

纳帕海湿地不同退化状态下土壤 有机碳素的分异特征

胡金明¹, 董云霞¹, 袁 寒^{1,2}, 李 杰¹, 马彬斌¹

(1. 云南大学亚洲国际河流中心, 昆明 650091; 2. 红河学院生命科学与技术学院, 蒙自 661100)

摘要: 纳帕海湿地地区4类土壤退化程度由高到低依次为: 弃耕地—中生草甸土 (AFMMS)、中生草甸土 (MMS)、湿草甸土 (WMS) 和沼泽土 (MS), 对4类土壤0~10 cm (上层)、10~20 cm (中层)、20~30 cm (下层) 进行采样, 分析土壤有机碳 (SOC)、活性有机碳 (LOC) 和溶解有机碳 (DOC) 含量。结果表明: 4类土壤间, 除 AFMMS 中下层 LOC 含量略高于 MMS 对应层 LOC 含量外, 其它各层 SOC、LOC、DOC 含量都为 AFMMS < MMS < WMS < MS; 剖面垂向上, MS 的 SOC 和 LOC 含量由上向下先增后减, 其它土壤 SOC、LOC、DOC 含量以及 MS 的 DOC 含量均由上向下减少; LOC/SOC (%) 变化于 8.6~16.8%, 而 DOC/SOC (%)、DOC/LOC (%) 更低; 除 AFMMS 外, 其它3类土壤 SOC 和 LOC 含量呈显著正相关, 且 LOC 和 LOC/SOC (%) 分异与土壤类型分异有明显的对应关系, 而 DOC 含量与 SOC 和 LOC 含量的相关性无明显规律。本研究表明, 微地貌制约下的水文情势—植被生态分异对湿地 SOC 及活性组分的分异有显著影响, 而强人为干扰会带来湿地土壤有机碳活性组分的明显损失, 缺乏水文生态调控的撂荒式恢复难以有效恢复退化高寒湿地土壤有机碳库; LOC 是表征湿地土壤有机碳库及其活性组分变化更为敏感和合适的指标。

关键词: 湿地土壤; 有机碳; 活性有机碳; 溶解有机碳; 纳帕海

文章编号: 1000-0585(2012)01-0053-10

1 引言

土壤有机碳 (SOC—Soil Organic C) 反映土壤有机质状况, 而其中的活性有机碳 (LOC—Labile OC) 是指土壤中极易发生变化、易被植物和土壤微生物等有效利用的有机碳组分, 如溶解有机碳 (DOC—Dissolved OC)、微生物量碳 (MBC—Microbial Biomass C)、易矿化有机碳 (EOC—Easily Oxidisable OC) 等^[1~5]。虽然 LOC 及相关组分占 SOC 比例较低, 但具有重要的指示意义, 常被用来检测环境变化或人为活动对土壤有机碳的影响^[1~11]。不同测试方法获得的活性组分含量只是反映土壤 LOC 库的某一组分特征^[1~5], 而土壤 SOC、LOC 及其活性组分的关系、土壤有机碳库变化检测敏感且适宜的指标等, 都有待深入探索。湿地生态系统碳储量高达 450 Gt, 约为陆地生态圈碳储量的 20%^[12], 在全球生物碳循环中发挥着重要作用^[13]。大多数湿地系统的水文情势—植被生态特征都具有明显的季节性和年际变化, 而高强度人类干扰对湿地系统水文、植被、土壤等都产生

收稿日期: 2011-04-22; 修订日期: 2011-09-25

基金项目: 云南省社发科技计划项目 (2008CA00602); 国家自然科学基金项目 (40961003)

作者简介: 胡金明 (1973-), 安徽枞阳人, 博士, 教授。主要从事湿地水文生态研究。

E-mail: jhuynu@163.com

董云霞 (1985-), 河南鹿邑人, 硕士, 从事湿地生态研究。E-mail: dongyunxia714@126.com

强烈影响,由此带来的湿地系统土壤 LOC 及其组分的动态变化,受到科学家们的高度关注^[5~11]。

纳帕海湿地为我国列入 Ramsar 名录 9 大高原湿地之一^[14],是发育在滇西北山地区较独特的半闭合湖沼湿地。自上世纪 50 年代,为防洪和发展农牧业等需要,当地政府通过一系列措施降低纳帕海湿地水位,湿地区南部大片的湿草甸和低洼沼泽逐渐演变成中旱生草甸。上世纪 90 年代以来,当地畜牧业和旅游业等迅猛发展,纳帕海湿地所受人为扰动更为严峻,目前严重退化破坏区占湿地区面积的 15 % 左右^[14],主要退化形式表现为湿地类斑块面积的减少^[14,15]、植物群落分布及植物多样性格局的变化^[16]、湿地土壤退化^[17~19]等。纳帕海湿地的持续退化态势引起了政府部门的高度关注,云南省于 2007 年将其列入湿地恢复工程优先项目。本研究试图通过分析纳帕海湿地区不同退化状态下土壤 SOC、LOC、DOC 含量的分异及其关联,以深入认识该湿地土壤的退化状态,为今后纳帕海湿地管理提供依据,并丰富高寒湿地土壤有机碳库及其活性组分关系的研究。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况、样地布设和采样方法

