氮、磷对镍在食物链上传递的影响

王明华,王桂忠*,李少菁

(厦门大学海洋系,近海海洋环境科学国家重点实验室,福建厦门 361005)

摘要 采用放射性同位素示踪法,研究氮或磷添加对镍在东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense* Lu)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)胞内累积的影响;并将其分别投喂中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)后,探讨镍在桡足类体内的吸收和生理周转。结果表明,经过 24 h 暴露后,氮或磷显著影响这两种藻类对镍的吸收,且高浓度氮或磷均能促进镍在这两种藻类细胞内的累积,因而促进镍在中华哲水蚤体内的吸收;而镍在中华哲水蚤体内的生理周转率却不受氮或磷浓度的影响,似乎更受动物个体的生理状态影响;中华哲水蚤对镍的吸收率与藻类细胞内镍含量呈极显著相关($p < 0.001$),证明了"桡足类只吸收饵料细胞内的水相金属库"的假说。由此可见,近海富营养化可促进浮游植物对镍的吸收,进而影响该金属在浮游生物食物链上的传递。

关键词 镍;营养盐;食物链;吸收率;生理周转率

文章编号 1000-0933(2007)07-2889-07 **中图分类号** Q143 **文献标识码** A

Influence of N, P additions on the transfer of nickel along the food-chain

WANG Ming-Hua, WANG Gui-Zhong*, LI Shao-Jing

Oceanographic Department, State Key Lab of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2889 ~ 2895.**

Abstract: We examined the influence of macronutrient (nitrate or phosphate) additions on the bioaccumulation of Ni in two species of phytoplankton (*Prorocentrum donghaiense* Lu and *Skeletonema costatum*), and its subsequent assimilation and physiological turnover in marine copepod (*Calanus sinicus*) after ingestion, using a radioactive-tracer method. The results showed that N or P addition significantly influenced intracellular Ni accumulation in the algal cells after 24 h of exposure, with higher ambient N or P enhancing the biological uptake of Ni in the algal cells. Ni assimilation efficiency by the copepod generally increased with an increase of nutrient concentration in two algal species, due to higher N or P concentration facilitating the uptake of Ni by algae. However, ambient nutritional conditions had insignificant effect on the physiological turnover rate of Ni by the copepod, which seemed to be affected by the physiological conditions of animal individuals. An extremely significant positive-correlation was found between Ni assimilation efficiency by the copepod and % intracellular Ni in algal diets ($p < 0.001$), testifying the hypothesis "copepod only assimilates metal in the cytoplasmic pool". Therefore, eutrophication may affect the transfer of Ni along the food-chain by facilitating the biological uptake of it by phytoplankton.

Key Words: Ni; macronutrient; food-chain; assimilation efficiency; physiological turnover rate

---

基金项目 国家自然科学基金委员会与香港研究资助局联合科研资助基金(40131160735);国家自然科学基金资助项目(40576065)

收稿日期 2006-09-18;**修订日期** 2007-05-24

作者简介 王明华(981 ~),男,福建人,博士生,主要从事浮游动物生态学研究. E-mail: wmhyao@hotmail.com

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: gzwang@xmu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by Sustentation Fund Sponsored by National Natural Science Foundation Committee and Stake Bureau of Hongkong (No. 40131160735); National Natural Science Foundation of China (No. 40576065)

Received date: 2006-09-18; **Accepted date**: 2007-05-24

Biography: WANG Ming-Hua, Ph. D. candidate, mainly engaged in zooplankton ecology. E-mail: wmhyao@hotmail.com

富营养化已成为一个严峻的环境问题，可显著地影响浮游植物的种群结构和初级生产力，进而导致生态系统的结构和功能的相应改变[1~3]，也可显著地影响氮、磷、硅和痕量金属在海区中的循环。迄今，许多工作涉及到海区中痕量金属与浮游植物相互作用的研究；结果表明，金属在浮游植物内的累积与金属的存在形态密切相关[4~6]。此外，开展不同营养盐水平下重金属在海区浮游植物群中的累积及在后续食物链上传递等方面的研究发现，营养盐的添加可促进浮游植物对金属的吸收，进而提高金属在桡足类体内的累积，即促进镍在浮游生物食物链上的传递[7~10]。

镍是水体中广泛存在的一种生物活性金属元素，是脲酶的金属辅基，该酶存在于细菌、真菌、浮游植物和无脊椎动物的某些种类等，催化尿素形成氨和氨基甲酸盐[1]。尽管镍在海洋生物地球化学循环中的功能和去向等方面研究在理论和实践上具有重要的意义，但相关研究却较少，有关镍在浮游植物种群内的累积及在食物链上传递等方面的研究特别缺乏。

