

# 利用气象卫星 GMS 和 AVHRR 资料 推算地面水分含量的方法\*

金一谔 刘长盛

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

张文忠

(南京大学大地海洋科学系, 南京 210093)

## 提 要

根据 GMS 红外通道遥感到的土壤表面温度随时间的变化率对土壤水分最敏感, 且该变化率又与极轨卫星测到的植被指数存在负相关的事实, 提出了一个更能反映土壤表面水分的干旱分级指数(DCI), 对土壤水分按6个等级监测。该指数与江苏、吉林两省实测土壤湿度或降水分级之间的相关系数在0.70以上。

关键词: 卫星遥感 土壤表面温度 土壤水分 植被指数 干旱分级指数

## 引 言

进入地面的净能量在感热与潜热之间的分配受地面水分状况的制约, 通过地面与大气之间能量、水分的交换, 地面水分对气候会产生较大影响<sup>[1]</sup>。利用气象卫星遥感资料推算地面水分的方法有多种, 可用静止气象卫星遥感到的表面温度随时间的变化, 结合近地层模式间接推算地面水分<sup>[2]</sup>。根据极轨卫星遥感到的表面温度  $T_s$  与归一化差分植被指数(NDVI)有明显的负相关, 其比值在干燥与湿润的两类地面状态下有显著的变化<sup>[3]</sup>, Gillies and Carlson 把这种关系应用到土壤-植被-大气传输模式(SVAT)中<sup>[4]</sup>, 以估算地面水分。也有用多年的极轨卫星资料监测干旱的<sup>[5]</sup>。

静止气象卫星资料时间分辨率高, 每小时播发一次, 但其空间分辨率低, 热红外通道的星下点分辨率为5 km; 而极轨卫星的分辨率一般要高些, 但一颗卫星一天仅两次通过当地。我们将两种卫星资料配合使用, 充分利用各自的优点。为了配准两种卫星图像以及配准静止卫星不同时间之间的图像, 在处理卫星资料前, 需先对卫星图像进行几何精校正处理。本文提出一个利用气象卫星和极轨卫星两种资料检测地面水分的指标。

\* 国家自然科学基金(49275235)资助项目。  
1996-11-27 收到, 1997-02-28 收到修改稿。

## 1 研究地区与资料处理

选取江苏、吉林两省作为研究地面水分状况的地区。江苏省(116°~122°E, 30.2°~35.5°N)静止气象卫星 GMS-4 图像时间为 1992 年 6 月 18 日 08:00 与 10:00 两个时次。同地区极轨卫星 NOAA-12 AVHRR 资料时间为 1992 年 6 月 19 日中午。6 月 18~19 日两天全省为晴空。6 月中旬江苏省黄淮地区降水稀少, 淮北地区月降水量在 10 mm 以下, 其中连云港仅 2 mm, 为 1949 年以来同期最小值。淮北重要灌溉水源洪泽湖、骆马湖等已接近死水位, 淮河干流 9 日已断流, 稻田龟裂, 春播作物成片枯萎。6 月中旬西南暖湿气流抵达江淮地区, 与冷空气在此汇合, 使切变线加强, 在江淮之间产生一次降水过程, 雨量达 40~90 mm。6 月 18 日吉林地区多云, 因此选 1992 年 5 月 18 日 08:00、10:00 两个时次静止卫星资料, 范围在 122°~129.8°E、41°~46°N, 但在北部部分地区仍有云, 需将这些地区剔除; 同地区极轨卫星 NOAA-11 AVHRR 资料时间是 1992 年 5 月 10 日中午。5 月中旬吉林省西北部降水量为 0~5 mm, 而其他地区为 10~50 mm。

