

水域富营养化研究进展

A review on eutrophication research of coastal waters

姚云^{1,2}, 沈志良¹

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态和环境科学重点实验室, 山东青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

中图分类号: P734.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2005)02-0053-05

随着工业化程度的提高、城市化进程的加快和世界人口的不断增加, 人类活动越来越频繁和深刻地影响着海洋环境。其中, 近海水域富营养化已经成为沿海国家的一个重要的水环境问题。在大多数水生生态系统中, 限制浮游植物生长的主要营养元素是 N 和 P。由于人类活动的影响, 大量富含 N、P 的有机物和污水排入海湾、河口和沿岸水域, 导致浮游植物在适宜的光温条件下异常繁殖, 初级生产力(有机碳)急剧增加, 水域呈现富营养化特征。仅仅在最近几十年中, 许多原先寡营养的河口和近海水域已经变得更加中等营养和富营养化^[1,2]。如在亚得里亚海^[3]、波罗的海^[4]、北海^[5]、密西西比河口^[6,7]、胶州湾^[8]和渤海^[9]等。富营养化可能威胁水生生态系统的平衡, 导致生态系统结构的变化和功能的退化。在北海北部, 由于 P/Si、N/Si 值的增加导致了硅藻被鞭毛藻所代替, 使浮游植物种类的组成发生了变化^[10]。在胶州湾, 营养盐结构的改变引起了生态环境一系列的变化, 如大型硅藻的减少和浮游植物优势种组成的变化等^[8]。渤海生态环境报告指出, 由于污水排海量逐年增多和赤潮的原因, 渤海经济鱼类产量大幅度下降, 鱼类结构越来越单一^[11]。由此可见, 富营养化已成为沿海生态平衡的主要威胁之一, 成为国内外关注的焦点。

Nixon^[1]认为, 从 20 世纪 50 年代人们就开始关注近海富营养化对海洋生态系统的影响。1979 年, 美国环境保护协会首次举办了关于河口地区富营养化问题的国际专题研讨会^[12]。Rosenberg^[13]1985 在《Marine Pollution Bulletin》上发表了极有影响力的文章《富营养化——未来海洋沿岸的威胁》。到 1990 年, 瑞典皇

家学会知名刊物《AMBIO》已发表大量有关波罗的海 20 年来富营养化状况的文章^[1]。Vidal^[14]查阅海洋文献、水科学和水产文摘数据库得到在 1988 年~1997 年间共有 1574 篇文献与近海富营养化相关, 并且维持了较高的论文数量的年增加速率。随着世界经济的发展, 大量未经处理的工业废水和生活污水排入海, 造成沿海水域的污染。20 世纪 60 年代以来, 日本的濑户内海受到的污染日趋严重, 赤潮频繁发生, 造成鱼虾大量死亡, 水产资源衰退; 欧洲地中海沿岸地区工业相当发达, 受到西班牙、法国、意大利、希腊等十几个国家的沿海城市工业废物及生活污水的侵害, 最近几年, 每年倾入地中海的废水达 $30 \times 10^8 \text{m}^3$, 固体垃圾达 $1 \times 10^8 \text{t}$, 倾注的磷酸盐达 3600 t; 黑海向以丰富的鱼类资源、温和的气候和重要的战略位置而闻名于世, 但是近几十年来, 这片美丽的海域受到了严重的破坏, 由于注入黑海的各条河流把上游农田里的化肥带入海中以及近岸城市把垃圾粪便排入黑海, 其结果是营养盐过剩, 水域富营养化, 导致海藻和细菌迅速繁殖, 在水面形成厚而密集的漂浮层,

收稿日期: 2003-12-12; 修回日期: 2004-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50339040, 40076021); 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX3-SW-214)

作者简介: 姚云(1979-), 女, 河南济源人, 在读硕士, 研究方向: 海洋生物地球化学, E-mail: yaoyun@ms.qdio.ac.cn; 沈志良, 通讯作者, E-mail: zhshen@ms.qdio.ac.cn

使阳光无法照射到水下,破坏了黑海水体的自然生态平衡。据德国科学研究部最近公布的一份关于北海水域状况的调查报告中说,每年有 50×10^4 t 氮、46000 t 磷流入北海水域。

