

基于 MODIS 数据的黑河流域地表温度反演研究

张福存¹, 李 净¹, 吴立宗², 张 晓¹

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘 要: 基于 MODIS 数据, 运用毛克彪的劈窗算法反演了具有冰雪、冻土地表类型的黑河流域 2009 年 9 月 23 日的地表温度。结果表明: 沙漠和戈壁的温度最高, 永久积雪/冰川的温度最低, 能够客观地反映黑河流域 9 月下旬白天的气候特点。将反演结果与流域内 9 个气象站点的实测数据对比分析, 得出反演的地面温度与实测的地面温度平均误差为 0.82℃, 在当前遥感反演地表温度的误差之内。因此, 该算法适合大面积的地表温度快速反演。

关键词: 地表温度; 劈窗算法; MODIS 数据; 大气透过率; 地表比辐射率

中图分类号: P468.0⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)06-0042-04

Study on Land Surface Temperature Retrieved in Heihe Basin Based on MODIS Data

ZHANG Fu-cun¹, LI Jing¹, WU Li-zong², ZHANG Xiao¹

(1. College of Geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Land Surface Temperature (LST) is a key parameter in geophysics and is widely used in climatology, hydrology and ecology. Nowadays, many methods have been developed on retrieving LST using infrared bands, and have good results in many arid and humid regions of China. Based on MODIS data, this paper retrieves land surface temperature of Heihe Basin with Mao's split-window algorithm. The results show surface temperatures of desert and gobi are the highest, surface temperatures of water body and permanent snow/ice are the lowest, which can objectively reflect the climate character in late September in Heihe Basin. According to comparison between retrieving results and measured data in 9 weather stations, the average error is 0.82℃, which is in error allowance of retrieving land surface temperature. So this algorithm is suitable for rapidly retrieving LST of large areas.

Key words: land surface temperature; split-window algorithm; MODIS data; atmospheric transmittance; emissivity

地表温度(Land Surface Temperature)是一个重要的地球物理参数,它在地—气间的物质与能量交换过程中起着重要的作用,是区域和全球尺度地表物理过程中的一个关键参数,广泛应用于气候学、水文学、生态学等的研究^[1]。

截至目前,国内外发展了很多利用热红外波段反演地表温度的方法,如热辐射传输方程法、单窗算法、劈窗算法和多波段算法^[2-17]。其中,劈窗算法具有较高的反演精度和反演效率,是目前应用最为广泛、发展最为成熟的地表温度反演方法^[3]。当前国内针对 MODIS 数据反演地表温度的时候,一些劈窗算法由于推导过程中进行过多假设而难以保证精度;一些算

法通过辐射强度与地表温度之间的简单线性回归得以建立,由于统计样本有限,使得该算法适应性不强;还有一些精度较高的算法含有一般情况下不易于估计的大气参数,使得这些算法过于复杂而不便于推广应用^[3]。毛克彪等^[4]对 Planck 方程进行了线性简化,同时分析了 MODIS 的波段设置特点,从而形成了针对 MODIS 数据的地表温度反演的劈窗算法,并用山东半岛地区的 MODIS 影像对该方法进行了应用和分析,结果比较合理。

此后,国内很多学者利用劈窗算法,针对 MODIS 数据在干旱/半干旱气候的新疆^[5];极干旱/干旱/半干旱/半湿润/湿润气候的内蒙古^[6]、陕西^[7];湿润/半

湿润气候的湖北^[8]、湖南^[9]、天津^[10]都对地表温度进行了反演,获得了较好的反演效果。然而在具有冰雪、冻土地表类型的寒旱区的研究目前很少。黑河流域具有“冰雪/冻土—河流—湖泊—绿洲—沙漠”多元自然景观。近年来,该流域内开展了一系列水文和生态等陆面过程的研究,而地表温度是这些陆面过程模型的重要参数。在黑河流域有学者做了一些地表温度反演的工作,主要是针对局部地区,例如孟宪红等^[11]、李净^[12]利用 Landsat-5 TM 的热红外波段数据,分别对黑河流域的金塔地区、张掖绿洲的地表温度进行了反演,并取得了较好的效果;周纪等^[13]针对黑河流域上游地区,利用卫星过境时地面样方的实测地表温度数据对 MOD/MYD11A1 产品及 4 种常用的分裂窗算法进行了验证,认为 Mao 等^[14]提出的实用性分裂窗算法精度较高,然而对整个流域这方面的研究工作几乎没有。本文基于 MODIS 数据,利用毛克彪的劈窗算法来反演整个黑河流域的地表温度,并对反演的地表温度与实测温度进行验证和分析。

