



中国海草分布、生态系统结构 及碳通量遥感

Seagrass Distribution,
Ecological System Structure and Carbon Flux
in China with Satellite Remote Sensing

杨顶田 等 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

中国海草分布、生态系统结构 及碳通量遥感

杨顶田 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书着力于海草碳汇的研究方法、通量等方面的研究,首先讨论海草及碳汇的遥感监测方法,对卫星遥感海草的水体校正进行阐述,然后对单种海草的分布进行制图。在海草生态系统结构方面,着重讨论海南海草床和广西海草床的结构。在此基础上,对海草生态系统中的附生生物、细菌以及浮游植物、浮游动物和底栖生物分别进行探讨。本书还分别讨论山东、台湾及海南海草床的碳通量。虽然海草净初级生产力只有 $500\text{g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,但海草床的年埋藏量可以达到 $14\text{kg C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 远高出海草本身的初级生产力。

本书可供国家或地方海湾、海岸带管理人员,以及从事海草科学、海岸带碳通量研究的科研人员及高等院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国海草分布、生态系统结构及碳通量遥感/杨顶田等编著. —北京:科学出版社, 2016.12

ISBN 978-7-03-050645-0

I. ①中… II. ①杨… III. ①海草-生态系统-碳循环-研究-中国 IV. ①Q949.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 274301 号

责任编辑: 许 健 田轶静 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 靓

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

苏州越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017年1月第一次印刷 印张: 15 1/2 插页: 6

字数: 360 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《中国海草分布、生态系统结构及碳通量遥感》

编写人员名单

主 编 杨顶田

副 主 编 单秀娟 许战洲 李文涛 黄道建
杨超宇

参编人员 高亚平 吴后波 郑凤英 周立柱
尹小青 陈 杰 陈云龙 朱 利
单秀娟 许战洲 李文涛 黄道建
杨超宇

前 言

气候变化已经对中国社会经济产生了重大的影响。2009年年底,在哥本哈根气候变化会议上,中国承诺将在减缓气候变化方面做出贡献。气候变化主要由温室气体引起,而且煤、石油等燃料燃烧所产生的温室气体已经大大超出预期。了解温室气体去向,对应对气候变化相关方针政策的制定以及措施的实施具有相当重要的意义,因此,定量研究全球温室气体的收支平衡,特别是关于碳循环的研究,一直是探讨气候变化和区域可持续发展的核心问题之一,也是全球变化研究的热点和难点,尤其在寻找未知碳汇方面更是目前共同关注的问题。

海洋作为重要的碳汇已经受到越来越多的关注,目前主要集中在近海和深远海的浮游生物对碳的吸收方面,但对海岸带,尤其是底栖水生植物的碳循环关注较少。近年来的研究认为,海岸带浅水底栖生态系统的净初级生产力占海洋总净初级生产力的9.5%,占全球总净初级生产力的6%。在海岸带生态系统中,海草生态系统是生产力最高的生态系统之一,可以达到 $300\sim 1500\text{g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,其净初级生产力占到海岸带净初级生产力的11%左右。而且海草是许多海洋生物的直接食物来源,为它们提供重要的栖息地和隐蔽保护场所,是将碳直接传递给海洋动物的主要途径之一,也是将碳固定在沉积物中的主要途径(如海草的根部钙化或海草的大量堆积等可以将碳直接固定在沉积物中)。海草的光合作用在大量固定碳的同时,也通过呼吸作用向海水中释放 CO_2 。在其腐烂过程中,细菌等微生物也是碳循环的主要贡献者和受益者。因此对海草生态系统中碳通量及循环模式的研究可以为统计我国海洋碳通量提供重要的第一手资料。

海草一般生活在浅水环境中,尤其是以淤泥为底质的区域,人力徒步和航船等都很难达到,对于大面积的海草碳通量的检测主要通过卫星遥感来实现。已有的卫星遥感模式研究表明,初级生产力的计算对输入的叶绿素场非常灵敏,而运用光谱法来检测叶绿素a的含量也有大量的研究,这样就为卫星遥感海草碳通量奠定了较好的基础。

