DOI: 10.5846/stxb201606301342

成方妍,刘世梁,张月秋,尹艺洁,侯笑云.基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响.生态学报,2017,37(18):5924-5934. Cheng F Y, Liu S L, Zhang Y Q, Yin Y J, Hou X Y.Effects of land-use change on net primary productivity in Beijing based on the MODIS series. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18):5924-5934.

基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生 产力的影响

成方妍,刘世梁*,张月秋,尹艺洁,侯笑云

北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室,北京 100875

摘要:了解土地利用变化对区域净初级生产力(NPP)的影响,对于综合理解区域植被的固碳能力及其与土地利用变化的关系, 以及维持区域生态安全均具有重要意义。以北京市为例,基于 2000—2012 年 MODIS NPP 遥感影像和土地利用类型数据,利用 同期 Landsat TM 影像(分辨率 30 m)对 MODIS NPP 数据进行降尺度计算的基础上,分析北京市区域 NPP 的时空分布特征,探 讨土地利用变化对植被固碳能力的影响。结果表明:研究期内 Landsat NDVI 与 NPP 数据的线性关系显著(*R*²为 0.22—0.68,*P*< 0.01),基于该线性关系可实现对 MODIS NPP 的降尺度重计算。土地利用面积分配和景观格局的变化均显著影响 NPP。13 年 间,北京市林地和草地面积增加而耕地面积迅速减少,NPP 总量由 123 万 t C 增长至 190 万 t C,其中 66%的 NPP 由林地贡献, 其次为耕地(26%),草地最低(8%)。2000—2006 年,面积变化促进了 NPP 的增加,贡献率为 34%;而 2006—2012 年,面积变化 则抑制区域 NPP 的增加,贡献率降低至 27%。同时,研究区域内斑块聚集度的降低,斑块密度及丰富度的增加均有利于其 NPP 的增加。提高研究区植被固碳能力,需要在维持区域当前植被数量和质量的基础上,增加区域景观的异质性和多样性。 关键词:土地利用变化;净初级生产力;MOD17A3 NPP;时空变化;景观格局指数

Effects of land-use change on net primary productivity in Beijing based on the MODIS series

CHENG Fangyan, LIU Shiliang^{*}, ZHANG Yueqiu, YIN Yijie, HOU Xiaoyun State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Understanding the impact of land-use change on Net Primary Productivity (NPP) is important in the elucidation of the relationship between the carbon assimilation ability of vegetation and land-use changes at the regional scale, which is also critical to the maintenance of regional ecological safety. Using Beijing as a case study, we analyzed the spatiotemporal distribution of NPP, and the impact of land-use changes based on land-use maps and MODIS data downscaled by 30-m resolution Landsat TM images from 2000 to 2012. The results revealed significant linear relationships between Landsat NDVI and MODIS NPP (R^2 values between 0.22 and 0.68, P < 0.01) and these linear functions were used to downscale the NPP data for this region. The NPP levels were also significantly affected by the area allocation and distribution of different land-use types. From 2000 to 2012, areas of woodland and grassland increased rapidly, whereas the area of farmland declined. Overall, the NPP of Beijing increased from 1.23 million t C to 1.9 million t C, and 66% of NPP was contributed by woodlands, followed by farmland (26%) and grassland (8%). For 2000 to 2012 impeded NPP growth and contributed 34% to its change, whereas the variations from 2006 to 2012 impeded NPP growth and contributed 27% to the change. Moreover, reduction of patch aggregation, and increment in patch density and patch richness density

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41530635);国家自然科学基金面上(41571173)

收稿日期:2016-06-30; 网络出版日期:2017-04-25

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shiliangliu@ bnu.edu.cn

contributed to the enhancement of NPP. The results suggest that maintaining the current vegetation quantity and quality, and increasing local landscape heterogeneity and diversity would improve NPP in Beijing.

Key Words: land-use change; net primary productivity; MOD17A3 NPP; spatiotemporal variation; landscape index

随着城市化进程的加剧,区域土地利用格局变化迅速而剧烈,大量非建成区土地快速流转为城市建筑用地,这直接影响区域系统的组成和结构,伴随而来的是系统过程和功能的变化^[1],以及区域物质和能量循环过程的变化^[2]。损失最严重的土地利用类型为林地和耕地,直接导致区域植被固碳能力的下降,给区域生态安全造成巨大压力^[3-6]。

