

FY-3A/MERSI 与 MODIS 的温度植被 干旱指数反演及对比分析

姜琳¹, 冯文兰¹, 刘志红¹, 李刚¹, 郭兵²

(1. 成都信息工程学院, 成都 610225; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘要:为了探讨近年来被广泛使用的 MODIS 数据以及我国的 FY-3A/MERSI 数据对同一地区同一时刻的旱情所得的温度植被指数的差异以及可比性,选择我国四川省旱灾频发的攀西地区为研究区,分别反演 MODIS-TVDI 和 MERSI-TVDI,并探讨两者监测结果的特点以及可比性。结果发现:(1) MERSI 数据的干湿边线性拟合系数要高于 MODIS 数据。(2) MODIS-TVDI 与 MERSI-TVDI 的差值变化范围在-0.12 到 0.23,差值均值为 0.11,MODIS 数据的监测结果比 MERSI 数据的监测结果略大。(3) MODIS-TVDI 与 MERSI-TVDI 在各类地物的反演结果上都具有较高的一致性,其中林地 R^2 最高为 0.944。(4) MODIS-TVDI、MERSI-TVDI 与当前月份降雨量存在显著负相关,其线性相关系数分别为-0.83,-0.91,两者干旱监测结果是可信的。

关键词:FY-3A/MERSI; MODIS; 温度植被干旱指数(TVDI); 攀西地区

中图分类号:TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)03-0231-04

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2014.03.044

Temperture Vegetation Drought Index(TVDI) Retrieve and Comparison between FY-3A/MERSI and MODIS

JIANG Lin¹, FENG Wen-lan¹, LIU Zhi-hong¹, LI Gang¹, GUO Bing²

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract:In order to present the difference and comparability between Temperture Vegetation Drought Index (TVDI) retrieved by FY-3A/MERSI and MODIS in Panxi region, TVDI abstracted from MERSI and MODIS are calculated and compared. The following conclusions are be drawn: (1) the fitting coefficient of the dry-wet edge of MERSI is much higher; (2) the difference of MODIS-TVDI and MERSI-TVDI is from -0.12 to 0.23 and the mean of the difference is 0.11, the MODIS-TVDI is slightly higher than MERSI-TVDI; (3) each inversion result of various kinds of ground objects showed a better linear consistency, the maximum R^2 was forest land, which reached to 0.944; (4) MODIS-TVDI and MERSI-TVDI are significantly negatively correlated with the rainfall of the current month and the R^2 were -0.83, -0.91, respectively. The drought monitoring results are credible.

Key words:FY-3A/MERSI; MODIS; Temperture Vegetation Drought Index(TVDI); Panxi region

近年来,在全球气候变暖的影响下,我国干旱灾害发生频率逐渐增加,干旱区域不断扩大,且有从干旱区向湿润区发展的趋势^[1]。干旱灾害的发生给农业生产和人民生活造成巨大的经济损失。传统的干旱监测是用稀疏点上的土壤水分含量数据来监测干旱的程度和范围,代表性差,无法实现大范围干旱灾

害的监测。应用遥感技术是实现大范围面上干旱监测的可行性技术途径之一。对地观测卫星(EOS)中分辨率光谱成像仪因其具有高时间分辨率、高光谱分辨率以及适中的空间分辨率等特点,已经在大范围的、长时期动态干旱监测中得到了很好的应用。其中,利用 MODIS 地表温度产品和植被指数(NDVI)

收稿日期:2013-07-23

修回日期:2013-10-14

资助项目:中国气象局西南区域气象中心重大科研项目“基于多源遥感的川渝地区干旱监测研究”与中国气象局兰州干旱气象研究所开放基金(IAM201102)

