

横断山脉纵谷区不同林型土壤胡敏素组分特征

周红¹, 何忠俊¹, 肖蒙¹, 秋新选³, 梁社往²

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学
农学与生物技术学院, 昆明 650201; 3. 云南省林业调查规划院, 昆明 650051)

摘要: 为了解不同林型对土壤胡敏素组分的影响, 以横断山脉纵谷区 5 种林型下暗棕壤为研究对象, 采用腐殖质组成修改法和 Pallo 修改法相结合的方法对其腐殖质组成进行了分析。结果表明: (1) 5 种不同林型中丽江云杉林腐殖酸含量显著高于其他 4 种林型, 不同林型土壤 HA/FA 表现为大果红杉林 > 川滇高山栎林 > 丽江云杉林 > 白桦林 > 丽江铁杉林; (2) 5 种不同林型土壤胡敏素组分中不溶性胡敏素占绝大部分, 丽江云杉林土壤胡敏素各组分含量最高; (3) 5 种不同林型土壤 Ah 层 HMi 与 HMc 的分子结构较其他土层复杂, 除川滇高山栎林的 C 层外, 各林型土层 $\Delta\lg K$ 皆表现为 HMc > HMi, 但 E4/E6 变化规律并不总是表现为 HMc > HMi, 其中 HMc 的分子结构在川滇高山栎林的 C 层最为复杂, 而 HMi 的分子结构在丽江云杉林的 Ah 层最为复杂。因此, 大果红杉林相对于其他林型土壤腐殖质品质较好, 丽江云杉林更有利于土壤碳的积累。该研究结果以期优化该区森林结构, 提高森林系统固碳能力提供参考。

关键词: 横断山脉; 不同林型; 暗棕壤; 胡敏素组分; 光学性质

中图分类号: S153.6⁺22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)02-0048-07

Charateristics of Soil Humin Under Different Forest Types in the Longitudinal Valley of the Hengduan Mountains

ZHOU Hong¹, HE Zhongjun¹, XIAO Meng¹, QIU Xingxuan³, LIANG Shewang²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China; 3. Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming 650051, China)

Abstract: In order to understand the effects of different forest types on soil Humin components, the soils of five forest vegetations under the longitudinal valley of the Hengduan Mountains in Northwestern Yunnan were selected as research samples. The composition of humus was analyzed by humus composition modification method & modified Pallo method. The results showed that: (1) the humic acid content in stand of *Picea likiangensis* was significantly higher than those in the other four stands, the HA/FA of different stands presented the decreasing trend, and decreased in the order: *Larix potaninii* var. *macrocarpa* > *Quercus aquifolioides* > *Picea likiangensis* > *Betula platyphylla* Suk. > *Tsuga forrestii* Downie; (2) the insoluble humin in humin components in the five different stands accounted for the majority; the content of humin in the stand of *Picea likiangensis* was the highest, which was more beneficial to accumulation of soil carbon compared with other stands; (3) the molecular structure of HMi & HMc in topsoil were more complex than those of the other soil layers; in addition to the C layer in the stand of *Larix potaninii* var. *macrocarpa*, the $\Delta\lg K$ of each layer presented as HMc > HMi, but the E4/E6 did not always presented as HMc > HMi; the molecular structure of HMc & HMi was the most complex in the C layer of the stand of *Quercus aquifolioides* and the Ah layer of the stand of *Picea likiangensis*, respectively; therefore, the quality of humus in the stand of *Larix potaninii* var. *macrocarpa* was higher than those in the other stands. All these findings may provide reference for optimizing the forest structure and improving the carbon sequestration capacity of the forest system in this area.

收稿日期: 2019-04-22

修回日期: 2019-05-05

资助项目: 云南省科技厅自然科学基金面上项目(2006D0039M); 云南省第四次森林资源规划设计调查——森林土壤专业调查(00000000038-407)

第一作者: 周红(1996—), 女(侗族), 贵州石阡人, 硕士研究生, 研究方向为森林土壤腐殖质研究。E-mail: 1554101399@qq.com

通信作者: 梁社往(1967—), 女, 陕西杨凌人, 硕士, 实验师, 主要从事药用植物栽培研究。E-mail: liangshewang09@sina.com

Keywords: Hengduan Mountains; different forest types; dark-brown soil; humin composition; optical properties

土壤腐殖质是土壤有机质的主要存在形态,由于腐殖质复杂芳香结构的存在,使其具有明显的微生物抗性,因此土壤腐殖质是有机碳库中比较稳定的组分^[1],被认为是影响森林土壤碳库的重要参考指标。以往对土壤腐殖质各组分的研究多集中于土壤腐殖酸组分(富里酸、胡敏酸),而对胡敏素组分相关报道较少,但近年来人们在对土壤腐殖质各组分研究时发现胡敏素占土壤腐殖质中绝大部分,且在碳截获、土壤结构、养分保持、生物地球化学循环等方面都有着重要作用^[2]。胡敏素被定义为任何 pH 值条件下都不可溶的腐殖质组分,但窠森^[3]利用腐殖质组合法与 Pallo 修改法结合能够将 HM 进一步分组为铁结合胡敏素(HMi)、黏粒结合胡敏素(HMc)、不溶性胡敏素(HMr),这一分组方法对土壤胡敏素组分更深入的研究奠定了良好的基础。目前,关于土壤胡敏素的研究多集中于不同施肥措施^[4]、耕作措施^[5]、土地利用方式^[6]等方面,除此之外,胡敏素在重金属及有机污染物修复^[7-8]方面的作用也不可小觑,而从不同林型植被对土壤胡敏素组分性质影响的研究少有报道。因此研究不同林型植被下土壤胡敏素组分特征对维持森林土壤碳平衡具有重要作用。

