

富铝酸水对大西洋鲑卵和仔鱼的毒性影响

李辛夫

(中国科学院水生生物研究所, 武汉)

H. 莱维斯泰德

(卑尔根大学动物研究室, 挪威) (萨拉尔鲑鱼孵化场, 罗丝兰, 挪威)

E. 詹森

提要

测定了培养于不同水质中的大西洋鲑卵和仔鱼在发育过程中的主要离子含量, 并比较了它们的死亡率和生长率。在 $320 \mu\text{g/l}$ 无机铝溶液中, 当 pH 值为 6.0 时, 仔鱼死亡率增加。pH 为 5.5 时晚期胚胎和仔鱼对氯和钠离子的摄取明显减少, pH 为 6.5 时, 由于 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 产生沉淀, 因而未见到对卵和仔鱼的离子摄取或排出有任何影响。对钾、钙、镁的影响不明显。加入海水对铝的毒性没有缓解作用。本文还讨论了铝对离子调节的作用方式。

关键词 大西洋鲑, 卵, 仔鱼, 铝, 酸碱度, 离子调节

酸沉降是北欧北美和许多其他地区所关注的重大环境问题。除酸性水本身的危害之外, 铝从土壤里被酸雨淋溶出来, 使河湖的铝浓度升高。结果, 会使鱼类在无铝情况下本来不致于受到危害的 pH 水平上受到危害。现在研究表明, H^+/Al 结合毒性所引起的最高死亡率发生在鱼类的早期发育阶段^[8,9,15,16]。引起死亡的主要原因被认为是离子交换失常^[10,11]。因此, 深入了解鱼卵和仔鱼在不同水质中的离子调节状况是有一定意义的。

材料与方法

试验材料是大西洋鲑 (*Salmo salar L.*), 用人工授精法取得其受精卵, 并将卵分置于若干孵化网箱中, 再将孵化网箱放入具不同水质的恒流槽中。水在槽中的暂留时间为大约 15 分钟。实验期间, 水温随季节波动在 1—14°C 之间。实验分成若干系列, 用 NaOH 或海水把 pH 调节到设计值, 并以 pH 自控系统加以控制和记录。向试验系统连续加入不同量的 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 H_2SO_4 , 可获得不同程度的 H^+/Al 结合水质(表 1)。

为了分析卵和仔鱼中的主要电解质离子和茚三酮阳性物质(NPS)含量, 定期对各实验组采样。每次每组取卵(或仔鱼) 24 个, 在 2 升蒸馏水中漂洗 20 分钟(加磁力搅拌), 然后在吸水软纸上吸干。每组 24 个卵被分成 3 等分, 在电子天平上迅速称重, 分别放入盛有 4 ml 6% 三氯醋酸(TCA) 的聚四氟乙烯有盖试管中, 静置于暗处至少 48 小时, 以抽提电解质离子和 NPS。卵在被抽提之前先用蒸馏水漂洗, 是为了去除卵周液中的离子和

表 1 孵卵用的水质
Tab. 1 Incubation water quality

批数 Batch	实验系列 Series	实测 pH	电导率 Conduc-tivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Al ($\mu\text{g}/\text{l}$)	Cl (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	F ($\mu\text{g}/\text{l}$)	TOC (mg/l)
1	pH5.5, Low Al, NaOH	5.54± 0.15	57±3	84±4	10.46± 0.62	6.43± 0.92	1.25± 0.04	0.87± 0.05	26±2	3.74± 0.59
1	pH6.0, high Al, NaOH	5.90± 0.07	58±2	353±11						
1	pH6.0, high Al, SW*	5.95± 0.05		351±13						
1	pH6.5, Low Al, NaOH	6.46± 0.22	59±2	84±4						
1	pH6.5, Low Al, SW	6.46± 0.09	1483±76	84±4	410	228	9.65	25.57	55	
1	pH6.5, high Al, NaOH	6.54± 0.23	61±2	353±19						
1	pH6.5, high Al, SW	6.47± 0.12	2349± 283	350±11	630	351	14.31	42.40	72	
2	pH5.5, high Al, NaOH	5.49± 0.06	58±2	347±14						
2	pH5.5 high Al, SW	5.49± 0.12	530±21	359±18	143	80	4.05	9.77	36	

* 海水作中和剂。 Sea water as neutralizing agent.

