

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^{*1}

朱庆莹 胡伟艳 赵志尚

(华中农业大学公共管理学院, 中国湖北武汉 430070)

【摘要】: 以湖北省为例, 利用 2000、2005、2010 和 2013 年的社会经济、土壤和气象等数据, 运用 Spearman 秩相关和空间自相关方法分析揭示耕地多功能权衡与协同时空格局及变化规律。结果显示: ①物质产出、净固碳、景观美学功能一直处于增加态势, 其中物质产出功能增长较快, 景观美学功能增长较慢; 水源涵养功能变化平稳, 劳动力承载功能不断减弱。②耕地功能之间主要表现为协同关系; 随时间推移, 部分功能之间由协同转为权衡, 并且协同程度逐渐减弱而权衡程度逐步增强。③空间尺度上, 相同耕地功能的协同类型多以“组团”形式出现, 聚集性较强, 权衡类型无明显聚集区域, 大多零星分布在协同类型的周围, 水源涵养和景观美学功能的权衡与协同格局比较稳定, 剩余三种功能均发生不同程度变化; 不同耕地功能之间的协同类型既有明显的“组团区”, 又有零星分布区, 权衡类型也有类似特点, 其中, 净固碳与水源涵养、物质产出与景观美学、物质产出与水源涵养、景观美学与水源涵养的权衡与协同格局随时间推移较稳定, 其余功能之间权衡与协同格局发生不同程度变化。研究认为, 在改善耕地本底质量, 合理引导劳动力流向和发展观光农业的同时, 应加强县域内各部门之间以及县际之间的合作, 科学划定耕地保护与利用区; 共同促进耕地多功能的协同利用, 增强耕地多功能的总体效益。

【关键词】: 耕地多功能; 权衡与协同; 生态功能; 景观美学功能; Spearman 秩相关; 空间自相关; 湖北省

【中图分类号】: F301.21 **【文献标志码】**: A **【文章编号】**: 1000 - 8462 (2018) 07 - 0143 - 11

DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2018.07.018

耕地多功能是指耕地系统提供满足人类生存与发展所需产品与服务的能力^[1], 包括提供粮食、蔬菜、油料等生产功能; 调节大气、保持土壤等生态功能; 保障农民生活和就业、维护国家粮食安全等社会功能和提供耕作风光、开敞空间景观等文化功能^[2]。由于耕地功能类型的多样性、空间分布的不均衡性和人类利用的选择性, 某类耕地功能的供给会因其他类型耕地功能利用的增加而减少, 也会出现两种或多种耕地功能同时增强或减弱的情形, 即各类耕地功能之间存在此消彼长的权衡与相互促进或抑制的协同关系^[3-9]。2017 年中央一号文件提出增强农业的生产环境治理和可持续发展能力, 2018 年中央一号文件指出, 挖掘乡村多种功能和价值, 建设一批功能多样的休闲观光园区, 注重协同性、关联性, 支持乡村全面振兴。耕地保护与利用决

¹ 收稿时间: 2017 - 12 - 29; 修回时间: 2018 - 02 - 06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71673105、71303087); 教育部人文社会科学基金项目 (14JZD009); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2662016PY116)

作者简介: 朱庆莹 (1992—), 男, 江西吉安人, 硕士研究生。主要研究方向为土地资源经济与土地利用规划。

E-mail: 1257019206@qq.com。

***通讯作者**: 胡伟艳 (1973—), 女, 湖南安化人, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为土地资源经济、土地政策分析、乡村发展管理; Email: hwymake@163.com。

策中考考虑多功能之间的权衡与协同规律有利于规避负向效应，促进各项功能协调发展，对深化耕地可持续利用与管理以及振兴乡村具有重要意义^[10-11]。权衡与协同包含时间、空间、主体和可逆等的权衡与协同^[3, 5-6, 10]，到目前为止，有少数学者开展了耕地多功能权衡与协同单个时点的静态研究^[7, 9]，基于多年数据的时空格局动态研究还鲜有报道。

本文以湖北省为例，在耕地功能的生产、生态、社会和文化四类一级分类体系下^[12]，选取目前受学者关注较多的物质产出、水源涵养与净固碳、劳动力承载和景观美学 5 种典型的耕地功能进行研究^[8-9, 13-15]。首先，在明晰耕地功能内涵的基础上，构建相应的指标体系及模型评价历年耕地的各项功能；其次，运用 Spearman 秩相关方法分析耕地功能权衡与协同的时间格局及其动态变化规律；最后，考虑单变量和双变量的空间关系，运用空间自相关方法分析耕地功能权衡与协同的空间格局及其动态变化规律。本文的研究结果可为科学的政策引导与规划管制，促进耕地多功能从权衡走向协同，增强耕地多功能总体效益提供依据。

1 数据来源与处理

1.1 数据来源

本文采用的数据主要包括：①水田与旱地面积、农作物播种面积、农业总产值、农林牧渔产值、各类农作物产值、种植业产值指数、农林牧渔业从业人员数量以及各类化肥投入量来源于 2001、2006、2011、2014 年《湖北省农村统计年鉴》。②各县（区、市）的人口数据、GDP 数据来源于各市（地、州）历年统计年鉴和《湖北省统计年鉴》。③气象数据来源于中国气象数据服务共享网（<http://data.cma.cn>）。④土壤深度与孔隙率数据来源于中山大学中国土壤数据库湖北省内 1 km×1 km 土壤剖面深度及土壤孔隙率。⑤县城中心距最近地级市辖区中心直线距离数据来源于百度地图的测距数据。⑥耕地斑块聚集度、耕地景观多样性数据通过 Fragstats4.2 软件计算得到。有一些数据由相关参考文献获得，具体见下文。

1.2 数据处理

数据处理主要包括：第一，对于部分区县个别年份个别数据的缺失，本文以历年数据为基础，采用移动平均、趋势外推等方法进行数据重建；第二，农业产值以 1978 年为基期进行平减；第三，农业劳动力人数采用农业总产值占农林牧渔业总产值比重与农林牧渔业从业总人数乘积求得；第四，由于统计年鉴中各区县数据的统计范围有些大于现有行政区范围，本文按照统计年鉴数据所对应的行政区进行合并处理，其中随县并入曾都区、东宝区与掇刀区合并为荆门市辖区、沙市区和荆州区并入荆州市辖区、茅箭区与张湾区合并为十堰市辖区、汉南区并入武汉市辖区、襄城区与樊城区并入襄阳市辖区、孝南区并入孝感市辖区。鉴于神农架林区耕地面积占区域总面积比重过小，本文未对其进行研究。

2 研究方法

2.1 耕地各项功能评估

物质产出功能：物质产出功能是耕地最基本的功能，也是耕地的核心功能^[9]。目前，多数研究通常用农作物的产出规模来衡量物质产出功能^[9]，但这种标准无法形成统一的度量尺度，易低估经济作物价值。鉴于湖北省经济作物播种面积比重较大，只考虑各类作物产量会造成评价结果失真。本文参考《湖北农村统计年鉴》对农业总产值的定义，采用单位耕地面积的农业总产值衡量物质产出功能，将所有年度农业总产值平减到 1978 年为基期进行比较。计算如下：

$$\text{物质产出功能} = \frac{\text{1978年基期农业产值}}{\text{耕地面积}} \quad (1)$$

净固碳功能：耕地的固碳功能是其生态功能的重要组成部分，应从自然和人为调控因素驱动下的净固碳功能来认识，主要取决于生长周期内农作物的碳吸收量与碳排放量^[13]。碳固定为农作物生长全生命周期中的碳吸收量，参考陈丽、谢光辉、田云等的研究成果^[13, 16-17]，测算方法如式（2）所示：

$$C_1 = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n c_i \cdot Y_i \cdot (1 - r_i) / HI_i \quad (2)$$

