
基于相关性和关联耦合分析的 上海市生态环境优化思考

【摘要】：城市生态环境是人类繁衍生息的重要基础，对其在时间和空间层面的演进趋势和规律的认识，有助于优化和提升其质量。在提出利用相关分析、关联耦合分析两种方法对上海市生态环境进行时空演化特征和优化途径研究的思路/技术路线的基础上，采用相关性分析方法，计算获得了上海市 2000—2011 年的大气环境、水环境、废弃物处理、绿化水平若干要素之间及要素群内部的皮尔逊相关系数；计算获得了上海市 2012 年各区县的若干生态环境要素与城市空间发展强度、综合生态安全水平、工业综合能耗等指标的皮尔逊相关系数数据。采用关联耦合分析方法，在时间角度，将上海市的生态环境要素分为质量表征指标和对生态环境质量产生直接或间接影响的指标两类，计算获得了上海市 2000—2011 年间两类指标的关联系数、关联度、耦合度和协调度；在空间角度，计算获得了上海市 17 个区县的人口经济要素群与生态环境要素群的关联度、耦合度和协调度。基于时间和空间角度的相关性和关联耦合分析方法获得的各类结论，兼顾考虑上海生态环境要素群指标对上海人均期望寿命的影响和作用，从削减(降低)不利因素，提高(增加)有利因素等角度，提出了优化上海生态环境的若干建议。

【关键词】：相关性，关联耦合分析，生态环境优化，上海市

基金项目：同济大学高密度区域智能城镇化协同创新中心，上海同济城市规划设计研究院科研项目“上海市生态环境建设发展评估研究”(KY-2013-C02)部分成果

城市生态环境是人类繁衍生息的重要基础，从要素与关系的角度，“城市生态环境”可界定为：包括城市人类在内的各种城市生物生存、发展、繁衍、进化的生态要素(因子)和生态关系的总和(沈清基，2011)。相关性分析是指对两个或两个以上具备相关性的变量元素进行计量上的分析，从而衡量两个变量元素的相关及密切程度；相关性表达了组成系统的要素之间的相互联系和相互作用所形成的某种特定关系，反映了偶然现象的规律性(赵世明，等，2008)。关联耦合分析是对两个或两个以上系统的关联程度进行计量上的分析，用来衡量两系统之间的关系密切程度；关联耦合分析可对一个事物(系统)的发展变化引起另一事物(系统)的发展变化的过程及程度进行反映(宋代军，杨贵庆，2007)。

生态环境的相关性和关联耦合分析是指在不同维度上(时间、空间)对生态环境要素之间及生态环境与社会经济要素群之间的关系分析。其基本目的是：通过对城市生态环境的演化进行较为深入的探析，为对城市生态环境进行有目的、有方向的针对性优化提供支撑。

当前，国内对生态环境的相关性研究，主要方向为：旅游、城市化、房地产、地质、金融等方面，与城市人居环境相关的研究包括：城市化与生态环境质量(孜比布拉·司马义，等，2011)、土地利用变化与生态环境(陈志，等，2009；谭许伟，等，2010)、生态环境与经济发展(李义，等，2002)、生态环境与人群健康(李彬，等，2012)；在生态环境的关联耦合分析方面，相关研究较少^①，与城市人居环境相关的研究包括：城市化与生态环境质量(刘耀彬，等，2005；赵宏林，等，2008)、经济与生态环境(李磊，等，2012)。

国外关于生态环境的相关性研究的主要方向包括：环境科学(Mallik, et al., 2015)、气象与大气科学(Duarte, et al., 2015)、公众环境与职业健康(Ciarrocca, et al., 2015)、地质科学(YU, et al., 2015)等，其中，Williams 等(2004)和 Ye 等(2007)对城市生态环境方面的相关性进行了研究；此外，以城市为对象进行关联耦合分析的研究已有一定数量^②，这些研究的主

要方向包括：环境科学(Vaz, et al., 2015)、气象与大气科学(Hellsten, et al., 2015)、水资源(Timbadiya, et al., 2015)等，其中，对城市生态环境方面关联耦合的分析有 Pagliosa 等(2006)、Rienow 等(2014)的研究。

从国内外文献的研究成果来看，尚未见明确提出对城市生态环境进行相关性和关联耦合复合分析的文献^③。这在一定程度上表明，基于相关性和关联耦合分析对城市生态环境进行复合研究，并在此基础上提出城市生态环境的优化途径具有一定的可能性和必要性。

1 城市生态环境相关性-关联耦合复合分析的技术路线

联系是指事物之间以及事物内部各要素之间的相互影响、相互制约的关系。联系具有普遍性、客观性和多样性(孙正聿, 等, 2011)，对“联系”的深入认识有必要借助有效的方法。对于城市生态环境而言，城市生态环境要素之间，城市生态环境要素与社会经济等要素之间存在着普遍的联系，这些普遍联系是否具有关系以及具有哪类关系，关系及关联的方向、强度及协调性等均需要予以明确的表征。

从物质结构的角度来看，随着科学家能够对单粒子和量子态进行调控，对量子世界的探索已从“观测时代”走向“调控时代”(白春礼, 2013)。这在某种程度上说明，人类解释世界的根本目的是调控及优化世界。与此类似，随着人类对城市的深入了解和科学技术手段的进步，人们已经开始致力于将研究目标锁定在了解和掌握城市演进规律，并据此对城市进行优化调控。在城市生态环境研究领域，不仅需要对各种生态环境现象进行观察和解释，更需要对生态环境演化的趋势做出预判和调控；不仅需要城市生态环境进行解构分析，更需要通过解构分析指导城市生态环境的重构方向和优化内容。通过对城市生态环境要素的相关性和关联耦合的复合分析，可以解构城市生态环境要素群内和群间的相关性和关联耦合关系，应用相关性和关联耦合分析结果建构城市生态环境优化的内容，对城市生态环境的研究具有重要的价值。基于对城市生态环境组成要素的相关性和关联耦合复合分析的思考，从时间角度、空间角度对城市生态环境要素群的相关性和关联耦合关系进行分析，一方面有助于对城市生态环境要素的时空变化和相互作用予以多类型、多侧面的表征，并据此总结提炼某些规律性的结论；另一方面也可根据研究显示的结果对城市生态环境进行针对性的优化(图 1)。

