

Hg(II)和Pb(II)对海洋单细胞藻的急性毒性效应

战玉杰^{1,2,3}, 杨茹君^{1,2, #, *}, 王修林^{1,2}, 张莹莹⁴, 王世荣^{1,2}

1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266003
2. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266003
3. 中国海洋大学图书馆, 青岛 266003
4. 盐城工学院化学与生物工程学院, 盐城 224000

摘要: 近年来, 海洋重金属污染日益严重, 为考察重金属对海洋藻类的生物毒性效应, 进而评估其对海洋生态环境的影响, 本研究采用一次性培养的实验方法, 测定了2种重金属 Hg(II) 和 Pb(II) 对8种海洋单细胞藻的急性毒性效应, 包括赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo* Hada)、旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus* Cleve)、海洋原甲藻 (*Prorocentrum micans* Ehrenberg)、裸甲藻 (*Gymnodinium* sp.)、中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum* (Greville) Cleve)、三角褐指藻 (*Phaeodactylum tricorutum* Bohlin)、青岛大扁藻 (*Platymonas helgolandica*) 和亚心型扁藻 (*Platymonas subcordiformis*), 测定出 Hg(II) 对8种海洋藻的96 h EC₅₀分别为 16、42、24、37、31、12、385 和 161 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 Pb(II) 对赤潮异弯藻、旋链角毛藻、海洋原甲藻和裸甲藻的96 h EC₅₀分别为 9 516、8 373、12 002 和 10 128 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在本研究的培养条件下, Hg(II) 对受试海洋藻的毒性效应明显大于 Pb(II), Pb(II) 对赤潮异弯藻、旋链角毛藻、海洋原甲藻和裸甲藻的96 h EC₅₀与 Hg(II) 对这4种藻的96 h EC₅₀的比值分别为 594.75、199.36、500.08 和 273.73, 而中肋骨条藻、三角褐指藻、青岛大扁藻和亚心型扁藻在有效浓度范围内未能检测到 Pb(II) 对其相应的96 h EC₅₀, 说明 Pb(II) 对这4种藻的生物毒性作用比较小; 比较重金属对各种藻作用的96 h EC₅₀, 可知饵料藻对重金属的耐受性高于赤潮藻。同时发现, 低浓度的 Pb(II) 对藻类生长有一定的促进作用; 在 f/2 营养液的培养条件下, 重金属对海洋单细胞藻96 h EC₅₀值高于自然海水条件下相应的值。

关键词: 急性毒性; EC₅₀; Hg(II); Pb(II); 海洋单细胞藻

文章编号: 1673 5897(2011)6 523 09 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Acute Toxic Effect of Hg(II) and Pb(II) on Marine Unicellular Algae

Zhan Yujie^{1,2,3}, Yang Rujun^{1,2, #, *}, Wang Xiulin^{1,2}, Zhang Yingying⁴, Wang Shirong^{1,2}

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China
2. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China
3. Library of Ocean University of China, Qingdao 266003, China
4. Institute of Chemistry and Biology, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224000, China

Received 21 March 2011 accepted 17 June 2011

Abstract: Heavy metal pollution is becoming more and more serious in marine environment recently. In order to evaluate the impact of heavy metals on marine environment, the biotoxicity of heavy metals to marine algae was investigated. Using batch culture method, acute toxicity of Hg(II) and Pb(II) to 8 species of marine unicellular algae, *Heterosigma akashiwo* Hada, *Chaetoceros curvisetus* Cleve, *Prorocentrum micans* Ehrenberg, *Gymnodinium* sp., *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve, *Phaeodactylum tricorutum*

收稿日期: 2011-03-21 录用日期: 2011-06-17

基金项目: 863 项目(2007AA09Z106); 山东省优秀中青年科学家奖励基金(BS2010HZ026)

作者简介: 战玉杰(1978), 女, 博士, 研究方向为毒理学, E-mail: qianjinanmai@yeah.net;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: yangrj@ouc.edu.cn

tum Bohlin, *Platymonas helgolandica* and *Platymonas subcordiformis*, was measured. The results showed that the 96 h EC₅₀ of Hg(II) for the tested algal species were 16, 42, 24, 37, 31, 12, 385 and 161 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; and the 96 h EC₅₀ of Pb(II) for *Heterosigma akashiwo*, *Chaetoceros curvisetus*, *Prorocentrum micans* and *Gymnodinium sp.* were 9 516, 8 373, 12 002 and 10 128 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The toxicity of Hg(II) was significantly higher than that of Pb(II) under the f/2 culture condition; the ratios of 96 h EC₅₀ values of Pb(II) to Hg(II) for *Heterosigma akashiwo*, *Chaetoceros curvisetus*, *Prorocentrum micans* and *Gymnodinium sp.* were 594.75, 199.36, 500.08 and 273.73, respectively. However, the 96 h EC₅₀ of Pb(II) for *Skeletonema costatum*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Platymonas helgolandica* and *Platymonas subcordiformis* could not be detected accurately in the effective concentration range under the f/2 culture condition, which suggested that the toxicity of Pb(II) to these four algae was very low. Based on the value of 96 h EC₅₀, the tolerance of feed algae to heavy metals was estimated to be higher than that of harmful bloom algae. Moreover, it is found that Pb(II) could stimulate the growth of algae at relatively lower concentration, and the tolerance of algae to heavy metal was higher under the f/2 culture condition than that in natural environment.

