

条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用

王鹏新¹ 龚健雅¹ 李小文²

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 北京师范大学资源与环境科学系, 北京市新街口大街 19 号, 100875)

摘 要: 应用 NOAA-AVHRR 数据, 在用条件植被指数、条件温度指数和距平植被指数进行年度间相对干旱程度监测的基础上, 提出了条件植被温度指数的概念, 它适用于监测某一特定年内某一时期(如旬)区域级的相对干旱程度。条件植被温度指数的定义既考虑了区域内归一化植被指数的变化, 又考虑了在归一化植被指数相同条件下土地表面温度的变化。陕西省关中平原地区 2000 年 3 月下旬干旱的监测结果表明, 条件植被温度指数能较好地监测该区域的相对干旱程度, 并可用于研究干旱程度的空间变化特征, 对干旱的监测结果与用土壤热惯量模型反演的土壤表层含水量的结果基本吻合。

关键词: 条件植被温度指数; 干旱监测; 归一化植被指数; NOAA-AVHRR

中图法分类号: P237.9; TP753

植被, 无论是自然的还是人工栽培的, 覆盖了地球大部分陆地表面并强烈地影响地球的生态环境。遥感是应用太阳辐射和植被冠层间的相互作用提取植被冠层有用的生物物理信息来实现对植被指数的表达。植被指数通常与绿色植被的丰度有关^[1], 而卫星遥感影像的多光谱特性、相对高的空间分辨率以及遥感信息的周期性使得遥感技术对植被及其地面覆盖的研究尤为重要, 现已广泛应用于探测地球生物圈的变化, 并在 GIS 技术的支持下监测土地覆盖与土地利用、观察植被类型及其生存状态、监测干旱、水土流失和土地荒漠化等。传统的干旱监测是应用地面观测的气象数据和其他实测数据如土壤含水量进行的, 这些监测方法属于点的干旱监测。然而, 要实现大范围的干旱监测, 遥感技术是可行性的技术途径之一^[2, 3]。实际上, 干旱每年发生, 只是地点不同而已, 在一特定年内某些地区能获得足够的降水资源, 而对其他地区来说, 有可能存在着干旱, 甚至极端的干旱^[4], 在黄土高原地区广泛流传着“十年九旱”和“三年一大旱”的农谚能充分地说明这一点。因此, 应用遥感技术研究一个地理区域的干旱具有重要的现实意义。

1 NOAA-AVHRR 数据的校正、定标和处理

1.1 NOAA-AVHRR 数据的校正、定标

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 卫星所载的 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 传感器有 5 个波段, 第 1, 2 波段分别位于红光和近红外区, 其波长分别为 $0.58 \sim 0.68 \mu\text{m}$ 和 $0.72 \sim 1.10 \mu\text{m}$, 主要用于研究植被覆盖状况; 第 3 波段位于中红外区, 波长为 $3.55 \sim 3.93 \mu\text{m}$, 用于热目标的监测; 第 4, 5 波段位于热红外区, 波长分别为 $10.30 \sim 11.30 \mu\text{m}$ 和 $11.50 \sim 12.50 \mu\text{m}$, 用于反演陆地和海洋表面的温度。AVHRR 具有时频高、覆盖范围大、成本低、波段范围宽等特点, 除了用其进行天气预报外, 还可为水文分析、环境监测、农作物估产和干旱监测等提供有用的信息, 而这些应用要以高精度的几何校正为前提, 以便多时相数据能够相互配准。

由于 AVHRR 的原始数据并非实际的反射率和辐射量, 要使用 AVHRR 数据获得地表的反射率和辐射温度, 就必须对其进行辐射校正和定标处理。经过辐射校正和定标后, 第 1, 2 波段

的数据便转化为地表的反射率;第 3, 4, 5 波段的数据便转化为地表的辐射亮度;然后根据普朗克定律用辐射亮度计算第 3, 4, 5 波段的亮度温度。

由于 AVHRR 数据的空间分辨率低,其扫描角度大(±55.4°)、扫描带宽(2 800 km),并受地球曲率、轨道漂移等的影响,数据变形大,影像几何畸变严重,因此,传统的几何校正法很难直接用于 AVHRR 数据的校正。为了对 AVHRR 数据进行几何校正,本文分两步进行:①对像素畸变进行校正;②采用传统的几何校正法——多项式校正法。经过校正后的 AVHRR 影像的像素大小为 1.1 km×1.1 km,投影方式为兰勃特等面积斜轴方位投影。有关上述数据的处理过程和亮度温度的计算与订正可参阅文献[6~8]。

