

基于分形几何理论的河湖结构连通性评价方法

胡尊乐,汪 姍,费国松

(江苏省水文水资源勘测局常州分局,江苏 常州 213022)

摘要:基于分形几何理论与方法,针对河湖的结构连通性,利用分形意义上的分形维数和分枝维数概念,给出了一种流域(或区域)河湖结构连通性的评价方法。运用构造的简单河网结构模型,通过计算河湖覆盖度、分形维数和分枝维数来验算和评价了常州市主城区的河湖结构连通性,并与湖西区对比,结果表明,常州市主城区的分形维数和河湖覆盖度均大于湖西区,分枝维数均在 1.50 左右,常州市主城区的河湖结构连通性水平高于湖西区,两者流域地貌均处于侵蚀发育阶段的壮年期。

关键词:河湖连通性;结构连通性;分形几何;分形维数;分枝维数;太湖流域;常州市主城区

中图分类号:P343 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0024-05

Evaluation method of structural connectivity for rivers and lakes based on theory of fractal geometry//HU Zunle, WANG Shan, FEI Guosong(*Changzhou Branch of Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Changzhou 213022, China*)

Abstract: An evaluation method of structural connectivity for rivers and lakes in a basin or an area is provided based on the theory of fractal geometry. This study used the simple fractal model to check and evaluate the structural connectivity of rivers and lakes in the main district of Changzhou City by calculating river and lake coverage, fractal dimension and branching dimension. The results are compared with those from the West Taihu Basin. The results show that the fractal dimension and river and lake coverage in the main district of Changzhou City are greater than in West Taihu Basin, while the branching dimension is 1.50 in both basins, which means that the structural connectivity of rivers and lakes in the main district of Changzhou City is greater than in West Taihu Basin. Both of the basins are at the mature stage of erosion development.

Key words: connectivity of rivers and lakes; structural connectivity; fractal geometry; fractal dimension; branching dimension; Taihu Basin; main district of Changzhou City

河湖连通在增强流域抵御水旱灾害能力和提高城市水资源配置能力^[1],改善河湖健康状况、维护河湖生态系统的结构和功能^[2],减轻已建工程给生态带来的负面影响^[3]等方面均具有重要作用。有关河湖连通性理论和技术研究尚处于探索阶段,已有研究成果中,对于流域(或水系)的河湖结构连通性分析,习惯上用河湖频率^[4]、水面率、河网密度及河网结构连通度^[5]来表示,但这几个参数只能大致反映一个流域河湖分布的均匀度、覆盖度以及密度变化。

分形几何理论及方法在近 30 年来已广泛应用于自然科学和社会科学等各个领域,如路网评价以及农业土壤特性研究等方面^[6-10],分形几何理论在水利工程生态环境影响评价、河流水系研究方面也得到了一定的应用,如汪富原^[11]采用分形等自组织理论研究了河流系统发展演变的规律;日本名古屋大学曾对亚马逊流域和尼罗河流域进行了分形研

究,结果表明亚马逊流域的分形维数为 1.85,尼罗河流域的分形维数为 1.40,显然多雨的亚马逊流域比少雨的尼罗河流域支流多,自相似程度高,分形维数也就大^[12]。为更加准确地反映河湖的结构连通性,本文将分形几何学运用到河湖连通性的研究中,建立分形模型,引进河湖覆盖度等概念,运用分形几何理论和方法,开展河湖连通性的应用研究;在不考虑水利工程调度、连通目标等因子影响的前提下,通过考察流域河湖的结构特征及各相关要素,对流域河湖的结构连通性水平(河湖的连通度、分布均匀度、覆盖度、密度)作出评价,从而为更深层次的连通性评价及河湖连通实践奠定基础。

1 分形与河湖结构连通性的关系

河湖连通是指以江河湖泊等水系为对象,在其间建立的具有一定水力联系的连接方式。现有的河

湖连通理论^[13]认为,河湖连通性包含两个基本要素:一是要有水流的连接通道(河湖),二是要有能满足一定需求的保持流动的水流。结构连通性是指一个流域(或区域)内河湖是否相互连接,分布是否均匀与合理,覆盖度和密度是否达到一定水平。结构连通性是河湖连通性调控的基础,只有达到一定的结构连通性水平,才能借助水利工程合理调度来改善水系的水力连通性,进而满足防洪排涝、水资源调度、水生态环境改善等不同目标下的水系连通需求,同时河湖结构连通性水平的高低也最终取决于各连通目标的实现程度。