1 地表温度计算方法

毛克彪等^[14-15]根据 MODIS 数据第 31, 32 波段特点,给出的估算地表温度的劈窗算法公式为:

$$T_s = [C_{32}(B_{31} + D_{31}) - C_{31}(B_{32} + D_{32})] / (C_{32}A_{31} - C_{31}A_{32})$$
 式中: T_s ——地表温度,其它参数均为中间变量,其表达式为:

$$A_{31} = 0.13787\epsilon_{31}\tau_{31}$$

$$B_{31} = 0.13787T_{31} + 31.65677\epsilon_{31}\tau_{31} - 31.65677$$

$$C_{31} = 0.13787(1 - \tau_{31})[1 + (1 - \epsilon_{31})\tau_{31}]$$

$$D_{31} = 31.65677(1 - \tau_{31})[1 + (1 - \epsilon_{31})\tau_{31}]$$

$$A_{32} = 0.11849\epsilon_{32}\tau_{32}$$

$$B_{32} = 0.11849T_{32} + 26.50036\epsilon_{32}\tau_{32} - 26.50036$$

$$C_{32} = 0.11849(1 - \tau_{32})[1 + (1 - \epsilon_{32})\tau_{32}]$$

$$D_{32} = 26.50036(1 - \tau_{32})[1 + (1 - \epsilon_{32})\tau_{32}]$$

可见,这些参数是 ϵ_{31} , ϵ_{32} , τ_{31} , τ_{32} , T_{31} , T_{32} 的函数,式中: ϵ_i ——地表比辐射率; τ_i ——大气透过率; T_{31} , T_{32} ——MODIS 数据第 31, 32 波段的亮度温度,可用 Planck 公式获得。算法的关键是求取地表比辐射率 ϵ_i 和大气透过率 τ_i 。

1.1 大气透过率估算

大气透过率是地表辐射、反射透过大气到达传感器的能量与地表辐射能、反射能的比值。它的估算是利用遥感资料反演地表温度的重要参数之一。理论上,利用实时的大气剖面数据进行大气模拟,从而求算大气透过率。但实时的大气剖面数据难以获取,因此,在实际应用中,常常使用标准的大气剖面数据代

替实时的剖面数据。但由于标准大气是一种平均状态,与每天的实时大气剖面数据有很大差异,并且就一个中大尺度的区域而言,不同地区的大气剖面状态不同,因此仅仅用标准大气进行大气模拟,并据此进行地表温度的反演,误差通常较大,这使地表温度反演结果的精度有时难以得到保证^[16]。

由于 MODIS 传感器是针对海洋、陆地、大气综合设置的,数据中有许多大气纠正的特征波段,可用于大气参数的反演。所以,对于 MODIS 数据而言,可以通过某些波段来反演大气参数,从而突破以往用大气数据模拟求参数的方法。毛克彪等^[17]针对 MODIS 的波段特征,通过 LOWTRAN 模拟大气水汽含量与 MODIS31 和 32 热红外波段透过率之间的线性方程为:

$$\text{第 31 波段: } \tau_{31} = -0.10671\omega + 1.04015$$

$$\text{第 32 波段: } \tau_{32} = -0.12577\omega + 0.99299$$

式中: τ_{31} , τ_{32} ——MODIS 数据第 31, 32 波段的大气透过率; ω ——大气水汽含量。

对于 MODIS 数据, Kaufman 等^[18]利用 MODIS 第 19 和第 2 波段模拟出了大气水汽含量的表达式:

$$\omega = [(\alpha - \ln \tau_{\omega}) / \beta]^2$$

式中: ω ——大气水汽含量; τ_{ω} ——MODIS 第 19 波段反射率与第 2 波段反射率的比值; α , β ——参数,对于混合地表, $\alpha = 0.02$, $\beta = 0.651$,对于纯植被像元和裸土像元, α 分别为 0.012 和 -0.040。

