

植被指数用户手册

2005 年 1 月 5 日

一、系统概述

1. 系统背景

地球观测系统(EOS)计划的主要兴趣之一是研究陆地植被在大尺度全球变化过程中的作用,以便理解地球的生态体系。这需要了解各种植被的全球分布情况及其生物物理特性、结构特性的时间和空间变化特点。

遥感观测提供了对受人类活动和气候影响的大尺度植被变化进行监测、量化和研究的机会。植被影响着能量平衡、气候、水文和生化循环,可以作为气候和人文因素对环境影响的敏感指标。

植被指数(VI)是对地表植被活动的简单、有效和经验的度量。将两个(或多个)光谱观测通道组合可得到植被指数,这一指数在一定程度上反映着植被的演化信息。通常使用红色可见光通道($0.6-0.7\mu m$)和近红外光谱通道($0.7-1.1\mu m$)的组合来设计植被指数。

植被指数产品的一个重要特点是可以转换成叶冠生物物理学参数。植被指数(VI)在植被生物物理学参数(如,叶面指数 LAI, 绿蔽度, 光合作用有效吸收辐射 fAPAR 等)的获取方面还起着“中间变量”的作用。目前正在利用有全球代表性的地面、飞机和卫星观测的数据集研究植被指数和植被生物物理学参数的关系。这些资料可用于在卫星发射前评估VI算法性能,同时也提供植被指数产品与叶冠生物物理特性之间的转换系数。生物物理学资料的使用是植被指数验证计划的组成部分。

MODIS VI产品是在已有的植被指数的基础上改进设计的,以便使其适用于全球范围,并增强其对植被的敏感度,减少外部影响因素(如大气、观测视角和太阳角、云等)和内在的非植被因素(如叶冠背景, 垃圾等)的影响。将生成两种全球陆地植被指数:一种是标准的归一化植被指数(NDVI),是 NOAA-AVHRRNDVI 的延续。NOAA-AVHRR 系列卫星有 20 年的全球 NDVI 资料,MODIS-NDVI 资料的加入可以为业务监测研究提供更长的资料序列。另一种是增强植被指数(EVI),它可以提高对高生物量区的敏感度,通过削弱叶冠背景信号和降低大气的影响来改善对植被的监测。二者互为补充。MODIS 植被指数使用新的合成算法减小随观测角度的变化和太阳—目标—传感器几何学因素引起的变化。在生成植被指数格点资料时将应用分子散射、臭氧吸收、气溶胶订正算法,用 BRDF 模式将观测量订正

到天顶角。

MODIS 植被指数产品将提供对全球植被状态的一致的时间和空间比较, 可用于监测地球上光合作用植物的活动, 以便进行变化检测和生物气候学及生物物理学的解释。例如, 16 天合成和月合成的植被指数格点图可以用来检测地球植被的季节变化和年际变化。MODIS 植被指数产品将在几项对地观测系统(EOS)研究中发挥主要作用, 同时也是近年来全球和区域生物圈模式产品的组成部分。

2. MODIS 植被指数计算方法

植被指数是对植被活动的经验性度量。红色和近红外通道的反射信号经过辐射定标、云检测、大气订正、表面各向异性修正(角度订正)、网格化投影等处理过程, 然后产生植被指数。视角和表面各向异性修正使用了双向反射率分布模式。第 3 级植被指数产品将 2 级产品逐日的反射率订正到星下点, 并分别对空间分辨率作 250m, 1km 的资料作 8、16、30 天合成。

在讨论植被指数的敏感性时, 用诸如 LAI 或绿蔽度等生物物理学参数来表达植被的度量是很有用的。这也是对植被指数(VI)图所反映的植被时间和空间变化与实际的变化相关联的验证。

1. 改进植被指数的理论基础

经验性的植被指数是根据叶子的典型光谱反射率特征得到的(图 4.35)。由于色素吸收在蓝色(470nm)和红色(670nm)波段最敏感, 可见光波段的反射能量很低。而几乎所有的近红外(Nm)辐射都被散射掉了(反射和传输), 很少吸收, 而且散射程度因叶冠的光学和结构特性而异。因此红色和近红外波段的反差(对比)是对植物量很敏感的度量。无植被或少植被区反差最小, 中等植被区反差是红色和近红外波段的变化结果, 而高植被区则只有近红外波段对反差有贡献, 红色波段趋于饱和, 不再变化。这种对比可以用比值, 差分, 线性组合或上述三者的组合来增强。一般来说, 植被指数就是对这种对比的度量, 也是叶冠结构(LAI, LAD)和生物参数(fAPAR)的函数。

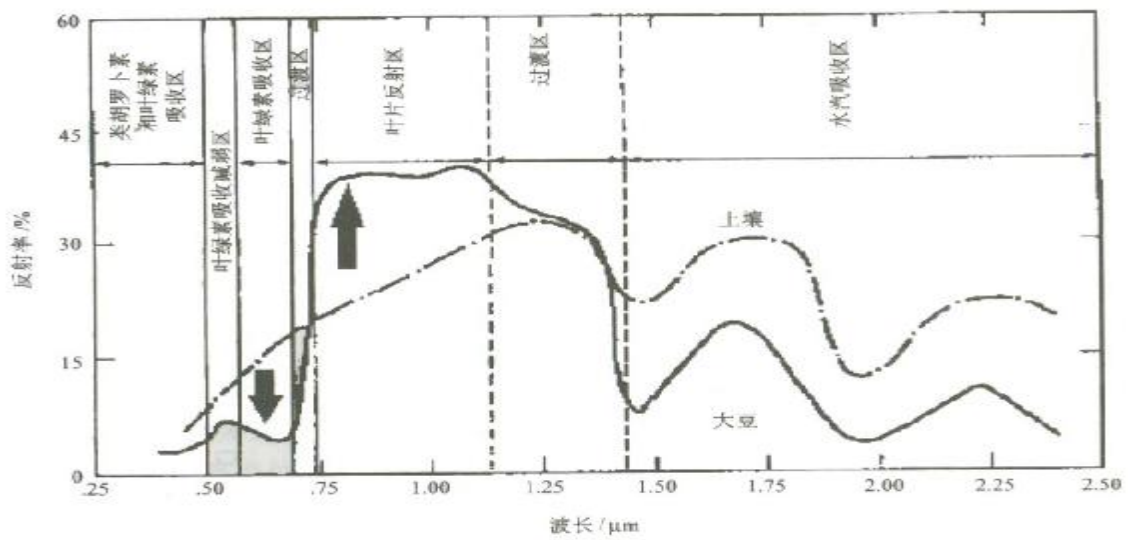


图 4.35 光合作用敏感的叶子和土壤的光谱反射对比图(Tucker and Seller, 1986)

地面观测的和 TM 卫星观测的两张红色和近红外波段反射率点聚图说明了上述对比关系。不论所取的资料是生长季节农作物随时间变化的反射率(地面观测资料, 图 4.36), 还是从沙漠到森林的空间变化的反射率(TM 卫星资料, 图 4.37), 点都集中在一个有清楚边界的三角区。接近 1: 1 线处有一条“基线”, 反映了植被活动的下界, 被 Richardson(1977)定义为“土壤线”(soil line), 它主要反映了土壤的频谱变化。基线进一步延伸可以包括水体(暗色)雪(亮色)、有各种矿物质、败叶、以及碎石的土壤(亮度由暗到亮都有, 土壤腐殖质为暗色), 代表着非光合作用目标。水和雪表现为较低位置的两个顶点。第 3 个顶点代表浓密植被(红色低反射率, 近红外高反射率)。

有植被像素分布在“基线”和近红外波段反射率极大值—红色波段反射率极小值极点之间的三角形区域内。绿色光合作用越强，离“土壤线”越远，沙漠像

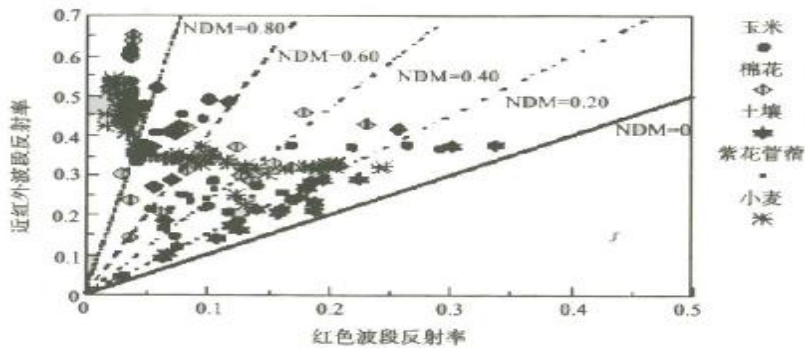


图 4.36 生长季节农作物的 NIR 和红色波段的反射率

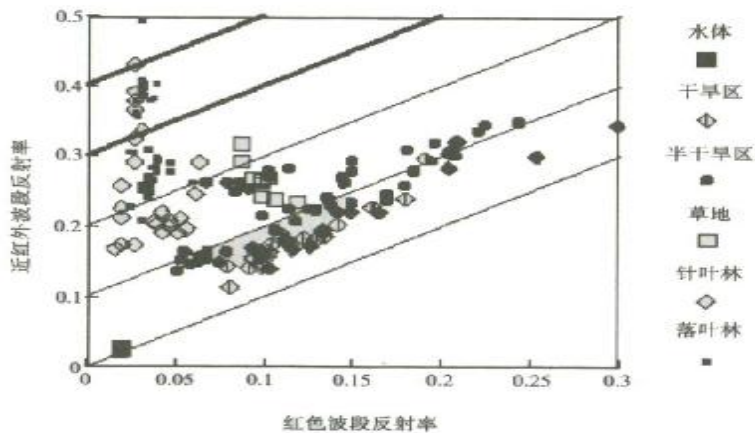


图 4.37 从沙漠到森林各种地表的 NIR 和红色波段反射率(TM 卫星资料)

元最靠近“基线”，其次是半干旱和草原像元。森林像元分布在左手边，且当 NIR 反射率增大时，红色反射率趋于“饱和”。三角形区域内的点来自植被和背景的多重响应。地球陆地表面 70%的地方表现为有空隙的叶冠和背景的混合像元。在近红外—红色波段空间域中像元的表现特征是叶子光学特性、植被量、叶冠结构参数的函数。所设计植被指数的作用就是要模拟近红外—红色波段空间坐标中陆地像元的特征、边界条件和相关的时间和空间变化。

1)NDVI 的理论基础

植被参数相等的红色—近红外反射率的连线为“植被等值线”，它可以从辐射传输模式或观测数据获得。植被指数等值线也反映了导致相同植被指数值的红色—近红外反射率响应的集合。这些等值线可以将像元数据对应到植被量各种等级的模式参数。等值线的概念与植被指数的辐射传输理论有本质上的联系，为从

植被信号中分解大气和背景信号提供了基础。

归一化植被指数(NDVI)是近红外与红色通道反射率比值($SR=NIR/RED$)的一种变换形式,

$$NDVI = \frac{[X_{nir} - X_{red}]}{[X_{nir} + X_{red}]} \quad (4.83)$$

X 可以是卫星接收的辐射、大气层顶显式反射率、地表辐射率、地表反射率或半球光谱反照率等的计数值。比值形式的 NDVI 可以使某些与波段正相关的噪声及直射辐射或漫射辐射发生变化,云、云影、太阳角和视角、地形、大气削弱等的影响最小化。还可以在在一定程度上消除定标和仪器误差的影响。NDVI 可以用原始辐射记数值、大气层顶辐射率来进行反射率计算。可以先做部分或完整的大气订正。尽管比值消去了变量的单位,但不同资料计算出的 NDVI 结果并不相同,使用时必须保持一致性(Jackson and Huete, 1991)。比值消除噪声的程度取决于近红外与红色通道反射率噪声的相关性,和地面接近朗伯体的程度。

在近红外与红色通道坐标系中,比值构成了由原点向外发散的植被指数等值线(图 4.38),斜率随着植被量的增加而增加,截距为 0。NDVI 有效地反映了从“基线”向绿色顶点的增量。在背景的较大的亮度变化域内,少(或无)植被的点落在 1:1 线上,使得 NDVI 能够消去这一部分,NDVI 只是略大于 0。这种 NDVI 定义是目前被广泛接受并在全球、局地监测应用中使用的唯一的植被指数定义。它也被用于各种传感器和平台(Landsat MSS 和 TM、NOAA-AVHRR、SPOT、SeaWiFS、AVIRIS 以及地面辐射计)。

虽然前面指出近红外与红色通道反射率的差值(DVI)也是对两个波段反射率对比度的度量,但 DVI 与 NDVI 并不等效,它反映的是植被像元另一方面的特征。

从下一节开始,将分析 NDVI 的局限性,以便估价产品的性能和开发潜在的改进方法。到目前为止,去除卫星资料的噪声的麻烦留给 NDVI 公式本身来解决。因此 NDVI 负有在减小噪声的同时增强植被信号的任务。可是遥感光谱信号随着传感器、大气、视角、太阳角、叶冠背景等内外因素的影响而变化。因此植被指数也有变化,导致生物物理学参数估计的不精确性。进行各种订正之后,植被指数可能会更好地描述植被的时间和空间变化。

比值型指数的主要缺点是非线性使得对一定的地表覆盖类型不敏感。也不能解释附加的大气效应(路径辐射)、叶冠背景、叶冠双向反射的各向异性,特别是叶冠阴影等问题。

2) 叶冠背景订正和去耦合

叶冠背景噪声对于叶冠来说是内在的，与植被信号紧密地耦合在一起。红色和近红外波段的辐射通过有光合作用活动的叶冠的传输(消光)差别很大，因为叶绿素对红色光高度吸收而对近红外高度散射。如此的辐射特性(包括叶冠暗影)不能服从于比值，并且穿透叶冠的信号和背景反射的信号随背景的亮度而变化。因此 NDVI 对背景亮度的变化很敏感。NDVI 等值线即不和植被等值线(它代表着各种背景条件下一定的植被量)相当，也不近似(图 4.38)。

与大气订正算法和 BRDF 模型不同，没有独立的方法可以预先估计叶冠背景的光学特性并被用来订正植被指数方程。当我们优化植被指数以便使它满足基本的辐射传输理论时也可以利用这一点。植被指数等值线能描述感兴趣的参数，同时又能消去不想要的变化，即构造一个 VI 等值线与植被等值线平行的 VI 方程。一般来说，非光合作用的背景变化是全球数据中光谱变化的主要来源。

3) 植被等值线与植被指数(VI)等值线

植被等值线是在一定的叶面指数(LAI)和叶倾角分布(LAD)及一定的外部条件(太阳角、视角，大气条件)下，改变背景的光学性质时所观测到的叶冠辐射率的点对(即一对近红外辐射率和红色辐射率值)所组成的线。当叶面指数 LAI 是唯一的变量时，斜率和近红外坐标轴的截距是叶面指数 LAI 的函数而不是背景亮度的函数。这时，植被等值线表明近红外和红色辐射率与固定 LAI 时背景亮度变化的关系。另外，植被指数有其自己的等值线，它代表着一定的植被条件随叶冠背景条件变化的真实特点。不需要背景亮度和 LAI 的知识就可以获得植被指数等值线。

这两种等值线截然不同，一般也不一致(Baret and Guyot, 1991; Huete, 1988; Major et al., 1990; Qi et al., 1994)(图 4.38)，导致 NDVI 随背景亮度的变化而变化。为了获得不随背景亮度变化的 VI，指数等值线必须与“真实”的植被等值线一致。因此，有关植被等值线的知识是必不可少的。这可以在某些近似条件下用叶冠辐射率的简单表现分析得到。下面是关于这个问题的分析总结。

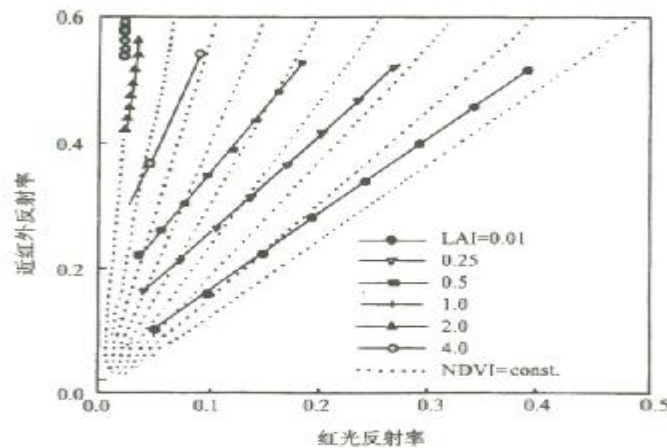


图 4.38 SAIL 模式得到的不同 LAI 和土壤反射率对
应植被点(有标记的实线)
虚线是 NDVI 等值线

(1) 红色波段—近红外波段反射率坐标空间中的植被等值线

目前一种在红色反射率—近红外反射率获取植被等值线方程的技术被提了出来。他们使用了考虑叶冠和背景表面之间光子的相互作用的辐射传输模式。为了得到红色反射率和近红外反射率的线性关系，高阶项被截断。该方法包括两个模式，一个是作为叶冠背景的吸收子，另一个是为确定等值线参数所需的用于估计叶冠光学属性的人为的背景。这些个例与任何特定的叶冠背景的光学属性无关，因此，结果可以用于为任何类型的背景条件构造植被等值线方程。等值线方程及有关的衍生品对于进一步研究有叶冠背景的两波段植被指数都是有用的。

首先将多层的叶冠和土壤耦合系统中的红色反射率和近红外反射率定义为： r_R 和 r_{No} 对于从上表面进入叶冠层的辐射，下行辐射和向上的反射分别为 T_{nl}^\downarrow 和 r_{nl} ， l 是波段代码 N 或 R。对于从下表面进入同一叶冠层的辐射，上行辐射和向下的反射分别为 T_{nl}^\uparrow 和 R_{nl} 。这 4 个变量可以通过把背景当作完全的吸收体来模拟得到。见图 4.39。进一步定义下行辐射和上行辐射的对数平均值(叶冠两路

辐射传输的均方根)为 T_{nl} 。假定红色和近红外波段的背景反射率服从一般土壤线方程那样的线性关系：土壤线的斜率和 NIR 轴的截距分别用 α 和 b 表示。

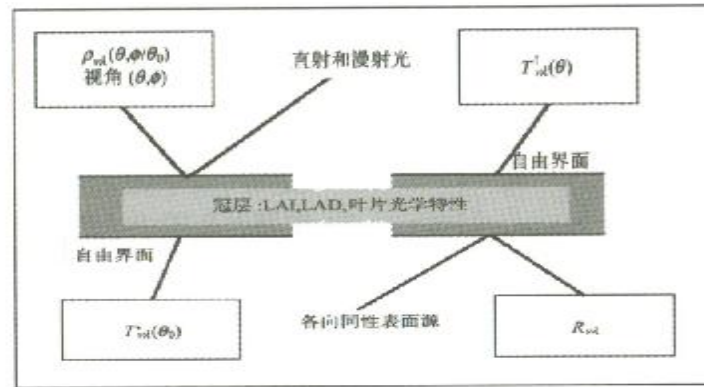


图 4.39 叶冠光学特性示意图

用上述变量,植被等值线可以用以下方程组表达:

$$\rho_N = \alpha\gamma\rho_R + D + O^2, \quad (4.84)$$

$$\gamma = \frac{T_{rd}^2}{T_{rd}^2}, \quad (4.85a)$$

$$D = D_N - \alpha\gamma D_R, \quad (4.85b)$$

$$D_N = \rho_{rd} + bT_{rd}^2, \quad (4.85c)$$

$$D_R = \rho_{rd}, \quad (4.85d)$$

$$O^2 = O_N^2 - \alpha\gamma O_R^2, \quad (1.85e)$$

$$O_N^2 = \frac{T_{rd}^2 R_{rd} R_{rd}^2}{1 - R_{rd} R_{rd}^2} \quad (4.85f)$$

γ 是两波段双向传输的比值,只与叶冠特性有关。(Huete, 1988; Major et al., 1990)。植被等值线的斜率不仅是植被光学特性的函数,也是土壤线斜率 α 的函数。 D 是植被等值线在 NIR(Y)轴截距,它与土壤亮度完全无关。 D_N 和 D_R 分别只是 NIR 和红色波段的函数。及 R_{rd} 为背景反射,在该项研究中,背景假设为朗伯面。 O^2 表示高阶项,若相对于较小,则可以忽略此项。因为很多研究表明植被等值线表现为直线。(Baret and guyot, 1991; Huete, 1998; Major et al., 1990; Qi et al., 1994),我们假定高阶项的贡献相对较小。

为了证明所得到的等值线,我们使用 SAIL 模式进行比较验证。使用与 Baret 和 Guyot(1991)所用的相似的 SAIL 模式模拟输入,即 3 种叶倾角分布类型:平均叶子角度 (ALA) 27° 的喜平型, $ALA45^\circ$ 的极端型和 $ALA63^\circ$ 的喜直型 (Goel, 1998)。叶面积指数 LAI 取 10 个不同的值 (LAI=0.01、0.25、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、6.0)。叶子光学特性设定如下:对红色光波段,叶子反射率和传输率分别为 0.05 和 0.02,对近红外波段,为 0.465 和 0.490 土壤

反射率服从土壤线方程, $\alpha = 1.2$ 和 $b=0.04$, 对 7 种不同的土壤, 红色光反射率值分别为 0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35。太阳角取为 45° 角(强度是太阳直射的 0.8 倍), 视角为星下点。

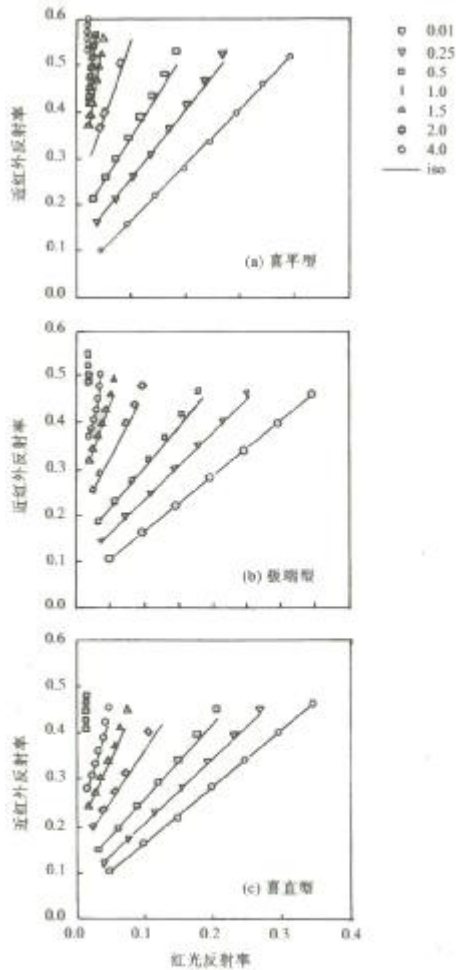


图 4.40 所得到的植被等值线和 SAIL 模拟数据的比较
图例中的值为 LAI 值, 'iso' 表示植被等值线

图 4.40 是 3 种叶倾角类型得到的植被等值线和 SAIL 反射率值的比较。只画出 7 种 LAI 值的情况。该图表明, 所估计的等值线与模拟数据匹配得非常好, 特别是对较黑暗的土壤(反射率较低)。我们还注意到植被等值线的两个性质: ①斜率随 LAI 指数增长。②截距也随 LAI 增长, 但当 LAI 约为 2.0 时就不再增长了(与 LAD 有关)。

(2) 由植被等值线得到的植被指数和模拟数据的比较本节的目的是检验使用植被等值线方程得到的植被指数的精度。若精度合理, 就可以应用所得到的分析表达式, 而不用模拟的或经验的数据点来看植被指数对叶冠背景的变化。植被等值线方程可以使我们能分析这些指数内在的有些性质。一个例子是对给定的 LAI, NDVI 随红色光反射率变化的分析表达。用方程 4.84 去掉高阶项后 NDVI 的表达式为:

$$\begin{aligned} NDVI &= \frac{r_N - r_R}{r_N + r_R} \\ &\approx \frac{(a_g - 1)r_R + D}{(a_g + 1)r_R + D} \end{aligned} \quad (4.86)$$

ρ 为反射率, N 表示近红外波段, R 表示红外波段。

对于固定的 LAI, γ 和 D 都是常数, NDVI 的变化仅依赖于红色光反射率(除非 $D=0$, 这时 NDVI 等值线与植被等值线等价)。这也说明 NDVI 随背景而变化是这个指数的内在的性质。再看用等值线方程估计的 SAVI。SAVI 可以表示为:

$$\begin{aligned} SAVI &= \frac{r_N - r_R}{r_N + r_R + L} (1 + L) \\ &= \frac{(a_g - 1)r_R + D}{(a_g + 1)r_R + D + L} (1 + L) \end{aligned} \quad (4.87)$$

L 是土壤调整因子, 它依赖于 RT 模式, 这里假定其为 0.1。

图 4.41 和 4.42 显示了由方程(4.86)和(4.87)获得的做了高阶截断的两个指数, 和 SAIL 模式(包括高阶项)的结果。二者都很一致, 都有效地反映了植被等值线的已知特征, 即斜率随 LAI 线性增长, 而截距有最大值, 并非单调递增。

该方法包括两个模式模拟, 一个是作为叶冠背景的完美的吸收体, 另一个是为获得纯叶冠反射和平均的叶冠辐射传输而设定的人为的背景。这些个例与实际的土壤亮度无关, 因此, 不需要知道实际土壤的光学特性。该技术涉及纯叶冠反射率的半球近似(从叶冠层底部向下。这项研究对于植被指数的内在的性质是有用的。由于植被等值线的特征是叶冠光学特性和土壤线参数的函数, 这是一个很重要的将叶冠背景信息与植被层信息分离开来的出发点, 从而可以减少从数值模拟中获得植被等值线所需的模拟参数的个数。

这项技术对于开发和使用植被指数和利用辐射传输方程提取生物物理学参数都是有用的。例如, 用植被等值线反演 LAI 等价于在红色—近红外反射率坐标空间寻找通过目标反射率点的特别的植被等值线。使用植被等值线的优点在于能将叶冠背景的亮度影响最小化。设计植被指数的最终的目标就是要使得植被指数等值线与植被等值线相重合。植被等值线方程的获得是达到这个目标的必不可少的步骤。

4) 大气气溶胶修正

在太阳辐射到达地面之前, 气溶胶散射太阳辐射; 太阳辐射经地面反射后到达卫星传感器之前, 气溶胶吸收该辐射。大气气溶胶(烟, 空气污染颗粒)对所有的植被指数都有重要的影响, 它降低了红色和近红外通道反射率的对比度, 从而使基于红色和近红外通道反射率的差值或比值植被指数值减少。大气气溶胶对

