

李星耀, 李志文, 朱志军, 等. 南昌市厚田剖面末次冰期沉积的色度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 170-179.
LI Xingyao, LI Zhiwen, ZHU Zhijun, et al. Chromaticity characteristics of the Last Glacial sediments in Houtian section of Nanchang city and its paleoenvironmental significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(1): 170-179.

南昌市厚田剖面末次冰期沉积的色度特征及其古环境意义

李星耀¹, 李志文^{1,2,3}, 朱志军¹, 詹江振¹, 李向洁⁴, 李世乾¹

1. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013
2. 佛山科学技术学院环境与化学工程学院, 佛山 528225
3. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061
4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要:色度是古环境重建的重要指标之一,常用于黄土高原黄土古气候重建,但其在亚热带湿润区第四纪沉积中的研究十分少见且意义不明。选取鄱阳湖南岸之厚田沙地的沉积剖面为研究对象,进行了色度测试,结合光释光测年结果,将色度参数与其他气候代用指标进行对比,探讨 MIS4—MIS2 期间的古气候变化特征。结果表明:各色度参数曲线在剖面垂直方向上产生了较大波动,呈现出干冷→暖湿→干冷的多个冷暖震荡。其中 L^* 值曲线的波峰段主要集中在沙丘砂层 (HT6、HT4、HT1), 指示 MIS4 阶段、MIS3b 阶段和 MIS2 晚期阶段为干燥寒冷的气候环境,冬季风增强; a^* 、 b^* 、 C^* 和 h^* 值曲线的波峰段主要集中在砂质古土壤层 (HT5、HT3、HT2), 指示 MIS3c 阶段、MIS3a 阶段和 MIS2 早期阶段为温暖湿润的气候环境,夏季风增强,反映了该区域在末次冰期受冬季风和夏季风交替影响的气候演变格局。

关键词:末次冰期; 沙丘砂-砂质古土壤序列; 色度; 古环境; 厚田沙地

中图分类号: P534.63 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022060201

Chromaticity characteristics of the Last Glacial sediments in Houtian section of Nanchang city and its paleoenvironmental significance

LI Xingyao¹, LI Zhiwen^{1,2,3}, ZHU Zhijun¹, ZHAN Jiangzhen¹, LI Xiangjie⁴, LI Shiqian¹

1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China
2. School of Environmental and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China
3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China

Abstract: Chroma is one of the important indicators of paleoenvironment reconstruction, and is often used for paleoclimate reconstruction of the loess plateau, but its research in the Quaternary sediments in subtropical humid regions is rare and its significance is unclear. The sedimentary profile of Houtian sandy land on the south bank of Poyang Lake was selected as the research object and the chromaticity test was carried out. Combining with the results of optically stimulated luminescence (OSL), the chromaticity parameters were compared with other climatic proxies, and the paleoclimate changes during MIS2-MIS4 were discussed. Results show that the chromaticity parameter curves have large fluctuations in the vertical direction of the profile, showing multiple cold-warm oscillations from dry-cold → warm-wet → dry-cold. Among them, the peak sections of the L^* (brightness) value curve are mainly concentrated in the dune sand layers of HT6, HT4, and HT1, indicating that the MIS4 stage, MIS3b stage, and early MIS2 stage, respectively, are dry and cold climate environment. The peak sections of the a^* (redness), b^* (yellowness), C^* (saturation), and h^* (hue) value curves are mainly concentrated in the sandy palaeosol layers of HT5, HT3, and HT2, representing the MIS3c stage, MIS3a stage and late MIS2 stage respectively, are warm and humid climate environment. The chromaticity index

资助项目: 国家自然科学基金青年基金“山东半岛北部海岸晚第四纪风沙沉积的时代划分与季风环境演变”(41201006); 国家自然科学基金面上项目“南暖温带—北亚热带晚第四纪不成熟网纹层的地质时代、形成机制与季风环境演变”(41571007)

作者简介: 李星耀 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为第四纪环境演变, E-mail: lixy0520@163.com

通讯作者: 李志文 (1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事地貌与第四纪地质学相关研究, E-mail: lizw1982@163.com

朱志军 (1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事沉积学研究, E-mail: zhuzj013@163.com

收稿日期: 2022-06-02; 改回日期: 2022-08-28. 文凤英编辑

better reveals the characteristics of climate change in the Houtian area, and reflect the climate evolution pattern in the area affected by alternating winter monsoon and summer monsoon during the last glacial period.

Key words: the Last Glacial Period; Dune sand-sandy paleosol sequence; chromaticity; paleoenvironment; Houtian sandy land

颜色是沉积物最直观的特征之一^[1], 是可见光波段中沉积物的反射光谱特征, 可以指示不同沉积物的发育程度和形成时的沉积环境^[2-3], 对重建古环境具有重要意义。色度参数变化受气候因素对沉积物性质和成壤环境的影响^[4], 与沉积物中水分、有机质、碳酸盐、铁氧化物含量、黏土矿物类型等属性密切相关^[3-6]。近年来随着研究的不断深入, 色度在黄土古气候重建方面得到了广泛的应用, 方小敏等^[7]在研究兰州地区千年尺度上夏季风的不稳定性时, 首次将色度作为气候替代指标; 王千锁等^[8]研究了黄土高原朝那剖面末次冰期-间冰期旋回的沉积序列, 认为根据色度变化能很好地识别弱黄土-古土壤层; 陈一萌等^[9]对塬堡剖面的研究认为, 土壤颜色记录的环境信息在多个时间尺度上是可靠的, 在末次冰期的效果最显著; 李越等^[10]分析了新疆昭苏黄土剖面的色度特征, 认为色度参数变化与不同的影响因素有关。研究表明, 色度参数中亮度(L^*)值主要受控于碳酸盐和有机质的含量, 红度(a^*)值主要受控于铁氧化物特别是赤铁矿含量, 黄度(b^*)值变化则与针铁矿含量关系密切^[11], 而且 3 个参数之间也会互相影响^[12]。因此, 色度通常与粒度、磁化率、有机质、 CaCO_3 含量、地球化学元素等指标结合使用, 在古气候研究中发挥了重要作用。

