

森林植被碳密度空间分布特征研究

李凤霞¹, 石 辉², 撒利伟¹, 刘明星¹, 冯晓刚¹, 李 萌¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 基于大量样方实测数据和高分辨率遥感影像数据, 采用异速生长模型与 GIS 空间分析相结合的方法进行西安森林植被碳密度空间分布特征分析。研究发现, 西安五种绿地类型乔木综合指数 D 表现出: 风景区绿地>文教区绿地>居住区绿地>工业区绿地>道路绿地。西安不同类型森林植被乔木层碳密度空间分布不均衡, 表现为文教区绿地>风景区绿地>居住区绿地。西安城市居住区森林植被乔木层碳密度集中分布在 1.21~3.63 kg/m²; 西安城市风景区树木碳密度取值范围介于 1.92~13.64 kg/m²; 西安城市文教区树木碳密度取值范围介于 0.422~94.646 kg/m², 未来西安森林植被具有巨大的固碳潜力, 但仍需优化西安森林植被结构, 加强城市物种多样性保护, 从而更好地发挥森林城市的生态服务功能。

关键词: 森林植被; 碳密度; 空间分布特征; 西北地区

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)03-0416-07

Research on spatial distribution characteristics of forest vegetation carbon density

LI Fengxia¹, SHI Hui², SA Liwei¹, LIU Mingxing¹, FENG Xiaogang¹, LI Meng¹

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on a large number of samples data and high resolution remote sensing image data, analyzing the spatial distribution characteristics of Xi'an forest vegetation carbon density by using a method combining allometric growth model with GIS space analysis. The study found that the five kinds of green space composite index D showed: scenic green space>cultural district green space>residential green space>industrial area green space>road green space. What's more, the carbon density of different types of forest vegetation in Xi'an showed that cultural district green space>scenic green space>residential green space, and its spatial distribution is imbalanced. Besides, the carbon density of residential forest vegetation ranges between 1.21 kg/m²~3.63 kg/m²; the scenic forest vegetation ranges between 1.92 kg/m²~13.64 kg/m², and the cultural district forest vegetation ranges between 0.422 kg/m²~94.646 kg/m². In the future, the forest vegetation in Xi'an has great potential for carbon sequestration. However, it is still necessary to optimize its structure, strengthen the protection of urban species diversity, so as to give full play the ecological service function of forest city.

Key words: forest vegetation; carbon density; spatial distribution characteristics; northwest China

随着城市化进程的加快, 城市热岛、交通拥堵、环境污染、温室效应等多种生态环境问题日益突出。近年来, 全球气候变暖引起了学术界广泛关注^[1], 森林生态系统是陆地生态系统的重要碳库, 在调节全球气候变化、维持全球碳平衡方面发挥着重要作用^[2-6]。科学精准地计量森林植被碳密度是有效评价森林碳汇潜力的重要因素, 可为提高应对全球气候变化的能力提供科学依据。

目前, 国内外学者围绕着森林生态系统碳储量、碳密度做了大量研究工作, 美国^[7]、俄罗斯^[8]、加拿大^[9]等国家对森林植被碳循环及碳汇估算研究均

有较大进展。基于森林资源清查资料, 估算森林植被碳储量、碳密度的方法主要有森林植被生物量换算因子连续函数法^[12,15]、运用海拔高度、郁闭度、胸径、坡向、灌木层和草本层覆盖度数据计算植被碳密度法^[14]、利用森林乔木层生物量与蓄积量回归模型估算森林植被碳储量法^[10-11,13,16]。

归纳起来, 这些研究均属于大尺度、大范围地估算森林植被碳储量及碳密度。然而, 由于区域研究对象的复杂性和广泛性, 森林植被具有地域性特点, 不同学者的研究方法存在着一定的差异性, 大尺度、大范围估算森林植被碳储量碳密

度的研究结果仍存在很大的不确定性。为此,本研究结合森林植被地域特性,基于实测数据,利用异速生长模型,因地制宜地进行区域范围森林植被碳储量和碳密度的精准计量。

西北地区生态环境脆弱,森林生态系统植被具有鲜明的地域性特点。而目前关于西安区域森林植被碳密度空间分布特征的研究报道较少。因此,本文以西安森林生态系统植被乔木林为研究对象,以高分辨率遥感影像为基础数据源,结合样地实测数据,采用异速生长模型与GIS空间分析相结合的方法,分析西安森林植被碳密度空间分布特征,旨在进一步精确估算森林植被碳密度,为区域森林碳汇评价提供科学依据、为城市各功能区的生态效益评价提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

