

学校编码:10384

密级_____

学 号:33120141151682

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

海桑属两种红树植物水分利用研究

Water use characteristics of two *Sonneratia* mangrove species

赵何伟

指导教师姓名:陈鹭真 副教授

专业名称:生态学

论文提交日期:2017 年 5 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

本人提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(陈鹭真副教授)课题(组)的研究成果,获得(国家自然科学基金项目41476071和31270581)课题(组)经费或实验室的资助,在(翔安校区金泉楼B417)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

目录.....	I
Contents	I
摘要.....	I
Abstract	I
第一章 前言.....	1
1.1 红树植物的水分利用.....	1
1.2 植物蒸腾耗水量的研究方法.....	3
1.3 红树植物碳-水关系的研究	6
1.4 红树植物水分利用与环境因子的关系.....	7
1.4.1 环境因子对红树植物水分利用的影响.....	7
1.4.2 极端气候事件(低温事件)对于红树植物水分利用的影响.....	8
1.5 红树植物茎流速率径向分布格局及其结构基础.....	9
1.6 研究内容.....	13
第二章 实验地点和实验方法.....	14
2.1 实验地点.....	14
2.2 茎流仪及小型气象站的安装.....	15
2.3 木质部解剖实验.....	17
2.3.1 采集实验材料(木芯).....	17
2.3.2 切片观察.....	17
2.4 冷害情况调查.....	18
2.4.1 枝条落叶百分比.....	18
2.4.2 叶片健康指数(F_v/F_m)	19
2.5 结合植物茎流与 ^{13}C 分馏估算海桑属两种红树植物总初级生产力	19
2.5.1 叶片同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定	19
2.5.2 大气气体同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定	19
2.5.3 大气 CO_2 浓度测定	20
2.5.4 总初级生产力计算.....	20
2.6 数据处理和分析.....	20

2.7 研究技术路线.....	21
第三章 实验结果.....	22
3.1 海桑属两种红树植物的耗水量.....	22
3.1.1 海桑属两种红树植物日整树耗水量变化.....	22
3.1.2 海桑属两种红树植物不同季节整树耗水量.....	23
3.2 茎流速率与环境因子的关系.....	24
3.2.1 茎流速率与环境因子的相关关系.....	24
3.2.2 不同季节茎流速率、饱和水汽压差和茎流速率的日变化.....	25
3.3 海桑属两种红树植物总初级生产力.....	28
3.4 冷害胁迫对两种红树植物水分利用的影响.....	29
3.4.1 冷害胁迫对两种红树植物叶片的影响.....	29
3.4.2 冷害对两种红树植物水分利用的影响.....	32
3.5 海桑、无瓣海桑木材解剖结构特征和茎流速率径向分布格局.....	36
3.5.1 茎流速率径向分布格局.....	36
3.5.2 不同深度木质部解剖特征.....	38
第四章 分析与讨论.....	41
4.1 海桑属两种红树植物水分利用策略对于海岸潮间带环境的适应.....	41
4.2 海桑属两种红树植物总初级生产力（碳同化量）的分析.....	42
4.3 海桑属两种红树植物水分利用情况对于极端气象事件(冷害)的响应.....	43
4.3.1 叶片受损与水分利用降低的恶性循环过程.....	43
4.3.2 冷害对茎流速率与气象因子响应情况的改变.....	43
4.3.3 红树林造林种的选择.....	44
4.4 基于木质部解剖特征对茎流速率径向衰退原因的分析.....	45
4.4.1 海桑属两种红树植物茎流速率径向分布格局.....	45
4.4.2 木质部解剖特征对于茎流速率径向分布格局的影响.....	46
4.4.3 耗水量的估算方法的比较.....	48
第五章 结论与展望.....	50
5.1 结论.....	50
5.2 展望.....	50

