

黄土高原褐土和黑垆土剖面中 Rb 和 Sr 分布与全新世成土环境变化^{*}

周群英 黄春长 庞奖励 陈宝群 李平华 张 建

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

摘 要 对黄土高原 3 个土壤剖面 Rb 和 Sr 分布规律的研究表明, 全新世不同阶段的黄土和土壤中 Rb 和 Sr 分布存在明显的差异, Rb/Sr 比值的变化反映了成土环境和成土作用强度的变化。全新世早期, 气候比较温和干燥, 风尘堆积速率降低, 土壤发育表现为边沉积边成土; 全新世中期, 气候温暖湿润, 沙尘暴很少发生, 风尘堆积速率极低, 生物风化成土作用达到最强, 以至于在黄土高原面发育黑垆土, 在关中盆地形成褐土。到了 3 100 多年前, 气候恶化变干, 风尘堆积速率加快, 土壤严重退化。从区域上看, 冬季风对黄土高原南部的环境效应比夏季风对北部的环境效应要强, 黄土高原南部季风场强的变化较北部大。

关键词 黄土高原, 土壤, 稀土元素, 成土环境

中图分类号 S151

Rb 和 Sr 是一对在地球化学行为方面有明显差别的微量元素, 国内外有许多学者对其在表生风化成土中的迁移规律进行了研究^[1~5]。在我国黄土与古土壤研究中, 一些学者试图将其作为一种气候替代性指标, 来揭示东亚季风的演变规律^[1, 2, 4]。然而目前对于现代土壤剖面 Rb 和 Sr 记录意义的理解仍然很有限, 因此有必要在不同的区域和地点, 获取更多的第一手数据资料, 以识别其气候敏感性, 达到对其在区域表生过程中的迁移规律有更深刻认识。为此, 选择黄土高原 3 个全新世土壤剖面进行分析, 探索土壤剖面中 Rb、Sr 元素时空分布特征, Rb、Sr 元素含量变化对成土环境的指示作用及 Rb、Sr 元素分布特征所反映的黄土高原全新世季风环流在时空上的演变特征。

1 研究地点和土壤剖面

本研究选择的合水 MJY-A、扶风 JYC、户县 WSC 3 个剖面分别位于黄土高原腹地、南部黄土台塬和渭河第二级河流阶地上(图 1)。剖面所在具体地点地形平坦, 土壤学层次与地层学层次都很完整清晰, 土壤发育良好。其中扶风 JYC 剖面全新世土壤—褐土是属于两个周期发育的复合土壤, 而合水剖面 and 户县剖面均为全新世单周期土壤剖面。合水 MJY-A 剖面全新世古土壤(S_0)为黑垆土, 户县 WSC 剖面全新世古土壤(S_0)为褐土。至于在合水和户县全新世剖面只能观察到一层古土壤, 而在扶风剖面却为两层古土壤, 表明全新世黄土剖面层系特点具有区域性差异。这主要是由于各种不同的地形位置、侵蚀与堆积平衡的差异所造成。其中扶风 JYC 剖面全新世沉积速率高, 成土过程没有发生侵蚀, 故其成土环境演变记录更为完整连续。

2 研究方法和分析结果

2.1 样品的采集与分析

对 3 个剖面自地表向下以每 2 cm 进行系统采样, 直至进入马兰黄土顶部约 1 m 深度, 共采集样品 455 个。这些样品经过自然风干, 每个样品取 50 g 进行粗研磨至粒径小于 2 mm; 用 WCL-1 型磁化率仪(1.55 kHz)对样品进行磁化率的测定, 每个样品测定 3 次, 取平均值。

