

# 黄河泥沙冲/沉积区土壤有机碳不同组分 空间特征及变异机制

张俊华<sup>1,2</sup>, 李国栋<sup>1,2</sup>, 王岩松<sup>1,2</sup>, 朱连奇<sup>1,2</sup>, 赵文亮<sup>1,2</sup>, 丁亚鹏<sup>1,2</sup>

(1. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室 河南大学, 开封 475004;

2. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

**摘要:** 黄河泥沙是黄河下游陆地地貌类型形成的物质来源, 泥沙沉积改变了地表土壤结构和有机碳含量水平。基于室内外实验和空间地统计分析方法, 文中对开封一周口土壤有机碳组分的空间特征和影响因素进行了分析。在0~100 cm土壤中TOC、AOC、NOC的含量分别为0.05~30.03 g/kg、0.01~8.86 g/kg和0.02~23.36 g/kg, 表层0~20 cm的TOC、AOC、NOC高于下层, 同一土层中TOC的变化幅度和含量差异性最大, AOC最小, NOC介于二者之间。NOC的含量对TOC的贡献大于AOC。空间地统计学研究显示, TOC、AOC、NOC的块金系数在0.50~0.67之间, 具有中等程度的空间相关性, TOC、AOC、NOC的含量受结构因素和随机因素的共同作用, 且二者的作用强度接近。空间上, 自表层向下层, 土壤TOC、AOC和NOC的整体变化趋势较为一致, 高值区与低值区之间过渡明显, NOC和AOC的含量及空间变化能较好地反映TOC的空间变化和碳积累区域。分析发现, 黄河泥沙冲/沉积区分布、农业耕作过程和耕作历史是影响区内土壤有机碳及其组成含量和空间分布的主要因素, 而有机物的输入量、土壤颗粒物组成及二者的动态关系是影响土壤结构体形成和有机碳含量的关键因素, 提高有机物的含量和改善土壤结构是提升土壤质量、实现区内农业可持续发展的有效途径。

**关键词:** 土壤有机碳; 黄河泥沙; 空间特征; 耕作历史

DOI: 10.11821/dlxb202003009

## 1 引言

土壤碳库作为陆地生态系统碳库的主体, 其在调节气候变化方面具备双重作用<sup>[1-2]</sup>。土壤有机碳的固存和变化机制是目前一个关键的生态过程和活跃的研究方向, 在区域生态系统中, 有机碳的变化过程及影响机制受到关注<sup>[3]</sup>。如何提升土壤有机碳含量已成为当前应对气候变化、粮食生产安全和区域可持续发展的核心问题。

土壤有机碳影响生命物质的供给、周转过程和土壤肥力水平, 对土壤生态系统的功能发挥<sup>[4-5]</sup>和结构稳定<sup>[6-8]</sup>具有重要调控作用。因物质来源的不均一性和周转速率的差异性, 土壤有机碳不同组分的含量和稳定性特征不同, 其中, 非活性有机碳更能代表土壤有机碳的积累和储存量, 而活性有机碳含量所占比例较少, 能体现短期内的变化和直接

收稿日期: 2019-05-17; 修订日期: 2020-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101088); 河南省自然科学基金项目(182300410129); 河南大学新兴交叉与特色学科培育项目(XXJC20140003) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41101088; Natural Science Foundation of Henan Province, No.182300410129; New Interdisciplinary and Characteristic Subject Cultivation Project of Henan University, No.XXJC20140003]

作者简介: 张俊华(1975-), 女, 河南舞阳人, 博士, 教授, 主要从事土壤碳氮特征与土壤质量研究。E-mail: oklgd@163.com

通讯作者: 李国栋(1978-), 男, 甘肃张掖人, 博士, 副教授, 主要从事环境变化与地表过程研究。E-mail: defskey@163.com

参与土壤生物化学过程的部分<sup>[9]</sup>,成为反映土壤变化的优选指标<sup>[10-11]</sup>,是土壤学及相关学科研究中关注的焦点。目前,土壤有机碳组分的研究多侧重含量分布、时空特征及变异机理方面,集中在点尺度上的典型样地和空间尺度上的典型区域<sup>[12]</sup>。前者注重长时间序列下有机碳组分动态特征和变化过程<sup>[13-15]</sup>,涉及的样本量偏少。后者采用地统计和GIS空间分析方法,进行非连续土壤有机碳的空间异质性研究是工作的重点<sup>[16-20]</sup>,涉及样本量较多。受测试过程、方法和样本保存条件的限制,对大量样品进行组分测定和空间变异研究相对较少,更多侧重土壤总有机碳方面的工作。对土壤有机碳组分的空间变异特征研究有助于揭示有机碳变化机理,拓展现有点尺度的工作,丰富有机碳空间尺度上的工作。

黄河泛滥是黄河下游陆地地貌类型形成的根源,泥沙冲刷和沉积使地表土壤性质发生了明显改变。黄河下游地区是中国重要的粮食生产区,砂质土壤在土地利用过程中对土壤有机碳含量会产生影响<sup>[13, 21-22]</sup>。同时,高强度的农业产出与土壤质量提升之间矛盾突出,采取什么样的管理措施来提升土壤质量是本区需要考虑的问题。

本研究选取黄河泛滥影响的典型区域—开封—周口地区,利用地统计分析方法,开展不同深度土壤有机碳、活性有机碳和非活性有机碳的空间分布特征,揭示有机碳的变化机制,以期为区域土壤有机碳的提升、土壤质量的改善和应对气候变化的影响提供依据。

## 2 研究区概况及研究方法

### 2.1 研究区概况

研究区位于河南省东部的豫东平原,行政上隶属于开封、周口两市(图1)。平原区主要以黄河大冲积扇为主,南抵郑州至漯河,东南达周口、郸城,向东、向北延伸出省界。地势平坦,属于暖温带大陆性季风气候。

黄河含沙量居世界首位,经黄土高原流入平原后,河道逐渐增宽,纵比降急剧变缓,河水中泥沙频繁迁徙,从而到处沉积<sup>[23]</sup>。黄河泥沙对所经区域的土壤造成了深刻影响,土壤类型以沙质土为主,砂、壤、粘等质地土壤镶嵌分布<sup>[24]</sup>。土层深厚,成土母质是不同时期的黄河冲积物,在此基础上形成了潮土、风沙土、盐土、新积土等土壤类型。豫东土地利用类型以旱地、水田、林地、水域、草地、城乡居民用地、未利用土地为主,其中旱地和城乡居民用地占总面积比例较大,分别为78.94%和18.55%,水田、林地、水域、草地、未利用土地分别占0.34%、0.67%、1.34%、0.13%、0.015%。

