

# 尕海湿地不同植被退化阶段凋落物分解及其有机碳动态

马瑞<sup>1</sup>, 马维伟<sup>1</sup>, 李广<sup>1,2</sup>, 吴江琪<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2. 兰州大学 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730020)

**摘要:**以甘南尕海湿地不同植被退化阶段的泥炭沼泽和沼泽化草甸为研究对象,通过2013、2014两年凋落物试验分析,研究了不同植被退化过程中凋落物的分解速率及有机碳动态变化特征。结果表明:随着植被退化演替,凋落物有机碳浓度、碳绝对含量和分解速率显著下降( $p < 0.05$ )。分解速率从6—9月随时间变化均呈现下降趋势,相应的分解速率在0.001 3~0.009 /d之间,分解速率最大的为2013年泥炭沼泽未退化PI(0.009 /d),最小为2014年沼泽化草甸中度退化SⅢ(0.001 3 /d)。泥炭沼泽凋落物中有机碳平均浓度未退化PI(515.07 g/kg) > 退化PⅡ(489.62 g/kg),沼泽化草甸凋落物有机碳平均浓度未退化SI(541.26 g/kg) > 轻度退化SⅡ(488.28 g/kg) > 中度退化SⅢ(456.01 g/kg),且两年的凋落物碳绝对含量均减小,即发生净释放;凋落物分解速率及有机碳浓度、碳绝对含量都随植被退化加深而减小。

**关键词:**尕海湿地; 退化阶段; 凋落物; 分解速率; 有机碳

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0029-06

## Litter Decomposition and Dynamics of Organic Carbon in Degraded Vegetation of Gahai Wetland

MA Rui<sup>1</sup>, MA Weiwei<sup>1</sup>, LI Guang<sup>1,2</sup>, WU Jiangqi<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** In this study, peat swamps and swamp meadows with different degrees of degradation in Gannan Gahai wetland area were selected to explore the decomposition rate and the organic carbon content of litter during different vegetation degradation process in two years, based on field sampling and laboratory analysis. The results showed that the organic carbon content and decomposition rate of litter decreased significantly with the degradation of vegetation ( $p < 0.05$ ). The decomposition rate decreased from June to September, and the maximum of it was observed in the undegraded peat swamp PI (0.009 /d) in 2013, and the minimum was found in the moderately degenerate swamp meadow SⅢ (0.001 3 /d) in 2014. Average content of organic carbon in litter of peat swamp decreased in the order: ungraded PI (515.07 g/kg) > degraded PⅡ (489.62 g/kg), mean concentration of organic carbon in litter of swamp meadow decreased in the order: ungraded SI (541.26 g/kg) > lightly degraded SⅡ (488.28 g/kg) > moderately degraded SⅢ (456.01 g/kg), and the absolute carbon content of litter decreased in the two years, indicating that it occurred net release. The litter decomposition rate, organic carbon content and absolute carbon content decreased with the vegetation degradation process.

**Keywords:** Gahai wetland; vegetation degradation; litter; decomposition rate; organic carbon

湿地凋落物是湿地生态系统的重要组成部分,其分解过程在湿地生态系统营养循环中起重要作用。凋落物分解不仅是湿地生态系统养分循环的一个重要组成部分,而且也是湿地生态系统碳循环过程中一个极为重要的环节,它连接着生物有机体的合成(光合作用),分解(有机物的分解)及营养元素的释放<sup>[1]</sup>。

通过凋落物分解,营养元素归还土壤并不断被植物循环利用,来维持生态系统的平衡,维持大气中二氧化碳的浓度<sup>[2-3]</sup>,凋落物分解的速率、强度和时节律也在很大程度上影响了生态系统的固碳速率、固碳潜力及动态<sup>[4]</sup>。因此,湿地凋落物分解及其养分变化规律不仅是湿地生态系统动态变化过程与机理研究

收稿日期:2016-11-17

修回日期:2016-12-27

资助项目:国家自然科学基金(41561022,31260155);甘肃省自然科学基金(1506RJZA015,1308RJZA256);甘肃省高等学校科研项目(2015A-069);甘肃省农业大学校自列课题(GASU-ZL-2015-042)和林学院中青年科技项目

第一作者:马瑞(1991—),女,内蒙古赤峰市宁城县人,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:mr\_797@sina.com

