

北京市 2008 年奥运前后植被覆盖变化趋势*

孙晓鹏¹ 王天明^{1**} 邬建国^{1,2} 葛剑平¹

(¹北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室/生命科学学院, 北京 100875; ²美国亚利桑那州立大学生命科学学院和全球可持续研究所, Tempe AZ 85287)

摘要 基于 2000—2009 年的 MODIS-NDVI 数据, 分析了 2008 年奥运前后北京市植被覆盖变化趋势的时间动态和空间分布特征. 结果表明: 研究期间, 归一化植被指数 (NDVI) 显著增加像元比例为 20.7%, 显著减小像元仅占 4.1%, 减少速率略快于增加速率; 植被的显著变化主要集中在低海拔、小坡度的人类活动密集地区, 并在平原区形成 2 个环带, 分别为五环路以内的植被增加环带、五环路到六环路外侧的植被减少环带; 植被显著变化区存在明显的 NDVI 高值段和低值段之间的转化, 中值段变化不大, 主要由土地覆被类型的转变引起; 首都功能核心区和生态涵养保护区主要表现为植被增加, 城市功能拓展区和城市发展新区则兼有植被增加和植被减少的双重特征. 奥运筹备期一系列的生态工程是研究区植被增加的主要原因.

关键词 北京 植被 趋势分析 MODIS-NDVI 奥运

文章编号 1001-9332(2012)11-3133-08 **中图分类号** Q948.15 **文献标识码** A

Change trend of vegetation cover in Beijing metropolitan region before and after the 2008 Olympics. SUN Xiao-peng¹, WANG Tian-ming¹, WU Jian-guo^{1,2}, GE Jian-ping¹ (¹State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ²School of Life Sciences and Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2012, 23(11): 3133-3140.

Abstract: The MODIS-NDVI data from 2000 to 2009 were used to analyze the temporal dynamics and spatial distribution of the vegetation cover in the Beijing metropolitan region before and after the 2008 Olympics. During the study period, the proportion of the significantly increased pixels of NDVI occupied 20.7% while that of the significantly decreased pixels only occupied 4.1% of the total, and the decreasing rate of the NDVI was slightly faster than the increasing rate. The significant changes of the NDVI were mainly concentrated in the low altitude and small slope areas with intensive human activities, and two bands were formed in the plain area, *i. e.*, the vegetation increasing band within the 5th Ring Road and the vegetation decreasing band from the 5th Ring Road to the outside areas of the 6th Ring Road. In the areas with significant vegetation change, there was an obvious transition between the high and low NDVI sections but less change in the medium NDVI section, mainly due to the conversion of land cover type. In the Capital function core area and ecological conservation zones, vegetation change represented a positive trend; while in the urban function expansion area and urban development area, vegetation change had the dual characteristics of both positive and negative trends. A series of ecological engineering projects during the preparatory period of the 2008 Olympics was the main cause of the vegetation increase in the study area.

Key words: Beijing; vegetation; trend analysis; MODIS-NDVI; the Olympics.

植被是土地覆被最主要的组成部分, 土地覆被变化研究是全球环境变化研究的核心领域之一, 在一个地区的可持续发展中占有重要地位^[1]. 当前,

城镇区域作为在多尺度上驱动植被景观格局和生态系统变化的热点区, 已经越来越受到人们的关注^[2-5]. 全球尺度上的城镇区域虽只拥有不足 3% 的陆地面积, 却占到约 80% 的碳排放、60% 的生活用水和近 80% 的工业用木材^[6-7]. 新的发展背景下, 城镇区域在影响周围环境的同时, 也通过人工手段

*北京市教育委员会科学研究与科研基地建设项目(2011)和北京市科技计划项目(Z100008000410018)资助.

** 通讯作者. E-mail: wangtianming@bnu.edu.cn

2012-02-19 收稿, 2012-08-20 接受.

加强了对周围环境的干预,使植被覆盖变化产生了新的特点.有研究表明,城市化过程扰乱了植被与降水之间的耦合关系,通过增加景观异质性,对植被的影响呈现出复杂化的倾向,既可能减小生态系统净初级生产力(NPP),又可能使之增加^[8].因此,研究城镇区域植被覆盖变化的新特点,对认识生态系统和环境状况的变化以及制定生态建设和环境保护政策均具有重要的参考价值.

近年来,由于人口增长、工业化和城市化进程的进一步加快以及森林、草地、湿地等自然生态系统被农田和其他人工生态系统所蚕食,人为因素主导下的生态系统约占整个陆地面积的80%^[9].作为首都,在高强度的人类活动干扰和管理下,北京的生态系统和环境状况发生了深刻变化.尤其在2000—2009年,北京经历了第29届夏季奥运会从筹备到举办的全过程,在一系列绿色理念指导下,人为因素对植被干预达到一个更高的水平,这与同时期剧烈的城市化过程相联系,使植被覆盖变化呈现出复杂化倾向:既存在破坏植被的城镇扩张现象,又有试图增加植被覆盖的各项生态建设措施.这为研究城镇区域的植被覆盖变化提供了良好的样本.在复杂的人为因素影响下,北京的植被覆盖发生了什么变化,成为当前亟需回答的理论和现实问题.

