



青藏高原东部表层土壤色度的空间变化特征及其环境意义

陈梓炫, 杨胜利, 粟娅婷, 刘晓静, 陈慧, 周建涛, 李普爽, 杨军怀, 王树源, 夏敦胜

Spatial variation of surface soil color in the eastern Tibetan Plateau and its environmental significance

CHEN Zixuan, YANG Shengli, SU Yating, LIU Xiaojing, CHEN Hui, ZHOU Jiantao, LI Pushuang, YANG Junhuai, WANG Shuyuan, and XIA Dunsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022032103>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈梓炫, 杨胜利, 栗娅婷, 等. 青藏高原东部表层土壤色度的空间变化特征及其环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 171-180.
CHEN Zixuan, YANG Shengli, SU Yating, et al. Spatial variation of surface soil color in the eastern Tibetan Plateau and its environmental significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 171-180.

青藏高原东部表层土壤色度的空间变化特征及其环境意义

陈梓炫, 杨胜利, 栗娅婷, 刘晓静, 陈慧, 周建涛, 李普爽, 杨军怀, 王树源, 夏敦胜

兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要:认识青藏高原东部现代表土的色度特征及其空间分布,理解其与现代气候因子之间的联系,对于高原地区黄土-古环境重建和揭示第四纪环境变化历史具有重要意义。通过对研究区表层土壤色度的详细分析,对比现代气候资料,探讨了青藏高原东部表层土壤色度的空间变化特征及其环境意义。结果表明:①高原东部表土色度参数空间变化特征差异显著,表现为随纬度升高,土壤亮度呈先减小后增大的趋势,而红度和黄度则逐步减小;随经度的升高,黄度先增大后减小,而红度值逐步减小;红度和黄度整体随着海拔上升而呈先减小后升高的特征。这些变化特征和差异是表土色度对高原东部复杂地理环境和水土条件变化响应的结果。②在高原的干旱-半湿润区,土壤亮度对降水的响应敏感;红度和黄度对大尺度的温度变化响应较敏感,而较冷的环境下,红度对温度响应复杂,但与降水存在一定的联系。红度/黄度比值主要指示了气候控制下的赤铁矿和针铁矿的变化和竞争,对干旱-半湿润区域的降水变化响应较为敏感。青藏高原东部现代表土色度与气候密切相关,其空间变化特征一定程度上反映了该地区现代气候因子的空间变化;另一方面由于该区地形和气候复杂多变,部分色度指标与气候关系复杂,在重建青藏高原东部黄土古环境变化历史时需要谨慎。

关键词:表层土壤;色度;空间变化;环境变化;青藏高原东部

中图分类号:P534.63

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022032103

Spatial variation of surface soil color in the eastern Tibetan Plateau and its environmental significance

CHEN Zixuan, YANG Shengli, SU Yating, LIU Xiaojing, CHEN Hui, ZHOU Jiantao, LI Pushuang, YANG Junhui,

WANG Shuyuan, XIA Dunsheng

Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The color characteristics and spatial variation of surface soil in the eastern Tibetan Plateau (ETP) are important for understanding the relationship between soil color and modern climate factors and for reconstructing the Quaternary paleoclimatic environment. We analyzed in detail the spatial variation of surface soil color and its environmental significance. Results show that the spatial variation of surface soil color in the ETP is obvious. The soil brightness decreases first and then increases with latitude increase, and the redness and yellowness decrease with the latitude increase. In addition, the change in yellowness shows a parabolic curve from increase to decrease with longitude increase, and redness decreases with longitude increase. Both redness and yellowness decrease first and then slightly increase with altitude increase. The redness/yellowness ratio does not change significantly with latitude, but decreases with longitude increase, and increases with altitude. The spatial variation of soil color is resulted from the hydrothermal variation in local complicated arid semi-humid environment. In the study region of plateau, brightness decreases with precipitation increase within a certain precipitation range and is sensitive to precipitation. Redness and yellowness are sensitive to large-scale temperature changes. However, the response of redness to temperature is complex in a cold environment, which is related to precipitation. The redness/yellowness ratio indicates mainly the formations of hematite and goethite under special climate conditions, and the ratio is more sensitive to precipitation in arid and semi-humid areas than to temperature. The spatial variation in the color of surface soil reflects the spatial variation of regional climate factors under modern atmospheric circulation to a certain extent. However, due to

资助项目:国家自然科学基金项目“青藏高原东部风成黄土多技术源区示踪方法”(41877447);科技部第二次青藏高原综合考察研究项目“粉尘气溶胶及其气候环境效应”(2019QZKK0602)

作者简介:陈梓炫(1992—),男,博士生,主要从事环境磁学与第四纪环境变化研究, E-mail: chen19@lzu.edu.cn

通讯作者:杨胜利(1975—),男,博士,教授,主要从事黄土与环境变化研究, E-mail: shlyang@lzu.edu.cn

收稿日期:2022-03-21; 改回日期:2022-05-18. 文凤英编辑

the complexity of terrain and climate in the ETP, the relationship between color parameters and climate is complex. One should be careful in rebuilding the paleoenvironmental history from loess in the ETP.

Key words: surface soil; color; spatial variation; environmental significance; Eastern Tibetan Plateau

土壤颜色通常是环境变化和成壤过程综合作用的结果。颜色作为土壤最为直观的特征之一,其变化与氧化铁种类及含量、有机质、碳酸钙、土壤含水量等理化性质密切相关^[1-4],广泛应用于第四纪气候与环境变化历史的重建^[5-11]。在大空间尺度上,土壤类型和颜色是大气环流格局下气候要素对土壤性质制约作用的结果,其随着气候要素的空间变化而有规律地变化^[1-2]。

