N - 1))] \approx \sum_{i=1}^s p_i^2$$

H 是反映群落多样性与均匀度的复合参数：*H* 越大，表示生物多样性越高。

$$H = - \sum_{i=1}^s (n_i / N) \ln(n_i / N) = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

其中 *s* 为样本中不同类型的菌落数量，*n_i* 为样本中某一特定类型菌落的数量，*p_i* 为某一特定类型的菌落数量占总菌落数的比例，*N* 为样本的菌落总数。

2 结果与分析

2.1 西湖水域可培养异养细菌的季节变化

2001 年 10 月 ~ 2002 年 10 月对杭州西湖水体和表层底泥中可培养异养细菌进行了 5 次分离，发现作为富营养化湖泊的杭州西湖，水体中可培养异养细菌的数量非常少（图 1），全湖平均只有 510 CFU/mL，这说明西湖周边的截污工作已取得了显著的成效：有机污染减少后，有机营养型的异养细菌数量也逐渐减少，从 1979 ~ 1980 年间的 18 500 CFU/mL 下降到 1995 ~ 1996 年间的 2293 CFU/mL

（吴根福等，2000）。钱塘江引水工程的建立，使西湖有了充足的清洁水源，异养细菌数量目前一直维持在 500 CFU/mL 左右（1998、1999 年的年均值分别为 471 和 490 CFU/mL）。从季节变化来看，温度较低的 12 月和 3 月数量相对较多，分别为 809 和 757 CFU/mL，而温度适宜的 5 月和 10 月细菌数只有 327 和 330 CFU/mL。湖水中的粪大肠菌群（图 2）也不多，2002 年全年平均只有 200 MPN/L，并且

图 1 水体中可培养细菌的季节变化
Fig.1 Seasonal changes in distribution of cultivable heterotrophic bacteria in water column

图 2 2002 年西湖外湖两位点粪大肠菌群的月变化
Fig.2 Monthly distribution of fecal coliforms at two stations of the outer lake of West Lake in 2002

图 3 表层沉积物中可培养细菌的季节变化
Fig.3 Seasonal distribution of cultivable heterotrophic bacteria in the sediment

也是在温度较高的夏季最少，6、7、8 月湖心平均只有 37 MPN/L，少年宫只有 23 MPN/L。这可能与夏季水体中异养细菌可利用的可溶性有机碳含量低，藻类和原生动物的生物量十分丰富有关。

表层底泥中可培养异养细菌的数量平均为 2.27×10^5 CFU/g（以干泥计，下同）。长桥湾沉积物中数量最高，平均达 3.06×10^5 CFU/g，而湖心泥中只有 1.70×10^5 CFU/g。2001 年 10 月，长桥湾刚疏浚不久，底泥生态正处于恢复阶段，异养细菌数量较少，只有 0.81×10^5 CFU/g；但到了 2001 年 12 月，

细菌数量就上升到 3.03×10^5 CFU /g ,这说明沉积物中细菌群落恢复得非常快。也许是由于底栖细菌的吞噬者——原生动物的恢复需要较长的时间。在以后的监测中(特别是 2002 年 5 月和 10 月)长桥湾的异养细菌一直维持在较高的水平(图 3)。湖心的情况也一样,2002 年 5 月刚完成疏浚时,表层底泥中的细菌只有 0.61×10^5 CFU /g ,但到了 10 月,就与西里湖底泥相差无几了。从季节的变化看,冬季的数量比较多,12 月份平均达 2.71×10^5 CFU /g ,但由于 1~2 月份的天气非常寒冷,经过一个冬天后,3 月份细菌数量只有 1.92×10^5 CFU /g。以后,随着气温的上升,细菌的繁殖速度加快,但底栖原生动物也随着日趋活跃,所以夏季微生物的生物量不是很高。1995~1996 年间对西湖表层沉积物中微生物的研究也有相似的结果(吴根福等 2000)。