Keywords: acute toxicity; EC₅₀; Hg(II); Pb(II); marine unicellular algae

近年来,随着沿海地区经济和工业的迅速发展,海洋污染日益严重,海洋生态环境遭到严重破坏。根据《中国海洋环境质量公报》,近岸海水中主要的重金属污染物是铅(Pb)和汞(Hg)^[1]。相对于国家一类海水水质标准(GB 3097—1997)^[2],渤海海区海水中Pb的超标率达63.4%,黄海近岸海域中Pb的超标率为42%,超标均值为3.42 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;东海近岸海域中Pb的超标均值为2.97 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,介于一、二类海水水质标准之间,污染指数为2.47^[3,4]。而Hg的超标也比较严重,锦州湾、辽河口和双台子河口的Hg的监测均值都超过了一类标准^[5]。

重金属可以被浮游植物富集并通过食物链进入海洋生态系统^[6]。早在20世纪30年代,针对藻类与重金属关系的研究就已开始^[7-8]。例如Ismail等^[9]研究了4种重金属Cd、Cu、Mn和As对钙质角毛藻(*Chaetoceros calcitrans*)、球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)、四肩突四鞭藻(*Tetraselmis tetrahele*)和四鞭藻(*Tetraselmis sp.*)的毒性,发现4种重金属的毒性排序为Cu>Cd>Mn>As。然而,已有的研究多着重于重金属毒性和藻类耐受性的比较,所研究的藻类也多局限于饵料藻,针对影响海洋环境生态系统的赤潮藻种的研究基本未见报道。本研究的目的即在于通过测定2种重金属Hg(II)和Pb(II)对5种赤潮藻和3种饵料藻的急性毒性效应,并结合实际海区重金属的污染状况,评估重金属污染的生物毒性效应及其对海洋生态环境的影响,从而为海水水质的综合评估和海洋环境污染的监测提供有价值的资料。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 仪器与试剂

仪器:LRH-250光照培养箱(广州医疗器械厂)、自制光照培养架、YXQD-02型电热式消毒蒸汽锅(山东新华医疗器械厂)和MultisizerTM3 Coulter计数仪(美国Beckman Coulter公司)。

试剂:HgCl₂(分析纯,北京化工厂)和PbCl₂(分析纯,上海试剂四厂)。

1.2 实验材料

实验所选用的赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo* Hada)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus* Cleve)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans* Ehrenberg)、裸甲藻(*Gymnodinium sp.*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum* (Greville) Cleve)由中国海洋大学海洋生命学院提供,三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum* Bohlin)、青岛大扁藻(*Platymonas helgolandica*)和亚心型扁藻(*Platymonas subcordiformis*)由黄海水产研究所微藻培养实验室提供。其中赤潮异弯藻在大连湾、胶州湾等曾多次形成赤潮;旋链角毛藻、中肋骨条藻是胶州湾夏季主要的优势藻,在东海、黄海和渤海分布较多,曾多次引发赤潮;海洋原甲藻、裸甲藻分布于渤海、东海和南沙群岛等水域,是形成赤潮的主要种类之一^[10,12];而三角褐指藻、青岛大扁藻和亚心型扁藻是3种比较常见的饵料藻^[3]。

1.3 海洋单细胞藻培养方法

单细胞藻的培养采用f/2营养液配方,培养条件为温度(20±1)℃,明暗周期12h:12h,光

源为白色日光灯, 光照强度约为 3 000 Lux。在整个培养过程中, 各操作步骤前均进行灭菌处理 (160 °C, 2 h)。

1.4 Hg(II) 和 Pb(II) 对海洋单细胞藻毒性效应测定

取 20 mL 藻液加入 300 mL f/2 营养液中, 使单细胞藻的起始细胞密度 B_0 均在 10^4 mL^{-1} 以上, 并在其中分别加入 0、10、30、50、80 和 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Hg(II) 以及 0、100、500、1 000、5 000 和 $10\,000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Pb(II) 进行实验, 实验设 3 组平行, 以藻细胞密度代表浮游植物生物量。经预实验发现, 赤潮异弯藻和三角褐指藻对重金属的耐受力与其他藻差异较大, 对这 2 种藻的重金属暴露浓度做了适当调整, 赤潮异弯藻的 Pb(II) 暴露浓度为 0、500、1 000、3 000、5 000 和 $10\,000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 三角褐指藻的 Hg(II) 和 Pb(II) 暴露浓度分别为 0、1、10、50、100、200 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0、50、200、1 000、3 000、5 000 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。实验条件与单细胞藻培养条件相同, 实验周期是 144 ~ 196 h。每隔 24 h 取 10 mL 藻液, 应用 Coulter 计数仪测定其细胞密度 B_t , 重复测定 3 ~ 6 次, 平行样之间的相对偏差小于 10%。Coulter 计数法的平均测量精密度为 $(99.7 \pm 0.2) \%$ 。

1.5 数据处理

1.5.1 重金属对藻类 96 h EC_{50} 计算方法

t 时刻重金属对浮游植物生长抑制率 P 可由 (2-1) 求得:

$$P = \frac{\lg B_{t, \text{control}} - \lg B_t}{\lg B_{t, \text{control}} - \lg B_{0, \text{control}}} \quad (2-1)$$

