

尕海湿地植被退化过程中土壤轻重组有机碳动态变化特征

许延昭, 马维伟, 李广, 吴江琪, 孙文颖

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘要: 以甘肃省甘南尕海湿地内的沼泽化草甸为研究对象, 采用野外取样和室内测试相结合的方法, 研究植被退化过程中土壤轻重组有机碳含量及动态变化。结果表明: 不同植被退化阶段 0—20 cm 土壤轻重组有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$), 表现为未退化 > 轻度退化 > 重度退化 > 中度退化; 20—100 cm 土壤轻重组有机碳受植被影响较小。整个土壤剖面重组有机碳含量表现为中度和重度退化显著高于未退化和轻度退化 ($P < 0.05$)。土壤轻重组有机碳含量均随土壤剖面下降显著降低 ($P < 0.05$)。各退化阶段沼泽化草甸土壤轻重组有机碳均呈现出明显的时间变化, 在 0—20 cm 土层, 未退化阶段轻重组有机碳表现为“降—升—降”的变化趋势, 即 5 月最高, 7 月和 9 月最低, 其他各退化阶段则在 6 月降低并趋于稳定; 20—100 cm 土层轻重组有机碳变化幅度较小。各退化阶段土壤重组有机碳动态变化较为一致, 均随时间延长呈线性下降, 不同月份之间差异显著 ($P < 0.05$)。说明植被退化导致轻重组有机碳含量下降, 重组有机碳增加, 而在植被生长过程中主要消耗轻重组有机碳, 重组有机碳相对稳定。相关分析表明, 地下生物量与土壤含水量的变化对土壤轻重组有机碳影响显著。

关键词: 沼泽化草甸; 植被退化; 轻重组有机碳; 重组有机碳

中图分类号: S153.6⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0205-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.032

Dynamic Characteristics of Soil Light and Heavy Fraction Organic Carbon During Vegetation Degradation in Gahai Wetland

XU Yanzhao, MA Weiwei, LI Guang, WU Jiangqi, SUN Wenyong

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: In order to study the contents and dynamic characteristics of soil light and heavy fraction organic carbon during the vegetation degradation process, the field and laboratory experiments were conducted in marsh meadow of Gahai wetland in Gannan state, Gansu province. The main results were as follows: The soil light fraction organic carbon contents in 0—20 cm layers varied in different stages of vegetation degradation of marsh meadow, following the order of UD (undegraded) > LD (lightly degraded) > HD (heavily degraded) > MD (moderately degraded). The soil light fraction organic carbon in 20—100 cm layer was less effected by vegetation degradation. The soil heavy fraction organic carbon contents HD and MD stages of vegetation degradation were significant higher than UD and LD in entire soil layer ($P < 0.05$). With the increasing soil layers, all the soil light and heavy fraction organic carbon contents significantly decreased. The soil light and heavy fraction organic carbon showed the obvious dynamic characteristics with time in all stages of vegetation degradation. The soil light fraction organic carbon contents gave a trend of “down-up-down” in UD stages of vegetation degradation in 0—20 cm soil layer, i. e., the highest in May, the lowest in July and September. But the contents were reduced and stabilized in June in the other stages of vegetation degradation. The variations of soil light fraction organic carbon contents was small in 20—100 cm soil layers. The variations of soil heavy fraction organic carbon contents were consistent in all stages, giving linear decreases with time, the significant difference occurred between different months ($P < 0.05$). These findings indicated that vegetation degradation could result in the decreases of soil light fraction organic carbon, and the increases of heavy fraction organic

收稿日期: 2017-10-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(41561022, 31260155); 甘肃省高等学校科研项目(2015A-069); 甘肃省农业大学校自列项目(GASU-ZL-2015-042)

第一作者: 许延昭(1993—), 男, 甘肃金昌人, 硕士研究生, 主要从事林业生态研究。E-mail: 1115106041@qq.com

通信作者: 马维伟(1980—), 男, 甘肃靖远人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: mww-007@163.com

carbon. However, the main consumption of soil organic carbon is the light fraction, and the heavy fraction is relatively stable. Correlation analysis showed that the changes of underground biomass and soil moisture contents had significant influence on soil light and heavy fraction organic carbon.

