

杜兰, 李志文, 杜丁丁, 黎武标, 王志刚, 马泽源, 詹江振. 2021. 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. 热带地理, 41 (2): 423-430.

Du Lan, Li Zhiwen, Du Dingding, Li Wubiao, Wang Zhigang, Ma Zeyuan and Zhan Jiangzhen. 2021. Chromatic Characteristics of Sediments in Zhifu Loess Section of Yantai during the Last Interglacial Period and Its Paleoenvironmental Significance. Tropical Geography, 41 (2): 423-430.

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

杜 兰¹, 李志文^{1,2}, 杜丁丁¹, 黎武标¹, 王志刚¹, 马泽源¹, 詹江振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, 广东 佛山 528225)

摘 要: 以烟台市的芝罘岛风砂沉积剖面为研究对象, 分析色度特征, 并结合光释光测年探讨末次间冰期该地区的气候。结果表明: 1) 色度参数 L^* 均值为52.13, 在整个剖面表现为黄土层 L^* 高于古土壤层, 指示寒冷干燥的气候条件。 a^* 、 b^* 、 C^* 、 h^* 均值依次为11.18、25.03、27.43和0.421, 其值均表现为古土壤层高于黄土层, 指示温暖湿润的气候条件。2) 各色度参数在剖面垂直方向上呈现峰谷交替的3个旋回, 反映该地区末次间冰期的气候变化经历由夏季风占主导, 气候暖湿, 降水较多(MIS5e: 118.5—124.9 ka)→夏季风势力减弱, 冬季风增强, 气温下降(MIS5d: 105.2—118.5 ka)→夏季风影响明显, 气候湿热(MIS5c: 94.7—105.2 ka)→冬季风增强, 气温下降(MIS5b: 83.4—94.7 ka)→开始转向暖湿(MIS5a: 70.18—83.4 ka)→再转向干冷(MIS4: 62.85—70.18 ka)的冷暖震荡。

关键词: 芝罘剖面; 末次间冰期; 黄土—古土壤序列; 色度参数; 古气候

中图分类号: S151; P532

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2021)02-0423-08

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003328

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



颜色是土壤显著的特征之一(柯夫达, 1998), 是揭示土壤沉积环境和一定时期内气候变化的重要指标。以CIELAB表色系统(刘荔昀等, 2019)定量描述颜色, 能够有效避免人的视觉系统对色彩感知的复杂影响, 可以更加直观地用于地层对比(冯力威等, 2015)、矿物质含量(孔立, 2010)和环境变化(丁敏等, 2010; 刘荔昀等, 2019)等研究。已有工作表明, 色度变化可以解释物质来源和古气候环境的变化(杨丹等, 2018), 可用于揭示冰期—间冰期旋回下气候与环境的周期性变化特征。在中国北方, 分布于黄土高原的黄土沉积因分布广、连续性好、厚度大和环境信息完善等特征, 与深海氧同位素和极地冰芯记录并列为第四纪研究三大载体之一(刘东生, 2009)。山东半岛北部亦

存在许多黄土—古土壤序列, 前人或从粒度(丁新潮等, 2016)、地球化学元素(李志文等, 2015)、磁化率(贾广菊, 2017)等方面探讨了沉积特征及其古环境意义, 揭示气候环境具有明显的气候旋回变化; 或探讨其物质来源, 认为其主要来自黄河下游平原和渤海湾大陆架暴露的松散沉积物, 具有近源性(郑力, 2018; 林旭, 2020), 这些工作为深入了解该区域晚第四纪环境的基本特征及其演变规律奠定基础。山东半岛北部的芝罘岛是陆连岛, 岛内黄土沉积受陆地与海洋的双重影响, 具有区域性特点, 能够代表山东半岛北部沿海地区的黄土特征(牛洪燕等, 2010)。色度作为揭示沉积物特征及其环境演化规律的重要指标, 在芝罘地区的适用性尚不明确。因此, 本文以山东省烟台市芝罘剖面为研

收稿日期: 2020-07-16; **修回日期:** 2020-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201006, 41571007); 核资源与环境部共建国家重点实验室培育基地(东华理工大学)开放基金项目(NRE1507)

作者简介: 杜兰(1995—), 女, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为第四纪环境演变研究, (E-mail) dulanygx@163.com;

通信作者: 李志文(1982—), 男, 湖南湘潭人, 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。

研究对象,测量色度指标 L^* 、 a^* 、 b^* ,探讨色度的气候意义和变化规律,并与朝那黄土磁化率、深海氧同位素曲线变化、色饱和度和色调角对比分析,据此重建末次间冰期—冰期旋回的气候变化特征。

1 研究区概况与剖面描述

1.1 研究区概况

芝罘岛位于山东半岛北部烟台市城郊,属于陆连岛。东西长9.2 km,南北宽1.5 km,面积约为10 km²。芝罘山位于岛屿中部,主峰海拔为295 m,海拔平缓向周围降低。地势地貌上朝海面一侧较为陡峭,坡度在45°以上,平均坡度约为70°,最陡峭处为与地面垂直的悬崖;朝陆面较为平缓,坡度为14°~40°,接近地面处为平缓的堆积层,坡度在10°以下。该地属暖温带季风气候,年均温12.6℃,夏季炎热多雨,多偏南风,冬季潮湿阴冷,多偏北风。芝罘山南坡广泛分布着黄土—古土壤沉积,面积小且分布极为分散,散落于山谷及地形低洼处,多与风积、坡积洪积和残积等地貌混杂。

