

1979—2020 年杭州市富阳区土地利用对耕层土壤有机碳储量变化的影响

邱乐丰¹, 虞舟鲁²¹

1. 浙江财经大学 土地与城乡发展研究院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学 农业遥感与信息技术研究所, 浙江 杭州 310058

摘要: 土地利用变化对陆地生态系统碳储量变化影响显著, 在制定土地政策时, 必须考虑土地利用变化对土壤碳储量的动态影响。以杭州市富阳区为研究对象, 探讨了 1979—2006 年间土地利用变化对碳储量的影响, 并预测评价了县区级土地利用规划政策对土壤碳库的影响。结果显示: 研究区 1979—2006 年间土地利用变化导致全区植被碳总量损失为 273.4 Gg, 表层土壤(0—20 cm)有机碳总量损失为 771.0 Gg, 建设占用耕地和林地是导致土壤碳储量下降的主要原因。预测 2006—2020 年间研究区植被碳损失的年均速率将减至 25.93 kg·hm⁻², 土壤有机碳损失的年均速率将减至 27.48 kg·hm⁻²。制定合理政策和有效措施来保护林地, 抑制建设用地增长, 扭转土壤碳损失趋势势在必行。

关键词: 碳库存; 植被碳; 碳密度; 土地利用规划; 城市化; 造林

中图分类号: S153; F301

文献标志码: A

文章编号: 1004-1524(2019)02-0291-06

近几十年来, 全球范围内的土地利用发生了巨大变化, 特别在中国等发展中国家, 由于经济发展和城市化扩展带来的土地利用密集变化导致陆地生态系统的物理、化学和生物特性发生显著改变^[1]。其中, 土地利用变化对全球大气 CO₂ 含量增加起重要作用, 其作用仅次于化石燃料的燃烧。据估算, 自工业革命以来, 土地利用变化引起的碳排放是人类活动碳排放总量的 1/3^[2]。土壤有机碳是陆地生态系统中体量最大的碳库, 对于全球碳排放作用巨大。相应地, 土地利用变化对土壤有机碳库的影响机理更加复杂, 不确定因素更多, 是国内外全球变化研究的热点和难点之一^[3, 4, 5]。

目前, 国内外的相关研究主要分为 3 块内容: 1) 土地利用变化对碳排放的影响。主要包括农用地内部用地类型转变、农用地与建设用地之间相互转变和农用地地管理等。Houghton^[6] 研究认为, 20 世纪 50—70 年代间发生在中国西南和东北的森林快速砍伐行为, 造成了 0.2~0.5 Pg·a⁻¹ 的碳排放。李颖等^[7] 分析了江苏省各用地类型总量、结构的碳排放效应, 发现碳源用地主要是建设用地和耕地。2) 土地利用碳排放核算。相关研究主要利用联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 公布的碳排放清单方法, 该方法的核算体系可以全面和综合地评价土地利用的碳排放效应^[8]。如俞超等^[9] 和张俊峰等^[10] 分别运用该方法估算了 2003—2010 年湖北省和 1996—2010 年武汉都市圈的土地利用碳排放效应和发展趋势。3) 低碳土地利用结构优化。Zomer 等^[11] 认为应该从合理调控土地利用结构的角度出发来缓解气候变化。朱道林等^[12] 从中国宏观经济的碳排放效应角度, 定性研究和探讨了基于低碳经济发展的土地利用转型模式。上述研究存在共性: 一是都体现了土地科学与生态学、经济学等多学科的交叉视角; 二是已形成以“来源测度—减排机理—技术筛选—成本收益—政策分析”为研究内容的与之匹配的研究方法的一体化框架。

¹**作者简介:** 邱乐丰(1985—), 男, 浙江湖州人, 博士, 副研究员, 主要从事土地生态与城乡发展等方面的研究。E-mail: qlf25@163.com

收稿日期: 2017-07-02

基金资助: 杭州市哲学社会科学规划课题 (Z18JC051)