式中： C_1 为农作物碳吸收总量； C_i 为第 i 类农作物的碳吸收量； n 为农作物种类数； c_i 为第 i 类农作物光合作用合成单位有机质所需吸收的碳； Y_i 为作物的经济产量； r_i 为第 i 类农作物经济产品的含水量； HI_i 为作物经济系数。

耕地碳排放主要包括三方面：一是农用物资投入造成的碳排放，二是农作物根系生长对土壤表层破坏导致的 N_2O 排放，三是水稻生长过程在浸泡环境下 CH_4 的排放。其中，化肥在农业生产碳排放中所占比重最大^[18-19]，本文采用折纯的化肥施用量代表农用物资投入来计算。化肥、 N_2O 和 CH_4 的碳排放系数参考田云、邓明君等的研究成果^[17, 20]；同时，根据 IPCC 第四次评估报告将 CH_4 、 N_2O 统一置换成标准 C，转换标准为：1t CH_4 和 N_2O 排放分别相当于 6.818t C 和 81.273t C 所产生的温室效应。三类碳的排放量总和即为碳排放量 C_2 ^[21]；净固碳功能计算公式为：

$$\text{净固碳功能} = \frac{\text{碳固定量 } C_1 - \text{碳释放量 } C_2}{\text{耕地面积}} \quad (3)$$

水源涵养功能：水源涵养功能是指耕地固持水量的能力，是耕地生态功能的又一重要组成部分^[22]。目前测算水源涵养功能的方法主要有土壤层蓄水能力法、综合蓄水能力法、水量平衡法等。结合数据的可获取性，本文采用综合蓄水能力法来测算，主要考虑农作物冠层降水截留量与土壤层蓄水量。参考秦嘉励的研究^[23]，计算公式如下：

$$Q_1 = \sum (S_j \cdot m \cdot \alpha_j), Q_2 = \sum (S_i \cdot H_i \cdot \lambda_i) \quad (4)$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_2$$

式中： Q_1 为农作物冠层降雨截留量； Q_2 为土壤层储水量； Q_3 为总储水量； S_j 为第 j 种农作物的种植面积； m 为该区的年降雨量，取前后三年的均值； α_j 为各类农作物的降雨截留率，参考马波的研究进行取值^[24]； S_i 为各区县耕地面积； H_i 为单位耕地土层厚度 (m)； λ_i 为单位耕地的非毛管孔隙率，参考俞建荣的研究结果，按非毛管孔隙率占总孔隙率的比例 16% 进行计算^[25]，最终结果在秦嘉励等使用的数据范围内^[23]，可认为合理；土层厚度以土壤剖面深度代替，取均值 0.6 m。

劳动力承载功能：劳动力承载功能是指耕地为农民提供生计，容纳农业劳动力的能力，是缓冲劳动力就业风险的重要屏障^[15]。本文以单位耕地劳动力投入强度来衡量劳动力承载功能的强弱，计算公式如下：

$$\text{劳动力承载功能} = \text{农业劳动力人数} / \text{耕地面积} \quad (5)$$

景观美学功能：耕地景观美学功能指耕地作为一种自然和人文的综合景观可以给人类美的享受，是耕地景观文化功能的重要组成部分^[26]，其强弱受到供需的影响。从供给方面讲，连片的耕地与园地、水体等形成的高功能景观组合更具美学价值。从

需求方面讲，耕地景观对较强支付意愿与欣赏能力的城镇居民更具吸引力，相邻近城市的人口规模越大，收入水平越高，对耕地景观需求度越大。本文从上述两个维度构建评价体系来综合表征景观美学功能，运用层次分析法确定的指标权重见表 1。

表 1 耕地景观美学功能评价指标体系

评价准则	评价指标	权重	评价指标
需求侧	需求量	0.149	县域周边最近地级以上城市人口总量
	需求水平	0.141	县域周边最近地级以上城市人口总量
	辐射范围强弱	0.200	县域中心距最近地级市辖区中心直线距离
	斑块聚集度	0.269	耕地景观斑块的团聚程度
供给侧	景观多样性指数	0.241	区域不同景观类型的多样性程度

注：判断矩阵一致性比例：0.054；参考朱俊林等的研究^[27]，辐射距离 50 km 以上为 0，0~50 km 内进行反向归一化。

2.2 评价指标的标准化处理

由于耕地功能评价指标体系中各指标的量纲不同，采用极差标准化方法对指标进行无量纲化处理：

$$Y_{ij} = \begin{cases} (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}), & \text{正向指标} \\ (X_{jmax} - X_{ij}) / (X_{jmax} - X_{jmin}), & \text{负向指标} \end{cases} \quad (6)$$

式中： X_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的指标评价价值； X_{jmax} 、 X_{jmin} 分别为第 j 个指标的最大值和最小值； Y_{ij} 为标准化后的指标值。

2.3 相关分析法

相关分析的方法能让权衡与协同结果更加直观，已被广泛用于生态系统服务权衡与协同的研究^[7]，主要包括统计学家 K. Pearson 提出的积矩相关系数 $r_p(X_i, Y_i)$ ^[28] 和心理学家 Spearman 提出的斯皮尔曼秩次相关系数 $r_s(X_i, Y_i)$ ^[29]，前者主要度量两个随机变量之间线性关系的强弱，后者属于非参数检验，适用范围更广。本文采用 Spearman 秩次相关系数分析耕地功能之间的权衡与协同关系，相关系数为正表示两种耕地功能之间存在协同关系，为负表示存在权衡关系，不显著表示存在独立关系。具体数学原理为：令 $\{(X_i, Y_i)\}$ 表示 n 对独立同分布的数据对，其母体为某二元连续分布。对 x_i 进行从小到大排列，可以得到一组新的数据对 $X_{(1)} < X_{(2)} < \dots < X_{(n)}$ ，其中 $X_{(k)}$ 为关于 x 的序统计量，与之相对应的 Y_i 称之为 X_i 的伴随。假设 x_j 位于序列 $\{(X_i)\}$ 中第 k 个位置，则定义数字 k 为 x_j 的秩次，记为 P_j 。类似地可以定义 y_j 的秩次并记为 Q_j 。令 \bar{X} 、 \bar{Y} 分别代表 X_i 、 Y_i 的算数平均值，则 $r_s(X_i, Y_i)$ 的计算公式如下：

$$r_s(X_i, Y_i) = 1 - \frac{6 \sum_1^n (P_i - Q_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (7)$$