2.2 水体中优势菌群的初步鉴定

西湖水体中的可培养异养细菌的菌落类型很少,在三个湖区连续 1 年的测定中总共只出现大约 14 种菌落类型。由于 B11~B14 的出现频率很低,B8 与 B9 较难培养,在移种过程中逐渐死亡,因此仅对其余的 8 类菌落(见表 1)进行了初步鉴定。结果表明(表 2),B1~B7 分别归属于气单胞菌属(最有可能是嗜水气单胞菌 *Aeromonas hydrophila*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢菌属(最有可能是地衣芽孢杆菌 *Bacillus licheniformis*)、奈氏球菌属(*Nesse-ria*)、假单胞菌属、芽孢菌属(最有可能是巨大芽孢杆菌 *Bacillus megaterium*)、肠杆菌科(最有可能是成团肠杆菌 *Enterbacter agglomerans*)、B10 归属于芽孢杆菌属(最有可能是短小芽孢杆菌 *Bacillus pumilns*)。

表 1 杭州西湖水体中可培养异养细菌的形态特征*
Table 1 The morphological characteristics of dominant cultivable heterotrophic bacteria in the water body of West Lake

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B10
菌落特征 Colony characteristics								
直径(mm) Diameter	3~5	1~3	3~5	1~3	<1	1~3	<1	>5
形状 Form	圆形 Circular	圆形 Circular	不规则 Irregular	圆形 Circular	圆形 Circular	圆形 Circular	圆形 Circular	根状 Rhizoid
隆起 Elevation	隆起 Raised	凸起 Convex	隆起 Raised	脐状凸起 Umbonate	凸起 Convex	扁平 Flat	凸起 Convex	扁平 Flat
边缘 Margin	全缘 Entire	全缘 Entire	波状 Undulate	全缘 Entire	全缘 Entire	波状 Undulate	全缘 Entire	丝状 Filamentous
均一性 Consistency	奶油状 Butyrous	奶油状 Butyrous	膜状 Membranous	脆性 Brittle	奶油状 Butyrous	膜状 Membranous	奶油状 Butyrous	膜状 Membranous
表面 Surface	光滑 Smooth	光滑 Smooth	皱褶 Rugose	颗粒状 Granular	光滑 Smooth	波状轮廓 Contoured	光滑 Smooth	皱褶 Rugose
光泽 Optical	有光泽 Glistening	有光泽 Glistening	不透明 Opaque	暗淡 Dull	透明 Translucent	不透明 Opaque	有光泽 Glistening	不透明 Opaque
颜色 Colour	浅黄色 Buff	褐色 Brown	白色 White	浅黄色 Buff	白色 White	白色 White	黄色 Yellow	白色 White
细胞特征 Cell characteristics								
大小 Size(μm)	(0.4~0.6) ×	(0.4~0.6) ×	(0.4~0.6) ×	0.5	(0.2~0.3) ×	(1.0~1.2) ×	(0.2~0.3) ×	(0.4~0.6) ×
	(1.0~2.0)	(1.0~2.0)	(1.0~2.0)		(1.5~2.0)	(3.5~5.0)	(1.5~2.0)	(1.0~2.0)
形状 Form	杆状 Rod	杆状 Rod	杆状 Rod	球状 Sphere	杆状 Rod	杆状 Rod	杆状 Rod	杆状 Rod
革兰氏染色 Gram staining	G ⁻	G ⁻	G ⁺	G ⁻	G ⁻	G ⁺	G ⁻	G ⁺
芽孢 Spore	-	-	+	-	-	+	-	+

* Cultivated at 30℃ for 48 hours

表 2 杭州西湖水体中可培养异养细菌的生理生化特征

Table 2 The physiological and biochemical characteristics of cultivable heterotrophic bacteria in the water body of West Lake

