基于 MODIS 的泾河流域植被动态年际变化

王 辉¹ 咎国盛² 毕晓丽³ 周 睿⁴ 熊友才¹ 洪 军⁵ 葛剑平^{1*}

(1 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875) (2 国家林业局调查与规划设计院, 北京 100714)

(3 中国科学院植物研究所, 北京 100093) (4 云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091)

(5 农业部全国畜牧总站, 北京 100026)

摘 要 以中分辨率成像光谱仪数据(Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)为基础计算泾河流域归一化差异植被指数(Normalized difference vegetation index, *NDVI*)在 2001 ~ 2004 年的时间序列值, 分别采用相关系数 *r* 值和成对 *t* 检验的 *t* 值定量描述年内 *NDVI* 曲线在年际间的协同性和差异性。以农田、森林、灌丛和草地 4 种土地利用类型 *NDVI* 曲线在年际间变化显著的面积百分比为参数, 在 2001 ~ 2004 年间分为 1、2 和 3 年间隔共 6 个时间组, 比较分析 4 种土地利用类型的 *NDVI* 曲线在 6 个时间组内的协同性和差异性, 进而探讨泾河流域植被年际变化及其与土地利用之间的关系。结果表明 4 种土地利用类型 *NDVI* 波动对外界环境的响应在不同的时间间隔里表现一致, 在 2001 ~ 2003 年和 2001 ~ 2004 年间变化比较明显, 在各个时间组内比较发现有较大面积的农田和草地 *NDVI* 协同性较差, 尤其在 2001 ~ 2002 年间, 这可能与退耕还林还草政策的实施有关, 4 年来泾河流域内 4 种土地利用类型的 *NDVI* 值有增加趋势, 植被状况趋于良好; *NDVI* 年际间差异最明显的是草地, 其次是农田和灌丛, 森林的 *NDVI* 比较稳定。

关键词 归一化差异植被指数 协同性 土地利用 泾河流域

MODIS-DETERMINED INTER-ANNUAL VEGETATION DYNAMICS IN JINGHE WATERSHED, CHINA

WANG Hui¹, ZAN Guo-Sheng², BI Xiao-Li³, ZHOU Rui⁴, XIONG You-Cai¹, HONG Jun⁵, and GE Jian-Ping^{1*}

¹College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China, ²Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China, ³Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China, ⁴Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091, China, and ⁵China Animal Husbandry Headstation, Beijing 100026, China

Abstract *Aims* *NDVI* is extensively used as an important index in evaluating vegetation growth and dynamics, including inter-annual dynamics; however, research on the relationship between inter-annual vegetation dynamics and land use is largely lacking. This study was conducted in the Jinghe watershed to determine inter-annual *NDVI* dynamics in different land use types.

Methods MODIS data were used to calculate *NDVI* time serial values from 2001 to 2004. Correlation coefficient (*r*) and *t*-test were used to test the consistency in six temporal intervals including one-, two- and three-year scales of four land use types: cropland, forest, shrub and grassland. We calculated the percent area to quantify the spatial extent of significant inter-annual *NDVI* variation.

Important findings The four land use types had similar *NDVI* dynamics in all temporal scales. Differences were significant in 2001 – 2003 and 2001 – 2004. Cropland and grassland were generally less consistent than forest and shrub in six temporal intervals, especially in 2001 – 2002, which may be the result of the policy of returning farmland to forest and grassland. Annual *NDVI* tended to increase over time in the four land use types, suggesting vegetation in this area was gradually restored. Grassland had the greatest percent of area with significantly increasing *NDVI*, followed by cropland, shrub and forest.

