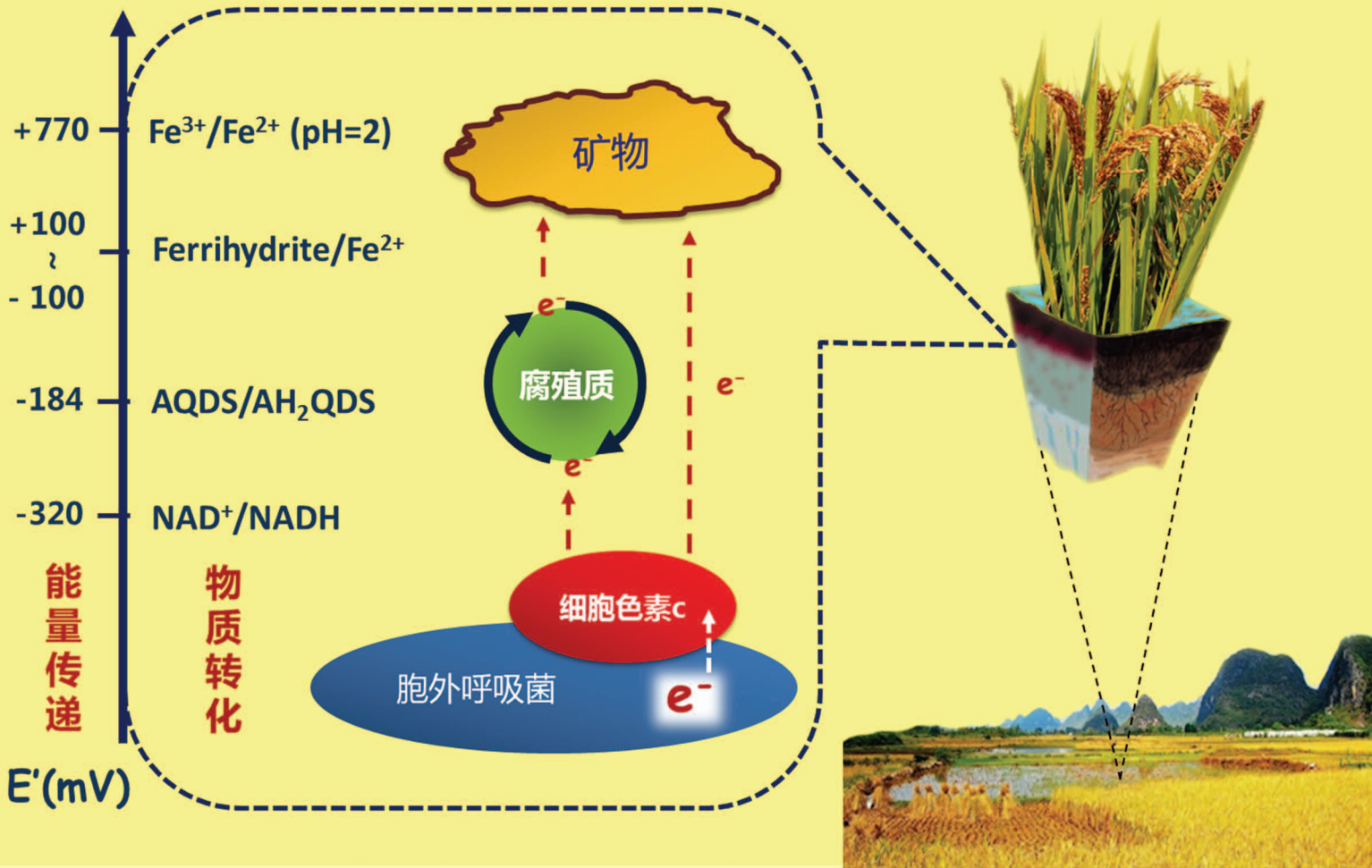


# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办  
科学出版社 出版

2016

第53卷 第2期

Vol.53 No.2



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

## 目 次

### 综述与评论

- 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展····· 吴云当 李芳柏 刘同旭 (277)  
长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响····· 王 敬 程 谊 蔡祖聪等 (292)

### 新视角与前沿

- 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究····· 蔡祖聪 黄新琦 (305)

### 研究论文

- 西安少陵塬黄土—古土壤序列 $S_3$ 剖面元素迁移及古气候意义····· 楚纯洁 赵景波 (311)  
基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演····· 刘 娅 潘贤章 石荣杰等 (322)  
基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建····· 刘艳芳 卢延年 郭 龙等 (332)  
基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究····· 王茵茵 齐雁冰 陈 洋等 (342)  
鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟····· 邓羽松 丁树文 蔡崇法等 (355)  
放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响····· 马美景 王军光 郭忠录等 (365)  
汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究····· 王仁新 何丙辉 李天阳等 (375)  
咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响····· 张 越 杨劲松 姚荣江 (388)  
基于不同估算方法的贵州省土壤温度状况····· 陆晓辉 董宇博 涂成龙 (401)  
拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征····· 巩玉玲 王兆锋 张德锂等 (411)  
砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响····· 杨 松 吴珺华 董红艳等 (421)  
AQDS加速红壤性水稻土中DDT厌氧脱氯效应研究····· 刘翠英 王 壮 徐向华等 (427)  
激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响····· 赵金花 张丛志 张佳宝 (438)  
臭氧污染对麦田土壤不同活性有机碳库的影响····· 寇太记 程相涵 张东亮等 (450)  
黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献····· 丛耀辉 张玉玲 张玉龙等 (457)  
水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响····· 黄尚书 成艳红 钟义军等 (468)  
祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· 赵维俊 刘贤德 金 铭等 (477)  
基于核酸DNA/RNA同位素示踪技术的水稻土甲烷氧化微生物研究····· 郑 燕 贾仲君 (490)  
适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响····· 梅新兰 闪安琪 蒋 益等 (502)  
旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义····· 王明伟 刘雨迪 陈小云等 (510)  
西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征····· 沙志鹏 张宇阳 王 超等 (523)  
加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响····· 康亚龙 景 峰 孙文庆等 (533)

### 研究简报

- CTMAB对BS-12修饰膨润土的复配修饰模式····· 余 璐 孟昭福 李文斌等 (543)  
不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响····· 孟庆英 张春峰 贾会彬等 (552)

### 信息

- 《土壤学报》2015年度审稿专家名录····· (560)

封面图片: 微生物胞外电子传递: 能量传递与物质转化 (由吴云当、李芳柏、刘同旭提供)

DOI: 10.11766/trxb201506160224

# 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\*

楚纯洁<sup>1, 2</sup> 赵景波<sup>1†</sup>

(1 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710119)

(2 平顶山学院资源与环境科学学院, 河南平顶山 467000)

**摘要** 以西安少陵塬S<sub>3</sub>古土壤剖面为研究对象, 通过地球化学分析并结合野外剖面观察, 探讨该剖面的元素迁移、化学风化特征及其所揭示的气候变化等问题。结果表明: (1) 少陵塬剖面S<sub>3</sub>黏化层具有3层结构, 根据铁质胶膜发育、CaCO<sub>3</sub>迁移等可以将S<sub>3</sub>剖面构型划分为黏化层(Bts1–Bts2–Bts3)、风化淋滤黄土层(BC)和CaCO<sub>3</sub>结核淀积层(Bck); (2) Bts层CaO与CaCO<sub>3</sub>迁移程度最大, 淋失率分别达到了–99.3%、–83.1%, Sr、Na<sub>2</sub>O和MgO也发生了显著迁移, 而Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Rb则在黏化层略有富集, 尤其Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在Bts3层有明显富集; (3) 少陵塬S<sub>3</sub>古土壤介于初等风化向中等强度风化的过渡阶段, 风化作用由BC→Bts2→Bts1→Bts3逐渐增强, Bts3已基本完成初期脱Ca、Na风化过程; (4) 依据CaCO<sub>3</sub>与Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的迁移富集特点确定, 少陵塬剖面S<sub>3</sub>古土壤Bts3发育时的土壤为弱碱性, 而Bts1和Bts2为碱性; 初步确定少陵塬S<sub>3</sub>为黄褐土, S<sub>3</sub>发育时期西安地区的年均降水量为800 mm左右。

