

DOI: 10.11766/trxb202006250335

任频频, 黄峰, 李保国. 黄淮海平原旱作农田土壤有机质含量的空间分异特征[J]. 土壤学报, 2022, 59 (2): 440–450.

REN Pinpin, HUANG Feng, LI Baoguo. Spatial Differentiation Characteristics of Soil Organic Matter in Dry Farmland in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (2): 440–450.

黄淮海平原旱作农田土壤有机质含量的空间分异特征*

任频频, 黄峰, 李保国[†]

(中国农业大学土地科学与技术学院, 农业农村部华北耕地保育重点实验室, 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

摘要: 基于空间自相关理论, 探讨黄淮海平原旱作农田土壤有机质含量的空间分布结构, 以及有机质与土壤黏粒含量和容重的空间相关关系。结果表明: 黄淮海旱作农田土壤不同土层有机质含量区域均值分别为 20.11±6.46 (0~10 cm), 14.76±5.11 (10~20 cm), 9.96±4.14 (20~30 cm), 8.03±3.45 (30~40 cm) g·kg⁻¹, 分别处在三级至五级水平; 0~20 cm 各土层中, 高值区域主要分布在太行山山前平原、山东引黄灌区等传统农业生产地带, 以及河南南部和安徽北部的砂姜黑土区。随着土层深度的增加, 有机质含量的空间分布结构趋于明显, 10~40 cm 各土层中, 河北平原和鲁西北地区呈现 LL (低-低)/HL (高-低) 型分布特征; 河南和安徽地区主要为 HH (高-高)/LH (低-高) 型, 但不同土层的具体分布差异较大。有机质含量与黏粒含量之间存在显著的数理相关关系, 与容重之间关系并不明显; 有机质/黏粒含量和有机质/容重的双变量局部空间自相关类型中, LL/HL 型主要分布在河北平原和鲁西北地区, 其中 HL 型在 0~20 cm 各土层中集中分布在太行山山前平原和山东引黄灌区地带, HH/LH 型样点主要分布在河南和安徽地区, 但不同土层具体分布差异明显。有机质与黏粒含量的空间自相关结构更明显; 0~10 cm、10~20 cm 土层较 20~30 cm、30~40 cm 土层的空间自相关结构更明显; 农业管理措施及其地域差异性造成各分布结构在空间水平方向及土壤垂直分层方向上差异化的重要原因。

关键词: 有机质含量; 分布结构; 空间自相关; 黄淮海平原; 旱作农田

中图分类号: S152; S158 文献标志码: A

Spatial Differentiation Characteristics of Soil Organic Matter in Dry Farmland in the Huang-Huai-Hai Plain

REN Pinpin, HUANG Feng, LI Baoguo[†]

(College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, and Key Laboratory of Agricultural Land Quality, Ministry of Natural Resources, Beijing 100193, China)

Abstract: [Objective] The Huang-Huai-Hai plain is one of the most important agricultural production bases in China. Nevertheless, there exists very little information on the current status of soil organic matter content in cultivated land across this area or on the in-depth analysis of spatial distribution characteristics for regional soil organic matter management. [Method]

* 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300801) Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300801)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: libg@cau.edu.cn

作者简介: 任频频 (1993—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事农业水土资源利用研究。E-mail: ppren2017@cau.edu.cn

收稿日期: 2020-06-25; 收到修改稿日期: 2021-01-15; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-08-05

Based on the spatial autocorrelation theory and soil property data from 267 sample sites, this study investigated the spatial distribution structures of soil organic matter content in dry farmlands in the Huang-Huai-Hai plain and analyzed the spatial autocorrelations between organic matter and soil clay particle content/soil bulk density. 【Result】The results showed that the regional average values of soil organic matter contents of dry farmlands in the Huang-Huai-Hai plain were 20.11 ± 6.46 (0–10 cm), 14.76 ± 5.11 (10–20 cm), 9.96 ± 4.14 (20–30 cm), and 8.03 ± 3.45 (30–40 cm) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which corresponded to levels 3 to 5. In the soil layers between 0–10 cm and 10–20 cm, the high-value areas were mainly distributed in the traditional agricultural production areas such as Piedmont plain of Taihang Mountain, and Yellow River Irrigation Area in Shandong, and lime concretion black soil areas in southern Henan and northern Anhui also included. As the depth of the soil layer increased, the spatial distribution structure of soil organic matter content became obvious. In the soil layers between 10–20 cm, 20–30 cm, and 30–40 cm, the Hebei plain and Northwestern Shandong showed LL (Low-Low) and HL (High-Low) distribution characteristics while Henan and Anhui regions mainly demonstrated HH (High-High) and LH (Low-High) type distributions. The specific distribution of spatial autocorrelation types in the different soil layers was different. Also, the mathematical relationship between the contents of soil organic matter and clay particles was significant ($P < 0.05$), but there was no significant difference in the relationship between organic matter content and soil bulk density. Among the two-variable local spatial autocorrelation types; organic matter/clay particle content and organic matter/bulk density, (i) the LL/HL types were mainly distributed in Hebei plain and Northwestern Shandong region; (ii) the HL type was concentrated in the Piedmont plain of Taihang Mountain and Yellow River Irrigation Area in Shandong for 0–10 cm and 10–20 cm soil layers; and (iii) the HH/LH types were mainly distributed in Henan and Anhui, with a distinct distribution in the different soil layers. 【Conclusion】Soil organic matter content in dry farmlands in the Huang-Huai-Hai plain showed apparent spatial autocorrelation characteristics. The spatial autocorrelation structure between soil organic matter content and clay content was more distinct. Importantly, the spatial autocorrelation structure in 0–10 cm and 10–20 cm soil layers was more obvious than that in 20–30 cm and 30–40 cm soil layers. The observed dissimilarities in distribution structure in the spatial horizontal and vertical soil layering directions were attributed to regional differences in agricultural management.