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B10
氧化酶 Oxidase test	+	+	+	-	-	-	-	+
接触酶 Catalase test	+	+	+	+	+	+	+	+
氧化葡萄糖产酸、产气 Acid and gas from Glucose(open)	+, +	- , -	+, -	- , -	- , -	- , -	+, -	+, -
发酵葡萄糖产酸、产气 Acid and gas from Glucose(close)	+, +	- , -	+, -	+, -	- , -	- , -	+, -	+, -
麦芽糖(开管)产酸、产气 Acid and gas from Maltose(open)	+, +	- , -	+, -	- , -	- , -	- , -	+, -	+, -
蔗糖(开管)产酸、产气 Acid and gas from Sugarose(open)	+, +	- , -	+, -	- , -	- , -	+, -	- , -	+, -
甘露醇(开管)产酸、产气 Acid and gas from Mannito(open)	+, +	- , -	+, -	- , -	- , -	+, -	+, -	+, -
甘露糖(开管)产酸、产气 Acid and gas from Mannose(open)	+, +	- , -	+, -	- , -	- , -	+, -	+, -	+, -
甲基红试验 Methyl test	+	-	+	-	-	+	-	+
VP 试验 VP test	+	-	+	-	-	-	-	+
吲哚试验 Indole production	+	-	+	+	+	-	-	+
硝酸盐还原 Nitrate reduction	+	+	+	+	-	-	-	-
明胶液化 Gelatin liquefaction	+	-	+	-	-	+	+	+
柠檬酸盐利用 Citrate utilization	-	-	-	-	-	-	-	-
硫化氢产生 H ₂ S production	+	+	+	-	-	+	-	+
无 NaCl 培养基中生长 Growth with 0% NaCl	+	+	+	+	+	+	+	+
2% NaCl 培养基中生长 Growth with 2% NaCl	+	+	+	+	+	+	+	+
5% NaCl 培养基中生长 Growth with 5% NaCl	-	-	+	-	-	+	-	+
7% NaCl 培养基中生长 Growth with 7% NaCl	-	-	+	-	-	+	-	-
10% NaCl 培养基中生长 Growth with 10% NaCl	-	-	-	-	-	-	-	-
运动性 Mobility	+	+	+	-	弱 Weak	+	+	+

2.3 水体中可培养异养细菌的群落多样性

对杭州西湖水域可培养异养细菌的生态调查(表 3)表明:水体中存在的主要是革兰氏阴性杆菌(占 95% 左右),以假单胞菌属、肠杆菌科和气单胞菌属占优势,革兰氏阳性菌很少(主要是一些芽孢杆菌,占 4.24%),球菌更少;而产色素菌的比例相对较高,其中以产黄色素为主,平均达 20.1%。而表层沉积物中产黄色素的菌落较少,只有 2.07%;芽孢杆菌的比例则相对较高,平均达 14.1%,特别是 10 月下旬的底泥中,芽孢杆菌占 20% 以上,可能与季节转换期温度变化较大,对环境适应能力强的芽孢菌能较多地存活下来有关。西湖水域优势菌的优势度高。如 2001 年 10 月长桥湾水体中可培养异养细菌的 80.4%、湖心水体的 68.2% 能形成一种黄色菌落,经鉴定最有可能是成团肠杆菌。又比如 2002 年 10 月的西里湖底泥中,有大约 33% 菌是芽孢杆菌(包括地衣芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌和短小芽孢杆菌三种类型),说明杭州西湖中异养细菌的种群不丰富,物种多样性较差。

