

DOI: 10.11766/trxb202211160624

郝翔翔, 王翠, 邹文秀, 严君, 韩晓增. 典型黑土的黑度与土壤有机质组分关系研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1421–1429.

HAO Xiangxiang, WANG Cui, ZOU Wenxiu, YAN Jun, HAN Xiaozeng. Study on the Relationship Between Blackness and Soil Organic Matter Fractions of Typical Mollisol[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1421–1429.

## 典型黑土的黑度与土壤有机质组分关系研究\*

郝翔翔<sup>1</sup>, 王翠<sup>2</sup>, 邹文秀<sup>1</sup>, 严君<sup>1</sup>, 韩晓增<sup>1†</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站, 黑土区农业生态重点实验室, 哈尔滨 150081;  
2. 哈尔滨学院信息工程学院, 哈尔滨 150086)

**摘要:** 土壤颜色作为土壤的一项重要物理指标, 被广泛应用于土壤诊断、分类以及土壤性质判断。在矿物成分大致相同条件下, 土壤有机质(SOM)是控制土壤变黑的重要因素。采用基于 CIE  $L^*a^*b^*$  颜色分析系统的分光测色仪, 并结合土壤物理分组方法, 对 30 个典型黑土及其物理组分(轻组、粗颗粒、细颗粒和矿质结合态有机质)的黑度进行了分析, 旨在明确黑土 SOM 含量与其黑度间的定量关系, 揭示不同物理组分对土壤黑度的贡献。结果表明: 黑土的黑度与 SOM、以及各物理组分的黑度与相应组分的有机碳含量之间, 均呈显著正相关关系。而且随着组分稳定程度的增加, 这种相关性逐渐增强。从不同组分看, 轻组和粗颗粒组分的黑度值大于细颗粒和矿质结合态组分, 但相关分析表明, 轻组和粗颗粒组分的黑度与原生黑度无显著相关关系, 二者对土壤黑度的贡献率仅为 2.6%。而矿质结合态组分作为土壤腐殖质的主要储存位置, 其对土壤的黑度贡献率达 81%以上, 是黑土呈现黑色的决定性因素。

**关键词:** 土壤颜色; 土壤有机碳; 亮度值; 物理分组; 黑土

**中图分类号:** S714.5      **文献标志码:** A

## Study on the Relationship Between Blackness and Soil Organic Matter Fractions of Typical Mollisol

HAO Xiangxiang<sup>1</sup>, WANG Cui<sup>2</sup>, ZOU Wenxiu<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>1</sup>, HAN Xiaozeng<sup>1†</sup>

(1. National Field Observation and Research Station of Hailun Agroecosystems, Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 2. School of Information Engineering, Harbin University, Harbin 150086, China)

**Abstract:** [Objective] Soil color is an important soil property. It is frequently used by soil scientists for the identification and classification of soil. It is also used as an indicator of many soil properties. Soil organic matter (SOM) is the most important pigment, that colors the soil in black color. [Method] In this study, a total of 30 mollisol samples were collected from the typical

\* 国家重点研发计划项目(2021YFD1500400、2022YFD1500100)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA28070100)和财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-04)共同资助 Supported by the National Key R & D Program of China (Nos. 2021YFD1500400, 2022YFD1500100), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA28070100), and the China Agriculture Research System of MOF and MARA (No. CARS-04)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xzhan@iga.ac.cn

作者简介: 郝翔翔(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事土壤有机质研究。E-mail: haoxx@iga.ac.cn

收稿日期: 2022-11-16; 收到修改稿日期: 2023-01-15; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-03-30

black soil region of northeast China. The SOM was physically separated into four fractions: light fraction, coarse particle fraction, fine particle fraction, and mineral - associated fraction. Based on the CIE  $L^*a^*b^*$  color analysis system, the darkness of bulk soil and soil physical fractions were analyzed using a spectro-colorimeter. The objective was to quantify the relationships between SOM content and the color of black soil and to reveal the contribution of different physical fractions to soil blackness. 【 Result 】 Bulk soil blackness was strongly positively correlated with the SOM content. Similarly, significant relationships were observed between the blackness of physical fractions and the organic carbon content in corresponding fractions. This relationship was gradually strengthened with the increase in the stability of the fractions. As for the color of soil physical fractions, the blackness value of light and coarse particle fractions was greater than that of fine particle and mineral - associated fractions. Also, correlation analysis showed that there was no significant relationship between the blackness of light or coarse particle fractions and the bulk soil blackness, and the contribution rate of the two fractions to bulk soil blackness was only 2.6%. 【 Conclusion 】 The mineral - associated fractions, as the main storage location of soil humus, contributed more than 81% to bulk soil blackness and plays a decisive role in coloring the soil black.