本实验采用放射性同位素示踪法，研究氮或磷的添加对镍在两种藻类胞内累积的影响，并将其分别投喂桡足类后，研究镍在桡足类体内的吸收和生理周转，以探讨近海富营养化是否影响镍在浮游植物种群中的累积及在食物链上的传递。

1 材料和方法

1.1 浮游植物和桡足类

所用藻种：东海原甲藻 *Prorocentrum donghaiense* Lu （由暨南大学吕颂辉惠赠）和中肋骨条藻 *Skeletonema costatum* （由厦门大学高亚辉惠赠），保存在 *f*/2 培养基中，光照强度为 2000 lx，光暗周期为 L /D = 14 /10，温度 （20 ± 1）℃。中华哲水蚤 *Calanus sinicus* 用 500 μm 浮游网在厦门港鼓浪屿附近水平拖网采集；短期摄食实验开始之前，中华哲水蚤以东海原甲藻或中肋骨条藻投喂 1 d，然后饥饿 1 ~ 2 h。实验海水取自厦门港外海区的陈化海水，其含硝酸盐和磷酸盐浓度分别小于 4 μmol/L 和 0.1 μmol/L。海水经 0.2 μm 醋酸纤维膜过滤，消毒后用于实验。

1.2 不同氮或磷浓度下浮游植物对镍的吸收实验

实验采用半连续培养的方法研究浮游植物对镍的吸收是否受氮或磷浓度的影响。氮添加实验中以硝酸钠为氮源，其浓度分别设置为 20、80 μmol/L 和 320 μmol/L，磷浓度均为 5 μmol/L （以磷酸氢二钠为磷源）；磷添加实验中以磷酸氢二钠为磷源，其浓度分别设置为 1 μmol/L 和 10 μmol/L，氮浓度均为 20 μmol/L （以硝酸钠为氮源）；其它营养盐均照 *f*/2 配方添加。东海原甲藻和中肋骨条藻的驯化时间分别为 4 d 和 3 d，每天均监测硝酸盐和磷酸盐的浓度[2]，追加营养盐使其达到原来所设浓度。

驯化结束后添加 $^{63}NiCl_2$，用 NaOH 调节 pH 为 8.0，在温度 （20 ℃）和光强 （2000 lx，L∶D = 14∶10）下进行为期 1 d 的镍吸收实验。培养期间不定时 （取样时间见图 1 ~ 2 所示）取 10 ml 藻液过滤到 1 μm 核孔膜上，然后以 20 ml 的 EDTA （1 mmol/L，pH 7.0）润洗 3 次，以洗脱藻细胞壁上黏附的镍[3]。取下膜，加入闪烁液，待测放射活度 （为藻类对镍的胞内吸收量）。实验结束时另取 10 mL 藻液过滤到 1 μm 核孔膜上，并用 20 ml 过滤海水润洗 3 次，取下膜加闪烁液，待测放射活度 （为藻类对镍的总吸收量，包括细胞壁和细胞内的活度）。余下藻液过滤到 1 μm 核孔膜上，以 100 ml 的 EDTA （1 mmol/L，pH 7.0）润洗 3 次，然后投喂桡足类 （见 1.3 所述）。另外，各吸收实验均设 1 个空白样 （即不添加 $^{63}NiCL_2$，但其它营养条件均同），相同时间采样以计藻细胞数。

吸收实验结束后，以藻细胞内金属含量 （为胞内吸收量与总吸收量的比值）来衡量两种藻类对镍的累积能力。采用生物浓缩因子 [Dry Weight Concentration Factor，简为 DCF，相当于每 kg 干重藻细胞的放射活度与每升培养液的放射活度之间的比值[4,15]] 来描述吸收过程中浮游植物对镍的吸收程度。

1.3 镍在桡足类体内的吸收和生理周转

经过不同氮或磷浓度的驯化培养以及对放射性镍的吸收后 （如 1.2 所述），将收集的藻类投喂中华哲水蚤；摄食实验在 300 ml 过滤海水中进行，温度为 22℃，时间为 20 min （实验显示，经过摄食和饥饿处理后，

