

Monitoring Pollution in the Pearl River: A Pilot Study

Gu-liuxin Jin¹, Fenghua Lu¹, Jin Ying¹, Hans Kreuzer², Zhibing Li^{1,3*}

¹The School of Physics, The Yat-sen School, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong

²Department of Physics and Atmospheric Science, Dalhousie University, Halifax

³The State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Guangdong Province Key Laboratory of Display Material and Technology, School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong

Email: *stslzb@mail.sysu.edu.cn

Received: Jan. 5th, 2017; accepted: Jan. 21st, 2017; published: Jan. 24th, 2017

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A key step in the restoration of rivers and lakes is to identify the major pollutants such as micro-organisms, oil, and of course chemicals, so that the source can be identified and remedies can be devised. A general method for rapidly monitoring pollutants of micrometer scale is still lacking. We use 4D digital holographic microscope with point laser source to study the typical water sample taking from Pearl River within Guangzhou. Copepods, rotifer, mineralized skeleton of radiolarian protozoa, dead cells, micro-oil drops are identified. The speeds of copepod and rotifer are measured to be 280 and 100 micrometer per second. The hazard of high-density micro-oil drops is noted.

Keywords

Digital Holography, Water Pollution, Micro Pollutant

珠江水污染全息检测初步结果

金谷柳新¹, 卢风华¹, 尹靖¹, 汉斯·科瑞扎², 李志兵^{1,3*}

¹中山大学, 物理学院, 逸仙学院, 广东 广州

²达尔豪西大学物理与大气科学系, 哈利法克斯

*通讯作者。

³光电材料与技术国家重点实验室, 广东省显示材料与技术重点实验室, 中山大学, 物理学院, 广东 广州
Email: stslzb@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2017年1月5日; 录用日期: 2017年1月21日; 发布日期: 2017年1月24日

摘要

江河水污染治理一个首要环节是检测和分析污染物, 例如微生物、油污、化学污染物等, 从而确定污染源和找出治理措施。目前对微米尺度污染物的快速检测仍然没有通用成熟的技术。我们采用点光源4维数字全息技术对珠江广州市河段的典型水体进行检测, 发现原生动物放射虫的矿化骨架、轮虫和微油滴等。测得桡足动物和轮虫的游动速度分别为280微米每秒和100微米每秒。我们指出高密度的微油滴的存在对自然环境的危害极为严重。

关键词

数字全息, 水污染, 微污染物

1. 引言

全球城市化进程除了导致空气质量的恶化外, 对于地处河流和湖泊地区的城市, 还会影响水的质量。幸运的是, 近十几年里, 人们在扭转这一趋势上已经取得了巨大的成就。莱茵河就是一个极佳的案例, 其修复程度甚至能让鲟鱼和鲑鱼这样珍贵挑剔的鱼类回来。恢复河流和湖泊生态环境的第一步是确定主要污染物, 如微生物、油脂以及化学物质, 这样可以确定污染源以及设计补救措施。虽然河岸上的游客也可以看出河水是否明显被污染, 但是对于危害更大的微米尺度污染物的快速检测目前仍然没有通用成熟的技术。本文以流经广州市的珠江水体作为一个案例, 采用全息成像技术检测水体中几十微米尺度的污染物。初步实验结果显示了全息成像技术在微米尺度污染物监测中的有效性。

近年发展出来的点光源数字全息显微镜可以拍摄水中微米尺度污染物的 4D 的图像, 即污染物三维图像及其运动轨迹, 是探测和识别水中微生物、有机和无机微小颗粒的极佳仪器。它和传统显微镜只能在焦平面内成像不同, 全息显微镜则能够在被光源照亮的整个区域内获得物体的立体图像。全息成像所根据原理由 Gabor 提出[1] [2], 在波动光学教科书均有介绍[3]。现代全息技术一般使用单色性和相位确定性都很好的激光作光源。本次实验使用液槽型 4Deep 点光源数值全息显微镜(简称 4Deep), 参见图 1。其成像过程主要由两步构成。第一步的原理和一般全息成像一样, 通过相干的参考光和经过物体散射的物体光的干涉产生全息图。特别之处是采用了点光源。第二步是通过数值计算重建出物体的图像。

