

DOI: 10.11766/trxb201905040582

郑兴芬, 吕镔, 陈梓炫, 刘鑫. 不同空间范围土壤色度的纬向变化特征及其气候意义[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1186–1196.

ZHENG Xingfen, LÜ Bin, CHEN Zixuan, LIU Xin. Latitudinal Variation Characteristics of Soil Color in Different Spatial Extents and Their Climatic Significance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1186–1196.

## 不同空间范围土壤色度的纬向变化特征及其气候意义\*

郑兴芬<sup>1, 2</sup>, 吕 镔<sup>1, 2, 3†</sup>, 陈梓炫<sup>1, 2</sup>, 刘 鑫<sup>1, 2</sup>

(1. 福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 3. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

**摘 要:** 对不同气候条件下发育的土壤/古土壤进行色度分析, 探讨其色度参数的空间变化规律及其作为气候变化代用指标的可靠性。结果表明: (1) 较小的空间尺度上, 土壤色度参数变化复杂, 与气候相关关系不显著。土壤色度参数在大空间尺度中均表现出一定的纬向变化, 红度 ( $a^*$ ) 随纬度的增加而降低, 黄度 ( $b^*$ ) 与纬度的拟合曲线趋近于开口向上的抛物线, 黄度与红度的比值 ( $b^*/a^*$ ) 随着纬度的增加近似呈线性增加。(2) 土壤剖面色度参数均与气候因子 (年均降水和年均温) 具有一定的相关关系,  $b^*/a^*$  与年均温相关系数最大。色度参数  $a^*$  与年均降水相关系数稍高于  $b^*/a^*$ , 但  $a^*$  易受其他因素影响; 而土壤色度参数  $b^*/a^*$  对土壤颜色的空间变化敏感, 是指示气候变化的适用指标。

**关键词:** 土壤; 色度; 空间变化; 气候

中图分类号: P934; O432.3 文献标志码: A

## Latitudinal Variation Characteristics of Soil Color in Different Spatial Extents and Their Climatic Significance

ZHENG Xingfen<sup>1, 2</sup>, LÜ Bin<sup>1, 2, 3†</sup>, CHEN Zixuan<sup>1, 2</sup>, LIU Xin<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study was intended to explore spatial variation of soil color parameters and reliability of the parameter being used as an alternative indicator of climate change. 【Method】 In this study, color analysis of the soils developed under different climatic conditions was carried out. The soil profiles studied in this paper were scattered in the range geographically from 23.79 ° N to 64.72 ° N, and from 38.52 ° E to 148.45 ° W, striding across the low latitude, mid-latitude and high latitude. Among the total of 32 soil profiles, 9 had data derived from the literature and the remaining 23 sections were collected from Fujian, the Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture in the West Sichuan Plateau, Siberian of Russia, and Alaska of

\* 国家自然科学基金项目 (41877435, 41772180 和 41402149) 和福建师范大学创新团队项目 (IRTL1705) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41877435, 41772180, 41402149) and Innovation Research Team Fund of Fujian Normal University (No. IRTL1705)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lvbin@fjnu.edu.cn

作者简介: 郑兴芬 (1993—), 女, 广东惠州人, 硕士, 主要从事环境磁学研究。E-mail: zhengxingfen@163.com

收稿日期: 2019-05-04; 收到修改稿日期: 2019-08-14; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-09-23

the USA. The soil profiles were distributed one each in Zhao'an, Yunxiao, Changtai, Hui'an, Putian, Fuqing, Zhangping, Quanzhou, Changting, Ninghua, Lianjiang, Minqing, Shaxian, Mingxi, Ningde, Taining, Jian'ou, Zhenghe, Songxi, Wuyishan, the Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture, Siberian of Russia, and central Alaska. As the soil profiles were distributed extensively in such a huge region, they diversified greatly in soil type, and developed separately in a huge variety of climatic conditions, including humid subtropical climate, temperate continental climate and Qinghai-Tibet Plateau climate, etc., which differed sharply in annual mean precipitation and annual mean temperature. 【Result】 Results show: (1) on a small spatial scale, soil color parameters are complex in variation and not so significantly related to climate, while on a large spatial scale, soil color parameters exhibit a certain trend of varying with latitude. Redness ( $a^*$ ) of the soils declines with increasing latitude, while yellowness ( $b^*$ ) does a fitting curve with latitude quite similar to a parabola with an upward opening. The ratio of yellowness to redness ( $b^*/a^*$ ) increases approximate linearly with increasing latitude; (2) Color parameters of the soil profiles are more or less related to climatic factors (annual mean precipitation and annual mean temperature); the correlation coefficient of  $b^*/a^*$  with annual mean temperature is the highest. The correlation coefficient of  $a^*$  with annual mean precipitation is slightly higher than that of  $b^*/a^*$ , but  $a^*$  is more likely to be affected by other factors. 【Conclusion】 Therefore, the soil chroma parameter  $b^*/a^*$  is quite sensitive to spatial variation of soil color, so is a suitable indicator of climate changes.

**Key words:** Soil; Color; Spatial change; Climate

颜色是土壤最直观且容易测量的物理属性之一，可以反映矿物成分和有机物含量，土壤颜色较暗时通常含有较多的有机质，红色和黄色调分别与土壤中最常见的致色矿物赤铁矿和针铁矿的含量有关<sup>[1-5]</sup>。土壤剖面垂直方向上的颜色变异具有发生学的诊断意义<sup>[6]</sup>，地理空间上的土壤颜色分带则反映了气候要素对土壤性质的显著制约<sup>[7]</sup>。土壤颜色对成土过程和环境变化敏感，被广泛应用于土壤研究<sup>[8-9]</sup>。土壤颜色的定量描述始于孟塞尔，随后孟塞尔表色系统被广泛用于定义土壤颜色，但其判断土壤颜色时单独依靠肉眼进行直观比较，这往往会导致操作失误和实验误差；相较于孟塞尔（Munsell）表色系统，国际照明委员会（CIE）提出的 CIELAB 表色系统使用  $L^*$ （亮度）、 $a^*$ （红度）和  $b^*$ （黄度）这 3 个参数来描述任何均匀连续的颜色空间，使颜色的空间表达由定性转为定量，它是目前最主要的颜色描述和测量系统之一<sup>[10-11]</sup>。研究发现  $L^*$  与土壤中有有机质的含量有关， $a^*$  和  $b^*$  分别与土壤中最常见的致色矿物赤铁矿和针铁矿有关<sup>[5, 10, 12]</sup>， $b^*/a^*$  为黄度与红度的比值，在土壤中可以反映针铁矿和赤铁矿相对含量的比值。

近几十年来，土壤色度在古气候研究中得到广泛的应用<sup>[12-21]</sup>。陈一萌等<sup>[12]</sup>发现在黄土高原上土壤颜色指标作为气候变化的代用指标在百年甚至万年时间尺度上均是可行的；石培宏等<sup>[13]</sup>对黄土高原西北缘厚层黄土剖面色度指标研究后发现色度指标

