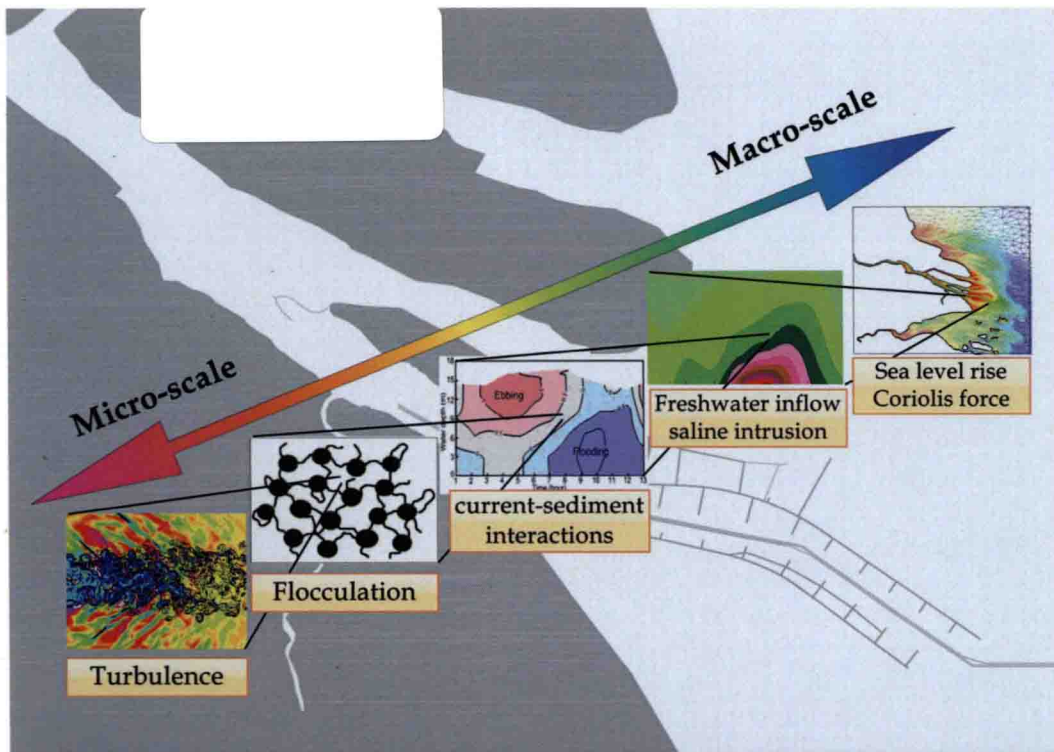




Multiscale Physical Processes of Fine Sediment in an Estuary

WAN Yuanyang

Multiscale physical processes of fine sediment in an estuary

DISSERTATION

Submitted in fulfillment of the requirements of
the Board for Doctorates of Delft University of Technology
and of
the Academic Board of the UNESCO-IHE Institute for Water Education
for the Degree of DOCTOR
to be defended in public
on Monday, 8 June 2015 at 15.00 hours
in ~~Delft~~, the Netherlands



by

WAN Yuanyang

Born in Hubei Province, China

Bachelor of Engineering, Wuhan University, Wuhan, China
Master of Science, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, China

This dissertation has been approved by the
promotor: Prof. dr. ir. J.A. Roelvink

Composition of the doctoral committee:

Chairman	Rector Magnificus, Delft University of Technology
Vice-Chairman	Rector of UNESCO-IHE
Prof. dr. ir. J.A. Roelvink	UNESCO-IHE/TU Delft, promotor

Independent members:

Prof. dr. ir. Z.B. Wang	Delft University of Technology
Prof. dr. ir. J.C. Winterwerp	Delft University of Technology
Prof. dr. ir. M. Chen	Vrije Universiteit Brussel, Belgium
Dr. A. Sottolichio	University of Bordeaux, France
Prof. dr. John Z. Shi	Shanghai Jiao Tong University, China
Prof. dr. ir. A.E. Mynett	UNESCO-IHE/TU Delft, reserve member

This study was supported by Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center and UNESCO-IHE Institute for Water Education. Funding was provided by UNESCO-IHE Partnership Research Fund (UPaRF, No. 60038881), Shanghai Municipal Natural Science Fund of China under grant No. 11ZR1415800 and National Key Technology R&D Program of China under grant No. 2013BAB12B00.