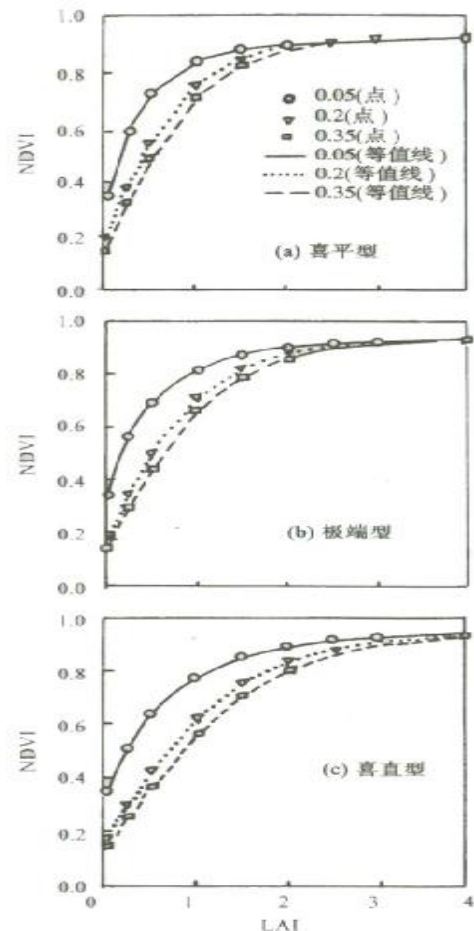


图 4.41 红色通道土壤反射率为 0.05、0.2 和 0.35 时 NDVI 和 LAI 的对应关系, 标记点为 SAIL 模式的结果, 线条为植被等值线。

植被指数的影响有两种途径：光程辐射(附加效应)和透过率(多重效应)。前者与背景无关，可以被很好地修正。而后者依赖于地表亮度，要修正它比较复杂。

图 4.43 说明了在不同的大气模拟条件下(能见度分别为 100km, 20km, 10km, 5km)植被指数和 LAI 的关系。有两类大气修正方法。第一类是使用大气修正的反射率。这类大气修正方法既有直接的方法也有间接的方法，涉及地面观测、辐射传输方程、气候学和暗目标相减方法。但是，到目前为止，对陆地地区进行气溶胶订正的方法从来没有在业务上使用过，也许是因为不大可能实现具有全球一致性的大气订正方案。第二类方法是使植被指数方程对大气的的影响具有稳定性。有好几种间接地逐像素地使气溶胶影响最小化的植被指数方程。这对有烟雾的地区很有用，因为在这些地区气溶胶空间变化会超出气溶胶产品的网格分辨率尺寸(Kaufman and Tanré, 1992b)。

5) 抗大气气溶胶植被指数

在减少大气影响的研究中，一个主要的发现是可以把蓝色光和红色光通道的反射率的差值作为衡量大气影响的指标(Kaufman and Tanré, 1992b)。这个概念的原理是气溶胶散射交叉部分对波长的依赖性。总的来说，蓝色光的气溶胶散射交叉部分比红色的要大。当气溶胶浓度较高时，二者的差也较大。这一点可以被用来使指数值相对于气溶胶浓度保持稳定。主要有两种使用该方法的植被指数：ARVI 和 EVI。

Kaufman 和 Tanré(1992b)开发了“抗大气植被指数(ARVI)以减小植被指数中各项因大气条件不同引起的变化。

$$ARVI = \frac{r_N^* - r_{rb}^*}{r_N^* + r_{rb}^*} \quad (4.88)$$

$$r_{rb}^* = r_R^* - g(r_B^* - r_R^*) \quad (4.89)$$

ρ^* 是预先经过了分子散射和臭氧订正的反射率。ARVI 的性能取决于光学路径效应因子 γ (Kaufman and Tanré, 1992b)。

同样的概念应用于 SAVI，形成了“抗土壤和大气的植被指数”(SARVI)(Kaufman and Tanré, 1992b)。但是，Liu 和 Huete(1995)，发现土壤和大气的影晌是相互作用的，消除其中的一个可能会增加另一个。因此，引入一个反馈项来同时对二者进行订正，这就是 EVI：

$$EVI = \frac{r_N^* - r_R^*}{r_N^* + C_1 r_R^* - C_2 r_B^* + L} (1 + L) \quad (4.9)$$

EVI 是用土壤调节系数, L 项及两个参数 C_1 , C_2 对 NDVI 进行修正的植被指数, 其中参数 C_1 和 C_2 描述了用蓝色通道对红色通道进行大气气溶胶散射修正。TM 图像(图版IVC 说明了 EVI 对烟雾的修正能力。 C_1 , C_2 和 L 分别取为 6.0、7.5 和 1.0。

正在进行的后续工作是保证抗大气的植被指数不会改变资料的质量和完整性, 也不会产生新的变化和不稳定源。它的主要缺点是蓝色通道的分辨率为 500m, 这将使最终的植被指数分辨率由 250m 降到 500m 或者要求“锐化”和蓝色波段与红色及近红外的配准。

2. 植被指数合成概论

MODIS-EOS 是在不同太阳照射角和大气条件下获得全球地表的双向反射信息。植被指数合成旨在减小云以及由太阳—目标—传感器几何角度所带来的影响, 并最大限度地获得全球信息。植被指数合成是指将许多天卫星观测的反射率、植被指数、角度信息和质量认证信息用最优的方法综合在一起, 按照一定的时间间隔形成一幅植被指数图像。按照 MODIS 的合成方案, 将在滤掉云和坏的资料的同时生成代表合成时段的空间连续的植被指数图像。因为每天升轨的 MODIS 轨道不能完成资料的覆盖, (特别是在赤道处), 所以需要两天的资料才能获得完整的全球覆盖图。但是对逐日的轨道进行时间合成产生空间连续一致的植被指数图像的主要缺陷是范围广大的云系覆盖了地表的许多地区。而且, 某些轨道的资料会因为卫星定标、资料传输或接受等方面的问题而丢失。MODIS 植被指数合成算法延承了植被指数算法的功用, 在资料处理方面提出了新的视角。图版 VA 是 SeaWiFS 卫星一天的绿色、红色和近红外反射波段的伪彩色合成图像。请注意那些不能完整覆盖的区域和白色云块。第二张图像是用与 MODIS 合成算法类似的方法得到的连续 16 天合成的 SeaWiFS 卫星图像。图版 VB 显示了一天中几条 SeaWiFS 轨道的角度变化。

我们用 AVHRR 和 SeaWiFS(宽视野海洋传感器)的资料来检验和仿真 MODIS 植被指数合成算法的原型, 虽然这些卫星的轨道特点及时间与空间的分辨率都与 MODIS 的有些差别, 但 MODIS 植被指数产品的空间分辨率将为 250m, 1km 和 28km, 时间间隔为 16 天和 1 个月。MODIS 光学波段输入数据的分辨率对红色光和近红外波段来说是 250m, 而对蓝色光和中红外波段来说是 500m。MODIS 植被指数算法将综合考虑轨道、光谱、空间、时间、辐射学、定标及以往处理算法等方面的问题。

除了时间合成以外, 太阳—目标—传感器几何配置会对植被指数产生重要影

响，需要尽可能地使合成产品标准化。太阳—目标—传感器几何配置对植被指数的影响可以用各种方法进行标准化处理：

①标准化到有代表性的太阳天顶角、星下点视角。

②将辐射率标准化到无论时间上和全球范围都一致的太阳天顶角、星下点视角。

③将辐射率标准化到给定的某个太阳天顶角、视角。

④使用光谱反照率。

研究表明第三和第四种方法在特定的地表条件下可以加强对植被指数的探测，(Kimes et al., 1984)，但总体而言，对从沙漠到森林的各种地表类型，其敏感度都降低了，并且在密植被叶冠区饱和问题更为突出。

将植被指数标准化到最小的接近星下点的视角和最小的太阳天顶角的优点在于：

- 最小视角的像元有最佳的空间分辨率(对红色和近红外通道为 250m)。
- 最小视角和天顶角像元的大气修正最精确。
- 已有的生物物理学参数和植被指数的关系是建立在星下点视角条件基础之上的。
- 远离星下点和较大的天顶角处植被指数的“饱和”问题最严重。
- 远离星下点的空间衰减和模糊性增大。
- 远离星下点处的碗边效应较大。
- 在靠近星下点处合成时段内太阳天顶角的差别最小。
- 太阳天顶角越小云影越少。
- 易于和星下点扫描传感器比较验证。

作为标准化的 MODIS 产品，将使用第一种方法，并对其它方法进行检验。首先利用 BRDF 模式将反射率标准化到有代表性的太阳天顶角、星下点视角条件下，然后计算植被指数。最大 NDVI 值方法用做 BRDF 模式订正的备份方法。

1)MODIS 植被指数合成的设计思想

MODIS 植被指数合成的目标是在一定时段内优先选择近星下点无云像元，尽可能减小残存云、暗影、大气气溶胶、应用 BRDF 模式将角度订正到一致的标准化的视角和太阳天顶角的条件下，在仪器特性和地表特性的限制条件下尽可能增加空间和时间的覆盖度，同时保证合成资料的质量和一致性，使得植被指数可以阐明和重构生物气候学变化并区分植被的年际变化。将生成两种 3 级合成产品

(NDVI 和 SARVI)和质量控制参数。

合成算法依赖于云检测、大气修正、观测天顶角、太阳天顶角、相对方位角以及地表的 BRDF 归一化。利用反射率质量控制信息预先处理 MODIS 3 个通道的大气订正反射率。有云或云暗影的陆地像元以及资料完整性不好的像元不参加植被指数合成。

基于如上所述的合成目标，下面几点考虑对于设计 MODIS 植被指数合成算法也是很重要的：

- .最小视角的像元有最佳的空间分辨率。(对于星下点分辨率为 250m 的红色和近红外通道，沿轨道方向，像元分辨率可降至 500m，在垂直于轨道的扫描线边缘像元分辨率可降至 1km。

- .远离星下点像元的空间衰减和遮蔽现象随视角增大而趋于严重，更难以配准。

- .生物物理参数与植被指数的关系是在星下点条件下建立的。

- .远离星下点像元的饱和问题更严重。

2)最大值合成(MVC)方法

目前为人们所接受的 AVHRR-NDVI 合成产品处理方法是最大值合成方法(MVC)。该方法通过云检测、质量检查等步骤后，逐像元地比较几张 NDVI 图像并选取最大的 NDVI 值为合成后的 NDVI 值。对大气散射各向异性的考虑，MVC 倾向于选择最“晴空”的(最小光学路径)、最接近于星下点和最小太阳天顶角的像元。在有晴空像元存在的情况下，排除了最受云和大气影响的像元。

MVC 由于其简单性而引人注目，但主要的缺点是地表的双向反射影响没有被充分考虑。比值 NIR/red 并没有消除地表各向异性的影响。这是 BRDF 的频率依赖性结果，NIR 反射率的响应比红色波段更具各向异性特点。研究表明，在大视角和太阳天顶角情况下选择到的像元并不总是晴空像元。残余的云和视角变化改变了地面反射率的值，因此植被指数(全球植被类型的比较)并非全年都是一致的。MVC 在近朗伯体表面的情况下工作很好，这时像元的变化主要是大气污染和光学路径的变化所引起的。

当朗伯体为各向异性表面所取代时，MVC 选择结果变得不可预料，倾向于选择远离星下点和较大的太阳天顶角的像元。前向散射产生较高的 NDVI 值，后向散射则相反。大气对地面 BRDF 信号的削弱主要是通过增加光学路径来体现的。大气修正算法改进以后，地面双向反射问题会更加突出。

MVC 方法有几个缺陷需要解决：

①MVC 方法倾向于选择非星下点前向散射的 NDVI 值，不能反映地表各向异性性质。

②MVC-NDVI 随太阳天顶角而线性增加，当太阳天顶角大于 30° 时，就非常值得关注了，尤其是对低 LAI 叶冠区。

③合成后，仍有残存的云和大气变化的影响。MVC-NDVI 没有将视角和太阳天顶角对 NDVI 的影响分别考虑，由于非星下点有云像元可能比星下点无云像元有更大的 NDVI 值，所以很难肯定地说 MVC 方法选择的才是最晴空的像元。

④同样的原因，MVC 方法可能导致对植被状态的过高估计，导致更严重的饱和和问题。

⑤合成过程要求合成前的每张 AVHRR 图像都经过尽可能精确的几何、抽样、配准订正。一般在抽样之前计算 NDVI。

尽管有很多不一致的结果，MVC 方法对于未做大气订正的资料还是很有效。MVC 方法的主要好处是它将降低了大气问题的影响，产生了无云的影像。但是 MVC 方法不一定适用于 MODIS 大气修正的反射率，原因是：

- 大气修正的反射率是在非星下点视角和较大太阳天顶角情况下进行的，该角度是传感器观测时大多数像元所具有的角度。

- 非星下点视角观测导致像元的扭曲和更粗糙的分辨率。

- 非星下点视角和较大太阳天顶角情况下，光学路径更长，大气修正可靠性更差。

- 大气修正资料计算出的植被指数更高，会使饱和问题更严重。

- 选择方法使得有更大的可能性选择残存的云和烟雾。

我们建议用 BRDF 将植被指数修正到星下点视角条件下来解决角度问题。MVC 方法将被当作最终使用的合成方案。

3)BRDF

植被指数受到双向反射率变化的影响。双向反射率是太阳—目标—传感器几何关系的函数。这种几何关系使得后向散射比前向散射有更大的太阳天顶角。所导致的视角和太阳天顶角的变化对于不同纬度和季节的植被覆盖的相互比较是十分重要的，在进行植被指数合成时，为保证“全球”植被指数的合理性，必须对此予以考虑。

像 AVHRR 和 SeaWiFS 一样 MODIS(星下点分辨率 250m 和 500m)是闪电式传感

器，其像元大小随视角变化，多达 4 倍。MODIS 的重复周期为 16 天，这导致除视角和太阳角很大的变化外，还有很大的像元大小的变化。图 4.44 给出了太阳和 MODIS 传感器位置及其像元大小的示意图。从 2 330km 宽的轨道图像的一侧到另一侧，视角变化为 $\pm 55^\circ$ (在轨道边缘，由于地球曲率的原因，地面实际视角会比卫星视角大 5°)，而太阳天顶角会发生 20° 的变化且与纬度和季节有关。像元的大小随视角而增加。在评价异质或均质地表的各向异性和生物物理学性质时，像元的大小变成一个很重要的变量。大像元的双向反射率分布函数特点与小像元的不同，这就引入了一个误差源(Leeuwen et al., 1997a)。

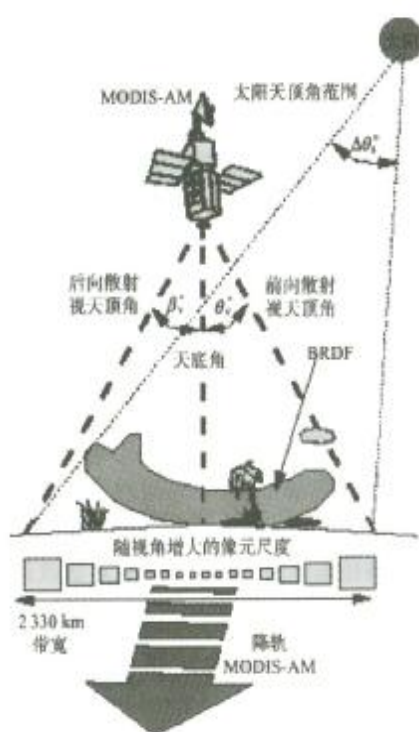


图 4.44 EOS-AM 观测平台上 MODIS 资料获取示意图

双向反射率函数 (BRDF) 随视角和太阳几何位置而变化。注意云影和叶冠的阴影。在轨道方向和垂直于轨道的方向, MODIS 像元的大小随扫描角而变化: 0° : $250\text{m} \times 250\text{m}$; 15° : $270\text{m} \times 260\text{m}$; 30° : $350\text{m} \times 285\text{m}$; 45° : $610\text{m} \times 380\text{m}$ (指星下点分辨率为 250m 的高分辨率的红色和近红外探测器)

当对资料作了大气订正，并将辐射值转变成地表反射率后，卫星系统获得的是很强的各向异性的反射率。反射率因地表类型、特征植被的相对量、像元中土壤的组成和太阳—目标—传感器几何配置等有关。因此为了利用具有方向性的反射率资料和植被指数资料及其导出的生物物理学参数，就必须应用双向反射率函数 (BRDF) (Cihlar et al. 1994a)。但是因为云的出现频率很高以及太阳—目标—传感器几何配置的特点，需要对反射率资料进行时间和空间的合成，从而实现对植被动态的连续监测 (无论是时间上还是空间上)。

MODIS 使用的大气订正和云检测方法相比于 AVHRR 的方法都有显著的改进。由于大气订正算法的改进，表面各向异性和双向反射问题更为突出。大气订正算法的改进使订正后的资料强调了受叶冠结构

影响的地表双向反射的差别。由经过大气订正的地表反射率资料计算得到的植被指数因此强烈地偏向于远离星下点和太阳天顶角，因为在这种情况下传感器观测到更多的植被。

此外，如果不考虑 BRDF 和地表层下行辐射的耦合关系，远离星下点像元的

大气订正也会不太精确。远离星下点像元的扭曲更大，更粗糙，即缺乏细节。进一步来说，MVC 方法会过高地估计 NDVI，从而过高估计生物物理学参数并加剧饱和现象。应用 MVC 标准对于 MODIS 资料而言，会选择到远离星下点的、扭曲的和辐射度量不精确的像元。这会影响最佳分辨率 250m 的 NDVI 资料集的质量。将 BRDF 订正应用于 AVHRR 反射率已经表明合成后的 NDVI 精度有所提高(Rouiearl et al., 1992; Wu et al., 1995)。因此 MODIS 的合成标准更加侧重于角度的考虑，而将 MVC 作为补充。由于两种方法的共存，植被指数图像中会有块状图案，但不会比单纯使用 MVC 的现有方法更严重(后者的块状图案是由于角度和日期选择引起的)。

BRDF 算法用于将地表反射率归一化到星下点视角的条件，但对太阳角的考虑教少，因为需要归一化到指定太阳角条件下的资料很有限。若将反射率归一化到观测太阳角范围以外的某个角度的话，结果将很不准确。在多大程度上可以外推到指定的太阳角还需要进一步研究。因此，将太阳天顶角和方位角放在合成后的资料中，以便进一步对植被指数作事后标准化处理。

现在已经有好几种用来解释地表反射率对视角和太阳角的各向异性的叶冠双向反射率分布函数(BRDF)。但是 BRDF 模型必须合理且在全球范围内可用。我们的方法是使用简单的 Walthal 模式来将反射率资料标准化到星下点并计算以星下点为基准的植被指数。研究表明，该方法比 MVC 方法更优越，与其他线性模式相比更合理(Leeuwen et al., 1996)。用它估计星下点植被指数比用 MVC 方法更好，后者的估计值过高。这种 BRDF 方法被认为在无云条件下能最好地代表陆地表面的状态。但是 MODIS 的重复周期为 16 天，这会导致 BRDF 特征的变化，因为在 16 天内像元的观测角度会变，像元大小也会变(图 4.44)。(Leeuwen et al., 1997a)。在这种情况下，植被指数的不确定性取决于所获得的资料的空间分辨率和角度分布、地表区域的均质性和所选择使用的 BRDF 模型。如果多角度观测在视角空间中均匀分布的话，远离星下点的像元的空间分辨率的逐渐降低对内插到星下点的反射率的值影响最小。(Leeuwen et al., 1997a)。对于休耕地和白杨植被来说，用 Walthal 模式和模拟的降低分辨率的 MODIS 像元获得的星下点等效反射率会导致 NDVI 分别产生 0.011 和 0.008 的不确定性(Leeuwen et al., 1997a)。远离星下点的像元，其空间分辨率的逐渐降低对 MODIS 1km 或更粗分辨率的植被指数的影响要小一些，因为其输入数据的分辨率比结果产品的分辨率要高。

Privette 等人(1997)比较了 Wanner 等人(1997)阐述的几种线性模式,他们发现,对于许多种植被类型来说,用 Ross—thick/Li—sparse HRDF 模式作星下点插值效果最好。Leeu-wen 等人(1996)发现对大多数植被类型来说 Walthal 模式计算出的星下点等效植被指数性能最好。Walthal 模式与 Roujean 的 BRDF 模型等效。在用于前向模式模拟计算星下点反射率值时, Ross—thick/Li sparse BRDF 模式产生少量的不正常的点。ASAS 和 AVHRR 资料的处理经验说明 Walthal 模式比其它线性模式更具有合理性。Walthal 模式要求的浮点运算也最少,这也是 250m 分辨率的植被指数产品设计中要考虑的一个重要因素。

4)合成时段

有各种不同的合成时段用于获得全球尺度无云条件的 NDVI。最小合成时段取决于云覆盖的频率,从 5 天(高纬度)到 30 天(潮湿热带地区)不等。NDVI 的合成时段有 7、9、10、11、14 天和逐月合成等许多种(空间分辨率 1 km 到 1° (Townshend, 1994)。合成时段的选择还取决于应用情况。合成时段较短,可以监测到更为动态的地表变化,并可以进一步作长时段的合成。但受云的影响的机会会更大。MODIS 选择 16 天的合成时段是根据 EOS-AM1 卫星 16 天的重复周期和使视角变化达到全域值的要求而定的。因为这提供即避免云的影响又能以较小的视角覆盖所有纬度的机会,似乎是合适的选择。月合成是基于已有用户群的要求而定的。

取约为 9 天的合成时段而不是 16 天的合成时段是否会影响从 BRDF 模式获得星下点等效反射率值还不清楚。根据重复周期 16 天时段内获得较多的星下点 AVHRR 和 MODIS 观测是可能的。AVHRR 扫描宽度为 2700km, MODIS 的为 2330km。MODIS 的扫描宽度将导致更大的视角动态范围。MODIS 是上午轨道卫星,比 AVHRR 的下午轨道卫星所观测到的云覆盖要少。因为两个传感器的资料中因为云的缘故而剔除的资料是随机出现的,所以视角的分布和变化域会有不同,但不可能显著地影响最终的星下点等效的植被指数产品。

5)MODIS 数据流程

MODIS 数据流程图见图 4.45。它是按算法要求设计的,与 MVC 不同的是将经过大气订正的地表反射率和云掩码作为输入,并尽可能多地使用好的观测数据。如果需要软硬件都可能改变。

6)植被指数合成算法

MODIS 植被指数合成的目标是优先选择近星下点无云像元,尽可能减小残存

云、暗影、大气气溶胶和 BRDF 效应的影响，在仪器特性和地表特性的限制条件下尽可能增加空间和时间的覆盖度，同时保证合成资料的质量及一致性，合成时段、空间分辨率和全球陆地范围的代表性。合成算法依赖于云检测、大气修正、观测天顶角、太阳天顶角、相对方位角以及地表的 BRDF 归一化。利用反射率质量控制信息(QA)预先处理 MODIS 4 个通道(1、2、3、7 既红色、蓝色、近红外和

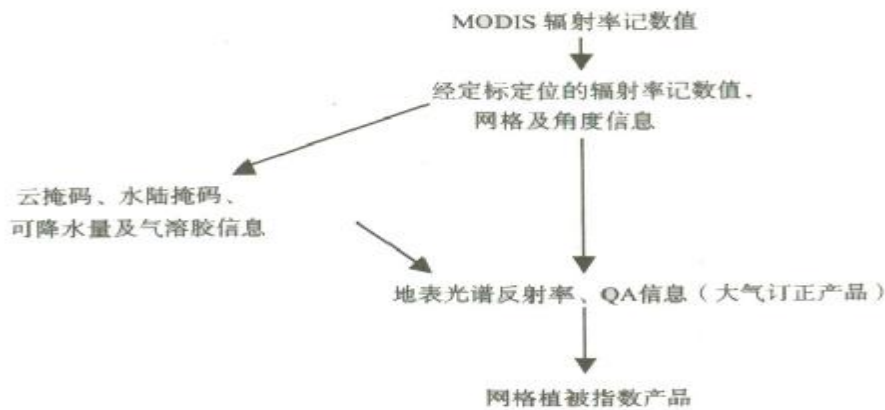


图 4.45 MODIS 数据流程

中红外通道)的大气订正反射率。有云或云暗影的陆地像元以及资料完整性不好的像元不参加植被指数合成。

16 天合成算法遵循如下步骤：

①在合成时段内有 5 天以上资料是好的话，就对各通道的双向反射率应用 BRDF 模式，将反射率值订正到星下点视角。然后计算太阳天顶角和植被指数。5 天是保证 BRDF 模式逆变换的稳定性的最低要求。当 BRDF 模式订正后的反射率为负值，而且植被指数高于或远小于 MVC 方法得到的 NDVI 则该点被舍去 ($0.3 - \text{NDVI MVC} \leq \text{NDVI BRDF} \leq \text{NDVI MVC} + 0.05$)。上述阈值是为保证 BRDF 模式订正不受残存云的影响。当 16 天中观测点的视角分布不均匀或受不理想的大气条件(烟、云)影响时，订正后的反射率值可能为负值。气溶胶光学厚度等大气参数不精确时，也可能导致负值。BRDF 模式订正公式如下：

$$r_l = (q_v, f_s, f_v) = a_l q_v^2 + b_l q \cos(f_v - f_s) + c_l \quad (4.91)$$

r_l 大气订正的反射率， q_v 卫星天顶角， f_s 太阳天顶角和 f_v 卫星方位角。模式参数 a_l ， b_l 和 c_l 用最小二乘法拟合得到。

②作为备份方法，当无云像元数小于 5 天时，选择视角最小的 2 天的资料，计算植被指数，取其大者。这称之为严格视角的最大值合成方法(CV-MVC)。若只有一天无云，该天资料自动被选中。

③若 16 天的资料都有云，逐日计算植被指数，用植被指数合成 MVC 方法选择最佳像元。合成的反射率资料和质量控制信息分通道分别存放，以便生成集成植被指数(即气候模式网格 CMG 植被指数,0.25° 分辨率)。合成产品输出为 16bit 整数，质量控制 QC 占一个字节，其中包括资料完整性、合成方法、云覆盖等参数。有云及不可用像元被统计出来后，计算云覆盖率。

④月植被指数产品(1km 和气候网格 CMG 分辨率)用代表 16 天合成的反射率资料(部分或全部属于该月的几个 16 天合成时段)加权平均得到。CMG 分辨率的植被指数由 1km 分辨率的合成反射率资料平均得到，在平均之后计算植被指数。QC 参数指出了用的是哪一个合成时段的资料。公历年 1 月 1 日开始计算每 16 天合成一次。

月集成和空间集成的(CMG—25km)植被指数产品根据 16 天/1km 植被指数产品中无云、经大气订正的好像元产生，有云像元或坏像元被统计下来以便计算云覆盖百分率。统计还包括 NDVI 和 EVI 的平均值和标准差、云盖、植被百分率。标准的 MODLAND QA 将被用于所有产品。

7) 卫星发射前的 MODIS 植被指数原型

在 MODIS 发射前用 1989 年的 AVHRR 资料检验并构造 MODIS 植被指数合成算法的原型。将各种 MODIS 合成算法和 MVC 合成算法分别应用于上述资料，得到 23 张连续的全球植被指数合成图。全球来看， $NDVI_{MODIS}$ 比 $NDVI_{MVC}$ 低 5%—8%。当应用 BRDF 算法时 $NDVI$ 值比 $NDVI_{MVC}$ 低 20%-30%。各大陆生长季节的 $NDVI_{MODIS}$ 的峰值不同。相对差 $[100 \times (NDVI_{MVC} - NDVI_{MODIS}) / NDVI_{MVC}]$ 为 1%-24%(keeuwen et al., 1997b)。

对沙漠和每年落叶的阔叶林做时间廓线，以评价 MODIS—BRDF 算法的精度。 $NDVI_{MODIS}$ 与 $NDVI_{MVC}$ 相等或略低，廓线略微光滑。两种算法的红色光和近红外反射率的时间廓线趋势一致。MODIS BRDF 和 CV—MVC 综合的合成方法表现更好些。而且该方法的植被指数图像也表现得很好，没有看到明显的不连续和人为的痕迹。QA 图像也可以反映算法的质量、云盖和丢资料区的情况。注意 BRDF 订正只适合于云较少的持续的半干旱和干旱地区。

8) 替代的植被指数合成方法

MODIS/MISR BRDF 产品方案将产生 16 天、1 km 分辨率的 BRDF 参数和反照率 (Strahler et al., 1996) 比 250m 网格 MODIS NDVI 产品的分辨率要低。因为 MODIS 植被指数合成算法的目标是获得星下点等效的反射率而不是完整的 BRDF, 5 次观测被认为已足够了。将 1 km 分辨率的 BRDF 应用于 250m 高分辨率的研究表明对均质地表结果很好 (keeuwen et al., 1997a)。月合成将保证 BRDF 有足够的输入资料。对于 25km 的空间分辨率, 植被指数将被归一化到一定的太阳角和视角。

