

doi:10.3799/dqkx.2013.106

# 福建长汀河田盆地的马尾松林碳储量时空动态变化

黄绍霖<sup>1,2,3</sup>, 徐涵秋<sup>1,2,3\*</sup>, 曾宏达<sup>1,2,3,4</sup>, 刘智才<sup>1,2,3</sup>, 王琳<sup>1,2,3</sup>

1. 福州大学环境与资源学院, 福建福州 350108

2. 福州大学遥感信息工程研究所, 福建福州 350108

3. 福建省水土流失遥感监测评估与灾害防治重点实验室, 福建福州 350108

4. 福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007

**摘要:** 以福建省长汀县侵蚀退化严重的河田盆地为例, 重点研究该区水土流失生态修复的主要树种——马尾松林的碳储量动态变化。通过 2011 年的野外样地调查获得了马尾松林的实测数据, 并将其与同期 SPOT5 影像对应样地改进的归一化植被指数(MNDVI)数据进行回归分析, 建立了河田盆地 2011 年马尾松林碳储量的反演模型。进一步通过不变特征法对所获得的 2011 年模型进行校正, 使其能够推广应用于 2004 年和 2009 年的马尾松林碳储量反演, 以揭示河田盆地马尾松林碳储量在 2004—2011 年间的时空变化。研究结果表明, 这期间河田盆地马尾松林的总碳储量和碳密度均呈逐步上升的趋势: 总碳储量由 2004 年的  $9.28 \times 10^5$  t 增加到 2011 年的  $12.49 \times 10^5$  t, 碳密度由  $27.31 \times 10^{-4}$  t/m<sup>2</sup> 增加到  $35.84 \times 10^{-4}$  t/m<sup>2</sup>, 总的说明该区马尾松林的碳汇能力在这期间有了明显的增加, 而且在 2009—2011 年间表现得更为明显。

**关键词:** 遥感; 马尾松林; 碳储量; 长汀; 环境影响。

**中图分类号:** TP79

**文章编号:** 1000-2383(2013)05-1081-10

**收稿日期:** 2013-08-03

## Analysis of Spatial and Temporal Dynamics of Carbon Storage of *Pinus Massoniana* Forest in the Hetian Basin in County Changting of Fujian Province, China

HUANG Shao-lin<sup>1,2,3</sup>, XU Han-qiu<sup>1,2,3\*</sup>, ZENG Hong-da<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Zhi-cai<sup>1,2,3</sup>, WANG Lin<sup>1,2,3</sup>

1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2. Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

3. Fujian Provincial Key Laboratory of Remote Sensing of Soil Erosion and Disaster Protection, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

4. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

**Abstract:** Implementing the ecological restoration by giving priority to planting trees in the eroded area, it is expected to increase the carbon sink of forests. This paper studies the dynamics of *Pinus massoniana* forest carbon storage of Hetian basin in Changting County of Fujian Province, southeastern China. As *Pinus massoniana* is the main species used in the ecological restoration, we carried out field surveys with 31 sampling sites in November 2011 to acquire basic data of *Pinus massoniana* forest in the study area. The regression analysis between the field-acquired data and the modified normalized difference vegetation index (MNDVI) data derived from a near-synchronised SPOT5 image was performed in order to develop a model to estimate the carbon storage of *Pinus massoniana* forest in the Hetian basin area. The obtained 2011 model was then calibrated using pseudo-invariant feature (PIF) method to allow the model to be used for estimating the carbon storage of *Pinus massoniana* forest in 2004 and 2009. As a result, the spatial and temporal dynamics of carbon storage of *Pinus massoniana* forest in the Hetian basin during 2004 and 2011 were revealed. The results indicate a gradual increase in the carbon storage and carbon density of *Pinus massoniana* forest in the Hetian basin area in the study period. The carbon storage grew from  $9.28 \times 10^5$  t in 2004 to  $12.49 \times 10^5$  t in 2011, accompanied by an increase in carbon density from  $27.31 \times 10^{-4}$  t/m<sup>2</sup> to  $35.84 \times 10^{-4}$  t/m<sup>2</sup> during the period. This suggests a significant increase of the carbon sink of *Pinus massoniana* forest in the area, particularly in the last two years.

**基金项目:** 教育部创新团队项目(No. IRT0960).

**作者简介:** 黄绍霖(1986—), 男, 博士生, 主要从事环境与资源遥感研究. E-mail: 515742109@qq.com

**\* 通讯作者:** 徐涵秋, E-mail: hxu@fzu.edu.cn

from 2009 to 2011.

**Key words:** remote sensing; *Pinus massoniana*; carbon storage; Changting; environment effect.

大气中 CO<sub>2</sub> 的剧增破坏了大气层中碳氧循环的自然平衡,从而引起温室效应等全球范围内的气候变化(Houghton *et al.*, 1999).森林作为陆地生态系统中最大的碳库,其森林生态系统中植被所固定的碳量约占陆地植被总固碳量的 82.5% (Sabine *et al.*, 2004),在降低大气中 CO<sub>2</sub> 等温室气体浓度、减缓全球气候变暖中,发挥着至关重要的作用(Pan *et al.*, 2011).但是,各种因素造成的生态系统退化已导致了森林碳储量的大幅度减少,因此,采用合理的生态恢复与重建措施,增加侵蚀退化区的森林碳储量,增强森林的碳汇能力,已受到世界各国的高度重视.

作为中国南方红壤地区的典型水土流失区,长汀县的水土流失治理历来受到社会各界的高度重视.1983年、2000年,福建省委、省政府相继把长汀、河田列为全省水土流失治理试点区和全省为民办实事项目,全面推动了长汀县的水土流失治理工作.经过 20 余年的努力,长汀县的水土流失治理取得了显著成效,已成为中国南方水土流失治理的一面旗帜.长汀水土治理主要采取的是植树造林的生态修复技术,近年来对其研究成果也有陆续报道(谢锦升等, 2001; 蒋芳市等, 2009),但针对该县侵蚀退化森林生态系统碳储量变化的研究尚未展开.由于马尾松是长汀县用于水土流失区生态修复的主要造林树种,同时也是长汀县的主要植被,因此,对长汀县马尾松林的碳储量动态变化进行定量评价意义重大.

