

DOI: 10.11766/trxb202001190693

张蕾, 张凤荣, 靳东升, 李超. 黄土高原淋溶土黏粒、氧化铁与颜色的关系及发生学解释——以山西土系调查的 31 个黏化层为例[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 876–886.

ZHANG Lei, ZHANG Fengrong, JIN Dongsheng, LI Chao. The Correlation of Soil Color Relative to Clay and Iron Oxides in Alfisol of the Loess Plateau and Its Genetic Explanation—A Case Study of the 31 Argillic Horizons Covered in the Soil Series Survey of Shanxi Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (4): 876–886.

黄土高原淋溶土黏粒、氧化铁与颜色的关系及发生学解释* ——以山西土系调查的 31 个黏化层为例

张 蕾¹, 张凤荣^{1†}, 靳东升², 李 超³

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030006; 3. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035)

摘要: 以黄土高原山西省 14 个淋溶土剖面的 31 个偏红的黏化层 (Bt) 为研究对象, 分析了其全铁、游离氧化铁、无定形氧化铁的含量与土壤颜色参数、黏粒含量之间的相关性, 并建立了定量关系模型。结果表明: Bt 的黏粒含量与氧化铁含量之间呈极显著正相关 ($P<0.01$) ; 颜色的红度与全铁、游离氧化铁和无定形氧化铁含量之间均呈极显著正相关 ($P<0.01$), 其中游离氧化铁是最直接的土壤红色“染色剂”; 其他色调、明度与彩度等颜色参数与土壤全铁、游离氧化铁含量之间亦呈现出显著的相关性, 这也间接说明了黏粒含量与土壤颜色具有一定相关性。野外观测发现, 某些黏化层结构体表面颜色较结构体内基质颜色更红, 证实了在土壤结构体表面氧化铁随着黏粒在土壤空隙中的迁移淀积。黄土高原淋溶土偏红的黏化层多是来自于土壤侵蚀而出露地表或接近地表的第三纪保德红土和第四纪红黏土, 其黏粒含量、土壤颜色等指标均表明第三纪的古气候条件较第四纪更为湿热。

关键词: 黄土高原; 红色古土壤; 黏粒含量; 土壤颜色; 氧化铁

中图分类号: S159 文献标志码: A

The Correlation of Soil Color Relative to Clay and Iron Oxides in Alfisol of the Loess Plateau and Its Genetic Explanation—A Case Study of the 31 Argillic Horizons Covered in the Soil Series Survey of Shanxi Province

ZHANG Lei¹, ZHANG Fengrong^{1†}, JIN Dongsheng², LI Chao³

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Agriculture Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China; 3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

* 国家自然科学基金项目 (41671216) 和国家科技基础性工作专项 (2014FY110200) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41671216) and the National Science and Technology Basic Work (No.2014FY110200)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: frzhang@cau.edu.cn

作者简介: 张 蕾(1996—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 研究方向为土壤与土地调查、土地可持续利用。E-mail: m13009866572@163.com

收稿日期: 2020-01-19; 收到修改稿日期: 2020-05-18; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-06-04

Abstract: [Objective] Clay content and soil color are the most basic physical properties of soil. And soil color, including its hue, value and chroma, is highly influenced by type, content and state of the ferric oxides in the soil. As a result of the intense erosion during the later period of the development of the Loess Plateau, the ancient red clay layer, originally buried down in the lower part of the plateau has emerged up close to or even out of the surface, which is of high significance in the researches on soil genesis and ancient environment. But so far little has been reported about any systematic studies on relationships of soil color with clay content and iron oxides in the ancient red clay soil of the Loess Plateau. The purpose of this paper is to provide certain scientific basis for further studies of soil classification, paleosol and paleoenvironment in the plateau. [Method] Soil samples were collected from the thirty one argillic horizons of the Alfisol profiles in Shanxi Province on the Loess Plateau for analysis of contents of total iron, free iron oxide, amorphous iron oxide and clay and soil color, and further for quantitative exploration of relationships of soil color (hue, value and chroma) with the first three indices, respectively. [Result] Results show that clay content in the argillic horizons was positively related to the content of iron oxides ($P<0.01$), and so was soil color, and especially soil redness ($P<0.01$), of which free iron oxide contributed the most. The other soil color parameters, like hue, brightness and chroma, were also significantly related to total iron oxides and free iron oxides, which indirectly indicates that clay content had a certain relationship with soil color. It was also found in field observations that the surfaces of some argic horizons were redder than the matrix inside the horizons, which demonstrates that iron oxide migrates with clay through soil pores and accumulates on the surface. [Conclusion] In Alfisols of the Loess Plateau, the reddish argillic horizons develop mainly from the Tertiary red soil of the Baode series and the Quaternary red clay that outcrop or lie close underneath the surface as a result of intense soil erosion. Their contents of clay and color indicate that the paleoclimate was hotter and wetter in the Tertiary than in the Quaternary in the Loess Plateau region.

Key words: Loess Plateau; Red paleosol; Clay content; Soil color; Iron oxides

黏粒含量与土壤颜色是土壤最基本的物理性质。黏粒作为土壤矿物质的重要组成部分，是鉴定成土母质和土壤发育程度的必要特性，也是黏化层和土壤系统分类的诊断指标^[1]。Torrent 和 Nettleton^[2]认为黏粒含量可以指示土壤母质的化学风化程度，并对密西西里的黄土粒径建立了质地指数，用于比较相似母质的风化状况；Levine 和 Ciolkosz^[3]的研究发现，黏粒含量（CAI 指数表征）和氧化铁均能识别不同土壤的发育程度，与成土年龄密切相关且两者变化趋势基本一致，均向剖面深处迁移，在淋溶层达到最大值；安芷生和魏兰英^[4]揭示了黏化层及黏粒胶膜中氧化铁含量的显著增多是黏粒与氧化铁共同淀积作用的结果。土壤颜色不仅是土壤剖面中最直观、最易识别的指标，也是鉴定土壤类型的重要指标^[1]。土壤中氧化铁的类型和含量，影响或决定着土壤颜色。其中，游离氧化铁（ Fe_d ）被认为是土壤发生与发育的间接指标之一，它不仅对土壤结构的形成起桥接的作用，而且还决定着土壤颜色^[5]。无定形氧化铁（ Fe_o ）（又称活性铁）是游离态氧化铁的重要组分，其活性高、比表面积大，在鉴别土壤特征和成土环境方面有一定指示作用^[1, 6]。章明奎

