

基于辅助数据的遥感干旱分析*

刘良明 李德仁

(武汉测绘科技大学信息工程学院,武汉市珞喻路129号,430079)

摘要 介绍了当前用 NOAA AVHRR 进行土壤湿度监测的3种主要关系模型,详细分析了它们的解算过程。利用地面实测数据对3种模型进行验证,同时利用该地区其他辅助数据对不同程度干旱的分布及孕灾环境进行了分析。

关键词 干旱;土壤湿度;建模;DEM;土地覆盖
分类号 P237.9

干旱是一种正常的、周期性发生的自然现象,而不是人们习惯上所认为的一种罕见的、随机的现象。它在不同的地区之间有显著不同的特征,几乎在所有的气候带上都发生过。干旱是一种缓慢的、渐进的自然灾害,但是却给社会和经济带来极大的危害。

为了对干旱发生的周期和程度进行有效监测,以减轻其给社会和经济带来的影响,人们研究和使用了许多方法以进行干旱分析,包括传统的测墒点法和新型的遥感监测法,其中遥感监测法中又以 NOAA AVHRR 的应用最普遍且最成熟。当前用 NOAA AVHRR 开展干旱监测有多种方法,包括热惯量法、植被供水指数法和距平植被指数法等。从国内外来看,这些方法均有已用于业务监测的报道,然而,干旱的发生与气候带、季风及当地的气候条件、地形条件、地理位置、土地覆盖类型有极大关系,限于这些资料的收集和更新困难,其应用还仅限于定性分析。尽管目前国内外也开发了一些蒸散模型,但是这些模型均有严格的约束条件,而且需要同步实测的参数较多,从而限制了它的实用。本文提出的方法在一定程度上回避了一些蒸散模型的苛刻条件,只需少量的地面实测数据和已有的测绘基础资料,便可以进行大范围的准同步干旱定量监测。

1 热惯量方法遥感土壤湿度的原理

土壤的温度分布取决于土壤的热性质,即土壤的热容量和土壤的导热率^[5]。土壤的热容量指单位体积土壤增温 1℃ 所需的热量,它由组成

土壤的水、空气和固体颗粒的热容量按所占的体积加权平均求得,即

$$C = (C_s V_s + C_w V_w + C_a V_a) / V \quad (1)$$

式中, C_s 、 C_w 、 C_a 分别为固体颗粒、水、空气的容积热容量; V_s 、 V_w 、 V_a 分别为固体颗粒、水、空气所占的体积; $V = V_s + V_w + V_a$, 为土壤的总体积。由于土壤中空气的 C_a 非常小,而水的热容量约为固体颗粒的两倍,因而 C 主要随土壤的容积含水量 θ 而变化,即

$$C \approx C_s V_s + C_w \theta \quad (2)$$

土壤中热量从温度高的部分传导到温度低的部分的过程称为土壤热传导。由 Fourier 定律,有:

$$Q_s = \lambda (\partial T / \partial z) \quad (3)$$

式中, Q_s 为热流通量; λ 为土壤热导率。矿物质的导热率一般较大,水次之,空气最小。因而土壤导热率的大小取决于固体颗粒的组合形态及含水量。当土壤含水量增加时,土壤的导热率增大。根据热传导的 Fourier 定律及能量守恒定律,可导出土壤热传导方程为:

$$C(\partial T / \partial t) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (4)$$

式中,左端项表示单位体积土壤能量的时间变化率,而右端项则表示单位体积土壤能量的净输入量。对于各向同性的均质土壤,当土壤含水率不随深度变化或其变化对热特性参数 C 、 λ 的影响可以忽略时, C 和 λ 可当作常数。假定只有垂直方向的能量交换,则方程(4)可进一步简化为一般固体的热传导方程:

$$(\partial T / \partial t) = \alpha (\partial^2 T / \partial z^2) \quad (5)$$

式中, $\alpha = \lambda / C$, 称为热扩散率。在一定的边界条件下,通过分离变量法解方程,可得到如下的热惯

收稿日期:1999-03-26。刘良明,男,30岁,讲师,现从事遥感与地理信息系统研究。

*“九五”测绘科技攻关及测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目,编号 906-03-02 及 WKL(96)0410。