通信作者:李广(1971—),男,内蒙古乌兰察布市化德县人,博士,教授,主要从事农业系统工程研究。E-mail:lig@gsau.edu.cn

中的一个重要问题,也是全球气候变化生态研究的热点之一。

尕海湿地位于青藏高原的东部,是中国独有青藏高原湿地的重要组成部分,是维系甘南高原生态安全的重要屏障。因地处高寒区域、常年冷湿环境使得尕海湿地生态系统积累了大量的有机物质,成为青藏高原自然生态系统最为重要的碳库之一,对区域碳循环以及大气温室气体平衡有着重要的功能作用<sup>[5]</sup>。近年来,受气候变暖、过度放牧及湿地排水疏干等人为因素的影响,尕海湿地退化问题较为严重<sup>[6]</sup>。目前,国内有关湿地凋落物分解及其养分动态研究主要集中在沼泽、河流、湖泊湿地,地域上主要集中在三江平原<sup>[7]</sup>,对凋落物分解速率的研究主要集中在单一湿地类型<sup>[8]</sup>,而针对地处特殊的高寒环境条件下,湿地不同植被退化阶段凋落物有机碳浓度及有机碳释放数量的动态变化研究较少<sup>[9]</sup>。因此,本文选择具有明显植被退化梯度的尕海湿地两种典型湿地(泥炭沼泽和沼泽化草甸)为研究对象,研究不同植被退化阶段下湿地凋落物早期分解的过程和有机碳释放动态,旨在为特殊高寒环境下湿地生态系统凋落物分解过程与养分变化机理研究提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

尕海湿地位于青藏高原东北边缘甘肃省甘南藏族自治州境内(102°05′00″—102°29′45″E, 33°58′12″—34°30′24″N),海拔3 430~4 300 m,属于尕海—则岔国家级自然保护区。尕海湿地中,沼泽化草甸面积51 160 hm<sup>2</sup>,泥炭沼泽面积10 429 hm<sup>2</sup>,泥炭层厚

度为1.94 m,泥炭储量2亿m<sup>3</sup>。属于高原亚寒带季风气候,年平均气温1.2℃,最高气温以7月最高,平均为10.5℃;最低气温出现在1月份,平均为-9.1℃;年平均降水量781.8 mm,主要集中在7—9月,占全年降水量的56.2%,年蒸发量为1 150.5 mm<sup>[10]</sup>。土壤类型主要包括暗色草甸土、沼泽土和泥炭土等<sup>[11]</sup>。植物优势种类为乌拉苔草(*Carex meyeriana*),唐松草(*Thalictrum* L.),线叶蒿(*K. capilifolia*),问荆(*Equisetum arvense* L.),珠芽蓼(*Polygonum viviparum* L.),蕨麻(*Potentilla anserina* L.),散穗早熟禾(*Poa subfastigiata* Trin.),青藏苔草(*Carex moorcroftii*),棘豆(*Oxytropis* sp.)等。

### 1.2 样地设置

在对尕海湿地资源实地调查和相关资料分析基础上<sup>[12]</sup>,选择具有明显植被退化程度的泥炭沼泽(贡巴点)和沼泽化草甸(尕海湖周边)两种典型湿地为研究对象,采用空间序列代替时间序列的研究方法,参考《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》(GB 19377—2003)以及相关湿地分级指标研究<sup>[13]</sup>,依据植被组成、植被总覆盖度、地表裸露面积和地下水位等特征,将泥炭沼泽划分为未退化(PI)和退化(P II)类型;沼泽化草甸划分为未退化(SI),轻度退化(S II),中度退化(S III)及重度退化(S IV)4种退化类型,由于S IV的沼泽化草甸地上植被退化严重,几乎无枯落物,故本试验未对重度退化沼泽化草甸进行研究。试验涉及的每个退化阶段湿地类型随机设置10 m×10 m定位研究样地,样地基本情况见表1。在每个研究样地分别设置面积1 m×1 m的3个样方,于2013年、2014年对每个退化阶段类型进行凋落物分解试验。

表1 研究样地基本情况

湿地类型	退化阶段	海拔/m	植被盖度	平均植株高/cm	基本情况
泥炭沼泽	未退化(PI)	3612	90%以上	9.42	沼泽植物为优势种,几乎无裸斑,常年积水,地下水位15~20 cm
	退化(P II)	3590	40%~70%	8.66	沼泽植物为主要伴生种,地表裸露面积10%~20%,无积水,地下水位30~50 cm
沼泽化草甸	未退化(SI)	3477	90%以上	16.31	湿生植物为优势种,凋落物和根系较多,几乎无裸斑,有较浅的季节性积水,地下水位20~40 cm
	轻度退化(S II)	3478	75%~90%	13.33	湿生植物为主要伴生种,地表裸露面积5%~10%,无积水,地下水位40~70 cm
	中度退化(S III)	3484	30%~70%	7.61	湿生植物为一般伴生种或偶见种,且出现一些毒草,地表裸露面积10%~30%,无积水,地下水位70 cm以下
	重度退化(S IV)	3486			植被很稀疏,仅有零星的旱生植物出现,地表裸露面积90%以上