与研究成果丰富的黄土高原沉积序列相比, 关于色度在亚热带湿润区晚第四纪砂质沉积中的研究十分少见。鄱阳湖湖滨地区广泛分布着一系列风沙沉积, 前人对沉积特征、地质年代和古气候变化等方面进行了许多研究, 确定其主体为晚更新世风沙堆积。位于南昌市的厚田沙地是鄱阳湖南部典型的河岸风沙化土地, 存在沙丘砂-砂质古土壤沉积序列。前人采用光释光测年技术(OSL)构建年代学框架, 依据粒度指标探讨了厚田剖面的沉积特征及古环境意义, 揭示该区域气候在末次冰期经历了数次明显的冷暖旋回变化^[13-14]。本文在野外调查和前人研究的基础上, 测试了该剖面的色度参数 L^* 、 a^* 和 b^* , 并与平均粒径^[13]、洛川黄土磁化率^[15]、古里雅冰芯^[16]等指标进行对比, 探讨色度特征及其反映的气候变化规律。

1 区域概况

厚田沙地位于江西省南昌市新建区厚田乡, 赣江和锦江交汇处西岸($28^{\circ}25' \sim 28^{\circ}30' \text{N}$ 、 $115^{\circ}46' \sim 115^{\circ}48' \text{E}$), 面积 2.8 km^2 , 海拔 $15 \sim 48 \text{ m}$ ^[17](图 1)。区域内以风化剥蚀岗地和侵蚀堆积平原为主要地貌特征, 由于赣江和锦江在此交汇, 水面展宽, 流速

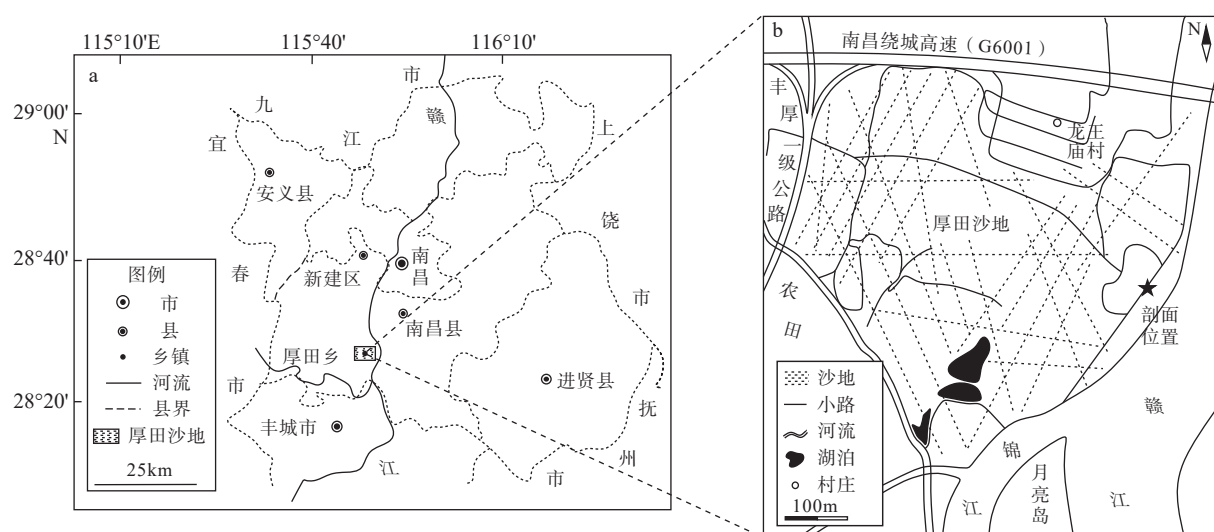


图 1 厚田剖面研究区域和采样点位置

a: 南昌地区图, b: 剖面位置图。

Fig.1 The study area and sampling site location of the Houtian section

a: Map of Nanchang area, b: map of the sampling site (marked by a star).

慢,泥沙易沉积。气候类型为亚热带湿润季风气候,具有四季分明、雨热同期的特点,年均气温 17.7℃,年均降雨量 1549.2 mm,年均风速 4.3 m/s^[18],夏季盛行东南风而冬季盛行北风和北北东风,箕状盆地地形使盛行风的“狭管效应”显著,风速较大且风力强劲,≥8 m/s 风速的年均出现天数达 76 天,≥10 m/s 风速的出现天数平均达 25 天^[19]。物源丰富、干季与风季同步等有利自然条件,最终在此形成了独特的沙质荒漠化景观。地带性植被是亚热带常绿阔叶林,但厚田沙地以沙地植物为主,种类主要有单叶蔓荆(*Vitex trifolia*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、球柱草(*Bulbostylis barbata*)、狗牙根等(*Cynodon dactylon*)。

剖面位于沙地东侧边缘,呈自然出露状态,各地层之间的沉积相对连续,呈现多个沉积旋回,未见明显间断^[13-14]。实测剖面末次冰期沉积的厚度为 5.74 m,根据沉积物的岩性、颜色和地层接触关系,可判断其由沙丘砂层和砂质古土壤层两种沉积相叠覆堆积组成,自上而下共 6 个层位,详细的地层特征描述见表 1。以 2 cm 等间距在剖面垂直方向

上连续采集 287 个样品用于色度分析,同时在 HT1 顶部、深度 1.74 m 处、HT4 顶部、HT5 顶部、HT6 顶部与底部分别采集了 6 个 OSL 测年样品^[13]。

2 实验方法与结果

2.1 年代测试方法与结果

确定沉积物形成年代最常用的测试方法是 OSL 技术^[20],已广泛应用于沙漠和黄土的年代学框架构建中。6 个 OSL 测年样品由河北省石家庄市国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成,仪器为 Daybreak 2200 光释光仪,年代测试结果和参数见文献^[13]。以 HT1 顶部的 14.9 ka 和 HT3 的 29.7 ka 结果为控制点,利用沉积速率内插法计算出 HT1 底部的年代为 19 ka, HT2 底部为 26.5 ka,根据实验结果可建立年代学框架(图 2)。

由图 2 可知,厚田剖面的沙丘砂-砂质古土壤沉积序列形成于 77.0 ka(HT6 底部)至 14.9 ka (HT1 顶部)之间,与深海氧同位素记录的末次冰期

表 1 厚田剖面地层特征描述
Table 1 Description of stratigraphic characteristics of the Houtian section

地层分层	深度/m	地层特征
HT1	0~0.50	黄红色沙丘砂层,松散,含较多植物根系
HT2	0.50~1.34	浅棕红色砂质古土壤层,较松散,含黄红色斑点
HT3	1.34~2.64	上部为黄红色砂质古土壤层,松散且无层理;下部为浅棕红色—黄红色中细砂,较紧实,含较多铁质结核与斑点
HT4	2.64~3.44	黄红色沙丘砂层,松散,含较多云母片
HT5	3.44~4.24	浅棕红色砂质古土壤层,紧实
HT6	4.24~5.74	灰白色沙丘砂层,松散

