

关中地区古耕作土壤和现代耕作土壤微形态特征及意义

庞奖励, 黄春长, 张旭

(陕西师范大学旅游与环境学院/西北历史环境变迁与经济社会发展研究中心, 西安 710062)

摘要: 【目的】通过对土壤微形态研究试图阐明陕西关中地区现代土壤的发育过程和微形态标志。【方法】用偏光显微镜对 LGT 剖面不同发生层的薄片进行了观察和影像定量分析。【结果】不同发生层的矿物组合十分相似, 石英 (Q) 和长石 (P1) 占绝对优势, 但 $C/F_{15\mu m}$ 值、不同矿物间的比例、颗粒形态等有明显差异。土壤形成物主要是粘土矿物、方解石和无定形 Fe, Ap 层中有大量针状方解石微晶、次生粘土和蚯蚓粪粒, BC 层方解石数量多且形态最复杂, Bt₁ 和 Bt₂ 层方解石很少, 但有大量粘土亚胶膜。【结论】所谓的“堆垫土”实际上由两部分组成, 下部 BC 主要是全新世晚期堆积的风积物, 表层 Ap 是 2000 年以来人类不断施加土粪、风尘堆积和农耕活动的综合产物。

关键词: 土壤微形态; 古耕作土壤; 现代土壤; 关中地区

Micromorphological Features of Old Cultivated and Modern Soil in Guanzhong Areas of Shaanxi Province, North China

PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang, Zhang Xu

(College of Tourism and Environmental Sciences/ Northwest Research Center for Historical Environment & Socio-economic Development, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062)

Abstract: 【Objective】 Using the data obtained from the LGT soil profile, this paper attempts to illustrate soil-forming process of modern soil in the Guanzhong areas and its micromorphological features. 【Method】 Micromorphology was observed under a petrographic microscope, and its image was quantitatively measured by LEICAL Qwin software. 【Result】 Micromorphological observations of the thin sections show that the minerals assemblage of different horizons very similar, which is mainly composed of Q and Pl. However, there are obvious differences in $C/F_{15\mu m}$ ratio, mineral content, and coarse features. Pedofeatures mainly consist of clay, calcite, and amorphous Fe. Ap horizon is characterized by abundant needleshaped secondary-calcite, secondary-clay, and earthworm fecal pellet. BC horizon is characterized by the secondary-calcite of large quantity with various shapes. Bt₁ and Bt₂ horizons are characterized by abundant clay hyopcoatings and a small quantity of secondary-calcite. 【Conclusion】 All the results of this research suggest that Earth-cumulic Orthic Anthrosols consist of both the upper Ap horizon, which cause loessal dung and eolian dust deposition, and cultivation occurs simultaneously during the process of Ap horizon-formation, and the lower BC horizon, which is aeolian sedimentary at the time of relative aridity during late Holocene.

Key words: Micromorphology; Old cultivated soils; Modern soil; Guanzhong areas

0 引言

【本研究的重要意义】土壤微形态是成土过程最终结果的表现, 它能直观地告诉我们土壤形成过程的各种信息 (如矿物结构的变化、物质的迁移、耕作方式、土壤肥力、环境条件等等), 也能作为土壤分类的指标之一。因此, 科学家不遗余力地通过改进观察

测试技术和手段来揭示其更深层次的信息。【前人研究进展】自 20 世纪 30 年代显微镜技术引入土壤微形态研究至今, 其研究内容从早期的纯土壤学已扩展到土地评估、土壤生态、环境演变等领域。郑毅^[1~3]等探讨了自然和农业环境土壤微形态形成过程和生态功能。贺秀斌^[4~6]等借助计算机技术对土壤微结构及其演化过程进行了数字模拟。夏艳玲^[7,8]等研究了不同土

收稿日期: 2005-11-20; 接受日期: 2006-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40471119); 教育部高校博士点基金 (批准号: 20050718008); 陕西师大重点项目 (HNNUHG04009)

作者简介: 庞奖励 (1963-), 男, 西安人, 教授, 博士, 研究方向为土地利用与土壤演变。Tel: 029-85308445, Fax: 029-853037981; E-mail:

jlplang@snnu.edu.cn, lhypjl@sina.com

地利用方式下土壤的微形态特征。Davidson^[9,10]等研究了古耕土壤的微形态标志。Mooney^[11~13]等从土壤微形态中提取了环境演变和土壤侵蚀的有关信息。【本研究的切入点】与国际上研究水平相比,国内在这方面的研究尚有一定差距。关中是中国发达的旱作农业区之一,在长期的耕作过程中不断施加黄土性质的土粪,这种特殊的加积作用使土壤剖面同时向上下两个方向发展,形成了所谓的“楼土”^[14,15]或“堆垫旱耕人为土”^[16]。但是,随着对东亚季风演变研究的深入,刘东生^[17~20]等认为关中地区土壤剖面分异的实质是全新世时期东亚季风变化引起成土过程在时间序列上变化的结果,所谓的“堆垫土”是晚全新世时期风尘堆积加速的产物。两种认识的分歧直接影响着对土壤所含信息的理解和提取。另外,不同时期的文化层常埋在土壤剖面的不同层位,而文化遗址周边土壤的同期层位也常能够见到一些人类活动的遗迹,说明这些被埋藏的土壤曾被先人扰动,属古耕作土壤。但有关古耕作土壤特别是微形态的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】本文通过对土壤微形态的研究,试图说明关中现代土壤的发生过程和古耕作层的微形态特征及其意义。

