

禹佳宁, 周燕, 王雪原, 郭诗怡. 城市蓝绿景观格局对雨洪调蓄功能的影响 [J]. 风景园林, 2021, 28 (9) : 63-67.

城市蓝绿景观格局对雨洪调蓄功能的影响

Influence of Urban Blue-green Landscape Pattern on Rainfall-flood Regulation and Storage Function

禹佳宁 周燕* 王雪原 郭诗怡

YU Jianing, ZHOU Yan*, WANG Xueyuan, GUO Shiyi

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



中图分类号: TU985.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2021)09-0063-05

DOI: 10.14085/j.fjyl.2021.09.0063.05

收稿日期: 2021-01-31

修回日期: 2021-07-19

禹佳宁 / 女 / 武汉大学城市设计学院在读硕士研究生 / 研究方向为城乡生态规划、雨洪管理、绿色基础设施

YU Jianing is a master student in the School of Urban Design, Wuhan University. Her research focuses on urban and rural ecological planning, rainwater and flood management, and green infrastructure.

周燕 / 女 / 博士 / 武汉大学城市设计学院副教授 / 研究方向为城乡生态规划、雨洪管理、绿色基础设施

通讯作者邮箱 (Corresponding author Email): joyeezhou@whu.edu.cn

ZHOU Yan, Ph.D., is an associate professor in the School of Urban Design, Wuhan University. Her research focuses on urban and rural ecological planning, rainwater and flood management, and green infrastructure.

王雪原 / 女 / 东南大学建筑学院在读博士研究生 / 研究方向为数字景观方法与技术

WANG Xueyuan is a Ph.D. candidate in the School of Architecture, Southeast University. Her research focuses on digital landscape methods and techniques.

郭诗怡 / 女 / 博士 / 武汉大学城市设计学院讲师 / 研究方向为城市生态学、景观生态学、绿地与健康

GUO Shiyi, Ph.D., is a lecturer in the School of Urban Design, Wuhan University. Her research focuses on urban ecology, landscape ecology, green space and health.

摘要: 近年来, 城市内涝问题频发, 引发了社会强烈关注。现有研究多从灾害成因角度聚焦于景观格局变化对洪涝产生的影响, 蓝绿景观格局与雨洪调蓄功能的响应关系尚待进一步探讨分析。以武汉市江夏区为研究区域, 通过对比连续晴天及雨后情景下的遥感影像结果, 建立了淹没转移变化矩阵表征调蓄状况, 结合以往研究与斯皮尔曼相关系数分析的结果, 选取了面积周长比、形状指数、分形维数、近圆指数、边缘对比度 5 个景观指数, 运用二元 Logistic 回归分析, 探究了景观格局对雨洪调蓄功能的影响。结果表明: 1) 分维指数对雨洪调蓄能力的发挥有直观的作用, 城市存量布局优化中需要着重注意对蓝绿空间自然形态的保护; 2) 雨洪调蓄功能与蓝绿空间聚集度指标之间没有显著关联, 蓝绿空间的复合程度对雨洪调蓄能力的影响有待更精细化的研究。研究结果为蓝绿空间景观格局的调蓄效能理论提供了量化支持, 可为今后城市洪涝治理和景观格局优化研究提供一定的思路。

关键词: 蓝绿空间; 景观格局; 土地利用; 城市内涝; 雨洪调蓄; logistic 回归分析

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (编号 51708426); 中央高校基本科研业务费专项基金 (编号 2042018kf0250)

Abstract: In recent years, frequent urban waterlogging has aroused strong concern in the society. The existing researches largely focus on the impacts of landscape pattern changes on flood from the perspective of the disaster genesis, and the response relationship between the blue-green landscape pattern and the rainfall-flood regulation and storage functions needs to be further studied. Taking Jiangxia District of Wuhan as the target, this research, by comparing the results of remote sensing images under continuous sunny and rainy days, establishes a rainfall-flood transfer matrix to characterize the storage conditions. Based on literature review and Spilman correlation coefficient analysis, it selects the landscape indexes of PARA, SHAPE, FRAC, CIRCLE and ECON, and applies the binary logistic regression analysis to analyze the influence of landscape pattern on the function of rainfall-flood regulation and storage. The results show that: 1) The FRAC has a direct effect on the capacity of rainfall-flood regulation and storage, and the protection of the natural form of blue-green space should be highlighted in the optimization of urban storage layout. 2) There is no significant correlation between the rainfall-flood regulation and storage and the contagion metrics of blue-green space. The results provide quantitative support for the theory of storage efficiency of urban blue-green landscape pattern, and ideas for the study of urban flood control and landscape pattern optimization.

