

水体沉积物的污染控制技术研究进展

朱广伟¹, 陈英旭², 田光明²

(1. 中科院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008, E – mail: zhugw@sohu. com;
2. 浙江大学环境工程系, 浙江 杭州 310029)

摘 要: 介绍了水体沉积物中所储存的过量有机质、N、P 等营养物及其他污染物释放后, 对水体质量及水生生态系统可能造成的威胁; 评述了目前较多采用的强化的自然消减技术、原位覆盖技术、原位治理技术以及生态疏浚技术等几种水体沉积物的污染控制技术。
关键词: 沉积物; 污染控制技术
中图分类号: X703. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 0267(2002)04 – 0378 – 03

Reviews on Development of Pollution Control Techniques of Sediment

ZHU Guang-wei¹, CHEN Ying-xu², TIAN Guang-ming²
(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)
Abstract: Owing to long – term accumulation, bottom sediment of rivers and lakes may contain a lot of pollutants, such as heavy metals, organic toxicants, organic matter, nitrogen and phosphorus. Releasing pollutants from the bottom sediment has become one of the major factors affecting ecological health of surface water. In this paper, pollution control techniques for bottom sediment have been reviewed, including natural reduction, in – situ capping, in – situ treatment and capping technology.
Keywords: sediment; pollution control technology

长期的外源输入和水生生物残渣的沉积, 使河流、湖泊等水体的沉积物中富集了大量的有机质、N、P 等营养物质, 这些营养物质一方面为水生生物提供了丰富的食物来源, 另一方面如果沉积物中营养物质含量过高, 则可能会大量释放到水体中, 使上覆水体处于富营养化状态, 引起水生生态系统的退化。如杭州西湖 1988 年 7 月至 1989 年 6 月间沉积物释放的磷占外源输入磷负荷的 41.5%^[1]。由于内源负荷磷的影响, 西湖引水工程的效果在停机 10 d 后即消失^[2]。对瑞典一个湖泊的研究表明, 夏季湖泊中 99% 的养分来自沉积物^[3], 更重要的是, 当水体养分的外源得到有效控制后, 沉积物中养分的季节性再悬浮仍能使水体的富营养化持续数十年^[4]。

通过各种途径进入水体的重金属很容易被水体悬浮物或沉积物所吸附、络合或共沉淀, 从而在水底的沉积物中富集, 致使沉积物中重金属浓度相对于水中的浓度要高得多。人类排放的大量有机有毒物质也有相当一部分进入水体而沉积在水底沉积物中, 从而对水生生态系统构成长期的威胁。

因此, 改善地表水体的水质, 必须对这些水底沉积物的污染释放进行有效的控制。本文对目前应用较多的沉积物污染控制技术作了简要评述。

收稿日期: 2001 – 08 – 02
作者简介: 朱广伟(1972—), 男, 浙江大学环境工程系博士研究生, 目前从事水体沉积物中污染物的环境行为研究工作。

1 污染源控制和自然净化法

沉积物的污染治理费用昂贵, 而且有时并不必要, 尤其是在中度污染区, 有时仅仅在有效控制外源输入后, 利用水体—沉积物系统本身的稀释、挥发、吸附、化学反应、生物作用等自然过程将污染物降低到可以忍受的浓度。自然净化法被美国 EPA 的污染沉积物管理对策项目列为一种最基本的治理方法, “如果在污染源得到控制的情况下, 在可接受的时间内沉积物污染能够得到恢复, 委员会将不会资助进行更多的清除行动”。

在有些水域纯粹依赖自然净化会有一定的局限性。比如说加拿大安大略湖西端的 Hamilton 湾的湖水水质, 用修正的 Snodgrass 模型预测, 即便是在严格的污染源控制下, 经过数十年, 沉积物污染仍将会恢复到治理前的状况^[5]。为克服这种缺点, Garbaciak 等人提出一种连续风险降低法, 即首先分析水域中沉积物的主要生态风险, 在利用一些工程措施控制其主要生态风险的同时, 最大程度地利用自然净化过程。他们在治理 Whatcom 航道沉积物污染时, 根据历史监测资料先确定 Whatcom 航道的主要生态风险是 Hg, 然后根据现场调查, 确定出几个污染严重点, 疏浚掉 Hg 含量超过 1 mg · kg⁻¹ 的沉积物, 沉积物的生态风险因此下降了 50%, 剩余 Hg 的污染则结合科学的航道管理采用自然净化法处理^[6]。

