

杭州市绿地生态系统服务功能价值评估及可持续性发展研究

魏云龙, 蔡建国

(浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 构建生态系统服务功能价值指数、经济发展指数及社会效益指数概念, 运用全排列多边形图示指标法对杭州市 2005-2014 年城市绿地生态系统服务功能价值进行评估, 并且计算出生态服务功能可持续性发展综合指数。结果表明: 2005-2014 年间杭州市城市绿地生态系统服务功能总价值由 $1\,440.67 \times 10^6$ 元增加至 $2\,463.22 \times 10^6$ 元; 10 a 间杭州市生态服务功能可持续性发展综合指数分别为 0, 0.008, 0.107, 0.341, 0.105, 0.781, 1.020, 0.834, 0.772, 0.836, 可持续发展能力逐年提升呈波动变化, 大体呈现先增后减趋势; 生态服务功能价值指数(I_{ESE})、经济发展指数(I_{ED})、社会效益指数(I_{SB})之间可以用线性方程 $S=0.912I_{\text{ESE}}-0.742I_{\text{ED}}+0.431I_{\text{SB}}-0.084$ 表征。图 4 表 3 参 28

关键词: 风景园林学; 生态系统服务功能; 价值评估; 可持续性发展; 全排列多边形图示指标法; 城市绿地系统; 杭州市

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2017)04-0695-09

Evaluation and sustainable development on ecological service value for urban green space system in Hangzhou City

WEI Yunlong, CAI Jianguo

(School of Landscape Architecture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Based on the concepts of ecological services value index (I_{ESE}), economic development index (I_{ED}) and social benefit index (I_{SB}), the research used the method of entire-array-polygon diagram index to evaluate the ecological services value of urban green area in Hangzhou between 2005 and 2014 and calculate the comprehensive index of sustainable development of ecological service. The results showed that the total ecological services value of urban green space system in Hangzhou had increased from $1\,440.67 \times 10^6$ RMB in 2005 to $2\,463.22 \times 10^6$ RMB in 2014; the annual comprehensive indexes of sustainable development of ecological service in these ten years were 0, 0.008, 0.107, 0.341, 0.105, 0.781, 1.020, 0.834, 0.772 and 0.836 respectively. The ability of sustainable development had been fluctuating, showing the trend of increasing first and then decreasing. The relationship among ecological services value index (I_{ESE}), economic development index (I_{ED}) and social benefit index (I_{SB}) could be described in linear equation: $S=0.912I_{\text{ESE}}-0.742I_{\text{ED}}+0.431I_{\text{SB}}-0.084$. The assessment of the ecological services value of urban green area and the research on sustainable development in Hangzhou will provide reference for optimizing the pattern of urban green space, and sustainable and coordinated development of ecology and economy. [Ch, 4 fig. 3 tab. 28 ref.]

Key words: landscape architecture; ecosystem services; value assessment; sustainable development; entire-array-polygon diagram index method; urban green space system; Hangzhou

生态环境的急剧退化已经成为影响区域可持续发展的重要因素之一。随着协调、绿色等发展理念的提出, 社会经济与自然生态的和谐稳定发展被越发受到重视。定量评价社会经济与生态之间的协调可持

收稿日期: 2016-08-01; 修回日期: 2016-11-11

作者简介: 魏云龙, 从事园林植物景观规划设计与园林生态研究。E-mail: plandscape@163.com。通信作者: 蔡建国, 副教授, 博士, 从事园林植物景观规划设计、家庭园艺和湿地景观等研究。E-mail: yuanlinzhiwu@163.com

续发展成为当下诸多学者的研究热点之一，其中评价方法主要涉及能值分析、物质流分析、服务流分析、生态补偿及生态足迹等^[1-6]。生态系统服务功能是人类直接或间接地从生态系统中得到的效益，同时也是实现可持续发展的基础^[7-8]，生态系统服务功能与社会经济发展之间有着密切的关系。学者对于生态系统服务功能价值的评估已经取得了大量的研究成果，但由于缺乏统一的评估方法及理论依据，研究结果往往差异性较大^[9-13]。本研究采用的全排列多边形图示指标法可以同时反映单项指标与综合指标的关系，从而减少了因主观判断而产生的随意性^[14-15]。通过研究分析一段时间内生态系统服务价值与社会经济发展之间的关系，可以表征区域内社会经济与生态环境之间的可持续性发展水平。本研究对杭州市 2005–2014 年的城市绿地生态系统服务功能价值进行评估，并且构建生态服务功能价值指数(I_{ESE})、经济发展指数(I_{ED})和社会效益指数(I_{SB})^[16-17]，从而探索研究区域近 10 a 绿地生态系统服务功能与社会经济发展之间的协调关系，为今后城市绿地格局优化及生态系统服务功能的可持续性发展提供参考。

1 研究概况与研究方法

1.1 研究区概况

杭州市位于 29°11′~30°33′N，118°21′~120°30′E，地处东南沿海北部，钱塘江下游，京杭大运河南端，东临杭州湾，西南与衢州市相接，北与湖州市、嘉兴市毗邻，西南与黄山市交界，西北与宣城市交接。杭州市总面积为 16 596 km²，下辖 9 区 2 县，代管 2 个县级市，全市 2014 年生产总值为 9 206.16 亿元，森林面积为 10 949 km²，森林覆盖率达 65.14%。杭州地处亚热带季风气候区，四季分明，雨水充沛，环境优美，景色怡人，自古就有“人间天堂”的美誉。本研究区域范围为市区城市绿地，不包含行政区划中的 2 县及 2 个代管县级市，根据 CJJ/T 85–2002《城市绿地分类标准》相关准则，文中城市绿地面积为公园绿地、生产绿地、防护绿地、附属绿地及其他绿地的面积总和。

