发展 NECT 土地覆盖特征数据集的原理、方法和应用

李晓兵 陈云浩* 余弘婧

(北京师范大学资源学院, 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 100875)

摘要 着重探讨了建立中国东北样带(Northeast China transect, NECT)土地覆盖特征数据集的原理、方法及其在全球变化研究方面的重要应用。NECT土地覆盖特征数据集是以多时相的1 km分辨率的NOAA/AVHRR归一化植被指数NDVI(Normalized difference vegetation index)数字影像为基础,同时采用高程、气候、土壤、植被、土地利用、土地资源、生态区域、行政边界、经济、社会等多源数据作为数据源,并经过标准化处理(如数字化、空间插值、几何配准、投影转换)集成而成。在土地覆盖特征数据集的主要应用方面,如:1)利用多时相、1 km分辨率的NOAA/AVHRR影像完成了中国东北样带土地覆盖分类图。一级分类系统包括森林、草原、荒漠和沙地、灌丛、农田、混合覆盖类型、城镇和水体等8类,二级分类体系包括12类。经过地面采样进行精度检验,分类精度达到81.61%。2)对主要植被类型的植物生长季变化进行的研究。利用多时相的遥感影像构造了能够反映植被年际、季节生长变化的遥感植被指数 $NDVI_{max}$ 、NDVI变幅 x_{am} 以及NDVI的标准偏差 x'_s 等,分析这3个参数1983~1999年的17年中的变化情况。该数据集的建立是研究该样带土地覆盖特征及其变化规律的基础,对基于样带的全球变化研究有重要的意义。

关键词 NECT 土地覆盖 数据集

PRINCIPLES, METHODOLOGIES AND APPLICATION OF REMOTELY SENSED DATA FOR DEVELOPING LAND COVER CHARACTERISTICS DATA SET FOR NECT

LI Xiao-Bing CHEN Yun-Hao* and YU Hong-Jing

(College of Resources Science & Technology, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of the Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract In this paper, the principles and methodologies for developing data set of land cover characteristics for the Northeast China transect (NECT) are discussed. Data set was developed using multi-temporal NOAA/AVHRR NDVI images with 1-km spatial resolution. Elevation, climate, soil, vegetation, land use, land resource, ecoregions, political boundaries, economic data, and social data were included as data layers, and all data layers were standardized and then integrated by digitization, spatial interpolation, geometrical registration, and projection transformation. Using this data set, several land use characteristics were mapped and analyzed. 1) Land cover mapping: multi-temporal NOAA/AVHRR NDVI images with 1-km spatial resolution were adopted to classify the land cover map of NECT. The first classification included 8 land cover types, forest, grassland, desert, shrub, cropland, mixed type, building area and water bodies. There were 12 land cover types in the second classification. Classification accuracy was 81.61% determined by ground truthing. The land cover patterns reflected the integrated physical geographical characteristics of NECT. 2) Land cover parameters were calculated using multi-temporal remotely sensed reflectance data that included annual NDVI maximum ($NDVI_{max}$), seasonal NDVI amplitude (x_{am}) and annual NDVI standard deviation (x'_s). Strong inter-annual and seasonal changes in vegetation growth for different land cover types were apparent. $NDVI_{max}$, x_{am} and x'_s showed an increasing trend with an increase in annual average temperatures for meadow steppe, typical steppe and desert steppe. 3) Two methods were used to evaluate seasonal changes in the length of the growing seasons over time. The length of the growing seasons of the meadow steppe and typical steppe lengthened by (9 ± 2) days and (11 ± 3) days, respectively, from 1983 to 1999. Similar change was not detected for the desert steppe. These results are in accordance with field records. This data set is a foundation for future research on land cover characteristics and their changes along the NECT. It also is an important contribution to

international research on large-scale gradients as well as to global change research based upon the NECT.

Key words NECT, Land cover, Multi-temporal NOAA/AVHRR NDVI images

全球土地覆盖的特征及其空间分布的信息对全球变化研究是至关重要的。调查及制定土地覆盖图、监测土地覆盖变化的能力是模拟全球碳循环和水文循环、研究地表-气候的相互作用、评价土地退化等的基础(IGBP, 1990)。日益深入的全球地表过程研究也需要确定土地覆盖类型及其各种特征参数,如生物量、反照率、地表粗糙度、冠层反射率、地表蒸散量等(Henderson-Sellers *et al.*, 1986)。在过去的近 20 中,经过长期的研究积累(Turker *et al.*, 1985; Townshend *et al.*, 1987; Lloyed, 1991; DeFries & Townshend, 1994; DeFries *et al.*, 1998),利用 NOAA/AVHRR (National oceanic and atmospheric administration/advanced very high resolution radiometer)数据建设土地覆盖数据集已经得到国际科学界的广泛共识,并取得了长足的进展。至今,国际上已经建立起来两个 1 km 分辨率的 NOAA/AVHRR 全球土地覆盖数据集,一是美国地质调查局(US Geological Survey, USGS)为国际地圈-生物圈计划(International geosphere-biosphere programme, IGBP)建立的全球土地覆盖数据集(Database information system of global land cover product, DISCover)(Loveland *et al.*, 1991; Townshend, 1994; Loveland & Belward, 1997; Loveland *et al.*, 2000),另一是美国马里兰大学建设的全球土地覆盖数据集(University of Maryland database, UMD)(Hansen & Reed, 2000)。这两个数据集建立的目的都是为了提供给人类更加准确的、完整的全球土地覆盖的信息,并以此为基础监测与模拟全球环境变化(Cihlar, 2000)。区域及全球土地覆盖数据库的建立,极大地推动了全球气候与环境变化研究,如利用遥感影像进行大尺度土地利用/覆盖分类及变化检测(Running & Loveland, 1995; Fung & LaDrew, 1987; Lambin & Ehrlich, 1997)、模拟各种植被及地表生物物理参数(James & Kalluri, 1994)、揭示大尺度土地覆盖变化与气候变化的关系(Cihlar *et al.*, 1991; Eklundh, 1998)等方面的研究,以及利用土地覆盖数据库作为全球环流模型的输入,检验和分析气候变化对于地表植被及其动态变化的依赖性和敏感性(Fennessy & Xue, 1997)。因此,土地覆盖特征数据集的建设,一直是国际全球变化研究的重要前沿领域(Cihlar, 2000)。