### 1.3 凋落物采样与样品分析

不同类型及退化程度的湿地优势种不同(表1),其凋落物也存在差异。采集各湿地类型中自然凋落且物质组成基本一致的凋落物,采用分解袋法测定其

分解速率,分解袋的孔径为0.5 mm,规格为15 cm×15 cm。凋落物于2012年11月末进行收集,为了降低冬季积雪压覆对凋落物破碎作用的影响,在表1中的不同植被退化阶段类型中,取样方中的部分凋落物

放入分解袋内, 2013 年每个分解袋装 20 g(烘干重), 2014 年每个分解袋内装 15 g(烘干重), 于 2013 年 5 月和 2014 年 5 月将装好的分解袋随机投放到各不同植被退化阶段类型的样地内, 每个样方内放置 4 个分解袋, 以竹签固定, 并埋杆做好标记。分解袋投放后的 30, 60, 90, 120 d 分别在每个样方内收集 1 个分解袋, 即在每个植被退化阶段类型的样地内收获 9 个凋落物分解袋。将分解袋按样方分别装入自封袋中带回实验室。凋落物投放后分解袋采样于 2013 年 6—9 月和 2014 年 6—9 月每月中旬各进行 1 次, 用于凋落物分解试验。对每次取回的凋落物样品, 清除其表面泥土颗粒、植物根系、苔藓类植物和无脊椎动物等杂质, 放入 70℃ 烘干至恒重并称重后, 将每组的重复样品混合、磨碎, 过 0.25 mm 筛, 用于样品中有机碳含量的测定, 凋落物有机碳含量用重铬酸钾氧化容量法<sup>[14]</sup>。凋落物残留物中碳绝对含量为测定的浓度与相应凋落物残留质量的乘积。

#### 1.4 数据处理

应用 Olson<sup>[15]</sup> 指数衰减模型  $\ln(x_t/x_0) = -kt$ , 对分解残留率  $X_t/X_0$  进行自然对数转换, 线性拟合求得分解速率常数  $k(d^{-1})$ 。  $X_0$  表示凋落物的初始量,  $X_t$  表示经时间  $t$  后的分解残留量,  $t$  为分解时间,

$k$  为分解速率常数(表 2)。

本文采用 Excel 2003 和 SPSS 21.0 软件进行数据统计及相关性分析, 采用单因素方差分析及 LSD 多重比较进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 瓯海湿地不同植被退化阶段类型凋落物的分解动态

2013 及 2014 两年中, 120 d 的分解期间, 湿地凋落物分解速率随退化程度加深而减小, 分解 120 d 后, 2013 年两种湿地类型凋落物的干物质分别损失初始量的 85.85%(P I), 75.17%(P II), 83.45%(S I), 71.63%(S II), 72.61%(S III); 2014 年凋落物干物质损失初始量分别为 44.36%(P I), 56.95%(P II), 48.37%(S I), 45.46%(S II), 36.18%(S III)(图 1), 即泥炭沼泽和沼泽化草甸凋落物分解失重率依次减小。其相应的分解速率为 0.001 3~0.009 /d, 95% 分解需要的时间分别为 0.57 a, 0.84 a, 0.77 a, 1.42 a, 2.39 a, 2.02 a, 2.26 a, 3.34 a, 3.91 a 和 5.61 a(表 2)。相同年份泥炭沼泽和沼泽化草甸未退化阶段的凋落物分解速率明显高于泥炭沼泽退化、沼泽化草甸轻度退化和中度退化凋落物分解速率( $p < 0.01$ )。