和胡国成^[7]对浙南地区变质岩发育的土壤研究表明，赤铁矿含量与土壤红度具有明显的相关性；刘峰等^[8]认为南京周家山下蜀黄土—古土壤中铁氧化物含量增加提升了土壤颜色参数；黄成敏等^[9]发现黏粒含量、土壤氧化铁和土壤颜色可以指示元谋盆地古红土壤的发生学和古环境特征。

黄土高原由于后期的强烈侵蚀作用（如水蚀、风蚀等），下部埋藏的古红土会接近或出露地表，具有极高的研究价值^[10]。但迄今为止，系统性地研究黄土高原古红土的黏粒、氧化铁与土壤颜色之间定量关系的报道甚少。为此，本文以 2014—2018 年开展的山西土系调查工作中获取的典型淋溶土剖面偏红的黏化层为研究对象，分析了其黏粒含量、土壤颜色与全铁、游离氧化铁以及无定形态氧化铁含量之间的关系及其发生学意义，旨在为研究黄土高原地区土壤系统分类、古土壤和古环境进一步提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西省属黄土高原的一部分，黄土覆盖广泛。

地势东北高西南低, 海拔介于180~3 058 m, 地势轮廓为“两山夹一川”, 地貌类型复杂多样, 其中山地和丘陵合计占80%。属温带半干旱大陆性季风气候, 年均日照时数2 808 h, 气温4.2~14.2℃, 降水量358~621 mm。成土母质类型主要是黄土和黄土状物质, 其他有第三纪红土以及各种岩石风化的残积、坡积物和冲积物等。发生学土壤类型主要有褐土724.09万hm²、栗褐土221.35万hm²、粗骨土170.64万hm²、黄绵土90万hm²、潮土80.32万hm²、石质土72.11万hm²、棕壤32.06万hm²、栗钙土31.33万hm²、红黏土14.24万hm²、山地草甸土0.31万hm²、新积土4.65万hm²、风沙土3.59万hm²、盐土2.62万hm²和水稻土0.82万hm²; 其他土类还有亚高山草甸土0.45万hm²、沼泽土0.18万hm²和火山灰土0.07万hm²^[11-12]。

1.2 样品采集与分析

依据2014—2018年开展的山西土系调查成果^[13], 选取主要分布于山地、丘陵和台塬地区(海拔在790~1 500 m)14个典型淋溶土剖面(图1)。包含了31个偏红黏化层(Bt, 包括古红土层)作为研究对象。成土母质主要为第三纪的保德红土、第四纪的离石黄土等, 受新构造运动和土壤侵蚀作用影

响, 这些地质历史上形成的古土壤出露于地表或接近地表, 各剖面点Bt层基本信息如表1所示。

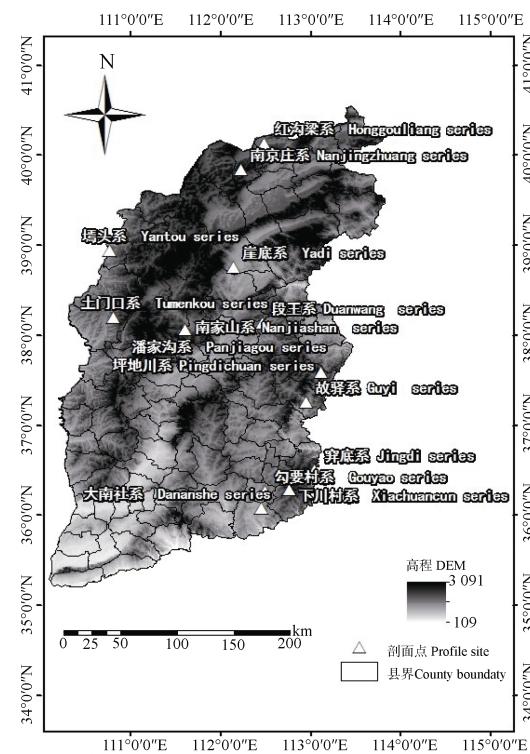


图1 典型剖面样点位置图

Fig. 1 Distribution of the studied soil profiles

表1 典型剖面样点Bt层基本信息

Table 1 Basic information of Bt horizons of the studied soil profiles

亚类 Subgroup	土系 Soil series	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Altitude/m	黏化层 Argillic horizons/cm	土壤干态颜色 Munsell soil color (dry)	成土母质 Parent materials	土地利用类型 Land use type
				5~18	红棕色(5YR4/4)		
红沟梁系		40°15'56.10"N 113°00'27.64"E	1 231	18~68 68~102	红棕色(2.5YR5/4) 红棕色(2.5YR5/4)	第四纪红 黏土	灌木林地
普通简育冷				102~145	红棕色(2.5YR5/5)		
凉淋溶土	南京庄系	39°55'54.20"N 112°42'29.72"E	1 446	75~118 118~150	红棕色(5YR 5/4) 亮红棕色(5YR 6/4)	马兰黄土与 红黏土	荒草地
	坪地川系	37°19'45.575"N 113°44'09.841"E	1 493	31~81	暗红棕色(2.5YR3/5)	坡积残积黄土状 物质与红黏土	灌木林地
普通钙质干	穿底系	36°05'11.151"N 113°39'16.104"E	960	15~37 37~75	浊红棕色(5YR4/4) 浊红棕色(5YR4/5)	石灰岩风化残 积物	林地
润淋溶土	下川村系	35°50'11.957"N 113°19'37.423"E	1 340	39~81 81~120 71~93	浊红棕色(2.5YR5/3) 橙色(5YR6/6) 亮红棕色(5YR5/6)	石灰岩风化残 积物	林地
普通钙积干 润淋溶土	大南社系	35°35'29.518"N 112°58'06.731"E	745.8	93~133 133~155	亮红棕色(5YR5/6) 橙色(5YR6/6)	马兰黄土覆盖 红黏土	耕地

