

基于 MODIS 的光合有效辐射估算系统设计与实现

曹 巍¹, 邵全琴^{1*}, 陈卓奇²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘要: 本文采用 PARcalc 算法, 并以 C# 和 ENVI/IDL 二次开发语言, 设计了主要以 MODIS 产品为驱动的光合有效辐射估算系统。鉴此, 比较了 IDL 和 ArcGIS Engine 两者的技术特点, 设计了 IDL 与 ArcGIS Engine 共存、多种开发环境相结合的技术方案。同时, 对模型参数置备、光合有效辐射估算、模型分析等模块的功能, 以及多种语言混合编程、数据分块处理、瞬时及日光合有效辐射批量计算等关键技术进行了分析。最后, 以内蒙古地区作为研究区, 估算了该区 2007 全年和四季的总光合有效辐射及日均光合有效辐射, 并对其特征值作了对比分析。结果表明, 对研究区域尺度光合有效辐射的定量化计算具有一定的参考价值。

关键词: 光合有效辐射; MODIS; PARcalc; IDL

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00144

1 引言

光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation, PAR) 是太阳辐射中被绿色植物用来进行光合作用的能量^[1], 是估算植被净初级生产力等生态指标的重要参数。光合有效辐射的大小与大气中的水分、云量、气溶胶等物质密切相关, 它们对太阳辐射具有吸收、反射, 以及散射作用, 使得到达地表的太阳辐射随时空的变化而产生差异^[2-6]。目前, 获取大范围区域光合有效辐射的主要手段以遥感反演为主, 该方法具有数据获取周期短、成本低、数据覆盖范围广的特点, 因此, 被广泛采用, 国内外已先后提出了多种估算光合有效辐射的反演算法^[7-11]。然而, 遥感反演需要进行多项输入参数的准备, 且不同参数来源于不同的产品, 包括遥感影像、气象资料、地面观测数据等, 必须对各参数的空间范围、投影参数、时空分辨率等指标进行统一。同时, 在反演的运算阶段, 需要设计高效率的算法, 保证运算结果的精度和运算过程的速度。因此, 构建体系化的遥感反演软件平台, 对提高反演的效率以及反演算法的推广、应用具有重要意义。

本文将选择遥感反演算法 PARcalc 进行光合

有效辐射的估算, 为了便于软件开发使用, 本文对算法的各个组成部分进行了拆分, 并设计了不同的软件模块。同时, 为了提高系统的运行效率, 本文选择 IDL 与 ArcGIS Engine 联合开发的实现方式, 将 RS 与 GIS 充分结合。最终利用组件编程技术, 集成多语言开发环境, 完成了内蒙古光合有效辐射估算系统的设计与实现, 为估算区域尺度光合有效辐射提供了重要的技术平台。

2 系统模型算法

PARcalc 是一种以 MODIS 大气产品 (MOD04、MOD05、MOD06 及 MOD07 的二级产品) 为主要数据源, 以简化的辐射传输模型估算瞬时光合有效辐射的模型方法^[10-11]。在 PARcalc 算法中, 地面接收到的总光合有效辐射包含 2 个部分: 直射光通量和漫反射光通量 (公式 1)。前者是经过大气损失后没有经过散射直接到达地面的太阳辐射, 后者是经过大气衰减后偏离直射方向到达地面的太阳辐射。

$$I_s = I_b + I_d \quad (1)$$

式中, I_s 为地面接收的单波段光合有效辐射 ($W \cdot$

收稿日期: 2012-05-07; 修回日期: 2012-10-22。

基金项目: 国家“973”计划项目 (2010CB950902)。

作者简介: 曹巍 (1982-), 男, 湖北武汉人, 博士, 助研, 主要研究方向: 土地利用/覆被变化, 生态系统评估。

E-mail: caowei@igsrr.ac.cn

* 通讯作者: 邵全琴 (1962-), 女, 江苏常州人, 博士, 研究员, 主要研究方向: GIS 与生态信息。E-mail: shaoqq@reis.ac.cn

$\text{m}^{-2} * \mu\text{m}^{-1}$), I_b 为直射光通量, I_d 为漫反射光通量。光合有效辐射的波段区间为 400~700nm, 因此, 所有到达地面的光合有效辐射可通过公式(2)计算得到, 式中, PAR 为光合有效辐射, λ 为波长, I_s 同公式(1)。

$$PAR = \int_{0.4}^{0.7} I_s(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

