

青海省植被光能利用率模拟研究

卫亚星^{1,2,*}, 王莉雯^{1,2}

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029; 2. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029)

摘要:借鉴了 MODIS-PSN、CASA、GLO-PEM、VPM 等光能利用率 NPP 模型的优点,同时充分考虑了研究区域其植被光能利用率和环境因素的典型特点。根据研究区域相关文献资料和 NPP 实测数据,模拟出主要植被类型的最大光能利用率。同时,特别细化了草地和灌丛最大光能利用率的估算步骤。采用蒸散比算法和陆地生态模型(TEM),根据 Liebig 定律,计算了对最大光能利用率产生影响的环境综合胁迫因子。估算了青海省主要植被类型的光能利用率,并详细分析了其空间分布和季相变化特征。结果表明:2006 年青海省植被平均光能利用率介于 0.026—0.403gC/MJ 之间,平均值为 0.096gC/MJ。青海省植被光能利用率的分布具有明显的地带性,呈由西北向东南逐渐递增的趋势。其随季节的推移变化比较明显,2006 年植被月平均光能利用率在 0.057—0.157gC/MJ 之间,峰值出现在 7 月份,主要的光能利用率累积发生在 5—9 月份。

关键词:光能利用率;植被;遥感;时空变化;青海省

The study on simulating light use efficiency of vegetation in Qinghai Province

WEI Yaxing^{1,2,*}, WANG Liwen^{1,2}

1 Center for Marine Economic and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

2 College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: In this paper, advantages of MODIS-PSN, CASA, GLO-PEM, VPM model based on light use efficiency (LUE) are used for reference, and typical characteristics of vegetation LUE and environment in the study area are taking into account. Based on relative literature and measured NPP, the maximum LUE values of main vegetation in the study area are simulated. The maximum LUE values of grassland and shrubland are calculated through three steps in order to reduce calculating errors. Based on Beer's law, environmental stress factors of LUE is calculated by evaporative fraction algorithm and TEM model. The LUE values of main vegetation in Qinghai province are simulated, and their spatial distributions and dynamic changes are analyzed. The result indicates that the mean LUE value ranges from 0.026gC/MJ to 0.403gC/MJ in 2006 in Qinghai province, and the average is 0.096gC/MJ. The LUE of Vegetation with obvious zone distributions gradually increases from north-west to south-east. The LUE value in Qinghai province largely varies with the season. The monthly mean LUE of vegetation changes from 0.057gC/MJ to 0.157gC/MJ in 2006, and the highest appears in July. The main accumulative period of LUE is from May to September.

Key Words: light use efficiency; vegetation; remote sensing; spatio-temporal variation; Qinghai province

在生态学上,光能利用率(light use efficiency, LUE)是表征植物固定太阳能效率的指标,一般用%表示。在 NPP 研究领域,光能利用率被用来表示植物通过光合作用将所截获/吸收的能量转化为有机干物质的效率,单位用 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 来表示^[1]。光能利用效率是植物光合作用的重要概念,也是区域尺度以遥感参数模型监测植被生产力的关键参数。

基金项目:辽宁省教育厅人文社会科学研究项目(2007T095);教育部人文社会科学重点研究基地项目(08JJD790142);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB714406);辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2010226)

收稿日期:2009-09-07; **修订日期:**2009-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyx9585@sina.com

由于各种基于光能利用率的 NPP 模型中 LUE 的取值相差很大,这会在很大程度上影响 NPP 模型估算结果的精度。表 1 列出了近年来常用光能利用率 NPP 模型中光能利用率的估算方法和最大光能利用率的取值。C-Fix 模型在估算 GPP 值时,将最大 LUE 的值定为一个不变的值 $1.1 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$,而且还考虑到环境条件对最大 LUE 的影响。GLO-PEM 模型在确定植被的最大光能利用率时,将植物分为 C_3 和 C_4 两大类型,其中 C_4 植物的最大光能利用率为固定值 $2.76 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。基于 BIOME-GPP 生态模型的 MODIS GPP 产品中 LUE 的估算是以 NASA 全球 1km 空间分辨率土地覆盖分类产品为基础的。许多基于光能利用率的 NPP 模型都参考相关文献将 LUE 值定为一个不变的平均值,以该值作为计算不同植被类型 NPP 时模型的统一输入参数,但是一些研究认为 LUE 不应是一个不变的数值^[2]。由此可见,需要针对模型的具体实际应用情况,对 LUE 的取值做出较为精确的校正。

