

幕阜山典型埋藏古土壤腐殖质特征^①

程利花, 张亮*, 向利利, 袁红, 盛浩

(湖南农业大学岳麓山实验室, 长沙 410128)

摘要: 本文以幕阜山埋藏古土壤为研究对象, 并以上覆的现代土壤作为对比, 结合土壤剖面序列挖掘与取样化验, 深入解析埋藏古山地土壤中残留腐殖质的积累、组分与质量特征。结果表明: ①古今土壤发生层中腐殖质总量积累相同, 均为淋溶层的积累更为明显; ②就土壤腐殖质组分含量而言, 除古淋溶层以胡敏酸含量最高外, 其余剖面序列土层的腐殖质组分含量特征总体相似, 均为胡敏素>富里酸>胡敏酸; ③就土壤腐殖质组分占比而言, 现代淋溶层与现代淀积层之间差异不显著, 而古淋溶层和古淀积层之间则差异显著; ④幕阜山埋藏古土壤淋溶层的腐殖质品质较好, 而其他土层胡富比值普遍小于 1。

关键词: 腐殖质组分; 古土壤; 山地土壤

中图分类号: S151+.3 **文献标志码:** A

Characteristics of Humus in Buried Paleosol in Mufu Mountain

CHENG Lihua, ZHANG Liang*, XIANG Lili, YUAN Hong, SHENG Hao

(Yuelushan Laboratory, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In this study, with the overlying modern soil as a comparative reference and through systematic excavation of soil profiles and subsequent sampling and analysis, the buried paleosol in the Mufu Mountain region was explored by a comprehensive examination of the accumulation, composition, and quality characteristics of residual humus in the soil. The results showed that: 1) The total accumulation of humus was consistent between ancient and modern soil horizons, with more pronounced accumulation observed in the leaching layer; 2) In terms of soil humus content, except for the ancient leaching layer with the highest content of humic acid, the overall characteristics of humus content in the soil layers of the other profile sequences were similar, with humin>humic acid>fulvic acid; 3) Regarding proportional representation of these components, no significant differences existed between modern leaching layers and modern accumulation layers; however, significant differences were present between ancient leaching layers and ancient accumulation layers; 4) The quality of humus in the leaching layer of buried ancient soils was relatively high, while other soil layers generally exhibited a ratio of humic acid to fulvic acid (H/F) less than 1.

Key words: Humus components; Paleosol; Mountain soil

古土壤是指古环境下形成的土壤, 是发育于过去的景观条件下, 全部特性与现代成土条件不相符的土壤, 主要形成于第四纪及第三纪地质末期, 多具有埋藏或非埋藏的表面^[1]。通过对古土壤的研究, 能够重建过去的成土环境, 以及古地理环境, 从而了解土壤的发生演变, 正确理解现代土壤性质和古土壤性质的关系, 对土壤资源的利用与保护以及埋藏土壤碳库保育等都具有重要的指导意义。

山地, 因其特殊的地理位置与海拔因素, 其土壤的形成与发育有着明显的垂直特征。山地土壤是山区

农业和林业的基本资源, 既是山区居民生计和产业发展的物质基础, 又是山区可持续发展的重要保障。然而, 山地土壤的生态属性相对脆弱, 对气候和土地利用变化较为敏感, 是地球陆地生态系统的关键地带^[2]。幕阜山脉位于湖南省东北角的湘、鄂、赣三省交界之地, 属大陆性亚热带季风湿润气候, 降水充沛, 气温、降水随海拔变化明显。该山脉地表植被资源丰富, 已查明的植物有 96 科 806 种, 森林植被类型以针叶林、落叶阔叶林为主, 其域内森林覆盖度高达 99.6%, 有面积达到 1 100 hm² 的天然黄山松林, 是我国中北亚

①基金项目: 湖南省教育厅优秀青年科学研究项目(15B110)资助。

* 通信作者(278218195@qq.com)

作者简介: 程利花(1999—), 女, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要从事土壤健康与土壤微生物研究。E-mail: 1670759713@qq.com

