

学校编码: 10384

密级\_\_\_\_\_

学号: 22420111151349

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

九龙江流域营养盐输出通量、时空变化及其影响因素的研究

Fluxes, Temporal and Spatial Variation and Influence

Factors of Dissolved Nutrients in the Jiulong River

Watershed

陈国祥

指导教师姓名: 蔡毅华 副教授

专业名称: 海洋化学

论文提交日期: 2016年05月

论文答辩时间: 2016年05月

2016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(厦门大学海洋与地球学院同位素海洋化学)课题(组)的研究成果,获得(厦门大学海洋与地球学院同位素海洋化学)课题(组)经费或实验室的资助,在(厦门大学海洋与地球学院同位素海洋化学)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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

---

## 目录

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 摘要.....                              | I         |
| Abstract.....                        | III       |
| <b>第一章 绪论.....</b>                   | <b>1</b>  |
| 1.1 营养盐与河流系统概述.....                  | 1         |
| 1.2 人类活动对流域营养盐的影响.....               | 2         |
| 1.3 九龙江流域研究现状.....                   | 4         |
| 1.4 研究目的和意义.....                     | 5         |
| <b>第二章 研究区域与方法.....</b>              | <b>7</b>  |
| 2.1 九龙江流域概述.....                     | 7         |
| 2.2 九龙江各支流水文地理、人类活动比较.....           | 8         |
| 2.2.1 九龙江北溪水文地理、人类活动状况概述.....        | 8         |
| 2.2.2 九龙江西溪水文地理、人类活动状况概述.....        | 10        |
| 2.2.3 九龙江南溪水文地理、人类活动状况概述.....        | 10        |
| 2.3 九龙江流域采样站位设计.....                 | 11        |
| 2.3.1 河流端采样站位.....                   | 11        |
| 2.3.2 全流域采样站位.....                   | 11        |
| 2.4 采样与分析方法.....                     | 20        |
| 2.4.1 营养盐测定.....                     | 20        |
| 2.4.2 其他辅助参数测定与获取.....               | 21        |
| 2.4.3 河流输出通量计算方法.....                | 24        |
| <b>第三章 九龙江营养盐的含量及其时空变化与输出通量.....</b> | <b>25</b> |
| 3.1 九龙江水文背景及其时空分布变化.....             | 25        |
| 3.1.1 河流端水文背景及其时空分布变化.....           | 25        |
| 3.1.2 全流域水文背景及其时空分布与变化.....          | 30        |
| 3.2 九龙江营养盐含量及其时空分布变化.....            | 34        |
| 3.2.1 河流端营养盐含量及其时空分布变化.....          | 34        |
| 3.2.2 全流域营养盐含量及其时空分布与变化.....         | 39        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3 九龙江营养盐输出通量与产率.....                  | 43        |
| <b>第四章 九龙江营养盐含量及其时空变化与输出的影响因素 .....</b> | <b>47</b> |
| 4.1 九龙江营养盐输出通量与产率的影响因素.....             | 47        |
| 4.2 九龙江营养盐含量时空分布与变化的影响因素.....           | 54        |
| 4.2.1 九龙江营养盐空间分布与变化的影响因素 .....          | 56        |
| 4.2.2 九龙江营养盐时间分布与变化的影响因素 .....          | 61        |
| <b>第五章 总结与展望 .....</b>                  | <b>65</b> |
| 5.1 主要结论.....                           | 65        |
| 5.2 存在的不足与展望.....                       | 67        |
| 参考文献.....                               | 68        |
| 附录：攻读硕士学位期间的科研状况 .....                  | 80        |
| 致谢.....                                 | 81        |