**Key words:** Soil color; Soil organic carbon; Lightness; Physical fraction; Mollisol

土壤颜色不仅是土壤分类的关键指标,也是判断土壤肥力和养分变化的重要依据<sup>[1-2]</sup>。无论是土壤学领域应用最广泛的门赛尔比色系统,还是国际光学委员会建立的定量描述物体颜色的 CIE  $L^*a^*b^*$  系统,都包括一个重要的颜色参数,就是亮度值 (Lightness,  $L$ )<sup>[3]</sup>,其范围为 0 (黑) ~ 100 (白),与之相反的描述即黑度值 (黑度值=100 -  $L$ )。土壤有机质 (SOM) 含量是影响土壤黑度的重要因素<sup>[4]</sup>。一般而言,黑度较大的土壤较浅色土壤含有更高的有机质,而对于矿物组成相同的土壤, SOM 含量越高,其黑度值也越大<sup>[5]</sup>。诸多研究采用统计学方法,建立了土壤黑度与 SOM 间的关系,并应用到 SOM 的快速预测中,与其他颜色参数 (色调、色值、色度、红度、黄度等) 相比,土壤黑度与 SOM 含量的关系更加密切,二者呈现显著的正相关关系<sup>[6-7]</sup>。

黑土作为一种以黑色为主色调的土壤,其矿物组成中富含 2:1 型硅酸盐黏土矿物,该类型矿物在颜色上呈现亮度较高的白色,但另一方面,黑土所富含的有机质,会对黏土矿物的白色产生掩蔽作用<sup>[4]</sup>,加之黑土不受碳酸盐、铁氧化物等其他显色物质的干扰,因此,相比于其他颜色的土壤,黑土颜色与 SOM 间的关系更加紧密。长期高强度利用导致黑土退化严重,最直观表现是 SOM 含量显著下降,颜色变浅。野外开展土壤调查时,研究人员往往通过土壤颜色的深浅来判断黑土的 SOM 含量或肥沃程度,但这些判断目前仍缺乏微观数据的支撑,黑土颜色的深浅与其 SOM 含量存在何种定量关系仍不得而知。此外,土壤含水量的差异会导致土壤

光谱反射率的变化,从而导致土壤黑度的变化<sup>[8]</sup>,量化土壤含水量和黑度间的关系,可为土壤可见光谱技术研究提供重要依据。

SOM 组成复杂,不同组分对土壤颜色的影响也各异,例如,胡敏酸对土壤的着色能力强于富里酸<sup>[7]</sup>。由于腐殖质在 SOM 中的比例较高,而且具有颜色深的特质,因此腐殖质含量较高的土壤,普遍具有较深的颜色。但腐殖质作为一种化学提取物质,并不适于开展土壤颜色研究,因为化学方法提取的 SOM,具有选择性,还会对 SOM 的组成和结构产生破坏,不能真实反映 SOM 的颜色特征<sup>[9]</sup>。而土壤物理分组,更能反映 SOM 的自然特征,是目前 SOM 分组研究中普遍采用的技术手段。但纵观国内外研究现状,有关不同土壤物理组分对其颜色影响的研究非常匮乏。Simon 等<sup>[7]</sup>对美国 915 个砂质土壤的研究发现,不同粒径的颗粒对土壤颜色的影响存在较大差异,土壤的亮度值与砂粒含量呈正相关,但与粉粒和粘粒的含量呈负相关。郭成士等<sup>[10]</sup>采用物理分组方法,研究了砂姜黑土不同物理组分的颜色特征及其对土壤黑度的影响。有关黑土不同物理组分与其颜色间关系的研究还未见报道。

综上,本研究假设:(1)有机质和矿质含量不同的物理组分,在颜色上可能存在着一定的差异;(2)含量和成分上的差异,会导致不同组分对土壤颜色的贡献不同。为验证以上假设,以典型黑土为研究对象,采用基于 CIE  $L^*a^*b^*$  颜色分析系统的分光测色仪,结合传统土壤物理分组方法,来研究黑土 SOM 含量与其颜色间的定量关系,明确不同物理

组分对土壤黑度的贡献,揭示黑土黑色的形成机理,以期为黑土地保护利用和土壤外业调查提供理论依据和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 区域概况及土壤样品采集

土壤样品采自于黑龙江省海伦市,该市位于中国典型黑土分布带的中部,成土的气候条件为温带大陆性季风气候,年均降水量 500~600 mm,年均气温约 1.5 °C,年均 $\geq 10$  °C有效积温 2 400~2 500 °C;成土母质为第四纪黄土状物质;大地形为平原,海拔高度为 200~240 m,10 000 m 水平距离内起伏高差 10~30 m 不等,存在大量排水不畅的低洼地;自然土壤的植被为草原化草甸植被,土壤垦殖期大约 120 年,种植作物包括玉米 (*Zea mays* L.)、大豆 (*Glycine max* L.)、小麦 (*Triticum aestivum* L.) 和水稻 (*Oryza sativa*),一年一季,生长季为 120~130 d。于 2022 年 5 月分别在海伦市的前进镇、祥福镇、乐业乡和福民乡 4 个乡镇,选取 30 个采样点,土壤利用方式均为农田,种植作物为玉米或大豆。在每个采样点,按蛇形法用土钻采集 10 个表层 (0~20 cm) 样品,混合为一个样品,采用四分法取土样约 1 kg,挑除植物残体和根系后进行风干、研磨,过 2 mm 和 0.25 mm 筛备用。

### 1.2 土壤有机质物理分组

采用物理分组方法<sup>[11-12]</sup>,将 SOM 分为轻组有机质 (light fraction organic matter, LFOM)、粗颗粒有机质 (coarse particulate organic matter, cPOM)、细颗粒有机质 (fine particulate organic matter, fPOM) 和矿质结合态有机质 (mineral-associated organic matter, MAOM)。具体步骤为:称取过 2 mm 筛的