Keywords: marsh meadow; vegetation degradation; light fraction organic carbon; heavy fraction organic carbon

全球气候变暖是当前人类面临的最为严重的环境问题之一,而土壤碳库对气候变化具有深刻作用,其周转速度直接决定着全球气候变化的发展方向^[1-2]。土壤碳库根据其周转速度可分为活性碳库和惰性碳库^[3]。活性碳库相对周转速度快,稳定性差,仅占土壤有机碳总量的很小比例,但可以迅速反映土壤全碳微小变化,是研究植被变化对土壤碳库影响的主要部分^[4]。轻组有机碳是活性碳库的重要表征指标,能够通过改变土壤微生物活性影响土壤碳库周转,进而导致温室气体排放^[5-6]。与活性碳库相比,土壤惰性碳库周转速度慢,它反映的是土壤保持有机碳的能力,其主要部分为重组有机碳,结构稳定复杂,抗干扰能力强^[7]。研究轻重组有机碳的变化能够及时反映土壤有机碳库的周转和动态变化特征,并能反映土地利用方式和植被变化等对土壤质量的影响,对正确评价土壤的固碳效应和预测气候变化具有重要意义。

湿地是重要的陆地碳库,在全球碳循环中发挥着重要的作用^[8]。有研究表明,在气候变化和人类活动干扰的双重影响下,全球近 50% 的湿地出现不同程度的退化^[9],湿地退化必然会引起湿地生态系统结构转变,功能衰退,进而影响植被生产力和土壤有机碳的周转^[10]。当前,关于湿地退化机制及恢复工作限制因素的研究已经成为生态学领域的热点问题^[11]。尕海湿地作为青藏高原高寒湿地的重要组成部分,其碳库变化对青藏高原湿地具有重要指示作用^[12]。但近年来,由于气候变化和人为作用导致湿地植被出现不同程度的退化^[13-14],引起湿地原有碳库组分发生显著改变。在此背景下,湿地土壤轻重组有机碳将对植被退化如何响应,对研究本区域土壤碳库变化具有十分重要的意义。鉴于此,本文选取尕海湖周围典型的沼泽化草甸,通过分析比较不同植被退化阶段土壤轻重组有机碳含量差异及其时间动态,揭示湿地植被退化过程中土壤轻重组有机碳变化特征及转化关

系,为准确认识湿地生态系统碳循环,评价湿地土壤碳吸存潜力和精确估算湿地生态系统碳收支状况提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

尕海湿地位于甘肃省甘南州,青藏高原、黄土高原和陇南山地交汇地带,地理坐标北纬 33°58'12"—34°32'16",东经 102°05'00"—102°47'39",海拔 3 430~4 300 m。保护区内湿地面积 57 846 hm²,其中沼泽化草甸主要分布于河谷滩地和湖沼,占总面积的 88.4%,植被类型以藏嵩草(*Kobresia tibetica* Maxim.)、华扁穗草(*Blysmus sinocompressus* Tang et Wang.)、线叶蒿(*Artemisia subulata* Nakai)、蕨麻(*Potentilla anserina* L.)、散穗早熟禾(*Poa subfastigiata* Trin.)、密毛白莲蒿(*Artemisia sacrorum* var. *Messerschmidiana* (Bess.) Y. R. Ling.)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)为主^[15]。年均气温 1.2 °C;7 月温度最高,平均为 10.5 °C,最低温出现在 1 月,平均-9.1 °C,无绝对无霜期,年降水量 781.8 mm,区内干湿季分明,降雨通常集中在 7—9 月,占全年 1/2 以上,年蒸发量 1 150.5 mm。土壤类型主要包括暗色沼泽化草甸土、沼泽土和泥炭土等^[16]。

1.2 样地设置

2016 年,在本团队研究工作的基础上,采用空间序列代替时间序列方法,以现在生长季可见的原生湿地为中心向外延伸的办法,选择地势相对平缓坡向一致的地段,根据植被组成、植被总覆盖度、地表裸露面积等特征,将沼泽化草甸划分为未退化(UD)、轻度退化(LD)、中度退化(MD)及重度退化(HD)4 种退化类型,并在每个退化类型区域上随机布设 5 m×5 m 定位研究样地,重复 3 次,重复之间间隔大于 10 m,共计 12 块样地,并围栏以避免人畜的干扰。样地植物和土壤基本特征见表 1^[17]。

表 1 样地基本情况

退化类型	优势种组成	盖度/%	平均高度/cm	地上生物量(干重)/(g·m ⁻²)	容重/(g·cm ⁻³)	有机质含量/(g·kg ⁻¹)
UD	藏嵩草+蕨麻+散穗早熟禾	90~96	16.31	373.81	0.36	65.82
LD	苔草+冷蒿+棘豆	75~90	13.33	328.28	0.39	65.45
MD	密毛白莲蒿+线叶蒿草	30~70	7.61	275.39	0.61	54.39
HD	由于严重退化,几乎无植被				0.56	53.63

1.3 土壤采样与样品分析

在 2016 年 5—9 月的每月中旬在研究样地内采

用“蛇”形布点法(7 点),用土钻在多样地分层取 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 的

土样,相同土层的土壤组成1个混合土样,四分法取部分,去掉植物残根和石块,带回实验室自然风干后过2 mm筛保存,共24份土样。土壤轻重组有机碳测定参照Janzen等^[18]的分离方法,分离出的轻重组研磨过0.15 mm筛后,采用外加热—重铬酸钾氧化容量法分别测定。

