

黄土母质典型农田土壤无机碳与有机碳的关系及影响因素^①

墨美玲¹, 王秀君^{1*}, 徐明岗^{2*}, 卢同平³

(1 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2 山西农业大学生态环境产业技术研究院/土壤环境与养分资源山西省重点实验室, 太原 030031; 3 北京大学城市与环境学院/北京大学碳中和研究院, 北京 100871)

摘要: 针对黄土母质农田土壤无机碳(SIC)的空间异质性及其与土壤有机碳(SOC)的复杂关系, 本研究搜集了黄土高原和华北平原地区同时包含有 SIC 和 SOC 的 0~100 cm 农田土壤剖面观测数据, 并经过整理和标准化处理, 获得了具有代表性的 SIC 和 SOC 土壤剖面数据, 开展了对黄土母质农田 SIC 和 SOC 的空间分布特征、二者之间关系及影响因素的分析。结果显示, 两个区域 0~100 cm 土层的 SOC 储量相近(华北平原 6.6 kg/m², 黄土高原 6.7 kg/m²)。但 SIC 储量存在明显差异: 在 0~40 cm 土层中, 华北平原的 SIC 储量(5.9 kg/m²)显著低于黄土高原(8.9 kg/m²); 相反, 在 40~100 cm 土层中, 华北平原的 SIC 储量(10.7 kg/m²)显著高于黄土高原(8.8 kg/m²)。华北平原表层 SIC 水平偏低的点位主要分布在耕作历史较长的河北平原, 长期农作施肥引起上层土壤酸化导致 SIC 水解; 黄土高原表层 SIC 水平偏高的农田多位于侵蚀程度高、肥力水平低的西部区域, 侵蚀过程使得 SIC 含量较高的亚表层土壤露出地表。华北平原农田 0~100 cm 土层中的 SIC 与 SOC 呈显著正相关关系($P<0.01$), 黄土高原 0~100 cm 土层中的 SIC 与 SOC 呈负相关关系。综上, 华北平原 SIC 储量及其与 SOC 的关系主要受施肥、灌溉等农田管理措施的影响, 而黄土高原则与其不同程度的土壤侵蚀导致的土壤碳在空间上的重新分配有关。

关键词: 土壤无机碳; 土壤有机碳; 黄土母质; 空间异质性; 华北平原; 黄土高原

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Relationship of Soil Inorganic and Organic Carbon and Main Regulating Factors in Typical Loess Farmlands

MO Meiling¹, WANG Xiujun^{1*}, XU Minggang^{2*}, LU Tongping³

(1 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 Shanxi Province Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Institute of Eco-environment and Industrial Technology, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 3 Institute of Carbon Neutrality, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: To better understand the spatial heterogeneity of soil inorganic carbon (SIC) in loess parent material farmlands and its complex relationship with soil organic carbon (SOC), field data from farmland sites containing both SIC and SOC from 0 to 100 cm depth across the Loess Plateau and North China Plain were collected. After reorganizing and standardizing, the representative SIC and SOC soil profile datasets were obtained and utilized to analyze the spatial distribution characteristics of SIC and SOC, their interrelationship, and influencing factors in the loess farmlands. The results showed that similar mean SOC stock in the 0–100 cm soil layer across the two regions (6.6 kg/m² in the North China Plain and 6.7 kg/m² in the Loess Plateau). However, there were significant differences in SIC stock, in the 0–40 cm soil layer, SIC stock in the North China Plain (5.9 kg/m²) was significantly lower than in the Loess Plateau (8.9 kg/m²); conversely, in the 40–100 cm soil layer, SIC stock in the North China Plain (10.7 kg/m²) was significantly higher than in the Loess Plateau (8.8 kg/m²). Sites with lower surface SIC levels in the North China Plain were mainly distributed in the Hebei Plain, with longer farming history, which might experience SIC dissolution in association with fertilization. Sites with higher surface SIC levels in the Loess Plateau were mostly found in low fertility soils located in western regions experiencing higher erosion with high-SIC subsoil exposed. A significant positive correlation ($P<0.01$)

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42177341)资助。

* 通信作者(xwang@bnu.edu.cn; xuminggang@caas.cn)

作者简介: 墨美玲(2000—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事中国北方农田土壤碳循环研究。E-mail: 202121490020@mail.bnu.edu.cn

was found between SIC and SOC in the 0–100 cm soil layer of the North China Plain, while a negative correlation was observed in the Loess Plateau 0–100 cm soil layer. In summary, the SIC stock and its relationship with SOC in the North China Plain are mainly influenced by agricultural management practices such as fertilization and irrigation. In contrast, in the Loess Plateau, it is related to the spatial redistribution of soil carbon due to varying degrees of soil erosion.

Key words: Soil inorganic carbon; Soil organic carbon; Loess soils; Spatial heterogeneity; North China Plain; Loess Plateau

土壤碳库是陆地生态系统的碳库之最,全球 1 m 土层中土壤碳库总储量达 2 157 ~ 2 293 Pg, 约为大气碳库的 2 倍 ~ 3 倍、植被碳库的 4 倍 ~ 5 倍^[1-2], 在全球碳循环和气候变化中起着重要作用^[2]。土壤碳库由土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)和土壤无机碳(Soil inorganic carbon, SIC)组成,我国 1 m 土层内二者储量分别为 77 ~ 99 Pg^[3-4]和 55 ~ 78 Pg^[5-6]。可见,目前对我国土壤碳储量的估算还存在较大不确定性,国内外对 SOC 的研究比较丰富,但对 SIC 的研究和认识仍显不足。

大量研究表明,我国 SOC 和 SIC 的空间分布特征存在显著差异,并受气候条件的影响^[6-7]。SOC 的高值区主要分布在东北地区 and 青藏高原,而低值区则多位于西北地区^[4]。相较之下, SIC 在西北干旱和半干旱地区储量最丰富,华北和东北半湿润地区以及青藏高原地区 SIC 水平也较高,而南方湿润地区的 SIC 储量最低^[5, 7]。值得注意的是,在我国北方的主要分布区, SIC 的密度可以达到 SOC 的 2 倍 ~ 10 倍^[8-9]。SOC 和 SIC 的空间分布差异除了受气候因素影响外,还与土壤类型/母质、植被类型/土地利用方式等因素密切相关。例如, SOC 通常在黑土、黑钙土等土壤类型中较高^[10],在森林、草地、农田等植被类型中也普遍高于灌丛和荒漠植被^[3, 11]。SIC 的主要成分是碳酸钙,常见于土壤 pH 较高的灰漠土和黄土母质的土壤中^[12]。此外,有研究表明,我国北方农田中的 SIC 储量高于其他土地利用类型^[8],但也有研究发现在黄土高原农田恢复成天然植被后, SIC 在各个土层中都有不同程度的增长^[13]。近年来针对我国 SIC 的研究发现,我国农田表层土壤 SIC 储量较 1980 年代减少了约 9.0%^[14],这与氮肥的长期施用存在很大关系^[15-16],但也有研究发现长期配施有机肥、灌溉等农业活动可以显著增加次生碳酸盐(Pedogenic inorganic carbonate, PIC)的积累^[17-18]。

近十年来,国内对 SIC 和 SOC 之间关系开展了一系列研究,其中针对我国北方多种土地利用方式下土壤碳的研究发现, SIC 与 SOC 之间存在显著正相关关系^[19]。在农田土壤中,华北平原 SIC 和 SOC 多呈正相关关系^[20-21],这与其悠久的耕作历史及较高的

