北京市平原造林遥感监测与未来空间适宜性评价模拟

胡腾云¹, 李雪草², 宫鹏^{3,4*}, 喻文承¹, 黄晓春¹

1. 北京市城市规划设计研究院规划信息中心, 北京 100045;

2. Department of Geological and Atmospheric Sciences, Iowa State University, Ames 50011, USA;

3. 清华大学地球系统科学系, 教育部地球系统模拟重点实验室, 北京 100084;

4. 清华大学中国城市研究院, 北京 100084

* 通讯作者, E-mail: penggong@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2019-12-06; 收修改稿日期: 2020-05-06; 接受日期: 2020-05-29; 网络版发表日期: 2020-07-23

国家高技术研究发展计划项目(编号: 2016YFA0600104)、清华大学Delos和唐仲英基金项目资助

摘要 以北京市“百万亩平原造林”(简称造林工程)为例, 利用长时序遥感影像监测林地生长状况及其变化、土地利用改变对林地生长的影响, 评价造林工程的植被生长状况特征变化。结果表明, 造林工程的生态效益仍有提升空间。研究发现, 第一期造林工程中存在部分对区域原有绿色空间生长破坏的情况, 主要发生在初始绿色空间生长状况较好且内部植被生长的空间异质性小的林地斑块以及优质的、较大规模的耕地, 具有这些特征的斑块原则上不适宜开展造林工作。基于对第一期造林工程实施评估的分析, 根据城市化过程对绿色空间格局的潜在影响分析, 构建第二期“百万亩造林工程”中绿色空间生长适宜性评价变量, 探索在城市土地利用扩展的情境下新一轮造林工程中新增绿色空间分布的模拟方法, 以期对绿色空间规划提供借鉴意义及政策实施考核。本研究所建立的评价方法可推广至全国范围, 对区域造林监测和未来造林规划提供借鉴。

关键词 城市土地利用, 造林工程, 生长状况, 适宜性分布, 空间布局模拟

1 引言

在新型城镇化建设的时代背景下, 空间治理工作面临诸多新要求和新的挑战, 伴随着2018年3月17日自然资源部的成立, 如何对自然资源进行有效监管并构建合理的空间规划体系等引起社会各界的普遍关注, 全空间、全要素规划中更重视城市生态环境中多种尺度空间的演替变化(陈发虎等, 2019; 方创琳等, 2019)。

绿色空间作为生产空间与生活空间的补充, 是城市中不同类型、不同性质和规模各类绿色设施构建而成的一个稳定持久的城市绿色环境体系(李锋和王如松, 2006)。然而, 在城市规划与建设实践中, 城市绿地系统规划工作的重点是对城市建设用地内的绿地(G类)以及其他各类城市建设用地中的附属绿地提出规划要求, 而且城市绿色空间发展战略中“生态优先”这一规划指导与规划实践仍然存在着差距, 导致城市绿色生

中文引用格式: 胡腾云, 李雪草, 宫鹏, 喻文承, 黄晓春. 2020. 北京市平原造林遥感监测与未来空间适宜性评价模拟. 中国科学: 地球科学, 50(10): 1455–1467, doi: 10.1360/SSTe-2019-0286

英文引用格式: Hu T, Li X, Gong P, Yu W, Huang X. 2020. Evaluating the effect of plain afforestation project and future spatial suitability in Beijing. Science China Earth Sciences, 63(10): 1587–1598, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9636-0>

态景观多为生产、生活空间内见缝插针式的规划布局。绿色空间作为城市的有机组成部分,是土地利用类型中最具自然性质的用地,一直以来与城市发展保持着紧密联系(Hu等, 2016)。除了提供休憩与观赏功能,绿色空间还能够固存碳排放(刘竹等, 2018)、调节空气质量、缓解城市热岛效应(Yang等, 2019; Huang和Wang, 2019)、维护生物多样性(Cao等, 2010; Clinton和Gong, 2013)。但目前对绿色空间在提升城市环境质量和保障区域生态安全的认识上相对不足,特别缺少对绿色空间动态性的生态系统服务评估(陶宇等, 2013; 曹世雄等, 2018; Huang等, 2019)。

城市绿色空间在调节城市人居和生态环境上有重要作用,因此被学界广泛研究和关注。绿色植被的生长状况以及景观格局是衡量和刻画绿色空间对生态系统服务调节作用的重要指标(Lee等, 2016; Maimaitiyiming等, 2014; Middel等, 2015; Wu等, 2016; 史宝刚等, 2018; 徐文彬等, 2017)。Zhou和Wang(2011)发现在城市绿色空间发展的过程中,农地是主要的被侵占来源,且这种发展方式往往会形成空间上比较破碎的绿色空间景观。Li等(2005)也提出绿色空间的景观及生态特征是发展城市绿色系统规划的重要指标之一。Bowler等(2010)认为除了要考虑绿色空间的景观格局之外,绿色空间本身的生长状况也是缓解和适应城市热岛、维持城市生物多样性的重要影响因素。例如,长势较好的绿色空间往往能更好地发挥植被的冷却效果,从而降低城市热岛对居住环境的影响(贾宝全和仇宽彪, 2017; 王芳和葛全胜, 2012)。除了对城市生态环境的影响,绿色空间的布局和植被的生长状况还会间接影响公众健康,例如净化空气质量(Gong等, 2012; Kondo等, 2018; Wolch等, 2014; 李强和顾朝林, 2015)。在国土空间全域规划背景下,开展科学的城市绿色空间监测和评价研究对于改善区域生态环境、加强绿色空间规划水平以及提升城市人居环境等具有重要现实意义(林晗和雪娅, 2018)。通过理解人-环境相互作用方向,揭示城市绿色空间动态变化规律,预估其未来发展趋势的基础(匡文慧等, 2017; 陈发虎等, 2019)。2012年初,北京市政府针对平原区林少、生态与环境问题严重的现实,规划并启动了北京市“百万亩平原造林”工程,旨在优化北京生态格局、改善城区周边生态环境质量、解决水资源短缺等问题。2012~2016年间造林工程对北京市平原地区生态文明起到了重要作用,也