表 2 凋落物物质残留率自然对数( $y$ )与分解天数( $t$ )的回归方程及其相应参数

湿地类型	退化类型	方程	$k$	$R^2$	$p$	分解时间/d	$t_{0.95}/a$
2013 泥炭沼泽	未退化(P I)	$y = -1.1266 - 0.009t$	0.009	0.9851	$< 0.01$	120	0.57
	退化(P II)	$y = -0.3471 - 0.0086t$	0.0086	0.9947	$< 0.01$	120	0.84
2013 沼泽化草甸	未退化(S I)	$y = -0.9834 - 0.0072t$	0.0072	0.9677	$< 0.01$	120	0.77
	轻度退化(S II)	$y = -0.8232 - 0.0042t$	0.0042	0.9230	$< 0.01$	120	1.42
	中度退化(S III)	$y = -0.9902 - 0.0023t$	0.0023	0.9275	$< 0.01$	120	2.39
2014 泥炭沼泽	未退化(P I)	$y = -0.3407 - 0.0036t$	0.0036	0.9617	$< 0.01$	120	2.02
	退化(P II)	$y = -0.4424 - 0.0031t$	0.0031	0.9600	$< 0.01$	120	2.26
2014 沼泽化草甸	未退化(S I)	$y = -0.4328 - 0.0021t$	0.0021	0.9489	$< 0.01$	120	3.34
	轻度退化(S II)	$y = -0.4288 - 0.0018t$	0.0018	0.9552	$< 0.01$	120	3.91
	中度退化(S III)	$y = -0.3341 - 0.0013t$	0.0013	0.9870	$< 0.01$	120	5.61

注:  $k$  表示分解速率常数;  $t_{0.95}$  表示 95% 干物质分解需要的时间。

### 2.2 瓯海湿地不同植被退化阶段类型凋落物有机碳动态变化

图 2 是 2013 年, 2014 年两年中泥炭沼泽和沼泽化草甸凋落物中碳元素浓度的变化, 反映了碳元素在凋落物中所占比例的动态变化特征; 图 3 是 2013 年, 2014 年两年中泥炭沼泽和沼泽化草甸碳元素绝对含量的变化, 直接反映凋落物中碳元素实际含量的动态变化特征。在 2013 年的分解过程中, 泥炭沼泽凋落物碳浓度呈“降—升—降”趋势, 未退化(P I)和退化(P II)泥炭沼泽凋落物碳浓度均在分解 90 d 时达到最大值 620.6 g/kg 和 541.8 g/kg, 分解 60 d 时达到最小值 542.9 g/kg 和 363.4 g/kg。沼泽化草

甸未退化(S I), 轻度退化(S II), 中度退化(S III) 3 种退化阶段类型凋落物有机碳浓度在分解 30~90 d 时呈下降趋势, 且均在分解 120 d 时达到最大值 601.3 g/kg, 536.7 g/kg 和 513.9 g/kg; 但中度退化(S III)沼泽化草甸在分解 30~60 d 时波动较大, 增加了 86 g/kg。2014 年分解过程中, 未退化(P I)和退化(P II)泥炭沼泽凋落物碳浓度在分解 60 d 时达到最小值 524.0 g/kg 和 421.5 g/kg, 随后 60~120 d 有所增加。沼泽化草甸 3 种退化阶段凋落物碳浓度整体呈下降趋势, 只有未退化(S I), 轻度退化(S II)凋落物在分解 90~120 d 和 30~60 d 时呈微小上升趋势, 分别增加了 10.4 g/kg 和 10.1 g/kg。