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Contents

|  |     |
|--|-----|
| Abstract in Chinese .....  | I   |
| Abstract in English.....   | III |
| Chapet 1 Introduction .....  | 1   |
| 1.1 Introduction to nutrient and river system.....   | 1   |
| 1.2 The influence of anthropologic activities on the nutrient .....  | 2   |
| 1.3 Research overview in the Jiulong River .....   | 4   |
| 1.4 Objective and significance .....   | 5   |
| Chapet 2 Study area and methods .....  | 7   |
| 2.1 Introduction to the Jiulong River .....  | 7   |
| 2.2 Comparing of hydrology geography and anthropologic activities in the<br>Jiulong River.....             | 8   |
| 2.2.1 Hydrology geography and anthropologic activities in the north tributary<br>of the Jiulong River..... | 8   |
| 2.2.2 Hydrology geography and anthropologic activities in the west tributary<br>of the Jiulong River.....  | 10  |
| 2.2.3 Hydrology geography and anthropologic activities in the south tributary<br>of the Jiulong River..... | 10  |
| 2.3 Sampling stations in the Jiulong River .....   | 11  |
| 2.3.1 Riverine stations in the Jiulong River .....   | 11  |
| 2.3.2 Watersheds stations in the Jiulong River .....   | 11  |
| 2.4 Sampling and analysis.....   | 20  |
| 2.4.1 Nutrient analysis.....   | 20  |
| 2.4.2 Auxiliary parameters analysis .....  | 21  |
| 2.4.3 Method of riverine fluxes.....   | 24  |
| Chapet 3 Fluxes, temporal and spatial variation of nutrients in the Jiulong<br>River.....                  | 25  |



|   |        |
|---|--------|
| 3.1 Temporal and spatial variation of hydrology in the Jiulong River .....                                      | 25     |
| 3.1.1 Temporal and spatial variation of hydrology in the riverine Jiulong River .....                           | 25     |
| 3.1.2 Temporal and spatial variation of hydrology in the Jiulong River watersheds.....                          | 30     |
| 3.2 Temporal and spatial variation of nutrients in the Jiulong River.....                                       | 34     |
| 3.2.1 Temporal and spatial variation of nutrients in the riverine Jiulong River.....                            | 34     |
| 3.2.2 Temporal and spatial variation of nutrients in the Jiulong River watersheds.....                          | 39     |
| 3.3 Fluxes and yields of the Jiulong River.....   | 43     |
| <br>Chapet 4 Influence factors of fluxes, temporal and spatial variation of nutrients in the Jiulong River..... | <br>47 |
| 4.1 Influence factors of fluxes and yields of the Jiulong River .....   | 47     |
| 4.2 Influence factors of temporal and spatial variation of nutrient content.....                                | 54     |
| 4.2.1 Influence factors of spatial variation of nutrient content .....  | 56     |
| 4.2.2 Influence factors of temporal variation of nutrient content .....   | 61     |
| <br>Chapet 5 Conclusions and outlook .....  | <br>65 |
| 5.1 Main conclusions .....  | 65     |
| 5.2 Outlook .....   | 67     |
| <br>References.....   | <br>68 |
| <br>Appendix.....   | <br>80 |
| <br>Acknowledgements.....   | <br>81 |

## 摘要

营养盐是水生生物生长不可或缺的化学成分。河流是连接陆地与海洋两大生态系统的重要纽带，也是营养盐输送的一个关键渠道。九龙江作为福建省第二大河流连接了福建省东南部发达地区与台湾海峡，流域内环境压力较大，但对于人类活动对九龙江流域营养盐的生物地球化学行为及其排放尚不明了。

本研究于 2013 年 3 月至 2014 年 4 月对九龙江北溪、西溪和南溪河流端进行了高频取样，并在枯水期（2013 年 1 月 19 - 21 日）及丰水期（2013 年 10 月 25 - 26 日）分别实施了北溪及西溪全流域内的沿程调查取样。基于河流端的全年数据和两次全流域的数据，结合水文背景对九龙江流域内营养盐的时空分布和影响因素进行了分析，并探讨了流域内营养盐输出情况的特点，初步阐明了九龙江营养盐生物地球化学过程、特征及其影响因素，通过其输出通量和产率了解了九龙江流域内的环境压力，结合对比其他河流特别是受人为因素影响较小的天然河流以及人口、地理、社会经济等因素，对九龙江流域管理提供了科学依据，为九龙江河口和台湾海峡研究提供了系统的资料支撑。

