

# 6 ka 以来广州溺谷湾形成演变的数值模拟和地貌动力学分析

韦惺<sup>①</sup>, 吴超羽<sup>①\*</sup>, 任杰<sup>①</sup>, 莫文渊<sup>①</sup>, 包芸<sup>②</sup>

① 中山大学近岸海洋科学与技术研究中心, 广州 510275;

② 中山大学工学院力学系, 广州 510275

\* 联系人, E-mail: [eeswcy@mail.sysu.edu.cn](mailto:eeswcy@mail.sysu.edu.cn)

收稿日期: 2008-03-05; 接受日期: 2008-09-22

国家自然科学基金(批准号: 40331007, 40406016 和 40676056)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2002CB412407)和广东省自然科学基金(批准号: 06023122)资助

**摘要** 广州溺谷湾具有独特的地貌动力体系, 6 ka 以来长期保持其活跃的水系. 为了探讨溺谷湾的地貌动力演变机制, 应用长周期数值模型对区域的水系和地貌演变进行了模拟和钻孔验证以及地貌动力分析. PRD-LTMM 是一个本课题组自行研发的建立在流体运动方程和沉积物输运方程的基础上, 应用约简技术对模型输入和计算进行处理高分辨率(10 a)的千年尺度的长周期动力形态模型. 以 193 个可以明确辨识出最大海侵面的钻孔资料为基础, 重建了距今 6 ka 海进盛期的古珠江河口湾的水下地形, 并作为 PRD-LTMM 模型模拟的初始边界. 同时以广州溺谷湾中“门”这一独特的地貌动力单元作为切入点讨论广州溺谷湾的地貌动力的耦合演进过程. 模型计算结果应用 27 个测年钻孔资料进行验证, 其平均绝对误差为 22.4%. 通过比较模型的计算结果与实际河网机构和口门相当符合, 表明 PRD-LTMM 的长周期模拟珠江河网、广州溺谷湾的形成和演变过程可行而且比较可信. 根据长周期模型的计算结果和地貌动力学分析表明: 广州溺谷湾的形态和“门”地貌单元是造成其活跃水动力的主导因素, 尤其是“门”地形所造成的双向射流系统的存在对广州溺谷湾的水系演变格局起了控制性的作用; 根据广州溺谷湾水动力结构、淤积过程和地貌形态的变化, 可将其演变划分为石门期、陈村期、黄埔期和珠江潮汐通道期.

## 关键词

广州溺谷湾  
动力形态模型  
长周期  
演变

溺谷湾是全新世海侵时海水上溯至河流下游所形成的一种半封闭型的河口湾<sup>[1]</sup>. 受地形影响溺谷湾具有纳潮量大, 潮流势力强, 湾底地形常有潮流脊发育等特点. 在河流来沙少、动力均衡的溺谷湾能较好的保持溺谷形态; 而河流来沙较多、动力不均衡的溺谷湾, 往往是泥沙的堆积大于冲蚀, 溺谷受到充填, 改变了其溺谷形态, 逐渐发育成三角洲. 对于溺谷湾的形成发育演变和特性, 中外学者从沉积学、地貌

学、水文地理学等不同角度进行了大量的研究工作<sup>[2-9]</sup>, 然而大多研究或侧重沉积学, 或对溺谷湾自然过程进行分析和描述. 对溺谷湾长时间尺度的时空演变从动力学进行机理性和量化的研究仍有待开展. 长周期动力形态模型是一种以过程模拟为主的耦合模型, 有助于我们对事件发生过程的理解和辨识. 此类模型以模拟事件的物理背景分析为基础, 耦合小尺度过程上的流体动力、泥沙输运及沉积侵蚀计

算,在一定控制或约减技术的导引下,可以模拟或预测较长时间尺度上的动力地形变化.因此,长周期动力形态模型和对其结果的地貌动力学分析成为研究这一问题的有力工具.

模拟地形演变的模型,最早可追溯到岸线模型类的动力模型,不过由于非线性多尺度的动力学问题相对来说十分复杂,因此早期模型模拟的时间尺度一般都比较短,并且只是集中在单一尺度的线性动力学领域.之后,随着学科的发展,非线性多尺度的动力学问题在很多领域上(像气象学,海洋物理学,结构动力学等)得到发展和应用,海洋沉积动力学在动力地形模拟(也是一个非线性动力学问题)领域也开始了深入探讨<sup>[10]</sup>.在极长时间尺度(地质时间尺度)形态模型方面,Quiquerez等<sup>[11]</sup>发展了一个两相岩层扩散模型,可以模拟  $10^5$  年以上的象层序边界,海岸线变迁等地层特征.这种带有仿真泥沙输运沉积侵蚀算子的扩散模型(diffusive model)适合地质年代尺度的时间平均的分散过程(dispersive process)的模拟.目前,以中长时间尺度(季节~年)的动力地形模型发展最为成熟,理论和方法也比较完善.其中,荷兰学者De Vriend等<sup>[10,12-18]</sup>的研究较为突出,自 1986 年他提出中尺度的 2DH 海岸模型以来,先后就模型的基本概念,整合机制,模拟理论,约减技术与方法等多方面进行了深入研究探讨.纵观国际上的长周期研究,其目标主要集中在岸线变迁,海岸剖面的平衡调整<sup>[19]</sup>,潮汐通道的封闭,经验平衡关系,海盆充填等<sup>[11,19-21]</sup>,模拟的时间尺度也多在中长(季节~年)或极长(地质年代)的尺度上.在较长时间尺度(千年)上的过程模型则以应用于 6 ka 以来珠江三角洲地形演变的 PRD-LTMM(Pearl River Delta long-term morphodynamic model)长周期“动力-沉积-形态”模型<sup>[22-27]</sup>为代表,它是一个以过程模型为主的混合模型(hybrid model),该模型虽也以经典的 Reynolds 方程为基础,但 PRD-LTMM 在长周期计算框架中,引入了特殊的控制技术,这就保证了混合模型在处理泥沙沉积总量与空间分布的合理性.模型的验证方法也与一般的长周期模型不尽相同.PRD-LTMM 在时间尺度(千年)和空间尺度(三角洲演变)上都填补了长周期过程模型的空白.

全新世以来的海进在珠江三角洲相当深入和广

泛,现今星罗棋布在三角洲平原上的台地和山丘在距今 6 ka 左右的海侵盛期是浅海中散落的大小基岩岛屿,这些基岩岛屿一方面成为了古珠江河口湾的沉积核心,另一方面也促使了三角洲网河的分汊,但更为重要的是其中一些基岩岛屿构成了“门”这一独特而典型的地貌单元,重塑了珠江三角洲的水动力结构<sup>[24]</sup>.几千年来,受珠江诸河泥沙的充填,珠江三角洲大部分区域发生了沧海桑田的变化.然而地处珠江三角洲北部边缘的广州溺谷湾却少受珠江三角洲淤积的影响,长期以来众水辐凑且基本上能保持其活跃的水系.得益于此,地处广州溺谷湾湾头河口区的广州成为了华南海上丝绸之路的最早始发港,并能长期保持其交通中心的地位,也造就了千年古港——黄埔港.前人具体针对广州溺谷湾地貌动力演变的研究甚少,大都只是在研究整个珠江三角洲范围的过程中稍有涉及<sup>[28-33]</sup>,真正对广州溺谷湾这一区域进行研究的学者是曾昭璇<sup>[34]</sup>,他注意到广州溺谷湾演变的特殊性,并从地貌学和历史地貌学角度进行过具体研究.本文根据历史文献、地形图、钻孔资料,应用PRD-LTMM模型,并从广州溺谷湾中“门”这一控制节点的动力和地形变化作为切入点,探讨在“门”这一独特地貌单元的作用下广州溺谷湾距今 6~2.5 ka 的地貌动力演变机制.本文的研究在深化对广州溺谷湾近 6 ka 的演变的认识的同时,希望可以为溺谷湾的研究提供新的思路和方法.

