doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.038

基于多源数据的武陵山区干旱监测研究*

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 农业部规划设计研究院, 北京 100125)

摘要:由于地表复杂性和气候环境等因素影响,针对采用遥感指标进行旱情监测具有一定局限性,利用 EOS/ MODIS 数据建立遥感旱情监测指标——温度植被干旱指数(TVDI),结合地面气象因子的降水量距平指数(PPAI), 构建线性加权形式的综合干旱监测指数(IMDI),应用该指数和 TVDI 指数在 2010 年 4 月中旬和 2011 年 4 月下旬 对武陵山区进行了干旱监测试验研究,通过与 10 cm 深度土壤水分拟合及标准化降水指数(SPI)关系对比分析,认 为 IMDI 和 TVDI 能够进行该区域的干旱监测,IMDI 较 TVDI 更具稳定性,而 SPI 在干旱发生时易加重旱情判定结 果。

关键词:干旱监测 MODIS 数据 温度植被干旱指数 标准化降水指数 中图分类号: S127; X833 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2014)01-0246-07

引言

干旱是一种较为常见的周期性发生的复杂的自 然灾害,随着遥感技术的不断发展,利用遥感手段监 测大范围旱情的研究在国内外已有很大进展。 Watson 等^[1]最早成功应用了热惯量模型,Idso 等^[2] 基于能量平衡原理提出了作物缺水指数(Crop water stress index, CWSI)的概念,很多学者对该指数进行 了深入研究和应用^[3-8],但该指数需要考虑因素较 为复杂,精度取决于地面气象参数的外推范围。与 其相比,基于植被光谱特征,构建各种植被指数进行 旱情监测的研究相比来说应用更为广泛。Kogan^[9] 将在多年极端天气条件(干旱和非干旱)下计算得 到的 NDVI 的最大和最小值作为量化气候影响的指 标,提出了植被状态指数(VCI)的概念,认为 VCI 不 仅描述了土地覆盖和植被时空变化,而且反映了天 气条件对植被的影响。在随后的研究中发现,在相 对均质地区,VCI能更好地反映降水的动态变化,并 提出了温度条件指数(TCI),该指数对温度变化较 为敏感,更适宜于实时的旱情监测^[10]。在已有研究 的基础上,王鹏新等^[11~12]提出了条件植被温度指数 (VTCI)。Goetz^[13]认为温度作为水分胁迫指标更具 有时效性, Sandholt 等^[14]在 Carlson^[15]、Nemani^[16] 等的植被供水指数研究和 Moran^[6]的梯形理论基础 上,提出了温度植被干旱指数(TVDI),其特征空间 的概念使不同地表覆盖度下旱情有了更为合理的解释。随着 Terra 和 Auqa 卫星携带的新一代中分辨率成像光谱仪(MODIS)的出现,其高光谱分辨率、多个光谱波段以及更高的分辨率波段较 NOAA/ AVHRR 进行旱情遥感监测优势更为突出,TVDI 有 了更为广泛的应用^[17-26]。

由于地表的复杂性和气候环境的多变性,单一的遥感指数存在光谱分辨率和空间分辨率等方面的制约,唐巍等^[27]提出将遥感监测与传统的气象监测相结合,有利于增强模型的适用性,进而为提高业务化监测干旱探索出新的方法。孙丽等^[28]基于该研究成果,提出了由 TVDI 和降水距平指数(PPAI)构成的综合干旱监测指数(IDMI),对中国冬小麦主产区进行了多期监测,效果较好。

本文尝试利用 EOS/MODIS 数据和气象站的降水 数据,建立 TVDI、IDMI 及标准化降水指数(SPI)对地形 和气候相对复杂的武陵山区进行干旱监测研究。

1 研究方法

1.1 温度植被干旱指数(*I*_{TVDI})

温度植被干旱指数的基本原理是:对于一个区域,若地表覆盖从裸土到密闭植被冠层,土壤湿度由 干旱到湿润,则该区域每个像元的归一化植被指数 (NDVI)和地表温度(*T*_s)组成的散点图呈现为梯 形^[6,29-30]。

