

DOI: 10.11766/trxb201911070420

晏昭敏, 袁大刚, 余星兴, 吕扬, 刘帆, 程璋. 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.

YAN Zhaomin, YUAN Dagang, YU Xingxing, LÜ Yang, LIU Fan, CHENG Zhang. 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.

## 紫色土色度参数与铁锰形态及有机质的定量关系研究\*

晏昭敏, 袁大刚<sup>†</sup>, 余星兴, 吕扬, 刘帆, 程璋

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 以四川省 30 个典型紫色土剖面共计 100 个样品为研究对象, 对其进行室内颜色测定和化学分析测试, 获取 Munsell HVC、CIE L\*a\*b\* 色度参数、各形态铁锰含量 (全量  $Fe_t/Mn_t$ , 游离态  $Fe_d/Mn_d$ , 活性态  $Fe_o/Mn_o$  和络合态  $Fe_p/Mn_p$ ) 及有机质含量数据。采用相关分析和逐步回归分析方法, 研究紫色土色度参数与铁锰形态及有机质的定量关系。结果表明: 紫色土有机质含量仅与 C、a\* 和 b\* 呈显著负相关, 与 H、V 和 L\* 没有相关关系。铁锰含量与颜色有着密不可分的联系,  $Fe_t$ 、 $Fe_o$ 、 $Fe_p$ 、 $Mn_t$ 、 $Mn_d$  和  $Mn_o$  与两颜色系统色度参数均有显著相关关系。除络合态外, 其余形态锰与色度参数的 Pearson 相关系数均高于铁, 且各形态锰与色度参数的一元拟合决定系数均高于各形态铁。铁锰及有机质共同作用与紫色土颜色的逐步回归拟合决定系数  $R^2$  介于 0.46~0.54 之间, 相对于铁或锰单独作用, 铁锰及有机质共同作用与两颜色系统的回归拟合度更高。

**关键词:** 紫色土; 色度参数; 铁锰形态; 有机质; 定量关系; 逐步回归

中图分类号: S155 文献标志码: A

## Quantitative Relationship of Colorimetric Parameters with Forms of Iron and Manganese and Organic Matter in Purplish Soil

YAN Zhaomin, YUAN Dagang<sup>†</sup>, YU Xingxing, LÜ Yang, LIU Fan, CHENG Zhang

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** [Objective] Sichuan is an area the most typical of concentrated distribution of purplish soil in China. For this paper, a total of 100 samples were collected from 30 typical purplish soil profiles widely distributed in Sichuan Province for analysis in an attempt to explore quantitative relationships of colorimetric parameters of purplish soil with forms of iron and manganese, and organic matter. [Method] The samples were subjected to color measurement and chemical analysis in the laboratory for determination of Munsell HVC, CIE L\*a\*b\* colorimetric parameters, content of iron and manganese by form (total  $Fe_t/Mn_t$ , free form  $Fe_d/Mn_d$ , amorphous form  $Fe_o/Mn_o$  and organic-bound form  $Fe_p/Mn_p$ ) and content of organic matter. Correlation analysis and stepwise regression analysis of the data were performed to specify quantitative relationships of colorimetric parameters of the purplish soil with forms of iron and manganese, and organic matter therein. [Result] Results show that organic matter content in

\* 国家自然科学基金项目 (41671218) 和国家科技基础性工作专项 (2014FY110200A12) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41671218) and Basic Work of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2014FY110200A12)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: 690654034@qq.com

作者简介: 晏昭敏 (1995—), 女, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源可持续利用研究。E-mail: 1756000941@qq.com

收稿日期: 2019-11-07; 收到修改稿日期: 2020-03-28; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-05-22

the purplish soil is significantly and negatively related only to C,  $a^*$  and  $b^*$ , but not related at all to H, V and  $L^*$ . Content of iron and manganese in the purplish soil is closely related to color of the soil.  $Fe_t$ ,  $Fe_o$ ,  $Fe_p$ ,  $Mn_t$ ,  $Mn_d$  and  $Mn_o$  are significantly correlated with colorimetric parameters of the two color systems. Pearson correlations of manganese of all forms, except for organic-bonded form, with colorimetric parameters are higher than those of iron of all forms in coefficient, and so are one-way fitting determination coefficients of manganese of all forms with colorimetric parameters. Determination coefficient  $R^2$  of stepwise regression fitting of the joint effect of iron, manganese and organic matter on color of the purplish soil varies between 0.46 and 0.54. 【 Conclusion 】 Manganese content has an extremely important effect on purplish soil, which is “purple” in color. The soils derived from the purplish parent rocks that are relatively high in manganese content are slightly purple in color. Compared with the effect of iron or manganese alone, the combined effect of iron, manganese and organic matter exhibits a higher degree of regression fit with the two color systems.

**Key words:** Purplish soil; Colorimetric parameters; Iron and manganese speciation; Organic matter; Quantitative relationship; Stepwise regression analysis

土壤颜色是土壤调查中常需观测的最醒目的形态特征之一，是系列物理、化学性质的重要诊断标志<sup>[1]</sup>。紫色土（在中国土壤系统分类<sup>[2]</sup>中属于紫色湿润锥形土和紫色正常新成土等类型）是热带、亚热带地区由紫色岩风化形成的幼年岩性土壤。四川是我国紫色土分布最集中、最具代表性的区域，占全国紫色土分布面积的 51.53%。紫色土呈色原因众说纷纭，从现有研究来看，紫色土由紫色岩继承而来的暗紫、紫红、棕红至红黄系列颜色，主要是母岩中铁、锰形态及含量的差异所致<sup>[3-5]</sup>。何毓蓉等<sup>[6]</sup>的研究发现结晶性赤铁矿（ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ）是决定紫色土土色的主要呈色成分；锰的化合物也有重要影响。此外，众多研究表明土壤有机质是影响土壤颜色参数指标之一，且主要影响土壤亮度<sup>[7-9]</sup>。

