

任向宁, 董玉祥, 王秋香. 珠三角核心区农田耕层土壤有机碳库储量时空变化特征及其影响因素识别[J]. 热带地理, 2018, 38(5): 668-677.
REN Xiangning, DONG Yuxiang and WANG Qiuxiang. 2018. Temporal and Spatial Variation of Soil Organic Carbon Storage in the Core Area of Pearl River Delta and Identification of Influencing Factors[J]. *Tropical Geography*, 38(5): 668-677.

珠三角核心区农田耕层土壤有机碳库储量 时空变化特征及其影响因素识别

任向宁^{1,3}, 董玉祥^{1,2}, 王秋香⁴

(1. 中山大学 地理科学与规划学院/广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275; 2. 中山大学新华学院, 广州 510520;
3. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 4. 广东省土地开发整治中心, 广州 510635)

摘要: 土壤有机碳库动态变化对区域乃至全球碳平衡具有显著影响, 快速城市化地区社会经济迅速发展过程中土地利用/覆被变化剧烈, 其农田耕层土壤有机碳库变化问题倍受关注。选择珠三角核心区为研究区域, 基于1980与2015年农田耕层土壤有机碳含量数据, 以乡镇为单元分析农田耕层土壤有机碳库储量的时空变化特征, 并通过地理探测器定量识别其影响因素的主导因素。结果表明: 1) 珠三角核心区农田耕层土壤有机碳库储量1980—2015年间损失巨大, 损失量达67.16%, 同时其空间变化具有典型的城镇集群指向特征, 即距离城镇集群越近, 损失程度越大; 2) 珠三角核心区农田耕层土壤有机碳库储量的时空异质性变化受到气候变化、地形状况、水文环境、社会经济发展、土地利用变化和农田景观变化等多种因素的影响, 且其影响力存在较大差异, 各因素贡献力(q 统计量)介于0.004~0.256之间; 3) 珠三角核心区农田耕层土壤有机碳库时空变化主导影响因素的贡献力表现为农田景观变化>二三产增长胁迫>水网密度>土地结构变化。

关键词: 土壤有机碳; 农田耕层; 碳库储量; 地理探测器; 主导影响因素; 珠三角核心区

中图分类号: S159

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2018)05-0668-10

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003075

农田土壤是陆地生态系统中最重要有机碳库之一, 人口、社会经济的发展导致大量不合理的土地利用与开发, 进而使土壤碳库发生剧烈变化, 对区域乃至全球气候均产生明显影响(Houghton et al., 1989; Running et al., 1999)。40 a来, 土地利用和人为管理对农田土壤的有机碳储存产生了深刻的影响(潘根兴, 2008), 其中农田耕层土壤有机碳库储量(Soil Organic Carbon Pool, SOCP)时空变化最为深刻和显著。

农田SOCP兼具自然和人为属性, 具有较强的空间变异。中大尺度上SOCP空间格局与土壤水平带谱具有显著一致性, 表现出较强的纬度和经度地带性, 并随地形和植被等产生一定偏转(方精云等, 1996; 王绍强等, 2000)。田块小尺度上, 受地形、土壤类型、土地利用方式和农田管理措施等影响, SOCP空间格局表现出较强的空间异质性(袁芳

等, 2008; 陈曦等, 2012)。已有研究表明, 自然土壤在气候变化、海拔高度与土地覆被变化等耦合作用下表现出复合变化的特征(Martin et al., 2010), 且受土壤类型(李娜娜等, 2015; 代杰瑞等, 2017)和土地利用方式影响较大(Xia et al., 2017)。温度升高、降水增加、海拔降低和地下水位下降, 生物活动速率加快, 均会促进耕层土壤有机碳分解, 矿化率上升; 反之, 则抑制土壤生物活性, 促进耕层土壤有机碳积累(张金屯, 1998; 连纲等, 2006; Mehmood et al., 2018)。土地利用/覆被与耕作方式变化既改变了土壤有机物的输入, 又通过影响小气候和土壤条件来调节土壤有机碳的分解速率, 从而改变土壤有机碳含量与区域碳库储量(Lal et al., 1999; 易亚男等, 2014; 苗正红, 2015)。同时, 农田景观的属性、结构与功能的时间变化, 是区域土壤生态过程的重要驱动力, 导致区域SOCP空间

收稿日期: 2018-07-16; 修回日期: 2018-08-13

作者简介: 任向宁(1978—), 男, 河北正定人, 博士生, 主要研究方向为土地资源开发利用与保护, (E-mail) xnrn@scau.edu.cn。

异质性增强(刘世梁等, 2001)。

但是, 现有区域SOCP研究主要集中在自然土壤或传统农业区农田土壤上, 对快速城市化地区SOCP变化特征及其影响因素研究较少。同时, 现有区域SOCP时空变化影响因素研究尚不完整, 主要集中在自然地理环境变化、土地利用/覆被变化和农田耕作管理方式等田块尺度影响因素上(Hontoria et al., 1999; Watson et al., 2000; 丁雪丽等, 2012), 对导致快速城市化地区发生重大土地利用/覆被变化的人口增长、社会经济发展等影响因素及其贡献力尚缺乏充分的研究与测度。

珠三角核心区地处中国南部面积最大的亚热带滨海平原三角洲, 热量充足, 水资源丰富, 农耕历史悠久, 农田利用方式多样; 且作为中国改革开放先发达地区, 人口不断积聚, 城镇化、产业化快速发展, 国土空间结构急剧变化, 农田破碎化严重, 空间异质性不断增强, 为探究SOCP时空变化特征, 识别主导影响因素提供了理想的研究区域。因此, 本文以珠三角核心区为例, 以乡镇级SOCP为研究对象, 探究亚热带经济先发达区SOCP时空变化特征, 并采用地理探测器识别研究区SOCP时空变化主导影响因素, 为区域耕层土壤有机碳库时空变化机理研究奠定基础, 进而为区域碳“源汇”、固碳潜力测算等研究提供科学依据。

1 研究区概况

珠三角核心区地处中国大陆最大的亚热带三角洲——珠江三角洲平原的核心区域, 区域范围为 $21^{\circ}48' - 23^{\circ}56' \text{N}$ 、 $112^{\circ}23' - 114^{\circ}37' \text{E}$, 总面积为 2.31万km^2 。研究区域内包括广州、深圳2个副省级城市, 珠海、佛山、东莞、中山4个地级市, 江门鹤山、蓬江、江海、新会与肇庆四会市5个市(县、区)(图1)。