一定程度有效提升了市民的生活水平,截止2017年,已累计完成平原地区造林117万亩,北京市平原森林覆盖率从2011年的14.85%提升到27.81%(佟文聪, 2019)。2018年1月,《北京市新一轮百万亩造林绿化行动计划》审议通过,提出到2020年,在北京的浅山区、平原区和中心城区再造100万亩城市森林,以期提升北京城市总体绿量、推动城乡生态一体化进程。

在城市绿色空间建设中,除了前期科学规划建设以外,很重要的一项内容就是后期建设效果的评估,这既可以全面了解工程建设所取得的成效,还可以发现问题与不足,为后期的完善提供参考。北京市“百万亩平原造林”工程成效如何?在土地有限、农业、城市建设和生态用地矛盾突出的情况下,如何解决在什么地方建设绿色空间?都是政府和公众关注的问题。本研究旨在针对绿色空间在城市规划中的关键问题,以北京市“百万亩平原造林”工程为例,利用长时序遥感影像观测绿色空间随时间变化的生长状态,识别区域内绿色空间生长、空间范围及景观格局的演替情况,对工程实施情况开展量化观测及评估,并在此基础上提出预测新一轮“百万亩平原造林”空间布局的模拟方法,以期在城市绿色空间规划提供多方案比选的量化支撑。

2 研究数据

研究数据主要是通过遥感和地理信息系统获取并处理。相比于其他城市建筑设施,绿色空间具有明显的季节变化特征从而反映为不同的绿色空间景观。因此研究选择空间分辨率适中、时间频度较高且连续的遥感影像作为监测绿色空间动态生长的主要数据源(董金玮等, 2018)。研究采用美国陆地卫星(Landsat)系列卫星影像,其空间分辨率为30m,重返观测周期为16天,具备构建多年长时序遥感观测绿色空间动态的能力。研究选择自2013年发射至今的Landsat 8卫星影像。使用完整覆盖北京市域的两景Landsat影像区域,并下载了自2013~2018年共336景Landsat遥感影像时间序列数据,其对应的年份及年内时段分布见图1。可以发现,大部分年份具有足够多的年内观测,特别是在春天和夏天所获取的影像,其植被生长状况在年内最为突出。

本研究还涉及其他规划数据及地理空间数据,用

图 1 研究采用的Landsat遥感数据时间分布
每个圆点代表获取影像的时间

于辅助理解城市绿色空间及其动态变化特征。相关数据的组织、管理和应用主要通过地理信息系统实现(表1)。根据林业和规划部门实地测量所得到的林地斑块数据发现,北京第一期造林工程新增造林图斑块共10807个,且多数为中小型林地斑块。多数林地斑块分布在北京中心城外围,最小的造林地斑块面积 5.25m^2 ,最大的林地斑块面积323.08公顷,平均造林斑块面积为7公顷。其中造林斑块中面积大于10公顷的斑块个数约为20%,面积大于50公顷的斑块个数仅有161个,占平原造林新增林地面积的70%以上,其空间分布见图2。

3 方法

为了达到评估北京市百万亩一期造林工程的生态效益,总结规律并对第二期造林工程的空间适宜性进行评价的目的,研究工作主要从以下三个方面展开(图3)。首先,对Landsat时间序列(2012~2018年)进行预处理,主要包括构建云掩模并通过逐年的植被生长指数反映造林工程绿色空间的生长状况,利用Google Earth

图 2 北京市一期平原造林面积大于50公顷的林地斑块分布

Engine(GEE)云平台开展计算分析(Gorelick等, 2017)。GEE作为目前主流的云计算平台,能够方便地实现对海量遥感数据的存储、管理和分析。其次,对一期平原造林的效果进行评价,结合遥感影像时间序列数据,对造林工程中绿色空间生长的变化趋势和林地斑块的空间分布进行了量化评估,总结最大化造林工程生态效益的特征指标。最后,基于上述评价工作所得到的认识规律,模拟二期造林工程新增林地斑块适宜的空间分布范围。

3.1 Landsat时间序列处理

绿色空间的生长状况可以通过植被生长指数刻画。基于遥感影像,通过计算归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),定量评估植被