1.2 地表比辐射率估算

比辐射率定义为物体在温度 T , 波长 λ 处的辐射出射度与同温度、同波长下的黑体辐射出射度的比值。在 MODIS 数据分辨率为 1 km 的尺度下,地面像元可以看成是植被、裸土和水体 3 种基本类型组成。MODIS 影像的混合像元的地表比辐射率可用下式估算^[15]:

$$\epsilon_i = P_w R_w \epsilon_{iw} + P_v R_v \epsilon_{iv} + (1 - P_w - P_v) R_s \epsilon_{is}$$

式中: R_w , R_v , R_s ——水体、植被和裸土的平均温度比率,在 5~45℃ 范围内,分别为 $R_s = 1.00744$, $R_v = 0.99240$ 和 $R_w = 0.99565$; ϵ_{iw} , ϵ_{iv} , ϵ_{is} ——水体、植被和裸土在波段 i 区间内的辐射率,可以在 ASTER 提供的常用地物比辐射率光谱库中查得; P_w , P_v ——水体和植被在该像元内的构成比例。该方程的求算关键在于估算混合像元中的 P_w 和 P_v 值。

对于水面较大地区,利用 $NDVI < 0$ 的特性来提取,此时 $P_w = 1$, $\epsilon_i = R_w \epsilon_{iw}$;对于冰雪,本文首先根据先验知识对冰雪信息进行提取,然后利用现有的比辐射率数据库对冰雪进行赋值为 0.99;对于水面可以忽略的陆地部分,像元中植被的构成比例可以表示

为: $P_v = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_s) / (\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s)$, 其中 NDVI_v 和 NDVI_s 分别表示完全植被和裸土的植被指数, NDVI 为任何像元的植被指数。本文中根据黑河流域植被特点, 选取 NDVI_s 为 0.15; NDVI_v 为 0.8。忽略水面的陆地部分的地表比辐射率可利用 NDVI 来求算: 当 $\text{NDVI} > \text{NDVI}_v$ 时, 表示该像元为完全植被, 此时 $P_v = 1, \epsilon_i = R_v \epsilon_{iv}$; 当 $\text{NDVI}_v > \text{NDVI} > \text{NDVI}_s$ 时, 表示该像元为混合像元, 此时 $\epsilon_i = P_v R_v \epsilon_{iv} + (1 - P_v - P_s) R_s \epsilon_{is}$; 当 $\text{NDVI} < \text{NDVI}_s$ 时, 表示该像元为完全裸土, 此时 $P_v = 0, \epsilon_i = R_s \epsilon_{is}$ 。

2 数据选取及处理

首先从甘肃省气象局获取流域内气象站点的 2009 年全年温度数据, 获取的数据是每天 4 个不同时刻, 分别是 2:00, 8:00, 14:00, 20:00 记录的定时气温。然后根据气象记录选择黑河流域大多数地区是气象条件较好的晴天, 同时以当天 MODIS 数据过境时间和记录的温度数据时间间隔最短为原则, 选择 2009 年 9 月 23 日的覆盖黑河流域的 Aqua MODIS 的 1B 级别数据, 过境时间为北京时间 14:25。

使用之前对获取的数据进行预处理, 过程如下: (1) 纠正“蝴蝶结”效应。MODIS 探测器是一种被动式摆动扫描探测器, 由于地球曲率的影响, 其像素尺寸随着扫描角的增大而逐渐增大, 从而造成边缘区域像素的重叠, 即“蝴蝶结”效应, 利用 ENVI 软件中的扩展模块“modis tools”下的“bow-tie correction”功能进行此效应纠正; (2) 物理定标。MODIS 1B 数据集存放的是探测器观测得到的原始数字信号经修正、调整和缩放后生成的 16 比特计数值, 所以在使用前必须进行定标处理。反射波段的定标结果为像素点的反射率, 热红外波段的定标结果为像素点的辐射亮度值。 (3) 几何纠正。根据 MODIS 数据自带的几何信息, 对数据进行几何纠正。选取阿尔伯斯等面积割圆锥投影, 两条标准纬线分别是 25°N 和 47°N , 以 99°E 为中央子午线。 (4) “云”区处理。下载的影像有少量云覆盖, 在反演地表温度的时候, 这些区域不能代表真实地表的温度, 利用 MODIS 数据高时间分辨率的优势, 用过境时间为当月 22 日 13:40 和 24 日 13:30 的两期数据对云区进行平滑替代。

