基于 $NDVI-T_s$ 特征空间的中国土地覆盖分类研究

喻 锋^{1,2} 李晓兵^{1*} 王 宏¹ 余弘婧¹ 陈云浩¹

(1 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

(2 国土资源部信息中心, 北京 100812)

摘 要 归一化植被指数($NDVI$)与地表温度(T_s)是描述地表覆盖特征的两个重要参数,其构成的 $NDVI-T_s$ 特征空间具有丰富的地学和生态学内涵。该文在 NOAA/AVHRR 连续时间序列数据反演 T_s 的基础上,通过主成分分析、非监督分类和基于 DEM 的分类后处理等方法,以 $T_s/NDVI$ 为指标对中国土地覆盖进行分类。结果表明, $T_s/NDVI$ 对中国较大尺度上不同土地覆盖类型的差异具有较强的敏感性,其对中国土地覆盖分类结果的野外抽样检验精度比传统的单独利用 $NDVI$ 时间序列进行非监督分类提高了 3.3%, Kappa 系数提高了 0.020 2;在综合其它反映植被特征及其环境的指标(如气候、地形等)的基础上,利用 $T_s/NDVI$ 将有可能较为准确地提取中国植被或土地覆盖的信息,有利于对其进行分类和变化监测,具有深远的研究潜力和应用价值。

关键词 T_s $NDVI$ $T_s/NDVI$ 土地覆盖分类

LAND COVER CLASSIFICATION IN CHINA BASED ON THE $NDVI-T_s$ FEATURE SPACE

YU Feng^{1,2} LI Xiao-Bing^{1*} WANG Hong¹ YU Hong-Jing¹ and CHEN Yun-Hao¹

(1 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of the Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 Information Center of Ministry of Land and Resources, Beijing 100812, China)

Abstract Mapping and quantifying land use and land cover changes are important for evaluating recent changes in the regional and global environment and for simulating future changes under different climate change and human land use scenarios. The normalized difference vegetation index ($NDVI$) and surface temperature (T_s) are two important parameters used to describe the characteristics of land cover. The $NDVI-T_s$ feature space combines these two parameters into one variable. By and large, $T_s/NDVI$ is synchronized to the growing season of vegetation so it can approximate the different phases and status of vegetation growth. Compared to $NDVI$ and T_s , $NDVI-T_s$ contains more land cover information and should be more suitable for characterizing the distribution of vegetation or land cover.

The aim of this paper was to discuss the feasibility of using the $NDVI-T_s$ feature space to better characterize the current distribution and changes in vegetation and land cover in China. We used several classification methods, including Principal Component Analysis (PCA), unsupervised classification and post-classification sustained based on digital elevation models (DEM). The results indicated that $T_s/NDVI$ was highly sensitive and could discriminate different vegetation cover categories in China at large-scales. The accuracy of vegetation classification based on $T_s/NDVI$ was 72.0%, a 3.3% improvement in accuracy as compared to $NDVI$ images, using unsupervised classification, and the Kappa value increased 0.020 2. Moreover, because of the simplicity of remote sensing information, the classification based on seasonal $T_s/NDVI$ data could not avoid completely the mixed classification phenomena. It was necessary to add other information, reflecting vegetation characteristic and its environment to implement post-classification, such as DEM.

When the inverting accuracy of T_s improved, $T_s/NDVI$ data can precisely describe the status of vegetation or land cover in China and improve monitoring of land use changes. This technique has great research potential and practical value.

Key words T_s , $NDVI$, $T_s/NDVI$, Land cover classification

1 研究背景及目的

土地覆盖数据尤其是区域及全球尺度上植被数据的准确获取及变化分析是土地利用/覆盖研究的基础性工作,对绝大多数全球变化研究目标能否实现起着决定性的作用;此外由于上述数据还被广泛应用于国家及区域的土地管理实践和政策规划等方面,因而一直受到各国政府及广大科学家的普遍关注。近几十年来,随着遥感技术的迅速发展和一系列国际遥感计划的实施,全天候、多层次的全球对地观测体系已经初步建立,土地覆盖信息的理论和方法取得长足进展,应用卫星图像进行土地利用/覆盖动态监测在全球和区域尺度上得到了广泛而深入地展开。其中,由于具有时间分辨率高(每日覆盖全球)、价格低廉、波段宽等优点,连续时间序列的 NOAA/AVHRR 数据已被证明是极有价值的区域及全球土地覆盖研究的数据源,在此基础上通过计算能快速、准确地进行全球和洲际尺度的植被变化和土地覆盖研究(Tucker *et al.*, 1985; Townshend *et al.*, 1987; Loveland *et al.*, 1991; Ehrlich *et al.*, 1994),在土地覆盖动态变化监测等方面已取得大量成果。如美国地质调查局于 1997 年 11 月发布的、为 IGBP(国际地圈生物圈计划)建立的全球 1 km 分辨率土地覆盖数据库(GLCC 1.2),它基于 NOAA/AVHRR 合成的多时相 $NDVI$ 数据、采用 IGBP 的土地覆盖分类系统按洲际分区进行非监督分类,提供了各洲际尺度上 Interrupted Goode Homolosine 和 Lambert Azimuthal Equal Area 两种投影形式的数据库以及在此基础上合成的 7 个全球土地覆盖专题数据集,其中所有数据都接受了统一的精度评估;此后,数据库版本得到了更新,新版本的土地覆盖数据库(GLCC 2.0)对全球地表将近 10% 面积上的土地覆盖分类数据进行了更新,并在数据库中增加了基于植被生活型体系的分类数据等内容(LPDAAC, 2004)。在数据源方面,MODIS(Moderate resolution imaging spectrometer)数据由于具有 250、500、1 000 m 的高空间精度以及 36 个分布在 0.4 ~ 14 μm 的光谱波段,并在全球免费接收,因而已成为全球和区域尺度上土地覆盖研究中的最新数据源(李晓兵等, 2004)。

