

河南封丘县域农田土壤固碳速率 空间变异特征及其影响因素

赵占辉^{1,2} 张丛志¹ 刘昌华² 蔡太义¹ 张佳宝^{1*}

(¹中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室封丘农田生态系统国家试验站, 南京 210008; ²河南理工大学测绘学院, 河南焦作 454000)

摘要 农田土壤固碳速率是评价土壤固碳效应和潜力的重要指标, 精确估算区域农田土壤固碳速率对土壤地力及环境效应均具有重要意义。本研究选取黄淮海平原典型潮土区河南省封丘县为研究区域, 按照土壤利用-土壤类型联合单元布点法, 于2011年采集了70个耕层土样, 测定了土壤有机碳含量、机械组成、容重、pH, 并与全国第二次土壤普查(1981年)数据进行对比分析, 结合地统计方法和GIS技术研究了该地区近30年农田土壤固碳速率的空间变异特征, 利用显著性检验、回归分析、方差分析等方法定量分析了该区域农田土壤固碳速率的影响因素。结果表明: 近30年封丘县域土壤固碳速率平均值为 $0.33 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 变异系数为74%, 属于中等变异性; 土壤固碳速率的变化在东西方向上表现为西高东低、中部高南北低, 呈片状分布, 区域结构性因素是引起农田土壤固碳速率空间分布差异的主导因素, 如土壤类型、机械组成、容重、pH, 可解释空间变异的59.5%, 其次是随机性因素, 如秸秆还田量、施肥量, 可解释空间变异的40.5%。

关键词 黄淮海平原; 空间变异; 有机碳; 固碳速率

Spatial variability of soil organic carbon sequestration rate and its influencing factors in Fengqiu County, Henan, China. ZHAO Zhan-hui^{1,2}, ZHANG Cong-zhi¹, LIU Chang-hua², CAI Tai-yi¹, ZHANG Jia-bao^{1*} (¹State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ²School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China).

Abstract: Carbon sequestration rate in cropland soil is an important index to evaluate the effect and potential capacity of soil carbon sequestration. Accurate estimation of soil organic carbon sequestration rate is very important for studying cropland soil fertility and environmental effect. In this research, a typical fluvial-aquic soil area, Fengqiu County of Henan Province, located in Yellow River basin of Huang-Huai-Hai Plain of China, was chosen as the study area. A total of 70 soil samples were collected according to combined unit grid method of soil utilization with soil type in 2011. The soil organic carbon content, soil mechanical composition, soil bulk density and pH were measured, respectively. The spatial variability of the soil organic carbon sequestration rate of Fengqiu County in recent 30 years was also investigated by using geostatistics method and geography information system (GIS) technique, based on the comparative analysis of soil organic carbon content from samples surveyed in 2011 and the results surveyed by the 2nd state soil survey of China in 1981. In addition, the influencing factors of the soil carbon sequestration rate were quantitatively analyzed by statistical methods, such as significance testing, regression analysis and variance analysis. The results revealed that the soil organic carbon sequestration rate of recent 30 years was about $0.33 \text{ t C} \cdot$

本文由中国科学院战略性先导科技专项(XDA0505050203, XDB15030302)、国家自然科学基金项目(41471182)和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-ST5-055-4)资助 This work was supported by the Strategic Pilot and Technology Special Funds of the Chinese Academy of Sciences (XDA0505050203, XDB15030302), the National Natural Science Foundation of China (41471182), and the Science and Technology Service System Program of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-EW-ST5-055-4).

2015-10-30 Received, 2016-02-27 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

$\text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ with a coefficient variance of 74%, which belonged to a medium variation. The spatial variability characteristics of soil organic carbon sequestration rate was of sheet distribution, which was higher in the west and lower in the east, and decreased from the central region to the south and north. The primary influencing factors of soil organic carbon sequestration rate were structural factors, such as soil type, mechanical composition, soil bulk density and pH, which could explain 59.5% of the spatial variability in the study area. The secondary factors were random factors, such as straw application and fertilizing amount, which could explain 40.5% of the spatial variability.

Key words: Huang-Huai-Hai Plain; spatial variability; soil organic carbon; sequestration rate.

我国农田面积约 $130 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占陆地面积的 13.54%, 农田总有机碳库接近 90 Pg , 表土有机碳约 $5 \times 10^9 \text{ t}$, 有机碳密度为 $38.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 农田土壤已有的固碳速率约 $20 \sim 25 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ [1], 远低于欧洲国家农田土壤表层有机碳密度 ($53.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) [2-3]. 近 20 年来, 我国农田表土有机碳贮量总体增加了 $311.3 \sim 401.4 \text{ Tg}$, 从分布面积来看, 53%~59% 的农田土壤有机碳含量呈增长趋势, 30%~31% 呈下降趋势, 4%~6% 基本持平 [4]. 作为整个碳库中最重要、最活跃的组成部分之一, 农田土壤碳库的变化不仅能改变土壤肥力, 而且影响区域乃至全球碳循环, 土壤肥力则直接决定了农作物生产力的高低及其稳产性, 而碳循环过程与大气中温室气体浓度及全球变暖密切相关 [4]. 因此, 研究农田土壤有机碳变化规律及其影响因素具有重要意义.

近年来, 关于农田土壤有机碳时空变异特征及其变化规律研究较多, 如国内许多学者研究了我国华北、华中、华南等区域农田土壤有机碳时空变异特征. 结果表明, 农田土壤有机碳存在强烈的空间相关性, 农田土壤有机碳增加受土壤类型、地貌类型、外源物质投入的影响 [3, 5-9]. 目前, 研究主要运用地统计学和 GIS 相结合的方法, 一方面研究了农田尺度下土壤有机碳的空间变异性, 从随机性因素方面分析了土壤有机质变化的影响因素; 另一方面研究了区域尺度下土壤有机碳的空间分布特点及其变异规律, 揭示了结构性因素对有机碳空间变异特征的影响 [10]. 研究表明, 有机碳含量增加受自然和人为因素的影响, 尽管农田土壤有机碳的最终饱和度和固碳持续期受制于自然因素, 但人类活动对农田土壤有机碳的变化具有极其重要的影响 [1, 11-13].

黄淮海平原作为我国典型的旱作农业区, 面积达 $31.53 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全国旱地总面积的 29.8%, 土壤分布规律为“高砂低黏”, 潮土为其主要土壤类型, 有机碳含量相对较低 [14], 黄潮土为华北平原最主要的耕作土壤, 耕性良好, 矿物养分丰富, 在利用、改造上的潜力很大. 虽然已有黄淮海平原农田土壤

有机碳空间变异特征及影响因素的相关报道 [6, 9, 15-16], 但目前研究还不够深入, 特别是针对低产潮土农田土壤有机碳时空变异特征的研究并不充分.