的引入能够很好地弥补磁化率指标在古气候重建上的部分缺陷；Yang 和 Ding<sup>[14]</sup>对黄土高原研究发现，红度整体上呈现由北向南增高的趋势；在新疆昭苏地区的研究发现，土壤色度也能应用于干旱区黄土古气候的研究<sup>[15]</sup>。近年来，对我国南方地区土壤颜色与气候之间关系的研究也逐渐丰富。经历了较西北黄土更强风化作用的下蜀黄土的色度参数与其他参数对应关系良好，可以反映气候的变化<sup>[16-17]</sup>；在热带至暖温带的湿润区土壤色度参数与年均温和年均降水间均存在良好的相关关系，尤其是利用土壤红度来反演气候变化具有很好的适用性<sup>[5, 18-20]</sup>，我国南方地区色度指标在揭示环境意义方面具有优势<sup>[22-23]</sup>。

目前，关于土壤颜色与气候之间关系的系统研究大多在较小空间内展开，大尺度空间上土壤色度研究则较少。杨胜利等<sup>[10]</sup>通过中国从海南岛向北直至山东半岛、向西至青藏高原东北边缘地区表土的颜色测定，发现土壤颜色与成土过程和现代气候因子之间具有良好的函数关系。有研究发现西北干旱地区红度与温度和降水均具有较好的相关性<sup>[24]</sup>；而严永耀等<sup>[25]</sup>在新疆青海地区的研究表明红度与降水存在明显的负相关，与温度的关系不明显。崔东等<sup>[26]</sup>则建立了海南岛至黑龙江的现代土壤淀积层（B 层）红度与年均降水的回归方程。研究发现我国的现代土壤红度和黄度与气候的关系在热带-暖温带湿润区相关性最好，而亮度与气候的关系仅存在

于温带湿润-干旱区<sup>[10]</sup>,色度参数红度、黄度和亮度的指示意义仍显现一定的限制性和区域性。由于地形的关系,表层土壤可能存在着侵蚀或再堆积作用,这使得样品的气候代表意义受到影响;由于成土时间的不同,土壤发生层中针铁矿和赤铁矿是否与气候达到平衡可能也不好判断。因此,本研究选择风成加积型黄土-古土壤序列和现代土壤剖面,综合分析不同时期、不同土壤发生层次的色度特征,系统分析亚热带地区至寒温带地区土壤色度空间变化规律,以期更全面更深入地探讨土壤色度参数与气候因子的关系及其作为气候变化代用指标的可靠性。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品采集与制备

本研究土壤剖面位置介于 23.79° N~64.72° N, 38.52° E~148.45° W 之间,地跨低纬、中纬和高纬地区。如表 1 所示,研究的土壤剖面共计 33 个,其中 9 个土壤剖面数据来源于文献<sup>[5, 15, 27-32]</sup>,其余 24 个剖面的样品分别在福建、四川甘孜藏族自治州、俄罗斯西伯利亚地区和美国阿拉斯加等地采集。本研究采集的剖面以风化壳型土壤为主,厚度小,样品数为 833 个,引用文献的剖面大多为沉积型黄土-古土壤序列,剖面厚度大,样品多,多达 2 875 个,总计 3 708 个。福建省南部亚热带地区包括诏安、云霄、长泰、惠安、莆田和福清 6 个土壤剖面,福建省中北部中亚热带地区由漳平、泉州、长汀、宁化、连江、闽清、沙县、明溪、宁德、泰宁、建瓯、政和、松溪和武夷山 14 个土壤剖面组成;此外,在福建漳浦还采集了 1 个砖红壤(古土壤)剖面。本研究在福建采集的 20 个分布于湿润亚热带地区的土壤剖面,以探讨色度参数是否适用于成土因素的复杂性和气候差异较小的小空间尺度上;结合四川甘孜、西伯利亚、阿拉斯加和漳浦剖面的色度参数拟探讨色度参数在大空间尺度上所指示的成土环境或气候。为了保证在纬度方向上剖面点分布的均衡,本研究引用的 9 个剖面均来自于采用了 CIELAB 表色系统表征颜色并且可获得准确数据的文献之中。整体而言,33 个土壤剖面分布范围广,土壤类型丰富;各剖面发育在不同气候条件下,主要包括湿润亚热带气候、温带大陆性气候和青藏高原气候,多

年平均降水量和年均温度差异较大。本研究 9 个引用文献的剖面的气候数据年均降水(MAP)和年均气温(MAT)出自于其相对应的文献,采集的 24 个剖面则采用剖面邻近气象观测站的数据,气象观测站的数据来自于中国气象局数据网和 KNMI Climate Explorer。

采样土壤剖面所处的局部地区天然植被较为良好,以尽量减小地形和水土流失的影响;并选取出露良好、土壤层次清晰易辨别、局部地域坡度尽量小于 5°、受人为活动影响较小和土壤排水良好的剖面。对露头剖面在清除表面浮土后,自上而下进行连续取样。若剖面出露不好,则从地面向下挖掘形成垂直切面以供采样。对于厚度较大的剖面 and 土壤层次,按 10 cm 间距进行采样;对于个别厚度较小的剖面 and 土壤层次,按 5 cm 间距进行采样。详细记录采样剖面地理位置(经纬度、海拔高度等)、所在局部区域植被状况、地形;详细记录土壤剖面形态特征:土壤颜色、母质类型、疏松-密实程度、结构、质地等。采集的土壤样品置于实验室内自然风干后,取足量的土壤样品剔除植物根系和石砾,然后将土壤样品研磨至 200 目以下备用。

### 1.2 土壤颜色的测定

首先将自然风干后的样品研磨至 200 目以下以避免湿度和粒径对测量结果的影响;然后将研磨后的干燥样品均匀铺满在测试皿底部,轻压至平整不起皱,再用美国 Hunter Lab 公司生产的 Color Flex<sup>®</sup> EZ 型分光光度计进行色度测量。本文所使用的数据均基于 CIELAB 表色系统,亮度(L\*)变化于黑(0)与白(100)之间,值越小表示土壤颜色越暗;红度(a\*)变化于红(60)与绿(-60)之间,值越大表示颜色越红;黄度(b\*)变化于黄(60)与蓝(-60)之间,值越大表示颜色越黄;b\*/a\*为黄度与红度的比值。L\*受有机质、碳酸盐(干旱半干旱区)和铁氧化物等多种物质影响,影响因素较为复杂,在不同气候带可能反映更多非气候因素;而 a\*、b\*分别受赤铁矿和针铁矿影响,影响因素较为单一<sup>[3]</sup>。本研究将围绕 a\*、b\*和 b\*/a\*这三个色度参数展开。