**关键词** 古土壤; 元素迁移; 化学风化; 古气候; 西安少陵塬

**中图分类号** X14 **文献标识码** A

第四纪风成黄土沉积在古环境重建过程中具有重要作用<sup>[1]</sup>。从黄土—古土壤序列所获取的古环境信息, 可以揭示不同地质时期的古环境、古气候、古生态以及重大地质事件, 因而黄土沉积是揭示过去全球变化、古地理学、古气候学以及沉积地质学的重要材料<sup>[2-3]</sup>。黄土沉积的地球化学特征与古气候变化密切相关<sup>[4-5]</sup>, 地球化学分析是从黄土—古土壤序列提取古环境信息的重要途径。

黄土高原黄土—古土壤相关研究较多的是洛川、西峰等典型剖面, 而对黄土高原南缘的研究则略显薄弱。S<sub>3</sub>古土壤在黄土高原中部的洛川为碳酸盐褐土, 具有褐土的基本特征, 但棱柱状构造不显

著, 碳酸盐未被充分淋失且含量相对较高, 并出现一定数量的碳酸盐胶膜, 呈碱性反应, 气候处于干凉向温湿的过渡阶段, 而且S<sub>3</sub>古土壤剖面由上部的黏化层和下部的CaCO<sub>3</sub>淀积层两层构成<sup>[6]</sup>。而在关中平原, S<sub>3</sub>古土壤已发育厚达2.8 m的深褐红色黏化层<sup>[6]</sup>。过去对关中地区剖面S<sub>1</sub>、S<sub>4</sub>、S<sub>5</sub>古土壤的化学风化及古环境进行了研究<sup>[6-8]</sup>, 取得了与以往显著不同的认识, 比如风化淋滤黄土层的确认、对古气候具有重要指示意义的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的淀积等。但是对关中地区S<sub>3</sub>古土壤层元素含量所指示的气候变化则缺少深入研究, 对于较剖面S<sub>4</sub>、S<sub>5</sub>等发育较弱的S<sub>3</sub>是否也存在风化淋滤黄土层、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>是否发生

\* 国家自然科学基金国际合作项目(41210002)和河南省高校“专业综合改革试点”项目(070502)资助 Supported by the International Cooperation Project of National Natural Science Foundation of China (No. 41210002) and the “Pilot Project of Comprehensive Discipline Reform” for Universities of Henan Province of China (No. 070502)

† 通讯作者 Corresponding author: 赵景波, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

作者简介: 楚纯洁(1978—), 男, 河南叶县人, 博士, 副教授, 主要从事自然地理、生态环境演变研究。E-mail: zzfccj@163.com

收稿日期: 2015-06-16; 收到修改稿日期: 2015-11-09

了迁移淀积等问题尚缺乏明确认识。本文将通过地球化学分析并结合野外剖面观察，探讨西安少陵塬黄土—古土壤序列 $S_3$ 古土壤剖面的元素迁移、化学风化特征及其所揭示的气候变化问题。

## 1 材料与方法

### 1.1 剖面概况及构型

少陵塬位于西安市南郊长安区境内，呈西北—东南走向，长18 km，宽6~10 km，海拔470~630 m。属暖温带半湿润季风气候区，年降水量620 mm，年均温13.4℃。采样剖面位于长安区韦曲镇东南3.5 km的西四府村（图1），地理坐标为34°08′17″N、108°57′55″E，海拔499 m，剖面厚度60 m左右，出露 $L_0$ 以来的黄土—古土壤序列。

笔者于2014年3月份进行了3次实地考察。根

据现场观察及测量， $S_3$ 层次界限清晰（图2），可划分为：（1）黏化层（Bts），厚2.65 m，黏化作用较强，由3个黏化亚层构成。上部黏化层（Bts1）：厚度1.4 m，具较大的棱柱状结构，上层70 cm棱柱体表面可见大量白色 $CaCO_3$ 薄膜，自25 cm以下至黏化层底部，以褐红色棱柱状黏土为主，质地较重，棱柱状表面及沿根孔分布有大量黑色铁锰胶膜，纵向裂隙发育强烈，自1.3 m以下多见沿裂隙发育的松散分布的块状或片状结核（Bts1-JH），平均直径约7~12 cm。中部黏化层（Bts2）：厚度0.6 m，以大的棕红色棱柱状结构为主，棱柱状表面及沿根孔亦分布有大量黑色铁锰胶膜，纵向裂隙发育强烈，表面无 $CaCO_3$ 薄膜或斑点，1.9 m以下多见厚约10 cm的块状结核（Bts2-JH）。下部黏化层（Bts3）：厚度0.65 m，其中上层约30 cm土层颜色略浅，呈浅棕红色，具粗

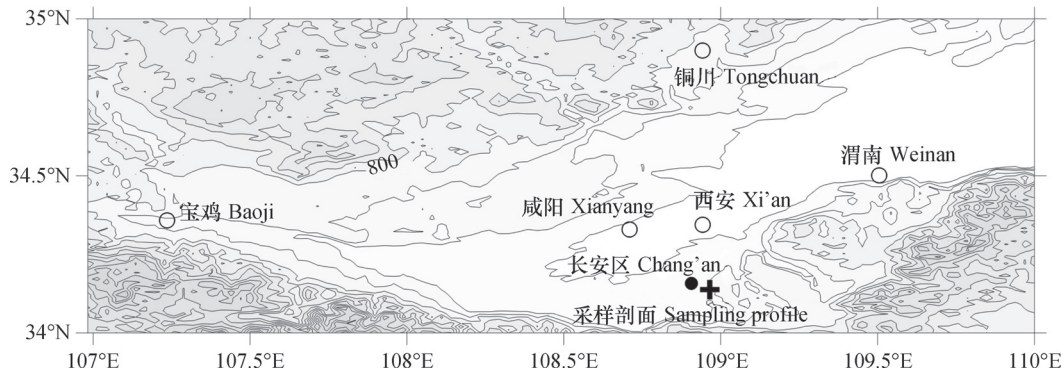


图1 西安少陵塬黄土中 $S_3$ 剖面地理位置

Fig. 1 Geographic location of the Shaolingyuan Profile of  $S_3$  paleosol in Xi'an

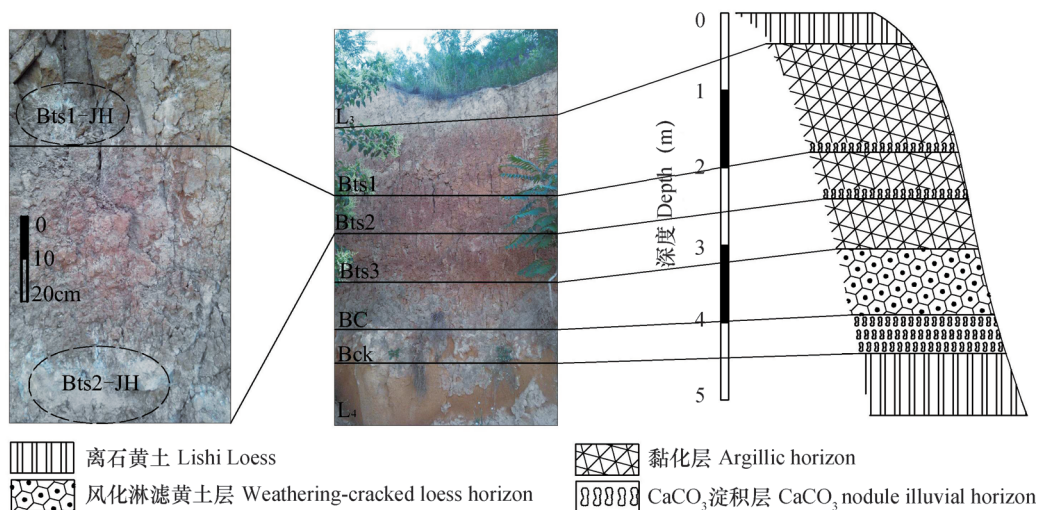


图2 西安少陵塬黄土中 $S_3$ 剖面构型

Fig. 2 Profile structure of the Shaolingyuan Profile of  $S_3$  paleosol in Xi'an