Key words: Soil organic matter content; Distribution structure; Spatial autocorrelation; The Huang-Huai-Hai Plain; Dry farmland

土壤有机质是土壤的重要组成部分，对改善土壤理化性质、调节土壤养分循环具有重要作用，是评价土地生产力的关键指标^[1]。掌握土壤有机质的空间分布特征及其关联因素，可为制定合理的农业种植规划及农田管理措施提供依据，是实现农田土壤可持续利用的前提^[2]。全国第二次土壤普查以来，我国大部分地区农田土壤有机质含量均呈现上升的趋势^[3]。了解现阶段农田土壤有机质含量的现状及空间分布特征，对下一步开展土壤有机质管理、土壤培肥等具有重要意义。为此，学者们开展了大量研究工作^[2-4]。马利芳等^[5]以新疆阜康市为研究区，综合运用经典统计学和地统计学方法，研究不同深度土壤盐分和有机质的空间变异特征。刘忆莹等^[6]采用地理空间插值方法，探讨了东北典型黑土区耕地有机质的空间分布规律。已有的研究多是基于地统计学方法评价土壤有机质的空间变异规律，并进一步采用不同的插值方法进行区域可视化。

黄淮海平原作为我国重要的农业生产基地之

一，针对该地区土壤有机质时空变化特征的研究已有诸多报道。陶雯等^[7]对华北平原引黄灌区农业土壤资源质量的研究结果表明，灌区农田土壤有机质含量存在明显时空分布差异性。胡景辉等^[8]探讨了河北山前平原高产类型区土壤养分状况，结果表明土壤有机质含量由第二次土壤普查的 $10.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提升至 2014—2015 年的 $19.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。贾良良等^[9]通过分析河北省 2009—2014 年测土配方施肥数据，发现河北全省土壤有机质含量均值为 $17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，且自西北向东南方向逐渐降低。然而，前人的研究多是基于田块尺度或者小区域尺度展开，并且单纯注重描述土壤有机质含量的时间变化或空间分布^[10-12]。此外，调研取样点范围小、取样时期不统一等是目前研究的普遍现状。在黄淮海平原全区域尺度内开展农田土壤有机质含量现状调查，并深入分析其空间分布特征，对该地区农田土壤碳固持和储量评估、在宏观尺度上把握土壤有机质含量的动态分布特征、因地制宜制定相应的培肥管理措施具有重要意义。

鉴于此,本研究依托 2017 年黄淮海旱作区土壤肥力调查项目,从空间自相关的角度探讨了该区域旱作农田土壤有机质含量的空间分布特征,并进一步分析了土壤有机质与黏粒含量和容重的空间自相关关系,基于划分的空间自相关类型,浅析了每种空间结构可能出现的原因,以期为确定合理的宏观土壤养分管理单元及土地利用规划等提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究中黄淮海平原旱作农田的确定:基于 2015 年黄淮海地区土地利用现状图,根据坡度分级标准,将地形坡度 < 5°、1 km² 网格内旱地占耕地 40% 以上区域、并考虑已有野外布点情况的区域作为旱作农田(图 1)。研究区位于 32°13'—41°06'N, 112°24'—119°85'E 之间,涵盖北京、天津、河北、山东、河南以及安徽的 274 个县市,总面积约 270 000 km²。该区域地处暖温带大陆性季风气候带,雨热同期特点明显,春冬寒冷干燥,夏季高温多雨,年降水量在 500~900 mm 之间,年际降水差异较大,年内降水季节分配不均,多集中于夏季,约占全年降水的 70%,区域内土壤类型以潮土、褐土、砂姜黑土为主,农业种植制度主要为冬小麦-夏玉米轮作,是我国重要的农业生产区域之一^[13-14]。

1.2 采样与分析

本研究土壤样点数据来源于 2017 年旱作区土壤肥力调查项目。土壤采样点布设原则和方法如下:通过采用网格布点与分层抽样相结合,在研究区以 15 km × 15 km 网格布点并抽取旱地斑块(含水浇地),结合土壤亚类进行抽样,同时考虑种植体系、分布面积和集中程度等因素,主要在潮土、褐土、砂姜黑土等土类布设,且保证每种土壤亚类均有布设,根据上述规则,黄淮海旱作农田共设置 267 个土壤采样点(图 1)。土壤样品采集时间为 2017 年 5 月,样地均选择作物长势良好的小麦地块,采样深度为 0~40 cm,每 10 cm 一个层次,每点取原状土和扰动土各一种,每种设 3 个重复。采集的土样利用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量,激光粒度仪法测定土壤机械组成,环刀法测定土壤容重。

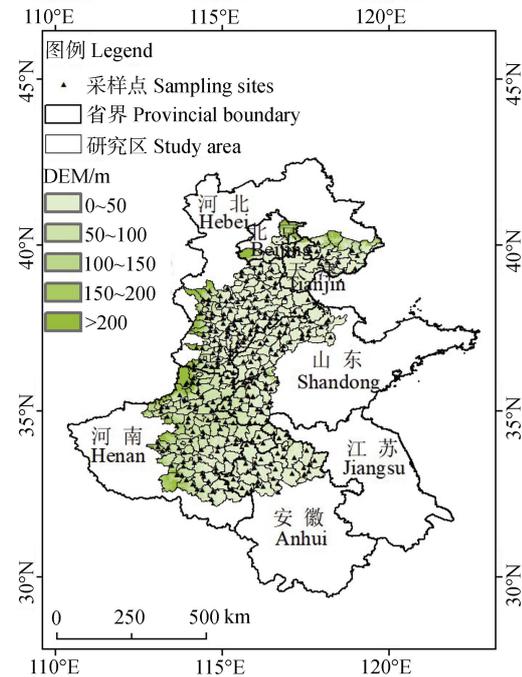


图 1 研究区高程和样点分布图

Fig. 1 Map of elevation and sample sites distribution in the study area

1.3 空间结构分析方法

空间自相关是指地理对象的某一属性值在相邻空间位置处取值之间的相互关系,是对该属性空间聚集或分散程度的度量。空间自相关现象广泛存在于地理空间数据中^[15],因此,进行空间自相关分析对深入理解地理对象的空间分布特征具有重要意义。Moran's I 指数在地理对象的空间自相关性研究中具有广泛应用,其不仅能在总体水平上对空间自相关现象做出评价,而且能够对地理属性值的聚集和离散程度作进一步的区域可视化。目前, Moran's I 指数在耕地质量保护^[16]、土壤重金属污染^[17]、土壤养分与肥力^[18]、土壤有机质^[19]等研究中得到普遍应用。空间自相关分为全局空间自相关和局部空间自相关。全局空间自相关对属性值的整体自相关程度进行描述,反映空间邻域单元属性值的总体相似程度^[16]。本研究中全局空间自相关采用全局 Moran's I 指数描述^[20]:

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum_i \sum_j W_{ij}) \sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$Z = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (2)$$

式中, N 为采样点总数目, W_{ij} 为空间权重, X_i 和 X_j 分别为 i 处和 j 处的有机质含量, \bar{X} 为有机质含量均值; Z 为标准化统计量值, $E(I)$ 为观测变量自相关性的期望值, $\text{var}(I)$ 为方差。Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, $I > 0$ 代表属性值呈现空间正相关, 趋于空间聚集; $I < 0$ 代表属性值呈现空间负相关, 趋于空间分散; $I = 0$ 代表属性值趋于空间随机分布。研究采用 Z 值进行显著性检验, 当 $Z \geq 1.96$ 或 $Z \leq -1.96$ 时, 表示空间相关性显著 ($P < 0.05$)。局部空间自相关用于进一步度量每个地域单元与其临近空间单元的属性值之间的相似性和相关性。本研究中局部空间自相关采用局部 Moran's I 指数进行描述^[20]:

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{S_X^2} \sum_j [W_{ij} (X_j - \bar{X})] \quad (3)$$

$$S_X^2 = \frac{\sum_j [W_{ij} (X_j - \bar{X})^2]}{N} \quad (4)$$

式中, 等号右边各项含义同式 (1)。将局部 Moran's I 指数进行区域可视化, 通过构建 LISA (Local Indicators of Spatial Association) 集聚图, 揭示属性值的不同空间分布类型。本研究采用 LISA 图将土壤有机质的空间自相关类型分为五种结构^[21]: HH (高-高型)、LL (低-低型)、HL (高-低型)、LH (低-高型) 以及 NN (非显著型)。其中, HH 和 LL 为正相关类型, 表示土壤有机质空间聚合程度较高, 即土壤有机质含量高/低的地区周围含量也高/低, HL 和 LH 为负相关类型, 表示土壤有机质呈空间离

散特性, 即土壤有机质含量高/低的地区周围含量低/高, NN 为非显著型, 表示土壤有机质无明显聚集或分散特征。此外, 研究进一步运用双变量局部空间自相关分析方法^[22], 探究土壤有机质含量与土壤黏粒含量/容重的空间自相关关系, 类似单变量空间分析, 双变量局部空间自相关采用双变量局部 Moran's I 指数进行描述, 计算公式如下:

$$I_{i,B} = \frac{(X_i - \bar{X})}{S_X^2} \sum_j [W_{ij} (Y_j - \bar{Y})] \quad (5)$$

式中, Y_i 为 i 处的土壤黏粒含量/土壤容重, \bar{Y} 为土壤黏粒含量/土壤容重均值, 其余各项含义同式 (1)、式 (4)。研究运用 ArcGIS10.2 软件进行地理数据空间结果展示, 运用 GeoDa1.12 软件进行空间自相关分析。

2 结果与讨论

2.1 有机质含量描述性统计特征

黄淮海平原旱作农田不同土层有机质含量的描述统计特征如表 1 所示。由表 1 可知, 不同土层有机质含量的区域均值分别为 20.11±6.46 (0~10 cm), 14.76±5.11 (10~20 cm), 9.96±4.14 (20~30 cm), 8.03±3.45 (30~40 cm) g·kg⁻¹, 变异系数分别为 32%、35%、42%、43%。有机质含量随土层深度的增加而减少, 变异系数则不断增大, 但均属中等变异范围^[23]。表层土壤 (0~10 cm) 有机质含量的极差最大, 为 33.99 g·kg⁻¹, 底层土壤 (30~40 cm) 最小, 为 21.81 g·kg⁻¹。

表 1 不同土层有机质含量的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of soil organic matter content in different soil layers

土层 Soil layers /cm	最小值 Minimum /(g·kg ⁻¹)	25%分位数 25% quantile /(g·kg ⁻¹)	平均值 Mean /(g·kg ⁻¹)	中位数 Median /(g·kg ⁻¹)	75%分位数 75% quantile /(g·kg ⁻¹)	最大值 Maximum /(g·kg ⁻¹)	标准差 SD /(g·kg ⁻¹)	变异系数 CV/%
0~10	4.96	15.65	20.11	19.87	24.08	38.95	6.46	32
10~20	3.91	11.44	14.76	14.18	17.87	35.14	5.11	35
20~30	2.02	6.98	9.96	9.39	12.11	26.79	4.14	42
30~40	1.04	5.61	8.03	7.58	9.93	22.85	3.45	43

不同土层有机质含量的空间分布如图 2 所示。0~10 cm 土层有机质含量多数在 $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上, 高值区域主要分布在河北西部、山东、河南南部和安徽北部地区, 有机质含量在 $20\sim 30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间; 10~20 cm 土层有机质含量多数在 $10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 高值区域分布类似 0~10 cm 土层; 20~30 cm、30~40 cm 土层有机质含量多数在 $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下, 且高值区域主要分布在研究区南部, 多数样点在 $10\sim 15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 低值区域主要分布在研究区北部, 多数样点在 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下。20~30 cm、30~40 cm 土层有机质含量总体呈现出“南高北低”的特点。

根据全国第二次土壤普查养分分级标准可知, 研究区 0~10 cm 土层有机质含量总体处于三级水平 ($20\sim 30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 10~20 cm 土层有机质含量总体处于四级水平 ($10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 20~30 cm、30~40 cm 土层则处于五级水平 ($6\sim 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。从空间分布来看, 不同土层之间存在较大差异。0~10 cm 土层中, 河北西部、山东、河南南部和安徽北部地区有机质含量均达到了三级水平, 上述区域在 10~20 cm 土层的有机质含量多数在 $15\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 接近三级水平。从地理位置看, 河北西部地处太行山山前平原地带, 水资源条件优越, 是我国高集约农业生产区域之一, 为获得作物高产, 大量投入水肥和有机物料^[24], 同时实施秸秆还田^[8], 是导致土壤有机质含量较高的主要原因。研究区山东县市地处引黄灌区, 水资源条件较好, 主要土壤类型为潮土, 农业资源条件优越, 完善的农田管理措施使土壤有机质含量处在一个较高的水平。位于引黄灌区的中国科学