西安地处我国西北东部、关中平原中部,地理坐标位于北纬 $33^{\circ}42' \sim 34^{\circ}45'$,东经 $107^{\circ}40' \sim 109^{\circ}49'$,属暖温带半湿润大陆性季风气候,平均海拔424 m,1月平均气温 0.4°C ,7月平均气温 26.6°C ,年平均温度约 13.3°C ,平均降水量604.2 mm,平均湿度69.6%。其辖区包括雁塔区、碑林区、新城、未央区、莲湖区、灞桥区、长安区、临潼区、阎良区、高陵区和鄠邑区,辖县包括蓝田和周至县,即11区2县,占地面积 $10\,108\text{ km}^2$ 。其中主城区包括新城、雁塔区、碑林区、未央区、莲湖区和灞桥区六区,面积 822 km^2 。

1.2 数据来源

本研究以2015年西安SPOT遥感影像数据、Landsat TM、ETM+数据、30 m分辨率的数字高程模型DEM数据和1:1万、1:5万比例尺的地形图数据、社会经济数据、人口数据(包括人口密度和人口数量)及大量样方实测等数据为数据源。

1.3 研究方法

基于3S(GIS、RS、GPS)技术,应用遥感软件ERDAS、Ecognition进行遥感影像分类,把西安森林植被乔木林划分为风景区绿地、居住区绿地、文教区绿地、工业区绿地及道路绿地,采用地理信息系统软件ARCGIS解析西安城区不同类型森林植被碳密度空间分布特征,分析森林植被多样性特征。

根据城市森林分布特点及公园、道路、居住区、文教区、工业区的规模等实际情况,确定外业实地调查的地点及样方数量。公园样方的大小

设置为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,相邻两个样方之间的间距不得小于150 m,共调查了兴庆宫公园、城市运动公园、丰庆公园等20个公园的40个样方;对于道路样方的设置,是根据道路的长度及其植被的配置,调查道路两侧 $100\text{ m} \times 10\text{ m}$ 内树木的具体情况,调查了友谊路、太乙路、文景路等113条道路共计140个样方;关于居住区样方的设置,每个样方包含一栋住宅楼及其周围的行道树和绿化带,样地的面积则根据实际情况来确定,共调查了东方雅苑、鼎新花园、海荣阳光城等23个住宅小区的23个样方;学校样方的大小设置为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,设置方法同公园样地的设置,一共调查了西安建筑科技大学、西安体育学院、西安交通大学等18个学校的31个样方;工业区样地的设置是 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,共调查了中国石油长庆油田集团、中国标准工业集团、西安机电车辆配件厂等6个工业区。

1.3.1 森林植被多样性指标

生物多样性的维持在城市环境建设与城市绿地生态效益发挥中具有重要的价值。森林植被多样性水平通常用多样性指数、丰富度指数和均匀度指数来衡量。多样性指数用来度量生物多样性的分布以及空间分布的特征,本研究使用Simpson指数 D_s 及Shannon—Wiener多样性指数 H' 来度量;丰富度指数用来度量群落里的物种数目的多少,是物种多样性测度中一种比较简单、而且生物学意义比较明显的指标,丰富度指数指的是群落中的物种数目,是基于物种是否存在,而不是物种相对多度的多样性测度,采用Patrick指数 S 及Margalef指数 da 来度量城市树木丰富度指数;均匀度指数用来衡量物种在群落内的分布状况,用Pielou均匀度指数 J'_{si} 来度量^[17]。

(1) 物种多样性指数

Simpson指数 D_s ,是对多样性的相反面,即集中性的量度,也叫集中性概率指数,

$$D_s = 1 - \sum_{i=1}^s \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (1)$$

其中: N_i 是第 i 种物种的个体数; N 是个体总数; S 是群落中物种数目。

Shannon—Wiener指数 H' ,是以信息出现的不确定性来反映种的个体的多样性,也叫信息指数。

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i, P_i = \frac{N_i}{N} \quad (2)$$

其中, P_i 是第 i 种比例多度。

(2) 物种丰富度指数

$$\text{Margalef 指数 } da = (S - 1) / \ln N, \quad (3)$$

Patrick 指数 $(S)=S$ (4)

其中, S 是群落中物种数目, N 是个体总数.

