

DOI: 10.11766/trxb202004280202

陈月明, 高磊, 张中彬, 郭自春, 邵芳荣, 彭新华. 淮北平原砂姜黑土区砂姜的空间分布及其驱动因素[J]. 土壤学报, 2022, 59 (1): 148–160.

CHEN Yueming, GAO Lei, ZHANG Zhongbin, GUO Zichun, SHAO Fangrong, PENG Xinhua. Spatial Distribution of Shajiang Content in Shajiang Black Soil of Huaibei Plain and Its Influencing Factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (1): 148–160.

淮北平原砂姜黑土区砂姜的空间分布及其驱动因素*

陈月明^{1, 2}, 高磊¹, 张中彬¹, 郭自春¹, 邵芳荣³, 彭新华^{1†}

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 安徽省农垦集团龙亢农场有限公司, 安徽怀远 233426)

摘要: 砂姜黑土的典型特征就是土体内含有“砂姜”。本论文基于经典统计学及地统计学方法, 研究了淮北平原砂姜黑土区东西(河南上蔡到安徽泗县)及南北(河南鹿邑到安徽怀远)两条典型样带 0~100 cm 土层内砂姜含量分布及 0~20 cm 土壤性质、地形因子和气候特征。结果表明:(1) 东西样带内从西向东、南北样带内从北向南, 砂姜含量逐渐增多, 埋深也逐渐变浅;(2) 两条样带砂姜含量随土层的加深呈增加的趋势, 而极大值出现在 20~60 cm 土层, 砂姜以 2~5 mm 粒级的占比最大(40%~44%);(3) 相关分析表明砂姜含量与蒙脱石组成比例($r=0.321, P<0.01$)、年均降水量($r=0.416, P<0.01$)、年均温度($r=0.369, P<0.01$)呈正相关, 而与土壤全钙($r=-0.279, P<0.05$)、高程($r=-0.387, P<0.01$)、年均蒸发量($r=-0.392, P<0.01$)呈负相关。可见, 淮北平原砂姜含量受地形、气候条件和土壤性质等因素的共同作用, 形成了“西低东高, 北低南高”空间分布格局。

关键词: 淮北平原; 砂姜黑土; 钙质结核; 空间变异; 地统计学

中图分类号: S159.2 文献标志码: A

Spatial Distribution of Shajiang Content in Shajiang Black Soil of Huaibei Plain and Its Influencing Factors

CHEN Yueming^{1, 2}, GAO Lei¹, ZHANG Zhongbin¹, GUO Zichun¹, SHAO Fangrong³, PENG Xinhua¹

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Longkang Farm Co. Ltd., Anhui State Farms Group Huaiyuan, Anhui 233426, China)

Abstract: 【Objective】 Shajiang black soil (Vertisol), one of the major soil types in China with low or medium productivity, is mainly distributed in the Huaibei plain. As the name suggests, in soil configuration, the soil is composed of a black soil layer and a Shajiang layer, with the former overlaid with the latter. Although the black soil layer is dark in color, it is very low in organic

* 国家自然科学基金项目(41930753, 41725004)、国家重点研发计划项目课题(2016YFD0300809)和江苏省重点研发计划(BE2017385)共同资助; Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41930753; 41725004), the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300809), and the Primary Research & Development Plan of Jiangsu Province of China (No. BE2017385)

† 通信作者 Corresponding author, E-mail: xhpeng@issas.ac.cn

作者简介: 陈月明(1991—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 研究方向: 土壤物理与水文过程研究。E-mail: chenyueming@issas.ac.cn

收稿日期: 2020-04-28; 收到修改稿日期: 2020-07-06; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-09-02

matter content ($< 1\%$) . “Shajiang”, a special kind of calcareous concretion, is a major component and a typical feature of Shajiang black soil. The presence of Shajiang leads to high heterogeneity of the soil and significantly influences physical and chemical properties of the soil, thus restraining root growth and crop yield. Shajiang is a byproduct of soil - forming process, and shows high spatial variability. However, little is yet known about spatial distribution of Shajiang and its driving factors in the Huaibei Plain. The objective of this study was to investigate spatial distribution of Shajiang its driving factors in the Plain .

【 Method 】 Based on the classical statistics and geo-statistics, this study selected two bands of Shajiang black soil, typical of the area, extending from west to east and from north to south in the plain for investigation of contents of Shajiang in the 0~100 cm soil layer, therein. Meanwhile, soils in the 0~20 cm soil layer were sampled for analysis of physico-chemical properties. Besides, topographic and climate data of the sampling sites were collected too. The west-east band extended from Shangcai County in Henan Province to Sixian County in Anhui Province (360 km long, and a total of 35 samples collected), and the north-south band did from Luyi County in Henan Province to Huaiyuan County in Anhui Province (195 km long and a total of 29 samples collected) .

【 Result 】(1) the two bands showed a general increasing trend from west to east and from north to south, separately in Shajiang content, but a decreasing one in depth of their burial; (2) Shajiang content increased with soil depth in both bands, and peaked in the 20~60 cm soil layer. The analysis of particle size composition of Shajiang shows that the 2~5 mm fraction of Shajiang accounted for 40%~44% of the total; (3) Similar to Shajiang content in variation trend, increasing from west to east and from north to south in the two bands, the proportion of montmorillonite, MAT and MAP increased too, but MAE and elevation did reversely. However, the content of total calcium only showed a decreasing trend from north to south in the north-south band; and (4) Pearson correlation analysis shows that Shajiang content was positively related to montmorillonite content ($r= 0.321, P < 0.01$), MAP ($r= 0.416, P < 0.01$), and MAT ($r= 0.369, P < 0.01$), but negatively to total calcium content ($r= -0.279, P < 0.05$), elevation ($r= -0.387, P < 0.01$), and MEA ($r= -0.392, P < 0.01$) . Principal component analysis shows that topography (37.4%) and climate conditions (38.4%) were factors more important than soil properties affecting Shajiang content (24.1%) .

【 Conclusion 】 Therefore, it can be concluded that Shajiang content in the Huaibei Plain is mainly regulated by topography, climate conditions and soil properties together, thus forming a spatial distribution pattern of “low in the northwest, and high in the southeast”.

Key words: Huaibei Plain; Shajiang black soil; Calcareous concretion; Spatial variability; Geo-statistics

砂姜黑土主要分布在淮北平原, 约占全国砂姜黑土面积的 62%, 是我国典型的中低产田^[1-2]。顾名思义, 砂姜黑土在土体构型上有黑土层和砂姜层, 前者上覆后者, 黑土层虽然颜色深, 但有机质含量低 ($< 1\%$); 砂姜层一般位于 20 cm 以下, 由粒径大小不一的碳酸钙结核组成^[1]。钙质结核作为一种特殊的粗粒介质, 是砂姜黑土的典型特征和重要组成部分^[3], 因其状似姜形, 也被称作“砂姜”。它是分散的碳酸盐在硅酸、二氧化物、三氧化物、铁和锰等吸附性物质表面与土粒胶结而成的, 是一种土壤新生体^[4]。砂姜一般随深度增加而增加, 20~40 cm 和 40~100 cm 土层中砂姜含量分别在 0.3%左右和 7%~15%^[5]。砂姜的存在导致了土壤的非均质性^[6]。这些粗粒介质在土壤中可起到“骨架”作用, 从而影响土壤结构、持水性与导水性、入渗蒸发等水力性质的变化^[7-14], 也影响