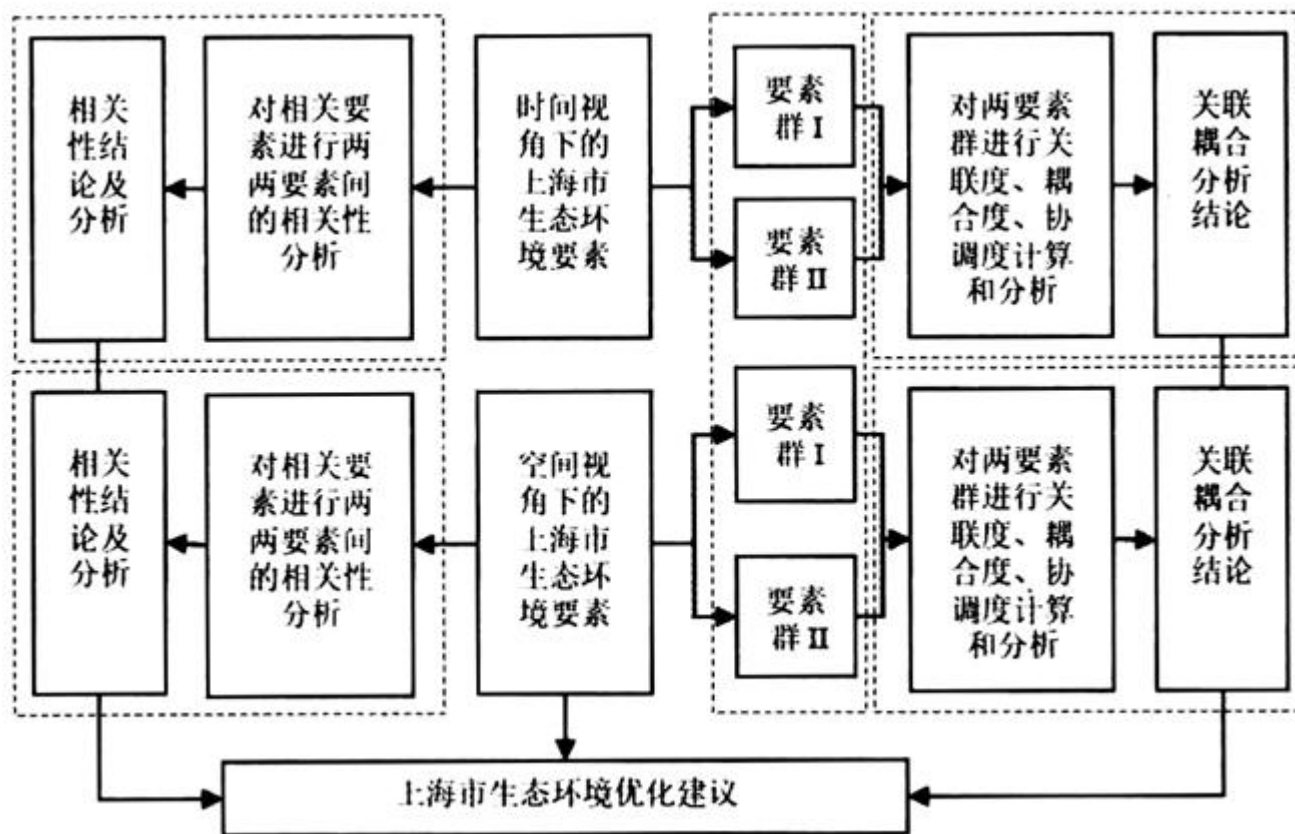


图1 基于相关性-关联耦合复合分析的城市生态环境优化技术路线

Fig. 1 Optimization model of urban ecological environment based on correlation and coupling analysis

资料来源：笔者自绘。

2 研究数据、来源及方法

2.1 研究数据

本研究从时间和空间两个视角对上海市生态环境要素进行分析。时间角度的数据选择 2000—2011 年共 12 年的相关要素数据 (表 1)；空间角度数据选择上海市 17 个县 (区) 的相关要素数据 (表 2)。

表1 历年上海市生态环境若干要素数据表

Tab. 1 Historical data of Shanghai's ecological environment

目标层	指标层			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	名称	代码	单位	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年

大气环境水平	空气环境质量优良率	A ₁	%	80.80	84.70	77.00	89.00	85.20	88.20	88.80	89.90	89.60	91.50	92.10	92.30
	万元国内生产总值SO ₂ 排放强度	A ₂	吨/万元	0.0097	0.0091	0.0078	0.0065	0.0059	0.0055	0.0048	0.004	0.0032	0.0025	0.0021	0.0013
水生态水平	城市水功能区水质达标率	W ₁	%	80.50	80.90	81.20	81.70	81.90	81.60	82.20	81.90	82.50	82.80	83.20	83.50
	万元国内生产总值COD排放强度	W ₂	吨/万元	0.0067	0.0059	0.0057	0.0042	0.0036	0.0033	0.0029	0.0024	0.0019	0.0016	0.0013	0.0013
	城镇污水集中处理率	W ₃	%	61.30	62.90	64.70	66.30	68.20	70.20	71.00	73.00	75.50	78.90	80.50	82.70
	人均水资源拥有量	W ₄	立方米/人	96.7	95.2	92.3	90.6	143.4	138.0	153.9	187.9	197.5	218.3	163.1	89.1
	工业用水重复利用率	W ₅	%	46.50	50.40	47.90	49.30	56.40	58.10	62.30	68.40	72.50	79.60	84.30	89.70
	酸雨频率	W ₆	%	26.00	25.20	10.90	16.70	32.70	40.00	56.40	75.60	79.20	74.90	73.90	67.80
废弃物处理	生活垃圾无害化处理率	S ₁	%	65.20	66.50	68.70	70.60	71.90	74.10	75.40	77.80	80.50	82.30	84.90	87.60
	工业固体废弃物综合利用率	S ₂	%	91.92	96.50	97.78	97.20	94.28	96.31	94.66	94.21	95.53	95.67	96.70	96.50
绿化水平	人均公共绿地面积	G ₁	m ² /人	7.83	8.858	10.95	13.83	14.54	15.27	15.58	15.41	16.00	52.90	52.18	52.10
	森林覆盖率	G ₂	%	13.90	14.40	15.10	16.50	17.10	11.60	11.60	11.60	11.60	11.60	12.58	12.58
	城市绿化覆盖率	G ₃	%	22.20	23.80	30.00	35.20	36.00	37.00	37.30	37.60	38.00	38.10	38.20	38.20
	自然保护区覆盖率	G ₄	%	11.76	11.76	11.76	16.11	16.11	16.11	16.11	16.11	16.11	16.11	16.11	16.11

资料来源：根据《上海统计年鉴》等相关资料数据，笔者自制。

表2 上海市各区县相关要素表

Tab. 2 Relevant variables for districts (county) of Shanghai

	常住人口 (万人)	GDP(亿元)	人口密度 (人/km ²)	空气质量指 数 ^①	城市绿地面 积(km ²)	空间发展强 度指数 ^②	综合生态安 全指数 ^③	生态用地比 例(%) ^④	工业综合能源消费 量(万 t 标准煤)
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
浦东新区	526.39	5929.91	4349	180	265.19	5.24	1.9	17.84	1148.68
黄浦区	70.48	1368.42	34448	155	2.66	76.69	3.6	0.07	193.12
徐汇区	111.12	1006.59	20292	200	12.71	33.32	0.90	0.15	24.76
长宁区	69.73	752.73	18206	190	10.55	33.96	0.98	0.06	3.15
静安区	25.58	617.46	33570	160	1.08	100	2.12	0.01	1.49
普陀区	129.2	657.58	23564	170	12.04	30.49	0.77	0.12	14.54
闸北区	84.61	505.53	28917	175	6.27	35.97	1.49	0.03	4.95
虹口区	84.56	659.22	36014	170	4.05	48.05	2.31	0.03	4.66
杨浦区	132.07	1201.11	21747	170	13.82	27.92	0.15	0.29	33.23
闵行区	250.8	1594.22	6765	115	83.87	8.42	133	2.82	534.85
宝山区	197.19	824.2	7277	130	65.62	6.77	0.59	2.18	1726.04
嘉定区	152.77	969.7	3291	100	76.44	3.59	1.64	5.27	109.19
金山区	76.16	553.5	1300	75	88.10	1.13	2.35	10.16	789.67
松江区	169.84	886.55	2804	80	125.71	2.94	0.80	8.55	89.26
青浦区	116.98	732.31	1746	70	102.06	1.38	2.18	11.26	70.5
奉贤区	112.99	624.6	1644	120	98.17	1.33	1.28	11.96	483.17
崇明县	69.96	236.3	590	50	274.60	0	6.61	29.21	61.43

