

城市绿色空间时空演变及其生态效益研究

——以合肥市区为例¹

姚侠妹^{1,2,3} 陈媛媛^{1,2} 偶春³ 张清怡^{1,2} 姚晓洁^{1,2*}

(1. 安徽建筑大学建筑与规划学院, 安徽合肥 230601;

2. 安徽省国土空间规划与生态研究院, 安徽合肥 230601;

3. 阜阳师范大学生物与食品工程学院, 安徽阜阳 236037)

【摘要】:城市绿色空间是生态系统的重要组成部分,研究城市绿色空间演变及其生态效益,揭示两者之间的作用机制,能够为改善生态环境、协助城市可持续发展提供理论依据。基于合肥市区的遥感影像图,借助 ENVI、ARCGIS、ArcView 等相关软件,利用监督分类法对其进行解译分类,分析绿色空间演变及其在固碳、空气净化、暴雨径流削减、热岛效应等方面的生态效益变化情况。结果表明:(1)合肥市区绿色空间面积降低 516.59km²,其中大部分转变为建设用地,转化面积占据了 2020 年建设用地面积的 74.9%,无植物覆盖、低植被覆盖度地区增加 255.5km²,景观格局向破碎化且异质化发展;(2)合肥市区绿色空间生态效益在总量上共计减少 4.2 亿元,固碳、大气污染物去除、暴雨径流削减分别减少了 1.77 亿元、548.9 万元以及 2.61 亿元,同时生态系统服务需求增至原来的 700 倍;(3)原围绕中心城区、长江西路等地的高温区,随城市空间扩展而不均匀的扩散到合肥市区范围内的大部分地方,同时研究区域内地表温度随区域植被覆盖度降低而增高,呈现出明显的负相关。合肥市区城市绿色空间面积随着城市化进程推进而降低,其产生的生态效益也随之降低,致使城市出现生态系统服务能力降低、生态供需失衡、热岛效应加强等问题。

【关键词】:绿色空间;时空演变;生态效益;CITYGREEN;合肥市区

【中图分类号】:X87;Q948 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004- 8227(2023)01- 0051- 11

【DOI】:10.11870/cjlyzyyhj202301005

随着城市化进程的不断推进,城市建设用地快速扩张,占用了大量的绿色空间,致使城市内部出现生物多样性逐年减少^[1]、生态系统服务价值不断降低^[2]、生态风险迅速攀升^[3]等问题,对城市生态环境造成了一定的负面影响。而城市内部的绿色空间是

¹ 收稿日期:2022- 02- 28;修回日期:2022- 05- 09

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJC760117);安徽省社会科学创新发展研究课题(2021CX182);安徽建筑大学博士科研启动基金项目(2020QDZ15);安徽省高校自然科学研究项目(KJ2020A0456);安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2021197);安徽省高峰学科培育课题(2021-138)

作者简介:姚侠妹(1981~),女,副教授,主要研究方向为景观规划与城乡发展.E-mail:yaoxiamei@126.com

*** 通讯作者** E-mail:yaoxj661@sina.cn

缓解这种负面影响的关键^[4],能够促使城市和生态环境协调发展。研究城市绿色空间的演变及其生态效益,有利于统筹规划城市未来的绿地系统,对于城市建设和生态环境和谐发展有着一定的借鉴意义。

目前国内外对于城市绿色空间演变及其生态效益研究是多方面和深层次的,主要包括从城市内不同种类植物的固碳释氧量^[5]、增湿降温^[6]效应出发,对绿色空间的生态效益进行估算;也可以通过 3S 技术^[7],提取出城市绿色空间的景观格局形态、结构等信息,进而研究其与温湿效应的关系;尤美子等^[8]、熊文涓等^[9]通过传统人工测绘、遥感影像解译等方法测量出绿色空间的二维或者三维绿量,再结合现场观测或遥感技术得出的城市热环境情况,对两者进行关联分析;或者通过一定的计算方法直接将城市绿色空间的生态效益转换为经济效益,借助 CITYGREEN^[10,11]和 I-TREE^[12]等软件,快速量化城市绿色空间所具有的经济和生态价值。综上所述,国内外对于城市绿色空间的生态效益研究已经较为深入,多数研究体现出了城市绿地空间和生态环境之间的响应关系,但是少有关于区域景观类型的内部转化与对生态环境影响研究,并且在研究区域的选择上,多数也选择了如上海、北京等发达城市,而对快速发展中城市的研究较为少见。

合肥市在近几十年发展迅速,已成长为长三角世界级城市群的副中心城市,对于长江流域的经济发展和生态环境至关重要。于此,研究以合肥市区在 1994~2020 年的遥感影像图为基础,借助 ARCGIS 数据分析平台,探究城市绿色空间的时空演变情况;再通过 ArcView 的扩展模块 CITYGREEN 获取到合肥市区内历年城市绿色空间的固碳、空气净化、水土保持等生态效益供给情况,以及从经济发展、人口密度、土地开发程度等方面描述对生态效益的需求情况,研究合肥市区内生态供需平衡问题,再结合城市地表温度,多层次、多角度探讨城市绿色空间对城市环境的作用机制,以此为城市未来可持续发展、解决用地矛盾等提供有力依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

合肥市为安徽省省会,属区域性特大城市,截止 2020 年,合肥市含 4 个市辖区、4 个县以及代管的 1 个县级市,总面积达 11 445 km²,建成区面积 528.5 km²,常住人口 937.0 万,城镇化率 82.3%^[13]。合肥位于江淮之间,属亚热带季风气候,具有四季分明、气候温和、降雨集中等特点^[14];研究区域地貌多样,有丘陵、平原、山地^[15]等;内含淝河以及中国五大淡水湖之一的巢湖^[16],地表水系较为发达;土壤可大致分为 5 个大类、12 个亚类,其中黄棕壤、水稻土总共约占合肥全部土壤的 85%^[17],土层分布广泛且厚重。伴随着城市化进程的推进,合肥市的城市结构和景观格局发生了深刻的变化,对城市生态环境产生了重大的影响。由于合肥市重要的地理位置,同时作为长江三角洲城市群的副城市中心^[18],其生态环境状况对于该区域以及周边地区有着重大影响。探究合肥市区绿色空间的时空演变及其生态效应,对于缓解城市用地矛盾、改善区域生态环境有着一定的借鉴意义。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

根据数据的可获取性以及分辨率的要求,选取了六期 Landsat TM 和 OLI 遥感影像数据(1994、1999、2004、2009、2014、2020)作为提取城市地表绿色空间信息的基础数据。同时还利用了安徽省统计年鉴、合肥市统计年鉴等相关文献对合肥市在 1994~2020 年的社会经济统计数据,作为研究所需的辅助数据。

1.2.2 城市绿色空间提取

遵循我国现有的土地分类体系、研究区域现状和遥感影像图分辨率,将区域内的用地分为绿色空间和非绿色空间两大类,其中绿色空间包括水域、林地、草地、农田^[19],非绿色空间包括城市建设用地和其他用地。基于 ARCGIS 分析平台,采用监督分类法中常用的最大似然估计法^[20],对合肥市区的地表覆盖情况进行分类,得到合肥市区土地利用分类图。采用抽样调查的方法,