在分形几何理论里,可将一个流域的河网视为整体,将一条条河流一个个湖泊视为构成这个整体的“生成元”^[14],流域河网与河湖之间可以形成基本相似的关系,即:作为整体的流域河网与作为部分的河湖之间具有某种自相似性,刻画局部与整体间自相似的参数就是分形意义上的维数。另外,刻画局部之间的分枝结构也具有自相似的分形性质,其自相似的参数就是分枝维数。一般地,对于流域河网来说,分形结构自相似性越高,分形维数越高^[15](越接近2维),表明河湖分布越均匀,相互之间的连通度越高,也即河湖的结构性越好,覆盖度越高;分枝结构自相似性越高,分枝维数越高(越接近2维),表明河湖的密度变化越小,水系发育越完全。因此,可通过计算一个流域的分形维数,来判定这个流域河湖的分布均匀度和覆盖度,也可以通过计算这个流域的分枝维数,来判定这个流域河湖的密度变化和河湖发育程度^[16]。

2 河湖结构连通性相关参数计算及评价方法

2.1 河湖分布的连通度、均匀度与覆盖度

就河湖结构连通性的研究现状来看,一个流域(或区域)的水系结构特征指标主要从几何学、河流地貌学等角度出发,利用河湖频率、水面率、河网密度等几个参数来反映流域河湖的结构连通性水平。河湖频率为单位流域面积上的河流数目,相对来说,一个流域的河湖频率越大,结构连通性水平就越高;但对于平原河网地区来说,水系复杂,河湖数目的确定以主观判断为主,难度较大,且小的支沟河道越多,河湖频率越大,显然河湖频率不能科学地反映连通性水平。水面率为单位面积上的水面面积,能在一定程度上反映区域的河湖规模,但在河湖空间分布的表达上明显不足,不能反映不同水域之间的连通情况,比如一个流域具有多座湖泊,水面率较高,但连通性可能不足。河网密度为单位面积上的河流长度,该参数未能反映各河段的连通能力和分布是

否均匀合理,比如一个流域内相邻的河道可能并不相通,或集中分布在某一区域。

张济忠^[14]根据图论原理,推荐使用河网结构连通度 γ 来表示一个流域河湖的结构连通性水平,即

$$\gamma = \frac{m}{3(n-2p)} \quad (1)$$

式中: m 为连线(边或弧)数目; n 为节点(顶点)数目; p 为网络中亚图的数目。 γ 的变化范围为 $[0,1]$, $\gamma=0$ 表示网络内无连线,只有孤立点; $\gamma=1$ 表示网络内每一个节点都存在与其他节点相连的连线。显然,这种拓扑化的网络结构连通度表达不能充分体现一个流域内实际意义上的河流的分布(覆盖)情况,即河湖是否均匀覆盖整个流域。

而按照分形几何理论,将一个流域分为 N 个局部,每个局部都按相似比 β 与整体相似,则分形维数^[12] D_f 表达式为

$$D_f = \frac{\ln N}{\ln(1/\beta)} = -\frac{\ln N}{\ln \beta} \quad (2)$$

计算流域分形维数的具体分形方法为:用 $A \times B$ 的方格网把一个流域分割成一个个边长为 a 的小正方形,数出至少含有1条河流的正方形的个数 N_a (对于一个流域而言,即河流通过的区域),一般地,对于流域河网而言,可以认为 N_a 随着 a 的减小而增大,即两者之间存在减函数关系。因此,可以画出 a 与 N_a 的双对数关系图,用最小二乘法率定出 $\ln a$ 与 $\ln N_a$ 的直线方程,直线的斜率即为这个流域的分形维数。显然,同一 a 情况下, N_a 越大,也就是说 D_f 越大,表明这个流域的河湖分布越均匀合理,覆盖度越大。另外,流域范围内孤立的水系几乎是不存在的,这也间接地表明 D_f 越大,流域的河湖连通度越高。