本研究选择黄淮海平原黄河流域典型低产潮土区封丘县作为研究对象, 探讨了该地区近 30 年农田土壤固碳速率的空间变异规律, 并定量分析了土壤类型、机械组成、容重、pH、秸秆还田、施肥对土壤有机碳的影响, 旨在为提升黄淮海平原典型潮土区域土壤固碳能力及应对全球气候变化提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

封丘县位于黄淮海平原中部的黄河流域, 地理坐标为 $34^{\circ}53' \sim 35^{\circ}14' \text{ N}$, $114^{\circ}14' \sim 114^{\circ}46' \text{ E}$, 属暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 $13.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 年降水量 615.1 mm , 无霜期 214 d, 耕地面积 $0.9 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 属于黄淮海平原典型农业生态类型区, 主要土壤类型为潮土、风沙土, 引黄灌溉旱地作为主要的土地利用类型, 种植与耕地面积比为 0.7, 农业以“一年两熟的冬小麦-夏玉米”种植制度为主.

1.2 样点布设与样品采集

1.2.1 样点布设 样点布设主要考虑综合性、均衡性、可对照性, 采用土壤利用-土壤类型联合单元布点法; 以涵盖典型土壤类型、土地利用方式、种植模式和地理分布为原则, 根据布点单元类型和面积大小分配点数, 考虑地形、河流、道路分布等地理信息调整布点位置. 样点按土壤类型面积比例分布, 保证布设的样点具有代表性, 能够代表全县农田土壤的基本情况. 样点在各类型单元中数目及在空间上分布大致均匀; 样点布设点与全国第二次土壤普查样点相对应, 共布设 70 个样点 (图 1), 样点平均间距为 2.75 km.

1.2.2 样品采集 2011 年 10—11 月在封丘县对样点进行样品采集, 取 0~20 cm 土壤约 1.5 kg, 将土样风干后过筛供实验室分析测定. 在采样的同时记录

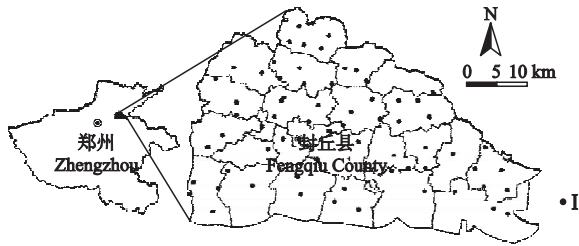


图1 封丘县采样点布设

Fig.1 Distribution of sampling sites in Fengqiu County.

I: 采样点 Sampling point.

每个样点的样点编号、行政区、经纬度、土壤类型、土地利用、农田管理等属性信息,调查当地的耕作制度、种植历史、当前种植状况、田间施肥管理情况、耕作状况、灌溉与水利设施、秸秆还田状况、正常产量水平等数据指标。

1.3 土壤性质测定

测定指标包括有机碳、容重、机械组成、pH。其中,土壤容重采用环刀法测定,机械组成采用吸管法测定,pH采用电位法测定,有机碳采用外加加热重铬酸钾氧化-滴定法测定^[17]。

1.4 数据处理

土壤有机碳密度($t C \cdot hm^{-2}$)采用土壤有机碳含量、土壤容重和土壤深度的乘积计算,其计算公式如下:

$$SOCD = (1 - \theta) \cdot \rho \cdot C \cdot T \cdot 1000^{-1} \quad (1)$$

式中: θ 为土壤中 $>2 mm$ 颗粒的体积百分含量; ρ 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); C 为土壤有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$); T 为土壤测量层的厚度(cm)。估算了土壤碳密度后,将土壤碳密度乘以不同区域的面积即获得区域的有机碳储量^[18]。

以土壤类型所代表的面积作权重,采用“土壤类型面积加权法”计算县域尺度农田土壤有机碳密度。用相似的加权法计算不同土类及全县农田土壤有机碳密度的平均值。近30年(1981—2011年)农田土壤固碳速率($t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)计算公式如下:

$$SOCD_{rate} = [(SOCD_{2011}) - (SOCD_{1981})] \cdot 30^{-1} \quad (2)$$

式中: $SOCD_{2011}$ 为2011年采样点的有机碳密度($t C \cdot hm^{-2}$); $SOCD_{1981}$ 为1981年采样点有机碳密度($t C \cdot hm^{-2}$)。

采用SPSS 19.0软件对数据进行相关统计分析。其中,单因素方差多重比较分析采用最小显著差异法(LSD),相关性分析采用双变量皮尔逊单侧显著检验;半方差函数分析在GS+ 7.0中完成,为减小特异值对数据分析的影响,采用域法识别特异值^[19];以ArcGIS 10.0作为分析平台,对封丘县1:20万土壤类型图、行政区划图进行配准和数字化,采用普通克里格方法进行克里格插值,生成封丘县农田土壤固碳速率分布图,并对各含量等级进行面积统计^[20-21]。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量统计特征

1981和2011年的封丘县表层土壤(0~20 cm)有机碳含量均服从正态分布(表1),从30年变化来看,有机碳最大值有显著提高,最小值变化较小,平均值增加明显。与1981年相比,2011年土壤有机碳最大值增加了83.1%,最小值降低了12.4%,平均值增加了54.1%。依据全国第二次土壤普查有机碳含量分级标准^[22],1981和2011年封丘县农田土壤有机碳平均含量处于四级水平($5.8 \sim 11.6 g \cdot kg^{-1}$)。从观测值构成的分布看,有机碳的分布在1981年呈右偏型,峰度为负,在2011年呈左偏型,峰度为正,反映了1981年观测值小于均值的样点数量较多,分布较平缓,经过30年变化,2011年观测值大于均值的样点数量增多,且大于均值的观测值离散性变弱,分布趋于陡峭,土壤有机碳密度趋于增加态势,这可能是由于受外界因素影响,如大量施入化肥与外源有机物料,促进了表层土壤有机碳累积,同时受结构性

