

江锐捷,程 鹏,高建华,等.红树林对潮流底边界层动力过程的影响[J].海洋地质前沿,2020,36(4):37-44.

红树林对潮流底边界层动力过程的影响

江锐捷¹,程 鹏²,高建华¹,王爱军³

(1 南京大学地理与海洋科学学院,南京 210046;2 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室,厦门 361102;

3 国家海洋局第三海洋研究所海洋与海岸地质实验室,厦门 361005)

摘 要:红树林是重要的滨海湿地木本生物群落,其生物地貌过程对防风护堤具有重要作用。为深入研究红树林近底部泥沙输运的机制,在福建漳江口红树林进行了现场观测。通过对比光滩和红树林处的水动力和泥沙动力过程发现,红树林对流速具有明显的阻滞作用和偏转效应,且光滩处沉降作用和再悬浮作用均较明显,红树林处沉降作用明显。结合输运方程计算结果发现,光滩上的沉积物通过潮沟向红树林输运,并为红树林截留沉降,表明红树林可以通过降低水动力以及植物吸附来影响悬沙运动,具有良好的促淤作用。

关键词:红树林;底边界层;悬移泥沙;沉积物输运;生物地貌

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.108

0 引言

湿地是全球生物生产量最高的生态系统之一,是海岸系统的重要组成部分,具有重要的生态系统服务价值^[1-2],也是海岸带陆海相互作用的重点研究对象之一。目前针对潮滩湿地剖面演化、水动力过程等方面的相关研究已经取得了很大的进展;但在植被的影响下,底边界层水动力和沉积物圈闭等过程都变得异常复杂^[3-6]。因此,虽已有不少学者对相关问题进行了深入研究,但仍有许多科学问题有待解决。

红树林是陆地向海洋过渡的特殊生态系,广泛分布于热带和亚热带海岸,不仅对生物多样性保护及水环境净化起重要作用,而且极大地影响海岸带沉积过程和地貌过程^[7]。红树林以红树植物为主体,枝叶繁茂,根系极其发达,其纵横交错的支柱根、呼吸根、板状根、气生根和表面根等形

成一个稳固的支架,使植物体牢牢地扎根于滩涂上。因此,这种严密的栅栏式根状结构可以显著削弱水动力强度,改变表层沉积物的分布模式,对防风护堤和促淤造陆至关重要^[8]。目前,已有一些学者重点围绕红树林的波浪衰减机制以及促淤效应进行了研究^[9-13]。但由于红树林海岸的沉积物以淤泥质为主,人行下陷达 10~40 cm,观测难度较大,因而野外观测数据仍然十分有限^[14],这也直接导致对红树林底边界层动力过程的研究尚不够深入。

福建漳江口红树林国家级自然保护区位于福建省云霄县漳江入海口(117°24'07"—117°30'00"E,23°53'45"—23°56'00"N),总面积约 2 360 hm²。该保护区红树林面积较大,红树植物群落结构稳定^[15]。本文在该地区进行了水动力观测和表层沉积物采集,在此基础上分析了红树林对水流的减阻和偏转效应,探讨了红树林对沉积物的捕获效应,以深入了解红树林对潮流底边界层沉积物输运的影响机制。

1 材料与方法

1.1 现场观测

本文资料来自 2018 年 6 月 29 日至 7 月 1 日

收稿日期:2019-05-10

资助项目:国家自然科学基金(41476004);近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学)(MEL)本科生科研奖学金

作者简介:江锐捷(1998—),男,本科生,主要从事海洋沉积动力调查及研究工作.E-mail:njujrj@163.com

(大潮)在福建漳江口红树林保护区进行的2天连续观测。由图1所示,站位1位于光滩(潮沟),站位2和3位于红树林。每个站位均布置观测杆,由于红树林主要依靠树干和气生根来改变水动力条件,本文在杆上距底床较近的0.15 m处分设1

个由诺泰克公司生产的“威龙”点式流速仪(ADV)和Campbell仪器公司生产的后向散射浊度仪(OBS)(表1),其中,ADV观测频率为32 Hz,OBS观测频率为0.5 Hz,以获取高频流速和浊度数据。

