

都市郊区乡村景观多功能权衡-协同关系演变

任国平^{1,2}, 刘黎明^{2*}, 李洪庆³, 袁承程²

(1. 湖南城市学院管理学院, 益阳 413000; 2. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193;
3. 河海大学公共管理学院, 南京 211100)

摘要: 针对景观功能相互表征的科学性和景观多功能间关系定量化问题, 采用 Spearman 秩次相关系数分析和双变量空间自相关方法, 对上海市青浦区 184 个行政村 1980—2015 年的乡村景观多功能间权衡-协同关系变化特征进行研究, 结果表明: 1) 农业生产功能不能取代经济发展功能, 青浦区经济发展功能已成为主导的功能形态。2) 该区乡村景观多功能间权衡-协同关系时空差异显著, 表现为: 生产功能-生活功能以协同为主, 空间上沿中轴线扩散; 生产功能-生态功能以权衡为主, 空间上从中部向东部扩散; 生活功能-生态功能权衡-协同关系较为均衡, 权衡区由中部向东部扩散, 协同区由西部向北部和南部扩散。农业生产功能与经济发展功能、经济发展功能与生态调节功能/环境维系功能为该区不可回避的矛盾; 经济发展功能与景观美学功能间权衡关系显著, 且两者关系格局呈东部权衡西部协同, 且权衡区的数量递增; 经济发展功能与空间承载功能呈现东部权衡和西部协同, 且协同区呈增长趋势; 景观美学功能与生态调节功能/环境维系功能间权衡区集中在青东区域, 协同区分布于青西区域, 且权衡区数量先增后减, 协同区先减后增。3) 时空结合的分析方法能准确全面的反映乡村景观多功能间权衡-协同关系演变特征。

关键词: 乡村; 景观; 多功能; 演变; 权衡-协同关系; 青浦区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.034

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-23-0273-13

任国平, 刘黎明, 李洪庆, 袁承程. 都市郊区乡村景观多功能权衡-协同关系演变[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 273—285. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.034 <http://www.tcsae.org>

Ren Guoping, Liu Liming, Li Hongqing, Yuan Chengcheng. Evolution on trade-offs and synergy of multifunction of rural landscape in metropolitan suburbs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 273 — 285. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.034 <http://www.tcsae.org>

0 引言

景观是由自然, 半自然和社会经济系统的空间相互镶嵌所构成的地表综合体^[1], 兼具生产、生活和生态价值; 景观功能是景观资源供给人类的产品和服务的能力^[2], 综合表征景观结构和生态学过程间的相互关系, 是景观生态学研究热点^[3]。景观功能存在类型多样性, 空间分布非均衡性和时间变异性特征^[4], 加之人类对其利用的选择性导致景观功能间相互关系复杂化, 表现为此消彼长的“权衡”和相互促进的“协同”^[5]。其中, 权衡指某种功能的增加或减少导致其功能的减少或增加, 协同指两种或多种功能同时增加或减少^[6]。随着快速城镇化的推进, 城乡转型的深入, 人类对景观功能的需求逐渐由单一性向多元化转变, 使其权衡-协同关系的复杂性愈发明显^[7]; 尤其在都市郊区, 景观资源的稀缺性与多元化需求更激发了景观功能的权衡-协同; 厘清乡村景观多功能间权衡-

协同关系的时空变化特征, 已成为促进区域功能总体效益最优、引导景观资源开发、实现经济发展和生态保护“双赢”的关键^[8-9]。然而, 多数学者以农业多功能性为出发点分析乡村景观多功能间的关系, 得到几乎趋于一致的结论: 农业生产功能与生态功能间存在权衡关系^[3,9-11]。但纵观上述结论的产生均指向统一的逻辑前提: 农业生产功能作为区域经济发展最主要的组成部分, 即将农业生产功能和经济发展功能等同。然而, 实际中从都市郊区社会经济统计数据看, 农业生产对经济发展的贡献非常小。由此引入论文的问题: 都市郊区的农业生产功能与生态功能间关系是否遵循学界的共识(两者间存在权衡关系)。推而广之, 都市郊区乡村景观多功能间关系如何。乡村景观多功能间关系时空演变有何特征。

目前, 国内外学者对景观功能关系研究主要依托于生态系统服务^[10-12]和农业景观多功能^[8,11], 从功能或服务的内涵^[13]、构成与分类^[14]等理论入手, 通过构建指标体系^[8,15]、计算生态服务价值^[12]、采用物质量^[16]等, 采用相关分析法^[12]、协同模型^[17]、InVEST 模型^[18]、空间自相关^[19]、情景分析法^[20]、bayesGIS 模型^[21]等方法, 对流域涵养区^[12]、生态敏感区^[9]、经济发展区^[22]、高原丘陵区^[19]、都市郊区^[3]、农作区^[17]等方面开展大量研究, 其成果对区域生态系统保护、功能分区及管理、充实景观生态学理论的案例发挥了重要作用。然而, 前人的研究存在以下不足:

收稿日期: 2019-06-13 修订日期: 2019-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(41471455); 湖南省社科评审课题(XSP17YBZC021, XSP18ZDI035); 湖南省教育厅重点课题(19A086)

作者简介: 任国平, 博士, 副教授, 主要从事土地利用和乡村景观规划研究。
Email: renguoping82@163.com

*通信作者: 刘黎明, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土地资源可持续利用与乡村景观规划。Email: liulm@cau.edu.cn

在忽视特殊区域景观功能的分化和演替下,其功能间关系研究结果的可靠性值得商榷;在忽视功能空间相互作用关系下,采用广泛的时间相关性分析得到结果的可信度值得商榷;短时段和大范围的景观功能间关系时空变化研究结果的稳健性值得商榷。鉴于此,研究尝试将权衡-协同的生态学研究方法引入乡村景观多功能间的关系分析,上海市西郊的青浦区 184 个行政村为例,采用区域景观功能时间上的 Spearman 秩次相关系数分析法和空间上的双变量空间自相关结合,对该区 1980—2015 年的乡村景观多功能间权衡-协同关系时空变化进行研究,为实现区域可持续发展提供科学借鉴。

1 研究区概况、研究方法数据来源

1.1 研究区概况

青浦区位于上海市西南部(120°53'E~121°17'E 和 30°59'N~31°16'N 之间),太湖下游,黄浦江上游,总面积 668.54 km²;地形东西宽,中心狭长;处于长三角经济核心区,紧邻上海市核心经济商贸区(图 1)。该区内辖淀山湖为上海市水生生态供给区;湖泊河流面积大,植被覆盖高,成为上海市重要的生态屏障。

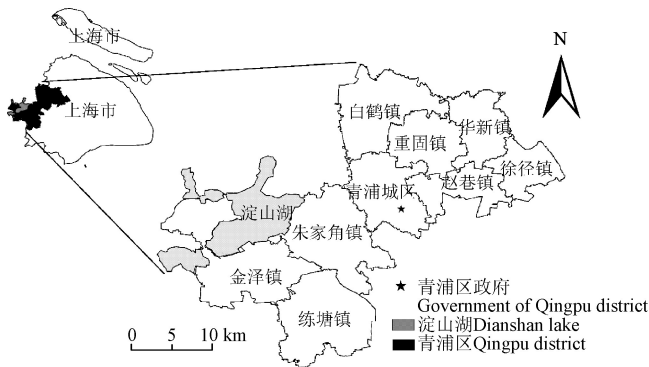


图 1 上海市青浦区位置图

Fig.1 Location of Qingpu district in Shanghai

该区地势平坦,平均海拔为 2.8~3.5 m,日平均气温 17.6℃左右。2016 年地区生产总值为 798.55 亿元,农业总产值 17.65 亿元,工业总产值 445.83 亿元,三大产业比例为 1.6:58.6:39.8。2016 年末,青浦区总人口 49.68 万人,其中,非农业人口 34.89 万人,占全区人口总数的 70.23%;城乡居民人均可支配收入为 36 188 元。全区共有 8 个镇和 3 个街道和 184 个行政村。上海市作为中国经济最发达的国际性大都市之一,其城郊的青浦区在优越的区位条件、快速城镇化和工业化等外力的驱动下,形成乡村景观结构无序化、空间破碎化、需求复杂化等特征,导致乡村景观功能混杂,功能间权衡-协同关系复杂;因此,选择该区域开展乡村景观多功能间关系研究具有典型性。

1.2 研究方法

1.2.1 乡村景观功能分类依据

乡村景观功能分类是开展景观功能权衡-协同关系研究的基础。研究依据乡村景观各功能成因机理^[23],结合自然资产功能评估框架^[24],按照功能的经济、社会和调

节特性,构建乡村景观多功能评价的“三生”功能体系。

1) 乡村景观生产功能。该功能是指采用景观资源直接或间接生产取得的产品和服务,促进经济进步为该功能的基础^[25],含农业生产功能(APF)和经济发展功能(EDF)。2) 乡村景观生活功能。该功能是指景观资源为维系社会和人类发展所提供各种服务,提供居住、交通、存储、美学享受为该功能的基底^[3],含空间承载功能(SCF)和景观美学功能(LAF)。3) 乡村景观生态功能。该功能是指维持人类生存的自然条件及效用服务,土壤、植被、水文、生物要素为基本组件^[26],含生态调节功能(ERF)和环境维衡功能(EMF)。

