

DOI: 10.11766/trxb201603140654

干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究*

郭 洋¹ 李香兰^{1†} 王秀君¹ 王家平² 王旭峰³
马明国⁴ 谢先红⁵ 孙敏敏¹

(1 北京师范大学全球变化与地球系统科学学院, 北京 100875)

(2 石河子大学农学院, 新疆石河子 832000)

(3 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所遥感与地理信息科学研究所, 兰州 730000)

(4 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

(5 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要 以中国干旱半干旱区农田土壤为研究对象, 通过收集自然农田和长期定位站点 (178 个剖面, 0~100 cm 土层) 农田土壤碳的数据并对其进行整合, 分析了农田土壤有机碳和无机碳含量的垂直剖面分布特征及其影响因素。结果表明, 随土层深度增加, 农田土壤有机碳呈下降趋势, 表层含量高于底层; 不同地区农田土壤无机碳含量变化趋势不一, 随土壤深度增加整体呈现升高的趋势, 但是也有一些地区呈现下降趋势。土壤剖面深度为 100 cm 的农田土壤有机碳和无机碳密度平均值分别为 8.33 和 15.83 kg m⁻², 农田土壤无机碳储量大约是土壤有机碳的 2 倍。土壤深度为 0~30 cm 的有机碳占 100 cm 总有机碳含量的 45%, 无机碳仅占 100 cm 总无机碳含量的 29%; 土壤无机碳主要集中在 30~100 cm 土层, 占 100 cm 总无机碳含量的 71%, 远高于有机碳在此土层占 100 cm 总有机碳含量的百分比 (55%)。综合自然农田和长期定位站点农田土壤碳的数据, 土壤容重与土壤 pH 是影响农田土壤有机碳和无机碳分布特征的重要因素: 自然农田土壤有机碳与土壤 pH ($R^2 = 0.61$, $p < 0.01$) 和土壤容重 ($R^2 = 0.64$, $p < 0.01$) 呈显著负相关; 长期定位站点土壤无机碳与土壤 pH ($R^2 = 0.56$, $p < 0.01$) 和土壤容重 ($R^2 = 0.63$, $p < 0.01$) 呈显著正相关。中国干旱半干旱区农田土壤有机碳和无机碳的分布特征与影响因素, 将为陆地生态系统碳储量估算提供数据基础与理论支撑。

关键词 土壤无机碳; 土壤有机碳; 土壤碳储量; 干旱半干旱区; 农田

中图分类号 S153 **文献标识码** A

土壤碳库是陆地生态系统中最大的储库, 约是大气碳库的 3.3 倍, 生物碳库的 4.5 倍^[1]。土壤有机碳库和土壤无机碳库是土壤碳库的两大组成部分。其中, 土壤有机碳库作为土壤肥力重要指标和陆地生态系统主要碳库之一, 全球 1 m 以上的有机碳储量达 1220~1576 Pg^[2]; 土壤无机碳的全球

储量估计为 700~1700 Pg^[1, 3]。与土壤有机碳相比, 土壤无机碳的总量估算存在更大的不确定性, 综合分析陆地生态系统土壤无机碳的分布规律, 对估算土壤碳吸收量和缓解气候变化具有重要意义。

农田碳循环方面的研究, 大都集中在施肥对农田土壤有机碳的影响^[4-5]、农田土壤有机碳密度的

* 国家自然科学基金青年基金项目 (41205104) 和地表过程与资源生态国家重点实验室开放基金项目资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41205104) and the State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xlli@bnu.edu.cn

作者简介: 郭 洋 (1991—), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事干旱半干旱区土壤碳循环研究。E-mail: yguo@mail.bnu.edu.cn

收稿日期: 2016-03-14; 收到修改稿日期: 2016-06-08; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-09-05

估算^[6-7]、农田土壤有机碳动态变化^[8]等。以全国土壤第二次普查数据为基础,研究指出全国农田土壤平均有机碳密度 8.01 kg m^{-2} ^[9],无机碳密度约 6.30 kg m^{-2} ^[10],并且西北干旱半干旱区农田土壤平均无机碳密度约为 13.50 kg m^{-2} ^[10]。近期研究指出,我国西北地区焉耆盆地的农田有机碳密度 9.20 kg m^{-2} ,无机碳密度高达 51.20 kg m^{-2} ^[7],黄土高原兰州区域农田有机碳密度 6.10 kg m^{-2} ,而无机碳密度也高达 21.00 kg m^{-2} ^[6]。其主要原因可能是干旱半干旱地区农田土壤管理措施对土壤碳库变化有重要影响^[7]。Wang等^[11]研究表明长期施肥不仅增加了农田土壤有机碳也增加了农田土壤无机碳,该研究进一步指出我国干旱区农田土壤次生碳酸盐的累计速率远远超过有机碳累积速率,农田土壤每增加 1 kg m^{-2} 的有机碳可增加 1.90 kg m^{-2} 的次生碳酸盐。农田管理措施成为土壤有机碳和无机碳累积变化的重要因素,目前大多数研究限于点位剖面观测而缺少区域尺度的总量估算。

土壤无机碳库主要分布在干旱、半干旱地区^[1],其储量是土壤有机碳储量的2倍~10倍且累积速

率远远高于土壤有机碳^[9]。早期研究显示,我国西北干旱区表层土壤无机碳的累积速率每年可达 $10 \sim 40 \text{ g m}^{-2}$ ^[12]。近期研究也表明,干旱区农田施肥导致的 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层土壤无机碳累积速率为 $101 \sim 202 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,施肥条件下仅次生碳酸盐累积速率就达 $60 \sim 179 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,超过了土壤有机碳的累积速率^[11]。Wu等^[10]以全国第二次土壤普查数据为基础,研究指出得中国西北农田灌溉地区土壤无机碳增加了约10%。Zhang等^[6]通过剖面实测数据研究兰州地区农田长期灌溉地区土壤无机碳也增加了10%。这些数据说明,占中国总面积三分之一的干旱半干旱地区具有巨大的固碳潜力,尤其是土壤无机碳的累积,因此,干旱半干旱区土壤有机碳和无机碳储量及分布特征需要进一步研究。