其中 $B_{t, \text{control}}$ 为 t 时刻参比样品的细胞密度; B_t 为 t 时刻样品的细胞密度; $B_{0, \text{control}}$ 为参比样品的起始细胞密度。

建立重金属离子对数浓度 C 藻生长抑制率 P 的方程^[4]:

$$P = \left(\frac{e^{\beta_0 + \beta_1 C}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 C}} \right) \times 100 \quad (2-2)$$

$C = \log C_{BT}$, C_{BT} 为重金属离子的实验浓度; β_0 、 β_1 为可调参数。

由于 $C_{BT} = EC_{50}$ 时, P 为 50%, 所以上式又可变形为:

$$P = \frac{\left(\frac{C_{BT}}{EC_{50}} \right)^b}{\left(1 + \frac{C_{BT}}{EC_{50}} \right)^b} \quad (2-3)$$

b 为可调参数, 这样由 P 对 C_{BT} 进行拟和即可

直接得到 EC_{50} 。当低浓度重金属对浮游植物的生长有促进作用时:

$$P = \frac{(2fEC_{50} + 1) \left(\frac{C_{BT}}{EC_{50}} \right)^b - fC_{BT}}{1 + (2fEC_{50} + 1) \left(\frac{C_{BT}}{EC_{50}} \right)^b} \quad (2-4)$$

f、b 为可调参数, f 可表示促进作用(hormesis)的大小。如果没有促进时, $f=0$ 。

1.5.2 拟合方法

采用 OriginPro 8 软件用非线性拟合方法对实验结果进行拟合。

2 结果(Results)

2.1 Hg(II) 和 Pb(II) 对海洋单细胞藻生长的影响

如图 1 和图 2 所示, 加入重金属后, 海洋藻类生长明显受到抑制, 生长周期缩短, 随着重金属浓度的增加, 藻类生长受到的抑制程度也逐渐加大, 甚至完全停止生长或死亡。例如, 浓度大于 $50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Hg(II) 几乎完全抑制了三角褐指藻和赤潮异弯藻的生长。同时发现, 暴露于低浓度的 Pb(II) 溶液反而促进了某些藻类的生长, 例如, $50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Pb(II) 对三角褐指藻的生长具有促进作用; $500 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Pb(II) 对亚心形扁藻和赤潮异弯藻的生长具有促进作用; 500 和 $1\,000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Pb(II) 对青岛大扁藻和旋链角毛藻的生长也具有促进作用。

2.2 Hg(II) 和 Pb(II) 对海洋单细胞藻的 EC_{50} 及重金属对藻类毒性的比较

本研究利用重金属离子对数浓度 C 藻生长抑制率 P 的方程拟和计算重金属对 8 种藻的 96 h EC_{50} ^[4], 结果列于表 1。由表 1 可以看出, 在 f/2 营养液的培养条件下, 重金属 Hg(II) 对 8 种海洋单细胞藻的 96 h EC_{50}

表 1 Hg(II) 和 Pb(II) 对 8 种海洋藻的 96 h EC_{50} 值

Table 1 Values of 96 h EC_{50} of Hg(II)

and Pb(II) to eight marine algae ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)

藻种	Hg(II)	Pb(II)
赤潮异弯藻(Heterosigma akashiwo)	16	9 516
旋链角毛藻(Chaetoceros curvisetus)	42	8 373
海洋原甲藻(Prorocentrum micans)	24	12 002
裸甲藻(Gymnodinium sp.)	37	10 128
中肋骨条藻(Skeletonema costatum)	31	-
三角褐指藻(Phaeodactylum tricorutum)	12	-
青岛大扁藻(Platymonas helgolandiaca)	385	-
亚心型扁藻(Platymonas subcordiformis)	161	-