卫星遥感图像针对引起几何畸变的原因已做了几何粗校正, 适宜作定性分析。但在同一地区分析不同时间静止卫星图像或同时使用静止卫星和极轨卫星两种遥感图像(因图像拍摄的高度和对本地区拍摄角度相差很大)还需作几何精校正, 以获得可供定量分析的数字图像。采用分带的边纬线与中央纬线变形绝对值相等的等角割圆锥投影、比例尺为 1:175 万的地图作为几何精校正的基础。把两种遥感图像处理成 1:175 万比例尺, 使它们与地图配准, 图像之间相互严格对应, 以进行图像对比分析。几何纠正的方法是将原图像阵列中的象素变动位置, 纠正到应有的位置上。为此建立一个变换关系式:

$$\begin{aligned} X &= F1(x, y) \\ Y &= F2(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $x, y$  是原始图像空间坐标,  $X, Y$  是同一象元在校正图像空间的坐标。该变换关系式通过地面控制点确定。地面控制点是在原始图像中可寻找, 在地形图上能精确定位的一些特征点, 如河流拐弯处或交叉处、小岛、小湖泊等。在原始图像上确定地面控制点是几何精校正的关键。为了使纠正后的图像能按行、列整齐排列, 采用反解式算法, 即以校正图像象元为目标, 如取其上  $X_{11}, Y_{11}$  象元(第一列、第一行), 反过来用式(2)计算原始图像上对应的象元, 且把其亮度值取出。

$$\begin{aligned} x &= G1(X, Y) \\ y &= G2(X, Y) \end{aligned} \quad (2)$$

静止卫星分辨率低, 特征点难以用地理特征找出, 因此用卫星所提供的地理经纬度网格点内插得到 10 个控制点, 这 10 个点都是江苏境内经纬线的交点, 在地图上标出它们正确的坐标值(图 1 a); 再在原始图像中找出地面控制点, 即它们对应的象元行号和象元列号, 它们与地图上的坐标值有一定的偏差(图 1 b)。由于原始图像已进行过几何粗校正, 即位置误差不大, 所以用原始图像与地图坐标的一次方程纠正, 即

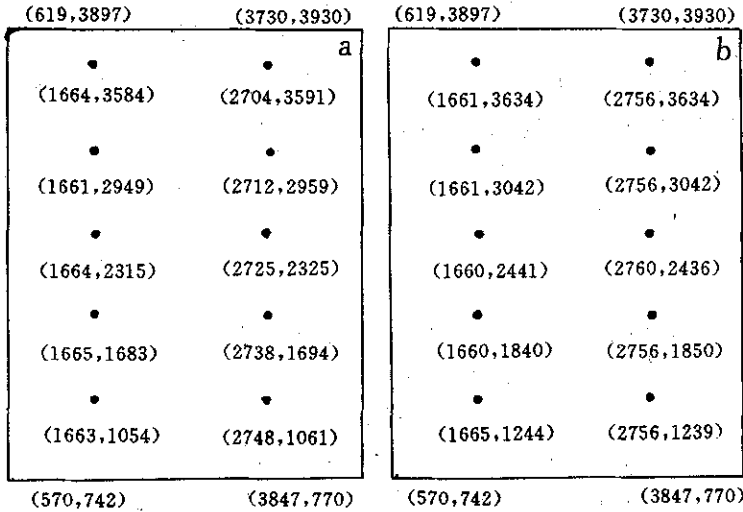


图 1 (a) 校正图像空间(X, Y) (b) 原始图像空间(x, y)

$$\begin{aligned} x &= A_0 + A_1X + A_2Y \\ y &= B_0 + B_1X + B_2Y \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  是 6 个待定系数。求解这些系数至少需要 3 个控制点, 实际上是选择足够数量的控制点, 利用最小二乘法原理求解, 解得 6 个系数后代入式(3), 便得原始图像坐标值。纠正图像上某点坐标是  $(X, Y)$ , 求这点的亮度值先要将  $X$ 、 $Y$  变换到原始图像上, 找出相应坐标  $x$ 、 $y$ 。若反求出的点  $(x, y)$  并不落在原始图像的网格交点上, 它就没有亮度值, 需要利用邻近点的亮度进行内插。最简便的方法是取该点最邻近象元的亮度值作为重抽样亮度值。

在江苏省境内选择 10 个点进行误差测算, 未作几何精校正前, 误差随地理位置而不同, 主要是纬度误差, 最大值接近  $0.3^\circ$ , 而经度误差较小。用式(3)作几何校正后, 地面控制点与该变换式相对剩余偏差小于  $0.4\%$ 。能够反映图像二维空间特征的还有长度, 在东-西长 182 km、南-北长 111 km 的方向上, 校正前长度误差约  $5\%$ , 校正后在  $1\%$  以内。