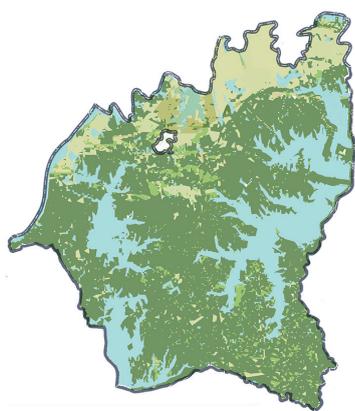
Keywords: blue-green space; landscape pattern; land use; urban waterlogging; rainfall-flood regulation and storage; logistic regression analysis

Fund Items: Young Scientists Fund of the National Natural Science Fund of China (No. 51708426); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2042018kf0250)

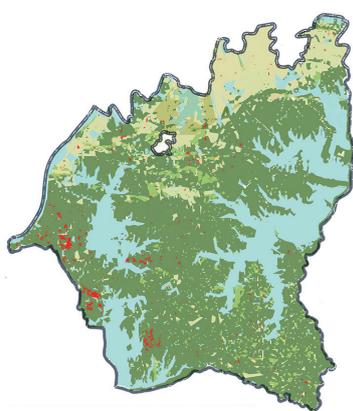
1 研究背景

随着城市化不断推进与全球气候变化的影响, 极端降雨天气频发, 城市建成区密度越来

越高, 城市不透水地面面积激增, 导致内涝问题频发。近年来, 洪涝灾害对武汉市经济、社会发展造成极大危害, 2019 年夏季, 连续降雨



1 江夏区连续晴天情景下土地利用现状
Current situation of land use in sunny days in Jiangxia District



2 江夏区雨后情景下土地利用现状
Current situation of land use in rainy days in Jiangxia District

致武汉市 10 个县(市、区) 6.5 万人受灾。同时,在建设韧性城市、健康城市等政策背景下,当下城市规划设计更加注重生态系统的健康可持续性发展,雨洪调蓄模式逐渐从排水工程视角转化为生态综合调控视角,并逐渐成为政府和学术界持续关注的热点^[1]。

在宏观层面,景观格局内部特征与洪水过程之间的关系是近年来研究的热点^[2],雨洪管理功能需要依靠一个区域内的所有绿地体系进行统筹协调,共同发展^[3],景观生态学中物质能量传输的“源—汇”理论,与城市自然降水过程的能量流动和绿地环境的相互作用相契合^[4-5]。近年来,许多学者把目光落在中微观层面,将绿地景观格局与雨洪过程二者进行耦合分析,研究绿地对雨洪过程的影响^[6-7]。当前学界关注城市景观格局对灾害成因、孕灾环境等方面的影响,多从灾害角度出发,聚焦城市景观格局与水文过程的响应关系^[8]:宏观层面景观格局内部特征与洪水过程之间的响应关系^[9-12],或是中微观层面城市化景观格局变化对城市内涝孕灾成因的影响^[11,13],但是对于蓝绿空间调蓄能力与内涝缓解途径的分析较少。

本研究立足于内涝缓解途径,聚焦城市化蓝绿空间内部特征差异,探究城市蓝绿景观格局与雨洪调蓄功能的响应关系。基于实

际降雨情况构建了城市淹没转移矩阵以表征雨洪调蓄能力,结合 Fragstats 景观指数,建立二元 Logistic 回归模型分析两者之间的关系。以期探究蓝绿空间格局与雨洪调蓄功能之间的响应关系,为城市蓝绿空间雨洪调蓄功能的优化提供可靠的理论支撑。