但由于海草生态系统是一个开放的生态系统,所以碳输入和碳输出的精确测定较为困难。可以采用卫星遥感的方法,并结合现场实验,通过测定有效光合辐射(PAR)、海草、悬附植物和底栖藻类初级生产力、捕食通量、碎屑通量、海草床中碳沉降及温度等指标,建立海草碳循环的生态模式,应用于海草碳通量的精细检测;并与卫星遥感模式进行有机结合,建立基于遥感的海草碳通量计算模型,为进一步综合评价我国海岸带对碳吸收的贡献等方面提供可靠的方法和基础数据。

国家自然科学基金项目资助了“基于卫星遥感和现场观测的南海海岸带海草

生态系统碳通量和碳循环研究”(编号 41176161)和国家自然科学基金海峡两岸重点项目“基于卫星遥感和现场观测的人类活动对海峡两岸海草影响研究”(编号 U1405234)。这些项目的主要目标是,以我国海草为研究对象,研究海草在海岸带的分布,碳通量及人类活动对海草的影响机理。

本书是这些项目的主要成果之一,主要从海草碳汇的卫星遥感、我国海草分布、海草生态系统结构、我国海草碳汇及影响因素等方面,全面阐述我国海草碳的分布特征及碳通量。本书编写组成员通过近两年的努力,在已有扎实工作的基础上,广泛收集资料和文献,并进行系统的总结梳理和深入的理论分析,定量给出我国海草分布及碳通量。为进一步研究相关内容提供了较好的理论基础。

本书共四篇分 16 章,包括海草及碳通量的卫星遥感、现场检测技术,以及中国海草的总体分布和单一物种的分布及海草床的分布区域。海草生态系统的结构和功能。不同区域的海草碳汇以及影响因素等内容,系统阐明中国海草分布及碳通量。

本书各章的编写人员如下:绪论,单秀娟;第一章,杨顶田,杨超宇;第二章,杨超宇,杨顶田;第三章,李文涛,杨顶田;第四章,杨顶田;第五章,杨顶田;第六章,许战洲;第七章,杨顶田;第八章,吴后波;第九章,杨顶田;第十章,杨顶田;第十一章,黄道建;第十二章,许战洲;第十三章,高亚平;第十四章,杨顶田;第十五章,许战洲;第十六章,杨顶田。参与本书校稿的还有周立柱、朱利等研究生。

由于海草生态系统碳汇通量的复杂性和编撰者学识与水平所限,书中肯定会有一些不尽如人意的地方,不足之处在所难免,衷心期望广大读者批评指正。

感谢国家科学技术学术著作出版基金的支持,感谢本书所有的研究与撰写者、有关文献与资料的提供者。

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 海草碳通量遥感研究进展及调查方法

第一章 海草生态系统碳汇及调查计划	9
第一节 海草生态系统及碳汇的重要性	9
第二节 国内外海草的调查及计划	12
一、国外关于海草生态系统本底调查	12
二、国内关于海草生态系统本底调查	15
第三节 海草的卫星遥感监测技术研究进展	16
第四节 海草信息遥感提取的水体校正模型	24
第五节 海草生态系统碳通量的卫星遥感检测	30
第二章 辐射传输模型在海草底质信息提取中的应用	47
第一节 水体、大气对海草光谱的影响	47
第二节 辐射传输模型	48
第三节 典型海区的海草光谱特征	50
第四节 海草地物光谱分析	56
第五节 海草的卫星遥感检测	70
一、海草遥感监测的可行性分析	70
二、海草分布的卫星遥感监测	70
第六节 海草分布变化分析	74
第三章 海草碳汇现场调查研究方法	77
第一节 海草生态系统碳通量评估方法	77

一、海草覆盖度观测方法	77
二、传统的初级生产力测量方法	80
三、生物光学模式 (bio-optical model)	81
四、海草床中捕食通量的碳同位素法测量	83
第二节 荧光技术在海草初级生产力监测方面的仪器和原理	83
第三节 海草的降解作用和测量方法	87
第四节 影响海草固碳的因素	89
第五节 相关观测仪器的制作	90