4Deep 的光源由半导体激光照射到一个微纳尺度针孔(直径要与波长相当)获得。实验证实亚微米小孔产生的球面波具有极佳的相干性, 视场在毫米尺度以上。通过小孔发出的具有固定频率和规则相位的球面波构成参考光, 其场强用复函数 $U_R(\mathbf{x})$ 来表示(略去周期振荡的时间因子)。液槽中的非均匀颗粒散射一小部分参考光。颗粒散射出来的光称为物体光, 其场强用复函数 $U_O(\mathbf{x})$ 表示。CCD 相机记录的是参考光和物体光叠加后在镜头上产生的光能量密度, 即全息图, 它正比于总场强的绝对值平方。全息图表现为明暗相间的干涉条纹图案, 数学表达式为

$$\begin{aligned} I(\mathbf{x}_C) &= k|U_R + U_O| \\ &= k|U_R|^2 + k|U_O|^2 + kU_R U_O^* + kU_R^* U_O \end{aligned} \quad (1)$$

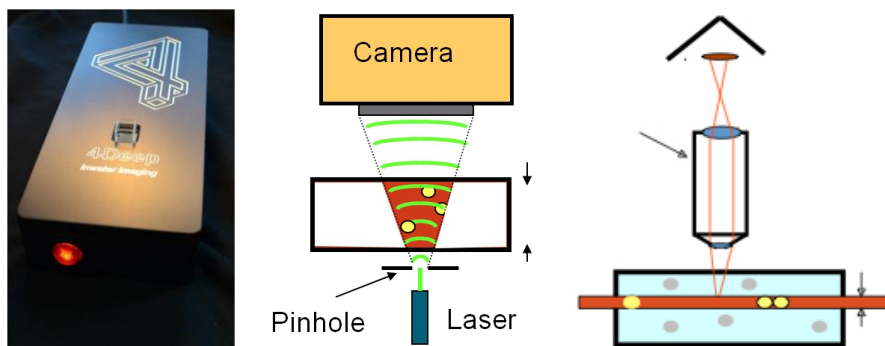


Figure 1. 4Deep Cuvette microscope (left image). Dimensions: $190 \times 90 \times 40 \text{ mm}^3$; 525 g with a $12 \times 12 \times 45 \text{ mm}^3$ quartz cuvette and an image volume of 5 microliters. The cuvette containing a water sample is inserted into the white square hole. Schematic of its hardware (center) in comparison with a conventional microscope (right)

图 1. 液槽型 4Deep 点光源全息显微镜(左图)。尺寸: $190 \times 90 \times 40 \text{ mm}^3$; 重量: 525 克。附带一个 $12 \times 12 \times 45 \text{ mm}^3$ 的石英比色皿, 其成像体积为 5 微升。使用时, 将装有样品溶液的比色皿放置在白色方形空洞中。中图是全息显微镜原理图, 右图是与之对比的传统光学显微镜原理图

其中 k 是比例常数, \mathbf{x}_c 表示镜头上一点。可见(1)式中包含物体光在镜头上的完整信息, 包括 $U_o(\mathbf{x}_c)$ 的绝对值和位相。而由波动光学知道, 空间任一界面上的场强复函数完全决定光在全空间的场强。因此原则上可以从(1)式重建物体光。

光学重建方法是首先生成透射率正比于(1)式的全息胶片, 然后用参考光照射全息胶片。所得光的场强复函数由 $U_R(\mathbf{x})$ 乘以(1)式给出

$$U(\mathbf{x}) = k(|U_R|^2 + k|U_o|^2)U_R + k(U_R)^2 U_o^* + k|U_R|^2 U_o \quad (2)$$