生产力水平有关。长期施肥、灌溉可提供钙/镁源,同时高产农田土壤有较丰富的碳源,二者能够促进 SIC 的形成和积累^[22]。而黄土高原 SIC 和 SOC 则表现出负相关关系^[13, 23],这可能是由于强烈的土壤侵蚀伴随的土壤碳在水平和垂直方向上再分配造成的^[23-24]。

一般情况下,土壤剖面中 SIC 的储量受成土母质的影响很大。黄土高原和华北平原均属于典型的黄土母质分布区,但两个地区的农田中 SIC 含量存在显著差异,这可能与土壤形成过程、气候条件以及农田管理措施等有关。围绕这一科学问题,本研究通过搜集、整理我国黄土母质区域典型农田土壤剖面中的 SIC 和 SOC 的配对数据,对比分析黄土高原和华北平原不同土层土壤碳的分布特征,系统地阐明了影响黄土母质区域土壤碳空间分布的主控因素,并进一步探讨了该区域典型农田 SIC 和 SOC 之间的关系及其主要影响因素。研究成果将有望进一步深化对我国北方农田土壤碳组分的耦合机制的理解,并为寻求有效的土壤固碳策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

利用中国知网和 Web of Science 文献数据库进行文献检索,设置检索关键词为“土壤无机碳(SIC)、土壤有机碳(SOC)、中国北方农田土壤碳”,发表时间为“2000—2023 年”。初步筛选出相关文献 154 篇,再根据以下 4 个标准进行进一步筛选:①采样区域为黄土高原或华北平原;②土壤剖面深度至少为 100 cm;③土壤剖面各深度均可获得 SOC 和 SIC 含量;④SOC 和 SIC 数据均为实测数据,而非再分析数据。最后,共收集到 145 个满足以上标准的土壤剖面数据,其分布情况如图 1A。数据库还获取了大部分站点的土壤类型、土壤 pH、土壤容重、年平均降水量、年平均气温等信息。对于缺乏土壤容重数据的部分点位,文献中包含表层土壤容重的使用表层土壤容重来计算其他土层土壤碳储量,文献中不包含土壤容重数据则从该点位采样年份相近的其他文献中查找并进行计算。根据所建立的数据库,本研究黄土高

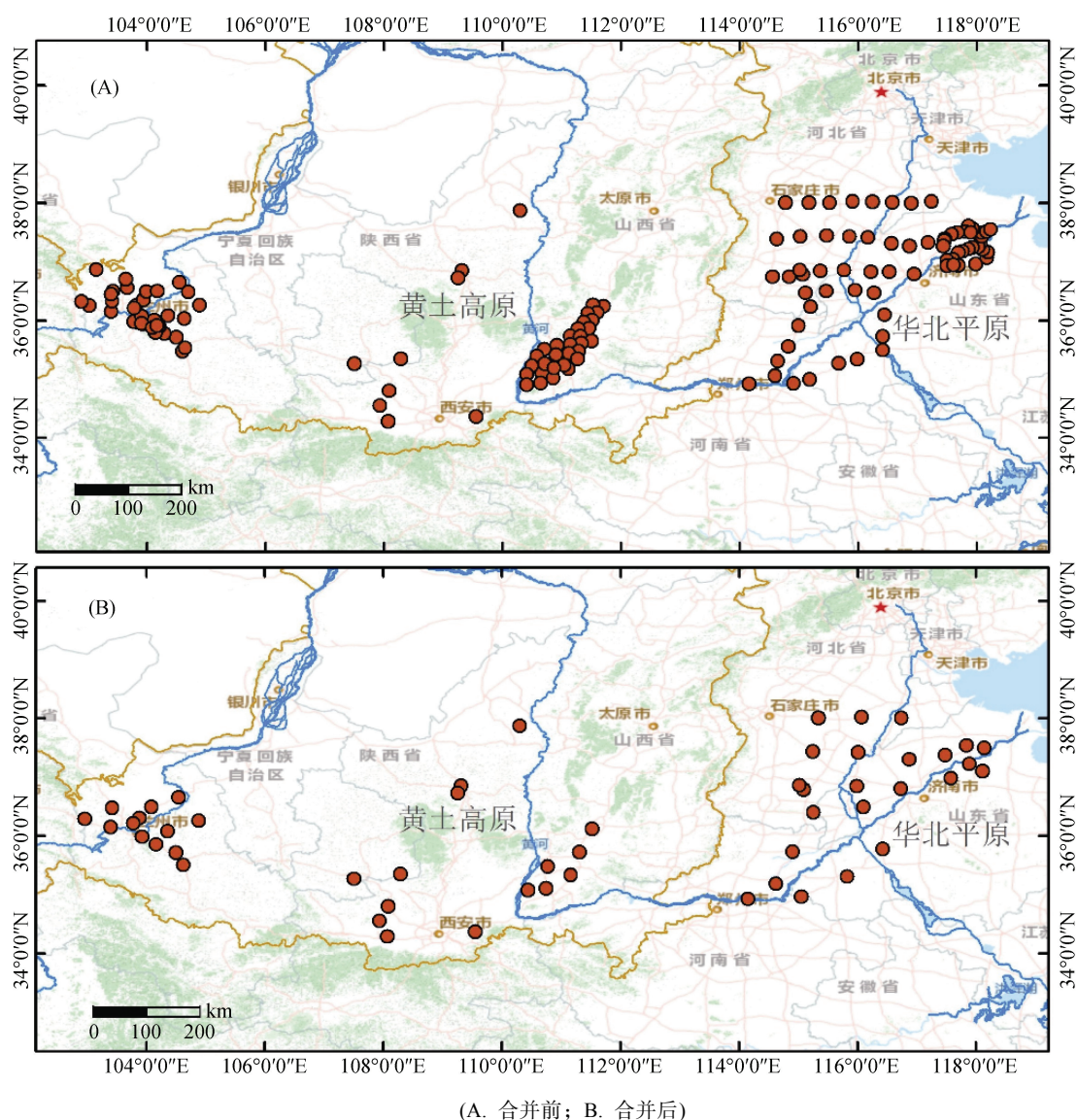


图 1 北方黄土母质区域所获得农田点位空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of sampled soil profiles in loess farmlands of north China

原点位年均降水量 250 ~ 600 mm, 年均温 8 ~ 12 °C; 华北平原点位年均降水量 500 ~ 650 mm, 年均温 12 ~ 14 °C。

1.2 数据处理

为了方便比较和分析,对 145 个土壤剖面进行了分层标准化处理,使用插值法估算 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 70 和 70 ~ 100 cm 土层 SOC、SIC 含量。由于收集的文献中土壤剖面的数据质量和处理程度不同,部分数据为对研究区进行多点采样、处理、分析后得到的具有区域代表性的土壤剖面,而部分数据为采样时获得的原始土壤剖面。数据处理程度不一致一方面导致不同土壤剖面对区域的代表性不同,另一方面也使得数据空间分布的密度差异很大。为解决这一问题,本研究采取了以下措施来确保数据的代表性和可靠

性:首先,将空间距离 ≤ 30 km 且土壤理化性质相似的剖面合并,以提高数据的区域代表性;其次,考虑到 SIC 受水文过程的影响较大,即使空间距离 ≤ 30 km,也不合并河流两侧的点,以保持数据的真实性和准确性。通过处理,将 145 个原始土壤剖面精简为 52 个具有代表性的农田土壤剖面(图 1B),为后续的土壤特性分析和比较提供了高质量的数据集。

1.3 数据分析

使用 Origin 2021 的“图像数字化”功能对文献中的图形数据信息进行提取,运用 Excel 2021 建立数据库,用 Matlab 2022、SPSS 16.0 及 ArcMap 10.3 进行数理统计分析及相关图表绘制。文中用变异系数(Coefficient of variation, CV)表示 SOC 和 SIC 空间分布的异质性大小。采用 LSD 法进行多重比较分析