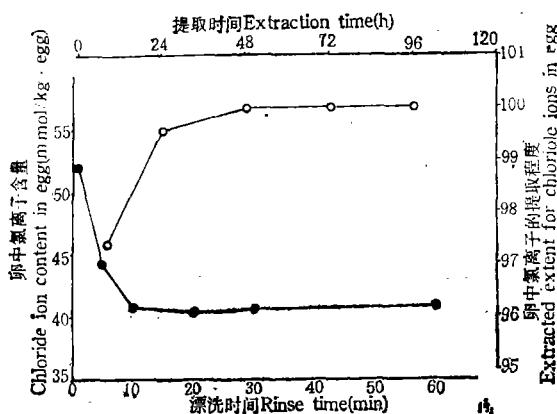


图 1 大西洋鲑卵在蒸馏水中漂洗后氯离子含量的变化及 6% TCA 对卵中氯离子的提取程度

Fig. 1 Change in chloride ion content in the egg of Atlantic salmon rinsed in distilled water, and extracted extent for chloride ions in egg with 6% TCA

—●—漂洗曲线 Rinse curve
—○—氯离子提取曲线 Extraction curve for chloride ions

NPS。在 20 分钟之内，可使漂洗水和卵周液中的离子取得平衡。由于漂洗水的相对体积大，平衡后的离子浓度极低，因此卵周液中残存的离子含量可以忽略不计。本实验所测定的鱼卵中离子与 NPS 的含量实际上都不包括卵周液中的离子含量。卵在 6% TCA 中经过 48 小时的抽提，卵内外离子浓度也足以达到平衡（图 1），因此可用下式计算卵中的离子与 NPS 浓度：

$$C_E = \frac{C_T \cdot (V_T + V_E)}{W_E}$$

式中： C_E 为卵中的离子浓度 ($\mu\text{mol}/\text{g} \cdot \text{卵}$)

C_T 为抽提液中的离子浓度 ($\mu\text{mol}/\text{ml}$)

V_T 为抽提液的体积 (ml)

V_E 为 8 颗卵的总体积 (ml), 可由卵重换算而得, 此处是假定卵的比重为 1。

W_E 为 8 颗卵的总重 (g)

至于每颗卵的平均离子含量, 可从上述结果求出。Cl⁻ 离子用氯离子滴定仪 (Radiometer, CMT-10) 测定。Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 离子用原子吸收光谱仪 (Pye-Unicam SP 192) 测定。NPS 以 Moore 和 Stein 的方法, 用分光光度计测定。每个样品各有 3 个平行。

结 果

(一) 实验水中铝的形态

试验用水在未经任何处理之前, 含铝量相当稳定, 总铝量保持在 $84 \mu\text{g}/\text{l}$, 总有机碳含量为 $3\text{--}4 \text{ mg}/\text{l}$ 。加入适量的 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, 使总铝浓度为 $350 \mu\text{g}/\text{l}$ 左右。在本试验中, 总铝可被分离成 3 个组分: ①可被滤膜 (Polycarbonate, $0.05 \mu\text{m}$) 保留的铝, 主要由沉淀性的 Al(OH)_3 颗粒所构成。②可被阳离子交换树脂柱 (Dowex-50, 20/50 目) 所保留, 主要由 Al(OH)^{2+} 、 Al(OH)^+ 、 AlF^{2+} 、 Al^{3+} 、 $\text{Al}(\text{SO}_4)^+$ 所构成。③既不为滤膜所保留, 也不为阳离子交换树脂柱所保留, 主要由有机铝, 即束缚到胶体腐植质上的铝所构成。

分析表明, 有机铝组分大约是 $32 \mu\text{g}/\text{l}$, 这一部分铝被认为是无毒的^[1]。有毒的是无机单体铝^[1, 4, 6, 13], 大约为 $320 \mu\text{g}/\text{l}$ 。

含有 $320 \mu\text{g}/\text{l}$ 无机铝的酸性水 ($\text{pH } 5.0$), 用 NaOH 或海水中和成不同的 pH 水平。在中和之后的 5—30 分钟, 再进行分析测定, 于是获得图 2 所示的图形。可以看出, 无机铝的溶解度随 pH 值的升高而下降, 最小溶解度是在 $\text{pH } 6.5\text{--}6.6$ 。曲线上方的部分相当于可被滤膜保留的组分, 它在各个 pH 水平的变化较大。有人认为这一部分铝对鱼也是有毒的, 因为它危害鳃的正常功能^[3]。

