

# Advances of Fate and Transport Model for Faecal Indicator Bacteria in Coastal Bathing Water Sites

Guanghai Gao

Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria (Ministry of Education), College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin  
Email: gaogh@nankai.edu.cn

Received: Jul. 11<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 29<sup>th</sup>, 2017; published: Aug. 1<sup>st</sup>, 2017

---

## Abstract

Human and animals may be infected by pathogens in water and food consumption and direct body contact with contaminated waters. With the rapid development of economy and tourism industry and growth in the living standard, bathing water quality in China is getting more attention. The marine tourism industry is the new growth point of economic development in China. Microorganism contamination of coastal bathing water sites is a major threat to swimmers; therefore, coastal bathing water quality is getting more and more attention. The ability to predict fate and transport of faecal bacteria in bathing waters is quite challenging to water managers and government authorities. In recent years, the developments of computing technology and numerical modeling technique have provided valuable tools for water scientists, consulting companies and water management authorities to apply water quality models to bathing waters. However, advances of research on prediction model for micro-organism contamination in China is relatively slow compare to developed countries. Here in this study, the recent advances of physical-based faecal bacteria fate and transport model were studied.

## Keywords

Coastal Bathing Water Site, Water Quality Model, Faecal Indicator Bacteria

---

# 海水浴场粪便指标菌迁移转化模型研究进展

高广海

南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津  
Email: gaogh@nankai.edu.cn

收稿日期: 2017年7月11日; 录用日期: 2017年7月29日; 发布日期: 2017年8月1日

## 摘要

致病微生物可以通过饮用水、食物或直接接触感染人群和动物。随着我国经济的高速发展和人民生活水平的提高、旅游度假经济的迅速发展,滨海浴场水质越来越受到人们的关注。海水浴场环境中的微生物污染对旅游者身体健康甚至生命安全有直接影响,越来越受到人们的重视。因此,了解、掌握和有效管理水环境中的微生物污染是相关行业和管理机构所面临的重大挑战之一。随着计算机和数值模拟技术的迅速发展,计算机模型技术正越来越多地被国内外国学者、工程咨询机构和环境管理部门应用于微生物污染的研究及制定相关政策的过程中。然而,我国关于海水浴场微生物污染预测模型的相关研究工作和发达国家相比相对滞后。本文对预测和管理海水浴场污染的有效工具数学模型的研究进展及应用进行研究和总结。

## 关键词

滨海浴场, 水质模型, 粪便指标菌(FIB)

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

致病微生物可以通过饮用水、食物或直接接触感染人群和动物。在中国,随着经济的发展和人民生活水平的提高,旅游度假经济的迅速发展,滨海浴场水质越来越受到人们的关注,因此,了解、掌握和有效管理水环境中的微生物污染是相关行业和管理机构所面临的重大挑战之一。随着计算机和数值模拟技术的迅速发展,计算机模型技术正越来越多地被国内外国学者、工程咨询机构和环境管理部门应用于微生物污染的研究及制定相关政策的过程中[1][2],然而,我国关于海水浴场微生物污染预测模型的相关研究工作和发达国家相比相对滞后。

海水浴场中致病微生物主要来自人类和其它生物排泄物的直接或间接的排放到水体当中。由于致病微生物种类的多样和差异,加之其在自然水体当中的浓度较低,以及对一些致病微生物缺乏标准化的检测方法,使得监测和管理过程中对每一种致病微生物都进行监测是不现实的,因此,在实际检测中多采用利用粪便菌指标(FIB, Farcacal Indicator Bacteria)作为检测指标[1][2]。主要国家和地区的水质标准都采用粪便菌指标(FIB, Farcacal Indicator Bacteria)作为检测指标,例如欧盟,美国和中国等。尽管我国将粪便菌指标作为地表水检测指标,但国内关于致病微生物或粪便菌指标的数学模型研究相对较少,欧美国家关于此类研究起步较早。

## 2. 影响微生物指标迁移转化的环境因素

粪便菌(FIB)一旦离开原有的生存环境进入水体当中会面临巨大的生存压力,在地表水中,大肠杆菌的消亡率通常可以用一级反应方程来表示[1]:

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (1)$$

其中  $C$  为粪便菌群浓度(CFU/100 ml),  $k$  为消亡率( $\text{day}^{-1}$ )。

参数  $T_{90}$  (小时) 是指 90% 初始微生物消亡所需时间, 这个参数可以通过求解上述方程获得其用消亡率的表达式如下:

$$T_{90} = \frac{2.303}{k} \times 24 \quad (2)$$

粪便菌群的消亡过程受多种环境因素影响如光照强度、温度、盐度、泥沙等。

## 2.1. 盐度

在海水浴场中盐度是影响致病微生物及指标微生物的重要因素, 一般来讲在海水环境中指标微生物的消亡率远大于淡水环境中的消亡。许多研究表明微生物在海水中的消亡率要大于在淡水中的 [3] [4] [5]。Mancini [5] 通过实验室和现场研究发现致病菌指示微生物在 20℃ 下在淡水和海水中的消亡率分别为 0.8/天和 1.4/天。

Mancini [5] 将海水中的消亡率表示为:

$$k_{\text{salt}} = 0.8 + 0.006P_s \quad (3)$$

其中  $P_s$  = 盐度 [%]。

## 2.2. 光照

Gameson and Saxon [6] 的研究表明光照是影响粪便菌群消亡率的一个主要因素。他们发现同一组样品在黑暗和海水 4 米以下日光照射, 日光照射下消亡率大大高于黑暗条件下。Gameson and Gould [6] 的研究表明,  $T_{90}$  值在夏季日光照射下可以短到 20 分钟而在黑暗条件下  $T_{90}$  值高于 100 倍。Bellair et al. [7] 通过实验确定光照强度和  $T_{90}$  的关系。在黑暗条件下消亡率很小, 但在日出之后消亡率开始升高直到中午。  $T_{90}$  取值从中午的 1.9 小时到夜间的 40 小时。

通常光照强度和细菌的消亡率可以用如下关系式表达:

$$k_{\text{light}} = \alpha I \quad (4)$$

where  $\alpha_i = 0.00824 \text{ cm}^2/\text{cal}$ ,  $I = \text{Irradiance (cal/cm}^2/\text{day)}$ 。

where  $k_{\text{light}} = \text{光照引起的消亡率 (day}^{-1}\text{)}$ 。

由于不同波段光照对致病微生物的影响不同, Hipsey 等 [8] 建议在模型中考虑不同波长光照对致病微生物消亡率的影响, 如下:

$$k_{\text{light}} = \sum_{b=1}^N \alpha_b I_b(z) \quad (5)$$

## 2.3. 温度

通常温度对消亡率的影响可以用以下形式表达 [1]:

$$k_t = k_{20} \theta^{(T-20)} \quad (6)$$

其中  $k_t$  为在黑暗环境和温度  $T$  时微生物的消亡率,  $k_{20}$  为温度  $T = 20^\circ\text{C}$  时的消亡率,  $\theta$  为无量纲常数, 典型取值为 1.07,  $T$  为水温 ( $^\circ\text{C}$ )。

## 2.4. 泥沙的影响

粪便指示菌 (FIB) 以不同形式进入到水体中, 如生活污水, 表面径流, 水生动物, 底泥冲刷等。在天然水体和底泥中, 粪便菌群的存在形式一般可分为游离于水体的自由态和吸附于泥沙上的吸附态两种,

而泥沙运动状态和吸附特征的变化是泥沙影响水质的两个主要方面。一方面, 泥沙颗粒可以吸附大量污染物微生物, 一定动力条件下随泥沙沉积于底泥中, 在一定时间内减小水中污染微生物的浓度, 起到净化水体的作用; 另一方面, 当水动力、化学以及生物等外部条件改变时, 吸附在泥沙颗粒上的污染微生物可能改变其状态, 从吸附态转移到自由态, 或者沉积在底泥中的污染微生物随着底泥的冲刷重新进入水体, 造成水体的二次污染。因水环境中污染物粪便菌群与泥沙运动有着密不可分的关系, 故必须结合水流和泥沙运动的研究水沙环境中粪粪便菌群的迁移和转化。