表 1 常用光能利用率 NPP 模型中光能利用率输入参数的估算
Table 1 Estimation of input parameters in various NPP models based on LUE

模型名称 Model name	光能利用率 ϵ_g (或 ϵ_n) /($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$) Light use efficiency	最大光能利用率 /($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$) Maximum Light use efficiency	参考文献 Reference
CASA	$\epsilon_n = \epsilon_0 \times T_s \times SM$	0.389	[3]
GLO-PEM	$\epsilon_g = \epsilon_0 \times T_s \times SM \times VPD$	$55.2\alpha^a$	[4]
	$\epsilon_g = \epsilon_0 \times T_s \times SM \times VPD$	2.76^b	[4]
MODIS-PSN	$\epsilon_g = \epsilon_0 \times T_s \times VPD$	$0.604-1.259^c$	[5]
3-PG	$\epsilon_g = \epsilon_0$	1.8^d	[6]
VPM	$\epsilon_g = \epsilon_0 \times T_s \times W$	2.208^e	[7]
	$\epsilon_g = \epsilon_0 \times T_s \times W$	2.484^f	[8]
C-Fix	$\epsilon_g = \epsilon_0$	1.1	[9]
EC-LUE	$\epsilon_g = \epsilon_0 \times T_s \times SM$	2.14	[10]

表 1 中, ϵ_n 为估算 NPP 的实际光能利用率, ϵ_g 为估算 GPP 的实际光能利用率, T_s 为温度对光能利用率的影响, SM 为土壤湿度指数, VPD 为水汽压缺失对光能利用率的影响, W 为冠层水分含量对光能利用率的影响, ϵ_0 为最大光能利用率; a: C_3 植物, α 为量子效率; b: C_4 植物; c: 11 种植物类型(包括常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、林地、林地草地混合带、郁闭灌丛、稀疏灌丛、草地、农田); d: 林地生态系统; e: 常绿针叶林; f: 热带雨林

基于此,本文借鉴了 MODIS-PSN、CASA、GLO-PEM、VPM 等光能利用率 NPP 模型的优点,同时充分考虑了研究区域其植被光能利用率和环境因素的典型特点。根据研究区域相关文献资料和 NPP 实测数据,模拟出主要植被类型的最大光能利用率。同时,特别细化了草地和灌丛最大光能利用率的估算步骤。采用蒸散比算法^[10]和陆地生态模型(TEM)^[11],根据 Liebig 定律,计算了对最大光能利用率产生影响的环境综合胁迫因子。最后,估算了青海省主要植被类型的光能利用率,并详细分析了其空间分布和季相变化特征。

1 研究区域

本研究的研究区域为青海全省,青海省位于中国的西部,青藏高原东北部。地理坐标为东经 $89^{\circ}35'-103^{\circ}04'$,北纬 $31^{\circ}39'-39^{\circ}19'$ 。青海是青藏高原的组成部分,因此青海的气候具有青藏高原的共同特征。青海省属大陆性干旱、半干旱高原气候^[12]。青海省独特的自然环境,决定了该省植物区系和植被类型亦具有相应的特征。青海森林植被稀少,结构简单。树种高寒性突出,分布海拔高。草地主要集中于青南高原、祁连山地和柴达木盆地东南部边缘山地。草地类型主要分为 6 类,有高寒草甸草地类、高寒草原草地类、高寒沼泽草地类、山地灌木草地类、山地草原草地类、山地疏林草地类。其中,高寒草甸草地类草场是青海省面积最大、分布最广的一类草场^[13]。

2 数据来源与预处理

2.1 遥感数据

本研究用于计算和验证的 MODIS 数据产品主要包括 MOD09A1、MOD11A2、MOD12Q1、MOD13A2、

MOD15A2、MOD17A2 和 MOD43B3,由美国 LP DAAC (Land Process Distributed Active Archive Center, U. S. A) 提供。对上述的 MODIS 数据产品做了几何纠正、去云处理、修复异常值像元等预处理工作。