1 材料与方法

1.1 自然环境

关中地区位于黄土高原南缘,秦岭是其南侧的天然屏障和风尘堆积的南界^[17]。属暖温带半湿润气候,年均气温和降雨分别为 12~14℃和 600~750 mm。区内地形平坦,土地肥沃,是中国十分重要的旱作农业区之一,主要栽培小麦、玉米、棉花,一年两熟。

1.2 试验材料

2003~2005 年对关中地区及周边的全新世土壤进行了多次野外调研和大量采样。但限于篇幅,本文选择 LGT 剖面为解剖对象。该土壤剖面位于关中东部,华县境内渭河南岸二级阶地上(34°31'N, 109°45'E,海拔 365 m),为一砖厂取土后出露的陡坎,马兰黄土和全新世地层保存,是理想的研究剖面。该地区土地很早就为人类所利用,长期栽培小麦和玉米。

1.3 试验方法

野外方法:在所选研究剖面从地表开始,向下每 2 cm 连续采全岩样(单样>700 g),至马兰黄土顶部。其中上部(0~100 cm)每 5 cm、下部(100~300 cm)每 10 cm 取一个适于微形态研究的样块,疏松层用库比纳盒取样。

室内试验:文中所涉试验在陕西师范大学环境演变实验室完成。样品在室内自然风干。颜色描述采用标准比色卡(中国科学院南京土壤研究所制,1989)。粒度测量用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer S 激光粒度仪。大于 0.1 mm 粗颗粒用筛分法分离。CaCO₃ 含量用德国 Elmentar 公司的 TOC II 分析仪。阳离子交换量(CEC)测定方法见参考文献[21]。古耕作层通过野外和室内相结合方法确定。野外采样过程中同时观察地层中是否含有古人类活动的遗迹(如陶片、较大的石块、灰烬等),室内对大于 0.1 mm 颗粒在实体显微镜下鉴别是否含有人类活动遗物,两种方法结果互相参比就能较准确判断其是否为古耕作层及其位置。

样品固化参照曹升庚方法^[22]。土壤薄片(32 mm×24 mm)在 Leica-DMRX 偏光显微镜下观察。微形态特征参数(具体含义参见有关表注释)的定量测量利用 LEICAL Qwin2.6 软件完成。文中对薄片的描述和术语与参考文献[23]一致。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面结构及理化性质

由于 LGT 剖面所在地形平坦使其保存完整,分异明显,土壤发生层比较清楚。在剖面不同层位可见到不同时期的陶片,这为初步断代提供了证据(表 1)。

2.2 粗颗粒特征及矿物组合

矿物统计显示,不同发生层矿物组合十分相似[石英(Q)和长石(Pl)占绝对优势],但 C/F_{15μm} 值、不同矿物的比例、颗粒形状等却有明显差异(表 2)。Ap 中颗粒呈次棱角状-次圆状,平均粒径 29 μm, C/F_{15μm} 值低,可见 Bi“假晶”和大于 1 mm 的晶屑、岩屑及砖瓦屑等(图 1)。BC 层以次棱角状为主,平均 48 μm, C/F_{15μm} 值较高, Q 和 Pl 所占比例降低,少量原生 Cc、Bi 和 Hb(图 2)。Bt₁ 和 Bt₂ 中粗颗粒呈圆状-次圆状(图 3, 4), Q 和 Pl 占 95%, 缺少原生 Cc、Bi 和 Hb, C/F_{15μm} 值低。其中 Bt₁ 中平均粒径较小(22 μm), 少量>1 mm 细砾,排列显示弱定向。

2.3 土壤形成物

土壤形成物主要是粘土矿物(伊利石和蒙脱石为主,少量高岭石),其次是方解石和无定形 Fe(表 3)。粘土可分为残积粘土和淀积粘土,前者常呈浓聚物状,其形态和大小变化很大,轮廓较模糊。后者主要呈亚胶膜状(hypocoatings)和少量不规则团块状,与周围物质界线清楚。粘土均被无定形 Fe 不同程度的混染而

表 1 关中东部 LGT 土壤剖面描述

Table 1 Pedological description of the soil profile at LGT site in the eastern Guanzhong areas, Shaanxi, North China