另取样品 10 g 在玛瑙研钵中细研至 200 目以下, 并将其混合均匀, 从中取出 0.5 g 溶解进行分析。

^{*} 国家自然科学基金项目(40071006)和教育部重大项目(01JAZJD770014)资助

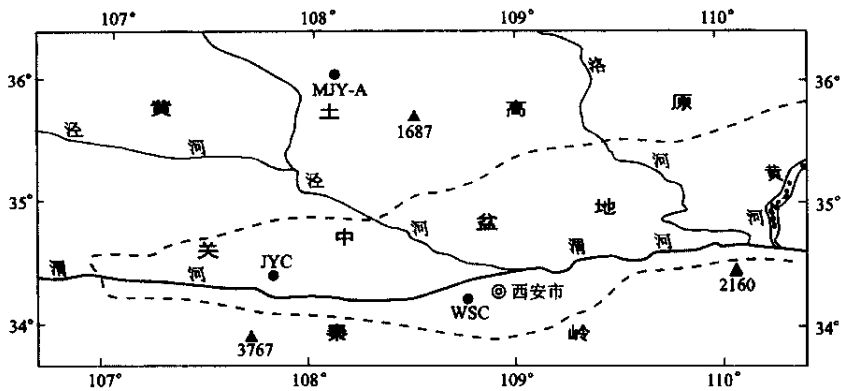


图 1 研究区域土壤剖面分布图

Fig.1 Map of the southern Loess Plateau showing the studied areas and the distribution of the Holocene soil profiles

样品中 Rb 和 Sr 的含量采用原子吸收光谱法分析, 仪器为北京第二光学仪器厂生产的原子吸收光谱仪 (WFX-1C 型)。在分析过程中, 加入标准样品进行精度控制。各种分析结果见表 1 和图 2 ~ 图 4。

表 1 黄土高原全新世土壤剖面中磁化率和 Rb、Sr 分析结果

Table 1 Magnetic susceptibility and Rb and Sr contents in the Holocene loess palaeosol sequences

土壤剖面 Soil profiles	层位 Stratigraphy	深度 Depth (cm)	样品数 Number of samples	MS ($\times 10^{-6}$ cgs)		Rb (mg kg ⁻¹)		Sr (mg kg ⁻¹)		Rb/Sr	
				范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
				Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average
合水 MJY-A	T _s	0 ~ 45	23	110 ~ 123	76	87 ~ 123	102	217 ~ 257	238	0.36 ~ 0.50	0.43
	L ₀	45 ~ 88	21	72 ~ 91	87	85 ~ 109	98	172 ~ 280	235	0.31 ~ 0.57	0.43
	S ₀	88 ~ 185	48	91 ~ 134	114	96 ~ 120	108	107 ~ 222	157	0.46 ~ 1.33	0.88
	L _t	185 ~ 205	10	73 ~ 85	78	93 ~ 97	95	203 ~ 256	228	0.41 ~ 0.57	0.45
	L ₁	205 ~ 280	38	36 ~ 60	40	78 ~ 87	90	246 ~ 329	297	0.26 ~ 0.35	0.31
扶风 JYC	T _s	0 ~ 40	20	140 ~ 166	151	74 ~ 102	91	63 ~ 114	85	0.80 ~ 1.54	1.10
	L ₀	40 ~ 80	20	119 ~ 161	131	78 ~ 95	88	100 ~ 159	151	1.40 ~ 1.11	0.61
	S ₀ ¹	80 ~ 160	40	148 ~ 168	155	89 ~ 104	97	43 ~ 88	58	1.20 ~ 2.22	1.71
	L _x	160 ~ 190	15	147 ~ 163	154	83 ~ 98	94	42 ~ 102	75	0.97 ~ 2.23	1.42
	S ₀ ²	190 ~ 244	27	107 ~ 170	147	83 ~ 113	103	35 ~ 97	52	0.93 ~ 3.22	2.13
	L _t	244 ~ 270	13	59 ~ 77	68	61 ~ 90	69	128 ~ 222	207	0.25 ~ 0.70	0.35
户县 WSC	L ₁	270 ~ 380	55	48 ~ 70	58	62 ~ 99	74	193 ~ 296	235	0.23 ~ 0.44	0.32
	T _s	0 ~ 30	15	110 ~ 123	115	87 ~ 106	94	151 ~ 206	174	0.44 ~ 0.67	0.54
	L ₀	30 ~ 80	25	120 ~ 158	137	67 ~ 108	91	154 ~ 228	186	0.31 ~ 0.65	0.49
	S ₀	80 ~ 136	28	128 ~ 217	174	86 ~ 116	104	73 ~ 150	99	0.61 ~ 1.48	1.08
	L _t	136 ~ 156	10	80 ~ 110	93	71 ~ 88	80	197 ~ 228	218	0.33 ~ 0.45	0.37
	L ₁	156 ~ 250	47	50 ~ 80	65	66 ~ 87	79	231 ~ 296	270	0.26 ~ 0.34	0.30