2 研究区域与方法

2.1 研究区域

江夏区隶属湖北省武汉市,总面积 28.29 km²。境内大小山体 118 座,大小湖泊 136 处,山水资源丰富;属亚热带季风性气候,降雨集中在夏季 6—7 月份,历年平均降水为 1 347.7 mm,四季鲜明,降水充沛。时间上,江夏区洪涝最早始于 4 月上旬,最迟终于 9 月中旬,尤以 6—7 月频次最高,危害最重;空间上,洪涝灾害地域差异分布明显。基于上述内涝局部频发的现实问题,以及区域较好的山水基底条件,江夏区是探讨蓝绿空间景观格局与雨洪调蓄功能关联机制的合适区域。

2.2 数据来源与处理

土地利用数据来源于“地理空间数据云”,获取空间分辨率 30 m 的 Landsat 8 遥感影像数据图,选取依据为云量低于 10% 且成像质量良好。根据气象数据资料,分别选取连续晴天(图 1)和雨后(图 2)情景下的遥感影像

数据图作为对比,在 ENVI 软件中进行波段合成与解译,根据 LUCC 分类系统,将土地利用分为草地、耕地、林地、建设用地、水域和未利用土地六大类^[14]。

2.2.1 雨洪调蓄功能表征

雨洪调蓄功能是响应关系建立中的反应变量,具备真实反映场地滞蓄调节情况、确保相关性建立过程与结果可靠真实等功能。基于土地利用转移矩阵的概念建立城市淹没状况转移矩阵,

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中: i 代表连续晴天下江夏区的淹没情况; j 代表雨后的淹没情况; S_{ij} 代表降雨发生前后,用地类型 i 和 j 之间淹没转化的情况^[15],其反映在一定时间间隔下,一个亚稳定系统从 T 时刻向 $T+1$ 时刻状态转化的过程。将江夏区连续晴天、雨后情景下用地类型在 ArcGIS 中进行栅格计算并赋值,依据不同用地类型上是否有水,确定不同用地类型的雨洪调蓄状况,建立雨洪调蓄功能发挥状况数值矩阵。通过遥感技术解析不同时段内某区域不同土地利用类型是否发生内涝的相互转换关系,建立淹没状况转移矩阵用以确定不同地表空间的汇水集水能力差异。淹没状况转移矩阵代表了城市用地的调蓄水平,这一信息具有统计学意义。

本研究所定义的蓝绿空间,包括农田、林地、草地等绿色空间与河流、坑塘、湖泊、水田等蓝色空间。根据相关文献^[6,16-17]对蓝绿空间雨洪调蓄能力进行分级:蓝绿空间相较于城市不透水地面,地表下渗能力较强,具有一定的雨洪调蓄能力^[5,17-18],判定为雨洪调蓄能力一般发挥;能够汇集雨水的蓝绿空间相较于一般蓝绿空间,可以减少径流,雨洪调蓄功能发挥更为显著^[19],判定为雨洪调蓄能力较优发挥(图 3)。这种方法相对于水文模型模拟结果更为真实,且易于获取、易于更新真实内涝与调蓄功能发挥状况,能够确保相关性模型建立过程与结果的可靠性。

表1 研究中选取的景观指数
Tab.1 Landscape index selected in the study

指标类型	景观指数	英文名称	指数意义
面积指标	面积指数 (AREA)	area	斑块面积
形状指标 (shape metrics)	面积周长比 (PARA)	perimeter-area ratio	面积周长比
	形状指数 (SHAPE)	shape index	形状指标
	分维指数 (FRAC)	fractal dimension index	地块自然复杂程度
	近圆形状指数 (CIRCLE)	related circumscribing circle	目标地块面积除以地块周围最小外接圆的面积
对比指标 (contrast metrics)	边缘对比度 (ECON)	edge contrast index	对比指标
聚集度指标 (contagion metrics)	临近指数 (PROX)	proximity index	在一定搜索半径内同类型斑块的丰富度
	相似度指数 (SIMI)	similarity index	聚散性指标

