



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 生态功能区生态系统服务协同权衡对影响因子的空间非平稳性响应——以福建省为例

作者: 张紫怡, 刘艳芳, 张扬, 刘耀林, 陆砚池, 任其然

DOI: 10.13203/j.whugis20200700

网络首发日期: 2021-07-07

引用格式: 张紫怡, 刘艳芳, 张扬, 刘耀林, 陆砚池, 任其然. 生态功能区生态系统服务协同权衡对影响因子的空间非平稳性响应——以福建省为例. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200700>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13203/j.whugis20200700

引用格式:

张紫怡, 刘艳芳, 张扬, 刘耀林, 陆砚池, 任其然. 生态功能区生态系统服务协同权衡对影响因子的空间非平稳性响应——以福建省为例 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200700 (Zhang Ziyi, Liu Yanfang, Zhang Yang, Liu Yaolin, Lu Yanchi, Ren Qiran. Spatial non-stationary response of the tradeoff/synergy between ecosystem services to influencing factors in Ecological functional areas-- A case study of Fujian Province [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200700)

# 生态功能区生态系统服务协同权衡对影响因子的空间非平稳性响应——以福建省为例

张紫怡<sup>1</sup> 刘艳芳<sup>1</sup> 张扬<sup>1</sup> 刘耀林<sup>1</sup> 陆砚池<sup>1</sup> 任其然<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉, 430079

**摘要:** 全球生态系统服务 (ecosystem services, ESs) 大幅衰退, 迫切需要正确的环境治理政策。为解决当前我国生态环境治理存在的两个问题: 缺少以生态功能区为单位的统筹规划和缺乏对 ESs 协同权衡的深入理解, 本研究以生态功能区为研究单元, 测定四项 ESs (粮食生产 (grain production, GP)、植物固碳 (carbon sequestration, CS)、户外休憩 (outdoor recreation, OR) 和生物多样性维护 (biodiversity conservation, BC)) 的时空变化, 探究 ESs 协同权衡的形成机制及其对温度、降水、日照、海拔和城市化程度这 5 项影响因子的空间非平稳性响应。本研究提出“差异比较法”来确定 ESs 协同权衡的空间分布, 通过主成分分析法选取影响因素, 并通过地理加权逻辑回归 (geographical weighted logistic regression, GWLR) 确定 ESs 协同权衡对影响因子的空间响应。结果表明, ESs 协同权衡具有显著的空间自相关性。每两项服务在空间上并非只是单一关系, 而是同时存在协同与权衡关系。其中 BC 与 OR 在整个研究区内表达出高度协同关系, 且其二者与其他两项服务 GP、CS 之间协同权衡的空间分布也十分相似。ESs 协同权衡对所有影响因子均表达出显著响应, 该响应具有空间异质性, 其正负性和强度随空间变化。研究通过总结 ESs 协同权衡发生的规律, 对已有的协同权衡形成机制进行细化: 在一定的区域范围内, 支持性土地利用类型和非支持性土地利用类型的面积比例, 以及它们对各项服务的支持程度会使得两项服务在该区域范围内区分出优势服务和劣势服务。优势服务和劣势服务之间存在动态差距, 当该差距处于增加状态时可能导致权衡发生。

**关键词:** 生态系统服务; 协同权衡; 地理加权逻辑回归; 生态功能区; 影响因子; 福建

**中图分类号:** P208; P273

项目资助: 国家重点研发计划项目 (项目编号: 2017YFB0503500)。

第一作者: 张紫怡, 博士, 主要从事生态遥感应用研究。zhangziyi\_violet@163.com

通讯作者: 刘艳芳, 博士, 教授。yfliu610@163.com

高速的城市化发展给生态环境造成巨大压力,生态系统服务(ecosystem services, ESs)在全球范围内大幅衰退<sup>[1]</sup>,人类福祉受到影响,迫切需要采取行动实现生态环境的可持续发展。当前我国生态环境保护、修复、治理工作被动依据国民经济和社会发展规划、城市总体规划和土地利用总体规划等开展<sup>[2]</sup>,存在两个问题。(1)忽略了生态系统是一个综合而整体的系统,制定决策时缺少统筹规划<sup>[3]</sup>,难以根据生态环境格局和资源环境承载力开展工作。划分生态环境功能区可作为有效衔接的突破口<sup>[4]</sup>,其目的是对不同环境功能的区域实施分类管理进而落实环保的总体规划<sup>[5]</sup>。(2)在制定政策时,忽略 ESs 之间的权衡和协同关系,盲目追求某项服务的产值最大化可能会导致另一项生态系统服务的大幅衰退<sup>[6]</sup>,对生态环境造成二次伤害。因此,以生态功能区为单元研究 ESs 之间的关系(协同权衡),了解其形成机制、分布特点,受什么因素影响以及如何影响,对科学制定生态保护政策具有重要意义<sup>[7]</sup>。

ESs 协同权衡是 ESs 之间关系的两种不同形式。ESs 之间相互影响,呈现出多重非线性关系,表现为此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系<sup>[8,9]</sup>。很多学者对 ESs 之间的协同权衡关系进行了研究,聚焦点多在格网或行政区尺度下的协同权衡关系评估及其空间尺度效应。冯雁云等<sup>[9]</sup>以格网为单元,利用相关分析的方法获得了典型山地区域的植物固碳与水文调节服务、植物固碳与粮食供给服务之间的全局关系。王晓萌等<sup>[10]</sup>以行政区为研究单元,利用基于线性拟合分析的生态系统权衡度(ecosystem services trade-off degree, ESTD)模型测定了河北省四项 ESs(农作物生产、碳储量、生境质量和土壤保持)之间的两两关系。刘海等<sup>[11]</sup>以格网为单元,利用相关系数和 ESTD 模型测定了丹江口水源区的多项生态系统服务价值两两之间的协同权衡。Xu 等在 20 种不同大小的格网尺度和 2 种行政区尺度,利用斯皮尔曼相关系数测定 ESs 协同权衡,探究 ESs 协同权衡的尺度效应<sup>[12]</sup>。然而,现阶段关于 ESs 协同权衡的影响因子的研究却十分有限。Feng 等<sup>[6]</sup>对此进行了尝试,在研究区抽取了 151 个样本,确定了与 ESs 之间的全局关系有关的 4 个环境因素(植被覆盖度、植被类型、海拔和泥沙成分)。Qiu 等<sup>[13]</sup>通过逻辑回归分别探究了 ESs 之间的全局关系在景观尺度与局部尺度上的潜在影响因子,包括坡度、土壤物理性质、人口密度、到溪流的距离、到最近湿地和森林的距离、半径 560 m 内的总景观包含森林、农地和湿地的百分比,以及限制施用养分和有机肥的面积百分比。这些研究存在以下不足:方法都是基于全局回归,无法得到协同权衡关系对影响因子的响应的空间差异化分布,且选取的潜在影响因子也都是以自然环境因素为主,缺少与社会经济因素的相关性分析<sup>[6,13]</sup>。

生态过程通常包含着空间非平稳性和自相关性问题<sup>[14-15]</sup>,这无法满足全局回归中使用的

假设（没有自相关模型残差和同方差）<sup>[16]</sup>。越来越多的研究证明局部回归模型可以解决上述两个问题<sup>[17-19]</sup>。因此在分析生态过程中发生的空间相关性问题上，局部回归，尤其是地理加权回归（geographical weighted regression, GWR）及其衍生出的其他局部回归模型，已逐渐替代了全局回归<sup>[20,21]</sup>。然而局部回归却鲜少用于测定 ESs 协同权衡与影响因子的空间关联，这是由于基于传统方法得到的 ESs 协同权衡结果无法支持局部回归运算。测定 ESs 之间关系的传统方法如成对相关系数和全局回归模型<sup>[20]</sup>，其结果是在空间上恒定的全局关系，只能反映研究区的平均情况，缺少地域分异特征，可能无法完全解释实际现象<sup>[20]</sup>。根据 ESs 之间权衡与协同的定义，本文提出一种新的方法——差异比较法，来绘制 ESs 协同权衡关系图，可以解决以往研究中 ESs 之间的关系与潜在影响因素不能进行局部回归分析的问题。该方法通过比较特定时间段内这些服务的变化量来判定协同或权衡，并用二元结果来描述 ESs 协同权衡的空间分布细节。进而使用地理加权逻辑回归（geographical weighted logistic regression, GWLR）<sup>[22]</sup>来探究 ESs 协同权衡与多元影响因素之间的空间关联。

本文以生态功能区为研究单元，测定了供应（粮食生产），调节（植物固碳），文化（户外休憩）和支持（生物多样性维护）四类生态系统服务，通过差异比较方法在空间上确定了它们的协同权衡关系；从地形、气候、人类活动三个方面综合选取潜在影响因素，并通过主成分分析进行筛选；最后基于 GWLR 得到 ESs 协同权衡关系对自然环境因素和人类活动因素的空间非平稳性响应，可为科学制定区域环境保护政策提供参考。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区