热带气候区重要的生态区位^[3]。然而,该山地土壤虽然通透性好,但偏酸性,且质地较粗,蓄水保肥性较差,其山地土壤质量保育工作十分重要。

土壤有机质水平是衡量反映土壤质量的重要指标^[4],而以高分子化合物为特征的土壤腐殖质是土壤中有有机物质的主体^[5]。腐殖质不仅是土壤肥力的重要来源,还具有提高养分有效性、增强土壤微生物活性、促进团聚体形成以及钝化重金属等能力^[6-7]。因此,土壤腐殖质的含量、组分特征以及质量演变,决定着土壤质量的发展态势^[8-9]。就腐殖质组分而言,基于各组分在不同 pH 下的溶解度差异,可将其分为胡敏素、胡敏酸和富里酸^[10]。其中胡敏素和胡敏酸的元素含量基本在同一范围,而胡敏酸和富里酸的元素含量存在差异^[11]。不同腐殖质组分的腐殖化程度不同,一般而言,胡敏酸和胡敏素的平均分子量大,腐殖化程度较高,而富里酸平均分子量最小,腐殖化程度较低^[12]。因此,土壤腐殖质组分特征是土壤腐殖质质量高低的重要体现。

本文以幕阜山埋藏古土壤为研究对象,并以上覆的现代土壤作为对比,结合土壤剖面序列与采样分析,解析现代土壤与古土壤中腐殖质的积累、组分特征以及质量差异,旨在探明我国中北亚热带典型山地土壤的有机质变化规律,从而为我国亚热带古山地环境变化等相关研究提供数据支撑,并为该气候区山地土壤质量的保护与资源利用以及土壤碳库保育提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤概况

作为研究对象的古山地土壤埋藏遗址(113.818705°E, 28.972280°N)位于湘鄂赣交界地带的幕阜山脉,为典型中亚热带花岗岩山体,该山脉最高海拔 1 598.6 m,植被和土壤垂直带谱的区域代表性强(图 1)。该古土壤埋藏遗址在国家科技基础性工作专项项目“我国土系调查与《中国土系志》编制”的野外调查过程中被勘探发现并被国内专家讨论。从研究区域所存在的大面积深厚埋藏黑土层以及平整的接合序列剖面构成来看,下部被埋藏的古土壤可能形成于末次冰期,大概率是一次古老的突然性地壳运动坡积后的二次发育结果,成土时间具有典型的第四纪烙印(图 1)。经中国科学院物理研究所利用 ^{14}C 同位素测年法检测(数据详见结果部分),埋藏古淋溶层(Ab)土壤年龄为 2 712 a,埋藏古淀积层(Bb)土壤年龄为 5 810 a,土壤发生发育的时间与第四纪吻合。

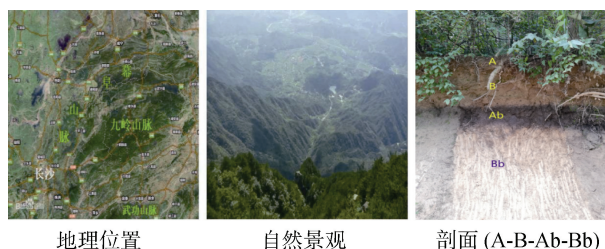


图 1 研究区域位置、景观及序列剖面

Fig. 1 Location, landscape and profile image of buried paleosol profile

1.2 样品采集

于湖南省平江县内幕阜山古土壤埋藏区域挖掘土壤剖面,根据“现代山地土壤(A层、B层)–埋藏古山地土壤(Ab层、Bb层)”序列剖面的发生层次,沿发生层垂直方向,使用不锈钢小铲均匀取样,混匀后带回实验室。将植株的根茎及砂砾挑出,在室温下风干,过 100 目筛,备用。各发生土层(A层 0~40 cm、B层 40~98 cm、Ab层 98~144 cm、Bb层 144~280 cm)样品均为 3 个平行。