本文以中国干旱半干旱区农田土壤为研究对象,收集以往研究涉及的土壤剖面数据,如兰州、张掖、焉耆、杨凌、郑州和乌鲁木齐等地区的剖面实测数据,同时收集前人发表文献的农田土壤有机碳和无机碳数据,如,固原、安塞、玛纳斯、皋兰、富县等,研究土壤有机碳和无机碳剖面分布以

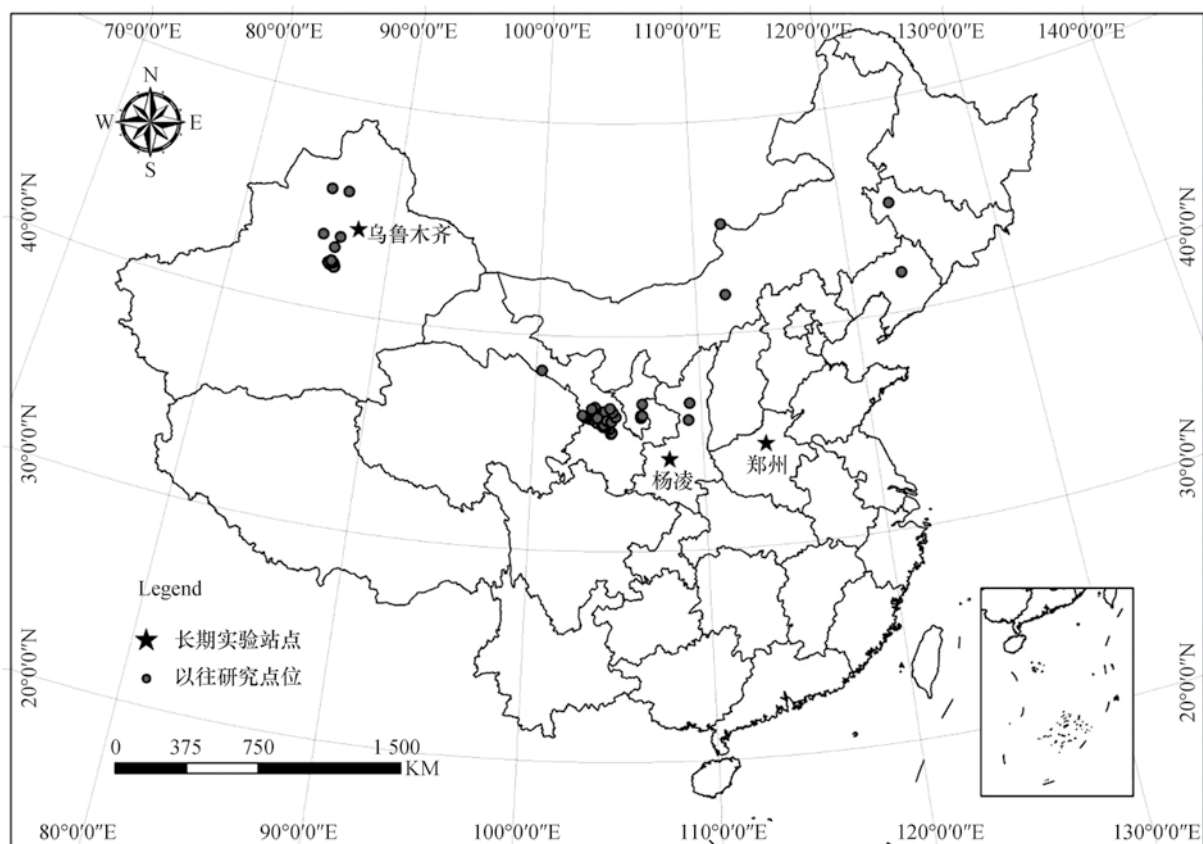


图1 干旱区半干旱区自然农田采样点位分布图以及长期试验点位图

Fig. 1 Location map of the farmlands and long-term field stations for soil sampling in the arid and semi-arid areas of China

及其影响因素，旨在了解全球变化背景下中国农田土壤碳库的储量和分布特点。

1 材料与方 法

1.1 数据收集

中国干旱半干旱区域分界线是根据Xie等^[13]计算得出1989—2009期间年均降雨量 ≤ 600 mm所划分。本文共收集该区域178点位的土壤剖面数

据，包括自然农田采样点和长期实验站点，主要分布在陕西、新疆、甘肃和内蒙古等省份（图1）。

本文收集土壤剖面的土壤类型主要包括黄土、灰漠土和灰钙土等（表1），剖面实测数据大都是2000年以后的采样数据。自然农田的剖面实测数据主要包括兰州、张掖和焉耆的农田剖面实测数据；长期定位监测实验站点的农田剖面实测数据主要包括杨凌、郑州和乌鲁木齐地区实验站点的农田剖面实测数据。文献数据主要提取相关土壤碳含量

表1 中国干旱半干旱区典型农田土壤点位基本采样信息

Table 1 Basic information of the typical farmland and the long-term stations in the arid and semi-arid area of China