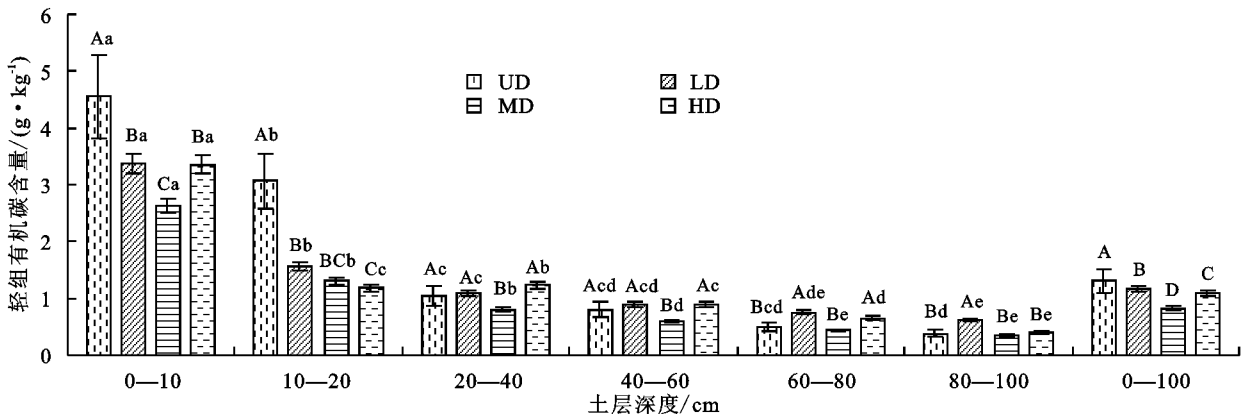
1.4 数据处理与分析

采用Excel 2010制图,SPSS 19.0软件进行数据统计分析。采用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)分析不同退化程度各变量的差异显著性($\alpha=0.05$)。文中各土层土壤轻、重组有机碳含量为5—9月的均值,各月轻、重组有机碳含量为所取土层的加权平均值,权重为土层厚度所占比例,Pearson相关系数法分析各因子之间相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同植被退化阶段沼泽化草甸土壤轻组有机碳含量

由图1可以看出,植被退化对杂海湿地土壤轻组



注:图中不同大写字母表示不同退化程度间存在差异($P<0.05$);不同小写字母表示不同土层间存在差异($P<0.05$)。下同。

图1 不同植被退化阶段沼泽化草甸土壤轻组有机碳含量

2.2 不同植被退化阶段沼泽化草甸土壤重组有机碳含量

由图2可以看出,不同退化程度沼泽化草甸土壤重组有机碳含量差异显著,平均值为HD(12.99 g/kg)>MD(12.96 g/kg)>UD(12.36 g/kg)>LD(12.07 g/kg),随植被退化加剧其含量显著增加($P<0.05$)。

在0—60 cm土壤剖面,植被退化导致重组有机碳呈波动性变化,随土层加深,各土层重组有机碳含量变幅分别为2.94,1.70,1.56,1.97 g/kg;而在60—80 cm土层各退化阶段趋于一致,80—100 cm土层MD、HD显著高于UD和LD阶段,说明植被退化会导致深层土壤有机碳向稳定碳库周转。从整个剖面0—100 cm土层来看,土壤重组有机碳含量为6.51~18.60 g/kg,垂直分布特征与轻组有机碳类似;0—10 cm土层重组有机碳平均含量为18.58 g/kg,比其他土层高出2.38%~132.14%。

有机碳影响显著。各退化程度0—100 cm土层轻组有机碳含量均值为UD(1.31 g/kg)>LD(1.16 g/kg)>HD(1.09 g/kg)>MD(0.83 g/kg),总体随植被退化加剧逐渐减小,但重度退化略有升高。说明植被重度退化加速了土壤有机碳向活性碳库的周转,导致轻组有机碳积累。

在0—10,10—20 cm土层,随植被退化加剧,轻组有机碳含量显著下降,变化趋势与整个剖面一致;在20—100 cm土层,各退化阶段土壤轻组有机碳含量在0.34~1.24 g/kg波动,受植被变化影响较小。表明植被退化对土壤表层轻组有机碳影响更显著。轻组有机碳存在明显的表聚性;在0—10 cm土层富集,含量均值为3.48 g/kg,随土层深度的增加呈递减趋势,不同土层间差异显著($P<0.05$)。这主要是因为沼泽化草甸植被地上部分的枯萎和凋落物归还主要沉积在土壤表面,为轻组有机质提供了丰富的来源,而凋落物对10—100 cm土层的影响逐渐减弱,植物根系和微生物残体成为轻组有机碳的主要来源。