卫星遥感可以为较大尺度的植被监测提供有效信息^[10].在众多基于遥感的植被指数中,归一化植被指数(NDVI)^[11]应用最广泛.NDVI通过直接反映光合有效辐射(APAR),进而指示生态系统的初级生产力,是反映植被覆盖状况的良好指标^[12-13].在取值上,NDVI生长季累加值可以减小大气因素对数据准确度的影响^[11].野外测量结果显示,NDVI生长季累加值在预测生物量的年际变化上很成功^[14].在土地退化的制图研究中,NDVI生长季累加值作为植被生产力的指标,能很好地反映土地退化程度^[15].在众多NDVI数据中,中等分辨率成像光谱仪(MODIS)的NDVI数据依托TERRA/AQUA卫星平台,具有较高的时间和空间分辨率,能很好地应用于城市植被和生态过程的定量研究^[8].与相应的AVHRR-NDVI数据相比,MODIS-NDVI具有更高的灵敏度和保真度,尤其是在大气水汽含量较高的情况下^[16].为此,本文利用MODIS-NDVI数据,结合地形数据、城市规划信息和统计数据,分析奥运前后(2000—2009年)北京植被覆盖年际变化趋势的时间动态和空间分布特征,并讨论这些特征与土地利用、生态建设和规划政策等人类活动之间的关系,旨

在为相关研究和决策提供依据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

北京市(39°38′—41°51′N, 115°25′—117°30′E)位于华北平原西北隅,四周与河北省、天津市相邻.全市总土地面积16410.54 km²,山地面积约占全市土地面积的2/3,东南部为平原,面积约占1/3,海拔从东南部的10 m上升到西北部的2000 m以上,地貌分为山地、丘陵台地、平原3种类型,土壤类型多样,主要有山地草甸土、山地棕壤、褐土、潮土、沼泽土、水稻土、风砂土.研究区属暖温带半湿润季风大陆性气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年均气温11~12℃,年日照时数2084~2873 h,年无霜期180~200 d,年均降水量470~660 mm,降水季节分配不均匀,全年降水的80%集中在6—8月.北京植被分布既表现出一定的垂直分异规律,又由于残存的原生群落与多种多样的次生群落相间、森林群落与灌丛草甸镶嵌,而显得零乱破碎.植被种类组成较复杂,群落类型多样,以各类次生植物群落占优势,主要自然植被类型包括针叶林、阔叶林、山地灌丛、灌草丛和山顶杂草草甸.

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 NDVI数据 采用MODIS-NDVI监测植被覆盖状况.NDVI数据来自美国航空航天局(NASA)LPDAAC中心提供的MODIS数据集V5版本.该版本经过了第2阶段(stage 2 validation)验证,即通过地面实况以及验证工作等过程,进行了较大时空范围的精确度评估,可以更好地用于科学研究^[17].本文所获取的MODIS-NDVI原始数据时间序列为2000年2月至2009年12月,采用NASA提供的MRT 4.0软件进行重采样、镶嵌处理和投影转换,并将每年的数据制成时间序列堆栈,然后对每年时间序列中的异常值进行平滑处理,从而达到数据降噪的目的.处理后数据的时间分辨率为16 d,空间分辨率为250 m,投影坐标为WGS84.

1.2.2 DEM数据 采用DEM数据进行地形区分析.DEM数据为NASA和日本经济产业省(METI)于2009年6月共同推出的先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(ASTER GDEM),来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdn.cn>).该数据是迄今最完整的全球地形数据,根据NASA的新一代对地观测卫星TERRA的详尽观测结果制作完成,地理坐标

系统为 WGS84,空间分辨率为 30 m,标称绝对高程精度为 20 m,标称绝对平面精度为 30 m,置信度均为 95%。

1.2.3 统计数据 统计数据来自北京市统计局和国家统计局北京调查总队编写的 2001—2010 年《北京统计年鉴》^[18]。选取与植被变化密切相关的统计指标,包括耕地面积、林地面积、园林绿地面积和城镇人口比重。由于年鉴在编修过程中会对历史数据重新进行核实并做出相应调整,所以在统计数据不一致的情况下,以调整后的数据为准。