1.2 绿地生态系统服务功能可持续性发展评估指标体系

充分考虑杭州市生态环境、经济和社会民生等方面的地域性特点，基于科学性、系统性、典型性、导向性和可操作性等原则下，同时借鉴国内外相关研究经验^[16-18]，本研究从环境、经济、社会等 3 个方面出发，选取了绿地生态系统服务功能价值指标、经济发展指标、社会效益指标作为生态系统服务功能可持续性发展研究的评估指标体系(表 1)。整个评估指标体系相对全面的涵盖了可持续性发展的各方面影响因素，创新性的引入社会效益指标，将社会民生等因素纳入评估指标当中，摆脱了以往单一的对生态环境与经济发展之间的可持续性研究，使对可持续性发展的研究更加科学性。

运用绿地生态系统服务功能可持续发展指数的概念来表示其可持续性发展能力的大小，将绿地生态

表 1 生态系统服务功能可持续性发展评估指标体系

Table 1 Evaluation index system for sustainable development of ecosystem service

一级指标	二级指标	计算公式	公式参数释义
生态系统服务 功能价值指标	涵养水源	$U_w = S \times S_0 \times (F_w + K_w) \times (P - E - C)$ (1)	U_w 为涵养水源价值； S 为绿地面积(hm ²)； S_0 为城市绿地面积转换系数； P 为城市年降水量系数； E 为城市绿地蒸散量系数； C 为地表径流量系数； K_w 为水的净化费用，取 2.28 元·m ⁻³ ； F_w 为单位水库库容造价，取 6.11 元·m ⁻³ ；公园绿地 S_0 为 0.87，风景林地 S_0 为 1.00； C 选取常绿阔叶林地表径流系数 2.04%； E 为 48.10% ^[19-22]
	固定土壤	$U_F = C_F \times S \times S_0 \times (X_2 - X_1) / P$ (2)	U_F 为固定土壤价值； C_F 为单位体积土方造价，取 12.60 元·m ⁻³ ； S 、 S_0 见式(1)； X_1 为有绿化土壤侵蚀模数，取常绿阔叶林土壤侵蚀模数 0.50 t·hm ⁻² ·a ⁻¹ ， X_2 为无绿化土壤侵蚀模数；取无绿化土壤侵蚀模数为 31.98 t·hm ⁻² ·a ⁻¹ ； P 为城市绿化土壤容重(t·m ⁻³)， P 取杭州市土壤平均容重 1.13 t·m ⁻³ ^[19-23]
	固碳	$U_C = S \times S_0 \times T_C \times (1.63 \times R_C \times B + F)$ (3)	U_C 为固碳价值； S 、 S_0 见式(1)； T_C 表示碳税率，取 150.00 元·t ⁻¹ ； R_C 为二氧化碳中碳质量分数，取 27.27%； B 为单位面积净生产力，取常绿阔叶林年净生产力 21.84 t·hm ⁻² ·a ⁻¹ ； F 为土壤年固碳量，取 5.73 t·hm ⁻² ^[19-22,24]

表 1（续）
Table 1 Continued

一级指标	二级指标	计算公式	公式参数释义
	释氧	$U_0=1.19\times S\times S_0\times C_0\times B$	U_0 为城市绿地释氧价值； S 、 S_0 见式(1)； C_0 表示工业制氧价格，取 1 000.00 元·t ⁻¹ ； B 为单位面积净生产力，取常绿阔叶林年净生产力 21.84 t·hm ⁻² ·a ⁻¹ [19-22]
	净化空气	$U_A=S\times S_0\times (Q_S\times F_S+Q_F\times F_F+Q_N\times F_N)$	U_A 为城市绿地净化空气总价值； S 、 S_0 见式(1)； Q_S 为城市绿地单位面积年吸收二氧化硫量，取 88.65 kg·hm ⁻² ； F_S 为治理二氧化硫费用，取 1.20 元·kg ⁻¹ ； Q_F 为城市绿地单位面积年吸收氟化物量，取 4.65 kg·hm ⁻² ； F_F 为治理氟化物费用，取 0.69 元·kg ⁻¹ ； Q_N 为城市绿地单位面积年吸收氮氧化物量，取 6.00 kg·hm ⁻² ； F_N 为治理氮氧化物费用，取 0.63 元·kg ⁻¹ [19-22,25-26]
	滞尘	$U_D=S\times S_0\times Q_D\times F_D$	U_D 为城市绿地滞尘价值； S 、 S_0 见式(1)； Q_D 为城市绿地单位面积积年滞尘量，取常绿阔叶树滞尘量为 10.11 t·hm ⁻² ； F_D 为治理尘土费用，取 0.15 元·kg ⁻¹ [19-22,26]
	减少噪声	$U_N=S\times S_0\times K_N/40$	U_N 为城市绿地减少噪声价值； S 、 S_0 见式(1)； K_N 绿地面积折算成隔音墙千米数的价值， K_N 取 400 000.00 元·km ⁻¹ [19-22,25]
	降低温度	$U_T=0.278\times 10^{-6}\times S\times S_0\times Q_T\times F_T\times D_T$	U_T 为城市绿地降低噪声价值； S 、 S_0 见式(1)； Q_T 为城市绿地夏季每天蒸腾吸收的热量，取 4.59×10 ⁸ J·hm ⁻² ·d ⁻¹ ； D_T 为夏季降温天数，取 60 d； F_T 为城市电价，取 0.56 元·(kW·h) ⁻¹ [19-22,25]
	保护物种多样性	$U_{sl}=S\times S_0\times Q_{sl}$	U_{sl} 为城市绿地保护物种多样性价值； S 、 S_0 见式(1)； Q_{sl} 为单位面积城市绿地每年物种损失的机会成本，取 30 000.00 元·hm ⁻² ·a ⁻¹ [19-22]
经济发展指标	国内生产总值 (GDP)		
	人均 GDP		
	第三产业比例		
	经济发展总体水平	$\delta=\sqrt{R_1\times R_2}$	R_1 为人均 GDP 指数， R_2 为 GDP 密度指数；人均 GDP 指数为某一区域人均 GDP 与全国人均 GDP 之比，GDP 密度指数为某一区域 GDP 密度与全国 GDP 密度之比[27]
社会效益指标	恩格尔系数		
	居民消费价格指数 (CPI)		
	生产者价格指数 (PPI)		
	城市化水平		用全市城镇人口数量占全市总人口数量的比值来表示[27]