($P=0.05$)。

SOC 和 SIC 储量(kg/m^2)的计算方法如下:

$$\text{SOC} = \text{BD}_i \times \text{SOCC}_i \times h_i \times 0.1 \quad (1)$$

$$\text{SIC} = \text{BD}_i \times \text{SICC}_i \times h_i \times 0.1 \quad (2)$$

式中: BD_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm^3); h_i 为第 i 层土壤深度 (cm); SOCC_i 和 SICC_i 分别代表第 i 层土壤有机碳和无机碳含量 (g/kg)。

2 结果

2.1 黄土母质区域典型农田土壤 pH 空间分布特征

研究区表层土壤 pH 的空间差异较大, 其中华北平原的空间异质性相较黄土高原南部区域更大(图 2)。华北平原土壤 pH 为 6.9~8.7, 其中黄河沿线区域的土壤 pH(6.9~8.4)低于河北平原(7.7~8.7)。可以看出, 华北平原黄河沿线土壤 pH 存在较大空间差异, 如郑州市到济南市河段附近土壤 pH 约为 7.6, 明显低于黄河三角洲上游的 8.1。黄土高原土壤 pH 略高于华北平原, 大部分地区土壤 pH 介于 8.1~8.9, 其中西部和东部黄河附近土壤 pH 均高于 8.4, 而中部区域土壤 pH 普遍偏低, 大多为 8.0~8.4。

2.2 黄土母质区域典型农田土壤有机碳空间分布特征

黄土母质区域农田 SOC 在各土层都存在较大的空间异质性, 其中黄土高原的空间异质性明显大于华

北平原(表 1)。黄土高原 SOC 的空间异质性在中南部区域最大($\text{CV}=57\% \sim 64\%$), 西部区域次之($\text{CV}=30\% \sim 39\%$), 东南部区域最小($\text{CV}=24\% \sim 27\%$)。华北平原 SOC 的空间异质性($\text{CV}=10\% \sim 29\%$)与黄土高原东南部相近, 其中黄河沿线 SOC 空间异质性较大, 在 0~20 cm 和 20~40 cm($\text{CV}=23\% \sim 24\%$)大于河北平原($\text{CV}=10\% \sim 14\%$)。

如图 3 所示, 黄土母质农田中, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中 SOC 水平较高的区域均位于黄土高原的东南部, 而较低的区域在 0~20 cm 土层主要位于黄土高原西部和中南部, 在 20~40 cm 则主要位于华北平原黄河沿线。在 0~20 cm 土层, 黄土高原东南部区域平均 SOC 储量高达 $4.2 \text{ kg}/\text{m}^2$, 远高于其西部($2.2 \text{ kg}/\text{m}^2$)和中南部($1.9 \text{ kg}/\text{m}^2$); 而华北平原黄河沿线($2.6 \text{ kg}/\text{m}^2$)及河北平原($2.9 \text{ kg}/\text{m}^2$)处于中等(表 1)。在 20~40 cm 土层, 黄土高原东南部平均 SOC 储量($2.7 \text{ kg}/\text{m}^2$)是华北平原黄河沿线($1.1 \text{ kg}/\text{m}^2$)的 2 倍多, 而中南部($1.4 \text{ kg}/\text{m}^2$)和西部($1.5 \text{ kg}/\text{m}^2$)的 SOC 储量也略高于华北平原。就 40~100 cm 土层而言, 黄土母质区域 SOC 的空间分布与 0~20 和 20~40 cm 土层有明显差异, 其中 SOC 储量最高的区域在河北平原($2.9 \text{ kg}/\text{m}^2$), 而华北平原黄河沿线($2.4 \text{ kg}/\text{m}^2$)与黄土高原西部($2.4 \text{ kg}/\text{m}^2$)、中南部($2.5 \text{ kg}/\text{m}^2$)和东南部($2.3 \text{ kg}/\text{m}^2$)的 SOC 储量相近。

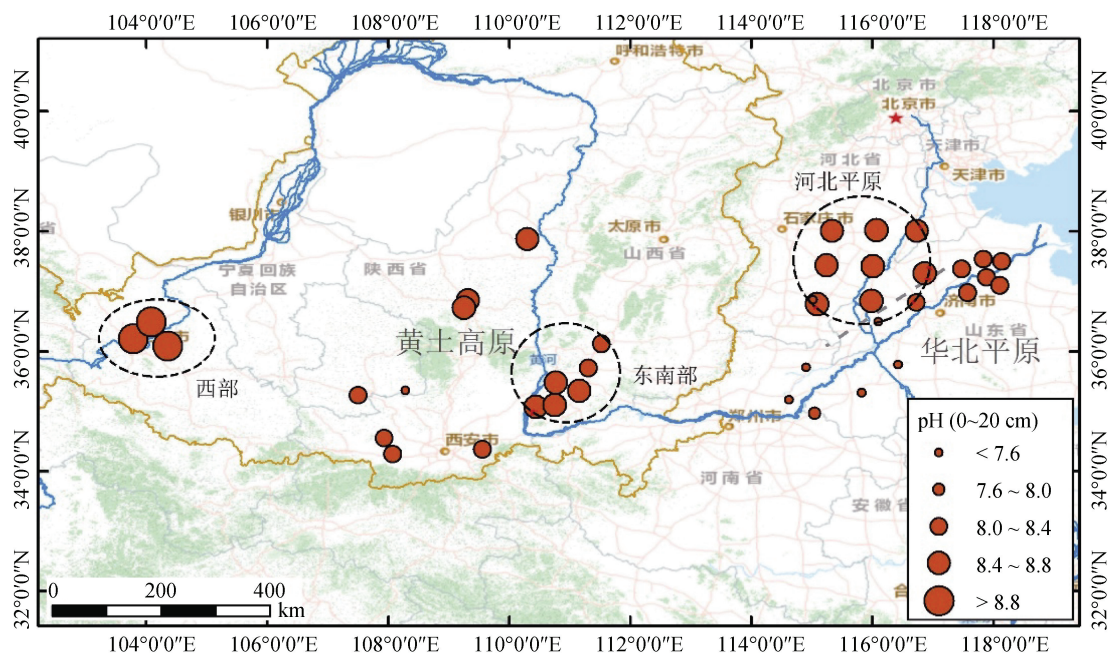


图 2 北方黄土母质区域典型农田表层土壤 pH

Fig. 2 Surface soil pH in typical loess farmlands of north China

表 1 黄土母质区域典型农田不同土层土壤碳描述性统计结果
Table 1 Statistics of soil carbon storages in different soil layers of typical croplands on loess parent materials