预处理后的数据可以直接应用于参数计算中, 步骤如下: ①利用第 2、第 19 波段计算大气水汽含量 ω , 计算第 31、32 波段的大气透射率 τ_{31} 和 τ_{32} ; ②利用第 1、第 2 波段计算 NDVI 及 P_v , 从而计算每个像元的地表比辐射率 ϵ_{31} 和 ϵ_{32} ; ③根据普朗克公式, 用第 31、32 波段的辐射量度值求算星上亮度温度 T_{31} 和 T_{32} ;

④根据劈窗算法公式, 求算地表温度 T_s ; ⑤对生成的地表温度, 叠加黑河流域矢量边界掩模, 形成黑河流域地表温度空间分布。以上计算在图像处理软件 ENVI 4.5 和 ArcGIS 9.2 下完成。

3 结果分析及精度验证

3.1 研究区介绍

本文的研究区是黑河流域, 该流域位于河西走廊中部, 大致介于东经 $98^\circ - 101^\circ 30'$, 北纬 $38^\circ - 42^\circ$, 西起嘉峪关, 东至山丹定羌庙, 北部与内蒙古相邻, 是甘肃西部最大的内陆河流域。流域全长 821 km, 流域面积 13 万 km^2 , 包括青海省祁连县, 甘肃省山丹、民乐、张掖、临泽、高台、肃南、酒泉、金塔, 内蒙古额济纳旗。流域内主要的土地利用类型和地表覆盖景观可以划分为林地、草地、水域、耕地、永久性积雪/冰川、沙丘/戈壁、盐碱地、裸岩/裸土地和居民建筑用地等 (附图 4)。

3.2 地表温度的空间分布

附图 5 是利用毛克彪的劈窗算法反演 MODIS 数据得到的黑河流域地表温度反演图。影响地表温度空间分布的主要因素是纬度、海拔和地表覆盖状况, 流域内多样的地形地貌和不同的地表覆盖类型决定了其地表温度的空间分布, 尤其是在上游地区, 土地利用类型主要是林地和草地, 并有少量永久积雪/冰川; 同时 9 月是雨季, 此地降雨充沛, 加上冰川融水, 致使地面湿度大, 蒸发量小, 另外上游地区是高海拔地区, 所以上游地区主要以低温为主, 反映在温度图上表现为低温图斑, 尤其是灌耕地和冰雪覆盖地区在图上反映为明显的低温碎块, 图中的最低温 -32°C 就是冰雪的反演温度; 根据地表温度反演图, 高温区域出现在中下游的大片地区, 尤其是中下游东部地区, 这与当地植被稀少, 主要有沙漠戈壁覆盖造成的强烈蒸发的实际情况相符, 最高温度达到了该流域当天最高的 39.7°C ; 图中流域中游中东部到下游东部有一条崎岖的宽度不均的低温条带, 并在下游分成两个支带, 这是黑河水域及流经地区湿度大, 水体的比辐射率高造成的低温现象; 图中东北角有两处明显的绿色低温块状区域, 这是两处水域, 其中北边水域是东居延海, 它在图上反映出的平均温度是 6.4°C 左右, 这在 9 月比较符合海水温度。林地反演出较沙漠戈壁要小、水体冰雪要高的温度, 在 $15 \sim 22^\circ\text{C}$ 之间。这些温度符合黑河流域 9 月下旬白天的气候特点。