棱柱状结构（约5~10 cm），中下部呈较深的褐红色，为小棱柱状结构（约0.5~1 cm），质地黏重，棱柱表面可见大量纵向光性红褐色铁质胶膜，偶见黑色斑点分布。（2）Bts3底界以下为垂向风化淋滤裂隙发育的风化淋滤黄土层（BC），厚约0.80 m，其中上部30 cm呈棕红色，中下部颜色变浅，呈棕黄色，但均明显较下伏L<sub>4</sub>黄土层深，且淋滤裂隙发育；具一般黄土所具有的块状结构和大孔隙，表面未见CaCO<sub>3</sub>斑点或薄膜存在，属典型的风化变性黄土，而且上部30 cm多根孔分布，沿根孔可见少量褐色斑点状铁质黏粒胶膜发育。

（3）BC层以下为厚约50 cm的CaCO<sub>3</sub>结核淀积层（Bck），为Bts3淋溶迁移产物，已迁出黏化层底界，不属于Bts3层的组成部分。（4）Bck层以下为L<sub>4</sub>黄土，由于黄土高原地区古土壤实际上是加积型古土壤，在成土过程中仍伴随一定的风尘沉积，因此不能认为S<sub>3</sub>古土壤物质全部来自L<sub>4</sub>黄土，其母质应有一部分来自成土过程中不断添加的粉尘物质<sup>[9]</sup>。由此认为，S<sub>3</sub>剖面构型为Bts（Bts1—Bts2—Bts3）—BC—Bck。

## 1.2 S<sub>3</sub>剖面年代控制

少陵塬剖面S<sub>3</sub>古土壤的三层复合结构在关中地区具有代表性，在蓝田、宝鸡等地均具有很好的对比性<sup>[6, 10]</sup>。因此，其年代框架可以通过与标准剖面的地层对比来建立。本文依据Ding等<sup>[11]</sup>通过轨道调谐计算得出的地层年龄，该年龄综合了黄土高原宝鸡、西峰、灵台等多个典型剖面，具有较强的

代表性。据此可确立少陵塬S<sub>3</sub>剖面的年代控制点，即S<sub>3</sub>顶界、底界的年龄分别为307 ka BP和336 ka BP，也即少陵塬S<sub>3</sub>古土壤发育年代处于336~307 ka BP之间。

## 1.3 样品采集与分析

为研究该剖面S<sub>3</sub>的风化特征，以平均8 cm间距采集样品61个，其中黄土母质层采样深度为80 cm。对所有样品进行元素化学分析和CaCO<sub>3</sub>测定。地球化学元素主要分析Fe、Ca、K、Mg、Mn、Na、Si、Ti和Al等常量元素以及Rb、Sr微量元素。将风干样品研磨至通过200目筛，采用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的YYJ-60型半自动压样机制成圆片，采用荷兰Panalytical公司生产的PW2403型X-Ray荧光光谱仪测定。分析过程中加入标准物质GSS-1与样品同样处理和测定，常量元素误差控制小于5%，微量元素小于10%。CaCO<sub>3</sub>测定采用荷兰Eijkelkamp公司生产的BW14-08.53型含钙量测定仪。

## 2 结果与讨论

### 2.1 少陵塬剖面S<sub>3</sub>元素含量特征

少陵塬S<sub>3</sub>剖面分层元素含量结果如表1。由表1可知，黏化层（Bts）CaCO<sub>3</sub>平均含量为9.5 g kg<sup>-1</sup>，3个黏化亚层CaCO<sub>3</sub>含量自上而下减小，上部含量明显较高，与野外观察到的Bts1层上部70 cm厚度内存在大量白色CaCO<sub>3</sub>胶膜是相符的。这主要是受

表1 西安少陵塬S<sub>3</sub>剖面元素含量

Table 1 Element contents in the Shaolingyuan Profile of S<sub>3</sub> paleosol in Xi'an

层位Layer	CaCO <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	CaO (g kg <sup>-1</sup> )	K <sub>2</sub> O (g kg <sup>-1</sup> )	MgO (g kg <sup>-1</sup> )	MnO (g kg <sup>-1</sup> )	Na <sub>2</sub> O (g kg <sup>-1</sup> )	SiO <sub>2</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	TiO <sub>2</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Rb (mg kg <sup>-1</sup> )	Sr (mg kg <sup>-1</sup> )
Bts	9.5	65.4	10.7	22.0	21.5	0.71	18.1	500.1	3.8	122.4	120.3	146.5
Bts1	13.0	65.3	11.3	21.8	21.6	0.73	17.5	501.8	3.9	121.6	120.9	146.9
Bts2	7.2	63.9	9.3	21.8	20.7	0.73	17.9	506.6	3.9	121.5	121.6	142.8
Bts3	6.0	66.7	10.5	22.4	21.5	0.70	18.2	494.4	3.7	124.5	121.3	148.0
Bts-JH	732.5	20.2	341.0	8.1	9.2	0.26	3.8	222.4	1.8	54.0	53.9	147.5
BC	6.1	62.4	11.0	21.5	22.9	0.66	24.4	503.3	3.6	118.1	105.9	144.3
Bck	672.0	21.7	321.6	8.6	10.8	0.27	8.0	220.2	1.7	51.9	51.8	148.5
L <sub>4</sub>	120.6	54.7	55.1	19.9	21.4	0.62	27.4	451.2	3.3	105.8	101.0	178.0
洛川S <sub>3</sub>												
Luochuan S <sub>3</sub> <sup>[12]</sup>	—	52.1	30.0	24.9	19.7	0.90	15.6	648.0	7.2	135.4	105.0	165.9

上覆黄土发育时钙质淋溶的影响,属覆钙作用。BC层CaCO<sub>3</sub>也出现了显著的淋滤迁移,平均含量仅6.1 g kg<sup>-1</sup>。紧接BC层底部的Bck层, CaCO<sub>3</sub>平均含量达到了672 g kg<sup>-1</sup>。与S<sub>3</sub>黏化层相比,下伏L<sub>4</sub>层CaCO<sub>3</sub>平均含量则高达120.6 g kg<sup>-1</sup>。由此可见,剖面S<sub>3</sub>中CaCO<sub>3</sub>自Bts3层顶面至Bck层底部的最大迁移深度达到了2 m左右。

表1反映了各元素在剖面中的分布情况,可以发现如下规律:(1)各常量元素在3个黏化亚层的分布存在差异,MnO、TiO<sub>2</sub>和SiO<sub>2</sub>含量呈中上层高而下层低,而Na<sub>2</sub>O含量自上而下增大;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和K<sub>2</sub>O为Bts3 > Bts1 > Bts2, CaO和MgO则为Bts1 > Bts3 > Bts2。与下伏L<sub>4</sub>相比,除CaO和Na<sub>2</sub>O外,其他常量元素在Bts和BC层的含量均有不同程度的增加。CaO在Bck层含量最高,相比L<sub>4</sub>及Bts均显著增加,其他常量元素则均明显减少。与Bck层相比,Bts-JH层CaO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量较高,MgO、SiO<sub>2</sub>和TiO<sub>2</sub>含量与Bck层较为接近,其他元素则明显较低。与BC层相比,Bts层Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、MnO和TiO<sub>2</sub>含量均较高,其他元素含量则较低。以上特征表明,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、MgO、MnO和TiO<sub>2</sub>在黏化层含量较高,指示了相对湿润的环境条件,而Na<sub>2</sub>O、CaO和SiO<sub>2</sub>在下伏黄土层含量较高,指示了与湿润程度反向的变化趋势。(2)微量元素Rb、Sr含量变化与前人研究的黄土高原黄土—古土壤变化规律一致<sup>[13]</sup>:Rb在L<sub>4</sub>和BC层含量较低,在S<sub>3</sub>黏化层含量较高;Sr与之相反,在下伏L<sub>4</sub>较高,而黏化层较低。这是因为Rb和Sr均为分散元素,Rb主要分散于含钾矿物(如白云母、黑云母和钾长石等),Sr主要赋存于含钙碳酸盐矿物,而含钾矿物较碳酸盐矿物稳定。因此在黄土化学风化过程中,Sr较Rb优先淋失,产生Rb和Sr的分离<sup>[13]</sup>。

(3)与黄土高原中部洛川剖面S<sub>3</sub>相比,少陵塬Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、Na<sub>2</sub>O和Sr含量较高,其他可比元素均低于洛川。这一对比结果反映了关中地区古土壤风化成壤作用明显强于黄土高原中部,能够指示风化成壤作用的区域差异。

## 2.2 少陵塬剖面S<sub>3</sub>元素迁移特征

元素含量的变化有时不能真实地反映元素在化学风化过程中的地球化学行为,为了消除碳酸盐淋溶作用对化学组分含量变化的影响,更直观地反映元素含量与化学风化的关系,有学者提出了在假定黄土是古土壤形成母质的基础上,以某种稳定性元