(二) 死亡率与生长率

图 3 所示的试验是在正常冬季水温条件下进行的。鱼卵在 11 月受精, 翌年 3 月底孵化。 $\text{pH } 6.5$ 组是用自控装置保持 pH 值恒定。 $\text{pH } 6.0$ 组是用酸性水 ($\text{pH } 5.0$) 与 $\text{pH } 6.5$ 的水混合而成。这两组的无机铝含量都是 $320 \mu\text{g}/\text{l}$ 。如图所示, 在胚胎阶段死亡率是很低的。孵化之后, $\text{pH } 6.5$ 的两个处理组的死亡率都稍有升高, 但彼此之间没有显著差异。这个死亡率与低铝水 ($52 \mu\text{g}/\text{l}$ 无机铝) 中的死亡率相近, 可以认为是正常的。不过, 在 $\text{pH } 6.0$ 的两个处理组中, NaOH 组的仔鱼从第 17 周起, 死亡率急剧增加, 几天之内死亡率就达 100%。海水组 (0.7%) 的仔鱼死亡较迟, 死亡率也较低, 到实验

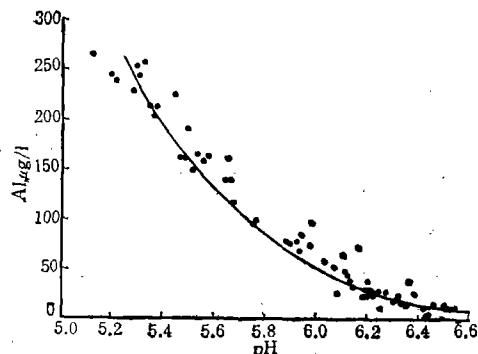


图 2 无机铝溶解度与 pH 的关系

Fig. 2 Relationship between the solubility of inorganic aluminium and pH level

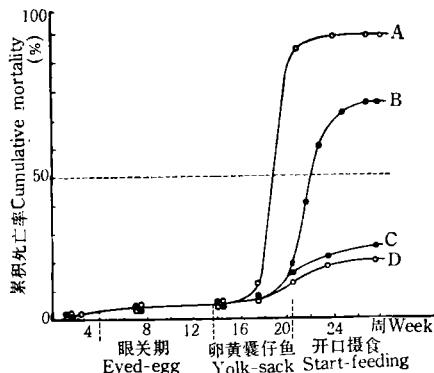


图3 大西洋鲑卵和仔鱼在四种不同水质中的累积死亡率(用NaOH或海水调节pH值)

Fig. 3 The cumulative mortalities of Atlantic salmon eggs and larvae hatched and reared at 4 different water qualities (Water neutralized with NaOH or seawater)

A. NaOH pH 6.0; B. Sea 0.7‰ pH 6.0;
C. Sea 1.4‰ pH 6.5; D. NaOH pH 6.5

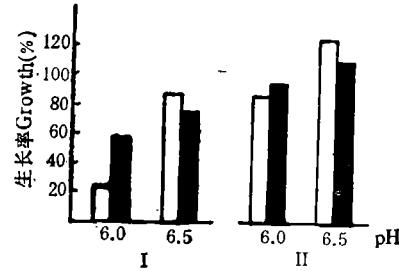


图4 在四种不同水质中34天后的生长
(无机铝320 $\mu\text{g/l}$; 实验 I: 10°C, 起始重量10g;
实验 II: 15°C, 起始重量5g)

Fig. 4 Growth over 34 days at 4 different water qualities
(Al-inorg 320 $\mu\text{g/l}$; Exp. I: 10°C, weight 10
g; Exp. II: 15°C, 5g)
■ 海水 sea water □ NaOH

结束时,死亡率为75%,看来加入海水对于仔鱼只有微弱的保护作用。

图4是两次生长试验的结果。水质与图3的试验相同。在实验II, pH 6.5的两个处理组的生长率比pH 6.0时稍高,但不同处理组之间没有显著差异。在实验I,不同处理之间的差异较为显著。用NaOH中和的水,pH 6.0时只有23%的重量增加。在pH 6.5时有88%的增加,在pH 6.0时海水组改善了生长(58%),但在pH 6.5时,两种处理的差异不显著。