上式最后项就是仅改变了强度的物体光, 它给出物体的三维虚像。如果通过仪器设计能够使得前面两项对应的光波和最后一项对应的物体光波分离开, 则可以获得原物体的三维图像, 即使原物体在图像重建时并不存在。

数值重建则通过数学方法从 $I(\mathbf{x}_c)$ 中解出物体光波 $U_o(\mathbf{x})$ 。在 4Deep 中这部分工作和仪器其它一些功能基本上是由系列软件(Octopus, Swordfish 和 Stingray) [2] 自动完成的。此重建算法的一个特性是可以从多个全息图中提取重建全息图的变化信息, 从而压低所有静止物体产生的背景噪音, 并提供同一个移动物体在不同时刻的静止图像, 据此可以计算物体的运动速度。

我们的实验对象是中山大学北门对开珠江水体。水样采集于不同深度和位置, 以及不同的潮汐状态下。比色皿的容量大约为 1 ml, 全息图的采集通常采用 15 帧的帧速率。在 4Deep 全息术的专利[4] [5]基础上开发的软件(如 octopus), 是一个独特的工具, 它让我们能够测量物体之间的距离, 以获得他们的游动速度, 即用距离除以 CCD 相机帧率的倒数。我们对样本所在的具体位置进行重建。第一个结果是, 我们的样品太过浑浊以至于显微镜下什么东西也看不到。因此我们用纯水:样品在大约 10:1 的比例稀释了样品。如后面的图片所显示, 样品甚至在稀释后仍有大量的泥沙和污垢, 造成图像的模糊。有意义的观察到结果如下。

1) 微生物

为了验证我们的实验方案的有效性, 我们首先采用中山大学生命科学学院黄建荣教授提供的实验室绕足动物比对样品。图 2 将两个拍摄时间相差 1.14 s 的图片叠加, 而不是单独的展示一张图片。必须指出的是: 所示的两个生物图像是同一个个体在两个不同时刻的图像。计算得它的游动速度为 280 微米每秒。这本身就是一个有趣的结果, 因为它证实了微生物自身不会运动很长的路程, 但会被江河水流或者

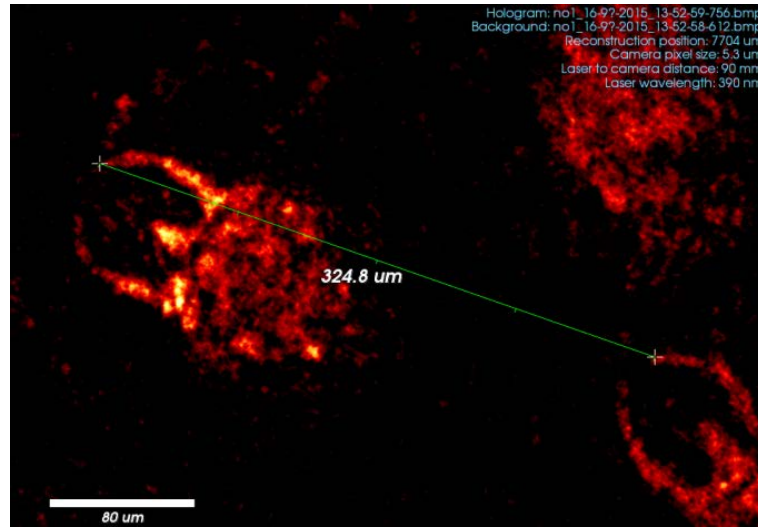


Figure 2. Swimming of copepod. It is a combination of two frames within 1.144 second, in which time the organism propelled itself 325 micrometers for a swim speed of 283 micrometers/sec

