

DOI: 10.5846/stxb202005281379

吕英烁, 王瑶函, 郑曦. 基于 SWAT 模型的北京平原区森林景观格局对雨洪减缓的影响研究. 生态学报, 2021, 41(10): 4036-4051.

Lü Y S, Wang Y H, Zheng X. Influence of forest landscape pattern on flood mitigation in Beijing Plain based on SWAT model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4036-4051.

基于 SWAT 模型的北京平原区森林景观格局对雨洪减缓的影响研究

吕英烁, 王瑶函, 郑 曦*

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要: 景观格局及其变化是影响地表径流及空间分布的重要因素, 也是管理城市雨洪、治理生态环境的途径。以北京市平原区百万亩造林项目为背景, 选取第一轮造林时间(2011、2013、2015、2017 年)的遥感数据, 以三环、五环、六环路为界, 将平原区划分为核心区、中心区、近郊区、远郊区四个区域, 分别分析整体及分区林地景观格局的变化。运用 SWAT 模型模拟不同格局对不同区域暴雨径流的影响, 探究影响径流变化的主导林地景观指数。研究发现: 1) 平原区林地面积呈增长趋势, 增幅为 12.96%。除核心区 and 中心区的部分地区外, 林地斑块更聚集、形状更复杂。2) 百万亩造林工程对平原区雨洪风险的减缓有积极作用, 但受城市建设及人类活动的影响, 不同区域造林对径流的减缓强度与建设扩张的影响强度大小关系略有不同。核心区、中心区造林对径流的减缓强度大于建设扩张对径流的副作用, 径流总量减小, 减少比例为 1.98%、4.29%。而近郊区、远郊区相反, 径流总量变大, 增大比例为 0.09% 与 6.82%, 其中远郊区建设扩张的强度是影响平原区径流风险的主导原因。3) 不同区域雨洪减缓的关键性林地景观指数不同。核心区径流的主导林地因子为斑块数量与形状因子, 中心区为面积因子, 近郊区为聚合度因子和形状因子, 远郊区为面积与聚合度因子。主导林地因子的大小调控将更高效的减缓雨洪风险。本研究通过 SWAT 模拟分析得到第一轮造林期间平原区森林格局与径流特征的空间变化及各区域径流减缓的关键性林地因子, 为第二轮造林提高雨洪减缓功效提供参考。

关键词: 森林景观格局; 北京平原区百万亩造林; 雨水径流量; 雨洪风险; SWAT 模型

Influence of forest landscape pattern on flood mitigation in Beijing Plain based on SWAT model

LÜ Yingshuo, WANG Yaohan, ZHENG Xi*

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The landscape pattern and its change are important factors affecting surface runoff and spatial distribution and are also an approach of managing urban rainfall flood and governing ecological environment. Taking one million mu of afforestation project in the plain area, Beijing as the background, the remote sensing data during the first round of afforestation time (2011, 2013, 2015, and 2017) were selected in this paper. Defining the Third Ring Road, the Fifth Ring Road and the Sixth Ring Road in Beijing as the boundary, the plain area was divided into core area, central area, suburban area, and outer suburban area for analyzing the changes of landscape pattern of the whole forest land and the partitioned forest land, respectively. SWAT model was used to simulate the impacts of different patterns on storm runoff in different regions, and explore the dominant forestland landscape index affecting runoff change. The results show that 1) the forestland area in plain area presents an increasing trend, with an increase of 12.96%. Apart from some parts in the core

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD11004021)

收稿日期: 2020-05-28; 网络出版日期: 2020-11-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhengxi@bjfu.edu.cn

area and the central area, the forestland patches are more concentrated and more complex in shape. 2) One million mu of afforestation project plays a positive role in reducing the risk of rainfall flood in the plain area. However, due to the influence of urban construction and human activities, the effecting intensity of afforestation and construction expansion on the runoff mitigation in different areas are slightly different. The effecting intensity of afforestation on runoff mitigation in the core area and central area is greater than the side effect of construction expansion on runoff, which is manifested as the case that the total runoff decreased, with the proportions of 1.98% and 4.29%, respectively. However, the situation is just on the contrary in the suburban area and outer suburban area; the total runoff increased by 0.09% and 6.82%. The intensity of construction expansion in the outer suburbs is the main factor affecting the runoff risk in plain areas. 3) The key forest landscape indices for different regions are different. The dominant forestland factors of runoff in core area are the number factors of patches and the shape factor; that for the central area is area factor; those for the suburban area are aggregation factor and shape factor; and those for the outer suburban area are area factor as well as aggregation factor. The control of dominant forestland factors will reduce the risk of rainfall flood more efficiently. In this study, through SWAT simulation analysis, the spatial changes of forest pattern and runoff characteristics in the plain area and the key forestland factors for runoff mitigation in different areas during the first round of afforestation were obtained which provides reference for improving the effect of mitigating rainfall flood during the second round of afforestation.

Key Words: forest landscape pattern; Beijing plain afforestation; rainwater runoff; risk of flood; SWAT

北京市平原区是由永定河、潮白河等冲洪积物堆积形成的山前倾斜平原,呈现西北高、东南低的形态特点。随着《北京城市总体规划(2016—2035 年)》^[1]的发布,平原区成为首都社会经济发展的核心区域,分布着众多重要发展区域(顺义空港、北京经济技术开发区等)和发展新区(通州、顺义)。此外,由于平原地区受到首都核心功能区的辐射带动作用,形成了人口和产业的重点聚集区,所以其对于城市生态安全尤为重要。平原区的地势特点造成了山前地带坡度陡、径流量大的弊端,在强降雨条件下,会导致洪水迅速下泄,给中部与东南部造成了极大危险。同时城市建设和发展需求导致城市水系结构的功能衰退,加剧了洪水的威胁。为了北京城市的生态安全,开展北京平原区雨洪减缓的研究势在必行。

对于雨洪灾害的缓解,相关学者提出建立堤坝^[2]、加高河堤^[3]、加宽河道^[4]等传统工程性措施。但由于缺乏适宜的规划理念及宏观调控,只在局部减缓了一定的雨洪,并未提高区域整体的防洪韧性。除此之外,传统工程性措施还存在经济成本偏高、易造成生态系统破坏的缺点,不利于城市的可持续发展。因此,相关学者提出区域性的雨洪消减问题应采取全局的非工程性措施来优化绿色空间结构、降低雨洪风险。主要包括洪水脆弱性评估^[5-6]、洪水风险图绘制^[7]、预警系统建立^[8]、低影响开发^[9-10]、景观格局优化^[11-15]等措施。景观格局优化是指通过景观单元的空间结构与配置的变化,改变土地覆被,从而对土壤的下渗能力、地表蒸发量、树冠截留水量产生影响,改变水分在空间的重新分配,实现对雨洪的控制。这种方式被认为是实现多流域雨洪管理的有效而生态的方式。

研究表明,景观格局是影响地表径流和空间变化的重要因素。其中林地通过根系吸水和气孔蒸腾直接产生水文影响,也通过垂直方向的冠层结构和水平方向的群落宽度对下渗、产汇流等过程产生作用,所以林地景观格局对陆地水文过程有着重要调控作用^[16]。如 Verburg 等^[11]通过模拟景观指数导向下的最佳雨洪消减的空间布局,得出林地斑块的面积和形状会对子流域的径流产生影响。Wu 等^[17]利用地理加权回归模型分析了景观格局对深圳不同区域洪水灾害的影响程度,认为在海拔较低的建成区,林地聚集度的增加对洪涝灾害有减缓作用。Gao 等^[18]通过模拟造林过程中林地景观格局与水文特征的变化,发现造林时斑块适当分散,有利于根系对径流的截留与蒸腾作用。林炳青等^[19]采用 SWAT 模型模拟流域景观格局和水文过程,发现径流与景观格局相关性极大,林地面积的减少会降低流域对强降水的截留能力。目前景观格局对于雨洪特征的影响研究存在选取指数类型较单一、未合理划分研究区域等问题。因此需根据发展特征和相关政策的实施范围

进行合理的区域划分,通过不同类型景观指数与雨洪特征的分析,确定不同区域能高效发挥森林生态功效以减缓雨洪影响的景观格局因子。

目前水文模型大致分为集总式水文模型和分布式水文模型^[20]。分布式水文模型将流域按不同地形、土壤类型、土地利用,划分为若干个水文单元,适用于本次研究。目前探讨土地利用改变所导致的景观格局对径流特征影响的分布式模型应用较广泛的有 HEC (Hydrology Engineering Center) 系列、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型等。其中 HEC-HMS 的水文结果主要基于土地利用类型的面积来计算,无法准确评估格局变化对流域水文的影响^[21]。SWAT 可以模拟复杂流域的水文与物质循环变化过程,也用于流域尺度各种土地管理措施对水文影响的模拟^[22]。SWAT 构建的土壤数据库和气候数据库可为数据较少、面积较大的区域提供便利性,相关学者已在北京地区的大尺度流域进行过一定的适用性模拟研究^[23-24],证实了该方法的有效性。