死亡率与生长率的试验表明,只要pH严格控制在6.5左右,就见不到铝的毒性影响。另一方面,在pH 6.0左右,铝的毒性作用是肯定的。在pH 6.0时,大部分铝依然是 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀,但离子交换铝有少量增加,这足以引起毒性影响。pH 6.0本身不能引起这种影响。

(三) 离子含量与 H^+/Al 结合的毒性作用

在高铝和低铝(320 $\mu\text{g/l}$ 和 52 $\mu\text{g/l}$ 无机铝)、高pH和低pH(6.5和5.5)、用NaOH与海水中和的各种结合水质中,测定了受精卵和仔鱼发育过程中的电解质离子含量和NPS含量。在pH 6.5的水质中,不论总铝含量高低,铝并不显出毒性,因此,这4个实验系列的测定值彼此没有显著差异,其平均值代表着受精卵发育中的正常离子调节过程(图5、6)。整个过程可以分为3个阶段。①受精后到眼点期(大约250度日),卵的离子含量相当稳定。反映出受精卵发育的前半个时期,卵黄膜的透性极低。②从250度日到孵化,胚胎器官已经形成,血循环建立。在这一阶段,各种离子表现出不同的调节行为。氯离子连续不断的损失,到孵化时,大约损失了原有量的18%。钙离子和镁离子也呈现出损失的倾向,但程度较小。海水的加入并不影响这种损失。大约在300度日前后,胚胎开始从水中主动地吸收钠,使钠含量有持续不断的增加,到孵化时,增加了原有量的19%。关

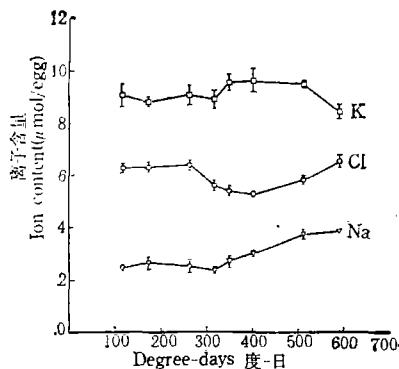


图5 大西洋鲑卵和仔幼鱼发育期间的钠、氯、钾含量
(pH 6.5 的 4 个处理组的平均值)

Fig. 5 Contents of sodium, chloride and potassium in egg and larvae of Atlantic salmon during development (Mean values from four treatment at pH 6.5)

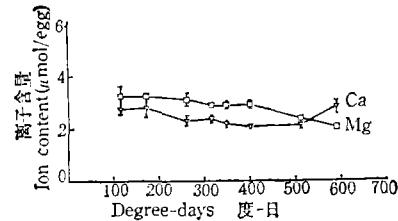


图6 大西洋鲑卵和仔鱼发育期间的钙、镁含量
(pH 6.5 的 4 个处理组的平均值)

Fig. 6 Contents of calcium and magnesium in eggs and larvae of Atlantic salmon during development (Mean values from four treatment at pH 6.5)

于钾离子,由于标准差太大,离子的得失倾向不明显。③大约在420度-日时,孵化开始。在孵化后的仔鱼中,钠的主动吸收仍在继续,到600度日时,钠的含量已增加了原有量的58%。孵化之后,氯的吸收也开始。但镁和钾继续损失,直到至少600度日。钙的吸收似乎在孵化之后不久也开始,在仔鱼阶段加速。

不同水质对 Na^+ 和 Cl^- 离子调节的影响可以相互比较。图7比较了使用海水和 NaOH 作为中和剂对离子含量的影响。胚胎钠含量因海水的加入而增高的倾向几乎难以

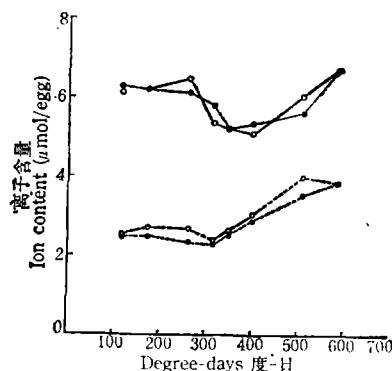


图7 低铝水 ($52 \mu\text{g/l}$ 无机铝, pH 6.5) 中卵和仔鱼的钠、氯含量

Fig. 7 Contents of sodium and chloride in eggs and larvae hatched and reared in low aluminium water ($52 \mu\text{g/l}$, inorganic) at pH 6.5