土地利用的变化直接引起了区域植被净初级生产力(NPP)的变化^[7-9]。植被 NPP 是指绿色植物在单位 时间、单位面积内所累积有机物数量,是由植物光合作用所产生的有机质总量中减去自养呼吸后的剩余部分, 也称净第一生产力^[10]。NPP 反映了植被的固碳能力,其数量的变化还能反映植被对土地利用变化的响应。 DeFries 等^[11]研究发现,每年,全球 NPP 因土地利用变化而降低约5%。从区域景观甚至全球尺度估测土地利 用变化对 NPP 的影响不仅有利于我们对陆地生态系统碳循环及其动态调节机制的了解,增强区域土地利用 格局的合理优化管理,对寻求区域的碳增长空间更是具有重要意义^[2,6,12]。

以往研究曾采用光能利用率模型、生态-遥感光能利用率模型和遥感光能利用率-植被-大气-土壤循环模型等模型对 NPP 进行模拟^[13-15],这往往需多种多年连续数据的支持,且模型中的气象数据需要插值补充;还有少部分学者直接利用 MODIS NPP 数据进行了不同尺度的 NPP 时空变化研究^[16-18]。以上两种 NPP 数据均存在分辨率偏低的问题(1—10 km),分辨率偏低时地物边界模糊,将会造成 NPP 对土地利用类型变化响应的敏感性降低,产生尺度效应^[19]。但尺度效应对 NPP 模拟值的影响目前尚不清楚,Turner 等^[20]研究发现分辨率 50 km 的植被 NPP 估计值比分辨率 1 km 的 NPP 估计值高出 11%;杨会巾等^[21]则发现分辨率 30 m 的植被 NPP 模拟值化 990 m 的 NPP 模拟值高出 5%。考虑到不同尺度的 NPP 具有相似的空间格局,其基本特征不变^[21];而且许多具有高分辨率影像的植被指数如 LAI(Leaf Area Index)、NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)等与 NPP 具有较好的线性关系^[22-24],尝试利用各指数间良好的统计相关性或可提高 NPP 数据分辨率。

北京市区域景观近年来变化显著, 而以往研究多集中探讨区域 NPP 的空间分布及其季节性变化, 大多集中于森林碳库, 但是区域 NPP 对景观格局变化的响应仍不清楚^[25-28]。本文采用的 MODIS NPP 影像分辨率为 1 km, 对区域建成区内的绿地变化反应不敏感, 因此本文集中探讨研究区内大面积连续植被(林地、草地和耕地)多年来的变化情况。本文将以北京市为例, 选取 MODIS NPP 影像, 包括同期的 Landsat 影像和土地利用类型图, 全面分析北京市 NPP 的时空变化, 及其对景观格局变化的响应, 以期量化土地利用变化对 NPP 年际变化的贡献, 并分析影响区域 NPP 的景观格局因素。由于 MODIS NPP 数据分辨率较低, 研究中进一步探讨了利用高分辨率的 Landsat 数据对其降尺度的方法及可行性。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

北京位于115°25′—117°30′E,39°28′—41°05′N,华北平原西北缘太行山脉与燕山山脉的交接位置,地势 西北高耸,东南低缓。行政区域内山区面积占62%,平原占38%,山区多以中、低山地为主。北京属暖温带大 陆性季风气候,年平均气温10—12℃,全年无霜期180—200 d,年平均降雨量约595 mm,降水季节分配不均 匀,地带性植被为暖温带落叶阔叶林。目前平原地区的植被类型主要是农作物,主要农作物类型为玉米、小 麦、大豆、大白菜和西瓜;山区植被是以落叶阔叶灌木林和落叶阔叶林为主^[28]。

1.2 数据来源

NPP 数据由美国 NASA 的 EOS/MODIS TERRA 卫星(MOD17A3)提供,选取 2000—2012 年 13 期遥感数

37 卷

据,分辨率为1km。MODIS NPP 基于 MODIS 遥感参数,利用改进的光能利用率模型 BIOME-BGG 模型计算全 球陆地植被 NPP 年际变化数据^[29]。

NDVI 数据采用 GLCF Earth Science Data Interface(ESDI)的陆地卫星数据计算,轨道号为 123/32,为了与 NPP 数据相匹配并保证数据的质量,最终选取 2000、2006 和 2012 年 9 月份无云覆盖的影像,分辨率为 30 m。 影像坏带利用 ENVI 插件 TM-DESTRIPE 处理,填补坏带后进行投影参数设置,几何校正等,并利用 ERDAS 的 INDICES 计算 NDVI 值。