同时, 当前研究也存在一些不足: 缺乏针对地区土地利用和生态特点的个性化核算, 缺乏针对具体土地利用规划政策对土壤碳库影响的研究等。本文以杭州市富阳区为例, 探索县(区)级尺度上土地利用变化的土壤有机碳(SOC)和植被碳(VC)库储量时空变化响应, 并基于土地利用总体规划对富阳未来土壤碳平衡状况做出预测, 以为富阳的低碳土地管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域简介

富阳位于浙江省杭州市域范围的西南部, 地理位置为 119.42° — 120.33° E、29.75° — 30.20° N, 面积 1 831 km²。研究时段内, 该区域行政区划几经调整, 1994 年撤县设市, 2014 年撤市设区, 但行政区划范围不变。整体地貌以“两山夹江”为最大特征, 山地、丘陵面积占区域总面积的 78.61%, 平原、盆地面积占 16.36%, 水域占 5.02%。土壤类型共分为 16 类土属, 主要以黄泥土与红泥土为主, 2 种土壤类型分别占全区总面积的 39.22%和 15.69%。土地利用类型多样, 自然植被以壳斗科、樟科等亚热带常绿林为主。传统农业生产以种植水稻、蔬菜、茶叶、水果为主。改革开放以来, 富阳的城市化和经济发展以前所未有的速度增长, 大量的农业用地转移为其他各种土地利用类型。本文选择 1979 年的土地利用数据作为研究富阳土地利用变化的基期数据^[13]。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 土地利用数据获取

1979 年富阳土地利用数据来自于对 Landsat MSS 遥感影像的监督分类, 并使用 Google Earth 高清卫星影像结合目视解译来提高准确率; 2006 年和 2020 年的土地利用数据分别来自于富阳区国土资源局提供的第二次全国土地调查成果和土地利用总体规划(2006—2020)。根据我国土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2007), 本文对 3 期(1979、2006、2020 年)富阳土地利用数据简化概括为 6 种土地利用类型: 建设用地、耕地、林地、园地、未利用地和水域。

1.2.2 碳密度计算

研究区耕地土壤有机碳密度[14]的计算公式为

$$DSOC=VSOC \times r \times H \times (1 - d_2/100) \times 10^{-1}, (1)$$

式(1)中: DSOC(Mg · hm⁻²)为土壤有机碳密度; VSOC(g · kg⁻¹)为土壤有机碳含量; H 为土壤厚度, 文中取 20 cm; r(g · cm⁻³)为土壤容重; d₂(%)为大于 2 mm 的土壤粗颗粒比率, 此处忽略不计。

土壤数据于 2006 年 3—10 月与当地农业局土肥站合作在全区范围内采集。采样深度为 20 cm, 以 1 个取土点为中心, 在 5 m 半径内取 5 点混合而成, 同时使用 GPS 仪记录中心点位置。充分考虑采样点在不同土地利用类型和土类上的分布, 共获取土壤样品 1 104 个(图 1)。土壤样品的有机质含量采用重铬酸钾容量法测定, 其他常规理化性质指标参照《土壤农化分析》[15]中方法测定。有机碳含量使用有机质含量除以平均换算系数 1.724 得到。