2.3 土壤轻组有机碳含量的时间动态

由图3可以看出,各退化阶段沼泽化草甸土壤轻组有机碳呈现出明显的季节变化。在0—10,10—20 cm土层,UD阶段土壤轻组有机碳呈现出“降—升—降”的变化趋势,5月最高,7月和9月最低,8月略有上升;其他退化阶段则在6月降低并趋于稳定。在20—40,40—60 cm土层轻组有机碳变化幅度减小,在0.16~2.97 g/kg波动,其中UD、LD和MD阶段轻组有机碳在5月最高,7月降低并趋于稳定,HD阶段呈双峰曲线。60—80,80—100 cm土层轻组有机碳季节变化特征基本相同,均随时间延长呈波动性变化,变幅分别为1.26,1.54 g/kg。从0—100 cm整个土壤剖面来看,UD、LD和HD阶段均呈双峰曲线,5月UD和LD轻组有机碳含量显著高于MD和HD,7月迅速降低,8月小幅上升,9月降至最低,且各退化阶段差异不显著($P<0.05$);MD阶段随时间延长

波动性下降。

2.4 土壤重组有机碳含量时间动态

由图 4 可以看出, 杂海沼泽化草甸各退化阶段土壤重组有机碳时间变化规律较为一致, 在 0—10, 10—20, 20—40, 40—60 cm 土层, 各退化阶段重组有机碳均随时间变化线性下降, 不同月份之间差异显著

($P < 0.05$)。60—80, 80—100 cm 土层, 各退化阶段大体呈单峰曲线, 在 6 月份略有上升, 7—9 月线性下降。在 0—100 cm 整个土壤剖面, 不同月份重组有机碳含量平均值为 5 月(19.18 g/kg) > 6 月(18.26 g/kg) > 7 月(10.93 g/kg) > 8 月(8.26 g/kg) > 9 月(6.34 g/kg), 不同月份之间差异显著($P < 0.05$)。

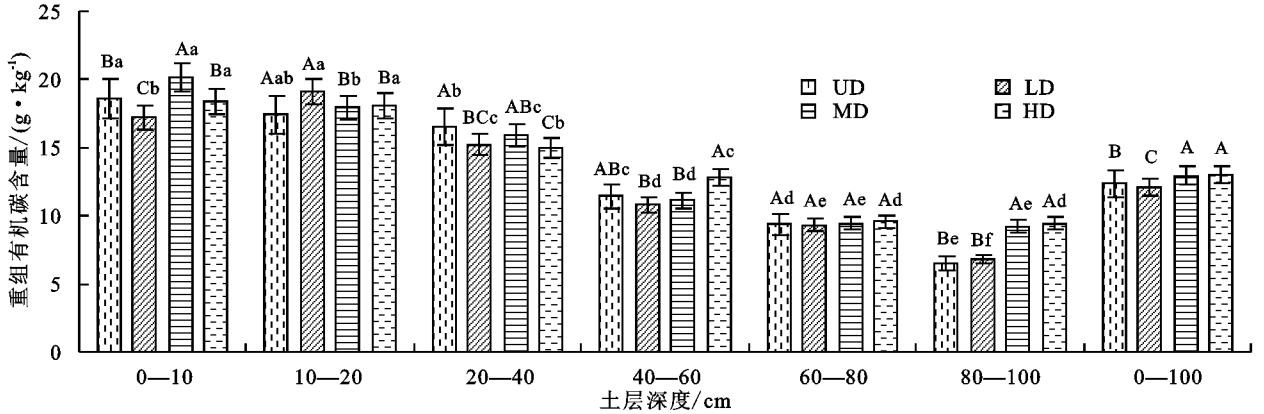
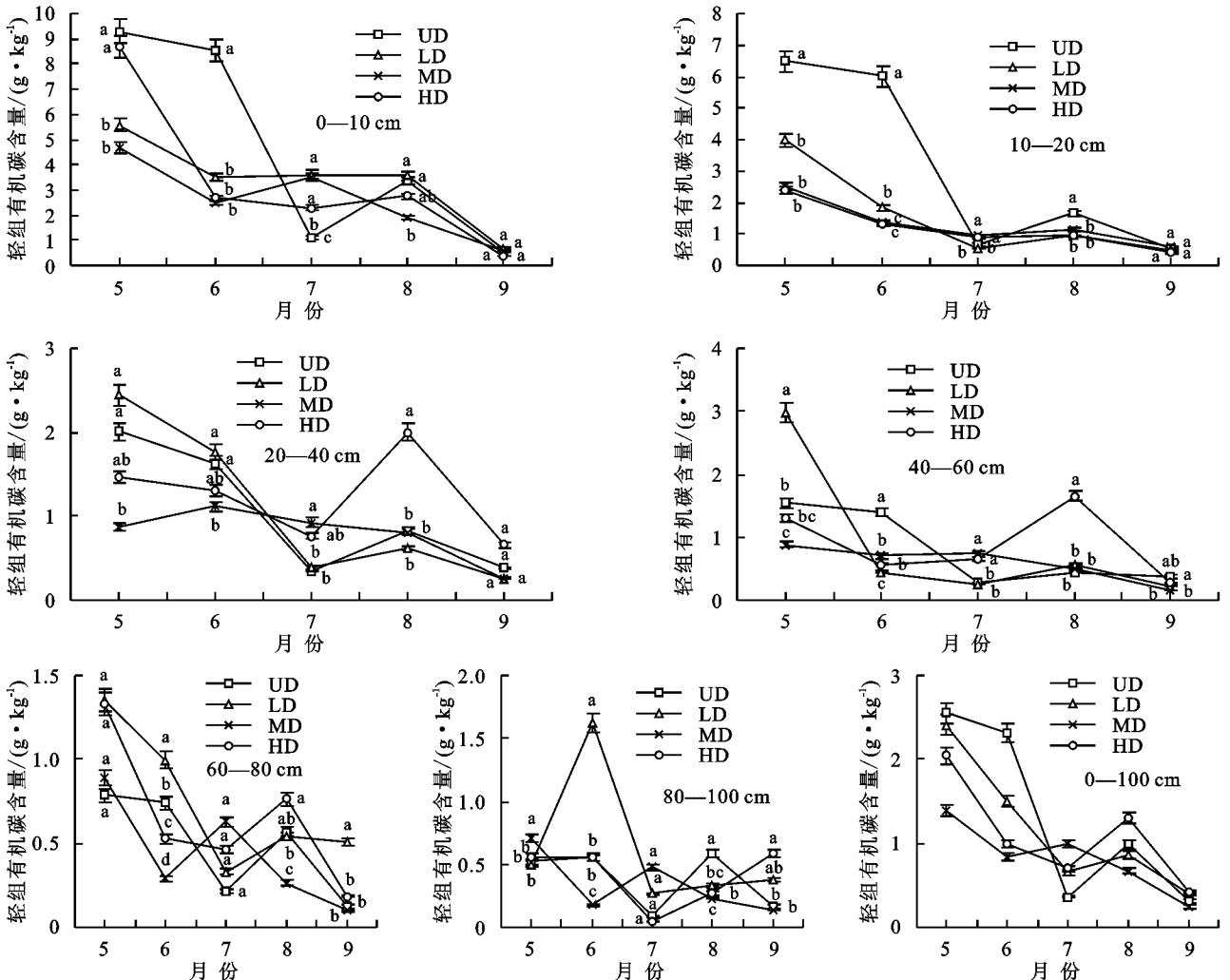


