

基于时空演变分析的武汉市城市蓝绿系统空间格局及其与城市发展的协同关系研究

Study on Spatial Pattern of Urban Blue-Green System and Its Synergistic Relationship with Urban Development in Wuhan Based on Spatiotemporal Evolution Analysis

杨柳琪 周 燕* 罗佳梦 郭诗怡
YANG Liuqi ZHOU Yan* LUO Jiameng GUO Shiyi

(武汉大学城市设计学院, 武汉 430061)
(School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan, Hubei, China, 430061)

文章编号: 1000-0283(2022)07-0066-09
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2022. 07. 0066. 007
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2021-09-15
修回日期: 2022-05-27

摘 要

以蓝绿系统为空间基础结构统筹城市生态、经济、社会等多目标的发展策略,是城市应对全球气候变化与城市快速发展挑战的共识。研究蓝绿空间的演化规律及其与城市社会、经济子系统之间的相互作用关系是促进蓝绿系统综合功能充分发挥的前提。基于时空演化分析视角,以武汉市为例,通过影像解译量化了1996-2018年间武汉市蓝绿空间时空演变;引入协同发展评估模型,选取武汉市代表的社会经济指标与蓝绿空间特征指标构建了“经济—社会—蓝绿空间”三者的复合模型,测算了各子系统的综合发展效益以及复合系统的协同度。研究结果显示,1996-2018年间,武汉市蓝绿空间的面积、破碎度及暴雨淹没体积在持续减小,“经济—社会—蓝绿空间”复合系统协同度逐渐升高,这一趋势与武汉市城市经济发展及生态文明建设历程基本相符,表明城市建设质量的提升以及相关保护措施的实施有助于促进城市子系统的协同发展。将蓝绿空间的形态结构变化置于城市发展的大背景之中,量化蓝绿空间形态结构、时空变化的同时,探讨了其与城市经济、社会要素之间的协同演化过程,以期为城市蓝绿空间可持续规划以及国土空间规划提供参考。

关键词

蓝绿空间; 空间结构演化; 协同发展评估模型; 时空变化; 复合系统; 协同度

Abstract

It is the consensus of many cities to cope with the challenges of global climate change and rapid urban development that the blue-green system should be used as the spatial infrastructure to coordinate urban ecology, economy, society, and other multi-objective development strategies. Understanding the evolution of blue-green space and its interaction with urban subsystems is the premise to promote the full play of the comprehensive functions of the blue-green system, but there are few existing studies. Based on the perspective of Spatio-temporal evolution analysis, this study takes Wuhan as an example. Firstly, the Spatio-temporal evolution of blue-green space in Wuhan from 1996 to 2018 is quantified through image interpretation. Secondly, the collaborative development evaluation model is introduced. The composite model of “blue-green system - urban economy - urban society” is constructed by extracting the characteristics of urban social economy and blue-green space. And each subsystem’s comprehensive development benefits and the hybrid system’s synergetic degree are measured. Results show that from 1996 to 2018, the area and fragmentation and heavy rains flood volume of the blue and green space in Wuhan city continued to decrease. Moreover, the coordination degree of the “economy - society - blue and green space” complex system increased. This trend is consistent with Wuhan’s urban economic development and ecological civilization construction, indicating that improving urban construction quality and implementing relevant protection measures help promote the coordinated development of

杨柳琪

1998年生/女/湖北襄阳人/在读硕士研究生/研究方向为城市蓝绿空间、生态基础设施、健康城市

周 燕

1980年生/女/湖北咸宁人/博士/副教授/研究方向为城市雨洪调蓄、城乡生态规划、可持续流域规划、景观系统规划

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: joyeezhou@whu.edu.cn

基金项目:

国家自然科学基金青年项目“响应城市内涝机制的减灾型景观地形设计与量化调控方法研究”(编号: 51708426);中央高校基本科研业务费专项(2020年武汉大学海外人文社会科学研究前沿追踪项目)“健康城市导向下城市蓝绿空间景观特征对人身健康的影响机制”(编号: 2020HW007)

urban subsystems. This paper puts the change in the morphology and structure of blue-green space in the background of urban development, quantifies the temporal and spatial variation of the morphology and structure of blue-green space, and discusses the process of its co-evolution with other economic and social factors of the city, in order to provide a reference for urban blue and green space sustainable planning and policy scientific formulation.

Keywords

blue-green space; evolution of spatial structure; collaborative development evaluation model; temporal and spatial variation; the composite system; synergy degree

在全球气候变化与快速城市化的背景下, 城市发展面临着更为严峻的挑战^[1], 为解决经济发展与生态环境之间的紧张关系, 城市规划者们开始从政策法规、公共基础设施、生态基础设施等角度思考应对生态问题、提升生活质量、促进经济发展的综合方案^[2-4]。厘清城市生态空间与经济社会因素之间的相关性与动态规律逐渐成为该领域学者们的关注重点。

基于系统动态特征的协同发展评估模型能够兼顾多个子系统与时空变化特性的分析, 自物理学家赫尔曼·哈肯^[5]提出以来, 已在经济和社会科学领域以及对城市的自组织研究中得到广泛应用^[6-7]。如YU H等^[8]对“矿产资源—环境—经济”复合系统进行协同评价, 在确定描述系统的重要要素和指标的基础上, 对系统的开发和协同有效度进行了计算; ZHANG T等^[9]利用层次分析法及协同发展评估模型, 确定水、能源和粮食子系统之间的协同关系; SUN C Z等^[10]利用协同学相关理论, 构建人海关系地域系统协同演化模型, 分析各地区人海关系协同发展情况; QIAO J Y等^[11]通过构建城市河流系统的“环境—社会—经济效益”复合系统评价指标体系, 建立了序贯协同度模型, 实现了协同度评价。基于协同发展评估模型测度协同度, 进而分析多个系统间关系的方法框架已较为成熟^[12]。