作者简介:姜琳(1987—),女,山东省文登市人,硕士研究生,研究方向为环境遥感。E-mail:linlin20061998@126.com

通信作者:冯文兰(1979—),女,四川成都人,副教授,研究方向为环境遥感应用。E-mail:fwl@cuit.edu.cn

产品计算 TVDI 或者 VTCI 干旱指数的方法由于数据易于获取、监测效果好而在干旱遥感监测中广泛使用^[2-8]。然而,由于 MODIS 温度产品与植被产品空间分辨率不一致,在干旱反演中需要对分辨率低的数据进行重采样从而降低了数据结果的精度。FY-3A 是我国自主研发的极轨气象卫星,其搭载的中分辨率光谱成像仪(MERSI)具有多光谱和高分辨率成像的特点,且 MERSI 传感器的波段设置与 MODIS 的某些波段基本一致,特别是用于监测地表植被、大气水汽以及地表温度的通道。与 EOS/MODIS 相比,FY-3A/MERSI 的 250 m 分辨率的可见光、热红外通道可分别用于植被指数和地表温度信息的提取。因此,利用 FY-3A/MERSI 数据进行干旱监测可以在保证植被指数与地表温度空间分辨率一致的同时将干旱监测反演的空间分辨率提高到 250 m^[9]。

攀西地区位于四川省西南部的攀西大裂谷,地处干热河谷区,由于受冬夏季风的交替影响,形成了干湿季分明的气候变化规律,每年 10 月至翌年 5 月底,降水量仅占全年的 10% 左右,造成冬春连旱。因此,选取该地区作为干旱监测的研究区域具有代表性。本文采用广泛使用的 TVDI 干旱指数法,应用 FY-3A/MERSI 数据,分析并揭示攀西地区复杂山区 NDVI-T_s 空间的形态特征,同时将监测结果与同期 EOS/MODIS 数据监测结果进行比较,以此对 FY-3A/MERSI 数据在攀西地区的干旱监测能力进行评价,为攀西地区遥感数据的应用和相关部门的防灾减灾提供借鉴和决策支持。

1 实验材料与方法

1.1 研究区概况

攀西地区位于四川省西南部,地理坐标为 26°03′—29°27′N,100°08′—103°53′E,总面积约 6.36 万 km²,行政上包括攀枝花市和凉山彝族自治州,共计 20 县(市)。境内海拔差异大,高山河谷南北相间排列,地貌类型复杂多样。气候特征属以南亚热带为基带的立体气候类型,太阳辐射强,蒸发量大,旱、雨季分明,是四川省近几年旱灾频发的地区^[10]。

1.2 数据源与数据处理

所用数据源主要是 FY-3A/MERSI 和 EOS-MODIS 数据,FY-3A/MERSI 原始数据来源于中国气象局国家卫星中心,其可见光和热红外通道的空间分辨率为 250 m,数据时间为 2012 年 5 月 18 日。数据处理使用 MAS 风云数据处理软件将其投影转换为阿尔伯斯等面积投影并对其进行几何校正。EOS-MODIS 数据选择 2012 年 5 月 18 日白天的地表反射

率产品以及地表温度产品,其中地表反射率产品空间分辨率为 250 m,地表温度产品空间分辨率为 1 000 m,在 MRT 软件下对其进行投影转换为阿尔伯斯等面积投影并统一重采样为 250 m。

1.3 研究方法

1.3.1 归一化植被指数(NDVI)的反演 NDVI 是反映土地覆盖植被状况的一种遥感指标,定义为近红外通道与可见光红通道反射率之差与之和的商^[11],近年来被广泛应用,其公式为

$$NDVI = (Q_{NIR} - Q_R) / (Q_{NIR} + Q_R) \quad (1)$$

式中: Q_{NIR} ——近红外波段的反射率; Q_R ——红波段反射率。对于 MERSI 数据, Q_{NIR} , Q_R ——大气校正后的其第 4 和第 3 波段的反射率。对于 MODIS 数据, Q_{NIR} 与 Q_R 则采用了反射率产品中的第 2 和第 1 波段的反射率。

