

DOI: 10.5846/stxb202108152249

熊燕飞, 张安录, 刘蒙罢, 李欢. 柑橘园扩张对生态系统服务和景观格局的影响——以江西省信丰县为例. 生态学报, 2022, 42(19): 7845-7857.

Xiong Y F, Zhang A L, Liu M B, Li H. Effects of citrus orchard expansion on ecosystem services and landscape pattern: A case study of Xinfeng County, Jiangxi Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7845-7857.

# 柑橘园扩张对生态系统服务和景观格局的影响 ——以江西省信丰县为例

熊燕飞<sup>1,2</sup>, 张安录<sup>1,2,\*</sup>, 刘蒙罢<sup>1,2</sup>, 李欢<sup>1,2</sup>

1 华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070

2 华中农业大学生态与环境经济研究所, 武汉 430070

**摘要:** 柑橘园扩张是我国柑橘主产区较典型的土地利用/覆盖变化过程之一。但柑橘园扩张对区域生态系统服务和景观格局的影响尚不清楚, 探明柑橘园种植的生态效应对柑橘主产区实现生态-经济协同发展具有重要的理论和现实意义。以江西省信丰县为研究区, 基于第二次、第三次全国国土调查数据, 借助 InVEST 模型、景观格局指数、图谱分析等方法, 结合地形梯度和相关性分析, 对柑橘园扩张所致的生态系统服务和景观格局变化及其权衡与关联进行分析。结果表明: ①2010—2019 年, 柑橘园扩张方向以占用林地和耕地为主, 柑橘园面积从 9961.29 hm<sup>2</sup> 增至 12633.84 hm<sup>2</sup>, 其中新增柑橘园 7504.72 hm<sup>2</sup>, 退出柑橘园 4832.16 hm<sup>2</sup>, 区域内柑橘园转换频繁。②柑橘园扩张导致信丰县景观格局总体呈现破碎化趋势, 景观连通性降低, 并对土壤保持服务和碳储量服务产生负向影响, 对柑橘供给服务产生正向影响, 对产水服务几乎无影响。③不同类型柑橘园在不同地形梯度上的扩张对生态系统服务的影响方向和程度存在差异。④在权衡与协同分析中, 供给服务与支持服务呈权衡关系, 碳储量-产水、碳储量-土壤保持等支持服务之间呈协同关系; 景观破碎化与生态系统服务显著关联。研究结果可为经济作物大规模种植区的园地合理开发利用和生境保护提供科学依据。

**关键词:** 柑橘园扩张; 生态系统服务; 景观格局; 相关性

## Effects of citrus orchard expansion on ecosystem services and landscape pattern: A case study of Xinfeng County, Jiangxi Province, China

XIONG Yanfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Anlu<sup>1,2,\*</sup>, LIU Mengba<sup>1,2</sup>, LI Huan<sup>1,2</sup>

1 School of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2 Institute of Ecology and Environmental Economics, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract:** The conversion of natural forest and cultivated land to citrus orchard has become one of the typical land use/cover change processes in major citrus producing areas in China. Enlarging citrus cultivation can bring promising profitability to smallholders. However, the ecological consequences of enlarging citrus cultivation on ecosystem services (ES) and landscape patterns remain unclear. It is of great significance to explore the ecological effects of citrus orchard scale planting on the eco-economic synergistic development of major citrus producing areas. This paper focuses on analyzing the changes of ESs and landscape pattern, their correlation and the tradeoff/synergy of ESs change caused by citrus orchard expansion, using a case of Xinfeng County, Jiangxi Province. First, we used TUPU analysis methods to characterize the spatial and temporal variation of citrus orchard expansion from 2010 to 2019, based on the data of the secondly and thirdly national land survey. Second, InVEST model was employed to evaluate critical ES dynamics caused by citrus orchard expansion, and then

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (71873053); 国家社会科学基金重大项目 (18ZDA054)

**收稿日期:** 2021-08-15; **网络出版日期:** 2022-05-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglanlu@mail.hzau.edu.cn

we analyzed its differences in different terrain gradients. Third, we applied correlation analysis to examine the tradeoffs between ESs and the relationships between ESs and landscape patterns. The results showed that: (1) from 2010 to 2019, the expansion direction of citrus orchards was mainly converted from forest land and cultivated land, and the area of citrus orchards increased from 9961.29 hm<sup>2</sup> to 12633.84 hm<sup>2</sup>, with 7504.72 hm<sup>2</sup> newly transferred in and 4832.16 hm<sup>2</sup> transferred out. The contradiction among forest land, cultivated land and citrus orchard is prominent in Xinfeng County. (2) The expansion of citrus orchards has boosted the supply of citrus supply services, whereas it had a negative impact on soil conservation services and carbon storage services. Soil conservation and carbon storage services decreased by 67.19% and 35.98%, respectively, from 2010 to 2019 throughout the region as a whole. Surprisingly, its impact on water yield services was not significant, with only a 5% reduction over the research period. Moreover, citrus orchard expansion has also resulted in a decrease in landscape connectivity and a trend of fragmentation in Xinfeng County. (3) The expansion of different citrus orchards on different terrain gradients had different effects on ESs. (4) In the tradeoff and synergy analysis, there was a tradeoff relationship between supply services and support services, and there was a synergy relationship between carbon storage-water yield and carbon storage-soil conservation. It is found that landscape fragmentation is significantly correlated with ESs. These results can provide scientific evidence for the rational development and utilization of gardens and habitat protection in large-scale cash crop planting areas.

**Key Words:** citrus orchard expansion; ecosystem services; landscape pattern; correlation

生态系统服务(ES)是指人类为满足自身需求从生态系统中所获取的直接或间接收益<sup>[1]</sup>,主要包含供给服务、调节服务、支持服务和文化服务4种服务类型<sup>[2]</sup>。各生态系统服务之间主要呈现此消彼长的权衡关系或同增同减的协同关系,明晰不同生态系统服务间的权衡与协同关系,有利于识别生态系统服务提升路径<sup>[3]</sup>。人类活动干扰下的土地利用变化改变了景观格局,而景观格局变化影响生态系统服务流的形成与循环过程,进而对生态系统服务供给产生影响<sup>[4-5]</sup>。科学合理估算土地利用变化对生态系统服务和景观格局的影响,分析生态系统服务之间的权衡关系,掌握生态系统服务和景观格局之间的关联,可为自然资源合理利用和生态环境保护政策制定提供参考依据。

生态系统服务评估研究发展迅速,国内学者陆续对全国<sup>[6]</sup>、流域<sup>[7]</sup>、黄土高原<sup>[8]</sup>、省域<sup>[9]</sup>、市域<sup>[10]</sup>、县域<sup>[4]</sup>等不同空间尺度下的生态系统服务进行评估,形成了以价值量评估和物质量评估<sup>[11]</sup>的两类生态系统评估方法。其中,InVEST模型由于评估精度高、结果空间可视化较强、且能满足不同区域的多项生态系统服务功能分析,已成为目前最为常用的生态系统服务评估模型<sup>[12-14]</sup>。该模型在进行生态系统服务评估时,需要根据不同区域设置不同参数,目前其在我国城市<sup>[15]</sup>、森林<sup>[16]</sup>、草地<sup>[13]</sup>、未利用地<sup>[12]</sup>等生态系统的评估应用取得了良好的模拟效果,但在我国丘陵地区园地生态系统评估的应用有待进一步验证并推广。此外,鉴于生态系统服务对维系人类福祉具有重要贡献,现有研究往往关注生态空间脆弱区或者建设空间和生态空间竞争激烈的区域<sup>[8,15]</sup>,对经济作物大规模种植区等农业空间与生态空间用地矛盾突出区域的研究较少。已有研究表明,经济作物规模种植可能会威胁生态系统服务。比如,Liu等<sup>[17]</sup>利用InVEST模型,分析西双版纳州的橡胶园在不同扩张强度下所引起的区域生态系统服务和景观格局变化情况,发现橡胶园高强度扩张区内碳储量大幅减少;Su等<sup>[18]</sup>的研究表明天然林向茶园转换严重影响了生态系统的水土保持功能;Li等<sup>[19]</sup>以中国亚热带杭州地区为例,得到生态系统服务价值与经济作物扩张之间存在负相关关系。然而,上述研究对于经济作物扩张引起的各种生态系统服务之间的权衡关系以及生态系统服务和景观格局之间的关联考虑不足,难以应用于种植业可持续发展决策之中。