(3) 物种均匀度指数

Pielou 均匀度指数 J'_s 是指群落的实测多样性和最大多样性(给定物种数目 S 的完全均匀群落的多样性)的比率, 即

$$J'_s = H'/\ln S \quad (5)$$

其中, H' 是多样性指数, S 是群落中的物种数目.

本研究引入综合指数 D 对森林植被乔木林多样性进行定量分析, 其中, $D=0.451\ 9S+0.455\ 6da+0.428\ 5Ds+0.446\ 9H'+0.452\ 84J'_s$ ^[18].

1.3.2 森林植被碳密度计算

碳密度是指单位面积的碳储量, 即碳储量与相应的面积之比. 本研究采用城市绿化树种异速

生长方程计算植物生物量, 利用生物量与含碳率估算城市森林的碳储量, 含碳率采用目前国际上常用的数值 0.5^[19]. 由于乔木林是森林植被碳储量的最主要贡献者, 因此本文主要研究西安主城区乔木林的碳储量、碳密度及其空间分布特征.

2 结果与分析

基于高分辨率遥感影像数据, 首先应用遥感软件易康、ERDAS 对遥感影像进行分类, 把土地利用类型划分为绿地和非绿地两大类, 然后再使用 ARCGIS 软件提取西安城市绿地信息(表 1), 结合大量的样地实测数据, 定量分析西安不同类型森林植被多样性水平及其碳密度空间分布特征.

表 1 西安主城区绿地数据统计

Tab. 1 Data statistics of green space in Xi'an urban are/m²

类别	计数	最小值	最大值	总和	平均值
道路绿地	445	2 815	560 697	15 633 211	35 130
居住区绿地	460	996	759 788	11 766 371	25 579
风景区绿地	172	3 741	2 256 168	28 449 692	165 405
文教区绿地	184	2 571	2 313 281	14 816 815	80 526
工业区绿地	124	3 084	1 337 854	5 293 384	42 688

由表 1 可知, 西安主城区绿地中, 风景区绿地面积所占比例最大, 风景区绿地共计 172 个斑块, 最小斑块面积为 3 741 m², 最大斑块面积为 2 256 168 m², 平均斑块面积为 165 405 m², 风景区绿地面积总和为 28 449 692 m²; 工业区绿地所占面积比例最小、绿地斑块最少, 工业区绿地总面积为 5 293 384 m²; 道路绿地分布比较均匀, 面积总和为 15 633 211 m²; 居住区绿地斑块最多, 达到了 460 个, 平均斑块面积为 25 579 m², 最小斑块面积仅为 996 m², 绿地面积总和为 11 766 371 m²; 文教区绿地面积为 80 526 m²,

集中分布在西安南郊, 这与居住区绿地的分布有相似之处, 是因为西安南郊的小学、中学、大学院校偏多, 南郊碑林区的常住人口密度最大, 达到了 26 701 人/km².

2.1 西安森林植被乔木林多样性分析

依据 Simpson 指数 D_s 及 Shannon—Wiener 多样性指数 H' ; Patrick 指数 S 及 Margalef 指数 da ; Pielou 均匀度指数 J'_s 以及综合指数 D 分析西安森林植被乔木林多样性特征, 综合起来, 西安城市绿地多样性指数如表 2 所示.

