

亚热带暴雨事件九龙江营养盐输出过程与河口响应

吴殷琪

指导教师
陈能汪
教授

厦门大学

学校编码：10384
学号：33120121151628

密级

厦门大学

硕士 学位 论文

亚热带暴雨事件九龙江营养盐 输出过程与河口响应

Riverine Nutrients Export and its Biogeochemical
Behavior in the Jiulong Estuary under Subtropical Storm
Events

吴殷琪

指导教师姓名：陈能汪 教授
专业名称：环境管理
论文提交日期：2015年05月
论文答辩时间：2015年05月

2015年05月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(亚热带暴雨事件的河海界面生物地球化学响应)课题(组)的研究成果,获得(亚热带暴雨事件的河海界面生物地球化学响应)课题(组)经费或实验室的资助,在(环境与生态学院环境过程)实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

- () 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。
() 2. 不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

图表目录	I
Figures and Tables	IV
专业词汇与缩略语	IX
摘要	XI
Abstract	XIII
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 流域营养盐输出与河流输送过程	2
1.2.2 暴雨事件河流营养盐动态及其控制机制	4
1.2.3 暴雨事件河口-近海生物地球化学响应	7
1.2.4 国内外研究进展与科学问题提出	9
1.3 研究目标和内容	10
1.3.1 研究目标	10
1.3.2 研究内容	10
1.3.3 主要科学问题	11
1.4 研究技术路线	12
第 2 章 研究区域概况	13
2.1 九龙江流域概况	13
2.1.1 自然环境	13
2.1.2 社会经济	14
2.1.3 水环境质量	14
2.2 九龙江河口概况	15
2.2.1 地形地貌	15
2.2.2 气象水文	16

2.2.3 潮汐特征.....	16
2.2.4 营养盐年代际变化.....	16
第3章 材料与方法	18
3.1 观测方案.....	18
3.1.1 站点布设.....	18
3.1.2 观测安排.....	21
3.1.3 九龙江流域、河口背景调查采样方案.....	21
3.1.4 九龙江流域暴雨过程定点观测方案.....	22
3.1.5 九龙江河口暴雨响应观测方案.....	22
3.1.6 九龙江营养盐周年日通量定点观测方案.....	22
3.1.7 样品采集与保存.....	23
3.1.8 现场测定参数.....	23
3.2 样品测定方法.....	23
3.2.1 营养盐测定方法.....	23
3.2.2 总悬浮颗粒物浓度（TSM）测定方法.....	24
3.3 数据预处理与综合分析.....	24
3.3.1 流量数据获取与预处理.....	24
3.3.2 降雨数据收集与计算.....	24
3.3.3 营养盐通量与负荷估算方法.....	25
3.3.4 数据统计分析.....	26
第4章 九龙江流域水文与营养盐基本特征	27
4.1 九龙江流域气象水文特征.....	27
4.1.1 历史水文气象情况.....	27
4.1.2 观测期间北溪和西溪的气象水文条件（2011-2014）	29
4.2 九龙江流域营养盐浓度、形态结构的时空分布	32
4.3 九龙江北溪周年日通量观测结果	42
4.4 九龙江流域营养盐输出的控制因素	48
4.5 本章小结	54
第5章 暴雨事件九龙江营养盐动态变化、输出过程与通量	57

5.1 暴雨事件降雨特征与水文过程线.....	57
5.2 降雨径流过程九龙江营养盐浓度、形态结构变化特征.....	61
5.2.1 各形态营养盐和悬浮颗粒物浓度变化与流量的关系.....	61
5.2.2 营养盐形态结构变化与流量的关系.....	67
5.3 暴雨事件九龙江营养盐输出通量.....	69
5.4 暴雨事件对九龙江营养盐输出的影响及控制因素.....	73
5.4.1 降雨水文条件对河流营养盐输出的总体影响.....	73
5.4.2 控制暴雨事件河流营养盐输出的过程和机制.....	77
5.5 本章小结.....	84
第 6 章 暴雨事件九龙江口营养盐分布及其对河流输入的响应	85
6.1 常态下九龙江口营养盐分布特征.....	85
6.1.1 调查期间潮汐与水质参数背景.....	85
6.1.2 河口区盐度、营养盐和 TSM 空间分布特征.....	87
6.1.3 河口混合区营养盐、TSM 与盐度的关系特征.....	90
6.1.4 河口区营养盐的季节变化规律.....	92
6.2 暴雨事件期间九龙江河口营养盐分布	93
6.2.1 盐度和营养盐空间分布的变化.....	93
6.2.2 营养盐与盐度关系的变化.....	97
6.3 河流输送与河口响应的关系分析.....	100
6.4 本章小结.....	105
第 7 章 结论与展望	106
7.1 主要结论	106
7.2 创新点	107
7.3 研究展望	107
参考文献	108
致谢	120
附录 硕士期间参与的课题研究与发表的论文	122