近几十年来,随着人们生活水平的提高,柑橘消费呈现逐年增长态势,我国柑橘种植面积在2000—2019年间也从 $1271.78 \times 10^3$  hm<sup>2</sup>增长至 $2617.30 \times 10^3$  hm<sup>2</sup>,年均增长达4%。在柑橘主产区,柑橘园以占用林地和耕地的方式实现规模扩张,已成为较典型的土地利用/覆盖变化过程<sup>[20-23]</sup>。在国家深入推进乡村振兴和生态文

明建设背景下,森林和耕地生态系统被柑橘园生态系统替代会对生态系统服务产生怎样的影响,是否存在地形效应差异?柑橘种植影响下生态系统服务权衡关系如何?柑橘园扩张如何影响区域景观格局,进而影响生态系统服务?这些问题的回答对柑橘主产区如何保障柑橘产业的经济效益且实现生态成本最小化,推动生态-经济协同发展具有重要现实意义。

信丰县是我国著名的“脐橙之乡”,是赣南脐橙的发源地。柑橘园作为园艺生态系统,柑橘供给是其重要的供给服务之一。研究表明,柑橘种植容易导致土壤侵蚀<sup>[24]</sup>,而且土壤侵蚀也是我国红壤地区最明显的生态系统退化现象<sup>[25]</sup>,定量测算柑橘园扩张对土壤保持服务的影响有利于维护区域生态安全。林地和耕地生态系统承担着重要的碳汇功能<sup>[26]</sup>,林地和耕地景观的减少不利于区域碳循环和气候稳定。此外,林地减少,会减少水分蒸散量,进而改变径流和蒸发比率,从而影响产水服务<sup>[27]</sup>。鉴于此,本研究以信丰县为研究案例,分析园地扩张的柑橘供给服务、产水服务、土壤保持服务和碳储量服务等4种生态系统服务和景观格局影响及其权衡与关联,并进一步探究园地扩张引起的生态系统服务变化的地形效应,以期为园地合理开发利用管理,促进农业生产和生态平衡提供依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

信丰县位于江西省南部,赣州市中部,全域土地总面积 2878 km<sup>2</sup>,辖 16 个乡镇(图 1)。境内地势由南向北倾斜,四周高而中间低,呈盆地地形。信丰县自 1970 年引种栽培赣南第一批脐橙以来,已有近 50 年种植历史,全县形成了“两线五点”脐橙生产基地格局,建成了 6 个万亩脐橙基地和一条以 105 国道为依托的十万亩“百里脐橙带”。大面积的果园取代了原有的旱地、常绿阔叶林,区域内果园、耕地、林地用地竞争矛盾突出。

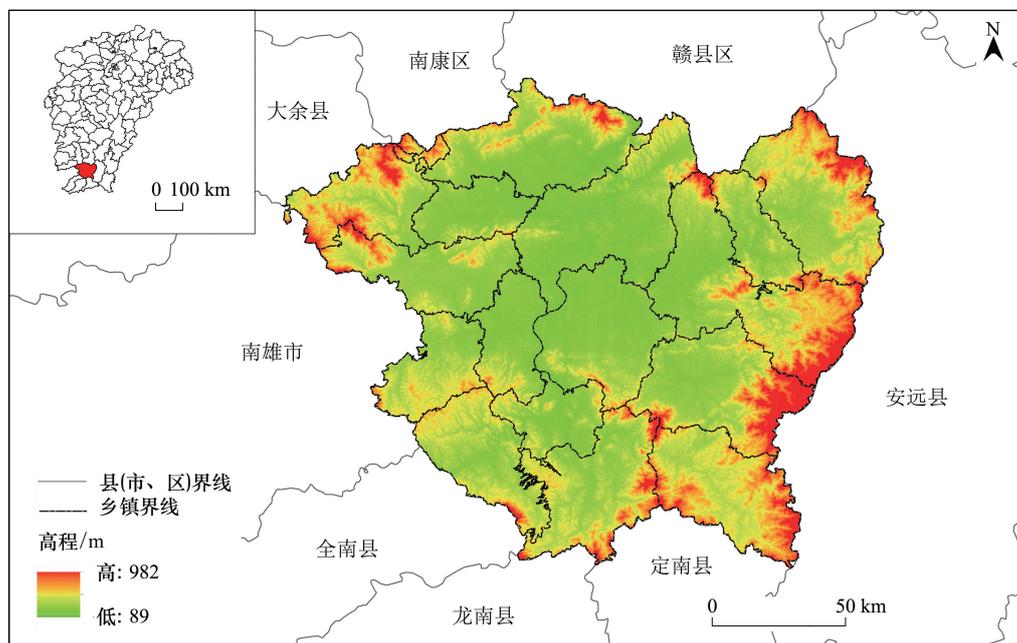


图 1 信丰县区位图

Fig.1 The location of Xinfeng County

### 1.2 数据来源

本研究数据主要包括土地利用数据、DEM 数据、气象数据、土壤数据、NDVI 数据、相关社会经济统计数据。①土地利用数据,来源于第二次、第三次全国国土调查数据库,根据研究区实际土地利用情况和研究目的,最终将信丰县土地利用类型分为耕地、柑橘园、林地、水域、建设用地、未利用地六类。②DEM 数据,来源

于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 分辨率为 30 m。③气象数据, 来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 采集信丰县周围 13 个气象站点的降雨、温度等数据。④土壤数据, 土壤中砂粒、粉粒、粘粒百分比来源于《信丰县土壤志》; 土壤有机质、有机碳数据来源于野外调查, 共采集 76 个土样; 土壤类型数据来自信丰县自然资源局; 土层厚度数据根据土壤类型数据、《信丰县土壤志》和 2019 年信丰县农用地分等定级数据库综合确定。⑤NDVI 数据, 来源于美国地质调查局 (USGS) 对地观测资源与科学中心 (<http://glvis.usgs.gov/>), 分辨率为 30 m。⑥相关统计数据, 来源于《江西省水土保持公报》《信丰县统计年鉴》和《信丰脐橙志》, 包括年均径流量、输沙量、柑橘种植面积和产量等。

## 2 研究方法

### 2.1 柑橘园时空变化测度

柑橘园的数量和空间来源及其流向是研究柑橘园时空变化的基础。本文借鉴李全峰等<sup>[28]</sup>测度耕地数量转换来源公式, 测算柑橘园数量转换来源。利用图谱分析方法刻画柑橘园涨势、落势和恒定图谱, 以探究柑橘园空间转换来源。根据相关研究<sup>[29-30]</sup>, 图谱分析方法主要包括图谱时空单元确定和图谱构建两个部分。

#### 2.1.1 图谱时空单元确定

选择 2010 年和 2019 年的土地利用数据为基础数据, 则图谱的时间序列单元为 2010—2019 年; 结合遥感数据的可获取性和数据单元的一致性, 最终选取 30 m×30 m 的空间分辨率作为图谱分析的空间单元。

#### 2.1.2 图谱构建

利用 ArcGIS 10.2 软件, 首先对 2010 年和 2019 年土地利用类型赋值编码 (表 1), 然后将编码后的两期土地利用现状图进行相交处理, 最后运用栅格计算器按照编码公式进行编码计算, 编码公式为:

$$C = 10A + B \quad (1)$$

式中,  $C$  为柑橘园变化图谱类型编码;  $A$  为前期土地利用类型编码值;  $B$  为后期土地利用类型编码值。如编码 32, 表示土地利用类型由林地转为柑橘园。