续表

亚类	土系	经纬度	海拔	黏化层	土壤干态颜色	成土母质	土地利用类型
Subgroup	Soil series	Latitude and longitude	Altitude/m	Argillic horizons/cm	Munsell soil color (dry)	Parent materials	Land use type
钙磐钙积干 润淋溶土	潘家沟系 勾要系 墕头系	37°28'23.051"N 111°11'14.255"E 35°48'36.516"N 113°01'00.949"E 38°53'31.256"N 111°01'54.752"E	1 010 881 938	40~88 88~140 27~60 15~48 48~100 100~150	亮红棕色 (2.5YR5/6) 亮红棕色 (2.5YR5/6) 红棕色 (2.5YR4/6) 橙色 (5YR4/6) 橙色 (5YR6/7) 橙色 (5YR6/8)	红土状物质 黄土 离石黄土	林地 耕地 未利用地 (荒草地)
表蚀铁质干 润淋溶土	土门口系	38°01'48.161"N 111°04'59.089"E	1 094	18~52 52~91 91~150	红棕色 (2.5YR4/8) 红棕色 (2.5YR4/9) 红棕色 (2.5YR4/10)	保德红土	未利用地 (荒草地)
崖底系		38°40'39.86"N 112°36'34.85"E	883	15~35 35~72 72~160	红棕色 (2.5YR4/4) 暗黄棕色 (10R3/5) 暗黄棕色 (10R4/6)	第四纪红黏土	灌木林地
段王系		37°57'32.36"N 112°58'42.30"E	1 160	120~150	浊橙色 (7.5YR6/4)	马兰黄土覆盖 红黏土	耕地
普通简育干 润淋溶土	故驿系	36°57'02.538"N 113°32'30.862"E	901	72~131 131~160	亮棕色 (7.5YR5/6) 亮棕色 (7.5YR5/8)	离石黄土	灌木林地
	南家山系	37°52'59.50"N 111°59'49.04"E	1 323	50~71 71~150	亮红棕色 (5YR5/6) 亮红棕色 (5YR5/6)	黄土与红黏土	林地

野外土壤剖面调查描述与采样严格按照《野外土壤描述与采样手册》^[14]进行, 土壤干态颜色采用美国芒塞尔比色卡 (Munsell Soil Color Charts) 确定^[15]。土样经风干、去杂、研磨过不同孔径筛后, 颗粒组成采用吸管法测定, 质地采用美国农业部 USDA 制确定, pH 采用电位法 (水土比为 2.5 : 1) 测定, 全铁 (Fe_t) 采用 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮-原子吸收分光光度法测定, 游离氧化铁 (Fe_d) 采用连二亚硫酸钠-柠檬酸-重碳酸钠浸提, 邻菲罗啉比色法测定, 无定形氧化铁 (Fe_o) 采用草酸-草酸铵缓冲液浸提, 邻菲罗啉比色法测定^[16], 供试剖面土壤理化性质如表 2 所示。

1.3 土壤颜色转换

芒塞尔比色卡中土壤颜色描述主要由色调 (Hue)、明度 (Value) 和彩度 (Chroma) 三个参数决定。

色调数值的转换: 色调 (Hue) 指区分物体所呈现的颜色主要特征, 与该物体的主波长相关。共

有 10 个基本色调: 包括 5 个主要色调 R、Y、G、B、P 和 5 个中间色调 YR、GY、BG、PB、RP。在土壤比色卡中以 2.5 分作为一个基本单位。如 2.5R、5R、7.5R、10R。为了更直观、准确地分析色调这一参数, 需要进行色调数值化:

$$H^{\circ}=36 \left(\frac{Ip+Is}{10} \right) \quad (1)$$

式 (1) 中, Ip 分为 R-0、YR-1、Y-2、GY-3、G-4、BG-5、B-6、PB-7、P-8、RP-9; Is 为 2.5YR-2.5、5YR-5 等。转换后的具体数值见表 3。

明度 (Value): 明度与土壤湿润程度、岩石矿物表面颜色等有关。土壤颜色的相对明度, 以无彩色为基准, 将绝对黑记为 0, 绝对白记为 10, 灰色在中间, 因此从 0 到 10 逐渐明亮。

彩度 (Chroma): 指物体呈现颜色的鲜艳程度, 与相对纯度或饱和度有关。颜色彩度随鲜艳程度增加而增加, 对于绝对无彩色的颜色 (纯灰、白、黑) 彩度为 0。

表2 供试土壤的理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of the studied soils

土系名称 Name of the soil series	土层 Soil layer/cm	色调转换 H°	红度 Redness rating	黏粒含量 Clay content / (g·kg⁻¹)	土壤质地 Soil texture	pH	Fe _t / (g·kg⁻¹)	Fe _d / (g·kg⁻¹)	Fe _e / (g·kg⁻¹)
红沟梁系	5~18	54	7.5	331	粉砂质黏壤土	8.4	57.83	19.59	0.67
	18~68	45	8	255	粉砂壤土	8.5	52.28	19.52	0.69
	68~102	45	8	273	粉砂质黏壤土	8.5	54.25	18.95	0.44
	102~145	45	10	217	粉砂壤土	8.4	59.91	19.01	0.32
南京庄系	75~118	54	6	308	粉砂质黏壤土	8.4	47.8	18.76	0.37
	118~150	54	5	129	粉砂壤土	8.4	40.44	16.74	0.28
坪地川系	31~81	45	16.7	594	黏土	8.4	62.84	20.78	2.38
穿底系	15~37	54	7.5	519	黏土	7.8	50.22	20.24	2.24
	37~75	54	9.4	491	黏土	8.2	52.35	21.98	2.20
下川村系	39~81	45	6	358	黏壤土	7.6	50.68	18.62	1.01
	81~120	54	7.5	306	砂质黏壤土	7.7	50.19	17.67	0.75
	71~93	54	9	402	粉砂质黏土	8.3	48.75	19.36	1.58
大南社系	93~133	54	9	460	粉砂质黏土	8.2	56.38	21.78	1.46
	133~155	54	7.5	424	粉砂质黏土	8.2	49.09	18.41	1.17
潘家沟系	40~88	45	12	344	粉砂质黏壤土	8.6	53.23	19.65	1.32
	88~140	45	12	320	粉砂质黏壤土	8.7	48.17	18.12	1.24
勾要系	27~60	45	15	312	粉砂质黏壤土	8.2	60.76	23.11	1.10
	15~48	54	11.3	272	粉砂质黏壤土	8.9	53.29	21.36	1.56
墕头系	48~100	54	8.8	343	粉砂质黏壤土	8.8	46.19	19.38	1.61
	100~150	45	10	311	粉砂质黏壤土	8.9	46.97	20.11	1.59
	18~52	45	20	488	粉砂质黏土	8	61.28	22.82	2.17
土门口系	52~91	45	22.5	473	粉砂质黏土	8.1	63.01	23.17	2.17
	91~150	45	25	471	粉砂质黏土	8.2	65.57	24.44	2.19
崖底系	15~35	45	10	352	黏壤土	8.1	56.75	19.22	2.02
	35~72	36	20.8	407	黏壤土	7.9	62.99	23	1.92
	72~160	36	18.8	404	粉砂质黏土	7.9	62.87	21.85	2.11
段王系	120~150	63	3.3	298	粉砂质黏壤土	8.4	44.76	17.49	2.25
	72~131	63	6	305	粉砂质黏壤土	8.2	45.54	18.44	1.99
故驿系	131~160	63	8	298	粉砂质黏壤土	8	53.8	18.86	1.79
	50~71	54	9	378	粉砂质黏壤土	8.7	47.74	19.47	1.81
	71~150	54	9	461	粉砂质黏土	7.7	57.88	21.02	1.94

