

文章编号: 1007-6301 (2001) 02-0146-07

植被指数- 地面温度特征空间的 生态学内涵及其应用

江 东, 王乃斌, 杨小唤, 刘红辉

(中国科学院地理科学与资源研究所 资源环境数据中心, 北京 100101)

摘要: 植被指数与地面温度是描述土地覆盖特征的重要参数, 对两种数据的综合分析, 可以衍生出更丰富、更清晰的地表信息, 有助于更加准确、有效地认知土地覆盖/土地利用的时空变化规律。本文探讨了植被指数与地面温度构成的二维向量空间的物理意义与生态学内涵, 以基于NOAA AVHRR的时间序列数据为本底, 分析了不同土地覆盖类型在该特征空间上的时序变化规律, 并以黄淮海地区主要农作物冬小麦为例, 研究了植被指数- 地面温度指标与干旱、半干旱地区农作物产量之间的响应关系。

关 键 词: 植被指数; 地面温度; NDVI; 生态学; 农作物

中图分类号: Q 948; X144 **文献标识码:** A

1 引言

植被指数与地面温度是描述土地覆盖特征的两个重要参数, 而两种数据的合理融合, 可以衍生出更丰富、清晰的地表信息, 有助于更加准确、有效地认知土地覆盖/土地利用的时空变化规律, 遥感技术可以为之提供大范围、更新快的植被指数与地面温度资料。以往的研究工作大多集中于植被指数, 即综合利用可见光、近红外两波段的波谱发射值, 构建植被指数 (Spectral Vegetation Index), 如常用的归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI), 根据植被指数的分布与时间变化特征, 进行土地覆盖/土地利用的分类与描述^[1~3]。近年来, 一些科学家开始综合利用植被指数与地面温度数据, 分析地表能量流动与物质转换的过程, 取得了很好的效果^[4~7]。常用的遥感数据为高时间分辨率 (卫星每天过境2次), 空间分辨率为1.1 km的美国气象卫星NOAA AVHRR资料。

2 植被指数与地面温度

2.1 参数的遥感反演

典型的绿色植物发射光谱曲线上, 蓝光区和红光区各有一个叶绿素吸收带 (吸收中心

收稿日期: 2001-03; 修订日期: 2001-05

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目资助 (KZCX2-308-4)

作者简介: 江东 (1973-), 男, 生态学博士, 现于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据中心从事科研工作, 已发表论文40余篇。

在 $0.45 \mu\text{m}$ 及 $0.65 \mu\text{m}$), 近红外区则有一个强反射峰, 植被对可见光和近红外辐射的吸收—反射作用的两种截然不同的表现是由色素及细胞内部机构差异造成的。NOAA AVHRR 观测通道的设置非常有利于捕捉这种差异: 第一波段 CH_1 ($0.58 \sim 0.68 \mu\text{m}$) 处在叶绿素的吸收带, 第二波段 CH_2 则位于绿色植物的光谱反射区。因此, 第一、第二波段组合而成的 NDV I, 常被有效地用于植被监测^[8, 9]:

$$\text{NDV I} = \frac{\text{CH}_2 - \text{CH}_1}{\text{CH}_2 + \text{CH}_1} \quad (1)$$

式中 CH_1 、 CH_2 分别为 NOAA AVHRR 的第一、第二波段的反射率值。

NOAA AVHRR 的第 4、第 5 通道为辐射观测通道, 一般采用分裂窗算法 (Split window algorithm) 解算地面温度 T_s , 该算法消弱了大气的干扰, 比单一的 CH_4 或 CH_5 值更为稳定和准确^[10~12]。计算公式为:

$$T_s = [T_4 + 3.33(T_4 - T_5)] \cdot \frac{3.5 + \epsilon_4}{4.5} + 0.75T_5(\epsilon_4 - \epsilon_5) \quad (2)$$

