

于敏,王春丽. 不同卫星遥感干旱指数在黑龙江的对比应用. 应用气象学报, 2011, 22(2): 221-231.

不同卫星遥感干旱指数在黑龙江的对比应用

于 敏^{1)*} 王春丽²⁾

¹⁾(黑龙江省气象局, 哈尔滨 150001) ²⁾(黑龙江省气候中心, 哈尔滨 150030)

摘 要

采用 MODIS 的 1 km×1 km 分辨率数据, 以我国黑龙江为研究区, 对基于植被指数的植被状态指数(I_{VC})、基于地表温度的温度状态指数(I_{TC})和基于植被指数-地表温度特征空间的植被温度状态指数(I_{VTC})与 10 cm, 20 cm 土壤相对湿度、降水量的关系、3 种指数监测结果及其相互关系进行了对比分析。结果表明: I_{VTC} 相对于 I_{TC} , I_{VC} 更适于反映土壤湿度的变化, 对浅层土壤湿度更加敏感; I_{VTC} 相对于 I_{TC} , I_{VC} 对降水更敏感, 与监测时段的降水和前期总体降水都密切相关; 在生长季早期, I_{VTC} 和 I_{TC} 用于干旱监测的适用性明显优于 I_{VC} ; 不同区域间, I_{VTC} 的可比性较好, I_{VC} 和 I_{TC} 则较差; I_{VTC} 所反映的地表温度信息对于干旱的直接指示作用最强, 所反映的植被信息对于干旱的直接指示作用较弱。

关键词: 干旱监测; 植被状态指数; 温度状态指数; 植被温度状态指数

引 言

干旱是一种在全世界范围普遍发生的自然灾害, 与其他自然灾害相比, 它给人类生活和生态系统带来的损害最为严重。目前, 全球极端干旱的面积正在扩大, 大量事实也揭示了我国北方地区干旱化正在加剧^[1-3], 主要农业区不同程度的干旱面积均有扩大趋势, 国家粮食安全受到严重威胁^[4], 干旱动态和大范围监测已成为当前全球变化和粮食安全领域的研究前沿与热点科学问题, 对防灾减灾、保障国家粮食安全和区域的可持续发展具有重要意义。卫星遥感是快速获取陆地表面分布式信息的重要手段, 时空分辨率高, 时效性强, 其中光学遥感干旱监测技术在过去二十多年发展较成熟, 目前应用较为广泛的基于卫星光学信息的遥感干旱监测方法主要包括基于植被指数的干旱监测方法^[5-13], 如标准植被指数、植被状态指数; 基于地表温度的干旱监测方法^[13-18], 如温度状态指数、归一化温度指数; 基于植被指数和地表温度相结合的干旱监测方法^[19-26], 如水分亏缺指数、植被温度状态指数等。但是干旱的发生发展非常复杂, 它的形成既有大尺度的气候背

景, 又受区域尺度地气相互作用的影响^[27-28], 是自然变化和区域人类活动共同作用的结果, 因此不同区域基于不同物理指标的干旱监测方法的适用性往往并不一致, 所以在具体监测区域, 对于干旱监测方法进行系统检验和评估, 对确保监测结果的有效性和准确性是必要的。

本文采用美国航空航天局(NASA)搭载在 TERRA 卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)的多时相遥感数据, 以我国黑龙江为研究区, 对分别基于植被指数、地表温度、植被指数-地表温度特征空间的植被状态指数(I_{VC})、温度状态指数(I_{TC})、植被温度状态指数(I_{VTC})与土壤相对湿度、降水量的关系、3 种指数的监测差异及 3 种指数之间的相互关系进行了分析, 对 3 种指数在研究区干旱监测中的作用进行了综合评价。

1 方 法

1.1 植被状态指数

Kogan^[22]在 NOAA 系列卫星的甚高分辨率辐射计(AVHRR)的归一化植被指数(I_{NDV})时间序列基础上建立了植被状态指数(I_{VC}), 通过植被生长

2010-08-31 收到, 2010-12-24 收到再改稿。

* E-mail: yy629@sina.com

状态的变化来反应土壤湿度的变化,

$$I_{VCi} = \frac{I_{NDVi} - I_{NDVmin}}{I_{NDVmax} - I_{NDVmin}} \quad (1)$$

式(1)中, I_{NDVi} , I_{NDVmax} , I_{NDVmin} 分别为观测时段内某像素植被指数的当前观测值、多年最大值和最小值。 I_{VC} 取值范围为 0~1, 当其他环境条件和植被覆盖类型不变时, 值越小表示植被长势相对于多年平均状况越差, 它试图从植被变化所反映的长期气候信号中分离出与短期天气有关的信号^[29], 且通过比值法有效降低了季节变化带来的噪音影响, 适合不同陆面系统的气候、生态和天气条件^[23]。

1.2 温度状态指数

Kogan^[24] 在地表温度时间序列基础上建立了温度状态指数, 它是基于植被冠层或土壤表面的温度随着水分胁迫的增加而升高的原理来反映土壤水分状况:

$$I_{TCi} = \frac{T_{smax} - T_{si}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad (2)$$

式(2)中, T_s , T_{smax} , T_{smin} 分别为观测时段内某像素地表温度的当前观测值、多年最大值和最小值。 I_{TC} 取值范围为 0~1, 当其他环境条件和植被覆盖类型不变, 值越小表示植被长势相对于多年平均状况越差, 表明土壤水分状况越差。与 I_{VC} 类似, I_{TC} 主要用于监测干旱引起的植物水分胁迫、评估天气条件对植被的影响等。