风干土样 20 g 于离心管中,加入密度为 1.8 g·cm<sup>-3</sup> 的 NaI 溶液 100 mL,上下颠倒 10 次,使土壤与 NaI 溶液充分接触,然后以转速 3 500 r·min<sup>-1</sup> 离心 15 min 后,收集离心管内的悬液,重复用 NaI 溶液处理土壤 3 次,悬液倒入真空过滤器,过 0.45 μm 滤膜,留在滤膜上的物质用 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 溶液和蒸馏水洗涤,转移至烧杯中,于 50 °C 烘干、称重,即为 LFOM。继续向离心管中加入 100 ml 的 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 六偏磷酸钠溶液,振荡 18 h 后依次通过 0.25 mm 和 0.053 mm 筛,留在筛子上的组分为 cPOM (>0.25 mm) 和 fPOM (0.25~0.053 mm),通过筛子的部分为 MAOM,将这 3 个组分在 50 °C 下烘干、称重。所有组分研磨后过 0.25 mm 筛。

### 1.3 土壤理化性质测定

黑度值采用便携式分光测色仪 (NS-800, 深圳市三恩驰科技有限公司) 进行测量。该仪器以国际通用的 CIE *L\*a\*b\** 系统为测色标准,可定量描述土壤的颜色空间<sup>[10]</sup>,测量结果中, *L* 值代表被测物体的亮度,其值域介于 0 (黑)~100 (白) 之间。对 5 个不同含水量条件下的原土 (未分组土壤) 进行亮度值的测定,以体积含水量计算,分别为 0%、12%、24%、36% 和 48%。测定前,先将过 2 mm 筛的土壤在 50 °C 下烘干 12 h,置于透明的培养皿中并压平,依据土壤重量和含水量,用移液管向培养皿中的土壤准确加入相应体积的蒸馏水,调节土壤含水量至目标值,盖上培养皿盖,静置 10 min,使土壤充分被水浸润。然后随机取 3 个不同区域,用测色仪测量土壤的亮度值 *L*,取 3 次测量的平均值,最后获得土壤的黑度值 (*B*),  $B = 100 - L$ 。不同有机质组分,仅测定其烘干样品的亮度值。

采用以下公式计算不同有机质组分对土壤黑度的贡献率:

$$C_i = \frac{P_i \times B_i}{P_{LFOM} \times B_{LFOM} + P_{cPOM} \times B_{cPOM} + P_{fPOM} \times B_{fPOM} + P_{MAOM} \times B_{MAOM}} \times 100\%$$

式中,  $C_i$  为某一组分对土壤黑度的贡献率,  $P_i$  为某一组分的含量,  $B_i$  为某一组分的黑度值,  $P_{LF}$ 、 $P_{cPOM}$ 、 $P_{fPOM}$  和  $P_{MAOM}$  分别为轻组、粗颗粒、细颗粒和矿质结合态有机质组分的含量,  $B_{LF}$ 、 $B_{cPOM}$ 、 $B_{fPOM}$  和  $B_{MAOM}$  分别为轻组、粗颗粒、细颗粒和矿质结合态有机质组分的黑度。

土壤及其物理组分的碳含量采用元素分析仪测定 (EA3000, Euro Vector, Italy) 进行测定,研究

土壤不含碳酸盐,全碳含量即总有机碳含量。本文重点讨论土壤有机质与黑度的关系,因此将土壤总有机碳含量换算为了土壤有机质,但土壤有机碳与有机质的转换系数不适用于各物理组分,因此,物理组分以有机碳浓度表示。

### 1.4 数据处理

运用 SPSS V19.0 和 GraphPad Prism 8 软件进行数据分析和绘图。采用 Pearson 相关系数来评估不

同变量之间的线性关系,包括原土黑度值与 SOM 含量、土壤物理组分黑度值与组分有机碳浓度间的关系,以及组分黑度与原土黑度间的关系。采用 Spearman 相关分析来评估土壤黑度值与土壤含水量间的定量关系。

## 2 结果

### 2.1 土壤黑度及其与有机质的相关性

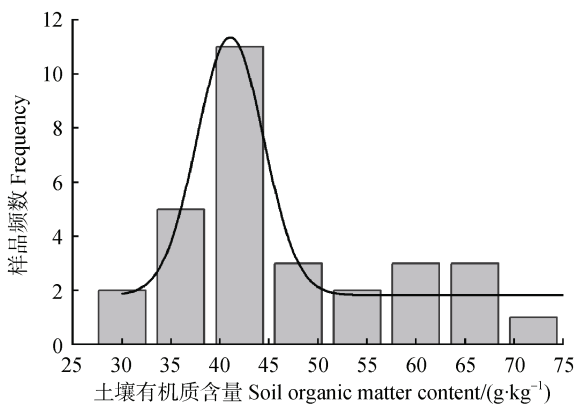
分析样品的土壤有机质 (SOM) 含量范围为 30.81~76.29 g·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 48.96 g·kg<sup>-1</sup> (表 1), 所有样品的 SOM 含量呈正态分布规律 (图 1)。土壤样品 (烘干样) 的黑度值介于 60.51~68.29 之间, 平均值为 64.05 (表 1)。

表 1 分析样品的土壤有机质含量和黑度的描述性统计 (n = 30)

Table 1 The descriptive statistics of the SOM content and blackness of the 30 samples

土壤属性	最小值	最大值	平均值	标准差	变异性
Soil properties	Min	Max	Mean	SD	CV/%
土壤有机质					
Soil organic matter	30.81	76.29	48.96	11.61	23.22
/(g·kg <sup>-1</sup> )					
黑度					
Blackness	60.51	68.29	64.05	2.39	3.73

注: 黑度值为烘干样品所测。Note: Blackness is the value of an oven-dried sample.

