

湖水含盐量和  $\text{Cu}^{2+}$  浓度变化对 Kinneret 湖浮游植物的影响胡章立<sup>1</sup> 沈银武<sup>2</sup> 刘永定<sup>2</sup>T. Bergstein Ben-Dan<sup>3</sup> D. Wynne<sup>3</sup>

(1. 深圳大学生命科学学院, 深圳 518060;

2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072;

3. The Yigal Allon Kinneret Limnological Laboratory, Israel)

**摘要:** 通过人为改变湖水中的  $\text{Cu}^{2+}$  浓度和含盐量的方法,  $\text{Cu}^{2+}$  浓度和含盐量变化对 Kinneret 湖水中浮游植物可能造成的影响进行了分析。结果表明, 湖水  $\text{Cu}^{2+}$  浓度增加会抑制 Kinneret 湖水中藻类等浮游植物的生长, 这对改善湖水水质来说是非常有利的, 但高的  $\text{Cu}^{2+}$  浓度对农作物生长和人类健康是有害的。在另一方面, 对含盐量较低的约旦河水来说, 适当增加  $\text{Cu}^{2+}$  浓度则有利于藻类的生长。Kinneret 湖中浮游植物的年平均生物量随湖水含盐量的下降而有增加的趋势, 特别是当含盐量低于  $200\mu\text{g/L}$  左右时, 浮游植物中蓝藻占的比例会升高, 这对作为饮用水资源的 Kinneret 湖水来说是不利的。由此可见, 适当控制和维持 Kinneret 湖水  $\text{Cu}^{2+}$  浓度和含盐量对湖水水质保护具有重要的意义。

**关键词:** Kinneret 湖; 浮游植物; 湖水含盐量;  $\text{Cu}^{2+}$  浓度

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2003)01-0031-005

Kinneret 湖是以色列惟一的天然淡水湖。二十世纪初期, Kinneret 湖水的含盐量低于  $250\mu\text{g/L}$ , 而到 60 年代初期, 则达到  $380-400\mu\text{g/L}$ <sup>[1]</sup>。高含盐量的湖水对农作物生长是有害的, 为了解决这一问题, 以色列政府于 60 年代后期在 Kinneret 湖的西岸沿线建立了一条干渠, 将来自 Kinneret 湖周围盐泉的盐水 ( $2200\mu\text{g/L Cl}^{-1}$ ) 导入 Kinneret 湖下游的约旦河, 此后, Kinneret 湖水的含盐量逐年降低, 到 1988 年, 湖水含盐量下降到  $208\mu\text{g/L}$ 。这种含盐量的变化, 大大地影响了湖水中浮游生物的生态环境, 从而导致了浮游植物种群的变化。由于 Kinneret 湖上游约旦河水含盐量是  $100\mu\text{g/L}$  左右, 因此, 在将来一段时间内, Kinneret 湖水的含盐量还有进一步变化的可能。有研究者认为, 湖水含盐量下降会使湖水中的藻类, 特别是蓝藻大量繁殖, 这对作为饮用水资源的 Kinneret 湖来说是不利的。在另一方面, 由于湖周围和湖底盐泉的影响, 湖水中的重金属, 特别是  $\text{Cu}^{2+}$  浓度也发生了很大的变化。目前湖水铜离子浓度差不多比早期湖水中的浓度高出 1 个多数量级, 即使

在同一年的不同季节, 湖水中铜离子浓度也会在  $10^{-9}-10^{-7}\text{mol/L}$  范围内波动, 这些变化直接影响到水体中藻类等浮游植物的生长和生物量。了解  $\text{Cu}^{2+}$  浓度和湖水含盐量变化对 Kinneret 湖水浮游植物的影响, 对 Kinneret 湖水资源的管理和水质监测保护是非常重要的。