表1 0~20 cm 土壤有机碳、固碳速率统计特征及有机碳密度

Table 1 Statistical characters of soil organic carbon, carbon sequestration rate and organic carbon density in the 0-20 cm layer

| 项目 Item | 年份 Year | 样点数 Sample size | 正态性 Normality | 最大值 Max | 最小值 Min | 均值 Mean | 标准 SD | 变异系数 CV (%) | 偏度 Skewness | 峰度 Kurtosis |
|---|------------|--------------------|------------------|------------|------------|------------|----------|----------------|----------------|----------------|
| 有机碳含量 Soil organic carbon ($g \cdot kg^{-1}$) | 1981 | 70 | 正态 | 8.42 | 3.09 | 5.98 | 1.41 | 24 | 0.50 | -0.40 |
| | 2011 | 70 | 正态 | 15.42 | 2.70 | 9.21 | 2.81 | 31 | -0.02 | 0.80 |
| 固碳速率 Carbon sequestration rate ($t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$) | 1981—2011 | 70 | 正态 | 1.19 | -0.19 | 0.35 | 0.26 | 74 | 1.03 | 2.29 |

表 2 土壤固碳速率半方差函数理论模型及相关参数

Table 2 Semivariance theoretical model and its parameters for soil organic carbon sequestration rate

| 理论模型 Theoretical model | 块金值 Nugget | 基台值 Still | 变程 Range (km) | 块金系数 Nugget coefficient (%) | 决定系数 R^2 | 残差 RSS |
|---------------------------|---------------|--------------|--------------------|----------------------------------|---------------|-----------|
| 线性 Linear | 0.0493 | 0.0677 | 340.25 | 72.9 | 0.63 | 0.0089 |
| 球状 Spherical | 0.0045 | 0.0631 | 18.30 | 7.1 | 0.40 | 0.0236 |
| 指数 Exponential | 0.0383 | 0.0703 | 46.20 | 54.5 | 0.40 | 0.0091 |
| 高斯 Gaussian | 0.0366 | 0.0724 | 30.14 | 50.5 | 0.40 | 0.0096 |

因素制约,如土壤固碳能力随土壤质地不同而存在差异,随着时间变化样点观测值域范围拉大,表现出峰度值增加。2011 年有机碳的变异系数较 1981 年增加了 25%,空间变异性明显增强。近 30 年土壤固碳速率最大值为 $1.19 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,最小值为 $-0.19 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,变异系数为 74%,属于中等变异性。样点平均值为 $0.35 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,高于全国农田耕层土壤平均固碳速率^[4-23];对其进行正态性检验 $P_{K-S}=0.15 (>0.05)$,数据正态分布达到显著水平,正态 QQ 图(图 2)表明,观测数据符合正态分布,满足地统计学分析要求。

2.2 土壤固碳速率空间变异结构特征

借助 GS+ 软件对研究区域有机碳密度进行变异函数拟合,根据拟合参数选择变异函数的最佳拟合模型,并以决定系数最大、残差最小的原则,选择变异函数的最佳拟合模型^[9]。由表 2 可知,研究区域土壤固碳速率变异函数最佳拟合模型为线性模型(图 3)。表 2 中块金值 (C_0) 表示块金效应,反映最小抽样尺度以下变量的变异性及测量误差,主要受试验误差和小于试验取样尺度上施肥、耕作方式、种植制度等随机因素影响而产生的变异;结构方差 (C) 又称偏基台值,主要受土壤母质、地形、气候等结构性因素影响而产生的变异,基台值 (C_0+C) 表示系统内

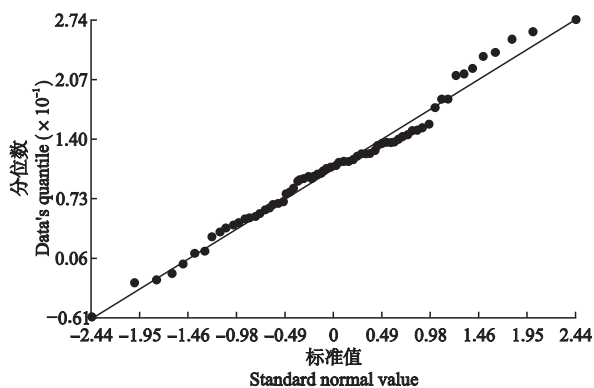


图 2 土壤有机碳密度变化速率正态 QQ 分布图

Fig.2 Normal QQ plot of soil organic carbon density change rate.

总的变异,块金系数 [$C_0/(C_0+C)$] 表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比例。一般认为,小于 25% 变量具有强烈的空间自相关性,在 25% ~ 75% 变量具有中等的空间自相关性,大于 75% 变量空间自相关性很弱,变异主要由随机变异组成,不适合采用空间插值的方法进行预测^[9-24]。分析结果显示(表 2),研究区域的块金值为 0.0493,说明在当前的采样尺度范围内存在随机因素引起的变异,块金系数为 72.9%,区域内存在中等空间自相关性,说明结构性因素对研究区有机碳变化速率空间变异起一定的作用。变程约为 340.25 km,说明研究区样点观测值在此空间范围内分布连续,存在空间自相关性,超出此范围空间自相关性消失。

2.3 土壤固碳速率空间分布特征

采用克里格插值后,选用交叉验证参数评价插值精度:标准平均值 (MS) 接近 0,均方根预测误差 (RMSE) 最小,平均标准误差 (ASE) 接近均方根预测误差 (RMSE),标准均方根预测误差 (RMSSE) 接近 1 为验证原则,选择预测结果最优插值方法。3 种克里格插值方法的交叉验证参数如表 3,从表中可以看出,普通克里格对固碳速率的插值预测结果较好,采用普通克里格对其进行插值绘制研究区域农田土壤有机碳变化速率空间分布图,并绘制标准误差预测图(图 4)。

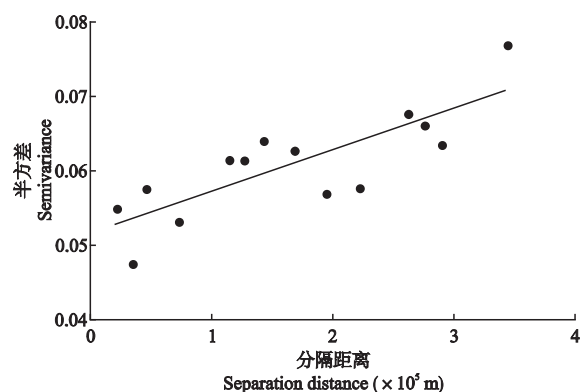


图 3 土壤固碳速率各向同性半方差图

Fig.3 Semivariograms of soil organic carbon sequestration rate at a lag distance.

