

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.016

下凹型内孤立波沿台阶地形演化特征试验

屈子云,魏 岗,杜 辉,靖树一,王欣隆

(解放军理工大学气象海洋学院,江苏 南京 211101)

摘要:通过大型分层流水槽中下凹型内孤立波沿台阶地形演化的试验模拟,认识我国南海东北部内孤立波沿海底突变地形传播的规律。利用分层染色标识法显示内孤立波与台阶地形作用过程中的特征变化,采用多点组合探头阵技术对其结构进行定量测量。研究表明:突变地形作用导致内孤立波波幅在台阶附近显著增加,使内孤立波波形变陡并出现尾部波列和极性转换等现象。

关键词: 分层流;台阶地形;内孤立波变化特征;水槽试验;分层染色标识法;多点组合探头阵技术
中图分类号: TV143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)01-0085-05

Experiment on evolution characteristics of internal solitary wave of depression over step topography

QU Ziyun, WEI Gang, DU Hui, JING Shuyi, WANG Xinlong

(Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: Through laboratory experiments of the evolution of an internal solitary wave (ISW) of depression over step topography in a large stratified fluid tank, the propagating characteristics of the ISW along the mutation topography of the seabed of the South China Sea were studied. The process of the interaction of the ISW and the step topography was shown using layered dye-injection techniques and its structure was quantitatively measured with multi-point combined conductivity-probe arrays. The results show that mutation topography can lead to an amplitude increase of the ISW near the step and cause the waveform to steepen. Further, dynamic phenomena, such as the trail wave train and polarity reversal, are generated.

Key words: stratified fluid; step topography; change characteristics of internal solitary wave; tank experiment; layered dye-injection techniques; multi-point combined conductivity-probe arrays

海洋内孤立波是发生在密度稳定层化的海水内部的一种特殊波动,我国南海海域是内孤立波的多发地,内孤立波在吕宋海峡以及吕宋海峡西北方向大陆架区域的动力学特征一直是中外学者十分关注的问题^[1-3]。内孤立波在向浅海区域传播的过程中会与海底变化的地形发生相互作用,其过程常伴有反射、透射、分裂以及极性转换(即下凹型转化为上凸型)等非线性演化特征^[4-5]。南海北部海域地形复杂、流态格局多变、密度垂向层化特征显著,为内孤立波的产生提供了条件,尤其是东北部海域大振幅内孤立波频发并沿着陆架陆坡地形向东沙群岛方向传播,内孤立波与海底地形相互作用的现象时有发生。另外由于温度、洋流等影响,海洋跃层与海底地形的相对位置也会发生变化,同样会对内孤立波与海底地形的相互作用产生影响。

针对内孤立波与地形的相互作用,很多学者用不同的方法进行了研究。魏岗等^[6]基于边缘层理论研究了两层流体中内孤立波在台阶地形上透射、反射及其分裂的演化特征;Xu等^[7]通过理论模型和试验研究相互验证,证明了KdV方程在研究内孤立波沿地形传播时的适用性;另外,用数值模拟结合实测资料以及卫星图片的方法也被广泛采用^[8-10]。由于内孤立波与地形相互作用的复杂性,理论研究和数值模拟对作用过程中的细节无

收稿日期:2014-01-05

基金项目:国家自然科学基金(11072267,11472307)

作者简介:屈子云(1990—),男,陕西韩城人,硕士研究生,主要从事分层流体中水动力学研究。E-mail:quziyun@yeah.net

通信作者:魏岗,教授。E-mail:weigangweigang12@163.com

法准确测量,试验研究仍是目前研究大振幅内波变形、破碎、混合等复杂过程的有效方法。自20世纪80年代以来,在分层流水槽中研究内孤立波与地形相互作用一直是认识海洋内孤立波沿海底地形传播的重要手段。贾村^[11]研究了上凸型内孤立波在两层流体中的分裂,证明了两层流体中内孤立子分裂理论的有效性;Chen等^[12]研究了两层流体中内孤立波经陡坡时的能量耗散,讨论了各种因素对能量耗散的影响;Carr等^[13]通过内孤立波在波浪地形上传播的试验和数值研究,阐述了内孤立波与地形作用产生混合及耗散的机理;Cheng等^[14]完成了内孤立波在陡坡地形上传播的试验,探讨了下凹型内孤立波在突变地形上的极性转换以及影响内孤立波演化的因素;Ermanyuk等^[15]进一步研究了水下圆柱与内孤立波相互作用问题。