表 1 本研究采用的数据及来源

数据类型	数据名称	数据来源
空间数据	各级区县	国家基础地理信息中心
	北京市绿化隔离区	北京市城市规划设计研究院
	平原造林区	北京市林业勘察设计院
	基本农田	北京市规划和自然资源委员会
现状数据	土地利用	2016年北京市用地现状
	地形	坡度
规划数据	土地利用	2016年北京市域规划图

图3 本研究整体框架

(a) Landsat遥感影像时间序列处理; (b) 一期平原造林评价; (c) 二期平原造林空间模拟

的生长状况(Franklin等, 2011), 其物理机制表现为植被在近红外和红光波段的光谱反应存在着差异, 具体见式(1)。考虑到影像获取时间的天气差异、不同植被物候以及轮耕农田等因素对构建的植被指数时间序列的影响, 采用最大值组合(maximum value composition, MVC)构建逐年的NDVI时间序列数据式(2)(Huang等, 2017)。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}), \quad (1)$$

$$\text{NDVI}_t^{\max} = \max \text{NDVI}_{t,i}, \quad (2)$$

式中, NIR是Landsat遥感影像所获取的近红外波段, RED是红外波段(Roy等, 2014)。NDVI_{t,i}是目标年份(*t*)多时相(*i*)遥感影像所得到的植被生长指数。

为了分析绿色空间最大植被生长指数NDVI_{max}逐年的变化情况, 利用一元线性回归分析模拟绿色空间的生长变化趋势(式(3)), 获取绿色空间植被生长状况的变化特征(刘爽和宫鹏, 2012)。

$$\text{NDVI}_t^{\max} = b \times t + a, \quad (3)$$

式中, *a*代表在研究时段内的初始植被生长状况(即截距), *b*代表绿色植被逐年的变化特征(即斜率)。若绿色空间生长状况增强, 其斜率大于0; 反之, 其斜率小于0。

3.2 一期平原造林评价

3.2.1 植被生长的长期趋势

为了研究“百万亩平原造林”工程期间(2013~2018年)林地斑块生长状况的变化, 以2012年为起始基准年, 比较起始年之后逐年的斑块内平均最大植被生长

指数, 并计算其相对变化率(图4和式(4))。

$$\text{Ratio}_t = \frac{(E_t - E_{\text{base}})}{E_{\text{base}}}, \quad (4)$$

式中, Ratio_{*t*}为造林斑块的植被生长指数的变化率, NDVI_{base}为基准年份(2012年)林地斑块的植被生长指数, 表示绿色空间初始生长状况, NDVI_{*t*}为基准年份之后逐年林地斑块的植被生长指数, *t* > 2012。

以“百万亩平原造林”工程中面积超过50公顷的林地斑块为主要分析对象, 以2012年造林初期各林地斑块绿色空间的植被生长指数为基准, 计算林地斑块逐年的生长变化速率。根据林地斑块内绿色空间植被生长指数的变化趋势, 利用自然断点法(natural break)将这些斑块分为绿色空间生长状况持续减弱(Ratio_{*t*} ∈ (−, −0.01])、相对稳定(Ratio_{*t*} ∈ (−0.01, 0.01))以及持续增强(Ratio_{*t*} ∈ [0.01, ~))等3个类型。

3.2.2 造林斑块的空间异质性

根据造林工程斑块内绿色空间的长势, 研究对不同类型的新增林地斑块内的植被生长状况进一步的分析。通过分析斑块内植被生长指数的空间一致性可以发现: 造林工程导致生长状况持续减弱的30个林地斑块在2012年斑块内绿色空间植被生长指数较高、斑块内空间异质性较小, 且其植被生长指数主要集中于0.6~0.8(图5a), 说明2012年前植被生长情况良好且匀质分布。而对于造林工程导致绿地持续增强的33个林地斑块在2012年斑块内绿色空间植被生长指数较低、斑块内空间异质性较大, 在2012年前这些林地斑块内

图 4 基于斑块的绿度变化率示意图

绿色空间植被生长指数跨度为0.2~0.8(图5b), 说明斑块间及斑块内部植被生长情况差异很大, 且这些斑块整体生长状况不高、植被生长状况良莠不齐。典型的造林斑块植被生长变化特征可以参见图6。

3.3 二期平原造林空间模拟

综合第一期平原造林工程实施过程监测及绿色空间的植被生长状况变化, 在定量评估造林用地的空间适宜性对实现造林空间生态价值最大化的基础上, 构建城市绿色空间生长适宜性评价变量, 模拟第二期“百万亩造林工程”中新增绿色空间分布, 指导绿色空间规划的建设实施(图7)。相比于传统的基于逐像元的模拟和评价方法, 研究提出了基于对象的模拟方法; 同时, 在评价造林空间适宜性上, 研究从空间分布格局、初始生长状态、动态生长趋势及特殊地类约束等方面进