颜色描述系统很多，土壤调查常使用 Munsell 系统描述土壤颜色，此外还有 CIE 标准色度学系统等<sup>[1]</sup>。日本柯尼卡美能达 CM-600d 型分光测色计能同时获得多种色度参数，包括 CIE  $L^*a^*b^*$  和 Munsell HVC 等色度指标，且获得的色度指标均为连续型数据。已有研究表明，分光测色计能准确测定土壤颜色<sup>[10]</sup>，这样就方便了土壤颜色与着色物质含量之间定量关系的研究。

前人对土壤颜色的研究集中在有机质、水分含量及铁的氧化物与土壤颜色的关系上<sup>[11-13]</sup>，另有大部分研究基于高光谱的土壤物质含量反演<sup>[14-16]</sup>，对紫色土色度参数的研究较少，且未关注锰形态对颜色的贡献。本文使用 CM-600d 型分光测色计测量四川 30 个典型紫色土剖面共计 100 个风干土壤样品的 Munsell HVC 和 CIE  $L^*a^*b^*$  颜色参数指标，并测定

紫色土有机质含量以及全量铁锰（ $Fe_t$ 、 $Mn_t$ ），游离态铁锰（ $Fe_d$ 、 $Mn_d$ ），活性态铁锰（ $Fe_o$ 、 $Mn_o$ ）和络合态铁锰（ $Fe_p$ 、 $Mn_p$ ）的含量，分析 Fe、Mn 各形态及有机质与紫色土各颜色参数的关系，为紫色土分类研究奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 紫色土样品采集与测定

依据第二次全国土壤普查资料、《中国土种志》<sup>[17]</sup>及《四川土种志》<sup>[18]</sup>中记载的四川紫色土信息，于 2015—2016 年在四川境内主要根据母岩颜色特征、土层厚度等采集酸性、中性和石灰性紫色土各 10 个剖面（图 1），共计 100 个样品。采集的土壤样品及时运回实验室，经风干、去杂、研磨、分别过 10 目和 60 目尼龙筛后混匀装袋储存以测定土壤颜色和各形态铁锰。供试土壤剖面所属地层及其母岩岩性见表 1。

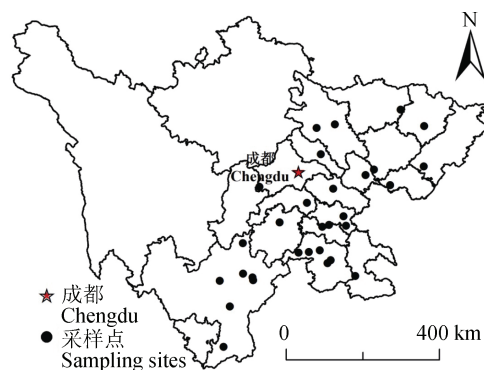


图 1 紫色土样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

表 1 供试紫色土母岩所属地层及岩性

Table 1 Stratigraphy and lithology of the tested purplish parent rocks

剖面编号 Profile No.	所属地层 Stratigraphy	岩性 Lithology	剖面编号 Profile No.	所属地层 Stratigraphy	岩性 Lithology
酸性紫色土			51-139	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S <sup>2</sup>	浊红棕色砂岩
51-082	侏罗系益门组 J <sub>1-2</sub> Y	浊红橙色泥岩	51-155	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S	灰红紫色砂岩
51-085	三叠系飞仙关组 T <sub>1</sub> f	浊棕色砂页岩	51-156	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S	灰红紫色砂岩
51-140	白垩纪夹关组 K <sub>j</sub>	红色砂岩	51-169	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S	紫灰色泥岩
51-142	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S <sup>2</sup>	灰红色砂岩	51-175	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S	红棕色粉砂岩
51-144	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S <sup>2</sup>	灰红色泥岩	石灰性紫色土		
51-145	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S <sup>2</sup>	灰红紫色砂岩	51-010	侏罗系蓬莱镇组 J <sub>3</sub> p	灰红色砂岩
51-146	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S <sup>2</sup>	浊橙色砂岩	51-086	白垩系汉阳铺组 K <sub>1</sub> h	橙色砂岩
51-149	侏罗系遂宁组 J <sub>3</sub> s	浊橙色泥岩	51-106	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S	亮红棕色砂岩
51-182	白垩系苍溪组 K <sub>1</sub> c	红棕色粉砂岩	51-120	白垩系汉阳铺组 K <sub>1</sub> h	紫红色砂岩
51-188	白垩系窝头山组 K <sub>1</sub> w	灰红色泥岩	51-136	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S	灰红紫色砂岩
中性紫色土			51-138	侏罗系沙溪庙组 J <sub>2</sub> S <sup>2</sup>	灰紫色砂岩
51-070	侏罗系官沟组 J <sub>3</sub> g	浊红棕色砂岩	51-162	侏罗系蓬莱镇组 J <sub>3</sub> p	灰紫色砂岩
51-076	侏罗系官沟组 J <sub>3</sub> g	暗灰紫色砂岩	51-164	侏罗系遂宁组 J <sub>3</sub> s	橙色泥岩
51-103	侏罗系益门组 J <sub>1-2</sub> Y	橙色泥岩	51-168	侏罗系遂宁组 J <sub>3</sub> s	亮红棕色泥岩
51-112	二叠系峨眉山玄武岩组 P <sub>2</sub> β	暗灰紫色砂岩	51-180	白垩系苍溪组 K <sub>1</sub> c	红棕色粉砂岩
51-113	三叠系飞仙关组 T <sub>1</sub> f	暗灰紫色砂岩			