数据来源 Data source	地点 Location	采样时期 (YYYY-MM) Observed period	土壤类型 Soil types	样点数 Sites	参考文献 References
自然农田 Natural farmland	固原 Guyuan	2011-08	黄土和灰褐土 Loess soil and mountain gray cinnamon soil	3	[14]
	玛纳斯 Manasi	2013-08, 2013-10	灰漠土 Gray desert soil	60	[15]
	皋兰 Gaolan	2010-05	灰钙土 Sierozem	5	[16]
	安塞 Ansai	2011-07	黄土 Loess soil	—	[17]
	富县 Fuxian	2009-07	黄绵土 Loessal soil	10	[18]
	通辽和赤峰 Tongliao and Chifeng	2005	栗钙土 Chestnut soil	12	[19]
	焉耆 Yanqi	2010-08, 2010-11	棕漠土和灰棕漠土 Brown desert soil and Gray brown desert soil	9	[7]
	兰州 Lanzhou	2012-08	黄土 Loess soil	33	[6]
	张掖 Zhangye	2012-11	荒漠土 Desert soil	15	未发表数据 Not published data
长期定位站 Long-term experiment site	杨凌 Yangling	2002, 2009	壤土 Manural Loess soil	10	[11]
	乌鲁木齐 Urumqi	2001, 2009	灰漠土 Gray desert soil	10	[11]
	郑州 Zhengzhou	2002, 2009	潮土 Fluvo-aquic soil	10	[11]

注：表1研究区域的划分是根据已发表文献涉及实际研究点位的信息。表2同 Note: Classification of the study area was based on the information of the sampling sites cited from published literatures. The same in Table 2

数据,一部分同时包括农田土壤有机碳含量和无机碳含量的数据,主要包括皋兰、安塞、富县以及锡林河流域的平均农田土壤碳数据;另一部分仅农田土壤无机碳含量的数据,主要包括固原和玛纳斯的平均农田土壤碳数据。文献数据选择需要符合以下标准:(1)具有明确的采样点覆盖范围,同一采样范围内存在重复采样的土壤剖面;(2)土壤剖面深度 ≤ 100 cm,超过100 cm的土壤剖面数据只取100 cm范围内。数据参数包括采样位置、经纬度、年均降雨量、pH、土壤容重、土壤无机碳含量、土壤有机碳含量、土壤无机碳密度、土壤有机碳密度、土壤垂直剖面深度等15个背景参数。其中选择数据地区土壤pH测量方法均采用电位测量法,而土壤容重测量方法均采用环刀法,土壤有机碳和无机碳浓度分析方法分别 $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 外加热法和气量法。文献数据所有参数通过软件WinDig2.5(又叫曲线数字化软件)进行数据获取。

1.2 数据分析

按农田土壤一般耕层深度划分的土壤剖面层次,将农田土壤剖面数据分为0~30 cm农田土壤表层、30~100 cm农田土壤深层。为比较不同地区相同土壤剖面深度下土壤碳的分布情况,将分层标准符合30 cm分层界线的土壤剖面利用土壤深度加权平均法计算土壤剖面0~30 cm和30~100 cm的土壤有机碳和无机碳密度;若剖面分层中有30 cm,直接以30 cm为土壤界线计算0~30 cm和30~100 cm农田土层土壤碳密度,若剖面分层中没有30 cm,比如分层为0~20 cm和20~40 cm的点,本文假设无机碳在20~40 cm土层均匀分布,通过土壤深度加权法推算出20~30 cm土层的无机碳密度,计算0~30 cm和30~100 cm农田土层土壤碳密度。根据不同地点对相同深度土层的土壤有机碳和无机碳密度取算术平均值分析区域土壤碳储量。实验数据按数据来源地分区域进行分析,包括张掖、兰州、焉耆、杨凌、郑州和乌鲁木齐地区;文献数据按实际研究区域对土壤有机碳和无机碳数据进行统计分析,包括区域平均土壤碳含量、最大值和最小值等。

农田土壤有机碳密度(SOC)和无机碳密度(SIC)按照以下公式计算:

$$SIC_i = \sum_{i=1}^n \rho_i \times P_i \times D_i \times (1 - G_i) / 100$$

$$SOC_i = \sum_{i=1}^n \rho_i \times P_i \times D_i \times (1 - G_i) / 100$$

式中, i 代表0~30 cm或者30~100 cm土层, ρ_i 代表第*i*层的农田土壤容重($g\ cm^{-3}$), P_i 代表第*i*层的农田土壤有机碳含量或者土壤无机碳含量($g\ kg^{-1}$), D_i 代表第*i*层土层厚度(cm), G_i 代表第*i*层中大于2 mm岩石颗粒所占的百分比^[20]。

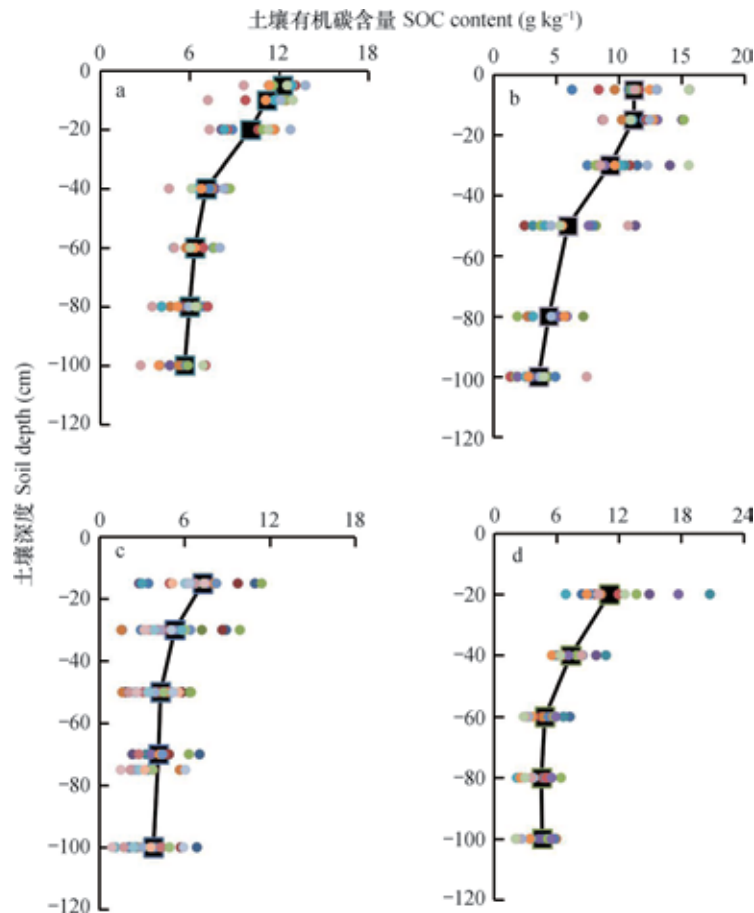
所有数据采用Excel 2003进行数据收集整理和SPSS 19.0统计软件进行相关性分析,并且使用Sigmaplot 12.5进行相关地统计分析和图件的制作。