解决 NDVI 值随太阳角变化的第二种方法是用 NDVI 和太阳天顶角的经验关

表 4.25 各 度太阳天顶角的预期变化范

区域	太阳角/(°)	
全球	33°	53°
南美洲	46°	33°
北美洲	30°	67°
欧洲	28°	66°
澳大利亚	51°	32°
亚洲	27°	62°
非洲	26°	46°
日记数	161	337

系。

9) 植被指数合成算法总结

由于地表各向异性的特点, 双向反射问题很重要。MODIS 植被指数引入蓝色光波段成功地构造了全球尺度的植被指数模型, 扩展了对密集植被的敏感度。

将视角标准化并强调星下点像元的选择使其优于 MVC 方法, 虽然一定程度上避免了饱和问题, 但同时它也受云和大气的影 响, 有其局限性。最终的评价取决于资料质量, 产品评价和用户要求。由于仪器精度和算法表现还有一些不确定性, 在 MODIS 植被指数合成算法中加入了一些能处理非预期资料输入的灵活性。算法的门槛值和参数是灵活的, 与资料质量有关。

根据 AVHRR 和 SeaWiFS 资料的模拟分析, 得到如下结论:

- . 每个像元要有一个简单的 BRDF 模型和几天可用的观测资料来将 NDVI 和 EVI 标准化到星下点视角, 改善对各向异性的特点的反映。
- . Walthall BRDF 在构造全球适用的植被指数模型方面是成功的。
- . 16 天合成 MODIS-BRDF 算法得到的植被指数比 MVC 方法更有代表性。
- . 现有的 MODIS-BRDF 合成方法自动地外推应用到更精细的空间分辨率。
- . 可靠的云检测对 BRDF 合成方法是至关重要的。

- .在 BRDF 模式不可用时(云太多),要有替代方法。
- .在大陆尺度, MVC-NDVI 比 MODIS-NDVI 高 1%—30%。

3. 定标和验证

植被指数验证要求有辐射和地球物理分量。MODIS 传感器的发射后验证包括相关测量并强调植被指数产品的长期的表现和质量。植被指数产品的验证高度依赖于 VI 值和地面光合作用和叶冠结构活动的真实变化的耦合。

植被指数算法验证涉及验证 VI 像所设计的那样能满足主要的科学目标和用途。验证计划有 4 个部分:

①与叶冠辐射传输模式比较,即与简化的二流模式、SAIL 模式和 Myneni 3 维叶冠模式的模拟数据比较。

②与实验场相关测量比较。

③与实验性飞行观测数据(AVIRIS, ASAS, AirMISR, 和 MAS 等)比较。

④与现有卫星观测数据比较[Landsat Thematic Mapper(TM), NOAA-AVHRR 和 SeaWiFS]。

对于各种叶冠密度和结构,野外实验观测数据、Landat TM 资料和叶冠模式输出中生物物理学参数的变化(LAI, fPAR, 生物量, 绿度覆盖)应该导致植被指数的相应的变化。植被指数应该能区别主要地表类型内部和相互之间的植被差别,并在全球的水平上进行真正的相互比较。在时间方面,我们关注残存的大气的角度效应对植被指数算法的影响,这种影响会导致时间廓线的虚假变化。实验场和 ASAS 的飞行观测的 BRDF 实地测量提供对这些数据的双向反射修正的“真值”以及对合成程序在消除角度噪声方面的性能。相似地,像 LAI 这样的生物物理学植被参数的季节性变化提供了植被生长季节的“真实”季节廓线。NDVI 连续性的作用要求在 AVHRR—NDVI 和 MODIS—NDVI 产品之间有适当的转换系数,该系数通过 AVHRR 和 MODIS 资料的事后配准处理得到。植被指数成功的真实的度量表现在对植被时间和空间配型的区分上。对于 EVI,植被指数随叶冠背景的变化应最小,其消除大气残余污染的能力将由实测资料和太阳光度计资料确定。在有限的时段,太阳光度计网络将被用于手动地对大气进行修正和评估 EVI 方程对大气影响的承受能力。对于业务化的基于暗目标相减法的大气订正算法对植被指数产品的影响也要被评估。

验证测试包括:

- 利用无植被区的观测进行“基线”检验,可以和 MCST 定标一起进行。

- 利用密植被观测场资料进行“饱和问题”检验。
- 对于干旱和半干旱区确定植被指数所能探测的植被量下限的“门槛值”检测。
- 与生物物理学参数的相干性检测。
- 季节变化时间廓线的检测。
- 转换带检测，在气候变化(降水、温度、地形等)的梯度区，植被应有相应的变化，对于检测植被指数的敏感度是理想的。
- 实测的星下点反射率对比。

4. 误差或不确定性估计

全球变化的预测取决于资料的质量和稳定性。作为 EOS 关键仪器，MODIS 将提供经验证的高质量的 15 年的数据集。误差或不确定性的估计是至关重要的。

植被指数的误差或不确定性分析目标在于：

- 建立误差或不确定性传播理论和方程。
- 估计植被指数产品在辐射测量学和生物物理学两方面的不确定性。
- 评价植被指数算法性能的特点。

分析产生的次级产品包括全球误差图，已知特征的验证场的误差收支。误差收支指出植被指数产品的主要误差源，用于算法性能评价。

1) 误差或不确定性传播理论和方程

用泰勒一级近似的不确定性传播理论来构造：设 y 为因变量， x_1, x_2, \dots, x_N 如为自变量， $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ ，则 y 的不确定性 $u(y)$ 表示为

$$\begin{aligned}
 u^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \\
 &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)
 \end{aligned} \quad (4.92)$$

不确定性的估计与卫星发射前和之后的验证活动一起进行。主要目的是评价植被指数总体的精度和与生物物理学参数的关系。

许多敏感性研究说明，由于环境因素的变化(如叶冠结构、大气、叶冠背景)和太阳目标传感器的几何变化，在植被指数中存在着许多噪声和不稳定源，它们既与仪器特性有关也与算法本身有关。因为植被指数有两种主要的用途：精确地度量植被辐射和估计植被生物物理学参数的量，也就有两种评价植被指数性能和不稳定性的方法：一种方法是对给定的辐射测量不稳定估计量，考察作为扰动程度的函数的植被指数的绝对和相对的变化量。第 2 种方法是描绘作为植被生物物理学参数(如 LAI、覆盖百分率)的植被指数对扰动的响应，从而提供一个生物物

理学单位的误差估计。

与仪器有关的误差：

- .通道 1、2、3 的 5%的绝对传感器标定经度引起的误差。
- .20%和 10%(目标)的通道配准精度引起的误差。
- .通道频率漂移引起通道输出变化(各通道所允许的漂移量不同，通道 1、2 为 0.5%，通道 3、4 为 2%)所引起的误差。

第 3 级植被指数合成产品最关心的主要误差问题是：

- .图像的几何定位和准确的几何配准，最好在 0.1 个像素之内。
- .空间抽样以便使辐射衰减最小化。
- .云过滤、大气修正、BRDF 产品等的精度和不确定性，它们直接影响第 3 级植被指数合成产品。

影响着全球植被指数的相互比较的环境的噪声源，包括：

- .与非线性和饱和问题有关的误差和不确定性。
- .与叶冠结构效应有关的误差和不确定性。
- .大气变化引起的误差和不确定性。
- .与不同的太阳角和视角有关的误差和不确定性。
- .与背景变化有关的误差和不确定性。

2)不确定性估计

在植被指数产品的这些潜在的误差源中，已对三类误差进行了估计：①反射率定标的不确定性，②光谱波段的漂移，③波段之间配准的误差。结果简单总结如下：

(1)反射率定标的不确定性

研究表明 AVHRR 定标随时间有根本性的漂移变化。MODIS 更强调其定标算法。它有三个星上太阳光反射定标参照体，周期性地检测这类变化。

定标不确定性对植被指数的影响。因地表反射率和大气条件而不同。暗目标(无或少植被)区引起的 NDVI 和 ARVI 的误差最大。在整个目标亮度和植被变化域中，SAVI 的不确定性几乎恒定。EVI 的不确定性随 EVI 值线性增加。在所有情况下，大气扰动增加定标的不确定性。当各波段的不确定性相关时，植被指数的不确定性降低。

当反射率的不确定性为 2%，能见度 $\geq 20\text{km}$ 的普通大气条件下，各种植被指数的不确定性分别为：NDVI 和 SAVI 为 ± 0.01 植被指数单位，ARVI 和 EVI 为 ± 0.2 植被指数单位，后者不确定性较大是因为加入了蓝光通道。敏感度分析表明植被指数的不确定性随反射率定标不确定性线性增加。

表 4.26 对于一定的植被指数不确定性所预期的反射率地表的不确定性

植被指数	NDVI	SAVI	ARVI	EVI
0.01	1.9%	2.1%	1.0%	1.2%
0.02	3.8%	4.2%	1.9%	2.4%
0.05	9.4%	10.5%	4.8%	5.9%
0.10	18.9%	21.1%	9.6%	11.9%

(2)光谱波段的漂移和波段之间配准的不确定性

研究表明，对于 2nm 的波段漂移 NDVI，SAVI，ARVI，and EVI 的误差均为 ± 0.01 植被指数单位。对于波段间配准误差，NDVI 和 EVI 的 ± 0.01 ，而 SAVI 和 ARVI 为 ± 0.03 。。

2. 系统目标

MODIS 数据计算各种植被指数、多天最大值法植被指数合成和植被指数距平，可以演绎植被指数的时间动态变化。

- I NDVI 归一化植被指数
- I DVI 差值植被指数
- I RVI 比值植被指数
- I EVI 增强植被指数
- I LAI 叶面积指数
- I FPAR

3. 功能概述

根据植被指数、植被指数合成、植被值数据平的特点，系统设计有如下列功能模块：

- 1. 文件显示

- ü 植被指数、植被指数的合成和植被值数距平等文件的显示
- ü 打印设置
- ü 最近显示的文件
- ü 退出
- 2. 查看
 - ü 工具栏
 - ü 状态栏
- 3. 产品制作
 - ü NDVI 动画
 - ü NDVI 分析
 - ü 单时次产品
 - ü 最大值合成
 - ü 距平
- 4. 帮助
 - ü 关于 NDVI
- 5. 工具
 - ü 拆分 MODIS 数据
 - ü 拆分 LDF 数据

二、该软件的开发环境

1. 系统软件环境选型

I 平台选型依据

本系统作为一个单机环境下运行的专业遥感植被指数图像处理系统，需要一些相应的基础软件支持，保证系统功能的稳定性，并实现一些基本通用功能。

本系统涉及的软件的选型是以 MODIS 数据产品植被指数加工开发的需要为目的，综合国内外技术最新水平，在经济、效益合理平衡的情况下确定的。系统用户是包括农业部、农科院、各基层单位等多层次的用户，各地用户的基础设施

建设、技术能力水平、科研应用经费等，会有很大的差异。在系统平台选型过程中，必须综合考虑这些情况，尽可能使得系统相关的各软件能够为大多数技术人员所熟悉，或者经过简单的培训讲解就能掌握的常用软件系统。另外，系统选型也要考虑系统的功能实现需要，保证能够满足系统的各项功能要求。

综上所述，系统相关软件平台选型的依据可以概况为：

- l 以系统功能准则，以满足功能需求为根本；
- l 适应大多数操作人员的状况、计算机水平、专业水平；
- l 符合各大多数单位的现有软件能力，尽可能减少在软件购置上的投入；
- l 要便于进行安装、调试、使用，操作界面要友好、人性化。

l 操作系统的选择

根据功能和系统的稳定性以及系统普及概率情况，我们决定采用 windows 2000 系列以及以后的 windows XP 等。

l 系统开发语言环境

程序开发语言 C++。

2. 系统硬件要求

系统的运行必须满足基本的硬件环境要求。系统硬件的好坏，将影响系统运行的速度和效率，是对系统功能指标具有较大影响的基础环境之一。

综合分析本系统使用的各基础软件的需求，考虑系统功能开发中设涉及的一些重要的参数设置、系统功能运算等，系统的基本硬件要求如下：

l **CPU:** Pentium 4

l **内存:** 128M

l **硬盘:** 20G

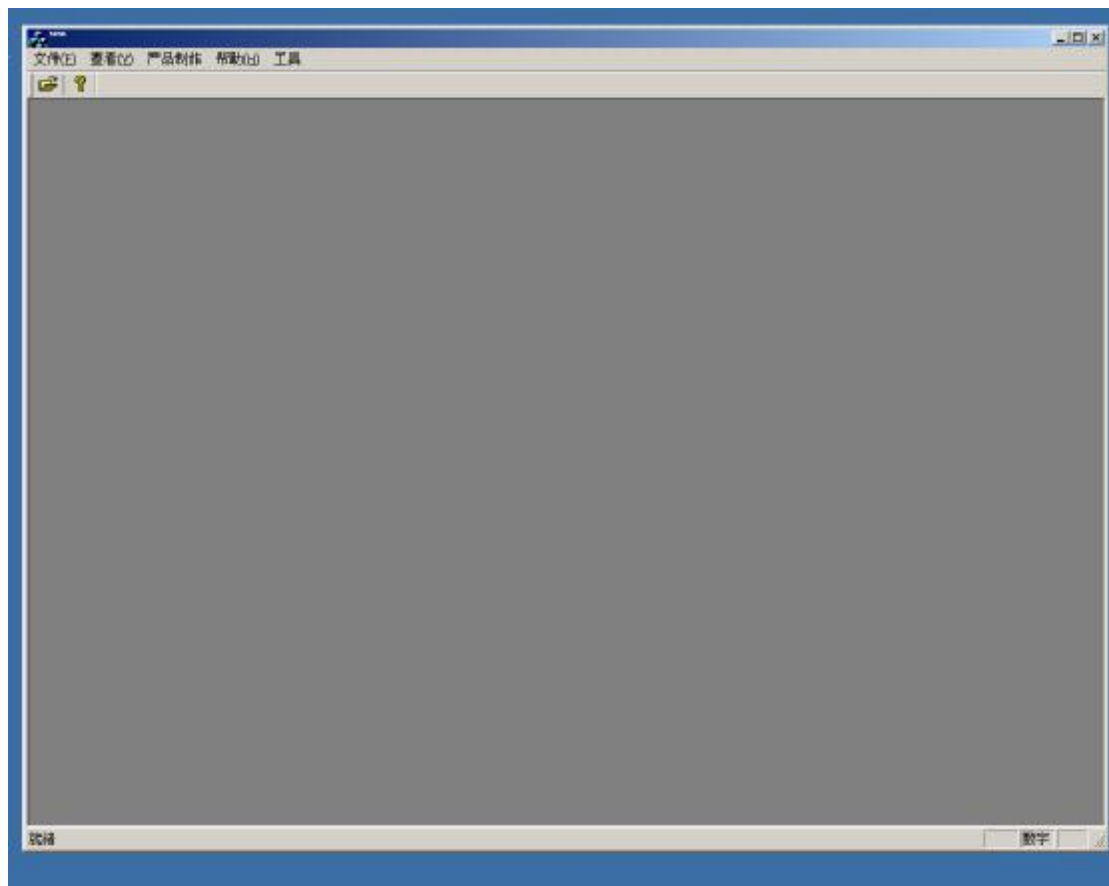
显示: 256M 显存，256 色以上，1024×768 分辨率。

三、系统安装

本软件为绿色软件，不需要安装，直接把软件拷贝到所需位置。

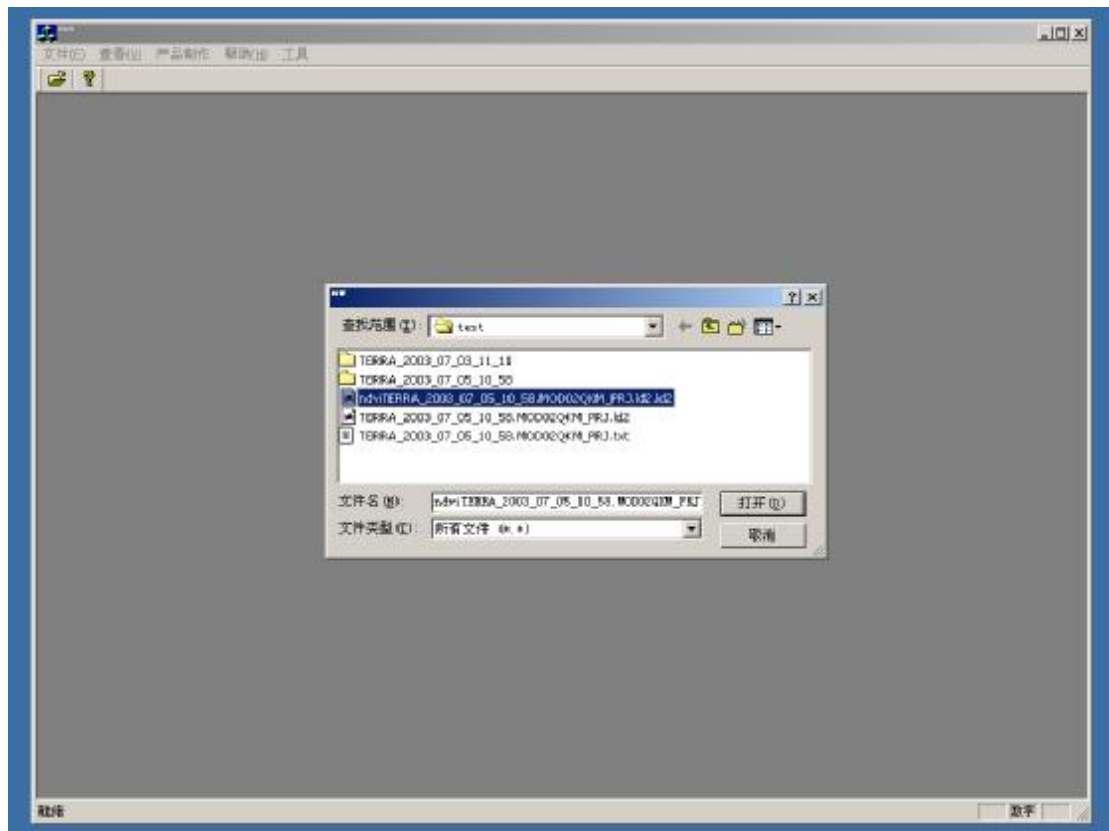
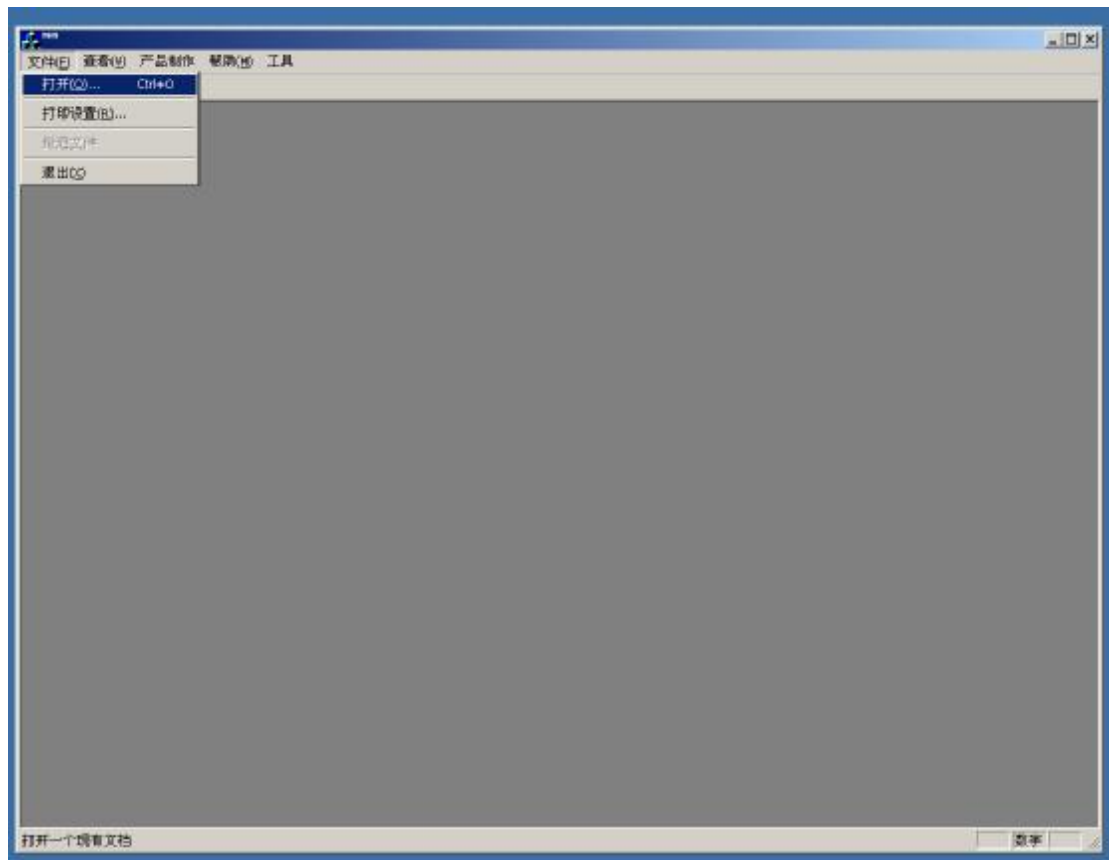
四、详细使用说明