2.2.2 景观格局指数筛选

在 Fragstats 4.2 中进行景观指数计算, 同时选择生成栅格图。结合斯皮尔曼相关性分析 (Spearman correlation analysis) 筛选出不具备空间相关关系的解释变量, 景观指数能够反映景观的结构特征, 包括类型、数目以及空间分配和配置等信息。考虑到各景观格局指数的实际内涵, 将斑块层级中的景观指数结果进行景观意义判读, 结合以往研究^[8, 10]从面积指标、形状指标、对比指标、聚集度指标 4 个方面初步筛选出可以进行相关性分析的景观指数 (表 1), 用以较为完整地描述景观格局。

2.2.3 雨洪调蓄功能与景观格局关联建立

利用 ArcGIS 空间连接工具, 将上述雨洪调蓄发挥状况栅格图与 Fragstats 生成的栅格图进行连接, 完成雨洪调蓄功能与蓝绿空间格局的属性表, 将属性表导出至 Excel, 将之作为样本数据, 为下一步的数据分析做准备。

2.3 数据分析

研究中的因变量为雨洪调蓄功能发挥矩阵, 自变量为城市景观格局指数。本研究采用斯皮尔曼相关系数 (Spearman correlation coefficient) 与二元 Logistic 回归分析来检验城市景观格局对雨洪调蓄功能的关系, 该部分的运算在 SPSS 中运行完成。

2.3.1 斯皮尔曼相关系数分析

选择斯皮尔曼相关系数检验因变量之间的线性关系, 它是衡量 2 个变量的依赖性的非参数指标, 适用数据类型较广, 利用单调方程评价 2 个统计变量的相关性。初步筛选

出与雨洪调蓄功能关联且不具备空间自相关性的因子, 为下一步研究打下基础。

2.3.2 二元 Logistic 回归分析

由于相关系数反映的线性关系不一定是因果关系, 为了进一步探讨多种景观格局在共同作用下对城市内涝的影响程度^[10], 本研究选择二元 Logistic 回归分析进一步探究蓝绿空间对雨洪调蓄功能的影响。二元 Logistic 回归的适用条件有 4 个: 1) 因变量为二分类变量或某事件的发生率, 并且是数值型模型; 2) 残差和因变量都要服从二项分布; 3) 自变量和 Logistic 概率是线性关系; 4) 各个观测对象之间相互独立^[20]。

3 结果与分析

3.1 斯皮尔曼相关系数分析结果

针对景观格局和雨洪调蓄能力进行相关性分析, 通过斯皮尔曼相关系数检验自变量景观指数与雨洪调蓄功能之间的相关关系。初步剔除自相关性较强因子之后, 获得面积指标、形状指标、对比指标、聚集度指标 4 个能够描述景观特征的代表性因子, 入选因子与雨洪调蓄功能之间的关系如表 2 所示。

根据分析结果发现, 蓝绿空间景观格局与雨洪调蓄能力之间存在显著关联, 主要集中在蓝绿空间的形状指标与对比指标中。将面积周长比、形状指数、分维指数、近圆形状指数、边缘对比度 5 个指数, 进一步进行二元 Logistic 回归分析。

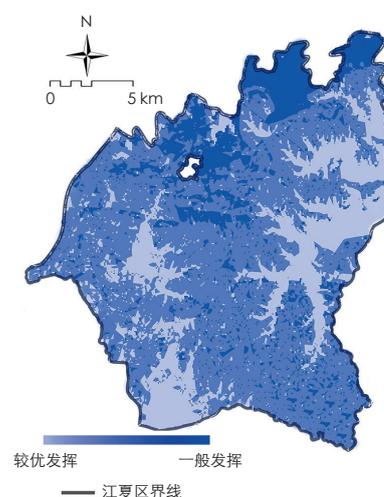
根据分析结果, 蓝绿空间的聚集度指标与雨洪调蓄能力之间没有关联。其中, 相似

表2 斯皮尔曼相关系数分析结果

Tab.2 Results of Spearman correlation coefficient analysis

指标类型	景观指数	相关系数	相关性 Sig. (双尾)
面积指标	面积	0.093	0.061
形状指标	面积周长比	-0.105**	0.000
	形状指数	0.081**	0.000
	分型维度	0.079**	0.000
	近圆形状指数	0.059**	0.004
对比指标	边缘对比度	0.064**	0.002
聚集度指标	临近指数	0.014	0.483
	相似度指数	-0.017	0.398

