

福州市主城区小型公园绿地空间布局分形特征研究

陈凤飞^{1,2}, 刘 健^{1,2,3*}, 余坤勇^{2,3}, 刘艳芬^{1,2}, 高仰驰^{1,2}, 杨柳青^{1,2}, 林灵辰^{1,2}

(1. 福建农林大学 艺术园林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 3S 技术与资源优化利用福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002; 3. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002)

摘 要:随着城市环境与居民健康之间的关系越来越为人们关注,作为城市绿地系统重要组成成分之一的小型公园绿地日益被重视。引入分形理论的计算方法,用量化的方式探讨福州市主城区小型公园绿地的空间布局特征,以期后续此类小型公园绿地的合理布局与科学选址提供参考。以福州市 143 个小型公园绿地为研究对象,通过网格维数、半径维数、边界维数 3 个分形维数的计算,分析总结其空间布局分形特征。结果表明,福州市主城区小型公园绿地空间布局具有分形特征但不明显,空间分布不均衡。其网格维数为 1.135 3,空间分布均匀度和填充度较低;半径维数达到 2.608 0,离心程度强,没有明显的城市中心指向形态,布局密度以绿地重心为中心向四周逐渐增大的平均速度比较大,但实际上是一个由中心开始,先缓慢地增加,后转为不均匀的较快速增加,继而进入缓慢增加的动态变化过程;边界维数为 1.385 9,生态稳定性一般,具有较为显著的边界效应。福州市主城区的小型公园绿地其空间布局仍可进一步优化,研究结果可为其空间布局合理性的提高与自我优化结构潜能的提升提供理论依据。

关键词:小型公园绿地;分形理论;空间布局;福州市主城区

中图分类号:S731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)06-0201-06

Research on Fractal Features of Small Public Urban Green Space in the Main Urban Region of Fuzhou

CHEN Feng-fei^{1,2}, LIU Jian^{1,2,3*}, YU Kun-yong^{2,3}, LIU Yan-fen^{1,2}, GAO Yang-chi^{1,2},
YANG Liu-qing^{1,2}, LIN Ling-chen^{1,2}

(1. College of Art and Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. 3S Key Laboratory of Technology and Resource Optimization, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
3. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: As the relationship between the urban environment and the health of residents has attracted more and more attention, small parks and green spaces, which are important components of the urban green system, have been paid more and more attention. Fractal theory was introduced to discuss the spatial layout characteristics of small parks in the main urban area of Fuzhou City, in order to provide references for the rational layout and scientific location of small parks. Taking 143 small public urban green spaces in Fuzhou City as the research object, the fractal characteristics of the three fractal dimensions, including grid dimension, radius dimension and boundary dimension, were analyzed and summarized. The results indicated that the spatial layout of small parks in the main urban area of Fuzhou had fractal features but was not obvious, and the spatial distribution was uneven. The grid dimension was 1.135 3, and the spatial distribution uniformity and filling degree were low; the radius dimension reached 2.608 0, the degree of centrifugation was

收稿日期:2021-10-22 修回日期:2021-11-16

基金项目:福建省高校重点实验室建设项目(PTJH17014)。

第一作者:陈凤飞。研究方向:风景园林规划设计与理论。E-mail:chenfengfeigx@163.com

* 通信作者:刘 健,教授,博士生导师。研究方向:森林资源与环境监测、风景园林规划设计。E-mail:fjljujian@126.com

strong, and there was no obvious urban center-pointing form. Its layout density was expressed as the center of the green space. The average speed of increase was relatively large, but in fact it was a process that starts from the center, first slowly increased, then became uneven and quickly increased, and then entered a slowly increasing dynamic change process; The boundary dimension was 1.3859, ecological stability was in general level. It had a more significant boundary effect. The small parks and green spaces in the main urban area of Fuzhou were able to be further optimized. In the follow up similar parks in the site selection and construction, attention should be paid to the rationality of its spatial layout, so that the potential of this self-optimizing structure can be further improved to better build a sustainable city.