图 2 不同植被退化阶段沼泽化草甸土壤重组有机碳含量



注: 图中不同小写字母表示不同退化程度间存在差异($P < 0.05$)。下同。

图 3 土壤轻组有机碳含量的时间动态

2.5 土壤轻重组有机碳的影响因子

由表 2 可知, 土壤轻组有机碳与地上生物量、地下生物量、土壤含水率呈正相关, 与重组有机碳呈显

著负相关;重组有机碳与各指标均为负相关关系,而轻重组有机碳均与地下生物量和土壤含水率显著相

关,说明地下生物量和土壤含水率的变化对轻重组有机碳有更显著的影响。

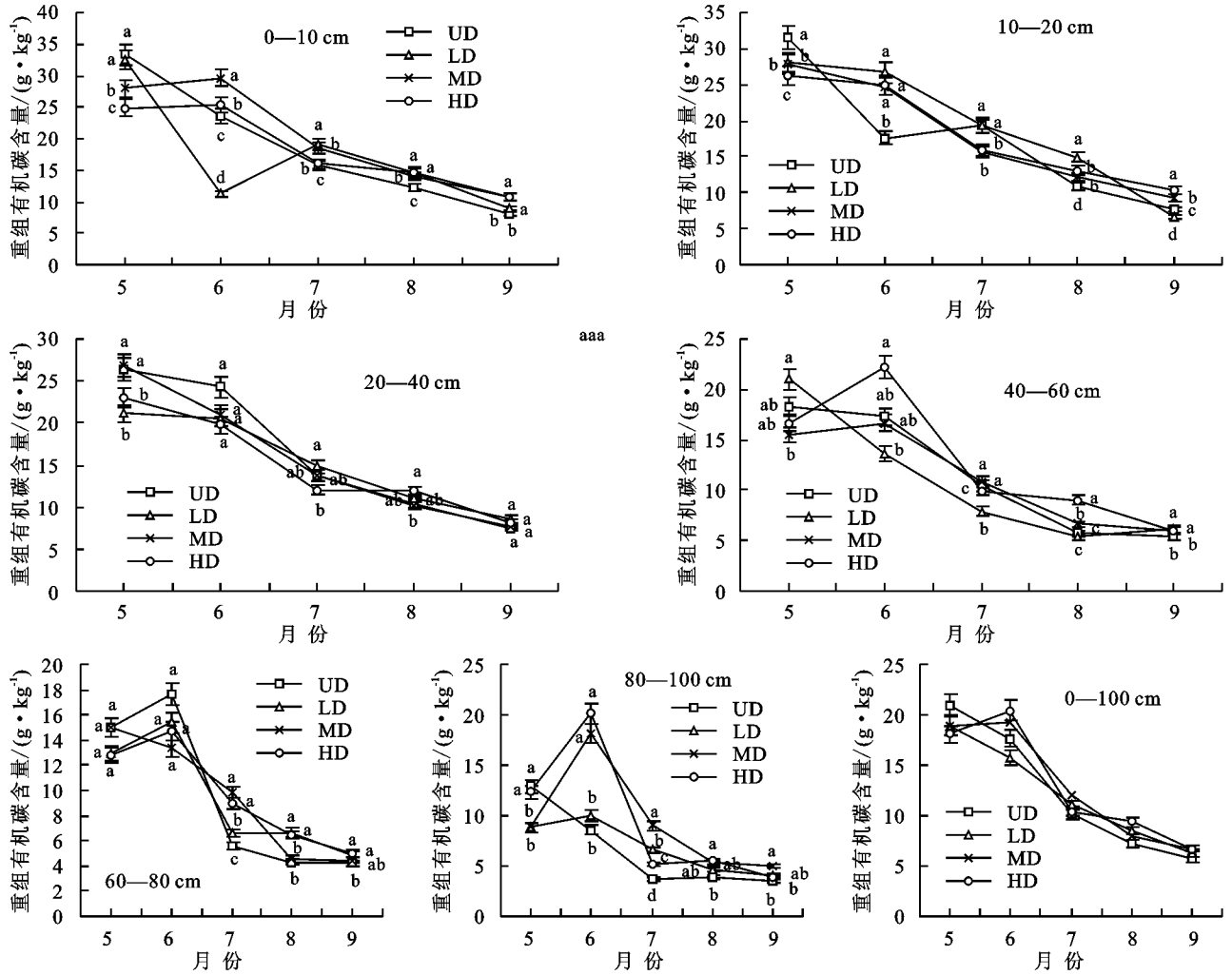


图4 土壤重组有机碳含量的时间动态

表2 土壤轻重组有机碳与各指标相关性

有机碳种类	重组有机碳	地上生物量	地下生物量	土壤含水率
轻重组有机碳	-0.597*	0.434	0.797*	0.758**
重组有机碳	1	-0.350	-0.754**	-0.717**

注: **表示相关性在0.01水平; *表示相关性在0.05水平。

3 讨论与结论

3.1 植被退化对杂海沼泽化草甸轻重组有机碳含量的影响

由于不合理的开发利用和过度放牧所引起的植被退化,已经导致杂海湿地土壤质量的下降和有机碳的流失^[17]。植被退化会降低湿地植物生产力,影响轻重组有机质的积累和分解,进而影响土壤轻重组有机碳含量^[19]。轻重组有机碳主要来源于未分解或半分解状态的植物根系和植物残体,还有新鲜的凋落物和微生物残体^[20],重组有机碳是主要存在于有机无机复合体中的有机质态碳,它与不同粒级的矿物紧密结合,性质稳定^[5]。本研究表明,杂海沼泽化草甸土壤轻重组有机碳含量随植被退化的加剧呈先降低后升高

趋势,未退化沼泽化草甸土壤轻重组有机碳含量明显高于其他退化阶段,这与刘育红等^[21]、王文颖等^[22]的研究结果一致。由于随植被退化加剧植物生物量减少,植被根系和凋落物归还量随之降低,土壤轻重组有机碳来源减少。本研究中重度退化沼泽化草甸轻重组有机碳含量为1.09 g/kg,高于中度退化阶段,这可能是由于在此退化阶段土壤微生物数量较少,分解缓慢导致轻重组有机质的积累,加之此退化阶段几乎无植被覆盖,植物对表层土壤轻重组有机碳直接吸收量的下降也是原因之一^[23]。而植被退化对土壤重组有机碳含量也有一定影响,刘玉红等^[21]对三江源高寒草原的研究认为土壤重组有机碳随植被退化加剧逐渐减小,本研究结果与其恰好相悖,表现为中度和重度退化土壤重组有机碳含量显著高于其他阶段,由于重组有机碳与不同粒级的土壤其结合紧密程度不同^[24],而杂海湿地土壤随植被退化孔隙度减小,黏粒增加^[15],而此退化阶段土壤微生物分解能力较弱,土壤颗粒对重组有机碳的保护作用加强,导致重组有机碳含量上升。