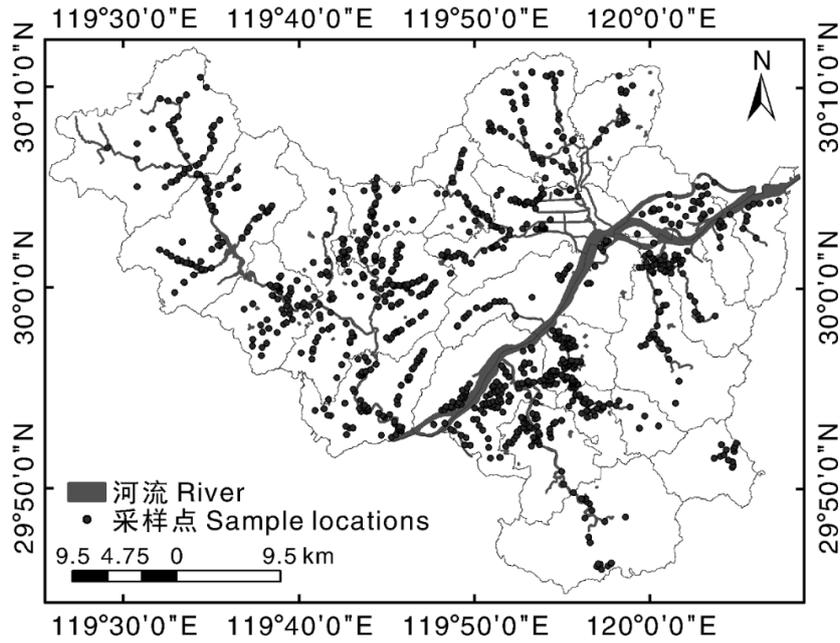


图1 采样点分布

植被碳密度通过参阅富阳及杭州地区相关文献获取，结果见表 1。其中，1979 年的未利用地数据缺失，建设用地不计入土壤有机碳计算，水域不计入碳总量计算。

表 1 不同土地利用类型土壤及植被碳密度

土地利用类型 Land use type	SOC	VC
建设用地 Built-up land	0	8.05
林地 Forest	55.54	28.11
园地 Orchard	42.35	19.38
未利用地 Vacant land	16.64	1.24
耕地 Cropland	42.5	3.25
水体 Water body	0	0

1.2.3 分析方法

土壤有机碳 (CSOC) 和植被碳 (CVC) 储量的计算公式分别为

$$C_{SOC} = \sum_{i=1}^n D_{SOC-i} \times A_i, (2)$$

$$C_{VC} = \sum_{i=1}^n D_{VC-i} \times A_i. (3)$$

式 (2)、(3) 中: D_{SOC-i} 和 D_{VC-i} ($Mg \cdot hm^{-2}$) 分别为土地利用类型 i 的土壤有机碳和植被碳密度; A_i (hm^2) 为土地利用类型 i 的面积。

本文所有的数据统计分析均在 SPSS 10.0 中完成。土地利用和土壤碳分布的空间分析在 ArcGIS 10.2 中完成。

2 结果与分析

2.1 1979—2006 年富阳土地利用结构变化

1979—2006 年，林地一直是富阳最主要的土地利用类型，其面积从 1 140.7 km² 降至 1 133.4 km²，下降了 0.6%(图 2)，耕地面积从 417.8 km² 急剧减少了 21.1%到 329.8 km²。相比之下，这一时期建设用地增幅最大，从 15.8 km² 猛增到 157.4 km²，增加了 8.96 倍，而同期园地面积则从 174.1 km² 减至 52.6 km²，大幅减少 69.8%。