3 讨论

3.1 杭州西湖水域异养细菌分布的共性与个性

杭州西湖水域浮游异养细菌分布的特点是以无芽孢的革兰氏阴性杆菌占绝对优势(95% 左右),革兰氏阳性菌很少,且限于芽孢杆菌属,这与有关报道相符。许光辉(1991)总结了西方国家湖泊中的细菌类群,发现革兰氏阴性杆菌占 80%~95%;Glockner *et al.* (2000)对澳大利亚、德国和俄国的三个淡水湖泊中细菌 16S rRNA 的分析也表明,总共得到的 190 个序列可分为 16 群,其中有 15 群为革兰氏阴性杆菌。说明中国湖泊中的细菌类型与其他国家的湖泊有一定的相似性。但杭州西湖水域异养细菌的分布也有其特殊性。一般说来湖泊中的细菌数量在温度较高的夏季较多(Bagde & Rangari, 1999),而西湖水域的异养细菌数量夏季反而比冬季要少。这可能与杭州西湖面积较小、湖水较浅,夏秋季藻类生长十分旺盛,原生动物生物量较高有关。据有关部门测定,西湖中夏秋季藻类数量可达 1.79×10^3 个/mL,这些藻类的生长可能会分泌某些物质来抑制细菌的生长,当然也可能是这些藻类的生长吸收了周围环境中的营养物质,使细菌可利用的 N、P 等物质的含量下降所致;而且夏秋季浮游动物的生物量达 3.0mg/L,它们的活动十分活跃,吞噬的细菌也会较

表 3 西湖水域异养细菌的群落组成
Table 3 The flora composition of cultivable heterotrophic bacteria in the West Lake

采样地点、日期 Sampling spot and time		丰度(S) Colony richness	优势菌 Dominant bacteria	优势度(%) Percentage	芽孢菌落 Spored colonies (%)	黄色菌落 Yellow colonies (%)	Simpson 指数(<i>L</i>) Simpson index	Shannon- Wiener 指数 (<i>H</i>) Shannon- Wiener index
外湖湖心水体 Water from center of outer lake	2001 年 10 月 October 2001	4	肠杆菌科 Enterobacteriaceae	68.2	6.1	72.1	0.511	0.922
	2001 年 12 月 December , 2001	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	76.9	1.6	1.85	0.631	0.682
	2002 年 3 月 March , 2002	8	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	52.7	2.6	1.51	0.374	1.20
	2002 年 5 月 May 2002	8	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	42.5	4.2	16.2	0.298	1.435
	2002 年 10 月 October , 2002	8	肠杆菌科 Enterobacteriaceae	38.0	3.7	38.2	0.261	1.488
长桥湾水体 Water from Chang-qiao Bay	2001 年 10 月 October 2001	5	肠杆菌科 Enterobacteriaceae	80.4	8.7	81.1	0.662	0.694
	2001 年 12 月 December , 2001	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	71.1	1.5	2.0	0.573	0.775
	2002 年 3 月 March , 2002	7	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	52.8	1.6	4.2	0.450	0.954
	2002 年 5 月 May 2002	4	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	36.8	2.0	14.7	0.279	1.327
	2002 年 10 月 October , 2002	7	气单胞菌 <i>Aeromonas</i>	40.5	7.5	19.0	0.268	1.561
西里湖水体 Water from Xili Lake	2001 年 10 月 October 2001	5	气单胞菌 <i>Aeromonas</i>	68.5	5.5	13.7	0.505	0.980
	2001 年 12 月 December , 2001	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	56.2	4.6	1.9	0.451	0.977
	2002 年 3 月 March , 2002	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	37.0	4.6	4.5	0.301	1.320
	2002 年 5 月 May 2002	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	58.8	4.7	8.0	0.384	1.291
	2002 年 10 月 October , 2002	8	肠杆菌科 Enterobacteriaceae	37.1	5.7	22.5	0.196	1.787
外湖湖心底泥 Sediment from center of outer lake	2001 年 10 月 October 2001	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	70.3	24.3	1.39	0.545	0.899
	2001 年 12 月 December , 2001	8	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	49.7	9.6	4.05	0.324	1.430
	2002 年 3 月 March , 2002	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	47.2	3.78	0.89	0.349	1.131
	2002 年 5 月 May 2002	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	64.6	3.08	1.54	0.491	0.953
	2002 年 10 月 October , 2002	7	芽孢杆菌 <i>Bacillus</i>	27.7	27.7	1.64	0.179	1.774
长桥湾底泥 Sediment from Chang-qiao Bay	2001 年 10 月 October 2001	6	气单胞菌 <i>Aeromonas</i>	32.2	22.6	0	0.211	1.669