行了系统的评价。

3.3.1 模型模拟单元

利用对象分割方法, 采用分水岭算法(watershed)在研究范围内生成形状不规则、内部匀质的斑块单元, 满足绿色空间斑块的特征(孙亚杰等, 2005; Wang等, 2012), 以此作为绿色空间布局预测模型的基本单元。分水岭算法是基于图像灰色空间的分割算法, 通过对图像灰度特征的识别, 寻找局部灰度值的极低和极高的像元并构成分水岭线, 这些分水岭线互相联结从而构建具体的分割单元。将北京市域范围内2018年最大植被生长指数(30m分辨率)的栅格图像作为输入, 进行分水岭分割算法运算, 结果如图8所示。所获得的斑块尺度适中, 且斑块内局部的绿色空间植被生长状态相似, 因而可作为新一期平原造林空间预测的模拟单元(Li等, 2017)。

3.3.2 空间适宜性评价

平原造林的适宜性受到地形地貌、土壤、土地利用、树种、气候等多种要素的影响。考虑到造林斑块本身尺度较小、空间分布较为离散, 以及上述数据的可获取性和分辨率, 本研究中模拟的空间适宜性主要从林地景观和绿色空间时空差异这两个方面进行评

图 5 一期造林工程林地斑块2012年初始绿色空间植被生长指数特征

(a) 造林后绿度持续减弱的林地斑块(共30个); (b) 造林后绿度持续增强的林地斑块(共33个)

图6 典型林地斑块造林前后绿色空间生长状况变化

图7 平原造林空间模拟整体框架

(a) 模拟单元; (b) 模型变量

价. 具体评价指标包括.

(1) 空间格局. 新增林地斑块之间及其与现有林地

斑块间的距离是空间布局模拟的重要变量之一. 根据绿色空间均衡分布的原则, 以第一期造林工程的林地斑块为基准, 提取各模拟评价单元(图7)到已有邻近斑块间的距离, 从而获得研究范围内到现状林地斑块间的距离梯度(图9a)和式(5).

$$P_{\text{patch}} = 1 - D_{\text{patch}}, \quad (5)$$

式中, P_{patch} 表示模拟斑块单元针对距离变量开展平原造林的适宜性, D_{patch} 表示模拟斑块单元到已有最邻近林地斑块间的距离.

(2) 初始状态. 绿色空间初始生长状况对造林工程的效益有重要作用, 根据第一期造林工程的实施评价, 初始生长状况较低、生长条件较差、斑块内部植被生长差异较大的林地斑块经过造林工程实施后, 区域绿色空间生长状况有明显提高. 在对模拟斑块内绿色空间初始状态表征方面, 设置了绿色空间初始覆盖比例、绿色空间初始生长状况、绿色空间初始内部异质性等三个变量.

绿色空间初始覆盖比例(图9b)通过计算模拟单元内初始(2018年)绿色空间的面积比(式(6))表示. 林地斑块内已有绿色空间面积越大, 其作为新一轮平原造林工程选址的适宜性越小.

图 8 基于2018年最大植被生长指数的分水岭分割结果

图 9 新增林地斑块适宜性评价变量

(a) 林地斑块间距离梯度分异; (b) 林地斑块绿色空间初始覆盖比例; (c) 林地斑块绿色空间初始生长状况分布; (d) 林地斑块绿色空间初始内部异质性分布; (e) 斑块内绿色空间生长趋势分布; (f) 基本农田分布(约束地类)

$$W_{\text{patch}} = 1 - \frac{A_{\text{forest}}}{A_{\text{patch}}}, \quad (6)$$

式中, W_{patch} 表示模拟斑块单元针对初始覆盖比例变量而适宜开展造林工程的适宜程度, A_{forest} 和 A_{patch} 分别表示斑块内现有绿色空间面积和斑块总面积。

绿色空间初始生长状况(图9c)通过计算模拟单元内初始(2018年)绿色空间的最大植被生长指数表示(式(7)), 林地斑块内绿色空间的初始植被生长指数越大, 其作为新一轮平原造林工程选址的适宜性越小。

$$\text{NDVI}_{\text{patch}} = 1 - \text{BNDVI}_{\text{max}}, \quad (7)$$

式中, $\text{NDVI}_{\text{patch}}$ 表示模拟斑块单元针对绿色空间初始生长状况变量而开展造林工程的适宜性表征,

$\text{BNDVI}_{\text{max}}$ 表示2018年绿色空间植被生长指数。

绿色空间初始内部异质性(图9d)用斑块内反映植被生长状况的 NDVI_{max} 的异质性表示(式(8)), 绿色空间生长异质性越大的斑块因其在造林之后植被生长状况及生态系统服务价值明显增加, 其作为新一轮平原造林工程选址的适宜性越大。

$$\text{NDVI}_{\text{d}} = \text{NDVI}_{75\text{th}} - \text{NDVI}_{25\text{th}}, \quad (8)$$

式中, NDVI_{d} 表示模拟斑块单元针对斑块内植被生长状况异质性变量而开展造林工程的适宜性, $\text{NDVI}_{75\text{th}}$ 和 $\text{NDVI}_{25\text{th}}$ 是斑块内 NDVI_{max} 在75%和25%分位数水平下的值。

(3) 生长趋势。绿色空间的生长呈现明显的季节性

和年际变化特征. 将2012~2018年间最大植被生长指数的变化斜率SLOPE表示其生长变化趋势(图9e), 斜率越高说明绿色空间所处条件(如温度、水分、土壤等)适合植被生长, 则斑块内绿色空间作为新一轮造林工程选址的适宜性越高.