Key words *NDVI*, consistency, land use, Jinghe watershed

目前植被指数被广泛应用于植被长势的监测, 其中使用最普遍的是归一化差异植被指数(Normal-

ized difference vegetation index, *NDVI*) ,该指数使用近红外和红波段反射率的差值来增强植被信息。同时 *NDVI* 综合利用了四则运算,提高了对土壤背景的鉴别能力,同时削弱了大气层和地形阴影的影响,对植被的生长势和生长量非常敏感,可以很好地反映地表植被的繁茂程度,在一定程度上能代表地表植被覆盖变化,常用来监测植被状况和植被覆盖变化 (Lyon *et al.* , 1998 ; Mass , 1999 ; Woodcock *et al.* , 2001)。 *NDVI* 时间序列已成功应用于全球植被动态的年际变化和大尺度上植被年际变化对气候的响应的研究 (Los *et al.* , 1994 ; Myneni *et al.* , 1997 ; 李本纲和陶澍, 2000 ; 张军等, 2001 ; 陈云浩等, 2001)。在监测区域到全球尺度上的土地利用/覆盖变化 (李晓兵等, 2004) 和模拟陆地生态系统 (Chen *et al.* , 2001) 叶面积指数 (Jiang *et al.* , 2005) 和有效光合辐射分量 (郭志华等, 2001 ; Lucht *et al.* , 2002) 净第一植被生产力 (Tucker *et al.* , 1986 ; 朴世龙和方精云, 2002 ; Li & Liao, 2004 ; Wang *et al.* , 2005) 和农业产量预报等领域 (吴炳方等, 2004 ; 冯强等, 2004) 应用也比较广泛。 *NDVI* 在高植被覆盖地区存在饱和现象,而对植被稀疏地区的植被变化尤其敏感,故利用 *NDVI* 分析中国西北地区的植被变化十分有益 (李震等, 2005)。

泾河流域地处黄土高原腹地,水土流失现象比较严重,植被状况对该流域内保持水土起着至关重要的作用,自退耕还林还草以来,对泾河流域植被恢复状况的研究主要集中在 *NDVI* 值的增加,对区域 *NDVI* 年际协同性和差异性的研究比较少。MODIS 影像数据具有时间分辨率高、覆盖范围广的优点,可以及时、方便地从国家对地观测系统共享平台网站获取,是目前对大范围内的植被、土地等信息进行动态评价研究的最合适的数据。本项研究在前人工作的基础上,尝试利用中分辨率 (500 m) 多时相的 *NDVI* 数字影像,引入两个统计指数研究 *NDVI* 年际间协同性和差异性的特征及其与土地利用的关系,探讨流域内不同土地利用类型的 *NDVI* 年际动态,及其对环境和人为干扰的响应差异,对监测泾河流域的植被恢复状况具有重要的现实意义。

1 研究区域、数据来源及研究方法

1.1 研究区域

泾河是渭河的主要支流,黄河的二级支流,发源于宁夏回族自治区泾源县关山东麓,由西北向东南流经宁夏、甘肃、陕西 3 省区的固原、平凉、庆阳和咸

阳等地市,在陕西省高陵县注入渭河。泾河全长 483 km,流域面积 4 5350 km²,流域内地形西北高,东南低,总体地势是东北西三面向东南倾斜。泾河及各级支流均深切于塬、梁、峁和黄土沟壑镶嵌的黄土地貌景观中,水土流失比较严重,多年平均侵蚀模数在 1 000 × 10³ kg·km⁻² 以上。本流域属于大陆性气候,为暖温带-温带、半湿润-半干旱过渡带,气温南高北低,降水南多北少,年平均气温 8 ~ 13 ℃,年平均降水量 390 ~ 560 mm,降水集中于 7 ~ 9 月,约占全年降水量的 50% ~ 60%,多以暴雨形式出现 (程积民和万惠娥, 2002)。种植业是该流域土地利用的一个重要方面,农田主要分布于流域的中下游,流域的东西两侧分别是六盘山和子午岭森林分布区,流域的中上游主要为草地,灌丛主要分布于森林向农田和草地的过渡地区。这 4 种土地利用类型占该流域面积的 90% 以上。