1.3 测定项目与方法

土壤腐殖质总量检测采用外加热容量法^[13]。土壤腐殖质组分测定采用焦磷酸钠–氢氧化钠混合液浸提–重铬酸钾容量法,即采用 0.1 mol/L 焦磷酸钠–氢氧化钠混合液提取可溶性腐殖质,然后采用重铬酸钾氧化容量法测定胡敏酸和富里酸总量;提取液经过氧化沉淀分离胡敏酸,并采用重铬酸钾氧化容量法测定其含量,之后通过计算可得富里酸含量;最后,用腐殖质总量减去胡敏酸和富里酸含量即可得到胡敏素含量。

土壤年龄检测采用 ^{14}C 测年法,介质为总有机碳,前处理和测试由中国科学院物理研究所完成,使用美国 NEC 公司生产的 1.5SDH-1 NEC 0.5MeV 加速器进行检测。样品采用酸–碱–酸法进行处理,去除碳酸盐并通过多次洗涤至中性后烘干备用。随后,处理后的样品在 400℃或 900℃加热,提取并纯化 CO_2 ,利用电炉和铁粉作为催化剂,将 CO_2 还原成石墨。年龄校正使用 Cal.7.04 程序^[14],基于 Int Cal 20 树轮曲线将 ^{14}C 测年结果校正为日历年龄^[15]。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 软件对数据进行统计分析;所有测试指标的显著性检验采用 Duncan 法,差异显著水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤腐殖质 ^{14}C 同位素测年结果

经 ^{14}C 同位素检测,埋藏古淋溶层(Ab)土壤年龄

为 2 712 a, 下部埋藏古淀积层(Bb)土壤年龄为 5 800 a, 土壤发生发育的时间与第四纪吻合。上部现代淋溶层(A)及其现代淀积层(B)的土壤年龄分别为 1 910 a 和 2 400 a, 表明古土壤被埋藏的时间久远, 也证实了古土壤的埋藏形成一次古老的、突然性的地壳运动以及坡积后二次发育的假设。

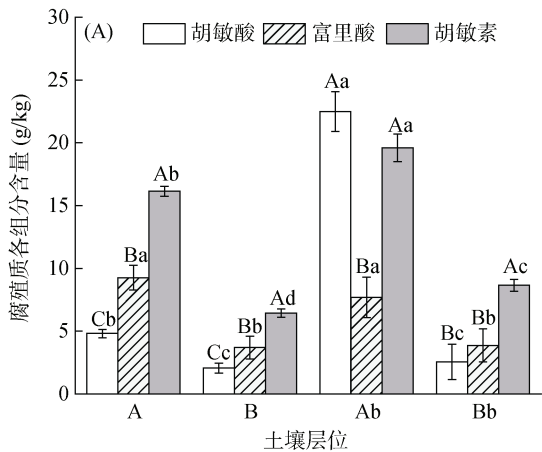
表 1 埋藏古土壤剖面各层次土壤年龄 ^{14}C 测年结果
Table 1 ^{14}C metric results of soil age of genetic horizons of buried paleosol profiles

剖面发生层次	^{14}C 年代(a)	年代校正(±a)
现代淋溶层 A	1 910	40
现代淀积层 B	2 400	30
古淋溶层 Ab	2 712	40
古淀积层 Bb	5 800	36

2.2 土壤腐殖质总量特征

经过 2 712 a 的埋藏, 古土壤各发生层次的腐殖质总量与上覆现代土层的腐殖质总量存在着显著差异(图 2)。埋藏古土壤与现代土壤相同发生层次的腐殖质积累特征相似, 即淋溶层的腐殖质积累更为明显。就古土壤而言, 其淋溶层(Ab)腐殖质总量为淀积层(Bb)的 3.31 倍; 就现代土壤而言, 其淋溶层(A)腐殖质总量为淀积层(B)的 2.46 倍。

就埋藏古土壤点位发生层而言, 埋藏古土壤的腐殖质积累程度普遍高于现代土壤。与现代土壤相比, 古淋溶层腐殖质总量为现代淋溶层的 1.65 倍, 古淀积层腐殖质总量为现代淀积层的 1.24 倍。



