

陕西洛川全新世黑垆土理化特征年龄函数的构建

刘刚^{1,2,3}, 许文年¹, 蔡崇法³, 刘普灵², 杨明义², 张琼³

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 3. 华中农业大学 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要:构建土壤理化特征年龄函数是定量认识土壤发育过程的重要途径,也是建立土壤发育模型的基础。本研究通过对陕西洛川全新世黑垆土剖面土壤理化特征及土壤¹⁴C年龄进行研究,利用线性函数、对数函数和三阶多项式对其进行拟合,从而构建土壤年龄函数。结果表明:利用三阶多项式对土壤黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)、砂粒(0.02~2 mm)与土壤年龄拟合效果最好,其变化趋势表明了黑垆土层的存在;而对数函数的拟合结果较好地反映了土壤有机碳随土壤年龄逐渐减少和pH随土壤年龄逐渐增大的过程;土壤CaCO₃含量、Mn/Zr、Fe/Zr、K/Zr、Mg/Zr、Ca/Zr、P/Zr、Na/Zr随土壤年龄变化规律与三阶多项式拟合结果最为相符,其结果较好地反映了CaCO₃与各种土壤元素在土壤中的迁移过程。

关键词:¹⁴C年龄;函数;土壤属性;元素迁移;土壤发育

中图分类号:P534.63⁺2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0024-06

Construction of Heilu Soil Chronofunction in the Holocene in Luochuan, Shaanxi Province

LIU Gang^{1,2,3}, XU Wen-nian¹, CAI Chong-fa³, LIU Pu-ling², YANG Ming-yi², ZHANG Qiong³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education,

Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and

Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences

and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Key Lab of Farmland Conservation in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Soil chronofunction is an important way to understand soil development processes quantitatively, and the foundation for establishment of soil genesis model. To establish soil chronofunction, soil properties and ¹⁴C ages in the Holocene of Heilu soil profile in Luochuan, Shaanxi Province, were studied. Linear, logarithmic, and three order polynomial functions were used to fit the relationships between soil properties and soil ages. The results indicated that three order polynomial function was the best to fit the relationships between clay (<0.002 mm), silt (0.002~0.02 mm), sand (0.02~2 mm) and soil ages, and the trend line showed the existence of Heilu soil in the profile. The logarithmic function indicated the variation of soil organic carbon and pH with time preferably. The variation of CaCO₃ content, Mn/Zr, Fe/Zr, K/Zr, Mg/Zr, Ca/Zr, P/Zr, and Na/Zr with soil ages could be described best by use of three order polynomial functions, and the trend line showed the migration of CaCO₃ and soil elements.

Key words: ¹⁴C age; function; soil properties; element migration; soil development

土壤的形成过程漫长并且复杂,很难对其进行观测,而通过研究土壤年龄序列则可以有效地对土壤发育过程进行定量研究^[1-2]。土壤年龄序列是指在相似

植被、地形、气候和母质条件下土壤理化特征随时间因子发生变化^[3],它一方面可以通过土壤剖面对土壤理化特征进行长时间序列研究,另一方面还可以将土

收稿日期:2011-04-27

修回日期:2012-02-15

资助项目:湖北省教育厅自然科学基金项目(Q20111207, XD20100595);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-1211);中国博士后科学基金(20110491162);三峡大学基金(KJ2009B033)

作者简介:刘刚(1982—),男,陕西西安人,博士,副教授,从事水土保持与生态环境研究。E-mail:extreme0082000@yahoo.com.cn

壤之间的空间差异转化为时间差异。土壤年龄序列对于成土速率和土壤发育方向具有非常好的指示作用,并且为检验土壤发生学理论提供了宝贵的信息。近些年来,许多学者对土壤年龄序列进行了研究,大部分土壤年龄序列研究表明:土壤属性与时间符合线性、幂函数、指数函数、对数函数关系^[2,4-5],而双曲线、多项式或非线性函数不仅可以改进拟合效果,而且有助于提出对成土系统的新认识,但土壤年龄函数的选择既要符合客观实际,又要有相应的理论作为依据。当土壤属性—时间关系方程确定后,y 截距可以被用来重建时间零点时的土壤属性^[6]。