分析得出 Kappa 系数及影像分类精度分别达到了 0.8 和 90%以上,符合研究对精度的要求。再利用 Fragstats 对土地利用分类图进行分析,提取出城市绿色空间的景观信息。

1.2.3 CITYGREEN 模型

(1)模型数据库的建立

CITYGREEN 模型是基于 ArcView 的一项扩展模块^[21],该模型可以将城市绿色空间的生态环境能够效应转换为经济效益,能够直接量化城市绿色空间的生态价值。本文借助 CITYGREEN 的大尺度分析方法,以上述分类后的城市绿色空间分布栅格图为基础,将栅格图转化为 CITYGREEN 模型的格式类型,再输入评价模型参数数据,进而进行效益分析。

模型参数的选择:

A. 降雨量

本文的降雨量(P)是采用的研究区域重现期两年,延时 24 h 的典型暴雨雨量。本文通过王睿根据合肥气象站记录[22]所绘制的合肥在 1960~2020 年的最大 24 h 降雨分布图,得出 P 值等于 8 cm。

B. 坡度

坡度(S)是研究区域的平均坡度。本文将研究区坡度划分为十二个等级,再用每个等级的中间值乘以每个坡度等级的面积所占比例,即得到该区域的平均坡度。故本文中 S 值为 1.05。

C. 暴雨时程分配类型

暴雨时程分配类型是对美国境内暴雨特征的总体描述,总共分为四种类型。目前国内没有类似参数可用。本文通过合肥气象站在暴雨天气的 24 h 内的降雨记录,描绘出雨量——时程曲线,该曲线呈现出合肥暴雨具有降落时间较为集中、强度大的特点,整体趋势与 TYPE II 最为相近。

D. 水文土壤类型

水文土壤类型表示区域内土壤的渗水能力等级,CITYGREEN 模型中将其划分为 A、B、C、D 四类,即由 A 到 D 土壤的黏性依次增加,透水性递减。合肥区域的土壤主要以黄棕壤和水稻土为主,其中占比最大的黄棕壤^[23],具有土层厚、质地粘重、阻水阻气的特点,但是由于市中心的土壤受到城市化的干扰^[24],有着一定的硬质化率,使得土壤的透水性有所增高。综合考虑,将合肥市区的水文土壤类型定为 C 类。

(2)CITYGREEN 计算原理

A. 碳的存储与吸收

CITYGREEN 模型可以对区域内植被的固碳效益进行估算,其中包括碳储存量和碳吸收量^[25],计算公式如下:

$$C_v = A_r \times F_c \times C_{vf} \quad (1)$$

$$C_r = A_r \times F_c \times C_{rf} \quad (2)$$

式中： C_v 为碳储存量； C_r 为碳吸收量； A_r 为研究区面积； F_c 为植被覆盖率(%)； C_{vf} 为碳存储因子； C_{rf} 为碳吸收因子； C_v 与 C_r 之和为固碳总量。

B. 大气污染清除

城市绿色空间的空气净化能力主要表现在分解、吸收和固定大气中的有害物质，植物的叶片可以吸收、分解 SO_2 、 O_3 、 NO_2 ^[26] 等，从而净化空气。计算公式如下：

$$C_a = L_a \times V_d \times T \quad (3)$$

式中： C 代表空气的污染物去除量； L_a 为区域内叶面积； V_d 为沉降率； T 为暴露时间^[27]。

C. 暴雨径流削减

地表的植被可以有效阻碍雨水快速流动，削减暴雨径流，CITYGREEN 可以根据土地类型、降雨量、土地利用类型等来预测雨水缓排量、流量高峰和集中流量。计算公式如下：

$$V_r = Q \times A_r \quad (4)$$

$$Q = [(P - 0.2S)^2 / P] + 0.8S \quad (5)$$

$$S = (1000 / CN) - 10 \quad (6)$$

式中： V_r 为年径流量； A_r 为研究区域面积； P 为研究区重现期 2 年延时 24 h 的典型暴雨量； S 为坡度值； CN 为降雨时的土壤曲度值^[27]。

(3) 生态系统服务供需关系

研究绿色空间生态系统服务供给依托于 CITYGREEN 的计算的生态效益结果，表达了区域在污染物去除、水土保持、碳储存等方面的生态系统服务供给价值。

$$EBS = C_v + C_r + C_a + C_b \quad (7)$$

文章参考彭建等^[28]的研究成果，用土地开发程度、人口密度和地均 GDP 来表达人类对生态系统服务的需求。

$$EBD = X1 \times \log_{10} X2 \times \log_{10} X3 \quad (8)$$

式中：EBS 为生态系统服务总供给；Cb 为暴雨径流削减价值；EBD 为生态系统服务需求指数；X1 为建设用地比例(%)；X2 为人口密度(人/km²)；X3 为经济密度(万元/km²)。

在供求关系描述上，使用 Z-score 法^[29]对供给和需求进行数据标准化，再以 X\Y 轴分别代表标准化后的生态系统服务供给值和需求值。当供给(需求)为正时则代表高供给(需求)，为负时则代表低供给(需求)。

$$Z = (Z_i - \bar{Z}) / S \quad (9)$$

式中：Z 为数据标准化后的供给(服务)值；Z_i 为第 i 个生态系统服务供给(需求)值； $\bar{Z}$ 为数据平均值；S 为数据标准差。

1.2.4 城市地表温度反演

研究采用的是精确度较高的单窗算法^[30]，同时因为研究时间段较长，采集到 Landsat TM 和 OLI 两个类型的遥感影像，针对两个类型的遥感影像数据有不同的地表温度反演计算公式，分别如下：

$$TS(TM) = K2 / \ln(K1 / B(TS) + 1) - 273.15 \quad (10)$$

$$TS(OLI) = [a \times (1 - C - D) + (b \times (1 - C - D) + C + D) \times T6 - D \times Ta] / C - 273.5 \quad (11)$$

式中：TS 代表地表温度，单位为摄氏度；对于 TM 影像，K1、K2 的值分别为 60.776 和 1 260.56^[31]，B(TS) 是热红外辐射亮度值，计算公式如下：

$$B(TS) = [b1 - lu - \tau \times (1 - \varepsilon) \times ld] / (\tau - \varepsilon) \quad (12)$$

对于 OLI 遥感影像，a、b 常量根据合肥市辖区情况和遥感影像图采集时间定为 -67.355 35 和 0.458 606；T6 是 TM6 卫星亮度温度，K1、K2 的值分别为 774.89 和 1 321.08^[32]，L_γ 为辐射定标后的热红外波段，计算公式如下；Ta 为当地实际情况下的大气平均作用温度；C、D 为中间变量，计算公式如下：

$$T6 = K2 / \ln(1 + K1 / L_{\gamma}) \quad (13)$$

$$C = \tau \times \varepsilon \quad (14)$$

$$D = (1 - \tau) \times [1 + \tau \times (1 - \varepsilon)] \quad (15)$$

式中： ϵ 为地表比辐射率^[33]； l_u 为大气向上的辐射亮度； τ 为大气透射率； l_d 为大气向下的辐射亮度^[34] (数据来源：美国国家航空航天局官网)；其中 ϵ 与归一化植被指数 NDVI 有密切关系^[35]：