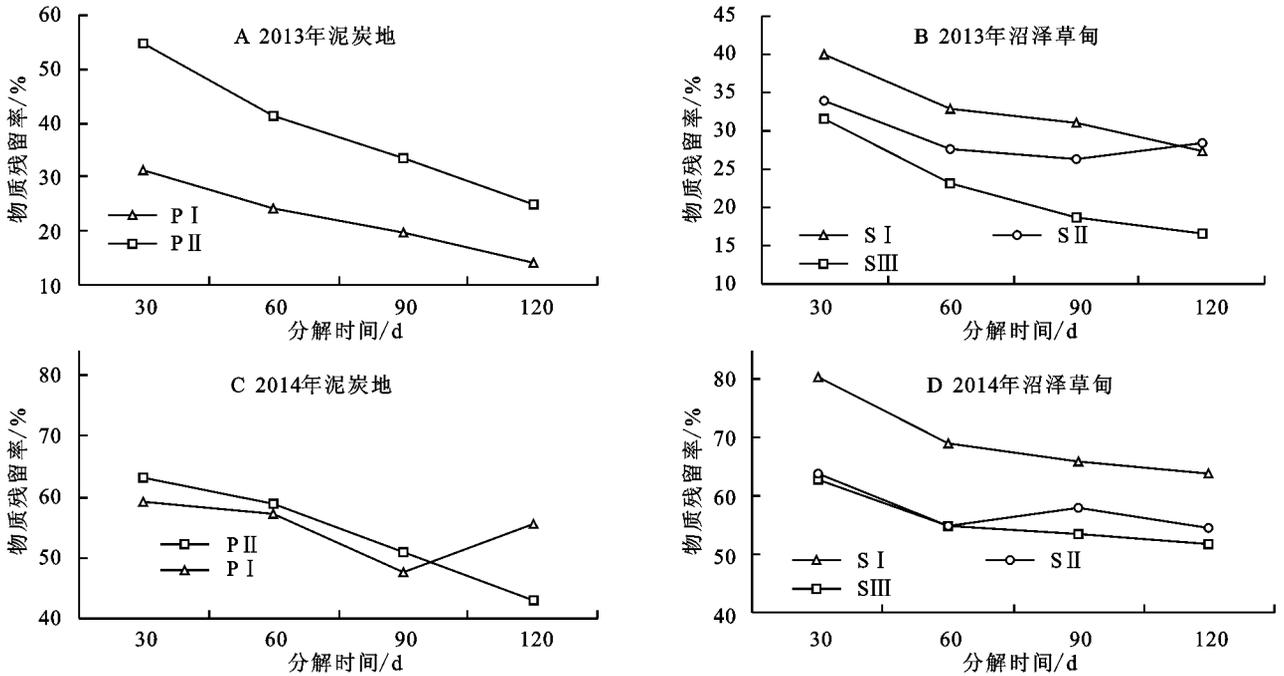


图1 湿地凋落物分解过程中干物质残留率的变化

从图2和图3的可看出碳绝对含量均下降,即都发生了净损失。2013年未退化(PI)和退化(PII)泥炭沼泽碳释放速率在分解90d时最小;沼泽化草甸未退化(SI),轻度退化(SII),中度退化(SIII)的碳绝对含量均在分解30d时达到最大值。2014年退化(SI)泥炭沼泽碳绝对含量基本处于平稳减小状态;沼泽化草甸未退化(SI),轻度退化(SII),中度退化(SIII)的碳绝对含量

均在分解30d时达到最大值7.5g,6.4g和5.6g,随后减小,但在分解30~60d时,轻度退化(SII)凋落物碳绝对含量有所增加。只有2014年沼泽草甸未退化凋落物碳绝对含量显著高于轻度和中度退化凋落物( $p < 0.05$ )。而且可以看出2013,2014两年凋落物碳浓度及碳绝对含量均表现为:泥炭沼泽  $PI > PII$ ;沼泽化草甸  $SI > SII > SIII$ 。