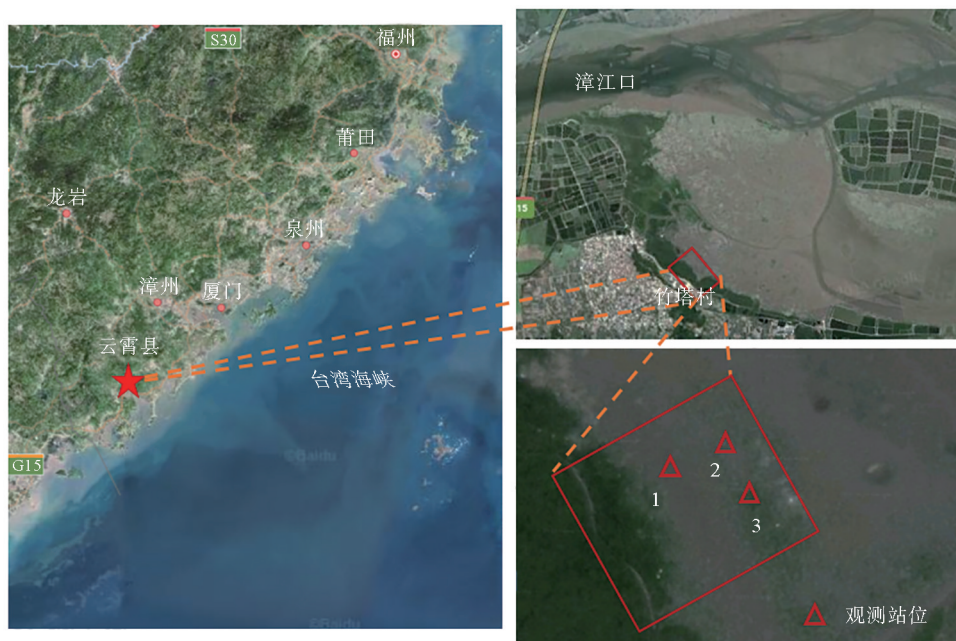


图1 观测站位(图片来源:<http://www.google.cn/intl/zh-CN/earth/>)

Fig.1 Observation sites (image from:<http://www.google.cn/intl/zh-CN/earth/>)

表1 站位信息

Table 1 Site information

站位	经度	纬度	观测内容
1	117°25'1.94''E	23°55'18.52''N	ADV/OBS 距底 0.15 m
2	117°25'2.27''E	23°55'18.87''N	ADV/OBS 距底 0.15 m
3	117°25'2.60''E	23°55'18.70''N	ADV/OBS 距底 0.15 m

1.2 室内标定

利用OBS获取水体中悬浮物浊度,通过相应的浓度和浊度进行回归分析,将连续的浊度转化为浓度,具有操作简单、快速、实时、连续等优点,国内外学者现已经广泛采用该方法^[16-17]。OBS标定可分为现场标定和室内标定2种方法,本文采用室内标定方法。具体过程如下:放一定量澄清的现场水样,将浓缩后的悬浮泥沙样品分多次加入清水中,并不断搅动,从清水开始,逐次记录

均匀混合后水体的浊度,并抽取OBS传感器附近水样,将水样过滤称重,获取悬浮泥沙浓度。最后,将其与OBS记录的浊度值进行相关分析,得到浊度和浓度的相关关系(图2),将浊度值(NTU)转换为悬沙浓度数据。

1.3 粒度测试

表层沉积物在运回实验室后,利用浓度为 0.5 mol/dm^3 的六偏磷酸钠溶液浸泡24 h后,再用英国马尔文公司生产的Mastersizer 2000型激光粒度仪进行粒度分析,在上机分析之前利用超声波进行振荡。测试时共取3组样品,每组样品测3次,最后求9组平均值。