横断山脉纵谷地区主要包括滇西北的怒江州、迪庆州、丽江市、大理州的部分地区。由于特殊的地理、气候条件,该区被认为是全球生态景观类型和生物多样性最为丰富的地区之一^[9];同时它也是典型生态脆弱区之一^[10],因此也一直备受研究者关注。但近些年来,由于自然因素与人为因素的综合作用,横断山脉纵谷区森林资源受到了不同程度的破坏,质量下降,数量减少,森林生态系统出现退化,有的甚至退化为荒山荒地^[11]。这已严重威胁到当地居民的生存和发展,因此加强该区域森林资源的保护对生态环境的建设及当地社会经济发展都具有重要意义。

因此,本研究以横断山脉纵谷区白桦林(*Betula platyphylla* Suk.)、丽江云杉林(*Picea likiangensis*)、大果红杉林(*Larix potaninii* var. *macrocarpa*)、川滇高山栎林(*Quercus aquifolioides*)、丽江铁杉林(*Tsuga for-*

restii Downie)下暗棕壤为研究对象,探讨不同林型下土壤腐殖质组分分布特征,以期从土壤胡敏素组分含量、光学性质和土壤腐殖质稳定性角度揭示不同林型植被固碳能力,为横断山脉纵谷地区植被恢复工作筛选适宜的碳汇造林模式提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究采样地位于滇西北横断山脉纵谷地区,境内地势北高南低,海拔高差悬殊,垂直气候和立体生态环境特征明显。境内水热差异显著,气候属温带—寒温带气候,年平均气温 4.7~16.5℃,年极端最高气温 25.1℃,最低气温 -27.4℃;年日照平均时数为 1 740~2 190 h;年降雨量 600~1 000 mm,土地利用方式以林地为主,主要土壤类型为暗棕壤,土壤质地为黏土。

1.2 采样点地上植被状况

供试土壤采自横断山脉纵谷区,该地区植被类型主要有寒温性针叶林、寒温性阔叶林,优势树种主要有白桦林、丽江云杉林、川滇高山栎林、丽江铁杉林、大果红杉林等。林下主要植被有柳叶忍冬(*Lonicera lanceolata* Wall.)、箭竹(*Fargesia spathacea* Franch.)、亮叶杜鹃(*Rhododendron vernicosum* Franch.)、冬青(*Ilex chinensis* Sims)、鼠尾草(*Salvia officinalis*)、羽叶鬼针草(*Bidens maximowicziana*)、凤尾蕨(*Spider brake*)、蛇莓(*Duchesnea indica* (Andr.) Focke)。

1.3 样品采集与分析

本研究土样于 2016 年 4 月进行采集,在横断山脉纵谷区范围内预先进行森林类型、森林土壤的类型调查,选择该区具有代表性的森林类型(白桦林、丽江云杉林、川滇高山栎林、丽江铁杉林、大果红杉林)设置样方,样方大小设置为 20 m×20 m,每个样方内采用对角线 5 点混合采样法,去掉表面枯枝落物,按土壤发生层(Ah,E,B,C)分别采集,最后各层按比例混合均匀,放于袋内带回实验室,经风干、过 0.25 mm 筛制样,供试验分析,每个样本做 3 次重复。采样点地理环境状况详见表 1。

表 1 供试土壤的成土环境条件

序号	森林类型	经纬度	海拔/m	母质	地形	坡度/(°)	坡向
1	白桦林	N27°54',E99°56'	3620	泥质页岩坡积物	高山	20	西北
2	丽江云杉林	N27°54',E99°56'	3685	泥质页岩坡积物	高山	25	西北
3	大果红杉林	N27°50',E100°0'	3745	花岗岩坡积物	高山	5	北
4	川滇高山栎林	N27°49',E99°53'	3528	花岗岩坡积物	高山	21	西北
5	丽江铁杉林	N27°2',E100°0'	3960	石英岩、页岩坡积物	高山	30	东

土壤有机碳采用重铬酸钾容量(外加热法)测定;土壤腐殖质采用腐殖质分组修改法测定^[12];土壤胡敏素各组分的分离:按腐殖质组成修改法提取胡敏酸(HA)、富里酸(FA)之后剩下的残渣 HM,用 0.5 mol/L H₂SO₄溶解铁、铝氧化物和氢氧化物,然后用稀碱提取出铁结合胡敏素(HMi),再通过 HF/HCl 破坏土壤黏土物与土壤腐殖质的紧密结合,用稀碱提取出黏粒结合胡敏素(HMc),最后的残余物为不溶性胡敏素(HMr);用 722 W 分光光度计在波长 400, 600, 465, 665 nm 分别测定富里酸、胡敏酸的吸光值,并计算 E4/E6 和色调系数($\Delta\lg K$)。

采用 Excel 分析软件进行数据统计、图表制作,SPSS 17.0 对各指标进行单因素方差分析,文中统计值均为 3 次重复下的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同林型土壤腐殖质组成分析