收稿日期: 2013-07-25 修回日期: 2013-08-30

^{*&}quot;十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAH33B02)

作者简介:孙丽,博士生,农业部规划设计研究院高级工程师,主要从事农业旱情遥感监测研究,E-mail: sunli0618@163.com 通讯作者: 李保国,教授,博士生导师,主要从事水土资源管理和资源环境信息技术研究,E-mail: libg@ cau.edu.cn

(2)

 T_s – NDVI 特征空间得到理论模型的论证和田间数据的支持,在此基础上 Sandholt 等^[14]提出了 TVDI 的概念,公式为

$$I_{\rm TVDI} = \frac{T_s - T_{\rm smin}}{T_{\rm smax} - T_{\rm smin}} \tag{1}$$

式中 T_s——任意像元的冠层温度,K

 T_{smin}——某一 NDVI 对应的最低冠层温度,即

 湿边,K

$$T_{\rm smin} = a_2 + b_2 I_{\rm NDVI} \tag{3}$$

式中 a1、b1、a2、b2 — 干、湿边方程拟合系数

 $T_{\rm smax} = a_1 + b_1 I_{\rm NDVI}$

由公式可推知, *I*_{TVDI}值域范围是 0~1之间。 *I*_{TVDI}值越大,表明越干旱。

1.2 综合干旱指数(*I*_{IMDI})

该指数由温度植被干旱指数(*I*_{TVDI})与气象数据 降水距平指数(*I*_{PPAI})通过线性加权生成,其中,*I*_{TVDI} 指数求取见式(1)。

降水距平指数(I_{PPAI})计算公式为

$$I_{\rm PPAI} = \frac{R-R}{\overline{R}} \times 100\% \tag{4}$$

式中 R——降水量 R——平均降水量

*I*_{PPAI}值域为 - 100 ~ + ∞,该值越大,表明越湿 润,越小,则越干旱。为保证*I*_{TVDI}和*I*_{PPAI}具有同向 性,将*I*_{PPAI}进行变形处理,公式为

$$I_{\rm PPAI} = \frac{100 \, \overline{\frac{R-R}{R}} + 100}{2} \tag{5}$$

此时,该指数的值域范围是 - ∞ ~100,该值越 大,越干旱。为更加明确该指数的域值区间,对降水 量 *R* 进行了分级定义:当 *R* > 2 \overline{R} 时, $I_{PPAI} < 0$,定义 $I_{PPAI} = 0$;当 $\overline{R} < R \leq 2 \overline{R}$ 时, $I_{PPAI} \in [0, 50)$;当 $\frac{1}{2}\overline{R} < R \leq \overline{R}$ 时, $I_{PPAI} \in [50, 75)$;当 $0 \leq R \leq \frac{1}{2}\overline{R}$ 时, $I_{PPAI} \in [75, 100]_{\circ}$

由于干旱是较长时间缺水造成的,在构建气象 指数时,应该考虑前期降水的影响,而有效降水难以 有效估计,因此,本研究以旬为时间单位,考虑连续 三旬的降水量,进行加权平均,构建一个连续时段内 的降水距平指数,其表达式为

 $I_{MPPAI} = A_1 I_{PPAI_1} + A_2 I_{PPAI_2} + A_3 I_{PPAI_3}$ (6) 式中, $A_1 \, A_2 \, A_3$ 是权重系数, 分别取 0.7、0.2、0.1; $I_{PPAI_1} \, I_{PPAI_2} \, I_{PPAI_3}$ 分别是当旬、前一旬及前两旬的降 水距平值, I_{MPPAI} 的域值区间为[0,100], 该值越大, 表明越干旱。

综合干旱指数(I_{IDMI})表达式为

$$I_{\rm IDMI} = B_1 I_{\rm TVDI} + B_2 I_{\rm MPPAI} \tag{7}$$

式中, B₁、B₂ 为权重系数。其确定方法参见文献[28]。B₁取0.3, B₂取0.7。I_{IDMI}表达式为

$$I_{\rm IDMI} = 0.3 \times 100 I_{\rm TVDI} + 0.7 I_{\rm MPPAI}$$
(8)