表 3 克里格插值交叉验证参数
Table 3 Cross-validation parameters of Kriging

| 项目 Item | 标准平均值 Mean standardized | 均方根 预测误差 Root- mean- square prediction error | 平均标准 误差 Average standard error | 标准均方根 预测误差 Root- mean- square standard error |
|---------------------------|-------------------------------|---|--|---|
| 普通克里格 Ordinary Kriging | 0.0028 | 6.6733 | 7.3442 | 1.1087 |
| 简单克里格 Simple Kriging | -0.0026 | 0.2424 | 0.2452 | 1.0115 |
| 范克里格 Universal Kriging | 0.0070 | 0.2603 | 0.2643 | 1.0099 |

由图 4 可知,封丘县农田土壤有机碳固存速率中西部偏高,南部偏低,各变化等级大致呈片状分布。高值区出现在研究区域中部、西南部等农业发展较好的乡镇,而低值区多出现在南部、北部等农业发展相对落后的地区。有机碳固存速率集中分布在 0~0.6 t C · hm⁻² · a⁻¹ 范围内, 占全县总耕地面积的 99.5%, 其中 0~0.3 t C · hm⁻² · a⁻¹ 之间面积为 0.03×10⁶ hm², 占总耕地面积的 35.2%, 0.3~0.6 t C · hm⁻² · a⁻¹ 之间面积为 0.06×10⁶ hm², 占总耕地面积的 64.3%。以土壤类型所代表的面积作权重, 近 30 年县域尺度农田土壤有机碳固存速率为 0.33 t C · hm⁻² · a⁻¹, 高于全国农田土壤有机碳平均固存速率 (0.15~0.19 t C · hm⁻² · a⁻¹) [21], 封丘县农田土壤碳汇效应表现显著。由图 4 普通克里格插值预测标准误差图可以看出, 空间插值精度边际效应明显, 误差

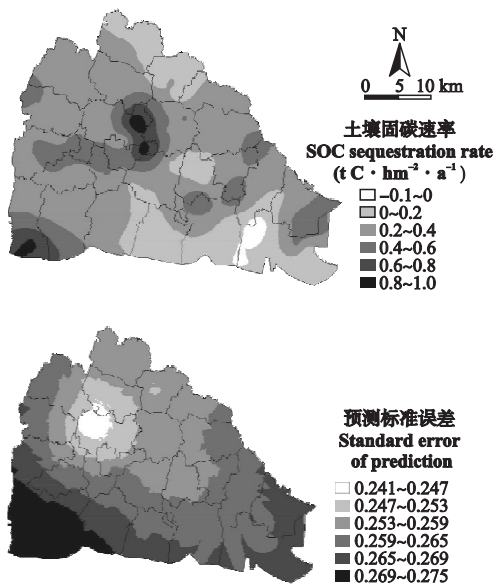


图 4 普通克里格插值土壤固碳速率空间分布图与预测标准误差
Fig.4 Spatial distribution and prediction standard error of SOC sequestration rate based on ordinary Kriging.

高值区集中在研究区域的边界,研究区域西南部表现尤为突出^[9],其原因可能在于预测误差随样点距离增加而增加,样点越少区域估值精度越低,最终形成样点密集区域预测误差小,样点稀疏区域预测误差迅速增加。因此,采用土壤利用-土壤类型联合单元布点法能在一定程度上减少空间插值预测误差。

以样点空间坐标为 X-Y 平面坐标, X 轴表示正东方向, Y 轴表示正北方向, Z 轴表示样点固碳速率大小, 将其投影到东西方向和南北方向的正交平面上, 通过投影点做出最佳拟合线, 得到土壤固碳速率的趋势面分析图(图 5), 研究区域土壤固碳速率在东西方向上表现为西高东低, 南北方向为中部高南北低, 呈 2 阶趋势, 该分析所得结果与该县土壤固碳速率的真实分布情况基本吻合。

2.4 土壤固碳速率的影响因素

影响农田土壤固碳速率的因素较复杂, 农田土壤固碳速率影响因素有结构性因素和随机性因素, 结构性因素, 如气候、地形、土壤理化性质等, 随机性因素, 如施肥、秸秆还田、耕作措施、种植制度等人为活动^[11-25]。前文初步揭示了研究区域农田土壤有机碳时空变异存在随机因素影响, 但结构性因素起主导作用, 鉴于封丘县区域内气候、地形、耕作措施、种植制度具有单一性的特点, 本研究仅从土壤质地、秸秆还田、施肥等 4 个方面分析封丘县农田土壤有机碳固碳速率的影响因素。

2.4.1 机械组成对土壤有机碳变化速率的影响 农田土壤理化性质作为影响有机碳库的首要因素, 对土壤固碳速率有重要影响, 如土壤砂粒、黏粒含量、

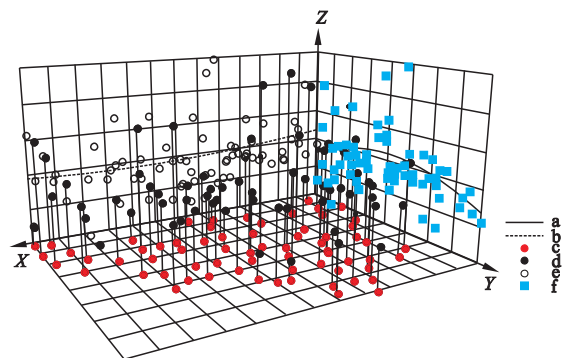


图 5 土壤固碳速率的趋势面分析
Fig.5 Trend surface analysis of soil organic carbon sequestration rate.

a) 南北方向趋势线 Trend line of north and south direction; b) 东西方向趋势线 Trend line of east and west direction; c) 观测值坐标 Location of sampling sites; d) 观测值 Observed value; e) 东西方向投影点 Projective sites in east and west direction; f) 南北方向观测值投影点 Projective sites in north and south direction.

容重、pH等.土壤机械组成影响着土壤的易耕性、通透性、保水保肥性能.影响土壤中有机碳的积累与消耗,进而影响土壤有机碳变化^[26].

土壤固碳速率与砂粒含量呈负相关关系,相关系数为-0.15,固碳速率与粉粒、黏粒含量呈正相关关系,相关系数分别为0.05、0.21,且固碳速率与黏粒含量呈显著相关关系($P < 0.05$).这可能由于封丘县地处黄河北岸,土质偏砂,不利于土壤中有机碳积累,即砂粒含量较高土质不利于土壤固碳,而黏粒含量较高会增加土壤物理和化学保护机制,即黏粒通过与有机物质结合形成有机-无机复合体,吸附稳定有机碳,降低了有机碳的矿化速度,有利于有机碳的积累.此外,土壤机械组成的差异性对土壤的水、热状况均有影响,制约土壤中作物根系生长与微生物活性,影响土壤有机碳的累积与损耗^[11, 24-25].