表 3 (续) Table 3 (continued)

采样地点、日期 Sampling spot and time		丰度(S) Colony richness	优势菌 Dominant bacteria	优势度(%) Percen- tage%	芽孢菌落 Spored colonies (%)	黄色菌落 Yellow colonies (%)	Simpson 指数(<i>L</i>) Simpson index	Shannon- Wiener 指数(<i>H</i>) Shannon- Wiener index
西里湖底泥 Sediment from Xili Lake	2001 年 12 月 December , 2001	7	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	53. 6	11. 3	0	0. 340	1. 387
	2002 年 3 月 March , 2002	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	49. 7	5. 09	1. 91	0. 343	1. 266
	2002 年 5 月 May 2002	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	67. 0	7. 77	10. 3	0. 476	1. 110
	2002 年 10 月 October , 2002	7	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	54. 3	10. 8	2. 17	0. 347	1. 405
	2001 年 10 月 October 2001	5	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	54. 5	10. 7	0	0. 351	1. 312
	2001 年 12 月 December , 2001	7	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	48. 1	22. 5	1. 73	0. 302	1. 474
	2002 年 3 月 March , 2002	6	假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	72. 7	4. 05	0. 27	0. 572	0. 809
	2002 年 5 月 May 2002	数据缺失	Absent					
	2002 年 10 月 October , 2002	7	芽孢杆菌 <i>Bacillus</i>	32. 9	32. 9	3. 05	0. 204	1. 714

多。

Sommaruga(1997) 发现 , 在以微囊藻(Microcyst) 占优势的富营养湖泊中 , 异养细菌的数量并不随着营养程度的增加而快速增长 ;Philippe *et al.* (2001) 也发现在富营养水体中丰富的原生动物生物量会限制细菌的产量。由于目前杭州西湖水体中无机营养过多 , 引起了藻类的过度增长 , 从而限制了细菌的多样性 , 水体的多样性指数 H 介于 0. 682 ~ 1. 787 之间 , 平均为 1. 16。根据沈韞芬(1995) 的标准 , $H \leq 1. 0$ 时表明水体受重度污染 , $H = 1. 0 \sim 2. 0$ 时表明受中度污染 , 杭州西湖水体应为中度到重度污染。

用多样性指数来评价湖泊的富营养水平虽然是水生生态研究的一个重要方面(Danilov *et al.* , 1999) , 但是 , 这种多样性的判断是相对的 , 因为水体中还存在着不少厌氧性细菌、自养细菌和许多不可培养细菌 , 因此总的细菌多样性应该丰富得多。Bossard *et al.* (2000) 在用 16S rDNA 的通用引物研究湖泊的多样性时 , 发现 47 个随机选择的克隆中竟存在 30 种不同的基因类型。

3. 2 疏浚后底泥中异养细菌群落的恢复

疏浚对表层底泥异养细菌的群落结构影响不大 , 虽然疏浚后的一段时间内底泥中的异养细菌数量较少 , 但 3 个月后即可得到恢复 , 这可能与西湖底泥的高流动性有关 , 杭州西湖由于湖水较浅 , 游船较多 , 特别是在春秋季节 , 游客多、游船吃水深、泥水交换频繁 , 因此底泥中除了芽孢杆菌比水体中有明显的提高外 , 其他优势菌与水体中相差不多。对这类移动性污泥中的微生物群落 , Todorov *et al.* (2000) 曾进行过分析 , 发现 79% 的细菌属于 G^- 的变形菌类 (Proteobacteria)。Madrid *et al.* (2001) 用 16S rDNA 技术对 Guiana 海岸移动性污泥中的细菌群落与水体中的细菌群落进行过比较 , 发现有 22% 的相同序列。杭州西湖也有相似的特性。

参考文献

Bagde U. S. and Rangari A. K. 1999. Periodicity of coliform bacteria in an aquatic environment. *Water Science and Technology*, **40**(7): 151 - 157.