资料来源：根据《上海统计年鉴》(2013)等相关资料数据，笔者自制

2.2 数据来源

时间角度的数据来源包括：2000-2011 年的《上海统计年鉴》、2000-2011 年的《上海市国民经济和社会发展统计公报》、《上海市环境保护和生态建设“十二五”规划》、上海环境网站^④和上海市人民政府门户网站^⑤。

空间角度的数据来源包括：《上海统计年鉴》(2013)、2013 年的《上海市国民经济和社会发展统计公报》、《上海市环境统计年报》、《上海市环境状况公报》、中央气象台网站^⑥及上海气象台网站^⑦等。

2.3 研究方法

包括相关性分析和关联耦合分析方法。对于前者，本研究采用 SPSS18.0 对数据进行皮尔逊相关性分析 (Pearson correlation)，该方法主要用于两个变量间线性相关程度的度量，使用皮尔逊相关系数 R 值表征结果，R 值越接近 1，相关性越强；越接近 0，相关性越弱。对于后者，本研究采用灰色关联分析法对要素群间的关联度、耦合度和协调度进行计算和分析^⑧。关联度 γ_{ij} 、耦合度 C(t)、协调度 D 的计算公式分别见式 (1) — 式 (3)。关联度表征两个系统之间的关联程度；耦合度表征关联系统间紧密配合与相互影响的程度；协调度度量系统间在发展过程中彼此和谐一致的程度。关联度、耦合度及协调度的表征数值均在 [0, 1] 范围内，不同数值对应了相应的含义 (表 3)。

表 3 关联度、耦合度及协调度评价标准表

Tab. 3 The evaluation criteria of correlation, coupling and coordination degree table

评价标准	关联度含义	耦合度含义	协调度含义
[0, 0.3]	系统之间关联关系较低	系统之间处于低水平耦合状态	系统之间处于低度协调耦合
(0.3, 0.5]	系统之间关联关系中等	系统之间处于中水平耦合状态	系统之间处于中度协调耦合
(0.5, 0.8]	系统之间关联关系较高	系统之间处于较高水平耦合状态	系统之间处于高度协调耦合
(0.8, 1.0]	系统之间关联关系很高	系统之间处于高水平耦合状态	系统之间处于极度协调耦合

资料来源：根据马丽等 (2012) 和李磊等 (2012)，笔者整理

其中，关联度 γ_{ij} 的计算公式为：

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \epsilon_i(j)(t) \quad (1)$$

耦合度 C(t) 的计算公式为：

$$C(t) = \left\{ \frac{U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n}{U_1 + U_2 + \dots + U_n} \right\}^{1/n} \quad (2)$$

协调度 D 的计算公式为:

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

3 上海市生态环境相关性分析

3.1 时间视角下的相关性分析

通过 SPSS18.0 进行皮尔逊相关系数计算(表 4)。从大气环境方面来看,空气环境质量优良率和万元国内生产总值 SO₂ 排放强度在 0.01 的置信水平上具有显著的负向相关关系。

表 4 时间视角下上海市生态环境若干要素皮尔逊相关系数表

Tab. 4 Pearson correlation of Shanghai's ecological and environmental variables based on longitudinal data

	空气 环境 质量 优良 率	万元国 内生产 总值 SO ₂ 排 放强度	城市 水功 能区 水质 达标 率	万元国 内生产 总值 COD 排 放强度	城镇污 水集中 处理率	人均 水资 源拥 有量	工业 用水 重复 利用 率	酸雨 频率	生活 垃圾 无害 化处 理率	工业 固体 废弃 物综 合利 用率	人均 公共 绿地 面积	森林 覆盖 率	城市 绿化 覆盖 率	自然 保护 区覆 盖率	人口期望寿命
空气环境质量优良率	1	-0.84**													0.83**
万元国民生产总值 SO ₂ 排放强度		1													-0.97**
城市水功能区水质达标率			1	-0.95**	0.97**	0.45	0.94**	0.78**							0.97**
万元国民生产总值 COD 排放强度				1	-0.96**	-0.66	-0.91**	-0.88**							-0.95**
城镇污水集中处理率					1	0.53	0.98**	0.86**							0.98**
人均水资源拥有量						1	0.51	0.78**							0.53
工业用水重复利用率							1	0.89**							0.98**

酸雨频率								1								0.87**
生活垃圾无害化处理率									1	0.23	0.86**	-0.59*	0.80**	0.72*		0.98**
工业固体废弃物综合利用率										1	0.27	0.12	0.27	0.08		0.23
人均公共绿地面积											1	-0.38	0.54	0.46		0.84**
森林覆盖率												1	-0.40	-0.33		-0.55
城市绿化覆盖率													1	0.94**		0.79**
自然保护区覆盖率														1		0.71*
人口期望寿命																1
**：0.01 置信水平上显著相关；*：0.05 置信水平上显著相关。																

资料来源：根据分析结果笔者自制；人口期望寿命数据来源于《上海统计年鉴(2013)》的户籍人口期望寿命。

从水生态方面来看，城市水功能区水质达标率与万元国内生产总值 COD 排放强度在 0.01 的置信水平上呈现出显著的负向相关关系，与城镇污水集中处理率、工业用水重复利用率在 0.01 的置信水平上呈现出显著的正向相关关系，即随着 COD 排放强度的降低和城镇污水集中处理率、工业用水重复利用率的提高，城市水功能区水质达标率得到提升(表 4)。

从废弃物处理与绿化水平方面来看，生活垃圾无害化处理率与人均公共绿地面积、城市绿化覆盖率在 0.01 的置信水平上具有显著的正向相关关系，与自然保护区覆盖率在 0.05 的置信水平上具有显著的正向相关关系；城市绿化覆盖率与自然保护区覆盖率在 0.01 的置信水平上具有显著的正向相关关系(表 4)。

3.2 空间视角下的相关性分析

在空间上，首先，根据上海市 17 个区(县)的 2012 年数据应用 ArcGIS10.1 对 17 个区县的相关要素的空间分布进行表达(图 2)；其次，通过 SPSS18.0 计算上海 17 个区(县)的若干生态环境要素皮尔逊相关性(表 5)。

