

热带地理
Tropical Geography
ISSN 1001-5221, CN 44-1209/N

《热带地理》网络首发论文

题目: 珠江三角洲典型基塘生态系统服务价值演变——以佛山市为例
作者: 韩然, 叶长盛
DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003249
收稿日期: 2019-10-21
网络首发日期: 2020-06-16
引用格式: 韩然, 叶长盛. 珠江三角洲典型基塘生态系统服务价值演变——以佛山市为例. 热带地理. <https://doi.org/10.13284/j.cnki.rddl.003249>



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。

珠江三角洲典型基塘生态系统服务价值演变 ——以佛山市为例

韩 然, 叶长盛

(东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013)

摘 要: 以珠江三角洲基塘发源地——佛山市为例, 采用市场价格法、影子工程法等方法, 对 2000、2009 和 2017 年其基塘生态系统服务价值进行估算, 分析其变化特征, 并利用地理探测器探讨其影响因素。结果表明: 1) 2000—2017 年佛山市西、北部的芦苞镇、荷城街道等少数镇(街道)基塘面积有所增加, 东、南部北滘、乐从镇等地基塘面积减少明显, 期内基塘净减少 19 244.47 hm², 主要转出地类为建设用地。2) 2000、2009 和 2017 年佛山市基塘生态系统服务价值(ESV)先降后增, 3 个年份中调节类功能占总价值比例均高于 86%, 为核心功能; 各单项功能中旅游休闲价值增加最多, 调节气候价值下降明显。3) 佛山市基塘 ESV 空间变化呈西、北增而东、南降的特征, 除物质生产和旅游休闲功能外, 其余单项功能的价值变化均呈现西南和北部增加明显的特征。4) 第一产业生产总值变化量是影响佛山市基塘 ESV 时空变化的首要因素, 其次是 GDP、人口密度变化量等。建议采取控制开发规模、恢复绿色植被、加强生态监测和基塘整治、发挥基塘景观优势等措施来提高基塘 ESV。

关键词: 基塘; 生态系统服务价值; 佛山市

中图分类号: F327. 文章标志码: A



开放科学标识码:

基塘是珠江三角洲地区特有的一种土地利用类型, 在当地被称为“基水地”, 是国际公认的最典型的生态农业用地类型之一(叶长盛, 2013)。三角洲内地形低洼, 易发生内涝, 人们为了排出积水进行灌溉, 将洼地深挖成塘、淤泥堆积为基, 塘中养鱼, 基上种桑、蔗等, 从而形成了基塘这种特殊的土地利用方式。21 世纪以来, 基塘的主要形式已由传统的桑基、蔗基鱼塘, 部分转变为草基、花基和果基鱼塘等新型模式(聂呈荣 等, 2001), 其功能也由物质生产向生态服务、休闲文化等多方面转变(仲亚美, 2017)。随着基塘区农业劳动力的流失, 加之城市扩张、房地产开发占用等原因, 原有的基塘面积正逐年缩小(丁疆华 等, 2001), 而工业、生活污水排入基塘以及塘内过度集约化养殖造成的水质恶化(聂呈荣 等, 2003), 使基塘生态安全面临巨大威胁。而对基塘进行生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)评估, 可将其对整个生态系统的贡献转化为具体货币价值, 引起人们对基塘的关注并提高保护意识, 同时也为基塘生态环境的恢复与可持续利用提供科学依据。

生态系统服务是指其为人类提供的生存环境以及对人类有利的各类生态系统产品、功能(陆健健,

收稿日期: 2019-10-21; **修回日期:** 2020-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461108); 东华理工大学研究生创新专项资金项目(DHYC-201902)

作者简介: 韩然(1994—), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向区域与城市规划, (E-mail) hr1172208715@163.com;

通信作者: 叶长盛(1977—), 男, 江西抚州人, 教授, 博士, 主要从事土地资源利用与保护研究, (E-mail) ycs519@163.com。

2006), 对其进行功能分类、价值测算等都具有重要意义, 已成为国内外学者研究的热点。Costanza 等(1997) 将生态系统服务划分为生产功能、环境效益、基本功能和娱乐价值 4 大方面, 在此基础上明确了 ESV 的估算原理和方法, 并由此估算出全球 ESV 超过 33 万亿美元/a, 引发了对 ESV 的研究热潮。De Groot 等(2010) 将生态系统服务定义为一种自然及其组成部分为人类提供所需物质与服务的能力, 并将其分为调节功能、提供生境功能、生产功能和传递信息功能 4 大类, 包括生产物质、产生和更新土壤、缓解旱涝、调节局地小气候、分解废物、提供休闲娱乐等 23 个子项目。近年来, Nesbitt (2017)、Bellver-Domingo (2018) 等分别采用防护费用法、影子工程法等方法, 对城市湿地、森林等多种地类的 ESV 进行了具体测算, 结果表明其存在巨大的生态价值, 具有重要的借鉴意义; 国内学者欧阳志云等(1999) 利用影子价格、替代工程等方法对中国陆地生态系统的间接经济价值进行定量评估, 结果表明其存在巨大的生态和经济效益。谢高地等(2003) 参考 Constanza 的研究成果, 综合中国 200 多位专家的调查结果, 构建了中国 ESV 当量因子表, 并计算得出青藏高原的 ESV 为 9 363.9 亿元/a。随着对 ESV 研究的进一步发展, 其估算方法也不断成熟, 目前主要有市场价格法、影子工程法、碳税法、替代成本法、比例折算法和成果参照法等, 中国部分学者利用以上方法评价了耕地、湿地和林地等多种土地利用类型的 ESV, 取得了较好的结果(李冬玉 等, 2013; 肖强 等, 2014; 吴后建 等, 2016)。而基塘作为一种特殊的土地利用类型, 关于其 ESV 的定量评估有少量研究见诸报道。如陈敏刚等(2005) 采用市场价值法、影子工程法、替代成本法等方法, 计算出 2003 年中国桑蚕生态系统提供原材料等产品、涵养水源和保持土壤等 5 类服务功能的总价值为 435.72 亿元; 王静禹等(2018) 采用实地调查和条件价值法, 评估了 2016 年湖州市桑基鱼塘生态系统中桑园、鱼塘和桑基鱼塘 3 部分所提供的产品、减少尘沙的功效、历史文化价值等 9 项功能的价值总计为 107 亿元, 并明确只有桑基和鱼塘结合在一起, 才能产生最大的 ESV。以上研究表明基塘生态系统具有物质生产、气候调节等多项服务功能, 价值较高, 但已有研究多以单一年份或宏观区域作为评估对象, 较少以多时段和小尺度为基础结合影响因素对基塘 ESV 时空变化进行探讨。

珠江三角洲作为中国基塘分布最典型、最集中的区域, 其基塘 ESV 有何变化, 影响机制如何? 目前尚不清晰。鉴于此, 本文拟以珠江三角洲典型基塘分布区——佛山市为例, 在分析其 2000—2017 年基塘用地变化的基础上, 利用市场价格法、影子工程法、成果参照法等估算其 ESV 并分析其变化特征, 探究影响基塘 ESV 变化的因素。以期为建立基塘 ESV 评估体系提供参考, 也为其治理提供科学依据。

1 研究区概况

佛山市位于广东省中部偏南, 22°38'—23°34'N、112°22'—113°23'E 之间, 地处珠江三角洲腹地, 东倚广州, 毗邻港澳, 地形以平原为主, 河汊众多, 鱼塘密布, 是典型的三角洲河网区; 下辖禅城区、顺德区、南海区、三水区、高明区 5 区, 土地总面积 3 797.72 km²¹。通过整理《佛山市统计年鉴(2001—2018)》(佛山市统计局, 2001—2018) 和分析遥感影像可知, 2017 年佛山市生产总值 9 398.52 亿元, 年末常住人口 765.67 万人, 比 2000 年增加 231.68 万人, 城市化率高达 92.85%。2000—2017 年, 佛山市工业总产值由 2 126 亿元增长到 22 400 亿元, 第一产业占比由 6.40% 降至 1.40%, 基塘面积由 2000 年的 88 139.26 hm² 萎缩至 2017 年的 68 894.79 hm², 2017 年塘鱼总产量 64.36 万 t, 比 2000 年增加了 52.62%。

为保持数据的一致性, 镇(街道)范围采用 2009 年佛山市行政区划, 即祖庙、石湾、张槎、桂城、罗村、大良、容桂、伦教、勒流、西南、云东海、荷城 12 个街道办事处和南庄、里水、九江、丹灶、大