(4) 其他地类约束. 根据《北京市土地利用总体规划(2006~2020)》中提取的基本农田范围作为新一轮造林工程的约束地类, 即不允许侵占基本农田开发林地(图9f). 模拟过程中提高了目前工矿、违建等低效用地开展造林工程的适宜性, 即优先考虑将该类用地斑块纳入新一轮造林中.

3.3.3 空间布局分配模拟

新一轮造林工程的林地空间分布基于模拟斑块单元, 在综合各变量后计算市域范围内适宜开展平原造林的适宜性(式(9)):

$$P = P_{\text{patch}} \times W_{\text{patch}} \times \text{NDVI}_{\text{patch}} \times \text{NDVI}_d \times \text{SLOPE}, \quad (9)$$

式中, P 为模拟斑块单元适宜开展平原造林的适宜性, P_{patch} 为模拟单元对现有林地斑块距离的适宜性, W_{patch} 表示模拟斑块单元针对初始覆盖比例变量而适宜开展造林工程的适宜性, $\text{NDVI}_{\text{patch}}$ 代表模拟斑块单元针对绿色空间初始生长状况变量而开展造林工程的适宜性, NDVI_d 表示模拟斑块单元针对斑块内植被生长状况异质性变量而开展造林工程的适宜性, SLOPE 代表模拟单元内植被生长状况变化趋势.

4 结果和讨论

4.1 一期造林实施评价结果分析

4.1.1 造林工程对土地利用的影响

借助地理信息工具和相关的辅助数据, 研究将造林工程中的林地斑块、2012年遥感影像解译的土地利用覆盖图, 以及《北京市土地利用总体规划(2006~2020)》中的基本农田保护区图层进行叠加(图10). 北京市一期平原造林工程共侵占耕地面积为40641公顷, 占造林总面积的41.51%. 其中一般耕地面积为39653公顷, 为被占耕地总面积比例的97.57%, 侵占基本农田(划入基本农田保护区的农田)面积为988公顷, 为被占耕地总面积比例的2.43%. 所占用基本农田空间主要分布在昌平、大兴、通州、顺义、房山等

图10 北京市一期平原造林工程中土地利用变化情况

区, 这些区域的耕地空间形态较集中, 具有现代农业生产与发展的条件. 表2为造林工程中161个面积超过50公顷的林地斑块的土地利用来源, 其中126个林地斑块的土地利用来源于耕地. 近十年, 北京社会经济发展迅速, 城市建设扩张发展也带来了土地利用结构与布局方式的改变, 区域对建设用地的需求在增加, 由此产生了建设用地对农用地、林地等侵占现象(Li等, 2015). 2012年随着“百万亩平原造林”的开展, 林地也成为了侵占耕地资源的来源.

4.1.2 造林工程中不同生长状况变化特征

研究重点分析了161个面积超过50公顷的造林新增林地斑块在造林工程前后的生长状况变化率, 约有30个斑块在2012年以后变化率 $\text{Ratio} \leq -0.01$, 即斑块内绿色空间生长状况逐年持续减弱(图11a); 约33个斑块的变化率 $\text{Ratio} > 0.01$, 即斑块内绿色空间生长状况持续增强(图11b); 约98个斑块变化率范围 $-0.01 < \text{Ratio} \leq 0.01$, 说明斑块内绿色空间平均生长状况相对稳定(图11c).

进一步分析造林工程后绿色空间生长状况持续减弱的33个林地斑块特征. 从以生长指数变化为主要特

表 2 面积超过50公顷林地斑块土地利用来源

土地利用来源	斑块个数
耕地	126
林地	9
草地	7
裸地	6
建设用地	13

征的生态效益来看, 这33个斑块在造林工程之后绿色空间生长状况远不及造林工程前的初始状态, 这些斑块原则上不适宜开展造林工程的行为. 这些林地斑块的土地来源主要为耕地, 在30个绿色空间生长状况持续减弱的林地斑块中有29个斑块土地利用来源于耕地(表3), 造林工程中有必要思考占用耕地是否导致植被生长状态降低的问题.

4.2 二期造林模拟结果分析

4.2.1 二期造林斑块适宜性分析

根据林地斑块本身的空间格局、初始生长状态及动态生长趋势进行综合评价, 对北京市的林地斑块的空间适宜性进行了分析(图12). 可以发现, 二期造林空间适宜性较高的地区主要集中在北京市平原区及延庆区. 同时, 适宜性较高的斑块在空间上分布较为零散, 以避免二期造林地区过度集中在林地高度集聚的地区. 在产生的空间适宜性图中, 研究并不关注绝对的适宜性值, 而主要为比较林地斑块的相对适宜性大小, 从而开展未来造林区域的空间模拟.