3.3 结果验证

为了更好地把握结果的可靠性, 应该利用地面卫星过境瞬间的测量数据来检验对比。但由于缺少卫

星过境瞬间的地面观测数据,选取当天 14:00 的黑河流域地区的气象站点的温度数据作为参考来对反演温度进行对比检验(表 1)。

表 1 观测值与反演数据对比

气象站	站点位置	观测值/℃	反演温度/℃	误差/℃
金塔	98.9058°E,39.9988°N	26.50	25.54	0.96
酒泉	98.4975°E,39.7036°N	24.70	23.71	0.99
张掖	100.4600°E,38.9124°N	25.30	24.76	0.54
山丹	101.0830°E,38.7746°N	24.90	26.30	1.40
民乐	100.8260°E,38.4376°N	20.70	20.87	0.17
鼎新	99.5117°E,40.3080°N	26.20	24.59	1.61
高台	99.7907°E,39.3623°N	26.50	26.15	0.45
临泽	100.1650°E,39.1385°N	25.50	25.41	0.09
肃南	99.6178°E,38.8399°N	20.20	19.00	1.20

当天 14:00 有实测温度数据的气象站点共 9 个,这些站点都在云覆盖区域以外,分布比较均匀,代表不同地表类型 1 km 范围内的平均温度,能够基本满足黑河流域地表温度的验证。以观测值与反演温度的差为误差,以所有误差的和除以气象站点数为平均误差。计算表明,9 个站点处的观测温度与反演温度的平均误差为 0.82℃,在当前遥感反演地表温度的误差之内。其中,反演精度在 0.5℃ 以内的有 3 个站点,分别是临泽站、民乐站和高台站,临泽站的反演精度达到了 0.09℃;反演精度在 1℃ 以内的有 6 个,占总站点的 67%;反演精度超过 1℃ 的有 3 个,其中鼎新站的误差最大,达到了 1.61℃。由于反演的温度是整个像元温度的均值,而观测值代表观测点处的值,又加上实测值与反演结果在时间上有差距,所以二者在数值上有差别。比较各站点的观测温度与对应的反演温度,发现在 9 个站点中,有 7 个站点的观测温度大于反演温度,由于观测温度是 14:00 的,而卫星过境时是 14:25,这时地表温度已经在慢慢降低,所以反演温度总体上小于观测温度,这同时说明反演的地表温度误差有可能比 0.82℃ 还要小一些,表明本文的地表温度反演结果和实测值很接近。

需要指出的是,有些站点所在位置由混合像元效应导致的比辐射率误差影响地表温度反演,所以在这些站点反演结果和实测值之间有可能出现较大差异,另外由于地表温度反演的复杂性,其它因素如大气因素、传感器观测角度和数据的后续定标中的误差等也是引起误差的原因。同时,该算法提出过程中的各种近似也影响地表温度反演的精度,因此模型有待更深入的改进,以达到更好的精度效果。

4 结论

本文基于 MODIS 数据,运用毛克彪的劈窗算法

反演了具有冰雪、冻土地表类型的黑河流域寒旱区的地表温度,经过结果分析与精度验证得出:

(1) 沙漠和戈壁的温度最高,永久积雪/冰川的温度最低,整个流域的反演温度符合地表水热关系,能够客观地反映黑河流域 9 月下旬白天的气候特点。

(2) 经过反演的地表温度与选取流域内 9 个气象站点的实测数据对比分析,平均误差为 0.82℃,在当前遥感反演地表温度的误差之内,这说明毛克彪的劈窗算法反演的地表温度结果准确可靠。