土壤养分含量与分布, 最终影响作物根系生长与产量^[15-16]。

目前关于砂姜黑土区砂姜空间分布的研究主要集中在农田田块尺度^[5-6], 研究结果表明砂姜在农田中普遍存在, 并且其出现的深度和含量均有强烈的变异性, 砂姜含量的变异系数最高可达 300%。砂姜的形成与地下水环境、气候条件、土壤碳酸盐含量、土壤矿物组成及 pH 等性质密切相关^[4], 它是成土过程外部环境和内在性质的共同产物, 田块尺度难以反映砂姜的空间分布格局及其驱动因素。因此, 本文采用经典统计学和地统计学空间变异方法, 分析了淮北平原砂姜黑土区东西及南北样带中砂姜含量的空间异质性与分布特征, 分析气象因子、地形因子、土壤性质与砂姜空间分布的关系, 明确影响砂姜空间分布的驱动因素, 以为砂姜黑土改良提供基础数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮北平原位于黄淮海平原南部 (114°55'~118°10'E, 32°25'~34°35'N), 具有明显的暖温带气候向北亚热带气候过渡的特点, 年平均气温 14~15℃, 年平均降水介于 750~950 mm, 年平均蒸发量介于 1330~1550 mm。淮北平原地势平坦, 由西北向东南微倾, 以黄泛平原和河间低平原地貌为主体, 呈典型的堆积性地貌景观^[17]。境内河网密布, 广泛发育松散岩类孔隙水, 有丰富的地表水和地下水资源^[4]。成土母质由第四纪堆积物及黄河南泛留下的大量泥沙形成。

本文以淮北平原广泛分布的砂姜黑土为研究对

象。根据淮北平原的气象和地形的分布特征, 选取具有气象梯度、地形梯度的东西及南北两条代表性样带。其中南北样带北起河南省鹿邑县, 南至安徽省怀远县, 全长 195 km, 约 6.5 km 为间隔布设 29 个样点; 东西样带西起河南省上蔡县, 东到安徽省泗县, 全长 360 km, 约 10 km 为间隔布设 35 个样点, 如图 1 所示。利用手持 GPS 记录各采样点的经纬度坐标。通过查阅中国土壤数据库 (<http://vdb3.soil.csdb.cn>) 得知, 所研究样点覆盖的土种主要有黄姜土、白姜土、黑姜土、姜地砂姜黑土及少姜地灰黑姜土等。各样点土地利用均为旱地, 轮作制度多为冬小麦夏玉米; 高程变化介于 19~60 m, 地下水多在 1~3 m 之间, 汛期可上升至 1 m 以内, 地下水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na} (\text{Mg})$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na} (\text{Ca} \cdot \text{Mg})$ 等^[4]。

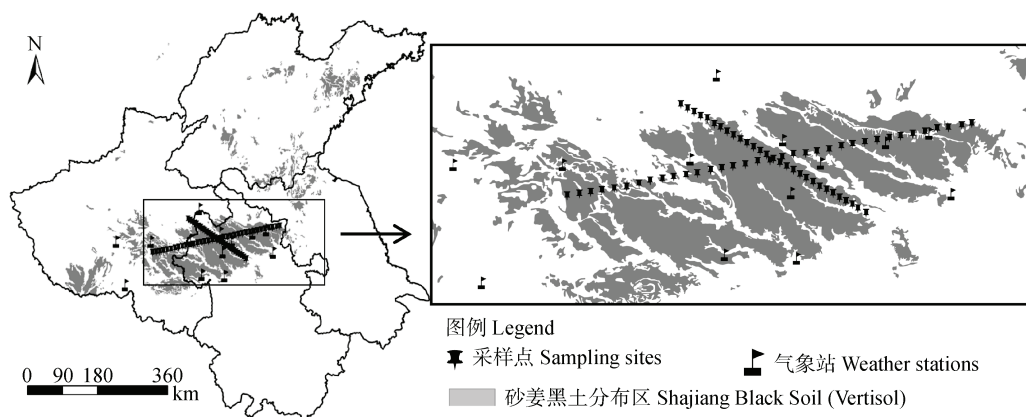


图 1 淮北平原砂姜黑土区样点分布图

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in the Shajiang black soil region of the Huaibei Plain

1.2 砂姜含量

采用电动土钻 (内径 10 cm) 采集各样点 0~100 cm 剖面 9 个土层, 分别为 0~20、20~30、30~40、40~50、50~60、60~70、70~80、80~90 和 90~100 cm 的土壤样品。将土壤样品带回实验室混合均匀后取出约 1 000 g 样品进行 105℃ 烘干称重 (m_T), 自来水冲洗泥土后收集 >2 mm 砂姜并烘干。将砂姜分为 2~5 mm、5~10 mm、10~20 mm 和 >20 mm 等 4 个粒级, 分别对每一级砂姜进行称重 (m_{R_i}), 精确至 0.01 g, 计算砂姜含量:

$$W_i (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{m_{R_i}}{m_T} \times 1000 \quad (1)$$

$$W (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \sum_{i=1}^n W_i \quad (2)$$

式中, W_i 为不同粒级砂姜含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), m_{R_i} 为各粒级砂姜质量 (g), m_T 为土壤 (包含砂姜) 质量 (g), i 代表砂姜不同粒级 ($n=4$), W 为土壤中砂姜含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 即 2~5 mm、5~10 mm、10~20 mm 和 >20 mm 等 4 个粒级之和。

1.3 土壤基本性质的测定

在砂姜采样点附近随机选取 3 个样点, 采用四分法采集 0~20 cm 土层混合样品 1 kg 左右, 带回实验室风干过 2 mm 筛后测定土壤性质^[18]: 土壤颗粒组成采用吸管法, 阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法, pH 测定采用 1:2.5 土水比电位法, 全钙及全镁含量采用吸收光谱法 (PE900T)。

土壤矿物组成采用 X 射线衍射法^[19]。首先将过 2 mm 筛后的土壤样品用稀 HCL 去除碳酸盐, 浓 H_2O_2 去除有机质, 用 0.5M NaOH 调节悬浮液 pH 为

7.3 左右, 经过超声波分散, 以自由沉降法提取 $< 2\mu\text{m}$ 黏粒并称量, 计算土壤中 $< 2\mu\text{m}$ 黏粒含量; 对于 $< 2\mu\text{m}$ 的黏粒, Mg^{2+} 饱和后, 用甘油水溶液处理, 制成定向薄膜, 置于 KNO_3 饱和溶液的干燥器中干燥 24 h 后, 进行 X 衍射分析; 对于 $> 2\mu\text{m}$ 粗粒, 先将样品磨细后, 装入玻璃试样盘中, 轻轻压紧后直接进行 X 射线衍射分析。X 射线衍射仪型号为日本理学 Ultima IV, 测定条件为 Cu 靶, 管压 40 kv, 管流 40 mA, 石墨单色器滤波, 扫描步长 0.02° , 扫描速度 $2^\circ \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.4 地形与气象数据

以东西及南北样带所在区域 13 个气象观测站 (图 1) 1970—2019 年气象数据为基础 (中国气象数据网, <http://data.cma.cn/>), 采用普通克里格插值的方法获取区域尺度下年均降水量、年均气温、年均蒸发量的分布图, 结合研究区域的 DEM 图, 利用地统计软件提取样带各样点的气象数据和地形因子数据。