陆地样带研究已成为 IGBP 全球变化研究的重

要手段与热点。中国东北样带 NECT 已被列为 IGBP 国际全球变化陆地样带之一。该样带位于 112° ~ 130°30' E, 42° ~ 46° N, 长约 1 600 km, 是一条中纬度温带以降水为驱动因素的梯度,具有由温带针阔混交林经农业化、城市化地区向温带草原的 3 个亚地带——草甸草原、典型草原与荒漠草原过渡的空间系列。我国对 NECT 样带的研究始于 1997 年,经过几年来的研究积累,已经建立了 NECT 样带气象数据库、多空间分辨率遥感影像数据库、多个地表植物群落参数的野外调查数据库等,从个体到区域尺度开展了大量的研究(张新时等, 1997; 周广胜, 2002)。但仍缺乏系统的、综合的 NECT 样带土地覆盖数据集的建设和研究的报道。

本研究的主要目的是确定和评估利用多时相 1 km 空间分辨率的 NOAA/AVHRR 数字影像和多源数据(如地形、气候、生态区、植被等)来刻画 NECT 土地覆盖特征的可能性。旨在紧跟世界土地覆盖及其动态变化研究的前沿,建立能够客观表达 NECT 土地覆盖特征的数据集,为进一步加强我国的全球变化研究奠定扎实的基础。同时,注意与全球土地覆盖数据集接轨,以便这项研究成果可以直接在国际上交流。此外,建立 1 km 空间分辨率的土地覆盖特征数据集模式,也可以为全球及区域气候模型的建立、地球表层动态变化机制的研究、生物圈-大气圈-水圈相互作用的研究提供有利的支持,为基于样带的全球变化研究提供重要的数字平台。

1 设计思路

大量研究表明,建立一个能够广泛满足多方面应用的土地覆盖数据集是可能的(Loveland *et al.*, 1991)。土地利用/覆盖变化(Land use and land cover change, LUCC)研究内容的广泛性决定了进行 LUCC 研究所需数据类型的多样性,现在国际上采用的基本数据类型及每一类型的基本内容见表 1。从中可以看出,LUCC 研究所需数据的来源是多方面的。

美国地质调查局在为 IGBP 建立大空间尺度土地覆盖数据集的研究中,取得了宝贵的经验,建议在数据处理和分析时遵循以下几个主要原则:1)尽量涵盖土地覆盖特征及其变化研究所需的各种参数;2)能够表达重要的土地覆盖季节变化、生态变化和人类活动的变化;3)在其它较大的空间尺度上,如其

表 1 土地利用/覆盖变化研究所需基本数据
Table 1 Basic data demanded for research on land use and land cover change