传统的区域碳储量估算通常采用样地清查法,但该方法只能用于小面积地区,且费时费力,成本高昂,无法及时反映森林碳储量的动态变化(Hyde *et al.*, 2007; Gallaun *et al.*, 2010).近年来,遥感技术的发展为大尺度森林碳储量的动态估算提供了一条快捷、经济、方便的途径.由于遥感影像具有瞬时覆盖面积大、可周期性重复的特点,这对于以稀疏离散观测为基础的传统方法而言具有不可比拟的优势,也为大尺度上森林碳储量的动态估算提供了有效技术支持.联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)已强调利用影像光谱信息与生物量的相关关系来估测森林的生物量(Eggleston *et al.*, 2006),进而求出森林的碳储量.国内外学者也对基于遥感技术的森林碳储量估算展开了许多研究: Myeong *et al.* (2006) 采用 TM/ETM+ 影像的归一化植被指

数(NDVI)数据与对应样地的碳储量数据建立了美国雪城的森林碳储量预测模型,结果显示,遥感技术在定量监测城市森林碳储量变化方面具有明显的优势;方精云等(2007)利用地面观测资料和 GIMMS 卫星的 NDVI 数据对 1981—2000 年间中国草地的碳汇进行了估算,表明中国草地单位面积的碳汇能力实际上仅相当于森林的 1/30; Piao *et al.* (2009) 利用实测数据与 AVHRR 卫星的 NDVI 数据建立经验回归方程,将实测调查点通过尺度上推来估算区域和全国灌丛的碳储量格局,表明中国灌丛的碳汇能力约为森林的 30%; Garcia *et al.* (2010) 利用 LiDAR 数据估算了位于西班牙瓜达拉哈拉市的自然公园的森林碳储量,而 Hudak *et al.* (2012) 则运用多时相的 LiDAR 数据对美国莫斯科山的针叶林碳储量变化进行了估算,结果都表明 LiDAR 数据可用于估算森林碳储量及其动态变化.

以上这些研究结果均表明,综合运用多源遥感数据协同反演森林碳储量具有很大的发展潜力,利用多源遥感数据来进行森林碳储量的估算已经成为定量分析森林碳储量的核心技术手段.但是,目前有关森林碳储量遥感估算的研究,多是针对单时相或有历史调查数据的多时相展开的,对于缺乏历史数据的多时相遥感估算研究,即如何将基于某一时相遥感信息建立的森林碳储量反演模型推广到其他时相上的应用研究,迄今仍鲜有报道,而这一研究对森林碳储量动态变化监测具有重要意义.因此,本研究以福建省长汀县侵蚀退化最严重的河田盆地作为研究对象,重点开展这一模型外推技术的研究,它将为森林生态系统碳储量的动态变化监测提供重要的技术手段.

## 1 研究区概况

河田盆地位于福建省西部的长汀县(116°16′~116°34′E, 25°30′~25°44′N),本次重点研究该盆地及其毗邻区的森林地区,面积为 775.40 km<sup>2</sup>.研究区属亚热带季风气候,年平均气温 18.3 °C,年降雨量 1 500~1 700 mm,土壤类型以红壤为主(图 1).研究区的植被主要为马尾松林,占研究区森林面积的 58%.

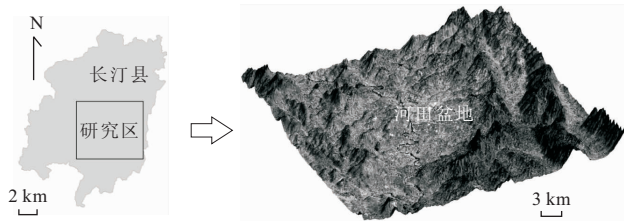


图1 研究区三维示意图

Fig.1 3D-perspective view of the study area

## 2 数据与方法

本研究通过将2011年野外实测的马尾松林数据与同期的遥感影像建立马尾松林碳储量的反演模型,然后将该模型推广到2004年和2009年的马尾松林碳储量反演,以分析研究区2004—2011年马尾松林碳储量的空间分布和动态变化。主要技术路线见图2。

### 2.1 样地数据获取及样地碳储量计算

兼顾不同高程和不同林分郁闭度,笔者设置了31个调查样地,于2011年10月25日—11月12日进行了野外实地调查。样地选在地表覆盖较均质的地段,大小均为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。对样地内的树木进行每木检尺,详细记录树种、胸径、树高及林分郁闭度。使用差分GPS准确记录样地的中心位置。

首先,利用福建省的森林调查用表(福建省林业勘察设计院,1978)计算出马尾松林样地的平均蓄积量。方精云等(2007)提出的生物量转换因子法符合生物的相关生长理论,可以适合于几乎所有的森林类型,并且可以非常简单地实现由样地调查向区域推算的尺度转换。因此,本文利用该方法来估算马尾松林样地的单位面积平均地上生物量:

$$B = 0.5101V + 1.0451, \quad (1)$$

式中: $B$ 为马尾松林样地的单位面积平均地上生物量( $\times 10^{-4}\text{ t/m}^2$ ), $V$ 为马尾松林样地的平均蓄积量( $\times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{m}^2$ )。

马尾松林碳储量的计算公式为:

$$C = B \times C_c, \quad (2)$$

式中: $C$ 为马尾松林样地的单位面积平均地上碳储量( $\times 10^{-4}\text{ t/m}^2$ ); $C_c$ 为含碳系数。

国际上通常采用的含碳系数为0.5(Olson *et al.*, 1983),但李海奎和雷渊才(2010)全面研究国内主要树种提出的含碳系数更有针对性,所以本研究选用其提出的马尾松含碳系数(0.4596)来进行计算,以提高马尾松林的碳储量估算精度。