地层 Stratigraphy	发生层 Horizon	颜色及结构 Colour and structure	CaCO ₃ (g·kg ⁻¹)	CEC [cmol(+) ·kg ⁻¹]	粒度 Particle (mm)			粗颗粒 Coarse (>0.1 mm)
					2~0.05	0.05~0.002	<0.002	
覆盖层 Cover layer	表土(TS) Top soil	Ap ₁ : 0~20 cm, 浊黄橙, 10YR7/3, 粉砂粘土质地。微团聚体(0.5~1.0 mm)发育, 大量孔隙、植物根系和蚯蚓粪, 常见侵入物 Ap ₁ : 0-20 cm. Pale orange, 10YR7/3, silt-clay. Abundant aggregate (0.5-1.0mm), pores, plant roots and earthworm excrement. Slight amount intrusive mass Ap ₂ : 20~40 cm, 浊黄橙, 10YR7/5, 粉砂粘土质地, 微显层状, 稍紧实, 大量植物根系和蚯蚓粪, 有侵入物 Ap ₂ : 20-40 cm. Pale orange, 10YR7/5, silt-clay, slight bed, slight compactness. Abundant plant roots and earthworm excrement. Little amount intrusive mass	50.51	12.30	121	702	187	Q 和 Pl 晶屑为主, 少量岩屑和砖瓦屑、碳酸钙结核 Main quartz and plagioclase fragment. Little amount rock fragment, pottery fragment and carbonate concretion.
	近代黄土(L ₀) Recent loess	BC 40~70 cm 浊橙色, 7.5YR7/4, 粘土粉砂质地, 疏松, 中等数量孔隙, 较多粉霜状碳酸盐 40-70 cm. Pale orange, 7.5YR7/4, clay-silt, friable. Medium amount pores, abundant pseudo-mycelia secondary-carbonate 70~96 cm, 浊橙色, 7.5YR7/5, 粘土粉砂质地, 疏松。底部偶见灰陶片 70-96 cm. Pale orange, 7.5YR7/5, clay-silt, friable. Rare grey pottery fragments in the lower part	57.73	11.93	122	697	171	Q 和 Pl 晶屑、碳酸钙结核。底部见先周-西周灰陶碎屑 Quartz and plagioclase fragment, carbonate concretion. Some fragment of West Zhou Dynasty grey pottery in lower part
古土壤 Paleosol	古耕作土壤(S ₀ ¹) Old cultivated soil	Bt ₁ 96~144 cm, 浊棕色, 7.5YR/6/4, 粘土粉砂质地, 团块结构, 球形小团粒较发育 (0.5~1.0 mm), 中等数量根孔, 大量粉霜状碳酸盐 96-144 cm, Pale brown, 7.5YR/6/4, clayey silt, crumb structure. Abundant aggregate (0.5-1.0 mm), medium amount pores, lots of pseudo-mycelia secondary-carbonate 144~176 cm, 浊橙色, 7.5YR7/3, 粉砂质地, 疏松多孔, 团块状结构, 局部有团粒状结构, 见球形小团粒, 中等数量粉霜状碳酸盐 144-176 cm. Pale orange, 7.5YR7/3, silt, friable, blocky structure, partly granular structure. little amount aggregate, medium amount pseudo-mycelia secondary-carbonate. 176~190 cm, 浊红棕色, 5YR/5/4, 粘土粉砂质地, 团块-团粒状结构, 中等数量粉霜状碳酸盐 176-190cm, Pale red-brown, 5YR/5/4, clayey silt, crumb-granular structure. Medium amount pseudo-mycelia secondary-carbonate.	29.29	17.95	91	705	202	总量少, Q 和 Pl 晶屑为主。134~176 cm 见夏-商周期的灰陶屑 Lower total amount, main quartz and plagioclase fragment. Some fragment of Xia-Shang Dynasty grey pottery between 134-176 cm
	自然古土壤(S ₀ ²) Natural paleosol	Bt ₂ 190~276 cm, 浊棕色, 5YR/6/3, 粉砂粘土质地, 棱块状结构, 较紧实, 中等数量孔隙, 少量粉霜状碳酸盐 190-276 cm. Pale brown, 5YR/6/3, silt-clay, prismatic structure. Slight compactness, medium amount pores, little amount pseudo-mycelia secondary-carbonate	23.43		89	698	213	总量少, 主要是 Q 和 Pl 晶屑 Lower total amount, main quartz and plagioclase fragment
马兰黄土(L ₁) Malan loess	Ck/C	276~? cm, 浊黄橙, 10YR7/4, 粉砂质地, 疏松多孔。顶部见大量星散状碳酸盐结核 (<5 mm) 276 cm-? Pale yellow orange, 10YR7/4, silt, very friable. Abundant carbonate concretion (<5 mm) in the upper part	138.45	18.95	133	687	180	Q 和 Pl 晶屑, 碳酸钙结核 Quartz and plagioclase fragment, carbonate concretion

CEC: 阳离子交换量 Cation exchange capacity; Q: 石英 Quartz; Pl: 长石 Plagioclase

表 2 关中东部 LGT 土壤剖面粗颗粒组成及特征

Table 2 Coarse features and mineral assemblage of soil profile at LGT site in the eastern Guanzhong areas, Shaanxi, North China

发生层 Horizon	矿物组合 Minerals assemblage	C/F _{15μm}	磨圆度 Roundness	定向性 Orientation (%)	球度 Aspect ratio	粒径 Size (μm)	
						范围 Range	平均 Mean
Ap (0~40 cm)	(Q+Pl) _{93%} +Bi(_{<1%})+Hb(_{<1%})+Ep(_{2%})+Op (_{3%})	0.32	1.70	27.61	1.740	15~90	29
BC (40~96 cm)	(Q+Pl) _{90%} +Bi(_{2%})+Hb(_{1%})+Ep(_{2%})+Cc1(_{<2%})+ Op (_{3%})	0.52	1.56	30.52	1.849	15~212	48
Bt ₁ (96~190 cm)	(Q+Pl) _{95%} +(Bi+Hb) _{<1%} +Ep(_{<2%})+ Op (_{3%})	0.15	1.72	19.43	1.723	15~70	22
Bt ₂ (190~276 cm)	(Q+Pl) _{95%} +(Bi+Hb) _{<1%} +Ep(_{<2%})+ Op (_{3%})	0.21	1.68	26.67	1.742	15~77	26
Ck/C (276~304 cm)	(Q+Pl) _{85%} +Bi(_{3%})+Hb(_{3%})+Ep(_{2%})+Cc1(_{4%})+ Op (_{3%})	0.71	1.54	24.52	1.838	15~243	52

