

时空谱多维数据格式 (MDD) 结构与计算机配套系统

张立福¹, 孙雪剑^{1*}, 张 霞¹, 王 楠¹, 张明月^{1,2}, 林昱坤^{1,2}, 黄 海¹,
岑 奕¹, 黄长平¹, 杨 杭¹, 张红明¹, 刘 佳¹, 童庆禧¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要: 遥感观测数据包括了时间、空间、光谱属性等特征在内的多维度信息, 为了便于多维度大数据之间互操作和数据分析, 作者团队在综合考虑多维大数据特点的基础上, 研发了一种将遥感产品涉及的时间、空间、光谱特征等关联成一体的数据格式, 命名为“多维数据格式 (MDD, Multi-Dimensional Data Format)”。本文论述.mdd数据格式的算法原理, 像元、波段、光谱时空特征的排列结构, 其中包括由 TSB (Temporal Sequential in Band)、TSP (Temporal Sequential in Pixel)、TIB (Temporal Interleaved by Band)、TIP (Temporal Interleaved by Pixel) 和 TIS (Temporal Interleaved by Spectrum) 五种数据存储格式组成的关联组织关系和数据组织结构。为了方便使用该数据格式, 作者团队研发了计算机配套软件系统-遥感多维数据格式互操作分析软件系统 (Multi-dimensional Analysis of Remote Sensing V1.0, MARS), 该软件具有.mdd格式数据的输入、存储、分析、输出及格式转换等功能。此外, 该软件也具有图像预处理、光谱分析、遥感数据分类等功能。

关键词: MDD; 数据格式; 多维数据; 数据分析; MARS

DOI: 10.3974/geodp.2017.02.01

1 前言

遥感是全球变化研究最重要的技术手段之一。遥感卫星长时间连续对地观测, 积累了大量长时间序列、多分辨率、多光谱系列数据。例如, Landsat TM 和 MODIS 遥感观测数据已经成为全球变化研究重要的遥感数据源。Landsat 长时间序列数据被广泛应用于森林扰动和恢复的趋势变化监测^[1]、森林扰动历史数据自动化重建^[2]、地表森林生物量变化定量分析^[3], 以及土地覆盖变化监测^[4-5]等研究; MODIS 长时间序列数据大量被应用于农作物物候监测^[6-7]等研究。

目前用于时间序列分析的遥感数据集通常是以一种常用格式的文件为基本存储单元, 如 Geo-TIFF (Tagged Image File Format)、HDF (Hierarchical Data Format), 以及遥感商用软件自带格式 (如 ENVI 和 ERDAS)。这些格式的数据, 每个文件对应一个时间的数据; HDF 和 Geo-TIFF 数据格式采用更加复杂的数据结构 (树状结构或链表结构)。由于目前常

收稿日期: 2017-05-10; 修订日期: 2017-06-01; 出版日期: 2017-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41072248)

*通讯作者: 孙雪剑 K-3661-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, sunxj@radi.ac.cn

论文引用格式: 张立福, 孙雪剑, 张霞等. 时空谱多维数据格式 (MDD) 结构与计算机配套系统[J]. 全球变化数据学报, 2017, 1(2): 121-135. DOI: 10.3974/geodp.2017.02.01.

数据集引用格式: 张立福, 孙雪剑, 张霞等. 遥感多维数据格式互操作分析软件系统 (MARS 1.0) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2017. DOI: 10.3974/geodb.2017.02.20.V1.

用遥感数据格式基本是基于三维立方体模型存储,对于数据的时间序列分析来说,就显得有很大的不方便之处。

作者团队基于遥感多时相、多空间、多光谱等数据特点,研发了时空谱多维数据格式^[8],即 MDD (Multi-Dimensional Dataset) 数据格式。根据多维数据存储顺序的不同,MDD 可分为五种基本数据存储格式:TSB (Temporal Sequential in Band)、TSP (Temporal Sequential in Pixel)、TIB (Temporal Interleaved by Band)、TIP (Temporal Interleaved by Pixel)和 TIS (Temporal Interleaved by Spectrum)。为便于多维时-空-谱数据的构建读取和分析,配套研发并出版了多维分析软件模块,即 MDA (Multi-dimensional Data Analysis) 软件模块,该模块集成于 MARS (Multi-dimensional Analysis of Remote Sensing) 多维遥感分析软件中。通过基于遥感数据的应用案例介绍,读者可以了解 MDD 数据结构的特点和使用方法。

2 MDD 数据格式

MDD 数据格式是作者团队研发的集遥感数据的时-空-谱特征于一体的多维数据存储格式。一个 MDD 数据集由一系列不同时相的光谱立方体组成,因此,从数据集的维度上来看,MDD 增加了时间维信息,由目前遥感数据集只包括空间和光谱维信息,变为可以包括时间-空间-光谱的多维遥感数据集。

2.1 MDD 数据格式特点

MDD 数据格式具有以下特点:

灵活性: MDD 对多维图像数据的组织有五种存储结构,五种存储结构之间可以相互转换,用户可以根据数据分析的需求灵活选择对应的数据组织结构。

多维性: MDD 是一种多维数据格式,允许用户将遥感数据时间、空间、光谱维度的信息集成到同一个数据集中。

可扩展性: MDD 数据集,可根据需要,将新获取的图像数据添加到已生成的 MDD 文件中,实现时间维度数据信息的扩展。

完整性: MDD 数据除了包含遥感栅格图像数据本身之外,还附带描述该数据的所有属性的全面信息,包含时间、大小、地理投影等等。

2.2 MDD 的物理存储结构

MDD 数据集由头文件和数据文件两部分组成。

头文件记录了影像数据本身的信息,包括空间、光谱和时间维的大小、数据存储格式、数据类型信息,也记录了关于影像数据附加的描述信息,包括坐标投影和仿射变换系数、光谱维和时间维的名称以及文件名称和类型、数据偏移等描述信息。数据文件是实际存储影像数据的文件,根据数据的存储顺序,可分为 TSB、TSP、TIB、TIP 和 TIS 五种数据存储结构。

2.2.1 MDD 头文件

MDD 头文件记录了用于表达和解析影像数据文件的所有元数据信息,如表 1 所示。

2.2.2 MDD 数据文件

MDD 数据文件是实际存储影像数据的文件,采用二进制的字节流并以 TSB、TSP、TIB、TIP 和 TIS 五种存储结构中的一种对栅格图像数据进行存储,五种数据结构之间可以相互转换。