珠三角核心区绝大部分在北回归线以南, 属亚热带海洋季风气候, 热量充足, 年均日照时数为 $1\,751.9 \text{h}$, 年均气温 22.5°C , 年均降水量 $1\,817.6 \text{mm}$ 。研究区四周多为山地、丘陵和岗地, 中间为河口三角洲沉积平原, 整体呈南向“铲”状地形。区内海拔高度在 $-52 \sim 1\,210 \text{m}$ 之间, 平均约为 50m ; 地形坡度在 $0 \sim 27.2^{\circ}$ 之间, 其中 $< 2^{\circ}$ 的区域占核心区总面积的 50.25% 。区内水资源丰富, 地表水网密集, 水域面积占区域总面积的 18.69% 。根据第二次土壤普查资料, 研究区农田土壤主要为赤红壤、水稻土、潮土等8个土类, 赤红壤、潜育水稻土、淹育水稻土等15个亚类, 潮泥田、河泥田、洪积泥田、麻沙质田、砂页



图1 珠三角核心区范围

Fig.1 The core area of the Pearl River Delta

岩赤红砂地等70多个土种(亚种、变种)。1980—2015年研究区内常住人口从 $1\,200.87 \text{万人}$ 增长到 $4\,970.17 \text{万人}$, 城镇规模从 520.05km^2 增加到 $3\,600.70 \text{km}^2$, 国民生产总值从 $1\,038.91 \text{亿元}$ (以2015年为基期的修正值)增加至 $55\,517.44 \text{亿元}$, 农田面积由 105.83万hm^2 减少至 41.78万hm^2 。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究区气象数据来源于中国气象局气象数据中心(<http://data.cma.cn>), 包括在1980—2015年间持续保持记录的广州、深圳、珠海、东莞、中山和增城6个气象站点的数据。区域耕层土壤有机碳含量(Soil Organic Carbon Content, SOCC)数据来源于广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室数据, 其中1980年研究区农田耕层土壤样本708个, 样本SOCC平均为 13.66g/kg ; 2015年样本942个, 样本SOCC平均为 11.01g/kg (表1)。1980年研究区耕地、水域等土地利用/覆被数据主要采用中国科学院遥感解译数据; 2015年研究区土地利用/覆被数据及行政区划界线主要根据研究区年度土地利用变更调查数据(耕地), 并采用地理空间数据云下载的高分一号遥感影像解译进行检验、修正。DEM数据采用ASTER GDEM数据(国家基础数据中心), 用于研究区海拔高度、地形坡度等信息提取, 空间分辨率 30m 。人口、经济等数据主要来源于研究区下辖各

表1 1980与2015年珠三角核心区耕层土壤
有机碳含量 (SOCC) 样本情况

Tab.1 Soil Organic Carbon Content (SOCC) of samples in the
core area of the Pearl River Delta in 1980 and 2015

项目	1980 年			2015 年			
	区间	平均值	数量/个	区间	平均值	数量/个	
利用方式	水田	[4.17, 24.63]	13.23	133	[5.09, 19.87]	11.05	368
	水浇地	[3.65, 24.99]	14.03	378	[5.13, 19.25]	10.89	292
	坑塘水面	[3.29, 24.63]	13.74	56	[4.97, 19.84]	11.24	49
	园地	[3.65, 24.14]	13.17	141	[5.15, 19.89]	10.94	95
	旱地	—	—	—	[5.02, 19.60]	11.11	114
	林地	—	—	—	[5.19, 19.24]	10.10	18
	草地	—	—	—	[6.77, 15.07]	10.66	6
行政区	广州市	[4.17, 24.99]	14.22	308	[4.97, 17.33]	10.65	393
	深圳市	[3.29, 19.94]	12.08	36	[9.01, 13.98]	11.2	47
	珠海市	[11.63, 24.99]	14.52	26	[8.39, 19.24]	15.67	34
	佛山市	[3.65, 24.63]	15.08	143	[5.93, 15.63]	9.93	210
	肇庆市	[4.17, 21.59]	13.34	39	[8.48, 16.79]	13.13	30
	江门市	[8.13, 18.82]	13.11	26	[6.13, 19.89]	11.11	128
	东莞市	[7.26, 24.63]	11.45	101	[6.77, 15.24]	10.86	67
	中山市	[8.39, 17.92]	13.87	29	[6.43, 18.74]	12.54	33
	研究区	[3.29, 24.99]	13.66	708	[4.97, 19.89]	11.01	942

注: 园地、林地、坑塘水面皆为可调整地类, 即由耕地转换成的其他利用方式, 但仍具耕地生产功能。

区1980年和2015年统计年鉴或统计报表, 公路交通数据采集于公开地图 (open street map)。

2.2 研究方法

2.2.1 耕层土壤有机碳库储量测算方法 区域农田耕层土壤有机碳主要包括耕层土壤有机碳含量 (SOCC)、耕层土壤有机碳密度 (Soil Organic Carbon Density, SOCD) 和耕层土壤有机碳库储量 (SOCP) 3部分, 三者之间既紧密联系, 又分属不同的层次和空间尺度。其中SOCC和SOCD主要体现田块尺度上有机碳的含量或浓度, SOCP则主要体现为一定区域内 (行政单元或自然单元内) 有机碳的总储量。通过ArcGIS软件对研究区1980和2015年样本SOCC进行QQ正态图、半变异函数/协方差 (云) 和全局Moran's I 等空间自相关分析, 通过检验后采用普通克里格插值完成研究区SOCC空间化 (任向宁等, 2018)。研究区SOCD则采用邵月红 (2006) 的公式进行测算。

$$T_{20} = \text{SOCC} \times \text{BD} \times H \times \frac{1-g}{100} \quad (1)$$

式中: T_{20} 为耕层 (20 cm) 土壤有机碳密度 (kg/m^3); SOCC为耕层土壤有机碳含量 (g/kg); BD为土壤容重 (g/cm^3); H 为耕层土壤厚度 (cm); g 为 $> 2 \text{ mm}$ 石砾含量 (%)。其中土壤容重 (BD) 采用土壤容

重传递函数 (韩光中, 2016) 测算, 耕层土壤 $> 2 \text{ mm}$ 石砾含量和黏粒 (clay) 采用平均值法 (邵月红等, 2006) 测算。1980年耕层土壤样本的 $> 2 \text{ mm}$ 石砾含量和黏粒平均值分别为16%和350 g/kg ; 2015年耕层土壤样本的 $> 2 \text{ mm}$ 石砾含量和黏粒平均值分别为18%和325 g/kg 。