量方程^[6]:

$$P = [k(1 - A)]/(\Delta T_0) \quad (6)$$

式中, P 为热惯量; ΔT_0 为每日温差; A 为全波段反照率; k 为常数。

如前所述,土壤的温度分布与土壤的热特性有直接的关系,热特性又与土壤的含水量有关,而 NOAA AVHRR 的可见光和热红外通道可以遥感土壤的反射率和亮度温度,利用它可以获得地面的日反照率和日温差,进而可间接获得热惯量 P ,使得遥感土壤的含水量成为可能。

2 线性模型、对数模型、指数模型

2.1 线性模型

线性模型的一般通式为:

$$S_w = a + b \cdot P \quad (7)$$

式中, S_w 为土壤水分含量; a 、 b 为系数; P 为热惯量(以下同)。 a 、 b 值根据实测的 S_w 和遥感获得的 P 根据最小二乘原理拟合算出^[1,2,3]。令

$$X = [a \ b]^T \quad B = [B_1 \ B_2] \quad (8)$$

式中, n 为样本数(以下同); $B_1 = [1 \ 1 \ \dots \ 1]_n^T$; $B_2 = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]_n^T$ 。由公式(7)、(8),有误差方程式:

$$V = B X - S_w \quad (9)$$

根据最小二乘原理,假定各实测点数据等权,有:

$$X = (B^T B)^{-1} (B^T S_w) \quad (10)$$

2.2 对数模型

对数模型的一般通式为:

$$S_w = a + b \cdot \ln P \quad (11)$$

$$\text{令 } X = [a \ b]^T \quad B = [B_1 \ B_2] \quad (12)$$

式中, $B_1 = [1 \ 1 \ \dots \ 1]_n^T$; $B_2 = [\ln P_1 \ \ln P_2 \ \dots \ \ln P_n]_n^T$ 。由式(11)、(12)有误差方程式:

$$V = B X - S_w \quad (13)$$

根据最小二乘原理,假定各实测点数据等权,有:

$$X = (B^T B)^{-1} (B^T S_w) \quad (14)$$

2.3 指数模型

指数模型的一般通式为:

$$S_w = aP^b \quad (15)$$

因为式(15)非线性,要用最小二乘解求 a 、 b ,须将该式线性化,由泰勒公式线性化并用矩阵表示的误差方程式为:

$$V = BX - L \quad (16)$$

$$\text{式中, } V = (V_P \ V_{S_w})^T; B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix};$$

$$X = [\Delta a \ \Delta b]^T; L = \begin{bmatrix} P - P \\ S_w - S_w \end{bmatrix};$$

$$b_{11} = (\partial P / \partial a) = -S_w^{1/b} (1/b) a^{-(1+(1/b))};$$

$$b_{12} = (\partial P / \partial b) = -(S_w/a)^{1/b} \ln(S_w/a) b^2;$$

$$b_{21} = (\partial S_w / \partial a) = P^b;$$

$$b_{22} = (\partial S_w / \partial b) = aP^b \ln P;$$

P 、 S_w 分别为实测的热惯量值和土壤含水量值;而 P 、 S_w 分别为待求系数 a 、 b 的近似值代入式(15)求得的近似值。根据最小二乘原理,假定各实测点数据等权,有:

$$X = (B^T B)^{-1} (B^T L) \quad (17)$$

式中, B 、 L 分别为 n 个实测点数据根据式(16)逐点列误差方程式后的系数矩阵和残差矩阵。式中的 X 往往需要逐渐趋近,未知数的最后值为其起始值与每次趋近时求得的改正值的总和。

