

DOI: 10.5846/stxb202011032813

党辉, 李晶, 张渝萌, 周自翔. 基于公平性评价的西安市城市绿地生态系统服务空间格局. 生态学报, 2021, 41(17): 6970-6980.

Dang H, Li J, Zhang Y M, Zhou Z X. Spatial pattern of urban green space ecosystem service in Xi'an City based on fairness evaluation. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6970-6980.

基于公平性评价的西安市城市绿地生态系统服务空间格局

党 辉¹, 李 晶^{1,*}, 张渝萌¹, 周自翔²

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

2 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054

摘要:城市绿地能够为居民提供诸多类型的生态系统服务, 而其格局的不均衡导致人类在享受其所带来效益的过程中产生差异化。根据西安市生态环境问题的具体现状, 并综合研究区的基础地理条件, 实现了西安市主城区绿地系统生物多样性、净化空气、固碳、气候调节四种生态系统服务的测算与空间化制图, 并从公平性角度对整个研究区绿地的生态系统服务进行了评价分析, 进一步采用具有动态约束的聚类分区的方法得到生态系统服务的分区群, 提出了区域化管理的构想。研究表明: ①研究区绿地生物多样性整体偏低; 绿地对 PM_{2.5} 的吸附作用呈现由北向南递减的趋势; 固碳量整体上南部高于北部, 东部高于西部; 绿地区域的地表平均温度低于整体均值; ②研究区城市绿地资源分布配置不均, 不同区域的生态系统服务分布不合理; ③在综合生态系统服务区域化的基础上引入生态系统服务簇, 913 个网格、12 个分区、5 个聚群为不同级别的生态系统服务管理提供参考。从而转变思路从生态系统服务水平指标对整体绿地格局进行规划指导, 最大化实现绿地的生态功能, 提升人民福祉。

关键词:城市绿地; 生态系统服务; 公平性; 空间格局; 区域化

Spatial pattern of urban green space ecosystem service in Xi'an City based on fairness evaluation

DANG Hui¹, LI Jing^{1,*}, ZHANG Yumeng¹, ZHOU Zixiang²

1 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: Urban green space can provide many types of ecosystem services for residents, and the imbalance of its pattern leads to the differentiation of human beings in the process of enjoying its benefits. According to the current situation of ecological environment problems in Xi'an and its basic geographical conditions, the calculation and spatial mapping of four kinds of ecosystem services, including biodiversity, carbon sequestration, air purification, and climate regulation, were realized. The ecosystem services of the whole study area were evaluated and analyzed from the perspective of fairness. Furthermore, the method of regionalization with dynamically constrained agglomerative clustering and partitioning (REDCAP) are used to get the partition group of ecosystem services, and the idea of regional management is proposed. The results indicated that: ① the complexity of urban green space community in the study area is low, and the level of biodiversity needs to be improved; the dry deposition flux of PM_{2.5} decreases from north to south, and plants have a certain adsorption effect on PM_{2.5}; the carbon sequestration in the south is higher than that in the north, and that in the east is higher than that in the west; the average surface temperature in the green space area is lower than that in the whole, and

基金项目:国家自然科学基金(42071285, 41771576); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(GK201901009)

收稿日期:2020-11-03; **网络出版日期:**2021-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijing@snnu.edu.cn

there is a strong correlation between normalized difference vegetation index (NDVI) and surface temperature in the study area; ② The distribution of urban green space resources in the study area is uneven, and the distribution of ecosystem services in different regions is unreasonable; ③ Based on the regionalization of integrated ecosystem services, ecosystem services cluster is introduced, including 913 grids, 12 partitions and 5 clusters, which can provide reference for different levels of ecosystem services management. In this way, urban managers can change their thinking, guide the overall green space pattern from the indicators of ecosystem service level, maximize the ecological function of green space, help the sustainable development of the city and improve people's well-being.

Key Words: urban green space; ecosystem services; fairness; spatial pattern; regionalization

生态系统服务的概念由 Holden 和 Ehrlic 等学者于 20 世纪 70 年代最早提出^[1],被定义为人类能够从生态系统中获得的那些有助于人类社会发展的惠益^[2-4]。城市绿地可以提供许多生态系统服务,如调节小气候、固碳释氧、减少噪音、暴雨截留、净化空气和游憩服务等^[5-6],这些服务为城市公民维持身心健康提供了保证。然而随着城市资源的不断紧缩,绿地区域面积总量不断减少并呈现出碎片化的趋势,生态系统服务格局的优化配置意义凸显。

城市绿地生态系统服务类型多样,许多学者通过不同的指标体系,使用多种方法从不同角度对各类服务进行测算^[7-12],构建了针对城市绿地生态系统服务的多种评价框架^[13-14]。对于城市生态系统服务及其空间格局的探索分析,一方面可以平衡生态系统服务与城市经济社会功能之间的协调关系,另一方面对提升城市环境宜居性和城市生态建设等方面具有关键意义。在城市绿地出现不同程度萎缩的过程中,人们所享有的城市绿地生态系统服务效益产生了不同程度的不公平性,这与城市生态系统服务的空间格局息息相关。公平性一般是指每个人具有平等的获得资源、服务等权利,绿地这类公共资源的公平性则可被定义为人人都具有均等的享受绿地资源及其相关服务的权利。目前已有的研究不乏对城市绿地能够起到的改善城市生态环境作用的评判,但多以评价性意见为主,缺乏量化的数据支撑,也就无法从绿地资源分配公平性的角度满足社会可持续发展的基本原则^[15-17]。城市绿地社会公平原则的落实往往依靠人口和绿地可达性等指标,但绿地的数量并非是满足公平条件的唯一标准,城市绿地依其植物种类、植物群落多样性,植物叶面积指数等多个条件各有所不同,因此依据城市绿地能够提供的生态系统服务来进行公平性的分配相较传统方法更为合理有效,更能真正意义上实现社会资源公平。