近年来,许多学者对不同地区的现代土壤和沉积物色度与气候因素之间的相关性开展了一系列研究^[5,12-17],揭示了土壤颜色与成壤强度和气候因素是密切相关的^[5,12-17]。我国大范围表土色度与气候因子的分析表明,土壤色度与降水和温度有良好的函数关系,可用于黄土古土壤序列的古降水和古温度历史的重建^[5]。黄土高原的土壤色度研究也发现黄土的红色(a^*)与纬度变化呈现线性相关,表明 a^* 可以作为黄土风化强度的有效指标^[7]。新疆天山地区现代地表的沉积物颜色分析表明,色度参数与降水量相关性较好,与温度相关性较差^[14]。从青海到新疆地区的现代沉积物颜色指标与降水量有较好的相关性,与温度相关性不显著^[15]。青藏高原现代代表土的色度特征分析表明不同地区降水的差异影响了表土的颜色变化^[16]。近年来,我国热带和亚热带地区的土壤色度研究也取得了重要进展。研究发现来自亚热带的土壤色度参数与气候因子存在相关性^[12-13,17-20],可用于指示气候的变化^[17-20]。此外,还有学者探讨了土壤颜色的垂直地带性变化,发现土壤色度与海拔和气候具有较好的相关关系^[13]。中国黄土-古土壤序列的研究表明土壤颜色的变化很好地记录了冰期-间冰期气候旋回变化特征,是季风气候变化的良好代用指标^[21-30],可以揭示轨道和千年尺度的气候变化^[5,8,28];并且可以在一定程度上弥补磁化率在古气候重建上的局限^[3,29]。

青藏高原东部地区是研究亚洲季风系统各个要素及其相互作用的关键区域^[31-34],其上广泛分布的黄土沉积是重建高原环境变化历史的良好地质载体^[34-36]。了解高原现代代表土色度特征与气候因素的关系可以为高原黄土的降水、湿度、温度等重建提供重要参考。然而,与其他地区相比^[12-17],由于其特殊的高海拔环境和复杂的地形,青藏高原东部地区尚未开展类似的研究,对该地区的土壤色度空间

变化特征及其与现代气候因子的关系缺乏明确的认知,影响了我们对青藏高原东部黄土古环境重建和季风演化的深入研究。

本研究通过系统采集青藏高原东部地区的大量表层土壤样品,开展详细的土壤颜色指标分析,明确青藏高原东部表土的颜色特征和空间变化;同时结合现代气象资料,探讨土壤颜色指标与气候要素的关系。研究结果对于认识高原地区土壤颜色与气候因素的关系,重建青藏高原黄土古环境历史及研究亚洲季风演化历史都具有重要意义。

1 研究区概况

青藏高原东部地区与黄土高原和四川盆地相接,是向青藏高原内部过渡的地带,大部分地区的海拔为3000~4500 m。该区地形复杂多变,是典型的高山峡谷区。植被类型以高山草甸和高山草原为主,西北部则有荒漠植被,东南部则以针叶林和阔叶林为主;土壤类型以黄壤、黄棕壤山地褐土、山地棕壤、亚高山/高山草甸土、高山寒漠土为主,成土母质有坡积残积物、洪积物、冲积物和风尘沉积物等^[37-39]。青藏高原东部地区是季风影响显著的区域之一。区域内干湿季明显,降水主要集中在夏季,年平均降水范围为300~900 mm,年平均温度范围为-6~15 ℃。

2 样品采集和实验分析

2.1 样品采集和气象数据

本文研究区的纬度范围为27°~37°N,经度范围为96°~104°E,海拔为1600~4700 m。由于母质颜色有很大的差异,为了尽量减少母质的差异和其他搬运动力带来的不确定性影响,在野外根据地貌部位、沉积特征、成壤特征选择以主体为风成沉积的土壤样品进行采集。通过多次野外考察,在青藏高原东部地区共采集了184个现代表层土壤样品(图1)。采样深度为5~10 cm,同时使用GPS记录样品的经纬度和海拔高度。采样位置均远离城镇、道路和人类活动密集的地区,尽量避免人为扰动的影响。

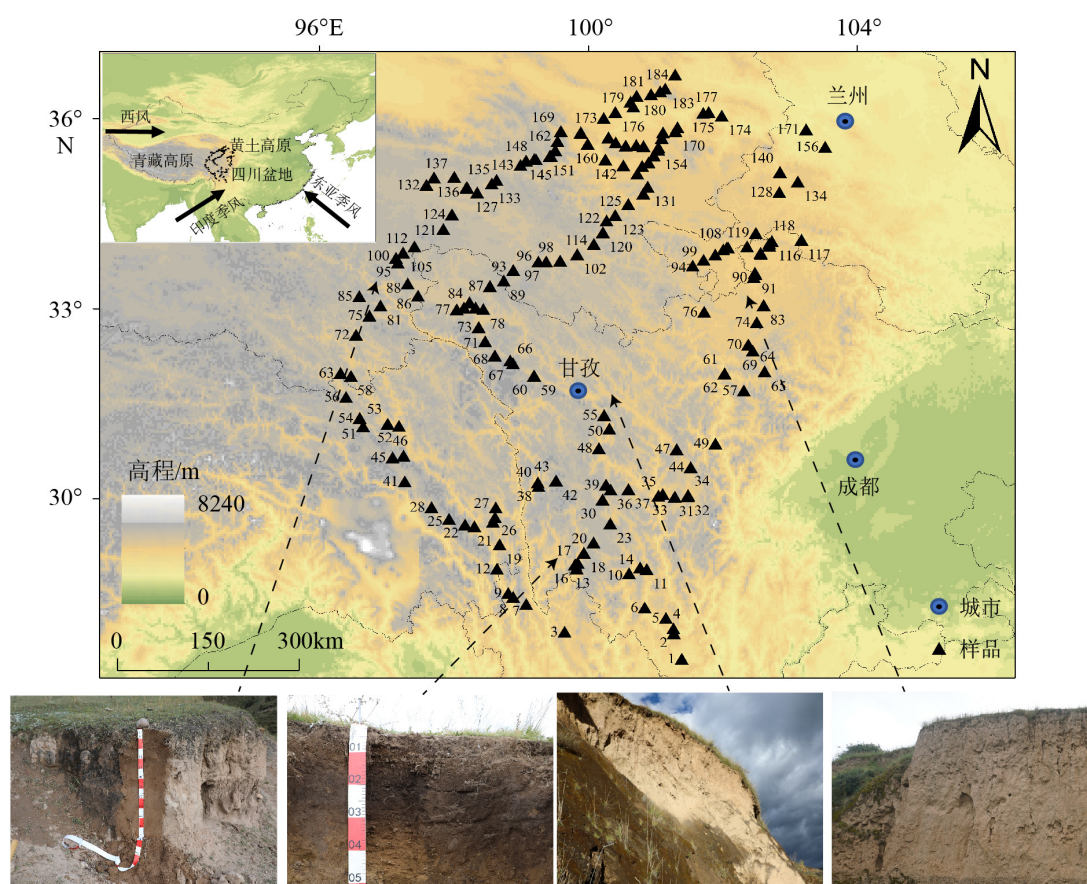


图 1 青藏高原东部表层土壤采样位置和风成沉积照片

Fig.1 Surface soil sampling and the aeolian deposits in the eastern Tibetan Plateau