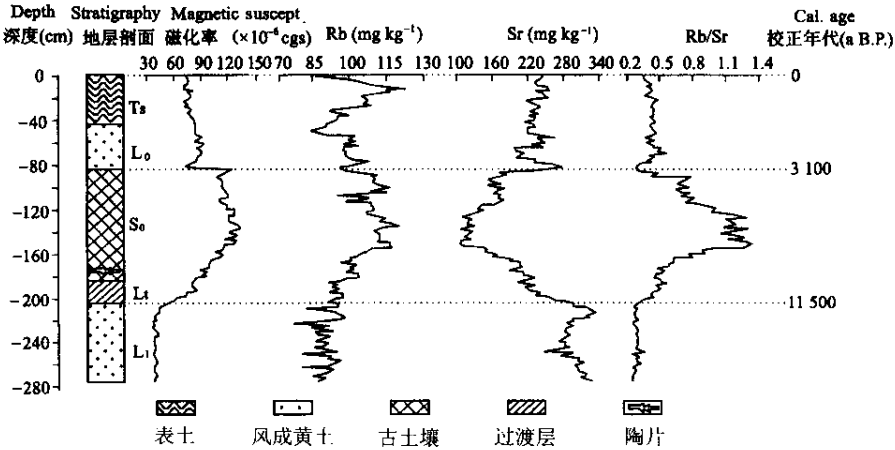


图 2 合水 MJY-A 剖面的 Rb、Sr、Rb/Sr 和磁化率变化曲线

Fig.2 Curves of changes in Rb , Sr ,Rb/Sr and magnetic susceptibility in the soil profile at the MJY-A site , Heshui County

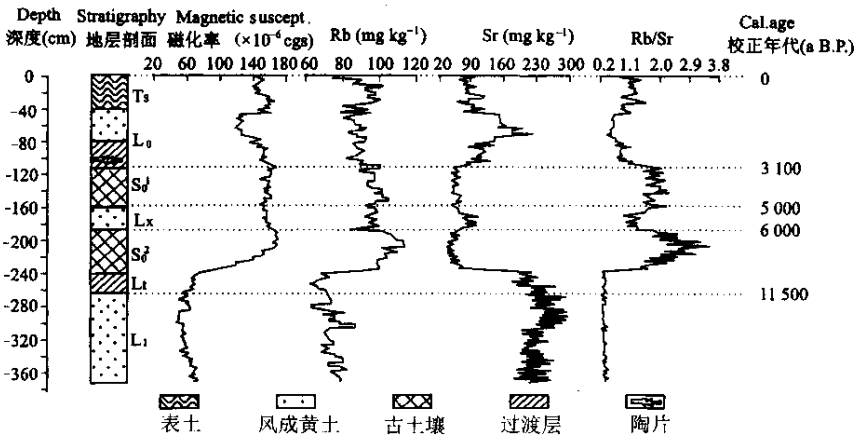


图 3 扶风 JYC 剖面的 Rb、Sr、Rb/Sr 和磁化率变化曲线

Fig.3 Curves of changes in Rb ,Sr ,Rb/Sr and magnetic susceptibility in the soil profile at the JYC site , Fufeng County

2.2 Rb、Sr 在时空上的分布特点

表 1 列出了以全新世地层为单位的各土壤剖面 Rb 和 Sr 含量及磁化率值统计结果。统计结果表明：

(1) 由于风化成土强度的变化,使得黄土高原全新世土壤剖面在不同时期形成的层位 Rb 和 Sr 变化幅度较大,其中黄土层中 Sr 含量远远高于古土壤,而黄土层中 Rb 含量则低于古土壤。同时,在由马兰黄土(L₁)向古土壤(S₀)过渡的过程中出现了过渡层(L₁),过渡层中的 Rb 与马兰黄土中的 Rb 值变化不大,但是 Sr 值的变化却很明显。这些均表明黄土化学风化过程中 Rb 和 Sr 地球化学行为之间的确存在着明显差异,即 Rb 比较稳定,而 Sr 比较跃。