1.3.2 FY-3A MERSI 数据地表温度的反演 由于 FY-3A/MERSI 只有一个热红外通道,所以本文采用 Jimenez-Munoz 和 Sobrino^[12]建立的适用于各种传感器的普适性单通道算法。该算法简便适用,只需要知道热红外通道的中心波长,地表比辐射率和大气水汽含量即可。其具体公式为:

$$T_s = \gamma [\epsilon^{-1} (\varphi_1 L_{\text{sensor}} + \varphi_2 + \varphi_3)] + \delta \quad (2)$$

$$\gamma = \left[\frac{c_2 L_{\text{sensor}}}{T_{\text{sensor}}^2} \left(\frac{\lambda^4}{c_1} L_{\text{sensor}} + \lambda^{-1} \right)^{-1} \right] \quad (3)$$

$$\delta = -\gamma L_{\text{sensor}} + T_{\text{sensor}} \quad (4)$$

式中: L_{sensor} ——传感器观测到的辐射亮度[W/(m²·sr·μm)]; T_{sensor} ——传感器观测到的亮温(K); λ ——有效作用波长(μm); ϵ ——比辐射率; $c_1 = 1.19104 \times 10^8$ [W/(m²·sr·μm)]; $c_2 = 1.43877 \times 10^4$ μm·K; φ_1 , φ_2 , φ_3 ——大气水汽含量 ω 的函数,可由下式计算:

$$\varphi_1 = 0.01653\omega^3 - 0.00331\omega^2 + 0.1338\omega + 0.99251 \quad (5)$$

$$\varphi_2 = -0.10768\omega^3 - 0.33642\omega^2 - 1.9709\omega + 0.23652 \quad (6)$$

$$\varphi_3 = -0.05494\omega^3 + 0.391\omega^2 + 0.99\omega - 0.08928 \quad (7)$$

1.3.3 温度植被干旱指数的(TVDI)反演 目前,国内外学者运用遥感技术进行干旱监测多是基于植被指数和地表温度的模型。Sandholt 等^[13]基于植被指数和地面温度的关系,提出了温度植被干旱指数(TVDI)估算土壤表层水分状况。在国内被广泛用来进行不同地区的大范围的旱情监测,其准确性也得到很好的验证。其中张顺谦等^[14]就利用 NOAA 数据依据温度植被干旱指数(TVDI)对 2006 年四川伏旱进行监测与评估,并验证了 TVDI 在四川地区进行

旱情监测的可行性。TVDI 的计算公式如下:

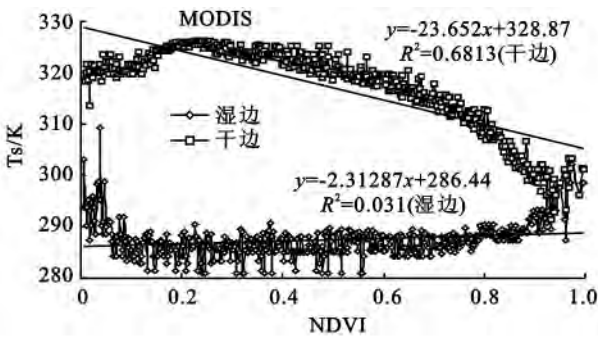
$$TVDI = (T_s - T_{smin}) / (T_{smax} - T_{smin}) \tag{8}$$

式中: T_{smin} ——某一 NDVI 对应的最小地表温度, 对应的是湿边 $T_{smin} = a_1 + b_1 NDVI$; T_s ——任意像元的地表温度; a_1, b_1 ——湿边拟合方程的系数; T_{smax} ——某一 NDVI 对应的最大地表温度, 对应的是干边 $T_{smax} = a + b NDVI$; a, b ——干边拟合方程的系数。TVDI 取值范围为 0~1, TVDI 越大, 表明越接近干边, 旱情就越严重。

2 结果与分析

2.1 FY-3A/MERSI 与 MODIS 数据 NDVI-Ts 特征空间的比较

基于 TVDI 干旱指数模型进行干旱监测最重要



的一步就是确定其干湿边, 干湿边的确定直接影响监测结果^[14]。本文以 NDVI 步长为 0.002 提取不同 NDVI 条件下的最大陆地表面温度和最小陆地表面温度, 得到 NDVI-LST 二维特征空间变化, 见图 1。

从图 1 中可以看出, 两者的变化趋势大概一致, 但是 MERSI 数据的最小温度、最大温度与植被指数拟合的线性关系更好一些, 而 MODIS 数据的植被指数与地表温度的二维散点图要散乱一些, 这主要是由于在对 MODIS 地表温度数据进行采集时把云像元误判成晴空地表造成的。同时, 从两幅散点图可以看出, 同一 NDVI 所对应的最大地表温度 MODIS 数据要大一些, 说明 MODIS 数据在晴空状态下监测的地表温度要比 MERSI 数据好一些。

