

DOI: 10.11766/trxb201812240572

若尔盖高寒沼泽湿地退化过程中土壤 有机氮组分的演变特征*

胡容¹ 叶春¹ 蒲玉琳^{1,2†} 胡嗣佳¹ 张世熔³
向双² 贾永霞¹ 徐小逊³

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

(2 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室,
中国科学院成都生物研究所, 成都 610041)

(3 四川农业大学环境学院, 成都 611130)

摘要 为明确湿地退化过程中土壤有机氮组分的变化及其生物有效性, 采用实地采样调查、室内分析与数理统计法, 研究若尔盖自然湿地保护区内相对原生沼泽 (RPM) 向轻度退化沼泽 (LDM)、中度退化沼泽 (MDM)、重度退化沼泽 (HDM) 退化过程中土壤有机氮组分的演变特征及与有效氮的耦合关系。结果表明, 当沼泽发生中度、重度退化时, 土壤全氮 (TN) 含量分别降低 33.4%~77.8%、69.4%~93.7% ($P<0.05$), 碱解氮 (AN) 含量分别降低 36.8%~80.2%、57.6%~82.2% ($P<0.05$)。4 类湿地土壤的酸解氨态氮、氨基酸态氮、未知态氮含量均按 RPM、LDM、MDM、HDM 的顺序降低。与 RPM 相比, HDM 土壤酸解氨态氮与未知态氮含量分别降低 66.3%~70.8%、62.2%~78.4% ($P<0.05$), MDM 和 HDM 土壤氨基酸态氮含量分别降低 47.2%~68.6%、85.7%~86.7% ($P<0.05$)。氨基糖态氮含量随着湿地退化先升高后降低。随着湿地退化程度的加剧, 氨基糖态氮与酸解氨态氮占全氮的比例上升, 而氨基酸态氮的比例下降。酸解氨态氮和未知态氮分别是影响 RPM 和 HDM 土壤碱解氮含量的主要有机氮组分, LDM 与 MDM 土壤碱解氮含量却主要受有机氮组分中氨基酸态氮的控制。若尔盖湿地退化降低了土壤全氮及酸解组分氮含量, 减弱了土壤氮“汇”功能, 改变了有机氮组分对氮素有效性的贡献。

关键词 若尔盖; 湿地退化; 酸解组分氮; 氮素积累; 氮素有效性

中图分类号 S151 **文献标识码** A

土壤有机态氮约占全氮 90%以上, 是植物生长过程中有效氮的源和库^[1]。自 Bremner^[2]提出将有机氮分为酸解氨态氮、氨基酸态氮、氨基糖态氮、未知态氮和非酸解氮等化学形态后, 人们开始关注不同施肥与耕作措施^[3]、土壤类型^[4]、土地利用方式^[5]下土壤有机氮组分的变异特征。如化肥配施有机肥可提高水田土壤酸解有机氮及其氨基酸氮、氨基糖

氮和酸解氨态氮含量^[3]。草甸型水稻土以未知态氮为主, 而滨海盐渍型水稻土以酸解氨基酸态氮和氨态氮为主^[6]。同一土壤在不同利用方式下有机氮组分差异明显, 如旱地土壤的全氮、酸解总氮含量均显著低于相应的水稻土^[7]。但上述研究多集中于农田、草地和森林生态系统, 鲜有报道土壤有机氮组分对湿地环境变化的响应。

* 中国科学院开放基金 (kxysws1606) 和国家自然科学基金项目 (41401328) 共同资助 Supported by the Open Fund of the Chinese Academy of Sciences (No.kxysws1606) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41401328)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: pyulin@sicau.edu.cn

作者简介: 胡容 (1993—), 女, 重庆武隆人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳氮养循环。E-mail: hy_rong@yeah.net

收稿日期: 2018-12-24; 收到修改稿日期: 2019-03-04; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-03-22

湿地作为维持生物多样性和自然资源的重要生态系统,被称为“地球之肾”^[8]。若尔盖高寒沼泽湿地是青藏高原上面积最大的沼泽湿地,对全球气候变化和人类干扰的敏感性高^[9]。从 20 世纪 60 年代开始,受气候干暖化及开沟排水、放牧等人为因素的影响,沼泽向沼泽化草甸、草甸、退化草甸逆向演替,甚至出现沙化草甸^[10]。高寒沼泽干化、甚至沙化,伴随植被退化会给土壤碳、氮、磷、硫等重要物质的循环带来怎样的影响?由此产生怎样的大气、水环境效应?近年来诸多学者围绕这些问题主要展开了湿地退化条件下土壤有机碳及其组分变化^[11-12]、土壤碳氮磷化学计量特征^[13]、温室气体排放通量^[14]等研究。土壤有机氮是湿地有效氮的主要来源,氮素的有效性通常限制湿地的净初级生产力^[15]。对湿地有机氮的关注,主要集中于土壤全氮储量及剖面变化^[16-17]、土壤溶解性有机氮的空间分布特征^[18],鲜有退化湿地土壤有机氮组分变化的系统、定量研究,有机氮组分与有效氮的耦合关系也尚不明晰。

因此,本文以若尔盖高寒沼泽干化过程中不同退化程度沼泽湿地为对象,探讨高寒沼泽湿地退化过程中土壤氮素积累和有机氮组分的演变特征,以期为深入研究高寒湿地退化过程中氮转化的演变特征提供理论基础,为恢复退化高寒沼泽湿地提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

