

DOI: CNKI: 32-1309/ P. 20110514. 1449. 017

Falls Lake 水库内溶解物输运模拟

李杰^{1,2}, 林晶^{2,3}, 吴增茂¹

(1. 中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛 266100; 2. Department of Marine, Earth and Atmospheric Science, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695, USA; 3. Division of Water Quality-Planning, North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Raleigh, NC 27699, USA)

摘要: 溶解物在水库内的输运过程受人为因素影响较大。为研究水库内物质输运的过程和机制, 以美国北卡罗来纳州的 Falls Lake 水库为研究对象, 运用 EFDC 三维数值模型对物质在水库内的输运过程进行模拟研究, 分析示踪物平均年龄和滞留时间的分布以及变化。结果显示: 理想状态下, 流量决定溶解物的输运过程; 实际情况中, 除流量外, 水库的即时蓄水量是影响输运过程的另一个重要因素; 水库结构和径流分布是导致示踪物在各区域局地滞留时间存在差异的主要因素。

关键词: Falls Lake 水库; 物质输运; 平均年龄; 滞留时间; EFDC 模型

中图分类号: P343.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)03-0413-08

径流输入携带大量的生物群体、营养盐、污染物和悬浮颗粒物, 当这些物质被输运到河口、湖泊、水库和近岸海域等水体系统中后, 会引起富营养化、水体缺氧等严重环境生态问题。除营养盐浓度之外, 到达、滞留特定地点的时间对有毒藻类“水华”的发生、浮游植物的生长、底层细菌的分布和缺氧时间的发生频率都有明显的影响^[1-3]。为研究和解决生态环境问题, 有必要定量地研究污染物输运的过程和机制。而数值模型, 特别是三维数值模型, 作为一种有用的工具已被证明能很好地定量模拟和研究湖泊、水库以及河口等水体系统中物质输运的过程和机制^[4-10]。

世界上 292 个大河系统中, 172 个受到水坝的影响^[11]。河流筑坝蓄水形成的水库, 改变了河流原有的物质场、能量场、化学场和生物场, 可能显著地影响河流中生源要素的生物地球化学行为(包括生源要素的输送通量、形态组成、利用方式等)^[12]。本文以美国北卡罗来纳州的 Falls Lake 水库为研究对象, 运用 EFDC 三维数值模型对物质在水库内的输运过程进行模拟研究, 分析示踪物平均年龄和滞留时间的分布以及变化, 以期揭示水库内物质输运的过程和机制。

1 输运时间的定义

在研究水体系统的交换、输运以及同化能力的过程中, 定义了许多时间的概念, 比如年龄、输运时间、滞留时间、周转时间和冲洗时间等。对于这些概念, 研究者们给出的定义不尽相同。Bolin 和 Rodhe^[14]在总结前人研究的基础上, 对年龄、输运时间和周转时间进行了更为严格的定义。Zimmerman^[15]在研究水体中运动颗粒单体的空间分布时, 将滞留时间定义为年龄的一部分。Deleersnijder^[16]将欧拉理论应用到对物质年龄的定义中。

Bolin 和 Rodhe^[14]将河口系统中物质的年龄(τ)定义为: 物质被流体介质携带进入河口之后运行的时间。Deleersnijder^[16]引入随时间 t 、空间 $\vec{x}(x, y, z)$ 和年龄 τ 变化的浓度分布函数 $c(t, \vec{x}, \tau)$, 提出了计算平均年

收稿日期: 2010-04-23; 网络出版时间: 2011-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110514.1449.017.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40730847; U0933001)

作者简介: 李杰(1977-), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事近海与湖泊、河口水质生态动力学数值模拟研究。

E-mail: 7788lijie@163.com

龄的具体方法。投放的示踪物浓度为

$$C(t, \vec{x}) = \int_0^{\infty} c(t, \vec{x}, \tau) d\tau \quad (1)$$

Deleersnijder^[16] 定义 $\alpha(t, \vec{x}, \tau)$ 为年龄浓度

$$\alpha(t, \vec{x}) = \int_0^{\infty} \tau c(t, \vec{x}, \tau) d\tau \quad (2)$$

在时间 t 和位置 \vec{x} 处平均年龄 $a(t, \vec{x})$ 可以表示为年龄浓度和示踪物浓度的比值。

$$a(t, \vec{x}) = \frac{\int_0^{\infty} \tau c(t, \vec{x}, \tau) d\tau}{\int_0^{\infty} c(t, \vec{x}, \tau) d\tau} \quad (3)$$