Table of contents

Figures and Tables (In Chinese).....	I
Figures and Tables (In English)	IV
Professional vocabulary and abbreviations	IX
Abstract (In Chinese).....	XI
Abstract (In English)	XIII
Chapter 1: Introduction.....	1
1.1 Background and research significance.....	1
1.2 Review of literature	2
1.2.1 Watershed nutrient export and riverine nutrient delivery.....	2
1.2.2 Riverine nutrient dynamic and mechanism under storm events	4
1.2.3 Biogeochemical response to storm events in estuaries	7
1.2.4 Research progress and related scientific questions	9
1.3 Objectives and contents of study.....	10
1.3.1 Objectives.....	10
1.3.2 Contents.....	10
1.3.3 Specific scientific questions.....	11
1.4 Study approach.....	12
Chapter 2: Descriptions of study site.....	13
2.1 Jiulong River watershed	13
2.1.1 Nature and Environment	13
2.1.2 Social-economics	14
2.1.3 Water quality issue	14
2.2 Jiulong Estuary.....	15
2.2.1 Topography and geomorphology	15
2.2.2 Meteorological and hydrological characteristics	16
2.2.3 Tidal characteristics.....	16

2.2.4 Nutrient decadal variations	16
Chapter 3: Materials and methods	18
3.1 Field survey.....	18
3.1.1 Sampling sites	18
3.1.2 Survey arrangement	21
3.1.3 Background survey of the Jiulong River Estuary	21
3.1.4 Survey of the Jiulong River under storm events	22
3.1.5 Survey of the Jiulong Estuary before and after storm events.....	22
3.1.6 Fixed-point observation of daily nutrients flux in the Jiulong River	22
3.1.7 Sampling and storage	23
3.1.8 In-situ measurements	23
3.2 Analyses method	23
3.2.1 Nutrients forms.....	23
3.2.2 Total suspended matters (TSM)	24
3.3 Data analysis	24
3.3.1 Discharge data.....	24
3.3.2 Rainfall data	24
3.3.3 Estimation of nutrient loads and fluxes.....	25
3.3.4 Statistical analysis	26
Chapter 4: Hydrological regime and nutrient characteristics in the Jiulong River	27
4.1 Meteorological and hydrological characteristics in the Jiulong River	27
4.1.1 Historical meteorology and hydrology.....	27
4.1.2 Meteorological and hydrological characteristics in 2011-2014	29
4.2 Spatio-temporal distribution of nutrient concentrations and compositon in the Jiulong River	32
4.3 Daily nutrients fluxes from the Jiulong River	42
4.4 Factors controlling nutrient export from the Jiulong River watershed.....	48
4.5 Brief summary	54

Chapter 5: Nutrients dynamics, export and fluxes in the Jiulong River under storm events	57
5.1 Storm characteristic and hydrograph	57
5.2 Variation of nutrients concentration and composition in storm runoff	61
5.2.1 Evolution of discharge and nutrient and TSM concentration	61
5.2.2 Evolution of discharge and nutrient composition	67
5.3 Nutrient loads and fluxes via storm runoff.....	69
5.4 Effects of storm events on nutrient export and controlling factors	73
5.4.1 Effects of storm size on riverine nutrient dynamics.....	73
5.4.2 Other factors controlling nutrients export pattern via storm runoff.....	77
5.5 Brief summary	84
Chapter 6: Variation of nutrient distribution in the Jiulong Estuary under storm events.....	85
6.1 Nutrients characteristic in the Jiulong Estuary under non-storm condition	85
6.1.1 Tidal and physicochemistry.....	85
6.1.2 Spatial variation of salinity and nutrients in the Jiulong Estuary.....	87
6.1.3 The relationship between nutrients and salinity	90
6.1.4 Seasonal variation of nutrients	92
6.2 Distribution of nutrients in the Jiulong Estuary during storm events	93
6.2.1 Changes in the spatial distribution of salinity ,nutrient and TSM.....	93
6.2.2 Changes in the relationship between nutrient & TSM and salinity.....	97
6.3 The coupled relationship between riverine export and estuary response ..	100
6.4 Brief summary	105
Chapter 7: Conclusions and research prospect	106
7.1 Main conclusions	106
7.2 Research highlights	107
7.3 Future work	107