## 1 材料和方法

**1.1 样品采集** 所有 Kinneret 湖水水样均来自生态 A 站(图 1)<sup>[1]</sup>, 利用采水瓶收集湖水供实验用。约旦河水采集于 Kinneret 湖上游约旦河入口处。

**1.2 水样处理** 将采集的水样首先按不同试验要求进行处理。将水样与一定量的 Amies salt solution ( $\text{NaCl } 8700\mu\text{g/L}$ ,  $\text{KCl } 350\mu\text{g/L}$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O } 7000\mu\text{g/L}$ ,  $\text{CaCl}_2 197\mu\text{g/L}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 77\mu\text{g/L}$ ) 或约旦河水(先用 GF/C 玻璃纤维滤膜过滤, 再用  $0.2\mu\text{m}$  滤膜过滤)混合, 以构成不同的盐度梯度; 同样将水样与一定量的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液混合, 以配成不同  $\text{Cu}^{2+}$  浓度的人工湖水(具体方法见结果 2.1 至 2.5, 所有培养物均在  $22^\circ\text{C}$

收稿日期: 2001-12-18; 修订日期: 2002-01-22

基金项目: 国家人事部非教育系统留学回国人员择优资助 A 类项目; 国家自然科学基金资助(30270226)

作者简介: 胡章立(1965—), 男, 湖南省澧县人; 博士, 副教授; 主要从事藻类生物生化和分子生物学研究

通讯作者: 刘永定

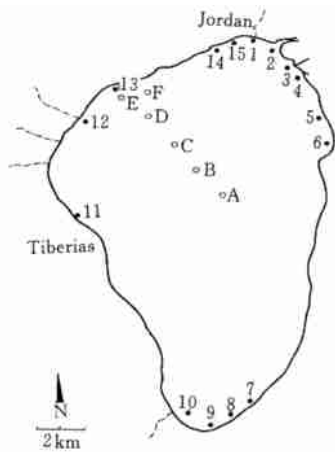


图 1 以色列 Kinneret 湖及各采样点的分布图  
Fig. 1 Map of Lake Kinneret with sampling stations

的光照培养箱中进行, 光周期 12h: 12h(L: D), 光强  $30\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 供本实验用。

**1.3 藻生物量测定** 通过测定水样中的叶绿素含量来表示藻生物量, 具体方法如下: 取一定量的水样, 通过 GF/C 玻璃纤维滤膜过滤收集藻细胞, 将膜和藻细胞匀浆, 并用丙酮抽提过液, 用荧光比色计比色测定叶绿素含量。

**1.4 藻类种群分析** 将水样中加入鲁戈氏液以固定藻细胞, 置于光学显微镜下观察藻类细胞的形态结构, 以此鉴定水样中藻类种群结构。

2 结果

2.1 湖水中铜离子浓度变化对湖水中浮游植物生物量的影响

在 6 个三角瓶中分别装入 1000mL Kinneret 湖水水样(新鲜水样, 采于 A 站, 并通过浮游动物网滤去浮游动物, 其含盐量约  $200\mu\text{g/L}$  左右), 其中, 3 个三角瓶中分别加入  $20\mu\text{g/L}$   $\text{Cu}^{2+}$  组分, 使其湖水中  $\text{Cu}^{2+}$  浓度大于  $10^{-6}\text{mol/L}$  左右; 另 3 个为对照组。

经过 6d 培养后, 对照组的生物量大大高于实验组(图 2), 这表明湖水中铜离子浓度过高, 会大大抑制湖水中藻类等浮游植物的生长。

2.2 铜离子浓度变化对含盐量低于 Kinneret 湖的约旦河水中浮游植物的影响

将 9 个三角瓶分为 A、B、C 三个实验组, 分别装入 1000mL 约旦河进入 Kinneret 湖的入口处水样(新鲜水样通过浮游动物网滤去浮游动物, 其含盐量约  $100\mu\text{g/L}$  左右), 其中, A 组为对照, 不加入  $\text{Cu}^{2+}$  溶液, B 组加入含  $10\mu\text{g}$   $\text{Cu}^{2+}$  组分; C 组加入  $20\mu\text{g}$   $\text{Cu}^{2+}$  组分。