Auer 和 Niehaus [9]把由于泥沙沉降引起的微生物消失率用泥沙乘降速度除以沉降距离表示, 如下:

$$k_{ss} = w_s / z_e \quad (7)$$

其中  $w_s$  泥沙沉降速度,  $z_e$  为水深。

近年来, 粪便指标菌(FIB)在泥沙中的存在被越来越多的研究, 这些研究显示大量细菌吸附在泥沙颗粒上和底泥之中[10]。Fries 等[11]对美国的 Neuse 河口进行粪便菌群和泥沙的吸附进行研究发现 38%的粪粪便菌群吸附在泥沙颗粒上。而 Characklis 等[12]发现肠球菌的吸附律可高达 55%。Gannon 等[13]指出泥沙沉积是影响粪粪便菌群存在的重要一素。悬沙可以通过两种方式影响粪大肠那个菌群的存在。其中一种方式就是吸附态的粪便菌群随泥沙沉积, 同时泥沙的存在影响光照在水中的强度进而影响粪粪便菌群的降解速度。Jamieson 等[14]在加拿大的 Swan 河进行了现场试验发现 E.Coli 随泥沙的冲刷再次进入到河水当中。Kashefipour 等[15] [16]利用耦合的水动力和粪粪便菌群(Faecal Coliform)迁移转化模型分别对英国的 Ribble 河口和 Irvine 海湾的粪粪便菌群(Faecal Coliform)的分布和传播过程进行了研究, 并在利用实测数据对模型进行验证的基础上, 成功的利用模型研究了不同因素对微生物污染分布及特性。但由于泥沙本身的运动规律复杂, 加之对微生物与泥沙相互作用的机理如吸附解析等的认识还比较有限, Kashefipour [15] [16]等的模型没有考虑底泥中微生物与上覆水中微生物的迁移转化过程。Bai 和 Lung [17]和 Gao 等[18]分别在 EFDC (Environment Fluid Dynamic Code)和 DIVAST (Depth Integrated Velocity And Solute Transport)模型的基础上考虑了底泥与上覆水之间微生物的交换、迁移, 并将模型应用于较简单及理想化的算例, 取得了较为准确的结果。Yang 等[19]和 Stapleton 等[20]尝试利用一二维耦合细菌迁移转化模型, 并考虑了吸附态的细菌的沉积和冲刷, 对 Severn 河口的微生物污染进行研究, 然而细菌的吸附律被假定为恒定的而不是随泥沙的浓度而变化的。Gao 等[18] [21] [22]将二维地表水水环境中泥沙微生物交互影响模型并应用于英国的 Severn 河口。由于致病微生物沿水深和底泥不同深度的分布特性不同, 因此对水沙环境中致病微生物三维迁移转化模型的研究是十分有必要的。

### 3. 微生物污染模型研究进展

综合考虑致病微生物在数环境中的生长, 消亡, 捕食, 沉积, 冲刷和其在自然水流下的对流扩散过程, 根据总量守恒, 致病微生物在水环境中的的迁移转化可以用如下方程表示[8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU_i}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_i \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) = C_{in} - C_{out} + (k_g - k)C \quad (8)$$

其中  $t$  为时间,  $x_i$  为  $i$  方向上的长度,  $U_i$  为  $i$  方向上的流速,  $D_i$  为紊流混合系数,  $C_{in}$  和  $C_{out}$  分别为致病微生物流入和流出量,  $k_g$  为生长率,  $k$  为消亡率(综合考虑酸碱度、光照、沉积、冲刷和捕食)。

### 4. 展望

总的来说, 由于对泥沙运动和泥沙与粪便菌群相互作用机理的认识不足, 目前建立的水沙环境下粪粪便菌群迁移转化模型还不完善, 针对相关的问题开展实验和理论研究, 建立机理性的模型是今后发展的

趋势。另一方面, 根据目前对机理已有的认识建立的数学模型在其整体构架和数学处理上是否合理和完善尚需要进一步探讨, 或者说, 如何在现有的对机理认识的基础上, 结合该方向的发展趋势, 建立在理论上更为合理, 更利于以后扩展的数学模型是很有意义的。关于模型的解析, 目前尚不存在, 尤其是在动床情况下系统的研究结果还没有。