1.2 剖面位置与地层描述

芝罘剖面位于芝罘岛内西口村入口的低丘缓坡上(37°37′04″N, 121°21′44″E)(图1),剖面顶

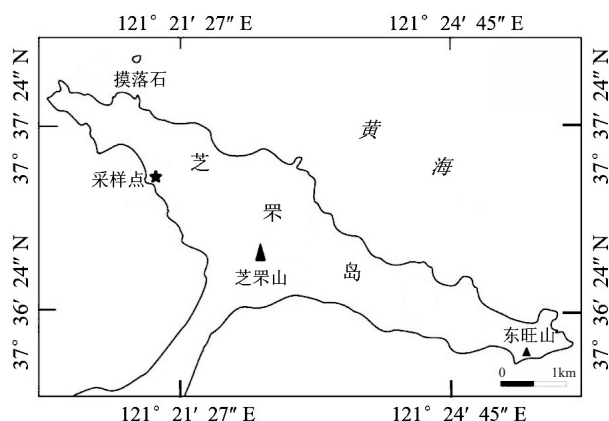


图1 研究区域和采样点位置

Fig.1 The study area and sampling site

部海拔约17 m,出露厚度约6 m。为减少动植物残体和人为活动的影响,刨去顶部混杂堆积的耕作层,选取70~496 cm深度的地层为研究对象,根据土壤颜色、质地和地层接触关系,将该地层序列分为6个层段,每隔2 cm间距连续采集213个样品用于色度分析,采集6个OSL样品用于年代框架构建。剖面上的地层划分和地层特征描述见表1。

表1 烟台市芝罘剖面地层特征描述

Table 1 Description of stratigraphic characteristics of Zhifu section in Yantai city

地层分层	厚度/cm	地层特征
ZF3	56	砂黄土—黄土层,褐色,含黏土的极细砂—中砂质粉砂,无明显层理,较紧实。
ZF4	68	古土壤层,红褐色,含极细砂的黏土质粉砂,有较多的黑色铁锰胶膜,偶见砾石。
ZF5	56	黄土层,黄土赭色,含黏土的极细砂质粉砂,偶见铁锰胶膜垂直分布。
ZF6	66	古土壤层,亮棕色,含极细砂的黏土质粉砂,紧实。
ZF7	52	黄土层,暗棕色,含黏土的极细砂质粉砂,含少量铁锰斑点,紧实。
ZF8	124	古土壤层,棕色,含极细砂的黏土质粉砂,含较多铁锰斑点,砾石层相间分布,紧实,未见底。

2 实验方法与结果

2.1 年代测试方法与结果

芝罘剖面地层属于风成沉积,分别在ZF3顶、ZF3底、ZF4底、ZF6顶、ZF8顶和ZF8底采集OSL测年样品以构建年代学框架(图2),年代测试结果和参数见文献(黎武标等,2019)。剖面中,ZF8底部的测年结果是124.9±9.7 ka, ZF3底部的测年结果是70.18±9.67 ka,分别与深海氧同位素末次间冰期的开始时间128 ka和结束时间75 ka基本接近。因此认为芝罘剖面的ZF4—ZF8层位属于末次间冰期沉积。ZF3顶部测年结果为62.85±6.94 ka, ZF3则属于末次冰期早冰阶的沉积。

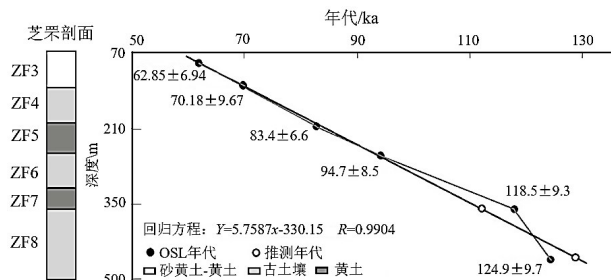


图2 芝罘剖面末次间冰期—末次冰期的地层序列与深度—年代框架(黎武标等,2019)

Fig. 2 Stratigraphic sequence and depth-age framework of Zhifu section from last interglacial to last glacial

2.2 色度测试方法与结果

CIELAB表色系统通常选用 L^* 、 a^* 、 b^* 描述任何均匀连续的空间,其中 L^* 表示亮度,介于黑(0)

和白（100）之间； a^* 表示红度，介于红（+60）和绿（-60）之间； b^* 代表黄度，介于黄（+60）和蓝（-60）之间（李越等，2014）。色度实验使用国产研特YT-ACM全自动色度仪，在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室。具体方法为：1）将烘箱中低温烘干的样品研磨至200目以下；2）使用标准校正白板对仪器进行颜色系统校正，称取样品15 g左右放在色度仪标准校正白板上，压平、压实待

测；3）同一样品在不同区域测量3次，然后取其 L^* 、 a^* 、 b^* 平均值。

C^* 表示饱和度值， $C^*=\sqrt{a^{*2}+b^{*2}}$ 指示颜色的鲜艳程度； h^* 表示色调角度值的柱形坐标， $h^*=\arctan(a^*/b^*)$ ，表示色相（顾磊，2011）。 C^* 、 h^* 可以作为色度研究的补充，有助于探讨不同时段内色饱和度值和色调角的变化趋势。色度参数结果及色饱和度、色调角的结果见表2所示。

表2 芝罘剖面各层位色度参数基本统计数据

Table 2 Basic statistical data of chromaticity parameters of each horizon in the Zhifu profile