Key words: small public urban green space; fractal theory; spatial layout; Fuzhou downtown

在城市化快速发展的背景下,人们越来越关注城市绿地的生态功能及其与居民健康之间的关系^[1],对小型绿地的利用日益重视。从20世纪80年代开始,许多城市小型未利用地被建设成了小型公园。城市小型绿地作为城市绿色基础设施的重要组成部分之一,更容易为难以抵达大型公园的城市居民提供服务^[2-4]。高密度城市建设对公共绿地的压缩,进一步减少了城市居民接触绿地、进行户外活动的机会。公园绿地资源与人口分布协调与否影响着公众福祉及社会发展^[5]。在土地资源紧缺的城市建成区规划建设大规模综合性城市公园是不切实际的,而通过小型公共绿地“见缝插针”地提升城市绿地系统的服务功能、满足城市居民日常活动需求却具有可实施性。如何科学、合理地配置这些小型公共绿地,才能使其最大效率地发挥服务作用,是需要深刻思考的问题。本研究中的小型公园绿地是指城市公园绿地中具有面积较小,数量多,分布广泛等特点的公园绿地。合理的选址和布局,能为创建可持续城市提供重要机遇。国内外针对小型公共绿地的研究多聚焦于其对使用者心理健康的影响^[6-7]、内部建成环境特征^[8]、使用情况^[9-10]和规划设计阶段建成环境的可操作要素对人群健康的影响作用^[11-12]。分形理论在空间布局研究方面的应用多集中在某一类型绿地^[13-14]、城市绿地系统^[15-17]、大公园^[18-19]或屋顶绿化^[20]。前人对城市小型公园绿地的系统研究较为缺乏,且尚未有人应用分形理论来探讨此类公园的空间布局特征。以福州市主城区小型公园绿地的位置、面积、周长等为基础,借助 Arcgis10.2、Excel 等相关软件技术和分形分析方法研究福州市主城区小型公园绿地的空间布局特征,评析其布局现状,为今后此类公园绿地的选址与布局优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福州市是福建省的省会,位于福建省中东区域,

是中国东南沿海城市之一,地理位置 $25^{\circ}15' - 26^{\circ}39'N, 118^{\circ}08' - 120^{\circ}31'E$ 。福州市目前包含鼓楼、台江、仓山、晋安、马尾、长乐6区及闽侯、闽清、永泰、罗源、平潭、连江6县以及1个福清县级市。本研究以福州市主城区为研究区,包含鼓楼区、仓山区、台江区、晋安区(建成区部分)4个区。

福州市水系发达,河网密布。2017年4月底,随着内河水系综合治理的推进,福州市创新性地提出打造内河串珠式公园,以沿岸步道和绿带为“串”,以有条件、可拓展的块状绿地为“珠”,串绿成线、串珠成链,在内河两岸建设形成串珠式公园绿地。几年来建设成果显著,原先零散分布在市区的大小公园被串联成公园网络,对满足福州市水系综合治理的需要、人民群众对于美好生活的需要以及保护和改善福州市生态环境具有重大意义。

1.2 数据来源与处理

利用2019年谷歌影像,结合串珠公园点位图、《福州市总体规划(2011—2020)》和福建天地图以及实地调研数据,通过目视解译共采集143块小型公园绿地的矢量数据。根据分形理论原理,采用 ArcGIS10.2 和 Excel 软件对福州市小型公园绿地的网格维数、半径维数和边界维数进行计算,量化其空间布局现状特征。

1.3 研究方法

1.3.1 网格维数计算 网格维数既可以表征公园绿地在城市中分布的均质程度,也可以反映出公园绿地与非公园绿地在空间中的协调关系(即公园绿地的填充度)^[19]。用一个矩形恰好将研究对象完全覆盖,设矩形的总边长为 L ,得到此时网格总数为1,这个矩形被研究对象完全地占据,非空格子个数 $N(L)$ 为0。将矩形长、宽对半划分,等分成为4个小矩形,得到此时网格总数为4,非空格子数为 $N(L/4)$ 。接着将4个小矩形等分为16个小矩形,格子总数为16,非空格子个数为 $N(L/4)$ 。按照以上规则,依次将矩形进行 n^2 等分,其中 $n=1,2,4,8,16,32,\dots,n$ 所对应的网格码尺为 $L/2n$,网格数目