土地利用数据采用 2000、2006 和 2012 年的 Landsat TM/ETM 遥感影像和面向对象的解译方法而获得。 由于 NPP 数据分辨率为 1 km,区域内部面积较小的绿地无法识别,故该研究着重于北京市的大面积连续的非 建成区土地利用类型,考虑研究区内主要的植被类型,将区域内非建成区土地利用类型简化为 3 类:林地、草 地和耕地,未考虑未利用地等。

1.3 研究方法

以 1 km 分辨率的 MODIS NPP 为基础, 探讨北京市 NPP 的年际变化趋势。为了分析景观格局变化对 NPP 的影响,对 1 km 分辨率的 MODIS NPP 降尺度至 30 m,结合土地利用类型数据,分析 NPP 总量变化、土地利用变化以及景观格局变化对 NPP 的影响。研究从区域和样方 2 个尺度展开,分析 NPP 年际变化趋势和土 地利用变化时,采用区域尺度;为了更系统的分析景观格局变化对 NPP 的影响,参考以往区域尺度的相关研 究^[30],在 ArcGIS 10.2.2 中划定连续的 10 km×10 km 正方形格网进行样方分析,北京市共 167 个格网。 **1.3.1** NPP 年际变化趋势

分别对 2000—2006 和 2006—2012 两个时段进行 NPP 年际变化趋势分析,年际变化趋势以各栅格多年数值回归方程的斜率(slope)表示^[31],回归方程采用最小二乘法获得,具体公式如下:

slope =
$$\frac{n \sum_{i=1}^{n} (i \times M_{\text{NPP},i}) - \sum_{i=1}^{n} i \times \sum_{i=1}^{n} M_{\text{NPP},i}}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^{2} - (\sum_{i=1}^{n} i)^{2}}$$
(1)

式中,*n*为7,*i*为年序号,*M*_{NPP,*i*}为第*i*年的NPP。其中,当 slope>0 时,说明植被覆盖在年际间的变化趋势是增加的;反之,则降低。当前,slope 值变化趋势的划分并没有统一标准^[32-34],考虑研究区域 NPP 的整体分布情况,通过计算 slope 值的变化,发现 slope 值基本符合正态分布,故利用等间距划分法,将 NPP 变化划分为 5 个等级,分别为明显降低(slope <= 15)、轻度降低(-15 < slope <= 5)、稳定不变(-5 < slope <5)、轻度增长(5 < slope <15)和明显增长(slope ≥ 15)。

1.3.2 降尺度方法

植被的 NDVI 与 NPP 具有较好的线性关系^[24,35],利用这种线性关系实现 NPP 数据的降尺度。首先,对 30 m 分辨率的 NDVI 重采样至 1 km,对 1 km 分辨率的 NDVI 和 NPP 构建线性关系。本文假定分辨率为 30 m 时,NDVI 与 NPP 的线性关系与分辨率为 1000 m 时相同。将 30 m 分辨率的 NDVI 代入以上关系式,求取 NPP 值,得到 30 m 分辨率的 NPP。本研究采用的 3 期 NDVI 影像中,NDVI 值在 0.7 以上的约为 10%,故不考虑 NDVI 过饱和的问题^[36]。

1.3.3 景观格局变化对区域 NPP 变化的影响分析

基于土地利用转移矩阵的景观格局变化分析:土地利用转移矩阵(Markov 转移矩阵)可以描述区域内土 地利用类型面积之间的相互转换情况,利用年际间不同利用类型土地转换的面积以及相应的转换概率描述土 地利用类型转换情况^[37]。本文分别对 2000—2006 和 2006—2012 年 2 个阶段进行转移矩阵的计算。

土地利用变化对 NPP 变化的贡献率(R)可以用其面积变化引起的 NPP 总量变化来表示,具体参考 Fu 等^[38]研究:

$$R = \frac{|\Delta S \times \text{NPP}_1|}{|\Delta \text{NPP} \times S_1| + |\Delta S \times \text{NPP}_1| + |\Delta S \times \Delta \text{NPP}|} \times 100\%$$
(2)

式中, NPP₁和 S_1 分别为某一段时间初始时的 NPP 总量和面积, Δ NPP 和 ΔS 分别为某一段时间的 NPP 变化量和面积变化量。

基于景观格局指数的景观格局变化分析:根据以往经验并参考张国栋^[39],本文从景观水平上选取9个指数,表征类型组分的有丰富度(PRD)和香农多样性指数(SHDI),表征空间形态的有斑块密度(PD)和平均斑 块维数(FRAC),表征空间关系的为分离指数(SPLIT)和聚合度(AI)。以上指数利用移动窗格法(500 m)在 Fragstats 4.2 中计算。