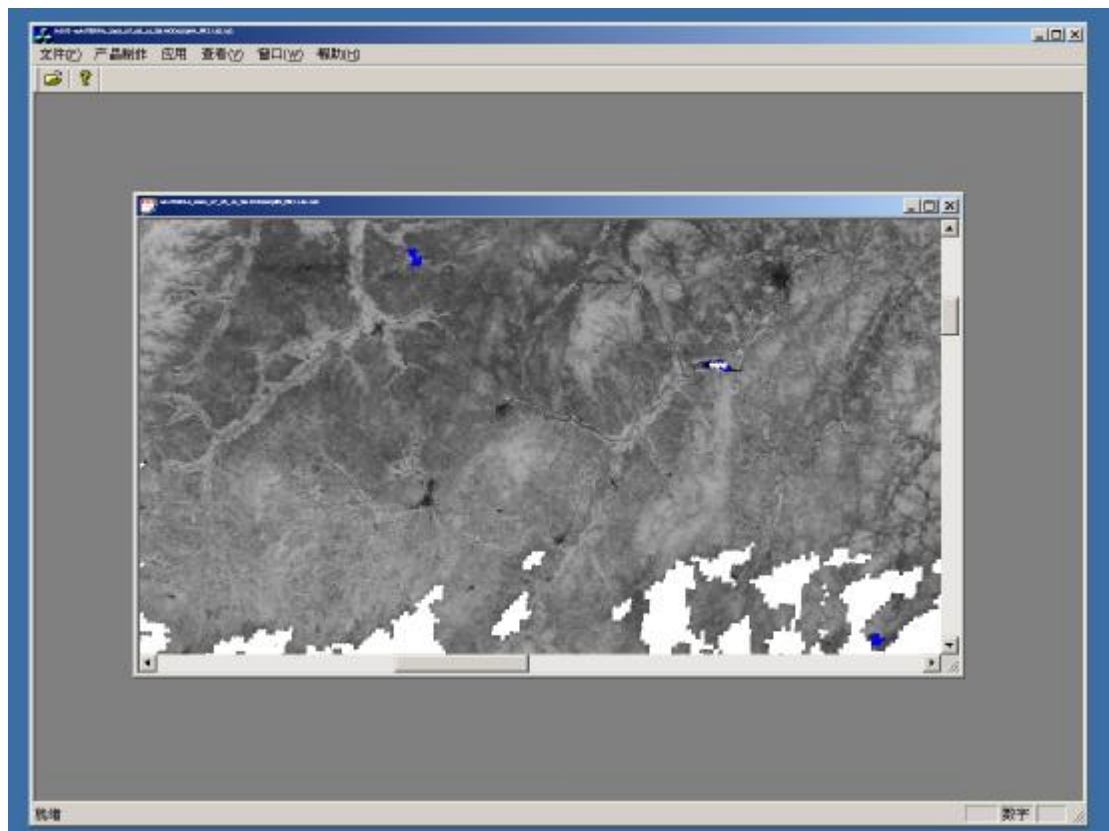
1. 主界面



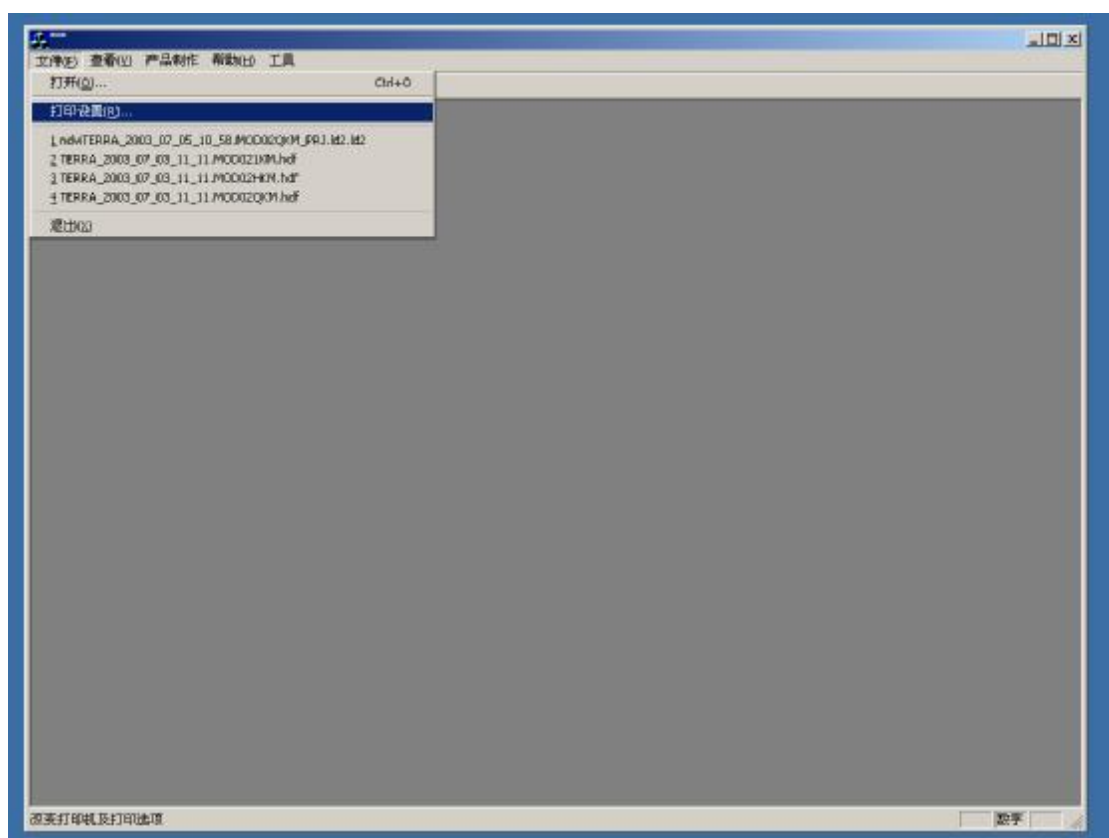
2. 文件

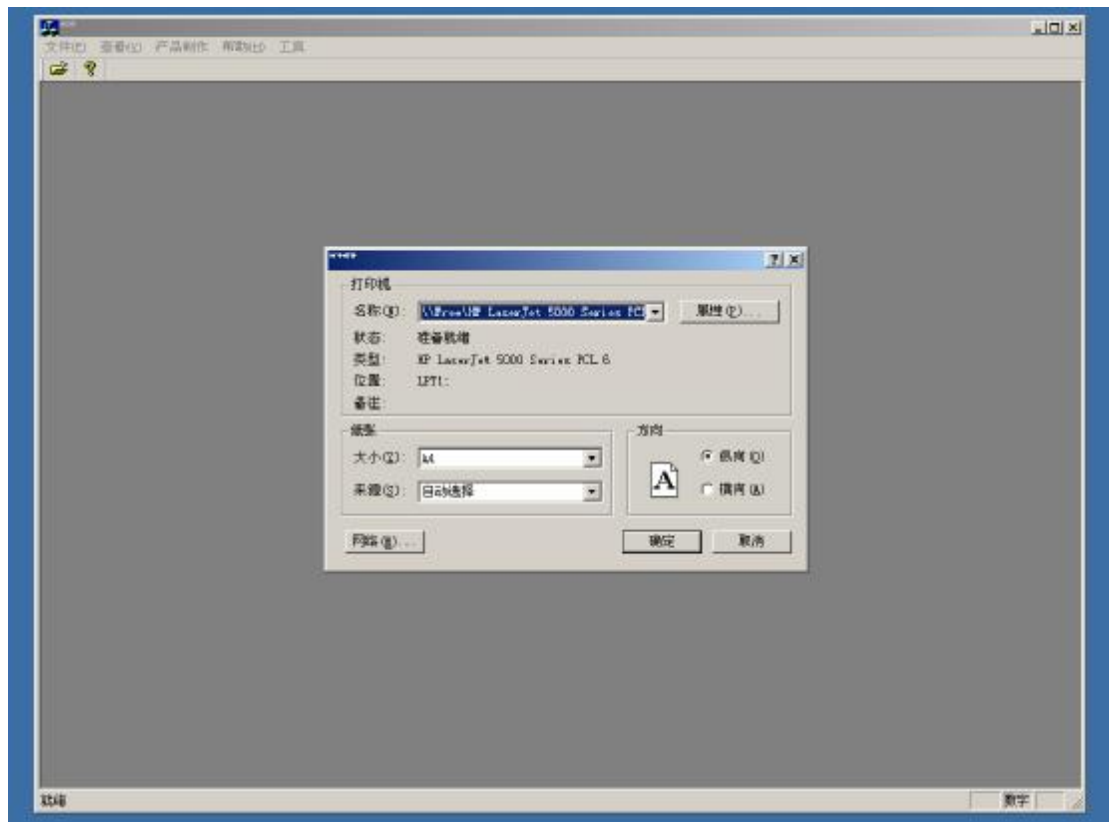
2.1 打开



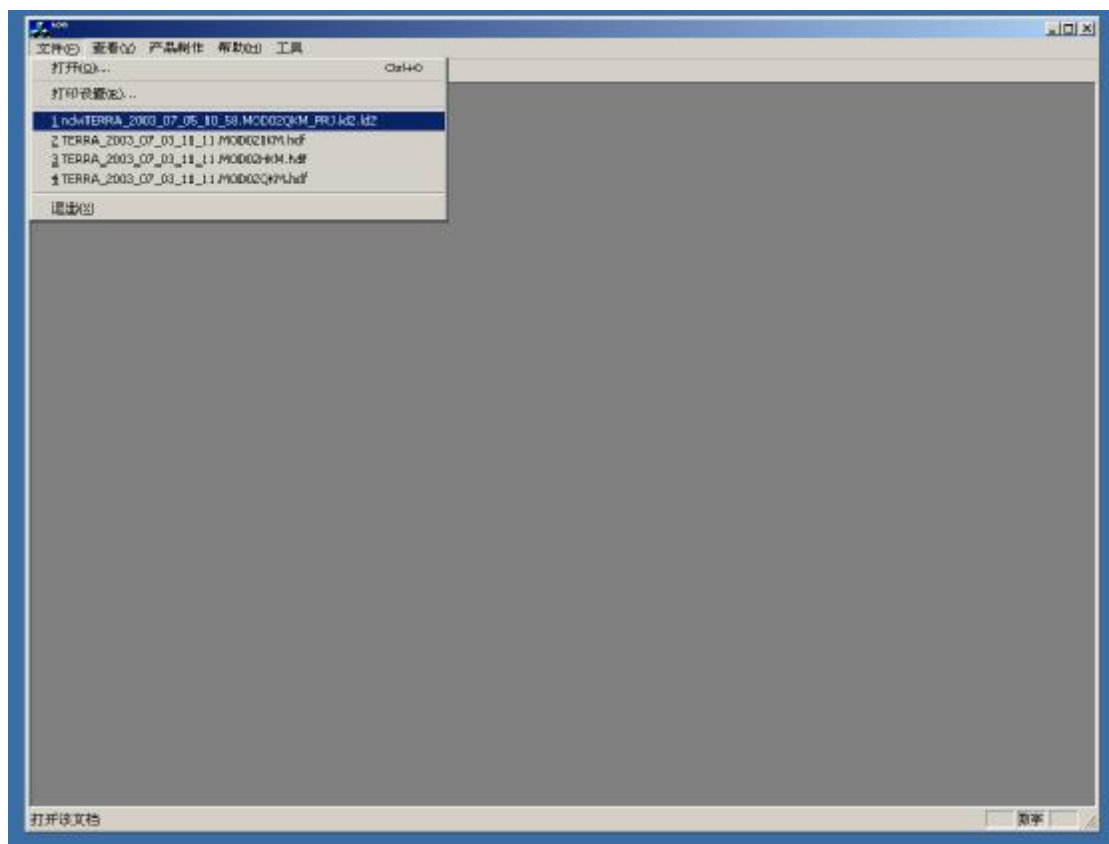


1. 2 打印设置

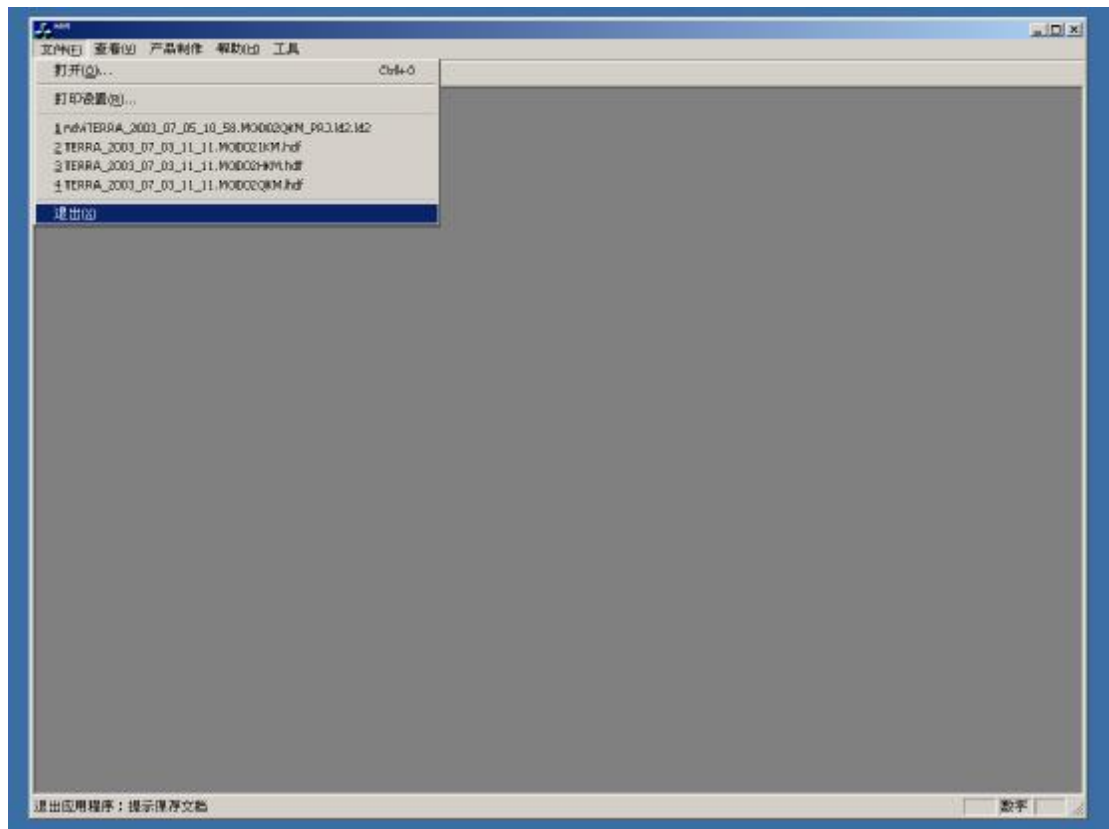




1. 3 打开文件记录

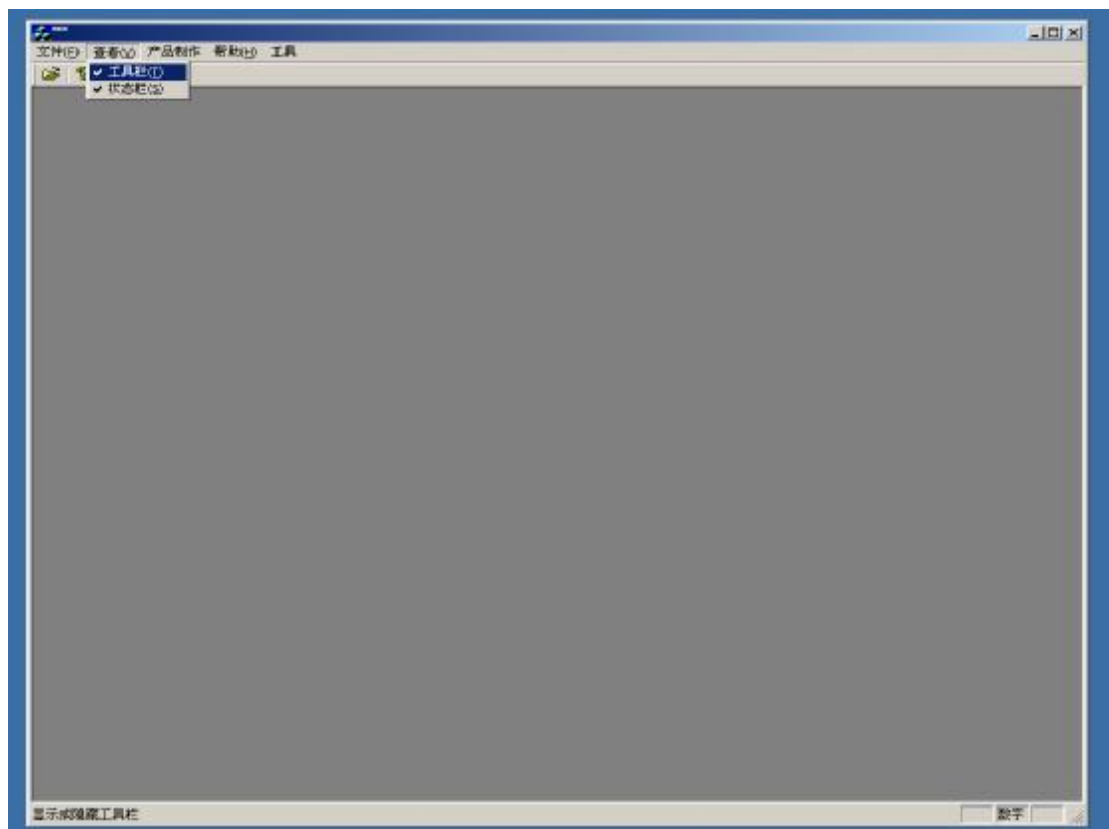


1. 4 退出



2. 查看

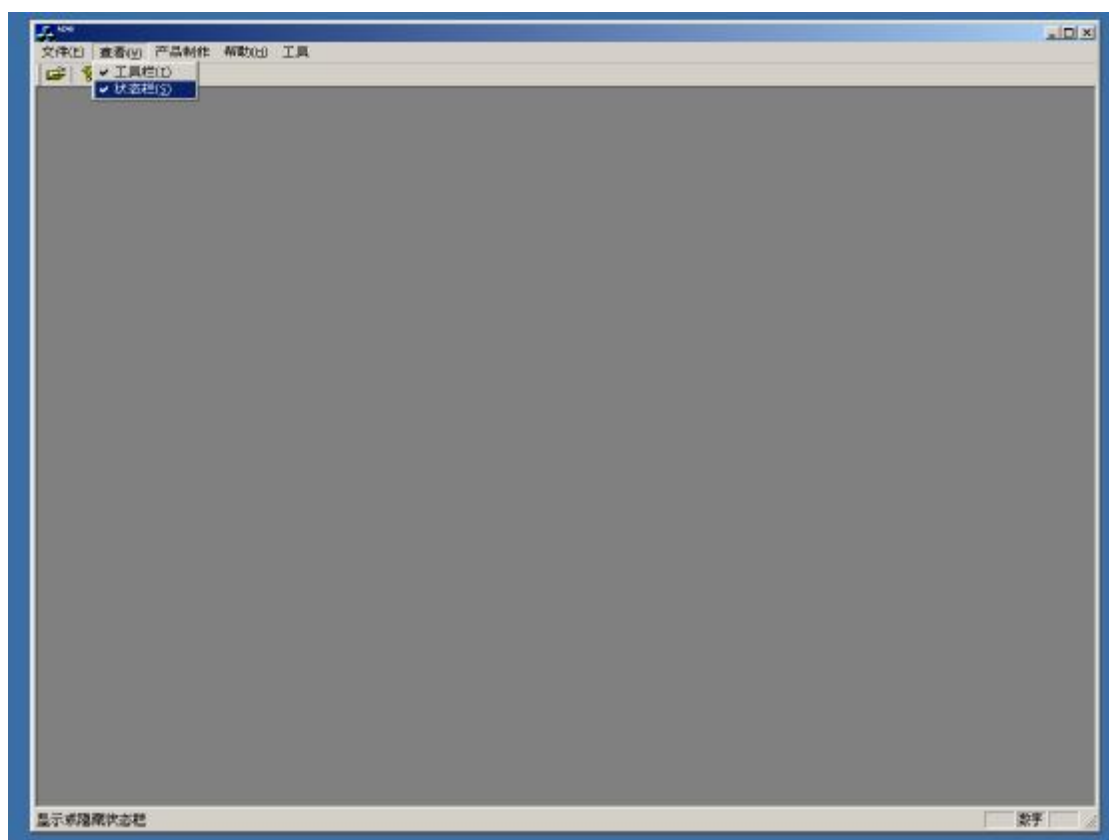
2. 1 工具栏



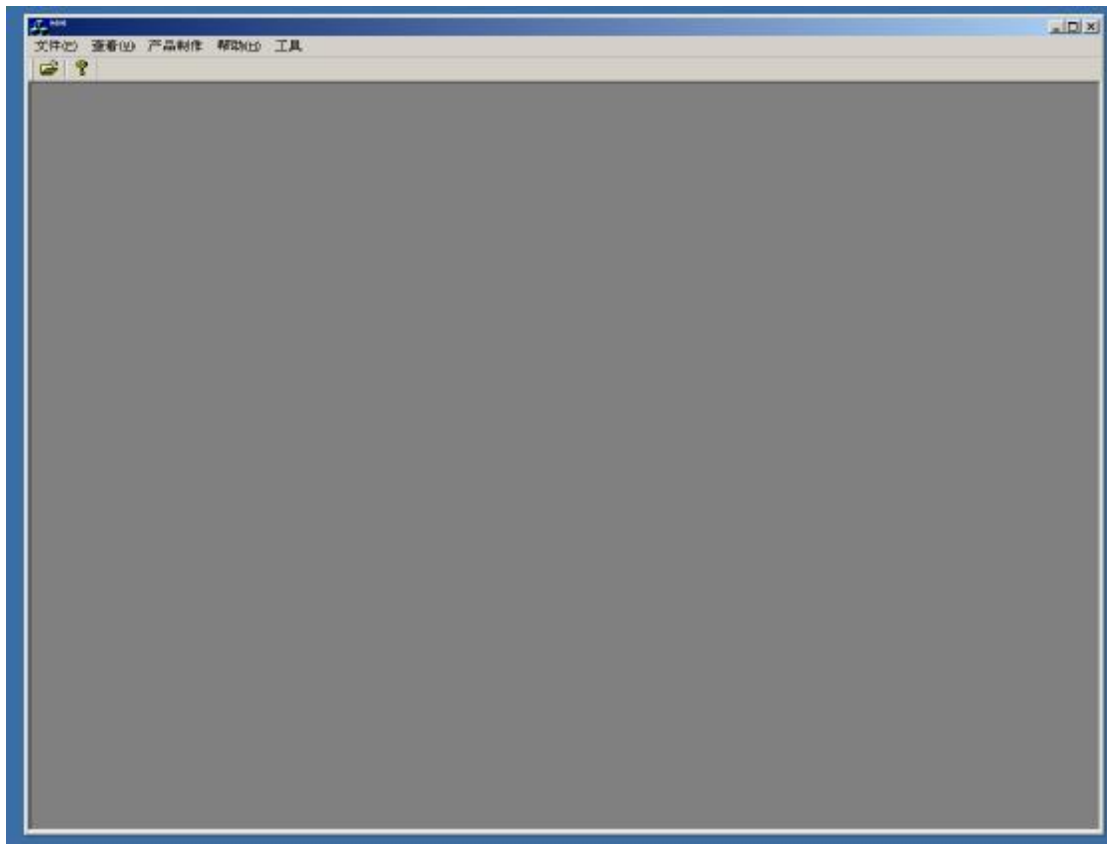
取消工具栏选择



2. 2 状态栏

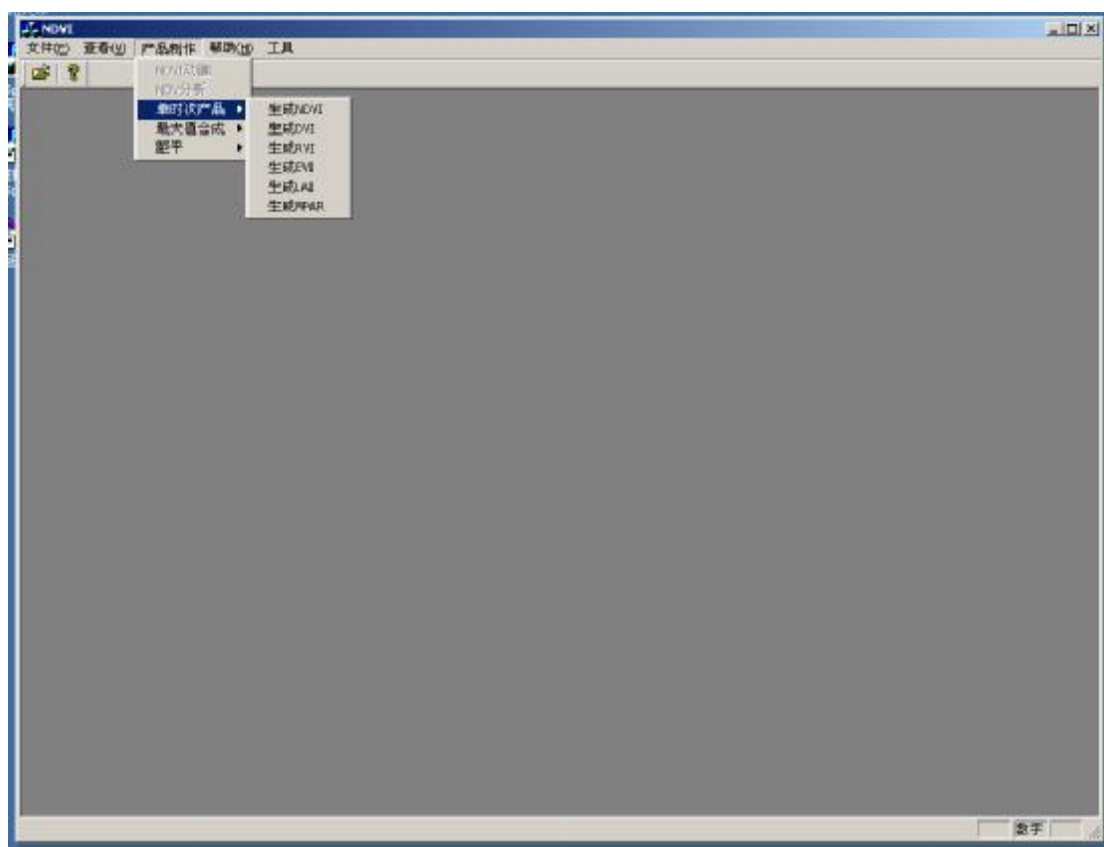


取消状态栏选择

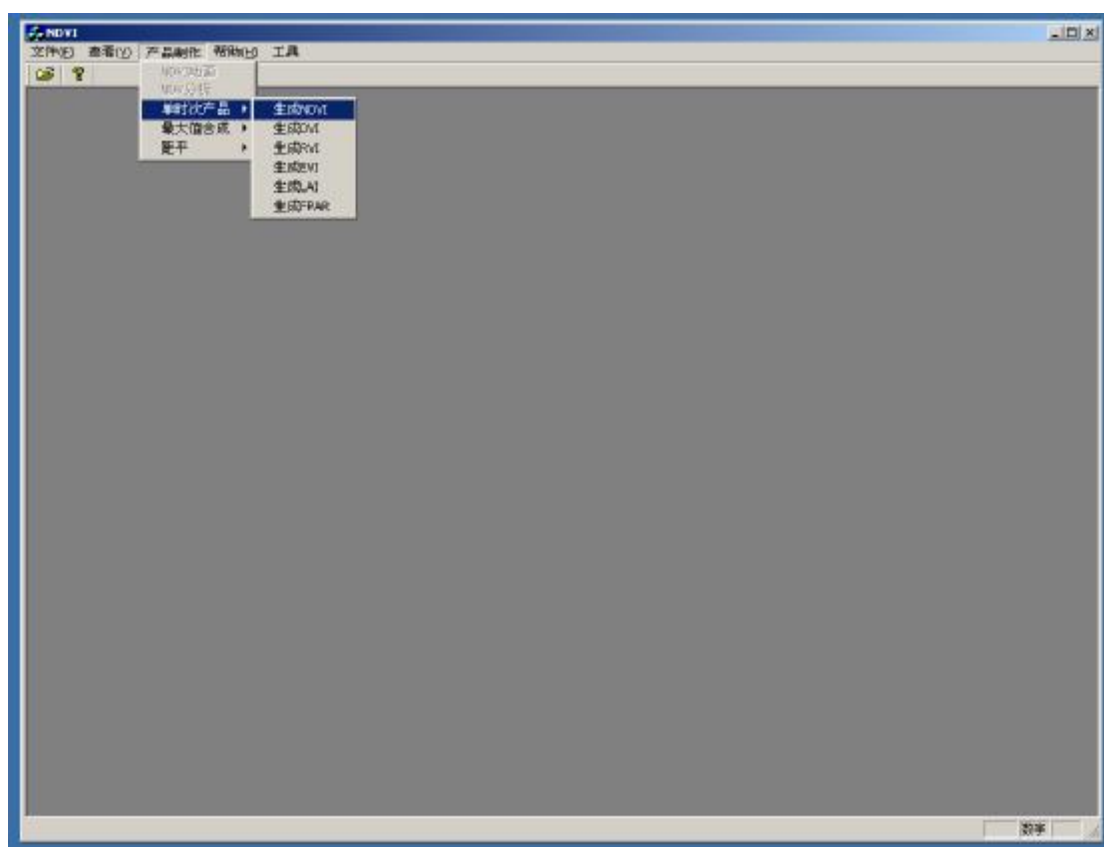


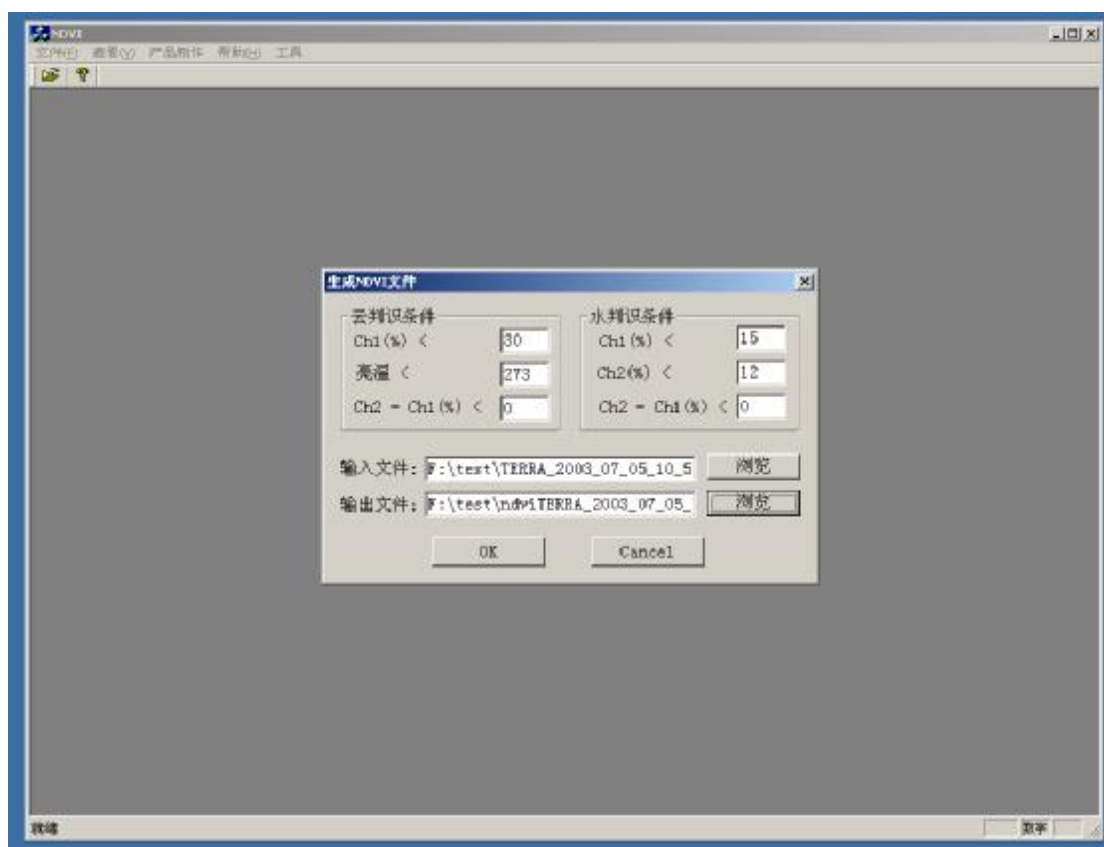
3. 产品制作

3.1 单时次产品



3. 1. 1 生成 NDVI

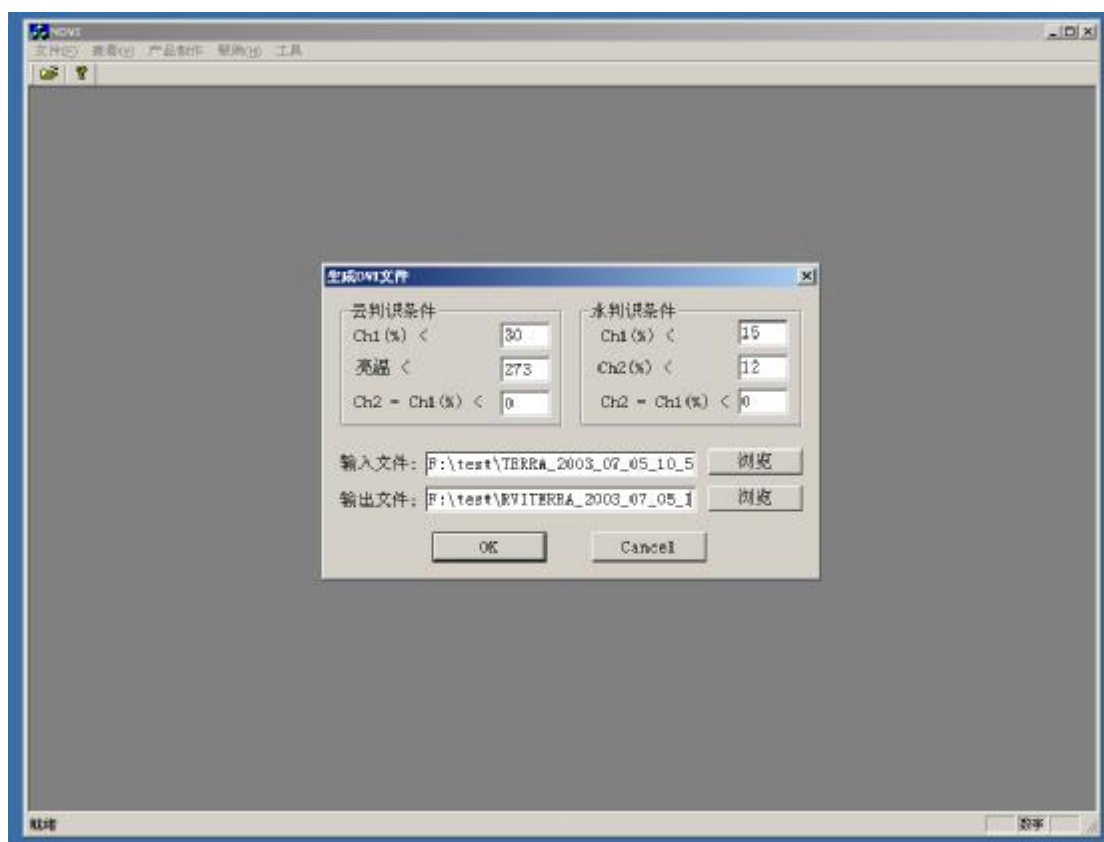