在中国,许多海湾呈现富营养化状态。如大连湾、杭州湾、胶州湾等^[15-17]。2001年 国家海洋局组织沿海省、自治区、直辖市全面实施了全国海洋环境调查。结果表明,中国大部分海域的主要污染物是无机氮、无机磷和石油类,污染区域主要分布在长江口至杭州湾、珠江口、辽河口、鸭绿江口等近岸海域^[18]。2001年 5月 长江口发生大面积赤潮^[19]。到 2001年 为止,东海区已记录赤潮事件 208次^[20]。据不完全统计,1972~1998年 中国有记载的赤潮达 360次,且赤潮发生频率明显增加,发生规模和危害程度也日益加剧^[19]。

1 导致富营养化的原因

Nixon^[1]在讨论富营养化问题时指出:海湾或河口的初级生产力若不断增高,则可以说此系统正处于富营养化进程中。无机营养盐和有机物大量输入,水交换能力减弱,水滞留时间延长,摄食压力下降等均可能引起水域富营养化。国内外学者对富营养化形成的原因进行了探讨,大体包括陆源径流输入、大气沉降输入、海水养殖废水排放、水流状态限制等几个主要方面。

1.1 陆源径流输入

陆源径流输入包括地表径流输入和地下水输入。河口地区往往是经济发达、人口稠密的地区,大量工农业废水和城市生活污水排入海湾,河口和沿岸海域。其中富含 N、P 的有机质进入水体后,绝大部分在海洋微生物作用下,发生降解,形成各种无机盐类,成为海水中营养盐的主要来源。在美洲, Mississippi 河 N、P 含量的升高使得墨西哥湾水中溶解态 N、P 浓度比 1950 年增加了一倍^[7]。Moore^[21]用 226Ra 示踪法发现了地下水至少对美国东海岸部分海域的营养盐输入起了重要作用。每年输入 Oder 河的总氮和总磷分别为 6.79×10^4 t 和 0.62×10^4 t,其中 71%~88% 的总氮和 73%~89% 的总磷输入波罗的海^[22]。在中国,每年经漳江排入福建东山湾的污染物入海量为 2175.71 t,东山湾沿岸的云霄、漳浦、东山的化肥使用量分别为 9372 t/a、51524 t/a、5170 t/a,因其实际使用率不高,相当部分经降水淋洗或排灌等形式流入

小溪、漳江后汇入东山湾^[23]。广西廉州湾沿岸的入海河流每年携带入海的有机物和营养盐高达 10.1×10^4 t 及 0.59×10^4 t^[24]。据估算,1986 年进入珠江口海域的污染物质, COD(化学耗氧量)为 39×10^4 t,磷为 1081 t,三氮为 31×10^4 t^[25]。长江每年向长江口海区输送 91.2×10^4 t 无机氮和 1.5×10^4 t 无机磷,这不仅对长江口海区和东海的氮磷循环,而且对太平洋地区也有很大影响^[26]。

1.2 大气沉降输入

大气输入是沿岸海域物质的一种重要来源。一部分通过陆地径流(地表和地下)间接带入海洋,另一部分是直接降落在沿岸近海水域。P 的大气输入与 N 相比相对较小,因此国内外学者对大气输入的讨论大都集中在 N 上。Beddig^[27]对德国 Bight 海域研究发现,1989 年 11 月至 1992 年 5 月期间该海域 30% 的氮来源于大气。Rendell^[28]对欧洲北海南部进行了 15 个月的大气取样,认为大气沉降对北海氧化态氮做出了重要贡献。Brockmann^[29]认为大气 N 的输入是造成欧洲北海富营养化的因素之一。Jaworski^[30]指出,在美国沿海,大气供应了 50% 以上浮游植物所需要的氮,且大气中氮氧化物的沉降对美国东北海岸水体的富营养化起了重要作用。Shen^[31]研究发现,输入至长江的降水无机氮通量占长江无机氮输出通量的 62.3%,是长江口高含量无机氮的主要控制因素。而大气湿沉降过程是中国黄海西部某些海洋生物营养物质(NO_3 、 NH_4 、 PO_4)的重要来源^[32]。