因此, 沼泽湿地在初期受到干扰后, 土壤有机碳会从活性碳库向惰性碳库周转, 以维持碳库稳定。

土层深度也是影响土壤轻重组有机碳含量分布变化的重要因素。本研究中不同退化阶段沼泽化草甸土壤轻重组有机碳含量均随土层的加深而显著降低 ($P < 0.05$), 这与雷利国等^[25]的研究结果一致。这是由于随土层深度的增加, 植被根系含量减少, 凋落物输入降低, 导致土壤轻组有机碳来源减少, 同时土壤温度、含水量降低, 土壤结构变差, 微生物活动减弱, 数量减少^[26], 轻组有机碳含量随之降低。研究结果还表明, 土壤轻组有机碳富集在土壤表层 (0—20 cm), 植被退化对此土壤剖面轻组有机碳含量影响显著, 这是因为沼泽化草甸植被优势种为矮篙草, 其根系主要分布于土壤 0—20 cm 土层^[27], 此土层土壤微生物较为活跃, 丰富了土壤轻组有机碳来源, 故导致此土壤剖面轻组有机碳含量较高。对于根区以下的土层 (20—100 cm) 而言, 表土层可溶性有机碳可能通过渗漏水垂直向下淋溶和淀积, 成为土壤轻组有机碳的主要来源^[28]。因此, 轻组有机碳在土壤的垂直分布主要反映了动植物和微生物残体在土壤剖面的分布状况^[29-30]。而重组有机质腐殖化程度较高, 随土壤剖面下降, 有机碳转化过程中分解速度逐渐变慢^[31], 而且轻组有机碳大量减少, 而部分重组有机碳是从轻组有机碳逐渐转化来的, 故其垂直分布特征与轻组有机碳类似。

3.2 土壤轻组有机碳和重组有机碳含量的时间动态

本研究中, 在 0—20 cm 土层, 未退化沼泽化草甸土壤轻组有机碳含量从 5—9 月呈现出“降—升—降”的变化趋势, 而其他退化阶段则在 6 月降低并趋于稳定。未退化阶段沼泽化草甸植被在 7 月生长旺盛, 对养分消耗较大, 而易分解的轻组有机质部分是植被养分的重要来源, 植物生长发育导致轻组有机碳消耗速度加快; 8 月植被加大了其地下部分碳的分配比例来促进根系的生长^[32], 根系生物量得到迅速增加, 而根系是土壤轻组的主要来源, 并且此时根系代谢非常活跃, 从而使根系分泌物增加, 轻组有机碳含量提高^[33]; 而轻度和中度退化阶段的苔草和蒿类植被在 6 月已经进入生长后期, 故轻组有机碳在 6 月下降并趋于稳定。重度退化阶段土壤微生物结构已发生较大改变^[23], 具有较强的分解能力, 导致轻组有机碳含量下降。各退化阶段沼泽化草甸土壤重组有机碳含量变化趋势较为一致, 大体均随时间推移而呈波动性降低, 这是因为从 5—9 月, 植被生长所需养分大部分由土壤活性碳库提供, 重组有机碳性质稳定, 植被对其分解利用程度极小, 而土壤温度、湿度和微生物的分解作用是导致随时间的延长其含量下降的主要因素。

对于未退化、轻度退化和中度退化阶段, 在植被生长过程中可能有部分重组有机碳转化为植物生长可利用的碳; 而重度退化阶段鼠害严重, 有大量老鼠穴居, 老鼠的频繁活动导致土壤变得疏松, 对重组有机碳的保护作用降低, 这可能是导致重组有机碳含量下降的原因之一。在 6 月 60—100 cm 土壤重组有机碳含量有小幅上升, 其原因可能是 6 月的持续降水造成水位上升, 限制了根系分解向土壤中的碳输入, 较稳定性碳组分被分解木质素细菌或真菌等微生物厌氧分解, 在土壤剖面中转移或被矿物质结合^[34], 导致重组含碳量上升。而重组有机碳含量的季节动态其详细驱动机制还有待进一步研究。

高寒草甸土壤碳密度高, 所以草甸发生严重退化后, 经土壤流失的碳数量绝对值较大。由于沼泽湿地表层和亚表层土壤的粗骨性 (含砾石 5%~30%, 且颗粒以细沙粒和粗粉粒为主, 黏粒较少^[31]), 导致该层土壤矿质对有机质的保护作用较弱, 一旦草甸遇到更为严重的干扰发生逆行演替, 将不可避免的造成轻重组中有机碳的流失, 进而导致温室气体的大量排放。因此, 制定适宜的植被恢复措施, 减缓和防止草甸退化对整个高寒湿地生态系统显得尤为重要。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384-393.
- [3] 高菲, 姜航, 崔晓阳. 小兴安岭两种森林类型土壤有机碳库及周转 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1913-1920
- [4] 王发刚, 王启基, 王文颖, 等. 土壤有机碳研究进展 [J]. 草业科学, 2008, 25(2): 48-52.
- [5] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates [J]. Advances in Soil Science, 1992, 20: 1-90.
- [6] Hassink J. Decomposition rate constants of size and density fraction of soil organic matter [J]. Soil Science Society of Am Journal, 1995, 59: 1631-1635.
- [7] 张文敏, 吴明, 王蒙, 等. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征 [J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1351-1360.
- [8] 黎明, 李伟. 湿地碳循环研究进展 [J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(1): 116-123.
- [9] O'connell M J. Detecting, measuring and reversing changes to wetland [J]. Wetlands Ecology and Management, 2003, 11: 397-401.
- [10] Lal R, Fausey N R, Eckert D J. Land use and soil management effects on emissions of radiatively active gases from two soils in Ohio [C] // Lal R, Kimble J, Kimble J, et al. Soil management and Greenhouse