注: - 表示 Pb(II) 对该藻种的 96 h EC_{50} 在有效浓度范围内未能检测到。

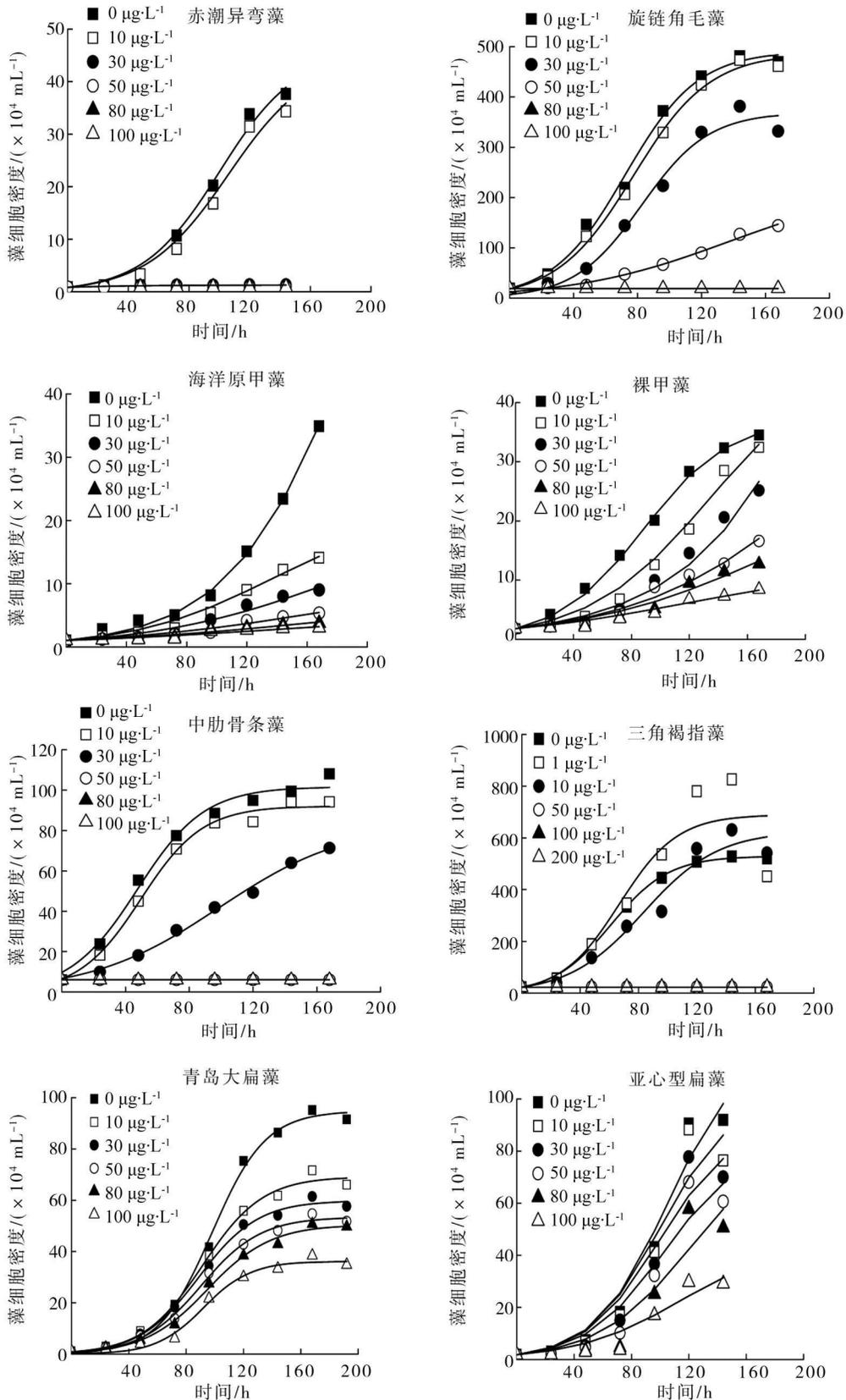


图1 8种海洋藻在不同浓度Hg(II)中的生长曲线

Fig. 1 Growth curves of eight marine algae exposed to Hg(II) at different concentrations