表 1 MDD 头文件中各字段含义

字 段	含 义
Samples	数据每个波段所包含的列数
Lines	数据每个波段所包含的行数
Bands	数据所包含的波段数
Time	数据所包含的时间数
Header Offset	文件中存在的嵌入式头信息的字节数。读取文件时，会跳过这些字节
File Type	文件类型，如 MDD Standard
Data Type	数据表示的类型：1 = 8 位字节；2 = 16 位有符号整数；3 = 32 位有符号长整数；4 = 32 位浮点数；5 = 64 位双精度浮点数；6 = 2×32 位复数，双重精度的实数对；9 = 2×64 位双精度复数，实数对双精度；12 = 16 位无符号整数；13 = 32 位无符号长整数；14 = 64 位有符号长整型；15 = 64 位无符号长整数
Interleave	说明数据存储所使用的结构，包括 TSB、TSP、TIB、TIP 和 TIS
Sensor Type	传感器类型，如 Landsat TM，SPOT，MODIS 等
Byte Order	字节顺序，指占内存多于一个字节类型的数据在内存中的存放顺序，Byte order = 0 表示先存储低字节（Least significant bit）；byte order = 1 表示先存储高字节（Most significant bit）
Map Info	将文件的信息按照投影名称、参考像素位置（文件坐标）、经度、纬度、像素大小、投影区域和坐标系的顺序列出
Coordinate System String	坐标字符串字段。它列出了用于地理坐标系或投影坐标系的参数
Band Names	数据文件中各个波段的名称
Time Names	数据中各个文件获取时间

（1）Temporal Sequential in Band (TSB)

假设多时相遥感数据集包含 T_1 、 T_2 和 T_3 三个时间的影像，每个时间的影像包含 3 个波段，每个波段 4 个像元（用 4 个小方块来表示），如图 1 所示，图中小方块排列的顺序代表 TSB 格式中所有像元的存储顺序。该数据集包含时间维、光谱维以及空间“行”和“列”四个维度。

TSB 存储格式首先将时间 T_1 的第一个波段的像元数据按照先行后列的顺序进行存储，然后依次将 T_1 各个波段的像元数据进行存放，最后依据上述规则将所有时间的立方体数据按时间顺序依次存储。这种存储结构可表示为

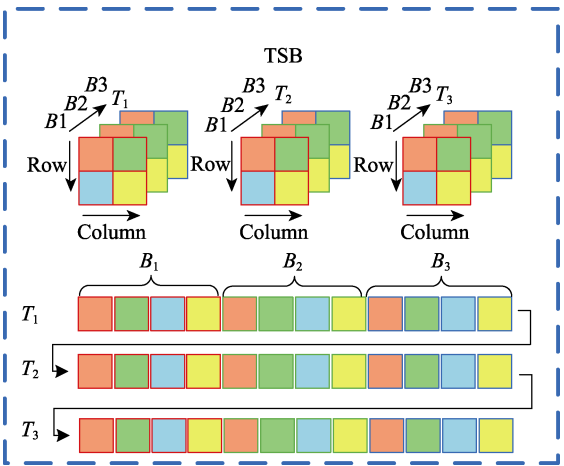


图 1 数据存储的 TSB 格式结构图

$$P_{\text{TSB}} = F_{\text{TSB}}(t) = F_{\text{TSB}}(1) + F_{\text{TSB}}(2) + \cdots + F_{\text{TSB}}(T), \quad t \in [1, T] \quad (1)$$

式中， $F_{\text{TSB}}(t)$ 代表每个时间的立方体影像数据集。式（1）表示数据存储按照时间 T 的顺

序，依次存储不同时间的影像立方体，在每个立方体影像数据中，按照波段的顺序存储，可表示为

$$F_{\text{TSB}}(t)=B_{\text{TSB}}(t,s)=B_{\text{TSB}}(t,1)+B_{\text{TSB}}(t,2)+\cdots+B_{\text{TSB}}(t,S),\quad s\in[1,S]$$

在每个波段的存储中，按照逐行的顺序存储，可表示为

$$\begin{aligned} B_{\text{TSB}}(t,s) &= A(t,s,c,r) \\ &= A(t,s,[1:C],1)+A(t,s,[1:C],2)+\cdots+A(t,s,[1:C],R),\quad r\in[1,R] \end{aligned}$$

TSB 格式将每一个时间的所有波段数据组织在一起，适用于对一个时间若干个波段的数据进行操作，以及波段在空间维的处理。提取一个或多个时间所有波段组成的光谱立方体数据、光谱运算和空间域滤波等应用可以采取 TSB 数据格式进行组织。

(2) Temporal Sequential in Pixel (TSP)

TSP 存储格式采取光谱维优先的原则，首先是将 T_1 时间的立方体数据按照波段方向依次存储第一个像元的光谱信息，然后再按照“先行后列”的顺序存储各个像元点的光谱信息，最后依据上述规则将所有时间的立方体数据按时间顺序存储，如图 2 所示，这种存储结构可表示为

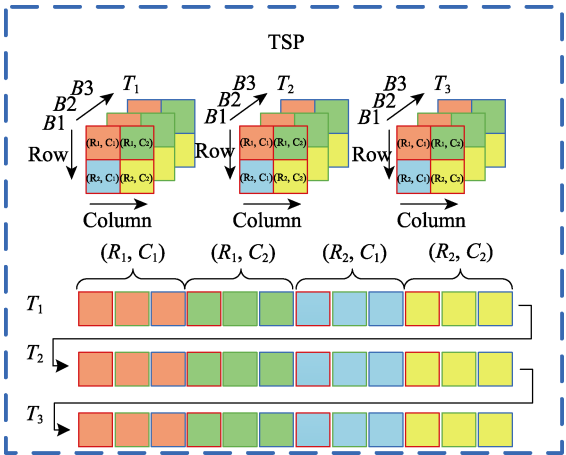


图 2 数据存储的 TSP 格式结构图

$$P_{\text{TSP}}=F_{\text{TSP}}(t)=F_{\text{TSP}}(1)+F_{\text{TSP}}(2)+\cdots+F_{\text{TSP}}(T),\quad t\in[1,T]$$

式中，每个立方体 $F_{\text{TSP}}(t)$ 的存储可用下式表示

$$\begin{aligned} F_{\text{TSP}}(t)=A(t,[1:S],c,r) &= A(t,[1:S],1,1)+A(t,[1:S],2,1)+\cdots+A(t,[1:S],C,1) \\ &\quad +A(t,[1:S],1,2)+A(t,[1:S],2,2)+\cdots+A(t,[1:S],C,2) \\ &\quad \vdots \\ &\quad +A(t,[1:S],1,R)+A(t,[1:S],2,R)+\cdots+A(t,[1:S],C,R) \end{aligned}$$