同样,根据分形几何原理,一个流域如无河流穿过,分形维数 $D_f=0$;如仅有1条河流,分形维数 $D_f=1$;如全为水体,则分形维数 $D_f=2$ 。根据分形几何原理^[12],可通过计算一个流域的分形维数,来判定这个流域河湖的分布均匀度和覆盖度,因此,本文用河湖覆盖度 S 定义流域河湖结构连通的覆盖度:

$$S = \frac{e^{D_f} - e^0}{e^2 - e^0} \quad (3)$$

式(3)在河流与其覆盖范围之间建立了联系(事实上,当式(2)中 N 足够大时,可以认为穿越无穷小的区域的线(河流)可以代表这个无穷小区域)。显然,分形维数 D_f 越大,河流水力通达(覆盖)的区域越广。也就是说,对于一个河湖结构连通性不大的区域,可以通过水利工程手段改善水力通达条件,促进河湖连通。

2.2 河湖分布的密度变化

对于式(1),河网结构连通度 γ 是一个静态指标,只能反映一个流域河湖的整体连通性;而河湖结构连通性往往又呈现出从流域上游节点向下游节点不断变化的动态特征,因此,根据分形几何理论,可用分枝维数^[4]来描述一个流域水文情势所呈现出的河湖连通性的动态变化过程。

分枝维数也是一种分形意义上的维数,其定义为:在一个流域中,选取一个合理的河湖节点为圆心,以 r 为连通半径,取 $r=1,2,\dots$,得到若干个同心圆弧(最大为同心半圆),分析流域被这些同心弧划分成若干个等宽的同心环带,环带以 k 编号。可见 r 的取值确定了 k 的取值,即 $k=1,2,\dots,r$ 。规定第 k 个环带内的网络分枝数目之和为 N_k , N_r 为 $\alpha\pi r^2$ (α 为弧度)半径范围内的圆环区域上网络分枝累计数,有

$$N_r = \sum_{k=1}^r N_k \tag{4}$$

也就是说, N_r 与 r 的幂指数之间存在线性关系,即

$$N_r = br^D \tag{5}$$

有研究^[8]表明:式(5)中的幂指数 D 在一个流域的一定连通半径范围内具有自相似性,这就意味着, D 是分形意义上的维数,由于在直观上体现了网络分枝的变化情况,所以可称为分枝维数。显然,分枝维数是由一个流域的分枝维数变化率确定的,可以很好地反映流域的空间组织结构及其变化特征。分枝维数越大,流域河湖的密度变化越小,支流水系发育越完全。因此,在合理选取河湖节点与连通半径的前提下,分枝维数可以作为衡量流域河湖结构连通性的一种标度。

对式(5)采用双对数拟合方式,可以求出分枝维数 D 。另外,对式(5)进行二阶求导变换,可以得到河湖分枝维数对于流域空间的密度衰减公式:

$$\rho_r \propto r^{D-2} \tag{6}$$

显然,对于一个流域而言,分枝维数 D 越大,流域空间的密度 ρ_r 随着 r 的增大而缓慢减小,即河湖分枝数目的密度从上游顶点向下游缓慢递减。

同样,根据分形几何学的原理,对于一个流域而言,如无河流穿过,分枝维数 $D=0$;如仅有 1 条河流穿过,则 $D=1$;如全为水体,则 $D=2$ 。根据分形几何理论,可以通过计算这个流域的分枝维数,来判定这个流域河湖的密度变化和河湖发育程度,因此,本文也定义一个流域河湖结构连通的分布密度:

$$\rho = \frac{\pi r^D}{\pi r^2} = r^{D-2} \tag{7}$$

式(7)在形式上与式(6)类似,可以很好地表述一个流域河湖结构连通的密度从上游到下游的变化情况。一般来说,一个流域河湖结构连通的分布密度从上游到下游总体上呈递减趋势(也间接地说明,对于一个流域而言,上游的河湖发育早于下游,且河湖发育的程度更深);另外,分枝维数越大,表明这个流域从上游到下游河湖发育越好。

2.3 分形几何理论的局限性

前面分析过,对于一个流域而言,水面率指标能在一定程度上反映区域的河湖规模,但利用分形几何理论分析一个区域或流域的河湖结构连通性水平时,没有充分考虑不同河湖在规模上的区别,例如一条窄浅的河流和一条宽深的河流,它们在分形几何里对分形维数的影响是一致的,但实际上对河湖连通的影响是不一样的(当然,当 r 足够小时可以看出这一点)。因此,本文引入修正系数 k 对 D_f 进行修正,即

$$D'_f = kD_f \tag{8}$$

式中 k 为与一个流域水面率有关的函数,满足 $1 \leq k < \frac{2}{D_f}$ 。另外,从前面的分析也可以看出,分形维数 D_f 在描述一个流域的河湖结构连通度方面不够直观。