基本数据类型 Basic data types	详细内容 Details
土地利用/覆盖变化数据 Data of land use and land cover change	各类土地利用/覆盖动态的信息,包括城市、工业、干旱区与灌溉农业、半天然与天然森林、草地、裸地等自然区域以及保护区等,还包括通过历史数据推演出来的历史上的 LUCC 动态信息 Information of land use and land cover change, including natural region and conservation such as cities, industry, arid region, irrigated farming, semi-natural forest and natural forest, grassland, bare soil, and so on, also including historic dynamic information of land use and land cover change through extrapolating historic data
环境数据 Environmental data	气候数据(降水、温度、光照、相对湿度等) Climate data (precipitation, temperature, solar irradiation, relative humidity, and so on) 地形数据(海拔、坡度与方位) Terrain data (altitude, slope, orientation) 土壤数据(土壤有机碳、肥力、组织等) Soil data (soil organic carbon, soil fertility, soil fabric, and so on) 植被数据(植被盖度、种类、动态) Vegetation data (vegetation fraction, species, dynamics) 养分传输 Nutrient transmission 土地资源退化 Land resource degradation 水资源退化与污染(地表水与地下水) Water resource degradation and pollution (surface water and ground water)
经济数据 Economic data	多部门生产结构(地区水平上) Multi-section productive structure (region-level) 生产投入(技术、农业化肥、劳动力、机械、灌溉等的投入,在地区水平上) Productive input (input of technology, agriculture fertilizer, labor force, mechanism, irrigation, and so on, in region-level) 价格、补贴与税收(省或国家水平上) Price, subsidies and revenue (province-level or country-level) 基础设施(能源、交通与电信) Foundation establishment (energy sources, traffic and telecom)
社会数据 Social data	人口普查数据与空间分布模式(地区水平上) Census data and distribution 收入分配(地区水平上) Income distribution (region-level) 迁移(国际间与省之间) Transference (international and provincial) 制度(土地占有权、水权等) Regime (soil possess rights, water rights) 健康(实际/潜在性疾病发生率的地区分布) Health (area distribution of actual/potential disease occur rate)
全球与区域尺度上 LUCC 驱动力数据 Driving force data of LUCC in global and regional scale	人口增长、人口结构与迁移的变化 Change of population increasing, population structure and transference 能源、产品与舒适的追求(消费模式、游憩) Pursue of energy sources, products and comfort (consumption pattern, relaxation) 生活方式与城乡间的相互关系 Interrelation of lifestyle with urban and rural 自然条件中的极端事件与变化性 Extreme event under natural condition and variability 宏观经济驱动力 Macro-economy driving force 国家政策措施与指令 Country policy and injunction 外部驱动力(贸易全球化、国际协定) Exterior driving force (commercial globalization, international trade)

该表内容由中国林科院刘硕博士提供 The table is derived from Dr. Liu Shuo from the Forestry Academy of Chinese

它大洲、大的研究区域,数据处理方法具有可应用性和可重复性;4)数据集的内容可以满足不同研究者的需要(具有不同的空间、时间分辨率);5)各种空间数据具有统一的投影方式,以利于综合分析(Love-land *et al.*, 1991; James & Kalluri, 1994)。

据此,基于遥感数据表达的 NECT 土地覆盖特征至少应包括以下几个方面的内容:1)通过 AVHRR 和其它辅助数据分析而确定的样带季节性土地覆盖区域。这些区域各具独立的季节变化特征,如植被生长的开始时间(Time of onset)、峰值(Peak)、绿度的季节持续时间(Period)、结束时间(Time of offset)、总

绿度值(Total greenness)等。2)描述景观区的特征。植被组成和外貌的描述,大量的季节性特征,如 *NDVI* 的月均值和季节参数。3)每一个像元均具有的空间位置特征:高程、气候条件、生态区、主要土地资源的类型和面积。4)提供将该区域土地覆盖类型与通用土地覆盖分类系统(如 USGS、UNESCO、IGBP、Anderson 系统等)转化的对照表。5)已经正式出版的研究区地形、生态区、土地利用和土地覆盖等图件,数字化后成图,并在 GIS 支持下完成配准(Love-land *et al.*, 1991)。

2 建立 NECT 土地覆盖特征数据集的概念模型

本文在 Loveland 等(1991)提出的发展美国大陆土地覆盖特征数据集研究成果的基础上,针对 NECT

土地覆盖研究的特点,综合研究了国际上建立土地覆盖数据集的原理和方法,经过改进提出了建立 NECT 土地覆盖特征数据集的概念模型(图 1),并进一步确定了建立 NECT 土地覆盖特征数据集的流程图(图 2)。

图 1 NECT 土地覆盖特征数据集组成及其应用方向的概念模型(Loveland *et al.*, 1991, 修改)
Fig.1 Diagram of land cover characteristics data set and its application ways of NECT(Modified from Loveland *et al.*, 1991)

3 NECT 土地覆盖特征数据集的数据源及其标准化

根据表 1 中所列出的进行土地利用/覆盖变化研究所需的各类特征数据,进行 NECT 土地覆盖特征数据集的建设。本项研究所采用的多源数据中的图像和地图数据,都经过了投影转换和配准,统一投影方式为大地坐标投影(Geographic: lat/long)。支持本项工作的软件主要为 ERDAS 8.5、ARC/INFO 8.0 等。

3.1 遥感数据的预处理、标准化及土地覆盖分类

在这项研究中,用以表征样带土地覆盖类型并对其变化进行动态监测和研究的数据是不同分辨率

的遥感数据。数据分为两类:

1) 全样带的遥感数据: NOAA/AVHRR 的归一化差值植被指数 *NDVI* 的数字影像,来自于美国地质调查局的地球资源观测系统(Earth resources observation system, EROS)数据中心的探路者数据集(Pathfinder data sets)(Eidenshink & Faundeen, 1986; Townshend, 1994)。图像的空间分辨率分别为 1 km × 1 km、4 km × 4 km、8 km × 8 km,这样便于在不同的空间尺度上、针对不同的研究需求表达土地覆盖特征(李晓兵等, 2003); 图像的时间分辨率为旬(10 d),时间序列分别为 1992 ~ 1996 年(1 km × 1 km)、1983 ~ 1992 年(4 km × 4 km)、1982 ~ 2000 年(8 km × 8 km)。