## 1 研究区域

本文所研究的广州溺谷湾是指东起黄埔港,西至南海平地,南以市桥台地为界,北达石门这一区域<sup>[34]</sup>(图 1).广州溺谷湾地处珠江三角洲北部边缘,总面积约 520 km<sup>2</sup>.受系列地质构造的影响,形态上广州溺谷湾为一东西向古海岸地貌的溺谷湾,西宽东狭,型如漏斗.从绝对年龄来看,广州溺谷湾形成即为全新世海面上升到今天情况时开始,即大约开始于 6 ka 前<sup>[34]</sup>.在广州溺谷湾形成时,即产生一系列海成地貌和海相沉积物,而突出海面的山丘台地成为溺谷湾上的小岛屿,红色砂岩基岩出露处形成了“丹霞地形”和“石门”等遗传河谷地貌.其中位于广州东南的七星岗海蚀崖及海蚀平台即为最为典型的海成地貌.

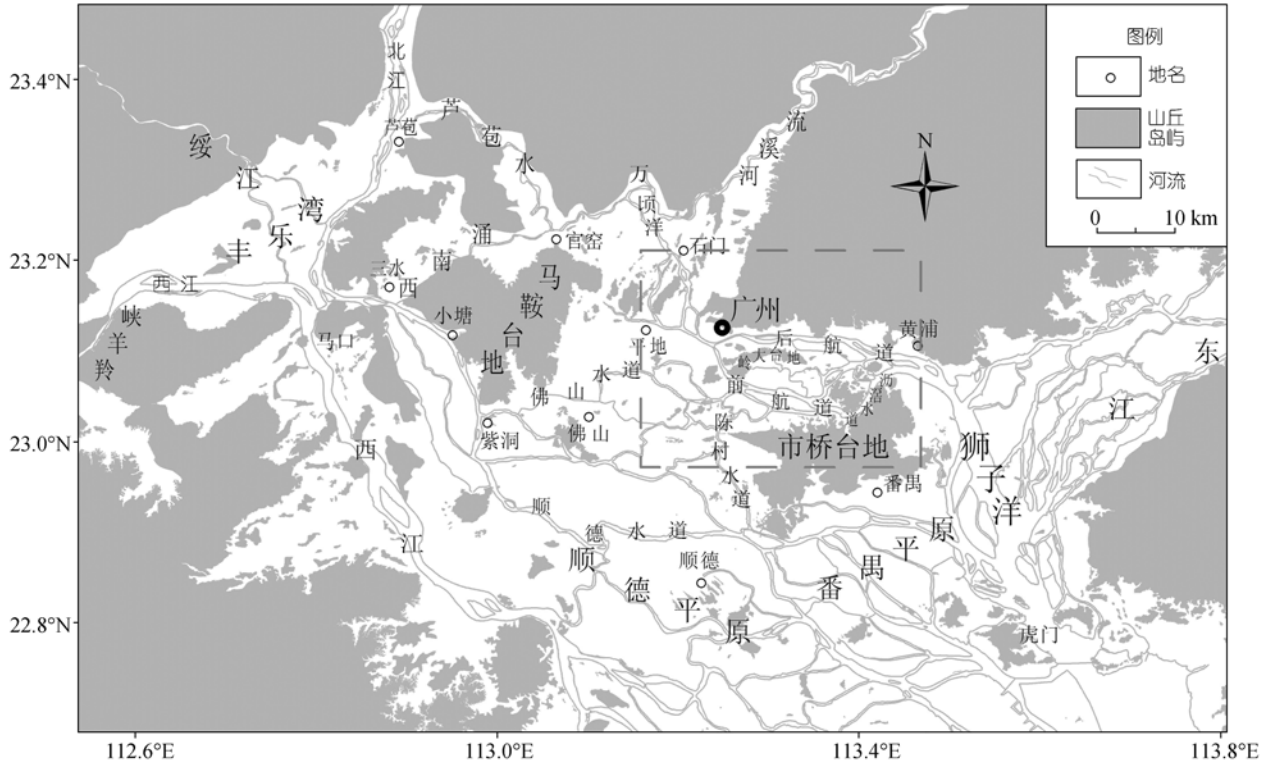


图 1 广州溺谷湾区域图

## 2 基本资料与研究方法

### 2.1 资料

(1) 钻孔资料. 钻孔资料的来源有 3 部分: 一部分源于出版物,《珠江三角洲形成发育演变》<sup>[32]</sup>一书收录有 80 个较为详细(有年代测定)的钻孔资料;《珠江三角洲一万年来环境演变》<sup>[31]</sup>一书附有 321 个较为详细的钻孔资料(部分与前者重复)及 57 个典型钻孔地质剖面;《广州地区第四纪地质》<sup>[28]</sup>一书收录的 28 个典型钻孔地质剖面;一部分工程钻孔由广州地理所李平日教授等提供, 1700 余个. 另一部分是由课题组自行钻探, 共 18 个, 取样总长 334.49 m, 集中在珠江三角洲中部平原, 对钻孔沉积物做了较高分辨率的 <sup>14</sup>C 测年、古生物鉴定、沉积物粒度分析及颜色反射率等测定. 测年数据共 210 个. 这些钻孔和测年数据是进行钻孔对比分析、进而恢复海侵盛期古珠江河口湾水下地形的基础, 是验证 PRD-LTMM 输出结果和理解沉积动力的基础. 文中年代为 <sup>14</sup>C 年代.

(2) 地形图. 珠江三角洲地区 1:50000 的电子地图一套, 广州地区 1:10000 的地形图 16 张(广东省

国土局, 1996), 广州市 1:50000 的地形图 1 张(国家测绘局, 1991), 珠江三角洲地区 1:100000 的地形图 19 张(中国人民解放军总参谋部测绘局, 1968), 珠江三角洲地区 1:200000 的地形图 9 张(中国人民解放军总参谋部测绘局)和珠江三角洲地区 1:500000 的地形图两张(中国人民解放军总参谋部测绘局).

(3) 海图. 主要海图有 1898 年(1:18.5 万)、1936 年(1:20 万)的英版海图及 1954 年(1:5 万)、1964 年(1:5 万)、1974 年(1:5 万)、1989 年(1:5 万)、1998 年(1:5 万)等伶仃洋海区海图, 其中 1898, 1936, 1954 年 3 幅图的基准面为略最低低潮面, 1964, 1974, 1989 和 1998 年 4 幅图的基准面为理论深度基准面或理论最低潮面; 1963 年海图——珠江口附近(1:15 万), 1979 年的崖门口和崖门水道两幅(1:1.5 万), 1982 年的小蒲台-小襟岛一幅(1:7.5 万), 1951 年的上川岛至大星簪岩(1:25 万).