上式中变量的含义与表 2 相同。

表 2 各个表达式或变量的含义

表达式或变量	含义描述
t	某一个时间，取值范围 $[1,T]$
S	某一个光谱波段，取值范围 $[1,S]$
C	某一列，取值范围 $[1,C]$
r	某一行，取值范围 $[1,R]$
$A(t,s,c,r)$	t 时间的光谱立方体 A 中第 s 波段、第 c 列、第 r 行的像元
B_{xxx}	表示一个波段的数据
F_{xxx}	表示多个波段组成的立方体数据
P_{xxx}	表示时空谱四维数据集，其中 xxx 为五种格式中的一种

TSP 格式的特点是将每个时间影像的光谱数据存储在一起, 适用于对一个时间的光谱数据进行操作。提取一个像元或者一片区域的光谱曲线或者对不同时间的影像进行光谱特征化等操作可以采取 TSP 数据格式进行组织, 例如计算光谱斜率和坡向、光谱二值编码、光谱吸收指数、光谱导数和积分等。

(3) Temporal Interleaved by Band (TIB)

如图 3 所示, TIB 存储格式以波段优先为原则, 首先将第一个波段 T_1 时间的所有像元按照“先行后列”的顺序存储,

然后依次将不同时间上第一个波段的所有像元数据按“先行后列”的顺序存储在一起, 最后依据上述规则将波段的数据按照时间顺序进行存储, 这种存储结构可表示为

$$P_{\text{TIB}} = F_{\text{TIB}}(s) = F_{\text{TIB}}(1) + F_{\text{TIB}}(2) + \dots + F_{\text{TIB}}(S), \quad s \in [1, S] \quad (6)$$

式中, $F_{\text{TIB}}(s)$ 表示的立方体是不同时间序列的同一个波段组成的数据立方体, 存储顺序为按照时间序列存储第一波段, 然后再存储第二波段, 直至存完所有波段。 $F_{\text{TIB}}(s)$ 可表示为

$$F_{\text{TIB}}(s) = B_{\text{TIB}}(t, s) = B_{\text{TIB}}(1, s) + B_{\text{TIB}}(2, s) + \dots + B_{\text{TIB}}(T, S) \quad (7)$$

式中, 每个波段的存储顺序为

$$\begin{aligned} B_{\text{TIB}}(t, s) &= A(t, s, c, r) \\ &= A(t, s, [1:C], 1) + A(t, s, [1:C], 2) + \dots + A(t, s, [1:C], R) \end{aligned} \quad (8)$$

上式中变量的含义与表 2 相同。

TIB 格式的特点是将一个波段所有时间数据组织在一起, 适用于提取某个波段的时间序列立方体数据。当需要提取一个波段的时间序列立方体或者针对某个波段需选择三个时间的数据用于假彩色合成显示时可以采取 TIB 数据格式进行组织。

(4) Temporal Interleaved by Pixel (TIP)

如图 4 所示, TIP 首先将所有时间第一个波段的第一个像元点的数据按时间顺序组织在一起, 然后将所有时间第一个波段内的像元数据再按“先行后

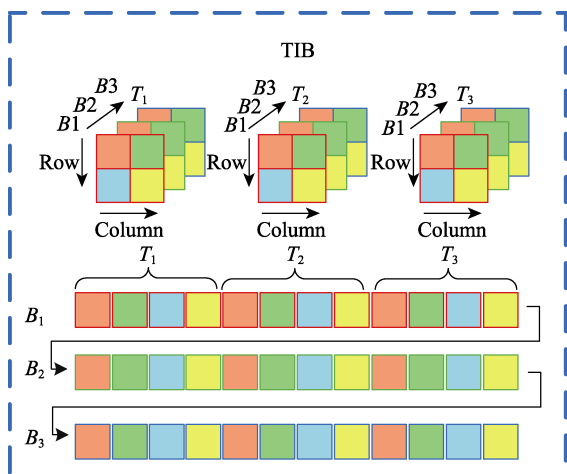


图 3 数据存储的 TIB 格式结构图

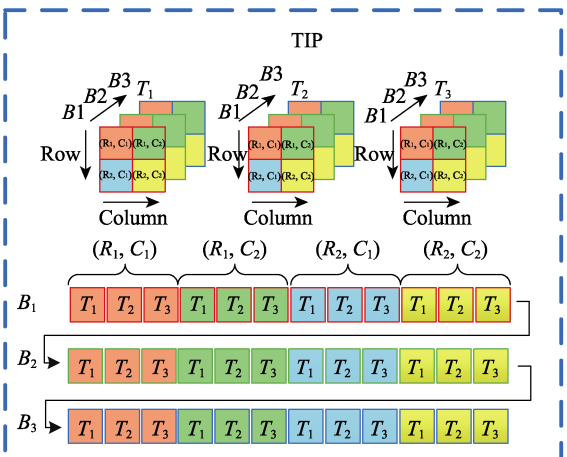


图 4 数据存储的 TIP 格式结构图

列”的原则顺序存储,最后依据上述规则将所有波段数据按照波段顺序进行存储,这种存储结构可以表示为

$$P_{TIP} = F_{TIP}(s) = F_{TIP}(1) + F_{TIP}(2) + \cdots + F_{TIP}(S), \quad s \in [1, S] \quad (9)$$

式中, $F_{TIP}(s)$ 表示不同时间影像的同一个像元光谱组成的立方体,可表示为

$$\begin{aligned} F_{TIP}(s) = A([1:T], s, c, r) = & A([1:T], s, 1, 1) + A([1:T], s, 2, 1) + \cdots + A([1:T], s, C, 1) \\ & + A([1:T], s, 1, 2) + A([1:T], s, 2, 2) + \cdots + A([1:T], s, C, 2) \\ & \vdots \\ & + A([1:T], s, 1, R) + A([1:T], s, 2, R) + \cdots + A([1:T], s, C, R) \end{aligned} \quad (10)$$

上述式子中变量的含义与表2相同。

TIP 格式最大的特点是将图像中像元的时谱数据组织在一起,适用于对像元的时间谱进行处理与分析。当提取一个像元或者一片区域在某个波段的时谱曲线,在时间维进行平滑和滤波处理,对时间谱曲线进行拟合,以及进行预测分析等操作时可采取 TSB 数据格式进行组织。

(5) Temporal Interleaved by Spectrum (TIS)

如图5所示, TIS 存储格式首先按照波段优先的原则,将所有波段第一个像元按照时间顺序进行存储,然后依据这一规则将其它像元按照空间上“先后列”的原则依次进行存储,这种存储结构可以表示为