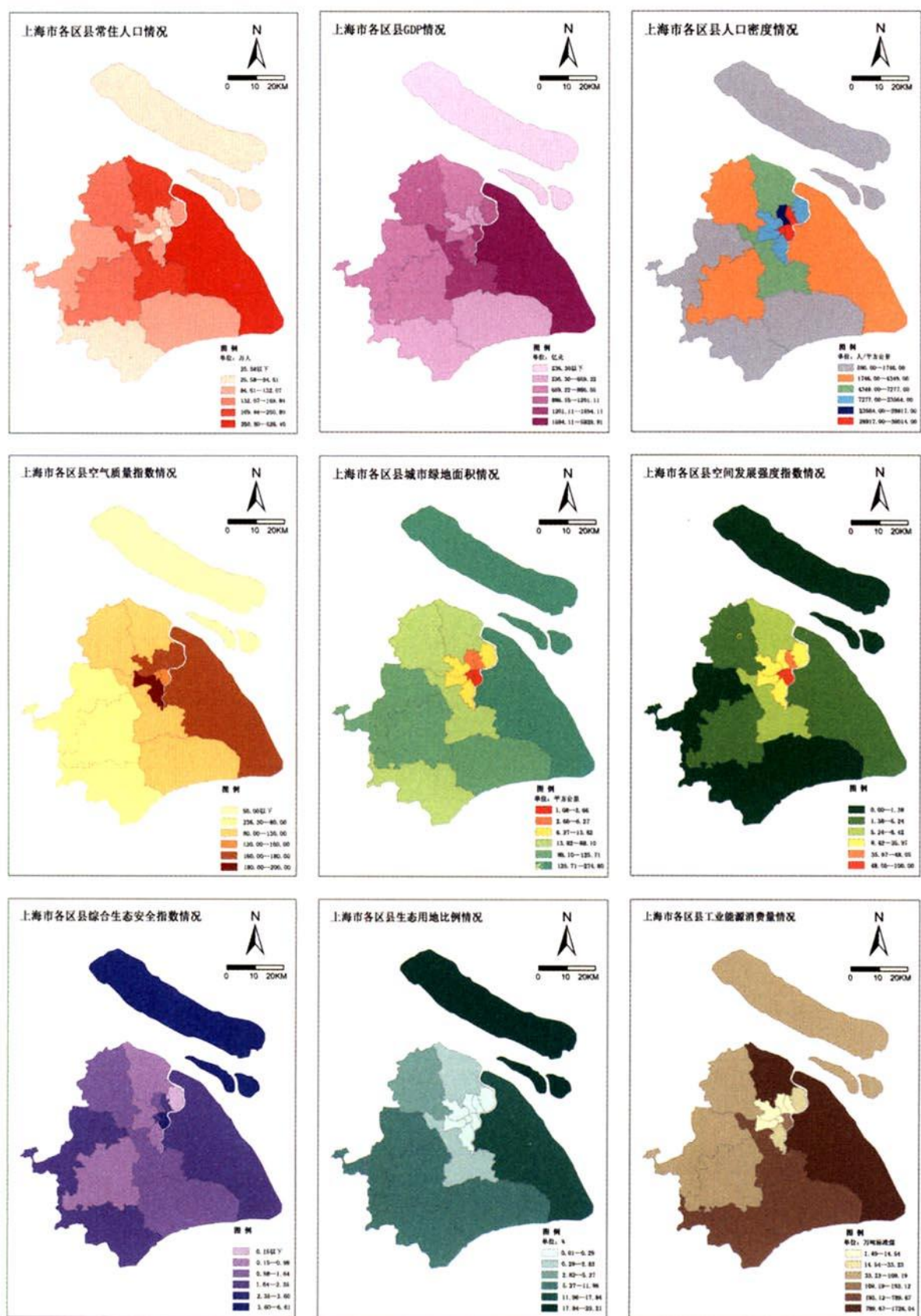


图2 基于空间视角的上海市各区县相关要素情况图

Fig. 2 Spatial elements of districts (county) of Shanghai

资料来源：根据相关数据笔者自制

表 5 基于空间视角的上海市生态环境若干要素 R 值表

Tab. 5 R Value of Shanghai's ecological and environmental variables based on longitudinal data

	常住人口	GDP	人口密度	空气质量指数	城市绿地面积	空间发展强度指数	综合生态安全指数	生态用地比例	工业综合能源消费量
常住人口	1	0.92**	-0.39	0.11	0.57*	-0.42	-0.20	0.29	0.58*
GDP		1	-0.16	0.29	0.49*	-0.14	-0.09	0.25	0.44
人口密度			1	0.72**	-0.73**	0.90**	-0.09	-0.70**	-0.42
空气质量指数				1	-0.54*	0.57*	-0.47	-0.65**	-0.10
城市绿地面积					1	-0.63**	0.52*	0.94**	0.36
空间发展强度指数						1	0.03	-0.58*	-0.39
综合生态安全指数							1	0.67**	-0.15
生态用地比例								1	0.19
工业综合能源消费量									1
**：0.01 置信水平上显著相关；*：0.05 置信水平上显著相关。									

资料来源：笔者自制。

在 0.01 置信水平上显著相关的相关性关系包括以下几个方面：①空气质量指数与人口密度呈现显著的正向相关关系，与生态用地比例呈现出显著的负向相关关系；②城市绿地面积与人口密度、空间发展强度指数呈现出显著的负向相关关系，与生态用地比例呈现出显著的正向相关关系；③综合生态安全指数与生态用地比例呈现出显著的正向相关关系；④生态用地比例与人口密度显著的负向相关关系。

在 0.05 置信水平上显著相关的相关性关系包括以下几个方面：①空气质量指数与城市绿地面积呈现出显著的负向相关关系，与空间发展强度指数呈现出显著的正向相关关系；②城市绿地面积与常住人口、GDP、综合生态安全指数呈现出显著的正向相关关系；③生态用地比例与空间发展强度指数呈现出显著的负向相关关系；④工业综合能源消费量与常住人口呈现出显著的正向相关关系。

4 上海市生态环境关联耦合分析

4.1 时间视角下的关联耦合分析

基于时间视角，将表 1 的生态环境要素分为两组，第一组包含对空气、水、固体废物三个方面的质量表征的指标；第二组是对前三个方面产生直接或间接影响的指标(表 6)。根据公式(1)–(3)，两组数据的关联系数见表 6、关联度、耦合度和协调度计算结果见表 7。

表 6 上海市生态与环境要素群关联系数表

Tab. 6 The correlation coefficient between ecological and environment variables of Shanghai

		生态环境要素群 II								
		A ₂	W ₂	W ₃	W ₄	W ₆	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
生态环境要素群 I	A ₁	0.76	0.83	0.70	0.69	0.51	0.64	0.51	0.77	0.76
	W ₁	0.91	0.83	0.90	0.73	0.50	0.73	0.49	0.70	0.67
	W ₅	0.80	0.73	0.89	0.75	0.48	0.81	0.47	0.65	0.66
	S ₁	0.87	0.78	0.97	0.76	0.48	0.77	0.47	0.68	0.67
	S ₂	0.69	0.65	0.72	0.62	0.66	0.60	0.54	0.63	0.60

资料来源：笔者自制。

表 7 基于时间视角的上海市生态环境关联耦合分析结果

Tab. 7 The correlation coupling analysis of Shanghai ecological environment based on longitudinal data

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	总体情况
关联度	0.83	0.66	0.67	0.62	0.60	0.65	0.69	0.65	0.63	0.71	0.69	0.76	0.68
耦合度	0.20	0.33	0.29	0.48	0.48	0.49	0.51	0.53	0.57	0.62	0.64	0.64	0.48
协调度	0.25	0.40	0.38	0.57	0.58	0.59	0.61	0.63	0.67	0.74	0.76	0.77	0.58