院禹城试验站长期定位试验结果表明, 长期平衡施肥显著增加了该地区土壤有机质含量^[25], 2016 年德州市土壤有机质含量为 $16.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与第二次土壤普查相比, 增加了 $5.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[7]。0~20 cm 土层中, 河南南部和安徽北部的部分区域土壤有机质含量同样维持在一个较高的水平, 该地区土壤类型主要为砂姜黑土, 是一种典型的中低产土壤, 该区域土壤有机质含量相对较高, 与近年来针对砂姜黑土改良的增施有机肥、秸秆还田等农田管理措施有一定的关系^[26]。

20~30 cm、30~40 cm 土层中, 土壤有机质含量多数降到了 $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下, 处在四级水平或五级水平的标准。全国第二次土壤普查以来, 我国大部分地区农田土壤有机质含量均呈上升趋势^[3], 耕作措施、施肥方式、灌溉、秸秆还田等农田管理措施对土壤有机质含量的变化起决定性的作用。有研究指出, 长期均衡施肥, 可显著增加土壤有机质储量, 但这种增加主要集中在 0~20 cm 的土层^[25]。化肥通过使作物生长繁茂, 根茬、枝叶等残留量增多, 间接增加土壤有机质含量^[27]。然而, 黄淮海平原种植制度比较单一, 尤其是河北和山东地区, 连年的冬小麦-夏玉米轮作, 使得根系分布和下扎深度年际变化小^[28], 连年的玉米季免耕、小麦季旋耕导致土壤耕层变浅、犁底层变厚变硬^[29], 同时, 农业机械化程度高, 土壤亚表层长期受机械耕作压实^[30], 减弱了根系对下层土壤的穿透, 从而使根茬在深层土壤的残留减少。此外, 现行的旋耕耕作制度深度一般在 15 cm 左右^[31], 秸秆旋耕还田、免耕还田^[26]也使得表层土壤有机质含量高于深层土壤。

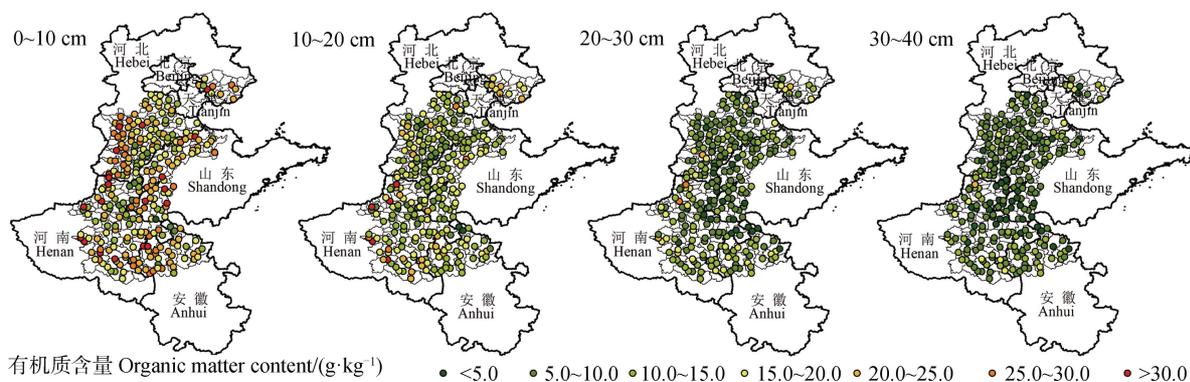


图 2 不同土层有机质含量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil organic matter content in different soil layers

2.2 空间自相关特征

不同土层有机质含量的空间自相关分析结果表

明: 0~10 cm 土层有机质含量的全局空间自相关特征并不显著 ($-1.96 < Z = -1.909 < 1.96$); 10~

20 cm、20~30 cm、30~40 cm 土层有机质含量的全局 Moran's I 值分别为 0.038 8、0.038 9、0.059 1, 且相应的标准化 Z 值均大于检验临界值 1.96, 表明各层次均呈现出显著的空间正相关特性 ($P < 0.05$), 土壤有机质含量有空间聚集的趋势。

图 3 揭示了在 95% 的置信水平下, 0~10 cm 土层大部分土壤样点表现出随机分布特点, 并无显著的局部空间自相关特征, 这与全局空间自相关结果

一致。10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 土层中, HL、LL 型样点主要分布在河北平原和鲁西北地区, 且以 LL 型为主, 表明这些区域除少数样点 (HL 型) 外, 有机质含量呈现低值聚集的空间分布结构。HH 和 LH 型在 10~20 cm 土层中集中分布在河南中南部区域, 在 20~30 cm 土层中则主要分布在河南南部, 在 30~40 cm 土层中则主要分布在河南南部和安徽北部区域, 不同土层中的具体分布差异较大。