1.3 海水养殖废水排放

养殖活动自身产生的有机物如残饵和养殖生物的排泄物,也会影响周边水环境质量。刘家寿等^[33]在探讨网箱养鱼时得出仅 24.7% 的 N 和 30% 的 P 用于鱼体生长,其余的 N、P 主要损失于排泄,且饲料中约 75% 的总氮和总磷进入水中。象山港水域网箱养鱼投喂的过剩饵料和鱼类排出的粪便日积月累已达 1m 多厚,致使水质严重恶化^[34]。Braaten 研究发现在海水网箱养殖鲑鱼中,投喂的干湿饲料有 20% 未被食用^[35]。Beveridge^[36]等根据已有的资料总结表明,对于鲑鱼、鳟鱼来说,消化 100 g 饲料时排出粪便约 20~30 g。由此可见,养殖过程中产生的残饵和粪便的数量相当可观。

1.4 水流状态限制

在大部分受 N、P 污染严重的封闭或半封闭海

湾,水交换能力弱,水的滞留时间长。波罗的海与北海通过狭浅的海峡相连,限制了水的交换。据估计,波罗的海海水的滞留时间长达 25~30 年^[37]。NSTF 研究发现,在水交换受限制的北海荷兰海岸和德国海岸,明显受 *Phaeocystis* 水华的影响,生态系统已显示出退化现象^[10]。中国渤海湾是个典型的半封闭海湾,水交换能力较差,经常爆发赤潮^[19]。

2 关于近海水域富营养化水平的评价

目前国际上还没有统一的评价水域富营养化的标准和方法,国内外许多学者致力于此研究,提出了一些方法和模型,以期较为客观的了解水域的富营养化状况,预测水体质量的可能发展趋势,并为有效的防治水体污染和提高水体质量提供合理的科学依据。

评价方法可以分为单因子法和多因子法^[38],但因为富营养化的复杂性,单因子法一般并不能准确的说明水域富营养化的水平。引起富营养化的原因是多维的,包括物理的,化学的,生物的作用等,因此多因子法更能如实的反映水体质量。

2.1 营养指数法

日本的冈市友利 1972 年提出如下营养指数方程^[39]:

$$E = \frac{c(\text{COD}) \times c(\text{DIN}) \times c(\text{DIP}) \times 10^6}{4500}$$

E 为营养指数, $E \geq 1$ 时表示水域已经呈现富营养化的特征。

$c(\text{COD})$ 为化学耗氧量浓度 mg/dm^3 ;;

$c(\text{DIN})$ 为溶解无机氮浓度 mg/dm^3 ;

$c(\text{DIP})$ 为溶解无机磷浓度 mg/dm^3 ;

4500 为来源于特定海区中 COD、DIN、DIP 三者富营养化单项阈值的乘积。在不同的海区,这三者的阈值是不同的。许多学者认为三者的阈值范围为 COD $1 \sim 3 \text{ mg}/\text{dm}^3$, DIN $0.2 \sim 0.3 \text{ mg}/\text{dm}^3$, DIP $0.01 \sim 0.02 \text{ mg}/\text{dm}^3$ ^[40]。

2.2 NEEA 法^[41]

美国国家海湾富营养化评估法 (NEEA) 是较有名的关于河口和海湾富营养化水平评价的综合模型,其方法的核心包括人类影响因子、富营养化状态因子和未来响应因子。它是以压力-状态-响应为模型基础的,即人类影响输入大量营养盐类,在合适的条件下,叶绿素、大型藻类、附生植物及一些沉水

植物生长繁殖,其生长状态及数量成为富营养化状态,未来营养盐的变化可能对海湾营养水平的影响是未来响应因子。此种方法参数较多,并且已经应用于美洲和欧洲的许多河口和海湾,结果较准确。