注: ** 代表在 0.01 级别上显著。



3 江夏区雨洪调蓄功能发挥状况
Function of land use for rain and flood regulation and storage in Jiangxia District

度指数反映了景观要素在景观中的相互分散或聚合的特点, 临近指数反映了景观类型的丰富度, 它们共同描述了不同景观类型的聚集程度, 景观类型丰富度与聚集度不具备空间自相关性, 且与雨洪调蓄能力之间不存在统计关系^[21]。反映在江夏区实际用地情况中, 部分区域相似度指数较低, 临近指数较高, 如城市高密度建成区, 景观类型较为丰富, 但同类型景观相邻关系相对不明显; 部分地区相似度指数较高, 临近指数较低, 如城市郊野或生态化程度较高的区域, 大面积的河湖水体或绿色景观类型较为单一, 但是对应相同景观类型聚合程度较高; 同时这些区域的调蓄能力散布、无规律。实验结果反映了雨洪调蓄功能与蓝绿空间聚集度指标之间没

表3 二元 logistic 回归分析参数
Tab. 3 Parameters of binary logistic regression analysis

变量	B	S.E.	Wald	sig.	Exp(B)
面积周长比	0.120	0.106	1.275	0.259	0.887
形状指数	1.326	0.772	2.954	0.086	0.266
分维指数	0.799	0.369	4.685	0.030	2.224
近圆形状指数	0.194	0.112	2.978	0.084	0.824
边缘对比度	0.007	0.086	0.008	0.931	1.007
常量	2.580	0.122	444.426	0.000	0.076

表4 霍斯默-莱梅肖检验结果
Tab. 4 Results of Hosmer-Lemeshaw test

步骤	卡方 χ^2	自由度 <i>df</i>	显著性 <i>sig.</i>
1	14.912	8	0.061

表5 景观格局对雨洪调蓄功能的影响
Tab. 5 Effects of landscape pattern on rainfall-flood regulation and storage function

景观指数	促进作用	用地形态
形状指标	正向相关	无强烈的人类活动、自然程度保持较好的用地
对比度指标	无明显相关	生态系统较为复杂、蓝绿耦合关系明显的用地
聚集度指标	无明显相关	聚集程度较高、连续性较强的用地

有关联，蓝绿空间的复合过程复杂，进一步的相关关系探索需要更精细化的实验研究。

3.2 二元 logistic 回归分析结果

为进一步研究不同景观指数的影响程度，在斯皮尔曼相关系数分析结果的基础上，利用二元 logistic 回归对变量进行处理（表3）。其中样本数量为 2 091 个，根据霍斯默-莱梅肖检验（Hosmer-Lemeshow Test）的结果（表4），显著性为 $0.061 > 0.050$ ，表明实验结果存在统计学意义。

在蓝绿空间的形状指标中，与雨洪调蓄最为直接相关的因素是分维指数。分维指数作为整体景观尺度的重要指标，反映斑块边界形状的复杂性和变异性，可揭示人类活动的干扰程度。分维指数越小，表示斑块受人类活动影响越大，形状趋于简单规整；分维指数越大，表示斑块受人类活动干扰程度越小，形状趋于自然复杂^[22-23]。实验结果显示：分维指数对雨洪调蓄能力的发挥有明显的正向促进，证明自然程度更高、人类活动干预更少的用地形状具备更优的雨洪调蓄能力；反之，受人类活动影响更大、更为简单规整的用地调蓄能力较差。

与分维指数相比，同样对用地形状进行量化的指标还有面积周长比、近圆指数，但是仅分维指数和雨洪调蓄功能具有相关性，这是因为面积周长比、近圆指数聚焦于地块的物理形状，简单的地块形状变化不能清晰地反映地块的空间意义，且形状的变化对雨洪调蓄能力也不具备指导意义，人类行为和城市活动相较之于自然环境的生态功能更具影响力。