2.4 空间自相关分析

空间自相关分析是一系列空间数据分析方法和技术的集合^[30]，已经广泛运用于生态系统服务^[31]、农产品生产功能^[32]等空间相关性的研究，本文将其运用于探索耕地多功能的空间集聚特征，分析耕地多功能权衡与协同空间格局及变化规律。采用 Global Moran's I 指数探索研究区耕地功能权衡与协同的整体状况。采用 Local Moran's I 指数探索局部区域耕地功能的聚集，其中，“HH”类型区为耕地功能高值空间关联性大的区域，表示相邻空间单元为耕地功能的高值协同区；“LL”类型区为耕地功能低值空间关联性大的区域，表示相邻空间单元为耕地功能低值协同区；“LH”与“HL”类型区为耕地功能高、低值空间关联性大的区域，为相应的低—高与高一低权衡区；不显著区则为独立关系。Global Moran's I 指数和 Local Moran's I 指数计算公式如下：

$$GMI = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (8)$$

$$LMI_i = \frac{\frac{X_i - \bar{X}}{m_1} \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})}{\sum_{j=1, j \neq i}^n (X_j - \bar{X})^2 / n}$$

式中：GMI 和 LMI_i 分别代表 Global Moran's I 指数和 Local Moran's I 指数； X_i 代表第 i 个地区的各项耕地功能值； n 为研究区县域个数； W_{ij} 为权重矩阵，空间数据的处理要求空间权重频率符合正态分布，否则会降低数据的估计精度^[33]，主要有 Rook、Queen、Bishop 三类邻接原则，其中 Rook 邻接关系的空间邻接性频率直方图基本符合正态分布特征，故本文以 Rook 邻接原则确定空间权重。当区域 i 、 j 相邻时， $W_{ij}=1$ ；当区域 i 、 j 不相邻时， $W_{ij}=0$ ；Moran's I 值一般在 $-1 \sim 1$ 之间，小于 0 为负相关，等于 0 为不相关，大于 0 为正相关。通常采用 Z 检验法对 Moran's I 值进行统计检验。

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{Var(I)}} \quad (9)$$

式中： $Z(I)$ 、 $E(I)$ 分别为 Moran's I 的 Z 法检验值和数学期望，如果 $Z(I)$ 大于正态分布函数在 0.05 水平下的临界值 1.96，说明县域之间存在显著的空间相关性。

在单变量自相关的基础上，Anselin 提出了双变量的局域空间自相关模型^[34]，定义如下：

$$I_i^{KI} = \frac{X_i^K - \bar{X}_K}{\sigma^K} \sum_{j=1}^n \left[W_{ij} \frac{X_j^I - \bar{X}^I}{\sigma^I} \right] \quad (10)$$

式中： I_i^{KI} 表示县域 i 的双变量局域空间自相关系数； X_i^K 表示县域 i 第 K 项耕地功能值； X_j^I 表示县域 j 第 I 项功能指数的观测值； \bar{X}_K, \bar{X}^I 分别表示第 K 项和第 I 项耕地功能的平均值； σ^K, σ^I 分别表示第 K 项和第 I 项耕地功能值的方差，其他符号含义与式（8）相同。

3 结果分析

3.1 耕地多功能的评价结果

基于前文的评估方法，湖北省各区县历年各项耕地功能的评价结果平均值见表 2。

表 2 湖北省耕地多功能的评价结果

年份	净固碳功 (NCF) (t/hm ²)	物质产出功 能 (MPF) (万元/hm ²)	景观美学功 能 (LAF) (得分)	水源涵养 功能 (WCF) (m ³ /hm ²)	劳动力承载 功能 (LCF) (人/hm ²)
2000	3.107	0.708	0.434	845.756	1.784
2005	2.898	1.087	0.45	847.278	1.773
2010	3.524	1.799	0.466	865.462	1.365
2013	3.228	1.958	0.467	854.788	1.276

从表 2 看，2000—2013 年的 14 年间，湖北省耕地各项功能呈现不同的变化趋势。净固碳功能呈现表 2 出“下降—上升—下降”趋势，但 2013 年固碳量相比 2000 与 2005 年有所增加，表明耕地实际的固碳能力在不断强化；物质产出功能呈现稳定的增加态势，年均增加 5.47%；景观美学功能不断增强，因受供需双面影响，增速较慢；水源涵养功能依赖于气候因素和土壤性质等的变化，在较短的时间尺度内波动较小，无明显的变化规律，2010 年降雨量较其他年份充足，其值达到最大；劳动力承载功能则由于城市化进程中大量耕地不断被非农化而逐步减弱。

3.2 耕地多功能权衡与协同的时间格局及其变化

在耕地多功能评价的基础上，利用 Spearman 秩相关性分析方法测算历年耕地各类功能之间的 Spearman 秩相关系数，分析

各类功能之间的权衡与协同及其变化情况，相关系数见表3。

表3 湖北省耕地各类功能之间的 Spearman 秩相关系数

类别	2000	2005	2010	2013
物质产出—净固碳 (MPF 与 NCF)	0.550* (0.000)	0.423* (0.000)	0.348* (0.000)	0.258* (0.020)
物质产出—景观美学 (MPF 与 LAF)	0.562* (0.000)	0.512* (0.000)	0.482* (0.000)	0.409* (0.000)
物质产出—水源涵养 (MPF 与 WCF)	0.594* (0.000)	0.460* (0.000)	0.286* (0.000)	0.230* (0.039)
物质产出—劳动力承载 (MPF 与 LCF)	0.479* (0.000)	0.326* (0.000)	0.312* (0.000)	0.394* (0.000)
净固碳—景观美学 (NCF 与 LAF)	0.268* (0.000)	0.259* (0.019)	0.171 (0.126)	0.230* (0.039)
净固碳—水源涵养 (NCF 与 WCF)	0.592* (0.015)	0.530* (0.000)	0.331* (0.000)	0.415* (0.000)
净固碳—劳动力承载 (NCF 与 LCF)	0.286* (0.010)	-0.136 (0.142)	-0.326* (0.000)	-0.314* (0.000)
景观美学—水源涵养 (LAF 与 WCF)	0.385* (0.000)	0.393* (0.000)	0.335* (0.000)	0.470* (0.000)
景观美学—劳动力承载 (LAF 与 LCF)	0.185 (0.098)	-0.025 (0.826)	-0.070 (0.536)	-0.156 (0.164)
水源涵养—劳动力承载 (WCF 与 LCF)	0.444* (0.000)	-0.060 (0.595)	-0.146 (0.193)	-0.147 (0.190)

注：*、**表示置信度分别为 0.05、0.01。

从表3看，整体上，耕地功能之间主要表现为协同关系；随着时间推移，功能之间的协同关系在减弱，权衡关系在增强。各类耕地功能之间权衡与协同及其变化存在一定差异，可归纳为以下几类情况：

物质产出与净固碳、景观美学、水源涵养之间始终是协同关系，但程度不断减弱。物质产出功能大，耕地利用强度高，农作物有机质的积累多，对应的净固碳能力强，两者为协同关系；两者相关系数由2000年的0.550减弱为2013年的0.258，可能是由于耕地利用的化肥使用强度大，耕地碳排放的增长率逐渐超过碳固定的增长率所致^[9]。景观美学功能的强弱与对耕地景观的改造效果有关，景观组合偏向于种植瓜果种植园、花卉种植区等美学价值较高的景观，因此，在耕地景观美学功能增强的同时物质产出功能也较强；可能由于种植结构和城市人口规模等因素的变化，协同程度不断降低。物质产出功能与水源涵养功能与耕地本底质量密切相关，土壤肥沃且土体较厚的耕地对映的产出功能大，蓄水能力强；两者协同程度的减弱则主要是由于人工辅能的大量投入降低了耕地质量对产出的束缚能力。

