

DOI: 10.5846/stxb201305151064

邵景安, 惠辽辽, 慈恩, 谢德体. 1980—2011 年川东平行岭谷区农田土壤有机碳动态. 生态学报, 2014, 34(15): 4347-4360.

Shao J A, Hui L L, Ci E, Xie D T. Dynamics of farmland SOC in parallel ridge valley of east Sichuan during 1980—2011. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4347-4360.

1980—2011 年川东平行岭谷区农田土壤有机碳动态

邵景安^{1,*}, 惠辽辽¹, 慈恩², 谢德体²

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 2. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716)

摘要:选取重庆市垫江县为川东平行岭谷的典型区,使用 1980 第二次土壤普查和 2011 年实测土壤数据,基于土壤类型,运用通用 SOC 密度/储量计算法和逐步回归分析,对研究区 1980—2011 年 0—20 cm 农田 SOC 动态和动因进行分析,结果表明:(1) 1980—2011 年农田 0—20 cm 土层 SOC 密度/储量总体表现为略有增加态势,单位面积碳增量 2307.63 kg C/hm²,碳增汇 235945.83 t,增幅为 10.74%,年均增长速率为 72.11 kg C hm⁻² a⁻¹; (2) 丢碳、固碳和相对平衡面积比 37.61:49.03:13.36,总体呈西部、西北部高于南部、东南部,更高于东北部和西南部的格局; (3) 宏观上 1980—2011 年农田 0—20 cm 土层 SOC 密度/储量变化与土壤类型的分布及利用有很大关系,尤其是黄壤和紫色土在相异的质地本底和不同的扰动下,展现出相反的碳汇/源状态; (4) 微观上 SOC 密度年均变化速率影响最大的因素是 SOC 密度初始值>全 N 密度>C/N 比,且全 N 密度和 C/N 比拥有正向影响, SOC 密度初始值则相反; (5) 结果为川东平行岭谷区借助施加适当投入和合适的耕作与管理实践,有效管理农田表层 SOC 库提供科学依据。

关键词:农田 SOC 密度/储量; 年均变化速率; 土壤碳源/汇; 驱动因素; 川东平行岭谷区

Dynamics of farmland SOC in parallel ridge valley of east Sichuan during 1980—2011

SHAO Jing'an^{1,*}, HUI Liaoliao¹, CI En², XIE Deti²

1 College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

2 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: Global warming and corresponding serious ecological and environmental problems induced by the rising CO₂ concentrations have attracted worldwide attentions. And they have become the focus of the international negotiations. As one of the core interface of terrestrial ecosystem, farmland soil in terrestrial ecosystems is the most intense part affected by human frequent disturbance. Management agricultural SOC is internationally recognized as one of the important strategies for mitigating or adapting global warming. Paralleled ridge valley of East Sichuan is typically representative of the concentrated distribution area of farmland around the Sichuan basin. It always plays an important role in the granary of East Sichuan. Recently, the production and management investment and frequent tillage disturbance in order to pursuit food security drove the opposite direction change of farmland SOC. Hence, it was very important to carry out the research on SOC dynamics. And, the farmland use of this region would be promoted to the strategic height responding to global change and food security at regional level. Taking Dianjiang County of Chongqing City is a typical area of East Sichuan parallel ridge valley, this paper analyzed the dynamics of farmland SOC of 0—20 cm soil layer and their driving factors during 1980—2011 by the soil type method, international general SOC density/storage calculation method and Stepwise Regression Analysis, using the second soil survey data in 1980 and the measured data in 2011. The results showed: (1) Farmland SOC density/storage of

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050506); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-003)

收稿日期:2013-05-15; **修订日期:**2014-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shao_ja2003@sohu.com

0—20 cm soil layer during 1980—2011 in the study area overall presented slightly increased trend. Carbon increment per unit area reached to $2307.63 \text{ kg C hm}^{-2}$. Total content of carbon sink enhancement was 235945.83 t, with the increasing range of 10.74% and the average annual growth rate of $72.11 \text{ kg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. (2) The proportion of carbon sink, loss and relative balance area to the total area of this study area was 37.61:49.03:13.36. In general, the spatial patterns of farmland SOC sink showed that west and northwest part is higher than that south and southeast, and more than that northeast and southwest. (3) At macro level, the changes of farmland SOC density/storage was pronounced relationship to the distributions of soil type and their utilization practices. Especially, yellow soil and purple soil under different texture and different perturbations, showed the opposite carbon sink/source state. (4) At microcosmic level, the rank of factors obviously influencing SOC density average annual change rate was SOC density > N > C/N. Moreover, total N density and C/N ratio have positive effects on SOC density average annual change rate, the effects of SOC density initial value were negative function. (5) Results of this paper could provide scientific proofs for the effective management of farmland surface SOC carbon pool in the parallel ridge and valley area of East Sichuan, depending on appropriate inputs and suitable cultivation and management practices.

Key Words: farmland SOC density/storage; annual mean change rate; soil carbon source/pool; driving factors; parallel ridge valley of east sichuan

川东平行岭谷作为四川盆地盆周优质耕地的集中分布区,是川东的重要粮仓。与农田土壤碳源/汇相对应,在该区值得思考的是:大量的农业生产和管理投入,如化肥、有机肥、秸秆还田、留茬等,不断向土壤补充有机质和养分元素,是否使该区农田土壤处于碳增汇状态? 频繁的耕作扰动,如顺坡耕作、翻耕连作、套种平翻等,连续扰动土体(打破土壤表面状态和耕层水热气肥间的平衡),增强土壤水蚀发生的可能,是否又使该区农田土壤处于碳失汇过程? 权衡上述两个方面,认为在川东平行岭谷区开展农田土壤有机碳动态的研究意义重大,它不仅有助于将该区的耕地利用提升到区域层面应对全球变化和保障粮食安全的战略高度,而且能为未来该区制定合适的耕地利用实践提供数据基础和依据,以实现耕地土壤的碳增汇和粮食安全的“双赢”。

累积文献认为,目前有关农田土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)的研究,大多集中于耕地在扰动胁迫或管理投入情境下,表层(0—20 cm)土壤到底是处于增碳还是失碳所控制问题的突破上,并已取得很好的科学认识,如中国农田土壤尚处于贫碳状态,未来可实现的碳增汇潜力巨大^[1];受气候、人为活动的影响,中国农田碳储量呈现较强的空间异质性^[2-4];固碳的关键是改善土壤管理和完善农田经营措施,且能够获得固碳稳产的双效协同^[5]。但是,现有研究主要集中于国家、省级或大区域层面,以及

样地尺度的定位观测,以连接宏观决策与微观实践层面且扮演“自上而下”和“自下而上”枢纽作用的县级尺度为单元的研究相对较少,获得的认识在宏观层面多是粗线条的,样地尺度的结果很难外推至大田。

本研究选取川东典型平行岭谷县—垫江县(全国重要商品粮基地县之一)为研究区,以1980年第二次土壤普查数据和2011年近似样点实测数据为基础,结合实地访谈和野外踏勘,基于土壤类型,借助ARCGIS空间分析功能和SPSS下的逐步回归分析,测算1980—2011年间农田SOC动态,查明影响1980—2011年间农田SOC动态的主要因素及重要性次序。结果有助于为未来制定出川东平行岭谷区农田固碳稳产双效协同的农田管理策略提供科学依据,丰富人们对该区农田土壤碳库管理的理解(增汇应对全球变化,保障区域粮食安全)。

1 材料与方法

1.1 研究区域

川东平行岭谷区位于四川盆地东部,与重庆的中西部相交,岭谷平行的地形为农业发展提供天然场所。垫江县($107^{\circ}13'—107^{\circ}38'E$, $29^{\circ}38'—30^{\circ}31'N$)素有巴国粮仓之称,处于川东平行岭谷的核心区,幅员面积 1518 km^2 (图1)。地质构造于四川盆地边缘、川东弧群褶皱带黄草山、明月峡背斜之间,