城市绿地公平性评价与优化有助于提高绿地生态产品的供给能力和生态系统服务水平,然而破碎的绿地斑块对城市绿地空间格局的优化带来一定困难,行政区划级别的管理并不能达到更好的效果。生态系统服务簇^[18]是有助于提高多功能景观管理的研究方法,它认为自然可以视为多种生态系统服务的集合,同时城市网格化管理对城市绿地生态系统服务优化管理具有一定的借鉴意义,不仅能够做到上级层面的有的放矢,而且能够从网格单元上达到精准治理的效果。传统的聚类过程没有考虑几何之间的空间关系^[19-20],基于探索性空间数据分析的方法^[21-23]具有不确定性,因此以客观、定量、可重复和透明的方法来确定同质区域,将满足对城市绿地综合生态系统服务指数进行统计稳定和有力估计的需要。具有动态约束的聚类和分区的区域化方法(REDCAP)是 Guo 等^[24]提出的一种新的空间聚类和区域化方法,该算法已用于将一个区域划分为若干空间连续区域,区域化已用于气候分区^[25],生态区分析^[26]和建立可变率农业管理区^[27]等领域。

西安市是全国副省级城市、关中平原城市群核心城市,也是国家森林城市、国家园林城市。但近年来,西安市城市雾霾的频发和高温天气的持续,再度引起人们的关注。为提高人人享受绿地资源及其相关服务的权利,优化城市绿地生态系统服务格局,本文以具有代表性的西安市主城区为例,针对当前存在的环境问题,选取了生物多样性、净化空气、固碳释氧、气候调节四种生态系统服务,通过识别并分析现有城市绿地资源,从公平性视角评价城市绿地资源空间分配,基于 REDCAP 算法以及前人的相关研究优化研究区在划定的城市绿地公平性阈值下的综合生态系统服务格局,实现生态系统服务格局的区域化,为合理高效地应用城市绿地生

态功能提供重要的数据支撑和保障。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

西安市位于渭河流域中部关中盆地,近年来西安市城市绿地建设在不断发展,基于 2018 年 Sentinel-2 10m 遥感影像数据,从绿地分布情况来看,见图 1,西安市成片状的较大绿地斑块数量较少,主要以分散零碎的小型绿地斑块类型为主。

本文所用数据主要包括:①西安的基础地理信息数据,包括行政区县等,主要来源于国家基础信息中心;②获取时间为 2018 年 1 月 14 日及 6 月 23 日的 Sentinel-2 10m 遥感影像数据;③气象数据,包括风速、风向、温度、相对湿度、降水量,主要来源中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);④PM_{2.5}数据,西安市 13 个国家监测站点 PM_{2.5}的连续测量每小时实时数据,主要来源国家环境保护部(<http://www.mee.gov.cn/>);⑤大气剖面参数,来源于 NASA 官网(<https://www.nasa.gov/>);以及来自西安市统计年鉴的相关人口社会经济数据,部分数据由野外实测获取。

1.2 野外实地调查

本研究在西安市六个城区中根据实际情况分别选取不同数量的绿地样方,为了保证样方的普遍性,选取的绿地包含多种类型,例如公园、社区绿地、大学校园、景区等。在进行样方数据实测过程中,利用手持 GPS 或含有经纬度信息的其他移动设备进行样方(大小为 20m×20m)定位。野外实测主要使用的工具包括胸径测量尺、测高仪、“形色”APP 等。野外数据收集时间为 2018 年 6 月至 8 月,野外测量主要收集的绿地植物信息包括胸径(树木距地面 1.3m 处)、枝下高、左右冠幅、树高、健康状况、所处坐标等信息,其他情况单独记录。实测数据样方共计 121 组,其中雁塔区 25 组、碑林区 25 组、莲湖区 25 组、新城区 22 组、未央区 16 组、灞桥区 8 组,一共获取 1795 棵绿地乔木植物测量数据。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务测算

根据研究区实际生态环境现状进行判断,选取生物多样性、固碳、净化空气、气候调节四种服务进行测算。生物多样性服务在实地测量数据和遥感影像的基础上,使用的乔木层物种多样性反演模型^[28]进行测算;根据沉降速率计算沉降通量^[29],结合研究区叶面积指数来进行绿地对 PM_{2.5}清除能力的评估,PM_{2.5}浓度逐小时获取时间为 2018 年 1 月 14 日;借助遥感工具和 InVEST 模型 Carbon 模块^[30]对研究区绿地的固碳服务能力及其空间分布进行研究;利用单窗算法^[31]进行地表温度测算,影像数据获取时间为 2018 年 6 月 23 日。具体测算指标体系如表 1。

1.3.2 绿地公平性评价

本研究引入区位熵^[34-35]的概念来分析生态系统服务公平性分布的空间格局。假设各个区域单元的区位熵为该区域内人口的人均绿地面积和四种生态系统服务物质量,具体的计算公式如下:

$$QS_i = \frac{\frac{G_i}{P_i}}{\frac{G}{P}} \quad (1)$$

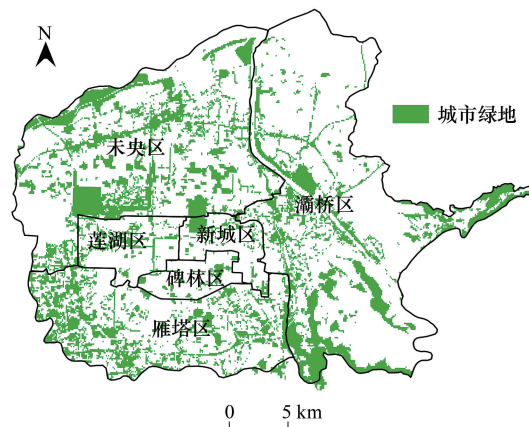


图 1 研究区绿地分布图

Fig.1 Distribution map of green space in study area

式中 QS_i 表示第 i 个空间区域单元区位熵; G_i 表示第 i 个空间区域单元中绿地面积和对应的四种生态系统服务物质质量; P_i 表示第 i 个空间区域单元中的常住人口; G 表示整个区域内的总绿地面积和生态系统服务物质质量的总和; P 表示整个研究区范围人口总数。

表 1 生态系统服务测算指标与方法
Table 1 Indexes and methods for estimating ecosystem service functions