第二篇 我国海草分布

第四章 我国海草的总体分布	97
第五章 我国海草种类的区域分布	106
一、大叶藻	106
二、矮大叶藻	107
三、泰来藻	108
四、海菖蒲	109
五、二药藻	109
六、川蔓藻	110
七、海神草	112
八、贝克喜盐草	113
九、齿叶海神草	114
十、齿叶丝粉藻	115
十一、丛生大叶藻	116
十二、喜盐草	117
十三、黑纤维虾海藻	119
十四、红纤维虾海藻	120
十五、具毛喜盐草	121

十六、丝粉藻	122
十七、小喜盐草	123
十八、羽叶二药藻	124
十九、针叶藻	125

第三篇 海草场生态系统的结构与功能

第六章 海南省典型海草生态系统的结构	131
第一节 海南省海草床总体状况	131
第二节 泰来藻海草床	133
第三节 海菖蒲海草床	135
第四节 海草床大型底栖生物群落	137
第七章 海草床中的附生生物及影响因素	140
第八章 海草生态系统中微生物群落	149
第一节 新村港和三亚湾细菌、聚球藻数量和碳含量	149
第二节 海草附着的放线菌	154
一、海草中的放线菌资源	154
二、海草中细菌和放线菌种类和丰度的影响因素	156
第三节 海草床中的固氮微生物	158
第九章 海草床中的浮游生物	162
第一节 新村港海草床中的浮游种类及数量	162
第二节 海南椰林湾海草床中的浮游生物	165
第三节 广东流沙湾海草床中的浮游生物	166
第四节 广西海草床中的浮游生物	167
第五节 广东柘林湾海的浮游植物	167
第六节 桑沟湾海草床中的浮游植物	168

第四篇 海草生态系统中的碳通量

第十章 海草蓝色碳汇的总论	171
第一节 全球海草固碳总量	171
第二节 海草床固碳途径	172
第十一章 海南新村港海菖蒲生物量和碳储存	175
第一节 海菖蒲的茎枝特征	175
第二节 海菖蒲生物量和茎枝密度	179
第三节 海南岛各调查区海草生物量	182
第十二章 新村港泰来藻生物量和生产力的季节变化	183
第一节 新村港采样地的海草和生态环境	183
第二节 新村港泰来藻的生产力	189
第三节 新村港水体中细菌碳和碳流向	200
第十三章 大叶藻海草碳通量	204
第一节 天鹅湖大叶藻的生产力	204
第二节 青岛湾大叶藻的生产力	204
第三节 桑沟湾大叶藻场系统碳汇扩增力	205
第四节 荣成俚岛海草生物量	207
第十四章 台湾典型区域海草的碳通量	209
第一节 东沙岛海草碳通量	209
第二节 垦丁海草碳通量	210
第三节 金门海草碳通量	210
第四节 高美湿地中海草碳通量	211
第十五章 影响海草生物量和生产力的环境因素	212
第一节 非生物因素	212
第二节 生物因素	217

第十六章 台风对海草生态系统的影响	225
附录 1: 国家海洋公报中海草状况	229
附录 2: 海草保护区	234
附录 3: 海草观测站	236
附录 4: 图版	237
附录 5: 彩图	247

