

MODIS 沙尘暴判识方法与业务系统

郭 锐¹ 蔡迪花¹ 韩兰英² 梁 芸² 李民轩²

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020; 2. 兰州区域气候中心)

提 要: 为了利用 MODIS 资料对沙尘暴的范围和强度进行定量判识, 应用 2002—2004 年多次 MODIS 资料, 通过对沙尘暴、云、雪和沙漠光谱特征的分析, 构建了定量判识沙尘暴范围和强度的两个沙尘指数。利用 2002—2007 年数次沙尘暴过程对沙尘指数的判别效果进行检验, 表明构建的两个 MODIS 沙尘指数能够有效地监测沙尘暴的范围和强度, 且方法简单, 适用于业务应用。针对目前西北沙尘暴遥感监测业务服务以定性图像为主, 服务产品较为单一的问题, 对 MODIS 沙尘暴判识方法进行业务化, 并结合 GIS 进行沙尘暴影响范围的分析, 开发研制了自动运行的 MODIS 沙尘暴监测和影响评估业务系统。系统具生成沙尘暴 MODIS 影像图、沙尘暴范围和强度遥感监测图、沙尘暴影响土地类型图、全国各省(直辖市)沙尘面积统计表、全国不同土地类型沙尘暴影响面积统计表、甘肃省各县沙尘暴的影响面积统计表和甘肃省不同土地类型沙尘影响面积统计表等功能, 为沙尘暴定量和精细服务提供了丰富的产品。

关键词: MODIS 沙尘暴 遥感监测 沙尘指数 业务系统

Introduction to the Operational System and Identification Method of Dust Storm Based on MODIS

Guo Ni¹ Cai Dihua¹ Han Lanying² Liang Yun² Li Minxuan²

(1. Institute of Arid Meteorology of China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Changes and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climatic Changes and Reducing of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020; 2. Area Climatic Center of Lanzhou)

Abstract: Based on the analyses of the spectral characteristic of dust storm, cloud, snow and desert using the several MODIS data during the period from 2002 to 2004, two dust indices were constructed, which can determine quantitatively the scope and intensity of dust storm. The test results in several storms from 2002 to 2007 indicated that the above-built dust indices could effectively determine the scope and intensity of dust storms, and are proved to be

simple and operable. In order to solve the actual issue that the present service product of remote sensing monitoring of dust storm is mainly simple and qualitative images, a new evaluating system was developed to monitor the dust storm based on MODIS data, which can offer not only MODIS image of dust storm, but the remote sensing monitoring image of the scope and intensity of dust storm, the plot of land classifications affected by dust storm, the statistics of dust area in different province, the statistics of area affected by dust storm for different land classification in China, and the statistics of area affected by dust storm for different county and different land classification in Gansu province. The new system is able to provide various products for the monitoring of dust storm in quantitative and fine service way.

Key Words: MODIS dust storm remote sensing monitoring dust index operation system

引 言

沙尘暴是干旱半干旱地区常见的一种自然灾害,沙尘暴不仅给农业、林业、畜牧业、电力、通信、交通和人民生命财产和健康造成严重危害,而且还带来一系列诸如气溶胶气候效应等气候和环境问题^[1]。沙尘暴常发生在沙漠及其边缘地区,中国西北干旱区为世界上海沙尘暴多发区之一^[2-4]。由于沙尘暴常发生在自然条件恶劣的地区,常规观测站点极其稀少,给沙尘暴的监测和预报及研究带来困难。

卫星覆盖范围广,探测波段多,是监测沙尘暴的有效手段。利用卫星遥感监测沙尘暴已经有不少成果,在沙尘暴的监测服务中发挥了很好的作用^[5-8]。搭载在 Terra 和 Aqua 上的 MODIS 探测器,在 $0.4\sim 14\mu\text{m}$ 的电磁波谱范围内有 36 个波段,提供了较以往卫星探测器更多的信息,为更有效地监测沙尘暴提供了丰富的信息源。

本文通过对多次沙尘暴过程 MODIS 光谱特征的研究分析,确定了定量监测沙尘暴的方法,设计了定量判识沙尘暴范围和强度的沙尘指数,经过 2002—2007 年多次沙尘暴过程的验证,表明本方法能有效地对沙尘暴进行监测且方法简捷实用,适用于沙尘暴业