## 2 表面温度递增率与表面水分

遥感到的表面温度受近地面各种过程的影响。大多数陆面由植被覆盖, 植物蒸发水分, 使土壤表面干燥, 但植物也要从土壤深层吸取水分, 植被对表面能量平衡最重要的作用就是增加水分的蒸腾, 并通过改变叶片气孔大小控制进入空气中的水汽量, 避免水分损耗。下垫面与大气间还有感热交换。考虑一定高度的植被层, 它本身要储存热量, 减缓表面温度的变化。设  $m$  是其单位面积的质量, 即总生物量。植被层的能量平衡方程可以写为:

$$mc \, dT_s/dt = R - G - H - LE \quad (4)$$

式中:  $c$  为植被层内物质的比热, 由于植被质量大部分是水,  $c$  取液体水的比热;  $T_s$  是植被的平均温度;  $m$  值对农作物为  $6 \text{ kg/m}^2$ , 草地为  $9 \text{ kg/m}^2$ , 温带森林为  $30 \text{ kg/m}^2$ , 热带森林为  $45 \text{ kg/m}^2$ , 其值也可以由卫星监测; 净辐射  $R$  分短波和长波部分, 短波部分与大气透过率  $V$ 、地面反射率  $a$  有关, 长波部分包括大气向下的逆辐射和地面向外的辐射, 前者在晴空条件下可用经验公式表示:

$$R = S_0 V (1 - a) \sin h + 0.67 (1670 q_a)^{0.08} \sigma T_a^4 - \epsilon \sigma T_s^4 \quad (5)$$

式中:  $S_0$  为太阳常数,  $T_a$ 、 $q_a$  分别为空气温度、比湿,  $h$  为太阳高度角,  $\epsilon$  为地面比辐射率。

进入地面的热通量  $G$  用一个包括叶面积指数  $L$  的经验关系表示<sup>[6]</sup>:

$$G = 0.4 \exp(-0.5 L) R \quad (6)$$

$$H = c_p \rho_a (T_s - T_a) / r_a \quad (7)$$

式中:  $H$  是感热通量,  $c_p$ 、 $\rho_a$  分别是空气比热与密度,  $r_a$  是空气动力学阻抗(s/m)。

蒸散  $LE$  与大气中两个高度之间的水汽压差成正比, 一般取大气中的一个高度, 另一个高度取作物表面。

$$LE = L \rho_a (q_s - q_a) / r_a \quad (8)$$

式中:  $q_s$ 、 $q_a$  为作物表面和大气中某一高度的水汽比湿。表面的比湿是一个未知量, 通常是土壤水分、植被状况的复杂函数, 但是表面温度  $T_s$  是可以遥感测量的, 因此可以计算表面的饱和比湿, 并且假定它也是叶片气孔腔内的饱和比湿。

$$LE = L \rho_a (q_{sat} - q_a) / (r_a + r_c) \quad (9)$$

但式(9)中又引入作物阻抗  $r_c$ ,  $r_c$  与土壤水分、作物密度、大气状况有关, 在式(8)、式(9)中引入一个参量  $M$ , 定义

$$M = r_a / (r_a + r_c) = (q_s - q_a) / (q_{sat} - q_a) \quad (10)$$

得到:

$$LE = L \rho_a M (q_{sat} - q_a) / r_a \quad (11)$$

可能蒸散  $E_p$  是  $r_a = 0$  时的蒸散速率, 故  $M$  亦可表示成  $M = E / E_p = W / W_s$ , 称  $M$  为土壤可用水分(绝对干燥的表面  $M = 0$ , 饱和的表面  $M = 1$ )。  $W$ 、 $W_s$  分别是实际的和饱和的土壤体积有效水分含量, 这样  $M$  就与植物根部水分饱和的百分比相联系。

空气动力学阻抗在计算中要考虑空气稳定度订正, 在稳定状态下,  $r_a$  有严格的分析解<sup>[7]</sup>。当已知最高和最低气温, 气温随时间变化白天按正弦式, 晚上按指数衰减式计算。