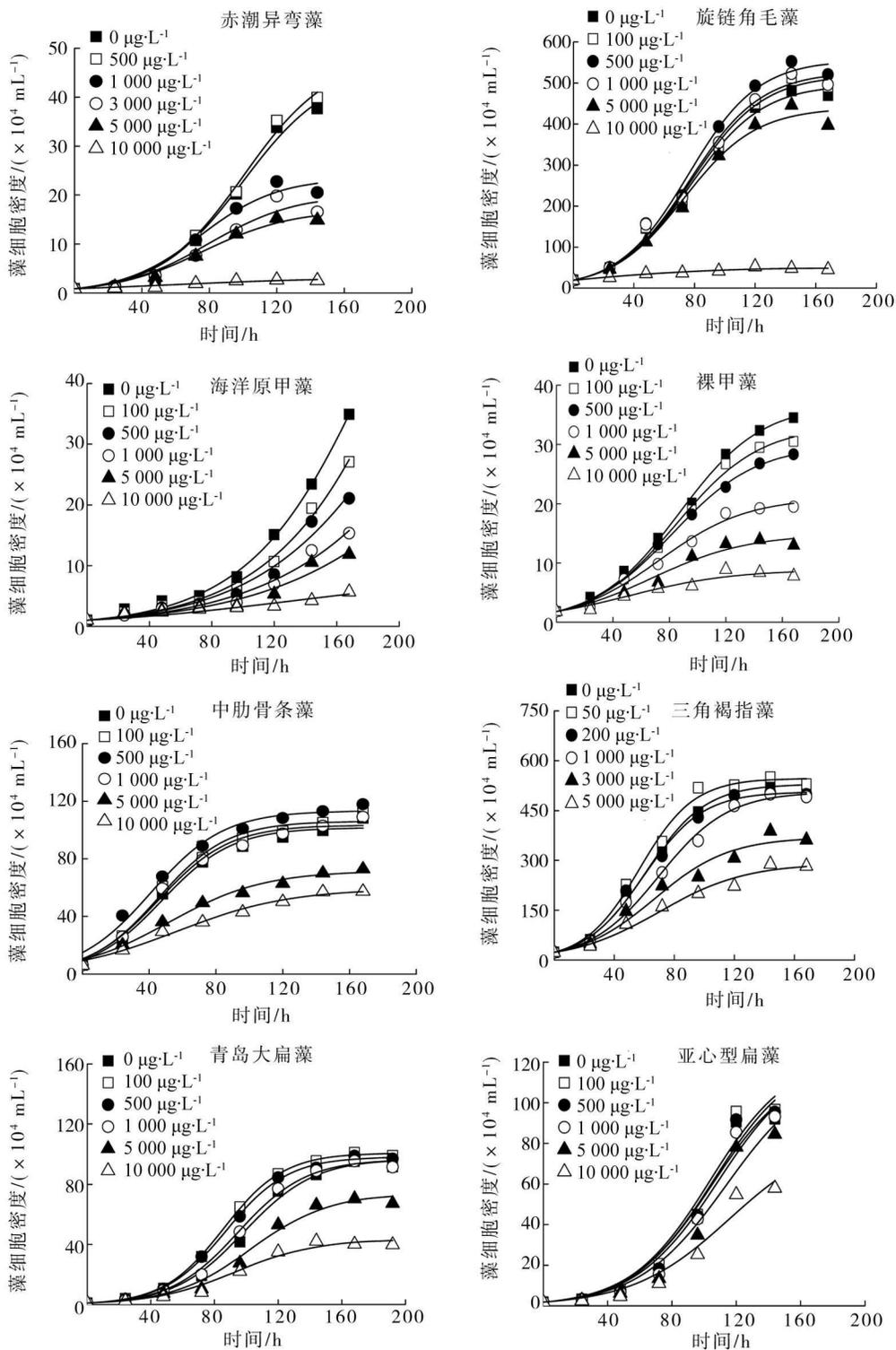


图 2 8 种海洋藻在不同浓度 Pb(II) 中的生长曲线

Fig. 2 Growth curves of eight marine algae exposed to Pb(II) at different concentrations

远小于 Pb(II) 对 8 种藻的 96 h EC₅₀, Pb(II) 对赤潮异弯藻、旋链角毛藻、海洋原甲藻和裸甲藻的 96 h EC₅₀ 与 Hg(II) 对这 4 种海洋藻的 96 h EC₅₀ 的比值分别为 594.75, 199.36, 500.08 和 273.73, 这表明 Hg(II) 的

生物毒性明显大于 Pb(II); 而 Pb(II) 对中肋骨条藻、三角褐指藻、青岛大扁藻和亚心型扁藻在有效浓度范围内未能检测到其 96 h EC₅₀, 说明 Pb(II) 对这 4 种藻的生物毒性作用比较小。

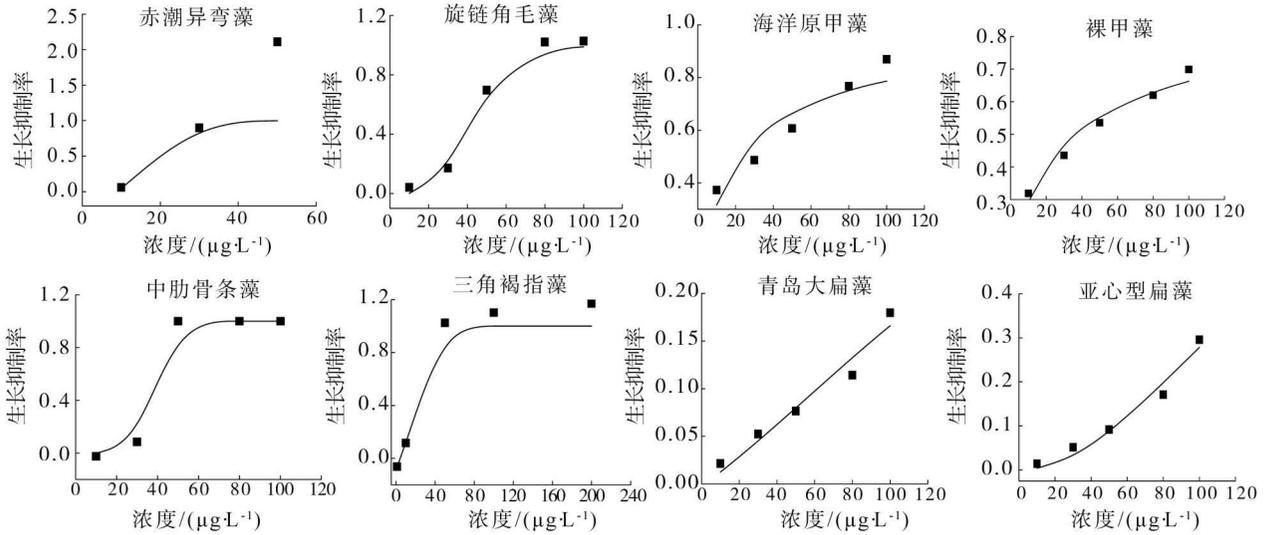


图3 不同浓度的 Hg(II) 对 8 种海洋藻的生长抑制率

Fig. 3 Inhibition rates of eight marine algae growth against Hg(II) concentrations