通过 20 多年的努力,研究者们发现,虽然尝试采用和改进各种分类技术(Lark, 1995; Meer, 1995; Hansen *et al.*, 1996; Carpenter *et al.*, 1997; Foody, 1998; Cihlar *et al.*, 1998),但仅利用 NOAA/AVHRR 的 $NDVI$ 数据进行分类,精度难以有很大的提高。

因此,为减少大气和土壤背景对 $NDVI$ 的影响,人们发展和改进了许多其它的光谱植被指数,并把它们引入到 NOAA/AVHRR 数据的分类试验上来,如 GE-MI(Global environmental monitoring index)、SAVI(Soil-adjusted vegetation index)、ARVI(Atmospheric resistant vegetation index)等(Running *et al.*, 1995)。此外,近年开始也有研究者试图从增加数据源信息量的角度入手,进行新的分类试验:如潘耀忠等(2000)尝试了利用 $NDVI$ 时间序列图像与能够反映区域植被分布格局的气候综合指标可能蒸散(Holdridge PE)进行多维信息复合,采用非监督分类对中国土地覆盖类型进行测量和制图;杜明义等(2002)、李道峰等(2003)融合 $NDVI$ 和 DEM 等信息,大大提高了土地荒漠化和地表植被覆盖遥感分类的精度。

T_s 是地表潜在热通量的函数,通过地表能量守恒方程与地表水分和蒸散密切相关,为地表水分及能量循环的平衡起着关键的作用。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,其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,土地覆盖状况(如植被类型和生长状况、土壤特性等)直接或间接地影响着 T_s 的变化,反过来 T_s 也就能够对土地覆盖变化进行有效地、定量地特征刻画。最近的研究表明(Lambin & Ehrlich, 1995, 1996),作为描述土地覆盖特征重要参数的 T_s ,其在植被景观由密到疏的过程中表现出来的变化趋势与 $NDVI$ 大致相反,两者比值(即 $T_s/NDVI$)的斜率大小在生物物理上被解释为区域地表蒸散的阻抗能力,因而综合 T_s 和 $NDVI$ 的信息能更准确地对土地覆盖进行分类和评价,相比于单独使用 $NDVI$ 或 T_s 能更有效地反映较大尺度上土地覆盖的时空变化规律。气象卫星 NOAA/AVHRR 上有两个热通道用来监测 T_s ,从 AVHRR 热通道数据中演算 T_s 主要是基于劈窗算法。近 10 多年来,国际遥感界已经提出了 10 多种劈窗算法(覃志豪等, 2001)。随着 T_s 遥感反演的精度不断提高,将 $NDVI$ 和 T_s 结合起来进行地表覆盖动态变化的监测已成为可能(陈云浩等, 2003)。在此基础上,Lambin 和 Ehrlich(1995, 1996, 1997)以 $T_s/NDVI$ 为指标采用非监督分类的方法来刻画非洲大陆的植被分布并进行土地覆盖变化的动态监测;陈云浩等(2003)则对中国北方草地与农牧交错带植被的 $NDVI-T_s$ 空间的年内变化特征进行了详细地描述。

本文顺应 IGBP 在未来全球变化研究上采用多

源数据进行大面积及全球尺度上的土地覆盖分类的发展趋势,尝试利用 $T_s/NDVI$ 的时间序列图像并结合 DEM 对中国土地覆盖进行分类,同时进行敏感性分析,以探讨 $NDVI-T_s$ 特征空间准确反映中国植被或土地覆盖状况及其变化规律的可能性,从而为解决全球范围的土地覆盖分类及精度等问题提供有意义的借鉴。