CRC Press/Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business
© 2015, WAN Yuanyang

All rights reserved. No part of this publication or the information contained herein may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, by photocopying, recording or otherwise, without written prior permission from the publishers.

Although all care is taken to ensure the integrity and quality of this publication and information herein, no responsibility is assumed by the publishers or the author for any damage to property or persons as a result of the operation or use of this publication and or the information contained herein.

Published by:
CRC Press/Balkema
PO Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherlands
e-mail: Pub.NL@taylorandfrancis.com
www.crcpress.com – www.taylorandfrancis.com
ISBN 978-1-138-02844-9 (Taylor & Francis Group)

Multiscale physical processes of fine sediment in an estuary

To my family

Summary

Estuaries are natural highly dynamic and rapidly changing systems, comprising a complex combination of physical processes on many different time- and space- scales. Fine sediment physical processes are attracting increasing attention by coastal engineers. One reason is that we need more coastal reclamations for sustainable society development and more and more harbors, ports and navigational channels. These are increasingly constructed in those fine sediment surroundings, where used to be considered as unfavorable place for waterway development, due to the high possibility of confronting with sedimentation issue. Another reason is because we are interested in the pursuit of the fascinating nature of fine sediment dynamics.

The Yangtze Estuary is an excellent example of a fine sediment estuarine system with a moderate tidal range ($\sim 1\text{--}5$ m) as well as a highly seasonally-varying ($\sim 10000\text{--}50000$ m³/s) freshwater inflow. The sedimentation ranks as a key issue in the Yangtze Estuary recently. Before conceiving a measure to mitigate channel siltation, the reasons and mechanisms related to the characteristics of sedimentation should be investigated as the first step. Thus, understanding the underlying mechanisms associated with fine sediment transport, ETM (estuarine turbidity maxima) dynamics and sediment trapping in the Yangtze Estuary is considered as a major challenge to maintain the “golden waterway”.

According to the systematic study on the topic of multiscale physical processes of fine sediment in a meso-tidal convergent alluvial estuary, the main contents and conclusions are summarized as follows.

In *Chapter 1*, **the complexity of fine sediment transport in estuaries is briefly identified** Apart from the interactions among riverine inflow, oceanic tide, wind wave, the Coriolis force, saline water intrusion and bed resistance in an estuarine system, the micro-scale effects from flocculation and hindered settling, baroclinic forcing, turbulence damping and drag reduction show the obvious influences on internal structures of current, salinity and suspended sediment concentration (SSC) which in turn have an impact on the macro-scale current and sediment regimes and morphological evolution. After highlighting the unique features and the challenge of the Yangtze Estuary, the main objective and organization of this study are introduced.

Chapter 2 focuses on the recent decadal hydrodynamic evolutions in the whole Yangtze Estuary from a series of hydrological data. Over the past few years, the Yangtze Estuary has witnessed an unprecedented scale of human intervention through extensive resource utilization. We found that, (i) the water level along the main outlet of the Yangtze Estuary increased from 1998 to 2009; this increase was induced by the variation in the whole river regime (including natural morphodynamic processes and local topography feedbacks from extreme meteorological events and human activities); (ii) the decrease of the flow portion ratio at the 3rd bifurcation is directly induced by the Deepwater Navigational Channel (DNC) project and the corresponding morphological changes at the North Passage; and (iii) the estuarine environmental gradients (salinity and suspended sediment concentrations) were compressed, and the fresh-salt gradient became steeper. **This has the indirect effect of back-silting on the waterway, i.e., strengthening the stratification effect near the area of estuarine turbidity maximum and enhancing the tendency of up-estuary sediment transport.**