若尔盖高寒沼泽湿地位于青藏高原东北部(102°08'E~103°39'E, 32°56'N~34°19'N),海拔 3 400~3 800 m,为典型的大陆性高原季风气候。最冷月 1 月平均气温-10.6℃,绝对最低气温-33.7℃;最热月 7 月平均气温 10.8℃,绝对最高气温 24.6℃,年平均气温 0.7℃。年降水量 600~800 mm,平均降水量 656.8 mm,其中 86% 集中于 4 月下旬至 10 月中旬。植被以沼泽植被和草甸植被为主,沼泽植物的优势种有木里苔草(*Carex muliensis*)、毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)、乌拉苔草(*Carex meyeriana*)等;草甸植被以草地早熟禾(*Kentucky bluegrass*)、车前草(*Plantain*)、黑褐苔草(*Carex alofusca*)等植物为主^[19]。

1.2 土壤样品采集

本研究在 2006—2013 年开展的 4 次若尔盖沼泽湿地分布状况的实地调查基础上,根据湿地的水文(有无地表积水与积水程度)、年际土壤水分状况、植被群落类型、植被盖度和人为干扰活动等生态环境指标,将研究区退化沼泽大致分为轻度退化沼泽(Lightly degraded marsh, LDM)、中度退化沼泽(Moderately degraded marsh, MDM)和重度退化沼泽(Heavily degraded marsh, HDM)。

2015 年 7 月利用前期的实地调查研究成果,在若尔盖湿地自然保护区用空间代替时间法,选择沼泽以及由沼泽退化而成的沼泽化草甸、草甸和退化草甸 4 种湿地景观,分别代表相对原生沼泽(Relatively pristine marsh, RPM)、LDM、MDM 和 HDM。4 种不同程度退化湿地的生态环境状况如表 1。在花湖-热尔大坝、向东牧场、尧拉乔-唐克、黑青乔、黑河牧场、黑河流域的中下游嫩哇段 6 个采样区设置 4 类景观 100 m×100 m 样地 2~3 个,每个样地先使用 GPS 定位和记录优势植被类型后,在每个样地设立 3 个 1 m×1 m 的样方,利用原状土取土器(Eijkelpamp, 荷兰)采集 0~100 cm 土壤剖面样品,按 0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层采集土样。将同一样地内 3 个样方的同一土层土样放置一起,去除杂物及植物根系、凋落物等,混合土样,缩分至 1 kg,装入密封塑料袋。土壤样品带回室内风干,研磨,过筛备用。

1.3 分析项目及方法

土壤有机氮分组采用 Bremner^[2]法,其中,酸解态氮测定采用 6 mol·L⁻¹HCl 酸解—凯氏半微量定氮法;酸解氨态氮测定采用 MgO 蒸馏法;酸解氨态氮与氨基糖态氮测定采用磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸馏法;酸解氨基酸态氮测定采用茚三酮氧化、磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸馏法;酸解未知态氮、非酸解氮和酸解氨基糖态氮则采用差减法求得。全氮、碱解氮分别采用 CuSO₄-K₂SO₄-Se (100:1:1) 消化、半微量凯氏定氮法和碱解扩散法测定^[20]。

1.4 数据分析与制图

数据运用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行计算和统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和邓肯(Duncan)法分析不同退化程度湿地土壤氮素间的差异显著性,应用皮尔逊(Pearson)相关系数分析全氮、碱解氮与有机氮组分间的相关性,多

表 1 不同退化程度湿地的生态环境状况

湿地类型 Wetland type	土壤类型 Soil type	地表积水 Surface water	植被覆盖度 Vegetation coverage/%	植被群落 Vegetation community	优势植物 Dominant plant	人为干扰情况 Human disturbance	地上生物量 Above-ground biomass / (g·m ⁻²)	地下生物量 Underground biomass / (g·m ⁻²)
RPM	潜育沼泽土 Incubationmarsh soil	常年积水 Perennial water-logging	60~85	沼生植被 Helophytes	藁草、狐尾藻、木里苔草、乌拉苔草 <i>Carex</i> , <i>Water milfoil</i> , <i>Carex mulieensis</i> , <i>Carex meyeriana</i>	无放牧 No grazing	334.3~568.6	969.5~1 318
LDM	沼泽化草甸土 Swampingmeadow soil	季节性积水 Seasonal water-logging	70~90	沼生、草甸植被 Helophytesand meadow vegetation	华扁穗草、木里苔草、垂穗披碱草、西藏蒿草 <i>Blysmus sinocompressus</i> , <i>Carex mulieensis</i> , <i>Elymus nutans</i> , <i>Littlelezdalei</i>	放牧较少、开沟排水 Less grazing, ditching and drainage	473.4~823.6	712.0~1 407
MDM	草甸土 Meadow soil	无积水 No stagnant water	70~85	草甸植被 Meadow vegetation	草地早熟禾、鹅绒委陵菜、蒲公英、高原毛茛 <i>Kentucky bluegrass</i> , <i>Potentilla anserina</i> , <i>Dandelion</i> , <i>R.tanguticus</i>	过度放牧、无序旅游 Overgrazing and disorderly tourism	338.4~367.0	618.0~816.0
HDM	草甸土 Meadow soil	无积水 No stagnant water	60~70	草甸、中生植被 Meadow and terraneous vegetation	车前草、狼毒、火绒草、黑褐苔草 <i>Plantain</i> , <i>Euphorbia</i> , <i>Edelweiss</i> , <i>Carex atrofusca</i>	超载放牧、无序旅游、鼠害 tourism and rodent damage	108.0~221.3	210~419.4

注：RPM，相对原生沼泽；LDM，轻度退化沼泽；MDM，中度退化沼泽；HDM，重度退化沼泽。下同 Note: RPM, Relatively pristine marsh; LDM, Lightly degraded marsh; MDM, Moderately degraded marsh; HDM, Heavily degraded marsh. The same below

元逐步回归分析进一步阐明有机氮组分对碱解氮的贡献。统计检验的显著水平为 $P=0.05$ 。利用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果