评价类型 Evaluation type	计算公式 Calculation formula	具体参数 Specific parameters
生物多样性 Biodiversity	$H = -0.096NDVI + 0.131 TC_2 + 0.143 TC_3 + 1.673$ ($R^2 = 0.637, P < 0.01$)	H 为 Shannon-Weiner 指数 ^[32] ; $NDVI$ 为归一化植被指数 ^[33] ; TC_2 为绿色度; TC_3 为湿度。
净化空气 Air purification	$C = F \times LAI \times T \times (1 - R)$	C 为无降雨天气情况下单位面积一天可清除 $PM_{2.5}$ 量; F 为干沉降通量; LAI 为叶面积指数; T 为每日时数 24; R 为重悬浮率。
固碳 Carbon sequestration	$C_{storage} = (C_{soil} + C_{above} + C_{below} + C_{dead}) \times S$	$C_{storage}$ 为总碳储量; C_{soil} 、 C_{above} 、 C_{below} 、 C_{dead} 分别对应土壤、地上以及地下植被、死亡有机质的碳密度; S 为其面积。
气候调节 Climate regulation	$T_s = \frac{a \times (1 - C - D) + [b \times (1 - C - D) + C + D] \times T_d - D \times T_a}{C}$ $C = \varepsilon \tau; D = (1 - \tau) [1 + (1 - \varepsilon) \tau]$	T_s 为地表温度; $a = -67.355351$ 、 $b = 0.458606$; ε 为地表比辐射率; τ 为大气透射率; T_d 为地表亮度温度; T_a 为大气平均作用温度

1.3.3 小单元区域化

本研究采用基于动态约束凝聚集群和分区的区域化方法 (REDCAP) 对公平性评价待改善的地区进行集群和分区, 以实现精准的分区管理与优化。该算法实质上是基于六种区域化方法的, 这些方法是将三种聚集聚类方法 (单链接聚类, 平均链接聚类和完全链接聚类) 和两种不同的空间约束策略 (一阶约束和全阶约束) 结合在一起构成的。本研究基于距离的 k 近邻矩阵和一组驱动凝聚聚类方法的约束策略。平均链接聚类将两个聚类之间的距离定义为所有跨聚类数据点对之间的平均差异:

$$d_{ALK}(L, M) = \frac{1}{|L| |M|} \sum_{u \in L} \sum_{v \in M} d_{uv}$$

(2)

式中 $|L|$ 和 $|M|$ 分别是簇 L 和 M 中数据点的数量, $u \in L$ 和 $v \in M$ 是两个数据点, d_{uv} 是 u 和 v 之间的不相似性。

合并过程使用全阶约束策略合并了邻接约束。连续性约束的聚类要求两个聚类在空间上不连续时不能合并, 这是经典空间聚类和区域化之间的差异元素。全序约束策略包括聚类过程中的所有边缘, 并且在所有边缘上定义了两个聚类之间的距离。此策略是动态的, 因为它会在每次合并后更新邻接矩阵, 以跟踪连接两个不同簇的所有边。

2 结果与分析

2.1 城市绿地生态系统服务评估

如图 2 所示, 对生态系统服务进行测算, 多样性指数范围为 1.694—1.725, 较高值主要分布在公园等地及附近, 最高值出现在西安植物园、灞桥生态湿地公园、渭河城市运动公园等, 最低值出现在灞桥区东部, 周边主要是一些村镇聚集地, 以及西高新立交、汉城立交附近; 整体上来看, 西安市绿地存在群落结构的复杂程度较低、绿地的分布不均衡、单一植物的分布较为高频等现象明显, 生物多样性水平有待提升。通过对城市绿地 $PM_{2.5}$ 的日削减量分析, 其最高值为 $0.0145g/m^3$, 吸附效果明显的区域主要分布于研究区北侧渭河城市运动公园、西侧汉长安城遗址公园、中部大明宫国家遗址公园、东侧灞桥生态湿地公园以及城区内一些旅游风景区等植物覆盖程度较高的区域, 而日削减量最低值为 $0.0058g/m^3$, 低值区主要分布于城区内道路密集的地方, 植

物吸附效果较差主要和污染量大、道路扬尘频繁等因素相关。研究区不同区域碳储能力存在较大差异,单位面积最高值是 $12.8\text{t}/\text{hm}^2$,城市绿地植物固碳能力较强的区域主要分布在历史较久的大型公园、大学校园和风景区等地,未央区、雁塔区以及灞桥区相对于其他区域而言固碳能力更强,研究区固碳量整体上南部高于北部,东部高于西部。2018 年 6 月 23 日遥感影像反演的地表温度在 $20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $54.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,使用自然断点法对地表温度进行分级,地表温度呈现从西北向东南递减,且高温区密集而低温区分散的特征,水体、大型公园等地明显出现低温区;进一步分析城市绿地与热岛区域的联系,NDVI 的低值区域和地表温度的高值区域吻合度较高,NDVI 的高值区则位于大部分城市公园区域,NDVI 的低值区域主要是河流等水体和城市中心绿地分布较少的区域。研究区 NDVI 与地表温度两者在 0.01 水平上呈显著负相关,表明植被覆盖较高的绿地区域地表温度相对于其他区域较低,即绿地能够在一定程度上降低地表温度,缓解城市热岛效应。