表 3 色调数值转换

Table 3 Transformation of Hue into value

Hue	7.5R	10R	2.5YR	5YR	7.5YR	10YR
H°	27	36	45	54	63	72

红度 (Redness rating) : 红度是由色调 (H) 、明度 (V) 、彩度 (C) , 三个参数确定。公式为:

$$RR = (K-H) \times C/V^{[17]} \quad (2)$$

式(2)中, K 值设定为 12.5, 10YR、7.5YR、5YR、2.5YR、10R 的 H 分别设定为 10、7.5、5.0、2.5、0, C/V 为土壤颜色彩度和明度的比值。

1.4 数据处理和统计分析

采用 Excel 2013 和 IBM Statistics SPSS20.0 等统计软件进行数据整理相关性分析, 并采用 Origin9.0 软件制图。

表 4 土壤黏粒含量、色度参数、pH 和各形态氧化铁的描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of clay contents, colorimetric parameters, pH and iron oxides of various forms

	最小值	最大值	平均值	变异系数	偏度	峰度	分布类型
	Min	Max	Mean	CV/%	Skewness	Kurtosis	Distribution type
转换后色调值 H°	36	63	50	2.4	0.06	-0.21	非正态
红度 Redness rating	3.3	25	10.92	9.0	1.22	0.62	非正态
黏粒 Clay / (g·kg⁻¹)	129	594	365	4.9	0.13	0.199	正态分布
pH	7.6	8.9	8.3	0.7	-0.02	-0.50	正态分布
全铁 Feₜ / (g·kg⁻¹)	40.44	65.57	53.67	2.2	0.12	-0.92	正态分布
游离铁 Feₖ / (g·kg⁻¹)	16.74	24.44	20.1	1.7	0.53	-0.48	非正态
无定形铁 Fe₀ / (g·kg⁻¹)	0.28	2.38	1.49	7.4	-0.52	-1.01	正态分布

2.2 典型土壤剖面形态特征描述

14 个典型淋溶土剖面所处地貌类型主要为丘陵、台塬、阶地等, 多属发生学分类的红黏土母质褐土土类, 其土体构型为: A-Bt (k) 或 A-Bw-Bt (k) 。Bt 层以棱块状或次棱块状结构为主, 多具有光亮的黏粒胶膜, 因此在系统分类中归类为淋溶土纲^[18-19], 再根据土壤温度和水分状况续分为冷凉淋溶土、干润淋溶土和湿润淋溶土三个亚纲。土壤剖面颜色主要呈现两种状态: 一种是通体红色 (如图 2a 土门口系), 其为第三纪保德红黏土, 可见明显的铁锰胶膜; 另一种为第四纪黄土覆盖第四纪古红土, 上部黄土有假菌丝体和石灰反应, 下部的古红

2 结 果

2.1 土壤黏粒含量、色度参数、pH 和各形态铁的描述性统计特征

土壤黏粒含量、色度参数、pH 和各形态铁的描述性统计分析结果见表 4。31 个偏红黏化层土样中, 转换后的色调范围介于 36~63, 平均为 50; 红度介于 3.3~25, 平均为 10.92; 黏粒介于 129 g·kg⁻¹~594 g·kg⁻¹, 平均为 365 g·kg⁻¹, 变化幅度大。pH 介于 7.6~8.9, 平均为 8.3; Feₜ 介于 40.44 g·kg⁻¹~65.57 g·kg⁻¹, 平均为 53.67 g·kg⁻¹, 含量较为丰富; Feₖ 16.74 g·kg⁻¹~24.44 g·kg⁻¹, 平均为 20.1 g·kg⁻¹。Fe₀ 0.28 g·kg⁻¹~2.38 g·kg⁻¹, 平均为 1.49 g·kg⁻¹。整体上所有指标变异系数均小于 10%, 属弱变异; 黏粒、pH 和各形态氧化铁均为正态分布, 其他指标经对数或其他形式转换后亦呈正态分布。

土在部分土系中有石灰反应, 是碳酸钙下移的结果, 并且在土体中可见明显砂姜 (如图 2b 南京庄系)。

2.3 不同母质的土壤剖面在黏粒含量、氧化铁含量和颜色参数的差异

水热条件相同的土壤剖面, 由于成土母质不同, 矿物风化强弱有异, 土壤理化性质可能有一定的差异, 从而影响土壤形成过程的速度。根据表 1 和表 2 所示, 不同母质的土壤剖面在黏粒含量、氧化铁含量和颜色参数上均有一定差异。黄土高原淋溶土的母质多为第四纪红黏土、坡残积黄土状红黏土、石灰岩风化残积物、第三纪保德红土。其中以黄土覆盖红黏土的占比最多, 达 36%。第三纪保德红土