4.2.2 二期造林斑块空间模拟

根据已获取的新增林地斑块的适宜性评价分布(图12), 对新一轮造林工程的林地斑块进行空间分配. 除了考虑适宜性较高的斑块、排除特定政策下基本农

图 11 平原造林中绿色空间生长状况持续减弱(a)、持续增强(b)和相对稳定(c)的林地斑块逐年变化率分布

表 3 造林斑块(大于50公顷)绿色空间生长状况变化类型及其土地利用来源

斑块类型	耕地	林地	草地	裸地	建设用地	合计
持续减弱(-)	29	0	1	0	0	30
持续增强(+)	19	3	0	3	8	33
相对稳定	78	6	6	3	5	98
合计	126	9	7	6	13	161

图 12 二期造林新增林地斑块适宜性分布

图 13 平原造林工程布局模拟预测结果(a)及其在各区县的面积分布(b)

田的斑块外, 对不同的土地利用类型也有特定约束, 建设用地中不符合《北京城市总体规划(2016~2035)》规定的城市定位的用地类型(如低效工业用地等)、腾退土地(如仓储物流用地、待研究用地)等将优先考虑开展造林工程. 基于以上原则, 按照适宜性评价概率、约束地类限制及优先开发地类, 将新一轮的百万亩林地总量综合分配到具体的空间单元, 从而获得新一轮平

原造林工程空间布局结果(图13). 两期造林规模从空间分布上基本一致, 主要造林规模集中在通州区、大兴区、顺义区及各平原新城内. 这些区域不仅是城市建设的重点, 是加强绿色空间、建设宜居城市的重要区域, 也是遵循《北京城市总体规划(2016~2035年)》中重点实施平原区造林, 建设全市域绿色空间体系的具体表现. 对一期造林及二期模拟造林斑块进行景观网

络(landscape network)分析, 将每一个林地斑块抽象为一个节点(node), 其与周围斑块的连接表达为交错的景观网络(links). 节点等级(node degree)是斑块面积的对数与周边链接林地斑块个数的乘积(Foltête等, 2012; Hu等, 2019). 通过对两期造林斑块的景观网络叠加, 模拟的第二期平原造林斑块能够很好地实现与一期已有林地斑块的空间互补(图14). 研究对第二期造林工程的空间模拟策略可以使得林地斑块在空间布局上更加均衡, 从而最大化地发挥林地的生态环境效益, 同时也尽量保留现有生产力高, 比较肥沃的农用耕地.

5 讨论

本研究综合利用多源数据, 评估城市绿色空间规划实施效益, 提出了绿色空间生长状况的动态评估方法; 相较于传统的静态评估, 该方法考虑了植被生长状况的长时序变化特征及未来发展趋势, 实现对绿色空间相关工程实施的动态评估及发展趋势的预测. 在对绿色空间实施评估的基础上, 从绿色空间斑块距离分异、初始条件、生长年际变化规律以及规划政策约束等方面, 探索预测城市绿色空间相关工程的空间布局的模拟方法, 为城市绿色空间规划提供多方案比选的量化支撑方法.

当前, 围绕北京平原造林的相关研究主要以政策分析和理论探讨为依托, 而科学定量评价方面的研究相对缺乏. 平原造林工程作为系统性的生态工程, 自开展以来受到了广泛的讨论和研究, 包括从宏观的战略思考(王成, 2012; 陈宇等, 2015)到更为微观具体的规划实施(吴田田, 2014; 贾宝全和仇宽彪, 2017), 再到后续造林生态效应的评价(冯雪等, 2016; 唐秀美等,

2016). 然而, 这些研究往往以定性评价和经验分析为主, 缺乏详实精准的观测资料, 特别是基于遥感观测的时间序列数据的佐证. 在本研究中, 我们基于具体的造林斑块, 从植被长势和景观网络这两个方面对一期造林工程进行了评价, 并对二期百万亩造林工程的空间适宜性进行了评价. 所提出的空间适宜性评价模型可以较好地实现林地斑块的均衡布局, 避免了过于“扎堆”, 可以最大化地发挥绿地系统在调节区域城市热岛、空间净化等方面的作用. 通过基于遥感的统计资料, 我们评价了造林斑块植被长势的变化, 可以实现有针对性地林地选择和实施策略. 需要指出的是, 本研究中用了植被的长势作为衡量植被调节生态环境和空间的主要指标, 但该指标未必能很好地反映系统的生态价值及货币化评价(唐秀美等, 2016). 未来, 可以引入更加系统化的生态效益评价指标以更好地指导城市绿地规划. 当前, 北京市一期造林工程的主要树种仍然是以常见的观叶树种为主, 依托于树种的更加详尽的生态效益评价也需要纳入到未来的评价体系中(王岩等, 2014).

鉴于城市绿色空间和城市建设之间互动的复杂性、长期性, 随着中国空间规划发展思路的逐步深入, 绿色空间的多维度监测与评价更加重要. 在研究尺度方面, 将研究范例推广到区域乃至全国主要城市, 进一步探讨不同发展水平的城市增长与绿色空间格局的关系, 从而加深对城市发展与绿色空间相互关系及作用机制的客观理解; 在规划研究和实施技术支撑方面, 对未来城市绿色空间建设实施的分布模拟中, 可纳入多源数据对规划实施建设的监测, 以丰富实施评价及空间预测的量化指标, 验证模拟精度, 增强实际监测及量化模拟对规划决策的支撑.