(3) 本文的研究表明毛克彪的劈窗算法适合大面积的地表温度快速反演。

致谢:本文所用的 MODIS 数据来源于美国宇航局(NASA)戈达德空间飞行中心,黑河流域边界和气象观测站点分布数据来源于“中国西部环境与生态科学数据中心”,黑河流域气象站观测数据由“甘肃省气象局”提供,从“中国西部环境与生态科学数据中心”下载,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 张兆民,何国金,肖荣波,等.利用 TM6 数据反演陆地表面温度新算法研究[J].遥感技术与应用,2005,20(6):547-550.
- [2] 毛克彪,唐华俊,周清波,等.用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演地表温度的方法[J].兰州大学学报:自然科学版,2007,43(4):12-17.
- [3] 覃志豪,Amon kameli.用 NOAA-AVHRR 热通道数据演算地表温度的分裂窗算法[J].国土资源遥感,2001,48(2):33-42.
- [4] 毛克彪,覃志豪,施建成.用 MODIS 影像和劈窗算法反演山东半岛的地表温度[J].中国矿业大学学报,2005,34(1):46-50.
- [5] 李琴,陈曦,包安明,等.干旱/半干旱区 MODIS 地表温度反演与验证研究[J].遥感技术与应用,2008,23(6):643-647.
- [6] 包钢,包玉海,李慧静,等.用 MODIS 数据和分裂窗算法反演内蒙古地区的地表温度[J].测绘科学,2009,34(1):32-34.
- [7] 秦晓敏,覃志豪,毛克彪.基于 MODIS 数据的陕西省地表温度的空间分布研究[J].干旱区地理,2005,28(4):548-553.
- [8] 许国鹏,李仁东,刘可群,等.基于 MODIS 数据的湖北省地表温度反演研究[J].华中师范大学学报:自然科学版,2007,41(1):143-147.
- [9] 马延辉,林辉,孙华.基于 MODIS 的湖南省地表温度动态变化研究[J].水土保持研究,2008,15(6):21-27.
- [10] 王铁,黎贞发.基于 MODIS 数据的地表温度反演:以天津地区为例[J].中国农业气象,2009,30(S1):137-139.

(下转第 50 页)

(2) 通过将实际验证数据和遥感监测分类结果的对比,图斑正确率为 86.8%,解译的森林面积精度达到 92.3%。因此,本研究结果可靠,可为大面积森林资源动态监测提供方法支持。

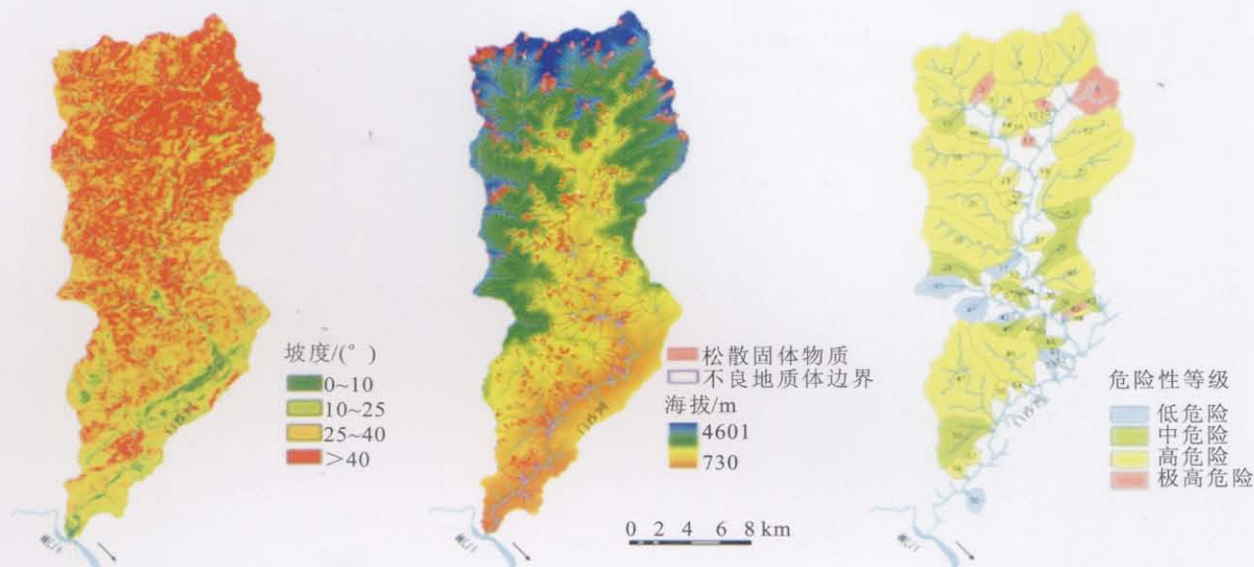
(3) 研究区在 1990—2005 年有林地面积增加,而草地和农地面积减少;其中有林地面积在 2000—2005 年增加尤为显著,说明从 1999 年以来实施退耕还林和天然林保护工程取得了显著成效,森林资源呈现出稳定增长的总趋势,景观斑块布局处于优化过程中。

参考文献:

- [1] Qiao Y, Wang Y, Tang J. Study of remote sensing monitoring of dynamic change of the Loess Plateau forest resources[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33: 302-306.
- [2] 陈雪峰,黄国胜,夏朝宗,等.全球森林资源评估方法与启示[J]. *林业资源管理*, 2005, 8(4): 24-29.
- [3] 吕春花,郑粉莉,安韶山.子午岭地区植被演替过程中土壤养分及酶活性特征研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 227-232.
- [4] 唐克丽,王斌科,郑粉莉,等.黄土高原人类活动对土壤侵蚀的影响[J]. *人民黄河*, 1994(2): 13-16.
- [5] 米登山,蒋定生,刘明信,等.近几年子午岭森林破坏情况及其影响[J]. *水土保持通报*, 1982, 2(5): 48-49.
- [6] 秦娟,王凯博,上官周平.子午岭林区山杨林、辽东栎林及其混交林植物多样性的变化[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2007, 35(5): 131-140.
- [7] 张希彪,上官周平.黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征[J]. *生态学报*, 2005, 5(8): 872-877.
- [8] 徐萍,徐天蜀.森林资源动态监测技术综述[J]. *云南大学学报*, 2007, 29(S1): 251-254.
- [9] 孟京辉,陆元昌, Kleinn C, 等.基于遥感的景观格局时空动态研究[J]. *西北林学院学报*, 2010, 25(1): 207-211.
- [10] 蒋学玮,周正立,李凯荣,等.景观生态学原理在流域规划中的应用[J]. *西北林学院学报*, 2003, 18(2): 112-115.
- [11] 周成虎,骆剑成.高分辨率卫星遥感影像地学计算[M]. 北京:科学出版社, 2009: 95-97.
- [12] 赵鹏祥,强建华,张会儒,等.基于遥感的黄土高原天然林地信息提取及计算机分类研究[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2006, 34(10): 75-80.
- [13] 彭道黎,赵永泉.基于 RS 的河北沽源县土地利用动态监测研究[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(2): 152-156.
- [14] 刘建平,赵时英.高光谱遥感数据解译的最佳波段选择方法研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 1999, 16(2): 153-161.
- [15] 陆灯盛. TM 图像信息量分析及特征信息提取的研究[J]. *遥感学报*, 1991, 6(4): 267-274.
- [16] Qin Y, Peng G. Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, 72(7): 799-811.
- [17] Ouma Y O, Josaphat S S, Tateishi R. Multiscale remote sensing data segmentation and post-segmentation change detection based on logical modeling: Theoretical exposition and experimental results for forestland cover change analysis[J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 34: 715-737.
- [18] 常庆瑞,蒋平安,周勇,等.遥感技术导论[M]. 北京:科学出版社, 2004: 235-241.
- [19] 赵英时.遥感分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003: 202-207.

(上接第 45 页)