2 结果与讨论

2.1 农田土壤有机碳与无机碳含量

中国干旱半干旱区典型点位土壤剖面实测数据(张掖、兰州、焉耆、杨凌、郑州和乌鲁木齐)显示,随着土壤深度增加农田土壤有机碳含量逐渐降低,80~100 cm土壤深度的土壤有机碳含量接近于最低值,有机碳含量的均值差异较小(图2a~图2c)。这与以往研究结果一致,绝大多数农田土壤有机碳的含量随深度的增加而下降,主要是与生物量以及分解速率等相关^[21]。长期定位监测实验站点0~20 cm土层农田有机碳含量最大值明显高于其他自然农田所在相应土层土壤有机碳含量最大值(图2),可能与长期定位监测试验站点的土壤管理措施有关,已有研究表明长期定位站长期灌溉与施肥有利于土壤有机碳的累积^[11],可造成土壤有机碳含量显著增加^[22]。

中国干旱半干旱区农田土壤有机碳含量均值差异相对较小,最大平均值存在于内蒙古锡林河流域($9.33\ g\ kg^{-1}$),最小平均值存在于黄土高原安塞地区($2.78\ g\ kg^{-1}$)(表2)。土层深度为0~100 cm自然农田土壤有机碳含量变化范围较长期实验站农田土壤有机碳变化范围大,如长期实验站郑州地区土壤有机碳的变化区间为 $4.34\sim 5.65\ g\ kg^{-1}$,自然农田通辽和赤峰地区土壤有机碳的变化区间为 $4.40\sim 13.00\ g\ kg^{-1}$ 。干旱半干旱地区农田表层土壤有机碳得以积累,其主要原因是施肥和灌溉使干旱半干旱区农田植物生物量增加,从而增加了土壤表层有机质来源^[23],但是由于不同地区农田土壤管理措施的差异,农田土壤有机碳含量存在差异。



注：干旱半干旱区农田土壤有机碳数据包括自然农田剖面如张掖（a）、焉耆（b）、兰州（c）和长期定位站农田剖面如杨凌、郑州和乌鲁木齐（d） Note: The data of SOC in farmlands in the semi-arid and arid areas of China include contents of SOC in natural fields in Zhangye (a), Yanqi (b) and Lanzhou (c), and in the long-term experiment stations in Yangling, Zhengzhou, and Urumqi (d)

图2 中国干旱半干旱区典型点位农田土壤有机碳垂直剖面分布特征

Fig. 2 Profile distribution of the SOC content in typical cropland in arid/semiarid region of China

中国干旱半干旱区典型点位土壤剖面实测数据（张掖、兰州、焉耆、杨凌、郑州和乌鲁木齐）显示，自然农田土壤无机碳含量随着土壤深度增加呈现升高趋势（图3a~图3c）；长期定位站农田土壤无机碳含量则呈现下降趋势（图3d）。总体上垂直剖面土壤无机碳含量主要存在40~80cm处，但是不同地区农田土壤无机碳含量在各土层均值也存在很大差异，焉耆地区的农田土壤无机碳含量均值较高（26~36 g kg⁻¹），杨凌、郑州与乌鲁木齐的农田土壤无机碳含量均值较低（0~10 g kg⁻¹）。长期定位站点农田土壤无机碳含量随着土层深度增加而降低的原因有待进一步研究。

中国干旱半干旱区不同区域农田土壤无机碳含量均值差异相对较大，较高值存在于新疆焉耆盆地（30.12 g kg⁻¹）以及黄土高原富县地区（22.42

g kg⁻¹），较低值存在于内蒙古高原通辽（3.46 g kg⁻¹）以及新疆乌鲁木齐地区（4.33 g kg⁻¹）（表2）。农田土壤无机碳含量分布差异主要与气候条件、土壤理化性质以及农田管理措施有关^[11]。焉耆盆地的农田土壤无机碳均值高于其他地区，主要原因可能是较高的土壤pH和干旱的气候有利于碳酸盐在土壤表层的积累，同时农田土壤有机碳分解释放的CO₂和施肥、灌溉以及地下水额外带来了更多的Ca²⁺/Mg²⁺为农田无机碳的形成提供了充足的碳源和钙镁源^[7]。黄土高原地区（比如张掖、兰州、富县、固原、安塞和皋兰等地区）农田土壤无机碳平均含量高达12.53 g kg⁻¹~22.42 g kg⁻¹（表2），可能因为黄土高原地区的土壤呈弱碱/碱性，富含Ca²⁺/Mg²⁺的土壤环境有助于土壤无机碳的形成^[24-25]。