1.4 数据处理与分析

以站位2为原点, x 轴正方向指向站位3, y 轴正方向为站位1指向站位2的方向,建立平面

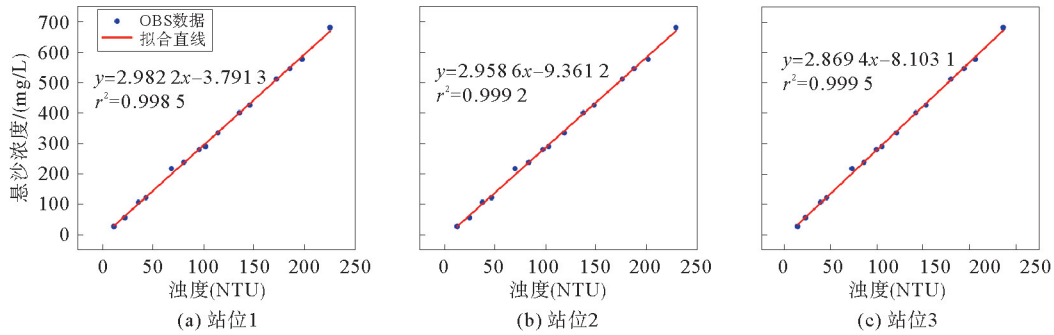


图 2 OBS 室内标定所得浓度与浊度相关关系

Fig.2 Relationship between suspended sediment concentration and turbidity

直角坐标系。由于仪器采样频率相对较高,采集数据量大,为消除数据中的高频波动,对各个仪器采集的数据均进行每 2 分钟的平均处理,得到流速、水深以及悬沙浓度的时间序列,从而可分析一次完整潮周期内光滩和红树林处的水动力过程。沉积物输运情况则可通过公式(1)^[18]计算得到。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} + D + E \quad (1)$$

式中: c 为悬沙浓度, (mg/L)/s;

t 为时间, s;

u 为 x 方向速度, m/s;

v 为 y 方向速度, m/s;

$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y}$ 表示平流输送, (mg/L)/s;

D 为沉降通量((mg/L)/s),可由公式 2 计算出;

E 为垂向湍流产生的悬沙通量, (mg/L)/s。

$$D = \frac{w_s \cdot c}{h} \quad (2)$$

式中: w_s 为悬沙沉降速度(m/s),与粒径平方成正比,可由公式 3^[19]计算出;

h 为距底床高度(m),由于本文 OBS/ADV 距底 0.15 m,故 h 取 0.15 m。

$$w_s = C d^2 \quad (3)$$

式中: C 为与温度相关的常数;

d 为沉积物粒径,本文取粒度测试所获得的中值粒径 5 μm 。

2 结果

2.1 潮位特征

水深数据显示(图 3),观测期间包含 4 次完

整的潮周期,第 1、第 3 次潮周期位于夜间,第 2、第 4 次潮周期位于白天。研究区的潮汐日变化不均匀性较为显著,夜潮的平均最大水位比日潮高 0.3~0.4 m,夜潮平均涨落潮历时也比日潮长半小时左右,为典型的不规则半日潮。潮沟处(光滩)最大潮位达 0.94 m,红树林处最大潮位为 0.66 m,这主要由于潮沟相较于红树林地势低。

2.2 底边界层流速特征

流速观测结果显示(图 3),所研究的潮滩在大潮期间是一个低能环境,在整个潮周期内光滩和植被内近底部流速均 < 0.11 m/s。流速峰值出现在涨急和落急时刻,最小流速则出现在涨憩和落憩时刻,夜潮平均流速比日潮大 30%。整体上,流向随潮汐呈现往复流特征(图 4),涨潮流向为北偏东,落潮流向为南偏西。上述变化特征也说明涨潮时潮流先到达潮沟,之后从潮沟漫上红树林,落潮时潮流慢慢退入潮沟。

对比潮沟和红树林流速的潮周期变化特征可以发现(图 3),潮沟处流速波动大于红树林处,且潮沟处流速明显大于红树林处流速,站位 2 处平均流速 0.029 m/s,为站位 1 处的 67.46%,站位 3 处平均流速 0.031 m/s,为站位 1 处的 62.72%(表 2)。此外,潮滩处落潮流速峰高于涨潮流速峰,而这一现象在红树林观测站位并不显著(图 3),这说明红树林对流速有明显的减小作用。

进一步分析 EW、SN 方向的流速分量可以发现,红树林处 U 分量平均值(EW 方向)大于潮沟处,而 V 分量平均值(SN 方向)远远小于潮沟处(表 2),这说明水流在红树林处发生偏转。落潮期间,红树林处的流向和原始流向间存在 50°左右的偏转,涨潮期间则有约 60°左右的偏转(图 4、