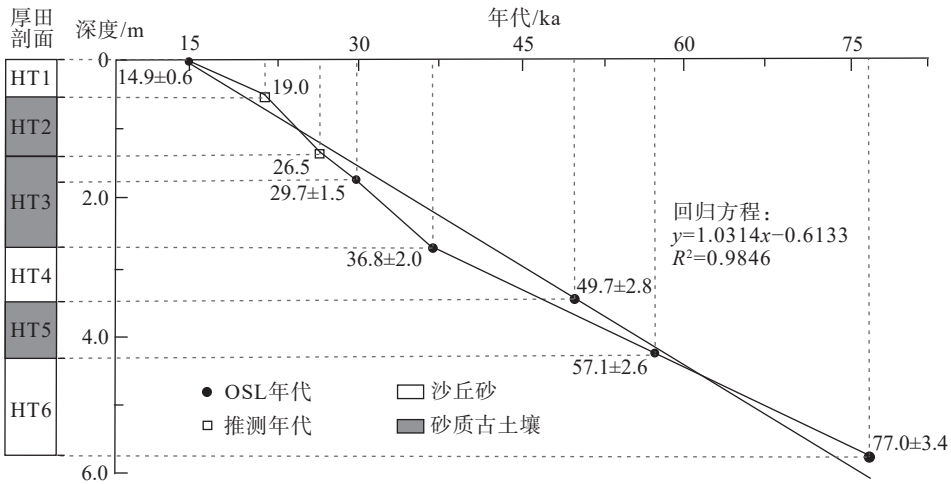


图 2 厚田剖面的地层序列与年代学框架^[13]

Fig.2 Stratigraphic sequence and chronological framework of the Houtian section^[13]

起止年代较为接近,可推断其属于末次冰期的风成沉积物^[13-14]。沙丘砂层包括 HT6、HT4 和 HT1,其发育时间为 HTS4(77.0~57.1 ka)、HTS3b(49.7~36.8 ka)和 HTS2 晚期(19.0~14.9 ka),分别对应于深海氧同位素的 MIS4、MIS3b 和 MIS2 晚期^[21];砂质古土壤层包括 HT5、HT3 和 HT2,发育时期为 HTS3c(57.1~49.7 ka)、HTS3a(36.8~26.5 ka)和 HTS2 早期(26.5~19.0 ka),分别对应于深海氧同位素的 MIS3c、MIS3a 和 MIS2 早期^[21]。

2.2 色度测试方法与结果

CIELAB 表色系统是目前最常用的颜色描述和测量系统之一,利用参数 L^* (亮度)、 a^* (红度)和 b^* (黄度)的数值直接定量描述任何连续均匀的颜色空间^[22]; L^* 值介于黑(0)至白(100)之间; a^* 值介于红(+60)至绿(-60)之间; b^* 值介于黄(+60)至蓝(-60)之间^[23]。为补充色度研究结论,特引进 a^*/b^* 、 C^* 和 h^* 指标,其中 a^*/b^* 为红度值和黄度值的差异大小; C^* 为饱和度值,指示沉积物颜色的鲜艳程度,计算公式为 $C^*=\sqrt{a^{*2}+b^{*2}}$; h^* 为色调角度值,公式为 $h^*=\arctan(a^*/b^*)$ ^[24]。

实验仪器为国产 YT-ACM 全自动色度仪。为避免粒径和水分对测试结果造成干扰,首先将低温烘干的样品研磨至过 200 目分析筛,然后将待测样品放入仪器的圆盘压实,每个样品分别测量 3 次,取其 L^* 、 a^* 和 b^* 数值的平均值^[25],实验结果见表 2。

由表 2 可知,色度参数的变化在不同沉积相的层位上产生了较大差异: L^* 整体表现为沙丘砂层的均值高于砂质古土壤层。 a^* 、 b^* 、 a^*/b^* 、 C^* 和 h^* 各指标的变化规律相似,均表现为砂质古土壤层的均值高于沙丘砂层。

3 结果与讨论

3.1 色度指标的相关性分析

CIELAB 表色系统是一种对颜色进行定量描述的系统,不同颜色坐标分量之间也会相互影响^[26],对部分色度参数进行相关性分析,结果如图 3 所示(图中 R^2 为决定系数,是对模型进行线性回归后,评价回归模型系数的拟合优度)。

由表 3 可知, L^* 和 a^* 的相关系数为-0.7041, L^* 随 a^* 的增大而减小; L^* 和 b^* 的相关系数为-0.8391, L^* 随 b^* 的增大而减小,说明 L^* 分别与 a^* 和 b^* 呈明显的负相关关系。研究发现土壤中致色矿物含量对土壤颜色变化的影响最大,特别是赤铁矿和针铁矿含量的变化^[27],赤铁矿含量越高土壤越红,针铁矿含量越高土壤越黄, a^* 和 b^* 数值的变化可能对该区域 L^* 值产生较大影响^[28]。 a^* 与 b^* 的相关系数为 0.7829,二者呈明显的正相关关系,说明影响 a^* 与 b^* 数值变化的因素可能相同。 C^* 与 b^* 的相关系数为 0.9876, h^* 与 a^* 的相关系数为 0.9135,呈现出高度的正相关

表 2 厚田剖面色度分段变化规律
Table 2 Variation of chromaticity in different vertical sectors of the Houtian section

色度参数		层位					
		HT1	HT2	HT3	HT4	HT5	HT6
L^*	范围	58.32~66.57	61.00~66.83	56.08~63.94	56.80~67.86	58.87~69.23	56.89~69.71
	平均值	62.93	63.84	60.53	62.82	63.08	65.01
a^*	范围	11.66~14.21	11.85~15.13	11.72~14.34	9.81~13.59	10.18~13.04	8.25~12.98
	平均值	12.94	13.73	13.24	12.40	12.23	10.49
b^*	范围	29.06~32.38	30.22~34.65	31.57~35.83	29.39~36.41	29.82~33.38	28.08~34.42
	平均值	30.48	32.30	33.84	32.77	31.67	30.49
a^*/b^*	范围	0.390~0.448	0.389~0.443	0.371~0.412	0.333~0.403	0.341~0.401	0.279~0.385
	平均值	0.424	0.425	0.391	0.378	0.386	0.343
C^*	范围	31.66~35.20	32.46~37.81	33.68~38.50	31.01~38.85	31.51~35.80	29.47~36.79
	平均值	33.11	35.10	36.34	35.04	33.96	32.25
h^*	范围	0.372~0.421	0.371~0.417	0.355~0.390	0.321~0.383	0.329~0.381	0.272~0.367
	平均值	0.401	0.402	0.373	0.361	0.368	0.330