(图中小写字母不同表示同一腐殖质组分不同土层间差异显著($P<0.05$), 大写字母不同表示同一土层不同腐殖质组分间差异显著($P<0.05$))

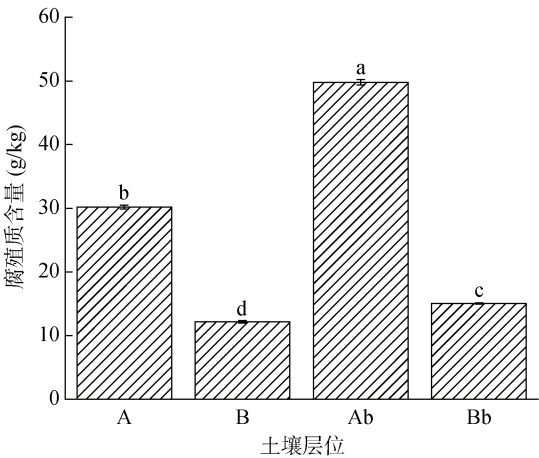
图 3 古土壤埋藏点位土壤剖面各发生土层腐殖质组分含量与占比

Fig. 3 Contents and proportions of humus components in genetic horizons of buried paleosol profiles

随着土层深度的增加, 现代土壤腐殖质各组分含量也普遍呈下降态势, 且变化显著, 但土壤淋溶层(A)与淀积层(B)腐殖质各组分的含量占比差异不明显。

2.3 土壤腐殖质组分特征

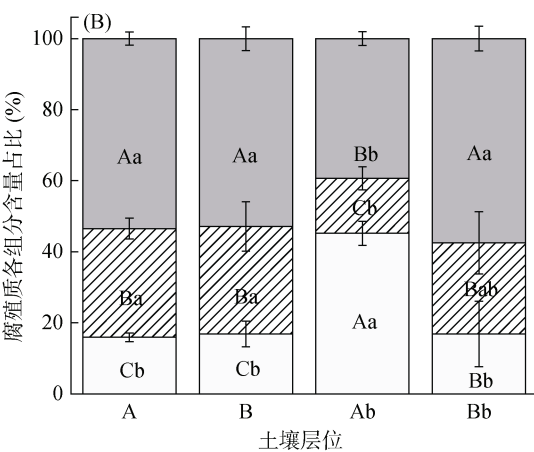
随着古土壤埋藏深度的增加, 古土壤腐殖质各组分含量均呈现下降的趋势(图 3A)。古淋溶层(Ab)的胡敏酸、富里酸以及胡敏素含量均显著高于古土壤淀积层(Bb), 且 Ab 层与 Bb 层腐殖质各组分的含量占比差异显著。Ab 层腐殖质以胡敏酸为主, 其次为胡敏素, 而富里酸最少, 其各组分含量分别为腐殖质总量的 45.2%、39.4% 和 15.4%。Bb 层腐殖质主要由胡敏素组成, 其次为富里酸, 而胡敏酸最少, 三者含量分别为腐殖质总量的 57.5%、25.6% 和 16.9% (图 3B)。



(图中小写字母不同表示不同土层间差异显著($P<0.05$), 下同)

图 2 古土壤埋藏点位土壤剖面各发生土层腐殖质累积总量

Fig. 2 Cumulative humus contents in genetic layers of buried paleosol profiles



现代山地土壤 A 层与 B 层的腐殖质组分均以胡敏素为主, 其次是富里酸, 胡敏酸最少, 其含量分别占腐殖质总量的 53.46%、52.79%, 30.62%、30.32% 和

15.93%、16.87%(图 3B)。

就埋藏古土壤发生层而言,幕阜山脉山地土壤腐殖质各组分呈现出不同特征。古淋溶层(Ab)富里酸含量略低于现代淋溶层(A),而其胡敏酸与胡敏素含量则普遍显著高于现代淋溶层;古淋溶层的胡敏酸含量占比显著高于现代淋溶层,而其富里酸与胡敏素含量占比则显著低于现代淋溶层。古土壤淀积层(Bb)的胡敏素含量显著高于现代淀积层(B),而胡敏酸与富里酸含量差异不明显;古土壤淀积层的胡敏酸、富里酸以及胡敏素的含量占比与现代淀积层基本无明显差异。