由表 2 可得出不同林型下土壤腐殖质组成不同,同一林型不同土层间腐殖质组分皆达到显著性差异($p < 0.05$)。其中,除白桦林、丽江云杉林外,土壤腐殖酸、富里酸垂直变化趋势为:即 Ah(腐殖质层) > E(淋溶层) > B(淀积层) > C(母质层)。5 种林型土壤腐殖酸含量变化趋势为:丽江云杉林(84.02 g/kg) > 川滇高山栎林(68.54 g/kg) > 大果红杉林(42.15 g/kg) > 白桦林(40.76 g/kg) > 丽江铁杉林(16.77 g/kg),其中丽江云杉林腐殖酸含量显著高于其他 4 种林型,丽江铁杉林(16.77 g/kg)的 5 倍。综上所述,从整个剖面土壤腐殖酸的分布来看,相对于我国其他区域土壤^[13],横断山脉纵谷区不同林型暗棕壤腐殖酸含量较高,这主要是由于横断山脉纵谷区森林茂密,枯枝凋落物大量累积于土壤表层,再加上冬干夏雨、干湿明显的气候环境的影响,使得土壤腐殖质含量较高。

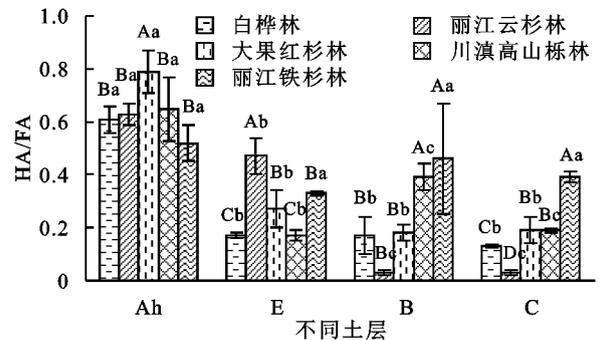
胡敏酸、富里酸作为腐殖酸的组成部分,胡敏酸与富里酸的比值(HA/FA)可用来表示土壤腐殖化程度,HA/FA 比值越大,土壤腐殖化程度越高,质量越好。从图 1 可看出,同一林型间不同土层 HA/FA 差异显著($p < 0.05$);不同森林类型下土壤腐殖质层 HA/FA 皆高于其他土层;且各林型土层间表现为差异显著($p < 0.05$)。分析得出,不同林型土壤腐殖化程度随着土壤发生层深度增加呈降低趋势,HA/FA 值在 B 层、C 层基本趋于稳定,5 种不同林型下 B 层土壤 HA/FA 分别为 0.17, 0.03, 0.18, 0.39, 0.46, C 层土壤 HA/FA 分别为 0.13, 0.03, 0.19, 0.19, 0.39。综合分析得出,不同林型植被下各土层 HA/FA 值为 0.03~0.79,即最高为大果红杉林的腐殖质层,最低

为丽江云杉林的淀积层、母质层,这说明大果红杉林下土壤腐殖化程度较高,形成良好土壤结构能力强,反之丽江云杉林较低。

表 2 不同林型土壤腐殖质组分含量 g/kg

森林类型	土壤发生层	腐殖酸(HE)	胡敏酸(HA)	富里酸(FA)
白桦林	Ah	40.76±1.28Ac	15.36±0.94Ad	25.39±1.23Ac
	E	24.59±0.77Bb	3.52±0.37Bb	21.07±0.41Bb
	B	29.96±1.29Cb	4.24±1.62Bb	25.71±1.25Ab
	C	12.60±0.74Db	1.45±0.08Ca	11.15±0.68Cb
丽江云杉林	Ah	84.02±4.40Aa	32.38±0.97Aa	51.64±3.73Ba
	E	41.97±1.31Ca	13.27±0.95Ba	28.70±2.09Ca
	B	57.99±0.43Ba	1.42±0.55Cc	56.57±0.23Aa
	C	17.51±2.08Da	0.46±0.09Cd	17.05±2.16Da
大果红杉林	Ah	42.15±3.15Ac	19.45±2.13Ac	22.70±3.04Ac
	E	19.53±0.18Bc	4.06±0.89Bb	15.47±0.83Bc
	B	5.78±0.12Cd	0.89±0.13Cc	4.89±0.19Cc
	C	4.70±0.23Cd	0.73±0.13Cc	3.97±0.35Cd
川滇高山栎林	Ah	68.54±2.48Ab	26.70±2.52Ab	41.85±4.10Ab
	E	24.55±1.34Bb	3.58±0.10BCb	20.97±1.42Bb
	B	20.66±0.99Cc	5.77±0.56Ba	14.89±0.82Cc
	C	7.80±0.32Dc	1.27±0.08Cb	6.54±0.26Dc
丽江铁杉林	Ah	16.77±1.10Ad	5.76±0.91Ae	11.00±0.24Ad
	E	9.18±0.28Bd	2.26±0.06Bc	6.92±0.24Bd
	B	7.04±1.30Cd	2.08±0.37Bc	4.96±1.55Cd
	C	4.97±0.06Dd	1.41±0.03Bab	3.57±0.09Cd

注:表中数据表示平均值±标准差,同列不同大写字母表示同一林型不同土层间差异显著,不同小写字母表示不同林型同一土层间差异显著($p < 0.05$, Duncan 法)。