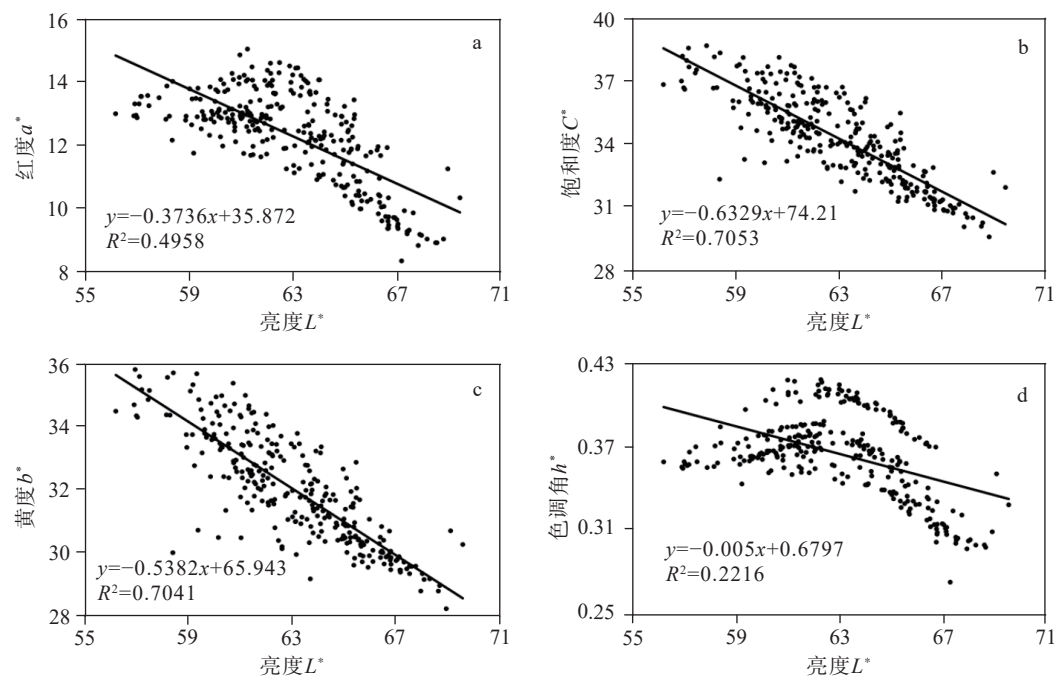


图 3 厚田剖面色度指标的相关关系图

Fig.3 Correlation of chromaticity indices of the Houtian section

表 3 色度参数 L^* 、 a^* 、 b^* 与色饱和度 C^* 、色调角 h^* 的相关性分析

Table 3 Correlation between chromaticity indices L^* , a^* , b^* , color saturation C^* and hue angle h^*

色度参数	L^*	a^*	b^*	C^*	h^*
L^*	1				
a^*	-0.7041	1			
b^*	-0.8391	0.7829	1		
C^*	-0.8398	0.8707	0.9876	1	
h^*	-0.4707	0.9135	0.4643	0.5968	1

关系,而 L^* 与 h^* 的相关系数仅为-0.4707。

3.2 色度的古环境意义及影响因素

沉积物色度产生差异的根本原因,在于不同地层中致色物质的含量或比例不同,或是环境条件的改变在风化成壤过程中形成了新的致色矿物^[8],如有机质的产生或分解、含铁矿物的迁移或转化等^[6],都会使色度记录的古环境信息发生改变。

L^* 值指土壤的明暗程度,其变化与土壤湿度、粗糙度、有机质含量等因素关系密切,实验前烘干和研磨样品,已尽量减少湿度和粗糙度对测试结果可能造成的影响。研究表明土壤有机质含量越高,则土壤颜色越暗, L^* 值就越低^[9]。有机质含量主要与一定气候条件下植被的生长状况有关,气温升

高、降水增多的环境条件有利于植物生长发育,促进土壤有机质的累积,因此剖面 L^* 值变化的实质是对区域水热条件改变的响应^[29]。由图 4 可知, L^* 值曲线在剖面不同层位中的震荡幅度较大,变化范围为 56.08~69.71,均值为 63.07,变化幅度为 24.30%, L^* 值在全剖面上整体表现为沙丘砂层的均值(64.01)高于砂质古土壤层(62.17)。说明沙丘砂层(HT1、HT4 和 HT6)形成时期有机质的含量较低,植物生长状况不好,指示干冷气候;砂质古土壤层(HT2、HT3 和 HT5)时期有机质的含量较高,植物生长状况良好,指示暖湿的气候。

a^* 值反映沉积物形成时期的水热组合情况,沉积物中铁氧化物特别是赤铁矿是使其颜色发生变化的主要原因,赤铁矿含量越高,沉积物的颜色就越红, a^* 值则越大^[30]。夏季风盛行时期为湿热的气候条件,强烈的风化成壤作用会加速土壤的淋溶与分解,淋失大量矿物组分,由于铁元素相对稳定而难以发生迁移,其氧化物在土壤分解时会发生累积,使赤铁矿含量升高,红度 a^* 值随之升高^[31]。由图 4 可知, a^* 值的变化范围为 8.25~15.13,均值为 12.31,变化幅度为 83.39%。 a^* 值在全剖面上整体表现为砂质古土壤层的均值(13.10)高于沙丘砂层(11.47),说明砂质古土壤层(HT2、HT3 和 HT5)形成时期的水热条件良好,风化成壤作用强,形成的赤铁矿含量高,指示湿热的气候条件;沙丘砂层(HT1、HT4 和 HT6)时期的风化成壤作用弱,导致