2.1 直射辐射

直射单色光通量 I_b 考虑传播过程中瑞利散射、臭氧、气溶胶的吸收和散射等作用, 计算方法如公式(3)-(10)所示:

$$I_b = I_0 \times \cos(i) \times \tau_R \times \tau_{O_3} \times \tau_w \times \tau_a \quad (3)$$

$$I_0 = E_0 \times (1 + 0.0344 \times \cos(360 \times N/365)) \quad (4)$$

$$\tau_R = \exp[-0.008735 \times \lambda^{-4.08} \times m_p] \quad (5)$$

$$\tau_{O_3} = \exp[-K_{O_3} \times l \times m_o] \quad (6)$$

$$\tau_w = \exp[-0.2385 \times K_w \times \omega \times m_o / (1 + 20.7 \times k_w \times \omega \times m_o)^{0.45}] \quad (7)$$

$$\tau_a = \exp[-\beta \times \lambda^{-\alpha} \times m_p] \quad (8)$$

$$m_o = \frac{1}{\cos \theta - 0.50572 \times (96.07995 - \theta)^{-16364}} \quad (9)$$

$$m_p = m_o \times \frac{P_z}{1013.25} \quad (10)$$

式中, I_0 为单波段大气顶瞬时辐射 ($\text{W} * \text{m}^{-2} * \mu\text{m}^{-1}$), $\cos(i)$ 为地形、纬度及地球赤纬的校正系数, τ_r 为瑞利散射透过率, τ_{O_3} 为臭氧透过率, τ_w 为水汽透过率, τ_a 为气溶胶透过率; E_0 为单波段大气顶太阳辐射光谱常数 ($\text{W} * \text{m}^{-2} * \mu\text{m}^{-1}$), N 为儒历日; λ 为波长 (μm)。 K_{O_3} 是臭氧的吸收系数, l 是臭氧垂直方向上的臭氧含量 (cm)。 K_w 是水汽的吸收系数, ω 是大气含水量 (cm)。 β 是气溶胶的浑浊度参数, 为 $\lambda=1\mu\text{m}$ 处的大气气溶胶光学厚度, θ 是太阳高度角, m_o 是太阳辐射在大气中的传播路径长度, m_p 是气压归一化的大气路径长度, P_z 和 1013.25 分别是地面台站实测大气压强和标准大气压强 (百帕)。以上参数中, 臭氧含量、气溶胶光学厚度、大气含水量、云顶气压均可由 MODIS 产品直接获取, 如表 1 所示。

2.2 漫反射辐射

漫反射辐射考虑了瑞利散射 I_r 和气溶胶散射 I_a 。气溶胶散射是指直射辐射中经过气溶胶颗粒散射后, 改变入射方向, 到达地面的那一部分辐射; 瑞

表 1 系统使用的 MODIS 产品

Tab. 1 Introduction of MODIS products applied in the system

产品名称	产品等级	时间分辨率	空间分辨率	产品描述
MOD04_L2/ MYD04_L2			10km	气溶胶光学厚度 (Aerosol)
MOD05_L2/ MYD05_L2			1km	大气总水含量 (Total atmospheric water content)
MOD06_L2/ MYD06_L2	二级产品	每天获取 2 次数据 (10:30/13:30)	1km	云光学厚度 (Cloud optical thickness)
MOD06_L2/ MYD06_L2			5km	云顶大气压 (Cloud top pressure)
MOD07_L2/ MYD07_L2			5km	臭氧柱总量 (Total column ozone)

利散射是指直射辐射中经过瑞利散射后, 改变入射方向, 到达地面的那一部分辐射, 计算方法如公式(11)-(15)所示, 式中除 ω_o 和 F 变量外, 其他变量的含义与上述相同, ω_o 为单次散射反照率, F 为前向散射。

$$I_d = I_r + I_a \quad (11)$$

$$I_r = I_0 \cos \theta \times \tau_{O_3} \times \tau_w \times 0.5 \times \tau_a \times (1 - \tau_r) \quad (12)$$

$$I_a = I_0 \cos \theta \times \tau_{O_3} \times \tau_w \times F \times \omega_o \times \tau_r (1 - \tau_a) \quad (13)$$

$$F = 0.9302 \times \cos \theta^{0.2556} \quad (14)$$

$$\omega_o = 0.945 \times \exp[-0.095 \times (\log_{10}(\lambda)/0.4)^2] \quad (15)$$