分别探讨 2000,2006 和 2012 年样方尺度上 NPP 与各景观格局指数的相关性,采用 Pearson 系数表示, 此外,对 6 个格局指数提取主成分,分析第一主成分与 NPP 的线性关系。

2 结果

2.1 NPP 时空分布特征

2000—2012 年,北京市 NPP 均值表现为先增大后减小,NPP 多年均值为 238 g C m⁻² a⁻¹。2004 年达到峰 值为 334 g C m⁻² a⁻¹,2001 年最低为 193 g C m⁻² a⁻¹(图 1)。2000—2006 年,NPP 为增长趋势,77%的区域表 现为明显增长,轻度增长的有 20%;而 2006—2012 年,NPP 则出现降低,8%的区域为明显降低,54%为轻度降 低,基本不变和增长的区域约占 39%(图 1)。



以 2000、2006 和 2012 年 30 m 分辨率的 NPP 数据为例, 对应同期土地利用类型图, 利用 ArcGIS 的 Zonation 模块, 得到 2000、2006 和 2012 年北京市 NPP 总量(分别为 1230000 t C、2040000 t C 和 1900000 t C, 图 2)。其中, NPP 以林地贡献最大约为 1130000 t C, 占 NPP 总量的 66%; 其次为耕地, 其 NPP 总量约为 460000 t C, 占 26%; 草地最低, 占 NPP 总量的 8%。

空间上,北京市 NPP 的主要贡献者集中在北部和西部,其 NPP 均值偏低但植被面积大,北部和西部的 NPP 产量较为稳定与区域整体年际变化同步,呈现先增加而后略降低的趋势;东南部的 NPP 值偏高,但面积 较小,且呈逐年增长趋势。

2.2 区域景观格局变化

2000—2012年,土地利用类型变化多分布在主城区周边,东北密云水库以及西北延庆县内(图3)。其中 林地面积呈增长趋势,但增长速度逐渐减缓;草地面积也呈增长趋势,且增长速度加快;但耕地面积在13年间 大幅减少。林地的增长主要是由耕地和草地转换,13年内,有553km²耕地和129km²草地转换为林地;草地 面积主要有耕地转换,13年内,有228 km²耕地转换为草地;耕地则主要转化为建设用地(699 km²)、林地和 草地。



图 2 2000、2006 和 2012 年北京市 NPP 总量变化 Fig.2 Total NPP variations of Beijing in 2000, 2006 and 2012



2000—2012年,北京市景观格局指数较稳定。类型组成方面,PRD和SHDI的平均值分别为5.26和0.46, PRD逐年降低,说明同一类型斑块更加集中,SHDI基本不变,说明不同土地利用类型在区域内所占比例变化 不大;空间形态方面,PD和FRAC的平均值分别为6.69和1.02,PD逐渐降低,说明破碎化程度降低,斑块变 大;FRAC值偏低,而且基本不变,说明斑块边界形状稳定且较简单;空间关系方面,SPLIT和AI的平均值分别 为1.24和98.41,SPLIT逐渐降低,说明不同土地利用类型分布不均匀性增加,与AI结果一致(表1)。PRD和 PD在11年间的波动约为2%,SHDI和SPLIT约为1%,而FRAC和AI年际波动则较微弱。总的来说,北京市 土地利用表现为同一类型集中分布,斑块形状相对简单,整体破碎化程度降低。

表 1 景观格局指数年际变化							
		Table 1 Vari	ations of landscape	e indexes			
年 V	景观格局指数 Landscape indexes						
+ Tear	PRD	SHDI	PD	FRAC	SPLIT	AI	
2000	5.32	0.46	6.76	1.02	1.24	98.39	
2006	5.28	0.46	6.72	1.02	1.24	98.39	
2012	5.19	0.46	6.60	1.02	1.23	98.44	

PRD:丰富度 Patch Richness Density; SHDI: Shannon's 多样性指数 Shannon's Diversity Index; PD:斑块密度 Patch Density; FRAC:平均斑块维数 FRACtal dimension index; SPLIT: 分离指数 SPLITting index; AI: 聚合度 Aggregation Index

2.3 景观格局变化对区域 NPP 变化的影响

2.3.1 土地利用面积变化对区域 NPP 变化的影响

2000—2006年,林地和草地面积均增长,二者 NPP 也表现为增长;2006—2012年,林地、草地面积继续增长,但林地 NPP 则降低,草地 NPP 继续增长(图 4)。2000—2012年间,耕地面积持续降低,但前 7年耕地 NPP 仍表现为增加,而后则为降低。