床沙与悬沙交换活跃的环境, 该问题尤为重要。关于泥沙对粪便菌群迁移转化规律影响的模型研究非常有限, 但对于重金属模型的研究较多, 并值得借鉴。一部分研究者则引入泥沙运动力学中床沙悬沙交换的理论, 结合泥沙吸附重金属的状态建立数学模型如[23] [24] [25] [26]。由于细颗粒泥沙的吸附能力强, 在运动泥沙中所占的比重大, 对污染物迁移转化的影响大, 因此对细颗粒泥沙运动的模拟成为水沙环境中污染物迁移转化模型研究的重点。由于在底泥不同深度处的物理、化学和生物条件不同, 粪便菌群的浓度及泥沙与菌群的相互作用的关系也是不同的。对于研究粪便菌群在水沙环境中的长时间行为, 底泥中泥沙和粪便菌群特性沿垂向的变化尤为重要。DiToro [27]根据底泥中的物理、化学和生物过程, 将底泥分成多个完全混合的层, 并建立各层间的交换关系用以建立底泥中有机物污染物的释放模型时。与单层模式相比, 虽然多层模式建模的复杂程度会增大, 但却能更多地考虑底泥中污染物与泥沙相互作用的机理, 随着对泥沙运动特性及泥沙与各种污染物相互作用关系认识的深入, 多层模型会有更大的发展空间。底泥划分的层数、各层厚度的选取及层间污染物及泥沙交换关系的确定是建立多层模型的关键。

由于影响泥沙吸附效应的因素众多, 但在平衡或准平衡状态下, 通过对吸附动力学方程进行简化, 可以用简单的分配系数来表达水相和固相之间的比例关系[28], 但分配系数的确定仍依赖于实测资料。目前已开展的多是静态实验, 有限的动态实验也是在特定的简化条件下进行的, 还缺少完整意义上的动态水沙环境下的污染物吸附解吸实验[29]。

## 基金项目

本项目为天津市应用基础与前沿技术研究计划资助(14JCYBJC22300)。

## 参考文献 (References)

- [1] Chapra, S.C. (1997) *Surface Water-Quality Modelling*. McGraw Hill, New York, 844.
- [2] De Brauwere, A., de Brye, B., Servais, P., Passerat, J. and Deleersnijder, E. (2011) Modelling *Escherichia coli* Concentrations in the Tidal Scheldt River and Estuary. *Water Research*, **45**, 2724-2738.
- [3] Anderson, I.C., Rhodes, M. and Kator, H. (1979) Sublethal Stress in *Escherichia coli*: A Function of Salinity. *Applied and Environmental Microbiology*, **38**, 1147-1152.
- [4] Solic, M. and Krstulovic, N. (1992) Separate and Combined Effects of Solar-Radiation, Temperature, Salinity, and PH on the Survival of Fecal-Coliforms in Seawater. *Marine Pollution Bulletin*, **24**, 411-416.
- [5] Mancini, J.L. (1978) Numerical Estimates of Coliform Mortality under Various Conditions. *Journal of Water Pollution Control Federation*, **38**, 2477-2484.
- [6] Gameson, A.L.H. and Saxon, J.R. (1967) Field Studies on Effect of Daylight on Mortality of Coliform Bacteria. *Water Research*, **1**, 279-295.
- [7] Bellair, J.T., Parr-Smith, G.A. and Wallis, I.J. (1977) Significance of Diurnal Variation in Faecal Coliform Die-Off Rates in the Design of Ocean Outfalls. *Journal of WPCF*, **77**, 2022-2030.
- [8] Hipsey, M.R., Antenucci, J.P. and Brookes, J.D. (2008) A Generic, Process-Based Model of Microbial Pollution in Aquatic Systems. *Water Resources Research*, **44**, W07408.
- [9] Auer, M.T. and Niehaus, S.L. (1993) Modeling Faecal Coliform Bacteria—I. Field and Laboratory Determination of Loss Kinetics. *Water Research*, **27**, 693-701.
- [10] Jamieson, R.C., Gordon, R., Joy, D. and Lee, H. (2004) Assessing Microbial Pollution of Rural Surface Waters: A Review of Current Watershed Scale Modeling Approaches. *Agricultural Water Management*, **70**, 1-17.
- [11] Fries, J.S., Characklis, G.W. and Noble, R.T. (2006) Attachment of Fecal Indicator Bacteria to Particles in the Neuse River Estuary, N.C. *Journal of Environmental Engineering*, **132**, 1338-1345.