综上,本文以北京平原造林政策的实施为例,采用 SWAT 水文模拟,研究了百万亩造林前后林地格局变化与雨洪特征的关系。通过分析造林前后的林地格局,模拟径流量变化,探讨景观指数与径流量之间的关系,总结影响径流量的最主要的林地景观格局特征,为之后的平原造林工作提出雨洪消减方面的建议。

1 研究数据及方法

1.1 平原造林项目概况

北京平原区总面积为 6338 km², 约占北京总面积的 38%, 其范围主要为东南部的平原地区和西北部的延庆盆地, 是城市发展的核心区域, 其生态环境的安全与健康直接关系到北京市 70% 人口的生态福祉。然而, 平原区的森林资源与山区相比有极大差距, 现存的森林资源大多以小斑块为主, 生态资源与人口极度不匹配^[25]。为了有效提高森林资源体量, 2012—2017 年间, 北京市先后实施了百万亩平原造林工程和重点区域绿化工程。截至 2017 年底, 累计完成造林 78000 hm², 平原区的森林覆盖率由 2011 年的 14.85% 提高到 2017 年的 27.81%, 全市森林覆盖率由 2011 年的 37.6% 提高到 2017 年的 43%^[26]。

依据北京圈层发展特点^[27]及《北京城市总体规划》(2016—2035 年)^[1], 以三环、五环、六环路为界, 把平原区分为核心区、中心区、近郊区和远郊区四部分, 研究区域地理位置、气象站点及水系分布如图 1 所示。

1.2 数据采集及预处理

1.2.1 土地利用数据

考虑到造林工程以春、秋两季施工为主, 本研究采用了 30 m × 30 m 精度的一期 2011 年 11 月 23 日 Landsat 7 ETM 影像、三期 2013 年 9 月 4 日、2015 年 10 月 9 日、2017 年 11 月 15 日 Landsat 8 OLI 影像作为数据源。在遥感图像处理平台 Envi 5.3 进行快速大气校正后, 采用最大似然法进行非监督与监督分类, 根据我国遥感监测土地利用/覆盖分类体系的《土地利用现状分类 GB/T 21010—2017》并结合平原造林工程的建设数据, 将用地划分为建设用地、水域、林地、草地、耕地、未利用土地 6 种主要类型, 如图 2 所示。分类精度验证表明 2011、2013、2015、2017 年的 Kappa 系数分别为 0.8719、0.8212、0.8653、0.8442, 符合一般要求^[28]。

1.2.2 土壤数据与降雨数据

本研究采用世界土壤数据库提供的 1:100 万土壤数据 (HWSD)。研究区域内土壤类型分为 12 种, 主要土壤成分为 68.3% 的潮土、21.6% 的褐土以及 3.7% 的棕壤土, 其余由砂姜黑土、水稻土等组成。土壤质地多为轻壤土、砂壤土和中壤土。利用通用土壤流失方程 (USLE 方程) 与 SPAW (Soil Plant Air Water) 模型建立土壤物理属性表^[29], 研究区不同属性的土壤共 25 类。

因研究区域范围较大, 存在气候数据的差异, 本文采用格点数据插值的 CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)^[30] 数据来减小实验误差, 并通过北京市各气象站点数据进行验证。研究区域内十四个气象站点共同构建了气候属性数据库。

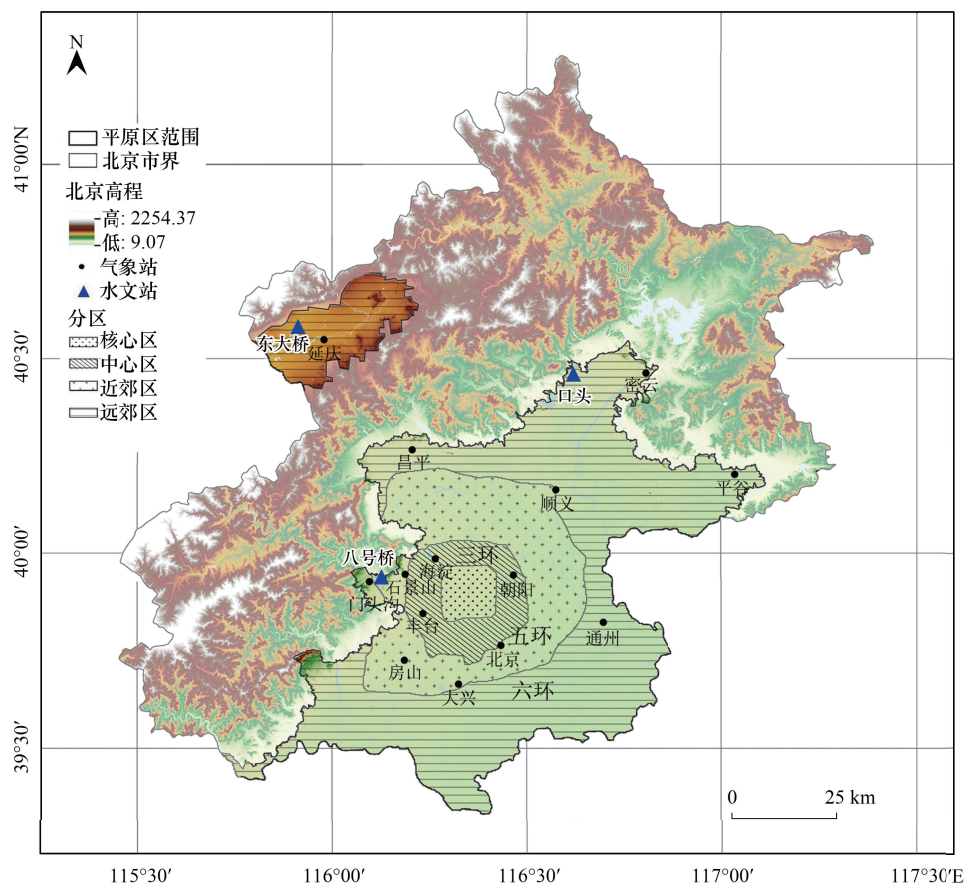


图1 平原区研究范围

Fig.1 Research scope of plain area

1.3 研究方法

1.3.1 景观格局分析

选取面积指标、密度大小及差异指标、边缘指标、形状指标及聚散性指标四类作为林地类型水平上的景观格局指标。其中面积指标包括斑块类型面积(CA)、斑块所占景观面积比例(PLAND)和最大斑块占景观面积指数(LPI),密度大小及差异指标包含斑块数量(NP)和斑块密度(PD),聚散性指标包含散布与并列指标(IJI)、分离度指数(SPLIT)和聚合度指数(AI),表1列举了各个指标的含义^[31]。根据所获取的不同时间节点的土地利用图,在景观格局计算软件Fragstats4.2中对4个区域进行了计算,并应用Fragstats中的移动窗口功能,选取120m宽的正方形移动窗口^[32],以避免分辨率降低、受到尺度和粒度的影响。

1.3.2 SWAT模型构建及参数率定与验证

将从地理空间数据云获取的30m精度的DEM数据与河流水系数据导入SWAT软件中。通过软件运算,本研究区域共划分成424个子流域(图3)。并将软件提取的河流长度、子流域面积等特征与上述气象数据、土地利用数据、土壤数据等相关联,进一步划分出8742个水文响应单元(HRUs)。

进行SWAT分析前,对模型进行了参数的率定与验证。利用SWAT-CUP,结合东大桥、口头、八号桥水文站及附近气象站2000—2010年逐月数据,采用多站校准检验的方法,多次迭代确定模型参数值,减少模拟误差。并利用决定系数 R^2 (公式1)与纳什效率系数 Ens (公式2)进行结果检验^[33]。

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{avg})(Q_{p,i} - Q_{pavg})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - Q_{pavg})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (1)$$