蓝绿空间作为城市的重要组成部分, 在

维持城市景观生态系统运行、保障和提高城市居民生活质量中发挥着关键作用^[13-15], 以蓝绿系统为空间基础结构统筹城市生态、经济、社会等多目标的发展策略已得到广泛认可。当前, 蓝绿系统的微气候调节^[16]、雨洪调蓄^[17]、心理健康的促进^[18]等生态功能已得到广泛研究, 却鲜少有学者将其放入城市发展的大背景中进行研究。已有研究表明, 社会、政治要素对于蓝绿基础设施 (Blue-Green Infrastructure, BGI) 的进一步发展和可持续的城市洪水风险管理等至关重要^[19], Andrew等^[20]强调蓝绿基础设施与社会环境利益之间的协调关系; Svetlana Stevovic等^[21]提出厘清城市发展多目标之间关系是当务之急。有少量研究已开始关注城市蓝绿基础设施绩效发挥与城市系统中其他要素的相关性, 如钟嘉伟等^[22]从定性分析的角度探讨了城市发展与湿地生态修复间的协同关系; WANG H Y等^[23]通过特定年份遥感影像的定量解译分析了城市蓝绿空间面积比例指数分布特征与城市经济和社会因素分布的相关性。

基于此, 研究以武汉都市发展区为例, 基于多时段城市遥感影像与社会经济统计数据, 引入协同发展模型评估, 量化了1996-2018年间武汉市蓝绿空间时空演变及其与城市经济、社会因素三者间协同关系的变化特征, 拓展了协同发展模型应用范围以及城市蓝绿空间的研究范畴, 以期当前需要

同时关注城市经济发展与生态环境的国土空间规划工作提供研究依据。

1 研究区域与数据

以《武汉市城市总体规划 (2010-2020年)》划定的都市发展区为研究范围, 这一区域由主城区与新城区共同构成, 是武汉城市功能的主要聚集区和城市空间的重点拓展区, 拥有丰富的蓝绿资源^[24-25], 也是近40年来武汉市的城市经济、社会活动最为活跃的区域^[26] (图1)。

从武汉市统计年鉴中收集社会经济统计数据^[27] (表1), 并从中国科学院及美国地质调查局 (USGS) 网站收集来自Landsat卫星的遥感影像进行分析。基于数据可获取性及武汉市城市发展形式, 选择1996-2018年作为研究的时间范围, 在此期间内, 随着城市社会、经济建设的不断加快, 城市问题的逐渐突出与生态环境保护的重视程度不断加强, 城市经济、社会建设取得显著成效的同时, 蓝绿空间结构形态的时空变化明显, 便于量化和分析其空间特征的演变规律并得出结论。同时从武汉市城市总体规划 (1996年) 首次提出将武汉基本建设成为富有滨水城市特色的山水园林生态城市这一目标开始, 到《武汉市城市建设绿色发展实施方案 (2018-2020年)》中详细制定的城市蓝绿空间建设具体要求, 城市的蓝绿空间形态结构产