式中,*I*_{IDMI}值域范围是[0,100]。其值越大,表明越 干旱。

1.3 标准化降水指数(I_{SPI})

SPI是 McKee 等^[31] 1993 年提出的一个相对简 单的干旱指数,其基本特点是:只需要较长时间的降 水量(一般应超过 30 a)资料,即可计算不同时间尺 度的干旱指数,主要是基于自然降水的 Γ 分布,然 后经过正态分布标准化变换而得出。袁文平等^[32] 研究认为该指数优于在我国广泛使用的 Z 指数,对 于旱涝灾害具有良好的预测作用,可用于我国不同 时间尺度的干旱监测。由于计算 SPI 的资料易于获 得,且相对简单,能够较好地反映干旱强度和持续时 间,具有相同干旱等级标准,可进行多时间尺度的旱 涝等级对比分析,而且在不同地区和不同时段均具 有良好的稳定性,因而得到广泛应用。

该指数需要先求出降水量 *Γ* 分布概率,然后进行正态标准化而得,其计算步骤为:

(1)假设某时段降水量为随机变量 x,则其 Γ 分 布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)} x^{\gamma - 1} e^{-x/\beta} \quad (x > 0)$$
 (9)

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty x^{\gamma-1} \mathrm{e}^{-x} \mathrm{d}x \qquad (10)$$

其中,β>0,γ>0,分别为尺度和形状参数,β和γ可 用极大似然估计方法求得

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}}{4A} \tag{11}$$

$$\hat{\beta} = \bar{x}/\hat{\gamma} \tag{12}$$

$$A = \lg \overline{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \lg x_i$$
 (13)

式中 x_i——降水量资料样本

x----降水量多年平均值

确定概率密度函数中的参数后,对于某一年的降水 量 x₀,可求出随机变量 x 小于 x₀ 事件的概率为

$$P(x < x_0) = \int_0^\infty f(x) \, \mathrm{d}x$$
 (14)

利用数值积分可以计算用式(11)代入式(14) 后的事件概率近似估计值。

(2) 降水量为0时的事件概率估计式为

$$P(x=0) = m/n \tag{15}$$

式中 m——降水量为0的样本数

n-----样本总数

(3)对 Γ 分布概率进行正态标准化处理,即将式(14)、(15)求得的概率值代入标准化正态分布函数,即

$$P(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-z^2/2} dx \qquad (16)$$

对式(11)进行近似求解可得

$$I_{\rm SPI} = S \, \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0}$$
(17)

其中, $t = \sqrt{\ln \frac{1}{P^2}}$, P为式(14)或式(15)求得的概 率,并当 P>0.5时,S=1;当 P < 0.5时,S=-1。 $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

2 试验

2.1 研究区域

以武陵山区为研究区域,其范围是北纬 25.56° 至 31.64°,东经 106.34°至 113.09°。包括湖北、湖 南、贵州和重庆 4 省市 11 个地(市、州)的 71 个县 (市、区)。该区域为亚热带向暖温带过渡类型气 候,多年平均气温为 17.50°C,平均降水量为 1 104.20 mm,年均蒸发量 950.40 mm。区内地形地 貌复杂多样,森林覆盖率高,有明显的山区立体气 候。土地利用方式以农业为主。据统计,该区域土 地面积约 333 350 hm²,耕地面积 92 004.6 hm²,水浇 地 面 积 22 907.8 hm², 15°以上坡耕地面积 58 336.3 hm^{2[33]}。虽然区内水能资源丰富,但农业基 础条件相对落后,季节性降水偏少常会引发干旱灾 害,局部地区较为突出,给农业生产造成很大不利影 响。基于软件平台,得到研究区域分布图,如图1 所 示。

2.2 数据来源与处理

利用能接收美国 EOS/MODIS 遥感数据的数字 信号广播系统(Digital video broadcast system, DVBS) 提供的 MODIS 1B 数据,基于 ENVI/IDL 软件平台对 2010 年4 月中旬和 2011 年4 月下旬 1 km 分辨率数 据进行处理、合成,生成温度植被干旱指数(TVDI), 具体参数求算参见文献[28]。气象数据来源于中 国气象局,以旬为时间单位获取,包括降水、气温、受 灾情况等有关信息。