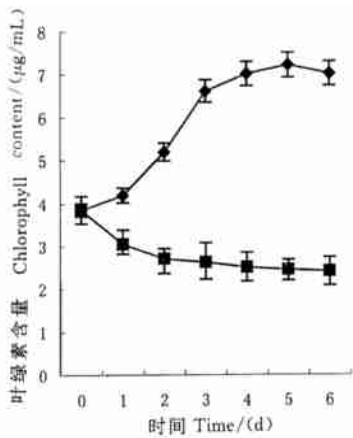


图 2 湖水中铜离子浓度对浮游植物生物量的影响  
Fig. 2 Effect of copper concentration on phytoplankton of lake water  
—●—湖水; —■—湖水+  $20\mu\text{g/L}$   $\text{Cu}^{2+}$

通过 7d 的培养, 结果表明, B 组中浮游植物的生长速率和最终生物量均明显高于 A 组, 而 C 组中浮游植物的生长速率和最终生物量最低。这说明稍高于约旦河水当前量的  $\text{Cu}^{2+}$  浓度有利于河水中浮游植物的生长。而高于  $20\mu\text{g/L}$  的  $\text{Cu}^{2+}$  浓度对河水中浮游植物的生长有明显的抑制作用(图 3)。

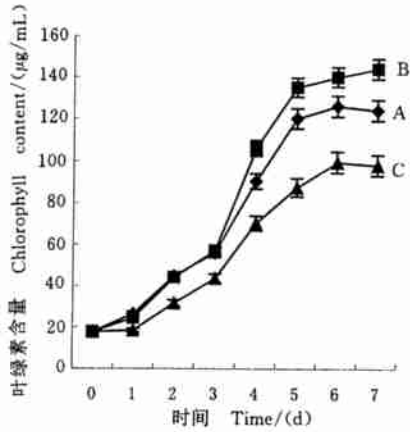


图 3  $\text{Cu}^{2+}$  浓度变化对约旦河水浮游植物生物量的影响  
Fig. 3 Effect of copper concentration on phytoplankton of Jordan River water

2.3 铜离子浓度变化对高盐度湖水中浮游植物的影响

将 9 个三角瓶分为 D、E、F 三个实验组, 分别装入 1000mL 高盐度湖水(Kinneret 湖 A 站湖水加一定量的 Ami's salt solution, 盐度为  $400\mu\text{g/L}$  左右), 其中, D 组为对照, 不加入  $\text{Cu}^{2+}$  溶液, E 组加入含  $10\mu\text{g}$   $\text{Cu}^{2+}$  组分; F 组加入  $20\mu\text{g}$   $\text{Cu}^{2+}$  组分。经过 7d 实验, 结果表明; D 组的湖水更有利于浮游植物的生长和生物量增加, 而随着  $\text{Cu}^{2+}$  浓度的增加, 其对浮游植

物生长的抑制作用明显加强(图4)。

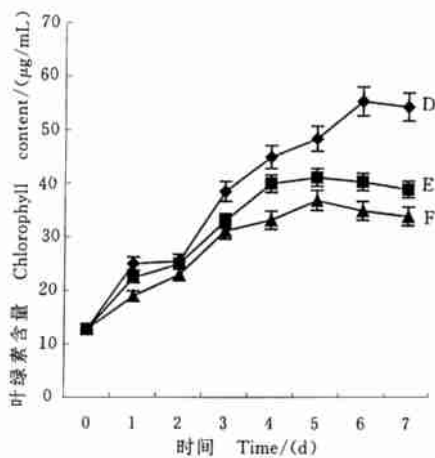


图4 Cu<sup>2+</sup> 浓度变化对高盐度湖水中浮游植物生物量的影响  
Fig.4 Effect of copper concentration on biomass of phytoplankton in lake water with high salinity