表2 中国干旱半干旱区100 cm土层深度农田土壤有机碳和无机碳含量的数据统计

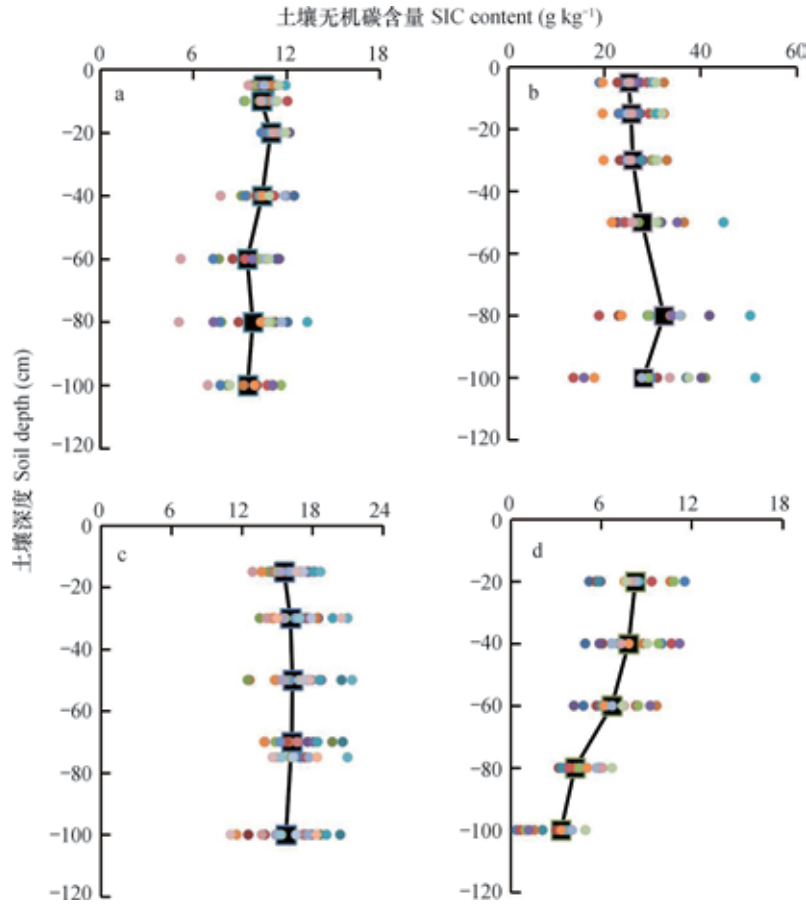
Table 2 Statistics of SOC and SIC contents in the 0 ~ 100 cm soil layer of the farmlands in the arid and semi-arid area of China

研究区域 Research region	农田有机碳含量			农田无机碳含量			文献 References
	SOC content of cropland (g kg ⁻¹)			SIC content of cropland (g kg ⁻¹)			
	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	
固原 Guyuan	—	—	—	18.95 ± 1.30	20.81	16.71	[14]
玛纳斯 Manasi	5.82 ± 1.51	7.08	4.15	—	—	—	[15]
皋兰 Gaolan	4.34 ± 0.24	6.07	2.77	12.53 ± 1.56	15.21	11.32	[16]
安塞 Ansai	2.78 ± 1.01	3.91	1.94	13.37 ± 0.40	13.76	12.97	[17]
富县 Fuxian	5.49 ± 3.34	7.85	3.12	22.42 ± 2.12	23.92	20.92	[18]
通辽和赤峰 Tongliao and Chifeng	9.33 ± 3.77	13.00	4.40	3.46 ± 0.54	3.95	2.78	[19]
焉耆 Yanqi	6.43 ± 1.36	8.92	4.57	30.12 ± 6.08	45.47	21.60	[7]
兰州 Lanzhou	4.99 ± 1.63	8.64	2.16	16.02 ± 2.20	19.75	10.22	[6]
张掖 Zhangye	8.44 ± 0.96	10.16	5.71	10.19 ± 1.07	11.32	8.00	未发表数据 Not published data
杨凌 Yangling	7.18 ± 0.88	8.38	6.25	6.92 ± 0.22	7.14	6.57	[11]
乌鲁木齐 Urumqi	7.32 ± 1.56	9.69	5.69	4.33 ± 0.79	4.80	2.93	[11]
郑州 Zhengzhou	5.13 ± 0.53	5.65	4.34	6.51 ± 0.46	7.16	6.00	[11]

2.2 农田土壤有机碳和无机碳密度

整合数据结果表明, 土壤深度为0 ~ 30 cm农田土壤无机碳密度(4.58 kg m⁻²)略大于有机碳密度(3.70 kg m⁻²), 30 ~ 100 cm农田土壤无机碳密度(11.25 kg m⁻²)明显大于有机碳密度(4.61 kg m⁻²); 0 ~ 100 cm农田土壤无机碳密度(15.83 kg m⁻²)显著高于有机碳密度(8.33 kg m⁻²), 约是有机碳密度的2倍(图4)。本研究区域中0 ~ 100 cm农田土壤有机碳密度高于以第二次全国土壤普查数据为基础估算得出西北典型地区农田土壤有机碳密度, 比如宁夏地区农田土壤有机碳密度(6.84 kg m⁻²)、青海地区农田土壤有机碳密度(7.45 kg m⁻²)和新

疆地区农田土壤有机碳密度(5.74 kg m⁻²)^[26]。西北干旱半干旱区在近20年间农田土壤有机碳密度有所增加, 主要原因可能是秸秆还田、有机肥的施用以及灌溉等农田管理措施影响土壤有机碳的转化与累积^[8-9]。干旱半干旱地区土壤深度为0 ~ 100 cm农田土壤无机碳密度(15.83 kg m⁻²)明显高于以第二次全国土壤普查数据为基础估算得出的全国农田土壤无机碳密度均值(6.41 kg m⁻²)^[27], 接近于西北农田地区土壤无机碳密度的最高取值范围15 ~ 18 kg m⁻²^[10]。西北干旱半干旱区在近20年间农田土壤无机碳密度也有所增加, 可能与农田土壤管理措施以及与有机碳之间的转换有关^[28], 但是目前



注：干旱半干旱区农田土壤无机碳数据包括自然农田剖面如张掖（a）、焉耆（b）、兰州（c）和长期定位站农田剖面如杨凌、郑州和乌鲁木齐（d） Note: The data of SOC in farmlands in the semi-arid and arid areas of China include contents of SOC in natural fields in Zhangye (a), Yanqi (b) and Lanzhou (c), and in the long-term experiment stations in Yangling, Zhengzhou, and Urumqi (d)