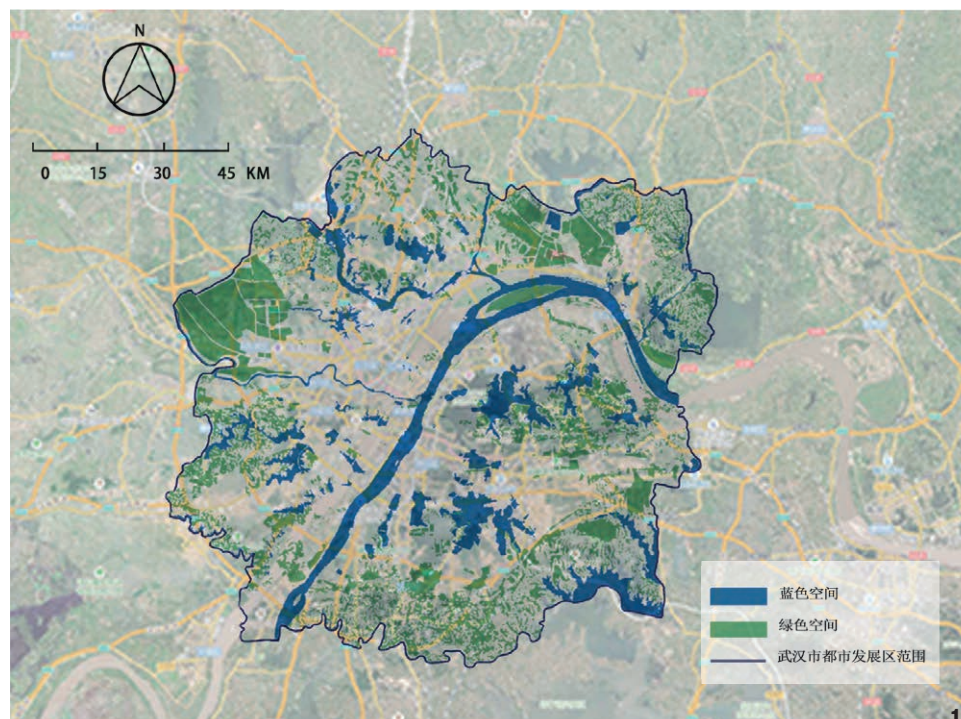


图1 研究区域
Fig. 1 Study area

生了较大的变化，复合系统之间协同发展的相关性初步体现，能更好地反映研究结果。

在此基础上充分考虑采集时间、覆盖范围、云量以及分辨率等因素后，研究以4~5年为步长，采集6个年度的遥感影像数据，如表2所示。

2 分析方法与框架

2.1 量化蓝绿空间景观格局

景观指数的重要作用在于其能用来描述景观格局，进而建立景观结构与过程或现象的联系，更好地解释与理解景观功能^[26]。在对景观进行空间分析，形成了许多描述景观格局及其变化的景观指数^[5,8,12]。为刻画蓝绿空间时空变化特征，研究从平面和垂直两个维度提取了空间属性量化指标。参考大多数研究者分析空间演变特征的量化指标，平

面空间属性的选择主要依据景观安全格局理论，选取总面积(TA)、斑块数量(NP)、形态指数(LSI)、边界密度(ED)、蔓延度(CONTAG)、聚集度(AI)、Shannon均匀度指数(SHEI)和斑块密度(PD)等8个指标；垂直或立面空间属性选取了暴雨淹没体积，该指标能较好地反演坡度、高程等竖向空间特征的变化结果。

2.2 构建协同发展评估模型

综合考虑子系统功能、影响和特点，结合参考文献中衡量城市经济社会发展情况的指标选取^[29-31]，以系统性与层次性、科学性、与简明性、共性和特性、可操作性与易获性为基本原则，以衡量城市中经济、社会、蓝绿空间三个子系统的指标为基础构建了城市复合系统协同发展评估指标体系(表3)。

目前关于权重的计算方法众多，主要有层次分析法、德尔菲法、标准离差法、熵值法等，熵值法通过指标传递给决策者的信息量来确定权重，这可以更深刻地反映指标熵的效用^[32]，研究采用熵值法计算各指标权重。体系中的指标分为正效应指标和负效应指标，对于正效应指标，即指标数值越大越好时，计算见公式(1)。对于负效应指标，即越小越好时，计算见公式(2)。

$$r_{ij} = (x_{ij} - \min\{x_j\}) / (\max\{x_j\} - \min\{x_j\}) \quad (1)$$

$$r_{ij} = (\max\{x_j\} - x_{ij}) / (\max\{x_j\} - \min\{x_j\}) \quad (2)$$

其中*i*为年份，*j*为指标，*r_{ij}*为标准值，*x_{ij}*为原始值，*max{x_j}*和*min{x_j}*分别为指标*j*在研究范围内的最大值和最小值。处理后所有指数值均在[0, 1]范围内。根据公式(1)(2)可得出第*i*年第*j*个指标数据的标准值。

2.3 模型计算

协同理论将研究对象视为一个由多个子系统构成的复合系统，各个子系统之间相互影响，形成整体效应，共同带动复合系统的发展变化^[33]。本研究对象为由经济子系统、社会子系统、蓝绿空间子系统组成的复合系统，通过协同发展评估模型计算可以求得研究时序范围内武汉市“经济—社会—蓝绿空间”这一复合系统的协同发展情况，了解发展质量与子系统间的相互关系。基于协同发展理论、系统理论构建的协同发展评估模型见公式(3)。

$$B(t) = \left[\frac{f(t,x)g(t,y)h(t,z)}{\left(\frac{f(t,x)+g(t,y)+h(t,z)}{3} \right)^3} \right]^k \quad (3)$$

公中，*B(t)*为三个子系统间的协同度；*f(t,x)*、*g(t,y)*、*h(t,z)*分别为A子系统、B

子系统、C子系统在t时刻的效益值；k为调整系数，一般k的取值范围为 [2, 5]，此处k的取值为3。协同度 $B(t)$ 的值在0 ~ 1之间，越接近1，说明三个子系统间的协同度越高，反之亦然。

三大子系统效益的计算见公式 (4) -(7)。

$$f(x) = \sum_{i=1}^m a_i x_i'$$
 (4)

$$g(y) = \sum_{i=1}^n b_i y_i'$$
 (5)

$$h(z) = \sum_{i=1}^j c_i z_i'$$
 (6)

$$C(t) = \alpha f(t, x) + \beta g(t, y) + \gamma h(t, z)$$
 (7)

式中， $f(x)$ 、 $g(y)$ 、 $h(z)$ 分别为A子系统、B子系统、C子系统的效益； x_i' 、 y_i' 、 z_i' 分别为A子系统、B子系统、C子系统所对应的指标的标准值， $i=1, 2, \cdots, n$ ； a_i 、 b_i 、 c_i 分别为指标对应的权重； $C(t)$ 为系统综合评价价值，其中 $\alpha+\beta+\gamma=1$ 。

系统耦合协同度由协同度和综合评价价值组成，计算见公式 (8)。

$$D = \sqrt{B(t)C(t)}$$
 (8)

式中， D 为系统协同度； $B(t)$ 为A、B和C三个子系统间的协同度； $C(t)$ 为系统综合评价价值。其中， $0 < D < 1$ ，协同度 D 越接近1，系统间协同度越高，反之亦然。