1.2.2 乡村景观功能评价指标设计

借鉴组分承载自然、经济和社会要素差异的思路^[27],运用各评价指标承载“三生”功能要素差异和重要性构建乡村景观功能评价指标体系。为避免指标的片面性和主观性,研究依据区域特性、评价单位的完整性、指标的相对稳定性、指标的可获取性等原则,具体咨询景观规划、生态学、土地利用、自然地理等领域的专家,经过多轮征询和筛选最终确定指标体系(表 1)。

1.2.3 乡村景观多功能评价及权衡-协同关系分析方法

1) 评价指标标准化

为克服乡村景观功能评价指标的量纲和正负方向差异,研究采用极差标准法对各指标进行无量纲化处理。

2) 评价指标权重设置

为克服因指标间差异过小造成的影响,研究采用因子分析法设置各指标的权重^[28]。采用各指标值构建相关关系矩阵,利用指标主成分贡献值占总贡献值比重确定指标权重(表 1)。

3) 乡村景观单项功能评价

乡村景观单项功能反映某种功能重要性程度,是构成该功能所有指标值大小的综合。研究采用加权求和模型计算,公式如下。

$$f_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \times w_j \quad (1)$$

式中 f_i 为单功能值, x_{ij} 为第 i 项指标, w_j 为 j 指标的权重, n 为第 i 项单功能的指标数。

4) 乡村景观多功能权衡-协同关系数量化

为分析乡村景观各项功能间的权衡-协同的数量特征,研究采用非参数检验的 Spearman 秩次相关系数分析法^[29]对乡村景观功能间的关系进行检验。该方法已被广泛运用于生态系统服务权衡与协同关系研究中,具有较强的普适性^[30]。该方法的数学原理为,令 $\{(X_i, Y_i)\}$ 表示 n 对独立同分布的数据对;对 X_i 进行从小到大排列,可得一组新的数据对 $X_1 < X_2 < \dots < X_n$,其中关于 x 的序统计量与之相对应的 Y_i 称之为 X_i 的伴随。

$$r_s(X_i, Y_i) = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

式中 P_i 指 X_i 为位于序列中第 k 个位置, k 为 X_i 的秩次; Q_i 为 Y_i 的秩次; n 为独立同分布数据对。 $r_s(X_i, Y_i)$ 为秩

次相关系数，相关系数为正表示乡村景观两种功能间存在协同关系，相关系数为负表示乡村景观两种功能间存在权衡关系，相关系数不显著表示两种功能存在独立关系。

表 1 乡村景观功能评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of landscape function in Qingpu district

目标层 Target	准则层 Criterion	指标层 Indicator	计算方法或指标意义 Methods and Significant	指标方向 Indicator Direction	指标权重 Indicator Weight
生产功能 Production function (PE)	农业生产功能 Agricultural production function (APF)	食物供给年价值	粮食作物播种面积×年产量×当年市场价格	+	0.064
		经济作物供给年价值	经济作物播种面积×年产量×当年市场价格	+	0.049
		人均耕地面积	区域耕地面积÷区域农业人口	+	0.038
	经济发展功能 Economic development function (EDF)	区域 GDP	反映区域经济发展水平	+	0.069
		土地城镇化率	区域建设用地面积÷区域总面积	+	0.052
		农业产业贡献率	农业产业总收入÷区域 GDP	+	0.043
生活功能 Living function (LF)	空间承载功能 Space carriage function (SCF)	人口密度	区域常住人口数÷区域总面积	+	0.059
		聚落景观用地面积	居民点及工矿用地面积	+	0.068
		人均公路里程	区域交通总里程÷区域人口总数	+	0.043
	景观美学功能 Landscape aesthetic function (LAF)	需求量	区域常住人口总量	+	0.044
		需求水平	区域人均 GDP	+	0.052
		辐射范围程度	距离最近城镇中心距离	+	0.038
		斑块集聚度	区域农业景观斑块团聚程度	+	0.042
		景观多样性指数	区域各景观类型多样性程度	+	0.033
生态功能 Ecological function (EF)	生态调节功能 Ecological regulation function (ERF)	植被覆盖指数	农业景观面积÷区域总面积	+	0.042
		水网密度指数	区域水域面积÷区域总面积	+	0.058
		土地退化指数	归一化系数×(0.05×轻度侵蚀面积+0.25×中度侵蚀面积+0.70×重度侵蚀面积)÷区域面积	-	0.039
	环境维持功能 Environmental maintain function (EMF)	年化肥施用量	反映农业生态系统对环境的负面影响	-	0.065
		景观生态用地环境年容量	反映生态环境在保持自身平衡下允许调节范围	+	0.048
		工业三废排放量	反映区域生态环境状况	-	0.054

注：农业景观包含耕地、园地、林地、草地；景观美学功能评价借鉴朱庆莹的研究成果^[11]；+、-分别表示正向指标和负向指标。
Notes: Agricultural landscape includes cultivated land, garden land, woodland and grassland. The evaluation of landscape aesthetic function learned from Zhu Qingying's research results. +, - represents positive and negative indicators, respectively.

5) 乡村景观多功能权衡-协同关系空间化

为分析乡村景观各项功能权衡-协同的空间特征，采用空间自相关分析法对其空间集聚特征进行研究。该方法由 Anselin 提出，主要研究地理要素之间相关性^[31]；且已被广泛应用于功能间关系^[11]的研究中。

全局空间自相关注重检验区域整体上属性值的聚合和离散程度。采用 Global Moran's *I* 统计量分析乡村景观功能权衡-协同的空间依赖程度，公式如下：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

(3)

$$Z(I) = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}}$$

(4)

式中 *n* 为区域行政村总数，*W_{ij}* 为空间权重，*X_i* 和 *X_j* 分别是区域 *i* 和 *j* 的属性； \bar{X} 属性均值。*Z(I)* 为标准化统计量的阈值；*E(I)* 为观测变量自相关性的期望值；*var(I)* 为方差。Moran's *I* 统计量在 [-1, 1] 之间，*I* > 0 代表乡村景观功能间存在协同关系，趋于空间聚合；*I* < 0 代表乡村景观功能间存在权衡关系，趋于空间离散；*I* = 0 代表没有通过显著性

检验，趋于空间随机分布。研究采用 *Z(I)* 值开展显著性检验；当 *Z(I)* ≥ 1.96 或 *Z(I)* ≤ -1.96 (*α* = 0.05) 时，代表乡村景观功能在空间上存在显著的相关性^[17]。

局部空间自相关是对区域局部的属性值的空间分布分析，直观展现局部关联特征。采用 Local Moran's *I* 统计量和 LISA (Local indicator of spatial association) 统计量分析乡村景观功能权衡-协同的局部空间依赖程度，公式如下

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{m_i} \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})$$

(5)

$$S_x^2 = \frac{\sum_j [W_{ij} (X_j - \bar{X})^2]}{N}$$

(6)

式中 *S_x²* 是方差，对 *j* 的累积区域不包括区域 *i* 自身。将 Local Moran's *I* 指数显著性结合 Moran 散点图，通过“Moran 显著性图”进行可视化，表示出不同象限区域分布和 LISA 显著区域。按相关性类型分为景观功能高值协同区 (HH 型)，景观功能低值协同区 (LL 型)，景观功能高低值和低高值权衡区 (HL 型和 LH 型) 和景观功

能兼容关系区 (NN 型)。

为分析乡村景观两种功能间权衡-协同的空间特征,并使功能间权衡-协同关系空间显化,研究在单变量空间自相关的基础上,采用双变量局部空间自相关分析法对其空间集聚特征进行研究,公式如下。

$$I_i^{KL} = \frac{X_i^K - \bar{X}_K}{\sigma^K} \sum_{j=1}^n W_{ij} \frac{X_j^L - \bar{X}^L}{\sigma^L} \quad (7)$$

式中 I_i^{KL} 为区域 i 的双变量局部空间自相关系数; X_i^K 为区域 i 第 K 种乡村景观功能值; X_j^L 为区域 j 第 L 种乡村景观功能值的观测值; \bar{X}_K , \bar{X}^L 分别为第 K 种和第 L 种乡村景观的平均值; σ^K , σ^L 分别为第 K 种和第 L 种乡村景观功能值的方差。

1.3 数据来源及处理

研究数据来源如下: 1) 空间地理数据来源于: 青浦区规土局提供的 4 期 (1980 年、1995 年、2007 年和 2015 年) 1:5000 的土地利用现状图、土地利用总体规划数据库 (2006—2020 年)、2003—2005 年土地统计台账; 2) 社会统计数据来源于: 1980—2015 年的《青浦区统计年鉴》、《青浦区乡镇统计年鉴》、《青浦区农业统计年鉴》、《青浦区乡镇工业发展报告》、《青浦区林业统计年鉴》、《青浦区环境调查报告》、《青浦区国民经济汇编》、《青浦区环境状况公报》和《青浦区土地退化分级报告》等。