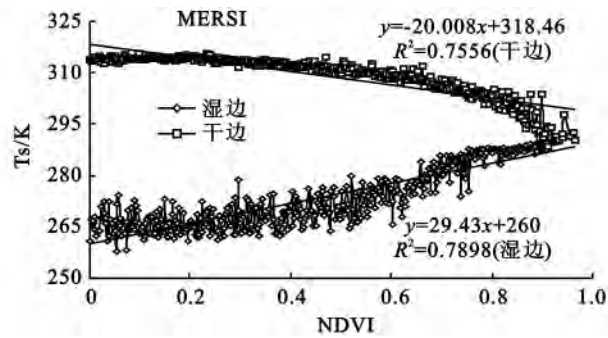


图 1 NDVI-TS 特征空间关系

根据 TVDI 的原理, 随着植被指数的增加, 地表最大温度应该逐渐降低, 但是由于攀西地区空气中水分含量高, 以及植被覆盖度过低的时候, NDVI 会高估, 而植被覆盖度过高的时候, NDVI 会低估等原因, 造成 NDVI-TS 在左右两端不符合实际规律, 结合两者散点图的空间拟合特征发现, NDVI 在 0.2 到 0.8 的区间内, 地表温度与植被指数呈现较好的线性关系。因此只取 NDVI 在 0.2 到 0.8 的中等植被覆盖度区间的数据进行干湿边的拟合, 拟合结果见表 1。

表 1 MODIS 和 MERSI 数据确定的干湿边方程

数据类型	湿边	干边
MODIS	$T_{smin} = 9.6304NDVI + 283.46$ $R^2 = 0.7065$	$T_{smax} = -26.966NDVI + 333.84$ $R^2 = 0.7106$
MERSI	$T_{smin} = 5.5163NDVI + 279.66$ $R^2 = 0.8665$	$T_{smax} = -16.592NDVI + 318.97$ $R^2 = 0.8901$

由表 1 可知, MERSI 数据的干湿边方程的拟合系数分别为 0.890 1, 0.866 5, 要高于 MODIS 数据的 0.710 6, 0.706 5, 说明 MERSI 数据的地表温度与植被指数的变化有着较高的一致性, 从而可以很好地体现出研究区的干旱发生变化机理。

2.2 MERSI-TVDI 与 MODIS-TVDI 的整体相关性分析

为了验证 FY-3A/MERSI 数据反演的 TVDI 与

MODIS 数据反演的 TVDI 数值的整体相关性, 对两种数据反演结果按照 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 共设置 120 个样点, 采用随机均匀布点法进行取样。对提取的相应数据进行相关性分析结果显示 (图 2), 两者呈线性相关, 相关系数达到 0.919 9, 同时将 MODIS 和 MERSI 数据所有样点进行差值计算, 所得差值变化区间为 -0.12 到 0.23, 均值为 0.11, 说明 MODIS-TVDI 整体数值要比 MERSI-TVDI 要略微大一些, 可能与 MERSI 数据反演的地表温度比 MODIS 数据低一些有关, 但是两者的干旱监测结果整体数值上有着较好的一致性。