务。根据西北沙尘暴遥感业务服务的需要,开发研制了自动运行的 MODIS 沙尘暴监测业务系统和基于 RS 和 GIS 沙尘暴影响评估业务系统,并在兰州区域气候中心遥感业务中进行试运行,效果良好。

1 资料来源及处理方法

MODIS 资料来源于中国气象局兰州干旱气象研究所 EOS/MODIS 卫星资料接收系统接收的 2002—2008 年多次沙尘过程 Terra 或 Aqua MODIS 资料,经过地理定位和辐射校正,并将 MODIS 各波段探测值转换为反射率或亮温。

2 沙尘指数的构建

沙尘暴发生时,大量的沙尘粒子飘浮在空中形成沙尘云,沙尘粒子一方面反射、散射和吸收来自太阳的辐射,同时也阻挡沙尘下方下垫面的长波辐射,并向外射出长波辐射,使卫星传感器的探测值发生变化。通过对多次沙尘暴过程 MODIS 光谱特征分析,确定对沙尘敏感的波段,对几个敏感波段进行组合,构建定量监测沙尘暴的沙尘指数,对沙尘暴范围和强度进行定量监测。

2.1 沙尘暴光谱特征分析

为了了解沙尘暴与云以及其他不同下垫面光谱特征的特点,从多次沙尘暴过程中选取不同强度沙尘区、云、雪盖、沙漠、戈壁以及盐碱地为研究样区,提取出各样区的 MODIS 通道值,进行分析。

2.1.1 沙尘暴的反射特征

通过对不同样本区反射光波段光谱特征的分析,发现不同强度的沙尘区、沙漠、戈壁光谱曲线有一致性,均随着波长的增加而增大,但在各波段表现不同。沙尘暴区在 $0.469\mu\text{m}$ 的蓝光波段(通道 3)反射率较扬沙或浮尘低约 0.15,随着波长的增加反射率迅速上升,在近红外波段与扬沙或浮尘区接近,通道 6($1.64\mu\text{m}$)达最大约 0.47 通道略有下降。扬沙与浮尘特征很相似,在蓝光波段反射率约 0.23,较沙尘暴区高,随着波长的增加反射率缓慢上升,也在 6 通道达最大,约 0.34。沙漠、戈壁、盐碱地反射率也随波长增加,沙漠、戈壁反射率低于沙尘区,盐碱地高于沙尘区。

云和积雪反射率在可见光和近红外波段较高,在短波红外区直线下降,7 通道达最低。

根据以上分析,设计了利用 MODIS 反射波段判别沙尘暴的沙尘指数 $NDSI$

$$NDSI = (B7 - B3) / (B7 + B3) \quad (1)$$

式(1)中, $B3$ 、 $B7$ 分别为通道 3 和 7 的反射率。

分析发现在近红外波段(通道 2)中,沙尘与其他样本差异最大,是区分沙尘的最佳波段,以此选通道 2 为另一判别指标。

经过分析发现, $NDSI$ 能够很好地将沙尘和云、雪区分开来,对沙尘浓度大的地方判别得较好,但对扬沙和浮尘区会与沙漠等高反射率地表混淆,发生误判。如以 $NDSI$ 和通道 2 为判别指标,在沙漠等高反射率地表

和较弱沙尘的判别上会产生误差。

2.1.2 沙尘暴的辐射特征

沙尘暴发生时,气流把大量的沙尘粒子带到大气中,形成沙尘云。沙尘粒子一方面反射、散射太阳短波辐射,另一方面阻挡并吸收地球长波辐射。在短波红外波段,既包含太阳短波辐射,又有地气系统热辐射,沙尘产生的辐射效应包含反射、散射和热辐射三部分。