福建省（图 1）（北纬 23°33′-28°20′，东经 115°50′-120°40′）位于中国东南部的东海之滨。它是中国大陆的重要海港，具有重要的经济地位和高度的城市化程度。作为中国创建的第一个国家生态文明试验区，这里还拥有丰富的自然栖息地，具有很高的生态价值。全区森林覆盖率达 65.95%，居全国首位，水系密布，水资源也居华东首位。福建省境内地形千差万别，山地占全省的 80% 以上，河谷流域错落有致，形成了福建省丰富的生态旅游资源。但福建农业有限，人均耕地不足全国平均水平的一半，粮食总产量约为全国平均水平的三分之一。因此，围绕粮食安全的问题需要紧急关注。福建气候存在明显的区域差异，这可能会影响其生态过程。闽东南沿海为亚热带气候，闽东北、闽北、闽西为中亚热带气候，各气候带水热条件的垂直差异也较大。

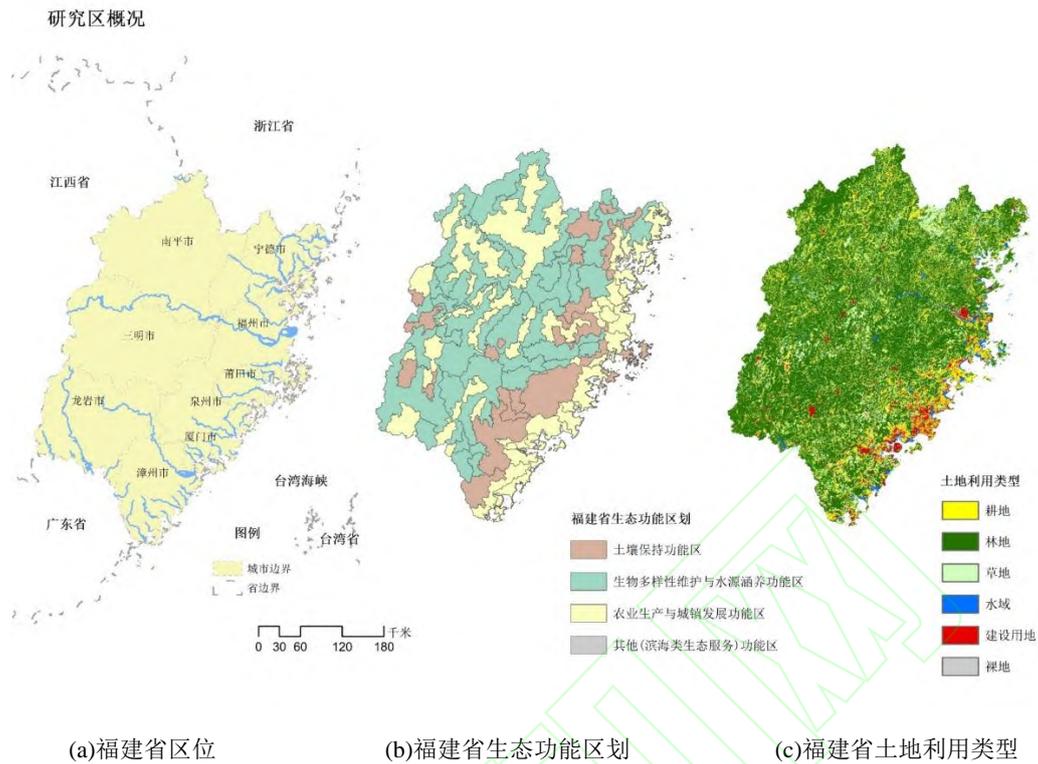


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

## 1.2 实验数据

本研究所使用的数据类型有栅格数据、矢量数据、监测点站数据和统计数据。所有非空间数据都进行了空间化处理，并统一使用 Krasovsky\_1940\_Albers 坐标系统。本研究使用的数据包括：2005 年和 2015 年  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  分辨率的土地利用/土地覆盖图是由 landsat 8 遥感影像，通过人工解译生成<sup>[23,24]</sup>， $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  分辨率的数字评价模型(digital elevation model, DEM)数据来自地理空间数据云平台 <http://www.gscloud.cn/>，归一化植被指数，中国植被类型图， $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  国内生产总值和人口空间分布数据都来自资源环境科学与数据中心 <http://www.resdc.cn/>，生态功能区划来自中国生态系统评估与生态安全数据库 <http://www.ecosystem.csdb.cn/>，2005 年和 2015 年的气象数据集，包括气温、降雨量和日照时数等来自中国气象数据网 <http://data.cma.cn/>，2005 和 2015 年福建省各地级市粮食总产量数据来自于《福建统计年鉴》。

## 2 研究方法

本研究基于以下四个步骤开展: (1) ESs功能测算; (2) ESs之间关系(协同/权衡)的测定; (3) ESs之间关系的空间自相关分析; (4) 潜在影响因子的主成分分析及其和ESs协同/权衡之间的地理加权逻辑回归。具体方法如下。

## 2.1 生态系统服务测算

本研究测定了四项的生态系统服务:粮食生产(grain production, GP)、生物多样性维护(biodiversity conservation, BC)、户外休憩(outdoor recreation, OR)和植物固碳(carbon sequestration, CS)。参考以往研究中使用的方法<sup>[25-28]</sup>, 对每项服务进行量化; 并通过分区统计方法<sup>[12]</sup>, 将其映射到生态功能分区上。已有学者研究发现粮食产量和植被状况指数(VCI)具有显著的相关性<sup>[25,29]</sup>, 因此, 将植被状况指数作为测算粮食生产服务的替代指标。参照文献[22]的方法, 按照每个格网中耕地VCI占这个区域所有耕地的总VCI的比例, 将一个区域的粮食总产量分配到每一个格网中, 再通过分区统计映射到每个生态功能区中。上述方法中的“区域”为地级市, 每个地级市的粮食总产量参考福建省统计年鉴。生物多样性维护服务基于InVEST模型的生境质量模块计算获得<sup>[30]</sup>。该模块是通过结合景观类型敏感度和以人类活动为主的外界威胁强度, 分析不同景观格局下的生境质量对威胁源的响应程度及其分布与退化情况, 其结果可以作为生物多样性维护服务的代理指标<sup>[31-33]</sup>。本研究中, 户外休憩服务基于Baro提出的估算-休闲方法进行修改和量化<sup>[27]</sup>, 主要衡量的是人类与自然环境(自然地类)的接亲近程度。分别提取具有游憩能力的土地利用类型, 根据距离衰减公式计算其自然亲密度。叠加后进行归一化, 得到每个网格单元的户外休憩级别。每种土地利用类型的户外休憩能力的参数和距离衰减公式参考自文献[24]。植物固碳服务用植被净初级生产力表示<sup>[34-36]</sup>。计算方法参考Potter 等建立的Carnegie Ames- Stanford Approach (CASA) 模型<sup>[36,37]</sup>。

## 2.2 生态系统服务之间协同权衡的测定

为使生态系统服务之间的关系能在空间上可视化, 本研究依照协同权衡的定义<sup>[8]</sup>, 提出差异比较法来测定生态系统服务之间的协同与权衡。通过比较 2005 年到 2015 年这两种服务的变化量来判断它们之间的关系。如果两项服务的变化量的乘积为正值, 则被认为是协同的, 否则为权衡关系, 协同权衡以二元变量表示。

$$A_{T1} - A_{T2} = \Delta A \quad (1)$$

$$B_{T1} - B_{T2} = \Delta B \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta A \times \Delta B \geq 0 & (\text{协同}) \\ \Delta A \times \Delta B < 0 & (\text{权衡}) \end{cases} \quad (3)$$

T1 和 T2 分别为两个不同的时期。 $A_{T1}$ 和 $A_{T2}$ 分别为 T1 时期和 T2 时期服务 A 的值, $B_{T1}$ 和 $B_{T2}$ 分别为 T1 时期和 T2 时期服务 B 的值,  $\Delta A$ 和 $\Delta B$ 分别为服务 A 和服务 B 在 T1 到 T2 时期的变化量。

### 2.3 空间自相关分析

莫兰指数 (Moran's I) <sup>[38]</sup>被用来描述 ESs 之间关系的空间自相关性。莫兰指数的取值从-1 到 1。正值表示空间正相关, 值越大表示相关性越显著。负值表示空间负相关, 值越小表示空间差异性越大。零值表示 ESs 之间关系在空间呈随机分布。本研究使用 ArcGIS 10.4 计算莫兰指数。

### 2.4 地理加权逻辑回归

GWLR 是 GWR 和广义线性建模 (特别是逻辑斯蒂模型(logistic model)) 的结合, 这种空间模型与逻辑回归的结合与逻辑自回归有相似之处, 但在概念上与之不同<sup>[39,40]</sup>。因变量是指在某一特定位置的生态系统服务之间的关系 (协同或权衡)。因此, 为服务之间的关系构建一个数据层; 这一层是二元的, 值 1 表示协同, 值 0 表示权衡。从人类活动、地形和气候三个方面选择了潜在的影响因子。