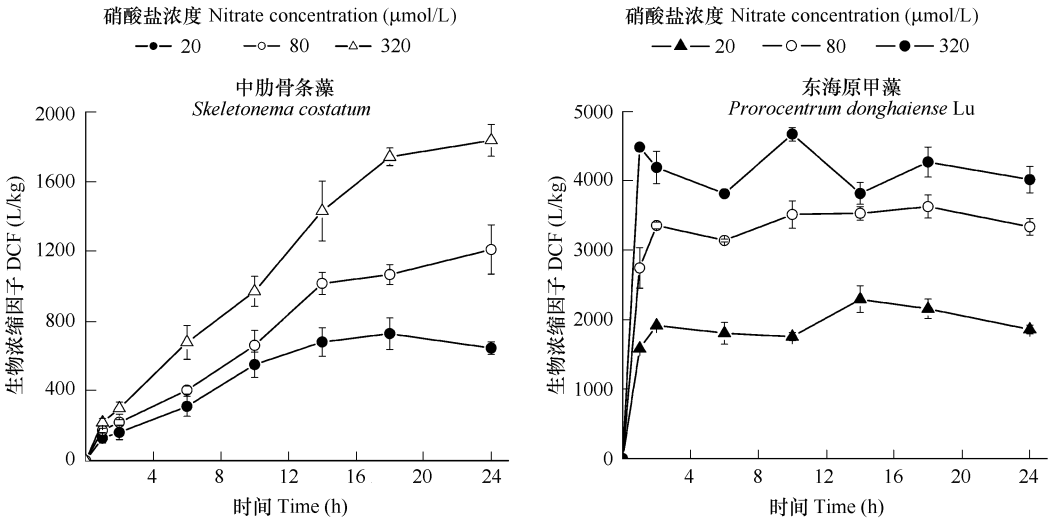


图 1　不同硝酸盐浓度下 ,藻类对镍的胞内吸收随着时间的变化

Fig. 1　Intracellular accumulation of Ni by the algae maintained at different nitrate concentrations

数据为平均值 ± 标准差 ($n = 3$**)**　Data are means ± SD ($n = 3$)

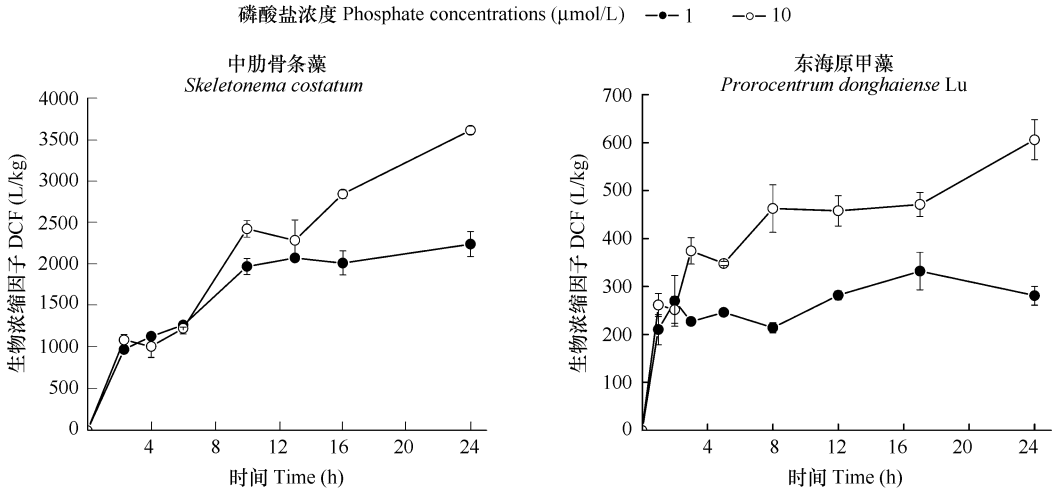


图 2　不同磷酸盐浓度下 ,藻类对镍的胞内吸收随着时间的变化

Fig. 2　Intracellular accumulation of Ni by the algae maintained at different phosphate concentrations

数据为平均值 ± 标准差 ($n = 3$**)**　Data are means ± SD ($n = 3$)

再摄食时中华哲水蚤在该时间内几乎不产生粪块)。摄食实验中,东海原甲藻和中肋骨条藻的细胞密度分别为 6×10^4 cells/ml **和** 4×10^5 cells/ml**,中华哲水蚤的密度为** 0.4 ind/ml**。结束后,立即吸出一部分桡足类 (**20 ind**),用** 50 ml **过滤海水润洗后,置于闪烁瓶,待测体内放射活度 (为在短期摄食过程中桡足类所摄取的总金属量),其余桡足类用** 300 μm **网收集,转移到无放射镍的藻液中进行肠道排空实验;时间为** 25 ~ 34 h**,期间不定期 (取样时间见图** 3 ~ **图** 5 **所示)吸取桡足类 (**20 ind**) 以测放射活度,同时更换藻液。桡足类对镍吸收率 (**$A E$**) 和生理周转率 (**k_e**) 的测定参照** Wang **等** [7] **和** Wang & Fisher [6] **描述的方法。**

藻类或桡足类置于 10 ml **闪烁液 (**cocktail for aqueous and non-aqueous samples**,购于** Sigma **公司)中,然后通过液体闪烁仪 (型号为** Packard Tricarb 4640**)测定其放射活度,计数时间为** 1 ~ 3 min**,调节仪器计数误差** < 0.05**。**