注:图中数据表示平均值±标准差,同列不同小写字母表示同一林型不同土层间差异显著,不同大写字母表示不同林型同一土层间差异显著($p < 0.05$, Duncan 法)。

图 1 不同林型土壤腐殖化程度

2.2 不同林型土壤胡敏素组分数量分析

分析表 3 发现,不同林型土壤胡敏素各组分中不溶性胡敏素组分皆高于可溶性组分(铁溶性胡敏素、黏粒结合胡敏素)。同一林型土壤剖面胡敏素各组分含量差异性表现为显著($p < 0.05$),其中 4 种林型(白桦林、丽江云杉林、大果红杉林、丽江铁杉林)土壤剖

面变化规律均表现为 Ah 层>E 层>B 层>C 层。从不同林型同一土层来看,各林型间胡敏素各组分含量表现为差异性显著($p<0.05$),除各林型 C 层的 HMi 外。其中 HMi 最高值出现在丽江云杉林的 Ah 层(6.22 g/kg),最低值为大果红杉林的 C 层(0.25 g/kg);HMc 最高值出现在丽江云杉林的 Ah 层(4.54 g/kg),最低值为大果红杉林的 C 层(0.13 g/kg);HM_r 最高值出现在川滇高山栎林的 Ah 层(187.40 g/kg),最低值为大果红杉林的 C 层(4.84 g/kg)。综上所述,5 种不同林型中丽江云杉林胡敏素组分含量普遍高于其他 4 种林型。

表 3 不同林型土壤胡敏素组分情况 g/kg

土壤发生层	森林类型	可溶性胡敏素		不溶性胡敏素(HM _r)
		铁溶性胡敏素(HMi)	黏粒结合胡敏素(HMc)	
Ah	白桦林	2.70±0.22BCa	1.61±0.14Ba	48.90±8.48Ba
	丽江云杉林	6.22±0.72Aa	4.54±0.31Aa	176.88±6.65Aa
	大果红杉林	2.45±0.46Ca	0.58±0.06Da	175.51±1.37Aa
	川滇高山栎林	3.48±0.45Ba	1.12±0.17Cb	187.40±9.21Aa
	丽江铁杉林	1.26±0.09Da	0.79±0.22CDa	31.56±2.03Ca
E	白桦林	0.97±0.12Bb	0.89±0.18Bb	28.20±0.76Cb
	丽江云杉林	2.14±0.17Ab	1.45±0.06Ab	57.85±1.18Ab
	大果红杉林	0.83±0.008Bb	0.20±0.02Cb	38.18±5.97Bb
	川滇高山栎林	1.08±0.24Bb	0.21±0.02Cb	41.69±6.29Bb
	丽江铁杉林	0.89±0.08Bb	0.21±0.04Cb	17.11±2.14Db
B	白桦林	0.63±0.12Cc	0.67±0.09Ab	18.99±0.79Cc
	丽江云杉林	0.71±0.05ABc	0.79±0.20Ac	46.96±5.10Ac
	大果红杉林	0.37±0.03Cc	0.13±0.02Bc	13.77±2.32Dc
	川滇高山栎林	0.90±0.20Ab	0.18±1.66Bb	31.38±2.08Bc
	丽江铁杉林	0.51±0.10BCc	0.23±0.01Ab	11.83±0.94Dc
C	白桦林	0.39±0.01Ac	0.18±0.02Bc	10.10±1.18Bd
	丽江云杉林	0.53±0.06Ac	0.21±0.04ABd	21.25±4.14Ad
	大果红杉林	0.25±0.02Ac	0.13±0.009Dc	4.84±0.59Cd
	川滇高山栎林	0.62±0.49Ab	0.15±0.004CDb	7.23±0.30BCd
	丽江铁杉林	0.41±0.02Ac	0.23±0.009Ab	10.79±0.54Bc

注:表中数据表示平均值±标准差,同列不同小写字母表示同一林型不同土层间差异显著,不同大写字母表示不同林型同一土层间差异显著($p<0.05$,Duncan 法)。

2.3 不同林型土壤可溶性胡敏素光学性质分析

传统观点认为,土壤腐殖质的颜色与土壤腐殖化程度一一对应,因此,色调系数($\Delta\lg K$)、光密度值(E_4/E_6)被用来表征土壤腐殖质分子结构的复杂程度,色调系数与光密度值呈正相关关系,色调系数越高,光密度值越高,化学稳定性越高,其分子结构越简单^[14]。因此,本文采用 $\Delta\lg K$, E_4/E_6 作为参考指标来探讨可溶性胡敏素组分分子结构。从图 2 可以看

出,不同林型土层 HMi, HMc 色调系数各不相同,除川滇高山栎林 C 层外,其他林型各土层 HMc 的色调系数皆高于 HMi 色调系数,这可说明土壤 HMc 的分子结构比 HMi 分子结构简单,但其复杂程度相差不大。 E_4/E_6 所表现的变化趋势与色调系数并不全然一致(图 3),除丽江铁杉林各土层表现为 E_4/E_6 表现为 HMc 大于 HMi 外,其他林型土层间 E_4/E_6 未表现明显变化规律。除川滇高山栎林外,其他林型土层间都达到了显著差异($p<0.05$)。从 Ah 层来看,除白桦林外,其他林型皆表现为 $HMi<HMc$,由此看出,不同林型土壤 Ah 层 HMi 的分子结构比 HMc 的分子结构简单;不同林型间土壤 E 层和 B 层 HMi, HMc 所表现的规律大致相同,而 Ah 层和 C 层则比较复杂;各林型间未表现出明显变化规律。