素为参照,计算其他元素相对于该稳定性元素的迁移变化<sup>[14]</sup>。基于此,采用以下方法计算元素相对下伏黄土在剖面中的迁移及富集程度<sup>[15]</sup>。计算公式如下:

$$\Delta x (\%) = 100 \times [ (X_s / T_s) / (X_m / T_m) - 1 ] \quad (1)$$

式中,X<sub>s</sub>、X<sub>m</sub>分别为X元素在古土壤和下伏黄土中的含量,T<sub>s</sub>、T<sub>m</sub>分别为参比元素(一般采用某种稳定性元素作参比,如K、Al、Ti等)在古土壤和下伏黄土的含量。 $\Delta x > 0$ ,表示该元素在风化过程中相对富集, $\Delta x < 0$ ,则相对亏损或迁移。本文以风化成壤弱的下伏L<sub>4</sub>黄土层中Ti元素为参比,并视其TiO<sub>2</sub>含量未受到后期风化作用影响。对少陵塬剖面S<sub>3</sub>元素迁移的计算结果如表2,并以CaCO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、MgO和Na<sub>2</sub>O为例着重分析其剖面变化(图3)。

由表2与图3可以看出,CaO与CaCO<sub>3</sub>具有最突出的迁移富集特点,两者在黏化层的平均迁移率分别达到了-99.3%、-83.1%,尤其CaCO<sub>3</sub>在Bts3和Bts1的下部淋失最强(图3)。两者在BC层也出现了强烈迁移淋失,迁移淋失率与黏化层接近,而CaO与CaCO<sub>3</sub>在钙积层(包括Bck、Bts-JH)显著富集,富集率高达1 000%左右。Sr与CaO相似,在3个黏化亚层均出现了显著的迁移淋失,淋失率达到-25%左右,而在钙积层出现了明显富集,平均富集率超过50%。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>具有相似的迁移变化规律,均在Bts3中下部及BC层上部有明显富集,最大富集率分别达到了26.9%、17.1%,在Bts3层的平均富集率分别达到了9.91%、6.16%。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在Bts1略有富集,在Bts2基本无迁移富集,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>则在Bts1和Bts2略有亏损。Rb在3个黏化亚层中均出现富集,且在Bts3层富集程度最大,而在BC层和钙积层略有亏损。K<sub>2</sub>O仅在Bts3略有富集,而在其他黏化亚层略有淋失,BC层无明显迁移富集。MnO除钙积层外,在其他层基本未发生明显迁移富集。SiO<sub>2</sub>在BC层略有富集,在3个黏化亚层略有亏损。MgO和Na<sub>2</sub>O具有相似的迁移特点,均在黏化层出现显著淋溶迁移,在BC层迁移淋失程度明显减小,其中Na<sub>2</sub>O迁移淋失最突出,在黏化层的平均淋失率达到了-42.3%。

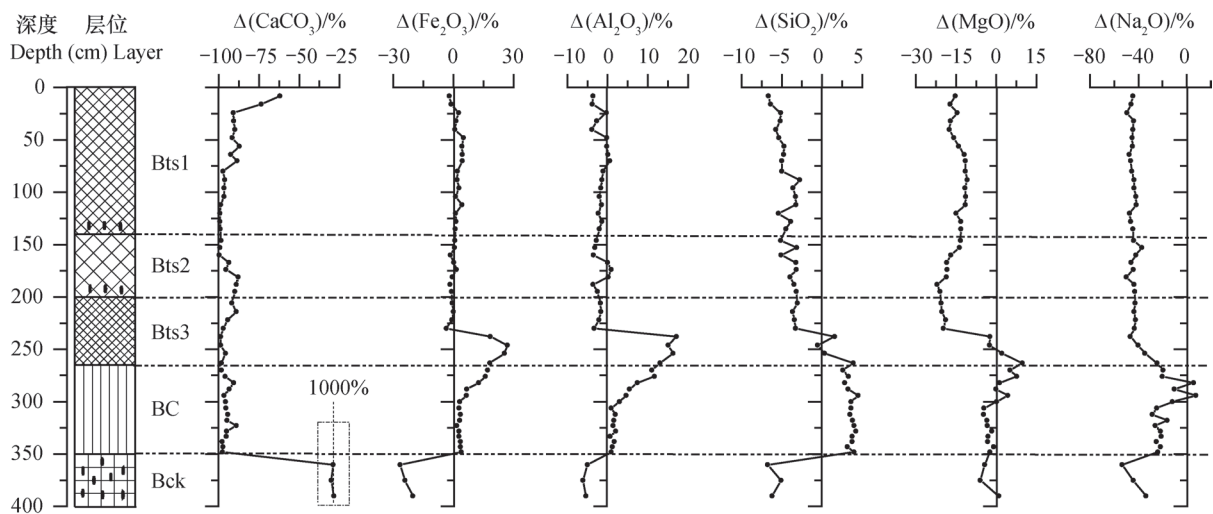
从以上分析可以看出,少陵塬剖面S<sub>3</sub>黏化层CaCO<sub>3</sub>、CaO、Sr、Na<sub>2</sub>O和MgO迁移淋失率超过10%,发生了显著迁移;K<sub>2</sub>O和SiO<sub>2</sub>略有亏损;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Rb轻微富集,具有典型的不活动性

表2 西安少陵塬S<sub>3</sub>剖面元素相对Ti迁移率

层位Layer	CaCO <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Rb (%)	Sr (%)
Bts	-99.3	4.23	-83.1	-3.61	-12.5	0.02	-42.3	-3.30	0.92	3.85	-29.9
Bts1	-99.1	2.13	-82.5	-5.96	-13.8	-0.14	-45.2	-4.77	-1.59	2.48	-30.1
Bts2	-99.5	-0.10	-85.6	-6.19	-17.4	0.44	-43.8	-3.90	-1.73	2.95	-32.1
Bts3	-99.6	9.91	-82.9	1.73	-9.62	0.81	-39.9	-1.14	6.16	8.35	-25.8
Bts-JH	1 015	-32.3	1 036	-25.3	-21.3	-24.9	-74.9	-9.60	-6.30	-2.23	50.4
BC	-99.5	5.93	-81.5	0.28	-0.67	-0.95	-17.2	3.59	3.65	-2.66	-25.5
Bck	973.2	-23.5	1 024	-17.0	-3.01	-17.4	-43.7	-6.04	-5.50	-1.29	58.8

元素特征。同时，钙积层与Bts层元素迁移具有明显互补性（表2）。化学风化过程依据元素活动性具有早期脱Na、Ca，中期脱K和晚期脱Si的3个阶段性特征<sup>[16]</sup>。由前述分析可知，少陵塬剖面S<sub>3</sub>发生了明显的脱Ca、Na风化过程，K淋失较弱。另据研究，CaCO<sub>3</sub>迁移是化学风化初期阶段的特征，而

Fe、Al的迁移则是风化中期阶段的特征，因此在确定古土壤性质及风化阶段时，Fe、Al迁移与否则CaCO<sub>3</sub>迁移具有更明确的指示作用<sup>[17]</sup>。少陵塬S<sub>3</sub>黏化层仅Bts3亚层有较明显的Fe、Al富集，由此可初步认为Bts3已基本完成初期脱Ca、Na风化过程，具有向中期风化过渡的特点。

图3 西安少陵塬S<sub>3</sub>剖面元素迁移率变化Fig. 3 Variation of element migration rates in the Shaolingyuan Profile of S<sub>3</sub> paleosol in Xi'an

### 2.3 剖面S<sub>3</sub>古土壤化学风化强度

**2.3.1 化学风化参数** 本文主要采用黄土古气候研究中常用的化学蚀变指数(CIA)<sup>[18]</sup>、硅铁铝率(Saf)<sup>[19]</sup>、风化淋溶系数(BA)<sup>[20]</sup>、残积系数(Ki)<sup>[21]</sup>以及Na/K<sup>[22]</sup>和Rb/Sr<sup>[13]</sup>等参数，用以指示古土壤的化学风化强度。各化学风化参数的计算及其古环境意义分别依据上述相关文献，其中CIA值计算中CaO<sup>\*</sup>含量为硅酸盐矿物中的钙含量，而不包括碳酸盐和磷酸盐中的钙含