3 实例分析

常州市主城区(运北片)位于太湖流域常州市区的中部,北为新龙河和沪宁高速公路,东为丁塘港,南及西南为京杭运河环绕,西为德胜河,研究区域面积约为 289 km²。区域内主要河道有京杭运河、关河、澡港河、北塘河、南运河等,河流总数为 50 条,水面面积为 10.51 km²,河流总长为 240 km,河流节点总数为 86 个;计算得河湖频率为 0.173 00 条/km²、水面率为 3.63%、河网密度为 0.83 km/km²,河网结构连通度为 0.48。与太湖流域湖西区及武澄锡虞区相比,常州市主城区河网结构连通度较高(表 1)。

表 1 太湖流域骨干水系河湖结构连通性评价结果

水利分区	河湖频率/ (条·km ⁻²)	水面率/%	河网密度/ (km·km ⁻²)	河网结构 连通度
湖西区	0.005 07	7.48	0.10	0.43
武澄锡虞区	0.016 05	6.86	0.23	0.43
常州市主城区	0.173 00	3.63	0.83	0.48

3.1 结构性分析

以 1 000 m 为一个方格边长单位,构造常州市主城区河网分形模型如图 1 所示。首先取 34 个边长单位的方格网($a=34$)划分常州市主城区,统计 N_a ;然后依次取 $a=17,8,4,2,1$ 对常州市主城区进行划分,统计相应的 N_a 。统计结果见表 2 和图 2。

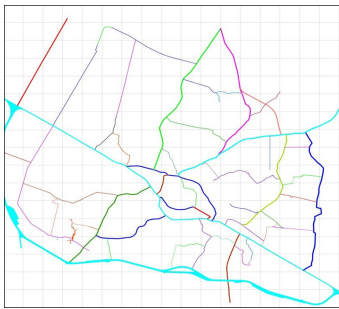


图1 常州市主城区分形模型($a=1$)

表2 不同方格边长单位下的 N_a 取值

a	$\ln a$	N_a	$\ln N_a$
1	0	1	0
2	0.693	4	1.386
4	1.386	15	2.708
8	2.079	56	4.025
17	2.833	187	5.231
34	3.526	493	6.201
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

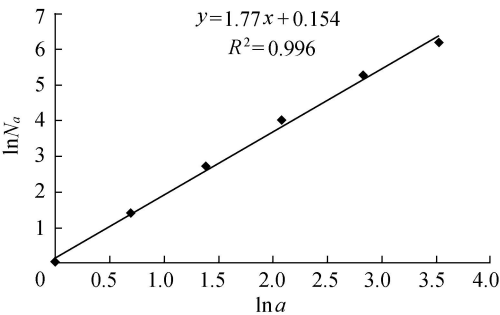


图2 常州市主城区 $\ln a$ - $\ln N_a$ 分形模型关系拟合曲线

从表2和图2可以看出,数据点呈对数线性分布。利用最小二乘法,可求得以分形维数表征的常州市主城区河湖的结构连通性水平,其中分形维数 $D_f=1.77$ 。同样,根据式(3),计算出常州市主城区河湖结构连通的覆盖度 $S=0.762$,即常州市主城区河湖覆盖的范围约为其总面积的76.2%(220.2 km²)。

3.2 连通性分析

以1000 m为1个方格边长单位,构造常州市主城区河网结构分枝模型如图3所示,选择京杭运河与德胜河交叉口为河湖节点。以1个边长单位(1000 m)为初始连通半径($r=1$),用相应的半圆划分

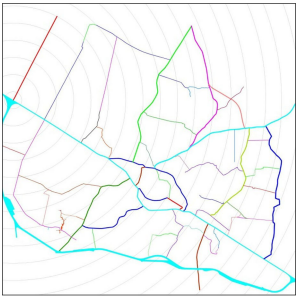


图3 常州市主城区分枝模型($r=1$)