基于区内实际情况(图2),选择代表性土地利用类型耕地(旱地)、林地和未利用土地(荒草地、盐碱地、沙地)采集土壤样品。

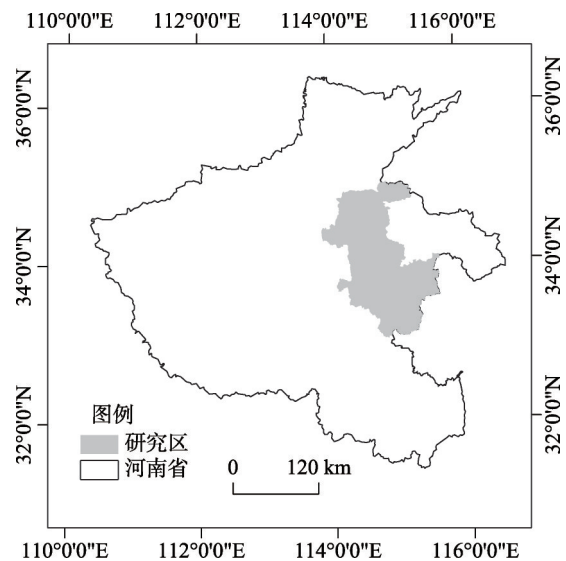


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

### 2.2 样品采集和室内实验

土壤样品的采集方法为网格法。参考区内的地形图、土地利用类型图，在地图上设置采样点，以 10 km×10 km 的网格为一个采样点，实地采样中考虑了土地利用类型的分布、种植方式、施肥方式、土壤类型、种植历史、可达性等多种因素，参照地图上预先设置的采样点而进行调整。剖面取样深度为 100 cm，取样间隔 20 cm，共 283 个样点 (图 3)，少量样点因距离较近存在空间重叠。样品在室内进行风干、过筛后，测定各指标。土壤总有机碳 (TOC) 采用油浴加热—K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 容量法<sup>[25]</sup>，土壤活性有机碳 (AOC) 采用 KMnO<sub>4</sub> 氧化法<sup>[26-27]</sup>，土壤总有机碳与活性有机碳含量的差值为非活性有机碳含量 (NOC)。土壤粒径采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer3000 型激光粒度仪测定<sup>[28]</sup>。

### 2.3 数据分析

在 GS+9 和 ArcGIS10.1 软件中进行数据正态分布检验、异常值的剔除、半方差函数的参数选取、插值方法选取、趋势效应分析和空间分布图的绘制。采用普通克里格的插值方法模拟空间分布，输入半方差函数拟合模型参数进行趋势效应的选取，通过交叉验证检验不同插值方法的结果和预测精度，模型的拟合精度选取平均误差 (ME)、平均标准误差 (ASE)、均方根误差 (RMSE)、均方误差 (MSE)、均方根标准误差 (RMSSE) 进行评价。

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)] \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2} \quad (2)$$

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma^2(x_i)}{n}} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2}{\sigma(x_i)} \quad (4)$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{Z(x_i) - Z^*(x_i)}{\sigma(x_i)} \right]^2} \quad (5)$$

式中：Z(x<sub>i</sub>)和 Z\*(x<sub>i</sub>)是实测值和预测值；σ(x<sub>i</sub>)是点 x<sub>i</sub> 处的预测标准方差。

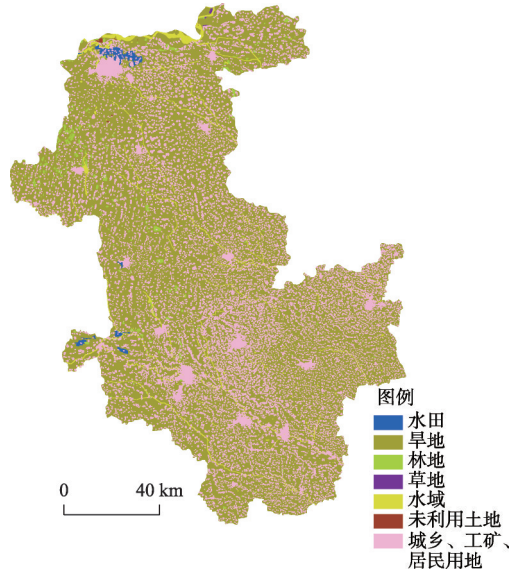


图 2 2008 年研究区土地利用类型分布

Fig. 2 Distribution of different land uses in the study area

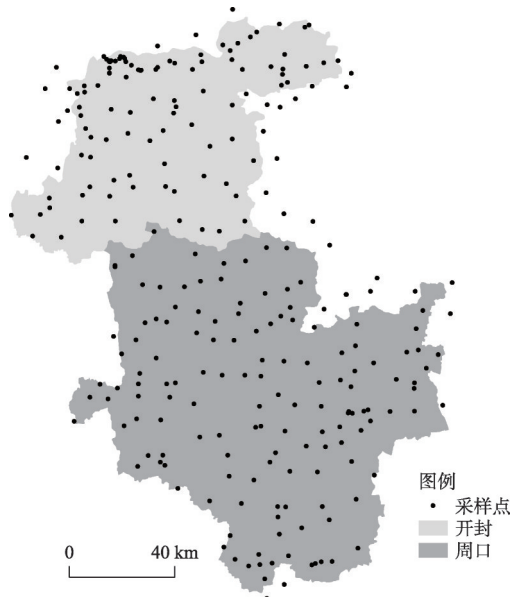


图 3 采样点空间分布

Fig. 3 Sampling points in the study area

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤有机碳及其组分的含量特征

土壤0~100 cm深度,土壤TOC、AOC、NOC含量分别在0.05~30.03 g/kg、0.01~8.86 g/kg、0.02~23.36 g/kg之间。从含量和变幅来看(表1),各层次均呈现TOC > NOC > AOC的趋势,随着深度的增加,平均值逐渐减小。表层0~20 cm的TOC、AOC、NOC标准差和方差均高于20 cm以下各层,说明TOC、AOC、NOC含量在表层0~20 cm的离散程度最大,层次越深,离散程度逐渐缩小。对比发现,同一土层中TOC的变化幅度和含量差异性最大,AOC最小,NOC介于二者之间。

表1 不同深度土壤有机碳及其组分含量的统计特征(g/kg)

Tab. 1 Statistical characteristics of soil organic carbon, 0-100 cm belowground(g/kg)

