

《水污染对我国主要渔业水域的经济损害分析》

课 题 总 报 告

课题下达单位：农业部渔业局

课题承担单位：中国水产科学研究院
东海水产研究所

《水污染对我国主要渔业水域的经济损害分析》课题组

一九九八年九月

《水污染对我国主要渔业水域的经济损害分析》

课题组成员名单

组长：沈新强(环境评价、渔业生态)

组员：陈亚瞿(环境评价、海洋生物)

张淳良(数模分析)

杨鸿山(海洋化学)

徐兆礼(海洋生物)

袁 骐(海洋生物)

蒋 玫(计 算 机)

目 录

一、“水污染对我国主要渔业水域的经济损害分析”课题执行工作报告

1. 课题的由来
2. 课题的目标
3. 课题的执行情况
4. 课题的主要成果
5. 存在的问题和建议

二、“水污染对我国主要渔业水域的经济损害分析”课题研究报告

前言

第一篇 水污染对渔业经济损失估算的理论模式

1. 二种不同类型的水体污染致渔业经济损失事件
 - 1.1 “脉冲型”水体污染致渔业经济损失事件
 - 1.2 “弥散型”水体污染致渔业经济损失事件
2. “弥散型”水体污染致渔业经济损失的估算模式
 - 2.1 水体污染的毒理影响和相应渔业生物死亡率分析
 - 2.1.1 石油对不同发育阶段对虾的毒理影响
 - 2.1.2 石油对刺参不同发育阶段的毒理影响
 - 2.1.3 砷对海参的毒理影响
 - 2.1.4 重金属对水生生物的毒理影响
 - 2.1.5 砷和油对刺参幼体的协同毒理影响
 - 2.1.6 铜和汞对对虾的协同毒理影响
 - 2.1.7 水生生物成体对污染物的回避效应

- 2.2 水产生物受污染毒害致损的动力理论
 - 2.2.1 水产生物受污染毒害致损估算模式
 - 2.2.2 死亡系数的定义
- 2.3 “弥散型”水体污染致渔业经济损失估算步骤
- 3. “弥散型”水体污染致渔业经济损失估算模式的简化
 - 3.1 混合浓度场分类的划分办法
 - 3.2 “弥散型”水体污染致渔业经济损失估算模式的简化和操作
 - 3.2.1 “弥散型”水体污染致渔业经济损失估算模式的简化
 - 3.2.2 “弥散型”水体污染致渔业经济损失估算模式的操作
- 4. 二种估算模式的说明

第二篇 我国主要渔业水域水体污染致渔业经济损失的估算

- 1. 黄渤海区水体污染致渔业经济损失的估算
 - 1.1 黄渤海区的污染状况和渔业现状
 - 1.2 黄渤海区水体污染对主要经济鱼类影响的损失估算
 - 1.2.1 对虾
 - 1.2.2 带鱼
 - 1.2.3 兰点马鲛
 - 1.2.4 小黄鱼
 - 1.2.5 大黄鱼
 - 1.2.6 梭鱼
 - 1.2.7 鲆、鲽类
 - 1.2.8 鲳鱼
 - 1.2.9 鲈鱼
 - 1.2.10 鹰爪糙虾

- 1.2.11 毛虾
- 1.2.12 海鳗
- 1.2.13 鲰鱼
- 1.2.14 蟹类
- 1.2.15 头足类
- 1.2.16 贝类
- 1.2.17 海蜇
- 2. 东海区水体污染致渔业经济损失的估算
 - 2.1 东海区污染状况和渔业现状
 - 2.2 东海区水体污染对主要经济鱼类影响的损失估算
 - 2.2.1 带鱼
 - 2.2.2 大黄鱼
 - 2.2.3 小黄鱼
 - 2.2.4 兰点马鲛
 - 2.2.5 鲳鱼
 - 2.2.6 鲈鱼
 - 2.2.7 鲢鳙鱼
 - 2.2.8 乌贼
 - 2.2.9 海蜇
- 3. 内陆诸省主要渔区水体污染致渔业经济损失的估算
 - 3.1 江苏省
 - 3.1.1 太湖地区
 - 3.1.2 洪泽湖地区
 - 3.1.3 长江江苏段
 - 3.2 浙江省
 - 3.2.1 象山港地区

- 3.2.2 姚江地区
- 3.2.3 东钱湖地区
- 3.3 山东省
 - 3.3.1 南四湖地区
 - 3.3.2 东平湖地区
 - 3.3.3 无棣滩涂区
- 3.4 重庆市
- 3.5 江西省