量。因此，可按以下方式进行修正<sup>[23]</sup>：通常硅酸盐中CaO<sup>\*</sup>与Na<sub>2</sub>O之比为1:1，当全岩样品CaO摩尔含量大于Na<sub>2</sub>O时，取 $m_{CaO^*} = m_{Na_2O}$ ；而小于Na<sub>2</sub>O时，则取 $m_{CaO^*} = m_{CaO}$ 。本文所有涉及CaO<sup>\*</sup>的计算均依此方法处理。少陵塬剖面S<sub>3</sub>化学风化参数变化如图4。

由图4可以看出，3个黏化层CIA值较高，除Bts2外，Bts1和Bts3风化程度最强的部分均集中于中下部，代表了这2个黏化层发育最强的时期。进

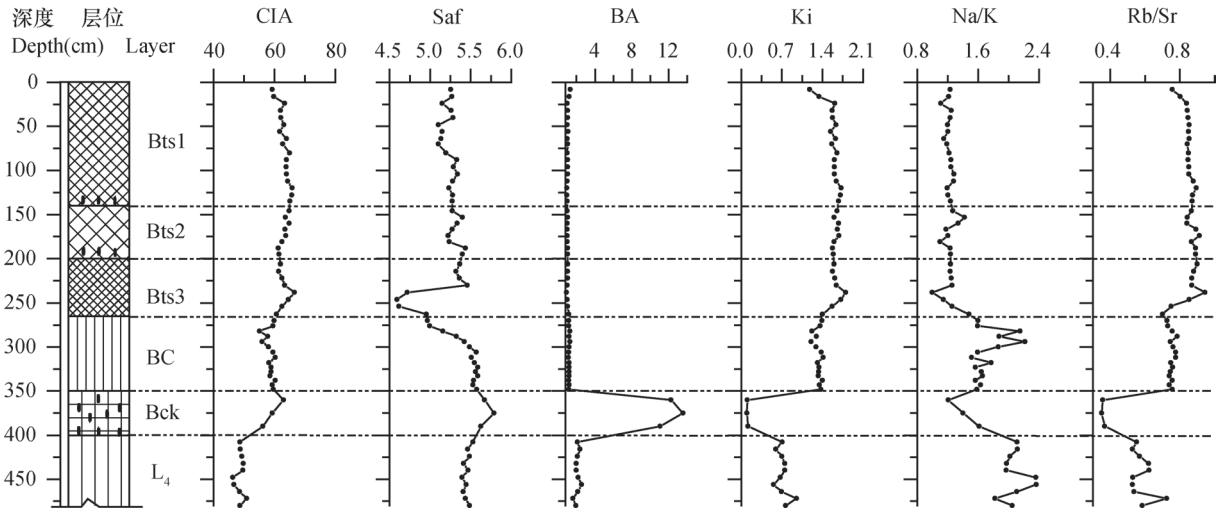


图4 西安少陵塬S<sub>3</sub>剖面化学风化参数变化

Fig. 4 Variation of chemical weathering parameters of the Shaolingyuan Profile of S<sub>3</sub> paleosol in Xi'an

一步统计表明，3个黏化层CIA值自上而下均值分别为63.66、63.44、64.25，3个黏化层风化程度相近，以Bts3层风化程度最高，反映了由初等化学风化向中等化学风化过渡的特点。BC层CIA值有所减小，平均值为58.64，处于冷干条件下的低等风化阶段；而L<sub>4</sub>层CIA平均值仅为48.69，反映了更为干冷的气候条件。硅铁铝率Bts3中下部最低，平均值为4.85，较Bts1和Bts2（分别为5.22、5.31）显著减小，最低处仅为4.59，说明Bts3层风化淋溶程度最高，以致铁铝氧化物明显富积，这从野外剖面观察所发现的Bts3层表面有一些棕红色铁质胶膜可以得到印证。BC和L<sub>4</sub>层硅铁铝率显著增大，风化程度明显减弱。BA值黏化层最低，Bts1~Bts3层平

均值分别为1.02、1.01、0.99，Bts3风化淋溶作用最强，BC层略有增大，至L<sub>4</sub>层明显较高，风化作用最弱。3个黏化层残积系数均值自上而下分别为1.62、1.63、1.68，均显著高于BC和L<sub>4</sub>层（1.33、0.71），Rb/Sr比值的剖面变化与残积系数基本吻合。3个黏化层Na/K比值由Bts3→Bts1→Bts2增大，分别为1.17、1.21、1.25，Bts3层风化程度最强，相比之下BC和L<sub>4</sub>层则显著增大。同时，除Bck层外，CIA值与硅铁铝率、BA值、残积系数、Na/K和Rb/Sr的相关系数分别为-0.438、-0.953、0.988、-0.914和0.938，均具有极显著的相关性。图5中Na/K与Rb/Sr两组参数所指示的各层风化强度从L<sub>4</sub>→BC→Bck→Bts2→Bts1→Bts3，化学风化强

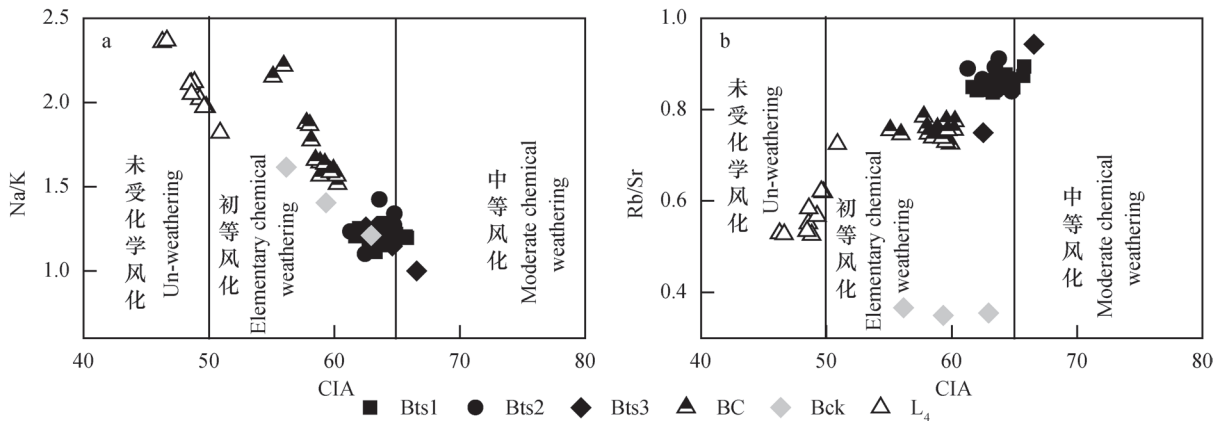


图5 西安少陵塬S<sub>3</sub>剖面CIA与Na/K及Rb/Sr关系散点图

Fig. 5 Scatter diagrams of CIA vs. Na/K and CIA vs. Rb/Sr in the Shaolingyuan Profile of S<sub>3</sub> paleosol in Xi'an



度依次增强，与上述其他参数所反映的情况一致。这一结论与前人依据磁化率、粒度及有机质指标所得出的西安地区S<sub>3</sub>剖面风化强度的剖面变化是一致的<sup>[10]</sup>。以上分析表明，少陵塬剖面S<sub>3</sub>古土壤Bts3层化学风化最强，其次为Bts1和Bts2层，已基本完成初级阶段的化学风化，处于暖湿程度相对较弱的阶段。

**2.3.2 A-CN-K和A-CN-K-FM图解** Nesbitt 和 Young<sup>[15]</sup>提出了反映大陆化学风化趋势及主要成分和矿物差异性变化的A-CN-K和A-CN-K-FM三角图，A-CN-K图解通过碱金属元素含量和Al含量反映化学风化程度和矿物学变化，但不能反映其他金属元素的迁移规律或风化过程，而A-CN-K-FM图解则可反映Fe、Mg元素的组成差异及其迁移和富集过程<sup>[24]</sup>，分析结果如图6。

A-CN-K图显示（图6a），少陵塬剖面S<sub>3</sub>各层风化沉积物与洛川S<sub>3</sub>的数据点成线状分布，均集中于UCC到陆源页岩方向的趋势线上（箭头方向），且与A-CN边近似平行，这一方面说明少陵塬S<sub>3</sub>与洛川古土壤物质组成具有高度均一性，另一方面揭