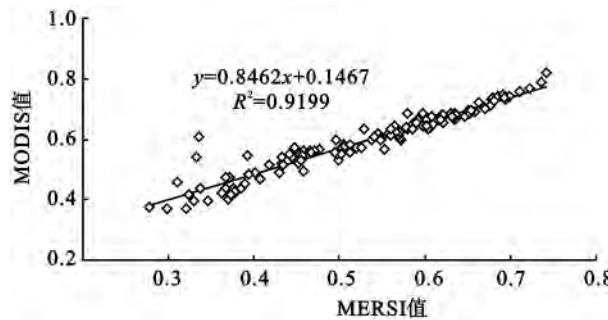


图 2 MERSI-TVDI 与 MODIS-TVDI 样点验证图

2.3 不同地表覆盖类型下 MERSI-TVDI 与 MODIS-TVDI 的对比分析

考虑到 TVDI 模型在对较大区域进行干旱监测

时会受到地表覆盖类型差异的影响^[15],本文进一步分析 FY-3A/MERSI 数据与 MODIS 数据在不同不同覆盖类型下监测结果的相关性。以攀西地区受干旱影响的林地、灌木、旱地、水田和草地 5 种土地利用类型为分析对象,按照不同海拔高度、不同坡度以及均一较大斑块的原则来进行 MERSI-TVDI 与 MODIS-TVDI 取样,采样点监测结果的相关分析结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,MERSI 与 MODIS 数据反演的 TVDI 在这 5 种土地利用类型中都表现出较好的相关性,其中草地、林地和灌木的相关系数分别达到了 0.944,0.903 和 0.915,而水田和旱地的相关系数则略小。

表 2 MERSI-TVDI 与 MODIS-TVDI 相关分析

地表覆盖类型	样本数	相关系数
灌木	245	0.915
旱地	241	0.861
水田	250	0.826
草地	378	0.944
林地	359	0.903

2.4 MERSI-TVDI 与 MODIS-TVDI 的空间分布分析

在温度植被干旱指数的基础上,根据攀西地区的旱情统计数据,按最大概率法,将攀西地区的 TVDI 进行如下分级: <0.67 为无干旱区、 $0.67\sim0.74$ 为轻度干旱、 $0.74\sim0.84$ 为中度干旱、 >0.84 为重度干旱,结果如附图 12 所示,从干旱监测结果空间分布的对比来看,MERSI-TVDI 的纹理特征更加明显,而 MODIS 的纹理特征则相对要差一些,主要是由于对 MODIS 的地表温度数据进行重采样造成其精度的降低。从干旱的分布情况来看,MODIS-TVDI 和 MERSI-TVDI 都反映出攀西地区的西南部包括盐源县的中部、攀枝花市辖区、会理县、米易县、宁南县的南部都存在着大面积的重度干旱,而东北部的大部分地区干旱情况比较轻。

2.5 验证分析

为了验证干旱监测结果的准确性,利用攀西地区及周围 20 个气象站点 2012 年 4 月 1 日到 5 月 17 日的日降雨量数据进行累加,然后考虑高程因素对其进行协和克里金插值,插值后数据分辨率为 250 m。得到结果如附图 13 所示,从图中可以看出攀西地区西部和南部地区 2012 年 4、5 月份的降雨量比东部和北部地区要明显偏少,而且降水极少的两个中心区域与 TVDI 的监测结果两个重度干旱区域基本重合,整个降雨分布情况与 TVDI 干旱情况分布数据变化趋势基本一致。为了进一步说明 MODIS 与 MERSI 数据的干旱监测结果可信,本研究采用均匀网格划分法将

攀西地区均匀划分为 $0.5^{\circ}\times0.5^{\circ}$ 网格,利用 ArcGIS 的 Zonal statistic 功能统计每个网格相应的降雨量和 MODIS(TVDI)、FY3A-MERSI(TVDI)均值,并对其进行定量的相关性分析,该方法避免了以点为单元进行验证时像元尺度的问题。研究结果表明:MODIS(TVDI)、FY3A-MERSI(TVDI)与当前月份降雨量存在显著负相关,其线性相关系数分别为 -0.83 、 -0.91 ,并且 FY3A-MERSI 数据反演的 TVDI 数据与降雨量的线性负相关性更好。

3 讨论与结论

MERSI 数据的植被指数和地表温度数据所构造的干湿边的散点分布图相关性要高于 MODIS 数据,说明 MERSI 数据可以更好地来体现干旱信息。MODIS-TVDI 与 MERSI-TVDI 的差值结果表明,两者之间数值上存在着一定的差别,变化范围在 -0.12 到 0.23 ,而且 MODIS 的监测结果要比 MERSI 的监测结果略大,这主要是由于探测仪器本身的参数、光谱响应差异、太阳高度角、几何畸变及云污染状况等因素的存在。