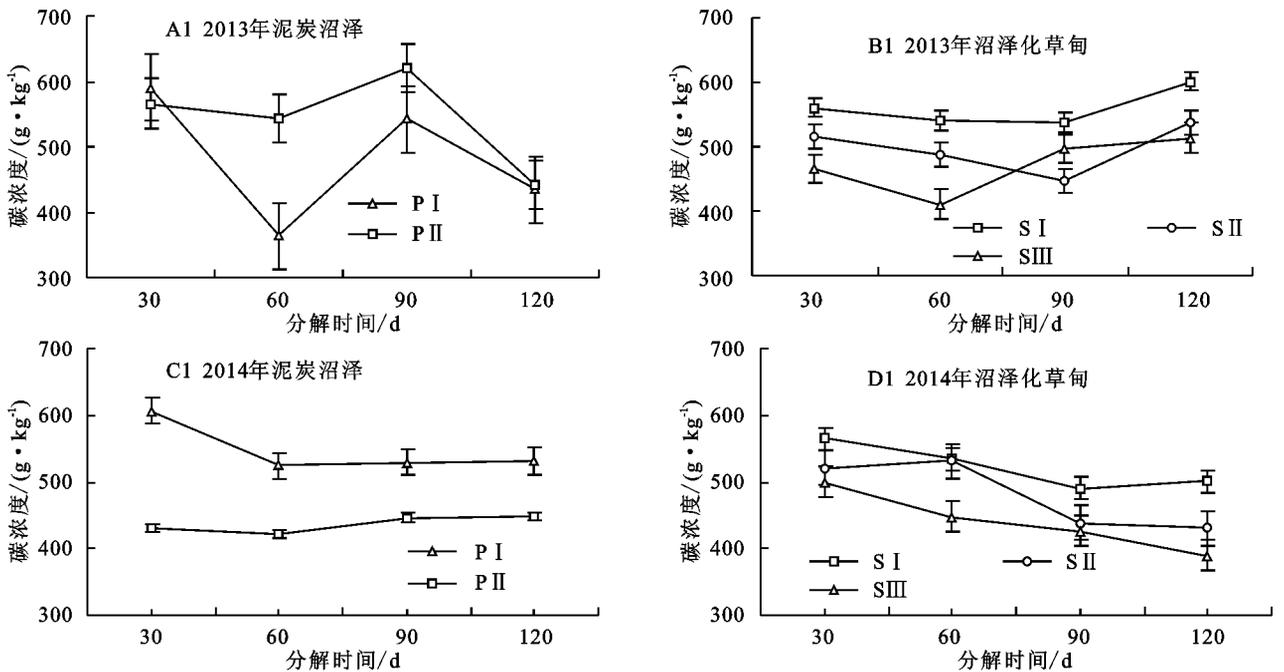


图2 杂海湿地泥炭沼泽、沼泽化草甸凋落物有机碳浓度动态变化

### 2.3 杂海湿地凋落物分解速率与有机碳含量的相关性分析

在泥炭沼泽中,凋落物有机碳含量与分解速率

整体上呈极显著负相关,2013年未退化(PI)和退化(PII)凋落物有机碳含量与分解速率的相关系数分别为0.892,0.710,而2014年只有未退化(PI)的凋

落物有机碳浓度与分解速率呈极显著负相关, 相关性为 0.859(表 2)。在沼泽化草甸中, 只有在 2013 年轻度退化(S II)凋落物有机碳浓度与分解速率时才呈极显著负相关, 而 2014 年轻度退化(S II)和轻度退化(S III)的凋落物有机碳浓度与分解速率都呈显著正相关, 相关性分别为 0.607, 0.705(表 3)。

表 2 不同年份泥炭沼泽凋落物分解速率与有机碳浓度的相关关系

参数	2013 年		2014 年	
	P I	P II	P I	P II
有机碳浓度	P I -0.892**	-0.574	-0.859**	-0.848**
	P II -0.829**	-0.710**	0.327	0.432