1.2 AVHRR 数据植被指数图和土地表面温度图的生成

1.2.1 植被指数的定义

植被指数是基于植物叶绿素在 0.69 μm 的强吸收特征,通过红光和近红外波段光谱特性及其简单组合比值或线性组合实现对植被状态信息的表达^[9]。植被指数是用定量化的手段描述植被覆盖度或者植被覆盖的活力,它不仅用于增强植被的响应,而且用于估算作物的产量。用于解释遥感数据的植被指数有多种,如简单植被指数、比值植被指数、归一化植被指数和土壤校准植被指数等,其中最常用的是归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),其定义为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \tag{1}$$

式中,ρ_{NIR}, ρ_{red} 分别表示植被在近红外波段和红光波段上的反射率(对 AVHRR 来说,分别为第 2 波段和第 1 波段)。

植被由于活性叶片的叶肉组织在近红外波段具有较高的反射率,叶绿素的吸收作用在红光波段具有低的反射率,因此,绿色植被的 NDVI 值趋向于 1。相反,云、水和雪在红光波段的反射率比近红外波段大,NDVI 为负值;岩石和裸土在这两个波段的反射率相似,NDVI 值接近 0。NDVI 之所以被广泛应用是由于它对不同视角及大气条件不敏感。

1.2.2 土地表面温度的反演

由于卫星过境时间并非当地日最高和最低温度时刻,为此笔者选择一帧卫星过境时间与日最高或最低温度时刻相近的 AVHRR 影像,以研究地面实测温度与 AVHRR 第 3, 4, 5 波段亮度温度

的关系,并选出较为合适的土地表面温度的反演方法。2000 年 3 月 26 日 NOAA 12 卫星夜间过境时间与日最低温度的时刻接近,卫星过境时间为地方时 6:10~6:28 时,与日最低温度的时刻(日出时刻)相差约 0.5h。在陕西省关中平原地区应用 18 个气象站所测 2000 年 3 月 26 日的日最高和最低土壤表面温度,按照作者开发的土壤表面温度的日周期变化模型求出卫星过境时的温度。

提取卫星过境时所在气象站的像素尺度的亮度温度。为了检测提取数据的空间分布的一致性,采用统计分析的方法(平均值和方差):以被检测像素(地面实测点最近的像素)为中心,建立 3×3 的像素方阵,若 3×3 方阵的第 4 波段亮度温度的方差大于 3℃²,则认为该像素及其周围像素存在云或其他因素的干扰^[11]。经过上述检测,有 12 个气象站所在地的数据合格。

在此基础上,用卫星过境时的土地表面温度与 AVHRR 第 3, 4, 5 波段的亮度温度进行线性相关分析、多元线性回归分析和通径分析,最终得出适合于关中平原地区土地表面温度(LST)反演的公式:

$$LST = T_4 + 3.63(T_4 - T_5) + 0.87 \tag{2}$$

式中,T₄, T₅ 分别表示 AVHRR 第 4, 5 波段的亮度温度,单位为℃。经检验,式(2)达到极显著的水平(α=0.01)。式(2)与 PRICE 法^[10]相比,反演土地表面温度的误差在可接受的 1.5℃之内;同时笔者认为,这一土地表面温度的反演误差比气象站实际观测的土壤表面温度的不确定性要小。有关上述土地表面温度的日周期变化模型、土地表面温度的反演方法及其与其他反演土地表面温度的分窗口算法对比分析将另文论述。

2 条件植被温度指数的定义

从农业生产考虑,干旱是在水分胁迫下,作物及其生存环境相互作用构成的一种旱生生态环境。影响作物生产的因素很多,主要有气候、土壤、生产水平和天气等,在这些因素中,对某一地区来说,在连续几年的时间内,可以认为气候、土壤和生产水平处于相对不变的状态,只有天气变化对作物生产有短期的效应。因此,植被指数的时空变化与干旱有一定的相关性。目前,国内外的研究者已开发出了条件植被指数(vegetation condition index, VCI)^[12]、条件温度指数(temperature condition index, TCI)^[13]、距平植被指数