自然表面的地表发射率

$$\epsilon = 0.9625 + 0.0614 * FVC - 0.0461 * FVC * FVC \tag{16}$$

城镇表面的地表发射率

$$\epsilon = 0.9589 + 0.086 * FVC - 0.0671 * FVC * FVC \tag{17}$$

$$FVC = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s) \tag{18}$$

式中： FVC 表示区域的植被覆盖度^[36]； $NDVI_v$ 代表着区域植被被全部覆盖时的 NDVI 值；而 $NDVI_s$ 代表着区域未被植被覆盖时的 NDVI 值，根据合肥市区不同年份的实际情况确定上述两个值。

2 结果与分析

2.1 城市绿色空间演变分析

2.1.1 城市绿色空间的演变概况

根据对遥感影像图进行分类处理后的统计结果可以得出，在 1994~2020 年间，合肥市区的绿色空间和非绿色空间变化明显。绿色空间降低为原面积的 1/2，非绿色空间增长了 3.85 倍，其中草地和耕地减少面积最多，分别减少 268.62 和 231.37 km²；建设用地增长最多，增长了 559.93 km²。

表 1 合肥市区城市绿色空间类型结构

类型年份	草地	耕地	水域	林地	其他用地	建设用地	合计	
							绿色空间	非绿色空间
1994 年	389.20	572.02	84.61	56.89	59.23	122.76	1 102.73	181.99
1999 年	338.63	614.91	75.77	56.43	65.80	133.19	1 085.73	198.99
2004 年	301.80	546.94	77.14	50.56	118.37	189.91	976.43	308.29

2009 年	348.49	418.66	74.45	44.15	113.18	285.80	885.74	398.97
2014 年	290.20	348.38	89.00	43.07	143.09	370.98	770.65	514.07
2020 年	120.58	340.65	81.78	43.12	16.65	681.93	586.14	698.58

再根据 1994 和 2020 年的土地利用分类图，对合肥市区内的绿色空间转移进行了总体分析，分析结果如图 1 所示。

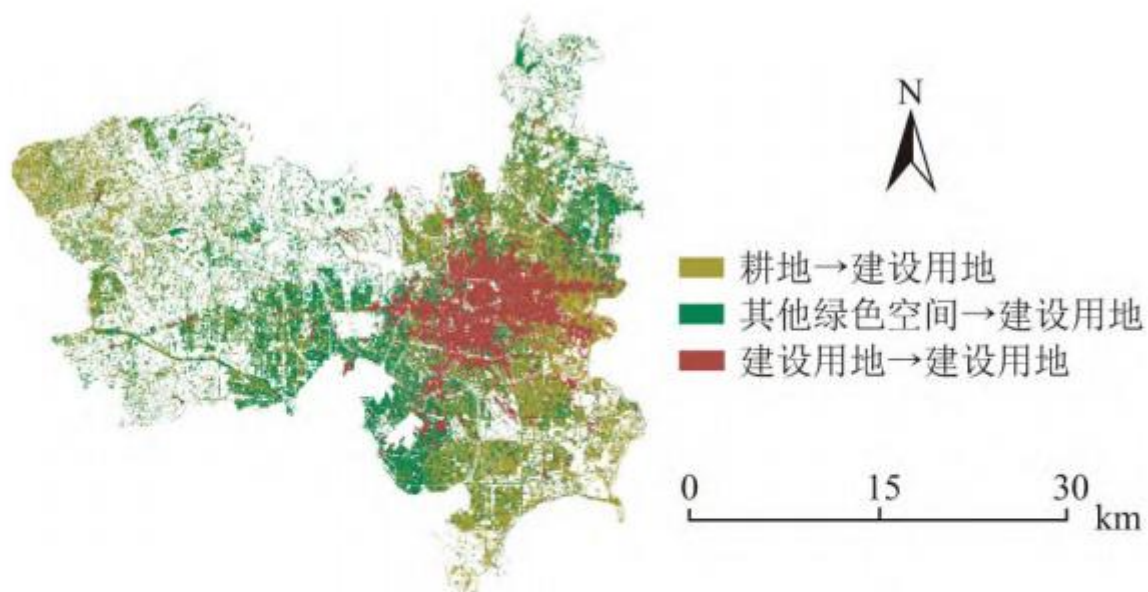


图 1 1994~2020 年合肥市区绿色空间转移关系图

Fig. 1 Transfer relationship of green space in Hefei municipal area from 1994 to 2020

研究期间，大量的绿色空间转换为了建设用地，尤其是草地、耕地分别有 245.3、226.2 km²，林地、水域转化为建设用地的面积则分别有 28.8、9 km²，四类绿色空间转变的面积占据了 2020 年建设用地的 74.9%。另外也存在着绿色空间内部转化的情况，主要有 12.0 的草地和 20.1 km²耕地转变为林地，这大部分是随着城市化进程的推进，草地和耕地不断向城市绿地转变，成为城市公园、街头绿地、防护绿化等，其中包括滨湖国家森林公园、方兴湖公园等。

2.1.2 植被覆盖度时空演变

在研究区域植被覆盖度计算基础上，参考其他学者的研究结果^[37,38]，根据研究区域现状和植被覆盖度阈值情况，将 $0 \leq FVC \leq 10\%$ 定义为近似无植被覆盖区域； $10\% < FVC \leq 30\%$ 定义为低植被覆盖； $30\% < FVC \leq 60\%$ 定义为中植被覆盖区域； $60\% < FVC \leq 85\%$ 定义为高植被覆盖区域； $FVC > 85\%$ 定义为全植被覆盖，根据以上分级规律，再将植被覆盖计算结果进行处理，制作成植被覆盖等级图，如图 2 所示。