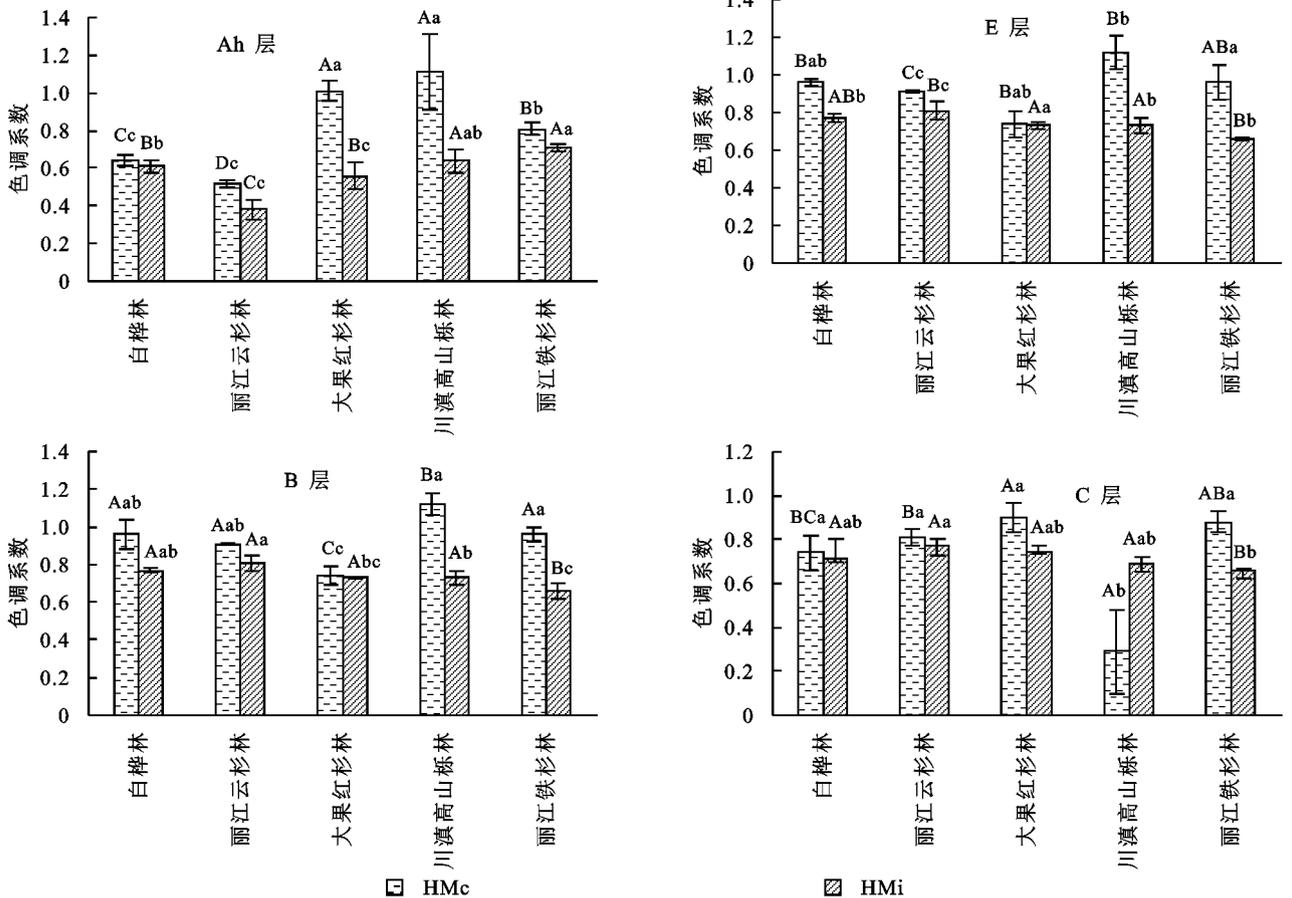
3 讨论

3.1 不同林型土壤腐殖质组分分布特征

土壤有机碳主要来源于植物残体等地表凋落物的输入^[15],土壤腐殖质作为有机碳主体,在土壤固碳方面发挥着重要作用。本研究中不同林型土壤腐殖酸(HE)大小变化为:丽江云杉林(84.02 g/kg)>川滇高山栎林(68.54 g/kg)>大果红杉林(42.15 g/kg)>白桦林(40.76 g/kg)>丽江铁杉林(16.77 g/kg),其中丽江云杉林含量显著高于其他 4 种林型。有研究表明^[16],土壤剖面腐殖酸的垂直分布主要受植被类型、根系分布的影响。这可能是因为丽江云杉林下植物残体量较高,根系固碳能力较强,进而提高了土壤有机碳的输入。随着土壤剖面深度的增加,土壤腐殖酸含量逐渐降低,表层枯枝落叶和根系分解为土壤提供了丰富的碳源,而深层土壤相对表层土壤缺乏碳源、能量,微生物活性降低,从而影响了土壤有机碳腐殖化过程,进而影响土壤腐殖质含量。胡敏酸、富里酸是土壤腐殖酸的组成部分,而腐殖质各组分含量高低取决于形成量和分解量的大小,即取决于植被类型和根系分布、微生物活性等因素。不同林型土壤胡敏酸(HA)含量变化规律与腐殖酸一致,而富里酸则表现为丽江云杉林>川滇高山栎林>白桦林>大果红杉林>丽江铁杉林,其中白桦林富里酸含量高于大果红杉林,这可能是因为不同林型植被下土壤微生物数量、多样性差异及凋落物分解速率不同。有研究表明,土壤腐殖质的形成主要靠微生物的聚合作用,土壤微生物能利用富里酸组分中氨基酸等含氮化合物,不断地转化成胡敏酸^[17]。