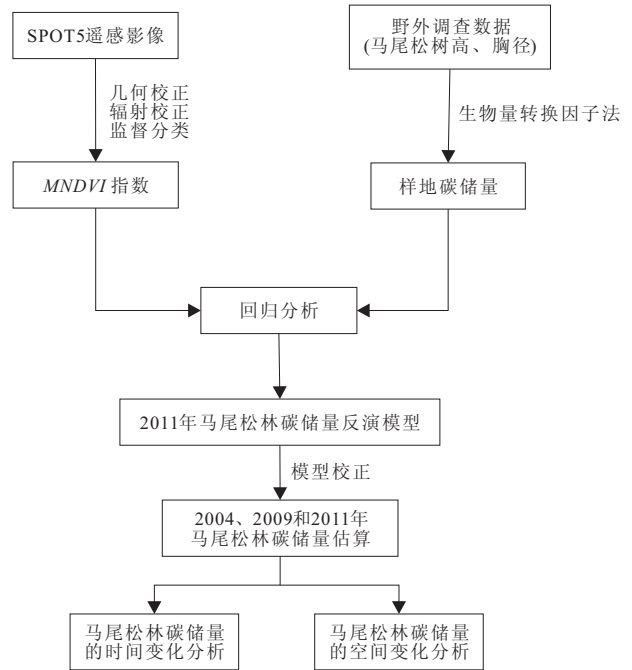


图2 研究技术路线

Fig.2 Technical flow chart

研究区马尾松的林下植被以芒萁为主(蒋芳市等,2009)。为排除芒萁对马尾松碳储量遥感估算的影响,采用美国ASD公司的便携式光谱仪(Field-Spec3)对马尾松和芒萁进行野外高光谱实测。所有的光谱测量均选择在晴朗无云的10:00—14:00之间进行,测量之前先以白板进行定标,选用 $25^\circ$ 视场角,传感器探头垂直向下,与冠层顶部相距约0.5 m,每个观测点采集10组光谱值,以其平均值作为该观测点的光谱反射值。

### 2.2 遥感数据预处理

本研究选用时相分别为2004年10月5日、2009年10月4日和2011年11月28日的SPOT5多光谱影像。影像预处理主要包括:(1)几何校正。通过高精度GPS实测获取的地面控制点对2011年的影像进行几何精校正,然后将2004年和2009年的影像分别与经过校正的2011年影像配准。校正均采用二次多项式进行坐标转换,并选择能保持原有灰度值的最近邻法进行象元重采样,均方根误差小于0.5个象元。(2)辐射校正。卫星传感器接收到的目标地物的反射会受到太阳高度、地形及大气条件等因素的影响而导致光谱信号的失真(徐涵秋和张铁军,2011)。Liang *et al.* (2011)的研究表明,辐射校正能有效提高植被参数的反演精度。因此,本研究采用日照大气综合校正模型(IACM)(徐涵秋,2007)

对 3 个时相的 SPOT5 影像进行辐射校正,通过将原始影像的  $DN$  值转换为象元在传感器处的反射率(at-sensor reflectance)来消除不同时相遥感影像之间的辐射差异。

### 2.3 马尾松林信息的提取

为获得研究区马尾松林信息,需要对 3 个时相的影像分别进行分类.采用基于最大似然法的分层分类法对 2004、2009 和 2011 年的研究区土地利用类型分别进行分类(林娜等,2013),并以野外实地调查资料和林业部门的森林小班图为依据进行精度验证,获得了 3 个时相的分类精度分别为 86.76%、86.96%和 86.79%,然后将其中的马尾松类提取出来,作为研究区马尾松林信息。

### 2.4 马尾松林碳储量反演模型的建立及精度验证

森林碳储量的遥感估算通常是利用植被指数与实测森林碳储量的关系来推算出区域的森林碳储量(Gibbs *et al.*,2007).当前应用最广的是从遥感影像中获取  $NDVI$ ,然后建立  $NDVI$  与森林碳储量的关系,实现大尺度森林碳储量的估算(Myeong *et al.*,2006).河田盆地曾是水土流失重灾区,在大量种植了马尾松之后,情况渐渐改善,但还存在较多的马尾松林疏林地(曾从盛,2006),因此,马尾松林林冠郁闭度较低,而林下植被(主要为芒萁)覆盖度较高.由此也导致了芒萁等林下植被的光谱信息在遥感影像的马尾松林光谱信息中占据一定的比例.为了排除芒萁的光谱信息,笔者对马尾松和芒萁的实测高光谱信息进行了对比研究.图 3 表明,芒萁的反射率明显大于马尾松的反射率,芒萁在红光波段(610~680 nm)和近红外波段(780~890 nm)的反射率分别比马尾松平均增加了 76.77%和 124.48%,导致芒萁的

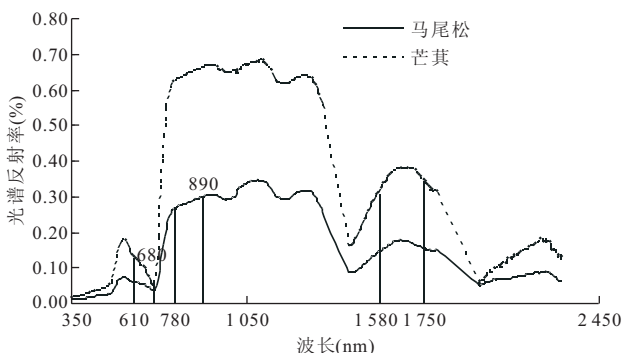


图 3 马尾松和芒萁 FieldSpec3 的实测高光谱反射光谱曲线

Fig. 3 FieldSpec3 measured spectral signature of *Pinus massoniana* and *dicranopteris dichotoma*

$NDVI$  值比马尾松高 7.37%,且马尾松林的  $NDVI$  值整体偏高.显然,如果采用  $NDVI$  指数来估算研究区马尾松林的碳储量,势必会造成高估的现象.因此,不能选用  $NDVI$  来进行河田盆地区马尾松林碳储量的反演。

进一步分析发现,芒萁在短波红外波段(1580~1750 nm)的反射率比马尾松的反射率平均高出 117.70%,如果引入该波段将有可能区分马尾松林冠层与芒萁.在众多的植被指数中,Nemani *et al.*(1993)提出了改进的归一化植被指数( $MNDVI$ ),在原有的近红外和红光波段构成的  $NDVI$  指数的基础上引入了短波红外波段.因此,拟选用  $MNDVI$  来进行河田盆地马尾松林碳储量的反演. $MNDVI$  的表达式为:

$$MNDVI = NDVI \times [1 - (MIR - MIR_{min}) / (MIR_{max} - MIR_{min})], \quad (3)$$