2.2 气象数据

模型中需要的气象数据从国家气象中心获取,本文选定青海省内 41 个站点的气象数据。气象要素包括这 41 个站点的平均气温 (0.1°C)、降水量 (0.1mm)、平均空气相对湿度 (%)、日照时数 (0.1h)、气压 (0.1hPa)、平均风速 (0.1m s^{-1})。

2.3 土地覆盖分类图

本研究采用的青海省植被覆盖分类方法^[14],是在野外实地调查和综合考虑国内外各种土地覆盖分类方法优缺点的基础上,根据青藏高原植被覆盖类型的特征,本着分类结果能最大程度反映出地面真实覆盖类型的原则,灵活地将监督分类、非监督分类、决策树分类等分类方法分别应用到其较为适宜的不同分类步骤中去,将青海省土地覆盖类型划分为 14 个类别。这种分类体系,重点突出了植被,特别是稀疏植被(包括低覆盖度草地和稀疏灌丛)的空间分布。

2.4 实测数据

本文所用的地面实测数据主要来源于在青海省达日县进行的实验,实验对象主要是草地。为了尽可能保证实地植被覆盖的真实情况,因此野外调查工作选在 2006 年 7 月份(青海植被生长状况最好的季节)进行。使用的实验仪器主要有 LI-6400 便携式光合仪、SUNSCAN 冠层分析系统、LAI-2000 植物冠层分析仪等。

3 方法

Potter 等^[3]认为在理想条件下植被具有最大光能利用率,而在现实条件下的最大光能利用率主要受温度和水分的影响。在本研究中,认为温度和水分对于光合作用的影响遵从 Liebig 定律,即植被的光能利用率 ε 在任意时间点只受最大限制因子的影响。因此,研究区 NPP 模型中对最大光能利用率产生影响的环境综合胁迫因子的计算,采用取水胁迫因子和温度胁迫因子的最小值,可以表示为下式:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \times \min(T_s, W_s) \quad (1)$$

式中, ε 为光能利用率, $\varepsilon_{\max}$ 为最大光能利用率, T_s 为温度对光能利用率的影响, W_s 为水分对光能利用率的影响。 T_s 和 W_s 的值域变动范围为 0—1,其值越小代表它对光能利用率的负面影响越大。

3.1 最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ 估算

最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ ^[15] 的取值大小对最终的 NPP 估算结果影响很大。本文根据研究区相关文献资料和野外实验数据,首先确定某种植被类型的一组 NPP、PAR、FPAR、温度胁迫因子和水分胁迫因子观测数据,然后采用极大似然估计准则模拟出该种植被类型的 $\varepsilon_{\max}$ ^[16-17]。

采用极大似然估计准则,经推导,可得最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ 的估值 $\hat{\varepsilon}_{\max}$ 为:

$$\hat{\varepsilon}_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (2)$$

式中, x_i 为某种植被类型 $PAR \times FPAR \times \min(T_s, W_s)$ 的计算值; y_i 为某种植被类型的 NPP 值; i 为某种植被类型的样本数; n 为某种植被类型的最大样本数; $\bar{x}$ 为 x_i 的平均值; $\bar{y}$ 为 y_i 的平均值。

由于自然生长环境中草地草种类型的混杂性,每类草种的最大光能利用率值有所差异。为了提高各种草地遥感分类类型(如高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地)最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ 的估算精度,在估算各种草地分类类型的最大光能利用率时,需要将主要草种类型的最大光能利用率信息均反映到所对应的草地遥感分类类型的最大光能利用率的值中,即计算主要草种类型最大光能利用率的加权平均作为对应的草地遥感分类类型的最大光能利用率,计算公式如下:

$$\varepsilon_{\max} = \sum_{i=1}^n c_i (\varepsilon_{\max})_i \quad (3)$$

式中, c_i 为第 i 种草种类型(或灌丛类型)所占的面积比例, $(\varepsilon_{\max})_i$ 为第 i 种草种类型(或灌丛类型)的最大光能利用率。

本研究根据研究区相关文献资料和野外实验数据^[18-21], 采用极大似然估计准则模拟了各植被类型的 $\varepsilon_{\max}$ 的优化值, 从而确定出研究区主要草地建群种类型和主要灌丛建群种类型的最大光能利用率的取值。在模拟出研究区主要草地建群种类型和主要灌丛建群种类型的最大光能利用率的取值后, 再采用公式(3)估算出各种草地遥感分类类型(如高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地)和各种灌丛遥感分类类型(郁闭灌丛和稀疏灌丛)的最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ 。