根据协同度的分类体系^[12]，本研究中“经济—社会—蓝绿空间”复合系统协同发展类型分类体系按照评估分数 D 值将协调发展程度由低到高分10个等级(表4)。

3 结果与分析

3.1 蓝绿空间形态结构时空变化

通过对武汉市都市发展区1996、2000、

表1 社会经济统计数据
Tab. 1 Socio-economic statistics

子系统 Subsystem	指标 Indicators	年份 Year					
		1996	2000	2005	2009	2014	2018
经济 Economy	人均收入水平/元	6 262	10 039	16 255	27 213	53 745	64 292
	人均GDP/元	12 673	15 082	26 279	44 290	89 000	123 831
	居民消费价格总指数	88.40	96.10	102.70	105.70	102.40	101.09
	恩格尔系数	0.68	0.64	0.56	0.43	0.39	0.30
	第二产业产值比重/%	48.6	44.1	46.2	46.1	48.6	43.7
	第三产业产值比重 /%	41.4	48.7	48.5	50.2	47.7	53.3
	人均水资源/m³	804	725	597	545	515	435
	人均用水量/m³	430.6	435.4	432.1	448.0	446.7	431.9
	人均粮食产量/kg	387	366	371	405	469	472
社会 Society	城市环境基础设施投资/万元	2 608.0	2 185.5	2 276.9	2 489.6	2 718.4	3 087.9
	人口自然增长率 /%	3.08	2.17	-1.89	2.46	6.30	3.96
	第三产业劳动者占社会劳动者比例 /%	41.5	42.7	48.3	48.3	51.8	54.1
	城乡居民收入比例 /%	2.18	2.29	2.41	2.63	1.86	2.08
	城镇失业率/%	2.63	3.45	4.46	4.20	3.15	2.14
	年底从业人员/人	389.76	417.78	417.50	456.00	522.24	564.08
	每万人拥有大学生数/人	212.79	276.10	783.61	972.05	1 384.89	964.00

表2 遥感影像数据
Tab. 2 Remote sensing image data

数据源 Data source	分辨率 Resolution ratio	数据编号 Data number	日期 Date	云量 Cloud cover
Landsat TM	30 m	LT51230391996166CLT00	1996.9.14	0
		LT51230382000257BJC00	2000.9.13	0
		LT51230382005254BJC02	2005.9.11	0
		LT51230392009249BJC00	2009.9.6	0
Landsat OLI	30/15 m	LC81230392014279LGN01	2014.10.6	6.9
		LC81230392018098LGN00	2018.4.18	8.9

2005、2009、2014、2018这6个时间段的高精度遥感卫星图进行识别矫正，可以得到武汉市相应年份蓝绿分布的空间数据(图2、3)。再利用GIS、Fragstats软件对平立面属性进行识别计算，得到武汉市蓝绿空间平立面属性变化表(表5)。

从表5可知，在整个研究时序区间内，TA、NP、LSI、ED、SHE和PD这6项指标在

1996-2018年中呈现逐年下降的趋势。SHE、CONTAG和AI这三项指标的变化则共同反映着景观水平上的景观格局变化，其中SHE逐年下降而其他两项指标逐年上升。