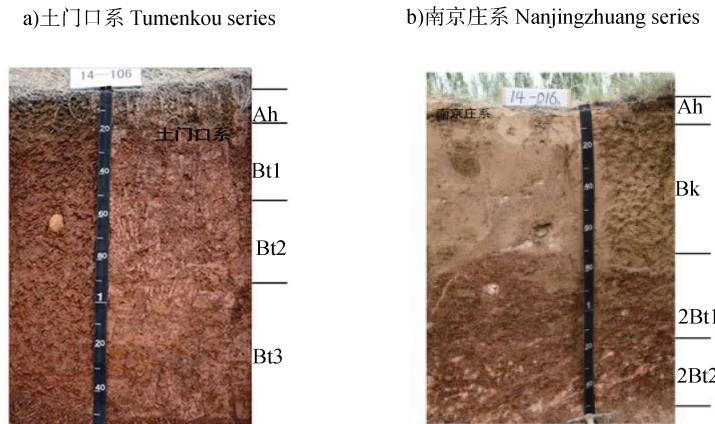


图2 古红土出露与埋藏的典型土壤剖面
Fig. 2 Soil profiles typical outcropped and underground red paleosols

的黏粒含量、各形态铁的含量和红度、色调均最高，分别为 $477 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $63.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $23.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $22.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；其次为石灰岩风化残积物，一般含有石灰岩碎屑，是发育于石灰岩类上的残余古土壤（红色石灰土）；黄土覆盖红黏土的各指标含量次之；离石黄土与第四纪红黏土的各指标含量相似并且很低，由于成土时间较其他母质短，红色程度较浅，质地以黏壤土为主，黏粒含量在 30% 以下。

2.4 黏化层土壤颜色与各形态铁的相关关系

表 5 给出了黏化层的土壤颜色参数（红度、明度、彩度、色调）与氧化铁含量之间的相关系数。一般认为，若土壤色调红于 10 YR，表明土壤中有赤铁矿存在，赤铁矿越多，土壤颜色越红。本研究的 31 个黏化层色调（H）介于 7.5YR~10R，其中 5YR 和 2.5YR 最多，分别为 14 和 12 个层次，10R 有 2

个层次，7.5YR 有 3 个层次，总体上表明了黏化层赤铁矿含量较高，这也是其颜色发红的根本原因。

在野外土壤颜色判别时，黄土高原淋溶土黏化层可见明显的褐色或红棕色的胶膜，色调为 5YR 或 2.5YR，部分黄土的黏化层的色调为 7.5YR。色调（H）与 Fe_t 和 Fe_d 呈极显著的负相关关系（ r 分别为 -0.609 和 -0.494 ， $P < 0.01$ ），但与 Fe_o 无相关性。明度与 Fe_t 和 Fe_d 呈现极显著负相关性（ r 分别为 -0.765 和 -0.682 ），但 Fe_o 呈现显著的负相关性（ r 为 -0.439 ， $P < 0.05$ ）。而彩度（C）与 Fe_d 和 Fe_o 呈现出显著正相关性（ r 分别为 0.545 和 0.424 ），这与 Soileau 和 McCracken^[21]研究结果部分一致，其研究结果表明彩度与游离氧化铁呈正相关关系，而明度与其结果存在一定偏差，这可能与不同地区土壤湿润程度和黏土矿物类型等因素的差异有关。

表 5 各形态铁与土壤颜色参数之间的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson' correlation coefficients between content of iron oxides and color parameters

土壤颜色参数 Soil color parameters	全铁 Fe_t		
	游离氧化铁 Fe_d	无定形氧化铁 Fe_o	
红度（RR）	0.817**	0.821**	0.467**
色调（H）	-0.609**	-0.494**	-0.017
明度（V）	-0.765**	-0.682**	-0.439*
彩度（C）	0.329*	0.545**	0.424*

** $P < 0.01$ ；* $P < 0.05$

黏化层红度（RR）与 Fe_t 、 Fe_d 、 Fe_o 均呈极显著正相关关系（ r 分别为 0.817 、 0.821 和 0.467 ， $P < 0.01$ ），红度与 Fe_t 和 Fe_d 均呈指数函数关系（图 3a 和图 3b），这与 Torrent 等^[20]研究欧洲地区淋溶土中氧化铁与

红度的关系一致。此外，在全铁与游离氧化铁含量较低时，红度增加缓慢；在含量高的情况下，红度上升趋势明显，进一步表明红度与氧化铁的密切程度。

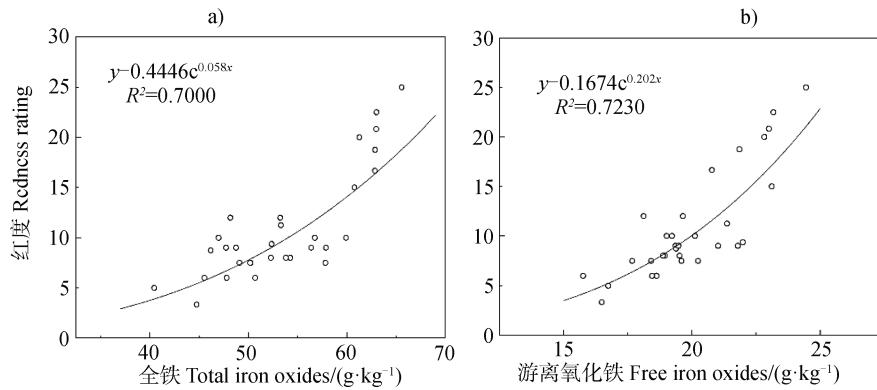


图 3 土壤红度与全铁、游离氧化铁之间的相关性

Fig. 3 Correlation between soil redness and contents of total iron oxides (a) and free iron oxides (b)

2.5 黏化层黏粒含量与各形态铁的相关关系

全铁、游离氧化铁、无定形氧化铁均主要分布在黏粒富集的层次, Soileau 和 McCracken^[21]研究表明, 除了含铁锰结核的土壤以外, 几乎所有的游离铁氧化物均存在于黏土矿物中, 主要分布在细黏粒中。本研究发现 31 个黏化层的黏粒含量与 Fe_t 、 Fe_d 、 Fe_o 均呈极显著正相关性 (r 分别为 0.536、0.638 和 0.702), 其中黏粒与 Fe_t 符合幂函数关系 (图 4a), 与 Fe_d 和 Fe_o 符合线性函数关系 (图 4b 和图 4c)。随着黏粒的增加, 全铁、游离氧化铁和无定形氧化铁均呈增加