Q. 石英 Quartz; Pl. 长石 plagioclase; Bi. 黑云母 Biotite; Hb. 角闪石 Hornblende; Ep. 帘石 Eepidote; Cc1. 原生方解石 Primary calcite; Op. 不透名矿物 Opacite

粒径=颗粒最大粒径 Size= Maximun length of coarse grain

磨圆度= (周长×周长) / (4×面积×1.064) Roundness = (perimeter × perimeter)/(4 × area × 1.064)

定向性=指颗粒最长轴与水平轴的夹角, 表中数据是夹角为 0 度颗粒的含量 Orientation = The angle of the longest feret, data in Table 2 is grain content whose angle is zero

球度=颗粒的最大粒径/最短粒径 Aspect Ratio = The ratio of length divided by breadth

C/F_{15μm}= 大于 15 μm 颗粒量/小于 15 μm 颗粒量 C/F_{15μm} = The ratio of greater than 15 μm grain to less than 15 μm grain in content

呈黄棕色-棕色-红棕色。Ap 层中大量浓聚物状残积粘土(图 5, 6)和少量不规则团块状淀积粘土(图 7)。BC 层主要是残积粘土, 数量较 Ap 层减少。在 Bt₂ 层出现大量淀积粘土, 亚胶膜状(膜厚 10~20 μm)和团聚状淀积粘土都十分发育(图 8)。Bt₁ 中粘土分布与 Bt₂ 相似, 但亚胶膜状粘土所占比例减小。

次生方解石形态多种多样, 根据结晶程度可分为隐晶、微晶、细晶, 根据形态可分为亚胶膜、浓集物、结核、针状、星散状。Ap 中方解石较丰富, 主要是隐晶和微晶, 以针状和星散状为主、少量浓集物状(常常混有粘粒而不清楚), 特别在 Ap₂ 中针状方解石微晶更多。BC 层方解石数量和形态复杂, 既有原生方解石又有次生方解石。可见细晶组成的方解石脉, 微晶组成的结核、浓聚体、亚胶膜等。Bt₂ 和 Bt₁ 中方解石较少, 其中 Bt₂ 中主要以微晶呈星散状分布于基质中, 而 Bt₁ 中主要以针状微晶分布在孔隙边沿(图 9)。

2.4 孔隙、微垒结和有机质

表层 Ap 中, 孔隙度高, 孔隙形状复杂, 既有粗大的较规则孔隙, 又有细小的不规则孔隙(图 5)。BC 层中主要由不规则状小孔隙组成, 以数量多为特征(图 10)。Bt₂ 中孔隙度高, 主要是由粗大的孔隙构成, 孔隙壁平滑。古耕作层 Bt₁ 中, 以圆形孔洞、囊孔占优势(图 10, 表 3)。

本次识别出的生物遗迹主要是蚯蚓粪粒, 多呈球形或椭圆形的团聚体。Ap 中蚯蚓粪粒较发育和形态较规则。BC 中粪粒与 Ap 相似, 但数量明显减少。Bt₂ 和 Bt₁ 中粪粒数量远少于表土层, 常呈长条形附着于孔隙壁, 其中古耕作层中数量远多于自然古土壤。

3 讨论

有关争论的焦点是古土壤 S₀ 以上部分的成因。多种证据表明, 黄河中游地区在全新世中期是一个亚热带环境, 大致在 3 000 年前后转为一种相对干冷的气候并持续到今天^[20,24,25]。S₀ 以上覆盖层在水平方向上连续存在而不受地形变化的影响, 这正是自然风尘堆积的特征。BC 层颗粒棱角明显和有原生不稳定矿物残存, 说明风化作用较弱, 指示一种较干旱的环境。这样的环境不利于风化, 不稳定矿物和风积物的原始特征才能保存下来。关中位于粘黄土带内, 大于 1 mm 颗粒不可能通过风力长距离的掣带而来^[17], 显然 Ap 层中大于 1 mm 的颗粒应与耕作活动有关。

从 BC→Ap, 不稳定矿物数量显著减少, 从少量→假晶→消失, 而表生环境下较稳定的 Q 和 Pl 所占比例却增大, 形状从次棱角状→次圆状为主, 粒径和 C/F_{15μm} 值也降低, 这表示风化程度增强和颗粒受到较强的磨圆。上述变化与人类长期的耕作活动直接有关。Ap₂ 与 BC 分界线因地形变化在水平方向上不连续, 仅在土粪易于送达的平坦地区清楚, 表明这个位置正是开始大量施加黄土性质土粪的位置, 人类影响急剧增强的时间(大约在秦汉时期)。耕作活动使颗粒发生频繁机械运动, 有利颗粒的圆化和细化, 同时土壤疏松有利于水气的运移, 这能增强矿物风化分解的强度。在 BC 层形成期间, 低下的农业生产水平对土壤产生的影响十分有限, 使其保持了更多自然堆积的特征。Bt₁ 和 Bt₂ 中颗粒显著圆化、缺少不稳定矿物, 这主要与当时亚热带气候环境有关。但 Bt₁ 层颗粒平均