- 第三篇 全国主要渔业水域污染致渔业经济损失估算总结
 - 1.1 全国主要渔业水域污染致渔业经济损失估算汇总
 - 1.2 结束语

二、水污染对我国主要渔业水域的经济损害分析课题研究报告

前 言

由于环境(主要指水体)污染,导致水体中水产生物受害变质,以至糜烂死亡。其危害所及,不仅破坏了自然水体中生物多样性的平衡,恶化了人类生存环境。而且,经济上的损失亦颇为可观。所以从经济角度分析和估算水污染致渔业的损失,一直为国家行政主管部门和当地受害渔业生产部门所重视,总希望得出一个经济受损额(以币值计)的估算办法和由此得出的损失总额,作为合理评价环境质量,加强科学管理的一个重要依据。

环境污染致渔业受损事件,一般而言,主要有二种致损方式。一是:局部地区突发性污染致害,经济损失的估算主要靠现场实测,再相应通过统计估算而得到损失总额。二是:大江大湖大海广阔水域长期受污水排放致害。由于该问题的复杂性,从估值数学角度考虑,是一个多因素变量、强相互非线性作用,且参数呈空间和时间上的广谱分布形式。目前人类观测手段有限,不易实测。所以污染致经济损失,尚未有一个令人满意的估算模式或公式。国内外对此情况的研究,大都停留在一定程度的定性水平上,即考查污染对待定水产种群的生物化学致害分析上。进而提出以一些种群,尤其是幼体阶段的死亡阈值(详见参考文献^[2]、^[18]等)。至于经济上损失的总体估算方法,尚未见详细报道。

通过对“水污染对我国主要渔业经济损失的分析”课题的研究,在纵览大量前人工作及参考资料的基础上,适当引用了当代复杂系统的分析研究思路和方法。提出了“弥散型”水体污染致渔业经济损失事件的估算模式和相应估算方法。并在此基础上,得到了一些令人兴奋的结果。

当然,探讨是初步的。期待今后作进一步、更深入的研究,以供政府主管部门和当地产业部门的参考。

第一篇 渔业经济损失估算的理论模式

1. 二种不同类型的水体污染致渔业经济损失事件

1.1 “脉冲型”水体污染致渔业经济损失事件

我国每年都要由渔政部门在全国范围内，统计由于江河湖海水质污染事故造成的渔业经济损失。通常，由事发当地的渔政部门，根据实际情况，按照统一的测量和计算办法^[7]，实测并计算出污染事件对渔业经济造成的损失，并上报主管部门进行全国汇总。这是一项从中央到地方渔政部门都十分重视的国情统计工作，每年都是不能少的。

总观实情的分析报告可知，所论及的水质污染致害事件，其成因主要是个别的工矿企业的工业废水的超标排放，或是海上个别船只的泄漏和排污。其祸害主要集中在一个地域范围。这种类型的水质污染事件主要特征是：

- I. 地区局部性：即事发当地一小块范围；
- II. 时间的短暂性：大都不超过一个月，稍长也是数月而已，时间的尺度是论月计算的；
- III. 污染的极度性：事发当地水质受到严重污染，黑臭冲天，指标超过标准十多倍，甚至几十倍；
- IV. 后果的显著性：事发当地到处可见水产生物的成片死亡和糜烂，受害之水产生物绝无逃身之地。

对于这样的水体污染事件，据其特征可用物理学中“脉冲”一词谓之。

对于这类事件的成因分析和相应经济损失的估算方法，农业部已有专文规定，详见文献^[7]，在此不予细述。

1.2 “弥散型”水体污染致渔业经济损失事件

本课题主要研究的是另一类非急性水体污染致损事件造成的渔业经济损失分析和相应的估算方法，在以往的文献中也鲜见报道。

自 70 年代以来, 由于我国大中城市和成片工矿企业的不断兴起, 出现居民生活污水和工业废水大量排放的问题。不少地方, 这些污水未经严格的降解处理, 就直接倾倒入江湖河海之中。靠着大江大湖径流的冲刷与稀释, 海洋潮汐进退, 不断扩散于周围广阔的水域空间。若是这些水域恰是某种水产生物、种群繁殖、栖息或是索饵洄游的必经之地, 则就会造成大面积的水体污染致害事件的发生。

这类水体污染致损事件的特点与脉冲式水体污染致损事件有明显的不同。它的主要特点是:

- I. 地域的广渺性: 它往往遍及甚至超过种群产卵、索饵和洄游之地;
- II. 事件的漫长性: 它危害的时间长度是以经年累月计, 甚至从延续上讲要以年代来度量;
- III. 污水浓度呈叠加型: 单一污水浓度稍逊于脉冲型水体污染所展现的——那种鱼臭冲天的程度, 一般不超过鱼类致死阈值, 但也大多超过渔业水质标准规定的阈值, 具有多项指标叠加效应。
- IV. 危害的隐蔽性: 有大量证据表明, 处于种群发育、成长阶段的胚胎、幼鱼、仔鱼是主要受害对象。成鱼因有稍强的适应和逃避能力, 受害较小, 但也会受到一定影响。

正因为受害对象主要为胚胎、幼鱼和仔鱼, 所以在事发当地, 未必见到成片死鱼现象的出现, 所以危害的表现具有一定的隐蔽性。

根据上述特征, 不妨命名这类水体污染事件为“弥散型”水体污染致损事件。

由分析和计算得知, 从全国范围来讲, 这类事件的渔业经济损失远远超过“脉冲型”事件的损失。它必须引起人们的高度重视。

2. “弥散型”水体污染致渔业经济损失的估算模式

探讨弥散型水体污染致渔业经济损失的模式和方法, 不仅需要水体污染、生物毒理的知识, 也需要现代种群数量变动理论的支撑。在本课题的

研究中正是融合了这二方面的知识模块，给出了渔业经济损失分析模式的框架和相应的计算公式。

2.1 水体污染的毒理影响和相应渔业生物死亡率分析

水污染对渔业生物的毒害是多方面的，污水成份的不同，其毒害作用和毒害程度也会有所不同，这方面已有不少文献进行了报道^[2、18]。

本研究要关心的是水体污染与相关渔业生物死亡率之间的关系。死亡以“死亡率”概念来进行表达。试验表明，种群“死亡率”的概念也有丰富的内容。文献^[2]的有关实验事例和数据对此可作佐证。

2.1.1 石油对对虾不同发育阶段的毒理影响

石油是如今海洋中一种数量大、分布面广的污染物，据统计，仅黄渤海石油类排放量每年有六万多吨，其数量之大仅次于化学耗氧量的排放量。石油对水产生物的危害必将成为黄渤海污染防治的主要任务。对虾是黄渤海重要的经济虾类，也是沿海各地大力发展的优良养殖品种，弄清石油对对虾的毒理和致死作用无疑是一项十分重要的任务。

对虾在生长发育时期，将经历受精卵胚胎发育及孵化、无节幼体、蚤状幼体及糠虾、仔虾等几个阶段。文献^[2]在各阶段分别作了毒理试验，其采样数据摘录如下：

表 2.1 不同油浓度中受精卵的孵化率

油浓度 ppm	对照	0.01	0.03	0.1	0.3	1.0	3.2	10	32	56
孵化率%	95	89	93	83	92	90	93	95	92	83

由表 2.1 可知在油浓度<56ppm 时胚胎发育正常。

表 2.2 不同油浓度中无节幼体变态率

油浓度 ppm	对照	0.01	0.03	0.1	3.2	10	32	100
变态率%	100	100	100	98	95	80	73	35

由表 2.2 可知, 无节幼体在油浓度<100ppm 的水体中继续发育变成蚤状幼体, > 100ppm 时, 不能摄食, 绝大多数沉于水体底部而不能继续变态以致于濒临死亡。

表 2.3 不同油浓度中蚤状幼体成活与变态影响

油浓度 ppm 时间(天) 变态率%	对照	0.01	0.03	0.1	0.3	1.0
6	80	83	73	70	0	0
8	85	88	88	90	5	0

由表 2.3 可知, 蚤状幼体在油浓度>0.3ppm 的水体中不能生存。

表 2.4 不同油浓度中蚤状幼体的成活率(时间效应)

油浓度 ppm 时间(天) 成活率%	对照	0.01	0.03	0.1	0.3	1.0	3.2
2	98	100	98	95	45	0	0
4	90	93	95	85	25	0	0
6	85	90	93	45	5	0	0
8	85	90	90	23	0	0	0