数据统计分析采用 SPSS 11.0 **软件,作图采用** Origin 7.0 **软件。**

2 结果与分析

2.1 不同氮或磷浓度下浮游植物对镍的吸收

不同氮或磷浓度下中肋骨条藻和东海原甲藻对镍吸收的影响见图 1，图 2。从图中可以看出，暴露 24 h 后，这两种藻类对镍的 DCF 随着氮或磷浓度的升高而显著地增加（$p < 0.05$）；当培养液中硝酸钠浓度从 20 μmol/L 升高至 320 μmol/L，磷酸氢二钠浓度从 1 μmol/L 升高至 10 μmol/L 时，中肋骨条藻和东海原甲藻对镍的 DCF 分别增加 2.8 倍和 2.2 倍（图 1），1.6 倍和 2.2 倍（图 2）。从表 1 可得出，吸收实验结束后，两种藻类对镍的胞内累积量随着硝酸钠或磷酸氢二钠浓度的升高而增加；当培养液中硝酸钠浓度从 20 μmol/L 升高至 320 μmol/L 时，中肋骨条藻对镍的胞内累积量从 27.5 % 上升至 66.9 %（$p < 0.01$），东海原甲藻则从 13.2 % 上升至 70.1 %（$p < 0.01$）。

中肋骨条藻与东海原甲藻对镍的吸收采用了不同的模式（图 1 ~ 图 2），东海原甲藻对镍的吸收很快达到平衡（1 ~ 3 h 之内），之后的 DCF 保持相对稳定（图 1 ~ 图 2）；而中肋骨条藻对镍的吸收在 12 h 内呈直线性增加，之后暴露过程中其对镍的 DCF 的影响随着时间推移呈现出了不同变化：80 μmol/L 和 320 μmol/L 两组继续平缓增加，而 20 μmol/L 组则呈现下降趋势（图 1）；1 μmol/L 和 10 μmol/L 两组呈上升趋势（图 2）。

2.2 镍在中华哲水蚤体内的吸收和生理周转

从表 1 中可知，不同营养盐浓度由于显著地影响藻类对镍的胞内累积量（$p < 0.05$），因而显著地影响中华哲水蚤对镍的吸收率（$p < 0.05$），且其吸收率随着培养液中营养盐浓度的升高而增加（图 3 ~ 图 5 和表 1）；当中肋骨条藻培养液中硝酸钠浓度从 20 μmol/L 升高至 320 μmol/L 时，中华哲水蚤对镍的吸收率从 16.6 % 上升到 41.2 %（$p < 0.01$）；同样地，当东海原甲藻培养液中硝酸钠从 20 μmol/L 升高至 320 μmol/L时，中华哲水蚤对镍的吸收率也随着显著地增加（$p < 0.01$）；中华哲水蚤对镍的吸收率与中肋骨条藻培养液中磷酸氢二钠浓度呈显著相关（$p < 0.05$）。中华哲水蚤对镍的吸收率与镍在两种藻类细胞内的镍含量呈极显著相关，且随着胞内镍含量的增加而增加（图 6，$p < 0.001$）；中肋骨条藻对镍的胞内累积量从 27.5 % 增加到 66.9 % 时，中华哲水蚤对镍的吸收率相应地从 16.6 % 提高到 41.2 %（表 1）。

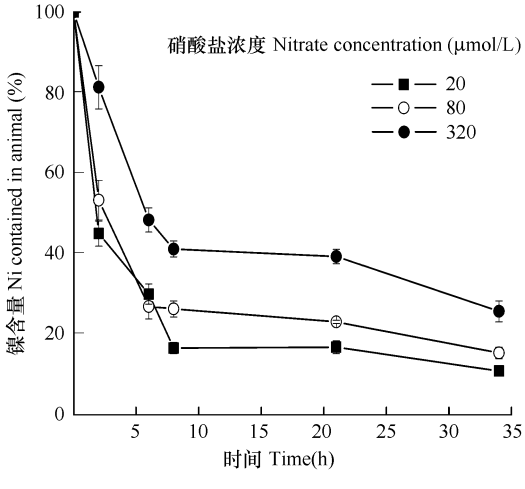


图 3 摄食不同硝酸盐浓度下累积镍的中肋骨条藻后，中华哲水蚤对镍的肠道排空

Fig. 3 The percentage of Ni retained in *Calanus sinicus* following a pulse feeding on *Skeletonema costatum* maintained at different nitrate concentrations