黑垆土剖面是黄土高原地区保存较为完整的全新世土壤剖面,可以为研究全新世气候环境演变提供重要信息。目前对于黑垆土剖面土壤年龄序列的研究较多^[7-9],但相应的土壤年龄函数却较为少见。本

研究对陕西洛川全新世黑垆土剖面土壤理化特征及土壤¹⁴C 年龄进行研究,通过构建并选择土壤年龄函数,增强对土壤形成和发育过程的认识,从而为预测土壤修复速率提供理论依据^[2],同时为土壤发育模型的建立提供数据支撑^[10]。

1 材料与方法

研究剖面位于陕西省洛川县京兆乡京兆村(35°42.561'N,109°23.952'E),本地区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均温度 9.2℃,年降雨量 622 mm。剖面所处地形为平坦塬面,周围长有苹果树。在地表挖开 2.0 m 深剖面,用剖面刀对剖面进行整理,使得剖面各发生层清晰可见,接着用皮尺测量各发生层的深度,同时观察各发生层特征,并作记录、拍照。黑垆土剖面特征如表 1 所示。

表 1 土壤剖面特征

剖面	发生层	深度/cm	特征描述
LC	耕作层(Ap)	0—25	淡灰棕色(10YR7/3),黏壤土,屑粒状结构,较疏松,根系多,石灰反应较强
	黑 垆 土 层(Ah)	25—80	暗褐色(7.5YR3/3),壤黏土,拟棱柱状结构,结构面上被覆有暗棕色铁锰胶膜,发光亮,较紧实,有虫孔及蚯蚓粪便,有假菌丝状石灰淀积,少量根系,石灰反应较弱
	过渡层(A/B)	80—100	杂有棕褐色土块,颜色不均一,黏壤土,碎块状结构,较疏松,有石灰假菌丝体,有个别根系,强石灰反应
	石 灰 淀 积 层(Bk)	100—125	浅灰褐色(7.5YR5/3),黏壤土,块状结构,有多量石灰菌丝体和少量粒状石灰结核,较紧实,有个别根系,强石灰反应
	母质层(C)	125—200	黄棕色(10YR8/4),黏壤土,碎块状结构,较疏松,有个别根系,强石灰反应

表 2 土壤剖面各采样层¹⁴C 年龄

深度/cm	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90	90—100
¹⁴ C 年龄/a	841±32	1714±21	2275±26	2970±21	3171±24	3686±30	3999±23	4443±31	4901±25	5651±26
深度/cm	100—110	110—120	120—130	130—140	140—150	150—160	160—170	170—180	180—190	190—200
¹⁴ C 年龄/a	6052±30	6284±26	7216±34	6159±27	7899±37	7659±29	8154±30	9923±35	10693±34	12816±40

在采集剖面样品时,首先清理剖面表层土壤,防止被污染土壤混入样品中,然后以 10 cm 为一层,自上而下将各剖面分为连续的 20 层(表 2),接着用环刀采集每一层土壤容重样品,用塑料铲子采集 500 g 左右土壤样品装入密封袋中并编号带回实验室。

本实验中采集的所有土壤样品送至中国科学院地球环境研究所加速器质谱中心,完成土壤¹⁴C 年龄样品的测量工作。该中心拥有的主要设备包括一台 3MV 的多核素分析加速器质谱仪及其样品制备系统,其现代样品的¹⁴C 测量精度优于 0.5%,可达 0.2%~0.3%。

本实验使用英国马尔文公司生产的 Mastersizer—2000 型激光粒度仪测量土壤颗粒粒径,使用雷磁公司 PHBJ—260 型酸度计测定样品 pH 值,采用重铬酸钾容量法—外加加热法测量土壤有机质含量,采用气量法测定土壤中 CaCO₃ 含量,使用美国 PE 公司生产