1.5 数据处理

综合利用数理统计和地统计空间变异分析方法, 基于 Arc GIS (ESRI® Arc Map™ 10.2) 等相关软件, 分析砂姜、地形、气象因子的数量特征和变异特征, 采用普通克里格插值的方法构建 0~100 cm 剖面砂姜的空间分布图。数据的基本统计特征、相关性分析、

主成分分析采用 IBM Statistics SPSS 19.0。

2 结 果

2.1 不同深度砂姜含量和粒级分布特征

表 1 显示东西和南北两条样带砂姜含量的统计结果。砂姜在这两条样带 0~100 cm 土层中, 0~30 cm 土层砂姜含量较少, 均低于 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 随土层深度增加砂姜含量呈增加趋势; 东西和南北样带的平均砂姜含量分别为 $14.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $18.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但是极大值分别达到 $56.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $49.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从各土层的极大值来看, 东西向样带从 20 cm 土层开始显著增加 ($154.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 而南北向样带则从 40 cm 土层开始显著增加 ($89.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 可以说明砂姜层出现的深度。

表 2 为东西及南北两条样带不同粒径砂姜含量组成比例的统计结果。可以看出两条样带 0~100 cm 土层内均以 2~5 mm 粒级的砂姜组成比例最大, 分别为 39.8% 和 45.6%, 10~20 mm 粒径砂姜的平均含量其次, 以大于 20 mm 的粒级占比最小, 两条样带的含量均低于 10%。在各个土层中, 除东西样带 20~40 cm 土层外, 其他均以 2~5 mm 粒径的砂姜含量占比最大 (33.76%~57.98%), 因此, 2~5 mm 粒径颗粒是该地区砂姜的主要组成部分。

表 1 东西和南北两条样带中砂姜含量

Table 1 Contents of Shajiang in the west-east and north-south bands

土壤深度 Soil depth /cm	东西向样带 (n=35)			南北向样带 (n=29)		
	West-East band			North-South band		
	平均值 Mean/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	极大值 Max/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数 CV/ %	平均值 Mean/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	极大值 Max/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数 CV/ %
0~20	7.01	22.90	79	8.35	46.03	144
20~30	9.50	154.59	275	5.89	43.91	138
30~40	11.67	188.80	274	7.65	43.73	132
40~50	11.19	156.94	234	11.84	89.04	181
50~60	10.92	60.20	106	23.46	107.70	132
60~70	12.43	57.06	101	24.48	95.30	114
70~80	18.53	96.29	118	21.91	77.92	112
80~90	23.82	115.10	111	31.38	98.34	89
90~100	24.02	131.73	127	30.10	96.77	92
0~100	14.34	56.47	82	18.34	49.87	76

表 2 东西和南北两条样带中不同粒径的砂姜组成比例

Table 2 Particle size composition of Shajiang in the two bands /%

土壤深度 Soil depth /cm	东西样带 (n=35) West-east band				南北样带 (n=29) North-south band			
	2~5 mm	5~10 mm	10~20 mm	>20 mm	2~5 mm	5~10 mm	10~20 mm	>20 mm
	0~20	34.88	23.65	33.79	8.27	36.23	17.28	23.00
20~30	24.49	24.12	41.11	10.44	57.98	25.25	18.15	0.00
30~40	25.70	23.60	48.10	2.73	43.89	19.02	13.16	0.00
40~50	33.76	16.46	23.65	26.30	43.38	14.43	25.62	10.69
50~60	57.76	26.07	13.58	3.15	36.67	23.20	24.74	11.14
60~70	53.69	23.79	23.43	0.00	32.76	17.00	26.66	17.94
70~80	41.66	18.22	31.38	8.39	46.91	20.52	20.85	8.68
80~90	39.21	24.20	33.09	12.38	56.29	25.23	15.49	7.75
90~100	40.25	27.47	26.66	3.57	54.62	20.87	17.88	0.87
0~100	39.83	23.38	30.34	8.20	45.58	20.62	20.76	9.65

2.2 东西和南北两个方向上砂姜含量的空间分布

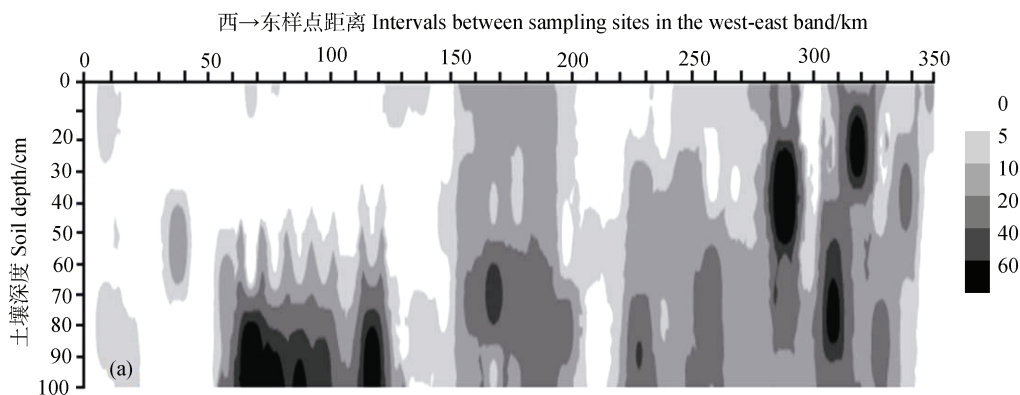
图 2 为采用普通克里格插值法得到的砂姜含量空间分布图。两条样带中砂姜含量空间分布规律相似：东西样带从西向东、南北样带从北到南，水平方向上砂姜含量逐渐增多，垂直方向上砂姜含量也明显增加，埋藏深度逐渐变浅。

从局部来看，两条样带的砂姜含量分布呈现出小区域聚集分布的特点。东西样带砂姜主要集中在样带的 3 个区域：西部 60~120 km 区域，砂姜层埋深在 70 cm 土层以下；中部 150~200 km 区域，从表层到底层均有砂姜出现但 60 cm 土层以下含量较多；东部 230~350 km 区域，此区域内砂姜埋深变化范围大，从表层至 60 cm 土层不等，20~40 cm 土层砂姜分布最为集中。南北样带中砂姜同样集中分布于 3 个区域：北部 13~52 km 区域，砂姜埋深

50~70 cm 土层不等；中部 65~130 km 及南部 130~188.5 km 区域，砂姜多分布于 40~50 cm 土层以下，浅处在地表附近有大量砂姜分布。

2.3 土壤性质、地形及气象因子的空间分布特征

从图 3 可以看出，东西样带从西到东，pH 无明显变化规律，CEC 有增大的趋势，全钙及全镁含量除在在样带 100 km 附近及 350 km 处含量明显升高外，其他区域变化平稳。对于南北样带而言，从北向南，pH 有减小的趋势，全钙及全镁含量降低明显，同样，CEC 表现出增大的趋势。对于颗粒组成而言（图 4），两条样带均以粉粒含量最大，砂粒最少。在东西样带中除在 100 km 附近粉粒明显增多、黏粒明显降低外，其他区域土壤颗粒组成差异不大。在南北样带中，从北向南，粉粒含量逐渐降低，黏粒含量逐渐增加，砂粒含量变化趋于平稳。