系统服务功能价值指标、经济发展指标、社会效益指标作为可持续性发展分指数，通过计算可以得出杭州市近 10 a 来绿地生态系统服务功能可持续发展的综合指标，从而评估其绿地生态系统服务功能的可

持续性发展水平与潜力。

1.3 全排列多边形图示指标法的运用

本研究采用全排列多边形图示指标法对城市绿地生态系统服务功能可持续发展进行综合评价。该方法可同时反映单项指标与综合指标,既有直观图形又有数值解释,只要确定有关的最大值、最小值、临界值,不需要考虑专家主观确定的权重系数大小。其基本原理:设共有 n 个指标(标准化后的值),以城市绿地生态系统服务功能可持续发展分指数及综合指数指标的最大极值作为半径构建一个中心的正 n 边形,各个指标相连接形成一个不规则中心 n 边形。对第 i 个指标进行计算时采用如下标准化函数:

$$S_i = (U_i - L_i)(X_i - T_i) / [(U_i + L_i - 2T_i)X_i + (U_i + L_i)T_i - 2U_iL_i] \quad (11)$$

式(11)中: S_i 为第 i 个指标标准化后指数, X_i 为该指标实际数值, U_i 为该指标最大数值, L_i 为该指标最小数值, T_i 为该指标平均值。全排列多边形综合指数计算公式为:

$$S_c = \sum_{i \neq j}^{ij} (S_i + 1)(S_j + 1) / [2n(n-1)] \quad (12)$$

式(12)中: S_c 为综合指标值, S_i 和 S_j 分别为第 i 个和第 j 个分指标值^[14]。

运用全排列多边形图示指标法,按照各评价指标所对应的具体分指标数目,分别构建相应数量的正多边形,从而得出城市绿地生态系统服务功能可持续发展的 3 个分指数即:生态服务功能价值综合指数(I_{ESE}),经济发展综合指数(I_{ED})和社会效益综合指数(I_{SB})。根据所得 3 个分指数数值,再次运用多边形综合指标法计算出城市绿地生态系统服务功能可持续发展综合指数(S_c),用来评估城市绿地生态服务功能可持续发展综合能力的水平大小。

2 结果与分析

2.1 杭州市绿地生态系统生态服务功能实际价值

根据杭州市 2005–2014 年城市绿地面积(表 2)及生态服务功能实际价值计算公式,计算出 2005–2014 年杭州绿地生态系统服务功能实际价值 X_i (表 3)。近 10 a 间杭州市城市绿地建设不断完善加强,绿地系统生态服务功能总价值增加了 10.22 亿元,年增长率为 6.14%,在 2014 年生态服务功能价值达到 10 a 中最高值,为 24.63 亿元;近 10 a 来生态服务功能总价值占当年国内生产总值(GDP)的比重基本呈现下降态势,2005 年生态服务功能价值占当年 GDP 比值的 0.49%,2014 年生态服务功能价值占当年 GDP 比值下降到 0.27%,生态服务功能价值增长率明显小于 GDP 增长率 13.50%;在生态系统服务功能价值构成中,9 个指标的历年平均价值大小排序为:涵养水源、保护物种多样性、释氧、固碳、减少噪声、降低温度、滞尘、固定土壤、净化空气。

2.2 杭州市绿地生态系统服务功能价值分指数及生态服务功能价值综合指数

对 2005–2014 年绿地生态系统服务价值实际价值 X_i 进行标准化处理,得到生态服务功能价值的各项分指数 S_i ,结果见图 1。分指数数值越高,表示该单项价值在当年的生态服务功能中贡献越大,分指数绝对值越大,表示该单项价值与平均值相差越大。利用全排列多边形综合指数公式分别计算出 2005–