根据范红等研究结果^[9],沙尘的散射能力与沙尘粒径有很大关系,沙尘粒径越大所产生的散射越强。直径为 $1.5\mu\text{m}$ 的沙尘粒子在波长为 $0.7\mu\text{m}$ 和 $3.9\mu\text{m}$ 的散射效率因子分别为 2.3125 和 0.395;当直径增加到 $2.5\mu\text{m}$ 时,粒子在这两个波段散射效率可达 2.7988 和 1.7984,比直径为 $1.5\mu\text{m}$ 的沙粒增加了 1.21 和 4.55 倍。而且,当散射效率因子大于 1 时,被粒子扰动的那块入射波波阵面面积要大于粒子本身的几何截面,粒子可以扰动它所占有截面以外的电磁波并把它散射出去。这表明在短波红外波段,随着沙尘粒子的增大,沙尘散射的能量成倍增加。短波红外波段为沙尘的敏感波段,是探测沙尘暴的较好波段。郭铎^[8]等利用 AVHRR 资料研究监测沙尘暴的方法时发现,沙尘在 $3.7\mu\text{m}$ 上亮度温度异常偏高,并用其作为监测沙尘暴的指标,取得了较好得效果。

从 MODIS 红外波段亮度温度变化曲线发现 3.75 、 8.55 、 11 和 $12\mu\text{m}$ 波段处沙尘与其他样本区差别较大。通过分析发现 $8.55\mu\text{m}$ 包含较多沙尘信息,提出另一个沙尘指数 DSI

$$DSI = (B20 - B29) \quad (2)$$

式(2)中, $B20$ 、 $B29$ 分别为 MODIS 通道 20 和通道 29 的亮温,单位:K。

详细的判别方法可以参阅文献^[10],在此仅对对沙尘指数的构建做简单介绍。

3 个例验证

将 *NDSI*、*DSI* 这两个沙尘指数在 2002—2007 年多次沙尘过程进行验证,表明利用这两个指数能将沙尘判识出来。*DSI* 不仅可以区分沙尘暴,其数值大小还可以反映沙尘强度。

以 2004 年 3 月 27 日沙尘暴个例为例。2004 年 3 月 27 日,受蒙古气旋南侧偏西大风影响,蒙古国东南部和内蒙古中部地区出现了大范围的沙尘暴,同时甘肃省河西走廊和青海柴达木盆地也出现了沙尘天气。图 1a(见彩页)是 11:36(北京时)TERRA/MODIS 真彩色合成图(R、G、B:1、4、3),可以看到中国内蒙古中部与蒙古国交界处有一大片东北-西南走向的沙尘区,这片沙尘区的西面还有一些小范围的沙尘带;甘肃河西走廊和柴达木盆地也有较大范围的沙尘区存在。可以看到东部沙尘区与西部和南部沙尘颜色上有较大的差异,表明东部为沙尘暴,西部和南部为浮尘或扬尘天气。

分别取 $NDSI > 0$ 和 $DSI > 33$ 为判别阈值,对 2004 年 3 月 27 日 Terra/MODIS 资料进行沙尘定量判别,并根据 *DSI* 大小对沙尘强度进行划分,结果见图 1b(见彩页)。将两图对比,可以看到沙尘暴的范围和强度与 MODIS 真彩色合成图目视结果一致,与气象站沙尘暴监测记录对比,除云覆盖下沙尘卫星无法判识外,其他地区判别结果令人满意。

4 沙尘暴监测业务系统

4.1 业务系统设计思路

目前西北沙尘暴遥感监测业务服务中的主要问题有:1)沙尘暴遥感监测服务以卫星三通道真(假)彩色影像图定性的产品为主,对沙尘区域的识别需要遥感监测的专业人员

在沙尘区做一定的标识,以供非专业人员阅读,影像中沙尘区不直观。2)产品仅停留“看图说话”阶段,对沙尘暴的范围和强度没有做定量分析,服务产品单一。3)沙尘暴遥感监测影响评估工作没有开展,对沙尘暴的影响面积以及受沙尘影响的土地状况没有做监测和分析。