常州市主城区;然后依次取 $r=2,3,\dots,18$,统计各连通半径 r 范围内的河湖分枝数 N_r ,结果见表3和图4。

表3 不同连通半径单位下的 N_r 取值

r	$\ln r$	N_r	$\ln N_r$
1	0	3	1.099
2	0.693	6	1.792
3	1.099	12	2.485
4	1.386	17	2.833
5	1.609	24	3.178
6	1.792	33	3.497
7	1.946	41	3.714
8	2.079	55	4.007
9	2.197	70	4.248
10	2.303	79	4.369
11	2.398	90	4.500
12	2.485	102	4.625
13	2.565	115	4.745
14	2.639	128	4.852
15	2.708	140	4.942
16	2.773	147	4.990
17	2.833	154	5.037
18	2.890	161	5.081

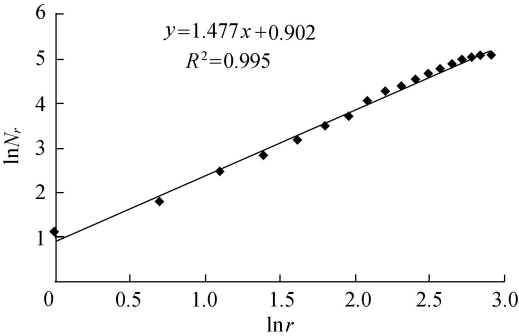


图4 常州市主城区 $\ln r$ - $\ln N_r$ 分枝模型关系拟合曲线

从表3和图4可以看出,数据点亦呈对数线性分布。同样求得常州市主城区河湖的分枝维数 $D=1.477$,显然,常州市主城区河湖的分枝维数从河湖顶点(京杭运河与德胜河交叉口)向外呈均匀递增趋势。

3.3 横向比较

湖西区位于太湖流域的西北部,北至长江,东自德胜河与澡港河分水线南下至常州市新闸,向南沿武宜运河东岸至太滪运河,再沿太滪运河北岸向东南至太湖,再沿太湖湖西岸向西南至苏浙两省分界线,南以苏浙两省分界线为界,西以茅山与秦淮河流域接壤,区域总面积7549 km²。用同样的方法对太湖流域湖西区的河湖结构连通性进行评价,结果见表4。

表4 常州市主城区与湖西区河湖结构连通性评价结果

水利分区	D_f	S	D
湖西区	1.70	0.700	1.483
常州市主城区	1.77	0.762	1.477

从表4可以看出,常州市主城区的分形维数和河湖覆盖度均大于湖西区,表明常州市主城区的河

湖结构连通性水平高于湖西区,与表 1 的比较结果基本一致。事实上,常州市主城区处于湖西区下游,河湖侵蚀发育程度更为完全。有关研究表明^[15],当分形维数 $D_f \leq 1.60$ 时,流域地貌处于侵蚀发育阶段的幼年期,此时河湖尚未充分发育,河网密度小;当 $1.60 < D_f \leq 1.89$ 时,流域地貌处于侵蚀发育阶段的壮年期,此时河湖发育基本成熟,河网分布均匀;当 $1.89 < D_f \leq 2.00$ 时,流域地貌处于侵蚀发育的晚年期,此时河湖发育完全,河网密集。因此,可以说常州市主城区和湖西区的流域地貌均处于侵蚀发育阶段的壮年期。

常州市主城区和湖西区的分枝维数均在 1.50 左右,可以间接地表明太湖流域的河网密度与上下游距离的平方根成反比,这与有关研究成果^[4,16]基本吻合。另外,常州市主城区的分枝维数略小于湖西区,主要原因是常州市主城区不是一个较为封闭的小流域,在计算分枝维数时,有可能偏小。

4 结 语

本文基于分形几何理论,用分形维数来表征一个流域河湖分布的均匀度与覆盖度,用分枝维数表征流域河湖分布的密度,建立了河湖覆盖度和密度计算模型,并以常州市主城区和湖西区为例,用分形几何理论和计算方法分析其连通性,为今后开展河湖连通性研究与评价提供了一种较为直观的评价方法,该评价方法比采用其他指标(如河湖频率、水面率、河网密度)的方法更能反映流域河湖分布的深入程度、均匀度、覆盖度以及密度。当然,随着经济社会的快速发展,对河湖连通的需求越来越高,一个流域(或水系)内的河湖不仅具有自然属性,还具有一定的社会属性(如为防汛防旱服务,为水环境改善服务,为地方经济社会发展服务),因此应用分形几何理论和方法研究流域的结构连通性还有许多方面有待于进一步研究,比如可以在流域水利工程规划、水资源调度的评估方面提供一些量化的参考指标。