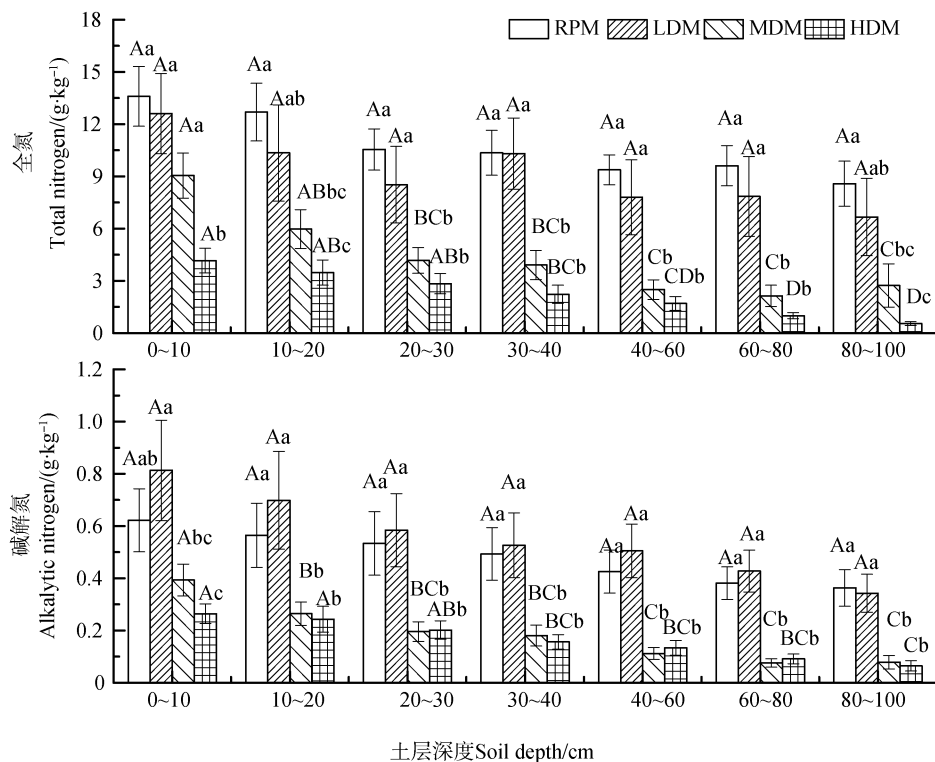
2.1 湿地退化条件下土壤全氮与碱解氮含量及其垂直变化

如图 1 所示, RPM 土壤 TN 含量最高可达 $13.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 RPM 相比, LDM、MDM、HDM 土壤 TN 含量分别降低 7.2%~22.3%、33.4%~77.8%、69.4%~93.7%, 且 RPM、LDM 土壤 TN 含量与 MDM、HDM 的差异显著 ($P<0.05$)。表明沼泽退化导致土壤 TN 含量降低, 且降低幅度随着退化程度的加剧而增加。

随着土层深度的增加, LDM 土壤 TN 含量先降低后增加再降低, 但各土层间无显著差异。RPM、MDM 和 HDM 土壤 TN 含量均随着土层的加深而显

著降低。其中, RPM 土壤 TN 含量各土层间无显著差异 ($P>0.01$); MDM 中土壤 TN 含量在 0~10 cm 与 20~100 cm 土层间、10~20 cm 与 40~100 cm 土层间的差异显著 ($P<0.01$); HDM 中土壤 TN 含量在 0~10 cm 与 30~100 cm 土层间、10~30 cm 与 40~100 cm 土层间、30~40 cm 与 60~100 cm 土层间显著差异 ($P<0.01$)。说明土壤 TN 含量的剖面分异随沼泽退化的加剧而增大。

1 m 深度内, RPM、LDM 各土层碱解氮 (AN) 含量分别为 $0.363 \sim 0.622 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.343 \sim 0.814 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。AN 含量在 RPM 与 LDM 间、MDM 与 HDM 间无显著差异 ($P>0.05$) (图 1)。然而, RPM、LDM 各土层土壤 AN 含量显著高于 MDM、HDM ($P<0.05$) (图 1)。MDM 和 HDM 土壤 AN 含量分别较 RPM 降低 36.8%~80.2%、57.6%~82.2%, 分别较 LDM 降低 51.7%~82.3%、65.2%~81.1%。说明沼泽发生中度、重度退化时, 土壤 AN 含量显著降低。



注: 小写字母代表同一土层不同类型土壤差异显著 ($P<0.05$), 大写字母代表同一类型土壤不同土层差异显著 ($P<0.01$)。下同 Note: Lowercase letters mean significant difference between soils different in type in the same depth at $P<0.05$, and uppercase letters mean significant difference between soil layers in the same type of soil at $P<0.01$. The same below

图 1 湿地退化条件下土壤全氮和碱解氮含量

Fig. 1 Soil total nitrogen and alkalytic nitrogen in wetland under degradation

各类湿地土壤 AN 含量均随着土层深度的增加而降低。RPM、LDM 土壤 AN 含量在土层间无显著差异 ($P>0.01$); MDM 中土壤 AN 含量在 0~10 cm 与 10~100 cm 土层间、10~20 cm 与 40~100 cm 土层间的差异显著 ($P<0.01$); HDM 土壤中 AN 含量在 0~10 cm 与 30~100 cm 间、0~30 cm 与 80~100 cm 间的差异显著 ($P<0.01$)。表明随着沼泽退化的加剧, 土壤 AN 含量的剖面分异加剧。