### 1.3 数据处理

本研究利用 SPSS 软件对实验数据进行相关分析和回归分析,并使用 Sigmaplot 软件完成数据图的绘制。

表 1 土壤样品信息简表

Table 1 Generalized information of soil samples

剖面采集地 Site of profiles	类型 Type	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m	样品量		年均气温 MAT/°C	数据 来源 Source of data
					Number of Sample	年均降水 MAP/mm		
浙江金衢盆地汤溪 <sup>①</sup>	加积红土 Aggradation red earth	29.05°N	119.41°E	86	178	1 424	17.5	[27]
江西九江 <sup>②</sup>	第四纪红黏土 Quaternary Red Clay	29.70°N	116.02°E	14	90	1 437	16.5	[5]
湖北鹿家湾 <sup>③</sup>	黄土-古土壤 Loess-paleosol	32.10°N	110.38°E	170	323	873	15.4	[28]
南京泰山新村 <sup>④</sup>	下蜀黄土 Xiashu loess	32.15°N	118.71°E	26	154	1 102	15.4	[29]
陕西汉中盆地 <sup>⑤</sup>	黄土-古土壤 Loess-paleosol	33.18°N	107.28°E	492	396	792	14.5	[30]
甘肃朝那 <sup>⑥</sup>	黄土-古土壤 Loess-paleosol	35.12°N	102.20°E	1 464	209	500	8.6	[31]
新疆奥依塔克 <sup>⑦</sup>	黄土-古土壤 loess-paleosol	38.98°N	75.46°E	2 010	275	60	3.5	[32]
新疆昭苏 <sup>⑧</sup>	黄土-古土壤 Loess-paleosol	42.65°N	80.25°E	1 875	138	512	2.9	[15]
俄罗斯 <sup>⑨</sup>	黄土-古土壤 Loess-paleosol	47.13°N	38.52°E	5	680	509	10.1	[32]
阿拉斯加 <sup>⑩</sup>	黄土-古土壤 Loess-paleosol	64.72°N	148.45°W	175	190	301	-2.9	本研究
西伯利亚 <sup>⑪</sup>	黄土-古土壤 Loess-paleosol	55.10°N	91.40°E	300	192	476	0.4	本研究
川西甘孜 <sup>⑫</sup>	黄土-古土壤 Loess-paleosol	31.62°N	99.98°E	3 397	242	637	5.6	本研究
福建中北部 <sup>⑬</sup>	红壤 Red Soil	25.33~27.63°N	116.41~119.59°E	16~483	439	1 455~2 027	17.4~20.7	本研究
福建南部 <sup>⑭</sup>	赤红壤 Lateritic red soil	23.79~25.74°N	117.10~119.31°E	9~58	193	1 136~1 824	20.1~21.7	本研究
漳浦砖红壤 <sup>⑮</sup>	古土壤 Paleosol	24.24°N	117.99°E	2.2	10	1 605	21.3	本研究

①Tangxi in Jinhua-Quzhou basin, Zhejiang, ②Jiujiang, Jiangxi, ③Tuojiawan, Hubei, ④Taishan new village, Nanjing, ⑤Hanzhong basin, Shaanxi, ⑥Chaona, Gansu, ⑦Tucker (AYTK), Xinjiang, ⑧Zhaosu, Xinjiang, ⑨Beglitsa, Russia, ⑩Alaska, USA, ⑪KurtakKurtak, ⑫Ganzi in West Sichuan Plateau, ⑬North Central Fujian, ⑭Southern Fujian, ⑮ Latosol in Zhangpu

## 2 结果

### 2.1 小区域土壤色度的纬向变化及其与气候的关系

福建省地处中国东南沿海一隅,本研究在福建共采集了 21 个剖面,剔除福建漳浦砖红壤这 1 个古土壤剖面,仅对剩余 20 个剖面色度数据进行讨论。20 个土壤剖面南北跨越 5 个纬度,年均降水量介于 1 133~1 997 mm,年均温度介于 17.4℃~21.7℃;色度参数  $a^*$  值介于 10.42~17.54 之间,  $b^*$  值介于 21.01~33.69,  $b^*/a^*$  值介于 1.66~3.15 (表 2)。如

图 1 所示,色度参数  $a^*$ 、 $b^*$  和  $b^*/a^*$  均未随着纬度的增加呈现出显著的变化规律;使用 SPSS 软件对色度参数与气候数据进行相关分析,  $a^*$ 、 $b^*$  和  $b^*/a^*$  与降水、温度这两个气候因子不存在显著的相关关系(相关系数  $r < 0.1$ , 显著性水平  $P > 0.05$ )。上述结果表明土壤色度在较小空间上变化比较散乱,没有纬向性,其气候上指示意义不明确。为尽量减少母质的影响,本研究提取了土壤剖面的 A 层和 B 层的色度参数并与纬度和气候进行相关分析,研究结果表明土壤淋溶层和淀积层的色度与纬度和气候之间也不存在相关关系 ( $r < 0.2$ ,  $P > 0.05$ )。

表 2 福建土壤剖面信息简表及色度参数(平均值)

Table 2 Information and color parameters (average value) of the soil profiles in Fujian

剖面 Profile	纬度 Latitude	经度 Longitude	样品量 Number of sample	母岩 Parent rock	年均降水 MAP/mm	年均气温 MAT/℃	$a^*$	$b^*$	$b^*/a^*$
诏安 Zhao'an	23.79°N	117.10°E	33	花岗岩	1 520	21.7	17.54	29.89	1.81
云霄 Yunxiao	24.05°N	117.42°E	27	花岗岩	1 831	21.7	12.61	24.94	2.04
长泰 Changtai	24.64°N	117.72°E	39	花岗岩	1 604	21.4	14.13	26.72	1.89
惠安 Hui'an	24.996°N	118.90°E	33	花岗岩	1 133	20.2	16.25	33.24	2.11
莆田 Putian	25.33°N	119.05°E	23	花岗岩	1 499	20.8	16.93	33.69	2.11
福清 Fuqing	25.74°N	119.31°E	38	花岗岩	1 536	20.1	10.42	27.98	3.15
漳平 Zhangping	25.33°N	117.42°E	66	粉砂岩	1 525	20.7	10.87	28.14	2.75
泉州 Quanzhou	25.38°N	118.17°E	16	花岗岩	1 784	20.6	11.07	21.01	1.96
长汀 Changting	25.68°N	116.41°E	19	花岗岩	1 707	19.6	13.70	27.12	2.04
宁化 Ninghua	26.07°N	116.68°E	16	花岗岩	1 785	17.9	13.93	29.46	2.16
连江 Lianjiang	26.27°N	119.49°E	47	花岗岩	1 569	19.4	11.40	25.36	2.27
闽清 Minqing	26.29°N	118.87°E	38	花岗岩	1 455	20.2	16.38	33.38	2.09
沙县 Shaxian	26.41°N	117.77°E	23	粉砂岩	1 692	19.6	16.79	29.31	1.80
明溪 Mingxi	26.46°N	117.05°E	20	玄武岩	1 811	18.3	14.34	29.47	2.09
宁德 Ningde	26.72°N	119.59°E	30	花岗岩	1 997	19.9	11.57	28.76	2.52
泰宁 Taining	26.91°N	117.15°E	22	花岗岩	1 784	17.4	12.74	25.46	2.07
建瓯 Jian'ou	27.06°N	118.36°E	33	变质砂岩	1 674	19.1	14.64	30.18	2.12
政和 Zhenghe	27.36°N	118.77°E	34	变质砂岩	1 628	18.8	15.91	33.05	2.11
松溪 Songxi	27.54°N	118.79°E	29	花岗岩	1 654	18.4	12.07	28.51	2.50
武夷山 Wuyishan	27.63°N	117.99°E	46	花岗岩	1 888	18.3	17.19	28.02	1.66