的 ZL—5100 型原子吸收分光光度计测量土壤中 Mn、Fe、K、Na、Ca、Mg 元素含量,使用国产 UV—VIS8500II 型紫外可见分光光度计测量土壤中 P 元素含量。土壤 Zr 元素,送至中国原子能研究所进行处理与测量。

本研究采用最为常用的^[2,6]线性函数($Y=a+bX$)、对数函数($Y=a+b\ln X$)和三阶多项式($Y=a+bX+cX^2+dX^3$)构建黑垆土年龄函数,通过比较各拟合函数的决定系数(r^2),辅以理论指导来选择土壤年龄函数。

2 结果与分析

2.1 土壤颗粒粒径分布

通过对该剖面土壤颗粒粒径进行分析发现,各层土壤中黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和砂粒(0.02~2 mm)均随土壤年龄发生变化,利用线性

函数、对数函数与三阶多项式对其关系进行拟合,其结果如表 3 所示。由表 3 可知,利用三阶多项式对不同

土壤颗粒组成和土壤年龄进行拟合效果最佳,其决定系数均远大于线性函数和对数函数拟合的结果。

表 3 不同土壤颗粒组成与土壤年龄回归结果

函数	土壤颗粒	a	b	c	d	r^2
$Y=a+bX$	黏粒	17.39	-2.00×10^{-4}			0.26
	粉粒	42.05	-4.00×10^{-4}			0.16
	砂粒	40.57	6.00×10^{-4}			0.20
$Y=a+b\ln X$	黏粒	21.20	-0.62			0.07
	粉粒	42.86	-0.35			0.01
	砂粒	35.95	0.97			0.02
$Y=a+bX+cX^2+dX^3$	黏粒	12.88	24.00×10^{-4}	-4.00×10^{-7}	2.00×10^{-11}	0.59
	粉粒	31.38	53.00×10^{-4}	-8.00×10^{-7}	3.00×10^{-11}	0.79
	砂粒	55.74	77.00×10^{-4}	1.00×10^{-6}	-5.00×10^{-11}	0.75

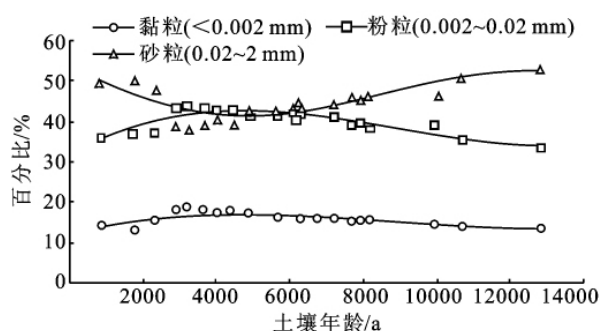


图 1 不同土壤颗粒组成随土壤年龄变化及其三阶多项式拟合曲线

这与一些学者的研究结果并不一致, Bockheim^[2]和 Merritts 等^[11]认为, 土壤黏粒含量与土壤年龄存在较好的对数关系, 而 Barrett^[12]的研究结果表明土壤粉粒含量与土壤年龄线性相关。究其原因, 可能是由于本研究剖面中存在黑垆土层, 其黏粒和粉粒含量均高于上下层土壤, 而砂粒含量低于上下层土壤(图 1)。黑垆土层中的黏粒增加不是从覆盖土层淋洗淀积形成, 而是土体内部风化作用的产物。因为石灰性土壤脱钙以前有大量钙和镁, 带负电荷的硅酸盐黏粒

与钙、镁作用而凝聚, 凝聚的黏粒不发生机械淋洗。但从图 1 中可以看出, 黑垆土层风化程度较轻, 粘化作用较弱, 这是受到水热条件限制的结果。三阶多项式从理论和实际的角度^[6]较好地反映了该剖面中存在黑垆土层这一特征, 因此可以作为土壤颗粒组成的年龄函数。

