

三峡大老岭自然保护区 森林生态系统 10 年 (2000–2010 年) 质量变化

甘娟¹, 葛继稳^{1*}, 刘奕伶¹, 王自业^{1,2}, 吴先¹, 丁少华¹

(1. 中国地质大学湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 生态环境研究所, 武汉 430074;

2. 中海石油环保服务(天津)有限公司, 天津 300452)

摘要: 为了解湖北三峡大老岭自然保护区森林生态系统质量状况, 利用多种遥感卫星影像资料并结合野外调查数据, 对该保护区 10 年间(2000–2010 年)的森林生态系统中植物地上生物量(AGB)、叶面积指数(LAI)、净初级生产力(NPP)的年际变化进行了比较研究。结果显示: (1)大老岭自然保护区 10 年间 AGB 总体呈下降趋势, 但下降幅度很小, 说明大老岭自然保护区森林生态系统植被结构状态比较稳定, 但整个森林生态系统的结构稳定性不够, 应创新管理机制, 减少人为干扰; (2)年均 LAI 以中等(1.6~2.2)和较高等级(2.2~2.8)所占比例较大, 年均 LAI 为 1.6~2.8 的植被面积占该区植被总面积的 90%以上并呈增加趋势, 说明该保护区内植被长势较好、生活力旺盛; (3)10 年间 NPP 年总量具有缓慢增加的趋势, 即从 4.99×10^{10} gC (2000 年)增加到 5.07×10^{10} gC (2010 年), 说明自然保护区内森林生态系统林分类型多样, 异质性较强, 整个森林生态系统生产能力较高。本研究结果表明大老岭自然保护区森林生态系统质量总体较好, 也从侧面反映出建立自然保护区进行植被保护所取得的效果。

关键词: 地上生物量; 叶面积指数; 净初级生产力; 大老岭自然保护区; 三峡库区

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2015)06-0766-09

Forest Ecosystem Quality Change over Ten Years (2000–2010) in the Three Gorges Dalaoling Nature Reserve

GAN Juan¹, GE Ji-Wen^{1*}, LIU Yi-Ling¹, WANG Zi-Ye^{1,2}, WU Xian¹, DING Shao-Hua¹

(1. Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution & Ecological Restoration, Institute of Ecology and Environmental Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. CNOOC Environmental Services (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: To understand the quality of the forest ecosystem in Hubei Dalaoling Provincial Nature Reserve in the Three Gorges area, we used remote sensing satellite image data combined with field survey and available material to conduct a comparative study of changes in above-ground biomass (AGB), leaf area index (LAI) and net primary productivity (NPP) from 2000 to 2010. Results showed that: (1) AGB decreased over the 10 years, but the decline was very small, indicating that the vegetation structure of the Dalaoling forest ecosystem is relatively stable. However, further management mechanisms are still required to reduce human disturbance; (2) According to annual average LAI, medium(1.6 – 2.2) and relatively high level LAI(1.6 – 2.8) accounted for the major proportion of LAI, and the annual average LAI between 1.6 – 2.8 accounted for more than 90% of total area and showed an increasing trend, suggesting that vegetation is vigorous and growing well; (3) Total NPP

收稿日期: 2015-05-23, 退修日期: 2015-07-02。

基金项目: 国家环保部湖北省生态环境 10 年(2000–2010 年)变化遥感调查与评估(2012046151); 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项资金(G1323521225, G1323521325)。

作者简介: 甘娟(1989–), 女, 硕士研究生, 主要从事植被生态学研究(E-mail: cug_agan08@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: gejiwen2002@aliyun.com)。

increased slowly over the 10 years, from 4.99×10^{10} gC in 2000 to 5.07×10^{10} gC in 2010. The forest ecosystem has rich forest types, strong heterogeneity and high production capacity. Comprehensive analysis suggested that the forest ecosystem quality in Dalaoling Nature Reserve is generally good and has maintained good stability over the last 10 years, which is a reflection of conservation and protection measures.

Key words: Above-ground biomass; Leaf area index; Net primary productivity; Dalaoling Nature Reserve; Three Gorges Reservoir Region

森林作为生物多样性保护的重要层次，是保存珍稀濒危物种的主要场所。三峡库区地处长江中上游，是我国乃至世界生物多样性保护研究的热点地区，也是我国生态环境保护的重点地区。三峡工程正式启动后，许多学者先后对三峡库区的森林资源进行了研究^[1–3]。随着遥感技术的发展，对三峡库区森林植被生物量和生产力的研究也逐渐深入^[4–6]。大老岭自然保护区作为三峡库区生物多样性的典型和关键区域，其森林覆盖率达90%^[7]，是三峡库区最重要、最直接水源涵养林区，是长江三峡库区坝前生态屏障。近年来已对大老岭的森林植被进行了一些调查研究^[8–10]，但还未见对大老岭自然保护区植被生物量、生产力以及森林生态系统质量进行系统研究的报道。

我们在野外调查的基础上，结合全国生态环境10年变化(2000–2010年)遥感调查与评估项目组提供的遥感反演数据及资料，对大老岭自然保护区森林生态系统的生物量、叶面积指数和净初级生产力10年间(2000–2010年)的年际变化进行比较研