土地利用面积变化对 NPP 变化的贡献在两个时段存在差异,2000—2006 年,土地利用面积变化促进了区域的 NPP 增长,而 2006—2012 年,土地利用面积变化则抑制了区域 NPP 的增长。前7年,区域土地利用面积 变化对 NPP 变化的贡献率为 34%,面积变化可以解释 55%的 NPP 增长区域,而 NPP 的降低受到面积的影响 很小。2006—2012 年,土地利用面积变化对区域 NPP 变化的贡献率为 27%,面积变化可以解释 29%的 NPP 轻度降低区域,而 NPP 增长受到面积变化的影响较小。

2.3.2 景观格局指数变化与区域 NPP 的关系

2000 和 2012 年,6 个景观格局指数与 NPP 的相关性多显著,除了 AI 与 NPP 呈负相关,其他指数与 NPP 均星正相关;2006 年,只有 AI 与 NPP 呈显著负相关(图 5)。

对 6 个景观格局指数进行主成分分析,只有第一个主成分的特征值大于 1 且成分累计载荷超过 85%,提取 第一个主成分。第一主成分中 PRD、SHDI、PD、FRAC、SPLIT 和 AI 的负荷值分别为 0.98、0.88、0.99、0.99 和 -0.98,该主成分反映了区域内斑块的类型、分布和形状。2000、2006 和 2012 年第一主成分的特征值分别为 5.60、 5.68 和 5.59,累积载荷分别为 93%、95%和 93%。2000 和 2012,NPP 与第一主成分均呈显著的线性关系,但 2006 年线性关系不显著,与图 5 中的相关分析结果一致;3 个年份中,NPP 均随着第一主成分增大而降低(图 6)。

5929



图 5 NPP 与景观格局指数相关性分析

Fig.5 Correlation between NPP and landscape indexes

PRD:丰富度 Patch Richness Density; SHDI:香农多样性指数 SHannon's Diversity Index; PD:斑块密度 Patch Density; FRAC:平均斑块维数 FRACtal dimension index; SPLIT:分离指数 SPLITting index; AI:聚合度 Aggregation Index



3 讨论

3.1 NPP 降尺度模拟分析

年际间 NDVI 值差异显著(F_{2,37582}=6288.421, P<0.01),探讨 NDVI 与 NPP 线性关系时,不同年份分别构 建线性关系。整体上,NPP 与 NDVI 线性关系均显著(表 2),与蒋蕊竹等^[35]与林志东和武国胜^[24]的研究结果 相似,但本文中 NDVI 与 NPP 的线性相关系数低于前述研究结果。原因可能与研究地植被类型不同有关,蒋 蕊竹等^[35]研究区内主要植被类型为草甸和农田,NDVI 数值的高低直接反映了当年植被的生长状况;林志东 和武国胜^[24]的研究区内以生长期林地为主,其高覆盖度的区域也是 NPP 的高值区。而北京的主要植被类型 为中龄林地^[27],生产力较低但覆盖度较高^[38],这可能是导致其 NDVI 与 NPP 相关性低于其他研究区的主要 原因。 将 30 m 的 Landsat NDVI 数据代入表 2 方程,得到 30 m Landsat NPP,对 Landsat NPP 重采样至 1 km,与 1 km 分辨率的 MODIS NPP 比较(图 7)。Landsat NPP 值 偏低,整体均值为 186 g C m⁻² a⁻¹, MODIS NPP 则为 225 g C m⁻² a⁻¹;且 Landsat NPP 分布也较为离散,变异系数 为 0.44,而 MODIS NPP 则为 0.20。文中结果与 Turner 等^[20]的研究相似,与杨会巾等^[21]的研究结果则不同, 杨会巾等^[21]发现高分辨率的 NPP 模拟值高于低分辨

表 2 MODIS NPP 与 Landsat NDVI 数据回归分析模型 Table 2 The linear regression models of MODIS NPP and Landsat NDVI

年 Year	方程 Equation	R^2	Р
2000	$y = 391.23 - 1017.649x + 448.52x^2$	0.680	< 0.01
2006	$y = 303.17 + 197.29x - 746.94x^2$	0.531	< 0.01
2012	$y = 104.85 + 1511.44x - 3212.70x^2$	0.224	< 0.01

率的模拟值。不同分辨率 NPP 之间的差异可能由以下两方面原因造成,首先来自于模拟带来的误差,地形变化、植被结构差异等造成的环境因子的变异性较高,增加了 NPP 空间模拟的不确定性。其次,本文中不同分辨率 NPP 之间的差异可能来源于森林的结构差异^[40],研究区域内多为中龄低产景观林地,本模型未考虑高覆盖度林地的实际生产力,在今后的研究中应考虑高覆盖度植被与高生产力植被不对应的问题。