2 数据和方法

2.1 数据

本研究采用的 NOAA/AVHRR 数据来源于美国地球资源观测系统(EROS)数据中心的探路者数据集,是空间分辨率为 8 km、时间序列为 1983~1999 年共 17 年的每 10 d 的合成数据。所使用的合成方法是最大值合成法(MVC),即在每个像元取该像元每旬的 $NDVI$ 最大值,同时记录各通道的灰度值。这种数据合成方法能有效地去除云的影响,从而提供了近似于晴空、无云的大气条件(Holben, 1986)。本研究进一步应用阈值法(Saunders & Kriebel, 1988)进行云检测,删除受云影响的像元。使用的 4 个通道为 CH_1 (可见光 $0.58 \sim 0.68 \mu m$)、 CH_2 (近红外 $0.73 \sim 1.10 \mu m$)、 CH_4 (热红外 $10.5 \sim 11.3 \mu m$)和 CH_5 (热红外 $11.5 \sim 12.5 \mu m$)。其中 CH_1 和 CH_2 是用百分比表示的地面反射率,而 CH_4 和 CH_5 是用绝对温度表示的大气上界的亮度温度。本文采用的参照图是来源于国家地理信息系统重点实验室的 1:400 万数字化中国植被类型图(吴征镒, 1980),数字高程模型(DEM)来源于美国 EROS 中心,两者经投影变换和几何纠正后与 $NDVI$ 、 T_s 及 $T_s/NDVI$ 图像相匹配,误差在 0.5 个像元之内。

2.2 方法

2.2.1 $NDVI$ 、 T_s 以及 $T_s/NDVI$ 的计算方法

2.2.1.1 $NDVI$

$$NDVI = (CH_2 - CH_1) / (CH_2 + CH_1) \quad (1)$$

其中, CH_1 和 CH_2 分别为 NOAA/AVHRR 的可见光和近红外通道的反射率值。 $NDVI$ 的值在 -1 到 $+1$ 范围之间,值越大,表示绿色植被越多。然后,通过下式计算将上述 $NDVI$ 的范围拉伸到 3 到 253 之间(NASA, 2004),以便存储与运算分析:

$$NDVI^* = NDVI / 0.08 + 128 \quad (2)$$

2.2.1.2 T_s

从 AVHRR 数据中精确反演 T_s 主要取决于研究区内的地表辐射率以及卫星过境时的实时大气状态(主要是水蒸气含量),其中后者研究难度很大,因而

以地表辐射率(通道 4、5 或其均值或其差值)作为决定 T_s 变化的重要参数的辐射率模型得到了广泛地应用(覃志豪和 Arnon, 2001)。

由于 Becker 和 Li(1990)劈窗算法的演算精度明显高于其它辐射率模型,因而本文在此基础上计算 T_s ,最后将其转化为摄氏温度($^{\circ}C$)参与下一步运算与分析。公式如下:

$$T_s = 1.274 + P(T_4 - T_5)/2 + M(T_4 + T_5)/2 \quad (3)$$

$$P = 1 + 0.156(1 - \epsilon)/\epsilon + 0.482\Delta\epsilon/\epsilon_2 \quad (4)$$

$$M = 6.26 + 3.98(1 - \epsilon)/\epsilon + 38.33\Delta\epsilon/\epsilon_2 \quad (5)$$

其中: $\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5)/2$, $\Delta\epsilon = (\epsilon_4 - \epsilon_5)/2$, ϵ_4 、 ϵ_5 分别为 AVHRR 热通道 4 和通道 5 的辐射率; T_4 和 T_5 分别是 AVHRR 热通道 4 和通道 5 的亮度温度,单位是绝对温度(K)。

地面实验表明, $NDVI$ 与地表辐射率有很强的相关性,因而 ϵ_4 和 ϵ_5 的计算使用 Josef 等(1997)的结论,方程为:

$$\epsilon_4 = 0.9897 + 0.029 \ln(NDVI) \quad (6)$$

$$\epsilon_4 - \epsilon_5 = 0.01019 + 0.01344 \ln(NDVI) \quad (7)$$

2.2.1.3 $T_s/NDVI$

对 $NDVI$ 和 T_s 数据的计算结果进行运算从而获取 1983~1999 年多年逐旬的 $T_s/NDVI$ 图像数据,在此基础上得到多年逐月以及多年逐月平均的 $T_s/NDVI$ 图像。由于 $NDVI$ 与 T_s 的值域区间相差较大,为了避免大值对小值的掩盖,首先对原始数据进行标准化处理。所谓标准化处理即产生数据集:

$$\{X_j | X_j = (X_i - \bar{X})/\sigma\} \quad (8)$$

其中, X_j : 标准化后数据; X_i : 原始数据; 均值 $\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i/n$; 均方差 $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)}$ 。