湿地区土壤为典型亚高山草甸土土属,根据地貌—水文、地表植被、土壤性状、人为干扰等,可分为弃耕地—中生草甸土 (AFMMS—Abandoned Farmland Mesophytic Meadow Soil)、中生草甸土 (MMS—Mesophytic Meadow Soil)、湿草甸土 (WMS—Wet Meadow Soil) 和沼泽土 (MS—Marsh Soil),其中 MS 有向湿草甸演替的趋势。本研究设计 4 条平行样带,其中 AFMMS、MMS、WMS 和 MS 样地分别为 6 个、13 个、6 个、3 个 (图 1)。

由南而北 4 条样带在一定程度上反映了湿地区水文地貌分异对土壤类型分布和退化状态的制约。AFMMS 样地主要分布在最南边的样线,该类土壤分布区经历垦殖并于上世纪 90 年代前后退耕,地貌部位高、土壤常年偏干;地表植被生态退化严重,出现大狼毒 (*Euphorbia jolkinii*)、瑞香狼毒 (*Stellera chamaejasma*) 等为优势种的大面积群落。MMS 样地主要分布在中间两条样线和北部样线的地貌部位较高的地段,年内大部分时段土壤都偏干,且长期受大型牲畜放养啃食和践踏等影响;其植被覆盖度高于 AFMMS 但低于 WMS,出现菊科千里光属 (*Senecio sp.*)、玄参科通泉草 (*Mazus japonicus*)、禾本科看麦娘 (*Alopecurus aequalis*)、十字花科芥 (*Capsella bursa-pastoris*) 等为优势种的非典型亚高山湿草甸植物群落类型。WMS 样地主要分布在地貌部位较低的区域,以北部两条样线为主,雨季长期积水;其植被覆盖度和多样性最高,地表植被以莎草科苔草属 (*Carex sp.*)、毛茛科毛茛属 (*Ranunculus sp.*) 等湿草甸植物群落为主。受长期干扰影响,纳帕海湿地区 MS 分布区极小,且有向湿草甸演替趋势;本次调查仅发现 3 个局地低洼地带分布有沼泽土,分布在中北部样线,基本常年积水或饱和,具有腐殖质累积现象;地表植物以湿 (水) 生植物群落为主。

不同湿地的土壤有机碳素剖面分异特征不同,但若干研究^[6, 8, 11, 20]表明,湿地土壤有机碳素一般在 0 ~ 30 cm 富集明显、30 cm 以下显著减少。因此,本研究仅采集 0 ~ 30 cm 剖面土样,分析其有机碳素的分异特征。考虑不同季节因水文和植被生长状态的变化,湿地土壤有机碳素含量会发生一定的变化,分别于雨季初 (2009 年 6 月)、旱季初 (2009 年 11 ~ 12 月) 和旱季中后期 (2010 年 3 月) 进行采样,利用三次采样测得的土壤有机

碳素含量的均值来反映该区湿地土壤有机碳素的基本特征。在雨季中期（2009 年 7 ~ 10 月）未采样，因为这一时期水位高，部分样地难以通行和定位。每个样地选 3 个剖面进行采样，利用 GPS 定位；每个剖面均按 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 分层取样，记录各层土壤基本性状，将同一样地 3 个剖面同一层位的新鲜样品混合，代表相应样地的土壤样品。共采集 AFMMS、MMS、WMS 和 MS 每层样品数均为 18 个、39 个、18 个、9 个。

2.2 样品测试与分析

样品自然风干后研磨分样，送东北地理与农业生态研究所分析测试中心测试。SOC 采用重铬酸钾测定法（LY/T1237—1999 森林土壤有机质测定）；LOC 采用重铬酸钾法^[21]；DOC 采

用水浸、燃烧法（GB/T13193—91 水质 TOC 测定）。各层土壤 SOC、LOC、DOC 含量两两间相关系数（CC—Correlation Coefficient）分析及显著性检验基于 SPSS—Pearson 单侧检验，各要素间差异性分析基于 SPSS 独立样本 *T* 检验。土壤剖面 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 在文中分别表述为上、中、下层，在图表中分别记以 L (1)、L (2)、L (3)。