2.4.2 土壤类型对土壤有机碳变化速率的影响 研究区域作为黄淮海平原黄河流域典型的冲积平原,土壤以潮土为主要代表类型,发育于黄河冲积母质,是经过人为耕作熟化而形成的土壤.由于黄河多次泛滥覆盖沉积,剖面层次变化较大,土体构型较为复杂,主要有通体质地型土壤、通体沙质型土壤等.通体质地型土壤如两合土、淤土等,两合土是较为理想的土体构型,上层为轻壤,中下层为黏土层,保水保肥性能较好,有利于土壤有机碳积累;通体沙质型土

壤如风沙土等,土温变化大,水肥易流失.20世纪90年代该地区农田土壤大量施入有机肥,逐步改良其理化性状,不断提升土壤养分含量.由此可知,土壤有机碳含量及其固碳速率与土壤发育历史关系密切.统计结果表明,土壤有机碳变化情况随土壤类型不同而出现显著差异(表4),如黏粒适中的褐土化两合土与黏粒丰富的淤土初始(1981年)有机碳密度较高,其次是黏粒含量相对较低的固定风沙土、两合土、沙土,其中淤土、固定风沙土固碳速率较大,不同类型土壤有机碳密度及其固碳速率差距较大,存在显著差异.在空间分布上呈片状分布(图4),在东西方向上表现为西高东低,南北方向为中部高南北低,这与该地区两合土多分布于中西部的特点具有一致性.上述结果表明,土壤类型主要通过土壤机械组成影响土壤固碳速率.

不同土壤类型的容重、pH等理化性质存在差异性,容重不同的土壤水、肥、气、热调节能力各异,土壤容重过大抑制植物地下生物量,遏制外源有机物进入土壤,同时易造成土壤通气性差,微生物缺少良好的栖息和活动微环境,微生物量少,阻碍微生物作用形成腐殖质,影响土壤中有机碳积累,遏制土壤固碳速率;而容重过低土壤透气性较强,造成有机碳易氧化分解,影响土壤有机碳积累^[26].分析结果显示,当土壤容重小于 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,随土壤容重增大,

表4 不同土壤类型固碳速率和机械组成

Table 4 Soil organic carbon sequestration rate and mechanical compositions of different soil types

| 土类 Group | 亚类 Subgroup | 土属 Genus | 样点数量 Sample size | 面积比例 Area proportion (%) | 1981年 有机碳密度 SOC density in 1981 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) | 2011年 有机碳密度 SOC density in 2011 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) | 固碳速率 SOC sequestration rate ($\text{t} \cdot \text{C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) | 砂粒 Sand (%) | 粉粒 Silt (%) | 黏粒 Clay (%) |
|---------------------------|---------------------------|--|---------------------|-----------------------------|---|---|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| 风沙土 Aeolian sandy soil | 风沙土 Aeolian sandy soil | 固定风沙土 Fixed aeolian sandy soil | 3 | 1.38 | 16.11± 3.29b | 27.83± 0.38a | 0.39± 0.12a | 74.38± 8.25ab | 04.31± 5.40b | 19.35± 1.98d |
| | | 半固定风沙土 Semifixed aeolian sandy soil | 3 | 0.30 | 08.93± 1.69d | 09.90± 2.15c | 0.03± 0.13d | 84.81± 4.57a | 00.96± 0.89b | 11.41± 1.47e |
| 潮土 Alluvial soil | 褐土化潮土 Fluvo-aquic soil | 褐土化两合土 Cinnamon-combined soil | 4 | 3.85 | 17.37± 3.58a | 23.60± 5.21b | 0.21± 0.07bc | 57.31± 3.46bc | 16.60± 3.77b | 23.16± 2.47c |
| | | 黄潮土 Fluriogenic soil | 4 | 5.38 | 15.07± 4.22c | 24.04± 4.31b | 0.30± 0.08b | 50.78± 4.49d | 20.97± 2.20b | 24.94± 0.80b |
| | | 黄潮土 Fluriogenic soil | 34 | 54.02 | 16.18± 3.79a | 27.25± 5.12ab | 0.37± 0.10b | 65.43± 9.86b | 09.74± 6.57b | 21.72± 2.57d |
| | | 黄潮土 Fluriogenic soil | 3 | 7.97 | 16.82± 4.67a | 20.53± 5.57bc | 0.12± 0.07c | 70.63± 2.48ab | 10.92± 2.51b | 14.75± 0.86e |
| | | 黄潮土 Fluriogenic soil | 9 | 10.54 | 17.70± 3.47a | 27.17± 3.92ab | 0.32± 0.08b | 48.99± 0.96e | 16.37± 0.55b | 31.60± 1.25a |
| 盐化潮土 Fluriogenic soil | 盐化潮土 Fluriogenic soil | 盐化潮土 Fluriogenic soil | 10 | 16.35 | 14.75± 1.79c | 26.00± 3.32b | 0.37± 0.05b | 56.66± 8.02c | 21.73± 7.61a | 18.96± 1.37d |

不同字母表示不同土属间差异显著($P < 0.05$) Different letters meant significant difference among different soil genus at 0.05 level.

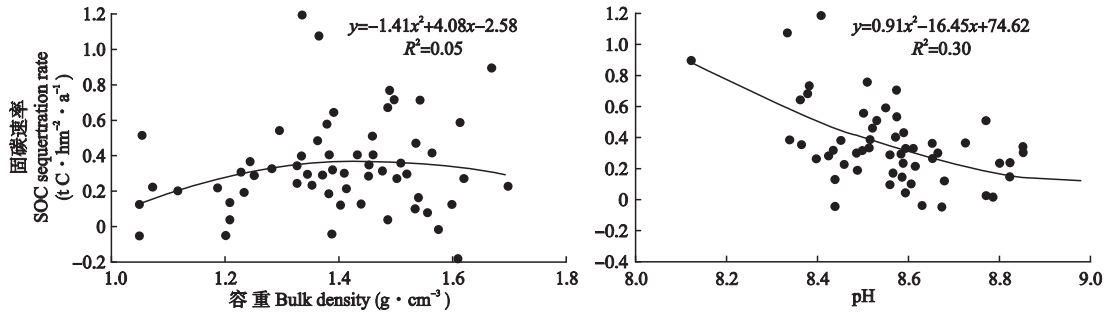


图 6 土壤容重和 pH 与土壤固碳速率的关系

Fig.6 Relationships between soil bulk density and pH and soil organic carbon sequestration rate.