目前,由于多数实验室所用的分层流水槽横截面面积狭窄,导致壁面效应显著,限制了人们对内孤立波沿地形演化的三维结构特征的认识。另一方面,内孤立波在台湾吕宋海峡产生后继续向西北方向的东沙群岛海域传播,该海域地形突变特征明显,其变化是近年来学者们关注的重点。鉴于上述,笔者从我国南海海底地形分布特点出发,将海洋内孤立波在水深急剧变化地形上的实际传播情形简化为其在台阶地形上的演化模型,借助大型分层流试验水槽,改变分层情况,采用染色标识和内波动态测量技术,对内孤立波与台阶地形的相互作用问题进行试验研究,以期深入了解分层效应对内孤立波沿海底地形传播特性和表观特征的影响。

1 试验装置和测量技术

试验在解放军理工大学大型重力式分层流试验水槽中进行。水槽主尺度为1200 cm×120 cm×100 cm(长×宽×高),采用“双桶”原理获取分层水环境。在水槽的两端分别安装内孤立波造波装置和内波消波装置。内波造波采用旋转百叶门重力式内孤立波造波装置^[16],该造波机利用重力塌陷式造波原理,可在任意跃层位置产生下凹型或上凸型内孤立波;内波消波采用三角楔形装置,可根据试验过程中分层流体界面位置与内孤立波振幅大小进行调节,用以获得最佳消波效果。

图1为试验装置示意图,取 x 轴正方向为水槽长度方向(水平向左), z 轴正方向为铅垂方向(垂直向上),坐标原点 $O(0,0)$ 位于水槽右端跃层位置。 H 为总深度, h_1 、 ρ_1 和 h_2 、 ρ_2 分别为上下流体层的厚度和密度, h_3 为台阶顶部距跃层距离, λ 、 a 和 c 分别为内孤立波波长、波幅和传播速度, η_0 和 L_0 分别为重力塌陷式造波原理中的势阱深度和势阱宽度(势阱指塌陷式造波原理中初始扰动的矩形区域^[16])。台阶高度为 $h_0=50$ cm,由1块长400 cm、宽150 cm的水平板和1块高度为50 cm的竖直板(密度大于盐水)拼接组成。

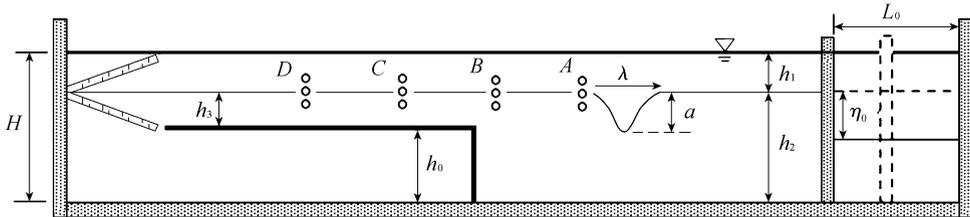


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device

内孤立波与台阶相互作用的演化特征由染色界面的扰动显示,并由高分辨摄录系统记录。密度剖面和内孤立波要素的测量由多通道内波动态测量系统完成,通过记录若干垂向排列探头的时间序列密度值获得等密度面变化的空间分布,继而确定内孤立波的波高和波长;通过记录相邻两探头间的距离和扰动峰值之间的相关时间来确定内孤立波的传播速度。在图1中 $A(500,0)$ 、 $B(590,0)$ 、 $C(700,0)$ 、 $D(800,0)$ 处分别布置若干垂向分布的电导率探头阵列,可以获得不同位置处的内孤立波结构,从而分析得到其演化特征。

