

DOI: 10.11766/trxb201603280072

# 西安地区第5层古土壤中的铁质薄膜类型与水文特征\*

罗小庆<sup>1</sup> 赵景波<sup>1, 2†</sup> 马延东<sup>1</sup> 周旗<sup>3</sup> 邵天杰<sup>1</sup>

(1 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062)

(2 黄土与第四纪地质国家重点实验室(中国科学院地球环境研究所), 西安 710061)

(3 宝鸡文理学院, 陕西省灾害监测与模拟重点实验室, 陕西宝鸡 721013)

**摘要** 揭示西安地区第5层古土壤中还原层的类型和水分平衡, 对认识西安地区S<sub>5</sub>古土壤发育时的气候和植被以及地下水补给来源具有重要科学意义。通过对西安地区第5层古土壤(S<sub>5</sub>)的调查和多个剖面的观察, 在西安东郊任家坡剖面、南郊双竹村剖面和蓝田田家坡剖面首次发现该层古土壤黏化层中含有1~5mm大小的低价氧化铁的灰绿色斑点。低价铁的灰绿色斑点是在地势较高和地下水位较深的还原作用下形成的, 属于高位还原层, 不同于以往认识的潜育化类型。灰绿色斑点指示S<sub>5</sub>古土壤发育时土壤上部出现了雨季积水并处于还原环境, 当时雨季还原层含水量达到了饱和状态, 土壤上部含水量为42%左右, 土壤水分非常充足。该层古土壤的红色铁质胶膜迁移到了上部古土壤黏化层顶界之下6.3 m深的黄土中, 表明当时高含量重力水分布达到了6.3 m左右深度, 至少出现过较长时期适于茂盛森林植被发育的气候。在西安地区S<sub>5</sub>古土壤发育时, 土壤水分的收入量大于支出量, 土壤水分呈显著正平衡。当时大气降水在经过蒸发、蒸腾与地表径流损失之后, 还有较多剩余的水分通过入渗补给深部土层水。S<sub>5</sub>古土壤发育时降水较丰富是导致该层古土壤出现高位还原层的主要因素。

**关键词** 第5层古土壤; 铁质薄膜; 高位还原层; 古含水量; 水分平衡; 西安地区

**中图分类号** X14 **文献标识码** A

国内外研究者对中国黄土与环境变化进行了大量研究, 取得了举世瞩目的重要成果。现已认识到中国黄土比较完整地记录了约250万年来陆地生物、气候等环境的变化<sup>[1-3]</sup>, 可作为全球陆地环境变化对比的重要标准<sup>[4-6]</sup>。过去的研究还认识到, 黄土代表冬季风加强的冷干气候, 红色古土壤代表夏季风加强的相对温湿气候<sup>[1-5]</sup>。过去对洛川黄土剖面的研究表明, 洛川第5层古土壤(S<sub>5</sub>)为棕褐土<sup>[5]</sup>。近10余年来的研究揭示, 黄土高原南部第5

层古土壤发育时为亚热带气候, 甚至较北亚热带更温暖<sup>[7]</sup>。虽然过去对黄土中的古土壤进行了许多研究, 但到目前为止尚未发现对当时土壤含水量和水循环有重要指示作用的低价铁斑点的存在。在中亚和欧洲黄土中, 也未发现古土壤中存在还原层的报道<sup>[8-9]</sup>。本文根据新发现的含灰绿色低价铁斑点的还原层和红色铁质胶膜的强烈迁移, 探讨西安地区第5层古土壤发育时的土壤含水量和水分平衡等问题。

\* 陕西省自然科学基金项目(2015JM4135)、中国地质调查局西安地质调查中心项目《关中盆地第四系形成与演化》(水[2016]4)、国家自然科学基金国际合作项目(41210002)资助 Supported by the Natural Science Foundation Research Project of Shaanxi Province (No.2015JM4135), Xi'an Geological Survey Center Project of China Geological Survey《Formation and evolution of Quaternary in Guanzhong Basin》(No.Water [2016]4), National Natural Science Foundation of China (No.41210002)

† 通讯作者: 赵景波, 博士, 教授, 主要从事第四纪研究。E-mail: zhaobjb@snnu.edu.cn

作者简介: 罗小庆(1989—), 女, 汉族, 陕西岐山人, 硕士研究生, 主要从事自然地理研究。E-mail: luoxq0815@126.com

收稿日期: 2016-03-28; 收到修改稿日期: 2016-08-10; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-09-19

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

西安市位于关中盆地中部，处在 $33^{\circ}42' \sim 34^{\circ}44' \text{ N}$ ， $107^{\circ}40' \sim 109^{\circ}49' \text{ E}$ 。西安地区属暖温带半湿润季风气候，年平均气温为 $13.1^{\circ}\text{C}$ ，年平均降水量约为 $600 \text{ mm}^{[10]}$ ，四季冷暖干湿分明。西安地区黄土与黄土地貌发育较好，东郊和南郊分别有黄土构成的白鹿塬和少陵塬，白鹿塬第四纪黄土与古土壤发育齐全，黄土剖面厚度约 $120 \text{ m}$ 。

通过调查，在西安地区的西安东郊任家坡、南郊双竹村和蓝田田家坡 $S_5$ 土壤中发现了灰绿色低价铁斑点。任家坡剖面属于西安市灞桥区，位于白鹿塬西端，距西安市东约 $8 \text{ km}$ 。双竹村剖面位于长安区少陵塬近北端，距长安区韦曲镇南约 $2 \text{ km}$ 。田家坡属于蓝田县安村乡，田家坡剖面位于白鹿塬东端，距蓝田县城西 $3 \text{ km}$ 左右。