In *Chapter 3*, observations of storm-induced fluid mud dynamics have been conducted at the DNC of the Yangtze Estuary from October to December 2010, during the occurrence of a cold-air front. The observed data reveal that just after the critical wind wave event, a large amount of fine sediment was trapped in a state of fluid mud along the channel. The observed thickness of the fluid mud was up to about 1-5 m, which caused some significant economic and safety problems for shipping traffic in the Yangtze Delta area. The mechanisms and transport processes of the storm-induced fluid mud are analyzed and presented from the angles of both process-oriented and engineering-oriented methods. With the help of tidal hydrodynamics and

wave modeling, it could be inferred that **the behavior of the storm-induced fluid mud event mainly depends on the overall hydrodynamic regimes and the exchanges of sediment, which is released by storm-wave agitation from adjacent tidal flats. These sediments are accumulated as fluid mud, and subsequently oscillate and persist at those locations with weaker longitudinal residuals in the river- and tide-dominated estuary.** In addition, the downslope transport of fluid mud is also thought to have stimulated and worsened the fluid mud event observed in this study. Our modeling results and observations demonstrate that: (i) the transport of fluid mud is an advective phenomenon determining the central position of fluid mud layer along the channel, and it's also a tidal energy influenced phenomenon controlling the erosion and accumulation of fluid mud; and (ii) both suspended particulate matter availability and local residual flow regime are of critical importance in determining the trapping probability of sediment and the occurrence of fluid mud.

In *Chapter 4*, spatial and temporal measurement data describing spring-neap variations of velocity, salinity and SSC in the DNC of the Yangtze Estuary were obtained in the wet season of 2012. These data were collected in the middle of the DNC for the first time, and apparently document the formation of a rather stable density stratification interface and salt wedge, especially during neap tides and slack waters. The convergent zone of residual currents, salinity and sediment during neap and spring tides oscillates in the middle and lower reach of the DNC. It encourages the formation of a near-bed high-SSC layer, which favors siltation in the dredged channel. Both the near-bed gradient Richardson number and the layer Richardson number vary dramatically from around zero to several hundred from spring to neap tides. Stratification and turbulence damping effects near the ETM area induce the upper half (near water surface) of the water body to be ebb-dominant and the lower part (near-bed) to be flood-dominant. These data reveal that the residual pattern of currents, salt flux and sediment flux are non-similar in a stratified estuary, and that **the salinity-induced baroclinic pressure gradient is a major factor controlling the variation of vertical velocity structure.** In addition, field observations indicate that the residual transport generated by internal tidal asymmetry plays a dominant role in maintaining a stable density stratification interface near the estuarine front.

In *Chapter 5*, by means of an improved apparatus, settling velocity (SV) of the Yangtze estuarine fine sediments was studied in the laboratory. The experimental data show that (i) SSC, salinity and temperature all affect SV, but to different extents; (ii) the relationships between SV of estuarine fine sediments and its controlling factors are highly dependent on specific environmental conditions; (iii) **the dependencies of various determinants (SSC salinity and temperature) on SV in different flocculation stages are varied;** and (iv) for the Yangtze estuarine mud, the SV peaks when the SSC is in the range 3-8 kg/m³, and the salinities for maximum flocculation settling are approximately 7 and 10 psu in dry and wet seasons, respectively.