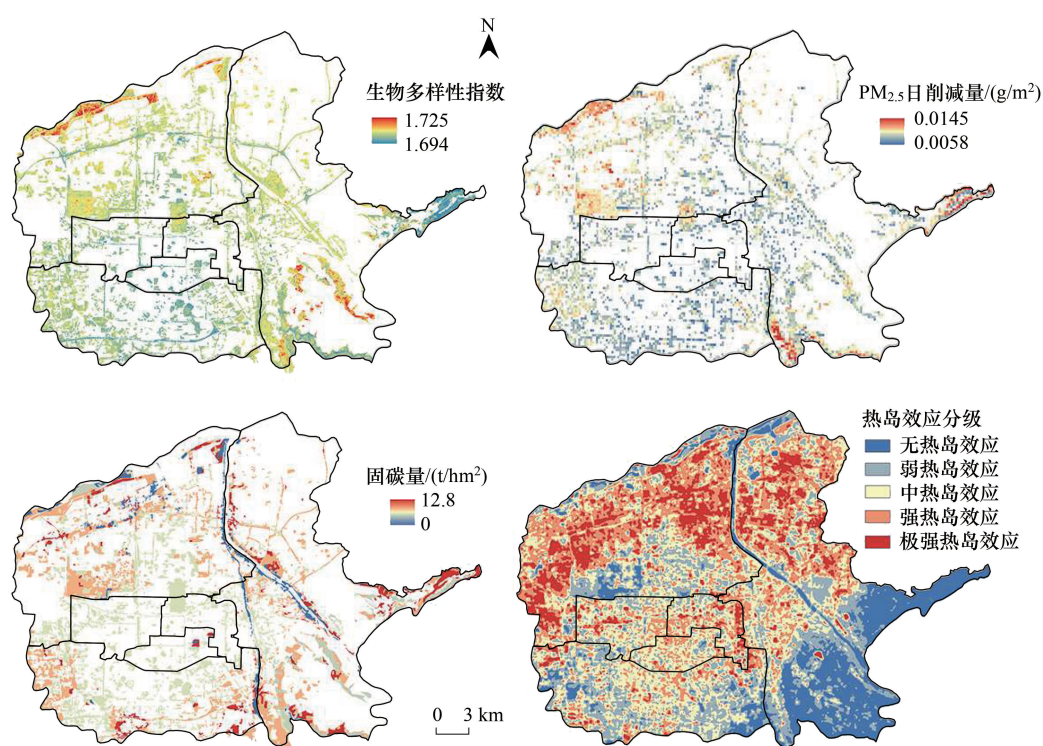


图 2 城市绿地生态系统服务评价结果

Fig.2 Evaluation of ecosystem services in urban green spaces

根据野外实测数据,进行实测验证,计算了相关系数。对于生物多样性服务,相关系数为 0.887,在 0.01 置信水平上显著相关;由于绿地结构信息难以识别进行判断,结构较差的绿地群落尽管植被覆盖高但多样性水平偏低,故在本研究利用变量参数反演得到的指标结果相对于实测值偏高。对于固碳服务,结合异速生长方程,来对各类树种的生物量进行测算^[36-37],相关系数为 0.811,在 0.01 置信水平上显著相关;由于 InVEST 模型在估算过程中除了地上植物本身通过光合作用将碳固定之外还涉及了土壤中的碳密度和植物枯枝落叶等死亡有机质等通过腐殖质所累积下来的固碳,模型计算结果偏大。

2.2 西安市绿地分布公平性评价

2.2.1 基于区位熵测算的生态系统服务公平性评价

生态系统服务的物质量为公平性量化提供可能,本文从社会公平概念出发,以城市绿地系统的生态系统服务为内容,建立了研究区城市绿地评价公平性的定量指标,根据区位熵值的高低进行等级划分,见表 2。

表 3 区域熵值的分类标准		
Table 3 The classification standard of location entropy value		
等级 Level	区位熵 Location entropy	等级描述 Description
低值 Low	< 0.77	区域人均生态系统服务水平低于研究区平均水平
中等 Middle	0.77—1.14(含)	基本与研究区平均水平保持相等
高值 High	1.14(不含)—2.2	区域人均生态系统服务水平高于研究区平均水平
极高 Extreme	> 2.2	区域人均生态服务水平高于研究区平均水平两倍

如图 3 所示,从区位熵分布情况可以看出,不同区域单元在绿地面积、植物群落丰富度、树种固碳能力差异及绿地净化空气和气候调节方面存在不同程度的差异;如图 4 所示,结合了区域人口因素的生态系统服务人均水平差异,也从另一个角度表明各区域生态系统服务存在不均衡的问题。

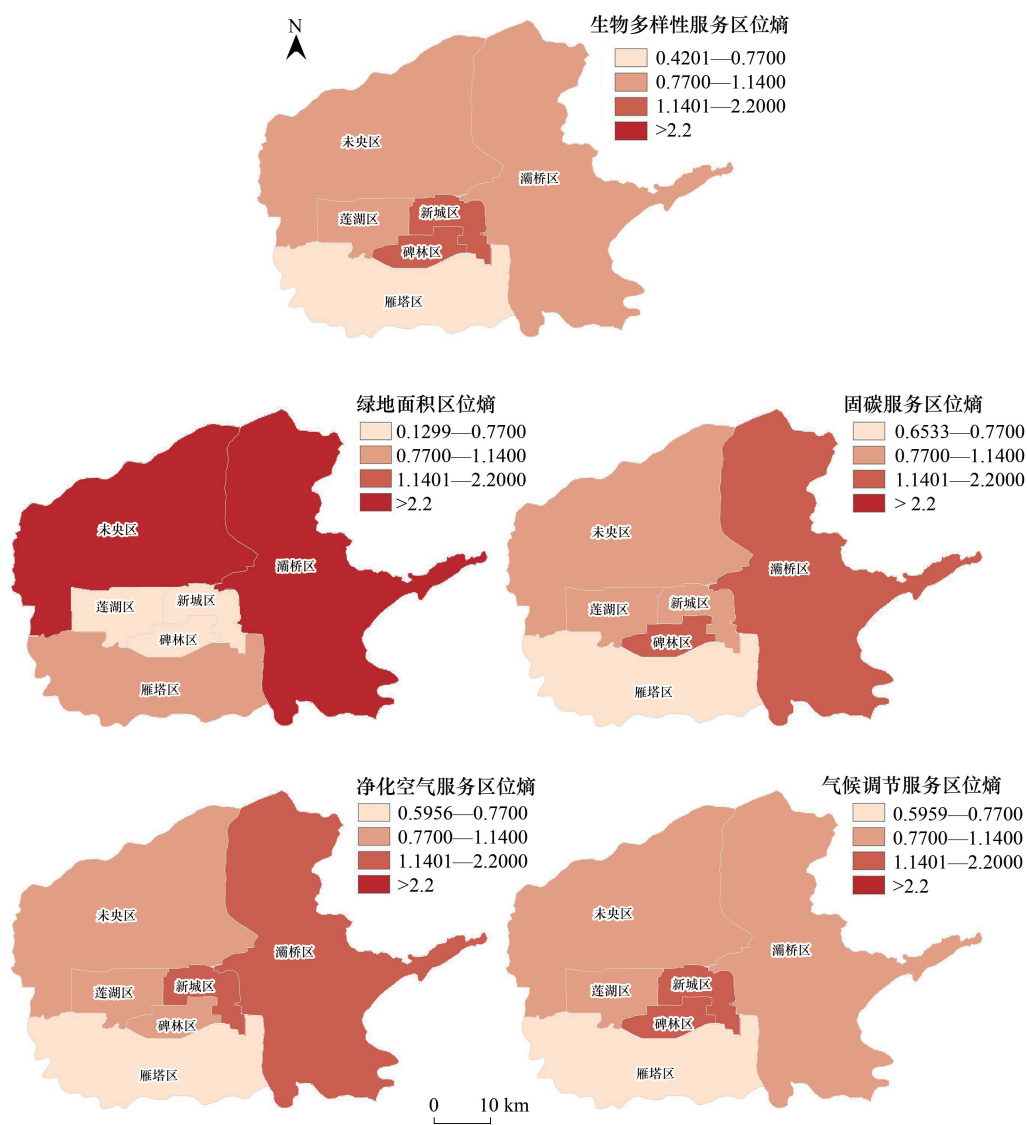


图 3 绿地面积和生态系统服务的区位熵分布模式

Fig.3 Location entropy distribution pattern of green space area and ecosystem services