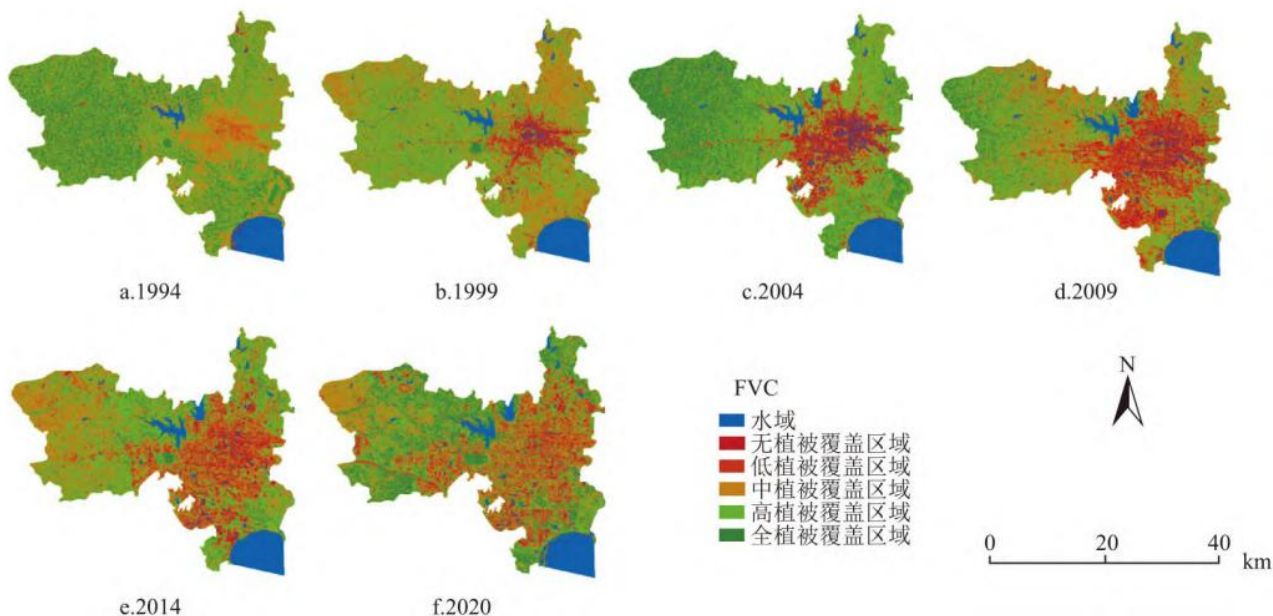


图 2 1994~2020 年合肥市区植被覆盖度等级图
Fig. 2 FVC grade map of Hefei municipal area from 1994 to 2020

1994~2020 年, 无植被覆盖区域和低植被覆盖区域的面积增加了 255.5 km², 变成原面积的近 10 倍; 中植被覆盖区域增加了 173.3 km²; 而高植被覆盖区域和全植被覆盖区域面积总共减少了 428.7 km², 减少到原面积的 56.4%。植被覆盖度的变迁和地表景观变化基本对应, 无、低以及中植被覆盖区域和城市用地扩展具有高度相似性, 可见绿色空间随着城市用地的扩展而减少是难以避免的, 因此在城市化进程中去提高和保护植被覆盖度尤为重要。

2.1.3 绿色空间景观格局分析

(1) 景观格局指数分析

结合研究区域特点, 为了能够反映出城市的绿色空间斑块、空间结构的特征, 选取了 13 个景观水平指数, 这 13 个指数大体可反映出景观斑块特征、景观多样性、景观聚集度, 从多个方面分析了研究区域的城市绿色空间景观格局。

表 2 合肥市区绿色空间景观格局指数变化情况 导出到 EXCEL

类型	景观斑块特征指数				景观多样性指数			景观聚散程度指数					
	NP	MPS	LPI	SHAPE-MN	SHDI	SHEI	D	PD	IJI	CONTAG	PLADJ	DIVISION	COHESION
1994	51 989	2.47	16.41	2.79	1.45	0.81	0.34	40.47	60.44	52.02	72.01	0.96	99.02
1999	57 466	2.24	15.86	2.97	1.47	0.82	0.32	44.73	59.92	55.19	72.51	0.86	99.03

2004	63 620	2.02	14.88	3.11	1.47	0.82	0.32	49.52	66.96	50.51	71.68	0.81	98.60
2009	68 005	1.89	12.88	3.13	1.48	0.82	0.32	52.93	66.14	48.38	70.67	0.73	98.53
2014	74 200	1.73	10.83	3.24	1.48	0.83	0.31	57.76	71.36	48.33	68.22	0.74	98.27
2020	75 528	1.70	10.49	3.31	1.26	0.70	0.54	58.79	77.10	44.88	66.38	0.72	98.16

1994~2020 年,地表景观发生了巨大变化。在景观斑块特征上,斑块数量增加 0.45 倍,斑块的平均面积从 2.47 减小到 1.7 hm^2 ,最大斑块在整个景观中的所占比例从 16.41%减小到了 10.49%,斑块平均形状指数增长到 3.31。表明合肥市区的景观斑块随着城市化进程的不断推进而逐渐破碎化,斑块的形状逐渐趋于不规则和复杂化。

景观多样性指数在研究期间内发生了波动变化,以 2014 年为转折点,香农多样性指数、香农均匀度指数均是先增后减,优势度指数先减后增。以上指数的变化表明随着合肥城市化进程的推进,先是原本具有优势度的斑块类型不断减少,使得各个景观斑块类型在空间上的组成越来越均衡;而后随着建设用地面积不断扩大,超过其他景观斑块类型所占面积,成为优势斑块,优势度指数又开始增长。

合肥市区斑块密度从 40.47 增长到 58.79 个/ km^2 ,散布与并列指数增长 0.27 倍,蔓延度指数从 52.02%降低到 44.88%,同类斑块邻接比从 72.01%降低到 66.38%,分离度从 0.96 降低到 0.72,斑块凝聚度也有所降低,意味着合肥市区斑块的聚集程度下降,斑块分布区域分散,斑块之间的连接度下降。

(2) 景观格局演变特征

城市建设用地随着时间推移不断向四周扩散总面积,主要往南部和东北方向扩展;耕地不断缩减,从原来面积第一变为第二,但依然围绕着城市建设用地;蜀山、小蜀山、自然绿地等绿色空间出现大面积缩减,但在环巢湖地区出现了大面积的林地和草地;水域面积变化不大,依然是以巢湖、董铺水库、大房郢水库等为主,但是也有南艳湖、翡翠湖等新水域建成。

城市的景观格局遵循合肥市对其的功能定位而变化,且不同区域拥有不同的特征,主要可概况为围绕着中心城区往外绿色空间逐步增多,各类用地破碎化程度降低。在高新区、工业区、经开区等开发区地,建设用地密集,绿色空间以草地、小面积的林地以及水域等城市公园空间为主。而在滨湖新区地,围绕着巢湖区域新增了大面积的林地与草地等生态效益更强的绿色空间,滨湖新区的建设也使得合肥往“滨湖城市”发展的路途上更进一步,成为促进东西部互动及协同发展的区域性中心城市[39]。

2.2 基于 CITYGREEN 模型的城市绿色空间的生态环境效益演变分析

2.2.1 城市绿色空间生态环境效应结果

通过 CITYGREEN 程序中具有的固碳模块(Carbon Storage and Sequestration)、大气污染物去除模块(Air Quality)、暴雨径流削减模块(Stormwater Runoff)3 个模块来计算出研究区域内绿色空间的生态效益,最终以经济价值的形式表达出来。按照在《森林生态系统服务功能评估规范》中提出的碳税率和水库容单位造价成本,分别为 1 200 元/t 和 6.110 7 元/ m^3 的价格标准计算固碳效益价值和暴雨径流削减价值^[40]。

由于 CITYGREEN 模型中的数据单位是在美国通用的重量单位—磅(lbs)和经济单位—美元(\$),为了更加符合研究区域的实际情况,将单位分别转换为吨(t)和人民币(¥),人民币汇率以 2020 年为准。计算结果如表 3 所示。