Chapter 6 attempts to explore the feedbacks of the micro-scale physical processes on the fine sediment dynamics within the river plume of the Yangtze Estuary. Through a numerical sensitivity analysis based on a three-dimensional (3D) small domain model, the effects of micro physical sediment processes related to flocculation and stratification are tested. (i) Settling velocity is a sensitive parameter determining the overall entrained and suspended sediment in the water column. The effect of flocculation on settling velocity controls longitudinal ETM dynamics. (ii) Saltwater intrusion in an estuary firstly creates longitudinal density gradient, which introducing a baroclinic effect. The direction of baroclinic pressure gradient forcing is landward mostly, therefore when the current velocity is relative small during slack waters and neap tides, the advective function is comparable to the baroclinic pressure gradient forcing in the water column (especially near the river-bed), so the internal flow structure will be altered largely. (iii) Furthermore, once the internal flow structure is changed, the up-estuary flux of sediment and salinity will be enhanced near the bottom. Thus the accumulation of denser materials near the convergent area (salt front) will result in a density stratification phenomenon. The vertical density gradient of in stratified flow produces a buoyancy effect on turbulence. This effect suppresses the vertical mixing of momentum and materials (turbulence damping). Then it favors forming of high-concentration layer near the bottom. Meanwhile, settling velocity decreases sharply with an increasing SSC near the bottom, therefore the hindered settling effect

enhances the bottom turbidity and promotes the density stratification (including sediment and salinity density). Then again, **sharper stratification will induce stronger turbulence damping and higher bottom SSC. The abovementioned snow ball effect is the primary micro mechanism of fine sediment dynamics in an estuary.** (iv) In addition, with an increasing SSC near the bottom, local bed resistance will be decreased due to drag reduction, tidal stirring is amplified and the erosion capacity is enhanced accordingly. Therefore **the aforementioned snow ball effect might be terminated under the competition between stratification and high-turbidity induced tidal amplification.**

Chapter 7 applied the above findings into the large domain model of the whole Yangtze Estuary and investigated the typical effect of seasonally varying river discharge, wind climate and mean sea level on the seasonal variation of ETM. From observation and modeling data, we concluded evidently that (i) **Both tidal energy and density stratification enhance saltwater intrusion;** (ii) Four independent factors (river flow, wind, mean sea level and water temperature) determining the seasonal sediment regime are identified; (iii) River discharge impacts the pattern of residual currents; (iv) Seasonally varying wind effect alters the longshore currents; and (v) Seasonally varying mean sea level affects the saltwater intrusion length in the DNC.

In this study, in short we highlight that **multiscale physical processes jointly characterize the current and sediment regime in a fine sediment estuarine system.**

KEYWORDS: fine sediment; settling velocity; stratification; flocculation; turbulence damping; modeling; observation; laboratorial experiment; navigational channel; Yangtze Estuary; China

Samenvatting

Estuaria zijn van nature hoogdynamische, snel veranderende systemen, die een complexe combinatie van fysische processen op een aantal verschillende tijdschalen bevatten. De fysische processen rond fijn sediment genieten een toenemende belangstelling van kustwaterbouwkundigen. Eén reden is dat steeds meer landaanwinning nodig is voor een duurzame groei van samenlevingen en tevens meer havens en scheepvaartgeulen. Deze worden in toenemende mate aangelegd in zulke fijn-sediment omgevingen, die voorheen gezien werden als ongunstig voor vaarwegontwikkeling, vanwege de grote kans op sedimentatieproblemen. Een andere reden is dat we geïnteresseerd zijn in het fascinerende karakter van fijn-sediment dynamica.

Het Yangtze estuarium is een uitstekend voorbeeld van een fijn-sediment estuarien systeem met een matige getijslag (~1-5 m) en een sterke seizoensfluctuatie (~10.000-50.000 m³/s) in het rivierdebiet. Sedimentatie wordt op dit moment gezien als een belangrijke kwestie. Voordat maatregelen om geulaanslibbing te verminderen kunnen worden ontworpen moeten de redenen en mechanismen ervan worden onderzocht. Daarom wordt het begrijpen van de onderliggende mechanismen rond fijn-sediment transport, de ETM (estuariene turbiditeits maximum) dynamica en sedimentvang in het Yangtze estuarium gezien als een majeure uitdaging bij het onderhouden van de "Gouden Waterweg".