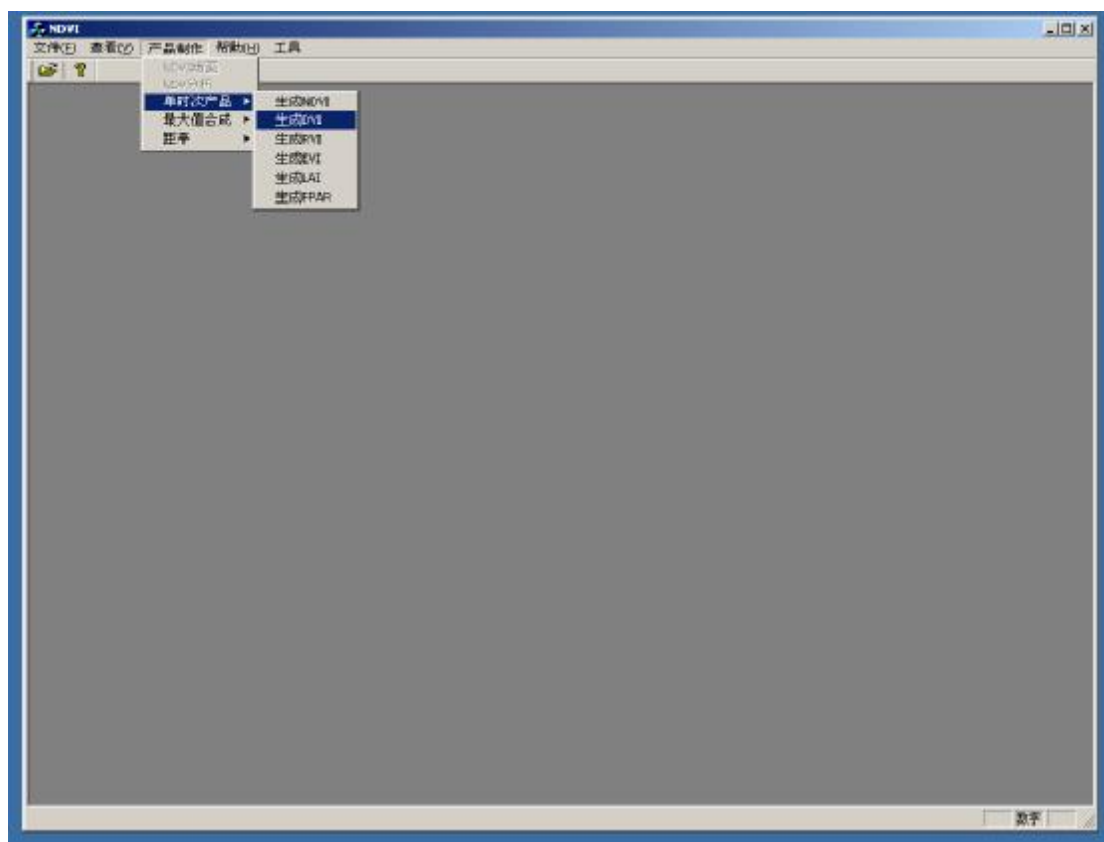




其中云判识条件为：第一通道 CH1 反射率大于 30，亮度温度小于 273，第二通道的反射率小于第一通道的反射率。水判识条件第一通道的反射率小于 15，第二通道的反射率小于 12，第二通道的反射率小于第一通道的反射率。

在输入文件中选择已经投影完的 LD2 文件，在输出文件选择输出的文件名和需要输出的路径。

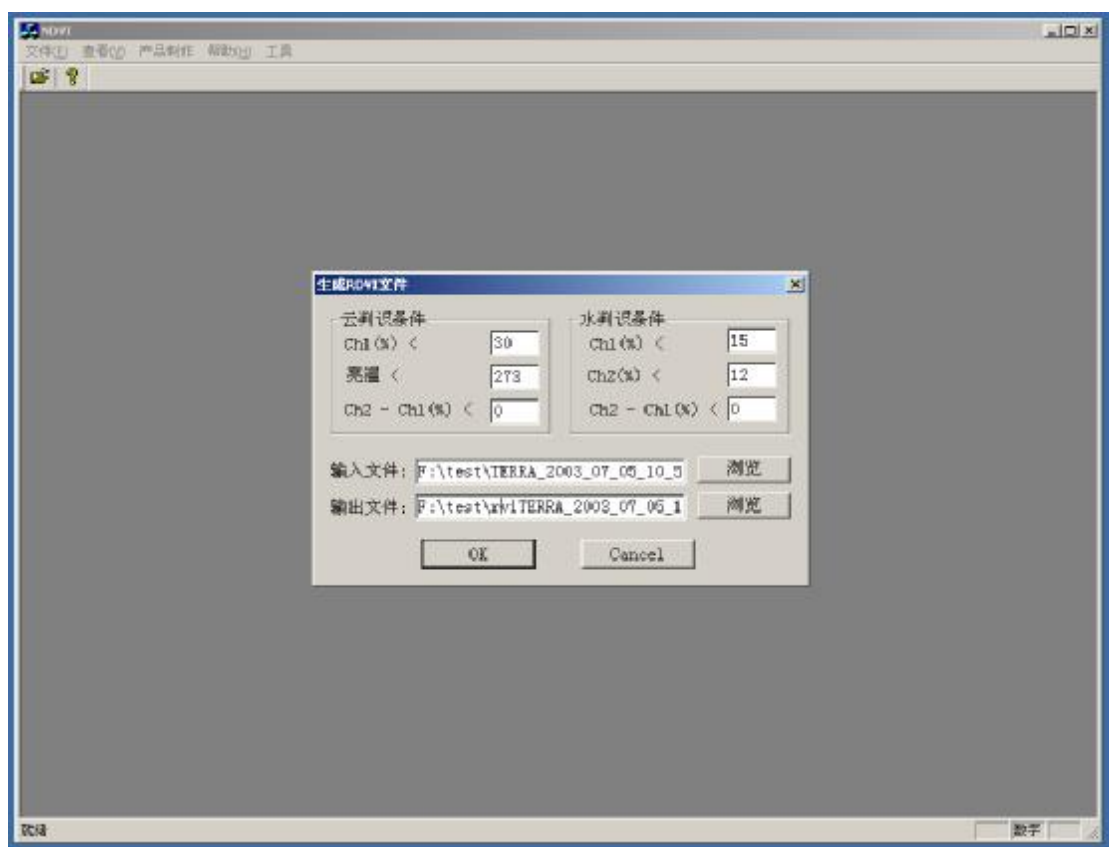
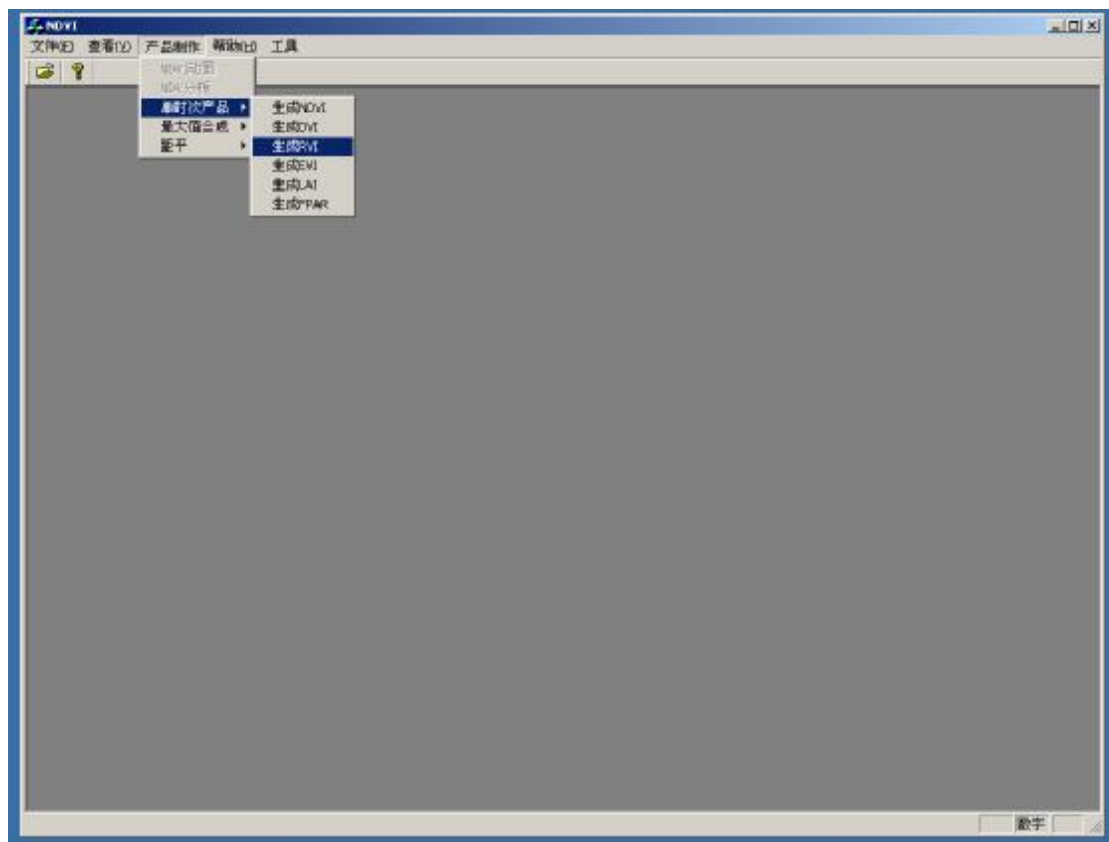
3.1.2 生成 DVI



其中云判识和水判识的参数设置同上。

操作方法同上。

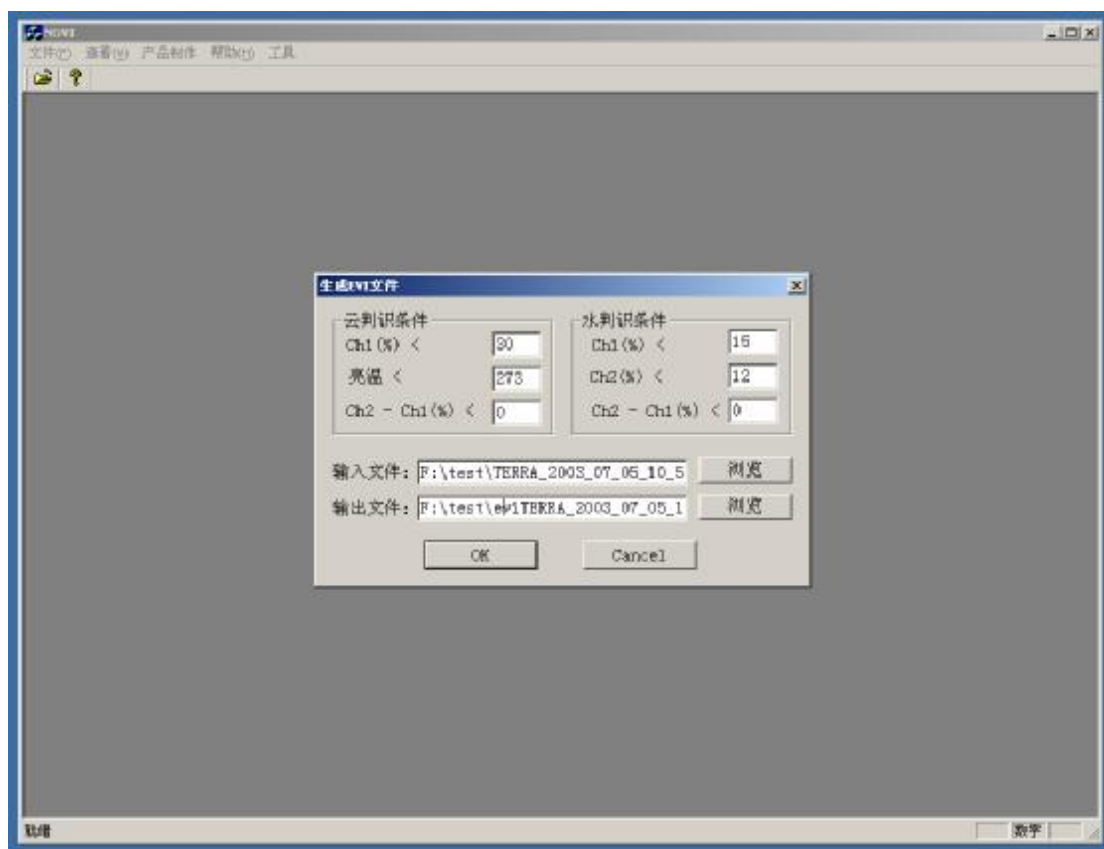
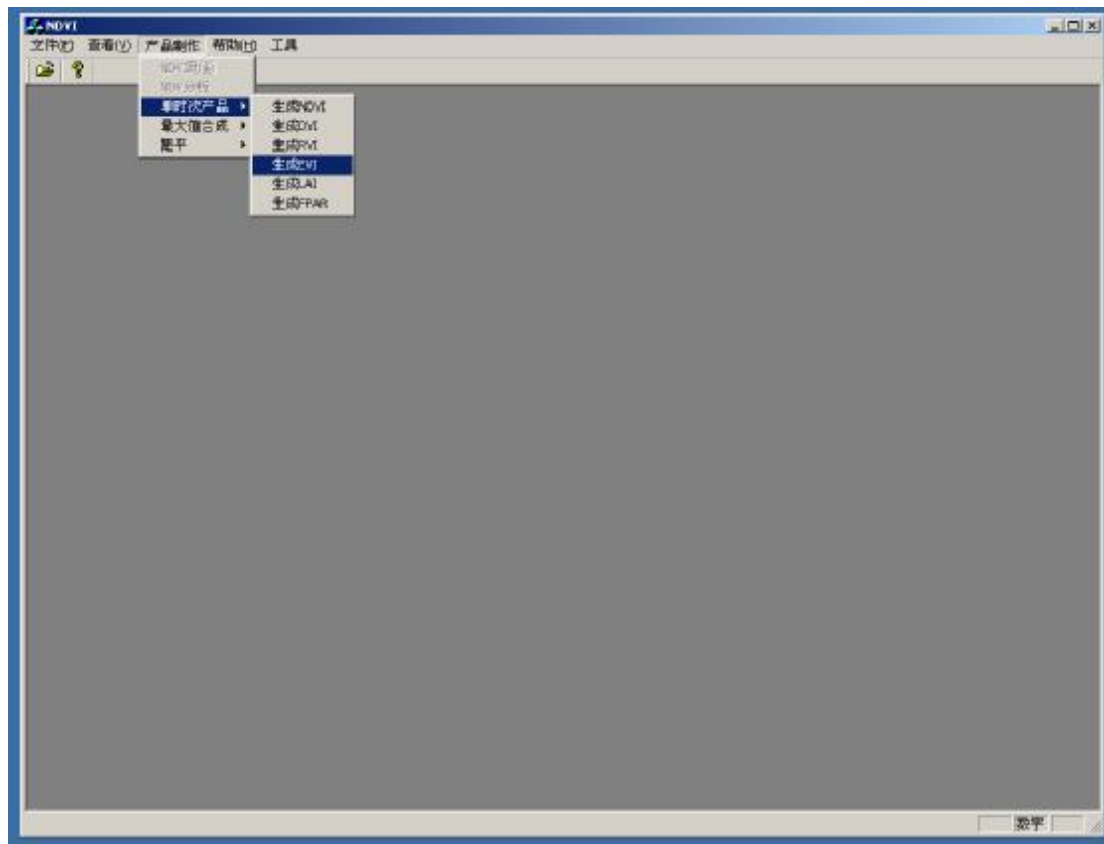
3.1.3 生成 RVI



其中云判识和水判识的参数设置同上。

操作方法同上。

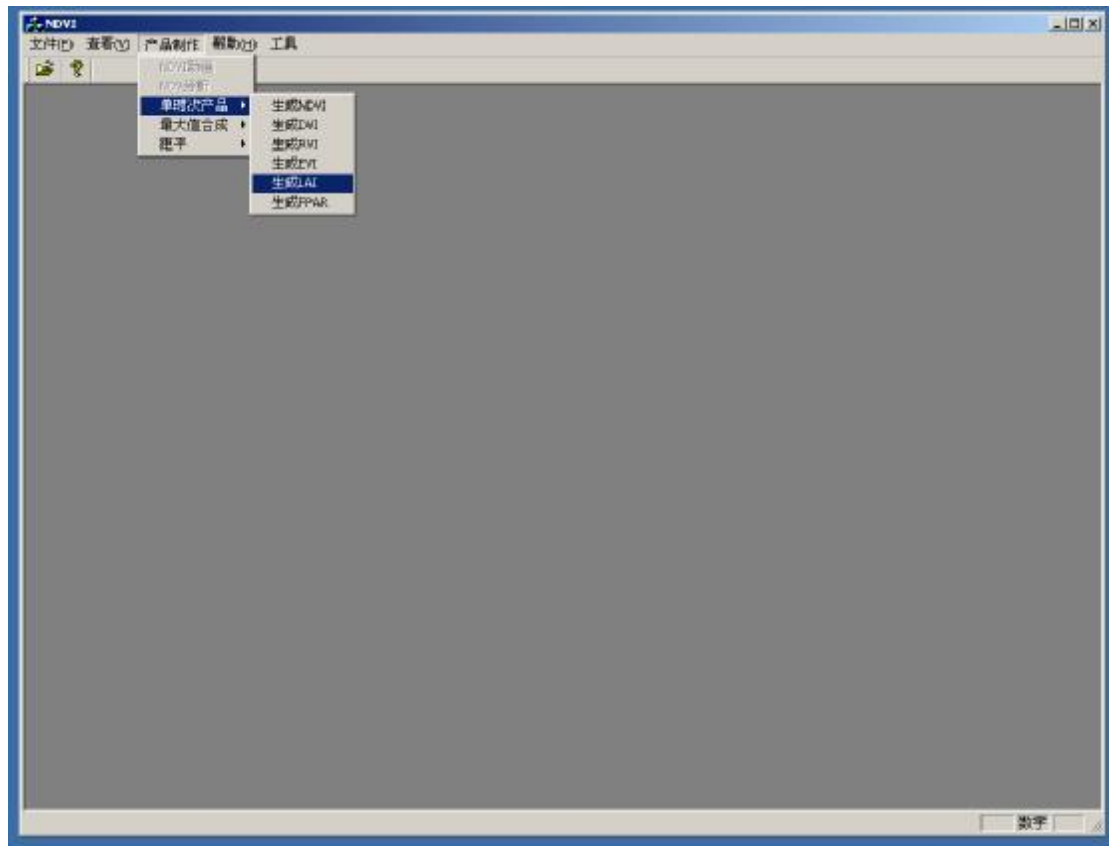
3.1.4 生成 EVI

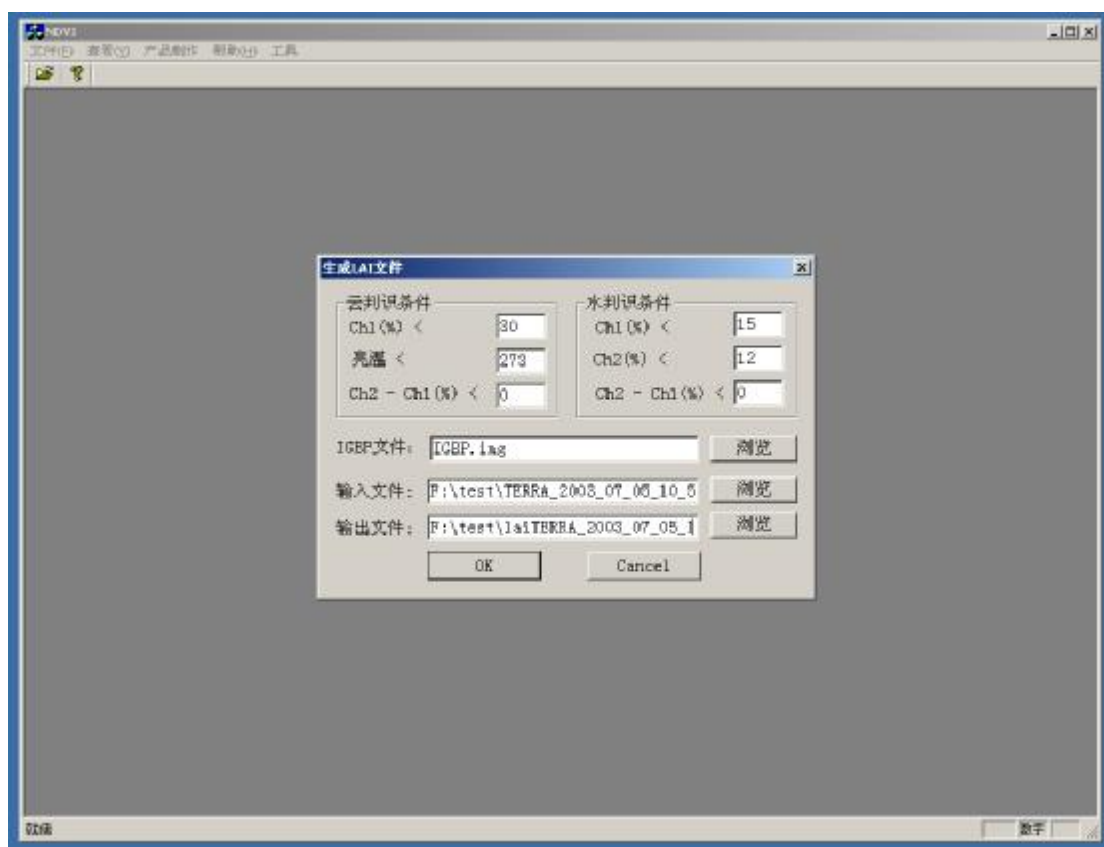


其中云判识和水判识的参数设置同上。

操作方法同上。

3.1.5 生成 LAI

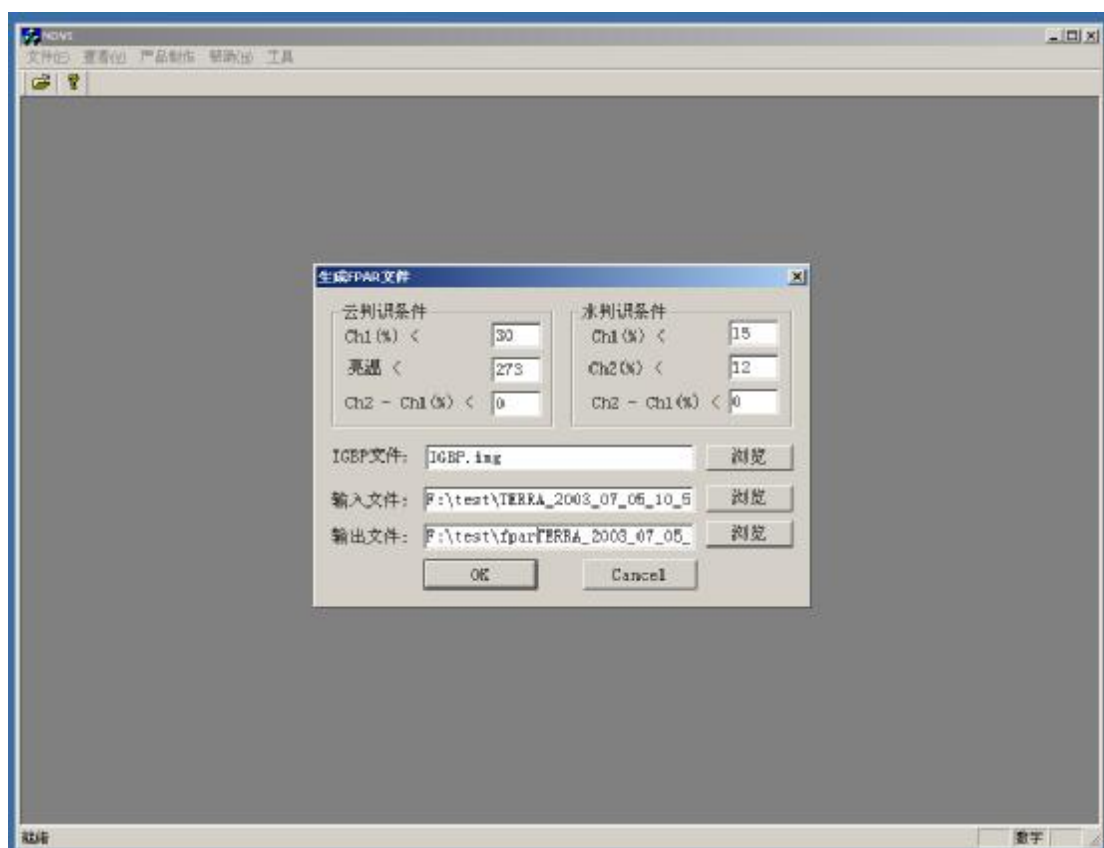
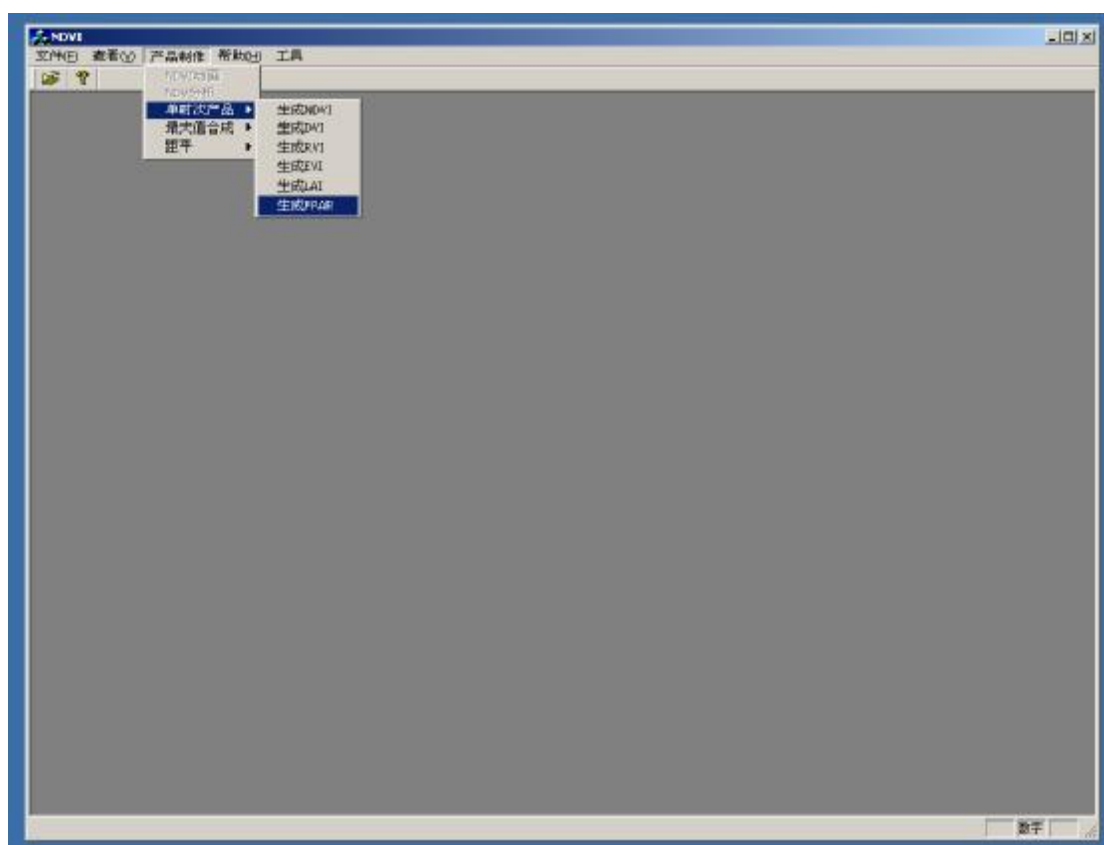