研究区SOCP采用 (王绍强等, 1999; 邵月红等, 2006) 测算公式:

$$M_{20} = T_{20} \times S \times H \quad (2)$$

式中: M_{20} 为耕层土壤有机碳库储量, 单位为 Tg (10^6 t); T_{20} 为耕层土壤有机碳密度 (kg/m^3); S 为区域农田面积 (m^2); H 为耕层土壤厚度 (20 cm)。

2.2.2 影响因素遴选与量化方法 区域SOCP具有较强的空间变异性, 影响因素众多, 但区域SOCD和农田面积是SOCP的核心组成要素, 各类影响因素主要是围绕区域SOCD和农田面积对区域SOCP变化产生影响。采用文献法收集整理已有研究成果中的自然地理环境、土地利用/覆被变化、农田管理和农田景观4个方面的19个影响因素 (连纲等, 2006; Lalr et al., 1999; 苗正红等, 2015; Mehmood et al., 2018), 通过“因素-空间尺度”响应特征分析, 剔除主要对田块尺度SOCP影响显著的地下水位、土壤性状、农田利用方式变化和农田管理措施等8个因素, 以及对珠三角核心区农田影响不显著的坡向、坡位、土壤侵蚀强度和亚铁矿物指数4个因素。补充对乡镇尺度SOCP影响显著的人口增长、城镇扩张等体现社会经济发展的5个因素, 最终遴选确定影响珠三角核心区SOCP时空变化的地理环境变化、土地利用/覆被变化、社会经济发展和农田景观变化4个方面的12个因素, 包括气温变化、降水量变化、海拔高度、地形坡度、水网密度、人口增长胁迫、城镇扩张胁迫、交通发展胁迫、单位经济产出变化、二三产增长胁迫、土地利用结构变化和农田景观破碎度变化。

采用ArcGIS软件中的克里格插值和空间分析工具完成珠三角核心区SOCP时空变化影响因素的空间化, 其中年均气温变化与年均降水量变化采用1980年与2015年前后3 a平均的年均气温值和年均降水量进行差距测算, 海拔高度与地形坡度根据区域DEM采用ArcGIS进行测算, 水网密度根据乡镇土地总面积、水域面积及河流、水渠长度测算水网密度指数进行度量。人口增长胁迫、城镇扩张胁迫和交通发展胁迫表征研究区社会发展对SOCP的影响, 其中人口增长胁迫根据1980年与2015年之间乡

镇单位面积农田上承载的人口变化量,无量纲化后测算出胁迫度;城镇扩张胁迫根据各乡镇内农田距城镇的平均距离变化量测算,交通发展胁迫根据乡镇路网密度指数变化量测算。单位经济产出变化与二三产增长胁迫表征研究区经济发展对SOCP的影响,其中单位经济产出变化根据1980年与2015年之间单位农田面积上农业产值的变化量,无量纲化后反映农田经济产出的变化强度;二三产增长胁迫根据单位城镇工矿用地面积上二三产业产值的变化量测算(以2015年为基期,修正1980年价格)。土地利用结构变化表征乡镇尺度上土地利用/覆被变化对SOCP的影响,根据1980年与2015年之间农田在区域土地利用中所占比例的变化量,无量纲化后反映其变化强度。农田景观破碎度变化表征农田景观变化对SOCP的影响,根据1980年与2015年之间乡镇农田总面积与斑块数量,测算出农田景观破碎化指数的变化量,反映农田景观变化强度。

2.2.3 地理探测器 地理探测器(王劲峰等,2017)基于自变量对因变量的空间相关性假设,通过构建分异及因子探测器,探测地理属性 Y 的空间变异性,和探测因子 X_1 、 X_2 ……对 Y 空间变异的解释力(即贡

献力),用 q 值度量,现已广泛应用于地理空间分异性影响因素识别(Wang J F et al., 2010; Du Z, 2016; 李雨等, 2017; 任向宁等, 2018)等。分异及因子探测的表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

式中: $SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2$; $SST = N \sigma^2$; $h = 1, 2, \dots$; L 表示因子 X 的分层(Strata),即自变量分类分级; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区 Y 值的方差。 SSW 和 SST 分别为层内方差之和(Within Sum of Squares)和全区总方差(Total Sum of Squares)。 $q \in [0, 1]$, q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强,反之则越弱。

3 结果与分析

3.1 耕层土壤有机碳库储量时空变化特征

珠三角核心区SOCD平均值从1980年的4.08下降至2015年的3.30 kg/m³(图2-a),下降19.12%;农田面积从1980年的105.83万hm²缩减至2015年的41.78万hm²(图2-b),减少60.52%;珠三角核心区