土壤胡敏酸较富里酸更为活跃,分子量较大,微生物抗性较强,对良好土壤结构形成、养分保持方面占重要地位。HA/FA 是衡量土壤腐殖质品质优劣的重要指标,即胡敏酸含量越高,分子量越大,分子结构复杂,腐殖质品质越好。本研究中,不同林型土壤 HA/FA 大小变化为:大果红杉林>川滇高山栎林>丽江云杉林>白桦林>丽江铁杉林,其中大果红杉林最高,且皆高于其他 4 种林型。这说明大果红杉林下土壤腐殖质品质相对其他 4 种林型较好,此外,

5 种不同林型土壤 HA/FA 均小于 1,其变化范围为 0.03~0.79,综合来看,5 种土壤腐殖质品质总体较差,主要为富里酸型土壤。随着土壤剖面深度的增加,HA/FA 总体呈下降趋势,其中土壤 Ah 的腐殖化程度明显高于其他土层,这与党亚爱等^[13]研究结果不一致,这可能与横断山脉纵谷区夏季温暖多雨、冬季寒冷干旱的气候环境有关,其次森林植被覆盖度高,人类活动干扰少有关,因此表层土壤有机质腐殖化过程进行加快。



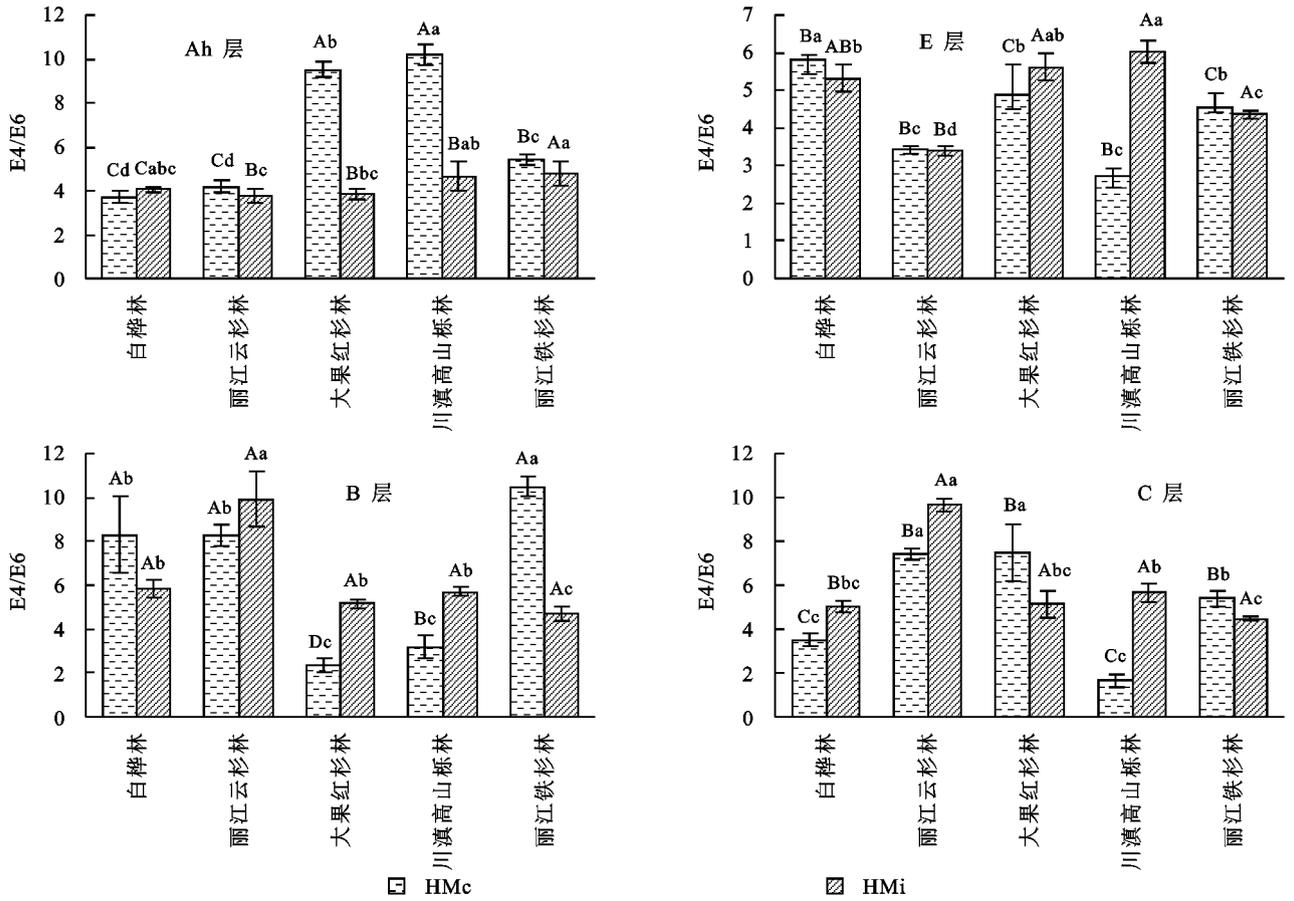
注:图中数据表示平均值±标准差,不同小写字母表示不同林型同一土层各组分差异显著,不同大写字母表示不同林型同一土层各组分差异显著 ($p < 0.05$, Duncan 法)。