### 2.2 古珠江河口湾水下地形重建

使用 PRD-LTMM 模型模拟近 6 ka 来珠江三角洲

和广州溺谷湾的发育演变, 首先需要对珠江古河口湾水下地形进行重建. 由于地层沉积相序记录着海陆的变迁, 钻孔也就成为了珠江河口湾古水下地形重建的有效资料. 从大约 2000 个钻孔资料中挑选出了具有孔口标高、可以明确辨识出最大海侵面的钻孔 193 个(其中有全新世测年数据的钻孔 74 个, 共计 134 个测年数据), 作为恢复古水深的重要依据, 其余钻孔作为确定古环境对比参考. 对于满足条件的钻孔用来计算古水深时所采用的方法参见文献[25]. 根据钻孔恢复所得的古水深值离散分布在珠江三角洲区域内, 其离散数据点虽按网格排列, 但格网的密度远远不能满足我们的要求, 还需要充分应用基岩边界所提供的大量岸线与水深信息[35], 以及适当的补充

水深信息, 增加插值中心点. 再利用图形处理软件 Suffer 8 对数据点进行内插, 最后得到距今 6 ka 古珠江河口湾水下地形(图 2).

### 2.3 长周期动力-沉积-形态模型(PRD-LTMM)

PRD-LTMM 是一个建立在水体运动方程和沉积物输运方程的基础上, 应用约简技术对模型输入和计算进行处理的千年尺度的长周期动力形态模型. 模型选择潮汐延展技术来进行地形时间步长的延长处理, 推延的时间长度为 10 a. 同时采用动边界技术对计算水域内的浅滩进行处理. 模型模块包括二维潮流模块、沉积输运模块、及时修正水深的底床形变模块以及长周期变量控制模块. 模型使用正交曲线网格, 对地形边界有较好的拟合, 空间步长最小为

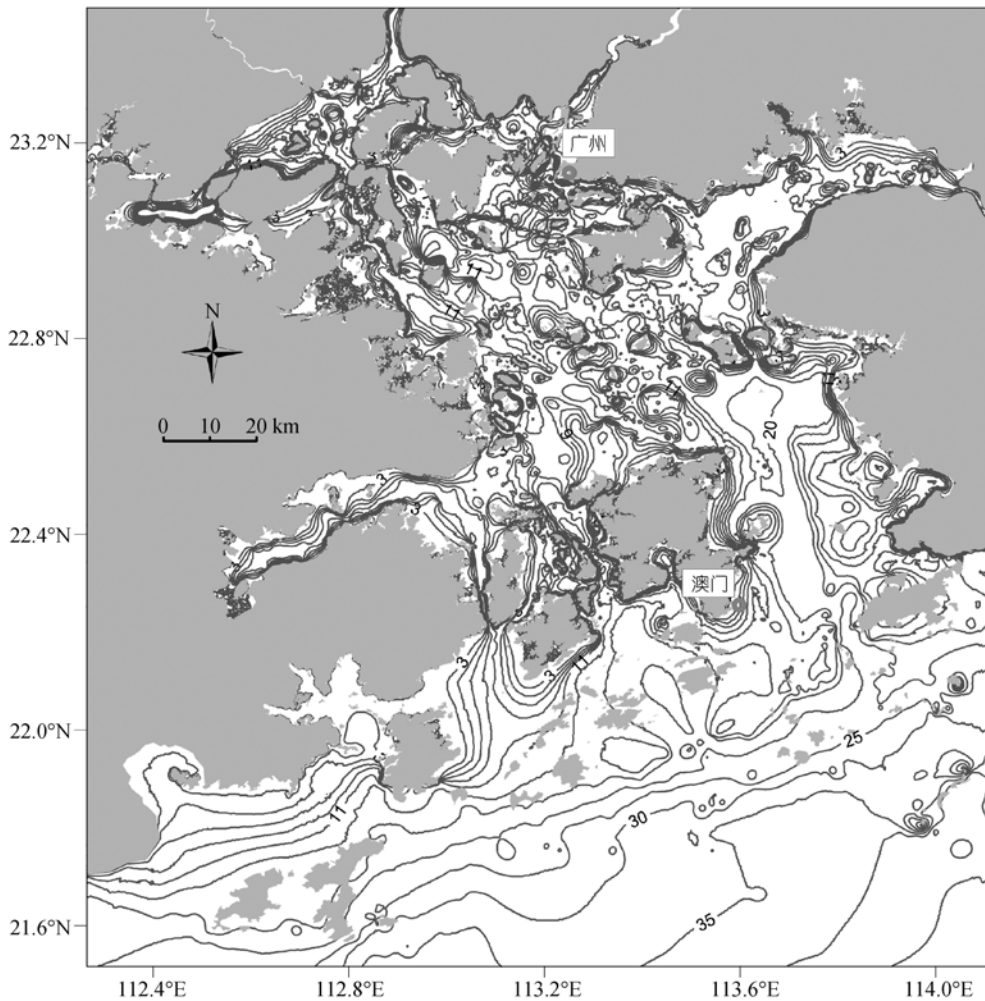


图 2 距今 6 ka 古珠江河口湾水下地形图  
等高距为 2 m

150 m. 地形改变的分辨率是 10 a. 在模型中考虑的驱动力和控制因素包括代表潮、河流流量、泥沙输入、海平面变化、沉积物压实率及新构造运动等. 模型结果通过测年钻孔资料验证来完成. 为了探讨近 6 ka 以来广州溺谷湾的地貌动力演变机制, 应用 PRD-LTMM 模型对研究区域进行模拟. 模型计算输出了珠江古河口湾自 6~2.5 ka 每 10 a 的地形、流场、悬沙浓度场. 模型运行时输入的边界条件与控制参数为:

海平面变化: 珠江三角洲 6 ka 以来海平面变化按李平日等<sup>[31]</sup>研究的结果输入(图 3).

新构造运动: 4.75~0.83 mm/a, 分三角洲区、周边地区和万顷沙区<sup>[32]</sup>.

沉积物压实率: 其中  $\gamma$  是压实率(%),  $t$  是时间, 单位: a<sup>[22]</sup>.

河流输入: 多年平均径流总量  $3600 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[22]</sup>, 多年平均悬移质输沙量  $8876 \times 10^4 \text{ t/a}$  的 1/3<sup>[23]</sup>.

代表潮: 大于平均潮差约 12.5% 的 3 个代表潮<sup>[22,36]</sup>.

模型计算起始时间是距今 6 ka, 结束时间为距今 2.5 ka. 图 4 是距今 2.5 ka 模型计算沉积厚度与钻孔资料的比较. 图 5 和 6 分别是 PRD-LTMM 模型输出的广州溺谷湾的流场分布图和古珠江三角洲的涨潮时泥沙场分布图.

### 3 研究结果

#### 3.1 广州溺谷湾中“门”的地貌动力分析

“门”是独特而典型地貌单元, 是造成双向射流系统的必要条件. “门”及其所产生的双向射流动力-沉积-形态系统的形成需要: 1, 基岩岛丘之间构成一定宽度的峡口; 2, 峡口上下游方向均有宽阔的水面和较大放宽率; 3, 峡口的走向与主要涨落潮流方向一致. 全新世海进盛期, 海水深入内陆, 广州溺谷湾中的“门”地貌单元有: 石门、黄埔“门”、陈村“门”和坑口“门”(图 7).