2.3 有云状况瞬时光合有效辐射

在计算光合有效辐射时会受到云层的影响, 云层可以将一部分辐射能量反射回去, 同时还可将一部分能量吸收, PARcalc 算法忽略了云层对太阳辐射的吸收作用而只考虑了反射作用, 其反射率可以通过下式计算得到:

$$T_\theta = 1 - (\beta_\theta \times \tau_c / \cos \theta) / (1 + \beta_\theta \times \tau_c / \cos \theta)$$

式中, T_θ 为云层反射率, β_θ 为辐射的后向散射分量, τ_c 为云的光学厚度, 取自 MOD06 产品, 如表 1 所示, θ 为太阳高度角。用晴空的光合有效辐射乘以云层反射率就可以得到有云状况下的光合有效辐射。

3 系统设计与实现

3.1 技术方案

3.1.1 数据特性

PARCalc 模型中的气溶胶、大气水含量、臭氧等参数均能通过 MODIS 大气产品获得,因此,MODIS 大气产品是本系统非常重要的数据源,如表 1 所示,表中列出的每个产品一天内获取 2 次,记录了当天 2 个时刻的大气参数信息,是模拟全天光合有效辐射的基础。

3.1.2 技术路线

本系统的核心任务包括 3 个方面:模型参数的置备、反演模型的运算及模型分析应用。本研究选择 ArcGIS Engine 和 ENVI/IDL 进行联合开发。为了充分发挥 2 个平台的技术优势,规避各自存在的不足,我们对它们的技术特点作了对比^[12-13],如表 2 所示。

表 2 IDL 平台与 ArcGIS Engine 平台的技术特点对比

Tab. 2 Comparison of techniques between IDL and ArcGIS Engine

	IDL 平台	ArcGIS Engine 平台
优点	(1)完全面向矩阵运算,数组的操作非常灵活,特别是在检索、更新数组中的元素,变换数组中元素的位置,截取指定索引的数组元素等方面,相对于以循环为主要的传统实现方法效率更高 (2)具有强大的空间数据处理能力,能实现 ENVI 所有的遥感影像处理功能。	(1)具有强大的空间分析功能 (2)提供强大的地图控件,便于实现空间数据的交互式操作和可视化表达
缺点	(1)GUI 开发能力较弱,人机交互界面不够美观 (2)开发的程序不能编译成标准 EXE 可执行程序	对超大规模栅格数据进行栅格计算时,效率较低

对比结果表明,IDL 适于栅格数据的预处理及代数运算,而 ArcGIS Engine 则适于地图显示和空间分析等操作,因此,我们将各模块与不同的开发平台进行了关联,如表 3 所示。

然而,尽管 IDL 与 ArcGIS Engine 的联合开发将显著提高系统的运行效率,但实现它们的无缝集成必须解决两者开发语言不统一的问题。ArcGIS Engine 有多种开发语言版本,支持 C++, C#, VB, JAVA 等开发语言;而 IDL 是为数据分析和图

表 3 系统模块与对应的开发组件

Tab. 3 The system modules and the corresponding developing components

系统模块	开发组件	实现功能
GIS 地图操作模块	ArcGIS Engine 9.3	地图的交互式操作(地图放大、缩小、漫游,数据选择,属性查询,距离量测等)
模型参数置备模块	IDL 8.0	MODIS 数据的格式转换、数据拼接、投影变换、重采样、数据裁切
光合有效辐射估算模块	IDL 8.0	大气顶总太阳辐射估算、大气透过率估算、瞬时及日光合有效辐射的估算
模型结果分析模块	ArcGIS Engine 9.3	季节分析、年际分析、区域分析
图形输出模块	ArcGIS Engine 9.3	地图输出设置及打印等
系统管理模块	.NET Framework 3.5(C#)	系统界面、用户权限管理等