固碳速率逐渐增大,当土壤容重大于 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,随土壤容重增大,固碳速率逐渐减小(图 6),可见容重适中(约 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)的土壤有利于有机碳累积.土壤 pH 通过影响微生物的活性和酶活性来影响土壤有机碳的矿化分解,pH 过高抑制微生物的活性,减缓有机碳的周转^[26],进而影响土壤有机碳变化.国内外学者研究发现,土壤 pH 对土壤酶活性的影响较大,而且土壤中的微生物含量受 pH 控制,细菌相对于古菌丰度随土壤 pH 的增大而逐渐减小^[27-29].研究区域土壤 pH 与固碳速率呈反比关系(图 6),这是由于该地区土壤为碱性潮土,pH 普遍偏高,抑制土壤酶和微生物活性,减缓有机碳周转,影响土壤有机碳积累^[27-31].

2.4.3 人为因素对土壤固碳速率的影响 影响土壤有机碳含量的因素是复杂的,除受土壤质地影响外,人为因素也是影响土壤有机碳含量及其变化的重要因素^[32].人为耕作施肥、秸秆还田等活动是影响土壤有机碳含量最活跃的因素,农田土壤被直接输入大量外源有机、无机物料,直接影响土壤地上、地下物质分配、根系深度、根生物量等,进一步影响土壤有机碳输入模式、速度、数量和质量^[33-34].在相同水热条件下,施肥量主要影响作物产量及地上与地下生物量,产量作为从土壤直接输出的部分,间接参与土壤固碳,地上生物量主要指秸秆、残茬等,秸秆通常以还田方式进入表层土壤,并快速分解为糖类、淀粉、脂肪等,增加土壤有机碳源,残茬在人为翻耕作用下被输入土壤,与地下生物量如根系等在微生物作用下转化为腐殖质,增加土壤碳贮量^[35-36].化肥中丰富的有效氮有利于外源有机物转化为腐殖质,如促进秸秆腐解等^[23],提高土壤有机碳库.

自 20 世纪 90 年代以来,研究区域内大力推广秸秆还田技术,根据本研究调查数据,封丘县近 30 年粮食作物秸秆总产出量约为 $11.98 \times 10^6 \text{ t}$,其含碳

量约为 $4.94 \times 10^6 \text{ t}$,而直接进行秸秆还田的农田面积约达 $0.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$,秸秆还田量约为 $10.16 \times 10^6 \text{ t}$,由秸秆还田带入土壤的有机碳总量约为 $4.19 \times 10^6 \text{ t}$,可见近年来由秸秆还田引起的土壤固碳数量较大,年间有明显增加趋势(图 7).河南省统计局 2011 年统计数据显示^[37],1981—2011 年,封丘县农田化肥施入量逐年增加(图 8),累积用量分别约为:氮肥(N) $0.64 \times 10^6 \text{ t}$,磷肥(P_2O_5) $0.36 \times 10^6 \text{ t}$,钾肥

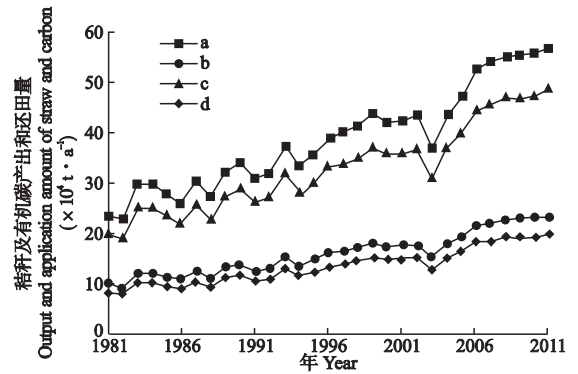


图 7 1981—2011 年农田秸秆产出和还田量

Fig.7 Amount of straw output and straw returned in cropland from 1981 to 2011.

a) 秸秆产出量 Straw output; b) 秸秆有机碳产出量 Straw carbon output; c) 秸秆还田量 Straw application; d) 秸秆有机碳还田量 Straw application carbon. 下同 The same below.

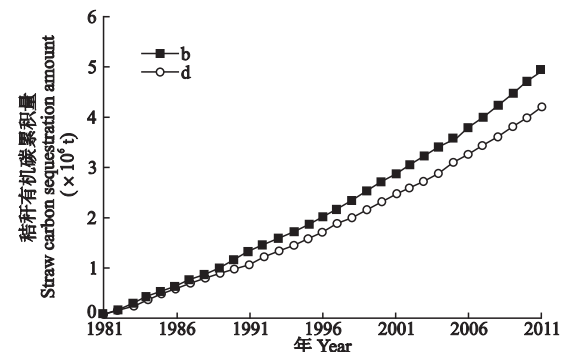


图 8 1981—2011 年农田秸秆产生和还田有机碳累积量

Fig.8 Organic carbon accumulation of straw output and return.

表 5 不同因素对土壤固碳速率影响的方差分析

Table 5 Variance analysis of different influence factors on soil organic carbon sequestration rate

| 固碳速率 Sequestration rate | 结构性因素 Structural factor | | | | | 随机性因素 Random factor | |
|---|-------------------------|------------|------------|-----------------------|------|------------------------------|------------------|
| | 砂粒 Sand | 粉粒 Silt | 黏粒 Clay | 容重 Bulk density | pH | 秸秆还田 Straw application | 施肥 Fertilizer |
| 方差 Variance | 11.15 | 8.58 | 5.95 | 0.09 | 0.10 | 12.61 | 4.99 |
| 占总方差比例 Variance percentage to total variance (%) | 25.6 | 19.7 | 13.7 | 0.2 | 0.2 | 29.0 | 11.5 |

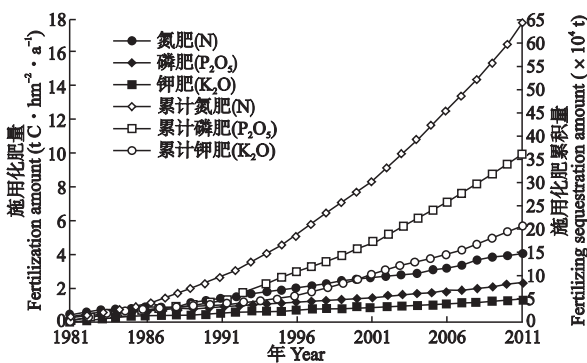


图 9 1981—2011 年农田化肥施入量及积累量

Fig. 9 Quantity and accumulation amount of chemical fertilizers in cropland during 1981 to 2011.