本文使用的气象数据主要来源于 WorldClim 数据集(<http://www.worldclim.com/>), 空间分辨率为 1 km^2 , 版本为 2.1, 时间为 1970—2000 年。

2.2 土壤颜色测量

样品分析在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成, 使用日本柯尼卡美能达公司生产的 CM-700 d 型分光测色仪进行颜色测量。测试仪器的波长范围为 $400 \sim 700 \text{ nm}$, 分辨率为 10 nm , 测试口径为 8 mm , 色度值的标准差值小于 0.04。本文采用 CIE $L^*a^*b^*$ 表色系统来描述土壤的颜色变化^[40]。该表色系统主要是通过亮度 (L^*)、红度 (a^*) 和黄度 (b^*) 来定量描述样品的颜色变化。其中 L^* 代表亮度, 变化范围为 0 (黑) 和 100 (白) 之间; a^* 代表红度, 其值在 -60 (绿色) 和 60 (红色) 之间变化; b^* 代表黄度, 变化于 -60 (蓝色) 和 60 (黄色)。为了减少土壤粗糙度和土壤湿度对土壤颜色的影响, 全部样品在实验室进行风干并研磨至 200 目以下。测试过程中保证背景光源恒定。取适量样品放在载玻片上进行压实和压平, 使用已校正的仪器对样品 3 个表面平整区域进行测量, 得到 3 组 L^* 、 a^* 和 b^* 数据结果

并求其平均值。

3 结果

青藏高原东部的表层土壤色度测量结果表明 L^* 、 a^* 、 b^* 的变化范围较大 (表 1, 图 2)。 L^* 、 a^* 、 b^* 的变异系数分别为 15%、27%、20%, a^* 的变异系数最大, 说明样品中 a^* 的变化程度较大, 其次为 b^* 。表 1 和图 2 展示了青藏高原东部表层土壤色度参数随纬度、经度和海拔的变化特征。

3.1 土壤颜色沿纬度变化特征

对不同纬度范围内的样品 (表 1, 图 2a) 分析表明, 相比 $27^\circ \sim 30^\circ \text{N}$, $30^\circ \sim 34^\circ \text{N}$ 范围内的 L^* 、 a^* 和 b^* 平均值较低, $34^\circ \sim 37^\circ \text{N}$ 范围内的 a^* 、 b^* 和 a^*/b^* 的平均值要低于其他范围, 但 L^* 的平均值较高。在图 2a 中, 青藏高原东部表层土壤 L^* 整体随纬度呈现开口向上的抛物线特征, 即南部和北部 L^* 较高, 中部 L^* 较低。 a^* 和 b^* 的变化随纬度的升高呈现显著下降的趋势 (图 2b, 2c), 而 a^*/b^* 随纬度的变化趋势不明显, 波动较大 (图 2d)。

表 1 青藏高原东部表层土壤不同纬度、经度和海拔范围的颜色参数
Table 1 The changes in color of surface soil with latitude, longitude, and altitude ranges in the ETP

样品的位置	L^*			a^*			b^*			a^*/b^*		
	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值
全样	47.22	62.87	28.27	5.95	10.89	1.68	16.07	30.29	9.45	0.37	0.70	0.11
27°~30°N	49.19	62.87	37.78	7.30	10.89	4.54	18.94	26.91	26.91	0.39	0.70	0.24
30°~34°N	45.32	57.91	28.27	5.76	10.15	1.68	15.57	22.45	9.46	0.37	0.60	0.12
34°~37°N	48.61	62.04	34.79	5.60	7.96	2.60	15.41	19.93	10.17	0.36	0.47	0.19
96°~99°E	47.64	62.87	31.19	6.50	10.82	4.34	16.04	22.44	10.61	0.41	0.70	0.25
99°~101°E	47.69	61.88	34.59	6.10	10.10	2.60	16.51	25.02	10.96	0.37	0.47	0.19
101°~104°E	46.32	59.97	28.27	5.30	10.89	1.68	15.56	30.3	9.46	0.34	0.47	0.12
1500~3000 m	49.68	59.97	34.96	6.34	10.77	3.91	17.52	30.29	10.17	0.36	0.51	0.27
3000~4000 m	46.31	62.87	28.27	5.60	10.89	1.68	15.47	26.91	9.46	0.36	0.70	0.11
4000~4600 m	47.30	62.04	31.19	6.34	10.15	2.60	16.19	22.45	10.61	0.39	0.60	0.19