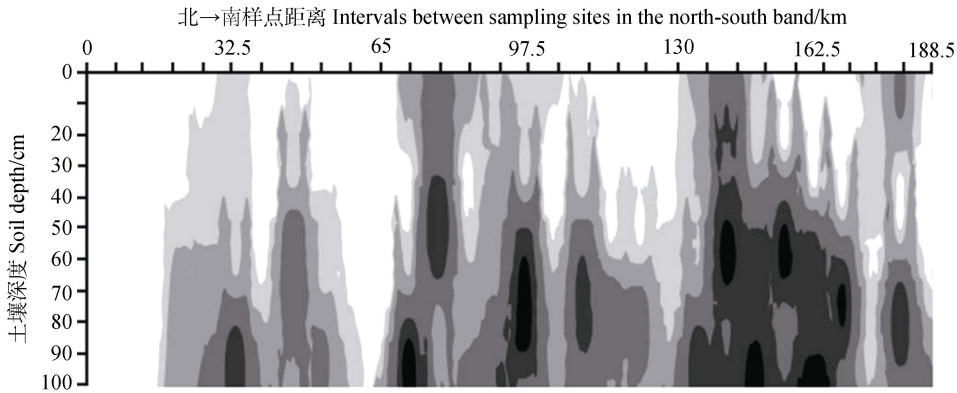


图 2 东西及南北样带中砂姜含量的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of Shajiang content in the west-east and north-south bands / (g·kg⁻¹)

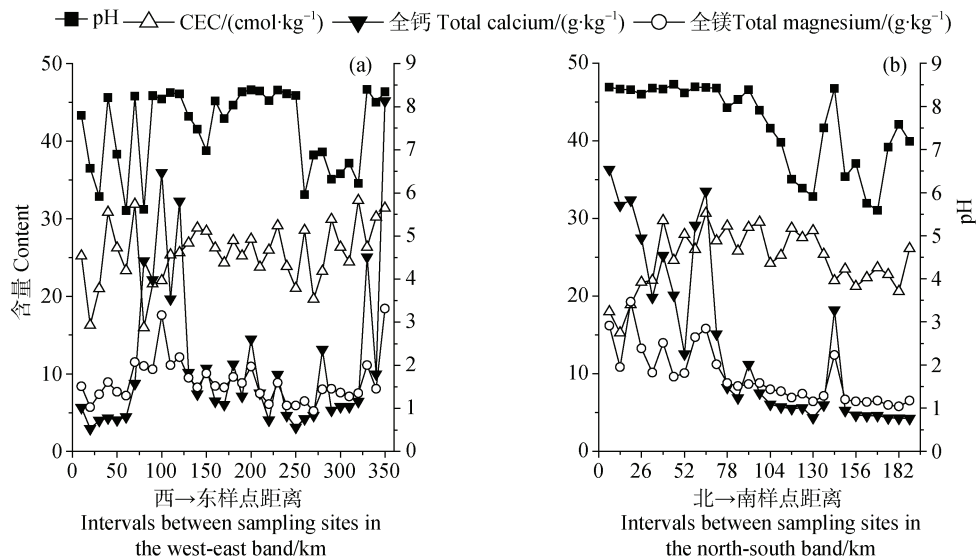


图 3 东西及南北样带土壤 pH、CEC、全钙及全镁含量空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of soil pH, CEC, total calcium and total magnesium separately in the two bands

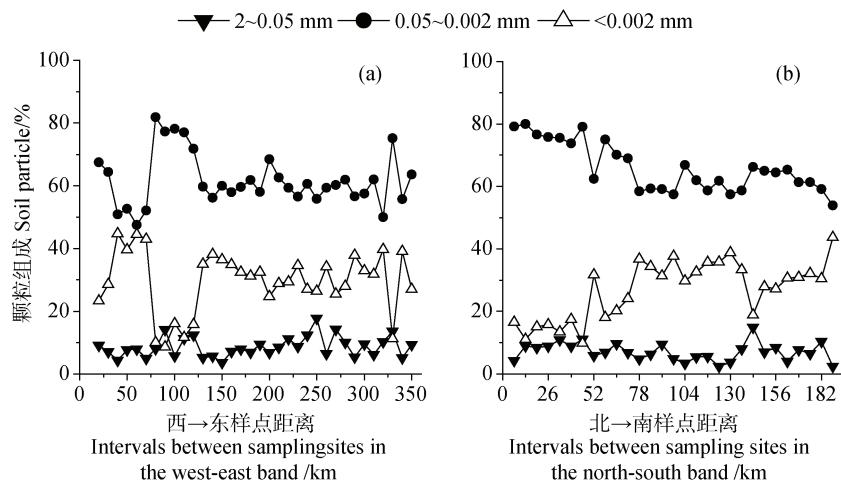


图 4 东西及南北样带土壤颗粒组成空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of soil particle composition in the two bands

由图 5 可知,在粗粒矿物组成中,两条样带均以石英组成比例最大,其次为长石。东西样带从西向东,石英组成比例逐渐增多,水云母逐渐减少,其他矿物变化规律不明显;南北样带从北向南,石英组成比例同样表现出逐渐增多的规律,水云母、绿泥石、闪石及长石逐渐减少。对于黏粒矿物组成的空间分布(图 6),两条样带均以蒙脱石组成比例最大,石英及蛭石最少,均在 10% 以下。东西样带内黏粒矿物变化趋势不明显,但总体来看,东部蒙脱石含量较高,西部水云母、绿泥石及高岭石含量较高,其他矿物组成比例差异不大;南北样带中从北向南蒙脱石组成比例呈增加趋势,绿泥石、高岭石和水云母呈减少的趋势,蛭石和石英组成比例差异不明显。

图 7 为两条样带中气象因子和地形因子的分布图。两条样带的地形及气象因子均存在明显的梯度变化:在东西样带从西向东,年均蒸发量(1 471~1 559 mm)、高程(19~60 m)逐渐减小,年均降水量(806~918 mm)逐渐增大,而年均气温(14.94~15.09℃)呈先升高后降低的趋势,但降低幅度小,不足 0.1℃。在南北样带中,由北到南,气象因子(年均蒸发量 1 494~1 544 mm、年均降水量 750~924 mm)和地形因子(高程 21~41 m)的变化趋势与东西样带相似,不同的是年均气温(14.89~15.16℃)呈逐增大的变化规律。

2.4 砂姜含量的影响因素

表 3 为采用 Pearson 相关分析方法得出的土壤性质、地形及气象因素与砂姜含量之间的相关系数。从分析结果可以看出,土壤矿质元素可影响砂姜含量,全钙含量与 20~80 cm 土层的砂姜含量间具有显著负相关性($P < 0.05$),而 pH、CEC、颗粒组成与砂姜含量间的相关性均未达到显著水平。

土壤矿物种类不同对砂姜含量的影响程度不同,粗粒矿物石英与 0~100 cm 土层内砂姜含量间具有显著正相关性($P < 0.05$),而黏粒矿物中高岭石与 0~100 cm 与之具有显著负相关性($P < 0.01$)。同时,土壤矿物对不同土层砂姜含量的影响程度也不同,除上述提及石英和高岭石外,黏粒矿物蒙脱石也与 20~80 cm 土层的砂姜含量间具有极显著正相关性($P < 0.01$),而粗粒及黏粒矿物中的水云母、绿泥石与其具有显著的负相关性($P < 0.05$)。此外,只有粗粒矿物石英与 0~20 cm 土层的砂姜含量间呈显著正相关($P < 0.05$)。通过以上分析可知,土壤矿物显著影响 0~100 cm 土层内砂姜的形成,主要是通过影响 20~80 cm 土层来实现的。