分光测色计测定土壤颜色方法参考陈剑科等<sup>[10]</sup>的研究。

土壤样品有机质采用重铬酸钾-硫酸消化法测定。全量铁、锰采用氢氟酸-高氯酸法消煮，游离态铁、锰采用柠檬酸钠-连二亚硫酸钠-重碳酸钠 (DCB) 法浸提，活性态铁、锰采用草酸-草酸铵缓冲液在避光条件下震荡 2 h 后浸提，络合态铁、锰采用 pH=10 的焦磷酸钠溶液浸提。消煮液或浸提液中各形态铁、锰含量采用电感耦合等离子发射光谱仪 (ICP-AES) 测定<sup>[19]</sup>。

## 1.2 数据分析

描述性统计、相关分析及逐步回归分析在 Excel 2013、SPSS 22.0 平台下完成。

## 2 结果

### 2.1 紫色土色度参数、有机质及铁锰形态统计特征

**2.1.1 色度参数** 根据表 2 及表中未显示的信息，在 Munsell 颜色系统中，所有样品的 H 均集中

于 YR 色调，介于 2.2~8.6YR 之间，平均值为 5.4YR，V 介于 3.1~5.2 之间，平均值为 4.4，C 介于 1.5~6.6 之间，平均值为 3.3；三个色度参数中均为酸性紫色土颜色分布范围最广，石灰性紫色土颜色分布最小；除 H 外，色度参数平均值总体呈现中性紫色土 < 石灰性紫色土 < 酸性紫色土的特征。在 CIE L\*a\*b\* 颜色系统中，L\* 介于 32.0~53.9 之间，平均值为 45.8，a\* 介于 3.8~23.2 之间，平均值为 9.7，b\* 介于 7.4~28.8 之间，平均值为 16.9；a\*/b\* 表征土壤的“相对红度”<sup>[9]</sup>，a\*/b\* 在 0.37~0.83 之间，平均值为 0.57，表明该区域紫色土颜色整体偏红。除 a\*/b\* 以外，色度参数平均值总体呈现出中性紫色土 < 石灰性紫色土 < 酸性紫色土。

**2.1.2 铁、锰形态及有机质** 根据表 3 及表中未显示的信息，紫色土 Fe<sub>t</sub> 含量介于 20.52~148.31 g·kg<sup>-1</sup> 之间，平均值为 62.09 g·kg<sup>-1</sup>；Fe<sub>d</sub> 含量介于 6.55~70.29 g·kg<sup>-1</sup> 之间，平均值为 23.96 g·kg<sup>-1</sup>；Fe<sub>o</sub> 含量介于 0.06~6.39 g·kg<sup>-1</sup> 之间，平均值为 1.35 g·kg<sup>-1</sup>；Fe<sub>p</sub> 含量介于 0.01~9.45 g·kg<sup>-1</sup> 之间，平均值为

表 2 紫色土 Munsell 和 L\*a\*b\* 颜色系统平均值

Table 2 Mean values of munsell and L\*a\*b\* color systems of the purplish soil

土壤类型 Soil type	色调 H ( YR )	明度 V	彩度 C	亮度 L*	红度 a*	黄度 b*	a*/b*
酸性紫色土	5.3a	4.6a	3.8a	47.7a	11.0a	19.4 a	0.56 a
中性紫色土	5.5a	4.1b	2.6b	42.4b	7.9b	13.6b	0.58a
石灰性紫色土	5.3a	4.6a	3.4c	47.1a	9.9a	17.5a	0.57a
三种紫色土	5.4	4.4	3.3	45.8	9.7	16.9	0.57

注: 同一列数据不同小写字母表示不同土壤类型间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different soil type ( $P < 0.05$ ) . The same as below.

表 3 紫色土各形态铁、锰及有机质平均值

Table 3 Mean value of iron and manganese of various forms and organic matter in the purplish soil

土壤类型 Soil type	Fe <sub>t</sub> / ( g·kg <sup>-1</sup> )	Fe <sub>d</sub> / ( g·kg <sup>-1</sup> )	Fe <sub>o</sub> / ( g·kg <sup>-1</sup> )	Fe <sub>p</sub> / ( g·kg <sup>-1</sup> )	Fe <sub>d</sub> /Fe <sub>t</sub> %	Mn <sub>t</sub> / ( g·kg <sup>-1</sup> )
酸性紫色土	63.39ab	27.49a	1.67a	2.24a	44.47ab	0.55a
中性紫色土	67.67a	26.98a	1.62a	0.21b	39.43a	1.21b
石灰性紫色土	54.37b	16.29b	0.68b	0.09b	30.41b	0.93b
三种紫色土	62.09	23.96	1.35	0.92	38.59	0.88

土壤类型 Soil type	Mn <sub>d</sub> / ( g·kg <sup>-1</sup> )	Mn <sub>o</sub> / ( g·kg <sup>-1</sup> )	Mn <sub>p</sub> / ( g·kg <sup>-1</sup> )	Mn <sub>d</sub> /Mn <sub>t</sub> %	SOM/ ( g·kg <sup>-1</sup> )
酸性紫色土	0.42a	0.33a	0.05a	62.89a	11.54a
中性紫色土	0.70a	0.72b	0.02b	57.95a	12.73a
石灰性紫色土	0.45a	0.32a	0.01b	48.88b	10.15a
三种紫色土	0.52	0.46	0.03	57.06	11.52