绪 论

工业革命以来,人类活动对全球生态系统的破坏严重扰乱了全球各碳库间的平衡。目前,全球 CO₂ 年排放量为 72~100 亿吨碳 (Trumper et al., 2009), 大气中的碳含量正在以约每年 20 亿吨碳的速度增加 (Houghton, 2007), 2009 年大气中 CO₂ 的浓度已达到 387mg/m³ (图 0-1)。CO₂ 是大气中最重要的温室气体, 对温室效应和全球气候变暖的贡献中占 70% (于洪贤等, 2010), 大气 CO₂ 浓度的剧烈上升, 导致全球气候变化, 并对生态系统的组成、结构和功能产生深刻的影响, 对全球的气候模式、粮食生产, 以及人类的生活和生计造成的影响越来越大。在今后的几十年, 粮食安全、社会发展、经济发展和人类发展都将受到严重危害 (Nellemann et al., 2009)。为应对全球变暖和生态系统的变化, 发展低碳经济已成为各国政府的战略选择, 其核心是降低大气 CO₂ 等温室气体的含量。目前, 各国采取多种措施致力于温室气体的减排, 其中加强碳汇能力是减少温室气体排放的重要补充, 在缓解气候变化方面发挥着重要的作用, 也是发达国家减排温室气体的基本政策和措施之一。人类活动释放 CO₂, 其中 45% 的 CO₂ 集聚在空气中, 55% 的 CO₂ 通过自然生态系统转移, 因此, 自然生态系统的碳汇功能具有不可忽视的作用, 在这里, 自然界的碳汇指的是从大气中移走 CO₂ 等温室气体的任何过程、活动和机制 (IPCC, 2007)。

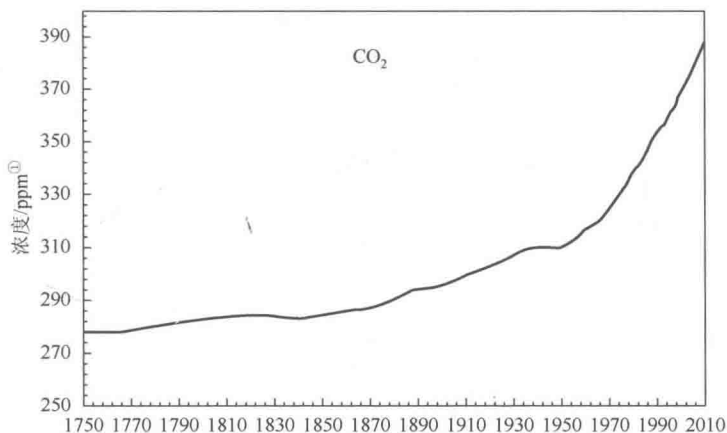


图 0-1 大气中 CO₂ 浓度的变化 (数据来源 NOAA)

① 1ppm=1mg/L。

海洋是地球气候的缓冲器,通过吸收 CO_2 降低其在大气中的浓度,从而减缓全球升温效应。自工业时代以来,海洋吸收的 CO_2 约占人为 CO_2 排放总量的 1/3 (Sabine and Feely, 2007)。海洋蕴藏着丰富的碳汇,是我国推进温室气体减排、缓和国际压力、促进产业结构优化的新空间。因此,海洋碳汇的研究已受到人类的普遍关注,也是 2010 年哥本哈根全球气候峰会的主要议题之一。

海洋是地球上最大的碳库,在海洋生物的生长、水气界面物质交换、海岸带促淤造陆等动态过程中积累了大量的无机碳和有机碳,整个海洋含碳总量达到 39 万亿吨,约占地球上碳总量的 93%,在全球碳循环中起着重要的作用,每年大约有 900 亿吨 CO_2 参与海洋循环 (González et al., 2008)。另外,海洋不仅能长期储存碳,还可以对 CO_2 进行重新分配,是影响全球变化的关键控制环节。研究表明,在过去的 20 年,海洋对碳的吸收为每年 20~22 亿吨碳 (Gurney et al., 2002; Plattner et al., 2002; Sabine et al., 2004; Bender et al., 2005; Miller et al., 2005; Manning and Keeling, 2006)。海洋碳汇功能主要通过两种形式实现,一种是物理泵,即 CO_2 从大气—海水表面—深海的水动力输送过程;二是生物泵,即海水中的 CO_2 通过海洋植物的光合作用,将无机碳转化为有机碳,并通过食物链能量传递,一部分海洋生物被人类收获利用而实现“碳转移”,另一部分则随着生物代谢和死亡,形成颗粒碳沉积于海底。物理泵和生物泵的这些固碳机制都紧密地联系在一起,维持着微妙的平衡,并影响海洋的碳汇能力。其中生物泵是海洋碳汇的主要形式,生物泵本身的净效应是把大气中的 CO_2 浓度保持在没有该效应情况下的浓度的 30% 左右 (Siegenthaler and Sarmiento, 1993),并增强海洋表层对 CO_2 的吸收,影响 CO_2 的溶解值,把碳转移到深海。根据联合国《蓝碳》报告,海洋生物生长的地区还不到全球海底面积的 0.5%,却捕获了地球上超过一半 (55%) 的生物碳,其中海洋植物的碳捕获能量极为强大和高效,虽然它们的总量只有陆生植物的 0.05%,但它们的碳储量 (循环量) 却与陆生植物相当,其中有超过一半或高达 71% 的碳被海洋植物捕集转化为海洋沉积物,形成植物的蓝色碳捕集和移出通道。