以往研究中也多次尝试利用 NDVI 与 NPP 的相关性,建立二者的模型以计算 NPP(表 3)。蒋蕊竹等^[35] 与林志东和武国胜^[24]构建的模型较简单,但是由于数据来源影像分辨率较低,所以 NPP 结果的分辨率也低; 孙成明等^[41-42]的方程模拟效果较好,但是模型相对复杂,需要的参数较多;与以往研究结果相比,本文模型简单分辨率高,但是模拟结果相关性偏低。模型结构、参数设置和验证数据的不同会造成研究结果间的差异性, 其次本文的估算模型没有考虑植被扰动干扰、森林年龄结构等其他因素^[40,43-44],这些因素均可能促成模型精度的降低。因此,提高本模型模拟精度是下一步亟待解决的问题。

3.2 景观格局变化对区域 NPP 变化的影响

3.2.1 土地利用变化对区域 NPP 变化的影响

2000—2012年,北京市 NPP 总量呈先增长后降低的变化趋势,这可能与区域土地利用类型的变化有关。 2000—2006年,林地面积快速增长,产生大量高产幼龄林,而 2006—2012年,林地面积增长减缓,耕地面积持 续降低,这可能导致后期 NPP 的降低。值得注意的是,尽管 13 年间耕地面积显著降低,但其 NPP 总量仍然 为增长趋势,这可能与农作物产量的提高有关,但考虑到耕地 NPP 约占植物 NPP 总量的 23%,当前耕地面积 骤减的趋势不容乐观。2000—2006年,土地利用面积变化促进了区域 NPP 的增长,这可能与该时期林地的增 长有关;而在 2006—2012年,土地利用面积变化则抑制了区域 NPP 的增长,这可能与该时期林地增长减缓, 耕地持续大量减少有关。土地利用面积变化对区域 NPP 具有明显的影响,在区域规划建设时,应当协调各种 用地类型的比例,维持区域的 NPP。

Table 3 Comparison of NPP models between this study and previous literatures							
文献来源 Data resource	模型参数 Model parameters	模型类型 Model type	R^2	分辨率 Resolution			
郑元润和周广胜[22]	NDVI	对数方程	_	_			
蒋蕊竹等[35]	NDVI	直线方程	0.86-0.97	1000 m			
李新 ^[23]	NDVI	直线方程和二次方程	—	-			
孙成明等[41]	NPP、年均温度、年降水量	多项式方程	0.83-0.90	500 m			
林志东和武国胜[24]	NDVI、NPP	直线方程	0.95-0.99	250 m			
孙成明等[42]	NDVI、LAI、月均温度、月均降雨、月辐射	多因素模型	0.85	500 m			
本研究	NDVI	二次方程	0.22-0.68	30 m			

表 3 本文 NPP 模型与以往模型的比较

空间上,NPP 分布为东南高,西北低,与土地利用类型对应后发现,耕地的 NPP 较高而林地则偏低,这与 尹锴等^[28]的结果不同。北京市种子管理站数据显示,2012 年北京农作物类型中玉米所占比例为 63%,其次 为小麦(28%),这两种农作物的生产力均较高,但北京市林地则多为低生产力的中龄林,这可能导致北京市 耕地 NPP 高于林地。

3.2.2 景观格局指数变化与区域 NPP 的关系

除了 AI 与 NPP 呈负相关,其他指数与 NPP 多呈正相关,这可能与土地利用的分布有关。新增的细碎斑 块为幼龄林具有较高的 NPP 产出,而长期集中分布的森林多形成低产中龄林导致 NPP 产量逐渐下降^[27,45]。因此,随着林龄的增加,区域土地利用的 NPP 可能会降低。景观格局指数与 NPP 相关性逐渐加强,表明北京 市景观格局特征对区域 NPP 变化的影响也逐渐加强。对 6 个景观格局指数进行主成分分析,第一个主成分 的累积载荷在 90%以上,PRD、SHDI、PD、FRAC 和 SPLIT 与该主成分均呈负相关,AI 与该主成分呈正相关,这 与图 5 中的相关分析结果一致。3 个年份中,NPP 均随着第一主成分增大而降低,表明当前仍需丰富区域内 植被类型,此外,还需要对区域内的森林采取抚育更新,维持一定面积成熟林的同时,保证适当的森林更新量。