区域		土层 (cm)	SOC(kg/m ²)		SIC(kg/m ²)		SIC : SOC
			平均值 ± 标准差	CV(%)	平均值 ± 标准差	CV(%)	平均值 ± 标准差
华北平原	河北平原	0 ~ 20	2.9 ± 0.4	14	2.5 ± 0.3	11	0.9 ± 0.1
		20 ~ 40	1.4 ± 0.1	10	3.2 ± 0.2	7	2.3 ± 0.4
		40 ~ 100	2.9 ± 0.9	29	10.9 ± 2.9	27	3.8 ± 0.8
		0 ~ 100	7.3 ± 0.8	11	16.6 ± 3.2	19	2.3 ± 0.4
	黄河沿线	0 ~ 20	2.6 ± 0.6	23	2.8 ± 0.9	32	1.1 ± 0.3
		20 ~ 40	1.1 ± 0.3	24	3.1 ± 0.8	27	3.0 ± 1.1
		40 ~ 100	2.4 ± 0.6	25	10.6 ± 2.8	26	4.6 ± 1.4
		0 ~ 100	6.2 ± 1.0	16	16.5 ± 4.3	26	2.7 ± 0.7
黄土高原	西部	0 ~ 20	2.2 ± 0.7	30	5.1 ± 1.3	26	2.4 ± 0.6
		20 ~ 40	1.5 ± 0.5	36	5.7 ± 1.4	25	4.4 ± 2.5
		40 ~ 100	2.4 ± 0.9	39	11.1 ± 3.0	27	5.1 ± 1.8
		0 ~ 100	6.1 ± 1.2	20	21.8 ± 2.7	12	3.7 ± 0.8
	中南部	0 ~ 20	1.9 ± 1.1	60	3.4 ± 0.9	27	2.5 ± 1.3
		20 ~ 40	1.4 ± 0.8	57	3.2 ± 1.5	46	3.4 ± 2.6
		40 ~ 100	2.5 ± 1.6	64	6.7 ± 4.2	63	4.2 ± 3.4
		0 ~ 100	5.8 ± 2.9	50	13.3 ± 5.5	42	3.1 ± 2.1
	东南部	0 ~ 20	4.2 ± 1.0	24	4.0 ± 1.1	27	1.0 ± 0.4
		20 ~ 40	2.7 ± 0.7	27	4.3 ± 0.7	17	1.8 ± 0.8
		40 ~ 100	2.3 ± 0.5	24	7.0 ± 2.0	29	3.3 ± 1.5
		0 ~ 100	9.2 ± 2.2	24	15.2 ± 2.8	18	1.8 ± 0.6

2.3 黄土母质区域典型农田土壤无机碳空间分布特征

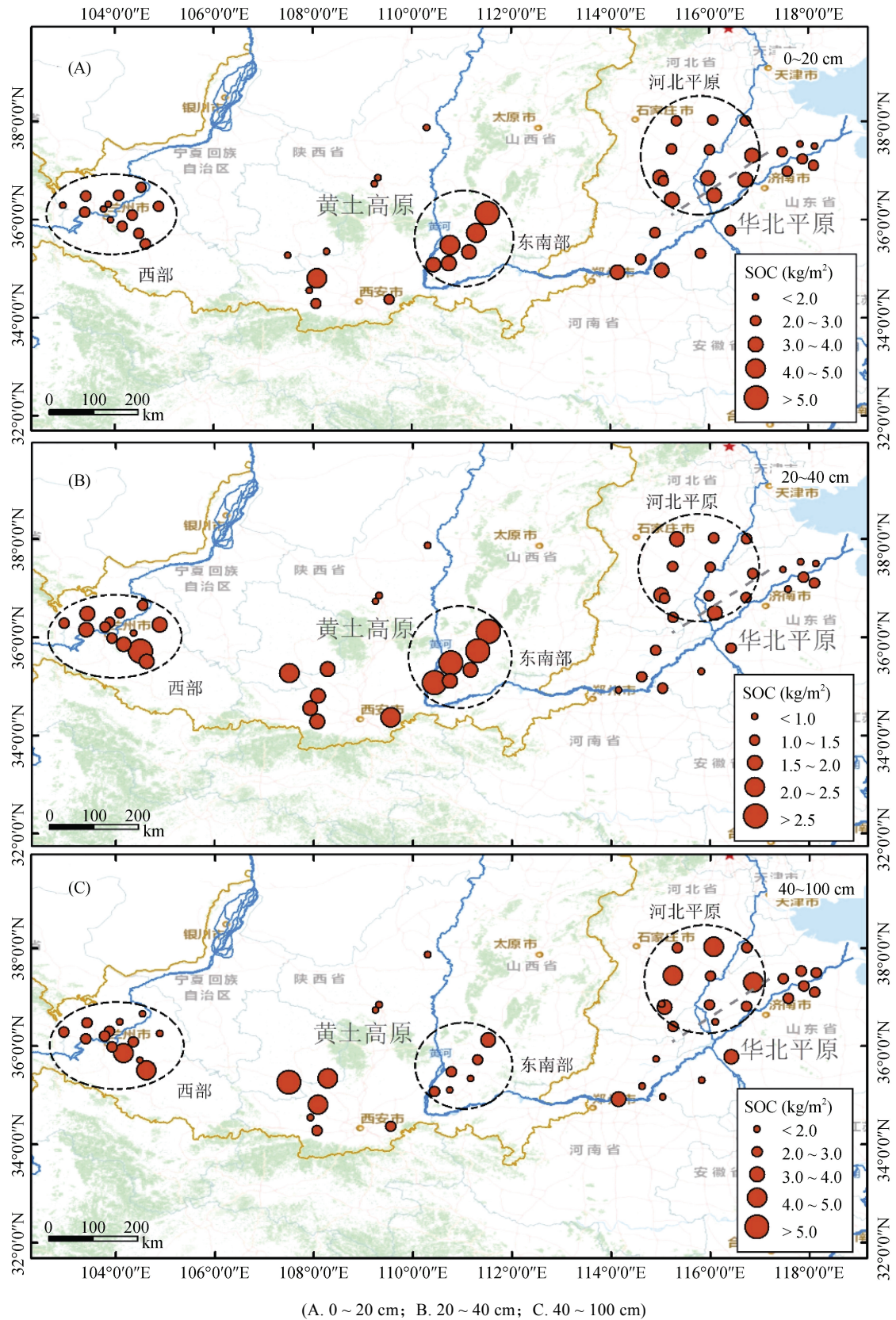
如图 4 所示，黄土母质区域各层 SIC 均存在较大的空间异质性。总体上，SIC 的空间分布特征在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层表现为西部明显高于东部，而在 40 ~ 100 cm 土层东部和西部之间无明显差异，均高于其他区域。就 SIC 空间异质性而言(表 2)，黄土高原中南部区域在各土层均为最大(CV=27% ~ 63%)，在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层中河北平原最小(CV=7% ~ 11%)，在 40 ~ 100 cm 土层中除东南部区域外其他几个区域相差不大(CV=26% ~ 29%)。

就 SIC 的空间分布而言，各土层储量最高的区域均位于黄土高原西部，在 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 100 cm 土层分别为 5.1、5.7、11.1 kg/m²(表 2)。而 SIC 储量最低的区域在不同土层中有所不同，0 ~ 20 cm 在河北平原(2.5 kg/m²)，20 ~ 40 cm 在华北平原黄河

沿线(3.1 kg/m²)，40 ~ 100 cm 土层在黄土高原中南部区域(6.7 kg/m²)。黄土高原东南部在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层的 SIC 储量分别为 4.0 和 4.3 kg/m²，均略高于黄土高原中南部区域。在 40 ~ 100 cm 土层，华北平原黄河沿线和河北平原的 SIC 储量分别为 10.6 和 10.9 kg/m²，略低于黄土高原西部，但显著高于黄土高原东南部(7.0 kg/m²)和中南部(6.7 kg/m²)。综上，SIC 的空间分布呈现出显著的地域差异，黄土高原西部为高值区，而河北平原和华北平原黄河沿线在表层土壤中相对较低。

2.4 黄土母质区域典型农田 SIC : SOC 分布特征

图 5 显示，黄土母质典型农田区域 SIC : SOC 呈现出明显的空间异质性，且不同土层之间差异较大。在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 100 cm 土层中，SIC : SOC 明显高于 0 ~ 20 cm 土层，这与深层土壤 SIC 较高且 SOC 较低有关。



(A. 0 ~ 20 cm; B. 20 ~ 40 cm; C. 40 ~ 100 cm)