(2) 剖面中不同层位的 Rb/Sr 比值变化也十分明显,古土壤中 Rb/Sr 比值显著高于黄土层。Rb/Sr 比值随深度分布曲线和磁化率分布曲线在形态上十分相似,具有几乎一致的变化规律。Rb/Sr 化学指

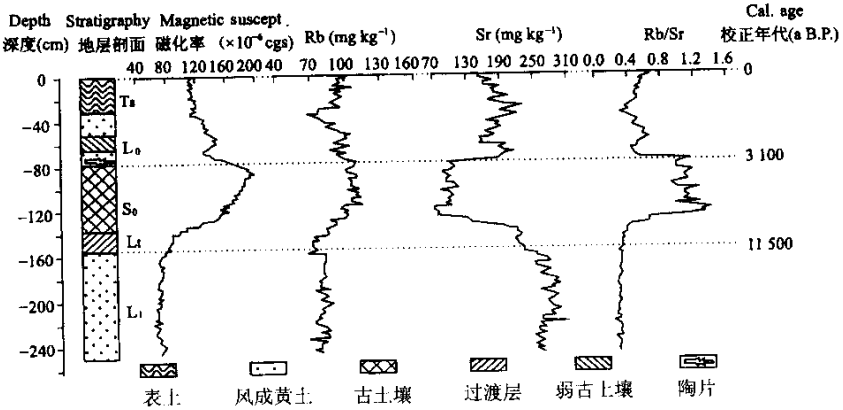


图4 户县 WSC 剖面的 Rb、Sr、Rb/Sr 和磁化率变化曲线

Fig.4 Curves of changes in Rb, Sr, Rb/Sr and magnetic susceptibility in the soil profile at the WSC site, Huxian County

标和磁化率物理指标之间的同步变化表明两者之间有可能存在某种成因上的联系。例如,在黄土高原腹地的合水 MJY-A 剖面中,成土作用很弱的马兰黄土层(L_1)到成土作用很强的古土壤层(S_0),Rb/Sr 平均比值从 0.31 上升到 0.45 直至 0.88 左右。即使是在同一古土壤层内部,Rb/Sr 比值波动也很大,Rb/Sr 比值的变化范围在 0.46~1.33 之间。这是由于古土壤层夹有一些弱风化的黄土母质,其 Rb/Sr 比值对此也有很灵敏的反映(见图 2)。这充分说明 Rb/Sr 比值对风化成土作用具有有效的指示作用。

(3)以距今 3 100 多年前为界限,各剖面古土壤层 S_0 和近代黄土层 L_0 中 Sr、Rb/Sr 比值变化的差异非常明显。 L_0 中的 Sr 的含量明显高于 S_0 ,Sr 值增高约为 46.77%左右,而 L_0 中的 Rb/Sr 比值明显低于 S_0 ,Rb/Sr 比值减少约为 40%左右。这说明在距今 3 100 多年前,东亚季风的格局发生了突变。

(4)从区域上看,处在黄土高原腹地的合水 MJY-A 剖面,古土壤与黄土层中的 Rb、Sr 及 Rb/Sr 比值变化幅度小于高原南部关中盆地内的扶风和户县剖面。例如,在合水 MJY-A 剖面中,Rb 的含量各层的平均值在 90~108 mg kg^{-1} 之间,Sr 的平均值在 157~297 mg kg^{-1} 之间,Rb/Sr 比值在 0.30~0.88 之间,而在户县 WSC 剖面中,Rb 的含量各层的平均值在 79~104 mg kg^{-1} 之间,Sr 的平均值在 99~270 mg kg^{-1} 之间,Rb/Sr 比值在 0.30~1.08 之间。这说明 Rb、Sr、Rb/Sr 变化所指示的古环境存在显著的区域差异。