参考文献.....	52
攻读硕士期间发表的论文.....	62
致谢.....	63

厦门大学博硕士论文摘要库

Contents

Contents (in Chinese)	I
Contents (in English)	I
Abstract (in Chinese)	I
Abstract (in English)	I
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Water use of mangroves	1
1.2 Application of thermometric methods in mangrove water use study	3
1.3 Water use and carbon uptake of mangroves	6
1.4 Factors that influence water use of mangroves	7
1.4.1 Environmental factors that influence water use of mangroves.....	7
1.4.2 Chilling injury to water use of mangroves.....	8
1.5 Anatomical explanations for acute depressions in radial sap flow	9
1.6 Research content	13
Chapter 2 Site and methods	14
2.1 Site	14
2.2 Installation of sap flow machine and meteorological station	15
2.3 Wood anatomy	17
2.3.1 Collection of wood cores	17
2.3.2 Anatomical observations.....	17
2.4 Investigation of chilling injury	18
2.4.1 Leaf loss	18
2.4.2 Leaf health index (F_v/F_m)	19
2.5 CO₂ uptake estimated from sap flow measurements and stable carbon isotope discrimination	19
2.5.1 Carbon isotope ratios of the leaf samples	19
2.5.2 Carbon isotope ratios of the air samples	19
2.5.3 Measurement of atmosphere CO ₂ concentration	20

2.6 Statistical analysis	20
2.7 Technique framework of present study	21
Chapter 3 Results	22
3.1 Water use of two <i>Sonneratia</i> mangrove species	22
3.1.1 Seasonal variation in diurnal whole-plant water use	22
3.1.2 Whole-plant water use in different seasons	23
3.2 Relationships between sap flow densities and meteorological factors	24
3.2.1 Relationships between sap flow densities and meteorological factors.....	24
3.2.2 Diurnal patterns of J_s , PAR and VPD in different season	25
3.3 Carbon uptake of two <i>Sonneratia</i> mangrove species	28
3.4 Chilling injury to two <i>Sonneratia</i> mangrove species	29
3.4.1 Chilling injury to leaves of mangroves	29
3.4.2 Chilling injury to water use.....	32
3.5 Radial patterns of sap flow densities and anatomical characteristics of two <i>Sonneratia</i> mangrove species	36
3.5.1 Radial patterns of sap flow densities	36
3.5.2 Anatomical characteristics	38
Chapter 4 Analysis and discussion	41
4.1 Adaptation of water use characteristics to coastal environments	41
4.2 Carbon uptake of two <i>Sonneratia</i> mangrove species	42
4.3 Respond of water use characteristics to chilling injury	43
4.3.1 Vicious circle between decline in water use and leaf loss	43
4.3.2 Chilling injury changed how water use characteristics respond to environmental factors.....	43
4.3.3 Suggestions to afforestation	44
4.4 Anatomical explanations for acute depressions in radial sap flow	45
4.4.1 Radial patterns of of two <i>Sonneratia</i> mangrove species.....	45
4.4.2 Anatomical explanations for acute depressions in radial sap flow	46
4.4.3 Estimation of water use in two <i>Sonneratia</i> mangrove species	48

Chapter 5 Conclusions and perspectives	50
5.1 Conclusions	50
5.2 Perspectives	50
References	52
The papers published during Master Degree	62
Acknowledgements	63

厦门大学博硕士论文摘要库

摘要

红树林生长在热带、亚热带海岸潮间带。虽然海水充沛，但高盐度的海水使得土壤孔隙水水势极低，这在很大程度上限制了红树植物对水分的吸收，造成红树植物生理干旱的现象。红树植物大都采取了相同的水分利用策略，就是在节约用水的同时，最大程度地吸收水分。对红树植物的水分利用特征的研究是认识红树植物适应潮间带高盐及淹水胁迫的关键。本研究利用热扩散式茎流仪和微型气象站，在 2015 - 2016 年期间对深圳福田红树林自然保护区(22° 31'N, 114° 0'E)内的两种同龄的海桑属红树植物，无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)和海桑(*Sonneratia caseolaris*)的茎流速率以及样地的气象因子进行监测，分析气象因子对于植物茎流速率的影响，以及极端气象事件(冷害)对红树植物水分利用的影响。同时，调查茎流速率的空间分布格局，并通过木质部解剖特征解释空间分布格局产生的原因。另外，结合植物水分利用与稳定同位素分馏，对两种红树植物的总初级生产力进行估算。主要的结果和结论如下：