¹ <http://www.foshan.gov.cn/zjfs/fsnj/2018nj/index.html>

沥、狮山、西樵、陈村、均安、杏坛、龙江、乐从、北滘、白坭、乐平、大塘、芦苞、南山、杨和、更合、明城 21 个镇。

2 数据来源与研究方法

2.1 评估指标体系

联合国千年生态系统评估项目 (The Millennium Ecosystem Assessment, MA) 将生态系统服务分为支持、供给、调节和文化四大功能, 这种功能划分受到广泛认可 (Millenium Ecosystem Assessment, 2003), 因此本文以 MA 框架为基础, 结合基塘生态系统特征及研究区域社会经济条件, 并借鉴前人研究成果 (陈敏刚 等, 2005; 王静禹 等, 2018), 构建佛山市基塘 ESV 评估指标体系 (表 1)。

表 1 佛山市基塘 ESV 评估指标体系

Table 1 Evaluation index system of dike-pond ESV in Foshan

评估项目	评估指标	评估方法
供给类功能	塘鱼生产	市场价格法 (江波 等, 2017)
调节类功能	调节气候	市场价格法 (林文波, 2016)
	调节湿度	替代成本法 (江波 等, 2011; 林文波, 2016)
	供水蓄水	影子工程法 (谢慧莹 等, 2018)
支持类功能	维持生物多样性	成果参照法 (王磊 等, 2016)
	保持土壤	替代成本法 (吴后建 等, 2016; 肖红克 等, 2020)
文化类功能	旅游休闲	比例折算法 (吴后建 等, 2016)

2.2 数据来源

土地利用数据来源于佛山市 2000、2009 和 2017 年 Landsat TM 遥感影像, 空间分辨率为 30 m×30 m, 经辐射校正、几何校正、图像配准和人工解译等处理后得到 3 个年份的土地利用类型图, 充分考虑珠三角地区土地利用特点并根据研究需要, 将土地利用类型分为耕地、林地、草地、基塘、水域、建设用地和未利用地, 从中提取基塘信息。社会经济数据中鱼类产量及其平均单价来源于《佛山市统计年鉴 (2001—2018)》, 禅城、顺德、南海、三水和高明区统计年鉴 (2000—2017), 佛山市农业农村局网站²; 佛山地区水面蒸发、地表水资源量来源于佛山市水资源公报 (2000—2017 年) (佛山市水务局, 2000—2017); 居民电价来源于佛山市发展改革局³公布的电价价格表 (2000—2017); 美元兑人民币汇率来自招商银行网站⁴; 国内和入境游客对水域风光感兴趣的比例来自于《2008 年福建省国内旅游市场抽样调查报告》(福建省旅游局, 2008) 和国家旅游局发布的《2000 年入境旅游者抽样调查综合分析报告》(国家旅游局, 2000); 国内、入境游客的旅游目的中观光游览和度假休闲目的所占比例来自于国家文化和旅游部网站⁵以及《中国国内旅游发展年度报告 2018》(中国旅游研究院, 2018); 旅游收入和各镇 (街道) 人口、人口密度、GDP、第一产业生产总值、第二产业生产总值及固定资产投资数据来源于《佛山市统计年鉴 (2000—2018)》、各区统计年鉴和统计公报及各镇 (街道) 政务网站。

2.3 基塘生态系统服务价值评估方法及数据

2.3.1 供给类功能 由于佛山各地基塘的基面覆被差异, 对基面上养殖的禽类、种植的花卉果蔬等数据一一获取存在困难, 且存在基面撂荒现象, 因此对基塘供给功能的计算只考虑塘鱼生产方面, 主要包括草

² <http://fsny.foshan.gov.cn/>

³ <http://fsdr.foshan.gov.cn/>

⁴ <http://www.cmbchina.com/>

⁵ <http://zwgk.mct.gov.cn/?classInfoId=356>

鱼、鲫鱼、白鲢和花鲢，通过市场价格法计算该功能价值，公式为（江波 等，2017）：

$$V_p = O_s \times P_s \quad (1)$$

式中： V_p 为基塘物质生产功能价值，单位为元； O_s 为渔产品产量，单位为kg； P_s 为渔产品平均价格，单位为元/kg。2000、2009、2017年佛山市塘鱼产量分别为 432.58×10^6 、 536.13×10^6 、 643.64×10^6 kg，均价分别为7.9、8.79和11.22元/kg。

2.3.2 调节类功能

1) 调节气候。调节功能主要由基塘的塘面实现，即通过蒸发水汽调节当地温度和湿度，从而实现调节气候的功能，包括调节温度和湿度功能，采用塘面占基塘面积65%的平均比例（黎丰收 等，2018），通过市场价格法和替代成本法分别对基塘塘面调节温度和湿度的价值进行估算。

调节温度功能的价值计算公式（林文波，2016）为：

$$V_{r1} = \frac{R \times P_d}{3600 \times K} \quad (2)$$

式中： V_{r1} 为基塘调节温度功能价值，单位为元； R 为基塘蒸发吸收热量，单位为kJ，2000、2009和2017年佛山市地区水面年蒸发量分别为1596.5、1022.9、1287.4 mm，采用空调制冷原理，水在汽化过程中吸热，且随温度升高汽化热逐渐降低，因此选择水在沸点100℃时和一个标准大气压下的汽化热2260 kJ/kg（林文波，2016），3个年份塘面蒸发吸热分别为 3180.14×10^{12} 、 1787.06×10^{12} 和 2004.51×10^{12} kJ； P_d 为当地居民电价，单位为元/kW·h，取0.6元/kW·h； K 为空调的能效比，取3.0。

调节湿度功能价值的公式（林文波，2016）为：

$$V_{r2} = Z \times D \times P_d \quad (3)$$

式中： V_{r2} 为基塘调节湿度功能价值，单位为元； Z 为基塘蒸发量，单位为kg，2000、2009和2017年分别为 14.07×10^{11} 、 7.91×10^{11} 和 8.89×10^{11} kg； D 为1 m³水转化为蒸汽耗电量，单位为kW·h，取市面上常见的32 W功率的加湿器将1 m³水转化为蒸汽的耗电量125 kW·h（江波 等，2011）。

2) 供水蓄水。佛山地区河网密集，基塘众多，2000—2017年基塘面积在水域总面积中占比均超过70%，可以很好地调节水分，具有与湿地相似的强大供水蓄水功能，通过影子工程法估算该功能，公式为（谢慧莹 等，2018）：

$$V_g = X \times P_k \quad (4)$$

式中： V_g 为基塘供水蓄水功能价值，单位为元； X 为基塘蓄水量，单位为m³，采用佛山市当年地表水资源量，并用当年基塘面积在佛山市水域总面积中所占比例进行修正，以此代替基塘蓄水量（吴后建 等，2016），2000、2009和2017年基塘蓄水量分别为 35.38×10^8 、 19.01×10^8 和 21.77×10^8 m³； P_k 为单位库容水库的建造成本，单位为元/m³，取0.67元/m³（谢慧莹 等，2018）。

2.3.3 支持类功能

1) 维持生物多样性。作为生态农业用地类型的代表，基塘以其特殊的循环系统，在实现市场价值的同时，也为各种植物与塘鱼提供良好的生活环境，实现维持生物多样性的功能，采用成果参照法估算基塘维持生物多样性的价值公式为（王磊 等，2016）：

$$V_w = T \times P_q \quad (5)$$

式中： V_w 为基塘维持生物多样性功能价值，单位为元； T 为基塘面积，单位为 hm^2 ； P_q 为单位面积栖息地功能价值，单位为元/ hm^2 ，参照 Costanza 等（1997）的研究成果，单位面积栖息地功能价值 304 美元/ hm^2 ，并用 2000、2009 和 2017 年美元兑人民币汇率修正得到 3 个年份的 P_q 分别为 2 516.63、2 076.62 和 2 052.55 元/ hm^2 。

2) 保持土壤。珠江三角洲地区降雨集中且强度大，山地丘陵多被红色风化壳覆盖，容易受到侵蚀，加之人类活动对地表植被的破坏，区内土壤侵蚀严重（魏秀国 等，2003）。基塘可以通过减少土壤养分损失、防止泥沙淤积和避免土地荒废等方式，起到与沼泽、湿地类似的土壤保持功能，采用替代成本法对基塘保持土壤价值进行估算，公式为（吴后建 等，2016）：

$$V_{s2} = T \times P_{s2} \quad (6)$$

式中： V_{s2} 为基塘保持土壤功能价值，单位为元； P_{s2} 为单位面积基塘保持土壤价值，单位为元/ hm^2 ，参照肖红克等（2020）修正的广佛肇生态系统服务价值系数表，基塘采用与湿地相同的保持土壤单位面积价值，即 4 642.08 元/ hm^2 。