究，以期了解保护区的植被生态质量状况，为森林生态系统建设、该保护区及周边区域经济发展和生态安全提供参考。

1 研究区自然概况

湖北三峡大老岭省级自然保护区位于鄂西南宜昌市夷陵区境内，地处大巴山系东端荆山余脉、长江三峡西陵峡左岸、三峡大坝库首^[7](图1)，地理坐标为北纬30°52′35″~31°07′24″，东经110°51′08″~110°00′26″。大老岭自然保护区总面积14 225 hm²，其中，核心区面积5127 hm²，缓冲區面积4410 hm²，实验区面积4598 hm²^[11]。该保护区是以森林生态系统为主要对象的保护区，是三峡库区生物多样性的典型代表和生态环境关键区域。保护区内优势群落有马尾松林(Form. *Pinus massoniana*)、杉木林(Form. *Cunninghamia lanceolata*)、栓皮栎林(Form. *Quercus variabilis*)、青冈栎林(Form. *Cyclobalanopsis glauca*)、宜昌润楠林(Form. *Machilus ichangensis*)、米心水青

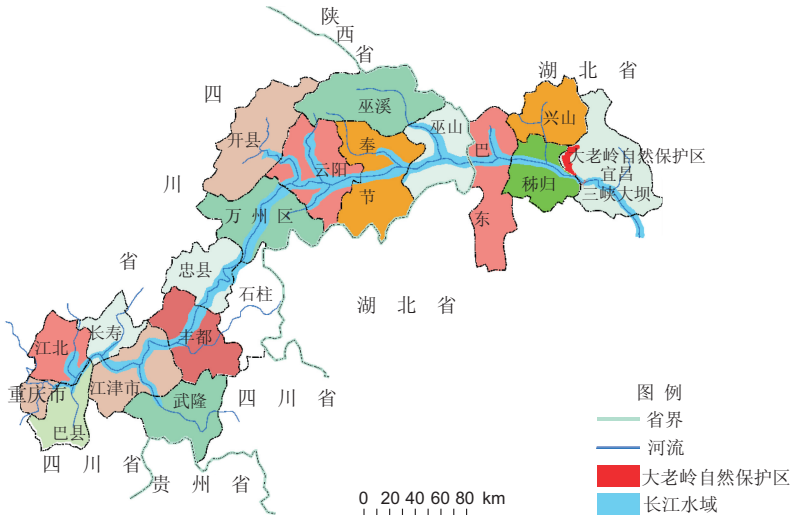


图1 大老岭自然保护区在三峡库区的位置
Fig. 1 Location of Dalaoling Nature Reserve in the Three Gorges Reservoir Region

冈林 (Form. *Fagus engleriana*)、板栗林 (Form. *Castanea mollissima*)、华山松林 (Form. *Pinus armandii*)、刺叶栎林 (Form. *Quercus spinosa*) 等^[10]；主要植被类型有针叶林、常绿阔叶林、常绿阔叶落叶混交林、落叶阔叶混交林、针阔混交林、灌丛等^[7](图 2)。

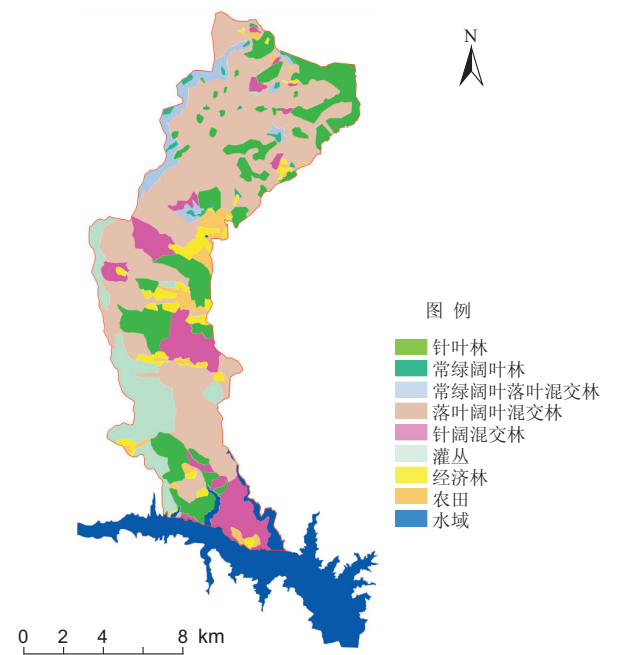


图 2 大老岭自然保护区植被类型
Fig. 2 Vegetation types in Dalaoling Nature Reserve

2 数据来源

本研究的遥感数据来源于美国地质勘探局网站 (<http://www.usgs.gov/>) 下载的 MODIS (中分辨率成像光谱仪 moderate-resolution imaging spectroradiometer) 的 16 天合成 NDVI 数据^[12]；生态参量反演所用到的数据见表 1；除遥感数据之外，生态参量的提取还需要气候数据以及地面样地调查