References	108
Acknowledgments.....	120
Appendix.....	122

厦门大学博硕士论文摘要库

图表目录

图 1-1 流域-近海营养盐输送过程示意图	4
图 1-2 不同土地利用类型和面积的流域暴雨事件河流平均总磷浓度	6
图 1-3 研究技术路线图	12
图 3-1 九龙江流域采样站位图	18
图 3-2 九龙江河口采样站位图	20
图 4-1 2014 年月降雨量、流量与 1970-2007 年期间多年月均水平的比较	27
图 4-2 1960-2009 年期间厦门和漳州暴雨事件频数和贡献率年际变化	28
图 4-3 九龙江各形态氮和溶解态硅 (DSi) 浓度的空间分布	34
图 4-4 九龙江各形态磷和 TSM 浓度的空间分布	35
图 4-5 九龙江北溪和西溪无机氮形态组成沿程变化 (2011-2014)	39
图 4-6 九龙江北溪和西溪磷形态组成沿程变化 (2013-2014)	39
图 4-7 九龙江北溪和西溪 DIN/DRP 与各形态营养盐浓度的时空分布	41
图 4-8 九龙江北溪和西溪表层水 DSi/DIN 与各组成形态营养盐浓度的时空分布	42
图 4-9 2014 年九龙江北溪日均流量与降雨事件分布	44
图 4-10 2014 年九龙江北溪江东断面营养盐日浓度分布	45
图 4-11 九龙江北溪 DSi 沿程变化 (Chen et al., 2014a)	51
图 4-12 九龙江北溪和西溪 NO ₂₃ -N, NH ₄ -N, DRP, DSi 浓度与 API 的关系	52
图 4-13 北溪江东断面暴雨径流贡献随时间的变化	53
图 4-14 北溪江东断面时间、累积流量与营养盐累积通量之间的关系	54
图 5-1 九龙江北溪 5 场暴雨事件的降雨与与水文过程线	58
图 5-2 九龙江西溪 2 场暴雨事件的降雨与与水文过程线	59
图 5-3 2013 年 3 场暴雨事件流量与氮、磷、硅、颗粒态物质浓度变化过程	63
图 5-4 2014 年 5 月暴雨事件流量与氮、磷、硅、颗粒态物质浓度变化过程	64
图 5-5 2014 年 7 月暴雨事件流量与氮、磷、硅、颗粒态物质浓度变化过程	65
图 5-6 北溪 5 场暴雨事件过程各形态氮占溶解态总氮的比例	68
图 5-7 北溪 5 场暴雨事件过程各形态磷占总磷的比例	68
图 5-8 西溪 2 场暴雨事件过程各形态氮、磷占 DTN、TP 的比例	69