### 1.2 样品采集与分析

在西安地区的西安东郊任家坡、南郊双竹村和蓝田田家坡 $S_5$ 古土壤3个剖面中以 $20 \text{ cm}$ 左右间距采集铁质胶膜样品，共采集样品 $60$ 块。研究方法包括野外观察灰绿色低价铁斑点和红色铁质胶膜的分布

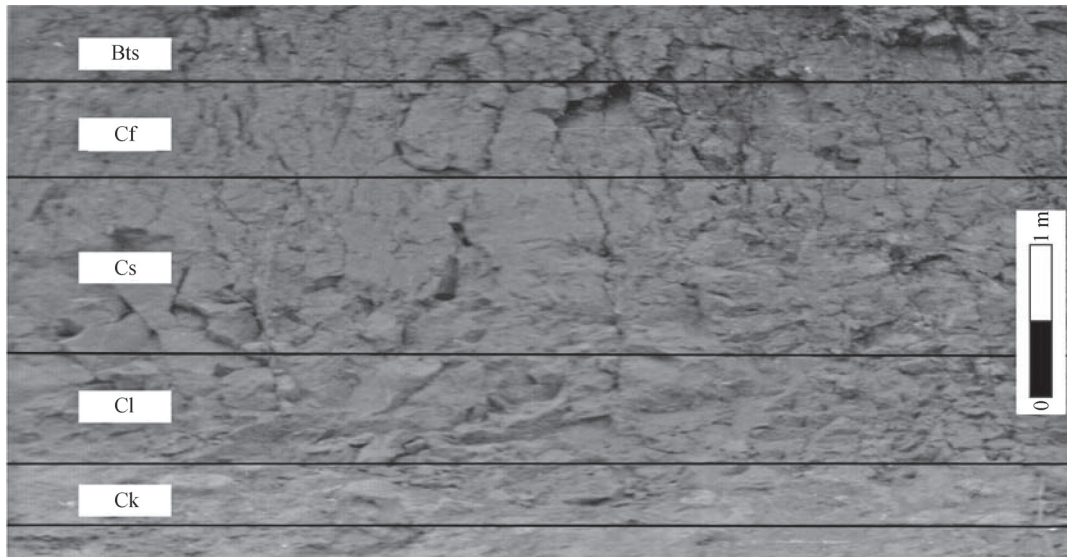
层位和存在形式，野外测量红色铁质胶膜的迁移深度，用电镜观察土壤微结构，利用能谱仪分析铁质薄膜化学成分。能谱分析是在电镜下利用能谱仪对喷金的样品进行化学成分分析。

## 2 结果

### 2.1 $S_5$ 古土壤剖面分层与铁质薄膜的分布

在西安地区，第5层古土壤( $S_5$ )由3个古土壤分层构成。该层古土壤是黄土中发育最好的土壤，具有典型亚热带黄棕壤的特点，可分为5层(图1)。从上向下第1层为红褐色黏化层(Bts)，厚 $4.5 \text{ m}$ (图1中表示的为 $0.4 \text{ m}$ )。黏化层中有结晶较好的新生黏土矿物，红色铁质胶膜中 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量很高，表明黏化层受到了较强的黏化作用。第2层为含厚片状红色铁质胶膜的浅棕红色风化淋滤黄土层(Cf)，厚约 $0.5 \text{ m}$ 。第3层为含红色薄片状铁质胶膜的棕黄色风化淋滤黄土层(Cs)，厚 $1.3 \text{ m}$ 。第4层为不含铁质胶膜的风化淋滤黄土层(Cl)，厚约 $0.5 \text{ m}$ 。第5层为 $\text{CaCO}_3$ 结核淀积层(Ck)，厚约 $0.4 \text{ m}$ 。再向下是未受风化的黄土母质层。

上述表明， $S_5$ 古土壤的 $\text{CaCO}_3$ 淀积层和红色铁质黏土胶膜分布特别，他们均迁移到了第6层黄土



注：Bts 古土壤黏化层；Cf. 含红色厚片状黏土胶膜的棕红色风化淋滤黄土层；Cs. 含红色薄片状与斑点状黏土胶膜的棕黄色风化淋滤黄土层；Cl. 不含黏土胶膜的棕黄色风化淋滤黄土层；Ck.  $\text{CaCO}_3$ 结核淀积层 Note: Bts Argillic horizon; Cf. The leached loess layer with red thick argillans; Cs. The leached loess layer with red thin argillans; Cl. The leached loess layer without argillans; Ck. The illuvial layer of  $\text{CaCO}_3$

图1 西安东郊任家坡第5层古土壤剖面分层

Fig. 1 Subdivision of section of  $S_5$  paleosol at Renjiapo in eastern suburbs of Xi'an