指标	深度(cm)	极差	最小值	最大值	平均值	方差	偏度	峰度
TOC	0~20	28.78	1.25	30.03	8.96±4.31	18.62	0.99	2.44
	20~40	16.72	0.59	17.32	5.08±2.87	8.24	1.12	1.81
	40~60	13.60	0.40	14.00	3.88±2.50	6.25	1.01	1.19
	60~80	15.73	0.08	15.81	3.08±2.24	5.02	1.56	4.64
	80~100	13.78	0.05	13.83	2.57±2.12	4.50	1.66	4.34
AOC	0~20	8.75	0.11	8.86	1.77±1.07	1.15	1.70	8.52
	20~40	3.47	0.01	3.48	0.80±0.62	0.38	1.19	1.84
	40~60	1.98	0.01	2.00	0.51±0.43	0.19	0.97	0.31
	60~80	1.49	0.01	1.50	0.37±0.34	0.12	1.00	0.15
	80~100	1.42	0.01	1.42	0.29±0.29	0.08	1.39	1.74
NOC	0~20	22.75	0.61	23.36	7.19±3.48	12.13	0.95	1.98
	20~40	15.27	0.58	15.85	4.28±2.49	6.25	1.30	2.52
	40~60	12.89	0.01	12.90	3.34±2.22	4.95	1.14	1.87
	60~80	15.20	0.06	15.26	2.76±2.02	4.07	1.86	6.96
	80~100	13.23	0.02	13.25	2.25±1.94	3.75	1.87	5.82

#### 3.2 土壤有机碳及其组分的空间变异特征

**3.2.1 有机碳及其组分地统计特征** 利用GS9+对不同层次TOC、AOC、NOC进行半方差函数特征值的计算和最优模型的选取。依据模型的决定系数( $R^2$ )值大、残差(RSS)最小的判别标准,获取有机碳空间最优拟合程度参数(表2),拟合模型有指数(E)和高斯(G)两种。

$C/C_0+C$ 反映了自相关引起的空间异质性占总空间异质性的比例,表明受随机因素和结构性因素共同作用程度。结构因素(气候、母质、地形、土壤等自然因素)的影响会使空间变量呈现强的空间相关性,而随机性因素(施肥、耕作等人为活动)可引起空间相关性减弱。TOC、AOC、NOC的块金系数在0.50~0.67之间,具有中等程度的空间相关性。剖面自上而下的块金系数在0.50附近变动,说明自然因素和人为因素的作用强度接近。

分形维数的高低表示有机碳受随机因素影响的程度和空间分布状况,数值低表示它受随机因素影响低,结构性好,空间分布相对简单。从剖面的变化来看,TOC和NOC的分形维数逐渐降低,而AOC的分形维数逐渐升高,说明TOC、NOC在表层受随机因素影响大、结构性差、空间分布较复杂,在深层受随机因素影响极小、结构性好、分布相对简单。AOC与TOC、NOC不同,表层0~20 cm的分形维数最低,20~40 cm的分形维



表2 不同深度土壤有机碳及其组分半方差函数拟合模型及参数

Tab. 2 Fitting model and parameters of SOC semi-variance function, 0-100 cm belowground

深度 (cm)	指标	模型	块金值 ( $C_0$ )	基台值 ( $C_0+C$ )	变程 ( $A_0$ )	块金系数 ( $C/C_0+C$ )	决定系数 ( $R^2$ )	残差 (RSS)	分形维数 (D)
0~20	TOC	E	10.91	27.56	6.52	0.60	0.91	8.37	1.92
	AOC	E	0.72	1.41	1.55	0.50	0.83	0.08	1.91
	NOC	E	6.95	14.79	4.04	0.53	0.90	3.92	1.92
20~40	TOC	E	4.56	13.28	9.03	0.66	0.93	1.11	1.92
	AOC	E	0.71	1.43	1.55	0.50	0.83	0.08	1.96
	NOC	E	3.36	9.79	7.73	0.67	0.93	0.70	1.91
40~60	TOC	E	2.92	6.31	3.21	0.54	0.95	0.46	1.91
	AOC	E	0.11	0.22	0.78	0.50	0.86	0.00	1.93
	NOC	E	2.27	4.68	2.51	0.52	0.92	0.44	1.91
60~80	TOC	E	2.18	5.06	3.35	0.57	0.94	0.38	1.90
	AOC	E	0.10	0.20	0.66	0.50	0.85	0.00	1.94
	NOC	G	1.81	3.62	1.23	0.50	0.93	0.35	1.89
80~100	TOC	G	1.86	3.72	0.97	0.50	0.93	0.49	1.89
	AOC	E	0.08	0.22	0.39	0.63	0.68	0.00	1.94
	NOC	G	1.53	3.07	0.89	0.50	0.90	0.46	1.88

数最高,可能是受随机因素和AOC活性共同作用的结果,AOC向下移动性强于TOC、NOC,导致中下层的分形维数高于表层0~40 cm。

**3.2.2 有机碳及其组分空间变异特征** 对剖面上每一层TOC、AOC、NOC的含量进行空间趋势效应分析,选择无趋势效应(0阶)、变量沿一定方向呈直线变化(1阶)、变量沿一定方向呈多项式变化(2阶),输入表1中半方差函数拟合模型参数,按照判断标准:ME的绝对值接近0, RMSE和MSE越小越好, ASE和RMSE最接近, 越小越好, RMSSE接近1,得到有机碳空间分布图。选择空间趋势效应为:AOC在20~40 cm和80~100 cm为0阶,其余均为1阶,表3列出了每一层TOC、AOC、NOC空间模拟的误差。

从TOC、AOC、NOC含量的空间变化分布图和分级来看(图4),表层0~20 cm的空间差异性和变幅最大,随深度增加,三类有机碳含量的变化幅度在缩小,其中AOC的变幅最小,TOC的变化最大,NOC介于二者之间。

空间上,同一层中TOC、AOC、NOC含量的高值区分布在周口的西南、东南及周口与商丘交界三部分区域,低值区在开封的西部,自低值区向高值区呈现出自西北向东南逐级升高的变化趋势。开封至兰考部分,TOC、AOC、NOC含量介于高值区和低值区之间。自表层向下层,土壤TOC和NOC的空间整体变化趋势较为一致,AOC的空间变化在表层0~20 cm与TOC、NOC一致,而在20~100 cm中的每一层变化趋势保持一致,且与表层0~20 cm存在差异,表现为高值区与低值区之间过渡更明显,空间差异性更强。图4黑色线围成的区域是1938年花园口决堤后的开封一周口黄泛区,1945年黄河改道后开始恢复农业生产。区内土壤TOC、AOC、NOC含量低于周边区域,自黄河河水的流向和所经的区域,土壤TOC、AOC、NOC含量逐级增加,而在靠近黄河的郑州与开封之间的区域含量最低。