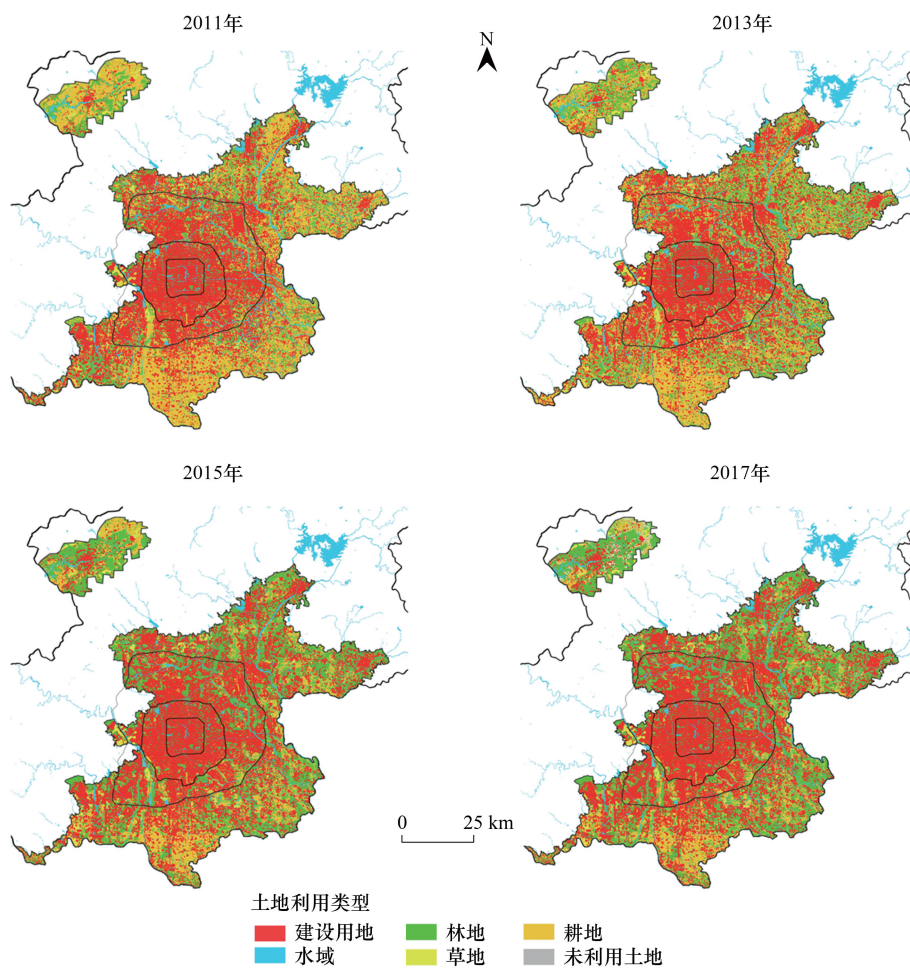


图2 研究范围土地利用类型

Fig. 2 Land use types within the study area

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{avg})^2} \quad (2)$$

式中, $Q_{o,i}$ 为实测流量值, $Q_{p,i}$ 为模拟流量值, Q_{avg} 为实测流量平均值, Q_{pavg} 为模拟流量平均值。 R^2 与 Ens 均在 0—1 之间变动, 越接近于 1 模拟精度越高^[34]。

为研究 1.2.1 中 4 个年份情景下径流变化的差异性, 本文选取了北京典型年份的降雨数据(2012 年), 不仅可以统一降雨条件, 且该年夏季雨量较大(7·21 暴雨), 能更好的研究景观格局对雨洪的响应关系^[35]。

1.3.3 相关与回归分析

选取 7 月典型暴雨季, 进行 4 个年份、4 个不同区域内所有汇流点径流量与峰值流量的统计。利用统计分析软件 SPSS 进行相关性分析, 显著相关的指数类型进入下一步的主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)^[36]。在确定主成分进行降维时, 选取了特征值大于 1 且累计贡献率至少达到 85% 的景观格局指数类别^[37], 与径流量共同构建回归模型。

2 结果与分析

2.1 模型的校准与验证

对平原区流域进行校正时, 设定 2000—2001 年为模型预热期, 2002—2005 年为模型校准期, 2006—2010

为模型验证期。河道实测径流数据用于模型的校准和验证,从图 4 可以看出模拟结果比较理想,满足应用要求。

表 1 所选景观指数
Table 1 Explanations for selected landscape indices

指标类型 Index types	名称 Index name	单位 Unit	含义 Meaning
面积指标 Area index	斑块类型面积(CA)	hm ²	CA>0,某一斑块类型中所有斑块的面积之和,制约物种丰度、数量、食物链等
	斑块所占景观面积比例(PLAND)	%	0<PLAND≤100,代表某一类型景观斑块在整体范围内的丰富度
	最大斑块占景观面积指标(LPI)	%	0<LPI≤100,有助于确定景观的优势类型,内部种的丰度等生态特征;也可反映人类活动干扰方向与强度
密度大小及差异指标 Density and difference index	斑块数量(NP)	个	NP≥1,描述整体景观的异质性,与破碎度有较好的正相关性
	斑块密度(PD)	10 ² hm ²	PD>0,景观总面积一定,类型斑块面积相同的情况下,值越高代表该景观类型破碎化程度越高
边缘指数 Edge index	总边缘长度(TE)	m	TE≥0,景观类型破碎化程度的重要指标之一
形状指标 Shape index	景观形状指数(LSI)	无	景观斑块形状不规则或偏离正方形时,LSI 增大
聚散度指标 Dispersion index	散布与并列指标(IJI)	%	0<IJI≤100,表征各个斑块类型间的总体散布与并列状况,取值小时表明斑块仅与少数几种其他类型相邻接
	分离度指数(SPLIT)	%	0<SPLIT≤100,斑块总量的平方,表征景观类型斑块的分离水平,数值越大,斑块之间的分离度越大
	聚合度(AI)	%	0≤AI<100,代表某类景观类型的斑块聚集程度,AI 值为 0 时,该类型景观斑块呈最大程度分散,值越大,斑块聚集度越高

CA:斑块面积 Class area;PLAND:斑块所占景观面积比例 Percentage of landscape;LPI:最大斑块占景观面积指标 Largest patch index;NP:斑块数量 Number of patch;PD:斑块密度 Patch density;TE:总边缘长度 Total edge;LSI:景观形状指数 Landscape shape index;IJI:散布与并列指数 Interspersion juxtaposition index;SPLIT:分离度指数 Splitting index;AI:聚合度 Aggregation index

2.2 林地景观格局的变化

2.2.1 四个区域林地景观格局变化

在林地类型水平上计算了 4 个区域的林地面积占比,并将前述 10 个景观指数进行了归一化处理。图 5 表示不同区域林地面积占比与景观指数变化,以下分别讨论不同景观指数的变化特点。

(1) 面积指标与边缘指标

随着百亩造林工程的实施,林地面积指数(CA/PLAND/LPI)受造林面积的影响,在 4 个区域发生了不同程度的变化。核心区与中心区面积先增加后下降再略为增加,但整体变化不大。2017 年底核心区林地面积相对于 2011 年增加 0.13%,中心区林地转入 2.52%。这两个区域位于五环内,受城市发展与造林政策矛盾影响严重,变化逐年波动。近郊、远郊区的林地面积逐年上升,二道绿隔多个大公园的建设使得近郊区林地转入 10.65%。因造林规划较为集中的分布在六环路两侧、环渤海基地及新机场等,所以远郊区增长比例较大,为