1.3 植被温度状态指数

根据地表能量守恒^[30], 当地表蒸散减少时, 潜热减小, 感热增加, 导致地表温度升高。研究表明, 当研

究区地表覆盖满足从裸土到完全植被覆盖的各种覆盖范围、土壤湿度满足从完全干旱到田间持水量的各种湿度条件时, 地表温度(T_s)和归一化植被指数(I_{NDV})的散点图呈三角形分布^[19-20, 31-32], 这种分布被称为 T_s - I_{NDV} 特征空间(图1)。图1中 AC 为特征空间的干边, 由裸土到完全植被覆盖条件下, 各植被指数对应的最大地表温度组成, 干边附近土壤湿度最小, 地表无蒸散, BC 为湿边, 由与干边相应的植被指数对应的最小地表温度组成, 湿边附近土壤湿度最大, 地表蒸散接近潜在蒸散。植被温度状态指数(I_{VTC})建立在 T_s - I_{NDV} 三角形特征空间基础上, 是对 T_s - I_{NDV} 特征空间的抽象和简化^[20-21, 33-35]; 根据 T_s - I_{NDV} 特征空间原理, 可以假设在其他环境因素不变的情况下, 该特征空间中存在着许多表示土壤湿度的等值线(图1), 因此每个像素点在特征空间中的位置可以反映该点的土壤湿度状况, 由此得到反映土壤湿度状况的 I_{VTC} :

$$I_{VTCi} = \frac{T_{I_{NDVi, max}} - T_{I_{NDVi}}}{T_{I_{NDVi, max}} - T_{I_{NDVi, min}}} \quad (3)$$

$$T_{I_{NDVi, max}} = a + bI_{NDVi} \quad (4)$$

$$T_{I_{NDVi, min}} = a' + b'I_{NDVi} \quad (5)$$

式(3)~(5)中, $T_{I_{NDVi}}$ 是特征空间内某给定像素的地表温度当前观测值, 下标为该像素的植被指数观测值, $T_{I_{NDVi, max}}$, $T_{I_{NDVi, min}}$ 分别是特征空间内该植被指数对应的干边和湿边地表温度, 式(4)和(5)分别定义了 T_s - I_{NDV} 特征空间的干边和湿边, a, b, a', b' 分别是干边和湿边的截距和斜率, 通过线性拟合获得。由定义可知, I_{VTC} 其值介于 0~1 之间, 量纲为 1, 其值越低, 表示土壤湿度越低, 反之, 土壤湿度越高。

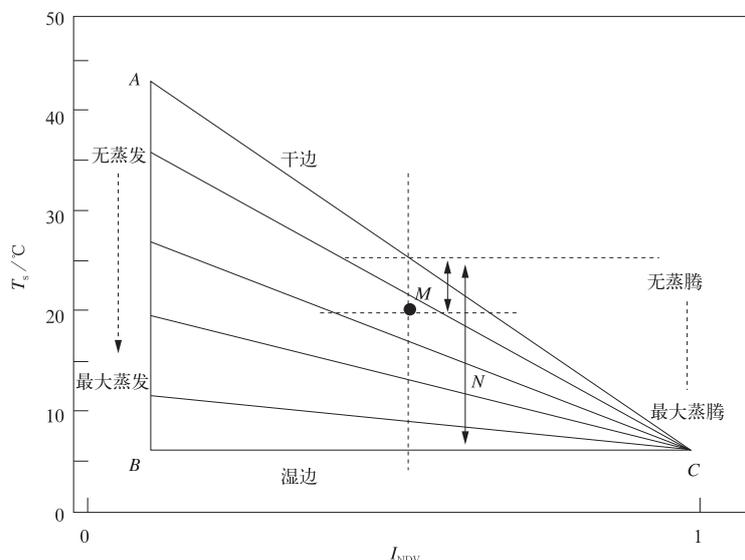


图1 I_{VTC} 定义示意图^[27, 30]

Fig. 1 The definition of I_{VTC} ^[27, 30]

2 研究区和数据处理

本文以黑龙江省为研究区,它地处我国东北部,是重要的粮食产地,土地面积约为 $46 \times 10^4 \text{ km}^2$,地表覆盖类型以农田、森林和牧草为主,属温带、寒温带大陆性季风气候,气候变化剧烈,自东向西由湿润型经半湿润型过渡到半干旱型气候带,年平均降水量为 400~650 mm,植被覆盖类型丰富,地表湿度变化范围大,干旱频发,近年来造成的损失不断攀升,严重威胁到国家粮食安全,其地面气象、水文观测站点稀疏,且分布不均,很难满足干旱动态和大范围监测的需要。

本文所用的卫星数据为美国 NASA 的 MODIS 产品,为减小云、大气条件、观测角度和太阳角度等的影响,并能够有效捕捉干旱的动态变化,选择 16 d 合成的 I_{NDV} (MOD13A2)、8 d 合成的 T_s (MOD11A2),空间分辨率均为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,对相邻两个 8 d 的 T_s 进行算术平均,合成 1 个 16 d 的 T_s 产品,投影坐标系由 Sinusoidal 变换到 Albers 等面积投影,变换后的地理坐标系统的椭球体参数采用 Krassovsky_1940。

地面观测数据来自国家气象信息中心和黑龙江省气象信息中心,包括 2000—2008 年 5 月 9 日—6 月 9 日的黑龙江省各气象观测站的 10 cm, 20 cm 土壤相对湿度和逐日降水量。为与卫星数据 16 d 的时间尺度相匹配,用逐日降水量建立新的以 16 d 为单位的累积降水量序列,常规土壤相对湿度为旬观测数

据,每月 8 日、18 日、28 日进行观测,将常规土壤相对湿度在时间域进行插值,插值成与卫星观测同期的数据。卫星遥感与地面气象观测数据的空间分辨率也不一致,为使两者的空间分辨率相匹配,同时保留地面测站的局地特征,对地面测站的卫星遥感数据进行了缓冲区处理,以地面测站为中心,在其周围 3×3 个像素的窗口内,选择 T_s 标准差小于 $1.41 \text{ }^\circ\text{C}$, I_{NDV} 标准差小于 0.07 的像素,分别用其平均值代表测站相应的卫星遥感指标。

3 I_{VC}, I_{TC}, I_{VTC} 对干旱指示作用的评价

本文分别对 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 分辨率的 I_{VC}, I_{TC}, I_{VTC} 与 10 cm, 20 cm 土壤相对湿度和降水量的相关关系、3 种指数的干旱监测效果以及它们的相互关系进行了分析,所选时间段为 2000—2008 年 5 月 9 日—6 月 9 日,每年该时间段包含两个 16 d 的卫星观测时段,起始时间分别对应于每年的第 129 天和第 145 天,这里分别记为 129(5 月 9 日—5 月 24 日)和 145(5 月 25 日—6 月 9 日)时段,这段时间正值黑龙江省植被进入生长期,植被覆盖度由低到高,且卫星观测受云的影响较小。