由于本研究中 ESs 之间的协同与权衡是基于变化量测定的, 故参与回归计算的也是潜在影响因子的变化量。本研究地形、气候、人类活动三个方面共选取了 13 个潜在影响因子, 分别为城市化程度<sup>[26]</sup> (人口、GDP、建设用地占地比例); 地形 (高程); 气候: 温度 ( $\geq 10^\circ\text{C}$  积温,  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温, 最冷月均温, 极端低温值、极端高温值), 降水 (年降水量、3-6 月降水量、7-9 月降水量), 日照 (日照时数), 其中, 气候单因子的选择是基于前人研究<sup>[41,42]</sup>, 从气候适宜度方面进行考量。对所选的因子进行主成分分析<sup>[43]</sup>, 最终得到参与回归计算的潜在解释变量如下: 地形影响因子一项 (高程), 气候影响因子三项, 分别为降水综合因子、气温综合因子、和日照影响因子 (日照时数), 人类活动影响因子一项 (城市化程度综合因子)。以上的综合因子由主成分分析获得, 单因子经过了归一化处理。GWLR 的计算基于 ArcGIS Pro 软件, 使用地理加权回归工具的二进制(logistic)选项。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态系统服务的空间分布

2005 年和 2015 年，四项生态系统服务(GP、CS、OR 和 BC)存在显著的空间异质性(图 2)。

GP 的最高值并不在农业生产和城镇发展功能区内，其值的分布与行政区具有明显的关联(图 1，图 2)。这是由于本研究中的粮食生产服务表达的是单位面积内的粮食生产能力，其值的大小主要与该区域的 VCI 和该区域所属行政区的粮食总产量有关。农业生产和城镇发展功能区虽然耕地占比大，但单位面积内的粮食生产能力较弱，故 GP 值较低。从 2005 年到 2015 年，福建省东部的 GP 值下降，西部的 GP 值上升(图 2)，这与福建省 2005 年和 2015 年统计年鉴显示的粮食总产量在这段时间内的变化是一致的。对比 2005 年和 2015 年的福建省地类分布图可知，在此期间，耕地由福建东部向西部转移。闽东耕地面积明显减少，闽西耕地面积明显增加。

BC 与 OR 的高值都出现在生物多样性维护与水源涵养功能区内(图 1，图 2)，这是因为在该功能区内生态资源丰富，水体、森林、草地等自然地类占比大、分布广。BC 与 OR 的值在空间分布中存在一种高度互补关系。在草地多林地少的地区表现为 OR 值较高，而在林地多草地少的地区表现为 BC 值较高。CS 的高值同样都出现在生物多样性维护与水源涵养功能区内(图 1，图 2)，这是由于该功能区内有大量的植物固碳的支持型地类——森林和草地。

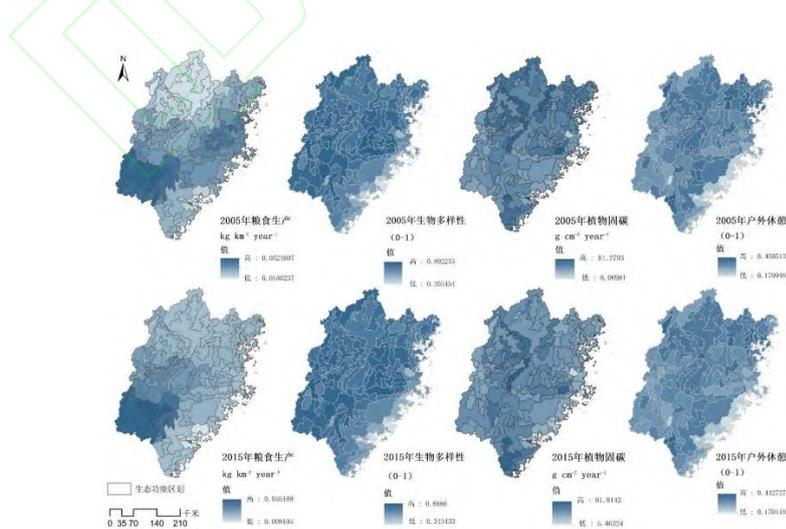


图 2 2005 和 2015 年福建省四项生态系统服务分布

Fig. 2 Spatial patterns of the ecosystem services in Fujian province in 2005 and 2015

### 3.2 生态系统服务之间的协同权衡

#### 3.2.1 空间自相关

每两项生态系统服务之间的协同权衡关系的全局莫兰指数如表 1 所示,所有协同权衡关系都是空间自相关的,并且在空间上聚集分布,而非均匀或随机分布( $P < 0.01$ )。

表 1 每两项生态系统服务之间的协同权衡关系的莫兰指数

**Tab.1** Moran's I for the relationships between ecosystem services

生态系统服务 的协同权衡	Moran's I	z- Scores	p-Value
粮食生产-生物多样性	0.738121	9.569939	0.000000
粮食生产-植物固碳	0.464048	6.083206	0.000000
粮食生产-户外休憩	0.630555	8.197258	0.000000
生物多样性-植物固碳	0.620895	8.069831	0.000000
生物多样性-户外休憩	0.170786	2.623416	0.008705
植物固碳-户外休憩	0.695457	9.024824	0.000000

#### 3.2.2 生态系统服务协同权衡的空间分布

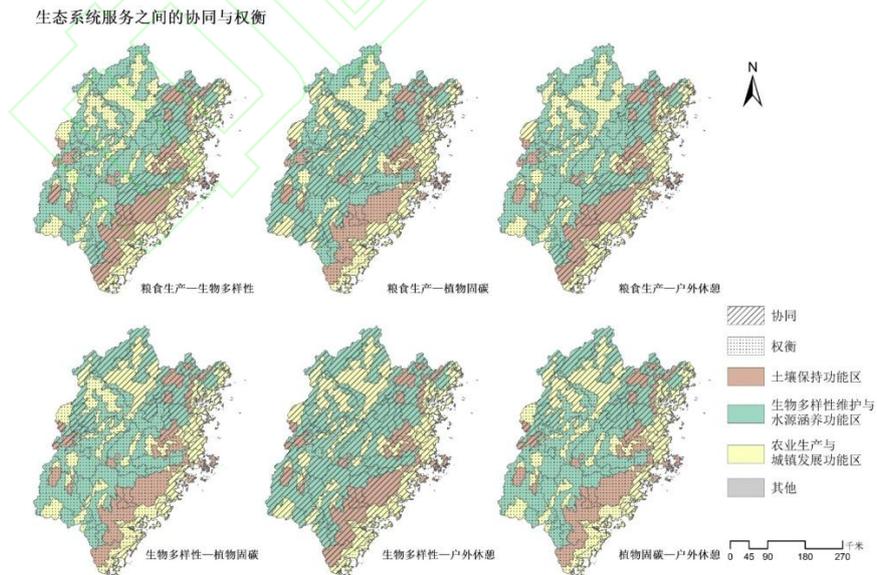


图 3 福建省生态系统服务协同权衡的空间分布

Fig. 3 Spatial patterns of the relationships between ecosystem services in Fujian province

GP 和 CS 的协同关系主要发生在福建省中部的生物多样性维护和水源涵养功能区, 以及位于闽西和闽东的部分农业生产与城镇发展功能区内。权衡关系主要发生在位于福建省中南部的土壤保持功能区和福建省西北部的农业生产与城镇发展功能区, 这两块区域都是福建省耕地最密集的地区。GP 与 BC 之间的协同关系主要发生在福建省东部以及个别位于福建省西部的土壤保持功能区内; 二者之间的权衡关系主要发生在福建省中西部。GP 与 OR 之间的协同权衡关系与 GP 与 BC 之间的关系分布十分相似, 协同关系主要发生在福建省东部以及个别位于福建省西部的农业生产与城镇发展功能区内; 权衡关系主要发生在福建省中西部。BC 和 OR 在整个研究区域内主要呈现协同关系, 仅在福建省中西部的一个生物多样性维护和水源涵养功能区以及福建省南部的一个农业生产与城镇发展功能区内为权衡关系。且 BC 和 OR 与其他两项服务之间的关系的空间分布也非常相似(图 3), BC 与 CS 之间的权衡关系主要发生在福建省中南部, 此区域的生态功能区多为生物多样性维护和水源涵养功能区与土壤保持功能区, 协同关系主要发生在闽北地区。CS 与 OR 之间的关系分布与 BC 与 CS 之间的关系呈现相似的规律(图 1, 图 3), 即权衡关系主要发生在福建省中南部, 协同关系主要发生在闽北地区。

### 3.2.3 生态系统服务之间协同权衡的形成机制

每两项生态系统服务之间的协同权衡关系都表现出了空间异质性(图 3)。Bennett<sup>[8]</sup>提出了影响生态系统服务关系的两种机制: 共同的驱动因素和生态系统服务之间的相互作用。共同的驱动因素包括土地利用条件。许等人对此增加了更详细的解释, 并将影响生态系统服务协同与权衡的土地利用条件归类为土地利用冲突和土地利用一致性<sup>[12]</sup>。土地利用冲突指当一块土地用于一种生态系统服务时就不能再用于另一种生态系统服务的情况, 这会导致了服务之间出现权衡关系。土地利用一致性是指某种土地利用类型可以同时支持两种或两种以上生态系统服务的情况, 这可以使得服务之间出现协同关系。