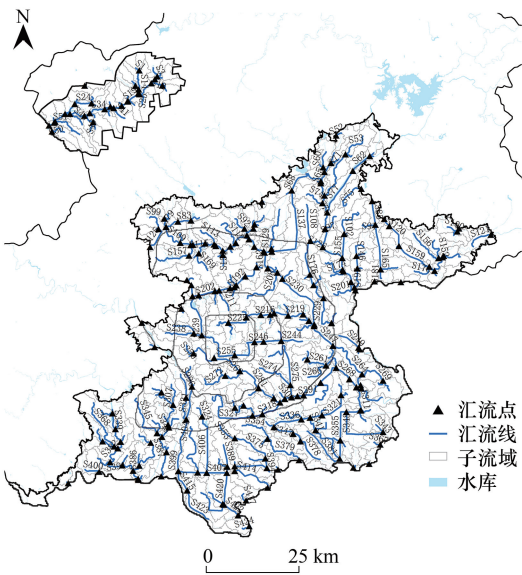


图 3 研究区域 SWAT 概化模型
Fig.3 SWAT generalization model in study area

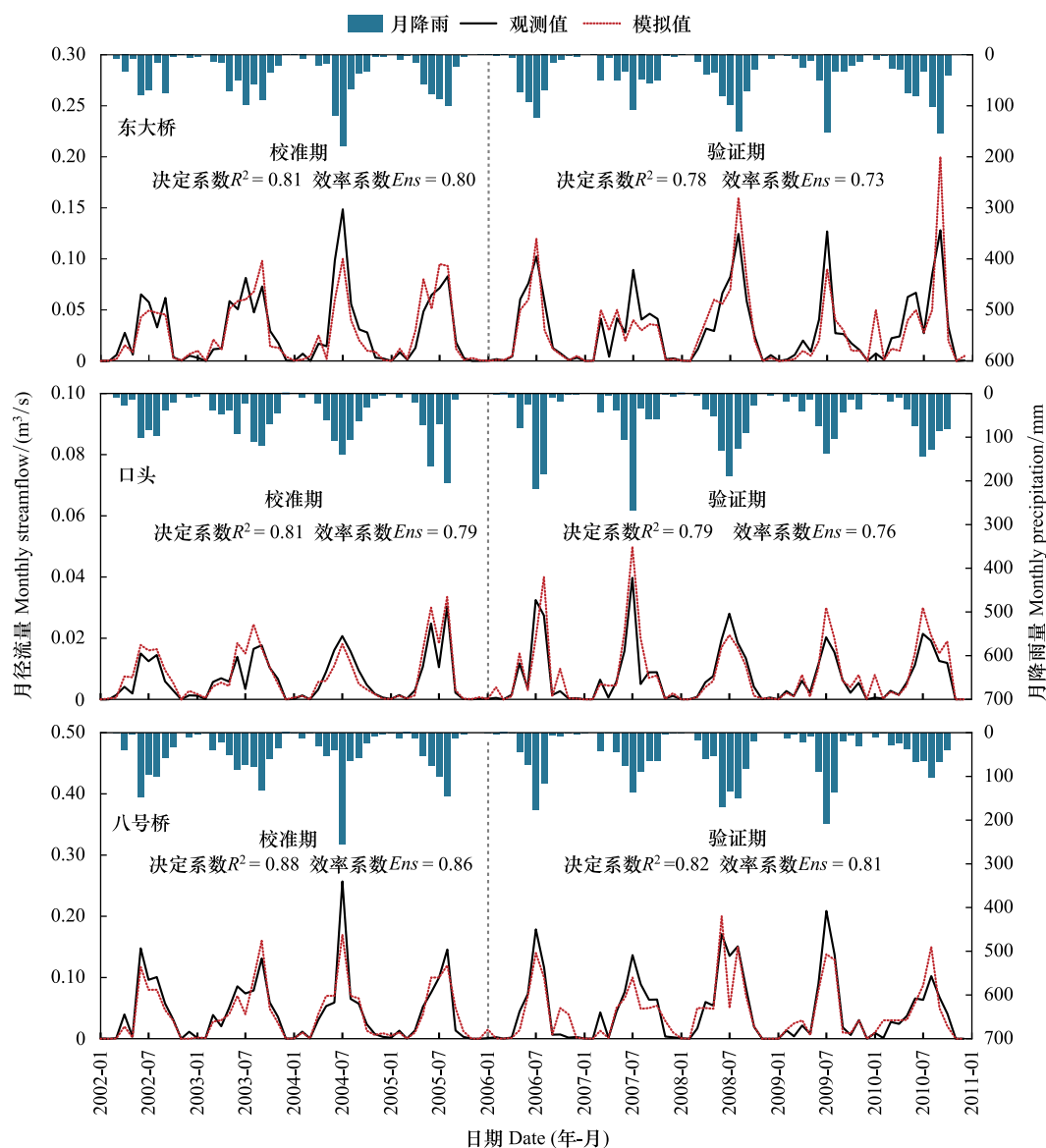


图4 研究区域率定与验证期降雨量及径流模拟结果

Fig.4 Precipitation and Simulation results of calibration and validation period of runoff in study area

17.05%。同时林地总边缘长度(TE)受面积的影响较大,呈现出相同的变化趋势。

(2) 密度大小及差异指标

林地斑块数量(NP)与斑块密度(PD)除核心区先增加后减少再增加外,其他均呈持续增长的变化特点。由于核心区建设密度与需求较大,又受留白增绿、见缝插绿等政策的影响,该指标发生波动变化。其他区域均增多,其中近郊、远郊区在2013年后增多,主要是由于重点村拆迁腾退、道路与河流两侧重点造林项目的实施。

(3) 形状指标

形状指数(LSI)在4个区域变化相似——先增加后减少再增加,总的来说边界形状的复杂程度均有所增加。该指数在2013年最大,2011年最小。其中中心区与近郊区增长比例较小,核心区与远郊区在2013年增长较大,证明这两个区域可能在该年受其他景观要素斑块割裂严重,也受自然活动如大兴区暴雨灾害等影响明显。

(4) 聚散性指标

散布与并列指标 (IJI) 整体大小关系为核心区 < 中心区 < 近郊区 < 远郊区, 间接表征了人类活动影响的剧烈程度与周边景观类型的丰富度。该指标在 4 个区域的变化不一致, 除远郊区外其他区域在 2013 年均呈上升趋势, 造林数量的增多使其与其他类型的并列度增多。而远郊区规划重点区域林地的建设, 降低了并列度。聚合度指数 (AI) 在 4 个区域的变化较小, 表明林地斑块聚集程度基本不变。分离度指数 (SPLIT) 在核心与中心区先下降后上升, 重点区域林地的建设降低了分离度, 而城市化又使得林地斑块再次分散。近郊区与远郊区先基本不变又大幅度降低, 大幅度降低是因 2013 年重点造林工程, 使得斑块更集中、分离度更小。

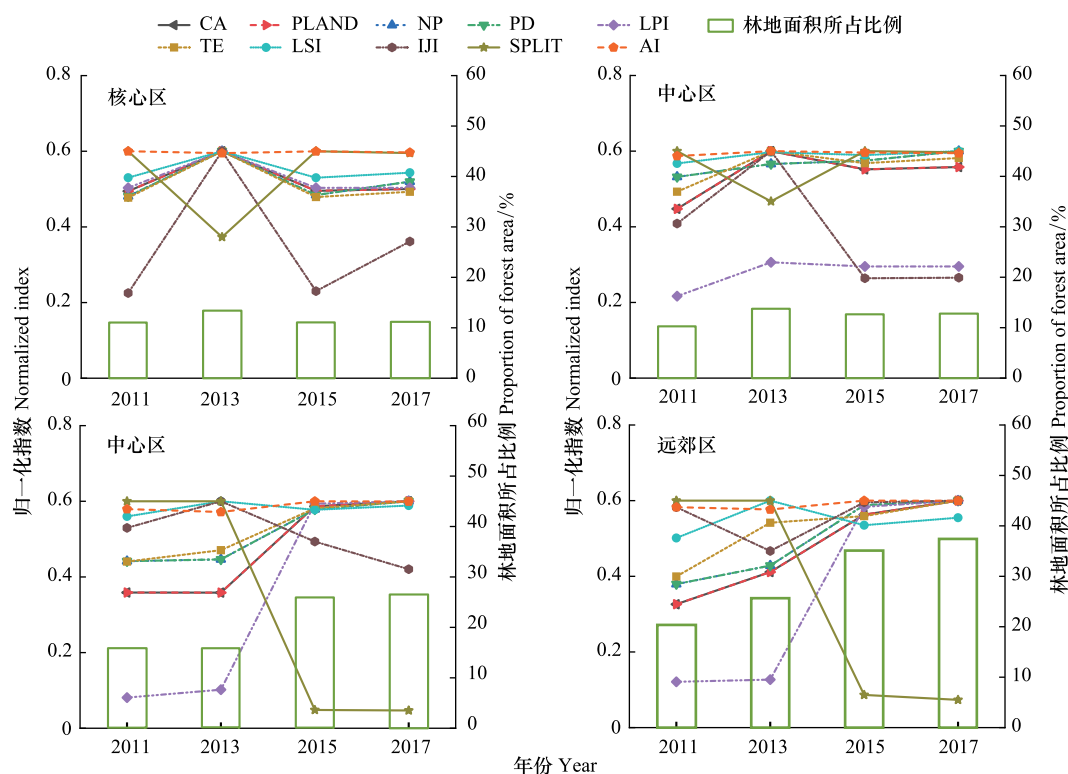


图 5 不同区域林地面积占比与景观指数变化图

Fig.5 Changes of forest proportion and landscape index in different regions

CA: 斑块面积 Class area; PLAND: 斑块所占景观面积比例 Percentage of landscape; LPI: 最大斑块占景观面积指标 Largest patch index; NP: 斑块数量 Number of patch; PD: 斑块密度 Patch density; TE: 总边缘长度 Total edge; LSI: 景观形状指数 Landscape shape index; IJI: 散布与并列指数 Interspersion juxtaposition index; SPLIT: 分离度指数 Splitting index; AI: 聚合度 Aggregation index

2.2.2 平原区整体林地景观格局变化

图 6 为研究区域整体的景观指数变化结果, 可以发现整体林地面积呈上升趋势, 由 2011 年的 14.85% 增加到 2013 年的 23.55%, 到 2015 年变为 25.89%, 2017 年达到了 27.81%。面积指标 (CA、PLAND、LPI)、数量及密度指标 (NP、PD)、边缘指标 (TE) 受近郊与远郊区相关指数变化的影响呈上升趋势。其中最大林地斑块面积指数 (LPI) 虽有所提升但仍位于较低水平, 表明林地内部种类的丰度较低, 破碎度在增加, 人类活动干扰方向与强度仍较明显。分离度指数 (SPLIT) 不断减小, 表明近郊与远郊区重点工程的集中性实施使得整体林地斑块的分散度降低。形状指标 (LSI) 及聚散性指数 (IJI) 变化较为离散, 没有很强的规律性, 但总的来说, 至 2017 年底区域整体受近郊与远郊的影响较大, 林地斑块的形状、周边类型变得更丰富。聚合度指数 (AI) 先减小再增大, 与四个区域变化相似, 说明不同区域的造林工程使得斑块增多、分离度增强, 而后又因重点区域的建设聚集度增大。