地形与气象因子显著影响砂姜含量,高程、年均蒸发量与 0~100 cm 土层砂姜含量间具有极显著的负相关性($P < 0.01$),而年均降水量、年均温度与砂姜总含量间有极显著的正相关性($P < 0.01$)。

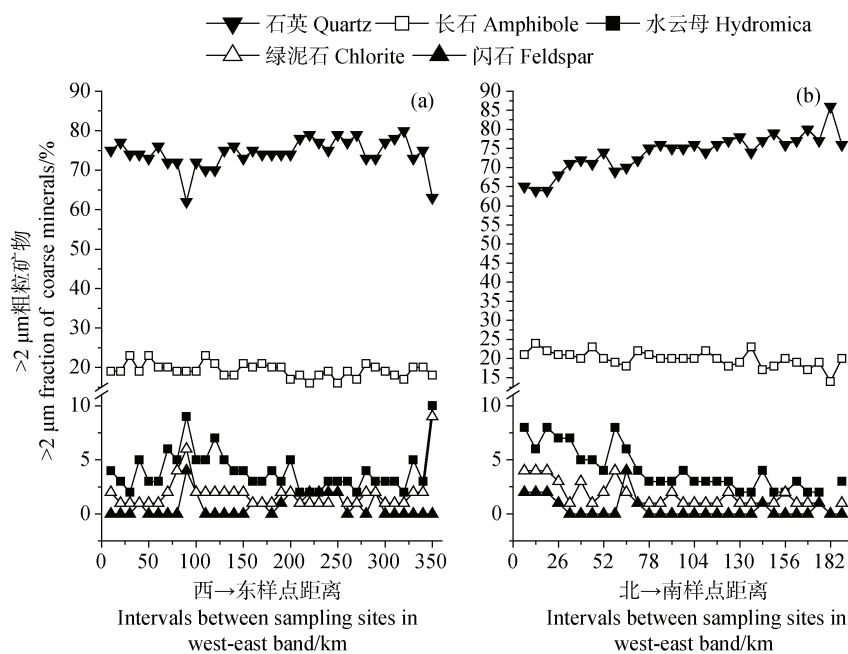


图 5 东西及南北样带土壤>2 μm 粗粒矿物组成空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution of >2 μm fraction of coarse minerals in the two bands

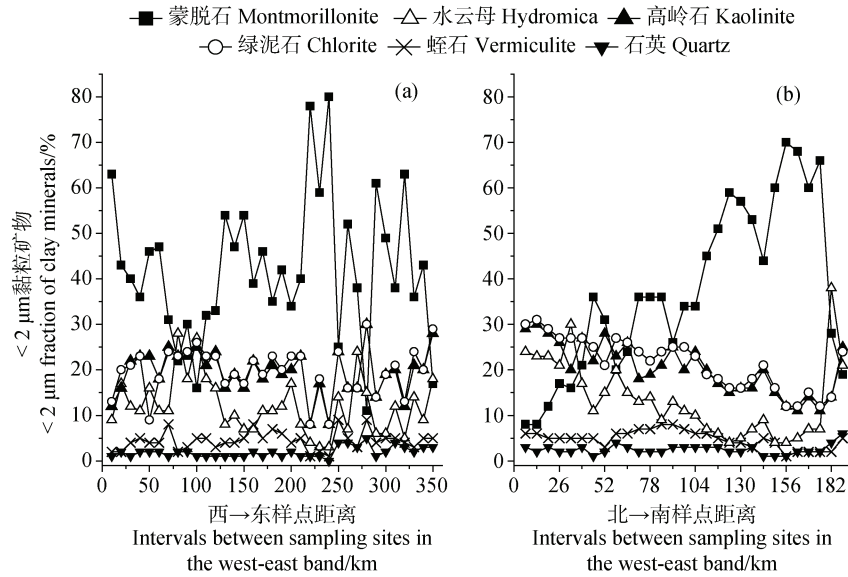


图 6 东西及南北样带土壤<2 μm 黏粒矿物组成空间分布特征
 Fig. 6 Spatial distribution of <2μm fraction of clay minerals in the two bands

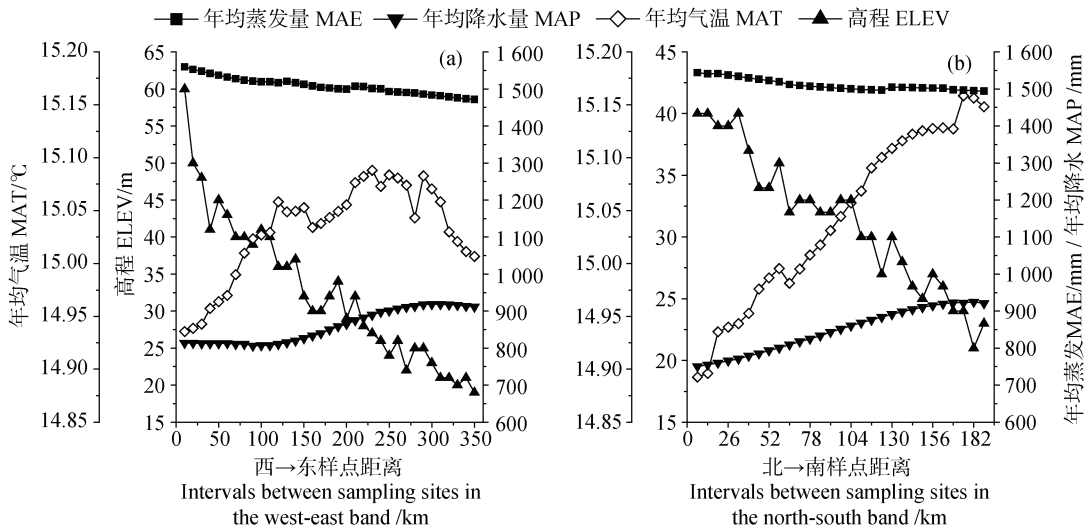


图 7 东西及南北样带地形及气象因素空间分布特征
 Fig. 7 Spatial distribution of mean annual precipitation (MAP), temperature (MAT), evaporation (MAE) and elevation (ELEV) in the two bands

同样，地形及气象因子对不同土层砂姜含量的影响程度不同，地形及气象因子只与 20~80 cm 土层的砂姜含量间具有极显著的相关性 ($P < 0.01$)，而与 0~20 cm 及 80~100 cm 土层的砂姜含量间的相关性未达到显著水平。由此可以认为，地形和气象因子对砂姜的形成影响显著，且对 20~80 cm 土层的影响程度最大。

为了进一步量化各影响因素对砂姜含量的影响程度，确定影响砂姜含量的主控因素，根据表 3 的相关分析结果，对土壤性质（土壤矿物组成及全钙含量）、地形因子（高程）及气候条件（年均蒸发量、