图3 中国干旱半干旱区典型点位农田土壤无机碳垂直剖面分布特征

Fig. 3 Profile distribution of SIC content in typical farmland in the arid/semiarid regions of China

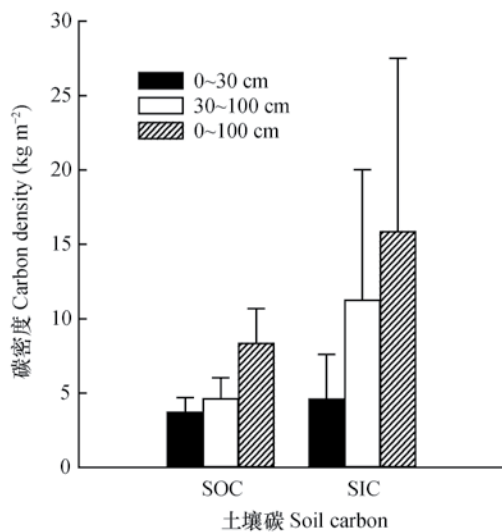


图4 在0~30 cm、30~100 cm和0~100 cm土层下农田土壤有机碳和无机碳密度的均值

Fig. 4 Mean SOC and SIC densities in farmlands in the soil layers 0~30 cm, 30~100 cm and 0~100 cm in depth

农田土壤有机碳密度与无机碳密度之间的转换机制尚不明确^[11-12]。

农田表层土壤中有有机碳密度所占1m总有机碳密度的百分比（45%）明显高于无机碳占1m总无机碳的百分比（29%），农田深层土壤中无机碳密度所占100 cm总无机碳密度的百分比（71%）明显高于有机碳占100 cm总有机碳的百分比（56%）。农田土壤无机碳密度在剖面中呈随土层深度增加而增加的趋势，这与多数结论相一致，即表层农田土壤有机碳的分解对以碳酸盐为主要存在形式的表层土壤无机碳的溶蚀具有驱动作用，随着水分的移动使得部分土壤无机碳迁移至土壤的较深层^[29]。土壤表层有机碳密度低于底层有机碳密度，主要是由于底层土壤较少受到人为活动的影响，其有机碳损失减少，还可以通过淋溶作用得到表层土壤有机碳的补充，从而底层的有机碳含量比较高，这与

Zhang等^[6]所得结论相一致。

2.3 土壤理化性质与碳密度的相关关系

土壤容重和土壤pH是影响农田土壤碳含量的重要因素,综合中国干旱半干旱区土壤碳和土壤pH数据,各剖面土壤pH在8~9之间,农田有机碳密度随pH升高而降低($R^2 = 0.61$, $p < 0.01$) (图5a),农田无机碳密度随pH升高而升高($R^2 = 0.56$, $p < 0.01$) (图5b)。土壤的酸碱环境会影响农田土壤碳的溶解和累积的过程,已有研究表明中国北方的碱性农田中土壤无机碳的累积十分明显^[11]。

土壤容重与农田土壤碳密度之间同样存在显著地相关性:随土壤容重的升高,农田土壤有机碳密

度呈下降趋势($R^2 = 0.64$, $p < 0.01$) (图5c),而无机碳密度呈上升趋势($R^2 = 0.63$, $p < 0.01$) (图5d)。土壤容重是土壤紧实度的指标之一,以机械阻力的形式影响农作物的生长,间接影响农田土壤碳含量的分布^[30]。各剖面的农田土壤容重差异较小,主要集中在 $1.3 \sim 1.4 \text{ g cm}^{-3}$,表层土壤容重略微低于深层土壤容重。中国农田表层土壤容重一般为 $1.0 \sim 1.3 \text{ g cm}^{-3}$,土壤越深容重越大,可达 $1.3 \sim 1.6 \text{ g cm}^{-3}$ ^[31]。本文研究区域表层农田土壤容重略大于中国农田土壤容重,主要原因是由于研究区域多处于干旱半干旱环境下,相对中国南部的农田土壤含水量较少,土壤毛管孔隙度孔隙度较大。