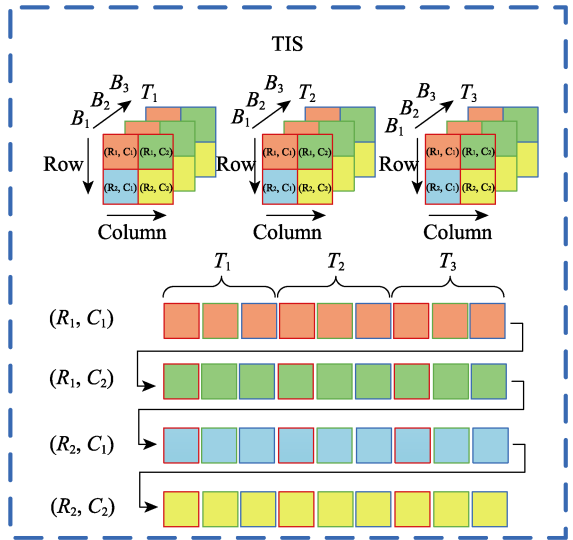


图5 数据存储的 TIS 格式结构图

$$\begin{aligned} P_{TIS} = B_{TIS}(c, r) = & B_{TIS}(1, 1) + B_{TIS}(2, 1) + \cdots + B_{TIS}(C, 1) \\ & + B_{TIS}(1, 2) + B_{TIS}(2, 2) + \cdots + B_{TIS}(C, 2) \\ & \vdots \\ & + B_{TIS}(1, R) + B_{TIS}(2, R) + \cdots + B_{TIS}(C, R) \end{aligned} \quad (11)$$

式中,

$$\begin{aligned} B_{TIS}(c, r) = & A(t, [1:S], c, r) \\ = & A(1, [1:S], c, r) + A(2, [1:S], c, r) + \cdots + A(T, [1:S], c, r), \quad t \in [1:T] \end{aligned} \quad (12)$$

上式中变量的含义与表2相同。

TIS 格式的特点是将每一个像元在整个时间序列上的光谱数据组织在一起,适用于提取像元光谱曲线的时间序列数据。抽取某一个像元在一个时间范围内的所有光谱曲线并对这些曲线进行三维可视化,并分析该像元的光谱随着时间变化的情况时可采取 TIS 格式进行组织。

3 MDA (Multi-Dimension Analysis) 多维分析模块

3.1 MDA 多维分析计算机软件模块

为了使用户理解和应用.mdd 数据格式，笔者团队研发了可用于.mdd 数据输入、存储、分析和输出的计算机软件模块，命名为 MDA (Multi-Dimension Analysis)多维分析计算机软件模块，该模块集成于遥感多维数据格式互操作分析软件系统（MARS 1.0）中（简称 MARS 1.0）。该系统在“全球变化科学研究数据出版系统”正式出版^[9]。该计算机系统的元数据简介列于表 3。

表 3 MARS1.0 版元数据简表

条 目	描 述
计算机系统名称	遥感多维数据格式互操作分析软件系统（MARS 1.0）
计算机系统短名	MARS 1.0
作者信息	张立福 F-4751-2014, 中国科学院遥感与数字地球研究所, zhanglf@radi.ac.cn 孙雪剑 K-3661-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, sunxj@radi.ac.cn 张 霞 K-3994-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, zhangxia@radi.ac.cn 王 楠 K-3670-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, wangnan@radi.ac.cn 张明月 K-3666-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所/中国科学院大学, zhang-my@radi.ac.cn 林昱坤 K-3645-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 中国科学院大学, linyk@radi.ac.cn 黄 海 K-3966-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 770855750@qq.com 岑 奕 K-3651-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, cenyi@radi.ac.cn 黄长平 K-3660-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, huangcp@radi.ac.cn 杨 杭 K-3796-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, yanghang@radi.ac.cn 张红明 K-3999-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, zhanghm@radi.ac.cn 刘 佳 K-4004-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, liujia@radi.ac.cn 童庆禧 K-4000-2017, 中国科学院遥感与数字地球研究所, tongqx@radi.ac.cn
主要功能	多维 MDD 数据文件的构建、读取、分析、显示，以及数据预处理、图像分类等基本遥感图像处理功能
数据格式	.mdd, .tsb, .tsp, .tib, .tip, .tis
系统文件组成	3 个文件
基金项目	国家自然科学基金（41072248）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
共享政策	（1）在“全球变化科学研究数据出版系统”出版的 MARS 1.0 版以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注系统来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可 ^[10]

3.2 MDA 模块功能

MDA 是基于 MDD 多维数据格式开发的集多维数据构建、多维数据分析和多维数据可视化于一体的遥感数据时空谱多维分析软件模块，该软件模块包括 MDD 数据构建（MDD Builder）及打开（MDD Open）、格式转换（MDD Conversion）、数据导出（MDD Export）和数据运算（MDD Math）等功能，其具体功能如图 6 所示。

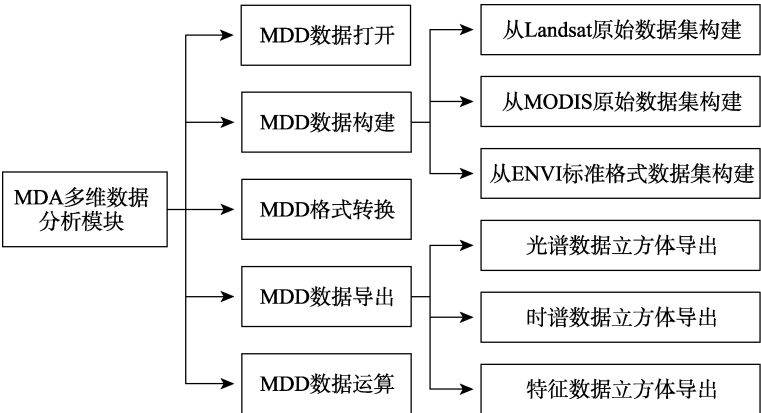


图 6 MDA 模块功能图

MDA 模块实现的功能包括：MDD 数据的构建、打开、转换，从 MDD 数据中进行时谱、光谱和特征参量立方体的提取，MDD 数据时间维和光谱维的信息可视化，以及对应的时谱和光谱的提取、显示及分析处理等。该模块能够将原始的或者经过预处理后的长时间序列的遥感数据集构建成 MDD 多维数据，提取不同空间范围内的光谱等信息的时间变化规律。由于 MDD 数据文件采用的五种存储结构分别针对不同的应用，因此为了快速有效地进行多维分析、提取与显示，可以通过该模块的格式转换功能进行格式转换，然后再进行后续操作。在构建的 MDD 数据集的基础上，可以利用光谱特征参量提取功能提取计算某个光谱特征参量（如 NDVI、RVI 等）的时间变化情况，构成特征参量立方体，并可以用灰度或者假彩色合成对特征参量进行显示，以交互式的方式显示任一像元的特征参量时谱曲线。可以通过光谱立方体或者时间立方体提取功能从 MDD 时空谱四维数据中提取三维立方体数据，导出成常用遥感软件支持的格式来进行数据的相关处理与分析。MARS 1.0 软件中 MDA 模块的菜单项及其功能如表 4 所示。