柑橘园变化包括转入和转出两个方面, 转入即其他土地利用类型转为柑橘园; 转出即柑橘园转为其他土地利用类型。根据编码原则, 利用筛选工具, 提取所有个位数值为 2 (22 除外) 的栅格单元即柑橘园转入栅格单元, 生成柑橘园涨势图谱; 提取所有十位数值为 2 (22 除外) 的栅格单元即柑橘园转出栅格单元, 生成柑橘园落势图谱; 提取编码为 22 的栅格单元, 生成柑橘园恒定图谱。

表 1 土地利用类型编码表

Table 1 The code of land use type

土地利用类型 Land use type	耕地 Arable land	柑橘园 Citrus orchard	林地 Forest land	水域 Water	建设用地 Built land	未利用地 Unused land
编码 Code	1	2	3	4	5	6

### 2.2 生态系统服务功能测算

#### 2.2.1 柑橘供给服务

本研究利用研究区 2010 年和 2019 年柑橘生产能力表征柑橘供给服务。通过年鉴数据获得信丰县柑橘产量, 利用 ArcGIS 软件将单位面积柑橘产量赋值到各个柑橘栅格单元, 计算每个栅格所对应的柑橘供给能力数值。

#### 2.2.2 产水服务

InVEST 模型的产水量评估模块其实质是基于 Budyko 水热耦合平衡假设<sup>[31]</sup>, 将每个栅格的降水量减去实际蒸散量, 从而确定研究区的年产水量。公式如下:

$$Y_{xj} = \left( 1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right) \times P_x \quad (2)$$

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + w_x + R_{xj}}{1 + w_x R_{xj} + \left(\frac{1}{R_{xj}}\right)} \quad (3)$$

$$w_x = Z \times \frac{PAWC_x}{P_x} \quad (4)$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} \times ET_0}{P_x} \quad (5)$$

式中,  $Y_{xj}$  为土地覆被类型  $j$  上栅格单元  $x$  的年产水量 (mm);  $AET_{xj}$  为土地覆被类型  $j$  上栅格单元  $x$  的年实际蒸散量 (mm);  $P_x$  为栅格单元  $x$  的年降水量 (mm);  $w_x$  为修正植被年可利用水量与预期降水量的比值;  $R_{xj}$  为土地覆被类型  $j$  上栅格单元  $x$  的 Budyko 干燥指数;  $K_{xj}$  为土地覆被类型  $j$  上栅格单元  $x$  的植物蒸散系数;  $ET_0$  为参考作物蒸散;  $PAWC_x$  为植物可利用含水量 (mm);  $Z$  为 Zhang 系数, 将产水模拟量与研究区水文站点的年径流量对比分析, 最终发现  $Z$  取值 10.36 时, 符合研究区实际情况。

### 2.2.3 土壤保持服务

InVEST 模型的土壤保持服务评估模块在 RUSLE 方程的基础上考虑地块本身拦截上游沉积物的能力, 故该模型的土壤保持服务包含土壤侵蚀减少量和泥沙持留量两个部分。公式如下:

$$SEDRET_x = R_x \times K_x \times LS_x \times (1 - C_x \times P_x) + SEDR_x \quad (6)$$

$$SEDR_x = SE_x \sum_{y=1}^{x-1} USLE_y \prod_{z=y+1}^{x-1} (1 - SE_z) \quad (7)$$

$$USLE_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (8)$$

式中,  $SEDRET_x$  为栅格单元  $x$  的土壤保持量 (t);  $SEDR_x$  为栅格单元  $x$  的泥沙持留量 (t);  $USLE_x$  和  $USLE_y$  为栅格单元  $x$  及其上坡栅格单元  $y$  的实际土壤侵蚀量 (t);  $R_x$  为降雨侵蚀力因子 ( $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ );  $K_x$  为土壤可蚀性因子 ( $\text{t hm}^2 \text{ h hm}^{-2} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ );  $LS_x$  为坡长坡度因子;  $C_x$  为植被覆盖与管理因子, 详见表 2;  $P_x$  为水土保持措施因子, 详见表 2;  $SE_x$  为泥沙持留效率。

### 2.2.4 碳储量服务

InVEST 模型的碳储量模块是根据不同土地利用/覆被类型或植被类型的地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机物质 4 个碳库评估碳储量。公式如下:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (9)$$

式中,  $C_{\text{tot}}$  为碳总储量 (Mg);  $C_{\text{above}}$  为地上生物碳储量 (Mg);  $C_{\text{below}}$  为地下生物碳储量 (Mg);  $C_{\text{soil}}$  为土壤碳储量 (Mg);  $C_{\text{dead}}$  为死亡有机物质碳储量 (Mg)。各土地利用/覆被类型的碳库数据, 基于已有相关研究成果<sup>[32-35]</sup>和信丰县实际情况修正获得, 具体见表 2。

表 2 InVEST 模型土地利用各部分关键参数

Table 2 Key parameters of land use in InVEST model

土地利用类型 Land use type	植被覆盖与 管理因子 $C_x$	水土保持 措施因子 $P_x$	地上碳密度 $C_{\text{above}}/$ ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	地下碳密度 $C_{\text{below}}/$ ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	土壤碳密度 $C_{\text{soil}}/$ ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	死亡有机 物碳密度 $C_{\text{dead}}/$ ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )
耕地 Arable land	0.23	0.40	14.40	10.89	114.60	2.11
柑橘园 Citrus orchard	0.45	0.69	10.75	6.75	89.90	1.50
林地 Forest land	0.08	1	26.30	14.60	140.70	3.10
水域 Water	0	0	0	0	0	0
建设用地 Built land	0	0	7.63	1.51	34.33	0
未利用地 Unused land	1	1	10.36	2.07	34.42	0.96

$C_x$ : Vegetation cover and management factors;  $P_x$ : soil and water conservation measure factors;  $C_{\text{above}}$ : Biological carbon storage on the ground;  $C_{\text{below}}$ : Biological carbon storage under the ground;  $C_{\text{soil}}$ : Soil carbon storage;  $C_{\text{dead}}$ : Dead organic carbon storage

### 2.2.5 生态系统服务变化测度

为单纯分析由柑橘园扩张引起的生态系统服务影响,而剔除柑橘园以外的其它土地利用变化引起的生态系统服务影响,将图谱类型编码中第二位数字编码为 2 的图斑作为基础数据,研究柑橘园扩张前后柑橘供给服务、产水服务、水土保持服务、碳储量服务的变化情况。具体公式如下:

$$k = 10 \times A + 2 \quad (10)$$

$$ES_i = \sum_{n=1}^k ES_{ik} \quad (11)$$

$$\Delta ES_i = ES_{it} - ES_{i(t-1)} \quad (12)$$

式中, $k$  为第  $A$  类土地利用类型转为柑橘园的图谱类型编码; $ES_i$  为第  $i$  种生态系统服务供给量; $ES_{ik}$  指编码为  $k$  的图斑的第  $i$  种生态系统服务供给量; $ES_{i(t-1)}$  为图斑成为柑橘园前的第  $i$  种生态系统服务供给量; $ES_{it}$  为图斑成为柑橘园后的第  $i$  种生态系统服务供给量。

### 2.3 景观格局分析

结合本文研究目的,同时为避免景观格局指数选取的冗余性,参考相关文献<sup>[36]</sup>,最终选取斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、景观凝聚度(COHESION)、景观连接度(CONNECT)和 Shannon's 多样性指数(SHDI)五个景观指数,分析柑橘园扩张对景观格局的影响。为仅分析柑橘园扩张引起的景观格局变化,剔除城市化、退耕还林等其它因素对景观格局的影响,本文采用单一变量法<sup>[37]</sup>,即将 2010 年土地利用现状数据作为柑橘园扩张前基础数据,将 2019 年的柑橘园图斑镶嵌入 2010 年土地利用现状数据,作为柑橘园扩张后基础数据。各景观格局指数可基于 Fragstats 4.2 软件计算而得。