数据(叶面积指数及生物量)的支持。温度及降水量数据从中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn/home.do>) 下载获取。

3 研究方法

生态系统质量主要表征生态系统自然植被的优劣程度，反映生态系统内植被的整体状况。森林群落的生物量 (AGB) 是森林生态系统结构优劣和功能高低的最直接表现；叶面积指数 (LAI) 是反映植物长势的一个重要生物学参数，也是森林生态系统的一个重要结构参数^[13]；净初级生产力 (NPP) 通常用来描述生态系统的生产能力^[14,15]。因此，本研究选取生物量、叶面积指数、净初级生产力 3 个生态参量，并通过这 3 个生态参量在 10 年间 (2000–2010) 的动态变化来反映大老岭森林生态系统质量状况，了解整个森林生态系统自然植被优劣程度及整体水平。

三峡大老岭自然保护区森林生态系统 10 年质量变化调查是以 2000–2010 年每一年为时间点 (AGB 调查以每 5 年为时间点) 进行调查，并结合遥感、地面调查以及已有的生态系统多年观测数据进行分析。遥感反演过程和数据由全国生态环境 10 年变化 (2000–2010 年) 遥感调查与评估项目组统一提供，地表参量遥感提取由中国科学院遥感应应用研究所测量完成。

实测数据通过野外调查获得：在大老岭自然保护区森林生态系统中共设置 5 个面积为 100 m × 100 m 的样地，每个样地内再设置 2 个 30 m × 30 m 的样方、3 个 5 m × 5 m 的林下植被样方；调查参数有：植物种类、株数、胸径、郁闭度、叶面积指数和生物量等。利用野外调查数据对反演结果进行准确性验证。

表 1 遥感数据列表
Table 1 Remote sensing data list

参量 Parameter	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Time resolution	数据源 Data source	辅助数据 Auxiliary data	时相 Phase
净初级生产力 Net primary production (NPP)	250 m	16 d	MODIS NDVI	气象数据	2000~2010
叶面积指数 Leaf area index (LAI)	250 m	16 d	MODIS NDVI	地面 LAI 测量数据	2000~2010
生物量 Above-ground biomass (AGB)	250 m	16 d	MODIS NDVI	地面森林生物量	2000、2005、2010

3.1 地上生物量(AGB)估算

3.1.1 生物量野外观测

大老岭自然保护区森林生态系统地上生物量观测分为立木和冠层下部观测，立木与冠层下部生物量之和即为样方生物量。

立木的地上生物量观测：对每个样方(30 m×30 m)内所有立木进行测量，获取树高、胸径等地面观测数据，依据相对生长方程，以所有林木生物量的平均值除以样方面积，即得到 1 m² 的立木生物量。

冠层下部活体植被地上生物量观测：在每个样方(30 m×30 m)内，随机选择 3 个 5 m×5 m 的林下植被样方，分别收集其全部地上植被，称量鲜重，并从中抽取不少于 5% 的样品，于 105℃ 烘干、称取干重，获取林下植被含水量，进而获得实测的地上生物量，计算 3 个林下植被样方生物量平均值并除以样方面积，获得冠层下部 1 m² 植被的生物量。

3.1.2 地上生物量的遥感估算

采用多源遥感数据协同反演的方法实现对森林生态系统地上生物量的估算。通过 ICESAT GLAS 星载激光雷达数据与光学数据相结合获取森林地上生物量监测数据，在此基础上，依据基于“LTSS-VCT”方法获取的植被扰动信息，并从中提取树龄信息，分别外推不同年份的森林地上生物量数据^[16,17]。具体步骤如下：

(1) 基于星载激光雷达实现对森林树高的建模反演，获取离散光斑点的森林树高估算结果。(2) 在树高反演结果的基础上依据相对生长方程进行森林地上生物量的反演计算，进而获取离散光斑点的森林地上生物量估算结果。(3) 根据不同的气候、地理条件，与光学/雷达遥感数据相结合，基于无缝推演算法，进行森林地上生物量空间上的融合外推。(4) 基于“LTSS-VCT”方法获取森林的植被扰动状况，并从中提取森林的树龄信息；通过时间序列的 TM/HJ 数据实现森林植被扰动信息的提取。(5) 依据森林生长模型，在时间尺度上进行森林地上生物量的外推。

根据以上获取的林龄信息，基于土地覆盖分类结果，模拟不同森林的生长，以 2005 年的估算结

果为基础，在时间尺度上外推，进而获取 2000、2010 年森林地上生物量的分布状况。

3.2 叶面积指数(LAI)估算

3.2.1 森林生态系统叶面积指数野外观测

野外观测时采用 TRAC-II 进行测量，然后计算样方的平均 LAI。采样点沿样地的两条斜对角线等间距分布，两点之间间隔 5 m，每条对角线上观测 8 次。

3.2.2 森林生态系统叶面积指数遥感估算

基于冠层辐射传输模型，采用查找表(LUT)的方法来反演 LAI。该方法是在冠层辐射传输模型的基础上建立查找表，进而通过遥感影像中每个像元相应的植被指数 NDVI 在表中进行查找匹配，实现 LAI 的遥感反演^[18]。具体步骤如下：