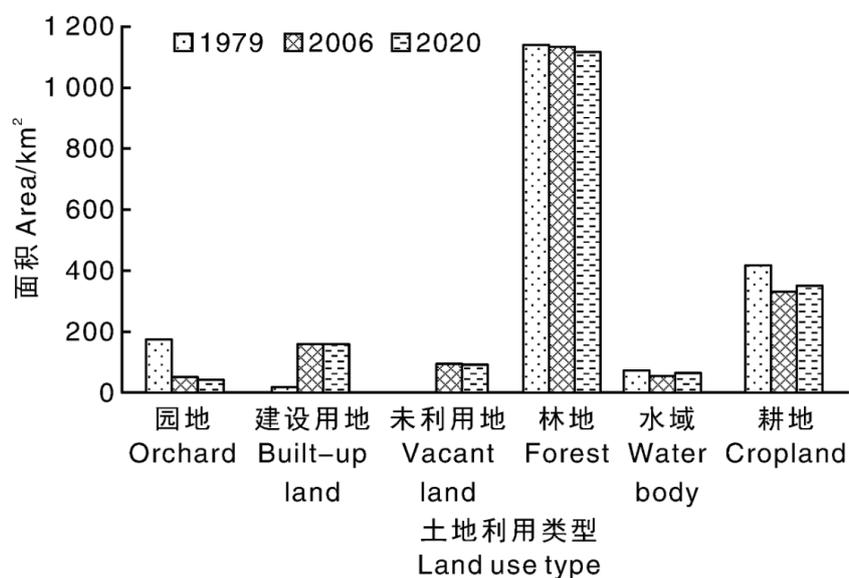


图 2 1979—2020 年富阳土地利用结构变化

2.2 1979—2006 年富阳土壤碳储量变化

富阳 1979 和 2006 年的植被碳储量估算值分别为 3.68、3.41 Tg(表 2)。这期间的土地利用变化导致植被碳储量减少 273.4 Gg，年均减少速度为 55.61 kg · hm⁻²。相比之下，植树造林工程固定植被碳总量 285.7 Gg(表 3)，而林地面积缩减导致 442.0 Gg 的植被碳损失。向耕地、未利用地和建设用地的转变分别造成植被碳损失 230.1、218.2、118.5 Gg。

表 2 1979—2020 年富阳土壤有机碳和植被碳储量变化

年份 Year	SOC	VC
1979	8.85	3.68
2006	8.08	3.41
2020	8.01	3.34

表 3 1979— 2006 年土地利用变化导致的植被碳储量变化

1979 年土地利用类型	2006 年各土地利用类型的植被碳储量变化						总量
Land use types in 1979	Variation of VC storage according to land use changes in 2006						Total
	建设用地	林地	园地	未利用地	耕地	水体	
	Built-up land	Forest	Orchard	Vacant land	Cropland	Water body	
建设用地 Built-up land	0	4.3	1.2	0.1	2.6	0	8.2
林地 Forest	-52.1	0	-15.6	-200.4	-165.9	-8	-442
园地 Orchard	-32.1	78.9	0	-16.1	-72.5	-2.8	-44.7
耕地 Cropland	-34.4	195	34.8	-1.9	0	-3.2	190.2
水体 Water body	0	7.7	1.2	0.2	5.8	0	14.8
总量 Total	-118.5	285.7	21.7	-218.2	-230.1	-14	-273.4

表层土壤有机碳库总量显著大于植被碳储量，1979 和 2006 年的土壤有机碳估算值分别为 8.85、8.08 Tg(表 2)。这期间的土地利用变化导致土壤有机碳库总量减少 771.0 Gg，年均减少速度为 156.81 kg·hm⁻²。建设占用林地和耕地分别造成土壤有机碳库损失 102.9、449.0 Gg，同时未利用地增加也造成土壤有机碳损失 334.2 Gg，而植树造林工程带来了 245.2 Gg 的土壤有机碳存储(表 4)。

表 4 1979— 2006 年土地利用变化导致的土壤有机碳储量变化

1979 年土地利用类型	2006 年各土地利用类型的土壤有机碳储量变化						总量
Land use types in 1979	Variation of SOC storage according to land use changes in 2006						Total
	建设用地	林地	园地	未利用地	耕地	水体	
	Built-up land	Forest	Orchard	Vacant land	Cropland	Water body	
建设用地 Built-up land	0	8.4	2.7	1	34	0	46.1
林地 Forest	-102.9	0	-23.5	-290.1	-87.3	-15.9	-519.6
园地 Orchard	-70.2	119.1	0	-22.9	0.5	-6	20.5

耕地 Cropland	-449	102.6	-0.2	-24.7	0	-42.3	-413.6
水体 Water body	0	15.1	2.7	2.5	75.3	0	95.5
总量 Total	-622	245.2	-18.3	-334.2	22.4	-64.2	-771

2.3 2006—2020年富阳土壤碳储量变化预测

根据富阳土地利用总体规划(2006—2020), 2006—2020年富阳土地利用类型结构变化不大(图2), 至2020年预计植被碳总量和土壤有机碳总量分别为3.34 Tg和8.01 Tg(表2)。在此期间, 植被碳和土壤有机碳的年均潜在损失速度分别为25.93、27.48 kg·hm⁻²。林地面积缩减是造成土壤碳总量下降的主要驱动力, 预计2006—2020年富阳的林地总面积将减少17.6 km²(表5), 将造成植被碳和土壤有机碳分别损失49.5、97.8 Gg。与此同时, 耕地面积相比2006年将增加20.1 km², 植被碳和土壤有机碳储量因此将分别增加6.5、85.1 Gg。