总为 n^2 个,未包含研究对象的非空格子个数为 $N(L/2n)$ 。若研究对象的空间分布格局存在无标度性,则有

$$A(kn) \propto k \pm \alpha A(n) \quad (1)$$

$$N(L/2n) = 2 - D \times N(L/2n+1) \quad (2)$$

式中: D 为网格维数; k 为常数。将非空网格数——网格尺度数据 (N, r) 的点列转化为双对数坐标图,会出现这些点沿着一条直线分布的情况,该直线的斜率就是研究对象的网格维数。



图1 研究区小型绿地分布

Fig. 1 Distribution of small public urban green space in the study area

1.3.2 半径维数计算 半径维数可以反映研究对象从中心向四周的聚集程度。首先确定测量中心点,以此为圆心画半径为 r ,且以 r 为等距递增尺度的同心圆,统计每一个同心圆内的研究要素面积为 $A(r)$,研究每一个圆的半径与圆内对应研究要素面积 $A(r)$ 之间的幂函数关系。如果满足

$$A(r) \propto r^D \quad (3)$$

则有

$$A(r) = k \times r^D \quad (4)$$

式中: D 为分维数,表示基于面积—半径关系定义的半径维数。对面积和半径两边取对数可得

$$\ln A(r) = \ln k + D \ln r \quad (5)$$

分维 D 即为上式线性回归得出的直线斜率^[21]。

1.3.3 边界维数计算 边界分维数可以反映出被测量物体的边界复杂程度。假设研究要素边界的周长为 C ,面积为 S ,其边界维数为 D ,则应满足以下关系

$$C^{1/D} \propto S^{1/2} \quad (6)$$

即为

$$C \propto S^{D/2} \quad (7)$$

将上式改写成一般形式为

$$C = \varphi S^{f(D)} \quad (8)$$

式中: φ 为比例常数,如果图形为正方形常数常常为4, $f(D)$ 是与分维数相关的函数。两边同取对数,可得以下公式:

$$\ln C = \ln \varphi + f(D) \ln S \quad (9)$$

显然, $f(D) = D/2$,所以

$$D = 2 \frac{\ln C - \ln \varphi}{\ln S} \quad (10)$$

而在景观生态学中,斑块形状是用于描述景观生态指标重要的因子之一,其中常用的表达式为

$$S = \frac{P}{A} \quad (11)$$

公式表达的是斑块周长—面积比,反映斑块的边界效应。鉴于景观生态学研究中的斑块的周长面积比与分形研究中的边界维数相类似,因此在结合景观生态学内涵后,边界维数的表达式可转化为

$$D = 2 \frac{\ln(P/4)}{\ln A} \quad (12)$$

式中: P 表示斑块周长, A 表示斑块面积。

2 结果与分析

2.1 小型公园绿地的空间填充度分析

计算网格维数时共有12组数据(表1),需剔除前2组不存在空与非空网格的无效数据,将空白网格出现作为起点,统计得到10组有效数据,以幂指数函数拟合散点图点列分布趋势(图2)。根据已有的研究,当点列中具有相关系数能通过 F 检验($R^2 \geq 0.95$)的区间时,可以初步判断该空间要素形态具有分形特征^[20]。由图2可知,福州市主城区小型公园绿地的网格维数拟合 R^2 为0.9879,具有分形特征。在现实世界中不存在严格符合理论规则的分形,即在双对数图中很少形成严格的直线,但在一定的区间内会出现单个或多个直线段,称为无标度区间。本文的数据量少且直观,可通过人工判断的方法来判定无标度区间^[19]。

由图3可知,福州市主城区小型城市绿地的无标度区间有3个,分别为 $4/L - 16/L$ 、 $32/L - 128/L$ 和 $256/L - 1024/L$,拟合 R^2 分别达到0.996、0.9979、0.9986,对应的分形维数依次为1.339、0.8644、1.4444。