对于水体的自然净化能力可以采取的措施进行强化, 如水体

曝气,即向沉积物-水界面通气、复氧来消除水底的缺氧症。另外一种强化法是强化的植物修复,如陈汉辉等人^[7]将在实验室分离培养的水网藻置于大型网袋中,投放到 N、P 含量较高的水体中,10 d 左右捞取一次,可以有效地去除地表水体中的 N、P 养分。Rock^[8]认为在污染的沉积物上种植一层植物,可以形成有效的保护层,防止沉积物的再悬浮和污染物的溶解扩散,另外维管型植物生长过程中根际可以释放出氧、酶等物质,有助于降解沉积物中有机污染物、降低重金属等污染物的生态活性,这种方法对于浅水水体、湿地系统的污染沉积物的治理具有很好的应用前景。

2 原位覆盖

原位覆盖是将一层粗沙等清洁物质沉积在污染的沉积物上面来有效地限制沉积物对上覆水体的影响的技术。覆盖材料可以是清洁沉积物、沙、砾石,中间还可以混有单层或多种土工材料。原位覆盖可以起到以下三个功能:(1) 将污染沉积物与底栖生物物理性地分开;(2) 固定污染沉积物,防止其再悬浮或迁移;(3) 降低污染物向水中的扩散通量。目前覆盖法已经在河道、近海、河口等地有成功使用,如日本 Kihama 湖和 Aka-noi 湾、美国的华盛顿 Simpson-Tacoma 海滨、Eagle 港、加拿大安大略省 Hamilton 港、挪威 Eitheim 湾等。

Bona 等^[9]采用一种包括化学分析、毒性测定以及栖息地质量评价(Habitat Quality Index)在内的一种整体性评价方法,评价了意大利 Venice 环礁湖 Lago dei Teneri 区沙土覆盖法治理污染沉积物的工程效果。发现对于水动力强度不大、污染程度不太高的沉积物,沙土覆盖可以有效地阻止污染沉积物扩散,使水底栖息地的氧含量能够满足底栖生物的需要。覆盖法可以与疏浚相结合,尤其是在航道中,先疏浚后覆盖。如日本的 Biwa 湖沉积物治理项目中采用先疏浚后沙盖的两步处理来限制沉积物中磷的释放。

覆盖法的不足是降低了水深,对底栖生态系统具有破坏性,在浮泥较多的水域,覆盖法如果施工不当,覆盖层上很快又会有一层富含有机质、N、P 及有毒污染物的浮泥沉积下来,继续对水体产生危害,降低了覆盖法的工程效果。另外覆盖法的一个大问题是寻找便宜清洁的沙土来源。在美国西雅图,由于清洁沙土难以获得,曾经利用清洁沉积物来覆盖污染的沉积物,尽管这种方法在远离海岸的深水区是成功的,但由于担心船只螺旋桨会搅起沉积物而破坏覆盖层,该方案在近岸区难以实施^[10]。

3 原位处理技术

第一个较为完善的原位处置记录可能是 Rippl^[11]所作的。Rippl 将铁或硝酸盐注入沉积物中有效地降低了磷的活性,从而降低了磷再次进入水体的机会。用沉药箱和恰当的试剂也可以进行沉积物的原位固定^[12],但这种方法不能完全控制污染物通过孔隙的上覆扩散。另外,疏浚之前先在沉积物中施用一种富含磷的试剂,可以有效地降低沉积物疏浚中铅的释放^[20]。并非所有的污染沉积物都可以进行原位处理,其处理效

果也因地而异,所以首先要对方法的可行性进行评价。

另一类处理方法是间接沉积法。比如投放铝盐、铁盐、石灰等到水体中,会形成一层新的活性层沉积在污染沉积物表面^[14、15]。这些化学物质很容易地与沉积物中释放出来的磷形成沉淀,阻止了磷向水体中的扩散。这些方法往往更关注水体中磷的沉积及有机质颗粒的再悬浮,很少关注他们对沉积物的处理能力。这种方法的最大缺陷是对水生生物存在潜在的影响。石灰可以增大水中氨的毒性,而铁和铝盐则可以破坏鱼鳃的正常功能。

4 疏浚

在仅靠水体的自净能力或覆盖等工程措施无法有效控制沉积物的污染释放对水体水质、生态系统的破坏时,则必须对沉积物进行疏浚处理。对于重金属、有机有毒污染物污染严重的沉积物,疏浚可以永久性消除沉积物对水质的影响。如在美国马萨诸塞州的 New Bedford 港,疏浚有效地消除了沉积物 PAHs 和重金属释放^[16]。然而对于疏浚沉积物能否消除水体的富营养化还存在很大的争议^[17]。尽管许多报道都对疏浚抱有很高的期望^[18-20],也有个别成功的例子^[21],但也有很多失败的案例,如南京玄武湖、日本 Suwa 湖等^[17]。疏浚残留下的沉积物残体很容易发生倒塌、扩散,从而会再次污染所有的表层沉积物^[22]。在荷兰的 Zierikzee 湾,“疏浚后沉积物污染变得比疏浚前更为严重”^[23]。