图 2 不同林型土壤可溶性胡敏素的色调系数

3.2 不同林型土壤胡敏素组分分布特征

土壤胡敏素(HM)是不同于 HA,FA 的独立的腐殖物质组分,它占土壤有机碳的绝大部分,在土壤肥力、生态环境方面都占有重要地位。本研究中土壤胡敏素各组分数量各有差异,从不同层次土壤胡敏素组分主要分布情况分析,不溶性胡敏素组分含量占胡敏素绝大多数,其次是铁结合胡敏素、黏粒结合胡敏素。腐殖质结合态与土壤酸碱度有关^[18],本研究供试土壤 pH 值范围在 3.99~5.53,酸性土壤中铁铝氧化物成为土壤主要胶结物质,从而铁结合态胡敏素相对黏粒结合态胡敏酸较高。从不同土壤发生层来看,

胡敏素各组分含量随着土层深度增加而降低,其主要变化规律为:腐殖质层>淀积层>淋溶层>母质层。从不同森林类型来看,白桦林、丽江云杉林、大果红杉林、川滇高山栎林的黏粒结合胡敏素(HMc)含量表现为差异显著($p < 0.05$),其中白桦林、丽江云杉林皆大于大果红杉林、川滇高山栎林,即泥质页岩坡积物母质发育的土壤黏粒结合胡敏素高于花岗岩坡积物母质。这是因为胡敏素在腐殖质组分中的占比大小,一般与土壤中的黏土矿物和无定形铁、铝氧化物的含量呈正相关。由此可知当土壤成土母质相同时,不同林型对土壤胡敏素组分的影响不大。



注:图中数据表示平均值±标准差,不同小写字母表示不同林型同一土层各组分差异显著,不同大写字母表示不同林型同一土层各组分差异显著($p < 0.05$, Duncan 法)。

图 3 不同林型土壤可溶性胡敏素的 E4/E6

3.3 不同林型土壤可溶性胡敏素光学性质特征

从色调系数指标来看,5 种不同林型植被下大部分土壤铁结合胡敏素(HMi)的色调系数值小于黏粒结合胡敏素(HMc)色调系数, HMi 色调系数大小与 HMc 相差不大;但从 E4/E6 来看, HMi 与 HMc 在不同林型土壤间变化规律不明显。综合 $\Delta \lg K$, E4/E6 变化规律分析,土壤 Ah 层 HMi 与 HMc 的分子结构较其他土层复杂,这与张志春等^[19]研究结果不一致,有研究表明随着土壤温度、含水量增高更有利于 HMi, HMc 的分子结构复杂化。但从其他土层 HMi 与 HMc 光学性质变化规律来看, HMi, HMc 的分子结构不仅仅主要受温度、含水量的影响^[20],可能和时间作用长短因素有关。此外,即不同林型植被所产生有机物与土壤腐殖质分子结构复杂程度有关,本研究中数据也仅是验证了这一观点,不同植被所产生的有机物与土壤腐殖质分子结构间影响机制还有待深入研究。各林型间 HMi, HMc 分子结构变化规律不明显,其中 HMc 的分子结构在川滇高山栎林的 C 层最为复杂,而 HMi 的分子结构在丽江云杉林的 Ah 层最为复杂。总而言之,土壤腐殖化进程是一个复杂且受到多种因素共同作用且长久的变化过程。从两个

参考指标的变化规律看, E4/E6 值在不同林型土壤间的变化幅度比色调系数大, E4/E6 值对各种影响因素的响应能力较色调系数更高。

4 结论

(1) 横断山脉纵谷区 5 种不同林型暗棕壤丽江云杉林下腐殖酸含量显著高于其他 4 种林型。不同林型暗棕壤 HA/FA 表现为大果红杉林 > 川滇高山栎林 > 丽江云杉林 > 白桦林 > 丽江铁杉林, 大果红杉林相对于其他林型土壤腐殖质聚合度较高、品质较好。

(2) 横断山脉纵谷区 5 种不同林型暗棕壤胡敏素组分中不溶性胡敏素占绝大部分。丽江云杉林下胡敏素组分含量最高。相对于其他 4 种林型, 丽江云杉林更有利于土壤碳的积累。

(3) 横断山脉纵谷区 5 种不同林型暗棕壤 Ah 层 HMi, HMc 的分子结构较其他土层复杂, 各林型间 HMi, HMc 分子结构变化规律不明显, 除川滇高山栎林的 C 层外, 各林型土层 $\Delta \lg K$ 皆表现为 HMc > HMi, 但 E4/E6 变化规律并不总是表现为 HMc > HMi; 其中 HMc 的分子结构在川滇高山栎林的 C 层最为复杂, 而 HMi 的分子结构在丽江云杉林的 Ah