3 线性模型、对数模型和指数模型在实际中的应用

农业气象中,把 0cm~20cm 的对农作物生长有特殊意义的土层称为表土墒层;20cm~50cm 的称为底土墒层;50cm~100cm 的称为基土墒层;100cm~200cm 的称为深土墒层^[4]。1998 年 11 月,中国南方地区出现了大面积的旱情。由于南方干旱持续的时间一般不会超过 3 个月,对土层的影响一般也在表墒层,有时会影响底墒层。《农业气象观测规范》规定,土壤湿度在 40% 以下为重旱,40%~60% 为轻旱,60%~90% 为正常,90% 以上为过湿。根据湖北省农气中心多年的观测表明,对湖北地区而言,当 20cm 深土壤湿度占田间持水量等于或低于 50% 时,作物将出现播种困难、叶子凋零、稻田缺水、缺苗等严重问题;当低于 60% 时,会出现播种不利、苗苗不齐、叶子上部卷起等问题。综合以上的规定和实际情况,把 20cm 深土壤湿度占田间持水量等于或低于 50% 的定为重度干旱;把 20cm 深土壤湿度占田间持水量介于 50%~65% 的定为轻度干旱。本文在湖北省气象局提供的实测 20cm 深土壤湿度数据的基础上,利用文中提到的 3 种模型对湖北省 1998 年 11 月份的干旱情况进行了研究,发现 3 种模型的精度均在 85% 左右,线性模型的精度比另外两种模型稍差,而对数模型与指数模型两者的精度没有太大的差别,因此,本文最终选用指数

模型计算土壤含水量。图1为湖北省1998年11月12日的表观热惯量分布图。在图1的基础上,根据地面实测数据利用式(15)得到土壤湿度分布图,见图2。从该图可以看到,郧西、房县、麻城和随州等部分地区的土壤湿度小于50%,表明这些地区的干旱已经比较严重,但是范围不大,约2000km²;而土壤湿度介于50%~65%的地区却分布较广,这也是被认为轻度干旱的范围,约33000km²,但仍然主要分布在上述地区。在不考虑云覆盖区的情况下,约有35000km²的地区处于不同程度的干旱之中,各级土壤湿度的面积分布如图3所示。