鉴于以上不足,我们将上述 MODIS 沙尘暴监测方法业务化,并结合全国行政边界和土地利用数字地图进行沙尘暴影响面积、影响范围的评估,设计流程如图 2。

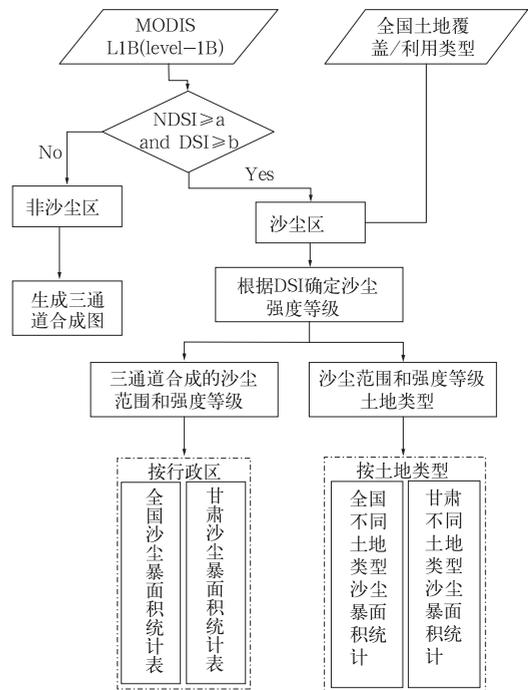


图 2 MODIS 沙尘暴遥感监测与影像评估流程图

4.2 系统的主要功能

MODIS 沙尘暴业务系统主要功能如下:

- (1) 资料处理:对(level-0)进行检验和解码,形成 L1A(level-1A) HDF 格式的文件,计算 1000 米分辨率各像素点的地理定位,将 MODIS 原始数据转换为反照率(反射通道)或辐射值(发射通道)并对资料进行有

关校正。

(2) 显示功能:显示单通道图和三通道真(假)彩色合成图。

(3) 沙尘暴监测:a. 沙尘指数参数的设置:选择沙尘指数 *NDSI* 和 *DSI* 的阈值、沙尘等级的阈值和显示颜色。b. 沙尘显示的方式:具有两种沙尘暴显示方式,一种将判识的不同强度沙尘暴叠加在 MODIS 真(假)彩色合成图像上;一种是将判识的沙尘暴叠加在全国土地利用图上。c. 选择 1000、500 或 250 米分辨率,选择投影方式。d. 沙尘面积统计:具有生成全国各省(直辖市)沙尘面积统计表、全国不同土地类型沙尘暴影响面积统计表、甘肃省各县沙尘暴的影响面积统计表和甘肃省不同土地类型沙尘影响面积统计表的功能,统计表能够以 .html、excel 和 txt 格式三种格式输出。

(4) 其他功能:系统还具有用户定义的算术运算、边界编辑与叠加、以图像或数据文件存储图像等多种功能,以及漫游、放大和缩小、调色板、挖图等基本图像编辑功能,在此不详细介绍。

5 应用实例

以 2006 年 4 月 10 日西北中东部发生的沙尘过程为例。2006 年 4 月 10 日西北中东部发生较大范围沙尘过程,图 3(见彩页)为

2006 年 4 月 10 日 12 时 28 分 Terra MODIS 真彩色合成图(R. G. B/1. 4. 3)。可以看到甘肃河西走廊、内蒙古西部和宁夏大部分地区被沙尘覆盖,新疆东部在云的间隙中也有沙尘存在。在这张沙尘暴遥感监测图上,如果没有专业人员介绍,其他人员不容易看出沙尘区。

在业务系统中选择 *NDSI* 和 *DSI* 的阈值,再根据 *DSI* 的大小确定沙尘强度等级,本文中分四级,即可输出沙尘暴范围和强度叠加在 Terra MODIS 真彩色合成图上的沙尘暴范围与强度图(图 4,见彩页)。图中可以直观地给出沙尘暴的发生范围和沙尘暴强弱的区域,适合为非专业人员和公众服务。图 5(见彩页)是沙尘暴范围和强度与土地利用叠加图,从中可以看到沙尘发生的区域。

利用系统中的沙尘影响面积统计功能,可以生成全国各省(直辖市)沙尘面积统计表、全国不同土地类型沙尘暴影响面积统计表、甘肃省各县沙尘暴的影响面积统计表和甘肃省不同土地类型沙尘影响面积统计表的四张统计表,统计表能够以 .html、excel 和 txt 格式三种格式输出。表 1 和表 2 为以 .html 输出的全国按行政区域和按土地类型统计的不同等级沙尘面积,从中可以看到各省受沙尘影响的具体面积以及不同土地类型上沙尘的影响面积,从而为沙尘暴的影像评估提供基础数据。