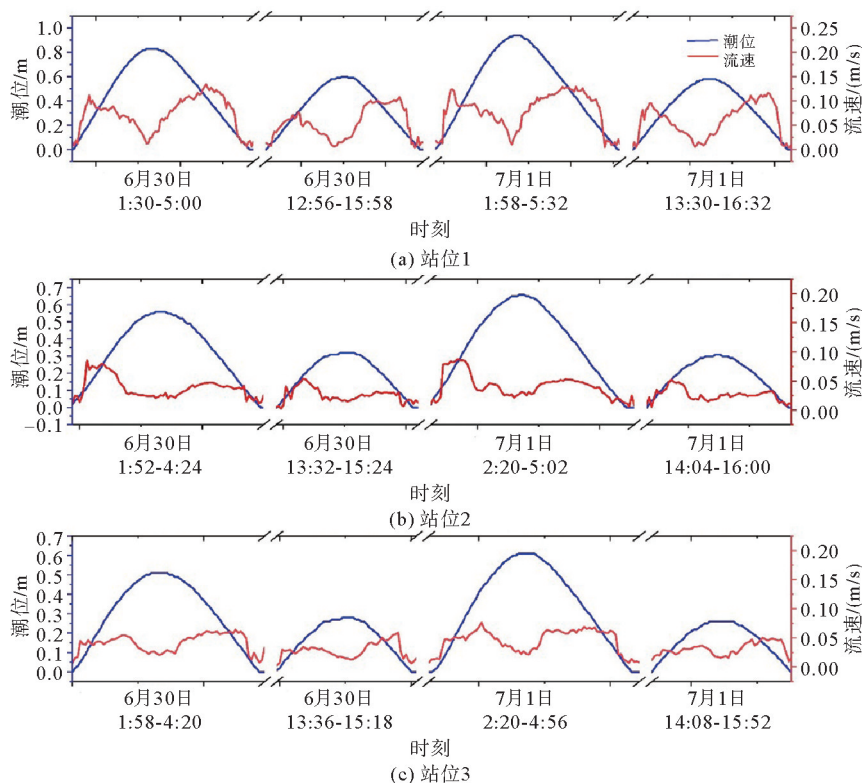


图3 观测期间潮位和流速情况

Fig.3 Water depth and flow velocity during observation

表2 潮周期内各站点流速参数情况

Table 2 Parameters of flow velocity over a typical tidal cycle

站点	流速/(m/s)			流向/(°)	
	平均流速	U分量	V分量	涨潮流向	落潮流向
站点1	0.046 4	0.016 9	0.042 0	73	251
站点2	0.029 1	0.025 1	0.011 6	8	201
站点3	0.031 3	0.027 9	0.012 1	15	200

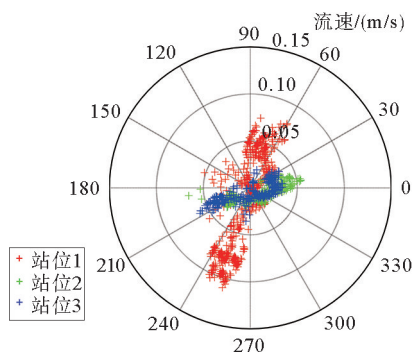


图4 潮周期内各站点流向情况

Fig.4 Flow directions of all sites over a typical tidal cycle

表2)。结合站点信息(图1,表1),可以发现由于红树林的阻挡作用导致水流向垂直于红树林边界的方向偏转。

2.3 底边界层悬沙浓度特征

近底部边界层内悬沙浓度的沉积动力过程相当复杂,平流输送、再悬浮效应、海底底床的可蚀性、上层水体悬沙的沉降等,均使得悬沙浓度在不同区域和不同时间内表现出不同的特点^[20]。红树林处在涨潮初期便形成了一个悬沙浓度峰值(250.1 mg/L),之后略有波动,但总体呈下降趋势,涨憩时悬沙浓度降至最低;落潮时刻,红树林处悬沙浓度维持在110~130 mg/L之间,表明此时并没有明显的泥沙起动(图5b,5c)。潮沟处悬沙浓度总体上要高于红树林处,呈现多峰性(图5a),涨潮初期也形成了一个浓度峰值,其中,夜潮时达320 mg/L,日潮时达250 mg/L,夜潮悬沙浓度显著高于日潮。对比流速数据可以发现(图3),悬沙浓度峰值恰好对应着流速峰值。在达到峰值后,悬沙浓度逐渐下降,至落急时刻降至