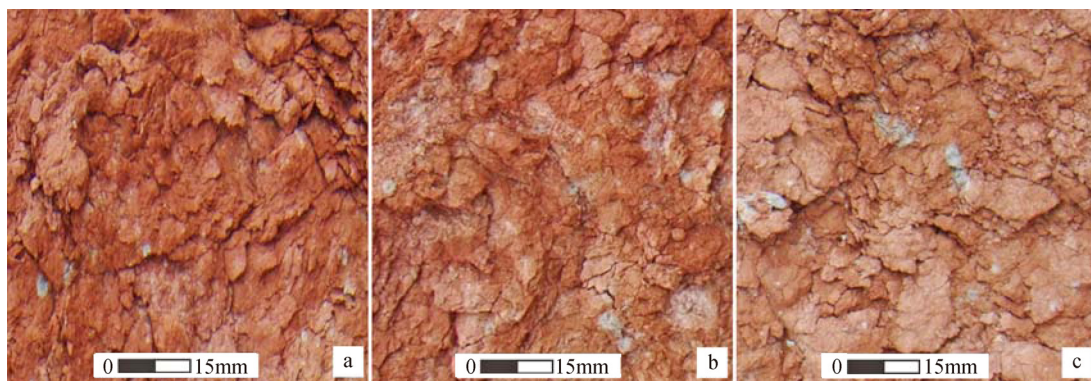
的中部。红色铁质胶膜的迁移深度达到了第6层黄土顶面之下1.8 m深处。从上向下,红色黏土胶膜含量减少,从厚片状变为薄片状及斑点状,多分布在裂隙和孔隙土体表面。如从第5层古土壤顶界算起,红色铁质胶膜迁移深度达到了6.3m,  $\text{CaCO}_3$ 结核淀积层的迁移深度达到了6.7m。因为在研究区第5层古土壤剖面中只有一层  $\text{CaCO}_3$ 结核淀积层,所以可确定其的迁移深度为6.7m。

## 2.2 灰绿色低价铁斑点与红色高价铁胶膜的分布

通过野外观察,首次发现西安东郊任家坡、南郊双竹村和蓝田田家坡 $S_5$ 古土壤上部分层的黏化层中均含有灰绿色低价铁的斑点。灰绿色斑点多为不规则形态,直径一般约为1~5 mm(图2),个别可达7~10 mm,主要分布在黏化层的中部,位于黏化层顶面之下约0.3~0.6m深处,占据厚度约25 cm,

这与土壤中部含水量一般较高相符合。土壤胶膜有多种类型,有黏粒胶膜、氧化物胶膜、铁质胶膜和碳酸盐薄膜等<sup>[11]</sup>。本研究观察得知,灰绿色铁质斑点与红色铁质胶膜不同,灰绿色斑点一般不具有光亮的表面,也没有明显的厚度,表明它不是胶体物质,而是呈溶解状态的二价铁经过略迁移沉淀形成的非胶体成分,可称之为灰绿色斑点或薄膜。在土壤上部,由于易受到蒸发作用影响,水分含量较低,不会出现还原和缺氧的环境。在土壤中部,黏化作用最强,受蒸发影响较上部小,加之黏化强隔水性好,利于水分聚集和出现还原条件。在土壤下部,由于受降水的补给不如中上部快,水分聚集较中部少,较难达到饱和条件,不利于出现还原环境。

观察与测量表明, $S_5$ 古土壤中的红色胶膜发育



注: a、b.西安东郊任家坡 $S_5$ 古土壤中的低价铁灰绿色斑点; c.南郊双竹村 $S_5$ 古土壤中的低价铁灰绿色斑点 Note: a, b. Green spots of ferrous iron in  $S_5$  at Renjiapo in eastern suburbs of Xi'an; c. Greyishi-green spots of ferrous iron in  $S_5$  at Shuangzhucun in southern suburbs of Xi'an

图2 西安地区 $S_5$ 古土壤中的灰绿色低价铁斑点

Fig. 2 Greyish-green spots of ferrous iron in  $S_5$  in Xi'an area

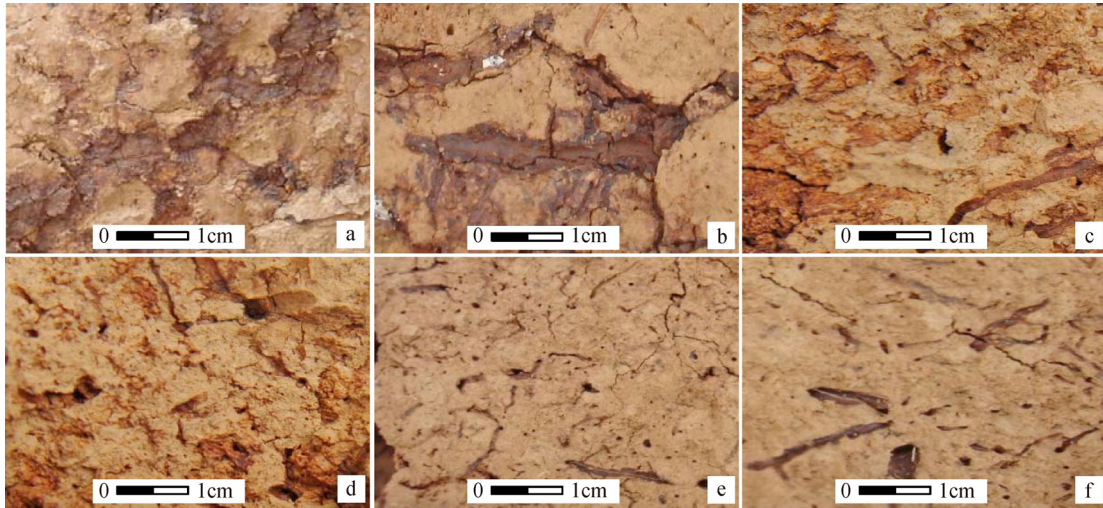
很好,红色铁质胶膜不仅分布在土壤黏化层中,而且迁移到了黏化层底界之下1.8 m深的黄土中(图1),并从上向下逐渐减少。在黏化层底界之下1m左右深处之上的黄土中可见红色胶膜呈较大片状分布(图3a~图3d),在1~1.8 m左右的黄土中分布减少,并主要分布在孔洞内(图3e~图3f)。