3 结果分析

3.1 SOC

图 2 表明，4 类土壤间 SOC 含量分异明显，各层 SOC 含量由低到高都为 AFMMS、

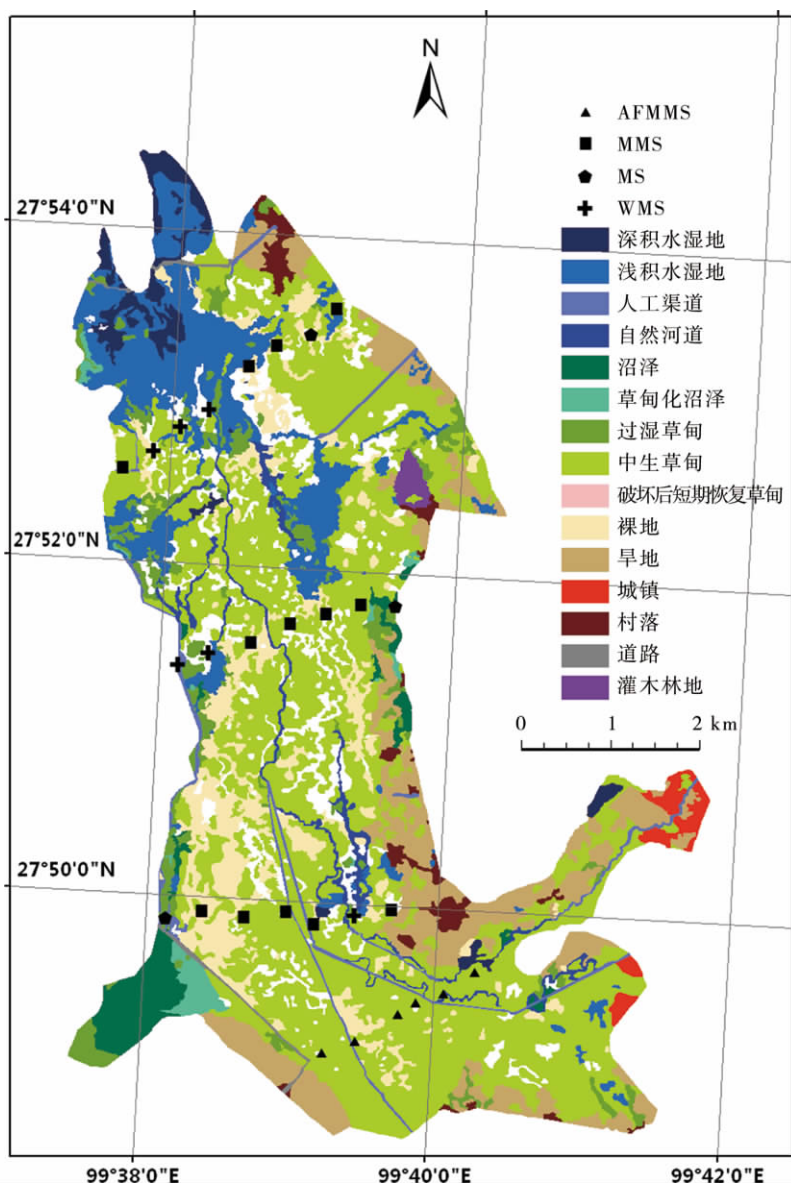


图 1 纳帕海湿地区景观与采样点

Fig 1 Landscape and sampling sites in Napahai wetland reserve

MMS、WMS、MS, 其中 MS 各层 SOC 含量极显著 ($P < 0.01$) 高于其它土壤对应层 SOC 含量, 这与 MS 长期处于积水环境利于有机碳积累和受到较低的人为干扰等有关。AFMMS、MMS、WMS 之间, 上层土壤 SOC 含量差异显著 ($P < 0.01$ 或 0.05), AFMMS 的 SOC 含量仅为 MMS 和 WMS 的 47.46%、35.42%; 在中层和下层, AFMMS 的 SOC 含量为 MMS 对应层 SOC 含量的 80.29%、86.42%, 为 WMS 对应层 SOC 含量的 48.97%、58.09%。

4 类土壤 SOC 含量剖面垂向分异明显。AFMMS、MMS 和 WMS 的 SOC 含量均由上层向下依次降低, 且中层 SOC 含量较上层都大幅降低, 而下层 SOC 含量较中层也有降低但变幅小, 表明 3 类土壤 SOC 含量都存在显著的上层富集现象。MS 与其它 3 类土壤不同, MS 中层 SOC 含量较上层略高, 至下层又较中上层下降, 表现为中上层相对富集; 在其它区域沼泽湿地研究中也发现类似现象, 如若尔盖沼泽土 SOC 整体上从表层向下呈下降趋势, 但在中间 16~18 cm 处出现高值点; 泥炭土 SOC 沿土壤剖面并没有呈现同样的下降趋势, 而是从表层向下至 22 cm 呈现升高趋势, 22 cm 向下才呈现下降趋势^[11]。