趋势, 但黏粒含量较低 (壤土) 的土壤, 其中全量氧化铁含量的增加程度要明显高于高黏粒含量 (黏土) 土壤, 说明土壤氧化铁作为风化产物, 会随着土壤黏粒移动。但在高黏粒含量情况下, 土壤细孔隙多, 黏粒表面能大, 氧化铁随黏粒运动缓慢^[22]。在实际野外观察中, 发现部分黏化层结构体面上颜色较结构体内基质的颜色更红, 如图 5a 故驿系, 结构体面颜色为浊红棕色 (2.5YR 3/4), 而结构体内基质颜色为亮棕色 (7.5YR 5/6), 这也证实了氧化铁随着黏粒在土壤空隙中的迁移淀积在土壤结构体表面上。

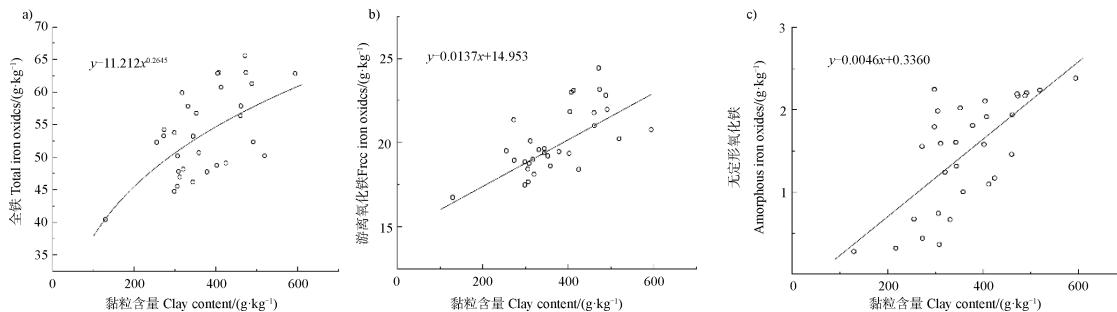


图 4 土壤黏粒含量与各形态铁的数量关系

Fig. 4 Correlation between contents of clay and iron oxides

3 讨 论

3.1 黏化层土壤颜色与各形态铁的关系机理

本研究结果显示, 黏化层土壤红度、色调、明度与全铁和游离氧化铁均呈极显著相关性, 彩度与土壤氧化铁之间也呈现出一定的相关性。在干燥、波动的第四纪气候时期, 黄土高原淋溶土地区由更新世到全新世, 经历了干冷-暖湿-干冷-温暖多旋回的气候变化^[23]。本研究区域的马兰黄土母质形成的土壤多是在半干旱气候条件下, 而“红色土壤”多为

埋藏的古土壤, 是在较现在更湿热气候条件下形成的, 成土母质经过强烈的化学风化作用, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等被完全淋洗, Fe^{3+} 由于淋失少而相对稳定积聚, 以胶体形态包被在土壤结构体表面, 经脱水氧化后赤铁矿的颜色 (红色) 显现在土壤表面。在野外调查中, 红黏土的土体结构面上往往可见明显的黏粒-氧化铁胶膜, 且具有微弱红色风化壳等残留特征。而且有些剖面结构体面还具有铁锰斑纹特征, 这是铁锰淋溶在结构体表面 (即导水空隙) 淀积的结果, 也可能与土壤生物作用有关, 如图 5b 垣头系, 其母

质为离石黄土，呈致密的大块状，在其结构面（裂隙面）上有些地方可见边界模糊的黑色斑纹。

3.2 土壤黏粒含量对各形态铁的影响机理

一般而言，黄土母质黏粒含量低（一般约 $100 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），加之黄土高原多为半干旱-半湿润区，降雨量较低（一般低于 650 mm ）^[24]，土壤风化淋溶弱，很难形成黏化层。而其埋藏的古红土一般形成于温暖湿润的环境。本研究发现，古红土层（黏化层）黏粒含量与氧化铁含量之间具有显著的正相关，这与雷梅等^[25]对太白山淋溶土土壤黏粒含量与氧化铁关系的研究结论基本一致。黏化层最典型的特征是黏粒胶膜，在对各剖面的野外实际观测中，

大部分黏化层（Bt）可观察到黏粒胶膜的存在，而黏粒胶膜一般是湿热气候条件下黏粒淋溶淀积形成的^[1]，这间接反映出黏化层形成时期的气候较现在半干旱的气候更加湿润，也进一步表明了黏化层属于古土壤。多数情况下，土壤在脱钙酸性条件下会有利于游离氧化铁的活性而发生黏粒的迁移。但从表2可以看出，黏化层的pH均在8以上，这是由于在古红土形成之后，其上覆黄土中的碳酸钙随降雨向下淋溶进入下伏的古红土，导致了其pH升高。即使是因为强烈水土流失、剥削等侵蚀作用使红色古土壤层出露地表，因黄土降尘中的碳酸钙随降水进入土体，其pH也在8以上（如图5c潘家沟系）。

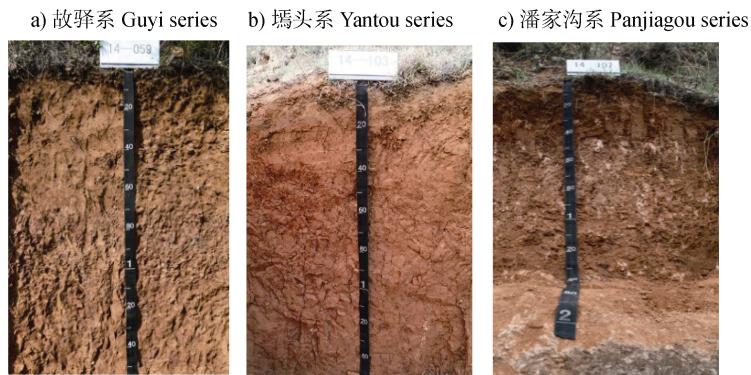


图5 故驿系、墕头系和潘家沟系代表土体剖面

Fig. 5 Soil profiles representative of the Guyi, Yantou and Panjiagou Series

3.3 氧化铁的发生学意义

土壤氧化铁在反映成土过程和风化发育程度上具有重要的指示意义。本研究进一步表明，在黄土高原地区，黏粒含量越高，游离氧化铁的含量也越高。土壤全铁主要包括游离铁、活性铁、络合态铁和有效铁，土壤氧化铁以离子态、无定形态、隐晶质态和结晶态4种形式存在，而游离氧化铁由无定形、隐晶质和结晶态组成的^[26]；此外，氧化铁具有离子吸附特性，主要是与 ΔpH_{ZPC} （土壤净电荷零点与pH之差）所表征铝硅酸盐矿物所带的电荷有关。随着土壤风化程度加深，土体中原生铝硅酸盐矿物晶格结构被破坏从而释放出 Fe^{3+} ，使 Fe^{3+} 与水结合形成无定形非晶体的含水氧化铁，它们以胶体的形式吸附在黏粒表面，这类铁不稳定，极易发生变迁，并逐渐脱水结晶，形成少量的赤铁矿晶体，这部分并不足以表征土壤的颜色，这也解释了无定形铁与土壤颜色参数相关性弱原因。