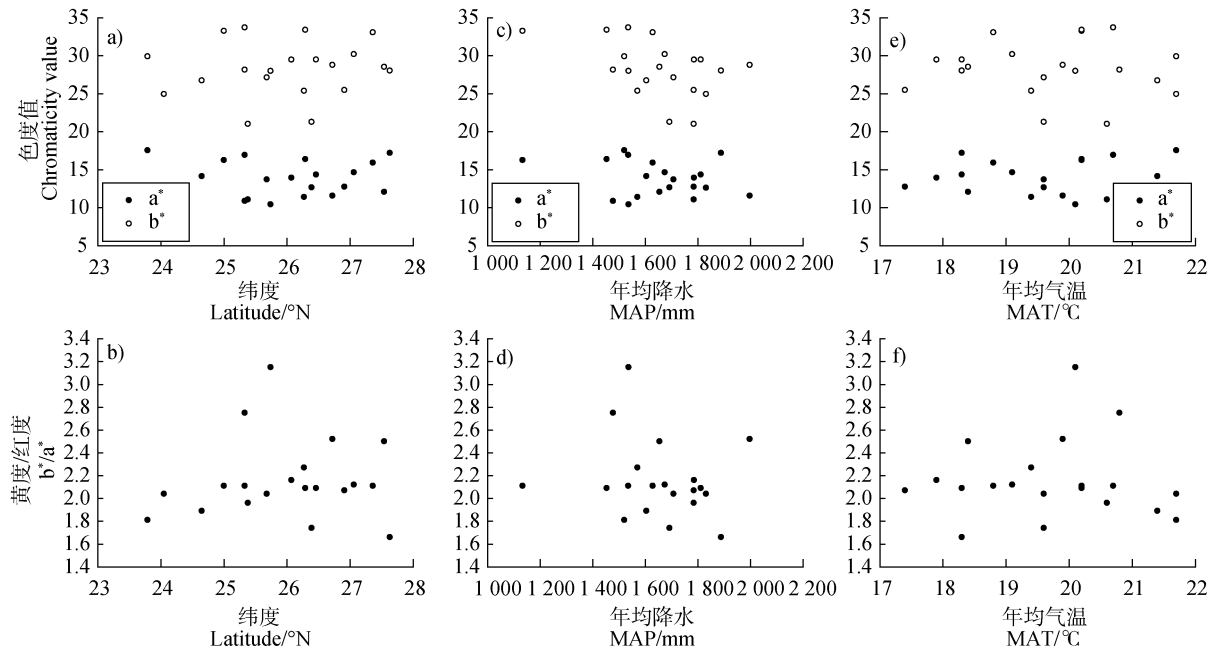


图1 福建土壤剖面色度参数与纬度和气候（平均降水与年均气温）关系

Fig.1 Relationships of the color parameters of the soil profile in Fujian with latitude and climate (precipitation and temperature)

整体而言，福建是典型的湿润亚热带地区，地势总体上西北高东南低，东部临海，三面环山，横断面略呈马鞍形，是相对封闭的地理环境。虽然土壤颜色与土壤发育过程有密切联系<sup>[33]</sup>，但由于取样点空间相对较小，区域内气候尤其是年均温度介于17.4~21.7℃，差异相对较小，加之除气候外，母质、地形、成土时间和生物等因素也会对土壤颜色造成一定的影响。本研究采集局部地域坡度尽量小于5°、受人为活动影响较小和土壤排水良好的土壤剖面，受地形因素影响较小。母岩本身铁元素含量或铁元素赋存形式不一样<sup>[9]</sup>，母质一定程度上影响土壤致色矿物的性质，继而影响土壤的颜色<sup>[11, 33]</sup>。福建省大地构造单元属华南加里东褶皱系的东南部，以中生代燕山期为主的火山岩类和以花岗岩类为特色的侵入岩约各占全省陆域面积的1/3，其余1/3为沉积岩和区域变质岩<sup>[34]</sup>。土壤母岩类型多样（表2）和土壤发育时间不一致均可能是福建省这一小区域土壤色度变化的原因。因此，在较小的空间上土壤色度参数变化复杂，与气候关系不显著。

## 2.2 大区域土壤色度的空间变化及其与气候的关系

### 2.2.1 大区域土壤色度的空间变化

本研究将阿拉斯加黄土剖面、西伯利亚黄土剖面、新疆奥依塔克黄土剖面、川西黄土剖面、南京下蜀黄土剖面、

浙江金衢盆地加积红土、福建政和红壤剖面、福建惠安赤红壤剖面以及福建漳浦砖红壤（古土壤）这9个代表性土壤剖面的色度参数 $a^*$ 、 $b^*$ 和 $b^*/a^*$ 的极值及其均值以箱图的形式表达，按纬度自北向南排列（图2a、图2c和图2e）。图2b、图2d和图2f分别为纬度与土壤色度参数 $b^*$ 和 $b^*/a^*$ 的散点图。代表性土壤剖面的红度（ $a^*$ ）随着纬度的减小具有波动上升的趋势（图2a），图2b显示随着纬度的增加，红度值逐渐减少，相关系数 $r$ 为-0.86，显著性水平 $P<0.01$ ，说明红度与纬度具有显著的相关关系。代表性土壤剖面黄度（ $b^*$ ）值在高纬和低纬处较高，整体而言较为散乱（图2c）；对黄度与纬度进行相关关系分析，黄度与纬度具有显著的相关关系（ $r=-0.77$ ， $P<0.01$ ），但黄度与纬度的相关系数低于红度（图2d）。图2e和图2f中土壤色度参数黄度与红度的比值（ $b^*/a^*$ ）均随纬度的增加而增加，相较于红度与黄度， $b^*/a^*$ 具有更为显著的相关（ $r=0.89$ ， $P<0.01$ ）。

整体而言，土壤色度参数均具有一定的纬向性。其中， $b^*$ 与纬度的相关系数最小， $r=-0.77$ ，低于 $a^*$ （ $r=-0.86$ ）和 $b^*/a^*$ （ $r=0.89$ ）， $b^*$ 与纬度之间的拟合函数形态趋近于抛物线。针铁矿和赤铁矿是土壤中最常见的致色矿物， $b^*$ 的变化主要受控于针铁矿含