数据为平均值 ± 半极值（$n = 2$）Data are means ± semi-range（$n = 2$）

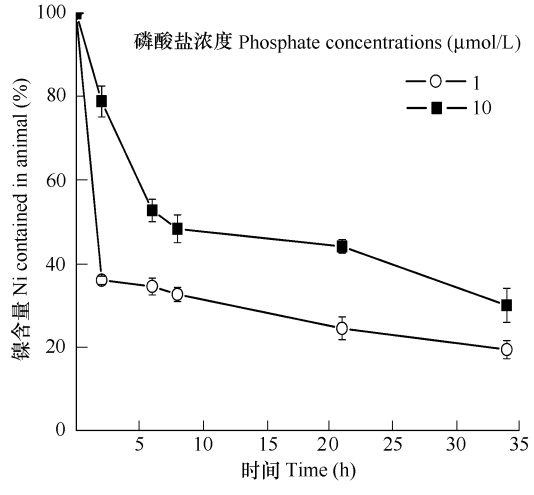


图 4 摄食不同磷酸盐浓度下累积镍的中肋骨条藻后，中华哲水蚤对镍的肠道排空

Fig. 4 The percentage of Ni retained in *Calanus sincus* following a pulse feeding on *Skeletonema costatum* maintained at different phosphate concentrations

数据为平均值 ± 半极值（$n = 2$）Data are means ± semi-range（$n = 2$）

中华哲水蚤摄食在不同氮或磷浓度下累积镍的藻类后，镍在桡足类体内进行的肠道排空如图 3 ~ 图 5 所示，在 8 ~ 9 h 内桡足类体内的镍含量急剧下降，之后则非常缓慢地降低。从表 1 可看出，当镍被中华哲水蚤吸收后，其生理周转率与两种藻类培养液中硝酸钠或磷酸氢二钠浓度没有显著相关性（$P > 0.05$），虽然不同营养盐浓度显著地影响藻类对镍的累积。当中肋骨条藻和东海原甲藻培养液中硝酸钠从 20 μmol/L 增加到 320 μmol/L 时，中华哲水蚤对镍的生理周转率分别在 0.390 ~ 0.495 d^{-1}，0.490 ~ 0.678 d^{-1} 之间波动（$P > 0.05$）；同样地，当中肋骨条藻培养液中磷酸氢二钠从 1 μmol/L 增加到 10 μmol/L 时，中华哲水蚤对镍的生理周转率也只在 0.442 ~ 0.478 d^{-1} 之间波动（$P > 0.05$）。

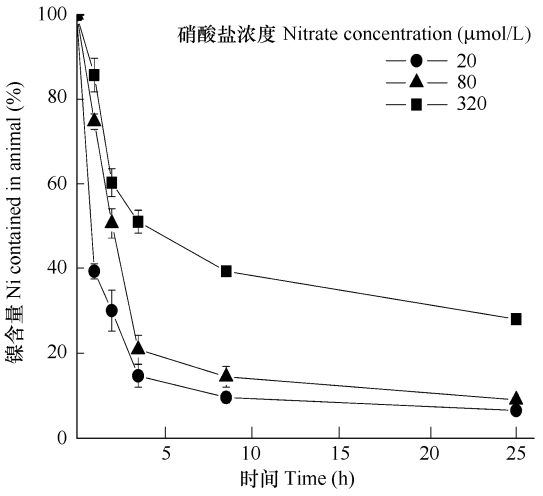


图 5　摄食不同硝酸盐浓度下累积镍的东海原甲藻后，中华哲水蚤对镍的肠道排空

Fig. 5　The percentage of Ni retained in *Calanus sinicus* following a pulse feeding on *Prorocentrum donghaiense* maintained under different nitrate concentrations

数据为平均值 ± 半极值（$n = 2$）　Data are means ± semi-range ($n = 2$)

3　讨论

3.1　不同氮，磷浓度对藻类吸收镍的影响

本研究表明，在添加镍的 24 h 暴露实验后，氮或磷的浓度显著地影响两种藻类对镍的吸收，而且高浓度的氮或磷促进浮游植物对镍的吸收（图 1 ~ 图 2）。这与 Wang 等[9,10,14,15]研究得出高浓度的硝酸盐会显著促进浮游植物对 Fe，Cd 和 Zn 的吸收，而不同浓度的磷酸盐则影响不显著的结果不一致；也有研究表明，磷酸盐的添加会显著提高藻类对 Cd，Zn 和 Cr 的吸收，但硝酸盐的添加不影响或反而抑制藻类对金属的吸收[7,18]，这可能与金属和藻类的种类有关。由此可见，氮和磷对浮游植物吸收金属的影响机制很复杂，有待于深入研究。本实验得出“高浓度的氮或磷显著地促进两种藻类对镍的吸收”，这可能是由于氮和磷均是藻类生长的必需元素，又是合成生物分子特别是细胞膜上转运蛋白的重要元素，高浓度的营养盐能促进藻细胞膜上转运蛋白的合成，进而提高藻类对镍吸收的缘故。国外学者也报道，通过碳，氮，硫或磷的饥饿处理后的固氮蓝细菌 *Nostoc calcicola* 细胞中，铜的吸收显著下降，而且其细胞内蛋白质和光合色素含量也显著降低[9]。Rijstenbil 等[10]也发现在为期 14 d 的不连续培养中，氮添加促进了还原型谷胱甘肽的合成，同时提高了硅藻细胞内 Cu，Zn 和 Mn 的含量。