2.3.4 文化类功能 由于资料获取受限，仅测算基塘文化功能中的旅游休闲功能。通过比例折算法估算该功能的价值，公式为（吴后建 等，2016）：

$$V_l = (X_1 \times M_1 \times P_1 + X_2 \times M_2 \times P_2) \times J \quad (7)$$

式中： V_l 为基塘旅游休闲功能，单位为元； X_1 、 X_2 为水域在国内和入境游客对旅游资源的偏好中所占的比例，分别为 26.3%和 33.7%； M_1 为国内旅客中观光游览和度假休闲目的所占比例，2000、2009 和 2017 年分别为 16.8%、38.1%和 45.8%； M_2 为入境旅客中观光游览和度假休闲目的所占比例，2000、2009 和 2017 年分别为 36.5%、47.4%和 37.1%； P_1 、 P_2 为研究区当年国内旅游收入和旅游外汇收入，单位为元； J 为研究区基塘面积占水域面积的比例。

2.4 地理探测器分析方法

地理探测器是探测空间差异性并探究其影响机制的一种统计学方法（王劲峰 等，2017），包括因子探测、交互探测、风险区探测和生态探测，本文主要应用因子探测结果 q 值来度量影响佛山市基塘 ESV 时空变化的因素，其公式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{f=1}^H D_f \delta_f^2}{D \delta^2} \quad (8)$$

式中： f 为自变量 X 或因变量 Y 的分类； D_f 和 D 分别为类别 f 和全区的单元数量； δ_f^2 和 δ^2 分别为类别 f 和全区因变量 Y 的方差。 $q \in [0,1]$ ， q 值越大，表明该影响因素对佛山市基塘 ESV 的时空变化影响程度越大，反之则越小。

3 结果与分析

3.1 基塘利用变化特征

2000—2017年佛山市基塘用地面积及占佛山市土地总面积比例均大幅减少(图1),其原因是研究期内其经济快速发展,城市化水平不断提高,基塘部分被占用并转化为建设用地。

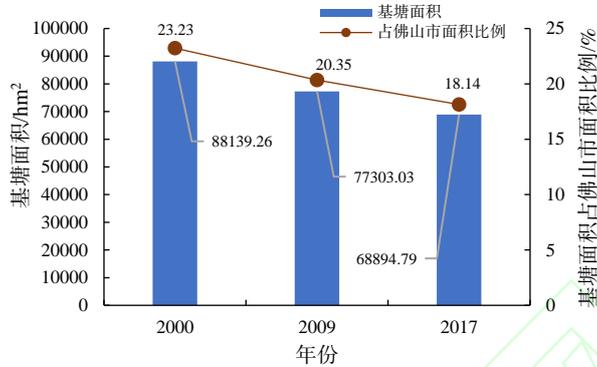


图1 佛山市基塘面积及占佛山市土地总面积比例变化(2000—2017年)

Fig.1 Changes in the area of dike-pond and its proportion in the total land area of Foshan during 2000-2017

佛山市基塘镇域分布差异明显(图2)。作为传统基塘分布区,顺德区的杏坛镇、勒流街道以及南海区的西樵镇等基塘形成早、面积大,2000、2009和2017年这三地基塘面积占当年佛山市基塘总面积比例分别为23.56%、18.37%和26.23%,而位于佛山市区的祖庙街道,城市化和工业化水平较高、人口密度大,土地利用类型以建设用地为主,基塘面积较小;镇域基塘面积变化方面,2000—2017年三水区芦苞镇和高明区荷城街道的基塘面积增加显著,分别增加了1318.29和1175.06hm²,20世纪末,三水区政府根据自身区位和农业优势,扩大基塘面积,组织渔业养殖产业化,芦苞镇获益明显(三水市人民政府,1998),同时荷城街道积极吸取三水区经验,对区内失修基塘进行高标准整治,修复了大量因“基崩、塘淤”而荒废的基塘,使区内基塘面积大大增加。而顺德区的北滘镇和乐从镇距离佛山市中心禅城区较近,受广佛一体化的影响,基塘用地被大量转化为建设用地,基塘面积明显减少。



图2 佛山市基塘镇域分布及变化(2000—2017年)

Fig.2 Distribution and change of dike-pond Township in Foshan during 2000-2017

将 2000、2017 年两期佛山市土地利用图进行空间叠置分析（表 2）可知：2000—2017 年基塘面积净减少 19 244.47 hm²，其中转出部分的最大去向为建设用地（73.81%），其次为耕地（21.97%）；而转入基塘的地类类型主要为耕地（91.38%）。主要原因为人类将基塘大量转化为建设用地进行社会经济活动以及基塘比较利益更高导致更多农民将耕地开挖成基塘从事渔业养殖（杨丹，2016）。

表 2 佛山市基塘转化情况（2000—2017 年）

Table 2 The Transformation of dike-pond of Foshan during 2000-2017

类型	基塘转出		转入基塘	
	面积/hm ²	占转出面积比例/%	面积/hm ²	占转出面积比例/%
耕地	7 741.52	21.79	14 876.66	91.38
林地	790.62	2.23	711.43	4.37
草地	19.68	0.06	27.86	0.17
水域	750.96	2.11	121.77	0.75
建设用地	26 221.95	73.81	530.06	3.26
未利用地	0.07	0.0002	12.55	0.08
总计	35 524.80	100.00	16 280.33	100.00

3.2 基塘 ESV 演变

3.2.1 基塘总 ESV 时空分布和变化特征

由表 3 可知，2000、2009 和 2017 年佛山市基塘 ESV 总体呈下降趋势，2000—2017 年共减少了 495.54 亿元，其中 2000—2009 年减少了 683.31 亿元，这与期内基塘用地持续减少密切相关；2009—2017 年 ESV 增加了 187.77 亿元，这是因为，据《佛山市农业农村发展“十二五”规划》，2010 年前后，佛山市近六成鱼塘已完成标准化改造，综合治理效果显著，面积减少趋势得到控制，塘内环境变好，物质生产价值增加；同时各区充分将基塘景观与旅游、观光等第三产业结合，大大提升了其旅游休闲价值，从而带动基塘 ESV 回升。从空间分布来看，佛山市基塘 ESV 的空间分布不均，ESV 高值区主要位于中部偏北和南部，而低值区集中于东部。2000 年基塘 ESV 较高的区域主要集中于佛山市东南部及中部（图 3），其中杏坛镇最高，其次为勒流街道，而东部祖庙街道最低；2009 年基塘 ESV 整体降低，价值相对高区向西、北扩展，其中乐平镇最高，祖庙街道最低。2017 与 2009 年分布较一致，ESV 较高镇（街道）沿“芦苞镇—西南街道—西樵镇—杏坛镇”一线分布，最高为杏坛镇，而东部的祖庙街道仍最低。

2000—2017 年，佛山市基塘 ESV 变化显著表现为北部、西部增加，东部下降。其中荷城街道增加最多，乐从镇减少最多。西南高明区和北部三水区自然环境受人类活动影响相对较弱，植被覆盖率高、生态环境优美，同时这 2 个区重点打造了以基塘农业为主的大塘农业园等一批五星级农业示范园区，基塘面积呈扩大趋势，ESV 增加明显；东、南部是珠江三角洲典型基塘发源地之一，粤港澳大湾区核心区域，近年来以制造业和现代服务业为发展重点，且毗邻广州，在其辐射带动作用作用下，城市人口增加较快，建设用地拓展迅速，导致基塘流失严重，经济快速发展带来的汽车尾气和工业废气排放，造成酸雨污染，严重影响基塘环境，导致 ESV 下降明显。