调查期间北溪、西溪和南溪水流量均在 5 - 9 月（丰水期）呈现高值，而其他时间则流量较低；平均日流量高于历史平均流量，属丰水年份。

九龙江流域的溶解无机氮（DIN）、溶解无机磷（DIP）和硅酸盐（ $\text{Si(OH)}_4$ ）含量分别为：252  $\mu\text{mol/L}$ 、4  $\mu\text{mol/L}$  和 217  $\mu\text{mol/L}$ （流量加权平均值），产率则分别为 7.84 t N/yr/km<sup>2</sup>、0.20 t P/yr/km<sup>2</sup> 和 10.48 t Si/yr/km<sup>2</sup>。其中西溪营养盐含量高于南溪和北溪，通量贡献主要来源于北溪和西溪，而南溪的营养盐负荷最大。与世界河流相比，九龙江属于富营养化河流，流域内营养盐产率较高。

营养盐含量整体上因雨水的稀释而表现出丰水期低而枯水期高的特点。DIN 的主要贡献者为硝酸盐（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ），但西溪铵盐（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）的贡献接近  $\text{NO}_3\text{-N}$ 。台风导致的洪水期间南溪的 DIP 含量出现极大值，明显高于其他丰水期样品含量，说明南溪流域中面源是 DIP 的一个重要来源。 $\text{Si(OH)}_4$  含量均无显著季节性差异，但在高流量采样点时出现低值，显示了雨水的稀释作用，同时丰水期内  $\text{Si(OH)}_4$  的输出通量大于枯水期，说明降雨导致的流域内化学风化产物的输出增加。

北溪干流 DIP 含量从上游至下游呈降低的趋势,西溪则在上游段含量升高,中游站位急剧下降,出现最低值而后回升;北溪干流  $\text{Si}(\text{OH})_4$  含量基本稳定,从上游至下游略升高,但支流含量明显高于干流,表明干流  $\text{Si}(\text{OH})_4$  主要来源于陆地岩石的风化,西溪  $\text{Si}(\text{OH})_4$  含量在两次沿程调查中都没有出现明显的变化趋势。北溪和西溪干流上 DIN 含量的变化总体上与 DIP 类似,说明氮、磷营养盐的同源性。作为 DIN 的主要贡献者,  $\text{NO}_3\text{-N}$  的变化趋势与 DIN 基本类似。 $\text{NH}_4\text{-N}$  和亚硝酸盐 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) 含量的沿程变化与 DIN 也具有一定相似性,整体表现出从上游至下游升高的趋势。整体而言,各营养盐含量西溪高于北溪,而 10 月份低于 1 月份。

九龙江  $\text{Si}(\text{OH})_4$  含量与电导率无显著的相关性,说明九龙江中的常量离子来源与硅酸盐的自然来源不同。但在北溪和西溪河流端和全流域调查中 DIP 和 DIN 含量与电导率都具有显著的相关性,说明九龙江氮、磷营养盐与电导率有共同的来源和运移途径。其主要来源于工业和生活污水的排放以及土壤中化肥施用添加的氮、磷营养盐与常量离子的共同溶淋、冲刷。南溪的氮、磷营养盐与电导率并无显著相关性,可能与电导率同时受人为输入与岩石天然风化作用影响有关。

九龙江流域内营养盐含量的空间分布与其污染负荷(土地利用类型)的变化有密切的联系,还与北溪众多的梯级电站有关。流域内雨水中 DIP 和  $\text{Si}(\text{OH})_4$  含量极低,但 DIN 含量较高,是九龙江流域氮营养盐的一个重要来源,而雨水中的高 N/P 比也是九龙江 N/P 比较高的一个原因。

关键词: 营养盐; 九龙江; 时空变化; 通量; 人为活动; 土地利用

## Abstract

Nutrient is an essential chemical for aquatic organism. River provides an important link connecting the terrestrial and the marine ecosystem as well as key conduit for nutrient export. As the second largest river in Fujian province, the Jiulong River connects the Taiwan Strait and the developed area in southeastern Fujian with serious environment pressure.