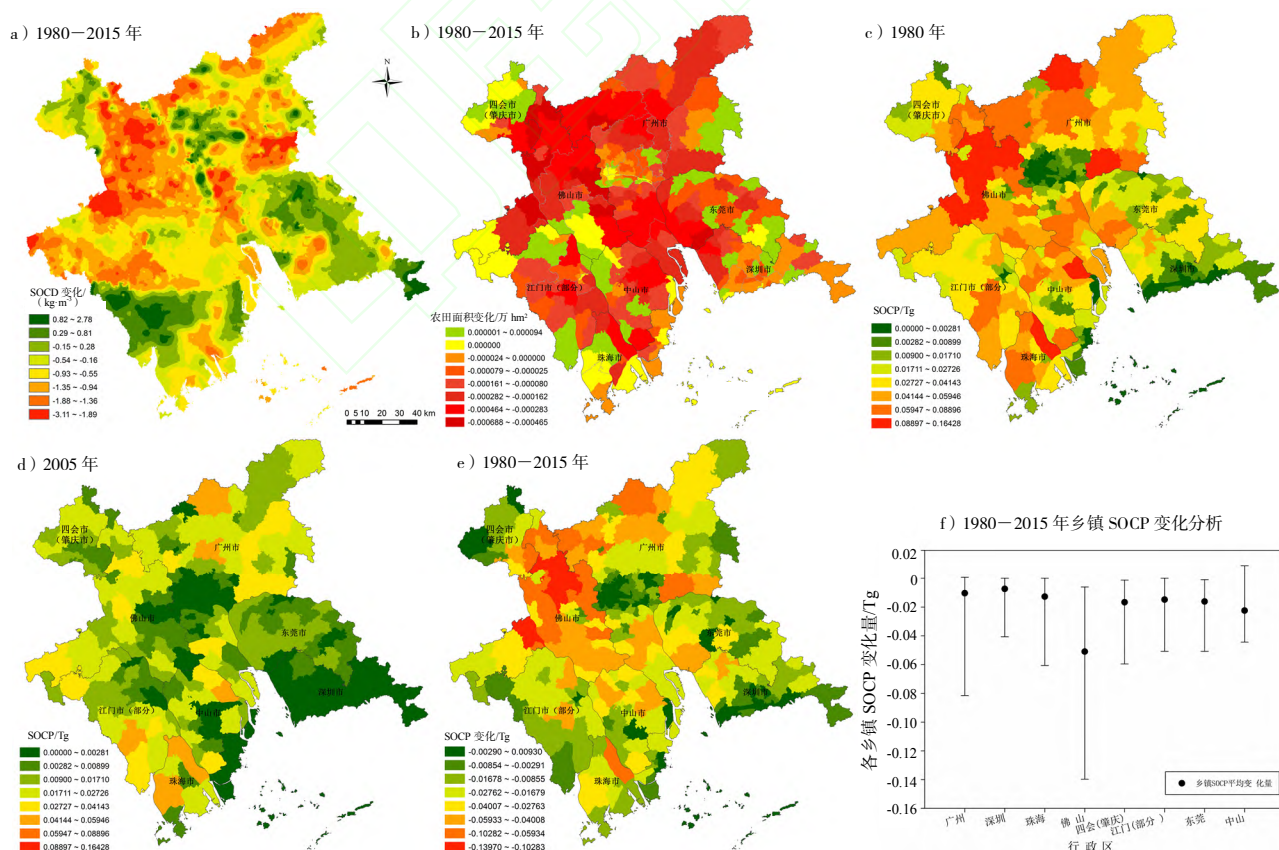


图2 1980—2015年研究区SOCP变化

Fig.2 Soil Organic Carbon Pool (SOCP) changes of the study area during 1980-2015

SOCP从1980年的8.80 Tg (图2-c) 减少至2015年的2.89 Tg(图2-d), 损失5.91 Tg, 损失高达67.16%(表2)。在距珠三角核心区几何中心20~80 km处, 形成宽度为20~60 km的不规则环形圈, 圈内SOCP下降

显著(图2-e)。研究区SOCP总体上中西部平原地区减少显著, 东南部地形复杂地区减少幅度相对较小, 广州、深圳、珠海、佛山和中山等区域核心城市的中心城区周边变化基本趋于稳定。

表2 1980—2015年珠三角核心区地级市耕层有机碳库储量时空变化

行政区	1980 年			2015 年			1980—2015 年变化		
	SOCD 平均值 kg·m ⁻³	农田面积 万 hm ²	SOCP/Tg	SOCD 平均值 kg·m ⁻³	农田面积 万 hm ²	SOCP/Tg	SOCD 平均值 kg·m ⁻³	农田面积 万 hm ²	SOCP/Tg
研究区	4.08	105.83	8.80	3.30	41.78	2.89	-0.83	-64.06	-5.91
广州市	4.19	30.60	2.59	3.22	13.65	0.90	-0.84	-16.95	-1.69
深圳市	3.74	5.86	0.44	3.38	0.42	0.03	-0.49	-5.44	-0.41
珠海市	4.31	6.65	0.59	4.30	3.36	0.28	-0.12	-3.30	-0.31
佛山市	4.39	23.35	2.10	3.05	6.83	0.42	-1.51	-16.52	-1.68
肇庆市	4.03	5.16	0.42	3.81	2.47	0.19	-0.25	-2.69	-0.23
江门市	3.98	12.04	0.96	3.29	6.09	0.45	-0.50	-5.95	-0.51
东莞市	3.57	11.06	0.77	3.28	3.79	0.25	-0.23	-7.26	-0.52
中山市	4.16	11.11	0.94	3.68	5.18	0.38	-0.59	-5.93	-0.56

3.2 主导影响因素识别

1980—2015年, 珠三角核心区作为改革开放后的快速城市化、工业化地区, 从传统农业型区域快速转变为先进制造业城镇集群, 由此带来的地理环境、人口、社会经济、土地利用/覆被与农田景观急剧变化。1980—2015年珠三角核心区内气候变化存在一定空间差异, 不同区域的年均气温变化幅度为-3.18~9.68℃ (图3-a), 降水变化幅度为-158.89~241.41 mm (图3-b)。采用ArcGIS对珠三角核心区DEM和水文情况进行分析, 其农田海拔高度平均为17.32 m (图3-c), 地形坡度平均为1.89° (图3-d), 水网密度平均为0.15 (图3-e)。单位农田承载的人口压力从1980年的11.35人/hm²增加到2015年的118.40人/hm², 城镇距农田的平均距离从1980年的1 015 m缩减至2015年的245 m, 道路密度从1980年的0.002增加至2015年的0.127;不同乡镇人口增长胁迫度在-99.64~100.00之间 (图3-f), 城镇扩张胁迫度在-2.64~97.97 (图3-g), 交通发展胁迫度在-0.56~47.48之间 (图3-h)。农田单位产值从1980年的5.60万元/hm²增加到2015年的14.62 万元/hm², 城镇工矿用地二三产业单位产值从1980年的25.20万元/hm²增长至2015年的918.11万元/hm²;不同乡镇农田单位产值变化在-4.96~257.72万元/hm²之间(图3-i), 二三产业单位产值变化在0.56~31 652.75万元/hm²之间(图3-j)。农田占区域土地总面积的比例从1980年的45.72%下降至2015年的18.05%, 农田景观破碎度从1980年的0.017增加至2015年的0.209;农田占乡

镇土地总面积的比例变化在-60%~19%之间 (图3-j), 不同乡镇农田景观破碎度变化在-1.16~20.39之间 (图3-l)。

以1980—2015年珠三角核心区380个乡镇SOCP变化量为因变量, 采用地理探测器进行探测, 12个因素的贡献力(*q* statistic)在0.004~0.256之间, 其贡献力序列为: 农田景观变化>二三产增长胁迫>水网密度>土地结构变化>单位经济产出变化>城镇扩展胁迫>年均降水变化>交通发展胁迫>人口增长胁迫>地形坡度>海拔高度>年均气温变化。其中农田景观变化和二三产增长胁迫的贡献力相对较强, 其*q*统计量分别为0.256和0.255, 水网密度、土地结构变化、单位经济产出变化和城镇扩展胁迫的*q*统计量在0.202~0.224之间, 其他6个因素对耕层土壤有机碳库储量时空变化的贡献力在0.200以下。

珠三角核心区SOCP影响因素中的年均气温变化、海拔高度和地形坡度的贡献力在0.050以下;特别是年均气温变化和海拔高度的*p*值较大, 分别为0.853和0.652, 以上3个因素对SOCP时空变化影响不显著。人口增长胁迫、交通发展胁迫、年均降水变化、城镇扩展胁迫和单位经济产出变化的贡献力在0.129~0.204之间, 位于研究区影响因素平均贡献力0.158附近, 属于一般影响因素。水网密度、土地结构变化、二三产增长胁迫和农田景观变化4个因素贡献力大于0.210, 平均为0.237, 对珠三角核心区SOCP时空变化贡献显著, 确定为珠三角核心区SOCP时空变化的主导影响因素 (图4)。