- 1、与陆地植物对比，海桑、无瓣海桑水分利用相对保守。无瓣海桑在红树植物中较为适应潮间带高盐、淹水的环境，在区域的水分收支中具有较大的影响力。无瓣海桑群落总初级生产力与海桑群落相比无显著差异。
- 2、光合有效辐射是海桑、无瓣海桑蒸腾作用最主要的驱动因子。冷害事件使得海桑属两种红树植物大面积落叶、蒸腾耗水量下降、对环境因子的响应情况发生改变。无瓣海桑在冷害事件中显示出一定的抵抗能力。
- 3、由于纹孔堵塞情况不同，导致了两个物种不同的茎流速率径向分布格局。较低的径向阻力使得无瓣海桑茎流速率的径向衰减幅度较小，无瓣海桑具有更好的水分利用策略。在估算耗水量的过程中，缺乏调查茎流速率的空间分布格局，导致了无瓣海桑的林段耗水量高估 55%，海桑的林段耗水量高估 51%。

关键词:红树林；木材解剖；茎流；冷害；水分利用；总初级生产力

Abstract

Mangroves are plants grown in tropical and subtropical tidal wetlands. Saline environment is a physiological obstacle for mangroves because water uptake is more energy-consuming under the extremely negative water potential of the seawater. Mangroves have developed very particular water use strategies in order to survive in highly saline and anaerobic environments, often resulting in efficient water use. Water use by trees in such saline environment has always been considered as a key process for understanding the special life traits of mangroves. Herein, we first studied water use characteristics of two mangrove species with same age, *Sonneratia apetala* and *Sonneratia caseolaris*, growing in intertidal environments in China, from 2015 to 2016, using sap flow machine and meteorological station. We also investigated how the chilling injury event influenced water use characteristics of *S. apetala* and *S. caseolaris*. We investigated radial patterns of sap flow densities of *S. apetala* and *S. caseolaris* and tried to explain it with anatomical characteristics. We estimated carbon uptake of *S. apetala* and *S. caseolaris* using sap flow measurements and stable carbon isotope discrimination. Main results and conclusions are listed below.

1. Whole-tree water use of *S. apetala* and *S. caseolaris* was relatively conservative compared to terrestrial tree species. In contrast, water use of them represents the higher end of what has been reported in the literature in comparison with mangroves species. *S. apetala* had the higher whole tree water use than *S. caseolaris*, which may explain why *S. apetala* might be more competitive along the Chinese coast and indicating that *S. apetala* had a greater influence on local area water budget than *S. caseolaris*. There was no significant difference in gross primary production between *S. apetala* and *S. caseolaris* plantations.

2. There were strong relationship among meteorological factors and sap flow densities of *S. apetala* and *S. caseolaris*, including photosynthetically active radiation, atmospheric temperature, soil temperature, vapor pressure deficit and relative

humidity. Chilling injury changed how sap flow densities of *S. apetala* and *S. caseolaris* responded to photosynthetically active radiation and caused a higher leaf loss in *S. caseolaris* than in *S. apetala* and a significant decline of water uptake in *S. caseolaris*.

3. Higher radial resistance in sapwood of *S. caseolaris* caused a steeper decline of sap flow density radially in *S. caseolaris* than in *S. apetala*. Furthermore, *S. apetala* had more percentage of sapwood area remained hydro-active than *S. caseolaris* which may indicated that *S. apetala* had a better water use regime than *S. caseolari*. Results showed that about 55% and 51% of water use could be overestimated if acute radial reductions in sap flow were not considered, corresponding to average discrepancies in stand water use of 5.6 mm d⁻¹ for *S. apetala* and 2.5 mm d⁻¹ for *S. caseolaris*.

Key words: Mangroves; Wood anatomy; Sap flow; Chilling injury; Water use; Gross primary production

第一章 前言

1.1 红树植物的水分利用

植物的生理活动对水有着较大的需求量,水是所有植物生理活动过程中最为关键的因子之一。植物在光合作用的过程中,空气中的 CO_2 通过开放的气孔进入植物体,被植物吸收;同时,水分经由气孔蒸腾到大气中。因此,更高的蒸腾耗水量意味着植物光合作用更加强烈。植物通过根部吸收水分,通过维管组织向上传导,最终经由叶片蒸腾到大气。陆地植物吸收的水分,约 95% 通过蒸腾作用散失到体外,仅有 1%–5% 的水分用于代谢活动,留在生物量中的约 1%。蒸腾作用是植物能量平衡的主要组成部分。随着水分从叶片表面蒸发,叶片冷却。缺少蒸腾作用,叶片温度可迅速上升导致叶片死亡。同时,参与代谢活动以及留在植物体内的水分虽然占植物吸收水分的比例较小;但这部分的水对植物生理过程尤为重要,植物一切正常生命活动过程都必须在含有一定量水分的条件下进行^[1, 2]。