0.92 g·kg<sup>-1</sup>; 铁游离度介于 19.65%~74.28%之间。从表中可以看出酸性紫色土 Fe<sub>d</sub>、Fe<sub>o</sub>、Fe<sub>p</sub> 以及铁的游离度的平均值均高于中性和石灰性紫色土。紫色土 Mn<sub>t</sub> 含量介于 0.12~6.15 g·kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值为 0.88 g·kg<sup>-1</sup>; Mn<sub>d</sub> 含量介于 0.03~6.05 g·kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值为 0.52 g·kg<sup>-1</sup>; Mn<sub>o</sub> 含量介于 0.00~5.06 g·kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值为 0.46 g·kg<sup>-1</sup>; Mn<sub>p</sub> 含量介于 0.00~0.16 g·kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值为 0.03 g·kg<sup>-1</sup>; 锰游离度介于 12.69%~93.78%之间。土壤有机质含量介于 2.40~56.69 g·kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值为 11.52 g·kg<sup>-1</sup>。

## 2.2 铁、锰形态及有机质与紫色土色度参数的相关与回归关系

### 2.2.1 铁形态

由相关分析结果可知, 土壤 Fe<sub>t</sub> 含量与 V、C、L\*、a\*、b\* 呈极显著负相关, 与 H 呈极显著正相关。Fe<sub>d</sub> 含量仅与 V、L\* 呈极显著负相关, 而与其他色度参数之间未出现显著相关关系。Fe<sub>o</sub> 含量与 H 呈极显著正相关, 与 V、L\* 和 a\* 呈极显著负相关, 与 C 呈显著负相关, 即 Fe<sub>o</sub> 含量越低,

色调越偏红。Fe<sub>p</sub> 与 V、C、L\*、a\*、b\* 均呈极显著正相关, Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub> 与 a\* 和 C 均呈显著正相关。综上, Fe<sub>d</sub> 含量只对紫色土颜色的 V 和 L 产生显著影响, Fe<sub>o</sub> 含量和 Fe<sub>p</sub> 含量在 2 个颜色描述系统中均至少与 2 个参数有显著相关关系, 尤其在 CIEL\*a\*b\* 颜色系统中, Fe<sub>o</sub> 与 L\*、a\*、b\* 均呈显著正相关。

紫色土铁形态与各色度参数的一元拟合结果表明, 各形态铁与 HVC 和 L\*a\*b\* 的一元拟合决定系数  $R^2$  介于 0.00~0.34 之间。随着 Fe<sub>t</sub> 和 Fe<sub>o</sub> 含量的增加, V、C、L\*、a\*、b\* 均呈逐渐下降趋势, 而 H 呈逐渐上升趋势。Fe<sub>t</sub> 与 L\* 和 V 的拟合决定系数  $R^2$  均为 0.34, 显著高于其他色度参数指标, 表明 Fe<sub>t</sub> 含量对紫色土明暗程度影响最大。相对于其他色度参数, Fe<sub>o</sub> 与 H 的拟合决定系数  $R^2$  最高, 为 0.25, Fe<sub>o</sub> 对紫色土 H 影响最大, H 随 Fe<sub>o</sub> 含量增加而偏黄。Fe<sub>p</sub> 含量与 H 未出现显著回归关系, 但随着 Fe<sub>p</sub> 含量的增加, V、C、L\*、a\*、b\* 值均呈逐渐上升的趋势, 即颜色亮度由暗向亮变化, 在红度方向上偏红, 在

黄度方向上偏黄。相比较而言,在 Munsell HVC 颜色系统中, H 主要受  $Fe_o$  含量影响, V 主要受  $Fe_t$  含量影响, C 主要受  $Fe_p$  含量影响;在 CIE  $L^*a^*b^*$  颜色系统中,  $L^*$  主要受  $Fe_t$  含量影响,  $b^*$  主要受  $Fe_p$  含量影响,  $a^*$  与各形态铁含量均无显著关系。

逐步回归法是通过自变量的显著性选取最优变量的过程,在土壤学研究中有广泛的应用。本研究利用逐步回归分析法定量判定紫色土各形态铁、锰含量解释色度参数变异的能力。逐步回归分析结果(表 4)表明,紫色土铁形态与两颜色系统各色度参

数的回归拟合决定系数  $R^2$  介于 0.284~0.398 之间。 $V$  和  $L^*$  的回归模型中包含  $Fe_t$  和  $Fe_p$ , 表明  $Fe_t$  和  $Fe_p$  是影响土壤明度(亮度)的主要决定因素,两者共同可以解释因变量 38.6% 的变化。 $Fe_p$ 、 $Fe_o$ 、 $Fe_d$  和  $Fe_t$  四种形态均能影响土壤 C 和  $a^*$ , 四方分别解释 C 和  $a^*$  在土壤中 39.8% 和 38.6% 的变化。H 主要受  $Fe_o$  和  $Fe_d$  影响,两者共同解释 H 在土壤中 28.4% 的变化,  $Fe_o$  是主要决定因素。 $b^*$  主要受  $Fe_p$  和  $Fe_o$  影响,两者共同解释  $b^*$  在土壤中 32.0% 的变化,  $Fe_p$  是主要决定因素。

表 4 紫色土铁形态与色度参数逐步回归方程

Table 4 Stepwise regression equations for correlations between iron forms and colorimetric parameters in the purplish soil