由表 2.4 可知, 致毒时间越长, 死亡率越大, 尤其在阈值区(0.3ppm)变化越大, 死亡率迅速上升为 100%(成活率为 0)。

表 2.5 不同油浓度中糠虾幼体的变态率

油浓度 ppm	对照	0.1	0.3	0.56	1.0	1.8	3.2	5.6	10	18
变态率%	77	90	90	80	97	55	67	32	20	35

由表 2.5 可知, 糠虾幼体可在油浓度<1.8ppm 的水体中继续发育, 当油浓度>1.8ppm 时开始受影响(变态率变小)。

表 2.6 不同油浓度中仔虾的成活率

油浓度 ppm 时间(天) 成活率%	对照	0.32	0.56	1.0	1.8	3.2	5.6	10	18	32	56
1	97	100	100	100	100	100	99	97	95	89	70
2	96	100	100	100	99	99	94	86	26	68	65
3	91	95	95	100	90	91	61	46	33	17	0

由表 2.6 可知, 仔虾在油浓度 $> 18\text{ppm}$ 时成活率受影响, $>56\text{ppm}$ 时受到较为显著的影响(死亡率增长较大)。

上述一系列毒性试验表明, 石油在一定浓度下会对对虾生长、发育的各个阶段产生死亡影响。当然, 在生长发育的各个阶段, 产生显著死亡影响的试验浓度值(阈值)是不一样的。必须指出的是, 水生生物生长发育的各阶段中有某一阶段(对虾是溞状幼体)对石油浓度特别敏感, 生命力特别脆弱(不妨称为生命“瓶颈”阶段)。

因此在我们估算水生生物受毒死亡率时必须注意, 以此作为估算的基础。

2.1.2 石油对刺参不同发育阶段的毒理作用

刺参是我国名贵的海产, 主要产于黄渤海区。毒理试验主要在刺参的耳状幼体、稚参、成参三个阶段。结果如下:

表 2.7 不同油浓度对耳状幼体和稚参的影响

油 浓 度 ppm	0	0.03	0.05	0.07	0.1	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0
影响稚参育 出数%	1180	1105	1040	904	344	164	36	2	0	0
情况	正常	正常	正常	正常	部分滞育	出现畸形	7天收缩	5天收缩	5天收缩	2天收缩

由表 2.7 可知, 油浓度 $>0.1\text{ppm}$ 时就会对稚参生长发育产生影响, 当油浓度达到 1.0ppm 时稚参实际上已不能生长(死亡率为 100%)。

表 2.8 不同油浓度对稚参的影响

油浓度	0	0.1	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0
死亡率%	4	0	8	0	78	53	75

由表 2.8 可知, 当油浓度 $> 3.0\text{ppm}$ 时, 就会对稚参生长产生影响(死亡率高达 70%)。

上述试验表明, 与对虾相类似, 海参在受石油毒害作用时, 也有一个生命脆弱的“瓶颈”时期(即耳状幼体阶段), 此时石油浓度的阈值为 1ppm 。

2.1.3 砷对海参的毒理影响

砷是一种重要的非金属污染因子，在污染物毒理作用的研究中占有重要的一席。表 2.9 为砷对稚参的毒理影响试验结果：

表 2.9 不同砷浓度下稚参的育出量

砷浓度 ppm 项 目	0	0.03	0.05	0.1	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0
第一次稚参量(头)	717	985	1369	342	224	10	0	0	0
第二次稚参量(头)	1294	967	670	361	83	141	0	0	0

由表 2.9 可知，砷浓度在 1.0ppm 以上时，耳状幼体在 7 天内全部受毒死亡。在砷浓度为 0.3 ~ 0.5ppm 时，有 50% 的幼体收缩不能正常发育以致死亡。在 0.1 ~ 0.3ppm 时，育出稚参数量明显减少。0.1ppm 以下时基本不受影响。

表 2.10 不同砷浓度下稚参的死亡率

砷浓度 ppm 项 目	0	0.1	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0
死亡率%	2	3	2	11	100	100	100
影响状态	正常	正常	管足收缩	体缩	3 天死亡	2 天死亡	2 天死亡

由表 2.10 可知，砷浓度在 0.5ppm 以上时稚参生长受影响，在 1.0ppm 以上时稚参不能发育生长，全部死亡。

表 2.9 和 2.10 还表明，在海参的整个生长发育阶段，耳状幼体易受砷毒害作用(0.1ppm 阈值)，而稚参、成参耐受能力较幼体为大(死亡阈值为 1ppm)，其生命“瓶颈”阶段在耳状幼体阶段。