2.4 土壤腐殖质质量特征

胡敏酸与富里酸的比例是衡量腐殖质品质与腐殖质活性高低的一个重要指标,胡敏酸与富里酸的比值越高,说明土壤中的腐殖质活性越强,腐殖质质量越好^[16]。

随着土壤剖面深度的增加,古土壤的腐殖质品质表现为淋溶层(Ab)优于淀积层(Bb),而现代土壤腐殖质品质表现为淀积层(B)优于淋溶层(A)(图 4)。与现代土壤相比,埋藏古土壤腐殖质胡富比普遍高于现代土壤,其中以淋溶层的腐殖质品质差异最为显著,古淋溶层胡富比值为现代淋溶层的 5.62 倍。与埋藏古土壤相比,幕阜山脉现代发育的山地土壤的腐殖质品质较低。

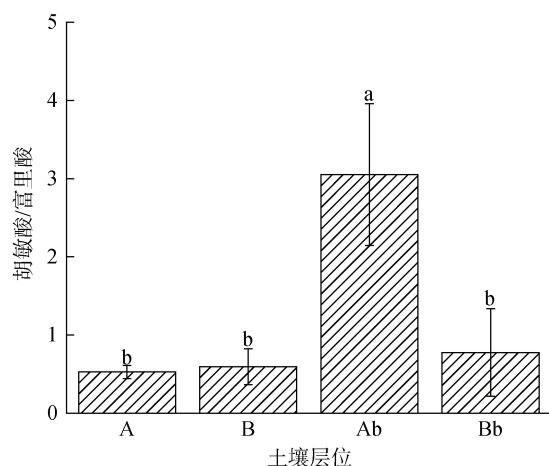


图 4 古土壤埋藏点土层剖面各发生土层腐殖质质量特征

Fig. 4 Humus quality characteristics of genetic layers of buried paleosol profile

3 讨论

腐殖质是土壤有机质的主体部分,也是反映土壤肥力水平的重要指标之一,土壤中腐殖质层的厚度及其腐殖化程度也代表了有机碳库的相对稳定

性^[17]。本文研究结果表明,幕阜山脉现代土壤腐殖质总量积累较高,肥力水平良好,但埋藏古土壤腐殖质积累程度更为显著,表明随着历史的时间延续,幕阜山脉山地埋藏古土壤肥力水平较好,虽然新鲜有机物质输入减少,但其有机碳库周转慢、相对稳定。这可能与现代幕阜山脉所处地带的气候、生物等因素有关^[18]。

胡敏酸和富里酸是土壤腐殖质的重要组成部分,胡敏酸和富里酸中存在苯酚、羧酸、羟基等各种官能团^[19],可以影响养分元素在土壤中的迁移,从而影响植物生长、土壤养分和水分的保持。本文通过对幕阜山脉土壤腐殖质组分含量的研究,发现埋藏古土壤与现代土壤在腐殖质组分含量或成分占比上存在不同特征。现代土壤中,腐殖质组分以胡敏素为主(>50%),富里酸次之,胡敏酸比例最低,且层次间组分比例差异较小。埋藏古土壤淀积层(Bb)中腐殖质各组分含量占比与现代土壤呈现类似变化,但埋藏古土壤淋溶层(Ab)中胡敏酸比例最高,其次为胡敏素,富里酸含量最低。这可能与山地特有的森林植被因素以及气候环境等变化有关,首先森林植被是山地土壤所特有的优势植被物种,其作为有机碳来源的输入主要集中于土壤表层;其次,古土壤的地表植被可能多为原生林,且植被密度应当远大于现代。此外,过去的成土环境已经与现代土壤有所不同,由管艳霞等^[20]研究发现温度等气候因素能够影响土壤腐殖质中胡敏酸与富里酸等成分的形成。