为了进一步分析干旱形成的孕灾环境,利用湖北省的数字高程图(图4)、土地覆盖类型图(图5)与土壤湿度分布图进行了干旱成因综合分析(图6和图7)。

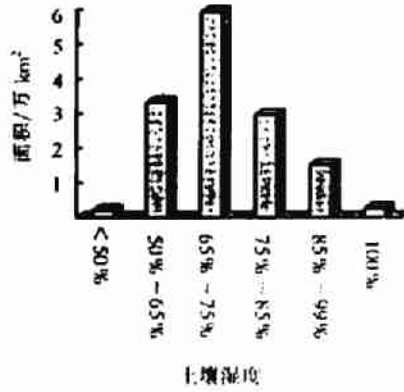


图3 不同土壤湿度面积分布图

Fig.3 The Area Distributing Chart of the Soil Moisture

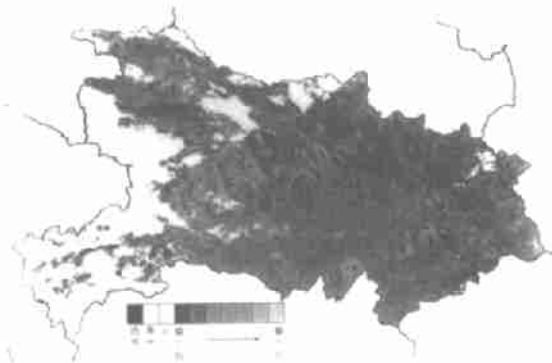


图1 湖北省表观热惯量图

Fig.1 The Apparent Thermal Inertia (ATI) Distributing Map in Hubei Province



图4 湖北省数字高程图

Fig.4 The DEM Map in Hubei Province

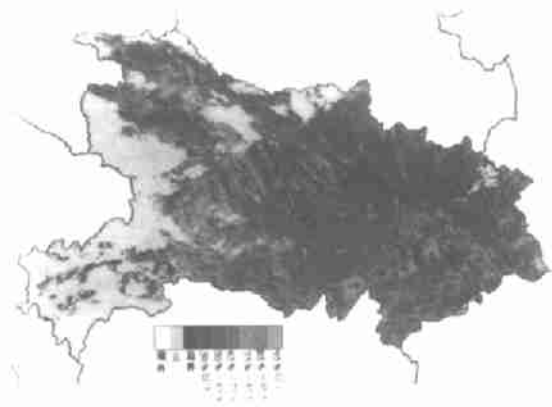


图2 湖北省土壤湿度分布图

Fig.2 The Soil Moisture Distributing Map in Hubei Province



图5 湖北省土地覆盖类型图

Fig.5 The Landcover Map in Hubei Province

根据湖北省的地形条件,笔者把高程分为6级,即0m~25m、25m~50m、50m~500m、500m~1000m、1000m~2000m、2000m以上,然后,把分级的高程图与土壤湿度图进行叠合分析,见表1。根据表1进而可得到各种干旱在不同高程范围的分布情况,如图8和图9所示。

根据湖北省土壤覆盖类型图,考虑到该图类

型太多(100多类)且分布凌乱,为了便于分析,笔者把湖北的土地覆盖类型划分为森林、林草混合地、灌木草地、农田、农田草地混合地、城市用地和水体六大类,再与土壤湿度分布图进行复合分析,结果见表2。

由表2进一步分析可得到干旱在不同土壤类型的分布情况,见图10和图11。

表1 不同高程下土壤湿度分布表

Tab.1 The Soil Moisture Distributing Table under Different DEM Values

湿度/%	高程/m						总计
	0~25	25~50	50~500	500~1000	1000~2000	>2000	
<50	85	211	1679	135	2	0	2112
50~65	1204	4903	24103	2725	272	1	33208
65~75	5729	18227	27673	5807	1738	27	59201
75~85	3775	6073	10766	6211	2709	20	29554
85~99	2054	1576	4599	4527	2387	8	15151
100	396	257	832	829	335	0	2649
总计	13243	31247	69414	20234	7443	56	141875

表2 不同土壤覆盖类型下土壤湿度分布表

Tab.2 The Soil Moisture Distributing Table under Different Landcover Types

湿度/%	土地覆盖类型/km ²							总计
	森林	林地草地	灌木草地	农田	草地农田	城市	水体	
<50	0	279	225	71	1331	186	20	2112
50~65	2534	4845	1004	21183	3226	3	413	33208
65~75	5038	13167	2158	29387	7381	51	2019	59201
75~85	3522	9797	2352	8297	3524	98	1964	29554
85~99	1529	6818	1412	2463	1227	71	1631	15151
100	153	1331	167	387	130	9	472	2649
总计	12776	36237	7318	61788	16819	418	6519	141875

由图8和图9可知,重旱和轻旱大都处于高程为50m~500m的范围,分别约占各自干旱总面积的80%和73%;而由图10和图11可知,重旱和轻旱也几乎都分布在林草地、农田和草地农田混合地3大类型,分别约占各自干旱总面积的88%和84%。综合以上的结果,结合湖北省的气候、地形和地理位置,对湖北的干旱孕灾环境主要归结为以下几点:①气候方面。该省属亚热带湿润季风气候,四季变化明显,春季阴晴,夏季湿热,秋高气爽,冬季干冷,全省年降水量在750mm~1500mm左右,但主要集中在春夏两季,1998年冬季少雨,是这次干旱形成的主要原因;②地形方面。该省地势西高东低,西、北、东三面环山,西部地区海拔范围在500m~3000m,大都为山地。由图4和图5可知,该区也是主要的森林覆盖区,而从表2看,该区几乎没有受干旱的影响,这表明在气候条件相似的情况下,森林比起其他土地类型有更强的自身防旱抗旱能力;北部和东部海拔

范围则在50m~500m,主要为山地丘陵。由图4和图5知,该区广泛分布着林草地、灌木草地、农田、农田草地混合地,从表2看,几乎所有的干旱均发生在该地区,这主要是因为这些地区的地势不容易存水,且天然水系(河、湖)不密集、不发达。降水是主要的农用水源,一旦降水不足,便容易干旱。同时,分布在该区的各土地类型不如森林的抗旱能力强,特别是农田,11月份该区田间主要是未进入发育期的半冬性小麦,其抗旱能力更差,这也是干旱主要分布在该地区特别是农田的另一个主要原因。南部地区地势低平,海拔多在50m以下,是主要的农业区,尽管其自身的抗旱能力不强,但是它处在极好的自然环境中,该区水面广阔,湖泊众多,以长江为主干、汉水为主支的长江水系构成密集、发达的河网,荆江分洪工程、杜家台分洪工程及各种干、支、民堤共同形成庞大的灌溉系统,使绝大部分的农田受益,几乎没有受到干旱的影响,图2、图8和图9表明了这一点。