基于DEM测算的暴雨淹没体积是城市蓝绿空间竖向变化情况的指示性指标，1996-2018年间，蓝绿系统的暴雨淹没体积呈逐年下降趋势，显示出武汉市蓝绿系统蓄洪

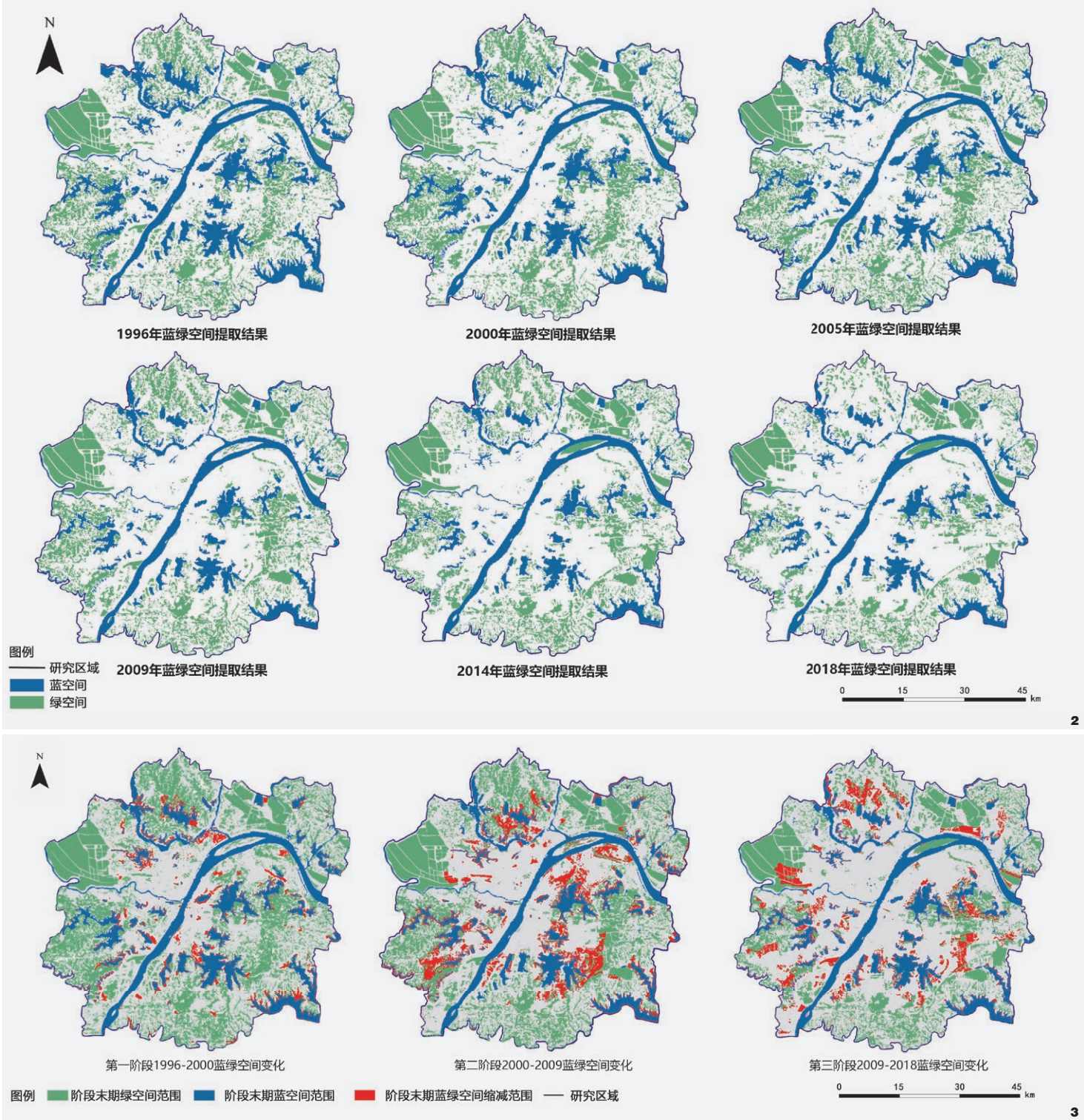


图2 1996-2018年武汉市蓝绿空间提取情况
Fig. 2 Extraction of blue-green space in Wuhan from 1996 to 2018

图3 1996-2018年武汉市蓝绿空间变化情况
Fig. 3 Spatial changes of blue and green in Wuhan from 1996 to 2018

表3 “经济—社会—蓝绿空间”复合系统协调度评价指标体系及权重
Tab. 3 Evaluation index system and weight of coordination degree of “economic-social-blue-green space” complex system

子系统 Sub-system	一级指标 Level indicators	分指标 Secondary indicators	指标方向 Indicators point	权重 Weight
经济 0.323	收入水平	人均收入水平	+	0.100
	经济规模	人均 GDP	+	0.099
	生活质量	居民消费价格总指数	-	0.108
		恩格尔系数	-	0.072
	结构合理度	第二产业产值比重	+	0.095
		第三产业产值比重	+	0.116
	生存资源禀赋	人均水资源	+	0.096
		人均用水量	+	0.103
	农业生产水平	人均粮食产量	+	0.098
	基础建设	城市环境基础设施投资	+	0.111
社会 0.210	人口发展	人口自然增长率	+	0.175
	社会结构	第三产业劳动者占社会劳动者比例	+	0.150
	社会公平	城乡居民收入比例	-	0.171
	社会安全	城镇失业率	-	0.184
		年底从业人员	+	0.145
	潜在社会效能	每万人拥有大学生数	+	0.169
蓝绿系统 0.467	平面布局	TA	+	0.104
		NP	-	0.112
		LSI	+	0.113
		ED	-	0.113
		CONTAG	+	0.067
		AI	+	0.069
		SHEI	-	0.121
		PD	-	0.104
	立体属性	暴雨淹没体积	+	0.200

表4 协同发展等级及划分标准
Table. 4 Synergetic development levels and classification standards

协同度 D 值区间 Coordination degree-D	协同等级 Coordination degree	协同发展程度 Degree of synergistic development
(0.0, 0.1)	1	极度失调
[0.1, 0.2)	2	严重失调
[0.2, 0.3)	3	中度失调
[0.3, 0.4)	4	轻度失调
[0.4, 0.5)	5	濒临失调
[0.5, 0.6)	6	勉强协调
[0.6, 0.7)	7	初级协调
[0.7, 0.8)	8	中级协调
[0.8, 0.9)	9	良好协调
[0.9, 1.0)	10	优质协调

排滞能力的下降。

3.2 武汉市“经济—社会—蓝绿空间”复合系统协调度时空演变

通过协同发展评估模型计算可得1996-2018年武汉市“经济—社会—蓝绿空间”复合系统的协调度。从表6中可以看出,协同度在研究时序区间内呈现逐步上升的趋势,复合系统一直朝着协调的方向发展,从1996年极度失调的协调水平逐步提升,发展到2018年勉强协调的水平,但并未达到协同发展程度较高的状态。

4 讨论

有诸多研究批判当前城市发展模式存在的悖论 (paradox): 即改善生活条件的行动反而造成了危害城市居民健康和生活的负面影响^[21], 主要体现在高水平的城市区域建设与城市生态环境维护的背道而驰。从整体研究结果来看, 1996-2018年间, 武汉市蓝绿空间的面积持续减小, 破碎度也在持续减小, “经济—社会—蓝绿空间”复合系统的协同度是一直在上升的, 即蓝绿空间与经济社会子系统之间随着城市的发展协同情况持续好转。梳理武汉市的城市发展历程可以发现, 这一趋势与武汉市城市经济发展及生态文明建设历程基本相符 (图4), 随着经济社会的不断进步, 政府及居民的生态环境保护意识也不断增强, 相关法律法规陆续出台, 复合系统的协调情况也在持续好转。这表明, 蓝绿空间面积的减小并不标志着其受到城市发展的侵害, 生态保护与经济建设也并不总是背道而驰的关系, 共同发展反而有助于整个城市复合系统达到协同的状态。

进一步对研究时序进行划分并分析, 在武汉市蓝绿空间建设历程的第一阶段, 即

表5 武汉市蓝绿系统空间属性变化表
Tab. 5 Spatial attribute change table of Wuhan blue-green system