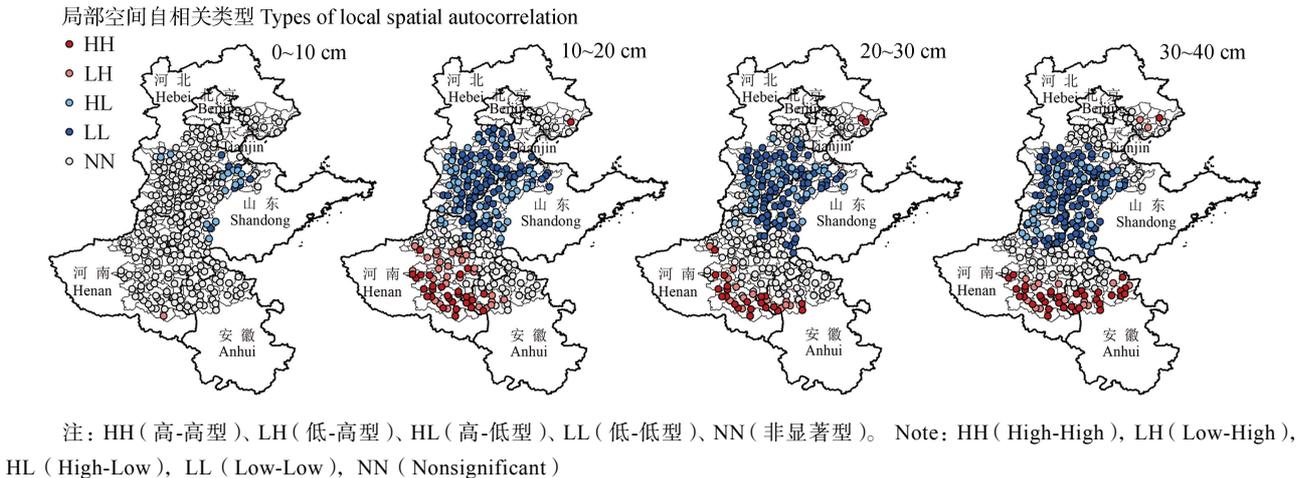


图 3 不同土层有机质含量局部空间自相关 LISA (Local Indicators of Spatial Association) 集聚图

Fig. 3 LISA (Local Indicators of Spatial Association) maps of local spatial autocorrelation of soil organic matter content in different soil layers

从空间自相关的分析结果来看, 0~10 cm 土层有机质含量在区域分布上并无地理位置上的相关性。由于表层土壤 (0~10 cm) 更容易受到人类活动和自然因素的影响, 其有机质含量并无显著空间自相关性, 反映了表层土壤有机质含量在空间结构特征上的随机性。10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 土层中, 有机质含量均呈现出显著的空间正相关特征, 并且随着土层深度的增加, 正相关性增强, 空间结构趋于明显。陈思明等^[19]的研究结果表明, 随着土层深度的增加, 结构性因素增强, 随机性因素减少, 土壤有机质含量的空间分布趋向规则。此外, 10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 土层中, LL/HL 型样点集中分布在河北平原和鲁西北地区, 且在不同土层的分布具有一定的相似性, 表明这些地区土壤有机质含量在空间水平方向以及土壤垂直分层上均具有一定的结构稳定性。农业种植制度单一 (冬小麦-夏玉米轮作), 以及所带来的连年固定的农业管理措施, 是造成上述分布特征的重要原因。相反, HH/LH 型样点在不同土层的空间分布差异较大。研

究区南部的河南、安徽地区土壤类型包括潮土、砂姜黑土、黄褐土、褐土等, 丰富的土壤类型是导致有机质含量空间差异较大的重要原因之一。此外, 种植结构多元化、农业管理措施的地域差异性也会对土壤有机质含量分布产生重要影响。

LISA 集聚图中, HL 和 LH 型样点的存在反映了局部地区土壤有机质含量的空间异向性。除了土壤母质、土壤类型的影响, 黄淮海地区耕地地块破碎、小农户种植管理比重大, 导致农田管理措施具有较大的地域差异性, 从而使得土壤有机质含量出现“低值环绕高值” (HL 型) 以及“高值环绕低值” (LH 型) 的空间分布结构。在实际农业生产中, HL 型样点土壤有机质含量高于周边地区的原因可做进一步分析, 以期为周边低有机质含量区培肥土壤、提升地力提供参考; LH 型则可以借鉴周边高有机质含量农田的管理措施等, 促使向 HH 型转化。

2.3 有机质关联因素及其空间自相关特征

基于空间自相关理论, 进一步探讨有机质含量与黏粒含量/土壤容重的双变量空间自相关特征, 相

应结果解释如下: 全局 Moran's I 值表示土壤有机质与黏粒含量/土壤容重的全局空间自相关性; 局部空间自相关中, HH 表示土壤有机质含量高的区域, 其周围土壤样点的黏粒含量/土壤容重也高, 其他 4 种自相关类型的含义与此类似^[22]。与传统的数理相关分析相比, 双变量空间自相关分析对识别两个地理要素在空间上的同向/异向分布特征, 揭示其空间分布结构具有独特优势。

2.3.1 黏粒含量 各个土层有机质含量和黏粒含量之间均呈现出显著的数理相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.39、0.47、0.43、0.60。土壤有机质和黏粒含量的全局空间自相关结果表明: 除 0~10 cm 土层两者无显著空间自相关关系外, 其余层次有机质含量与黏粒含量均呈现显著的全局空间正相关性, 表明有机质与黏粒含量的空间分布具有一定的同向性。有机质和黏粒含量的 LISA 集聚图(图 4)进一步揭示了两者的空间分布特征: 不同土层中, LL 型和 HL 型主要分布在河北平原和山东西北部地区, 尤其在 0~20 cm 土层中, HL 型集中分布在太行山山前平原以及山东引黄灌区一带; HH 型和 LH

型则主要分布在河南东南部和安徽北部地区。

一般而言, 土壤中黏粒含量越多, 有机质越容易被吸附和积累, 两者之间具有较大的关联性^[32]。本研究中, 土壤有机质含量与黏粒含量具有较好的数理相关关系; LISA 集聚图中, HH/LL 型土壤样点在空间上印证了上述理论。然而也有研究表明, 土壤黏粒、粉粒含量与土壤有机质呈负相关关系, 而土壤砂粒与土壤有机质呈正相关关系^[33], 造成这种结果差异的原因可能是研究区域的不同, 以及所带来的农田管理措施的差异性。本研究中, 研究区北部的河北平原和鲁西北地区土壤有机质含量较低与土壤黏粒含量偏低有较大的关系 (LL 型主导), HL 型样点的存在则表明局部地区土壤有机质管理的优越性, 使之维持在一个较高的水平。研究区南部的 LH 型地区土壤黏粒含量较高, 相应的有机质含量却处在一个较低的水平, 这些地区应被视为农业生产中的“有机质含量异常点”, 不适当的人类活动, 如频繁耕作、秸秆移除或焚烧等^[25], 一方面会加速土壤有机质的消耗, 另一方面使其得不到补充, 从而使有机质含量相对偏低。