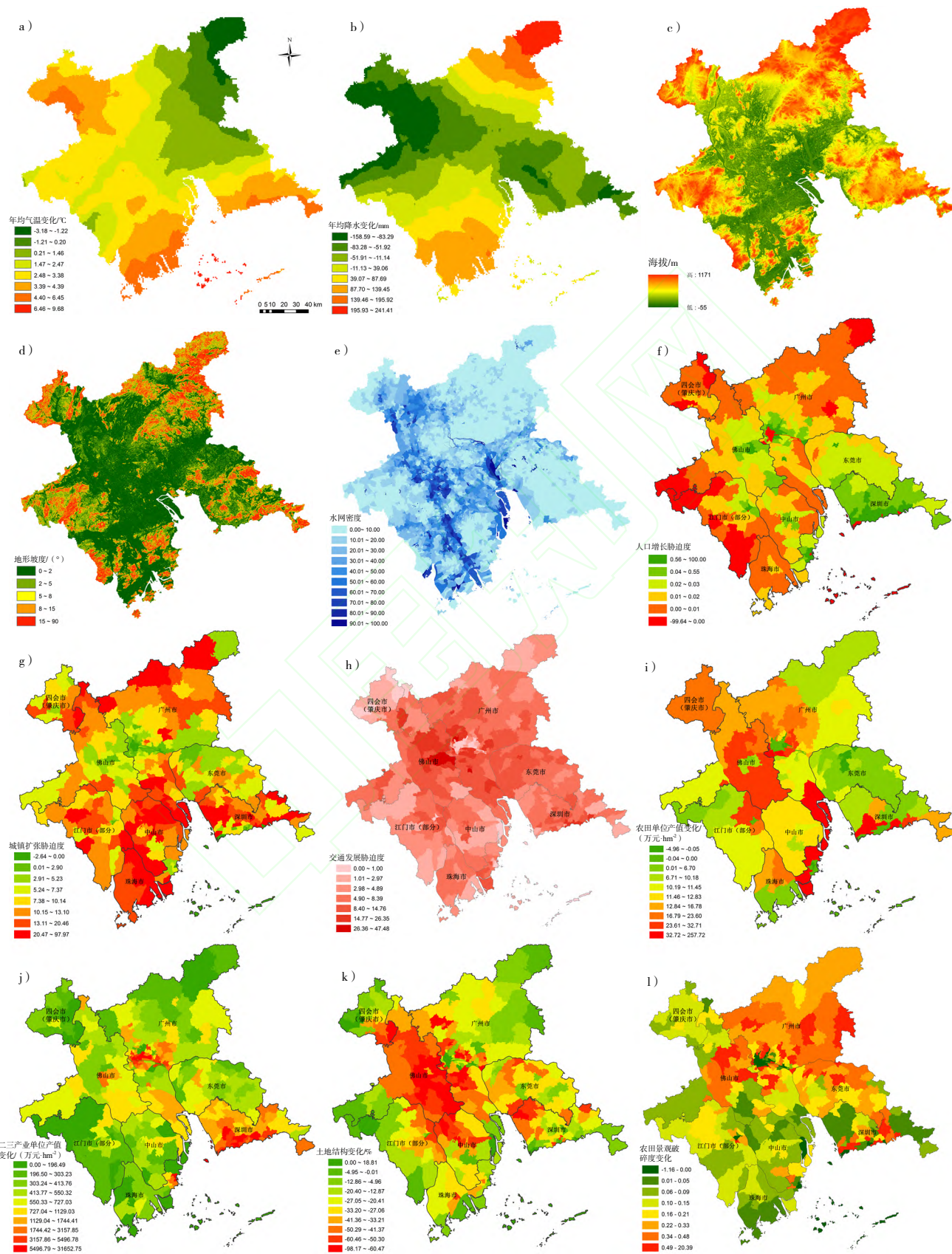
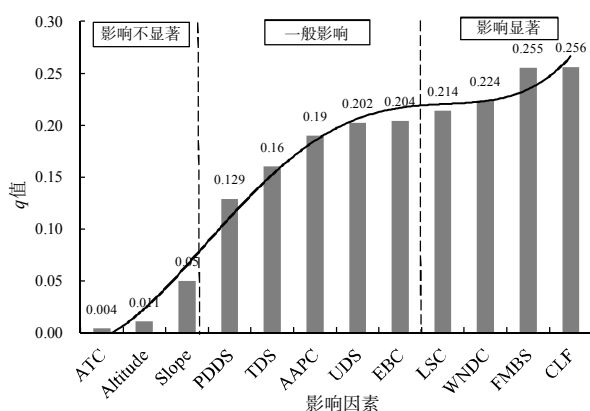


图3 研究区 SOCP 影响因素分析

Fig.3 Influencing factors for Soil Organic Carbon Pool (SOCP) in the study area



图注: 年均气温变化(ATC); 海拔高度(Altitude); 地形坡度(Slope); 人口增长胁迫(PDDS); 交通发展胁迫(TDS); 年均降水变化(AAPC); 城镇扩展胁迫(UDS); 单位经济产出变化(EBC); 土地结构变化(LSC); 水网密度(WNDC); 二产增长胁迫(FMBS); 农田景观变化(CLF)。

图4 研究区 SOCP 变化主导影响因素分析

Fig.4 The leading factors of SOCP change in the study area

4 讨论

4.1 城市化地区乡镇尺度农田耕层土壤有机碳库储量变化特征

当区域土地利用/覆被向非农化方向演化, 且强度较大时, 农田SOCP总体呈下降趋势。如中国东部地区、辽河三角洲、黑龙江省富锦市和青海省乐都区, 在20 a左右的时间, 不同尺度的SOCP下降幅度为0.33%~24% (李娜娜等, 2015; Xia et al., 2017; Zhao G et al., 2017; 苗正红等, 2017)。1980—2015年珠三角核心区农田SOCD平均下降19.12%, 农田面积减少60.52%, 在两者叠加作用下, 区域农田SOCP损失5.91 Tg, 损失率为67.16%。同时, SOCP时空变化的相关研究均表明土地利用/覆被变化是区域SOCP时空变化的主要作用要素 (Martin et al., 2010; Xia et al., 2017), 珠三角核心区乡镇尺度农田SOCP变化即呈现出典型的城镇集群指向特征, 围绕“广州—佛山—东莞”城镇集群与产业经济带, 形成不规则农田SOCP显著下降环形圈, 距离城镇集群越近, SOCP损失越大。