然而, 两项或两项以上服务可能同时具有土地使用冲突和土地使用一致性。例如, GP 和 CS 具有土地利用一致性。耕地是 GP 的主要支持地类, 对 GP 有很强的支持作用。同时耕地也支持 CS, 但作为 CS 的非主要的支持地类, 它对 CS 的支持力度有限<sup>[44]</sup>。然而, CS 的主要支持地类, 如森林和草地<sup>[44]</sup>, 不能用于粮食生产。此时, GP 和 CS 又具有土地利用冲突。因此, 在前人基础上, 补充了影响生态系统服务协同与权衡的土地利用条件的详细描

述,即在一定范围内,协同或权衡的发生取决于支持性土地利用类型与非支持性土地利用类型的面积比,以及它们对每种服务的支持程度。在一定范围内,如果某一项服务的支持性地类比例大,且该地类对该服务的支持程度较大,则该服务在该区域内成为优势服务。其他服务相应地变为劣势服务。随着土地利用类型的变化,优势服务和劣势服务之间存在着动态差距。当这种动态差距处于增大状态时可能导致权衡发生。本研究中的生态系统服务之间的协同权衡的产生和空间分布都可以用上述机制来解释。

GP 和 CS 的协同关系主要发生在生物多样性维护和水源涵养功能区(图 1,图 3),可能的原因是,该功能区具有大量林地,耕地不过分密集,且林地和耕地交错分布。已有研究发现,在耕地附近保留森林斑块(林地是植物固碳服务的主要支持地类)能够增加授粉,进而增加粮食产量<sup>[8,45,46]</sup>。此外,农作物也具有固碳能力,从而 GP 和 CS 具有土地利用一致性,因此该区域二者为协同关系。在耕地密集地区,如福建省中南部的土壤保持功能区和福建省西北部的农业生产与城镇发展功能区,GP 与 CS 的关系是权衡的。可能的原因是,虽然农作物具有固碳能力,但这一能力远远低于森林和草地。此外,过度耕作会导致土壤质量下降,从而阻碍碳循环。

BC 和 OR 在整个研究区域内主要是协同关系,且它们与其他两项服务之间的关系的空间分布也非常相似(图 3),这可能是由于 BC 和 OR 具有高度的土地利用一致性。它们之间的权衡主要发生在农业生产与城镇发展功能区中,因为耕地对 BC 具有威胁作用<sup>[30]</sup>,而对 OR 没有威胁效应<sup>[27]</sup>。

GP 与 BC、GP 与 OR 在福建省西部的关系主要呈现出权衡关系(图 3),可能是由于在此期间,耕地由闽东向闽西转移,占用生态用地,导致土地利用冲突所致。然而,它们的关系在福建东部都是协同的。究其原因,可能是闽东地区的建设用地快速扩张占用了大量的生态用地,导致支持粮食生产、生物多样性与户外休憩服务的地类大幅减少,拉近了优势服务和劣势服务之间的差距从而使得它们的关系为协同。

BC 与 CS、以及 CS 与 OR 之间的权衡关系主要发生在位于闽中与闽南的生物多样性维护和水源涵养功能区与土壤保持功能区(图 1,图 3)。对比图 1 的土地利用图可知,这可能是因为是在生物多样性维护和水源涵养功能区,林地分布密集且占比大,林地是固碳的主要支持地类,对 CS 有很强的支持作用。它也支持 BC 与 OR,但作为一种非主要的支持性地类,林地对这两项服务的支持度低于对固碳的支持度。因此,在生物多样性维护和水源涵养功能区,可能会在 CS 较优势而 BC 与 OR 较劣势的情况下发生权衡。在土壤保持功能区,林地

和耕地的占比较大，耕地对 CS 具有支持作用而对 BC 与 OR 无支持作用。在土地利用冲突的情况下使得服务之间的关系为权衡。

值得注意的是，在福建省东部沿海地区的农业生产与城镇发展功能区中建设用地特别密集的地区，几乎每两项服务之间的关系都为协同。可能的原因是由于在该地区建设用地密集且占地比例大，其他生态用地被占用，导致优势服务和劣势服务之间的差距缩小，从而使得两项服务之间的关系为协同。

### 3.3. 生态系统服务之间协同权衡的潜在影响因子

#### 3.3.1. 模型诊断与结果描述

我们利用 GWLR 分析了 6 对生态系统服务之间的协同权衡与地形、温度、降水、日照和城市化程度五个影响因素之间的空间相关性。如图 4 所示，偏差残差值在-2.5 和 2.5 之间的区域几乎占据了整个研究区域，这表明所有影响因素与这 6 个因变量之间的关系都是稳健的。

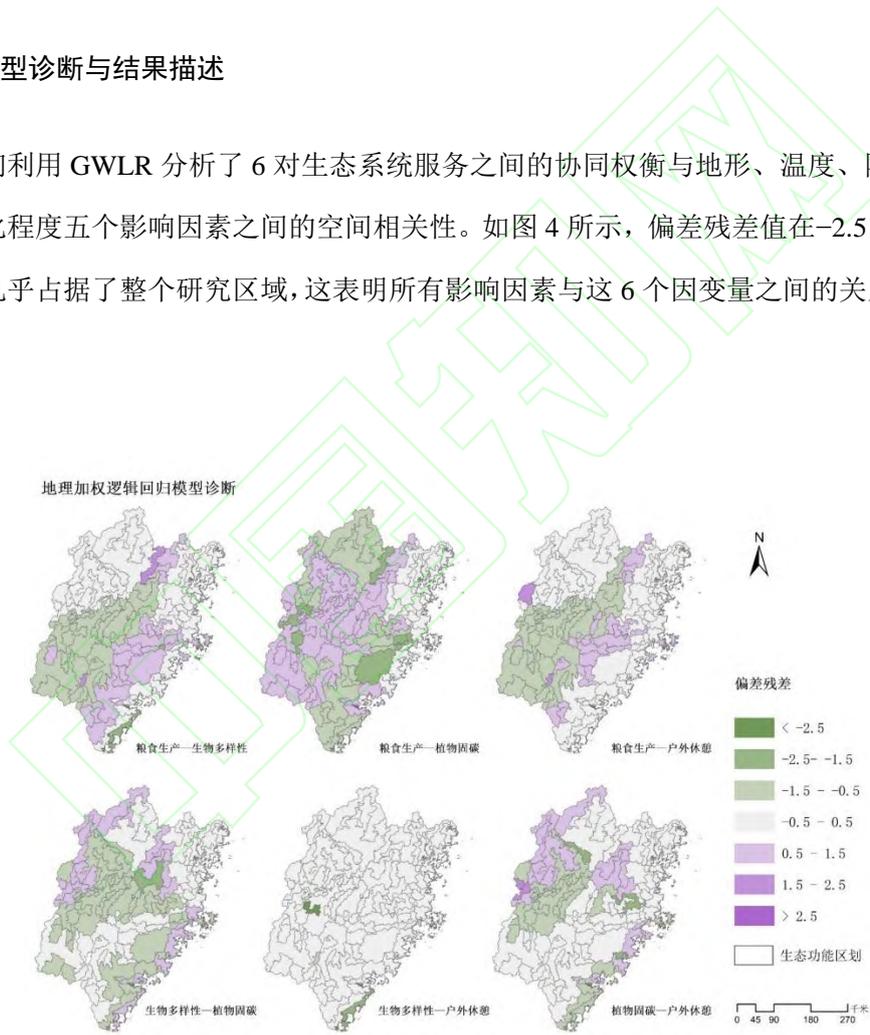


图 4 地理加权逻辑回归模型诊断参数偏差残差值

Fig. 4 Deviance residual of the geographically weighted logistic regression

该模型提供了与全局回归模型进行比较的诊断参数，如表 2 所示。由全局模型解释的偏差（非空间）可以量化全局逻辑回归的性能，而由局部模型解释的偏差用于量化地理加权逻

辑回归的性能。这两个参数的取值范围都在 0 到 1 之间，用于检验拟合度。值越大，表示拟合程度越高。由局部模型相对于全局模型解释的偏差是用于通过比较局部模型的残差平方和与全局模型的残差平方和来评估从全局模型转移到局部回归模型的优势的指标。由局部模型和全局模型解释的偏差是通过比较局部模型的残差平方和与全局模型的残差平方和来评估从全局模型 (GLR) 移动到局部回归模型 (GWR) 的优势的指标。该值在 0 和 1 之间变化，值越高表示局部回归模型的性能优于全局模型。

表 2 地理加权逻辑回归模型诊断参数

Tab.2 Parameters of the model diagnostic

服务之间的协同与权衡	模型诊断参数		
	由全局模型解释的偏差(非空间)	由局部模型解释的偏差	由局部模型和全局模型解释的偏差
粮食生产-生物多样性	0.3269	0.5103	0.2725
粮食生产-户外休憩	0.3315	0.4878	0.2339
粮食生产-植物固碳	0.1521	0.3050	0.1803
生物多样性-植物固碳	0.3398	0.4956	0.2360
生物多样性-户外休憩	0.3713	0.4655	0.1497
植物固碳-户外休憩	0.5159	0.6143	0.2032