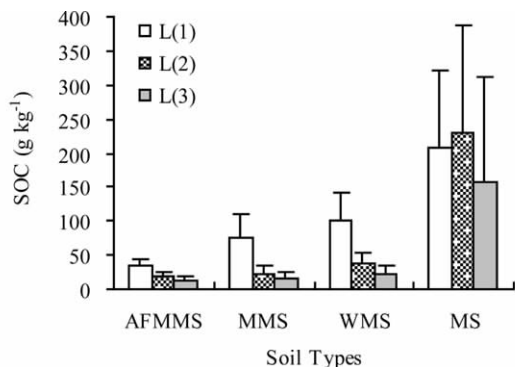


图 2 四类土壤各层位 SOC 含量

Fig. 2 SOC contents at each layer of the 4 types of soils

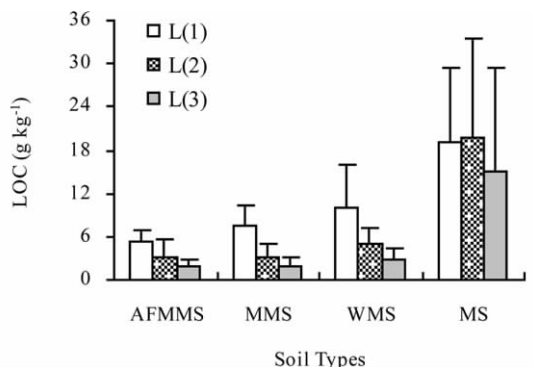


图 3 四类土壤各层位 LOC 含量

Fig. 3 LOC contents at each layer of the 4 types of soils

3.2 LOC

图 3 表明, 除 AFMMS 中层和下层 LOC 含量略高于 MMS 对应的中层和下层 LOC 含量外, 4 类土壤间相应层 LOC 含量变化都与 SOC 含量的总体变化趋势相一致, 且 4 类土壤 LOC 含量垂向变化也与各自的 SOC 垂向变化一致, 这表明 4 类土壤各层 LOC 含量与其 SOC 含量有关联。表 1 显示, MMS 和 MS 各层、WMS 上层和下层, LOC 与 SOC 含量呈极显著或显著正相关, 仅 WMS 中层未通过 0.05 显著性相关检验。AFMMS 各层 LOC 和 SOC 含量的相关系数都未通过 0.05 显著性水平检验。可见, 对于未受高强度耕作干扰的 3 类土壤 (MMS、WMS、MS), 其 LOC 和 SOC 含量存在极显著或显著的正相关关系; 而经耕作退耕的 AFMMS, 其 LOC 与 SOC 含量的相关性低。

表 1 还显示, 4 类土壤各层 LOC/SOC (%) 变化于 8.6% ~ 16.8%, 可见惰性有机碳占该湿地区土壤有机碳的比例明显高于 LOC。4 类土壤间各层 LOC/SOC (%) 变化一致, 都表现为 AFMMS > MMS > WMS > MS。结合湿地区土壤水文情势和植被调查来看, 4 类土壤各层 LOC/SOC (%) 分异与其水文—植被生态情势有着明确的对应关系, 即土壤水分—植被生物量低的土壤类型, 其活性有机碳占总有机碳的相对比例越高; 土壤

水分—植被生物量高的土壤类型，其活性有机碳占总有机碳的相对比例越低。

表 1 四类土壤各层 LOC/SOC 及两者的相关系数
Tab. 1 LOC/SOC and their CCs ($R_{LOC\&SOC}$) at each layer of the 4 types of soils

土壤类型	L (1)		L (2)		L (3)	
	LOC/SOC (%)	$R_{LOC\&SOC}$	LOC/SOC (%)	$R_{LOC\&SOC}$	LOC/SOC (%)	$R_{LOC\&SOC}$
AFMMS	14.726	0.138	16.766	0.223	15.238	0.255
MMS	10.233	0.868**	13.043	0.725**	13.023	0.832**
WMS	9.970	0.461*	12.676	0.296	12.760	0.878**
MS	9.175	0.827**	8.604	0.818**	9.473	0.846**

注：**表示通过 0.01 显著性水平的相关性检验，*表示通过 0.05 显著性水平的相关性检验。

3.3 DOC

4 类土壤间，各层 DOC 含量由低到高都依次为 AFMMS、MMS、WMS（图 4a）、MS（图 4b）。上层 DOC 含量分异最明显，而 MS 的 3 个层位 DOC 含量都显著高于其它 3 类土壤对应层位的 DOC 含量。在 AFMMS、MMS、WMS 之间，中、下层 DOC 含量存在分异但并不显著。

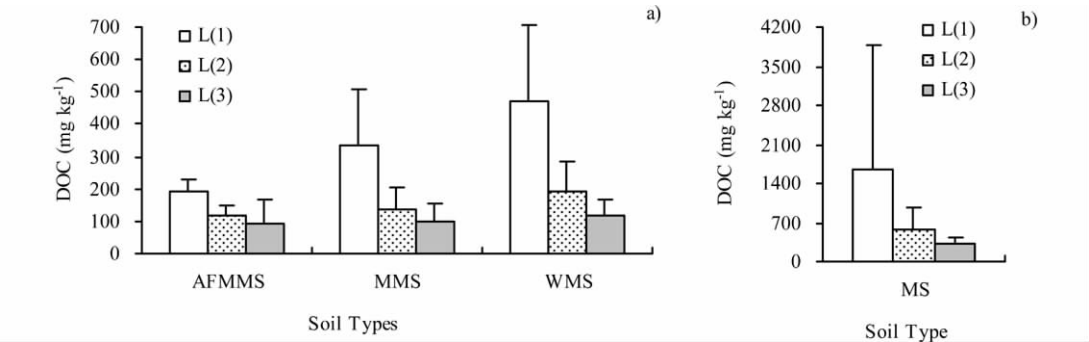


图 4 四类土壤各层位 DOC 含量
Fig. 4 DOC contents at each layer of the 4 types of soils

剖面垂向上，4 类土壤 DOC 含量变化一致，都由上向下逐渐减少，其中上层和中层间的 DOC 含量全部呈锐减变化、下层和上层间的 DOC 减幅较中上层间的减幅小；MS 剖面垂向 DOC 含量分异与其 SOC（图 2）和 LOC（图 3）不同。相对上层和中层间的变幅而言，4 类土壤下层和上层间 DOC 含量减幅要小，但仍达 19% ~ 45% 左右，依次为 AFMMS (19.026%)、MMS (28.020%)、WMS (38.275%) 和 MS (44.930%)。