表 3 关中东部 LGT 土壤剖面微形态特征描述

Table 3 Micromorphological features of soil profile at LGT site in the eastern Guanzhong areas, Shaanxi, North China

发生层	c/f 相对分布式	基本垒结及孔隙	土壤形成物
Horizon	c/f-related distribution	Elementary fabric and void	Pedofeatures
Ap	双空间填隙型 Double spaced fine enaulic	中等分离的团块状微结构。简单填充孔隙和孔道, 边沿锯齿状, 0.1~0.8 mm, 总孔隙度 10%~12% Moderately separated crumb microstructure. Simple packing voids and channel voids, zigzag planes, 0.1-0.8 mm, about 10%-12%	大量残积粘粒浓聚物(0.1~0.3 mm)。少量淀积粘土(<5%), 以不规则团聚状存在。常见椭圆形蚯蚓粪粒。大量针状方解石微晶 Abundant residual clay concretion (0.1-0.3 mm), little amount illuvial clay concretion (<5%), erose shape. Some ellipsoid earthworm excrement. Abundant needleshaped secondary-calcite
BC	单空间填隙型 Single spaced fine enaulic	中等分离的团粒状微结构。简单填充孔隙, 少量孔道, 孔隙边沿锯齿状。孔隙度 8~10% Moderately separated granular microstructure. Simple packing voids, little channels, zigzag planes, about 8%-10%	少量粘粒浓聚物, 缺少淀积粘土。大量结核状、浓聚物状次生方解石。少量椭圆形蚯蚓粪粒 Little amount residual clay concretion, no illuvial clay. Abundant secondary-calcite nodule and concretion. Little amount ellipsoid earthworm excrement
Bt ₁	双空间斑状 Double spaced fine porphyic	弱分离的海绵微结构。主要是孔道孔隙, 其中以园状孔隙(根孔)占优势, 孔隙壁平滑。孔径 0.1~1.5 mm, 孔隙度 15%~17% Weakly separated spongy microstructure. Channel voids, most of them being circular void, smooth planes, 0.1-1.5 mm, about 15%-17%	大量粘粒浓聚物, 形状不规则, 局部呈条带状。淀积粘土十分发育(5%), 以亚胶膜和团聚体两种形式存在, 亚胶膜厚 10~20 μm。大量蚯蚓粪粒。少量针状碳酸盐分布在孔隙边沿, 常见扁圆形蚯蚓粪粒 Abundant clay concretion, erose shape, little being zonal. Abundant illuvial clay concretion and hypocoatings (5%), about 10-20 μm thickness of hypocoatings. Lots of ellipsoid earthworm excrement. Little needleshaped secondary-calcite at edge of void
Bt ₂	双空间斑状 Double spaced fine porphyic	弱分离的海绵微结构。通道孔隙, 少量园状孔隙, 孔隙形状较规则, 孔隙壁平滑, 0.1~1.5 mm, 孔隙度 14%~15%。 Weakly separated spongy microstructure. Channel voids, little circular void, erose shape, smooth plane, 0.1-1.5 mm, about 14%-15%.	粘粒浓聚物发育, 淀积粘土十分发育(5%), 以亚胶膜和团聚体两种形式存在, 亚胶膜状粘土更发育, 膜厚 30~60 μm Abundant residual clay and illuvial clay (5%), later being illuvial clay concretion and hypocoatings in a thickness of 30-60 μm
Ck/C	单空间填隙型 Single spaced fine enaulic	中等分离的团粒状微结构。简单填充孔隙, 孔隙形状极不规则, 孔隙较粗糙, 缺少大孔隙, 孔隙度 10%~12% Moderately separated granular microstructure. Simple packing voids, shape being very erose, rough planes, no big voids, about 10%-12%	大量结核状、脉状、浓聚物状次生方解石。少量残积粘土 Abundant secondary-calcite nodule and concretion and vein, little amount residual clay

粒径趋于减小和出现>1 mm 细砾, 这与当时简单的耕作扰动有关。

淀积粘土是土壤强淋溶作用的标志, 残积粘土是粘土原地发生扩散和重新集中的结果, 常出现在风化强度和降水不高的条件下^[15,16]。故次生粘土矿物的多少和形式指示了成土强度。Bt₂ 和 Bt₁ 大量淀积粘土和 R/I 值较低 (R/I=残积粘土/淀积粘土), 这与大暖期的暖湿环境有关。但 Bt₁ 中淀积粘土显示弱定向趋势和 R/I 值升高与耕作扰动有关, 频繁的耕作扰动使土壤孔隙经常改变方向, 难以长时间保持方向向下而向水平方向偏转。按正常理解, 形成于 3 100 年以来相对干旱早期的 BC+Ap 层不应出现大量次生粘土, 但 Ap 却有大量次生粘土, 说明矿物遭到较强风化, 其原因只能是人类耕作活动所致, 因为大暖期结束以后的相对干