### 3.3.2. 对影响因子的空间非平稳性响应

了解生态系统服务的协同权衡与影响因子之间的空间关联，对于制定和完善生态系统管理策略具有重要意义。管理者可以通过制影响因素或因地制宜地鼓励某种服务，来提高增加多种服务的产出，提高发展的可持续性。

### 对人类活动因子的空间响应

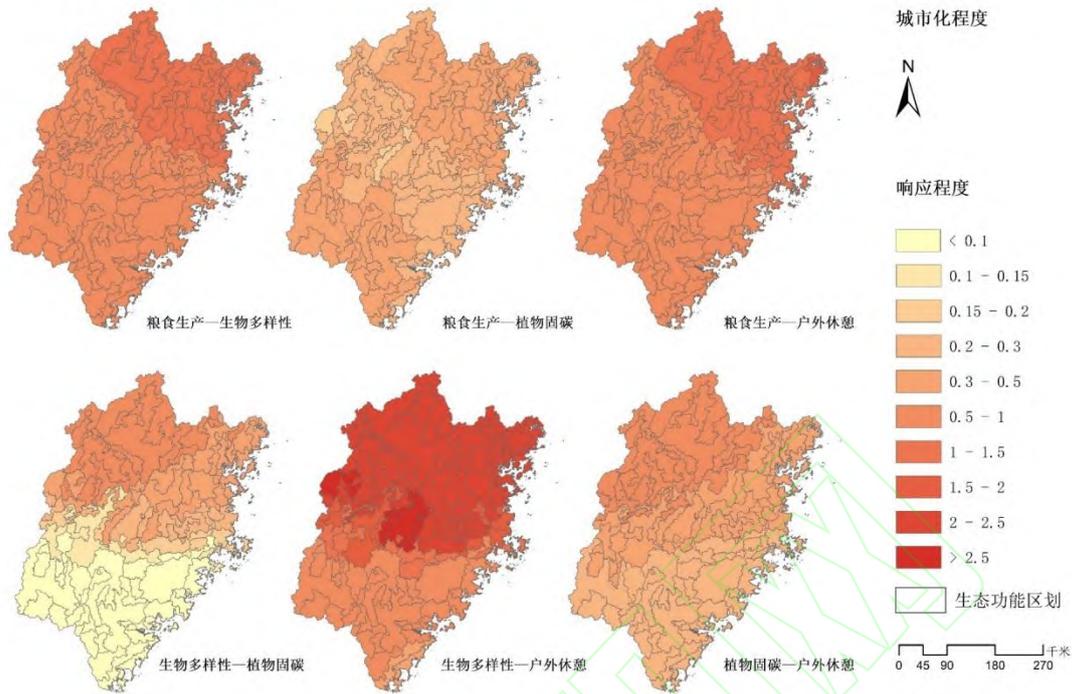


图 5 生态系统服务协同权衡对城市化的空间响应

Fig.5 Response of the tradeoff/synergy between ecosystem services to urbanization

上述六对关系对城市化程度的响应在整个研究区均呈现正响应,且在闽北的响应程度较强(图 5)。可能的原因是,相比其他地区,闽北的人类活动强度较弱,建设用地稀少,人口密度低,GDP 密度低。在城市化进程中,人类活动强度的适度增加可能会改变土地利用模式,建设用地的扩张将占用大量耕地和生态用地,导致各类服务的支持地类的面积发生不同程度的下降,可能导致优势服务和劣势服务之间的差距缩小,从而增加服务之间协同关系的概率。然而,协同概率的提高并不意味着城市扩张对生态环境有利。相反,现有研究表明城市化与各项服务均呈负相关<sup>[26]</sup>,建设用地的快速扩张必然会对生态环境产生负面影响<sup>[47]</sup>。因此,生态系统管理应密切关注不透水层面的快速生长,可以通过逐步改造旧城的方式进行城市建设。

协同权衡对高程的显著正响应也出现在闽北和闽西(图 6),这与国家级风景名胜区武夷山的位置是一致的。政府应充分利用闽北和闽西的生态资源,鼓励发展生态旅游,与自然景观并存,保护原始景观生态。在这些地区,建设项目必须经批准后方可进行,并严格限制商业和工业用地。这是为了在促进区域经济发展的同时,尽可能保护生态环境不受破坏,有利于吸引人口从生态压力区(东部)向生态适宜区(西部)转移,从而减轻快速城镇化给闽东带

来的重大压力。

#### 对地形因子的空间响应

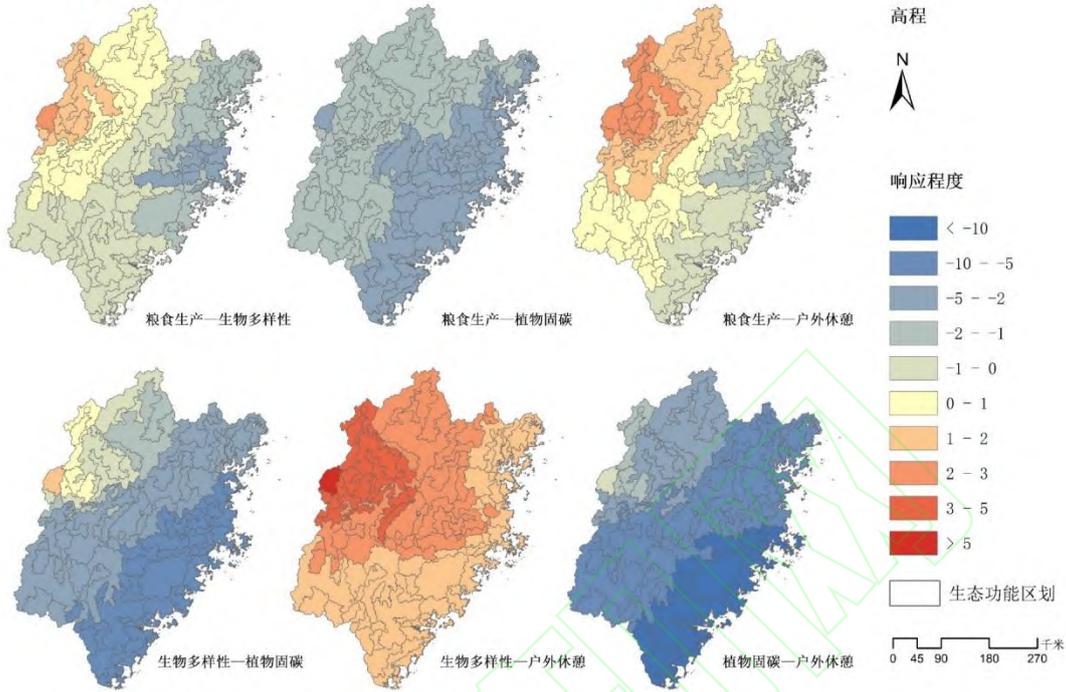


图 6 生态系统服务协同权衡对高程的空间响应

Fig.6 Response of the tradeoff/synergy between ecosystem services to elevation

因 BC 和 OR 具有高度的土地利用一致性，它们与其他两项服务（GP、CS）之间的协同权衡关系的空间分布十分相似，且这种协同权衡关系对三个气候因素的响应在空间分布上也具有相似的规律（图 7-9）。（1）对降水的响应，在闽北地区主要为负响应；而对温度的响应，在闽北地区主要为正响应。（2）对日照的响应和对温度的响应，在性质上刚好呈现相反的分布，即对温度正响应的地区对应的是对日照负响应的地区。以 GP 与 BC、GP 与 OR 这两对关系为例，它们对降水的响应在整个区域为负，且在闽北的响应强度更强。对温度的响应在闽北为正，在闽南为负。对日照的响应在闽北为负，在闽南为正。这可能与水源涵养量（降水量-蒸发量）<sup>[48,49]</sup>有关。福建省的河流分布呈现北高南低的状态，主干河流闽江位于福建省北部，闽北地区具有丰富的水资源。在闽北，生态系统服务间的关系与降水呈现显著负相关，说明降水增加会使得服务之间出现权衡关系的概率增加。已有研究表明，日照和温度都能影响水分蒸发量，且温度对蒸发量的贡献率为正，日照对蒸发量的贡献率为负。在闽北，服务之间的关系与日照呈现负相关，与温度呈现正相关；即蒸发量增加会使得服务之间出现协同关系的概率增加。说明 GP 与 BC、GP 与 OR 这两对关系若要增加协同关系发生