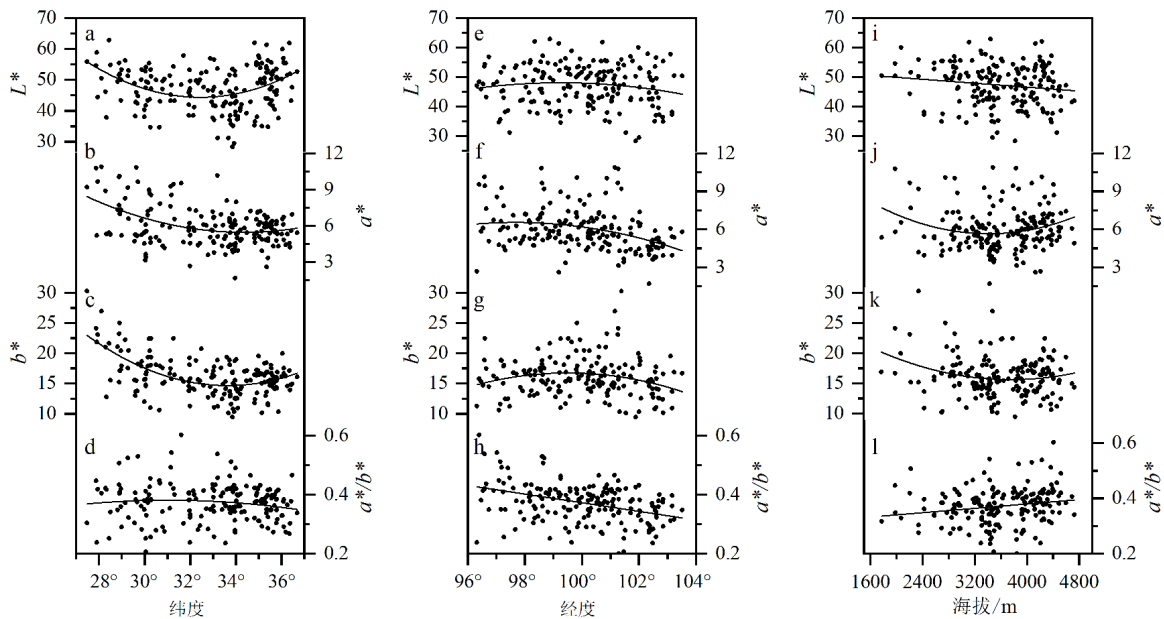


图 2 青藏高原东部表层土壤的颜色参数随纬度、经度和海拔的变化
h, i, l 使用线性函数进行拟合, 其余使用二阶函数进行拟合。

Fig.2 Variations of color parameters of surface soil with latitude, longitude and altitude in the ETP
h, i, and l are fitted with linear functions, and the rest are fitted with second-order functions.

3.2 土壤颜色沿经度变化特征

对不同经度范围(表 1, 图 2)内的样品分析表明, 相比 96°~99°E, 99°~101°E 的 L^* 平均值差异较小, b^* 平均值较高, 而 a^* 和 a^*/b^* 平均值较低。在 101°~104°E 范围内, L^* 、 a^* 、 b^* 和 a^*/b^* 平均值都要低于其他范围。在图 2e 中, 青藏高原东部表层土壤的 L^* 整体趋势随经度的变化不显著, a^* 大体随经度

的升高呈现逐渐降低的趋势(图 2f)。 b^* 随经度的升高呈现开口向下的抛物线特征(图 2g), 而 a^*/b^* 随经度的升高呈现较显著的降低趋势(图 2h)。

3.3 土壤颜色沿海拔变化特征

对不同海拔范围内的样品分析表明(表 1, 图 2), 相比 1500~3000 m 的海拔范围, 3000~4000 m 范围内 L^* 、 a^* 和 b^* 平均值较低, 但 a^*/b^* 波动幅度较

大。在 4000~4600 m 范围内 L^* 、 a^* 、 b^* 和 a^*/b^* 平均值较 3000~4000 m 范围高。在图 2i 中, 土壤的 L^* 大体随海拔的升高而呈现降低的趋势; a^* 和 b^* 都随着海拔的升高呈现显著降低后升高的趋势(图 2j, k), 但 a^* 在 3500 m 以上的增长趋势相对明显(图 2j); a^*/b^* 随着海拔的升高呈现显著升高的趋势(图 2l)。

4 讨论

4.1 高原东部土壤色度空间变化特征

青藏高原东部表土的土壤色度参数变化显著, 其中 L^* 、 a^* 、 b^* 和 a^*/b^* 的变化范围分别为 28.27~62.87、1.68~10.89、9.45~30.28、0.11~0.70。这些色度参数总体上随着纬度、经度和海拔表现出不同的变化特征。土壤亮度在不同的地区存在不同的空间分布特征^[13-16]。在中纬度的新疆地区, 沉积物的 L^* 在空间上表现出随纬度(41°~45°N)的增加而减少的特征^[14], 而青海到新疆地区的研究则表明 L^* 随纬度(35°~46°N)的增加而先增加后减少^[15]。在青海到西藏地区, L^* 的变化与东南向西北递减的降水分布存在密切联系^[16]。在青藏高原东部地区, 土壤 L^* 具有显著的纬向变化特征。 L^* 总体上先随纬度的增加而减少, 后随纬度的增加而增加, 呈现开口向上的抛物线特征(图 2a)。图 3 展示了土壤色度与气候因素的空间分布。在图 3a 和图 3b 中, L^* 的高值样品主要集中于研究区的最南部和最北部, 这与图 2 结果一致。较低的 L^* 主要分布于中等降水量的研究区中心区域。总体而言, L^* 的高值主要分布于高降水高温的区域和低降水区域, 中等降水区域以较低的 L^* 为主; L^* 从研究区中心区域向边缘呈现整体升高的现象。从西北部向东南部的一定区域内, L^* 的分布与降水梯度的变化有较高的一致性, 说明降水对 L^* 的变化有重要的影响。从 L^* 和年平均温度的分布来看, L^* 的高值在空间上与温度的分布一致性较差, 说明温度的分布对 L^* 的分布影响较小。海拔是影响土壤颜色变化的一个重要因素^[2, 13, 41]。云南地区^[13] 和武夷山^[41] 土壤颜色与海拔关系研究分析表明, 土壤亮度主要随着海拔的升高而降低。在青藏高原东部地区, 土壤 L^* 也呈现随海拔升高而降低的趋势(图 3a), 说明海拔较高的地区 L^* 较低, 而海拔较低的地区 L^* 则较高。

一般认为 a^* 对大范围空间尺度气候带明显的气候要素响应敏感, 具有显著的纬向变化特征^[7, 12-15, 17]。

在新疆地区, a^* 则随纬度的增加向北而减少^[14], 而青海到新疆地区的 a^* 则随纬度的增加而先增加后减少^[15]。在黄土高原, a^* 整体上随纬度的增高而降低^[7]。大范围的土壤色度研究表明 a^* 也随纬度(20°~65°N)的增加而降低^[17]。在青藏高原东部地区, a^* 具有一定的纬向和经向的变化特征, 总体随着纬度和经度的升高而降低(图 2b, f)。在图 3c 和 3d 中, a^* 的高值主要分布于研究区的西南部地区, 而低值则分布于东北部地区。总体上, a^* 的分布表现出从西南部向东北部逐渐降低, 与较大空间尺度的温度分布有很好的的一致性, 说明较大空间尺度的温度分布对 a^* 的分布具有重要的影响。然而, a^* 从南到北的变化与降水分布的一致性较差, 但从西北往西南则呈现 a^* 逐渐变大的趋势, 这与降水分布一致性相对较好。研究表明 b^* 的变化与 a^* 基本一致, 也具有明显的纬向变化特征^[14-15, 17]。在青藏高原东部地区, b^* 与 a^* 呈现相似的分布特征(图 3e, f), 其高值主要分布在温度较高的研究区西南部地区。总体而言, a^* 和 b^* 的空间分布与较大空间尺度的温度分布相对一致。 a^* 和 b^* 整体上随着海拔的升高呈现先减小后升高的趋势(图 2j, k), 中高海拔地区发育较低的 a^* 和 b^* , 与云南地区的土壤色度研究相似^[13]。