2.3 北京平原造林工程对雨洪减缓的影响

雨水径流是指降雨后不会下渗的雨水,对雨洪危害的评估通常采用径流总量和峰值来确定。

2.3.1 四个区域的径流变化

图 7 为研究区域不同年份夏季暴雨产流与径流空间变化图。在百万亩造林工程的实施下,北京平原区径流量发生重大空间变化。受建成区不透水面的比例影响,径流量最多的区域仍位于核心区、中心区及近郊区。由于汇流作用,径流量大的地区仍位于城市下游近郊、远郊区的北部与东部。产流量有明显减少的包括核心与中心区的东部、近郊区的东南部。由于朝阳区内十八里店和南磨房等乡、二环绿廊、大兴区南海子郊野公园和通州区台湖组团等多个公园与绿地的建设、二道绿隔的拆迁腾退,形成了良好的绿色生态屏障,极大改善了这些区域的生态安全状况。产流量增加的区域有近郊区内的顺义区,近远郊区内的永定河流域以及远郊区的延庆盆地中部,这是因城市的扩张,绿色空间让步于建设用地开发所导致的。

图 8 为不同年份下 4 个区域的夏季暴雨径流统计,表 2 为径流总量相对于前一年的变化比例。2011—2017 年间,4 个区域径流统计量逐年变化的大致趋势相同,均先降低后增高再降低,但变化的幅度不同。2013 年 4 个区域的径流总量与峰值量均比 2011 年的要小,其中中心区与核心区的降低幅度最大,为 5.40% 和 4.88%,远郊区与近郊区降低比例较小,为 2.57%、1.87%。但随着城市建设强度的加强、建设区域的扩散,2015 年 4 个区域的径流总量与峰值流量呈现增长趋势。其中远郊区增长幅度最大为 9.53%,其他依次为核心区、近郊区及中心区。伴随着造林收尾工作的进行与城市建设强度的限制,2017 年 4 个区域的径流总量与峰值量有所控制,降低幅度最大为 1.19%。

此外,第一轮造林实施期间,2013 年径流总量与峰值量为 4 年最低水平。核心区、中心区两个区域径流量虽有减少后又增加的波动变化,但均小于造林前 2011 年的径流量。由此可见,第一轮造林时间内,尽管这两个区域仍处于不断扩张的趋势,但林地的建设保障了这两个区域的雨洪安全。近郊区、特别是远郊区在 2013 年雨洪减缓后,数据有所增加且远大于 2011 年数值,表明城市建设的副作用大于林地对雨洪的消减作用,危险加剧。

表 2 不同区域随时间的径流变化比例

Table 2 Explanations for selected landscape indices

	径流比例变化量 Runoff variation			
	核心区 Core zone	中心区 Central zone	近郊区 Suburb zone	远郊区 Outer suburbs zone
2011	—	—	—	—
2013	-4.88%	-5.40%	-1.87%	-2.57%
2015	4.09%	1.81%	2.49%	9.53%
2017	-1.19%	-0.70%	-0.53%	-0.14%

2.3.2 平原区整体径流变化

如图 9 统计了平原区整体的径流总量及峰值流量的变化。可以发现总体趋势与四个区域变化趋势相同,从 2011 年到 2013 年明显降低,月径流总量由 491382237m³ 降为 479450501m³,雨洪灾害减弱。2015 年又增多至 513340724m³,此时雨洪风险加强。随后略微下降,变为 511899022m³,雨洪风险稍有控制,但仍大于

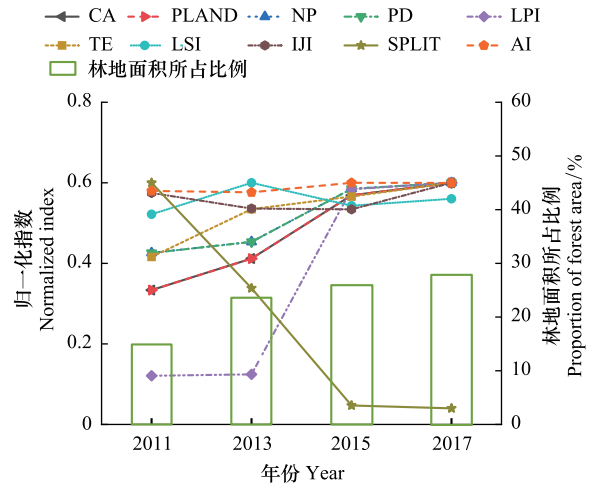


图 6 研究区域林地面积占比与景观指数变化图

Fig. 6 Changes of forest proportion and landscape index in study area

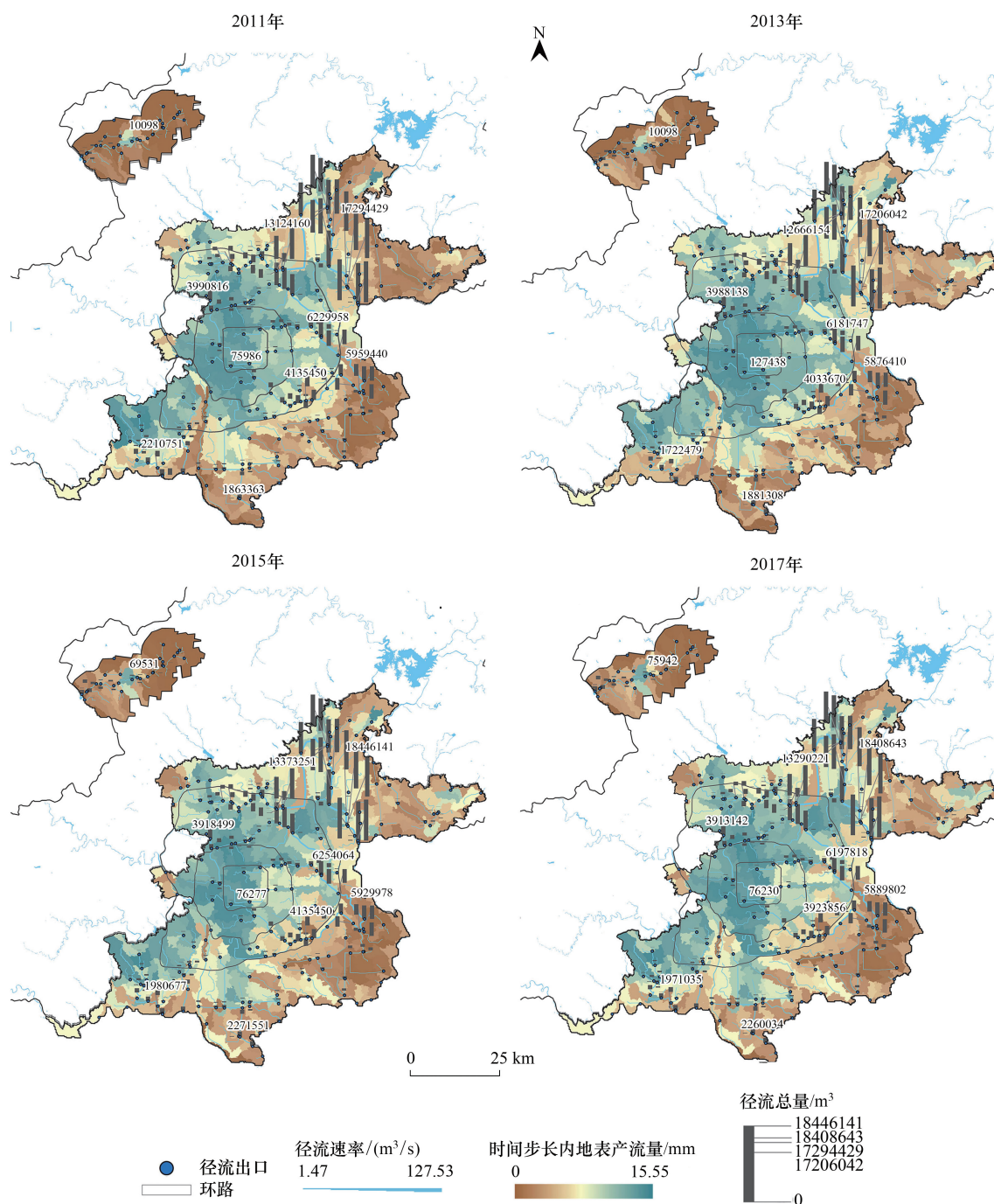


图7 产流与径流特征变化图

Fig.7 Variation of runoff characteristics in different regions

2011 年。峰值流量的变化与径流总量的变化相似,2011 年峰值流量为 $6.46\text{m}^3/\text{s}$,2013 年下降为 $6.42\text{m}^3/\text{s}$,在 2015 年增长到 $6.89\text{m}^3/\text{s}$,2017 年略有下降为 $6.87\text{m}^3/\text{s}$ 。在 2013 年至 2015 年雨洪风险出现了增加的趋势,主要是受城市扩张、人类活动的影响,耕地、林地转出变为建设用地,没有得到很好的控制,且造林工程仍处于尚未完成阶段,无法完全发挥生态功效。