具有“三山两槽一台”的典型格局。地貌以平坝和浅丘为主,山地、深丘和浅丘平坝占比 14.13:19.53:66.34。气候属亚热带湿润季风气候区,年均温 17℃,年均降水量 1183 mm。据第二次土壤普查,成土

母质以三迭系为主,土壤类型以紫色土、水稻土、黄壤、冲积土等为主,共有 4 个土类,6 个亚类,17 个土属,78 个土种。植被属亚热带阔叶林区,常绿阔叶林是基带植被。

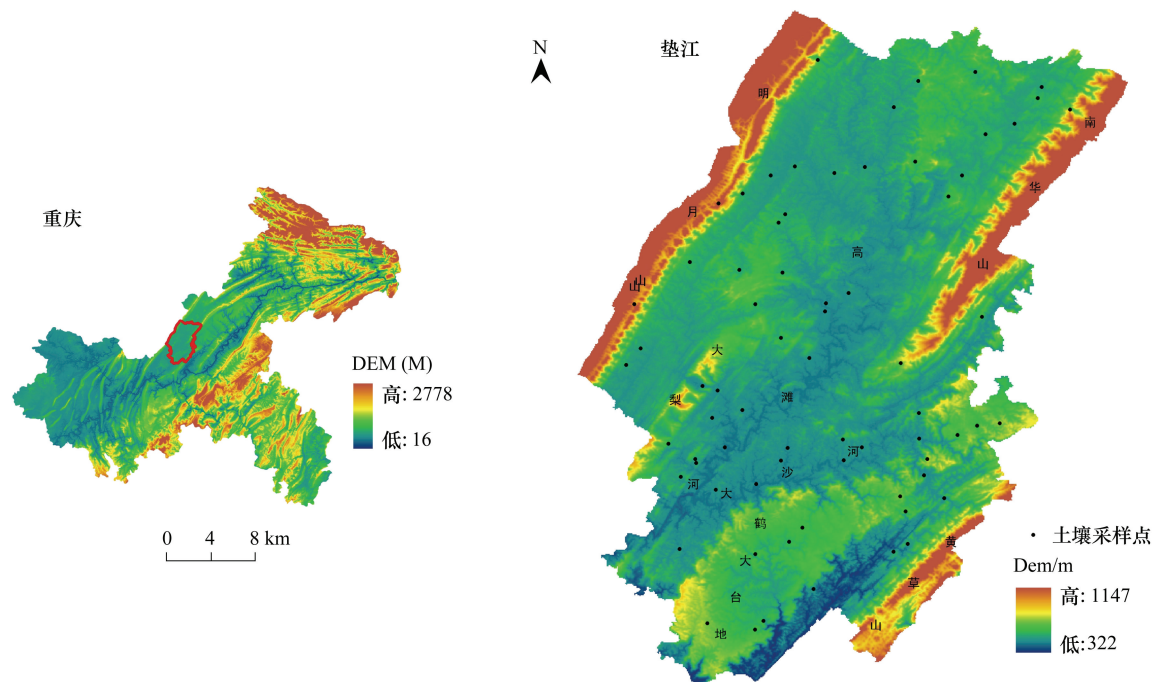


图 1 研究区地理位置和数字高程模型

Fig.1 Distribution of geographical location of this study area and its DEM

1.2 数据来源

1980 年第二次土壤普查数据。1980 年第二次土壤普查图及其与之对应的土壤属性值(细化到土属)来源于垫江县农业局,而少部分缺少土壤属性值的则主要依靠垫江县土种志补缺。依据土种志对相同土属发生地的描述,与缺乏土壤属性值的同一土属位置相对比,位置相近或相邻的即以土种志上的土壤属性作为缺乏属性值土属的属性值。而且,对缺乏属性值的土属,按照二次土壤普查的编号方式进行编号,并参考土种志或已有记录的描述,确定第二次土壤普查的采样发生地,以便为 2011 年实测土壤采样提供便利。1980 年第二次土壤普查共采集 403 个土壤剖面。

2011 年实测样点分析数据。依据第二次土壤普查的发生地,展开 2011 年土壤样品的采集。为降低土壤理化形状受位置的影响,提高测试分析精度,在一个采样点周围实施多点采样制备混合样的方法施行样品采集。土壤采样厚度为表层(0—20 cm),每

一土属设置多于 1 个采样点,共 70 个(图 1 和表 1)。且为避免测试方法不同产生的结果差异,针对每一土壤性状,采用与第二次土壤普查相同或近似的测试方法进行样品测试,与第二次土壤普查对应,新采土样的测试内容有容重均值、砾石体积比、土壤有机质、全(N、K、P)、有效 P、速效 K、pH 值、C/N 值等。

图形数据。1980 和 2011 年耕地资源分布图、行政界线图来源于垫江县国土资源和房屋管理局。

1.3 数据处理

耕地图和耕地土壤图制作。耕地覆被在 1980—2011 年间必定发生较大变化,尤其是建设占用、退耕还林和农业结构调整造成耕地减少,以及土地整治、居民点复垦、荒草地开发等又带来耕地增加,前者由耕地转为非耕地,后者则相反。然而,为体现农田土壤本身演化对 SOC 的作用,本研究将这部分耕地给予扣除,即不考虑耕地覆被变化对 SOC 的影响。在 ARCGIS 软件支持下,将 1980 和 2011 年耕地资源分布图相叠加,提取两期同为耕地的部分作为本研究

表 1 采样点在不同土壤类型的分布和作物种植状况
Table 1 The distributions of soil sampling site in the different soil types and their corresponding crop plant conditions

土类 Soil group	亚类 Subgroup	土属 Soil genus	利用 Use patterns	作物 1 季 The first season crop		作物 2 季 The first season crop		留茬 Stubble mulch/ cm	秸秆还田 Straw returned to farmland/%	有机肥 Manure/ (kg/hm ²)	磷肥 Phosphatic fertilizer/ (kg/hm ²)	尿素 Urea/ (kg/hm ²)	复合肥 Compound fertilizer/ (kg/hm ²)
				作物 Crop	产量 Yield / (kg/hm ²)	作物 Crop	产量 Yield / (kg/hm ²)						
紫色土 Purple soil	棕紫泥土	暗紫泥土	旱地		1625—8250	玉米		3—8	0—90	11100—14100	375—2250	0—750	450—900
水稻土 Paddy soil	紫色性水稻土	暗紫色水稻土	水田		6375	水稻		20	25	750	750	75	
紫色土	棕紫泥土	红棕紫泥土	旱地		4125—7500	玉米		3	0—90	600—12750	150—3000	0—225	0—1125
水稻土	紫色性水稻土	红棕紫色水稻土	水田	油菜	6000	水稻	6750—7875	15—28	0—25	750—12750	1125—3375		0—1875
紫色土	棕紫泥土	灰棕紫泥土	旱地		3000—6000	玉米		2—5		750—12750	300—3000	0—150	0—1350
水稻土	紫色性水稻土	灰棕紫色水稻土	水田	油菜	4125—6750	水稻	4875—15000	12—25	0—36	600—14250	750—2250	0—1500	0—1500
黄壤土	黄壤	矿子黄泥土	旱地		6000	玉米		5		11100	900		750
黄壤土	黄壤	冷沙黄泥土	旱地		4500	玉米		3—5		1650—12750	0—750	0—150	150—1500
水稻土	冲积性水稻土	紫色冲积水稻土	水田	油菜	4125	水稻	8250	20		6000	1875		1312.5
冲积土	河流冲积土	紫色冲积土	旱地		9750	玉米		3		750			375
紫色土	棕紫泥土	棕紫泥土	旱地		4500—5250	玉米		5	0—80	750—12750	1500—2250	0—262.5	0—937.5
水稻土	紫色性水稻土	棕紫色水稻土	水田	油菜	5250—6000	水稻	5625—6375	15—25		750—8250	750—2437.5	0—187.5	0—1687.5