颜色系统 Color system	回归方程 Regression equations	$R^2$	P
HVC	$H=5.074+0.709 Fe_o^{**}-0.027Fe_d^*$	0.284	<0.001
	$V=4.970-0.01Fe_t^{**}+0.082Fe_p^{**}$	0.385	<0.001
	$C=3.645+0.234Fe_p^{**}-0.267Fe_o^*+0.04Fe_d^{**}-0.019Fe_t^*$	0.398	<0.001
$L^*a^*b^*$	$L^*=51.267-0.101Fe_t^{**}+0.843Fe_p^{**}$	0.383	<0.001
	$a^*=10.744+0.504Fe_p^*-1.252Fe_o^{**}+0.162Fe_d^{**}-0.06Fe_t^*$	0.386	<0.001
	$b^*=16.785+1.573Fe_p^{**}-0.965Fe_o^*$	0.320	<0.001

注:表中\*\*表示在  $P<0.001$  水平下显著相关,\*表示在  $P<0.01$  水平下显著相关。下同。Note: \*\* indicates significant correlation at  $P<0.001$  level, \* indicates significant correlation at  $P<0.01$  level. The same as below.

**2.2.2 锰形态** 相关分析结果表明,  $Mn_t$  与  $V$ 、 $C$ 、 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  呈极显著负相关,与 H 呈极显著正相关,  $Mn_d$  和  $Mn_o$  均与 H 呈极显著正相关,与  $V$ 、 $C$ 、 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  呈显著负相关;  $Mn_p$  对紫色土颜色没有显著影响,可能是由于紫色土中  $Mn_p$  含量过低,对颜色的影响得不到体现。相比较而言,除络合态外,紫色土各形态锰含量与色度参数的相关关系均高于各形态铁,初步表明 Mn 对紫色土颜色的影响要高于 Fe。

紫色土锰形态与各色度参数的一元拟合结果表明,各形态锰与 HVC 和  $L^*a^*b^*$  的一元拟合决定系数  $R^2$  介于 0.16~0.44 之间。随着紫色土  $Mn_t$  含量的增加,  $V$ 、 $C$ 、 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  均呈逐渐下降的趋势,而 H 呈逐渐上升的趋势。 $Mn_t$  与  $L^*$  和  $V$  的拟合决定系数  $R^2$  最高,达到 0.44,表明紫色土  $Mn_t$  含量对土壤明暗程度影响最大;与  $C$ 、 $a^*$  和  $b^*$  的拟合决定系数  $R^2$  分别为 0.41、0.41 和 0.39,拟合度较高。相对于其他色度参数,  $Mn_d$  与  $L^*$  和  $V$  的拟合决定系数  $R^2$  最高,分别为 0.35 和 0.34,与  $b^*$  的拟合决定系数  $R^2$  最低,为 0.16,表明  $Mn_d$  对紫色土亮度影响最大,

即随着  $Mn_d$  含量增加,紫色土亮度越暗。随着  $Mn_o$  含量的增加,  $V$ 、 $C$ 、 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值均呈逐渐下降的趋势,即  $Mn_o$  可削弱紫色土亮度、红度和黄度。

逐步回归分析结果(表 5)表明,紫色土锰形态与两颜色系统回归拟合的决定系数  $R^2$  介于 0.242~0.435 之间。相对于锰的其他形态,  $Mn_t$  是影响紫色土  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $V$  和  $C$  的主要因素,而 H 主要受  $Mn_o$  影响。

表 5 紫色土锰形态与色度参数逐步回归方程

Table 5 Stepwise regression equations for correlation between manganese forms and colorimetric parameters in the purplish soil

颜色系统 Color system	回归方程 Regression equations	$R^2$	P
HVC	$H=4.747+1.54Mn_o^{**}$	0.242	<0.001
	$V=4.882-0.522Mn_t^{**}$	0.435	<0.001
	$C=4.15-1.025Mn_t^{**}$	0.349	<0.001
$L^*a^*b^*$	$L^*=50.345-5.405Mn_t^{**}$	0.435	<0.001
	$a^*=12.341-3.196Mn_t^{**}$	0.329	<0.001
	$b^*=20.718-4.499Mn_t^{**}$	0.298	<0.001

**2.2.3 有机质+铁、锰形态** 本研究中紫色土有机质含量与 C、 $a^*$ 和  $b^*$ 呈显著负相关，相关系数分别为-0.243，-0.235 和-0.219，与 H、V 和  $L^*$ 未出现相关关系。

紫色土各形态铁锰及有机质与色度参数的逐步回归分析结果如表 6 所示，铁、锰各形态及有机质共同作用于两种颜色系统的回归拟合决定系数  $R^2$  介于 0.457~0.536 之间，其中有机质只出现在 C、 $a^*$ 和  $b^*$ 的回归方程中，且在  $P<0.05$  水平下与 C、 $a^*$ 和  $b^*$ 呈显著负相关，与相关分析结果一致。V 和  $L^*$ 的回归模型中包含  $Mn_t$ 和  $Fe_t$ ，两者可以解释紫色土 V 和  $L^*$  45.7%的变化， $Mn_t$ 是影响土壤明度（亮度）的主要决定因素。 $Mn_o$ 、 $Fe_d$ 、 $Fe_t$ 和 SOM 共同影响紫色土 C，并可解释其 53.6%的变化，其中  $Fe_d$ 、 $Mn_o$ 和  $Fe_t$ 是主要决定因素。 $Mn_t$ 、 $Fe_d$ 、 $Mn_p$ 、 $Fe_o$ 和 SOM 共同影响紫色土  $a^*$ ，并解释其 53.4%的变化，其中  $Mn_t$ 和  $Fe_d$ 是主要决定因素。H 受铁锰 5 种形态共同影响，它们共同解释 H 在紫色土中 49.9%的变化，其中  $Fe_p$ 、 $Fe_d$ 和  $Mn_d$ 是主要决定因素。 $b^*$ 受  $Mn_t$ 、 $Fe_p$ 、 $Fe_d$ 、 $Fe_t$ 和 SOM 共同影响，它们共同解释  $b^*$ 在紫色土中 46.6%的变化。相对于铁和锰单独作用与土壤颜色的回归分析，铁锰及有机质共同作用与土壤颜色的逐步回归拟合度更高。