图 10 为 4 组不同区域的径流总量柱状图。可以发现暴雨季径流总量关系为远郊区 ($341581709\text{—}311859504\text{m}^3$)>近郊区 ($153424109\text{—}157247525\text{m}^3$)>中心区 ($10292475\text{—}10879500\text{m}^3$)>核心区 (3874413—

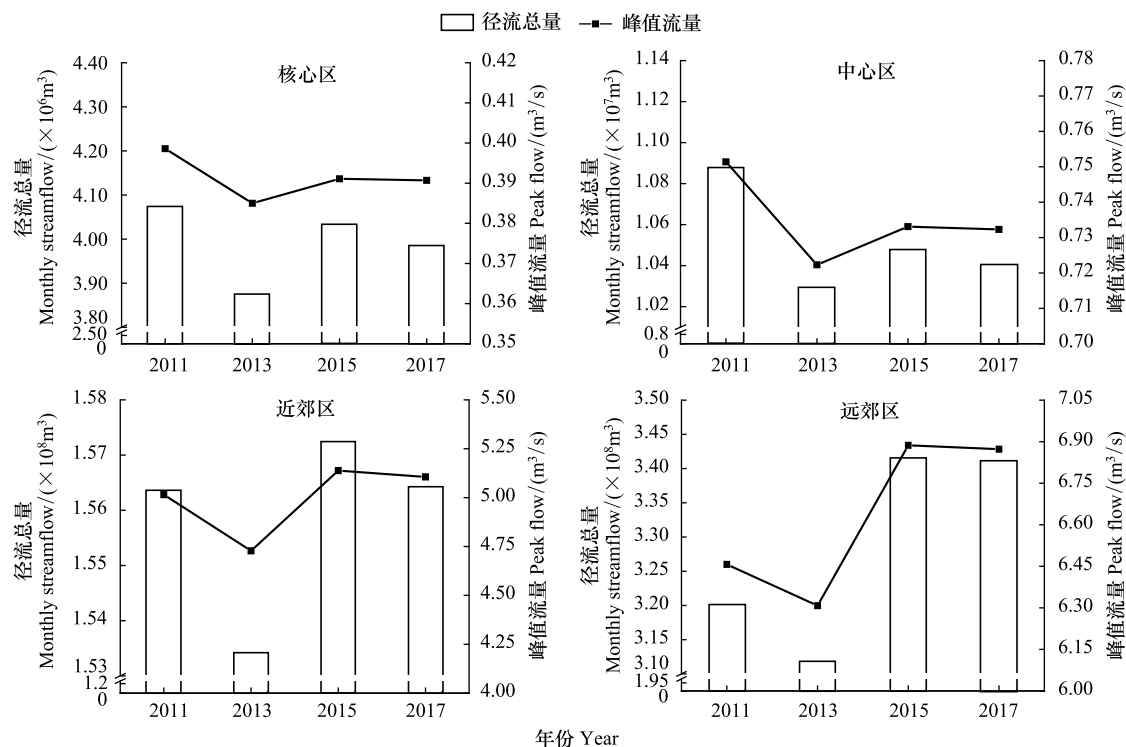


图8 不同区域径流特征变化图

Fig.8 Variation of runoff characteristics in different regions

4073230 m^3),这是由于划分区域的面积、地形、汇流等差异所致。

2.4 林地景观格局变化与雨洪特征的关系

有研究表明土地利用格局和生态过程之间是高度尺度依赖的^[38],学者针对不同尺度下的景观格局与径流量进行相关性分析,发现景观指数与径流特征在不同尺度下会有不同类型的相关性^[12]。于是本研究利用SPSS软件对2.2得出的分区景观指数和2.3的径流总量进行了分析,表3统计了相关系数。从表3可以看出,选取的十个景观指数与核心区径流量均具有较强相关性,其中与林地斑块的散布与并列度(IJI)、数量与密度(NP、PD)指数显著相关,与景观形状(LSI)、聚合度(AI)指数较为相关。中心区林地与总边缘长度(TE)、斑块类型面积(CA、PLAND)、分离度(SPLIT)、景观形状指数(LSI)、最大斑块占景观面积(LPI)、聚合度(AI)指数具有很强的相关性。近郊区径流量与林地斑块的分离度(SPLIT)、景观形状指数(LSI)、散布与并列指数(IJI)、最大斑块面积指数(LPI)之间的相关系数较大。与远郊区显著相关的有聚合度(AI)、最大斑块占景观面积指数(LPI),与斑块数量与密度(NP、PD)也较为相关,其他影响较小。

因景观指数之间本身存在一定的相关性,应对各个区域进行因子分析法的处理。为避免主因子遗漏景观格局指数信息,将表3中相关性系数大于0.5的所有指数代入主因子分析^[39],并选取特征值大于1、累积贡献率大于85%的1—2个主因子,代表所有变量的信息。

表4统计了径流量与景观格局回归模型的函数。进入主因子的10个景观格局指数在核心区可以归纳为

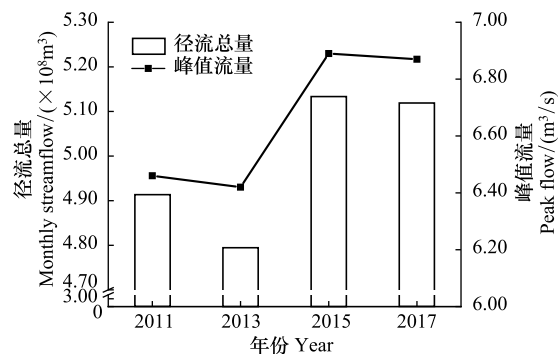


图9 研究区整体径流特征变化图

Fig.9 Variation of runoff characteristics in study area

1个主因子,命名为林地数量与形状因子(X_1),对核心区景观格局累积贡献为96.382%。主因子中景观形状指数、总边缘长度、数量与密度指标贡献率超过0.990。进一步建立径流量—林地数量与形状因子的线性回归模型,相关性系数 R^2 为0.933,通过共线性诊断和Durbin-Watson诊断,判定模型有效。进入中心区的9个指数归纳为1个主因子,命名为林地面积因子(X_1),累积贡献为90.129%,其中总边缘长度、林地斑块所占景观面积比例、类型面积贡献率超过0.990。构建线性回归模型, R^2 为0.989。进入近郊区的5个相关景观格局指数可归纳为2个主因子,分别命名为林地聚合因子(X_1)与林地形状因子(X_2),累积贡献为96.506%。主因子 X_1 中的聚合度、最大斑块面积指标、分离度、散布与并列指数,主因子 X_2 中景观形状指数贡献率均超过0.900。构建线性回归模型, R^2 为0.985。进入远郊区的8个景观指数可归纳为1个主因子,命名为林地面积与聚合因子(X_1),林地斑块并列度(X_2),累积贡献为88.960%。主因子 X_1 中的最大斑块面积指标、斑块数量与密度、斑块面积、分离度、聚合度指标贡献率均超过0.900。构建线性模型, R^2 为0.900。根据相关回归分析,林地斑块的数量密度、形状对核心区径流量有着重要的影响,林地的面积对中心区的径流量相关性最大,林地聚合程度和形状严重影响近郊区的径流量,林地面积大小、聚合程度对远郊区径流量的影响最大。

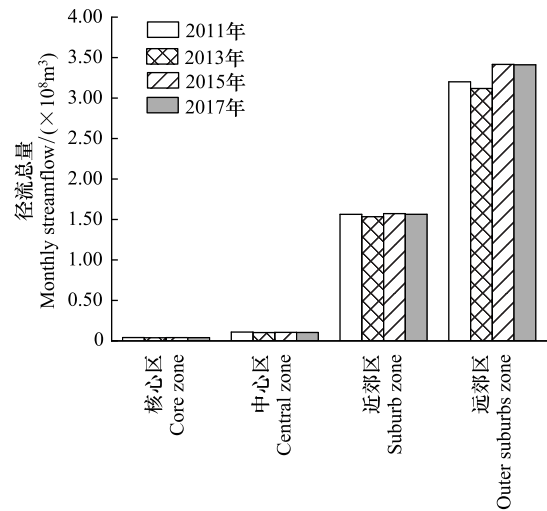


图10 不同区域不同时间下径流变化图

Fig.10 Runoff changes in different areas at different times

表3 各区景观指数与径流量相关性分析结果

	相关性系数值 Correlation coefficient									
	CA	PLAND	NP	PD	LPI	TE	LSI	IJI	SPLIT	AI
核心区 Core zone	0.856	0.856	0.966	0.966	0.822	0.896	0.923	0.967	0.835	0.915
中心区 Central zone	0.991	0.991	0.582	0.577	0.930	0.999	0.934	0.032	0.957	0.927
近郊区 Suburb zone	0.438	0.438	0.395	0.399	0.817	0.280	0.887	0.858	0.896	0.663
远郊区 Outer suburbs zone	0.756	0.756	0.842	0.841	0.945	0.305	0.088	0.662	0.748	1.000