边缘对比度用于衡量相邻斑块之间的边缘对比关系，代表了周边生态系统的复杂性

和生物多样性。如边缘对比度变化呈下降趋势，说明用地斑块和周边用地的对比越来越类似，与其他类型的用地相互交织区域的生态性能下降；如边缘对比度越高，则说明斑块周边的生态系统复杂性和生物多样性同样也越好。边缘对比度指标关注于用地类型的相邻关系，与蓝绿空间形状的破碎化与规则程度等方面没有直接的因果关系，因此边缘对比度对于雨洪调蓄能力没有直接的指导意义。

3.3 景观格局对雨洪调蓄能力的影响

整理实验结果（表5），发现蓝绿空间格局中影响最为显著的是形状指标。其中，能够表征人类活动影响的分维指数更为显著，蓝绿空间的对比度指标与聚集度指标虽然在净化水环境质量、改善热舒适度等方面有较为成熟的实证研究^[24-25]，但对调蓄影响较弱。

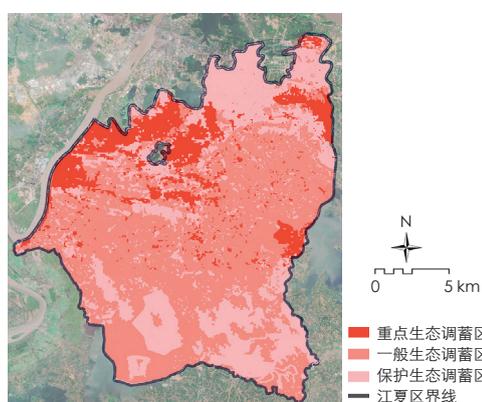
结合实际城市水文循环过程与江夏区现实情况，分析具体影响成因。1) 下渗过程主要发生在雨水落在蓝绿空间等软质下垫面时，部分人类活动会影响土壤的结构与质量，进而影响雨水下渗，城市内大规模的建设、垦殖等都会增加径流、加剧土壤侵蚀^[26-28]。同时，人类不合理的经济活动会产生以风沙活动为主要标志的土地退化，在不同程度上造成周边范围内蓝绿空间质量的退化。2) 径流过程主要发生在雨水落在不透水面时，城市化进程会在一定程度上改变城市下垫面状况，不透水面的高径流系数使得雨水汇流速度大大提高，从而使洪峰出现时间提前^[29]，同时，水库和防洪堤坝、河道取水等工程的修建会在一定程度上削弱城市河流湖泊之间的连通性，引起蓝绿空间蓄水削洪能力的减弱。

4 基于调蓄能力提升的城市规划布局建议

在城市发展中，需要考虑如何在区域化空间规划中提升韧性应对能力。将本次研究过程与城市规划建设思路相融合，在城市规划编制、运行全过程中完善韧性发展方式。结合蓝绿空间与雨洪调蓄关联机制，对于空间规划提出建议，具体开展思路如下：

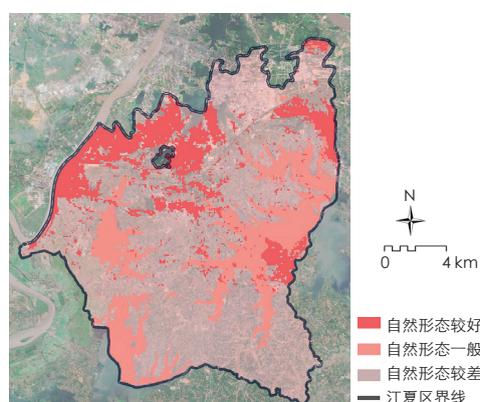
1) 在城市规划与建设阶段，应提前开展全域尺度定量化风险评估，通过识别和评估城市原本生态基底格局与城市洪涝情况，提前制定与之相适应的韧性目标与管控策略。以江夏区为例，根据实验结果中重要的景观指数与实际淹没情况，分析城市不同滞洪调蓄空间，分层级提出规划管理建议。人工干预较少的蓝绿空间雨洪调蓄能力最优，将其划分为重点生态调蓄区，作为能够弹性应对极端气候灾害的重要空间地带进行保护；人工干预较多的蓝绿空间与未被淹没的建成空间，具有一般调蓄能力，且极端天气下受灾损失较小，将其划分为一般生态调蓄区，严格控制区域内空间利用方式和开发强度；淹没情况较为严重的建成空间，灾害弹性应对能力较弱，且易对人身财产安全造成威胁，将其划分为保护生态调蓄区，结合海绵城市与韧性城市等防灾安全相关政策指导规划方案，尽可能将灾害损失降到最低（图4）。