3.4 “红色土壤”的发生学意义

古红土是研究古环境最好的例证，是土壤环境的

记录者和指示者^[27]。早期人们对“红色条带”的理解仅仅局限于黄土高原水成说基础之上的分析，19世纪60年代朱显谟院士首次公开提出黄土中的“红层”是古土壤的观点^[28]。黄土高原地区古红土壤经历时期长，类型多。本文研究的古土壤有：上新世时期的保德红土，黏粒含量可达到40%左右（如图2a土门口系）；中更新世时期的离石黄土，黏粒含量基本为35%左右（如图5a故驿系）。龚子同等^[29]研究表明，黄土中马兰黄土形成时期的年均气温为8~10℃，降水量约300~500 mm，与近现代的气候条件较为近似；而离石黄土和午成黄土形成时期的年均气温为11~14℃，降水量约600~800 mm，虽然第四纪时期整体气候均属于暖温带，但在早更新世至全新世时期发生的气候变化是较为明显的。晚更新世，该地区的气候条件属于半干旱大陆性气候区，马兰黄土即在此时形成，并覆盖于湿热期形成的红土层之上。随后，受到新构造运动抬升，其上的黄土层被侵蚀，可见红黄土层交替的现象（如图2b南京庄系）。

成土时间对古红土的性质也具有至关重要影响, 在黏粒含量、铁氧化物的富集程度和红度指数等几个指标中, 早期形成的古红土均高于晚期形成的古红土^[29]。但与南方的古红土相比, 本研究的土壤颜色较浅, 红度值、黏粒以及氧化铁的含量均较低, pH 有明显不同^[30]。主要的原因是南方古红土的黏粒含量一般还是高于北方的古红土, 而且其黏粒中有相当一部分是氧化铁, 而氧化铁是影响红度的主要因素, 以赤铁矿形式存在。而北方的红色土壤对于第四纪黄土, 其黏粒含量不高, 红色主要是结构体面的黏粒吸附氧化铁的结果, 其结构体内部土壤基质的颜色为浅红偏黄(如墕头系、南京庄系和段王系等第四纪红黏土)。但是本研究样本剖面中黏粒含量足够高的土壤如坪地川系、穿底系和土门口系(第三纪的红色石灰土、第三纪保德红土), 其红度与南方红土的相似, 这也进一步证明第三纪北方的气候较第四纪温暖, 风化强烈, 黏化程度高。

需要指出的是, 本研究对土壤颜色的测定是通过目视比色获取的, 易受人眼对光的反应等影响, 具有较大的主观性和异读性^[31], 如果条件许可还是应该采用便携式测色仪^[32]或颜色传感器^[33]。此外, 有研究表明红黏土微形态观察会发现黏粒胶膜^[34], 但本次调查对于结构体面上的黏粒胶膜观察也只是在肉眼和借助手持放大镜条件下的观察, 并未用膜片进行原状土微型态观察, 也有可能遗漏了某些土层的黏粒胶膜信息。

4 结 论

结果表明, 调查的 14 个典型淋溶土剖面多为黄土覆盖古红土或古红土出露, 古红土母质多为第三纪的保德红土和第四纪的红黏土。这些土壤剖面由于成土环境和时间等因素在黏粒含量、氧化铁含量和颜色参数上有差异, 第三纪的保德红土的黏粒含量、氧化铁含量和红度均较第四纪古土壤高。这些剖面具有黏化层, 其土壤结构为棱块状或次棱块状, 结构体面上可见明显的黏粒胶膜。某些黏化层结构体表面较结构体内的土壤基质的颜色更红, 证实了氧化铁随着黏粒在土壤空隙中的迁移淀积在土壤结构体表面上。黏化层中各种形态的氧化铁与土壤颜色参数(红度、色调、明度和彩度)存在一定相关性, 游离氧化铁与土壤红度正相关性最高, 是黏化层红色的最直接的“染色剂”。土壤黏粒含量与土壤全铁、游离氧化铁和无定

形氧化铁均为极显著的正相关关系, 间接表明了黏粒含量与土壤颜色之间存在一定关系。

参考文献 (References)

- [1] Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese Soil Taxonomy[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001. [中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 第3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.]
- [2] Torrent J, Nettleton W D. A simple textural index for assessing chemical weathering in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43 (2): 373–377
- [3] Levine E R, Ciolkosz E J. Soil development in till of various ages in northeastern Pennsylvania[J]. Quaternary Research, 1983, 19 (1): 85–99
- [4] An Z S, Wei L Y. Genetic significance of deposition clay cutans[J]. Chinese Science Bulletin, 1979, 24 (8): 356–359. [安芷生, 魏兰英. 淀积铁质黏粒胶膜及其成因意义[J]. 科学通报, 1979, 24 (8): 356–359.]
- [5] Zhang Z W, Zhu Z X, Fu W L, et al. Morphology of soil iron oxides and its correlation with soil-forming process and forming conditions in a Karst mountain[J]. Environmental Science, 2012, 33 (6): 2013–2020. [张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 等. 岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系[J]. 环境科学, 2012, 33 (6): 2013–2020.]
- [6] Shao Z C, Chen J F. Study on Iron adsorption characteristics of some iron oxides[J]. Acta Pedologica Sinica, 1984, 21 (2): 153–162. [邵宗臣, 陈家坊. 几种氧化铁的离子吸附特性研究[J]. 土壤学报, 1984, 21 (2): 153–162.]
- [7] Zhang M K, Hu G C. Study on mineral composition and characteristics of iron oxide in limestone soils in western Zhejiang Province[J]. Soils, 2000, 32 (1): 39–43. [查明奎, 胡国成. 浙西石灰岩发育土壤中氧化铁矿物组成及特性的研究[J]. 土壤, 2000, 32 (1): 39–43.]
- [8] 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.]
- [9] Huang C M, Wang C S, He Y R, et al. Pedogenetic properties and paleo-environmental implication of paleo-krasnosems in the Yuanmou basin[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35 (3): 251–256. [黄成敏, 王成善, 何毓蓉, 等. 元谋盆地古红土的土壤发生学特征及古环境意义[J]. 土壤通报, 2004, 35 (3): 251–256.]
- [10] Liu D S, Sun J M, Wu W X. Past present and future of the Chinese loess research: A discussion on the reality of facts and myth[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21 (3): 185–207. [刘东生, 孙继敏, 吴文祥. 中国黄土研究的