### 3 讨论

#### 3.1 有机质与紫色土色度参数的关系

关于土壤颜色的现有文献大都表明土壤亮度与有机质或有机碳的含量呈显著负相关关系<sup>[7-9]</sup>，但是，这种关系是非线性的，表明土壤亮度受其他参数的影响。大多数是单独研究有机质对土壤颜色的影响，而没有考虑有机质与土壤其他性质的相互作用；同时，土壤样品的来源和质地也是影响有机质与亮度关系的重要因素，如一些作者认为，亮度和有机质之间的关系在很大程度上取决于土壤质地及其均匀性<sup>[8]</sup>。本文紫色土有机质含量平均值较低，为  $11.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，相关分析和逐步回归结果均表明有机质对紫色土亮度没有影响。相对于其他有机质含量高的土壤，四川紫色土分布在温暖湿润的亚热带气候下，物质循环强烈，有机质含量普遍偏低，导致其对土壤颜色的影响不够明显。且有机质易与黏土矿物结合形成有机无机复合体态，有机质在土壤中主要是以胶膜的形式包被在矿物质土粒的表面，二者共同影响土体颜色的呈现。因此，有机质与其他物质的包裹、镶嵌进一步削弱了其颜色参数的直接关系。

表 6 紫色土铁锰形态及有机质与色度参数逐步回归方程

Table 6 Stepwise regression equations for correlations of iron forms, manganese forms and organic matter with colorimetric parameters

颜色系统 Color system	回归方程 Regression equations	$R^2$	P
HVC	$H=4.274+0.37Fe_o^* -0.074Fe_d^{**}+2.062Mn_d^{**}+0.272Fe_p^{**}+0.019Fe_t^*$	0.499	<0.001
	$V= 5.054-0.407Mn_t^{**}-0.004Fe_t^*$	0.457	<0.001
	$C= 4.172+0.056Fe_d^{**}-1.398Mn_o^{**}-0.022Fe_t^{**}-0.025SOM^*$	0.536	<0.001
L*a*b*	$L^*= 52.122-4.217 Mn_t^{**}-0.045Fe_t^*$	0.457	<0.001
	$a^*= 11.842-3.897Mn_t^{**}+0.128Fe_d^{**}-0.632Fe_o^*-18.283Mn_p^*-0.055SOM^*$	0.534	<0.001
	$b^*=20.95-2.834 Mn_t^*+0.746Fe_p^*-0.118SOM^*+0.145Fe_d^*-0.071Fe_t^*$	0.466	<0.001

#### 3.2 铁形态与紫色土色度参数

许书堂等<sup>[20]</sup>研究认为表现为红、黄、棕等颜色的岩石是由于岩石中含有铁的氧化物或氢氧化物（赤铁矿和褐铁矿）。何柳等<sup>[21]</sup>对中国黄土颜色变化的控制因素研究表明，黄土的  $L^*$ 变化主要与铁氧化物、有机质、碳酸盐的含量有关，三者的影响依次减弱，而  $a^*$ 变化则主要受控于铁氧化物的种类和含量。本研究中三种紫色土  $Fe_t$ 含量达  $21\sim 148 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，

平均值为  $62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $Fe_d$ 含量为  $6\sim 70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均值为  $24 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，从铁质丰富这一点可以认为铁对紫色土土色有重要影响。紫色土各形态铁含量均与土壤  $L^*$ 显著相关，随  $Fe_d$ 含量增加，紫色土明度和亮度由亮向暗变化，原因可能是 Fe 的发色团与黏土矿物结合时降低了亮度<sup>[22]</sup>。对紫色母岩颜色的研究表明在  $L^*<50$  区间， $Fe_d$ 与亮度的相关系数更大，分别达到 0.748 和 0.702。有学者认为土壤呈红色的鲜



艳程度与  $Fe_d$  含量呈正相关,黏粒中  $Fe_d$  含量对土色影响最大。Soileau 和 McCracken<sup>[23]</sup>研究了  $Fe_d$  含量与土壤 Munsell 间的关系,认为土壤 C 随  $Fe_d$  含量增加而增加。本研究中 C 和  $a^*$  与  $Fe_t$ 、 $Fe_o$  和  $Fe_p$  显著相关,而与  $Fe_d$  无相关关系。紫色土多是新成土,土壤风化程度低,紫色土的颜色主要是对母质的继承,土壤中  $Fe_d$  大部分来自于红色母岩,且紫色土的颜色又受有机质和锰形态等其他因素的影响,部分呈现出不同于红壤或黄壤的“紫色”特征,从而掩盖了土体铁质的影响,或由此使得  $Fe_d$  与  $a^*$  和 C 的关系并不显著。而铁锰逐步回归分析结果表明 C 和  $a^*$  主要受  $Mn_t$  和  $Fe_d$  含量影响,与相关分析结果不尽一致,原因在于解释变量之间存在共线性,逐步回归法筛选并剔除引起多重共线性的变量使最终保留在模型中的解释变量既是重要的,又没有严重多重共线性,从而使得  $Fe_d$  被保留在模型中。 $Fe_o$  对色度参数的影响主要在于其本身具有极大的比表面和化学活性。