## 2.3 灰绿色斑点与红色铁质胶膜化学组成

为了确认红色铁质胶膜和灰绿色斑点的化学组成,本研究采用电子显微镜对红色胶膜和灰绿色斑点样品进行了观察和能谱分析,代表性分析结果见表1。由表1可知,红色铁质黏粒胶膜在电镜下呈现两种形态:一是呈胶体形态,无定型

(图4a,图4b);二是呈微小的新生黏土矿物晶粒(图4c,图4d),具有明显定向排列。表明胶膜中除胶体形态的氧化铁之外,还有许多新生黏土矿物。灰绿色斑点在电镜下呈胶体形态,未见新生黏土矿物出现。能谱分析结果(表1,图5)显示,红色铁质胶膜和灰绿色斑点中 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量较高,含量变化在12.85%~17.15%之间,平均为15.28%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量也较高,在20.45%~25.07%之间,平均为23.07%。 $\text{SiO}_2$ 含量占首位,含量在47.19%~54.17%之间,平均为52.13%。 $\text{CaO}$ 含量在2.13%~4.4%之间,只有1个样品含量高达11.30%。 $\text{MgO}$ 含量在2.07%~3.94%之间。 $\text{K}_2\text{O}$ 含

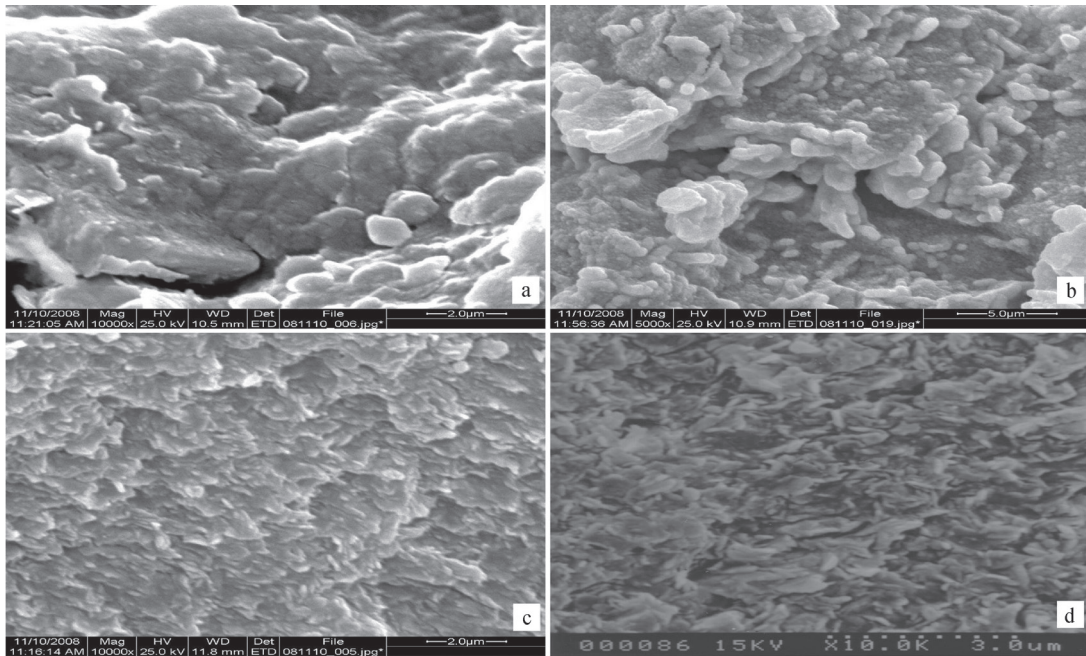




注：a、b. 分别为西安东郊任家坡和蓝田田家坡第6层黄土0.6m 左右深度的红色厚片状铁质胶膜；c、d. 分别为西安东郊任家坡和蓝田田家坡第6层黄土1.0m 左右深度的红色薄片状铁质胶膜；e、f. 分别为西安东郊任家坡和南郊双竹村第6层黄土1.5m 左右深度根孔内的红色铁质胶膜 Note: a, b. Red ferri-argillans at 0.6 m deep in leached sixth loess at Renjiapo in eastern suburbs of Xi'an and Tianjiapo in Lantian; c, d. Red ferri-argillans at 1.0 m deep in leached sixth loess at Renjiapo in eastern suburbs of Xi'an and Tianjiapo in Lantian; e, f. Red ferri-argillans filled in the holes at 1.5 m deep in leached sixth loess at Renjiapo in eastern suburbs of Xi'an and Shuangzhucun in Chang'an

图3 西安地区S<sub>5</sub>古土壤之下第6层黄土中的红色铁质胶膜

Fig. 3 Red ferri-argillans in sixth loess layer under S<sub>5</sub> in Xi'an area