垂直方向上,每一层土壤有机碳含量的差异性和变幅均呈现出TOC>NOC>AOC,NOC的含量对TOC的贡献大于AOC,而AOC的含量更能体现出土壤TOC中的易变化量和空间上易发生变化的区域,NOC和AOC的含量及空间变化能较好反映TOC的空间变

表3 不同深度土壤有机碳及其组分空间分布的模拟误差

Tab. 3 Simulation error of SOC spatial distribution, 0-100 cm belowground

深度 (cm)	指标	平均误差 (ME)	均方根误差 (RMSE)	平均标准误差 (ASE)	均方误差 (MSE)	均方根标准误差 (RMSE)
0~20	TOC	0.02	3.50	3.50	0.01	0.99
	AOC	0.01	0.99	0.87	0.01	1.13
	NOC	0.00	2.83	2.81	0.00	1.01
20~40	TOC	0.01	2.28	2.27	0.01	1.01
	AOC	0.01	0.56	0.58	0.02	0.95
	NOC	0.00	1.99	1.95	0.01	1.02
40~60	TOC	0.04	1.89	1.81	0.00	1.04
	AOC	0.00	0.38	0.33	0.01	1.15
	NOC	0.00	1.69	1.59	0.00	1.06
60~80	TOC	0.00	1.70	1.62	0.00	1.07
	AOC	0.00	0.33	0.27	0.00	1.20
	NOC	0.01	1.57	1.38	-0.01	1.14
80~100	TOC	-0.02	1.50	1.40	-0.01	1.09
	AOC	0.02	0.41	0.39	0.01	1.11
	NOC	-0.01	1.40	1.27	-0.01	1.11

化和碳积累区域的空间分布。

**3.2.3 土壤有机碳及其组分空间分布的影响因素** 土壤有机碳是土地利用过程中地表动植物残体在多种因素综合作用下与土壤颗粒结合的化合物,其不同组分含量及分布受土地利用类型、土地利用方式、耕作方式、种植类型、土壤质地和气候等共同影响。从气候因素来说,气温和降水在区内小范围内的空间差异性不明显,农业用水主要以抽取地下水或引黄河水进行灌溉,对土壤有机碳空间差异的影响较小。从土地利用类型来看,区内79.28%是农业用地,而城镇用地、林地、草地、未利用土地所占比例较低,因此,农业土地利用方式、种植类型和耕作过程是影响区内土壤有机碳含量空间变化的主要因素。

研究区是历史上受黄河泥沙影响较为严重的区域,有黄泛区、黄河故道和少受泥沙影响三部分组成。黄泛区内,在靠近黄河的郑州与开封之间的区域有机碳含量最低,这与黄河决口后河水流速、沉积物颗粒大小、沉积层厚度及空间分布有关。黄河决口处河水流速慢,细砂和粗砂为主要沉积物类型,呈扇形分布,而粘粒和粉粒则在河水流经途中沉积<sup>[29]</sup>。自该区向东南的周口各县,泥沙冲积淤积厚度逐渐变薄,在1~5 m之间<sup>[30]</sup>,并向“破碎化”和“分散化”的分布趋势过渡,土地利用过程引起土壤TOC、AOC、NOC含量呈逐级递减的空间变化趋势。明清黄河故道是黄河泥沙影响有机碳空间分布的另一个区域,位于研究区东北部的兰考县。1855年黄河自兰考向北经山东入海后,开始恢复农业生产,约有160年的利用历史,土地利用类型以农田(水浇地、旱地)、农村建设用地和水域为主,其中农田约占总面积的73%,建设用地和水域面积分别为15%、5%左右<sup>[31]</sup>,土地利用类型以农田为主。其他为少受黄河泥沙影响的区域。从含量特征来看(图5),黄泛区、黄河故道和少受泥沙影响区的TOC、AOC、NOC平均含量分别在1.56~11.18 g/kg、0.18~2.23 g/kg、1.35~8.59 g/kg之间。剖面上每一层内TOC、AOC、NOC的含量均呈现出少受泥沙影响区>黄河故道>黄泛区的趋势,且每层中TOC、AOC、NOC的极差、最小值、最大值和标准差的特征(表4)基本与均值有类似的变化规律。在周口与安徽交界处的黄泛区内,这里虽然是历史上黄河流经的区域,但受黄河泥沙影响较小,土壤质地与非泛区较为一致,TOC、AOC、NOC含量较高。少受黄河泥沙影响的非