### 3.3 锰形态对紫色土颜色的影响

综合来看,锰与色度参数一元回归拟合模型的拟合度均高于铁,表明锰对紫色土颜色的影响高于铁。在 CIE  $L^*a^*b^*$  颜色系统中, $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  均受  $Mn_t$  含量影响最大;除络合态外,各形态锰均在不同程度上削弱了紫色土的亮度、明度和彩度,使其颜色暗沉,这可能是产生人眼所见紫色土“紫色”

的原因。土壤中  $Mn_d$  含量高时,可使土壤带有紫色,如日本静岗县发现的一种称为“巧克力色”的土壤,据测其易还原性锰高达  $1\ 201\ mg\cdot kg^{-1}$ ,较同地区的红黄色土高出 10 倍,因此推测土壤中含有较多的易还原性锰是该土壤呈现巧克力色的原因<sup>[6]</sup>。杨艳生<sup>[24]</sup>的研究也发现锰的氧化物含量相对较高的紫色母岩和土壤,其颜色略偏紫。本研究发现,对四川地区紫色土而言,锰形态对各色度参数均有影响, $Mn_t$  影响紫色土的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、V 和 C, H 主要受  $Mn_o$  影响。本研究中  $Mn_t$  含量高于  $1\ 000\ mg\cdot kg^{-1}$  的土壤剖面(图 2),其土色多呈棕紫、暗紫或紫红色,还有个别呈现出类似巧克力的颜色,而其他锰含量较低的土壤剖面土色多呈棕红或红黄色。图 2 中的紫色土大多发育自中生代三叠纪和侏罗纪地层的紫色沉积岩,较其他母质发育的土壤有更典型的偏紫色特征,其原因可能与前述日本静岗县巧克力色土相似,由此可见 Mn 含量对呈现“紫”颜色的紫色土有极其重要的影响。

## 4 结 论

紫色土有机质含量仅与 C、 $a^*$  和  $b^*$  呈显著负相关,与 H、V 和  $L^*$  没有相关关系。紫色土铁锰含量与颜色有着密不可分的联系, $Fe_t$ 、 $Fe_o$  和  $Fe_p$  与两颜色系统的色度参数有显著相关关系, $Fe_d$  仅与 V 和

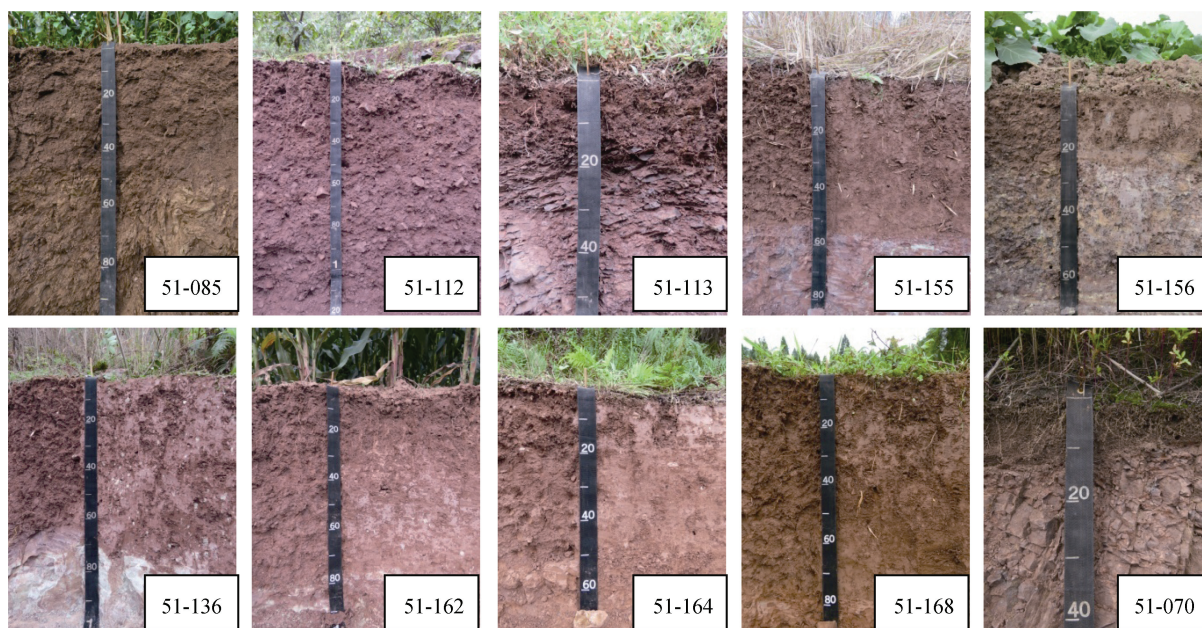


图 2  $Mn_t$  含量高于  $1\ 000\ mg\cdot kg^{-1}$  的土壤剖面  
Fig. 2 Soil profiles with  $Mn_t$  content higher than  $1\ 000\ mg\cdot kg^{-1}$