The lowermost downstreams of the north, west and south tributaries of the Jiulong River were sampled twice a month from March 2013 to April 2014 and the whole watersheds of the north and west tributaries were also sampled in wet (25<sup>th</sup> - 26<sup>th</sup>, October 2013) and dry (19<sup>th</sup> - 21<sup>st</sup>, January 2013) seasons, respectively. High discharge appeared in wet season (May to September) while low discharge in dry season (October to April) in all tributaries during the sampling period. Comparing with the historical average daily flow, 2013 - 2014 was a wet year. The concentrations of DIN, DIP and Si(OH)<sub>4</sub> in the Jiulong River were 252 μmol/L, 4 μmol/L and 217 μmol/L (weighted average for flows) while the yields were 7.84 t N/yr/km<sup>2</sup>, 0.20 t P/yr/km<sup>2</sup> and 10.48 t Si/yr/km<sup>2</sup> respectively. The average concentration of nutrient in the west tributary was higher than the south and north tributaries. Major species of the nutrient flux were the west and north tributaries, while the nutrient yield in south was the highest. Comparing to the other rivers in the world the nutrient flux and yielded were high indicating its serious environment pressure in the Jiulong River.

Generally, the concentrations of DIN and DIP were higher in dry season than wet season due to the dilution of rainfall. The DIN concentration showed a significant difference between wet and dry seasons in all three tributaries. NO<sub>3</sub>-N was a major species of DIN although NH<sub>4</sub>-N abundance was close to NO<sub>3</sub>-N in the west tributary. DIP concentration reached maximum during high flow events induced by typhoons in the south tributary, indicating the input of non-point anthropogenic sources by the surface flushing in the watershed. No significant difference between wet and dry

seasons was found for  $\text{Si(OH)}_4$  concentration while export flux of  $\text{Si(OH)}_4$  was higher in the wet season than dry season, indicating the increase export of weathering product during high flow period.

DIP concentration in the main stem of the north tributary reduced from upstream to downstream, while a minimum DIP concentration was observed in the middle stream of the west tributary.  $\text{Si(OH)}_4$  concentration in the north tributary was somewhat stable with higher concentration in its branch tributaries comparing to the main stem, indicating weathering as a main source. However, there was no spatial variation of  $\text{Si(OH)}_4$  concentration in the west tributary on both January and October. The spatial variation of DIN was similar to DIP in the north and west tributaries. As a major contribution to DIN,  $\text{NO}_3\text{-N}$  showed a similar spatial variation to DIN, so did  $\text{NH}_4\text{-N}$ .

$\text{Si(OH)}_4$  concentration showed no significant correlation with conductivity, indicating its different sources from the major ions in the Jiulong River. However, significant correlations between conductivity and DIN as well as DIP were observed in the north and west tributaries, indicating the anthropogenic pollution is the source for both N and P nutrient and major ions. However, such significant correlations between DIN, DIP and conductivity were not observed in the south tributary, indicating conductivity might be influenced by both weathering processes and anthropogenic input.

The spatial variation of nutrient concentration in the Jiulong River watershed is influenced by the pollution loading (land-use type) as well as cascading hydropower plants in the north tributary. Meanwhile, rainfall-induced wet deposition of DIN was also an important nutrient source to the Jiulong River and partly resulted in the high N/P ratio in the Jiulong River.

**Key Words:** Nutrient; The Jiulong River; Temporal and spatial variation; Flux; Anthropogenic activities; Land-use type

## 第一章 绪论

### 1.1 营养盐与河流系统概述

河流是全球水循环重要的一环（图 1.1），也是连接陆地与海洋两大系统的重要纽带（Bianchi, et al., 2014）。陆源物质通过河流向海洋输送及其对海洋环境的影响和对气候变化的响应已逐渐成为国际上全球变化科学的重点研究领域。营养盐向海洋的输送中，河流一直扮演着至关重要的角色。河流是海洋中溶解硅和磷的主要来源，分别达到海洋总输入量的 82% 和 75% - 94%（Tréguer et al., 1995; Benitez-Nelson, 2000）。河流向海洋输送的氮也是海洋获得氮的主要途经，尤其是那些流域面积大、沿岸工农业生产密集的河流（Howarth et al., 1996; Vitousek et al., 1997; Xing and Zhu, 2002; Shen et al., 2003），陆地径流输送的总氮占 11% - 23%（Bouwman et al., 2005），其中溶解无机氮的输送量为  $2.08 \times 10^{13}$  g N/yr（Kroeze and Seitzinger, 1998）。