图 5-9 不同暴雨事件九龙江各形态营养盐和颗粒态物质的变化范围（箱形图）	75
图 5-10 不同暴雨事件九龙江氮、磷占比的分布（箱形图）	76
图 5-11 不同暴雨事件九龙江各形态氮、磷瞬时通量的变化范围（箱形图）	76
图 5-12 暴雨事件各形态营养盐通量与流量之间的关系（2013）	81
图 5-13 2014 年 7 月暴雨事件各形态营养盐通量与流量之间的关系	81
图 5-14 暴雨事件各形态氮浓度与流量之间的关系	82
图 5-15 暴雨事件各形态磷浓度与流量之间的关系	82
图 5-16 2013 年北溪 3 场暴雨事件累积流量与营养盐累积通量之间的关系	83
图 6-1 2014 年九龙江口潮位周日变化与采样时段覆盖情况	87
图 6-2 九龙江口表层水盐度与营养盐的空间分布	89
图 6-3 九龙江口表层水营养盐与盐度的关系	91
图 6-4 2014 年九龙江口营养盐和颗粒物含量的季节变化（箱形图）	92
图 6-5 2013 年 7 月暴雨 storm C 后九龙江口盐度与颗粒物浓度的空间变化	93
图 6-6 2013 年 7 月暴雨 storm C 后九龙江口溶解态营养盐浓度的空间变化	94
图 6-7 2014 年 5 月暴雨 storm D 后九龙江口盐度、颗粒物和硅浓度的空间变化	94
图 6-8 2014 年 5 月暴雨 storm D 后九龙江口溶解态氮磷浓度的空间变化	95
图 6-9 2014 年 7 月暴雨 storm E 前后九龙江口盐度、颗粒物和硅浓度的空间变化	95
图 6-10 2014 年 7 月暴雨 storm E 前后九龙江口溶解态氮磷浓度的空间变化	96
图 6-11 2014 年 7 月 storm E 前后九龙江口 DTN 和 DTP 结构的空间变化	96
图 6-12 2013 年 7 月暴雨 storm C 后九龙江口营养盐、颗粒物与盐度的关系	98
图 6-13 2014 年 5 月暴雨 storm D 后九龙江口营养盐、颗粒物与盐度的关系	99
图 6-14 2014 年 7 月暴雨 storm E 后九龙江口营养盐、颗粒物与盐度的关系	99
图 6-15 九龙江河流-河口营养盐和颗粒物含量的空间分布（箱形图）	102
图 6-16 暴雨事件（storm E）河流-河口营养盐响应关系图	103
图 6-17 2013 年 7 月暴雨 storm C 前后叶绿素、盐度和 NO ₃ -N 的时间序列变化	104

表 2-1 九龙江流域干流主要水电站和大坝汇总表	15
表 3-1 九龙江北溪和西溪采样站位信息	19
表 3-2 九龙江口采样站位信息	20
表 3-3 野外采样安排	21
表 4-1 1960-2009 年期间各月暴雨特征值的分布	29
表 4-2 2011-2014 年水文气象参数与多年平均的比较	30
表 4-3 观测所在月份的降雨量与径流参数	31
表 4-4 九龙江 11 次大面调查期间的前期降雨量指数（API ^a ）	32
表 4-5 九龙江主要形态氮、磷、硅浓度范围和平均值	37
表 4-6 九龙江营养盐占比与氮磷硅比值	38
表 4-7 北溪江东断面表层水氮、磷、硅浓度形态结构范围和平均值	44
表 4-8 北溪江东断面营养盐月通量与负荷估算结果（2014）	46
表 4-9 北溪江东断面暴雨事件营养盐通量与负荷估算结果（2014）	47
表 5-1 九龙江流域 5 场暴雨事件观测期间的水文条件	59
表 5-2 2013-2014 年 5 场暴雨事件流量与雨量基本特征	60
表 5-3 5 场暴雨事件观测期间表层水营养盐和悬浮颗粒物浓度范围	66
表 5-4 5 场暴雨事件观测期间表层水营养盐形态结构范围	66
表 5-5 5 次暴雨事件九龙江氮和硅负荷、通量与流量加权平均浓度	71
表 5-6 5 场暴雨事件九龙江磷和颗粒物负荷、通量与流量加权平均浓度	72
表 6-1 2014 年九龙江口常态航次的潮汐基本信息	85
表 6-2 2014 年九龙江口常态航次的表层水基本参数信息	86
表 6-3 2014 年九龙江口常态航次表层水营养盐、颗粒物浓度范围和平均值	88
表 6-4 2014 年 7 月暴雨前后九龙江口营养盐输出有效浓度和入海通量估算 ...	103