资料来源：笔者自制。表中“总体情况”是根据历年生态环境相关要素数据，应用公式(1)–公式(3)，进行关联度、耦合度和协调度计算的结果。

由表 7 可见，上海市生态环境两个要素群间的关联度总体保持在一个较为稳定的水平(0.68 上下)，关联度基本处于中等偏上水平。从耦合度和协调度角度来看，两要素群间的耦合度和协调度在 2000—2011 年间均不断上升；两者的决定系数 R² 分别为 0.893 和 0.9008(图 3)，呈现高度的线性关系且两者呈现出相一致的增长趋势。2003 年之后，两要素群间的耦合关系进入较高水平的耦合状态，2006 年之后，两要素群间的协调度达到了高度协调耦合关系(表 3，图 3)。

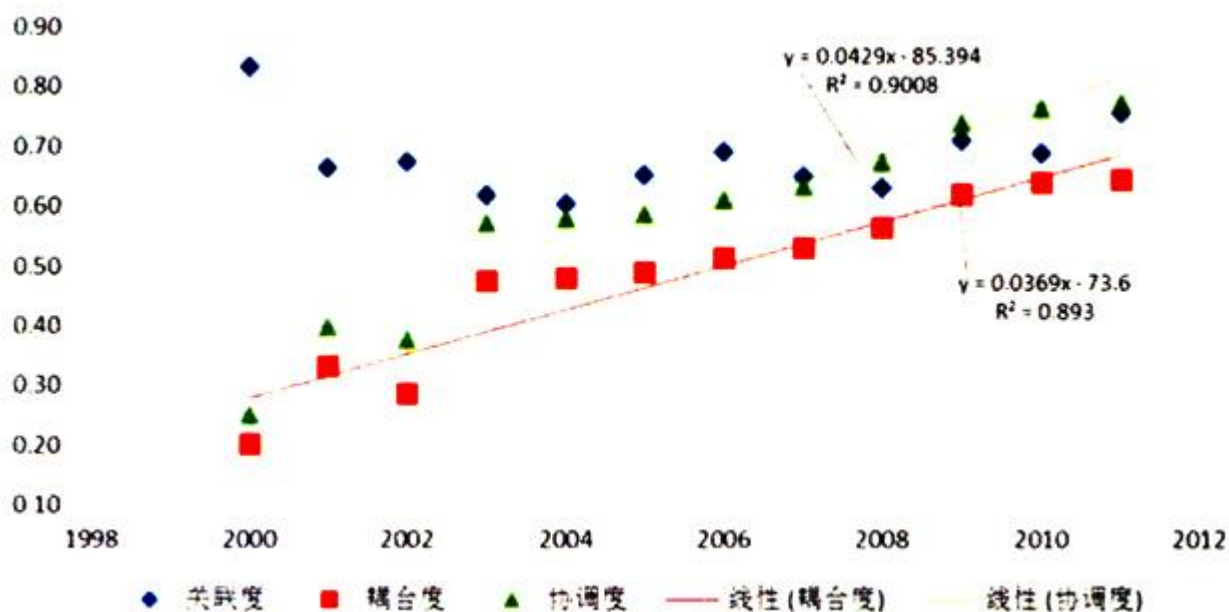


图3 基于时间视角的上海市生态环境关联耦合分析图

Fig. 3 The correlation coupling analysis of Shanghai's ecological environment based on longitudinal data

资料来源：笔者自制.

4.2 空间视角下的关联耦合分析

基于空间视角，将表2的指标分为人口经济要素群(X1-X3)和生态环境要素群(Y1-Y6)两组。根据公式(1)-(3)，对两个组的关联度、耦合度和协调度进行计算(表8)。结果表明，全市除崇明县以外关联度均处于较高水平，说明上海人口经济与生态环境两要素群间有着较密切的关联关系。从耦合度角度来看，全市71%的行政区均处于中等水平耦合关系，要素群间的耦合关系不佳；从协调度角度来看，仅有虹口、静安、黄浦和浦东四区达到了高度协调耦合水平，其余区县均处于中度协调耦合水平(表3，图4，表8)。

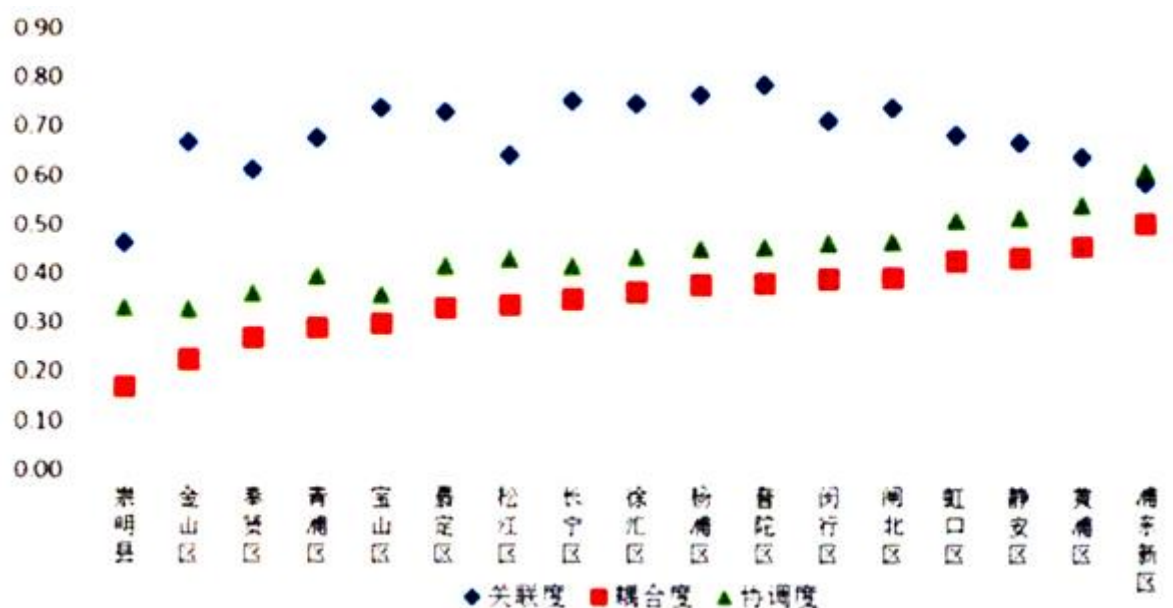


图4 基于空间视角的上海市生态环境关联耦合分析图

Fig. 4 The correlation coupling analysis of Shanghai's ecological environment based on spatial data

资料来源：笔者自制。

表8 上海市各区县人口经济与生态环境要素群关联耦合分析结果表

Tab. 8 The coupling analysis between population & economic and ecological & environment elements of Districts (County) in Shanghai

	浦东新区	黄浦区	徐汇区	长宁区	静安区	普陀区	闸北区	虹口区	杨浦区	闵行区	宝山区	嘉定区	金山区	松江区	青浦区	奉贤区	崇明县
关联度	0.59	0.64	0.75	0.75	0.67	0.78	0.74	0.68	0.76	0.71	0.74	0.73	0.67	0.64	0.68	0.61	0.46
耦合度	0.50	0.46	0.36	0.35	0.43	0.38	0.39	0.43	0.38	0.39	0.30	0.33	0.23	0.34	0.29	0.27	0.17
协调度	0.61	0.54	0.43	0.41	0.52	0.45	0.47	0.51	0.45	0.46	0.36	0.42	0.33	0.43	0.4	0.36	0.33