### 2.4 地形梯度划分

参考研究区实际地形条件和柑橘种植对地形条件的要求<sup>[38]</sup>,最终将坡度、高程、地形位三个地形因素纳入考虑范围,并对其进行等级细分(表 3),以探究柑橘园扩张引起的生态系统服务变化的地形效应差异。

表 3 地形因素等级划分标准

Table 3 Classification criteria of terrain factors

地形因素 Terrain factors	等级 Rank			
	1	2	3	4
坡度 Slope/(°)	0—5	5—15	15—25	≥25
高程 Elevation/m	<200	200—300	300—400	≥400
地形位 Terrain niche	<0.6	0.6—0.9	≥0.9	

### 2.5 相关分析

相关分析能够揭示景观格局变化和生态系统服务变化之间是否存在相关性,以及其相关程度和方向。本研究利用 Pearson 相关系数研究柑橘供给、产水、土壤保持、碳储量四种生态系统服务变化之间的相关性以及各生态系统服务和 NP、PD、COHESION、CONNECT、SHDI 五种景观格局指数之间的关联性,以揭示柑橘园扩张过程中生态系统服务变化的权衡关系和生态系统服务对景观格局变化的响应。

## 3 结果与分析

### 3.1 柑橘园时空变化分析

2010—2019 年间,信丰县柑橘园数量整体处于扩张状态(表 4)。信丰县柑橘园面积从 9961.29  $\text{hm}^2$  增至 12633.84  $\text{hm}^2$ ,柑橘园净转入 2672.55  $\text{hm}^2$ ,净转换源于林地、耕地和未利用地。从转换来源来看,10 年间柑橘园转入面积为 7504.71  $\text{hm}^2$ ,增幅 75.33%,主要来源于林地和耕地;柑橘园转出面积为 4832.16  $\text{hm}^2$ ,减幅 51.49%,主要流向林地和耕地。

柑橘园涨势、落势、恒定图谱如图 2 所示。各乡镇柑橘园扩张类型均以占林型和占耕型为主,占林型柑橘

园呈现集聚现象,主要分布在嘉定镇、古陂镇和大塘埠镇,而占耕型柑橘园分布较为分散。仅安西镇柑橘园大面积还林,其它乡镇柑橘园缩减面积较小且无明显地域差异。研究区域内稳定的柑橘园,主要分布在信丰县中部的嘉定镇、安西镇和大塘埠镇等乡镇。

表 4 2010—2019 年信丰县柑橘园数量转换来源和转化变化率

Table 4 Conversion sources and rate of citrus orchards in Xinfeng County from 2010 to 2019

转换类型 Conversion type	耕地 Arable land		林地 Forest land		水域 Water		建设用地 Built land		未利用地 Unused land	
	面积 Area/hm <sup>2</sup>	贡献率 Rate/%								
转入 Transfer-in	1341.97	17.88	5574.66	74.28	88.01	1.17	203.94	2.72	296.14	3.95
转出 Transfer-out	751.94	15.56	3089.81	63.94	157.74	3.26	629.87	13.03	202.80	4.20
净转换 Net conversion	590.03	—	2484.85	—	-69.74	—	-425.93	—	93.33	—

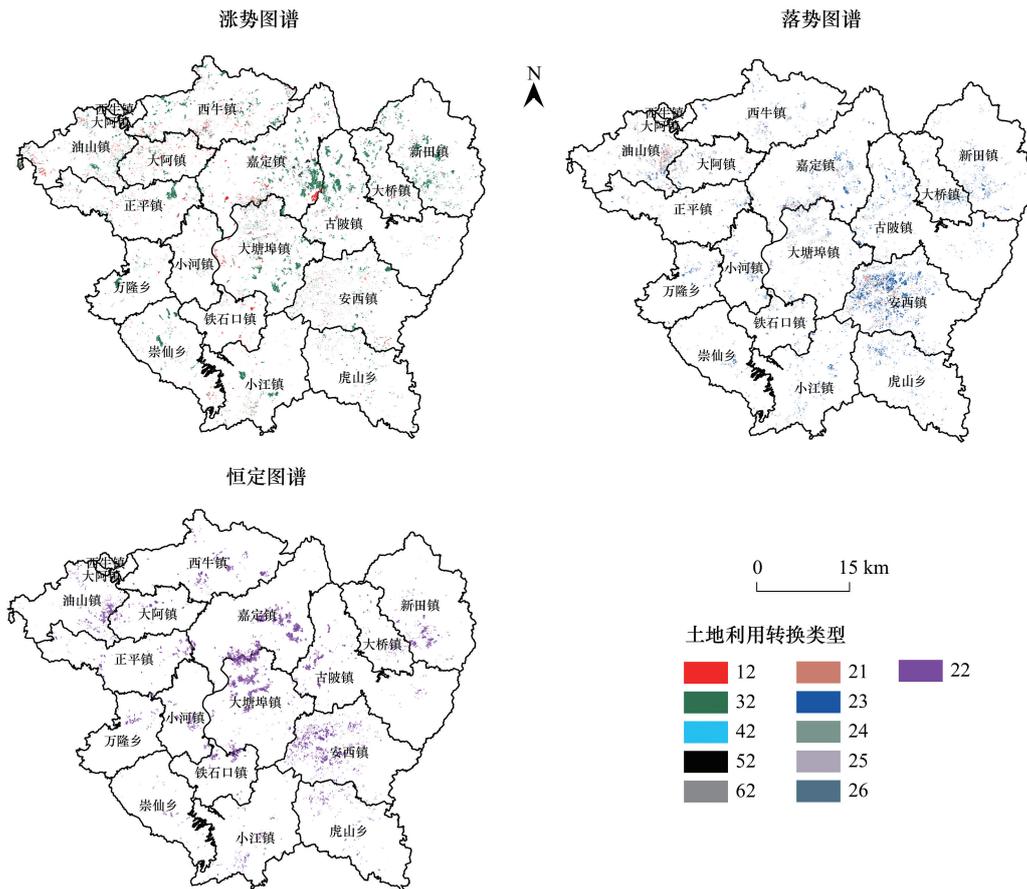


图 2 柑橘园涨势、落势、恒定图谱

Fig.2 Rising, falling, constant TUPU of citrus orchards

1 为耕地, 2 为柑橘园, 3 为林地, 4 为水域, 5 为建设用地, 6 为未利用地; 如编码 32, 表示土地利用类型由林地转为柑橘园

### 3.2 生态系统服务功能影响分析

2019 年赣江流域信丰段的平均径流量 36.38 亿 m<sup>3</sup>、总输沙量为 7.71×10<sup>5</sup> t, 对比 InVEST 模型模拟的 2019 年信丰县产水量 36.32 亿 m<sup>3</sup>、总输沙量 7.82×10<sup>5</sup> t, 模拟产水模数与实际产水模数相对误差为 0.15%, 模拟输沙量与实际输沙量相对误差为 1.39%, 模拟结果在可允许误差内, 可用于生态系统服务影响分析。

总体来看(表 5), 柑橘园扩张导致柑橘供给服务增加了 7957.28 t, 产水服务、土壤保持服务和碳储量服务分别减少了 5.13×10<sup>5</sup> mm、5.0×10<sup>6</sup> t、3.67×10<sup>5</sup> Mg, 对全域生态系统服务供给变化的贡献率分别为 31.49%、