式(4)设定了地面条件(包括土壤可用水分  $M$ )、气象条件及初始值后, 就能对表面温度求解。图2是根据模式计算的不同土壤水分含量条件下表面温度随时间的递增率。由图2可以看出土壤越干燥, 日出后表面温度的上升就越快。日出后1h达到最大值。07:00~10:00之间为最大, 一般在2~5°C/h之间变化。而且这个温度递增率随土壤水分大小有明显的变化, 因此选择上午两个不同时刻表面温度差来反映土壤水分含量大小。影响表面温度的参量中, 除土壤水分外还有地面植被状况、气象参量的影响。这些参量在中间状态的值见表1。为了研究这些参量对温度递增率的影响, 将某个参量偏离中间状态, 而其他参量不变, 并取其极值时引起温度递增率变化的百分率也在表1中给出。

表面温度递增对土壤水分的变化最为敏感，递增率的 94% 是由表面温度递增引起的。完全干燥的土壤比中间状态下 ( $M = 0.5$ ) 递增率的变化大 75%，而完全饱和的土壤比中间状态下的变化小 19%，因此更适合检测干燥条件下的土壤水分。而地面粗糙度与风速亦有相当大的影响，特别是植被表面与裸地对表面温度的影响差异很大。模式在一系列地面、气象条件下运行，可计算出 08:00~10:00 之间的表面温差，由此建立不同条件下温差与土壤水分的检查表。实际应用该方法是由卫星测到两个时刻计数差  $DN$ ，输入地面气象资料(空气最高(最低)温度、湿度、风速、地面反射率、作物高度、生物量、叶面积指数以及日期等)，根据检查表反过来查算可用水分。

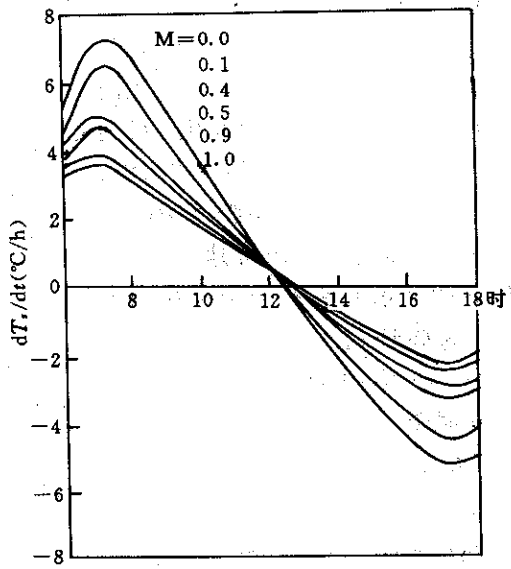


图 2 不同土壤水分含量条件下表面温度的递增率(单位: °C/h, LT)

表 1 各种参量对表面温度变化的影响

参 量	变化范围	递增率相对变化(%)
土壤水分	0.5 ± 0.5	94
	(0.5~0)	(75)
	(0.5~1)	(19)
粗糙度(m)	0.01~0.026~0.2	44
	(0.002~0.026~0.2)	(78)
风速(m/s)	1~2.5~5	33
生物量(kg/m <sup>2</sup> )	6~9~50	22
相对湿度(%)	20~100	17
反射率	0.1~0.25~0.4	12

### 3 表面温度递增率与植被指数

AVHRR 资料包括可见光(CH1)，近红外(CH2)及 3 个红外通道。绿色植物在 CH2 通道上比 CH1 通道上反射更多的太阳辐射。而更重要的是植被生长受干旱影响时，CH2 减少，CH1 增加<sup>[8]</sup>。反映植被状况常用  $NDVI$  表示。

图 3 是江苏、吉林两省植被指数直方图。 $NDVI$  变化范围：江苏省为 0~0.7，吉林省为 0~0.4，反映了南北方气候差异的影响，并且通过植被反映了较长时段的地面水分状况。两省虽然都有干旱、降水的区域，但在直方图中，江苏省只有一个峰值(在 0.15 处)；而吉林省除了在 0.1 处有一个峰值外，还在 0.15~0.30 之间有一个较为平坦的区域，这与吉林白城地区有一个干旱区域(旬雨量 0~5 mm)，而其他地区旬雨量在 8~40 mm