3.1 I_{VC}, I_{TC}, I_{VTC} 与土壤相对湿度的关系

表 1、表 2 分别给出了研究区 2000—2008 年 129 和 145 时段的 I_{VC}, I_{TC}, I_{VTC} 与 10 cm, 20 cm 土壤相对湿度的相关系数,由于各年土壤湿度的观测站数量不尽相同,样本给出了各年站点的具体数目。从表

表 1 129 时段 I_{TC}, I_{VC}, I_{VTC} 与土壤相对湿度的相关系数
Table 1 The correlation between I_{TC}, I_{VC}, I_{VTC} and soil relative moisture in the period 129

年份 (样本数)	指数	10 cm 土壤相对湿度	20 cm 土壤相对湿度	年份 (样本数)	指数	10 cm 土壤相对湿度	20 cm 土壤相对湿度
2000 (49)	I_{TC}	0.149	0.203	2005 (66)	I_{TC}	0.300***	0.194*
	I_{VC}	0.238*	0.111		I_{VC}	-0.101	-0.160
	I_{VTC}	0.290***	0.170		I_{VTC}	0.330***	0.248**
2001 (61)	I_{TC}	-0.051	-0.048	2006 (64)	I_{TC}	-0.166	-0.021
	I_{VC}	0.185	0.178		I_{VC}	0.220*	0.022
	I_{VTC}	0.257**	0.210		I_{VTC}	0.279**	0.241**
2002 (62)	I_{TC}	0.049	0.129	2007 (69)	I_{TC}	-0.217	-0.176
	I_{VC}	-0.040*	-0.101		I_{VC}	0.055	0.021
	I_{VTC}	0.139	0.177		I_{VTC}	0.283**	0.253*
2003 (67)	I_{TC}	-0.039	-0.165	2008 (71)	I_{TC}	0.461*****	0.398*****
	I_{VC}	-0.081	-0.107		I_{VC}	-0.084	-0.015
	I_{VTC}	0.222*	0.169		I_{VTC}	0.467*****	0.430*****
2004 (68)	I_{TC}	0.129	0.084				
	I_{VC}	0.002	-0.098				
	I_{VTC}	0.386*****	0.338***				

注:*****,****,***,**,*,* 分别代表相关性通过 0.001, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1 的显著性检验。

表 2 145 时段 I_{TC} , I_{VC} , I_{VTC} 与土壤相对湿度的相关系数Table 2 The correlation between I_{TC} , I_{VC} , I_{VTC} and soil relative moisture in the period 145

年份 (样本数)	指数	10 cm 土壤相对湿度	20 cm 土壤相对湿度	年份 (样本数)	指数	10 cm 土壤相对湿度	20 cm 土壤相对湿度
2000 (43)	I_{TC}	0.305**	0.165	2005 (61)	I_{TC}	0.064	-0.045
	I_{VC}	-0.302	0.144		I_{VC}	-0.233	-0.160
	I_{VTC}	0.435****	0.294**		I_{VTC}	0.292	0.111
2001 (65)	I_{TC}	0.233**	0.037	2006 (72)	I_{TC}	0.037	-0.089
	I_{VC}	0.109	0.039		I_{VC}	0.093	0.022
	I_{VTC}	0.264**	0.189		I_{VTC}	0.117	0.175
2002 (60)	I_{TC}	0.132	0.119	2007 (70)	I_{TC}	0.099	0.148
	I_{VC}	0.232	0.298		I_{VC}	-0.235	0.021
	I_{VTC}	0.323**	0.319**		I_{VTC}	0.451****	0.432****
2003 (67)	I_{TC}	0.087	-0.165	2008 (71)	I_{TC}	0.072	0.024
	I_{VC}	-0.082	0.011		I_{VC}	0.353****	0.354****
	I_{VTC}	0.251**	0.160		I_{VTC}	0.306****	0.331****
2004 (68)	I_{TC}	0.198*	0.191				
	I_{VC}	0.213*	0.198*				
	I_{VTC}	0.366****	0.292***				

注: ****, ***, **, *, * 分别代表相关性通过 0.001, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1 的显著性检验。

1, 2 可以看出, 129 和 145 时段多数年份内 I_{VTC} 与 20 cm 土壤相对湿度的相关性好于 10 cm, 20 cm 土壤相对湿度的相关系数均通过 0.05 的显著性检验, 与 10 cm 土壤相对湿度的相关性好于 20 cm 土壤相对湿度, 而且, I_{VTC} 与 10 cm, 20 cm 土壤

表 3 129 时段 I_{TC} , I_{VC} , I_{VTC} 与降水量的相关系数Table 3 The correlation between I_{TC} , I_{VC} , I_{VTC} and precipitation in the period 129

年份	指数	超前时段				
		0	1	2	3	4
2000	I_{TC}	0.336	0.394	0.460	0.430	0.439
	I_{VC}	0.179	0.206	0.181	0.180	0.151
	I_{VTC}	0.504	0.551	0.539	0.568	0.568
2001	I_{TC}	0.256	0.160	0.130	0.095	0.079
	I_{VC}	0.117	0.302	0.299	0.265	0.261
	I_{VTC}	0.495	0.428	0.398	0.437	0.433
2002	I_{TC}	0.234	0.176	0.166	0.366	0.322
	I_{VC}	0.346	0.296	0.528	0.487	0.481
	I_{VTC}	0.246	0.258	0.343	0.181	0.228
2003	I_{TC}	0.229	0.200	0.141	0.089	0.116
	I_{VC}	0.100	0.044	-0.060	-0.080	-0.090
	I_{VTC}	0.165	0.232	0.231	0.213	0.213
2004	I_{TC}	-0.090	0.039	0.028	0.050	0.068
	I_{VC}	-0.157	-0.095	-0.111	-0.139	-0.142
	I_{VTC}	0.320	0.427	0.443	0.498	0.501
2005	I_{TC}	0.603	0.582	0.523	0.548	0.527
	I_{VC}	-0.022	-0.066	-0.035	-0.011	-0.002
	I_{VTC}	0.679	0.536	0.474	0.493	0.495
2006	I_{TC}	0.125	0.125	0.062	0.032	0.030
	I_{VC}	0.149	0.295	0.278	0.263	0.256
	I_{VTC}	0.361	0.349	0.368	0.382	0.381
2007	I_{TC}	0.160	0.059	0.185	0.189	0.200
	I_{VC}	-0.010	0.055	0.071	0.112	0.095
	I_{VTC}	0.239	0.277	0.081	0.011	-0.016
2008	I_{TC}	0.375	0.580	0.564	0.565	0.541
	I_{VC}	-0.200	-0.169	-0.128	-0.103	-0.115
	I_{VTC}	0.371	0.501	0.465	0.432	0.432