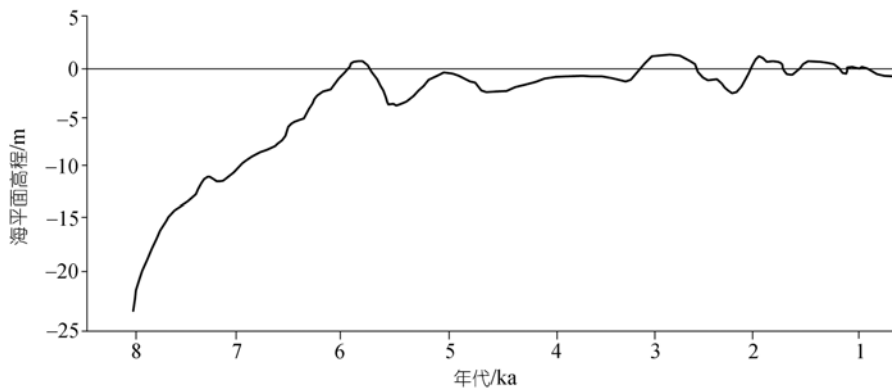


图 3 珠江三角洲距今 8 ka 来海平面变化曲线<sup>[32]</sup>

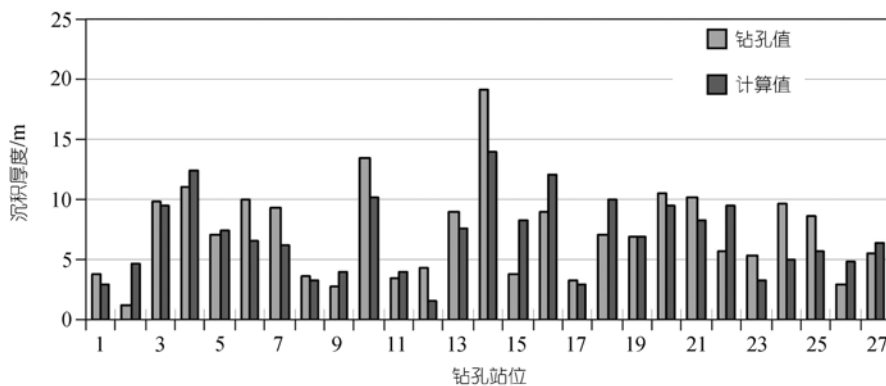


图 4 计算沉积厚度与钻孔资料比较(距今 6~2.5 ka)