像化应用设计的特定开发语言,无法直接与其他编程语言兼容,但是 IDL 完全支持 COM/ActiveX 组件技术,可以将 IDL 应用开发程序集成到与 COM 兼容的环境中,然后通过其他编程语言(C++, C#, VB, JAVA 等)进行访问,实现 IDL 与其他编程语言的相互嵌入和调用。根据该思路,本文选择 C# 语言作为联系 IDL 与 ArcGIS Engine 的桥梁,实现 IDL 与 ArcGIS Engine 的联合开发。图 1 是具体的技术方案,图中包括 2 个部分,第一部分是 IDL,其程序的编写在 IDLDE (IDL 集成开发环境)中完成,程序调试完毕后可以发布成供外部程序访问的工程;第二部分是 ArcGIS Engine 组件,组件的功能通过 C# 语言进行调用开发,同时 C# 通过调

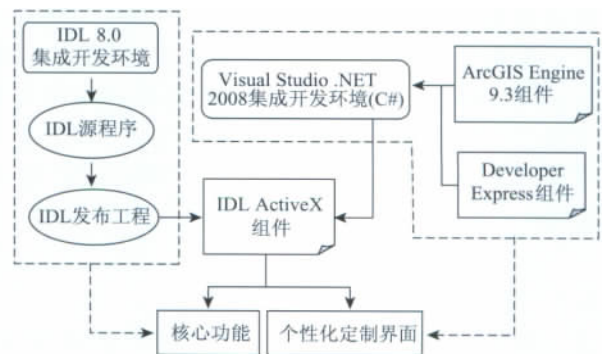


图 1 系统技术方案

Fig. 1 The technical proposal of the system

用 Developer Express 组件实现个性化用户界面的定制。在 IDL 与 ArcEngine 两者之间,通过 IDL ActiveX 组件(IDLDraw Widget)进行关联,实现两者的无缝集成。

3.2 系统实现

3.2.1 IDL 与 C# 的混合编程

(1)IDL 控件及功能初始化

在 C# 开发界面中添加 IDLDrawWidget 控件,调用以下代码对 IDL 控件进行初始化,代码第 1 行 IDLDrawWidget.IdlPath 设置为 IDL 安装路径下的动态链接库文件;第 2 行 InitIDL 函数执行初始化操作,如果初始化失败将进行提示;初始化成功后可以进行 IDL 功能的调用,如代码第 7 行所示,调用时使用 ExecuteStr 函数,IDL 的指令以字符串形式传递给函数,指令的编写与 IDL 环境中的编写方法一致,第 7 行的指令中“PARcalculator.sav”是 IDL 开发环境中编译生成的工程文件,IDL 开发的功能都包含在该文件中,“Restore”是 IDL 的关键字用于初始化工程文件,只有执行该初始化工作后才能调用“PARcalculator.sav”中的函数和方法。

```
1 IDLDrawWidget.IdlPath = @" c:\Program
Files\ITT\IDL\IDL80\bin\bin.x86\idl.dll";
2 IDLDrawWidget1.InitIDL((int)this.Handle);
3 IDLDrawWidget1.ExecuteStr("Restore,'PAR-
calculator.sav'");
```

(2)数据的相互传递

在 IDL 与 C# 的混合编程过程中,两者之间的数据传递是一个非常重要的过程,例如,从 C# 向 IDL 传递遥感影像的存储路径,以便 IDL 能够正确读取数据进行运算,同时 IDL 需要将结果数据传递给 C#,以便在用户界面上正确输出。IDL 提供的的数据传递方式,一是普通数据的传递;二是矩阵数据的传递。普通数据的传递主要是指字符串数据和数值数据的传递,C# 只用提供与 IDL 对应数据类型的变量进行存储即可;矩阵数据的传递是指对数组数据的传递,C# 在接收数组数据时,首先,通过 IDLDrawWidget 控件的 CopyNamedArray 函数将 IDL 中的数据变量转化为 object 类型,然后通过类型强制转换变为和 IDL 对应数组类型的数据;而向 IDL 传递数组数据时,直接通过 IDLDrawWidget 控件的 SetNamedArray 函数即可。具体代码如下所示:

```
1 float[] wavelength;
2 string cmd = " getWaveLength, wavelength =
wavelength";
3 IDLDrawWidget.ExecuteStr(cmd);
4 object obj_wavelength = axIDLDrawWidget1.
CopyNamedArray(" wavelength");
5 wavelength = (float[])obj_wavelength;
6 IDLDrawWidget.SetNamedArray(" wave-
length", wavelength, true);
7 cmd = " calculate_instantPAR, transmittance,
wavelength = wavelength, instantPar_outPath
= instantPar_outPath";
8 IDLDrawWidget.ExecuteStr(cmd);
```