运行冠层辐射传输模型，按一定的步长输入相应的 LAI 及其他辅助参数(如植被类型、叶倾角等)，模拟冠层反射率或植被指数，进而建立查找表；根据标准化处理后的植被指数，构建代价函数，在查找表中查找最接近的项并进行插值，然后获取该像元对应的 LAI 值。

3.3 净初级生产力(NPP)估算

光能利用率模型估算 NPP 基于资源平衡观点，是目前应用最多的一种 NPP 遥感反演模型。CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型是由 Potter 等^[19]建立的、目前使用较多的光能利用率模型。本研究采用 CASA 模型对净初级生产力进行计算^[20,21]，即：

$$NPP = APAR(t) \times \epsilon(t) \tag{1}$$

$$APAR = FPAR \times PAR \tag{2}$$

式(1)和(2)中， $APAR(t)$ 为 t 月份植被吸收的光合有效辐射， $\epsilon(t)$ 为 t 月份的光能利用率， $APAR$ 表示植被吸收的光合有效辐射， $FPAR$ 表示光合有效辐射吸收比例， PAR 表示光合有效辐射。

模型参数包括平均温度、蒸散量、日照时数、植被指数、反照率、植被类型、像元经纬度信息等。

从资料文档、气象数据中得到太阳总辐射量及日照时数信息，然后结合研究区中像元经纬度计算得到 PAR 。利用 MODIS NDVI 产品计算得到比值指数 SR (Simple Ratio, 植被归一化指数的简单比率)，然后通过 $FPAR$ 与比值指数 SR 之间存在的关

系,得到 $FPAR$ 。具体公式如下:

$$FPAR = \frac{(SR - SR_{min}) \times (FPAR_{max} - FPAR_{min})}{SR_{max} - SR_{min}} + FPAR_{min} \quad (3)$$

$$SR = \frac{NIR}{RED} = \frac{1 + NDVI}{1 - NDVI} \quad (4)$$

式(3)和(4)中, $FPAR_{min}$ 和 $FPAR_{max}$ 的取值与植被类型无关,分别取值为 0.001 和 0.95; SR_{min} 和 SR_{max} 与植被类型有关,为对应植被类型 $NDVI$ 的 5%和 95%的下侧百分位数。 NIR 和 RED 分别表示近红外波段和红波段的反射率。参数 ϵ 表示植物通过光合作用将吸收的有效光合辐射 ($APAR$) 转化为有机碳的效率,其获取方法为:

$$\epsilon(t) = \epsilon^* \times T_1(t) \times T_2(t) \times W(t) \quad (5)$$

式(5)中, $\epsilon(t)$ 表示在 t 月份的光能利用率, ϵ^* 表示最大光能利用率(单位: gC/MJ), T_1 和 T_2 表示环境温度对光利用的抑制影响, W 表示水分影响胁迫系数。 T_1 、 T_2 和 W 均为无量纲参数。 T_1 、 T_2 和 W 分别由以下公式计算获得:

$$T_1 = -0.0005 (T_{opt} - 20)^2 + 1 \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp\{0.2 (T_{opt} - 10 - T_{mon})\}} \times \frac{1}{1 + \exp\{0.3 (-T_{opt} - 10 + T_{mon})\}} \quad (7)$$

$$W(t) = \frac{EET(t)}{PET(t)} \quad (8)$$

式(6)中, T_{opt} 表示生长季内植被的 $NDVI$ 值达到最高时的月平均气温(单位: $^{\circ}C$), 式(7)中 T_{mon} 表示月平均气温(单位: $^{\circ}C$)。

式(8)中, EET 表示保护区每月实际蒸散量(单位: mm), PET 表示保护区每月潜在蒸散量(单位: mm), 由 ETWatch 计算获得。

利用 ArcGIS 和 Excel 软件对大老岭自然保护区的植被参量及 10 年变化进行统计。

4 结果与分析

4.1 地上生物量

在遥感反演所得生物量数据的基础上,统计得到 3 期(2000 年、2005 年、2010 年)三峡大老岭自然保护区地上植被生物量总量及密度(表 2)。结果显示,该保护区 2005 年植被总生物量比 2000 年有所增加,到 2010 年呈下降趋势,生物量年平均密度

表 2 大老岭自然保护区地上植被生物量及年平均密度
Table 2 Above-ground biomass and annual average density of plants from Dalaojing Nature Reserve

年份 Year	总生物量 Total biomass (gC)	增长百分比 Growth rate	年平均密度 Annual average density (gC/m ²)
2000	9.08×10^{11}	—	5461.98
2005	9.77×10^{11}	7.65%	5879.60
2010	8.97×10^{11}	- 8.19%	5397.98