De voornaamste inhoud en conclusies van deze systematische studie naar multi-schaal processen van fijn sediment in een gematigd-getij, convergerend estuariu kunnen als volgt worden samengevat.

In Hoofdstuk 1 wordt de **complexiteit van fijn sediment transport** geïdentificeerd. Afgezien van de interacties tussen rivierafvoer, oceaantij, windgolven, de Coriolis kracht, zoutwater-indringing en bodemweerstand in een estuarien systeem, tonen micro-schaal effecten van flocculatie, gehinderde bezinken, barocliene forcing, turbulentiedemping en vermindering van de weerstand duidelijke invloed op de interne structuren van stroming, saliniteit en suspensief sediment concentratie (SSC), die op hun beurt weer een effect hebben op de macro-schaal stromings- en sediment regimes en de morfologische ontwikkeling. Na het belichten van de unieke karaktertrekken en uitdagingen van het Yangtze Estuarium worden de de voornaamste doelstelling en de organisatie van deze studie geïntroduceerd.

Hoofdstuk 2 focust op de recente hydrodynamische evolutie van het hele Yangtze Estuarium op de tijdschaal van decaden, afgeleid uit hydrologische waarnemingsreeksen. Gedurende de laatste jaren heeft het systeem menselijke ingrepen ten behoeve van de ontginning van natuurlijke rijkdommen ondergaan op een tot dan toe ongeziene schaal. We hebben vastgesteld dat (i) het waterniveau in de hoofdtak van het Yangtze Estuarium is toegenomen tussen 1998 en 2009; deze toename werd veroorzaakt door veranderingen in het afvoerregime van de volledige rivier (met inbegrip van natuurlijke morfodynamische processen en de topografische terugkoppeling door extreme weerfenomenen en menselijke activiteit); (ii) de afname van het afvoeraandeel ter hoogte van de derde vertakking is een direct gevolg van het Deepwater Navigatie Channel (DNC) project en de daarbij horende morfologische veranderingen in the Noordelijke Doorgang; en (iii) de gradiënten in estuariene omgevingsvariabelen (zoutgehalte en concentraties van suspensiemateriaal) werden ruimtelijk gecomprimeerd, en de zout-zoetovergang werd scherper. **Dit alles heeft het stroomopwaarts opslippen van de vaargeul als indirect gevolg: het stratificatieeffect nabij het turbiditeitsmaximum wordt versterkt, evenals de tendens van stroomopwaarts sedimenttransport.**

In Hoofdstuk 3 worden observaties van de stormgerelateerde vloeistof modder dynamiek in het DNC van het Yangtze Estuarium beschreven, zoals waargenomen tussen Oktober en December 2010 tijdens de passage van een koudefront. De verzamelde gegevens beschrijven hoe net na de storm een grote hoeveelheid fijn gesuspenseerd materiaal in de vaargeul werd

gevangen onder de vorm van vloeistof modder. The mechanismen en transportprocessen gelinkt aan de stormgeïnduceerde vloeistof modder-vorming werden geanalyseerd en gepresenteerd vanuit het standpunt van zowel de procesgebaseerde als de ingenieursbenadering. **Met behulp van getij- en golfmodellering kan worden aangetoond dat het stormgerelateerde gedrag van vloeistof modder hoofdzakelijk afhankelijk is van de grootschalige hydrodynamica en de uitwisseling van fijn sediment tussen vaargeul en intergetijdeplaten als gevolg van opwoeling door stormgolven. Dit sediment verzamelt zich in de vorm van vloeistof modder, oscilleert mee met het getij, en hoopt zich op die plaatsen op waar de longitudinale reststromen in de rivier en het tijgedomineerde estuarium relatief zwakker zijn.** Bovendien heeft het hellingafwaartse transport van vloeistof modder het in deze studie geobserveerde event versterkt en verergerd. Onze modelresultaten en observaties tonen het volgende aan: (i) het transport van vloeistof modder is een advectioneel verschijnsel dat de centrale positie van de fluid mudlaag in de vaargeul bepaalt, en bovendien is het een tijgedreven fenomeen dat de erosie en accumulatie van fluid mud controleert; (ii) zowel de beschikbaarheid van gesuspenderd materiaal als het lokale reststromingsregime spelen een kritieke rol bij het bepalen van de waarschijnlijkheid dat sediment wordt ingevangen en leidt tot de vorming van vloeistof modder.