(anomaly vegetation index, AVI)^[14] 等干旱监测的方法。这些方法均适用于年度间相对干旱程度的监测,也就是说,以多年(如 10 年)第 i 个时期 NDVI 或第 4 波段亮度温度的历史最大值和最小值为标准,研究某一年第 i 个时期 VCI, TCI, AVI 的相对变化。对某一研究区域来说,这 3 种方法均可得出区域内某一时期的干旱程度及范围,并可得到像素尺度的监测结果。然而,由于干旱发生的时间和地点存在着时空变异,所以在像素水平上,上述三种指数法所使用的指标(如研究年限内最大的 NDVI 和平均 NDVI)就有可能不同,进而造成某一特定时期内不同像素间监测结果的可比性较差。因此,笔者提出了条件植被温度指数(vegetation-temperature condition index, VTCI)的概念,它是在前面几种指数的基础上,研究一特定年内某一时期整个区域相对干旱的程度及其变化规律。笔者将 VTCI 定义为:

$$VTCI = \frac{LST_{NDVI_{i\max}} - LST_{NDVI_i}}{LST_{NDVI_{i\max}} - LST_{NDVI_{i\min}}} \quad (3)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} LST_{NDVI_{i\max}} &= a + bNDVI_i \\ LST_{NDVI_{i\min}} &= a' + b'NDVI_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $LST_{NDVI_{i\max}}$, $LST_{NDVI_{i\min}}$ 分别表示在研究区域内,当 $NDVI_i$ 值等于某一特定值时的土地表面温度的最大值和最小值; LST_{NDVI_i} 表示某一像素的 NDVI 值为 $NDVI_i$ 时的土地表面温度; a, b, a', b' 为待定系数。在本研究中,式(4)中的系数通过作研究区域内的 NDVI 和 LST 的散点图近似获得,也就是说,通过绘制散点图得到 $LST_{NDVI_{i\max}}, LST_{NDVI_{i\min}}, NDVI_i$ 三者间的线性方程。

VTCI 的定义既考虑了区域内 NDVI 的变化,又考虑了在 NDVI 值相同条件下 LST 的变化,即高温对作物生长不利。式(3)中的分母表示在研究区域内,当 $NDVI_i$ 值等于某一特定值时的像素的土地表面温度的最大值和最小值之差,分子表示 $NDVI_i$ 值等于这一特定值时的土地表面温度的最大值与该条件下某一像素土地表面温度值之差。因此, VTCI 的取值范围为 $[0, 1]$, VTCI 的值越小,相对干旱程度越严重。在实际应用中应按下述步骤进行判别。

1) b 的负值越大,说明研究区域内存在干旱。若 b 的值与 b' 的值接近,则表明整个区域内均存在干旱,相对干旱程度最严重, VTCI 的值较

小。

2) b 的负值越小并接近于 0,说明研究区域内不存在干旱, VTCI 的值较大。

3) b 与 b' 的差值越大,说明研究区域内存在不同程度的干旱。 VTCI 的值越小,相对干旱程度越严重; VTCI 的值越大,相对干旱程度越轻。

步骤 1)、2)可以认为是步骤 3)的特殊情况。在步骤 1)情况下,研究区域内的土地表面温度向线性方程 $LST_{NDVI_{i\max}} = a + bNDVI_i$ 逼近;在步骤 2)情况下,则向线性方程 $LST_{NDVI_{i\min}} = a' + b'NDVI_i$ 逼近。

3 实验结果

3.1 NDVI 影像和 LST 影像的生成

选择 2000 年 3 月下旬陕西关中平原地区天空晴朗时卫星过境时(地方时 15:06~15:57)的 6d 的 AVHRR 数据。应用上述数据处理方法首先生成每天 NDVI 影像和 LST 影像,然后用最大值合成法生成 NDVI 的最大值影像和 LST 的最大值影像^[15, 16],这样就得到关中平原地区 3 月下旬的 NDVI 最大值合成影像和 LST 最大值合成影像,简称 NDVI 影像和 LST 影像,见图 1、图 2。所选影像中心点的地理坐标为东经 108°45'、北纬 34°39',所选影像大小均为 131 像素×281 像素(144.1 km×309.1 km)。在 NDVI 和 LST 数据的处理中,在一旬内取最大的目的是进一步消除太阳高度角、卫星视角、轨道漂移以及云等的影响。