表 2 2005–2014 年杭州市城市绿地指标动态变化

Table 2 Dynamic change of urban green space index in Hangzhou from 2005–2014

年份	园林绿地总面积/hm ²	公园绿地面积/hm ²	公园数量	公园面积/hm ²	建成区绿化覆盖面积/hm ²	建成区绿化覆盖率/%
2005	10 774	2 564	184	997	11 734	37.31
2006	11 309	2 926	106	852	12 490	38.14
2007	12 141	3 486	138	1 412	13 284	38.55
2008	12 971	4 078	150	1 430	14 177	38.60
2009	14 366	4 676	165	1 688	15 686	39.94
2010	15 118	5 017	176	1 906	16 483	39.95
2011	15 898	5 287	181	2 047	17 336	40.00
2012	16 647	5 635	185	2 065	18 135	40.07
2013	17 071	5 820	190	2 094	18 606	40.23
2014	18 386	6 304	207	2 298	20 031	40.57

表 3 2005–2014 年杭州市绿地生态系统服务功能价值

Table 3 Ecological service value of urban green space system in Hangzhou from 2005–2014

年份	生态系统服务功能价值/(×10 ⁶ 元)									总价值	GDP	总价值占 GDP 比例
	涵养水源	固定土壤	固碳	释氧	净化空气	滞尘	减少噪声	降低温度	保护物种多样性			
2005	497.34	3.66	193.84	266.88	1.18	15.83	104.41	44.31	313.22	1 440.67	294 384.00	0.49
2006	529.14	3.84	195.57	279.35	1.24	16.57	109.29	46.31	327.86	1 509.15	344 349.00	0.44
2007	642.17	4.10	197.86	298.75	1.33	17.72	116.88	49.41	350.63	1 678.87	410 401.00	0.41
2008	693.27	4.37	195.30	318.00	1.41	18.87	124.41	52.49	373.23	1 781.33	478 897.00	0.37
2009	855.44	4.83	214.71	351.67	1.56	20.86	137.58	57.99	412.74	2 057.40	511 140.00	0.40
2010	948.89	5.08	219.53	369.76	1.64	21.94	144.66	60.95	433.97	2 206.41	596 571.00	0.37
2011	827.11	5.34	230.41	388.80	1.72	23.07	152.11	64.08	456.32	2 148.97	703 727.00	0.31
2012	1044.25	5.59	227.94	406.79	1.80	24.13	159.14	67.02	477.43	2 414.11	783 361.00	0.31
2013	967.16	5.73	231.43	417.02	1.85	24.74	163.14	68.69	489.43	2 369.18	839 857.00	0.28
2014	955.21	6.17	247.58	449.02	1.99	26.64	175.66	73.95	526.99	2 463.22	920 616.00	0.27

2014 年生态服务功能价值综合指数(I_{ESE}), 结果见图 2。2005 年除了涵养水源分指数之外, 其余分指数最低值均为-1.000, 表明 2005 年的生态服务功能在近 10 a 中效果最差, 但涵养水源功能对本年度的生态服务功能价值贡献最大; 从 2006 年开始, 各项分指数均呈现上升态势, 且涵养水源分指数值均为最高; 2011 年涵养水源分指数出现较大降幅, 为当年各项分指数中最低, 固碳分指数上升明显, 为当年所有分指数中最高, 固碳功能所提供的生态服务功能价值贡献值最大; 2013 年固定土壤、释氧、净化空气、滞尘、减少噪声、保护物种多样性这 6 个分指数数值相同, 均为当年最大分指数; 2014 年中涵养水源分指数最小, 其他分指数均达到最大值 1.000, 表明该年涵养水源贡献力最微弱, 2014 年的生态服务功能在近 10 a 效果表现最佳。生态服务功能价值的 9 个分指数, 从总体来看均呈现增加趋势, 其中固定土壤、释氧、净化空气、滞尘、减少噪声、保护物种多样性这 6 个分指数每年数值都相同, 生态服务功能价值贡献力一致。

2005–2014 年杭州市绿地生态系统服务功能综合指数(I_{ESE})分别为 0.000, 0.011, 0.069, 0.147, 0.492, 0.721, 0.920, 1.246, 1.352, 1.893。通过这 10 a 来城市绿地系统的不断规划整治, 使得杭州市绿地生态系统服务功能价值综合指数呈现上升趋势, 生态服务功能水平得到提升。

2.3 杭州市经济发展分指数及经济发展综合指数

对杭州市近 10 a 经济发展各项指标实际数值 X_i 进行标准化处理, 得到经济发展各项分指数 S_i 。近 10 a 杭州市经济发展分指数中, GDP, 人均 GDP, 第三产业比例等 3 个分指数逐年上升, 均在 2014 年达到最大值 1.000, 第三产业比重分指数在 2010 年出现下滑波动, 而后在 2011 年重新呈现上升趋势,