3个无标度区间的拟合优度均在0.99以上,说明在对应尺度下分形特征显著,且小型公园绿地存

在 3 种不同尺度的扩张机制。蓝色线段表征大尺度下小型公园绿地所填充的空间,分维值为 1.339,均衡性和填充性并非很高。绿色线段表征小尺度下小型公园绿地的内部特征,分维值为 1.444 4,接近理想分维值 1.5,简单反应出小型公园绿地的面积特征。福州市主城区小型公园绿地的建设面积并无十分严格的标准,由图 4 可知,其面积在 300 m² 以上,20 000 m² 以下。而在比这个更小的尺度范围内,随着网格码尺不断减小,网格维数将越来越趋近于 2,网格码尺与对应测度的标度关系将失效,不具备参考价值。红色线段对应的则是过渡区间,分维值为 0.864 4,表明在中尺度下,空间填充度很低。

表 1 福州市小型公园绿地网格维数数据汇总

Table 1 Summary of meshdimension data of small public urban green space in the main urban area of Fuzhou

序号	网格码尺	非空网格数	网格总数
1	1/L	0	1
2	2/L	0	4
3	4/L	15	16
4	8/L	46	64
5	16/L	121	256
6	32/L	189	1 024
7	64/L	330	4 096
8	128/L	636	16 384
9	256/L	1 352	65 536
10	512/L	3 522	262 144
11	1 024/L	10 442	1 048 576
12	2 048/L	34 863	4 194 304

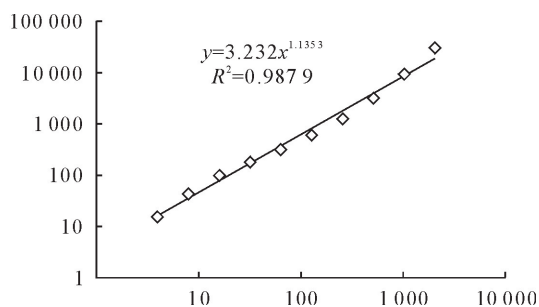


图 2 网格维数拟合散点

Fig. 2 Mesh dimension fitting scatter plots

2.2 福州市小型公园绿地的空间分布聚集度分析

在计算半径维数时,由于圆心即城市中心的位置和合适的半径增量对于分形维数的计算结果有着直接影响。本研究通过将研究区重心、城市绿地重心和城市行政中心或商业中心做圆心 3 种方案进行对比分析(图 5),发现以绿地重心为圆心所得到的有效点最多,并且能对这些小型公园绿地实现较良好的覆盖,因而选择方案(c)进行半径维数的计算,共得出 28 组数据(表 2)。以同心圆半径为横坐标、覆盖的公园绿地用地面积为纵坐标绘制散点图(图 6)。