2.3 模糊综合评价模型法

容跃和金键^[42]用模糊集理论开辟了新的途径计算水质综合评价指数。王化泉和赵丽云^[43]在容跃等的工作基础上又将模糊数学方法运用到海水水质评价中来。彭云辉和王肇鼎^[44]将模糊数学理论应用于近海(包括河口区)水域富营养化水平的评价,从而有了各种模糊综合评价模型。因海水水质的污染程度、水质分级界限等本身都是一些客观存在的模糊概念与模糊现象,所以众多学者认为模糊综合评价模型能够较为客观的反映海水水质的实际情况。如徐恒振^[45-46]提出以矩阵代数乘法复合运算代替模糊复合运算(取大取小)的模糊综合评价模型和物元分析法,邓超冰应用模糊数学理论提出海水水质评价的模糊分析优选法及灰色聚类法^[47],熊德琪和陈守煜^[48]结合改进的层次分析法提出综合指标权重矩阵的概念及矩阵的确定方法,推导出新的海水富营养化程度模糊评价理论模式。这些模型都尽量避免了数据信息的遗失,从而可以得到较为准确的结果。

模糊综合评价模型法的基本思路是根据国家海水水质分级标准(可视为营养级标准)拟出隶属函数,求出各评价因子对各级标准的隶属度,得到隶属矩阵 $R = (r_{ij})_{nm}$ ($0 < r_{ij} \leq 1$),然后根据公式 $\bar{w}_i =$

$$\frac{x_i / \bar{S}_i}{\sum_{i=1}^n X_i / \bar{S}_i}$$

计算各评价因子的权重,得出一模糊向量

$$A = \{\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n\}$$

最后以综合评价矩阵 $Y =$

$$A \cdot R = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$$

作为综合评价的结果。 r_{ij} 为任一评价因子 i 对其 j 级标准的隶属度, x_i 为评价因子 i 的实测值, \bar{S}_i 为评价因子 i 各级标准的平均值, \bar{w}_i 为归一化后因子 i 的权重, n 为标准级数, m 为评价因子个数, y_i 为海水对 i 级水质标准的隶属度。

最近,李凡修和陈武^[49]采用中国学者赵克勤的集对分析不确定性理论评价了海水富营养化状况,这是另一种模糊评价方法。

尽管模糊综合评价模型有许多的优点,如评价相对准确、严谨,但是鉴于富营养化的复杂性及评价等级之间的模糊性,对于水域富营养化的评价模型和方法仍需要进一步完善和创新。

比较 3 种方法, NEEA 综合法最为准确, 使各研究结果之间具有可比性, 但是参数众多, 较复杂。营养指数方程法和模糊数学综合评价模型法计算简单, 结果较准确, 许多研究者也采用这两类方法。在中国许多学者以国家海水水质标准作为评价富营养化的分级依据, 为了使不同海湾的评价结果之间具有可比性, 可以用国家海水水质标准作为营养级标准。

3 防治近海水域富营养化的措施

近海水域富营养化的后果是海洋生态系统遭到破坏, 失去平衡, 同时也造成了海洋经济的巨大损失, 因此各国都加大力度预防和治理富营养化。各国制定了相应的法律法规限制污染物的排放, 投入大量的人力、物力、财力, 实施各种计划集中治理污染海区, 并加强国际间的合作。黑海周围的国家保加利亚、罗马尼亚、俄罗斯、土耳其和乌克兰已联合拟定了一项计划, 在 3 年内清除黑海的严重污染, 拟投资 3160 万美元。2002 年芬兰政府启动全民计划保护波罗的海^[37]。在中国, 2001 年国务院正式批准了由国家环保总局、国家海洋局、交通部等联合制定的“渤海碧海行动计划”, 以期从根本上扭转渤海污染日益严重, 生态环境不断恶化的状况, 达到海域环境质量明显好转, 生态系统初步改善的目标。许多国家还对处理城市废水和垃圾的基础设施进行投资, 因地制宜的兴建大中小型污水处理工程, 提高污水处理的技术水平, 减少工业废水和生活污水中 N、P 物质直接排入海水; 倡导生态农业的建立, 减少化学 N、P 肥的使用量, 提高其利用率, 并积极推广使用生物肥, 保护一些有益藻类, 作为海洋环境中有效的生物过滤器, 如红树林素有“海洋湿地”之称, 天然红树林对来自陆地的污染物起着过滤、吸收作用, 一些大型藻类如龙须菜已经在许多富营养化海域推广; 推广科学养殖模式, 合理布置养殖区, 适量有效的施放饵料, 及时清除养殖水体中的污染物。