的概率，可能需要维持一个较为适中的水源涵养量。即在水资源丰富的地区，需要较低的水源涵养量，在水资源较少的地区需要较大的水源涵养量。

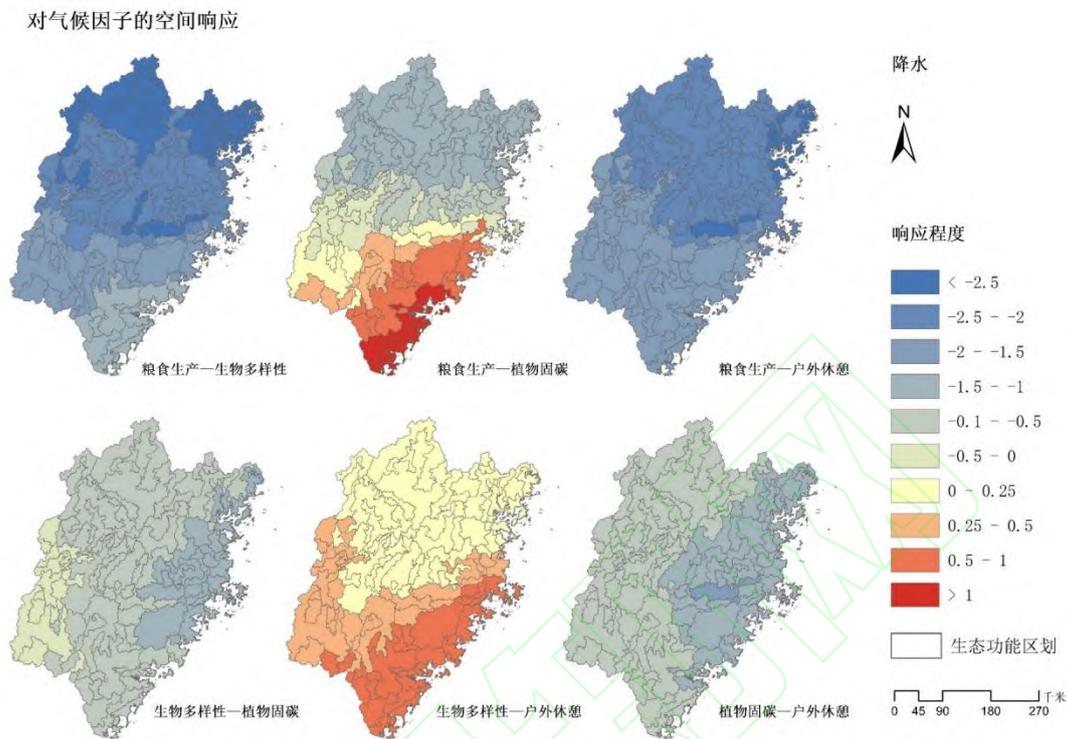


图 7 生态系统服务协同权衡对降水胁迫因子的空间响应

Fig.7 Response of the tradeoff/synergy between ecosystem services to precipitation stress factor

GP 和 CS 之间的关系对降水和温度的响应在整个研究区内的分布十分相似，都是在福建省东南部为正响应，在闽西和闽北为负响应。这可能是由于闽东南和闽西、闽中、闽北处于不同的气候分区。福建省属于亚热带气候，除闽东南地区属于亚热带气候，其他地区都属于中亚热带气候，闽东南的降水量和温度都要高于其他地区。在闽东南，降水和温度的增加都会增加服务间协同关系发生的概率；而在福建省其他地区，降水和温度的增加都会增加服务间权衡关系发生的概率，这是由于共同的驱动因子（降水和温度）对两项服务的影响具有空间异质性。在潮湿的生态系统中，降水增加可能会通过减少辐射输入、增加养分流失或降低土壤氧气有效性来降低碳固定能力<sup>[50]</sup>。在一定阈值范围内，耕地、常绿针叶林和常绿阔叶林的植物固碳能力随温度的升高而减小<sup>[28]</sup>。故在福建省全域，植物固碳能力会随着降水和温度的增加而降低。福建省的粮食作物以水稻为主，水稻喜高温、多湿、短日照，在中亚热带气候区，降水和温度的适度升高都能促进作物增产<sup>[51]</sup>。故在闽北、闽中和闽西，GP 和 CS 之间的关系对降水和温度表达为负响应。而属于亚热带气候的闽东南沿海地区的强

对流天气和台风带来的暴雨可能造成耕地积涝成灾，且暖湿气候可能会增加病虫害基数和危害率，从而影响到粮食产量。故 GP 和 CS 之间的关系在闽东南对降水和温度表达为正响应。

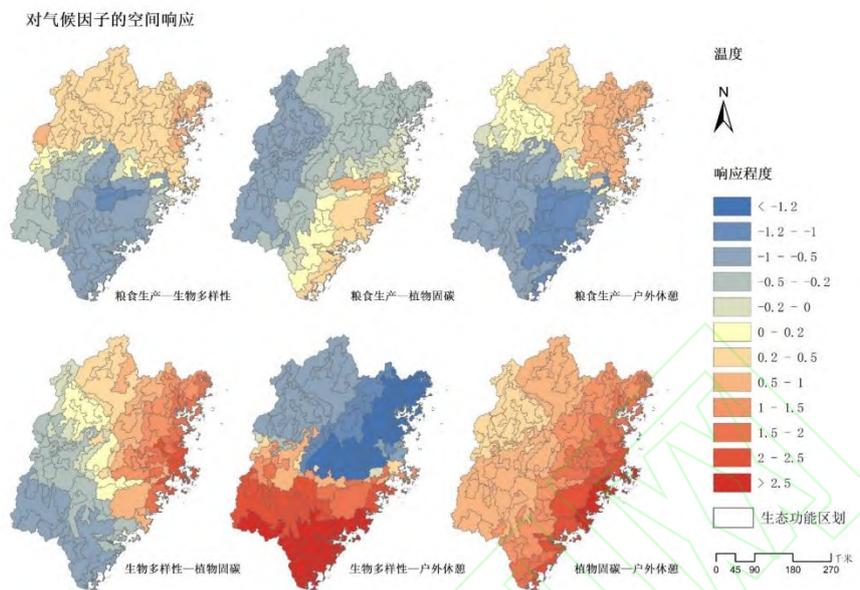


图 8 生态系统服务协同权衡对温度胁迫因子的空间响应

Fig.8 Response of the tradeoff/synergy between ecosystem services to temperature stress factor

由于气候因素以组合的形式共同影响植物<sup>[52]</sup>，不同植物对各种气候胁迫因素的敏感性不同<sup>[42]</sup>。故而生态系统服务也受到气候因素组合的影响。温度、降水和日照的不同组合对不同区域和系统的服务的影响也不同<sup>[28,52]</sup>。因此，每项服务对气候因子的响应不是一对一的，而是对包括多种气候因素和区域土地类型和植物类型在内的一组综合条件的共同响应。因此，很难完全解释两种服务之间的关系对单一气候因素的响应机制。然而，了解这种响应的空间分布，管理者可以通过控制这些因素，以增加服务之间协同关系发生的概率<sup>[33]</sup>。

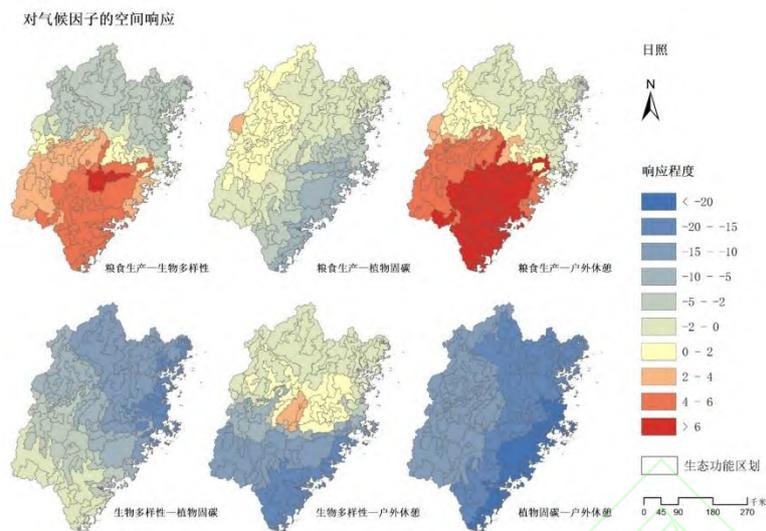


图9 生态系统服务协同权衡对日照胁迫因子的空间响应

Fig.9 Response of the tradeoff/synergy between ecosystem services to sunshine stress factor

## 4 结论

本研究以生态功能区为研究单元，提出差异比较法，确定了 ESs 协同权衡的空间分布；综合选取自然环境因素和社会经济因素，并基于 GWLR 获得 ESs 协同权衡对地形、气候和城市化三方面因素的空间非平稳性响应。主要结论如下：

(1) 研究中选取的四项 ESs (GP、CS、OR、BC) 都具有空间异质性。其中，GP 的产量分布与行政区具有明显的关联，BC、OR 与 CS 的最高值都出现在生物多样性维护与水源涵养功能区内。

(2) ESs 之间的协同权衡具有显著的空间自相关性，并非在空间上恒定。每两项服务在空间上并非只是单一关系，而是同时存在协同与权衡关系。当两项服务产量的空间分布相似时，它们各自与其他服务之间的协同权衡的空间分布也十分相似。

(3) 研究通过总结 ESs 协同权衡的发生规律，对已有的协同权衡形成机制进行细化：在一定的区域范围内，支持性土地利用类型和非支持性土地利用类型的面积比例，以及它们对各项服务的支持程度会使得两项服务在该区域范围内区分出优势服务和劣势服务。由于土地利用变化，优势服务和劣势服务之间存在动态差距，当该差距处于增加状态时，可能导致权衡发生。