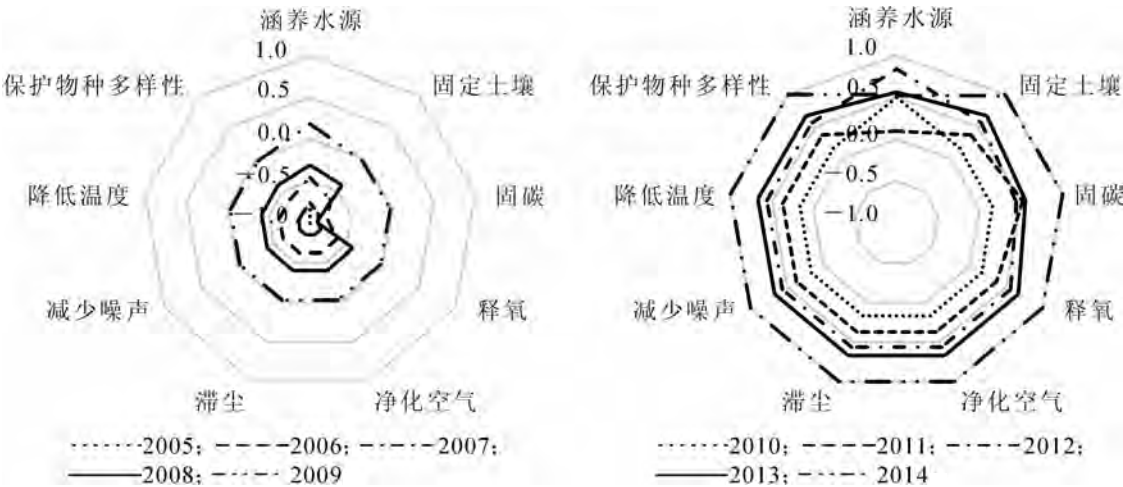


图 1 2005–2014 年绿地生态系统服务功能价值各项分指数

Figure 1 Each individual index of the ecological service value of urban green space system from 2005–2014

经济发展总体水平分指数与其他 3 个分指数表现相反, 总体呈现下降趋势, 并在 2013 年达到最低值-1.000, 主要因为杭州市人均 GDP 增长率低于全国人均 GDP 增长率, 导致人均 GDP 指数逐年下降, 所以经济发展总体水平分指数呈现下降趋势。

利用全排列多边形综合指数公式分别计算出 2005–2014 年杭州市经济发展综合指数 I_{ED} , 结果见图 2。由图 2 可知: 2005–2014 年杭州市经济发展综合指数 I_{ED} 总体呈现上升趋势, 由 2005 年的 0.000 上升至 2014 年的最大值 1.111, 其中 2013 年出现波动, 数值下降, 后又在 2014 年重新上升。

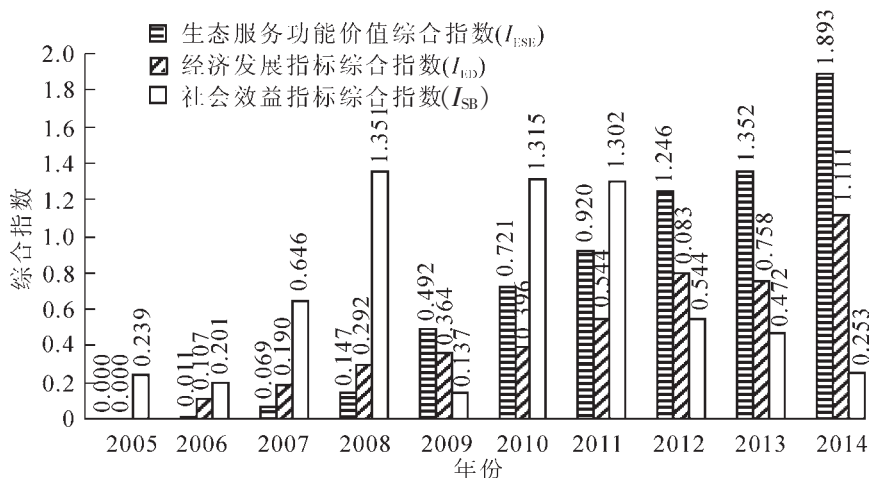


图 2 2005–2014 年生态服务功能价值、经济发展和社会效益综合指数

Figure 2 Ecological services value index of ecological service values, economic development index and social benefit index in 2005–2014

2.4 杭州市社会效益分指数及社会效益综合指数

对杭州市近 10 a 社会效益各项指标实际数值 X_i 进行标准化处理, 得到社会效益各项分指数 S_i 。近 10 a 杭州市社会效益分指数中, 城市化水平分指数变化稳定, 呈现总体上升趋势, 表明近 10 a 杭州市城市化进程处于稳步发展阶段, 恩格尔系数分指数、居民消费价格指数(CPI)分指数、工业品出厂价格指数(PPI)分指数均呈现较大波动, 但三者变化存在相似性, 从 2005 年至 2008 年均表现上升趋势, 在 2009 年均出现最大降幅, 在 2010 年出现回升趋势, 而后至 2014 年总体呈现下降趋势。利用全排列多边形综合指数公式计算得出的 2005–2014 年社会效益综合指数 I_{SB} 结果见图 2。由图 2 可知: I_{SB} 变化起伏较大, 大致 3 个阶段, 从 2005–2008 年呈上升趋势并达到最大值 1.351, 受 CPI 分指数和 PPI 分指数的影响, 在 2009–2010 年出现大幅波动, 数值下降到最低值 0.137, 而后又上升至 1.315, 2011–2014 年呈现总体下降趋势。

2.5 杭州市生态服务功能可持续性发展综合指数

选取生态服务功能价值综合指数 I_{ESV} , 经济发展综合指数 I_{ED} 和社会效益综合指数 I_{SB} 作为生态服务功能可持续性发展综合指数的 3 个分指数, 对数值进行标准化处理, 得到生态服务功能可持续性发展分指数 S_i , 结果见图 3。生态服务功能价值分指数和经济发展分指数总体呈现上升趋势, 均由 2005 年的最小值-1.000 上升在 2014 年的最大值 1.000, 社会效益分指数受 CPI 和 PPI 指数影响, 总体波动较大, 在 2008 年达到最大值 1.000, 在 2009 年下降到最小值-1.000, 最终在 2014 年达到-0.746。