色度参数		层位						均值
		ZF3	ZF4	ZF5	ZF6	ZF7	ZF8	
L^*	均值	53.67	50.89	52.59	51.99	53.19	51.55	52.31
	范围	52.07~55.37	46.43~53.69	47.20~54.45	49.72~54.30	50.37~54.73	49.13~53.50	
a^*	均值	11.56	12.31	11.49	10.86	10.44	10.44	11.18
	范围	9.67~12.6	10.03~13.94	9.99~13.11	9.90~12.27	9.44~12.75	9.65~13.29	
b^*	均值	25.55	26.20	25.47	24.58	24.11	24.25	25.03
	范围	23.38~26.42	23.57~27.11	23.44~25.61	23.44~25.93	23.03~26.65	22.93~27.05	
a^*/b^*	均值	0.450	0.470	0.450	0.440	0.430	0.44	0.445
	范围	0.414~0.477	0.426~0.525	0.426~0.489	0.421~0.473	0.408~0.487	0.422~0.491	
C^*	均值	28.05	28.94	27.95	26.94	26.12	26.58	27.43
	范围	25.30~29.27	25.62~30.39	25.48~29.83	25.49~28.69	24.92~28.12	25.32~30.14	
h^*	均值	0.424	0.439	0.424	0.416	0.406	0.416	0.421
	范围	0.392~0.445	0.402~0.483	0.403~0.455	0.397~0.442	0.387~0.428	0.398~0.457	

从表2可以看出， L^* 数值在各层位呈现出高低变化，整体表现为黄土层高于古土壤层，黄土层均值53.15，变化范围为47.2~55.37；古土壤层均值51.48，变化范围为46.43~54.3。 a^* 数值整体上呈现出古土壤层高于黄土层，古土壤层均值12.31，变化范围为9.65~13.94，黄土层均值11.16，变化范围为9.44~13.11。 b^* 数值表现为古土壤层高于黄土层，古土壤层均值为25.01，变化范围为22.93~27.11，黄土层均值24.79，变化范围为23.03~26.65。 a^*/b^* 数值表现为古土壤层高于黄土层，古土壤层均值0.450，变化范围为0.421~0.525，黄土层均值0.443，变化范围为0.408~0.489。 C^* 和 h^* 数值的变化规律与 a^* 、 b^* 的变化规律基本吻合，亦表现为整体上古土壤层高于黄土层， C^* 古土壤层均值27.49，变化范围是25.32~30.39，黄土层均值是27.37，变化范围是24.92~29.27。 h^* 古土壤层均值为0.424，变化范围是0.397~0.483，黄土层均值是0.418，变化范围是0.387~0.455。

3 分析与讨论

3.1 色度指标的相关性分析

CIELAB（1976）表色系统是立体的颜色空间，

不同颜色坐标分量之间会相互影响。因此，对 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 和 h^* 进行了相关性分析，表3显示： a^* 、 b^* 变化对 L^* 的影响程度很大： L^* 和 a^* 呈明显的负相关关系，相关系数 $r=-0.502$ ， L^* 随着 a^* 的增大而明显减小，红度 a^* 受控于铁氧化物含量的变化（Baumann et al., 2016），由此可知铁氧化物含量的变化可能对该区黄土的 L^* 产生明显影响； L^* 与 b^* 也呈负相关关系，相关系数 $r=-0.348$ ， L^* 随 b^* 的增大而降低， a^* 、 b^* 成为影响 L^* 的主要因素，这可能与影响 a^* 、 b^* 的物质相对含量有关。 a^* 与 b^* 相关系数高达0.963，相关性极为显著。 C^* 、 h^* 分别与 a^* 、 b^* 呈现高度正相关关系，变化趋势具有很好的一致性。而亮度 L^* 与色饱和度和 C^* 相关性较弱，相关系数仅为-0.395。

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

Table 3 Correlation analysis between chroma parameters L^* , a^* , b^* , color saturation C^* and hue angle h^*

色度参数	L^*	a^*	b^*	C^*	h^*
L^*	1				
a^*	-0.502	1			
b^*	-0.348	0.963	1		
C^*	-0.395	0.981	0.997	1	
h^*	-0.822	0.967	0.865	0.901	1

3.2 色度参数的古环境意义及影响因素

土壤沉积过程中,不同沉积环境与气候条件对土壤颜色的影响不同。 L^* 、 a^* 、 b^* 受多种因素的影响,其变化特征与沉积物性状及矿物组成、沉积环境的冷暖变迁、冬夏季风的强弱变化密切相关。

L^* (亮度)指土壤的明暗程度,主要受土壤的有机质含量、湿度、粗糙度和矿物组成等多种因素影响,测试前将样品烘干与研磨已将湿度与粗糙度对 L^* 的影响降至最小。陈一萌等(2006)研究表明

土壤有机质是导致土壤颜色变暗的最主要因素。而古土壤一般被认为形成于气候温暖时期,降雨量较多,亮度值可以推断区域降水量的多少和植被发育情况(冯力威等,2015)。由图3可知,芝罘剖面中 L^* 值变化波动较大,变化范围为46.43~55.37(平均值为52.31),变化幅度为19%。在各个地层中也有明显的差异,整体表现为ZF3、ZF5、ZF7(黄土层)高于ZF4、ZF6、ZF8(古土壤层),反映了较为寒冷干燥的气候条件。