表 3 合肥市区绿色空间生态效益变化情况

	生态效益	1994 年	1999 年	2004 年	2009 年	2014 年	2020 年
固碳效益	碳储量(t)	564 091.7	551 326.3	467 585.2	434 752.92	425 949.2	390 083.4
	碳储量价值(¥)	676 910 040	661 591 560	561 102 240	521 703 504	511 139 040	468 100 080
	年碳吸收量(t)	4 391.6	4 292.2	3 640.3	3 384.7	3 316.1	3 036.9
	年碳吸收量价值(¥)	5 269 920	5 150 640	4 368 360	4 061 640	3 979 320	3 644 280
	固碳总量	568 483.3	555 618.5	471 225.5	438 137.6	429 265.3	393 120.3
	固碳总量价值	682 179 960	666 742 200	565 470600	525765 120	515 118 360	471 744 360
大气污染物去 除量	O ₃	187 269.1	183 031.2	155 230.6	144 330.8	141 408.1	129 501.2
	SO ₂	52 019.2	50 842	43 119.6	40 091.9	39 280	35 972.6
	NO ₂	116 404.1	113 769.9	96 489.4	89 714.2	87 897.5	80 496.3
	PM ₁₀	142 384	139 161.8	163 374.5	109 737.2	107 515	98 462.1
	CO	17 775.7	17 373.4	14 734.6	13 700	13 422.5	12 292.3
	总计吸收量(kg)	515 852.2	504 178.4	427 598.6	397 574.1	389 523.2	356 724.5
	总计价值(¥)	17 790 873.5	17 388 263.9	14 747 157.6	13 711 660.5	13 433 998.8	12 302 829
暴雨削减效益	暴雨径流削减量(m ³)	85 081 869.4	77 302 210	77 302 096.8	69 700 952	61 921 292.5	42 354 809.6
	暴雨径流削减量价值(¥)	519 909 779.5	472 370 614.4	472 369 922.7	425 921 607.3	378 382 442.2	258 817 535
	生态效益价值总计(¥)	1 219 880 613	1 156 501 078	1 052 587 680	965 398 387.8	906 934 801	742 864 724

生态效益价值总值变化呈现出单调递减的趋势,生态效益价值总值由12.19亿减少到7.42亿,减少了2/5,年均减少 1 834.62 万。

2.2.2 生态效益分析

由表分析可知,研究区域内的固碳效益、大气污染物去除、以及暴雨径流削减等生态效益在整体上呈现出单调递减的趋势,具体如下:

研究区域的固碳总量和固碳总量价值分别从 1994 年的 56.84 万 t 和 6.82 亿元减少到 2020 年的 39.31 万 t 和 4.72 亿元，降低为原来的 7/10, 其中 1999~2004 年减少 0.15 倍，降幅最大。表明区域内绿色空间面积的减少，其整体对二氧化碳的转化能力减弱，固碳量降低。

在大气污染物去除效益中，对于 O₃、SO₂、NO₂、PM₁₀、CO 大气污染物的吸收总量从 1994 年的 515 852.2 kg 降低到 2020 年的 356 724.5 kg，其生态效益换算成经济价值相当于降低 548.9 万元，减少了 0.31 倍。建设用地的大面积增长，导致硬化地面增多，导致研究区域的绿色空间对于大气污染物的清除能力减弱。

对于暴雨径流削减，研究区域对暴雨的削减量从 1994 年的 8 508.19 万 m³降低到 2020 年的 4 235.48 万 m³, 相当于生态效益价值降低了 2.61 亿元，减少了近一半。绿色空间的大面积减少，尤其是草地和耕地的减少，导致研究区域在面对暴雨时，对暴雨径流的削减能力减弱，进而导致水土保持能力被削弱。

2.2.3 生态系统服务供需

文章以 citygreen 模型计算的生态效益价值作为生态系统服务供给价值，供给价值在研究期间内降低了 0.4 倍；以人口密度、土地开发程度、地均 GDP 的乘积表示生态系统服务需求，需求值从 90 975 上涨到 64 917 776, 增长近 700 倍。两者发展方向的相悖，使得研究区域内的供需逐渐失衡。

合肥城市化进程的推进，使得城市绿色空间的生态系统服务供给能力越来越弱，而区域内人类的生态系统服务需求越来越强。如图 3 所示，合肥市区的生态系统服务供需从高供给-低需求，到低供给-低需求，再到低供给-高需求，象征着研究区域内的生态系统服务需求随着城市发展越来越强，但同时供给不足也愈演愈烈。表示合肥市区城市绿色空间的生态供给能力需要加强，生态环境亟待修复和改善。

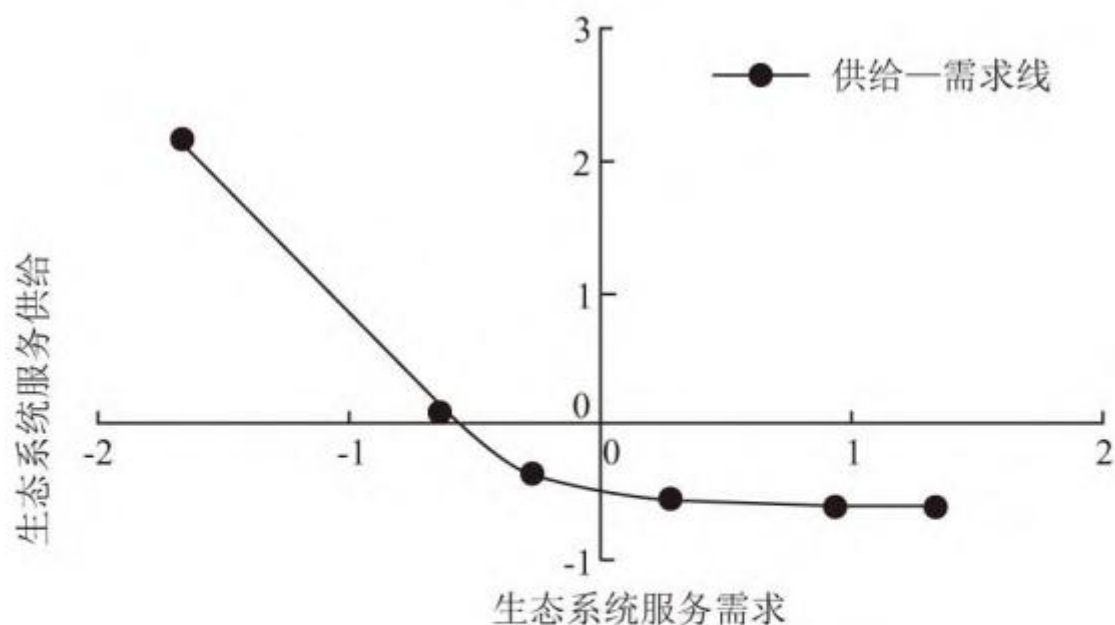


图 3 1994~2020 年合肥市区生态系统服务供给需求线

Fig. 3 Supply and demand line of ecosystem services in Hefei municipal area from 1994 to 2020