1.3 研究方法

对每个 MODIS-NDVI 像元的 NDVI 生长季(4—10 月)平均值进行趋势分析,然后基于此分析结果,分析不同趋势(显著增加或显著减小)下 NDVI 像元平均值的年际变化动态和空间分布特征:年际变化动态主要分析不同显著趋势下像元的 NDVI 均值动态和 NDVI 各值段像元所占比例的变化,空间分布特征主要分析不同显著趋势像元在各地形区和规划区的分布特点。最后分析和讨论这种动态变化和分布特点与人类活动之间的关系。本研究用于遥感图像和 GIS 数据处理的软件分别为 ERDAS IMAGINE 9.1 和 ArcGIS 9.3。

1.3.1 趋势分析 对 NDVI 时间序列的分析方法中,变化斜率法已被广泛应用于研究植被覆盖、生物量、NPP 以及农作物产量的长期变化趋势等^[19-21]。本研究采用变化斜率法分析 NDVI 随时间变化的趋势。斜率(b)的计算方法如下式:

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NDVI_i - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n NDVI_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: i 为年序号; n 为时间长度; $NDVI_i$ 为基于像元的 10 年时间序列,采用生长季平均值,即每年 4—10 月所包含的 13 景图像的 NDVI 均值。NDVI 随时间的变化斜率反映植被覆盖的变化方向,斜率为正值表示植被覆盖呈增加趋势,为负值表示植被覆盖呈减少趋势,为 0 表示植被覆盖无变化趋势^[22]。对斜率的显著性检验采用 t 检验法,显著性水平设置为 0.05。

1.3.2 地形区的划分 利用 ASTER GDEM 数据,依据北京地形和土地利用特点,按照海拔和坡度进行地形区划分。

海拔决定植被的垂直分异。考察不同海拔段的植被变化状况,可以推测不同垂直植被带的变化。北

京地形按海拔可分为 6 级,即 >1800、1500 ~ 1800、800 ~ 1500、350 ~ 800、100 ~ 350、<100 m,对应的地形分别为中山顶部、中山上部、中山下部、低山、丘陵、平原,对应的主要植被类型分别为山地草甸、针阔混交林、落叶阔叶林、中生落叶阔叶灌丛、半旱生灌草丛、农田及其他人工植被。

坡度与土壤侵蚀关系密切^[23],进而影响植被的生长状况。本研究将北京坡度分为 6 级,即 <5°、5° ~ 10°、5° ~ 15°、15° ~ 25°、25° ~ 35°、>35°。北京平原地区坡度多集中在 5° 以下,是目前城市建设及农业用地集中地区。山区绝大部分为坡地,而且坡度较陡,>25° 的陡坡地面积占 60% ~ 70%。一般情况下,坡度越大,土壤侵蚀风险越高,水土流失越严重,尤其是 25° ~ 35° 的陡坡地上,水土流失非常严重,一般作为退耕的重点区域。

1.3.3 规划区的划分 城市的土地利用是按照城市发展规划来进行的,而这种规划引导的土地利用会反映在植被变化上。不同规划区的植被变化状况,在一定程度上可以看作该区规划和相应政策的一种实际效果。依据北京市发展与改革委员会发布的《北京市“十一五”时期功能区域发展规划》^[24],将全市 18 个区县从总体上划分为首都功能核心区、城市功能拓展区、城市发展新区和生态涵养保护区四大功能区(图 1)。首都功能核心区承担国家政治文化中心、金融管理中心和国际交往中心的职能;城市功能拓展区是国家高新技术产业基地,国内外知名的高等教育和科研机构聚集区,著名的旅游、文化、体育活动区;城市发展新区是北京发展制造业和现代农业的主要基地,也是北京疏散城市中心区产业与人口的重要区域;生态涵养保护区是北京的生态屏障和水源保护地,为北京可持续发展提供支撑。

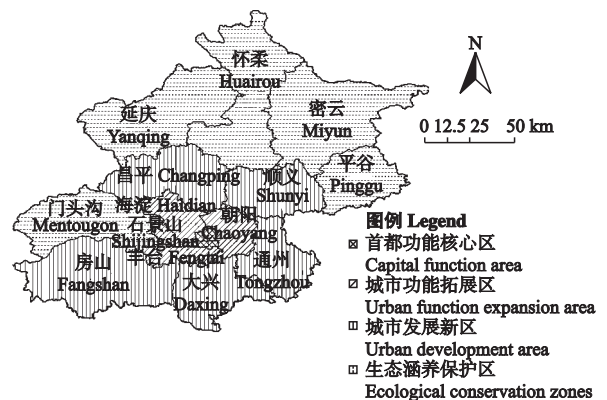


图 1 北京规划区的划分

Fig. 1 Division of the planning areas of Beijing.

2 结果与分析

2.1 单像元 NDVI 趋势分析

2000—2009年,北京市单像元NDVI生长季平均值有20.7%显著增加,4.1%显著减小,NDVI变化不显著的像元占75.2%(图2).说明研究期间北京大部分地区(约占3/4)植被覆盖没有出现显著变化趋势(显著增加或显著减少),其余地区则以植被的增加趋势为主.