上验证了模型的正确性。对于我国南方地区,地形条件、土地覆盖类型同降水条件一样,对于干旱的形成均有显著的影响,必须引起充分的重视。

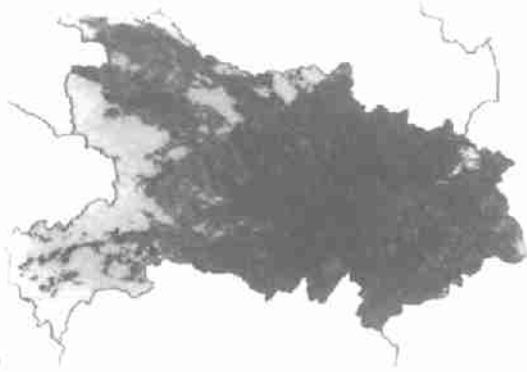


图6 不同高程土壤湿度分布图
Fig.6 The Soil Moisture Distributing Map under Different DEM Values

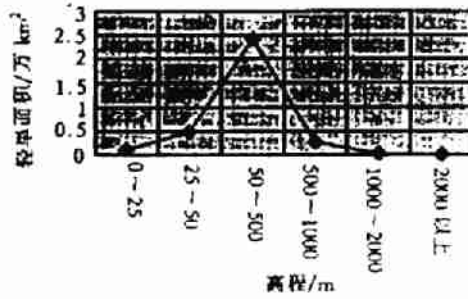


图9 不同高程轻度干旱面积分布图
Fig.9 The Slight Drought Area Distributing Chart under Different DEM Values

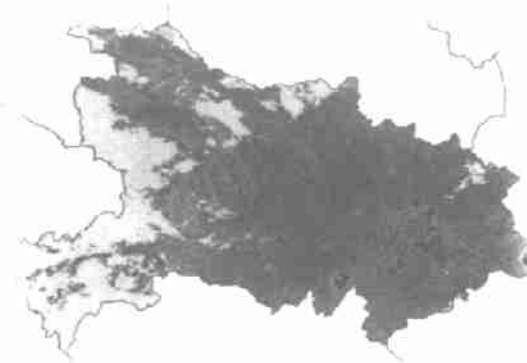


图7 不同土地覆盖类型土壤湿度分布图
Fig.7 The Soil Moisture Distributing Map under Different Landcover Types

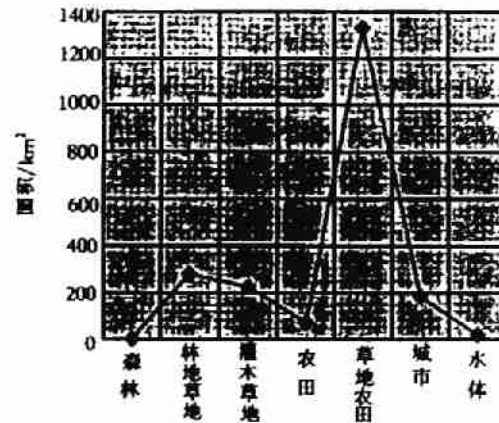


图10 不同土壤覆盖重旱面积分布图
Fig.10 The Severe Drought Area Distributing Chart under Different Landcover Types

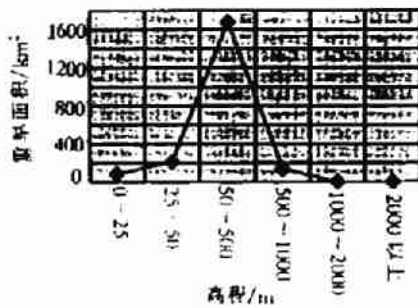


图8 不同高程重度干旱面积分布图
Fig.8 The Severe Drought Area Distributing Chart under Different DEM Values