旱环境不足以使矿物强烈风化 (BC 中原生不稳定矿物的存在证实了这一点)。正如上述, 耕作活动能改变土壤环境, 风化作用增强的使大量铝硅酸盐矿物分解形成粘土矿物。BC 中次生粘土数量少也说明较干旱的环境不利于次生粘土矿物的形成。

土壤中次生方解石的形成经历了原生方解石→溶解→(移动)→再沉淀的过程。在再沉淀过程中, 环境的差异会形成不同结晶程度和形态的方解石。Bt₂ 和 Bt₁ 中次生方解石较少, 这是由于在暖湿的环境下结晶的方解石难以保存。但在 Bt₁ 中特别是上部有针状方解石微晶分布在孔隙边沿, 这应该是上层碳酸盐淋溶至此淀积的结果。大量针状方解石微晶是 Ap 层的显著特征, 它是耕作活动影响的结果, 但其与 Bt₁ 中的成因不同。根据矿物结晶原理, 矿物要形成较粗

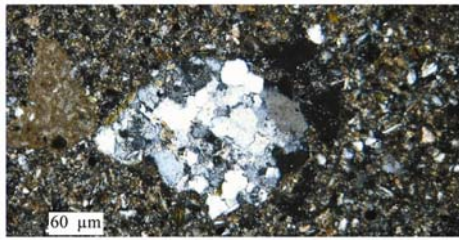


图 1 Ap层中粗大的石英晶屑 (正交偏光, 10×10)
Fig. 1 Coarse grain in Ap horizon (crossed polarised light, 10×10)

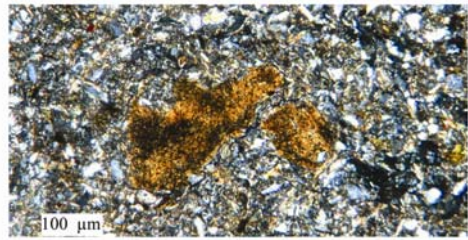


图 6 Ap层中残积粘土 (正交偏光, 10×20)
Fig. 6 Residual clay in Ap horizon (crossed polarised light, 10×20)

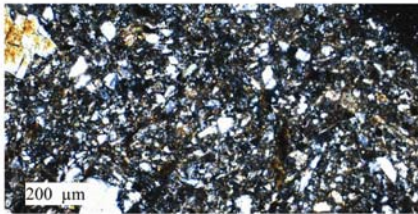


图 2 BC层中原生不稳定矿物角闪石 (正交偏光, 10×20)
Fig. 2 Primary Hb in BC horizon (crossed polarised light, 10×20)

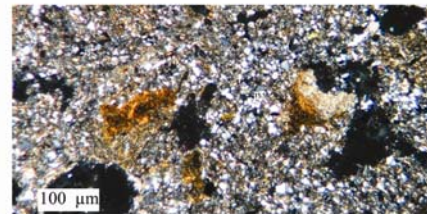


图 7 Ap层中残积粘土和孔隙 (正交偏光, 10×10)
Fig. 7 Residual clay and void in Ap horizon (crossed polarised light, 10×10)

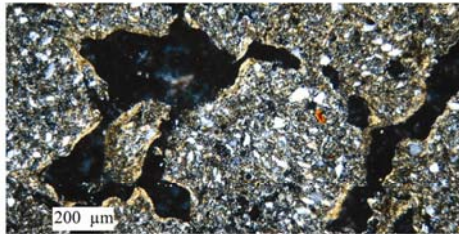


图 3 自然土壤Bt₂中粗颗粒、孔隙和淀积粘土 (正交偏光, 10×10)
Fig. 3 Coarse grain, void and illuvial clay in Bt₂ horizon (crossed polarised light, 10×10)

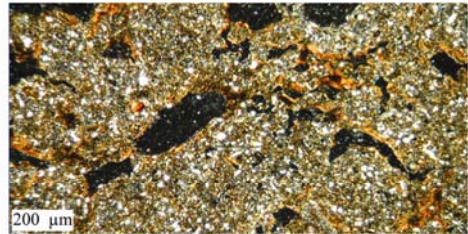


图 8 Bt₂层中淀积粘土和孔隙 (正交偏光, 10×20)
Fig. 8 Illuvial clay and void in Bt₂ horizon (crossed polarised light, 10×20)

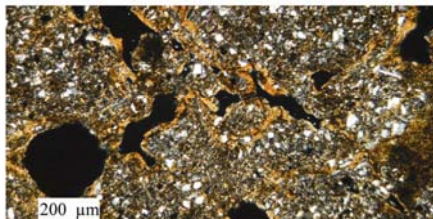


图 4 古耕作土壤Bt₁中粗颗粒、孔隙和淀积粘土 (正交偏光, 10×10)
Fig. 4 Coarse grain, void and illuvial clay in Bt₁ horizon (crossed polarised light, 10×10)

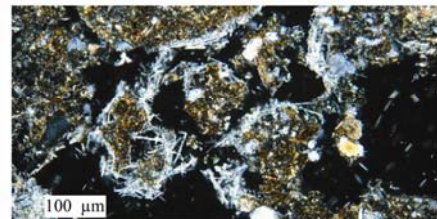


图 9 古耕作土壤Bt₁中针状次生方解石 (正交偏光, 10×40)
Fig. 9 Needleshaped secondary-calcite in Bt₁ horizon (crossed polarised light, 10×40)