图 2. 桡足动物的游动。结合了两张拍摄时间间隔 1.144 秒的图片，在这期间，微生物以 283 微米每秒的速度前进了 325 微米的距离

海洋中的潮汐以及风力输运到各个地方。从流体力学的角度来看，这种低速行为是水中微生物具有非常低雷诺数的结果，说明了其受到的粘滞力远远大于惯性力[6] [7]。

2) 放射虫矿化骨架

接下来我们在图 3 中展示在广州市区中山大学北门对开珠江浅水层样本中发现的原生动物放射虫的矿化骨架。这其实是一种海洋生物，所以很可能是被海洋潮汐冲进来的。它在各处海洋中都很常见，如图 4 所示，会有上百种不同的美丽形态。此标志性的生物种类值得在未来更系统化的监控中仔细研究。这个结果给出水样受海洋潮汐影响的证据。

3) 硅藻

下一个例子硅藻轮虫，见图 5。他们是活水中最常见的微生物之一。将珠江水样用一比十的比例稀释之后，虽然无法得到作者之一(Kreuzer)在武汉长江流域用潜水型显微镜得到的高质量的轮虫图片(这反映了水质的污染对成像质量的影响)，但从珠江水样的轮虫视频中还是可以得到轮虫的游动速度大约为 100 微米每秒。

我们发现硅藻轮虫经常会聚集形成如图 6 所示的长链。而肉眼是几乎看不见单个微生物的。左图是拍摄于稀释后的珠江水样品中藻轮虫长链。右图给出在长江用潜水型显微镜得到的轮虫链更清晰的图像，从中我们可以测量它每个单元的尺寸和分布。我们发现单个细胞长约 30 微米，宽约 20 微米。从潜水型显微镜得到全息图中可以看到它有 3 微米大小的脊柱。

4) 细胞

在许多相位图中我们发现了圆形的结构，周围呈现壁状，中空。有时这些壁是闭合的，有时只是包裹在周围，见图 7。

对物体进行横切测量(我们在接下来关于油滴的讨论中将解释这种操作)发现，它的折射率比水稍大一些。这说明了他们是细胞壁。如图 8，这个壁似乎已经破裂。它和水的折射率的相似性说明了这是一个死去的细胞。这些细胞在水中的聚集程度很大，至少大于油滴一个数量级。之后我们会在结论中讨论这个重要发现的意义。

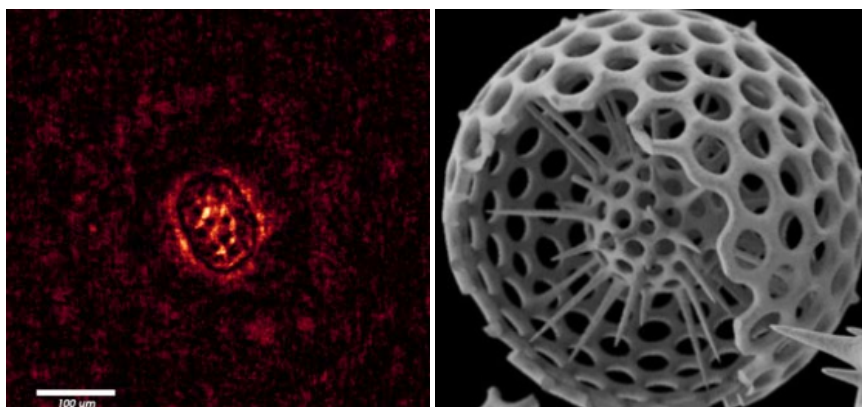


Figure 3. Shell of a Radiolarian sp. found in the Pearl River estuary, likely washed in from the ocean. Right image is used for comparison, taken from webpage [8]

图 3. 左图是样本中发现的放射虫的躯壳，可能是被洋流冲进来的。右图是对比，来自网页[8]

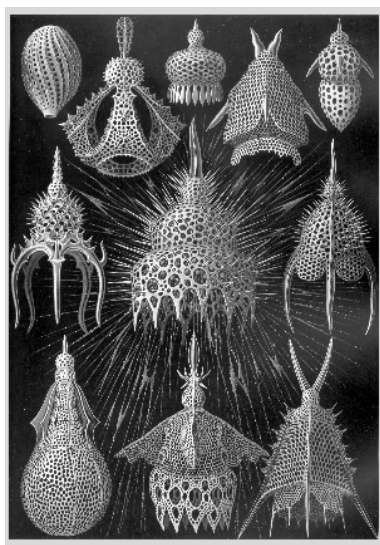


Figure 4. Some of the hundreds of different skeleton shells of Radiolarian, taken from webpage [8]