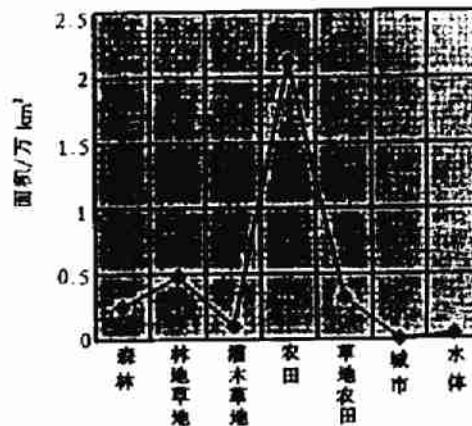


图11 不同土壤覆盖轻旱面积分布图
Fig.11 The Slight Drought Area Distributing Chart under Different Landcover Types

4 结论

1) 3种土壤湿度监测关系模型均可满足干旱的宏观监测需要;辅助数据的应用不仅对干旱的分布和成因有了定量分析,而且也在一定程度

2) 通过少数的地面实测点,用3种热惯量-土壤湿度法大面积估算土壤湿度都是可行的,精度均可达到80%以上,其中线性模型较指数模型和对数模型稍差。

3) 对于湖北地区,由于其自然地理环境复杂多变和降水年际变化显著,在气候条件相近的条件下,地形条件对土壤含水量的影响也是很明显的,有时甚至超过本地区降水因素的影响。从本研究可以看到,山地本身虽然不易储水,但是它有较好的森林覆盖,容易形成自己的丛间小气候,对水土保持有良好的调节作用,南方地区周期较短的干旱对它不会有太大的影响;丘陵地区对干旱敏感,该地区地形起伏较大,而且其地面覆盖一般为稀疏的林草地,水系不发达,不易储水,降水是主要的水源,一旦降水量不足,便易受影响;平原地区尽管是主要的自身抗旱能力不强的农业区,但是它具有得天独厚的自然地理条件,水系和灌溉系统发达,除非出现更为严重的水文干旱,一般

不会受到短期降水不足的影响。

4) 不同的土地覆盖类型的防旱抗旱能力会有显著的差异,其中森林的防旱抗旱能力最强,林草地次之,农作物地最易受害。

5) 保护森林、兴修水利、植树造林、退田还湖是防旱抗旱的有效途径之一。

参 考 文 献

- 1 王之卓. 摄影测量原理. 北京:测绘出版社,1979
- 2 李德仁,郑肇葆. 解析摄影测量学. 北京:测绘出版社,1992
- 3 游祖吉,樊功瑜. 测量平差教程. 北京:测绘出版社,1991
- 4 马锡彬,李玉尧. 地表层水环境的变化及其利用. 北京:气象出版社,1997
- 5 黄洪峰. 土壤·植物·大气相互作用原理及模拟研究. 北京:气象出版社,1997
- 6 马蔼乃. 遥感信息模型. 北京:北京大学出版社,1992

Drought Analysis Based on Remote Sensing and Ancillary Data

Liu Liangming Li Deren

(School of Information Engineering, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract This paper introduces three main models(linear, logarithmic, and exponential model), which are used in monitoring the soil moisture at present according to the thermal inertial theory based on NOAA AVHRR data, and the processing steps of these models are presented in details. Three models are tested and validated by using ground truth data, then the environment which causes drought is also discussed in the paper by using ancillary data including DEM and landcover. The results show that three models meet the needs of the large scale drought monitoring, and that the application of ancillary data not only makes the quantitative analysis of drought distributing and its causes possible, but also validates the models correctness in a certain extent. The example, which uses NOAA AVHRR data and DEM and landcover data to monitor the drought condition in Hubei province on Nov. 12, 1998, gives that the terrain condition is also the main factor which affects the soil water content in southern China as well as the climate condition, and that the drought-against capacities of the different landcover types are of diversity. Forest is best, woodland and grass take the second place and crop worst. Therefore, these conditions must be taken into account in monitoring drought in southern China.

Key words drought; soil moisture; model building; DEM; landcover