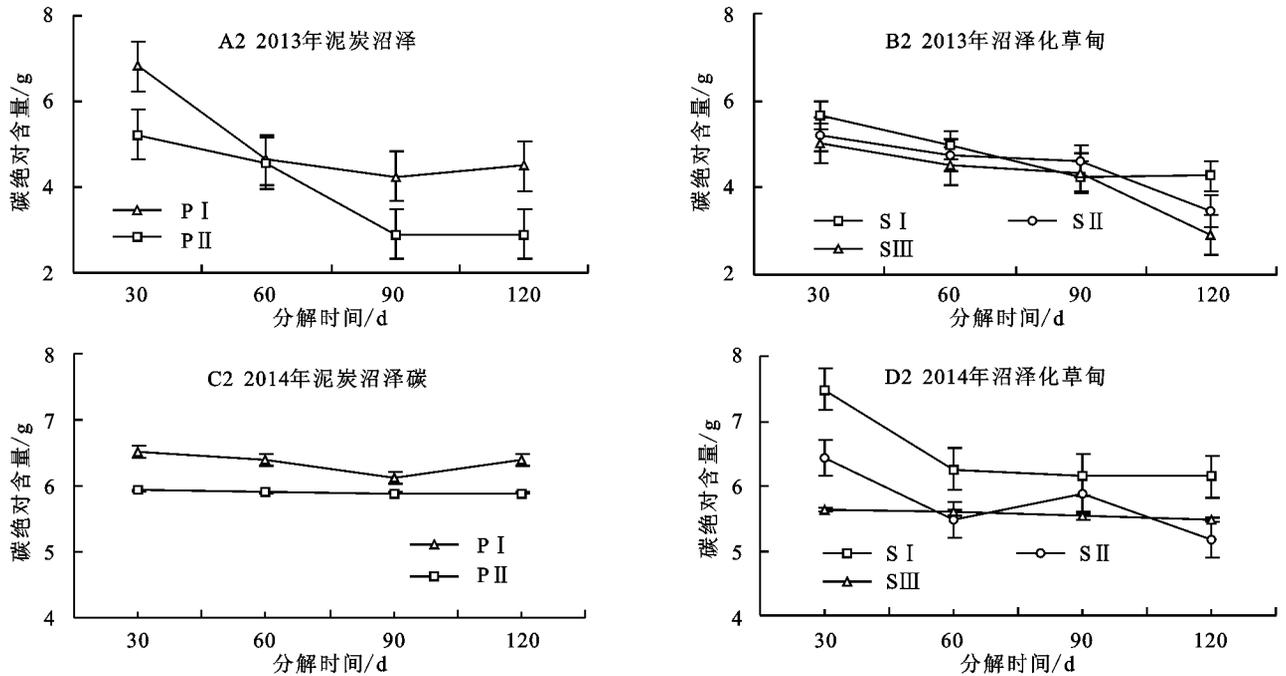


图 3 尕海湿地泥炭沼泽和沼泽化草甸凋落物有机碳绝对含量动态变化

表 3 不同年份沼泽化草甸凋落物分解速率与有机碳含量的相关关系

处理	2013 年				2014 年			
	S I	S II	S III	S IV	S I	S II	S III	S IV
S I	0.081	0.158	0.215	-0.016	0.094	-0.034	-0.047	-0.026
S II	-0.886**	-0.837**	-0.788**	-0.665*	0.669*	0.607*	0.600*	0.595*
S III	-0.599*	-0.519	-0.455	-0.467	0.466	0.525	0.521	0.470
S IV	-0.569	-0.493	-0.424	-0.364	0.679*	0.641*	0.682*	0.705*

### 3 结论与讨论

#### 3.1 植被退化对凋落物分解速率的影响

在不同退化程度下, 凋落物的分解速率及有机碳动态存在差异。影响凋落物分解速率有多种因素, 凋落物的质量、化学组成、环境因素、微生物的分解及酶活性等都会影响凋落物的分解<sup>[16]</sup>。随着植被的退化演替, 凋落物分解速率显著下降。2013 年、2014 年泥炭沼泽分解速率分别由 0.009 /d, 0.003 6 /d 降到 0.008 6 /d, 0.003 1 /d, 沼泽化草甸分解速率分别由 0.004 2 /d, 0.002 1 /d 降为 0.003 6 /d, 0.001 3 /d。不同退化阶段的泥炭沼泽和沼泽化草甸优势种有所不同, 有研究表明<sup>[17]</sup>, 尕海湿地中典型的凋落物毛果苔草、乌拉苔草和小叶章在前 41 d 中分解速率最快, 而影响这 3 类凋落物分解的主要环境因子分别为土

壤温度、土壤容重和土壤含水量<sup>[18]</sup>, 不同退化阶段泥炭沼泽和沼泽化草甸土壤的物理性质及能量流动的快慢存在差异, 造成分解速率的不同<sup>[19]</sup>。

在分解 30~60 d 时凋落物的降解主要是以可溶性的物质为主, 而 90~120 d 时则以木质素、纤维素等难降解的物质为主<sup>[20]</sup>。退化程度较高的湿地类型其凋落物中所含微生物的种类和数量较多, 在 5—9 月地温升高的过程中, 其对环境的变化较为敏感, 分解速率有所增加, 武海涛<sup>[16]</sup>等研究发现, 凋落物分解的速率和凋落物自身的质量关系最为密切, 因为凋落物的质量决定了凋落物的化学组成, 含有较多木质素及难降解物质的凋落物其分解所用的周期要长。研究还发现<sup>[21-22]</sup>, 凋落物的降解与周围所处环境的营养状况水分条件有很大关系, 不同退化阶段的泥炭沼泽和沼泽化草甸的土壤中所含营养元素存在差异, 土壤

为微生物提供了所需的营养物质,有利于微生物的生长,从而加快了凋落物的分解速率。

### 3.2 植被退化对凋落物有机碳动态的影响

尕斯湖湿地植被退化主要是由于过度利用而导致其生产力降低乃至完全丧失的过程,Gessner<sup>[23]</sup>认为微生物对营养物质的固定是影响凋落物有机碳动态的重要过程,微生物固定有机碳的结果使有机碳的浓度升高,甚至绝对含量增加。有研究已表明这一过程能使土壤板结、物质循环放慢、地表覆盖物和土壤的枯枝落叶减少,凋落物有机碳浓度随之减小<sup>[24]</sup>。从碳绝对含量的变化上看,在整体下降趋势中却存在不同程度的上升,这种波动说明微生物固定外源碳和凋落物释放碳间的动态平衡。