2) 在规划运行阶段，应结合实际用地情况对保护措施进行及时调整，研究结果发现，关联更为显著的景观格局呈现蓝绿自然程度较高、用地形状较复杂的特点。以武汉市江夏区为例，根据其景观格局分析自然形态保



4 江夏区城市滞洪调蓄空间

Zoning of urban flood detention and storage capacity in Jiangxia District



5 江夏区蓝绿空间自然形态保护情况

Natural form protection of blue-green space in Jiangxia District

护情况，区域内蓝绿空间自然保护程度较好，反演实际用地情况，区域内用地情况整体分布相对均匀，生态本底条件较好^[28]，针对区域内用地分形维数具体分析，对城市规划布局提出实际建议。江夏区北部自然生态系统较为完善，镶嵌结构较为复杂，人工干预程度较低（图5）。结合实际用地情况，森林公园、风景名胜等景观型生态空间的侵占风险较低，能够得到较好的保护；散布在城市较为破碎的景观斑块，需要严格控制增长，严防侵占。在进行城市规划时需结合城市自然山水特点，因地制宜地进行规划，避免简单的尺规制图，破坏蓝绿空间原有的自然肌理，最大可能地发挥蓝绿空间调蓄效能。

5 结论与讨论

目前，已有研究大多关注景观格局与洪水过程或内涝孕灾环境之间的关系。本研究从内涝缓解途径出发，根据雨洪调蓄功能发挥状况，定量分析了不同空间特征因子对雨洪调蓄能力变化的影响及贡献程度。经研究发现，人类活动程度较轻、自然程度保持较好的用地的雨洪调蓄能力更强，而蓝绿耦合关系、同类型用地聚集关系与调蓄能力无显著相关。相关结论对城市建设具有积极的作用与意义，且在以往内涝成因研究中较少提及。

研究中，在雨洪调蓄能力量化方面，Landsat 多波段遥感影像可以有效解译出雨水范围，不受限于资料获取，能够快速有效地

反映雨洪调蓄的真实状况，在以后的研究中，如果能够获取更高精度的遥感影像，将进一步提升本研究的准确性与稳定性；在影响因子探究方面，本研究聚焦于蓝绿空间的斑块尺度，在中微观层面探究了蓝绿空间的调蓄效能，未来研究中还需要更多尺度层面的探索，以更有效地指导城市建设。城市蓝绿景观格局与雨洪调蓄功能响应关系的研究，有利于更加具体地了解二者之间的关系，对于蓝绿空间雨洪调蓄功能的提升具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 康嘉奇, 戈晓宇. 半湿润地区外源径流型海绵绿地设计方法研究: 以迁安市滨湖东路绿地为例 [J]. 风景园林, 2019, 26 (8) : 77-82.
- [2] 袁媛, 王沛永. 从防止城市内涝谈海绵城市建设的策略 [J]. 风景园林, 2016 (4) : 116-121.
- [3] 张云路, 李雄, 邵明, 等. 基于城市绿地系统优化的绿地雨洪管理规划研究: 以通辽市为例 [J]. 城市发展研究, 2018, 25 (1) : 97-102.
- [4] 王雪原, 周燕, 禹佳宁. 基于元胞自动机模拟城市扩张下的绿色基础设施布局演变与内涝风险评估: 以武汉市为例 [J]. 风景园林, 2020, 27 (11) : 50-56.
- [5] 刘丽君, 王思思, 张质明, 等. 多尺度城市绿色雨水基础设施的规划实现途径探析 [J]. 风景园林, 2017 (1) : 123-128.
- [6] 廖佳卉, 周安娜, 裘鸿菲. 城市绿地雨洪调蓄能力研究综述 [J]. 华中建筑, 2020, 38 (8) : 5-9.
- [7] 于冰沁, 车生泉, 严巍, 等. 上海海绵城市绿地建设指标及低影响开发技术示范 [J]. 风景园林, 2016 (3) : 21-26.
- [8] 吴健生, 张朴华. 城市景观格局对城市内涝的影响研究: 以深圳市为例 [J]. 地理学报, 2017, 72 (3) : 444-456.
- [9] ZHOU Z X, LI J. The Correlation Analysis on the Landscape Pattern Index and Hydrological Processes in the Yanhe Watershed, China [J]. Journal of Hydrology, 2015(524): 417-426.