图 3 黄土母质典型农田不同土层 SOC 储量分布

Fig. 3 Distributions of SOC storages in different soil layers of typical loess farmlands

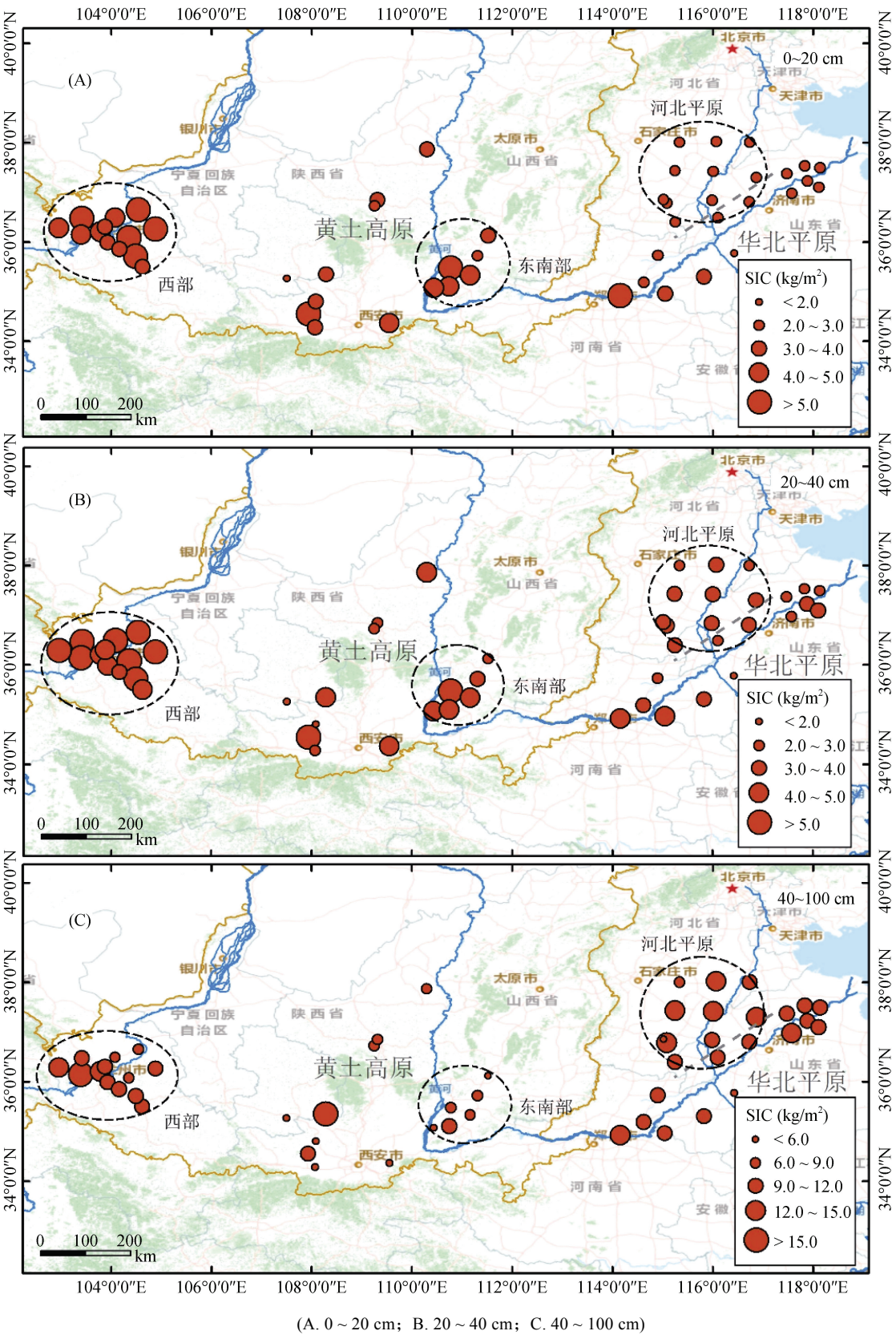


图 4 黄土母质典型农田不同土层 SIC 储量分布
Fig. 4 Distributions of SIC storages in different soil layers of typical loess farlands

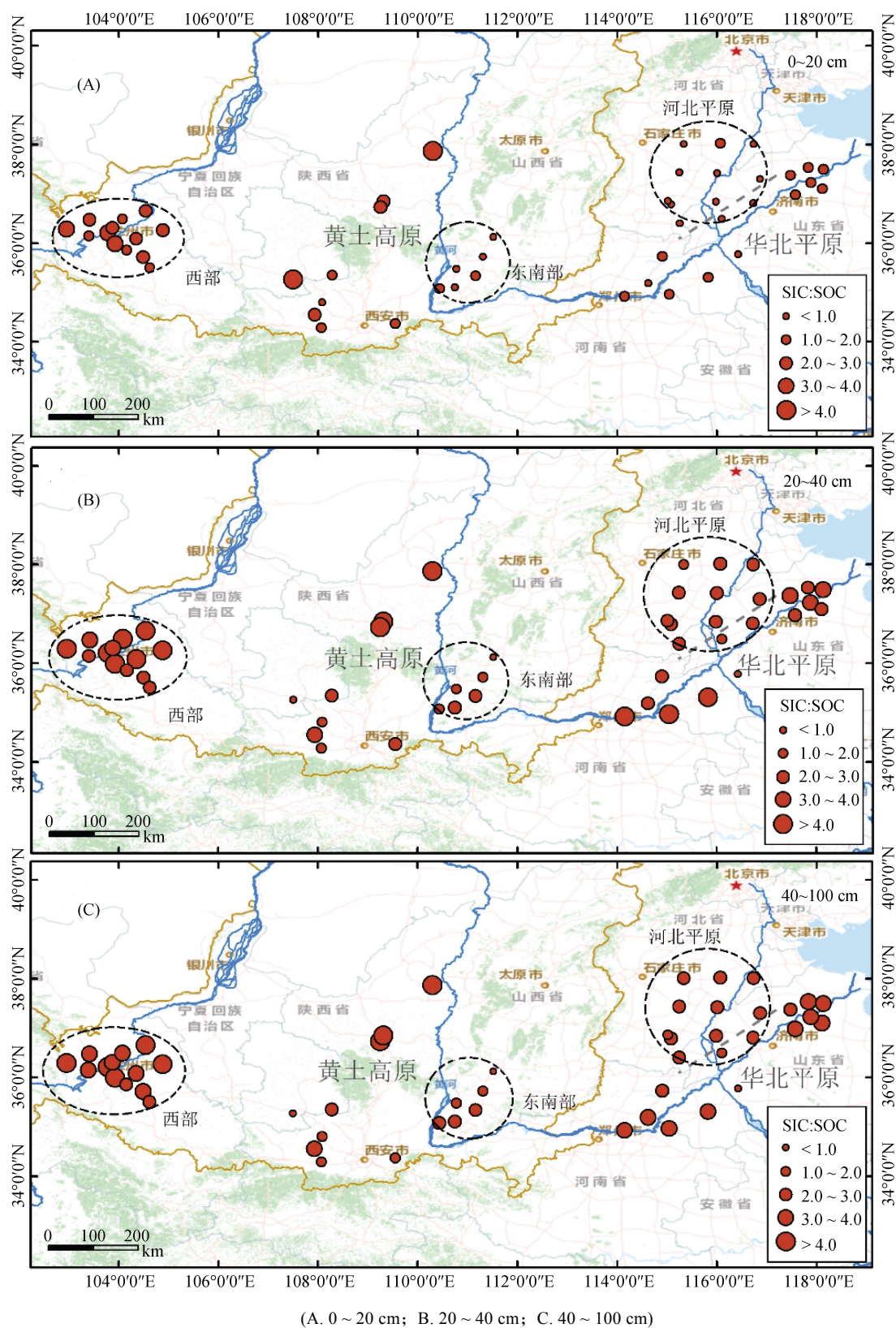


图 5 黄土母质区域典型农田不同土层 SIC : SOC 空间分布

Fig. 5 Distributions of SIC : SOC ratios in different soil layers of typical loess farmlands