表 1 2006 年 4 月 10 日全国沙尘暴面积统计表(按行政区) 单位:km²

编号	省名	总面积	一级	二级	三级	四级
2	内蒙古	243139	87798.9	87828.5	64175.2	3336.44
3	新疆	91077.7	51841.9	7568.56	14786.7	16880.5
6	甘肃	76216.1	24467.4	25712.4	23925.5	2110.82
11	陕西	5046.56	4385.54	622.839	38.1888	0
12	宁夏	20630.1	11854.2	6366.43	2409.42	0
13	青海	45057	36670.1	6090.7	2241.31	54.8897
15	西藏	33313.5	299955.2	3337.14	21.2248	0

表 2 2006 年 4 月 10 日全国沙尘暴面积统计表(按土地类型) 单位: km²

编号	省名	总面积	一级	二级	三级	四级
1	耕地	15066.8	7456.58	4348.9	2996.39	264.942
2	林地	8690.38	5457.08	2400.29	578.555	254.465
3	草地	194271	110139	51807.4	27835.2	4489.91
4	水域	1706.81	776.517	324.637	592.28	13.3721
5	城镇	111.035	59.0181	48.0947	3.92243	0
6	未利用	292607	121481	78268.3	75497.2	17359.9

从甘肃省沙尘暴业务服务的实际出发,对甘肃省沙尘影响做了更细致的统计,能够对甘肃省各县沙尘暴的影响面积和甘肃省不同土地类型沙尘影响面积进行统计,具体统计表产品与全国类似,在此不再赘述。

利用上述沙尘暴产品,可以使沙尘暴遥感监测服务产品量化,丰富沙尘暴服务的内容和服务效果。

6 结语

(1) 在对沙尘暴的光谱特征分析的基础上构建的定量判识沙尘暴范围和强度的两个沙尘指数,经实际检验对监测沙尘暴十分有效,且方法简单,适用于业务应用。

(2) 从西北沙尘暴遥感监测服务的业务实际出发,开发的沙尘暴 MODIS 监测业务系统能够提供沙尘暴 MODIS 影像图、沙尘暴范围和强度遥感监测图、沙尘暴影响土地类型图、全国各省(直辖市)沙尘面积统计表、全国不同土地类型沙尘暴影响面积统计表、甘肃省各县沙尘暴的影响面积统计表和甘肃省不同土地类型沙尘影响面积统计表等产品,使沙尘暴遥感监测服务从定性向定量化和精细化服务发展。

(3) 由于缺乏地面沙尘强度观测数据,本文提供的沙尘强度是相对的,仅供参考。还需要通过地面观测和数值在这方面作更多

的工作。

(4) 本系统仅在兰州区域气候中心做了试运行,不免存在问题,还需对系统不断改进和完善。

参考文献

- [1] Huang, J., B. Lin, P. Minnis, T. Wang, X. Wang, Y. Hu, Y. Yi, and J. R. Ayers, 2006: Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi: 10.1029/2006GL026561.
- [2] 钱正安,宋敏红,李万元. 近 50 年来中国沙尘暴的发布及变化趋势分析[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 106-111.
- [3] 延昊,王长耀,牛铮,等. 东亚沙尘源地、沙尘输送路径的遥感研究[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(1): 90-94.
- [4] 邱新法,曾燕,缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J]. *地理学报*, 2001, 56(3): 316-322.
- [5] 方宗义,张运刚,郑新江. 用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(1): 48-55.
- [6] 郑新江,陆文杰,罗敬宁. 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究[J]. *遥感学报*, 2001, 5(4): 300-305.
- [7] 胡秀清,卢乃锰,邱红. 利用静止气象卫星监测沙尘暴[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 101-106.
- [8] 郭锐,倾继祖. NOAA 卫星沙尘暴光谱特征分析及信息提取研究[J]. *高原气象*, 2004, 23(5): 643-647.
- [9] 范红,陈桂林. 应用米氏理论选择气象卫星探测沙尘暴的波段[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(4): 271-275.
- [10] 郭锐,梁芸. 利用 MODIS 资料定量判识沙尘暴方法研究[J]. *干旱气象*, 2006, 26(1): 1-6.