2 试验结果和分析

2.1 内孤立波演化特征

为模拟分层效应的影响,将分层流体上下层厚度比例分为3种情况进行试验,即 $h_1/h_2=10/70$ 、 $20/60$ 和 $15/65$,则台阶地形相对跃层位置对应应有3种情况,即 $h_1 < h_3$ 、 $h_1 > h_3$ 和 $h_1 = h_3$ 。根据两层流体理论,当上层流体厚度小于下层流体厚度时,所形成的稳定孤立波为凹型波;反之,内孤立波为凸型波。对于 $h_1/h_2=10/70$,在台阶前后,上层流体厚度始终小于下层体流厚度,该种分层情况下凹型内孤立波始终是稳定的;对于

$h_1/h_2 = 20/60$,在台阶前部表现为上层流体厚度小于下层流体厚度,在台阶上表现为上层流体厚度大于下层流体厚度,故该种分层情况可导致稳定的下凹型内孤立波向上凸型转化;对于 $h_1/h_2 = 15/65$,在台阶前部,上层流体厚度小于下层流体厚度,而在台阶上,上下两层流体厚度相同,该种分层情况对应临界分层状态^[6]。

2. 1. 1 $h_1/h_2 = 10/70$

取不同的势阱深度,观察不同波幅的内孤立波与台阶地形相互作用的情况,以典型的势阱深度 $\eta_0 = 15\text{ cm}$ 为例,当 $h_1/h_2 = 10/70$ 时,在试验观测中,下凹型内孤立波与台阶地形无直接作用,受地形的实际影响较小,波形保持良好,未发生极性转换现象。

由电导率探头阵列数据可进一步分析内孤立波与台阶地形相互作用的定量信息。图 2 是相同势阱深度条件下不同位置探头测得的波形。从不同位置(A、B、C、D)的探头阵列实测波形可以更清楚地看到:初始内孤立波保持较好的对称性(图 2(a));当内孤立波传播至台阶附近,其前部与台阶接触,波形逐渐变陡,波幅逐渐增加(图 2(b));内孤立波继续传播至台阶上,其波形依然保持较好(图 2(c)),但随着传播距离增加,内孤立波开始逐渐消散,波幅明显减小(图 2(d))。

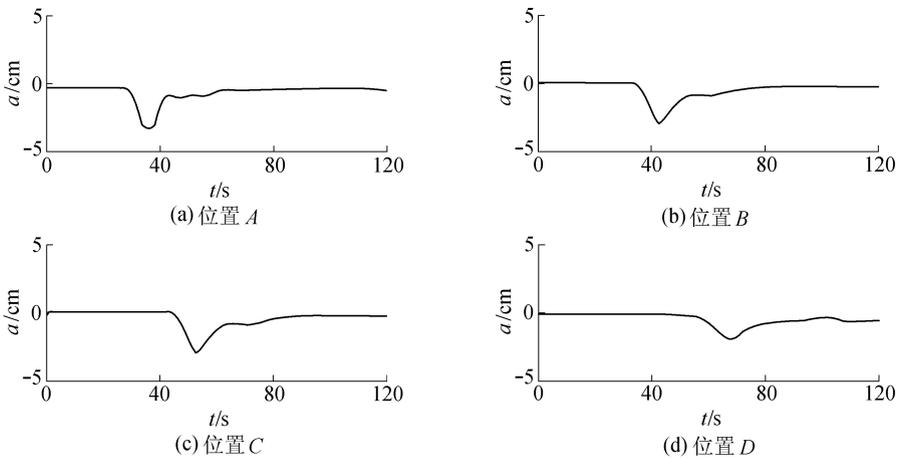


图 2 $h_1/h_2 = 10/70$ 时内孤立波在 4 种不同位置的波形

Fig. 2 Profiles of ISW at four positions when $h_1/h_2 = 10/70$

2. 1. 2 $h_1/h_2 = 20/60$

图 3 为 $h_1/h_2 = 20/60$ 时内孤立波沿台阶地形演化的过程。试验结果表明:当内孤立波前部刚与台阶接触时,出现明显的水流从台阶上向下流动(图 3(a));当内孤立波波谷抵达台阶时,波谷下方出现明显的涡旋(图 3(b));当内孤立波传上台阶时,发生明显的极性转换,即内孤立波由凹型波转变为凸型波(图 3(c)(d))。