研究数据处理如下: 1) 将不同时期地类参照《第二次全国土地调查技术规程 (TD/1014-2007)》进行转换, 分成耕地景观、园地景观、林地景观、草地景观、聚落景观、交通景观、水域景观和荒地景观 8 类; 2) 运用 ArcGIS9.3 的空间分析功能统计距离数据; 3) 鉴于 2005 年白鹤镇行政边界调整, 以 2015 年青浦区行政界线对各时段的行政边界进行拟合; 4) 使用 Fragstats3.3 软件对 4 期数据计算斑块集聚度和景观多样性指数; 5) 鉴于 62km² 的淀山湖水面归属昆山市和青浦区共有, 故按面积的 1/4 平均分配至朱家角镇和金泽镇; 6) 辐射范围程度参考朱俊林的研究并根据区域实际进行修正, 辐射距离 20 km 以上为 0, 0~20 km 内采用反向归一法^[32]; 7) 利用 ArcGIS 的面状数据提取功能对不同区域土地侵蚀程度类型 (轻度、中度和重度) 面积进行提取和计算; 8) 从人口容量 (人口自然增长率、人口密度、农业人口比例、就业率)、生态资源容量 (耕地、园地、林地、草地、未利用地面积、水域面积) 和废弃物消纳容量 (废水处理率、生活垃圾处理率、秸秆综合利用率) 3 个面构建生态环境容量指数对景观生态用地环境年容量进行评价^[33]; 9) 为克服数据差异过小导致分析结果辨识性差的问题, 研究以 184 个行政村为空间统计单元; 10) 考虑到孤立点或噪声点的影响, 采用探索性数据分析法对离群值剔除^[34]; 11) 为克服空间权重出现比例效应而导致数据估算精度降低产生的结构特征不明显问题, 采用 Rook 邻接原则确定空间自相关权重; 12) 为消除货币因素的影响, 以 2015 年为基期对社会经济数据进行平滑处理; 13) 根据《上

海市青浦区土地利用总体规划 (2006—2020 年)》, 夏阳、盈浦和香花桥为青中区域, 金泽镇、朱家角镇、练塘镇为青西区域, 徐泾镇、重固镇、白鹤镇、赵巷镇、华新镇为青东区域; 14) 采用 GeoDa095 软件进行空间相关性分析, 采用 SPSS.20 软件进行社会经济指标分析。

2 结果与分析

2.1 乡村景观多功能评价结果

对构建 20 个评价指标在极差标准化和客观赋权法的基础上, 采用加权求和模型 (公式 1) 测算 4 个年份青浦区 184 个评价单元的“三生”功能和 6 种乡村景观功能的平均值, 得到结果如下 (表 2)。

1) 乡村景观功能时间差异明显。青浦区 1980—2015 年各乡村景观功能值呈现出明显的时间差异: 从不同年份的功能均值分析, 生产功能>生活功能>生态功能; 经济发展功能 (2015 年) 均值最大 (0.947), 环境维衡功能 (2007 年) 均值最小 (0.247); 从研究期间的功能均值分析, 经济发展功能均值最大为 0.777, 其次为空间承载功能均值为 0.583, 研究期间青浦区环境维衡功能均值最小, 其值为 0.368。

2) 乡村景观功能时间变异显著。研究期间各乡村景观功能值变化显著, 生产功能和生活功能逐年增加, 生态功能先降后升。各分功能变化主要分成以下情况: 功能值逐年增长型, 主要表现为经济发展功能和空间承载功能, 其中经济发展功能增长幅度最大, 36 年间功能值增长了 74.72%, 空间承载功能值增长了 65.81%; 功能值逐年下降型, 主要表现为农业生产功能, 研究期间该功能值减少了 0.51, 下降幅度为 59.51%; 功能值波动变化型, 主要表现为景观美学功能、生态调节功能和环境维衡功能, 3 种功能值在研究期间均呈现先下降, 后上升的波动变化趋势, 其中, 生态调节功能波动幅度最大。该结果表明农业生产功能不再是青浦区第一性功能, 经济发展功能成为主导功能; 该结果与唐林楠^[35]、刘玉等^[36]学者的研究存在较大的差异。

表 2 青浦区乡村景观多功能综合评价结果

Table 2 Results of multifunctional comprehensive evaluation of rural landscape in Qingpu district

功能 Functions	1980 年 Year of 1980	1995 年 Year of 1995	2007 年 Year of 2007	2015 年 Year of 2015
生产功能	0.547	0.642	0.664	0.679
生活功能	0.526	0.548	0.586	0.592
生态功能	0.604	0.504	0.335	0.394
农业生产功能	0.657	0.605	0.452	0.347
经济发展功能	0.542	0.728	0.891	0.947
空间承载功能	0.427	0.548	0.648	0.708
景观美学功能	0.612	0.514	0.324	0.387
生态调节功能	0.657	0.419	0.308	0.312
环境维衡功能	0.569	0.348	0.247	0.309

2.2 乡村景观多功能权衡-协同关系时间格局

采用青浦区 1980—2015 年乡村景观多功能评价结果, 运用 Spearman 秩相关性分析法 (公式 2) 计算不同

年份 184 个评价单元的乡村景观功能间秩相关系数，在此基础上分析多功能间的权衡-协同时间变化趋势，结果见表 3。

通过对青浦区 1980—2015 年 4 个时段 72 组（剔除 7 组没有通过显著性检验的数据）乡村景观功能间秩相关系数分析，该区乡村景观功能间权衡关系主导，表现为权衡关系为 34 组，协同关系为 31 组；但乡村景观间权衡-协同程度时间差异显著。

2.2.1 协同关系时间格局

研究期间青浦区乡村景观生产功能-生活功能始终保持协同关系，但协同差异变化较大，呈现先上升后下降的变化趋势。从 6 种分功能分析，研究期间农业生产功能-景观美学功能，经济发展功能-空间承载功能，景观美学功能-生态调节功能/环境维衡功能，生态调节功能-环境维衡功能 5 组功能间始终维持协同关系，但协同程度差异较大。农业生产功能-景观美学功能、景观美学功能-生态调节功能/环境维衡功能 3 组功能间协同关系呈现先降低后升高的时序变化。

农业生产功能的大小主要依托农业景观的数量和结构的变化导致的食物和经济作物供给价值的变化^[11]。1980—2007 年间青浦区人口总量增长 1.96 倍，农业景观

面积减少 11 294.62 hm²，在人口激增和农业景观面积减少的双重压力下，导致斑块集聚度下降 1.01，景观多样性指数下降 0.26，造成农业生产功能-景观美学功能间协同程度降低；而随着 2007—2015 年农业景观面积减少放缓，人口增加逐年降低和农业结构由粮食作物向经济作物转变，两者间协同程度升高。研究期间经济发展功能和空间承载功能间存在高协同关系。1980—2015 年该区 GDP 由 52.59 亿元增长至 827.40 亿元，城镇化率由 32.45% 提高至 79.67%，农业产业比重由 31.14% 下降至 1.14%，人口密度增长 8.52 倍。因此，经济发展功能的强拉动能力为空间承载功能的提升奠定了经济保障，而空间承载功能的强推动能力为经济发展功能的增长提供了物质基础^[8]；两者通过长期融合和良性互馈实现高协同。

景观美学功能与生态调节功能/环境维衡功能间存在先降后升的协同关系，主要原因为景观组成要素的多样性及景观格局的复杂性对景观美学功能的提升作用，以及对生态调节功能的水土保持能力和环境维衡功能的吸纳能力具有相互增益的协同效应^[12]。

生态调节功能与环境维衡功能在研究期间呈现高协同关系，主要原因为生态调节功能与环境维衡功能的功能生成机理具有较强的附着性，因此协同增益效应显著。

表 3 青浦区乡村景观多功能相关分析

Table 3 Multifunction correlation analysis of rural landscape in Qingpu district

乡村景观功能类型 Types of rural landscape functions	1980 年 Year of 1980			1995 年 Year of 1995			2007 年 Year of 2007			2015 年 Year of 2005		
	β 值	β value	P 值	β 值	β value	P 值	β 值	β value	P 值	β 值	β value	P 值
生产功能-生活功能 (PF-LF)	0.445**		0.000	0.412*		0.005	0.318**		0.000	0.327**		0.000
生产功能-生态功能 (PF-EF)	-0.351		0.311	-0.387**		0.000	-0.524**		0.000	-0.421*		0.016
生活功能-生态功能 (LF-EF)	-0.334*		0.005	-0.358		0.127	-0.403**		0.000	-0.384**		0.000
农业生产功能-经济发展功能 (APF-EDF)	-0.454**		0.000	-0.418**		0.000	-0.387**		0.000	-0.301**		0.000
农业生产功能-空间承载功能 (APF-SCF)	-0.432*		0.033	-0.454**		0.000	-0.495*		0.027	-0.387**		0.000
农业生产功能-景观美学功能 (APF-LAF)	0.751**		0.000	0.654*		0.012	0.412**		0.000	0.438*		0.009
农业生产功能-生态调节功能 (APF-ERF)	-0.214*		0.018	0.457**		0.000	0.321*		0.000	0.423*		0.000
农业生产功能-环境维衡功能 (APF-EMF)	-0.254*		0.038	0.416**		0.000	0.257*		0.041	0.357**		0.000
经济发展功能-空间承载功能 (EDF-SCF)	0.334**		0.000	0.415*		0.044	0.575*		0.017	0.689*		0.025
经济发展功能-景观美学功能 (EDF-LAF)	-0.247**		0.000	-0.459**		0.000	-0.584**		0.000	-0.545*		0.000
经济发展功能-生态调节功能 (EDF-ERF)	-0.452*		0.011	-0.579**		0.000	-0.614*		0.009	-0.482**		0.000
经济发展功能-环境维衡功能 (EDF-EMF)	-0.551*		0.042	-0.598**		0.000	-0.657*		0.037	-0.524*		0.026
空间承载功能-景观美学功能 (SCF-LAF)	-0.212*		0.024	-0.351		0.647	-0.421		0.557	0.129*		0.002
空间承载功能-生态调节功能 (SCF-ERF)	-0.443*		0.032	-0.472*		0.016	-0.553		0.954	-0.261**		0.000
空间承载功能-环境维衡功能 (SCF-EMF)	-0.159*		0.021	-0.311		0.584	-0.201*		0.008	-0.254		0.753
景观美学功能-生态调节功能 (LAF-ERF)	0.214*		0.011	0.158*		0.024	0.104**		0.000	0.242*		0.031
景观美学功能-环境维衡功能 (LAF-EMF)	0.334*		0.007	0.275*		0.017	0.202*		0.037	0.305**		0.000
生态调节功能-环境维衡功能 (ERF-EMF)	0.541*		0.042	0.598**		0.000	0.621*		0.016	0.647*		0.022

注：*，**分别表示置信度为 0.05 和 0.01。

Note: *, ** indicates a confidence of 0.05 and 0.01, respectively.