结果表明,不同行政区域单元之间生态系统服务区位熵存在明显差异。整体上雁塔区的绿地面积虽然处于中上水平,但四类生态系统服务人均值处于较低水平;灞桥区人均绿地面积较高,净化空气服务和固碳服务

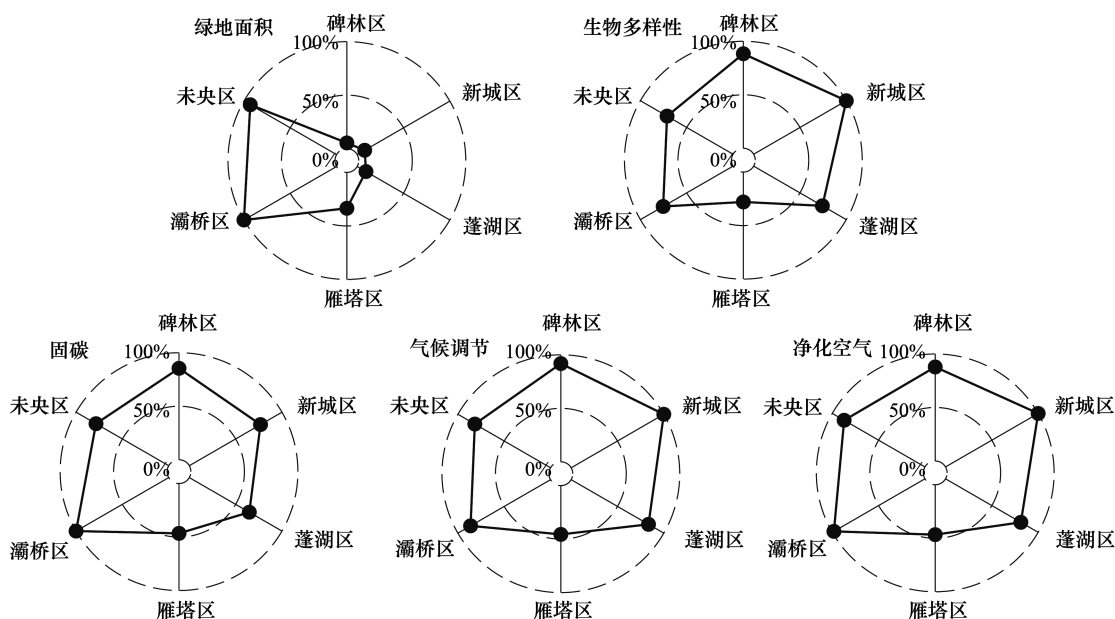


图4 行政区人均绿地面积与生态系统服务

Fig.4 Per capita green space area and ecosystem services in administrative region

人均水平较高;新城区在生物多样性、气候调节、净化空气三类生态系统服务方面人均水平较高;碑林区在生物多样性、固碳和气候调节服务方面人均水平较高;莲湖区和未央区的生态系统服务人均水平处于中等水平。根据资料可知,灞桥区人口密度约为 2.3 万人/ km^2 ,而雁塔区人口密度约为 4.5 万人/ km^2 ,约等于灞桥区人口密度的两倍,因此,尽管雁塔区存在较多的公园、风景区等不同类型绿地,但绿地生态系统服务人均水平仍然较低。相对来说在人口密度低的区域,其人均绿地生态系统服务水平较高,因此将人口密度因素考虑进生态系统服务空间分布格局使得城市绿地公平性的研究更加合理,更有利于实现社会公平。

2.2.2 基于生态系统服务公平性评价结果的城市绿地格局区域化

结合公平性评价结果,选取各行政区域单元中区位熵处于中下水平(区位熵值小于 1.14)的生态系统服务进行综合优化评价,以期为研究区生态系统服务的提升提供借鉴。由于各个服务指标存在量纲不一致的问题,因此首先需要对生物多样性、改善空气质量、固碳以及缓解城市热岛效应四类服务结果进行归一化处理,来消除指标量纲不一致所造成的影响。标准化操作之后,进而得到待改善的综合生态系统服务空间分布情况,即各个行政单元局部区域的生态系统服务待改善程度的空间分布情况,见图 5。

综合生态系统服务指数越低的地方,其优化对于整个区域的生态系统服务价值的提升价值越高,通过空间分布情况可以直观判断需要尽快改善的局部地区,并且可以判断待改善区域的改善重要性优先级。然而破碎化的绿地景观生态对生态系统服务管理优化具有不可

操作性,生态系统服务的空间区域化对政府及相关部门实行精准调控具有积极的指导意义。本研究基于格网尺度,以 1km 为单位共得到 913 个格网,统计对应格网的综合生态系统服务指数,基于 REDCAP 的方法实现

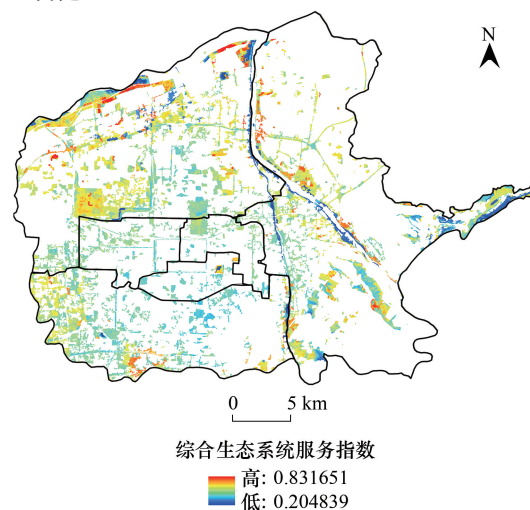


图5 综合生态系统服务评价图

Fig.5 Comprehensive ecosystem service evaluation map

研究区不同改善程度的区域划分。分区统计每个格网的综合生态系统服务指数平均值作为输入数据,基于距离的 k 近邻矩阵方法生成空间权重矩阵,通过 REDCAP 方法识别连续和均匀块的聚类,具体过程如图 6。选择了 Sum of Squared Error (SSE) 组内平方误差和来确定最佳聚类数目,调用 R 语言中现成的 factoextra 包进行计算。如图 7 中的拐点图显示,当超过 12 个群集时,聚类中的方差不会显著减少。因此选择群集的最佳数为 12。