2.4 低于湖水的盐度变化对浮游植物的影响

取约旦河水(用 GF/C 玻璃纤维滤膜滤去浮游植物,用 0.2μm 的滤膜除去细菌)与 Kinneret 湖 A 站湖水及 Amí's salt solution 按一定比例混和,并分成 G、H、I 三个实验组,每组三个重复,各实验组的湖水盐度如下:G 组盐度为 100μg/L;H 组盐度为 150μg/L;I 组盐度为 200μg/L。实验结果表明:低含盐量(100μg/L 和 150μg/L)湖水中浮游植物的生长明显好于在含盐量较高的湖水(200μg/L)(图5)。

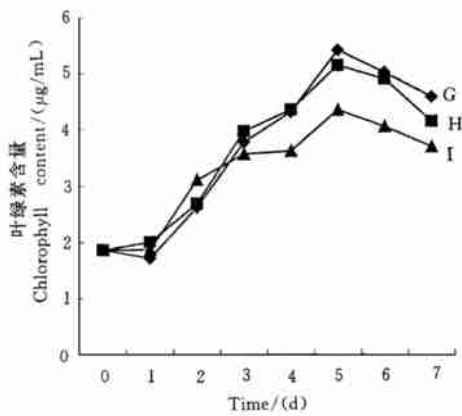


图5 低于当前湖水的盐度变化对浮游植物的影响  
Fig.5 Influence of salinity changes on phytoplankton under Lake water with low salinity

2.5 高于湖水的盐度变化对湖水中浮游植物的影响

将9个三角瓶分为 J、K、L 三个实验组,分别装入 1000mL 不同盐度的人工湖水,每组三个重复,各实验组的湖水盐度如下:J 组盐度为 200μg/L;K 组

盐度为 300μg/L;L 组盐度为 400μg/L。

结果表明,含盐量较低(200μg/L)湖水中,浮游植物生长情况好于含盐量较高(300μg/L 和 400μg/L)的湖水(图6)。通过藻类种群结构分析,湖水含盐量在 200μg/L 左右时,蓝藻在整个浮游植物生物量中所占比例明显增加。

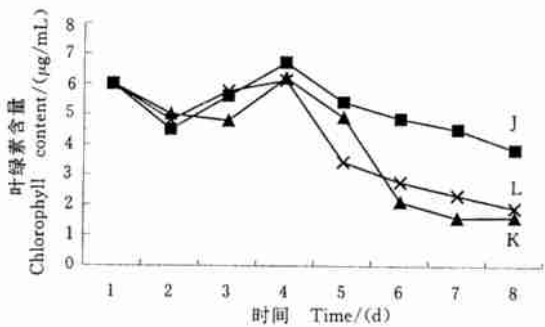


图6 高于湖水的盐度变化对湖水中浮游植物的影响  
Fig.6 Influence of salinity changes on phytoplankton under Lake water with high salinity

2.6 Kinneret 湖水含盐量随时间的变化与其浮游植物生物量变化间的关系

从图7和图8可以看出,在 Kinneret 湖的自然水中,藻类在相对较低含盐量的(200 μg/L)的湖水中,每年从7月到12月的平均生物量明显高于较之含盐量相对较高湖水中的情况。这和人工湖水中的实验结果(图5和图6)相类似,但也出现了一些小的波动,其原因可能与其他环境因素(诸如细菌、浮游动物、辐射和光照、鱼类活动等)的相互影响有关。

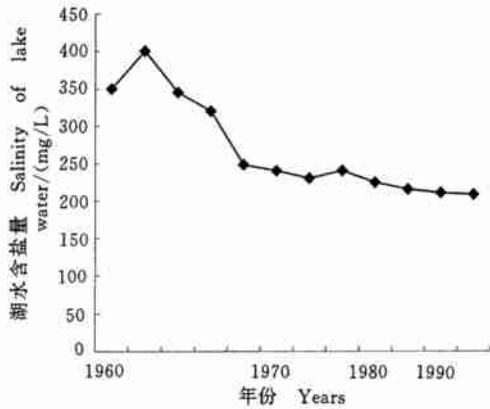


图7 Kinneret 湖水含盐量随时间的变化情况  
Fig.7 The salinity changes of Lake Kinneret with time (The data were from Gophen et al 1992<sup>[9]</sup>, Berman 1994<sup>[8]</sup>, Research report of Kinneret Limnological Laboratory)