从空间分布上看,整个市域范围内植被并无统一变化趋势,而呈现出明显的空间分异:NDVI显著变化区域主要集中在平原地区和东北部山区,西部广大山区未出现较明显成片变化.在平原地区,NDVI有显著变化趋势的像元围绕主城区这个中心,形成2个环带:1)大体位于五环路以内的NDVI显著增加环带;2)大体位于五环路到六环路外侧的NDVI显著减小环带.另外,在平原地区东南部外围,NDVI存在普遍增加的趋势.

2.2 植被趋势显著区 NDVI 的年际动态

2.2.1 NDVI 均值变化 由图3可以看出,植被显著增加区NDVI均值呈极显著增加趋势($P < 0.01$),变化幅度为0.11,变化速率为 $0.0107 \cdot a^{-1}$,变化百分率为31.8%,NDVI的增加呈现较好的连续性;植被显著减少区NDVI均值呈极显著减小趋势($P < 0.01$),变化幅度为0.14,变化速率为 $-0.0153 \cdot a^{-1}$,变化百分率为-30.1%,NDVI的减小也呈现较好的连续性.说明北京植被减少区的减少速率略快于植被增加区的增加速率,年际变化持续性良好,波动不大,变化百分率相当(约30%).

2.2.2 NDVI 组分变化 由图4可以看出,植被显著

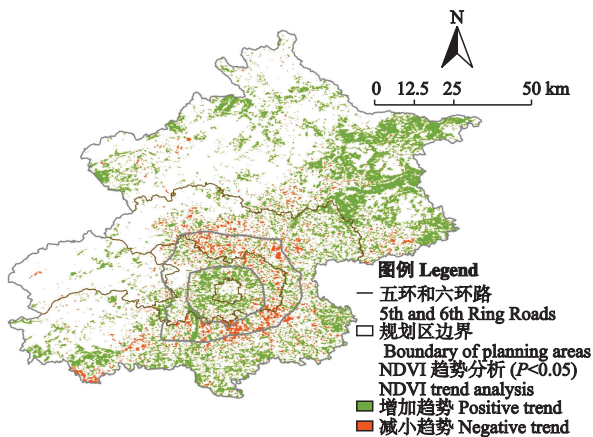


图2 2000—2009年北京NDVI生长季平均值的趋势分析
Fig.2 Trend analysis of the mean NDVI of growing season from 2000 to 2009 in Beijing.

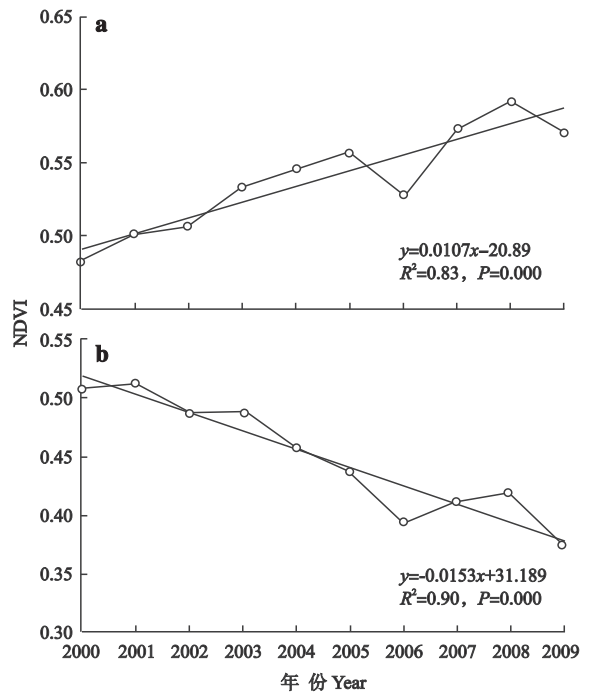


图3 北京植被显著增加区(a)和植被显著减少区(b)的NDVI年际动态
Fig.3 Annual dynamics of NDVI in the significantly positive trend area (a) and the significantly negative trend area (b) of Beijing.