其中, $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$ , (4) 式中: $Red$ 、 $NIR$  和  $MIR$  分别代表 SPOT5 影像的红光波段、近红外波段和短波红外波段的反射率; $NDVI$  为归一化植被指数; $MIR_{min}$ 、 $MIR_{max}$  分别为开放冠层和完全郁闭冠层短波红外波段反射率,分别取该波段直方图两端 1% 处的反射率值。

为确定马尾松林碳储量的最佳反演模型,笔者在所测的 31 个马尾松林样地中,随机选取了 25 个样地的碳储量作为建模数据,剩余的 6 个样地用以验证模型精度.采用线性、对数、二次多项式、乘幂和指数等多种回归模型将 2011 年野外实测的 25 个样地的马尾松林碳储量与 2011 年 SPOT5 影像对应象元的  $MNDVI$  和  $NDVI$  值进行回归分析,以求出马尾松林碳储量的遥感模型和决定系数,从中选取最佳反演模型来估算研究区马尾松林的碳储量(表 1)。

由表 1 可知,与  $NDVI$  相比,基于  $MNDVI$  建立的反演模型的拟合精度均有明显的提高,其中又以  $MNDVI$  指数模型的拟合效果最好,其  $R^2$  最大,  $RMSE$  最小.为进一步确定 2011 年马尾松林碳储量的最佳反演模型,笔者分别对  $NDVI$  指数模型和  $MNDVI$  指数模型进行了检验:利用剩余的 6 个马尾松林样地的碳储量实测值与模型预测值进行验证,并用决定系数  $R^2$  和相对误差  $RE$  这 2 个指标进行定量精度分析(图 4). $RE$  的计算公式如下:

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_{Est,i} - C_{Obs,i}}{C_{Obs,i}} \right) \times 100\%, \quad (5)$$

式中: $C_{Est,i}$ 、 $C_{Obs,i}$  分别表示第  $i$  个样地的马尾松林



表 1 马尾松林碳储量反演模型

Table 1 Models for retrieving the carbon storage of *Pinus massoniana* forest

函数类型	NDVI	R <sup>2</sup>	RMSE	MNDVI	R <sup>2</sup>	RMSE
线性	$C=185.35NDVI-91.357$	0.386	19.601	$C=151.351MNDVI-41.948$	0.655	14.685
对数	$C=100.28\ln(NDVI)+72.261$	0.346	20.228	$C=49.877\ln(MNDVI)+67.703$	0.525	17.240
二次多项式	$C=571.38NDVI^2-487.83NDVI+102.93$	0.447	19.018	$C=-148.79MNDVI^2+362.235MNDVI+14.232$	0.737	13.114
乘幂	$C=308.23NDVI^{6.602}$	0.592	0.805	$C=193.524MNDVI^{3.103}$	0.801	0.561
指数	$C=0.0083e^{11.801NDVI}$	0.617	0.779	$C=0.2716e^{8.818MNDVI}$	0.877	0.441

注:回归方程均通过 0.1% 的显著性检验。

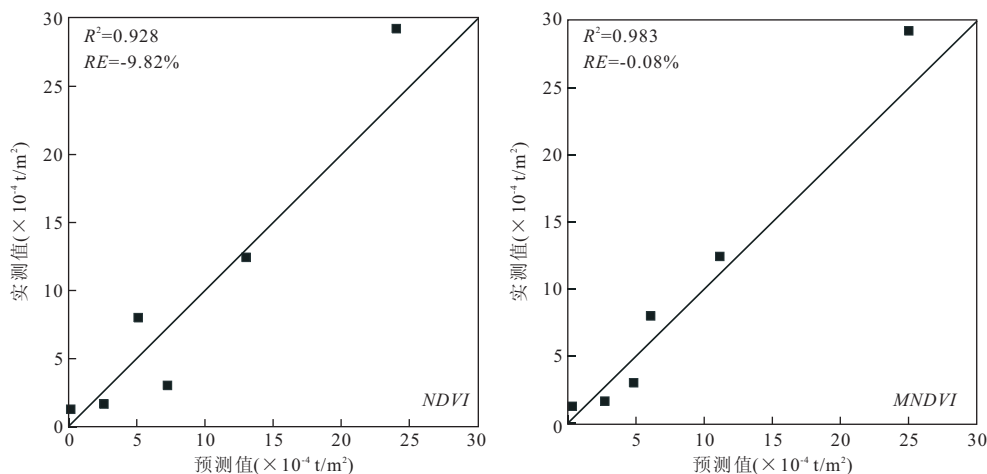


图 4 马尾松林碳储量的实测值和预测值统计比较

Fig.4 Comparison between measured and predicted carbon storage of *Pinus massoniana* forest

碳储量的预测值和实测值,  $n$  是样本总量。

从图 4 可以明显地看出,马尾松林样地的碳储量实测值与模型预测值沿 1 : 1 线的分布情况及模型的精度.与 NDVI 指数模型相比,MNDVI 指数模型具有更高的精度:其预测值与实测值之间的决定系数  $R^2$  达到了 0.983,大于 NDVI 指数模型的 0.928;而 NDVI 指数模型的反演结果与之前分析的一样,果然高估了马尾松林的碳储量,其预测值比实测值高出 9.82%,而 MNDVI 指数模型的反演结果则与实测结果非常接近,二者相差不到 0.10%.这说明利用 MNDVI 指数模型进行马尾松林碳储量的估算可以有效地抑制芒萁等林下植被的影响,从而避免马尾松林碳储量被高估.因此,本研究选用基于 MNDVI 建立的指数回归模型作为 2011 年马尾松林碳储量的最佳反演模型。

### 2.5 模型校正

不同时相的遥感影像数据由于受到太阳光照角度差异、大气条件波动等因素的影响,造成了地表同一景观的一些“伪变化”,所以为了控制和减少这些“伪变化”,使得基于影像亮度值建立的模型更具有