另外,沉积物污染的疏浚治理费用十分昂贵。如果按照 NOAA(National Oceans and Atmospheric Administration, US Department of Commerce)关于多环芳烃(PAHs, $45 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)的规定划分去疏浚污染沉积物的话,像五大湖的 Hamilton 湾及 Indiana 湾这样的污染港口的治理费用相当惊人(Hamilton 湾的污染中心区需 2 千万美元,全部治理需要 40 亿美元)。由于财力、人力的限制,疏浚所有的污染沉积物几乎是不可能的。

另外,疏浚沉积物的处置会引起更多涉及政策、经济、立法甚至难以解决的环境问题。比如,由于经常进行航道疏浚和生态疏浚,Hamilton 湾南岸一带的许多湿地都被疏浚和填埋。更有甚的是,在浅水地区,将堆积疏浚沉积物后覆土造地,人为地将自然湿地改成了陆地,而且港口委员会还有权批地处置沉积物以及获得覆土,这些人类活动实际上侵占了许多野生动物如鸟类、鱼类的栖息地。另外,船只通过这些松散的厌氧沉积物堆积区时会立即引起强烈的再悬浮作用,造成如缺氧症、高浓度硫化氢、高浊度等水质问题,以及对地下水造成潜在危害^[24、25]。

地表水的环境治理是一个系统工程,可以将上述方法综合运用来达到恢复水体水质的目的。如在运河(杭州段)的污染治理中,既采用了部分河段沉积物疏浚的方法来降低沉积物污染释放的强度,还通过污染源控制、上游引水等手段来强化水体的自净化能力,取得了较为满意的效果。

参考文献:

- [1] 韩伟明. 底泥释磷及其对杭州西湖富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 1993, 5(1): 71-77.

- [2] 吴根福, 吴雪昌, 金承涛. 杭州西湖底泥释磷的研究[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(2): 107 – 110.
- [3] Rydin F, Brunberg A. Seasonal dynamics of phosphorous in Lake Erken surface sediments[J]. *Arch Hydrobiol Spec Issues Advanc Limnol*, 1998, 51: 17 – 167.
- [4] Sas H. Lake Restoration by reduction of Nutrient Loading: Expectations, Experiences, and Extrapolations. Acedemia Verlag, St. Augustin, Germany. 1989.
- [5] Van Arkel G J. Long – term sediment modeling in Hamilton Harbour, M. Sc. Thesis, Civil Engineering, McMaster University, Ontario, Canada. 1993.
- [6] Garbaciak S, Spadaro J P, Thornburg T, et al. Sequential risk mitigation and the role of natural recovery in contaminated sediment projects [J]. *Water Science & Technology*, 1998, **37**(6 – 7): 331 – 336.
- [7] 陈汉辉. 应用水网藻净化水源水质[J]. 重庆环境科学, 1998, (2): 19 – 21.
- [8] Rock S A. Potential for phytoremediation of contaminated sediments[A]. In: National Conference on Management and Treatment of Contaminated Sediments[C]. EPA – 625 – R – 98 – 001. 1997. 101 – 105.
- [9] Bona F, Cecconi G, Maffiotti A. An integrated approach to assess the benthic quality after sediment capping in Venice lagoon[J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, 3: 379 – 386.
- [10] Hale E, Browning S, Browning D, et al. On – scene coordinator’s report, East Harbour operable unit removal action. Wyckoff Harbour Superfund Site, Bainbridge Island, Washington. US Environmental Protection Agency and Army Corps of Engineers, Seattle, Washington. 1994.
- [11] Ripl W. Biochemical oxidation of polluted lake sediment with nitrate — A new restoration method[J]. *Ambio*, 1976, 5: 132 – 135.
- [12] USEPA. EPA’s Contaminated Sediment Management Strategy. EPA 823 – R – 94 – 001, Washington DC. 1994.
- [13] Haecon. ABR – CIS Bioremediation. Ghent, Belgium. 1994.
- [14] Murphy T P, Hall K G, Northcote T O. Lime treatment of a hardwater lake to reduce eutrophication[J]. *Lake and Reservoir Management*, 1988, **4**(2): 51 – 62.
- [15] Prepas E E, Murphy T P, Crosby J M, et al. Reduction of phosphorus and chlorophyll a concentrations following CaCO_3 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ additions to hypertrophic figure, Eight Lake, Alberta[J]. *Environmental Science & Technology*, 1990, 24: 1 252 – 1 258.
- [16] Otis M J. “New Bedford Harbor, Massachusetts Dredging/Disposal of PCB Contaminated Sediments,” Dredging 94 – Proceedings of the Second International Conference on Dredging and Dredged Material Placement, American Society of Civil Engineers, 1994, 1: 579 – 587.
- [17] 濮培民, 王国祥, 胡春花, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? [J]. 湖泊科学, 2000, **12**(3): 269 – 279.
- [18] Murphy T P, Mawhinney M, Savile H, et al. Do it yourself dredging that works[J]. *Lake Line*, 1990, **10**(4): 2 – 4.
- [19] 刘丽萍. 底泥疏挖工程对草海水生生态环境的影响预测[J]. 云南环境科学, 1999, **18**(1): 11 – 12.
- [20] 卢云涛. 滇池草海污染底泥疏挖及处置工程效益分析[J]. 云南环境科学, 1998, **17**(2): 27 – 30.
- [21] Murphy T P, Hodge V. Wilcox Lake Study, Gartner – Lee report to Richmond Hill, Toronto. 1995.
- [22] Cooke G D, Welch E B, Peterson S A, et al. Lake and Reservoir Restoration, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI. 1986.
- [23] Murphy T P, Lawson A, Kumagai M, Babin J. Review of emerging issues in sediment treatment[J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 1999, (2): 419 – 434.
- [24] Irvine K N, Droppo I G, Murphy T P, Lawson A. Sediment resuspension and dissolved oxygen levels associated with ship traffic: implications for habitat remediation[J]. *Water Pollution Research Journal Canada*, 1997, **32**(4): 421 – 437.
- [25] 汤承彬. 草海底泥堆放对地下水的污染分析[J]. 云南环境科学, 1998, **17**(2): 31 – 34.