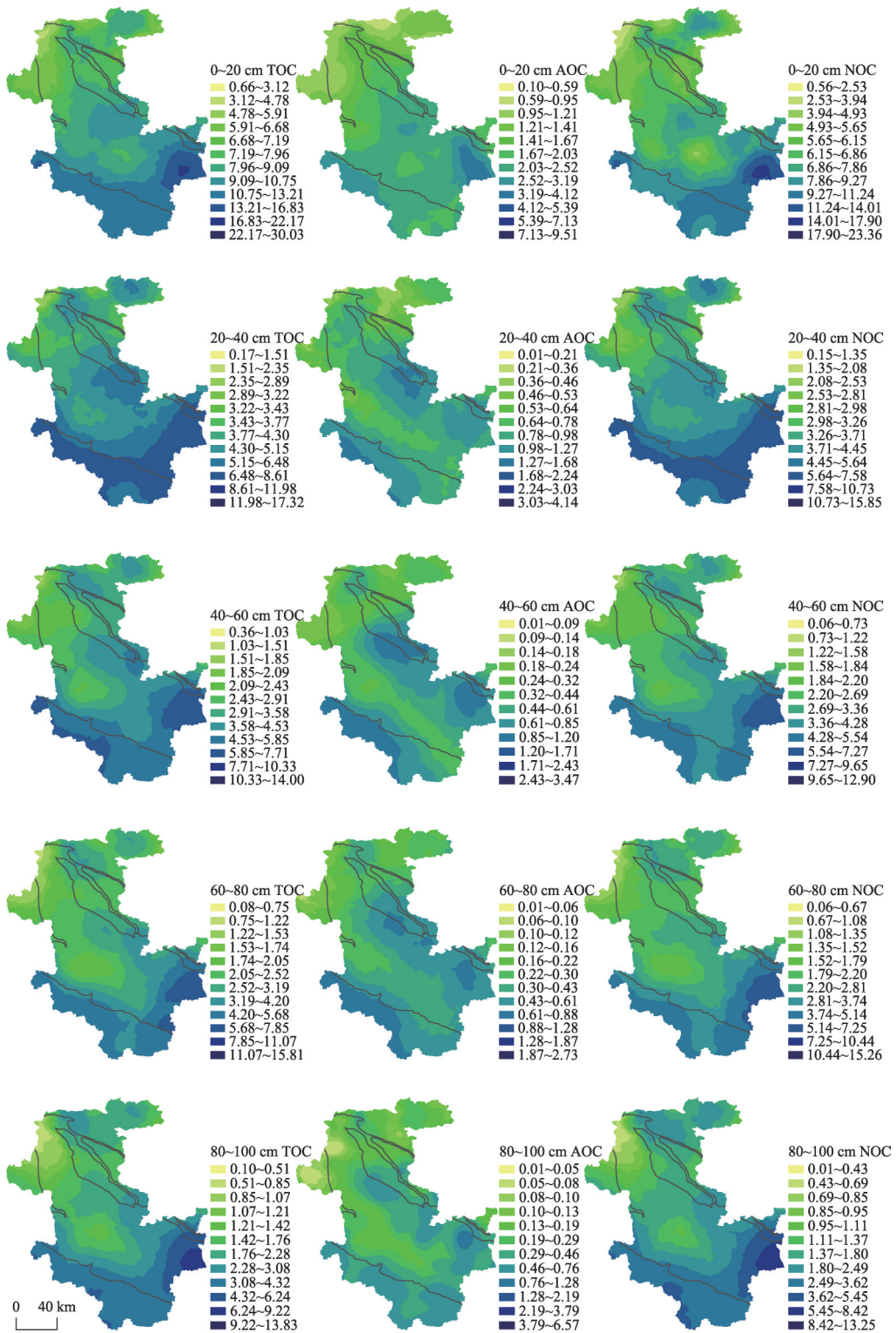


图4 研究区不同深度土壤有机碳(TOC)及其组分(AOC、NOC)的空间分布特征(g/kg)

Fig. 4 SOC spatial distribution of different layers, 0-100 cm belowground (g/kg)

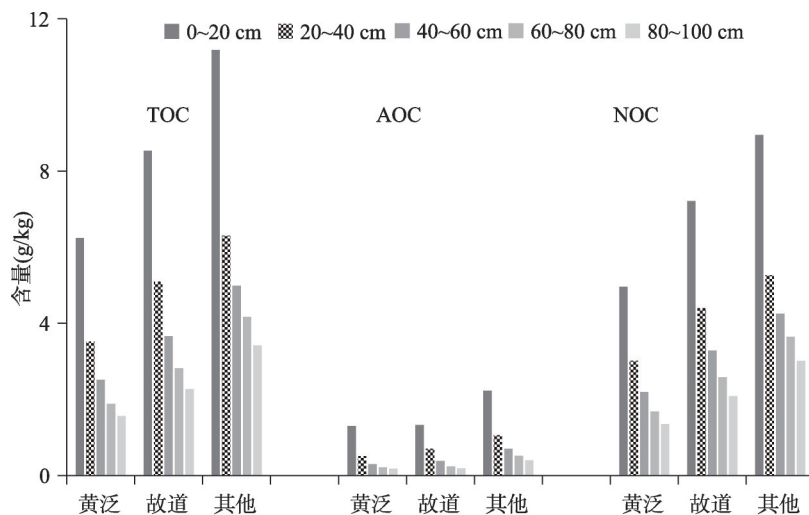


图5 黄河泥沙影响区土壤有机碳平均含量分布

Fig. 5 Average SOC contents in the sediment-affected zone of the Yellow River

表4 黄河泥沙影响区土壤有机碳及其组分含量的统计特征(g/kg)

Tab. 4 Statistical characteristics of SOC in the sediment-affected zone of the Yellow River, 0-100 cm belowground

指标	深度(cm)	极差			最小值			最大值			标准差		
		黄泛	故道	其他	黄泛	故道	其他	黄泛	故道	其他	黄泛	故道	其他
TOC	0~20	13.69	16.16	26.81	1.25	2.03	3.22	14.94	18.19	30.03	2.74	4.72	4.06
	20~40	9.48	11.34	15.50	0.59	1.29	1.82	10.07	12.63	17.32	1.87	2.76	2.98
	40~60	7.36	9.58	13.17	0.40	0.62	0.83	7.76	10.20	14.00	1.67	2.39	2.55
	60~80	5.56	7.54	14.18	0.08	0.46	0.26	5.64	8.00	14.44	1.28	2.02	3.03
	80~100	6.66	6.47	13.53	0.05	0.13	0.30	6.71	6.60	13.83	1.32	1.65	2.34
AOC	0~20	3.53	2.74	8.60	0.11	0.15	0.26	3.64	2.89	8.86	0.80	0.84	1.11
	20~40	2.60	1.71	3.45	0.01	0.04	0.04	2.61	1.75	3.49	0.45	0.55	0.65
	40~60	1.51	1.16	1.99	0.03	0.04	0.01	1.54	1.20	2.00	0.31	0.37	0.44
	60~80	1.27	0.67	1.48	0.01	0.03	0.02	1.28	0.70	1.50	0.25	0.26	0.35
	80~100	1.21	0.58	1.41	0.00	0.02	0.01	1.21	0.60	1.42	0.22	0.20	0.30
NOC	0~20	11.26	14.21	20.45	0.61	1.87	2.91	11.87	16.08	23.36	2.17	4.00	3.27
	20~40	7.39	10.61	14.91	0.58	1.10	0.94	7.97	11.71	15.85	1.62	2.48	2.66
	40~60	7.01	8.82	12.89	0.06	0.58	0.01	7.07	9.40	12.90	1.52	2.12	2.31
	60~80	4.98	6.97	12.74	0.06	0.43	0.24	5.04	7.40	12.98	1.13	1.81	2.88
	80~100	6.17	5.90	13.10	0.02	0.10	0.15	6.19	6.00	13.25	1.18	1.51	2.16

泛区0~100 cm的TOC、AOC和NOC的含量均高于黄泛区。在明清黄河故道, 0~100 cm中每一层TOC、AOC和NOC的含量均高于同层黄泛区土壤, 而低于少受泥沙影响区的土壤。分析发现, 自1945年恢复农业生产以来, 在近70年的耕作过程中, 改变了黄泛区表层0~40 cm的土壤性质, 而对40~100 cm的影响相对较弱, 致使表层0~20 cm、20~40 cm的有机碳组分含量高于深层40~100 cm。综上所述, 黄河泥沙冲/沉积区分布、沉积层的厚度、农业耕作过程、耕作历史是影响区内土壤有机碳及其组成含量和空间分布的主要因素。