物质产出与劳动力承载、净固碳与景观美学、净固碳与水源涵养以及景观美学与水源涵之间的协同程度在2000—2010年间是减弱的，2010—2013年间又有所增强。就物质产出与劳动力承载功能而言，劳动力投入强度直接影响物质产出量的大小，两者互为协同；随时间推移，前期劳动力的大量投入逐渐转变为后期农药化肥的大量投入，协同程度有所下降；近年来，国家重

视农业生态环境，对农药、化肥等限制较严，使得协同程度又有所上升。就净固碳与景观美学功能而言，两者都与耕地本底质量有关，本底质量越好，对应的净固碳和景观美学功能越强；协同程度的变化与居民对景观美学功能的需求、耕地质量的变化等有关。就净固碳与水源涵养而言，耕地的本底质量越好，农作物固碳能力与耕地综合蓄水能力越强；2010年以前，农用物资的大量投入降低了耕地的净固碳效应，因此两者的协同程度不断下降，近年来耕地投入行为的改善使得协同程度有所增加。水源涵养功能与景观美学功能之间表现为较为稳定的协同关系，2013年协同程度有所增强；两者之间的协同关系及变化与耕地本地质量、居民需求的变化和农户耕地利用行为等的变化密切相关。

劳动力承载与净固碳、水源涵养、景观美学功能之间的关系在2000—2013年间由协同转为权衡，并且权衡程度随时间不断增强。劳动力承载与净固碳在2000年时存在较弱的协同作用，2000年之后两者转变为权衡关系，并且在2010和2013年通过了显著性检验。可能是由于2000年时劳动力转移较少，耕地产出大，固碳能力强，两者呈现协同关系；随时间推移，鄂中平原地区劳动力大量流向东、西山地和丘陵地区，使得两者逐步表现为权衡关系并逐渐加剧。而劳动力承载与水源涵养、景观美学在2000年时为协同关系；2000年后为权衡关系，但没有通过显著性检验。

3.3 耕地多功能权衡与协同的空间格局及其变化

3.3.1 相同耕地功能

为明晰研究区相同耕地功能权衡与协同的空间格局及变化情况，进行单变量的全局自相关分析，得到单一功能的Global Moran's I 指数见表4。

表4 研究区相同耕地功能的全局自相关指数

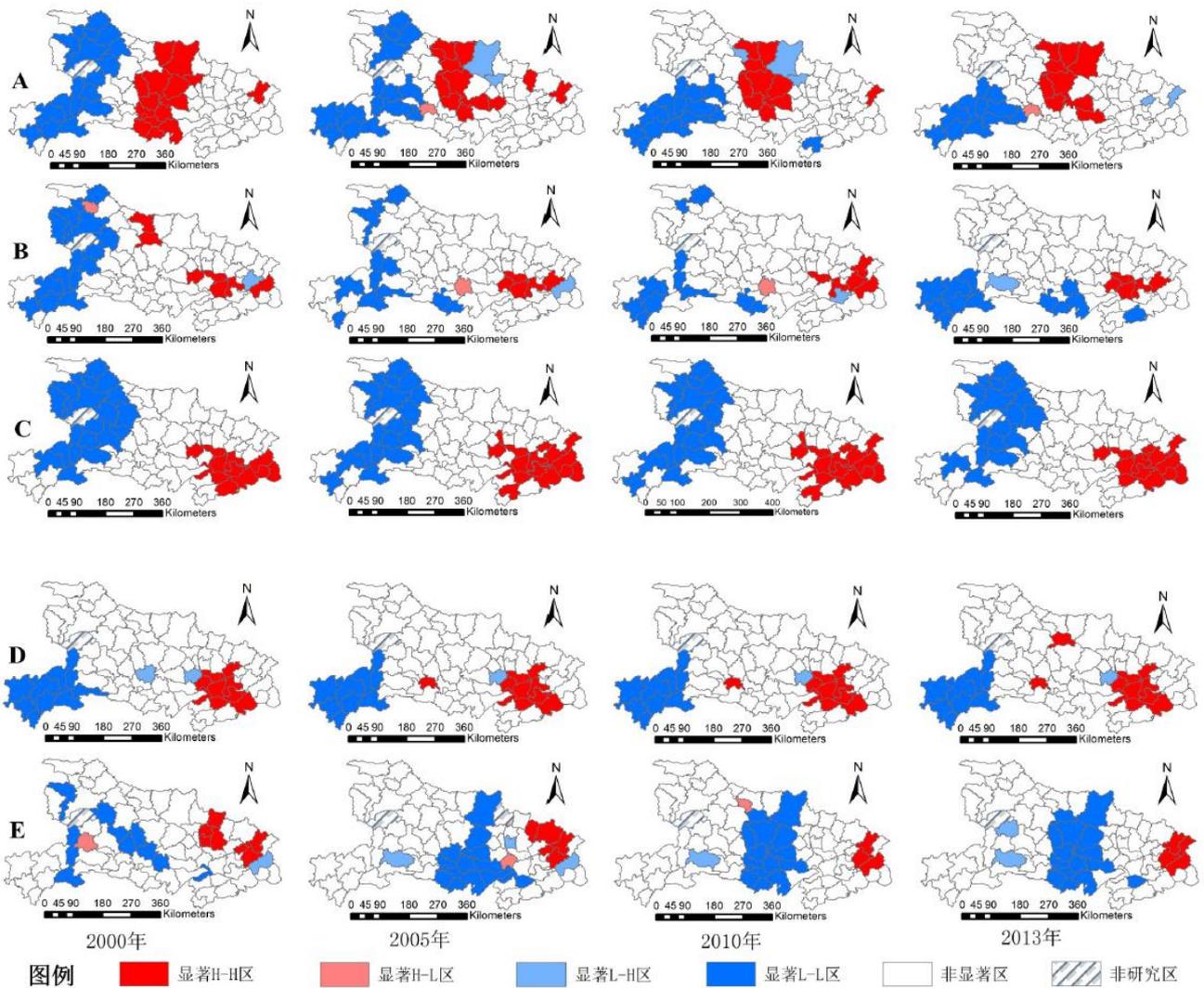
年份	净固碳功能 (NCF)	物质产出功能 (MPF)	水源涵养功能 (WCF)	景观美学功能 (LAF)	劳动力承载功能 (LCF)
2000	0.525 (7.176)	0.394 (5.295)	0.733 (10.036)	0.489 (6.757)	0.240 (3.415)
2005	0.488 (6.718)	0.224 (3.235)	0.700 (9.408)	0.496 (6.993)	0.284 (3.941)
2010	0.472 (6.403)	0.206 (3.064)	0.750 (10.036)	0.500 (6.698)	0.289 (4.073)
2013	0.374 (5.301)	0.252 (3.602)	0.726 (9.763)	0.518 (7.172)	0.276 (4.038)