3 讨论

在 Kinneret 湖,从 20 世纪 60 年代初到 90 年代

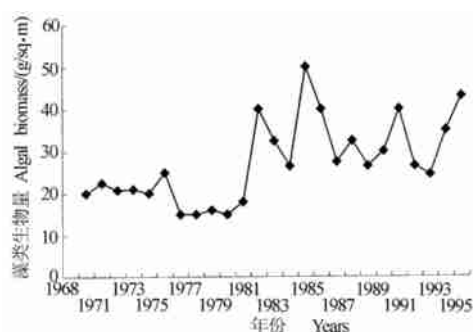


图8 在自然状态下 Kinneret 湖水藻类生物量随时间的变化情况

(数据来自 Beman et al 1995<sup>[10]</sup>, Beman et al 1992<sup>[11]</sup>, Gophen 1992<sup>[12]</sup>, Research report of Kinneret Limnological Laboratory)

Fig. 8 The algal biomass changes with time in Lake Kinneret (The

data were from Beman et al 1995<sup>[10]</sup>, Beman et al 1992<sup>[11]</sup>, Gophen

1992<sup>[12]</sup>, Research report of Kinneret Limnological Laboratory)

末的四十年间, 不仅其湖水含盐量发生了很大的改变, 其微量元素, 特别是  $\text{Cu}^{2+}$  浓度也发生了很大的变化。这种变化直接影响到水体中浮游植物的生长。 $\text{Cu}^{2+}$  浓度对海洋和淡水中藻类生长的影响被许多研究者证实过<sup>[2]</sup>, 其结论是当  $\text{Cu}^{2+}$  浓度大于  $10^{-10} \text{ mol/L}$  时, 就有可能对藻类的生长产生较严重的抑制作用。当然, 不同的藻类对  $\text{Cu}^{2+}$  的浓度需求是不一样的。本研究将 Kinneret 湖水中人为加入  $\text{Cu}^{2+}$  组分, 使其浓度提高到大约  $10^{-6} \text{ mol/L}$  左右时, 其湖水中的浮游植物生长受到严重的抑制。这再一次证明了湖水中  $\text{Cu}^{2+}$  浓度过高, 会直接影响藻类种群和生物量。

对于 Kinneret 湖水的主要来源——约旦河水来说, 其  $\text{Cu}^{2+}$  浓度大约在  $10^{-9} \text{ mol/L}$  左右, 本研究的实验结果表明, 河水中  $\text{Cu}^{2+}$  浓度稍有增加, 将有利于藻类生物量的增加(图3), 这似乎与 Sunda 等的结果不完全一致。可能的原因是: 尽管  $\text{Cu}^{2+}$  作为重金属来说对藻类生长是有害的, 但它作为一种藻类生长必须的微量元素, 其一定的浓度对藻类来说是必须的, 这一浓度范围因不同的种类而有差异。对约旦河水中的优势藻类种群来说, 等于或稍高于  $10^{-9} \text{ mol/L}$   $\text{Cu}^{2+}$  浓度可能是比较适宜的, 但当  $\text{Cu}^{2+}$  浓度增加到 Kinneret 湖水当前年平均水平 ( $10^{-6.5} \text{ mol/L}$  左右) 时, 表现出明显的抑制作用。这也进一步证实, 约旦河水中的浮游植物在进入 Kinneret 湖后, 被湖水高浓度的  $\text{Cu}^{2+}$  所抑制的现象<sup>[3]</sup>。

对于 Kinneret 湖水中的藻类种群来说, 由于同一年的不同季节, 其湖水中的  $\text{Cu}^{2+}$  浓度变化较大, 这主要是因为春季和夏末湖水水位相差悬殊, 加之湖水在不同季节的  $\text{Cu}^{2+}$  结合和分布情况不同所