表 4 MDA 模块菜单项及其功能

字 段	含 义
MDD Open	打开 MDD 格式的数据
MDD Builder	创建 MDD 格式的数据
From Landsat	由 Landsat 数据集创建 MDD 格式数据
From MODIS	由 MODIS 数据集创建 MDD 格式数据
From ENVI Image	由 ENVI 标准数据集创建 MDD 格式数据
MDD Conversion	将 TSB、TSP、TIB、TIP、TIS 数据格式相互转换
MDD Export	将选定的 MDD 数据按照时间维或光谱维导出
MDD math	光谱运算，提取特征立方体等

3.3 MDD 数据构建及可视化

目前，MDA 模块已经集成了对原始 MODIS、原始 Landsat 和经处理为 ENVI 标准数据格式的遥感数据的 MDD 数据构建。本节将介绍利用 MDA 模块，以 MODIS 和 Landsat 为数据源的 MDD 构建的总体流程，并以 MODIS 数据为例详细介绍 MDD 数据的构建、信

息提取与可视化过程。

利用 MDA 将原始 MODIS 和 Landsat 数据构建为 MDD 数据的总体流程如图 7 和图 8 所示。

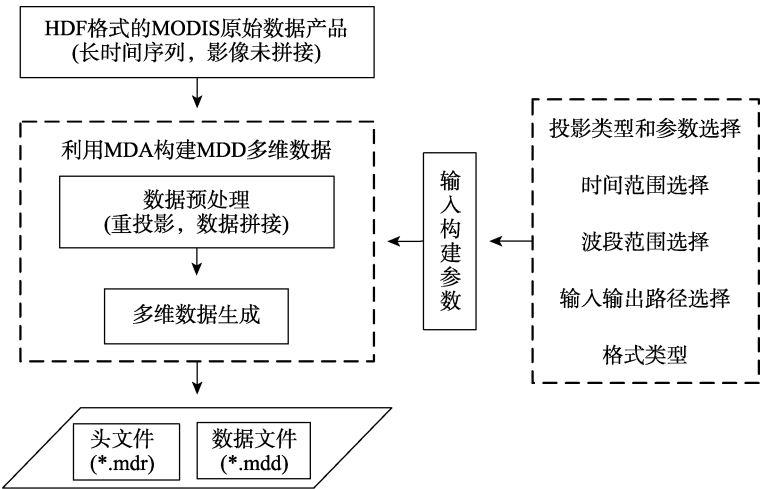


图 7 利用 MDA 模块以 MODIS 为数据源构建 MDD 的总体流程

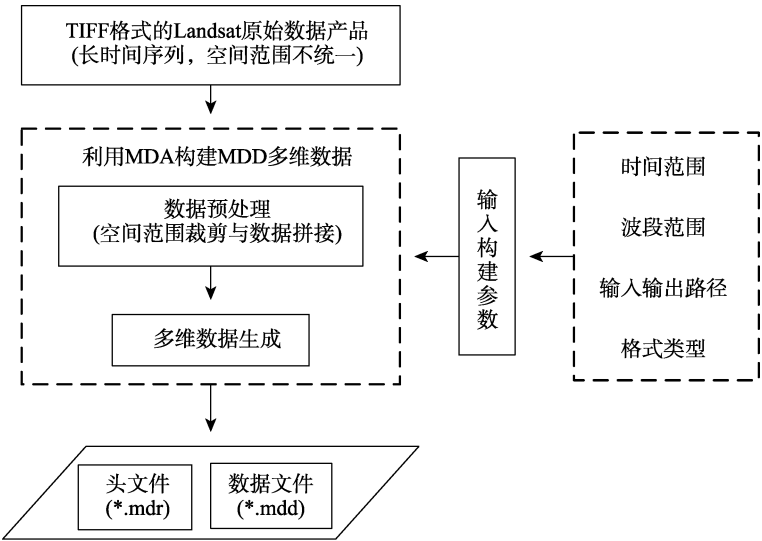


图 8 利用 MDA 模块以 Landsat 为数据源构建 MDD 的总体流程

3.3.1 MDD 数据构建过程（以 MODIS 数据为例）

MODIS 数据具有全球免费、覆盖范围广、更新频率高等特点，在全球变化研究中被广泛应用。USGS 网站上提供了 MODIS 的各级产品数据，最常用的包括 8 天合成的 MOD09A1 和 MOD09GA 等反射率产品，这些数据采用 HDF 格式的文件进行发布，反射率波段以及属性数据均以子数据集的形式存储在 HDF 文件中。MDA 模块提供了针对 MODIS 和 Landsat

等数据的 MDD 数据自动构建方法，本例采用 46 景 2011 年全年的 8 天合成的 MOD09A1 反射率数据为原始数据来构建 MDD 数据文件。MODIS 产品采用的空间投影类型为正弦投影，需对其进行重新投影，可采用常用的 UTM 投影。对于大研究区域，如整个北美洲，需要多个条带的 MODIS 产品才能在空间上完全覆盖，此时还需对不同条带的数据进行空间拼接。

利用 MDA 模块，以 MODIS 构建 MDD 数据的操作流程包含三个步骤：

步骤 1：将原始 MODIS 数据解压到指定文件夹，文件自动按时间顺序排列，MDA 通过对数据文件名的解析，自动识别数据类型及数据获取时间等参数，如图 9 所示；

步骤 2：通过 MDD Builder from MODIS 功能模块进入 MODIS 构建 MDD 的主界面(图 10)，依次选择数据源所在路径、构建的波段范围、重投影类型和 MDD 的存储结构等，然后在子数据集选项中选择 HDF 数据文件中的栅格图像数据（图 11）。