表 2 显示，4 类土壤各层 DOC 仅为 SOC 含量的 0.205% ~ 0.802%，4 类土壤间 DOC/SOC (%) 分异不明显；DOC 占 LOC 含量的比例也不高，MS 上层 DOC/LOC (%) 达 8.736%，其它变化于 3.640% ~ 4.989% 之间。无论是不同土壤类型间、还是同一土壤类型的不同层位间，这一比值都无明显规律性分异。MMS 各层 DOC 与 SOC、LOC 全部在 0.01 显著性水平上正相关。WMS 的 DOC 和 SOC 达 0.01 或 0.05 显著性水平上正相关；其 DOC 与 LOC 仅在下层显著正相关 ($P < 0.01$)，其它两层都未达到 0.05 显著性水平的相关。而 AFMMS、MS 的 DOC 与 SOC、LOC 仅在个别层位达到 0.01 或

0.05 显著性水平上的相关。

表 2 四类土壤 DOC 占 SOC 和 LOC 百分比及相关系数
 Tab 2 DOC/SOC (%), DOC/LOC (%) and their CCs ($R_{\text{DOC}\&\text{SOC}}$, $R_{\text{DOC}\&\text{LOC}}$)
 at each layer of the 4 types of soils

土层	AFMMS				MMS			
	DOC/SOC	$R_{\text{DOC}\&\text{SOC}}$	DOC/LOC	$R_{\text{DOC}\&\text{LOC}}$	DOC/SOC	$R_{\text{DOC}\&\text{SOC}}$	DOC/LOC	$R_{\text{DOC}\&\text{LOC}}$
L (1)	0.536	0.458*	3.64	0.535*	0.447	0.512**	4.372	0.562**
L (2)	0.621	0.294	3.707	-0.104	0.591	0.770**	4.533	0.743**
L (3)	0.714	0.697**	4.685	0.268	0.65	0.519**	4.989	0.686**
土层	WMS				MS			
	DOC/SOC	$R_{\text{DOC}\&\text{SOC}}$	DOC/LOC	$R_{\text{DOC}\&\text{LOC}}$	DOC/SOC	$R_{\text{DOC}\&\text{SOC}}$	DOC/LOC	$R_{\text{DOC}\&\text{LOC}}$
L (1)	0.468	0.415*	4.692	0.352	0.802	0.393	8.736	0.129
L (2)	0.495	0.576**	3.905	0.292	0.255	0.687*	2.969	0.47
L (3)	0.514	0.719**	4.029	0.712**	0.205	0.501	2.167	0.297

注: **、* 表示分别通过 0.01、0.05 显著性水平上的相关性检验。

4 讨论

4.1 有机碳素分异与土壤退化程度

图 2 至图 4 表明, 纳帕海湿地区 4 类土壤的有机碳素都表现为上层的显著富集, 而 MS 中层也显著富集。4 类土壤间, 各层有机碳素含量水平总体上为 AFMMS < MMS < WMS < MS; 相较于中层和下层而言, 4 类土壤上层有机碳素的分异极为显著。从 Yu 等^[20]关于三江平原毛苔草沼泽、乌拉苔草沼泽化草甸 (接近 MS)、小叶章草甸 (接近 WMS) 和大豆农田 (接近 AFMMS) 土壤间和垂向剖面 SOC、DOC 含量的研究来看, 两个案例结果一致。由此可见, 微地貌制约下的水文—植被生态情势分异, 对湿地土壤有机碳素分异有明显影响, 而人为强度干扰 (垦殖、疏水排干、放牧等) 会显著改变湿地土壤有机碳素的特征。

纳帕海湿地区 AFMMS (尤其是上层) 有机碳素含量明显低于其它 3 类土壤, 这主要是因为此前的疏水排干和耕作导致了该类土壤有机碳素的损失, 这与 Zhang 等^[2]、Huang 等^[10]、Yu 等^[20]研究的认识相一致。Zhang^[2]发现三江平原毛苔草和小叶章湿地土壤 SOC、MBC、DOC 含量明显高于湿地垦殖后的农田。Huang^[10]研究发现, 沼泽湿地向农业用地的转变带来土壤有机碳显著减少, 其中: 0 ~ 20 cm 层 active-C 和 slow-C 一阶分解速率都高于 20 ~ 40 cm 层; 垦殖后 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 层土壤活性碳库半衰期分别约为 3 年和 4 年, 对应的惰性碳库半衰期分别约为 346 年和 462 年, 沼泽湿地垦殖 15 年将导致 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 层约分别损失 60 %、37 % 的有机碳, 表层有机碳素损失严重。在纳帕海湿地区, AFMMS 垦殖前的状况最接近于 MMS, 部分甚至来自于疏水排干后的 WMS 垦殖, 比较 AFMMS、MMS、WMS 上层有机碳素含量发现, AFMMS 上层 SOC、LOC 含量分别为 MMS 上层对应组分含量的 47.46 %、68.30 %, 为 WMS 上层对应组分含量的 35.42 %、52.31 %。