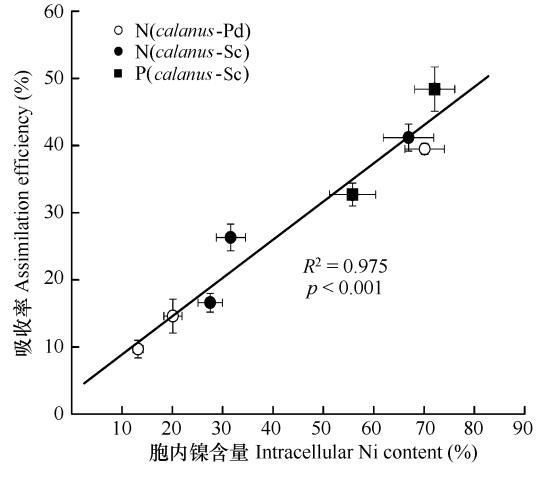


图 6　不同氮或磷水平下藻类胞内镍含量与中华哲水蚤对镍吸收率之间的相关性

Fig. 6　Relationship between the calculated Ni assimilation efficiency in *Calanus sinicus* and % intracellular Ni in algal cells

Pd 为东海原甲藻，Sc 为中肋骨条藻 数据为平均值 ± 标准差或半极值（$n = 2 \sim 3$）　Pd and Sc stand for *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* respectively. Data are means ± semi-range or SD ($n = 2 - 3$)

“生物配体模型”假说也可解释不同氮或磷浓度对藻类吸收镍的影响机制。研究表明，绝大多数自由态或溶解态金属通过膜通道（阳离子转运蛋白）进入海洋生物体内[21,22]；然而膜上同样地存在供无机阴离子（如 PO_4^{3-} 和 SO_4^{2-}）和有机阴离子（如氨基酸）转运的阴离子转运系统，继而有些金属也会偶尔和一些阴离子结合成金属螯合物而通过对应的阴离子通道被跨膜运

输[3]。因此，高浓度氮或磷可促进浮游植物对它们的吸收，进而提高了镍的跨膜通量。然而，有关“营养盐对浮游植物吸收金属的影响机制”有待于更深入系统地研究。

表 1 摄食不同营养盐（氮或磷）条件下累积镍的藻类（中肋骨条藻和东海原甲藻）后，镍在中华哲水蚤体内的吸收率和生理周转率

Table 1 The calculated assimilation efficiency (*AE*) and physiological turn-over rate of Ni in *Calanus sinicus* feeding on Ni-bound algae (*Skeletonema costatum* and *Prorocentrum donghaiense*) maintained under different nutrient treatments (N or P)

桡足类-浮游植物 Copepod-phytoplankton	营养处理 Nutrient treatment		胞内镍含量 IntracellularNi content (%)	吸收率 Assimilation efficiency (%)	周转率 Turn-over rate (d^{-1})
中华哲水蚤-中肋骨条藻	20 μmol/L	硝酸盐 Nitrate	27.5 ± 2.4	16.6 ± 1.4	0.390 ± 0.029
C. sinicus-S. costatum	80 μmol/L	硝酸盐 Nitrate	31.6 ± 2.9	26.3 ± 2.0*	0.495 ± 0.015
	320 μmol/L	硝酸盐 Nitrate	66.9 ± 5.0***	41.2 ± 2.0***	0.436 ± 0.049
	1 μmol/L	磷酸盐 Phosphate	55.8 ± 4.6	32.7 ± 1.7	0.478 ± 0.058
	10μmol/L	磷酸盐 Phosphate	72.1 ± 4.0	48.4 ± 3.3*	0.442 ± 0.064
中华哲水蚤-东海原甲藻	20 μmol/L	硝酸盐 Nitrate	13.2 ± 1.0	9.7 ± 1.3	0.556 ± 0.067
C. sinicus-P. donghaiense	80 μmol/L	硝酸盐 Nitrate	20.1 ± 1.8	14.6 ± 2.5	0.678 ± 0.164
	320 μmol/L	硝酸盐 Nitrate	70.1 ± 3.9***	39.5 ± 0.8***	0.490 ± 0.002