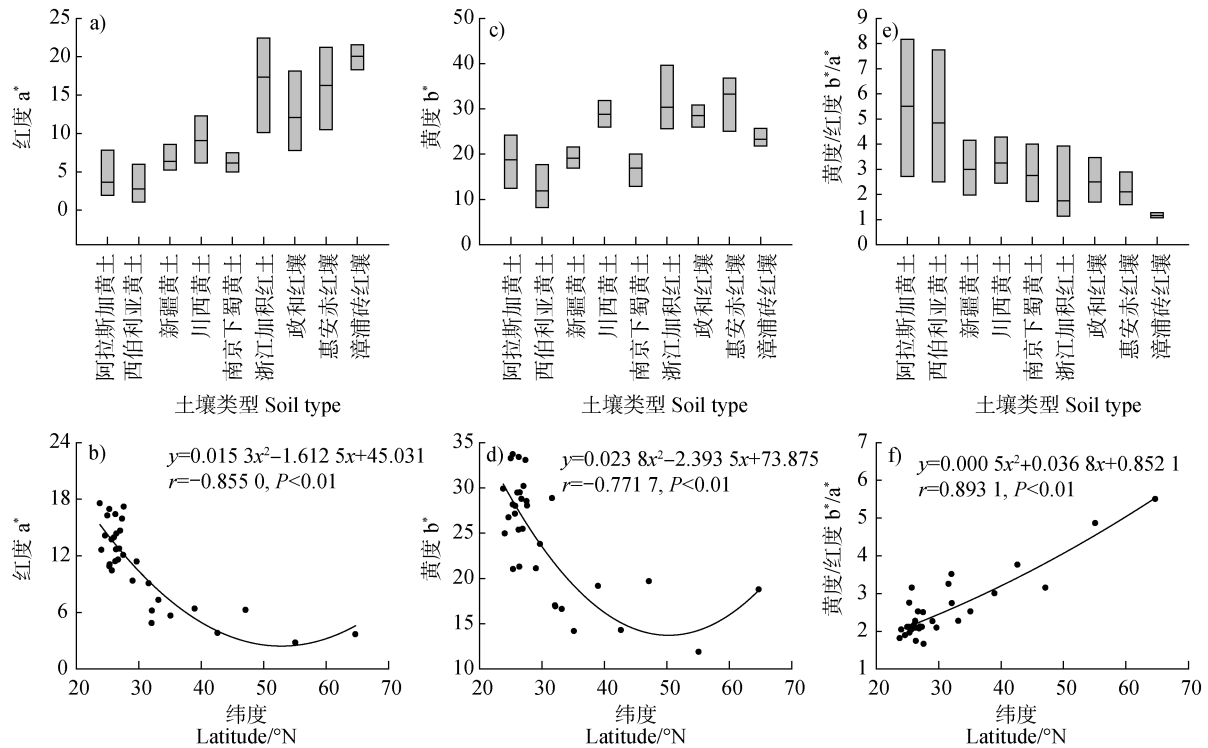


图2 土壤剖面色度参数与纬度的关系

Fig. 2 Relationships of color parameters of the soil profiles with latitude

量的变化<sup>[8]</sup>。低纬地区的强降水和高纬地区低蒸发量均可能使得土壤保持较高的湿度有利于针铁矿的形成<sup>[13, 35]</sup>。因此,在低纬和高纬地区均具有较高 $b^*$ 值, $b^*$ 与纬度的拟合函数曲线形态近似于开口向上的抛物线。有研究分别对在华南地区和西北黄土高原土壤红度与纬度之间的关系进行研究,发现红度与纬度呈现负相关关系,认为红度一般自北向南增加,与当地水热条件一致,具有气候意义<sup>[5, 10, 14]</sup>。在本研究中, $b^*/a^*$ 与纬度的相关系数较 $a^*$ 高, $b^*/a^*$ 实质上代表着土壤致色矿物针铁矿和赤铁矿的比值,与针铁矿和赤铁矿的绝对含量无关,主要反映针铁矿与赤铁矿相对含量的变化趋势,这两者的比值受母质影响较小,说明色度参数 $b^*/a^*$ 的空间变化在低纬到高纬地区是连续的,随着纬度的增加呈现近似线性增加。

**2.2.2 大区域土壤色度与气候的关系** 图3是土壤色度参数( $a^*$ 、 $b^*$ 和 $b^*/a^*$ )与气候(降水和气温)因子的关系图。如图3a、图3c和图3e所示,本研究对色度参数和多年年均降水进行相关分析,年均降水与 $a^*$ 、 $b^*$ 和 $b^*/a^*$ 的相关系数分别为0.79、0.66和-0.73( $P < 0.01$ ),年均降水与 $a^*$ 之间的相关系数

最大,与 $b^*$ 之间的相关系数最小。图3b、图3d和图3f则是对色度参数和多年年均温度进行相关性分析,年均温与 $a^*$ 、 $b^*$ 和 $b^*/a^*$ 的相关系数分别为0.82、0.70和-0.88( $P < 0.01$ ),年均气温与 $b^*/a^*$ 之间的相关系数最大,与 $b^*$ 之间的相关系数最小。综合图3a~图3f分析,色度参数( $a^*$ 、 $b^*$ 和 $b^*/a^*$ )与年均气温的相关系数均高于与年均降水的相关系数。

综上所述,在土壤的空间分布上, $b^*$ 对气候变化的响应程度有限。其他研究也指出 $b^*$ 值的变化随气温降水的增加而增加,但随着降水的变化更为显著<sup>[21]</sup>。 $b^*$ 虽与针铁矿含量密切相关,但也有研究表明当针铁矿含量较少或受其他方面因素影响时, $b^*$ 与针铁矿含量的相关性会变差<sup>[13]</sup>。如果土壤中生成黄铁矿、褐铁矿等含铁矿物也会影响 $b^*$ 的变化<sup>[13]</sup>。因此, $b^*$ 虽然能够一定程度上反映降水的变化情况,但其变化与气候的关系不明确。杨胜利等<sup>[10]</sup>和崔东等<sup>[26]</sup>的研究发现, $a^*$ 随着温度和降水增加,尤其是在赤铁矿的形成条件所要求的排水良好的强氧化环境相一致的湿热亚热带地区;因此,与其他色度参数相比, $a^*$ 与年均降水的相关关系可能与本研究有20个湿热亚热带地区的剖面有关。结合图2f来看,

色度参数在空间上表现出一定的纬向性；而相较于年均降水量，色度参数 ( $a^*$ 、 $b^*$  和  $b^*/a^*$ ) 与年均气温的相关系数更高 (图 3a~图 3f)，说明在空间上色度参数的变化可以体现出纬度变化对气温的影

响，对温度变化敏感。 $b^*/a^*$  与年均气温的相关系数最高，相关系数达  $-0.88$  (图 3f)，回归分析模型变量显著性水平高；说明土壤  $b^*/a^*$  作为空间温度变化的代用指标效果更好。