步骤 3：生成 MDD 多维数据，构建的结果包括头文件和数据文件，分别以 mdr 和 mdd 后缀结尾（图 12）。

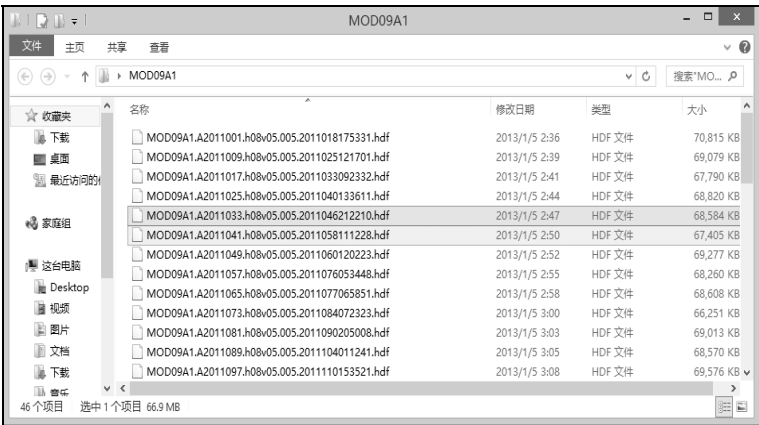


图 9 待构建 MDD 的 MODIS 数据文件

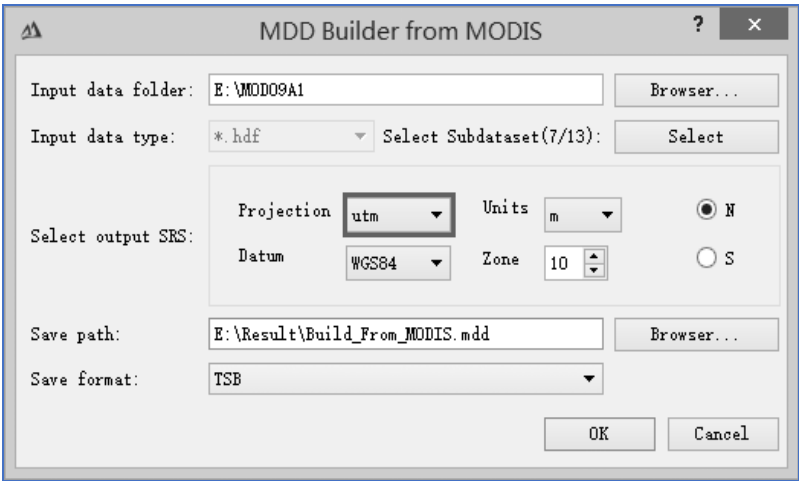


图 10 MODIS 多维数据构建界面

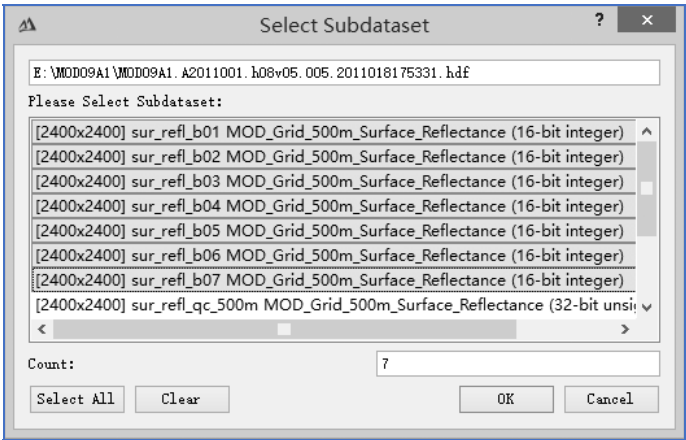


图 11 栅格图像数据选择

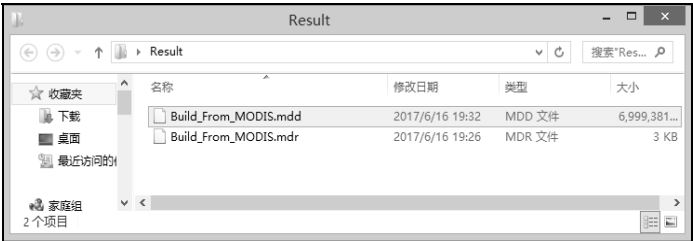


图 12 MODIS 构建 MDD 数据结果

图 13 为本次实例生成的 MDD 数据的头文件，内容的具体解释如表 5 所示。

```
MDDdescription = {MDD Dataset}
samples = 5002
lines = 2225
bands = 7
times = 46
header offset = 0
file type = MDD Standard
data type = 2
interleave = TSB
sensor type = Unknown
byte order = 0
map info = {UTM, 1, 1, -143989.186406262,
4455081.15653954, 500, 500, 10, North,WGS-84}
coordinate system string = {PROJCS
["WGS_1984_UTM_Zone_10N",GEOGCS
["GCS_WGS_1984",DATUM["D_WGS_1984",SPHEROID
["WGS_1984",6378137,298.257223563]],PRIMEM
["Greenwich",0],UNIT
["Degree",0.017453292519943295]],PROJECTION
["Transverse_Mercator"],PARAMETER
["latitude_of_origin",0],PARAMETER
["central_meridian",-123],PARAMETER
["scale_factor",0.9996],PARAMETER
["false_easting",500000],PARAMETER
["false_northing",0],UNIT["Meter",1]]}
band names = {Band 1,Band 2,Band 3,Band 4,Band
5,Band 6,Band 7}
time names = {
MOD09A1.A2011001.h08v05.005.2011018175331,
MOD09A1.A2011009.h08v05.005.2011025121701,
MOD09A1.A2011017.h08v05.005.2011033092332,
```

图 13 MDD 数据结果头文件

3.3.2 MDD 数据的信息提取

MDA 模块具备对 MDD 数据的解析与分析功能，可以从 MDD 多维数据中提取各个维

表 5 MDD 数据结果头文件每一行信息描述

字 段	含 义
MDD description Samples	表示的是 MDD 数据集，该数据每个波段含有 5,002 行
lines	该数据每个波段含有 2,225 列
bands	该数据包含 7 个波段
times	该数据包含 46 个时间点
header offset	该数据嵌入式头信息为 0 字节
file type	该数据类型为 MDD 标准类型数据
data type	用 16 位有符号整数来表示本数据
interleave	该数据组织方式为 TSB 格式
sensor type	传感器类型，该数据为新定义生成的所以为未知
byte order	该数据是最低有效优先数据
map info	图像信息，该图像采用 UTM 投影、起始像素坐标为(1, 1)等相关描述信息
coordinate system string	该数据采用的坐标系相关描述，如 WGS84 坐标等
band names	该数据文件中的波段名称，如 Band 1 等 7 个波段
time names	该数据中各个文件的获取时间，时间名称以文件名称表示这里有如 MOD09A1.A2011001.h08v05.005.201101817533 等 46 个时间点