根据 Zimmerman^[15] 的定义, 滞留时间表示每个物质粒子由释放到被运输至出口所经历的时间。滞留时间

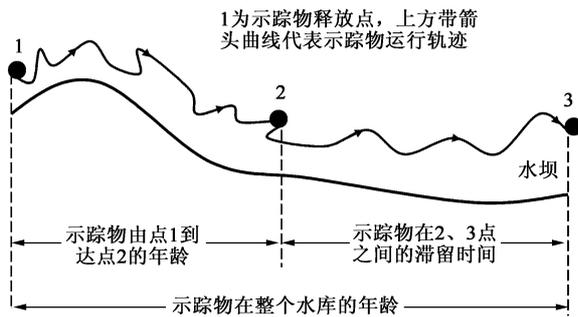


图1 年龄与滞留时间示意图

Fig. 1 Diagram of definitions of age and residence time

有关物质年龄和滞留时间详尽的定义和计算方法, 请参阅文献[14-17]。

表示一个物质粒子在水体系统中生命的剩余时间, 因此它是年龄的一个组成部分。图1展示了滞留时间与年龄两者间的关系。Takeoka^[17] 定义了类似平均年龄的一个剩余函数来计算滞留时间: 以 R_0 表示初始时刻 ($\tau = 0$) 水体中物质的总量, $R(\tau)$ 代表在 τ 时刻水体中物质的剩余量, 滞留时间的计算公式为

$$\tau_r = \int_0^{\infty} \frac{R(\tau)}{R_0} d\tau = \int_0^{\infty} r(\tau) d\tau \quad (4)$$

式中 $r(\tau) = \frac{R(\tau)}{R_0}$ 为剩余函数, 表征水体中物质的减少、交换和输运过程。

2 研究区及模型介绍和试验设计

Falls Lake 水库 (图2) 位于美国北卡罗来纳州 Neuse 河上游, 是一个筑坝蓄水形成的水库。水坝位于该州首府罗利 (Raleigh) 以北 17 km, 距离上游的 Eno 河、Flat 河和 Little 河交汇处 37.5 km。水库及相应流域的面积分别约为 50 km² 和 2 000 km²。处于设计正常蓄水水位 (海拔 76.8 m) 时, 水库的蓄水量约为 1.53 亿 m³, 为其流域内 45 万人口提供生活用水^[13]。

本文利用 EFDC 数值模型对 Falls Lake 水库的水动力过程进行模拟, 配合 DYE 染色示踪模块对物质运输的平均年龄以及滞留时间进行研究, 分析狭长水库中物质运输过程的特点和规律。EFDC 模型已被美国环保局指定为研究和发美国 TMDL (Total Maximum Daily Load) 的一个三维水动力模型, 由美国弗吉尼亚海洋研究所的 Hamrick 和 Park 等开发并实时维护^[18-19]。该模型已被成功地应用到河口、湖泊和近岸海域等水体系统的研究中^[3,9-10,19-21]。模型可以模拟水体密度场, 地形、潮汐和风等驱动的环流场, 表面水位抬升, 盐度和温度的时间、空间分布。该模型在水平方向上采用曲线正交坐标 (ξ, ζ), 垂向采用 sigma 坐标 (σ)。

USGS (U. S. Geological Survey) 提供了 28 年 (1981 ~ 2008 年) 的径流观测资料, 对其统计分析的结果显示: 多年平均的出流量和入流量基本持平, 分别为 19.41 m³/s 和 19.60 m³/s; 年际变化大, 年均流量介于 6 ~ 35

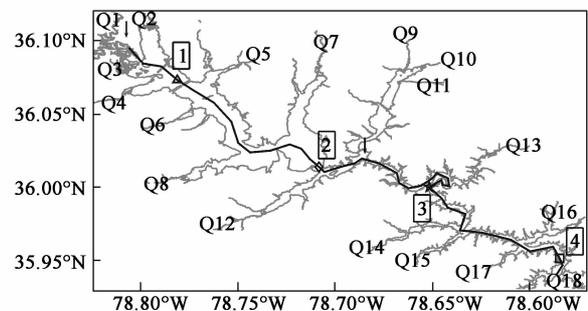


图2 水库位置和研究断面

Fig. 2 Locations of the reservoir and study transect

m^3/s ; 月均流量变化更大, 在 $2 \sim 150 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此, 研究选取 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ …… $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量, 出流等于入流, 进行了 16 个理想状态试验。不考虑蒸发、降水以及风的影响, 模拟分析示踪物在水库内的输运规律。随后利用实测资料, 进行了两次实况模拟, 研究真实条件下水库内物质输运过程的特点。为保证输运时间计算的充分积分, 所有试验模拟时段均为 2 年。图 2 中, Q1 ~ Q17 为 17 处入流点, Q18 为出流点(水坝)。理想状态试验在总入流量固定的前提下, 根据 2005 ~ 2007 年的径流观测资料对各入流点进行份额分配(表 1), 采用海拔 76.8 m(0 基面)作为初始水位。水库形状具有上宽下窄的特点, 因此引入局地滞留时间的概念来分析上、下游物质输运过程的不同。