(K_2O) 0.21×10^6 t, 累积总施肥量 1.21×10^6 t. 可见, 近年来研究区域内投入了大量化肥. 进一步研究表明, 调查样点施肥量、秸秆还田量与土壤固碳速率呈显著正相关 ($P < 0.05$). 由此可得, 秸秆还田量与施肥量能够在一定程度上影响该地区农田土壤固碳速率.

2.5 土壤固碳速率与影响因素的相关性及方差分析

土壤固碳速率与土壤 pH 呈显著负相关, 与黏粒含量、秸秆还田量、施肥量呈显著正相关. 结合前文分析可得, 机械组成、土壤类型可作为研究区域内影响土壤固碳速率的主要因素, 土壤容重、pH 与土壤固碳速率关系密切, 秸秆还田量、施肥量则是促进土壤有机碳累积重要的人为因素之一. 因此, 通过改良土壤结构, 合理添加外源有机、无机物料, 有利于土壤固碳, 提高农田土壤固碳速率.

通过一般线性模型方差成分估计方法, 分析各影响因素对土壤固碳速率变异性的贡献 (表 5). 在县域尺度上, 农田土壤固碳速率受结构性因素与随机性因素的影响, 结构性因素可解释 59.5% 的土壤固碳速率变异性, 其中机械组成在结构性因素中占主导地位; 秸秆还田量与施肥量作为研究区域主要随机性因素, 可解释 40.5% 的土壤固碳速率变异性,

秸秆还田量方差贡献大于施肥量. 因此, 在研究封丘地区农田土壤固碳效应时, 应充分考虑土壤质地、秸秆还田情况、施肥量等因素的影响.

3 结 论

研究区域农田土壤固碳速率在空间上呈片状分布, 在东西方向上表现为西高东低, 南北方向为中部高南北低, 高值区出现在研究区域中部、西南部地区农业发展较好的乡镇, 而低值区多出现在南部、北部农业发展相对落后地区. 固碳速率集中分布在 $0 \sim 0.6$ $t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 范围内, 占全县总耕地面积的 99.5%, 其中固碳速率为 $0 \sim 0.3$ $t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 面积为 30515.33 hm^2 , 占总耕地面积的 35.2%, $0.3 \sim 0.6$ $t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 面积为 55709.33 hm^2 , 占总耕地面积的 64.3%.

对封丘县农田土壤样点有机碳密度进行面积加权计算所得县域农田土壤有机碳密度 1981 年为 15.91 $t C \cdot hm^{-2}$, 2011 年为 25.93 $t C \cdot hm^{-2}$, 与全国农田表土有机碳密度平均值 (38.5 $t C \cdot hm^{-2}$) 相比仍有很大差距, 土壤有机碳储量 2011 年为 2.25×10^6 t, 1981 年为 1.38×10^6 t, 近 30 年县域有机碳储量增加 0.87×10^6 t, 碳汇效应表现显著. 农田表土固碳速率为 0.33 $t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, 明显高于全国农田土壤有机碳平均固碳速率 $0.15 \sim 0.19$ $t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ [21]. 因此, 近 30 年封丘县农田土壤具有显著固碳效应, 但有机碳密度仍低于全国平均值. 可见, 目前封丘县农田土壤具有较大的固碳潜力.

研究区域土壤固碳速率受到结构性因素和随机性因素影响, 结构性因素是引起农田土壤固碳时空变异的主导因素, 如土壤类型、机械组成、容重、pH, 可解释空间变异性的 59.5%, 其次是随机性因素, 如秸秆还田、施肥, 可解释空间变异性的 40.5%. 提升该地区农田土壤固碳能力和肥力, 需要进一步改良土壤结构, 优化施肥方式, 合理采用秸秆还田等措施.