同一土层中,黄土母质区域内的 SIC : SOC 也存在较大差异。SIC : SOC 较高的区域在各土层均位于

黄土高原西部,其中 0~20 cm 土层为 2.4 ± 0.6 , 20~40 cm 和 40~100 cm 土层分别高达 4.4 ± 2.5 和 $5.1 \pm$

1.8(表 3)。相比之下, SIC : SOC 较低的区域在 0 ~ 20 cm 土层位于河北平原, 为 0.9 ± 0.1 , 而黄土高原东南部区域在这一土层的 SIC : SOC 也较低, 为 1.0 ± 0.4 , 与河北平原接近。在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 100 cm 土层中, SIC : SOC 较低的区域则位于黄土高原东南部, 分别为 1.8 ± 0.8 和 3.3 ± 1.5 。

此外, 华北平原黄河沿线的 SIC : SOC 在各土层中均高于河北平原, 尤其是黄河三角洲上游区域的 SIC : SOC 比值明显较高。黄土高原中南部区域的 SIC : SOC 在各土层中也普遍高于东南部, 其中黄土高原中部区域的 SIC : SOC 明显偏高。在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 100 cm 土层, 华北平原黄河沿线的 SIC : SOC 与黄土高原中南部区域较为接近, 但 20 ~ 40 cm 土层黄土高原中南部区域的 SIC : SOC 略高, 为 3.4 ± 2.6 , 而在 40 ~ 100 cm 土层华北平原黄河沿线的 SIC : SOC 略高, 为 4.6 ± 1.4 。

3 讨论

3.1 黄土母质典型农田土壤有机碳空间分布的影响因素

大量研究显示黄土母质农田土壤剖面中 SOC 存在较大的空间异质性^[25-26], 华北平原 SOC 水平普遍高于黄土高原, 其差异与不同区域自然环境及农田管理措施密切相关。华北平原气候相对湿润, 灌溉水源充足, 农作物生长旺盛, 作物残体和根系向土壤中提供了更多的有机质^[27]。另外, 华北平原种植历史悠久, 长期秸秆还田和使用有机肥也促进了表层土壤 SOM 的提高^[28-29]。而黄土高原 SOC 较低则与其强烈的水土流失导致的土壤侵蚀有关^[24, 30], 有研究显示黄土高原不同区域之间土壤侵蚀程度不一致^[31], 多数区域以侵蚀过程为主, 因此 SOC 含量较高的表土大量流失^[30]。

本研究中发现黄土高原 SOC 的空间异质性大于华北平原, 同样受土壤侵蚀—搬运—再沉积过程影响,

少数地势较低的区域有较厚的表土堆积, 造成黄土高原侵蚀与沉积区域之间 SOC 的空间差异增大。Yu 等^[25]对 0 ~ 20 cm 土层 SOC 的分析发现, 黄土高原南部地区(即本研究区域)SOC 表现出西低东高的分布特征。本研究也发现黄土高原南部地区 0 ~ 20 cm 农田 SOC 储量在西部和中南部区域明显低于东南部, 且空间异质性表现为西部和中南部大于东南部。进一步分析发现, 黄土高原东部区域 20 ~ 40 cm 土层 SOC 含量比 80 ~ 100 cm 高出 80%^[23], 这一变化幅度与华北平原经过长期培肥的农田土壤剖面^[20-21]相似, 而黄土高原西部区域浅层 SOC 仅比深层高出 30% ~ 45%^[32]。本研究中的东南部区域位于汾河谷地, 其周围地势较高的区域及汾河上游地区被侵蚀的表层土壤(SOC 含量较高)堆积在河谷地区, 因此东南部区域表层土壤 SOC 储量明显偏高^[23]。

华北平原农田 SOC 也具有显著的空间异质性。张婧婷等^[27]的研究显示, 华北平原中部地区(与本研究华北平原区域一致)0 ~ 20 cm 土壤的 SOC 含量普遍高于华北平原其他地区, 尤其是河北平原西部和黄河中段沿线地区含量较高, 而河北平原东部和黄河三角洲 SOC 含量则相对较低。本研究也发现, 华北平原黄河沿线中段和河北平原 0 ~ 20 cm 的 SOC 普遍高于黄土高原西部和中南部, 而 SOC 低值区多位于土壤盐碱化程度较高的黄河三角洲。黄河三角洲 SOM 较低与土壤盐碱化和较强烈的水文过程有关, 因为盐碱地土壤理化性状差, 不利于作物生长, 作物向土壤中的碳输入量少^[33]; 另一方面, 高盐碱环境会破坏土壤结构, 降低 SOM 的稳定性^[34], 而强烈的水文过程容易引起 SOM 的溶解和流失^[21, 35]。

3.2 黄土母质典型农田土壤无机碳空间分布的影响因素

由表 2 可知, 黄土母质区域典型农田土壤中 0 ~ 100 cm SIC 储量显著高于 SOC, 不同区域之间 SIC 的空间异质性十分显著。从不同土层来看, 0 ~ 40 cm

表 2 黄土母质典型农田不同土层土壤碳储量(kg/m²)
Table 2 Means and standard deviations of soil carbon storages in different layers in loess farmlands

土层(cm)	华北平原(n=24)			黄土高原(n=28)		
	SOC	SIC	SIC : SOC	SOC	SIC	SIC : SOC
0 ~ 20	2.8 ± 0.5 a	2.7 ± 0.7 b	1.0 ± 0.3 b	2.5 ± 1.3 a	4.3 ± 1.3 a	2.1 ± 1.0 a
20 ~ 40	1.2 ± 0.3 a	3.2 ± 0.7 b	2.7 ± 0.9 b	1.7 ± 0.8 a	4.6 ± 1.7 a	3.5 ± 2.4 a
40 ~ 100	2.7 ± 0.7 a	10.7 ± 2.8 a	4.3 ± 1.2 a	2.4 ± 1.1 a	8.8 ± 3.8 b	4.4 ± 2.4 a
0 ~ 100	6.6 ± 1.1 a	16.5 ± 3.8 a	2.5 ± 0.6 a	6.7 ± 2.4 a	17.7 ± 5.4 a	3.1 ± 1.5 a

注: 数据为均值 ± 标准差。同一行小写字母不同表示 SOC、SIC 或 SIC : SOC 在不同区域间差异显著(P<0.05)。

土层华北平原的 SIC 储量(5.9 kg/m^2)显著低于黄土高原(8.9 kg/m^2),但在 $40 \sim 100 \text{ cm}$ 土层中,华北平原的 SIC 储量(10.7 kg/m^2)却略高于黄土高原(8.8 kg/m^2 ,表 2)。Tao 等^[36]的研究也发现,在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层,华北平原 SIC 普遍低于黄土高原,且华北平原黄河沿线 SIC 空间异质性明显偏高,黄河三角洲区域的 SIC 水平高于华北平原黄河沿线上段。Zhang 等^[21]的研究显示,河北平原 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 的 SIC 储量低于黄河三角洲,其中 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层中差异达到 10%。这是因为河北平原耕作历史悠久,在长期种植过程中施肥、灌溉等农田管理措施以及当地较高水平的 SOM 分解和根呼吸释放的 CO_2 都会促进 SIC 的水解^[22],而这些过程在黄河三角洲区域不明显,且黄河三角洲土壤剖面中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量较高^[20],有利于 SIC 的积累。