情况相对应。

取江苏境内 34.5°~31.5°N, 沿 119.5°E 经线的剖面, 对比该剖面上 DN 值与 NDVI 的变化, 得到图 4。该剖面从北向南经过连云港、灌南、涟水、宝应、高邮、江都, 跨长江后至金坛、溧阳等地。DN 值与 NDVI 值几乎有一个反相的变化。为验证这一现象, 对吉林省 1992 年 5 月的 DN 与 NDVI 也做一剖面图, 从 122.5°E、44.9°N 至 127.0°E、42.5°N。该剖面从通榆、长岭、长春、盘石至靖宇, 结果是 NDVI 与 DN 也呈负相关。

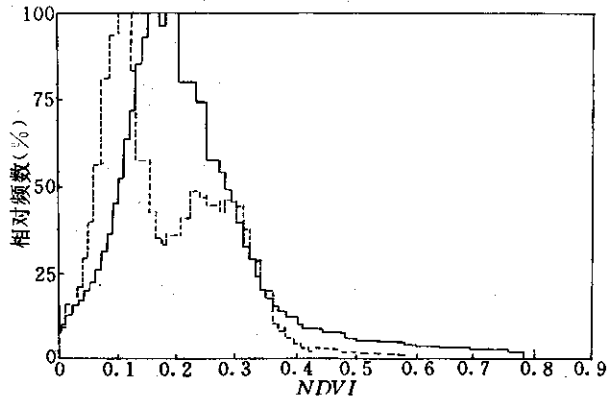


图 3 江苏(实线)、吉林(虚线)两省植被指数直方图

江苏、吉林省其它一些点的 DN 与 NDVI 也证实两者确实存在着负相关关系, 并有一个共同特点: 当 NDVI 的值较小时 (<0.25), DN 随 NDVI 的减小而急剧增加, DN 与 NDVI 的相关系数达 -0.7 以上。

DN 值虽然能反映表面水分变化, 但对植被状况并未充分考虑。因此, 本文提出干旱分级指数 (DCI), 它可根据  $DN/(NDVI+0.1)$  的大小分成 6 级:

$DN/(NDVI+0.1)$	101~200	51~100	36~50	21~35	10~20	0~10
DCI	1	2	3	4	5	6

$DN/(NDVI+0.1)$  愈大, DCI 值愈小, 表面愈干旱。

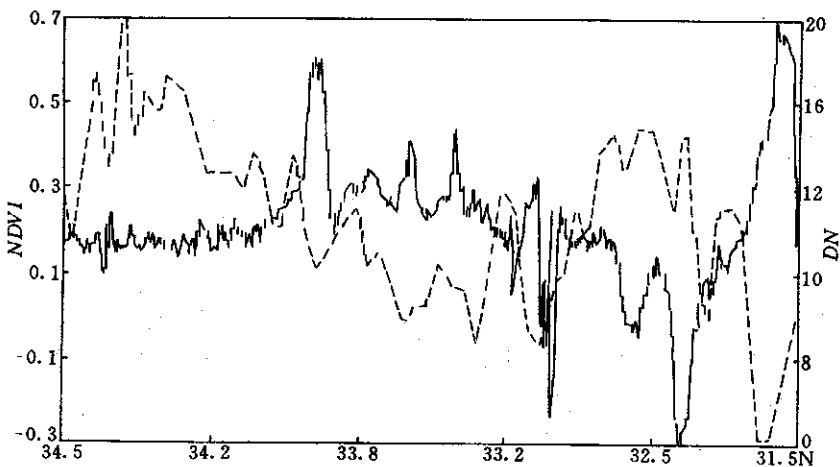


图 4 江苏省沿 119.5°E 经线的 DN(虚线)、NDVI(实线)变化图

土壤湿度以土壤水分占田间持水量的百分比表示。称田间持水量到凋萎含水量之间的水分为有效水分的上限, 田间持水量到田间持水量的 70% 之间的水分对作物生长最为

有效. 同样按土壤湿度分为 6 级, 标准如下:

土壤湿度 $W$	<35%	35%~45%	46%~55%	56%~65%	66%~75%	>75%
干旱分级	1	2	3	4	5	6

表 2 给出江苏省的土壤湿度分级和  $DCI$  指数.

$DCI$  与土壤湿度分级的相关系数约为 0.7, 当  $DCI < 6$  时, 相关系数为 0.73. 吉林省 1992 年 5 月 18 日  $DCI$  指数与该月旬降水量分级相关系数为 0.80, 这说明该方法更适合干燥的北方地区.