2.14 重金属对水生生物的毒理影响

重金属通过工业废水的排放进入江河湖海，也是水质污染的主要污染物。在海域中它危害时间最久，毒性较大，在弥散型水体污染事件中，也应给予充分的重视。

试验表明^[2]，重金属致毒作用大小排序为汞>铜>锌>铅>镉，表 2.11 为汞和铜对贻贝受精、孵化、变态和成活的影响试验结果。

表 2.11 不同浓度下汞和铜对贻贝的毒性效应试验

金属名称	金属浓度 ppm	4 小时受精率 %	24 小时孵出担轮幼体率 %	48 小时轮虫变态率 %	72 小时成活率 %
汞(HgCl ₂)	对照组	98	94	90	93
	0.0032	95	92	90	64
	0.0056	97	77	64	26
	0.01	26	23	12	2
	0.018	14	1	0	0
	0.032	2	0	0	0
	0.056	0	0	0	0
铜(CuSO ₄)	对照组	94	91	89	94
	0.0032	96	86	86	75
	0.0056	96	84	84	68
	0.01	92	77	74	67
	0.018	92	41	1	1
	0.032	80	3	0	0
	0.056	53	0	0	0
	0.1	41	0	0	0

由表 2.11 可知, 汞浓度在 0.0056ppm 时对贻贝幼体各阶段均会产生影响, 当浓度达到 0.01ppm 时对贻贝的成活率造成显著影响(死亡率近 100%), 是贻贝受汞毒害死亡的生命“瓶颈”阶段。

当铜的浓度达到 0.01ppm 时, 铜对贻贝发育产生影响, 浓度达到 0.018ppm 时产生显著影响(死亡率近 100%), 是受铜致死的生命“瓶颈”阶段。

汞和铜对贻贝幼体的 96TLM 值(表 2-12)表明, 成年贻贝受汞、铜毒性致死较幼年时较低, 耐受力增强。

表 2.12 汞和铜对贻贝幼体的 96TLM 值

金属名称	直线交合期幼体(96TLM, ppm)	葡萄期幼体(96TLM, ppm)
汞(HgCl ₂)	0.045	0.04
铜(CuSO ₄)	0.04	0.07

天然水域的污染比较复杂, 往往由多种污染物混合组成, 各种物质间会因拮抗作用或协同作用在毒性上互相发生影响, 使毒性与单因素时发生很大变化, 一般是协同作用为主, 加剧毒性效应, 在估算种群死亡率时必须考虑协同作用的效应。

2.1.5 砷、油对刺参幼体的协同影响

表 2.13 为不同浓度的砷、油对刺参幼体的毒理试验结果。

表 2.13 不同浓度砷、油对刺参幼体的协同影响

砷、油浓度 ppm 育出稚参数(头) 次 数	0	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1	0.3	0.5
第一次	903			307		131	3	0
第二次	561	317	402	369	8	1	45	0
第三次	1393	428	309	154	106	57	0	0
影响情况	正常	正常	正常	正常	部分耳状 体收缩	出现大量 畸形	8 天全部 死亡	

试验结果表明：在单一因子条件下，油对刺参幼体的最低影响浓度为 0.1ppm，砷同样是 0.1ppm；而混合后共同影响的范围为 0.05 ~ 0.07ppm。这说明混合物对刺参幼体的毒性影响增强，具有叠加作用，毒性大小为单一因子的 1.4 ~ 2 倍。

其它混合物的毒性作用也呈相似的叠加(协同)作用。

2.1.6 铜和汞对对虾的协同毒理影响

本节以二种重金属铜和汞的联合毒性影响为例，说明混合物毒性的数量特点^[2]。

单一因子的铜、汞 96h-LC₅₀ 分别为 0.537 和 0.0175ppm，汞的毒性约为铜的 31 倍，现作三种配比的铜和汞的混合液。

$$A: 31: 1(0.5 \times LC_{50Cu}: 0.5 \times LC_{50Hg})$$

$$B: 73: 1(0.7 \times LC_{50Cu}: 0.3 \times LC_{50Hg})$$

$$C: 13: 1(0.3 \times LC_{50Cu}: 0.7 \times LC_{50Hg})$$

$$Q = PLC_{50} / OLC_{50} (OLC_{50} \text{ 为实测混合物半致死浓度})$$

PLC₅₀ 为混合物的预计致死浓度, Q 为联合毒物的特征值。

从实验得知，当 $Q = 0.57 \sim 1.75$ 时，混合物具有相加作用；当 $Q < 0.57$ 时，混合物具有拮抗作用； $Q > 1.75$ 时呈协同作用。