3.2 水分对光能利用率的影响 W_s 估算

准确建立水分对植被光能利用率的影响函数是有困难的。在传统的 NPP 模型中, 经常使用的水分胁迫因子是由土壤湿度^[3]和水气压缺失(VPD)^[5]作为参与变量来构建相应的计算函数, 但是这些参与计算的变量都存在各自的缺点:(1)无论从模型中还是从遥感数据中都难以准确确定大尺度研究区域的土壤湿度数值, 这限制了那些基于土壤湿度的 NPP 模型的预测能力。(2)VPD 不是一个好的表征土壤湿度条件空间异质性的指示因子, 它与土壤含水量不是线性相关的。

本研究采用一种经实践证明较为成熟的计算水分胁迫因子的替代算法——蒸散比(EF)^[10], 用来计算水分对光能利用率的影响 W_s , 计算公式如下:

$$W_s = EF = \frac{LE}{LE + H} \quad (4)$$

式中, LE 为潜热通量($W \cdot m^{-2}$), H 为显热通量($W \cdot m^{-2}$)。

在本研究中, 水分胁迫因子 W_s 在数值上就等于 EF 。 EF 是一种良好的能表征土壤或植被水分条件的指示因子。许多研究都已采用 EF 来表征生态系统的水分条件^[22-23]。另外, EF 较易从遥感植被指数和陆表温度产品中获得, 例如 AVHRR 和 MODIS^[24], 这是该方法的一个主要优点。

3.3 温度对光能利用率的影响 T_s 估算

本研究采用 Raich 等^[11]建立的陆地生态模型(the Terrestrial Ecosystem Model, TEM)中的方法来计算 T_s :

$$T_s = \frac{(T - T_{\min})(T - T_{\max})}{(T - T_{\min})(T - T_{\max}) - (T - T_{opt})^2} \quad (5)$$

式中, T 为大气温度, $T_{\min}$ 、 T_{opt} 和 $T_{\max}$ 分别为光合作用的最低、最适和最高温度。如果大气温度低于 $T_{\min}$ 或高于 $T_{\max}$, 将 T_s 定为 0。在本研究中, $T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 分别被定为 0 和 36℃。同时, 假设植物已经适应了其所生长的环境的温度, T_{opt} 可定为生长季的长期平均温度。

4 结果与分析

4.1 研究区草地最大光能利用率的估算结果

表 2 是采用极大似然估计准则, 根据研究区相关文献和野外实验数据, 模拟出的草地遥感分类类型各自

表 2 草地遥感分类类型对应的主要建群种最大光能利用率的估算结果

Table 2 Simulated results of main vegetation LUE corresponding to each grassland classification

草地遥感分类类型 Grassland classification	主要建群种类型 Main grassland type	最大光能利用率/($gC \cdot MJ^{-1}$) Maximum LUE
高覆盖度草地 Dense grassland	矮嵩草草甸 Kobresia humilis	0.326
	小嵩草草甸 Kobresia pygmaea	0.296
	线叶嵩草草甸 Kobresia capillifolia	0.285
中覆盖度草地 Middle density grassland	紫花针茅草原 Stipa purpurea	0.221
	长芒草草原 Stipa bungeana	0.238
低覆盖度草地 Sparse grassland	硬叶苔、垫状绒藜(荒漠)草原 Carex moorcroftii, Ceratoides compacta	0.185
	簇生柔荑草垫状植被 Thylacospermum caespitosum	0.115

所对应的主要建群种最大光能利用率的优化估值。

4.2 研究区主要植被类型最大光能利用率 $\epsilon_{\max}$ 的估算结果

表 3 为估算出的研究区各种植被类型最大光能利用率 $\epsilon_{\max}$ 的取值。

表 3 研究区各植被类型最大光能利用率 $\epsilon_{\max}$ 的估算结果
Table 3 Simulated results of maximum LUE for each vegetation