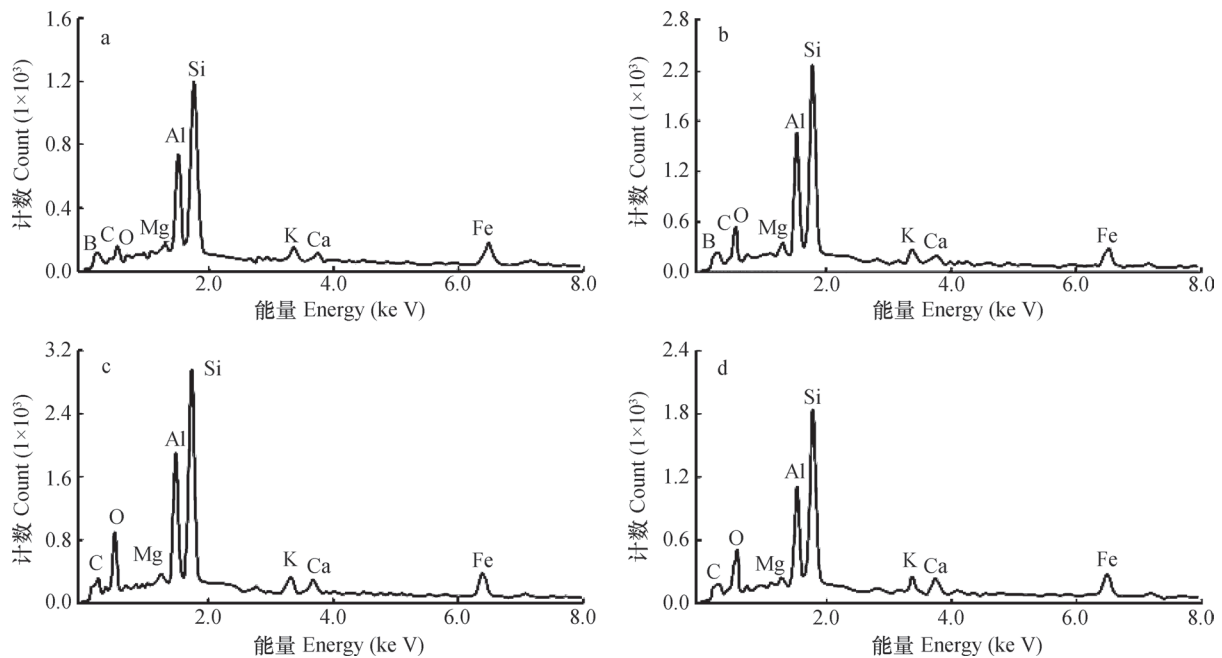
注：a、b. 分别为西安东郊任家坡和南郊双竹村S<sub>5</sub>中铁质黏粒胶膜中的胶体成分；c、d. 分别为西安东郊任家坡和蓝田田家坡S<sub>5</sub>中铁质黏粒胶膜中的新生黏土矿物 Note: a, b. Colloidal substance in red ferri-argillans of S<sub>5</sub> at Renjiapo in eastern suburbs of Xi'an and Tianjiapo in Lantian; c, d. Secondary clay mineral in red ferri-argillans of S<sub>5</sub> at Renjiapo in eastern suburbs in Xi'an and Tianjiapo in Lantian

图4 西安地区S<sub>5</sub>的红色铁质胶膜超微结构

Fig. 4 Ultra microstructure of ferri-argillans of S<sub>5</sub> in Xi'an area

表1 能谱分析获得的西安地区 $S_5$ 铁质薄膜化学组成Table 1 Chemical composition of ferri-argillans of  $S_5$  determined by energy spectrum

点Sites	样品号 Sample number	薄膜类型 Film types	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$K_2O$	$MgO$	$CaO$
			(%)					
任家坡Renjiapo	XA01	红色胶膜	17.15	22.50	51.99	3.25	2.34	2.77
任家坡Renjiapo	XA02	红色胶膜	12.97	24.84	54.17	3.33	2.55	2.13
任家坡Renjiapo	XA03	灰绿色斑点	14.84	23.57	53.34	2.83	2.65	2.67
任家坡Renjiapo	XA04	灰绿色斑点	16.28	21.95	52.48	2.89	2.68	3.72
双竹村Shuangzhucun	XA05	红色胶膜	15.43	23.83	53.44	2.25	2.07	2.98
双竹村Shuangzhucun	XA06	灰绿色斑点	16.79	22.40	51.04	3.01	2.36	4.40
田家坡Tianjiapo	XA07	红色胶膜	15.96	20.45	47.19	2.92	3.94	11.30
田家坡Tianjiapo	XA08	灰绿色斑点	12.85	25.07	53.42	3.32	2.69	2.65



注: a、b. 为西安东郊任家坡剖面 $S_5$ 中的红色铁质胶膜; c、d. 分别为南郊双竹村和蓝田田家坡剖面 $S_5$ 中的红色铁质胶膜 Note: a, b. Red ferri-argillans of  $S_5$  at Renjiapo section in eastern suburbs of Xi'an; c, d. Red ferri-argillans of  $S_5$  at Shuangzhucun section in Changan and Tianjiapo section in Lantian

图5 西安地区 $S_5$ 铁质黏粒胶膜能谱分析曲线Fig. 5 Energy spectrum curve of ferri-argillans of  $S_5$  in Xi'an area