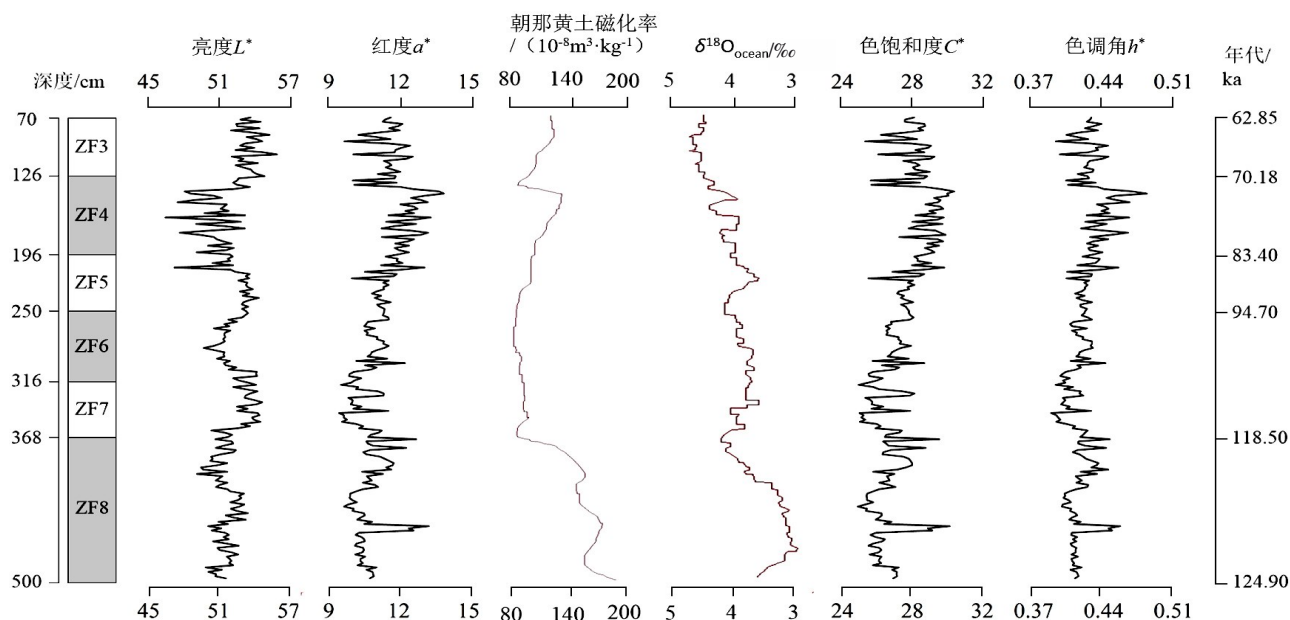


图3 芝罘剖面色度参数 L^* 、 a^* 、 b^* 与色饱和度 C^* 、色调角 h^* 的垂直变化

Fig.3 Vertical changes of chromaticity parameters L^* , a^* , b^* , color saturation C^* and hue angle h^* in the Zhifu section

a^* 反映沉积物在特定条件下的颜色变化,已有研究表明,在排除水分影响的情况下,导致黄土古土壤颜色变化的主要根源是铁氧化物,特别是赤铁矿和针铁矿的含量变化(陕西师范大学地理系,1988)。红度值高,反映这一时期气温升高、气候暖湿,强烈的风化成壤作用使大量易淋溶及易分解的矿物和组分发生淋失,而黄土中的Fe作为一种不易迁移的元素往往难以发生明显的迁移,以铁氧化物(如赤铁矿、针铁矿、磁铁矿等)的形式在黄土中发生累积,进而使得黄土的颜色发生变化,成为影响 a^* 、 b^* 变化的主因。剖面中 a^* 值的变化范围为9.44~13.94(平均值为11.18),变化幅度为48%。不同地层其 a^* 值也有较大差异,ZF4、ZF6、ZF8(古土壤层)呈现高值,均值为12.31;而ZF3、ZF5、ZF7(黄土层)呈现相对低值。反映了古土壤

层为气温升高、气候暖湿的气候条件。 a^* 和 b^* 的相关系数达到0.963(见表3),说明引起 a^* 和 b^* 变化的铁氧化物可能相同,并且受控于相似的气候条件。

b^* 主要与黄土—古土壤的针铁矿质量分数有关(陕西师范大学地理系,1988),温暖湿润的环境条件有利于针铁矿的形成。芝罘岛属于温带季风气候,因此降水是影响 b^* 变化的主要因素之一。杨胜利等(2001)指出 b^* 值随气温升高和降水增加呈线性增加,在气候较为温暖湿润的间冰期或间冰阶,古土壤发育,黄度值高,除形成常见的针铁矿以外,还可能生成黄铁矿、沼铁矿、褐铁矿等其他铁氧化物。剖面中 b^* 值的变化范围是介于22.93~27.11,均值是25.03,变化幅度为18%。且不同地层单元的变化趋势与 a^* 相似,表现为ZF4、ZF6、ZF8(即古土壤层)呈现高值,平均为25.01,ZF3、

ZF5、ZF7(黄土层)表现为低值,平均值为24.79。 a^*/b^* 的比值在剖面中随黄土—古土壤地层呈现出有规律的变化, a^*/b^* 值随深度的变化趋势与 a^* 相似。其变化范围为0.408~0.525,变化幅度达到28.68%,平均为0.445。其中古土壤层ZF4中 a^*/b^* 值最高,平均为0.47;黄土层各单元(ZF3、ZF5、ZF7)则呈现相对的低值,上层黄土层ZF5的 a^*/b^* 值平均为0.45。下层黄土层ZF7 a^*/b^* 的值较小,平均为0.43。