2.2 湿地退化条件下土壤有机氮组分变化

2.2.1 土壤酸解态氮和非酸解态氮含量变化 如图 2 所示, 0~40 cm 深度内, 各类湿地土壤酸解氮、非酸解氮含量随土层深度的增加而降低。4

类湿地土壤酸解氮含量均大于非酸解氮, 且各土层土壤酸解氮与非酸解氮含量均按 RPM、LDM、MDM、HDM 的顺序降低, 其中, RPM 酸解氮与非酸解氮含量分别可达 9.8 、 3.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。MDM、HDM 的土壤酸解氮含量相较于 RPM 分别降低 38.9%~60.9%、72.3%~78.8% ($P<0.05$)。0~20 cm 土层, HDM 土壤非酸解氮含量较 RPM 降低 66.1% ($P<0.05$), 20~40 cm 土层, MDM 和 HDM 土壤非酸解氮含量分别较 RPM 降低 58.5%、66.7% ($P<0.05$), 表明沼泽退化显著降低了土壤酸解氮和非酸解氮含量, 且降低幅度随沼泽退化程度的加剧而增大。

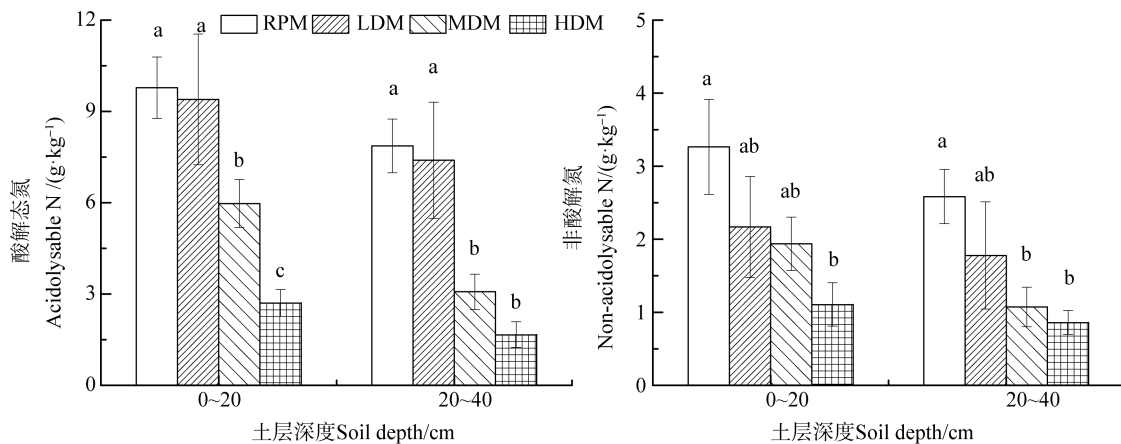


图 2 湿地退化条件下土壤酸解态氮和非酸解态氮含量

Fig. 2 Soil acidolytic N and non-acidolytic N content in wetland under degradation

2.2.2 土壤酸解氮组分含量变化 如图 3 所示, 随土层深度的增加, 4 类湿地土壤酸解氮态氮、氨基酸态氮、未知态氮含量均降低, 除 MDM 外的其余 3 类湿地土壤的氨基糖态氮含量却增加。沼泽退化显著降低了土壤除氨基糖态氮外的其余酸解氮组分含量, 且降低幅度随退化程度的加剧而增加。其中, 0~20 cm 土层 HDM 土壤酸解氮态氮含量相较于 RPM (2.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 降低 66.3% ($P<0.05$); 20~40 cm 土层, MDM 和 HDM 土壤酸解氮态氮含量分别较 RPM (1.9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 降低 47.4%、70.8% ($P<0.05$)。MDM 和 HDM 土壤氨基酸态氮含量相较于 RPM (2.9 ~ 4.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别降低 47.2%~68.6%、85.7%~86.7% ($P<0.05$)。HDM 未知态氮较 RPM (3.0 ~ 3.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 降低 62.2%~78.4% ($P<0.05$)。4 类湿地土

壤氨基糖态氮含量的显著差异主要体现在 20~40 cm 土层, 其中 MDM、HDM 土层土壤氨基糖态氮含量分别较 LDM (0.20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 降低 56.1%、49.4% ($P<0.05$)。

2.2.3 土壤各有机氮组分占全氮的比例 由图 4 可见, 土壤氨基酸态氮或未知态氮的占比最高, 分别约为 25.5%~30.8%、26.7%~38.1%; 酸解氮中氨基糖态氮占全氮的比例最低, 仅为 0.9%~5.8%。

湿地发生轻度退化时, 酸解氮占全氮的比例约为 84.9%, 增加了 8.6%; 而湿地中度或重度退化后, 酸解氮占全氮比例却分别降低了 7.1%、10.5%。与 RPM 相比, HDM 土壤氨基糖态氮与酸解氮态氮占全氮的比例分别上升了 3.1%、5.5%, 而氨基酸态氮的比例下降了 14.9% (图 4)。