量在2.25% ~ 3.33%之间。由分析结果可知, 红色胶膜与灰绿色斑点中 $Fe_2O_3$ 的含量差别很小, 其他成分也无明显差别。需要指出的是灰绿色斑点是分布在红色黏土胶膜表面的, 是低价铁溶液微量沉淀的显示, 能谱分析显示的灰绿色斑点的 $Fe_2O_3$ 和

$Al_2O_3$ 含量实际上主要是与红色铁质胶膜混合后的含量, 这也是灰绿色斑点中 $Fe_2O_3$ 和 $Al_2O_3$ 含量高的原因。红色铁质胶膜形成于酸性条件下, 在这样的条件下土层中不应该含有 $CaCO_3$ ,  $CaO$ 显示的含有一定量的 $CaCO_3$ 应该是从上覆黄土中后期迁移来的成分。

## 3 讨 论

### 3.1 S<sub>5</sub>古土壤中灰绿色低价铁斑点的形成

通常认为，土壤还原层的形成有两种作用，一是土壤的潜育化作用，二是潴育化作用。潜育化发生在地势地平、地下水位接近地表的条件下，土壤常年处于还原环境，造成整个土壤层均具有蓝灰色或青灰色、灰绿色的还原特征<sup>[12]</sup>。潴育化发生在地下水位较高且土壤氧化与还原环境交替的条件下<sup>[12]</sup>。在雨季地下水位升高时土壤水分饱和，处于还原环境，形成灰绿色的低价氧化铁；在旱季地下水位下降时土壤处于氧化环境，形成高价氧化铁。因此，潴育化作用导致土壤既有灰绿色的还原特点又有红色的氧化特点<sup>[12]</sup>。

西安地区发现有灰绿色斑点还原层的S<sub>5</sub>剖面均位于地势很高的黄土塬区，在该层土壤发育时地下水位也很深，在S<sub>5</sub>剖面10多米厚度范围内没有指示地下水存在的针铁矿及铁锰结核层出现，因此该层土壤中还原层的形成与地下水位无关。S<sub>5</sub>古土壤总体呈现红褐色，仅在黏化层中部发育灰绿色斑点，显示还原条件不是很强。显然，S<sub>5</sub>古土壤中的还原成分是在雨季积水条件下形成的，属于土壤潴育化作用的产物。因为S<sub>5</sub>还原层形成于地势高和地下水位深的条件下，与通常的土壤还原层形成于地形低洼和地下水位很高完全不同，所以本研究提出这种还原层应该称之为高位还原层。根据入渗率研究，该层土壤入渗率较低，在西安地区为0.14 ~ 0.21 mm min<sup>-1</sup><sup>[13-14]</sup>，利于产生土壤积水。然而这样的人渗率仍然可将土壤水输送至深部土层，土壤积水主要还是降水量较丰富造成的。根据古气候的研究，该层土壤发育时的年降水量达到了1 000 mm左右<sup>[15]</sup>，也表明丰富的降水是导致土壤积水主要原因。

### 3.2 高位还原层与红色铁质胶膜指示的土壤水分存在形式与含量

土壤水分存在形式主要有重力水和薄膜水。在关中平原地区，当土壤含水量大于20%时就有重力水出现，小于20%为薄膜水<sup>[16]</sup>。灰绿色铁质斑点代表的S<sub>5</sub>古土壤的潴育化指示的是雨季出现了积水，造成土壤中部缺氧。调查得知，这种雨季的积水不是局部的地形低洼造成的，当时在西安地区普遍存在。这种积水不是一年发生的，而是较长时期存在的。土壤雨季积水的发生能够非常可靠地指

示该层古土壤发育时土壤水分处于饱和状态。西安地区S<sub>5</sub>古土壤孔隙度为42%左右<sup>[13-14]</sup>，可以确定当时土壤黏化层中部含水量为42%左右。当时土壤中含有很多的能够自由流动的重力水。这一含水量是在当时雨季经过土壤蒸发、植物吸收与蒸腾及径流损失之后的剩余含水量，指示当时土壤水分很充足。

红色铁质胶膜是不可溶的成分，它只能在较强重力水的推动下才能发生迁移，它的分布下界至少代表了重力水到达的下界。该层古土壤的黏化层厚度为4.5 m，加上红色铁质胶膜在古土壤底界之下黄土中迁移的1.8 m深度，可以确定当时重力水的分布深度至少达到了6.3 m。根据能够指示重力水分布深度的CaCO<sub>3</sub>结核淀积层<sup>[17]</sup>迁移深度确定，重力水分布深度为6.7 m左右。由此可见，在该层古土壤发育时，6.3 m以上土壤含水量较高。