参考文献

- [1] Huang Y, Sun WJ, Zhang W, et al. Changes in soil or-

- ganic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review. *Scientia Sinica Vitae*, 2010, **53**: 766–775
- [2] Pan G-X (潘根兴), Zhao Q-G (赵其国). 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 (地球科学进展)*, 2005, **20**(4): 384–393 (in Chinese)
- [3] Zhang X-W (张晓伟), Xu M-X (许明祥), Shi C-D (师晨迪), et al. Soil organic carbon sequestration rate and its influencing factors in farmlands of semiarid regions: A case study in Zhuanglang County, Gansu Province. *Plant Nutrition and Fertilizer Science (植物营养与肥料学报)*, 2012, **18**(5): 1086–1095 (in Chinese)
- [4] Huang Y (黄耀), Sun W-J (孙文娟). The changes of farmland surface soil organic carbon content in mainland China during the past 20 years. *Chinese Science Bulletin (科学通报)*, 2006, **51**(7): 750–763 (in Chinese)
- [5] Cheng X-F (程先富), Shi X-Z (史学正), Yu D-S (于东升), et al. Change in carbon sequestration potential of cropland soil for 20 years in Xingguo County of Jiangxi, China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology (应用与环境生物学报)*, 2007, **13**(1): 37–40 (in Chinese)
- [6] Wang M-Y (王美艳), Shi X-Z (史学正), Yu D-S (于东升), et al. Scale effects of soil organic carbon variability of uplands in Huang-Huai-Hai agriculture region of China. *Soils (土壤)*, 2013, **45**(4): 648–654 (in Chinese)
- [7] Cai ZC, Qin SW. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Geoderma*, 2006, **136**: 708–715
- [8] Zhang X-Z (张秀芝), Zhao X-L (赵相雷), Li H-L (李宏亮), et al. Research on organic carbon storage and sequestration mechanism of soils in the Hebei Plain. *Earth Science Frontiers (地学前缘)*, 2011, **18**(6): 41–55 (in Chinese)
- [9] Zhao M-S (赵明松), Zhang G-L (张甘霖), Wang D-C (王德彩), et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai alluvial plain. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, 2013, **50**(1): 1–11 (in Chinese)
- [10] Song S (宋莎), Li T-X (李廷轩), Wang Y-D (王永东), et al. Spatial variability of soil organic matter and its influencing factors at county scales. *Soils (土壤)*, 2011, **43**(1): 44–49 (in Chinese)
- [11] Xu X-W (许信旺), Pan G-X (潘根兴), Wang Y-L (汪艳林), et al. Research of changing characteristics and control factors of farmland topsoil organic carbon in China. *Geographical Research (地理研究)*, 2009, **28**(3): 601–612 (in Chinese)
- [12] Liu Y, Guo L, Jiang QH, et al. Comparing geospatial techniques to predict SOC stocks. *Soil & Tillage Research*, 2015, **148**: 46–58
- [13] Brahim N, Ibrahim H, Hatira A. Tunisian soil organic carbon stock: Spatial and vertical variation. *Procedia Engineering*, 2014, **69**: 1549–1555
- [14] Wang S-H (王世航), Shi X-Z (史学正), Zhao Y-C (赵永存), et al. Simulation of carbon sequestration potential for dryland soils under recommended management practice scenarios in the Huang-Huai-Hai Region: A case study of Huojia County in Henan Province. *Ecology and Environmental Sciences (生态环境学报)*, 2011, **20**(3): 403–408 (in Chinese)
- [15] Jin X (靳熙). Estimation of the Organic Carbon Storage in Cultivated Surface Soil and Analysis of Its Scale Effect in Henan Province. Master Thesis. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014: 11–64 (in Chinese)
- [16] Dong L-L (董林林), Yang H (杨浩), Yu D-S (于东升), et al. Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia Irrigation Zone. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2014, **34**(3): 690–700 (in Chinese)
- [17] Lu R-K (鲁如坤). Soil and Agro-chemistry Analysis. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [18] Liu Y (刘杨), Yu D-S (于东升), Shi X-Z (史学正), et al. Influence of vegetable cultivation methods on soil organic carbon sequestration rate. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2012, **32**(9): 2953–2959 (in Chinese)
- [19] Zhang C-S (张朝生), Zhang S (章申), He J-B (何建邦). Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang River system: Geostatistics method. *Acta Geographica Sinica (地理学报)*, 1997, **52**(2): 185–192 (in Chinese)
- [20] Guo S-L (郭胜利), Che S-G (车升国), Liang W (梁伟), et al. SOC spatial distribution at small Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2010, **30**(1): 52–59 (in Chinese)
- [21] Yu DS, Shi XZ, Wang HJ, et al. National scale analysis of soil organic carbon storage in China based on Chinese Soil Taxonomy. *Pedosphere*, 2007, **17**: 11–18
- [22] Census Office of the State Soil Survey of China (全国土壤普查办公室). China Soil Survey Database. Beijing: China Agricultural Press, 1997 (in Chinese)
- [23] Zheng JF, Cheng K, Pan GX, et al. Perspectives on studies on soil carbon stocks and the carbon sequestration potential of China. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**: 3748–3758
- [24] Zhao Y-F (赵彦锋), Shi X-Z (史学正), Yu D-S (于东升), et al. Spatial variation of soil nutrients and its affecting factors at small scale: A case study of peri-urban areas in Wuxi, Jiangsu Province. *Chinese Journal of Soil Science (土壤通报)*, 2006, **37**(2): 214–219 (in Chinese)
- [25] Liang E (梁二), Cai D-X (蔡典雄), Dai K (代快), et al. Changes in soil organic carbon in croplands of China. I. Analysis of driving forces. *Soil and Fertilizer Sciences in China (中国土壤与肥料)*, 2010(6): 80–86 (in Chinese)

- [26] Wei X-B (魏小波), He W-Q (何文清), Li X-F (黎晓峰), *et al.* Review on the mechanism of soil organic carbon sequestration and its influence factors in cropland soils. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2010, **31**(4): 487-494 (in Chinese)
- [27] Xue Y (薛妍), Wu Z-J (武志杰), Zhang L-L (张丽莉), *et al.* Inhibitory effect of DMPP on soil nitrification as affected by soil moisture content, pH and organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(10): 2663-2669 (in Chinese)
- [28] Wang H (王涵), Wang G (王果), Huang Y-Y (黄颖颖), *et al.* The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(6): 2401-2406 (in Chinese)
- [29] Yang H, Ding WH, Wang JX, *et al.* Soil pH impact on microbial tetraether lipids and terrestrial input index (BIT) in China. *Science China Earth Sciences*, 2012, **55**: 236-245
- [30] Zhou L-X (周丽霞), Ding M-M (丁明懋). Soil microbial characteristics as bioindicators of soil health. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2007, **15**(2): 162-171 (in Chinese)
- [31] Song C-Q (宋长青), Wu J-S (吴金水), Lu Y-H (陆雅海), *et al.* Advances of soil microbiology in the last decade in China. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2013, **28**(10): 1087-1105 (in Chinese)
- [32] Zhou P (周萍), Pan G-X (潘根兴), Li L-Q (李恋卿), *et al.* SOC enhancement in major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in South China. V. Relationship between carbon input and soil carbon sequestration. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(12): 4260-4268 (in Chinese)
- [33] Liu W (刘伟), Cheng J-M (程积民), Gao Y (高阳), *et al.* Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influencing factors. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2012, **49**(1): 68-76 (in Chinese)
- [34] Xu K (许轲), Liu M (刘萌), Chen J-D (陈京都), *et al.* Effects of wheat-straw returning into paddy soil on dissolved organic carbon contents and rice grain yield. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(2): 430-436 (in Chinese)
- [35] Zhao M-S (赵明松), Zhang G-L (张甘霖), Wu Y-J (吴运金), *et al.* Temporal and spatial variability of soil organic matter and its driving force in Jiangsu Province, China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2014, **51**(3): 449-456 (in Chinese)
- [36] Wang H (王虎), Wang X-D (王旭东), Tian X-H (田宵鸿). Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(12): 3491-3498 (in Chinese)
- [37] Liu Y-Q (刘永奇), Liu S-D (刘世德). Henan Statistical Yearbook of 2011. Beijing: China Statistics Press, 2011 (in Chinese)

作者简介 赵占辉,男,1988年生,硕士研究生.主要从事土壤区域固碳、GIS应用研究. E-mail: zhanhuizhao@126.com

责任编辑 张凤丽

赵占辉,张丛志,刘昌华,等.河南封丘县域农田土壤固碳速率空间变异特征及其影响因素.应用生态学报,2016,27(5): 1479-1488

Zhao Z-H, Zhang C-Z, Liu C-H, *et al.* Spatial variability of soil organic carbon sequestration rate and its influencing factors in Fengqiu County, Henan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1479-1488 (in Chinese)