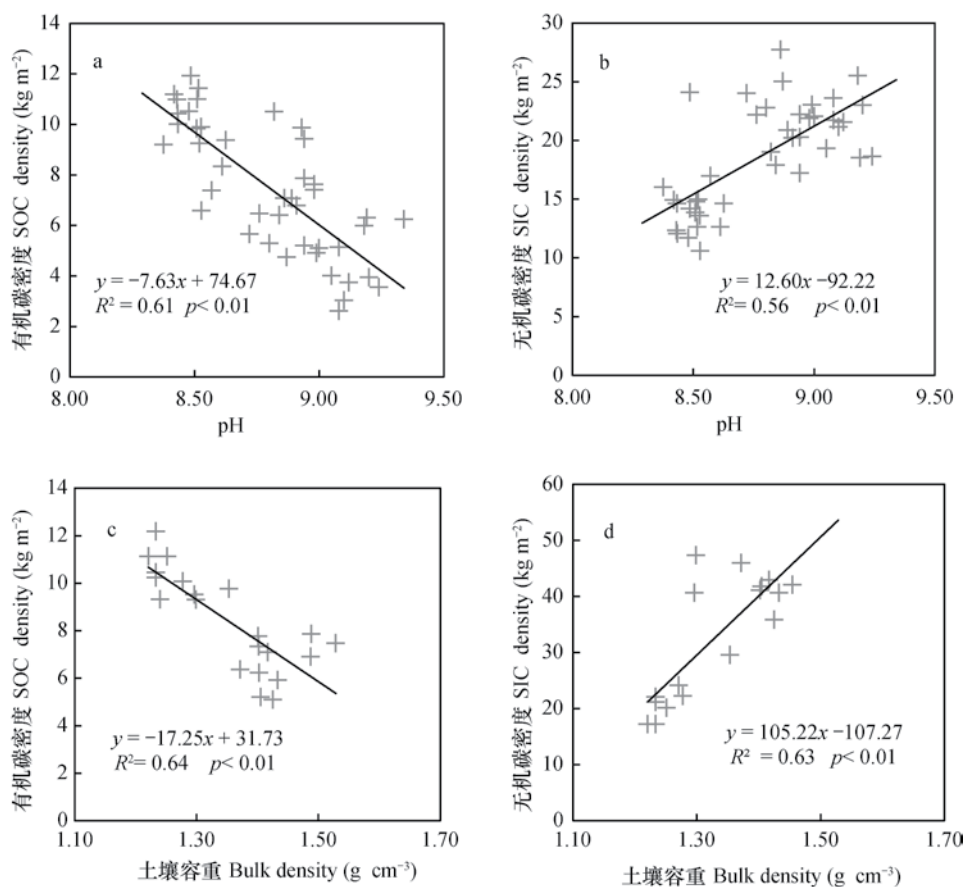


图5 中国干旱半干旱地区农田土壤理化性质与碳密度的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of soil properties and soil carbon in the arid and semi-arid area of China

3 结 论

通过对中国干旱半干旱区农田土壤有机碳和无机碳的数据整合分析表明,土壤有机碳含量与无机碳含量在剖面分布上的分布存在明显的差异:有机

碳随土壤深度增加呈现下降的趋势,可能主要与生物量以及分解速率等相关;无机碳含量随土壤深度的变化在不同区域受农田灌溉、施肥与土壤属性的影响,呈现不同的变化趋势,长期施肥灌溉等农田土壤管理措施有助于农田无机碳的累积。中国干旱

半干旱区0~100 cm农田土壤无机碳储量大约是土壤有机碳储量的两倍,如果在碳收支平衡计算方面忽略无机碳储量,可能导致对农田生态系统碳汇、土壤固碳潜力的低估。中国干旱半干旱区农田土壤pH和土壤容重是影响无机碳和有机碳空间分布的重要因素。

参考文献

- [1] Eswaran H, Reich P F, Kimble J M, et al. Global carbon stocks//Global climate change and pedogenic carbonates. USA: Lewis Publishers, 2000: 15—25
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (2): 151—163
- [3] Schlesinger WH. Global change ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21 (6): 348—351
- [4] 曾骏, 董博, 张东伟, 等. 不同施肥方式对灌漠土土壤有机碳、无机碳和微生物量碳的影响. *水土保持通报*, 2013, 33 (2): 35—38
- Zeng J, Dong B, Zhang D W, et al. Effect of long-term fertilization on organic, inorganic and microbial biomass carbon in irrigated desert soils (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33 (2): 35—38
- [5] 曾骏, 郭天文, 包兴国, 等. 长期施肥对土壤有机碳和无机碳的影响. *中国土壤与肥料*, 2008 (2): 11—14
- Zeng J, Guo T W, Bao X G, et al. Effect of soil organic carbon and soil inorganic carbon under long-term fertilization (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008 (2): 11—14
- [6] Zhang F, Wang X, Guo T, et al. Soil organic and inorganic carbon in the loess profiles of Lanzhou area: Implications of deep soils. *Catena*, 2015, 126: 68—74
- [7] Wang J P, Wang X J, Zhang J, et al. Soil organic and inorganic carbon and stable carbon isotopes in the Yanqi Basin of northwestern China. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66 (1): 95—103
- [8] 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
- Huang Y, Sun W J. The changes of soil organic carbon content of farmland surface in mainland China during the past 20 years (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (7): 750—763
- [9] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17 (2): 67—80
- [10] Wu H B, Guo Z T, Gao Q H, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129 (4): 413—421
- [11] Wang X J, Xu M G, Wang J P, et al. Fertilization enhancing carbon sequestration as carbonate in arid cropland: assessments of long-term experiments in northern China. *Plant and Soil*, 2014, 380 (1/2): 89—100
- [12] 潘根兴. 中国干旱性地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义. *南京农业大学学报*, 1999, 22 (1): 51—57
- Pan G X. Pedogenic carbonates in arid soils of China and the significance in terrestrial carbon transfer (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, 22 (1): 51—57
- [13] Xie X H, Liang X L, Yao Y J, et al. Detection and attribution of changes in hydrological cycle over the Three-North region of China: Climate change versus afforestation effect. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 203 (7): 74—87
- [14] Liu W G, Wei J, Cheng J M, et al. Profile distribution of soil inorganic carbon along a chronosequence of grassland restoration on a 22-year scale in the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 2014, 121 (7): 321—329
- [15] 王泽, 颜安, 张文太. 区域绿洲农田土壤有机碳分布及其影响因子研究. *农业资源与环境学报*, 2014 (4): 308—312
- Wang Z, Yan A, Zhang W T. Distribution of soil organic carbon and the influencing factors in an oasis farmland area (In Chinese). *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014 (4): 308—312
- [16] 张丽华, 谢忠奎, 王亚军, 等. 陇中黄土高原土地利用变化对土壤有机碳、无机碳的影响. *土壤通报*, 2013, 44 (2): 369—375
- Zhang L H, Xie Z K, Wang Y J, et al. The impact of land use change on soil organic carbon and soil inorganic carbon contents at Loess Plateau in Longzhong (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (2): 369—375
- [17] 张瑞. 黄土高原无机碳密度分布、储量及其影响因素. 陕西杨凌: 中国科学院研究生院 (教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012
- Zhang R. Spatial distribution of soil inorganic carbon density, stock and its affecting factors in the Loess Plateau (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment Chinese Academy of Science and Ministry