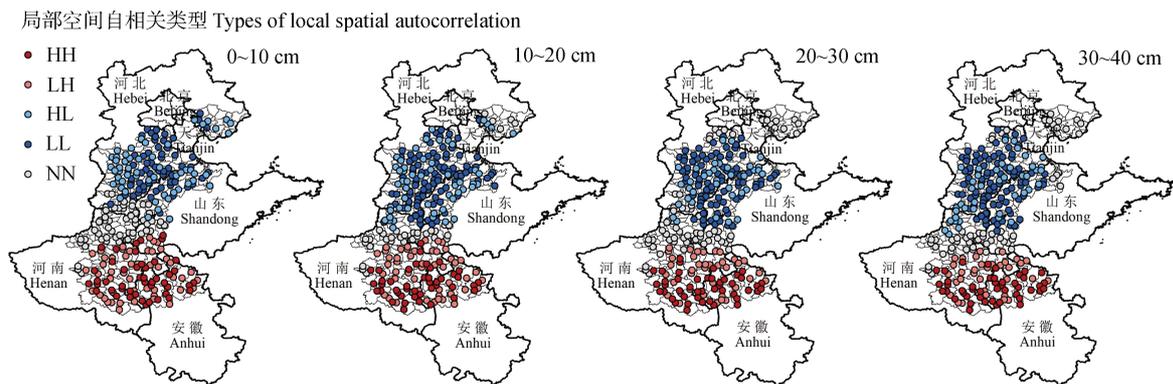


图 4 不同土层有机质含量和黏粒含量的局部空间自相关 LISA 集聚图。注: HH (高-高型)、LH (低-高型)、HL (高-低型)、LL (低-低型)、NN (非显著型)

Fig. 4 LISA (Local Indicators of Spatial Association) maps of local spatial autocorrelation of soil organic matter content and clay content. Note: HH (High-High), LH (Low-High), HL (High-Low), LL (Low-Low), NN (Nonsignificant)

2.3.2 容重 土壤容重是土壤物理性状的一项重要指标, 反映了土壤的紧实度、孔隙状况和结构特征^[34]。黄淮海旱作农田土壤有机质和容重之间的统计学相关系数表明两者之间并未有显著的相关关系。土壤有机质与容重的全局空间自相关结果表明: 总体水平上, 各个土层有机质含量与容重均呈现显著的空间正相关性 ($P < 0.05$)。有机质与容重的 LISA 集聚图(图 5)中: 0~10 cm、10~20 cm 土层 HH/LH

型主要分布在河南中南部和安徽北部地区; LL/HL 型主要分布在河北平原和鲁西北地区, 且 HL 型主要分布在太行山山前平原及引黄灌区一带。20~30 cm 土层中, 各自相关类型的空间分布较表层变化较大, 且 NN 型的样点增多。30~40 cm 土层中, LL/HL 型主要分布在河北和山东西北部地区, HH/LH 型则主要分布在河南地区。20~40 cm 土层各自相关类型的空间分布差异较大。

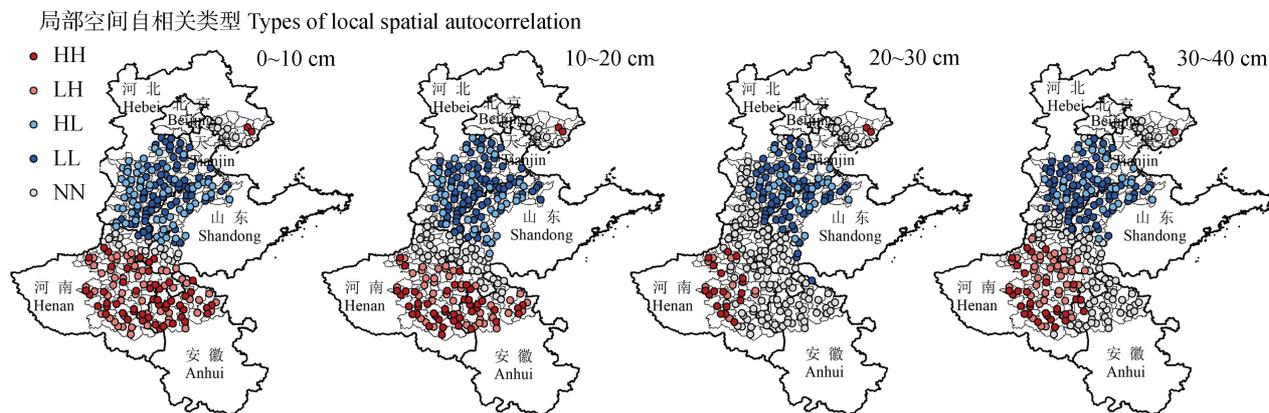


图 5 不同土层有机质和容重的局部空间自相关 LISA 集聚图。注：HH（高-高型）、LH（低-高型）、HL（高-低型）、LL（低-低型）、NN（非显著型）

Fig. 5 LISA (Local Indicators of Spatial Association) maps of local spatial autocorrelation of soil organic matter and bulk density in different soil layers. Note: HH (High-High), LH (Low-High), HL (High-Low), LL (Low-Low), NN (Nonsignificant)

通常情况下，农田土壤有机质含量越多，越容易促进土壤团聚体的形成，从而使土壤中大小孔隙增多，容重降低。然而本研究中，土壤有机质含量与容重之间并没有显著的数理相关关系。有研究表明，耕作对容重的影响较大，耕作能改善表层土壤孔隙状况，使表层土壤容重减小^[29]，免耕则会使表层土壤容重增加^[35]。冬小麦-夏玉米轮作、夏玉米季免耕冬小麦季旋耕是黄淮海旱作农田普遍的种植制度和耕作制度^[28]。连年固定的种植模式使得作物根系分布和下扎深度年际变化较小，对下层土壤的穿透减少，减弱对底层土壤的疏松作用^[27]。此外，连年的旋耕、农机具的压实等，促使土壤亚表层变厚变硬，容重增大^[28, 36]。农业措施对土壤容重、有机质含量带来了垂直分布上的影响，而各地区在具体耕作管理上的不同，则造成了两者的地域差异性，从而使两者之间关系复杂化。本研究中，土壤有机质和容重的 LISA 集聚图揭示了两者在空间上的同向/异向分布特征，为区域土壤有机质调控提供了一定参考。例如，对 HH 型地区来说，在维持现有有机质含量的前提下，可考虑深松等耕作方式，疏松深层土壤，增大孔隙度，减小容重，为作物根系生长创造良好的土壤物理环境。LH 型地区应在注重提高土壤有机质含量的同时，适当降低土壤容重，比如秸秆深耕还田等。LL 型地区则应在维持或降低现有土壤容重的情况下，通过增施有机肥等方法提高土壤有机质含量。HL 型地区可认为是相对比较理想的农业生产示范区，例如太行山山前平原一带以及山东引黄灌区一带。需要指出的是，土壤有机质培肥、作物根系生长最适容重等耕层特征的构建，需要在现有