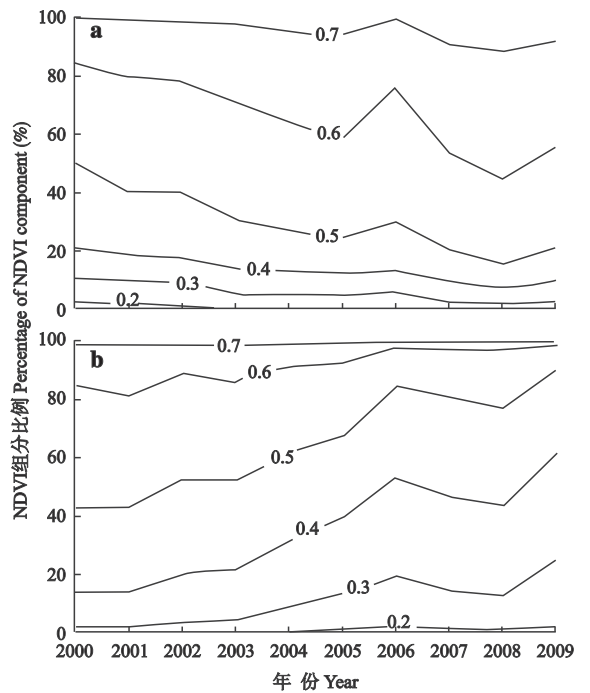


图4 北京植被显著增加区(a)和植被显著减少区(b)的NDVI组分变化
Fig.4 Component changes of NDVI in the significantly positive trend area (a) and the significantly negative trend area (b) of Beijing.

增加区 NDVI 各值段的像元组成比例中,0.6~0.8 值段明显增加,0.4~0.5 和 0.2~0.3 值段明显减少,而 0.3~0.4 和 0.5~0.6 值段的比例变化不大,说明该区存在明显的 NDVI 低值段到 high 值段的转化现象;植被显著减少区 NDVI 各值段的像元组成比例中,0.2~0.4 值段明显增加,0.5~0.7 值段明显减少,而 0.4~0.5 值段的比例基本不变,说明该区存在明显的 NDVI 高值段到低值段的转化现象。

2.3 植被趋势显著区的空间特征

2.3.1 地形区分析 研究区 NDVI 具有显著变化趋势的像元在地形上显示出良好的集中性分布。从海拔上看,NDVI 呈显著增加趋势的像元集中在平原 (<100 m)、丘陵 (100~350 m) 和低山带 (350~800 m) 等海拔较低的地区,像元比例高达 97.7%, NDVI 呈显著减小趋势的像元几乎集中在平原地区,像元比例为 89.4% (表 1)。从坡度上看,植被显著增加区超过一半的像元 (56.6%) 分布在坡度小于 5° 的区域,而 93.9% 的像元分布在坡度小于 25° 的区域;植被显著减少区有超过 90% (91.7%) 的像元分布在坡度小于 5° 的区域,在坡度较大地区的分布则很少 (表 2)。

植被显著增加区多为灌丛、灌草丛和人工植被的主要分布区,而中山带及其以上地带的天然林分

表 1 不同 NDVI 趋势像元随海拔的分布

Table 1 Distribution of the different NDVI trend pixels under different altitudes (%)

海拔 Altitude (m)	增加趋势 Positive trend	减小趋势 Negative trend	无趋势 No trend
<100	45.8	89.4	34.3
100~350	30.4	4.7	13.7
350~800	21.4	4.6	35.2
800~1500	2.3	1.3	16.0
1500~1800	0	0	0.6
>1800	0	0	0.1
合计 Total	100	100	100

表 2 不同 NDVI 趋势像元随坡度的分布

Table 2 Distribution of the different NDVI trend pixels under different slope gradients (%)

坡度 Slope (°)	增加趋势 Positive trend	减小趋势 Negative trend	无趋势 No trend
<5	56.6	91.7	42.1
5~10	14.5	3.7	9.8
5~15	10.5	1.6	10.8
15~25	12.3	1.9	20.8
25~35	4.7	0.9	12.4
>35	1.4	0.3	4.1
合计 Total	100	100	100

布区植被基本无显著变化趋势。超过一半的植被显著增加区,以及绝大部分植被显著减少区主要位于城镇建设和农业活动较集中的平原地区,即人类活动对土地利用和土地覆被变化占主导的地区。

2.3.2 规划区分析 植被趋势显著区像元随规划区的分布特点与规划区的发展定位存在密切联系 (表 3)。植被显著增加区的像元分布比例最大的规划区为生态涵养保护区,超过 50%,其次是城市发展新区和城市功能拓展区;植被显著减少区的像元大部分位于城市发展新区,比例接近 70%,其次是生态涵养保护区和城市功能拓展区。

不同规划区内 NDVI 显著变化像元的分布也各有特点 (表 4)。首都功能核心区和城市功能拓展区 NDVI 显著增加像元的比例较高,均在 30% 左右,而城市发展新区和生态涵养保护区 NDVI 显著增加像元的比例较低,均在 20% 左右;对于 NDVI 显著减小像元的比例,城市功能拓展区和城市发展新区均超过 7%,而首都功能核心区和生态涵养保护区分别为 0.3% 和 1.2%。可见,对于植被显著变化趋势而言,首都功能核心区和生态涵养保护区主要表现为植被增加,城市功能拓展区和城市发展新区则兼有

表 3 不同 NDVI 趋势像元随规划区的分布

Table 3 Distribution of the different NDVI trend pixels under different planning areas (%)

