

学校编码: 10384

密级\_\_\_\_\_

学号: 33120141151720

廈門大學

硕士学位论文

厦门市非常规水资源的利用策略与保障措施

Utilization Strategies and Indemnificatory Measures of  
Unconventional water resources in Xiamen

刘芳

指导教师姓名: 薛雄志 教授

专业名称: 环境管理

论文提交日期: 2017年4月

论文答辩时间: 2017年5月

2017年5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( 薛雄志教授 )课题(组)的研究成果,获得( 薛雄志教授 )课题(组)经费或实验室的资助,在( 薛雄志教授 )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

---

## 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 非常规水资源的概念及分类.....	1
1.2.1 非常规水资源的概念.....	1
1.2.2 非常规水资源的分类.....	2
1.3 研究目的与意义.....	4
1.4 研究内容和方法.....	4
1.4.1 研究内容.....	4
1.4.2 研究方法.....	5
第 2 章 厦门市水资源现状分析.....	7
2.1 厦门市基本情况.....	7
2.1.1 自然地理.....	7
2.1.2 社会经济.....	7
2.1.3 人口规模.....	7
2.2 厦门市水资源概况.....	8
2.2.1 降雨量.....	9
2.2.2 地表水总量.....	10
2.2.3 地下水总量.....	10
2.2.4 水资源总量.....	11
2.3 厦门市水资源供给情况.....	12
2.3.1 供水现状.....	12
2.3.2 本地地表水资源情况.....	13
2.3.3 区域外调水情况.....	14
2.3.4 地下水取水井情况.....	15

2.3.5 饮用水源地.....	16
2.3.6 水质情况.....	16
2.4 厦门市水资源利用情况.....	18
2.4.1 用水现状.....	18
2.4.2 用水指标分析.....	19
2.5 厦门水资源开发利用存在的问题.....	20
<b>第 3 章 厦门市水资源系统动力学模型</b> .....	<b>23</b>
3.1 系统动力学.....	23
3.1.1 系统动力学简介.....	23
3.1.2 系统动力学特点.....	23
3.1.3 系统动力学建模步骤.....	24
3.1.4 模型变量的类型.....	25
3.1.5 模型参数的确定.....	25
3.2 模型的构建.....	25
3.2.1 模型系统结构分析.....	26
3.2.2 模型系统流程图.....	27
3.2.3 模型原因树图.....	29
3.2.4 模型中各子系统参数的确定.....	30
3.2.5 模型方程.....	40
3.3 模型检验.....	41
3.4 模型结果分析.....	42
<b>第 4 章 厦门市非常规水资源的利用策略</b> .....	<b>46</b>
4.1 雨水利用.....	46
4.1.1 厦门市雨水利用基础.....	46
4.1.2 国外雨水利用现状.....	46
4.1.3 国内雨水利用现状.....	49
4.1.4 厦门市雨水利用存在的问题.....	50
4.1.5 厦门市雨水利用策略.....	52

---

4.1.6 雨水利用效益.....	54
4.2 中水回用.....	55
4.2.1 厦门市中水回用基础.....	55
4.2.2 国外中水回用现状.....	55
4.2.3 国内中水回用现状.....	57
4.2.4 厦门市中水回用存在的问题.....	59
4.2.5 厦门市中水回用策略.....	61
4.2.6 中水回用效益.....	61
4.3 海水淡化.....	62
4.3.1 厦门市海水淡化基础.....	62
4.3.2 国外海水淡化现状.....	62
4.3.3 国内海水淡化现状.....	64
4.3.4 厦门市海水淡化存在的问题.....	66
4.3.5 厦门市海水淡化策略.....	67
4.3.6 海水淡化效益.....	67
4.4 厦门市利用非常规水资源的保障措施.....	68
4.5 小结.....	71
<b>第 5 章 总结与展望</b> .....	<b>72</b>
5.1 主要研究成果.....	72
5.2 不足与展望.....	73
参考文献.....	75
致谢.....	79

---

## Table of Contents

<b>Abstract (in Chinese)</b> .....	I
<b>Abstract (in English)</b> .....	III
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 Background</b> .....	1
<b>1.2 The Concept and Classification of Unconventional Water Resources</b> .....	1
1.2.1 The Concept of Unconventional Water Resources .....	1
1.2.2 The Classification of Unconventional Water Resources.....	2
<b>1.3 Research Purpose and Meaning</b> .....	4
<b>1.4 Research Contents and Methods</b> .....	4
1.4.1 Research Contents.....	4
1.4.2 Research Methods .....	5
<b>Chapter 2 Water Resources Status in Xiamen</b> .....	7
<b>2.1 Overview of Xiamen</b> .....	7
2.1.1 Natural Environment of Xiamen.....	7
2.1.2 Social Enconomic of Xiamen .....	7
2.1.3 Population of Xiamen .....	7
<b>2.2 Water Resources of Xiamen</b> .....	8
2.2.1 Rainfull in Xiamen.....	9
2.2.2 Surface Water Resources of Xiamen.....	10
2.2.3 Goundwater Resources of Xiamen .....	10
2.2.4 Total Water Resources of Xiamen.....	11
<b>2.3 Water Supply in Xiamen</b> .....	12
2.3.1 The Current Status of Water Supply in Xiamen.....	12
2.3.2 Surface Water Supply of Xiamen.....	13
2.3.3 Water Transfer .....	14
2.3.4 Goundwater Well .....	15