分析所用耕地图,再将已提取的耕地图与第二次土壤普查图相叠加,即得到以土属为单元的耕地土壤图。

SOC 动态及主要土壤理化性状的空间化。依据 1.4 部分给出的方法,计算各采样点 SOC 指数(储量、密度和年均变化速率)和全(N、K 和 P)、有效 P、速效 K 密度,以及土壤容重、砾石体积比、质地、pH 值、C/N 值等。对于同一土属有多个采样点的,将所有采样点中已计算出的对应值作算术平均记作该土属最终对应值。以此为基础,基于土壤类型,认为同一土属拥有相同的 SOC 动态及主要土壤理化性状,将其赋值于耕地土壤图,即得到 SOC 动态及主要土壤理化性状的空间分布图。将上述已生成的空间格局图在 ARCGIS 软件 Conversion Tools 支持下转换为 90 m 分辨率的栅格图,再在 Data Management Tools 支持下将栅格图转换为 .shp 格式点文件,使用 EXCEL 将每一栅格中心点的上述数值导出,即得到 90 m 分辨率的 SOC 动态及主要土壤理化性状的空间属性值。

1.4 数据分析

0—20cm 土壤剖面 SOCD 及主要理化性状密度。采用国际上通用的 SOCD 计算方法^[5]和剖面权重法,计算 SOCD。

$$\text{SOCD}_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i \times T_i \times \rho_i (1 - \theta_i \%)}{100} \right)$$

式中, SOCD_{0-20} 为 0—20 土层土壤有机碳密度 (kg C/m^2), C_i 为第 i 层土壤有机碳含量(由与有机质含量的换算所得,换算系数为 1.742) (g C/kg), ρ_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm^3), θ_i 为第 i 层 >2mm 的砾石含量(体积百分比)(%), T_i 为第 i 层土层厚度 (cm), n 为参与计算的土壤层次总数。最后,将 SOCD 单位换算为 kg C/hm^2 。同理,算出其它主要理化性状的

密度,以便分析影响 SOCD 变化的因素和作用次序。

0—20cm SOC 储量。为土属面积与 SOCD 的乘积

$$\text{POC}_i = \sum_{j=1}^m (S_j \sum_{i=1}^n \text{SOC}_{ji})$$

式中, POC 为 SOC 储量 (kg C), S_j 为每一土属的面积 (hm^2), SOC_{ji} 为第 j 个土属第 i 层 SOCD (kg C/hm^2)。

0—20cm SOCD 年均变化速率。为两期 SOCD_{0-20} 之差除以研究时段。

$$\alpha = (T_i - T_j) / (i - j + 1)$$

式中, α 为 0—20cm SOCD 年均变化速率, T_i 为第 i 时期的 SOCD_{0-20} , T_j 为第 j 时期的 SOCD_{0-20} , j 和 i 分别为前后时期。

影响 SOCD 动态的主要因素识别。尽管影响农田表层 SOC 的因素涉及地形(如海拔、坡度等)、施肥(如化肥、有机肥等)和生物因子(如留茬、秸秆还田、产量等),但由于它们很难准确量化,且某些因子变异范围较小(如海拔等),这样,也就很难针对每一土属类型给出它们的具体数值。加之,不同因子之间存在较强的交互作用关系,它们对 SOC 的影响是直接作用还是潜在仍不明晰。因此,为真实地反映关键影响因素的作用,研究将它们剔除,仅选取实测 SOCD 初始值、土壤理化性状作为影响 SOCD 动态的主要因素,具体指标参考相关文献^[6-9]细化(表 2)。

逐步回归分析。以 $\text{SOCD}_{1980-2011}$ 年均变化速率为因变量,以表 2 中所给指标为自变量,使用逐步回归分析^[10]建立农田 SOCD 年均变化速率与影响因素间的定量模型。将 $\text{SOCD}_{1980-2011}$ 年均变化速率与所选影响因素间作逐个逐步回归,考虑显著性检验和共线性诊断,最终得到 SOCD 年均变化速率与影响因素间的定量模型(最优模型)。

表 2 影响 SOCD 变化速率的主要因素

Table 2 Main indicators impacting the average rate of SOCD change

类别 Category	指标 Indicators	数量 Number
SOC _D * 初始值 X_1 SOCD initial value	$\text{SOCD}_{1980}(\text{kg C/hm}^2) X_{11}$	1
土壤物理性状 X_2 Soil physical properties	砾石体积比 (%) X_{21} 、容重 (g/cm^3) X_{22} 、粘粒 (0—0.002 mm) 含量比 (%) X_{23} 、粉粒 (0.002—0.05 mm) 含量比 (%) X_{24} 和砂粒 (0.05—2 mm) 含量比 (%) X_{25}	5
土壤化学性状 X_3 Soil chemical properties	C/N 比 X_{31} 、全 N 密度 (kg N/hm^2) X_{32} 、全 P 密度 (kg P/hm^2) X_{33} 、全 K 密度 (kg K/hm^2) X_{34} 、有效 P 密度 (kg P/hm^2) X_{35} 、速效 K 密度 (kg K/hm^2) X_{36} 和 pH 值 X_{37}	7

* 土壤有机碳密度 Soil organic carbon density, SOCD

2 结果

2.1 1980—2011 年 SOC(密度/储量)动态格局

1980—2011 年农田 0—20 cm 土层 SOC 密度/储量总体表现为略有增加态势。SOC_D 由 1980 年的 21491.05 kg C/hm²增加到 2011 年的 23798.68 kg C/

hm²,单位面积碳增量为 2307.63 kg C/hm²,增幅为 10.74%(表 3)。不同土壤类型间,增幅最大的是占耕地面积 0.10% 的冲积土,单位面积碳增量达 17143.72 kg C/hm²,增幅为 143.70%;其次是水稻土,SOC_D 增幅为 32.27%;而增幅最低的是占耕地面积 53.24% 的紫色土,增幅为-8.01%。与此相对应,

表 3 1980—2011 年农田 SOC 密度、储量及其动态变化

Table 3 The SOC_D, SOC storage and their corresponding change for every one soil type during 1980—2011

土壤类型 Soil type	面积 Area / hm ²	SOC _D ₁₉₈₀ [*] /t	T ₁₉₈₀ /t	SOC _D ₂₀₁₁ / (kg C/hm ²)	T ₂₀₁₁ /t	ΔSOC _D / (kg C/hm ²)	ΔSOC _D / SOC _D ₁₉₈₀ /%	ΔT/t	ΔT/T ₁₉₈₀ /%
冲积土	100.19	11929.98	1195.27	29073.70	2912.90	17143.72	143.70	1717.63	143.70
黄壤土	4079.48	36658.67	149548.45	40929.28	166970.35	4270.61	11.65	17421.90	11.65
水稻土	43628.11	21662.68	945101.60	28654.02	1250120.56	6991.34	32.27	305018.96	32.27
紫色土	54438.19	20234.48	1101528.51	18614.06	1013315.83	-1620.42	-8.01	-88212.68	-8.01
总计 Total	102245.98	21491.05	2197373.82	23798.68	2433319.65	2307.63	10.74	235945.83	10.74

* T₁₉₈₀、T₂₀₁₁分别表示 1980、2011 年的 0—20 cm 土层有机碳储量(t);SOC_D₁₉₈₀、SOC_D₂₀₁₁分别表示 1980、2011 年的 0—20 cm 土层有机碳密度(kg C/hm²);ΔSOC_D为 0—20 cm 土层单位面积碳增量(kg C/hm²);ΔSOC_D/SOC_D₁₉₈₀为 0—20 cm 土层碳密度变化占 1980 的 SOC_D 的比例(%);ΔT 为 0—20 cm 土层有机碳储量变化(t);ΔT/T₁₉₈₀为 0—20 cm 土层有机碳储量变化占 1980 碳储量的比例(%)