表 3 佛山市基塘 ESV（2000—2017 年）

Table 3 Dike-pond ESV in Foshan during 2000-2017

基塘ESV分类	价值组分	2000年		2009年		2017年	
		价值量/亿元	占比/%	价值量/亿元	占比/%	价值量/亿元	占比/%
供给类功能	塘鱼生产价值	34.17	2.06	47.13	4.82	72.22	6.19
	调节气候价值	1 594.27	95.93	895.89	91.55	1 004.90	86.16
调节类功能	供水蓄水价值	23.70	1.43	12.74	1.30	14.58	1.25
	维持生物多样性价值	2.22	0.13	1.61	0.16	1.41	0.12
支持类功能	保持土壤价值	4.09	0.25	3.59	0.37	3.20	0.27
	旅游休闲价值	3.46	0.21	17.64	1.80	70.06	6.01
总价值		1 661.91	100.00	978.60	100.00	1 166.37	100.00
单位面积价值/(万元 hm ⁻²)		188.56		126.60		169.30	

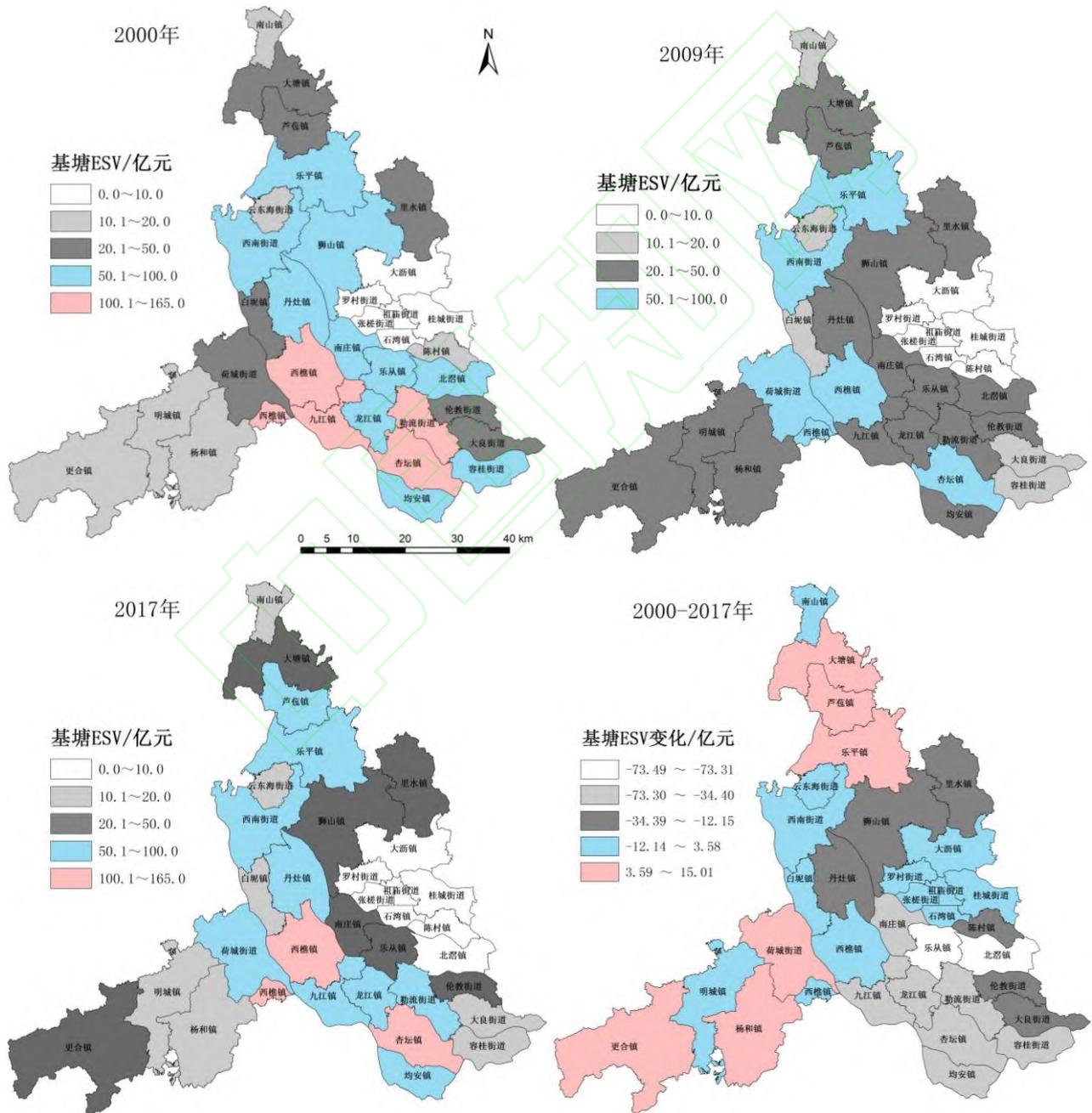


图3 佛山市镇域各年份基塘ESV及变化(2000—2017年)

Fig.3 ESV and change of dike-pond in various towns in Foshan during 2000-2017

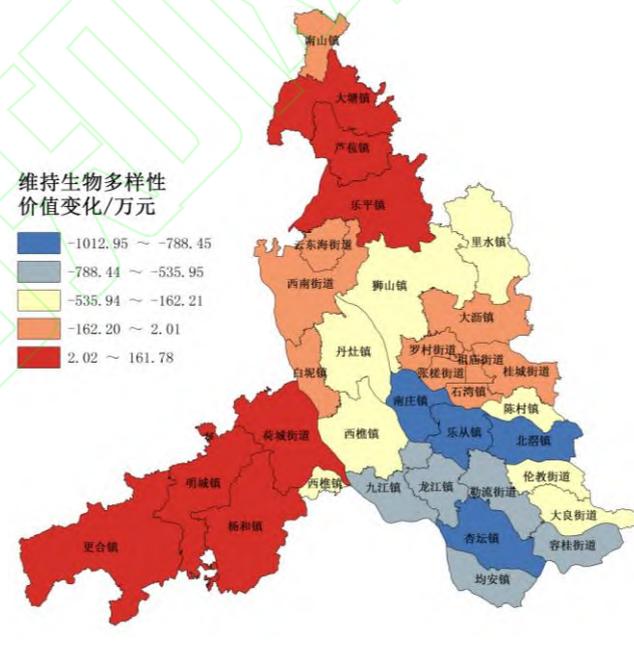
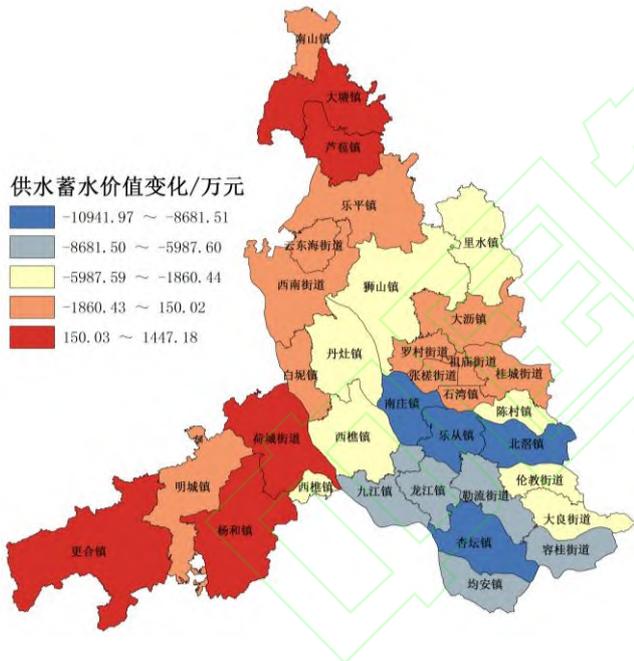
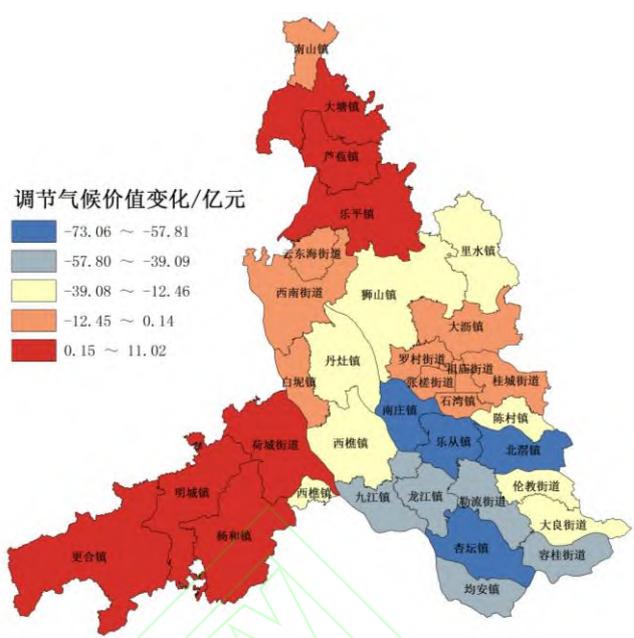
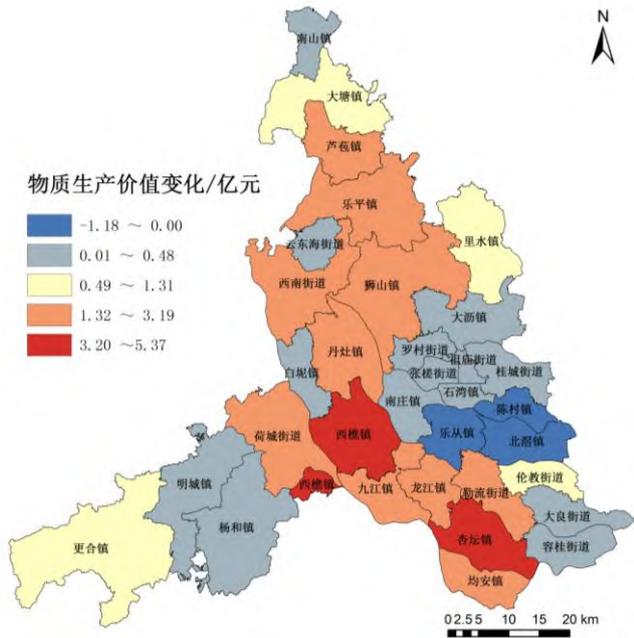
3.2.2 基塘各单项 ESV 时空变化特征