## 4 讨论

研究区内不同土层中 TOC、AOC、NOC 含量的空间分布即有一致性,也存在明显的差异性,AOC 的空间异质性较 TOC 和 NOC 更能反映区内受黄河泥沙冲/沉积的影响范围以及泥沙区、非泥沙区的过渡地带。

黄河泥沙层厚度和空间范围是影响有机碳空间变异的关键因素。黄河泛滥后携带大量泥沙冲刷地表,原有土壤被冲走,泥沙大量堆积于地表,改变了原有土壤的结构,在农业耕作过程中,伴随着有机物的归还、分解和转化,有机物与土壤颗粒物相互作用,形成了稳定的结构体,提高了土壤的肥力和质量。对区内土壤各粒径含量的分析表明,黄河泥沙影响区土壤颗粒组成以 0.01~0.05 mm 的粗粉粒和 0.05~0.25 mm 的细砂粒为主,黄泛区内二者的含量在 50%~88% 之间,黄河故道内的含量在 56%~87% 之间,少受黄河泥沙影响区的含量在 30%~70% 之间。对比发现,黄泛区和黄河故道的土壤颗粒组成与黄河中游黄土具有较为相似的分布规律,以细砂粒和粗粉粒占绝对优势<sup>[32-34]</sup>。不同历史时期黄土颗粒物在黄河下游的沉积过程和影响强度是导致区内土壤各粒径含量空间差异性的主要原因。研究表明,不同粒径大小的无机颗粒物因比表面积、粘结力的差异,其吸附能力和结合有机物的量不同,粗颗粒物不利于土壤结构的形成和有机物的积累。因此,不同粒径大小的颗粒物含量在空间上的差异性影响土壤结构体形成和有机碳含量。剖面上 TOC、AOC、NOC 含量的统计特征和空间分布显示,泥沙影响区的土壤有机碳含量低于少受黄河泥沙影响区的土壤,尤其是 40~100 cm 有机碳含量更低,说明泥沙沉积区土壤有机碳及其组分的含量偏低,还存在提升空间。

土地利用年限或耕作历史是影响土壤有机碳及其组分含量和空间差异性的重要因素。研究表明,开垦年限有利于表层有机碳含量的增加,呈现出先增加后减缓的变化趋势,这主要归因于表层黏粒、粉粒颗粒物的增加及其与有机物之间团聚体的形成过程<sup>[35-36]</sup>,团聚体颗粒大小与有机碳的组分、稳定性和微生物活性相关<sup>[37-38]</sup>。耕作时间影响土壤有机碳腐解及其组分与不同粒径颗粒物的团聚过程。未开垦荒漠植被覆盖下的土壤,0~5 年的垦殖初期,砂粒有机碳快速增加并趋于稳定,有机碳活性高、易转化;随着垦殖年限增加(5~20 年),粉砂粒和黏粒有机碳(木质素、多酚、腐殖质等)增加,有机碳稳定、难降解,出现了非活性有机碳库的累积<sup>[39-40]</sup>。空间上,黄泛区、黄河故道和少受黄河泥沙影响区大致有 70 年、160 年和 > 160 年的利用历史,随耕作时间的延长,TOC 含量呈增加趋势,其中 NOC 和 AOC 也增加,且 NOC 增幅高于 AOC。NOC 含量增加反映了土壤的固碳效应,AOC 的增加为生物定居创造条件,提高土壤生物种类和活性,加速了有机物的分解和物质周转,为土壤团聚体形成和土壤质量的改善提供条件。利用年限对林地的影响与耕地较为一致,不同之处在于人为干扰强度低于耕地。与少受泥沙影响的区域相比,黄泛区和黄河故道土壤中稳定有机碳含量处于较低水平,还有一定提升空间。同时,受到土地利用类型、耕作方式、种植类型、施肥方式和利用年限等多因素的共同作用,有机碳的活性和非活性部分含量在空间和剖面上差异性较显著。

河南是中国重要的粮食生产基地,高强度的用地方式和粮食需求与砂质土壤有机碳含量的提升之间矛盾突出。从耕地表层 0~20 cm 土壤 TOC 的平均含量来看,在近 70 年和 160 年的利用过程中,黄泛区和黄河故道的含量分别为 6.24 g/kg、8.54 g/kg,每年平均增速约 0.09‰、0.05‰,与少受泥沙影响区的 TOC 含量(11.18 g/kg)还存在 4.94 g/kg(黄泛区)、2.64 g/kg(黄河故道)差距,而 AOC 和 NOC 的含量也与少受泥沙影响区存在差距;20~100 cm 深度,黄泛区和黄河故道土壤有机碳各组分也有较大提升空间。分析表

明,黄河泥沙影响下的土壤质量有待改善。有机物的输入量和土壤颗粒物组成影响土壤结构体的形成和有机碳组分含量,推广秸秆还田、有机肥还田、外源颗粒物质的添加、保护性耕作等措施是提升土壤质量的有效途径。

## 5 结论

黄河泥沙冲/沉积作用改变了区内地表土壤颗粒物组成和土壤有机碳含量,表层0~20 cm的TOC、AOC、NOC含量和离散程度高于下层,同一土层中TOC的变化幅度和含量差异性最大,AOC最小,NOC介于二者之间。TOC、AOC、NOC的含量受结构因素和随机因素的共同作用,且二者的作用强度接近。

空间上的变化趋势来看,自表层向下层土壤TOC和NOC较为一致,AOC在表层0~20 cm与TOC、NOC一致,而在20~100 cm各层与0~20 cm存在差异,表现为高值区与低值区之间过渡更明显。从含量的空间变化来看,表层0~20 cm的差异性和变幅最大,随深度增加,三类有机碳的变化幅度在缩小,同一层中TOC、AOC、NOC含量差异性和变幅均呈现TOC > NOC > AOC的趋势。NOC的含量对TOC的贡献大于AOC,而AOC的含量更能体现出土壤TOC中的易变化量和空间上易发生变化的区域,NOC和AOC的含量及空间变化能较好反映TOC的空间变化和碳积累区域的空间分布。分析发现,黄河泥沙冲/沉积区分布、农业耕作过程和耕作历史是影响区内土壤有机碳及其组成含量和空间分布的主要因素。

农业耕作提高了砂质土壤中有机碳的含量,但增速缓慢,与区内高强度的农业生产和农产品需求之间矛盾突出。有机物的输入量和土壤颗粒物组成影响土壤结构体的形成和有机碳组分含量,推广秸秆还田、有机肥还田、外源颗粒物质的添加、保护性耕作等措施,是提升土壤质量环境和区内农业持续发展的有效途径。