1.2 数据来源

以全球土地利用数据库 (Global land cover facility, GLCF) 提供的欧亚大陆 32 d 组合中分辨率成像光谱仪 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 数字影像作为该研究的基础材料,空间分辨率为 500 m。选用 2001 ~ 2004 年共 44 期 MODIS 数据计算每期的 *NDVI*,计算公式为:

$$NDVI = (MIR - RED) / (MIR + RED) \quad (1)$$

其中 *MIR*、*RED* 和 *NIR* 分别为中红外波段、红色波段和近红外波段的上行地表反射率。对应 MODIS 影像数据的第一、二波段。计算之前数据已进行定标和数据校正,减少了云层、大气浮尘颗粒、视角和太阳高度角的影响。

对 2000 年 TM 遥感图像进行监督分类并提取农田、草地、森林和灌丛 4 种不同的土地利用类型,基于不同的土地利用类型对 *NDVI* 的年际变化进行比较。

1.3 研究方法

将植被的 *NDVI* 值以时间为横坐标排列起来,就形成植被生长的 *NDVI* 动态曲线,它以最直观的形式反映了植被生长的 *NDVI* 变化过程。不同植被类型的 *NDVI* 曲线具有不同的特征,同类植被类型受气候变化和人为干扰的影响也会造成 *NDVI* 时间曲线的波动。因此,通过对植被 *NDVI* 时间曲线的分析,可以了解植被的生长状况。植被生长的年内 *NDVI* 曲线在年际间具有协同性,年内 *NDVI* 的值反映生长量。从 *NDVI* 曲线的协同性分析和 *NDVI* 值比较两个方面研究植被动态的年际间关系。选取相

关系数 r 分析 $NDVI$ 曲线年际间的相关关系,指示植被生长周期年际间的协同性,采用成对 t 检验的 t 值定量研究 $NDVI$ 值的年际间差异。并对不同土地利用类型 $NDVI$ 的年际差异进行比较。

1.3.1 协同性分析和值的差异分析

在地理信息系统软件 ARC/INFO 的 Grid 模块中针对流域内每个栅格(500 m × 500 m)计算 $x \sim y$ 年的 $NDVI$ 差异,本研究利用 2001 ~ 2004 年这 4 年的 $NDVI$ 序列,分别计算 2001 ~ 2002 年、2001 ~ 2003 年、2001 ~ 2004 年、2002 ~ 2003 年、2002 ~ 2004 年和 2003 ~ 2004 年的相关指数和成对 t 检验的 t 值计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{2}$$

$$t_{xy} = \frac{\sqrt{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 - [\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)]^2}} \tag{3}$$

其中 r_{xy} 为 x 和 y 年 $NDVI$ 的相关系数; t_{xy} 为 x 、 y 年的成对比较的 t 值; x_i 、 y_i 分别为 x 、 y 年中每个栅格第 i 期的 $NDVI$ 值; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为 x_i 、 y_i 的年内平均值; n 为 11,代表一年 11 期 $NDVI$ 影像。 x 、 y 具有正相关关系的条件是 $r_{xy} > 0.58$ ($\alpha = 0.05$),满足该条件的 x 、 y 年际间 $NDVI$ 协同性较好,反之协同性差。 x 、 y 年 $NDVI$ 值差异显著,差异条件是 $|t_{xy}| > 2.23$ ($\alpha = 0.05$),反之差异不显著。综合两个指数,提取 6 组时间段中 4 种土地利用类型 $NDVI$ 协同性较差 ($r < 0.58$) 且 $NDVI$ 平均值差异显著 ($|t| > 2.23$) 的区域,可分析 4 年来泾河流域 $NDVI$ 变化的整体特征。