致<sup>[4]</sup>。但就全年的平均水平来说, 从 20 世纪 60 年代到目前湖水中的  $\text{Cu}^{2+}$  浓度在不断增加, 主要的原因是由于湖泊底部和周围盐泉中的  $\text{Cu}^{2+}$  大量流入, Kinneret 湖的结果。按照本实验的结果, Kinneret 湖水中的浮游植物种群应随  $\text{Cu}^{2+}$  浓度增加而不断受到抑制(图2), 尽管湖水中  $\text{Cu}^{2+}$  的浓度对农业水资源来说是有利的因素, 但对作为饮用水资源来说, 浮游植物生物量的减低是有益的。然而, 从近 30 年的浮游植物生物量的变化情况来看, Kinneret 湖中藻类年均生物量不但没有减少迹象, 反而有增加的趋势, 这可能是因为湖水含盐量下降与藻类生物量之间存在相关性。

湖水含盐量对 Kinneret 湖生物种群的影响是多方位的, 本研究小组曾在早些时候讨论过含盐量对水细菌种群的影响问题<sup>[5]</sup>。同样, 含盐量与湖水中的浮游植物之间也有密切的关系。本研究结果表明, 湖水含盐量越低, 藻类年平均生物量越大, 高于  $300 \mu\text{g/L}$  时, 其藻类生长明显受到抑制(图5, 6), 这一结果与 Kinneret 湖长期演变情况是非常相似的(图7, 8)。当湖水含盐量下降时, 湖水中硝化细菌活性提高, 硝化作用加强, 导致  $\text{NO}_3$  消耗, 反硝化作用加强<sup>[6]</sup>, 从而导致 Kinneret 湖水生态系统中“N”的大量丢失<sup>[7]</sup>, 而总 P 水平在不断增加, TN/TP 的比率下降, 当低于一定水平(小于 29)时, 浮游植物一般以蓝藻为优势种群<sup>[7]</sup>。由于 Kinneret 湖是以色列主要的饮用水资源, 这种蓝藻是不受欢迎的, 1994 年 9 月到 11 月间, 在 Kinneret 湖出现了束丝藻大量爆发, 这种蓝藻以前很少在 Kinneret 湖水中出现, 尽管对束丝藻大量爆发的原因有许多说法, 但可以肯定的是与湖水含盐量的下降有一定的相关性<sup>[8]</sup>。由于进入 Kinneret 湖的约旦河水含盐量仅  $100 \mu\text{g/L}$  左右, 因此, Kinneret 湖水含盐量还有逐渐下降的可能。从本文的实验结果来看, 适当控制湖水含盐量对 Kinneret 湖水水质保护是非常重要的。

浮游动物与藻类的年生产量之间也有直接的相关性。Gophen et al<sup>[9]</sup> 等认为, 湖水中藻类生物量的增加, 除了营养方面的变化外, 浮游动物对藻类捕食的减少也是一个原因, 而浮游动物的减少是因为不恰当的渔业, 而盐度与浮游动物间也存在相关性<sup>[13]</sup>。从上面的分析来看, Kinneret 湖的盐度和铜浓度都应控制在适宜的水平, 过高或过低都有可能不利于湖水水质的保持和管理。