表4 径流量与景观格局的主成分荷载矩阵及回归模型

Table 4 Principal factor matrix and regression model of runoff and landscape pattern							
因变量 Y	主成分荷载矩阵 The principal component factor loading matrix			自变量 X_1	自变量 X_2	相关性 系数 R^2	回归模型 Regression model
	成分指数 Component index	主因子 X_1	主因子 X_2				
核心区 Core zone	景观形状指数	1.000		林地数量与形状因子	—	0.933	$Y = -0.010X_1 + 1.490$
	总边缘长度	0.996					
	斑块数量	0.993					
	斑块密度	0.993					
中心区 Central zone	总边缘长度	0.997		林地面积因子	—	0.989	$Y = -0.033X_1 + 3.926$
	斑块所占景观面积比例	0.994					
	斑块类型面积	0.994					
近郊区 Suburb zone	聚合度	0.988	-0.115	林地聚合因子	林地形状因子	0.985	$Y = 0.301X_1 - 0.351X_2 + 58.310$
	最大斑块占景观面积指标	0.984	0.137				

续表

因变量 Y	主成分荷载矩阵 The principal component factor loading matrix			自变量 X_1	自变量 X_2	相关性 系数 R^2	回归模型 Regression model
	成分指数	主因子	主因子				
	Component index	X_1	X_2				
远郊区 Outer suburbs zone	分离度	-0.977	-0.174	林地面积与聚合因子	—	0.900	$Y=2.054X_1+122.857$
	散布与并列指数	-0.907	0.222				
	景观形状指数	0.011	0.994				
	最大斑块占景观面积指标	0.998					
	斑块数量	0.994					
	斑块密度	0.994					
	斑块类型面积	0.978					
	斑块所占景观面积比例	0.978					
	分离度	-0.974					
	聚合度	0.957					

3 讨论

研究发现,2013 年的径流总量与峰值量为四年最低水平,之后林地面积虽仍在增加、但四个区域的径流量却呈上升趋势。与已有研究的林地增加可在一定程度上减缓径流量的结论似乎不一致^[11,15]。为此,本文设定:以 2011 年的土地利用为基准,保持建设用地等类型不变、林地以真实情况增加,生成特定情景下的 2013、2015、2017 年土地利用类型图,带入 SWAT 中进行 1.3.2 降雨条件的模拟。径流总量及峰值流量的结果如图 11 所示,四个区域均呈降低趋势,2011—2013 年的降低幅度最大,核心区、中心区、近郊区、远郊区径流总量的降幅分别为 5.6%、5.9%、5.0%、11.9%。2013—2017 径流减少较小,分别为 2.9%、1.7%、2.3%、3.0%。

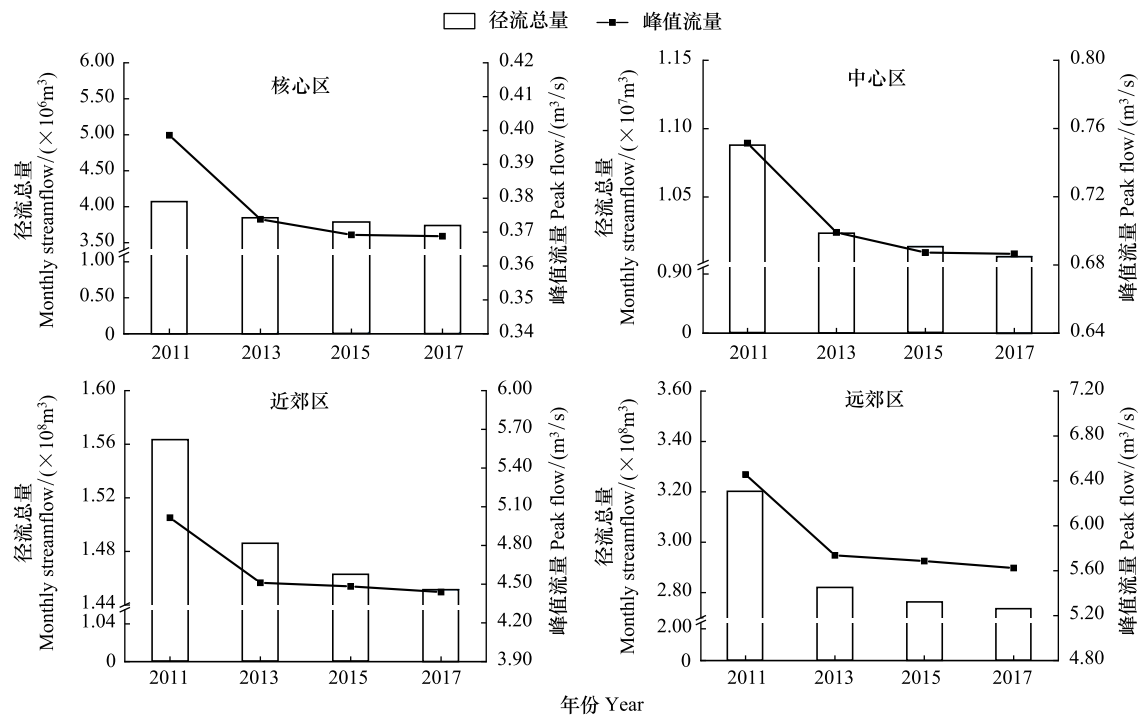


图 11 特定情境下不同区域径流特征变化图

Fig.11 Variation of runoff characteristics in different regions under specific circumstances

这主要是由于 2011—2013 期间,百万亩造林使得平原区林地面积增长了 8.71%,基本完成了第一批造林的主体^[40],而 2013—2017 年四年间面积增幅为 4.26%,为部分造林扫尾工作,因此径流量发生了不均等变化。此外,特定情境中远郊区径流总量的下降总幅度是最大的,为 14.50%,且对比 2.3 可知远郊区径流总量的上升也是整个平原区径流风险增大的主要原因,说明城市化过程中六环外新扩张区的比例主导着平原区径流风险的变化。可能是由于六环内特别是核心与中心区,现状建设密度较高,大规模地表覆被的变化较难实现,但六环外可扩张的区域较大且下游汇流量大、难控制,易造成区域整体雨洪风险的上升。《北京城市总体规划(2016—2035 年)》提出降低平原地区开发强度、优化结构,在对中心城区疏解腾退的同时,也应关注六环外发展建设需求与造林生态效应的平衡点,在优化林地结构获取最大雨洪减缓效益的同时,寻求建设强度的动态阈值,促进城市生态与经济的同步发展。

以上特定情境的结果表明城市化严重影响着城市的雨洪风险。在研究期内,林地对雨洪的减缓作用与建设扩张带来的副作用共同影响着平原区的雨洪风险,而本研究模拟径流量是二者影响强度大小关系的综合作用结果,与已有研究中城市扩张导致雨洪风险增大^[41-42]、林地可有效减缓雨洪^[11,19]的结论基本一致。其中核心区、中心区因建设较为饱和、有相关政策的开发限制等,造林对径流的减缓强度较大。而近郊区、特别是远郊区建设扩张的副作用大于林地对雨洪的减缓作用,影响了区域整体的雨洪安全。因此,适当控制城市扩张强度、优化林地空间结构、寻求造林生态效益与扩张发展需求的平衡点将有助于进一步提升平原区的雨洪安全。此外,雨洪减缓量虽主要受林地景观格局的影响,但也与结构类型^[43-44],如林层结构、树种组成、冠层结构等有一定关系。因本次研究区域较大,土地利用分类笼统分成六大类,具有一定的局限性。在后续研究中宜在土地利用类型上进行细化,为林地规划建设提供更多参考。

4 结论与建议

4.1 结论

本文研究了 2011—2017 年林地动态演变对夏季暴雨径流的影响,通过 SWAT 水文模拟及相关性分析明确近年雨洪风险的空间变化及各区域相关的造林指数,主要结论有:

(1)第一轮造林期间,林地面积虽有波动但总的来说各区和整体均有改善。重点区域林地的建设使得整体斑块更聚集、分离度更小、形状更复杂,但局部(核心与中心区)存在因建设扩张所导致的斑块更破碎、与其他类型斑块并列度减少、边缘形状更简单的现象。

(2)各区与整体径流特征变化趋势一致。因受城市建设及人类活动的影响,呈现先减小后增多再减小的波动变化,但总体而言核心区、中心区造林带来的雨洪缓解作用大于建设扩张所带来的负作用。而近郊、特别是远郊区,绿色空间让步于建设用地开发,使得这两个区域径流量增大,从而导致平原区的雨洪风险变大,因此远郊区扩张强度成为整个平原区雨洪风险的重要因素。