表 1 理想状态试验中各入流点流量所占份额

Table 1 Proportions of flow at each river input point in steady-state condition tests

入流点	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17	Q18
所占份额/%	17.23	6.94	24.71	10.60	1.75	2.10	4.89	3.84	2.97	2.62	2.45	4.54	3.84	3.14	2.62	3.49	2.27	-100

3 模拟结果及分析

3.1 理想状态下的平均年龄

2005 ~ 2007 年径流资料显示, Q1 ~ Q4 的入流量占总入流量的 60%; 水质要素的同期观测结果表明, 污染主要来源于上游。因此, 数值试验中采取上游 Q1 处投放示踪物, 研究理想状态下示踪物平均年龄在水库内的分布情况。水库下游河道较狭窄, 且漫滩形成的上游宽阔水域在低水位时面积将缩小。因此, 在对模拟结果的分析中, 以示踪物投放点为起点, 在水深较大的主河道上, 由上游至下游沿图 2 中黑色折线取一纵剖面来分析平均年龄的分布及其变化情况。

图 3 展示了不同流量下示踪物平均年龄的部分模拟结果。比较各子图发现, 随着流量的增大, 示踪物在水库内运移加快, 到达相同区域的平均年龄随之降低。示踪物在上游的滞留时间较长, 平均年龄的等值线较密集, 下游相对稀疏。这说明物质在上游的输运速度较下游慢。对 Falls Lake 水库而言, $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 是两个比较有代表性的流量。图 4 为理想状态下, $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量所对应流场的垂向平均分布图。图 4 显示, 水体流速在上游较小, 下游较大, 与平均年龄的变化特征基本一致。水体流速的区域差异是水库结构特点和径流分布特征共同作用造成的:

(1) 与下游相比较, 上游水深较浅, 但河道较宽, 上、下游河道截面积相差并不大。当流量相同时, 上、下游河道形态上的差异本身所引起的水体流速变化相对较小。

(2) 上游输入以及下游径流的补充, 使得下游流量较上游大。这是造成示踪物输运速度在上、下游存在明显差异的主要原因。

$5 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量时, 示踪物自释放后约 1 年才能到达水坝; 而 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下, 这个过程仅需 12 d 左右。水库 28 年平均的流量约为 $19.50 \text{ m}^3/\text{s}$, 接近于 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此, 就历史水平来看, 来自于上游的物质到达水坝的平均年龄约为 130 d(图 3(c))。

图 3(a)、图 3(b) 显示, 低流量下底部摩擦对平均年龄的影响比较显著, 低层示踪物的平均年龄大于上层; 相对于下游, 底摩擦在上游浅水区的作用较明显, 平均年龄的等值线更为倾斜。结合实际情况, 模拟试验中采用底层出流方案。因此, 当流量增大时, 底摩擦对平均年龄的影响变得不明显, 示踪物到达下游底层的时间小于表层(图 3(e)、图 3(f))。平均年龄随流量的增大而减小, 可以寻求一个总流量与平均年龄之间的关系式, 方便地估算示踪物到达不同地点的平均年龄。Shen 等^[9]在研究潮汐影响下的 York River 河口时, 利用式(5)对平均年龄(a)与冲淡水流量(Q)之间的关系进行分析, 得到较理想的拟合曲线(式(5)中, b 、 c 为常数)。