海洋大型植物中海草床、红树林和藻类存储了海底埋藏的碳的一半,每年可存储 16.5 亿吨 CO_2 ,几乎占全球交通排放的 CO_2 的一半,成为地球上最密集的碳储存器,并且这种移出的生物碳可以在海洋中储存上千年 (Mateo et al., 1997)。因此,海洋大型植物作为海洋生态系统组成中的重要部分,其碳循环过程和特征的研究在海洋生态系统碳循环中占有重要的地位,而海洋大型植物碳汇潜力及其影响因素的研究在全球气候变化框架下也成为提高碳汇能力,降低温室效应的研究热点。

海洋大型植物固碳是海洋碳汇的重要组成部分,它通过光合作用把吸收的 CO_2 以有机物的形式固存 (Duarte and Cebrián, 1996; Gattuso et al., 1998; Duarte et al., 2005),从而有效地去除大气中的 CO_2 ,并支持着生态系统功能。一部分过

量的 CO_2 被输送出去为邻近的生态系统所利用, 包括开阔洋和海滩生态系统 (Duarte and Cebrián, 1996; Bouillon et al., 2008)。海草、红树林、海藻林和盐沼植物是生物圈中最密集的自然碳汇之一, 它可以把富余的有机物产量埋藏在沉积物中, 其生产力堪比最强的农作物 (Duarte and Chiscano, 1999) 海草 (图 0-2), 虽然其面积不到海底面积的 0.2%, 但埋藏力惊人, 每年为全球埋藏 120~329 百万吨碳 (Duarte et al., 2005), 是开阔海洋平均埋藏率的 180 倍, 并且时间可达千年之久 (Mateo et al., 1997)。特别是海岸带的海草, 其有机物质累积可以增加海底海床, 有的沉积层甚至可以达到 3m。另外, 海洋大型植物的树冠能捕获水流携带的颗粒, 减少对叶子的冲击力 (Hendriks et al., 2007), 从而促进沉积作用并减少沉积物再悬浮 (Gacia and Duarte, 2001)。因此, 海草等海洋大型植物在减缓全球变暖方面存在巨大的潜力 (Nellemann et al., 2009)。

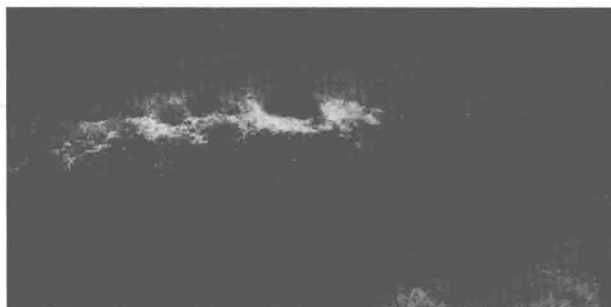


图 0-2 海草可以沉积碳达千年之久

图片来源: <http://www.nature.com/ngeo/journal/v5/n7/full/ngeo1477.html>; Photo credit: Miguel Angel Mateo

为此, 国家自然科学基金项目资助了“基于卫星遥感和现场观测的南海海岸带海草生态系统碳通量和碳循环研究”(编号 41176161) 和国家自然科学基金海峡两岸重点项目“基于卫星遥感和现场观测的人类活动对海峡两岸海草影响研究”(编号 U1405234)。这些项目的主要目标是, 以我国海草为研究对象, 研究海草在海岸带的分布以及碳汇通量以及人类活动对海草的影响机理。