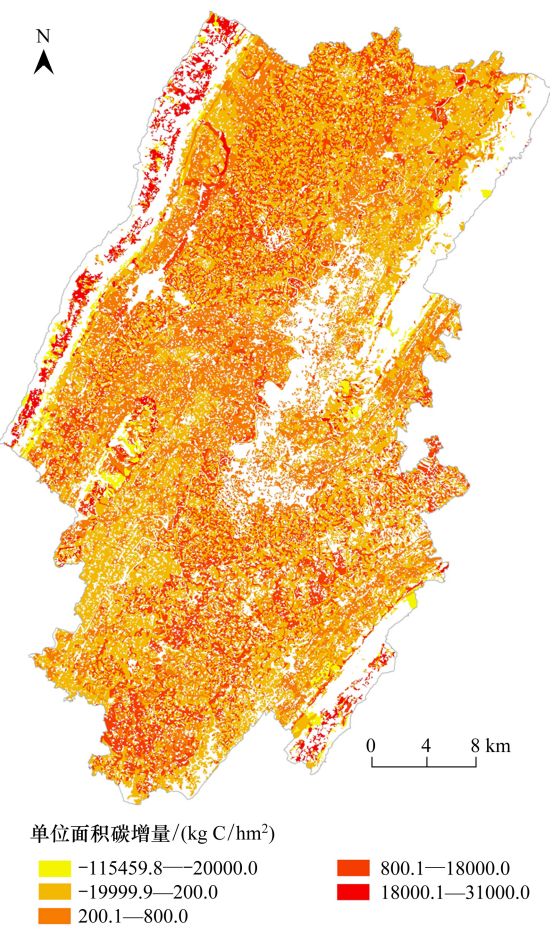


图 2 1980—2011 年 SOC_D 变化的空间格局
Fig.2 The spatial patterns of SOC_D during1980—2011



图 3 1980—2011 年 SOC 储量变化的空间格局
Fig.3 The spatial patterns of SOC storage during1980—2011

SOC 储量由 1980 年的 2197373.82 t 增加为 2011 年的 2433319.65 t,新增固碳量 235945.83 t。换一角度,1980—2011 年农田 SOC 的增加量(324158.50 t)略高于损失量(88212.68 t),呈现盈余状态。而且,受不同土壤类型面积的影响,新增固碳量最多的不是单位面积碳增量最大的冲积土(仅 1717.63 t),而是处于第 2 位的水稻土,新增固碳量达 305018.96 t;其次是单位面积碳增量排第 3 位的黄壤,新增固碳量 17421.90 t。

面积上,紫色土和水稻土分别占耕地面积的 42.67%和 53.24%,总体上决定农田 SOC 库的盈亏,而 SOCD 处于增加趋势的冲积土和黄壤即便增幅达到该类土壤所能容纳有机碳的上限,也不能从总体上控制农田 SOC 库动态的基本格局,而只能在该类土壤分布的局地对 SOC 库产生较大影响。因此,要使整个农田土壤处于碳增汇状态,必须从改善土壤理化性状、外施合适管理实践提升紫色土和水稻土 SOCD 的视角入手增加单位面积碳储量,进而提升农田 SOC 库。

1980—2011 年农田 0—20 cm 土层 SOC 密度/储量动态空间上展现显著差异。图 2 和图 3 可看出,大部分区域 2011 年农田 SOC 密度/储量值高于 1980 的对应值。SOCD 的空间动态总体呈西部、中部(腰间)和南端升高显著,北部和南部增加较少。展现为四级分布特征:增加值最大的是西部明月山及其周围地区,其次是中部沿高滩河和大沙河及其支流沿岸的串珠状河谷平坝区(小冲积坝)和南部和鹤大台地区,再次是中部沿河除冲积坝外的缓坡地带及三大山系(明月、南华和黄草)与中部槽谷间的交错地带,最低的是大梨山东部与鹤大台地所夹槽

谷区段的沿高滩河和大沙河两岸的坡地区。类似地,SOC 储量增加最明显的是西北部 and 东南部,中部增加处中等水平,东南部及其它局部地区碳储量增加较少甚至下降。呈三级梯度特征:增加明显的是明月山及其与南华山所夹槽谷区的北段、大沙河与荒草山和鹤大台地所围区域(大沙河流域东南部区),其次是大沙河流域以北的中部地区,增量较少乃至降低的是大梨山与鹤大台地所夹槽谷区,以及北部和东南部的零星地区。

2.2 1980—2011 年 SOC(密度/储量)年均变化速率/丢(固)碳分布特征

1980—2011 年农田 0—20 cm 土层 SOCD 年均增长速率为 72.11 kg C hm⁻²a⁻¹,低于川中丘陵区农田 SOCD 年均上升均值(108.0 kg C hm⁻²a⁻¹)^[11],总体上拥有微弱的碳增汇效应。但是,表 4 可看出,不同土壤类型间的年均变化速率差异显著,年均增长速率最大的是冲积土,达 535.74 kg C hm⁻²a⁻¹,展现出显著的碳增汇效应;其次是水稻土,年均增长率 218.48 kg C hm⁻²a⁻¹;而年均增长速率最低的是紫色土,为-50.64 kg C hm⁻²a⁻¹,呈弱的碳失汇状态。与此对应地,SOC 储量的年均变化速率也表现为微弱增加(7373.31 t C/a),而且,在不同土壤类型间的差异既受 SOCD 变化的影响,也受对应土壤类型面积的控制。与水稻土相比,冲积土虽然 SOCD 的年均增长速率最大(为水稻土增速的 2.45 倍),但因面积较小使得其 SOC 储量的年均增长速率仅是水稻土的 0.56%。因此,在农田 SOC 的管理中,既要看到 SOCD 提升的空间和潜力,也要考虑该土壤在面积占比上是否主要的类型。

表 4 1980—2011 年 SOC 储量和 SOCD 的年均变化速率及固碳、丢碳和相对平衡面积比
Table 4 The annual change rate of SOC storage and SOCD, and the proportion of carbon sink, loss and relative balance area to the total area of every one soil type during 1980—2011

土壤类型 Soil type	面积 Area /hm ²	$\Delta T^*/t$	$\Delta T/t/(t\ C/a)$	$\Delta SOC D/(kg\ C/hm^2)$	$\Delta SOC D/t/(kg\ C\ hm^{-2}\ a^{-1})$	面积比 Proportion/%		
						丢碳 Loss	固碳 Sink	平衡 Relative balance
冲积土	100.19	1717.63	53.68	17143.72	535.74	0.00	100.00	0.00
黄壤土	4079.48	17421.9	544.43	4270.61	133.46	39.00	61.00	0.00
水稻土	43628.11	305018.96	9531.84	6991.34	218.48	17.26	82.74	0.00
紫色土	54438.19	-88212.68	-2756.65	-1620.42	-50.64	53.89	21.03	25.08
总计 Total	102245.98	235945.83	7373.31	2307.63	72.11	37.61	49.03	13.36

* : ΔT 和 $\Delta SOC D$ 分别见表 3, $\Delta T/t$ 和 $\Delta SOC D/t$ 表示 0—20 cm 土层 SOC 储量的年均变化速率($t\ C/a$)和密度的年均变化速率($kg\ C\ hm^{-2}\ a^{-1}$),丢碳、固碳和相对平衡面积比分别为各土壤类型丢碳、固碳和相对平衡的面积该土壤类型总面积的比重(%)