与总生物量变化趋势一致;从 3 个年份数据来看,2010 年地上总生物量有所下降,但下降幅度较小。

通过计算该保护区森林植被的相对生物量密度,在 ArcGIS 平台上运用 Natural Breakes (Jenks) 分类方法将相对生物量密度分为:低(0~0.2)、较低(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、较高(0.6~0.8)和高(0.8~1)5 个等级,并统计各等级相对生物量密度占自然保护区面积的比例。从图 3 可看出,保护区内植被相对生物量密度呈南低北高的趋势,其中,较低(0.2~0.4)和中等(0.4~0.6)两个级别相对生物量密度所占比例最大(表 3),两者之和在 70%左右,且 3 个时间点(2000 年、2005 年、2010 年)的数值间变化很小,说明该自然保护区植被相对生物量密度以中低水平为主,并保持了生物量构成的总体稳定。

4.2 叶面积指数

将 MODIS 反演叶面积指数进行叠加统计,在 ArcGIS 平台上运用 Natural Breakes (Jenks) 分类方法,对其进行分级统计,得到:低(0~1)、较低(1~1.6)、中等(1.6~2.2)、较高(2.2~2.8)和高(2.8~3.5)5 个等级(图 4),计算得到大老岭自然保护区植被 10 年平均 LAI 值为 2.04。从图 4 可见,大老岭自然保护区植被年均叶面积指数(LAI)以中等(1.6~2.2)和较高(2.2~2.8)两个等级所占比例最大,10 年中(2000-2010),中等级 LAI 所占比例为 70%左右,较高等级 LAI 所占比例约为 25%,两者植被面积占该保护区植被总面积的 90%以上,其他等级所占比例很小,甚至为零。

根据叶面积指数等级面积所占比例,进一步对 10 年间中等级和较高等级叶面积指数面积所占比例的变化趋势进行分析(图 5),可见中等级和较高等级 LAI 占该保护区植被总面积的 90%以上,且 10 年间两者在年际之间的百分比变化趋势差异较大。总

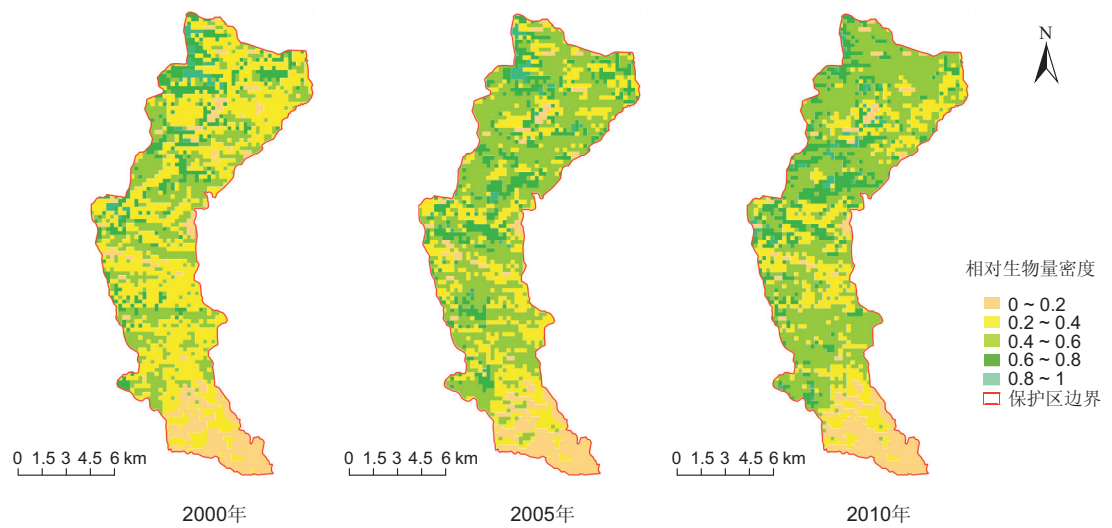


图 3 大老岭自然保护区植被相对生物量密度分布图
Fig. 3 Relative biomass density distribution in Dalaoling Nature Reserve

表 3 大老岭自然保护区地上植被相对生物量
密度等级及所占比例
Table 3 Above-ground biomass and relative proportions
of graded plants from Dalaoling Nature Reserve

年份 Year	低 Lower 0~0.2	较低 Low 0.2~0.4	中等 Medium 0.4~0.6	较高 Relatively high 0.6~0.8	高 High 0.8~1
2000	11.92	44.13	25.12	16.57	2.25
2005	11.21	27.71	44.58	15.19	1.31
2010	11.44	37.72	41.13	9.37	0.34

体来看，两者所占百分比有所增加(由 2000 年的 93.33%增加到 2010 年的 94.04%，图 5)。

4.3 净初级生产力(NPP)

使用 ArcGIS 将 MODIS 反演的净初级生产力数据进行求和，得到各年 NPP 总量变化趋势图(图 6)。结果显示，10 年间 NPP 年总量呈缓慢增加的趋势，从 2000 年的 4.99×10^{10} gC 增加到 2010 年的 5.07×10^{10} gC，10 年间 NPP 的平均值为 $4.93 \times$



图 4 大老岭自然保护区植被年均叶面积指数各等级面积所占比例
Fig. 4 Proportion of annual leaf area index of graded area in Dalaoling Nature Reserve