从探头阵列实测波形可进一步看出:初始内孤立波保持较好的对称性(图 4(a));在内孤立波即将接触到台阶地形时,波形变尖,波幅增大(图 4(b));当内孤立波刚接触到台阶地形时并没有立即发生极性转换,但其波形前部变缓、后部变陡;随着内孤立波沿台阶的继续传播,其发生极性转化,由凹型波变为凸型波(图 4(d))。

2. 1. 3 $h_1/h_2 = 15/65$

试验观测发现:当内孤立波传播至台阶附近时,波谷与台阶相互作用,在其下方产生了一个顺时针方向

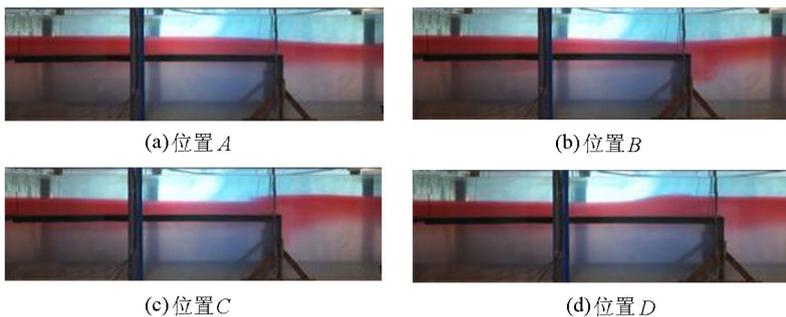


图 3 下凹型内孤立波沿台阶地形传播的试验图片

Fig. 3 Interaction of ISW of depression and step topography

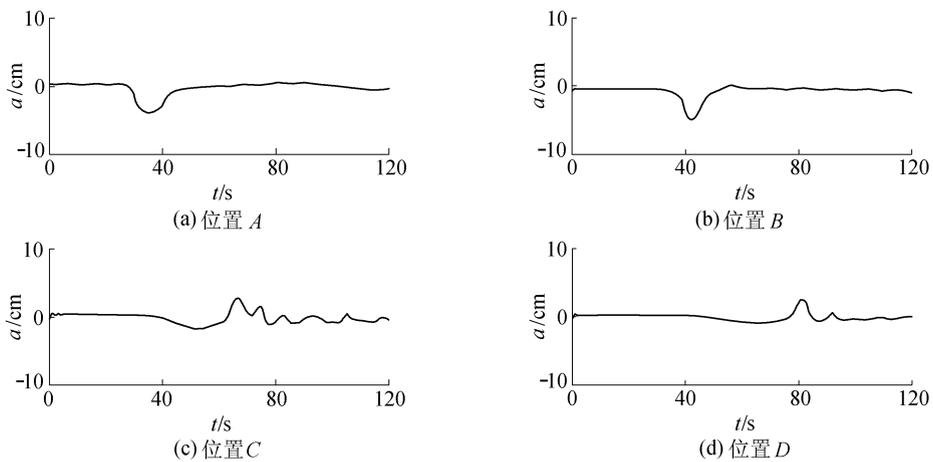


图4 $h_1/h_2=20/60$ 时内孤立波在4种不同位置的波形

Fig. 4 Profiles of ISW at four positions when $h_1/h_2=20/60$

旋转的涡旋,类似于图3(b)的情形;当内孤立波传播至台阶上时,涡旋在原处发展并逐渐扩散,使波的背部抬升;在整个传播过程中,并未发生极性转换现象。从探头阵列实测波形可进一步看出,内孤立波经过台阶地形时会出现频率较高的振动,即产生尾部波列效应(图5(b)(c)),界面处于不稳定状态,能量耗散明显,波幅衰减更快(图5(d))。