$$a = cQ^{-b} \quad (5)$$

本研究据此对示踪物到达水库 4 个不同位置(图 2)的平均年龄与水库流量间的关系进行了分析, 拟合曲

线如图5(a)所示。Shen等^[9]拟合上游、中游、入海口3个区域的参数分别为0.8650、0.6992、0.6677，而本研究得到的值均在1左右。

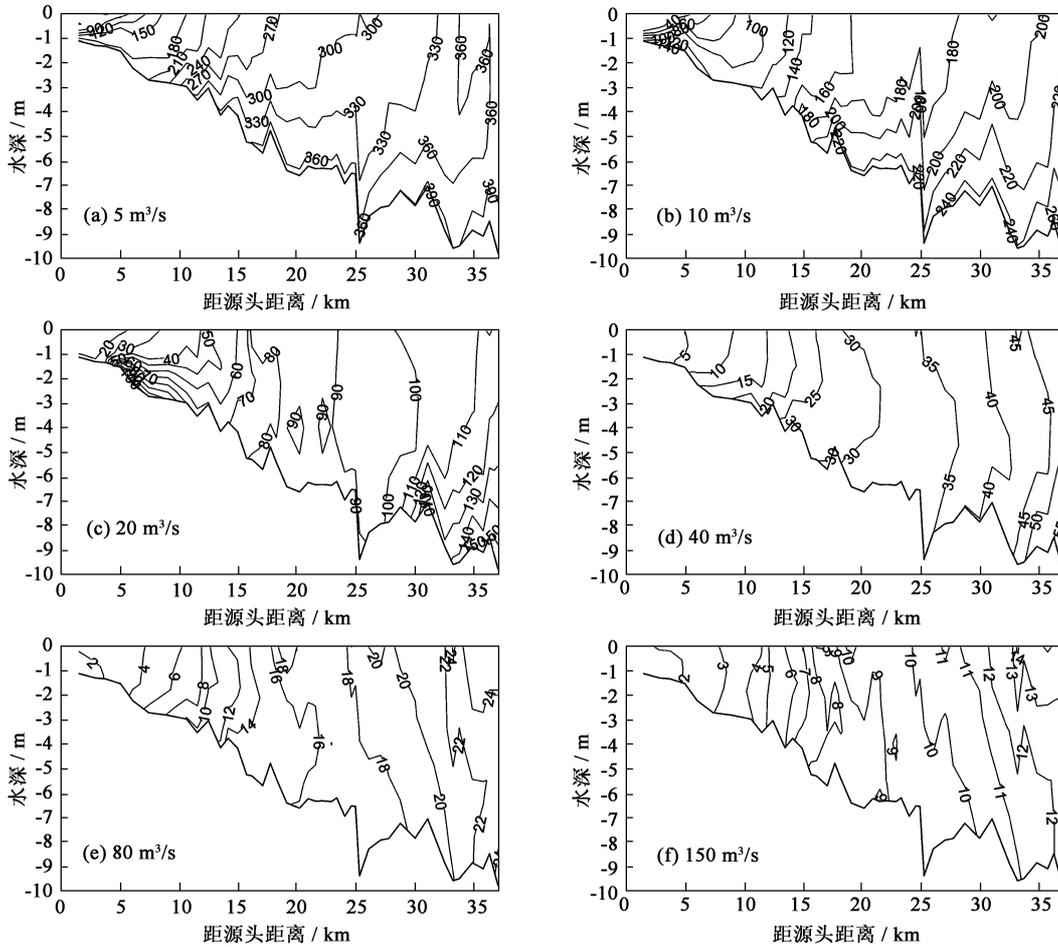


图3 不同流量下示踪物平均年龄的垂向分布(等值线单位: d)

Fig. 3 Vertical distributions of mean age at different flows

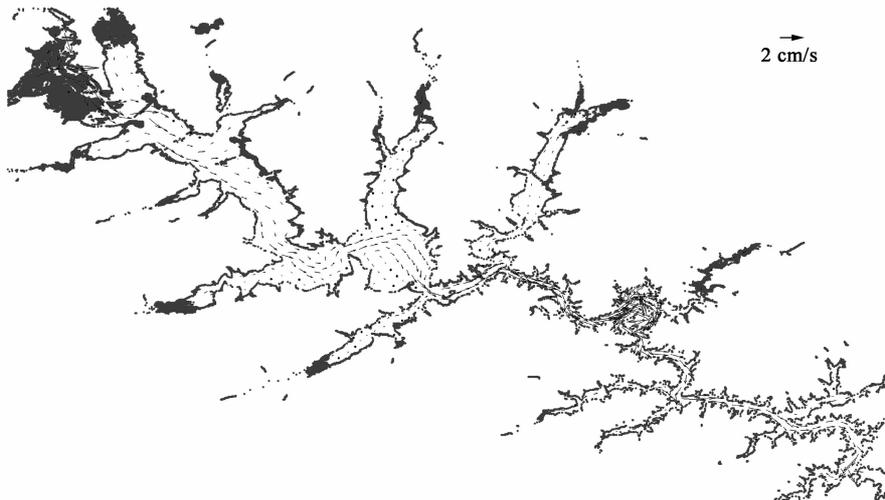


图4 20 m³/s 流量时水库内垂向平均流场

Fig. 4 Vertical mean current field with 20 m³/s

所以,有理由认为:理想状态下不受潮汐影响的河道系统中,示踪物平均年龄与水体流量呈反比关系;潮汐作用下的河口系统,示踪物的平均年龄因受潮汐影响而增大,增幅与所受影响强弱有关。利用式(6)对本文的模拟结果再次分析,拟合曲线仍保持较高的 R^2 值(图 5(b))。