相对湿度的相关性都明显好于 I_{TC} 和 I_{VC} , 表明 I_{VTC} 比 I_{TC} 和 I_{VC} 更适于反映土壤湿度的变化, 且对浅层土壤湿度更加敏感。3 种指数与土壤相对湿度的相关性并不稳定, 可能有以下几个主要原因: 一是各年土壤湿度的观测站点数量不尽相同; 二是各年大气条件、观测角度等对卫星观测的影响不同; 三是尽管常规土壤相对湿度经过了插值和缓冲区处理, 但与卫星观测数据在时间和空间分辨率上的差异依然不能完全消除; 此外, 基于单个时段卫星数据的 T_s-I_{NDV} 特征空间自身也存在一定程度的不稳定性^[36], 所以即使 I_{VTC} 的相关性好于另外两个指数, 但是年际间依然存在不小的波动。

3.2 I_{VC}, I_{TC}, I_{VTC} 与降水量的关系

表 3 和表 4 分别给出了 129 和 145 时段研究区 80 个气象观测站的 I_{VC}, I_{TC}, I_{VTC} 与监测同期及前 1~

4 个时段累积降水量的线性相关系数, 超前时段表示降水量超前于干旱监测时间的累计时段数, 从监测时段本身开始, 按 16 d 为 1 个单位向前累加降水量。例如, 145 时段如果超前时段为 0, 累积降水量就是监测时段本身的降水量; 如果超前时段为 1, 累积降水量就是 145 和 129 这 2 个时段的降水量之和。从表 3 和表 4 可以看出, I_{VTC} 与监测同期的降水量和前 1~4 个时段的累积降水量之间都存在明显的正相关关系, 且都明显好于 I_{VC} 和 I_{TC} 与相应降水量的相关性, 说明 I_{VTC} 比 I_{VC} 和 I_{TC} 对降水更敏感, 且不仅与监测时段的降水而且与前期总体降水事件都密切相关。各年的相关性并不稳定, 大气条件、观测角度的影响及地面与卫星观测数据在时空分辨率上的差异, 以及 T_s-I_{NDV} 特征空间自身的不稳定性^[36], 同样可能是导致这种现象的原因。

表 4 145 时段 I_{TC}, I_{VC}, I_{VTC} 与降水量的相关系数

Table 4 The correlation between I_{TC}, I_{VC}, I_{VTC} and precipitation in the period 145

年份	指数	超前时段				
		0	1	2	3	4
2000	I_{TC}	0.202	0.430	0.432	0.375	0.400
	I_{VC}	-0.381	-0.292	-0.265	-0.249	-0.272
	I_{VTC}	0.375	0.629	0.622	0.617	0.622
2001	I_{TC}	0.276	0.334	0.389	0.387	0.430
	I_{VC}	0.285	0.340	0.417	0.384	0.360
	I_{VTC}	0.480	0.594	0.546	0.514	0.508
2002	I_{TC}	0.125	0.162	0.189	0.152	0.087
	I_{VC}	0.130	0.126	0.151	0.159	0.175
	I_{VTC}	0.288	0.271	0.342	0.307	0.190
2003	I_{TC}	0.091	0.141	0.157	0.213	0.255
	I_{VC}	-0.023	-0.077	-0.100	-0.166	-0.180
	I_{VTC}	0.174	0.209	0.259	0.329	0.375
2004	I_{TC}	0.326	0.462	0.444	0.481	0.503
	I_{VC}	0.214	0.384	0.308	0.280	0.313
	I_{VTC}	0.549	0.628	0.642	0.690	0.673
2005	I_{TC}	0.643	0.529	0.454	0.420	0.403
	I_{VC}	0.204	0.197	0.242	0.209	0.213
	I_{VTC}	0.464	0.412	0.372	0.339	0.337
2006	I_{TC}	0.118	0.086	0.006	0.028	-0.010
	I_{VC}	-0.110	-0.090	0.004	0.002	0.027
	I_{VTC}	0.006	0.154	0.255	0.273	0.267
2007	I_{TC}	0.100	0.263	0.229	0.267	0.266
	I_{VC}	-0.163	-0.112	-0.110	-0.068	-0.108
	I_{VTC}	0.503	0.577	0.568	0.507	0.489
2008	I_{TC}	-0.263	-0.227	-0.063	-0.055	-0.026
	I_{VC}	-0.100	-0.020	0.112	0.104	0.075
	I_{VTC}	0.137	0.220	0.308	0.316	0.326

3.3 I_{VC}, I_{TC}, I_{VTC} 监测结果比较

选择受云影响较小的 2004 年 129 和 145 时段, 对 3 种指数的监测结果进行比较分析, 图 2、图 3 分别

给出了相应的 I_{VC}, I_{TC}, I_{VTC} 的空间分布, 图中白色区域为水体和无效数据, 监测指数值以 0.2 为间隔划分为 5 类。从图 2 可以直观地看出, 在 129 时段 I_{VC} 方

法在大部分区域没有监测结果,主要是由于该时段研究区处于植被生长季早期,植被覆盖度较低,各年的最大、最小 I_{NDV} 基本相同,从而导致大量的无效结果。图3显示在145时段 I_{VC} 方法监测结果的空间覆盖明显提高, I_{TC} 和 I_{VTC} 监测结果的空间覆盖率在两个时段都很高,说明 I_{VC} 方法在生长季早期植被覆盖度较低时,适用性较差,而 I_{TC} 和 I_{VTC} 在生长季早期可以适用。

I_{VC} 和 I_{TC} 适于在同一地点内的同一时段的历史序列中进行比较,两个不同区域之间的比较意义不大, I_{VTC} 则是在整个研究区内提取该区域的干、湿边,这使得不同区域之间的 I_{VTC} 值具有可比性。本文以