4 结论

北京市 NPP 总量在近 13 a 内呈增长趋势,区域面积变化明显影响了区域 NPP 的分布。除面积变化外, 各土地利用类型的年固碳能力变化也容易促使 NPP 的空间变化,例如农作物的产量和林龄效应干扰下的森 林植被年固碳量等会影响 NPP 在该用地类型的空间分布。因此,在区域规划建设时,应当充分考虑不同土地 利用类型的特性,才能保持甚至提高区域植被的固碳能力。同时,土地斑块的分布也显著影响着 NPP,随着 斑块密度和丰富度的增长 NPP 呈增加趋势,斑块聚集度的增长则促使 NPP 降低。此外,区域内 NPP 增长量 逐渐减缓是值得注意的问题,考虑到区域景观格局的变化对 NPP 的显著影响作用,可以加强区域内植被异质 性和丰富度,对森林采取抚育更新,维持成熟林面积的同时,更新部分林地,将有利于维持区域的固碳能力,从 而帮助增加区域碳增长空间。

参考文献(References):

- 🚺] Albert M. The effects of urban patterns on ecosystem function. International Regional Science Review, 2005, 28(2): 168-192.
- [2] Imhoff M L, Tucker C J, Lawrence W T, Stutzer D C. The use of multisource satellite and geospatial data to study the effect of urbanization on primary productivity in the United States. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(6): 2549-2556.
- [3] Nizeyimana E L, Petersen G W, Imhoff M L, Sinclair H R, Waltman S W, Reed-Margetan D S, Levine E R, Russo J M. Assessing the impact of land conversion to urban use on soils with different productivity levels in the USA. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 391-402.
- [4] Imhoff M L, Bounoua L, Defries R, Lawrence W T, Stutzer D, Tucker C J, Ricketts T. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 434-443.
- [5] Tian G J, Qiao Z. Assessing the impact of the urbanization process on net primary productivity in China in 1989-2000. Environmental Pollution, 2014, 184; 320-326.

- [6] 姜春, 吴志峰, 程炯, 钱乐祥. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析. 自然资源学报, 2016, 31(6): 961-972.
- [7] 周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响. 地球科学进展, 2006, 21(2): 138-143.
- [8] Pei F S, Li X, Liu X P, Wang S J, He Z J. Assessing the differences in net primary productivity between pre-and post-urban land development in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 171-172: 174-186.
- [9] Dong G T, Bai J, Yang S T, Wu L N, Cai M Y, Zhang Y C, Luo Y, Wang Z W. The impact of land use and land cover change on net primary productivity on China's Sanjiang Plain. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(4): 2907-2917.
- [10] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [11] Defries R S, Field C B, Fung I, Collatz G J, Bounoua L. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of humaninduced land cover change on carbon emissions and primary productivity. Global Biogeochemical Cycles, 1999, 13(3): 803-815.
- [12] Xu C, Liu M, An S, Chen J M, Yan P. Assessing the impact of urbanization on regional net primary productivity in Jiangyin County, China. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 597-606.
- [13] 朱文泉,潘耀忠,何浩,于德永,扈海渡.中国典型植被最大光利用率模拟.科学通报,2006,51(6),700-706.
- [14] 张杰,潘晓玲. 天山北麓山地-绿洲-荒漠生态系统净初级生产力空间分布格局及其季节变化. 干旱区地理, 2010, 33(1): 78-86.
- [15] Eisfelder C, Kuenzer C, Dech S, Buchroithner M F. Comparison of two remote sensing based models for regional net primary productivity estimation-a case study in semi-arid Central Kazakhstan. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(4): 1843-1856.
- [16] 李燕丽,潘贤章,王昌昆,刘娅,赵其国. 2000—2011年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 生态学报, 2014, 34(18): 5220-5228.
- [17] 孙庆龄,冯险峰,肖潇.武陵山区植被净第一性生产力的时空格局及其与地形因子的关系。地球信息科学学报, 2014, 16(6): 915-924.
- [18] 谢宝妮,秦占飞,王洋,常庆瑞.黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素.农业工程学报,2014,30(11):244-253.
- [19] 李成秀,曹广超,吴成永,陈克龙.基于 LandSat8 OLI 数据的山区 NPP 遥感估算模型研究.绿色科技,2016,(4):7-9.
- [20] Turner D P, Dodson R, Marks D. Comparison of alternative spatial resolutions in the application of a spatially distributed biogeochemical model over complex terrain. Ecological Modelling, 1996, 90(1): 53-67.
- [21] 杨会巾,刘丽娟,马金龙,王进,李小玉.基于 Landsat 8 遥感影像反演干旱区净初级生产力的尺度效应.生态学杂志,2016,35(5): 1294-1300.
- [22] 郑元润,周广胜. 基于 NDVI 的中国天然森林植被净第一性生产力模型. 植物生态学报, 2000, 24(1): 9-12.
- [23] 李新. 基于 MODIS 数据的内蒙古森林净初级生产力遥感估算研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011.
- [24] 林志东, 武国胜. 基于 MODIS 的大田县均溪谷地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征.亚热带资源与环境学报, 2015, 10(1): 27-33.
- [25] 刘芳, 迟耀斌, 王智勇, 王艳艳. NPP 列入生态统计指标体系的潜力分析——以北京地区 NPP 测算与空间分析为例. 生态环境学报, 2009, 18(3): 960-966.
- [26] 宋国宝,潘耀忠,张树深,朱文泉,北京市植被净生产力遥感测量与分析.资源科学,2009,31(9):1568-1572.
- [27] 王光华. 北京森林植被固碳能力研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [28] 尹锴,田亦陈,袁超,张飞飞,苑全治,花利忠. 基于 CASA 模型的北京植被 NPP 时空格局及其因子解释. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 133-139.
- [29] 国志兴, 王宗明, 张柏, 刘殿伟, 杨桄, 宋开山, 李方. 2000 年—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析. 资源科学, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [30] 刘世梁, 崔保山, 温敏霞, 王娟, 董世魁. 纵向岭谷区道路网络特征和生态系统变异统计规律. 科学通报, 2007, 52(S2): 71-77.
- [31] 刘世梁,赵海迪,董世魁,苏旭坤,刘琦,邓丽,张翔. 基于 SPOT NDVI 的阿尔金山自然保护区植被动态变化研究. 干旱区研究, 2014, 31(5): 832-837.
- [32] 张月丛, 赵志强, 李双成, 孟宪锋. 基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势. 地理研究, 2008, 27(4): 745-754.
- [33]》庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华, 郑华, 王效科, 白杨. 基于 MODIS 的海河流域生态系统空间格局. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1149-1154.
- [34] 范娜, 谢高地, 张昌顺, 陈龙, 李文华, 成升魁. 2001 年至 2010 年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析. 资源科学, 2012, 34(7): 1222-1231.
- [35] 蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 张治国. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(22): 6708-6716.
- [36] Xu C, Li Y T, Hu J, Yang X J, Sheng S, Liu M S. Evaluating the difference between the normalized difference vegetation index and net primary productivity as the indicators of vegetation vigor assessment at landscape scale. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(3): 1275-1286.