规划区 Planning area	增加趋势 Positive trend	减小趋势 Negative trend	无趋势 No trend
首都功能核心区 Capital function area	0.9	0.1	0.6
城市功能拓展区 Urban function expansion area	10.8	14.0	6.8
城市发展新区 Urban development area	36.4	69.8	37.3
生态涵养保护区 Ecological conservation zone	51.9	16.2	55.4
合计 Total	100	100	100

表 4 各规划区内不同 NDVI 趋势像元的比例

Table 4 Percentage of the different NDVI trend pixels in the different planning areas (%)

NDVI 趋势 Trend of NDVI	首都功能核心区 Capital function area	城市功能拓展区 Urban function expansion area	城市发展新区 Urban development area	生态涵养保护区 Ecological conservation zone
增加趋势 Positive trend	30.2	28.4	19.6	20.3
减小趋势 Negative trend	0.3	7.2	7.4	1.2
无趋势 No trend	69.5	64.4	73.0	78.5
合计 Total	100	100	100	100

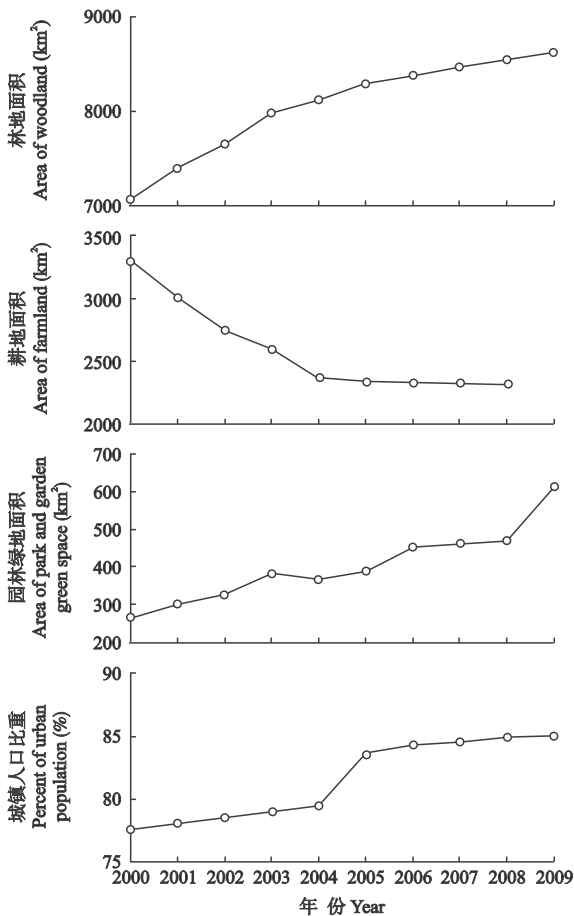


图5 2000—2009年北京林地面积、耕地面积(2009年未公布)、园林绿地面积和城镇人口比重

Fig. 5 Area of woodland, area of farmland (no 2009 data), area of park and garden green space, and percent of urban population in Beijing (2000–2009).

植被增加和植被减少的双重特征。

2.4 相关植被指标的变化

2000—2009年,北京林地面积增加22.3%,林木覆盖率从42.0%上升到53%,园林绿地增加了131.2%,耕地面积减少了29.6%(2000—2008年),与此同时,城市化大幅推进,城镇人口增加41.1%,城镇人口比重从77.5%上升至85.0%(图5)。这些统计指标反映了人为因素作用的连续性,可在一定程度上解释研究区NDVI趋势分析结果。

3 讨论

3.1 植被覆盖变化与土地利用的关系

土地利用是驱动土地覆被或植被变化的重要因素之一^[25],而只有当土地利用施加一种持续的正效应或负效应的时候,才能使植被变化在趋势分析的结果上有所反映。因此,植被的显著变化趋势可以解释为某种人为操作下稳定的土地利用变化所产生的

效果。从面积上看,植被的显著变化趋势以增加为主,显著增加的面积是显著减小面积的5倍左右,所以整体上这种土地利用变化以增加植被覆盖为主。土地利用变化导致的土地覆被变化主要有两种类型:渐变(modification)和转变(conversion)^[26]。渐变是同一种土地覆被类型内部条件的变化,而转变是一种覆被类型转变为另一种覆被类型。NDVI组分分析结果显示,植被趋势显著区的NDVI组分存在低值段和高值段之间的转化现象,而中间值段的比例基本没有变化,由此可推断造成植被显著趋势的主要是土地覆被类型的“转变”,而非“渐变”。根据NDVI不同值段与土地覆被类型之间的对应关系可进一步推断,植被增加可能由林地增加、农田减少和城镇绿化等因素引起,植被减少可能由城镇建设、农田减少和林地减少等因素引起。