大范围的土壤色度研究表明 a^*/b^* 具有显著的纬向变化特征, 其值随着纬度的增加而呈现近似线性的降低^[10, 17]。青藏高原东部的表层土壤 a^*/b^* 的纬向变化相对复杂, 但经向变化特征和海拔变化特征相对明显。 a^*/b^* 随经度的增加而逐渐降低, 但随海拔的升高而升高。从 a^*/b^* 的空间分布来看(图 3g, h), a^*/b^* 的高值主要分布在研究区的西部和西南部地区, 低值主要分布在研究区东部。 a^*/b^* 整体从西北向研究区中心呈现逐渐升高的趋势, 这与降水逐步增高一致, 说明 a^*/b^* 的变化与降水的变化存在密切的联系; 但研究区中心往东则呈现明显的降低(图 3g)。与温度的分布相比, a^*/b^* 的整体分布与温度的分布有很大差异(图 3h), 说明温度对 a^*/b^* 的分布影响相对较小。

在中国东部地区, 由于季风降水的影响, 气温和降水自南向北逐渐递减, 土壤类型和土壤色度也随纬度呈现规律性的变化; 而在中纬度半干旱-干旱地区则由东向西随着降水量的逐渐降低也呈现土壤类型和土壤色度的规律性变化^[1-2, 5, 14-15]。土壤色度的空间变化主要反映了气候因素对土壤过程的控制作用。在青藏高原东部地区, 土壤色度随纬度、经度和海拔呈现一定的规律性变化。然而, 由于海

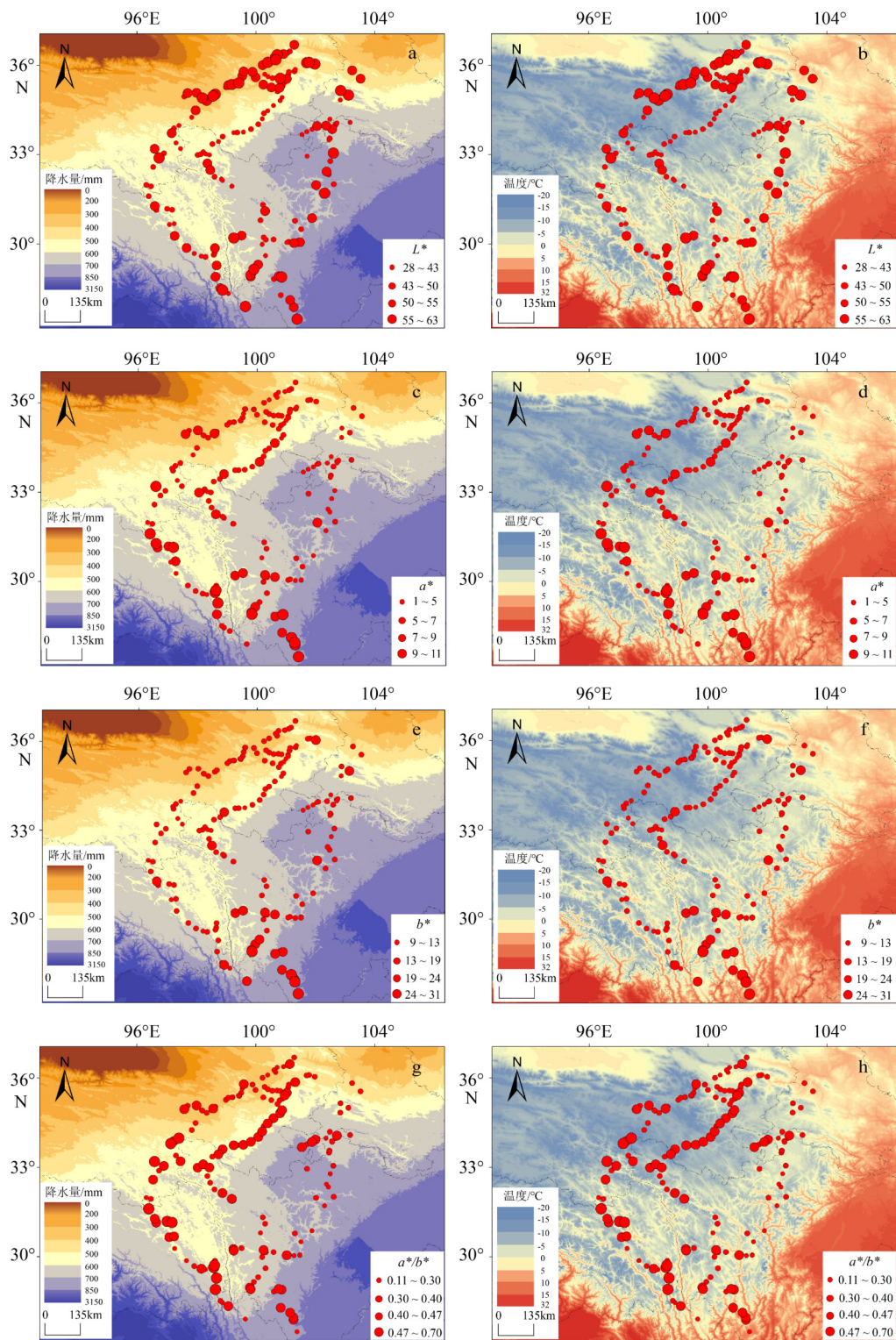


图3 青藏高原东部表层土壤的色度参数与年平均降水、年平均温度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of surface soil color, annual average precipitation, and annual average temperature in the ETP