图 4. 上百种放射虫躯壳遗骸中的一部分，来自网页[8]

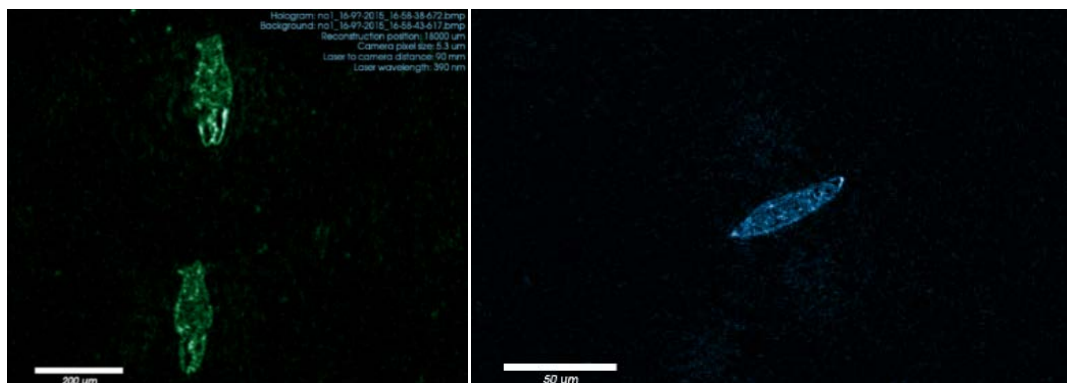


Figure 5. Left: Two exposures of a diatom in the Pearl River. Right: A rotifer imaged in the Yangtze River

图 5. 左图：珠江中一个硅藻的两次曝光记录。右图：长江中轮虫的图像

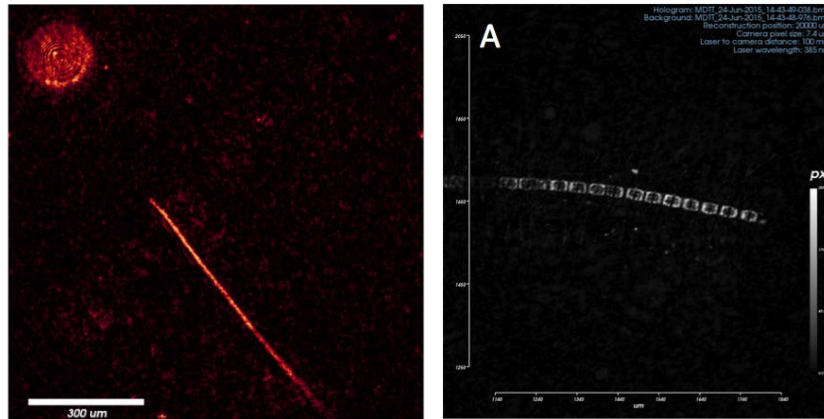


Figure 6. Chains of diatoms. Left: Pearl River (the big blob in the left upper corner is an air bubble on the cuvette surface); Right: A similar experiment at Yangtze River
图 6. 硅藻形成的长链。左图：珠江(左上的圆球形为比色皿壁上的空气气泡)，右图：来自长江流域的类似实验