#### 参考文献:

- [1] Malinsky Rushansky N, Beman T, Dubinsky Z. Seasonal dynamic

- sof picophytoplankton in Lake Kinneret, Israel [J]. *Freshwater Biology*, 1995, **34**: 241—254
- [ 2 ] Sunda WqBarbr RT, Huntsman SA. Phytoplankton growth in nutrient rich seawater: importance of copper manganese cellularintera ctio [J]. *J. Mar. Res.* 1981, **39**(3): 567—586
- [ 3 ] Frevert T. Heavy metals in Lake Kinneret (Israel) I. Total Kinneret and the River Jordan [J]. *Arch. Hydrobiol.* 1985, **104**(5): 527—542
- [ 4 ] Avnimelech, Y. Studies on lake Kinneret (Sea ofGalilee), I. Characterization of water and suspended load in Lake Kinneret Tributaries [J]. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 1980, **14**: 451—460
- [ 5 ] Hu Z L, Bergstein Berr Dan J, Wynne D, et al. The influence of artificially induced salinity changes on the bacterial population in lake Kinneret [J]. *Acta Hydrobiol. sin.* 2000, **24**(4): 326—329. [ 胡章立, Bergstein Berr Dan T, Wynne D, 等. 人为因素导致的盐度变化对 Kinneret 湖水细菌种群的影响 II. 水生生物学报, 2000, **24**(4): 326—329]
- [ 6 ] Cavari BZ, Phelps G. Denitrification in Lake Kinneret in the presence of oxygen [J]. *Freshwat. Biol.* 1977, **7**: 385—391
- [ 7 ] Smith SV, Semya S, Giefman Y et al. Annual mass balance of water, P, N, Ca and Cl in Lake Kinneret [J]. *Limnol. Oceanogr.* 1989, **34**: 1202—1213
- [ 8 ] Berman T, The Kinneret Sea of Galilee [C]. ARIEC, 1994, **98**: 27—43
- [ 9 ] Gophen M, Paz J D. Decreased salinity effects in Lake Kinneret (Israel) [J]. *Hydrobiologia*, 1992, **228**: 231—237
- [ 10 ] Berman T, Stone L, Yacobi, YZ, et al. Primary production and phytoplankton in Lake Kinneret: A long term record (1972—1993) [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1995, **40**(6): 1064—1076
- [ 11 ] Berman T, Yacobi YZ, Pollinger U. Lake Kinneret phytoplankton: stability and Variability during twenty years (1970—1989) [J]. *Aquatic Sciences*, 1992, **54**: 102—127
- [ 12 ] Mophen M. Long term changes of plankton communities in Lake Kinneret, Israel [J]. *Asia Fisheries Science* 1992, **5**: 291—302
- [ 13 ] Gophen M, Semya S, Threlkeld T. Long term patterns in nutrients, phytoplankton and zooplankton of Lake Kinneret and future predictions for ecosystem structure [J]. *Arch. Hydrobiol.*, 1990, **118**: 449—460

## THE EFFECTS OF SALINITY AND $\text{Cu}^{2+}$ CONCENTRATION ON THE PHYTOPLANKTON IN LAKE KINNERET

HU Zhang-li<sup>1</sup>, SHEN Yirwu<sup>2</sup>, LIU Yongding<sup>2</sup>, T. Bergstein Berr Dan<sup>3</sup> and D. Wynne<sup>3</sup>

(1 College of life sciences, Shenzhen University, Shenzhen 518060;

2 Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072;

3 The Yigal Allon Kinneret Limnological Laboratory, Israel)

**Abstract:** This paper dealt with the influence of salinity and  $\text{Cu}^{2+}$  concentration on the phytoplankton by inducing artificially the changes of salinity and  $\text{Cu}^{2+}$  concentration of lake water. By means of experimental analysis, it found that increasing the  $\text{Cu}^{2+}$  concentration of lake water inhibited the algal growth, it was good for improving water quality; however, high  $\text{Cu}^{2+}$  concentration was harmful to human health and crop growth. On other hand, as the salinity was low in Jordan river, increasing appropriately the  $\text{Cu}^{2+}$  concentration enhanced algal growth rate in river water. The annual mean biomass of phytoplankton have showed progressively increase with salinity decreasing successively. Especially, when the salinity of lake water was low than 200 $\mu\text{g/L}$ , the ratio of Blue-green algae/ phytoplankton caused a shift, it was harmful to water quality in Lake Kinneret. It indicate that controlling  $\text{Cu}^{2+}$  concentration and keeping salinity is very important for the preservation of water quality in Lake Kinneret.

**Key words:** Lake Kinneret; Phytoplankton; Salinity;  $\text{Cu}^{2+}$  concentration