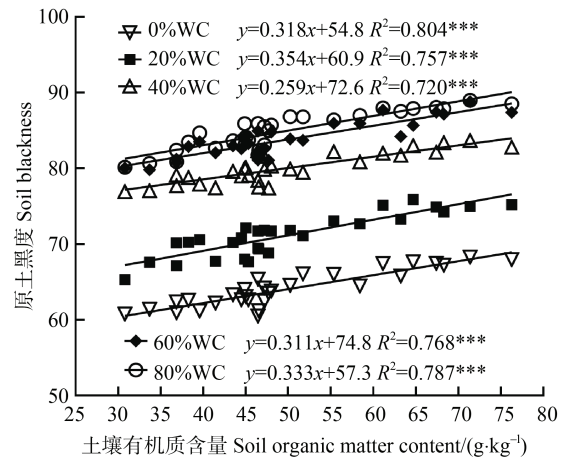


注: 实线为正态分布曲线。Note: The solid line is a normal distribution curve.

图 1 分析样品土壤有机质含量的频率分布直方图

Fig. 1 Frequency distribution histogram of soil organic matter of samples

在 5 个不同土壤含水量条件下, 土壤的黑度值与 SOM 含量均呈现极显著正相关关系 ( $P < 0.001$ ,  $R^2 \geq 0.72$ , 图 2), 而且随着土壤含水量的升高, 土壤的黑度值逐渐增大, 二者呈一元二次函数关系 ( $P < 0.001$ ,  $R^2 = 0.99$ , 图 3)。

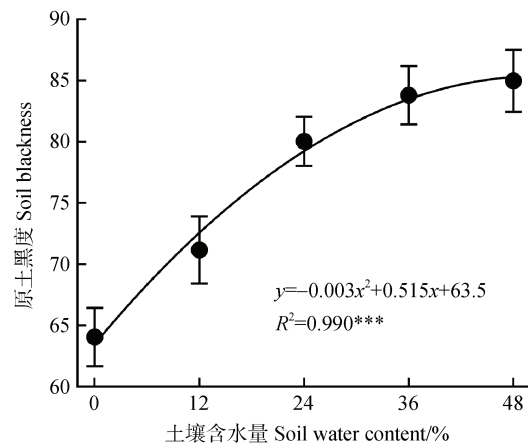


注: WC 表示土壤含水量, \*\*\*表示相关性  $P < 0.001$ ,  $n = 30$ 。

Note: WC means soil water content, \*\*\* indicates significant correlation at the probability level of 0.001,  $n = 30$ .

图 2 不同含水量条件下土壤黑度与有机碳含量相关性

Fig. 2 Relationship between bulk soil organic carbon and blackness under different soil water content



注: 每个点为 30 个土壤样品黑度的平均值, 竖线为标准差, \*\*\*表示相关性  $P < 0.001$ 。Note: Each point is the average blackness of 30 soil samples, the vertical bar is the standard deviation, \*\*\* indicates a significant correlation at the probability level of 0.001,  $n = 30$ .

图 3 土壤含水量与土壤黑度间的相关性

Fig. 3 Relationship between bulk soil water content and blackness

### 2.2 土壤有机质物理组分的含量及其黑度

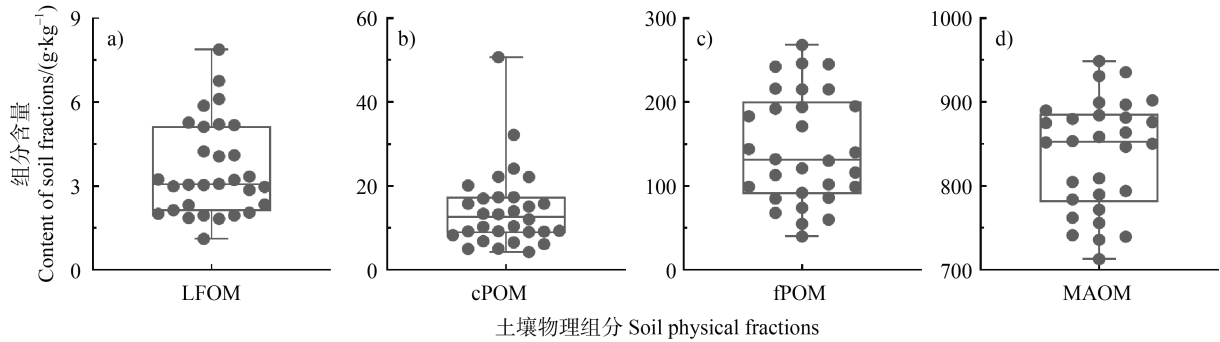
土壤 4 个物理组分中, LFOM、cPOM、fPOM

和 MAOM 组分含量的平均值分别为 3.50、14.23、114.6 和 837.7  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图 4), 分别占原土的 0.35%、1.42%、11.5% 和 83.8%。

从每个独立组分的黑度来看, LFOM、cPOM、fPOM 和 MAOM 组分的黑度值分别为 65.77、66.01、48.89 和 43.04 (图 5), LFOM 和 cPOM 组分的黑度

值大于原土, 而 fPOM 和 MAOM 组分的黑度值则小于原土。

LFOM、cPOM、fPOM 和 MAOM 四个土壤物理组分的黑度均与各自相应的有机碳浓度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 而且相关系数表现为 MAOM > fPOM > cPOM > LFOM (图 6)。



注: LFOM、cPOM、fPOM 和 MAOM 分别表示轻组、粗颗粒、细颗粒和矿质结合态组分, 下同。Note: LFOM、cPOM、fPOM and MAOM stand for light fraction organic matter, coarse particulate organic carbon, fine particulate organic carbon and mineral - associated organic matter, respectively. The same below.