年份 Year	总面积/hm ² Area	斑块数量/个 Number of patches	斑块密度/ (个 /100 hm ²) Patch density	边界密度 / (m/ hm ²) Boundary density	形态指数 Morphological indices	蔓延度/% Spread degrees	均匀度指数 Evenness index	聚集度 Aggregation index	淹没体积 /m ³ Flooding volume
1996	1 978.6	5 403	1.19	31.1	54.6	37.8	0.97	95.35	18 507
2000	1 950.4	5 335	1.11	30.9	54.5	38.2	0.97	95.38	18 688
2005	1 868.9	5 165	1.08	29.1	51.4	38.9	0.96	95.65	17 481
2009	1 757.8	4 273	0.98	27.7	48.3	40.8	0.94	95.87	14 549
2014	1 672.0	3 688	0.79	23.2	40.8	43.2	0.92	95.53	12 199
2018	1 583.3	3 229	0.68	20.5	36.2	46.0	0.89	95.94	10 319

表6 武汉市1996-2018年“经济—社会—蓝绿空间”复合系统协调度
Tab. 6 Coordination degree of "economic-social-blue-green space" complex system in Wuhan
from 1996 to 2018

时间 Year	协同度 B 值 Coordination degree-B	协同度 C 值 Coordination degree-C	协同度 D 值 Coordination degree-D	协同等级 Coordination degree	协同发展程度 Degree of synergistic development
1996	0.223	0.044	0.099	1	极度失调
2000	0.318	0.069	0.148	2	严重失调
2005	0.320	0.124	0.199	2	严重失调
2009	0.457	0.193	0.296	3	中度失调
2014	0.686	0.289	0.445	5	濒临失调
2018	0.883	0.311	0.525	6	勉强协调

1996-2000年中，城市经济和社会子系统效益提升，但二者的上升速率还相对较低，蓝绿空间子系统效益始终为负值，发展水平低下，复合系统的协同发展程度由极度失调状态提升至严重失调状态，表明在这一城市发展水平逐渐提高的阶段下，民众生态保护的意识却较为薄弱，蓝绿空间受破坏现象突出，政府虽提出了山水园林生态城市建设等目标，但未有效落实，经济社会的发展对蓝绿空间起负面作用。而在第二阶段，即2000-2010年中，城市经济和社会子系统效益提升幅度增大，蓝绿空间子系统效益先下降后上升，当时正值房地产开发浪潮，城市建设与环境保护之间矛盾越发尖锐的同时，武汉市政府于2002年进一步完善了城市绿地系统与城市湖泊水体的相关概念，制定

了更为清晰、细致的管控措施，蓝绿空间子系统的综合效益下降的趋势得以逐渐遏制并有所回升；2009年左右，国家开始对房地产业进行调控，由刺激转为遏制，城市扩张速率开始逐步减缓，这一趋势也对蓝绿空间保护政策的实施、蓝绿空间子系统效益提升起到了积极作用。总体而言，随着城市扩张速率的趋缓、蓝绿空间保护政策的落实和环境保护意识的加强，“经济—社会—蓝绿空间”复合系统的协同发展程度呈现出逐步提升的趋势，经济社会发展对蓝绿空间的负面影响有所减弱。而在2010-2018年的第三阶段，城市经济社会子系统效益及蓝绿空间子系统效益均进一步提升，增量发展转存量发展的趋势成为主流，城市蓝绿空间的相关政策进一步完善，更加重视蓝绿空间景观格局

上的优化，以保证最大限度地发挥蓝绿空间在城市环境保护、优化居民生活方面的作用，加之监管系统的进一步完善保证了各项保护、优化措施的落实，城市发展对蓝绿空间造成的负面影响逐步减轻，并最终在2018年达到了复合系统勉强协调的程度，这表明武汉市蓝绿系统相关政策的发展、优化方向是正确的，在发展过程中确实起到了明显的积极作用，但仍有很大的提升空间。

城市系统是一个“自然—社会—经济”复合系统，但三者间却并不是简单的叠加关系，研究蓝绿空间形态结构演变过程发现，SHEI值的上升、CONTAG值和AI值的下降反映出武汉市蓝绿空间的整体格局中大斑块的影响力逐步提升，但景观中各个类型的斑块分布越来越不均匀，同时蓝绿系统的蓄洪排涝能力也持续下降，即尽管符合系统的整体协同度呈现上升趋势，蓝绿空间的建设发展仍存在一定问题和改进空间。研究城市发展变化需要充分认识和承认城市系统的整体性和复杂性，强调系统内部存在的相互作用和联系，利用协同学关注复杂系统内部各子系统之间的竞争，以及由于竞争所达到的协同状态的学科特性，帮助城市规划者认识城市子系统的演化过程及相互作用机制，并针对性地提出相应政策来促进系统的发展。

5 结论

了解城市蓝绿空间与经济、社会子系统之间的协同关系，不仅可以揭示城市蓝绿空间在城市化进程中与城市其他要素演变过程的复杂关系，同时更有利于对城市蓝绿空间进行科学、有效的规划，引导其发展方向。本文以武汉市的蓝绿空间为研究对象，对武汉市1996-2018年的蓝绿空间形态结构进行了量化，分析其时空变化特征，并进一步聚焦分析蓝绿系统与城市系统中其他子系统之间的协同关系，通过引入协同学理论，构建协同发展评估模型对城市“经济—社会—蓝绿空间”复合系统的协同度进行了测算，厘清了武汉市蓝绿空间、经济、社会三个子系统的协同关系的演变特征，发现“经济—社会—蓝绿空间”复合系统的协调度与武汉市生态保护政策的提出与规划的落实息息相关。