129时段的黑河和杜尔伯特站为例来表示这种差别,黑河位于研究区北部,多为森林覆盖,其10 cm土壤相对湿度为99%,杜尔伯特位于西部,多草甸和盐碱地表,其10 cm土壤湿度为41%,相应的 I_{VC} 为0.278, 0.326; I_{TC} 为0.982, 0.058; I_{VTC} 为0.762, 0.361,可见 I_{VC} 值不能比较出这两个站土壤湿度的高低, I_{VC} 和 I_{TC} 虽然可以反映出这种差异,从值的比例看, I_{VTC} 似乎更合理。可以认为, I_{VC} 和 I_{TC} 在不同区域之间可比性较差,而 I_{VTC} 根据地表能量守恒原理,采用植被指数和地表温度的实际观测值并经过归一化处理,在不同区域间的可比性较好。

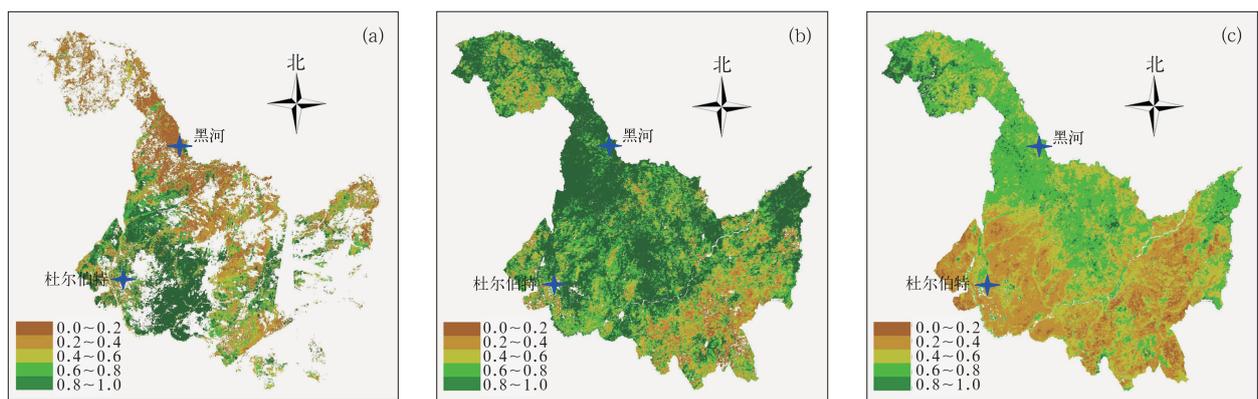


图2 2004年129时段 I_{VC} (a), I_{TC} (b), I_{VTC} (c) 的空间分布(边界内白色区域为水体或无效数据)

Fig. 2 The spatial distribution of I_{VC} (a), I_{TC} (b), I_{VTC} (c) in the period 129 in 2004 (the white area is the water or the invalid value)

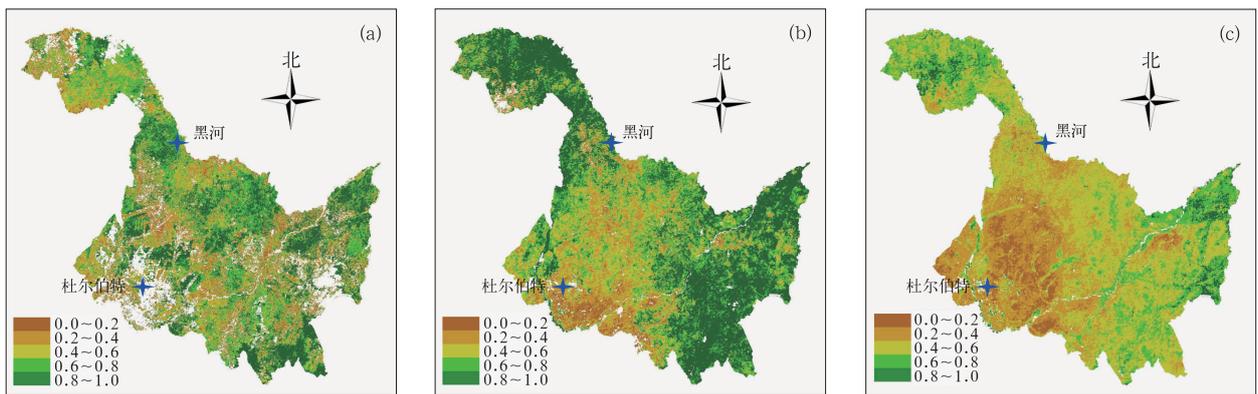


图3 2004年145时段 I_{VC} (a), I_{TC} (b), I_{VTC} (c) 的空间分布(边界内白色区域为水体或无效数据)

Fig. 3 The spatial distribution of I_{VC} (a), I_{TC} (b), I_{VTC} (c) in the period 145 in 2004 (the white area is the water or the invalid value)

3.4 I_{VC} , I_{TC} , I_{VTC} 的相互关系

通过比较 I_{VC} , I_{TC} , I_{VTC} 之间的相关关系,来评价基于植被指数、地表温度及两者相结合的方法在干旱监测中的作用。对3.3节的监测结果按照农田、森林、草原草甸、灌木4种地表覆盖类型分类,分别以同一像素点的 I_{VC} , I_{TC} , I_{VTC} 为横、纵坐标,给出3种指数监测结果的关系散点图。

从图4、图5中可以看出,在各种地表覆盖状况

下, I_{TC} 和 I_{VTC} 之间的正相关关系都很显著,而 I_{VC} 与 I_{VTC} 之间的负相关、 I_{VC} 与 I_{TC} 之间的正相关关系都很不明显,不同的地表类型间,3种指数的相关关系也各有差异,草原草甸的相关性最好,农田次之,然后依次是灌丛和森林,说明在干旱监测中 I_{TC} 与 I_{VTC} 的作用类似,基于 T_s-I_{NDV} 特征空间的 I_{VTC} 所携带的地表温度信息对干旱的直接指示作用较强,而植被信息对干旱的直接指示作用则较弱,这种特征在草