由于降水距平等气象数据为点数据,非区域面 上的数据,而遥感数据是面域数据,将两者进行融 合,需要把点站数据进行空间插值。不同插值方法 的选择,对监测结果有直接影响。根据刘志红等^[34]



Fig. 1 Distribution of Wuling mountain area

研究结果,在本研究中,采用 ANUSPLIN 软件进行气 象要素空间插值。在 GIS 软件平台上,根据武陵山 区边界数据对插值结果进行剪裁,得到研究区的降 水距平面值图。根据综合干旱指数模型,将 TVDI 与降水距平插值数据进行融合,得到综合干旱指数。

为使监测结果具有针对性,本研究基于吴炳方 等^[35]研究成果,对武陵山区域进行了耕地范围的提 取。上述模型方法均在耕地范围内使用。

2.3 试验结果与分析

2.3.1 IDMI 和 TVDI 与土壤含水率关系分析

齐述华等^[36]利用 MODIS 构建了多个遥感干旱 指数模型,通过与表层土壤水分的关系分析确定了 不同时期适宜的干旱指数。吴孟泉等^[37]利用 MODIS 构建了 TVDI 指数,通过与表层土壤水分的 拟合,认为该指数适于大区域尺度的干旱监测。王 颖等^[38]利用中低分辨率卫星 FY - 3A/MERSI 构建 了遥感指数,并与气象干旱指数 SPI 融合,对重庆进 行了伏旱监测,在验证过程中,分别与10 cm 和 20 cm深度土壤水分拟合,得出 10 cm 深度的相关性 更为稳定。张洁等^[39]在构建了多个遥感干旱指数 对华北平原中部进行了冬小麦生长季的干旱监测, 并分别与10 cm、20 cm 和 50 cm 深度的土壤水分进 行关系分析,得出10 cm 是土壤含水率估算的最佳 深度,该结论与孙丽等^[40]的结论一致。众多研究认 为,基于温度和植被指数的干旱指数具有更强的机 理性,可以进行区域干旱监测,而在进行验证时,往 往遥感干旱指数与土壤含水率拟合系数整体偏低, 其原因分析主要有:在进行区域尺度监测时,多用中 低分辨率遥感数据,为250~1000 m,而地面实测土 壤湿度是一个点,从点值到面值固然会存在一定误 差;农气站点分布不均衡,不同土壤及植被覆盖等对 水分影响较大;遥感数据和地面气象数据获取时间 的不同步性等。鉴于目前诸多研究常采用同期气象 条件或土壤水分进行关系对比的验证分析方法,在 本研究中也以此为验证手段,实现基于多源数据的 武陵山区干旱监测应用。

将 2010 年 4 月中旬和 2011 年 4 月下旬两期武 陵山区的综合干旱指数(IDMI)和温度植被干旱指 数(TVDI)分别与 10 cm 深度土壤相对含水率 (SM10)进行关系分析。其中,同期土壤相对含水率 点有 8 个,包括湖北 2 个,湖南 3 个,重庆 2 个,贵州 1 个。拟合线性方程及相关统计参数详见表 1。该 表所用土壤含水率数据为国家气象局提供的旬农气 监测数据。

表 1 IDMI、TVDI 与 10 cm 深度土壤湿度(SM10) 关系分析表

Tab.1 Correlation between IDMI, or TVDI and soil moisture in 10cm depth

监测时间	IDMI 与 SM10 拟合 方程、复相关系数、 显著水平及 F 检验值	TVDI 与 SM10 拟合方程、 复相关系数、显著 水平及 F 检验值
2010年4月中旬	$y = -706x + 118$ $R^{2} = 0.563$ $P = 0.03 < 0.05$ $\text{d} \bar{x} \bar{x} (F = 7.73)$	y = -55.41x + 106 $R^2 = 0.493$ P = 0.052 > 0.05 $\overline{\Lambda}$ $\overline{\Delta}$ \overline{A} $(F = 5.84)$
2011年4月下旬	$y = -1.503x + 197.1$ $R^{2} = 0.564$ $P = 0.03 < 0.05$ $\text{Be} \dot{R} (F = 7.78)$	$y = -254.4x + 260.4$ $R^{2} = 0.551$ $P = 0.006 < 0.01$ $W \ \text{Left}(F = 16.75)$