## 参考文献(References)

- [1] Belay-Tedla A, Zhou X, Su B, et al. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(1): 110-116.
- [2] Zhu L Q, Hu N J, Zhang Z W, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system. *Catena*, 2015, 135: 283-289.
- [3] Yao J T, Kong X B. Modeling the effects of land-use optimization on the soil organic carbon sequestration potential. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(11): 1641-1658.
- [4] Greiner L, Keller A, Grêt-Regamey A, et al. Soil function assessment: Review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy*, 2017, 69: 224-237.
- [5] Drobnik T, Greiner L, Keller A, et al. Soil quality indicators-From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 151-169.
- [6] Wang Jingya, Zhang Fenghua. Distribution of soil aggregates and aggregate-associated organic carbon from typical halophyte community in arid region. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 600-607. [王静娅, 张风华. 干旱区典型盐生植物群落土壤团聚体组成及有机碳分布. *生态学报*, 2016, 36(3): 600-607.]
- [7] Liu Xinghua, Zhang Haibo, Li Yuan, et al. Variation of organic matter in soil aggregates with the succession of tidal flatland from barren land-saltmarsh-upland in the Yellow River Delta. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(2): 374-385. [刘兴华, 章海波, 李远, 等. 黄河三角洲滩涂—湿地—旱地土壤团聚体有机质组分变化规律. *土壤学报*, 2019, 56(2): 374-385.]
- [8] Chai Y J, Zeng X B, Sheng Z E, et al. The stability mechanism for organic carbon of aggregate fractions in the irrigated desert soil based on the long-term fertilizer experiment of China. *Catena*, 2019, 173: 312-320.

- [9] Zhu Renhuan, Zheng Zicheng, Li Tingxuan, et al. Effects of converting farmland to tea plantations on soil labile organic carbon fractions in the hilly region of western Sichuan, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(2): 744-751. [朱仁欢, 郑子成, 李廷轩, 等. 退耕植茶对川西低山丘陵区土壤活性有机碳组分的影响. *环境科学学报*, 2018, 38(2): 744-751.]
- [10] Laik R, Kumar K, Das D K, et al. Labile soil organic matter pools in a calciorthent after 18 years of afforestation by different plantations. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(2): 71-78.
- [11] Pu Yulin, Ye Chun, Zhang Shirong, et al. Effects of different ecological restoration patterns on labile organic carbon and carbon pool management index of desertification grassland soil in zoige. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 367-377. [蒲玉琳, 叶春, 张世榕, 等. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化. *生态学报*, 2017, 37(2): 367-377.]
- [12] Xu L, Wang C, Zhu J, et al. Latitudinal patterns and influencing factors of soil humic carbon fractions from tropical to temperate forests. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(1): 15-30.
- [13] Xu Jisheng, Zhao Bingzi, Zhang Jiabao, et al. Effects of long-term application of organic manure and chemical fertilizer on structure of humic acid in fluvo-aquic soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(3): 647-656. [徐基胜, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 长期施有机肥和化肥对潮土胡敏酸结构特征的影响. *土壤学报*, 2017, 54(3): 647-656.]
- [14] Chatterjee S, Bandyopadhyay K K, Pradhan S, et al. Effects of irrigation, crop residue mulch and nitrogen management in maize (*Zea mays* L.) on soil carbon pools in a sandy loam soil of Indo-gangetic plain region. *Catena*, 2018, 165: 207-216.
- [15] Cillis D, Maestrini B, Pezzuolo A, et al. Modeling soil organic carbon and carbon dioxide emissions in different tillage systems supported by precision agriculture technologies under current climatic conditions. *Soil & Tillage Research*, 2018, 183: 51-59.
- [16] Wu Min, Liu Shujuan, Ye Yingying, et al. Spatial variability of surface soil organic carbon and its influencing factors in cultivated slopes and abandoned lands in a Karst peak-cluster depression area. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(6): 1619-1627. [吴敏, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素. *生态学报*, 2016, 36(6): 1619-1627.]
- [17] Du Peiyong, Zhang Haitao, Guo Long, et al. Variation of soil organic matter in transition zones and its influencing factors. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1286-1295. [杜佩颖, 张海涛, 郭龙, 等. 平原丘陵过渡区土壤有机质空间变异及其影响因素. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1286-1295.]
- [18] Jia Haifeng, Luo Huaixiu, Hu Jinming, et al. Spatial variability of topsoil organic carbon and labile components in Napahai Wetland, northwest of Yunnan, China. *Mountain Research*, 2014, 32(5): 624-632. [贾海锋, 罗怀秀, 胡金明, 等. 纳帕海湿地地区表土有机碳及其活性组分的空间分异. *山地学报*, 2014, 32(5): 624-632.]
- [19] Kumar S, Lal R, Liu D, et al. Estimating the spatial distribution of organic carbon density for the soils of Ohio, USA. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(2): 280-296.
- [20] Li Y, Wang X, Niu Y, et al. Spatial distribution of soil organic carbon in the ecologically fragile Horqin Grassland of northeastern China. *Geoderma*, 2018, 325: 102-109.
- [21] Gao Wei, Yang Jun, Ren Shunrong. Balance characteristics of soil organic carbon under different long-term fertilization models in the upland fluvo-aquic soil of North China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1465-1472. [高伟, 杨军, 任顺荣. 长期不同施肥模式下华北旱作潮土有机碳的平衡特征. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1465-1472.]
- [22] Li Peipei, Wang Qiang, Wen Qian, et al. Effects of the return of organic materials on soil physical and chemical properties and bacterial number in sandy soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3665-3672. [李培培, 汪强, 文倩, 等. 不同还田方式对砂质潮土理化性质及微生物的影响. *生态学报*, 2017, 37(11): 3665-3672.]
- [23] Li Yongwen, Xu Xiaoxia, Liu Yuzhen. *Henan Geography*. Beijing: Beijing Normal University Press, 2010. [李永文, 徐晓霞, 刘玉振. *河南地理*. 北京: 北京师范大学出版社, 2010.]
- [24] Meng Zhaojiang, Liu Anneng, Wu Haiqing, et al. Mathematical model of water-fertilizer interaction for water-saving and high-yield winter wheat in east area of Henan Province. *Transaction of the CSAE*, 1998, 1: 86-90. [孟兆江, 刘安能, 吴海卿, 等. 黄海豫东平原冬小麦节水高产水肥耦合数学模型研究. *农业工程学报*, 1998, 1: 86-90.]
- [25] Huo Yazhen, Li Tianjie. *Experiment and Practice of Soil Geography*. Beijing: Higher Education Press, 1986. [霍亚贞, 李天杰. *土壤地理实验实习*. 北京: 高等教育出版社, 1986.]
- [26] Loginow W, Wisniewski W, Gonet S S, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20(1): 47-52.