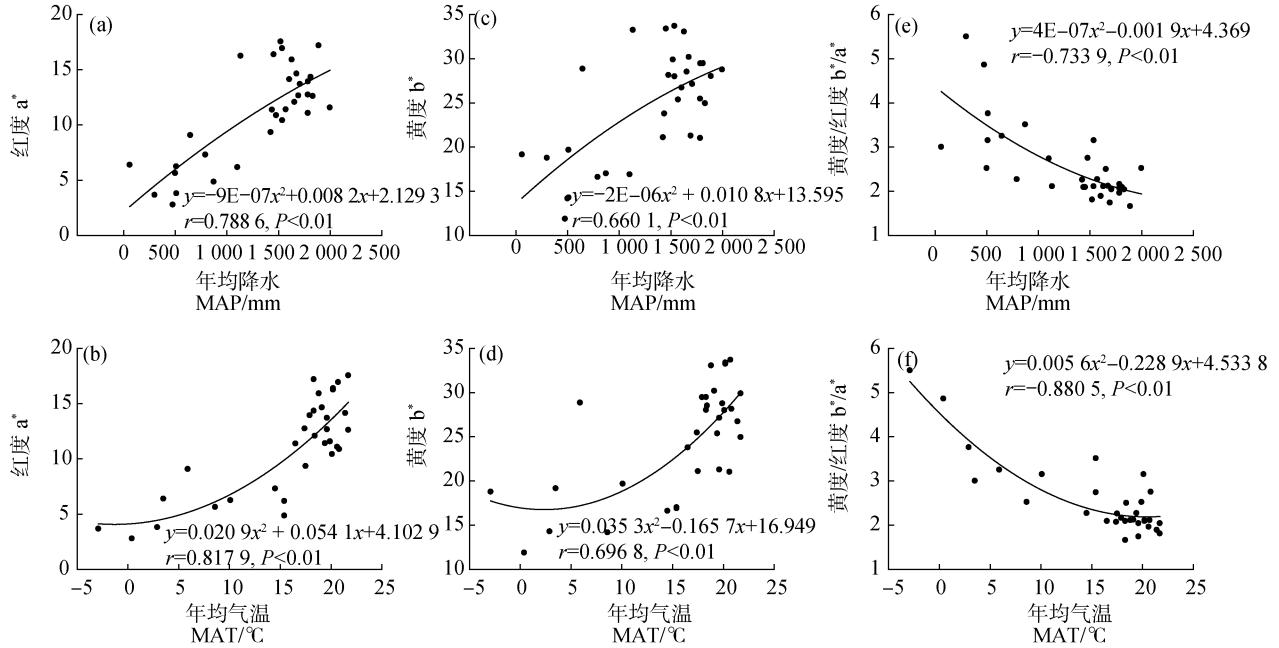


图 3 土壤色度参数 ( $a^*$ 、 $b^*$  和  $b^*/a^*$ ) 与年均降水和年均气温的关系

Fig. 3 Relationships of soil color parameters ( $a^*$ 、 $b^*$  and  $b^*/a^*$ ) with MAP and MAT

### 3 讨论

相比其他色度参数，本研究中  $a^*$  与年均降水的相关性最好， $b^*/a^*$  与年均温相关性最好。 $a^*$  和  $b^*/a^*$  均可作为空间气候变化的指标。赤铁矿是常见的致色矿物，通常形成于干燥温暖的环境下，其存在具有气候指示意义<sup>[36-37]</sup>。红度 ( $a^*$ ) 参数指示赤铁矿的含量。研究表明在赤铁矿含量与土壤红度存在高度的相关关系<sup>[5, 8, 38]</sup>。Hu 等<sup>[5]</sup>建立了和赤铁矿含量的函数关系，表明当赤铁矿含量低于 12.5% 时，红度随赤铁矿含量的增加呈线性增加，相关系数  $r$  可达 0.999。但由于赤铁矿的形成涉及水铁矿的形成和针铁矿的脱水反应<sup>[36]</sup>，长期干燥高温的环境更有利于赤铁矿的形成，湿润环境易导致针铁矿和其他矿物的存在，赤铁矿在浸水条件下部分容易发生溶解。王涛等<sup>[39]</sup>对分布在澳大利亚悉尼地区附近的一套中新世古土壤进行研究，结合常量元素、岩石磁学、土壤色度以及现代土壤诊断学特征进行综合分析，认为该中新世古土壤是在热带的高温环境中发育形

成的； $b^*$  和  $a^*$  与该剖面针铁矿和赤铁矿含量变化趋势一致；该剖面  $b^*/a^*$  介于 0.83~3.52 之间，均值仅为 1.54，说明热带地区  $b^*/a^*$  具有低值。在土壤磁学研究中发现，母质对次生磁性矿物赤铁矿的形成具有深刻的影响<sup>[9, 33, 40]</sup>，母质中原生的磁性矿物种类和含量直接影响  $a^*$  的变化。在他人的研究中发现  $a^*$  对气候的响应具有局限性。石培宏等<sup>[13]</sup>认为可以反映季风气候系统下温度与降水二者组合变化的过程，特别是在降水量较少的地区；丁敏等<sup>[41]</sup>发现在半干旱—干旱地区， $a^*$  随着温度和降水的急剧增加而增长缓慢；红度对干冷地区的气候反映不敏感；戴霜等<sup>[42]</sup>认为  $a^*$  在与温度和降水呈正相关关系，但对干冷环境变化不敏感；李越等<sup>[15]</sup>也认为单一使用红度  $a^*$  来解释气候的变化可能会造成信息的不完整。此外，最近的一项研究中发现随着赤铁矿含量的增加，除了土壤中红度值会显著增长外，黄度的数值也会有所增加<sup>[5]</sup>。土壤中赤铁矿和针铁矿两者的形成是相互竞争的，土壤中赤铁矿较针铁矿具有更强的致色能力<sup>[43]</sup>。



本研究中32个土壤剖面 $a^*$ 和 $b^*$ 之间相关性高达0.8952 ( $P < 0.01$ ), 两者相互影响; 有研究表明受相对湿度的影响, 土壤颜色可以存在从红色变为黄色的系统变化<sup>[44]</sup>。本研究中 $a^*$ 与年均降水的相关关系更好还可能是受到亚热带地区剖面基数的影响。而土壤中 $b^*/a^*$ 实质上代表着针铁矿和赤铁矿的比值, 这两者的比值几乎不受母质影响, 且与气候存在密切的联系。赤铁矿与针铁矿的比值随着年均气温的升高和土壤相对湿度的降低而增大, 可以作为东亚季风干湿变化的敏感指标, 也可以显示冰期和间冰期的变化<sup>[35]</sup>, 这说明针铁矿与赤铁矿的比值即 $b^*/a^*$ 更能反映气候的变化。

## 4 结论

对32个分布于不同地区的土壤剖面进行色度分析, 结果表明: 在较小的空间尺度上, 土壤色度参数变化复杂, 与气候关系不显著; 而在较大的空间尺度上, 土壤色度参数 $a^*$ 、 $b^*$ 和 $b^*/a^*$ 均具有一定的纬向性,  $a^*$ 一般随着纬度增加而降低,  $b^*$ 由于高纬的高值使得拟合曲线趋近于开口向上的抛物线,  $b^*/a^*$ 则随着纬度的增加呈现出近似线性增加。色度参数与气候因子(年均降水和年均温)具有一定的相关性,  $a^*$ 与年均降水相关性最高,  $b^*/a^*$ 与年均温相关性更为显著。在空间分布中土壤色度参数 $a^*$ 、 $b^*$ 和 $b^*/a^*$ 对温度的响应程度均高于对年均降水的响应程度。相比于 $a^*$ 、 $b^*$ ,  $b^*/a^*$ 对土壤颜色的空间变化敏感, 为最佳的气候代用指标。