2.2.2 权衡关系时间格局

从“三生”功能分析，研究期间青浦区乡村景观生产功能-生态功能几乎维持着权衡关系，（除 1980 年和 1995 年）。从 6 种分功能分析，研究期间青浦区农业生产功能-经济发展功能/空间承载功能，经济发展功能-景观美学功能 3 组功能间始终存在权衡关系。

农业生产功能与经济发展功能/空间承载功能间存在先降后升的权衡关系，主要原因为经济发展功能的景观资源消耗性和空间承载功能的景观空间占用性对农业生产功能的产出性造成严重的削减作用^[36]，导致多功能间此消彼长的权衡。1980—2015 年间，青浦区三大产业比

重由 31.14：53.18：15.68，转变为 1.14：54.22：44.64；农业总产值减少了 30%，农业生产功能逐渐下降，经济发展功能逐年增长，导致两者的权衡。

经济发展功能与景观美学功能间存在先降后升的权衡关系，主要归于经济发展功能的负外部效应对乡村景观基质的撕裂和切割作用和景观多样性的同一化作用，导致两种功能间权衡^[36]。

2.2.3 权衡-协同关系转化时间格局

农业生产功能与生态调节功能、环境维衡功能主要表现为协同关系（除 1980 年），该结果与董鹏宇研究基本一致^[15]，客观上验证了本研究的可靠性。但该研

究结果与多数学者研究存在差异^[3,9-11]；主要原因为该区位于大都市上海市的特殊经济区位优势 and 成为生态涵养区的特殊规划定位,在强大的经济拉动和生态保护地限制下,农业生产功能退居次位,区域生产功能几乎可以摆脱农业产出的贡献,以高集约化、低肥农业和低污染工业的管理策略维持生态调节功能和环境维衡功能的协同。

经济发展功能与生态调节功能/环境维衡功能在研究期间呈现权衡关系,但权衡程度表现为先降后升的变化趋势;该趋势符合 EKC 曲线的阶段特征,1980—2007 年随着该区经济和人口的快速增长,景观资源消耗超出资源的再生产能力,环境污染和生态破坏加剧,3 种功能间权衡程度提升,而 2007—2015 年区域调整产业结构和相关土地管理政策(如:《关于青浦区集建区外建设用地减量化工作实施方案的通知》等)实施,导致 3 种功能间的权衡关系趋于缓和。

2.2.4 兼容关系时间格局

1980—2015 年青浦区空间承载功能-景观美学功能,空间承载功能-生态调节功能,空间承载功能-环境维衡功能间关系没有通过显著性检验,表现为兼容关系;但从 3 组功能间正负值的变化分析,符合“兼容-权衡-兼容-协同-兼容”的演变路径,与刘玉的研究成果一致^[36]。

2.3 乡村景观多功能权衡-协同关系空间格局

采用双变量的全局空间自相关分析,从青浦区

1980—2015 年乡村景观功能间的 Global Moran's *I* 统计量结果得到(表 4):区域乡村景观“三生”功能间权衡关系为 6 组(统计量为负),协同关系为 6 组(统计量为正);6 种分功能间权衡关系为 32 组,协同关系为 22 组,兼容关系为 6 组(没有通过 $\alpha=0.05$ 水平检验);表明空间上青浦区 1980-2015 年乡村景观功能间以权衡关系主导,但乡村景观间权衡-协同程度空间差异显著。

1) 权衡-协同关系空间差异显著。研究期间农业生产功能-经济发展功能/生态调节功能/环境维衡功能、经济发展功能-生态调节功能/环境维衡功能间始终处于权衡关系;经济发展功能-空间承载功能、景观美学功能-生态调节功能/环境维衡功能、生态调节功能-环境维衡功能间一直处于协同关系;景观美学功能-农业生产功能/经济发展功能、空间承载功能-生态调节功能/环境维衡功能间为权衡-协同关系转化。

2) 权衡-协同程度上空间异质性较高,且协同关系逐渐增强。研究期间农业生产功能-经济发展功能间权衡程度逐年降低;农业生产功能/经济发展功能-生态调节功能/环境维衡功能间权衡程度呈现先升高后降低的趋势;经济发展功能-空间承载功能、景观美学功能-生态调节功能/环境维衡功能、生态调节功能-环境维衡功能间协调程度逐年提升;景观美学功能-农业生活功能/经济发展功能、空间承载功能-生态调节功能/环境维衡功能间出现强协同向弱协同转化趋势。

表 4 青浦区乡村景观功能间全局空间自相关指数
Table 4 Global spatial autocorrelation index between rural landscape functions in Qingpu district

乡村景观功能类型 Types of rural landscape functions	1980 年 Year of 1980		1995 年 Year of 1995		2007 年 Year of 2007		2015 年 Year of 2005	
	<i>I</i> 值 <i>I</i> value	<i>Z</i> 值 <i>Z</i> value	<i>I</i> 值 <i>I</i> value	<i>Z</i> 值 <i>Z</i> value	<i>I</i> 值 <i>I</i> value	<i>Z</i> 值 <i>Z</i> value	<i>I</i> 值 <i>I</i> value	<i>Z</i> 值 <i>Z</i> value
生产功能-生活功能 (PF-LF)	0.335	6.247	0.317	5.341	0.215	8.651	0.244	9.632
生产功能-生态功能 (PF-EF)	0.158	1.994	-0.101	6.227	-0.292	5.551	-0.117	2.624
生活功能-生态功能 (LF-EF)	0.271	9.014	0.137	5.185	-0.125	5.689	-0.102	6.357
农业生产功能-经济发展功能 (APF-EDF)	-0.555	-6.257	-0.452	-5.554	-0.389	-4.576	-0.315	-3.681
农业生产功能-空间承载功能 (APF-SCF)	0.247	7.561	-0.335	-0.681	-0.458	-0.688	-0.548	-0.652
农业生产功能-景观美学功能 (APF-LAF)	0.352	7.885	-0.245	-6.335	-0.218	-4.541	0.141	3.335
农业生产功能-生态调节功能 (APF-ERF)	-0.141	9.936	-0.312	-8.551	-0.565	-8.164	-0.336	5.514
农业生产功能-环境维衡功能 (APF-EMF)	-0.037	2.654	-0.114	-6.654	-0.328	-5.514	-0.201	2.354
经济发展功能-空间承载功能 (EDF-SCF)	0.258	6.661	0.357	9.651	0.468	10.247	0.632	11.658
经济发展功能-景观美学功能 (EDF-LAF)	0.139	2.017	-0.142	-3.654	-0.368	-4.547	-0.242	-8.557
经济发展功能-生态调节功能 (EDF-ERF)	-0.256	-6.354	-0.318	-7.524	-0.545	-9.991	-0.421	-5.214
经济发展功能-环境维衡功能 (EDF-EMF)	-0.336	-3.652	-0.457	-4.441	-0.628	-6.694	-0.524	-7.123
空间承载功能-景观美学功能 (SCF-LAF)	-0.211	-0.751	-0.305	-5.711	-0.328	-0.125	-0.364	-1.624
空间承载功能-生态调节功能 (SCF-ERF)	0.185	2.571	-0.052	-5.624	-0.245	-7.554	-0.351	-6.687
空间承载功能-环境维衡功能 (SCF-EMF)	0.214	1.997	-0.102	-5.685	-0.229	-8.665	-0.368	-9.654
景观美学功能-生态调节功能 (LAF-ERF)	0.245	2.228	0.314	8.654	0.425	12.547	0.632	18.541
景观美学功能-环境维衡功能 (LAF-EMF)	0.335	5.634	0.412	8.667	0.495	5.665	0.598	10.247
生态调节功能-环境维衡功能 (ERF-EMF)	0.452	6.658	0.465	2.574	0.512	13.541	0.522	9.665

农业生产功能-空间承载功能、空间承载功能-景观美学功能间的 Global Moran's *I* 统计量仅在 1980 和 1995 年通过了显著性检验。因此,仅对剩余的 16 组功能进行局部空间自相关分析(图 2—4);鉴于篇幅原因,仅采用 1980 年和 2015 年的两期乡村景观功能间的局部空间关联图表征期间功能空间格局的变化趋势。