图 4 土壤不同物理组分的含量  
Fig. 4 Content of soil physical fractions

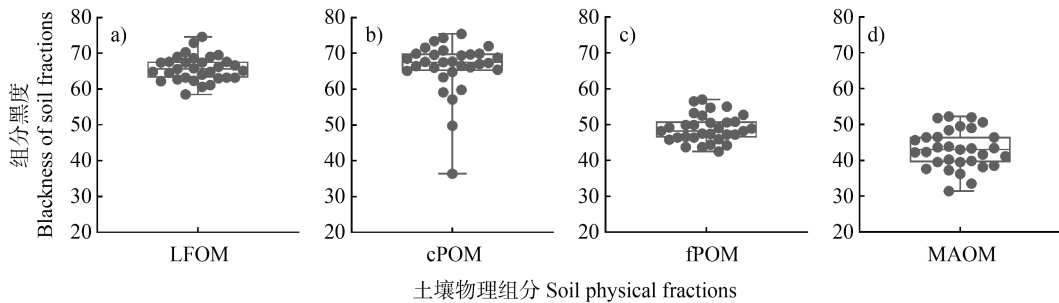
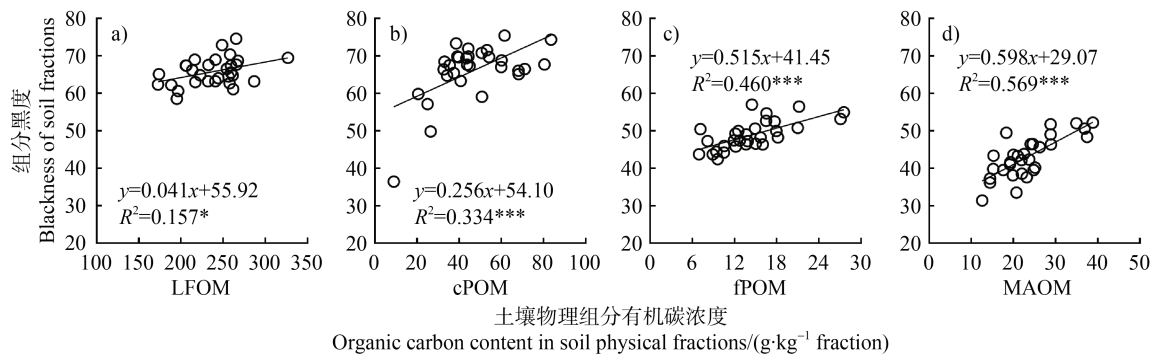


图 5 土壤不同物理组分的黑度  
Fig. 5 Blackness of soil physical fractions



注: \*和\*\*\*分别表示相关性  $P < 0.05$  和  $P < 0.001$ 。Note: \* and \*\*\* indicate significant correlation at 0.05 and 0.001.

图 6 土壤不同物理组分的黑度与其有机碳浓度的关系  
Fig. 6 Relationship between organic carbon content and blackness of soil physical fractions

### 2.3 土壤黑度与有机质物理组分的相关性

图 7 为原土黑度与四个不同物理组分黑度的相关性, 其中 LFOM 和 cPOM 组分的黑度与原土黑度无显著相关性 ( $P > 0.05$ ), 但 fPOM 和 MAOM 组分的黑度值则与原土黑度呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 且 MAOM 组分的相关系数 ( $R^2 = 0.665$ ) 大于 fPOM 组分 ( $R^2 = 0.272$ )。

MAOM 组分对土壤黑度的贡献率最高, 达到 81.46% (图 8), 其次为 fPOM 组分 (15.90%), 二者合计贡献率 97.36%。LFOM 和 cPOM 组分对土壤黑度的贡献率则分别为 0.55% 和 2.09%。

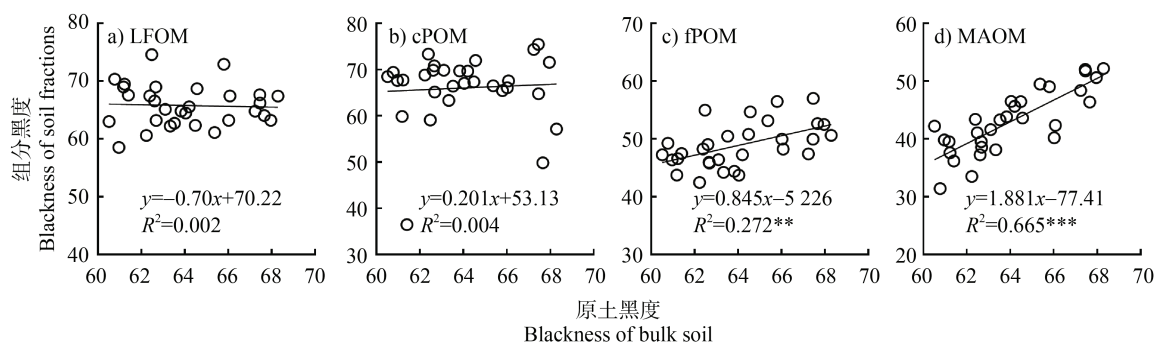
## 3 讨论

### 3.1 黑土的黑度与其有机质含量间的关系

土壤颜色是土壤物质组成的集中体现, SOM、锰可使土壤变黑, 石英、碳酸盐可使土壤变白<sup>[4]</sup>, 赤铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 可使土壤变红, 而针铁矿 ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) 可使土壤变黄<sup>[7]</sup>。但在矿物组成大致相同时, 土壤的色度变化就由 SOM 控制。由于 SOM 在土壤肥力中的重要作用, 诸多研究人员试图建立 SOM 含量与土壤颜色间的定量关系, 从而建立一种低成本、快速、有效的方法, 来预测 SOM 含量。本研究中, 黑土的黑度值为 64 左右, 该值明显高于 Vodyanitskii 和 Savichev<sup>[4]</sup> 在俄罗斯开展的研究结果, 可能是由于本研究中 SOM 含量 ( $48.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 明显高于后者 ( $29.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。但与 Baumann 等<sup>[5]</sup> 的研究结果相比, 尽管本研究的 SOM 含量较低, 黑度值却高于后者, 主要是由于后者土壤所含的碳酸盐, 降低了 SOM 对