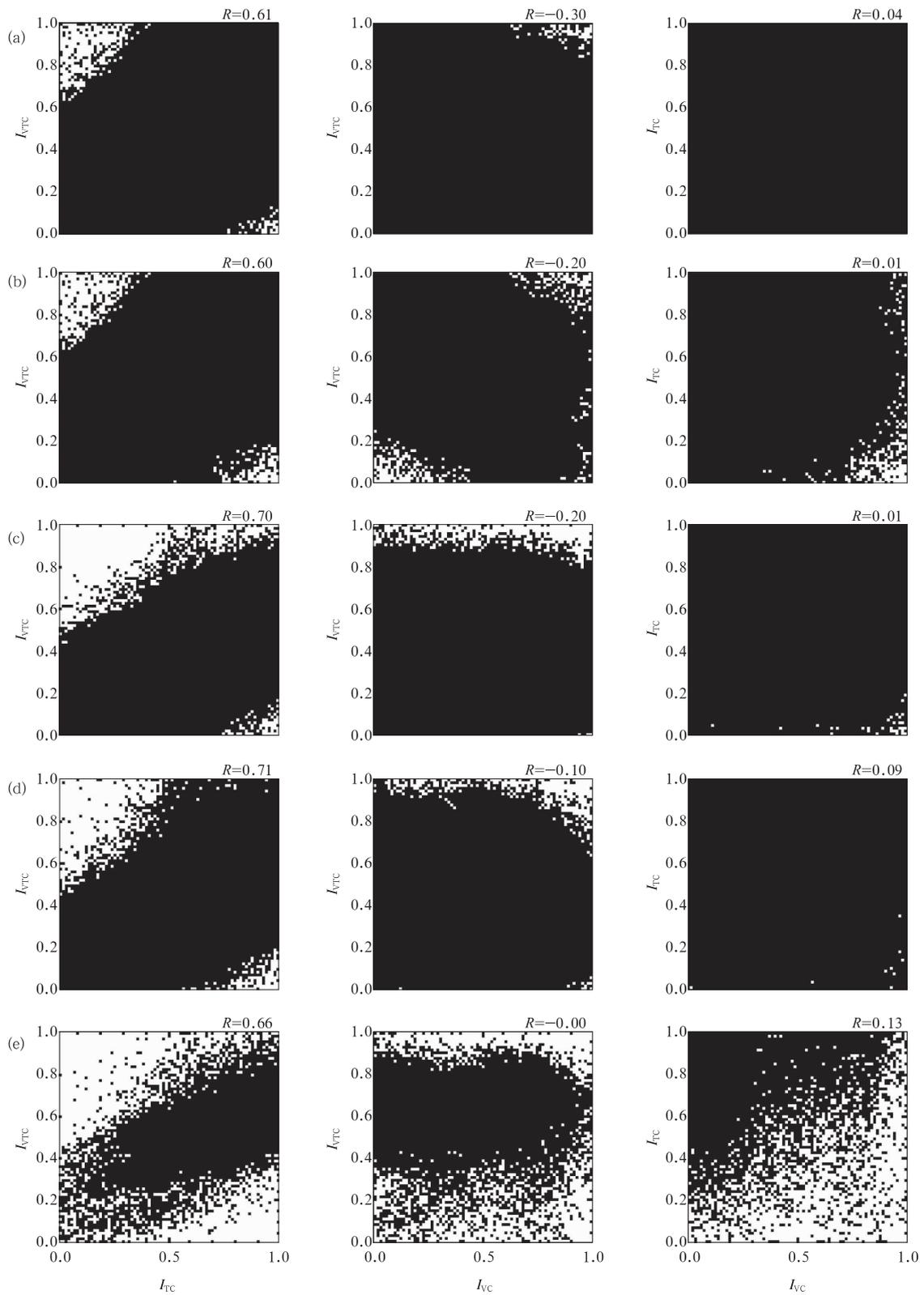


图 4 2004 年 129 时段 I_{Vc}, I_{TC}, I_{VTc} 的关系散点图 (R 为相关系数)

(a) 整个地表, (b) 森林, (c) 农田, (d) 草原草甸, (e) 灌丛

Fig. 4 The scatters plot of I_{Vc}, I_{TC}, I_{VTc} in the period 129 in 2004 (R is the correlation coefficient)