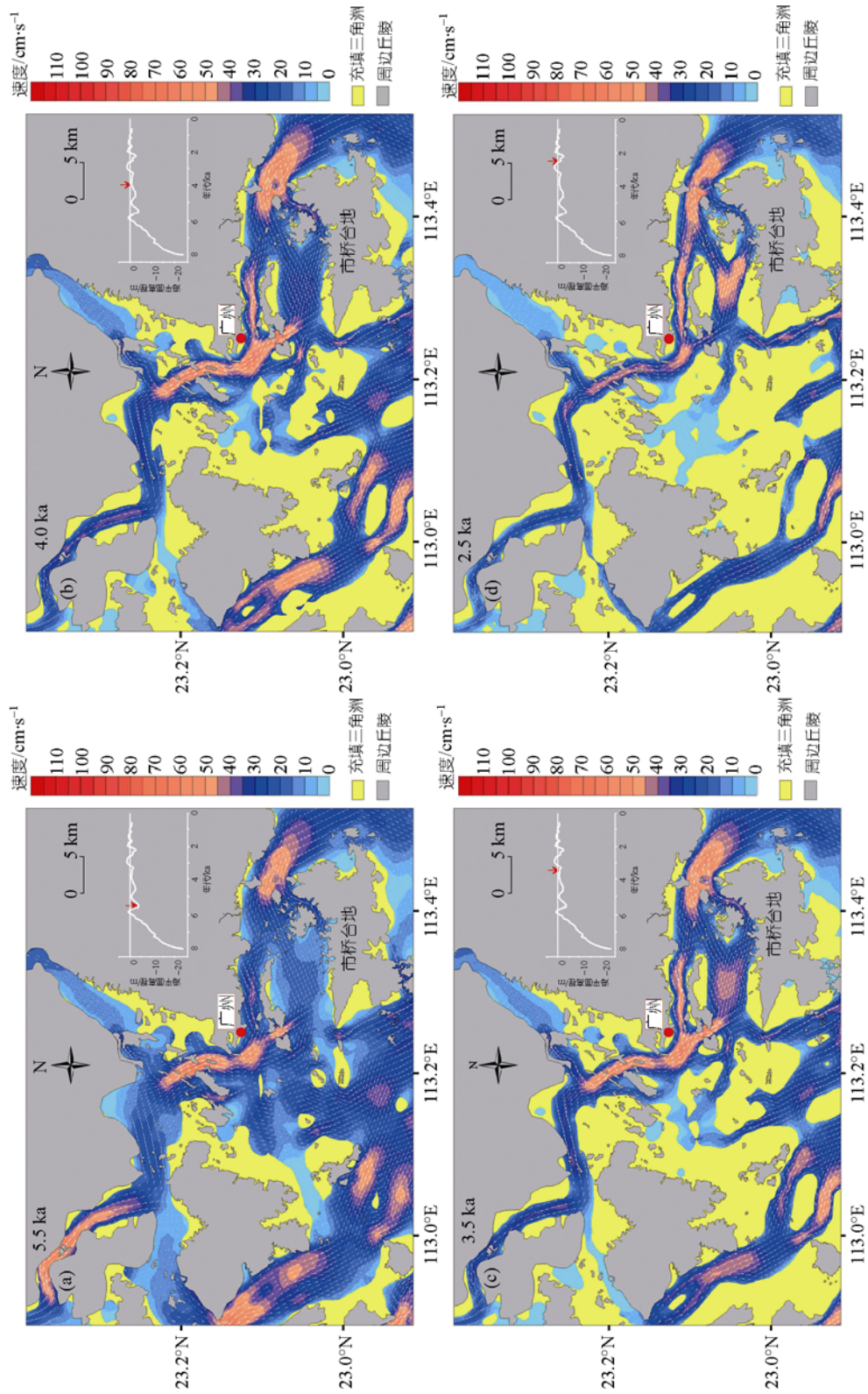


图 5 距今 6 ka 以来广州溺谷湾的落潮流场分布——PRD-LTMM 模型输出

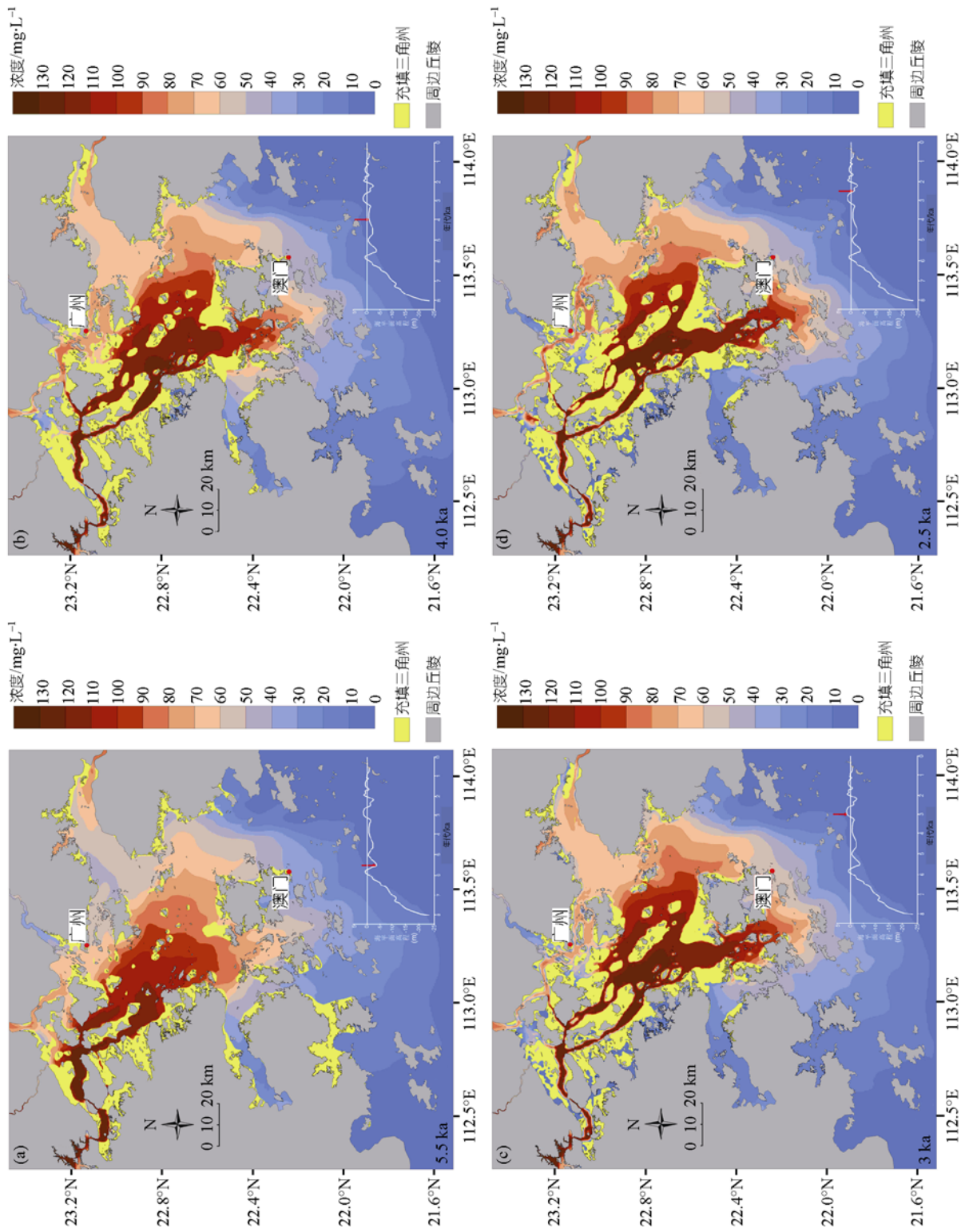


图 6 距今 6 ka 以来珠江三角洲演进及涨潮泥沙场分布——PRD-LTMM 模型输出

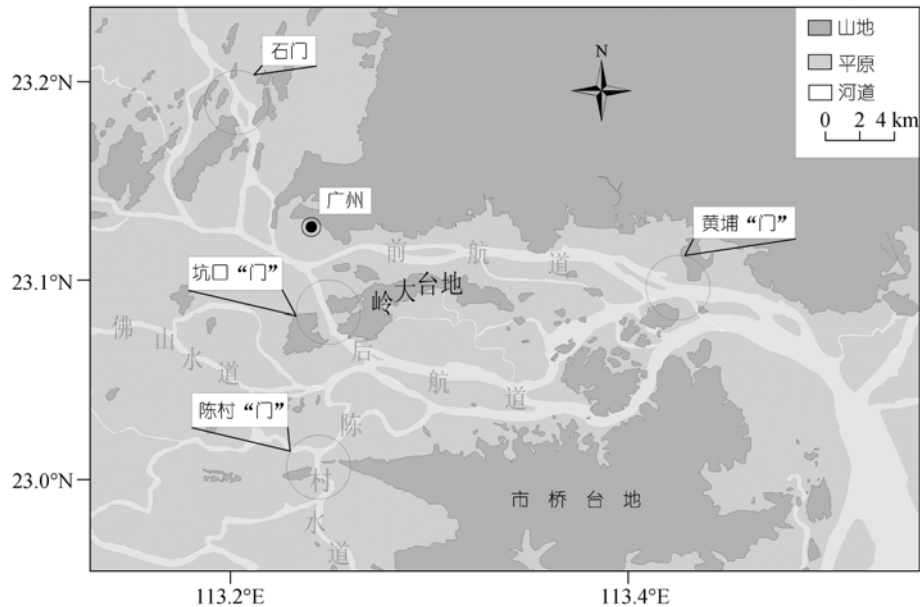


图 7 广州溺谷湾中的“门”分布位置

石门位于广州溺谷湾北部湾头, 因其两岸峰峦雄峙, 临江如门, 崖岸岩石露出, 故名为石门. 石门最窄处仅有不到 200 m. 与现在淤浅的河道不同, 全新世海进盛期石门上游区曾经是一片广阔水域, 其名为六颈海, 又名万顷洋. 西、北江水经小北江、芦苞涌、西南涌与流溪河水汇合于此(图 1, 2). 当时的石门上下游均具有巨大纳潮量, 它的存在将万顷洋和广州溺谷湾潮汐的巨大能量, 包括动能和位能, 自“门”的上下游集中到峡口附近, 产生了强烈的双向射流. 射流系统的存在使得无论涨潮或落潮, 石门的流速均大于上下游的流速. 黄埔“门”位于广州溺谷湾西部湾头, 峡口宽约 850 m, 而其上下游的河宽要数倍于峡口宽度. 加以广州溺谷湾和狮子洋都有巨大纳潮量, 射流作用亦非常强烈. 陈村“门”是由市桥台地附近基岩岛屿所构成的“门”地貌单元, 其位于广州溺谷湾西南侧. 大约距今 4 ka 紫洞至佛山一带淤浅成陆后, 陈村“门”双向射流系统逐渐显现, 不过它的双向射流强度相对于石门、黄埔“门”较弱. 坑口“门”是指广州溺谷湾中的岭大台地和坑口附近基岩所组成的峡口地形, 它的存在维系和增强了后航道的活跃水动力, 但随着广州溺谷湾自身的淤积演变, 其射流强度不断减弱.

从地貌动力的角度, “门”的存在极大的改变了广

州溺谷湾的海洋与河流动力及其复杂的相互关系, 对溺谷湾水系结构的长期建造产生独特而重要的作用. 一方面, 各“门”之间即相互独立, 各自影响附近水下地形的发育演变, 又相互作用, 共同造就广州溺谷湾活跃的水动力. 另一方面, 泥沙淤积与“门”所塑造的动力系统耦合演进, 水系结构与格局的发展演变亦受“门”的控制.