1) 时间变化特征。从各功能对总价值的贡献率来看, 2000、2009 和 2017 年, 调节气候和供水蓄水两项服务价值之和占总价值的比例均达 86%以上, 说明调节类功能是佛山市基塘生态系统为人类社会提供的核心功能。对所评估的四大功能按价值量大小进行排序, 2000 年为: 调节类功能>供给类功能>支持类功能>文化类功能; 2009 和 2017 年为: 调节类功能>供给类功能>文化类功能>支持类功能。其中, 物质生产和旅游休闲功能的价值逐年增加, 这与养殖技术的提高、当地政府对基塘的整治和建设基塘农业园、发展旅游业关系密切。维持生物多样性和保持土壤功能的价值不断下降, 主要原因是受人类活动影响, 基塘被大量转化为建设用地和耕地, 面积缩小, 塘内和基面上植被数量减少, 对湿度、温度的调节功能势必减弱, 同时水面蒸发量下降, 这些都导致基塘与大气、河湖之间的循环减弱, 影响基塘气候调节和供水蓄水功能。受现代淡水养殖业的冲击, 农民普遍挖基阔塘, 基面与塘面的比例一度达到 2:8, 远低于 4.5:5.5 的最佳比例, 基面作物减少 (刘凯 等, 2008), 加之 2000—2017 年塘内蓄水量减少, 因此基面作物和塘内水资源的减少导致基塘维持生物多样性和保持土壤功能下降。

2) 空间分布和变化特征。2000、2009 和 2017 年, 物质生产功能价值最大的均为杏坛镇, 分别为 3.51 亿、5.32 亿和 8.27 亿元, 祖庙街道最低; 旅游休闲功能价值最大的均为南庄镇, 分别为 0.77 亿、4.11 亿和 14.29 亿元, 陈村镇最低; 其余四项单项功能中, 乐平镇、杏坛镇优势显著, 祖庙街道价值量最低。空间变化方面, 2000—2017 年物质生产功能价值增加明显的区域集中于佛山市中部偏北和南部 (图 4), 该区域基塘自然质量优越、发展基础雄厚, 加之引进了先进的养殖技术和优良的品种, 塘鱼亩产增加明显, 其中西樵镇价值增量最高, 增长率为 247.57%, 2000—2017 年仅有陈村镇、乐从镇和北滘镇由于大量基塘被生产生活用地占用, 甚至被填平用于种植利润更高的花卉, 导致物质生产价值降低。

2000—2017 年, 佛山市北部和西南部少数镇 (街道) 植被覆盖情况明显改善, 基塘面积增长; 中、东部植被退化 (杨晶晶, 2018), 基塘面积大幅减少, 与周围水体和大气之间的循环减弱, 调节功能价值下降明显。其中, 芦苞镇调节气候和供水蓄水功能分别增加了 11.02 亿和 0.14 亿元, 乐从镇这两项调节功能分别减少 73.06 亿和 1.09 亿元。北部和西南部各镇 (街道) 积极实行基塘综合治理, 基塘面积扩张的同时植被和水体环境也得到了较大改善。增量最大的为芦苞镇, 维持生物多样性和保持土壤价值分别增加了 161.78 万和 611.96 万元; 而中、东部各研究单元经济发展水平高, 基塘大量转为建设用地, 面积萎缩, 同时顺德和南海区转变基塘利用方式, 大力发展基塘淡水鱼养殖业, 基面作物减少, 功能明显下降, 其中乐从镇基塘维持生物多样性价值下降最多, 北滘镇基塘保持土壤功能下降明显。

随着市场经济的发展, 除了传统的物质生产功能外, 基塘系统的文化功能也倍受关注, 依托基塘景观建立的水乡乐园、蚕丝博物馆等, 丰富了基塘的休闲旅游价值。佛山市 33 个镇 (街道) 的旅游休闲功能价值均增加明显, 南庄镇最为明显, 增加了 13.52 亿元, 而陈村镇以花卉产业为主, 积极打造“千年花乡”, 基本不存在集中连片的基塘斑块, 所提供的附加文化价值有限, 2000—2017 年仅增加了 0.10 亿元。



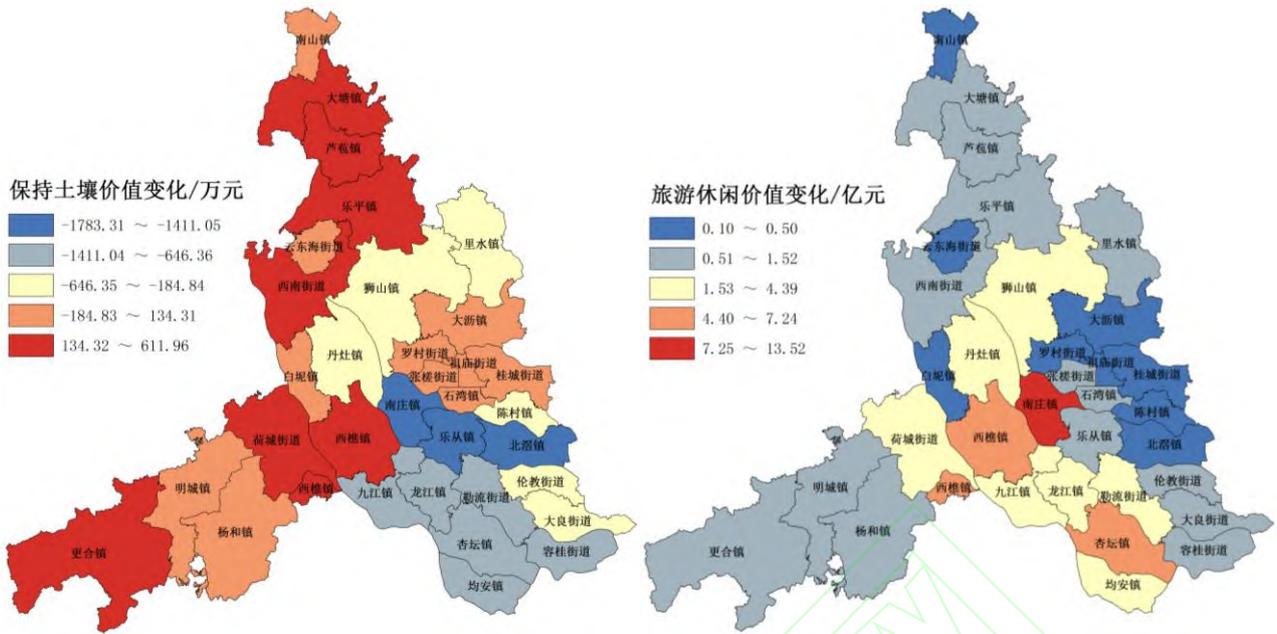


图 4 镇域基塘生态系统单项功能价值变化（2000—2017 年）

Fig.4 Changes in the value of individual functions of the dike-pond ecosystem in the township during 2000-2017