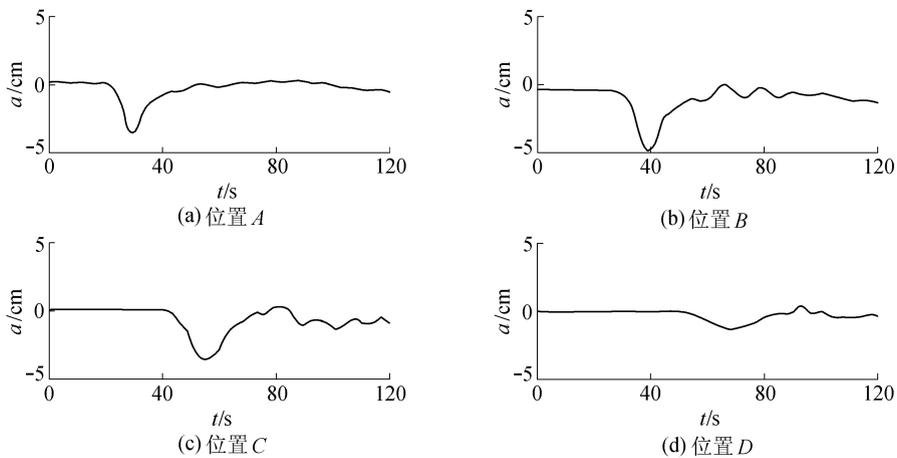


图5 $h_1/h_2=15/65$ 时内孤立波在4种不同位置的波形

Fig. 5 Profiles of ISW at four positions when $h_1/h_2=15/65$

2.2 内孤立波波幅变化特征

图6为3种不同分层情况下内孤立波与台阶地形作用前后的波幅变化情况。

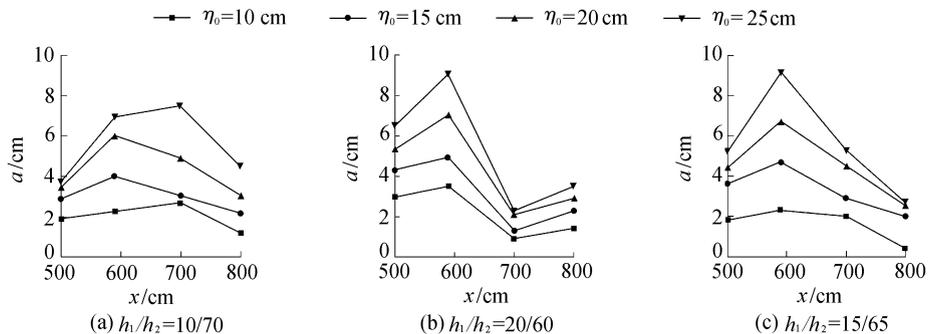


图6 内孤立波传播过程中的波幅变化

Fig. 6 Amplitude variations of ISW in propagating process

a. 对于 $h_1/h_2=10/70$ 的情况,在内孤立波遇到台阶之前,由于台阶对内孤立波的“遮拦效应”,出现了

波幅增大的现象,但随着内孤立波在台阶上的传播,能量耗散作用使波幅减小,在 $590\text{ cm} \leq x < 800\text{ cm}$ 范围基本呈逐渐减小的趋势,但波幅仍然可以保持初始入射波波幅的水平,在 $x \approx 800\text{ cm}$ 处的波幅与 $x \approx 500\text{ cm}$ 处初始入射波幅基本一致。