2.3 城市热环境时空分布格局及其演变特征分析

2.3.1 城市热环境时空布局特征分析

在 ENVI 和 ARCGIS 软件的支持下, 利用单窗反演法反演出合肥市区地表温度, 如图 3 所示, 研究区域的高温区主要分布在建设用地及其辐射范围内, 同时随着时间的不断推移, 建设用地不断扩张, 高温区也不断扩展, 使得原本占地面积较小的高温区, 扩张数倍。

从图 4 可见, 在 1994 年时, 高温区主要分布在中心城区、东部工业区以及沿着长江西路、长江东路和金寨南路等附近, 这些地方的地表上覆盖了水泥、金属等不透水材料, 并聚集了大量人口, 同时部分工业区存在着排放热量的情况, 导致大量热量产生且无法被吸收。1999 年以后, 高温区的范围继续向外不断扩展, 至 2020 年时高温区范围已经散布在研究范围内中的大部分地方, 城市热岛效应随着城市建设用地扩张而扩展, 交通干线与周边城镇地区的热岛效应相互交融形成一个整体。整体上从原来较为单一的围绕中心城区及其辐射区域的明朗形态, 变为沿着城市扩展轴不断向外辐射延伸的不规则且复杂的形态。

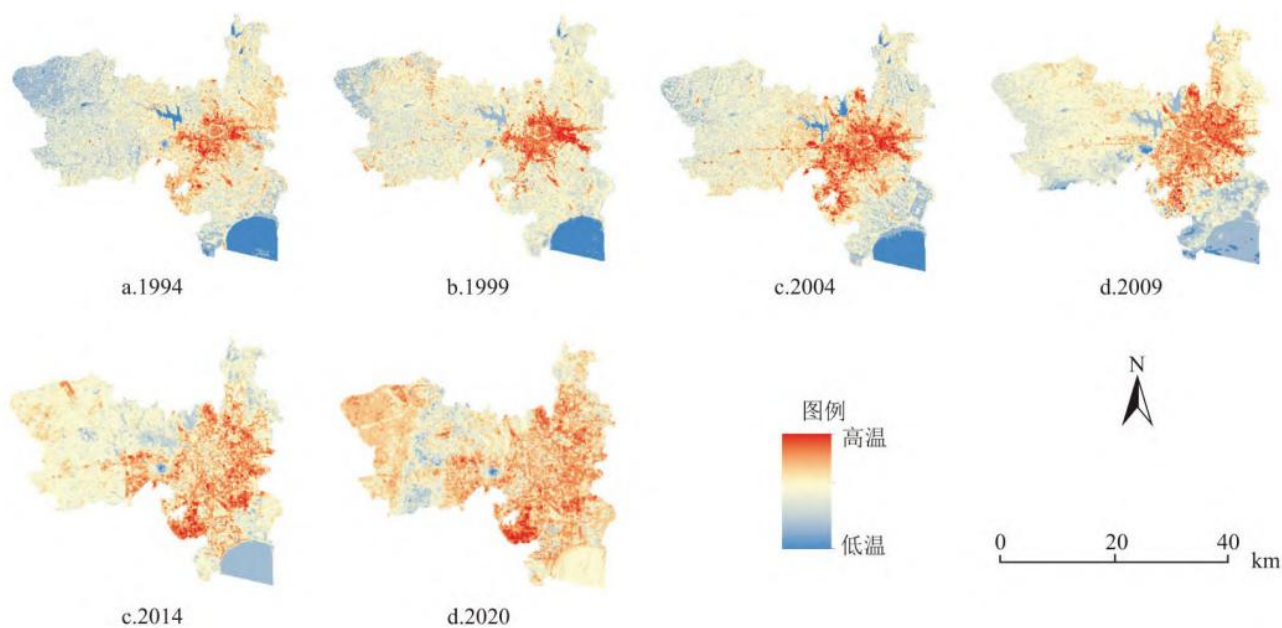


图 4 1994~2020 年合肥市区地表热环境情况

Fig. 4 Surface thermal environment in Hefei municipal area from 1994 to 2020

2.3.2 植被覆盖度与城市热环境关系分析

选取了合肥市区在 2020 年 10 月 24 日 02:48 的 LANDSAT 遥感影像图(中心经纬度为: $31^{\circ} 49' 21.30''$ N, $117^{\circ} 13' 18.25''$ E), 在内随机抽取了 20 个样区和 63 个样点并获取到该样区以及样点的植被覆盖度和地表温度平均值, 将两组数据分别作为自变量和因变量, 通过对 SPSS 软件中的回归模型进行对比, 得出最优回归方程, 从而定量分析城市绿色空间中的植被覆盖度和地表温度之间的关系, 结果如图 5 所示。