[10] 袁玉, 方国华, 陆乘璇, 等. 基于景观生态学的城市化背景下洪灾风险评估 [J]. 地理学报, 2020, 75 (9) : 1921-1933.

[11] PENG Y, WANG Q, WANG H, et al. Does Landscape Pattern Influence the Intensity of Drought and Flood? [J]. Ecological Indicators, 2019, 103: 173-181.

[12] 于淼, 戈晓宇. 基于 SWMM 模拟的首钢西十地块低影响开发系统雨洪调控效果研究 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40 (12) : 97-109.

[13] 吴涌平, 林钰璐, 吴姝婷, 等. 福州市景观格局对城市内涝的影响 [J]. 中国城市林业, 2020, 18 (2) : 57-61.

[14] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析 [J]. 地理学报, 2009, 64 (12) : 1411-1420.

[15] 李灿, 曾和平. 基于面积转移矩阵的龙川江流域土地利用变化研究 [J]. 人民长江, 2018, 49 (17) : 39-44, 51.

[16] 张彪, 谢高地, 薛康, 等. 北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估 [J]. 生态学报, 2011, 31 (13) : 3839-3845.

[17] 杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述 [J]. 水利学报, 2010, 41 (10) : 1142-1149.

[18] 殷学文, 俞孔坚, 李迪华. 城市绿地景观格局对雨洪调蓄功能的影响 [C]// 中国城市规划学会. 中国城市规划年会 2014 年论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[19] 朱文彬, 陈倩莹, 李付杰, 等. 厦门市城市绿地雨洪减排效应评价 [J]. 环境科学研究, 2019, 32 (1) : 74-84.

[20] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨 [J]. 资源科学, 2010, 32 (8) : 1544-1550.

[21] 禹莎, 陈保禄, 王祥荣. 杭州市西北部生态带景观格局 [J]. 复旦学报 (自然科学版), 2010, 49 (3) : 355-361.

[22] 高婷婷. 土地整治景观生态评价方法与应用 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2013.

[23] 角媛梅, 马明国, 肖笃宁. 黑河流域中游张掖绿洲景观格局研究 [J]. 冰川冻土, 2003, 25 (1) : 94-99.

[24] 刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组别到空间构型 [J]. 生态学报, 2017, 37 (23) : 7769-7780.

[25] 李雪, 张婧, 于婉晴, 等. 京杭运河杭州段城市景观格局对河网水环境的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41 (13) : 5242-5253.

[26] 李冰, 唐亚. 金沙江下游地区人类活动对土壤侵蚀的影响 [J]. 山地学报, 2012 (3) : 299-307.

[27] WU Y F, ZHANG G X. A Review of Hydrological Regulation Functions of Watershed Wetlands [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 458-469.

[28] 蔡卓杰, 卢远, 谢坤坚. 广西人类活动对土壤侵蚀的影响 [J]. 中国水土保持, 2017 (2) : 51-53.

[29] 李树平, 黄廷林. 城市化对城市降雨径流的影响及城市雨洪控制 [J]. 中国市政工程, 2002 (3) : 37-39, 69.

图表来源 (Sources of Figures and Tables):

图 1~5 由作者绘制，底图来自湖北省省级自然资源行政主管部门下载的武汉市行政区域地图（审图号：鄂 S(2020)003 号）；表 1~5 由作者绘制。

(编辑 / 王一兰 李卫芳)