现实意义,需要对多时相遥感影像进行相对辐射校正.因此,欲将以上建立的 2011 年马尾松林碳储量反演模型应用于 2004、2009 年的马尾松林碳储量反演,需对所建立的 2011 年的模型进行相对辐射校正,使其能够应用于这两个时相的影像.当前,基于伪不变特征 (pseudo-invariant feature, PIF) 原理 (Schott *et al.*, 1988) 的相对辐射校正是一种最常用的方法(徐涵秋, 2008; 温小乐和徐涵秋, 2010).它通过采集两幅不同年份影像上不随时间发生变化的地物的象元,对这些象元进行回归分析,找出它们之间的关系式,然后再将其用于校正所建立的模型.常用的不变特征地物有建筑物、道路、干裸土、深水等.因此在所研究的 3 个年份中选取了这些不变地物的 MNDVI 值,然后将 2004、2009 年获得的不变象元的 MNDVI 值分别与 2011 年对应不变象元的 MNDVI 值进行回归分析,得到了它们之间的回归关系方程:

$$\begin{aligned}
 &2004 \text{ 年: } MNDVI_{2011} = 1.0506MNDVI_{2004} - 0.0167 \quad (R^2=0.771, Sig.<0.001), \quad (6) \\
 &2009 \text{ 年: } MNDVI_{2011} = 0.9637MNDVI_{2009} +
 \end{aligned}$$

0.022 3 ( $R^2=0.770, Sig.<0.001$ ), (7)

将以上回归方程代入表 1 建立的 2011 年马尾松林碳储量反演的指数模型,就得到校正后的 2004 年和 2009 年时相的马尾松林碳储量反演模型:

$$2004 \text{ 年: } C_{2004} = 0.271 6e^{8.818(1.050 6MNDVI_{2004}-0.016 7)}, \quad (8)$$

$$2009 \text{ 年: } C_{2009} = 0.271 6e^{8.818(0.963 7MNDVI_{2009}+0.022 3)}. \quad (9)$$

### 3 结果与分析

利用上文建立的 2004、2009 和 2011 年马尾松林碳储量反演模型,分别对各年份的马尾松林碳储量进行反演(表 2),并将碳储量反演结果划分为 5 个等级进行统计(表 3),以揭示研究区马尾松林碳储量的时空分布变化情况。

#### 3.1 马尾松林碳储量的时间变化

从表 2 可知,2004—2011 年研究区马尾松林的碳密度和总碳储量均呈逐步上升的趋势,与四川省及全国的森林碳储量变化趋势一致(方精云等, 2007;黄从德等,2008).碳密度由 2004 年的  $27.31 \times 10^{-4} \text{ t/m}^2$  增长到 2011 年的  $35.84 \times 10^{-4} \text{ t/m}^2$ ;总碳储量增加了  $3.22 \times 10^5 \text{ t}$ ,年增长  $0.459 \times 10^5 \text{ t/a}$ ,年均增长率 4.95%。其中,2004—2009 年间马尾松林碳密度增加了  $5.89 \times 10^{-4} \text{ t/m}^2$ ,总碳储量增加了  $2.34 \times 10^5 \text{ t}$ ;2009—2011 年间马尾松林碳密度增加了  $2.64 \times 10^{-4} \text{ t/m}^2$ ,总碳储量增加了  $0.87 \times 10^5 \text{ t}$ 。

森林的碳密度年变化量反映了各年份森林碳储量的增加或减少,可以表征该森林年际尺度碳源汇的大小(陈德祥等,2010)。据表 2 可知,研究区的碳密度年变化量均为正值,分别为 2004—2009 年的  $1.18 \times 10^{-4} \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  和 2009—2011 年的  $1.32 \times 10^{-4} \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,表明研究区的马尾松林在 2004—2011 年间均为碳汇,而且碳汇作用越来越显著。表 3 表明低碳储量的马尾松林比重在逐步减少,碳储量低于  $50 \times 10^{-4} \text{ t/m}^2$  的马尾松林面积比例从 2004 年的 83.49% 减少到 2011 年的 76.98%,相应的碳储量总量比例由 47.87% 降低到 37.11%;而碳储量高于  $75 \times 10^{-4} \text{ t/m}^2$  的马尾松林面积比例则由 2004 年的 7.63% 逐渐增长到 2011 年的 13.51%,相应的碳储量总量比例也由 32.31% 逐步提高到 46.63%。这表明,水土流失治理的生态修复已使得高碳储量的马尾松林的比重逐渐增加,碳储量结构朝良性发展。

表 2 2004—2011 年研究区的马尾松林碳储量统计

Table 2 The carbon storage of *Pinus massoniana* forest in the study area from 2004 to 2011

时间 (年)	面积 ( $10^4 \text{ m}^2$ )	碳密度 ( $10^{-4} \text{ t/m}^2$ )	总碳储量 ( $10^5 \text{ t}$ )
2004	33 965.40	27.31	9.28
2009	35 003.94	33.20	11.62
2011	34 856.45	35.84	12.49

表 3 2004—2011 年间各级马尾松林碳储量的分布统计

Table 3 The classified carbon storage of *Pinus massoniana* forest during the study years

碳储量范围 ( $10^{-4} \text{ t/m}^2$ )	面积所占百分比(%)			碳储量总量所占百分比(%)		
	2004 年	2009 年	2011 年	2004 年	2009 年	2011 年
$C \leq 25$	64.46	53.40	57.54	22.86	18.81	17.72
$25 < C \leq 50$	19.03	24.53	19.44	25.01	26.61	19.39
$50 < C \leq 75$	8.88	12.06	9.51	19.82	22.17	16.26
$75 < C \leq 100$	4.09	5.51	5.35	12.85	14.25	12.89
$C > 100$	3.54	4.50	8.16	19.47	18.16	33.74

#### 3.2 马尾松林碳储量的空间分布特征

森林碳储量的空间分布主要受到人类活动的影响(王淑君等,2008)。图 5 为 2004—2011 年间研究区内不同等级的马尾松林碳储量的时空分布图。图 5 表明,在不同年份,研究区马尾松林碳储量的空间分布均呈现出“外高内低”的分布特征:高碳储量的马尾松林主要分布在河田盆地外围地区,而盆地内的马尾松林因受人类活动影响强烈,其碳储量明显较低。