---

2.3.5 Drinking Water.....	16
2.3.6 Water Quality .....	16
<b>2.4 Water Resources Utilization in Xiamen .....</b>	<b>18</b>
2.4.1 The Current Status of Water Utilization in Xiamen.....	18
2.4.2 The Water Consumption of Xiamen .....	19
<b>2.5 Problem of Water Resources Utilization in Xiamen .....</b>	<b>20</b>
<b>Chapter 3 System Dynamic Model of Water Resources in Xiamen...</b>	<b>23</b>
<b>3.1 System Dynamic .....</b>	<b>23</b>
3.1.1 Introduction of System Dynamic .....	23
3.1.2 Characteristic of System Dynamic.....	23
3.1.3 Process to Build System Dynamic.....	23
3.1.4 Type of Variable of System Dynamic .....	25
3.1.5 Methods of Determination of Model Parameters.....	25
<b>3.2 Construction of System Dynamic Model of Water Resources in Xiamen</b> <b>.....</b>	<b>25</b>
3.2.1 Structural Analysis of System Dynamic Model.....	26
3.2.2 Flow Chart of System Dynamic Model .....	27
3.2.3 Causes Tree of System Dynamic Model.....	29
3.2.4 Determination of Model Parameters.....	30
3.2.5 Model Equation.....	40
<b>3.3 Model Test.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4 Analysis of Model Results.....</b>	<b>42</b>
<b>Chapter 4 Utilization Strategies and Indemnificatory Measures of</b> <b>Unconventional water resources in Xiamen .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1 Rainwater Utilization.....</b>	<b>46</b>
4.1.1 Foundation of Rainwater Utilization in Xiamen.....	46
4.1.2 Experience of Rainwater Utilization Abroad .....	46
4.1.3 Experience of Domestic Rainwater Utilization .....	49



Table of Contents

---

4.1.4 Problem of Rainwater Utilization in Xiamen .....	50
4.1.5 Utilization Strategies of Rainwater in Xiamen .....	52
4.1.6 Benefit of Rainwater Utilization.....	54
<b>4.2 Rejuvenated Water Reuse .....</b>	<b>55</b>
4.2.1 Foundation of Rejuvenated Water Reuse in Xiamen .....	55
4.2.2 Experience of Rejuvenated Water Reuse Abroad .....	55
4.2.3 Experience of Domestic Rejuvenated Water Reuse.....	57
4.2.4 Problem of Rejuvenated Water Reuse in Xiamen.....	59
4.2.5 Strategies of Rejuvenated Water Reuse in Xiamen.....	61
4.2.6 Benefit of Rejuvenated Water Reuse .....	61
<b>4.3 Sea Water Desalination.....</b>	<b>62</b>
4.3.1 Foundation of Sea Water Desalination in Xiamen.....	62
4.3.2 Experience of Sea Water Desalination Abroad .....	64
4.3.3 Experience of Domestic Sea Water Desalination.....	65
4.3.4 Problem of Sea Water Desalination in Xiamen.....	66
4.3.5 Strategies of Sea Water Desalination in Xiamen .....	67
4.3.6 Benefit of Sea Water Desalination .....	67
<b>4.4 Measure of unconventional water resources in Xiamen.....</b>	<b>68</b>
<b>4.5 Summary of Chapter 4 .....</b>	<b>71</b>
<b>Chapter 5 Summary and Prospect .....</b>	<b>72</b>
5.1 Achievement of the Research .....	72
5.2 Shortcomings and Prospect.....	73
<b>Reference.....</b>	<b>75</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>79</b>

## 摘要

水资源是重要的自然资源，关乎民生发展。随着经济发展、人口增长、城市规模扩张，城市对水资源的需求逐年增加，供需矛盾突出。在全球传统水资源匮乏的背景下，充分利用非常规水资源已成为缓解城市用水压力的重要手段。非常规水资源（也称为非传统水资源）是指区别于一般意义上的地表水、地下水的水源，包括雨水、中水、海水、微咸水等，这些水源的特点是经过处理后可以再生利用，在一定程度上可以替代常规水资源。厦门市淡水资源极其短缺，人均水资源占有量为  $343.3 \text{ m}^3$ ，仅为福建省人均量的 10%，城市供水水源 60% 以上来自区域外调水，现有水资源赋存量已难以满足城市未来用水需求。