基于武汉市“经济—社会—蓝绿空间”复合系统及各子系统综合发展水平的变化情况，为提高武汉市蓝绿空间的综合发展、保护武汉市的蓝绿资源、促进复合系统的协同发展，实现可持续的发展目标，对武汉市蓝绿空间建设提出如下建议：

(1) 对蓝绿空间的保护不仅需要关注面积指标的变化，更要重视蓝绿空间的景观格局。城市的建设容易对用地造成分隔，导致蓝绿空间失去其自然形态特征，蓝绿斑块之间联系性减弱，但在这一过程中蓝绿空间的面积变化并不明显，因此在未来的城市规划与政策中不能一味关注面积、绿地率等常规性指标，应更重视蓝绿空间景观格局的优化，同时应充分发挥蓝绿空间的雨洪调蓄能力。现有的城市政策虽然点明了蓝绿空间在雨洪调蓄方面的作用，但还缺乏更加具体的措施，海绵城市规划尚未形成完整体系并得

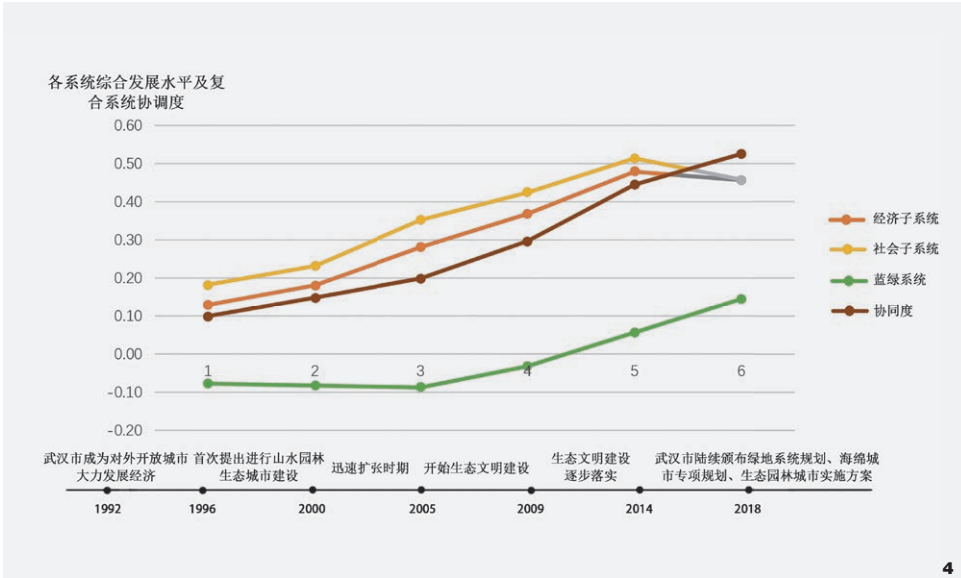


图4 武汉市城市发展时间轴
Fig. 4 Timeline of Wuhan's urban development

到推广。

(2) 应当保持现阶段蓝绿空间建设的规划、政策导向，制定更多尺度、多层次的建设措施并保障实施效率。蓝绿空间从早期以宏观目标为主逐渐发展得更科学、更精细化，这一趋势确实引导了蓝绿空间综合效益的提升，这一点在“经济—社会—蓝绿空间”复合系统协同发展程度的提升中也得到印证。而为了进一步促进城市的可持续发展，且在国土空间规划背景下加强蓝绿空间的建设和引导，在继续保持这一政策趋势的基础上，对蓝绿空间的量化与评价需要更多角度及尺度的指标，并形成完整统一的体系，其输出结果应和双评价结果形成衔接，纳入“一张图”的规划体系。

本研究在进行生态系统形态结构时空变化的同时纳入了与城市社会、经济因素协同关系的量化分析，有助于理解武汉市城市蓝绿空间发展规律，同时为武汉市蓝绿空间后续规划以及国土空间规划工作的展开提供一

定的理论依据。目前该研究分析框架仍不完善，有望在蓝绿空间形态结构的遥感影像数据、社会经济数据精度方面进一步突破，实现基于地理空间的微观分析，进一步明晰城市蓝绿空间与其他子系统间的协同关系与机制。[1][2]

注：文中图片均由作者绘制。

参考文献

[1] RUBAN L, SGEM. Natural-Hydrological Protection for Waterfront Territories: “Blue-green” Initiative[C]//3rd International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts, SGEM 2016, 2016: 443-450.
[2] RIZWAN A M, DENNIS Y C L, LIU C H. A Review on the Generation, Determination and Mitigation of Urban Heat Island[J]. Journal Of Environmental Sciences, 2008, 20(1): 120-128.
[3] 陈梦芸, 林广思. 基于自然的解决方案: 利用自然应对可持续发展挑战的综合途径[J]. 中国园林, 2019, 35(03): 81-85.
[4] NEUMAN M. The Compact City Fallacy[J]. Journal Of Planning Education and Research, 2005, 25(1):