John G. H. , Noel R. K. , Peter H. A. S. and Bergy D. 1994.

Bergey's Manual of Determinative Bacteriology (9th edn.). Williams & Wilkins, Lippincott.

- Borsodi A. K., Farkas I. and Kurdi P. 1998. Numerical analysis of planktonic and reed biofilm bacterial communities of lake Fertő. *Water Research*, **32**(6): 1831 – 1840.
- Bosshard P. P., Santini Y., Gruter D., Stettler R. and Bachofen R. 2000. Bacterial diversity and community composition in the chemocline of the meromictic alpine Lake Cadagno as revealed by 16S rDNA analysis. *FEMS Microbiology Ecology*, **31**: 173 – 182.
- Danilov R. and Ekelund N. G. A. 1999. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the level of eutrophication in lakes in central Sweden. *The Science of the Total Environment*, **234**: 15 – 23.
- Dong X-Z (东秀珠) and Cai M-Y (蔡妙英). 2001. *Systematic Determinative Manual of General Bacteria* (常见细菌系统鉴定手册). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Edwards M. L., Lilley A. K., Wilson T. H., Thompson I. P. and Cooper I. 2001. Characterisation of the culturable heterotrophic bacterial community in a small eutrophic lake. *FEMS Microbiology Ecology*, **35**: 295 – 304.
- Gasol J. M. and Duarte C. M. 2000. Comparative analyses in aquatic microbial ecology. *FEMS Microbiology Ecology*, **31**: 99 – 106.
- Glockner F. O., Zaichikov E., Belkova N., Denissova L., Pernthaler J., Pernthaler A. and Amann R. 2000. Comparative 16S rRNA analysis of lake bacterioplankton reveals globally distributed phylogenetic clusters including an abundant group of Actinobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, **66**(11): 5053 – 5065.
- Madrid V. M., Aller J. Y., Aller R. C. and Chistoserdov A. Y. 2001. High prokaryote diversity and analysis of community structure in mobile mud deposits off French Guiana. *FEMS Microbiology Ecology*, **37**: 197 – 209.
- Philippe L., Pierre S., Marc T., Claude C., Gerard M. and Laetitia B. 2001. Microbial community dynamics in Mediterranean nutrient-enriched seawater mesocosms: changes in abundances, activity and composition. *FEMS Microbiology Ecology*, **34**(3): 255 – 266.
- Shen Y-F (沈韞芬). 1995. *Determination of Rivers Pollution* (河流的污染监测). China Architecture and Building Press, Beijing, 219 – 223. (in Chinese)
- Sommaruga R. and Roberts R. D. 1997. The significance of autotrophic and heterotrophic picoplankton in hypertrophic ecosystems. *FEMS Microbiology Ecology*, **24**(3): 187 – 200.
- Todorov J. R., Chistoserdov A. Y. and Aller J. Y. 2000. Molecular analysis of microbial communities in mobile deltaic muds of southeastern Papua New Guinea. *FEMS Microbiology Ecology*, **33**: 147 – 155.
- Wei F-S (魏复盛主编). 2002. *The Determining and Analyzing Method for Water and Waste Water* (水和废水监测分析方法). China Environmental Science Press, Beijing, 704 – 706. (in Chinese)
- Wu G-F (吴根福), Wu X-C (吴雪昌), Wu J (吴洁) and Xuan X-D (宣晓东). 2000. Studies on the ecological distribution of microorganisms in the West Lake, Hangzhou. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报), **24**(6): 589 – 596. (in Chinese)
- Xu G-H (许光辉) and Li Z-G (李振高). 1991. *Microbial Ecology* (微生物生态学). Southeast University Press, Nanjing, 160 – 161. (in Chinese)

(责任编辑: 时意专)