(4) ESs 之间的协同权衡关系与气候、地形和城市化因子稳健相关。模型诊断结果表明地

理加权逻辑回归在解决 ESs 协同权衡对影响因子响应的问题上要优于全局回归。

(5) ESs 协同权衡关系对影响因子的响应具有空间差异，其正负性和强度都随空间变化。

## 5 结语

从科学到决策，是新时期中国地理学发展的重要特征与任务<sup>[53]</sup>。“生态系统服务权衡”既可指 ESs 供给此消彼长的权衡关系，也可强调 ESs 消费取舍的权衡行为。因此，ESs 协同权衡是关系认知与行为决策的结合，是地理学研究从科学到决策转型的核心途径<sup>[54]</sup>。在千年生态系统评估工作结束前后，ESs 研究议题更加重视空间异质性、区域差异和社会经济因素，ESs 研究范式呈现出显著的空间转向、区域转向和综合转向<sup>[7]</sup>。

本文主要创新点有：(1) 以生态功能区为研究单元，有利于生态治理统筹规划；(2) 提出了将 ESs 协同权衡关系绘制成图的方法——差异比较法；(3) 细化了 ESs 协同权衡关系的形成机制；(4) 潜在影响因子的选择更加全面；(5) 获得了 ESs 协同权衡关系对影响因素的空间非平稳性响应。本研究有利于更深入地理解生态系统服务之间的协同和权衡关系，可为其他区域的研究以及决策的制定提供参考。本研究提出的差异比较法，对比局回归模型或成对相关系数，能清晰反映出 ESs 协同权衡的地域分异特征，且能支持后续的局部回归计算；对比空间制图的方法（通过比较各项服务的热点来判断 ESs 关系）<sup>[13]</sup>，能明确表达出协同和权衡发生的区域，而不只是反映各项服务供应的最终状态。但该方法同样存在着局限性，例如，只能反映出两种服务之间的空间关联，不能同时描述多种服务之间的空间关联，确定多种服务之间的空间关联一直都是 ESs 之间协同权衡的研究的难点；该方法的结果是二元的，因此不能像连续的数值结果那样表达出 ESs 之间关系的强弱。但由于本研究的主要内容是确定与 ESs 协同权衡对其影响因子的空间响应，ESs 空间关系强弱的确定可作为下一步研究的方向。

致谢：本研究获得国家重点研发计划（项目编号：2017YFB0503500）的资助。

## 参考文献

- [1] Millennium Ecosystem Assessment M. Ecosystems and human well-being[J]. Synthesis, 2005.
- [2] Xu Man, He Xuan, He Jia, et al. Strictest Environmental Protection System Framework Based on Ecological Civilization [J]. ENVIRONMENTAL SCIENCE AND MANAGEMENT, 2013,

38(10): 121-126. (徐曼, 何璇, 何佳, 等. 基于生态文明的最严格环保制度的框架体系研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(10): 121-126.)

[3] YANG Fan, et al. Research on Ecological Spatial Distribution and Conservation Direction Based on the Analysis of Ecosystem Service Function Importance and Ecological Sensitivity[J]. TERRITORY & NATURAL RESOURCES STUDY, 2020(5): 19-25.(杨帆, 李纯斌, 吴静, 等. 基于生态系统服务功能重要性及生态敏感性分析的生态空间分布与保护方向研究[J]. 国土与自然资源研究, 2020(5): 19-25.)

[4] DAI Fei, QIU Yue, BI Shibo, et al. Analysis of Landscape Architecture Development Trends in the Perspective of National Territory Spatial Planning[J]. Landscape Architecture, 2020, 27(1): 12-18.(戴菲, 邱悦, 毕世波, 等. 国土空间规划视角下的风景园林发展动态分析[J]. 风景园林, 2020, 27(1): 12-18.)

[5] LONG Hua - lou, LIU Yong - qiang, et al. LI Ting - ting Spatial Interlinking of Land Use Planning and Environmental Protection Planning From the Perspective of Ecological Civilization Construction[J]. ECONOMIC GEOGRAPHY, 2014, 34(5): 1-8.(龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态文明建设视角下土地利用规划与环境保护规划的空间衔接研究[J]. 经济地理, 2014, 34(5): 1-8.)

[6] Feng Q, Zhao W, Fu B, et al. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: A case study in the Loess Plateau of China[J]. Science of The Total Environment, 2017, 607-608: 1250-1263.

[7] LI Shuangcheng, WANG Jue, ZHU Wenbo, et al. Research framework of ecosystem services geography from spatial and regional perspectives [J]. ACTA GEOGRAPHICA SINICA, 2014, 69(11): 1628-1639.(李双成, 王珏, 朱文博, 等. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架[J]. 地理学报, 2014, 69(11): 1628-1639.)

[8] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. Ecology letters, 2009, 12(12): 1394-1404.

[9] FENG Yanyun, ZHAO Yuluan, YANG Zhimou, et al. Spatio-temporal Differentiation of Trade-offs and Synergies of Ecosystem Services in Typical Mountain Areas of China [J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(2): 268-279.(冯雁云, 赵宇鸾, 杨智谋, 等. 典型山地生态系统服务权衡与协同关系的时空分异研究(英文) [J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(2): 268-279.)

[10] WANG Xiaomeng, PAN Peipei, WANG Xiaoxu, et al. Research on Ecosystem Service Trade-off/Synergy Relationship in Hebei Province Based on Land Use[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(1): 80-88.(王晓萌, 潘佩佩, 王晓旭, 等. 基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(1): 80-88.)

[11] LIU Hai, WU Jing, CHENG 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.(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.)

[12] Xu S, Liu Y, Wang X, et al. Scale effect on spatial patterns of ecosystem services and associations among them in semi-arid area: A case study in Ningxia Hui Autonomous Region, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 598: 297-306.

[13] Qiu J, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(29): 12149.

[14] Fortin M-J, Payette S. How to test the significance of the relation between spatially autocorrelated data at the landscape scale: a case study using fire and forest maps[J]. Ecoscience, 2002, 9(2): 213-218.

[15] TIAN Jing, SHAO Shiwei, HUANG Yimin, YU Mengting. Towards a Core Set of Landscape Metrics for Land Use: A Case Study from Guangzhou, China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(3): 443-450. (田晶, 邵世维, 黄怡敏, 等. 土地利用景观格局核心指数提取: 以中国广州市为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(3): 443-450.)

[16] Su S, Li D, Hu Y N, et al. Spatially non-stationary response of ecosystem service value changes to urbanization in Shanghai, China[J]. Ecological Indicators, 2014, 45: 332-339.

[17] Luo J, Kanala N K. Modeling urban growth with geographically weighted multinomial logistic regression[C]. Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: The Built Environment and Its Dynamics, 2008: 71440M.

[18] Rodrigues M, De La Riva J, Fotheringham S. Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression[J]. Applied Geography, 2014, 48: 52-63.

[19] Tu J, Xia Z-G. Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression I: Model design and evaluation[J]. Science of The Total Environment, 2008, 407(1): 358-378.

[20] Fotheringham A S, Brunsdon C. Local forms of spatial analysis[J]. Geographical analysis, 1999, 31(4): 340-358.

[21] P é z A, Wheeler D. Geographically weighted regression[J], 2009.

[22] Alexandra-Maria, Klein, Ingolf, et al. Fruit Set of Highland Coffee Increases with the Diversity of Pollinating Bees[J]. Proceedings Biological Sciences, 2003.

[23] MEN Jilin, LIU Yueyan, ZHANG Bin, ZHOU Fan. Land Use Classification Based on Multi-structure Convolution Neural Network Features Cascading[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(12): 1841-1848. (门计林, 刘越岩, 张斌, 等. 多结构卷积神经网络特征级联的高分影像土地利用分类[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(12): 1841-1848.)

[24] XING Hanfa, MENG Yuan, HOU Dongyang, XU Haibin, LIU Jinran. A Land-Cover

Classification Method Using Point of Interest[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(5): 758-764. (邢汉发, 孟媛, 侯东阳, 等. 一种应用兴趣点数据进行地表覆盖分类的方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2019, 44(5): 758-764.)

[25] Kuri F, Murwira A, Murwira K S, et al. Predicting maize yield in Zimbabwe using dry dekads derived from remotely sensed Vegetation Condition Index[J]. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 2014, 33: 39-46.

[26] Zhang Y, Liu Y, Zhang Y, et al. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: A case study in Wuhan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 780.

[27] Baró F, Palomo I, Zulian G, et al. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: A case study in the Barcelona metropolitan region[J]. *Land Use Policy*, 2016, 57: 405-417.

[28] Zhu W. Remote sensing estimation of net primary productivity of vegetation in terrestrial ecosystems in China and its relationship with climate change[D]. Beijing Normal University, 2005.

[29] Peng J, Tian L, Liu Y, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 706-714.

[30] Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, et al. InVEST 2.0 Beta User's Guide: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs[J]. Woods Institute for the Environment, Stanford University: California, CA, USA, 2011.

[31] Reyers B. Incorporating anthropogenic threats into evaluations of regional biodiversity and prioritisation of conservation areas in the Limpopo Province, South Africa[J]. *Biological Conservation*, 2004, 118(4): 521-531.