式中 T_4 、 T_5 分别为 NOAA AVHRR 的第 4、5 波段的辐射值 (单位为 K); ϵ_4 、 ϵ_5 分别为第 4、5 波段的地面发射率。

2.2 参数的物理特性

研究表明, 绿叶的叶面积系数 (LAI) 与红光反射成反比, 与近红外反射成正比^[13], 而 NDV I 与 LAI 有很好的正相关关系, 归一化植被指数 NDV I 综合了 NOAA AVHRR 对植被敏感的可见光 (CH_1) 和近红外 (CH_2) 波段反射光谱信息, 是反映植物生长状态最为直接和灵敏的指标之一, 是区域地表植被覆盖度与植物长势的函数^[14~16]。

在没有水分限制的情况下, T_s 主要是地表蒸散的函数。蒸散包括蒸发 (裸土的蒸发以及植被冠层截获水分的直接蒸发) 和植物的蒸腾, 用于蒸散的能量 (潜热能) 很大程度上决定了地表的平均温度^[17, 18]。地表蒸散的主要影响因素是辐射能量、地表水汽、植被盖度、地表风速、表面粗糙度等。因此, T_s 与决定蒸散大小的表面阻抗 (空气动力传导阻抗和冠层蒸腾阻抗) 与土地覆盖状况 (如植被类型和生长状况、土壤特性等) 有较为密切的关系。

3 T_s -NDV I 特征空间

近年来, 一些学者开始综合利用遥感多光谱信息, 探讨 NDV I (可见光、近红外) 和 T_s (热红外) 耦合空间的时空变化规律与生态学意义。研究表明, T_s -NDV I 的时空对应关系与土地覆盖类型有很密切的关系^[19, 20]。很多学者对 T_s -NDV I 特征空间中 T_s 、NDV I 及地表水分状况的对应关系进行了深入的研究^[21~23]。

3.1 基本特征

不同的土地覆盖类型、不同的地表水分状况, 在以 T_s 和 NDV I 为主轴构成的二维空间中, 呈现出较好的分异规律 (见图 1)。

图 1 将土地覆盖类型大致分为裸土、植被部分覆盖和植被完全覆盖 3 种。在图上的裸土区, 地表辐射温度与地表水分含量高度相关^[24, 25]。图中 A 点和 B 点分别代表干旱裸土 (低 NDV I, 高 T_s) 和富水裸土 (低 NDV I, 低 T_s), 随着植被盖度的增加, 表面温度降低, 图中点 C 代表的是植被盖度高、土壤水分含量低的情况, 此时蒸散阻抗大 (高 NDV I, 较

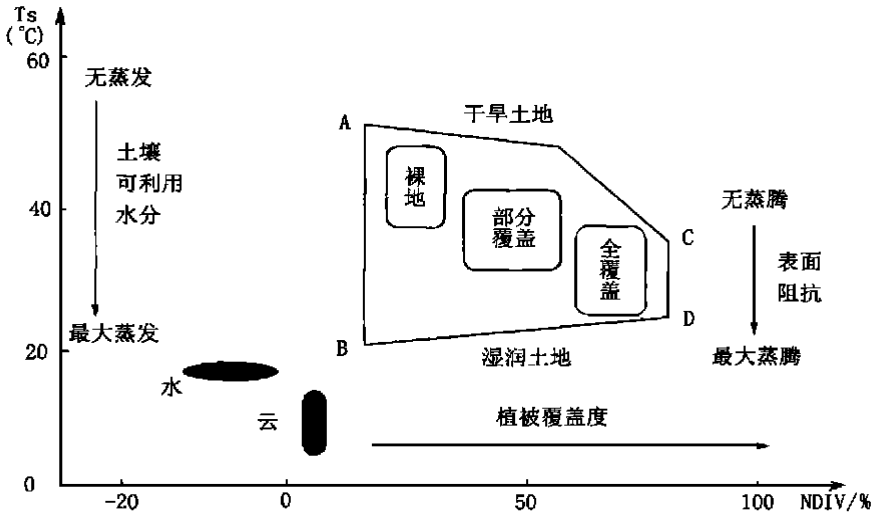


图 1 地面温度 (T_s) - 植被指数 (NDVI) 特征空间

Fig. 1 Feature space of surface temperature (T_s) and vegetation index (NDVI)