通过对两种数据监测结果的整个区域的均匀取样点以及不同植被覆盖类型的取样点的相关性分析发现,MERSI-TVDI 和 MODIS-TVDI 不论在整体上还是典型样点上都呈现明显的线性相关性。从攀西地区旱情空间分布情况来看,两者的无旱、轻旱、中旱以及重旱 4 个干旱等级的分布情况大概一致。但是 MERSI 数据的纹理特征相比于 MODIS 数据更加明显。攀西地区 2012 年 4 月、5 月份的整个降雨分布情况与 TVDI 干旱情况分布数据变化趋势基本一致,说明两者干旱监测结果是可信的。综上,FY3A-MERSI 数据具备干旱监测能力,且其监测结果与 MODIS 数据的监测结果具有可比性。

致谢:感谢四川省气象局和国家气象卫星中心为本研究提供数据资料以及国家气象中心的韩秀珍和陈楠老师为本次研究提供的方法和技术指导。

参考文献:

- [1] 尹晗,李耀辉.我国西南干旱研究最新进展综述[J].干旱气象,2013,31(1):182-193.
- [2] 李永亮,林辉,马延辉.基于 MODIS 数据的湖南省旱情监测研究[J].水土保持研究,2010,17(2):111-114.
- [3] 柳锦宝,何政伟,段英杰. MODIS 数据支持下的西藏干旱遥感监测[J].干旱区资源与环境,2013,27(6):134-139.

(下转第 241 页)

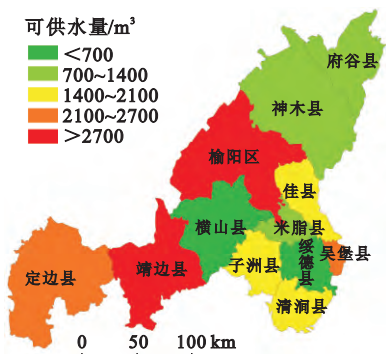
源诅咒”^[15]现象的环境发展指数下降。研究表明,经济发展水平低,将会对社会稳定产生一定压力^[16]。因此,充分发挥县域资源优势和比较优势,把持续发展经济、不断改善民生、切实保护生态环境结合起来,在推进开发式扶贫的同时,增强县域绿洲城市造血功能,并将引导产业转移和培育特色优势产业结合起来,以确保县域绿洲城市经济持续、社会稳定与生态安全的全面协调发展,为全面建成小康社会奠定坚实基础。

参考文献:

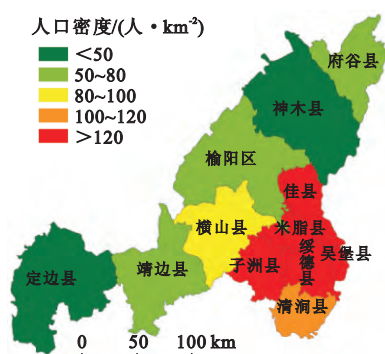
- [1] 聂春霞,何伦志,甘昶春. 城市经济、环境与社会协调发展评价:以西北五省会城市为例[J]. 干旱区地理,2012,35(3):517-525.
- [2] 岳晓燕,周军. 城市经济、社会与环境系统协调发展研究:以15个副省级城市为例[J]. 江淮论坛,2011(5):37-41.
- [3] 段七零. 江苏省县域经济—社会—环境系统协调性的定量评价[J]. 经济地理,2010,30(5):829-834.
- [4] 李春平,张二勋,段艺芳. 山东省县域经济—社会—环境系统协调性评价[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2012,37(3):67-71.
- [5] 杨头平. 欠发达地区县域生态经济发展模式分析及其启示[J]. 经济地理,2012,32(1):13-18.
- [6] 盛明兰. 县域经济发展水平评价及分析建议:以重庆市为例[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2000,33(6):106-111.
- [7] 王爱辉. 天山北坡城市群经济、社会与环境协调发展与对策[J]. 水土保持研究,2014,21(2):316-332.
- [8] 王爱辉. 干旱区绿洲型生态城市建设能力评价[J]. 干旱区资源与环境,2011(5):19-24.
- [9] 杨木,奚砚涛,李高金. 徐州市生态环境—社会经济系统耦合态势分析[J]. 水土保持研究,2012,19(2):137-141.
- [10] 胡碧玉,胡昌升,郭郡郡. 基于熵权的川北城市生态系统健康综合评价[J]. 水土保持研究,2010,17(6):158-162,168.
- [11] 余凤鸣,周杜辉,杜忠潮. 陕西省经济发展与生态环境耦合关系研究[J]. 水土保持通报,2012,32(4):292-297.
- [12] 王爱辉,张丹,戴新俊. 干旱区绿洲型城市土地持续利用评价:以奎屯市为例[J]. 干旱区地理,2006,29(3):431-438.
- [13] 方创琳. 中国西部地区城市群形成发育现状与建设重点[J]. 干旱区地理,2010,33(5):667-675.
- [14] 周玄德,孜比布拉·司马义,严姝,等. 新疆南部主要中心城市竞争力研究[J]. 水土保持研究,2012,19(6):264-268.
- [15] 周亚雄,王必达. 我国西部欠发达地区资源依赖型经济的资源诅咒分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(1):25-29.
- [16] 黄梅,甘德欣,唐常春,等. “两型社会”背景下长株潭生态工业网络构建研究[J]. 经济地理,2011,31(2):271-276.