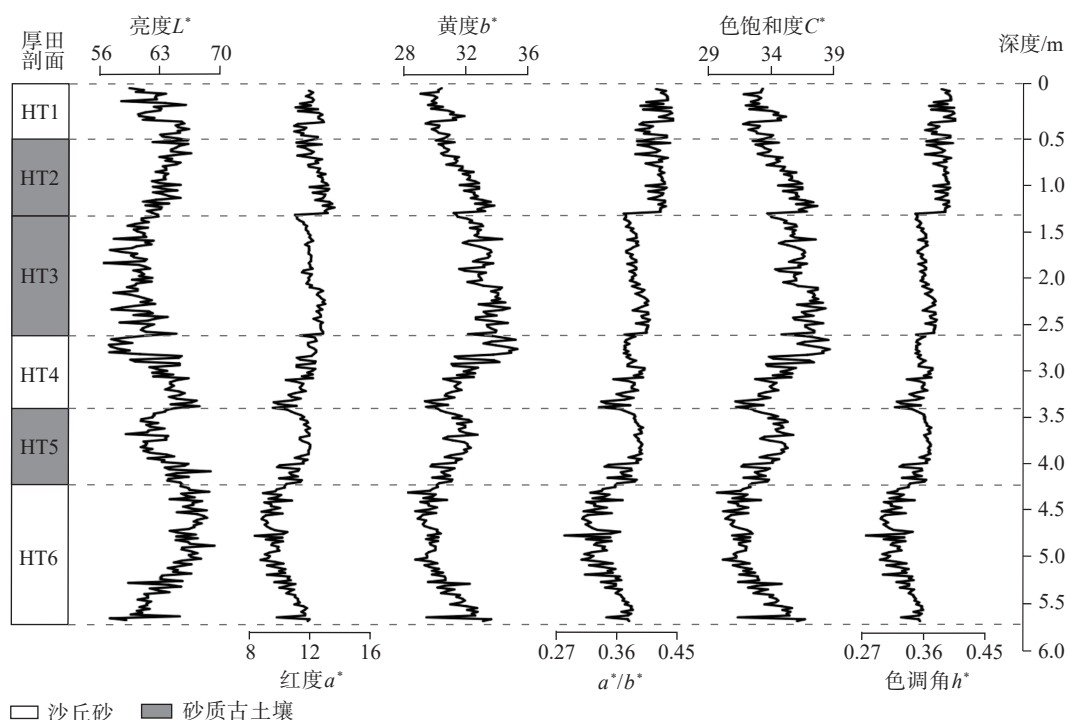


图 4 厚田剖面色度参数 L^* 、 a^* 、 b^* 与色饱和度 C^* 、色调角 h^* 的垂直变化

Fig.4 Vertical changes of chromaticity indices L^* , a^* , b^* , C^* and h^* in the Houtian section

赤铁矿含量降低, 指示干冷的气候。

b^* 值与 a^* 值相比, 影响其变化的因素比较复杂, 杨胜利等^[11] 认为 b^* 值变化主要与土壤中黄色的针铁矿有关。针铁矿形成与气候条件的关系密切, 在气温和降水增加的环境下, 强烈的风化成壤作用会使土壤中的易分解成分大量淋失, 铁氧化物累积, 有利于针铁矿及其他铁氧矿物形成^[32], 厚田地区受亚热带湿润季风气候的影响, 雨热同期, 有利于针铁矿的形成, 使 b^* 值增大。由图 4 可知, b^* 值的变化范围为 28.08~36.41, 均值为 32.00, 变化幅度为 29.67%, b^* 值全剖面上整体表现为砂质古土壤层的均值 (32.81) 高于沙丘砂层 (31.14)。 a^* 和 b^* 的曲线升降趋势呈现相近的同向变化特征, 说明影响二者变化的因素都与铁元素有关, 可能受控于气候条件。砂质古土壤发育时期针铁矿的含量高, 指示湿热的气候环境; 沙丘砂层形成时期针铁矿含量低, 指示干冷的气候环境。

从图 4 可以看出 a^*/b^* 曲线的变化趋势与 a^* 值曲线相似, 其变化范围为 0.279~0.448, 均值为 0.384, 变化幅度达 74.91%, 整体表现为砂质古土壤层的均值 (0.401) 高于沙丘砂层 (0.382)。色饱和度 C^* 和色调角 h^* 是红度 a^* 和黄度 b^* 的衍生参数, 因此具有一定的相关性^[25]。 C^* 值越大表示颜色越鲜艳; h^* 值越大表示颜色越黄, 角度越小表示颜色越红^[24]。 C^* 与 b^* 的变化趋势几乎一致, 而 h^* 与 a^* 的趋势更为接近,

C^* 值在全剖面变化范围为 29.47~38.85, 均值为 34.30; h^* 值在全剖面变化范围为 0.272~0.421, 均值为 0.366。 C^* 值和 h^* 值与 a^* 和 b^* 指示的气候变化规律相似, 二者作为色度参数的补充, 有利于对沉积物颜色进行全面描述。

通过以上讨论可以得出, 各色度参数指示环境的敏感程度存在差异: L^* 的高值表明区域内水热组合条件较差, 指示干燥寒冷的冬季风环境, 低值则相反; 而 a^* 、 b^* 、 C^* 和 h^* 的高值表明水热组合条件较好, 指示温暖湿润的夏季风环境, 低值则相反, 色度指标较好揭示了厚田地区的气候变化特征。

4 色度与其他气候指标揭示的古环境意义

色度参数在不同环境和沉积物中的意义可能会不同, 因此要结合其他代用指标才能准确地重建古环境。鹿化煜^[33] 等研究了洛川黄土剖面的粒度, 认为粗粒级颗粒含量受东亚冬季风强度的影响最大, 是记录冬季风强度变化的良好指标; 安芷生等^[34] 认为黄土磁化率与土壤中的铁磁矿物含量有关, 暖湿环境下的强烈风化成壤作用会将大量粗粒铁磁性矿物分解成细粒铁磁性矿物, 使磁化率升高, 是指示东亚夏季风强度变化的指标。冰芯是第四纪研究的重要载体之一, 对气候变化的响应十分敏

感。本文选取前人研究中厚田剖面的平均粒径(M_z)^[13]、洛川黄土的磁化率^[15]和古里雅冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的记录^[16]与本文的色度参数 L^* 、 a^* 和 b^* 进行对比(图5),结果显示了良好的对应关系。

HTS4: 为 HT6 地层, 深度 4.24~5.74 m, 年代 77.0~57.1 ka, 对应于 MIS4 阶段。由图 5 可知 L^* 值曲线自下而上有逐渐升高的趋势, 在曲线上呈现出波峰, 达到全层段的最高值(69.71), 表明土壤中有机质的含量减少。 a^* 值和 b^* 值曲线的变化趋势与 L^* 相反, 在曲线上呈现为低谷, 分别达到全层段的最低值(10.49 和 30.49), 表明土壤中氧化铁的含量减少。可知这一时期冬季风盛行, 水热条件差, 沙丘砂开始发育, 指示干燥寒冷的气候环境。 M_z (1.50 Φ) 最粗, 其曲线位于波谷段, 表明此时期温度较低, 强烈的冬季风将粗颗粒沉积物搬运到阶地上沉积下来, 且风化成壤作用强度较弱, 分解的细颗粒沉积物较少^[13]。该阶段对应同期洛川黄土磁化率曲线^[15]的波谷和古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量曲线^[16]的波峰, 同样表明冬季风盛行, 降水量减少, 风化成壤作用分解的细粒铁磁性矿物较少, 也指示干冷的气候环境。