注：括号内数值为 $\alpha = 0.05$ 水平下对应的 Z 值。

从表4看，空间上，研究区各类耕地功能的Global Moran's I 值都为正，且都通过了水平 $\alpha = 0.05$ 下的检验，表明各类耕地功能在研究区内呈显著的协同作用，但协同程度及其变化存在显著差异。水源涵养功能的协同程度最高，其次是净固碳与景观美学功能，再次是物质产出功能，最后是劳动力承载功能。从协同程度的变化来看，整体上，物质产出功能和净固碳功能的Global Moran's I 值在2000—2013年间是下降的，说明两者各自的协同程度逐渐减弱；水源涵养功能和景观美学功能的Global Moran's I 值起伏较小，分别在0.7和0.5左右浮动，表明各自的协同程度较为稳定；劳动力承载功能Global Moran's I 值总体有所增加，表明协同程度有增强趋势。

为进一步明晰相同耕地功能权衡与协同具体的空间格局及其变化情况，本文接下来进行局部空间自相关分析，获得相同耕地功能的局部空间关联图（图1），反映相同耕地功能“HH”或“LL”协同，“HL”或“LH”权衡或独立关系的空间格局及变化。

整体看，各类耕地功能权衡与协同的整体数量特征类似，即非显著区数量最多，其次为HH、LL 协同区，最少为HL 和 LH 权衡区，但各类型数量变化和空间格局及变化存在差异。



注:A净固碳;B物质产出;C水源涵养;D景观美学;E 劳动力承载。

图1 相同耕地功能局部空间关联图

Fig.1 Local Spatial Correlation Map of Same Cultivated Land Function

从图 1A 看，净固碳功能权衡与协同的空间格局及各类型数量随时间有一定程度变化。HH 协同区主要分布于鄂中的枣阳—钟祥—荆门一带，数量逐渐减少；LL 协同区主要分布于鄂西地区并逐渐缩减至鄂西南地区；HL 和 LH 权衡区分别零星分布于枝江市和曾都区、安陆市、襄阳市辖区等区域。实际中，鄂中地区属平原地带，耕地自然条件好，固碳功能较强；鄂西地区耕地坡度大，水土流失与耕地荒漠化严重，耕地综合质量低，固碳功能较弱。随时间推移，HH 和 LL 协同区收缩以及 HL 和 LH 型权衡区的零星出现可能与农业生产方式改变和农户耕地认知程度的提高等因素有关。

从图 1B 看，物质产出功能权衡与协同空间格局及各类型数量随时间变化较明显。HH 协同区主要分布在武汉、鄂州及黄石市辖区一带；LL 协同区主要分布在鄂西地区，随时间有向鄂西南和鄂中南转移的趋势；LH 和 HL 权衡区分别无规律分布于浠水和大冶以及潜江和十堰市辖区等地区。实际中，武汉、鄂州等地区为都市农业区，经蔬菜作物需求量大，物质产出功能较强；鄂西

地区耕地自然条件差，农业生产率低，物质产出功能较弱。HH 和 LL 协同区数量的变化以及 HL 和 LH 型权衡区零星出现可能与农业政策和农户耕地利用行为等因素有关。

从图 1C 看，水源涵养功能权衡与协同空间格局及各类型数量较稳定。HH 协同区主要分布鄂东地区，LL 协同区主要分布在鄂西地区。实际中，鄂东武汉—大冶—阳新一带降雨丰富，耕地的土体较厚，通气性好，农作物截留量较高，水源涵养功能较强。鄂西山区耕地坡度较大，蓄水能力不强；加上降雨量较少，因此水源涵养功能普遍较弱。

从图 1D 看，景观美学功能权衡与协同的空间格局及各类型数量变化都较稳定。HH 协同区主要分布在阳新县—大冶市—武汉市一带；LL 协同区主要是在鄂西南地区；LH 权衡区主要是汉川市和沙洋县。实际中，阳新县—大冶市—武汉市一带经济发展较好，城市居民对耕地景观美学功能需求旺盛，且该地带农地景观资源丰富，已形成休闲赏花产业链条，景观效益逐步凸显；鄂西南地区经济落后，人口密度小且交通等市场条件差，景观功能较弱；汉川市离市辖区较近，但它是农作区，景观功能不强，与周围区域形成权衡。

表 5 研究区不同耕地功能的全局自相关指数

类别	2000 年	2005 年	2010 年	2013 年
净固碳与物质产出 (NCF 与 MPF)	0.428 (7.485)	0.161 (2.898)	0.091 (1.611)	-0.025 (7.391)
净固碳与水源涵养 (NCF 与 WCF)	0.452 (7.391)	0.377 (6.306)	0.228 (4.152)	0.2333 (3.990)
净固碳与景观美学 (NCF 与 LAF)	0.266 (4.787)	0.190 (3.476)	0.188 (3.395)	0.207 (3.727)
净固碳与劳动力承载 (NCF 与 LCF)	0.155 (2.912)	-0.083 (-1.546)	-0.163 (-2.838)	-0.118 (-2.204)
物质产出与景观美学 (MPF 与 LAF)	0.359 (5.641)	0.310 (5.164)	0.252 (4.229)	0.280 (4.483)
物质产出与水源涵养 (MPF 与 WCF)	0.493 (7.679)	0.364 (6.588)	0.274 (4.856)	0.176 (3.143)
物质产出与劳动力承载 (MPF 与 LCF)	0.200 (3.323)	0.032 (0.704)	0.025 (0.496)	0.073 (1.327)
景观美学与水源涵养 (LAF 与 WCF)	0.401 (6.527)	0.357 (6.061)	0.328 (5.770)	0.418 (7.053)
景观美学与劳动力承载 (LAF 与 LCF)	0.149 (2.740)	-0.074 (-1.322)	-0.139 (-2.628)	-0.108 (2.033)
水源涵养与劳动力承载 (WCF 与 LCF)	0.277 (5.100)	-0.026 (-0.435)	-0.085 (-1.490)	0.007 (0.103)

注：括号内数值为 $\alpha = 0.05$ 水平下对应的 Z 值。

从图 1E 看，劳动力承载权衡与协同的空间格局及各类型数量在 2000—2005 年间变化明显，后期较为稳定。HH 协同区主要分布于麻城和黄冈周边几个区县，有逐步东移的趋势；LL 协同区 2005 年前数量较少且分布零散，2005 年后大量增加并由江汉平原向北扩展；HL 与 LH 权衡区零散分布在秭归和长阳等区域，无明显规律。实际中，黄冈市周边几个区县是茶叶主产区，农村劳动力数量较大；鄂中地区城镇化的发展使得农业劳动力大量转移；HL 与 LH 权衡区则可能由于地方政府的特殊政策引起的。