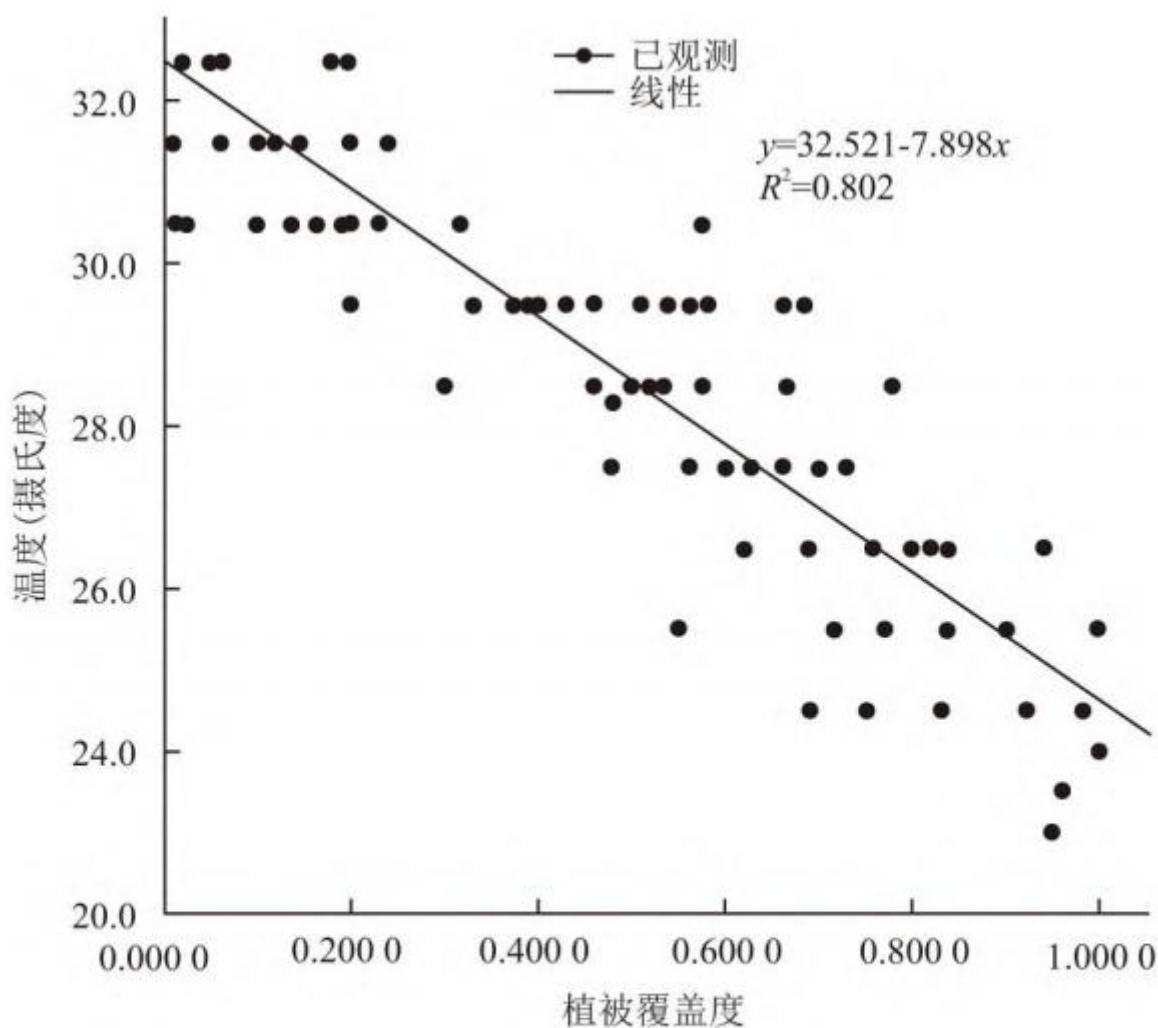


图 5 地表温度与植被覆盖度关系图

Fig. 5 Relationship between surface temperature and vegetation coverage

植被覆盖度与地表温度之间呈现出较为明显的负相关。从图中可以看出，随着植被覆盖度的不断上涨，环境温度随之下降。即当区域内植被越多，植物进行生产活动时吸收热量，增加环境湿度，使得地表温度越低。

3 结论与展望

本文基于 3S 技术的城市绿色空间生态效益研究，利用 CITYGREEN 计算绿色空间的生态效益价值和以及 ENVI 反演地表温度，研究在 1994~2020 年，合肥市市区内的生态效益在城市绿色空间演变下的变化情况。得出以下结论：

(1)城市绿色空间减少了 1/2, 其中共计 577 km² 的草地和耕地转化为建设用地。

城市内植被覆盖度降低, 植被覆盖度的平均值从 0.718 降低到 0.509。同时合肥市市区内景观格局随城市规划布局而发生改变，

且逐渐破碎化，区域优势类型转变为建设用地。以上研究表明目前合肥市区的的功能扩展破坏了区域内原本的绿色空间结构。

(2)随着城市绿色空间不断被削减，其生态效益也不断降低。

绿色空间的生态效益总价值减少了 4.7 亿，且各项指标的持续性降低，意味着绿色空间生态效益减弱，合肥市的生态服务能力与价值降低，且随着城市化进程推进，人口增多，经济文化不断发展，城市生态需求也随之增多。

(3)城市绿色空间对城市热岛效应有着较强的削弱能力。

在 1994~2020 年，城市高温区随着城市建设用地的扩展而扩张，由原来简单围绕中心城区以及主要交通廊道的布局演变成复杂且不规则的全域不均匀布局。同时，发现地表温度随区域内植被覆盖度的降低而增加，两者呈现负相关。

近年来，作为中国长三角城市群副中心城市的合肥市快速发展，致使其生态环境在城市建设进程中受到一定的负面影响，亟待优化现有的城市建设格局与未来规划建设提供量化依据，增强城市绿色空间生态效益，实现碳中和目标下的可持续发展以及生态效益供需平衡，有效提高人们的生活环境质量。而本研究所用的 3S 技术及 CITYGREEN 模型，对于监测合肥区域的生态环境质量、指导城市生态环境规划与建设有着重要的助力作用。

参考文献

- [1] 傅强, 宋军, 毛锋, 等. 青岛市湿地生态网络评价与构建[J]. 生态学报, 2012, 32(12):3670-3680. FU Q, SONG J, MAO F, et al. Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12):3670-3680.
- [2] 孟孟, 张运, 支俊俊, 等. 快速城市化背景下生态系统服务价值时空演变——以南京市为例[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3):296-304. MENG M, ZHANG Y, ZHI J J, et al. Spatial-temporal evolution of ecosystem service value under rapid urbanization: A case study of Nanjing city[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3):296-304.
- [3] 吴静, 白中科, 赵雪娇. 资源型城市城镇化进程及其土地利用生态风险研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(8):60-68. WU J, BAI Z K, ZHAO X J. Research on ecological risk on land use of resource-based cities in process of urbanization[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(8):60-68.
- [4] 李婷婷. 城市绿色空间时空演变及其对生态环境效应的关联性研究——以重庆主城区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2018. LI T T. Spatio temporal evolution of urban green space and its relevance to eco-environmental effects: Taking the main city of Chongqing as an example[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [5] 郝鑫杰, 李素英, 王继伟, 等. 呼和浩特市 13 种绿化植物固碳释氧效率的比较研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(6):1196-1204. HAO X J, LI S Y, WANG J W, et al. 13 species of urban greening plants in Hohhot based on the efficiency of carbon fixation[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(6):1196-1204.
- [6] PATZ J A, THOMSON M C. Climate change and health: Moving from theory to practice[J]. PLoS Medicine, 2018, 15(7):e1002628.
- [7] YAO L, XU Y, ZHANG B. Effect of urban function and landscape structure on the urban heat island phenomenon

in Beijing,China[J].Landscape and Ecological Engineering, 2019, 15(4):379-390.

[8] 尤美子,黄晓霞,徐伟涛,等.城市道路绿带遥感绿量与地温相关性研究[J].西北林学院学报, 2021, 36(4):266-272. YOU M Z, HUANG X X, XU W T, et al. Correlation between green quantity in urban road and land surface temperature on remote sensing image[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4):266-272.

[9] 熊文涓,刘艳红,周传航.北京公墓植物三维量与墓石对植被温湿度调控能力的关系[J].东北林业大学学报, 2012, 40(8):52-59. XIONG W J, LIU Y H, ZHOU C H. Correlation between tridimensional green biomass, tombstone and humiture of cemetery in Beijing[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(8):52-59.

[10] 付晖,廖建和.基于RS的海口城市绿地及其生态效益演变研究[J].热带作物学报, 2016, 37(6):1199-1205. FU H, LIAO J H. Evolution of urban green space and its ecological effect in Haikou based on RS[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(6):1199-1205.

[11] JANTZ C A, MANUEL J J. Estimating impacts of population growth and land use policy on ecosystem services: A community-level case study in Virginia, USA[J]. Ecosystem Services, 2013, 5:110-123.

[12] WANG Q, ZHANG Z, WANG P. An assessment of ecosystem services of urban green spaces based on i-Tree[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 11(1):53-56.

[13] 陈永生,徐小牛,张前进.合肥城市绿地系统的景观生态评价[J].长江流域资源与环境, 2012, 21(12):1536-1541. CHEN Y S, XU X N, ZHANG Q J. Landscape ecological evaluation of urban green land system in Hefei[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(12):1536-1541.