运用全排列多边形综合指标法算出 2005–2014 年生态服务功能可持续性发展综合指数见图 4。参照相关综合指数分级方法研究^[14,27], 将生态服务功能可持续性发展能力分为 4 个等级, 综合指数 ≤ 0.25 为弱可持续性; $0.25 \leq$ 综合指数 ≤ 0.50 为较弱可持续性; $0.50 \leq$ 综合指数 ≤ 0.75 为较强可持续性; 综合指数 ≥ 0.75 为强可持续性。由图 4 可知: 2005–2008 年生态服务功能可持续性发展指数呈现上升趋势, 2009 年出现下降, 2009–2011 年开始回升, 2011–2014 年处于相对平稳状态, 可持续性发展指数受 I_{ESV} , I_{ED} , I_{SB} 三者的共同影响, 虽然 I_{ESV} 和 I_{ED} 指数均在 2014 年达到最高值, 但由于 I_{SB} 指数的波动性影响较大, 在对 3 个分指数进行标准化处理之后, 在 2011 年 3 个分指数之和达到最大值, 所以生态服务功能可持续性发展指数在 2011 年达到最大值 1.020; 从可持续性发展能力来看, 2005–2007 年生态服务功能

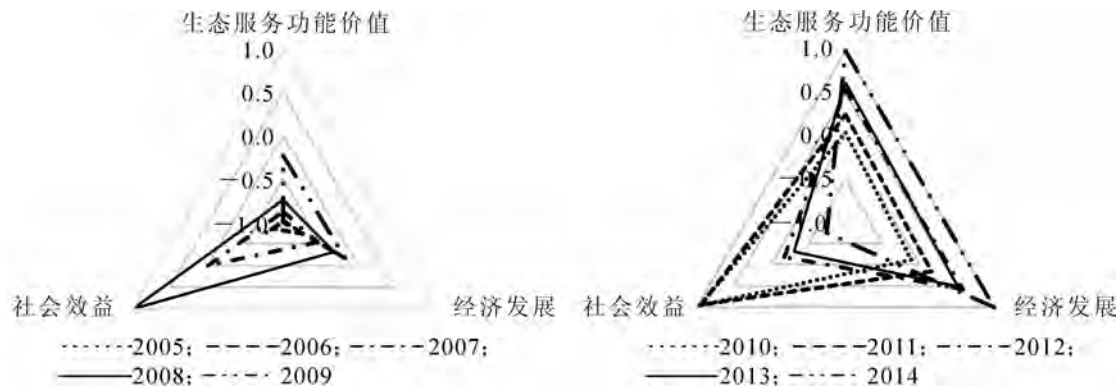


图 3 2005–2014 年生态服务功能可持续性发展各项分指数

Figure 3 Each individual index of the sustainable development of ecological service function in 2005–2014

可持续性发展处于弱可持续性水平，2008 年发展至较弱水平，2009 年重新下降至弱可持续性水平，2010–2014 年发展成强可持续性水平。

运用 SPSS 19.0 对生态服务功能可持续性发展综合指数 S_c 与 3 个分指数进行多元线性回归分析^[28]，发现 S_c 与 I_{ESE} 、 I_{ED} 、 I_{SB} 之间存在可信线性关系。线性方程为 $S_c = 0.912I_{ESE} - 0.742I_{ED} + 0.431I_{SB} - 0.084$ 。方差分析表明： $R^2 = 0.960$ ，通过 F 检验， $P < 0.01$ ，达到极显著水平。从线性方程中可以看出： I_{ESE} 对于生态服务功能可持续性发展综合指数的影响最大，其次是 I_{ED} 和 I_{SB} 的影响相对较小，对于提高生态服务功能可持续性发展水平来说，首先应该关注生态服务功能价值的体现，注重区域内生态服务功能价值的提升，同时要重视经济的循环发展，维持经济与生态之间的和谐稳定，社会效益问题也应该加以权衡。

3 结论与讨论

2005–2014 年间杭州市绿地生态服务功能总价值由 $1\,440.67 \times 10^6$ 元增加至 $2\,463.22 \times 10^6$ 元，增加了 10.22 亿元，年增长率为 6.14%，单位面积绿地生态服务功能价值由 8.68×10^4 元增加至 14.84×10^4 元，但生态服务功能总体价值所占 GDP 比例从 0.49% 下降至 0.27%，这是因为虽然生态服务功能价值量在逐年增加，但相对城市经济总量发展速度而言却在降低。在构成杭州市绿地生态系统服务功能价值的 9 个指标中，历年平均价值大小排序为涵养水源、保护物种多样性、释氧、固碳、减少噪声、降低温度、滞尘、固定土壤、净化空气。2005–2014 年生态服务功能价值综合指数呈现逐年上升趋势，城市绿地生态系统服务功能水平处于积极向上状态。2005–2014 年杭州市生态服务功能可持续发展综合指数呈现波动性变化，10 a 间生态服务功能可持续性能力先增后减，整体趋势表现良好；生态服务功能可持续性发展综合指数与生态服务功能价值综合指数、经济发展综合指数、社会效益综合指数等 3 个分指数之间可以用线性方程 $S = 0.912I_{ESE} - 0.742I_{ED} + 0.431I_{SB} - 0.084$ 较好表征，对于提高生态服务功能可持续性发展水平来说，应该把生态服务功能价值放在首要位置。