In Hoofdstuk 4 worden de in ruimte en tijd variërende meetgegevens geanalyseerd die de spring-doodtijveranderlijkheid van stroomsnelheden, zoutgehalte en SSC in het DNC beschrijven zoals gemeten in het natte seizoen van 2012. Deze gegevens werden voor het eerst verzameld in het midden van het DNC, en naar blijkt documenteren ze een relatief stabiele dichtheidsstratificatie en zouttong, in het bijzonder gedurende doodtij en tijkentering. De convergentiezone van reststromen, zout en sediment tijdens dood- en springtij verplaatst zich tussen het middelste en het zeewaartse deel van het DNC. Het bevordert de vorming van een laag met bijzonder hoge sedimentconcentraties nabij de bodem, wat aanslibbing van de gebaggerde vaargeul veroorzaakt. Zowel het Richardsongetal voor de bodemlaaggradiënt als het Richardsongetal voor gelaagdheid variëren dramatisch, van nul tot ordegrrootte honderden naargelang spring- of doodtij. Stratificatie- en turbulentiedempingseffecten in de zone van het ETM leiden tot ebdominantie in de bovenste helft van de waterkolom, en vloeddominantie in de onderste helft. De meetgegevens tonen aan dat het patroon van reststromingen, zout- en sedimentflux niet gelijklopend zijn in een gestratificeerd estuarium, en dat de **zoutgeïnduceerde barocliene drukgradiënt een belangrijke factor is in de variatie van de verticale snelheidsstructuur** Bovendien tonen meetgegevens aan dat de residuele transporten als gevolg van interne getijdenasymmetrie een dominante rol spelen in het behouden van een stabiele dichtheidsstratificatie in de zone van het estuariene front.

In Hoofdstuk 5 werd de valsnelheid van fijne sedimenten uit het Yangtze Estuarium in het laboratorium bestudeerd met behulp van een verbeterd meettoestel. De experimentele gegevens tonen aan dat (i) SSC, zout en temperatuur in verschillende mate de valsnelheid beïnvloeden; (ii) dat het verband tussen de valsnelheid van fijne estuariene sedimenten en de controlerende factoren in hoge mate afhankelijk is van specifieke lokale condities; (iii) de afhankelijkheid van de valsnelheid van de bepalende factoren (SSC, zout, temperatuur) varieert volgens de mate van flocculatie; en (iv) voor wat estuariaen slib uit de Yangtze betreft, de valsnelheid maximaal is wanneer de SSC van grootteorde $3\text{--}8 \text{ kg/m}^3$ is. De zoutgehaltes voor maximale neerslag van geflocculeerd sediment zijn ongeveer 7 en 10 psu, respectievelijk tijdens het droge en natte seizoen.

Hoofdstuk 6 tracht de terugkoppeling te karakteriseren tussen de fysische processen die spelen op microschaal en de dynamiek van het fijne sediment in de rivierpluim van het Yangtze estuarium. Met behulp van een numerieke gevoeligheidsanalyse op basis van een driedimensionaal model op relatief kleine ruimtelijke schaal, werden de effecten van fysische sedimentprocessen op microschaal, gerelateerd aan flocculatie en stratificatie getest. (i) Valsnelheid is een gevoelige parameter die de globale hoeveelheid meegevoerd en gesuspenderd materiaal bepaalt. Het flocculatie-effect op de valsnelheid controleert de longitudinale ETM dynamiek. (ii) Zoutwaterindringing in een estuarium genereert vooreerst een longitudinale dichtheidsgradiënt, hetgeen een baroclien effect introduceert. De richting van de krachtenwerking gelinkt aan de barocliene drukgradiënt is meestal landwaarts. Om deze reden is bij relatief lage stroomsnelheden tijdens kentering en doodtij de advection van dezelfde