以 $\text{SOC}_{1980-2011}$ 变化占 SOC_{1980} 为研究区农田 SOC 的变化幅度, 变幅 $>5\%$ 时为固碳, 变幅介于 $\pm 5\%$ 之间时为相对平衡, 变幅 $<-5\%$ 时为丢碳, 以此为依据进行研究区丢碳、固碳和相对平衡面积比统计, 表 4 可看出, 在 1980—2011 年间农田 0—20 cm 土层丢碳、固碳和相对平衡面积比分别为 37.61%、49.03% 和 13.36%, 表现为微弱的碳增汇态势。冲积土均处于固碳状态, 但因该土壤面积较小, 即便全部固碳对研究区整体碳增汇的影响仍是微弱的; 水稻土固碳面积高达 82.74%, 是研究区整体表现为微弱碳增汇的主要贡献者。而水稻土的丢碳主要是劳动力缺乏导致部分旱作造成的; 黄壤固碳面积 61%, 尽管土壤面积不大, 但因集中于两山区 (明月和黄草), 对该区碳增汇贡献突出; 紫色土丢碳面积达 53.89%, 相对平衡面积 25.08%, 固碳面积仅占 21.03%。但因紫色土是研究区面积最大、分布最广的土壤类型, 致使其 SOC 的丢失对整个农田土壤碳汇的影响较大。研究



图 4 1980—2011 年 SOC 年均变化速率的空间格局

Fig.4 The spatial patterns of annual average rate of SOC change during 1980—2011

区 1980—2011 年间农田表层 SOC 的源/汇动态关键取决于水稻土和紫色土间碳效应的平衡。

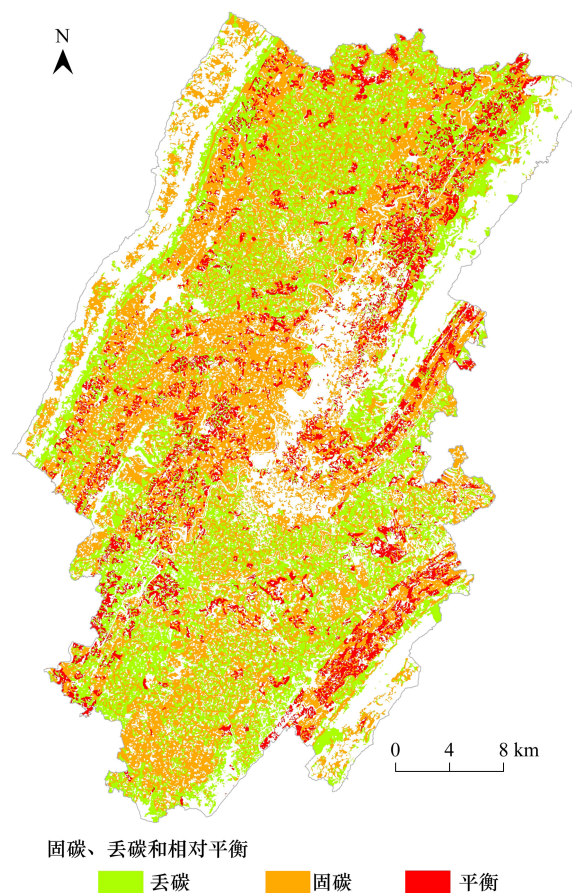


图 5 1980—2011 年固碳、丢碳及相对平衡的空间格局

Fig.5 The spatial patterns of carbon sink, loss and relative balance during 1980—2011

年均 SOC 变化速率和固碳、丢碳、平衡面积比在空间分布上差异明显。年均 SOC 变化速率空间上总体呈西部、西北部高于南部、东南部, 更高于东北部, 体现为三级梯度展布 (图 4): 西部明月山区和东南部黄草山区是变化的高值区 (一级梯度); 高滩河 (县城以北段) 西北部、大梨山西部、大沙河东南部 SOC 年均变率升高显著 (二级梯度); 县城以东、大沙河以北、高滩河 (县城以北段) 所围区及鹤大台地与大梨山所夹槽谷区 SOC 年均变率以降低为主, 是变化的低值区 (三级梯度)。对应地, 1980—2011 年固碳、丢碳及相对平衡空间格局较为清晰, 呈明显的三分态势: 固碳主要集中于西部明月山及其下缘槽谷区、县城以西的中部区、高滩河北段流域沿岸、鹤大台地中南部; 相对平衡出现在环南华山下缘的周围地区、黄草山紧靠下缘的以西以北地区、高滩河 (县城南段) 与大梨山所夹槽谷区; 丢碳基

本发生于北部高滩河与明月山所夹槽谷区的中部、高滩河(县城南段)与县城边缘、南华山南端、鹤大台地中北部、黄草山下缘所围槽谷区。但是,总体上看,由于研究区土壤类型以紫色土和水稻土为主,且主要交错集中分布于三山(明月、南华和黄草)所围槽谷区,致使上述分布在空间上体现为紫色土、水稻土的镶嵌分布格局。

3 讨论

3.1 1980—2011 年 SOC(密度/储量)动态的宏观讨论

本研究获得的上述结果与土壤类型的分布及其利用有很大关系。山地黄壤由三迭系白云(灰质)岩、灰黄色沙粉质母岩发育而成,主要分布在明月山和黄草山区的内槽地带,带有粘重的质地和不良的耕性。但因地处山区人口密度小,且随大量青壮年劳动力向城镇或非农产业转移迅速,黄壤区坡耕地的人口压力较小,一年一季玉米或红薯的种植及少耕或穴耕对耕地土壤的干扰强度较低,致使表层(0—20 cm)SOC 密度/储量的变化表现为略微增加。因此,黄壤区农田表层 SOC 在 1980—2011 年间获得一定程度的提升也就不难理解,这一结果与目前已取得的结论一致^[11-12]。

冲积土由第四系全新统河流冲积发育而成,零星分布于高滩河、大沙河及其支流沿岸,处于靠近消落区的地带。地势平缓,土壤肥厚,沙粘重适度,地下水埋藏浅,有机质输入量高,土壤含水量高降低其分解矿化释放速率,从而驱使 SOC 密度/储量增加迅速。但是,这一发现与罗怀良等^[11]人在川中丘陵区(盐亭县)获得的认识相反。比较发现,研究区的冲积土主要分布于高滩河沿岸,土壤肥厚,以一季冬水田或稻油、稻蔬轮作为主,有机质输入量大。而盐亭县冲积土主要集中于城镇周围的河流阶地上,存在比较劣势的农作物逐渐退为经济作物,有机质输入量降低。

水稻土由侏罗系灰棕紫泥母质发育而成,广布于河流沿岸的串珠状河谷平坝和坡沟间,呈条带状镶嵌于槽谷区,尤以县城拓展方向和大梨山走向的以西以北地区和东部鹤大台地区较为集中。质地轻至重壤,矿质养分丰富,一季冬水田或水旱轮作(稻油或稻蔬)的利用方式,不仅使得对水稻土的耕作扰

动较少,而且利用过程中又有大量有机质输入到土壤中,进而提升单位面积 SOC 及储量。而且,研究区水稻土 SOCD 年均增长率显著高于长江以南水稻土 SOCD 的年均增长速率($145.0 \text{ kg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[6]。这一结果类似于王绍强等^[13]人的发现,即长期淹水的水稻田,营造出的良好还原环境有助于缓解土壤有机质的矿化速率,积累更多的稻田 SOC,展现碳增汇效应。

紫色土由侏罗系(红)棕紫泥母质发育而成,集中于三山所夹槽谷的丘陵坡地区,呈浑圆状或馒头状。质地中壤至轻粘、重沙质,含少量石骨子,保水肥能力差,不耐干旱,以玉米、红薯为主的旱作是主要的利用方式,人口密度大,耕作扰动频繁,土壤易水蚀,尽管利用过程中有机质投入较多,但因利用干扰造成的丢碳强于输入碳增加,致使农田 SOC 密度和储量整体处于降低状态。阚泽忠等^[7]人对成都经济区东部丘陵区紫色土 SOC 的分布和动态研究获得了类似结果。