3.3 基塘 ESV 时空变化影响因素分析

3.3.1 影响因素的探测结果

佛山市基塘 ESV 的时空变化受到多种因素的综合影响，由于研究时段为短时间尺度，降水、温度、地形等自然因素变化不大，在佛山市各镇（街道）间差异不显著，而政策因素由于难以量化、分级，且 2000 年佛山市镇域数据获取难度大，因此主要分析人口、经济等人文因素的影响（邓伟 等，2020）。结合已有研究结果（赵志刚 等，2017；李颖 等，2017）和研究区域特点，选择 2009—2017 年佛山市各镇（街道）的人口变化量、人口密度变化量、GDP 变化量、第一产业生产总值变化量、第二产业生产总值变化量和固定资产投资变化量作为指标，采用自然断裂点法将 6 项影响因素分为 5 个等级，与基塘 ESV 组成地理探测器的样本，代入公式 8 计算得出各影响因子对基塘 ESV 时空变化的影响力 q 值（表 4）和解释力 p 值（ p 值越小，表示该因子对基塘 ESV 变化的解释力越强，反之则愈弱）（叶妍君 等，2018），结果表明除第二产业生产总值变化量以外，其他因子均通过了显著性为 0.1 的 t 检验，其中，第一产业生产总值变化量、GDP 变化量和人口密度变化对佛山市基塘 ESV 的时空变化影响较大（王劲峰 等，2017；潘竟虎 等，2020）。

表 4 影响因子的地理探测结果

Table 4 Results of impact factors by Geodetector

影响因子	q 值	p 值	排序
第一产业生产总值变化量	0.514	0.000	1
GDP 变化量	0.321	0.000	2
人口密度变化量	0.307	0.000	3
人口变化量	0.277	0.036	4
固定资产投资变化量	0.119	0.065	5
第二产业生产总值变化量	0.066	0.127	6

3.3.2 主要影响因素分析

1) 第一产业生产总值变化量。第一产业生产总值的增减,可以反映当地农业生产环境和生产设施、条件的变化。佛山市第一产业生产总值由2009年的95.77亿元增长为2017年的133.65亿元,增长明显。近年来,新型生产技术的出现、高产品种的引进和相关优惠政策的出台,对佛山市农业发展特别是基塘养殖起良好的推动作用,如西樵镇引进加州鳗鱼等高产鱼种,提高了基塘供给功能的价值;西北部的荷城街道和芦苞镇等地通过改善农业耕作环境、整治鱼塘等措施,实现了农业增产、农民增收,基塘ESV增加明显。但过量使用饲料和盲目扩大养殖密度也可能引发基塘水质的污染,导致基塘ESV下降。

2) GDP变化量。GDP的增长是一个城市经济发展的重要指标,而经济发展在带来建设用地面积扩大的同时,也会增加生态系统处理污染物的压力(赵志刚等,2017)。2009—2017年佛山市GDP年均增长率达51.88%,GDP的不断提高,加快了基塘向交通、住宅等建设用地的转移,仅剩的基塘单位面积租金随之上涨,农民只能通过增加养殖密度追求利润,导致塘内水体含氧量下降,饲料和鱼类排泄物增多,引发水体污染(刘通等,2017),基塘ESV明显下降,如GDP增幅较高的顺德区部分镇(街道),基塘ESV降幅明显。

3) 人口密度变化量。人口密度可以反映区域内人口分布和人类活动的情况。佛山市是珠三角劳动力的集中分布区域,2009—2017年其人口密度由1558升至2016人/km²,人口增多导致生活污水排放量增加,同时大量汽车尾气和工业废气的排放造成酸雨污染,加之近年来区内工业污水得不到有效治理(刘小玲等,2015),影响了基塘环境,造成其ESV下降,如人口密度增速较快的东部桂城街道和北滘镇等地,基塘ESV的下降幅度较大。

另外,由于政策因素对基塘ESV的影响也不容忽视。2000年,广州提出“西联佛山”发展战略,标志着广佛一体化进程的开端,自此在广州的辐射带动下,佛山城市化、工业化进程不断加快,基塘被迅速扩展的交通和建设用地大量占用,ESV整体呈下降趋势。而2009年以来,以芦苞镇为示范,荷城街道及更合镇等地都积极进行鱼塘改造和整治工作,在优化基塘环境的同时,积极引进高产品种,打造了一批无公害水产品养殖基地,如大塘镇和西南街道兴建以基塘为依托的大塘农业园、青岐现代渔业产业园等,提高了基塘物质生产功能;而均安镇和西樵镇则积极恢复桑基鱼塘景观,发展基塘旅游业,开发了一批如南沙桑基鱼塘大观园、西樵山桑基鱼塘风景区等景点,吸引大批游客,基塘旅游休闲价值得到较大提高。受到相关政策的积极扶持后,佛山市基塘ESV呈现回升趋势,可见政策因素对佛山市基塘ESV空间变化的影响不容小觑,其定量分析有待进一步深化。

4 结论与讨论

以珠江三角洲典型基塘分布区佛山市2000、2009和2017三年土地利用数据为基础,分析2000—2017年基塘用地的变化特征,并构建指标体系估算其基塘生态系统服务功能的货币价值,采用地理探测器对其影响因素进行分析,所得结论为:

1) 佛山市基塘主要分布于北部和东南部,研究期内西、北部少数镇(街道)基塘面积有所增加,东、南部基塘面积减少明显,转出地类建设用地占比最高,为73.81%;转入地类以耕地为主,占比91.38%。

2) 研究期内,佛山市基塘ESV先降后升,调节类功能为佛山市基塘的核心功能;基塘物质生产价值和旅游休闲价值增幅较大,而供水蓄水、维持生物多样性、保持土壤和调节气候价值均呈下降趋势。

3) 研究期内,佛山市基塘ESV空间分布不均。随着时间推移,北、西南部少数镇(街道)基塘ESV增加,东、东南部区域内基塘ESV明显降低。各单项功能方面,南部基塘物质生产价值增加明显;随着基塘观光旅游的兴起,全市基塘的旅游休闲价值普遍增加;而调节气候、供水蓄水、维持生物多样性和保持土壤价值的空间变化较为一致,增加区域集中于三水、高明区的大塘、芦苞、更合镇和荷城街道等地,其

他区域呈下降趋势。

4) 影响因素方面, 第一产业生产总值变化量是影响佛山市基塘 ESV 时空变化的首要因素, 其次是 GDP 和人口密度变化量。

本文通过对佛山市基塘 ESV 的估算, 利用直观的经济数据反映了佛山市基塘生态系统蕴含的巨大服务价值, 由于各镇(街道)基塘情况不同且相关基础数据获取难度大, 在估算物质生产功能时仅考虑了塘内主要鱼类的产量、用当年地表水资源量代替基塘蓄水量, 以及采用对水域旅游资源感兴趣的比率进行估算, 较为粗糙, 计算结果可能存在一定偏差。但 ESV 评估的重点不应只是具体、精确的计算出相应年份 ESV 的数值, 而是借助估算结果, 服务于管理和决策(江波等, 2011)。虽然本文对佛山市基塘 ESV 的估算结果相对较为保守, 但也反映了基塘可以为人类社会带来巨大的经济效益和生态贡献。因此, 估算基塘 ESV 可以使人们更为深入地了解其蕴含的价值, 加强对保护基塘和合理利用的意识, 也可为基塘的可持续发展和当地政府决策提供数据支持。

参考文献:

- Bellver-Domingo Águeda, Fuentes Ramón, Hernández-Sancho Francesc and Carmona Eric. 2018. Monetary Valuation of Salicylic Acid, Methylparaben and THCOOH in a Mediterranean Coastal Wetland Through the Shadow Prices Methodology. *Science of The Total Environment*, 627: 869-879.
- Costanza R, D'Arge R, Groot R D, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P and Belt M V D. 1997. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, 387: 253-260.
- De Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L and Willemen L. 2010. Challenges in Integrating The Concept of Ecosystem Services and Values in Landscape Planning, Management and Decision Making. *Ecological Complexity*, 7(3): 260-272.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). 2003. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework For Assessment*. Washington D C: Island Press, .
- Nesbitt L, Hotte N, Barron S, Cowan J and Sheppard S R J. 2017. The Social and Economic Value of Cultural Ecosystem Services Provided by Urban Forests in North America: A Review and Suggestions for Future Research. *Urban Forestry & Urban Greening*, 25: 103-111.
- 陈敏刚, 金佩华, 鲁兴萌, 黄凌霞, 叶志毅. 2005. 蚕桑生态系统服务功能价值的初步评估. *蚕业科学*, 31(3): 316-320. [Chen Mingang, Jin Peihua, Lu Xingmeng, Huang Lingxia and Ye Zhiyi. 2005. Preliminary Evaluation on Sericultural Ecosystem Services and Their Value. *Science of Sericulture*, 31(3): 316-320.]
- 邓伟, 周渝, 张勇, 孙荣. 2020. 重庆市生态保护红线区生态系统服务价值时空演变特征及其驱动. *长江流域资源与环境*, 29(1): 79-89. [Deng Wei, Zhou Yu, Zhang Yong and Sun Rong. 2020. Spatio-Temporal Evolution Characteristics of Ecosystem Service Value in Chongqing Ecological Red Line Area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 29(1): 79-89.]
- 丁疆华, 温琰茂, 舒强. 2001. 基塘系统可持续发展现状、问题及对策研究. *重庆环境科学*, 23(5): 12-14. [Ding Jianghua, Wen Yanmao and Shu Qiang. 2001. Studies on Sustainable Development of Aquaculture in the Dike-Pond Ecosystem. *Chongqing Environmental Science*, 23(5): 12-14.]
- 佛山市水务局. 2000—2017. 佛山市水资源公报. (2018-12-25) [2020-06-11]. <http://fswater.foshan.gov.cn/zhengwu/ywxx/gongshui/szygb/>. [The Water Affairs Bureau of Foshan. 2000-2017. Foshan Water Resources Bulletin. (2018-12-07) [2020-06-11] http://www.foshan.gov.cn/gzjg/stjj/tjnj_1110962/.]
- 佛山市统计局. 2001—2018. 佛山市统计年鉴. (2018-12-07) [2020-06-11]. http://www.foshan.gov.cn/gzjg/stjj/tjnj_1110962/. [The Statistics Bureau of Foshan. 2001-2018. Foshan Statistical Yearbook. (2018-12-07) [2020-06-11]. http://www.foshan.gov.cn/gzjg/stjj/tjnj_1110962/.]
- 福建省旅游局. 2008. 2008年福建省国内旅游市场抽样调查报告. (2010-12-01) [2020-06-11]. <http://wlt.fujian.gov.cn/>. [Fujian Provincial Department of Culture and Tourism. 2008. Sample Survey Report on the Domestic Tourism Market of Fujian Province in 2008. (2010-12-01) [2020-06-11]. <http://wlt.fujian.gov.cn/>.]
- 国家旅游局. 2019. 2000年入境旅游者抽样调查综合分析报告. (2019-03-11) [2020-06-11]. <https://www.mct.gov.cn/>. [National Tourism Administration

- of the People's Republic of China. 2019. Comprehensive Analysis Report of A Sample Survey of Inbound Tourists in 2000. (2019-03-11) [2020-06-11].
<https://www.mct.gov.cn/>]
- 江波, 陈媛媛, 肖洋, 赵娟娟, 欧阳志云. 2017. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估. 生态学报, 37(8): 2497-2505. [Jiang Bo, Chen Yuanyuan, Xiao Yang, Zhao Juanjuan and Ouyang Zhiyun. 2017. Evaluation of the Economic Value of Final Ecosystem Services from the Baiyangdian Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 37(8): 2497-2505.]
- 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 郑华, 白杨, 庄长伟, 方瑜. 2011. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价. 生态学报, 31(8): 2236-2244. [Jiang Bo, Ouyang Zhiyun, Miao hong, Zheng Hua, Bai Yang, Zhuang Changwei and Fang Yu. 2011. Ecosystem Services Valuation of the Haihe River Basin Wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 31(8): 2236-2244.]
- 黎丰收, 刘凯, 刘洋, 唐焕丽, 柳林, 彭力恒. 2018. 基于 WorldView-2 数据的基塘系统遥感分类研究. 湿地科学, 16(5): 587-596. [Li Fengshou, Liu Kai, Liu Yang, Tang Huanli, Liu Lin and Peng Liheng. 2018. Remote Sensing Classification for Dike-pond System based on Worldview-Orldview-2 Data. *Wetland Science*, 16(5): 587-596.]
- 李冬玉, 任志远, 刘宪锋, 林志慧. 2013. 陕西省耕地生态系统服务价值动态测评. 干旱区资源与环境, 27(7): 40-45. [Li Dongyu, Ren Zhiyuan, Liu Xianfeng and Lin Zhihui. 2013. Dynamic Change of Ecological Service Value of Cultivated Land in Shaanxi Province. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 27(7): 40-45.]
- 李颖, 冯玉, 彭飞, 陈树登. 2017. 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变. 经济地理, 37(12): 180-189. [Li Ying, Feng Yu, Peng Fei and Chen Shudeng. 2017. Pattern Evolvement of Ecological Land in Tianjin Based on Geodetector. *Economic Geography*, 37(12): 180-189.]
- 林文波. 2016. 闽江河口湿地生态服务功能价值评估. 防护林科技, (7): 69-71, 89. [Lin Wenbo. 2016. Evaluation of Ecological Service Function Value of Minjiang Estuary Wetland. *Protection Forest Science and Technology*, (7): 69-71, 89.]
- 刘凯, 王树功, 解靓, 庄剑顺. 2008. 佛山市基塘系统空间格局演变分析. 热带地理, 28(6): 513-517. [Liu Kai, Wang Shugong, Xie Liang and Zhuang Jianshun. 2008. Spatial Evolution Analysis of Dike-Pond Systems in Foshan City. *Tropical Geography*, 28(6): 513-517.]
- 刘通, 程炯, 苏少青, 郭月婷, 陈旭飞, 徐秋婷. 2017. 珠江三角洲桑基鱼塘现状及创新发展研究. 生态环境学报, 26(10): 1814-1820. [Liu Tong, Cheng Jiong, Su Shaoqing, Guo Yueting, Chen Xufei and Xu Qiuting. 2017. Current Situation and Innovative Development Countermeasures of the Mulberry Dike-Fish Pond in the Pearl River Delta. *Ecology and Environmental Sciences*, 26(10): 1814-1820.]
- 刘小玲, 甘建文. 2015. 珠三角地区水环境空间分异及其优化对策研究. 中国农业资源与区划, 36(4): 1-9. [Liu Xiaoling and Gan Jianwen. Study on the Spatial Differentiation and Optimization Strategies of the Water Environment in the Pearl River Delta Region. 2015. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 36(4): 1-9.]
- 陆健健. 2006. 湿地生态学. 北京: 高等教育出版社. [Lu Jianjian. 2006. *Wetland Ecology*. Beijing: Higher Education Press.]
- 聂呈荣, 黎华寿. 2001. 基塘系统: 现状、问题与前景. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 19(1): 49-53. [Nie Chengrong and Li Huashou. 2001. The Integrated Dike-pond Systems: Its New Developments and Ecological Problems. *Journal of Foshan University (Natural Science Edition)*, 19(1): 49-53.]
- 聂呈荣, 骆世明, 章家恩, 黎华寿, 赵玉环. 2003. 现代集约农业下基塘系统的退化与生态恢复. 生态学报, 23(9): 1851-1860. [Nie Chengrong, Luo Shiming, Zhang Jia'en, Li Huashou and Zhao Yuhuan. 2003. The Dike-Pond System in the Pearl River Delta: Degradation Following Recent Land Use Alterations and Measures for Their Ecological Restoration. *Acta Ecologica Sinica*, 23(9): 1851-1860.]
- 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 1999. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, (5): 19-25. [OuYang Zhiyun, Wang Xiaoke and Miao Hong. 1999. A Primary Study on Chinese Terrestrial Ecosystem Services and Their Ecological-economic Values. *Acta Ecologica Sinica*, 19(5): 19-25.]
- 潘竞虎, 冯娅娅. 2020. 中国农村深度贫困的空间扫描与贫困分异机制的地理探测. 地理学报, 75(4): 769-788. [Pan Jinghu and Feng Yaya. 2020. Spatial Distribution of Extreme poverty and Mechanism of Poverty Differentiation in Rural China Based on Spatial Scan Statistics and Geographical Detector. *Acta Geographica Sinica*, 75(4): 769-788.]