图 2 建立 NECT 土地覆盖特征数据集的流程图(Loveland *et al.*, 1991, 修改)

Fig.2 Processing flow for developing the land cover characteristics data set in NECT(Modified from Loveland *et al.*, 1991)

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

其中, NIR 是植物在近红外波段的发射率, R 是植被在红光波段的发射率。对于 NOAA/AVHRR 来说, $NDVI$ 的计算表达为:

$$NDVI = (CH2 - CH1) / (CH2 + CH1) \quad (2)$$

其中, $CH1$ 是第一通道的发射率, $CH2$ 是第二通道的发射率。

为了更加有效地消除云遮盖、大气影响、观测中的几何畸变、非卫星天底角观测等的不利因素,可以在一定时间内采取逐日 $NDVI$ 图像的最大值合成处理方案(Holben, 1986),现在国际上采用较多的是

10 d 的逐日 $NDVI$ 图像最大值合成处理方案(James & Kalluri, 1994),如下式:

$$NDVI_{max} = \text{Max}(NDVI_i) \quad (i = 1, \dots, 10) \quad (3)$$

其中, i 表示合成的天数。

从原始 NOAA/AVHRR 影像到生成本项研究所用的双周的 $NDVI$ 最大值影像的全部处理过程均采用国际上公认的、可靠的方法,保证了数据的质量(Townshend, 1994; James & Kalluri, 1994)。

2)典型区遥感数据:选择样带中具有代表性的、表示不同类型土地利用/覆盖变化的区域作为典型样区,利用多时相的 MSS、TM(选择从 70 年代末到

90年代末的3个时段的影像)进行土地利用/覆盖分类和动态变化监测。这些样区主要包括:城市化-农业化过渡地区(长春)、人工林-天然林过渡地区(长白山)、不同退化类型草原过渡地区(锡林郭勒草原)、农牧交错区(内蒙古哲里木盟扎鲁特旗)。在此基础上,结合地面调查数据,可以深入开展样带典型区的土地利用/覆盖变化驱动力研究,并为变化的动力学模型建模奠定了基础。

3)土地利用、覆盖分类:许多研究已经表明,进行大范围的土地覆盖分类,应用多时相的、GIS支持下的多源遥感影像分类技术是必须的(Loveland *et al.*, 1991; 李晓兵, 1997)。因为仅利用单一时相的遥感数据,特别是 AVHRR 数据确定土地覆盖类型具有明显的不足之处,即不同的土地覆盖类型可能具有相同的光谱反射特征或有反射特征的大量重叠。因此,在本项研究中,采用上述得到国际公认的多时相遥感数据与多源数据相结合的方法来完成样带尺度宏观土地覆盖分类及动态变化规律研究。

由于随着时间的变化,不同土地覆盖类型的光谱特征表现出不同的变化形式,所以这种季节变化的节律特征可以被用来区分不同的土地覆盖类型(Loveland *et al.*, 1995)。根据已有的研究表明(Fung & LaDrew, 1987; Eastman & Fulk, 1993):对一个时间序列的遥感影像进行主分量分析后,第一、第二主分量已被用于土地覆盖分类,虽有混分现象,但效果尚好(Turker *et al.*, 1985)。而且研究已经验证,标准化的主分量对分析土地覆盖的类型及其时间序列数据在空间上的变化具有极大的潜力(Lark, 1995)。因此,在 RS 和 GIS 软件支持下,本项研究对逐月 NDVI 图像进行了主分量分析,并利用数据集中的 DEM、温度、降水数据计算了 Holdridge 生命地带的可能蒸散(PE)、生物温度(BT)和降水(P)3个指标的图像,综合利用遥感影像的前三个主分量图像、Holdridge 生命地带指标图像进行了非监督分类,分类方法选用成熟的非监督分类方法——迭代自组织数据分析技术(The iterative self-organizing data analysis technique, ISODATA),得到 NECT 土地覆盖粗分类图;然后,结合数据集中其它多源数据,详细分析每一覆盖类型的特征,特别是如前所述的季节特征,以确定详细的土地覆盖类型;最后,利用在野外 GPS 支持下获得的路线考察资料,校验分类结果的准确性。对于错分和混分的类型,进行再分类,最终输出 NECT 土地覆盖类型图。Holdridge 以年平均生物温度作为热量指标。生物温度被限定于出现植物营养

生长的范围内,一般认为是在 0℃ 到 30℃ 之间,日均温度低于 0℃ 与高于 30℃ 者均排除在外。其计算公式为(张新时, 1989):

$$BT = \sum t / 365 \text{ 或 } BT = \sum T / 12 \tag{4}$$

其中, BT 为年平均生物温度(℃); t 为 < 30℃ 与 > 0℃ 的日均温度(℃); T 为 < 30℃ 与 > 0℃ 的日均温度的月均温度(℃)。

计算 BT 图像的方法:作为热量指标的生物温度 BT 指标与我国的纬度、经度及海拔高度相关(张新时, 1989)。因此,首先利用 658 气象站点数据(1950~1990年),采用多元逐步回归方法,计算得到了 1992年4月~1993年3月的 BT 和纬度、经度及海拔的相关公式:

$$BT = -0.04A - 4.90La - 0.97Lo + 432.06 \tag{5}$$

(R = 0.98, n = 658)