(据 Goward and Hope 1989, Nemani et al 1993, Lambin and Ehrlich 1996)

(From: Goward and Hope 1989, Nemani et al 1993, Lambin and Ehrlich 1996)

高 T_s)，点 D 代表的是植被盖度高、土壤水分含量充足的情况，此时蒸散阻抗小 (高 NDVI，低 T_s)。因此，图中的 A ~ C 为低蒸散线，反映的是干旱条件；B ~ D 为潜在的最大蒸散线，反映的是地表水分供给良好的状态^[26]。A、B、C、D 四点代表了 T_s -NDVI 特征空间中四种极端情况，在生长季，各种类型都囊括在多边形 ABCD 圈绕的区域内，在生长季节以外，一些受地温影响的地区 (即高纬度地区)，其轨迹会部分地超出该范围。

图 1 很好地说明 T_s -NDVI 特征空间中 T_s 、NDVI 及地表水分状况之间互动关系的生物学意义。本次研究中选取了我国黄淮海平原三种典型土地覆盖类型作为研究对象：冬小麦地、麦土混合地、裸地，以这些地物类型 1999 年 5 月的 T_s -NDVI 数据，投放到坐标系中，所得结果如图 2 所示。基于图 1 所揭示的机理，在 T_s -NDVI 特征空间中，三种地物类型可以很好地加以区分。

3.2 时序变化规律

进一步的研究发现，麦地、裸地的 T_s 、NDVI 的时间变化轨迹 (1999 年 1 月 ~ 6 月)，在 T_s -NDVI 空间中具有截然不同的特征 (图 3)，这种差异特征是由于土地覆盖类型的不同所造成的：不同的土地覆盖类型，其水热交换和能量平衡的机理不同，在时间轴上表现出不同的展布规律。

从图 3 上可以看出，1 ~ 5 月份，由于冬小麦蒸腾作用的存在，麦地的坐标点位于图的右方，到 6 月份，黄淮海平原的冬小麦收割完，原来的麦地变成空地，坐标点随之陡然偏

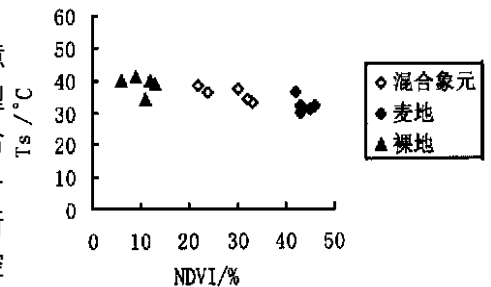


图 2 我国几种典型土地覆盖类型

T_s -NDVI 特征空间 (1999 年 5 月)