表 2 西安城市绿地多样性指数

Tab. 2 Diversity index of Xi'an city green space

绿地类型	Patrick 指数 S	Margalef 指数 da	Simpson 指数 D_s	Shannon-Wiener 指数 H'	Pielou 指数 J'_s	综合指数 D
道路绿地	2	0.32	0.32	0.57	0.52	1.86
居住区绿地	5	1.25	0.62	1.09	0.74	3.86
风景区绿地	9	1.90	0.77	1.67	0.81	6.19
文教区绿地	8	1.65	0.73	1.52	0.81	5.50
工业区绿地	4	1.04	0.55	1.05	0.69	3.30

由表 2 可知, 西安城市道路绿地、居住区绿地、风景区绿地、文教区绿地、工业区绿地五类绿地中乔

木综合指数 D 表现出:风景区绿地>文教区绿地>居住区绿地>工业区绿地>道路绿地;物种丰富度 Patrick 指数 S 的排序为:风景区绿地>文教区绿地>居住区绿地>工业区绿地>道路绿地;物种丰富度 Margalef 指数 da 表现出:风景区绿地>文教区绿地>居住区绿地>工业区绿地>道路绿地;物种多样性 Simpson 指数 D_s 的排序为:风景区绿地>文教区绿地>居住区绿地>工业区绿地>道路绿地;多样性 Shannon-Wiener 指数 H' 的表现出:风景区绿地>文教区绿地>居住区绿地>工业区绿地>道路绿地;物种均匀度 Pielou 指数 J'_s 表现出:风景区绿地=文教区绿地>居住区绿地>工业区绿地>道路绿地。

综上所述,五种绿地类型中风景区绿地的丰富度、均匀度及多样性水平最高,植物的多样性比较丰富,植物的配置科学合理,这与园林绿化设计有关,同时,风景区绿地园林植物的增长已趋于稳定。然而,西安城市道路乔木的生物多样性水平较低,丰富度指数偏低,树种比较单一,缺乏植物的多样化,因此西安道路绿化有待进一步改善,首先应该更新行道树,合理选择植物,建设具有地方特色的植物景观,在道路两侧建设更多的生态景观林带,营造更加丰富的道路植物景观,同时需注重色彩与层次的搭配;其次,通过合理、科学的复层结构关系,增加城市三维绿量,从而有效提高绿地的生态景观效益;最后仍需进一步加强道路绿化的后期养护管理,为创建西安森林城市做出贡献。

2.2 西安居住区森林植被乔木林碳密度分析

根据测量的树高 H 和胸径 D ,结合绿化树种的异速生长方程,以及居住区样地面积计算出每个居住区样地的单位面积碳储量,即碳密度。基于西安城市居住区森林植被乔木层样地碳储量数据结果,使用 ARCGIS10.4 地理信息系统分析软件的分析工具,绘制出西安城市居住区森林植被碳密度的空间分布图,如图1所示。

对西安城市居住区森林植被碳密度的空间分布特征进行地理空间分析。从图1可以看出,西安城市居住区乔木碳密度等级位于 $0 \sim 1.21$ 的占3%,碳密度等级位于 $1.21 \sim 2.42$ 的占41.1%,碳密度等级位于 $2.42 \sim 3.63$ 的占41%,碳密度等级位于 $3.63 \sim 4.84$ 的占10.1%,碳密度等级位于 $4.84 \sim 6.05$ 的占3%,碳密度等级位于 $6.05 \sim 7.26$ 的占1%,碳密度等级位于 $7.26 \sim 8.47$ 的占0.3%,碳密度等级位于 $8.47 \sim 9.68$ 的占0.2%,

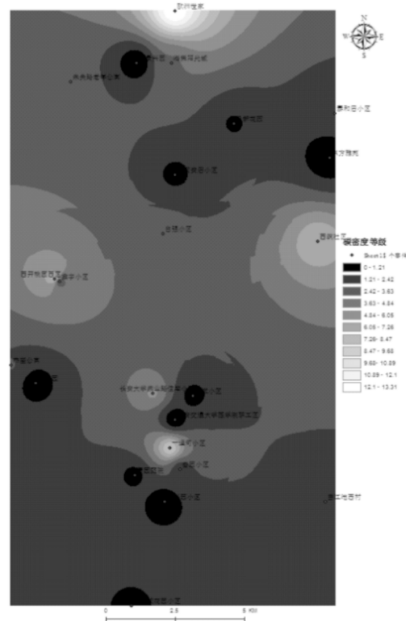


图1 西安城市居住区森林植被碳密度空间分布

Fig. 1 Forest vegetation carbon density spatial distribution of Xi'an city residential area

碳密度等级位于 $9.68 \sim 10.89$ 的占0.1%,碳密度等级位于 $10.89 \sim 12.10$ 的占0.1%,碳密度等级位于 $12.10 \sim 13.31$ 的占0.1%。