拔对水热条件的重新分配和地形的阻挡作用,降水和温度的空间变化有明显的分异(图3),这导致了该区域较复杂的水热组合条件,使得土壤色度与纬度、经度和海拔之间的相关性较其他地区复杂。从研究区北部到中部的土壤 L^* 的变化主要反映了现

代降水量梯度自北向南的增加,而 a^* 和 b^* 的纬度变化反映了研究区东南部和西北部温度的显著差异(图3d, f)。土壤色度随经度和海拔也呈现一定的变化规律,但其变化相对复杂。从现代降水和温度的分布来看,该地区现代降水自东向西的“凸状”递

减分布以及复杂的温度和海拔分布导致经度上的水热组合多变, 这导致了 L^* 、 a^* 、 b^* 和 a^*/b^* 随经度和海拔的复杂变化。这些说明了土壤色度的纬向、经向和海拔的变化是对青藏高原东部复杂的地理环境下的水热组合变化响应的结果。因此, 了解土壤色度的空间变化可以为该地区古气候重建提供重要的参考依据, 甚至对评估缺乏气象站区域的气候和成壤环境也具有较大的潜力。

4.2 土壤颜色与现代气候的关系

土壤亮度 L^* 通常被认为主要与有机质的含量、碳酸钙含量以及铁氧化物种类和含量等有关^[3, 42-45], 其变化与降水存在密切的联系^[5, 8]。当气候环境干旱时, 降水量较少, 土壤产生的有机质含量较少, 利于碳酸盐沉淀, 这使得土壤亮度升高; 当降水和温度较高时, 植被发育较好, 土壤有机质积累, 使得土壤亮度迅速变暗。图 3a 中可见 300~400 mm 降水范围内分布高值的 L^* , 400~500 mm 降水范围内以高值的 L^* 和部分低值的 L^* 分布为主, 500~600 mm 以低值的 L^* 分布为主; 但 600~700 mm 降水范围内以低值和部分高值的 L^* 为主, 高值的 L^* 主要出现在东南部, 而 700 mm 以上的降水量以分布高值的 L^* 为主。总体上, 在 600 mm 降水以下, 青藏高原东部表层 L^* 随着降水的增加而降低, 表明随着降水的增加, 成壤作用增强, 土壤有机质含量增多, L^* 逐渐降低; 而在 600~700 mm 的降水量范围, 土壤 L^* 的高值出现频率增高, 随后降水的增加导致土壤普遍发育较高的 L^* , 这可能与以往研究认为在高温和高降水的气候条件下, 有机质的分解高于其积累导致土壤亮度增加有关^[46]。相比年平均降水量, 年平均温度对土壤亮度的影响相对复杂。总体而言, 较高温度地区的 L^* 整体相对较高, 而温度偏低且有一定降水的条件下适合产生较低的 L^* , 这可能与以往认为低温有利于有机质的积累有关^[47], 但偏低的温度和较少的降水则以高值的 L^* 为主, 与土壤发育程度较低有关。在青藏高原东部干旱-半湿润地区, 土壤 L^* 主要受控于年平均降水量的变化, 年平均温度的影响相对复杂, 这与以往在新疆地区^[14-15] 和青藏高原内部^[16] 研究基本一致。大范围的土壤色度研究也支持 L^* 与气候的关系仅存在于温带湿润-干旱区^[5]。然而, 云南地区的土壤色度研究表明 L^* 与降水和温度都有很好的相关性^[13], 这些都说明不同地区的 L^* 与气候的关系是具有区域差异的, 这可能与不同区域气候条件下的土壤母质、有机质、腐殖质、碳酸盐积累和分解密切相关。

红度 a^* 的变化主要受控于土壤中赤铁矿的含量, 而黄度 b^* 的变化则主要受控于土壤中针铁矿的含量, 这两者与土壤水热组合状况有密切的联系^[22, 28, 48]。短期降水和长期干旱的气候环境会使得土壤处于强氧化环境, 这对赤铁矿的形成最为有利^[22, 48-49], 而针铁矿更多形成于湿润的气候条件, 且与还原环境有关^[22, 48-49]。在热带-亚热带气候条件下, 土壤处于强氧化环境, 降水量和温度增加会引起红度的快速升高^[5, 12]; 而在半干旱-干旱地区, a^* 随着温度和降水的急剧增加而增长缓慢, a^* 对干冷环境变化不敏感, 这被认为是赤铁矿的形成受到抑制^[5, 12, 50-51]。在青藏高原东部地区, 表层土壤的 a^* 在 300~500 mm 的降水量之间基本处于低值, 在 500~700 mm 降水量之间出现 a^* 的高值和低值分布(图 3c), 说明 a^* 与年平均降水量存在一定的联系; 值得注意的是, 500~850 mm 降水量内的 a^* 高值在温度较高的东南部区域要比温度较低的研究区西北部和东部区域显著, 说明较高的温度对 a^* 有重要的影响, 较冷的环境可能影响了赤铁矿的生成。然而, a^* 的变化与温度的分布只在较大的空间尺度是显著的, 表现在研究区暖湿的东南部和干冷的西北部的显著差异; 而在较冷的研究区西北部 a^* 的变化与温度的分布比较复杂, 但与降水的变化存在一定联系。此外, 研究区北部较高的温度地区未出现 a^* 的高值, 可能是与较少的降水导致土壤发育较弱有关。研究表明 b^* 值与 a^* 的变化大体是一致的, 且与温度和降水的变化相关, 但与降水关系更显著^[5, 17]; 与 a^* 相比, b^* 的受控因素更为复杂, 对气候的响应关系不明确^[17, 27, 29, 52]。青藏高原东部 b^* 的变化在 600 mm 降水量以下呈现低值且变化较小(图 3e), 说明 b^* 与降水的相关性较差; 但研究区东南部 b^* 与 a^* 同样呈现高值, 说明大空间尺度的 b^* 同样对温度的响应较敏感。总体而言, 青藏高原东部的 a^* 和 b^* 的变化对较大空间尺度的温度变化响应敏感; 而在较冷的环境下, a^* 和 b^* 对温度的响应相对不敏感, 但 a^* 与降水的变化存在一定的联系。