3 讨论

3.1 Rb、Sr、Rb/Sr 比值对成土环境的指示意义

许多学者的研究结果认为,岩石在风化成土过程中,Rb、Sr 元素的地球化学行为有所不同,Rb/Sr 比值大小与风化程度呈明显的正相关关系^[1,4],黄土 Rb/Sr 比值与黄土成土程度的这种密切相关,可指示夏季风强弱变化情况^[1,2,4]。由于风化成土作用强度的差别,使得各剖面中的 Rb 和 Sr 含量变化幅度也较大(见表 1)。另外,由图 2~图 4 可以看出在同一个剖面中 Sr 值比 Rb 值的变化更为明显,变化幅度更大。这表明在风化成土过程中,Rb 比较稳定,而 Sr 比较活跃,而且剖面中 Rb/Sr 变化主要取决于 Sr 的淋失程度。

在风化淋溶过程中,由于 Rb 的离子半径较大,具有较强的被吸附性能,被粘土矿物吸附而保留在原位,相比之下离子半径较小的 Sr 则主要以游离态形式被地表水或地下水带走,造成风化产物中 Rb/Sr 比值升高^[1,4,5]。Rb/Sr 大小实际上指示了淋溶程度,即降雨量的大小。降雨量的增加会促进植被发育,生物风化增强,导致土壤的淋溶作用加强,可溶物质的迁移加剧,Rb/Sr 比值升高,降雨量的减少,会导致地表植被覆盖降低,尘暴频繁发生,风尘堆积速率加快,可溶物质在土壤沉积物中的富集,Rb/Sr 比值则会降低。由于降雨量是衡量我国东南季风效应的主要指标,因此,土壤剖面中 Rb/Sr 比值的变化实际上是区域成土环境对夏季风强度变化的响应。Rb/Sr 比值和磁化率一样可以作为指示夏季风强度变化

的替代性指标。同时, Rb/Sr 比值对风化成土作用具有指示作用, 随着生物风化成土程度的增强, Rb/Sr 的比值会明显增大。

3.2 全新世成土环境演变的时间特征

最近的一万多年虽属于冰后期, 但黄土高原千年、百年尺度的自然环境波动变化仍很显著, 所以沙尘暴活动的强度和频率、风尘堆积的速率和成土速率也都是变化的。通常在东南季风占优势、降水比较丰沛的时候, 生物风化成土作用大于风尘堆积作用, 随着土壤剖面的成土继续, 土壤层增厚。受淋溶作用和淋移作用的影响, 土壤剖面有正常的向下的风化成土过程, 同时, 受风尘堆积作用的影响, 土壤剖面又有向上的增长加厚过程^[6,7]。当西北季风占优势即干旱少雨时期, 沙尘暴频繁发生, 风尘堆积作用大于风化成土作用, 生物风化成土过程大大减弱, 剖面加速增长, 形成的黄土层覆盖了前期的土壤剖面使之成为埋藏的古土壤。根据目前通用新的全新世时段划分方案, 由图 2~图 4 可以看出在全新世早期 (11 500~8 500 a. B. P.), 由于受东南季风所控制的降水仍较少和受西北季风所控制的降水仍较多的影响, 虽然属于气温回升期, 但仍较为干燥。此时, 风尘堆积速率降低, 并有一定的生物风化成土作用, 这一时期土壤的发育, 主要表现为边沉积边成壤, 在土壤剖面 Rb 、 Rb/Sr 比值等指标与马兰黄土 (L_0) 相比较, 变化均不甚明显, 但磁化率和 S_r 的值却略高于马兰黄土 (L_0) 表现出过渡特点 (见表 1)。这也说明磁化率和 S_r 对气候变化反映的灵敏度高于 Rb 。在全新世中期 (8 500~3 100 a. B. P.), 全球气候进入大暖期, 东南季风长期控制黄土高原, 气候普遍温暖湿润, 沙尘暴较少发生, 风尘堆积速率极低, 植被繁茂, 强烈的生物风化成土作用, 使得在黄土高原腹地发育着黑垆土 (S_0), 而在南部的黄土台塬和渭河平原地表形成了弱淋溶土—褐土 (S_0)。土壤剖面的 S_r 遭到强烈的淋失, Rb 则相对富集, Rb/Sr 比值急剧升高。正是由于水土资源条件的优越, 在黄土高原南部的关中盆地, 我们祖先利用这个环境资源优化的时机, 在距今 8 000~7 000 年前, 创造形成了前仰韶文化, 从 7 000 年前后开始, 创造并发展了仰韶文化, 形成了定居的旱作农业类型文化。但是, 所谓的“全新世大暖期”也不是一个稳定、连续的温暖湿润期, 其间存在若干次较强的干旱和沙尘暴堆积期。与全新世气候大暖期相对应的扶风 JYC 剖面发育着两层古土壤 (S_0^1 和 S_0^2) 在两层古土壤之间夹着一层黄土 (L_x), 这正是成土气候与环境变化造成多周期成土现象。据研究^[8,9], 与这个黄土夹层相对应的干旱期, 应发生在 6 000~5 000 a. B. P.。到距今 3 100 多年前时, 受全球气候变化的影响, 东亚季风格局发生突变, 西北季风势力大大增强。黄土高原从此进入了一个相对干旱少雨时期, 沙尘暴频繁发生, 风尘堆积速率增高, 堆积形成近代的风尘黄土 (L_0)。而目前地表土层 (T_s) 或者耕作层都是 L_0 的顶部。有学者^[10~14]认为渭河流域全新世古土壤 S_0 与黄土 L_0 界面本身反映了季风格局的快速转变和黄土高原环境的恶化。各剖面中 Rb 、 S_r 、 Rb/Sr 比值的分布特征, 也充分地证明了这一点。