4 结语

由于人类活动的影响, 近海水域富营养化问题已经越来越严重。国际上对于富营养化尚没有一个统一的标准, 这可能因为不同的海区水文、化学、物理特性不同, 从而造成其净化能力和纳污能力不同, 也给富营养化程度的评价带来了困难。但不可否认的是, 在水域富营养化的形成机制中, 众多研究资料表

明, 外源营养盐的输入是个不可忽视的重要原因。因此, 控制营养盐的外源输入已成为公认的治理富营养化的一项重要措施。建议加大污水处理力度, 提高化肥的使用效率, 减少外源营养盐排入河口、海湾和沿海水域。

参考文献:

- [1] Nixon S W. Coastal eutrophication: A definition, social causes and future concerns[J]. *Ophelia*, 1995, 41: 199–220.
- [2] Paerl H W. Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and ground-water as “new” nitrogen and other nutrient sources[J]. *Limnol Oceanogr*, 1997, 42 (5. Part 2): 1 154–1 165.
- [3] Marchetti R, Provini A, Ciosa G. . Nutrient load carried by the River Po into the Adriatic Sea 1968–1987[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1989, 20: 168–172.
- [4] Ambio M. Special issue: Marine eutrophication[J]. *Ambio*, 1990, 19 (3): 25–29.
- [5] Van Bennekom A J, Wetsteijn F J. The winter distribution of nutrients in the Southern Bight of the North Sea (1961–1978) and in the estuaries of the Scheldt and the Rhine/Meuse, Netherlands[J]. *Journal of Sea Research*, 1990, 25: 75–87.
- [6] Turner R E, Rabalais N N. Changes in Mississippi River water quality this century – implications for coastal food webs[J]. *Bioscience*, 1991, 41: 140–147.
- [7] Turner R E, Rabalais N N. Evidence for coastal eutrophication near the Mississippi River delta[J]. *Nature*, 1994, 368: 619–621.
- [8] Shen Zhiliang. Historical Changes in Nutrient Structure and its Influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2001, 52: 211–224.
- [9] 沈志良. 渤海湾及其东部水域水化学要素的分布 [A]. 中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊[C]. 北京: 科学出版社, 1999. 41: 51–59.
- [10] NSTF (North Sea Task Force). North Sea Quality Status Report[R]. London: Oslo and Paris Commission, 1993.
- [11] 藏公柱. 环境报告[J]. 海洋环境保护工作通讯, 2003, 1: 32.
- [12] Neilsen B J, Cronin L E. Estuaries and Nutrient. – Humann Press[R]. Clifton, New Jersey, 1981. 643.
- [13] Rosenberg R. Eutrophication – the future Marine coastal