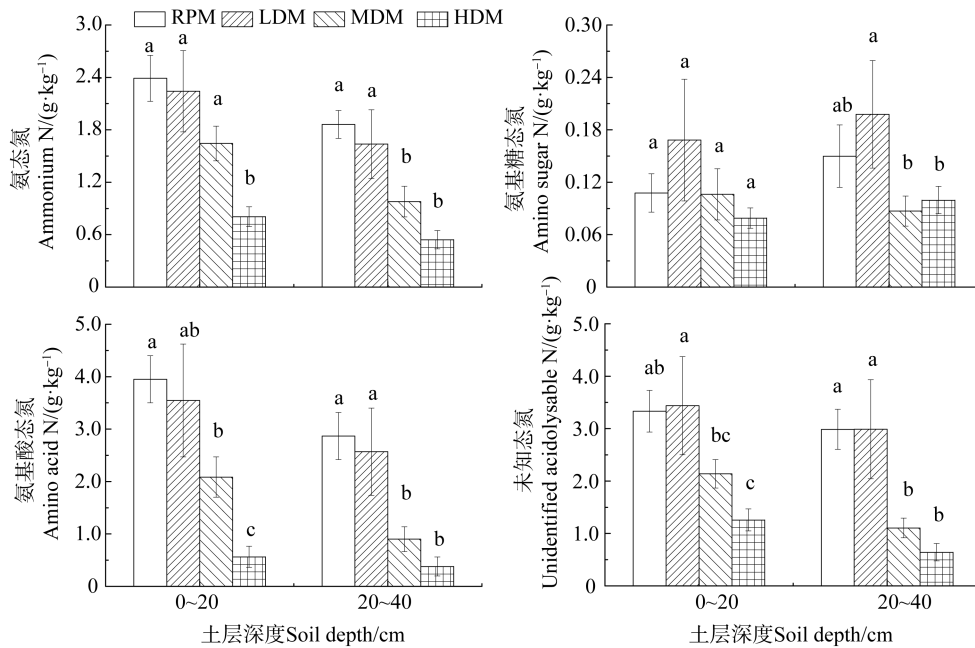
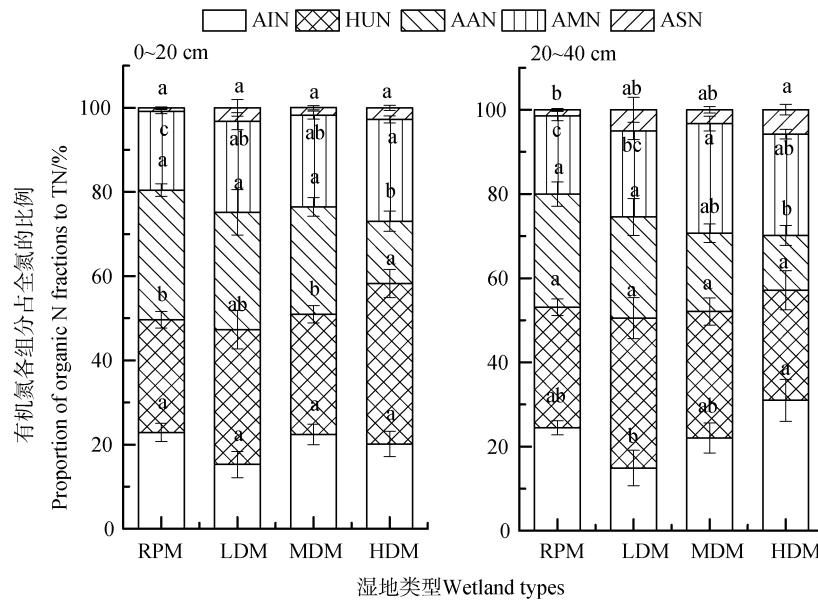


图 3 湿地退化条件下土壤酸解氮组分含量
Fig. 3 Soil acidolytic nitrogen fractions in wetland under degradation



注: AIN, 非酸解氮; HUN, 未知态氮; AAN, 氨基酸态氮; AMN, 酸解氨态氮; ASN, 氨基糖态氮。下同 Note: AIN, non-acidolysable N; HUN, Unidentified acidolytic N; AAN, Amino acid N; AMN, Ammonium N; ASN, Amino sugar N. The same below

图 4 湿地退化条件下土壤有机氮各组分占全氮的比例
Fig. 4 Proportions of organic nitrogen fractions to TN in wetland under degradation

2.3 湿地退化条件下有机氮组分与碱解氮的相关性

除氨基糖态氮外, 尽管 4 类湿地土壤全氮、碱解氮与有机氮各组分基本呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$) (表 2), 但逐步线性回归分析显示, 各类湿

地土壤中均仅有一个氮组分进入碱解氮与氮组分的回归拟合方程 (表 3)。RPM 土壤中碱解氮含量的主要影响因素是酸解氨态氮, LDM 与 MDM 土壤中的主要影响因素是氨基酸态氮, HDM 中为未知态氮。

表 2 湿地退化条件下土壤有机氮组分与全氮、碱解氮的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of soil organic nitrogen fractions, with total nitrogen and alkalytic nitrogen in wetland under degradation

湿地类型 Wetland type	指标 Index	AMN	ASN	AAN	HUN	AIN
RPM	TN	0.949**	0.278	0.874**	0.819**	0.918**
	AN	0.939**	0.147	0.926**	0.889**	0.815**
LDM	TN	0.984**	0.056	0.868**	0.794**	0.912**
	AN	0.854**	-0.443	0.947**	0.372	0.866**
MDM	TN	0.976**	-0.127	0.947**	0.910**	0.932**
	AN	0.634**	-0.255	0.710**	0.566**	0.454*
HDM	TN	0.979**	-0.204	0.906**	0.764**	0.790**
	AN	0.701**	-0.239	0.449*	0.882**	0.189

注: TN, 全氮; AN, 碱解氮。**在 0.01 水平上极显著相关, *在 0.05 水平上显著相关 Note: TN, Total nitrogen; AN, Alkalytic nitrogen. ** significant correlation at the level of 0.01, * significant correlation at the level of 0.05

表 3 不同退化程度湿地土壤碱解氮与氮组分间的多元逐步回归

Table 3 Multivariate stepwise regression analysis of soil alkalytic nitrogen and organic nitrogen fractions in wetland relative to degradation degree

湿地类型 Wetland type	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination/ R^2
RPM	AN = -372.8 + 0.551AMN	0.939
LDM	AN = 78.48 + 0.188AAN	0.947
MDM	AN = 199.5 + 0.100AAN	0.710
HDM	AN = 67.59 + 0.142AIN	0.882