图 14 两期平原造林工程林地斑块的空间分布格局

6 总结

以北京“百万亩平原造林”工程为例,以长时序植被生长指数及其变化率反映林地斑块的生长状况及变化趋势。发现第一期“百万亩平原造林”中存在部分林地斑块植被生长状况降低的情况。对于初始绿色空间生长基础较好、内部植被空间异质性小的斑块,造林工程可能会打破其已有的生长平衡,导致斑块内植被生长状况下降;造林工程对优质耕地的大规模侵占破坏了区域农业用地的景观格局的连通性和聚集度,也会造成植被生长状况降低。这些影响因子分析也对下一步城市绿色空间规划提供借鉴。

基于对“百万亩平原造林”工程中绿色空间生长状况变化监测及现状归因分析,设计了新一轮造林工程空间布局模拟的定量预测方法。模拟过程中考虑林地斑块空间连接的特点,采用分水岭分割斑块为模拟单元;将林地斑块间空间格局分布、斑块内绿色空间初始状态(覆盖比例、生长状况、内部异质性)以及斑块内绿色空间动态生长趋势等变量作为新增林地斑块适宜性评价的因子;将基本农田作为约束发展新增林地的限制用地类型,而城市低效、腾退用地作为优先发展新增林地的用地类型。对第二期“百万亩平原造林”布局模拟的预测结果显示,造林规模主要集中在各平原新城内,在维护北京生态涵养区内现有林地基础上,应避免大规模人为干扰,加强涵养区内耕地的保护。

参考文献

曹世雄,刘玉洁,苏蔚,郑鑫怡,余中洪. 2018. 中国陆地生态系统服务净价值评估. 中国科学: 地球科学, 48: 331-339

陈发虎,傅伯杰,夏军,吴锋,吴绍洪,张镱锂,孙航,刘禹,方小敏,秦伯强,李新,张廷军,刘宝元,董治宝,侯书贵,田立德,徐柏青,董广辉,郑景云,杨威,王鑫,李再军,王飞,胡振波,王杰,刘建宝,陈建徽,黄伟,侯居峙,蔡秋芳,隆浩,姜明,胡亚鲜,冯晓明,莫兴国,杨晓燕,张东菊,王秀红,尹云鹤,刘晓晨. 2019. 近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1659-1696

陈宇,佟跃,张磊. 2015. 国内外城市森林建设对北京平原造林工程的借鉴. 国土绿化, 5: 42-43

董金玮,匡文慧,刘纪远. 2018. 遥感大数据支持下的全球土地覆盖连续动态监测. 中国科学: 地球科学, 48: 259-260

方创琳,高倩,张小雷,程卫国. 2019. 城市群扩展的时空演化特征及对生态环境的影响——以天山北坡城市群为例. 中国科学: 地球

科学, 49: 1413-1424

冯雪,马履一,蔡宝军,段劼,贾黎明,贾忠奎,王金增. 2016. 北京平原百万亩造林工程建设效果评价研究. 西北林学院学报, 31: 136-144

贾宝全,仇宽彪. 2017. 北京市平原百万亩大造林工程降温效应及其价值的遥感分析. 生态学报, 37: 726-735

匡文慧,杨天荣,刘爱琳,张弛,陆灯盛,迟文峰. 2017. 城市地表覆盖结构组分与热环境调控模型(EcoCity)研究——以北京城市为例. 中国科学: 地球科学, 47: 847-859

李锋,王如松. 2006. 城市绿色空间服务功效评价与生态规划. 北京: 气象出版社

李强,顾朝林. 2015. 城市公共安全应急响应动态地理模拟研究. 中国科学: 地球科学, 45: 290-304

刘竹,关大博,魏伟. 2018. 中国二氧化碳排放数据核算. 中国科学: 地球科学, 48: 878-887

林晗,雪娅. 2018. 人居,人居环境和人的城市. 科学通报, 63: 14-15

刘爽,宫鹏. 2012. 2000-2010年中国地表植被绿度变化. 科学通报, 57: 53-64

史宝刚,尹海伟,孔繁花. 2018. 南京市新街口地区垂直绿化发展潜力评价. 应用生态学报, 29: 1576-1584

孙亚杰,王清旭,陆兆华. 2005. 城市化对北京市景观格局的影响. 应用生态学报, 16: 1366-1369

唐秀美,潘瑜春,高秉博,鄧允兵. 2016. 北京市平原造林生态系统服务价值评估. 北京大学学报(自然科学版), 52: 274

陶宇,李锋,王如松,赵丹. 2013. 城市绿色空间格局的量化方法研究进展. 生态学报, 33: 2330-2342

佟文聪. 2019. 北京平原造林建设存在问题及推进新一轮百万亩造林绿化的相关建议. 北京园林, 2: 3-8

王成. 2012. 北京平原区造林增绿的战略思考. 中国城市林业, 10: 7-11

王芳,葛全胜. 2012. 根据卫星观测的城市用地变化估算中国1980-2009年城市热岛效应. 科学通报, 57: 73-80

王岩,王玉玲,张金全,李云,李颖岳. 2014. 北京市平原造林常见观叶树种抗寒性的比较. 植物生理学报, 8: 1223-1226

吴田田. 2014. 以通州区平原造林为例谈营造北京平原地区大尺度森林景观. 农业科技与信息(现代园林), 11: 19-26

徐文彬,尹海伟,孔繁花. 2017. 基于生态安全格局的南京都市区生态控制边界划定. 生态学报, 37: 4019-4028

Bowler D E, Buyung-Ali L, Knight T M, Pullin A S. 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landsc Urban Plan*, 97: 147-155