**致谢** 刘秀铭教授带领陈渠博士和陈家胜博士赴西伯利亚考察采样, 阿拉斯加大学 James Begét 教授提供了阿拉斯加样品, 在此一并致谢。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] 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.]
- [ 2 ] Li Y C, Pan K, Wang C K, et al. PLSR-based prediction of soil color and its comparison with color space conversion method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 6 ): 1411—1421. [李怡春, 潘恺, 王昌昆, 等. 基于PLSR的土壤颜色预测方法及其与色系转换法的对比研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55 ( 6 ): 1411—1421.]
- [ 3 ] 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.]
- [ 4 ] Chen J, Yang T B, Zeng B, et al. Chroma characteristics and its paleoclimatic significance in Pamir loess section, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36 ( 2 ): 333—342. [陈杰, 杨太保, 曾彪, 等. 中国帕米尔地区黄土上部色度变化特征及古气候意义[J]. *沉积学报*, 2018, 36 ( 2 ): 333—342.]
- [ 5 ] Hu X F, Du Y, Guan C L, et al. Color variations of the Quaternary Red Clay in Southern China and its paleoclimatic implications[J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 303: 15—25.
- [ 6 ] Розанов Б Г. Soil morphology[M]. Wang H Q, Zheng J. Trans. Beijing: Science Press, 1998: 223—240. [罗扎诺夫. 土壤形态学[M]. 王浩清, 郑军. 译. 北京: 科学出版社, 1998: 223—240.]
- [ 7 ] Hseung Y, Li Q K. Chinese soil[M]. Beijing: Science Press, 1987: 20—26. [熊毅, 李庆远. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 20—26.]
- [ 8 ] Sun Y B, He L, Liang L J, et al. Changing color of Chinese loess: Geochemical constraint and paleoclimatic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40 ( 6 ): 1131—1138.
- [ 9 ] Lü B, Liu X M, Zhao G Y, et al. Mechanism of magnetic minerals transformation of subtropical red soils derived from granite weathering crust: Comprehensive analysis base on non-magnetic indicators and rock magnetism[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36 ( 2 ): 367—378. [吕兵, 刘秀铭, 赵国永, 等. 亚热带地区花岗岩风化壳上发育红土的磁性矿物转化机制——基于非磁学指标和岩石磁学的综合分析[J]. *第四纪研究*, 2016, 36 ( 2 ): 367—378.]
- [ 10 ] Yang S L, Fang X M, Li J J, et al. Transformation functions of soil color and climate [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 31 ( S1 ): 175—181. [杨胜利, 方小敏, 李吉均, 等. 表土颜色和气候定性至半定量关系研究[J]. *中国科学: D辑: 地球科学*, 2001, 31 ( S1 ): 175—181.]
- [ 11 ] Robertson A R. The CIE 1976 color-difference formulae[J]. *Color Research & Application*, 1977, 2 ( 1 ): 7—11.
- [ 12 ] Chen Y M, Chen X S, Gong H L, et al. Soil color—a new sensitive indicator for climatic change[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29 ( 3 ): 309—313. [陈一萌, 陈兴盛, 宫辉力, 等. 土壤颜色——一个可靠的气候变化

- 代用指标[J]. 干旱区地理, 2006, 29(3): 309—313.]
- [ 13 ] Shi P H, Yang T B, Tian Q C, et al. Chroma characteristics in the loess-paleosol at Jingyuan section and its signification to paleoclimete[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2012, 48(2): 15—23. [石培宏, 杨太保, 田庆春, 等. 靖远黄土—古土壤色度变化特征分析及古气候意义[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(2): 15—23.]
- [ 14 ] Yang S L, Ding Z L. Color reflectance of Chinese loess and its implications for climate gradient changes during the last two glacial-interglacial cycles[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(20): 1182—1200.
- [ 15 ] Li Y, Song Y G, Wang Q S. Chroma characteristics in the Zhaosu loess section and its paleoclimatic significance[J]. Journal of Earth Environment, 2014, 5(2): 67—75. [李越, 宋友桂, 王千锁. 新疆昭苏黄土剖面色度变化特征及古气候意义[J]. 地球环境学报, 2014, 5(2): 67—75.]
- [ 16 ] Xia Y F, Wang Y J, Chen J. Systematic study on reflectance spectrum of Xiashu loess in lijiagang, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 443—448. [夏应菲, 汪永进, 陈峻. 李家岗下蜀黄土剖面的反射光谱研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 443—448.]
- [ 17 ] Liu F, Wang H, Qin Y F, et al. Chroma characteristics of the Zhoujiashan Xiashu loess profile in Nanjing and its significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(5): 143—151. [刘峰, 王昊, 秦艺帆, 等. 南京周家山下蜀黄土色度特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 143—151.]
- [ 18 ] Zhu L D, Zhou S Z, Li F Q, et al. Climatic implication of the chroma of JL red earth section in the Lushan mountain[J]. Tropical Geography, 2007, 27(3): 193—197, 202. [朱丽东, 周尚哲, 李凤全, 等. 庐山 JL 红土剖面的色度气候意义[J]. 热带地理, 2007, 27(3): 193—197, 202.]
- [ 19 ] Zhu L D, Liu M Y, Gu X J, et al. Environmental implication of the color index of the plinthitic red earth in Jinhua-Quzhou Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(3): 133—141. [朱丽东, 刘名瑜, 谷喜吉, 等. 金衢盆地网纹红土色度及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(3): 133—141.]
- [ 20 ] Ji H L, Zhou W J, Zhang Y P, et al. Relationship between soil color and climatic factors in Yunnan[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2013, 35(s2): 352—358. [姬红利, 周文君, 张一平, 等. 云南土壤色度与海拔及气候的关系研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2013, 35(s2): 352—358.]
- [ 21 ] Wu Y, Qiu S F, Fu S Q, et al. Pleistocene climate change inferred from multi-proxy analyses of a loess-paleosol sequence in China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 154: 428—434.
- [ 22 ] Gao P K, Pang J L, Huang C C, et al. Chroma characteristics and its significances of the Chafangcun loess-paleosol profile in southeast Shaanxi, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(3): 537—542. [高鹏坤, 庞奖励, 黄春长, 等. 陕南丹凤茶房村黄土—古土壤剖面色度参数特征[J]. 沉积学报, 2015, 33(3): 537—542.]
- [ 23 ] Feng L W, Wu K N, Zha L S, et al. Chroma characteristics and its climatic significance of Yangshao culture relic[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5): 892—897. [冯力威, 吴克宁, 查理思, 等. 仰韶文化遗址区古土壤色度特征及其气候意义[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 892—897.]
- [ 24 ] Miao Y F, Yang S L, Zhuo S X, et al. Relationship between the color of surface sediments and precipitation in arid northwest China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(4): 77—85. [苗运法, 杨胜利, 卓世新, 等. 我国西北干旱区现代地表沉积物颜色指标与降水关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(4): 77—85.]
- [ 25 ] Yan Y Y, An C R, Miao Y F, et al. Relationship between color index of modern surface sediment and climate parameters in the region of Xinjiang and Qinghai[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 355—364. [严永耀, 安聪荣, 苗运法, 等. 新疆青海地区现代地表沉积物颜色指标与气候参数关系[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 355—364.]
- [ 26 ] Cui D, Rong X, Wang X L, et al. Quantitative study on the correlation between the redness degree in soil colour and mean annual precipitation in China[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2011(10): 6—7, 10. [崔东, 荣雪, 王晓磊, 等. 中国土壤颜色与气候指标的定量研究[J]. 农业科技与装备, 2011(10): 6—7, 10.]
- [ 27 ] Zhang M M, Chen Q, Ye W, et al. Environmental changes in Jinhua-Quzhou basin: A study based on the recording of aggradation red earth's multi-index[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2015, 10(1): 1—9. [张萌萌, 陈渠, 叶玮, 等. 金衢盆地加积红土多指标记录的环境变化[J]. 亚热带资源与环境学报, 2015, 10(1): 1—9.]
- [ 28 ] Wang H Y, Pang J L, Huang C C, et al. Chroma characteristics and paleoclimatic reconstruction of the loess-paleosol profile at Tuojiawan in Yunxi County, Hubei Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 151—156. [王海燕, 庞奖励, 黄春长, 等. 郧西县鹿家湾黄土剖面色度参数特征及其古气候重建[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 151—156.]
- [ 29 ] Ren S F. The environment information and spectral reflectance characteristic recorded by Xiashu Loess in Nanjing, China[D]. Shanghai: East China Normal University, 2010. [任少芳. 下蜀黄土地层的色度特征