为研究马尾松林碳储量在高程、坡度上的空间变化特征,本研究将 2004、2009 和 2011 年的马尾松林碳储量分布图分别与研究区的 DEM 及其衍生的坡度图进行叠加分析。将高程划分为  $\leq 400 \text{ m}$ 、 $400 \sim 600 \text{ m}$ 、 $600 \sim 800 \text{ m}$  和  $> 800 \text{ m}$  四级。参照国家林业局(2003)的《森林资源规划设计调查主要技术规定》,将坡度分为平坡( $\leq 5^\circ$ )、缓坡( $5^\circ \sim 15^\circ$ )、斜坡( $15^\circ \sim 25^\circ$ )、陡坡( $25^\circ \sim 35^\circ$ )、急坡( $35^\circ \sim 45^\circ$ )和险坡( $> 45^\circ$ ) 6 个等级。

如表 4 所示,研究区不同年份的马尾松林碳储量在高程上表现出相对一致的空间分布特点:马尾松林平均碳储量均呈现随着高程的增大而增加的趋势。究其原因在于:高程小的区域人类活动频繁,许多成熟马尾松林被严重破坏,代之以新种植的幼龄马尾松林,但由于幼龄马尾松林的碳储量较低(刘国华等,2000),低海拔区的马尾松林平均碳储量也较低。随着高程的增加,人类活动减少,对马尾松林的

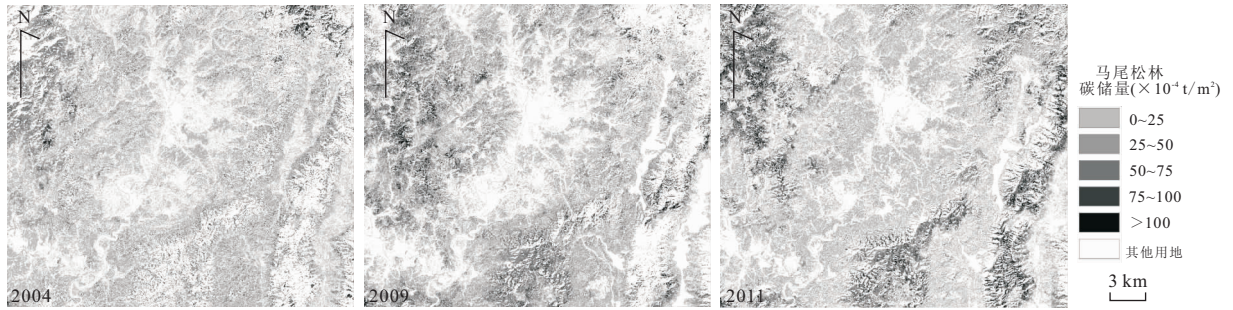


图 5 各研究年份的马尾松林碳储量分布

Fig.5 Spatial variations of the carbon storage of *Pinus massoniana* forest in the study area

表 4 马尾松林碳储量在不同高程的分布特征

Table 4 Spatial variations of the carbon storage of *Pinus massoniana* forest with different altitudes

时间(年)	高程(m)	面积(10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	面积所占百分比(%)	平均碳储量(10 <sup>-4</sup> t/m <sup>2</sup> )	总碳储量(10 <sup>5</sup> t)	总碳储量所占百分比(%)
2004	≤400	21 754.93	64.05	17.80	3.87	41.74
	400~600	9 917.48	29.20	37.09	3.68	39.65
	600~800	2 113.22	6.22	73.01	1.54	16.63
	>800	179.78	0.53	101.82	0.18	1.97
2009	≤400	22 084.37	63.09	24.36	5.38	46.30
	400~600	10 988.52	31.39	45.56	5.01	43.08
	600~800	1 834.30	5.24	64.13	1.18	10.12
	>800	96.74	0.28	59.42	0.06	0.49
2011	≤400	20 621.14	59.16	20.42	4.21	33.70
	400~600	10 608.53	30.43	49.24	5.22	41.82
	600~800	3 321.45	9.53	83.78	2.78	22.28
	>800	305.32	0.88	90.20	0.28	2.20

表 5 马尾松林碳储量在不同坡度的分布特征

Table 5 Spatial variations of the carbon storage of *Pinus massoniana* forest with different slopes

时间(年)	坡度(°)	面积(10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	面积所占百分比(%)	平均碳储量(10 <sup>-4</sup> t/m <sup>2</sup> )	总碳储量(10 <sup>5</sup> t)	总碳储量所占百分比(%)
2004	≤5	9 463.51	27.86	22.45	2.12	22.90
	5~15	13 528.01	39.83	22.91	3.10	33.40
	15~25	7 120.64	20.96	32.28	2.30	24.77
	25~35	2 913.87	8.58	42.82	1.25	13.45
	35~45	788.24	2.32	52.38	0.41	4.45
	>45	151.14	0.44	63.00	0.10	1.03
2009	≤5	9 251.32	26.43	28.93	2.68	23.03
	5~15	13 680.01	39.08	29.04	3.97	34.19
	15~25	7 773.11	22.21	37.68	2.93	25.20
	25~35	3 262.26	9.32	45.87	1.50	12.88
	35~45	877.88	2.51	52.20	0.46	3.94
	>45	159.36	0.46	55.19	0.09	0.76
2011	≤5	9 362.68	26.86	29.56	2.77	22.16
	5~15	13 470.33	38.65	29.37	3.96	31.67
	15~25	7 460.13	21.40	42.19	3.15	25.19
	25~35	3 348.35	9.61	54.95	1.84	14.73
	35~45	1 009.36	2.90	63.70	0.64	5.15
	>45	205.61	0.59	67.12	0.14	1.10

干扰强度减小,碳储量较高的成熟马尾松林所占比例增大,因而马尾松林平均碳储量也不断增大.但

是由于占研究区内马尾松林总面积约 90% 的马尾松林均分布在高程小于 600 m 的区域,因此,该区马

尾松林总碳储量中的约 80% 集中分布于高程小于 600 m 的区域。

由表 5 可知, 3 个年份的马尾松林碳储量在坡度上也呈现相似的空间分布特征: 马尾松林平均碳储量均随坡度的增大而呈增大趋势, 在坡度大于 45° 的区域达到最大值。这同样是因为坡度低的区域受人类活动的影响强烈, 马尾松林多为新种植的幼龄林, 其碳储量较低; 随着坡度的增大, 人为干扰的程度减小, 碳储量高的成熟马尾松林比例增多, 因而马尾松林平均碳储量也不断增大。然而, 占马尾松林总面积比例达 86% 以上的马尾松林均分布在坡度低于 25° 的区域, 使得该区域的马尾松林碳储量比例达到总量的 80% 左右。