表1中,除2010年4月中旬TVDI与SM10拟 合关系不显著外,其他均达到置信度为95%的显著 相关以上水平,其中,2011年4月下旬,TVDI与 SM10拟合达到极显著相关水平。但总体上,IDMI 与SM10拟合关系相比TVDI的拟合更为稳定,因此 认为其更适宜用于基于土壤水分的干旱监测。

2.3.2 IDMI、TVDI 与 SPI 监测结果对比分析

由于干旱的形成原因较为复杂,影响因素多,在 干旱指标的选取上也受到了时间和空间尺度的诸多 限制。McKee 等提出的标准化降水指数 SPI 采用 Γ 函数分布来反映降水量的变化,表征某时段降水量 出现的概率,弱化了区域和时间差异带来的限制,使 不同地区和不同时段发生的干旱具有了可比性并得 到了广泛应用^[41-43]。并认为该指数可以用于农业 区的干旱监测^[44],因此,在本研究中,将基于遥感的 IDMI和 TVDI 2 个干旱指数与 SPI 进行相关性分 析,统计结果见表 2。

表 2 IMDI、TVDI 与 SPI 的相关系数 Tab. 2 Correlations of IMDI,、TVDI and SPI

叶词	IMDI 与 SPI	TVDI 与 SPI
印1日	相关系数	相关系数
2010年4月中旬	0.974	0.737
2011 年 4 月下旬	0.984	0. 792

由表 2 可知, IMDI 和 TVDI 与 SPI 的相关系数 均超过 0.70, 说明两指数与 SPI 具有较强的相关性, 而 IMDI 与 SPI 的相关性大于 0.95, 较 TVDI 更具一 致性。

参照土壤水分的旱情评定标准(见表 3)和 SPI 等级划分标准(见表 4),应用 IDMI、TVDI及 SPI 对 武陵山区 2010 年 4 月中旬和 2011 年 4 月下旬进行 旱情监测试验研究,结果如图 2 所示。

表 3 基于土壤含水率的旱情评定标准 Tab.3 Drought criterion of soil moisture

表4 SPI干旱等级标准

Tab. 4 Drought criterion of SPI

序号	等级名称	I _{SPI} 范围	出现频率/%
1	无 旱	$-0.5 < I_{\rm SPI}$	68
2	轻 旱	$-1.0 < I_{\rm SPI} \leqslant -0.5$	15
3	中 旱	$-1.5 < I_{\rm SPI} \leqslant -1.0$	10
4	重旱	$-2.0 < I_{\rm SPI} \leqslant -1.5$	5
5	特 旱	$I_{\rm SPI} \leq -2.0$	2

在 2010 年 4 月中旬的监测结果中,未出现明显 的干旱区域,大部为适宜,局部为过湿。而 TVDI 的 过湿范围有些过大,说明对土壤水分的反演值偏高; SPI 监测结果中,由于其等级划分中未含有过湿,因 此大部为适宜,与 IMDI 趋势基本一致。在 2011 年 4 月下旬的监测结果中,可以看出,西南部出现了不 同程度的旱情,北部和东部基本适宜。TVDI 的监测 结果中,大部为适宜,虽然在西南部和东南部出现了 少量轻旱区域,但旱情反映程度总体偏轻;SPI 监测 结果与之相反,大部为干旱发生区域,其旱情程度分 布比 IMDI 整体偏重。



图 2 武陵山区 IDMI、TVDI及 SPI 干旱监测结果对比图 Fig. 2 Drought comparison charts of IMDI, TVDI and SPI in Wuling mountain area (a) IMDI (b) TVDI (c) SPI