示了古土壤中斜长石最先风化，斜长石的风化使富含其中的强活动性元素Ca、Na易发生淋失，其淋失率由少陵塬L<sub>4</sub>→BC→洛川S<sub>3</sub>→Bts2→Bts1→Bts3逐渐增大，而钾长石相对稳定，尚未进入去K风化阶段，反映了少陵塬S<sub>3</sub>成壤期化学风化作用仍然较弱，L<sub>4</sub>则处于该趋势线末端，说明风化作用微弱，气候冷干。

A-CN-K-FM图显示（图6b），少陵塬S<sub>3</sub>剖面各分层数据点基本呈线状分布，与UCC→陆源页岩一线近似平行。从不同分层的对比来看，少陵塬S<sub>3</sub>各分层差异分布明显，尤其L<sub>4</sub>层与其他数据点分化显著，落于UCC的右下方，说明L<sub>4</sub>层相比UCC发生了一定的化学风化；BC层与Bts层也有明显分化，Bts层的3个亚层则基本重叠在一处且靠近FM端，说明风化作用强度逐渐加强，古土壤化学组成相比黄土出现了显著差异，Bts层Fe氧化物趋于富集，而L<sub>4</sub>层黄土层则趋于淋失。洛川S<sub>3</sub>剖面数据点位于少陵塬S<sub>3</sub>黏化层数据点的左上方，说明洛川S<sub>3</sub>剖面的Fe氧化物富集程度不及关中地区，化学风化强度相比也较弱。

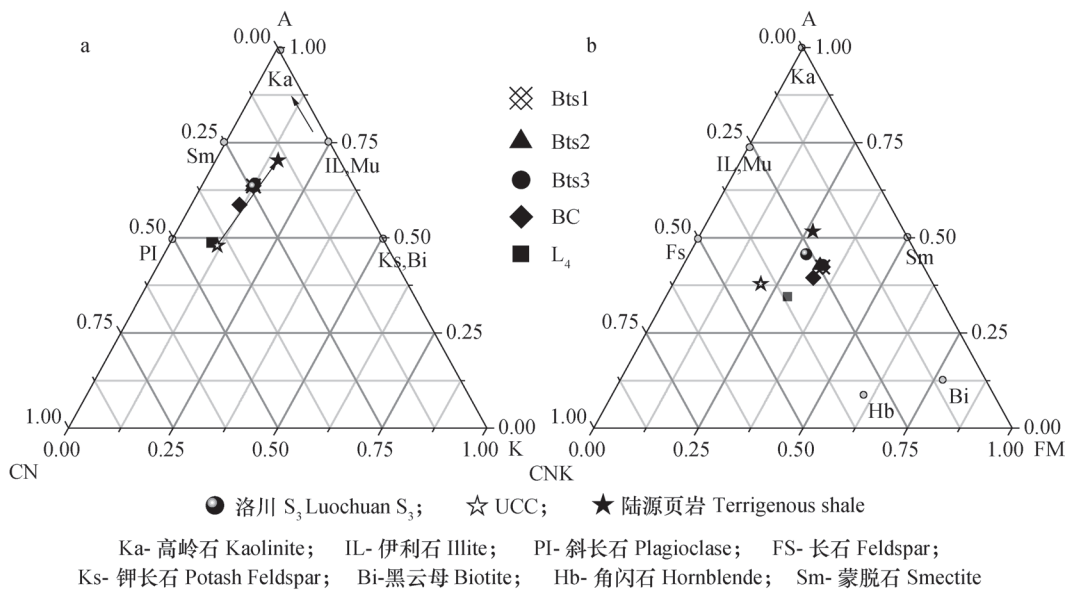


图6 西安少陵塬S<sub>3</sub>剖面A-CN-K与A-CN-K-FM化学风化趋势图解

Fig. 6 Sketch of the chemical weathering tendencies of A-CN-K and A-CN-K-FM in the Shaolingyuan Profile of S<sub>3</sub> paleosol in Xi'an

**2.4 S<sub>3</sub>剖面的土壤类型与古气候**

CaCO<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>迁移深度与古土壤发育时期的降水量有关，是确定当时降水量多少的重要依据<sup>[25]</sup>。Bts1层上部约25 cm所出现的大量CaCO<sub>3</sub>薄膜是受上覆土层发育时的淋溶影响形成的，属后

期淋溶淀积CaCO<sub>3</sub>，不能反映Bts1发育时的气候。Bts1和Bts2底层所发育的松散CaCO<sub>3</sub>结核淀积，也均未迁出相应的黏化层底界，指示Bts1和Bts2层发育时的土壤呈碱性，这与碱性土壤CaCO<sub>3</sub>紧接着在黏化层底部淀积是一致的<sup>[19]</sup>。但Bts1和Bts2层质

地黏重,少陵塬长竹村S<sub>3</sub>剖面 < 5 μm黏粒平均含量达到了40%<sup>[10]</sup>,以棕红色棱柱状结构为主,表面及沿根孔亦分布有黑褐色与红褐色铁锰胶膜发育,红色化明显,纵向裂隙发育强烈,碳酸盐基本淋失,符合亚热带北缘黄褐土的性质,明显较华北褐土发育强,由此可初步判断Bts1和Bts2黏化层为黄褐土类型。

Bts3层CaCO<sub>3</sub>的最大淀积深度达到了2 m,已迁出Bts3层底界0.8 m,而且在Bts3层呈小棱柱体结构,表面具有许多纵向分布的红褐色铁质胶膜和黑褐色铁锰胶膜发育,土层致密黏实,说明Bts3层较Bts1和Bts2层具有更强的黏化特征。在Bts3层的BC层上部30 cm深度范围内有少量褐色铁质胶膜分布,表明Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>迁出了黏化层,指示了Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>较为强烈的迁移。因此,综合以上分析,可初步确定Bts3层为淋溶黄褐土。

Sheldon等<sup>[26]</sup>依据北美土壤数据分别建立了古土壤发育时期的区域年均降水量(P)与CIA-K(即100Al/(Al+Ca+Na))、B值(即SUM(Bases)/Al=(Ca+K+Mg+Na)/Al)的定量转换关系,两者均适用于降水量介于200~1600 mm的范围,但不适用于地表蒸发大的沙漠地表及风化强度大的以高岭土、水铝石等矿物为主的红壤,其定量关系分别为

$$P = 221e^{0.0197(CIA-K)}, R^2 = 0.72; \quad (2)$$

$$P = -257.34 \ln(B) + 759.05, R^2 = 0.66 \quad (3)$$

欧阳椿陶等<sup>[27]</sup>利用华北现代褐土的CIA值构建了古降水量与CIA值的定量转换关系:

$$P = -1162.9 + 30.248(CIA) \quad (4)$$

据式(2)推算出来的少陵塬S<sub>3</sub>剖面古土壤Bts1~Bts3发育最适宜时期的年均降水量分别为925、904、939 mm,据式(3)推算出来的年均降水量分别为754、756、761 mm,据式(4)推算出来的年均降水量分别为827、797、850 mm。对比来看,式(2)推算出的降水量已接近亚热带地区水平,在此降水条件下的土壤应呈弱酸性,这与前述分析不符。式(3)和式(4)推算出来的降水量差别较小,达到800 mm左右,而少陵塬S<sub>3</sub>剖面古土壤为黄褐土,而且利用现代土壤气候代用指标与降水的定量关系反演古降水也是当前黄土古气候研究的一个主要途径<sup>[28]</sup>,因此,结合前文分析的少陵塬S<sub>3</sub>剖面性质及土壤类型,认为少陵塬S<sub>3</sub>剖面古土壤发育时期的年均降水在800 mm左右。

### 3 结 论

少陵塬S<sub>3</sub>剖面黏化层具有3层结构,根据铁质胶膜发育、CaCO<sub>3</sub>迁移等可以将S<sub>3</sub>剖面构型划分为黏化层(Bts1-Bts2-Bts3)、风化淋滤黄土层(BC)和CaCO<sub>3</sub>结核淀积层(Bck)。Bts层CaO与CaCO<sub>3</sub>迁移程度最大,Sr、Na<sub>2</sub>O和MgO也发生了显著迁移;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Rb在黏化层呈轻微富集,尤其是Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在Bts3层有明显富集;Bts3已基本完成初期脱Ca、Na风化过程,具有向化学风化中期过渡的特点。少陵塬S<sub>3</sub>古土壤介于初等风化向中等强度风化的过渡阶段,风化作用由BC→Bts2→Bts1→Bts3逐渐增强。依据CaCO<sub>3</sub>与Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的迁移富集特点,少陵塬S<sub>3</sub>古土壤Bts3发育时的土壤为弱碱性,而Bts1和Bts2为碱性,初步判定少陵塬S<sub>3</sub>古土壤属于黄褐土,发育最适宜期西安地区的年均降水量为800 mm左右。