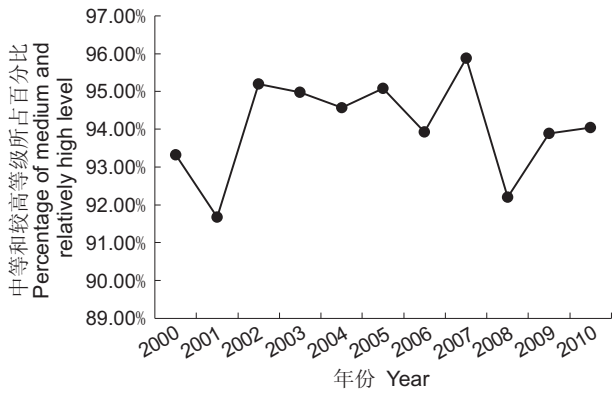


图 5 大老岭自然保护区植被年均 LAI 中等(1.6~2.2)和较高等级(2.2~2.8)所占比列的变化趋势
Fig. 5 Percentage change trend of medium and relatively high level annual leaf area index of Dalaoling Nature Reserve

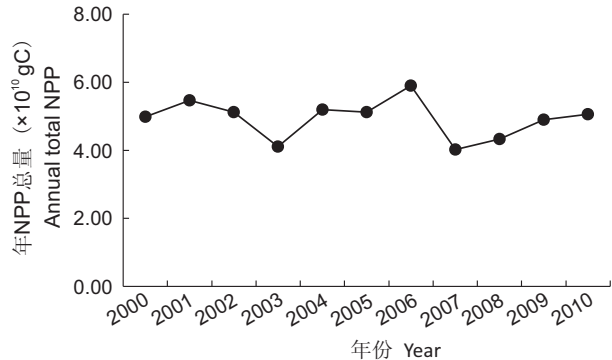
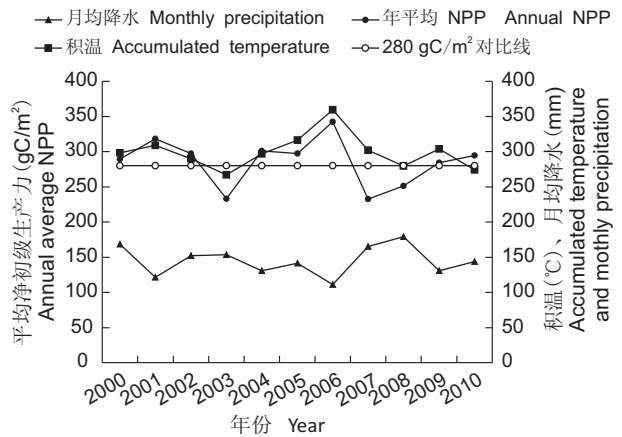


图 6 大老岭自然保护区植被年 NPP 总量变化曲线
Fig. 6 Curve of annual total net primary productivity in Dalaoling Nature Reserve

10^{10} gC。NPP 最高值出现在 2006 年(达到 5.90×10^{10} gC)，最低的是 2007 年(为 4.02×10^{10} gC)。

经统计得到大老岭自然保护区植被年平均净初级生产力、各年 4 - 10 月的积温和平均降水量。根据该保护区所处地区的气候特点，保护区内植被年 NPP 主要是在 4 - 10 月份生长季节产生的，此时期的温度一般在 20°C 以上，降水量也超过 100 mm，可以认为植被 NPP 在 20°C 以上的值较高。因为温度年际变化较小，所以将温度进行差异扩大化处理，即将 4 - 10 月每个月的积温减去 20 个基础温度后相加，然后再乘以 7(4 - 10 月的总积温 - 20×7)。从平均年 NPP、4 - 10 月的积温和平均降水量的变化趋势及相互关系可见(图 7)，该保护区植被年平均 NPP 的年际变化较为明显，表现为在 280 gC/m^2 上下波动，年平均 NPP 与温度的变化趋势总体上较相似，说明温度是大老岭自



图中的积温为 $(t - 140) \times 7$ ，其中 t 为每年 4 - 10 月累积温度；降水为每年 4 - 10 月的平均降水量。
In the figure, accumulated temperature is $(t - 140) \times 7$, t is accumulated temperature each year from April to October; precipitation is average precipitation each year from April to October.

图 7 大老岭自然保护区植被年平均净初级生产力(gC/m^2)与温度、降水的关系

Fig. 7 The relationship of annual average net primary productivity with temperature and precipitation in Dalaoling Nature Reserve

然保护区植被年净初级生产力的主导因子。

5 讨论

5.1 地上生物量 10 年变化

2000 年至 2010 年的 10 年间，该保护区植被生物量总体呈下降趋势，2005 年保护区生物量总量比 2000 年有所增加，可能是由于 2001 年成立三峡大老岭自然保护区以来，采取了一系列保护和管理措施，减少了人为干扰，因而森林植被生物量呈增长趋势，这也证明保护区管理取得了一定的效果。而 2005 年至 2010 年保护区植被生物量有所减少，可能与周边区域经济发展、人为活动频繁有关，自 2006 年该保护区由原来的生产经营型林场向自然保护区转型以来，生态建设带动了旅游迅速发展，保护区鼓励社区居民发展经济，但在经济得到快速发展的同时，频繁的人为活动也增加了对保护区的干扰，使植被的生物量减小，因此要进一步加强保护区的管理并不断创新管理机制。