(a) the whole study area, (b) forest, (c) crop, (d) grass, (e) shrub

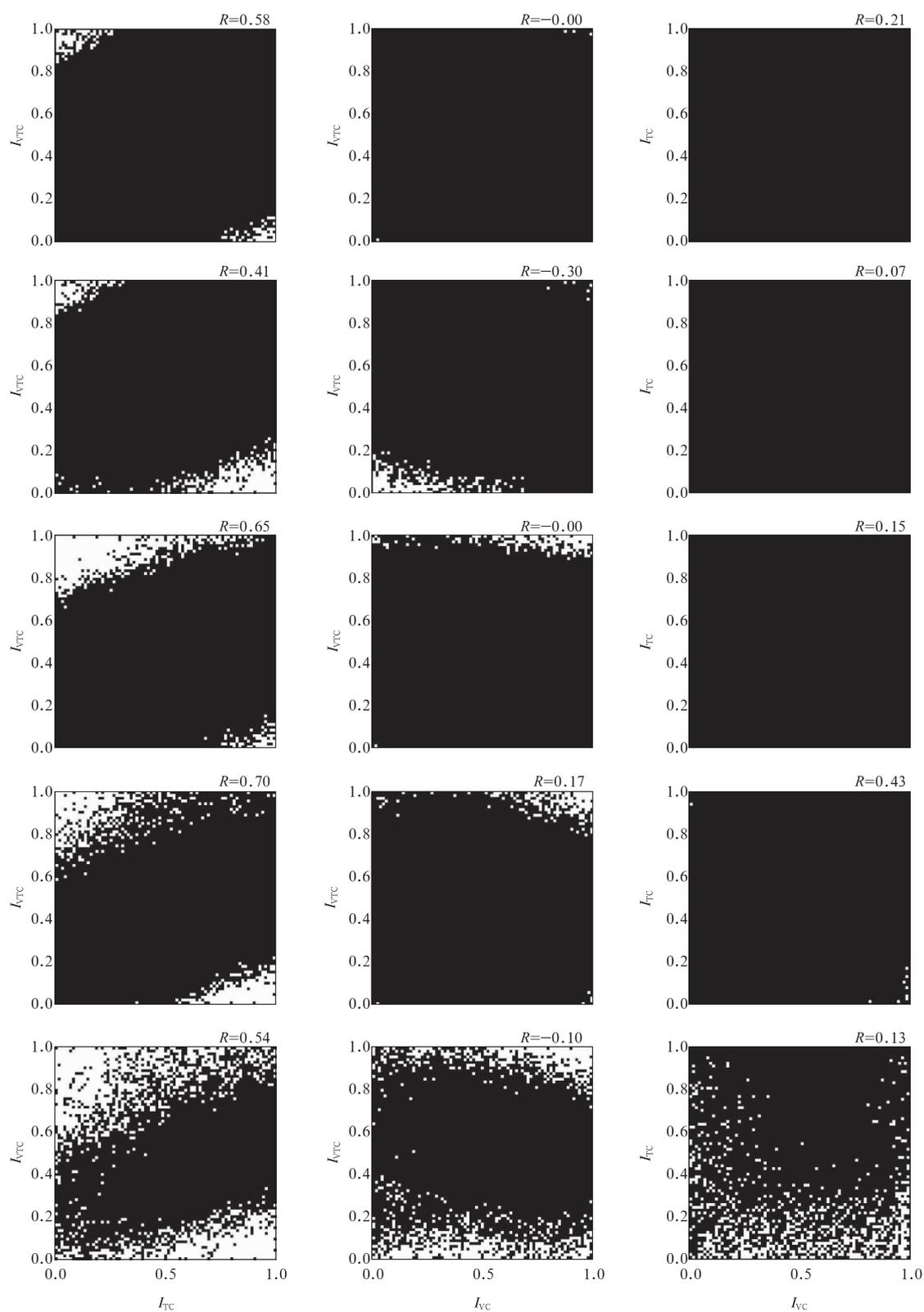


图5 2004年145时段 I_{Vc} , I_{Tc} , I_{VTc} 的关系散点图(R 为相关系数)

(a) 整个地表, (b) 森林, (c) 农田, (d) 草原草甸, (e) 灌丛

Fig. 5 The scatters plot of I_{Vc} , I_{Tc} , I_{VTc} in the period 145 in 2004 (R is the correlation coefficient)

(a) the whole study area, (b) forest, (c) crop, (d) grass, (e) shrub

原草甸表现最明显,然后依次是农田、灌丛和森林。

4 小结和讨论

植被指数和地表温度是地表能量守恒过程中的两个重要的生物物理指标,与土壤湿度密切相关, I_{VC} , I_{TC} , I_{VTC} 分别是基于上述不同物理指标的较为典型的干旱监测方法,本文采用MODIS数据,对上述3种干旱监测指数与土壤相对湿度、降水量的关系、3种方法监测结果及它们之间的相互关系进行了分析,从而对3种指数在黑龙江省干旱监测中的作用进行了综合评价,得到以下主要结论:

1) 基于 T_s - I_{NDV} 特征空间的 I_{VTC} 与土壤相对湿度之间存在显著的正相关关系,相关性明显好于 I_{VC} 和 I_{TC} 与土壤相对湿度的相关性,表明 I_{VTC} 比 I_{VC} 和 I_{TC} 更适于反映地表土壤湿度的变化,且对浅层土壤湿度更加敏感。

2) I_{VTC} 与监测同期的降水量及前1~4个时段的累积降水量之间都存在明显的正相关关系,且明显好于 I_{VC} 和 I_{TC} 与相应降水量的相关性,说明 I_{VTC} 比 I_{VC} 和 I_{TC} 对降水更敏感,且与监测时段的降水和前期总体降水都密切相关。

3) I_{VC} 在植被生长季早期植被覆盖度较低时,适用性较差, I_{VTC} 和 I_{TC} 在植被生长季的早期可以适用。

4) I_{VC} 和 I_{TC} 在不同地区间可比性较差,而 I_{VTC} 根据地表能量守恒原理,结合植被指数和地表温度的实际观测值并经过归一化处理,在不同区域的可比性较好。

5) 在干旱监测中,基于 T_s - I_{NDV} 特征空间的 I_{VTC} 所携带的地表温度信息对干旱的直接指示作用最强,而所携带的植被信息对干旱的直接指示作用则较弱,这种特性在草原草甸表现最明显,然后依次是农田、灌丛和森林。

综上所述,在地表干旱监测中, I_{VTC} , I_{VC} 和 I_{TC} 都是基于植被和地表温度等生物物理指标对土壤水分的响应,来间接反映地表湿度状况,并不是对土壤湿度的直接测量,且虽然 I_{VTC} 方法的适用性要优于 I_{VC} 和 I_{TC} ,但 T_s - I_{NDV} 特征空间干、湿边存在不稳定性,因此对特征空间干、湿边的提取技术还有待于进一步改进,如果需要到土壤水分进行大范围的直接观测,微波遥感也是一个很有发展前景的监测手段。

参考文献

- [1] 马柱国. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1011-1018.
- [2] 邹旭恺, 张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. 应用气象学报, 2008, 19(6): 679-686.
- [3] 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 近20年华北地区干旱期大气环流异常特征. 应用气象学报, 2003, 14(2): 140-151.
- [4] 王志伟, 翟盘茂. 中国北方近50年干旱变化特征. 地理学报, 2003, 58(增刊): 61-68.
- [5] Townshend J R G, Justice C O. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *Int J Remote Sens*, 1986, 7: 1555-1570.
- [6] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int J Remote Sens*, 1986, 7: 1395-1416.
- [7] Gutman G G. Review of the workshop on the use of satellite derived vegetation indices in weather and climate prediction model. *Bull Amer Meteor Soc*, 1990, 71: 1458-1463.
- [8] Guttman N B. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35: 311-322.
- [9] Goward S N, Dye D G, Turner S, et al. Objective assessment of the NOAA global vegetation index data product. *Int J Remote Sens*, 1993, 14: 3365-3394.
- [10] Philippon N, Jarlan L, Martiny N, et al. Characterization of the interannual and intraseasonal variability of west African vegetation between 1982 and 2002 by means of NOAA AVHRR NDVI data. *J Climate*, 2007, 20(4): 1202-1218.
- [11] 王开存, 陈长和, 郭妮. 用NOAA/AVHRR探测地表反射率和NDVI的订正及误差分析. 应用气象学报, 2003, 14(2): 165-175.
- [12] 陈燕丽, 龙步菊, 潘学标, 等. 基于MODIS NDVI和气候信息的草原植被变化监测. 应用气象学报, 2010, 21(2): 229-236.
- [13] 王晓云, 郭文利, 奚文, 等. 利用“3S”技术进行北京地区土壤水分监测应用技术研究. 应用气象学报, 2002, 13(4): 422-429.
- [14] McVicar T R, Jupp D L B, Yang X, et al. Linking Regional Water Balance Models with Remote Sensing // Proceedings of the 13th Asian Conference on Remote Sensing. Ulaanbaatar, Mongolia, 1992; B6. 1-6. 6.
- [15] McVicar T R, Bierwirth P N. Rapidly assessing the 1997 drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery. *Int J Remote Sens*, 2000, 22: 2109-2128.
- [16] Jupp D L. Directional radiance and emissivity measurement models for remote sensing of the surface energy balance. *Environmental Modelling & Software*, 1998, 3: 341-351.
- [17] Bayarjargal Y, Karnieli A, Bayasgalan M, et al. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sens Environ*, 2006, 105(1): 9-22.