郭锐等：MODIS沙尘暴判识方法与业务系统

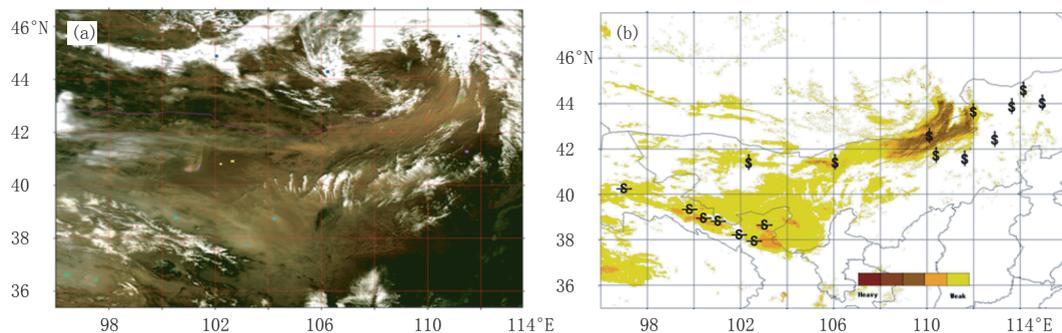


图1 2004年3月27日/MODIS真彩色合成图(a)与沙尘暴范围和判别图(b)

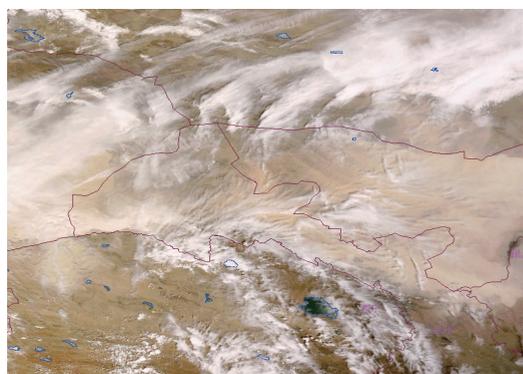


图3 2004年4月10日12:28分Terra MODIS真彩色合成图(R. G. B/1. 4. 3)

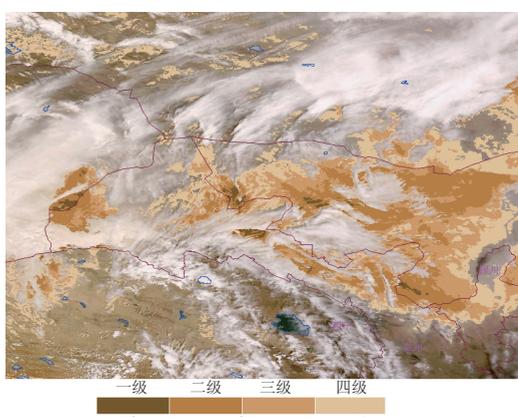


图4 2006年4月10日12:28(北京时间)沙尘暴范围和强度监测图

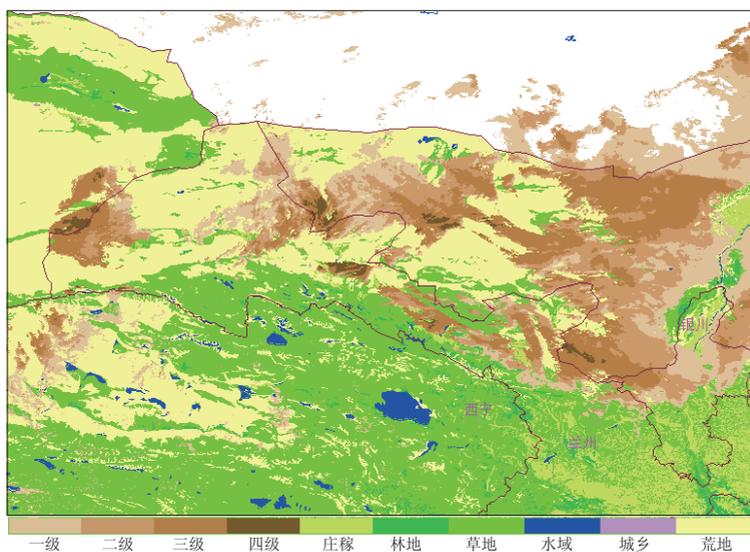


图5 2006年4月10日12:28(北京时间)沙尘暴范围和强度与土地利用叠加图