- 及环境信息研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.]
- [ 30 ] Yang D, Pang J L, Zhou Y L, et al. Chroma characteristics and its significance of the Junwangcun loess-paleosol profile in the Hanzhong basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2018, 57 ( 1 ): 93—101. [杨丹, 庞奖励, 周亚利, 等. 汉中盆地军王村黄土-古土壤剖面的色度特征及机理[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2018, 57 ( 1 ): 93—101.]
- [ 31 ] Wang Q S, Song Y G, Li J J, et al. Characteristics of color in chaona section and its paleoclimatic significance during the last glacial-interglacial cycle[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35 ( 11 ): 1489—1494. [王千锁, 宋友桂, 李吉均, 等. 末次冰期-间冰期旋回朝那黄土颜色特征及古气候意义[J]. *地理科学*, 2015, 35 ( 11 ): 1489—1494.]
- [ 32 ] He Y. The loess research on magnetic characteristics and environmental evolution in Azov region of Russia and Pamir region of China since MIS5[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. [何毅. 俄罗斯亚速海地区与中国帕米尔地区 MIS5 以来黄土磁性特征及环境演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.]
- [ 33 ] Hu P X, Liu Q S. The production and transformation of magnetic minerals during pedogenesis and its paleoclimate significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34 ( 3 ): 458—473. [胡鹏翔, 刘青松. 磁性矿物在成土过程中的生成转化机制及其气候意义[J]. *第四纪研究*, 2014, 34 ( 3 ): 458—473.]
- [ 34 ] Li J H. Stratigraphy (Lithostratic) of Fujian Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997. [李兼海, 福建省地质矿产局. 福建省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.]
- [ 35 ] Ji J F, Chen J, Balsam W, et al. Quantitative analysis of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequences and its implication for dry and humid variability[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27 ( 2 ): 221—229. [季峻峰, 陈骏, Balsam William, 等. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究[J]. *第四纪研究*, 2007, 27 ( 2 ): 221—229.]
- [ 36 ] Jiang Z X, Liu Q S. Factors controlling the Al content in Al-substituted hematite and its environmental significances[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32 ( 4 ): 608—614. [姜兆霞, 刘青松. 影响赤铁矿中铝替代量的因素及其环境意义探讨[J]. *第四纪研究*, 2012, 32 ( 4 ): 608—614.]
- [ 37 ] Zhou W, Ji J F, Balsam W, et al. Determination of goethite and hematite in red clay by diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13 ( 4 ): 730—736. [周玮, 季峻峰, Balsam William, 等. 利用漫反射光谱鉴定红粘土中针铁矿和赤铁矿[J]. *高校地质学报*, 2007, 13 ( 4 ): 730—736.]
- [ 38 ] Torrent J, Barrón V, Liu Q S. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 ( 2 ): 140—165.
- [ 39 ] Wang T, Liu X M, Lü B, et al. Miocene paleosol in Sydney, Australia and its paleoclimatic significances. *Quaternary Sciences*, 2015, 35 ( 4 ): 997—1005. [王涛, 刘秀铭, 吕宾, 等. 澳大利亚悉尼中新世古土壤形成时期的古气候特征. *第四纪研究*, 2015, 35 ( 4 ): 997—1005.]
- [ 40 ] Lu S G, Yu J Y. Progress in soil magnetism and its application[J]. *Progress in Soil Science*, 1991, 19 ( 5 ): 1—8. [卢升高, 俞劲炎. 土壤磁学及其应用研究进展[J]. *土壤学进展*, 1991, 19 ( 5 ): 1—8.]
- [ 41 ] Ding M, Pang J L, Huang C C, et al. Chroma characteristics and its climatic significance in Holocene loess-paleosol sequence—A case study of the Holocene Liangcun profile in the western Guanzhong basin[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 38 ( 5 ): 92—97. [丁敏, 庞奖励, 黄春长, 等. 全新世黄土-古土壤序列色度特征及气候意义——以关中平原西部梁村剖面为例[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 38 ( 5 ): 92—97.]
- [ 42 ] Dai S, Liu J W, Zhang M Z, et al. Climate change during 140.66-124.19 Ma recorded by the color of the sediments of the Hekou group from Lanzhou-Minhe basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85 ( 6 ): 1058—1067. [戴霜, 刘俊伟, 张明震, 等. 兰州-民和盆地八盘峡剖面河口群沉积物色度纪录的 140.66-124.19Ma 间气候变化[J]. *地质学报*, 2011, 85 ( 6 ): 1058—1067.]
- [ 43 ] Long X Y, Ji J F, Balsam W. Rainfall-dependent transformations of iron oxides in a tropical saprolite transect of Hainan Island, South China: Spectral and magnetic measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116 ( F3 ): F03015.
- [ 44 ] Long X Y, Ji J F, Barrón V, et al. Climatic thresholds for pedogenic iron oxides under aerobic conditions: Processes and their significance in paleoclimate reconstruction[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 150: 264—277.

(责任编辑: 檀满枝)