2.3.1 生产-生活-生态功能间权衡-协同关系空间格局

生产功能-生活功能 (PF-LF) 以协同关系主导,空

间上沿中轴线扩散。HH 和 LL 协同区主要集中于青中、青东和环淀山湖周边区域,且逐渐形成“徐泾镇-赵巷镇-盈浦街道-朱家角镇”为主线的中心轴线变化;HL 和 LH 权衡区分布于青东和北部区域。PF-LF 协同源于经济发展的正外部性(青东)、产业发展的集聚性(青中)和居住环境的舒适性(环淀山湖);PF-LF 权衡源于区域“人-地-业”的冲突产生的空间发展失衡。

生产功能-生态功能 (PF-EF) 以权衡关系主导,空

间上从中部向东部扩散。HH 和 LL 协同区呈条状集中青西和北部区域，数量呈现先减后增的变化；HL 和 LH 权衡区呈块状集中在青东区，且数量逐年增加。PF-EF 协同区虽然为农业景观基底，但良好的生态本底加上水网对

污染物的吸纳和稀释作用造成该区域成为高协同区；PF-EF 权衡区源于植被覆盖稀疏和工业污染物排放造成环境的自净能力差，加之位于人口密集区产生的污染物更弱化了 EF 进而产生权衡。

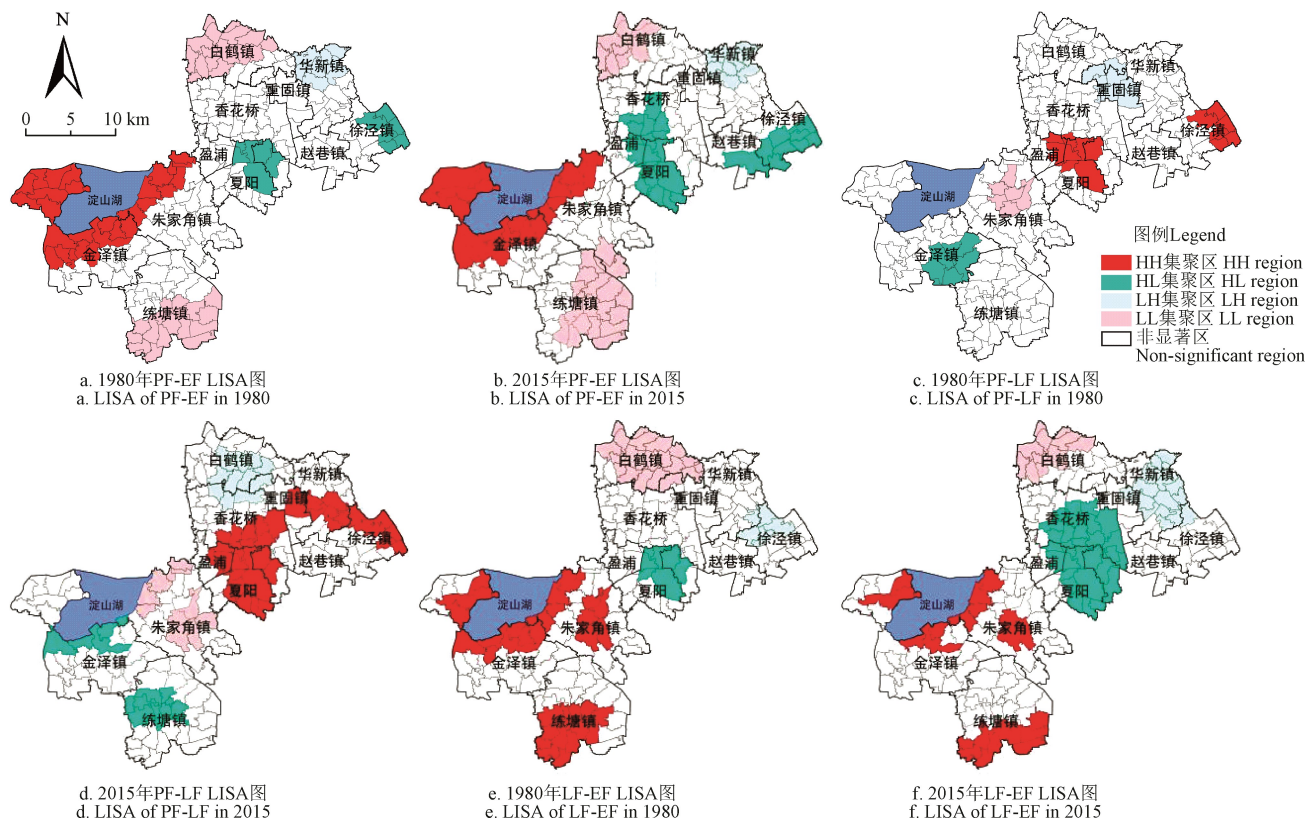


图 2 青浦区 1980 - 2015 年生产-生活-生态功能 LISA 图

Fig.2 Local indicator of spatial association among production-living-ecological functions in Qingpu district from the year 1980 - 2015

生活功能-生态功能 (LF-EF) 权衡-协同关系较为均衡，权衡关系由中部向东部扩散，协同关系由西部向北部和南部扩散。HH 和 LL 协同区主要集中于青东、北部和环淀山湖区域；HL 和 LH 权衡区分布于青东区域，且数量逐年增长。协同区域源于大范围的农业景观基底、高集聚的农业斑块、多种类的农业景观类型和辽阔的水域景观；而青东区域过多的人口承载和过高的需求水平导致区域 LF-EF 权衡。

2.3.2 6 种分功能间权衡-协同关系空间格局

农业生产功能-经济发展功能 (APF-EDF)：HL/LH 权衡区由纵轴线（徐泾镇-赵巷镇-夏阳街道-朱家角镇-练塘镇）向“+”字轴线（华新镇-重固镇-香花桥街道-盈浦街道-朱家角镇）转变，且数量呈现先增后减。HH/LL 协同源于二三产业发展缓慢，加之环湖肥沃的土质条件导致协同关系。HL/LH 权衡区源于城镇化由东向西和中心向南北的扩散和辐射作用造成的农业景观用地数量锐减和农业产值的弱化。

农业生产功能-景观美学功能 (APF-LAF)：HH/LL 协同区呈带状分布，且数量呈现先减后增的变化，主要源于沿湖周边水森林带密集（金泽镇），耕地地块集中和集约化程度高（练塘镇），远离城镇和生境连通状态较好（白鹤镇）等^[15]。HL/LH 权衡区呈块状集中在青

东，源于在城镇化的推动下产生的单一农业景观类型和景观斑块的破碎化和形状复杂化。

农业生产功能-生态调节功能 (APF-ERF)：协同区和权衡区呈现明显的东西差异，且权衡区的数量先增后减，协同区数量先减后增。青西区域的水土优势和植被高植被覆盖率加之环湖区域的严格的土地管控措施促进了两者的协同。东部区域景观斑块细碎，农业景观面积少和人为因素造成的土地退化形成权衡。

农业生产功能-环境维持功能 (APF-EMF)：协同区和权衡区呈现交叉分布，且在全区分散分布。协同区以环湖和沿水网分布，HH 协同逐年减少，LL 协同逐年增加；权衡区以镇中心分布，数量逐年增长。

经济发展功能-空间承载功能 (EDF-SCF)：两者关系格局呈现东部权衡和西部协同格局，且协同关系区呈增长趋势。受区域产业结构优化和 EDF-SCF 的相互作用和良性反馈影响，全区权衡区逐年减少，协同区递增。

经济发展功能-景观美学功能 (EDF-LAF)：两者关系格局呈东部权衡西部协同，且权衡区的数量递增。依靠农业产业发展的优越条件（金泽镇）、旅游产业推动（朱家角镇）和多种农业经营模式的推广（白鹤镇）形成 EDF-LAF 协同；在人口集聚和农业景观用地和类型被挤占和单一化的影响下，青东区域形成权衡区。