式中: A 为海拔(m), La 为经度(°), Lo 为纬度(°)。

然后有:

$$PET = BT \times 58.93 \tag{6}$$

$$PER = PET / P = BT \times 58.93 / P \tag{7}$$

式中: PET 为年可能蒸散量(mm); PER 为可能蒸散率; P 为年降水量(mm)。

详细的分类方法及野外校验方法见李晓兵和史培军(1999)、Pan 等(2003)。

4)分类结果的精度验证:在 GPS 支持下,对样带的土地覆盖特征等参数进行了野外考察,考察时每隔 25 km 取一个点,每一样点面积约 1 km²,记载土地覆盖类型、景观结构和比例、土地利用现状类型和结构比例等一系列地表特征,作为校验遥感影像分类精度的资料(李晓兵和史培军, 1999)。

3.2 土地利用专题地图数据层

采用样带 1:100 万土地利用图、典型区 1:25 万土地利用图等专题图件,数字化后作为样区土地利用/覆盖研究的重要参考图件。

3.3 其它数据层

1)高程数据层:样带范围内的 1 km × 1 km 分辨率的数字高程模型,来自于 EROS 数据中心。数字高程数据是地表过程研究的重要的数据源。样带 DEM 是从 EROS 数据中心编制的全球数字高程模型中切割出来的。生成全球 DEM 的主要数据源为数字化世界地图(Digital chart of the world, DCW)和数字化地形高程数据(Digital terrain elevation data, DTED)。DCW 是依据 1:100 万的航海图(Operational navigation charts)编制的。DTED 是栅格格式的地形数据,为 3 弧度秒(约 90 m)分割的水平网格,经处理

产生 30 弧度秒(约 1 km)分割的水平网格¹⁾。

2) 气候数据层：气候数据层包括样带内 110 个基本标准气象站的 1951 ~ 2000 年的观测数据，内容涉及逐月的月均温、月降水量、相对湿度、平均风速，以及年均温、年均降水量、年平均风速、无霜期等，均制成数字地图(矢量、栅格两种形式)。

3) 生态区域数据层：主要包括样带土壤类型图(1:100 万)、植被图(1:100 万)²⁾和植被区划图，均数字化。同时，经过野外考察，已采集到土壤有机质含量、肥力、结构以及植被类型、盖度、生物量、种类组成等属性数据。此外，在牧业气象站搜集了草原区主要物种物候期数据。

4) 行政边界数据层：以国家测绘局正式出版的行政区划图为基础，建立样带上以县为单位的行政边界矢量图层。

5) 以地区、市为单位的社会经济统计数据。

6) 其它辅助数据层：收集了已出版的中国气候区划图、综合自然地理区划图、地貌图、作物熟制及分布图、森林分布图、草地类型图、水系图(河流、湖泊)等，制成矢量图件。

4 基于特征数据集的应用分析与研究

4.1 NECT 土地覆盖分类研究

进行空间大尺度土地覆盖分类的重要意义在于由此可以理解土地覆盖类型的空间配置，即空间分异规律以及各种覆盖类型正在发生的变化。分类结果如图 3 所示。可以看出，采用多时相 1 km 遥感影像，通过分类可以较精确的表达 NECT 样带宏观的土地覆盖格局，反映出了沿样带的气候梯度、地形变化，同时也反映出沿样带的土地利用变化。

野外考察中利用 GPS 定位的 87 个观测点中，实地观测类型与图像分类结果完全对应的有 71 个点，占总数的 81.61%；不对应的有 7 个点，占总数的 8.05%；混分的有 9 个点，占总数的 10.34%(李晓兵和史培军, 1999)。

4.2 主要土地覆盖类型 NDVI 变化特征——以草原区为例

根据图 3 所示的分类结果，对 3 种草原类型区 1983 ~ 1999 年 17 年间的逐旬 NDVI 进行了空间平均，进而提取出其 NDVI 变化曲线(图 4)。遥感影

像记录的 3 种草原植被生长的季节节律是一致的，均呈单峰曲线，冬季 NDVI 值接近于 0，7 ~ 8 月 NDVI 达到一年中的最大值，表现出了北方温带草原植物生长与水、热条件同季达到高峰期的基本特征。同时，NDVI_{max} 的平均水平呈现出草甸草原 > 典型草原 > 荒漠草原的特征。这与地面监测的植物生长节律、生物量、NPP 的季节变化结果相同。说明利用多时相遥感影像记录的地表特征是可信的，可以作为构成数据集的数据源之一。

为了进一步比较研究不同草原植被生长的状况，构造了 3 个指数：

1) 年 NDVI 最大值 NDVI_{max} = Max (NDVI_i)：代表每年中植被生长最旺盛时期的 NDVI；其中 i = 1, ……，36，代表一年中的 36 个旬；

2) 季节 NDVI 变幅 x_{am} = NDVI_{max} - NDVI_{min}：代表一年中遥感影像记录的植被生长状况的变幅，NDVI_{min} 表示年 NDVI 最小值，表示一年中地表植被覆盖状况最差时的 NDVI，NDVI_{min} = Min (NDVI_i)；