从图 1 和图 2 可以看出,关中平原与其南部秦岭山地的界线清晰,位于晋陕豫三省交界处的黄河亦可见(影像右上角)。从 NDVI 影像可以大致划分出关中平原与其北部渭北旱塬的界线,渭北旱塬的 NDVI 小于关中平原的 NDVI。同时可以看出, NDVI 的空间变化特性很难用于干旱的监测。从 LST 的空间分布来看,关中平原与渭北旱塬的 LST 变化无明显的规律可循,在杨凌北部渭北旱塬的局部地区和黄河两岸的部分地区的土地表面温度较高,因而可得出这些地区有可能存在干旱的结论。

3.2 条件植被温度指数在干旱监测中的应用

为了消除位于关中平原南部秦岭山地(低 NDVI, 低 LST)对生成的 VTCI 影像的影响,笔者选择关中平原为样区,以便获得样区 $LST_{NDVI_{i\max}}, LST_{NDVI_{i\min}}$ 与 $NDVI_i$ 的线性方程,



图 1 NDVI 最大值合成影像

Fig. 1 The NDVI Maximum Composite Image



图 2 LST 最大值合成影像

Fig. 2 The LST Maximum Composite Image

然后用这两个线性方程研究整个区域 VTCI 的变化规律。该样区 2000 年 3 月下旬 NDVI 最大值合成影像与 LST 最大值合成影像的散点图如图 3 所示。根据条件植被温度指数的定义, 从图 3 可近似地得到:

$$\left. \begin{aligned} LST_{NDVI_{i,max}} &= 40.725\ 5 - 25.490\ 4NDVI_i \\ LST_{NDVI_{i,min}} &= 24.941\ 2 + 8.823\ 5NDVI_i \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

用 2000 年 3 月下旬卫星白天过境时 NDVI 最大值合成影像和 LST 最大值合成影像, 按照

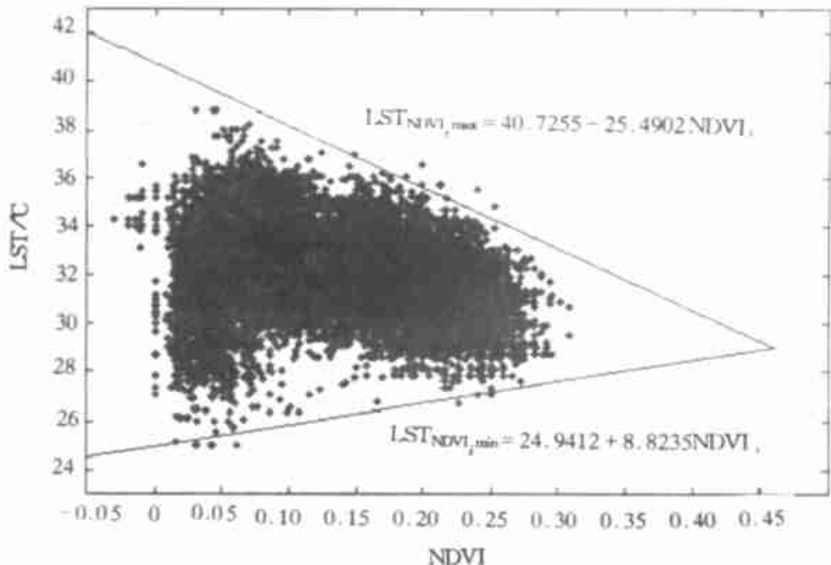


图 3 关中平原样区 NDVI-LST 散点图

Fig. 3 Scatterplot of NDVI and LST of the Pilot for the Last Ten Days of March 2000

式(5)和式(3)生成的 VTCI 影像如图 4。影像大小为 131 像素×281 像素(144.1 km×309.1 km)。从图中可以看出, 关中平原与秦岭的界线

清晰; 关中平原南部与秦岭接壤的地区有一条 VTCI 小于 0.4 的地带, 该地带存在着相对较严重的干旱; 黄河两岸也存在着相对较重的干旱。

陕西省澄城县附近的渭北旱塬(自西偏南向东偏北为蒲城县、澄城县和合阳县)和位于杨凌北部的渭北旱塬表现出连片分布相对较严重的干旱。黄河西部、澄城县与秦岭之间有一条集中连片分布的干旱带,该处位于陕西省大荔县附近的渭河滩地,土壤质地偏沙。上述相对干旱监测的结果与