胡富比值是指胡敏酸碳和富里酸碳之间的比值,能够反映土壤腐殖质的质量及其腐殖质的芳构化程度、聚合度和稳定性。一般来说,富里酸含量高,反映土壤成熟度低,腐殖化程度低,有利于碳循环和碳平衡^[21]。本文研究结果表明,幕阜山古土壤淋溶层(Ab)胡富比显著高于现代土壤,说明长期处于埋藏状态的古土壤腐殖化程度更高、稳定性更好,腐殖质品质更佳,由其构成的土壤碳库较为稳定。此外,本文结果显示,除古淋溶层外,幕阜山脉山地土壤的胡富比值普遍小于 1,表明土壤存在腐殖物质聚合程度及稳定性不够理想、碳循环较为活跃、易受外界环境扰动的可能,应加强现代土壤的保育工作,这对于提升山地土壤碳库的稳定性具有重要意义。

4 结论

与现代土壤相比,幕阜山埋藏古土壤腐殖质含量更高,且品质更优。除古淋溶层外,其他土层腐殖质

组分含量依次为胡敏素>富里酸>胡敏酸，而古淋溶层中胡敏酸含量及占比最为突出。

参考文献：

- [1] 龚子同, 黄成敏, 陈鸿昭, 等. 土壤起源与宜居地球的形成[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 1–6.
- [2] 盛浩, 周清, 黄运湘, 等. 中国亚热带山地土壤发生特性和系统分类研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(5): 143–149.
- [3] 胥东海, 李凤武. 湖南幕阜山国家森林公园不同海拔黄山松直径分布研究[J]. 中南林业调查规划, 2021, 40(4): 44–49.
- [4] 刘雅璇, 于慧, 罗勇. 基于辅助变量的紫色土耕地土壤有机质空间预测[J]. 土壤, 2024, 56(4): 857–865.
- [5] 俄胜哲, 时小娟, 车宗贤, 等. 有机物料对灌漠土结合态腐殖质及其组分的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1436–1448.
- [6] 刘国梁, 吴伟, 李素艳, 等. 园林绿化废弃物堆肥配施化肥对土壤腐殖质碳组分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(12): 27–35.
- [7] 刘谣. 雪被减少对川西亚高山森林土壤腐殖质含量的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- [8] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 80–99.
- [9] Spaccini R, Mbagwu J S C, Conte P, et al. Changes of humic substances characteristics from forested to cultivated soils in Ethiopia[J]. Geoderma, 2006, 132(1/2): 9–19.
- [10] Li C L, Gao S Q, Zhang J J, et al. Moisture effect on soil humus characteristics in a laboratory incubation experiment[J]. Soil and Water Research, 2016, 11(1): 37–43.
- [11] 窦森, 李凯, 崔俊涛, 等. 土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1148–1158.
- [12] 郝翔翔, 王翠, 邹文秀, 等. 典型黑土的黑度与土壤有机质组分关系研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1421–1429.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Bronk Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates[J]. Radiocarbon, 2009, 51(1): 337–360.
- [15] Reimer P J, Austin W E N, Bard E, et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP)[J]. Radiocarbon, 2020, 62(4): 725–757.
- [16] 孙莹, 侯玮, 迟美静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤腐殖质组分的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 940–952.
- [17] 周红, 何欢, 肖蒙, 等. 云南省森林土壤腐殖质组分特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 1008–1017.
- [18] 邓泽澍, 盛浩, 黄得志, 等. 湘东平江幕阜山土壤研究初探[J]. 湖南林业科技, 2020, 47(1): 63–66, 76.
- [19] Guo X X, Liu H T, Wu S B. Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions[J]. Science of The Total Environment, 2019, 662: 501–510.
- [20] 管艳霞, 陆金妹, 马榕均, 等. 土壤铁氧化物与腐殖质的交叉染色效应研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 138–150.
- [21] 张博, 王书航, 姜霞, 等. 湖泊沉积物有机质的连续提取与荧光光谱特征分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 2878–2888.