3.3 全新世成土环境演变的区域特征

在全新世的不同时期, 冬、夏季风界限曾发生大规模地迁移, 这些变化同样在不同区域土壤剖面的土壤发育和 Rb 、 S_r 及 Rb/Sr 比值变化上体现出来。

首先, 粉尘在搬运过程中, 由于受气流运行路径及基底地形的影响, 其堆积速率在不同的地区或同一地区的不同地貌位置是不一样的。这导致同一时段内, 黄土堆积厚度具有明显的区域差异。况且, 在不同的沉积地区, 气候和环境条件也是不同的, 粉尘物质在堆积以后所经受的地球化学作用或成土强度也是不一样的。上述两方面的因素使得合水 MJY-A、扶风 JYC、户县 WSC 3 个剖面全新世黄土的沉积厚度和成土强度存在明显的差异。

其次, 在全新世大暖期, 由于地形位置、侵蚀与堆积平衡的差异, 在扶风剖面发育了多周期古土壤 (S_0^1 和 S_0^2), 而在合水和户县则发育了单周期古土壤 S_0 。古土壤 (S_0) 成土强度在合水与户县之间是具有明显差异的。在黄土高原腹地的合水剖面, S_0 为典型的半干旱草原土壤——黑垆土, 具有 A-A_{hk}-C 土壤剖面构型。但在黄土高原南部的户县剖面, 由于气候的温暖湿润, 成土过程活跃, 土壤微生物活动强烈, 形成了典型的半湿润森林土壤——褐土, 其 S_0 具有 A-B_t-C_k-C 土壤剖面构型。其中户县 WSC 剖面淀积粘化层 (B_t 层) 的存在, 表明 S_0 的成土作用已经相当强, 碳酸钙已基本淋失殆尽。从空间上看, S_0 的成土作用强度从东南向西北有降低的趋势, 这与夏季风强度的区域变化规律一致。

最后,从 Rb、Sr 及 Rb/Sr 比值变化特点上看,在合水剖面中,古土壤与黄土层中的 Rb、Sr 及 Rb/Sr 比值变化幅度均小于南部的扶风和户县剖面。这说明夏季风虽能深入到黄土高原北部,但是其环境效应已大大减弱。相反,冬季风不仅能到达黄土高原南部,而且其环境效应仍然很强大。这一点从剖面 L₀、L₄ 的 Rb/Sr 比值能很好地反映。所以说,冬季风对黄土高原南部的环境效应要比夏季风对北部的环境效应要强得多。黄土高原南部季风场强的变化大于北部地区。