土壤的着色程度。因此, 在对不同成土母质或矿物成分差异较大的土壤进行颜色与 SOM 间的定量关系分析时, 必须考虑其他着色物质的影响。本研究中的 30 个土壤, 成土母质与矿物组成基本一致, 且均不含碳酸盐, 所以可以排除其他着色物质的影响, 这对于分析 SOM 与土壤颜色间的定量关系非常有利。

黑土的黑度值与其有机质含量呈显著正相关关系 (图 2), 这与绝大部分研究结果一致<sup>[13-15]</sup>。但对比不同研究结果发现, 土壤黑度值与 SOM 的线性相关系数存在较大差异, 分析其原因, 主要有以下几点: 一是受土壤粒径或均匀程度的影响, 在德国<sup>[5]</sup> 和日本<sup>[13]</sup> 针对不同土壤类型开展的研究均表明, 与过 2 mm 筛的土壤相比, 粒径  $< 0.5 \text{ mm}$  土壤的黑度值与 SOM 的相关系数可提高 45% 以上, 因为土壤粒径越小, 均匀度越高, 测得的颜色变异和误差也更低, 土壤颜色与 SOM 间的相关性就会更强。二是与所调查土壤的有机质范围有关, 有研究发现, 当 SOM 含量大于  $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, SOM 会掩盖其他显色因素, 从而在土壤显色及可见光波的吸收中发挥主导作用, 这也是高有机质含量土壤呈现黑色的重要原因<sup>[16]</sup>。但当 SOM 含量小于  $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, SOM 掩盖其他因素 (如黏土矿物等) 的作用会大大减弱, 而其他显色因素则会在土壤显色及可见光波吸收中发挥更大作用。本文中样品的 SOM 含量均达到了  $30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上, 根据以上研究结果推断, SOM 在土壤显色中发挥主要作用。此外, 土壤黑度值与 SOM 的相关性还与样本范围有关, 当调查土壤范围较大 (区域尺度), 或者 SOM 梯度较大时, 往往会获得较高的相关系数, 而当土壤调查范围较小 (田块尺度),



注: \*\*和\*\*\*分别表示相关性  $P < 0.01$  和  $P < 0.001$ 。Note: \*\* and \*\*\* indicate significant correlation at 0.01 and 0.001.

图 7 原土黑度与不同物理组分黑度的相关性

Fig. 7 Relationship between the blackness of bulk soil and blackness of soil physical fractions

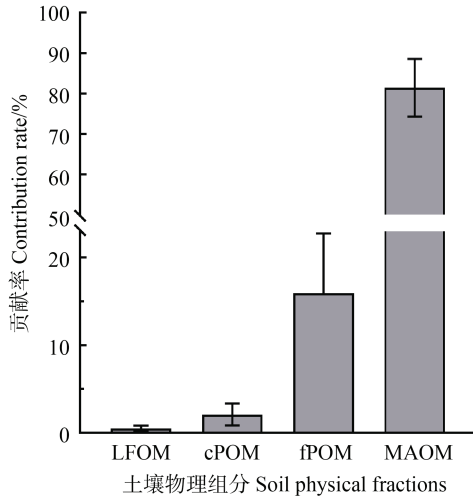


图 8 不同物理组分对原土黑度的贡献率

Fig. 8 Contribution rate of soil physical fractions to bulk soil blackness

或样品的 SOM 梯度较小时, 相关系数往往较低<sup>[13]</sup>。因此, 通过土壤颜色来快速预测 SOM 的方法更适用于在区域尺度上使用<sup>[6, 17]</sup>。当然, 并非所有土壤的黑度均与 SOM 含量呈现正相关关系, 例如, 我国黄淮海地区的砂姜黑土, 虽然 SOM 含量不高 (一般低于  $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 但其颜色却较黑, 主要是由于其所富含的黏土矿物蒙皂石在吸附有机质后会产生很强的黑色效应, 但其受 SOM 含量的直接影响相对较小<sup>[13]</sup>。

水分含量也是影响土壤颜色一个重要因素, 随着含水量的升高, 土壤的黑度值逐渐增大 (图 3)。有研究证明, 水分差异会导致土壤光谱反射率的变化<sup>[8]</sup>。湿润后, 土壤中的空气 (折射率  $n = 1$ ) 被水所取代, 水的折射率 ( $n = 1.33$ ) 更接近土壤颗粒 ( $n = 1.40 \sim 1.70$ ), 随着土壤颗粒与其周围介质的折射率差的减小, 光散射相应减小<sup>[18]</sup>。因此, 土壤含水量越大, 其对光的吸收越强, 颜色越显深色<sup>[19]</sup>。本文研究结果验证了一个实际现象, 即在黑土区, 往往在雨后或者土壤比较潮湿时, 在视觉上会感觉土壤的颜色更深、更黑。当然, 黑土的黑度值与土壤含水量之间并非呈线性关系, 而是呈一元二次函数关系, 当土壤含水量达到 36% 以上时, 其黑度值便趋于稳定 (图 2)。此外, 值得注意的是, 在 0% ~ 48% 这一范围内, 土壤含水量的高低并未影响 SOM 与土壤颜色之间的相关性。总之, 当采用土壤颜色或可见光谱技术研究土壤颜色属性时, 必须充分考虑土壤含水量的影响。