C^* 、 h^* 指标与色度参数 L^* 、 a^* 、 b^* 对应关系良好,具有一定的相关性。由图3不难看出, C^* 、 h^* 与 a^* 、 b^* 变化趋势几乎一致,由公式 $C^*=\sqrt{a^{*2}+b^{*2}}$, $h^*=\arctan(a^*/b^*)$,可将红度和黄度的组合理解为平面坐标,而将色饱和度和色调角理解为极坐标,继而可知角度越大土壤颜色越黄,角度越小土壤颜色越红,中间过渡的范围属于橙色(顾磊,2011)。古土壤层的色调角值较黄土层高,古土壤层铁氧化物累积成壤强度较高,土壤多呈鲜艳的红色,反映温暖湿润的气候。古土壤在此区域内颜色偏黄,而黄土颜色属于橙色偏红。在描述黄土颜色时,要结合色度 L^* 、 a^* 、 b^* 以及饱和度和色调角等共同描述,更接近于实际情况。

4 色度参数与气候代用指标揭示的古气候变化

根据芝罘剖面色度参数的变化情况,并将其与深海氧同位素(Grootes et al., 1993)、朝那黄土磁化率变化(王千锁等,2015)进行对比,探讨研究区的气候变化特征与波动情况(图4)。由图4可知,芝罘剖面黄土—古土壤序列记录了末次间冰期—末次冰期的多个气候冷暖旋回,具体描述如下:

MIS4: 为地层ZF3(见图4),深度70~126 cm,年代62.85—70.18 ka,属于MIS4中早期。 L^* 值高于剖面各层段平均值, a^* 、色饱和度 C^* 、色调角 h^* 平均值为低值(见表2),对应于同期朝那黄土磁化率的谷值和格陵兰冰芯氧同位素曲线的低谷,反映该阶段气温较低。黄渤海地区其时为末次冰期早期海退期(60~70 ka)(刘厚敏等,1987)。根据前人研究结果,亮度值低说明植被生长茂盛,有机质积累多(冯力威等,2015),而红度值高反映铁氧化物含量高,土壤成壤作用强,古土壤发育(石培宏等,2012)。据此认为,ZF3层段较高的亮度值和低红度值、低色饱和度色调角值说明该层沉积处于黄土广泛发育的时期,属于冬季风主导下的干

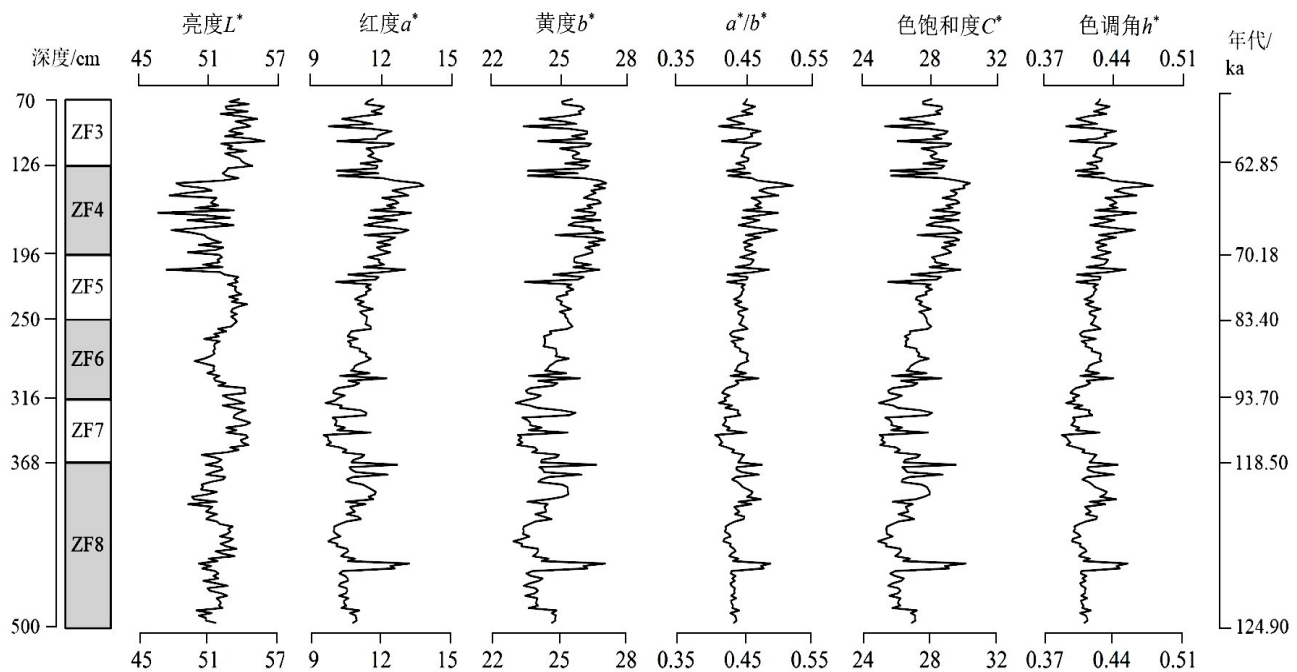


图4 芝罘剖面亮度 L^* 、红度 a^* 、色饱和度 C^* 、色调角 h^* 与气候代用指标朝那黄土磁化率(王千锁等,2015)和深海氧同位素(Grootes et al., 1993)的比较

Fig. 4 Comparison of brightness L^* , redness a^* , color saturation C^* and hue angle h^* at the Zhifu section with climatic proxy index magnetic susceptibility of Chaona loess (Wang et al., 2015) and deep-sea oxygen isotope (Grootes et al., 1993)

冷气候。

MIS5a: 为地层 ZF4, 深度 126~194 cm, 年代 70.18—83.4 ka。L*值小于全剖面平均值, a*值、色饱和度 C*、色调角 h*平均值相对全层较高 (见表 2)。其时朝那黄土的磁化率明显增加, 也对应于格陵兰冰芯氧同位素曲线的峰值, 指示气温升高, 夏季风增强, 风化成壤作用增强。该时期的黄渤海地区为海侵时期 (刘厚敏 等, 1987)。据此认为, ZF4 层段发育的 MIS5a 时期的温度升高, 夏季风增强, 冬季风减弱, 导致 L*值降低, a*、b*、C*、h*值升高。