参考文献

1. 陈骏,安芷生,汪永江,等. 最近 800 ka 洛川黄土剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁. 中国科学 D 辑, 1998, 28(6): 498 ~ 504
2. 刘连文,陈骏,陈阳,等. 黄土的连续提取实验及 Rb/Sr 值意义. 土壤学报, 2002, 39(1): 65 ~ 70
3. Gallet S, Jahn B-M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications. Chem. Geol., 1996, 133: 67 ~ 88
4. 庞奖励,黄春长,张战平,等. 陕西岐山黄土剖面 Rb、Sr 组成与高分辨率气候变化. 沉积学报, 2001, 19(4): 637 ~ 641
5. 田均良,彭祥林,等著. 黄土高原土壤地球化学. 北京: 科学出版社, 1994. 87 ~ 109
6. 朱显谟,祝一志. 试论中国黄土高原土壤与环境. 土壤学报, 1992, 29(4): 351 ~ 357
7. 季耿善. 黑垆土的形成环境. 土壤学报, 1992, 29(2): 113 ~ 123
8. Huang C C, Zhou J, Pang J L, *et al.* A regional aridity phase and its possible cultural impact during the Holocene Megathermal in the Guanzhong Basin, China. The Holocene, 2000, 10(1): 135 ~ 143
9. 黄春长,庞奖励,陈宝群,等. 扶风黄土台塬全新世多周期土壤研究. 西北大学学报(自然科学版), 2001(6): 509 ~ 513
10. 黄春长. 渭河流域 3100 年前的资源退化与人地关系演变. 地理科学, 2001, (1): 29 ~ 35
11. Huang C C, Pang J L, Li P H. Abruptly increased climatic aridity and its social impact at 3 100 a BP on the Loess Plateau of China. Journal of Arid Environments, 2002, (3): 1 ~ 13
12. Huang C C, Pang J L, Hang P, *et al.* An early Holocene erosion phase on the loess tablelands in the southern Loess Plateau of China. Geomorphology, 2002, 43: 209 ~ 218
13. Huang C C, Pang J L, Zhao J B. Chinese loess and evolution of the East Asian monsoon. Progress in Physical Geography, 2000, 24(1): 75 ~ 96
14. Huang C C, Zhou J, Pang J L, *et al.* High-resolution studies of the oldest cultivated soils in the southern Loess Plateau of China. Catena, 2002, 47: 29 ~ 42

DISTRIBUTION OF Rb AND Sr ELEMENTS IN SOIL PROFILES AND CHANGES IN HOLOCENE PEDOGENIC ENVIRONMENT ON THE LOESS PLATEAU

Zhou Qun-ying Huang Chun-chang Pang Jiang-li Chen Bao-qun Li Ping-hua Zhang Jian

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

Summary

In this paper , three typical Holocene soil profiles in the Loess Plateau are studied. The analytical results show that Sr concentration is higher in the loess beds than that in the paleosol beds and that Rb concentration and Rb/Sr ratio is lower in the loess beds than that , respectively , in the paleosol beds. The change in Rb/Sr ratio reflects changes in pedogenic environment during the Holocene , and spatial-temporal changes in monsoon circulation over the Loess Plateau , as well. In the early Holocene (11 500 ~ 8 500 years B.P.) , dust deposition reduced because of climate warming , and biological weathering began. In the mid-Holocene (8 500 ~ 3 100 years B.P.) , as the climate became warmer and wetter ; the effect of pedogenesis was getting stronger and stronger than that of the eolian dust deposition , and thus black loessial soil developed on the surface of the plateau , and cinnamon soil in the Guanzhong Basin. But beginning form 3 100 years BP , the climate has become dry , and dust storms and dust-fall occurred frequently. Recent loess (L_0) has begun to accumulate and gradually covered the mid-Holocene soil (S_0). As a result , the S_0 has become buried paleosol , The change from soil formation to loess accumulation indicates environment deterioration and soil degradation. In the Loess Plateau , the environmental effect of the winter monsoon on the south is much stronger than that of the summer monsoon on the north , and so is the amplitude of the change in monsoon on the south than on the north.

Key words Loess Plateau , Soil , Rare earth element , Pedogenic environment