由此可知,西安城市居住区森林植被乔木层碳密度集中分布在 $1.21 \sim 3.63 \text{ kg/m}^2$,占总量的82%。其中,欧洲世家的单位面积碳储量最高,为 13.215 kg/m^2 ,而旭景兴园的单位面积碳储量最低,仅为 0.198 kg/m^2 ,这是因为欧洲世家是一个比较成熟的大居住区,绿化率高,乔木普遍比较高粗大粗壮,绿化面积大,且碳密度高,所以,其碳储量较高。而旭景兴园内的绿化主要为草地和灌木,乔木较少,而且偏小,所以,其碳密度低、碳储量小。总体来说,繁华区域居住区的碳储量比郊区的碳储量偏低,可见,人类活动是影响森林植被碳储量空间分布的一个因素。总之,西安居住区乔木平均碳密度为 2.926 kg/m^2 ,碳密度取值范围介于 $0.198 \sim 13.215 \text{ kg/m}^2$,碳储量取值范围介于 $1.08 \sim 437.25 \text{ t}$ 。

2.3 西安风景区森林植被乔木林碳密度分析

基于外业GPS测量样点经纬度坐标及各风景区样地的森林植被碳密度,应用地理信息系统分析软件 ARCGIS 空间分析、插值分析等功能,以植被碳密度分布的标准差 2.12 作为碳密度分级标准,所绘制的西安风景区森林植被碳密度空间分布图,如图2所示。

由图2可知,西安风景区森林植被乔木层碳密度等级位于 $0 \sim 2.12$ 的占0.02%,碳密度等级位

类活动是影响森林植被碳密度空间分布的一个重要驱动因素,同时,植物的丰富度、均匀度及多样性水平是森林植被碳储量的一个驱动因子,且西安森林植被乔木林碳储量与树木的胸径 D 、树高 H 近乎成正比,可见西安森林植被碳密度与林龄密切相关。

(3)西安风景区绿地乔木植物多样性水平最高,综合指数 D 为 6.19,远远高于其它类型绿地,城市公园景观是高度人工化景观,这说明人对绿地的科学有效管理是影响城市生物多样性的的重要因素。

保护和改善生态环境是西北地区社会经济可持续发展的前提,城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分,具有重要的生态服务功能,是衡量城市文明程度和可持续发展的重要标志^[20]。城市迅速扩张及土地利用格局的演变对城市植物的生存环境条件具有深刻的影响,进一步影响着城市植物的分布格局、种类组成及其多样性水平^[21]。城镇用地的空间拓展将日益成为现在及未来几十年中国土地利用变化的主要特征^[22]。城市公园绿地维持较高水平的生物多样性,具有降低犯罪率的作用,同时可以减小由城市环境所导致的心理压力、弥补城市化带来的生物多样性流失^[23]。

研究发现,西安森林植被碳储量与碳密度相对较低,这是因为西安森林植被中中幼林所占比重比较大,未来西安森林植被具有巨大的固碳潜力。森林植被碳储量是计量森林生态效益的基础,是衡量生态建设的关键指标。西安森林植被的结构质量水平有待进一步提高,同时要加强城市物种多样性保护,从而更好地发挥森林城市的生态服务功能。