### 参 考 文 献

- [1] Lowe J J, Walker M J C. 沈吉, 于革, 吴敬禄, 等译. 第四纪环境演变. 北京: 科学出版社, 2010: 91—174  
Lowe J J, Walker M J C. Shen J, Yu G, Wu J L, et al. Trans. Reconstructing Quaternary environments (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010: 91—174
- [2] 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
- [3] 黄成敏, Retallack G J, 王成善. 白垩纪钙质古土壤的发生学特征及古环境意义. 土壤学报, 2010, 47(6): 1029—1038  
Huang C M, Retallack G J, Wang C S. Cretaceous calcareous paleosols: Pedogenetic characteristics and paleoenvironmental implications (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1029—1038
- [4] 殷科, 洪汉烈, 高文鹏, 等. 末次间冰期以来临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

- [ 5 ] 安芷生, 魏兰英, 卢演侑. 洛川黄土剖面土壤地层学的初步研究. 第四纪研究, 1985, 6 ( 1 ) : 166—173  
An Z S, Wei L Y, Lu Y C. Preliminary study on soil stratigraphy of Luochuan loess ( In Chinese ) . Quaternary Sciences, 1985, 6 ( 1 ) : 166—173
- [ 6 ] 赵景波. 关中平原420—350 ka BP的古土壤与环境. 地理学报, 2005, 60 ( 1 ) : 32—40  
Zhao J B. Paleosol developed and paleoenvironment in the Guanzhong Plain during 420—350 ka BP ( In Chinese ) . Acta Geographica Sinica, 2005, 60 ( 1 ) : 32—40
- [ 7 ] 赵景波, 顾静, 杜娟. 关中平原第5层古土壤发育时的气候与土壤水环境研究. 中国科学: D辑, 2008, 38 ( 3 ) : 364—374  
Zhao J B, Gu J, Du J. The effect of climate and soil water environment on the fifth Paleosol developed in Guanzhong Plain ( In Chinese ) . Science in China: Series D, 2008, 38 ( 3 ) : 364—374
- [ 8 ] 赵景波, 邢闪, 董红梅, 等. 西安蓝田杨家湾黄土中第一层古土壤 ( S<sub>1</sub> ) 元素含量与环境. 第四纪研究, 2011, 31 ( 3 ) : 514—521  
Zhao J B, Xing S, Dong H M, et al. The elements contents of S<sub>1</sub> paleosol in Yangjiawan, Lantian, Xi'an and the environmental implication ( In Chinese ) . Quaternary Sciences, 2011, 31 ( 3 ) : 514—521
- [ 9 ] 胡雪峰, 鹿化煜. 黄土高原古土壤成土过程的特异性及发生学意义. 土壤学报, 2004, 41 ( 5 ) : 669—675  
Hu X F, Lu H Y. Peculiarities in soil-forming processes of paleosols in the Loess Plateau and their pedogenic implication ( In Chinese ) . Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 ( 5 ) : 669—675
- [ 10 ] 韩宇平, 赵景波. 西安地区第三层古土壤研究. 中国沙漠, 2000, 20 ( 1 ) : 9—13  
Han Y P, Zhao J B. Study on the third paleosol in Xi'an region ( In Chinese ) . Journal of Desert Research, 2000, 20 ( 1 ) : 9—13
- [ 11 ] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea  $\delta^{18}O$  record. Paleoclimatology, 2002, 17 ( 3 ) : 1—21
- [ 12 ] 陈骏, 季峻峰, 仇纲, 等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究. 中国科学: D辑, 1997, 27 ( 6 ) : 531—536  
Chen J, Ji J F, Qiu G, et al. The geochemical study of the loess chemical weathering degree in Luochuan, Shaanxi Province ( In Chinese ) . Science in China: Series D, 1997, 27 ( 6 ) : 531—536
- [ 13 ] 陈骏, 汪永进, 季峻峰, 等. 陕西洛川黄土剖面的Rb/Sr值及其气候地层学意义. 第四纪研究, 1999, 19 ( 4 ) : 350—356  
Chen J, Wang Y J, Ji J F, et al. Rb/Sr variations and its climatic stratigraphical significance of a loess-paleosol profile from Luchuan, Shaanxi Province ( In Chinese ) . Quaternary Sciences, 1999, 19 ( 4 ) : 350—356
- [ 14 ] 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近2.5 Ma以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化. 中国科学: D辑, 2001, 31: 136—145  
Chen J, An Z S, Liu L W, et al. Changes of the eolian chemical composition in Chinese Loess Plateau and the chemical weathering of Asian inland since the last 2.5 Ma ( In Chinese ) . Science in China: Series D, 2001, 31: 136—145
- [ 15 ] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 1982, 299: 715—717
- [ 16 ] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. Geochem Cosmochim Acta, 1980, 44 ( 11 ) : 1659—1666
- [ 17 ] 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
- [ 18 ] Martin R, JrÉme V, Stéphane B, et al. Controls on weathering and provenance in the Amazonian Foreland B as in: Insights from major and trace element geochemistry of neogene amazonian sediments. Chemical Geology, 2006, 226: 31—65
- [ 19 ] 朱鹤健, 何宜庚. 土壤地理学. 北京: 高等教育出版社, 1992: 8—77  
Zhu H J, He Y G. Soil geography ( In Chinese ) . Beijing: Higher Education Press, 1992: 8—77
- [ 20 ] 韩春兰, 刘素花, 王秋兵, 等. 辽宁省朝阳市第四纪古红土基本性状与发生学特征研究. 土壤通报, 2009, 40 ( 6 ) : 1233—1239  
Han C L, Liu S H, Wang Q B, et al. Basic properties and genetic characteristic research of Quaternary Paleosol in Chaoyang City of Liaoning ( In Chinese ) . Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40 ( 6 ) : 1233—1239
- [ 21 ] 赵锦慧, 王丹, 樊宝生, 等. 延安地区黄土堆积的地球化学特征与最近13万年东亚夏季季风气候的波动. 地球化学, 2004, 33 ( 5 ) : 495—500  
Zhao J H, Wang D, Fan B S, et al. Geochemical characteristics of the loess deposit at Yan'an and its

- implication to changes of East Asia summer monsoon during the past 130 ka (In Chinese). *Geochimica*, 2004, 33 (5): 495—500
- [22] 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征. *地理学报*, 2007, 62 (11): 1174—1184
- Li X S, Han Z Y, Yang S Y, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu Province (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62 (11): 1174—1184
- [23] McLennan S M. Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 1993, 101: 295—303
- [24] 徐志伟, 鹿化煜, 赵存法, 等. 库姆塔格沙漠地表物质组成、来源和风化过程. *地理学报*, 2010, 65 (1): 53—64
- Xu Z W, Lu H Y, Zhao C F, et al. Composition, origin and weathering process of surface sediment in Kumtagh Desert, northwest China (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65 (1): 53—64
- [25] 赵景波, 黄春长, 岳应利. 中国黄土中的风化壳研究. *沉积学报*, 2001, 19 (1): 90—95
- Zhao J B, Huang C C, Yue Y L. Residua in Loess of China (In Chinese). *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19 (1): 90—95
- [26] Sheldon N D, Retallack G J, Tanaka S. Geochemical climofunctions from North America soils and application to palaeosols across the Eocene-Oligocene boundary. *Journal of Geology*, 2002, 110: 687—696
- [27] 欧阳椿陶, 李保生, 欧先交, 等. 萨拉乌苏河流域末次间冰期古土壤化学风化与古气候. *地理学报*, 2007, 62 (5): 518—528
- Ouyang C T, Li B S, Ou X J, et al. Chemical weathering of the Milanggouwan Paleosols in the Salawusu River Valley and their paleoclimatic implication during the last interglacial period (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62 (5): 518—528
- [28] Balsam W L, Ellwood B B, Ji J F, et al. Magnetic susceptibility as a proxy for rainfall: World wide data from tropical and temperate climate. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30 (19/20): 2732—2744