作为古气候研究的良好气候代用指标, a^*/b^* 主要反映了赤铁矿和针铁矿的比值^[10, 42], 而赤铁矿和针铁矿在成壤环境中是相互竞争且相互制约的, 它们的含量和比值对气候响应非常敏感^[46, 49, 53]。有研究表明 a^*/b^* 可以揭示大范围的空间气候变化, a^*/b^* 与年平均降水呈现良好的线性关系^[17]。在图 3g 中, 研究区西北部 300~500 mm 降水范围内以 a^*/b^* 的低值为主, 500~600 mm 降水范围内以 a^*/b^* 的高值为主, 说明 a^*/b^* 随降水的升高而升高

且赤铁矿占据有利的优势;之后 a^*/b^* 随着降水的升高而出现低值,说明这有利于针铁矿的增长,可能与降水增多导致土壤湿度增加有关。研究还发现大范围的 a^*/b^* 变化对温度的响应较降水敏感, a^*/b^* 随温度的增加而增加^[17]。然而,青藏高原东部表土 a^*/b^* 的空间分布与温度分布一致性较差(图 3h),说明土壤中赤铁矿和针铁矿的比值对温度的响应相对复杂。总体而言,青藏高原东部土壤的 a^*/b^* 对温度的响应复杂,对降水的响应相对敏感, a^*/b^* 与区域气候条件控制下赤铁矿和针铁矿的竞争和制约有关。

5 结论

(1) 青藏高原东部表土的土壤亮度(L^*)的变化范围为 28.27~62.87, 红度(a^*)的变化范围为 1.68~10.89, 黄度(b^*)的变化范围为 9.45~30.28, 红度与黄度的比值(a^*/b^*)的变化范围为 0.11~0.70。青藏高原东部土壤色度参数变化波动较大,在空间上呈现不同的变化特征。

(2) 表层土壤的 L^* 、 a^* 和 b^* 在该区域呈现较显著的纬向变化特征,而 a^*/b^* 的纬向变化特征较复杂。 a^* 、 b^* 、 a^*/b^* 具有一定的经向变化特征,而 L^* 则随经度的变化较小。较低的海拔主要发育较高的 L^* 、 a^* 和 b^* 。土壤色度参数的空间变化是青藏高原东部复杂地理环境下的水热组合变化的结果。

(3) 青藏高原东部表层土壤的 L^* 和 a^*/b^* 可以用于揭示干旱-半湿润区域的降水变化。 a^* 和 b^* 的变化对大尺度、大区域的温度变化响应较敏感,在较冷环境下 a^* 与降水的关系较温度更密切。

青藏高原东部现代表土色度与气候因素密切相关,其空间变化特征一定程度上反映了该地区现代气候因子的空间变化;另一方面由于该地区地形和气候复杂多变,部分色度指标与气候关系复杂,在重建青藏高原东部黄土古环境变化历史时需要谨慎。

参考文献 (References)

- [1] 柯夫达 B A. 土壤学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1981. [Ковда В А. Principles of Soil Science[M]. Beijing: Science Press, 1981.]
- [2] 朱鹤健, 何宜庚. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992. [ZHU Hejian, HE Yigeng. Soil Geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992.]
- [3] 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. [HE Liu, SUN Youbin, AN Zhisheng. Changing color of Chinese loess: Controlling factors and paleoclimatic significances [J]. Geochimica, 2010, 39(5): 447-455.]
- [4] 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.
- [5] 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, 31(S1): 175-181. [YANG Shengli, FANG Xiaomin, LI Jijun, et al. Transformation functions of soil color and climate [J]. Science in China (Series D), 2001, 31(S1): 175-181.]
- [6] 陈诗越, 方小敏, 王苏民. 川西高原甘孜黄土与印度季风演化关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(3): 41-46. [CHEN Shiyue, FANG Xiaomin, WANG Sumin. Relation between the loess stratigraphy on the eastern Tibetan plateau and Indian monsoon [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(3): 41-46.]
- [7] 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.
- [8] 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.]
- [9] 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 Sedi-mentologica Sinica*, 2018, 36(2): 333-342.]
- [10] 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.]
- [11] 杜丁丁, Mughal M S, Blaise D, 等. 青藏高原中部色林错湖泊沉积物色度反映末次冰盛期以来区域古气候演化[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 551-558. [DU Dingding, Mughal M S, Blaise D, et al. Paleoclimatic changes reflected by diffuse reflectance spectroscopy since Last Glacial Maximum from Selin Co Lake sediments, central Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(3): 551-558.]
- [12] 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. [CUI Dong, RONG Xue, WANG Xiaolei, 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.]
- [13] 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. [JI Hongli, ZHOU Wenjun, ZANG Yiping, et al. Relationship between soil color and climatic factors in Yunnan [J]. *Journal of Yunnan University*, 2013, 35(S2): 352-358.]
- [14] 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 & Quaternary Geology*, 2013, 33 (4): 77-85.]
- [15] 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. [YAN Yongyao, AN Congrong, MIAO Yunfa, 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.]
- [16] 宋瑞卿, 朱芸, 吕镔, 等. 青藏高原表土的色度特征及其环境意义[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11 (1): 14-20. [SONG Ruiqing, ZHU Yun, LYU Bin, et al. Topsoil color and its environmental significance in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2016, 11 (1): 14-20.]
- [17] 郑兴芬, 吕镔, 陈梓炫, 等. 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, et al. Latitudinal variation characteristics of soil color in different spatial extents and their climatic significance [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1186-1196.]
- [18] 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. [ZHU Lidong, ZHOU Shangzhe, LI Fengquan, 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.]
- [19] 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.
- [20] 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. [LIU Feng, WANG Hao, QIN Yifan, 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.]
- [21] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [LIU Tungsheng. *Loess and the Environment*[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [22] Balsam W, Ji J F, Chen J. Climatic interpretation of the Luochuan and Lingtai loess sections, China, based on changing iron oxide mineralogy and magnetic susceptibility [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 223 (3-4): 335-348.
- [23] Schaetzl R J, Bettis E A, Crouvi O, et al. Approaches and challenges to the study of loess Introduction to the LoessFest Special Issue [J]. *Quaternary Research*, 2018, 89 (3): 563-618.
- [24] 王攀, 张培新, 杨振京, 等. 靖边黄土剖面记录的末次冰期以来的气候变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39 (3): 162-170. [WANG Pan, ZHANG Peixin, YANG Zhenjing, et al. Climate change since the last glacial stage recorded in Jingbian loess section [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39 (3): 162-170.]
- [25] 陈海涛, 孔凡彪, 徐树建, 等. 山东仙境源黄土常量元素特征及其古气候环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (6): 189-197. [CHEN Haitao, KONG Fanbiao, XU Shujian, et al. Geochemical characteristics of major elements and their paleoenvironmental significance of the Xianjingyuan loess in Shandong Province [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (6): 189-197.]
- [26] 王博, 王牛牛, 王志远, 等. MIS13时期黄土高原东西部地区夏季风不对称演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (3): 185-192. [WANG Bo, WANG Niuniu, WANG Zhiyuan, et al. Unparallel MIS13 climate evolution between western and eastern Chinese Loess Plateau [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (3): 185-192.]
- [27] 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.]
- [28] Wang Q S, Song Y G, Zhao Z J, et al. Color characteristics of Chinese loess and its paleoclimatic significance during the last glacial-interglacial cycle [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 116: 132-138.
- [29] 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.]
- [30] Fang X M, Ono Y, Fukusawa H, et al. Asian summer monsoon instability during the past 60, 000 years: magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the western Chinese Loess Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 168 (3-4): 219-232.
- [31] Chen F H, Zhang J F, Liu J B, et al. Climate change, vegetation history, and landscape responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: A comprehensive review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 243: 106444.
- [32] 潘保田, 王建民. 末次间冰期以来青藏高原东部季风演化的黄土沉积记录[J]. *第四纪研究*, 1999 (4): 330-335. [PAN Baotian, WANG Jianmin. Loess record of Qinghai-Xizang Plateau monsoon variations in the eastern part of the plateau since the last interglacial [J]. *Quaternary Science*, 1999 (4): 330-335.]
- [33] 方小敏. 青藏高原东部边缘及邻区马兰黄土成因与来源的初步研究[J]. *中国科学(B辑)*, 1994, 24 (5): 539-546. [FANG Xiaomin. The origin and provenance of Malan loess along the eastern margin of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its adjacent area [J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 24 (5): 539-546.]
- [34] 欧先交, 曾兰华, 周尚哲, 等. 四川西部黄土沉积与环境演变研究综述[J]. *地球环境学报*, 2012, 3 (1): 692-704. [OU Xianjiao, ZENG Lanhua, ZHOU Shangzhe, et al. A review on research of loess and environmental change in west Sichuan Plateau of the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3 (1): 692-704.]
- [35] Dong Z B, Hu G Y, Qian G Q, et al. High-altitude Aeolian research on the Tibetan Plateau [J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55 (4): 864-901.
- [36] Huang X, Miao X, Chang Q, et al. Tibetan dust accumulation linked to ecological and landscape response to global climate change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49: e2021GL096615.
- [37] 高以信, 李明森. 横断山区土壤[M]. 北京: 科学出版社, 2000. [GAO