本文对厦门市的水资源现状进行分析，并建立厦门市水资源系统动力学模型预测分析厦门市水资源供需趋势，以此分析厦门市开发利用非常规水资源的必要性及潜力。基于非常规水资源利用的水资源配置，根据非常规水资源的特点，纵观国内外开发利用现状，结合厦门市的实际情况，对厦门市开发利用非常规水资源三种主要方式：雨水利用、中水回用及海水淡化进行研究分析，提出利用策略及保障措施，促进水资源可持续利用。

本文的研究成果主要包括：

分析总结了厦门市水资源供给情况、利用情况及水质情况，厦门市在水资源开发利用中存在以下几点问题：本地水资源极为贫乏，水资源对外依存度高，本地应急备用水源不足，供水水质难以保障；同时，尚未建立起协调高效的水资源管理体制，无法实现水资源的合理开发和集约利用。

结合厦门市的实际情况，以可持续利用为原则，从水资源的供给和需求两个方面进行描述，建立了以 2005 年为基准，边界到 2030 年的厦门市水资源系统动力学模型，以现状发展模式模拟结果显示：厦门市现有的以区域外调水为主的供水模式暂时能满足 2020 年的用水需求，但在 2030 年缺水总量将达到  $4.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，缺水率超过 30%。可见，在现有的主要集中于常规水资源开发利用的模式下，常规水资源充分开发利用仍旧无法满足将来的用水需求。为了保障厦门市水安全，促进厦门市社会经济的可持续发展，大力开发利用非常规水资源是厦门市

水资源得以长期安全保障的根本途径。

对厦门市开发利用非常规水资源三种主要方式：雨水利用、中水回用及海水淡化进行研究分析，提出利用策略及保障措施，提出通过工程体系建设、完善政策法规、强化监督管理、改进技术标准和宣传等措施来推动非常规水资源的开发利用，为厦门市开展非常规水资源开发提供了参考。

**关键词：**厦门；非常规水资源；系统动力学；利用策略；保障措施

## **Abstract**

Water resources play an important role in social, demographic and economic development. With the economic development, population growth and expansion of city scale, more and more water resources are needed. There is an increasing demand on water resources, a gradual increase in supply as well. Based on the background of global water scarcity, make full use of unconventional water resources has become an important means to alleviate urban water pressure. Unconventional water resources (non-traditional water resources) are different from the traditional water sources of surface water and groundwater, which including rainwater, rejuvenated water, sea water and brackish water. These water can be recycled after treatment, then replace part of the conventional water resources. There is an extremely shortage of fresh water resources in Xiamen, water resources per capita is just 343.3 cubic meters, which is 10% less than the average per capita water capacity in Fujian Province. More than 60% of the municipal water supply comes from water transfer of Jiulong River. It is difficult to meet the future water demand of water resources in Xiamen.

This study analyzed the current situation of water resources in Xiamen, and established the system dynamic model of water resources to analyze and forecast the trend of water supply and demand in Xiamen. The results showed that it is necessary to develop and utilize unconventional water resources in Xiamen.

The development and utilization of unconventional water resources in Xiamen were analyzed in three main ways: rainwater utilization, reclaimed water reuse and seawater desalination. According to the characteristic, method, technique, equipment and water quality, and combined with actual situation of Xiamen and the present situation of development and utilization on domestic and overseas, this study brought forward the strategies of unconventional water resources exploitation and utilization. The main outcomes and results of are as follows:

This study analyzed and summarized water resources supply and demand present situation, utilization and water quality in Xiamen. There are many problems in the development and utilization of water resources in Xiamen, including the shortage of local freshwater resources and emergency water supply, high dependence on regional water transfer, unstable water quality and a lack of coordinated and efficient water resources management system. Those make it difficult to develop and utilize water resources reasonably.

The system dynamics model for the sustainable utilization of water resources of Xiamen is established considering the water supply and demand from 2005 to 2030. It was based on the principle of sustainable development and combined with the actual situation of Xiamen. The model was simulated with the current situation of Xiamen and the results showed that the water supply pattern mainly depend on regional water transfer can just meet the water demand in 2020. However there will be 4.77 million cubic meters total water shortage in 2030 and the rate of water shortage will exceed 30%. Accordingly, the water supply pattern is unable to meet future water demand if it mainly focused on the development and utilization of conventional water resources. It was concluded that development and utilization of unconventional water resources is the fundamental way to ensure the long-term security of water resources and the sustainable development of Xiamen.