2.2 土壤有机碳、CaCO₃ 和 pH 值

由表 4 可以看出, 利用三个函数对土壤有机碳含量和土壤年龄进行拟合, 发现其决定系数均在 0.8 左右, 二者相关性较高。但线性函数和三阶多项式函数与 y 轴截距分别为 0.57 和 0.60, 这与实际情况并不相符, 其值至少大于 0.6(图 2a)。因为长有植被的土壤剖面顶部有机质含量往往最高, 向下迅速减小, 至一定深度后有机质含量减小速率变缓^[13]。

唐克丽和贺秀斌^[14]的研究亦表明洛川黑垆土剖面有机质随土壤年龄变化符合这一规律。因此, 对数函数表明土壤表面有机碳含量无限接近于实测值 1.68 是符合客观规律的, 可以将其作为土壤有机碳含量的年龄函数。

表 4 不同土壤属性与土壤年龄回归结果

函数	土壤属性	a	b	c	d	r^2
$Y=a+bX$	有机碳含量	0.57	-3.00×10^{-5}			0.79
	CaCO ₃ 含量	-2.87	16.00×10^{-4}			0.74
	pH 值	8.10	2.00×10^{-5}			0.80
$Y=a+b\ln X$	有机碳含量	1.68	-0.15			0.79
	CaCO ₃ 含量	-51.39	6.83			0.59
	pH 值	7.48	0.09			0.90
$Y=a+bX+cX^2+dX^3$	有机碳含量	0.60	-5.00×10^{-5}	8.00×10^{-10}	2.00×10^{-14}	0.81
	CaCO ₃ 含量	4.78	-41.00×10^{-4}	1.00×10^{-6}	-5.00×10^{-11}	0.85
	pH 值	8.02	6.00×10^{-5}	-7.00×10^{-9}	3.00×10^{-13}	0.88

利用线性函数和对数函数对土壤 CaCO₃ 含量与土壤年龄进行拟合, 其决定系数分别为 0.74 和 0.59, 但 y 轴截距分别为 -2.97 和 -0.15(表 4), 而土壤中

CaCO₃ 含量不可能为负值, 因此这两个函数不能反映土壤 CaCO₃ 含量变化规律。三阶多项式拟合曲线则较好地反映了土壤 CaCO₃ 含量与土壤年龄之间的关

系,其决定系数为 0.85,并且曲线变化趋势反映出了剖面表层土壤受到淋溶作用而导致 CaCO_3 在下层发生淀积(图 2b),且黑垆土层 CaCO_3 含量最低。唐克丽和贺秀斌^[14] 和赵景波等^[15] 的研究结果同样表明 CaCO_3 在黄土剖面上层受到淋溶作用而在下层发生淀积的趋势,因此三阶多项式符合理论及实际情况。