年均降水量、年均气温）做主成分分析后计算出各指标对砂姜含量影响的权重（表 4）。从表中可以看出，研究区的地形及水热条件对砂姜含量影响的权重（分别 37.47%和 38.41%）较土壤性质的影响权重（24.12%）更大。在单个指标对砂姜含量的影响中，以年均降水量的影响权重最大（11.76%），其次为年均蒸发量、年均气温和高程（10.71%~10.87%）。在土壤性质中，黏粒矿物蒙脱石对砂姜含量影响的权重也较大，为 9.34%。因此可以认为，研究区的地形及气候条件是影响砂姜含量的主控因素。

表 3 土壤性质、地形及气象因素与不同土层砂姜含量之间的相关性 (n=64)

Table 3 Relationships between content of Shajiang and its influencing factors

影响因素 Influencing factors		砂姜含量 Shajiang content / (g·kg ⁻¹)			
		0 ~ 100 cm	0 ~ 20 cm	20 ~ 80 cm	80 ~ 100 cm
土壤理化性质 Soil physical and chemical properties	全钙 Total Ca / (g·kg ⁻¹)	-0.217	-0.084	-0.279*	0.023
	全镁 Total Mg / (g·kg ⁻¹)	-0.178	-0.031	-0.24	0.031
	CEC / (cmol·kg ⁻¹)	0.103	0.046	0.123	0.005
	pH	-0.143	0.159	-0.207	0.019
	砂粒 2 ~ 0.05 mm ^① / %	0.039	0.204	0.002	0.055
	粉粒 0.05 ~ 0.002 mm ^② / %	-0.099	-0.162	-0.166	0.109
	黏粒 < 0.002 mm ^③ / %	0.073	0.074	0.143	-0.113
> 2 μm 粗粒 矿物组成 > 2 μm fraction of coarse minerals	石英 Quartz / %	0.270*	0.254*	0.298*	0.033
	水云母 Hydromica / %	-0.214	-0.092	-0.317*	0.100
	闪石 Feldspar / %	-0.097	-0.129	-0.052	-0.102
	绿泥石 Chlorite / %	-0.247	-0.114	-0.260*	-0.071
	长石 Amphibole / %	-0.124	-0.216	-0.124	-0.022
< 2 μm 黏粒 矿物组成 < 2 μm fraction of clay minerals	蒙脱石 Montmorillonite / %	0.231	-0.046	0.321**	-0.043
	高岭石 Kaolinite / %	-0.293*	-0.092	-0.341**	-0.036
	绿泥石 Chlorite / %	-0.179	0.003	-0.260*	0.060
	水云母 Hydromica / %	-0.185	0.111	-0.297*	0.092
	蛭石 Vermiculite / %	0.018	0.223	-0.004	0.009
	石英 Quartz / %	-0.097	0.034	-0.087	-0.069
环境因素 Environmental factors	高程 ELEV / m	-0.334**	-0.213	-0.387**	-0.024
	年均蒸发量 MAE / mm	-0.349**	-0.24	-0.392**	-0.046
	年均降水量 MAP / mm	0.361**	0.180	0.416**	0.039
	年均气温 MAT / °C	0.397**	0.187	0.369**	0.200

注: *, **分别表示显著水平 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。Note: *, ** indicate a significant level at the $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

①Sand, ②Silt, ③Clay.

表 4 单个因素对砂姜含量影响的权重

Table 4 Weight of each influencing factor on content of Shajiang

影响因素 Influence factors	权重 Weight / %	影响因素 Influence factors	权重 Weight / %
土壤性质 Soil properties	24.12	黏粒矿物水云母 Hydromica (clay mineral)	8.22
地形因子 Topology	37.47	黏粒矿物高岭石 Kaolinite (clay mineral)	8.66
气候条件 Climate conditions	38.41	黏粒矿物绿泥石 Chlorite (clay mineral)	8.28
全钙含量 Total Ca	5.77	高程 ELEV	10.84
粗粒矿物石英 Quartz (coarse fraction)	6.71	年均气温 MAT	10.71
粗粒矿物水云母 Hydromica (coarse fraction)	6.37	年均蒸发量 MAE	10.87
粗粒矿物绿泥石 Chlorite (coarse fraction)	2.48	年均降水量 MAP	11.76
黏粒矿物蒙脱石 Montmorillonite (clay mineral)	9.34		

3 讨 论

3.1 砂姜含量和粒级的土壤深度依赖性

砂姜黑土土体深厚，其中上覆黑土层是数千年前草甸潜育化过程的产物，而土体中数层砂姜则是过去和现在一直进行的成土地球化学过程^[20]。本研究发现，东西向及南北向两条样带随土层的加深砂姜含量呈增大趋势，且 0~100 cm 土层内均以 2~5 mm 粒级的砂姜含量最多（表 2），这主要与砂姜的发育过程有关。大粒径砂姜的形成对土壤环境条件要求苛刻，且需长时间的积累，即使环境发生微小变化时，土壤中的 CaCO_3 的浓度也会在临界饱和度附近波动，砂姜随之长长停停，有时甚至还会重新溶解^[21]，随着土层深度的增加砂姜形成条件逐渐稳定。在工程地质中的研究也表明，土壤剖面 1 m 内多是粉碎的钙质结核，在下部粒径较大而质地硬，在 3 m 以下则形成钙质硬磐层^[4]。此外，砂姜在表层中含量低，也有可能与当地农民在长期耕作过程中将大粒级的砂姜清理出去有关。

3.2 砂姜形成与分布的驱动因素

本研究发现淮北平原从西北到东南砂姜含量逐渐增多，埋深由深变浅（图 2），这与研究区域的土壤性质、地形及气象因素变化规律吻合（图 3~图 7）。相关分析表明，土壤全钙、绿泥石及水云母、高程、年均蒸发量与砂姜含量间呈显著或极显著负相关性，而粗粒矿物石英、黏粒矿物蒙脱石、年均降水量、年均气温与砂姜含量间呈显著或极显著正相关（表 3），主成分分析也表明，研究区的地形及气候条件对砂姜含量影响的权重系数较土壤性质的权重系数大（表 4）。这是因为淮北平原土壤的母质来自于黄土或黄土类物质，其富含碳酸钙，这为砂姜的形成提供了物质基础，而地形因子、降水及蒸散发可显著影响碳酸钙沉淀结晶强度^[1, 22]。此外，地形及气候条件会影响土壤性质，而土壤性质又可反作用于微区域的水热条件。因此，研究区的地形及气候条件对砂姜含量的影响起主导作用。有学者指出土壤 pH 的增大，可促进碳酸钙的沉淀^[22]，但是本次研究中土壤 pH、CEC 对砂姜含量的影响未达到显著性（表 3）。主要原因是此次研究的土壤样品取自耕作层（0~20 cm），长期施用化肥及土壤培肥可能改变土壤相关性质^[23]，掩盖了自然成土过程中 pH 等对砂姜形成的影响。