3.2.2 数据的分块处理

系统在进行模型运算(栅格运算为主)时,需要同时输入多个影像数据,占用较大的内存资源,因此,有可能出现内存资源不足,造成系统的崩溃。为了防止内存溢出,在设计时,采取数据分块的方式,减少每次读入内存的数据量,将大容量的数据分多次进行运算,然后对分块运算的结果进行合并,得到完整的数据结果。由于在栅格运算的过程中,每个栅格单元是独立的,因此先分块,后合并的方案是可行的。IDL 将影像数据以数组形式存储,并能通过索引对数组数据进行分段截取,本文利用该特性,实现了数据的分块操作。具体步骤为:

(1)设定每个分块数据的大小,并依据原始数据的大小,确定分块的数量(行数和列数),并为每个分块进行编号(编号由分块的行、列号确定);

(2)确定每个分块左上角和右下角栅格在原始数据中的行、列位置,从而确定整个分块数据的范围,利用 IDL 提供的数据接口将该范围内的数据读入内存。以 Tiff 数据为例,实现的方法为:

```
Read_Tiff(TIFF_Path, SUB_RECT = [ x, y,
cols, rows])
```

其中,Read_Tiff 为 IDL 提供的读取 Geo-Tiff 文件的函数,TIFF_Path 为数据的路径,SUB_RECT 为描述数据范围的参数,以数组形式表示,其中, x , y 表示所截取数据在原数据中的索引位置,cols, rows 表示所截取数据跨越的列数和行数。通过该方法,每次载入内存的数据将会得到控制,从而避免内存溢出。

(3)依次对载入内存的每个分块数据,按照模型算法的要求进行栅格计算,得到分块计算的结果;

(4)根据每个分块的编号,将所有分块计算的结果进行拼接,得到最终的结果。

3.2.3 瞬时光合有效辐射批量计算

MODIS 二级大气产品的获取周期为一天 2 次:上午 10:30 来自 TERRA 卫星,下午 13:30 来自 AQUA 卫星。瞬时光合有效辐射的批量计算功能,即批量计算全年每天 2 次的瞬时 PAR 值。其计算过程包括 2 部分:MODIS 产品的预处理和模型的运算。

MODIS 产品预处理包括 4 个步骤:

(1)根据研究区的范围反算出 MODIS 产品的范围,依据该范围从下载的数据集中筛选出落在研究区的数据,从而避免非研究区的数据参与后续的各项操作,提高系统运行效率;

(2)对筛选出的数据进行拼接,形成覆盖研究区的完整数据;

(3)对操作(2)的结果进行投影转换,由于转换过程会出现几何形状的改变,因此,在第(1)步操作中,需要将研究区的范围扩大,以免在投影转换后出现局部区域数据的丢失;

(4)根据研究区的实际范围对(3)的结果进行裁切,得到最终用于模型运算的参数集。

模型运算则是根据 PARcalc 算法中的计算公式对预处理阶段获取到的参数集进行逐栅格的运算,得到最终的瞬时光合有效辐射值。

3.2.4 日光合有效辐射批量计算

本系统采用非线性的正弦函数来拟合白天的瞬时光合有效辐射分布。根据上下午瞬时光合有效辐射和日出日落时间这 4 个数据来拟合出正弦函数,进而对瞬时光合有效辐射函数进行积分得到全天光合有效辐射量。正弦函数式为: $y=A\sin(Bx+C)+D$;其中, x 为 24 小时制的时间值, y 为某一时刻的瞬时光合有效辐射值,取正值的时间范围为 [日出时间,日落时间],函数 y 中日落时间减去日出时间为半个周期,因此:

$$B = \frac{\pi}{\text{日落时间} - \text{日出时间}}$$

对于日出和日落两个时间点(日出、日落时间可以根据地理位置和日期推算),其光合有效辐射值为 0,同时 MODIS 大气产品记录了早上 10:30 和下午 13:30 两个时间点的光合有效辐射值,依据这些已知信息并利用 LM 算法^[15]可以拟合出正弦函数式中其他 3 个未知数(A、C、D)的值。根据求解出