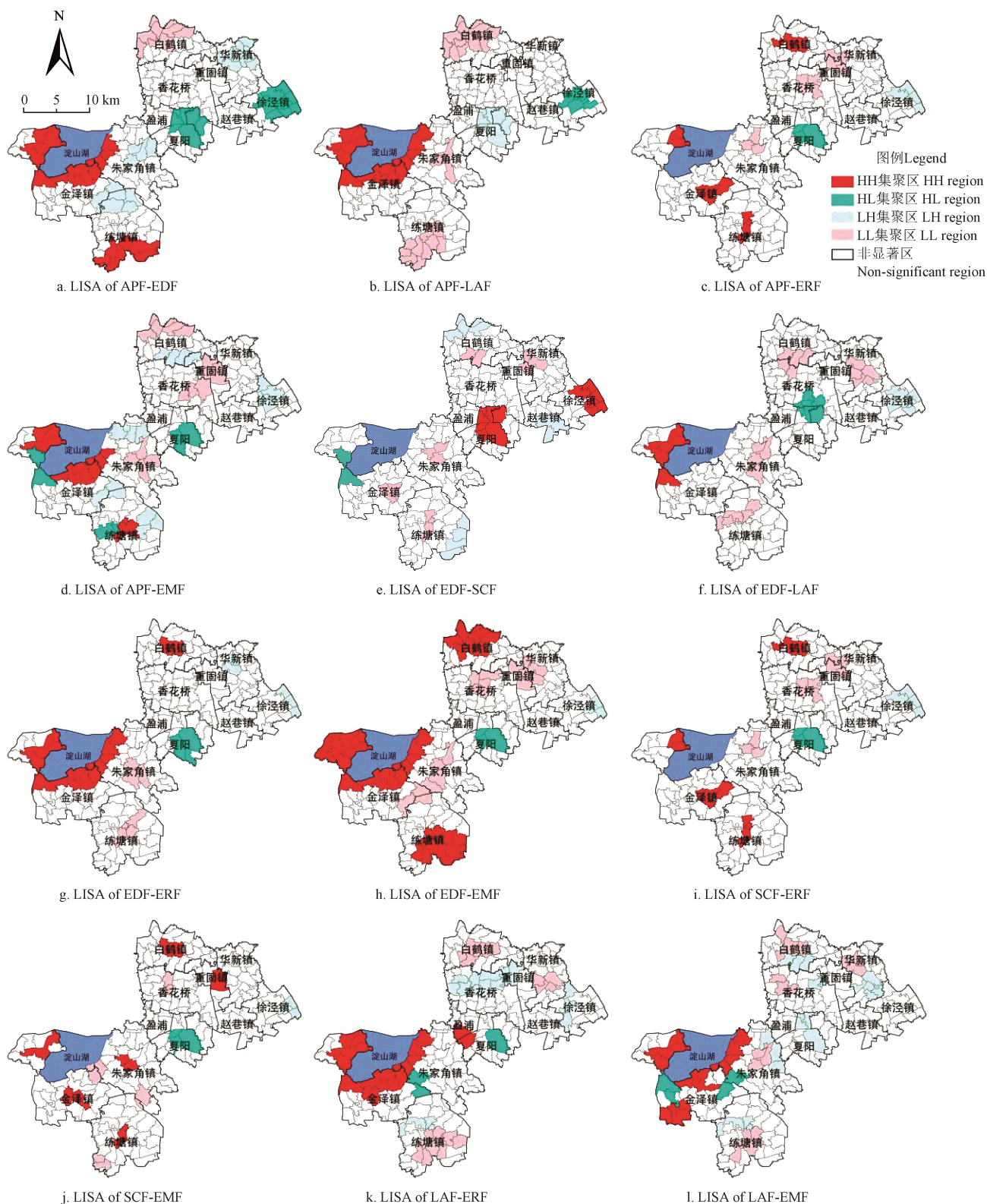


图3 青浦区1980年乡村景观多功能LISA图

Fig.3 Local indicator of spatial association among rural landscape functions in Qingpu district from the year 1980

经济发展功能-生态调节功能 (EDF-ERF): 在二三产业快速发展的青东区域, 随着植被覆盖率下降和水域环境受损造成生态环境的脆弱化, 产生 EDF-ERF 权衡区域, 且数量和范围逐年增长; 虽然受乡镇企业的发展和城镇化率提升的影响, 一定程度上降低了青西区域的生态调节功能, 但依赖于自然本底条件优越的特点, 仍存在较

多协调关系区 (如环湖区域)。

空间承载功能-环境维衡功能 (SCF-EMF): 权衡区与协同区呈环绕状分布于区域内, 且数量上均呈增加趋势。在人口和农业景观资源的双重影响下, 权衡区集中于镇域中心, 源于社会经济的发展, 加大了对周边农业景观资源的开发产生, 对于干扰较少的区域则形成协同关系区。

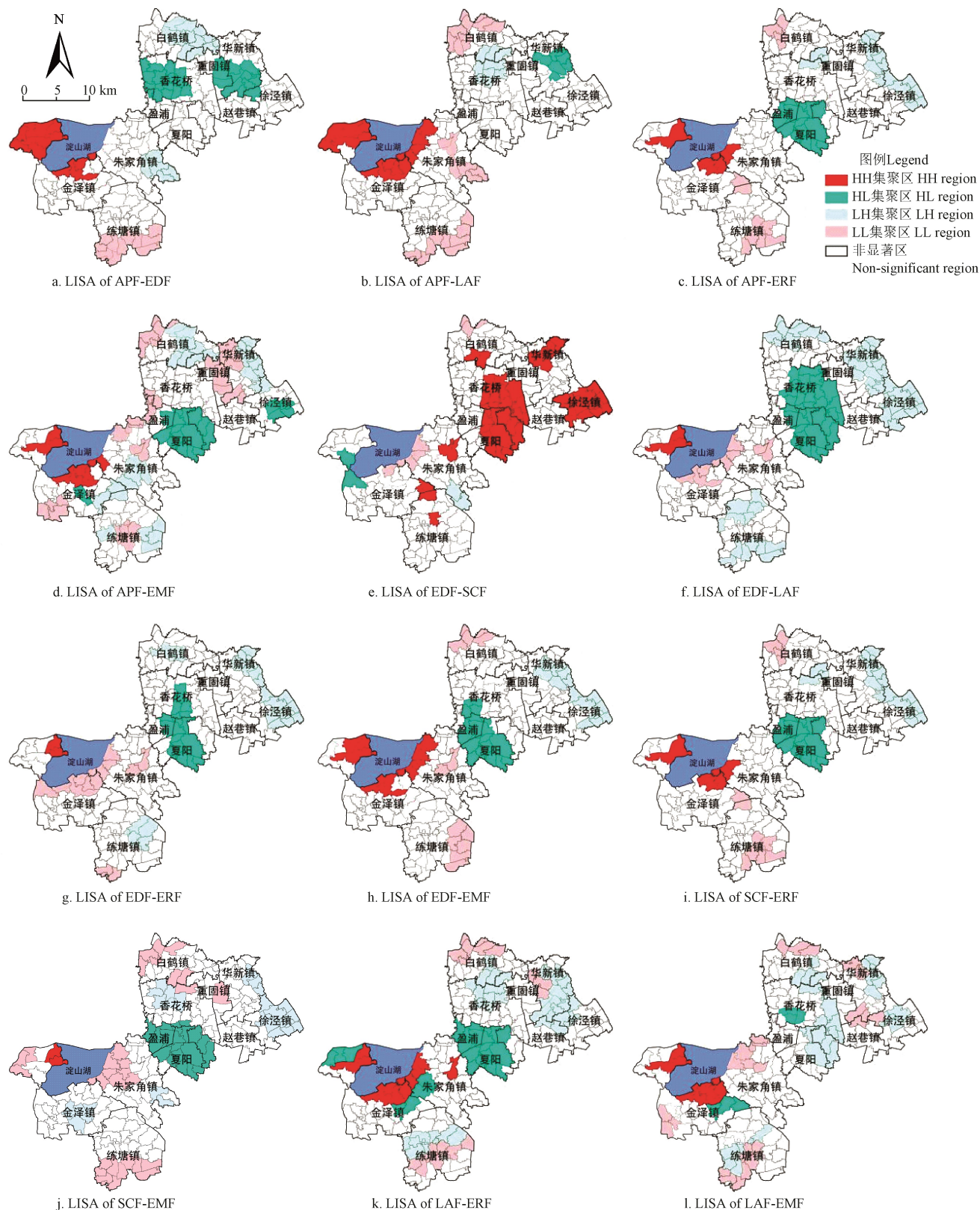


图 4 青浦区 2015 年乡村景观多功能 LISA 图

Fig.4 Local indicator of spatial association among rural landscape functions in Qingpu district from the year 2015

景观美学功能-生态调节功能/环境维衡功能 (LAF-ERF/EMF)：LAF-ERF 和 LAF-EMF 关系在空间分布上具有较高的相似性，权衡区集中在青东区域，协同区分布于青西区域，且权衡区数量先增后减，协同区先减后增。由于 3 种功能在成因机理上具有一定相似性

和因果关系，景观美学功能强的青西区域具有人口密度较小、农业产业相对发达、工业产业较少等增强了区域的环境维衡功能；也维持了区域农业景观面积大、斑块集聚和农业景观类型多样的特征，故一定程度上增强了生态调节功能。反之，在青东区域产生权衡区。

生态调节功能-环境维衡功能(ERF-EMF): 协同关系呈带状分布与环湖区域、练塘镇和白鹤镇; 权衡区集中在赵巷镇和重固镇。协同区源于景观生态资源的配置较好, 对环境污染的吸纳作用; 而权衡区源于工业园区的发展产生工业污染增加, 在日益减少的农业景观数量的影响下, 该区域的环境容量下降所致。