纳帕海湿地区自上世纪 60 年代以来经历了长期的疏水排干等强烈干扰, 湿地区水位明显下降、湿地面积也大幅萎缩, 受水位下降等的影响部分湿草甸演替为中生草甸^[14,15]。

本研究表明，MMS 上层 SOC、LOC、DOC 含量分别为 WMS 上层对应组分含量的 74.62 %、76.59 %、71.37 %。如果人为驱动下的纳帕海湿地旱化态势仍将持续，势必带来湿地地区湿草甸向中生草甸次生演替的持续，从而带来湿地地区土壤有机碳的进一步损失。尽管纳帕海湿地自 1980 年代中期设立省级自然保护区以来就开始逐步退耕，其生态恢复也超过 10 年，但因水文情势变化，加上长期过度放牧和旅游马匹践踏导致土壤紧实度增加^[22]等，均不利于土壤有机质（碳）累积。因此，如果没有水文—生态等调控措施配合，仅仅是撂荒式的自我恢复，难以有效恢复水文情势发生显著变化的退化高寒湿地土壤有机碳库。

4.2 活性碳素分异的指示意义

土壤 LOC 及其组分比土壤有机碳对区域微环境变化的响应更敏感^[1~4, 10, 23~25]，且 LOC/SOC 值被认为是反映土壤活性有机碳库周转速率的重要指标^[7]。万忠梅等^[7]研究发现三江平原毛苔草湿地 LOC 与土壤 TOC 呈显著正相关。本研究也表明，除 AFMMS 剖面 LOC 和 SOC 含量的相关性未通过 0.05 水平显著性检验外，其它 3 类土壤 LOC 和 SOC 含量基本呈显著正相关（表 1）。剔除受人为高强度干扰的 AFMMS 土壤，纳帕海湿地区其它 3 类土壤分层 SOC 和 LOC 含量（ln 对数化）关系如图 5 所示，两者之间具有极显著正相关关系（ $P < 0.01$ ， $N = 66$ ），可见耕作等高强度人为干扰改变了 AFMMS 的 SOC 和 LOC 含量间的对应关系，而干扰相对较小的 3 类土壤 SOC 和 LOC 之间呈显著正相关。同时，在纳帕海湿地 4 类土壤间，各对应层 LOC 含量分异均为 AFMMS < MMS < WMS < MS，而 LOC/SOC（%）分异则为 AFMMS > MMS > WMS > MS，这与 4 类土壤的水文情势（AFMMS 干、MMS 中生、WMS 过湿或积水、MS 长期积水）有着明显的对应关系，表明土壤越干，有机碳及其活性组分的含量越低，但活性有机碳库的周转速率却越高。

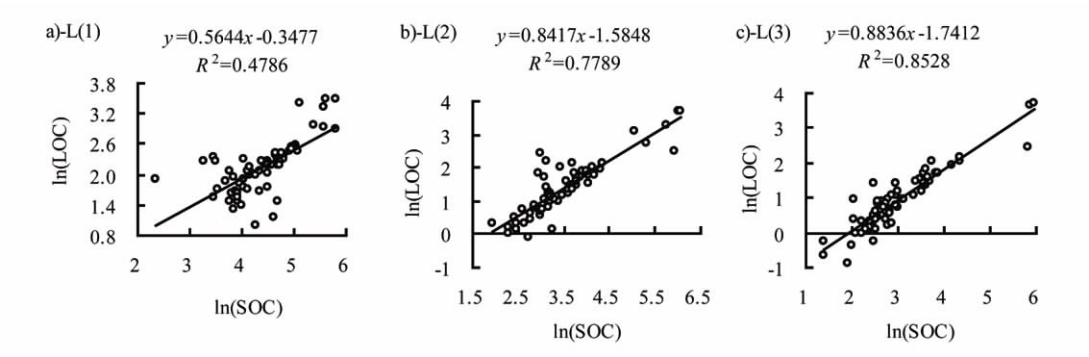


图 5 土壤分层 ln（SOC）和 ln（LOC）对应关系（单位：g kg⁻¹）

Fig. 5 Corresponding relationship between ln（SOC）and ln（LOC）at each soil layer（unit：g kg⁻¹）
（a：0 ~ 10 cm；b：10 ~ 20 cm；c：20 ~ 30 cm）

表 2 显示，湿地区 4 类土壤分层 DOC 含量与对应层 SOC、LOC 含量的相关显著性存在明显分异，如 MSS 各层 DOC 含量与其 SOC、LOC 含量呈显著正相关，WMS 各层 DOC 含量与 SOC 含量呈显著正相关，其它则不一。DOC/SOC（%）、DOC/LOC（%）在 4 类土壤间、各类土壤不同剖面间都无明显分异规律，且 DOC 占 SOC 含量百分比仅为 0.205~0.802 %。Yu 等^[20]发现，乌拉苔草沼泽化草甸、小叶章草甸和大豆农田土壤 0 ~