## 4 结论

(1) 利用遥感技术可以快速有效地揭示大面积马尾松林的碳储量时空动态变化。采用基于野外实地调查数据和 SPOT5 影像光谱信息建立的马尾松林碳储量反演模型精度较高, 通过相对辐射校正可以实现反演模型在历史时期的推算应用, 其结果能比较合理且准确地反映出马尾松林碳储量的空间分布特征和动态变化。

(2) 通过侵蚀退化生态系统的生态恢复与重建, 可以大大增强森林的碳汇能力。长汀河田地区的生态修复工程使得该地区在 2004—2011 年间, 马尾松林的总碳储量增加了  $3.22 \times 10^5$  t, 碳密度增加到  $35.84 \times 10^{-4}$  t/m<sup>2</sup>, 马尾松林碳汇作用显著。

(3) 河田盆地区的马尾松碳储量的空间分布呈现一定的规律性: 在高程上, 马尾松林碳储量主要集中在低于 600 m 的区域, 但马尾松林的平均碳储量则表现为随着高程的加大而增长的趋势; 在坡度上, 马尾松林碳储量主要分布在坡度低于 25° 的区域, 但其平均碳储量则随坡度的增大而增大, 在坡度大于 45° 的区域达到最大值。

致谢: 在本文的试验研究过程中, 课题组成员陈文惠、林娜、杨冉冉和张清林等同志参与了野外调查工作, 在此表示衷心的感谢!

## References

Chen, D. X., Li, Y. D., Liu, H. P., et al., 2010. Biomass and Carbon Dynamics of a Tropical Mountain Rain Forest in China. *Science in China: Life Science*, 40(7): 596—609 (in Chinese with English abstract).

Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., et al., 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies, Japan.

Fang, J. Y., Guo, Z. D., Piao, S. L., et al., 2007. Terrestrial Vegetation Carbon Sinks in China, 1981—2000. *Science in China (Ser. D)*, 37(6): 804—812 (in Chinese with English abstract).

Fujian Forestry Survey and Design Institute, 1978. Forest Survey Tables. Fujian Forestry Survey and Design Institute, Fujian (in Chinese).

Gallaun, H., Zanchi, G., Nabuurs, G., et al., 2010. EU-Wide Maps of Growing Stock and Aboveground Biomass in Forests Based on Remote Sensing and Field Measurements. *Forest Ecology and Management*, 260(3): 252—261. doi: 10.1016/j.foreco.2009.10.011

García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., et al., 2010. Estimating Biomass Carbon Stocks for a Mediterranean Forest in Central Spain Using LiDAR Height and Intensity Data. *Remote Sensing of Environment*, 114(4): 816—830. doi: 10.1016/j.rse.2009.11.021

Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., et al., 2007. Monitoring and Estimating Tropical Forest Carbon Stocks: Making REDD a Reality. *Environmental Research Letters*, 2(4): 1—13. doi: 10.1088/1748—9326/2/4/045023

Houghton, R. A., Hackler, J. L., Lawrence, K. T., 1999. The U. S. Carbon Budget: Contributions from Land-Use Change. *Science*, 285(5427): 574—578. doi: 10.1126/science.285.5427.574

Huang, C. D., Zhang, J., Yang, W. Q., et al., 2008. Dynamics on Forest Carbon Stock in Sichuan Province and Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 28(3): 965—975 (in Chinese with English abstract).

Hudak, A. T., Strand, E. K., Vierling, L. A., et al., 2012. Quantifying Aboveground Forest Carbon Pools and Fluxes from Repeat LiDAR Surveys. *Remote Sensing of Environment*, 123: 25—40. doi: 10.1016/j.rse.2012.02.023

Hyde, P., Nelson, R., Kimes, D., et al., 2007. Exploring LiDAR-RaDAR Synergy—Predicting Aboveground Biomass in a Southwestern Ponderosa Pine Forest Using LiDAR, SAR and InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 106(1): 28—38. doi: 10.1016/j.rse.2006.07.017

Jiang, F. S., Huang, Y. H., Zhong, B. L., et al., 2009. Effects of Different Measures on Biomass and Productivity in Eroded Red-Soil Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 29(5): 12—16 (in Chinese with English abstract).