3 讨 论

3.1 基于乡村景观多功能权衡-协同关系的启示

1) 研究期间该区域 6 种乡村景观功能间权衡大于协同, 验证了“发展中国家土地分离(land sparing)比土地共享(land sharing)更适合的观点”^[10,37]; 即通过划分部分土地专用于生态系统保育和自然保护, 并采用高效集约的利用方式提高剩余土地单产和经济效益以实现区域发展和自然保护的双赢策略比通过对土地进行综合利用、不划分禁耕区, 采用较低小的土地生产方式在农业生产的同时实现生物多样性保护的策略^[38], 更加具有优势。该优势主要体现于现行的土地所有制下, 政府推行土地分离策略执行效率更高, 监督成本更小, 以限制性开发政策来处理多数依赖于土地的乡村景观功能间的博弈, 发掘景观的复合功能, 提高区域生态系统服务的供给。同时, 也验证了青浦区“一城两翼”(西部为生态涵养区、中部为中心城区、东部的经济发展区)的规划方案具有一定的科学性。2) 由经济发展功能与生态调节功能/环境维衡功能间的权衡关系可知, 乡村景观的经济发展功能与生态功能为一组矛盾体; 青浦区研究期间经济快速发展是以牺牲生态环境为代价实现的。因此, 应强化政府调节机制的补充和矫正作用, 着眼于实现自然环境的可持续发展和社会经济系统福利的最大化, 实现两种功能的整体收益和长远效益最大化。3) 由农业生产功能和景观美学功能间的协同关系可知, 集中连片的景观连通效应在提升景观美学功能的同时, 实现了农业生产功能的提升。因此, 在土地整理中应尽量实现农业景观的集中连片, 合理归并小块景观, 实现规模化的生产经营带来的农业产业集聚效应和规模效益^[3]。4) 由景观美学功能与生态调节功能/环境维衡功能间的协同关系可知, 生物多样性和集聚性对神态环境的优化具有重要的作用。因此, 应以提升物种多样性的保护措施, 辅助各具特色的开发模式, 形成多样化的农业景观风貌、种植特色和文化风格, 满足不同生活价值取向的多样化区域特色, 实现环境和美学共生。5) 由经济发展功能与空间承载功能间的协同关系, 以及与景观美学功能间的权衡关系可知, 经济发展的资源拉动和促进的正外部效应和利用冲突和切割的负外部效应, 对不同功能间关系显著。因此, 应推动生产要素在空间的有序流动, 确保人口、资本的空间分布与自然地理环境本底特征相耦合, 强化经济的正外部效应, 削弱负外部效应, 推动各功能随着社会需求结构的变化且有序演替。6) 由空间承载功能与生态调节功能/环境维衡功能间在时空上存在的差异性, 即两组功能在时间上呈现兼容关系, 在空间呈现权衡关系。该结果说明人类干扰对生态功能产生负向影响, 但

由于地域空间的禀赋差异, 该负向影响并不一定产生功能间的权衡, 关键在于如何将人类干扰产生的影响限定在自然承载阈值之内。因此, 应加强对生态节点、廊道的划定和保护, 构建系统完整的生态安全格局, 控制人类活动的强度和广度, 确保将干扰控制在生态稳定性的阈值、安全最低标准范围和资源环境承载力之内。7) 由农业生产功能与生态调节功能/环境维衡功能间在时空上存在的差异性, 即两组功能在时间上呈现协同关系, 在空间呈现权衡关系。该结果与多数学者将农业生产功能代替经济发展功能以此评判得到的结构不同。一方面由于青浦区的农业生产功能不是第一位的功能形态, 以农业生产功能代替经济发展功能无法准确刻画各功能间的关系, 体现了功能权衡-协同关系分析的区域特殊性; 另一方面验证了单一采用功能间时间上的相关分析, 而不进一步对功能间的空间关系分析具有局限性, 无法全面表征权衡-协同关系的整体性。

3.2 不确定性分析

研究在 Spearman 秩相关性分析法和双变量局部空间自相关的支持下, 对青浦区 1980—2015 年乡村景观多功能间的权衡-协同时空关系进行研究。相比之前仅关注功能间时间特征的研究而言, 将空间分析纳入多功能权衡-协同研究能更全面清晰地表征功能间的关系。然而, 在区域尺度的地理生态过程空间化表达中, 存在以下不确定性。

1) 静态时间节点选择问题。研究基于任国平等^[37]的研究成果, 对时间节点选择在 1980 年、1995 年、2007 年和 2015 年 4 个年份。但由于功能值的差异性高度依赖时间节点, 因此, 可能造成乡村景观多功能时空关系分析存在不确定。2) 乡村景观功能多功能构成问题。研究从生产-生活-生态角度选择 6 种功能代表乡村景观多功能; 但乡村景观多功能是由多种功能构成的功能簇, 如社会支持功能、文化传承功能等并没有包含在研究中。3) 指标组合表征功能的完整性问题。由于功能直接刻画的难度, 通过指标表征功能具有优势^[26]; 但采用较少指标难以准确全面表征功能, 指标的精选和表征的精准性是结果准确性的基础。4) 主观需求定量表征难度的问题。人类需求具有层次性和多样性造成需求表征的困难。研究基于景观斑块整体性、支付意愿和吸引力等因素, 结合前人的研究^[3,11]从需求量、需求水平等角度刻画景观美学功能的方法忽视了乡村景观美学功能的禀赋特性, 即景观奇特性、色彩性等因素。

4 结 论

研究以上海市西郊青浦区为例, 从生产-生态-生态角度构建表征乡村景观多功能的评价指标体系, 利用 Spearman 秩相关性分析法和双变量局部空间自相关模型分析了该区 1980—2015 年多功能间权衡-协同关系的时空变化, 得到以下结论:

1) 农业生产功能不再是青浦区第一性的功能形态, 经济发展功能成为该区主导功能。快速城镇化过程中, 都市城郊乡村地域在自然资源禀赋、社会经济条件等内

外部因素共同作用下其乡村景观功能发生变化, 导致农业生产功能无法取代经济发展功能成为乡村景观生产功能的主导; 研究将两种功能分离, 对准确表征都市郊区乡村景观的生产功能具有科学性。

2) 青浦区 1980—2015 年乡村景观多功能间权衡-协同关系时空差异显著。研究尝试将权衡-协同的生态学研究方法引入乡村景观多功能间的关系分析, 得到较为显著的结果。生产功能-生活功能以协同关系主导, 空间上沿中轴线扩散; 生产功能-生态功能以权衡关系主导, 空间上从中部向东部扩散; 生活功能-生态功能权衡-协同关系较为均衡, 权衡关系由中部向东部扩散, 协同关系由西部向北部和南部扩散。农业生产功能与经济发展功能、经济发展功能与生态调节功能/环境维衡功能为该区不可回避的矛盾, 该区经济发展是以牺牲生态环境为代价实现的; 经济发展功能与景观美学功能间权衡关系显著, 且两者关系格局呈东部权衡西部协同, 且权衡区的数量递增; 经济发展功能与空间承载功能间关系格局呈现东部权衡和西部协同格局, 且协同关系区呈增长趋势; 景观美学功能与生态调节功能/环境维衡功能间权衡区集中在青东区域, 协同区分布于青西区域, 且权衡区数量先增后减, 协同区先减后增。

3) 乡村景观多功能单一的时间维度相关性分析, 无法全面准确的表征多功能间关系变化, 时空关系格局存在差异性。对时间维度上的乡村景观多功能值进行 Spearman 秩相关性分析得到的结果掩盖了空间维度上区域景观资源禀赋差异导致的资源环境承载力差异, 无法全面反映多功能间的权衡-协同关系。研究在 Spearman 秩相关性分析法和双变量局部空间自相关的支持下, 对青浦区 1980—2015 年乡村景观多功能间的权衡-协同时空关系进行研究得到空间承载功能与生态调节功能/环境维衡功能间时间上呈现兼容关系和空间呈现权衡关系, 以及农业生产功能与生态调节功能/环境维衡功能间时间上呈现协同关系和空间呈现权衡关系的结果, 较好的验证了采用时空模型结合分析乡村景观多功能间权衡-协同关系的科学性。

[参 考 文 献]

- [1] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等. 景观生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] Willemsen L, Hein L, Vanmensvoort E F, et al. Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region[J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1): 62—73.
- [3] 彭建, 吕慧玲, 刘焱序, 等. 国内外多功能景观研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(4): 465—476.
Peng Jian, Lü Huiling, Liu Yanxu, et al. International research progress and perspectives on multifunctional landscape[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(4): 465—476. (in Chinese with English abstract)
- [4] Firbank L, Bradbury R B, McCracken D I, et al. Delivering multiple ecosystem services from Enclosed Farmland in the UK[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 166(66): 65—75.
- [5] Yang G, Ge Y, Xue H, et al. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2015, 136: 110—121.
- [6] Qiu J X, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(29): 12149—12154.
- [7] Peng Jian, Liu Zhicong, Liu Yanxu, et al. Multifunctionality assessment of urban agriculture in Beijing City, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 537: 343—351.
- [8] 王成, 彭清, 唐宁, 等. 2005—2015 年耕地多功能时空演变及其协同与权衡研究: 以重庆市沙坪坝区为例[J]. *地理科学*, 2018, 38(4): 590—599.
Wang Cheng, Peng Qing, Tang Ning, et al. Spatio-temporal evolution and the synergy and trade-off relationship of cultivated land multi-function in 2005—2015: A case of Shapingba District, Chongqing city[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(4): 590—599. (in Chinese with English abstract)
- [9] 潘竟虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 280—289.
Pan Jinghu, Li Zhen. Analysis on trade-offs and synergies of ecosystem services in arid inland river basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)* 2017, 33(17): 280—289. (in Chinese with English abstract)
- [10] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 868—879.
Qian Caiyun, Gong Jie, Zhang Jinxi, et al. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 868—879. (in Chinese with English abstract)
- [11] 朱庆莹, 胡伟艳, 赵志尚. 耕地多功能权衡与协同时空格局的动态分析: 以湖北省为例[J]. *经济地理*, 2018, 38(7): 143—153.
Zhu Qingying, Hu Weiyan, Zhao Zhishang. Dynamic analysis on spatial-temporal pattern of trade-offs and synergies of multifunctional cultivated land: Evidence from Hubei province[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(7): 143—153. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(13): 4609—4624.
Liu Hai, Wu Jing, Chen Xiaoling. Study on spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships of ecosystem services in the Danjiangkou water source area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 4609—4624. (in Chinese with English abstract)
- [13] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem function, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002,