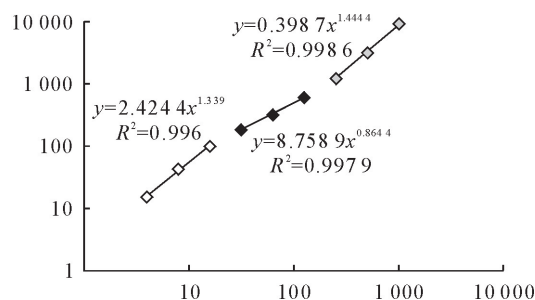


图 3 网格维数无标度区间

Fig. 3 The scale-free range of mesh dimension

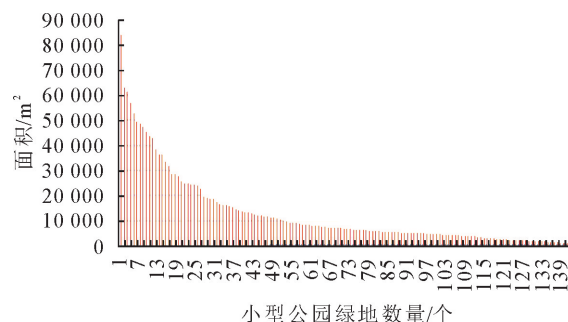


图 4 研究区小型公园绿地面积分布

Fig. 4 Distribution map of small public urban green space in the study area

在双对数图中存在直线线段即无标度区间,说明福州市主城区小型绿地具有分形特征。关于判断无标度区间的办法,与上文计算网格维数时相同。由图 7 可知,其无标度区间为 $r=2\ 000\sim4\ 500\text{ m}$,拟合优度为 0.999 5,分维值为 2.608。半径维数远 >2 ,直线斜率相对较陡,半径增加时小型城市绿地的面积增幅大,说明小型公园绿地的离心程度强,其布局密度以绿地重心为中心向四周增加的速度较快,没有明显的城市中心指向形态。由图 8 可知,通过观察环带内面积的变化,发现小型公园绿地由中心向外变化是非匀速的,先缓慢增加,进而较快速且不均匀地增加,最后增速非常缓慢。主要由于中心落在了住宅区内,周围建筑用地密集,可建设小型公园绿地的土地稀少;且小型公园绿地虽数量多但面积较小,面积在 20 000 m² 以下,其中约 1/3 面积在 5 000 m² 以下,无法像大型城市公园般形成“城市绿心”。最后,前文提到主城区周边尚还存在较多空白区域,于是出现最终环带内面积增加非常缓慢的趋势。

2.3 福州市小型公园绿地的生态稳定性分析

利用 Arcgis 软件统计福州市小型公园绿地的周长与面积,将其分别取对数,并求出其边界维数(表 3)。边界分维数越大,表明研究要素的空间复杂程度越高,边界复杂程度越高。由表 3 可知,福州市主城区小型公园绿地的边界维数为 1.385 9,在 1 和 1.5 二者之间而更加趋近于 1.5,说明其稳定性不好,边界

比较复杂。主要因为主城区内小型公园绿地是结合水系综合治理而建的,一面被城市道路及其他建设用地等用地规则切割,但另一面也与城市水系吻合衔接,因此仍具有相对比较显著的边界效应。