Figures and Tables

Fig.1-1 Schematic diagram of riverine nutrients export to coastal waters	4
Fig.1-2 Comparison of event-based mean concentration (EMC) of TP in storm runoff from various sites with different dominant land use and watershed size.....	6
Fig.1-3 Study approach.....	12
Fig.3-1 Sampling sites in the Jiulong River.....	18
Fig.3-2 Sampling sites in the Jiulong Estuary	20
Fig.4-1 Comparison of precipitation and discharge between 2014 and 1970-2007	27
Fig.4-2 Interannual variance of the storm occurrence and contribution at Xiamen (a) and Zhangzhou (b) in 1960-2009 period	28
Fig.4-3 Spatial variation of nitrogen and dissolved silica along the Jiulong River	34
Fig.4-4 Spatial variation of phosphorus and total suspended matters (TSM) along the Jiulong River	35
Fig.4-5 Inorganic nitrogen composition along the North Jiulong River and West Jiulong River (2011-2014).....	39
Fig.4-6 Phosphorus composition along the North Jiulong River and West Jiulong River (2013-2014).....	39
Fig.4-7 Seasonal and spatial variations of DIN:DRP ratio and concentrations along the North Jiulong River and West Jiulong River (2011-2014)	41
Fig.4-8 Seasonal and spatial variations of DSi:DIN ratio and concentrations along the North Jiulong River and West Jiulong River (2011-2014)	42
Fig.4-9 Spatial variation of daily river discharge and storm events at the outlet of North Jiulong River watershed	44
Fig.4-10 Spatial variation of daily nutrients concentration at the outlet of North Jiulong River watershed.....	45
Fig.4-11 Change of DSi along the the North River under different hydrological conditions	51
Fig.4-12 Relationships between nutrients concentrations and API in Jiulong River... <td>52</td>	52

Fig.4-13 Temporal variation of stormflow flux contribution at the outlet of North Jiulong River watershed.....	53
Fig.4-14 Relationships between cumulative mass transport and time & cumulative discharge volume for nutrients at the outlet of North Jiulong River watershed	54
Fig.5-1 Change in river discharge and precipitation during five storm events occurred in the North River watershed	58
Fig.5-2 Change in river discharge and precipitation during two storm events occurred in the West River watershed.....	59
Fig.5-3 Evolution of discharge and nutrient forms during the course of the monitored storm events in 2013	63
Fig.5-4 Evolution of discharge and nutrient forms during the course of the monitored storm event in May, 2014.....	64
Fig.5-5 Evolution of discharge and nutrient forms during the course of the monitored storm event in July, 2014	65
Fig.5-6 Changes in proportion of DTN composition during five storm events	68
Fig.5-7 Changes in proportion of TP composition during five storm events.....	68
Fig.5-8 Changes in proportion of total P and N during two storm event.....	69
Fig.5-9 Boxplot of nutrients and total suspended matters concentration with different size of storm events.....	75
Fig.5-10 Boxplot of dissolved N, P composition with different size of storm events .	76
Fig.5-11 Boxplot of dissolved N, P flux with different size of storm events.....	76
Fig.5-12 Relationships between nutrient fluxes and river discharge during the three studied storm events.....	81
Fig.5-13 Relationships between nutrient fluxes and river discharge of storm E	81
Fig.5-14 Relationships between N concentration and river discharge during the five studied storm events.....	82
Fig.5-15 Relationships between P concentration and river discharge during the five studied storm events.....	82

Fig.5-16 Relationships between cumulative mass transport and cumulative discharge volume for nutrient (a-g) and sediment (h) at the outlet of North Jiulong River (2013)	83
Fig.6-1 Diurnal variations of tide and sampling period during the cruises in the Jiulong Estuary.....	87
Fig.6-2 Spatial distributions of surface salinity and nutrient in the Jiulong Estuary...	89
Fig.6-3 Relationship between nutrient concentrations and salinity in the Jiulong Estuary	91
Fig.6-4 Seasonal variations (boxplot) of measured nutrient and total suspended matters in the Jiulong Estuary	92
Fig.6-5 Changing salinity and partical concentrations in the Jiulong Estuary after storm C	93
Fig.6-6 Changing dissolved nutrient concentrations in the Jiulong Estuary after storm C	94
Fig.6-7 Changing salinity, particulate matter and silica concentrations in the Jiulong Estuary after storm D	94
Fig.6-8 Changing dissolved nutrient concentrations in the Jiulong Estuary after storm D	95
Fig.6-9 Changing salinity, particulate matter and silica concentrations in the Jiulong Estuary before and after storm E	95
Fig.6-10 Changing nitrogen and phosphorus concentrations in the Jiulong Estuary before and after storm E.....	96
Fig.6-11 Changing nitrogen and phosphorus compositions in the Jiulong Estuary before and after storm E.....	96
Fig.6-12 Relationship between salinity and nutrient & TSM concentrations in the Jiulong Estuary after storm C	98
Fig.6-13 Relationship between salinity and nutrient & TSM concentrations in the Jiulong Estuary after storm D	99
Fig.6-14 Relationship between salinity and nutrient & TSM concentrations in the Jiulong Estuary after storm	99

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.