资料来源：笔者自制。

从空间分布来看，两要素群关联度较高的区域分布于中心城区，西南、东、北三个方向的远郊区县关联度逐渐降低；从耦合度角度来看，除浦东新区以外，外围区县表现出耦合度较低的情况；从协调度来看，除浦东新区呈现出高度协调耦合外，其他区域的协调耦合水平均不高(图5)。

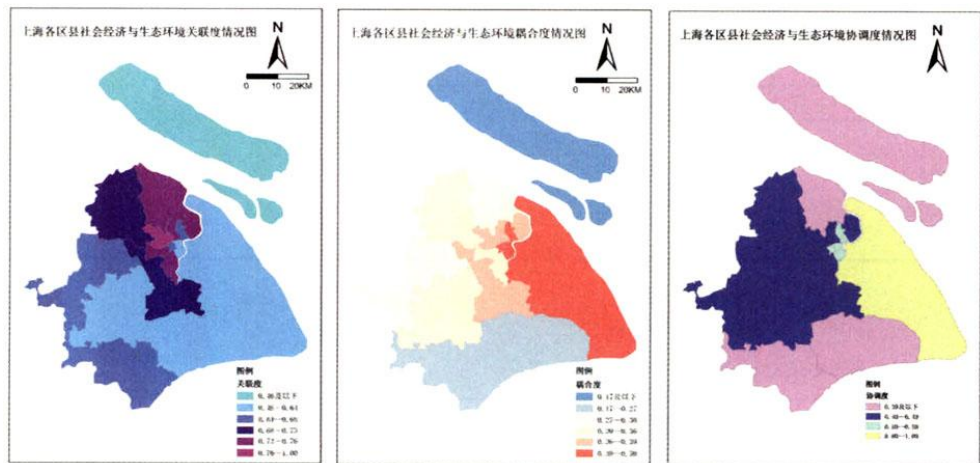


图5 上海市人口经济与生态环境要素群关联耦合分析图

Fig. 5 The coupling analysis between demographic-economic and ecologic-environmental variables of Shanghai

资料来源：笔者自制。

5 上海市生态环境优化建议

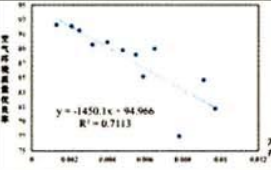
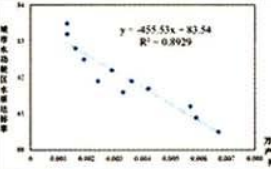
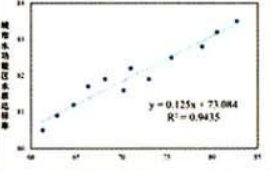
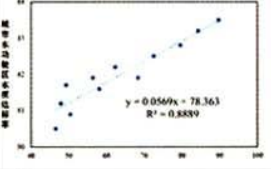
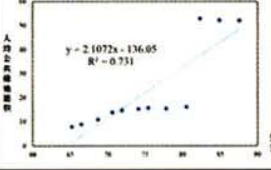
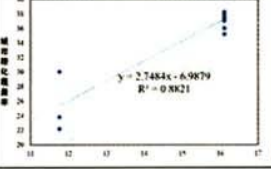
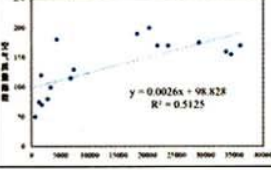
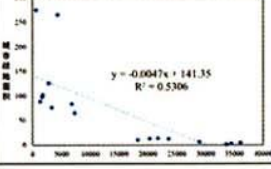
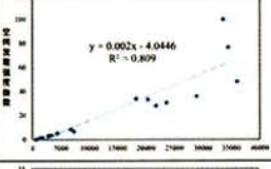
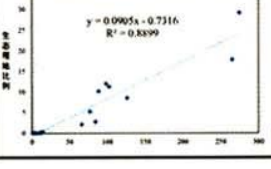
城市生态环境对居民健康和寿命有着重要的影响，沈洁 (2013) 的研究发现，生态环境对人群期望寿命有着重要的影响。因此，对城市人口期望寿命与相关生态环境要素的关联研究，有助于鉴别对城市人口期望寿命产生影响作用的生态环境要素。从对上海市 2000-2011 年的户籍人口期望寿命与相关生态环境要素的相关性分析来看，人口期望寿命与多个生态环境要素有着密切的关系 (表 4)。从分析结果来看，空气质量优良率、城市水功能区水质达标率、城镇污水集中处理率、生活垃圾无害化处理率等指标与城市人均期望寿命有着很高的相关性。由此来看，优化改善城市生态环境对于居民有着至关重要的影响。

5.1 基于相关性分析的优化建议

首先，从大气环境和城市空气质量的分析来看，上海市的空气质量与 SO_2 排放强度、人口密度、生态用地比例、空间发展强度指数及城市绿地面积有着较强的相关关系 (表 9)；其次，从城市水功能区水质达标率的角度来看，上海市的水质水平与污水处理水平、工业用水重复利用水平、废水排放水质有着较强的相关关系 (表 9)；第三，从上海市综合生态安全的角度来看，上海市的综合生态安全与生态用地、城市绿地面积、生活垃圾的无害化处理、人口密度及空间发展强度指数有着较强的相关关系 (表 9)。因此，应从以上三个方面对应要素的调整和改善上着手，对上海的生态环境进行优化 (表 9)。

表 9 基于相关性分析的上海市生态环境优化建议

Tab. 9 Optimization suggestions of Shanghai's ecological environment based on correlation analysis

序号	相关性要素	相关系数	线性回归图	优化建议
1	空气环境质量优良率	-0.84		降低万元国内生产总值SO ₂ 排放强度,降低化石能源的使用总量,提高化石能源的使用效率和清洁率,增加化石能源尾废气体排放的清洁设施
	万元国内生产总值SO ₂ 排放强度			
2	城市水功能区水质达标率	-0.95		提高对废水出水的水质要求
	万元国内生产总值COD排放强度			
3	城市水功能区水质达标率	0.97		增加城镇污水集中处理设施的整体水平,倡导节约用水,重复利用
	城镇污水集中处理率			
4	城市水功能区水质达标率	0.94		提高工业用水的处理水平,提高中水回用设施企业的普及率
	工业用水重复利用率			
5	生活垃圾无害化处理率	0.86		提高生活垃圾的无害化处理水平,增加无害化处理设施,对垃圾填埋场等进行生态化改造
	人均公共绿地面积			
6	城市绿化覆盖率	0.94		提高自然保护区绿化覆盖面积;保护和逐步增加城市绿地比重
	自然保护区覆盖率			
7	人口密度	0.72		积极疏散城市人口,降低人口密度
	空气质量指数			
8	人口密度	-0.73		积极疏散城市人口,降低人口密度
	城市绿地面积			
9	人口密度	0.90		积极疏散城市人口,降低人口密度;降低城市的空间发展强度
	空间发展强度指数			
10	城市绿地面积	0.94		提高生态用地比例,加强对生态用地的保护力度和措施;保护和逐步增加城市绿地比重
	生态用地比例			