- Yixin, LI Mingsen. Soils of Hengduan Mountains [M]. Beijing: Science Press, 2000.]
- [38] 熊毅, 李庆远. 中国土壤[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1987. [XIONG Yi, LI Qingkui. Chinese Soil [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1987.]
- [39] 张荣祖, 郑度, 杨勤业, 等. 横断山区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1997. [ZHANG Rongzu, ZHENG Du, YANG Qinye, et al. Physical geography of Hengduan Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1997.]
- [40] Robertson A R. The CIE 1976 color-difference formulae [J]. *Color Research and Application*, 1977, 2(1): 7-11.
- [41] 邱棚星, 叶飞. 武夷山土壤性状及其垂直变化规律[J]. *东北林业大学学报*, 2008, 36(1): 55-57. [QIU Pengxing, YE Fei. Characteristic and vertical changing regularities of soils in Wuyi Mountain [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36(1): 55-57.]
- [42] 王海燕, 庞奖励, 黄春长, 等. 郧西县庾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.]
- [43] Balsam W L, Deaton B C, Damuth J E. Evaluating optical lightness as a proxy for carbonate content in marine sediment cores [J]. *Marine Geology*, 1999, 161(2-4): 141-153.
- [44] 田庆春, 杨太保, 石培宏, 等. 可可西里BDQ0608钻孔沉积物色度环境意义及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1): 133-140. [TIAN Qingchun, YANG Taobao, SHI Peihong, et al. Environmental implication of color reflectance of drill hole BDQ0608, Keke Xili region and its influencing factors [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(1): 133-140.]
- [45] 吴艳宏, 李世杰, 夏威岚. 可可西里荷仁错湖泊沉积物元素地球化学特征及其环境意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(3): 64-68. [WU Yanhong, LI Shijie, XIA Weilan. Element geochemistry of lake sediment from Gourenco Lake, Kekexili, Qinghai-Xizang plateau and its significance for climate variation [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(3): 64-68.]
- [46] Torrent J. Iron oxides in Mediterranean soils: properties and influence on soil behavior [C]. Transactions of the 15th World Congress of Soil Science, 1994, 8a: 1-14.
- [47] 刘驰, 刘希瑶, 刘澎. 松辽平原典型黑土区有机质的变化及影响因素分析[J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 550-555. [LIU Chi, LIU Xiyao, LIU Peng. Analysis on the changes of organic matters and their influencing factors of typical black soil areas in Songliao Plain [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 550-555.]
- [48] Ji J F, Chen J, Balsam W, et al. High resolution hematite/goethite records from Chinese loess sequences for the last glacial-interglacial cycle: Rapid climatic response of the East Asian Monsoon to the tropical Pacific [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(3): L03207.
- [49] Schwertmann U. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments [M]//Stucki J W, Goodman B A, Schwertmann U. Iron in Soils and Clay Minerals. Dordrecht: Springer, 1988: 267-308.
- [50] 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. [DING Min, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, 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.]
- [51] 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. [DAI Shuang, LIU Junwei, ZHANG Mingzhen, 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.]
- [52] 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.]
- [53] 季峻峰, 陈骏, Balsam W, 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. [JI Junfeng, CHEN Jun, 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.]