b. 当 $h_1/h_2 = 20/60$ 时,在内孤立波遇到台阶之前依然出现波幅增大现象,在 $500\text{ cm} < x < 590\text{ cm}$ 范围波幅明显增大;随着极性转化的发生,波幅明显减小,台阶上传播至位置 $x \approx 700\text{ cm}$ 处的内孤立波波幅明显小于入射波波幅;由于浅水效应,在 $700\text{ cm} < x < 800\text{ cm}$ 范围,台阶上转化为凸型波的内孤立波波幅继续增加。

c. 对于 $h_1/h_2 = 15/65$ 的情况,在 $500\text{ cm} < x < 590\text{ cm}$ 范围内孤立波波幅明显增大,随着内孤立波在台阶上的传播,由于能量耗散较快,在 $590\text{ cm} \leq x < 800\text{ cm}$ 范围波幅衰减较快。

3 结 论

a. 内孤立波与台阶地形作用过程中,台阶作用可导致内孤立波发生波形变陡、尾部波列和极性转换现象。当台阶上的上下两层流体厚度相等时($h_1 = h_2$),内孤立波在台阶上传播最不稳定,能量耗散效应更明显。

b. 内孤立波与台阶地形作用过程中波幅变化较大,尤其内孤立波与台阶地形相遇的初始阶段,波幅增加最明显,验证了实际海洋中突变地形会导致内孤立波能量聚集的观测结论。

c. 通过考察分层流体中不同上下层厚度比 h_1/h_2 下的内孤立波沿台阶地形传播的演化特征,证明了分层效应对内孤立波沿台阶地形传播的影响,获得不同分层环境下内孤立波的传播规律。

参考文献:

- [1] CHEN Chenyuan. An experimental study of stratified mixing caused by internal solitary waves in a two-layered fluid system over variable seabed topography[J]. Ocean Engineering, 2007, 34: 1995-2008.
- [2] 赵国君,邵利民,陈旭. 内孤立波过山脊地形演化实验研究[J]. 海洋工程,2013, 31(4): 42-47. (ZHAO Guojun, SHAO Linmin, CHEN Xu. An elementary research on the evolution of internal solitary wave crossing ridge topography[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(4): 42-47. (in Chinese))
- [3] MADERICH V, TALIPOVA T, GRIMSHAW R, et al. Interaction of a large amplitude interfacial solitary wave of depression with a bottom step[J]. Physics of Fluids, 2010, 22(7):0766021-07660212.
- [4] BAINES P G. Topographic effects in stratified flows[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 325-329.
- [5] CHENG Minghung, HSU J R, CHEN Chenyuan. Modelling the propagation of an internal solitary wave across double ridges and a shelf-slope[J]. Environ Fluid Mech, 2009, 9: 321-340.
- [6] 魏岗,尤云祥,缪国平,等. 分层流体中内孤立波在台阶上的反射和透射[J]. 力学学报,2007,39(1):45-53. (WEI Gang, YOU Yunxiang, MIAO Guoping, et al. Reflection and transmission of an internal solitary wave over a step in stratified fluid[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(1): 45-53. (in Chinese))
- [7] XU Zhaoting, XU Hao, SHEN Guojin. Evolution of interface soliton over topography[J]. China Ocean Engineering, 2007, 21(1): 39-49.
- [8] 沈国瑾. 陆架陆坡区初始内孤立波分裂的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.
- [9] 孙丽,杜涛,李群. 内孤立波的研究与数值模型[J]. 海洋湖沼通报,2006(4):1-8. (SUN Li, DU Tao, LI Qun. A study of internal solitary waves and their numerical models[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2006(4):1-8. (in Chinese))
- [10] 孙丽. 南海内孤立波的生成、演变及对桩柱的作用[D]. 青岛:中国海洋大学,2006.
- [11] 贾村. 孤立波在单层和两层流体中分裂的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2006.
- [12] CHEN Chenyuan, HSU J R, CHEN H H, et al. Laboratory observations on internal solitary wave evolution on step and inverse uniform slopes[J]. Ocean Engineering, 2007, 34: 157-170.
- [13] CARR M, STASTNA M, DAVIES P A. Internal solitary wave-induced flow over a corrugated bed [J]. Ocean Dynamics, 2010, 60: 1007-1025.
- [14] CHENG Minghung, HSU J R, CHEN Chenyuan. Laboratory experiments on waveform inversion of an internal solitary wave over a slope-shelf [J]. Environ Fluid Mech, 2011, 11:353-384.
- [15] ERMANYUK E V, GAVRILOV N V. Experimental study of the dynamic effect of an internal solitary wave on a submerged circular cylinder[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2005, 46(6): 800-806.
- [16] WEI Gang, DU Hui, QU Ziyun, et al. Experimental investigation of the generation of large-amplitude internal solitary wave and its interaction with a submerged slender body [J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronom, 2014, 57(2): 1-9.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.017