3.97%、67.19%、35.98%。这表明柑橘园扩张对产水服务几乎无影响,但对土壤保持服务和碳储量服务产生负向影响。在柑橘园扩张类型中,占林型柑橘园和占耕型柑橘园是造成生态系统服务发生变化的主要柑橘园类型。除柑橘供给服务外,占耕型柑橘园对其它三种生态系统服务均表现为抑制作用,而占林型柑橘园对土壤保持服务和碳储量服务表现为抑制作用,但对产水服务产生较小的促进作用,且在土壤保持服务和碳储量服务中,占林型柑橘园的抑制作用均显著大于占耕型柑橘园。

由图 3 可知,占林型柑橘园(32)和占耕型柑橘园(12)在不同地形梯度上的扩张对生态系统服务的影响存在显著差异。从柑橘供给服务来看,占林型柑橘园主要分布在 200—300 m、坡度 5°—15°和中地形位部位,而占耕型柑橘园主要分布在 200 m 以下、坡度 5°—15°和低地形位部位。占耕型柑橘园在各个地形梯度的扩张均对产水服务产生了负向影响,而占林型扩张仅在高程 200 m 以下,坡度 5°以下和低地形部位处的扩张对产水服务产生负向影响,其他地形梯度上均呈现正向影响,这主要是因为信丰县属于丘陵地区,实际蒸散量对产水服务变化的影响程度较大<sup>[39]</sup>,地形差异导致林地实际蒸散量存在空间异质性,使得位于低地形林地的产水服务供给比高地形林地的产水服务供给大。占林型和占耕型柑橘园在各个地形梯度上的扩张均对土壤保持服务和碳储量服务产生负向效应,处于高程 200—300 m、5°—25°、中低地形部位的扩张引起的土壤保持服务和碳储量服务损失量最大,这可能是因为柑橘园较林地和耕地而言,植被覆盖率低,涵养水土能力弱,生物活动较少。

表 5 柑橘园扩张生态系统服务影响表

Table 5 Impact of citrus orchard expansion on ecosystem services

柑橘园扩张类型 Citrus orchard expansion type	柑橘供给变化量 Variation of citrus supply		产水变化量 Variation of water yield		土壤保持变化量 Variation of soil conservation		碳储量变化量 Variation of carbon storage	
	总量 Total/t	平均 Mean/ (t/hm <sup>2</sup> )	总量 Total/t	平均 Mean/ (t/hm <sup>2</sup> )	总量 Total/t	平均 Mean/ (t/hm <sup>2</sup> )	总量 Total/t	平均 Mean/ (t/hm <sup>2</sup> )
	占耕型 Occupied arable land	841.31	0.63	-228535.98	-170.30	-549529.95	-409.49	-35597.09
占林型 Occupied forest land	3515.57	0.63	49800.21	8.93	-4523417.21	-811.42	-359287.53	-64.45
占水型 Occupied water	55.74	0.63	191651.41	2177.61	-24549.39	-278.94	3826.51	43.48
占建型 Occupied built land	127.46	0.63	-59446.42	-291.49	-76096.74	-373.13	9792.15	48.01
占未利用地型 Occupied unused land	186.88	0.63	-290654.92	-981.48	359591.60	1214.26	14024.48	47.36
恒定柑橘 Constant citrus orchards	3230.31	0.63	-175667.11	-34.25	-183666.45	-35.81	-170.85	-0.03
总计 Total	7957.28	0.63	-512852.81	-40.59	-4997668.14	-395.58	-367412.34	-29.08
全域贡献率 Contribution rate	31.49%	—	3.97%	—	67.19%	—	35.98%	—

### 3.3 景观格局分析

在单变量条件下,分析 2010—2019 年柑橘园扩张对景观格局的影响,结果见表 6。柑橘园扩张前(2010 年)、扩张后(2019 年),研究区斑块数量、斑块密度和 Shannon's 多样性指数都有所增长,而景观凝聚度和景观连接度指数均呈现下降趋势。这表明柑橘园扩张导致研究区景观趋于破碎化,土地利用方式较柑橘园扩张前分散,景观连通性降低。Shannon's 多样性指数有所提升,这可能是因为信丰县的优势景观为林地,林地覆盖率高达 70%,在单变量条件下林地转为园地使得土地利用结构更为平衡。

### 3.4 生态系统服务权衡/协同分析

图 4 显示,在乡镇尺度上 4 种生态服务除产水服务和土壤保持服务的相关关系不显著外,其它两两服务之间的相关系数均通过了 0.01 显著性水平的检验。相关分析表明,柑橘供给服务与产水服务( $r=-0.91$ ,  $P=0.001$ )、土壤保持服务( $r=-0.70$ ,  $P=0.01$ )、碳储量服务( $r=-0.87$ ,  $P=0.001$ )均为显著权衡关系;碳储量服务与产水服务( $r=0.76$ ,  $P=0.001$ )、土壤保持服务( $r=0.85$ ,  $P=0.001$ )之间为极显著协同关系。

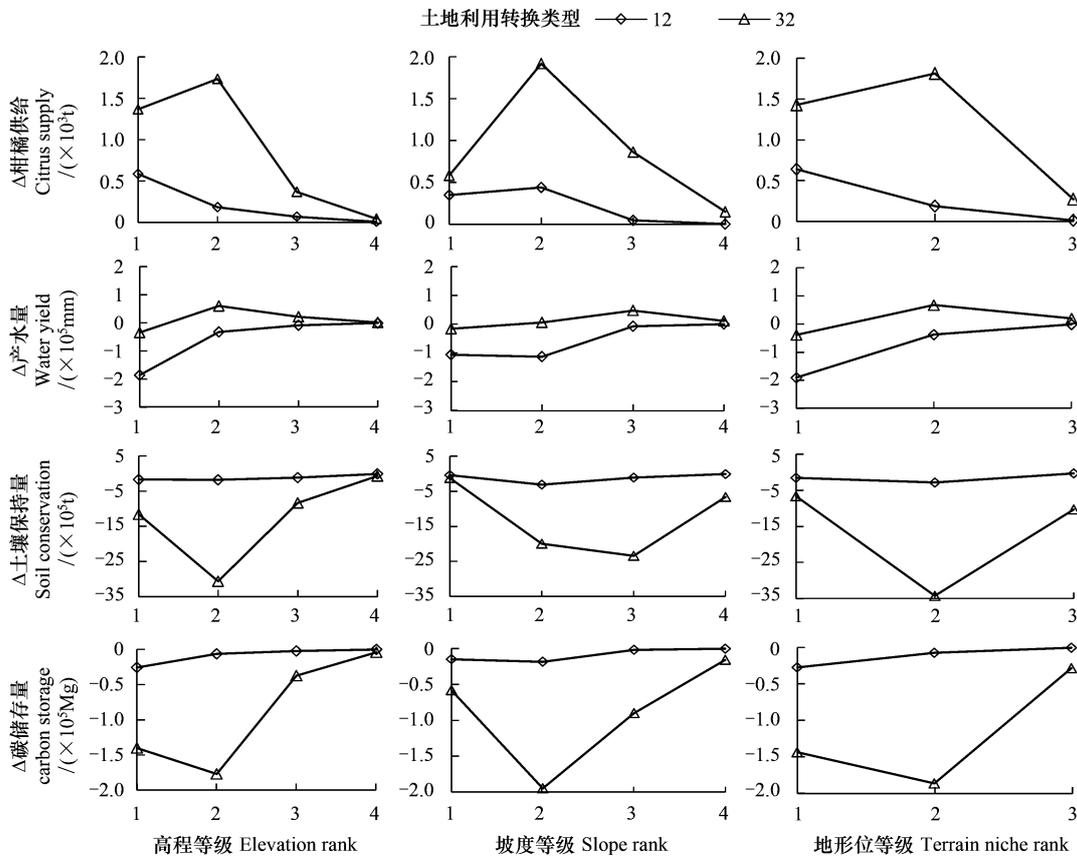


图3 柑橘园扩张引起不同地形梯度上的生态系统服务变化

Fig.3 Variation of ecosystem services on different topographic gradients caused by citrus orchard expansion