度的数据信息，实现各个时间的光谱立方体、各个波段的时谱立方体和经过运算后的时谱特征立方体（如 NDVI 时间序列）的导出。

（1）光谱及时谱立方体导出

导出时首先选择“MDD Export”菜单项，然后出现图 14（左）所示的导出窗口，选择其中的“Image”出现图 14（右）窗口，可以选择空间范围。如果在导出类型中选择“Spectral Cube”则表示导出光谱立方体，在图 15（左）中选择一个时间以及光谱范围；如果在导出类型中选择“Temporal Cube”则表示导出光谱立方体，在图 15（右）中选择一个光谱波段以及时间范围。导出结果如图 16 所示。

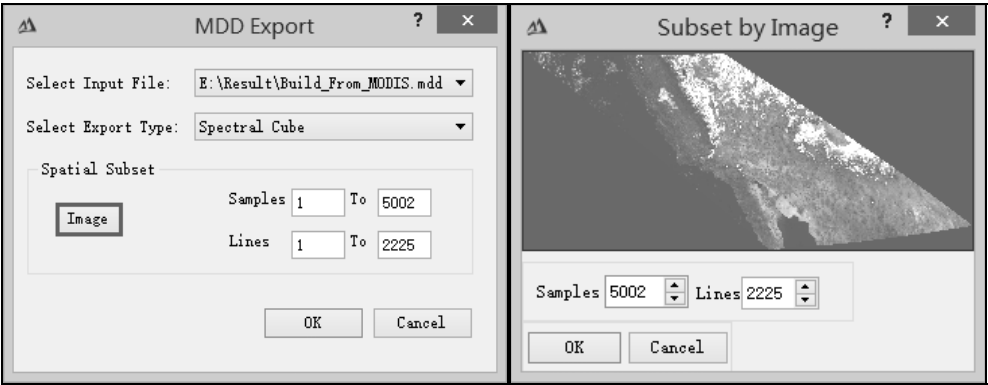


图 14 MODIS 数据导出主界面

（2）时谱特征立方体导出

以生成 NDVI 时间序列为例介绍时谱特征立方体的导出过程，在这里需要用到 MDA

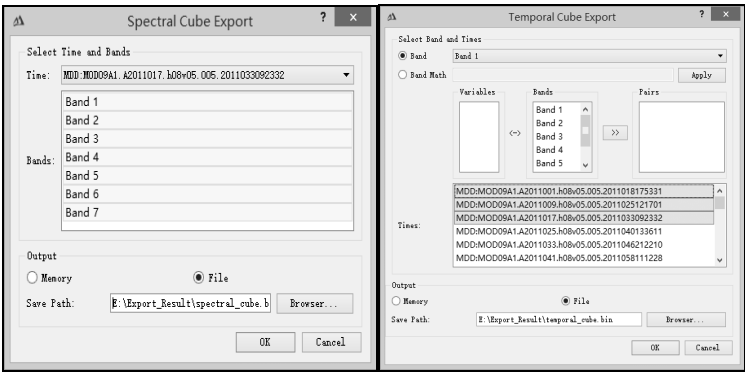


图 15 光谱和时谱立方体导出参数选择

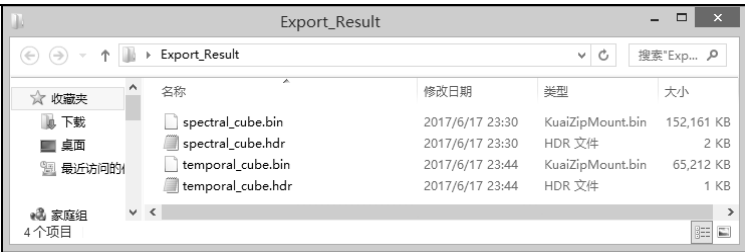


图 16 光谱和时谱立方体导出结果

模块中的光谱运算工具。光谱运算是为了计算一个时间序列上的特征参量组成的立方体数据（称为时谱特征立方体）。时谱特征立方体的生成过程分为两步：第一步，针对每一个时间的影像立方体，按照输入的表达式以及表达式中变量与波段的对应关系，计算特征参量，例如植被指数；第二步，将各个时间计算的特征图层按照时间顺序组合成一个特征参量立方体。

在 MDA 利用“MDD Math”功能（如图 17），首先选择空间范围，然后输入特征参量表达式，例如 NDVI 的计算表达式为 $(b1-b2)/(b1+b2)$ ，由于 MODIS 数据的红波段和近红外波段分别为第 1 波段和第 2 波段，因此将解析表达式后中的变量 b1、b2 与分别与波段 2 和波段 1 进行对应，并选择时间范围，指定输出路径后就可以导出结果。

3.3.3 MDD 数据的可视化显示

（1）光谱维显示

MDA 模块具备对 MDD 数据的可视化交互功能。使用“Available Data List”工具，切

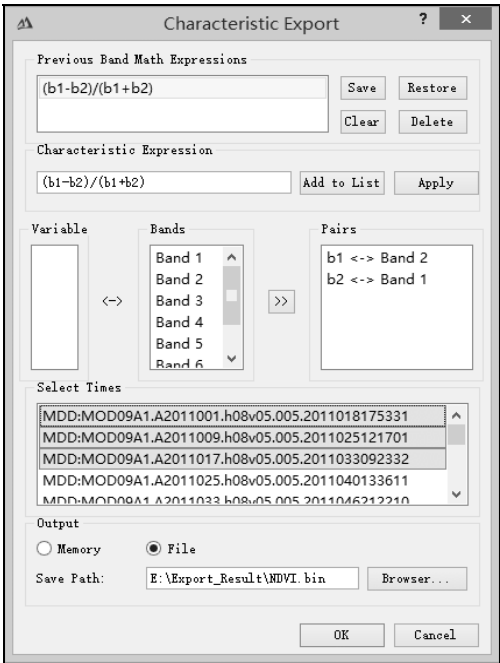


图 17 NDVI 时谱特征立方体导出

换至“Spectral Dimension”选项卡，可进行光谱维数据显示。首先选择某个时间，然后选择三个波段进行 RGB 彩色合成显示，或者选择一个波段进行灰度图像显示，显示结果为该时相的光谱立方体数据，“Data Profile”提取的为每个像元某一时间的光谱曲线（如图 18）