黄土高原 3 个区域 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层中 SIC 储量均显著高于华北平原两个区域,尤其是黄土高原西部明显偏高,分别为 5.1 、 5.7 kg/m^2 (表 1)。黄土高原 SIC 水平较高是因为其土壤母质为碳酸盐含量丰富的原生黄土,同时其干旱气候有助于保留原生矿床风化释放的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,使其与碳酸氢根结合形成碳酸盐^[37]。黄土高原中南部区域 $0 \sim 100 \text{ cm}$ SIC 的变异系数(42%)明显大于西部(12%)和东南部

区域(18%),表明黄土高原中西部空间异质性更为突出。黄土高原西部区域 SIC 水平偏高的原因可能包括两个方面:一是该区域土壤 pH 较高(图 2),有利于 SIC 的积累;二是该区域土壤侵蚀较为严重^[31],导致表层土壤流失,从而暴露出 SIC 含量较高的亚表层土壤。然而,尽管黄土高原中南部区域侵蚀也相对强烈,但仅有两个土壤剖面 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 的 SIC 储量与西部区域相近,其余剖面则不到 14 kg/m^2 ,低于黄土高原的平均水平 17 kg/m^2 ^[12]。这种低 SIC 储量的现象主要发生在耕作历史较长的关中平原,长期施用化肥造成了土壤 pH 的下降,引起 SIC 水解^[38]。

3.3 黄土母质典型农田土壤无机碳与有机碳的关系

前人针对北方农田土壤 SIC 和 SOC 的关系开展了大量研究,发现黄土母质区域二者的关系存在较大的差异,具体来说,华北平原 SIC 和 SOC 大多呈正相关关系^[20-21],而黄土高原则多呈负相关关系^[23-24, 39]。本研究对黄土母质区域农田 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 深度的土壤碳储量数据进行了整合分析,同样发现华北平原在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 深度中 SIC 与 SOC 均呈正相关关系,尤其是 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 相关性极为显著($P < 0.01$);而在黄土高原这两个深度均呈负相关关系,其中 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 相关性显著($P < 0.05$,图 6)。

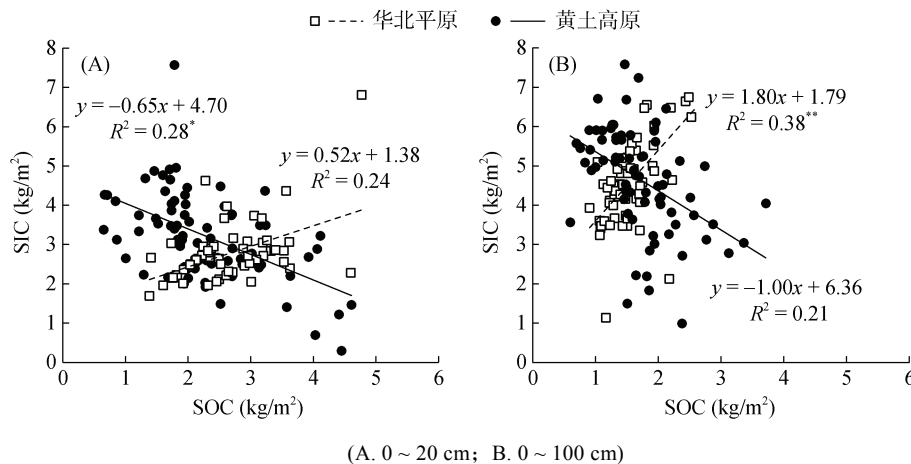


图 6 黄土母质区域典型农田 SIC 与 SOC 的关系

Fig. 6 Relationship between SIC and SOC in typical loess farmlands

土壤剖面中 SIC 和 SOC 的关系受到很多因素的影响。而 SIC 的累积转化主要受控于以下 2 个平衡方程:



就华北平原而言,长期施肥和灌溉等农业活动为土壤剖面补充了 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$,同时土壤 SOM 分解和较强的根呼吸产生的较高浓度的 CO_2 ,这些能够

推动反应(3)和(4)向右进行,有利于 PIC 的形成^[22]。而高水平 SIC 的存在又有助于提高 SOC 的稳定性^[34],使得 SOC 和 SIC 之间出现正反馈。而在黄土高原,由于土壤侵蚀现象普遍存在,通常会使得 SOC 含量较高、SIC 含量较低的表土从侵蚀严重的区域搬运到地势较低的区域^[24],致使侵蚀严重区域的土层中 SOC 储量明显偏低、SIC 储量相对较高,而沉积为主的区域土层中 SOC 储量相对较高、

SIC 储量相对较少, 因此 SIC 与 SOC 在黄土高原呈负相关关系^[23]。

本研究进一步对华北平原和黄土高原不同肥力水平下 SIC 及 SIC : SOC 进行了分析, 发现黄土高原高肥力土壤 0 ~ 100 cm 各土层的 SIC : SOC 与华北平原 0 ~ 40 cm 土层接近, 而其低肥力土壤的 SIC : SOC 与华北平原 20 cm 以下的 SIC : SOC 接近(表 3), 由此推测黄土高原高肥力区域可能以沉积过程为主, 而低肥力区域以侵蚀过程为主。华北平原高肥力土壤 SIC 含量在各土层均略高于低肥力土壤, 而黄土高原

高肥力土壤 SIC 含量却低于低肥力土壤(表 3)。华北平原高肥力土壤中 SIC 水平高可能是因为较强的根呼吸和 SOM 分解提供了碳源, 且长期施肥、灌溉等过程以及地下水、黄河水又补充了钙/镁源^[20], 促进了 SIC 的沉淀和累积。黄土高原高肥力农田大多位于地势相对较低的河谷区域, 沉积了较厚的来自于周围地势较高区域被侵蚀的表层土壤^[23], 使得土层中 SIC 储量相对偏低。而低肥力农田区域侵蚀作用更强烈, 表土不断流失暴露出 SIC 含量较高的亚表层土壤^[24], 土壤剖面中 SIC 储量明显偏高。

表 3 黄土母质典型农田高低肥力土壤碳含量(g/kg)
Table 3 Means and standard deviations of carbon contents in high and low fertility soils of typical loess farmlands

区域	土层(cm)	高肥力			低肥力		
		SOC	SIC	SIC : SOC	SOC	SIC	SIC : SOC
华北平原	0 ~ 20	10.8 ± 0.9 a	9.8 ± 3.8 a	0.9 ± 0.4 a	8.8 ± 0.7 b	9.2 ± 2.9 a	1.0 ± 0.3 a
	20 ~ 40	4.1 ± 0.9 a	10.9 ± 2.5 a	2.8 ± 1.2 a	4.1 ± 0.9 a	10.4 ± 2.9 a	2.6 ± 0.8 a
	40 ~ 70	2.9 ± 0.7 a	11.4 ± 1.6 a	4.1 ± 0.7 a	3.2 ± 0.9 a	11.1 ± 2.8 a	3.7 ± 1.2 a
	70 ~ 100	2.7 ± 1.1 a	12.3 ± 2.5 a	4.8 ± 0.9 a	2.7 ± 0.9 a	11.4 ± 3.5 a	4.7 ± 1.8 a
黄土高原	0 ~ 20	12.5 ± 2.4 a	10.8 ± 3.2 b	0.9 ± 0.4 b	6.7 ± 2.0 b	14.0 ± 3.3 a	2.3 ± 0.8 a
	20 ~ 40	7.5 ± 1.6 a	11.1 ± 2.9 b	1.6 ± 0.7 b	4.5 ± 1.9 b	14.4 ± 3.9 a	4.1 ± 2.4 a
	40 ~ 70	5.4 ± 1.5 a	11.1 ± 2.9 b	2.2 ± 1.0 b	3.5 ± 1.4 a	14.5 ± 5.5 a	4.7 ± 2.2 a
	70 ~ 100	4.7 ± 1.6 a	11.7 ± 3.3 a	2.9 ± 1.9 a	3.4 ± 1.6 a	14.1 ± 5.9 a	5.3 ± 2.8 a