MIS5b: 为地层 ZF5, 深度 194~250 cm, 年代 83.4—94.7 ka。L*值大于全剖面平均值, a*、色饱和度 C*、色调角 h*均值处于低值 (见表 2), 其时朝那黄土磁化率降低 (见图 4), 同时也对应于格陵兰冰芯氧同位素曲线的谷值, 说明该时期气温降低, 夏季风减弱, 风化成壤作用降低。该时期的黄渤海地区为海退时期 (刘厚敏 等, 1987)。据此认为, ZF5 层段发育的 MIS5b 时期的温度较低, 夏季风衰弱, 冬季风增强, 导致 L*值升高, a*、b*、C*、h*降低。

MIS5c: 为地层 ZF6, 深度 250~316 cm, 年代 94.7—105.2 ka。L*小于全剖面平均值, a*、色饱和度 C*、色调角 h*均值处于相对高值 (见表 2)。其时朝那黄土磁化率升高 (见图 4), 也对应于格陵兰冰芯氧同位素曲线的高值。说明该时期气候回暖, 夏季风增强, 风化成壤作用增强。该时期的黄渤海地区为海退时期 (刘厚敏 等, 1987)。据此认为, ZF6 层段发育的 MIS5c 时期的温度升高, 夏季风增强, 冬季风减弱, 导致 L*值降低, a*、b*、C*、h*值升高。

MIS5d: 为地层 ZF7, 深度 316~368 cm, 年代 105.2—118.5 ka。L*值大于全剖面平均值, a*值、色饱和度 C*、色调角 h*平均值处于低值 (见表 2)。其时朝那黄土磁化率降低 (见图 4), 也对应于格陵兰冰芯氧同位素曲线的低谷。说明该时期气温较低, 夏季风减弱, 风化成壤作用降低。该时期的黄渤海地区为海侵时期 (刘厚敏 等, 1987)。据此认为, ZF5 层段发育的 MIS5b 时期的温度较低, 夏季风衰弱, 冬季风增强, 导致 L*值升高, a*、b*、C*、h*值降低。

MIS5e: 为地层 ZF8, 深度 368~496 cm, 年代 118.5—124.9 ka。L*值小于全剖面平均值, a*值、色饱和度 C*、色调角 h*均值较高 (见表 2)。其时朝那

黄土磁化率为全剖面最高值, 也对应于格陵兰冰芯氧同位素曲线的高值。说明该时期气候回暖, 夏季风最强, 风化成壤作用最强。该时期的黄渤海地区为海侵时期 (刘厚敏 等, 1987)。据此认为, ZF8 层段发育的 MIS5e 时期的温度升高, 夏季风增强, 冬季风减弱。导致该层段 L*值最低, a*、b*、C*、h*值高。

5 结论

通过 OSL 年代测定以及对色度参数在剖面变化特征的分析, 并与朝那黄土磁化率变化特征和深海氧同位素变化对比分析, 得到的主要结论有:

1) 色度参数结果表明, L*均值表现为黄土层高于古土壤层, 而 a*、b*、C*和 h*均表现为古土壤层高于黄土层。相关性分析显示 L*与 a*、b*呈显著的负相关关系, a*与 b*呈高度正相关; a*、b*、a*/b*、C*、h*随深度变化趋势具有很好的一致性, 其高值指示温暖湿润的气候条件。

2) 各色度参数在剖面垂直方向上呈现出波峰、波谷交替的 3 个旋回, 其变化趋势反映了 MIS5e、MIS5c 和 MIS5a 为温暖期; MIS5d、MIS5b 和 MIS4 为寒冷期, 在轨道尺度上经历了 3 次气候冷暖振荡。这些冷暖阶段与朝那黄土磁化率指示的夏季风强弱、深海氧同位素变化具有较高的同步性。

参考文献 (References):

- Baumann K, Schoning I and Schrupf M. 2016. Rapid Assessment of Soil Organic Matter: Soil Color Analysis and Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Geoderma*, 278: 49-57.
- 陈一萌, 陈兴盛, 宫辉力, 魏明建, 李小娟. 2006. 土壤颜色——一个可靠的气候变化代用指标. *干旱区地理*, (3): 309-313.
- [Chen Yimeng, Chen Xingsheng, Gong Huili, Wei Mingjian and Li Xiaojuan. 2006. Soil Color—A Reliable Alternative Index of Climate Change. *Arid Area Geography*, (3): 309-313.]
- 丁新潮, 曹文, 徐树建, 倪志超. 2016. 山东砣矶岛大口北黄土剖面的沉积特征及其古环境意义. *干旱区资源与环境*, (10): 195-200. [Ding Xinchao, Cao Wen, Xu Shujian and Ni Zhichao. 2016. Sedimentary Characteristics and Paleoenvironmental Significance of Dakoubei Loess Section in Yunji Island, Shandong Province. *Resource and Environment in Arid Area*, (10): 195-200.]
- 丁敏, 庞奖励, 黄春长, 彭淑贞, 杨炯, 陈栋栋. 2010. 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. *陕西师范大学学报 (自然科学版)*, (5): 98-103. [Ding Min, Pang Jiangli, Huang Chunchang, Peng Shuzhen, Yang Jiong and Chen Dongdong. 2010. Chromatic Characteristics and Climatic Significance of Holocene Loess-Paleosol Series: A Case