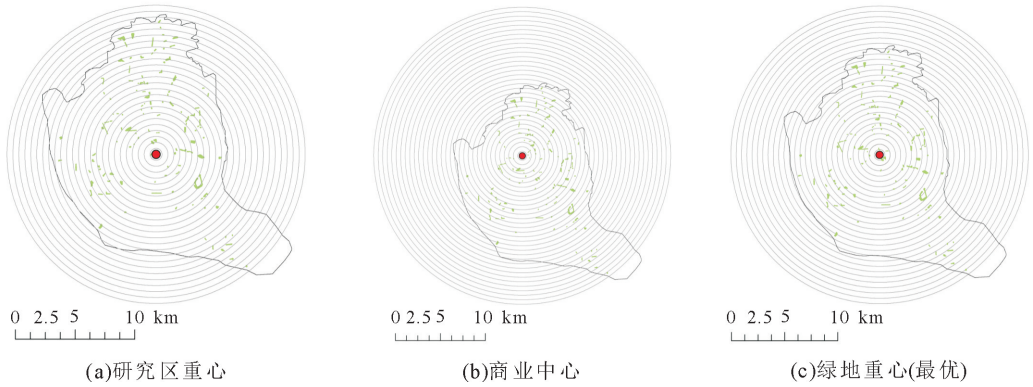


图 5 中心、半径与尺度对比分析

Fig. 5 The center, radius, and scale comparative analysis

表 2 福州市主城区小型公园绿地半径维数计算数据汇总			
Table 2 Summary of small public urban green space			
序号	半径/m	相交面积/m ²	环带内面积/m ²
1	500	2 828.86	2 828.86
2	1 000	39 994.24	37 165.37
3	1 500	65 893.10	25 898.86
4	2 000	84 225.13	18 332.03
5	2 500	224 002.87	139 777.75
6	3 000	368 828.71	144 825.84
7	3 500	494 009.47	125 180.76
8	4 000	571 890.50	77 881.03
9	4 500	712 488.84	140 598.34
10	5 000	798 245.69	85 756.85
11	5 500	960 140.33	161 894.63
12	6 000	1 139 682.76	179 542.43
13	6 500	1 207 979.44	68 296.68
14	7 000	1 353 322.23	145 342.79
15	7 500	1 439 712.25	86 390.02
16	8 000	1 522 581.09	82 868.84
17	8 500	1 700 347.80	177 766.72
18	9 000	1 708 766.63	8 418.83
19	9 500	1 770 165.97	61 399.34
20	10 000	1 772 301.84	2 135.86
21	10 500	1 773 261.59	959.75
22	11 000	1 786 435.62	13 174.03
23	11 500	1 816 482.76	30 047.14
24	12 000	1 819 543.97	3 061.21
25	12 500	1 827 962.01	8 418.04
26	13 000	1 832 839.78	4 877.77
27	13 500	1 832 839.78	0.00
28	14 000	1 841 024.96	8 185.18

表 3 福州市主城区小型绿地面积、周长及分维值				
Table 3 The area, perimeter and boundary dimension of small green space in the main urban area of Fuzhou				
面积/m	周长/m	lgA	lgP	分维值
1 841 024.960	87 790.240	6.265 1	4.943 4	1.385 9

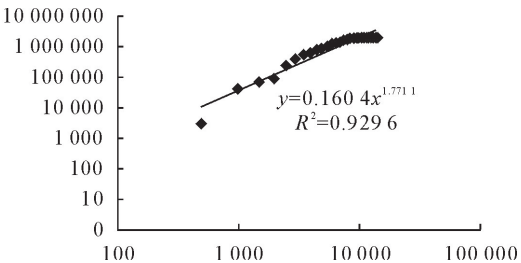


图 6 半径维数拟合散点

Fig. 6 The radius dimension fitting scatter plots

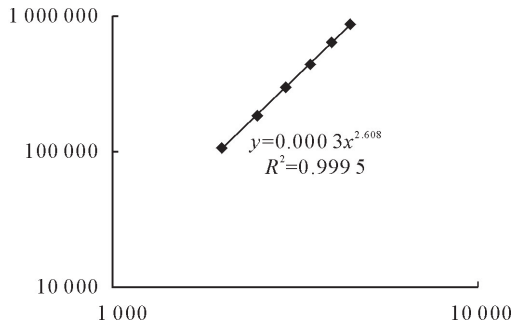


图 7 半径维数无标度区间

Fig. 7 The scale-free range of radius dimension

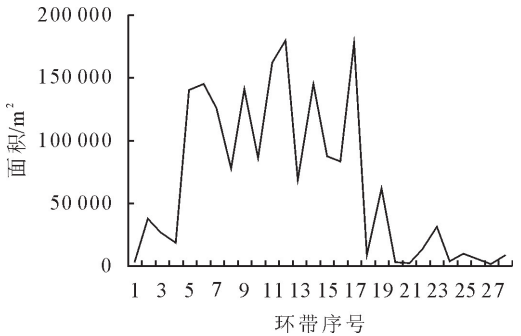


图 8 环带内面积分布

Fig. 8 Area distribution within the annulus

3 结论与讨论

研究基于分形理论,通过对福州市小型公园绿

地进行分形维数计算,分析总结其空间布局现状分形特征,得出以下主要结论。

网格维数为 1.135 3,福州市主城区小型公园绿地空间分布不均衡,均质度和填充度不高,配置不均衡。除去闽江较大面积的水域外,主城区周边、仓山区的中部和东南部,仍存在着较大面积的空白区域尚未有小型公园绿地分布其中。

半径维数为 2.608,福州市小型公园绿地离心程度强,没有明显的城市中心指向形态。其影响因素是多样的,一方面与城市本身的历史、文化密不可分,在已经形成传统格局的旧老城区和土地资源紧缺的建成区,建设小型公园绿地的条件十分有限,另一方面,政府的决策、规划设计者对于此类绿地的选址、布局有着重要的影响^[11-12,20]。小型公园绿地虽然数量多,但由于面积小,在城市绿地系统总面积中占比少,仍旧是比较缺乏的,增加此类公园绿地的数量,提高比例结构,优化布局,才能满足城市居民日常生活对公园绿地的需求,这一结论与于苏建^[24]的研究相同。