- 41(3): 393—408.
- [14] 蔡运龙. 中国农村转型与耕地保护机制[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 1—6.
Cai Yunlong. The mechanisms of cropland conservation in Chinese rural transformation[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(1): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [15] 董鹏宇, 赵华甫. 耕地多功能权衡与协同关系研究: 以上海市青浦区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 368—375.
Dong Pengyu, Zhao Huafu. Study on trade-off and synergy relationship of cultivated land multifunction: A case of Qingpu District, Shanghai[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2): 368—375. (in Chinese with English abstract)
- [16] Sandhu H S, Wratten S D, Cullen R, et al. The future of farming: The value of ecosystem services in conventional and organic arable land: An experimental approach[J]. *Ecological Economics*, 2008, 64(4): 835—848.
- [17] 卓志清, 兴安, 孙忠祥, 等. 东北旱作区农业生态系统协同发展与权衡分析[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 892—902.
Zhuo Zhiqing, Xing An, Sun Zhongxiang, et al. Synergies and trade-offs of agro-ecosystem in dry-farming areas in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6): 892—902. (in Chinese with English abstract)
- [18] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571—1581.
Wu Wenhuan, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(12): 1571—1581. (in Chinese with English abstract)
- [19] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男. 关中盆地生态服务权衡与协同时空差异[J]. 资源科学, 2016, 38(11): 2127—2136.
Sun Yijie, Ren Zhiyuan, Zhao Shengnan. Spatial-temporal difference analysis of ecosystem service trade-off and synergy in the Guanzhong Basin of China[J]. *Resources Science*, 2016, 38(11): 2127—2136. (in Chinese with English abstract)
- [20] Mina M, Bugmann H, Cordonnier T, et al. Future ecosystem services from European mountain forests under climate change[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(2): 389—401.
- [21] Gonzalez-Redin J, Luque S, Poggio L, et al. Spatial Bayesian belief networks as a planning decision tool for mapping ecosystem services trade-offs on forested landscapes[J]. *Environmental Research*, 2016, 144: 15—26.
- [22] 李晶, 李红艳, 张良. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3053—3062.
Li Jing, Li Hongyan, Zhang Liang. Ecosystem service trade-offs in the Guanzhong-Tianshui economic region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 3053—3062. (in Chinese with English abstract)
- [23] 樊杰. 中国主体功能区划方案[J]. 地理学报, 2015, 70(2): 186—201.
Fan Jie. Draft of major function oriented zoning of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186—201. (in Chinese with English abstract)
- [24] Millennium E A. *Ecosystems and Human Well-being Synthesis*[M]. Washington DC: Island Press, 2005: 559—567.
- [25] 汤茜, 丁圣彦. 多功能景观研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3151—3157.
Tang Qian, Ding Shenyan. A review of multifunctional landscape[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3151—3157. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李广东, 方创琳. 城市生态-生产-生活空间功能定量识别与分析[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 49—64.
Li Guangdong, Fang Chuanglin. Quantitative function identification and analysis of urban ecological production living spaces[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 49—64. (in Chinese with English abstract)
- [27] 任国平, 刘黎明, 孙锦, 等. 基于 GRA 和 TOPSIS 耦合模型的都市郊区乡村景观多功能定位[J]. 地理研究, 2018, 37(2): 263—280.
Ren Guoping, Liu Liming, Sun Jin, et al. Multifunction orientation of rural landscape in metropolitan suburbs based on GRA and TOPSIS models[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(2): 263—280. (in Chinese with English abstract)
- [28] 薛德升, 曾献君. 中国人口城镇化质量评价及省际差异分析[J]. 地理学报, 2016, 71(2): 194—204.
Xue Desheng, Zeng Xianjun. Evaluation of China's urbanization quality and analysis of its spatial pattern transformation based on the modern life index[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 194—204. (in Chinese with English abstract)
- [29] Spearman C. The proof and measurement of association between two things[J]. *The American Journal of Psychology*, 1904, 15(1): 72—101.
- [30] 彭建, 刘志聪, 刘焱序, 等. 京津冀地区县域耕地景观多功能性评价[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2274—2285.
Peng Jian, Liu Zhicong, Liu Yanxu, et al. Assessment of farmland landscape multifunctionality at county level in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2274—2285. (in Chinese with English abstract)
- [31] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93—115.
- [32] 朱俊林, 蔡崇法, 杨波, 等. 基于星座图法的湖北省农业功能分区[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(6): 666—671.
Zhu Junlin, Cai Chongfa, Yang Bo. Study on agricultural functions zoning of Hubei Province based on constellation clustering analysis[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(6): 666—671. (in Chinese with English abstract)
- [33] Johst K D, Watzold F. An ecological-economic modeling procedure to design compensation payments for the efficient spatio-temporal allocation of species protection measures[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(1): 37—49.
- [34] Hair J F, Black W C, Babin B J, et al. *Multivariate Data Analysis*[M]. London: Prentice Hall, 2008.
- [35] 唐林楠, 潘瑜春, 刘玉, 等. 北京市乡村地域多功能时空

- 分异研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2016, 52(2): 303—312.
- Tang Linnan, Pan Yuchun, Liu Yu, et al. Temporal characteristic and coupling of urban-rural transformation and rural regional multifunction in Beijing: from 1978 to 2012[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2016, 52(2): 303—312. (in Chinese with English abstract)
- [36] 刘玉, 刘彦随, 郭丽英. 乡村地域多功能的内涵及其政策启示[J]. 人文地理, 2011, 26(6): 103—106.
- Liu Yu, Liu Yansui, Guo Liying. Connotations of rural regional multifunction and its policy implications in China[J]. *Human Geography*, 2011, 26(6): 103—106. (in Chinese with English abstract)
- [37] 冯喆, 许学工, 周建, 等. 基于生态系统服务视角的“土地分离与共享框架”解析[J]. 地理科学进展, 2016, 35(9): 1100—1108.
- Feng Zhe, Xu Xuegong, Zhou Jian, et al. Land sparing versus sharing framework from ecosystem service perspective[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(9): 1100—1108. (in Chinese with English abstract)
- [38] Green R E, Cornell S J, Scharlemann J P W, et al. Farming and the fate of wild nature[J]. *Science*, 2005, 307: 550—555.

Evolution on trade-offs and synergy of multifunction of rural landscape in metropolitan suburbs

Ren Guoping¹, Liu Liming^{2*}, Li Hongqing³, Yuan Chengcheng²

(1. College of Urban Management, Hunan City University, Yiyang 413000, China; 2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The rural landscape function has obvious temporal and spatial heterogeneity, and exploring the relationship between landscape functions has become the focus of landscape ecology research. Aiming at the scientific representation of landscape function and the quantification of landscape multifunctional relationship, taking Qingpu district of Shanghai as an example, 6 kinds of landscape functions were constructed according to the functional framework of “production, life and ecology”. Based on the data from 1980 to 2015, the variation characteristics of multi-functional trade-off and synergy relationships of rural landscape in 184 administrative villages in this area were studied by using the method of Spearman rank correlation coefficient analysis and bivariate spatial autocorrelation. The following results are obtained: 1) the agricultural production function of urban suburbs cannot replace the function of economic development. The economic development function of Qingpu district has become the leading functional. 2) The spatial and temporal differences of the multi-functional trade-off and synergy relationships of rural landscape in Qingpu district from 1980 to 2015 were significant. The production function- living function is led by the cooperative relationship, the space was spread along the central axis, the production function- ecological function was dominated by the trade-off relationship, the space was spread from the middle to the east, and the living function-ecological function trade-off the cooperative relationship was more balanced, The trade-off relationship was spread from the middle to the east and the synergy was spread from the west to the north and south. The contradiction between agricultural production function - economic development function (EDF), economic development function- ecological regulation function (ERF)/ environmental maintain function (EMF) was the inevitable contradiction in this area, and the economic development of this area was realized at the expense of ecological environment. There was a significant trade-off relationship between the EDF and landscape aesthetic function (LAF), and the pattern of the relationship between the two was the synergy of the eastern trade-off west, and the number of weighing areas was increasing. The relationship between EDF and spatial bearing function presents the pattern of eastern trade-off and western coordination, and the cooperative relationship area showed an increasing trend. The trade-off area between LAF-ERF/EMF was concentrated in Qingdong area, and the cooperative area was distributed in Qingxi area, and the number of weighing area increases at first and then decreases. The synergy area decreases at first and then increases. 3) The analysis method of temporal and spatial combination can accurately and comprehensively reflect the evolution characteristics of multi-functional trade-offs & synergies relationships of multifunctional rural landscape. The correlation analysis of multi-function and single time dimension of rural landscape cannot fully and accurately represent the change of multi-functional relationship, and there are differences in the pattern of space-time relationship. The relationship between spatial carrying function and ecological regulation function/environmental balance function was found to be compatible in time and tradeoff in space. And the results of time synergy and spatial tradeoff between agricultural production function and ecological regulation function/environmental balance function verify the scientific nature of using space-time model to analyze the multi-function tradeoff-synergy relationship of rural landscape.

Keywords: rural areas; landscape; multifunction; evolution; relationship of trade-off and synergy; Qingpu district