Fig. 2 T_s -NDVI feature spaces of the typical types of land covers in China

向左上方, 显示出低蒸散、低覆盖的特征。而裸地从 1 月到 6 月, NDVI 值变化很小, 随着地面温度的升高, 坐标点沿近似与 T_s 轴方向向上方移动。

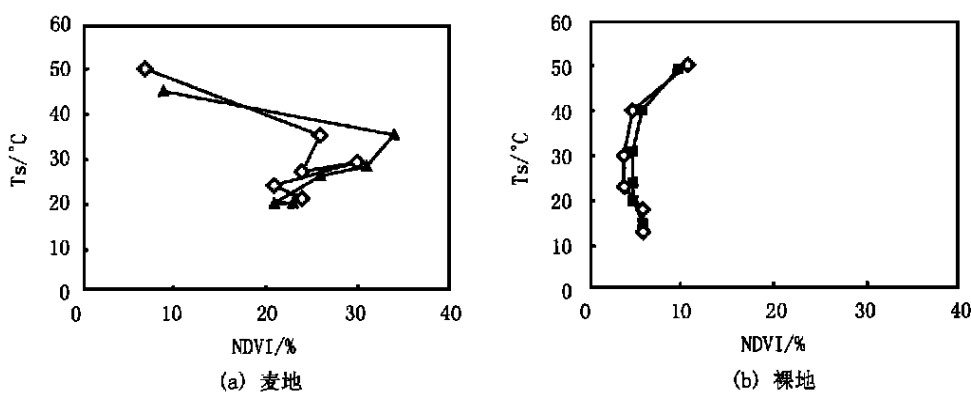


图 3 麦地、裸地在 T_s -NDVI 空间中的时序变化特征 (黄淮海平原, 1999 年 1~ 6 月)

Fig. 3 Temporal variation of the T_s -NDVI feature spaces of winter wheat field and bare soil (Huang Huaihai campaign, January~ June, 1999)

4 作物水分指数

根据以上的分析结果, 研究中考考虑利用植被指数与地面温度的比值 $NDVI/T_s$ 来作为表征地表水分状况特别是农作物水分胁迫情况的指标。NDVI 反映了植被在不同时期的生长发育情况, 而 T_s 为冠层表面温度, 指标 $NDVI/T_s$ 将土壤水分与作物长势结合起来, 凸现了“作物可利用水分 (或有效水分)”的思想。

4.1 NDVI/ T_s 的生态学内涵

在干旱、半干旱地区, 植被指数、冠层表面温度与植被的水分状况三者之间有着很显著的互动关系: 水分供给条件好时, 作物生长迅速长势好, NDVI 值高; 此时作物的生命活动旺盛, 蒸腾量大, 整个象元的蒸散阻抗降低 (Lambin and Ehrlich, 1996), 潜热能所占的比例增大, 象元内的表面温度 T_s 值降低。

根据像元植被覆盖比例, 可以将卫星图像 (如 NOAA AVHRR 图像) 的像元分为 3 种类型: 植被全覆盖像元、裸土像元和植被土壤混合像元, 对于每种像元, 遥感反演出的地面温度的生态学意义各不相同: 对于植被全覆盖的象元, 植物的蒸腾使冠层表面的温度低于同环境条件下的裸土的表面温度, 也低于水分匮乏情况下的冠层表面温度; 对于裸土而言, 土壤中含水量越大, 其比热容越大, 温度上升缓慢, 同时水分的增加增强了表面蒸发作用, 因此地面温度低于同环境条件下含水量较低的土壤; 植被—土壤混合象元, 它是裸地表面温度和植被冠层表面温度的综合温度, 它受以下几个主要因素影响: 植土比例、植被蒸腾强度、土壤水分含量。因此, 在水分对作物生长起控制作用的干旱、半干旱地区, 土壤中水分含量越高, 作物的水分供给越充足。则作物的生长旺盛 (NDVI 值大), 蒸腾作用强烈, 土壤蒸发大, 象元的表面温度低 (T_s 值小), 因此 $NDVI/T_s$ 值高, 反之, $NDVI/T_s$ 值较低。因此, $NDVI/T_s$ 是一个对区域土壤水分含量和作物水分状况较为敏感的指标。

4.2 NDVI/ T_s 的时间序列曲线

研究中收集了 1999 年度黄淮海地区每日的 NOAA AVHRR 数据, 对每 10 天 (旬度) 合成的 NDVI 和 T_s 数据进行检测和平滑, 除去噪声和明显错误的的数据, 然后计算出研究区内作物生长季旬度的 NDVI/ T_s 值, 建立了水分状况基础数据库。图 4 为研究区内河南省武涉县、博爱县、修武县三县的冬小麦 1999 年 1~5 月旬度水分变化情况。图上纵坐标为水分指数 NDVI/ T_s , 横坐标为从 1999 年 1 月 1 日起的时间 (天数)。