代码 Code	植被类型 Vegetation types	最大光能利用率 /($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$) Maximum LUE	Running 等人模拟值 ^[5] /($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$) Simulated values from Running
1	阔叶林 Broad-leaved forest (BLF)	0.908	1.044
2	针阔混交林 Needle-leaved and broad-leaved mixed forest (NLBLMF)	0.725	1.116
3	针叶林 Needle-leaved forest (NLF)	0.645	1.008
4	高覆盖度草地 Dense grassland (DG)	0.312	0.604
5	郁闭灌丛 Dense shrub (DS)	0.538	0.888
6	中覆盖度草地 Middle density grassland (MDG)	0.234	0.604
7	草地耕地混合体 Grassland mixed with farmland (GMF)	0.208	—
8	低覆盖度草地 Sparse grassland (SG)	0.175	0.604
9	稀疏灌丛 Sparse shrub (SS)	0.114	0.774

从表 3 可以看出,本文模拟的各植被类型最大光能利用率的值略低于 Running 等人的模拟值,这主要是由于地理位置、植被类型和气候条件等因素的综合影响。

4.3 青海省植被光能利用率的空間分布特征

青海省的植被属于长期受高寒气候环境条件影响所形成的高原地带性植被类型,以适应高寒气候的多年生草本植物和耐寒中生灌木为主。由于受水热条件的限制,和我国同纬度东部地区的植被相比,青海省植被的光能利用率较低。

通过模型计算,本文得到了 2006 年青海省植被平均光能利用率的空間分布(图 1)。经统计,2006 年青海省植被平均光能利用率介于 0.026—0.403gC/MJ 之间,平均值为 0.096gC/MJ。青海省植被光能利用率的分布具有明显的地带性,呈由西北向东南逐渐递增的趋势。西北部大部分地区(如柴达木盆地)都为沙漠或戈壁,植被的平均光能利用率也较低,一般在 0.061—0.079gC/MJ 之间。东南部植被的平均光能利用率较高,约在 0.116—0.403gC/MJ 之间,如东南部的达日为 0.125gC/MJ,玛沁为 0.356gC/MJ,甘德为 0.378gC/MJ。青海省南部植被的平均光能利用率也较高,一般介于 0.082—0.37gC/MJ,如玉树为 0.25gC/MJ,曲麻莱为 0.2gC/MJ,囊谦为 0.35gC/MJ。青海湖周围地区植被的平均光能利用率较高,一般在 0.081—0.321gC/MJ 之间,如湟源为 0.23gC/MJ,刚察为 0.19gC/MJ,海晏为 0.21gC/MJ。

青海省不同植被间的光能利用率存在差异。阔叶林的光能利用率在 0.281—0.403gC/MJ 之间,针阔混交林的光能利用率在 0.193—0.322gC/MJ 之间,针叶林的光能利用率在 0.172—0.285gC/MJ 之间,郁闭灌丛的光能利用率在 0.133—0.239gC/MJ 之间,高覆盖度草地的光能利用率在 0.076—0.138gC/MJ 之间,中覆盖度草地的光能利用率在 0.057—0.103gC/MJ 之间,草地耕地混合体的光能利用率在 0.048—0.091gC/MJ 之间,低覆盖度草地的光能利用率在 0.040—0.076gC/MJ 之间,稀疏灌丛的光能利用率在 0.026—0.049gC/MJ

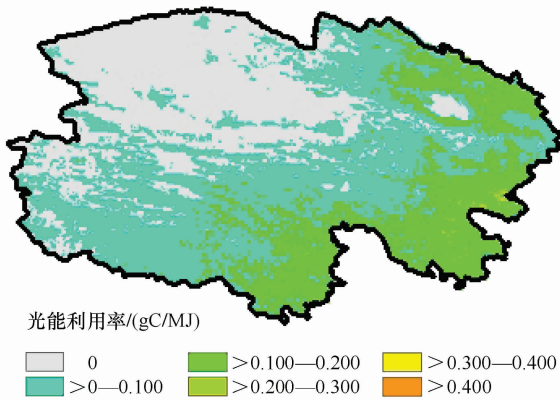


图 1 青海省 2006 年植被平均光能利用率分布
Fig. 1 The distribution of mean LUE for vegetation in Qinghai Province in 2006