Cao X, Onishi A, Chen J, Imura H. 2010. Quantifying the cool island intensity of urban parks using aster and Ikonos data. *Landsc Urban Plan*, 96: 224-231

Clinton N, Gong P. 2013. Modis detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. *Remote Sens Environ*, 134:

- 294–304
- Franklin S E, He Y, Pape A, Guo X, McDermid G J. 2011. Landsat-comparable land cover maps using aster and spot images: A case study for large-area mapping programmes. *Int J Remote Sens*, 32: 2185–2205
- Foltête J C, Clauzel C, Vuidel G. 2012. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environ Model Softw*, 38: 316–327
- Gong P, Liang S, Carlton E J, Jiang Q, Wu J, Wang L, Remais J V. 2012. Urbanisation and health in China. *Lancet*, 379: 843–852
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. 2017. Google Earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens Environ*, 202: 18–27
- Hu T, Huang X, Li X, Liang L, Xue F. 2019. Toward a better understanding of urban sprawl: Linking spatial metrics and landscape networks dynamics. In: Geertman S, Zhan Q, Allan A, Pettit C, eds. *Computational Urban Planning and Management for Smart Cities*. CUPUM 2019. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Cham
- Hu T, Yang J, Li X, Gong P. 2016. Mapping urban land use by using Landsat images and open social data. *Remote Sens*, 8: 151
- Huang H, Chen Y, Clinton N, Wang J, Wang X, Liu C, Gong P, Yang J, Bai Y, Zheng Y, Zhu Z. 2017. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sens Environ*, 202: 166–176
- Huang X, Wang Y. 2019. Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 152: 119–131
- Huang X, Han X, Ma S, Lin T, Gong J. 2019. Monitoring ecosystem service change in the City of Shenzhen by the use of high-resolution remotely sensed imagery and deep learning. *Land Degrad Dev*, 30: 1490–1501
- Kondo M C, Fluehr J M, McKeon T, Branas C C. 2018. Urban green space and its impact on human health. *Int J Environ Res Public Health*, 15: 445
- Lee H, Mayer H, Chen L. 2016. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landsc Urban Plan*, 148: 37–50
- Li F, Wang R, Paulussen J, Liu X. 2005. Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: A case study in Beijing, China. *Landsc Urban Plan*, 72: 325–336
- Li X, Gong P, Liang L. 2015. A 30-year (1984–2013) record of annual urban dynamics of Beijing city derived from Landsat data. *Remote Sens Environ*, 166: 78–90
- Li X, Gong P, Yu L, Hu T. 2017. A segment derived patch-based logistic cellular automata for urban growth modeling with heuristic rules. *Comput Environ Urban Syst*, 65: 140–149
- Maimaitiyiming M, Ghulam A, Tiyp T, Pla F, Latorre-Carmona P, Halik Ü, Sawut M, Caetano M. 2014. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 89: 59–66
- Middel A, Chhetri N, Quay R. 2015. Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods. *Urban Forry Urban Greening*, 14: 178–186
- Roy D P, Wulder M A, Loveland T R, Curtis E W, Allen R G, Anderson M C, Helder D, Irons J R, Johnson D M, Kennedy R, Scambos T A, Schaaf C B, Schott J R, Sheng Y, Vermote E F, Belward A S, Bindaschadler R, Cohen W B, Gao F, Hipple J D, Hostert P, Huntington J, Justice C O, Kilic A, Kovalsky V, Lee Z P, Lymburner L, Masek J G, McCorkel J, Shuai Y, Trezza R, Vogelmann J, Wynne R H, Zhu Z. 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sens Environ*, 145: 154–172
- Wang L, Gong P, Ying Q, Yang Z, Cheng X, Ran Q. 2012. Settlement extraction in the North China Plain using Landsat and Beijing-1 multispectral data with an improved watershed segmentation algorithm. *Int J Remote Sens*, 31: 1411–1426
- Wolch J R, Byrne J, Newell J P. 2014. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough’. *Landsc Urban Plan*, 125: 234–244
- Wu Z, Kong F, Wang Y, Sun R, Chen L. 2016. The impact of greenspace on thermal comfort in a residential quarter of Beijing, China. *Int J Environ Res Public Health*, 13: 1217
- Yang Q, Huang X, Tang Q. 2019. The footprint of urban heat island effect in 302 Chinese cities: Temporal trends and associated factors. *Sci Total Environ*, 655: 652–662
- Zhou X, Wang Y C. 2011. Spatial-temporal dynamics of urban green space in response to rapid urbanization and greening policies. *Landsc Urban Plan*, 100: 268–277

(责任编辑: 李新)