该数据集是均值为 0, 均方差为 σ 的正态分布。

2.2.2 主成分分析

主成分分析(Principal component analysis)是一种基于数据统计特征的多维正交线形变换,也是数字图像处理中常用的一种图像变换方法,其在遥感上主要应用于数据压缩、图像信息的增强,以及对地表覆盖动态变化的监测等(延昊等, 2001)。本文分别对多年逐月平均的 $NDVI$ 、 T_s 和 $T_s/NDVI$ 3 类参量进行主成分分析。其步骤是:基于各月图像的均值,计算均方差矩阵,并求特征值和特征向量;接着计算主成分变换矩阵,从而计算各主分量图像;最后分别选取包含信息量大并去除噪声干扰的那几个主分量进行土地覆盖和植被分类。

2.2.3 非监督分类及 DEM 信息复合

在主成分分析的基础上, 分别对 $NDVI$ 、 T_s 和 $T_s/NDVI$ 的主成分图像采用 ISODATA 算法进行非监督分类。ISODATA 算法的聚类过程始于聚类平均值, 聚类每重复 1 次, 聚类的平均值就更新 1 次并用于下次聚类循环, 直到最大的循环次数已达到设定阈值或两次聚类结果相比达到要求百分比的像元类别不再发生变化。在具体研究中, 非监督分类过程在遥感软件 ERDAS 8.5 中进行, 且定义初始分类数为 80, 达到了最终土地覆盖类型总数(即 27 类)的两倍以上。此后, 通过复合 DEM 信息以及非监督分类结果进行分类后处理(图 1, 其中 1、2、3 代表不同的土地覆盖类型, 而 I、II、III 则代表不同的高程带水平), 即在不同的高程带水平上(如平原区, 低海拔山地丘陵区, 亚高山、中低山地地区, 高山区等)对非监督分类得到的结果进行人为的分割及归并, 以充分体现不同土地覆盖类型在一定海拔范围内分布的地带性特点, 最终获取较大尺度上基于 $NDVI-T_s$ 特征空间的中国土地覆盖类型图。例如, 初始非监督分类结果的某一类别把内蒙古高原地区的丛生禾草草原和青藏高原地区的高寒草原混分, 那么可以依据两种不同草原类型垂直分布的高程范围差异, 利用海拔 3 000 m 上、下的两个高程带把混分图斑进行

分割、归并及赋予相应的类型。

3 结果与分析

3.1 $NDVI$ 、 T_s 和 $T_s/NDVI$ 时间序列的主成分分析

$NDVI$ 数据的第一主成分在全年各月的载荷因子均为正值(表 1), 且占据总方差的 81%, 表示了各土地覆盖类型 $NDVI$ 的全年累积值。由于此主成分与各土地覆盖类型的总生物量有良好的相关性(陈云浩等, 2003), 因而据此可以将土地覆盖分为森林、农作物、草和无植被地段等类型(延昊等, 2001); 第二主成分占据了总方差的 14.7%, 其中 6、7 和 8 月的贡献率分别为 -0.33、-0.40 和 -0.37, 而 12 月、翌年 1 和 2 月的贡献率分别为 0.37、0.25 和 0.32, 显示了 $NDVI$ 的夏冬变化; 第三、四主成分则分别反应了 $NDVI$ 的春秋变化和春夏变化。 $NDVI$ 的前四个主成分的方差累积量达到 98.6%, 包含了大部分的信息量, 所以采用前四个主成分进行土地覆盖分类是可行的。 T_s 第一主成分的各月贡献率均为正值, 反应了地表热量的全年累积状况; 第二主成分 12 月、翌年 1 和 2 月的贡献率分别为 -0.49、-0.52 和 -0.41, 而 6、7 和 8 月的贡献率分别为 0.23、0.23 和 0.20, 显示了 T_s 的夏、冬变化。 $T_s/NDVI$ 数据

图 1 基于 DEM 的分类后处理
Fig.1 Post-classification based on DEM

表 1 $NDVI$ 、 T_s 和 $T_s/NDVI$ 主成分分析的荷载因子矩阵
Table 1 Factor loading matrix of principal component analysis for $NDVI$, T_s and $T_s/NDVI$

主成分 Principal component		NDVI、 T_s 和 $T_s/NDVI$ 主成分变换特征向量 Eigenvectors of principal components for $NDVI$, T_s and $T_s/NDVI$												方差(%) Expressed variance
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$NDVI$	PC ₁	0.26	0.26	0.27	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.31	0.29	0.28	0.27	81
	PC ₂	0.25	0.32	0.36	0.13	-0.12	-0.33	-0.40	-0.37	-0.26	0.05	0.25	0.37	14.7
	PC ₃	-0.44	-0.15	0.07	-0.54	-0.08	0.31	-0.05	-0.17	0.01	0.36	0.36	0.29	1.5
	PC ₄	-0.05	-0.14	-0.16	0.29	0.67	0.35	-0.22	-0.41	-0.25	0.04	0.03	-0.13	1.4
T_s	PC ₁	0.13	0.19	0.25	0.32	0.36	0.37	0.36	0.36	0.33	0.28	0.20	0.15	96.5
	PC ₂	-0.52	-0.41	-0.21	0.01	0.17	0.23	0.23	0.20	0.11	-0.04	-0.29	-0.49	3.0
$T_s/NDVI$	PC ₁	0.13	0.19	0.27	0.33	0.37	0.37	0.36	0.35	0.32	0.28	0.20	0.15	96.3
	PC ₂	-0.54	-0.43	-0.20	-0.01	0.15	0.21	0.24	0.22	0.13	-0.01	-0.27	-0.47	2.8