1.3.2 面积百分比的计算

在泾河流域内针对选取的 4 种土地利用类型(农田、草地、森林和灌丛)和 6 个时间段内分别计算 $NDVI$ 协同性较差、 $NDVI$ 值差异显著的面积与该类型总面积的百分比,该百分比表征研究小流域内 $NDVI$ 年际变化显著的空间分布幅度。计算公式如

下:

$$p_{ri} = \frac{S_i(r_{xy} \leq 0.58)}{S_{i总}} \times 100\% \tag{4}$$

$$p_{ti} = \frac{S_i(|t_{xy}| > 2.23)}{S_{i总}} \times 100\% \tag{5}$$

$$p_i = \frac{S_i(r_{xy} \leq 0.58, |t_{xy}| > 2.23)}{S_{i总}} \times 100\% \tag{6}$$

其中, P 为面积百分比, i 为其中一种土地利用类型, S_i 为流域内满足括号内条件的 i 土地利用类型的面积, $S_{i总}$ 为流域内 i 种土地利用类型的总面积, p_{ri} 为 $NDVI$ 曲线年际间协同性较差的面积百分比, p_{ti} 为 $NDVI$ 值年际差异显著的面积百分比, P_i 为 $NDVI$ 曲线年际间协同性较差且 $NDVI$ 值年际差异显著的面积百分比。

2 结果分析

2.1 NDVI 年际协同性分析

对泾河流域 2001 ~ 2004 年间的 6 个时间段的 $NDVI$ 曲线年际协同性变化进行分析。图 1 中黑色代表在 95% 置信度下的 $NDVI$ 曲线年际间协同性比较差,灰色代表协同性较好。从图上看 2003 ~ 2004 年的黑色面积最小,表明该流域大部分地区在该时间段内 $NDVI$ 曲线变化不显著。2001 ~ 2003 年和 2001 ~ 2004 年的 $NDVI$ 曲线年际协同性变化较显著的面积最大,该格局在流域的上游地区比较明显。

对 4 种土地利用类型 2001 ~ 2004 年 6 组时间段内的空间变化幅度进行分析,采用 $NDVI$ 曲线年际间协同性较差的面积百分比为指标进行计算,表 1 中 p_{ri} 值表现出与上图相同的趋势,即在这 4 年中 $NDVI$ 协同性的年际变化与间隔时间有关,3 年间隔的变化大于 2 年间隔和 1 年间隔的变化。2003 ~ 2004 年 4 种土地利用类型的 $NDVI$ 曲线年际协同性最好。2001 ~ 2002 年、2001 ~ 2003 年和 2001 ~ 2004 年 3 组中农田和草地的 $NDVI$ 年际协同性较差的空间幅度明显高于森林和灌丛,灌丛在 2002 ~ 2003 年和 2003 ~ 2004 年间的变化比较显著,高于草地和森林。

表 1 4 种土地利用类型协同性较差的面积百分比
Table 1 The area percentage of the consistence of a sort among four land use types(%)

土地利用类型 Land use types	时间段 Temporal interval(Year)					
	2001 ~ 2002	2002 ~ 2003	2003 ~ 2004	2001 ~ 2003	2002 ~ 2004	2001 ~ 2004
农田 Crop	21.82	21.17	3.27	42.82	18.42	48.60
森林 Forest	3.54	4.36	0.43	13.93	25.63	40.71
灌丛 Shrub	7.26	10.83	1.17	22.59	17.52	34.35
草地 Grass	16.01	8.81	1.14	37.58	9.16	51.10

图 1 6 个时间段的 NDVI 曲线相关性计算结果

Fig.1 The NDVI calculated results of the correlation at six temporal intervals

2.2 NDVI 值年际比较

从 4 种土地利用类型 2001 ~ 2004 年的 NDVI 平均值(表 2)可以看出,森林和灌丛的 NDVI 值高于农

表 2 4 种土地利用类型的 NDVI 平均值

Table 2 The mean value of NDVI among four land use types

土地利用类型 Land use types	年份 Year			
	2001	2002	2003	2004
农田 Crop	0.30	0.33	0.33	0.34
森林 Forest	0.43	0.46	0.47	0.48
灌丛 Shrub	0.40	0.43	0.49	0.45
草地 Grass	0.29	0.33	0.33	0.33