(3)不同区域造林减缓径流的关键性景观指数不同。林地斑块的数量密度、形状对核心区径流量有着影响,林地的面积与中心区雨洪风险的相关性最大,林地斑块的聚合度和形状影响着近郊区的径流量,林地面积、斑块聚合程度对远郊区雨洪影响最大。

4.2 建议

2012—2017 年间,北京市先后实施了百万亩平原造林和重点区域绿化建设工程。2018 年 1 月,《北京市新一轮百万亩造林绿化行动计划》经审议通过,提出到 2022 年,全市新增森林湿地 100 万亩。建设任务在百万亩造林工程的基础上查缺补漏,在平原区、浅山区和山区共同实施。根据本文研究结论,为第二轮造林高效发挥雨洪减缓功能提出以下建议:

(1)核心区在控制开发强度的前提下,利用疏解整治,大力建设留白增绿、小微绿地和城市休闲公园项目,提高林地斑块的数量与密度,林地边缘形态尽可能的复杂,增加与其他类型斑块的并列度。

(2)中心区在推进一道绿隔建设的同时,于区域内的丰台、海淀、朝阳区北部进行防洪重点林地的建设,

提高中心区林地面积与最大林地斑块面积。

(3) 近郊区应重点关注五环到六环内潮白河与北运河水系由于汇流所导致的径流量过大的风险,保持近郊区东部朝阳区内雨洪降低的良好趋势。同时减少林地斑块的聚合度,提高林地斑块形状的复杂性。

(4) 远郊区应在严控开发强度的前提下,重视远郊区内潮白河水系的汇流风险、永定河流域及延庆盆地近年径流量增长风险。大力提高林地面积,增强林地斑块的密度、减少聚合度。

致谢:感谢北京市气象局姜滨老师对本论文中气象数据的支持与贡献。

参考文献 (References):

- [1] 北京市规划和国土资源管理委员会.北京城市总体规划(2016年—2035年)[EB/OL].http://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngh/cqgh/201907/t20190701_100008.html, 2017-09-29.
- [2] Wan Y, Sun D, Labadie J. Modelling evaluation of dam removal in the context of river ecosystem restoration. *River Research and Applications*, 2015, 31(9): 1119-1130.
- [3] Marijnissen R, Kok M, Kroeze C, Van Loon-Steensma J. Re-evaluating safety risks of multifunctional dikes with a probabilistic risk framework. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(4): 737-756.
- [4] Tong B X, Li Z J, Wang J F, Yao C. Development of topography-based river width estimation model for medium-sized mountainous watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2020, 25(5): 04020018.
- [5] Kourgialas N N, Karatzas G P. Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas-a case study. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(2): 212-225.
- [6] 石勇, 许世远, 石纯, 孙阿丽, 王军. 洪水灾害脆弱性研究进展. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 41-46.
- [7] Van Dau Q, Kuntiyawichai K, Plermkamon V. Quantification of flood damage under potential climate change impacts in central vietnam. *Irrigation and Drainage*, 2017, 66(5): 842-853.
- [8] Charnay B. A system method for the assessment of integrated water resources management (IWRM) in mountain watershed areas; the case of the "giffre" watershed (France). *Environmental Management*, 2011, 48(1): 189-197.
- [9] Yang Y, Chui T F M. Rapid assessment of hydrologic performance of low impact development practices under design storms. *Journal of the American Water Resources Association*, 2018, 54(3): 613-630.
- [10] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(7): 4253-4273.
- [11] Lin Y P, Hong N M, Wu P J, Wu C F, Verburg P H. Impacts of land use change scenarios on hydrology and land use patterns in the Wu-Tu watershed in Northern Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(1/2): 111-126.
- [12] Zhang G, Guhathakurta S, Dai G, Wu L Y, Yan L J. The control of land-use patterns for stormwater management at multiple spatial scales. *Environmental Management*, 2013, 51(3): 555-570.
- [13] Qiu J X. Effects of landscape pattern on pollination, pest control, water quality, flood regulation, and cultural ecosystem services; a literature review and future research prospects. *Current Landscape Ecology Reports*, 2019, 4(4): 113-124.
- [14] Amiri B J, Gao J F, Fohrer N, Mueller F, Adamowski J. Regionalizing flood magnitudes using landscape structural patterns of catchments. *Water Resources Management*, 2018, 32(7): 2385-2403.
- [15] Yuan Y, Fang G H, Yan M, Sui C M, Ding Z Y, Lu C X. Flood-landscape ecological risk assessment under the background of urbanization. *Water*, 2019, 11(7): 1418.
- [16] 刘效东, 刘佩伶, 戴雨航, 莫其锋, 林浩娟, 李吉跃, 张倩媚, 陈修治. 森林与径流关系研究进展. *林业科学*, 2019, 55(7): 155-162.
- [17] Wu J S, Sha W, Zhang P H, Wang Z Y. The spatial non-stationary effect of urban landscape pattern on urban waterlogging: a case study of Shenzhen City. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 7369.
- [18] Gao Q, Yu M. Reforestation-induced changes of landscape composition and configuration modulate freshwater supply and flooding risk of tropical watersheds. *PLoS One*, 2017, 12(7): e0181315.
- [19] 林炳青, 陈兴伟, 陈莹, 刘梅冰. 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析. *生态学报*, 2014, 34(7): 1772-1780.
- [20] Gironás J, Roesner L A, Davis J. Storm Water Management Model Applications Manual. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2009.
- [21] 章戈. 基于土地利用格局优化的雨洪管理模式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

- [22] 祖拜代·木依布拉, 师庆东, 普拉提·莫合塔尔, 张润. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响. 生态学报, 2018, 38(14): 5149-5157.
- [23] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, Peter S, 姚安坤. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [24] 刘昭, 赵树旗, 刘培斌, 王利军, 高晓薇. 奶水河流域水文模拟及参数不确定性分析. 水力发电, 2020, 46(2): 27-30, 122-122.
- [25] 王成. 北京平原区造林增绿的战略思考. 中国城市林业, 2012, 10(1): 7-11.
- [26] 孙杰. 近十万亩平原今年添新绿[N]. 北京日报, 2018-04-09.
- [27] 王岩. 北京城市圈层结构研究. 中国商贸, 2014, (23): 28-30.
- [28] 刘建涛. 黄河三角洲典型地表类型遥感协同提取方法及生态环境遥感评价研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- [29] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法. 水利水电技术, 2007, 38(6): 15-18.
- [30] National Center for Atmospheric Research Staff. The climate data guide; climate forecast system reanalysis (CFSR). (2017-11-08). <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>.
- [31] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [32] Han S R, Wei S, Zhou W, Zhang M J, Tao T T, Qiu L, Liu M S, Xu C. Quantifying the spatial pattern of urban thermal fields based on point of interest data and Landsat images. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5305-5312.
- [33] 周帅, 王义民, 郭爱军, 周凯, 李紫妍. SWAT 模型参数不确定性对黄河上游径流模拟的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(8): 144-154.
- [34] 窦小东, 黄玮, 易琦, 刘晓舟, 左慧婷, 李蒙, 李忠良. LUCC 及气候变化对澜沧江流域径流的影响. 生态学报, 2019, 39(13): 4687-4696.
- [35] 刘传铭. 基于 HEC-HMS 模型的流域景观格局变化洪水效应模拟分析[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- [36] Blazquez-Cabrera S, Bodin Ö, Saura S. Indicators of the impacts of habitat loss on connectivity and related conservation priorities: do they change when habitat patches are defined at different scales? Ecological Indicators, 2014, 45: 704-716.
- [37] 王莺, 王静, 姚玉璧, 王劲松. 基于主成分分析的中国南方干旱脆弱性评价. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1897-1904.
- [38] O'Neill R V, Gardner R H, Turner M G. A hierarchical neutral model for landscape analysis. Landscape Ecology, 1992, 7(1): 55-61.
- [39] 杨帆, 冯翔, 阮羚, 陈俊武, 夏荣, 陈昱龙, 金志辉. 基于皮尔逊相关系数法的水树枝与超低频介损的相关性研究. 高压电器, 2014, 50(6): 21-25, 31-31.
- [40] 国家林业和草原局政府网. 北京春季平原造林建设取得重大成果[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/main/102/content-602982.html>, 2013-05-20.
- [41] Zope P E, Eldho T I, Jothiprakash V. Hydrological impacts of land use-land cover change and detention basins on urban flood hazard: a case study of Poisar River basin, Mumbai, India. Natural Hazards, 2017, 87(3): 1267-1283.
- [42] 李孝永, 匡文慧. 北京城市土地利用/覆盖变化及其对雨洪调节服务的影响. 生态学报, 2020, 40(16): 5525-5533.
- [43] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. Hydrological Processes, 2000, 14(16/17): 2903-2920.
- [44] 刘春霞. 重庆缙云山典型林分结构特征对坡面水文过程的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.