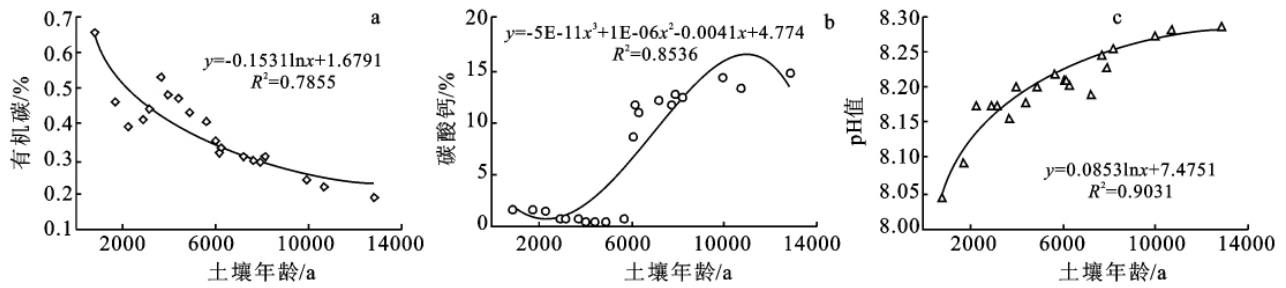


图 2 土壤有机碳含量、碳酸钙含量、pH 值随土壤年龄变化及其拟合曲线

2.3 土壤化学元素的迁移

土壤中易迁移元素与 Ti 或 Zr 等不易迁移元素的比值常被用来研究土壤元素随时间的富集与淋溶^[18]。但一些研究表明 Ti 也为可迁移元素,而 Zr 更

对数函数对土壤 pH 值和土壤年龄的拟合结果最好,决定系数为 0.90。对数曲线的变化趋势(图 2c)反映了土壤剖面受到淋溶作用导致碱化作用在土壤形成初始阶段便很快发生,pH 值在土壤表面迅速增大,而其下层 pH 值增大速率则减缓。这一结果与大多数学者的研究结果相似^[16-17]。

不易迁移^[19-20],因此本文利用多种土壤元素与 Zr 的比值来研究土壤元素的迁移。由表 5 可知,利用三阶多项式对各种元素同 Zr 元素的比值与土壤年龄进行拟合,其决定系数均最高。

表 5 不同土壤化学元素同 Zr 元素的比值与土壤年龄回归结果

函数	土壤元素比值	a	b	c	d	r ²
Y=a+bX	Mn/Zr	217.22	3.00×10 ⁻³			0.22
	Fe/Zr	10362.00	0.22			0.44
	K/Zr	6175.20	0.15			0.68
	Na/Zr	4092.90	0.10			0.62
	Ca/Zr	-4439.10	2.18			0.77
	Mg/Zr	3527.00	0.27			0.92
	P/Zr	141.63	0.01			0.68
Y+a+blnX	Mn/Zr	61.71	20.39			0.46
	Fe/Zr	809.08	1276.10			0.67
	K/Zr	660.09	751.88			0.78
	Na/Zr	1358.60	392.23			0.41
	Ca/Zr	-68638.00	9049.10			0.61
	Mg/Zr	-5071.10	1197.70			0.82
	P/Zr	-181.56	44.99			0.61
Y=a+bX+cX ² +dX ³	Mn/Zr	153.32	0.04	-5.00×10 ⁻⁶	2.00×10 ⁻¹⁰	0.69
	Fe/Zr	7664.10	1.65	-2.00×10 ⁻⁴	7.00×10 ⁻⁹	0.78
	K/Zr	5455.40	0.48	-4.00×10 ⁻⁵	9.00×10 ⁻¹⁰	0.81
	Na/Zr	4894.30	-0.44	9.00×10 ⁻⁵	-4.00×10 ⁻⁹	0.79
	Ca/Zr	5832.50	-5.34	14.00×10 ⁻⁴	-7.00×10 ⁻⁸	0.88
	Mg/Zr	3811.10	-0.04	7.00×10 ⁻⁵	-4.00×10 ⁻⁹	0.96
	P/Zr	165.90	0.02	6.00×10 ⁻⁶	-3.00×10 ⁻¹⁰	0.84

从图 3 中可以看出,Mn/Zr,Fe/Zr 及 K/Zr 与土壤年龄虽然用三阶多项式拟合效果最好,但其变化趋势与对数函数比较接近。由此表明,Mn,Fe 和 K 元素在土壤表层受到淋溶作用相对较强,而在黑垆土层及其下层受到淋溶作用较小,并且没有明显富集现象发生。这与唐克丽和贺秀斌^[14] 的研究结果非常相