在生态稳定性方面,边界维数为 1.385 9,具有比较显著的边界效应,稳定性一般。福州市位于东南沿海,三江入城,水系纵横交错,城区内河共有 107 条,水网密集。在 2017—2019 年完成建设的这批小型公园绿地,基本上是依托着内河网络分布的,支流众多的发达水系对绿地空间分布具有割裂作用,使得这些小型公园绿地成为形状复杂、分布分散的小斑块,生态稳定性相对较差,与张慧霞^[13]及吴冲^[14]的相关结论相类似。

本研究基于分形理论对福州市主城区的小型公园绿地空间分布特征进行了分析,但由于数据获取难度较大,福州市此类公园绿地的建设仍在不断推进,后续研究能如获取更完整的数据,同时考虑自然、社会等更多因素对其空间分布合理性和规划选址的影响,将会使得其空间结构的优化更进一步。

参考文献:

- [1] 任斌斌,李薇,谢军飞,等.北京居住区绿地规模与结构对环境微气候的影响[J].西北林学院学报,2017,32(6):289-295.
REN B B, LI W, XIE J F, *et al*. Effects of residential green space with different scales and structures on micro climatic environment in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6): 289-295. (in Chinese)
- [2] KOWARIK, INGO. Cities and wilderness: a new perspective [J]. International Journal of Wilderness, 2013, 19(3): 32-36.
- [3] KREMER, PELEG, HAMSTEAD, *et al*. A social-ecological assessment of vacant lots in New York city [J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 120: 218-233.
- [4] SHASHUA-BAR, LIMOR, HOFFMAN, *et al*. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees [J]. Energy Build, 2000, 31(3): 221-235.
- [5] 邢露华,王永强,刘曼舒,等.郑州市主城区公园绿地与居民人口分布均衡性研究[J].西北林学院学报,2020,35(3):258-265.
XING L H, WANG Y Q, LIU M S, *et al*. Evaluation on the balance of park greenspace and residential distribution in the major urban area of Zhengzhou city [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3): 258-265. (in Chinese)
- [6] NORDH, HELENA, HARTIG, *et al*. Components of small urban parks that predict the possibility for restoration [J]. Urban For. Urban Green, 2009, 8(4): 225-235.
- [7] NORDH, HELENA, OSTBY, *et al*. Pocket parks for people—a study of park design and use [J]. Urban forestry & Urban Green, 2013, 12(1): 12-17.
- [8] COHEN, DEBORAH A, MARSH, *et al*. The potential for pocket parks to increase physical activity [J]. American Health Promot, 2014, 28(3): S19-S26.
- [9] DANFORD, RACHEL S, STROHBACH, *et al*. Active greening or rewilding the city: how does the intention behind small pockets of urban green affect use? [J]. Urban forestry & Urban Green, 2018, 29: 377-383.
- [10] 耿超.基于城市修补的北京老城小微绿地现状改造提升研究 [D].北京:北方工业大学,2019.
- [11] SUN X Y, WANG L J, WANG F, *et al*. Behaviors of seniors and impact of spatial form in small-scale public spaces in Chinese old city zones [J]. Cities, 2020, 107: 102894.
- [12] 关芑,徐小东,徐宁,等.以人群健康为导向的小型公共绿地建成环境要素分析——以江苏省南京市老城区为例 [J]. 景观设计学, 2020, 8(5): 76-92.
GUAN P, XU X D, XU N, *et al*. Analyses of the impact of built environment factors of small public green space on public health—a case study on the old city center of Nanjing, Jiangsu Province [J]. Landscape architecture frontiers, 2020, 8(5): 76-92. (in Chinese)
- [13] 张慧霞,娄全胜.基于分形理论及信息熵的广州边缘区绿地空间结构分析——以番禺区为例 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1593-1598.
ZHANG H X, LOU Q S. Analysis on the spatial structure of green space in Guangzhou fringe district based on fractal theory and information entropy—a case study of Panyu district [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1593-1598. (in Chinese)
- [14] 吴冲.以分形河网为骨架的米脂县城绿化开敞空间布局研究 [D].西安:西安建筑科技大学,2014.
- [15] 于苏建,袁书琪.基于网格的城市公园绿地空间格局研究——以福州市主城区为例 [J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 2011, 27(6): 88-94.
YU S J, YUAN S Q. Study on the spatial pattern of urban public green space based on grids—a case study of the main urban area of Fuzhou [J]. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 2011, 27(6): 88-94. (in Chinese)