随退化程度加深,2013年泥炭沼泽和沼泽化草甸凋落物有机碳绝对含量分别降低了2.33 g,2.32 g和1.4 g,1.75 g,2.11 g;2014年凋落物有机碳绝对含量分别减少了0.13 g,0.04 g和1.33 g,1.28 g,0.16 g,即发生了净释放。5—6月是土壤微生物活性最强的时期,在这个阶段,有机质分解加速,而进入9月,土壤温度降低,减弱了微生物活性,使有机碳浓度降低<sup>[25-26]</sup>。不同退化阶段的植被凋落物(同一年)有机碳浓度SI>SII>SIII,退化程度越严重,其地上部分植被覆盖率越低,土壤盐渍化与板结较重<sup>[27]</sup>,在0—10 cm的土层中碳释放速率越小,土层基质中可利用的营养物质含量也是影响凋落物有机碳浓度的重要因素<sup>[28]</sup>。除此之外,凋落物自身的质量和环因子都可能为影响凋落物有机碳浓度及碳绝对含量的主导因子。

#### 参考文献:

- [1] 郭雪莲,吕宪国,郗敏.植物在湿地养分循环中的作用[J].生态学杂志,2007,26(10):1628-1633.
- [2] 吕铭志,盛连喜,张立.中国典型湿地生态系统碳汇功能比较[J].湿地科学,2013,11(1):114-120.
- [3] 郑春雨,王光华.湿地生态系统中主要功能微生物研究进展[J].湿地科学,2012,10(2):243-249.
- [4] 王建,王根绪,王长庭,等.青藏高原高寒区阔叶林植被固碳现状、速率和潜力[J].植物生态学报,2016,40(4):374-384.
- [5] 杨永兴.国际湿地科学研究进展和中国湿地科学研究优先领域与展望[J].地球科学进展,2002,17(4):508-514.
- [6] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [7] 马维伟,王辉,李广,等.尕斯湖湿地CH<sub>4</sub>,CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O通量特征初步研究[J].草业学报,2015,24(8):1-10.
- [8] 付强,李伟业.三江平原沼泽湿地生态承载能力综合评价[J].生态学报,2008,28(10):5002-5010.
- [9] 李正才,徐德应,杨校生,等.北亚热带6种森林类型凋落物分解过程中有机碳动态变化[J].林业科学研究,2008,05:675-680.
- [10] 王元峰,王辉,马维伟,等.尕斯湖湿地泥炭土土壤理化性质[J].水土保持学报,2012,26(3):118-122.
- [11] 魏文彬,李婷,李俊臻.尕斯湖湿地生态系统的保护与管理[J].湿地科学与管理,2010,9(3):32-34.
- [12] 刘惠斌,李俊臻.甘肃尕斯湖湿地退化泥炭地恢复技术评价[J].湿地科学与管理,2010,6(2):26-29.
- [13] 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标[S].GB19377-2003,2009.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [15] Olson J S. Energy storage and the balance of products and decomposers in ecological systems [J]. Ecology, 1963,44(2):322-331.
- [16] 武海涛,吕宪国,杨青.湿地草本植物枯落物分解的影响因素[J].生态学杂志,2006,25(11):1405-1411.
- [17] 郑玉琪,刘景双,王金达,等.三江平原典型沼泽生态系统毛茛苔草枯落物中化学元素变化分析[J].中国草地,2000,4(3):13-17.
- [18] 武海涛,吕宪国,杨青,等.三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素[J].生态学报,2007,27(10):4027-4035.
- [19] Agren G I, Andersson F O. Terrestrial ecosystem ecology principles and applications [J]. Forestry Chronicle, 2012,88(3):363-364.
- [20] 李强,周道玮,陈笑莹.地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J].生态学报,2014,34(14):3807-3819.
- [21] 孙志高,刘景双.湿地枯落物分解及其对全球变化的响应[J].生态学报,2007,27(4):1606-1618.
- [22] 李学斌,陈林,吴秀玲,等.荒漠草原4种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素[J].生态学报,2015,35(12):4105-4114.
- [23] Gessner M O. Mass loss, fungal colonisation and nutrient dynamics of *Phragmites australis* leaves during senescence and early aerial decay[J]. Aquatic Botany, 2001,69(2):325-339.
- [24] 廖小娟,何东进,王韧,等.闽东滨海湿地土壤有机碳含量分布格局[J].湿地科学,2013,11(2):192-197.
- [25] 杨文英,邵学新,梁威,等.杭州湾湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳组分的关系[J].湿地科学与管理,2011,7(2):54-58.
- [26] 王娇月,宋长春,王宪伟,等.冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J].冰川冻土,2011,33(2):442-452.
- [27] 姜明,吕宪国,杨青.湿地土壤及其环境功能评价体系[J].湿地科学,2006,4(3):168-173.
- [28] 肖焯,商丽娜,黄志刚,等.吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征[J].地理科学,2014,34(8):994-1001.