表 5 可看出,大多研究均认为第二次土壤普查以来,农田 SOC 总体上表现为增加趋势,发挥固碳增汇效应^[6,11,13],但在单位面积 SOC 的年均变化速率上却存在一定差异。本研究得出的 SOCD 年均增速均低于罗怀良等^[11]人和于严严等^[6]人、王绍强等^[13]人获得的结果。造成这种差异的原因主要在于,本研究区作为川东重要的粮油基地,农田在进行大量有机质(秸秆还田)和养分元素(化肥)投入的同时(SOC 输入),又频繁开展以常规耕作(犁耕深翻、顺坡耕作)为代表的人为扰动(SOC 释放和流失),这样,输入增碳和输出丢碳间的消长,使得研究区 SOCD 年均增速相对较低。不同土壤类型上的研究结果与现有发现不论在 SOCD 年均变化速率还是固碳、丢碳和相对平衡方面均有很大不同^[6,11,13-18]。冲积土的结果与罗怀良等^[11]人的相反(前面已解释),而与 Leifeld 和 Fuhrer^[16]的一致(只是 SOCD 年均变化速率明显高于此);黄壤的结果尽管与现有的一致,但本研究的 SOCD 年均变化速率高于罗怀良等^[11]人的而低于 West 和 Post^[15]的,原因在于平行岭谷的山地区耕地人口压力远小于低山丘陵区,亚热带湿润区的农田土壤的扰动远小于干旱区;水稻土的结果与现有研究一致^[7,9],但 SOCD 年均变化速率高于严严等^[6]人的而低于罗怀良等^[11]人和叶德

宪等^[17]人的。这可能是由丘陵山区人们为追求更多的收益而对仅有的水田投入较多所驱使,如养分元素(花费)、有机质(秸秆还田)等;紫色土的结果

与于严严等^[6]人的一致而与罗怀良等^[11]人的相反,但是,详细对比,罗怀良等^[7]人获得的紫色土固碳仅呈稳定少动状态(近似于平衡)。

表 5 本研究结果与现有研究发现间的对比

Table 5 Comparing the results of this paper and these findings obtained by the existing researches

土壤类型 Soil type	SOCD 年均变化速率/% Annual mean rate of SOCD change		固碳、丢碳和平衡 (kg C hm ⁻² a ⁻¹) Carbon sink, loss and relative balance	
	本研究 This paper	现有研究 Existing researches	本研究 This paper	现有研究 Existing researches
冲积土 Alluvial soil	535.74	-330.8 ^[11] /(100—400) ^[16]	固碳	丢碳 ^[11] /固碳 ^[16]
黄壤土 Paddy soil	133.46	84.4 ^[11] /(570±140) ^[15]	固碳	固碳 ^[11-12,15,18]
水稻土 Paddy soil	218.48	313.2 ^[11] /145 ^[6] /760 ^[17]	固碳	固碳 ^[6,11] /平衡 ^[6]
紫色土 Purple soil	-50.64	5.6 ^[11]	丢碳	平衡 ^[11] /丢碳 ^[6,18]
总计 Total	72.11	108 ^[11] /85 ^[15] /180 ^[13]	固碳	固碳 ^[6,11,13]

3.2 1980—2011 年 SOC(密度/储量)动态的微观因素讨论

SOC 年均变化速率为因变量,表 2 所选 13 个因素为因变量,考虑 R 方的变化(表 7)和影响因素间的共线性诊断(表 8),逐步回归出的最优模型,表达式为:ΔSOC/t = -739.494 - 0.032SOC 初始值(X₁₁) + 0.316 全 N 密度(X₃₂) + 75.779C/N 比(X₃₁)。

式中,所有因素 t 值的绝对值均大于 2,即通过显著性检验(表 6),整体拟合结果最优。依据标准化系数,初步认为,影响因素的贡献较为集中于 SOC 初始值(X₁₁)、全 N 密度(X₃₂)和 C/N 比(X₃₁)三大因素。就影响因素的作用方向看,全 N 密度(X₃₂)和 C/N 比(X₃₁)对 SOC 年均变化拥有正向影响,SOC 初始值的影响则相反。

表 6 1980—2011 年 SOC 变化与影响因素间的逐步回归参数

Table 6 Stepwise regression parameters between SOC change and its impact factors during 1980—2011

模型 Model		非标准化系数		标准系数 Standardized coefficients	t	Sig.	共线性统计量	
		Non-standardized coefficients					Collinearity statistics	
		B	标准误差 Standardized error				容差 Tolerance	VIF
...
3	(常量)	-739.494	1.175		-629.222	0.000		
	X ₁₁	-.032	0.000	-.808	-1566.877	0.000	0.946	1.058
	X ₃₂	0.316	0.000	0.608	1145.121	0.000	0.893	1.120
	X ₃₁	75.779	0.128	0.317	593.086	0.000	0.883	1.133
...

...为模型 3 前后逐步回归结果的省略,且在模型 9 及以后变量 X₂₃、X₂₄和 X₂₅的 VIF>10 存在共线性,合适模型只能在 3—8 中选择

SOC 初始值对农田表层 SOC 变化的影响最大且具有反方向作用关系。SOC 初始值越高,距离 SOC 库收支动态平衡的临界空间就越近,提升潜力就越小。于严严等^[6]人和程先富等^[19]人获得了类似发现,耕层 SOC 的年均变化速率与初始值呈负相关关系。农田表层 SOC 存在一定的上限阈值(饱和容量),SOC 的管理和为追求作物产量的投入必须考虑这一数值。SOC₁₉₈₀ 初始值高的北部和西南部区,在相同的耕作、利用和投入条件下,年均

SOC 提升的速率低于初始值相对较低的中部、南部和东南部区,即高初始值 SOC 含量的农田土壤增加不明显(甚至下降),而低的则相对显著。相反地,初始值低的中部、南部和东南部区土壤贫瘠,常常需要更多的投入来提高产量,初始值高的北部和东南部区土壤肥沃,当地人们往往忽视投入而较多地依靠土壤本身的生产能力,从而驱使初始值低的 SOC 提升的速率快于初始值高的。SOC 初始值与其年增长速率间的反向关系,告诉我们:在丘陵山区少有粮

油基地——平行岭谷区兼顾“粮油生产”和“土壤增碳”,需要在 SCOD 初始低值区加大对土壤的投入,以提高粮油产量,增加 SOC 储量;在初始高值区不但不忘增加对土壤的投入,而且要选择较为合适的耕作和管理实践,以降低耕作对土壤表层的扰动,使得土壤表层有机碳的分解速率达于累积程度,维持高值区的土壤高生产力和高 SOC 储量。

表 7 1980—2011 年 SOCD 变化与影响因素间的逐步回归模型汇总
Table 7 The summary of stepwise regression model between SOCD change and its impact factors during 1980—2011

模型 Model	<i>R</i>	<i>R</i> ²	调整 <i>R</i> ² Adjust R square	标准估计误差 Standard estimate error	修正统计量 Revised statistics				
					<i>R</i> ² 修正 <i>R</i> square correction	<i>F</i> 修正 <i>F</i> correction	d/1	d/2	Sig. <i>F</i> 修正 Sig. <i>F</i> correction
...
3	0.984c	0.968	0.968	59.4293773	0.089	351768.405	1	126223	0.000
...