$$a = cQ^{-1} \tag{6}$$

由此可认为河道或出入流基本持平的水库中,经过固定位置的水量与示踪物平均年龄的乘积为一常数(c)。离示踪物释放点距离越远,这个常数 c 越大。水库的流量易于观测,结合式(6)可以估算示踪物到达水库内任意点的平均年龄。这对初步掌握溶解态物质在水库中的运移过程,制定合理的管理方案十分有用。

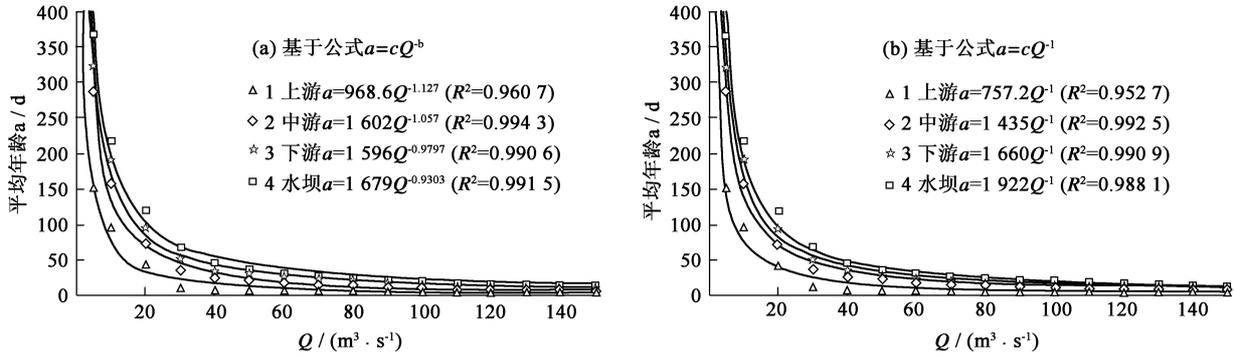


图 5 选定位置示踪物平均年龄和流量的关系

Fig. 5 Mean age distributions with respect to flows at selected locations

3.2 基于实测资料的平均年龄研究

真实过程中,流量是变化的。并且水坝经常处于封闭状态,扩散、回流等因素对平均年龄的影响显著。所以有必要进一步探讨真实条件下公式(6)的适用性。

分析 28 年的水位观测资料,2005、2006 年是两个较典型的年份,水库水位分别经历了由高到低和由低到高的过程;同时,这两年资料的连续性也较好。基于径流实测资料,研究进行了 2005 年 1 月 1 日和 2006 年 1 月 1 日于上游投放示踪物的两个数值试验,得到示踪物平均年龄的分布如图 6 所示(下文讨论中所指的 2005 年或 2006 年分别为这两次试验的结果,并非这两年各自的平均态)。与图 3 相比较,2005 年与理想状态下 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量对应的结果相似,2006 年与 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 结果相似。两年的平均出流量分别为 $12.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $12.8 \text{ m}^3/\text{s}$,考虑到扩散、回流等因素的影响,2006 年的结果容易解释;但 2005 年出现的则是小于等(平均)流量下理想状态平均年龄的异常结果。分析观测资料发现,2005 年年初即存在较大规模的水体交换。计算得到 2005 年示踪物由上游到达水坝的平均年龄为 136.4 d,这段时间水库的平均流量为 $22.18 \text{ m}^3/\text{s}$;2006 年平均年龄为 224.8 d,这段时间的平均流量为 $9.72 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此,就计算时有效积分的时段来看,2005 年的结果也是合理的。