- [18] 金一谔,刘长盛,张文忠. 利用气象卫星 GMS 和 AVHRR 资料推算地面水份含量的方法. *应用气象学报*, 1998, 9(2): 197-204.
- [19] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale vapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28: 940-948.
- [20] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9: 161-173.
- [21] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens Environ*, 1994, 49: 246-263.
- [22] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in nonhomogeneous areas. *Int J Remote Sens*, 1990, 11: 405-419.
- [23] Kogan F N, Sullivan J. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 1993, 13: 219-222.
- [24] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995, 15: 91-100.
- [25] Kogan F N. Global drought watch from space. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78: 727-636.
- [26] 于敏,程明虎. 基于 NDVI-Ts 特征空间的黑龙江省干旱监测. *应用气象学报*, 2010, 21(2): 221-228.
- [27] 孙丞虎,李维京,张祖强,等. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 130-138.
- [28] 李巧萍,丁一汇,董文杰. 壤湿度异常对区域短期气候影响的数值模拟试验. *应用气象学报*, 2007, 18(1): 1-10.
- [29] 侯英雨,何延波,柳钦火,等. 干旱监测指数研究. *生态学杂志*, 2007, 26(6): 892-897.
- [30] Monteith J L. *Principles of Environmental Physics*. Arnold, London, 1973.
- [31] Gillies R R, Carlson T N, Cui J, et al. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurement of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *Inter J Remote Sens*, 1997, 18: 3145-3166.
- [32] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sens Environ*, 2002, 79: 213-224.
- [33] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *Inter J Remote Sens*, 1997, 18(1): 71-94.
- [34] Nemani R R, Running S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *J Applied Meteor*, 1989, 28: 276-283.
- [35] 王鹏新,龚健雅,李小文,等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 527-533.
- [36] 于敏,高玉中,张洪玲. 地表温度-植被指数特征空间干旱监测方法的改进. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 243-250.

Satellite Remote Sensing Drought Monitoring Methods Based on Different Biophysical Indicators

Yu Min¹⁾ Wang Chunli²⁾

¹⁾ (Heilongjiang Provincial Meteorological Bureau, Harbin 150001)

²⁾ (Heilongjiang Provincial Climate Center, Harbin 150030)

Abstract

As a frequent natural hazard, drought causes the heaviest damage to daily life and ecological environment among all natural disasters. The large scale and dynamic drought monitoring has been frontier and hot topic in the global climate change and food security research. Satellite remote sensing is the main method of obtaining distributed information of the land surface. However, the applicability of a drought monitoring method varies by region and period. So it's necessary to inspect and evaluate the drought monitoring method to ensure the validity and accuracy in drought monitoring.

Vegetation index based I_{VC} , land surface temperature based and Surface Temperature-Normalized Difference Vegetation Index space (T_s - I_{NDV} space) based are compared to analyze and evaluate their characteristics and applicability in drought monitoring. The MODIS 16-day NDVI (MOD13A2) and 8-day T_s (MOD11A2) provided at 1 km spatial resolution as a gridded level-3 product in the Sinusoidal projection are used, and the Heilongjiang Province, the main food production area in China, is chosen as the study area. The monitoring period is from 9 May to 9 June of the year 2000 to 2008. The correlation between I_{VC} , I_{TC} , I_{VTC} and relative soil moisture in 10 cm and 20 cm depth, the correlation between I_{VC} , I_{TC} , I_{VTC} and the precipitation in the satellite monitoring period and the cumulative precipitation in the last 1-, 2-, 3-, 4-period time scales, the difference and the relationship between I_{VC} , I_{TC} , I_{VTC} are analyzed.

Significant linear correlation is found between I_{VTC} and the relative soil moisture in 10 cm and 20 cm depth, especially for the 10 cm depth. The correlation between I_{VTC} and relative soil moisture is obviously better than that between I_{TC} , I_{VC} and the relative soil moisture. So, it can be judged that I_{VTC} may mirror the soil moisture better than I_{VC} and I_{TC} , and is more sensitive to shallow soil moisture. I_{VTC} is also found linearly correlated with precipitation in current monitoring period, as well as the cumulative precipitation in the last 1-, 2-, 3-, 4-period timescales. The correlations are better than those between I_{TC} , I_{VC} and precipitation as well as corresponding cumulative precipitation, which show that I_{VTC} is more sensitive to precipitation than I_{VC} and I_{TC} , and is closely related to not only current precipitation but also past cumulative precipitation. In the early growing season, I_{VTC} and I_{TC} are applicable in drought monitoring, while the fractional I_{VC} cover is too low to monitor drought. It is difficult to compare the drought among different areas with I_{VC} and I_{TC} , while based on the energy conservation principle, combining the I_{NDV} and T_s , I_{VTC} can reflect soil moisture better and is comparable in different areas. Furthermore, the land surface temperature implied by I_{VTC} gives more direct hint of drought than the I_{NDV} implied especially on the grassland, then in the crop land, brush land and forest land in sequence.

Key words: drought monitoring; Vegetation Condition Index; Temperature Condition Index; Vegetation Temperature Condition Index