生态系统服务功能价值涵盖面广泛，其选择价值和存在价值均有重要研究意义。本研究由于数据获取的限制没有将两者纳入指标体系当中。不同的绿地结构和类型的相互组合对于生态服务功能价值量的影响也会出现差异，不同绿地类型在固碳、涵养水源及固定土壤等方面的参照标准均有变化。本研究由于相关数据获取的难度较高没有对不同类型的绿地分别展开计算。在今后的研究中应该充分全面的考虑生态系统服务功能价值的指标选择，涵盖其多方面功能价值，并且结合地理信息系统(GIS)等影像数字处理技术，分析不同植被类型下的绿地生态服务功

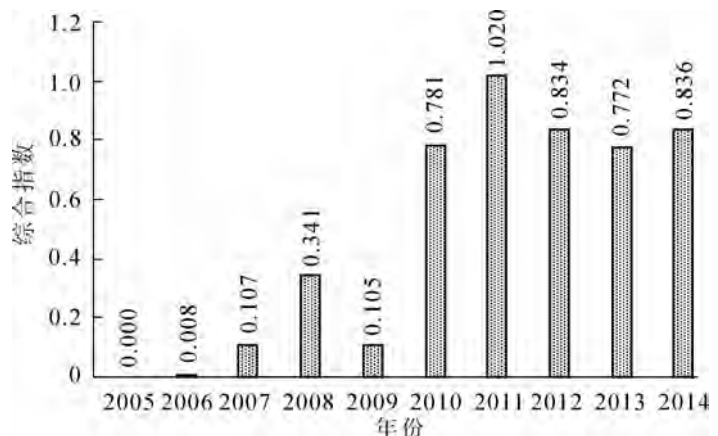


图 4 2005–2014 年生态服务功能可持续性发展综合指数

Figure 4 Comprehensive index of sustainable development of ecological service function in 2005–2014

能,提高研究数据的科学性及精确性。

生态系统服务功能价值的逐年上升并不表示生态环境得到了很好的保护,城市经济的总体发展速率远远高于生态服务功能价值的发展速率,生态服务功能的可持续性发展往往受到经济发展的制约和影响,要极力避免经济发展造成环境破坏之后,盲目单一地进行生态保护,从而提高生态服务功能的暂时性表现。处理好生态环境与经济发展之间的矛盾是促进生态服务功能可持续性发展的关键,从城市角度而言,应该出台完善有效的法律政策来保障城市绿地不被破坏,创建生态效益补偿机制、科学规划城市绿地系统、合理布局、优化结构、加强管理,从而多方面多角度有效地提高城市绿地生态系统服务功能价值,实现生态服务功能的绿色、协调可持续发展。

4 参考文献

- [1] SERNA-CHAVEZ H M, SCHULP C J E, van BODEGOM P M, *et al.* A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services [J]. *Ecol Indic*, 2014, **39**(4): 24 – 33.
- [2] MONONEN L, AUVINEN A P, AHOKUMPU A L, *et al.* National ecosystem service indicators: measures of social-ecological sustainability [J]. *Ecol Indic*, 2016, **61**(1): 27 – 37.
- [3] TURNER W R, BRANDON K, BROOKS T M, *et al.* Global biodiversity conservation and the alleviation of poverty [J]. *BioScience*, 2012, **62**(1): 85 – 92.
- [4] 黄和平, 毕军, 张炳, 等. 物质流分析研究述评[J]. 生态学报, 2007, **27**(1): 368 – 379.
HUANG Heping, BI Jun, ZHANG Bing, *et al.* A critical review of material flow analysis (MFA) [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(1): 368 – 379.
- [5] 党小虎, 刘国彬, 赵晓光. 黄土丘陵区县南沟流域生态恢复的生态经济耦合过程及可持续性分析[J]. 生态学报, 2008, **28**(12): 6321 – 6333.
DANG Xiaohu, LIU Guobin, ZHAO Xiaoguang. Ecological-economic coupling process and sustainability for ecological rehabilitation of Xiannangou Catchment in the Loess Hilly Region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(12): 6321 – 6333.
- [6] 安宝晟, 程国栋. 西藏生态足迹与承载力动态分析[J]. 生态学报, 2014, **34**(4): 1002 – 1009.
AN Bosheng, CHENG Guodong. Dynamic analysis of the ecological footprint and carrying capacity of Tibet [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(4): 1002 – 1009.
- [7] COSTANZA R, d'ARCE R, de GROOT R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, **387**: 253 – 260.
- [8] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 中国森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2005, **25**(8): 2096 – 2102.
YU Xinxiao, LU Shaowei, JIN Fang, *et al.* The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25**(8): 2096 – 2102.
- [9] 李锋, 王如松. 城市绿色空间生态服务功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(3): 527 – 531.
LI Feng, WANG Rusong. Research advance in ecosystem service of urban green space [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15**(3): 527 – 531.
- [10] 王凤珍, 周志翔, 郑忠明. 城郊过渡带湖泊湿地生态服务功能价值评估: 以武汉市严东湖为例[J]. 生态学报, 2011, **31**(7): 1946 – 1954.
WANG Fengzhen, ZHOU Zhixiang, ZHENG Zhongming. Evaluation on service value of ecosystem of Peri-urban transition zone lake: a case study of Yandong Lake in Wuhan City [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(7): 1946 – 1954.
- [11] 彭立华, 陈爽, 刘云霞, 等. Citygreen 模型在南京城市绿地固碳与削减径流效益评估中的应用[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(6): 1293 – 1298.
PENG Lihua, CHEN Shuang, LIU Yunxia, *et al.* Application of Citygreen model in benefit assessment of Nanjing urban greenbelt in carbon fixation and run off reduction [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18**(6): 1293 – 1298.
- [12] 凌焕然, 王伟, 樊正球, 等. 近 20 年来上海不同城市空间尺度绿地的生态效益[J]. 生态学报, 2011, **31**(19): 5607 – 5615.
LING Huanran, WANG Wei, FAN Zhengqiu, *et al.* Ecological effect of green space of Shanghai in different spatial scales in past 20 years [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(19): 5607 – 5615.
- [13] 陈莉, 李佩武, 李贵才, 等. 应用 CITYgreen 模型评估深圳市绿地净化空气与固碳释氧效益[J]. 生态学报,