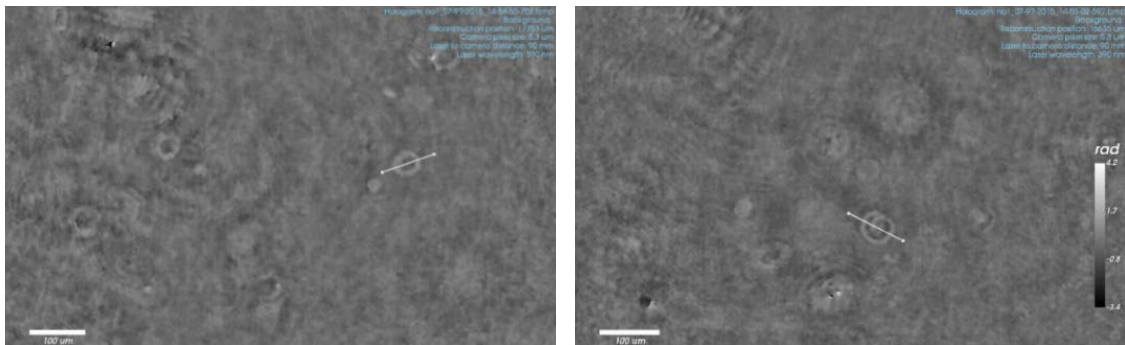


Figure 7. Phase images of cells
图 7. 细胞的相位图举例

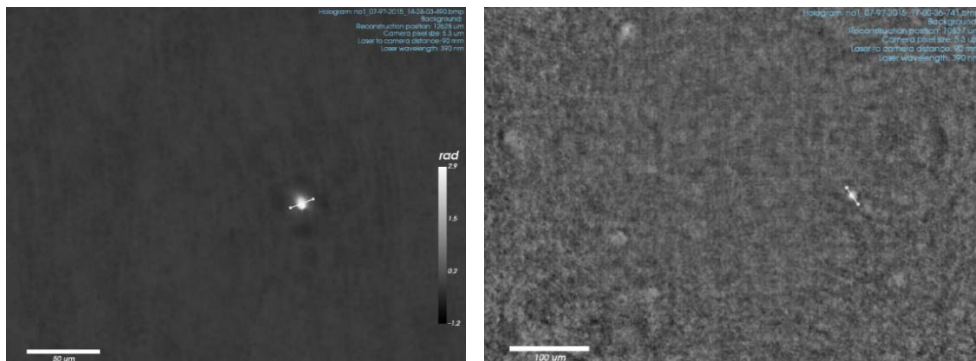


Figure 8. Phase images of oil drops. The scale bars are 50mm (left) and 100 mm (right)
图 8. 油滴的相图。左图和右图的标尺分别为 50 微米和 100 微米

5) 油类

图 8 是珠江水中两张有代表性的油滴的照片。

我们是如何知道这些亮斑是油滴呢？Octopus 软件可以对其进行横切测量，如图 9 所示。

因为真空中波长为 λ 的光波在折射率为 n 的介质中的波数为 $n2\pi/\lambda$ ，所以光在悬浮液滴中相对于水的相位差变化为

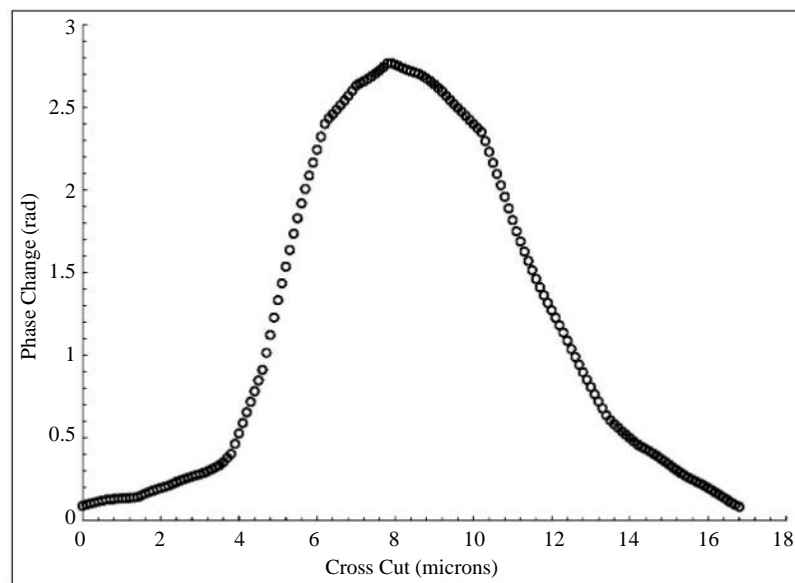


Figure 9. The phase change through an oil drop. The horizontal axis is the penetration depth through the oil drop (z)