似。但亦有研究表明,土壤中 Mn,Fe 和 K 元素与土壤年龄呈线性或对数关系^[18,20-22],这可能与土壤类型及其发育程度有关。

Mg/Zr 与土壤年龄的三阶多项式拟合结果同线性函数拟合结果的决定系数非常接近,其变化趋势也非常相似。不同之处在于,三阶多项式表明 Mg 元素在

土壤表层淋溶较快,而随着土壤年龄的增加,其淋溶量逐渐减小,直至其含量在母质层中稳定。而线性函数则显示 Mg 元素在土壤剖面中以恒定的速率发生淋溶,这与现实情况并不相符。但一些学者的研究结果表明土壤中 Mg 元素与土壤年龄存在线性或对数关系^[18,21-22]。

Ca/Zr, P/Zr 与 Na/Zr 在剖面中随土壤年龄变化表现出相同的趋势,上层较年轻的土壤受到淋溶作用

较强,在黑垆土层出现最低值,而 Ca, P 和 Na 这三种元素均在较老的下层土壤中发生富集。而三者中 Ca 元素的迁移作用最为强烈,其次是 P 元素, Na 元素的迁移相对较小。Ca 元素的迁移特征与 CaCO_3 含量随土壤年龄变化的趋势是完全一致的。但在非石灰性土壤中, Ca, P 和 Na 元素与土壤年龄仍表现出了线性或对数的关系^[18,20,22]。