### 3.3 S<sub>5</sub>古土壤发育时的土壤水分平衡与植被发育条件

林地土壤水分平衡为： $W=P-I-R-E$ ，式中， $W$ 为土壤储水量， $P$ 为年降水量， $I$ 为树冠截流量， $R$ 为地表径流量， $E$ 为土壤总蒸发量（土壤水蒸发量和植物蒸腾量之和）。前人的多年观测表明，在年平均降水量600 mm左右条件下的黄土高原，林地土壤总蒸发量与年降水量基本保持平衡，即土壤年总蒸发量与年均降水量基本相等<sup>[16]</sup>。在年均降水量多于600 mm的年份土壤水量平衡值为正值，在年均降水量少于600 mm的年份土壤水量平衡值为负值<sup>[16]</sup>。如前所述，西安地区S<sub>5</sub>发育时年均降水量达到了1 000 mm左右<sup>[15]</sup>，由此可以推断当时年降水量显著大于年土壤总蒸发量。土壤化学成分迁移深度是指示年降水量和土壤总蒸发量相对多少的可靠证据，而且还能用于判定大气降水对地下水的补给情况。土壤化学成分迁移深度越大，代表的降水量越多，化学成分迁移达到了一定深度就能够指示年降水量大于土壤总蒸发量。土壤的CaCO<sub>3</sub>淀积层迁移深度超过2 m指示土壤为明显的淋溶类型<sup>[12, 17-18]</sup>，表明年降水量等于或略大于土壤年总蒸发量。如前面所述，S<sub>5</sub>的CaCO<sub>3</sub>淀积层迁移到了4.2 m深度，Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>也发生了显著迁移，显然指示当时年降水量显著大于土壤总蒸发量。由此可以确定，在S<sub>5</sub>发育时期，关中平原年降水量显著大于年土壤总蒸发量，每年有剩余的大气降水补给深部土层水。



上述分析表明S<sub>5</sub>发育时土壤水分不但能够满足森林植被的生长,而且还有很多水分的剩余。有的研究者根据土壤微结构的研究认为当时主要是森林植被<sup>[19]</sup>,有的认为出现过短期森林植被<sup>[20]</sup>。然而同位素资料显示当时发育的植被不是森林,而是森林草原<sup>[21]</sup>。这一问题很值得深入研究。到目前为止,即使认为以草原和森林草原植被为主的研究者一般也承认在典型温湿的间冰期有过短期的落叶阔叶林发育。黄土塬区能否发育森林植被取决于降水量的多少,只要降水量达到森林发育的要求,就能够发育森林植被。过去的研究得出,在厚层黄土发育的黄土塬区,年降水量达到800 mm就能发育森林植被<sup>[22]</sup>。本文研究的S<sub>5</sub>古土壤是250万年来最湿润的气候条件下发育的,当时年降水量超过了800 mm,所以那时发育森林植被是完全可能的。因此,根据碳同位素研究得出的黄土高原南部间冰期无森林植被发育的认识是值得商榷的。

## 4 结 论

西安地区S<sub>5</sub>古土壤上部分黏化层中部发育了灰绿色低价铁斑点,土壤黏化层中部出现了雨季积水和高位还原环境。S<sub>5</sub>古土壤发育时降水较丰富是导致该层土壤出现高位还原环境的主要因素。S<sub>5</sub>上部分层古土壤发育时土壤含水量丰富,雨季土壤黏化层中部含水量处于饱和状态,积水时期含水量为42%左右。S<sub>5</sub>上部分层古土壤发育时土壤黏化层中存在持续性重力水。重力水分布深度至少达到了6.3 m左右。在6.3 m深度范围内土壤含水量充足,适于茂盛森林植被发育。S<sub>5</sub>古土壤发育时水分为明显的正平衡,即在经过蒸发与蒸腾及径流损失之后,还有剩余水分通过入渗补给深部土层。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985: 350—351  
Liu D S. Loess and environment (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985: 350—351
- [ 2 ] Guo Z T, Liu D S, Fedoroff N, et al. Climate extremes in loess of China coupled with the strength of deep water formation in the North Atlantic. *Global and Planetary Change*, 1998, 18: 113—128
- [ 3 ] Porter C, An Z S. Episodic gullying and paleomonsoon cycles on the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, 2005, 64: 234—241
- [ 4 ] Kukla G J, Heller F, Liu X M, et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, 1998, 16: 811—814
- [ 5 ] 楚纯洁, 赵景波. 西安少陵塬黄土—古土壤序列S<sub>3</sub>剖面元素迁移及古气候意义. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 311—321  
Chu C J, Zhao J B. Element migration in S<sub>3</sub> profile of the Shaolingyuan loess-paleosol sequence in Xi'an and its paleoclimatic implication (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 311—321
- [ 6 ] 潘美慧, 宋春晖, 李吉均, 等. 甘肃天水地区中新世古土壤的微形态特征及其古环境意义. *土壤学报*, 2009, 46 (4): 578—585  
Pan M H, Song C H, Li J J, et al. Micromorphological characteristics of Miocene palaeosol and their paleoenvironment significants in Tianshui, Gansu (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (4): 578—585
- [ 7 ] 殷科, 洪汉烈, 高文鹏, 等. 末次间冰期以来华夏地区气候变化的黏土矿物学及地球化学记录. *土壤学报*, 2012, 49 (2): 246—259  
Yin K, Hong H L, Gao W P, et al. Clay mineralogical and geochemical records of paleoclimate in Linxia since the Last Interglacial (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (2): 246—259
- [ 8 ] Dodonov A E, Baiguzina L. Loess stratigraphy of central Asia: Palaeoclimatic and paleoenvironmental Aspects. *Quaternary Sciences Reviews*, 1995, 14 (7/8): 707—720
- [ 9 ] Kukla G J. Pleistocene land-sea correlation in Europe. *Earth Science Review*, 1977, 13: 307—374
- [ 10 ] 陕西师范大学地理系. 西安市地理志. 西安: 陕西人民出版社, 1988  
Department of Geography, Shaanxi Normal University. Records of Xi'an's geography (In Chinese). Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 1988
- [ 11 ] 黄丽, 刘凡, 谭文峰, 等. 土壤胶膜的研究进展. *土壤通报*, 2003, 34 (2): 143—147  
Huang L, Liu F, Tan W F, et al. The progress of soil cutan study (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34 (2): 143—147
- [ 12 ] 朱鹤健, 何宜庚. *土壤地理学*. 北京: 高等教育出版社, 2001: 42—43  
Zhu H J, He Y G. *Pedogeography* (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2001: 42—43
- [ 13 ] Zhao J B, Ma Y D, Cao J J, et al. Effect of quaternary climatic change on modern hydrological systems in the Southern Chinese Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73: 1161—1167