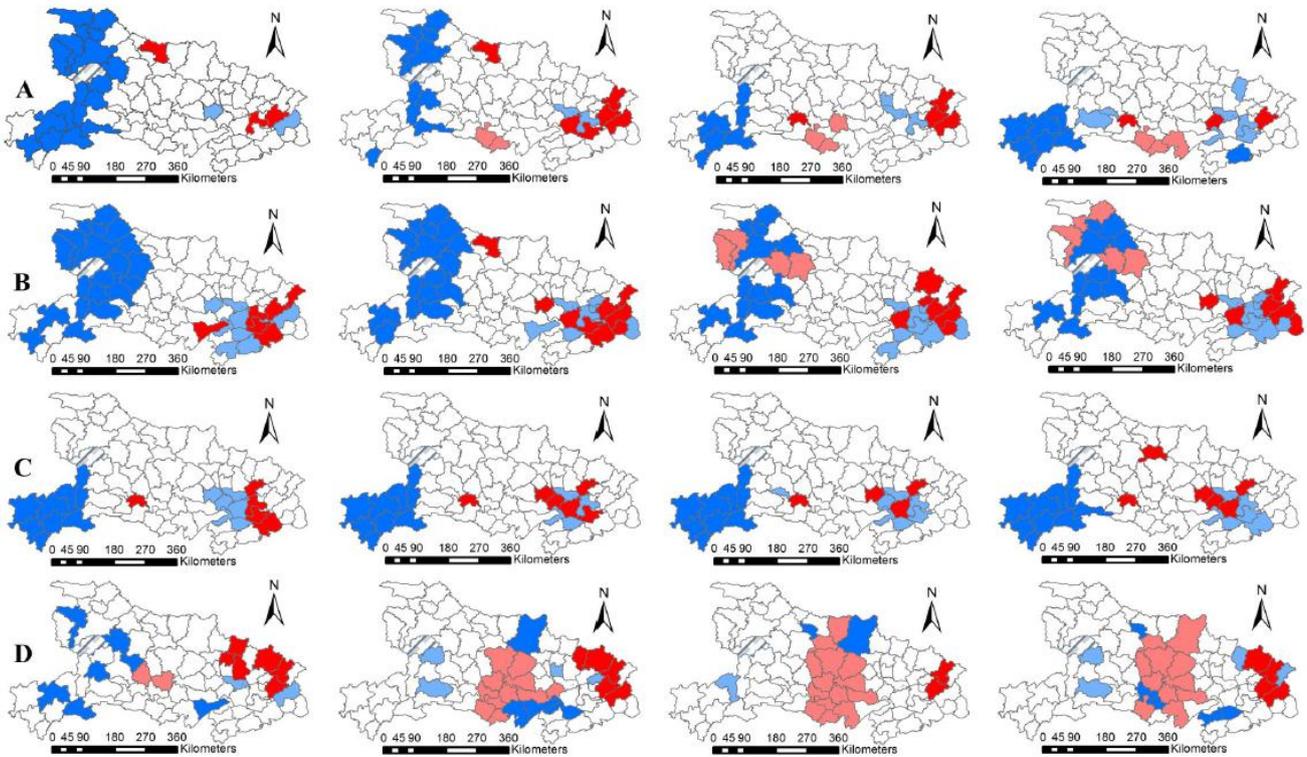
3.3.2 不同耕地功能

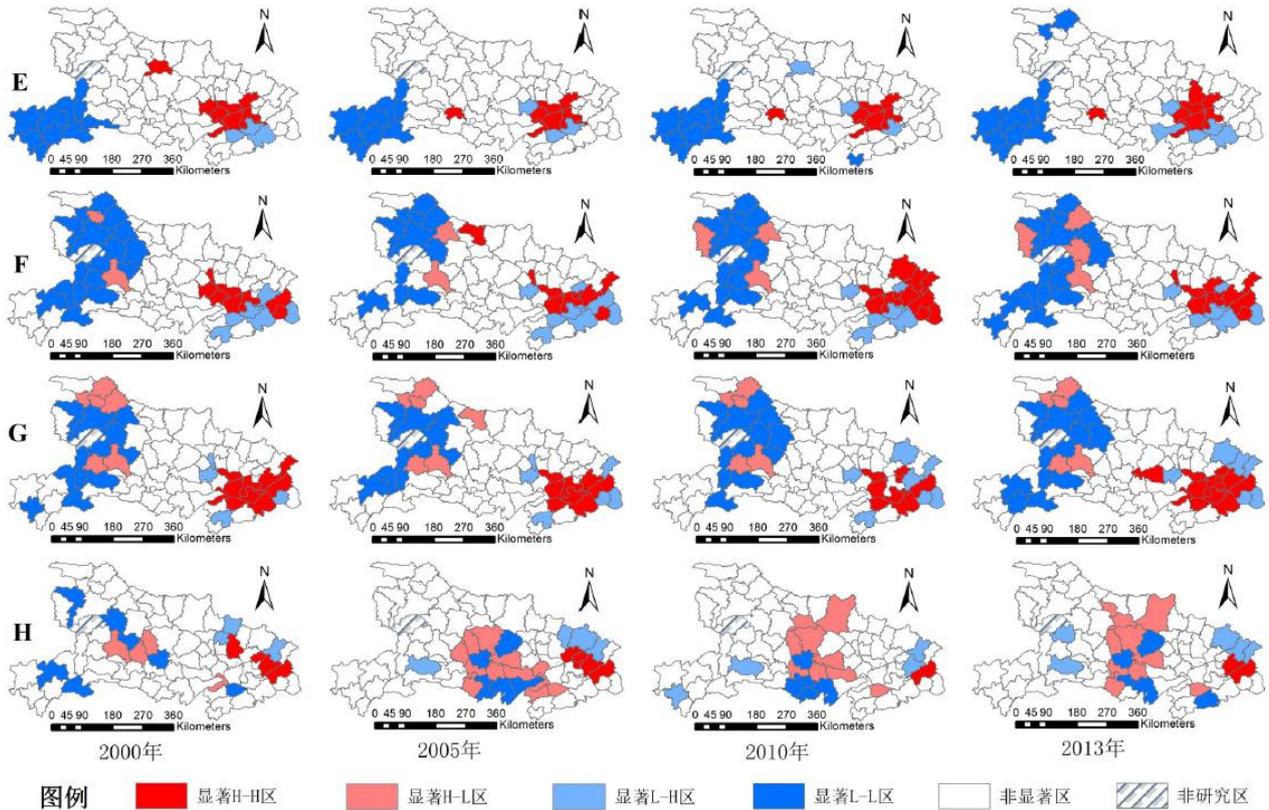
为探索研究区不同耕地功能之间权衡与协同格局及其变化情况，本文进行双变量的全局自相关分析，获得功能之间的全局

自相关指数见表 5。

从表 5 看，空间上，研究区多数耕地功能之间的 Global Moran' s I 值为正，少数为负，表明多数功能之间为协同关系，少数为权衡关系。其中净固碳与水源涵养、物质产出与景观美学和景观美学与劳动力承载功能之间的协同作用较强，净固碳与劳动力承载和景观美学与劳动力承载功能之间的权衡作用较强。整体看，Global Moran' s I 值随时间逐渐变小甚至变为负，表明耕地功能之间协同作用随时间呈减弱趋势，权衡作用呈增强趋势。

由表 5 知，研究区耕地物质产出与景观美学、水源涵养与景观美学之间的权衡与协同关系只在 2000 年通过了显著性检验，因此，本文只对其余 8 种情况进行局部空间自相关分析，得到不同耕地功能之间局部空间关联图（图 2），反映 HH、LL 协同，HL、LH 权衡或独立关系的空间格局及其变化情况。从图 2 看，净固碳与劳动力承载、景观美学与劳动力承载 HL 权衡型数量较多；其余功能之间 HH 或 LL 协同型数量较多。其中，净固碳与水源涵养、物质产出与景观美学、物质产出与水源涵养和景观美学与水源涵养空间格局较稳定。