grootteorde als de forcing door de barocliene drukgradiënt in de waterkolom. Dit heeft een grote verandering in de interne structuur van de stroming tot gevolg. (iii) Bovendien geldt dat, eens de interne structuur van de stroming is veranderd, de landwaartse flux van zout en sediment nabij de bodem wordt versterkt. Dus de accumulatie van dichter materiaal in de convergentiezone geassocieerd aan het zoutfront zal leiden tot dichtheidsstratificatie. De verticale dichtheidsgradiënt in gestratificeerde stroming resulteert in een drijfvermogen effect op de turbulentie. Dit effect onderdrukt de verticale menging van impuls en materie (turbulentiedemping). In dat geval bevordert het de vorming van een laag met hoge concentraties nabij de bodem. Terzelfdertijd neemt de valsnelheid scherp af met een verhoogde SSC, waardoor hindered settling effecten de bodemlaagturbiditeit versterken en de dichtheidsstratificatie doen toenemen (concentratie van sediment en zout inbegrepen). Een duidelijkere stratificatie leidt dus tot een grotere demping van turbulentie en een hogere SSC nabij de bodem. Dit sneeuwbaaleffect is het voornaamste micro-mechanisme voor de dynamiek van fijn sediment in een estuarium. (iv) Bovendien zal door weerstandsreductie de lokale bodemwrijving afnemen wanneer de SSC nabij de bodem toeneemt, getijgerelateerde menging wordt versterkt, en het potentieel voor erosie neemt toe. Het vernoemde **sneeuwbaaleffect kan daarom effectief gestopt worden door de tegenwerking tussen stratificatie en de versterkte tijnvloed als gevolg van hoge turbiditeit.**

Hoofdstuk 7 past deze bevindingen toe in een model dat het hele Yangtze estuarium omvat. Het onderzoekt het typische effect van seizoensgebonden rivierafvoer, windklimaat en gemiddeld zeeniveau op de veranderlijkheid van het ETM. Uit meetgegevens en modelresultaten kan besloten worden dat (i) **zowel getijslag als dichtheidsstratificatie bevorderen zoutwaterindringing**; (ii) Vier onafhankelijke factoren (rivierafvoer, wind, gemiddeld zeeniveau en watertemperatuur) bepalen het seizoensgebonden sedimentatiepatroon; (iii) Rivierafvoer beïnvloedt het residueel stromingspatroon; (iv) Seizoensgebonden variatie in windrichting en -snelheid veranderen de kustlangse stroming; en (v) Seizoensgebonden veranderingen in de gemiddelde waterstand beïnvloeden de afstand waarover zoutindringing plaatsvindt in het DNC.

Samengevat tonen we aan in deze studie hoe **fysische processen op meerdere schalen samen het stromings- en sedimentatiepatroon bepalen in een estuarien systeem met fijn sediment.**

TREFWOORDEN: fijn sediment; valsnelheid; stratificatie; flocculatie; turbulentiedemping; modelleren; observaties; laboratoriumexperimenten; vaargeul; Yangtze Estuarium; China

** This summary is translated from English to Dutch by Mr. Johan Reyns, but the author himself is responsible for the accuracy.*

Acknowledgements

It was indeed a value-added trip for me to do the PhD research in the past 5 years, though I led a busy life and I had to travel between Delft and Shanghai for my PhD study and consultant research jobs, respectively. There were painfully tough moments, which turned to be extremely rewarding when this thesis was completed. This trip has provided me with academic experience that was challenging, as well as an opportunity to see various thoughts, ways of life, cultures, and dreams. I would like to express my sincere gratitude to all the people that I met during the trip, and especially to those who have made direct or indirect contribution to this study.