其中云判识和水利判识的参数设置同上，同时需要输入 IGBP.img 文件。

操作方法同上。

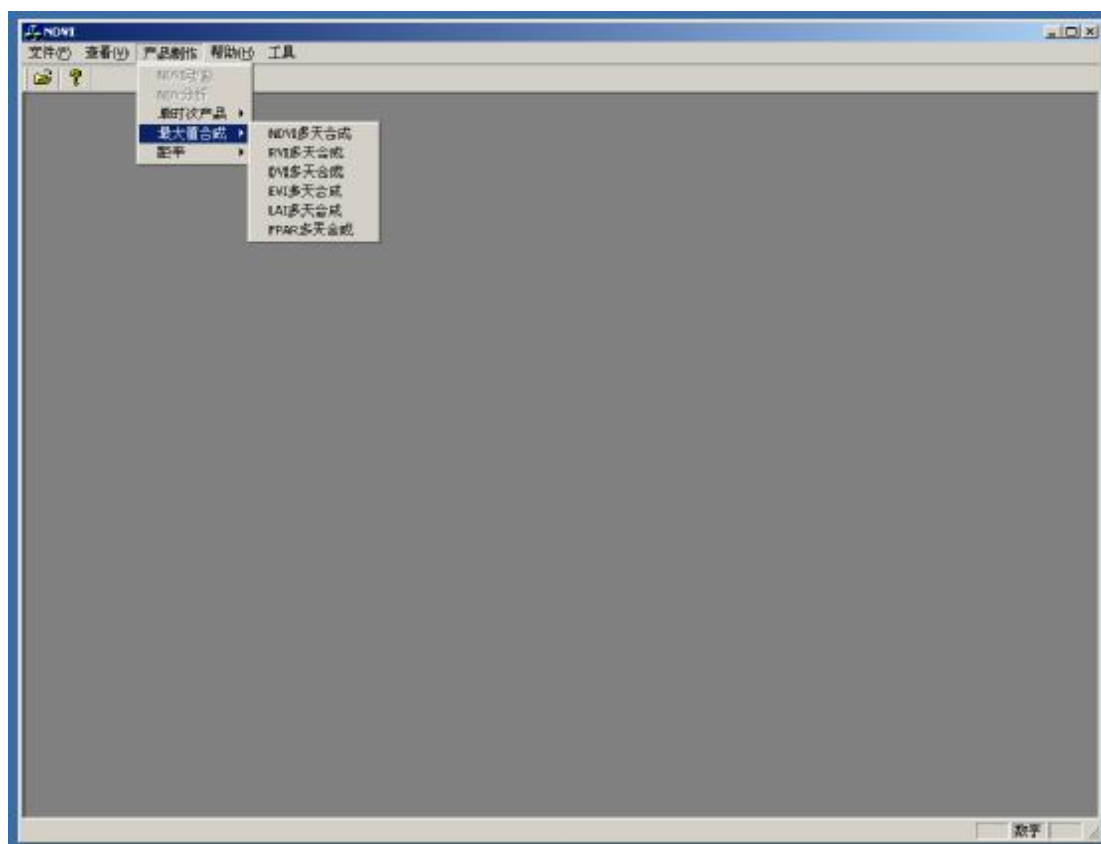
3.1.6 生成 FPAR



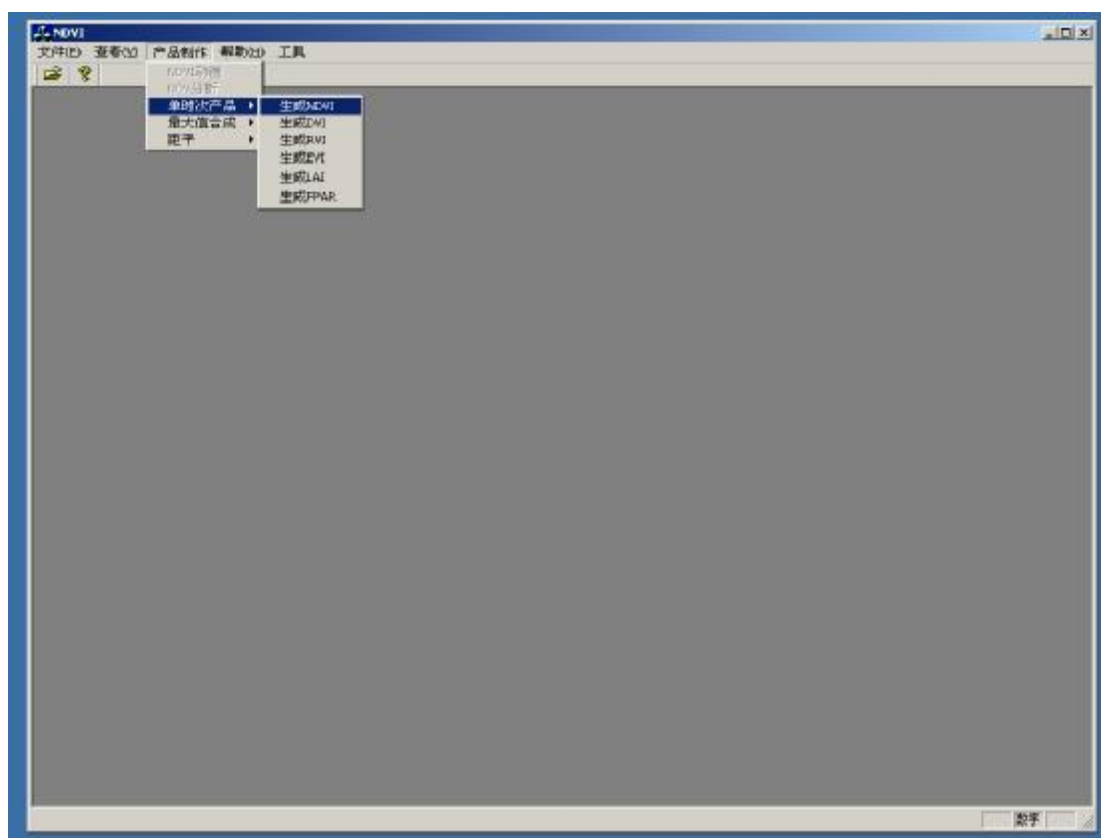
其中云判识和水判识的参数设置同上，同时需要输入 IGBP.img 文件。

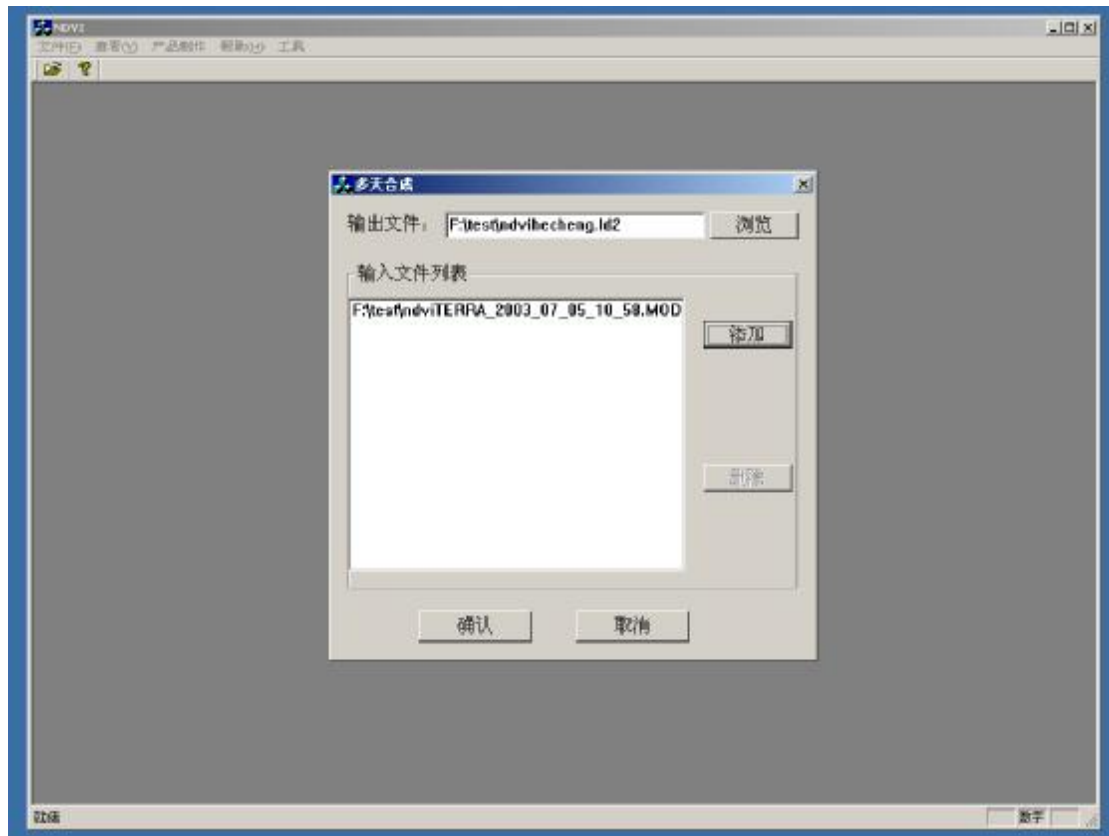
操作方法同上。

3.2 多天最大值合成



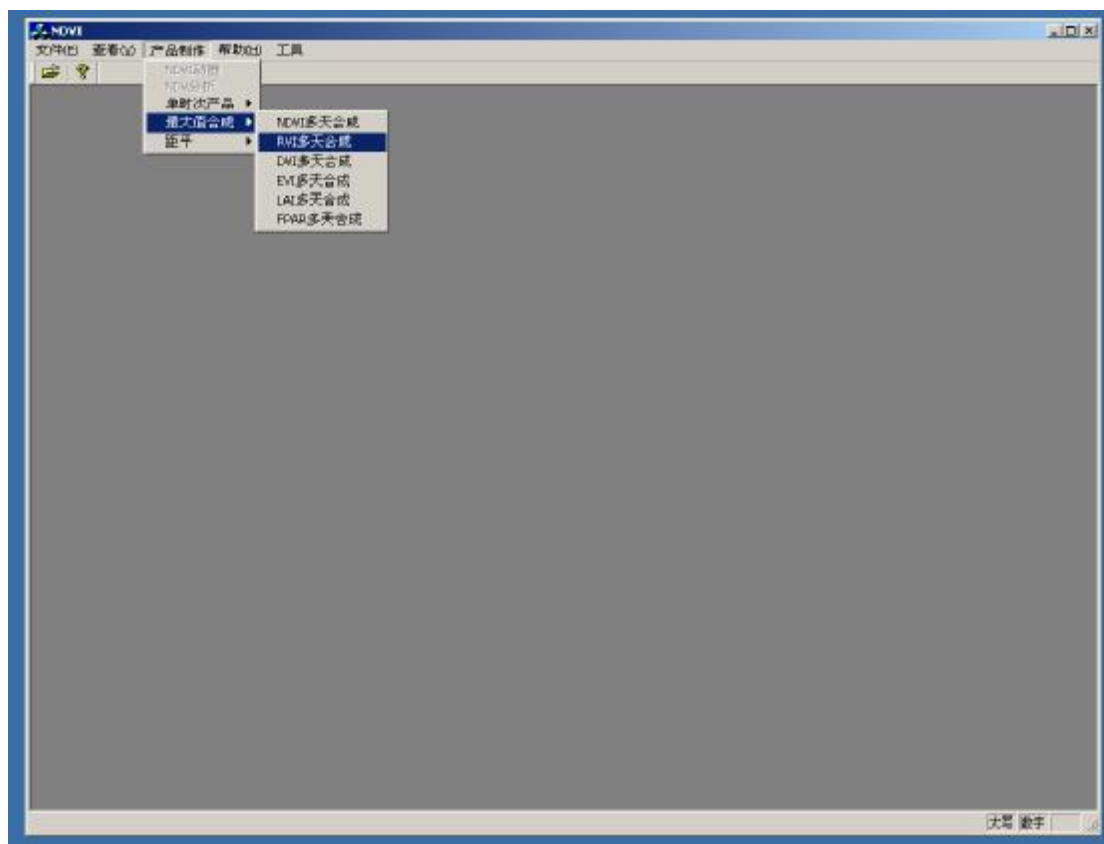
3.2.1 NDVI 多天合成





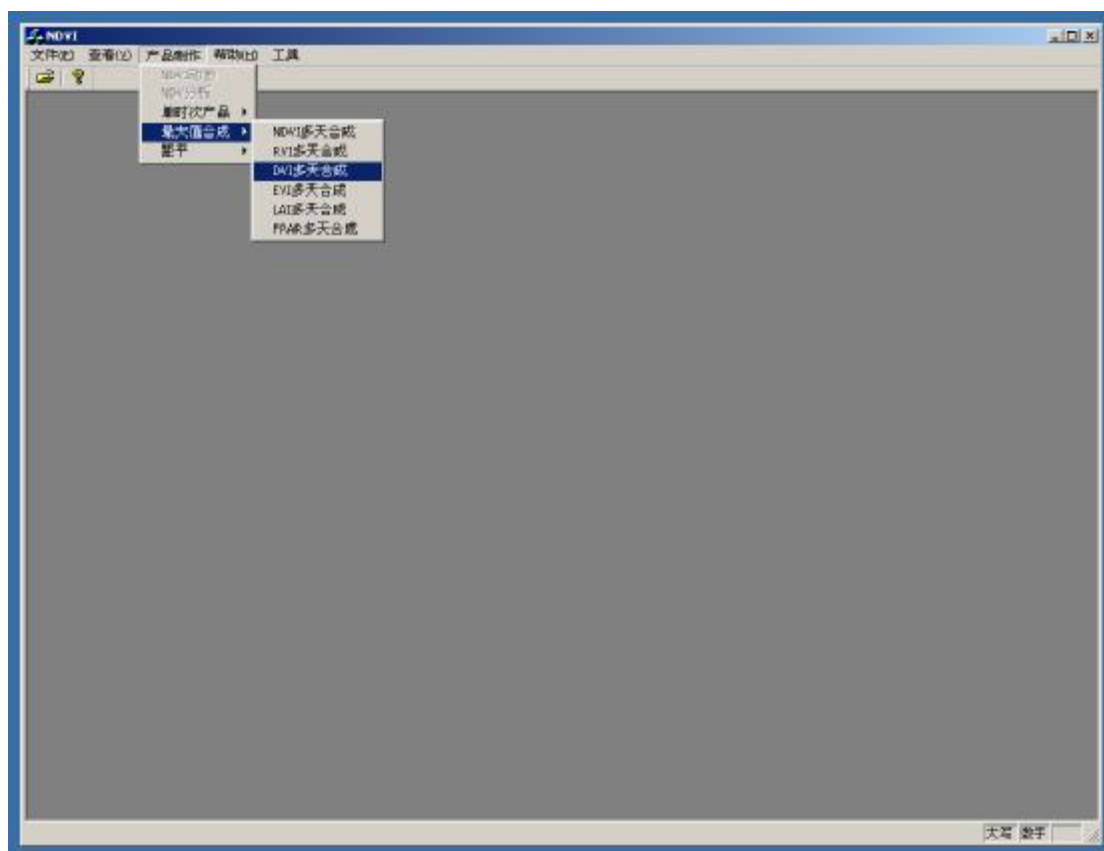
在输出文件中选择需要输出的文件和路径，在输入文件列表中添加多天的 NDVI，也可删除不需要的 NDVI 文件，然后点击确认。

3.2.2 RVI 多天合成



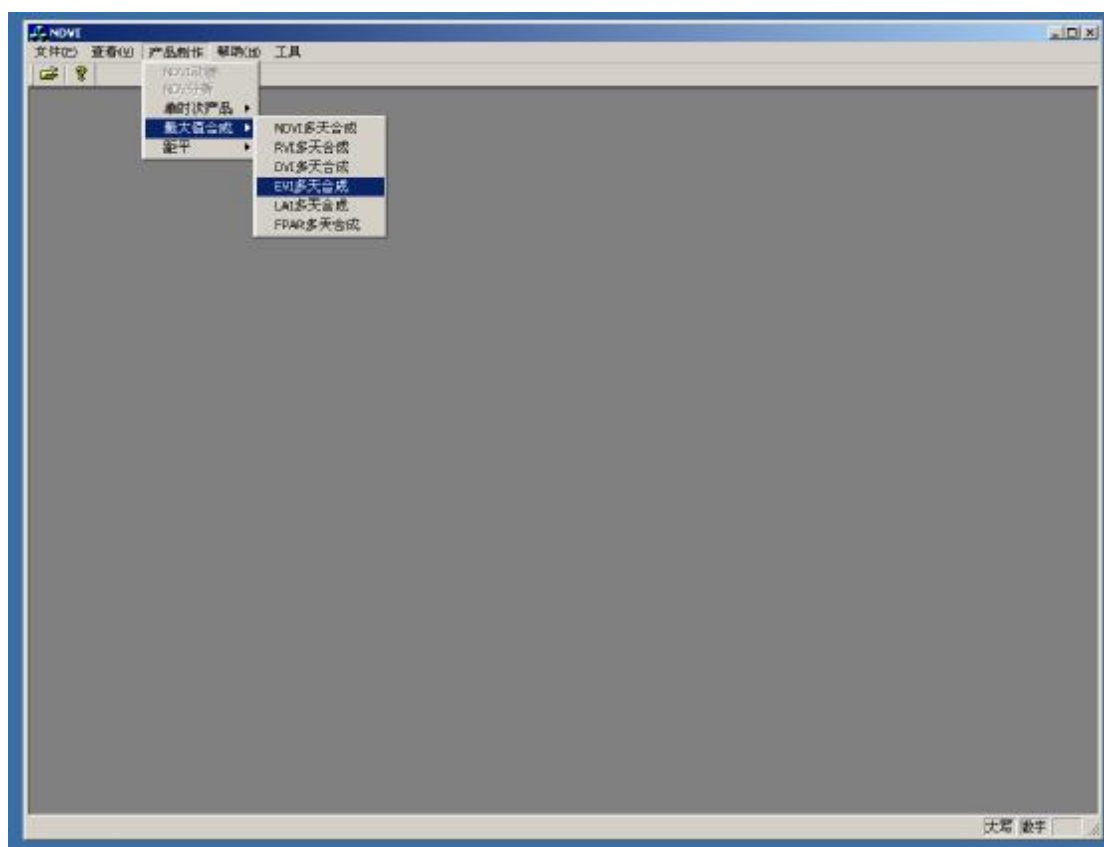
合成面板同上，在输出文件中选择需要输出的文件和路径，在输入文件列表中添加多天的 RVI，也可删除不需要的 RVI 文件，然后点击确认。

3.2.3 DVI 多天合成



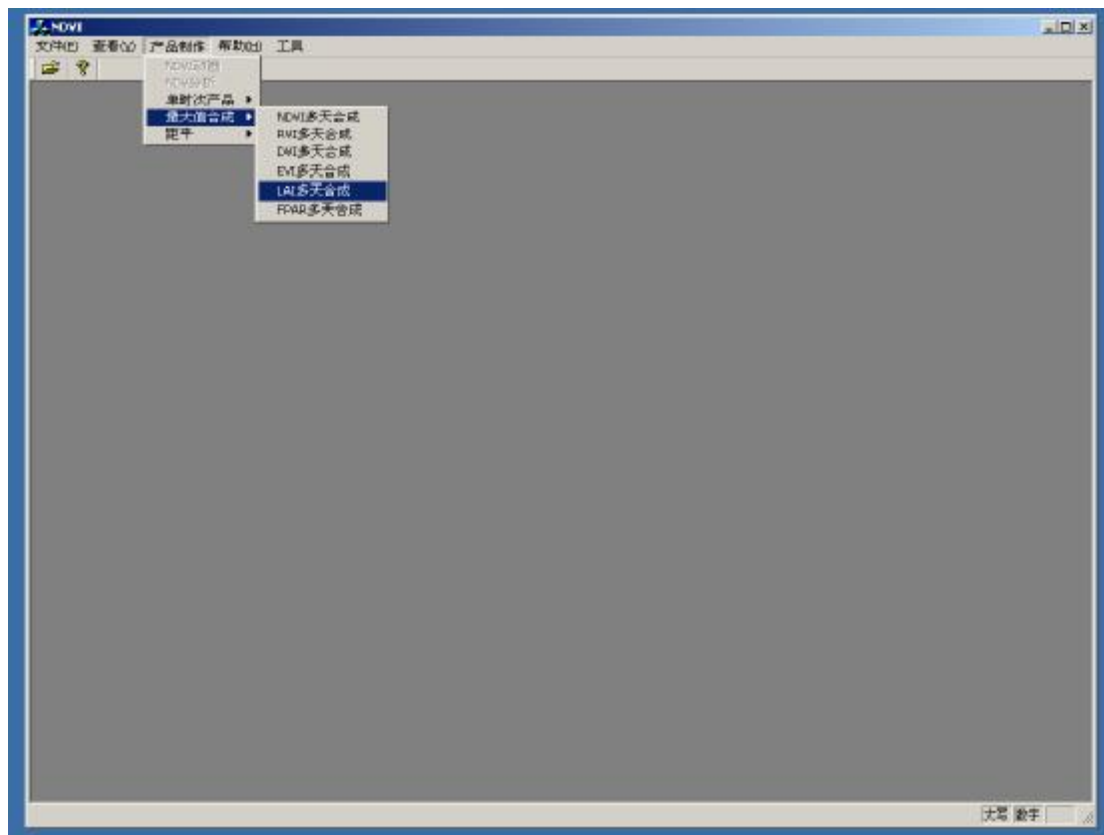
合成面板同上，在输出文件中选择需要输出的文件和路径，在输入文件列表中添加多天的DVI，也可删除不需要的DVI文件，然后点击确认。

3.2.4 EVI 多天合成



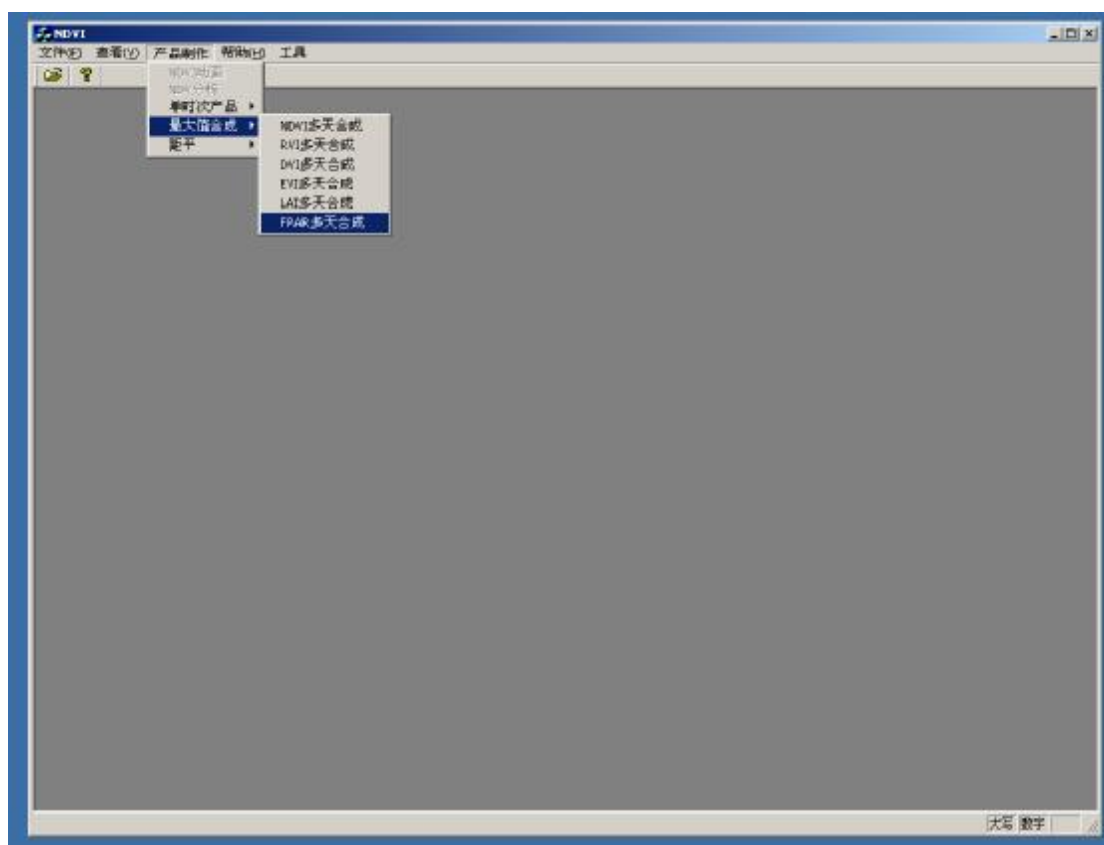
合成面板同上，在输出文件中选择需要输出的文件和路径，在输入文件列表中添加多天的EVI，也可删除不需要的EVI文件，然后点击确认。