- [37] 张琳琳, 孔繁花, 尹海伟, 孙振如, 庄艳美, 居为民. 基于景观空间指标与移动窗口的济南城市空间格局变化. 生态学杂志, 2010, 29 (8): 1591-1598.
- [38] Fu Y C, Lu X Y, Zhao Y L, Zeng X T, Xia L L. Assessment impacts of weather and Land Use/Land Cover (LULC) Change on urban vegetation Net Primary Productivity (NPP): a case study in Guangzhou, China. Remote Sensing, 2013, 5(8): 4125-4144.
- [39] 张国栋. 黄河三角洲净初级生产力、水分蒸散与景观格局变化的关系[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [40] 李登秋,张春华,居为民,刘丽娟.江西省森林净初级生产力动态变化特征及其驱动因子分析.植物生态学报,2016,40(7):643-657
- [41] 孙成明,刘涛,田婷,郭斗斗,王力坚,陈瑛瑛,李菲,李建龙.基于 MODIS 的南方草地 NPP 遥感估算与应用.草业学报,2013,22(5): 11-17.
- [42] 孙成明, 孙政国, 刘涛, 王力坚, 陈瑛瑛, 郭斗斗, 田婷, 李建龙. 基于 MODIS 的中国草地 NPP 综合估算模型. 生态学报, 2015, 35(4); 1079-1085.
- [43] Coomes D A, Holdaway R J, Kobe R K, Lines E R, Allen R B. A general integrative framework for modeling woody biomass production and carbon sequestration rates in forests. Journal of Ecology, 2011, 100(1): 42-64.
- [44] Ter-Mikaelian M T, Colombo S J, Chen J X. Effect of age and disturbance on decadal changes in carbon stocks in managed forest landscapes in central Canada. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2014, 19(7): 1063-1075.
- [45] Luyssaert S, Schulze E D, Börner A, Knohl A, Hessenmöller D, Law B E, Ciais P, Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks. Nature, 2008, 455(7210): 213-215.