[14] 吴青云.基于Landsat影像的合肥市植被覆盖度动态变化及驱动因子分析[D].合肥:合肥工业大学, 2021. WU Q Y. Dynamic change of vegetation coverage and driving factor analysis based on landsat Hefei[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2021.

[15] 邵陈丽.合肥城市圈城市化对气温、降水和相对湿度的影响[D].合肥:安徽农业大学, 2019. SHAO C L. Influence of urbanization on temperature, precipitation and relative humidity in Hefei metropolitan area[D]. Hefei:Anhui Agricultural University, 2019.

[16] 杨洋,王庭婷,舒婷.环巢湖地区体育旅游资源特点及其发展研究[J].现代商贸工业, 2021, 42(33):12-13. YANG Y, WANG T T, SHU T. Characteristics and development of sports tourism resources in Chaohu area[J]. Modern Business Trade Industry, 2021, 42(33):12-13.

[17] TAN X, LI P, SHEN M, et al. Evaluation of the spatial variability characteristics of the unsaturated clay in Hefei, China[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(2):454-465.

[18] 朱道才,孙家敏,陆林.合肥经济圈空间关联时空演进研究[J].地理科学, 2017, 37(5):738-747. ZHU D C, SUN J M, LU L. Spatial-temporal evolution of Hefei economic circle ' s spatial correlation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(5):738-747.

-
- [19] 李莹莹, 邓雅云, 陈永生, 等. 基于卫星遥感的合肥城市绿色空间对热环境的影响评估[J]. 生态环境学报, 2018, 27(7):1224-1233. LI Y Y, DENG Y Y, CHEN Y S, et al. Characterization of urban green space thermal environmental effects based on satellite remote sensing: A case study of Hefei, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(7):1224-1233.
- [20] ZUBAIR O A, JI W. Assessing the impact of land cover classification methods on the accuracy of urban land change prediction[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2015, 41(3):170-190.
- [21] AMERICAN FORESTS. CITYGREEN: Calculating the value of nature[M]. Washington D C: American Forests. 1999.
- [22] 王睿. 合肥市暴雨强度公式推求及应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015. WANG R. Hefei city rainstorm intensity formula derivation and application research[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [23] 张明, 潘国林, 张宗应, 等. 合肥市城区不同类型绿地土壤肥力质量评价[J]. 农业灾害研究, 2018, 8(5):55-57. ZHANG M, PAN G L, ZHANG Z Y, et al. Soil fertility quality evaluation for different types of urban green space in Hefei City[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2018, 8(5):55-57.
- [24] 李莹莹. 城镇绿色空间时空演变及其生态环境效应研究——以上海为例[D]. 上海: 复旦大学, 2012. LI Y Y. The Change of Urban Green Space and Its Impact on Eco-environmental Effects: A case study in Shanghai[D]. Shanghai: Fudan University, 2012.
- [25] PENG L, CHEN S, LIU Y, et al. Application of CITYgreen model in benefit assessment of Nanjing urban green space in carbon fixation and runoff reduction[J]. Frontiers of Forestry in China, 2008, 3(2):177-182.
- [26] 周月明, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)林净化空气功能研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4):660-664. ZHOU Y M, CHANG S L, ZHANG Y T, et al. Study on air decontamination function of *Picea schrenkiana* in the Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(4):660-664.
- [27] 左松源, 陈国富, 左宗贵, 等. 南京市森林生态系统服务功能与价值评估[J]. 林业资源管理, 2021(6):76-82. ZUO S Y, CHEN G F, ZUO Z G, et al. Assessment of forest ecosystem service functions and values in Nanjing city[J]. Forest Resources Management, 2021(6):76-82.
- [28] 彭建, 杨旸, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区[J]. 生态学报, 2017, 37(13):4562-4572. PENG J, YANG Y, XIE P, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong Province based on the supply and demand of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13):4562-4572.
- [29] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J]. 地理学报, 2021, 76(11):2780-2796. ZHAO X Y, MA P Y, LI W Q, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11):2780-2796.
- [30] 覃志豪, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4):456-466. QIN Z H, ZHANG M H, KARNIELI A, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature

from landsat TM6 data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4):456-466.

[31] 莫玉琴, 沈瑶, 史俊国, 等. 近 15 年天津市城市热岛时空演变分析[J]. *遥感信息*, 2015, 30(5):102-110. MO Y Q, SHEN Y, SHI J G, et al. Temporal and spatial evolution of Tianjin urban heat Islands in recent 15 years[J]. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(5):102-110.

[32] 袁振, 吴相利, 臧淑英, 等. 基于 TM 影像的哈尔滨市主城区绿地降温作用研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(10):1600-1608. YUAN Z, WU X L, ZANG S Y, et al. Cooling effect of green patche based on TM image in Harbin downtown city[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(10):1600-1608.

[33] REN T, ZHOU W, WANG J. Beyond intensity of urban heat island effect: A continental scale analysis on land surface temperature in major Chinese Cities[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 791:148334.

[34] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat 8 数据地表温度反演算法对比[J]. *遥感学报*, 2015, 19(3):451-464. SONG T, DUAN Z, LIU J Z, et al. Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat 8 satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3):451-464.

[35] 张船红, 郭豫宾. Landsat 影像的地表温度反演及其强度变化分析[J]. *测绘科学*, 2020, 45(3):61-66, 94. ZHANG C H, GUO Y B. Land surface temperature and intensity analysis based on Landsat[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(3):61-66, 94.

[36] 王敬文, 赵微, 叶江霞, 等. 应用 Landsat-8 数据分析山地地表温度格局及影响要素[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(5):97-104. WANG J W, ZHAO W, YE J X, et al. Patterns of land surface temperature over mountainous area and its influencing factors using landsat-8 data[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(5):97-104.

[37] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 基于遥感的植被覆盖变化景观分析——以北京海淀区为例[J]. *生态学报*, 2002, 22(10):1581-1586. CHEN Y H, LI X B, SHI P J. Landscape spatial-temporal pattern analysis on change in the fraction of green vegetation based on remotely sensed data: A case study in Haidian district, Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10):1581-1586.

[38] 胡洁, 姜成桢, 杨勇, 等. 黑河中下游植被覆盖度变化遥感监测[J]. *测绘通报*, 2021(10):34-38. HU J, JIANG C Z, YANG Y, et al. Vegetation coverage change remote sensing monitoring of the middle and lower reaches of the Heihe River[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(10):34-38.

[39] 郝英红, 李晓晖, 陈忠良, 等. 城市地下空间开发地质环境质量三维评价方法研究——以合肥市滨湖新区为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(1):11-16. HAO Y H, LI X H, CHEN Z L, et al. Study on 3D evaluation method of geological environment quality for urban underground space development: A case study of Binhu new district, Hefei city[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(1):11-16.

[40] 国家林业局. 森林生态系统服务功能评估规范: LY/T 1721-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. STATE FORESTRY ADMINISTRATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Specifications for assessment of forest ecosystem services in China: LY/T 1721-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.