3 讨 论

3.1 湿地退化对土壤氮素积累的影响

土壤氮素主要来源于凋落物与根系, 水分及温度状况、植物群落影响着土壤氮素积累^[21]。RPM 土壤 TN 含量最高, 由于相对原生沼泽常年积水(表 1), 土壤通气性极差, 微生物活性低, 有机质分解缓慢, 有利于有机氮的积累^[21], 全氮积累量可高达 $13.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。RPM 向 LDM 演变后, 土壤处于季节性积水状态, 季节性疏干时有机质在好氧微生物的作用下分解^[22], 致使 TN 含量有所降低, 但与 RPM 无显著差异。当 RPM 水分持续减少, 退化为 MDM 后, 一方面土壤通气条件得到显著改善, 有机氮的矿化增强^[23], 另一方面放牧强度增大, 植物在生长初期就被牛羊消耗, 使得地上植被覆盖度随之降低(表 1), 枯落物归还量大大减少, 结果导致土壤 TN 含量相

比 RPM 降低 56% ($P < 0.05$)。MDM 长期超载放牧, 加之鼠害频发, 植被种类与数量、盖度大大降低, 地下根系生物量与枯落物归还量也因此大大减少(表 1), 至此, RPM 退化为 HDM, 土壤 TN 含量较 RPM 降低 82% ($P < 0.05$)。因此, 4 类不同退化程度湿地, 由于水文状况、植被群落特征、枯落物归还量、地下根系、放牧等人为干扰的差异导致土壤 TN 含量表现为: RPM > LDM > MDM > HDM, 与 Li 等^[24]的研究结果相似。

正是由于上述植被与水文、放牧等影响, 高寒沼泽湿地向草甸-退化草甸演替时, 土壤碱解氮含量逐渐降低, 但向沼泽化草甸转变时, 土壤碱解氮含量却增加。究其原因, 与微生物数量与活性有关, 因为有机氮化合物只有在微生物作用下才能转变成碱解氮类, 如酰胺、蛋白质等小分子有机氮和无机态氮^[23]。相较于沼泽而言, 沼泽化草甸处于干湿交

替频繁的条件下,好气和兼性厌氧细菌和放线菌大量繁殖^[25],地下生物量增大(表 1),根系分泌物更多,有机氮分解量增大。所以 LDM 土壤碱解氮含量高于 RPM。

3.2 湿地退化对土壤有机氮组分的影响

土壤有机氮组分含量及其在全氮中的分配比例常因环境条件的变化而有所差异^[5]。本研究中,除氨基糖态氮外,其余各有机氮组分含量均随着湿地退化加剧而逐渐降低(图 3),与余倩等^[26]关于高寒草地沙化条件下土壤有机氮组分含量变化特征相似。究其原因与沼泽逆向演替条件下土壤全氮含量的变化一致。然而,氨基糖态氮含量随着湿地的退化先升高后降低,在 LDM 处最高,这是因为氨基糖态氮主要来源于微生物细胞壁物质^[26],处于干湿交替环境的沼泽化草甸土壤微生物得以大量繁殖;而当沼泽演变为草甸、退化草甸后微生物数量降低^[27]。

研究表明,酸解氨态氮主要来源于土壤中的交换性铵和固定态铵,是植物吸收利用的有效氮库^[5]。本研究中,土壤氨态氮占全氮的比例随着湿地退化呈现升高的趋势。这可能是由于湿地逆向演变成草甸、退化草甸后,有机氮分解速率加快,而大部分固定态铵被固定于矿物晶格之间,释放缓慢,造成了氨态氮相对比例增加。氨基酸态氮作为一个过渡氮库,协调土壤氮素储存和植物吸收有效氮之间的关系^[28]。湿地退化过程中,有机氮库中的氨态氮一部分以固定态铵的形式存在,导致可矿化氮不足以满足植物生长,依赖更多的氨基酸态氮分解,来满足植物的氮素需求。因此,氨基酸态氮占全氮的比例随着湿地的退化而降低。这与王晋等^[7]研究不同种植年限水稻土氨基酸态氮比例的变化趋势相似。氨基糖态氮占全氮的比例随着湿地的退化而增加,这可能与湿地退化后土壤微生物群落的改变有关。未知态氮和非酸解氮占全氮比例无明显变化趋势,是因为未知态氮由脂肪胺和芳胺等生物有效性低的含氮物质组成^[1],非酸解氮主要存在于腐殖质结构成分中^[29],在有机氮库中较为稳定、难矿化。

3.3 湿地退化条件下土壤有机氮组分对氮素有效性的贡献

土壤中无机态及部分小分子有机态的有效氮(碱解氮)能够较灵敏地反映土壤供氮水平^[30]。本研究显示,相对原始沼泽,土壤中酸解氨态氮是碱解氮的主要贡献者。究其原因是由于淹水环境抑制了

真菌、部分放线菌和一些硝化细菌的活性,使得土壤中累积了大量的 NH_4^+-N ^[31]。当沼泽演变为沼泽化草甸或草甸后,土壤中氨基酸态氮对碱解氮贡献最大,与 Bardgett 等^[32]对棕壤型草地土壤的研究结果相似,可能是由于相较于沼泽土壤而言,沼泽化草甸通气条件有所改善,草甸土壤通气性大大改善,氨态氮中活性的交换性铵含量下降^[33],致使氨基酸态氮分解加快来满足植物生长。草甸继续退化后,甚至沙趋化或沙化后,未知态氮变为有效氮的主要影响因素,这是由于沼泽发生严重退化时,人为干扰剧烈,易于矿化的氨态氮及氨基酸态氮含量大大降低,促使未知态氮向碱解氮转化。