4.2 自然地理环境因素对耕层有机碳库储量变化的影响

珠三角核心区SOCP具有响应地理环境变化的特征, 但是气候变化和地形特征的贡献力较低, 而水网密度的影响较为显著。自然地理环境因素中区域气候变化在一定程度上加快或降低土壤有机碳分解速率 (张金屯, 1998; Hobley et al., 2015; Mehmood et al., 2018), 海拔高度和地形坡度也能够影响不同

地貌部位土壤有机碳的累积和流失速度 (连纲等, 2006; Martin et al., 2010)。但是, 施肥、管理等随机性因素对农田SOCP影响强度更大 (李珊等, 2015), 农业生产活动通过大量输送有机肥料与水分进入农田系统, 以维持其生产功能, 导致SOCP具有更强的应对自然环境变化的能力 (易亚男等, 2013)。珠三角核心区温度、降水的地理背景值较高, 地形也相对较为平坦, 在高强度农业活动干扰下, 气候变化与地形状况对区域农田SOCP变化的影响不显著, 贡献力在0.004~0.190之间。

受地形影响, 珠三角核心区水网密度空间差异较大。在地势低洼、水网密度大的区域, 农田地下水位较高, 长期处于渍水状态, 抑制了土壤微生物的生长和有机物质的矿化, 土壤有机物质可不断积累 (易亚男等, 2014)。农田耕作层土壤持续处于水作状态下, 土壤黏粒不断增加, 固碳能力增强, 土壤有机碳越不易被分解 (Hassink, 1997; 徐明岗等, 2017)。同时, 复杂的水文环境增加了农田转用为建设用地的困难程度, 阻滞了区域农田面积下降, 有利于区域SOCP稳定。而在地势较高、水网密度较小的区域, 耦合区域SOCD与农田面积下降的双重影响, 导致区域SOCP损失相对较大。

4.3 社会经济驱动及其引发的土地利用结构与农田景观变化是耕层有机碳库储量变化的主导影响因素

社会经济发展对土地利用/覆被变化也具有重要的驱动作用, 其人口迁移动态、社会发展以及不同土地利用方式间的经济竞争对区域土地利用影响较大 (张明, 2001)。1980—2015年珠三角核心区作为中国改革开放后的快速城市化地区之一, 其二三产业经济增长幅度远大于人口增长、城镇扩展、交通发展与农业经济增长 (叶玉瑶等, 2011), 在引发区域农田SOCP变化的各类社会经济影响因素中贡献力最为显著。随着二三产业增长胁迫度的增加, 农田经济产出的竞争力急剧下降, 导致农田转用强度加大, 农田规模大幅缩减 (黄滢冰等, 2017), 区域土地利用结构出现伴随响应, 农田在区域土地总面积中所占比例下降, 对区域SOCP时空变化产生重要影响 (赵荣钦等, 2013)。而城镇工矿用地的扩张及大量新增道路的空间切割作用, 也导致区域农田景观形态破碎化, 阻碍了农田生态系统中的水分流动与生物循环, 降低了作物生产量及进入土壤中的有机物量, 农田土壤有机碳积累速率下降 (刘世梁等, 2001)。农田景观破碎化程度越高, 区域农田SOCP下降幅度越大。

5 结论

在区域自然环境、土地利用/覆被急剧变化及社会经济快速发展的耦合作用下, 1980—2015年珠三角核心区SOCP由8.80 Tg减少至2.89 Tg, 总体表现为大幅损失67.16%, 并具有显著的城镇集群指向特征, 距离城镇集群越近, 损失量越大。同时, 珠三角核心区SOCP时空变化主要受农田景观变化、二三产业增长胁迫、水网密度和土地结构变化4个因素的影响。

快速城市化地区乡镇尺度农田SOCP的影响因素众多, 包括气候变化、地形状况、水文环境、社会经济发展、土地利用变化、农田景观变化等各方面因素, 相对自然土壤具有更强的多因性和复杂性。在人为活动的强烈干扰下, 气候变化与地形状况对乡镇尺度SOCP时空变化影响较小, 而水网密度作为区域水环境的代表性指标, 综合影响了区域SOCD和土地利用变化, 在诸多自然地理环境因素中对SOCP时空变化影响最为显著。同时, 作为经济先发地区, 社会经济快速发展促使区域人口大幅增长, 城镇快速扩张, 交通密度不断加大, 尤其是农业生产与非农经济之间产生了巨大的效益差距, 从而导致区域土地利用/覆被发生急剧改变及农田景观的严重破碎化, 引发了区域SOCP剧烈的时空变化。

本文在测算乡镇SOCP过程中, 由于耕层土壤样本中容重和黏粒信息不足, 导致测算结果可能存在一定误差。未来需要进一步补充调查相关土壤样本数据, 修订、完善土壤容重传递系数模型, 提高测算精度。同时, 由于篇幅限制, 对农田转用为建设用地后封闭 (sealing) 的耕层土壤有机碳库储量也未进行考虑和探讨, 需要在后续研究中不断完善。

参考文献 (References):

陈曦, 彭稳, 曹建华. 2012. 典型峰林平原土壤有机碳储量和分布特征研究. 科技通报, 28(2): 167-173. [CHEN Xi, PENG Wen and CAO Jianghua. 2012. Study on the distribution and reserves features of soil organic carbon in the typical peak-forest plain, Southwest China. *Bulletin of Science and Technology*, 28(2): 167-173.]

代杰瑞, 庞绪贵, 董健, 王增辉, 喻超. 2017. 山东省土壤有机碳库及其时空变化特征. 现代地质, 31(2): 386-393. [DAI Jierui, PANG Xugui, DONG Jian, WANG Zenghui and YU Chao. 2017. Soil organic carbon pool and temporal variation characterizes in Shandong province. *Geoscience*, 31(2): 386-393.]

丁雪丽, 韩晓增, 乔云发, 李禄军, 李娜, 宋显军. 2012. 农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制. 土壤通报, 43(3): 737-

744. [DING Xueli, HAN Xiaozeng, QIAO Yunfa, LI Lujun, LI Na and SONG Xianjun. 2012. Sequestration of organic carbon in cultivated soils: main factors and their stabilization mechanisms. *Chinese Journal of Soil Science*, 43(3): 737-744.]

DU Z, XU X, ZHANG H, WU Z and LIU Y. 2016. Geographical detector-based identification of the impact of major determinants on aeolian desertification risk. *PLoS One*, 11(3): e0151331.