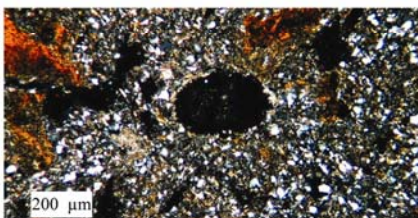


图 5 Ap层中淀积粘土和孔隙 (正交偏光, 10×10)
Fig. 5 Illuvial clay and void in Ap horizon (crossed polarised light, 10×10)

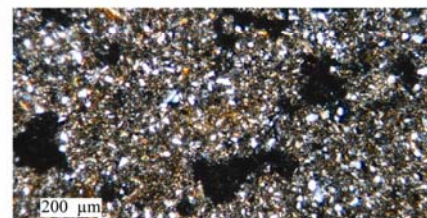


图 10 BC层中孔隙 (正交偏光, 10×10)
Fig. 10 Voids in BC Horizon (crossed polarised light, 10×10)

的晶体必需同时满足 3 个条件。一必需能形成大量结晶中心; 二必需有足够的结晶时间; 三需要稳定的环境。耕作活动使 Ap 层的环境频繁变化而不稳定, 形成的方解石结晶中心难以持续长大, 仅形成了状针状方解石微晶或隐晶方解石。在 BC 形成过程, 人类扰动有限, 能够保持一个较长时间的稳定环境, 结晶中心能够长大形成了细晶, 甚至粗晶方解石。

Bt₁ 中大量圆形和囊状孔洞暗示古耕作活动使得草本植物比例增加并成为主体, 而 Bt₂ 粗大的孔道说明木本植物根系的特征。Bt₂ 和 Bt₁ 中蚯蚓粪粒数量远少于表层 Ap, 这可能是后期的改造使有些粪粒强烈变化而难以识别之故。而 Bt₁ 蚯蚓粪粒数量多于 Bt₂ 是先人耕作活动所致。BC 层中大量不规则状小孔隙反映了降尘自然堆积的孔隙特征, 较干旱的环境拟制了蚯蚓的生长, 使蚯蚓粪粒数量明显减少。Ap 中孔隙十分复杂和蚯蚓粪粒发育, 这是由于长期耕作使土壤疏松和生物活动活跃所致, 应是土壤肥力较强的标志。

4 结论

4.1 古土壤 S₀ 以上部分呈现风积物的主要特征, Ap 是 2 000 年以来人类施加土粪、农业耕作和粉尘降落的综合产物, 而 BC 层主要是全新世晚期风尘持续堆积的产物, 人类的影响十分有限。

4.2 古耕作层 Bt₁ 微形态继承了自然土壤 Bt₂ 的主要特征, 耕作活动阻滞了亚胶膜状粘土的发育, 使团聚状粘土更发育, 使孔隙变小但数量增多, 由孔道占优势变为圆状占优势, 颗粒圆度增加而粒径和 C/F_{15μm} 趋于降低。

4.3 Ap 层的微形态是: 方解石仅长到微晶和隐晶程度, 大量针状方解石微晶和蚯蚓粪粒, 不稳定矿物比例很低, 颗粒圆度和球度增加, 粒径和 C/F_{15μm} 值减小。

4.4 本文对生物遗迹识别、不同耕作方式微形态标志研究不够, 有些微形态的确切释义尚需深入研究。

致谢: 在野外和室内工作中得到周自翔、王利军、张健的帮助, 在此表示衷心的感谢。

References

[1] 郑毅, 张福锁. 土壤结构和耕作对根际微生态系统的影响. 云南农业大学学报, 2003, 18: 193-197.
Zheng Y, Zhang F S. Effects of soil structure and tillage on the rhizospheric micro-ecosystem. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2003, 18: 193-197. (in Chinese)

[2] 文倩, 赵小蓉, 张书美, 妥德宝, 李贵桐, 陈焕伟, 林启美. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量磷的分布特征. 中国农业科学, 2005, 38: 327-332.
Wen Q, Zhao X R, Zhang S M, Tuo D B, Li G T, Chen H W, Lin Q M. Distribution characteristics of microbial biomass phosphorus in different soil aggregates in semi-arid area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38: 327-332. (in Chinese)

[3] Davidson A D. Bioturbation in old arable soils: quantitative evidence from soil micromorphology. *Journal of Archaeological Science*, 2002, 29: 1247-1253.

[4] 贺秀斌, 冯 桓, 冯兆东. 土壤显微结构的 X 光——同步加速器计算机三维图像透视技术. 土壤学报, 2005, 42: 328-330.
He X B, Feng H, Feng Z D. 3D imaging of soil microstructure using synchrotron X-ray computed microtomography. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42: 328-330. (in Chinese)

[5] 李德成, Velde B, Delerue J F, 张桃林. 免耕制度下耕作土壤结构演化的数字图像分析. 土壤学报, 2002, 39: 214-220.
Li D C, Velde B, Delerue J F, Zhang T L. Image analysis of development of cultivated soil structures under non-tillage system. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39: 214-220. (in Chinese)

[6] Bryant R G, Davidson D A. The use of image analysis in the micromorphological study of old cultivated soils: an evaluation based on soil from the island of Papa Stour, Shetland. *Journal of Archaeological Science*, 1996, 23: 811-822.