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

藻类从外界获取金属的过程一般分为：生物吸附和吸收内在化。前者主要包括自由态或溶解态金属快速地，被动地吸附在细胞表面进而很疏松地和细胞壁上生物配体相互螯合，该过程是可逆的；而后者则指那些疏松“挂在”壁上金属进一步跨膜转运到细胞内（即细胞内在化）以参与代谢等过程，因此该过程缓慢且不可逆。因此，细胞壁或膜的结构形态和物质组成等在金属的跨膜运输过程中起重要作用。本实验结果“中肋骨条藻与东海原甲藻对镍的吸收采用了不同的模式”也证实了细胞壁上结构形态和物质组成在藻类吸收金属过程中起重要作用；东海原甲藻的细胞壁上可能拥有更多的多糖和负离子基团等易与金属离子结合的物质，而中肋骨条藻的细胞壁主要是由硅质组成，与金属离子的结合能力较弱，使得东海原甲藻在吸收镍的过程中更快地达到平衡（图 1 ~ 图 2）。

3.2 不同氮，磷浓度对镍在食物链上传递的影响

当含有镍的藻类被中华哲水蚤摄食后，由于高浓度氮或磷显著促进藻类对镍的吸收，进而显著提高中华哲水蚤对镍的吸收率，因而使得桡足类对镍的吸收率与藻类驯化培养时氮或磷浓度显著相关，这与高浓度硝酸盐提高了藻类胞浆内的金属含量，进而使得桡足类对其的吸收率增加的研究结果一致[9,10]。从图 6 中发现桡足类对镍的吸收率与分布在藻类细胞内的镍含量呈显著正相关（$p < 0.001$），这与 Hutchins 等[4]的研究结果基本一致，其研究表明，桡足类对金属的吸收率与其分布在饵料细胞胞浆内的含量呈 1:1 正相关性，而与分布在细胞内的金属含量呈 1:3 正相关性，可推测桡足类只消化吸收胞内金属库的 1 / 3，而这部分刚好相当胞浆内的金属库。这是由于桡足类简单的肠道结构和消化机制造成的，只有细胞内那些呈“水相”的金属才能被消化吸收，而细胞壁或膜上那些金属通常以粪块形式被桡足类排出体外[6,24,25]。“桡足类只消化吸收饵料细胞内‘水相’金属库”的学说[6,24,25]正好可解释“高浓度氮或磷可提高中华哲水蚤对镍吸收”的现象。尽管本实验未测定在短期摄食实验中桡足类对两种藻类的摄食率，然根据 Wang 等[9,10]研究不同饵料浓度或不同摄食率与桡足类对金属的吸收率不相关的结果，可推测本实验中桡足类的不同摄食率对镍在其体内的吸收影响不显著。

从图 3 ~ 图 5 可以看出摄食后的镍在中华哲水蚤的肠道排空符合经典的“两相”模式[7~10,16]：在 8 ~ 9 h 内中华哲水蚤体内金属含量急剧下降即为第一相，然后非常缓慢地减少即为第二相。第一相中，分布在细胞壁或膜上的金属以粪块形式快速地排出体外，而只有胞浆金属被消化吸收；而当进入第二相时候，吸收后的金属在动物体内开始进行生理周转过程。根据该模型，第一相和第二相的交接点正是金属在桡足类体内消化吸收的完成时刻，因此本实验可以得出中华哲水蚤对镍的吸收在 9 h 内完成，这与 Wang 等[8,9]研究表明桡足类对金属的消化吸收一般是在 4 ~ 15 h 内完成的结果基本一致。尽管外界营养盐由于显著影响藻类

对镍的吸收而影响金属在桡足类体内的吸收,然而金属在中华哲水蚤内的生理周转率不受外界营养水平影响(表 1);这与 Wang 等[9,10]的研究结果基本一致。上述现象可解释为:当金属被吸收后,其在桡足类体内的生理周转似乎与外界环境(如营养盐等)不相关,而只受到动物个体本身的生理状态等因素影响。研究表明,相对刺尾纺锤水蚤来说,摄食不同种类或不同营养处理的饵料后,锌在中华哲水蚤体内的周转率较小[10]。

本研究表明,氮或磷浓度显著影响东海原甲藻和中肋骨条藻对镍的吸收,且高浓度氮或磷促进其对镍的吸收,因而提高了镍在中华哲水蚤体内的吸收;然而不同氮或磷浓度对镍在桡足类体内的生理周转影响不显著($p > 0.05$)。由此可见,近海富营养化可促进浮游植物对镍的吸收,进而增加该金属在浮游生物食物链上的传递。

References:

[1] Sanders J G, Cibik S J, D'Elia C F, *et al*. Nutrient enrichment studies in a coastal plain estuary: Changes in phytoplankton species composition. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, 1987, 44: 83-90.