由2000—2009年的统计分析可以发现,北京的耕地面积、林地面积、园林绿地面积和城镇人口比重的变化与上述推断一致。从土地利用类型转化的方向来看,农田的减少可能有两大去向,即城镇建设用地和造林用地,而城镇区域内部则可能进行了优化,表现为一部分建设用地向公园绿地转化。这些变化在近年来的各种新闻报道中不乏例证,也有同类研究结果的支持,如夏兵等^[27]对近20年北京地区景观格局演变的研究表明,北京城镇建设用地面积大幅增加,而城市化的直接结果导致了农田的损失速度加快。

3.2 植被趋势显著区与人类活动密集区的空间一致性

植被显著增加区几乎全部位于平原、丘陵和低山带等海拔较低、或坡度小于25°的区域,而植被显著减少区更为集中,几乎全部位于平原区、或坡度小于5°的区域。在人类活动较少的区域,如低山带以上或坡度较陡的山区,植被几乎没有发生显著变化趋势。这与其他北京地区植被的长期研究结果类似。张本昀等^[28]在对1979和2005年遥感影像的对比研究中发现,北京山区高海拔地区植被覆盖较稳定,低海拔区变化剧烈。吴晓甫等^[29]对1978—2001年北京地区的研究发现,海拔100 m以下区域的土地覆被变化主要是城市化过程,海拔大于100 m区域土地覆被主要是灌丛向林地的转变,而且是林地面积增加的主要地区。与之相比,本研究进一步发现,2000年以后北京平原地区除了明显的城市化过程外,还有显著的植被增加过程。

北京奥运筹备期的生态工程能较好地阐释ND-

VI 增加像元的空间分布特征. 这些工程在 2000—2007 年先后展开,其分布范围与植被显著增加区大体一致:1)位于二环路到五环路的植被显著增加环带,与第一道绿化隔离带建设区域基本一致.第一道绿化隔离带建设以植树为主要方式,在城市中心区和 10 个边缘集团之间,以及各边缘集团之间用成片的大绿带进行隔离,以防止城市中心地区与外围组团之间连成一片.2)平原地区西南部外围部分的植被显著增加区域,可与“三北”防护林、播草盖沙工程和平原治沙工程的施工区域联系起来.这些工程以植树造林、植灌种草等方式为主,大面积增加林地面积和改造裸露沙地.3)山区的植被显著增加区主要在东北部山区成片分布,而该区大部分为海拔在 350 m 以下的丘陵带,调查中发现其与造林和林业抚育工程范围吻合.

3.3 规划区规划定位和政策措施对植被覆盖的影响

北京 4 个规划区是一个从市中心到山区的辐射结构:首都功能核心区城市化水平最高,植被覆盖最少,向外至生态涵养保护区,其城市化水平最低、植被覆盖最多.这种特征与 NDVI 显著增加像元的分布一致,即从市中心向外所占比例依次增加.不过,从各规划区内部 NDVI 趋势像元的比例上看,则表现出更多的人为因素,即首都功能核心区和城市功能拓展区植被显著增加的比例较高,而城市发展新区和生态涵养保护区的比例则较低.植被显著减少区主要集中在城市发展新区,该区的定位是制造业基地、农业基地和疏散城市中心区产业与人口的重要区域,是北京城市化过程最剧烈的地区.相关土地覆被的研究表明,北京的城市化过程从城市核心区向四周辐射,强度随着距离核心区的增大而逐渐减弱,2000 年以前主要发生在海淀区、朝阳区、丰台区、通州区、顺义区和昌平区等地区^[29],近 10 年则向外扩展至城市发展新区.植被趋势分析结果显示,一条非常明显的植被减少环带位于五环路到六环路外侧,明显反映了新一轮城市化过程所引起的植被减少.

从各规划区具体情况来看,首都功能核心区土地利用格局基本定型,植被方面主要进行城市绿地建设,植被变化以增加为主,植被减少的情况几乎没有.类似结果也出现在生态涵养保护区,不过原因在一系列生态保护政策.以门头沟为例,过去由于居住区扩张、采石采矿等导致的植被退化现象,正在被生态恢复工程和自然过程所改变,植被覆盖逐渐得到改善^[30].城市功能拓展区和城市发展新区在城市

化加快的同时,也重视绿化建设,因而具有了某些区域植被增加、某些区域植被减少的双重特点.