方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 1996. 中国陆地生态系统的碳库. 北京: 中国环境科学出版社, 109-128. [FANG Jinyun, LIU Guohua and XU Songling. 1996. *Carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China*. Beijing: China Environment Sciences Press, 109-128.]

韩光中, 王德彩, 谢贤健. 2016. 中国主要土壤类型的土壤容重传递函数研究. 土壤学报, 53(1): 93-102. [HAN Guangzhong, WANG Decai and XIE Xianjian. 2016. Pedotransfer functions for prediction of soil bulk density for major types of soils in China. *Acta Pedologica Sinica*, 53(1): 93-102.]

HASSINK J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*, 191(1): 77-87.

HOBLEY E, WILSON B, WILKIE A, GRAY J and KOEN Terry. 2015. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia. *Plant and Soil*, 390(1/2): 111-127.

HONTORIA C, SAA A and RODRÍGUEZ-MURILLO J C. 1999. Relationships between soil organic carbon and site characteristics in peninsular Spain. *Soil Science Society of America Journal*, 63(3): 614-621.

HOUGHTON R A and WOODWELL G M. 1989. Global climate change. *Scientific American*, 260(4): 36-40.

黄滢冰, 南卓铜, 徐启恒, 赵克飞. 2017. 珠三角典型地区耕地流失特征及机制分析. 世界地理研究, 26(5): 44-55. [HUANG Yingbing, NAN Zhuotong, XU Qiheng and ZHAO Kefei. 2017. Characteristics and driving forces of the arable land loss in Dongguan. *World Regional Studies*, 26(5): 44-55.]

LAL R, FOLLETT F, KIMBLE J and COLE C V. 1999. Management US cropland to sequester carbon in soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54(1): 374-381.

连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 2006. 黄土丘陵沟壑区县域土壤有机质空间分布特征及预测. 地理科学进展, 25(2): 112-122. [LIAN Gang, GUO Xudong, FU Bojie and HU Chenxia. 2006. Spatial variability and prediction of soil organic matter at county scale on the loess plateau. *Progress in Geography*, 25(2): 112-122.]

李娜娜, 张彦军, 周小刚, 邹俊亮, 刘庆芳, 李俊超, 刘京, 郭慧敏, 王蕊, 郭胜利. 2015. 青海乐都县30 a来农田表层土壤有机碳储量变化特征. 自然资源学报, 30(6): 1005-1012. [LI Nana, ZHANG Yanjun, ZHOU Xiaogang, ZOU Junliang, LIU Qingfang, LI Junchao, LIU Jing, GUO Huimin, WANG Rui and GUO Shengli. 2015. Changing Characteristics of Soil Organic Carbon Storage in Cropland in Ledu of Qinghai in Recent 30 Years, Qinghai Province. *Journal of Natural Resources*, 30(6): 1005-1012.]

李珊, 李启权, 王昌全, 史文娇, 袁大刚, 李冰, 高雪松. 2015. 盐源县耕层土壤有机碳时空变化及影响因素显著性变化分析. 土壤通报, 46(5): 1063-1070. [LI Shan, LI Qiquan, WANG Changquan, SHI Wenjiao, YUAN Dagang, LI Bing and GAO Xuesong. 2015.

- Spatio-temporal variation of soil organic carbon and significant changes in its impact factors-A case study in Yanyuan county, southwest Sichuan. *Chinese Journal of Soil Science*, 46 (5): 1063-1070.]
- 李雨, 韩平, 任东, 罗娜, 王纪华. 2017. 基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析. *中国农业科学*, 50(21): 4138-4148. [LI Yu, HAN Ping, REN Dong, LUO Na and WANG Jihua. 2017. Influence factor analysis of farmland soil heavy metal based on the geographical detector. *Scientia Agricultura Sinica*, 50 (21): 4138-4148.]
- 刘世梁, 傅伯杰. 2001. 景观生态学原理在土壤学中的应用. *水土保持学报*, 1(3): 102-106. [LIU Shiliang and FU Bojie. 2001. Application of landscape ecology principle in soil science. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1 (3): 102-106.]
- MARTIN D, LAL Tarsem, SACHDEV C B and SHARMA J P. 2010. Soil organic carbon storage changes with climate change, landform and land use conditions in Garhwal hills of the Indian Himalayan mountains. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138 (1): 64-73.
- MEHMOOD A, AKHTAR M, RUKH S, IMRAN M, HASAN A, ABBASI K, QAYYUM A, MAHMOOD T, AHMED W, SHAHZAD K, KHAN A and AHMAD Z. 2018. Soil organic carbon stock variation with climate and land use in shale derived soils. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 83 (1): 1-9.
- 苗正红, 杨清臣, 邱中军, 毕强, 王宗明. 2015. 基于GIS技术的土地利用变化对表层土壤有机碳储量的影响——以富锦市为例. *水土保持研究*, 22 (6): 19-23. [MIAO Zhenghong, YANG Qingchen, QIU Zhongjun, BI Qiang and WANG Zongming. 2015. Impact of land use change on soil organic carbon stocks based on GIS-A case study in Fujin city. *Research of Soil and Water Conservation*, 22(6): 19-23.]
- 潘根兴. 2008. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化. *气候变化研究进展*, 4(5): 282-289. [PAN Genxing. 2008. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of China. *Advances in Climate Change Research*, 4 (5): 282-289.]
- 任向宁, 董玉祥. 2018. 基于地理探测器的区域土壤耕层有机碳含量多元复合模型构建——以珠三角核心区为例. *热带地理*, 38 (4): 546-556. [REN Xiangning and DONG Yuxiang. 2018. Construction of Multivariate Composite Calculation Model of Soil Organic Carbon Content in Plough Horizon Based on Geodetector. *Tropical Geography*, 38 (4): 546-556.]
- RUNNING S W, BALDOCCHI D D, TURNER D P, GOWER S T, BAKWIN P S and HIBBARD K A. 1999. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 70 (1): 108-127.
- 邵月红, 潘剑君, 许信旺, 米高奇. 2006. 浅谈土壤有机碳密度及储量的估算方法. *土壤通报*, 37 (5): 1007-1011. [SHAO Yuehong, PAN Jianjun, XU Xinwang and MI Gaoqi. 2006. Discussion on the methods for estimating soil organic carbon density and storage. *Chinese Journal of Soil Science*, 37 (5): 1007-1011.]
- WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, LIAO Y L, ZHANG T, GU X and ZHENG X Y. 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 24 (1): 107-127.
- 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.]
- 王绍强, 周成虎. 1999. 中国陆地土壤有机碳库的估算. *地理研究*, 18 (4): 340-355. [WANG Shaoqiang and ZHOU Chenghu. 1999. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. *Geographical Research*, 18 (4): 340-355.]
- 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 2000. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 55 (5): 533-544. [WANG Shaoqiang, ZHOU Chenghu, LI Kerang, ZHU Songli and HUANG Fanghong. 2000. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 55 (5): 533-544.]
- WATSON R T and BOLIN B. 2000. *Landuse, Landuse change and forestry: A special report of the IPCC*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 189-217.
- XIA Xueqi, YANG Zhongfang, XUE Yuan, SHAO Xin, YU Tao and HOU Qingye. 2017. Research paper: Spatial analysis of land use change effect on soil organic carbon stocks in the eastern regions of China between 1980 and 2000. *Geoscience Frontiers*, 8 (3): 597-603.
- 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 张文菊. 2017. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展. *植物营养与肥料学报*, 23(6): 1441-1449. [XU Minggang, ZHANG Xubo, SUN Nan and ZHANG Wenju. 2017. Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 23 (6): 1441-1449.]
- 叶玉瑶, 张虹鸥, 许学强, 周春山. 2011. 珠江三角洲建设用地扩展与经济增长模式的关系. *地理研究*, 30 (12): 2259-2271. [YE Yuyao, ZHANG Hongou, XU Xueqiang and ZHOU Chunshan. 2011. Study on the relationship between construction land expansion and economic growth pattern in the Pearl River Delta. *Geographical Research*, 30 (12): 2259-2271.]
- 易亚男, 尹力初, 张蕾, 高德才. 2013. 施肥对不同地下水位水稻土团聚体组成及有机碳分布的影响. *水土保持学报*, 27(5): 144-153. [YI Yanan, YIN Lichu, ZHANG Lei and GAO Decai. 2013. Effects of fertilization on aggregate composition and organic carbon distribution in paddy soil under different groundwater level. *Journal of Soil and Water Conservation*, 27 (5): 144-153.]
- 易亚男, 尹力初, 张蕾. 2014. 不同地下水位和施肥管理对水稻土有机碳组分的影响. *生态学杂志*, 33 (5): 1284-1289. [YI Yanan, YIN Lichu and ZHANG Lei. 2014. Effects of water table and fertilization on organic carbon fractions in paddy soil. *Chinese Journal of Ecology*, 33 (5): 1284-1289.]
- 袁芳, 赵小敏, 乐丽红, 贾学铭. 2008. 江西省表层土壤有机碳库储量估算与空间分布特征. *生态环境*, 17 (1): 268-272. [YUAN Fang, ZHAO Xiaomin, LE Lihong and JIA Xueming. 2008. Organic carbon reserves of topsoil and spatial distribution in Jiangxi province. *Ecology and Environment*, 17 (1): 268-272.]
- 张金屯. 1998. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响. *地理科学*, 18 (5): 463-471. [ZHANG Jintun. 1998. Effects of global climate change on C and N circulation in natural soils. *Scientia Geographica*