表5 2006—2020年富阳土地利用结构变化预测

2006年土地利用类型 Land use type in 2006	2020年土地利用类型 Land use type in 2020						总面积 Total area
	建设用地 Built-up land	林地 Forest	园地 Orchard	未利用地 Vacant land	耕地 Cropland	水体 Water body	
建设用地 Built-up land	131.5	8.6	1	—	16.3	—	157.4
林地 Forest	2.9	1107.3	—	—	23.3	—	1133.5
园地 Orchard	5.9	—	40	—	6.7	—	52.6
未利用地 Vacant land	0.4	—	—	90.2	4.5	—	95.1
耕地 Cropland	18.7	—	—	—	298.9	12.1	329.7
水体 Water body	0.1	—	—	—	0.1	52.6	52.8
总面积 Total area	159.5	1115.9	41	90.2	349.8	64.7	1821.2

3 讨论

本研究表明, 1979—2006年, 富阳土地利用变化导致表层土壤有机碳和植被碳分别损失771.0、273.4 Gg, 损失速度分别为年均156.81、55.61 kg·hm⁻²。建设占用耕地和林地是导致土壤碳储量下降的主要原因。预测到2020年, 富阳土壤有机碳损失的平均速率将减至年均27.48 kg·hm⁻², 植被碳损失的平均速率将减至年均25.93 kg·hm⁻², 主要原因为林地面积减少和建设用地面积继续增长。

研究表明, 不同土地利用类型下土壤碳库的总储量以及碳源/汇变化速率不同, 由此导致土壤碳储量对土地利用变化的动态响应现象^[16, 17]。富阳自1979年以来土地利用结构发生了巨大变化, 造成了大量土壤有机碳和植被碳流失。在中国厦门[18]和

美国西雅图[19]的研究显示, 植被碳固定速率和流失速率分别为年均 0.64、1.2 Mg · hm⁻², 中国吴江[14]和西班牙 Murcia 地区[20]的年均土壤有机碳固定速率和流失速率分别为 6、8 kg · hm⁻²。相比这些研究区域, 富阳的植被碳流失速率较慢, 年均 55.61 kg · hm⁻², 而土壤有机碳流失速率偏快, 年均 156.81 kg · hm⁻²。

建设用地面积变化对于土壤碳平衡至关重要。1978 年以来, 随着城市化进程的快速推进, 我国东部地区出现了大规模的农业用地向建设用地转移的现象。1979—2006 年, 富阳的建设用地总面积由 15.8 km² 暴涨至 157.4 km², 这些地区大片的肥沃农田和植被已越来越多地被建设用地所取代, 带来地区生态系统服务功能退化的同时, 也导致土壤固碳能力的丧失。由于城市扩张所占用的土地大部分来源于耕地, 而且耕地的土壤有机碳密度高于植被碳密度(表 1), 因此土壤有机碳储量损失相对植被碳更大。据研究区 1979—2006 年的碳平衡分布, 碳储量急剧下降的地区主要集中于富春江及其支流两岸的冲积平原附近。这些地区由于地势平坦、水资源丰富、交通条件便利, 是富阳传统的粮食种植地区, 同时也是城镇发展最快速的地区, 大量的农田被建设用地占用, 导致土壤碳储量出现不可逆转的损失。

森林面积变化是土壤碳储量变化的重要驱动力。有研究显示, 由于我国在 20 世纪 80—90 年代开展了国家造林和再造林工程, 我国森林的碳储量大幅增加。然而, 1979—2006 年间, 富阳的林地面积却显现出轻微减少(图 2), 有小部分林地转化成了耕地和未利用地。由于森林的土壤有机碳密度和植被碳密度很高, 即使较小的面积减少也会造成显著的土壤碳损失。以林地向耕地转化为例, 造成碳损失量分别占土壤有机碳和植被碳总损失量的 1/4 和 1/3, 对土壤碳平衡变化的影响极其显著。