30 cm 分层 DOC/SOC (%) 变化区间分别约为 0.83%~0.89%、0.48%~0.86%、0.19%~1.43%，且 4 类土壤 DOC/SOC (%) 垂向分异也不一致，这与本案例所得结果 (表 2) 基本一致。

本研究以及相关研究^[7, 20]表明：相对自然状态下的湿地土壤 LOC 和 SOC 呈显著正相关，LOC 含量、LOC/SOC (%) 分异与土壤类型 (水分) 分异有着明显对应关系；DOC 含量与 SOC 和 LOC 含量的相关性不具一致规律性，且 DOC 含量占土壤 SOC 和 LOC 含量的比例都极低。而纳帕海湿地区 4 类土壤 LOC/SOC (%) 变化于 8.6%~16.8% (表 1)，其有机碳库 80% 以上为惰性有机碳。由于湿地土壤惰性有机碳库半衰期明显高于活性有机碳库^[10]，因此可认为，在分析湿地土壤有机碳库及其变化时，LOC 含量比 SOC 含量更为合适，它既能直接表征相对自然状态下的湿地土壤活性有机碳库自身的大小，又能间接表征总有机碳库的大小；而且 LOC/SOC (%) 还可反映土壤活性有机碳库的周转速率，其在不同土壤类型间的分异与环境因子 (如水文情势) 还具有明确的对应关系。虽然 DOC 也是湿地土壤活性有机碳库中最活跃的组分类型之一，但可能受到土壤的温度变化 (如冻融作用^[20])、水文情势^[23]等多因素的影响，其在不同土壤类型间的分异不具有明显的一致性规律，对环境等变化的指示意义不如 LOC 更适合。

5 结论

(1) 纳帕海湿地区 4 类土壤间，除 AFMMS 中下层 LOC 含量接近并略高于 MMS 对应层 LOC 含量外，其它各层 SOC、LOC、DOC 含量由低到高为 AFMMS、MMS、WMS、MS。土壤剖面 (0~30cm) 由上而下 3 层间，AFMMS、MMS、WMS 的 SOC、LOC、DOC 含量均由上向下减少，表现为上层的显著富集；而 MS 的 SOC、LOC 含量呈先增后减，中层为显著富集，但其 DOC 含量为由上向下减少，也表现为表层相对富集。

(2) 纳帕海湿地区 4 类土壤 LOC/SOC (%)、DOC/SOC (%)、DOC/LOC (%) 的变化区间分别为 8.6%~16.8%、0.21%~0.80%、3.64%~8.74%，可见活性有机碳占湿地土壤有机碳的比例低、溶解有机碳所占比例更低。除受耕作强烈扰动 AFMMS 外，其它 3 类土壤 LOC 与 SOC 含量呈显著正相关，且 LOC 含量和 LOC/SOC (%) 分异与土壤类型分异有明显的对应关系，而 DOC 含量与 SOC 和 LOC 含量的相关性不具规律性。因此，相较于 SOC 和 DOC 而言，LOC 是表征湿地土壤有机碳库及其活性组分变化更为敏感和合适的指标。

(3) 本案例及其它地区的湿地相关研究表明，微地貌制约下的水文情势—植被生态分异对湿地土壤 SOC 及其活性组分的分异有着显著影响，而垦殖和排水疏干等强人为干扰下的湿地退化会带来土壤有机碳及其活性组分的明显损失。对水文情势发生显著变化的退化高寒湿地来说，无水文生态调控的撂荒式恢复，难以有效恢复湿地土壤的有机碳库。

致谢：感谢香格里拉县林业局、纳帕海湿地保护所等对本研究野外工作的支持！

参考文献：

- [1] Zou X M, Ruane H H, Fua Y, *et al.* Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 1923~1928.
- [2] Zhang G. Changes of soil labile organic carbon in different land uses in Sanjiang Plain, Heilongjiang Province. Chi-