表 2 江苏省土壤湿度分级与  $DCI$  指数

台站	$W$	$W$ 分级	$DN/NDVI$	$DCI$	台站	$W$	$W$ 分级	$DN/NDVI$	$DCI$
丰县	41	2	51	2	扬州	60	4	16	5
赣榆	24	1	200	1	泰县	86	6	18	5
徐州	67	5	45	3	靖江	62	4	9	6
新沂	34	1	86	2	如皋	86	6	22	4
连云港	24	1	88	2	如东	55	3	22	4
睢宁	36	2	40	3	南通	53	3	44	3
沐阳	40	2	60	2	启东	65	4	0	6
泗洪	58	4	27	4	南京	48	3	33	4
淮阴	84	6	28	4	江浦	58	4	28	4
盱眙	57	4	23	4	镇江	46	3	44	3
滨海	59	4	37	3	金坛	63	4	70	2
射阳	60	4	24	4	常州	68	5	39	3
建湖	58	4	28	4	高淳	64	4	20	5
盐城	45	2	41	3	宜兴	80	6	20	5
大丰	82	6	19	5	无锡	80	6	26	4
东台	78	6	20	5	苏州	59	4	20	5
兴化	54	3	0	6	昆山	54	3	25	4
高邮	80	6	14	5					

#### 4 结 论

由气象卫星 GMS 和 AVHRR 两种资料结合近地层模式、常规地面资料, 推算出土壤表面水分的相对分级指数 ( $DCI$ ). 在江苏、吉林省的试验表明,  $DCI$  与土壤水分分级或降水分级存在着正相关, 相关系数约在 0.70 以上. 该方法适用于半干燥地区以及土壤水分空间、时间变化较大的区域. 近地层模式推算地面水分有两个前提条件, 一是假定土壤有效水分含量与蒸发量的关系是线性的 ( $E/E_p = W/W_p$ ), 实际上土壤蒸发以两个土壤临界湿度为界分成 3 个阶段, 该关系仅在第 2 阶段才适用; 其次是模式假定地面均为一作物表面, 实际地表状况要复杂得多. 由于模式本身的缺陷以及卫星遥感表面温度误差方面的原因, 该方法在反映表面水分含量上仍受到局限.

## 参考文献

- 1 Shuttleworth W J. Insight from large-scale observational studies of land/atmosphere interactions. Land Surface-Atmosphere Interactions for Climate Modeling, Observations, Models and Analysis. E. F. Wood, Ed., Kulwer Academic. 1991. 300~320.
- 2 Wetzel P J, et al. Determining soil moisture from geosynchronous satellite infrared data: a feasibility study. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1984, **23**: 375~391.
- 3 Nemani R R, Pierce L, Running S and Goward S. Developing satellite derived estimates of surface moisture status. *J. Appl. Meteor.*, 1993, **32**: 548~557.
- 4 Robert R Gillies and Carlson T N. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**(4): 745~756.
- 5 Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv. Space Res.*, 1995, **15**(11): 91~100.
- 6 Choudhury B J, et al. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared—temperature based energy balance equation. *Agri. Forz. Meteor.*, 1987, **39**: 283~297.
- 7 Choudhury B J, et al. An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. *Agri. Fore. Meteor.*, 1986, **37**: 75~88.
- 8 Gray T I and McCrary D G. The environmental vegetation index, a tool potentially useful for arid land management. AgRISTARS Report EW-N1-04076, JSC-17132. 1981.

## A METHOD OF CALCULATING SURFACE MOISTURE FROM GMS AND AVHRR

Jin Yi'e    Liu Changsheng    Zhang Wenzhong  
(Nanjing University, Nanjing 210093)

### Abstract

The change of soil surface temperature with time from GMS infrared channels is the most sensitive to soil moisture and has negative correlation with vegetation index from polar orbiting satellite, so that a Drought Condition Index (*DCI*) with six classifications to estimate surface moisture is put up. The correlation coefficients between *DCI* and the observed soil moisture or precipitation classification in Jiangsu and Jilin Provinces are more than 0.7.

**Key words:** Satellite remote sensing    Soil surface temperature    Soil moisture    Vegetation index    Drought Condition Index (*DCI*)