砂姜是成土过程中钙元素迁移和富集的结果。因此，砂姜中富集的元素正是土壤中相对亏缺的元素^[24]。本研究结果发现砂姜含量与土壤 Ca 离子呈负相关也证实了这一现象。土壤水是重碳酸钙运动的载体，水分运动受地下水位、降雨和蒸散发等影响。本研究发现砂姜含量与高程呈极显著负相关（ $P < 0.01$ ），与降雨呈正相关（ $P < 0.01$ ）。可见，土壤中 Ca 离子含量少，主要原因受雨水淋洗作用。而砂姜的形成除了雨水淋洗所带来的钙离子外，还有来自地下水上升所带来的 Ca 离子。但是，砂姜中 Ca 离子主要来源富含 HCO_3^- - Ca^{2+} 的浅层地下水^[24]。因此高程越大，越不利于砂姜的形成。淮北平原从北到南、从西到东，高程逐渐降低，地下水位则可能逐渐变浅^[25-26]，这为砂姜的分布提供了地下水环境。现有研究也表明，砂姜的分布规律与地面高程的变化情况一致，在古河道高地、泛濫微高地少见有砂姜分布^[4]。

淮北平原降水集中且多暴雨，是地下水补给的主要来源^[27]，雨季和旱季地下水位变动在 0.5~1 m，有时可达地表^[20]。此外土壤淋溶强度也随降水量的增加呈对数增大^[28]，淋溶作用越强，土壤溶液中易溶性重碳酸钙含量越高。降水过后土壤逐渐变干，强烈的蒸发有利于碳酸钙的沉淀，但在蒸发量大于降水量的前提下，若蒸发速率过快，含重碳酸钙的土壤水上行过程中在土体中停留时间过短，不利于砂姜的进一步长大^[22]。更重要的是，蒸发速率的大小对于地下水位保持也有不可忽视的影响，两者具有负相关性^[29]，而地下水在这一层位保持时间的长短也是影响砂姜进一步发育的重要因素^[29]。土壤水分蒸发需要驱动力，而温度是极其重要的影响因素之一^[31]，且温度与降水之间关系显著。此外温度的升高可显著提高土壤 CO_2 的溶解度^[32]，促进难溶性碳酸钙的淋溶。因此，温度主要是通过影响蒸散发作用来影响砂姜的形成。研究区从西北到东南，年均降水量逐渐增加、年均气温升高，而年均蒸发量逐渐减小，因此砂姜形成与发育的结晶动力不同，导致了砂姜含量空间分布的差异。

黏粒矿物显著影响土壤水分运动。蒙脱石具有强胀缩性，富含蒙脱石的土壤在含水量降低时即可急剧收缩而产生大量裂缝，为含重碳酸钙的地下水蒸发提供了通道^[33]，促进了土体内碳酸钙的沉淀。而在土壤湿时黏粒吸水膨胀，裂隙闭合，使水分渗

流异常缓慢, 由于底层土壤 CO_2 含量少, 亦可造成碳酸钙的沉淀^[4]。淮北平原季节性的干湿交替, 有利于蒙脱石形成, 且水云母、绿泥石、高岭石等矿物在此环境条件下易于向蒙脱石转换^[34-35]。土壤溶液中碳酸钙开始沉淀时多以石英等碎屑为沉淀中心^[36], 所以土壤中粗粒矿物石英越多, 越有利于碳酸钙的沉淀。淮北平原从西北到东南, 因砂姜发育对钙等元素的富集, 使得土壤中的钙元素逐渐减少, 而石英、蒙脱石含量逐渐增加, 这为碳酸钙的持续沉淀提供了物质基础与前提条件。

本研究还发现土壤性质、地形及气象因素对各土层砂姜含量的影响程度不同, 其中对 20~80 cm 土层内砂姜影响程度最大, 主要是因为 20~80 cm 土层受降水入渗及蒸发影响大^[27, 31], 地下水位多在此范围变动^[20], 淋溶淀积作用及水分蒸发过程中碳酸盐沉淀作用强烈。砂姜的分布规律在大区域下与土壤性质、气象及地形因子变化规律吻合的同时, 也出现了小区域聚集分布的特点, 且砂姜的埋藏深度深浅不一, 在 20~60 cm 土层不等 (图 2), 有些地区在地表处即有出现, 造成这种现象的主要原因与微域地形变化 (图 7) 有关^[4], 另一方面土壤侵蚀^[4]和人为活动也会改变砂姜的垂直分布^[6], 表层土壤的流失和翻耕使得砂姜出露于地表。

综上所述, 河湖相沉积物及地形条件为砂姜的形成提供了物质基础, 地下水环境和适宜的气候条件则为碳酸钙的沉淀结晶提供动力, 在年复一年的土体干湿交替作用下, 砂姜逐渐形成。也正是由于淮北平原地形、气候条件及土壤性质在空间分布上存在不均匀和差异性, 导致了砂姜形成与发育的条件不同, 促使了淮北平原砂姜空间分布格局的形成。其中, 地形及气候条件是砂姜空间格局形成的主要驱动力。

4 结 论

基于淮北平原砂姜黑土区东西和南北两条样带砂姜含量及其驱动因素的分析, 本研究主要结论如下: (1) 砂姜含量存在明显的深度依赖性。0~100 cm 的土体中, 砂姜层多出现在 20~60 cm 以下, 砂姜含量随深度增加而增加。(2) 砂姜以 2~5 mm 的小粒级为主体, 而大于 20 mm 的砂姜质量占比很低。(3) 土壤性质、地形及气候条件是影响砂姜形成的

重要因素。从内因上, 砂姜常与粗粒矿物石英和黏粒矿物蒙脱石伴生; 从外部因素上, 地下水位埋深浅和干湿分明的温暖湿润气候条件下有利于砂姜的形成。(4) 砂姜在空间上存在西低东高、北低南高的分布格局。淮北平原砂姜黑土区, 从西北到东南, 地势逐渐降低, 温度逐步升高, 降水有所增加, 并且土壤性质也具有一定的空间不均匀性, 外部环境及内在性质的空间格局是砂姜含量呈现西北到东南逐步升高趋势的重要驱动力。

参考文献 (References)

- [1] Li D C, Zhang G L, Gong Z T. On taxonomy of Shajiang black soils in China[J]. *Soils*, 2011, 43 (4): 623—629. [李德成, 张甘霖, 龚子同. 我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J]. *土壤*, 2011, 43 (4): 623—629.]
- [2] Zhang J M. Research on comprehensive management of Shajiang Black Soil. [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 1988. [张俊民. 砂姜黑土综合治理研究[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1988.]
- [3] Liu L W. Formation and evolution of vertisols in Huaibei plain[J]. *Pedosphere*, 1991, 1 (1): 3—15.
- [4] Cao Y J. Study on distribution and formation of the calcareous concretions soil in Huaibei Plain, Anhui Province[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. [曹亚娟. 安徽淮北平原钙质结核土的分布及成因研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.]
- [5] Wei C L. Shrinkage-cracking characteristics of lime concretion black soil and improvement with biochar[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. [魏翠兰. 砂姜黑土收缩开裂特征及生物质炭改良效应[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.]
- [6] Gu F. Characteristics and modeling of soil water and nutrition dynamics in a typical calcic vertisol[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. [谷丰. 典型砂姜黑土区农田土壤水分养分动态变化特征及模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.]
- [7] Gargiulo L, Mele G, Terribile F. The role of rock fragments in crack and soil structure development: A laboratory experiment with a vertisol[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66 (4): 757—766.
- [8] Gu F, Ren T S, Li B G, et al. Accounting for calcareous concretions in calcic vertisols improves the accuracy of soil hydraulic property estimations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81 (6): 1296—1302.
- [9] Ilek A, Kucza J, Witek W. Using undisturbed soil samples to study how rock fragments and soil macropores affect the hydraulic conductivity of forest stony soils: Some methodological aspects[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 132—140.
- [10] Tetegan M, Nicoulaud B, Baize D, et al. The

- contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: Proposition of new pedotransfer functions[J]. *Geoderma*, 2011, 165 (1): 40—49.
- [11] Coppola A, Dragonetti G, Comegna A, et al. Measuring and modeling water content in stony soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 128: 9—22.
- [12] Diaz F J, Jimenez C, Tejedor M. Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 74 (1): 47—55.
- [13] Hlavacikova H, Holko L, Danko M, et al. Estimation of macropore flow characteristics in stony soils of a small mountain catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 1176—1187.
- [14] Shi Z J, Xu L H, Wang Y H, et al. Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11 (39): 9350—9361.
- [15] Du Z Y, Cai Y J, Yan Y, et al. Embedded rock fragments affect alpine steppe plant growth, soil carbon and nitrogen in the northern Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2017, 420 (1/2): 79—92.
- [16] Zhang Y H, Zhang M X, Niu J Z, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress[J]. *Catena*, 2016, 147: 153—166.
- [17] Jin Q. Quaternary system of Huaibei Plain, Anhui Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. [金权. 安徽淮北平原第四系[M]. 北京: 地质出版社, 1990.]
- [18] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [19] Yang Z J, Bing H J, Zhou J, et al. Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuoguo glacier foreland of Gongga mountain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (3): 507—516. [杨子江, 邴海健, 周俊, 等. 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化[J]. 土壤学报, 2015, 52 (3): 507—516.]
- [20] Ma L, Zhang M. The occurrence and soil forming characteristics of black soil with ginger[J]. *Chinese of Journal of Soil Science*, 1993, 24 (1): 1—4. [马丽, 张民. 砂姜黑土的发生过程与成土特征[J]. 土壤通报, 1993, 24 (1): 1—4.]
- [21] Shi G J, Wu D X, Xu D S, et al. Study of structure category and formation reason of calcareous concretion soil in Huaibei Plain[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2010, 33 (11): 1681—1685, 1693. [施国军, 吴道祥, 徐冬生, 等. 淮北平原钙质结核土的结构类型和成因分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33 (11): 1681—1685, 1693.]
- [22] Wu D X, Cao Y J, Zhong X M, et al. Distribution, age and genesis of cohesive soil containing calcareous nodules in Huaibei Plain of Anhui Province[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30 (S2): 434—439. [吴道祥, 曹亚娟, 钟轩民, 等. 安徽淮北平原钙质结核土分布及成因年代研究[J]. 岩土力学, 2009, 30 (S2): 434—439.]
- [23] Wang Y K, Guo Z C, Zhang Z B, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil(Vertisol)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (6): 1370—1380. [王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56 (6): 1370—1380.]
- [24] Liu L W, Zhang M. Element enrichment and environmental significance of denaturated soils with Fe, Mn, oxide and calcareous nodules[J]. *Soils*, 1995, 27 (5): 262—268. [刘良梧, 张民. 变性土铁锰氧化物结核与钙质结核的元素富集及其环境意义[J]. 土壤, 1995, 27 (5): 262—268.]
- [25] Chen X, Hao Z C, Dai M L. Dynamic analysis of shallow groundwater in Huaibei Plain[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44 (28): 73—76. [陈玺, 郝振纯, 戴明龙. 淮北平原浅层地下水动态研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44 (28): 73—76.]
- [26] Zhu K, Zhang X W, Xia J, et al. Simulation of groundwater level distribution in a large area using digital elevation model as auxiliary information[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35 (11): 15—21. [朱奎, 张祥伟, 夏军, 等. 利用 DEM 作为辅助信息推定大区域地下水初始流场[J]. 水利学报, 2004, 35 (11): 15—21.]
- [27] Zhang X M. Variation characteristics of soil moisture variation and its relationship with groundwater transformation in Huaibei Plain of Anhui Province[D]. Handan, Hebei: Hebei University of Engineering, 2019. [张晓萌. 安徽淮北平原土壤水分变化特征及其与地下水转化关系研究[D]. 河北邯郸: 河北工程大学, 2019.]
- [28] Wang X. Study about the rule of gravel-sand chemical elements leaching simulation test of Ningxia Zhongwei area[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018. [王霞. 宁夏中卫地区压砂砾石元素淋溶规律模拟实验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.]
- [29] Hu W W, Wang S C, Wang G X, et al. Study on the groundwater dynamic of the Huaibei alluvial plain in Anhui Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24 (11): 1893—1901. [胡巍巍, 王式成, 王根绪, 等. 安徽淮北平原地下水动态变化研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24 (11): 1893—1901.]
- [30] Zhang M, Gong Z T. Study on carbonate sources of soil and calcareous nodules with stable isotopes[J]. *Soils*, 1994, 26 (2): 65—69, 94. [张民, 龚子同. 用稳定同位素探讨土壤及钙质结核的碳酸盐来源[J]. 土壤,

- 1994, 26 (2): 65—69, 94.]
- [31] Hao Z C, Chen X, Wang J H, et al. Trend and impact factors of evaporation from shallow phreatic groundwater of bare soil on Huaibei Plain in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (6): 73—78. [郝振纯, 陈玺, 王加虎, 等. 淮北平原裸土潜水蒸发趋势及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27 (6): 73—78.]
- [32] Gao D, Lu S W, Rao L Y, et al. Soil respiration flux of four land-use types in non-growing season in North Plain of Huai River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (4): 94—99. [高东, 鲁绍伟, 饶良懿, 等. 淮北平原四种土地利用类型非生长季土壤呼吸速率[J]. 农业工程学报, 2011, 27 (4): 94—99.]
- [33] Zhang Y F, Wang Y F, Liu L X. Function mechanism between the drought and waterlogging disaster and the soil-structure of the Shajiang soil in Huaibei plain[J]. Progress in Geography, 2001, 20 (2): 169—176. [张义丰, 王又丰, 刘录祥. 淮北平原砂姜黑土旱涝(渍)害与水土关系及作用机理[J]. 地理科学进展, 2001, 20 (2): 169—176.]
- [34] He S, Tan W F, Xie H X. Composition and Genesis of clay minerals in salinized soils in Junggar basin and Tarim basin of Xinjiang, China[J]. Soils, 2019, 51 (3): 566—577. [何帅, 谭文峰, 谢海霞. 准噶尔和塔里木盆地盐渍化土壤黏土矿物组成特征及成因[J]. 土壤, 2019, 51 (3): 566—577.]
- [35] Xie H X. The characteristic of soil clay minerals in mountain and basin of north slope of Tianshan mountain and their responses for soil-forming environments[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. [谢海霞. 天山北坡山盆系统土壤黏土矿物特征及其对成土环境的响应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.]
- [36] Li C A, Wu J P, Cao J X. Form and genetic dynamics characteristics of calcareous concretion in the loess of northwestern Hebei Province and its stratigraphic significance[J]. Journal of China University of Geosciences (Earth Science), 1995, 20 (5): 511—514. [李长安, 吴金平, 曹江雄. 冀西北黄土钙质结核形态及其成因动力学特征与地层环境意义. 中国地质大学学报(地球科学), 1995, 20 (5): 511—514.]

(责任编辑: 檀满枝)