- Sinica*, 18 (5): 463-471.]
- 张明. 2001. 以土地利用/土地覆被变化为中心的土地科学研究进展. 地理科学进展, 20 (4): 297-304. [ZHANG Ming. 2001. The progress on comprehensive land sciences focused on land-use and land-cover change. *Progress in Geography*, 20 (4): 297-304.]
- ZHAO G, YE S, LI G, YU X and MCCLELLAN S A. 2017. Soil Organic Carbon Storage Changes in Coastal Wetlands of the Liaohe Delta, China, Based on Landscape Patterns. *Estuaries And Coasts*, 40 (4): 967-976.
- 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 揣小伟. 2013. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化. 农业工程学报, 29 (17): 220-229. [ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin, ZHONG Taiyang and CHUAI Xiaowei. 2013. Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29 (17): 220-229.]

Temporal and Spatial Variation of Soil Organic Carbon Storage in the Core Area of Pearl River Delta and Identification of Influencing Factors

REN Xiangning^{1,3}, DONG Yuxiang^{1,2}, WANG Qiuxiang⁴

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Xinhua College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510520, China; 3. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 4. Guangdong Land Consolidation and rehabilitation Center, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The dynamic change of soil organic carbon storage has a significant influence on the regional and even global carbon balance. In the rapidly urbanized area, the rapid social and economic development has made the land use/cover change intensely, and the change of soil organic carbon storage in plough layer of this area has attracted much attention. The core area of the Pearl River Delta is selected as the research area. Based on the data of soil organic carbon content of plough layer in 1980 and 2015, this paper calculates the reserves of the soil organic carbon pool of the plough layer in different time, analyzes the spatio-temporal variation characteristics of the soil organic carbon storage by the towns, and uses the geographic detector to measure the contribution of different influence factors, identifies the dominant factors affecting the spatio-temporal variation of soil organic carbon storage at the township scale. The results show that: 1) during the period from 1980 to 2015, the reserves loss of soil organic carbon pool in the core area of the Pearl River Delta was 5.91Tg, and the loss rate was 67.16%. The spatial change had the direction of the typical urban cluster, that is, the closer to the urban cluster the area is, the greater the degree of loss will be. Around the “Guangzhou-Foshan-Dongguan” town cluster, the irregular circle of soil organic carbon storage decreased significantly. 2) The spatio-temporal heterogeneity of soil organic carbon storage in the core area of the Pearl River Delta is influenced by various factors such as climate change, topography, hydrological environment, social and economic development, land use change and farmland landscape change, and the influence has great difference, and the contribution of each factor (q Statistics) ranged from 0.004 to 0.256. 3) The change of farmland landscape, pressure stress from the growth of the secondary and tertiary industries, water network density and land structure change are the dominant factors affecting the spatial and temporal changes of soil plough organic carbon storage in the core area of the Pearl River Delta. Under the interference of high intensity artificial activities such as irrigation, fertilization and artificial soil improvement, climate change and topographic conditions have no significant influence on the spatial and temporal changes of soil plough organic carbon storage at the township scale in the core area of the Pearl River Delta. The water network density determines the water environment of the farmland, which affects the soil organic carbon density of plough layer and land use/cover change, and has the most significant influence among the factors that belong to the natural geographical environment. At the same time, as the rapidly urbanized area, there was a huge benefit gap between agricultural production and non-agricultural economy in the core area of the Pearl River Delta from 1980 to 2015, which led to the sharp change in the land use/cover change and the serious fragmentation of the farmland landscape, which caused the severe changes of the soil organic carbon pool of plough layer at the township scale.

Key words: soil organic carbon; plough layer; carbon storage; geodetector; dominant factors; the core area of Pearl River Delta