- nese Geographical Science, 2010, 20(2): 139~143.
- [3] Ni J, Xu J, Xie Z, *et al.* Changes of labile organic carbon fractions in soils under different rotation systems. *Pedosphere*, 2004, 14(1): 103~109.
- [4] Barreto P A B, Gama-Rodrigues E F, Gama-Rodrigues A C, *et al.* Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agroforest Systems*, 2011, 81: 213~220.
- [5] 万忠梅, 郭岳, 郭跃东. 土地利用对湿地土壤活性有机碳的影响研究进展. *生态环境学报*, 2011, 20(3): 567~570.
- [6] 刘景双, 杨继松, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 5~8.
- [7] 万忠梅, 宋长春, 杨桂生, 等. 三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系. *环境科学学报*, 2009, 29(2): 406~412.
- [8] 杨继松, 刘景双. 小叶章湿地土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳的分布特征. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1544~1549.
- [9] Neff J C, Hooper D U. Vegetation and climate controls on potential CO₂, DOC and DON production in northern latitude soils. *Global Change Biology*, 2002, 8: 872~884.
- [10] Huang Yao, Sun Wenjuan, Zhang Wen, *et al.* Marshland conversion to cropland in Northeast China from 1950 to 2000 reduced the greenhouse effect. *Global Change Biology*, 2010, 16: 680~695.
- [11] 高俊琴, 欧阳华, 白军红. 若尔盖高寒湿地土壤活性有机碳垂直分布特征. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 76~79.
- [12] Maltby E, Immirzi P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils: regional land global perspectives. *Chemosphere*, 1993, 27: 999~1023.
- [13] Reddy K R, DeLaune R D. *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [14] 胡金明, 李杰, 袁寒, 等. 纳帕海湿地季节性景观格局动态变化及其驱动. *地理研究*, 2010, 29(5): 899~908.
- [15] 李杰, 胡金明, 董云霞, 等. 1994~2006 年滇西北纳帕海流域及其湿地景观变化研究. *山地学报*, 2010, 28(2): 247~256.
- [16] 肖德荣, 田昆, 杨宇明, 等. 高原退化湿地纳帕海植物多样性格局特征及其驱动力. *生态学报*, 2007, 12(6): 523~529.
- [17] 田昆. 云南高原纳帕海湿地土壤退化过程及驱动机制. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所博士学位论文, 2004.
- [18] 田昆, 常凤来, 陆梅, 等. 人为活动对云南纳帕海湿地土壤碳氮变化的影响. *土壤学报*, 2004, 41(5): 681~686.
- [19] 张昆, 田昆, 吕宪国, 等. 纳帕海湖滨草甸湿地土壤氮动态对水文周期变化的响应. *环境科学*, 2009, 30(8): 2216~2220.
- [20] Yu X F, Zou Y C, Jiang M, *et al.* Response of soil constituents to freeze-thaw cycles in wetland soil solution. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 1308~1320.
- [21] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 常凤来, 田昆, 莫剑锋, 等. 不同利用方式对纳帕海高原湿地土壤质量的影响. *湿地科学*, 2005, 3(2): 132~135.
- [23] Laik R, Koushendra Kumar, Das D K, *et al.* Labile soil organic matter pools in a calcioriented after 18 years of afforestation by different plantations. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42: 71~78.
- [24] Wang S P, Zhou G S, Gao S H, *et al.* Soil organic carbon and labile carbon along a precipitation gradient and their responses to some environmental changes. *Pedosphere*, 2005, 15(5): 676~680.
- [25] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, 165: 277~304.

Variations of soil organic C components under different degradation conditions in Napahai wetland reserve

HU Jin-ming¹, DONG Yun-xia¹, YUAN Han^{1, 2}, LI Jie¹, MA Bin-bin¹

(1. Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. College of Life Science and Technology, Honghe University, Mengzi 661100, Yunnan, China)

Abstract: There are four major types of soils in Napahai wetland reserve, northwest Yunnan, i. e., Abandoned Farmland Mesophytic Meadow Soil (AFMMS), Mesophytic Meadow Soil (MMS), Wet Meadow Soil (WMS), and Marsh Soil (MS), correspondingly their degradation degrees from high to low. Soil organic carbon (SOC), labile organic carbon (LOC) and dissolved organic carbon (DOC) contents and their correlation at three layers (1st layer 0~10 cm, 2nd layer 10~20 cm, and 3rd layer 20~30 cm) for the 4 types were investigated. Results showed that except that LOC contents at the 2nd and 3rd layers of AFMMS were slightly higher than those at corresponding layers of MMS, the orders of the contents of SOC, LOC and DOC at the other layers of the 4 soils were AFMMS < MMS < WMS < MS, which clearly reflected the degradation conditions of the 4 soils within the wetland region. From up to down in the soil profiles, soil SOC, LOC and DOC contents of AFMMS, MMS and WMS, as well as the DOC contents of MS, declined from top to down layer; the decrease between the 1st and 2nd layers was significantly larger than that between the 2nd and 3rd layers; while the contents of SOC and LOC of MS increased from the 1st to 2nd layer and then declined to the 3rd layer. LOC/SOC (%) of the 4 soils varied from 8.6 % to 16.8 % and LOC/SOC at 3 layers of the 4 soils was AFMMS > MMS > WMS > MS, which indicated dryer soil had a higher turnover rate of the biological activity of SOC. Except extremely human-disturbed AFMMS, LOC contents are significantly positive to SOC contents for the other 3 types of soils; furthermore, the variations of LOC contents and LOC/SOC (%) have correlations with soil types. Compared with SOC and DOC, LOC is more suitable to detect the changes of wetland SOC pool. The study indicated the variation of wetland hydrology and vegetation controlled by topography has significant influence on the variation of wetland SOC and its labile components; high disturbance (e. g. wetland reclamation and drainage) usually causes obvious loss of wetland SOC and its labile components. For the degraded sub-alpine wetlands like Napahai where significant hydrological changes were observed, hydro-ecological regulation measures should be taken to prevent their further degradation.

Key words: wetland soil; SOC; LOC; DOC; Napahai