### 3.2 黑土不同物理组分的黑度特征

土壤分组结果表明, 黑土的 MAOM 组分含量最大, 可达 80% 以上 (图 4), 其次为 fPOM 组分 (11.5%), LFOM 和 cPOM 含量则不足 2%。由于在形成机制上的差异, 4 个组分本身的有机碳浓度也存在较大差异。LFOM 的主要成分是未分解或半分解的动植物残体, 具有很高的微生物活性<sup>[20]</sup>, 其有机碳浓度最高, 平均为  $237.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 接近植物残体的碳含量 ( $300 \sim 400 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); 颗粒态有机质组分则是经过物理破碎、轻度腐殖化的组分<sup>[9]</sup>, 其有机碳浓度明显低于 LFOM, 且 cPOM 组分的有机碳浓度 ( $46.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 高于 fPOM ( $26.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); 而 MAOM 组分为有机无机复合体, 其内的有机质高度腐殖化, 并与土壤黏土矿物紧密结合, 稳定程度高, 周转时间长<sup>[21]</sup>, 其有机碳浓度在 4 个组分中最低 (23.4%)。

土壤颜色分析结果证实了本文的第一个假设, 即有机质和矿质含量不同的物理组分, 在颜色上存在差异, 表现为 LFOM/cPOM > fPOM > MAOM。一般认为, 腐殖化程度越强, SOM 中颜色较深的胡敏酸和胡敏素含量越高, 其颜色也会越深, 但本文对土壤组分的独立分析得到了看似相反的结论, 这是由于不同组分间所含黏土矿物的差异造成的。有研究证实, 黏土矿物中富含的  $\text{SiO}_2$  可使土壤呈现白色, 并具有较高的亮度值<sup>[4]</sup>。尽管 fPOM 和 MAOM 组分中的腐殖质颜色很深, 但二者当中所富含的白色黏土矿物会对腐殖质的黑色起到中和作用<sup>[7]</sup>, 而轻组和粗颗粒中, 基本不含或仅含少量黏土矿物, 对二者的颜色发挥主导作用的是有机质, 因此, 其黑度较 fPOM 和 MAOM 组分深。

值得注意的是, 4 个土壤组分的黑度值均与组分有机碳浓度呈现显著正相关关系, 且随着组分稳定程度的增加, 相关性逐渐增强 (图 6)。这反映了有机质在各个组分的显色中发挥着重要作用, 而且腐殖化程度越高, 有机质对组分的显色作用越强。

### 3.3 不同物理组分对黑土黑度的贡献

本研究认为, 原土的黑度是各个物理组分混合后的结果, 即各个组分的含量和组分本身的黑度共同决定了土壤的整体黑度, 因此, 采用加权法来计算不同组分的贡献率。组分的含量即为权数, 不同组分的黑度值乘以相应的权数, 然后相加得到总体数, 再用某一组分黑度值与含量的乘积除以总体数, 即为该组分对土壤黑度的贡献值。这一计算方法可

能存在着一定的局限性,因为不同组分对土壤黑度的贡献可能不是简单的加和效应,但以现有的数据来看,我们认为该计算方法可有效评价不同组分对土壤黑度贡献。尽管 LFOM 和 cPOM 组分的黑度较高,但由于其占土壤的比例非常低,二者的黑度与原土的黑度无显著相关性(图7),且这两个组分对土壤黑度的合计贡献率仅为2.6%。与之形成鲜明对比是, fPOM 和 MAOM 组分对土壤黑度的贡献率达到了97%以上,且 MAOM 可达81%以上,因此,土壤的黑度主要由 MAOM 的黑度决定。一方面, MAOM 组分中所富含的腐殖质本身会呈现较强的黑色;另一方面,腐殖质会对黏土矿物的白色产生掩蔽作用<sup>[4]</sup>。从物理组成的角度来看,本研究中的 MAOM 组分,其矿质颗粒的主体为粉粒(0.05 ~ 0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm),在美国开展的研究证实,土壤的黑度与粉粒和黏粒含量呈显著正相关<sup>[7]</sup>。从化学组成的角度, MAOM 组分中有机质的化学结构以芳香碳为主<sup>[22]</sup>,有学者采用核磁共振技术,分析了 SOM 化学结构与土壤颜色的关系,发现芳香碳含量是所有化学结构中唯一与土壤黑度呈显著正相关的官能团<sup>[23]</sup>。总之, MAOM 组分在数量上的优势,及其物理和化学组成共同决定了其在土壤黑度中发挥着关键作用。

本文重点讨论土壤不同物理组分对其黑度的贡献,从传统知识来看,土壤腐殖物质对黑度贡献巨大,这也是本研究中 MAOM 组分对土壤黑度贡献率最高的原因,因为 MAOM 组分中的有机质几乎全部以腐殖质形式存在。此外,腐殖质组分的黑度值往往表现为:胡敏素>胡敏酸>富里酸,即腐殖化程度越高,腐殖质的黑度值越大,因此, SOM 的腐殖化程度也是影响土壤黑度的重要因素。今后的研究可以进一步从化学组分的角度,研究 SOM 的腐殖化程度与土壤黑度间的关系。