Thank you to my family, including my wife Xu Yan, my parents in law, my mother and my father, who always show great tolerance and love to deal with family matters and take care of my son Wan Jinhui when I was absent. They present to me a "complaint free" attitude, which encourages me to keep smile to everything.

Prof. Dano Roelvink is gratefully acknowledged for his insightful advice, helpful guidance and artistic inspiration to this study. I thank you from the bottom of my heart for allowing me to come and the nice experience. His modeling philosophy (*Roelvink and Reniers, 2012*) has reshaped my understanding of sediment transport and morphodynamics. It is my honor to be his PhD student. Thanks ever so much for the fun, your sense of humor, and your patience. I have felt so motivated after each meeting with you. Moreover, you encouraged me to think independently, you taught me to do writing with simple words and trained me to express academic ideas in gentle and moderate way.

Mr. Gao Min is greatly thanked for having recommended me to do this PhD research. In 2008, this guy did a very impressive study on the topic of sediment transport and morphological process in the Yangtze Estuary (*Gao, 2008*). It is just this research that attracted Dano's great interest on the Yangtze estuarine sediment dynamics. With the funding of the project, Research on Sediment from Upstream to Estuary (ReSedUE), Prof. Dano brought me to Delft to pursuit the beauty of the Yangtze Estuary.

Special thanks go to my colleagues (Wu Hualin, Qi Dingman, Gu Fengfeng, Kong Lingshuang, Wang Wei, Shen Qi, Liu Jie, Liu Gaofeng, Wang Yuanye, Le Jiahai, etc.) at Shanghai Estuarine Coastal Science Research Center and all the members of the Yangtze Estuary Research Team, under the management of the Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau. Without their contribution and support, I cannot have the chance to access these experimental facilities, measurement data and numerical models.

It was fantastic to meet all of you, colleagues and Ph.Ders in IHE, Rosh, Mick, Ali, Johan, Jolanda, Tonneke, Wendy, Anique, Sylvia, Peter, etc. Thank you for your help during my study in Holland.

The scientific discussions and personal communications with Han Winterwerp, Wang Z.B., Jin Liu, Robert, Shi Wei, Swart, J.Z. Shi, Zhu Jianrong, Cheng Peng, Yu Qian, Ma Gangfeng, Han Yufang, Chu Ao, Cheng Wenlong, Ye Qinghua, Shao Yuyang and Wang Li inspired me and brought me some new ideas.

Prof. Richard Burrows is thanked for having sent some copies of literatures about fluid mud. Lu Shengzhong, Chen Xi and Huang Wei are thanked for their enthusiastic

assistances on the laboratory experiments in this study. My BSc supervisor Prof. Yu Minghui and MSc supervisor Prof. Dong Yaohua are acknowledged for their continuous encouragements.

The hot pot, BBQ and marathon friends in Holland and China are appreciated for sharing the happy and relaxing moments together. They are Yang Zhi, Li Shengyang, Wang Chunqin, Guo Leicheng, Yan Kun, Pan Quan, Lin Yuqing, Xu Zhen, Chen Qiuhan, Chu Kai, Zhao Gensheng, Zhang Yong, Ouyang Xiaowei, Fu Bingjie, Zhao Dezhaohao, Wang Wei, Shen Qi, Pan Jiajun, Dong Bingjiang, Zhou Chi, Zuo Liqin, Wang Hao, Li Shouqian, etc.

I would like to thank Prof. John Z. Shi for his constructive comments and improvements.

I thank the developers and contributors of the Delft3D, GOTM, SELFELCIRC, FVCOM, NaoTide for the open access to source codes.

WAN Yuanyang
Shanghai, China
April, 2015