- Effect. Florida: CRC Press, 1995: 41-59.
- [11] 逢好胜. 大兴安岭南坡植被退化对土壤微生物群落多样性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [12] 连树清, 王辉, 马维伟. 尕海湿地泥炭土土壤理化性质[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(3): 128-132.
- [13] 刘帆, 刘晖, 徐凌霄, 等. 青藏高原东部尕海湿地种子库沿水位梯度的分布格局[J]. 科学通报, 2013, 58(14): 1332-1339.
- [14] 马维伟, 王辉, 王跃思, 等. 甘南尕海泥炭沼泽地退化过程土壤特征和水源涵养功能的变化[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1531-1541.
- [15] 黄蓉, 王辉, 马维伟, 等. 尕海洪泛湿地退化过程中土壤理化性质的变化特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 221-227.
- [16] 魏文彬, 李婷, 李俊臻. 尕海湿地生态系统的保护与管理[J]. 湿地科学与管理, 2010, 6(3): 32-34.
- [17] 马维伟, 王辉, 李广, 等. 甘南尕海湿地不同植被退化阶段土壤有机碳含量及动态[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 254-259.
- [18] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1799-1806.
- [19] 王合云, 董智, 郭建英, 等. 不同放牧强度对大针茅草原土壤全土及轻组碳氮储量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 101-106, 207.
- [20] 林丽, 曹广民, 李以康, 等. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草沼泽化草甸碳过程的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4012-4018.
- [21] 刘育红, 魏卫东, 温小成, 等. 三江源退化高寒草原土壤有机碳组分分布研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1370-1376.
- [22] 王文颖, 王启基, 鲁子豫. 高寒草甸土壤组分碳氮含量及草甸退化对组分碳氮的影响[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(5): 647-654.
- [23] 蔡晓布, 彭岳林, 于宝政, 等. 不同状态高寒草原主要土壤活性有机碳组分的变化[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 315-323.
- [24] 魏朝富, 谢德体, 陈世正. 紫色水稻土有机无机复合与土粒团聚的关系[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 70-77.
- [25] 雷利国, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2669-2677.
- [26] 陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 等. 不同干扰对黄土高原典型草原土壤有机碳的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(2): 298-311.
- [27] Barrios E, Buresh R J, Sprent J I. Organic matter in soil particle size and density fractions from maize and legume cropping systems [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(2): 185-193.
- [28] 李洁, 盛浩, 周萍, 等. 亚热带丘陵几种林地土壤剖面有机碳和轻组有机碳的分布[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 851-857.
- [29] 谢锦升, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 退化红壤植被恢复后土壤轻组有机质的季节动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 557-563.
- [30] Barrio E, Kwesiga F, Buresh R J, et al. Light fraction soil organic matter and available nitrogen following trees and maize [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(3): 826-831.
- [31] 马维伟, 王辉, 王修华, 等. 甘南尕海不同湿地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 194-198, 220.
- [32] Jobbag E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [33] 黄小娟, 郝庆菊, 吴艳. 紫色水稻土轻组有机质的季节动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1579-1585.
- [34] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 290-297.
- (上接第 204 页)
- [22] Verchot L V, Dutaur L, Shepherd K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils [J]. Geoderma, 2011, 161(3/4): 182-193.
- [23] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. European Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [24] Bidisha M, Joerg R, Yakov K. Effects of aggregation processes on distribution of aggregate size fractions and organic C content of a long-term fertilized soil [J]. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(6): 365-370.
- [25] 孙艳, 王益权, 刘军, 等. 日光温室蔬菜栽培对土壤团聚体稳定性的影响: 以陕西省泾阳县日光温室土壤为例[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 168-174.
- [26] Guan S, Dou S, Chen G, et al. Isotopic characterization of sequestration and transformation of plant residue carbon in relation to soil aggregation dynamics [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96(3/4): 18-24.
- [27] 苏慧清, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 924-932.
- [28] 邢旭明, 王红梅, 安婷婷, 等. 长期施肥对棕壤团聚体组成及其主要养分赋存的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 267-273.