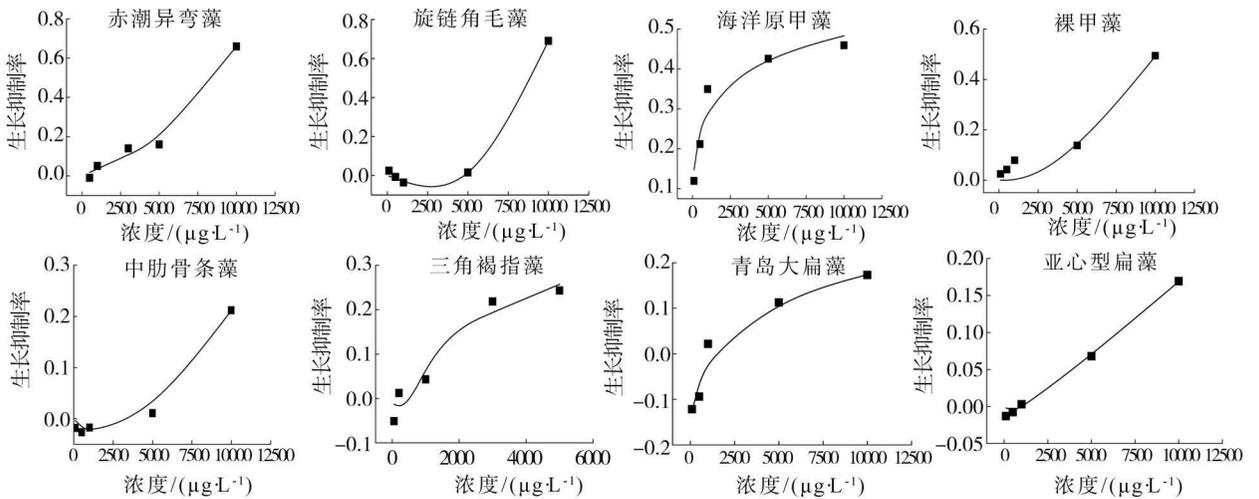


图4 不同浓度的 Pb(II) 对 8 种海洋藻的生长抑制率

Fig. 4 Inhibition rates of eight marine algae growth against Pb(II) concentrations

图3和图4是 Hg(II) 和 Pb(II) 对 8 种单细胞藻的“浓度抑制率”曲线图。由图4可知, Pb(II) 的浓度与抑制率关系表现为比较明显的“U”型(β 型), 这种“U”型曲线被认为是典型的 homeosis 效应的结果, 其峰值表示最大刺激效应^[15-18]。由此可知, 低浓度的 Pb(II) 对藻类生长有一定的促进作用。

针对重金属离子对浮游植物的毒性研究较多, 但实验结果较难比较。因为实验所用的浮游植物不同, 且不同研究者采用的实验条件也不尽相同。通常, 几种常见的重金属对藻类的毒性顺序是 $Hg > Cu \approx Cd > Cr > Zn > Pb$, 本研究结果与之相符,

表2列出了本研究与部分文献的毒性实验结果^[9, 19-24]。

3 讨论 (Discussion)

高浓度的重金属离子对海洋浮游植物的生长具有抑制作用, 这可能是因为重金属离子造成藻细胞线粒体损伤, 影响了光合作用的电子传递系统, 阻碍了蛋白质合成, 从而抑制了藻类生长^[25-26]; 而低浓度的 Pb 暴露能促进浮游植物生长这一结论与何学佳等^[27]及周银环等^[28]的研究结果一致。

EC₅₀可用于表示化学污染物对浮游植物(如藻类)的生物毒性, 且具有简单、明确的特点, 是生物毒性学中一个重要的参数, EC₅₀值越小, 污染物毒性越

表 2 几种常见重金属对藻类毒性作用的比较

Table 2 Comparison of toxicity of several common heavy metals to algae

重金属种类	藻 种	毒性排序	数据来源
Cd, Zn	中肋骨条藻(<i>Skeletonema costatum</i>)	Cd> Zn	[19]
Cd, Cu, Mn, As	角毛藻(<i>Chaetoceros calcitrans</i>)、 球等鞭金藻(<i>Isochrysis galbana</i>)	Cu> Cd> Mn> As	[9]
Cu, Cd, Zn	栅藻(<i>Scenedesmus</i>)	Cu> Cd> Zn	[20]
Cu, Pb, Zn, Cr, Cd	新月菱形藻(<i>Nitzschia closterium</i>)、 青岛大扁藻(<i>Platymonas subcordiformis</i>)	Cu> Pb> Cd> Cr> Zn	[21]
Zn, Cd, Pb, Cu	三角褐指藻(<i>Phaeodactylum tricoratum Bohlin</i>)	Cu> Cd> Zn> Pb	[22]
Cu, Zn, Cd	三角褐指藻(<i>Phaeodactylum tricoratum Bohlin</i>)、 青岛大扁藻(<i>Platymonas helgolandica</i>)	Cd> Cu> Zn	[23]
Hg, Cu, Zn, Cd	角毛藻(<i>Chaetoceros calcitrans</i>)	Hg> Cu> Zn> Cd	[24]
Hg, Pb	旋链角毛藻(<i>Chaetoceros curvisetus</i>)、 中肋骨条藻(<i>Skeletonema costatum</i>)、 三角褐指藻(<i>Phaeodactylum tricoratum Bohlin</i>)、 亚心型扁藻(<i>Platymonas subcordiformis</i>)、 青岛大扁藻(<i>Platymonas helgolandica</i>)	Hg> Pb	本研究