$L^*$ 呈显著负相关;  $Mn_t$ 、 $Mn_d$ 、 $Mn_o$ 与两颜色系统色度参数有显著相关关系。除络合态外, 紫色土各形态锰含量与色度参数的相关关系均高于各形态铁, 对于紫色土而言, 锰对紫色土颜色的影响高于铁, 锰含量相对较高的紫色母岩和土壤, 其颜色也出现略偏紫的特征。逐步回归分析表明,  $Mn_t$ 是影响紫色土  $V$ 、 $L^*$ 、 $a^*$ 和  $b^*$ 的主要因素, 与铁锰其他形态相比,  $Mn_t$ 对紫色土颜色的影响最大。铁锰与有机质共同作用与土壤颜色的逐步回归方程决定系数  $R^2$ 介于 0.46~0.54 之间, 相对于铁和锰单独作用, 铁锰及有机质共同作用与紫色土颜色的逐步回归拟合度更高。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Viscarra Rossel R A, Minasny B, Roudier P, et al. Colour space models for soil science[J]. *Geoderma*, 2006, 133 (3/4): 320—337.
- [ 2 ] Chinese Soil Taxonomic Classification Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Chinese soil taxonomy[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001. [中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索(第三版) [M]. 第 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.]
- [ 3 ] He Y R, Zheng L, Chen X H, et al. Purple soils in China (Part two) [M]. Beijing: Science Press, 2003. [何毓蓉, 郑霖, 陈兴华, 等. 中国紫色土(下篇) [M]. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [ 4 ] Xiong Y. Soil color research[J]. *Geological Review*, 1937, 2 (1): 5—22, 127—128. [熊毅. 土壤颜色之研究[J]. *地质论评*, 1937 (1): 5—22, 127—128.]
- [ 5 ] Qing C L, Mou S S, Wang D Y, et al. More insights into purple soil I parent material: Redbeds[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2009, 31 (7): 120—125. [青长乐, 牟树森, 王定勇, 等. 紫色土再研究 I 紫色土的母质—红层[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2009, 31 (7): 120—125.]
- [ 6 ] He Y R, Zuo T X F, He T X D, et al. Soil color study of purple soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 1990, 21 (6): 247—250. [何毓蓉, 佐藤幸夫, 和田秀德, 等. 紫色土土色研究. *土壤通报*, 1990, 21 (6): 247—250.]
- [ 7 ] Baumann K, Schöning I, Schrupf M, et al. Rapid assessment of soil organic matter: Soil color analysis and Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Geoderma*, 2016, 278: 49—57.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Miralles I, Ortega R, Sánchez-Marañón M, et al. Assessment of biogeochemical trends in soil organic matter sequestration in Mediterranean calcimorphic mountain soils (Almería, Southern Spain) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39 (10): 2459—2470.
- [ 10 ] Chen J K, Yuan D G, Yan Z M, et al. Comparison between colorimeter and New Standard Soil Colour Chart of China in determining Munsell color of soils—A case study of Central Sichuan Hilly Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (1): 78—89. [陈剑科, 袁大刚, 晏昭敏, 等. 测色仪与中国标准土壤色卡测定土壤颜色比较——以川中丘陵区为例[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (1): 78—89.]
- [ 11 ] Barrón V, Torrent J. Use of the Kubelka–Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour[J]. *Journal of Soil Science*, 1986, 37 (4): 499—510.
- [ 12 ] Vodyanitskii Yu 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.
- [ 13 ] Viscarra Rossel R A, Fouad Y, Walter C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100 (2): 149—159.
- [ 14 ] 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. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60 (4): 475—485.
- [ 15 ] Ji W J, Li S, Chen S C, et al. Prediction of soil attributes using the Chinese soil spectral library and standardized spectra recorded at field conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 492—500.
- [ 16 ] Wei C L, Zhao Y G, Wu D W, et al. Prediction of soil free iron oxide content based on spectral analysis[J]. *Soils*, 2014, 46 (4): 678—683. [魏昌龙, 赵玉国, 邬登巍, 等. 基于光谱分析的土壤游离铁预测研究[J]. *土壤*, 2014, 46 (4): 678—683.]
- [ 17 ] National Soil Survey Office. Soil Series of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993. [全国土壤普查办公室. 中国土种志-第一卷[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.]
- [ 18 ] Sichuan Provincial Department of Agriculture and Animal Husbandry, Sichuan Soil Survey Office. Soil Series of Sichuan[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1997. [四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土种志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1997.]



- [ 19 ] Zhang G L , Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012: 193—201. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 193—201.]
- [ 20 ] Xu S T, Jiao C L, Wang J Q. Color index characteristics of sedimentary rocks, basin evolution and favorable exploration strata in Yili Basin[J]. Petroleum Explorationist, 1998, 3 ( 3 ): 60—63. [许书堂, 焦存礼, 王敬缺. 伊犁盆地沉积岩颜色指数特征、盆地演化与有利勘探层系[J]. 勘探家, 1998, 3 ( 3 ): 60—63.]
- [ 21 ] He L, Sun Y B, An Z S. Changing color of Chinese loess: Controlling factors and paleoclimatic significances[J]. Geochimica, 2010, 39 ( 5 ): 447—455. [何柳, 孙有斌, 安芷生. 中国黄土颜色变化的控制因素和古气候意义[J]. 地球化学, 2010, 39 ( 5 ): 447—455.]
- [ 22 ] Mussel W N, Murad E, Criscuolo P S R, et al. Variation of mineralogy during the beneficiation of Capim Kaolin from Pará, Brazil[J]. Clay Minerals, 2008, 43 ( 3 ): 381—391.
- [ 23 ] Soileau J M, McCracken R J. Free iron and coloration in certain well-drained coastal plain soils in relation to their other properties and classification[J]. Soil Science Society of America Journal, 1967, 31 ( 2 ): 248—255.
- [ 24 ] Yang Y S. Study on restoration of biodiversity in eroded quaternary red clay region ( I ) principles and models[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1998, 5 ( 2 ): 77—81. [杨艳生. 第四纪红黏土侵蚀区生物多样性恢复重建研究 ( I ) 恢复重建原则和模式[J]. 水土保持研究, 1998, 5 ( 2 ): 77—81.]

(责任编辑: 檀满枝)