之间。

青海省各植被类型 2006 年平均光能利用率大小依次为:阔叶林 0.358gC/MJ > 针阔混交林 0.282gC/MJ > 针叶林 0.248gC/MJ > 郁闭灌丛 0.207gC/MJ > 高覆盖度草地 0.120gC/MJ > 中覆盖度草地 0.089gC/MJ > 草地耕地混合体 0.076gC/MJ > 低覆盖度草地 0.063gC/MJ > 稀疏灌丛 0.041gC/MJ 。

图 2 显示,植被的最大光能利用率和光能利用率存在明显的差异,而且不同植被的二者差异幅度区别显著。可以看出,青海省独特的高寒自然环境,对树木(包括阔叶林、针阔混交林、针叶林)的潜在光能利用率影响较大,即与其它植被相比它们的最大光能利用率与实际光能利用率差异大,其中阔叶林的二者差值最大,为 0.550 ,针阔混交林为 0.443 ,针叶林为 0.397 。其后,依次是:郁闭灌丛为 0.331 ,高覆盖度草地为 0.192 ,中覆盖度草地为 0.145 ,草地耕地混合体为 0.132 ,低覆盖度草地为 0.112 。最大光能利用率与光能利用率差值最小的是稀疏灌丛,为 0.073 。

4.4 青海省植被光能利用率的季相变化特征

由图 3 可以看出,在青海省生长季 4—10 月份期间,植被光能利用率随季节的推移变化比较明显。4 月份植被光能利用率的最大值为 0.448gC/MJ ,最小值为 0.025gC/MJ ;7 月份植被光能利用率的最大值为 0.68gC/MJ ,最小值为 0.035gC/MJ ;10 月份光能利用率的最大值为 0.419gC/MJ ,最小值为 0.024gC/MJ 。