实际情况的基础上进行改良和完善，并结合各地区农业生产实际情况，因地制宜实施农业管理。

3 结 论

随着土层深度的增加，有机质含量的空间分布结构趋于明显。有机质含量与黏粒含量之间存在显著的数理相关关系；两者的空间分布结构中，HL/LH（高-低/低-高）型反映了在土壤黏粒含量影响的基础上，人类活动等对土壤有机质含量的增加或减少作用。有机质含量与土壤容重之间无显著的数理相关关系；两者的空间分布结构中，HL（高-低）型样点“有机质含量较高，同时土壤容重较低”，是相对理想的分布结构；LH（低-高）型样点“有机质含量低，同时土壤容重高”，属于相对不理想的空间分布结构。有机质与黏粒含量的空间分布结构更明显；0~10 cm、10~20 cm 土层较 20~30 cm、30~40 cm 土层的空间分布结构更明显；农业管理措施及其地域差异性造成上述分布结构在空间水平方向及土壤垂直分层方向上差异化的重要原因。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Y T, Chang Q R, Li Z P, et al. Spatial characteristics of soil organic matter and total nitrogen in cultivated land of Weibei Tableland area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45 (8): 140—148. [赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45 (08): 140—148.]

- [2] Yuan X Y, Huang Y F, Gao R T, et al. Spatial variability characteristics of farmland soil organic matter in Pinggu District, Beijing, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (2): 70—76. [苑小勇, 黄元仿, 高如泰, 等. 北京市平谷区农用地土壤有机质空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24 (2): 70—76.]
- [3] Zhang J T, Lu C A, Wang J Z, et al. The change of farmland soil fertility in fluvo aquic soil district of China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(5): 6—10. [张金涛, 卢昌艾, 王金洲, 等. 潮土区农田土壤肥力的变化趋势[J]. 中国土壤与肥料, 2010 (5): 6—10.]
- [4] Wang Z L, Sun J, Jiang Q X, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of organic matter in black soil region of the Songnen Plain[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50 (10): 54—62. [王子龙, 孙建, 姜秋香, 等. 松嫩平原黑土区有机质空间分布特征及影响因素[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50 (10): 54—62.]
- [5] Ma L F, Xiong H G, Wang N, et al. Spatial variability of soil salinity and organic matter content at different depths[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47 (16): 264—270. [马利芳, 熊黑钢, 王宁, 等. 不同深度土壤盐分和有机质含量的空间变异特征[J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (16): 264—270.]
- [6] Liu Y Y, Pei J B, Wang J K. Spatial distribution and relationship between organic matter and pH in the typical black soil region of northeast China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36 (6): 738—743. [刘忆莹, 裴久渤, 汪景宽. 东北典型黑土区耕地有机质与pH的空间分布规律及其相互关系[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36 (6): 738—743.]
- [7] Tao W, Zhang X B, Sun Z G, et al. Spatio-temporal patterns of the grain yield and quality of agricultural soil resources in the irrigated area of the Yellow River in the North China Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34 (4): 829—838. [陶雯, 张旭博, 孙志刚, 等. 华北引黄灌区粮食产量与农业土壤资源质量时空分布特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34 (4): 829—838.]
- [8] Hu J H, Sun L M, Lei Y K, et al. Soil nutrient status and evolution rule of high yield fields in piedmont plain of Hebei Province. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44 (11): 1664—1668. [胡景辉, 孙丽敏, 雷雅坤, 等. 河北省山前平原高产类型区耕地土壤养分状况及演变规律[J]. 山西农业科学, 2016, 44 (11): 1664—1668.]
- [9] Jia L L, Sun Y M, Liu K T, et al. Soil fertility status of farmland and its change in different ecological region of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49 (2): 367—376. [贾良良, 孙彦铭, 刘克桐, 等. 河北省不同生态区农田土壤肥力现状及变化特征[J]. 土壤通报, 2018, 49 (2): 367—376.]
- [10] Zheng H N, Wang X J, Wan Z M, et al. Spatial heterogeneity of soil organic matter and nutrients in typical farmland in the North China Plain[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019 (1): 55—61. [郑昊楠, 王秀君, 万忠梅, 等. 华北地区典型农田土壤有机质和养分的空间异质性[J]. 中国土壤与肥料, 2019 (1): 55—61.]
- [11] Jiang W, Gao Y B, Liu Y, et al. Spatial variability of soil organic matter and its influencing factors in southern area of Daxing District in Beijing[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28 (3): 482—488. [蒋威, 郜允兵, 刘玉, 等. 北京市大兴区南部土壤有机质空间变异及其影响因素[J]. 浙江农业学报, 2016, 28 (3): 482—488.]
- [12] Sun Y L, Liu Q. Soil fertilities and its relationship to maize productivity in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Soils, 2009, 41 (2): 274—277. [孙叶林, 刘勤. 黄淮海平原封丘县土壤肥力变异与农田生产力相关研究[J]. 土壤, 2009, 41 (2): 274—277.]
- [13] Wang X T, Zhang S, Deng F, et al. Mapping the cultivation areas of summer maize using spatial variations of crop phenology over Huang-Huai-Hai Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40 (10): 647—659. [王雪婷, 张莎, 邓帆, 等. 基于作物空间物候差异提取黄淮海夏玉米种植面积[J]. 中国农业气象, 2019, 40 (10): 647—659.]
- [14] Sun X S, Long Z W, Song G P, et al. Effects of climate change on cropping pattern and yield of summer maize-winter wheat in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50 (13): 2476—2487. [孙新素, 龙致炜, 宋广鹏, 等. 气候变化对黄淮海地区夏玉米-冬小麦种植模式和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50 (13): 2476—2487.]
- [15] Zhang C S, McGrath D. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods[J]. Geoderma, 2004, 119 (3/4): 261—275.
- [16] Gao J G, Huang R. Protection zoning of cultivated land based on cultivated land quality index and spatial autocorrelation on southern area of Jiangsu Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26 (3): 213—218. [高建岗, 黄锐. 基于耕地质量指数和空间自相关的苏南地区耕地保护分区[J]. 水土保持研究, 2019, 26 (3): 213—218.]
- [17] Zhang C S, Luo L, Xu W L, et al. Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban

- soils of Galway, Ireland[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 398 (1/2/3): 212—221.
- [18] Feng D B, Chen Y, Zhang R Z, et al. Spatial autocorrelation analysis of nutrient content in cultivated layer soils in Anding District of Dingxi City[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2015, 50 (6): 119—125, 131. [冯定邦, 陈英, 张仁陟, 等. 安定区耕作层土壤养分含量的空间自相关分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2015, 50 (6): 119—125, 131.]
- [19] Chen S M, Wang N, Qin Y F, et al. Horizontal variability and autocorrelation of soil organic matter at different soil layers in estuarine wetland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38 (9): 2805—2812. [陈思明, 王宁, 秦艳芳, 等. 河口湿地不同土层有机质的水平异质性与自相关性[J]. *生态学杂志*, 2019, 38 (9): 2805—2812.]
- [20] Ren G P, Liu L M, Guan Q C, et al. Rurality evaluation and spatial autocorrelation type classification based on quality of life in metropolitan suburbs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (7): 264—275, 317. [任国平, 刘黎明, 管青春, 等. 基于生活质量的大都市郊区乡村性评价及空间自相关类型划分[J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (7): 264—275, 317.]
- [21] Zhang H, Zhao X M, Ouyang Z C, et al. Spatial disparity features and protection zoning of cultivated land quality based on spatial autocorrelation—A case study of Shanggao County, Jiangxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (1): 304—312. [张晗, 赵小敏, 欧阳真程, 等. 基于空间自相关的耕地质量空间差异特征及耕地保护分区——以江西省上高县为例[J]. *水土保持研究*, 2018, 25 (1): 304—312.]
- [22] Marasteanu I J, Jaenicke E C. Hot spots and spatial autocorrelation in certified organic operations in the United States[J]. *Agricultural and Resource Economics Review*, 2016, 45 (3): 485—521.
- [23] Lei Z D, Yang S X, Xu Z R, et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, 16 (9): 10—21. [雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. *水利学报*, 1985, 16 (9): 10—21.]
- [24] Li X X, Ma H B, Hu C S, et al. Soil nitrate leaching and control methods in the piedmont of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19 (5): 1109—1114. [李晓欣, 马洪斌, 胡春胜, 等. 华北山前平原农田土壤硝态氮淋失与调控研究[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19 (5): 1109—1114.]
- [25] Zhao G S, Li F D, Li Y S, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic matter accumulation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21 (5): 840—847. [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.]
- [26] Ye X X, Wang B Q, Liu S J, et al. Influence of tillage and straw retention on soil carbon pool and maize-wheat yield in Shajiang black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (14): 112—118. [叶新新, 王冰清, 刘少君, 等. 耕作方式和秸秆还田对砂姜黑土碳库及玉米小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (14): 112—118.]
- [27] Shi J P, Zhang F D, Lin B. Effects of long-term fertilization on soil organic matter and biological characteristics[J]. *Soils and Fertilizers*, 1998 (3): 7—11. [史吉平, 张夫道, 林葆. 长期施肥对土壤有机质及生物学特性的影响[J]. *土壤肥料*, 1998 (3): 7—11.]
- [28] Wang J X, Wang Y Q, Li X, et al. Evaluation of soil physical state in Guanzhong farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35 (3): 245—252. [王加旭, 王益权, 李欣, 等. 关中农田土壤物理状态与分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35 (3): 245—252.]
- [29] Xie Y X, Jin H Y, Li M D, et al. Effect of annual tillage practices on soil nutrient and crop yield in lime concretion black soil farmland[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42 (10): 1560—1568. [谢迎新, 靳海洋, 李梦达, 等. 周年耕作方式对砂姜黑土农田土壤养分及作物产量的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42 (10): 1560—1568.]
- [30] Zhuo Z Q, Xing A, Sun Z X, et al. Cold and hot spot patterns of grain yield and soil properties of plough horizon and plow pan in the dry farming region of northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50 (4): 904—912. [卓志清, 兴安, 孙忠祥, 等. 东北旱作区粮食产量冷热点格局及耕层特征差异[J]. *土壤通报*, 2019, 50 (4): 904—912.]
- [31] Zhai Z, Li Y Y, Pang H C, et al. Study on present situation and characteristics of plow pan in the northern region of Huang Huai Hai Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (12): 2322—2332. [翟振, 李玉义, 逢焕成, 等. 黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (12): 2322—2332.]
- [32] Mao L, Su Z Z, Wang G L, et al. Soil particle size and organic matter content of different land use types in the Mu Us sandland[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36 (3): 589—598. [毛丽, 苏志珠, 王国玲, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型的土壤粒度及有机质特征[J]. *干旱区研究*, 2019, 36 (3): 589—598.]
- [33] Zhang H T, Shi Y Q. Soil particle-size distribution and fractal dimension of different land use types in Shandong Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (1): 126—131, 138. [张海廷, 时延庆. 山东省不同土地利用方式土壤颗粒组成及其分形维数

- 特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25 (1): 126—131, 138.]
- [34] Hu L F. No-tillage affects soil bulk density under major soil types in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36 (12): 73—78. [胡立峰. 中国土壤类型下免耕对土壤容重的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36 (12): 73—78.]
- [35] Zhou H, Lü Y Z, Yang Z C, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40 (9): 1973—1979. [周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40 (9): 1973—1979.]
- [36] Wang X B, Che W, Ji R T, et al. Effects of straw returning and conservation tillage patterns on the contents of organic matter and nitrogen nutrient in the lime concretion black soil[J]. Soils, 2015, 47 (3): 483—489. [王晓波, 车威, 纪荣婷, 等. 秸秆还田和保护性耕作对砂姜黑土有机质和氮素养分的影响[J]. 土壤, 2015, 47 (3): 483—489.]

(责任编辑: 檀满枝)