——○—— Cl pH 6.5 SW
---○--- Na pH 6.5 SW
——●—— Cl pH 6.5 NaOH
---●--- Na pH 6.5 NaOH

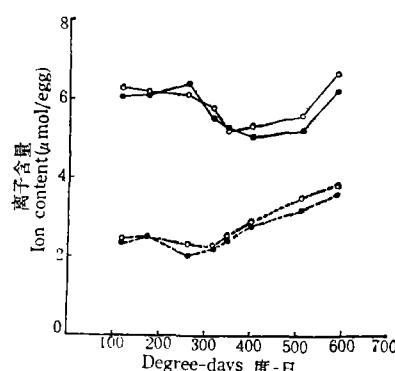


图8 低铝水 ($52 \mu\text{g/l}$ 无机铝) 中卵和仔鱼的钠、氯含量 NaOH 作为中和剂

Fig. 8 Contents of sodium and chloride in eggs and larvae hatched and reared in low aluminium water ($52 \mu\text{g/l}$, inorganic) neutralized with NaOH

——○—— Cl pH 6.5
---○--- Na pH 6.5
——●—— Cl pH 5.5
---●--- Na pH 5.5

检出。对氯的影响又被分析误差所掩盖。尽管用海水作为中和剂的水中 NaCl 浓度高于用 NaOH 中和的 35 倍,但是对胚胎离子含量却没有明显的效应。即使在眼点期之后卵黄膜透性增加时也如此,显示了在鱼类胚胎中水和离子的体内平衡调节能力是非常强的。

两种水质都含有 $52 \mu\text{g}/\text{l}$ 无机铝(图 8),但 pH 值分别是 6.5 和 5.5,可以比较在低铝水中 pH 的影响。在胚胎阶段,未发现差异。孵化之后, pH 5.5 中的仔鱼钠离子和氯离子水平稍低。对照死亡率来看,不论在胚胎期还是仔鱼期,都未发现这两个处理组有显著差异。不过,在仔鱼的末期(即卵黄囊吸收将尽时)和摄食早期(800 度日), pH 5.5 中的幼鱼死亡率是 pH 6.5 中的两倍。引起较高死亡率的因素可能是铝。在 pH 5.5 的水中,有 $48 \mu\text{g}/\text{l}$ 的铝以阳离子形式存在,而在 pH 6.5 的水中,只有 $15 \mu\text{g}/\text{l}$ 的铝是以阳离子形式出现。

图 9 表明,只要 pH 保持在 6.5 左右,无机铝的含量高低对于胚胎的离子调节就没有影响,因为 pH 6.5 时,铝的溶解度最小(图 2)。高铝和低 pH 的结合毒性在第一批实验中未测验。图 10 是用第二批实验(高铝, pH 5.5)数据与第一批实验(高铝, pH 6.5)的数据相比较。每一个 pH 水平又有两种不同的处理。需要指出,为了把酸性水(pH 5.0)调节到 pH 5.5,所加入海水量比调节到 6.5 所加入的海水量要少。例如 pH 5.5 水中所含的钠为 3.5 mmol/l ,而 pH 6.5 水中是 15 mmol/l 。用 NaOH 作中和剂时, pH 5.5 与 6.5 的水中钠含量相差不大,约在 0.28 mmol/l mol 左右。

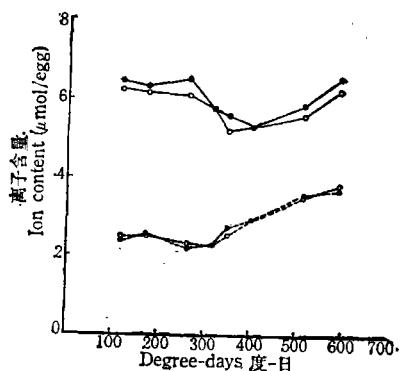


图 9 卵和仔鱼在低铝水($52 \mu\text{g}/\text{l}$ 无机铝)和高铝水($320 \mu\text{g}/\text{l}$ 无机铝)中钠、氯含量的比较(用 NaOH 中和到 pH 6.5)