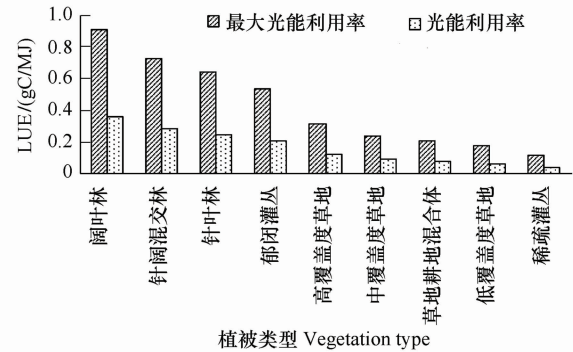


图 2 青海省植被最大光能利用率和光能利用率的对比

Fig. 2 Comparison between maximum LUE and LUE for each vegetation

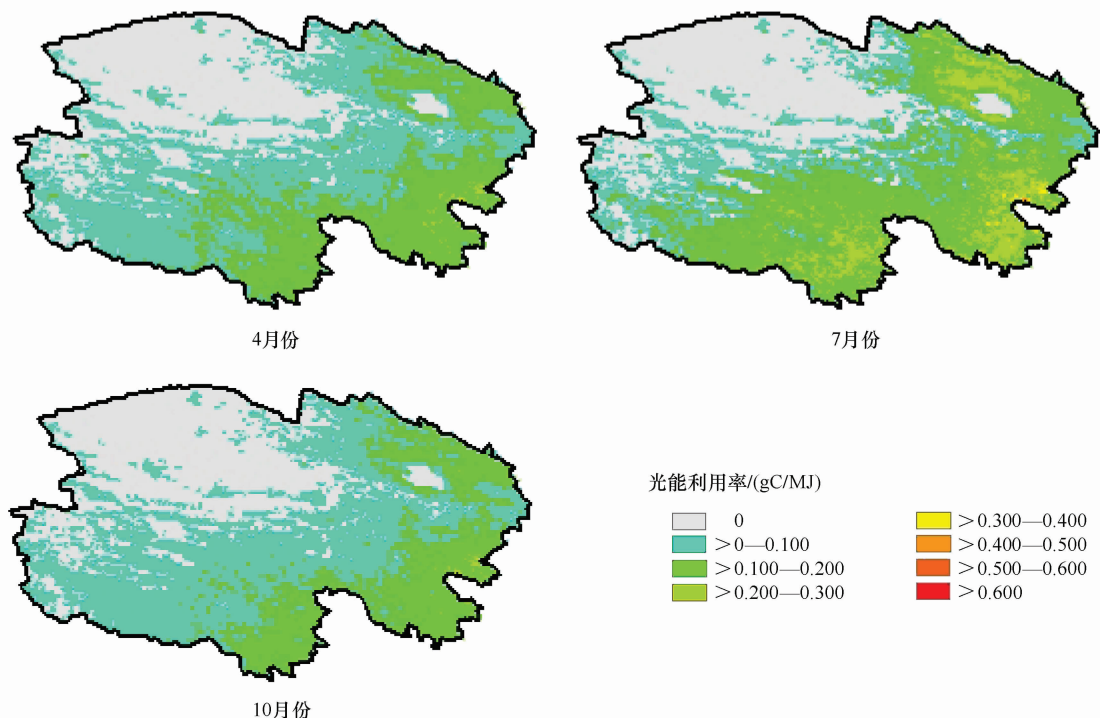


图 3 青海省 2006 年植被光能利用率的季相变化

Fig. 3 Dynamic changes of vegetation LUE in Qinghai Province in 2006

由图 4 可见,青海省 2006 年植被月平均光能利用率在 $0.057—0.157\text{gC/MJ}$ 之间,峰值出现在 7 月份,主要的光能利用率累积发生在 5—9 月份。冬季的光能利用率较低,一般在 0.091gC/MJ 以下。2006 年的 6 月

份光能利用率较低,只有 0.103 gC/MJ ,是由于这一年 6 月份环境综合胁迫因子偏低,水分胁迫因子的值较低。从青海省气象台站的实测资料来看,该年 6 月份的降水量与往年相比有所降低。光能利用率的这种季节变化特征,反映了水分和温度是光能利用率的主要调控因子。

5 讨论

本文估算青海省主要植被类型的光能利用率有以下几个特点:

(1)本研究的目标是针对估算特定区域典型植被的光能利用率,因此充分考虑了研究区域植物光能利用率和环境因素的典型特点,也就保证了光能利用率的估算结果较一般模拟结果的准确性;

(2)采用极大似然估计准则,根据研究区域相关文献资料和 NPP 实测数据,模拟出主要植被类型的最大光能利用率,使之更符合研究区的实际情况;

(3)由于研究区的主要植被覆盖类型为草地,所以特别细化了草地最大光能利用率的估算步骤,具体措施是:①首先在进行研究区植被覆盖遥感分类时,根据草地的生长盖度,将草地分为高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地 3 个类型,②采用(2)提出的方法,估算出各草地遥感分类类型各自所对应的主要草地建群种类的最大光能利用率,③计算主要草地建群种类最大光能利用率的加权平均作为对应的草地遥感分类类型的最大光能利用率,权重为各草地建群种类所占的面积比例;

(4)计算水分对光能利用率的影响 W_s 时,舍弃众多土壤参数,仅利用气象数据和遥感数据,采用一种经实践证明较为成熟的计算水分胁迫因子的替代算法——蒸散比(潜热通量/(潜热通量+显热通量)),来实现水分胁迫因子的估算。这样一方面可以保证估算水分对光能利用率影响的准确性不变,另一方面则在一定程度上实现了估算算法的简化,提高了实际的可操作性。

References:

- [1] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9(3):747-766.
- [2] Russell G P, Jarvis G, Monteith J L. Absorption of radiation by canopies and stand growth//Russell G P ed. In *Plant Canopies: Their Growth, Form and Function*. New York: Cambridge University Press, 1989: 108-119.
- [3] Potter C S, Randerson J T, Field C B. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [4] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4/5): 815-835.
- [5] Running S W, Thornton P E, Nemani R. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system//Sala O E, Jackson R B., Mooney H A. eds. *Methods in Ecosystem Science*. Springer-Verlag, New York, 2000: 44-57.
- [6] Landsberg J J, Waring R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95(3): 209-228.
- [7] Xiao X M, Zhang Q Y, Hollinger D. Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data. *Ecological Applications*, 2005a, 15(3): 954-969.
- [8] Xiao X M, Zhang Q Y, Scott S. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, 2005b, 94(1): 105-122.
- [9] Veroustraete F, Sabbe H, Eerman E. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-FIX model and Euroflux data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 376-399.
- [10] Yuan W P, Liu S G, Zhou G S. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production