- Study of Liangcun Section in Western Guanzhong Plain. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, (5): 98-103.]
- 冯力威, 吴克宁, 查理思, 鞠兵, 王文静. 2015. 仰韶文化遗址区古土壤色度特征及其气候意义. *生态环境学报*, (5): 168-173. [Feng Liwei, Wu Kening, Cha Lisi, Ju Bing and Wang Wenjing. 2015. Chromatic Characteristics of Paleosol in Yangshao Cultural Relics Area and Its Climatic Significance. *Ecology and Environmental Sciences*, (5): 168-173.]
- Grootes P M, Stuiver M and White J W C. 1993. Comparison of Oxygen Isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland Ice Cores. *Nature*, 366: 552-554.
- 顾磊. 2011. 基于色度学的灵台剖面晚新生代地层序列研究. 兰州: 兰州大学. [Gu Lei. 2011. Study on Late Cenozoic Stratigraphic Sequence of Lingtai Section Based on Colorimetry. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 贾广菊. 2017. 山东大黑山岛 BZ 孔黄土沉积特征及其环境意义. 济南: 山东师范大学. [Jia Guangju. 2017. Sedimentary Characteristics and Environmental Significance of Loess in BZ Hole Daheishan Island Shandong Province. Jinan: Shandong Normal University.]
- 柯夫达. 1998. 土壤学原理. 北京: 科学出版社. [Ke Fuda. 1998. *Soil Principle*. Beijing: Science Press.]
- 孔立. 2010. 六盘山群沉积物色度和粘土矿物测量及古气候意义. 兰州: 兰州大学. [Kong Li. 2010. Measurement of Sediment Chromaticity and Clay Minerals in Liupanshan Group and Its Paleoclimatic Significance. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 刘厚敏, 吴世迎, 王永吉. 1987. 黄海晚第四纪沉积. 北京: 海洋出版社. [Liu Houmin, Wu Shiying and Wang Yongji. 1987. *Late Quaternary Sedimentation of the Yellow Sea*. Beijing: Ocean Press.]
- 刘荔昀, 鲁瑞洁, 刘小楝. 2019. 风成沉积物色度记录的毛乌素沙漠全新世以来气候变化. *中国沙漠*, (6): 86-92. [Liu Liyun, Lu Ruijie and Liu Xiaokang. 2019. Climate Change of Maowusu Desert since Holocene Recorded by Aeolian Sediment Chromaticity. *Chinese Desert*, (6): 86-92.]
- 刘东生. 2009. 黄土与干旱环境. 合肥: 安徽科学技术出版社. [Liu Dongsheng. 2009. *Loess and Arid Environment*. Hefei: Anhui Science and Technology Press.]
- 李志文, 李保生, 孙丽, 王丰年. 2015. 柳沟剖面末次冰期层段 Rb/Sr 的不稳定变化及其揭示的气候特征. *热带地理*, 35 (4): 152-160. [Li Zhiwen, Li Baosheng, Sun Li and Wang Fengnian. 2015. Unstable Change of Rb/Sr in the Last Glacial Interval of Liukuang Section and Its Climatic Characteristics. *Tropical Geography*, 35(4): 152-160.]
- 李越, 宋友桂, 王千锁. 2014. 新疆昭苏黄土剖面色度变化特征及古气候意义. *地球环境学报*, (2): 26-34. [Li Yue, Song Yougui and Wang Qiansuo. 2014. Chroma Variation Characteristics and Paleoclimatic Significance of Zhaosu Loess Profile in Xinjiang. *Journal of Earth Environment*, (2): 26-34.]
- 黎武标, 李志文, 王志刚, 李子康. 2019. 山东烟台地区芝罘剖面粒度分维特征及其环境意义. *地球科学与环境学报*, (5): 92-103. [Li Wubiao, Li Zhiwen, Wang Zhigang and Li Zikang. 2019. Grain-Size Fractal Characteristics of Zhifu Section in Yantai Area, Shandong Province and Its Environmental Significance. *Journal of Geosciences and Environment*, (5): 92-103.]
- 林旭, 刘静, 吴中海, 刘维明, 李长安, 李志文, 王世梅, 刘海金, 陈济鑫. 2020. 末次冰期山东黄土物源研究: 来自碎屑锆石 U-Pb 年龄的约束. *地球科学*: 1-22[2021-01-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20201221.1809.002.html>. DOI: 10.3799/dqkx.2020.334. [Lin Xu, Liu Jing, Wu Zhonghai, Liu Weiming, Li Changan, Li Zhiwen, Wang Shimei, Liu Haijin and Chen Jixin. 2020. Study on Provenance of Loess in Shandong Province during the Last Glacial Period: Constraint from U-Pb Age of Detrital Zircon. *Earth Science*: 1-22[2021-01-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20201221.1809.002.html>. DOI: 10.3799/dqkx.2020.334.]
- 牛洪燕, 金秉福, 刘春暖, 钟军伟, 张照贵. 2010. 芝罘岛黄土状黄土的沉积特征与物源分析. *海洋地质与第四纪地质*, (1): 119-127. [Niu Hongyan, Jin Bingfu, Liu Chunnuan, Zhong Junwei and Zhang Zhaogui. 2010. Sedimentary Characteristics and Provenance Analysis of Loess-Like Loess in Zhifu Island. *Marine Geology and Quaternary Geology*, (1): 119-127.]
- 陕西师范大学地理系. 1988. 西安地理志. 西安: 陕西人民出版社. [Department of Geography, Shaanxi Normal University. 1988. *Geography of Xi'an*. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House.]
- 石培宏, 杨太保, 田庆春, 王建永. 2012. 靖远黄土—古土壤色度变化特征分析及古气候意义. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 48 (2): 15-23. [Shi Peihong, Yang Taibao, Tian Qiangchun and Wang Yongjian. 2012. Analysis of Chromaticity Change Characteristics of Loess-Paleosol in Jingyuan and Its Paleoclimatic Significance. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 48(2): 15-23.]
- 王千锁, 宋友桂, 李吉均, 赵志军, 荣培. 2015. 末次冰期—间冰期旋回朝那黄土颜色特征及古气候意义. *地理科学*, (11): 146-151. [Wang Qiansuo, Song Yougui, Li Jijun, Zhao Zhijun and Rong Pei. 2015. Color Characteristics and Paleoclimatic Significance of Chaona Loess in the Last Glacial-Interglacial Cycle. *Geographical Sciences*, (11): 146-151.]
- 杨丹, 庞奖励, 周亚利, 黄春长, 查小春, 张旭, 张文桐. 2018. 汉中盆地军王村黄土-古土壤剖面的色度特征及机理. *中山大学学报 (自然科学版)*, (1): 99-107. [Yang Dan, Pang Jiangli, Zhou Yali, Huang Chunchang, Cha Xiaochun, Zhang Xu and Zhang Wentong. 2018. Colorimetric Characteristics and Mechanism of Loess-Paleosol Profile in Junwang Village, Hanzhong Basin. *Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition)*, (1): 99-107.]
- 杨胜利, 方小敏, 李吉均, 安芷生, 陈诗越, 福泽仁之. 2001. 表土颜色和气候定性至半定量关系研究. *中国科学辑: 地球科学*, (S1): 179-185. [Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, An Zhisheng, Chen Shiyue and Fuze Renzhi. 2001. Study on Qualitative to Semi-Quantitative Relationship between Topsoil Color and Climate. *Chinese Scienceseries: Earth Science*, (S1): 179-185.]