森林的生物量与森林的年龄组成密切相关。森林的年龄结构除取决于森林自身的发展演化外，在很大程度上还受外部环境的影响，并且受干扰频度越高的森林其幼龄林的比例越大，森林的生物量越小。该保护区植被生物量总体呈下降趋势说明受到

一定的人为干扰, 整个森林生态系统年龄结构存在不稳定因素, 必须加强对保护区的管理, 严格控制周边人类活动, 减少人为干扰。

5.2 叶面积指数 10 年变化

叶面积指数是反映植物长势的一个重要生物学参数。根据遥感反演的结果, 该自然保护区植被森林植被叶面积指数以中等级和较高等级 2 个等级的叶面积指数比例占优势(即年均叶面积指数主要以 1.6~2.8 为主), 10 年间二者占保护区总面积的比例均在 90% 以上并呈增长趋势, 说明保护区植被整体长势较均匀, 也表明森林植被长势良好。

5.3 净初级生产力 10 年变化

净初级生产力受植物自身活动和外界环境的相互影响, 其代表植被在光合作用下的固碳能力, 反映生态系统的生产能力。2001 年到 2003 年自然保护区森林年生产力总量呈下降趋势, 可能与三峡工程的建设对周围植被和生态系统的影响有关, 自 2003 年三峡库区蓄水达到 135 m 后周围环境转好, 森林的净初级生产力有了较大幅度的增长。而 2006 年三峡库区蓄水水位再次提高, 使原本稳定的生态系统受到一定的影响, 到 2007 年时保护区森林净初级生产力总量下降, 之后生态系统又呈较稳定、缓慢的增长状态。

从年 NPP 总量变化趋势来看, NPP 时空差异较大, 证明保护区内森林的林分异质性较强, 森林群落的类型、结构、年龄阶段和演替阶段有较大差异。

很多研究表明, 温度和降水对自然生态系统的 NPP 影响很大, 温度和降水对净初级生产力的影响不是线性的, 而是受多因子的复合影响, 温度通常和光照有一定相关性, 两者对净初级生产力影响都很大^[4,19,22-24]。尽管温度年际变化较小, 但很小的温度变化仍会对 NPP 产生很大影响^[4,19], 所以我们采用差异扩大化方法对温度进行处理(图 7), 从图 7 可以看出, 平均年净初级生产力与温度的变化趋势总体上一致, 说明温度是三峡大老岭自然保护区森林年净初级生产力的主导因子。2007 年、2008 年和 2010 年 NPP 的变化趋势与温度变化趋势不太一致, 这是因为受到降水量的影响。根据以往的研究, 降水量对年 NPP 有 2 年的时滞影响, 温度对 NPP 有 1 年的时滞影响^[22,25],

且这两种因子是复合影响。本研究中 2005 年降水量为 10 年中的中位值, 2006 年降水量为 10 年内最低值(月均降水仅 111.38 mm), 而温度却达到最高值(4–10 月累积温度为 359.66℃, 2007 年 NPP 值为 10 年中最低, 温度为 10 年中的中位值, 降水量在 10 年中相对较高, 表现出降水量的 1 年时滞效应和温度的实时效应; 2001 年降水量为 10 年中的低值, 与 2006 年的降水量相当, 2002 年降水量和温度都处在 10 年中的中位值, 2003 年 NPP 值显著降低(处在 10 年中的低谷期), 温度也降至 10 年中的低值, 表现出降水量的 2 年时滞效应; NPP 在 2009 年和 2010 年表现为升高趋势, 而气温则在 2008 年、2009 年和 2010 年先升后降, 2007 年和 2008 年降水量升高, 反映了气温的 1 年时滞效应和降水量的 2 年时滞效应。综合分析可见, 本研究中月均降水量很低时会严重限制 NPP 上升, 成为限制性因子, 且降水量的时滞效应不一定是 2 年, 也可能是 1 年或 2 年, 温度的 1 年时滞效应对 NPP 的影响则不太明显, 更多的表现为实时效应。

本研究表明, 该保护区植被生物量 10 年变化趋势和净初级生产力变化趋势不同, 可能与二者的影响因子不同有关。二者均受气候的影响较大, 然而植被生物量与森林的年龄结构关系密切, 除自身演替外, 人为干扰对森林生态系统年龄结构的影响较大, 人为干扰越频繁, 幼龄植物所占比例越大, 生物量就越小。而净初级生产力则受温度和降水的影响较大。气候以及植被覆盖度、植被类型等因素对生物量和净初级生产力都会造成一定的影响。因此, 生物量和净初级生产力产生这种变化趋势差异的原因, 可能与各影响因子的权重不同有关。