4 结 论

不同退化程度沼泽土壤全氮(TN)与除氨基糖态氮外的各有机氮组分含量均随湿地退化的加剧而降低,碱解氮(AN)含量与氨基糖态氮却随着湿地的退化先升高后降低。湿地退化改变了有机氮组分占全氮的比例以及对氮素有效性的贡献。随着湿地退化程度的加剧,氨基糖态氮与氨态氮占全氮的比例上升,而氨基酸态氮的比例下降。RPM 土壤中碱解氮含量的主要影响因子是氨态氮,LDM 与 MDM 土壤中的是氨基酸态氮,HDM 中的为未知态氮。

参 考 文 献

- [1] 吴汉卿,杜世宇,高娜,等. 水氮调控对设施土壤有机氮组分、全氮和矿质氮的影响. 水土保持学报, 2017, 31(6): 212—219
Wu H Q, Du S Y, Gao N, et al. Effects of water and nitrogen regulation on soil organic nitrogen fractions, total nitrogen and mineral nitrogen in greenhouse soils (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 212—219
- [2] Bremner J M. Organic forms of nitrogen//Black C A. Methods of soil analysis. Madison, USA: American Society of Agronomy, 1965: 1238—1255
- [3] Kaur J, Singh J P. Long-term effects of continuous cropping and different nutrient management practices on the distribution of organic nitrogen in soil under rice-wheat system. Plant, Soil and Environment, 2014, 60(2): 63—68
- [4] 张玉玲,顾婉宣,丛耀辉,等. 下辽河平原两种类型水稻土有机氮组分的研究. 土壤, 2015, 47(6): 1021—1026
Zhang Y L, Gu W X, Cong Y H, et al. Study on organic

- nitrogen fractions of two types of paddy soils in Lower Liaohe Plain (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (6): 1021—1026
- [5] Tian J, Wei K, Condon L M, et al. Effects of elevated nitrogen and precipitation on soil organic nitrogen fractions and nitrogen-mineralizing enzymes in semi-arid steppe and abandoned cropland. *Plant and Soil*, 2017, 417: 217—229
- [6] 伍玉鹏, 邓婵娟, 姜炎彬, 等. 长期施肥对水稻土有机氮组分及氮素矿化特性的影响. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (10): 1958—1964
- Wu Y P, Deng C J, Jiang Y B, et al. Effects of long-term fertilization on organic nitrogen components and nitrogen mineralization characteristics of paddy soils(In Chinese). *Journal of Agro-environment Science*, 2015, 34 (10): 1958—1964
- [7] 王晋, 庄舜尧, 朱兆良. 不同种植年限水田与旱地土壤有机氮组分变化. *土壤学报*, 2014, 51 (2): 286—294
- Wang J, Zhuang S Y, Zhu Z L. Fractions of soil organic nitrogen in paddy and upland soils relative to cropping history (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2): 286—294
- [8] Wu C Y, Chen W, Cao C X, et al. Diagnosis of wetland ecosystem health in the Zoige wetland, Sichuan of China. *Wetlands*, 2018, 38 (3): 469—484
- [9] Bai J H, Lu Q Q, Wang J J, et al. Landscape pattern evolution processes of alpine wetlands and their driving factors in the Zoige Plateau of China. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10 (1): 54—67
- [10] Gao J, Li X L, Cheung A, et al. Degradation of wetlands on the Qinghai-Tibet Plateau: A comparison of the effectiveness of three indicators. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10 (4): 658—667
- [11] Ma K, Liu J G, Balkovič J, et al. Changes in soil organic carbon stocks of wetlands on China's Zoige plateau from 1980 to 2010. *Ecological Modelling*, 2016, 327: 18—28
- [12] Ma K, Zhang Y, Tang S X, et al. Spatial distribution of soil organic carbon in the Zoige alpine wetland, northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Catena*, 2016, 144: 102—108
- [13] 青焱, 孙飞达, 李勇, 等. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析. *草业学报*, 2015, 24 (3): 38—47
- Qing Y, Sun F D, Li Y, et al. Soil C/N/P ratio and correlation analysis of Alpine degraded wetland in Zoige (In Chinese). *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24 (3): 38—47
- [14] Liu Y, Liu G, Xiong Z, et al. Response of greenhouse gas emissions from three types of wetland soils to simulated temperature change on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmospheric Environment*, 2017, 171: 17—24
- [15] 解成杰, 郭雪莲, 余磊朝, 等. 滇西北高原纳帕海湿地土壤有机氮矿化特征. *生态学报*, 2013, 33 (24): 7782—7787
- Xie C J, Guo X L, Yu L C, et al. Net nitrogen mineralization in soils of Napahai wetland in Northwest Yunnan (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (24): 7782—7787
- [16] 万斯昂, 刘兴土, 牟晓杰. 双台河口四种类型湿地土壤中的碳、氮含量垂直分布特征. *湿地科学*, 2017, 15 (4): 149—154
- Wan S A, Liu X T, Mou X J. Vertical distribution characteristics of carbon and nitrogen contents in soils of 4 types of wetlands in Shuangtai River Estuary (In Chinese). *Wetland Science*, 2017, 15 (4): 149—154
- [17] Hua C, Popovich S, Mceuen A, et al. Carbon and nitrogen storage of a restored wetland at Illinois' Emiquon Preserve: Potential for carbon sequestration. *Hydrobiologia*, 2017, 804 (6): 1—12
- [18] 李兰海, 刘翔, 朱咏莉. 垦殖对伊犁河谷湿地土壤可溶性有机氮含量的影响. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2017, 41 (3): 1—6
- Li L H, Liu X, Zhu Y L. Effects of reclamation on soil soluble organic nitrogen contents in wetlands of the Ili River Valley (In Chinese). *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 41 (3): 1—6
- [19] Yang G, Wang M, Chen H, et al. Responses of CO₂ emission and pore water DOC concentration to soil warming and water table drawdown in Zoige Peatlands. *Atmospheric Environment*, 2017, 152: 323—329
- [20] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
- Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese)*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [21] Wan S, Mou X J, Liu X T. Effects of reclamation on soil carbon and nitrogen in coastal wetlands of Liaohe River Delta, China. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28 (3): 443—455
- [22] 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
- Wan Z M, Song C C, Yang G S, et al. The active soil organic carbon fraction and its relationship with soil enzyme activity in different types of marshes in the Sanjiang Plain (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29 (2): 406—412
- [23] Nannipieri P, Eldor P. The chemical and functional characterization of soil N and its biotic components. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41 (12): 2357—2369
- [24] Li W, Wang J L, Zhang X J, et al. Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*,