3 结论

(1)将温度植被干旱指数与降水距平指数结合,构建综合干旱指数(IMDI),在武陵山区进行了 旱情监测应用,并与 TVDI 进行比较,通过与 10 cm 深度土壤相对含水率关系分析表明, IMDI、TVDI 均 能较好反映出区域尺度旱情,但 IMDI 监测干旱更 具稳定性。

(2)由于 IMDI 融合了反映地表信息的遥感指标 TVDI 和降水变化量指标 PPAI,克服了单一手段监测干旱的局限性,通过 IMDI、TVDI 与 SPI 的对比分析,认为 IMDI 能够客观反映出旱情的分布情况,而基于降水的 SPI 在发生旱情时,容易加重旱情判定结果。

参考文献

- 1 Watson K, Rowen L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images [J]. Remote Sensing of Environment, 1971, 3:2017 ~ 2041.
- 2 Idso S B, Jackson R D, Jr Pinter P J, et al. Normalizing the stress-degree-day for environmental variability [J]. Agricultural Meteorology, 1981, 24:45 ~ 55.
- 3 田国良. 土壤水分的遥感监测方法[J]. 环境遥感,1991,6(2):89~99. Tian Guoliang. The method of monitoring soil moisture by remote sensing[J]. Journal of Environment Remote Sensing, 1991, 6(2):89~99. (in Chinese)
- 4 武晓波,阎守邑,田国良,等. 在 GIS 支持下用 NOAA/AVHRR 数据进行旱情监测[J]. 遥感学报,1998, 2(4):280~284. Wu Xiaobo,Yan Shouyong,Tian Guoliang, et al. Using NOAA/AVHRR data to monitor drought with GIS[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(4):280~284. (in Chinese)
- 5 David L B Jupp. Constrained two layer models for estimating evapotronspiration [C]. 11th Asia Conference on Remote Sensing Guangzhou, China, 1990.
- 6 Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between suface-air temperature and spectral vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3):246~263.
- 7 李韵珠,陆景文,吕梅,等.作物干旱指数(CWSI)和土壤干旱指数(SWSI)[J].土壤学报,1995,32(2):202~209. Li Yunzhu,Lu Jingwen,Lü Mei, et al. Crop water stress index(CWSI) and soil water stress index(SWSI)[J]. Acta Pedologica Sinica, 1995,32(2):202~209. (in Chinese)
- 8 蔡焕杰,熊运章,李培德. 遥感红外温度估算农田土壤水分状况研究[J]. 西北农业大学学报,1994,22(1):113~117. Cai Huanjie, Xiong Yunzhang, Li Peide. Remote sensing of infrared canopy temperature to estimate soil water status[J]. Acta Universitatis Agriculturae. Boreali-Occidentalis,1994,22(1):113~117. (in Chinese)
- 9 Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas [J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8): 1405 ~ 1419.
- 10 Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection [J]. Advances in Space Research, 1995, 15(11):91 ~ 100.
- 11 王鹏新,龚健雅,李小文.条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J].武汉大学学报,2001,26(5):412~418.
 Wang Pengxin,Gong Jianya,Li Xiaowen. Vegetation-Temperature condition index and its application for drought monitoring[J].
 Editoral Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5):412~418. (in Chinese)
- 12 王鹏新,Wan Z M,龚健雅,等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展,2003, 18(8):527~533. Wang Pengxin, Wan Z M, Gong Jianya, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation and land surface temperature products[J]. Advance in Earth Sciences,2003, 18(8):527~533. (in Chinese)
- 13 Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(5):71 ~ 94.

- 14 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(2~3): 213~224.
- 15 Carlson T N. Remote sensing estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for gricultural fields [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 52(1~2):45~69.
- 16 Nemani R R, Running S W, Lars Pierce. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status [J]. Journal of Applied Meteorology, 1993, 32:548 ~ 557.
- 17 高磊,覃志豪,卢丽萍. 基于植被指数和地表温度特征空间的农业干旱监测模型研究综述[J]. 国土资源遥感,2007(3): 1~7.