Fig. 9 Contents of sodium and chloride in eggs and larvae hatched and reared in water neutralized to pH 6.5 with NaOH . Comparison between low aluminium water ($52 \mu\text{g}/\text{l}$, inorganic) and high aluminium water ($320 \mu\text{g}/\text{l}$, inorganic)

—○— Cl pH 6.5 low Al
---○--- Na pH 6.5 low Al
—●— Cl pH 6.5 high Al
---●--- Na pH 6.5 high Al

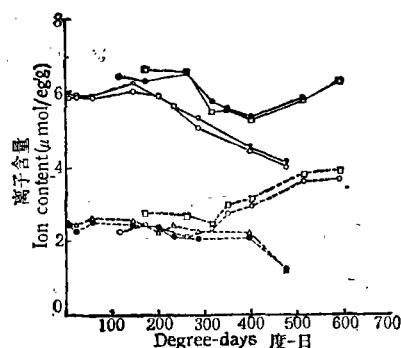


图 10 高铝水($320 \mu\text{g}/\text{l}$ 无机铝)中卵和仔鱼的钠、氯含量(pH 6.5 和 pH 5.5 的比较,用 NaOH 和海水作中和剂的比较)

Fig. 10 Contents of sodium and chloride in eggs and larvae hatched and reared in high aluminium water ($320 \mu\text{g}/\text{l}$ inorganic) (Comparison between pH 6.5 and pH 5.5 and between NaOH and seawater as neutralizing agent)

—□— Cl pH 6.5 Al + SW
—●— Cl pH 6.5 Al + NaOH
---○--- Na pH 6.5 Al + NaOH
—▽— Cl pH 5.5 Al + SW
---○--- Na pH 5.5 Al + SW
—○— Cl pH 5.5 Al + NaOH
---●--- Na pH 5.5 Al + NaOH

可以看出，直到 300 度日，在四种处理组中，钠离子含量的变化规律是相似的。在 300 度日以后，在 pH 6.5 的两个处理中，卵和仔鱼对钠有主动吸收。与 NaOH 组相比，海水组具有稍高的钠值，但没有显著性差异。在 pH 5.5 的两个处理中，直到 400 度日（接近孵化），钠的净增尚未出现。在新孵化的仔鱼中，钠含量已有相当大的降低。由于死亡率高，实验不得不在大约 500 度日时中止。对于氯离子，情况是相似的。在 pH 5.5 的水中，胚胎氯离子含量在 250 度日后开始下降。正常情况下在仔鱼期所能看到的净吸收始终未能出现。海水的加入 (Ca^{2+} 为 4 mg/l, Na 为 80 mg/l) 对上述离子损失现象没有缓解作用。这里应强调，这种调节紊乱不是由于单纯的 H^+ 离子压力所引起，因为图 8 已经表明，当 Al 的含量低时，pH 5.5 的影响很小，因此差异必然是由两种 pH 水平下的铝种类不同所引起的。pH 5.5 时，离子交换铝在总铝中占了优势（图 2）。高铝与低 pH 的结合也使钾含量在幼鱼期显著降低，但对钙、镁的影响很小。

在第三批实验中，高铝与低 pH 结合具有相似的影响，但由于死亡率太高，在孵化之前实验就不得不中止。

图 11 中 NPS 的数据是 pH 6.5 的四个处理组的平均值，代表着正常发育过程中的含量变化过程。在 350 度日之前，NPS 含量保持在大约 $170 \mu\text{mol/g}$ 卵的水平。在 350 度日之后，直到至少 600 度日，含量直线下降，下降的时间过程与胚胎对离子的旺盛主动吸收过程大体平行，可能反映出这一时期对能量的巨大消耗。800 度日时，已是摄食的早期，幼鱼有了从周围环境直接摄取有机营养的能力，因此 NPS 的含量下降过程中止。