最低。在落潮后期,悬沙浓度又逐渐增加,至落憩时达到另一个峰值(300 mg/L),而沉降作用可能 是导致上述变化的最主要原因。

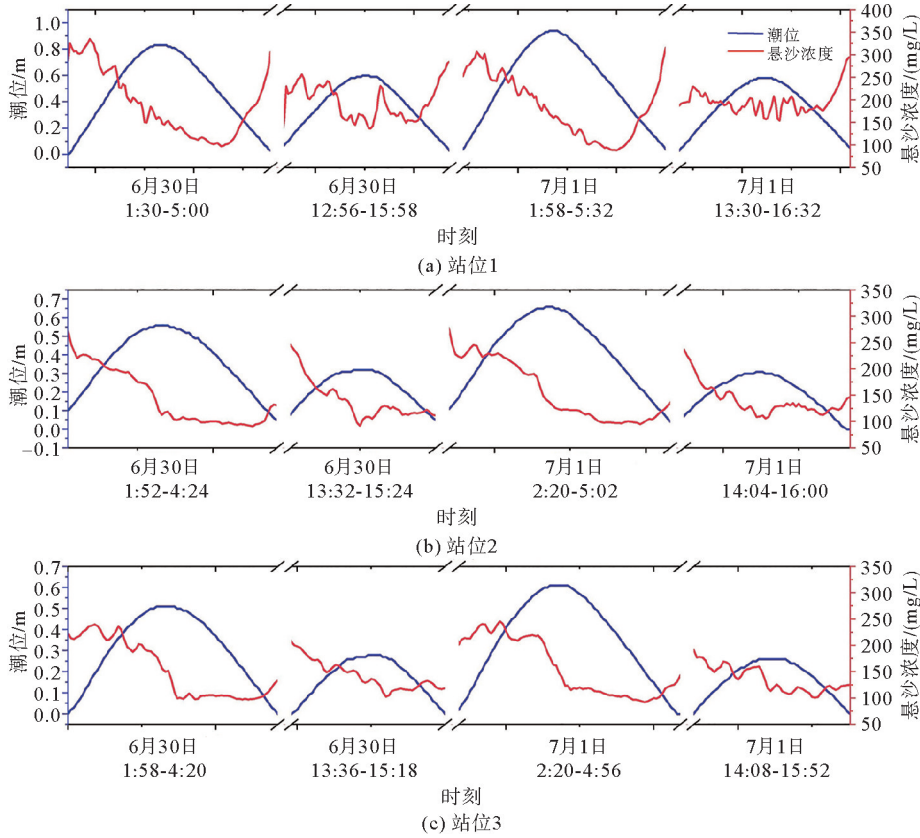


图 5 观测期间悬沙浓度情况

Fig.5 Suspended sediment concentration during observation

2.4 沉积物输运特征

图 6 为计算结果的时间序列,可以看到一个潮周期内,站点2近底部悬沙浓度总体呈逐渐降

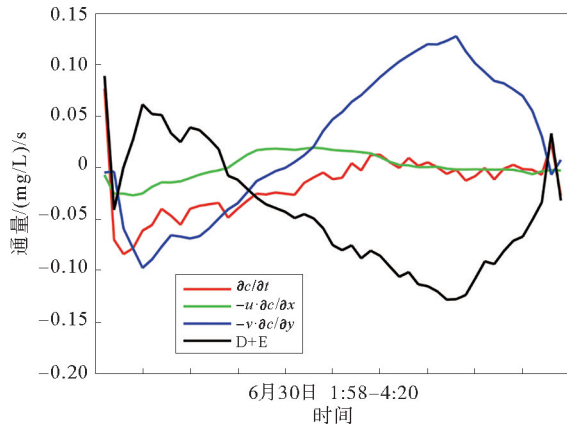


图 6 沉积物输运情况

Fig.6 The transport of sediment

低趋势($\partial c/\partial t$),沉积物在站点 2 不断沉降(D+E),且日净悬移泥沙沉降量为 $0.441 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$,即红树林存在明显的促淤功能。有学者研究结果显示,沉积物在红树林处沉降,使得滩面发生淤高,可以补偿海平面上升带来的影响,以降低海平面变化对生态系统的冲击^[21-22]。