1 ~ 12: 月份 Month

表 2 中国土地覆盖分类表
Table 2 Land cover classification list in China

一、针叶林 Coniferous forest	
1. 寒温带、温带落叶、常绿针叶林 Cold temperate and temperate deciduous and evergreen coniferous forest	
2. 亚热带、热带常绿针叶林 Subtropical and tropical evergreen coniferous forest	
二、阔叶林 Broad-leaf forest	
3. 温带、亚热带落叶阔叶林 Temperate and subtropical deciduous broad-leaf forest	
4. 亚热带落叶阔叶、常绿阔叶混交林 Subtropical deciduous and evergreen broad-leaf forest	
5. 亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broad-leaf forest	
6. 热带雨林性阔叶林及次生植被 Tropical rain broad-leaf forest and secondary vegetation	
三、灌丛和萌生矮林 Shrub and sprouting dwarf-forest	
7. 温带、亚热带落叶灌丛、矮林 Temperate and subtropical deciduous shrub and sprouting dwarf-forest	
8. 亚热带、热带常绿、落叶阔叶灌丛、矮林和草甸 Subtropical and tropical evergreen and deciduous broad-leaf shrub, dwarf-forest and meadow	
9. 温带、亚热带高山矮半灌木、草本植被 Temperate and subtropical alpine dwarf semi-shrub and meadow vegetation	
四、荒漠 Desert	
10. 温带矮半灌木荒漠 Temperate dwarf semi-shrub desert	
11. 温带灌木、半灌木荒漠 Temperate shrub and semi-shrub desert	
12. 温带半乔木荒漠 Temperate semi-arbor desert	
13. 温带高寒矮半灌木荒漠 Temperate cold semi-shrub desert	
五、草原和稀树灌木草原 Steppe and savanna	
14. 温带禾草、杂类草草原 Temperate grass and forbs steppe	
15. 温带丛生禾草草原 Temperate bunchgrass steppe	
16. 温带矮禾草、矮半灌木草原 Temperate dwarf-grass and dwarf semi-shrub steppe	
17. 温带、亚热带高寒草原 Temperate and subtropical cold steppe	
六、草甸和草本沼泽 Meadow and herbaceous swamp	
18. 温带草甸 Temperate meadow	
19. 温带、亚热带高寒草甸 Temperate and subtropical cold meadow	
20. 温带草本沼泽 Temperate herbaceous swamp	
七、人工栽培植被 Artificial cultivated vegetation	
21. 一年一熟粮作和耐寒经济作物 One crop per year and hardy economic crop	
22. 一年两熟或两年三熟旱作(局部水稻)和暖温带落叶果树园,经济林 Two dryland crop per year or three dryland crop per two years(paddy locally), temperate deciduous fruit forest and economic forest	
23. 一年水旱两熟粮作和亚热带常绿、落叶经济林、果树园 Two crop per year alternate paddy and dryland, subtropical evergreen and deciduous economic forest and fruit forest	
24. 单(双)季稻连作喜凉旱作或一年三熟旱作和亚热带常绿经济林、果树园 Single(double)-harvest rice with successive cropping, cryophilous dryland crop or three dryland crop per year, subtropical evergreen economic forest and fruit forest	
25. 双季稻或双季稻连作喜温旱作和热作常绿经济林、果树园 Double-harvest rice or with successive cropping, thermophilic dryland crop, tropical evergreen economic forest and fruit forest	
八、无植被地段 Region without vegetation	
26. 无植被地段 Region without vegetation	
九、湖泊 Lake	
27. 湖泊 Lake	

的主成分变化特征与 T_s 相似,由于二者的前两个主成分的方差累积量均超过 99%,因而完全可以被用来进行土地覆盖分类。

3.2 分类体系及结果

为提高分类结果的精度,采用中国植被图(1:400 万)作为基本分类参考依据,在有关辅助信息的帮助下,完成土地覆盖类型的最终判定。由于遥感影像空间分辨率的限制以及中国土地覆盖宏观分布规律研究的目的,共分成 9 个一级类型、27 个二级类型(表 2)。