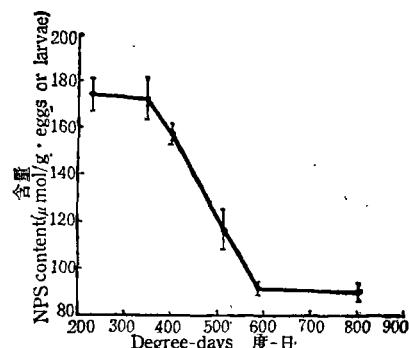


图 11 大西洋鲑卵和仔鱼发育期间的 NPS 含量 (pH 6.5)

Fig. 11 Content of NPS in eggs and larvae of Atlantic salmon during development (pH 6.5)

讨 论

关于淡水鱼卵离子调节的报道不多。已有的文献几乎全部局限于钠或钾的平衡^[5,14]。Baker & Schofield 认为，溪泉红点鲑卵对低 pH 比仔鱼敏感，而仔鱼对铝比卵敏感^[1]。Eddy & Talbot (1985) 也有相似的结论^[15]。Rudy & Potts (1969) 发现^[14]，大西洋鲑卵的离子调节主要基于卵黄膜对水和离子的极低透性。他们测定大西洋鲑卵在发育的早期含有 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{钠/g} \cdot \text{卵}$ 。这个钠量在眼点期之前几乎保持恒定不变。大约在眼点期前后，胚胎开始从水中进行主动的钠吸收。到孵化的前夕，钠含量比新产卵增加 20%。孵化之后，主动吸收加速进行。根据本实验测定的结果，眼点期之前的钠含量平均为 $18 \mu\text{mol/g} \cdot \text{卵}$ ，孵化前夕为 $21.5 \mu\text{mol/g} \cdot \text{卵}$ ，增加了原有量的 19%。考虑到测定的钠值不包括卵周液的含有量，因此这些结果与 Rudy & Potts 用 ^{24}Na 所得的结果十分一致，但他们未测定氯、钙、镁等离子。

关于低 pH 和毒性铝对成鱼离子调节影响机制的资料报道较多。毒性作用主要是通过鳃部实现的^[7,10-13]。但在受精卵方面，了解较少。Eddy & Talbot 用²²Na 发现去膜胚胎的钠流失速度比完整胚胎大得多，充分证明了卵周液中带过量负电荷的胶体大分子有阻遏钠流失的作用，并且有利于钠的主动吸收。当环境 pH 值降低时，卵周液中的大分子物质优先束缚氢离子，于是钠的吸收受到抑制。在本实验中，pH 5.5 本身对大西洋鲑卵不具有明显毒性，起毒性作用的主要是铝。对于受精卵来说，铝的毒性作用方式也许与 H⁺ 离子的毒性作用方式不同。在卵的发育早期，未发现铝的影响。但在发育的晚期，(300 度日以后)，铝对于离子的主动吸收有明显的抑制。Dagson (1986)^[4] 的初步研究表明，大西洋鲑卵发育的后半个时期，Na-K-ATP 酶活性大大增加，这与胚胎钠含量的增加过程和铝对钠吸收的抑制过程恰相平行。因此可以认为，铝是通过抑制 Na-K-ATP 酶活性或阻断酶系统来施加毒性影响的。

已经发现，在较大的鱼中，随着环境中 Ca²⁺、Na⁺ 离子的增加，其离子损失的程度降低，因为 Ca²⁺、Na⁺ 离子有降低膜透性的能力^[2,10]。另一方面，Kjartansson (1984)^[2] 表明，对于鳃部 Na-K-ATP 酶系统的阻断，Ca²⁺ 离子没有缓解作用。在本实验中，海水的加入也没有效应。据此可以推测，铝对卵和仔鱼只阻断 Na-K-ATP 酶系统，而不影响渗透性的离子流出。

本实验证明，铝的毒性不仅取决于总量，也取决于 pH 水平。因为在不同的 pH 水平下，铝的溶解度及占优势的铝种类不同。许多学者发现，在 pH 5—5.2 时，铝的毒性最大^[10]。在这样的 pH 水平下，阳离子交换形式的铝占绝对优势。因此在研究铝的毒性时，控制铝的种类是非常重要的。