- [14] 赵景波, 邵天杰, 牛俊杰. 西安白鹿原黄土渗透性与含水条件. 地理研究, 2009, 28 (5): 1188—1196  
Zhao J B, Shao T J, Niu J J. Permeability and water bearing conditions of loess in Bailu tableland in the eastern suburbs of Xi'an (In Chinese). Geographical Research, 2009, 28 (5): 1188—1196
- [15] 赵景波. 陕西黄土高原500 ka BP的古土壤与气候带迁移. 地理学报, 2001, 56 (3): 323—331  
Zhao J B. The Paleosol and the migration of climatic zone about 500 ka BP in Loess Plateau, Shaanxi Province (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2001, 56 (3): 323—331
- [16] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000: 67—89  
Yang W Z, Shao M A. Soil moisture research in Loess Plateau (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000: 67—89
- [17] Zhao J B, Luo X Q, Ma Y D, et al. The reconstruction of palaeoenvironment during development of the fourth palaeosol in the southern Loess Plateau of China. Catena, 2015, 132: 21—28
- [18] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1987: 67—75  
Hseung Y, Li Q K. Soils in China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1987: 67—75
- [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 (2): 129—138  
Tang K L, He X B. Re-discussion on loess-paleosol evolution and climatic change on the Loess Plateau during the Holocene (In Chinese). Quaternary Sciences, 2004, 24 (2): 129—138
- [20] Guo Z T, Liu D S, Fedoroff N. Climate extremes in loess of China coupled with the strength of deep water formation in the North Atlantic. Global and Planet Change, 1998, 18: 113—128
- [21] 林本海, 刘荣谟. 最近800 ka 黄土高原夏季风变迁的稳定同位素证据. 科学通报, 1992, 37 (18): 1691—1693  
Lin B H, Liu R M. Stable isotopic evidence of summer monsoon changes in recent 800 ka in the Loess Plateau (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1992, 37 (18): 1691—1693
- [22] 吕厚远, 刘东生, 吴乃琴, 等. 末次间冰期以来黄土高原南部植被演变的植物硅酸体记录. 第四纪研究, 1999, 19 (4): 336—347  
Lü H Y, Liu D S, Wu N Q, et al. Phytolith record of vegetation succession in the southern Loess Plateau since Late Pleistocene (In Chinese). Quaternary Sciences, 1999, 19 (4): 336—347

## Ferruginous Adhesive Film and Hydrographic Features of the Fifth Palaeosol in Xi'an Area

LUO Xiaoqing<sup>1</sup> ZHAO Jingbo<sup>1, 2†</sup> MA Yandong<sup>1</sup> ZHOU Qi<sup>3</sup> SHAO Tianjie<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

(<sup>2</sup> State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

(<sup>3</sup> Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China)

**Abstract** 【Objective】 To reveal the water logogenic type of the fifth palaeosol in Xi'an area, and identify the water content, moisture balance and possible vegetation types when the S<sub>5</sub> developed. 【Method】 Field investigation, electron microscope observation and energy spectrum analysis were used to research relevant problem. 【Result】 The fifth palaeosol was composed of three layers, which was the best ancient soil in the loess. Based on the field investigation of the fifth palaeosol in Xi'an area, celadon spots were first discovered in the argillic horizon of this palaeosol, proving the accumulated water in the middle and upper paleosol and reducing environment during the development of S<sub>5</sub>. The red ferruginous adhesive film developed very well, which has two kinds of micro structure under the electron microscope, one was crystal structure composed of newborn clay minerals, the other was amorphous colloid structure. According to the energy



spectrum analysis, the content of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  in the red ferruginous adhesive film and celadon spots was between 12.85% ~ 17.15%、20.45% ~ 25.07% and 47.19% ~ 54.17%, with average of 15.28%、23.07% and 52.13%, separately. Resulting from the deposition of green iron film on the surface of the red adhesive film, the difference of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  content between the red ferruginous adhesive film and celadon spots was quite small. The migration depth of red ferruginous adhesive film is 1.8m under the bottom of argillic horizon, and that was 6.3m from the top of the palaeosol. 【Conclusion】 These celadon spots in the fifth palaeosol were formed under the condition of deep ground water level. The major factor was abundant precipitation for reducing layer appearance above deep ground water level. The distribution depth of gravity water is up to 6.3m when the  $S_5$  developed and the climate would have been favorable to sustain forest development for a long period. At that time moisture content of reducing layer reached saturation state and that in the upper part of the soil was about 42%, generally speaking, soil moisture was quite adequate at then. During the development of  $S_5$ , the volume of receipts of soil water was more than the volume of expenditure, and the value of soil moisture balance was positive. Meanwhile, there was still sufficient atmospheric precipitation infiltrating to groundwater after evaporation, transpiration and surface runoff loess.

**Key words** The fifth palaeosol; Ferruginous adhesive film; Reducing layer above deep ground water level; Paleo-moisture content; Moisture balance; Xi'an area

(责任编辑: 檀满枝)