## 4 结论

在5种不同含水量条件下,黑土的黑度均与 SOM 含量呈极显著正相关关系。土壤含水量越大,其对光的吸收越强,黑度值越高,但当土壤含水量达到36%以上时,其黑度值趋于稳定。土壤不同物理组分的黑度存在差异, LFOM 和 cPOM 组分的黑度值大于 fPOM 和 MAOM 组分。虽然 MAOM 组分的黑度值最低,但

其数量优势及其所富含的腐殖质,使 MAOM 组分在土壤的黑化过程中发挥着决定性作用。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Turk J K, Young R A. Field conditions and the accuracy of visually determined Munsell soil color[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84 ( 1 ): 163—169.
- [ 2 ] Yan Z M, Yuan D G, Yu X X, et al. Quantitative relationship of colorimetric parameters with forms of iron and manganese and organic matter in purplish soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 ( 2 ): 372—380. [晏昭敏, 袁大刚, 余星兴, 等. 紫色土色度参数与铁锰形态及有机质的定量关系研究[J]. *土壤学报*, 2021, 58 ( 2 ): 372—380.]
- [ 3 ] Yue Z H, Huang Q, Xiao L, et al. Quantitative conversion of soil color from CIELAB to Munsell system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39 ( 9 ): 2842—2846. [岳智慧, 黄强, 肖理, 等. 土壤颜色由 CIE 向 Munsell 系统的定量转换[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39 ( 9 ): 2842—2846.]
- [ 4 ] Vodyanitskii Y N, Savichev A T. The influence of organic matter on soil color using the regression equations of optical parameters in the system CIE- $L^*a^*b^*$ [J]. *Annals of Agrarian Science*, 2017, 15 ( 3 ): 380—385.
- [ 5 ] Baumann K, Schöning I, Schrumph M, et al. Rapid assessment of soil organic matter: Soil color analysis and Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Geoderma*, 2016, 278: 49—57.
- [ 6 ] Ramos P V, Inda A V, Barrón V, et al. Color in subtropical Brazilian soils as determined with a Munsell chart and by diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Catena*, 2020, 193: 104609.
- [ 7 ] Simon T, Zhang Y K, Hartemink A E, et al. Predicting the color of sandy soils from Wisconsin, USA[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114039.
- [ 8 ] Viscarra Rossel R A, Minasny B, Roudier P, et al. Colour space models for soil science[J]. *Geoderma*, 2006, 133 ( 3/4 ): 320—337.
- [ 9 ] Lavalley J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26 ( 1 ): 261—273.
- [ 10 ] Guo C S, Ma D H, Zhang C Z, et al. Extraction method and composition of black matter in typical Shajiang Calci-Aquic Vertisols in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 ( 2 ): 421—432. [郭成士, 马东豪, 张丛志, 等. 典型砂姜黑土黑色物质提取方法及成分研究[J]. *土壤学报*, 2021, 58 ( 2 ): 421—432.]
- [ 11 ] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*,



- 1992, 56 ( 6 ): 1799—1806.
- [ 12 ] Cambardella C A , Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56 ( 3 ): 777—783.
- [ 13 ] Moritsuka N, Matsuoka K, Katsura K, et al. Soil color analysis for statistically estimating total carbon, total nitrogen and active iron contents in Japanese agricultural soils[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2014, 60 ( 4 ): 475—485.
- [ 14 ] Ibáñez-Asensio S, Marqués-Mateu A, Moreno-Ramón H, et al. Statistical relationships between soil colour and soil attributes in semiarid areas[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116 ( 2 ): 120—129.
- [ 15 ] Liles G C, Beaudette D E, O'Geen A T, et al. Developing predictive soil C models for soils using quantitative color measurements[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 ( 6 ): 2173—2181.
- [ 16 ] Galvão L S, Pizarro M A, Epiphany J C N. Variations in reflectance of tropical soils: Spectral-chemical composition relationships from AVIRIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75 ( 2 ): 245—255.
- [ 17 ] Swetha R K, Chakraborty S. Combination of soil texture with Nix color sensor can improve soil organic carbon prediction[J]. Geoderma, 2021, 382: 114775.
- [ 18 ] Sánchez-Marañón M, Ortega R, Miralles I, et al. Estimating the mass wetness of Spanish arid soils from lightness measurements[J]. Geoderma, 2007, 141 ( 3/4 ): 397—406.
- [ 19 ] Hill I, Park D, Bridges W, et al. Soil water content and photosynthetically active radiation influences soil color assessment[J]. Geoderma Regional, 2022, 31: e00581.
- [ 20 ] Llorente M, Glaser B, Turrión M B. Storage of organic carbon and black carbon in density fractions of calcareous soils under different land uses[J]. Geoderma, 2010, 159 ( 1/2 ): 31—38.
- [ 21 ] von Lützw M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39 ( 9 ): 2183—2207.
- [ 22 ] Yao S H, Zhang Y L, Han Y, et al. Labile and recalcitrant components of organic matter of a Mollisol changed with land use and plant litter management: An advanced <sup>13</sup>C NMR study[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 1—10.
- [ 23 ] Spielvogel S, Knicker H, Kögel-Knabner I. Soil organic matter composition and soil lightness[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 167 ( 5 ): 545—555.

( 责任编辑：卢 萍 )