红树林生长在热带、亚热带海岸潮间带^[3]。虽然海水充沛,盐渍的生境使得土壤孔隙水水势极低,这在很大程度上限制了红树植物对水分的吸收,造成红树植物生理干旱的现象^[4, 5]。红树植物通过一系列的生理适应机制来调节水分平衡,在节约用水的同时,最大程度地吸收水分^[6, 7]。红树植物节水的策略包括:气孔凹陷减少水分散失^[8]、调节叶片角度避免阳光直射^[9, 10]、叶片变小变厚^[9]且角质化^[11]、非叶片结构吸收 CO_2 ^[12]、叶被密生绒毛以减少水分蒸发^[13]等等。而在节水的同时,红树植物的正常存活仍然需要保持足够的水分供应。红树植物通过维持较高的渗透势来吸收水分^[14, 15]。红树植物的根系可以延伸到盐分浓度较低的土壤吸收水分^[16], 并可以利用地下水、雨水、河水等淡水资源^[17–21]。

红树植物水分利用通常认为较为保守,可以在光合作用的过程中保持较低的蒸腾速率,具有较高的水分利用效率(water use efficiency, WUE)^[22]。我们在 Krauss 等^[22]和 Wullshleger 等^[23]的综述基础上,将使用热技术研究植物整树耗水量的研究汇总于表 1–1 中。由表可知,红树植物的整树耗水量与非红树植物相比属于较低的水平,红树植物水分利用相对比较保守,水分蒸腾耗水量较低。了解红树植

物的水分利用特征是理解红树植物对潮间带高盐及淹水胁迫适应的关键因素^[6, 24]。

表 1-1 用热技术方法测定红树植物与其他植物单株树木蒸腾耗水量的比较
Table 1 - 1 Comparison of whole-plant water use among mangrove and other plants as reported by studies using thermometric methods.

红树植物 Mangrove species	直径 Diameter (cm)	蒸腾耗水量 Water use (kg H ₂ O tree ⁻¹ d ⁻¹)	参考文献 Reference
萌芽白骨壤 <i>Avicennia germinans</i>	11.8–15.6	3.2–5.3	[24]
	23.7–24.3	11.5–30.8	[24]
	43.9–46.6	40.8–64.1	[24]
	5.1–15.0	0.5–2.4	[25]
	15.1–25.0	5.1–9.6	[25]
	25.1–35.0	8.7–18.5	[25]
秋茄 <i>Kandelia obovata</i>	2–4	0.14–0.19	[27]
	4–8	0.94–1.45	[27]
	8–10	1.96–3.43	[27]
拉贡木 <i>Laguncularia racemosa</i>	5.1–15.0	1.9–7.2	[27]
	15.1–25.0	11.8–24.9	[27]
	25.1–35.0	19.1–30.5	[27]
美洲大红树 <i>Rhizophora mangle</i>	5.1–15.0	1.0–6.8	[27]
	15.1–25.0	5.1–6.6	[27]
非红树植物 Other species	直径 Diameter (cm)	蒸腾耗水量 Water use (kg H ₂ O tree ⁻¹ d ⁻¹)	参考文献 Reference
冷杉 <i>Abies amabilis</i>	40	98	[28]
金合欢 <i>Acacia dealbata</i>	25	59	[29]
欏如树 <i>Anacardium excelsum</i>	102	379	[30]
卡瑞帕 <i>Carapa procera</i>	38	52	[31]
美国山核桃 <i>Carya illinoensis</i>	8	123	[32]
油桃木 <i>Caryocar glabrum</i>	26	48	[27]
天蚕长柄双花木 <i>Cecropia longipes</i>	20	47	[30]