### 3.2 珠江三角洲水系演变对广州溺谷湾的影响

地处珠江三角洲北部边缘的广州溺谷湾是珠江三角洲有机整体的一部分, 它的地貌动力演变与整个珠江三角洲水系演变息息相关. 与广州溺谷湾相联系的珠江三角洲水系由北向南依次为芦苞水, 西南涌, 白泥水, 流溪河, 佛山涌, 平洲水道, 陈村水道和狮子洋. 这些水系的时空演变对广州溺谷湾的地貌动力演变具有不同程度的影响.

根据 PRD-LTMM 模型输出的结果(图 5, 6), 流溪河水少沙少, 对广州溺谷湾的影响不大. 芦苞水、西南涌对广州溺谷湾的影响较为深刻: 一方面, 由于汇潮点的存在, 由芦苞水、西南涌南下的西、北江泥沙大部分沿途淤积, 较少传入广州溺谷湾; 另一方面, 随着石门上游区域的淤积变浅, 纳潮量不断减少, 从而使得石门射流强度逐渐减弱, 广州溺谷湾的水动



力结构亦随之改变. 狮子洋在全新世海进盛期曾是一片广阔的水域(图 2), 其面临强劲的虎门双向射流系统和由乌珠大洋涌进的巨大潮量. 狮子洋的存在不仅造就了黄埔“门”强劲的双向射流系统, 而且在狮子洋强大潮汐作用下本身含沙量就少的东江和增江泥沙更是难以传入广州溺谷湾. 距今 6 ka 广州溺谷湾西侧的佛山、南海一带为一开阔的浅海湾(图 2), 由小塘南出的北江水沙在外海潮汐顶托作用下向南海佛山区域扩散淤积, 到了大约距今 4 ka, 紫洞至佛山一带逐渐淤浅成陆, 阻隔了该区域的北江水沙继续向溺谷湾输运(图 6), 此后, 陈村水道区域成为了广州溺谷湾与古珠江三角洲顺德区水域之间的主要通道, 石门南下的水流部分由此入海, 外海的潮流也由此进入广州溺谷湾, 即使是在现在陈村水道依然是广州至珠江三角洲下游各港市(市桥、石岐、江门)和通往西北江的捷径. 陈村水道的存在使得广州溺谷湾的水动力和沉积模式变得更为复杂. 具体表现在涨潮时, 外海的潮水通过陈村水道将北江水沙带入广州溺谷湾; 此外陈村水道水流和沥滘水道水流相互作用, 二者间在市桥台地西北侧形成一个流速低值区, 从而易于泥沙的沉积堆积.

### 3.3 广州溺谷湾的地貌动力分析和沉积过程

通过PRD-LTMM计算可清楚看到地处珠江三角

洲北部湾头的广州溺谷湾, 沉积物来源少, 特别是在“门”这一独特的地貌单元影响下, 水动力活跃, 沉积物较难沉积. 根据钻孔资料计算(图 8, 表 1)广州溺谷湾的整体沉积物沉积速率在大西洋期平均为 0.98 mm/a, 在亚北方期平均为 1.18 mm/a, 都明显小于珠江三角洲的相应时期的沉积速率(珠江三角洲沉积物沉积速率在大西洋期平均为 2.665 mm/a, 在亚北方期平均为 2.180 mm/a<sup>[32]</sup>). 然而, 广州溺谷湾由于自身地貌形态分布的不同所导致的动力结构差异使得不同区域的沉积演进具有不同特点(图 5).

(1) 在射流口门区, 尤其是石门和黄埔“门”射流口门区, 这里水动力尤为强劲, 泥沙不易落淤.

(2) 前航道在石门和黄埔“门”共同作用下, 沿程能够维持较大流速, 沉积物沉积模式主要以边滩沉积为主.

(3) 水流在岭大台地南侧由于受岭大台地的阻隔, 水流较弱, 泥沙在此由北向南迅速堆积.

(4) 相对开阔的广州溺谷湾西部区域, 水动力较弱, 受北江水沙和外海潮水作用泥沙的堆积方式为自西向东.

(5) 陈村水道自形成后, 其水流与沥滘水道水流相互作用, 在市桥台地西北侧形成一个流速低值区, 易于泥沙的落淤. 市桥台地西北侧的泥沙堆积方式为自南向北.

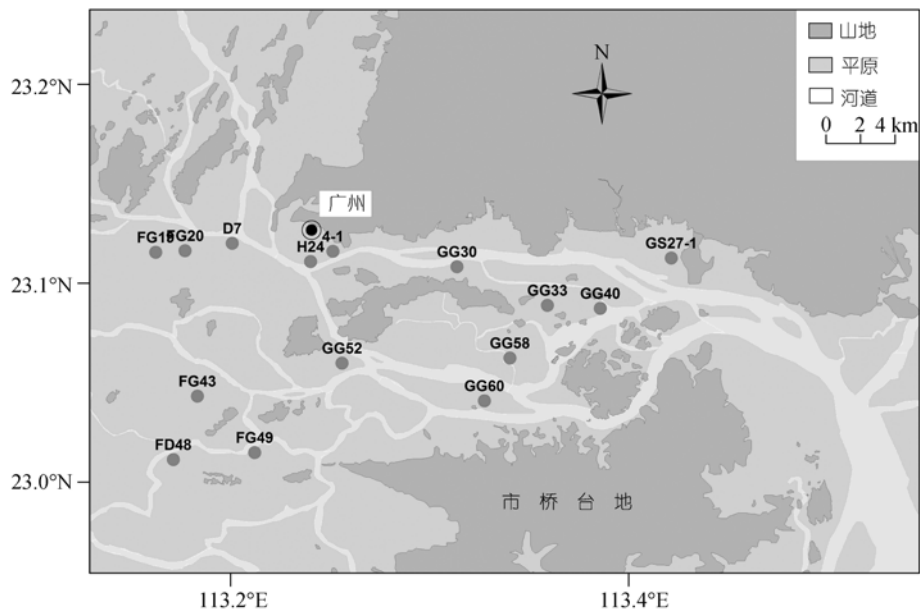


图 8 广州溺谷湾沉积速率计算钻孔位置分布

表 1 广州溺谷湾沉积速率<sup>a)</sup>

钻孔编号	沉积速率/mm·a <sup>-1</sup>	
	大西洋期	亚北方期
FG19	1.70	2.94
FG20	0.80	1.08
D7	0.52	0.16
H24	0.20	1.07
4-1	0.49	0.49
GG30	0.48	1.13
GG33	0.26	1.48
GG40	1.41	1.69
GS27-1	1.37	0.47
FG43	1.32	1.38
FD48	1.70	0.94
FG49	0.99	1.15
GG52	1.58	0.77
GG60	1.56	2.14
GG58	0.35	0.84
平均值	0.98	1.18

a) 所用的计算钻孔来自文献[28]和[31]

(6) 广州溺谷湾东部靠近黄埔段, 分布着诸多基岩岛屿. 这些基岩岛屿的存在成为了泥沙的沉积堆积核心.