的正弦方程函数,可以得到任意时刻的光合有效辐射值,根据日照时长,对瞬间光合有效辐射进行积分,得到全天的光合有效辐射。具体流程如图 2 所示。

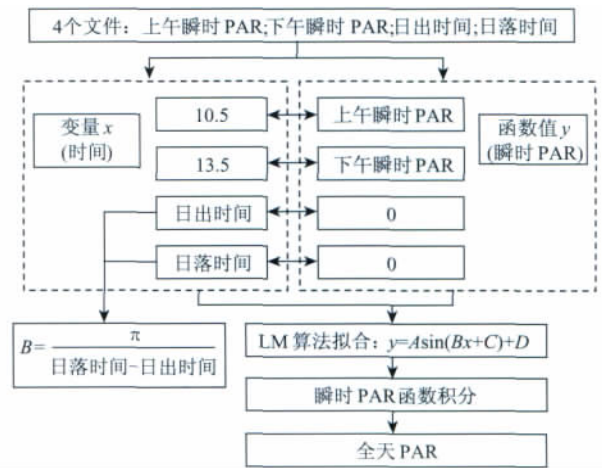


图 2 由瞬时 PAR 得到全天 PAR 的流程

Fig. 2 Workflow of getting daily PAR from incident PAR

4 系统测试与应用

4.1 系统测试

系统主要应用于区域尺度的逐日及逐年光合有效辐射的估算,对性能要求较高,为了检验系统运行效率是否满足应用需求,本研究以内蒙古自治区作为测试区,利用系统对该地区 2007 年的光合有效辐射进行了估算(图 3),系统运行的硬件环境为 Intel Core i7-2600 处理器,主频 3.4GHz,内存 1GB。试验区域由东北向西南斜伸,呈狭长形,是我国的第 3 大省份,面积较大,在估算光合有效辐射时,参与运算的数据量(含参数准备和运算的中间数据)将非常大。对于 1km 分辨率的数据,覆盖内蒙古全境的单个栅格数据量为 15.549MB,栅格大小为 2132 列 × 1867 行,全年 365 天的数据量超过了 5.6GB,由于模型运算同时需要臭氧、大气含水量、云顶大气压、云光学厚度、地表大气压等多个参数,因此,计算 1 年的光合有效辐射的数据量将至少超过 25GB。

在系统测试过程中,为了更好地反映系统运行性能的高低,本文以 ArcEngine 方法进行了对比试验,具体操作如下:

(1)首先,通过系统的模型参数置备模块构建一套完整的模型参数集(包括臭氧、大气水含量、云顶光学厚度、云顶大气压强、气象台站大气压强等),数据空间分辨率 1km,时间分辨率为 1d,数据

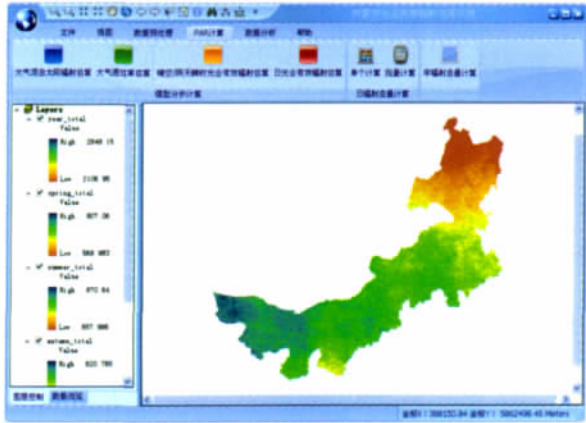


图 3 光合有效辐射估算系统主界面

Fig. 3 Main interface of the PAR calculation system

范围为内蒙古全境,数据格式为 GeoTiff;

(2)通过系统的光合有效辐射估算模块,利用第(1)步的参数集计算全年逐日光合有效辐射,然后对逐日值进行累加得到全年总光合有效辐射;

(3)通过以 ArcEngine 的传统方法,利用第(1)步的参数集执行与第(2)步同样的操作;

(4)对第(2)和第(3)步的运行时间及运算结果进行对比,结果如表 4、表 5 所示。

表 4 本系统与以 ArcEngine 方法的运行时间对比

Tab. 4 Comparison of running time performed by the all ArcEngine-based method and the system