HTS3c: 为 HT5 地层, 深度 3.44~4.24 m, 年代

57.1~49.7 ka, 对应于 MIS3c 阶段。 L^* 均值为 63.08, 接近于全层段均值(63.07), L^* 值曲线开始逐渐下降, 表明土壤中有机质的含量增加; a^* 均值(12.23)和 b^* 均值(31.67)都略低于全层段平均值(12.31 和 32.00), 二者曲线均呈上升趋势, 表明土壤中氧化铁含量较上一阶段开始增多。推断这一时期由夏季风占主导, 水热条件良好, 砂质古土壤开始发育, 指示温暖湿润的气候环境。 M_z (2.60 Φ) 偏细, 说明该时期的风化成壤作用较强, 粗颗粒沉积物被分解得到了大量细颗粒沉积物, 指示以夏季风为主导的暖湿气候^[13]。对应洛川黄土磁化率曲线^[15]的波峰段和古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量曲线^[16]的波谷段, 说明此时期的水热条件良好, 风化成壤作用强, 分解的细粒铁磁性矿物较多, 也指示暖湿的夏季风气候环境。

HTS3b: 为 HT4 地层, 深度 2.64~3.44 m, 年代 49.7~36.8 ka, 对应于 MIS3b 阶段。 L^* 均值为 62.82, 低于全层段均值(63.07), 自下而上呈逐渐上升的趋势, 在曲线上呈现为高峰, 表明土壤中有机质的含量减少; a^* 值(12.40)和 b^* 值(32.77)自下而上逐渐下降, 但仍高于全层段平均值(12.31 与 32.00), 表明土壤中氧化铁的含量也减少。推断这一时期夏季风减弱, 开始盛行冬季风, 水热条件较差, 沙丘砂发

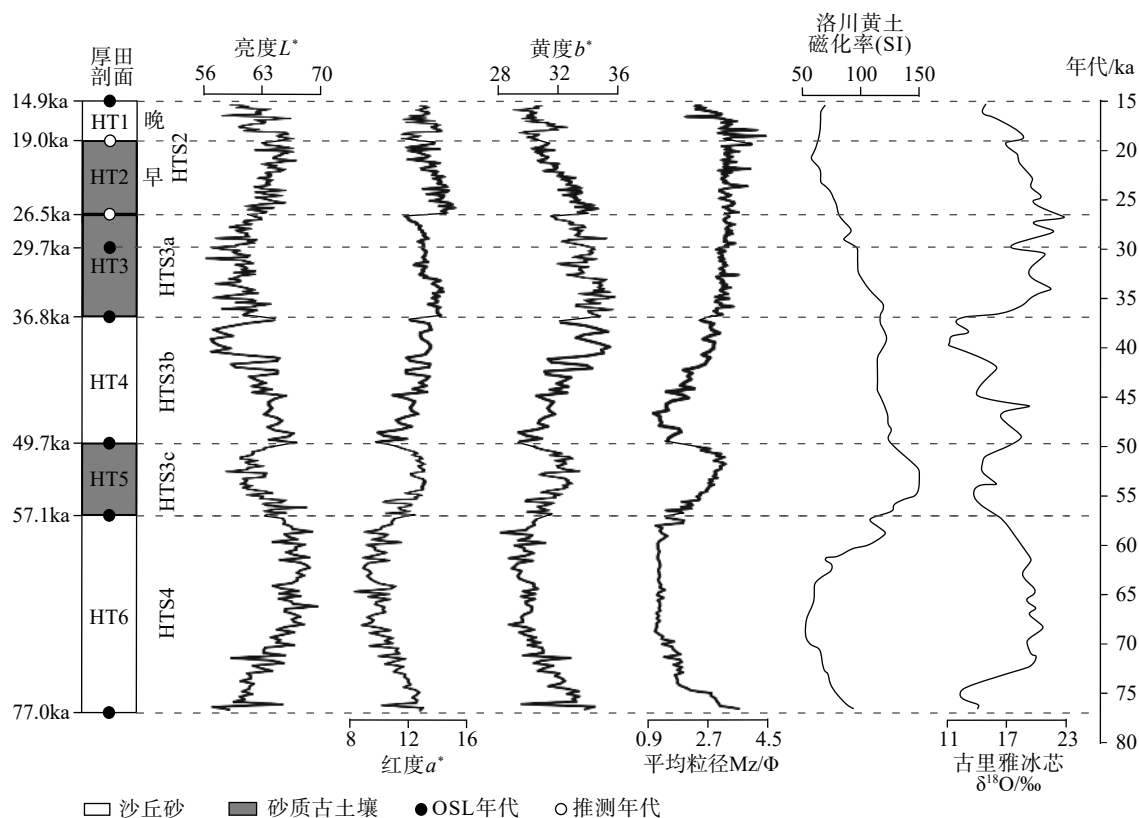


图5 厚田剖面亮度 L^* 、红度 a^* 、黄度 b^* 、平均粒径^[13]与洛川黄土磁化率^[15]和古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ ^[16]的比较

Fig.5 Comparison in brightness (L^*), redness (a^*), yellowness (b^*), and medium size (M_z)^[13] of the Houtian section with the magnetic susceptibility of Luochuan loess^[15] and $\delta^{18}\text{O}$ of Guliya ice core^[16]

育, 指示干燥寒冷的气候环境。Mz(2.04 Φ)略粗, 自下而上呈逐渐降低的趋势, 其曲线位于波谷段^[13]。同期洛川黄土磁化率曲线^[15]呈现低谷, 古里雅冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的曲线^[16]呈现为高峰, 说明此阶段仍以暖湿的气候环境为主, 但也出现了夏季风减弱的干冷时期。