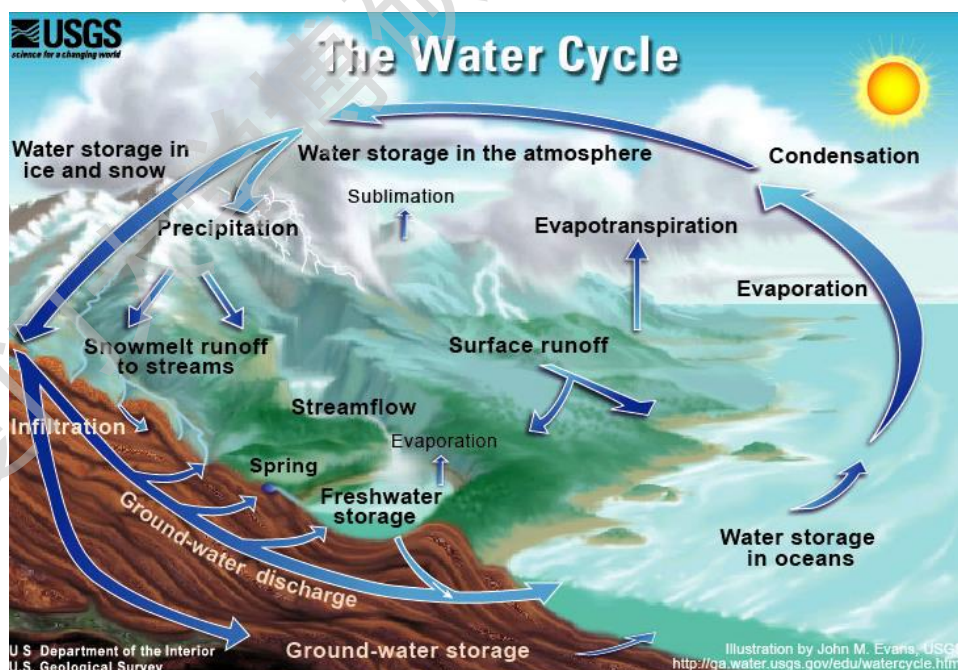


图 1.1 水循环示意图

Fig. 1.1 The water cycle

(<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>)

## 1.2 人类活动对流域营养盐的影响

天然河流的营养盐主要来自土壤和基岩的物理和化学风化及陆地生态系的生物固氮作用，因此氮、磷等营养盐含量较低（Cai et al., 2008; Guo et al., 2012; Ludwig et al., 2009; Heartsill-Scalley et al., 2007; Passell et al., 2005）。而受到近年来人类活动加剧和全球气候变化的双重影响，河流中营养盐含量及输出都明显增高。

河流流域内灌溉水源充足，地势平坦，土地相对肥沃，气候温和，适宜人类生存，利于农作物培植和生长，能够满足人们生存的基本需要，故农业往往很发达，所以河流流域成为人类文明的发源地。但随着人类文明的进步，流域内人口增长、化肥施用和牲畜养殖增多、工业和生活污水的排放以及城市建设，世界许多河流中氮、磷营养盐含量及入海通量均大幅升高（Rabalais et al., 1996; Turner et al., 2007; Alexander et al., 2007; Wang, 2006; David and Gentry, 2000），而流域内大坝建设则使水体停留时间变长（Vörösmarty et al., 1997），对溶解态硅酸盐形成截留导致河流中其含量和输出通量降低及营养盐结构的变化（Wang, 2006; Chai et al., 2009; Chen et al., 2014; Zhang et al., 1999）。人类的城市建设和农业活动会加剧土壤风化，同时形成城市、工业等点源污染及农业非点源污染。流域内各种人类活动强烈地冲击着河流原有的生物地球化学过程（Degens et al., 1991）。