- [27] 杨尚武,张勃. 基于 SPOT NDVI 的甘肃河东植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2014, 33(2): 455-461.
YANG S W, ZHANG B. Vegetation cover change and its response to climatic factors using SPOT NDVI in Hedong of Gansu Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(2): 455-461. (in Chinese)
- [28] 康满萍,赵成章,白雪,等. 苏干湖湿地植被覆盖度时空变化格局[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2975-2984.
KANG M P, ZHAO C Z, BAI X, *et al.* The temporal and spatial variation pattern of vegetation coverage in Suganhu wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2975-2984. (in Chinese)
- [29] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776.
PENG W F, ZHANG D M, LUO Y M, *et al.* Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1758-1776. (in Chinese)
- [30] 李丽丽,王大为,韩涛. 2000—2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1108-1118.
LI L L, WANG D W, HAN T. Spatial-temporal dynamics of vegetation coverage and responding to climate change in Shiyang River Basin during 2000 to 2015[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 1108-1118. (in Chinese)
- [31] 吴玮江,王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.
- [32] 邓晨晖,白红英,高山,等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 425-438.
DENG C H, BAI H Y, GAO S, *et al.* Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 425-438. (in Chinese)
- [33] 姚晓红,许彦平. 气候变化对天水市林区森林资源的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30): 16969-16971.
- [34] 胡春艳,卫伟,王晓峰,等. 甘肃省植被覆盖变化及其对退耕还林工程的响应[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 588-594.
HU C Y, WEI W, WANG X F, *et al.* Change in vegetation cover as affected by grain for green project in Gansu[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(4): 588-594. (in Chinese)
- [35] 肖强,陶建平,肖洋. 黄土高原近 10 年植被覆盖的动态变化及驱动力[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7594-7602.
XIAO Q, TAO J P, XIAO Y. Dynamic vegetation cover change over the past 10 years on the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7594-7602. (in Chinese)

(上接第 206 页)

- [16] 孙志学. 基于分形理论的城市绿地系统尺度等级研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [17] GONG Y L, LI X M, CONG X P, *et al.* Research on the complexity of forms and structures of urban green spaces based on fractal models[J]. Complexity, 2020, 2020.
- [18] 聂森垚. 基于分形理论的城市公园绿地规模等级研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [19] 李盈秀. 基于分形理论的大城市公园绿地空间布局合理性评价方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [20] VERSINI P-A, GIRES A, TCHIGUIRINSKAIA I, *et al.* Fractal analysis of green roof spatial implementation in European cities[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 49: p. 126629.
- [21] 张宸铭,高建华,黎世民,等. 基于路网可达性的城市空间形态集聚分形研究[J]. 地理研究, 2018, 37(12): 2528-2540.
ZHANG C M, GAO J H, LI S M, *et al.* Fractal dimension study of urban morphology based on network accessibility[J]. Geographical Research, 2018, 37(12): 2528-2540. (in Chinese)
- [22] 陈彦光. 城市形态的分维估算与分形判定[J]. 地理科学进展, 2017, 36(5): 529-539.
CHEN Y G. Approaches to estimating fractal dimension and identifying fractals of urban form[J]. Progress in Geography, 2017, 36(5): 529-539. (in Chinese)
- [23] 张 远. 基于分形理论的传统乡村聚落平面形态量化方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [24] 于苏建. 福州市主城区公园绿地的综合评价研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2011.