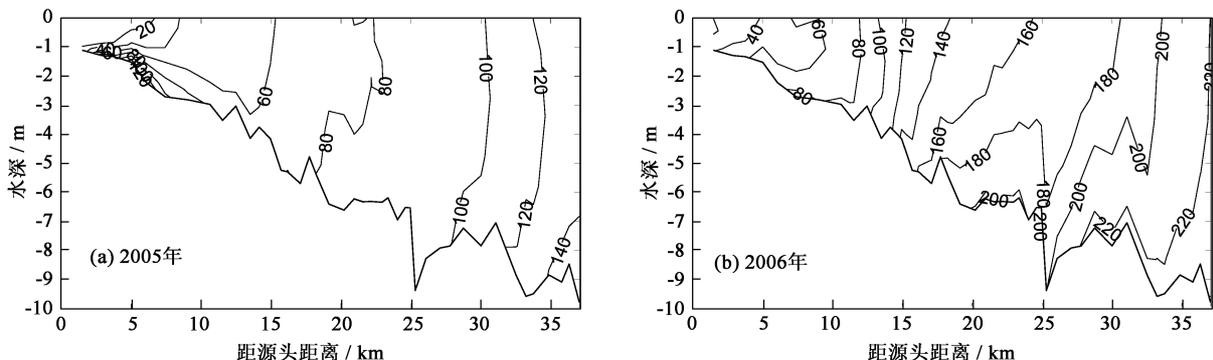


图 6 实测流量下平均年龄垂向分布的模拟结果(等值线单位: d)

Fig. 6 Vertical distributions of mean age for the real-time flows simulation

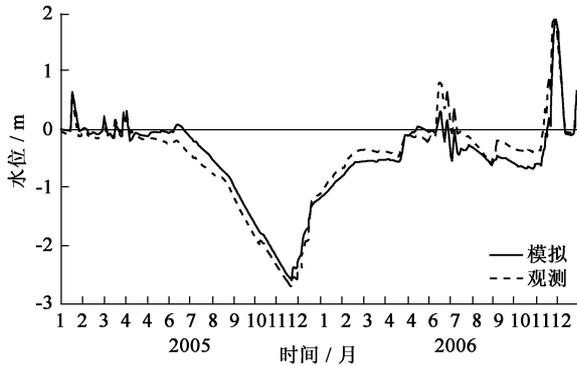


图7 水位模拟结果与实测的比较

Fig. 7 Comparison of simulated and observed surface elevation

理想状态 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下示踪物到达水坝的平均年龄为 117 d; $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 对应 220 d。将 2005、2006 两年流量和到达水坝的平均年龄代入式(6), 得到两年的 c 值分别为: $c_{2005} = 3\,025$ 、 $c_{2006} = 2\,196$ 。图 5(b) 中标注理想状态下水坝处 c 值约为 1922, 与 2006 年的结果较接近, 与 2005 年差别较大。分析两年的水文特征可知, 2005 年 c 值较大是水库蓄水量所造成的: 蓄水越少, 示踪物运移速度越快。2005 年水位较低的情况出现在下半年, 前 6 个月水位较高; 而 2006 年的高水位出现在年末, 前 10 个月只有年中约 40 d 的水位超过正常蓄水位(图 7)。所以, 对积分平均年龄起主要作用的时段内, 2005 年的蓄水量大于 2006 年。

因此, 在利用式(6)估算示踪物平均年龄时, 需考虑蓄水量的影响: 较少的蓄水量会加速示踪物的输运过程。对所有试验结果综合分析, 得到下面的积分公式近似计算示踪物的平均年龄:

$$\int_0^{\infty} \tau \frac{Q(\tau)}{V(\tau)} d\tau \quad (7)$$

其中 $Q(\tau)$ 、 $V(\tau)$ 分别为研究点上游的即时流量和蓄水量。以示踪物释放时为 0 时间点积分式(7), 积分值达到常数 c 所对应的时间 τ , 即示踪物到达该点的平均年龄($\tau = a$)。计算得到理想状态下, 示踪物到达水坝时对应的值约为 1.16, 而 2005、2006 年分别为 1.66 和 1.54。对水库而言, 大部分时段出流较少, 径流输入向下游的物质输送作用较弱; 当下游径流有较大输入时, 经常会出现水体向上游运动的回流现象; 扩散不仅向下游, 也会出现由下游高浓度区向上游的扩散。这些因素最终产生的结果是: 物质向下游的输运需要更长的时间。2005 年 c 值较 2006 年大的原因可能在于出流时段配置的不同。尽管 2005、2006 两年水库的蓄水时段、干湿特征以及出、入流分布特征存在较大差异, 但计算得到的 c 值差别不大, 这说明式(7)准确性较好。不同水库的特点不尽相同, c 的取值也会不同; 且同一水库内, 不同点的 c 值也不同。但在确定某点 c 值的前提下, 即可利用式(7)估算物质到达该点的平均年龄。