[7] 夏艳玲, 东野光亮. 不同棚龄大棚土壤微形态特征研究. 云南农业大学学报, 2003, 18: 340-342.
Xia Y L, Dongyie G L. Micromorphology analysis on degeneration of conservatory soil. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2003, 18: 340-342. (in Chinese)

[8] 东野光亮, 史衍玺, 李贻学. 从微形态特征看砂姜黑土土地资源的利用改良. 土壤通报, 2000, 31(2): 52-54.
Dongyie G L, Shi Y X, Li Y X. Micromorphological characteristics and melioration of Shajiang black soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(2): 52-54. (in Chinese)

[9] Davidson D A, Carter S P. Micromorphological evidence of past agricultural practices in cultivated soils: the impact of a traditional agricultural system on soils in Papa Stour, Shetland. *Journal of Archaeological Science*, 1998, 25: 827-838.

[10] Usai M R. Textural pedofeatures and pre-hadrian's wall ploughed paleosols at Stanwix, Carlisle, Cumbria, U.K. *Journal of Archaeological Science*, 2001, 28: 541-553.

[11] Scarciglia F, Terribile F, Colombo C. Micromorphological evidence of paleoenvironmental changes in Northern Cilento (South Italy)

- during the Late Quaternary. *Catena*, 2003, 54: 515-536.
- [12] Mooney S J. Using micromorphology to understand the rewetting mechanisms in milled peat. *Catena*, 2003, 54: 665-678.
- [13] 门明新, 赵同科, 彭正萍, 宇振荣. 基于土壤粒径分布模型的河北省土壤可蚀性研究. *中国农业科学* 2004, 37: 1647-1653.
Men M X, Zhao T K, Peng Z P, Yu Z R. Study on the soil erodibility based on the soil particle-size distribution in Hebei province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37: 1647-1653. (in Chinese)
- [14] 郭兆元. 陕西土壤. 北京: 科学出版社, 1992, 68-110.
Guo Z Y. *Shaanxi Soil*. Beijing: Science Press, 1992, 68-110. (in Chinese)
- [15] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1987.
Xiong Y, Li Q K. *Chinese Soil*. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [16] 龚子同, 陈志城. 中国土壤系统分类. 北京: 科学出版社, 1999, 132-146.
Gong Z T, Chen Z C. *Chinese Soil Taxonomy*. Beijing: Science Press, 1999: 132-146. (in Chinese)
- [17] 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985.
Liu D S. *Loess and Environment*. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)
- [18] 黄春长. 渭河流域 3 100 年前资源退化与地人关系演变. *地理科学*, 2001, 8 (1): 20-31.
Huang C C. The deterioration of land resources and the change in human-earth relationships in the Weihe river basin at 3100 a B.P. *Science Geographic Sinica*, 2001, 8 (1): 20-31. (in Chinese)
- [19] 唐克丽, 贺秀斌. 黄土高原全新世黄土-古土壤演替及气候演变的再研讨. *第四纪研究*, 2004, 24: 129-139.
Tang K L, He X B. Re-discussion on loess-paleosol evolution and climatic change on the Loess Plateau during the Holocene. *Quaternary Sciences*, 2004, 24: 129-139. (in Chinese)
- [20] Pang J L, Huang C C, Zhang Z P. Micromorphological and geochemical evidence of climate variation in the southern Loess Plateau of China during the last 10 000 years. *Eurasian Soil Science*, 2003, 36(2): 136-148.
- [21] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996: 25-27.
Liu G S, Jiang N H, Zhang L D. *Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles*. Beijing: Chinese Standard Press, 1996: 25-27. (in Chinese)
- [22] 曹升庚. 土壤和非固结物质薄片的系统制备方法. *土壤专报*, 1989, 43: 42-45.
Cao S G. Thin section preparation of soil and non-clotted material. *Monograph Pedologica Sinica*, 1989, 43: 42-45. (in Chinese)
- [23] Stoops G. *Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. Madison: . Published by Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin. USA, 2003.
- [24] 黄春长, 庞奖励, 陈宝群, 周群英, 毛龙江, 李平华. 渭河流域先周-西周时代环境和水土资源退化及其社会影响. *第四纪研究*, 2003, 23: 404-414.
Huang C C, Pang J L, Chen B Q, Zhou Q Y, Mao L J, Li P H. Land degradation and its social impact in the Weihe river drainage basin during the predynastic Zhou-western Zhou Dynasty. *Quaternary Sciences*, 2003, 23: 404-414. (in Chinese)
- [25] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 唐领余, 王富葆, 姚檀栋, 赵希涛, 张丕远, 施少华. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. *中国科学(B辑)*, 1992, 22: 1300-1308.
Shi Y F, Kong Z C, Wang S M, Tang L Y, Wang F B, Yao T D, Zhao X T, Zhang P Y, Shi S H. Climatic fluctuation and important events in China during the Holocene Meg thermal. *Science in China (Series B)*, 1992, 22: 1300-1308. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)