注：数据为均值 ± 标准差。同行小写字母不同表示 SOC、SIC 或 SIC : SOC 在高肥力和低肥力土壤间差异显著(P<0.05)。高、低肥力土壤是依据 0 ~ 20 cm 土层 SOC 是否高于 10 g/kg 来划分, SOC ≥ 10 g/kg 为高肥力土壤, SOC < 10 g/kg 为低肥力土壤。

4 结论

1)华北平原和黄土高原在 0 ~ 100 cm 土层的 SOC 储量接近, 分别为(6.6 ± 1.1) kg/m² 和(6.7 ± 2.4) kg/m²; 然而 SIC 储量存在明显差异: 在 0 ~ 40 cm 土层中, SIC 储量在华北平原显著低于黄土高原; 而在 40 ~ 100 cm 土层中, 华北平原的 SIC 储量显著高于黄土高原。

2)华北平原 SIC 储量低的点位主要位于农作历史较长的河北平原; 黄土高原 SIC 储量低的点位主要分布在土壤 pH 较低的中南部区域和以沉积过程为主的东南部河谷地区, 而 SIC 储量较高的点位集中在土壤侵蚀较严重的西部区域。

3)华北平原 0 ~ 100 cm 土层 SIC 储量和 SOC 储量呈显著正相关关系(P<0.01), 黄土高原 0 ~ 20 cm 土层 SIC 储量和 SOC 储量呈显著负相关关系(P<0.05)。

参考文献:

[1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1):

10-21.
[2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
[3] Xu L, Yu G R, He N P, et al. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: A synthesis [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2806.
[4] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1048.
[5] Wu H B, Guo Z T, Gao Q, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 413-421.
[6] Li Z P, Han F X, Su Y, et al. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China [J]. Geoderma, 2007, 138(1-2): 119-126.
[7] Mi N, Wang S Q, Liu J Y, et al. Soil inorganic carbon storage pattern in China [J]. Global Change Biology, 2008, 14(10): 2380-2387.
[8] 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 [J]. European Journal Of Soil Science, 2015, 66(1): 95-103.
[9] 郭洋, 李香兰, 王秀君, 等. 干旱半干旱区农田土壤碳

- 垂直剖面分布特征研究 [J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1433-1443.
- [10] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析 [J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- [11] Wang Y G, Li Y, Ye X H, et al. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(8): 1925-1931.
- [12] 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 [J]. *Catena*, 2014, 121: 22-30.
- [13] Zhang L, Zhao W, Zhang R, et al. Profile distribution of soil organic and inorganic carbon following revegetation on the Loess Plateau, China [J]. *Environmental Science And Pollution Research*, 2018, 25(30): 30301-30314.
- [14] Song X D, Yang F, Wu H Y, et al. Significant loss of soil inorganic carbon at the continental scale [J]. *National Science Review*, 2022, 9(2): mwab120.
- [15] 周建斌, 陶静静, 赵梦真, 等. 农业生产对石灰性土壤无机碳库损失的影响 [J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 593-602.
- [16] Raza S, Miao N, Wang P Z, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3738-3751.
- [17] 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 [J]. *Plant And Soil*, 2014, 380(1-2): 89-100.
- [18] Bughio M A, Wang P L, Meng F Q, et al. Neoformation of pedogenic carbonates by irrigation and fertilization and their contribution to carbon sequestration in soil [J]. *Geoderma*, 2016, 262: 12-19.
- [19] 张旭博, 李雄, 徐梦, 等. 不同土地利用方式下我国北方土壤有机、无机碳库的变化趋势及原因分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1440-1450.
- [20] Shi H J, Wang X J, Zhao Y J, et al. Relationship between soil inorganic carbon and organic carbon in the wheat-maize cropland of the North China Plain [J]. *Plant And Soil*, 2017, 418(1-2): 423-436.
- [21] Zhang W X, Wang X J, Lu T P, et al. Influences of soil properties and hydrological processes on soil carbon dynamics in the cropland of North China Plain [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 295: 106886.
- [22] Lu T P, Wang X J, Xu M G, et al. Dynamics of pedogenic carbonate in the cropland of the North China Plain: Influences of intensive cropping and salinization [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 292: 106820.
- [23] Lu T P, Wang X J, Zhang W X. Total and dissolved soil organic and inorganic carbon and their relationships in typical loess cropland of Fengyu Basin [J]. *Geoscience Letters*, 2020, 7(1): 17.
- [24] Tong L S, Fang N F, Xiao H B, et al. Sediment deposition changes the relationship between soil organic and inorganic carbon: Evidence from the Chinese Loess Plateau [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 302: 107076.
- [25] Yu T, Fu Y S, Hou Q Y, et al. Soil organic carbon increase in semi-arid regions of China from 1980s to 2010s [J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 116: 104575.
- [26] 付东磊, 刘梦云, 刘林, 等. 黄土高原不同土壤类型有机碳密度与储量特征 [J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 44-50.
- [27] 张婧婷, 石浩, 田汉勤, 等. 1981—2019 年华北平原农田土壤有机碳储量的时空变化及影响机制 [J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9560-9576.
- [28] 赵广帅, 李发东, 李运生, 等. 长期施肥对土壤有机质积累的影响 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 840-847.
- [29] 马子钰, 马文林. 施肥对中国农田土壤固碳影响效应研究 [J]. 土壤, 2022, 54(5): 905-911.
- [30] Han J Q, Pan Y W, Xiao P Q, et al. Quantifying the effects of climate change and revegetation on erosion-induced lateral soil organic carbon loss on the Chinese Loess Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(7): 1775.
- [31] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China [J]. *Catena*, 2014, 121: 151-163.
- [32] Zhang F, Wang X J, Guo T W, et al. Soil organic and inorganic carbon in the loess profiles of Lanzhou area: implications of deep soils [J]. *Catena*, 2015, 126: 68-74.
- [33] Amini S, Ghadiri H, Chen C R, et al. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: A review [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 939-953.
- [34] Wu L P, Zhang K J, Zhu X Y, et al. Effects of amendments on carbon and nitrogen fractions in agricultural soils of Yellow River Delta [J]. *Geoscience Letters*, 2023, 10: 22.
- [35] Shi H J, Wang X J, Xu M G, et al. Characteristics of soil C: N ratio and delta C-13 in wheat-maize cropping system of the North China Plain and influences of the Yellow River [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16854.
- [36] Tao J J, Raza S, Zhao M Z, et al. Vulnerability and driving factors of soil inorganic carbon stocks in Chinese croplands [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 154087.
- [37] 尤炜. 干旱土壤无机碳的碳汇研究 [J]. 环境科学导刊, 2024, 43(1): 22-26.
- [38] Jin S F, Tian X H, Wang H S. Hierarchical responses of soil organic and inorganic carbon dynamics to soil acidification in a dryland agroecosystem, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(5): 726-736.
- [39] 沙国良, 陈宇轩, 魏天兴, 等. 黄土高原丘陵区典型退耕恢复植被土壤碳分布特征及其影响因素 [J]. 土壤, 2022, 54(6): 1265-1272.