...见表 5, *R*² 在模型 3 后变化不大,意味着可以靠共线性诊断在 3—8 中选择最优模型

表 8 1980—2011 年 SOCD 变化影响因素间的共线性诊断
Table 8 Collinearity diagnosis between impact factors driving SOCD change during 1980—2011

模型 Model	维数 Dimension	特征值 Proper value	条件索引 Condition index	方差比例 Variance proportion												
				(常量) (Constant)	<i>X</i> ₁₁	<i>X</i> ₃₂	<i>X</i> ₃₁	<i>X</i> ₂₂	<i>X</i> ₃₆	<i>X</i> ₃₃	<i>X</i> ₂₃	<i>X</i> ₂₄	<i>X</i> ₂₅	<i>X</i> ₃₇	<i>X</i> ₃₅	<i>X</i> ₂₁
...
1	3.857	1.000	0.00	0.01	0.00	0.00										
2	0.096	6.329	0.01	0.97	0.06	0.01										
3	0.035	10.491	0.11	0.02	0.93	0.10										
4	0.011	18.334	0.88	0.00	0.00	0.88										
...

...见表 5,按条件指数[10, 30)弱相关、[30, 100]中等相关和>100 强相关规律,一般选所有变量条件指数<30 的为最优;模型 3 后中的自变量至少有一条件指数≥30,1980—2011 年 SOCD 变化与影响因素间的最合适的模型只能是模型 3

土壤全 N 密度和 C/N 比对 SOCD 变化的影响处于二、三位且拥有正向作用关系。土壤全 N 密度和 C/N 比越大,SOCD 的年均变化速率就越大。段华平等^[20]人发现 SOC 与全 N 含量之间存在极显著的正效应关系,土壤全 N 含量越高,SOC 含量增加的速度越快(表 9)。而且,周莉等^[21]人得出土壤中矿质态 N 的有效性直接控制 SOC 的分解速率(微生物同化 1 份 N 需消耗 24 份 C)。齐雁冰等^[8]人认为土壤 C/N 比的提升有助于降低微生物的活性,抑制 SOC 和 N 的矿化分解,可以积存更多地 SOC 并减少 N 的流失。Brady 和 Weil^[9]认为特定土壤的 C/N 比基本为一常数,SOC 的含量很大程度上依靠土壤中 N 素的含量(能同化腐殖质)。因此,在某种意义上,土壤全 N 密度和 C/N 比之间有一定的相互依赖性,土壤 N 的积累往往伴随 C 的集聚。整体上,研究区 1980—2011 年间的养分元素的输入,大大提升土壤全 N 的含量,从而有助于 SOC 积累;冲积土和水稻土土壤水

含量较多,有助于土壤全 N 的累积和 SOC 的增加;黄壤区人为扰动较 1980 年有所减轻,土壤全 N 因扰动流失造成的释放大大降低,SOC 展现为提升状态;与黄壤相反,紫色土因处于谷地丘陵区,扰动压力较大,雨季水蚀经常发生,致使土壤全 N 有一定程度流失,并诱发 SOC 的丢失。当然,在土壤 C/N 比对研究区 SOC 的作用也呈与土壤全 N 类似的规律,仅仅在作用程度上较后者低^[8]。

依据现有研究,土壤物理性状(质地、砾石体积比和容重)、化学性状(pH 值、全量(速效)P 和 K)均会对农田表层 SOC 的变化产生一定影响,而且,在本研究中这些因素尽管也已进入部分模型并通过显著性检验,但是,涵盖有粘粒(0—0.002 mm)、粉粒(0.002—0.05 mm)和砂粒(0.05—2 mm)三变量的模拟结果 VIF 值>10,说明它们之间存在较强的共线性(表 6)。同时,依靠共线性诊断中条件指数的统计学意义(10—30 之间弱相关、30—100 之间中等相关

和大于 100 强相关),砾石体积比、容重、pH、全量(速效)P 和 K 的条件指数均大于 30,有的甚至伴随因素的引入在 200 以上(表 9)。另外,这部分因素

的影响相对较小,除土壤质地外标准系数绝对值在 0.003—0.028 之间。

表 9 主要影响因素的作用方向与现有研究间的对比

Table 9 Comparing the function direction of the influence factors between this paper and the existing researches

因素类别 Factor categories		与现有研究比较 Compared with the existing research		因素类别 Factor categories		与现有研究比较 Compared with the existing research	
		本研究 This paper	现有研究 Existing researches			本研究 This paper	现有研究 Existing researches
SOCD 初始值 SOCD initial value		—	— ^[6]	土壤物理性状 Soil physical properties	砾石体积比 Gravel volume	—	— ^[7]
土壤化学性状 Soil chemical properties	C/N 比 C/N rate	+	+ ^[8,19]		粘粒 Clay (0—0.002mm)	—	+ ^[22-23]
	全 N 密度 Total N density	+	+ ^[20]		粉粒 Silt (0.002—0.05mm)	—	+ ^[22-23]
	pH 值 pH value	—	—或+ ^[23]		砂粒 Sand (0.05—2mm)	—	— ^[20]

土壤质地对农田表层 SOC 的影响均是负向作用的,且标准化系数间未展现显著差异。这一结果与目前已取得的粘粉粒土壤中较砂质能储存更多的 SOC 相矛盾,粘粉包被(有机无机复合体)对 SOC 起到明显的保护作用,不受微生物的侵袭诱发矿化分解^[22-23]。然而,分析发现,研究区土壤质地 在 1980—2011 年间发生较大变化,粘粒和粉粒的比重分别由 1980 年的 27.23%和 60.51%,下降为 2011 年的 21.20%和 24.65%,而砂粒的比重则相反,由 12.26%上升为 55.15%。据此,研究区农田表层 SOC 理应处于丢碳状态,但为什么 SOC 在 1980—2011 年间总体上仍体现为微弱的碳增汇呢?这可能因 SOC 和质地的空间数据受诸多其它与土壤质地交互因素作用的影响所导致。

表层土砾石体积比越大,SOC 储量越小^[7]。但是,本研究结果与目前研究一致,仅仅是作用程度较小,标准化系数仅为-0.003。分析发现,研究区砾石体积比>1.0%的土壤主要是分布于三山区的黄壤,0.6%—1.0%的土壤大多是分布于谷地丘陵区的紫色土,而综合黄壤区碳增汇效应明显和紫色土区碳失汇显著,也就出现研究区砾石体积比对 SOC 变化的负向作用但不显著。

pH 值过高或过低都会抑制土壤微生物的活性,影响表层 SOC 的矿化分解和周转^[22]。研究区土壤 pH 值 5.0—8.6,且 1980—2011 年间变化较小,当然,pH 值对 SOC 变化的影响也较小。研究区土壤 pH 值>7.0 区集中出现在北部的中部区和东南部,而这些区域又是明显丢碳区(图 5),从而出现 pH 值对 SOC 变化的影响为负向作用。在施肥和生物因子上,尤其是有机肥施用、作物留茬、秸秆还田、作物产量等直接向土壤输入有机质,化肥施用直接向土壤输入养分元素,特别是 N 素,前者有助于积累更多的 SOC,后者通过调节 C、N 循环增加 SOC 集聚^[5]。但是,除作物留茬外,本研究获得的有机肥、化肥、秸秆还田、作物产量对 SOC 变化的影响结果与现有研究相反,且作用程度均较低。产生这一差异原因,是由本研究以乡(镇)为单元进行施肥和生物因子统计所造成的,未考虑乡(镇)范围内不同海拔、不同土壤类型间的差异,而且,本研究对 SOC 的分析又使用的是土壤类型法,致使不同土壤类型对应相同的施肥和生物因子,这样,使用施肥和生物因子为自变量的逐步回归分析,必然会出现施肥和生物因子对 SOC 变化的影响较弱甚至反方向作用。

4 结论

(1)研究区 1980—2011 年农田 0—20 cm 土层 SOC 密度/储量总体表现为略有增加态势,单位面积碳增量 $2307.63 \text{ kg C/hm}^2$,碳增汇 235945.83 t ,增幅为 10.74%。其中,对研究区 SOC 碳库盈亏有决定性调控意义的水稻土和紫色土,SOC 密度/储量增幅分别为 32.27% 和 -8.01%。而且,研究区 SOCD 呈西部、中部(腰间)和南端升高显著,北部和南部增加较少。SOC 储量增加最明显的是西北部和东南部,中部增加处中等水平,东南部及其它局部地区碳储量增加较少甚至下降。