参 考 文 献

- [1] Baker, J. P. and Schofield, C. L., 1982. Aluminium toxicity to fish in acidic waters. *Water Air Soil Pollut.*, 19: 289—309.
- [2] Brown, D. J. A. and Lynam, S., 1981. The effect of sodium and calcium concentrations on the hatching of eggs and survival of the yolk sac fry of brown trout, *Salmo trutta* L. at low pH. *J. Fish Biol.*, 19: 205—211.
- [3] Dickson, W., 1983. Liming toxicity of aluminium to fish. *Vatten*, 39: 400—404.
- [4] Driscoll, C. T., Baker, J. P., Briscogni, J. J. and Schofield, C. L., 1980. Effects of aluminium speciation on fish in dilute acidified waters. *Nature* (Lond.), 284: 164—165.
- [5] Eddy, F. B. and Talbot, C., 1985. Sodium balance in eggs and dechorionated embryos of the atlantic salmon, *Salmo salar* L. exposed to zinc, aluminium and acid water. *Comp. Biochem. Physiol.*, 81: 259—266.
- [6] Fivelstad, S. and Leivestad, H., 1984. Aluminium toxicity to atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and brown trout (*Salmo trutta* L.): Mortality and physiological response. *Rep. Inst. Freshw. Res. Drottningholm*, 61: 69—77.
- [7] Holeton, G. F., Booth, J. H. and Tansz, G. F., 1983. Acid-base balance and Na regulation in rainbow trout during exposure to, and recovery from, low environmental pH. *J. Exper. Zool.*, 228(1): 21—32.
- [8] Jensen, K. W. and Snekvik, E., 1972. Low pH wipe out salmon and trout populations in southernmost Norway. *Ambio*, 1: 223—226.
- [9] Leivestad, H., Hendrey, G., Muniz, I. P. and Snekvik, E., 1976. Effects of acid precipitation on freshwater organisms. p. 87—111. In: Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems in Norway. Ed.: F. H. Braekke. SNSF-Project FR 6/76. Oslo-As.
- [10] Leivestad, H., 1980. Acidification-effects on freshwater fish. *Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precip.*, No-

1) 硕士论文； 2) 毕业论文。

- rway SNSF Project 84—92.
- [11] Leivestad, H., 1982. Physiological effects of acid stress in fish. Pro. Int. Symp. Acid Precip., Cornell Univ.
- [12] Muniz, I. P. and Leivestad, H., 1980. Toxic effects of aluminium on the brown trout, *Salmo trutta* L., p. 320—321. In: Ecological impact of acid precipitation. Proc. Int. Conf., Sandefjord, Norway 1980. Eds.: D. Drablos and A. Tolland. SNSF-Project, Oslo-As.
- [13] Rossetland, B. O. and Skogheim, O. K., 1984. A comparative study on salmonid fish species in acid aluminium-rich water. Rep. Inst. Freshwater Res. Drottningholm, 61: 186—194.
- [14] Rudy, P. P. JR, and Potts, W. T. W., 1969. Sodium balance in the eggs of the atlantic salmon, *Salmo salar*. J. Exp. Biol., 50: 239—246.
- [15] Schofield, C. L., 1976. Acid precipitation: Effects on fish. Ambio, 5: 228—230.
- [16] Trojnar, J. R., 1977. Egg hatchability and tolerance of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) fry at low pH. J. Fish. Res. Board Can., 34: 574—579.

THE TOXIC EFFECTS OF ACID ALUMINIUM-RICH WATER ON EGGS AND LARVAE OF ATLANTIC SALMON (*SALMO SALAR* L.)

Li Xingfu

(Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan)

H. Leivestad

(Zoological Laboratory, University of Bergen, Norway)

E. Jenson

(Salar A/S, 5112 Rossland, Norway)

Abstract

The developing eggs and larvae of the Atlantic salmon (*Salmo salar*) were exposed to different water qualities. The contents of major ions in the eggs and larvae, mortality and growth rate were determined. Exposed to 320 $\mu\text{g/L}$ inorganic aluminium, mortality of the larvae increased at pH 6.0. Losses in sodium and chloride in eggs and larvae occurred only at pH levels where cationic forms of Al dominate; losses in eggs occurred only in the later stage of development when active uptake of ions started. No effects were found at pH 6.5, where the precipitating Al(OH)_3 dominate. Effects on K, Ca and Mg were less prominent. Addition of seawater did not mitigate the toxic effect of aluminium. Discussion was made on the way in which aluminium influences the ion exchange in fish.

Key words Atlantic salmon, egg, larvae, aluminium, pH, ionic regulation