- [12] Characklis, G.W., *et al.* (2005) Microbial Partitioning to Settle Able Particles in Storm Water. *Water Research*, **39**, 1773-1782.
- [13] Gannon, J., Busse, M.K. and Schillinger, J. (1983) Faecal Coliform Disappearance in a River Impoundment. *Water Research*, **17**, 1595-1601.
- [14] Amieson, R.C., Joy, D., Lee, H., Kostaschuk, R. and Gordon, R. (2005) Re-Suspension of Sediment-Associated Escherichia in a Natural Stream. *Journal of Environmental Quality*, **34**, 581-589. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0581>
- [15] Kashefipour, S.M., Lin, B., Harris, E. and Falconer, R. (2002) Hydro-Environmental Modelling for Bathing Water Compliance of an Estuarine Basin. *Water Research*, **39**, 1854-1868.
- [16] Kashefipour, S.M., Lin, B. and Falconer, R.A. (2006) Modelling the Fate of Faecal Indicators in a Coastal Basin. *Water Research*, **40**, 1413-1425.
- [17] Bai, S. and Lung, W. (2005) Modeling Sediment Impact on the Transport of Fecal Bacteria. *Water Research*, **39**, 5232-5240.
- [18] Gao, G., Falconer, R.A. and Lin, B. (2011) Numerical Modelling of Sediment-Bacteria Interaction Processes in Surface Waters. *Water Research*, **45**, 1951-1960.
- [19] Yang, L., Lin, B. and Falconer, R.A. (2008) Modelling Enteric Bacteria Levels in Coastal and Estuarine Waters. *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Engineering and Computational Mechanics*, **161**, 179-186.
- [20] Stapleton, C.M., Wyer, M.D., Kay, D., Bradford, M., Humphrey, N., Wilkinson, J., Lin, B., Yang, Y., Falconer, R.A., Watkins, J., Francis, C.A., Crowther, J., Paul, N.D., Jones, K. and McDonald, A.T. (2007) Fate and Transport of Particles in Estuaries, Volume I, II, III, IV. Environment Agency Science Report SC000002/SR1-4.
- [21] Gao, G., Falconer, R.A. and Lin, B. (2011) Numerical Modelling Sediment-Bacteria Interaction Processes in the Severn Estuary. *Journal of Water Resource and Protection*, **3**, 22-31. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2011.31003>
- [22] Gao, G., Falconer, R.A. and Lin, B. (2013) Modelling Importance of Sediment Effects on Fate and Transport of Enterococci in the Severn Estuary, UK. *Marine Pollution Bulletin*, **67**, 45-54.
- [23] 黄岁梁, 万兆惠, 张朝阳. 冲积河流重金属污染物迁移转化数学模型研究[J]. 水利学报, 1995(1): 47-56.
- [24] Ng, B., Turner, A., Tyler, A.O., Falconer, R.A. and Millward, G.E. (1996) Modelling Contaminant Geochemistry in Estuaries. *Water Research*, **30**, 63-74.
- [25] 何用, 李义天. 重金属迁移转化模型研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 576-583.
- [26] Wu, Y., Falconer, R.A. and Lin, B. (2005) Modelling Trace Metal Concentration Distributions in Estuarine Waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **64**, 699-709.
- [27] DiToro, D.M. (2001) Sediment Flux Modelling. John Wiley & Sons Inc., Hoboken.
- [28] Thomann, R.V. and Mueller, J.A. (1987) Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper Collins Publishers, New York, Chapter 8 Toxic Substance, 495-598.
- [29] 禹雪中, 钟德钰, 李锦秀, 廖文根. 水环境中泥沙作用研究进展及分析[J]. 泥沙研究, 2004(6): 75-81.

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)