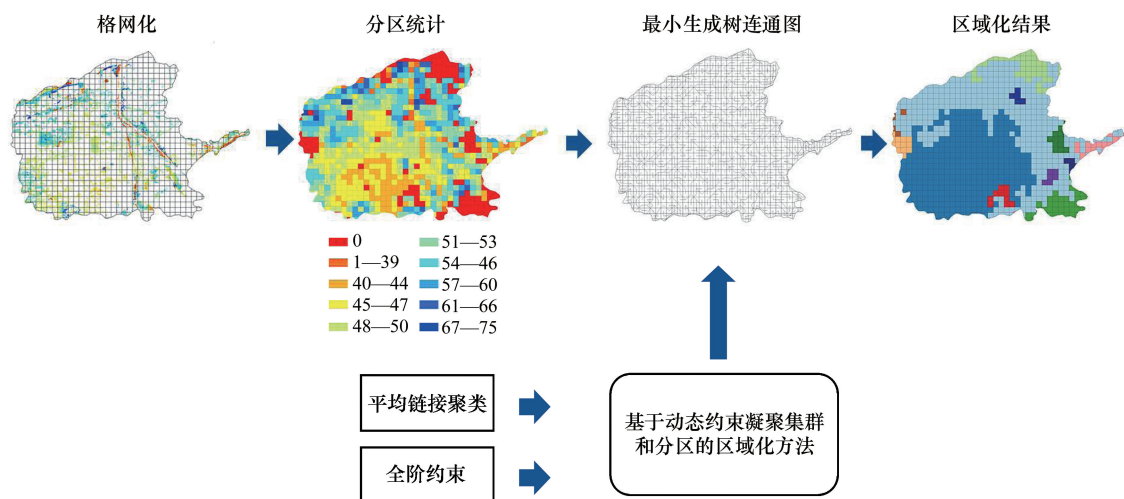


图 6 区域化过程图

Fig.6 Regionalization process diagram

将 913 个生态网格的进行区域化后得到 12 类分区,进一步根据表 3 所显示各同质区域的统计值进行再分类最终确定 5 类生态系统服务簇。如图 8、9 所示为通过 REDCAP 确定的同质区域结果。区域 1(第一类分区簇)主要为未央区、灞桥区的大部分地区,研究区内水系主要分布在该地区,包括一横(渭河)两纵(泾河、灞河)大型水域,该区域绿地建设工程的脚步近年来不断加快,但仍然需要关注提升绿地物种多样性的丰富程度,且道路绿化带的生态系统服务水平仍需提升,由于风向等自然因素和地理因素,位于渭北台塬南部与白鹿原西部地区空气质量相对较差,因此绿地植物可以多选择叶面积指数较高的树种,并注意根据风向因素调整建筑物及绿地植物排列,以便空气质量的改善;区域 2(第二类分区簇)大部分地区为城市化更高的碑林区、雁塔区、新城区和莲湖区,该地区绿地破碎程度大且公园较多,包括各类公园、大学绿地、社区绿地以及绿化带等,由于城镇建设生态环境的考虑整体生态系统服务水平相对较高,针对具体斑块如火车站附近及部分社区绿化资源较少,应适量栽种一些固碳量较高的树种例如悬铃木、栎树等,并通过增加社区绿化来提升局部生态系统服务水平;区域 3、4、6、7、8、12(第三类分区簇)为研究区内绿化资源未分布的地区或已达到相对公平指标的地区;区域 5(第四类分区簇)为山地部分,也具有较高的生态系统服务水平;区域 9、10、11(第五类分区簇)具有占比较高的农田分布,城镇化率低,鲜有具有强生态效益的植被,生态系统服务指数偏低。

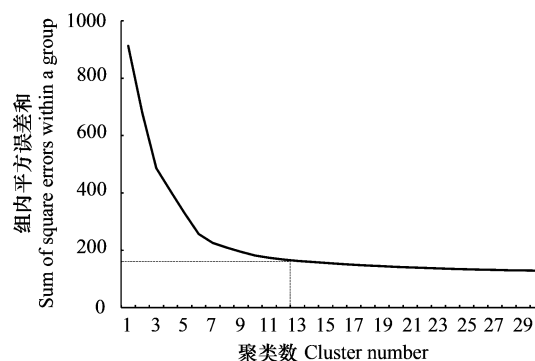


图 7 最佳聚类数选择

Fig.7 Optimal cluster number selection

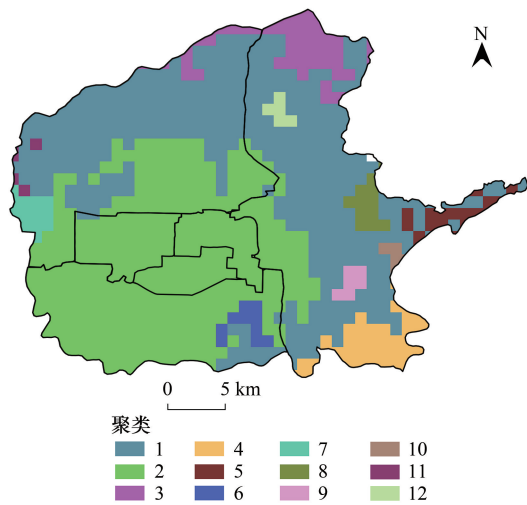


图8 区域化结果
Fig.8 Regionalized results

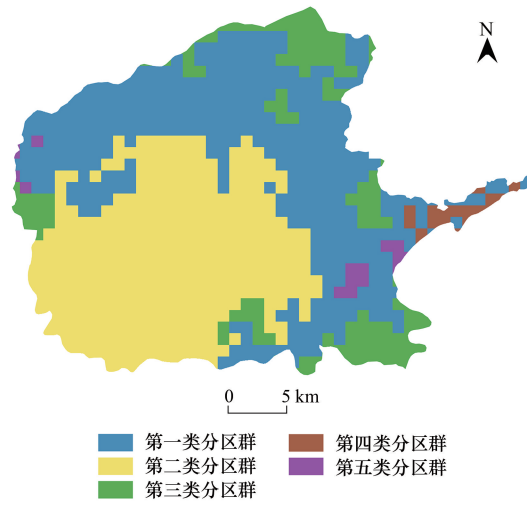


图9 分区群生态系统服务簇
Fig.9 Zoning group ecosystem service

表 3 各同质区域统计值
Table 3 Statistics of homogeneous regions

生态系统服务综合评价指数 Ecosystem services index	聚类 Clusters											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均值 Mean	52.79	45.5	0	0.729	40.68	0	0	0	30.33	18.2	20.6	0
第一分位数 Q1	50	45	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0
中值 Median	54	47	0	0	41	0	0	0	45	0	0	0
第三分位数 Q3	56	49	0	0	41	0	0	0	45	43	51	0
标准差 STD	7.459	9.454	0	4.439	3.061	0	0	0	23.5	24.98	28.21	0