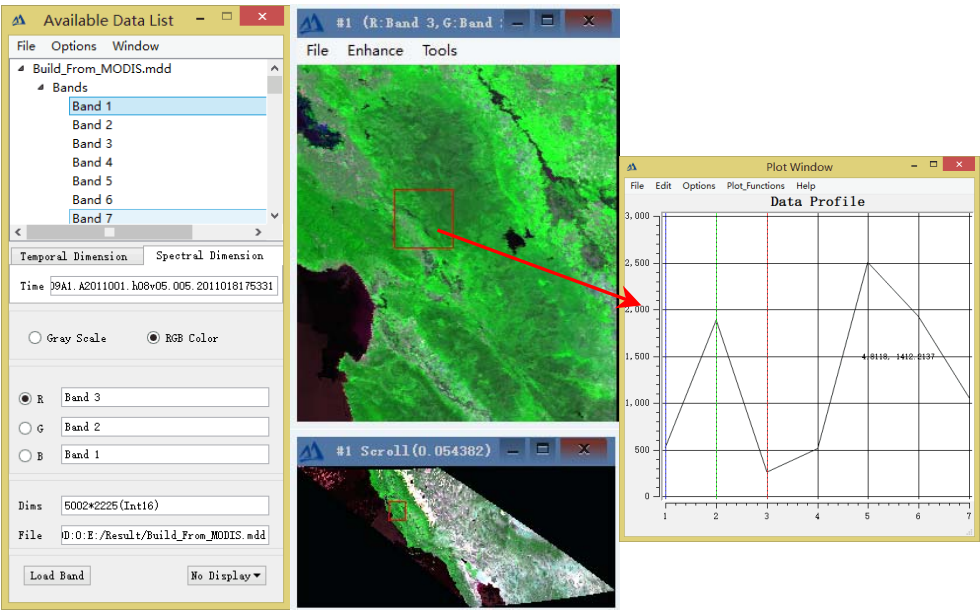


图 18 光谱维信息可视化

（2）时间维显示

MDA 模块还可以便捷地对 MDD 数据进行时间维的合成显示，同样是使用“Available Data List”工具，切换至“Temporal Dimension”选项卡，选择一个波段，然后选择三个时间进行 RGB 彩色合成显示，或者选择一个时间进行灰度图像显示，显示结果为某一波段的时间序列（时谱）立方体数据，“Data Profile”提取的为每个像元某一波段的时谱曲线（如图 19）。

4 展望

遥感数据时间、空间和光谱维度的综合组织，是遥感在诸多应用领域的现实需求。例如，在水质监测方面，针对日益严重的水体生态环境退化问题，利用 MDD 数据能够快速并准确的计算出多种水体指数，辅助进行水体污染监测和动态监控，加强对水体生态系统的保护；在森林扰动监测方面，利用 MDD 数据可以有效组织长时间序列遥感影像，计算多种森林动态监测指数，并对森林区域从空间和光谱维度进行时序联合分析，准确解译森林扰动原因；在农情监测方面，利用 MDD 数据能够完成对多源遥感数据的时-空-谱三种信息的融合，完成农作物种类、空间分布及其长势信息的高精度提取，满足农情精准监测这一重大国家需求；在城市扩张方面，利用 MDD 数据可以快速实现城区不透水面积的变化分析，结合空间特征得到准确的城市扩张信息，为后续的城市发展方向提供决策支持。总之，MDD 多维遥感数据能够在全球变化研究中发挥重要作用，具有广阔的应用前景。

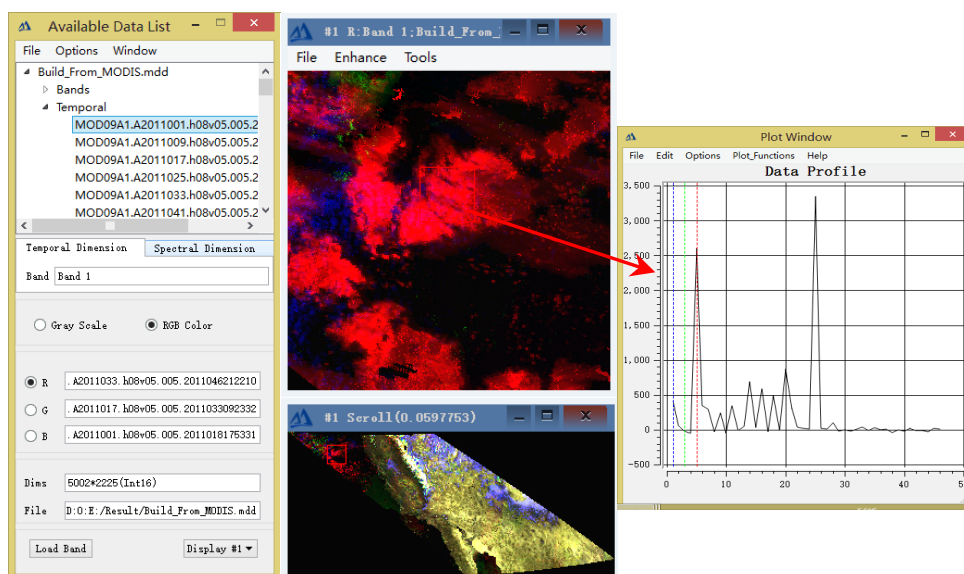


图 19 时间维信息可视化

致谢：中国科学院地理科学与资源研究所刘闯研究员对本文的完成和软件测试提出建议和帮助，仅此深表谢忱。

参考文献

- [1] Kennedy, R. E., Yang, Z., Cohen, W. B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr-Temporal segmentation algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2897–2910.
- [2] Huang, C., Goward, S. N., Masek, J. G., *et al.* An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 183–198.
- [3] Powell, S. L., Cohen, W. B., Healey, S. P., *et al.* Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(5): 1053–1068.
- [4] Margono, B. A., Turubanov, S., Zhuravleva, I., *et al.* Mapping and monitoring deforestation and forest degradation in Sumatra (Indonesia) using Landsat time series data sets from 1990 to 2010 [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(3): 034010.
- [5] Townsend, P. A., Helmers, D. P., Kingdon, C. C., *et al.* Changes in the extent of surface mining and reclamation in the Central Appalachians detected using a 1976–2006 Landsat time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1): 62–72.
- [6] Galford, G. L., Mustard, J. F., Melillo, J., *et al.* Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(2): 576–587.
- [7] Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., *et al.* A crop phenology detection method using time-series MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(3): 366–374.
- [8] 张立福, 陈浩, 孙雪剑等. 多维遥感数据时空谱一体化存储结构设计[J]. *遥感学报*, 2017, 21(1): 62–73.
- [9] 张立福, 孙雪剑, 张霞等. 遥感多维数据格式互操作分析软件系统 (MARS 1.0) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2017. DOI: 10.3974/geodb.2017.02.20.V1.
- [10] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017年更新).