田和草地,农田和森林的 NDVI 平均值在 2001 ~ 2004 年间是持续增加的,灌丛的 NDVI 平均值在 2003 年达到峰值,总体趋势也是增加的,草地的在 2002 ~ 2004 年间没有变化,但都高于 2001 年。除灌丛外,平均值在 2001 ~ 2002 年增加幅度最大,2002 年后比较稳定。

对泾河流域 2001 ~ 2004 年间的 6 个比较的 NDVI 平均值 t 检验结果进行分析。图 2 中黑色代表 95%置信度下 NDVI 平均值年际间差异显著,灰色代表差异不显著。

从 4 种土地利用类型在 6 个时间段的 NDVI 平均值显著差异的面积百分比计算结果(表 3)看出 4 种土地利用类型 NDVI 平均值差异显著的面积百分

比在年际变化上一致,2001 ~ 2002 年 NDVI 平均值差异显著的面积百分比均表现出最大,2002 ~ 2003 年面积百分比最小。6 组时间段中 NDVI 平均值差异显著的面积百分比由大到小依次是:草地、农田、灌丛和森林。

2.3 NDVI 年际变化分析

通过对 NDVI 曲线协同性和平均值分析结果进行综合,利用公式 6 计算的结果(表 4)可知,2001 ~ 2004 年间 NDVI 变化显著的面积百分比最大,其次是 2001 ~ 2003 年间。在这两个时间段内草地的变化最为明显。2002 ~ 2003 年间的变化最小,灌丛和草地的变化尤其不明显。2002 年以后的 3 个时间段内的 NDVI 变化都不明显,而 2001 与 2002、2003 和 2004 年的年际间变化较大,其中变化由大到小依次是草地、农田、灌丛和森林。

3 结论与讨论

NDVI 与土地利用都是描述陆地表面过程的重要参数,本研究在前人研究的基础上,尝试把 NDVI 的年际变化分为 NDVI 协同性和 NDVI 值的年际变化,分别比较植被生长周期的年际差异和生长量的变化。在不同土地利用类型 NDVI 年际变化幅度的比较上,采用面积百分比作为空间幅度的参数,减小了仅用面积比较带来的不确定性。

4 种土地利用类型的 NDVI 年际变化显著的空

图 2 6 个时间段 NDVI 比较的 t 检验结果

Fig.2 The NDVI calculated results of t -test at six temporal intervals

表 3 4 种土地利用类型平均值差异显著的面积百分比

Table 3 The area percent of significant difference in the mean value of NDVI among four land use types (%)

土地利用类型 Land use types	时间段 Temporal interval (Year)					
	2001 ~ 2002	2002 ~ 2003	2003 ~ 2004	2001 ~ 2003	2002 ~ 2004	2001 ~ 2004
农田 Crop	25.86	1.86	10.77	21.70	6.71	21.33
森林 Forest	21.37	0.79	5.47	10.80	2.50	11.89
灌丛 Shrub	23.10	1.20	7.35	13.95	4.47	15.90
草地 Grass	35.73	2.00	12.25	28.60	6.44	24.35

表 4 4 种土地利用类型 NDVI 年际变化显著的面积百分比

Table 4 The percent area of significant difference in inter-annual NDVI among four land use types (%)

土地利用类型 Land use types	时间段 Temporal interval (Year)					
	2001 ~ 2002	2002 ~ 2003	2003 ~ 2004	2001 ~ 2003	2002 ~ 2004	2001 ~ 2004
农田 Crop	2.75	0.06	0.13	6.66	1.04	6.72
森林 Forest	0.70	0.02	0.01	2.06	0.20	3.19
灌丛 Shrub	1.08	0.00	0.24	3.09	0.70	4.89
草地 Grass	3.57	0.00	0.04	9.06	0.34	9.07