3 讨论

在一个潮周期内(以本文第 1 个潮周期为例),由于红树林改变了近底部的水动力过程,因而沉积物存在从潮水沟向红树林的净输运趋势,反映了区域控制沉积物输运的动力学过程。涨潮时潮沟处由于存在边界层浅水效应^[23],初期便形成一个悬沙浓度峰值(图 7a)。进一步分析泥沙输运情况发现(图 6),整个涨落潮过程中,站点 2 和站点 3 之间浓度梯度($u \frac{\partial c}{\partial x}$)很小,而站点 1 和

站位2之间浓度梯度($v \frac{\partial c}{\partial y}$)变化范围很大,且变化趋势与净悬移泥沙沉降量(D+E)变化趋势高度吻合,这说明红树林处悬沙浓度明显低于外缘光滩区域或潮水沟。而上述变化也表明红树林处悬浮泥沙主要来源于平流输送,其在涨潮初期便形成了浓度峰值主要是由于在潮沟处起动的泥沙在涨潮流作用下输送到了红树林。

进一步分析红树林的流速变化可发现(图7d),红树林存在明显的缓流作用,减弱了滩面水流流速,降低了水流紊流程度,使通过平流输送至

红树林的沉积物在此迅速沉降。先前的研究表明,盐沼植被对潮滩沉积过程的影响主要是通过对底部边界条件的改变而实现的,光滩地区的流速结构表现为对数分布,而盐沼植被区由于平均粗糙长度较大,其水流结构很少出现对数分布,主要是以没有结构的湍流为主^[10,24-27]。同时由于潮滩表层泥沙多为黏性颗粒,且随着海底侵蚀深度的增加,底床的抗蚀能力逐渐增强,临界剪切应力也随之增大^[28-29],即悬沙物质来源减少,因而整个涨潮期间红树林处悬沙浓度随着潮沟处悬沙浓度的降低而降低(图7b)。