[2] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenko J, *et al*. Human domination of Earth's ecosystems. Science, 1997, 277: 233-239.

[3] Smith V H, Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs of freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. Environmental Pollution, 1999, 100: 179-196.

[4] Morel F M M, Hudson R J M, Price N M. Limitation of productivity by trace metals in the sea. Limnology and Oceanography, 1991, 36: 1742-1755.

[5] Hudson R J M. Which aqueous species controls the rates of trace metal uptake by aquatic biota? Observations and predictions of non-equilibrium effects. The Science of the Total Environment, 1998, 219: 95-115.

[6] Sunda W G, Huntsman S A. Processes regulating cellular metal accumulation and physiological effects: phytoplankton as model systems. The Science of the Total Environment, 1998, 219: 165-181.

[7] Wang W X, Reinfelder J R, Lee B G, *et al*. Assimilation and regeneration of trace elements by marine copepods. Limnology and Oceanography, 1996, 41(): 70-81.

[8] Wang W X, Fisher N S. Accumulation of trace elements in marine copepod. Limnology Oceanography, 1998, 43(): 273-278.

[9] Wang W X, Robert C H Dei. Biological uptake and assimilation of iron by marine plankton: influences of macronutrients. Marine Chemistry, 2001, 74: 213-226.

[0] Wang W X, Robert C H Dei, Xu Y. Responses of Zn assimilation by coastal plankton to macronutrients. Limnology and Oceanography, 2001, 46(): 1524-1534.

[1] Smyj R P. A conformational analysis study of a nickel(Ⅱ) enzyme: urease. Journal of Molecular Structure, 1997, 391: 207-208.

[2] Chen C M, Chen Z W. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Xiamen: Xiamen University Press, 1991. 23-27.

[3] Campbell P M, Smith G. D. Transport and accumulation of nickel ions in the cyanobacterium *Anabaena cylindrical*. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1986, 244: 471-472.

[4] Wang W X, Robert C H Dei. Effect of major nutrients additions on metal uptake in phytoplankton. Environmenta Pollution, 2001, 111: 233-240.

[5] Wang W X, Robert C H Dei. Metal uptake in a coastal diatom influenced by major nutrients(N, P, and Si). Water Research, 2001, 35: 315-321.

[6] Wang W X, Fisher N S. Assimilation efficiency of chemical contaminants in aquatic invertebrates: a synthesis. Environmental Toxicology and Chemisty, 1999, 18(): 2038-2039.

[7] Yu R Q, Wang W X. Biokinetics of cadmium, selenium and zinc in freshwater alga *Scenedesmus obliquus* under different phosphorus and nitrogen conditions and metal transfer to *Daphnia magna*. Environmental Pollution, 2004, 129: 443-456.

[8] Lee W L, Wang W X. Metal accumulation in the green macroalga *Ulva fasciata*: effects of nitrate, ammonium and phosphate. The Science of the Total Environment, 2001, 278: 11-22.

[9] Verma S K, Singh S P, Singh R K. Nutritional control of copper uptake in the cyanobacterium *Nostoc calcicola* Bréb. BioMetals(Historical Archive), 1991, 4: 192-196.

[20] Rijstenbil J W, Dehairs F, Ehrlich R, *et al*. Effect of the nitrogen status on copper accumulation and pools of metal-peptides in the planktonic diatom *Thalassiosira pseudonana*. Aquatic Toxicology, 1998, 42: 187-209.

[21] Tessier A, Buffle J, Campbell P G C. Uptake of trace metals by aquatic organisms. In: Buffle J and De Vitre R R eds. Chemical and Biological Regulations of Aquatic Systems. Lewis Publishers: Boca Raton, 1994. 197-230.

[22] Simkiss K, Taylor M G. Transport of metals across membranes. In: Tessier A and Turner D R eds. Metal Speciation and bioavailability in Aquatic Systems. John Willey & Sons Ltd: Chichester, 1995. 1-44.

[23] Campbell P G C, Errécalde O, Fortin C, *et al*. Metal bioavailabiltiy to phytoplankton- applicability of the Biotic Ligand model. Comparative Biochemisty and Physiology Part C, 2002, 133: 189-206.

[24] Hutchins D A, Wang W X, Fisher N S. Copepod grazing and the biogeochemical fate of diatom iron. Limnology and Oceanography, 1995, 40(): 989-994.

[25] Reinfelder J R, Fisher N S. The assimilation of elements ingested by marine copepods. Science, 1991, 215: 794-796.

参考文献:

[2] 陈慈美,陈子望. 海水分析的化学和生物学方法. 厦门:厦门大学出版社, 1991. 23~27.