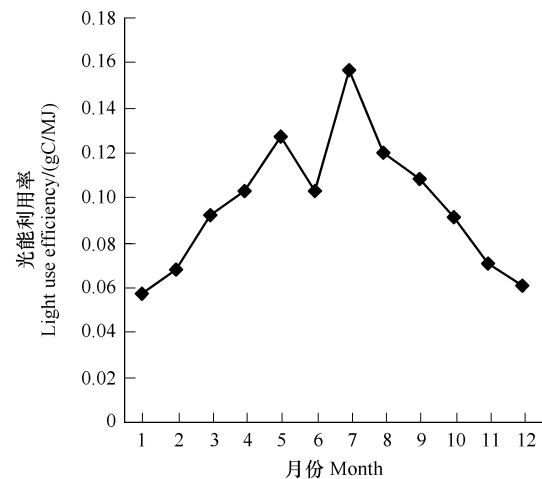


图4 青海省2006年植被月平均光能利用率

Fig. 4 Monthly mean LUE of vegetation in Qinghai Province in 2006

- across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3/4): 189-207.
- [11] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M. Potential net primary productivity in South America: application of a global model. *Ecological Applications*, 1991, 1(4): 399-429.
- [12] Shen Y C, Xiang L P. *The Physical Geography of Qinghai Province*. Beijing: Ocean Press, 1991: 14-71.
- [13] Zhou X M. *Vegetation in Qinghai Province*. Xining: Qinghai Press, 1987: 38-94.
- [14] Wang L W, Wei Y X, Niu Z. Spatial and temporal variations of vegetation in Qinghai Province based on satellite data. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(1): 73-84.
- [15] Raymond E, Hunt J R. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(8): 1725-1730.
- [16] Wang X Z, Tao B Z, Qiu W N. *Advanced Surveying Adjustment*. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006: 26-30.
- [17] Zhu W Q, Pan Y Z, He H. Simulation of maximum light use efficiency for main vegetation in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 700-706.
- [18] Zhou C P, OU Y H, Wang Q X. Estimation of net primary productivity in Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 74-79.
- [19] Li Y N, Zhao X Q, Cao G M. Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei Alpine Meadow ecosystem research station. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(4): 558-567.
- [20] Yang F T, Wang Q J, Shi S H. The allocation of the biomass and energy in Kobresia Humilis Meadow, Haibei district, Qinghai Province. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1987, 11(2): 106-112.
- [21] Pu J Y, Li Y N, Zhao L, Yang S H. Seasonal changes of Kobresia Humilis Meadow biomass with climate factor. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(3): 238-241.
- [22] Zhang Y Q, Liu C M, Yu Q. Energy fluxes and the Priestley-Taylor parameter over winter wheat and maize in the North China Plain. *Hydrological Processes*, 2004, 18(12): 2235-2246.
- [23] Suleiman A, Crago R. Hourly and daytime evapotranspiration from grassland using radiometric surface temperatures. *Agronomy Journal*, 2004, 96(2): 384-390.
- [24] Venturini V, Bisht G, Islam S. Comparison of evaporative fractions estimated from AVHRR and MODIS sensors over South Florida. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 77-86.

参考文献:

- [12] 申元村, 向理平. 青海省自然地理. 北京: 海洋出版社, 1991: 14-71.
- [13] 周兴民. 青海植被. 西宁: 青海出版社, 1987: 38-94.
- [16] 王新洲, 陶本藻, 邱卫宁. 高等测量平差. 北京: 测绘出版社, 2006: 26-30.
- [17] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩. 中国典型植被最大光能利用率模拟. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [18] 周才平, 欧阳华, 王勤学. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算. *地理学报*, 2004, 59(1): 74-79.
- [19] 李英年, 赵新全, 曹广民. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析. *高原气象*, 2004, 23(4): 558-567.
- [20] 杨福国, 王启基, 史顺海. 青海海北地区矮嵩草草甸生物量和能量的分配. *植物生态学与地植物学学报*, 1987, 11(2): 106-112.
- [21] 蒲继延, 李英年, 赵亮, 杨时海. 矮嵩草草甸生物量季节动态及其与气候因子的关系. *草地学报*, 2005, 13(3): 238-241.