大。比较 EC₅₀ 值可知, 硅藻门的旋链角毛藻对 Hg(II) 的耐受性比较强, 而对 Pb(II) 的耐受性比较弱; 黄藻门的赤潮异弯藻对这 2 种重金属离子的耐受性都比较弱; 绿藻门的青岛大扁藻和亚心形扁藻对这 2 种重金属的耐受性都很强; 甲藻门的海洋原甲藻和裸甲藻对这 2 种重金属都具有一定的耐受性, 2 种藻耐受性的差别不明显。由此可以看出, 饵料藻对重金属的耐受性高于赤潮藻。不同的单细胞藻类对重金属的耐受性的差异可能与藻细胞形态上的区别有关, 重金属离子在通过细胞壁这一屏障时, 一部分离子会形成无机沉淀在细胞壁上沉积或嵌入; 同时, 细胞壁上存在的活性基团也可结合重金属, 从而在一定程度上保护了细胞; 此外, 细胞的胞外分泌物和酶等因素也都会影响重金属对细胞的作用。不同门类单细胞藻细胞结构和生理机能各不相同, 从而造成了其对重金属的耐受性也各不相同^[29]。

另外有研究表明, 营养液浓度的高低也会直接影响海洋浮游植物对重金属的耐受力。将张首临等^[22]的研究结果和相应的实验条件与本研究进行比较, 可知, 在 f/2 营养液的培养条件下, 重金属对海洋单细胞藻的 96 h EC₅₀ 值明显高于自然海水条件下的值。Wang 和 Dei^[30] 的研究也表明, 当培养液中 N 的含量增加, 海洋浮游植物对某些重金属的耐受性增强, 这可能是因为营养盐与重金属离子之间存在拮抗作用所致^[31]。将本研究的金属和营养盐浓度与实际海区做比较, 由于实际海域营养盐浓

度远远低于 f/2 营养液, 因此可以推测, 自然条件下重金属对单细胞藻会产生更大的毒性。同时, 由于较低浓度的重金属可以促进浮游植物的生长, 笔者推测, 低浓度重金属有可能是刺激赤潮形成的因素之一。

通讯作者简介: 杨茹君(1970—), 女, 海洋化学博士, 讲师, 主要研究方向为生态毒理学和污染生物化学, 发表学术论文 20 余篇。

参考文献:

- [1] 国家海洋局. 中国海洋环境质量公报(2009 年)[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010
 - [2] 国家环境保护总局. 海水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997
 - [3] 国家环境保护部. 中国近岸海域环境质量公报(2008 年)[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009
 - [4] 战秀文. 中国近海的环境质量评价[J]. 海洋信息, 2000(1): 18-21
 - [5] 毛天宇, 戴明新, 彭士涛, 等. 近 10 年渤海湾重金属 (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg) 污染时空变化趋势分析[J]. 天津大学学报, 2009, 42(9): 817-825
- Mao T Y, Dai M X, Peng S T, et al. Temporal-spatial variation trend analysis of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg) in Bohai Bay in 10 years [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(9): 817-825 (in Chinese)
- [6] Stumm W, Morgan J J. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996, 1-34