以中国 1:400 万植被图(图 2a)为参照,基于 $T_s/NDVI$ 和 $NDVI$ 时间序列得到的中国土地覆盖分类(图 2a、b)能基本反映我国土地覆盖的宏观空间分布规律。相比于 $T_s/NDVI$ 或 $NDVI$,以 T_s 作为分类指标(图 2d)则在南方、东北等地区出现较大程度的错分和混分现象:如我国南方的亚热带落叶阔叶、常绿阔叶混交林(类型代码 4),单(双)季稻连作喜凉旱作或一年三熟旱作和亚热带常绿经济林、果树园(类型代码 24)等类型;东北地区的温带、亚热带落叶灌丛、矮林(类型代码 7),温带草本沼泽(类型

代码 20), 一年一熟粮作和耐寒经济作物(类型代码 21)等类型; 青藏高原东部地区的温带、亚热带高寒草甸(类型代码 17)等。此外, T_s 对于地带性不明显或宏观上空间零星分布的土地覆盖类型敏感性很低, 基本上很难将其划分出来, 如温带草甸(类型代码 18)。

通过分析基于 $NDVI$ 的土地覆盖分类与参考植被图的具体类型差异可以发现: 基于 $NDVI$ 的土地覆盖分类在华北平原地区显示了较低的空间匹配性, 对亚热带常绿阔叶林(类型代码 5)及一年水旱两熟粮作和亚热带常绿、落叶经济林、果树园(类型代码 23)两种覆盖类型的混分现象较为严重; 另外, 温带、亚热带高寒草甸(类型代码 19)及无植被地段

(类型代码 26)的空间分布有明显的扩大趋势。

对于 $T_s/NDVI$, 由于加入了与植被生长状况有着密切关系的参数 T_s , 各土地覆盖类型在以 T_s 和 $NDVI$ 构成的二维空间中呈现出较好的分异规律。因此, 基于 $T_s/NDVI$ 的土地覆盖分类在 3 种分类指标(T_s 、 $NDVI$ 和 $T_s/NDVI$)中与实际状况最为接近, 虽然其东北地区的类型分布比较集中、整齐, 而相应地在参照图上则是嵌套、零星分布。在此分类基础上, 计算各覆盖类型(湖泊除外)以及 $T_s/NDVI$ 的距平比(图 3)。可以看出, 各土地覆盖类型 $T_s/NDVI$ 的差异相比于 T_s 和 $NDVI$ 最为明显, 因而也初步印证了上述比较结果。

图 3 各土地覆盖类型 $NDVI$ 、 T_s 和 $T_s/NDVI$ 的距平比
Fig.3 Anomaly ratios of $NDVI$, T_s and $T_s/NDVI$ to various land cover types
1 ~ 26: 同表 2 See Table 2

3.3 各土地覆盖类型 $T_s/NDVI$ 季节变化曲线

图 4 给出了基于 $T_s/NDVI$ 的分类方法得到的各土地覆盖类型 $T_s/NDVI$ 季节变化曲线, 各曲线按照 $T_s/NDVI$ 峰值所对应的时段进行归类。从中可以发现, 各类型 $T_s/NDVI$ 季节变化曲线与前人基于 $NDVI$ 的土地覆盖分类得到的 $NDVI$ 季节变化曲线(潘耀忠等, 2000)基本类似。此外, 各覆盖类型 $T_s/NDVI$ 曲线的变化趋势较为一致, 一般均表现为先增大后减小, 其峰值一般出现在 4、5、6 或 7 月(图 4a ~ d), 而在 12 月或翌年 1 月达到最小。这表明 $T_s/NDVI$ 的大小能大致反映植被生长的不同阶段及好坏状况, 其时间序列与植物的生长变化规律相吻合, 与不同植被覆盖有密切的对应关系, 可被广泛用来定性甚至定量评价植被生长活力、覆盖及变化。但是, 由于遥感影像单一的信息结构的特点, 基于

NOAA/AVHRR 的 4 个通道获取的 $T_s/NDVI$ 时间序列进行非监督分类来区分不同土地覆盖类型的方法难以克服近似覆盖类型混分的问题, 如图 4 中某些覆盖类型的曲线在个别时段出现重合现象, 因而 $T_s/NDVI$ 参数要更准确的应用还需综合其它能反映植被特征及其环境的指标(如气候、地形等)。

3.4 分类结果精度评价

由于作为分类基本参考依据的中国植被图(1: 400 万)及其它图件的生成年代较早, 与现实的土地覆盖状况可能会存在差别, 因而必须通过野外的大量 GPS 定位信息来进行分类的精度评价。从表 3 中的野外抽样检验结果可以看出, 基于 $T_s/NDVI$ 时间序列的土地覆盖分类结果的总体抽样精度明显高于 $NDVI$ 的 68.7%, 达到了 72.0%, 而在海南地区则略低于 $NDVI$; 此外, $T_s/NDVI$ 在北方地区(新疆、内蒙

图4 各种土地覆盖类型 $T_s/NDVI$ 季节变化曲线
Fig.4 The seasonal variation curves of $T_s/NDVI$ to various land cover categories
1 ~ 17, 22 ~ 27: 同表 2 See Table 2