- of Water Resources), 2012
- [18] Chang R Y, Fu B J, Liu G H, et al. The effects of afforestation on soil organic and inorganic carbon: A case study of the Loess Plateau of China. *Catena* 2012, 95 (3) : 145—152
- [19] Wang Z P, Han X G, Chang S X, et al. Soil organic and inorganic carbon contents under various land uses across a transect of continental steppes in Inner Mongolia. *Catena*, 2013, 109 (10) : 110—117
- [20] Li Z P, Han F X, Su Y, et al. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China. *Geoderma*, 2007, 138 (1/2) : 119—126
- [21] Charley J L, West N E. Micro-patterns of nitrogen mineralization activity in soils of some shrub-dominated semi-desert ecosystems of Utah. *Soil Biology&Biochemistry*, 1977, 9 (5) : 357—365
- [22] 荣井荣, 李晨华, 王玉刚, 等. 长期施肥对绿洲农田土壤有机碳和无机碳的影响. *干旱区研究*, 2012, 29 (4) : 592—597
Rong J R, Li C H, Wang Y G, et al. Effect of long-term fertilization on soil organic carbon and soil inorganic carbon in oasis cropland (In Chinese). *Arid Zone Research*, 2012, 29 (4) : 592—597
- [23] Khan S, Hanjra M A, Mu J X. Water management and crop production for food security in China: A review. *Agriculture Water Management*, 2009, 96 (3) : 349—360
- [24] Lal R, Kimble J M. Pedogenic carbonate and the global carbon cycle//Lal R, Kimble J M, Eswaran H, et al. *Global climate change and pedogenic carbonates*. Boca Raton: CRC Press, 2000: 1—14
- [25] Tan W F, Zhang R, Cao H, et al. Soil inorganic carbon stock under different soil types and land uses on the Loess Plateau region of China. *Catena*, 2014, 121 (7) : 22—30
- [26] 梁二, 蔡典雄, 代快, 等. 中国农田土壤有机碳变化: II 土壤固碳潜力估算. *中国土壤与肥料*, 2010 (6) : 87—92
Liang E, Cai D X, Dai K, et al. Change in soil organic carbon in cropland of China: II Estimation of soil carbon sequestration potentials (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010 (6) : 87—92
- [27] Mi N, Wang S, Liu J, et al. Soil inorganic carbon storage pattern in China. *Global Change Biology*, 2008, 14 (10) : 2380—2387
- [28] Wang X J, Wang J P, Xu M G, et al. Carbon accumulation in arid croplands of northwest China: Pedogenic carbonate exceeding organic carbon. *Scientific Reports*, 2015, 5, DOI: 10.1038/srep11439
- [29] 黄斌, 王敬国, 金红岩, 等. 长期施肥对我国北方潮土碳储量的影响. *农业环境科学学报*, 2006, 25 (1) : 161—164
Huang B, Wang J G, Jing H Y, et al. Effects of long-term application fertilizer on carbon storage in calcareous meadow soil (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25 (1) : 161—164
- [30] Bengough A G, Mackenzie C J, Elangwe H E. Biophysics of the growth-responses of pea roots to changes in penetration resistance. *Plant and Soil*, 1994, 167 (1) : 135—141
- [31] 郑存德. 土壤物理性质对玉米生长影响及高产农田土壤物理特征研究. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012
Zheng C D. *Research of physical properties on maize growth and properties of high yield maize farmland (In Chinese)*. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012

Profile Distribution of Soil Inorganic and Organic Carbon in Farmland in Arid and Semi-Arid Areas of China

GUO Yang¹ LI Xianglan^{1†} WANG Xiujun¹ WANG Jiaping² WANG Xufeng³
MA Mingguo⁴ XIE Xianhong⁵ SUN Minmin¹

(1 College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

(3 Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(4 School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(5 School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract 【Objective】 The objective of this study was to investigate distribution of soil inorganic (SIC) and soil organic carbon (SOC) in farmland in the arid and semi-arid areas of China, and analyze factors influencing SIC and SOC stocks. 【Method】 Data of SOC and SIC contents in farmland were collected from some articles published after 2000 and some unpublished sources, involving 178 soil profiles (0 ~ 100 cm in depth) located in natural farmlands and long-term field stations. Linear regression analyses of the data were performed to evaluate relationships of SIC and SOC with soil physical properties (i.e. pH, and bulk density) with Sigmaplot (version 12.5) and ArcMAP (version 10.1). 【Result】 Results show that SOC content decreased with soil depth. However, vertical distribution of SIC content varied from field to field. In general, SIC content increased with soil depth in natural farmlands, but decreased in the fields of the long-term experiment stations, which indicates that climate condition (i.e. annual precipitation) and soil properties might be the factors influencing vertical distribution of SIC. On average, the SOC and SIC of these soil profiles was 8.33 and 15.83 kg m⁻², respectively, in density. SOC was mainly accumulated in topsoil (0 ~ 30 cm), whereas SIC in subsoil (30 ~ 100 cm). The SOC in topsoil accounted for 45% of the total in profile 100 cm in depth, whereas SIC in subsoil accounted for 71% of the total. Soil bulk density and soil pH were important factors influencing SOC and SIC stocks. Significantly negative correlations of SOC density with soil pH ($R^2 = 0.61$, $p < 0.01$) and soil bulk density ($R^2 = 0.64$, $p < 0.01$) were found in this study, while profoundly positive relationships of SIC density with soil pH ($R^2 = 0.56$, $p < 0.01$) and soil bulk density ($R^2 = 0.63$, $p < 0.01$) were. 【Conclusion】 The study on profile distribution and total SOC and SIC stocks in farmlands in the arid and semi-arid areas of China may provide some basic data and theoretical support to carbon budgeting in inland terrestrial ecosystems.

Key words Soil inorganic carbon; Soil organic carbon; Soil carbon stock; Arid and semi-arid area; Cropland

(责任编辑: 卢 萍)