3.2.5 LAI 多天合成



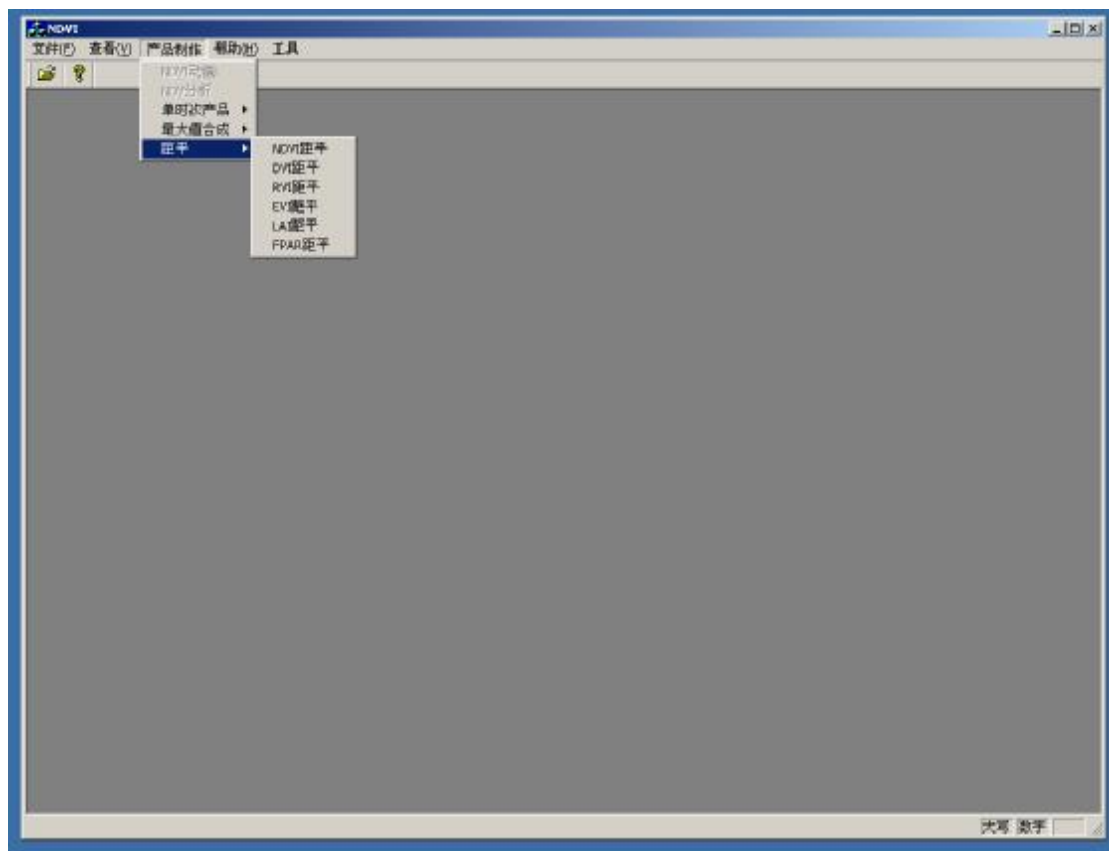
合成面板同上，在输出文件中选择需要输出的文件和路径，在输入文件列表中添加多天的 LAI，也可删除不需要的 LAI 文件，然后点击确认。

3.2.6 FPAR 多天合成

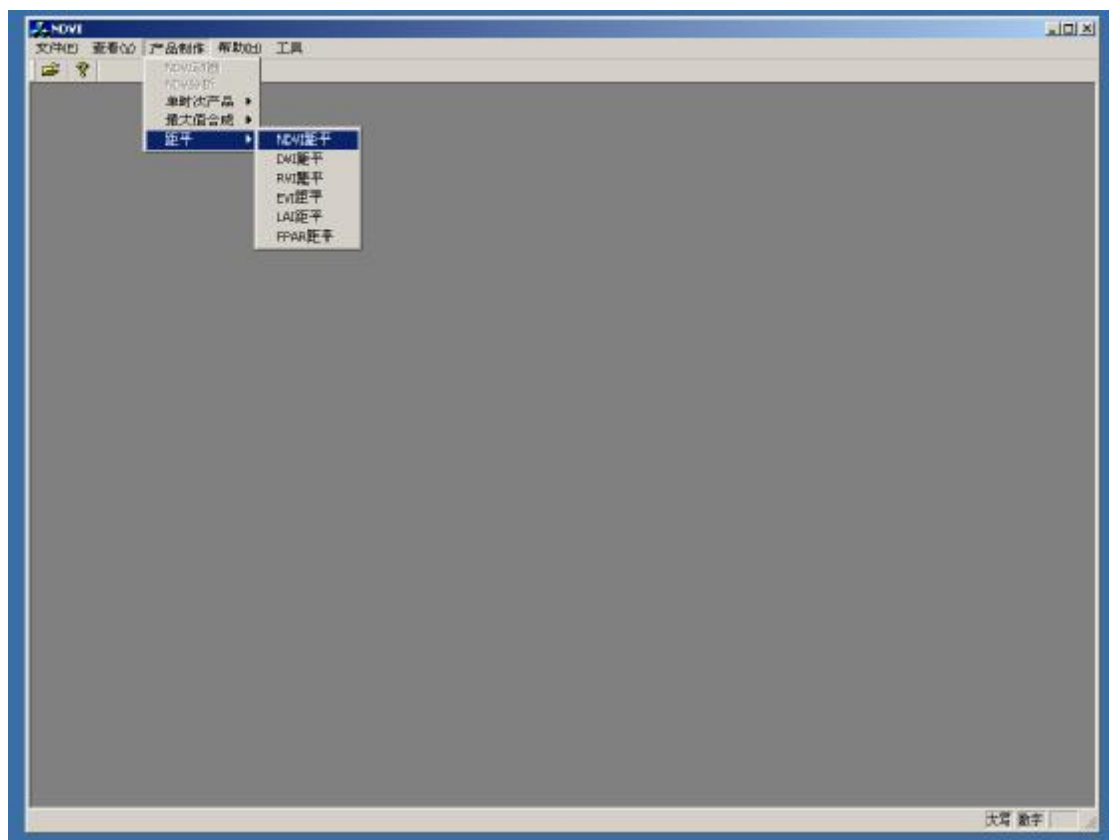


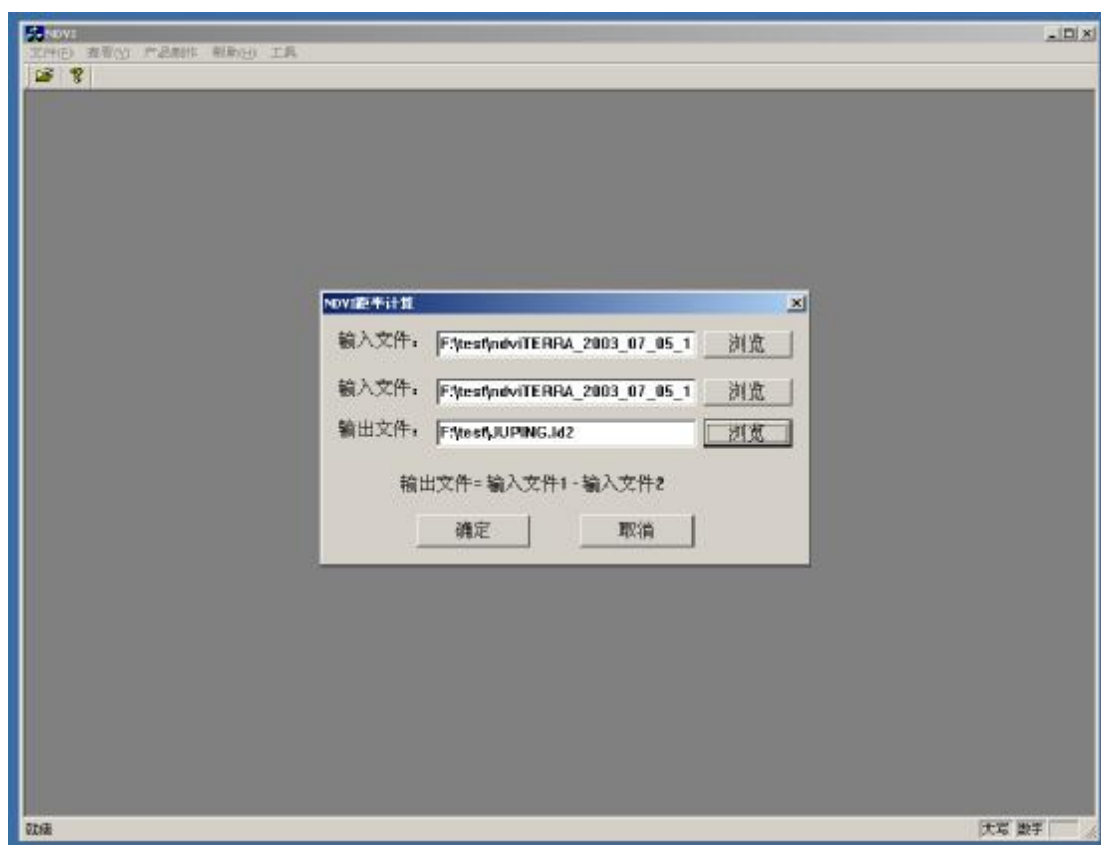
合成面板同上，在输出文件中选择需要输出的文件和路径，在输入文件列表中添加多天的 FPAR，也可删除不需要的 FPAR 文件，然后点击确认。

3.3 距平



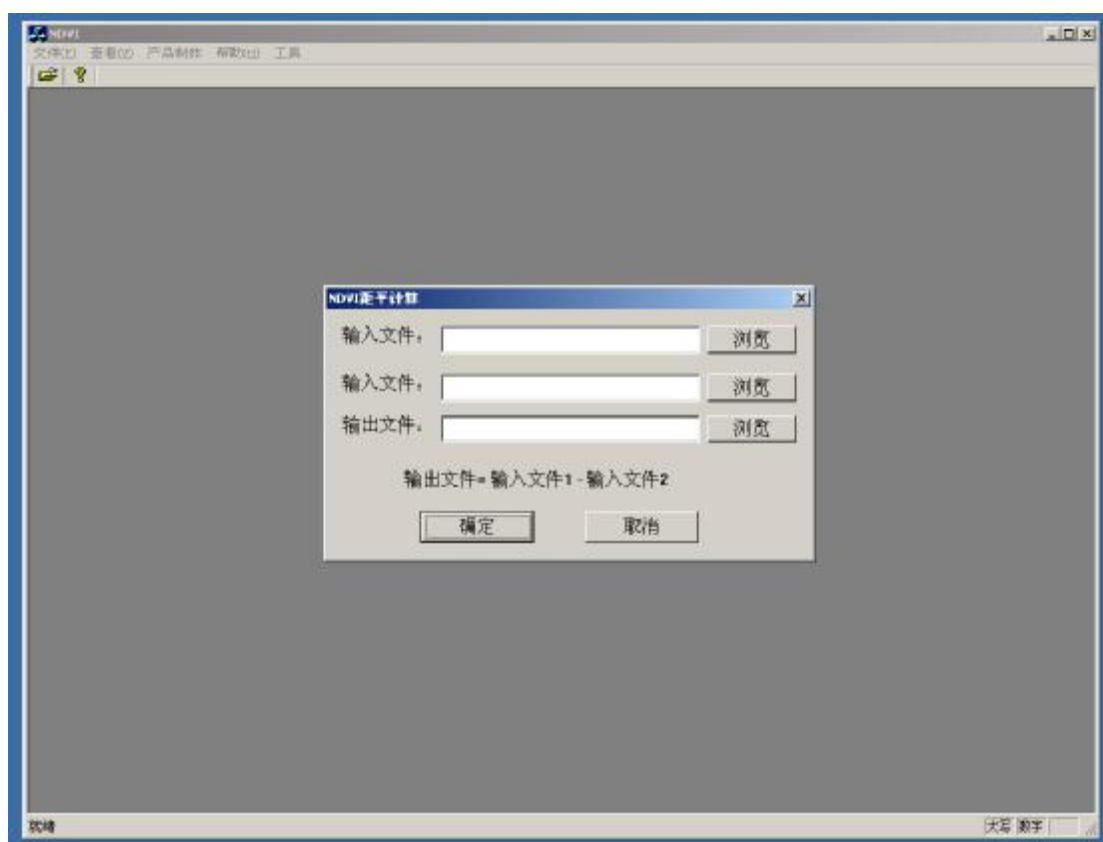
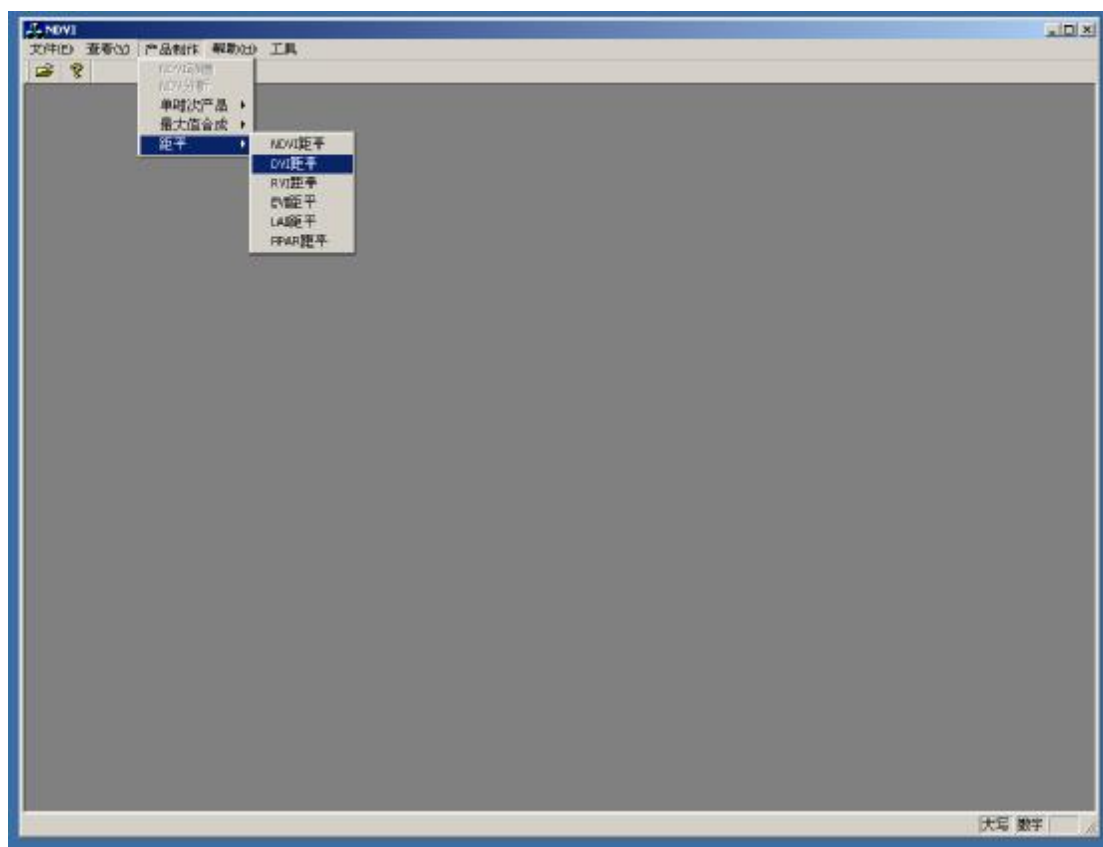
3.3.1 NDVI 距平





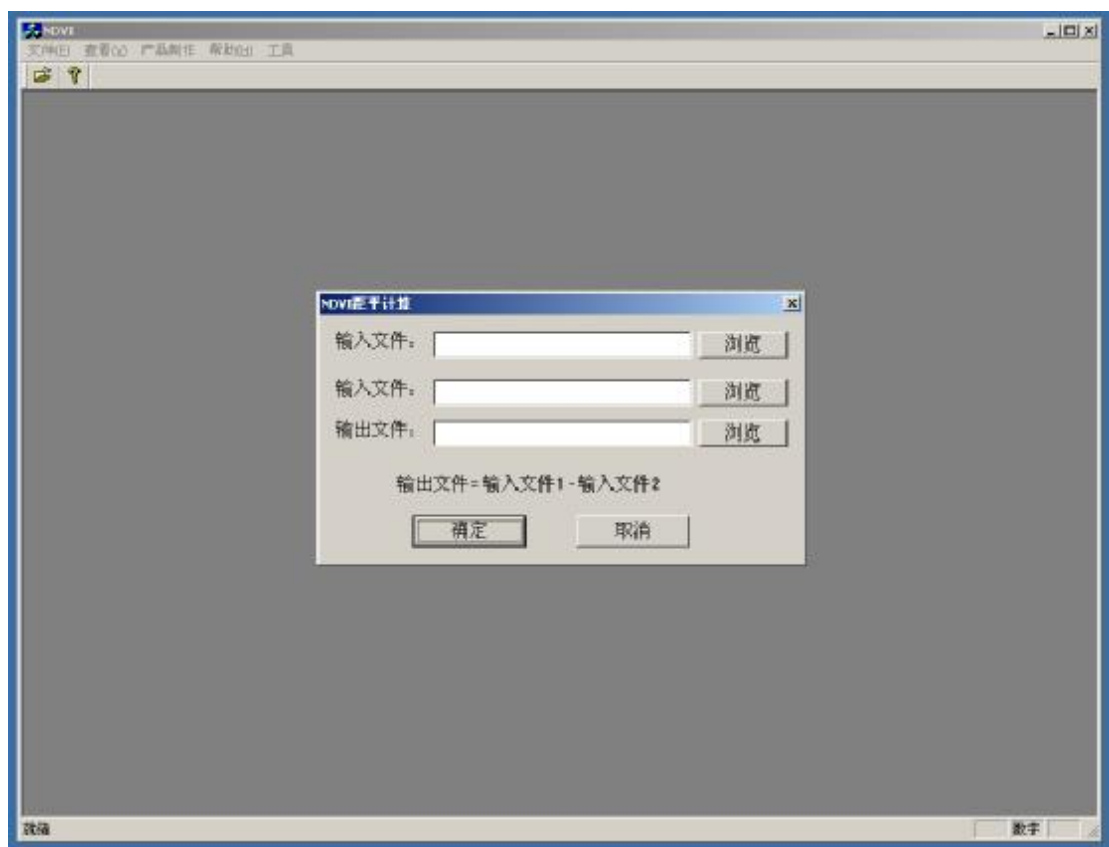
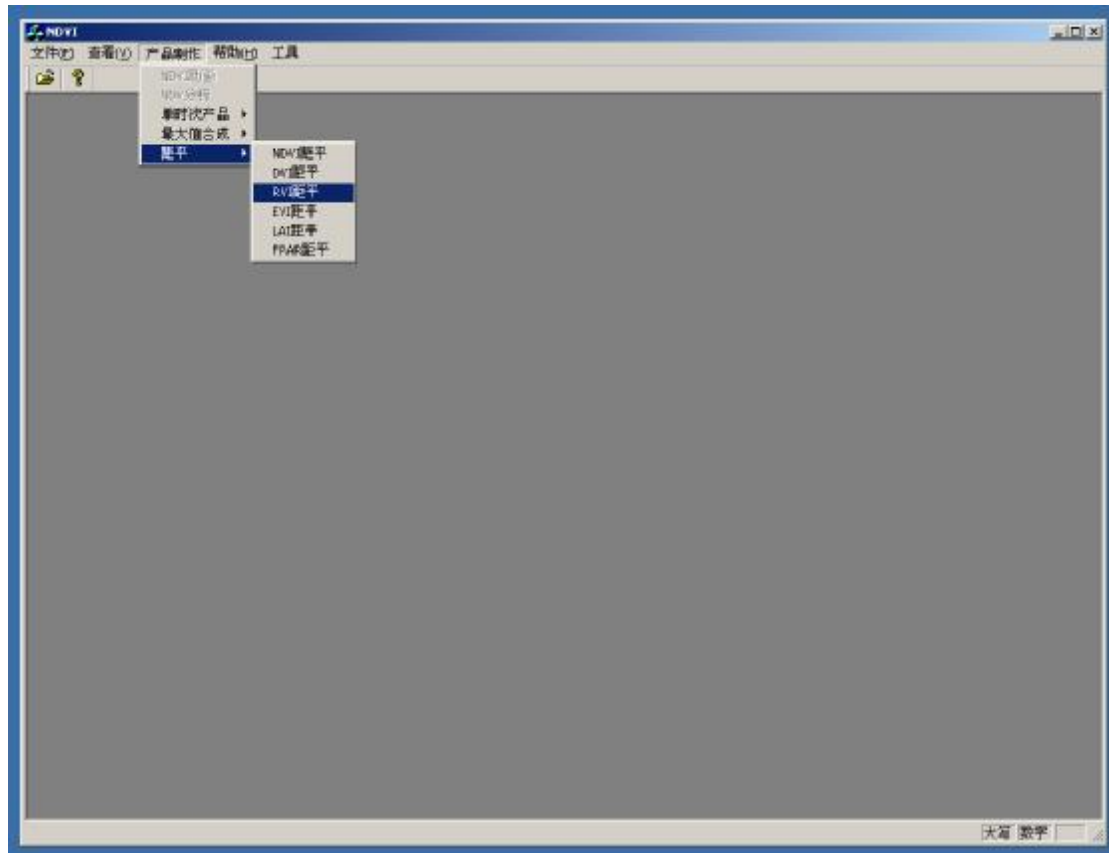
在输入文件 2 中选择平均 NDVI，在输入文件 1 中选择需要计算的距平，输出文件中选择输出的文件名和路径。输出文件=输入文件 1-输入文件 2。

3.3.2 DVI 距平



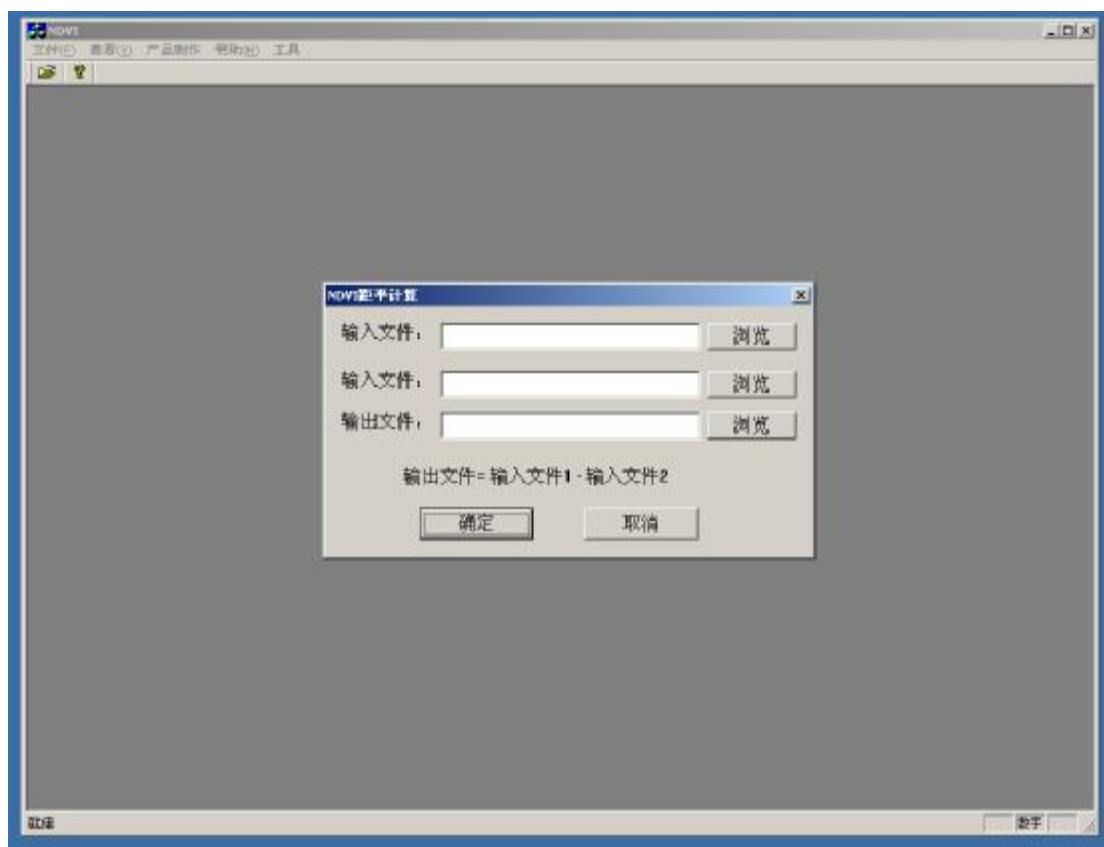
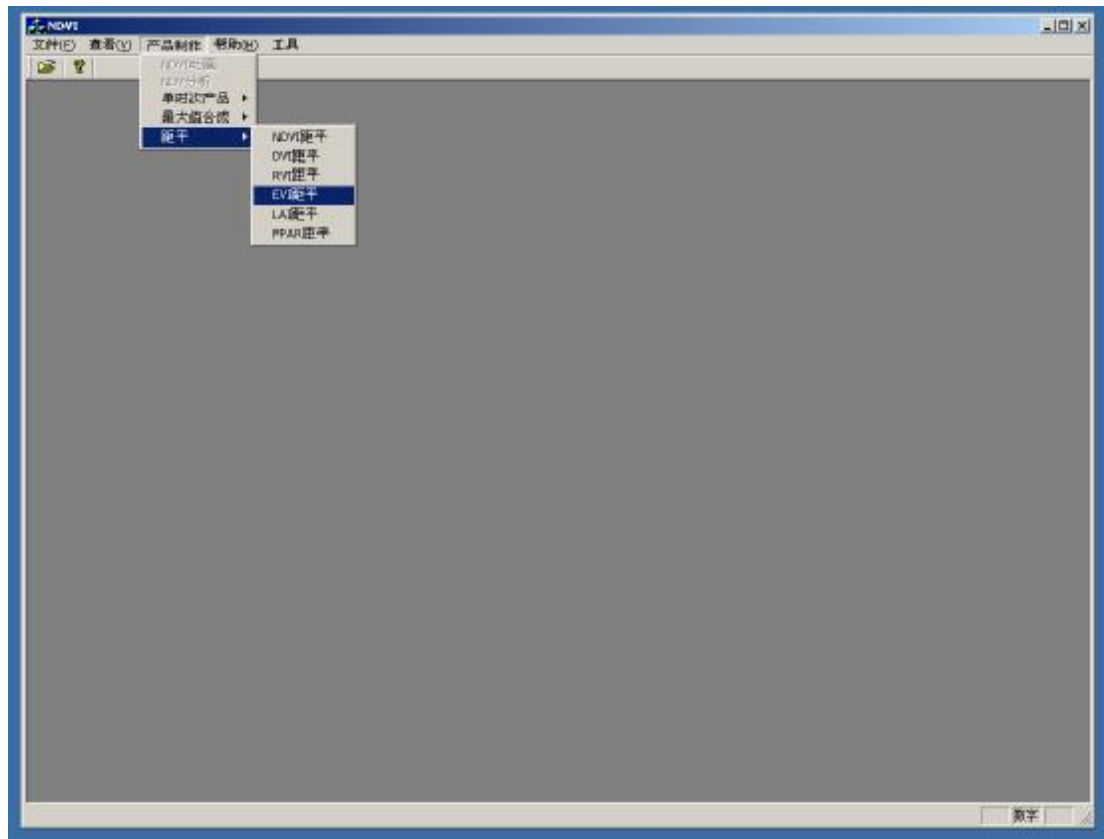
在输入文件 2 中选择平均 DVI，在输入文件 1 中选择需要计算的距平，输出文件中选择输出的文件名和路径。输出文件=输入文件 1-输入文件 2。