表6 信丰县柑橘园扩张前后(2010年)、扩张后(2019年)景观指数变化

Table 6 Landscape indexes changes before (2010) and after (2019) expansion of citrus orchards in Xinfeng County

年份 Year	斑块数量 Patches number	斑块密度 Patch density	景观凝聚度 Cohesion	景观连接度 Connect	Shannon's 多样性指数 Shannon's diversity index
2010	38423	13.402	99.601	0.100	1.017
2019	47257	16.484	99.560	0.097	1.080

在柑橘规模种植的影响下,研究区林地和耕地面积逐渐减少,生态系统截留雨水、拦沙和固碳能力减弱,因此柑橘供给服务与产水服务、土壤保持服务、碳储量服务具有较强的权衡关系。这表明随着柑橘园的扩张,柑橘供给服务增加的同时,可能会引起生态系统产水服务、土壤保持服务和碳储量服务减少。碳储量服务与产水服务、土壤保持服务具有较强的协同关系,可能是因为柑橘园种植区植被覆盖度低、地表裸露、容易发生水土流失,从而导致植被生长受限,碳密度较低。故从柑橘园生态管理的角度来看,提高柑橘园地表植被覆盖率,有利于防止水土流失,降低柑橘园扩张对生态系统产生的不利影响。

### 3.5 生态系统服务与景观格局的关联分析

由图4可知,斑块数量(NP)与生态系统服务之间的关联性最为显著。斑块数量与柑橘供给服务呈极显著正相关关系( $r=0.86, P=0.001$ ),而其与产水服务( $r=-0.84, P=0.001$ )、土壤保持服务( $r=-0.75, P=0.001$ )、碳储量服务( $r=-0.90, P=0.001$ )呈显著负相关关系。景观凝聚度指数(COHESION)与土壤保持服务( $r=0.61, P=0.05$ )、碳储量服务( $r=0.69, P=0.01$ )具有显著正相关关系。其它景观格局指数和4种生态系统服务之间的关系较弱。

综合分析,研究区柑橘供给服务的增加可能会导致景观破碎化,而景观破碎化会对产水服务、土壤保持服

务和碳储量服务产生负向影响。柑橘园连片种植,提高景观凝聚度,减少景观破碎化,有助于提高土壤保持服务和碳储量服务供给能力。研究区柑橘园扩张会导致土地利用结构更为平衡(表 6),而 Shannon's 多样性指数与生态系统服务之间的关系表明,柑橘园扩张引起的数量结构平衡可能会对生态系统产生不利影响。虽然部分景观格局指数与生态系统服务之间的相关关系并未通过显著性检验,但是从相关系数可知,不同生态系统服务对景观格局变化的响应存在方向性差异。

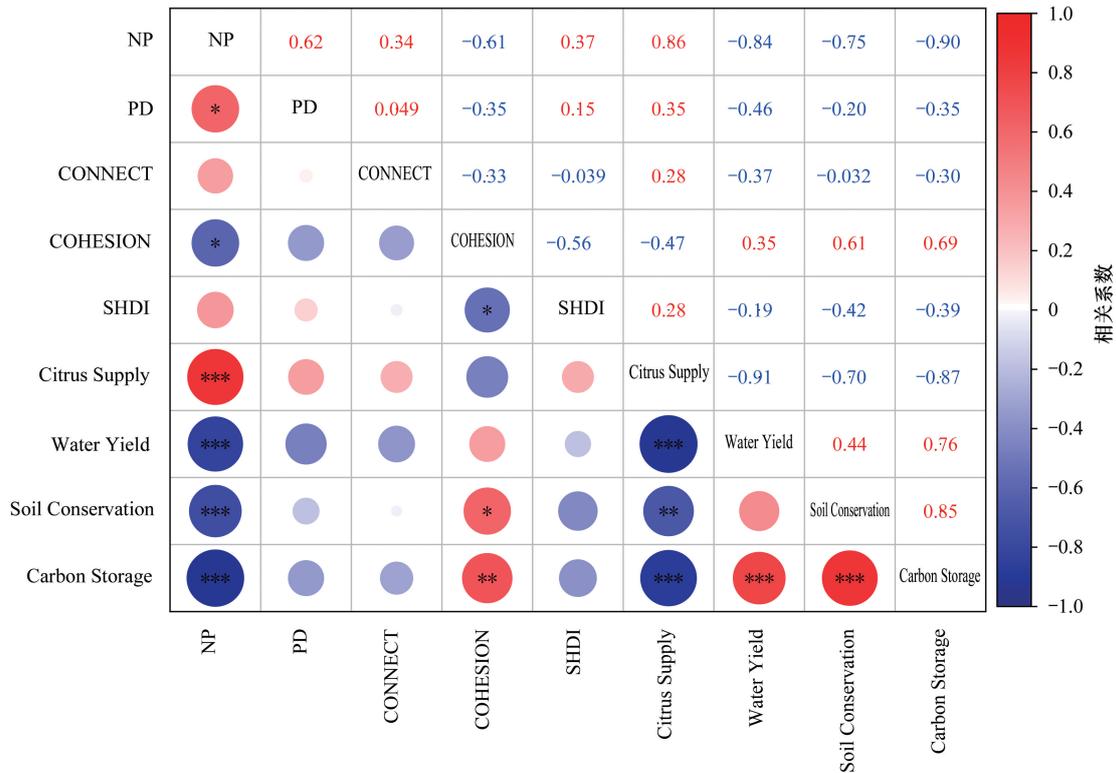


图 4 生态效应权衡/协同与关联

Fig.4 Tradeoff/synergy and correlation of ecological effects

NP:斑块数量 Patches Number;PD:斑块密度 Patch Density;CONNECT:景观连接度 Connect Index;COHESION:景观凝聚度 Cohesion Index;SHDI:Shannon's 多样性指数 Shannon's Diversity Index;Citrus Supply:柑橘供给服务;Water Yield:产水服务;Soil Conservation:土壤保持服务;Carbon Storage:碳储量服务。\*表示在 0.05 水平显著,\*\*表示在 0.01 水平显著,\*\*\*表示在 0.001 水平显著

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本研究通过分析柑橘园扩张前后(2010—2019 年)柑橘园的数量和空间转换来源、生态系统服务的地形效应、生态系统服务和景观格局变化及其权衡与关联,从而揭示了信丰县柑橘园扩张对生态环境的影响,得到以下主要结论:

(1)2010—2019 年间,柑橘园大量转入转出,转入柑橘园 7504.72 hm<sup>2</sup>,转出柑橘园 4832.16 hm<sup>2</sup>,柑橘园净增加 2672.55 hm<sup>2</sup>,新增柑橘园主要来源于林地和耕地,缩减柑橘园主要转为林地、耕地,区域内林地、耕地和柑橘园三者转换频繁。

(2)柑橘园扩张对水土保持服务和碳储量服务产生负向影响,对柑橘供给服务产生正向影响,对产水服务几乎无影响,且导致信丰县景观格局总体呈现破碎化趋势,景观连通性降低。林地和耕地减少、陡坡和海拔相对较高地区种植、植被覆盖度降低以及种植规模小而分散是柑橘园扩张对生态效应产生负向影响的重要原因。

(3) 不同类型柑橘园在不同地形梯度上的扩张对生态系统服务的影响方向和程度存在差异。其中,柑橘园在高程 200—300 m,坡度 15°—25°以及中地形部位的柑橘园扩张行为对生态系统服务的负向影响最大。

(4) 2010—2019 年间,柑橘供给服务与产水服务、土壤保持服务、碳储量服务呈权衡关系,碳储量服务与产水服务、土壤保持服务呈协同关系。斑块数量与柑橘供给服务呈显著正相关关系,而与支持服务呈显著负相关关系。