- 历史、现状和未来——一次事实与故事相结合的讨论[J]. 第四纪研究, 2001, 21 (3): 185–207.]
- [11] Shanxi Soil Survey Office. Soil Species of Shanxi[M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1992. [山西省土壤普查办公室. 山西土种志[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1992.]
- [12] Liu Y Z, Zhang J Y. Soils of Shanxi[M]. Beijing: Science Press, 1992. [刘耀宗, 张经元. 山西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [13] Zhang F R, Jin D S, Li C, et al. Soil Series of Shanxi[M]. Beijing: Science Press, 2020. [张凤荣, 靳东升, 李超, 等. 山西土系志[M]. 北京: 科学出版社, 2020.]
- [14] Zhang G L, Li D C. Manual of soil description and sampling[M]. Beijing: Science Press, 2017. [张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [15] Thompson J A, Pollio A R, Turk P J. Comparison of munsell soil color charts and the globe soil color book[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 (6): 2089–2093.
- [16] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [17] Blavet D, Mathe E, Leprun J C. Relations between soil colour and waterlogging duration in a representative hillside of the West African granito-gneissic bedrock[J]. Catena, 2000, 39 (3): 187–210
- [18] Zhang G L, Wang Q B, Zhang F R, et al. Criteria for establishment of soil family and soil series in Chinese soil taxonomy[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (4): 826–834. [张甘霖, 王秋兵, 张凤荣, 等. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准[J]. 土壤学报, 2013, 50 (4): 826–834.]
- [19] Zhang F R. Soil geography[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2016. [张凤荣. 土壤地理学[M]. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2016.]
- [20] Torrent J, Schwertmann U, Schulze D G. Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain[J]. Geoderma, 1980, 23 (3): 191–208.
- [21] Soileau J M, McCracken R J. Free iron and coloration in certain well-drained coastal plain soils in relation to their other properties and classification[J]. Soil Science Society of America Journal, 1967, 31 (2): 248–255.
- [22] Dong Y Y, Zhao C Y, Yu Z T, et al. Characteristic curves and models analysis of soil water in interdune at the southern edge of gurbantunggut desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31 (1): 166–171. [董义阳, 赵成义, 于志同, 等. 吉尔班通古特沙漠南缘丘间地土壤水分特征曲线及模拟[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (1): 166–171.]
- [23] Hu X F, Gong Z T. Soil genesis and the study of Quaternary[J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1998, 7 (3): 257–259. [胡雪峰, 龚子同. 土壤发生学与第四纪研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7 (3): 257–259.]
- [24] Zhang Z G. Loess in China[M]. Beijing: Geology Press, 1989. [张宗沾. 中国黄土[M]. 北京: 地质出版社, 1989.]
- [25] Lei M, Chang Q R, Feng L X, et al. Soil characteristic and genetic feature of iron oxide of Taibai Mountains[J]. Geographical Research, 2001, 20 (1): 83–90. [雷梅, 常庆瑞, 冯立孝, 等. 太白山土壤特性及氧化铁发生学特征[J]. 地理研究, 2001, 20 (1): 83–90.]
- [26] Wang L D, He Z J, Wang J. Iron oxides in soil of three parallel Rivers (Nujiang, Lancangjiang, and Jinshajiang) area and its genealogical significance[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2009, 40 (7): 864–868. [王立东, 何忠俊, 王晶. 三江并流区土壤氧化铁及其发生学意义研究[J]. 广西农业科学, 2009, 40 (7): 864–868.]
- [27] Wang Q B, Cui D, Han C L, et al. Relationship between soil-developing indicators and climate factors and reconstruction of paleoclimate in the western area, Liaoning Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (2): 244–252. [王秋兵, 崔东, 韩春兰, 等. 土壤发育指标与气候因子的关系及辽西地区古气候重建[J]. 土壤学报, 2013, 50 (2): 244–252.]
- [28] Peng X L. An introduction of professor Zhu Xianmo on loess-paleosol research[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1995, 2 (4): 20–25. [彭祥林. 朱显模教授关于黄土—古土壤研究简述[J]. 水土保持研究, 1995, 2 (4): 20–25.]
- [29] Gong Z T, Chen H Z, Liu L W. Paleosols and quaternary environment in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26 (4): 379–387. [龚子同, 陈鸿昭, 刘良梧. 中国古土壤与第四纪环境[J]. 土壤学报, 1989, 26 (4): 379–387.]
- [30] Ouyang N X, Zhang Y Z, Sheng H, et al. Taxonomy of granite-derived red soils in eastern Hunan[J]. Soils, 2017, 49 (4): 828–837. [欧阳宁相, 张杨珠, 盛浩, 等. 湘东地区花岗岩红壤在中国土壤系统分类中的归属[J]. 土壤, 2017, 49 (4): 828–837.]
- [31] Melville M D, Atkinson G. Soil colour: Its measurement and its designation in models of uniform colour space[J]. Journal of Soil Science, 1985, 36 (4): 495–512.
- [32] Viscarra Rossel R A, Minasny B, Roudier P, et al. Colour space models for soil science[J]. Geoderma, 2006, 133 (3/4): 320–337.
- [33] Stiglitz R, Mikhailova E, Post C, et al. Evaluation of an inexpensive sensor to measure soil color[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 141–148.
- [34] Wang X L, Zhang F R, Wang S, et al. Discussion on characteristics, pedogenetic process and taxonomy of red clay in Beijing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (2): 238–246. [王秀丽, 张凤荣, 王数, 等. 北京地区红色黏土特性及成土过程和系统分类探讨[J]. 土壤学报, 2014, 51 (2): 238–246.]

(责任编辑: 檀满枝)