(上接第 377 页)

- Sci Technol*, 2000, **34**(11): 2 131 – 2 137.
- [15] 马文漪. 环境微生物工程[M]. 南京: 南京大学出版社, 1998.
- [16] Kaufman D D. Soil degradation and persistence of benchmark pesticides [M]. George Washington University Medical Center, 1976.
- [17] Dearden J C, Nicholson R M. The prediction of biodegradability by the use of quantitative structure – activity relationships: correction of biological oxygen demand with atomic charge difference[J]. *Pestic Sci*, 1986, 17: 305 – 310.
- [18] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [19] Van Genuchten, Wierenga P J. Mass transfer studies in adsorbing porous: 1. analytical solutions[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1976, 40: 473 – 480.
- [20] Seyfried M S, Rao P. Solute transport in undisturbed columns of an aggregated tropical soil: preferential flow effects[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1987, 51: 1 434 – 1 444.
- [21] Van Genuchten, Wierenga P J. Two – site/two – region models for pesticide transport and degradation: theoretical development and analytical solutions[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1989, 53: 1 303 – 1 310.
- [22] James C S, Gujin T. Evaluation of continuous distribution models for rate – limited solute adsorption to geologic media[J]. *Water Resour Res*, 2000, **36**(7): 1 627 – 1 639.
- [23] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [24] Nauman E B, Buffham B A. Mixing in continuous flow systems[M]. John Wiley and Sons, Inc., 1983.
- [25] Sardin M, Schweich D. Modeling the nonequilibrium transport of linearly interacting solutes in porous media: a review[J]. *Water Resour Res*, 1991, 27: 2 287 – 2 307.
- [26] Glendening L D, Jury W A, Ernst F F. A field mass balance study of pesticide volatilization, leading and persistence[A]. In: Kurtz D A eds., Long Range Transport of Pesticides[C]. Lewis, Chelsea, Mich, 1990.
- [27] Yates S R, Papiernik S K, Gao F. Analytical Solutions for the transport of volatile organic chemicals in unsaturated layered systems[J]. *Water Resour Res*, 2000, **36**(8): 1 993 – 2 000.
- [28] Simmons C S. A stochastic – convective transport representation of dispersion in one – dimensional porous media[J]. *Water Resour Res*, 1982, 18: 1 193 – 1 214.
- [29] Jury W A, Roth K. Transfer functions and solute movement through soil: theory and applications[M]. Birkhauser, Verlag, Basel. 1990.
- [30] Fogg G E, Nielsen D R, Shibberu D. Modeling contaminant transport in the vadose zone: perspective on state of the art[A]. In: Wilson L G eds., Vadose Zone Characterization and Monitoring[C]. CRC Press, Inc. 1995.
- [31] Cai Daoji, Zhu Zhonglin. Dynamics, fate and toxicity of pesticides in soil and groundwater and remediation strategies in mainland China[J]. *Soils Groundwater Pollut Rem*, 2000, 2: 225 – 253.