表 3 分类结果野外抽样检验表
Table 3 Field spot check list of classification

分类指标 Index for classification	GPS 取样区 Sampling area for GPS spots	总点数 Number of total spots	正确点 Number of correct	错(混)分点 Number of incongruous (mixed)	精度 Accuracy(%)
$T_s/NDVI$	海南地区 Hainan region	79	50	29	63.3
	内蒙古地区 Inner Mongolia region	219	163	56	74.4
	新疆地区 Xinjiang region	282	201	81	71.3
	东北地区 Northeast region	87	66	21	75.9
	整个研究区 The whole study region	667	480	187	72.0
$NDVI$	海南地区 Hainan region	79	54	25	68.4
	内蒙古地区 Inner Mongolia region	219	152	67	69.4
	新疆地区 Xinjiang region	282	192	90	68.1
	东北地区 Northeast region	87	60	27	69.0
	整个研究区 The whole study region	667	458	209	68.7

古、东北)的分类精度普遍要高于南方(海南)。与此同时,采用 Kappa 一致性检验方法来比较不同指标下土地覆盖分类的模拟效果。该方法是用评价测量目标影像与参照影像一致性的方法,它的意义在于忽略了“偶发的精确”,其计算出的误差可以看作是在对比两幅图时的变化量(杨正宇等,2003)。结果表明,基于 $NDVI$ 和 $T_s/NDVI$ 的中国土地覆盖分类的 Kappa 系数分别为 0.558 0 和 0.578 2,以 $T_s/NDVI$ 作为指标提高了中国土地覆盖宏观空间格局分异的准确性。

4 结论与讨论

1) 植被指数与地表温度是描述地表覆盖特征的重要参数,其构成的 $NDVI-T_s$ 特征空间具有丰富的地学和生态学内涵,因而整合地表温度和植被指数信息能够改善全球及区域尺度上土地覆盖分类的精度,同时提高对其动态变化监测的能力。

2) 本文在参考中国 1:400 万植被类型图的基础上,把中国土地覆盖共分为 9 个一级类型、27 个二级类型,在宏观上体现了天然植被空间布局的地带性规律;由于是采用遥感技术对中国地表覆盖现状进行分类,因而也较客观地凸现了近十几年来中国尤其是东部地区强烈人类活动下形成的次生植被(如热带、亚热带的许多灌丛、草丛)和人工栽培植被及其导致的植被地带性的破碎化。

3) $T_s/NDVI$ 的变化基本同步于植被生长季,能大致反映植被生长的不同阶段及好坏状况;相比于 $NDVI$ 和 T_s , $T_s/NDVI$ 包含的信息最为丰富,能更真实地体现中国各植被覆盖类型的分异规律;基于 $T_s/NDVI$ 的中国土地覆盖分类结果的总体精度达到

72.0%,与利用 $NDVI$ 分类的结果相比提高了3.3%, Kappa 系数提高了 0.020 2。

4) 文中的分类体系把沙漠、裸地、城镇用地(水体除外)等无植被区视为一个类型,虽然 $T_s/NDVI$ 不适用于上述无植被区(很小的 $NDVI$ 值将会导致 $T_s/NDVI$ 异常),但对宏观尺度上的土地覆盖分类并没有影响。

5) 由于遥感影像单一的信息结构的特点,导致基于 NOAA/AVHRR 的某些土地覆盖类型的 $T_s/NDVI$ 季节动态基本类似,且某些类型的 $T_s/NDVI$ 值在个别时段出现重叠现象,难以克服近似覆盖类型的混分,因而在不断提高 T_s 遥感反演精度的同时还需综合其它植被及环境参数进行研究。在此基础上,本文复合 DEM 信息进行的分类后处理在一定程度上减少了近似土地覆盖类型混分的情况,而依据则是植被宏观空间布局具有的垂直地带性规律。至于具体的 DEM 阈值的选取,则根据不同的地理位置、不同的植被类型而有所变化,由于其阈值相对繁多、零碎,因而未能在文中一一列出。

6) 本文利用 8 km 空间分辨率的 NOAA/AVHRR 图像进行土地覆盖分类,虽然空间分辨率较低,但从得到的结果看,仍能反应地表覆盖状况的宏观格局。中国国土面积大,跨多个经度带、纬度带,热量、水分条件差异大,同时地形复杂多变,导致植被或土地覆盖类型多样、格局复杂,因此准确刻划土地覆盖格局一直是多年来科学研究工作者不懈追求的目标。本文的重点是把反映植被环境特征的 T_s 与反映植被绿度特征的 $NDVI$ 结合起来,增加分类数据源的信息含量,以便更好地刻划土地覆盖的格局。从得到的结果看,这种探索是有益的,从方法上为采用高精