资料来源：笔者自制，表中的相关关系要素的相关系数均是在 0.01 置信水平上显著相关的。

5.2 基于关联耦合分析的优化建议

从时间视角来看，2000-2011 年，上海市的生态要素环境群 I 和生态环境要素群 II 之间有着较高水平的关联。同时，两者之间也呈现出高度协调耦合关系。这意味着，通过对各要素的改善和调整，将会对上海市生态环境整体产生显著的优化和提升。

从空间视角来看，人口经济与生态环境两要素群的空间分布与城市集中建设的区域有着较明显的关系。从全市范围内看，人口经济与生态环境要素群关联度高的区域处于城市的东北区域，西南、东南和崇明三岛的人口经济与生态环境要素群的关联度较低。

基于以上分析的结果，对上海市生态环境提出以下优化建议：

首先，加大上海市环境要素水平指标(包括绿地面积、空间发展强度、生态用地比例、工业综合能源消费量等)的提升，推动城市生态环境要素群整体的优化和改善。

其次，上海市高密度集中建设区域的人口经济与生态环境的关联度较强，调节人口规模、推动经济的生态化发展将会对高密度集中建设区域的生态环境产生较显著的优化作用。

再次，从时空结合的视角来看，上海市中心城区高密度集中建设区域可从人口、经济和环境要素等方面对人居环境进行优化。

最后，对于远郊区(县)则更多的需要从环境要素方面对人居生态进行优化。

6 结论

其一，从时间视角的相关性分析结论来看，在 0.01 置信水平下上海空气环境质量优良率和万元国内生产总值 SO_2 排放强度具有负相关关系；城市水功能区水质达标率与万元国内生产总值 COD 排放强度具有负相关关系，与城镇污水集中处理率、工业用水重复利用率具有正相关关系；生活垃圾无害化处理率与人均公共绿地面积、城市绿化覆盖率具有正相关关系。

其二，从空间视角的相关性分析结论来看，在 0.01 置信水平下空气质量指数与人口密度具有正相关关系，与生态用地比例具有负相关关系；城市绿地面积与人口密度、空间发展强度指数具有负相关关系，与生态用地比例具有正相关关系；综合生态安全指数与生态用地比例具有正相关关系；生态用地比例与人口密度具有负相关关系。

其三，从时间视角下的关联耦合分析来看，上海市生态环境要素群 I 和生态环境要素群 II 总体保持一个较为稳定的水平，关联度基本处于中等偏上水平，耦合度和协调度也不断上升，2006 年之后两者均达到了较高的状态(水平)。

其四，从空间视角下的关联耦合分析来看，人口经济要素群与生态环境要素群关联度较高的区域分布于中心城区(关联度平均值为 0.72)，全市除浦东新区外(耦合度为 0.5，协调度为 0.61)，其他区县的耦合度(平均值为 0.34)均较低，其他区县的协调度(平均值为 0.43)均较低。

其五，基于相关性和关联耦合复合分析的结论，上海生态环境优化的途径包括：降低化石能源的使用总量、降低人口密度、提高生态用地比例、增加城市绿地比重、提高城镇污水集中处理设施的整体水平、提高工业用水的处理水平、提高中水回用设施的企业普及率、提高对废水出水的水质要求、提高生活垃圾的无害化处理、对垃圾填埋场等进行生态化改造等。从空间角度

来看，上海市中心城区高密度集中建设区域可从人口、经济和环境要素等方面对人居环境进行优化；对于远郊区(县)则更多的需要从环境要素方面对人居环境进行优化。

此外，笔者认为，基于本课题还可对以下问题进行延伸研究。如：城市生态环境要素与要素群间的因果关系分析，相关要素发展阶段判断和未来发展水平的预测等。

注释：

①2015-11-1，在 CNKI 中，以“生态环境”+“关联耦合”进行“篇名”检索，共 7 篇。

②2015-11-1，在 WEB OF SCIENCE(SCI)中，以“urban”+“coupling”进行“标题”检索，共 177 篇。

③2015-11-1，在 CNKI 中，以“生态环境”+“相关性”+“关联耦合”为“篇名”检索，结果为 0 篇；在 WEB OF SCIENCE(SCI)中，以“urban”+“correlation”+“coupling”进行“标题”检索，结果为 0 篇。

④上海环境网站：<http://www.sepb.gov.cn/fa/cms/shhj/index.htm>。

⑤上海市政府门户网站：<http://www.shanghai.gov.cn/shanghai/node2314/index.htm>。

⑥中央气象台网站：<http://www.weather.com.cn/weather/101020100.shtml>。

⑦上海气象台网站：<http://www.smb.gov.cn/index.html>。

⑧数学方法和计算公式参考了马丽等(2012)和李磊等(2012)。

⑨空气质量指数采用 2013 年 12 月 3 日上海气象台和中央气象台相关数据。

⑩空间发展强度指数采用了建筑面积毛密度(万 m²/km²)、高层建筑(8 层及以上)面积毛密度(万 m²/km²)、地均 GDP(亿元/km²)等三个指标，在正向归一化处理之后，进行算术平均运算后与 100 的乘积作为该指数，以上三个指标的相关数据来源于《上海统计年鉴(2013)》。

⑪综合生态安全指数数据来源于：沈清基等，2015，见参考文献^[18]。

⑫生态用地比例数据来源于：上海市城市规划设计研究院，2012；上海市城市规划设计研究院，2015。

⑬式(1)中，k 为要素数量，j 为要素类型， $\epsilon_i(j)(t)$ 是两要素群内要素间的关联系数，计算公式为：

$$\epsilon_i(j)(t) = \frac{\min_j \min_t |Z_i^X(t) - Z_j^Y(t)| + \rho \max_j \max_t |Z_i^X(t) - Z_j^Y(t)|}{\max_j \min_t |Z_i^X(t) - Z_j^Y(t)| + \rho \max_j \max_t |Z_i^X(t) - Z_j^Y(t)|} \circ$$

⑭式(2)中， ρ 是分辨系数，本研究中取 $\rho=0.5$ ， $Z_i^X(t)$ 和 $Z_j^Y(t)$ 是两要素群内要素标准化后的值；n 指耦合系统(要素群)的

数量，本文中均为对两个要素群的分析，即 $n=2$ ； $U_i = \overline{\epsilon_i(j)(t)}$

05式(3)中, C 是耦合度, T 是综合协调指数, 计算公式为 $T = \sqrt{\alpha U_1 + \beta U_2}$ 。其中, α 、 β 是待定系数, 系数的个数是根据本研究中涉及的系统(要素群)数量取得的, 本研究中均按照两系统同等重要对其进行赋值, 即 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

参考文献:

- [1]白春礼. 世界正处在新科技革命前夜[N]. 光明日报, 2013-01-21(5). (BAI Chunli. The world is on the eve of the new technological revolution[N]. Guangming Daily, 2013-01-21(5).)
- [2]CIARROCCA M, ROSATI M V, TOMEI F. Correlation between cadmium and blood counts in workers exposed to urban stressor[J]. Archives of Environmental & Occupational Health, 2015, 70(2): 70-76.
- [3]陈志, 孙志国, 刘成武. 土地利用变化与生态环境质量的相关性研究[J]生态经济, 2009(7): 170-173. (CHEN Zhi, SUN Zhiguo, LIU Chengwu. Study on relativity betweenland-use and environment quality[J]. EcologicaEconomic, 2009(7): 170-173.)
- [4]DUARTE R M. B. O., FREIRE S M. S. C., DUARTE A C. Investigating the water-soluble organic functionality of urban aerosols using two-dimensional correlation of solid-state C-13 NMR and FTIR spectral data[J]. Atmospheric Environment, 2015, 116(9): 245-252.
- [5]HELLSTEN A, LUUKKONEN S M, STEIN FELD G, et al. Footprint evaluation for flux and concentration measurements for an urban-like canopy with coupled lagrangian stochastic and large-eddy simulation models[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2015, 157(2): 191-217.
- [6]李彬, 初然梁, 刘永伟, 等. 生态环境与健康长寿老人相关性研究[J]疑难病杂志, 2012(6): 445-448. (LI Bin, CHU Ranliang, LIU Yongwei, et al. Correlation study of ecological environment and heathy longevous elderly[J]. Chinese Journal of Difficult and Complicated Cases, 2012(6): 445-448.)
- [7]李磊, 潘慧玲. 区域经济与生态环境的关联耦合[J]. 技术经济, 2012(9): 59-64. (LI Lei, PAN Huiling. Correlative coupling between regional economy and eco-environment[J]. Technology Economics, 2012(9): 59-64.)
- [8]刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J]地理学报, 2005(2): 237-247. (LIU Yaobin, LI Rendong, SONG Xuefeng. Grey association analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China[J]. Acta Geographic Sinica, 2005(2): 237-247.)
- [9]李义, 王建荣. 陕西省生态环境与经济发展相关性分析[J]统计与决策, 2002(6): 35-36. (LI Yi, WANG Jianrong. The correlation analysis of ecological environment and economic development in Shaanxi province[J]. Statisrics and Decision, 2002(6): 35-36.)
- [10]马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析[J]. 地理学报, 2012(10): 1299-1307. (MA Li, JIN FengJun, LIU Yi. Spatial pattern and industrial sector structure analysis on the coupling and coordinating degree of regional economic development and environmental pollution in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012(10): 1299-1307.)

-
- [11]MALLIK C, LAL S, VENKATARAMANI S. Trace gases at a semi-arid urban site in western India: variability and inter-correlations[J]. Journal of Atmospheric Chemistry. 2015, 72(2): 143-164.
- [12]PAGLIOSA P R, BARBOSA F A R. Assessing the environment-benthic fauna coupling in protected and urban areas of southern Brazil[J]. Biological Conservation, 2006, 123(3):408-417.
- [13]RIENOW A, STENGER D, MENZ G. Sprawling cities and shrinking regions-forecasting urban growth in the ruhr for 2025 by coupling cells and agents[J]. Erdkunde, 2014, 68(2):85-107.
- [14]上海市城市规划设计研究院. 转型上海规划战略[M]. 同济大学出版社, 2012. (Shanghai Urban Planning and Design Research Institute. Transformation of Shanghai & planning strategy[M]. Tongji University Press, 2012.)
- [15]上海市城市规划设计研究院. 上海市基本生态网络规划[EB/OL]. [2015-11-01]<http://www.supdri.com/index.php?c=article&id=89>. (Shanghai Urban Planning and Design Research Institute. Shanghai basic ecological network planning[EB/OL]. [2015-11-01])
- [16]沈洁. 城市人群期望寿命趋势及影响因素研究[D]. 复旦大学博士学位论文, 2013. (SHEN Jie. Changing trends of life expectancy and effect on associated factors in China urban cities[D]. The Dissertation for Doctor Degree of Fudan University, 2013.)
- [17]沈清基. 城市生态环境: 原理、方法与优化[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2011. (SHEN Qingji. Urban ecological environment: principles, methods and optimization[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [18]沈清基, 等. 基于 SSM-ES-GIS 的城市生态安全空间格局分析及构建研究[R]. 上海: 上海同济城市规划设计研究院, 2015. (SHEN Qingji, et al. Research of urban ecological security spatial pattern analysis and construction based on SSM-ES-GIS[R]. Shanghai: Shanghai Tongji Urban Planning & Design Institute, 2015.)
- [19]宋代军, 杨贵庆 “关联耦合合法” 在城市设计中的运用与思考[J]城市规划学刊, 2007(5): 65-71. (SONG Daijun, YANG Guiping. Application and consideration of linkage theory in urban design[J]. Urban Planning Forum, 2007(5): 65-71)
- [20]孙正聿, 等. 马克思主义基础理论研究[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2011. (SUN Zhengyu, et al. Marxist theory foundation[M]Beijing: Beijing Normal University Press, 2011.)
- [21]谭许伟, 李晓宇, 殷健, 等. 沈阳城市土地利用与生态环境相关性分析及空间优化策略[C]//中国城市规划学会, 2010 中国城市规划年会论文集, 2010: 1-15. (TAN Xuwei, LI Xiaoyu, YIN Jian, et al. Shenyang urban land use and ecological environment and spatial correlation analysis optimization strategy[C]. Urban Planning Society of China, China urban planning symposium 2010, 2010:1-15.)
- [22]TIMBADIYA P V, PATEL P L, POREY P D.A. 1D-2D Coupled hydrodynamic model for river flood prediction in a coastal urban floodplain[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(2): 17-33.
- [23]VAZ E, ARSANJANI J J. Predicting urban growth of the greater toronto area — coupling a markov cellular automata with document meta-analysis[J]. Journal of Environmental Informatics, 2015, 25(2): 71-80.

[24]WILLIAMS C J, WILLOCKS L J, LAKE I R. Geographic correlation between deprivation and risk of meningococcal disease: an ecological study[J]Bmc Public Health, 2004, 4(7): 30-40.

[25]YE Youhua, ZHOU Kai, SONG Liying. Dew amounts and its correlations with meteorological factors in urban landscapes of Guangzhou China[J]Atmospheric Research, 2007, 86(1): 21-29.

[26]YU Huibin, SONG Yonghui, GAO Hongjie. Applying fluorescence spectroscopy and multivariable analysis to characterize structural composition of dissolved organic matter and its correlation with water quality in an urban river[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9): 5163-5171.

[27]赵宏林, 陈东辉. 城市化与生态环境之关联耦合性分析[J]中国人口·资源与环境, 2008(6): 174-177. (ZHAO Honglin, CHEN Donghui. Study on conjunction and coupling between urbanization and eco-environment[J]. China Population, Resource and Environment, 2008(6): 174-177.)

[28]赵世明, 刘富铀, 张智慧, 等. 海洋能调查与评价的相关性分析[J]. 海洋技术, 2008(2): 109-112. (ZHAO Shiming, LIU Fuyou, ZHANG Zhihui, et al. Correlation analysis of ocean energy survey and evaluation[J]. Ocean Technology, 2008(2): 109-112.)

[29]孜比布拉·司马义, 苏力叶·木沙江, 帕夏古·阿不来提. 南疆铁路沿线地区城市化与生态环境质量相关性分析[J]中国沙漠, 2011, 31(6): 1509-1515. (SIMAYI Z, MUSHAJIANG S, ABULAITI P. Correlation between urbanization and ecological environment in areas along south Xinjiang railroad[J]. Journal of Desert Research, 2011(6): 1509-1515)

作者简介: 冯东海, 同济大学建筑与城市规划学院博士生, iaves@qq.com; 沈清基, 同济大学建筑与城市规划学院, 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 教授, 博士生导师(通讯作者)。