间幅度在 6 组时间段内表现的较为一致。在 NDVI 协同性分析的计算结果中,2001 ~ 2004 年 3 年间发生显著变化的 p 值高于 2001 ~ 2003 年和 2002 ~ 2004 年两年间发生显著变化的 p 值,一年间变化的 p 值最小。在 NDVI 平均值的计算结果中,2001 ~ 2002 年间 NDVI 平均值差异显著的空间范围最大,其次为 2001 ~ 2004 年。2002 ~ 2003 年和 2002 ~ 2004 年的 NDVI 平均值差异显著的空间范围不大。

通过对相同时间段内不同的土地利用类型的 NDVI 协同性和 NDVI 平均值年际差异的幅度进行比较,发现农田、森林、灌丛和草地的 NDVI 的年际差异幅度无论在协同性上还是在平均值上都不同。综合两个指数对 NDVI 年际变化进行分析,发现森林的 NDVI 年际变化幅度最小,森林的 NDVI 值持续增加,此外灌丛的生长状况也较稳定。草地和农田的 NDVI 值低于森林和灌丛,但年际变化幅度相对较

大,其中草地的 *NDVI* 平均值有差异的空间幅度最大。这是由于不同的土地利用类型的植被对降雨、气温的响应不同,即敏感性不同,造成不同的土地利用类型的植被在相同的外界条件下的生长状况不同。李晓兵和史培军(1999)认为,各种植被类型 *NDVI* 变化与植被种类组成有关。他们就曾经利用不同植被类型 *NDVI* 变化规律,结合 *NDVI* 年内季节变化规律,把中国主要植被类型划分为 35 种植被类型和 9 个植被型组,并经过野外抽样校证明可行。

综合比较发现 4 种土地利用类型在 2001 年后的 3 组时间段内的 *NDVI* 变化明显高于 2002 年后相同时间间隔的变化,表明 2001 年的外界条件与 2002 年以后的条件差异较大,这可能与 2001 年实施的退耕还林还草政策实施有关。

泾河流域为农业较发达地区,农作物的 *NDVI* 协同性和 *NDVI* 值的年际变化在一定程度上反映了人为干扰的强度。2001~2004 年,农田的 *NDVI* 的年际变化幅度仅次于草地,虽然其 *NDVI* 值是增加的,但借助 ARC/INFO 对 *NDVI* 进行抽样调查显示,与其它 3 种土地利用类型不同,部分地区农田的 *NDVI* 曲线年内呈现双峰特征(图 3),这是由于经济效益的驱动,使当地的耕作措施发生改变,部分农田由一年一收改为一年两收,在降雨集中的 7、8 月份 *NDVI* 值较低,地表接近裸露,人为的翻地保墒措施更加剧了水土流失的强度。在泾河流域植被覆盖整体趋于良好的情况下,农田的耕作措施也应得到改进,避免在降雨高峰期地表裸露,减少水土流失的风险。

图 3 抽样的农田 *NDVI* 曲线

Fig.3 The sampled result of normalized difference vegetation index(*NDVI*) time serial in cropl

参 考 文 献

Chen J, Jonsson P, Tamura M (2001). A simple method for reconstructing a high-quality *NDVI* time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing Environment*, 91, 332 – 344.