度遥感影像更准确地描述土地覆盖格局奠定了基础。

参 考 文 献

- Becker F, Li ZL (1990). Towards a local split window method over land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 369 – 393.
- Carpenter GA, Gajda MN, Gopal S, Woodcock CE (1997). ART neural networks for remote sensing: vegetation classification from Landsat TM and terrain data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 308 – 325.
- Chen YH (陈云浩), Li XB (李晓兵), Shi PJ (史培军), Dou W (窦闻), Li X (李霞) (2003). Intra-annual vegetation change characteristics in the NDVI- T_s space application to Farming-Pastoral Zone in North China. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 45, 1139 – 1145. (in Chinese with English abstract)
- Cihlar J, Xiao QH, Chen J, Beaubien J, Fung K, Latifovic R (1998). Classification by progressive generalization: a new automated methodology for remote sensing multichannel data. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2685 – 2704.
- Du MY (杜明义), Wu WB (武文波), Guo DZ (郭达志) (2002). Research on multi-source geographic information based classification of desertification. *Journal of Image and Graphics* (中国图象图形学报), 7, 740 – 743. (in Chinese with English abstract)
- Ehrlich D, Estes JE, Singh A (1994). Applications of NOAA-AVHRR 1 km data for environmental monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 145 – 161.
- Foody GM (1998). Sharpening fuzzy classification output to refine the representation of sub-pixel land cover distribution. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2593 – 2599.
- Hansen M, Dubayah R, DeFries R (1996). Classification trees: an alternative to traditional land cover classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1075 – 1081.
- Holben BN (1986). Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1435 – 1445.
- Josef C, Ly H, Li QZ, Chen J, Hartely P, Huang FT (1997). Multitemporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies-artifacts and corrections. *Remote Sensing of Environment*, 60, 35 – 57.
- Lambin EF, Ehrlich D (1995). Combining vegetation indices and surface temperature for land-cover mapping at broad spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 573 – 579.
- Lambin EF, Ehrlich D (1996). The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 463 – 487.
- Lambin EF, Ehrlich D (1997). Land-cover change in Sub-Saharan Africa (1982 – 1991): application of a change index based on remotely sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale. *Remote Sensing of Environment*, 61, 181 – 200.
- Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC) (2004). Global land cover characterization database. <http://ed-cdaac.usgs.gov/glcc/>. Cited 20 Jun 2004
- Lark RM (1995). A reappraisal of unsupervised classification II. Optimal adjustment of the map legend and a neighbourhood approach for mapping legend units. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1445 – 1460.
- Li DF (李道峰), Tian Y (田英), Hao FH (郝芳华) (2003). NDVI data based study on complex classification of vegetation cover of Yellow River Basin. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 10, 88 – 91. (in Chinese with English abstract)
- Li XB (李晓兵), Chen YH (陈云浩), Yu F (喻锋) (2004). Global and regional cover mapping from remote sensing data: status quo, strategies and trends. *Advance in Earth Sciences*, 19 (1), 71 – 80. (in Chinese with English abstract)
- Loveland TR, Merchant JW, Ohlen DO, Brown J (1991). Development of a land-cover database for the conterminous U.S. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, 1453 – 1463.
- Meer F (1995). Spectral unmixing of landsat the matci mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 3189 – 3194.
- NASA. Pathfinder Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Land FTP Data (2004). <http://daac.gsfc.nasa.gov/>. Cited 20 Jun 2004
- Pan YZ (潘耀忠), Li XB (李晓兵), He CY (何春阳) (2000). Research on comprehensive land cover classification in China: Based on NOAA-AVHRR and Holdridge PE index. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 20, 270 – 281. (in Chinese with English abstract)
- Qin ZH (覃志豪), Arnon K (2001). Split window algorithms for retrieving land surface temperature from NOAA-AVHRR data. *Remote Sensing for Land & Resources* (国土资源遥感), 2, 33 – 42. (in Chinese with English abstract)
- Running SW, Loveland TR, Pierce LL, Nemani RR, Hunt ER (1995). A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. *Remote Sensing of Environment*, 51, 39 – 48.
- Saunders RW, Kriebel KT (1988). An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 123 – 150.
- Townshend JR, Justice CO, Kalb V (1987). Characterization and classification of South American land cover types using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 1189 – 1207.
- Tucker CJ, Townshend JR, Goff TE (1985). African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227, 369 – 375.
- Wu ZY (吴征缜) (1980). *Vegetation of China* (中国植被). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Yan H (延昊), Wang CY (王长耀), Niu Z (牛铮), Jiang XG (姜小光), Wang W (王汶) (2001). Bio-implication of Principal Component Analysis to land cover using multitemporal AVHRR data. *Remote Sensing Technology and Application* (遥感技术与应用), 16, 209 – 213. (in Chinese with English abstract)
- Yang ZY (杨正宇), Zhou GS (周广胜), Yang DA (杨奠安) (2003). Comparison of simulated vegetation distribution in China produced by four popular climate-vegetation classification models. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 27, 587 – 593. (in Chinese with English abstract)