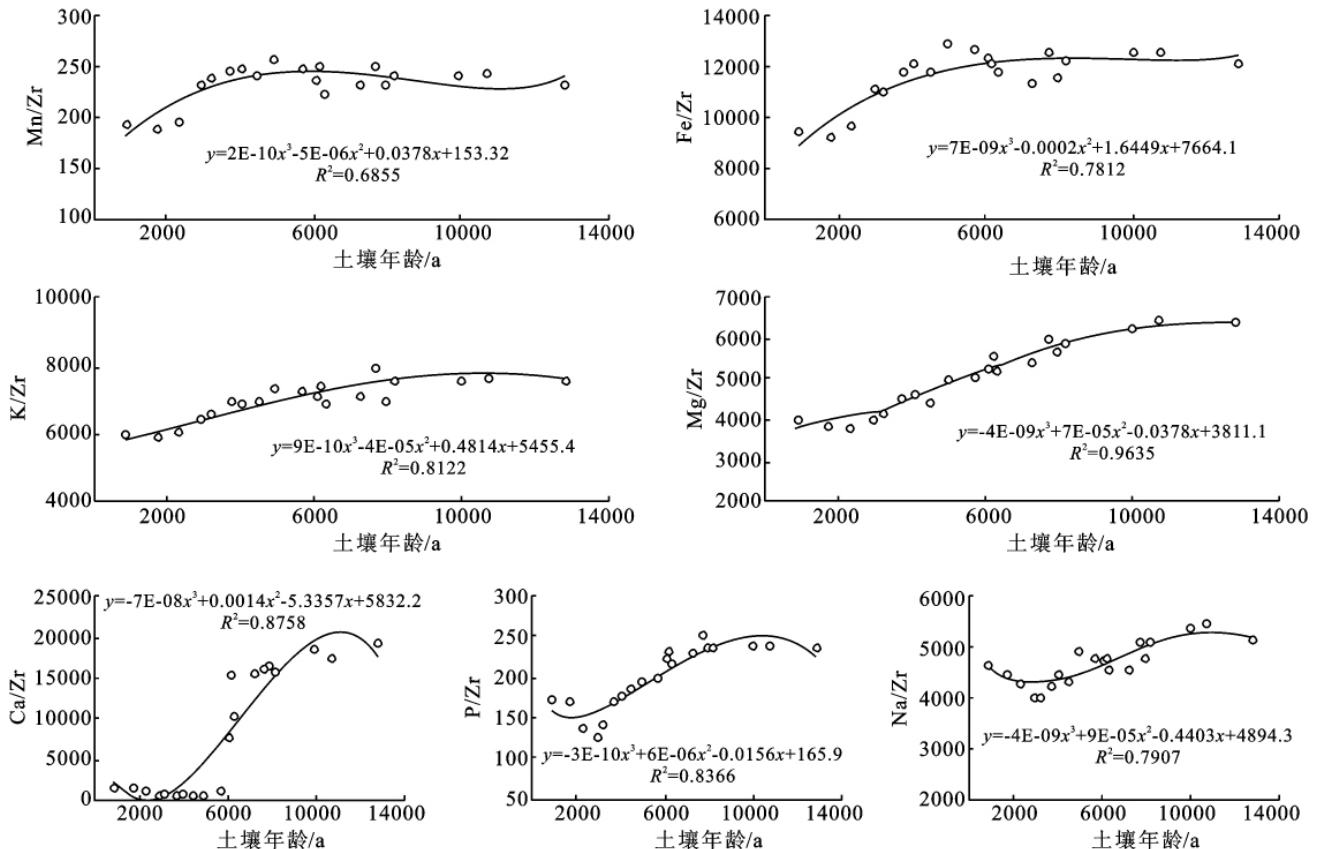


图3 土壤 Mn/Zr, Fe/Zr, K/Zr, Mg/Zr, Ca/Zr, P/Zr 和 Na/Zr 值随土壤年龄变化及其拟合曲线

3 结论

本研究通过对洛川全新世黑垆土剖面土壤理化特征及土壤¹⁴C 年龄进行研究,利用线性函数、对数函数和三阶多项式对其进行拟合,结果表明不同土壤理化特征与土壤年龄之间的关系存在差异。

三阶多项式对土壤黏粒、粉粒及砂粒与土壤年龄之间的关系拟合结果较好,而其它两个函数拟合结果较差。三阶多项式所反映的变化趋势表明粘化作用导致黑垆土层黏粒和粉粒含量增高,砂粒含量减少,因此可以较好地反映该剖面存在黑垆土层的特征。

对数函数较好地反映了土壤有机碳和 pH 值随土壤年龄变化的规律。二者所不同的是,土壤有机碳随土壤年龄迅速减小至一定程度后减小速率变缓,而 pH 值随土壤年龄迅速增大至一定程度后增大速率变缓。

CaCO_3 含量与土壤各种元素在土壤中迁移的规律可以用三阶多项式进行描述。但 Mn/Zr, Fe/Zr 和 K/Zr 的变化趋势同对数函数拟合结果比较接近,由此表明 Mn, Fe 和 K 元素在土壤表面受到较强的淋溶作用,而在黑垆土层及其下层迁移作用较为微弱。Mg/Zr 的三阶多项式拟合结果表明 Mg 元素在土壤表面受到淋溶作用较强,随着土壤年龄增加逐渐减小直至稳定。而 Ca/Zr, P/Zr, Na/Zr 和 CaCO_3 含量随时间变化的规律表明 Ca, P, Na 元素和 CaCO_3 在剖面表层受到强淋溶,在黑垆土层出现极低值,并在剖面下层发生富集,这一变化规律与三阶多项式的拟合结果最为接近。

参考文献:

- [1] Vreeken W J. Principal kinds of chronosequences and their significance in soil history[J]. European Journal of Soil Science, 1975, 26(4): 378-394.