3 讨论

近年来西安市城市建设步伐加快,缓解城市化所带来的生态系统负面影响势在必行,揭示量化城市绿地所产生的生态系统服务对改善人居环境质量与生态空间建设管理具有重要的指导价值。本研究采用城市绿地实测数据与高分辨率 Sentinel-2 遥感影像数据,选取了生物多样性、固碳、气候调节和净化空气四种生态系统服务,分析了西安市生态系统服务空间格局,结果表明多样性指数分布范围为 0.694—1.725,城市绿地对 PM_{2.5} 的日削减量范围为 0.0058—0.0145g/m³,城市绿地碳储存单位面积最高值是 12.8t/hm²。韩晔等^[10] 基于 TM 遥感影像对西安市绿地吸收雾霾的生态系统服务价值进行了测算和空间分析,发现西安市绿地景观吸收雾霾的生态系统服务空间差异明显,整体表现为中心值高于四周;胡忠秀等^[11] 应用景观生态学方法测评和分析西安市区绿地生态系统的服务功能及其空间格局特征,从单项生态服务功能来看,空间分布差异较大。该结果与前人研究结论基本一致。本文并基于公平性结果通过分区化揭示了 12 个特征明显的聚群、5 类生态系统服务簇。各类生态系统服务簇特征明显,第一类分区簇为研究区内水系主要分布地,包括一横(渭河)两纵(泾河、灞河)大型水域,河道周边植被丰富。由于该区域属于现阶段快速城市建设的区域,各类绿色基础设施还不够完善,故该地区复合生态系统服务指数差距大。第二类分区簇为城镇化程度更高的城市核心区,城市绿地规划完善,但相对核心区周围绿化资源较少。第三类分区簇为城市绿地资源无分布的地区或已达到相对公平指标的地区。第四类分区簇为山地地区,具有较高的生态系统服务水平。第五类分区簇具有占比较高的农田分布,城镇化率低,鲜有具有强生态效益的植被,复合生态系统服务指数偏低。具有动态约束的聚类和分区的区域化方法以空间权重的形式考虑了几何之间的空间关系,区域化方法作为一种特殊的空间聚类方

法,利用目标函数最优化将若干较小的区域转变为由一些空间相连的较大的同质区域。基于生态系统服务簇的目标优化不仅能够最大限度涵盖生态用地的功能属性,而且能够在空间上量化不同生态系统服务的相对比例,有助于对绿地系统与生态功能之间的对应关系形成深入系统的认识,从而为区域生态系统服务精细化管理和生态治理差异化管控提供借鉴。

复合生态系统服务指标的空间区域化不仅可以更好地缓解城市生态问题,更能在此基础上提升城市的绿地生态系统服务层次,进一步改善城市居民的生态环境,使在进行整体绿地格局规划与管理过程中有的放矢,精准改善。城市绿地生态系统服务角度下的空间优化就是最大化发挥其本身生态效益的有效途径,只有进一步让绿地与城市融合,优化绿地生态系统服务的空间格局才能更有助于绿地系统发挥本身的生态效益。但是如何进行更深层的城市与环境之间的耦合,其内部机理仍然需要我们探究,从实际情况出发,因地制宜的进行系统的规划。

城市绿地系统的配置,应转变思路根据生态系统服务水平指标进行指导,才能够最大化实现绿地的生态功能,合理利用并且避免绿地资源的浪费。基于公平性评价的西安市城市绿地生态系统服务空间区域化相比于现有的行政区划管理模式加强了对生态内涵的考量,新算法的应用也为其提供了更多可能,拓展了生态效益受益者需求导向的管理思路,提高了生态系统服务量化管理的针对性和科学性,但由于数据获取和评估方法的局限,研究仍有进一步探索的空间。城市生态系统服务功能多样,已有的研究中已经存在一些评价体系,本研究在综合考虑了研究区特点的基础上,针对当前的快速城市化现状,对研究区城市生态系统服务的未来规划提供参考,且本研究使用的生态系统服务评价方法具有普遍适用性。但如果要对城市绿地系统进行全面的评价,研究的内容可以被进一步补充完善,例如包含于城市绿地环境的行道树具有一定的吸附灰尘和减少噪音的功能,而这些功能的实现有待进一步研究,再例如对城市中绿地系统的防灾减灾功能的研究,城市作为一个较为庞大的承灾体,如何进行防灾减灾的话题已经被广泛讨论,除生态功能之外,有城市内部的绿地系统构成的减灾避难体系也将成为绿地空间规划的考虑因素之一。另外,本研究因为时间精力等限制,考虑到乔木作为生态系统服务的主要贡献源,因此研究对象主要以绿地中的乔木植物为主,而未能采集灌木和草本植物的信息,今后的研究应当对城市绿地系统进行充分的考虑,使得数据更为完整,也可选取高光谱遥感以及 LiDAR 技术等完善绿地树种信息采集的工作。同时人均指标的计算仍然是基于行政单元的,且行政单元为区级,未来可以考虑使用最新的街道级数据可能会使得区域分异水平更高。研究中选择四种城市生态系统服务也主要是针对当前西安市存在较为突出的生态问题,未来的研究可以从更为全面的绿地生态系统服务量化角度来建立多服务功能的评价模型,以期更好地为城市绿地规划工作提供理论参考,为城市可持续发展提供助力。

4 结论

本文根据西安市生态环境问题的具体现状,并综合研究区的基础地理条件,实现了西安市主城区绿地系统各项生态系统服务的测算与空间化制图,并从公平性角度对整个研究区绿地的生态系统服务进行了评价分析,进一步基于评价结果提出了区域化管理的构想。研究表明:

(1) 西安市主城区城市绿地群落的复杂程度较低,生物多样性水平有待提升;植物对 $PM_{2.5}$ 具有一定的吸附作用,吸附效果明显的区域主要分布于研究区一些旅游风景区等植物覆盖程度较高的区域;固碳量整体上南部高于北部,东部高于西部;绿地区域的地表平均温度低于域整体地表温度均值,并与 NDVI 存在相关性。

(2) 整体上看,西安市主城区城市绿地资源分布配置不均,不同区域的生态系统服务空间分布普遍不合理。

(3) REDCAP 算法协同其数量结构与空间分布合理的进行了研究区综合生态系统服务指标的区域化,913 个网格、12 个分区、5 个聚群为不同级别的生态系统服务优化提供了空间上的规划指导,为城市生态环境的改善与公平化,为进一步满足居民生态环境需求,促进人与环境和谐发展做出贡献。

参考文献 (References):

- [1] Holdren J P, Ehrlich P R. Human population and the global environment. *American Scientist*, 1974, 62(3): 282-292.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Policy Responses*. Findings of the Responses Working Group. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] Kumar P. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London: Earthscan, 2010.
- [4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [5] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-301.
- [6] Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Kazmierczak A, Niemela J, James P. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: a literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(3): 167-178.
- [7] Liddicoat C, Bi P, Waycott M, Glover J, Lowe A J, Weinstein P. Landscape biodiversity correlates with respiratory health in Australia. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 113-122.
- [8] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: an urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 2016, 577: 349-359.
- [9] Mirzaei P A. Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 2015, 19: 200-206.
- [10] 韩晔, 周忠学. 西安市绿地景观吸收雾霾生态系统服务测算及空间格局. *地理研究*, 2015, 34(7): 1247-1258.
- [11] 胡忠秀, 周忠学. 西安市绿地生态系统服务功能测算及其空间格局研究. *干旱区地理*, 2013, 36(3): 553-561.
- [12] Jones L, Vieno M, Fitch A, Carnell E, Steadman C, Cryle P, Holland M, Nemitz E, Morton D, Hall J, Mills G, Dickie I, Reis S. Urban natural capital accounts: developing a novel approach to quantify air pollution removal by vegetation. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 2019, 8(4): 413-428.
- [13] 汤姚楠, 王佳, 周伟奇. 城市生态系统服务价值评估方法体系探索——以江苏省徐州市为例. *林业经济*, 2020, 42(3): 27-38.
- [14] 林勇. 城市绿地生态系统服务指标体系构建. *上海建设科技*, 2020, (3): 110-113.
- [15] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 肖建设, 扎西拉旦, 颜玉倩, 陈国茜, 史飞飞. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1660-1672.
- [16] 卢龙辉, 陈福军, 许月卿, 黄安, 黄玲. 京津冀“生态系统服务转型”及其空间格局. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 532-545.
- [17] 周晓艳, 李霄雯, 侯美玲. 居住小区视角下武汉市公共绿地可达性和公平性研究. *地理信息世界*, 2020, 27(2): 124-129.
- [18] Kareiva P, Watts S, McDonald R, Boucher T. Domesticated nature: shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science*, 2007, 316(5833): 1866-1869.
- [19] 王宏亮, 高艺宁, 王振宇, 沙威, 吴健生. 基于生态系统服务的城市生态管理分区——以深圳市为例. *生态学报*, 2020, 40(23): 8504-8515.
- [20] Liu Y X, Li T, Zhao W W, Wang S, Fu B J. Landscape functional zoning at a county level based on ecosystem services bundle: methods comparison and management indication. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109315.
- [21] Zen M, Candiago S, Schirpke U, Vigl L E, Giupponi C. Upscaling ecosystem service maps to administrative levels: beyond scale mismatches. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1565-1575.
- [22] 祁宁, 赵君, 杨延征, 苟睿坤, 陈佳琦, 赵鹏祥, 李卫忠. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同. *生态学报*, 2020, 40(9): 2827-2837.
- [23] Zhou S Y, Li W, Lu Z Y F, Cheng R H. An ecosystem-based analysis of urban sustainability by integrating ecosystem service bundles and socio-economic-environmental conditions in China. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106691.
- [24] Guo D. Regionalization with dynamically constrained agglomerative clustering and partitioning (REDCAP). *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(7): 801-823.
- [25] Fovell R G, Fovell M Y C. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis. *Journal of Climate*, 1993, 6(11): 2103-2135.
- [26] Handcock R N, Csillag F. Spatio-temporal analysis using a multiscale hierarchical ecoregionalization. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(1): 101-110.
- [27] Boluwade A, Madramootoo C, Yari A. Application of unsupervised clustering techniques for management zone delineation: case study of variable rate irrigation in Southern Alberta, Canada. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2016, 142(1): 05015007.
- [28] 张彩虹, 李巍岳, 胡志斌, 朱教君, 闫巧玲. 基于 RS 与 GIS 的乔木层物种多样性分布格局——以辽东山区水源涵养林为例. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1749-1755.
- [29] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, Hoehn R. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 395-402.
- [30] 陈登帅, 李晶, 张渝萌, 张城, 周自翔. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究. *生态学报*, 2020, 40(01): 112-122.
- [31] 胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 赵利民, 季国华. 单窗算法结合 Landsat 8 热红外数据反演地表温度. *遥感学报*, 2015, 19(6): 964-976.
- [32] Shannon C E. The mathematical theory of communication. 1963. M.D. Computing: Computers in Medical Practice, 1997, 14(4): 306-317.
- [33] Paruelo J M, Epstein H E, Lauenroth W K, Burke I C. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1997, 78(3): 953-958.
- [34] 赵小汎. 区位熵模型在土地利用变化分析中的新运用. *经济地理*, 2013, 33(2): 162-167.
- [35] 孙晶, 李涵硕. 金融集聚与产业结构升级——来自 2003—2007 年省际经济数据的实证分析. *经济学家*, 2012, (3): 80-86.
- [36] 李巍, 王传宽, 张全智. 林木分化对兴安落叶松异速生长方程和生物量分配的影响. *生态学报*, 2015, 35(6): 1679-1687.
- [37] 曾伟生. 3 种异速生长方程对生物量建模的对比分析. *中南林业调查规划*, 2014, 33(1): 1-3, 19-19.