HTS3a: 为 HT3 地层, 深度 1.34~2.64 m, 年代 36.8~26.5 ka, 对应于 MIS3a 阶段。L*均值为 60.53, 低于全层段的均值(63.07), L*值曲线开始逐渐下降, 表明土壤中的有机质含量增加。a*值(13.24)和 b*值(33.84)的曲线呈现上升趋势, 略高于全层段平均值(12.31 和 32.00), 表明土壤中的铁氧化物含量较上一阶段增加。推断此时期夏季风盛行, 水热条件良好, 砂质古土壤发育, 指示温暖湿润的气候环境, 可知这一时期的气候变化与 MIS3c 阶段相似, 但湿润程度明显低于 MIS3c 阶段。Mz(3.13 Φ)偏细, 推断以夏季风为主导的暖湿气候使风化-成壤作用增强, 分解大量粗颗粒沉积物, 使细颗粒沉积物大量增加^[13]。对应于同期洛川黄土磁化率曲线^[15]的峰值和古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量曲线^[16]的低值, 说明该时期夏季风增强, 温度较高, 降水量较多, 是风化成壤作用最强的暖湿气候环境。

HTS2 早期: 为 HT2 地层, 深度 0.50~1.34 m, 年代 26.5~19.0 ka, 对应于 MIS2 阶段早期。L*均值 63.84, 较全层段均值(63.07)略高, 从低位开始上升; a*值和 b*值开始逐渐下降, 二者均值(13.73 和 32.30)仍分别高于全层段平均值(12.31 和 32.00), 表明土壤中的有机质和铁氧化物含量开始下降。说明这一阶段夏季风仍占主导地位, 但其势力在逐渐减弱, 水热条件开始变差, 指示由温暖湿润向干燥寒冷气候转变的过程。Mz(3.34 Φ)最细, 风化成壤作用较强, 说明水热条件良好, 此时期气候仍主要为暖湿气候^[13]。同期的洛川黄土磁化率曲线呈现为峰值^[15], 古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的曲线^[16]在震荡中从高位下降, 反映在末次冰期冰盛期早期仍以湿润的气候为主, 但也开始了由暖湿向干冷气候转变的过程。

HTS2 晚期: 为 HT1 地层, 深度 0~0.5 m, 年代 19.0~14.9 ka, 对应于 MIS2 阶段晚期。L*均值为 62.93, 较全层段的均值(63.07)略低, 震荡幅度较大, 但上升趋势明显, 表明土壤中有有机质的含量减少; a*值(12.94)接近于全层段的均值(12.31), b*值(30.49)低于全层段均值(32.00), 二者曲线均出现由下至上逐渐下降的变化趋势, 表明土壤中的铁氧化物含量减少。说明此时期内盛行冬季风, 沙丘砂发

育, 水热条件变差, 指示干冷多风的气候环境。Mz(3.07 Φ)偏粗, 其值也有逐渐减小的趋势^[13], 说明这一时期风化成壤作用较弱, 粗颗粒沉积物较多。同期的洛川黄土磁化率在曲线上^[15]呈现为低谷, 古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量在曲线上^[16]呈现峰值, 二者的变化趋势与 MIS2 早期一致, 表明是从夏季风盛行到冬季风占主导的过程, 反映 MIS2 阶段气候是由早期的暖湿向晚期的干冷转变。

5 结论

(1)南昌市厚田沙地经历了由冬季风占主导, 降水减少, 气候干冷(HTS4: 77~57.1 ka)→夏季风盛行, 降水增多, 气温上升(HTS3c: 57.1~49.7 ka)→夏季风开始减弱, 降水减少(HTS3b: 49.7~36.8 ka)→夏季风增强, 降水增多, 气温上升(HTS3a: 36.8~26.5 ka)→暖湿开始转向干冷(HTS2 早期: 26.5~19.0 ka)→冬季风增强, 降水减少(HTS2 晚期: 19.0~14.9 ka)的冷暖旋回变化, 很好地反映了厚田地区的降水和气温等古气候变化信息。

(2)将厚田剖面与东亚季风区古气候进行对比, 发现其与洛川黄土磁化率和古里雅冰芯记录的东亚季风强度变化具有较好的一致性, 说明将色度作为指示东亚季风区古气候变化规律的适用指标具有一定的可行性。

参考文献 (References)

- [1] 柯夫达 B A. 土壤学原理(上)[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 19-20. [KOVA V A. Principles of Soil Science (One)[M]. Beijing: Science Press, 1981: 19-20.]
- [2] 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. [MIAO Yunfa, YANG Shengli, ZHUO Shixin, et al. Relationship between the color of surface sediments and precipitation in arid north-west China [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(4): 77-85.]
- [3] 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): 2058.
- [4] 沈曼丽, 张军, 惠争闯. 兰州西津黄土色度指标记录的第四纪气候演化[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3): 809-817. [SHEN Manli, ZHANG Jun, HUI Zhengchuan. Quaternary climate evolution recorded by loess chromatic proxy in Xijin, Lanzhou [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(3): 809-817.]
- [5] 莫东坡, 朱丽东, 李凤全, 等. 浙江曹娥江下游XYC孔色度特征及其全新世环境记录[J]. 古地理学报, 2018, 20(1): 163-174. [MO Dongpo, ZHU Lidong, LI Fengquan, et al. Chroma characteristics and