Chen YH (陈云浩), Li XB (李晓兵), Shi PJ (史培军) (2001). Variation in *NDVI* driven by climate factors across China 1983 – 1992. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 25, 716 – 720. (in Chinese with English abstract)

Cheng JM (程积民), Wan HE (万惠娥) (2002). *The Vegetation Restoration and the Soil and Water Conservation in the Loess Plateau in China* (中国黄土高原植被恢复与水土保持). China Forestry Publishing House, Beijing, 163 – 201. (in Chinese)

Feng Q (冯强), Tian GL (田国良), Wang AS (王昂生), Liu QH (柳钦火), McVicar TR, Jupp DLB (2004). Experimental study on drought monitoring by remote sensing in China by using vegetation condition indexes. Data analysis and processing. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 27, 132 – 136. (in Chinese with English abstract)

Guo ZH (郭志华), Peng SL (彭少麟), Wang BS (王伯荪) (2001). Estimation of solar energy use efficiency and spatiotemporal pattern in Guangdong based on multi-temporal NOAA-AVHRR *NDVI* and GIS methods. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 43, 857 – 862. (in Chinese with English abstract)

Jiang JJ, Chen SZ, Cao SX, Wu HG, Zhang L, Zhang HL (2005). Leaf area index retrieval based on canopy reflectance and vegetation index in eastern China. *Journal of Geographical Sciences*, 15, 247 – 254.

Li BG (李本纲), Tao S (陶澍) (2000). Correlation between AVHRR *NDVI* and climate factors. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 20, 898 – 902. (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* (地球科学进展), 19, 71 – 80. (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)

Li Y, Liao SD (2004). NPP distribution related to the terrains along the north-south transect of eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 49, 617 – 624.

Li Z (李震), Yan FL (阎福礼), Fan XT (范湘涛) (2005). The variability of *NDVI* over northwest China and its relation to temperature and precipitation. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), 9, 308 – 313. (in Chinese with English abstract)

Los SO, Justice CO, Tucker CJ (1994). A global 1 degree by 1 degree *NDVI* data set for climate studies derived from the GIMMS continental *NDVI* data. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3493 – 3518.

Lucht W, Prentice IC, Myneni RB, Sitch S, Friedlstein P, Cramer W, Bousquet P, Buermann W, Smith B (2002). Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 296, 1687 – 1689.

Lyon GJ, Yuan D, Lunetta RS, Elvidge CD (1998). A change de-

tection experiment using vegetation indices. *Photogramm Engi-
neer & Remote Sensing*, 64, 143 – 150.

Mass JF (1999). Monitoring land-cover changes: a comparison of
change detection techniques. *International Journal of Remote
Sensing*, 20, 139 – 152.

Myneni 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.

Piao SL (朴世龙), Fang JY (方精云) (2002). Terrestrial net
primary production and its spatio-temporal patterns in Qinghai-
Xizang Plateau, China during 1982 – 1999. *Journal of Natural
Resources* (自然资源学报), 17, 374 – 379. (in Chinese with
English abstract)

Tucker CJ, Fung IY, Keeling CD, Gammon RH (1986). Relation-
ship between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived
vegetation index. *Nature*, 319, 195 – 199.

Wang Q, Ni J, Tenhunen J (2005). Application of a geographical-
ly-weighted regression analysis to estimate net primary production
of Chinese forest ecosystems. *Global Ecology & Biogeography*,
14, 379 – 393.

Woodcock CE, Macomber SA, Pax-Lenney M, Cohen WB(2001).
Monitoring large areas for forest change using Landsat: general-
ization across space, time and Landsat sensors. *Remote Sensing
of Environment*, 78, 194 – 203.

Wu BF (吴炳方), Zhang F (张峰), Liu CL (刘成林), Zhang L
(张磊), Luo ZM(罗治敏) (2004). An integrated method for
crop condition monitoring. *Journal of Remote Sensing* (遥感学
报), 8, 498 – 513. (in Chinese with English abstract)

Zhang J (张军), Ge JP (葛剑平), Guo QX (国庆喜) (2001).
The relation between the change of *NDVI* of the main vegetational
types and the climatic factors in the northeast of China. *Acta
Ecologica Sinica* (生态学报), 21, 522 – 527. (in Chinese with
English abstract)

责任编辑:周广胜 责任编辑:姜联合