参考文献 References

- [1] ADAMS J M, PIOVESAN G. Uncertainties in the role of land vegetation in the carbon cycle[J]. *Chemosphere*, 2002, 49: 805-819.
- [2] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 2008, 320: 1444-1449.
- [3] BEER C, Reichstein M, Tomelleri E, et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and co-variation with climate[J]. *Science*, 2010, 329: 834-838.
- [4] BOUSQUET P, PEYLIN P, CIAIS P, et al. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980[J]. *Science*, 2000, 290(5495): 1342-1346.
- [5] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精. 小兴安岭 7 种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 140-158.
- [6] HU Haiqing, LUO Bizhen, WEI Shujing. Biomass carbon density and carbon sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(2): 140-158.
- [7] HOUGHTON R A. Above ground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*[J], 2005, 11: 945-958.
- [8] VLOEDBELD M, LEEMANS R. Quantifying feedback processes in the response of the terrestrial carbon cycle to global change: The modeling approach of image-2[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1993, 70: 615-628.
- [9] KING A W, EMANUEL W R, WULLSCHLEGER S D, et al. In search of the missing carbon sink: A model of terrestrial biospheric response to land-use change and atmospheric CO₂ [J]. *Tellus*, 1995, 47, 501-519.
- [10] FOLEY J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget[J]. *Tellus*, 1995, 47: 310-319.
- [11] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2007, 37(6): 804-812.
- [12] FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PU Shilong, et al. Estimation of carbon sequestration in terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000[J]. *Science China (series D)*, 2007, 37(6): 804-812.
- [13] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-16.
- [14] WANG Xiaoke, FENG Zongwei, OUYANG zhiyun. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 13-16.
- [15] 马琪, 刘康, 张慧. 陕西省森林植被碳储量及其空间分布[J]. *资源科学*, 2012, 34(9): 1781-1789.
- [16] MA Qi, LIU Kang, ZHANG Hui. Carbon storage by forest vegetation and its spatial distribution in Shaanxi [J]. *Resources Science*, 2012, 34(9): 1781-1789.
- [17] 杨玉姣, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配[J]. *生态学报*, 2014, 34(8): 2128-2136.
- [18] YANG Yujiao, CHEN Yunming, CAO Yang. Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in hilly loess plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(8): 2128-2136.
- [19] 潘帅, 于澎涛, 王彦辉, 等. 六盘山森林植被碳密度空

- 间分布特征及其成因[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6666-6677.
- PAN Shuai, YU Pengtao, WANG Yanhui, et al. Spatial distribution of carbon density for forest vegetation and the influencing factors in Liupan Mountains of Ningxia, NW China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6666-6677.
- [15] 曹扬, 陈云明, 晋蓓, 等. 陕西省森林植被碳储量、碳密度及其空间分布格局[J]. 干旱区资源与环境, 2014, (9): 69-73.
- CAO Yang, CHEN Yunming, JIN Bei, et al. Carbon storage and density of forest vegetation and its spatial distribution pattern in Shaanxi province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, (9): 69-73.
- [16] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 966-975.
- HUANG Congde, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al. Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing city[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 966-975.
- [17] 沈波, 苗国丽, 江晓东, 等. 宁波城市园林植物多样性调查研究[J]. 福建林业科技, 2011, 38(4): 134-138.
- SHEN bo, MIAO guoli, JIANG Xiaodong, et al. Study on the diversity of city garden plants in Ningbo[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2011, 38(4): 134-138.
- [18] 李玉梅. 南宁市城市园林绿地系统植物多样性的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- LI Yumei. Study on plant diversity of urban green space system in Nanning city[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.
- [19] 贺红早, 黄丽华, 段旭, 等. 贵阳二环林带主要树种生物量研究[J]. 贵州科学, 2007, 25(3): 33-39.
- HE Hongzao, HUANG Lihua, DUAN Xu, et al. Study on biomass of main tree species in the second ring forest zone of Guiyang[J]. *Guizhou Science*, 2007, 25(3): 33-39.
- [20] 李凤霞, 石辉, 冯晓刚, 等. 西安市土地利用格局动态演变及其驱动力研究[J]. 测绘通报, 2015(12): 41-45.
- LI Fengxia, SHI HUI, FENG Xiaogang, et al. Research on the dynamic evolution of land use pattern and its driving force in Xi'an[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(12): 41-45.
- [21] 孟雪松, 欧阳志云, 崔国发, 等. 北京城市生态系统植物种类构成及其分布特征[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2200-2206.
- MENG Xuesong, OUYANG Zhiyun, CUI Guofa et al. Composition of plant species and their distribution patterns in Beijing urban ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2200-2206.
- [22] 谈明洪, 李秀彬, 吕昌河. 20世纪90年代中国大中城市建设用地扩张及其对耕地的占用[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(12): 1157-1165.
- TAN Minghong, LI Xiubin, LÜ Changhe. The expansion of construction land and the occupation of cultivated land in large and medium cities in China in 1990s[J]. *Science China (series D)*, 2004, 34(12): 1157-1165.
- [23] BOLUND P, HUNHAMMAR S. Ecosystem services in urban areas[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29: 293-301.

(编辑 吴海西)