测试区域	运算对象	本系统运行时间	ArcEngine 的运行时间
内蒙古	全年逐日光合有效辐射	104min	221min
	全年总光合有效辐射	6.45s	46.57s

表 5 本系统与以 ArcEngine 方法的运行结果特征值对比

Tab. 5 Comparison of the running result performed by the all ArcEngine-based method and the system

特征值(MJ/m ²)	本系统方法	ArcEngine 方法
最小值	1289.158	1289.158
最大值	2495.025	2495.027
平均值	2016.379	2016.379
标准差	173.450	173.450

表 4 表明,本系统运行时间明显低于以 ArcEngine 的方法,且完成内蒙古全年逐日光合有效辐射的运行时间控制在 2 小时以内,在无需实时性的前提下,时间足以满足应用要求。这主要得益于本系统采用了 IDL 完成栅格运算,在栅格数据量较大的情况下,IDL 的运行效率要明显高于 Arc Engine。

表 5 是全年总光合有效辐射特征值的对比结

果,在此基础上,我们还对 2 个计算结果的误差率进行了统计,其绝对误差小于 0.005 的数据超过了 99.99%,绝对误差小于 0.001 的数据超过了 96.32%,表明 2 个计算结果基本一致。

在系统的交互式操作方面,系统采用了 Office2007 风格进行主界面及菜单的设计(图 3),缩短了用户对系统的适应过程。另一方面,为了降低非专业用户的使用难度,系统提供了一键化的批处理功能(图 4),用户不必考虑数据格式、投影类型、空间分辨率等专业性问题就能反演得到最终结果。同时,考虑到专业用户的需求,系统将尽可能全的数据处理功能设计成独立的菜单,使用户能够通过对不同菜单功能的组合完成各项任务。总体来看,系统考虑到了不同的用户群体,易于操作且具备较强的实用性。

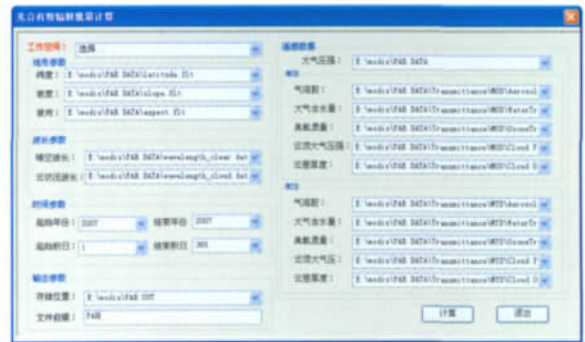


图 4 光合有效辐射批量计算界面

Fig. 4 Main interface of batch calculation of PAR

4.2 系统应用

在内蒙古 2007 年全年逐日光合有效辐射的基础上,利用系统对该地区全年及四季(春季从 3 月开始)的日平均光合有效辐射和总光合有效辐射进行了特征值统计(图 5 和表 6)。结果表明:(1)2007

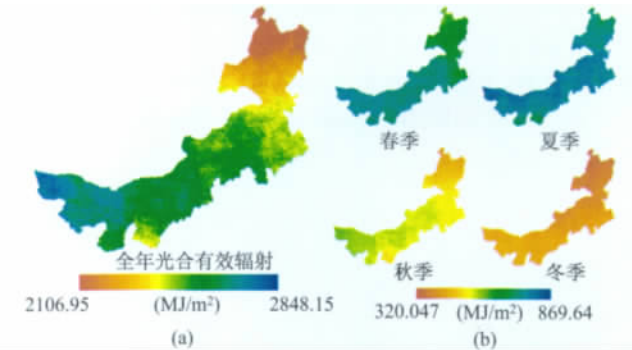


图 5 内蒙古 2007 年全年(a)及四季(b)光合有效辐射空间分布
Fig. 5 The distribution of annual (a) and seasonal (b) PAR in Inner Mongolia in 2007

年,内蒙古地区从西南到东北,全年光合有效辐射逐渐递减;(2)四季的光合有效辐射强度大小依次为夏季>春季>秋季>冬季;(3)光合有效辐射的最大、最小及平均值等特征值大小同样为夏季>春季>秋季>冬季。

表6 内蒙古地区光合有效辐射特征值统计(MJ/m²)