3) NDVI 的标准偏差 x'_s = 离差/标准差，表示植被生长偏离多年平均状态的程度。设 x(k, m, y) 是像元 k 在 y 年 m 旬的 NDVI。x(k, m) 表示像元 k 多年第 m 旬的 NDVI 平均值。因此有：

$$\bar{x}(k, m) = \frac{1}{N_y} \sum_{y=1}^{N_y} x(k, m, y) \tag{1}$$

其中，N_y 表示年数。

逐旬 NDVI 的离差 x'(k, m, y) 定义为：

$$x'(k, m, y) = x(k, m, y) - \bar{x}(k, m) \tag{2}$$

设 x'_s 表示标准偏差，可以被定义为：

$$x'_s(k, m, y) = \frac{x(k, m, y) - \bar{x}(k, m)}{\sigma(k, m)} \tag{3}$$

其中，σ(k, m) 表示像元 k 在多年第 m 旬的 NDVI 标准差，定义为：

$$\sigma(k, m) = \left\{ \frac{1}{N_y - 1} \sum_{y=1}^{N_y} [x(k, m, y) - \bar{x}(k, m)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

然后应用遥感影像时间序列处理的断面分析(Profile)算法获取了各植被类型 3 个参数的逐旬变化特征曲线(图 5, 图 6)。图 5 显示，1983 ~ 1999 年的 17 年中，3 种草原植被类型季节 NDVI 变幅呈上升趋势，依次分别上升 13.8%、34.8% 和 19.9%，整个草原区平均上升幅度为 23.7%，典型草原 NDVI 变幅增长最大(图 5a)。NDVI_{max} 也呈上升趋势。同

1) Dean BG, Kevin SL (1998). *Techniques for Development of Global 1-Kilometer Digital Elevation Models*. EROS Data Center.
2) 由中国科学院植物研究所数字化 Digitalized by Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences

图3 中国东北陆地生态系统样带土地覆盖图
Fig.3 Land cover map of NECT

时,3种草原类型的 $NDVI$ 变幅多年变化的曲线形式是一致的,它们的 $NDVI_{max}$ 变化的形式也是一致的(图5a、b)。逐月的 $NDVI$ 的标准偏差上升趋势明显,说明近年来植被生长的状况偏离多年平均生长状况较大(图6)。同时,区域的年平均气温、年降水量均呈现出相同的上升趋势(图5c、d)。

4.3 基于遥感影像的植被生长季变化分析——以草原植被为例

根据国际上采用撒哈拉沙漠时间序列 $NDVI$ 影像校正其它区域影像 $NDVI$ 值的方法,利用我国极干旱的塔克拉玛干荒漠的时间序列 $NDVI$ 值作为偏移量对研究区的 $NDVI$ 值进行了校正,以保证能够精确地检测 $NDVI$ 的年际变化及其对气候变化的响应。采用3种方法测量植物返青期、枯黄期和生长季长度:1)改进的“阈值法”(Keeling *et al.*, 1995; Myneni *et al.*, 1997):根据研究区植被生长季起始时间的实地观测结果(一般在90~120 d左右),设置

了6个阈值确定生长季起始时间(从0.1到0.35,步长为0.05, $NDVI < 0.1$ 可作裸地处理)。2)“滑动平均法”(Reed *et al.*, 1994),利用 $NDVI$ 滑动平均曲线与原始值曲线的交点确定生长季的起始点和长度。采用该方法检测的结果与阈值法的结果进行比较。3)从内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市牧业气象试验站收集到牧草返青期数据作为地面验证。

采用改进的“阈值法”检测生长季变化的结果为:与1983年相比,1999年草甸草原和典型草原的生长季长度分别延长了约(9 ± 2) d 和 (11 ± 3) d,返青期分别提前了约(7 ± 3) d 和 (10 ± 3) d。荒漠草原的植物生长季长度没有明显的延长。“滑动平均法”检测结果与该结果一致。同时,两种检测的结果与牧业气象站记录的牧草返青期时间基本一致。17年来,植被生长季总体上有延长的趋势,但不明显,主要表现为波动的特征。同期的区域年平均温度 T 呈明显的上升趋势,典型草原区年降水量 P 呈增

图 4 1983 ~ 1992 年逐旬 NDVI 变化
Fig.4 Seasonal NDVI rhythm (ten-day) from 1983 to 1999

图 5 1983 ~ 1992 年季节 NDVI 变幅(a), $NDVI_{max}$ (b), 年均温(c)和年降水量(d)动态
Fig.5 Seasonal NDVI amplitude (a), annual $NDVI_{max}$ (b), annual averaged temperature (c) and annual precipitation variation (d) from 1983 to 1999
图中虚线代表变化趋势线 Broken lines present trend in the figure

图 6 NDVI 标准偏差的时间变化特征
Fig.6 Time series of spatial sums of 10-day NDVI standard deviation