- 11-26.
- [5] HAKEN H, PORTUGALI J. A Synergetic Approach to the Self-organization of Cities and Settlements[J]. *Environment and Planning B-Planning & Design*, 1995, 22(1): 35-46.
- [6] CHEN A M, GAO J. Urbanization in China and the Coordinated Development Model —— the Case of Chengdu[J]. *Social Science Journal*, 2011, 48(3): 500-513.
- [7] RUDOKAS K, LANDAUSKAS A M, GRAZULEVICIUTE-VILNEISKE I, et al. Valuing the Socio-economic Benefits of Built Heritage: Local Context and Mathematical Modeling[J]. *Journal Of Cultural Heritage*, 2019(39): 229-237.
- [8] YU H, MU D, COMM E B M O. Synergetic Assessment of Mineral Resource-Environment-Economy System of Jinling Iron Ore Group in Shandong Province[C]//2nd International Conference on Engineering and Business Management, 2011: 2464-2469.
- [9] ZHANG T, TAN Q, ZHANG S, et al. Synergetic Assessment of Water, Energy and Food Nexus System[C]//5th International Conference on Water Resource and Environment (WRE) / 1st International Conference on Advances in Civil and Ecological Engineering Research (ACEER), 2019.
- [10] SUN C Z, ZGANG K L, ZOU W. Study on Regional System of Man-sea Relationship and its Synergetic Development in the Coastal Regions of China[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(10): 1824-1838.
- [11] QIAO J Y, WANG M, ZHANG D Q, et al. Synergetic Development Assessment of Urban River System Landscapes[J]. *Sustainability*, 2017, 9(12).
- [12] 孟庆松, 韩文秀. 复合系统协调度模型研究[J]. *天津大学学报*, 2000(04): 444-446.
- [13] WU D, WANG Y, FAN C, et al. Thermal Environment Effects and Interactions of Reservoirs and Forests as Urban Blue-green Infrastructures[J]. *Ecol Indic*, 2018(91): 657-663.
- [14] AHMED S, MEENAR M, ALAM A. Designing a Blue-green Infrastructure (BGI) Network: Toward Water-sensitive Urban Growth Planning in Dhaka, Bangladesh[J]. *Land*, 2019, 8(9): 138.
- [15] ZHOU Y, SHI T M, HU Y M, et al. Urban Green Space Planning Based on Computational Fluid Dynamics Model and Landscape Ecology Principle: A Case Study of Liaoyang City, Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(4): 465-475.
- [16] YU Z W, YANG G Y, ZUO S D, et al. Critical Review on the Cooling Effect of Urban Blue-green Space: A Threshold-size Perspective[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020: 49.
- [17] 金云峰, 周艳, 沈洁. 蓝绿生态网络系统修复的LID雨景单元设计方法研究——基于山地水文特征分析[J]. *中国园林*, 2018, 34(10): 83-87.
- [18] VAEZTAVAKOLI A, LAK A, YIGITCANLAR T. Blue and Green Spaces as Therapeutic Landscapes: Health Effects of Urban Water Canal Areas of Isfahan[J]. *Sustainability*, 2018, 10(11).
- [19] THORNE C R, LAWSON E C, OZAWA C, et al. Overcoming Uncertainty and Barriers to Adoption of Blue-green Infrastructure for Urban Flood Risk Management[J]. *Journal Of Flood Risk Management*, 2018(11): S960-S972.
- [20] ANDREW R F. Spatial Evaluation of Multiple Benefits to Encourage Multi-Functional Design of Sustainable Drainage in Blue-Green Cities[J]. *Water*, 2017, 9(12).
- [21] SVETLANA S, SLADANA M, NEDO D. Sustainable Urban Environment and Conflict of Resources Management [J]. *Archives for Technical Sciences*, 2017(17): 79-87.
- [22] 钟嘉伟, 吴韩, 陈永生. 基于协同发展为导向的城市新区湿地生态修复策略研究——以铜陵西湖城市湿地公园为例[J]. *中国园林*, 2020, 36(07): 93-98.
- [23] WANG H Y, HU Y F, TANG L, et al. Distribution of Urban Blue and Green Space in Beijing and its Influence Factors[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6).
- [24] DING L, CHEN K L, CHENG S G, et al. Water Ecological Carrying Capacity of Urban Lakes in the Context of Rapid Urbanization: A Case Study of East Lake in Wuhan[J]. *Physics And Chemistry Of the Earth*, 2015(89-90): 104-113.
- [25] CHEN K L, WANG X, LI D, et al. Driving Force of the Morphological Change of the Urban Lake Ecosystem: A Case Study of Wuhan, 1990-2013[J]. *Ecological Modelling*, 2015(318): 204-209.
- [26] WU J, LUO J M, TANG L. Coupling Relationship Between Urban Expansion and Lake Change: A Case Study of Wuhan[J]. *Water*, 2019, 11(6).
- [27] Yearbook of China[EB/OL]. <http://www.yearbookchina.com/>
- [28] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. *应用生态学报*, 2002(01): 121-125.
- [29] 张琪, 郑刘根, 刘辉, 等. 煤炭资源型城市生态-经济-社会协调发展分析——以淮南市为例[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4313-4322.
- [30] 华坚, 刘秀, 李晶晶. 河南省水利工程系统与“经济—社会—水域生态”复合系统的协调度评价[J]. *水利经济*, 2018, 36(05): 1-6.
- [31] 黄磊, 吴传清, 文传浩. 三峡库区环境—经济—社会复合生态系统耦合协调发展研究[J]. *西部论坛*, 2017, 27(04): 83-92.
- [32] MENG D, SHEN S, LU Y. Coupling of County Transportation Superiority and Regional Economic Space in Central Plains Economic Zone[J]. *Econ Geogr*, 2012(32): 7-14.
- [33] 黄润荣, 任光耀. 耗散结构与协同学[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1988.