注:A.净固碳与物质产出;B.净固碳与水源涵养;C.净固碳与景观美学;D.净固碳与劳动力承载;E.物质产出与景观美学;F.物质产出与水源涵养;G.景观美学与水源涵养;H.景观美学与劳动力承载。

图2 不同耕地功能之间局部空间关联图
Fig.2 Local spatial correlation map between different cultivated land functions

从图 2A 看，净固碳与物质产出的 HH 协同区数量较少，空间分布不稳定且无明显规律；LL 权衡区主要分布于鄂西地区并逐渐收缩至鄂西南地区；HL 与 LH 权衡区分别零散分布于石首、鄂州和黄石周边一带。由前文分析可知，实际中，鄂西地区尤其是鄂西南地区耕地各项功能值普遍较低；石首市周边几个地区耕地资源状况好且耕作合理，固碳功能较强，由于种植经济作物少，物质产出功能较弱；鄂州和黄石等地区，经济作物种植面积大，物质产出功能较强，但净固碳功能相对较弱。

从图 2B 看，净固碳与水源涵养 HH 协同区主要分布在团风—浠水—蕲春一线；LH 权衡区主要分布于阳新一大冶—鄂州一带，两者的空间分布随时间有较小变化，数量较为稳定；LL 协同区主要分布于鄂西地区，数量减少明显；HL 权衡区 2005 年才出现，主要分布于鄂西北的竹溪、南漳等区县，数量有增加趋势。实际中，鄂西地区各类耕地功能较弱；而浠水、蕲春等地各类耕地功能较强；阳新、大冶等地化肥和农药等投入较大，耕地破坏较严重，固碳效应大大降低，但降雨量丰富。

从图 2C 看，净固碳与景观美学的 HH 协同区数量变化不大，空间分布无规律；LL 协同区主要分布在鄂西南地区，空间分布与数量随时间推移相对稳定；LH 权衡区主要分布在武汉市周边城市并存在向鄂东南“下移”态势。实际中，鄂西南属山地类型，耕地资源条件差，距城市中心较远，固碳功能和景观美学功能都较弱；武汉市周边城市耕地地区位条件好，休闲农庄等较多，景观功能较强，净固碳功能相对较弱。

从图 2D 看，净固碳与劳动力承载的 HH 协同区主要分布于鄂东北的麻城、罗田等区县，空间位置相对稳定；LL 协同区数量不断减少，分布较为零散，有“东移”态势；HL 权衡区在 2000—2005 年间大量增加，之后较为稳定，主要分布在江汉平原地区；LH 权衡区零星分布在兴山、长阳等地区，数量较少，空间分布无规律。实际中，麻城、罗田等地的劳动力人口多，耕地资源条

件好，农作物固碳能力强；江汉平原地区主要为机械化生产，农业劳动力转移速度较快、数量较多，但耕地本底条件好。

从图 2E 看，物质产出与景观美学的 HH 协同区主要分布于武汉市下辖的几个区县，LL 协同区主要分布在鄂西南地区，数量及空间分布较为稳定；LH 权衡区数量较少，无规律分布于大冶、咸安等区县。实际中，鄂西南地区耕地质量差，距离中心城区较远，农业市场条件落后，物质产出和景观美学功能较弱，武汉市下辖区县经济作物种植面积较大，农产品市场条件好，居民景观休闲的需求高，物质产出和景观美学功能较强；而咸安、大冶等地区可能由于种植结构缘故，物质产出功能较弱，但景观美学功能较强。

从图 2F 看，物质产出与水源涵养的 HH 与 LH 协同区主要分布于武汉城市圈内，其中，HH 协同区空间分布变化较明显，呈现“向东”或“向北”转移的图态势；LH 权衡区主要分布在阳新、大冶、黄梅等区县，空间分布与数量都较稳定。LL 协同区主要分布于鄂西地区，数量在 2005 年明显减少，之后较稳定；HL 权衡区零散分布于武陵、南漳等地，并呈扩张态势。由前文分析可知，实际中，鄂西地区物质产出与水源涵养功能较弱；武汉城市圈各区县水源涵养功能较高；鄂州、浠水等区县耕地的物质产出功能较高，阳新、大冶和黄梅等地区受种植结构影响，物质产出功能较低。

从图 2G 看，景观美学与水源涵养的 HH 协同区主要位于以武汉市辖区和大冶市为中心的周边区县，LL 协同区主要位于鄂西地区，HL 权衡区主要分布在郧县、武陵等 5 个区县，三种类型的空间格局较稳定，LL 协同区数量有所增加，HH 和 HL 数量较稳定；LH 权衡区主要分布在黄梅、武穴等区县，零散分布于 HH 协同区周围，并有所扩张，空间格局有向“西北”转移态势。由前文分析可知，实际中，少数几个区县除外，鄂西地区景观美学价值较低，水源涵养能力差；黄梅、武穴等区县除外，武汉市辖区、大冶市周边区县周边居民对景观休闲的需求较高，土地较厚，对应的水源涵养功能较强。

从图 2H 看，景观美学与劳动力承载的 HH 协同区主要分布在浠水、蕲春等少数几个区县，数量较少；LL 协同区空间分布变化明显，有向“鄂东南”下移趋势，数量较少且随时间逐步减少；HL 权衡区 2000 年分布较散，之后主要分布于江汉平原地区，有向北扩展态势，2005 年数量大量增加，之后数量较稳定；LH 权衡区空间分布不太稳定且数量较少。实际中，少数几个区县除外，江汉平原地区劳动力损失严重，劳动力承载功能较弱，但景观美学的价值较高；浠水、蕲春等地区农业劳动力数量较多，有特色的农业休闲产业，对应的景观美学价值和劳动力承载功能较高；LH 权衡区则可能由于地理位置与耕地资源禀赋较差，对应的美学价值也较低。

4 结论与政策建议

本文以湖北省为研究区，选取物质产出、净固碳、水源涵养、景观美学和劳动力承载 5 种典型的耕地功能，在明确各项功能内涵的基础上，建立相应指标体系与模型对各项耕地功能进行了评价，在此基础上，分析了研究区 2000、2005、2010 和 2013 年耕地多功能权衡与协同时空格局及其动态变化规律，得到的主要结论如下：

第一，各项耕地功能随时间变化差异明显。净固碳、物质产出与景观美学功能呈不断增加态势。其中物质产出功能增长较快，景观美学功能增长较慢，水源涵养功能变化平稳，劳动力承载功能不断减弱。

第二，时间尺度上，耕地功能之间的权衡与协同普遍存在且具有一定的规律性，大多数功能之间表现协同作用，少数为权衡作用。其中物质产出与景观美学、净固碳与水源涵养功能之间协同作用较强，净固碳与劳动力承载功能之间的权衡作用较强。随时间推移，整体表现为功能之间的协同程度不断较弱，权衡程度不断增强。