(2)研究区 1980—2011 年农田 0—20 cm 土层 SOCD 年均增长速率为 $72.11 \text{ kg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,总体上拥有微弱的碳增汇效应。其中,水稻土 SOCD 年均增长率 $218.48 \text{ kg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,紫色土为 $-50.64 \text{ kg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。而且,以 $\pm 5\%$ 为界限,研究区丢碳、固碳和相对平衡面积比分别为 37.61%、49.03% 和 13.36%。决定研究区 SOC 源/汇动态的水稻土和紫色土的固、丢碳面积比分别为 82.74% 和 53.89%。在空间分布的差异上,总体呈西部、西北部高于南部、东南部,更高于东北部和西南部的格局。

(3)宏观上研究区 1980—2011 年农田 0—20 cm 土层 SOC 密度/储量变化与土壤类型的分布及利用有很大关系。黄壤粘重和不良的耕性使得 SOC 密度/储量常处于降低态势,但人口压力的减轻和人为扰动的减弱,驱使 SOC 的积累速率大于矿化分解速度。紫色土尽管处于三山谷地丘区,质地中壤至轻粘、重沙质,但人口压力大,耕作扰动频繁,SOC 的积累速率低于分解速率。

(4)微观上研究区对 SOCD 年均变化速率影响最大的因素是 SOCD 初始值>全 N 密度>C/N 比。而且,全 N 密度和 C/N 比拥有正向影响,SOCD 初始值则相反。特别是 SOCD 初始值对 SOCD 年均变化速度的作用,说明在平行岭谷区管理农田土壤碳库,不但要对 SOCD 低值区的中低产田增加投入,而且要对 SOCD 高值区施加适当投入和合适的耕作与管理实践,以增加 SOC 储量。

References:

[1] Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: facing the challenge of global change

and food security. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 384-393.

- [2] Jin L, Li Y E, Gao Q Z, Liu Y T, Wan Y F, Qin X B, Shi F. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3): 734-743.
- [3] Wang L G, Qiu J J, Tang H J, Li H, Li C S, van Ranst E. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China. *Geoderma*, 2008, 147(1/2): 47-55.
- [4] Yu Y Q, Huang Y, Zhang W. Modeling soil organic carbon change in croplands of China, 1980—2009. *Global and Planetary Change*, 2012, 82-83: 115-128.
- [5] Zheng J F, Cheng K, Pan G X, Smith P, Li L Q, Zhang X H, Zheng J W, Han X J, Du Y L. Perspectives on studies on soil carbon stocks and the carbon sequestration potential of China. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26): 2162-2173.
- [6] Yu Y Y, Guo Z T, Wu H B. Changes in organic carbon of cultivated soils in China from 1980 to 2000. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(6): 123-130.
- [7] Kan Z Z, Jin L X, Li Z H, Yang Z H, Zhang H, Bao Y H. Distribution characteristics and reserves estimation of soil organic carbon of different physiognomy in Chengdu eco-nomic zone. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(10): 1126-1133.
- [8] Qi Y B, Huang B, Gu Z Q, Zhao Y C, Sun W X, Wang Z G, Yang Y F. Spatial and temporal variation of C/N ratios of agricultural soils in typical area of Yangtze Delta Region and its environmental significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(1): 50-56.
- [9] Brady A C, Weil R R. *The Nature and Properties of Soils*. 13th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002: 21-526.
- [10] Liu X Z, Zhang A D, Li J Z. *Geography Mathematical Method*. Beijing: Science Press, 2009.
- [11] Luo H L, Wang H P, Chen H. Change of farm land soil organic carbon density in hilly area of central Sichuan Basin in the last 25years: A case study of Yanting County, Sichuan Province. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(2): 212-217.
- [12] Huang Y, Sun W J. The change tendency of Chinese farmland topsoil organic carbon in recent 20 years. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 750-763.
- [13] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, Zhu S L, Huang F H. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533-544.
- [14] Wu L Z, Cai Z C. Estimation of the change of topsoil organic carbon of croplands in Chinabased on long-term experimental data. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6): 1768-1774.
- [15] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1930-1946.
- [16] Leifeld J, Fuhrer J. Organic farming and soil carbon sequestration: What do we really know about the benefits? *Ambio*,

2010, 39(8): 585-599.

- [17] Ye D X, Li K. Analysis of the variation of soil nutrient contents and soil pH changes in Sichuan province. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 16(S1): 101-107.
- [18] Zhang X Z, Li T X, Zhou J X, Zhang R S. Study on the farmland nutrient balance and the dynamic variation tendency of soil nutrients in Zitong County. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2004, 22(1): 53-57.
- [19] Cheng X F, Shi X Z, Yu D S, Wang H J. Change in carbon sequestration potential of cropland soil for 20 years in Xingguo county of Jiangxi China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2007, 13(1): 37-40.
- [20] Duan H P, Niu Y Z, Bian X M. Effects of tillage mode and straw return on soil organic carbon and rice yield in direct seeding rice field. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(3): 23-27.
- [21] Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1): 99-105.
- [22] Wei X B, He W Q, Li X F, Liu E K, Liu S. Review on the mechanism of soil organic carbon sequestration and its influence factors in cropland soils. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(4): 487-494.
- [23] Freixo A A, de A Machado P L O, dos Santos H P, Silva C A, de S Fadigas F. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64(3/4): 221-230.

参考文献:

- [1] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384-393.
- [2] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 刘运通, 万运帆, 秦晓波, 石锋. 中国农田管理土壤碳汇估算. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 734-743.
- [5] 郑聚锋, 程琨, 潘根兴, Smith P, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟, 韩晓君, 杜彦玲. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题. *科学通报*, 2011, 56(26): 2162-2173.
- [6] 于严严, 郭正堂, 吴海斌. 1980—2000 年中国耕作土壤有机碳的动态变化. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(6): 123-130.
- [7] 阚泽忠, 金立新, 李忠惠, 杨振鸿, 张华, 包雨函. 成都经济区不同地貌景观区土壤有机碳分布特征及储量估算. *地球科学进展*, 2012, 27(10): 1126-1133.
- [8] 齐雁冰, 黄标, 顾志权, 赵永存, 孙维侠, 王志刚, 杨玉峰. 长江三角洲典型区农田土壤碳氮比值的演变趋势及其环境意义. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(1): 50-56.
- [10] 刘贤赵, 张安定, 李嘉竹. *地理学数学方法*. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] 罗怀良, 王慧萍, 陈浩. 川中丘陵区近 25 年来农田土壤有机碳密度变化——以四川省盐亭县为例. *山地学报*, 2010, 28(2): 212-217.
- [12] 黄耀, 孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. *科学通报*, 2006, 51(7): 750-763.
- [13] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [14] 吴乐知, 蔡祖聪. 基于长期试验资料对中国农田表土有机碳含量变化的估算. *生态环境*, 2007, 16(6): 1768-1774.
- [17] 叶德宪, 李昆. 四川土壤养分及酸碱性变化趋势分析. *西南农业学报*, 2003, 16(S1): 101-107.
- [18] 张锡洲, 李廷轩, 周建新, 张仁绥. 梓潼县农田养分平衡与土壤养分变化研究. *四川农业大学学报*, 2004, 22(1): 53-57.
- [19] 程先富, 史学正, 于东升, 王洪杰. 江西兴国县农田土壤固碳潜力 20a 变化研究. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(1): 37-40.
- [20] 段华平, 牛永志, 卞新民. 耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤有机碳及水稻产量的影响. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 23-27.
- [21] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105.
- [22] 魏小波, 何文清, 黎晓峰, 刘恩科, 刘爽. 农田土壤有机碳固定机制及其影响因子研究进展. *中国农业气象*, 2010, 31(4): 487-494.