- [2] Bockheim J G. Solution and use of chronofunctions in studying soil development[J]. *Geoderma*, 1980, 24(1): 71-84.
- [3] Vincent K R, Bull W B, Chadwick O A. Construction of a soil chronosequence using the thickness of pedogenic carbonate coatings[J]. *Journal of Geological Education*, 1994, 42: 316-324.
- [4] Birkeland P W. Holocene soil chronofunctions, Southern Alps, New Zealand[J]. *Geoderma*, 1984, 34(2): 115-134.
- [5] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review[J]. *Catena*, 1998, 32(3/4): 155-172.
- [6] Schaetzl R J, Barrett L R, Winkler J A. Choosing models for soil chronofunctions and fitting them to data[J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45(2): 219-232.
- [7] 胡双熙. 陇东和陇中黑垆土的发生与演变[J]. *土壤学报*, 1994, 31(3): 295-304.
- [8] 陈晓远, 乌力更, 李绍良, 等. 全新世以来乌盟南部地区黑垆土的发生与演变规律[J]. *土壤通报*, 1998, 29(6): 241-244.
- [9] 唐克丽, 贺秀斌. 第四纪黄土剖面多元古土壤形成发育信息的揭示[J]. *土壤学报*, 2002, 39(5): 609-617.
- [10] Finke P A, Hutson J L. Modelling soil genesis in calcareous loess[J]. *Geoderma*, 2008, 145(3/4): 462-479.
- [11] Merritts D J, Chadwick O A, Hendricks D M. Rates and processes of soil evolution on uplifted marine terraces, northern California[J]. *Geoderma*, 1991, 51(1/4): 241-275.
- [12] Barrett L R. Astrand plain soil development sequence in Northern Michigan, USA[J]. *Catena*, 2001, 44(3): 163-186.
- [13] 陈庆强, 沈秉德, 孙彦敏, 等. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 1-8.
- [14] 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[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 129-139.
- [15] 赵景波, 郝玉芬, 岳应利. 陕西洛川地区全新世中期土壤与气候变化[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 969-975.
- [16] Vidic N J. Soil-age relationships and correlations: comparison of chronosequences in the Ljubjana Basin, Slovenia and USA[J]. *Catena*, 1998, 34(1/2): 113-129.
- [17] 黄承敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发育过程的定量研究[J]. *地理科学*, 2000, 20(4): 337-342.
- [18] Egli M, Fitze P. Formulation of pedologic mass balance based on immobile elements a revision[J]. *Soil Science*, 2000, 165(5): 437-443.
- [19] Langley-Turnbaugh S J, Bockheim J G. Mass balance of soil evolution on late Quaternary marine terraces in coastal Oregon[J]. *Geoderma*, 1998, 84(4): 265-288.
- [20] Sauer D, Schellmann G, Stahr K. A soil chronosequence in the semi-arid environment of Patagonia (Argentina)[J]. *Catena*, 2007, 71(3): 382-393.
- [21] Koutaniemi L, Koponen R, Rajanen K. Podzolization as studied from terraces of various ages in two river valleys, northern Finland[J]. *Silvia Fennica*, 1988, 22: 113-133.
- [22] Lichter J. Rates of weathering and chemical depletion in soils across a chronosequence of Lake Michigan sand dunes[J]. *Geoderma*, 1998, 85(4): 255-282.

(上接第23页)

参考文献:

- [1] 张永光, 伍永秋, 刘洪鹤, 等. 东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 35-38, 49.
- [2] Foster G R. Modeling ephemeral gully erosion for conservation planning[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2005, 20(3): 57-175.
- [3] 张永光, 伍永秋, 汪言在, 等. 典型黑土区小流域浅沟侵蚀季节差异分析[J]. *地理研究*, 2008, 27(1): 145-154.
- [4] 范昊明, 蔡强国, 崔明. 东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 8-11.
- [5] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J]. *地理科学*, 2009, 29(4): 545-549.
- [6] 崔明, 蔡强国, 张永光, 等. 漫岗黑土区坡耕地中雨季浅沟发育机制[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 59-65.
- [7] 刘新宇, 赵岭, 王立刚, 等. 黑龙江省西部丘陵漫岗区径流效益分析[J]. *防护林科技*, 2000(3): 29-31, 41.
- [8] 胡振宇, 马钦彦, 王金锡, 等. 川中丘陵区防护林改良土壤作用研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(30): 15009-15013.
- [9] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨[J]. *地理科学*, 2006, 26(4): 449-454.
- [10] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等. 景观生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 40-41.
- [11] 张科利, 唐克丽, 王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J]. *水土保持学报*, 1991, 5(2): 8-13.