第三，空间尺度上，耕地多功能权衡与协同的空间分布呈现较强的集聚性特征；随时间推移，部分耕地功能空间格局发生一定程度变化，部分较为稳定。相同耕地功能的所有 Global Moran' s I 值显著为正，表明研究区耕地功能在研究区呈现协同效应，其中水源涵养功能的协同效应最强且较为稳定；劳动力承载功能最弱却有增强趋势。从空间分布看，协同区呈现“组团”

特征，聚集性较强；权衡区零星分布于协同区的周围，无明显的聚集区。随时间推移，水源涵养和景观美学功能的权衡与协同的空间格局较稳定，其余三种功能的空间格局发生不同程度变化。不同耕地功能 Global Moran's I 值有正有负，表明研究区不同种耕地功能之间既有权衡又有协同效应，其中净固碳与水源涵养、物质产出与景观美学和景观美学与水源涵养功能之间的协同效应较强；净固碳与劳动力承载和景观美学与劳动力承载功能之间的权衡效应较强。随时间推移，整体呈现协同减弱，权衡增强的趋势。从空间分布看，协同类型既有明显的“组团区”，又有零星分布区，权衡类型也有类似规律。随时间推移，净固碳与水源涵养、净固碳与景观美学、物质产出与景观美学和景观美学与水源涵养的权衡与协同格局较稳定，其余功能之间的格局发生不同程度变化。

基于本文的研究结论，提出以下政策建议：①考虑县域内资源禀赋和经济发展水平，加强县域内政府部门之间的合作，制定轮作休耕、秸秆还田、测土施肥等政策改良耕地本底质量；鼓励农地流转，适当引导劳动力匮乏区的劳动力回流；加大农业补贴与科技支农力度，加强农业市场的信息化建设和扶持休闲农庄等观光产业发展，促进耕地多功能由权衡走向协同。②加强县际之间的区域合作，首先，进行跨县域的耕地利用分区，将 HH 协同区划为“优势功能区”，LL 协同区划为“全面改良区”，HL 和 LH 权衡区易受空间极化效应的影响而转化为 LL 和 HH 协同区，划为“适度保护区”与“重点改良区”。就研究区而言，可划分为鄂西山地丘陵区、鄂东山地丘陵区、鄂中平原区和城市辖区四大区域开展差异化的耕地利用与管理。其次，积极推广区域间净固碳—物质产出、净固碳—水源涵养和净固碳—景观美学等功能之间的“HH”协同利用模式；通过工程技术、经济、政策等改良区域间 LL 协同或 HL、LH 权衡的利用模式，促进耕地多功能的合理保护与利用，提升耕地多功能利用的总效益。

参考文献：

- [1] OECD. Multifunctionality:towards an analytical framework [R].2001.
- [2] 宋小青, 欧阳竹. 中国耕地多功能管理的实践路径探讨 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 540 - 551.
- [3] Rodríguez J, Beard Jr T D, Bennett E, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services [J]. Ecology and Society, 2006, 11(1): 709 - 723.
- [4] Barbier E B, Koch E W, Silliman B R, et al. Coastal ecosystembased management with nonlinear ecological functions and values [J]. Science, 2008, 319(5861): 321 - 323.
- [5] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析 [J]. 地理研究, 2017, 36(3): 592 - 602.
- [6] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题 [J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1 379 -1 390.
- [7] 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): 2 274 - 2 285.
- [8] Su C H. Study on Spatiotemporal Change of Ecosystem Services and Its Anthropogenic Driving Mechanisms A Case Study in Yanhe Watershed [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [9] 杨雪, 谈明洪. 近年来北京市耕地多功能演变及其关联性 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(5): 733 - 743.
- [10] Deng X, Li Z, Gibson J. A review on trade-off analysis of ecosystem services for sustainable land-use

management [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 953 - 968.

[11] 胡伟艳, 魏安奇, 赵志尚, 等. 农地多功能供需错位与协同作用研究进展及趋势 [J]. 中国土地科学, 2017, 31(3): 89 - 97.

[12] 宋小青, 欧阳竹. 耕地多功能内涵及其对耕地保护的启示 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 859 - 868.

[13] 陈丽, 郝晋珉, 王峰, 等. 基于碳循环的黄淮海平原耕地固碳功能研究 [J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1 039 - 1 053.

[14] 柯新利, 李红艳, 刘荣霞. 武汉市耕地景观游憩功能与可达性的空间匹配格局 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 751 - 760.

[15] 张雪靓, 孔祥斌, 王洪雨, 等. 区域耕地社会保障功能替代程度及其差异研究——基于北京市海淀区、大兴区 24 村 214 户农户问卷的实证 [J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1 555 - 1 566.

[16] 谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 等. 中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数 [J]. 中国农业大学学报, 2011(1): 9 - 17.

[17] 田云, 张俊飏, 吴贤荣, 等. 中国种植业碳汇盈余动态变化及地区差异分析——基于 31 个省(市、区)2000—2012 年的面板数据 [J]. 自然资源学报, 2015(11): 1 885 - 1 895.

[18] 黄祖辉, 米松华. 农业碳足迹研究——以浙江省为例 [J]. 农业经济问题, 2011(11): 40 - 47, 111.

[19] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制 [J]. 农业经济问题, 2014(7): 18 - 26, 110.

[20] 邓明君, 邓俊杰, 刘佳宇. 中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力 [J]. 资源科学, 2016(3): 534 - 544. .

[21] IPCC. 气候变化 2007: 综合报告 [C] //Pachauri R K, Reisinger A. 政府间气候变化专门委员会第四次评估报告第一、第二和第三工作组的报告. 日内瓦: IPCC, 2007: 104.

[22] 白杨. 武汉城市圈城市化进程对水源涵养功能影响变化研究 [D]. 海口: 海南大学, 2014.

[23] 秦嘉励, 杨万勤, 张健. 岷江上游典型生态系统水源涵养量及价值评估 [J]. 应用与环境生物学报, 2009(4): 453 - 458.

[24] 马波, 马璠, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 136 -146.

[25] 俞建荣. 我国不同生态类型烟区土壤持水性能及水分有效性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.

[26] O' Farrell P J, Reyers B, Le Maitre D C, et al. Multi-functional landscapes in semi arid environments:

implications for biodiversity and ecosystem services [J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(8): 1 231 - 1 246.

[27] 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(6): 666 - 671.

[28] Pearson WR, Lipman D J. Improved tools for biological sequence comparison [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1988, 85(46): 16 138 - 16 143.

[29] Spearman C. The proof and measurement of association between two things [J]. *The American Journal of Psychology*, 1904, 15(1): 72 - 101.

[30] 张燕, 徐建华, 曾刚, 等. 中国区域发展潜力与资源环境承载力的空间关系分析 [J]. *资源科学*, 2009, 31(8): 1 328 - 1 334.

[31] Turner, Katrine Grace, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125(6): 89 - 104.

[32] 刘玉, 唐林楠, 潘瑜春, 等. 京津冀地区县域农产品生产功能的时空格局及耦合特征 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 305 - 314.

[33] 孙英君, 王劲峰, 柏延臣. 地统计学方法进展研究 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(2): 268 - 274.

[34] Anselin L, Syabri I, Kho Y. GeoDa: An introduction to spatial data analysis [J]. *Handbook of Applied Spatial Analysis*, 2010, 38(1): 73 - 89.