- [7] 周名江, 颜天. 中国海洋生态毒理学的研究进展[J]. 环境科学研究, 1997, 10(3): 1 - 6
Zhou M J, Yan T. Progress in marine eco toxicology study in China [J]. Research of Environmental Sciences, 1997, 10(3): 1 - 6 (in Chinese)
- [8] 姜慧彬, 林碧琴. 重金属对藻类的毒性作用研究进展[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2000, 27(3): 281 - 287
Jiang H B, Lin B Q. Toxicological effects of heavy metals on algae [J]. Journal of Liaoning University: Natural Science Edition, 2000, 27(3): 281 - 287 (in Chinese)
- [9] Ismail M, Phang S M, Tong S L, et al. A modified toxicity testing method using tropical marine microalgae [J]. Environmental Monitoring Assessment, 2002, 75(2): 145 - 154
- [10] 康元德. 渤海浮游植物的数量分布和季节变化[J]. 海洋水产研究, 1991(12): 31 - 44
Kang Y D. Distribution and seasonal variation of phytoplankton in the Bohai Sea [J]. Marine Fisheries Research, 1991(12): 31 - 44 (in Chinese)
- [11] 孙军, 刘东艳, 杨世民, 等. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群落结构的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 461 - 471
Sun J, Liu D Y, Yang S M, et al. The preliminary study on phytoplankton community structure in the central Bohai Sea and the Bohai Strait and its adjacent area [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2002, 33(5): 461 - 471 (in Chinese)
- [12] 齐雨藻, 邹景忠, 梁松. 中国沿海赤潮[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 51 - 59
- [13] 刘东艳, 孙军, 唐优才, 等. 胶州湾北部水域浮游植物研究 I —— 种类组成和数量变化[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(1): 67 - 72
Liu D Y, Sun J, Tang Y C, et al. Study on the phytoplankton in the Jiaozhou Bay I : Species composition and abundance [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(1): 67 - 72 (in Chinese)
- [14] Vanewijk P H, Hoekstra J A. Calculation of the EC₅₀ and its confidence interval when subtoxic stimulus is present [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1993, 25(1): 25 - 32
- [15] Calabrese E J, Baldwin L A. A quantitatively based methodology for the evaluation of chemical hormesis [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 1997, 3(4): 545 - 554
- [16] Calabrese E J, Baldwin L A. Toxicology rethinks its central belief [J]. Nature, 2003, 421: 691 - 692
- [17] Ristow M, Zarse K. How increased oxidative stress promotes longevity and metabolic health: The concept of mitochondrial hormesis (mitohormesis) [J]. Experimental Gerontology, 2010, 45(6): 410 - 418
- [18] Lefcort H, Freedman Z, House S, et al. Hormetic effects of heavy metals in aquatic snails: Is a little bit of pollution good? [J]. EcoHealth, 2008, 5(1): 10 - 17
- [19] Braek G S, Malnes D, Jensen A. Heavy metal tolerance of marine phytoplankton. IV. Combined effect of zinc and cadmium on growth and uptake in some marine diatoms [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1980, 42(1): 39 - 54
- [20] Mallick N, Mohn F H. Use of chlorophyll fluorescence in metal stress research: A case study with the green micro alga *Scenedesmus* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2003, 55(1): 64 - 69
- [21] 朱卓洪, 李飞永, 陈金斯. 珠江河口铜、铅、锌、铬和镉对单细胞藻类生长的影响[J]. 热带海洋学报, 1992, 11(2): 31 - 37
Zhu Z H, Li F Y, Chen J S. Influence of toxicity of Cu, Zn, Cr and Cd to algae in Pearl River estuary [J]. Journal of Tropical Oceanography, 1992, 11(2): 31 - 37 (in Chinese)
- [22] 张首临, 刘明星, 李国基, 等. 4种重金属离子对海洋三角褐指藻生长影响的研究[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(6): 582 - 585
Zhang S L, Liu M X, Li G J, et al. Influence of toxicity of heavy metal ions to growth of *Phaeodactylum tricorutum* [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1995, 26(6): 582 - 585 (in Chinese)
- [23] 苏秀榕, 李太武, Chien P K. Cu²⁺、Zn²⁺ 和 Cd²⁺ 对 5 种单细胞藻类生长的影响[J]. 水产科学, 1999, 18(1): 3 - 5
Su S R, Li T W, Chien P K. Studies on growth rate of five species unicellular algae affected by Cu²⁺, Zn²⁺, Cd²⁺ [J]. Fisheries Science, 1999, 18(1): 3 - 5 (in Chinese)
- [24] 许章程. 四种重金属对海洋钙质角毛藻的毒性[J]. 台湾海峡, 1999, 18(3): 301 - 308
Xu Z C. Toxic effect of four heavy metals on unicellular marine algae [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1999, 18(3): 301 - 308 (in Chinese)
- [25] 阎海, 王杏君, 林毅雄, 等. 铜、锌和锰抑制蛋白核小球藻生长的毒性效应[J]. 环境科学, 2001, 22(1): 23 - 26
Yan H, Wang X J, Lin Y X, et al. Toxic effects of Cu, Zn and Mn on the inhibition of *Chlorella pyrenoidosa*'s growth [J]. Environmental Science, 2001, 22(1): 23 - 26 (in Chinese)
- [26] 杨世勇, 王方, 谢建春. 重金属对植物的毒害及植物的耐受性机制[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2004, 27(1): 71 - 74
Yang S Y, Wang F, Xie J C. Plant toxicity of heavy metals and the tolerant mechanisms of plants [J]. Journal of Anhui Normal University: Natural Science, 2004, 27(1): 71 - 74 (in Chinese)

- [27] 何学佳, 彭兴跃. 应用流式细胞仪研究 Pb 对海洋微藻生长的影响 [J]. 海洋环境科学, 2003, 22(1): 1 - 5
He X J, Peng X Y. The influence of lead on marine microalgae by a flow cytometry [J]. Marine Environmental Science, 2003, 22(1): 1 - 5 (in Chinese)
- [28] 周银环, 刘东超. 4 种微量元素对绿色巴夫藻生长、叶绿素 a 及大小的影响 [J]. 湛江海洋大学学报, 2003, 23(1): 22 - 28
Zhou Y H, Liu D C. Effect of four kinds of trace metal element on growth, chlorophyll a and size of Pavlova viridis [J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2003, 23(1): 22 - 28 (in Chinese)
- [29] 陈海柳, 潘纲, 闫海, 等. 六价铬抑制淡水蓝绿藻生长的毒性效应 [J]. 环境科学, 2003, 24(2): 13 - 18
Chen H L, Pan G, Yan H, et al. Toxic effects of hexavalent chromium on the growth of blue green microalgae [J]. Environmental Science, 2003, 24(2): 13 - 18 (in Chinese)
- [30] Wang W X, Dei R C H. Effects of major nutrient additions on metal uptake in phytoplankton [J]. Environmental Pollution, 2001, 111(2): 233 - 240
- [31] Olguin H F, Salibián A, Puig A. Comparative sensitivity of Scenedesmus acutus and Chlorella pyrenoidosa as sentinel organisms for aquatic ecotoxicity assessment: Studies on a highly polluted urban river [J]. Environmental Toxicology, 2000, 15(1): 14 - 22

更正说明

2010 年第 5 卷第 6 期第 857 861 页,“小麦根对镉离子的吸收机制及镉的亚细胞分布”一文做出如下更正:

第 859 页图 1“差速离心法分离小麦根的亚细胞组分”中:“10 000 g, 60 min”应为“100 000 g, 60 min”。