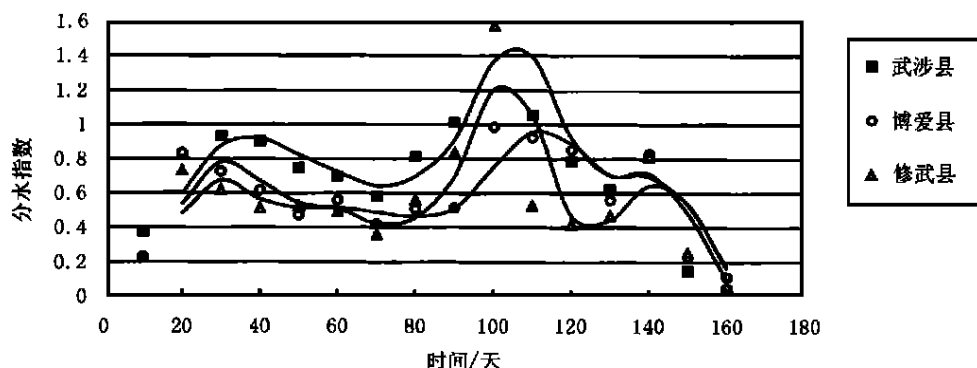


图 4 1999 年度河南省冬小麦水分指数时间曲线

Fig. 4 Temporal profile of water index of winter wheat in He Nan province in 1999

4.3 NDVI/ T_s 与农作物产量

在河南省不同冬小麦生长区, 选取不同单产水平的 60 余县 (高、中、低产县各 20 个), 将 1999 年 1 月~5 月水分指数积分与当年产量, 投放到单产—水分指数积分坐标系中, 其散点图如图 5。

从图 5 可以看出, 冬小麦单位面积产量与水分指数积分与具有很好的正相关关系。用线性函数对其进行拟合:

$$y = 23.326x + 60.057 \quad (3)$$

式中 y 为冬小麦单产, x 为水分指数积分, 相关系数 $R^2 = 0.7308$, 相关性良好。水分指数以农作物为对象, 其表达式中, 分子为植被指数, 分母为冠层温度, 它侧重反映了“作物可利用水分”或“有效水分”, 因此它与作物单产具有密切的相关性, 可以将水分指数积分作为冬小麦的主要产量因子之一, 与其它来源的产量因子一起, 用于农作物产量模型的构建及产量估算。

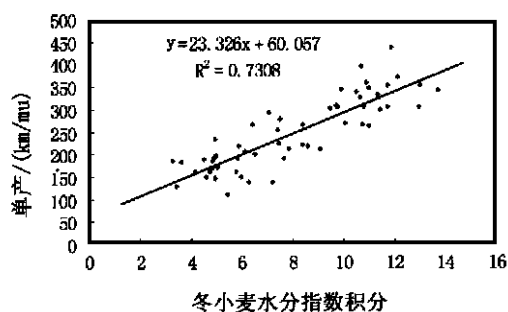


图 5 河南省 1999 年冬小麦单产—水分指数积分关系图

Fig. 5 Scatter graph of the relationship between winter wheat yields and water index in He Nan province in 1999

5 结论

多源信息融合与信息挖掘是地球信息科学新的生长点。本文综合利用植被指数与地面

温度数据, 探讨了NDV I- T_s 坐标空间内不同土地覆盖类型的空间分异规律与时序变化特征, 并据此构建了水分指数NDV I/ T_s , 分析了它与农作物产量的相关关系。研究表明, 多光谱遥感数据的综合利用, 可以对地表过程进行更全面、更深刻、更清晰的认知, 取得事半功倍的效果。

致谢: 感谢本所全球变化信息中心刘闯研究员在 AVHRR 数据上给予的支持与帮助。

参考文献:

- [1] Justice Townshend, Holben B H, Tucker C J. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, **6**: 1271-1381.
- [2] Loveland, Merchant J W, Ohlen D O et al. Development of a land-cover characteristics database for the conterminous[J]. *U. S. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, **57**: 1453-1463.
- [3] 童庆禧 等. 中国典型地物波谱及其特征分析[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [4] Price U sing the special context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing*, 1989, **28**: 940-948.
- [5] Nemani, Pierce L L, Running S W, Goward S N. Developing satellite derived estimates of surface moisture status [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, **32**: 548-557.
- [6] Ehrlich L D. The surface temperature- vegetation index space for land cover and land-cover change analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**: 463-487.
- [7] Nemani S Running. Land cover characterization using multitemporal red, near- IR, and thermal- IR data from NOAA /AVHRR[J]. *Ecological Applications*, 1997, **7**(1): 79-90.
- [8] Turk C J, Townshend J R, Goff T T. Africa land-cover classification using satellite data[J]. *Science*, 1985, **227**: 369-375.
- [9] 王长耀 等. 资源环境动态遥感与模型分析试验研究[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [10] John C Price. Estimating surface temperatures from satellite thermal infrared data—a simple fomulation for atmospheric effect[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, **13**: 353-361.
- [11] Price J C. Land surface measurements from the split window channels of NOAA -7 AVHRR [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89**: 7231-7237.
- [12] Ottle C, Vidal M D. Estimation of land surface temperature with NOAA -9 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **4**: 27-41.
- [13] Tucker C J, Sellers P J. Satellite remote sensing of primary production [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, **7**: 1395-1416.
- [14] Huete A R, Jackson R D, Post D F. Spectral response of a plant canopy with different soil back grounds et al, 1985[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, **17**: 37-53.
- [15] Omsby J P, Choudary B J, Owe M. Vegetation spatial variability and its effect on vegetation indices [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, **8**: 1301-1306.
- [16] Price J C. U sing spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration [J]. *I. E. E. E. Transaction in Geoscience & Remote Sensing*, 1990, **28**: 940-948.
- [17] Monteith J L. Principles of environment physics, 1973[M]. London: Edward Arnold Press.
- [18] Brutsaert W. Evaporation into the atmosphere, 1982[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [19] Hope and McDowell. The relationship between surface temperature and a spectral vegetation index of a tall grass prairie: effect of burning and other landscape contrals[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 2849-2863.
- [20] Friedl and Davis, sources of variation in radiometric surface temperature over a tall grass prairie [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **48**: 1-7.

- [21] Goward and Hope Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, **18**: 137-146
- [22] Price J C. Using the spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration [J]. *IEEE Transactions of Geophysical Research*, 1989, **28**: 940-948
- [23] Nemani, Pierce, Running, Goward Developing satellite derived estimates of surface moisture status[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, **32**: 548-557.
- [24] Jackson, Reginato, Idso. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements [J]. *Water resources Management*, 1977, **13**: 651-656
- [25] Schmugge Remote sensing of surface soil moisture[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, **17**: 1549-1557.
- [26] Goward and Hope Evaporation from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation: preliminary FIFE results from AVHRR data[J]. *Advances in Space Research*, 1989, **9**: 239-249

Ecological Connotation and Application of the Vegetation Index- Surface Temperature Feature Space

J IANG Dong, WANG Nai-bin, YANG Xiao-huan, L I U Hong-hui

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, C.A.S., Beijing 100101 China)

Abstract: Studies on character and variation of land cover/land use become more and more important in geographical and ecological research. Vegetation index and surface temperature are important parameters to describe characters of land covers. More useful information will be created by integrated analyses of these two kinds of data together, which will help us to find out main principles of the temporal and spatial variation of land cover/land use. The paper focused on physical connotation and ecological meaning of the vegetation index - surface temperature feature space, analyzed temporal variation of different type of land covers in this feature space using NOAA AVHRR remote sensing data, and did much site work on relationship between water index and winter wheat yield in the Huang Huaihai campaign. Following views have been set forth and tested based on these data: (1) Large area and long time series land surface parameters could be retrieved from remote sensed information; (2) Different types of land covers have different characters in the vegetation index- surface temperature feature space; (3) Water index, derived from vegetation index and surface temperature, is turned out to be a good indicator of growing situation of crops.

Key words: Vegetation index; Surface temperature; NDVI; Ecology; Crop