土壤非饱和区含水层对潮致地下水波动的影响

程博超¹, 罗照阳¹, 严佳伟¹, 孔俊^{1,2}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 河海大学水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 针对滨海潜水层中存在的潮致地下水波动现象, 以 Kong 等提出的新型 Boussinesq 方程为理论基础, 通过摄动解析法剖析波动组成及函数表达, 在此基础上分析土壤非饱和区含水层对潮致地下水波动的影响机制。结果表明: 地下水波传入滨海潜水层后, 主频波幅呈指数型衰减, 且渗透系数越小波能衰减越快; 在非线性的作用下, 波动传播过程中将衍生出高频波, 波能从低频波向高频波迁移; 当土壤的非饱和持水性较强、土壤层非饱和区厚度较小、土壤孔隙率较小时, 有利于潜水层内高频波的形成。

关键词: Boussinesq 方程; 摄动解析法; 土壤非饱和含水层; 地下水波动

中图分类号: TV131.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)01-0090-05

Unsaturated zone aquifer's impact on tidally-induced groundwater fluctuations

CHENG Bochao¹, LUO Zhaoyang¹, YAN Jiawei¹, KONG Jun^{1,2}

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Concerning the phenomenon of tidally-induced groundwater fluctuation in a coastal aquifer, based on the new Boussinesq equation derived by Kong et al., the function express and composition of the wave were analyzed using the perturbation method. Analytical research on the influence mechanism of a tidally-induced high-frequency groundwater wave affected by the unsaturated zone aquifer was conducted. The results indicate that, after the groundwater wave propagated into the coastal aquifer, the dominant frequency amplitude decreased exponentially, and the smaller the hydraulic conductivity was, the larger the decay rate of wave energy was. Besides, under the nonlinear effect, a high-frequency wave was generated during the wave propagation process, and the wave energy transformed from a low-frequency wave to a high-frequency wave. Numerical experiment results show that the increase of unsaturated water holding capacity, the decrease of thickness of the unsaturated zone, and the decrease of porosity of soil promote the formation of a high-frequency wave.

Key words: Boussinesq equation; perturbation method; unsaturated zone aquifer; groundwater fluctuation

目前,沿海地下水运动问题研究已成为国内外的热点课题之一^[1-2]。传统 Boussinesq 方程的理论研究^[3-5]均假定地下水自由面是饱和含水层和不含水层间的突变界面,实际上这一突变界面并不存在,而是存在一过渡区(又称毛细效应区)^[6]。Millham 等^[7]曾经指出,如果不考虑非饱和流的存在,会严重错估地下水头的时空特征。为了进一步分析 2 种不同区域的相互影响,Parlange 等^[8]引入 Green 等的假定,在方程中添加了高阶项,提出考虑毛细效应的 Boussinesq 方程。Barry 等^[9]研究表明,在一般情况下对于长周期波(如潮波),紧邻饱和区上层的毛细效应作用不明显,但对高频波(波浪)来说,毛细效应的诱发作用较明显,在非饱

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划(201310294008Y)

作者简介: 程博超(1993—),男,江西南昌人,本科生,主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail:cbc_3677@qq.com

通信作者: 孔俊,副教授。E-mail:kongjun999@126.com