## 4.2 讨论

### 4.2.1 柑橘园扩张的生态效应及其权衡与关联

政策因素是柑橘园扩张的主要驱动力之一<sup>[22]</sup>。在我国南方地区,柑橘主产区与重点扶贫区高度重合<sup>[40]</sup>,柑橘产业不仅能拉动地方经济发展,还能促进农民增收,受到地方政府重视。信丰县政府及相关部门制定了柑橘幼苗补助、化肥农药补贴、免费技术培训以及山地开发优惠等政策,鼓励柑橘产业发展<sup>[41]</sup>。在政策扶持和柑橘种植的地形条件约束下,县域内柑橘园快速扩张,柑橘供给服务主要发生在高程 300 m 以下,坡度 5°—25°以及低、中地形部位的区域,这与张起明等<sup>[21]</sup>和王斌等<sup>[22]</sup>对赣南柑橘分布规律的研究结果相似。本文的研究结果表明,柑橘园扩张会给生态系统的土壤保持服务、碳储量服务带来负向效应,这与 Duan 等<sup>[42]</sup>和 Liu 等<sup>[17]</sup>研究结果一致。其中,柑橘园在高程 200—300 m,坡度 15°—25°以及中地形部位的柑橘园扩张行为引起的区域碳储量、土壤保持量损失最大。然而刘冠等<sup>[43]</sup>对麻塔流域的研究结果表明,经果林在坡度 15°—25°的建设有利于增强景观固碳能力,这与本文的研究结果不同,可能原因在于土地利用变化差异。本研究区域柑橘园主要由林地和耕地转换而来,大面积的林地转为柑橘园是研究区碳储量减少的主要原因,而麻塔流域的果园主要来源于灌木和未利用地。一些研究也表明<sup>[44—46]</sup>,林地和耕地是生态系统重要的碳库,林地和耕地向其它碳密度低的地类转换时,植被和土壤碳储量会有所减少。同时,Su 等<sup>[18]</sup>和 Cerdà 等<sup>[47]</sup>的研究发现,陡坡建园会加速地表径流,加剧水土流失。这些研究表明柑橘园的土地转换来源以及种植坡度对生态系统服务具有重要的影响,这也佐证了本研究的结果。

本研究识别了柑橘种植影响下生态系统服务之间的关系,发现柑橘供给服务与支持服务之间存在较强权衡关系,表明区域内农业空间和生态空间竞争水土资源的矛盾突出。而戴路炜等<sup>[48]</sup>对多伦多县的研究结果显示供给服务与支持服务呈协同关系。究其原因,一方面可能因为本研究所涉及的供给服务提供主体为果园生态系统,而后者研究中的供给服务提供主体为农田和草地生态系统;另一方面可能是生态系统服务的评估方法不同<sup>[49]</sup>。柑橘园扩张过程中,区域景观格局呈现破碎化趋势,景观连通性降低。王云等<sup>[50]</sup>关于西安市的研究发现农业景观破碎化与生态系统服务价值呈较强的负相关关系。董敏等<sup>[51]</sup>的研究表明林区景观破碎化度增加会致使生态系统服务减少。邵大伟等<sup>[52]</sup>运用地理探测器方法揭示了破碎化因子交互作用对生态系统服务价值的作用效应。这些研究结果与本研究相互印证,景观破碎化限制了生态系统服务功能或价值的发挥。

### 4.2.2 模型变量数据的选取及研究局限性

由于数据可获取性原因,本研究仅探讨了柑橘园扩张(2010—2019 年)对柑橘供给、产水、土壤保持和碳储存 4 种生态系统服务变化和景观格局变化的影响,对生态系统服务和景观格局变化的驱动机制分析不足,未考虑不同经营年限柑橘园的生态效应差异和柑橘园扩张对气候调节、文化服务等其它种类生态系统服务的影响,尚待未来深入研究。此外,利用 InVEST 模型对生态系统服务进行评估时,一是模型中的生物物理参数大多以土地利用类型为单元确定,且部分参数无年际变化,故本研究仅能反映柑橘园扩张对生态系统服务影响的趋势和程度,并不能准确估算柑橘园扩张对生态系统服务的影响。二是考虑到赣南湿润地区风蚀过程较弱,模型评估土壤保持服务时仅考虑了水蚀,忽略了风蚀的量化。因此,在未来的研究中,模型的修正和参数的本地化仍需进一步精确量化。

### 4.2.3 柑橘园管理与生态保护

(1) 优先利用存量园地,减少新开垦园地,对于受严重病虫害而无法种植的果园实行有序还林,恢复生

态。研究区内柑橘园、林地、耕地三种土地利用类型转换频繁,园地内部转换剧烈。开垦新果园会加剧土壤侵蚀<sup>[53]</sup>,尤其是占林型柑橘园新种植区可能面临土壤流失和碳储量减少双重生态风险。建议开发果园执行准入立项审批制度和退出审查制度,对于园地转换频繁的嘉定镇、古陂镇和大塘埠镇等乡镇重点实行柑橘园开发监管,禁止随意开发、扩张或撂荒果园。

(2)开展柑橘种植规划,引导农户合理选址开发果园。禁止在海拔 300 m 以上,坡度 25°的地形处开发果园,严格要求位于高程 200—300 m,坡度 15°—25°以及中地形部位的柑橘园做好果园地表覆盖、实行“山顶戴帽”,建立果园水平等高反坡梯田、横山排蓄水沟、果园生草等水土保持措施,最大程度减少对重要林地和优质耕地的占用。结合自然资源基础条件,合理划定柑橘园可开发种植区、限制开发种植区、禁止开发种植区三类区域。

(3)减少和限制农户小规模分散经营果园,恢复和新开发柑橘园采取适度规模种植。规模种植的果园,应种植一定规模的隔离带,防止病虫害的快速传播。开展相关教育培训或技术指导,提高农户柑橘种植的生态保护意识,坚持生态开发、生态种植原则,实现柑橘供给服务和产水服务、土壤保持服务、碳储量服务的权衡转向协同。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Study of Critical Environmental Problems (SCEP). Man's Impact on the Global Environment: Assessment and Recommendations for Action. Cambridge: MIT Press, 1970; 22-23.
- [ 2 ] 王良杰, 马帅, 许稼昌, 朱殿珍, 张金池. 基于生态系统服务权衡的优先保护区选取研究——以南方丘陵山地带为例. 生态学报, 2021, 41(5): 1716-1727.
- [ 3 ] 祁宁, 赵君, 杨延征, 苟睿坤, 陈佳琦, 赵鹏祥, 李卫忠. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, 2020, 40(9): 2827-2837.
- [ 4 ] 徐建英, 樊斐斐, 刘焱序, 陈吉星, 魏建瑛. 汶川县生态系统服务对景观格局及其变化的响应. 生态学报, 2020, 40(14): 4724-4736.
- [ 5 ] 郑博福, 黄琼瑶, 陶林, 谢泽阳, 艾彪, 朱元皓, 朱锦奇. 赣南地区景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2021, 41(15): 5940-5949.
- [ 6 ] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [ 7 ] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. 地理研究, 2021, 40(3): 821-838.
- [ 8 ] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 李妙莹. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析. 生态学报, 2020, 40(17): 6161-6170.
- [ 9 ] 蒋春丽, 张丽娟, 张宏文, 姜春艳, 于洋, 潘涛. 基于 RUSLE 模型的黑龙江省 2000—2010 年土壤保持量评价. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 642-649.
- [ 10 ] 杨波, 王全九, 董莉丽. 榆林市还林还草后土壤保持功能和经济价值评价. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1313-1322.
- [ 11 ] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [ 12 ] 陈雅倩, 赵丽, 陶金源, 张蓬涛. 基于 InVEST 模型的未利用地开发前后生境质量评价——以唐县为例. 中国生态农业学报, 2020, 28(7): 1093-1102.
- [ 13 ] 仲俊涛, 王蓓, 米文宝, 樊新刚, 杨美玲, 杨显明. 基于 InVEST 模型的宁夏盐池县禁牧草地生态补偿标准空间识别. 地理科学, 2020, 40(6): 1019-1028.
- [ 14 ] Zhao M M, He Z B, Du J, Chen L F, Lin P F, Fang S. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models. Ecological Indicators, 2019, 98: 29-38.
- [ 15 ] Wang R B, Bai Y, Alatalo J M, Yang Z Q, Yang Z B, Yang W, Guo G M. Impacts of rapid urbanization on ecosystem services under different scenarios-A case study in Dianchi Lake Basin, China. Ecological Indicators, 2021, 130: 108102.
- [ 16 ] 邹文涛, 何友均, 叶兵, 赵晓迪, 许单云, 肖仁乾, 段艺璇. 基于 InVEST 模型的森林生态系统服务功能评估研究进展. 世界林业研究, 2020, 33(4): 19-24.
- [ 17 ] Liu S L, Yin Y J, Liu X H, Cheng F Y, Yang J J, Li J R, Dong S K, Zhu A N. Ecosystem Services and landscape change associated with plantation expansion in a tropical rainforest region of Southwest China. Ecological Modelling, 2017, 353: 129-138.
- [ 18 ] Su S L, Wan C, Li J, Jin X F, Pi J H, Zhang Q W, Weng M. Economic benefit and ecological cost of enlarging tea cultivation in subtropical China: characterizing the trade-off for policy implications. Land Use Policy, 2017, 66: 183-195.
- [ 19 ] Li J, Zhang Z L, Jin X F, Chen J Q, Zhang S J, He Z, Li S, He Z M, Zhang H P, Xiao H. Exploring the socioeconomic and ecological consequences of cash crop cultivation for policy implications. Land Use Policy, 2018, 76: 46-57.
- [ 20 ] Xu H Z Y, Qi S H, Gong P, Liu C, Wang J B. Long-term monitoring of citrus orchard dynamics using time-series Landsat data: a case study in southern China. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(22): 8271-8292.