据报道，约 50% 的世界人口聚集在离岸 100 km 内的地区，而预计到 2050 年则会达到 75%（Tilman et al., 2001）。而人口的增长势必对环境造成巨大压力，如密西西比河氮、磷营养盐含量自 1960 年代至 1990 年代分别增长了 2 - 3 倍，但硅酸盐含量则下降了约 50%（Rabalais et al., 1996），相应地其对墨西哥湾的氮、磷营养盐输出通量也大幅增加（Turner et al., 2007），Alexander et al.（2007）认为其输送主要与农业生产（氮、磷分别为 66% 和 43%）和城市生活污水（氮、磷分别为 9% 和 12%）有关。美国伊利诺斯州内各流域化肥施用的氮、磷输出自 1950 年代年至 20 世纪末分别增长了约 20 倍和 15 倍（David and Gentry, 2000）。同样的，长江氮、磷营养盐含量自 1960 年至 2005 年均增长了近 10 倍而硅酸盐含量则下降了约 3 倍（Wang, 2006），而三峡大坝的建设则导致了硅氮比（Si/N）自 2002 年的 2.7 降低至 2006 年的 1.3，同时氮磷比（N/P）则从 22.1 增加至 80.3

(Chai et al., 2009), Zhang et al. (1999) 则早在上世纪末通过模型计算预测了 2010 年长江地区 N/P 比会因三峡大坝而上升至 300 - 400。

同时随着全球 CO<sub>2</sub> 含量不断上升(图 1.2), 诸如厄尔尼诺等极端异常气候近年来不断上演(Xu et al., 2013; 冯利华, 2001), 其会直接导致干旱、暴雨、山洪等极端事件, 这将对河流营养盐的形态及其输出过程产生明显改变(Tesi et al., 2013; Mengistu et al., 2013; 黄金良等, 2004) 进而影响河流生态系统, 河水通量的显著改变则会影响营养盐的输出通量(Chen et al., 2012; Cai et al., 2013)。

尽管人类正在给世界上的河流带来重大影响, 但不同流域之间以及流域内不同区域之间的社会经济情况及流域自身特性决定了其差异性(Howarth et al., 1996; Caraco and Cole, 1999; Stedmon et al., 2006; Chen et al., 2008), 因此对某个具体流域及其子流域进行系统研究并对比分析是了解此流域内营养盐生物地球化学循环的重要手段。

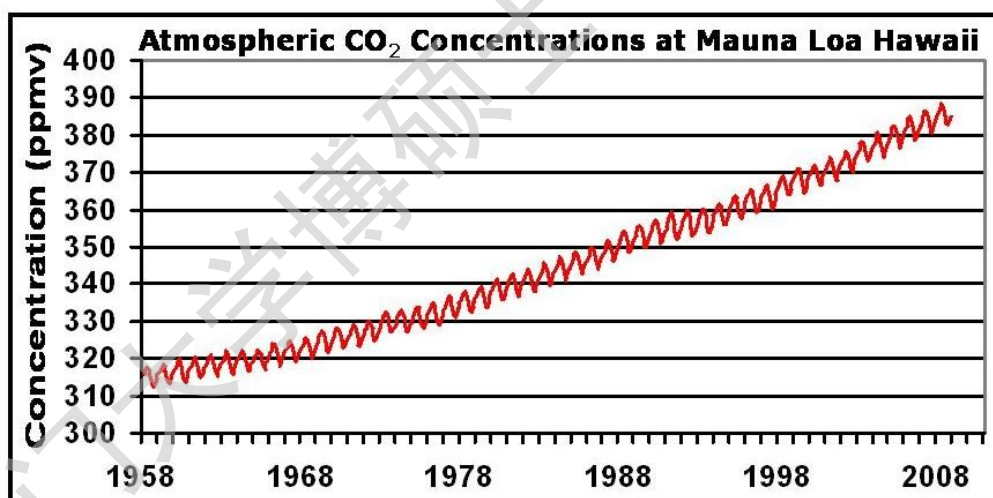


图 1.2 全球 CO<sub>2</sub> 含量变化

Fig. 1.2 Variations of global CO<sub>2</sub>

(<http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/graphics/SIOMLOINSITUTHRU2008.JPG>)



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.