作者开发出的基于土壤热惯量^[17]的水分模型的监测结果(如图 5)基本吻合(影像左下角与秦岭交界处的部分地区除外),影像大小为 131 像素×281 像素(144.1 km×309.1 km)。因此,条件植被温度指数可用于区域级相对干旱的监测。



图 4 卫星白天过境时的 VTCI 影像

Fig. 4 The VTCT Image for the Last Ten Days of March 2000



$$\text{土壤含水量}(0\sim10\text{ cm})(\%) = \text{土壤重量含水量} / \text{土壤田间持水量}$$

图 5 2000 年 3 月 28 日土壤热惯量模型反演的土壤水分的分布图

Fig. 5 The Soil Moisture Map of March 28, 2000 Simulated by Soil Inertia Model

4 结 论

1) 本文提出了条件植被温度指数的概念,它的定义既考虑了某一区域内归一化植被指数的变化,又考虑了在归一化植被指数值相同条件下土地表面温度的变化。由于该定义中强调了在归一化植被指数值相同条件下土地表面温度的变化,因此建议将条件植被温度指数英文名称定为 Vegetation-Temperture Condition Index。

2) 条件植被指数、条件温度指数和距平植被指数适用于监测年度间大尺度和区域级的相对干旱程度。而条件植被温度指数适用于监测某一特定年内某一时地区域级的相对干旱程度,它具有地方专一性和时域专一性的特点。

3) 对陕西省关中平原地区 2000 年 3 月下旬干旱的监测结果表明,条件植被温度指数能较好地监测该区域的相对干旱程度,并可用于研究干旱程度的空间变化特征。

参 考 文 献

- 1 Jackson R D, Slater P N, Pinter P J. Discrimination of Growth and Water Stress in Wheat by Various Vegetation Indices through Clear and Turbid Atmospheres. Remote Sensing of Environment, 1983, 13: 187~208
- 2 Lambin E F, Ehrlich D. The Surface Temperature-Vegetation Index for Land Cover and Land Cover Change Analysis. Int. J. of Remote Sensing, 1996, 17: 463~487
- 3 Liu W T, Kogan F N. Monitoring Regional Drought Using the Vegetation Condition Index. Int. J. of Remote Sensing, 1996, 17: 2 761~2 782
- 4 王鹏新, 魏益民. 旱地农业可持续发展的道路. 西安: 世界图书出版公司, 1998
- 5 Di L P, Rundquist D C. A One-step Algorithm for Correction and Calibration of AVHRR Level 1b Data. Photogrammetric and Remote Sensing, 1994, 60: 165~171
- 6 刘良明, 廖明生, 朱攀, 等. NOAA 气象卫星 AVHRR 1A. 5 数据集的定位处理方法研究. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(1): 62~66
- 7 吴炳方. NOAA-AVHRR 1B 数据的几何精纠正. 环境

遥感, 1994, 9; 287 ~ 295

8 王鹏新, 龚健雅, 李小文. RS, GIS, GPS 在西北农业大开发中的应用前景. 遥感技术与应用, 2000, 15; 241 ~ 245

9 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究. 北京: 科学出版社, 1998. 175 ~ 185

10 Price J. C. Land Surface Temperature Measurements from Spilt-window Channels of the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer. J. of Geophysical Research, 1984, 89; 7 231 ~ 7 237

11 Prata A J. Land Surface Temperatures Derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer and the A-longtrack Scanning Radiometer. 1. Theory. J. of Geophysical Research, 1994, 98; 16 689 ~ 16 702

12 Kogan F. N. Remote Sensing of Weather Impacts on Vegetation in Non-homogeneous Areas. Int. J. of Remote Sensing, 1990, 11; 1 405 ~ 1 420

13 Kogan F. N. Application of Vegetation Index and Brightness Temperature for Drought Detection. Advances in Space Research, 1995, 15; 91 ~ 100

14 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用. 环境遥感, 1994, 9; 106 ~ 112