- 2009, **29**(1): 272 – 282.
- CHEN Li, LI Peiwu, LI Guicai, *et al.* Application of CITYGREEN model in air purification carbon fixation and oxygen release by greenbelt system of Shenzhen City [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(1): 272 – 282.
- [14] 吴琼, 王如松, 李宏卿, 等. 生态城市指标体系与评价方法[J]. 生态学报, 2005, **25**(8): 2090 – 2095.
- WU Qiong, WANG Rusong, LI Hongqing, *et al.* The indices and the evaluation method of eco-city [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25**(8): 2090 – 2095.
- [15] 万年峰, 蒋杰贤, 季香云. 多边形综合指标法在上海市设施菜田农药减量技术评估中的应用[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(3): 582 – 588.
- WANG Nianfeng, JIANG Jiexian, JI Xiangyun. Application of polygon synthesis for pesticide reduction evaluation in protected horticultural vegetable fields in Shanghai [J]. *Acta Sci Circumst*, 2008, **28**(3): 582 – 588.
- [16] 许学强, 张俊军. 广州城市可持续性发展的综合评价[J]. 地理学报, 2001, **56**(1): 54 – 62.
- XU Xueqiang, ZHANG Junjun. Comprehensive evaluation of Guangzhou urban sustainable development [J]. *Acta Geogr Sin*, 2001, **56**(1): 54 – 62.
- [17] 徐福留, 赵珊珊, 张颖, 等. 经济发展可持续性状态与趋势定量评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(6): 711 – 720.
- XU Fuli, ZHAO Shanshan, ZHANG Ying, *et al.* A methodology for evaluating quantitatively the sustainability status and trends of economic development [J]. *Acta Sci Circumst*, 2005, **25**(6): 711 – 720.
- [18] 郭存芝, 彭泽怡, 丁继强. 可持续发展综合评价的 DEA 指标构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, **26**(3): 9 – 17.
- GUO Cunzhi, PENG Zeyi, DING Jiqiang. Construction of the indexes of DEA used in comprehensive evaluation of sustainable development [J]. *China Popul Resour Environ*, 2016, **26**(3): 9 – 17.
- [19] 中共杭州市委, 杭州市人民政府. 杭州统计[EB/OL].[2016-07-20]. <http://www.hangzhou.gov.cn/col/col805741/index.html>.
- [20] 中共浙江省委, 浙江省人民政府. 浙江统计[EB/OL].[2016-07-20]. <http://www.zj.stats.gov.cn/tjsj/tjnj/>.
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[DB/OL].[2016-07-20]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>.
- [22] 武文婷. 杭州市城市绿地生态服务功能价值评估研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- WU Wenting. *Study on the Value Assessment Of Urban Green Space Ecosystem Services in Hangzhou* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [23] 姚鸿文, 陶吉兴, 杜群, 等. 浙江省森林生态服务功能评估与分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, **36**(4): 13 – 17.
- YAO Hongwen, TAO Jixing, DU Qun, *et al.* Evaluation and analysis of forest ecosystem services in Zhejiang Province [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2012, **36**(4): 13 – 17.
- [24] 莫蕙榕. 株洲云龙示范区绿地生态服务功能评估及优化[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- MO Huirong. *The Evaluation and Optimization of Ecological Service Function-Take Zhuzhou Yunlong Demonstration Zone as Example* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [25] 段彦博, 雷雅凯, 马格, 等. 郑州市生态系统服务价值时空变化特征[J]. 浙江农林大学学报, 2017, **34**(2): 511 – 519.
- DUAN Yanbo, LEI Yakai, MA Ge, *et al.* Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Zhengzhou [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2017, **34**(2): 511 – 519.
- [26] 中华人民共和国国家林业局. LY/T1271-2008 森林生态系统服务功能评估规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [27] 蔡邦成, 陆根法, 韩尚富, 等. 江苏省经济的可持续发展评价[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(4): 496 – 499.
- CAI Bangcheng, LU Genfa, HAN Shangfu, *et al.* Evaluation studies on the economic sustainable development of Jiangsu Province [J]. *China Environ Sci*, 2006, **26**(4): 496 – 499.
- [28] 包凤达, 翁心真. 多元回归分析的软件求解和案例解读[J]. 数理统计与管理, 2000, **20**(5): 56 – 61.
- BAO Fengda, WENG Xinzhen. The software solving of multiple regression and correlation analysis and case explanation [J]. *Appl Stat Manage*, 2000, **20**(5): 56 – 61.