根据广州溺谷湾水动力结构、淤积过程和地貌形态的变化可以把广州溺谷湾的发育演变分为 4 个时期: 1, 石门期(6~4 ka), 该时期的广州溺谷湾受淤积充填较少, 水域面积广阔, 特别是此时的芦苞水、西南涌径流作用强, 使得石门双向射流落潮射流远大于涨潮射流; 泥沙堆积主要发生在溺谷湾西侧; 2, 陈村期(4~2.5 ka), 陈村期是以陈村水道形成后广州溺谷湾的地貌形态和水动力特征命名的. 该时期随着紫洞至佛山一带淤浅成陆, 与石门期的广州溺谷湾相比更为封闭, 先前广州溺谷湾西侧的广阔水域被充填淤积只剩下了佛山涌、平洲水道、陈村水道等河道与顺德区古海湾相联系. 由于陈村水道的形成, 陈村“门”作用的显现, 和此时的石门双向射流由于上游纳潮量的减少, 径流作用减弱, 广州溺谷湾的水动力结构和沉积过程变得更为复杂; 3, 黄埔期(2.5~4 ka), 随着石门上游水道的淤积作用越来越强烈, 石门射流变得更为弱小; 陈村水道亦由于淤积逐渐形成一狭长河道, 而脱离了陈村“门”的作用; 此时的广州溺谷湾水动力结构主要由黄埔“门”双向射流系统所控制; 4, 珠江潮汐通道期: 该时期的广州溺谷湾随着上游芦苞水、西南涌的淤积干涸(“兹则西南达三江之水,

秋冬亦与芦苞而皆涸矣”《康熙三水县志》), 石门射流逐渐湮灭; 广州溺谷湾自身亦随着陆域、海域来沙的充填淤积和历史上人为的滩涂垦殖, 水域面积大大缩窄, 不过由于黄埔“门”的存在, 局部强化了涨落潮流, 使广州溺谷湾得以至今保持活跃潮汐水系的.

## 4 讨论

不论是长周期模型还是潮周期尺度的模型, 在应用之前都需要进行仔细的校准和验证. 然而, 这两种过程模型的校准和验证在原理上和本质上存在着差别. 对于短周期模拟而言, 验证过程就是在给定边界条件下, 找出模型输出与观测数据之间的统计离差(水位、流速、泥沙浓度等), 这一验证过程在物理学上是合理的和严格的, 因而是普遍接受的. 而长周期的模拟(十年至千年尺度)的验证过程应当视每个独立模块的验证为第一步. 但是, 就长周期混合模型来说, 通常既没有边界输入所需的资料(如全新世的地形和潮汐), 又缺乏与模型输出相比较的观测数据(地形变化、沉积模式、潮流等). 因此这些模型校准和验证所需的信息多从地质学、沉积学和考古学的研究中获取. 本文根据现有钻孔和测年资料, 把珠江三角洲 27 个钻孔距今 6~2.5 ka 的沉积厚度与 PRD-LTMM 模型计算进行了比较, 钻孔与计算的沉积趋势基本吻合. 27 个钻孔平均沉积厚度为 7.66 m, 计算值为 6.95 m, 平均绝对误差为 22.4%. 通过比较模拟结果可以看到, 至距今 2.5 ka, 珠江河网的基本框架已经形成, 广州溺谷湾的河道格局也已经呈现. 计算结果与实际河网结构和口门相当符合, 表明 PRD-LTMM 的长周期模拟珠江河网、广州溺谷湾的形成和演变过程可行而且比较可信. 不过, 应当指出, 模型计算虽然经过现有的钻孔资料验证, 但结果仅仅是初步的, 需要在资料、方法等方面作更深入细致的工作, 对模型作进一步调试和调整, 从而进一步提高模型模拟的信度.

长周期模型因其时间长度的特殊性, 不可能以真实的自然条件进行输入, 通常考虑平水年份的平均状况, 而不涉及极端情况(风暴, 台风等突变天气, 人类改造工程)下发生的不可逆变化, 尽管极端情况对地形的影响十分深刻. 李平日等<sup>[38]</sup>根据大量已有的沉积物年龄测定资料和古环境演变序列得出珠江河口湾在距今 6~2 ka 风暴潮沉积层出现的频率是较

低的. 通过课题组在珠江三角洲关键部位钻取的 18 个钻孔的测年和粒度资料分析珠江河口湾在距今 6~2 ka 风暴潮沉积层所占比例初步估计不足 10%. 而且在较长的时间尺度上, 大部分在短期内发生的灾变效应, 在均衡效应下会趋于恢复平衡状态. 当模型的计算结果通过初步验证其合理性和可信性后, 极端情况并不干扰对研究区域长时间尺度的动力演进机制和沉积发育模式的大体格局的认识. 在 6 ka 的时间尺度里, 无论是河流流量还是河流输入的沉积物通量, 它们变化的时间序列目前课题组正在开展研究.

高分辨率(10 a)的PRD-LTMM长周期动力形态模型, 其成果有一定的普遍意义, 它涉及的是复杂的多时间、空间尺度问题, 因此对过程的模拟理论和模型的研究需要多学科深入渗透和结合. 长周期模型的应用和效果在很大程度上依赖于其他学科的研究成果, 然而当模型建立和调试后将能提供合理而更详细的量化结果, 帮助我们较好地理解推动地形发育演变的动力过程或影响因素. PRD-LTMM模型为重新认识珠江三角洲千年尺度的沉积过程提供了有力的工具. 虽然未见到国内外对大型三角洲演变进行同样时空尺度和分辨率的模拟报道, 但是多时空尺度问题存在于所有学科领域, 而将它提炼到物理和数学的层次, 在原理上却是相通或共同的, 目前已经引起不同领域, 包括数学、通讯、环境及生态的中外科学家的高度重视和兴趣<sup>[39,40]</sup>, 有较高的理论和实际意义, 有待进一步开展研究. 同时, 长周期的三角洲演进模拟涉及多学科大量资料和复杂机理, 需要应用其他学科的研究成果, 但其中许多重要相关过程至今并没有精确的和一致的结论, 海平面变化是其中之一, 其他如沉积物压缩、新构造运动均可达到

海平面变化的量级或更大(mm/a). 模拟的进一步发展不仅是模型技术问题, 更重要的进展取决于对三角洲演变机理的深入认识和相关过程的研究进展. 另一方面, 本研究的进展也对相关学科和问题的研究提供了启发和新的基础.

## 5 结论

广州溺谷湾全新世以来的发育演变机制是一个包含多过程、多尺度(时间尺度和空间尺度)变化的复杂体系, 它是诸多因素有机结合共同作用的结果. 根据地貌动力学的分析和长周期动力形态模型的应用, 对广州溺谷湾末次海进盛期以来的地貌动力演变有如下认识:

(1) 广州溺谷湾中的“门”地貌单元是造成其活跃水动力的主导因素. 各“门”之间相互作用, 重塑了海洋和河流动力的分布, 对广州溺谷湾的形成演变起了控制性的作用.

(2) 广州溺谷湾是珠江三角洲有机整体的一部分, 其地貌动力演变受珠江三角洲各水系不同程度的影响, 其中通过影响广州溺谷湾中“门”的动力特征和泥沙传输, 芦苞水、西南涌、陈村水道和狮子洋的表现最为突出.

(3) 广州溺谷湾沉积物来源少. 由于汇潮点的存在由芦苞水、西南涌下传的西北江泥沙大部分沉积在石门上游地区, 较少传到溺谷湾中.