15 Helben B. N. Characteristics of Maximum-Value Composite Images from Temporal AVHRR Data. Int. J. of Remote Sensing, 1986, 7; 1 417 ~ 1 434

16 Cihlar J, Manak D, D' Iorio M. Evaluation of Compositing Algorithms for AVHRR Data over Land. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1994, 32; 427 ~ 437

17 Cracknell A. P, Xue Y. Thermal Inertia Determination from Space: A Tutorial Review. Int. J. of Remote Sensing, 1996, 17; 431 ~ 461

作者简介: 王鹏新, 博士生. 主要从事遥感技术在农业中的应用研究, 着重于反演土地表面温度和土壤表层水分以及进行干旱监测等. 代表成果:《旱地农业可持续发展的道路》等专著. 已发表论文 25 篇.

E-mail: pengxinwang@263. net

Vegetation-Temperature Condition Index and Its Application for Drought Monitoring

WANG Pengxin¹ GONG Jianya¹ LI Xiaowen²

(1 National Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)
(2 Department of Resource and Environment Sciences, Beijing Normal University, 19 Xijiekou Road, Beijing, China, 100875)

Abstract: Most previous applications of the National Oceanic and Atmospheric Administration's Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA-AVHRR) remotely sensed data for drought monitoring were based on vegetation condition index (VCI), temperature condition index (TCI), and/or anomaly vegetation index (AVI), which extracted from AVHRR derived normalized difference vegetation index (NDVI) and brightness temperature data. These indices were often applied to monitor drought occurrence at a large scale or a regional level by comparing the indices' inter-annual changes for a special period of the covering years. On basis of the above drought monitoring results, an index called vegetation-temperature condition index (VTCI) was developed for drought monitoring in this study. The index can be used to monitor drought occurrence at a regional level for a special period (e. g. 10 days) of a year, and to capture spatial variations of drought occurrences within the region. The new drought monitoring index is not only related to NDVI changes in a region, but also gives emphasis on land surface temperature changes of pixels which have the same NDVI value. The value of VTCI is from 0 to 1. The lower value of VTCI, the heavier the drought occurrence is. The index is site-specific and time-specific.

A pilot study was carried out for drought monitoring for the last tenDays of March 2000 in the Guanzhong Plain area of Shanxi Province, China. The results showed that VTCI had better

performances in classifying the relative drought occurrence levels and in studying the distribution of drought occurrences. There are different levels of drought occurrences in the Plain. The boundary between the Plain and Qingling Mountain, which is located in the south of the studied area, was clearly showed in the VTCI image. There was a strip area just to the north of this boundary with relatively heavy drought occurrence where VTCI values were less than 0.4. The other centralized heavy drought occurrence areas were the area at banks of the Yellow River valley, the area around Chengcheng county which is located in the Weibei tablelands, and the area to the north of Yangling city. The scattered drought occurrence pixels can also be found in the study area. In General, the monitoring results were accorded with soil surface (0 ~ 10 cm) moisture distribution which was simulated by using soil real thermal inertia model developed by the authors. For future development of the drought index, robust methods have to be found to enable estimation of the VTCI parameters for a long time series of data, and the index should be tested in more dryness areas.

Key words: vegetation-temperature condition index; drought monitoring; normalized difference vegetation index; NOAA-AVHRR

About the author: WANG Pengxin, Ph. D candidate. His major research fields are applications of remote sensing technology in agriculture, especially in retrieving of land surface temperature and soil surface moisture, and monitoring drought occurrence. His publications include a book entitled “The Way for the Development of Sustainable Dryland Farming Systems” and 25 papers.
E mail: pengxinwang@263.net

(上接第 392 页)

more attention, and geometric, attribute and time information in GIS should be handled with same importance. ③ Holistic GIS data model has to give more functions to layer (especially to compound layer) such as adding and removing geographical object, query and spatial analysis, etc. ④ Object model and field model can be unified with object-oriented method. ⑤ A part of geographical objects, must have 3D information such as elevation value.

As a result, one design of holistic GIS data model is presented at the end of this paper.
Key words: topologic relation; layer; geographical space; holistic GIS data model

About the author: XIAO Lebin, post doctoral research fellow. His research interest include 3D GIS data model, 3D data structure, 3D Geomati- cal visualization, 3D spatial database and 3D WebGIS software development.
E mail: xlbyh@sina.com