## Element Migration in S<sub>3</sub> Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication

CHU Chunjie<sup>1, 2</sup> ZHAO Jingbo<sup>1†</sup>

(1 College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

(2 College of Resources and Environmental Science, Pingdingshan University, Pingdingshan, Henan 467000, China)

**Abstract** The loess-paleosol sequence in the Loess Plateau of China contains a complete set of climate environment information since Quaternary, of which the extraction uses geochemical analysis as an important approach. In this paper, the key issue under discussion is whether the knowledge in the past coincides with the profile configuration and soil properties of the S<sub>3</sub> paleosol developed during 336 to 307 ka BP in the Guangzhong region and the paleoclimate conditions under which it was developed. For that end, this study took the Shaolingyuan profile of S<sub>3</sub> paleosol in Xi'an as subject, for exploration of, element migration in and chemical weathering characteristics of the profile and their implications in terms of paleoclimatic change through field investigations and geochemical analysis. The authors conducted three field investigations in March, 2014. Based on the field observation and measurement, the author divided the S<sub>3</sub> profile in configuration and collected 61 soil samples, one every 8 cm on average along the profile for analysis of, chemical composition and CaCO<sub>3</sub> content. Geochemical elements were determined with a PW2403 X-Ray fluorescence spectrometer analyzer of the Holland Panalytical Corp., and CaCO<sub>3</sub> was with a BW14-08.53 calcium analyzer of the Holland Eijkelkamp Corp.

Results show as follows: The profile could be divided into argillic horizon (Bts), weathered and leached loess horizon (BC) and CaCO<sub>3</sub> nodule illuvial horizon (Bck) in the light of development of

ferruginous clay film and migration of CaCO<sub>3</sub>, and the argillic horizon of the Shaolingyuan Profile S<sub>3</sub> was formed of three layers ( Bts1-Bts2-Bts3 ). In Horizon Bts, migration of CaO and CaCO<sub>3</sub> was the most significant, with leaching rate reaching up to -99.31% and -83.06%, respectively, and that of Sr, Na<sub>2</sub>O and MgO was significant, too, but Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Rb accumulated slightly, particularly, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Bts3 layer. The Shaolingyuan Profile of S<sub>3</sub> paleosol lied in the transient phase between the primary weathering stage and the moderately strong weathering stage, with weathering displaying a rising order of BC < Blt2 < Blt1 < Blt3 in intensity. The Bts3 layer had basically completed the primary chemical weathering process characterized by leaching of Ca and Na, but had not yet started the next process characterized by leaching of K. In the light of migration and accumulation of CaCO<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, it could primarily be determined that the soil of the Bts3 layer was slightly alkaline during its development, and the soils in the other two layers, Bts1 and Bts2 were alkaline, and, the Shaolingyuan profile S<sub>3</sub> belonged to yellow cinnamon soil. During the period of S<sub>3</sub> paleosol development, the annual mean precipitation in Xi'an region was calculated to be around 800 mm.

**Key words** Peleosol; Element migration; Chemical weathering; Paleoclimate; Shaolingyuan in Xi'an

( 责任编辑：檀满枝 )

CONTENTS

**Reviews and Comments**

- Mechanism of Extracellular Electron Transfer among Microbe-Humic-Mineral in Soils: A Review ..... WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu ( 290 )  
 Effects of Long-term Fertilization on Key Processes of Soil Nitrogen Cycling in Agricultural Soil: A Review ..... WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zucong, et al. ( 303 )

**Insights and Perspectives**

- Soil-borne Pathogens Should not Be Ignored by Soil Science ..... CAI Zucong, HUANG Xinqi ( 310 )

**Research Articles**

- Element Migration in S<sub>3</sub> Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication ..... CHU Chunjie, ZHAO Jingbo ( 320 )  
 Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation ..... LIU Ya, PAN Xianzhang, SHI Rongjie, et al. ( 330 )  
 Construction of Calibration Set based on the Land Use Types in Visible and Near-Infrared ( VIS-NIR) Model for Soil Organic Matter Estimation ..... LIU Yanfang, LU Yannian, GUO Long, et al. ( 340 )  
 Prediction of Soil Organic Matter based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm ..... WANG Yinyin, QI Yanbing, CHEN Yang, et al. ( 353 )  
 Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei ..... DENG Yusong, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. ( 363 )  
 Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow ..... MA Meijing, WANG Junguang, GUO Zhonglu, et al. ( 373 )  
 Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area ..... WANG Renxin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. ( 386 )  
 Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil ..... ZHANG Yue, YANG Jingsong, YAO Rongjiang ( 399 )  
 Soil Temperature Regime in Guizhou Province Relative to Assessment Method ..... LU Xiaohui, DONG Yubo, TU Chenglong ( 409 )  
 Characteristics of Variation of Soil Temperature in Shrub Meadow Area of Lhasa ..... GONG Yuling, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, et al. ( 419 )  
 Soil Water Repellency of Sands and Clay as Affected by Particle Size ..... YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. ( 426 )  
 Effect of AQDS Accelerating Anaerobic Dechlorination of DDT in Hydragric Acrisols ..... LIU Cuiying, WANG Zhuang, XU Xianghua, et al. ( 436 )  
 Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ..... ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao ( 448 )  
 Effects of Ozone Pollution on Different Active Organic Carbon Stocks in Wheat Farmland Soil ..... KOU Taiji, CHENG Xianghan, ZHANG Dongliang, et al. ( 455 )  
 Soil Organic Nitrogen Components and Their Contributions to Mineralizable Nitrogen in Paddy Soil of the Black Soil Region ..... CONG Yaohui, ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, et al. ( 466 )  
 Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Labile Organic Carbon and Soil Enzyme Activity in Gentle Slope Land of Red Soil ..... HUANG Shangshu, CHENG Yanhong, ZHONG Yijun, et al. ( 475 )  
 Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains ..... ZHAO Weijun, LIU Xiande, JIN Ming, et al. ( 488 )  
 The Application of Biomarker Genes for DNA/RNA-Stable Isotope Probing of Active Methanotrophs Responsible for Aerobic Methane Oxidation in Six Paddy Soils ..... ZHENG Yan, JIA Zhongjun ( 500 )  
 Screening of Phosphate-solubilizing Bacteria Adaptable to Corn and Effects of the Bacteria on the Growth of Corn ..... MEI Xinlan, SHAN Anqi, JIANG Yi, et al. ( 508 )  
 Response of Soil Nematode Community to Cultivation in Upland Red Soil Relative to Cultivation History and Its Significance as Indicator ..... WANG Mingwei, LIU Yudi, CHEN Xiaoyun, et al. ( 521 )  
 Nutrient Absorption and Nutrient Balance in an Agro-pastoral Compound Production Pattern of "Raising Geese in Corn Fields" in Tibet ..... SHA Zhipeng, ZHANG Yuyang, WANG Chao, et al. ( 531 )  
 Effects of Continuous Cropping of Processing Tomato on Physical-chemical Properties of and Microbial Biomass in the Soil ..... KANG Yalong, JING Feng, SUN Wenqing, et al. ( 542 )

**Research Notes**

- Mechanism of CTMAB Modifying BS-12 Modified Bentonite ..... YU Lu, MENG Zhaofu, LI Wenbin, et al. ( 550 )  
 Effects of Mechanical Soil Amelioration Method on Physical Properties of and Enzyme Activity in Planosol ..... MENG Qingying, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. ( 559 )

**Cover Picture:** Microbial Extracellular Electron Transfer: Energy Transfer and Substance Transformation ( by WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu )

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：卢 萍 檀满枝 陈荣府

## 土 壤 学 报

### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

## ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 53 No. 2 Mar., 2016

编 辑 《土壤学报》编辑委员会  
地址：南京市北京东路 71 号 邮政编码：210008  
电话：025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica  
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China  
Tel: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正  
主 管 中 国 科 学 院  
主 办 中 国 土 壤 学 会  
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng  
Superintended by Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Soil Science Society of China  
Undertaken by Institute of Soil Science,  
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司  
总发行 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717  
电话：010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company  
Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China  
Tel: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址：北京 399 信箱 邮政编码：100044

Oversea distributed by China International Book Trading Corporation  
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号：CN 32-1119/P

国内邮发代号：2-560

国外发行代号：BM45

定价：60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