为实现经济和环境的可持续发展, 在土地利用和管理决策过程中纳入碳平衡影响评价至关重要。当下, 经济发展与生态环境保护之间的冲突已经带来了巨大的挑战, 根据富阳土地利用总体规划(2006—2020), 富阳下一阶段的土地利用结构变化呈现出 2 个主要趋势: 一是耕地面积持续增加, 国家主要发展政策都将严格保护基本农田、保障粮食生产能力和发展现代农业放在突出地位; 二是城镇化进程将进一步推进, 城镇建设用地面积将继续增长。据此预测, 至 2020 年富阳的土壤有机碳和植被碳储量将保持持续流失状态。对此问题, 土地管理部门应给予高度重视, 在土地管理工作中需要努力扭转目前的土壤碳损失状况, 并进一步深入评价土地利用规划对土壤碳平衡的影响。

参考文献:

- [1] KONG X, DAO T H, QIN J, et al. Effects of soil texture and land use interactions on organic carbon in soils in North China cities' urban fringe[J]. *Geoderma*, 2009, 154(1/2): 86-92.
- [2] JANZEN H H. Carbon cycling in earth systems: a soil science perspective[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104(3): 399-417.
- [3] 宇万太, 姜子绍, 李新宇, 等. 不同土地利用方式对潮棕壤有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2760-2764.
- [4] 吴崇书, 谢国雄, 章明奎. 农艺措施与土地利用方式转变对土壤碳库管理指数的影响[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(4): 611-617.
- [5] 朱真令, 麻万诸, 龙文莉, 等. 杭州余杭区农田耕层土壤有机碳空间分布特征及其影响因素[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(11): 1990-1997.
- [6] HOUGHTON R A. Temporal patterns of land -use change and carbon storage in China and tropical Asia[J]. *Science in China (Series C)*, 2002, 45(Supp.): 10-17.

-
- [7] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 102-107.
- [8] IPCC. Climate change 2000, land use, land use change and forestry: a special report of the IPCC[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [9] 俞超, 张丽琴, 唐殿明. 基于清单算法的湖北省土地利用碳排放效应和趋势分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 168-172.
- [10] 张俊峰, 张安录, 董捷. 武汉城市圈土地利用碳排放效应分析及因素分解研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 595-602.
- [11] ZOMER R J, TRABUCCO A, BOSSIO D A, et al. Climate change mitigation: a spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism a forestation and reforestation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 126(1/2): 67-80.
- [12] 朱道林, 林瑞瑞. 论低碳经济与转变土地利用方式[J]. 中国土地科学, 2010, 24(10): 3-6.
- [13] QIU L, ZHU J, ZHU Y, et al. Land use changes induced soil organic carbon variations in agricultural soils of Fuyang County, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(6): 981-988.
- [14] GAO J F, PAN G X, JIANG X S, et al. Land -use induced changes in topsoil organic carbon stock of paddy fields using MODIS and TM/ETM analysis: a case study of Wujiang County, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(7): 852-858.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 王连晓, 史正涛, 刘新有, 等. 西双版纳橡胶林土壤有机碳分布特征研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(7): 1200-1205.
- [17] 张文敏, 姜小三, 吴明, 等. 杭州湾南岸土壤有机碳空间异质性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1087-1095.
- [18] REN Y, WEI X, PAN J, et al. Relationship between vegetation carbon storage and urbanization: a case study of Xiamen, China[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(7): 1214-1223.
- [19] HUTYRA L R, YOON B, HEPINSTALL-CYMERMAN J, et al. Carbon consequences of land cover change and expansion of urban land s: a case study in the Seattle metropolitan region[J]. Land scape and Urban Planning, 2011, 103(1): 83-93.
- [20] BOIX-FAYOS C, DE VENTE J, ALBALADEJO J, et al. Soil carbon erosion and stock as affected by land use changes at the catchment scale in Mediterranean ecosystems[J].