层最为复杂。

综上所述,大果红杉林、丽江云杉林更有利横断山脉纵谷区碳素的利用、积累,该研究结果可为提高横断山脉纵谷区森林固碳能力提供参考。本文仅就横断山脉纵谷区 5 种主要林型腐殖质特征进行研究,具有一定的局限性。不同林型土壤固碳量有所差异,因此加强筛选相对维持高碳水平的树种对增汇减排具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张晋京,窦森,土壤胡敏素研究进展[J].生态学报,2008,28(3):1229-1239.
- [3] 窦森.土壤有机质[M].北京:科学出版社,2010.
- [4] 李梓瑄,迟凤琴,张久明,等.长期定位施肥对黑土养分平衡和胡敏素分子结构动态变化的影响[J].光谱学与光谱分析,2018,38(12):3875-3882.
- [5] 朱姝,窦森,关松,等.秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响[J].土壤学报,2016,53(1):127-136.
- [6] 刘秋香,刘泉,张怡颖,等.川中丘陵区不同土地利用方式的石灰性紫色土土壤腐殖质特征[J].绵阳师范学院学报,2019,38(2):111-116.
- [7] 丛鑫,梅傲雪,朱含露.PCB138 在土壤中的吸附特征及土壤特性对其吸附的影响[J].生态环境学报,2018,27(1):137-143.
- [8] 范春莹,谢修鸿,燕爱春,等.土壤胡敏素结构特征及对铜离子的吸附特性[J].土壤学报,2018,55(6):1460-1471.
- [9] 王卫斌.滇西北地区的森林资源及其保护与发展对策[J].云南林业科技,2003(1):18-21.
- [10] 张燕妮,张志明,耿宇鹏,等.滇西北地区优先保护的植物群落类型[J].生物多样性,2013,21(3):296-305.
- [11] 李晋,张劲峰,景跃波,等.滇西北亚高山植被恢复中存在的问题及对策探讨[J].林业资源管理,2011(1):30-34.
- [12] 肖彦春.土壤胡敏素分组及特性的研究[D].长春:吉林农业大学,2004.
- [13] 党亚爱,李世清,王国栋.黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分割面分布特征[J].生态学报,2012,32(6):1820-1829.
- [14] 王晶,何忠俊,王立东,等.高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究[J].土壤学报,2010,47(4):723-733.
- [15] 许炼烽,徐谔为,李志安.森林土壤固碳机理研究进展[J].生态环境学报,2013,22(6):1063-1067.
- [16] 李茜,王芳,曹扬,等.陕西省森林土壤固碳特征及其影响因素[J].植物生态学报,2017,41(9):953-963.
- [17] 徐嘉晖,孙颖,高雷,等.土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J].中国生态农业学报,2018,26(2):222-230.
- [18] Jardine P M, Mayes M A, Mulholland P J, et al. Vadose zone flow and transport of dissolved organic carbon at multiple scales in humid regimes [J]. Vadose Zone Journal, 2006,5(1):140-152.
- [19] 张志春,张晋京,潘根兴,等.下拉秀剖面有机碳赋存特征[J].水土保持学报,2012,26(3):174-179.
- [20] 张志春,潘根兴,张晋京,等.下拉秀剖面胡敏素组分特征[J].水土保持研究,2013,20(3):295-298,304.
- [19] Posadas A N D, Giménez D, Bittelli M, et al. Multi-fractal characterization of soil particle-size distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001,65(5):1361-1367.
- [20] 白一茹,汪有科.黄土丘陵区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征[J].农业机械学报,2012,43(5):43-48.
- [21] 代豫杰,李锦荣,郭建英,等.乌兰布和沙漠不同灌丛土壤颗粒多重分形特征及其与有机碳分布的关系[J].环境科学研究,2017,30(7):1069-1078.
- [22] 郭树江,杨自辉,王多泽,等.民勤绿洲—荒漠过渡带土壤粒径分形特征研究[J].中国水土保持,2018,439(10):53-56.
- [23] 魏茂宏,林慧龙.江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J].应用生态学报,2014,25(3):679-686.
- [24] 李巍,毛文梁.青藏高原东北缘生态脆弱区城镇体系空间结构研究:以甘南藏族自治州为例[J].冰川冻土,2011,33(6):1427-1434.
- [25] 魏兰香.基于 USLE 模型的祁连山南坡土壤保持量评估[D].西宁:青海师范大学,2017.
- [26] 王涛,高峰,王宝,等.祁连山生态保护与修复的现状问题与建议[J].冰川冻土,2017,39(2):229-234.
- [27] 刘晓敏.祁连山青海云杉林土壤理化性质的空间变异性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2012.
- [28] Deng S F, Yang T B, Zeng B, et al. Vegetation cover variation in the Qilian Mountains and its response to climate change in 2000—2011[J]. Journal of Mountain Science, 2013,10(6):1050-1062.
- [29] 金博文,康尔泓,宋克超,等.黑河流域山区植被生态水文功能的研究[J].冰川冻土,2003,25(5):580-584.
- [30] 李璇,杨帆,李德成,等.祁连山区土壤砂粒含量剖面分布模式及其影响因素[J].土壤学报,2017,54(4):854-863.
- [31] 于海艳,宫汝宁,周娅,等.北京八达岭地区 4 种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].水土保持学报,2015,29(5):162-166.

(上接第 47 页)