(上接第234页)

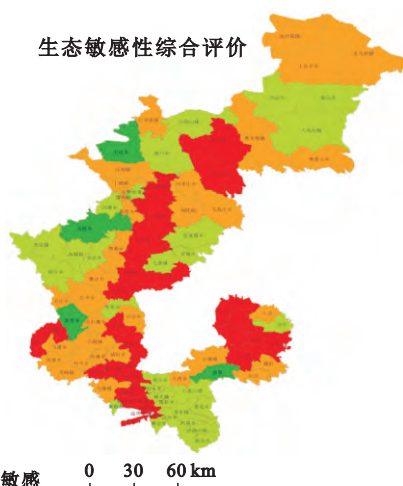
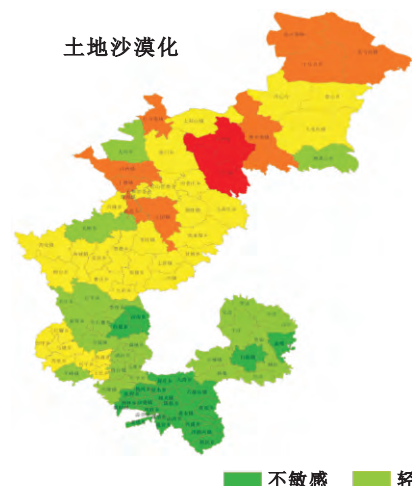
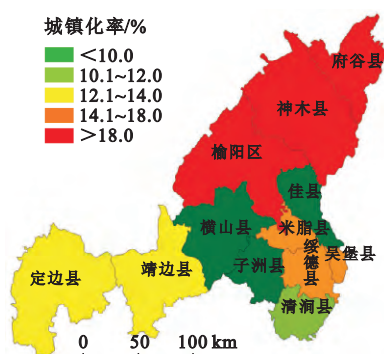
- [4] 李慧,王鹏新. 基于 Terra-MODIS 和 NOAA-AVHRR 数据的条件植被温度指数干旱监测及其对比分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(3):61-66.
- [5] 康为民,罗宇翔,郑小波,等. 贵州温度植被干旱的指数(TVDI)特征及其遥感干旱的监测应用[J]. 贵州农业科学,2008,36(4):27-30.
- [6] 范辽生,姜纪红,盛晖,等. 利用温度植被干旱指数(TVDI)方法反演杭州伏旱期土壤水分[J]. 中国农业气象,2009,30(2):230-234.
- [7] 姚春生,张增祥,汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用,2004,19(6):473-478.
- [8] 齐述华,王长耀,牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报,2003,7(5):420-427.
- [9] 向大亨,刘良明,韩涛. FY-3AMERSI 数据干旱监测能力评价[J]. 武汉大学学报,2010,35(3):56-62.
- [10] 王小广. 生态脆弱区农业经济发展模式及对策研究:以四川攀西地区为例[J]. 生态农业研究,1994,2(1):41-46.
- [11] 冯锐,纪瑞鹏,武晋雯,等. FY3/MERSI 和 EOS/MODIS 归一化植被指数差异分析[J]. 中国农学通报,2010,26(19):359-362.
- [12] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 2003, 108(D22):4688-4694.
- [13] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(2):213-224.
- [14] 张顺谦,卿清涛,侯美亭,等. 基于温度植被干旱指数的四川伏旱遥感监测与影响评估[J]. 农业工程学报,2007,23(9):141-146.
- [15] 易佳,杨世琦,田永中,等. 基于温度植被特征空间的夏季重庆土壤干湿状况与土地利用关系研究[J]. 中国农学通报,2010,26(22):183-189.