- 三水市人民政府. 1998. 对推进农业产业化现代化的探索. 农村研究, (3): 8-10, 4. [The People's Government of Sanshui City. 1998. Exploration on Promoting the Modernization of Agricultural Industrialization. *Rural Studies*, (3): 8-10, 4.]
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng and Xu Chengdong. 2017. Geodetector: Principle and Prospective. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116-134.]
- 王静禹, 周逸斌, 孟留伟, 杨良, 何赟涛, 黄凌霞. 2018. 湖州桑基鱼塘生态系统的服务价值评估. 蚕业科学, 44(4): 615-623. [Wang Jingyu, Zhou Yibin, Meng Liuwei, Yang Liang, He Yuntao and Huang Lingxia. 2018. Evaluation on Service Value of Mulberry-Base Fishpond Ecosystem in Huzhou. *Science of Sericulture*, 44(4): 615-623.]
- 王磊, 何冬梅, 江浩, 丁晶晶. 2016. 江苏滨海湿地生态系统服务功能价值评估. 生态科学, 35(5): 169-175. [Wang Lei, He Dongmei, Jiang Hao and Ding Jingjing. 2016. Evaluation of Coastal Wetland Ecosystem Services in Jiangsu Province. *Ecological Science*, 35(5): 169-175.]
- 魏秀国. 2003. 珠江流域河流碳通量与流域侵蚀研究. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所). [Wei Xiuguo. 2003. Study on Riverine Carbon Flux and Erosion of Zhujiang(Pearl) River Drainage Basin. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences.]
- 吴后建, 但新球, 刘世好, 黄球, 舒勇. 2016. 湖南省湿地生态系统服务价值初步评价. 湿地科学, 14(6): 781-787. [Wu Houjian, Dan Xinqiu, Liu Shihao, Huang Yan and Shu Yong. 2016. Preliminary Evaluation of Wetland Ecosystem Services in Hunan Province. *Wetland Science*, 14(6): 781-787.]
- 肖红克, 李洪忠, 王莉, 陈劲松, 韩宇. 2020. 粤港澳大湾区土地利用及生态系统服务价值的变化——以广佛肇为例. 水土保持研究, 27(1): 290-297. [Xiao Hongke, Li Honzhong, Wang Li, Chen Jinsong and Han Yu. 2020. Changes of Land Use and Ecosystem Service Value in Guangdong-HongKong-Macao Greater Bay Area. 2020. *Research of Soil and Water Conservation*, 27(1): 290-297.]
- 肖强, 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 向轼, 李勇志. 2014. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 34(1): 216-223. [Xiao Qiang, Xiao Yang, OuYang Zhiyun, Xu Weihua, Xiang Shi and Li Yongzhi. 2014. Value Assessment of The Function of The Forest Ecosystem Services in Chongqing. *Acta Ecologica Sinica*, 34(1): 216-223.]
- 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 2003. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 18(2): 189-196. [Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, Zheng Du and Li Shuangcheng. 2003. Ecological Assets Valuation of the Tibeyan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 18(2): 189-196.]
- 谢慧莹, 郭程轩. 2018. 广州海珠湿地生态系统服务价值评估. 热带地貌, 39(1): 26-33. [Xie Huiying and Guo Chengxuan. 2018. Evaluation of Haizhu Wetland Ecosystem Service Value in Guangzhou. *Tropical Geomorphology*, 39(1): 26-33.]
- 杨丹, 叶长盛. 2016. 基于CA模型的珠江三角洲基塘景观破碎化分析及模拟. 湖北农业科学, 55(11): 3931-3917. [Yang Dan, Ye Changsheng. 2016. Analyses and Simulation on Landscape Fragmentation of Dike - pond Based on CA Model in Pearl River Delta. *Hubei Agricultural Sciences*, 55(11): 3931-3917.]
- 杨晶晶. 2018. 佛山市植被覆盖动态变化及预测分析. 北京: 中国地质大学. [Yang Jingjing. 2018. Vegetation Coverage Dynamic Change and Forecast Analysis in Foshan. Beijing: China University of Geosciences.]
- 叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 张岸. 2018. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析. 地理研究, 37(1): 171-182. [Ye Yanjun, Qi Qingwen, Jiang Lili and Zhang An. 2018. Impact Factors of Grain Output from Farms in Heilongjiang Reclamation Area Based on Geographical Detector. *Geographical Research*, 37(1): 171-182.]
- 叶长盛. 2013. 珠江三角洲基塘变化特征及其空间类型. 东华理工大学学报(自然科学版), 36(3): 315-322. [Ye Changsheng. 2013. Change Characteristics and Spatial Types of Dike-pond in the Pearl River Delta. *Journal of East China Institute of Technology*, 36(3): 315-322.]
- 赵志刚, 余德, 韩成云, 王凯荣. 2017. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力. 生态学报, 37(24): 8411-8421. [Zhao Zhigang, Yu De, Han Chengyun and Wang Kairong. 2017. Ecosystem Services Value Prediction and Driving Forces in The Poyang Lake Eco-Economic Zone. *Acta Ecologica Sinica*, 37(24): 8411-8421.]
- 中国旅游研究院. 2018. 中国国内旅游发展年度报告 2018. (2018-06-27) [2020-06-11]. https://www.sohu.com/a/288843053_825181. [China Tourism Academy. 2018. China Domestic Tourism Development Annual Report in 2018. (2018-06-27) [2020-06-11].]

Evolution of Ecosystem Service Value of Typical Dike-Pond in the Pearl River Delta: A Case Study of Foshan

Han Ran and Ye Changsheng

(School of Geosciences, East China University of Technology, Nanchang 330010, China)

Abstract: Dike-ponds are a type of ecological agricultural land formed by man-made depressions in ponds where silt is accumulated as dikes to farm fish and grow crops such as mulberry and sugarcane; they are mainly distributed in the Pearl River Delta. Ecosystem services refer to the living environment they provide for human beings, as well as the various types of ecosystem products and functions that are beneficial to human beings. In recent years, ecosystem service value (ESV) has become a hot topic for scholars in China and abroad. Using the Pearl River Delta's birthplace, Foshan City (FS), as a case study, the Millennium Ecosystem Assessment (MA) framework, which combines the characteristics of a dike-pond ecosystem and the social and economic conditions of the study area, is used to adopt the market price method, replacement cost method, and shadow engineering method to estimate the ESV of dike-ponds in FS in 2000, 2009, and 2017. Additionally, Dike-pond's ESV in FS law of change was discussed and the influencing factors of ESV changes in dike-ponds were analyzed. The results show that during the study period of 2000–2017: 1) a few towns (streets) such as Lubao Town and Hecheng Street in the west and north, respectively, of FS have increased their dike-pond area, while Beijiao Town and Lecong Town in the east and south, respectively, have significantly decreased their dike-pond area to 19,244.47 hm², which have been mainly transferred to construction land. 2) In 2000, 2009, and 2017, the ESV of dike-ponds in FS first decreased and then increased to $1,661.91 \times 10^8$ and 978.60×10^8 , and $1,166.37 \times 10^8$ yuan, respectively. The overall trend is a declining one, with a total decrease of 495.54×10^8 yuan. In the three years, the proportion of adjustment functions in the total ESV is higher than 86%, which is the core function. Among the individual functions, the value of tourism and leisure increases the most, with an average annual growth rate of 19.36%. The value of climate regulation decreases significantly, by 589.37×10^8 yuan. 3) The ESV of dike-ponds in the southeast of FS is the highest. The western and northern regions are less affected by human activities and the ecological environment is suitable in this region; thus, the ESV of the dike-ponds increases accordingly. While the high level of industrialization and urbanization in the eastern and southern regions, serious pollution in the dike-ponds, and shrinkage of the dike-ponds all caused the ESV to decline, the material production and tourism and leisure values of the dike-pond of each research unit generally increased. The value changes of the remaining individual functions show strong consistency in space, i.e., the value of the towns (streets) in the northwest and southwest has increased significantly and the value in the southeast has decreased. 4) The results of a Geodetector probe show that a change in the gross domestic product (GDP) of primary industries is the principal factor affecting the spatial distribution of the ESV of dike-ponds in FS, followed by the change in GDP, population density, population, investment in fixed assets, GDP of the secondary industries as well, and impact of policy

factors, none of which should be ignored. Measures such as controlling the scale of development, restoring green vegetation, and giving importance to the advantages of the dike-pond landscape to increase the ESV of the dike-pond are all recommended.

Keywords: dike-pond; ecosystem service valuation (ESV); Foshan City