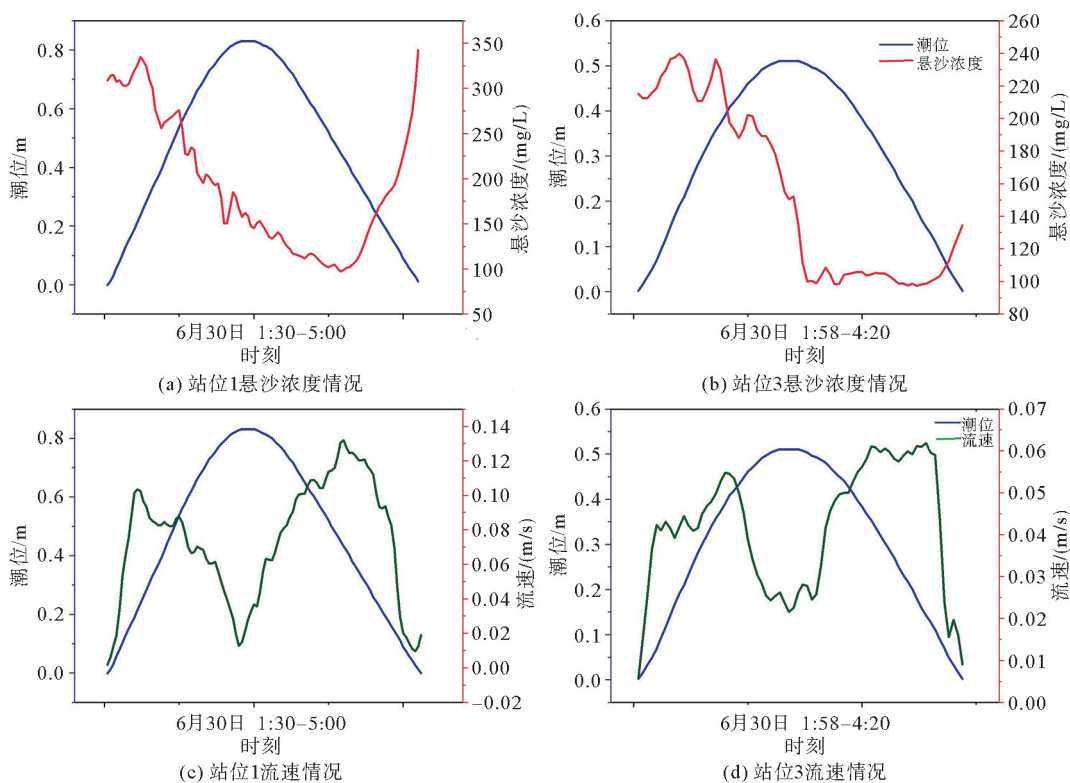


图7 第1个潮周期内潮沟及红树林处底边界层动力情况

Fig.7 Dynamics of the bottom boundary layer at tidal flat and mangrove over the first tidal cycle

落潮时近底部流向为红树林向潮沟方向,因而基本不存在潮沟向红树林的物质运输;而红树林处的悬沙浓度较低(图7b),表明红树林处并没有明显的泥沙起动。这主要是由于红树林的缓流作用以及盐沼植物的捕捉作用^[30],在红树林内沉积下来的泥沙只有部分在落潮初期重新悬浮起来。

上述结果表明,潮沟作为重要的地貌单元,在沉积物输运方面起着非常重要的作用。在一个潮周期内,潮沟作为物质输运通道,涨潮时将沉积物

输送至红树林,而红树林由于根系发达,存在显著的缓流作用,将沉积物截留沉降,所以红树林表现出良好的促淤功能。

4 结论

(1)红树林具有明显的缓流作用,可导致近底部流速衰减达30%~40%,近底部水流向垂直于红树林边界的方向偏转,底部边界层结构发生明

显改变。

(2)红树林的捕捉效应使其悬沙浓度明显低于外缘光滩区域,研究区内红树林处沉积物沉降通量达 $0.441 \times 10^{-3} (\text{kg}/\text{m}^2)/\text{d}$,红树林存在明显的促淤作用。

(3)在一个潮周期过程中,由于红树林对流速的减缓作用以及对沉积物的捕捉效应,导致沉积物从潮水沟向红树林的净输运趋势。

致谢:本项研究得到了 MEL 海洋环境科学本科科研奖学金项目的资助,在此深表谢意。

参考文献:

- [1] Moller I. Bio-physical linkages in coastal wetlands implications for coastal protection[J]. Jubilee Conference Proceedings, 2012: 51-60.
- [2] Morris J T, Sundareshwar P V, Nietch C T, et al. Responses of coastal wetlands to rising sea level[J]. Ecology, 2002, 83(10): 2869-2877.
- [3] Frey R W, Basan P B. Coastal salt marshes[J]. Coastal Sedimentary Environment, 1985: 225-301.
- [4] 杨世伦, 陈吉余. 试论植物在潮滩发育演变中的作用[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(6): 631-635.
- [5] Yang S L. The role of scirpus marsh in attenuation of hydrodynamics and retention of fine sediment in the Yangtze Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 47(2): 227-233.
- [6] 王爱军, 高 抒, 贾建军. 互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响[J]. 海洋学报(中文版), 2006, 28(1): 92-99.
- [7] 张乔民, 张叶春. 华南红树林海岸生物地貌过程研究[J]. 第四纪研究, 1997(4): 344-353.
- [8] 林 鹏. 中国红树林湿地与生态工程的几个问题[J]. 中国工程科学, 2003, 5(6): 33-38.
- [9] 谭晓林, 张乔民. 红树林潮滩沉积速率及海平面上升对我国红树林的影响[J]. 海洋通报, 1997, 16(4): 29-35.
- [10] 杨世伦, 时 钟, 赵庆英. 长江口潮沼植物对动力沉积过程的影响[J]. 海洋学报(中文版), 2001, 23(4): 75-80.
- [11] Mazda Y, Okada S, Kobashi D. Tidal flow mangrove forests and the eddy viscosity[J]. Journal of the School of Marine Science and Technology, 2004(1): 29 - 35.
- [12] Bouma T J, Vries M B D, Low E, et al. Flow hydrodynamics on a mudflat and in salt marsh vegetation: identifying general relationships for habitat characterisations[J]. Hydrobiologia, 2005, 540(1/3): 259-274.
- [13] Bao T Q. Effect of mangrove forest structures on wave attenuation in coastal Vietnam [J]. Oceanologia, 2011, 53(3): 807-818.
- [14] Chen Y, Li Y, Cai T, et al. A comparison of biohydrodynamic interaction within mangrove and saltmarsh boundaries [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41(13): 1967-1979.
- [15] 李 屹, 陈一宁, 李 炎. 红树林与互花米草盐沼交界区空间格局变化规律的遥感分析[J]. 海洋通报, 2017, 36(3): 348-360.
- [16] 刘 红, 何 青, 王元叶, 等. 长江口浑浊带海域 OBS 标定的实验研究[J]. 泥沙研究, 2006(5): 52-58.
- [17] Downing J. Twenty-five years with OBS sensors: the good, the bad, and the ugly[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17/18): 2299-2318.
- [18] 蒋东辉, 高 抒. 海洋环境沉积物输运研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 51(1): 100-108.
- [19] Stokes G G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums[J]. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 1851, 8: 8-106.
- [20] 李东义, 陈 坚, 汪亚平, 等. 近底部沉积动力过程的高分辨率观测与分析[J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 278-289.
- [21] Neumeier U, Amos C L. The influence of vegetation on turbulence and flow velocities in European salt-marshes [J]. Sedimentology, 2006, 53(2): 259-277.
- [22] 李 华, 杨世伦. 潮间带盐沼植物对海岸沉积动力过程影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 55(6): 583-591.
- [23] 李占海, 高 抒, 陈沈良. 江苏大丰潮滩潮流边界层特征研究[J]. 海洋工程, 2007, 23(3): 53-60.
- [24] Ke X K, Collins M B, Poulos S E. Velocity structure and sea bed roughness associated with intertidal (sand and mud) flats and saltmarshes of the Wash, U.K. [J]. Journal of Coastal Research, 1994, 10(3): 702-715.
- [25] Leonard L A, Luther M E. Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies[J]. Limnology and Oceanography, 1995, 40(8): 1474-1484.
- [26] Davidson-Arnott R G D, van Proosdij D, Ollerhead J, et al. Hydrodynamics and sedimentation in salt marshes: examples from a macrotidal marsh, Bay of Fundy[J]. Geomorphology, 2002, 48: 209-231.
- [27] Lawrence D S L, Allen J R L, Havelock G M. Salt marsh morphodynamics: an investigation of tidal flows and marsh channel equilibrium [J]. Journal of Coastal Research, 2004, 20(1): 301-316.
- [28] Maa J P Y, Sanford L P, Halka J P. Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbor, Maryland [J]. Marine Geology, 1998, 146(1/4): 137-145.
- [29] Sanford L P, Maa J P Y. A unified erosion formulation for fine sediments [J]. Marine Geology, 2001, 179(1/2): 9-23.
- [30] 李 华, 杨世伦. 潮间带盐沼植物黏附悬浮颗粒物的差异性研究[J]. 海洋学报(中文版), 2010, 32(1): 114-119.

IMPACTS OF MANGROVE ON THE DYNAMIC PROCESS OF BOTTOM BOUNDARY LAYER

JIANG Ruijie¹, CHENG Peng², GAO Jianhua¹, WANG Aijun³

(1 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China;

2 State Key Laboratory of Marine Environmental Science(Xiamen University), Xiamen 361102, China;

3 Laboratory for Coast & Ocean Geology, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China)

Abstract: As an important coastal wetland plant, mangrove and its biogeomorphologic process are crucial for coast protection. In order to study the sediment transport mechanism near the bottom of a mangrove, hydrodynamic observations were carried out in the Zhangjiang Estuary, Fujian Province; and the hydrodynamics and sediment transport between the bare flat and mangrove were studied. The results indicate that tidal current speed was obviously decreased and deflected by mangrove, and prominent sediment deposition and resuspension observed at the bare flat, and sediment deposition predominates the mangrove. It means that the mangrove has the capability to trap sediment from movement. Further more, the calculation of the transport equation also shows that the sediments on the bare flat were transported towards the mangrove through tidal creeks, and then intercepted by mangrove, implying that the mangrove exerts significant effect on siltation through reducing water movement and plant adsorption.

Key words: mangrove; bottom boundary layer; suspended sediment; sediment transport; biomorphology