图 9. 对油滴进行横切相位差。横轴为透入油滴深度(z)

$$\Delta\varphi = (n_o - n_w)2\pi z/\lambda \quad (3)$$

其中 z 是透入悬浮液滴的深度, λ 是蓝色激光在真空中的波长, n_o 和 n_w 分别是悬浮液滴和水的折射率。对所测特定悬浮液滴拟合得到折射率 1.4。我们对许多油滴做了横切测量和估算, 发现折射率的变化范围在 1.38 和 1.46 之间。这是典型的正烷烃和油类。正烷烃是由 CH_2 单体构成的线性链, 如正己烷(6 个单体)、正辛烷(8 个单体)和正十六烷(16 个单体)。我们可以合理的估计这些液滴是石油或者汽油的残余物, 当然还不能完全确定。

此外, 从很多横截面图中我们发现油滴尺寸一般为 5 到 12 微米, 估算得到油滴的数密度为 10 微升或者体积分数为 10^{-4} 。我们将在结论中讨论这一发现的含义。

2. 结论

本次对珠江水样的初步研究说明了利用全息图像来监控江水微米尺度污染物的可行性和必要性。我们主要的发现可以被归纳为以下几点:

1) 用液槽型显微镜监测重度污染水体, 如流经市区段珠江水体, 可供考虑的措施是将水体样品用清水进行 1:10 的稀释。如果使用潜水型显微镜, 图像体积必须减少到约 1 毫米的厚度。这样仪器可以连续, 自动地运行, 也就是说它可以通过网络连接(在河流流域可以容易获得)或者卫星传送数据。

2) 我们发现的油滴聚集状态是一个警醒的现象。特别是微米尺度油滴会堵塞水生动物的腮, 从而会在一个更高的层次上给水中生物带来不利的影响。容易想到, 这样的水中生产出来的鱼类是不适合人类食用的。此外, 油滴在被细菌分解的过程中需要氧气, 会产生无氧死亡带(就像 Horizon 漏油灾难后美国南部多个州广阔沿海地区发生的情形一样)。尽管这样的死亡带不会影响大多数硅藻, 但是更高级的生命形式, 如鱼、蟹、虾, 却难以生存。

致 谢

液槽型全息显微镜由 Bosma 公司提供。感谢陈敏(中山大学逸仙学院), 沈韩(中山大学物理科学与工

程技术学院), 黄建荣(中山大学生命科学学院)提供所需试验条件和比对样品。本研究得到中山大学逸仙学院资助。

参考文献 (References)

- [1] Gabor, D. (1948) A New Microscopic Principle. *Nature*, **161**, 777-778. <https://doi.org/10.1038/161777a0>
- [2] Gabor, D. (1949) Microscopy by Reconstructed Wave-Fronts. *Proceedings of the Royal Society*, **197**, 454-487. <https://doi.org/10.1098/rspa.1949.0075>
- [3] 母国光, 战元龄. 光学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [4] Kreuzer, H.J. (2002) Holographic Microscope and Method of Hologram Reconstruction. US Patent US 6,411,406 B1 (Canadian Patent CA 2376395).
- [5] Kreuzer, H.J. and Jericho, M.H. (2005) Method for Tracking Particles and Life Forms in Three Dimensions and in Time. US Patent No. 6,876,474 B2.
- [6] Happel, J. and Brenner, H. (1965) *Low Reynolds Number Hydrodynamics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [7] Purcell, E.M. (1977) Life at Low Reynolds Number. *American Journal of Physics*, **45**, 3-11.
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiolaria>, 29-12-2016.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: mp@hanspub.org