郑力. 2018. 中国东部主要黄土分布区的 Sr-Nd 同位素物源示踪研究. 高校地质学报, (2): 102-106. [Zheng Li. 2018. Study on Sr-Nd Isotope Provenance Tracing in the Main Loess Distribution

Areas in Eastern China. *Geological Journal of China Universities*, (2): 102-106.]

Chromatic Characteristics of Sediments in Zhifu Loess Section of Yantai during the Last Interglacial Period and Its Paleoenvironmental Significance

Du Lan¹, Li Zhiwen^{1,2}, Du Dingding¹, Li Wubiao¹, Wang Zhigang¹, Ma Zeyuan¹ and Zhan Jiangzhen¹

(1. School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Environmental and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China)

Abstract: Color is a vital characteristic of soil. It is also an important index to reveal the sedimentary environment and climate change of soil in a certain period. A quantitative description of color by the CIELAB color system can effectively avoid the significant influence of the human visual system on color perception. Additionally, it can be more intuitively used in the study of stratigraphic correlation, mineral content, and environmental change, and can help in explaining the changes in material sources and paleoclimate environment and revealing the remarkable characteristics of climate change during periodic glacial and interglacial periods. There are several loess-paleosol sedimentary sequences in the north of the Shandong Peninsula that contain abundant paleoenvironmental information. This study considered a typical section in the Zhifu District of Yantai City as a research object to explore the climate change characteristics of the northern Shandong Peninsula during specific periods. A chronological framework was built by collecting samples, dividing strata, and optically-stimulated luminescence dating. Moreover, the chromaticity was measured, the characteristics of chromaticity changing with section depth was analyzed, and the climate characteristics and change law of the last interglacial period was discussed. The results showed that 1) the bottom age of the profile was 124.9 ka, while the top age was approximately 62.85 ka, indicating that the main body belongs to the last interglacial deposit. The stratigraphic age-depth framework was constructed based on the piecewise sedimentation rate interpolation method, with a significant correlation between age and depth. This indicates that the new and old relationships between stratigraphic age and sequence are consistent, with no sedimentary fault or stratigraphic inversion. The chromaticity parameter results showed that the average value of L^* was 52.13, which is higher in the loess layer than that of the paleosol layer; its high value indicated cold and dry climate conditions. The average values of a^* , b^* , C^* , and h^* were 11.18, 25.03, 27.43, and 0.421, respectively, indicating that the paleosol layer is higher than the loess layer; its high value indicated warm and humid climate conditions. A correlation analysis was carried out on the chromaticity parameters, indicating a significant correlation between L^* and a^* and between a^* and b^* , where a^* and b^* are controlled by the same substance and are the main factors affecting L^* . 2) The following results were obtained by comparing the color saturation, hue angle, magnetic susceptibility of Chaona loess, and deep-sea oxygen isotopes. The chromaticity parameters showed three cycles of alternating peaks and valleys in the vertical direction of the profile. Their variation trend reflected the climate change characteristics of the last interglacial period, which was dominated by a summer monsoon, with a warm and humid climate, and more precipitation (MIS5e: 118.5–124.9 ka). Subsequently, the intensity of the summer monsoon wind weakened, the intensity of the winter monsoon wind increased, and the air temperature dropped (MIS5d: 105.2–118.5 ka), with the climate becoming hot and humid (MIS5c: 94.7–105.2 ka). The monsoon intensity increased, and the temperature dropped (MIS5b: 83.4–94.7 ka), becoming warm and humid (MIS5a: 70.18–83.4 ka) and finally dry and cold (MIS 4: 62.85–70.18 ka).

Keywords: Zhifu section; last interglacial period; loess-paleosol sequence; chroma parameter; paleoclimate