长趋势,草甸草原、荒漠草原区年降水量 P 呈波动特征。3 个植被类型区的冬季、春季的气温、降水都有上升的趋势,即上年冬季和当年春季的增温和降水量增加对植被生长季的提前有重要的影响。以 1998 年为例,年均温、年降水量均在 17 年中最高,冬季(1997 年 12 月~1998 年 2 月)和春季(1998 年 3 月~1998 年 5 月)的温度和降水也是 17 年来同季节中最高的,因此,遥感影像检测的植被生长季和牧业气象站记载的当年春季牧草的返青期较其它年份提前。但当年植被的 $NDVI_{max}$ 、 $NDVI$ 变幅($NDVI_{max} - NDVI_{min}$)并不一定是 17 年来最高的,因在北方草原区,夏季的气温、降水对群落生物量的积累是非常重要的。

此外,通过对 $NDVI_{max}$ 出现的时间进行逐年对比分析可以看出,典型草原、荒漠草原 $NDVI_{max}$ 出现的

时间有较明显的提前趋势(图 7)。

5 结论与讨论

在土地覆盖特征数据集方面: 1)NECT 样带的数据集包括的数据内容主要有:多时相、多空间分辨率的 NOAA/AVHRR 和 TM、MSS 遥感影像, DEM、气象数据、社会经济统计数据、数字化的辅助图件、野外考察的植物群落和土壤数据、牧业气象站记录的植物返青期和生长季数据等等; 2)对所有数据均进行的标准化处理,处理方法主要包括数字化、空间插值、几何配准、投影转换等; 3)在此基础上,经过对多时相遥感数据的处理,数据库中包括了各种植被类型的标准光谱数据、植物生长季的开始时间、峰值、绿度的季节持续时间(Period)、总绿度值等基本参数,以及土地利用/覆盖分类图等。

图 7 1983~1999 年 $NDVI_{max}$ 出现的时间变化曲线
Fig.7 Change of $NDVI_{max}$ outlet timing from 1983 to 1999

在土地覆盖特征数据集的应用方面: 1) 利用多时相、1 km 分辨率的 NOAA/AVHRR 影像完成了中国东北样带土地覆盖分类图。一级分类系统包括森林、草原、荒漠和沙地、灌丛、农田、混合覆盖类型、城镇和水体等 8 类, 二级分类体系包括 12 类。经过地面采样进行精度检验, 分类精度达到 81.61%。2) 利用多时相的遥感影像构造了能够反映植被年际、季节生长变化的遥感植被指数 $NDVI_{\max}$ 、 $NDVI$ 变幅 x_{am} 以及 $NDVI$ 的标准偏差 x'_s 等, 分析这 3 个参数 1983 年至 1999 年的 17 年中的变化情况可以看出, 草甸草原、典型草原和荒漠草原等 3 种草原植被类型季节 $NDVI$ 变幅 x_{am} 呈上升趋势, 依次分别上升 13.8%、34.8% 和 19.9%。 $NDVI_{\max}$ 也呈上升趋势。同时, 3 种草原类型的 x_{am} 多年变化的曲线形式是一致的, 它们的 $NDVI_{\max}$ 变化的形式也是一致的。逐月的 $NDVI$ 的标准偏差 x'_s 上升趋势明显, 说明近年来植被生长的状况偏离多年平均生长状况较大。同时, 区域的年平均气温 T 、年降水量 P 均呈现出相同的上升趋势。3) 采用改进的“阈值法”检测生长季变化的结果与“滑动平均法”检测结果与该结果一致: 与 1983 年相比, 1999 年草甸草原和典型草原的生长季长度分别延长了约 (9 ± 2) d 和 (11 ± 3) d, 返青期分别提前了约 (7 ± 3) d 和 (10 ± 3) d。荒漠草原的植物生长季长度没有明显的延长。同时, 两种检测的结果与牧业气象站记录的牧草返青期时间基本一致。17 年来, 植被生长季总体上有延长的趋势, 但不明显, 主要表现为波动的特征。

总的来看, 以遥感数据等为基础的 NECT 样带土地覆盖特征数据集的建立, 是国际样带研究的基础工作, 对基于样带的全球变化及其与陆地生态系统关系的研究非常重要。利用多时相遥感数据建立土地覆盖特征数据库, 可以确定土地利用/覆盖类型及其格局、进行土地利用/覆盖变化检测、在大尺度上反演地表参数(如植被盖度、生物量、 NPP 、地表反射率、 LAI 、蒸散量、地表温度、土壤湿度等)、模拟土地利用/覆盖变化过程、分析土地利用/覆盖变化与气候变化和人类活动的相互关系并预测其过去和未来的状态等等。其应用的前景是十分广泛的。为此, 我们在 NECT 样带进行了该项工作的初步尝试。

从 2002 年开始, 美国发射的 TERRS 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪 MODIS 数据可以供全球大部分区域使用。MODIS 影像与 NOAA/AVHRR 影像具有相同的时间分辨率, 但其拥有的 250 和 500 m 空间分辨率的 4 个波段可以作为检测土地覆盖的信