参 考 文 献

- 于洪贤, 黄璞伟. 2008. 湿地碳汇功能探讨: 以泥炭地和芦苇湿地为例. 生态环境, (5): 2103-2106.
- Bender M L, Ho D T, Hendricks M B, et al. 2005. Atmospheric O_2/N_2 changes, 1993–2002: Implications for the partitioning of fossil fuel CO_2 sequestration. *Global Biogeochem. Cy.*, 19 (4): 4057-4061.
- Bouillon S, Borges A V, Castañeda-Moya E, et al. 2008. Mangrove production and carbon sinks: A revision of global Budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2): 1-12.

- Duarte C M, Cebrián J. 1996. The fate of marine autotrophic production. *Limnology and Oceanography*, 41: 1758-1766.
- Duarte C M, Chiscano C L. 1999. Seagrass biomass and production: A reassessment. *Aquatic Botany*, 65: 159-174.
- Duarte C M, Dennison W C, Orth R J W, et al. 2008. The charisma of coastal ecosystems: Addressing the imbalance. *Estuaries and Coasts*, 31: 233-238.
- Duarte C M, Middelburg J, Caraco N. 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2: 1-8.
- Duarte C M. 2002. The future of seagrass meadows. *Environmental Conservation*, 29: 192-206.
- Duarte C M. 2009. Global Loss of Coastal Habitats: Rates, Causes and Consequences. FBBVA, Madrid. 181 p. ISBN: 978-84-96515-84-0 (available as pdf's at: <http://www.fbbva.es/TLFU/tlfu/esp/publicaciones/libros/fichalibro/index.jsp?codigo=411>).
- Gacia E, Duarte C M. 2001. Elucidating sediment retention by seagrasses: Sediment deposition and resuspension in a Mediterranean (*Posidonia oceanica*) meadow. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 52: 505-514.
- Gattuso J P, Frankignoulle M, Wollast R. 1998. Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annual Review of Ecological Systems*, 29: 405-434.
- González J M, Fernandez-Gomez B, Fendandez-Guerra A, et al. 2008. Genome analysis of the proteorhodopsin-containing marine bacterium *Polaribacter* sp. MED152 (Flavobacteria): A tale of two environments. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 105: 8724-8729.
- Gurney K R, Law R M, Denning A S, et al. 2002. Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 415: 626-630.
- Hendriks I E, Sintès T, Bouma T, et al. 2007. Experimental assessment and modeling evaluation of the effects of seagrass (*P. oceanica*) on flow and particle trapping. *Marine Ecology Progress Series*, 356: 163-173.
- Houghton R A. 2007. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 313-347.
- IPCC. 2007. IPCC fourth assessment report: Climate change 2007-The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press.
- Manning A C, Keeling R F. 2006. Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network. *Tellus-B*, 58B: 95-116.
- Mateo M A, Romero J, Pérez M, et al. 1997. Dynamics of millenary organic deposits resulting from the growth of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 44: 103-110.
- Miller K G, Kominz M A, Browning J V, et al. 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change. *Science*, 310: 1293-1298.
- Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, et al. 2009. Blue Carbon. Norway: Birkeland Trykkeri AS.
- Plattner G K, Joos F, Stocker T F. 2002. Revision of the global carbon budget due to changing air-sea oxygen fluxes. *Global Biogeochemical Cycles*, 16: 1096.
- Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. 2004. The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂. *Science*, 305: 367-371.

- Sabine C L, Feely R A, Reay D S. 2007. The oceanic sink for carbon dioxide. *Greenhouse Gas Sinks*, Oxfordshire: CABI Publishing.
- Siegenthaler U, Sarmiento J L. 1993. Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, 365: 119-125.
- Trumper K, Bertzky M, Dickson B, et al. 2009. The natural fix? The role of ecosystems in climate mitigation. A UNEP rapid response assessment. United Nations Environment Programme, UNEP-WCMC, Cambridge, UK, 30 (11): 65.