续表 1-1

非红树植物 Other species	直径 Diameter (cm)	蒸腾耗水量 Water use (kg H ₂ O tree ⁻¹ d ⁻¹)	参考文献 Reference
龙脑香 <i>Dryobalanops aromatica</i>	75	310	[33]
木荚 <i>Eperua falcata</i>	45	166	[27]
木荚 <i>Eperua grandifolia</i>	55	151	[27]
窿缘桉 <i>Eucalyptus grandis</i>	30	141	[34]
杏仁桉 <i>Eucalyptus regnans</i>	37	151	[29]
	89	285	[35]
榕树 <i>Ficus insipida</i>	54	164	[30]
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	25	67	[36]
大木玉蕊 <i>Lecythis idatimon</i>	39	94	[27]
假山毛榉 <i>Nothofagus fusca</i>	60	110	[37]
挪威云杉 <i>Picea abies</i>	19	49	[38]
	36	175	[39]
	15	66	[40]
海岸松 <i>Pinus pinaster</i>	34	161	[41]
	35	125	[42]
辐射松 <i>Pinus radiata</i>	42	349	[43]
杨树 <i>Populus trichocarpa</i> × 美洲	15	51	[44]
黑杨 <i>Populus deltoides</i>			
花旗松 <i>Pseudotsuga menziesii</i>	20	22	[45]
无梗花栎 <i>Quercus petraea</i>	9	10	[46]
槟榔青 <i>Spondias mombin</i>	44	80	[30]

1.2 植物蒸腾耗水量的研究方法

大多数对于红树植物耗水量的研究使用便携式气体交换系统测定叶片水平的蒸腾速率^[22, 24]。而对于个体水平、群落水平红树植物耗水量的研究，主要通过测定植物茎流来推算整株红树植物的蒸腾耗水量^[22, 24]。最为广泛的研究茎流的方法是热技术法^[47]。但是，由于红树植物生长在高温、高湿、高盐度且强风

的海岸环境，热技术方法仪器安装及维护成本较高，目前相关的研究仍然较少。Zimmermann 等^[48]利用热平衡技术对美洲大红树(*Rhizophora mangle*)水分利用的保守性进行了研究。Becker 等^[49]利用热脉冲方法发现红树(*R. apiculata*)、白海榄雌(*Avicennia alba*)的茎流速率并不一定较低。Krauss 等^[25]利用热扩散技术研究了潮汐活动对萌芽白骨壤(*A. germinans*)、拉贡木(*L. racemosa*)和美洲大红树(*R. mangle*)水分利用的影响。Hao 等^[50]利用热脉冲技术研究了美洲大红树的水分再分配现象。此外，还有实验研究了气象因子对于红树植物柱果木榄(*Bruguiera cylindrica*)、白骨壤(*A. marina*)、红海榄(*R. stylosa*)、秋茄(*Kandelia obovata*)水分利用的影响^[22, 24, 27, 51, 52]。

热技术方法主要包含热平衡技术、热扩散技术和热脉冲技术。其中，热扩散技术是科学家 Granier^[45, 53]在 Vieweg 和 Ziegler^[54]工作的基础上设计发明的。热扩散技术系统主要由电源、缆线、数据采集器、茎流探头这四个部分构成(图 1-1)^[55]。在整个系统中，起到测定茎流速率作用的部分是茎流探头，探头由两根探针组成，上部分的探针通过电阻丝加热树干液流，同时装有热电偶测定温度，下部份的探针只有热电偶，作为参考端测定未加热的液流温度。通过两个探针之间树干液流的温差，结合经验公式(公式 1-1)推算茎流速率(J_s)^[53, 56]。

$$J_s = 118.99 \times 10^{-6} \times \left[\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right]^{1.231} \quad (1-1)$$

其中， ΔT 为两个探针之间的温度差， ΔT_{\max} 为昼夜最大温差。

树木单株耗水量(tree water use, TWU)由某一深度的 J_s 乘以对应的边材面积累加而得，公式如下^[22]：

$$TWU = \sum_{i=1}^n (J_{s1} \times SA_i \times \frac{J_{si}}{J_{s1}}) \quad (1-2)$$

其中，1 是第一个深度， i 是第 i 个深度， J_{s1} 是第一个深度的茎流速率， SA_i 是第 i 个深度的边材面积， J_{si}/J_{s1} 是第 i 个深度茎流速率相对于第 1 个深度茎流速率的比值。

林段耗水量(stand water use, SWU)根据以下公式计算^[22]：

$$SWU = \frac{\sum_{i=1}^n TWU_i}{A} \times \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

其中， i 是样方内第 i 棵树，1 是第一棵树， TWU 见公式(2-1)， ρ 是水的密

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 for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库