- nuisance? [J]. *Mar Poll Bull*, 1985, 16: 227 – 231.
- [14] Vidal M. Coastal Eutrophication Research in Europe: Progress and Imbalances[J]. *Marine Bulletin*, 1999, 38 (10): 851 – 854.
- [15] 杨新梅. 大连湾海水环境质量状况分析[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(4): 18 – 20.
- [16] 章守宇. 杭州湾富营养化及浮游植物多样性问题的探讨[J]. *水产学报*, 2001, 25(6): 512 – 517.
- [17] 孙耀. 胶州湾营养状况的化学指标分析[J]. *海洋环境科学*, 1993, 12(3-4): 25 – 31.
- [18] 战秀文. 2001年中国海洋环境质量状况[J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(2): 47 – 49.
- [19] 齐雨藻. 中国沿海赤潮[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [20] 叶属峰, 黄秀清. 东海赤潮及其监视监测[J]. *海洋环境保护工作通讯*, 2003, 22(2): 10 – 14.
- [21] Moore W S. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by 226Ra enrichments [J]. *Nature*, 1996, 380 (18): 612 – 613.
- [22] Grelowski A. Budget calculations of nitrogen, phosphorus and BOD5 passing through the Oder Estuary[J]. *Journal of Marine Systems*, 2000, 25: 221 – 237.
- [23] 李亚治. 福建东山湾水质状况分析与污染防治对策[J]. *海洋环境科学*, 2000, 19(1): 64 – 67.
- [24] 陈群英. 广西廉州湾水质状况评价[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(2): 56 – 58.
- [25] 马应良. 珠江口海域环境质量状况和保护对策[J]. *海洋环境科学*, 1989, 8(4): 65 – 69.
- [26] 沈志良. 长江生源要素的输出通量[J]. *海洋科学*, 1991, 6: 67 – 69.
- [27] Bedding S, Brockman U H, Dannecker W, *et al.* Nitrogen fluxes in the German Bight [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, 34 (6): 382 – 394.
- [28] Rendell A R. The atmospheric input of nitrogen species to the North Sea [J]. *Tellus B*, 1993, 45(1): 53 – 56.
- [29] Brockmann U, Billen G, Goesles W W C. Pollution of the North Sea – an Assessment[R]. Berlin: Springer – Verlag., 1988, 348 – 389.
- [30] Jaworski N A, Howarth R W, Hetling L J. Atmospheric deposition of nitrogen oxides out to landscape contributes to coastal eutrophication in the Northeast United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31 (7): 1995 – 2004.
- [31] Shen Zhiliang. A Nitrogen Budget of the Changjiang River Catchment[J]. *Ambio*, 2003, 32(1): 65 – 69.
- [32] 高原. 沿海海 – 气界面的化学物质交换[J]. *地球科学进展*, 1997, 12(6): 553 – 563.
- [33] 刘家寿. 网箱养鱼对环境的影响的研究进展[J]. *水生生物学报*, 1997, 21(2): 174 – 183.
- [34] 王福表. 网箱养殖水污染及其治理对策[J]. *海洋科学*, 2002, 26(7): 24 – 26.
- [35] 杨蕾. 中国海水养殖及其可持续发展的对策[J]. *水产科学*, 2003, 22(4): 45 – 48.
- [36] Beveridge M C M. *Advances in world Aquaculture* [R]. Louisiana: World Aquaculture Society, 1991, 3: 456 – 467.
- [37] Kohonen J T. Finnish strategies for reduction and control of effluents to the marine environment – examples from agriculture, municipalities and industry[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 115 – 122.
- [38] 林荣根. 海水富营养化水平评价方法分析[J]. *海洋科学*, 1996, 15(2): 28 – 30.
- [39] 冈市友利. 浅海的污染与赤潮的发生, 内湾赤潮的发生机制[R]. 日本水产资源保护协会, 1972, 58 – 76.
- [40] 陈彬. 福建湄洲湾海域营养状态趋势预测[J]. *台湾海峡*, 2002, 21(3): 322 – 327.
- [41] Bricker S B, Ferreira J G, Simas T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 169: 39 – 60.
- [42] 容跃, 金键. 用模糊集理论计算水环境综合评价指数[J]. *环境科学*, 1982, 3(2): 69 – 72.
- [43] 王化泉, 赵丽云. 海洋环境质量评价探讨 – 模糊集理论的应用[J]. *热带海洋*, 1985, 4(2): 44 – 51.
- [44] 彭云辉, 王肇鼎. 珠江河口富营养化水平评价[J]. *海洋环境科学*, 1991, 10(3): 7 – 12.
- [45] 徐恒振. 海水水质级别的模糊综合评价方法[J]. *海洋环境科学*, 1992, 11(2): 41 – 48.
- [46] 徐恒振, 尚龙生, 周传光. 海水水质评价的物元分析法[J]. *海洋环境科学*, 1996, 15(3): 10 – 15.
- [47] 邓冰超. 海水水质的模糊综合评价模型的比较[J]. *海洋环境科学*, 1993, 12(2): 22 – 28.
- [48] 熊德琪, 陈守煜. 海水富营养化模糊评价理论模式[J]. *海洋环境科学*, 1993, 12(3-4): 104 – 110.
- [49] 李凡修, 陈武. 海水水质富营养化评价的集对分析方法[J]. *海洋环境科学*, 2003, 22(2): 72 – 74.

(本文编辑: 张培新)