- [27] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and  $^{13}\text{C}$  natural isotope abundance. *Plant and Soil*, 1993, 155/156(1): 399-402.
- [28] Zhang Junhua, Li Guodong, Nan Zhongren, et al. Research on soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbon under the effects of tillage in the Heihe oasis. *Geographical Research*, 2012, 31(4): 608-618. [张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 黑河绿洲区耕作影响下的土壤粒径分布及其与有机碳的关系. *地理研究*, 2012, 31(4): 608-618.]
- [29] Huang Xiaokui, Wang Anqiu. Soil geography of the yellow plain region. *Acta Geographica Sinica*, 1954, 20(3): 313-331. [黄孝夔, 汪安球. 黄泛区土壤地理. *地理学报*, 1954, 20(3): 313-331.]
- [30] Li Zhitian, Ma Zhensheng, Chen Guoming. *Soil Resources in Zhoukou Region*. Beijing: China Science and Technology Press, 1991. [李志田, 马振生, 陈国明. 周口地区土壤资源. 北京: 中国科学技术出版社. 1991.]
- [31] An Chunhua. Research on landscape pattern changes of the old course of Yellow River in Ming-Qing dynasties and the area beside the lower reaches of the Yellow River based on 3S [D]. Kaifeng: Henan University, 2007. [安春华. 基于3S的明清黄河故道与黄河下游沿岸景观格局变化研究[D]. 开封: 河南大学, 2007.]
- [32] Sun Caili, Xue Sha, Liu Guobin, et al. Effects of long-term fertilization on soil particles and microaggregate distribution in the loess area. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 550-561. [孙彩丽, 薛婳, 刘国彬, 等. 黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 550-561.]
- [33] Xue Weijiang, Che Defu, Cai Hong, et al. Grain-size composition of surface layer loess of Xi'an city and its shape character. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2004, 34(2): 223-227. [许卫疆, 车得福, 蔡宏, 等. 西安城郊表层黄土的粒度组成及其形态特征. *西北大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(2): 223-227.]
- [34] Yang Ting, Jing Hang, Yao Xu, et al. Soil particle composition and its fractal dimension characteristics of different land uses in Loess hilly region. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 1-24. [杨婷, 景航, 姚旭, 等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 1-24.]
- [35] Su Yongzhong, Zhang Ke, Liu Tingna, et al. Changes in soil properties and accumulation of soil carbon after cultivation of desert sandy land in a marginal oasis in Hexi Corridor region, Northwest China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(9): 1646-1654. [苏永中, 张珂, 刘婷娜, 等. 河西边缘绿洲荒漠沙地开垦后土壤性状演变及土壤碳积累研究. *中国农业科学*, 2017, 50(9): 1646-1654.]
- [36] Su Y Z, Yang R, Liu W J, et al. Evolution of soil structure and fertility after conversion of native sandy desert soil to irrigated cropland in arid region, China. *Soil Science*, 2010, 175(5): 246-254.
- [37] Aye N S, Sale P W G, Tang C X. The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(5): 697-709.
- [38] Vanlauwe B, Nwoke O C, Sanginga N, et al. Evaluation of methods for measuring microbial biomass C and N and relationships between microbial biomass and soil organic matter particle size classes in West-African soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(8): 1071-1082.
- [39] Tan Guangmu, Xu Wanli, Sheng Jiandong, et al. The variation of soil organic carbon and soil particle-size in Xinjiang oasis farmland of different years. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 279-285. [唐光木, 徐万里, 盛建东, 等. 新疆绿洲农田不同开垦年限土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳变化. *土壤学报*, 2010, 47(2): 279-285.]
- [40] McConkey B G, Liang B C, Campbell C A, et al. Crop rotation and tillage impact on carbon sequestration in Canadian prairie soils. *Soil & Tillage Research*, 2003, 74(1): 81-90.



## Spatial characteristics and variation mechanism of different soil organic carbon components in the alluvial/sedimentary zone of the Yellow River

ZHANG Junhua<sup>1,2</sup>, LI Guodong<sup>1,2</sup>, WANG Yansong<sup>1,2</sup>, ZHU Lianqi<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Wenliang<sup>1,2</sup>, DING Yapeng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions (Henan University), Ministry of Education, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

**Abstract:** Sediment from the Yellow River is the main material source in the formation of several landform types in the lower reaches of the Yellow River. This sediment deposition changes the surface soil structure and its organic carbon content. Here, the distribution characteristics of soil organic carbon components and their influencing factors were analyzed in the Kaifeng and Zhoukou areas based on field investigations, laboratory experiments and spatial analyses. The statistical results showed that the TOC, AOC and NOC contents were 0.05-30.03 g/kg, 0.01-8.86 g/kg and 0.02-23.36 g/kg, respectively. Contents were higher in the surface (0-20 cm) layer than those in the lower (20-100 cm) layer, and the sequence of change from high to low content in a single layer was TOC, AOC and NOC. The NOC content contributed to TOC more than AOC did. The geostatistical characteristics obtained by using the GS+ software showed that the nugget coefficients of TOC, AOC and NOC were between 0.50 and 0.67, with a moderate degree of spatial correlation. This indicates that structural and random factors commonly influence variations in TOC, AOC and NOC, and that the action intensity between them is similar. The overall trend in all areas was that the contents of TOC, AOC and NOC were relatively consistent with those from the 0-20 cm to the 20-100 cm layer, although a transition from high-value region to low-value region was obvious. The spatial distribution and the statistical characteristics of TOC, AOC and NOC contents indicates that the high-value region is located in the area less affected by sediment, and the low-value region is located in the area which the Yellow River floods. The old riverway of the Yellow River has a value somewhere in between. In flooded areas, the TOC, AOC and NOC contents were the lowest in the burst place, and then contents gradually increased in the direction of water flow and passed area. Spatial variation in the NOC and AOC contents reflected the regions of TOC spatial variation and accumulation well. Throughout history, the banks of the Yellow River have been overflowed, causing river realignment and serious flooding. The resulting sediment deposition changed the surface particulate matter composition and soil organic matter content. It was found that the distribution of deposited sediment in the flooded area and old riverway of the Yellow River, the farming process and the cultivation history were all important factors affecting SOC composition content and spatial distribution. In addition, the organic matter input, soil particle composition and their dynamic relationship were the key factors affecting soil structure and organic carbon components. In short, increasing organic matter content and improving soil structure are effective ways to improve soil quality and to achieve sustainable regional agricultural development.

**Keywords:** soil organic carbon; Yellow River sediment; spatial characteristics; farming history