息源, 大大地提高了大尺度对地观测的精度。因此, 利用 MODIS 影像逐步更新现有的基于 NOAA/AVHRR 的遥感影像库是未来几年中重要的任务。

参 考 文 献

- Cihlar J (2000). Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1093 – 1114.
- Cihlar J, St-Laurent L, Dyer JA (1991). Relationship between the Normalized Difference Vegetation Index ($NDVI$) and ecological variables. *Remote Sensing of Environment*, 35, 279 – 298.
- DeFries KL, Townshend JRG (1994). $NDVI$ -derived land cover classification at global scales. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3567 – 3586.
- DeFries RS, Hansen MC, Townshend JRG, Sohlberg RS (1998). Global land cover classification at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3141 – 3168.
- Eastman JR, Fulk M (1993). Long time series evaluation using standardized principal components. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59, 991 – 996.
- Eidenshink JC, Faundeen JL (1986). The 1-km AVHRR global land data set: first stages in implementation. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1417 – 1434.
- Eklundh L (1998). Estimating relations between AVHRR $NDVI$ and rainfall in East Africa at 10-day and monthly time scale. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 563 – 568.
- Fennessy MJ, Xue Y (1997). Impact on USGS vegetation map on GCM simulations over the United States. *Ecological Applications*, 7, 22 – 23.
- Fung T, LaDrew E (1987). Application of principal components analysis to change detection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, 1649 – 1658.
- Hansen MC, Reed B (2000). A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1 km global land cover products. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1365 – 1373.
- Henderson-Sellers A, Wilson MF, Thomas G, Dickinson RE (1986). *Current Global Land-Surface Data Sets for Use in Climate-Related Studies: NCAR Technical Note + STR*. Boulder, Colorado, 110.
- Holben BN (1986). Characteristic of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3443 – 3462.
- IGBP (1990). *Global Change, Report No. 12*. Stockholm, Sweden.
- James ME, Kalluri SNV (1994). The Pathfinder AVHRR land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3347 – 3363.
- Keeling CD, Whorf TP, Whalen M, van der Plicht J (1995). Interannual extremes in the rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666 – 667.
- Lambin EF, Ehrlich D (1997). Land-cover changes 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.
- Lark RM (1995). Contribution of principal components to discrimination of classes of land cover in multi-spectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 779 – 787.
- Li XB (李晓兵) (1997). Application of NOAA-AVHRR data on study of land cover change. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 4(1–2), 16. (in Chinese with English abstract)
- Li XB (李晓兵), Chen YH (陈云浩), Li X (李霞) (2003). Study on regional land cover patterns derived from multi-scale remotely sensed data. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 27, 577 – 586. (in Chinese with English abstract)
- Li XB (李晓兵), Shi PJ (史培军) (1999). Research on regulation of *NDVI* change of Chinese primary vegetation types based on NOAA/AVHRR data. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 41, 314 – 324. (in Chinese with English abstract)
- Lloyd D (1991). A phonological classification of terrestrial vegetation using shortwave vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 2269 – 2279.
- Loveland TR, Belward AS (1997). The IGBP-DIS global 1 km land cover dataset, DISCover: first results. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3289 – 3295.
- Loveland TR, Merchant JW, Brown JF, Ohlen DO, Reed BC, Olson P, Hutchinson J (1995). Seasonal land-cover regions of the United States. *Annals of Association of American Geographer*, 82, 339 – 355.
- Loveland TR, Merchant JW, Ohlen DO, Brown JF (1991). Development of a land-cover characteristics database for the conterminous U. S. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, 1453 – 1463.
- Loveland TR, Reed BC, Brown JF, Ohlen DO, Zhu Z, Yang L, Merchant JW (2000). Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1303 – 1330.
- Mynenl RB, Keeling CD, Tucker CJ, Asrar G, Nemani, RR (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386, 698 – 702.
- Pan YZ, Li XB, Gong P, He CY, Shi PJ, Pu RL (2003). An integrative classification of vegetation in China based on NOAA/AVHRR and vegetation-climate indices of the holdridge life zone. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1009 – 1027.
- Reed BC, Brown JF, VanderZee D, Loveland TR, Merchant JW, Ohlen DO (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5, 703 – 714.
- Running SW, Loveland TR (1995). A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. *Remote Sensing of Environment*, 51, 39 – 48.
- Townshend JRG (1994). Global data sets for land applications from the Advance Very High Resolution Radiometer: an introduction. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3319 – 3332.
- Townshend JRG, Justice CO, Kalb V (1987). Characterization and classification of South American land cover types using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1395 – 1416.
- Turker CJ, Townshend JRG, Goff TE (1985). African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227, 369 – 375.
- Zhang XS (张新时) (1989). The potential evapotranspiration (*PE*) index for vegetation and vegetation-climatic classification (II) — an introduction of main methods and PEP program. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 13, 197 – 207. (in Chinese with English abstract)
- Zhang XS (张新时), Gao Q (高琼), Yang DA (杨奠安), Zhou GS (周广胜), Ni J (倪健), Wang Q (王权) (1997). A gradient analysis and prediction on the northeast China transect (NECT) for global change study. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 39, 785 – 799. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GS (周广胜) (2002). *NECT and Global Change* (NECT与全球变化). Meteorological Press, Beijing. (in Chinese)

责任编辑: 傅伯杰 责任编辑: 刘丽娟