附图6 2010年榆林市水资源人均可供水量空间分布情况



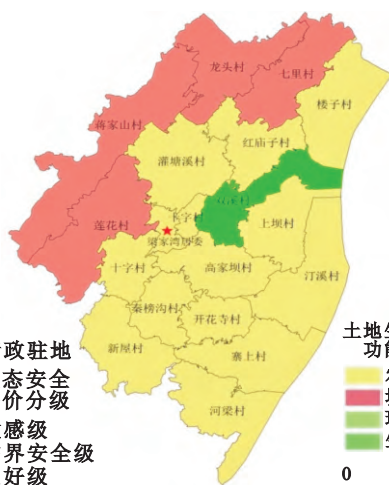
附图7 2010年榆林市人口密度与城镇化特征



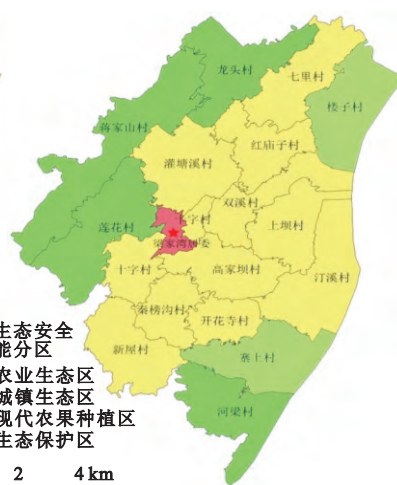
附图8 宁夏限制开发生态区生态敏感性分布



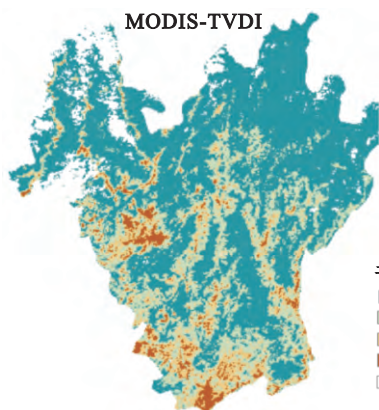
附图9 重庆市丰都县十直镇2011年土地利用现状分布



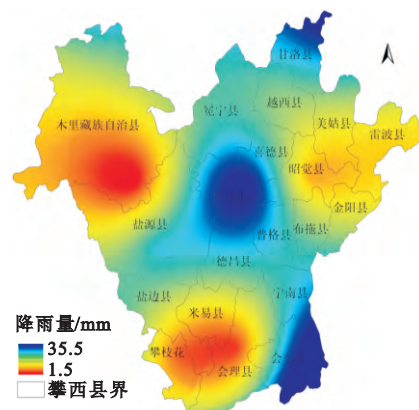
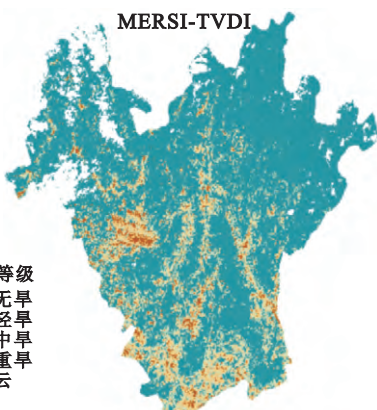
附图10 重庆市丰都县十直镇土地生态安全综合评价分级



附图11 重庆市丰都县十直镇土地生态功能区



附图12 攀西地区的MODIS-TVDI和MERSI-TVDI结果



附图13 攀西地区降雨量累计分布