参考文献:

[1] 孟祥永,陈星,陈栋一,等.城市水系连通性评价体系研究[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):24-28. (MENG Xiangyong, CHEN Xing, CHENG Dongyi, et al. Evaluation system of urban water system connectivity [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(1): 24-28. (in Chinese))

[2] 武国正,徐宗学,李畅游.基于分形理论的水体富营养状况评价及其验证[J].水资源保护,2012,28(4):12-16. (WU Guozheng, XU Zongxue, LI Changyou. Watereutrophication assessment and validation based on

fractal theory [J]. Water Resource Protection, 2012, 28 (4): 12-16. (in Chinese))

[3] 姜翠玲,王俊.我国生态水利研究进展[J].水利水电科技进展,2015,35(5):168-175. (JIANG Cuiling, WANG Jun. Recent advances of ecological water conservancy in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 168-175. (in Chinese))

[4] 夏军,高扬,左其亭,等.河湖水系连通特征及其利弊[J].地理科学进展,2012,31(1):26-31. (XIA Jun, GAO Yang, ZUO Qiting, et al. Characteristics interconnected rivers system and its ecological effects on water environment [J]. Progress Geography, 2012, 31 (1): 26-31. (in Chinese))

[5] 窦明,崔国韬,左其亭,等.河湖水系连通的特征分析[J].中国水利,2011,62(16):17-19. (DOU Ming, XUI Guotao, ZUO Qiting, et al. Characteranalysis of riverand lake system interconnection [J]. China Water, 2011, 62 (16): 17-19. (in Chinese))

[6] 王秋平,张琦,刘茂.基于分形方法的城市路网交通形态分析[J].城市问题,2007,26(6):52-55. (WANG Qiuping, ZHANG Qi, LIU Mao. Traffic pattern analysis of urban road network based on fractal theory [J]. City Problem, 2007, 26(6): 52-55. (in Chinese))

[7] 刘立明.分形法在河北省高速公路规划中的应用[J].河北工业大学成人教育学院学报,2001,16(4):21-23. (LIU Liming. Application of fractal method in Hebei province highway planning [J]. Journal of Adult Education School of Hebei University of Technology, 2001, 16(4): 21-23. (in Chinese))

[8] 张铮,陈亮,魏洪涛.基于分形理论的区域路网覆盖性评价研究[J].河北工业大学成人教育学院学报,2005,20(1):10-13. (ZHANG Zheng, CHEN Liang, WEI Hongtao. Study on regional road network coverage evaluation based on fractal theory [J]. Journal of Adult Education School of Hebei University of Technology, 2005, 20(1): 10-13. (in Chinese))

[9] 马德良,李巧茹,魏连雨.分形理论在公路网络评价中的应用[J].内蒙古公路与运输,2001,26(增刊1):26-27. (MA Deliang, LI Qiaoru, WE I Lianyu. Application of fractal theory in highway network evaluation [J]. Highways and Transportation in Inner Mongolia, 2001, 26 (Sup1): 26-27. (in Chinese))

[10] 鲁植雄,张维强,潘君拯.分形理论及其在农业土壤中的应用[J].土壤学进展,1994,22(5):40-45. (LU Zhixiong, ZHANG Weiqiang, PAN Junzheng. Fractal theory and its application in agricultural soil [J]. Advances in Soil Science, 1994, 22(5): 40-45. (in Chinese))

[11] 汪富泉.河流动力系统的自组织原理及机制探讨[J].水利水电科技进展,2014,34(4):1-4. (WANG Fuquan. Self-organised principles and mechanisms of river dynamic system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4): 1-4. (in Chinese))

(下转第 43 页)