Li, H. K., Lei, Y. C., 2010. Forest Biomass and Carbon Stocks



- of Vegetation Assessment in China. China Forestry Publishing House, Beijing, 29—30 (in Chinese).
- Liang, S. L., Fang, H. L., Chen, M. Z., 2011. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (11): 2490—2498.
- Lin, N., Xu, H. Q., He, H., 2013. Land Use Changes in a Reddish Soil Erosion Region of Southern China, Hetian Basin, County Changting. *Acta Ecologica Sinica*, 33 (10): 3115—3127 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. H., Fu, B. J., Fang, J. Y., 2000. Carbon Dynamics of Chinese Forests and Its Contribution to Global Carbon Balance. *Acta Ecologica Sinica*, 20 (5): 733—740 (in Chinese with English abstract).
- Myeong, S., Nowak, D. J., Duggin, M. J., 2006. A Temporal Analysis of Urban Forest Carbon Storage Using Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, 101 (2): 277—282. doi:10.1016/j.rse.2005.12.001
- Nemani, R., Pierce, L., Running, S., et al., 1993. Forest Ecosystem Processes at the Watershed Scale; Sensitivity to Remotely-Sensed Leaf Area Index Estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (13): 2519—2534. doi:10.1080/01431169308904290
- Olson, J. S., Watts, J. A., Allison, L. J., 1983. Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystem. United States Department of Energy, Washington, D.C..
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J. Y., et al., 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333 (6045): 988—993. doi:10.1126/science.1201609
- Piao, S. L., Fang, J. Y., Ciais, P., et al., 2009. The Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems in China. *Nature*, 458 (7241): 1009—1013. doi:10.1038/nature07944
- Sabine, C. L., Heimann, M., Artaxo, P., et al., 2004. Current Status and Past Trends of the Global Carbon Cycle. In: Field, C. B., Raupach, M. R., eds., *The Global Carbon Cycle; Integrating Humans, Climate and the Natural World*. Island Press, Washington, 17—44.
- Schott, J. R., Salvaggio, C., Volchok, W. J., 1988. Radiometric Scene Normalization Using Pseudoinvariant Features. *Remote Sensing of Environment*, 26 (1): 1—14. doi:10.1016/0034-4257(88)90116-2
- State Forestry Administration, 2003. Forest Resource Planning Design Investigation Main Technical Regulations. State Forestry Administration, Beijing, 13—14 (in Chinese).
- Wang, S. J., Guan, D. S., Li, X., et al., 2008. The Temporal Spatial Evolution and Heterogeneity of Forest Carbon in Guangzhou, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28 (4): 778—785 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X. L., Xu, H. Q., 2010. Remote Sensing Analysis of Impact of Fuzhou City Expansion on Water Quality of Lower Minjiang River, China. *Scientia Geographica Sinica*, 30 (4): 624—629 (in Chinese with English abstract).
- Xie, J. S., Huang, R. Z., Chen, Y. X., et al., 2001. Change of Biomass and Productivity of *Pinus massoniana* Community after Closing of Hillsides and Management in Serious Eroded Red Soil. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 18 (4): 354—358 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. Q., 2007. Image-Based Normalization Technique Used for Landsat TM/ETM+ Imagery. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 32 (1): 62—66 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. Q., 2008. Comparison of the Models for the Normalization of Landsat Imagery. *Geo-Information Science*, 10 (3): 294—301 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. Q., Zhang, T. J., 2011. Cross Comparison of ASTER and Landsat ETM+ Multispectral Measurements for NDVI and SAVI Vegetation Indices. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 31 (7): 1902—1907 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, C. S., 2006. Fujian Typical Area Ecological Environment Research. China Environmental Science Press, Beijing, 1—26 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈德祥, 李意德, Liu Heping, 等, 2010. 尖峰岭热带山地雨林生物量及碳库动态. *中国科学: 生命科学*, 40 (7): 596—609.
- 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等, 2007. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学(D辑)*, 37 (6): 804—812.
- 福建省林业勘察设计院, 1978. 森林调查用表. 福建: 福建省林业勘察设计院.
- 黄从德, 张健, 杨万勤, 等, 2008. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. *生态学报*, 28 (3): 965—975.
- 蒋芳市, 黄炎和, 钟炳林, 等, 2009. 不同治理措施对侵蚀红壤区生物量及生产力的影响. *水土保持通报*, 29 (5): 12—16.
- 李海奎, 雷渊才, 2010. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社. 29—30.
- 林娜, 徐涵秋, 何慧, 2013. 南方红壤水土流失区土地利用动态变化研究——以长汀河田盆地区为例. *生态学报*, 33 (10): 3115—3127.
- 刘国华, 傅伯杰, 方精云, 2000. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 20 (5): 733—740.

- 国家林业局, 2003. 森林资源规划设计调查主要技术规定. 北京: 国家林业局, 13—14.
- 王淑君, 管东生, 黎夏, 等, 2008. 广州森林碳储量时空演变及异质性分析. 环境科学学报, 28(4): 778—785.
- 温小乐, 徐涵秋, 2010. 福州城市扩展对闽江下游水质影响的遥感分析. 地理科学, 30(4): 624—629.
- 谢锦升, 黄荣珍, 陈银秀, 等, 2001. 严重侵蚀红壤封禁管理后群落的生物量及生产力变化. 浙江林学院学报, 18(4): 354—358.

- 徐涵秋, 2007. 基于影像的 Landsat TM/ETM+ 数据正规化技术. 武汉大学学报(信息科学版), 32(1): 62—66.
- 徐涵秋, 2008. Landsat 遥感影像正规化处理的模型比较研究. 地球信息科学, 10(3): 294—301.
- 徐涵秋, 张铁军, 2011. ASTER 与 Landsat ETM+ 植被指数的交互比较. 光谱学与光谱分析, 31(7): 1902—1907.
- 曾从盛, 2006. 福建典型区生态环境研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1—26.

\* \* \* \* \*

(上接 1080 页)

- Wang, Y. L., An, W. C., Xu, Y., 2011. Present Status and Environmental Assessment on Water Quality of Jiaozhou Bay. *Environmental Science and Management*, 36(9): 164—167 (in Chinese with English abstract).
- Windom, H. L., Moore, W. S., Niencheski, L. H., et al., 2006. Submarine Groundwater Discharge: A Large, Previously Unrecognized Source of Dissolved Iron to the South Atlantic Ocean. *Marine Chemistry*, 102(3—4): 252—266. doi:10.1016/j.marchem.2006.06.016
- Zhuo, W. H., Iida, T., Yang, X. T., 2001. Occurrence of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and U in Groundwater in Fujian Province, China. *Journal of Environmental Radioactivity*, 53(1): 111—120. doi:10.1016/S0265—931X(00)00108—9

### 附中文参考文献

- 陈晨, 杨桂鹏, 高先池, 等, 2012. 胶州湾微表层和次表层海水中营养盐的分布特征及富营养化研究. 环境科学学报, 32(8): 1856—1865.
- 陈金瑞, 陈学恩, 于华明, 等, 2011. 胶州湾潮汐潮流高分辨率数值模拟研究. 中国海洋大学学报, 41(7/8): 29—35.
- 郭占荣, 黄磊, 刘花台, 等, 2008. 镭同位素示踪隆教湾的海底地下水排泄. 地球学报, 29(5): 647—652.
- 郭占荣, 黄磊, 袁晓婕, 等, 2011. 用镭同位素评价九龙江河口区的地下水输入. 水科学进展, 22(1): 118—125.
- 郭占荣, 李开培, 袁晓婕, 等, 2012. 用氡-222 评价五缘湾的地下水输入. 水科学进展, 23(2): 263—270.
- 王艳玲, 安文超, 许颖, 2011. 胶州湾海域水质现状评价. 环境科学与管理, 36(9): 164—167.