3.3 滞留时间

为更直观地比较上、下游物质输运过程的差异, 引入局地的概念^[9]对滞留时间进行分析。为此, 研究增加了理想状态下, 水库中部投放示踪物的数值试验。中部投放点(图 2 中间箭头)的选取考虑了它离上游投放点和水坝两段曲线距离的对等。同时兼顾到两侧水库形态的区域性差异: 投放点之上为上游开阔水域, 之下为狭窄的下游河道。当以整个水库作为研究对象时, 示踪物到达水坝的平均年龄即示踪物在整个水库的滞留时间; 同样, 中部投放示踪物可得到它在下游的局地滞留时间; 整个水库的滞留时间减去下游局地滞留时间, 可得到上游局地滞留时间。

理想状态下, 滞留时间的计算结果如表 2 所示。将式(6)中的平均年龄(a)替换为表 2 中各项滞留时间, 对它们与流量间的关系分别进行了拟合, 得到的 R^2 均大于 0.99。说明理想状态下滞留时间与水库流量之间也存在很好的相关性。

表 2 显示, 低流量下, 示踪物在上游的局地滞留时间明显大于下游; 随着流量的增大, 物质在水库内的运移速度逐渐加快, $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下, 上、下游局地滞留时间之间的差异变得不明显。水库结

表 2 滞留时间的模拟结果

Table 2 Model-simulated residence times

流量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	整个水库滞留 时间/d	上游局地滞留 时间/d	下游局地滞留 时间/d
5	388	213	175
10	220	125	95
20	117	79	38
30	68	45	23
40	47	29	18
50	37	22	15
60	32	19	13
70	27	16	11
80	23	13	10
90	21	12	9
110	17	9	8
150	12.3	6.3	6

构和径流分布同样是产生局地滞留时间区域性差异的主要原因。观测显示,径流输入的营养盐主要来自上游。上游水深较浅、水面宽阔,水温、光照等条件都适宜浮游植物生长,较长的滞留时间使得营养盐在上游被大量消耗,会导致这个区域的水质状况较差;相对而言,下游的水文条件不利于初级生产,营养盐的局地滞留时间也较短,即使有上游残余的高浓度营养盐输入,可在相对较短的时间内排出水库。据此可推断水库上游水质较下游差,水质的观测资料证实了这一点。

4 结 论

以 Falls Lake 水库为研究对象,利用 EFDC 水动力数值模型配合 DYE 示踪模块,对水库分别进行了理想状态和实测资料支持下的试验研究。对模拟结果的分析表明:

- (1) 理想状态下的水库或开放的河道系统中,物质到达指定地点的平均年龄与流量基本呈反比关系;
- (2) 对筑坝拦河形成的水库而言,物质的平均年龄是流量和即时蓄水量的函数,可利用一个简单的积分关系式估算溶解物到达指定地点的平均年龄;
- (3) 水库结构和径流分布是影响物质平均年龄和滞留时间的重要因素,物质在 Falls Lake 水库上游的滞留时间相对较长,对水质状况的影响更为明显。

参考文献:

- [1] JORDAN T E, WELLER D E, CORRELL D L. Sources of nutrient inputs to the Patuxent River Estuary[J]. *Estuaries*, 2003, 26(2A): 226-243.
- [2] SOFIE S, GEORGE T, DANIEL B D, et al. Effects of pulsed nutrient inputs on phytoplankton assemblage structure and blooms in an enclosed coastal area[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 73(3/4): 807-815.
- [3] LIN J, XIE L A, PIETRAFESA L J, et al. Water quality gradients across Albemarle-Pamlico estuarine system: Seasonal variations and model applications[J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 23(1): 213-229.
- [4] 韩龙喜. 三峡大坝施工期水环境三维数值预测方法[J]. *水科学进展*, 2002, 13(4): 427-432. (HAN Long-xi. 3-D numerical simulation for water environment in the region of Three-Gorge Project during construction period[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4): 427-432. (in Chinese))
- [5] 刘登国, 卢士强, 林卫青. 陈行水库水质模型与自净规律研究[J]. *水资源保护*, 2005, 21(2): 40-45. (LIU Deng-guo, LU Shi-qiang, LIN Wei-qing. Study on water quality model and self-purification of Chenhang Reservoir[J]. *Water Resources Protection*, 2005, 21(2): 40-45. (in Chinese))
- [6] LIU W C, CHEN W B, KUO J T, et al. Numerical determination of residence time and age in a partially mixed estuary using three-dimensional hydrodynamic model[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(8): 1068-1088.
- [7] SHUKLA J B, MISRA A K, CHANDRA P. Modeling and analysis of the algal bloom in a lake caused by discharge of nutrients [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, 196(2): 782-790.
- [8] 李一平, 逢勇, 罗激葱. 波流作用下太湖水体悬浮物输运实验及模拟[J]. *水科学进展*, 2009, 20(5): 701-706. (LI Yi-ping, PANG Yong, LUO Lian-cong. Experimental and numerical study on the transfer process of suspended matter in the interaction of wave and current in Taihu Lake[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(5): 701-706. (in Chinese))
- [9] SHEN J, HAAS L. Calculating age and residence time in the tidal York River using three-dimensional model experiments[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(3): 449-461.
- [10] 徐洪周, 林晶, 王东晓. 基于一个年龄概念的河口污染物输运数值模拟[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 92-98. (XU Hong-zhou, LIN Jing, WANG Dong-xiao. Numerical study on pollutant transport in an estuary based on age concept[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 92-98. (in Chinese))
- [11] NILSSON C, REIDY C A, DYNESIUS M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems[J]. *Science*, 2005, 308(5720): 405-408.
- [12] 冉祥斌, 于志刚, 姚庆祯, 等. 水库对河流营养盐滞留效应研究进展[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(5): 614-622. (RAN Xiang-bin, YU Zhi-gang, YAO Qing-zhen, et al. Progress in research on the retention effect of reservoirs on river nutrient[J]. *Lake Science*, 2009, 21(5): 614-622. (in Chinese))

- Xiang-bin, YU Zhi-gang, YAO Qing-zhen, et al. Advances in nutrient retention of dams on river[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(5): 614-622. (in Chinese))
- [13] TTL. Upper Neuse Watershed management plan [R]. North Carolina: Tetra Tech, Inc, Research Triangle Park, 2003.
- [14] BOLIN B, RODHE H. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs[J]. Tellus, 1973, 25(1): 58-63.
- [15] ZIMMERMAN J T F. Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea; Part I: Distribution of salinity and calculation of mixing time scales[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1976, 10(2): 149-191.
- [16] DELEERSNIJDER E, CAMPIN J M, DELHEZ E J M. The concept of age in marine modeling: I: Theory and preliminary model results[J]. Journal of Marine Systems, 2001, 28(3/4): 229-267.
- [17] TAKEOKA H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea[J]. Continental Shelf Research, 1984, 3(3): 311-326.
- [18] HAMRICK J M, WU T S. Computational design and optimization of the EFDC/HEM3D surface water hydrodynamic and eutrophication models[C]// Next Generation Environmental Models and Computational Methods. Philadelphia: Society of Industrial and Applied Mathematics, 1997: 143-156.
- [19] PARK K, JUNG H S, KIM H S, et al. Three-dimensional hydrodynamic eutrophication model (HEM-3D): Application to Kwang-Yang Bay, Korea[J]. Marine Environmental Research, 2005, 60(2): 171-193.
- [20] SHEN J, LIN J. Modeling study of the influences of tide and stratification on age of water in the tidal Jams River[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 68(1/2): 101-112.
- [21] XU H Z, LIN J, WANG D X. Numerical study on salinity stratification in the Pamlico River Estuary[J]. Estuarine, Coastal, and Shelf Science, 2008, 80(1): 74-84.

Numerical study on dissolved matter transport in Falls Lake Reservoir*

LI Jie^{1,2}, LIN Jing^{2,3}, WU Zeng-mao¹

(1. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Department of Marine, Earth & Atmospheric Sciences, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695, USA; 3. Division of Water Quality-Planning, North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Raleigh, NC 27699, USA)

Abstract: As a consequence of the dam, the physical transport of dissolved matter is profoundly affected by human activities in reservoirs. A three-dimensional numerical model, Environmental Fluid Dynamics Computer Code (EFDC), is used to study the physical mechanisms of mass transport in the Falls Lake Reservoir in North Carolina, USA. The spatial and temporal variations of the mean age and the residence time of a tracer are analyzed. Under steady-state conditions with constant in-/out-flows, the dissolved matter transport is dominated by river discharges. Under dynamic conditions, the phase of the water storage is also an important factor. The geometric feature and the function of the reservoir and the distribution of the tributary runoffs are the major factors that contribute to the differences of the local residence times.

Key words: Falls Lake reservoir; mass transport; mean age; residence time; environmental fluid dynamics computer code model

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.40730847; No. U0933001).