3.3.3 RVI 距平



在输入文件 2 中选择平均 **RVI**，在输入文件 1 中选择需要计算的距平，输出文件中选择输出的文件名和路径。输出文件=输入文件 1-输入文件 2。

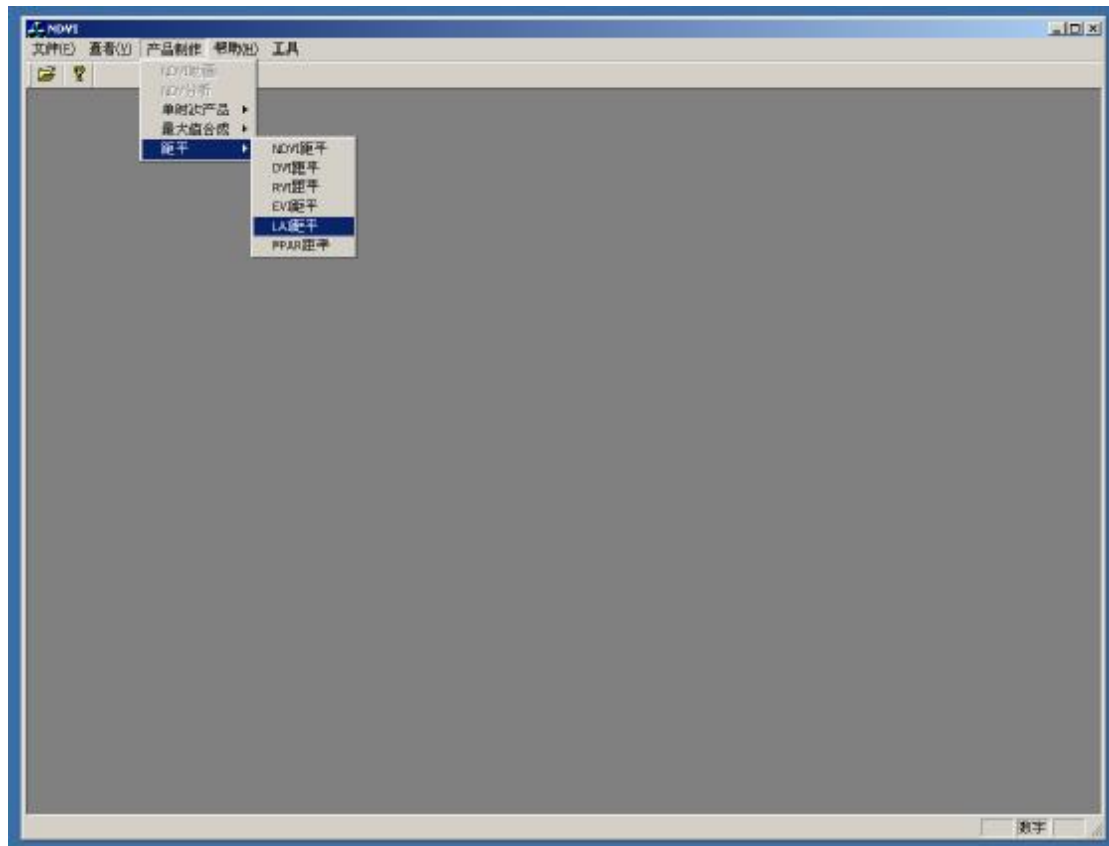
3.3.4 EVI 距平

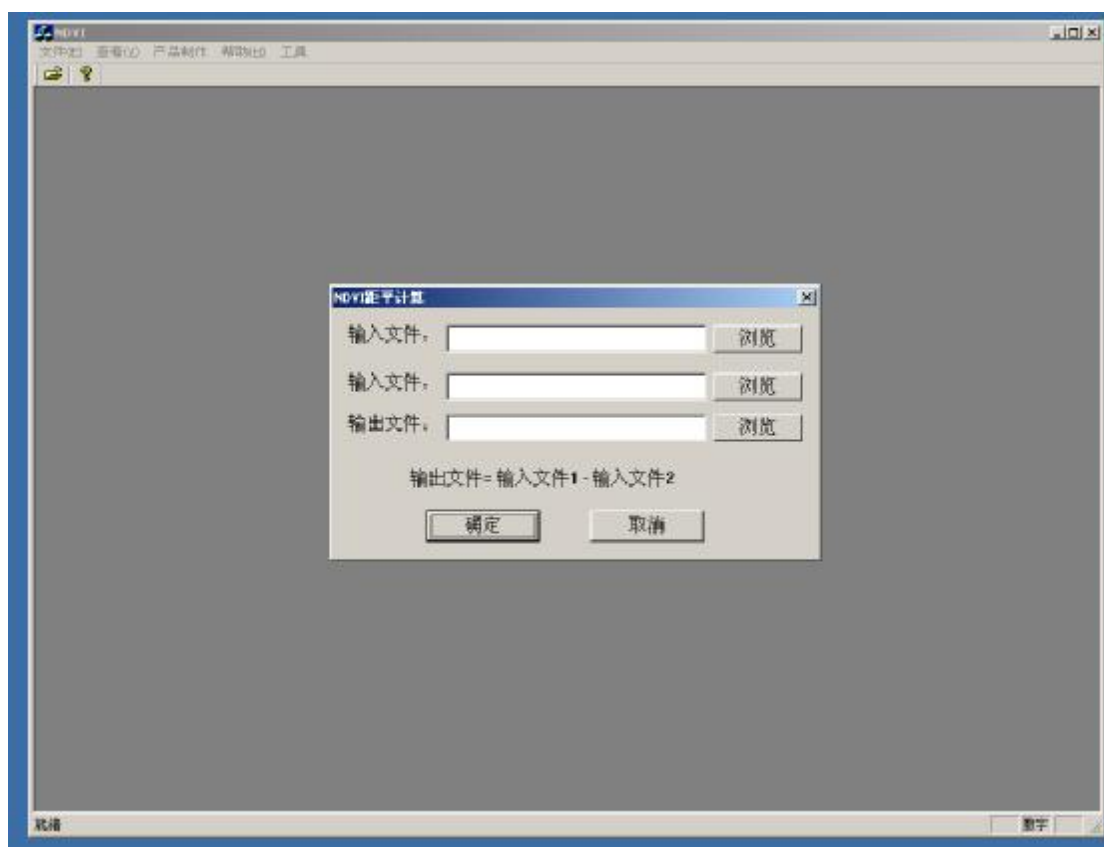


在输入文件 2 中选择平均 EVI，在输入文件 1 中选择需要计算的距平，输出文件中选择输出

的文件名和路径。输出文件=输入文件 1-输入文件 2。

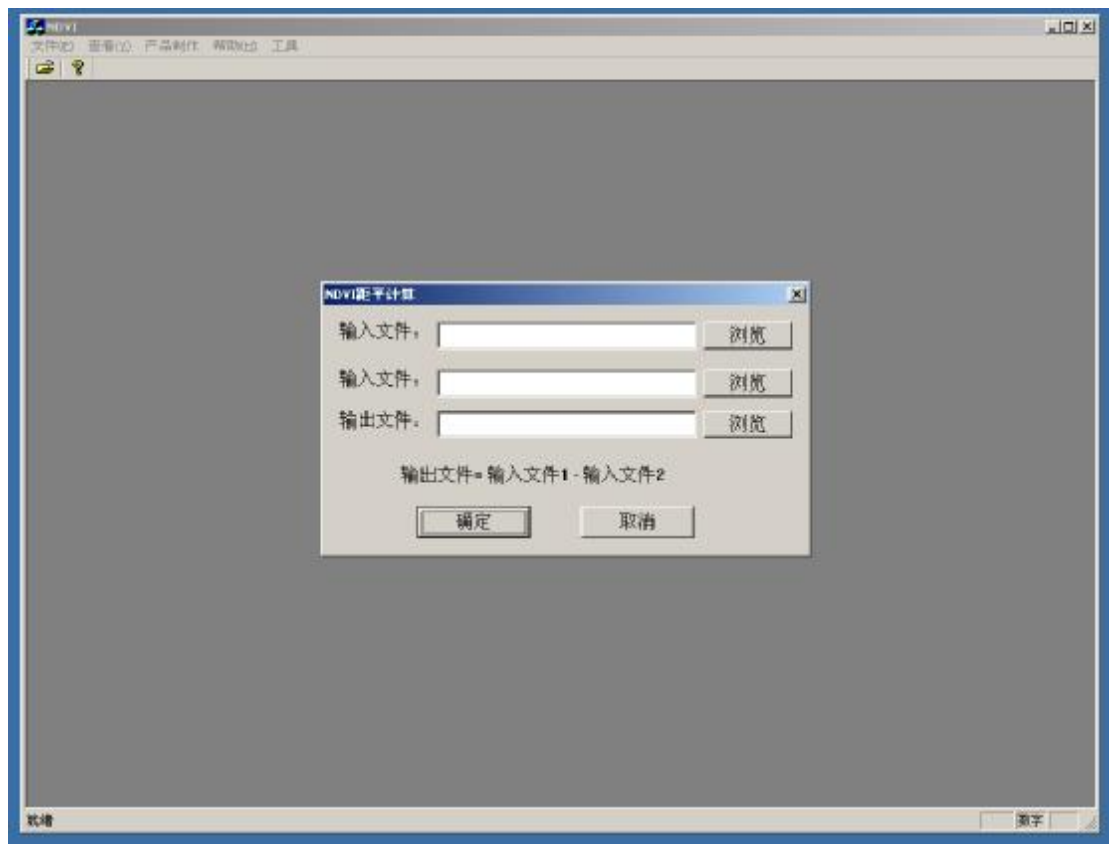
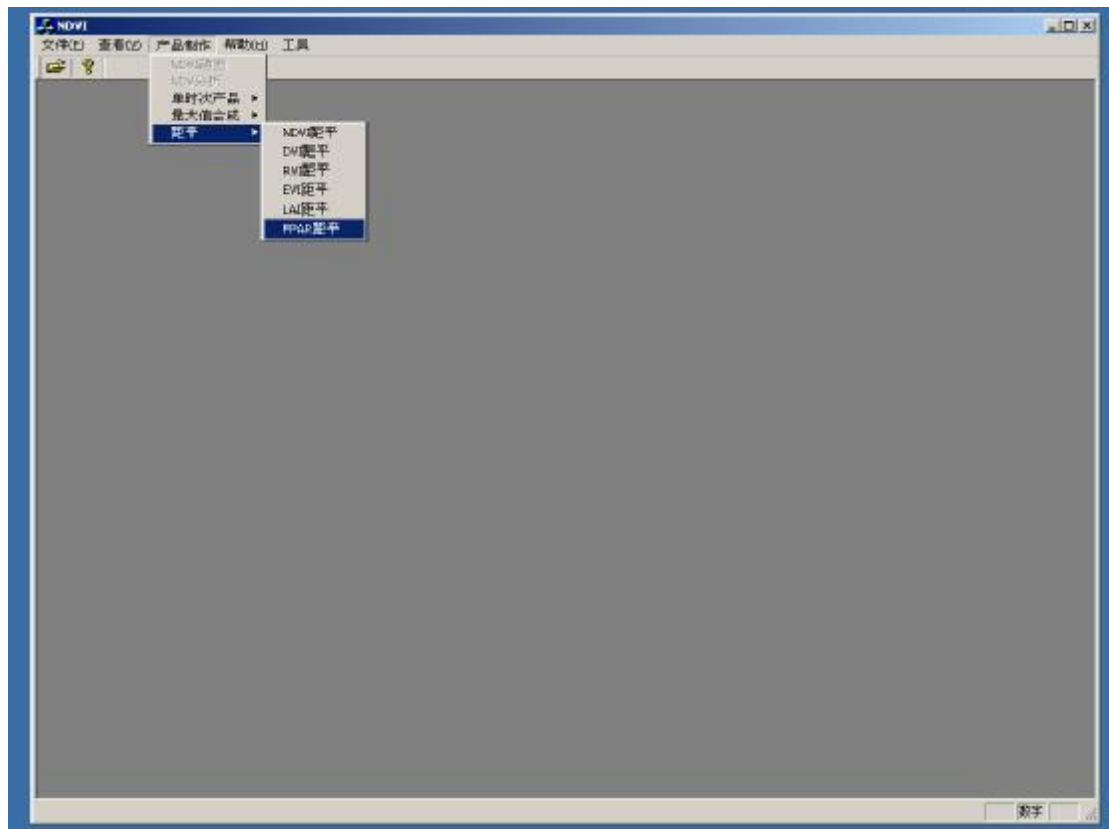
3.3.5 LAI 距平





在输入文件 2 中选择平均 LAI，在输入文件 1 中选择需要计算的距平，输出文件中选择输出的文件名和路径。输出文件=输入文件 1-输入文件 2。

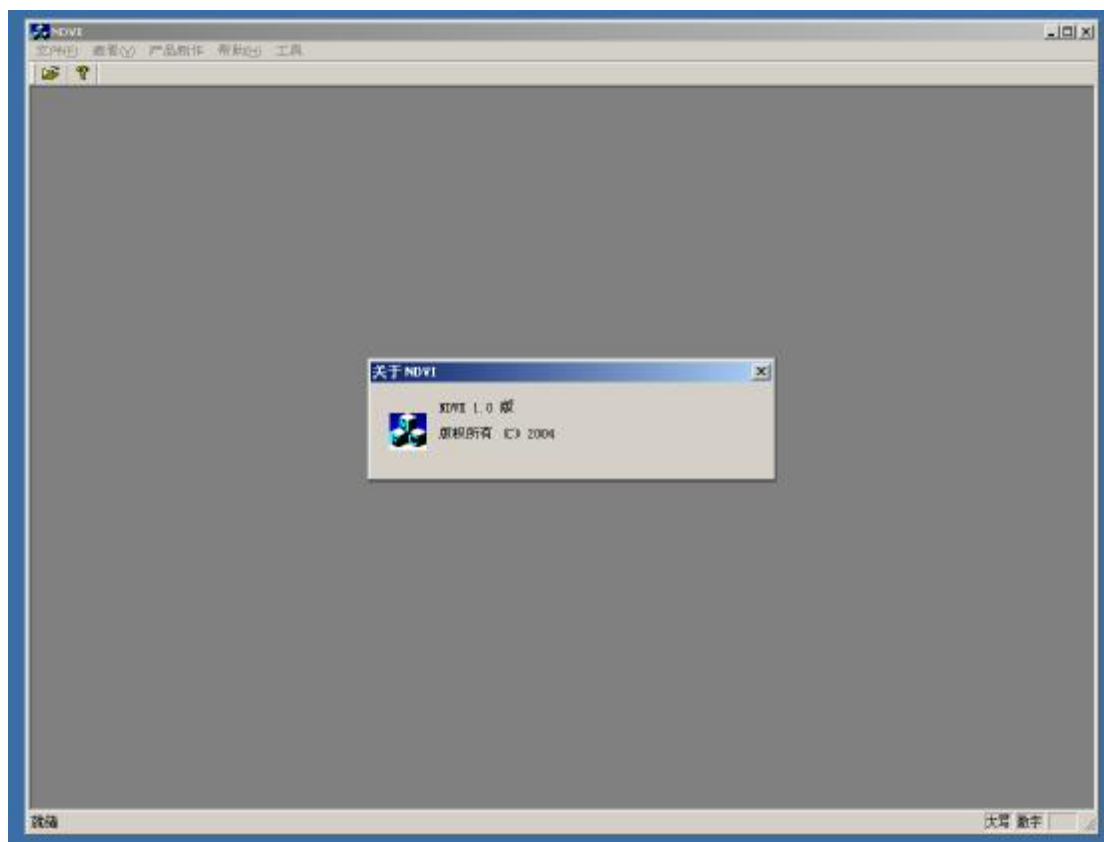
3.3.6 FPAR 距平



在输入文件 2 中选择平均 FPAR，在输入文件 1 中选择需要计算的距平，输出文件中选择输出的文件名和路径。输出文件=输入文件 1-输入文件 2。

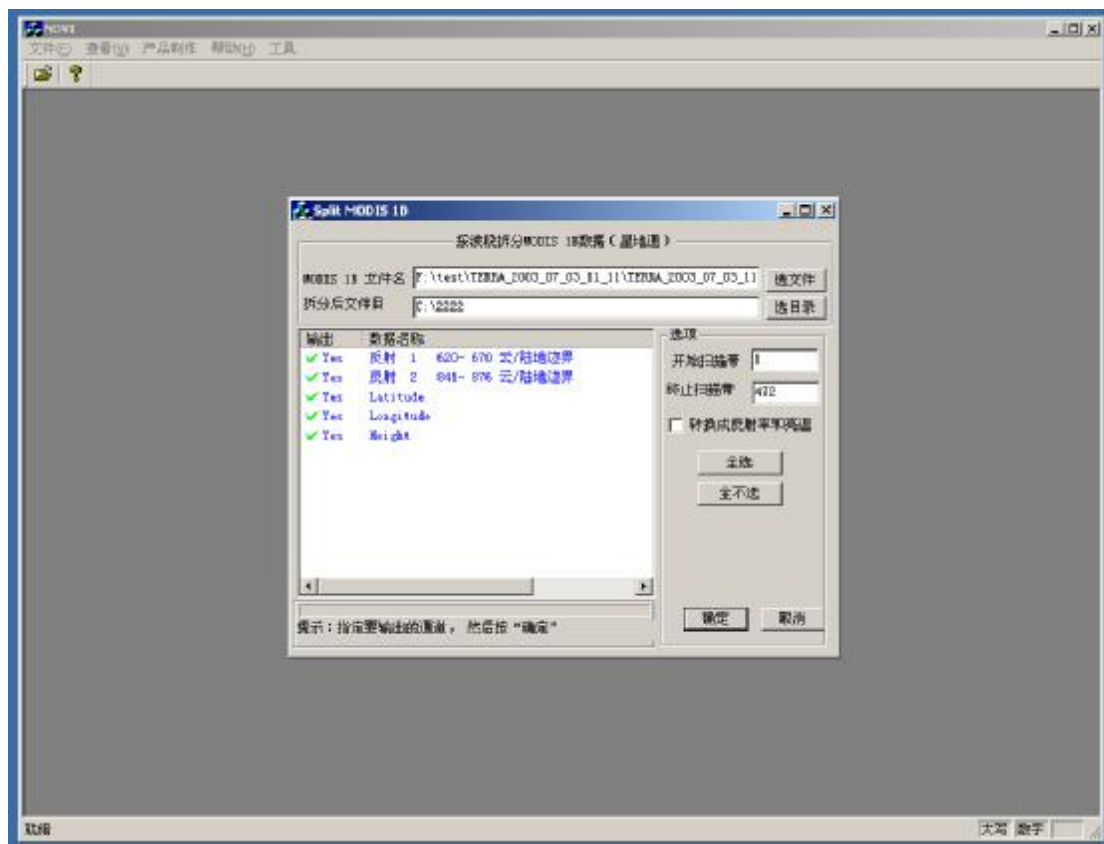
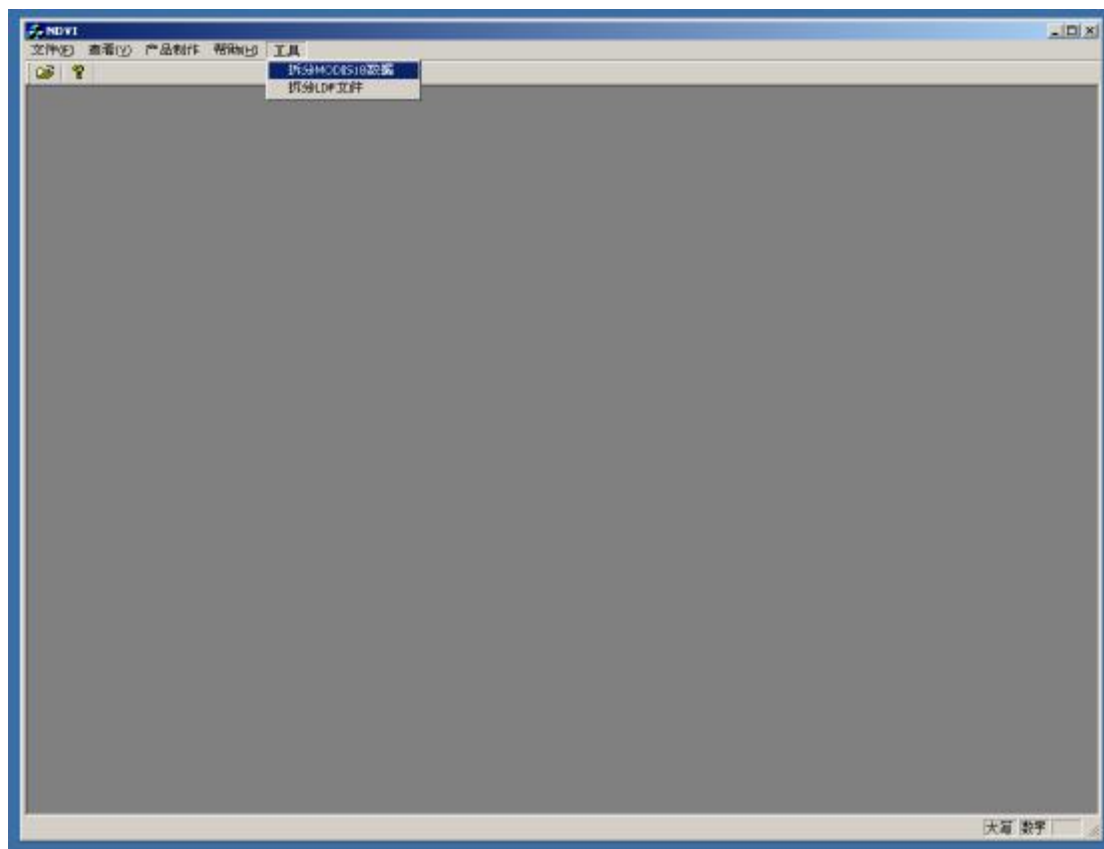
4.帮助

关于 NDVI 版权说明。



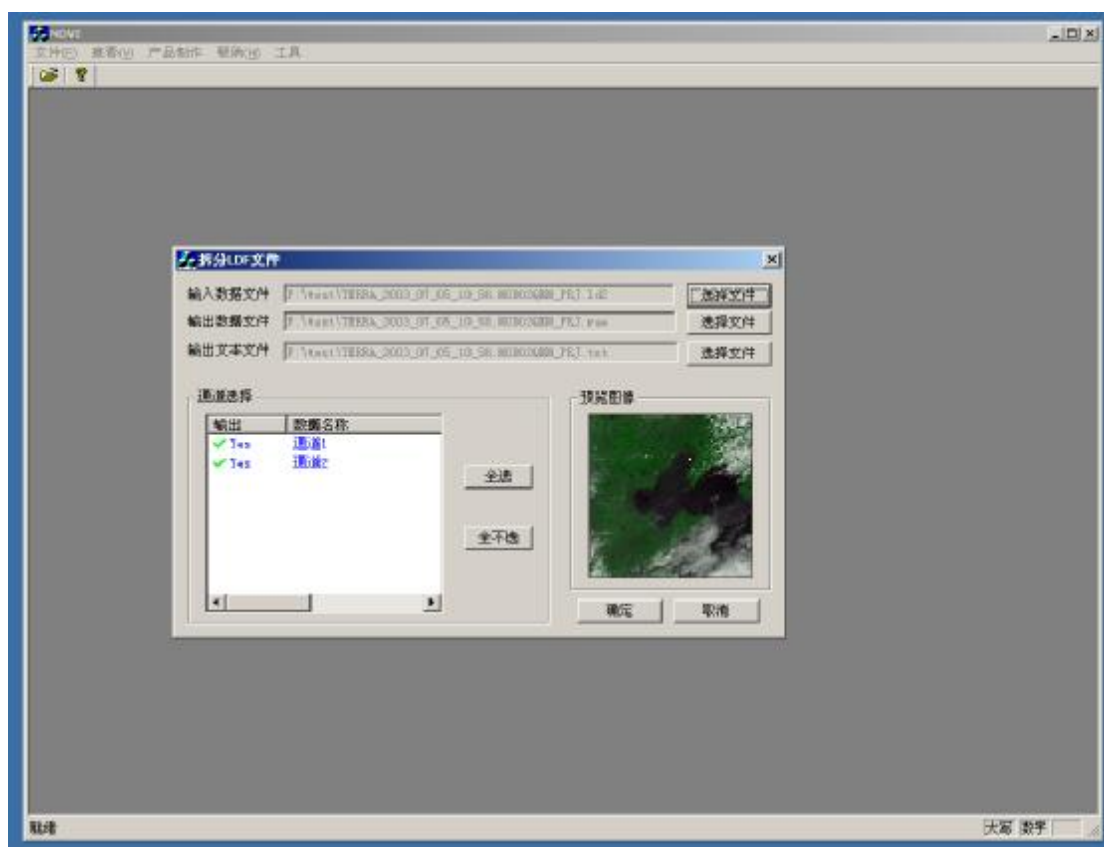
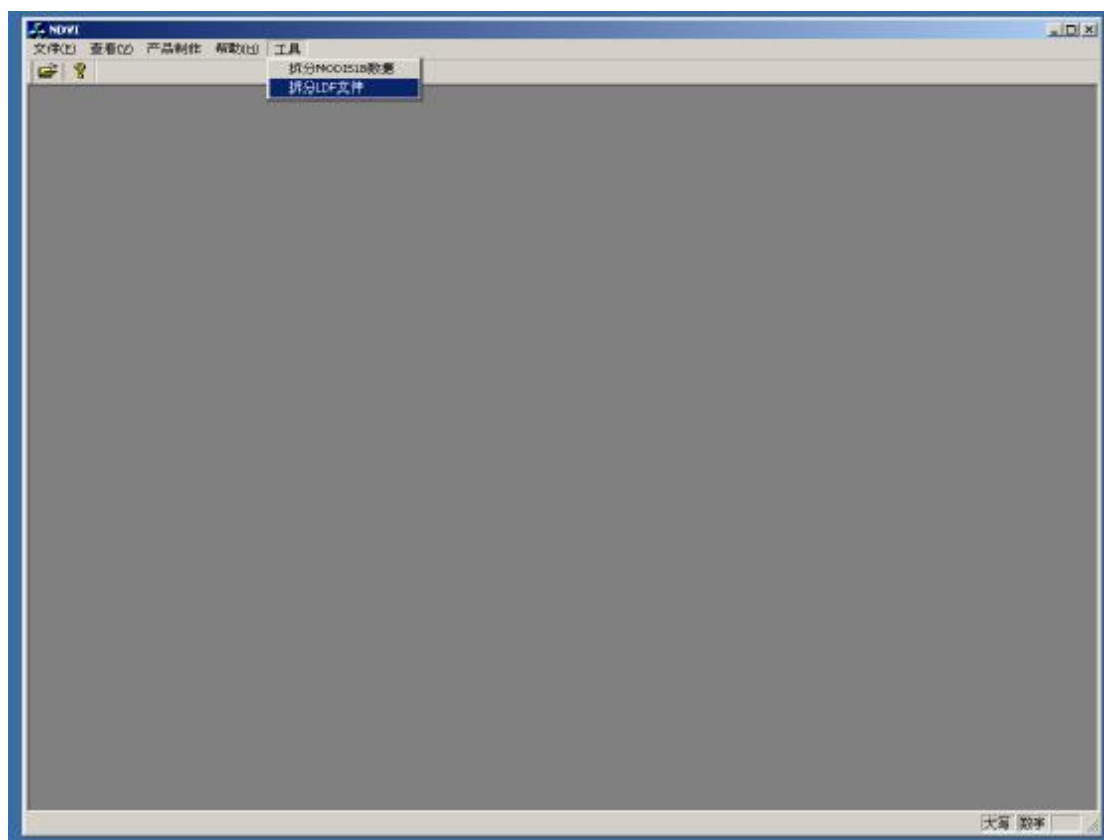
5.工具

5.1 拆分 MODIS 1B 数据



输入需要拆分的 MODIS 1B 数据可以选择不同的波段拆分，选择拆分后的数据文件路径和文件名。

5.2 拆分 LDF 文件



选择需要拆分的 LDF 文件，输出 RAW 格式的文件和相应的参数文件*.TXT。