6 结论

本研究利用遥感影像作为数据源, 结合野外调查资料以及遥感反演结果, 得出以下结论: (1) 大老岭自然保护区 10 年间地上植被生物量总体呈下降趋势, 但下降幅度很小, 说明大老岭自然保护区森林生态系统植被结构状态比较稳定, 但整个森林生态系统的结构稳定性不够, 应进一步加强保护区管理, 不断创新管理机制, 减少人为干扰; (2) 中

等和较高等级年均叶面积指数所占比例较高, 年均 LAI 为 1.6~2.8 的植被面积占保护区植被总面积的 90%以上并呈增长趋势, 说明保护区内植被长势较好, 植被生活力较旺盛; (3) 10 年间 NPP 年总量具有缓慢增加的趋势, 从 2000 年的 4.99×10^{10} gC 增加到 2010 年的 5.07×10^{10} gC, 表明该自然保护区内森林生态系统植被类型多样, 异质性较强, 整个森林生态系统生产能力较高。大老岭自然保护区森林生态系统质量总体较好, 10 年间保持了良好的稳定状态, 也从侧面反映出该自然保护区良好的保护效果。

参考文献:

- [1] 金义兴, 陈卓良, 郑重, 许天全. 长江三峡库区植被及环境考察报告[J]. 武汉植物学研究, 1984, 2(增刊): 1-112.
- [2] 葛继稳, 梅伟俊, 高发祥, 张德春, 雷永松, 吴金清, 江明喜, 金义兴, 赵子恩, 黄汉东, 肖文发, 李建文. 三峡库区(湖北部分)珍稀濒危保护植物资源现状[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(4): 378-385.
- [3] 王鹏程. 三峡库区森林植被水源涵养功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [4] 陆逸. 基于 MODIS 数据的三峡库区净初级生产力遥感估算研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [5] 曾立雄, 王鹏程, 肖文发, 万睿, 黄志霖, 潘磊. 三峡库区植被生物量和生产力的估算及分布格局[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3808-3816.
- [6] 李锦业, 吴炳方, 周月敏, 张磊. 三峡库区植被生物量遥感估算方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(6): 784-787.
- [7] 沈泽昊, 胡鸿兴, 徐慎东, 汪小凡, 韩庆瑜, 李道新. 湖北三峡大老岭省级自然保护区科学考察与研究报[R]. 2010 年 12 月.
- [8] 沈泽昊, 张新时. 三峡大老岭地区森林植被的空间格局分析及其地形解释[J]. 植物学报, 2000, 42(10): 1089-1095.
- [9] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 三峡大老岭森林物种多样性的空间格局分析及其地形解释[J]. 植物学报, 2000, 42(6): 620-627.
- [10] 沈泽昊, 金义兴, 赵子恩, 吴金清, 黄汉东. 三峡大老岭地区森林群落的数量分类研究[J]. 武汉植物学研究, 2000, 18(2): 99-107.
- [11] 葛继稳, 王虚谷. 湖北自然保护区[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2014: 66.
- [12] 蒋耿明. MODIS 数据基础处理方法研究和软件实现[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [13] 孙晓. 基于 CASI 高光谱遥感数据估测森林叶面积指数研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [14] 罗海江, 方修琦, 白海玲, 王文杰, 熊文成, 申文明. 基于 Vegetation 数据的区域生态系统质量评价之一——指标体系选择[J]. 中国环境监测, 2008, 24(2): 45-49.
- [15] 罗海江, 方修琦, 白海玲, 王文杰, 熊文成, 申文明. 基于 Vegetation 数据的区域生态系统质量评价之二——生产能力指数评价[J]. 中国环境监测, 2008, 24(5): 61-64.
- [16] 李德仁, 王长委, 胡月明, 刘曙光. 遥感技术估算森林生物量的研究进展[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(6): 631-635.
- [17] 娄雪婷, 曾源, 吴炳方. 森林地上生物量遥感估测研究进展[J]. 国土资源遥感, 2011(1): 1-8.
- [18] 周洋, 米晓飞, 叶李灶. 叶面积指数遥感反演算法研究[J]. 计算机与现代化, 2013(3): 71-73.
- [19] Potter CS, Randerson JT, Field CB, Matson PA, Vitousek PM, Mooney HA, Klooster SA. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [20] 俞静芳, 余树全, 张超, 李土生. 应用 CASA 模型估算浙江省植被净初级生产力[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(4): 473-481.
- [21] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608.
- [22] Crabtree R, Potter C, Mullen R, Sheldon J, Huang SL, Harmsen J, Rodman A, Jean C. A modeling and spatio-temporal analysis framework for monitoring environmental change using NPP as an ecosystem indicator[J]. *Remote Sens Environ*, 2009, 113(7): 1486-1496.
- [23] 刘广. 京津冀地区森林植被净初级生产力遥感估算研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [24] 王璐珏. 河北省植被净初级生产力遥感估算[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2012.
- [25] Potter CS, Klooster S, Brooks V. Interannual variability in terrestrial net primary production: exploration of trends and controls on regional to global scales[J]. *Ecosystems*, 1999, 2(1): 36-48.