Gao Lei, Qin Zhihao, Lu Liping. An overview on agricultural drought monitoring models based on vegetation index and surface temperature feature space[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007(3): 1 ~7. (in Chinese)

18 江东,王乃斌,杨小唤,等 植被指数-地面温度特征空间的生态学内涵及其应用[J]. 地理科学进展, 2001, 20(2): 146~152. Jiang Dong, Wang Naibin, Yang Xiaohuan, et al. Ecological connotation and application of the vegetation index-surface

temperature feature space[J]. Advance in Earth Sciences,2001, 20(2): 146 ~152. (in Chinese)

- 19 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. Qi Shuhua,Wang Changyao, Niu Zheng. Evaluating soil moisture status in China using the temperature/vegetation dryness index (TVDI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2003,7(5):420~427. (in Chinese)
- 20 Wang C, Qi S, Niu Z, et al. Evaluating soil moisture status in china using temperature vegetation dryness index (TVDI) [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(5): 671 ~ 679.
- 21 李红军,郑力,雷玉平,等. 植被指数-地表温度特征空间研究及其在旱情监测中的应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11):170~174.

Li Hongjun, Zheng Li, Lei Yuping, et al. Vegetation index-surface temperature feature space and its application in the regional drought monitoring[J]. Transactions of the CASE, 2006, 22 (11): 170 ~ 174. (in Chinese)

- 22 Xin J, Tian G, Liu W, et al. Combining vegetation index and remotely sensed temperature for estimation of soil moisture in China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(10): 2071 ~ 2075.
- 23 柳钦火,辛景峰,辛晓洲,等. 基于地表温度和植被指数的农业干旱遥感监测方法[J]. 科学导报, 2007, 25 (6): 12~18.
 Liu Qinhuo, Xin Jingfeng, Xin Xiaozhou, et al. Monitoring agricultural drought by vegetation index and remotely sensed temperature
 [J]. Science & Technology Review, 2007, 25 (6): 12~18. (in Chinese)
- 24 魏国栓,沈润平,丁国香. 仪征地区农田深层土壤湿度遥感反演初探[J]. 遥感技术与应用,2008,21(1):36~41. Wei Guoshuan,Shen Runping,Ding Guoxiang. Primary studies on estimating soil moisture in deep layer of farmland by remote sensing in Yizheng[J]. Remote Sensing Technology and Application,2008,21(1):36~41. (in Chinese)
- 25 杨曦,武建军,闫峰,等. 基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. 生态学报,2009,29(3):1205~1216. Yang Xi,Wu Jianjun,Yan Feng, et al. Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperatue/ vegetation index space[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(3):1205~1216. (in Chinese)
- 26 Patel N R, Anapashsha R, Kumar S, et al. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009,30(1): 23 ~ 39.
- 27 唐巍,覃志豪,秦晓敏. 农业干旱遥感监测业务化运行方法研究[J]. 遥感信息,2007(2): 37~42.
 Tang Wei,Qin Zhihao,Qin Xiaomin. Operational method for crop drought monitoring[J]. Remote Sensing Information,2007(2): 37~42. (in Chinese)
- 28 Li Sun, Quan Wu, Zhiyuan Pei, et al. Study on drought index in major planting area of winter wheat of China [J]. Sensor Letters, 2012, 10: 453 ~ 458.
- 29 Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evaportranspiration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 940 ~ 948.
- 30 Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurement to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(1 ~ 2): 161 ~ 173.
- 31 McKee T B, Doesken N J, Kliest J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C] // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Boston, MA: American Meteorological Society, 1993:179 ~ 184.
- 32 袁文平,周广胜.标准化降水指标与Z指数在我国应用的对比分析[J].植物生态学报,2004,28(4):523~529. Yuan Wenping, Zhou Guangsheng. Comparison between standardized precipitation index and Z index in China [J]. Acta Phytoecologica Sinica,2004,28(4):523~529. (in Chinese)
- 33 何治江. 武陵山片区特色农业发展研究[J]. 改革与开放,2012,22:57~58.
- 34 刘志红,Li Lingtao,Tim R McVicar,等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象,2008,34(2):92~100. Liu Zhihong, Li Lingtao,Tim R McVicar, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN[J]. Meteorological Monthly,2008,34(2):92~100. (in Chinese)
- 35 Wu Bingfang, Xu Wenting, Huang Huiping, et al. Combining Spot4-vegetation and meteorological data derived land cover map in China[J]. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 2004, 4: 2 672 ~ 2 675.
- 36 齐述华,李贵才,王长耀,等.利用 MODIS 数据产品进行全国干旱监测的研究[J].水科学进展,2005,16(1):56~61.