(4) 由于地貌形态分布的不同所导致动力结构的差异, 使得广州溺谷湾整体沉积过程和局部沉积模式具有独特性和多样性.

(5) 根据广州溺谷湾水动力结构、淤积过程和地貌形态的变化, 广州溺谷湾的发育演变可分为 4 个不同时期: 石门期、陈村期、黄埔期和珠江潮汐通道期.

**致谢** 本文承蒙华南师范大学曾昭璇教授、广州地理研究所黄镇国研究员、中国科学院南海海洋研究所赵焕庭研究员和张乔民研究员提出宝贵意见; 李平日教授提供 1700 余个工程钻孔资料, 评审专家提出建设性意见, 在此表示真诚感谢.

## 参考文献

- 1 夏东兴, 刘振夏. 中国海湾的成因类型. 海洋与湖沼, 1990, 21(2): 185—191
- 2 莫永杰. 广西溺谷湾海岸地貌特征. 海洋通报, 1990, 9(6): 57—60

- 3 祝永康. 瓯江溺谷海湾充填成陆和河口湾的形成过程. 地理学报, 1993, 48(3): 254—261
- 4 刘志杰, 庄振业, 韩德亮, 等. 全新世胶州湾海侵及大沽河古河口湾的形成和演变. 海岸工程, 2004, 23(1): 5—12
- 5 戴纪翠, 宋金明, 郑国侠. 胶州湾沉积环境演变的分析. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 397—406
- 6 Harris P T, Pattiaratchi B C, Cole A R, et al. Evolution of subtidal sandbanks in Moreton Bay, eastern Australia. *Mar Geol*, 1992, 103: 225—247[[doi](#)]
- 7 Piers L, Colin F J. The late devensian and holocene evolution of Barmouth Bay, Wales. *Sediment Geol*, 1994, 89: 163—180[[doi](#)]
- 8 Rachid E L Bouzidi, Mustapha Labraimi, Bendahhou Zourarah. Morphological evolution and spatio-temporal variability of the long-shore drift system in the bay of Tangier (Morocco). *J African Earth Sci*, 2004, 39: 527—534[[doi](#)]
- 9 Anna D L, François F, Giuliano F, et al. Geochemical approach to the sedimentary evolution of the Bay of Nice (NW Mediterranean sea). *Continent Shelf Res*, 2004, 24: 223—239[[doi](#)]
- 10 De Vriend H J, Zyserman J, Nicholson J, et al. Medium-term 2DH coastal area modeling. *Coast Eng*, 1993, 21: 193—224[[doi](#)]
- 11 Quiquerez A, Allemmand P, Dromart G. DIBAFILL: a 3-D two-lithology diffusive model for basin infilling. *Computer Geosci*, 2000, 26: 1029—1042[[doi](#)]
- 12 De Vriend H J. 2DH Mathematical modeling of morphological evolution in shallow water. *Coast Eng*, 1987, 11(1): 1—27[[doi](#)]
- 13 De Vriend H J. Analysis of 2DH morphological evolutions in shallow water. *J Geophys Res*, 1987, 92: 3877—3893[[doi](#)]
- 14 De Vriend H J. Mathematical modeling and large-scale coastal behavior, Part1: physical processes. *J Hydraulic Res*, 1991, 29(6): 727—740
- 15 De Vriend H J. Mathematical modeling and large-scale coastal behavior, Part2: predictive models. *J Hydraulic Res*, 1991, 29(6): 741—753
- 16 De Vriend H J, Capobianco M, Chesher T, et al. Approaches to long-term modeling of coastal morphology: a review. *Coast Eng*, 1993, 21: 225—269[[doi](#)]
- 17 De Vriend H J, Bakker W T, Bilsle D P. A morphological behavior model for outer delta of mixed-energy tidal inlets. *Coast Eng*, 1994, 23: 305—327[[doi](#)]
- 18 De Vriend H J. Prediction of aggregated-scale coastal evolution. *Coast Dyn*, 1997: 644—653
- 19 Dean R G. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *J Coast Res*, 1991, 7(1): 53—84
- 20 O'Brien M P. Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts. *Proc ASCE, J Waterw Harbours Coast Eng*, 1969, 15: 43—52
- 21 Bruun P, Gerritsen F. *Stability of Coastal Inlets*. Amsterdam: Publishing Company, North Holland. 1960. 1—123
- 22 任杰. 末次海进盛期以来珠江三角洲演变的长周期动力地形模型及应用. 广州: 中山大学博士学位论文, 2003. 1—110
- 23 何志刚. 珠江三角洲大整平原形成与古磨刀门动力演变的互动机制研究. 广州: 中山大学博士学位论文, 2006. 1—160
- 24 吴超羽, 包芸, 任杰, 等. 珠江三角洲及河网形成演变的数值模拟和地貌动力学分析: 距今 6000~2500 a. *海洋学报*, 2006, 28(4): 64—80
- 25 吴超羽, 任杰, 包芸, 等. 珠江河口“门”的地貌动力学初探. *地理学报*, 2006, 61(5): 537—548
- 26 吴超羽, 何志刚, 任杰, 等. 珠江三角洲中部平原形成演变机理研究——以大整平原为例. *第四纪研究*, 2007, 27(5): 814—827
- 27 Wu C Y, Ren J, Bao Y, et al. A long-term morphological modeling study on the evolution of the Pearl River Delta, and estuarine bays since 6000 yr BP. *Geol Soc Amer*, 2007, (Special Paper): 199—214
- 28 李平日, 郑建生, 方国祥. 广州地区第四纪地质. 广州: 华南理工大学出版社, 1989. 1—192
- 29 赵煥庭. 珠江河口演变. 北京: 海洋出版社, 1990. 1—357
- 30 曾昭璇, 黄少敏. 珠江三角洲历史地貌学研究. 广州: 广东高等教育出版社, 1987. 1—201
- 31 李平日, 乔彭年, 郑洪汉, 等. 珠江三角洲一万年来的环境演变. 北京: 海洋出版社, 1991. 1—154
- 32 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982. 1—274
- 33 李春初. 中国南方河口过程与演变规律. 北京: 科学出版社, 2004. 1—599
- 34 曾昭璇. 广州溺谷湾地貌发育. *华南师院学报*, 1979, 2: 59—68
- 35 史合印. 丘陵和台地在珠江三角洲及其河网形成中的作用. 广州: 中山大学硕士学位论文, 2002. 1—53
- 36 任杰, 吴超羽. 长周期模型中的代表性输入条件. *水科学进展*, 2006, 17(2): 278—282
- 37 任杰, 吴超羽, 包芸. 长周期动力地形模型中地形演变方法探讨. *海洋学报*, 2007, 29(1): 76—80
- 38 李平日, 黄光庆, 王为, 等. 珠江口地区风暴潮沉积研究. 广州: 广东科技出版社, 2002. 1—153
- 39 Combescur A, Gravouil A. A time-space multi-scale algorithm for transient structural nonlinear problems. *Mec Ind*, 2001, 2: 43—55
- 40 Marsan M A, Bianco A, Casettic, et al. An integrated simulation environment for the analysis of ATM networks at multiple time scales. *Computer Networks ISDN Sys*, 1998, 29: 2165—2185[[doi](#)]