- [2] DORING M, OGER G, ALESSANDRINI B, et al. SPH simulations of floating bodies in waves [C] // Proceedings of ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 741-747.
- [3] PADOVA D, DALRYMPLE R A, MOSSA M, et al. SPH simulations of regular and irregular waves and their comparison with experimental data [EB/OL]. [2015-09-08]. <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0911/0911.1872.pdf>.
- [4] 高睿,任冰,王国玉,等.孤立波浅化过程的SPH数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2010, 25 (5): 620-629. (GAO Rui, REN Bing, WANG Guoyu, et al. SPH model of solitary waves shoaling on a mild sloping beach [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25 (5): 620-629. (in Chinese))
- [5] 郑兴,段文洋. K2_SPH 方法及其对二维非线性水波的模拟 [J]. 计算物理, 2011, 28 (5): 659-666. (ZHENG Xing, DUAN Wenyang. K2_SPH method and application for 2D nonlinear water wave simulation [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011, 28 (5): 659-666. (in Chinese))
- [6] DALRYMPLE R A, ROGERS B D. Numerical modeling of water waves with the SPH method [J]. Coastal Engineering, 2006, 53 (2): 141-147.
- [7] 任冰,高睿,金钊,等.波浪对透空式结构物冲击作用的光滑粒子流体动力学数值模拟 [J]. 海洋学报, 2012, 34 (1): 163-177. (REN Bing, GAO Rui, JIN Zhao, et al. The numerical simulation of wave slamming on an open-piled structure using the SPH model [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34 (1): 163-177. (in Chinese))
- [8] PARSHIKOV A N, MEDIN S A, LOUKASHENKO I I, et al. Improvements in SPH method by means of interparticle contact algorithm and analysis of perforation tests at moderate projectile velocities [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24 (8): 779-796.
- [9] VILA J P. On particle weighted methods and smooth particle hydrodynamics [J]. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 1999, 9 (2): 161-209.
- [10] GÓMEZ-GESTEIRA M, CRESPO A J C, ROGERS B D, et al. SPHysics-development of a free-surface fluid solver-part 2: efficiency and test cases [J]. Computers & Geosciences, 2012, 48: 300-307.
- [11] TORO E F. Shock-capturing methods for free-surface shallow flows [M]. San Francisco: Wiley, 2001.
- [12] ROGERS B D, DALRYMPLE R A, STANSBY P K. Simulation of caisson breakwater movement using 2-D SPH [J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48 (Sup1): 135-141.
- [13] MONAGHAN J J. On the problem of penetration in particle methods [J]. Journal Computational Physics, 1989, 82 (1): 1-15.
- [14] MONAGHAN J J, KOS A. Solitary waves on a Cretan Beach [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1999, 125 (3): 145-154.
- [15] ROGERS B D, DALRYMPLE R A. SPH modeling of tsunami waves [J]. Advances in Coastal and Ocean Engineering, 2008, 10: 75-100.
- [16] XU Rui. An improved incompressible smoothed particle hydrodynamics method and its application in free-Surface simulations [D]. Manchester: University of Manchester, 2009.
- [17] LEIMKUHLER B J, REICH S, SKEEL R D. Integration methods for molecular dynamic IMA volume in mathematics and its application [M]. Berlin: Springer, 1997.
- [18] MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics [J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68 (8): 1703-1759.
- [19] ROGERS B D. Refined localized modelling of coastal flow features using adaptive quadtree grids [D]. Oxford: University of Oxford, 2001.
- [20] GÓMEZ-GESTEIRA M, DALRYMPLE R A. Using a 3D SPH method for wave impact on a tall structure [J]. Journal of the Waterway Port, Coastal and Ocean Division, 2004, 130 (2): 63-69.
- (收稿日期: 2015-09-08 编辑: 郑孝宇)
- +++++
- (上接第 28 页)
- [12] 孙洪泉. 分形几何与分形插值 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [13] 季笠, 陈红, 蔡梅, 等. 太湖流域江河湖连通调控实践及水生态环境作用研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [14] 张济忠. 分形 [M]. 2 版, 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [15] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义 [J]. 地理科学, 1996, 16 (2): 124-128. (HE Longhua, ZHAO Hong. The fractal dimension of river networks and its interpretation [J]. Geography Science, 1996, 16 (2): 124-128. (in Chinese))
- [16] 茹彪, 陈星, 张其成, 等. 平原河网区水系结构连通性评价 [J]. 水电能源科学, 2013, 31 (5): 9-12. (RU Biao, CHEN Xing, ZHANG Qicheng, et al. Evaluation of structural connectivity of river system in plain river network region [J]. Water Resources and Power, 2013, 31 (5): 9-12. (in Chinese))
- (收稿日期: 2015-08-13 编辑: 熊水斌)