This study brought forward the strategies of unconventional water resources exploitation and utilization of rainwater utilization, reclaimed water reuse and seawater desalination. These strategies to promote the development and utilization of unconventional water resources include construction of system engineering, improving policies and regulations, strengthening supervision and management, improving of technical regulations and standards system, doing advocacy work and so on.

**Key words:** Xiamen; Unconventional water resources; System dynamics; Utilization

strategies; Indemnificatory measures

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景

水资源作为重要的自然资源，是促进可持续发展的基础，是发展社会经济和维护生态环境不可或缺的。目前全球淡水资源匮乏，各国已经针对非常规水资源开展了多种形式的开发利用。厦门市虽是南方的沿海城市，但水资源却严重短缺，随着人口增长、经济发展和城市规模不断扩张，厦门市对水资源的需求逐年增加。因此，对常规水资源十分匮乏的厦门市来说，在充分利用常规水资源的基础上，开发和利用非常规水资源是化解水资源危机的一个重要途径。非常规水资源的开发利用能够增加淡水资源供应量，对于缓解水资源供应紧张状况具有不可替代的重要作用。

但目前厦门市对非常规水资源的合理开发利用尚未重视，对其在社会、经济、环境等各方面的效益认识不足，导致各种形式的非常规水资源未得以充分的开发和利用。尽管厦门市部分规划有提到雨水利用、中水回用、海水淡化利用，但没有明确的工程项目建设目标，只是作为鼓励性的建议。此外，厦门市也没有专项的规划和标准，这对厦门市非常规水资源利用十分不利。因此，本文将从厦门市水资源的现状入手，建立厦门市水资源系统动力学模型预测水资源供需情况，以此分析厦门市开发利用非常规水资源的必要性及潜力，并提出利用策略和保障措施，以推动非常规水资源的开发利用。

### 1.2 非常规水资源的概念及分类

#### 1.2.1 非常规水资源的概念

非常规水资源（也称为非传统水资源）是区别于常规水资源（传统水资源）而言的，与一般意义上的地表水、地下水的水源不同，特指那些原本不能直接利用，但经过处理后可以再生利用的水资源，包括雨水、中水、海水、微咸水等，在一定程度上可以替代常规水资源，在全球各国传统水资源贫乏的背景下，非常规水资源的利用情况已经成为衡量一个城市水资源开发利用水平的重要指标，充分利用非常规水资源利用已经成为解决城市缺水问题的重要途径，也是区域水资

源配置工作中的重要组成部分<sup>[1]</sup>。

若将雨水、中水、海水等非常规水资源进行开发利用并纳入城市整体规划设计，不仅有利于提高水资源利用效率和经济效益，优化区域水资源利用的布局；而且有利于建设节水型社会、减少水环境污染、改善城市水环境和生态环境，创造出多功能的水域空间和景观<sup>[2,3]</sup>。

### 1.2.2 非常规水资源的分类

目前，根据非常规水资源的不同的收集途经，可以分为如下几类。

#### (1) 雨水

雨水主要是指城市雨洪水的利用<sup>[4]</sup>。城市雨洪水的利用是指通过利用城市的建筑物、道路、市政管网、绿地和水体等采用各类有针对性的技术手段和工程措施对雨水资源进行开发和利用，主要包括以下几类：通过对雨水的收集、储存和净化后的直接利用；通过各种自然或人工水体、低洼地或湿地对雨水径流实施调蓄、净化和利用；通过各种自然或人工渗透设施增强雨水的下渗，补充地下水资源<sup>[5]</sup>。

在我国大部分地区降雨形成的大量径流一般都是汇集到雨水管道或沟渠，直接排放，没有加以利用。现阶段我国在这方面的研究和实践尚在起步阶段，但于近年来提出了“海绵城市”这一概念，开始关注雨水下渗、净化和集蓄利用，注重雨水处理措施及场地建设。

在城市中汇集的雨水有毒物质含量较低，经过简单沉淀处理就可以用于绿地灌溉、道路清洗、消防、冲厕等<sup>[6,7]</sup>。而随着城市绿化覆盖率日益增加，绿地灌溉、道路清洗等用水量将大大增加，城市雨水的开发利用显得十分必要<sup>[8]</sup>。

雨水的优点是再生速度快、季节性和区域性差异较强。可以说雨水是再生速度最快的水资源，平均的降水周期仅 10 日左右，而位于深层的地下水的再生周期则长达千年，因此，雨水资源是可以持续利用的<sup>[9]</sup>。充分利用雨水资源不仅可以节约水资源和缓解城市水土流失和内涝，可以减少水体污染和改善城市生态环境，兼具社会效益、经济效益和环境生态效益<sup>[10]</sup>。

#### (2) 中水

中水（再生水）是指经过处理过的生活污水和工业废水，是现有水源中较为



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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.

厦门大学博硕士论文摘要库