Qin Shuhua, Li Duicai, Wang Changyao, et al. Study on monitoring drought in China with MODIS product [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1):56 ~ 61. (in Chinese)

- 37 吴孟泉,崔伟宏,李景刚. 温度植被干旱指数(TVDI)在复杂山区干旱监测的应用研究[J]. 干旱区地理,2007, 30(1):30~35. Wu Mengquan,Cui Hongwei,Li Jinggang. Monitoring drought in mountainous area based on temperature/vegetation dryness index (TVDI) [J]. Arid Land Geography,2007, 30(1):30~35. (in Chinese)
- 38 王颖,李国春,高阳华,等. FY 3A/MERSI 数据在重庆市伏旱监测中的应用[J]. 现代农业科技,2011(10):271~274,278. Wang Ying,Li Guochun,Gao Yanghua, et al. Application of FY - 3A/MERSI satellite data on drought monitoring in Chongqing city[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology,2011(10):271~274,278. (in Chinese)
- 39 张洁,武建军,周磊,等. 基于 MODIS 数据的农业干旱监测方法对比[J]. 遥感信息,2012,12(5):48~54. Zhang Jie,Wu Jianjun,Zhou Lei,et al. Comparative study on remotely sensed methods of monitoring agricultural drought based on MODIS data[J]. Remote Sensing Information,2012,12(5):48~54. (in Chinese)
- 40 孙丽,王飞,吴全. 干旱遥感监测模型在中国冬小麦区的应用[J]. 农业工程学报,2010,26(1): 243~249. Sun Li, Wang Fei, Wu Quan. Drought monitoring by remote sensing in winter-wheat-growing area of China[J]. Transactions of the CASE,2010,26(1): 243~249. (in Chinese)
- 41 Nathaniel B Guttman. Comparing the parmer drought index and the standardized precipitation index[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 113 ~ 121.
- 42 王彦集,刘俊明,王鹏新,等. 基于加权马尔可夫模型的标准化降水指数干旱预测研究[J]. 干旱地区农业研究,2007, 25(5):198~203.

Wang Yanji, Liu Junming, Wang Pengxin, et al. Prediction of drought occurrence based on the standardized precipitation index and the Markov chain model with weights [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(5):198 ~ 203. (in Chinese)

43 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J]. 农业工程学报,2010, 26(7):50~59.

Huang Wanhua, Yang Xiaoguang, Li Maosong, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index[J]. Transactions of the CASE, 2010, 26(7):50 ~ 59. (in Chinese)

44 李红梅,李林,王振宇. 气象干旱指标在青海东部农业区的适用性研究[J]. 青海气象,2010(2):25~28.

Study on Drought Monitoring of Wuling Mountain Area Based on Multi-source Data

Sun Li^{1,2} Wang Fei² Li Baoguo¹ Chen Xiwei²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

Abstract: For the complexity of land surface and the climatic variation, the result of drought monitoring maybe couldn't give us satisfaction only by using the single remote sensing index. A new solution of the problem was put forward. An integrated linear weighted drought monitoring index (IMDI) was suggested, which is incorporated with remote sensing index (TVDI) constructed by EOS/MODIS data and meteorological factor, named percent of precipitation departure (PPAI). Two periods had been selected to monitor drought in Wuling Mountain area including mid- and the late April in 2011. By comparing with soil moisture in 10cm depth from the observatories around the same area in 2010 and 2011, together with contrasting the correlations with SPI, IMDI and TVDI were confirmed to be able to monitor drought distribution in such a large and complicated area and IMDI is superior to TVDI. However, drought monitored by SPI may be more serious than that of actual situation.

Key words: Drought monitoring MODIS data TVDI SPI