- its holocene environmental record of borehole XYZ in the downstream area of Cao'e River, Zhejiang Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20 (1): 163-174.]
- [6] 曹乐, 胡春生, 李文慧, 等. 宣城红土剖面色度特征及其古气候意义[J]. *安徽师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 42 (4): 355-359. [CAO Le, HU Chunsheng, LI Wenhui, et al. Chroma characteristics of Xuancheng red clay profile and its paleoclimatic significance [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2019, 42 (4): 355-359.]
- [7] 方小敏, 潘保田, 管东红, 等. 兰州约60 ka以来夏季风千年尺度不稳定性研究[J]. *科学通报*, 1999, 44 (24): 2264-2267. [FANG Xiaomin, PAN Baotian, GUAN Donghong, et al. A 60 000-year loess-paleosol record of millennial-scale summer monsoon instability from Lanzhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (24): 2264-2267.]
- [8] 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. [WANG Qiansuo, SONG Yougui, LI Jijun, 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.]
- [9] 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. [CHEN Yimeng, CHEN Xingsheng, GONG Huili, et al. Soil color: a new sensitive indicator for climatic change [J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29 (3): 309-313.]
- [10] 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. [LI Yue, SONG Yougui, WANG Qiansuo. Chroma characteristics in the Zhaosu loess section and its paleoclimatic significance [J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5 (2): 67-75.]
- [11] 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*, 2001, 44 (1): 218-226. [YANG Shengli, FANG Xiaomin, LI Jijun, et al. Transformation functions of soil color and climate [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44 (1): 218-226.]
- [12] 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. [SHI Peihong, YANG Taibao, TIAN Qingchun, et al. Chroma characteristics in the loess-paleosol at Jingyuan section and its signification to paleoclimatic [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48 (2): 15-23.]
- [13] 王志刚, 李志文, 黎武标, 等. 南昌市厚田沙地风沙沉积记录的末次冰期气候变化特征[J]. *中国沙漠*, 2018, 38 (6): 1200-1208. [WANG Zhigang, LI Zhiwen, LI Wubiao, et al. Climatic change recorded by Aeolian deposition in the Houtian section of Nanchang during the last glacial period [J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38 (6): 1200-1208.]
- [14] 詹江振, 李志文, 王志刚, 等. 南昌市厚田剖面末次冰期风沙沉积的粒度分维特征及其揭示的古环境意义[J]. *热带地理*, 2020, 40 (6): 1075-1084. [ZHAN Jiangzhen, LI Zhiwen, WANG Zhigang, et al. Grain-Size fractal dimension of Aeolian sand during the last glacial period: The Houtian section of Nanchang and its paleoenvironmental significance [J]. *Tropical Geography*, 2020, 40 (6): 1075-1084.]
- [15] 饶文波, 李晓彪, 高振敏, 等. 洛川黄土剖面中矿物固定态铵的分布[J]. *中国沙漠*, 2004, 24 (6): 685-688. [RAO Wenbo, LI Xiaobiao, GAO Zhenmin, et al. Distribution of fixed-NH⁺-N in Luochuan loess section [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24 (6): 685-688.]
- [16] 姚檀栋, THOMPSON L G, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究[J]. *中国科学: D辑*, 1997, 40 (6): 662-668. [YAO Tandong, THOMPSON L G, SHI Yafeng, et al. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1997, 40 (6): 662-668.]
- [17] 吴昊, 李志文, 郭福生, 等. 南昌市厚田乡风沙地貌形态特征与美学价值[J]. *华东地质*, 2019, 40 (4): 264-272. [WU Hao, LI Zhiwen, GUO Fusheng, et al. Morphological characteristics and aesthetic value of Aeolian landforms in Houtian township, Nanchang [J]. *East China Geology*, 2019, 40 (4): 264-272.]
- [18] 李向洁, 李志文, 杜建会, 等. 南昌市厚田沙地蔓荆灌丛沙堆的形态与沉积特征[J]. *地理科学*, 2021, 41 (11): 2042-2051. [LI Xiangjie, LI Zhiwen, DU Jianhui, et al. Morphology and sedimentary characteristics of *Vitex trifolia* Nebkhas in the Houtian sandy land of Nanchang City [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41 (11): 2042-2051.]
- [19] 邹学勇. 南昌地区风沙化土地风沙地貌发育规模和风沙活动预测[J]. *地理研究*, 1991, 10 (3): 51-58. [ZOU Xueyong. The forecasts of desert landform scale and shifting sand action degrees in Nanchang area [J]. *Geographical Research*, 1991, 10 (3): 51-58.]
- [20] 张克旗, 吴中海, 吕同艳, 等. 光释光测年法: 综述及进展[J]. *地质通报*, 2015, 34 (1): 183-203. [ZHANG Keqi, WU Zhonghai, LV Tongyan, et al. Review and progress of OSL dating [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34 (1): 183-203.]
- [21] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Paleoceanography*, 20(1): PA1003.
- [22] 王海燕, 庞奖励, 黄春长, 等. 鄱西县虞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. [WANG Haiyan, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, 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.]
- [23] 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. [FENG Liwei, WU Kening, ZHA Lisi, et al. Chroma characteristics and its climatic significance of Yangshao culture relic [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24 (5): 892-897.]
- [24] 顾磊. 基于色度学的灵台剖面晚新生代地层序列研究[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2011. [GU Lei. A study on Lingtai section of late cenozoic era based on colorimetry[D]. Master Dissertation of Lanzhou University, 2011.]
- [25] 杜兰, 李志文, 杜丁丁, 等. 烟台芝罘黄土剖面末次间冰期沉积物色度特征及其古环境意义[J]. *热带地理*, 2021, 41 (2): 423-430. [DU Lan, LI Zhiwen, DU Dingding, et al. Chromatic characteristics of sediments in Zhifu loess section of Yantai during the last Interglacial period and its paleoenvironmental significance [J]. *Tropical Geography*, 2021, 41 (2): 423-430.]
- [26] 杨丹, 庞奖励, 周亚利, 等. 汉中盆地王村黄土-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. [YANG Dan, PANG Jiangli, ZHOU Yali, 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.]
- [27] 刘荔昀, 鲁瑞洁, 刘小糠. 风成沉积物色度记录的毛乌素沙漠全新世以来气候变化[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 83-89. [LIU Liyun, LU Ruijie, LIU Xiaokang. Climate change in the Mu us desert since Holocene based on soil chromaticity [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(6): 83-89.]
- [28] 李杨, 方晶, 潘隆, 等. 沉积物色度在古环境重建中的应用[J]. *气象科技进展*, 2018, 8(6): 22-27. [LI Yang, FANG Jing, PAN Long, et al. Application of sediment chromaticity in paleo-environment reconstruction [J]. *Advances in meteorological Science and Technology*, 2018, 8(6): 22-27.]
- [29] 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. [GAO Pengkun, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, 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.]
- [30] 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.
- [31] 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. [CHEN Jie, YANG Taibao, ZENG Biao, et al. Chroma characteristics and its paleoclimatic significance in Pamir Loess Section, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(2): 333-342.]
- [32] 韩洪军, 陈海涛, 孔凡彪, 等. 山东章丘黄土剖面色度研究[J]. *枣庄学院学报*, 2019, 36(5): 59-64. [HAN Hongjun, CHEN Haitao, KONG Fanbiao, et al. Study on the Chroma of Zhangqiu loess in Shandong Province [J]. *Journal of Zaozhuang University*, 2019, 36(5): 59-64.]
- [33] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. *中国科学: D 辑*, 1998, 41(6): 626-631. [LU Huayu, AN Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 1998, 41(6): 626-631.]
- [34] 安芷生, PORTER S, KUKLA G, 等. 最近13万年黄土高原季风变迁的磁化率证据[J]. *科学通报*, 1990, 35(7): 529-532. [AN Zhisheng, PORTER S, KUKLA G, et al. Magnetic susceptibility evidence for the 130000 year Loess Plateau monsoon variation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(7): 529-532.]