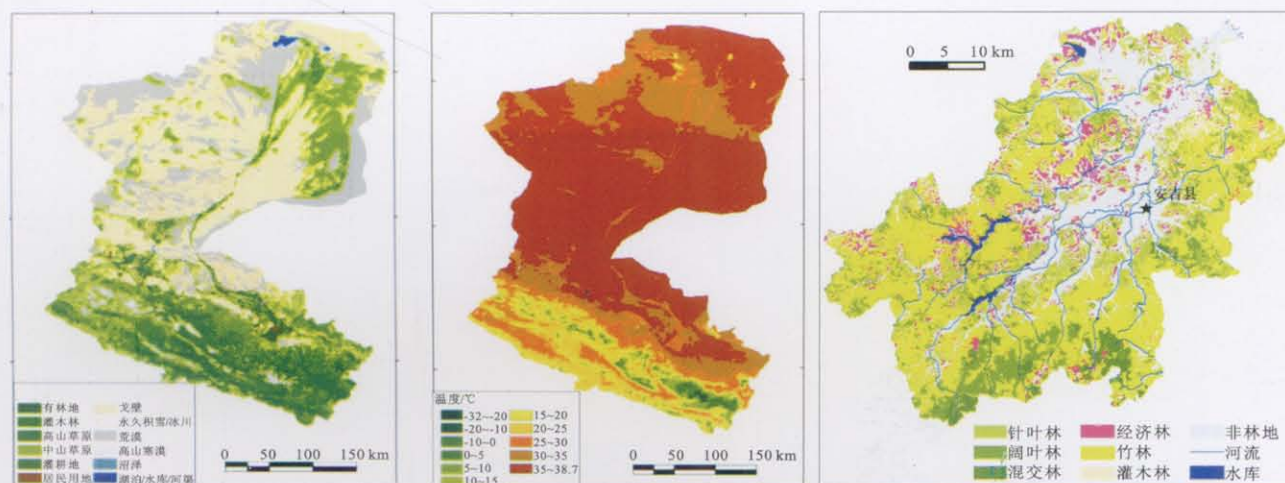
- [11] 孟宪红,吕世华,张宇,等.使用 LANDSAT-5 TM 数据反演金塔地表温度[J]. *高原气象*, 2005, 24(5): 721-726.
- [12] 李净.基于 Landsat-5 TM 估算地表温度[J]. *遥感技术与应用*, 2006, 21(4): 322-327.
- [13] 周纪,李京,张立新,等.针对 MODIS 数据的地表温度反演算法检验:以黑河流域上游为例[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(2): 239-246.
- [14] Mao K, Qin Z, Shi J, et al. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(15): 3181-3204.
- [15] 毛克彪,覃志豪,施建成,等.针对 MODIS 影像的劈窗算法研究[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2005, 30(8): 704-707.
- [16] 阎福礼,李震,邵芸,等.基于 NOAA/AVHRR 数据的西部植物覆盖变化监测[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2003, 39(2): 90-94.
- [17] 毛克彪,覃志豪,王建明,等.针对 MODIS 数据的大气水汽含量反演及 31 和 32 波段透过率计算[J]. *国土资源遥感*, 2005, 63(1): 26-29.
- [18] Kaufman Y J, Gao Bocai. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30: 871-884.



附图1 白沙河流域坡度分布图

附图2 白沙河流域松散固体物质分布图

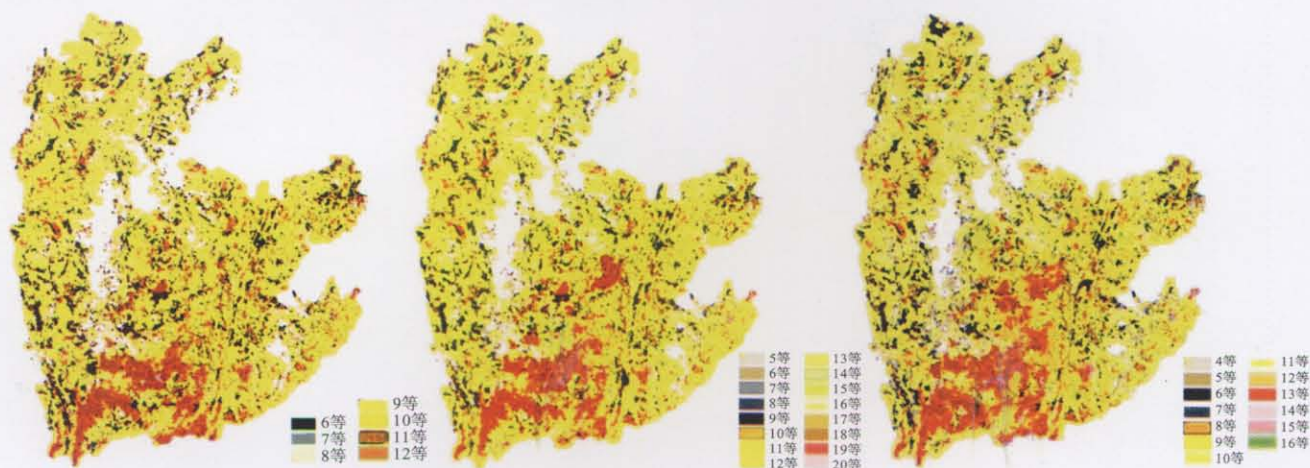
附图3 白沙河各小流域泥石流危险性



附图4 2000年黑河流域土地利用类型图

附图5 黑河流域地表温度反演图

附图6 安吉县森林资源分布图



附图7 绥阳县耕地自然质量等别、利用等别、经济等别分布图