[32] Wei Y, Huang Y, Li G. Reproductive isolation in sympatric *Salvia* species sharing a sole pollinator[J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(6): 608-614. (魏宇昆, 黄艳波, 李桂彬. 同域分布共享传粉者的鼠尾草属植物的生殖隔离[J]. *生物多样性*, 2017, 25(6): 608-614.)

[33] Zhang Z, Liu Y, Wang Y, et al. What factors affect the synergy and tradeoff between ecosystem services, and how, from a geospatial perspective?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120454.

[34] Jiang C, Li D, Wang D, et al. Quantification and assessment of changes in ecosystem service in the Three-River Headwaters Region, China as a result of climate variability and land cover change[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 199-211.

[35] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1977, 281(980): 277-294.

[36] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.

[37] Zhu W, Pan Y, He H, et al. Simulation of maximum light use efficiency for some typical

- vegetation types in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(4): 457-463.
- [38] Moran P a P. The Interpretation of Statistical Maps[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1948, 10(2): 243-251.
- [39] Augustin N, Muggleston M A, Buckland S T. An autologistic model for the spatial distribution of wildlife[J]. Journal of Applied Ecology, 1996: 339-347.
- [40] Atkinson P, E. German S, Sear D, et al. Exploring the Relations Between Riverbank Erosion and Geomorphological Controls Using Geographically Weighted Logistic Regression[M]. 35. 2003.
- [41] YAN Luming. A mathematical model for functional evaluation of agroclimatic system in the middle subtropics of Fujian Province [J]. Resources Science, 1991(1): 41-47.(晏路明. 福建省中亚热带农业气候系统功能评价的数学模型[J]. 自然资源, 1991(1): 41-47.)
- [42] XIE Xianquan. Study of Agriculture Climate Resources Information system in Fujian Province[D]. Fujian Normal University, 2003.(谢先全. 福建省农业气候资源信息系统研究[D]. 福建师范大学, 2003.)
- [43] LI Yanshuang, ZENG Zhenxiang. Application of Primary Component Analysis in the Methods of Comprehensive Evaluation for many Indexes [J]. JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 1999(1): 94-97.(李艳双, 曾珍香. 主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用[J]. 河北工业大学学报, 1999(1): 94-97.)
- [44] YANG Xiaonan, LI Jing, QIN Keyu, et al. Trade-offs between ecosystem services in Guanzhong-Tianshui Economic Region [J]. ACTA GEOGRAPHICA SINICA, 2015, 70(11): 1762-1773.(杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 等. 关中—天水经济区生态系统服务的权衡关系[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1762-1773.)
- [45] Morandin L A, Winston M L. Pollinators provide economic incentive to preserve natural land in agroecosystems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 116(3-4): 289-292.
- [46] Ricketts T H, Regetz J, Steffan - Dewenter I, et al. Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns?[J]. Ecology letters, 2008, 11(5): 499-515.
- [47] Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109: 16083-16088.
- [48] Dabral P P, Baithuri N, Pandey A. Soil Erosion Assessment in a Hilly Catchment of North Eastern India Using USLE, GIS and Remote Sensing[J]. Water Resources Management, 2008, 22(12): 1783-1798.
- [49] Jia X, Fu B, Feng X, et al. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China[J]. Ecological Indicators, 2014, 43: 103-113.
- [50] Singer G. Productivity and Global Climate Revisited: The Sensitivity of Tropical Forest Growth to Precipitation[J]. Ecology, 2003, 84(5): 1165-1170.
- [51] YAO Yubi, LIU Jining, ZHANG Min, ZHAO Jifeng, LI Qiang, LI Dongling, LI Yu, ZHANG

- Xiuyun, 2020. Impact of climatic change on the agriculture in Hexi Oasis and countermeasures [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 29(8): 1499-1506.(姚玉璧, 刘吉宁, 张民, 等. 气候变化对河西绿洲农业的影响及对策[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1499-1506.)
- [52] Porter J R, Semenov M A. Crop responses to climatic variation[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 360(1463): 2021-2035.
- [53] Fu Bojie, Leng Shuying, Song Changqing. The characteristics and tasks of geography in the new era. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(8): 939-945.(傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 新时期地理学的特征与任务[J]. *地理科学*, 2015, 35(8): 939-945.)
- [54] PENG Jian, HU Xiaoxu, ZHAO Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making [J]. *ACTA GEOGRAPHICA SINICA*, 2017, 72(6): 960-973.(彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策[J]. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.)

# Spatial non-stationary response of the tradeoff/synergy between ecosystem services to influencing factors in ecological functional areas-- A case study of Fujian province

Zhang Ziyi<sup>1</sup> Liu Yanfang<sup>1</sup> Zhang Yang<sup>1</sup> Liu Yaolin<sup>1</sup> Lu Yanchi<sup>1</sup> Ren Qiran<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan,430079, China

**Abstract: Objectives:** Due to the sharp decline of global ecosystem services (ESs), there is an urgent need for correct environmental governance policies. The two problems existing in the current ecological environment governance in China are needed to be solved: (i) the lack of overall planning based on the unit of ecological functional areas and (ii) the lack of in-depth understanding of the synergy and tradeoff between ESs. This study takes ecological functional areas as the research unit, to determine the Spatio-temporal changes of four ESs (grain production (GP), carbon sequestration (CS), outdoor recreation (OR), and biodiversity conservation (BC)), and to explore the formation mechanism for the synergy/tradeoff between ESs and its spatially non-stationary response to influencing factors. These factors are temperature, precipitation, sunshine, altitude, and urbanization degree. **Methods:** In this study, Various models and multisource data were integrated to estimate the distribution of the yield of ESs in Fujian. A "difference comparison method" is proposed to determine the spatial distribution of the synergy/tradeoff between ESs. The Moran's I was applied to determine the spatial autocorrelation of the synergy/tradeoff between ESs. The principal component analysis method is used to select influencing factors, and the geographically weighted logic regression (GWLR) is used to determine the spatial response of the synergy/tradeoff to influencing factors. **Results:** The main results are as follows: (1) the four ESs selected in the study (GP, CS, OR, BC) have spatial heterogeneity. Among them, the yield distribution of GP was significantly related to the administrative region, and the highest values of BC, OR, and CS appeared in the Ecological functional areas of biodiversity conservation and water conservation. (2) All the Moran's I were are greater than 0, which means the synergy/tradeoff between ESs has significant spatial autocorrelation and spatially clustered. (3) In space, there are synergy and tradeoff simultaneously between two ESs, instead of a single relationship. (4) When the spatial distribution of the yield of the two services is similar, such as BC and OR, the spatial distribution of the synergy/ tradeoff between them and other services is also very similar. (5) The synergy/tradeoff between ESs showed significant responses to climate, topography, and urbanization factors. (6) The responses from the synergy/tradeoff between ESs to the influencing factors were spatially heterogeneous, and their positivity and intensity varied with space. **Conclusion:** The diagnosis results of the model show that the GWLR is superior to the global regression model in explaining the correlation between the synergy/tradeoffs of ESs and the influencing factors. By summarizing the law of the occurrence of the synergy/tradeoff, this paper refines the existing formation mechanism for the synergy/tradeoff between ESs: in a certain area, the area proportion of supportive land-use type and non-supporting land-use type, and the degree of their support effect for various services will make the two services distinguish between superior services and inferior services in this region. Due to the changes in land use, there is a dynamic gap between the superior services and the inferior services, which may lead to trade-offs when the gap is increasing.

**Key words:** ecosystem services; synergy and tradeoffs; geographical weighted logistic regression; ecological function areas; influencing factors; Fujian

**First author:** Zhang Ziyi, PhD, specializes in the application of ecological remote sensing. E-mail: zhangziyi\_violet@163.com

**Corresponding author:** Liu Yanfang, PhD, professor. E-mail: yfliu610@163.com

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program, China (Grant No. 2017YFB0503500).

**网络首发：**

**标题：**生态功能区生态系统服务协同权衡对影响因子的空间非平稳性响应——以福建省为例

**作者：**张紫怡，刘艳芳，张扬，刘耀林，王一恒，陆砚池，任其然

**收稿日期：**2021-06-

**DOI:**10.13203/j.whugis20200700

**引用格式：**

张紫怡，刘艳芳，张扬，刘耀林，陆砚池，任其然. 生态功能区生态系统服务协同权衡对影响因子的空间非平稳性响应——以福建省为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200700

( Zhang Ziyi , Liu Yanfang, Zhang yang, Liu Yaolin, Lu Yanchi, Ren Qiran. Spatial non-stationary response of the tradeoff/synergy between ecosystem services to influencing factors in Ecological functional areas-- A case study of Fujian Province [J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200700 )

**网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！**

---

**您感兴趣的其他相关论文：**

**基于云模型的土地整理生态影响评价研究**

樊敏,刘耀林,吴艳娟,杨啸颀

武汉大学学报(信息科学版),2008(9):986-989

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi10.13203/j.whugis200809008>

**基于生态绿当量的土地利用结构优化**

刘艳芳,明冬萍,杨建宇

武汉大学学报(信息科学版),2002(5):493-498+515

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi10.13203/j.whugis200205011>

### **土地生态经济适宜性评价模型研究**

俞艳,何建华,袁艳斌

武汉大学学报(信息科学版),2008(3):273-276

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi10.13203/j.whugis200803026>