- [21] 张起明, 徐晗泽宇, 江丰, 齐述华. 赣南地区柑橘果园空间分布特征分析. 江西科学, 2018, 36(4): 591-598.
- [22] 王斌, 何丙辉, 林娜, 王伟, 李天阳, 安丽超. 奉节县脐橙果园用地时空演变特征与驱动因子分析. 农业机械学报, 2021, 52(6): 204-214.
- [23] 钟琪. 南丰县柑橘果园种植扩张的遥感评价[D]. 南昌: 江西师范大学, 2020.
- [24] Niu Y H, Wang L, Wan X G, Peng Q Z, Huang Q, Shi Z H. A systematic review of soil erosion in citrus orchards worldwide. CATENA, 2021, 206: 105558.
- [25] Li Z W, Ning K, Chen J, Liu C, Wang D Y, Nie X D, Hu X Q, Wang L X, Wang T W. Soil and water conservation effects driven by the implementation of ecological restoration projects: evidence from the red soil hilly region of China in the last three decades. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 121109.
- [26] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 王永琳, 周稳, 陈集景, 宋珺, 丁键涛, 迟永刚. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析. 生态学报, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [27] 王修文, 于书霞, 史志华, 王玲. 南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应. 生态学报, 2021, 41(17): 7002-7014.
- [28] 李全峰, 胡守庚, 瞿诗进. 1990-2015 年长江中游地区耕地利用转型时空特征. 地理研究, 2017, 36(8): 1489-1502.
- [29] 刘金雅, 汪东川, 孙然好, 汪翡翠, 胡炳旭, 陈俊合, 孙志超. 基于变化轨迹分析方法的生态用地流失空间关联研究. 地理研究, 2020, 39(1): 103-114.
- [30] 于元赫, 李子君, 林锦阔, 刘金玉, 王硕. 沂河流域土地利用时空变化图谱特征分析. 自然资源学报, 2019, 34(5): 975-988.
- [31] Budyko M I. Climate and Life. San Diego: Academic Press, 1974.
- [32] 查印水, 汤序军, 吴建勋, 周强, 唐学君. 基于土壤类型法的鄱阳湖生态经济区土壤碳密度和碳储量评估. 江西科学, 2020, 38(4): 541-545.
- [33] 宋满珍, 刘琪璟, 吴自荣, 欧阳勋志. 江西森林植被土壤有机碳储量估算及空间分布特征. 江西农业大学学报, 2009, 31(3): 416-421.
- [34] 傅清, 赵小敏, 袁芳. 江西省农田耕层土壤有机碳量分析. 土壤通报, 2010, 41(4): 835-838.
- [35] 王兵, 魏文俊. 江西省森林碳储量与碳密度研究. 江西科学, 2007, 25(6): 681-687.
- [36] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 李秀珍, 贺红土. 景观指数之间的相关分析. 生态学报, 2005, 25(10): 2764-2775.
- [37] 钟莉娜, 王军, 白中科, 陈艳华, 董占杰. 农用地整理对区域景观动态与生态风险影响研究——以福建省建溪流域为例. 中国土地科学, 2019, 33(1): 73-82.
- [38] 徐樵利, 李鹤鸣, 李世猛. 湖北省宜昌县适种柑桔土地评价研究. 自然资源, 1984, (1): 49-57.
- [39] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析. 地理学报, 2020, 75(3): 607-619.
- [40] 胡友, 陈昕, 祁春节. 农村劳动价格、收入结构变化与柑橘种植布局变迁. 农业现代化研究, 2021, 42(3): 496-506.
- [41] 王雪莲, 郑林. 柑橘种植规模影响因素的灰色关联度分析——基于信丰县 186 份农户问卷. 安徽农业科学, 2020, 48(10): 190-194, 222-222.
- [42] Duan J, Liu Y J, Yang J, Tang C J, Shi Z H. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of southern China. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124290.
- [43] 刘冠, 李国庆, 李洁, 张艳如, 鲁奇, 杜盛. 基于 InVEST 模型的 1999—2016 年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究. 干旱区研究, 2021, 38(1): 267-274.
- [44] Tao Y, Li F, Wang R S, Zhao D. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in urbanized areas: a study from Changzhou, China. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 651-657.
- [45] 任玺锦, 裴婷婷, 陈英, 谢保鹏, 程东林. 基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响. 生态科学, 2021, 40(4): 66-74.
- [46] 郭晓敏, 揣小伟, 张梅, 梁华石, 李建豹, 左天惠. 扬子江城市群土地利用时空变化及其对陆地生态系统碳储量的影响. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 269-280.
- [47] Cerdà A, Novara A, Moradi E. Long-term non-sustainable soil erosion rates and soil compaction in drip-irrigated citrus plantation in Eastern Iberian Peninsula. Science of the Total Environment, 2021, 787: 147549.
- [48] 戴路炜, 唐海萍, 张钦, 崔凤琪. 北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究. 生态学报, 2020, 40(9): 2863-2876.
- [49] Yang S Q, Zhao W W, Liu Y X, Wang S, Wang J, Zhai R J. Influence of land use change on the ecosystem service trade-offs in the ecological restoration area: dynamics and scenarios in the Yanhe watershed, China. Science of the Total Environment, 2018, 644: 556-566.
- [50] 王云, 周忠学, 郭钟哲. 都市农业景观破碎化过程对生态系统服务价值的影响——以西安市为例. 地理研究, 2014, 33(6): 1097-1105.
- [51] 董敏, 苏常红, 王亚璐. 汾河上游流域景观破碎化与生态系统服务关系研究. 山西大学学报: 自然科学版, 2020, 43(1): 186-195.
- [52] 邵大伟, 吴殿鸣. 景观破碎化对生态系统服务价值的影响作用分析——以苏州为例. 长江流域资源与环境, 2020, 29(11): 2436-2449.
- [53] 陈春平. 赣南丘陵红壤区发展柑桔对土地资源可持续利用的研究——以江西省南丰县建立生态桔园为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.