参考文献

- [1] Li X-B (李秀彬). A review of the international researches on land use/land cover change. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 1996, **51**(6): 553–558 (in Chinese)
- [2] Grimm NB, Faeth SH, Golubiewski NE, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, **319**: 756–760
- [3] Pataki DE, Alig RJ, Fung AS, et al. Urban ecosystems and the North American carbon cycle. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 2092–2102
- [4] Violin CR, Cada P, Sudduth EB, et al. Effects of urbanization and urban stream restoration on the physical and biological structure of stream ecosystems. *Ecological Applications*, 2011, **21**: 1932–1949
- [5] Jenerette GD, Potere D. Global analysis and simulation of land-use change associated with urbanization. *Land-scape Ecology*, 2010, **25**: 657–670
- [6] Brown LR. *Eco-Economy: Building an Economy for the Earth*. New York: Norton, 2001
- [7] Wu JG. Making the case for landscape ecology: An effective approach to urban sustainability. *Landscape Journal*, 2008, **27**: 41–50
- [8] Buyantuyev A, Wu J. Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: A case study of the Phoenix metropolitan region, USA. *Journal of Arid Environments*, 2009, **73**: 512–520
- [9] Fu CB. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon. *Global and Planetary Change*, 2003, **37**: 219–229
- [10] Goward SN, Waring RH, Dye DG, et al. Ecological remote sensing at OTTER: Satellite macroscale observations. *Ecological Applications*, 1994, **4**: 322–343
- [11] Wessels KJ, Prince SD, Malherbeb J, et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments*, 2007, **68**: 271–297
- [12] Law BE, Waring RH. Remote sensing of leaf area index and radiation intercepted by understory vegetation. *Ecological Applications*, 1994, **4**: 272–279
- [13] Monteith JL. Climatic variation and the growth of crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1981, **107**: 749–774
- [14] Wessels KJ, Prince SD, Zambatis N, et al. Relationship between herbaceous biomass and 1-km² Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park, South Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**: 951–973
- [15] Wessels KJ, Prince SD, Reshef I. Mapping land degradation by comparison of vegetation production to spatially derived estimates of potential production. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**: 1940–1949
- [16] Huete A, Didan K, Miura T. Overview of the radiomet-

- ric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 195–213
- [17] Friedl MA, Sulla-Menashe D, Tan B, *et al.* MODIS collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**: 168–182
- [18] Beijing Municipal Bureau of Statistics (北京市统计局). Beijing Statistical Yearbook 2001–2010. Beijing: China Statistics Press, 2001–2010 (in Chinese)
- [19] Milich L, Weiss E. GAC NDVI images: Relationship to rainfall and potential evaporation in the grazing lands of the Gourma (Northern Sahel) and in the croplands of the Niger-Nigeria border (Southern Sahel). *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**: 261–280
- [20] Fuller DO. Trends in NDVI time series and their relation to rangeland and crop production in Senegal, 1987–1993. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **19**: 2013–2018
- [21] Tottrup C, Rasmussen MS. Mapping long term changes in Sacannah crop productivity in Senegal through trend analysis of time series of remote sensing data. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, **103**: 545–560
- [22] Kepner WG, Rubio JL, Mouat DA, *et al.* Desertification in the Mediterranean Region: A Security Issue. Netherlands: Springer, 2006
- [23] Yang C-J (杨存建), Liu J-Y (刘纪远), Zhang Z-X (张增祥), *et al.* Analysis of features of soil erosion under different slope based on GIS. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2002, **16**(6): 46–49 (in Chinese)
- [24] Beijing Municipal Commission of Development and Reform (北京市发展与改革委员会). Functional Area Development Planning during the Eleventh Five-Year Plan Period of Beijing[EB/OL]. (2006-12-06) [2012-01-12]. http://www.bjpc.gov.cn/fzgh_1/guihua/11_5/11_5_zx/11_5_yb/200612/t146010.htm (in Chinese)
- [25] Verburg PH. Simulating feedbacks in land use and land cover change models. *Landscape Ecology*, 2006, **21**: 1171–1183
- [26] Turner BL, Meyer WB, Skole DL. Global land-use/land-cover change: Towards an integrated program of study. *Ambio*, 1994, **23**: 91–95
- [27] Xia B (夏兵), Yu X-X (余新晓), Ning J-K (宁金魁), *et al.* Landscape pattern evolution of Beijing in recent 20 years. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2008, **30**(suppl. 2): 60–66 (in Chinese)
- [28] Zhang B-J (张本昀), He F-Z (何富中), Yu Z-Z (喻铮铮), *et al.* Analysis of spatial and topographical characteristics of vegetation coverage changes of Beijing mountainous areas using remote sensing. *Journal of Geomatics Science and Technology* (测绘科学技术学报), 2008, **25**(3): 160–163 (in Chinese)
- [29] Wu X-P (吴晓蕾), Tang Z-Y (唐志尧), Cui H-T (崔海亭), *et al.* Land cover dynamics of different topographic conditions in Beijing. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30**(2): 239–251 (in Chinese)
- [30] Liu LY, Jing X, Wang JH, *et al.* Analysis of the changes of vegetation coverage of western Beijing mountainous areas using remote sensing and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **153**: 339–349

作者简介 孙晓鹏,男,1983年生,博士研究生.主要从事景观生态学和城市生态学研究. E-mail: gsxp2003@163.com

责任编辑 杨弘