Tab. 6 The characteristic values of PAR in Inner Mongolia (MJ/m²)

时段	日平均光合有效辐射特征值			总光合有效辐射特征值		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
全年	7.46	5.44	6.64	2848.15	2106.95	2568.11
春季	8.77	6.18	7.89	807.06	568.98	723.84
夏季	10.07	7.65	9.04	870.64	657.99	776.93
秋季	6.97	4.43	6.03	620.77	394.03	534.43
冬季	5.37	3.56	4.56	483.03	320.05	408.52

5 结语

本文以内蒙古地区为例对该区2007年的年、季光合有效辐射进行了估算分析。结果表明,系统操作便捷,具有良好的交互性,功能丰富,具有很强的实用性,为研究区域尺度光合有效辐射的定量化计算提供了参考。

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所刘纪远、樊江文研究员,对本文提出了宝贵的意见,廖畅和王丽敬在程序调试时提供了帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

[1] 周允华,项月琴,单福芝. 光合有效辐射(PAR)的气候学研究[J]. 气象学报, 1984, 42(4): 387-397.

[2] 吕宁,刘荣高,刘纪远. 1998-2002年中国地表太阳辐射的时空变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(5): 5623-5630

[3] McCree K J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against photosynthesis data

[J]. Agricultural Meteorology, 1972, 10, 443-453.

[4] Szeicz G. Solar radiation for Plant growth[J]. Journal of Applied Ecology, 1974, 11(2): 617-636.

[5] Stanhill G, Fuchs M. The relative flux density of photosynthetically active radiation[J]. Journal of Applied Ecology, 1977, 14(1): 317-322.

[6] 白建辉,王庚辰. 内蒙古草原光合有效辐射的计算方法[J]. 环境科学研究, 2005, 17(6): 15-18, 34.

[7] Liu R G, Liang S L, He H L, *et al.* Mapping incident photosynthetically active radiation from MODIS data over China[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 998-1009.

[8] Liang S L, Zheng T, Liu R G, *et al.* Estimation of incident photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectrometer data[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111, D15208.

[9] Liang S L, Zheng T, Wang D D, *et al.* Mapping high-resolution incident photosynthetically active radiation over land from polar-orbiting and geostationary satellite data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2007, 73(10): 1085-1089.

[10] Laake P E, Sanchez-Azofeifa G A. Simplified atmospheric radiative transfer modelling for estimating incident PAR using MODIS atmosphere products[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(1): 98-113.

[11] Laake P E, Sanchez-Azofeifa G A. Mapping PAR using MODIS atmosphere products[J]. Remote Sensing Environment, 2005, 94(4): 554-563.

[12] 闫殿武. IDL 可视化工具入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.

[13] 钱志奇,张友静,邓世赞,等. 基于组件技术的地表蒸散发遥感监测系统设计与应用[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(5): 679-686.

[14] 刘荣高,刘洋,刘纪远. MODIS 科学数据处理研究进展[J]. 自然科学进展, 2009, 19(2): 141-147.

[15] Lourakis M I A. A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar[J]. Matrix, 2005, 3(2).

Design and Implementation of the PAR Calculation System Based on MODIS Data

CAO Wei¹, SHAO Quanqin¹ and CHEN Zhuoqi²

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: In this paper we developed a PAR (photosynthetically active radiation) calculation system based on PARcalc algorithm which was driven by MODIS data. Before designing, we compared the characteristic of IDL with ArcGIS Engine, and analyzed the requirements of system functions. Therefore we designed a technical scheme which integrated IDL with ArcGIS Engine together, and chose C# as the main programming language. The communication between C# and IDL is dependent on the IDL ActiveX component. Then we gave a detailed introduction to the main modules and functions of the system and analyzed the key techniques for the implementation such as programming with C# and IDL in the same environment, data partition, batch computation of incident PAR, and batch computation of daily PAR by LM (Levenberg-Marquardt) algorithm. Finally we calculated the annual and seasonal PAR in Inner Mongolia in 2007 by the system, and made a statistic of the characteristic value. The results showed that the system provided a friendly man-machine interaction. It was easy to use and met the demands of practical applications. It had great reference value for PAR calculation in regional scale.

Key words: photosynthetically active radiation; MODIS; PARcalc; IDL