表 2.14 不同配比的铜和汞混合物对仔虾的协同作用

混合物中毒物比(铜: 汞)	PLC ₅₀	OLC ₅₀	Q	联合作用的特性
A: 31: 1	0.279	0.285	0.98	相加作用
B: 73: 1	0.383	0.384	0.997	相加作用
C: 13: 1	0.172	0.085	2.02	协同作用

由试验结果^[2]可知, 汞和铜具较大毒性, 且汞大于铜的毒性; 当铜、汞在水域同时存在, 且含量相当或铜含量>汞时, 二种毒物的混合毒性对对虾显示相加作用; 当汞含量>铜时, 混合物毒性呈现协同作用, 即少量的铜可以增加汞的毒性。

2.1.7 水生生物成体对污染物的回避效应

当水生生物栖息的水域受到一定程度的污染时, 其成体具有一定的回避能力。

由图 2.1 可知, 当污染物浓度增高时, 水生生物的逃避反应也更明显。

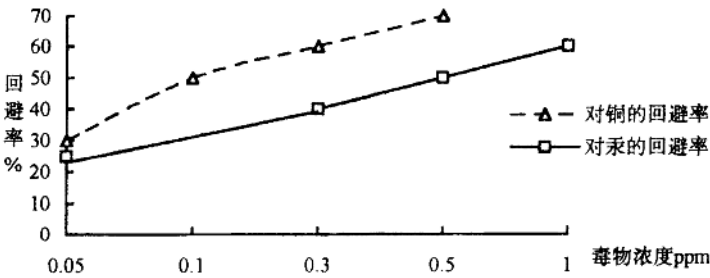


图 2.1 对虾对不同浓度铜、汞的回避率

2.2 水产生物受污染毒害致损的动力学理论

2.2.1 水产生物受污染毒害致损估算模式

生物种群数量及其变动特征是种群本身内禀生物学特性和外界环境(自然环境、人为捕捞和排污毒害)种种因素, 多层次的复杂非线性相互作用结

果。种群数量既常常处在不稳定状态，在一定条件下又有趋向稳定态发展的倾向，其数量变动的较精确描述应属种群非线性动力学范畴。此种动力学的研究，80～90年代刚刚起步，显著成果仍属鲜见^[1]。该文中提供了若干前人较粗糙的简略变动数量模型。本文取其一，在此基础上研究毒害致损的估算模式。种群数量变动与死亡率的关系可由下式表达：

$$\frac{dN(t)}{dt} = -N(t) \cdot Z \quad (1)$$

其中： $N(t)$ 表示种群在 t 时刻的数量(以尾数计)。(注： $N(t)$ 仅具理论意义，在实例估算中很难知道 N 的确切数量，或称不可测量)。

Z 代表自然和人为的死亡系数。

上式表示种群数的减少与初始值 $N(t_0)$ 和 Z 有关。该方程有形式解：

$N(t) = N_0 e^{-Zt}$ ， $N_0 = N(t_0)$ 。总死亡系数 Z 可由自然死亡(M)、捕捞死亡(即捕捞 F)和水体污染致死死亡(H)三项系数构成：

$$Z = M + F + H \quad (2)$$

式(1)和式(2)有相当近似性：它们都以集中参数形式代表了种群系统参数的空间-时间分布性；二是 F 、 M 、 H 三项系数在实际系统中都是有机的搅和在在一起的，很难作简单的代数相加处理。

尽管近似，还是有一定的参考意义，故在此加以引用。

鉴于 $N(t)$ 是以尾数计，是种群资源量的理论值，且不易实测，更不能据此作损失估算的参量。必须加以变换、改造成当年捕捞量(这是可由各地渔区统计实测得到)。现作数学改造： $Z = \frac{N_0 - N(t)}{N_0}$ (Z 的定义)。

代入(1)式： $\frac{dN(t)}{dt} = -N(t) \times Z$

或代入 $N(t) = N_0 \cdot e^{-Zt}$ ，则： $Z = \frac{N_0(1 - e^{-Zt})}{N_0} = 1 - e^{-Zt}$

又据 $N(t) = N_0 e^{-Zt}$ ，则： $e^{-Zt} = N(t)/N_0$

令 $S = e^{-Zt} = \frac{N(t)}{N_0}$ 表示 t 时刻种群数量的残存率；又令 $Y(t)$ 为 t 时刻后的捕捞量(即渔获量，以尾数计)，则：

$$Y(t) = \frac{F}{Z} (N_0 - N(t)) = \frac{FN_0}{Z} (1 - e^{-Zt}) \quad (3)$$