- 2018, 111: 134—142
- [25] 徐国伟, 陆大克, 孙会忠, 等. 干湿交替灌溉与施氮耦合对水稻根际环境的影响. 农业工程学报, 2017, 33 (4): 186—194
Xu G W, Lu D K, Sun H Z, et al. Effect of alternative wetting and drying irrigation and nitrogen coupling on rhizosphere environment of rice (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (4): 186—194
- [26] 余倩, 胡玉福, 蒋双龙, 等. 川西北高寒沙化草地有机氮组分特征. 中国沙漠, 2017, 37 (3): 500—506
Yu Q, Hu Y F, Jiang S L, et al. Characteristics of soil organic nitrogen fractions in the process of grassland desertification in northwest of Sichuan (In Chinese). Journal of Desert Research, 2017, 37 (3): 500—506
- [27] 唐杰, 徐青锐, 王立明, 等. 若尔盖高原湿地不同退化阶段的土壤细菌群落多样性. 微生物学通报, 2011, 38 (5): 677—686
Tang J, Xu Q R, Wang L M, et al. Soil bacterial community diversity under different stages of degradation in Zoige Wetland (In Chinese). Microbiology China, 2011, 38 (5): 677—686
- [28] Lü H J, He H B, Zhao J S, et al. Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season. Plant and Soil, 2013, 373 (1/2): 595—607
- [29] 彭令发, 郝明德, 来璐. 土壤有机氮组分及其矿化模型研究. 水土保持研究, 2003, 10 (1): 46—49, 70
Peng L F, Hao M D, Lai L. Soil organic nitrogen compounds and the research of its mineralizable models (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10 (1): 46—49, 70
- [30] 艾尤尔·亥热提, 王勇辉, 海米提·依米提. 艾比湖湿地土壤碱解氮的空间变异性分析. 土壤, 2014, 46 (5): 819—824
Ghayur-Ghayat, Wang Y H, Hamit-Yimid. Spatial variability of soil available nitrogen in Ebinur Lake Wetland (In Chinese). Soils, 2014, 46 (5): 819—824
- [31] Wang J, Zhuang S Y, Zhu Z L. Soil organic nitrogen composition and mineralization of paddy soils in a cultivation chronosequence in China. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17 (6): 1588—1598
- [32] Bardgett R D, Streeter T C, Bol R. Soil microbes compete effectively with plants for organic nitrogen inputs to temperate grasslands. Ecology, 2003, 84 (5): 1277—1287
- [33] 吴江琪, 马维伟, 李广. 甘南尕斯湖湿地泥炭地不同退化状态下氮素的特征. 水土保持通报, 2016, 36 (5): 107—112
Wu J Q, Ma W W, Li G. Nitrogen characteristics of peat land under different degradation states in Gahai Lake wetland of south Gansu Province (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36 (5): 107—112

Evolution of Soil Organic Nitrogen Composition with Degradation of Zoige Alpine Marsh Wetland

HU Rong¹ YE Chun¹ PU Yulin^{1,2†} HU Sijia¹ ZHANG Shirong³ XIANG Shuang²
JIA Yongxia¹ XU Xiaoxun³

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

(2 Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization, CAS & Ecological Restoration and Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(3 College of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract 【Objective】 This study was oriented to characterize the evolution of organic nitrogen composition and bioavailabilities of its components with degradation of alpine wetlands, in an attempt to provide certain basic data for restoration of degraded alpine marsh wetlands. 【Method】 Soil samples were collected from 4 types of wetlands, including relatively pristine marsh (RPM), lightly degraded marsh (LDM), moderately degraded marsh (MDM), and heavily degraded marsh (HDM) in the Zoige Wetland Nature Reserve. Organic nitrogen in the soil samples were fractionated using the Bremner method. Multivariate stepwise regression analysis was performed to determine contribution of each fraction of organic nitrogen to availability of soil nitrogen. 【Result】 With RPM turning into MDM and HDM, soil total nitrogen (TN) decreased significantly or by 33.4%—77.8% and 69.4%—93.7%, respectively, and alkalytic nitrogen (AN) by 36.8%—80.2% and 57.6%—82.2%, respectively, in content. In terms of contents of acidolytic ammonia nitrogen, amino acid nitrogen and unknown nitrogen, the four types of wetlands exhibited an order of RPM > LDM > MDM > HDM. With a marsh degrading, amino sugar nitrogen therein increased first and

then decreased in content, and the proportion of amino sugar nitrogen and ammonia nitrogen to TN increased, while that of amino acid nitrogen to TN decreased. The main organic nitrogen fraction affecting the content of soil available nitrogen in RPM and HDM was ammonia nitrogen and unknown nitrogen, respectively; whereas that in LDM and MDM was amino acid nitrogen.

【Conclusion】 Degradation of the Zoige Alpine Wetland reduced the contents of soil TN and the fraction of acidolytic nitrogen, weakened nitrogen “sink” function of the soil, and changed the contribution of each organic nitrogen fraction to nitrogen availability.

Key words Zoige; Wetland degradation; Organic nitrogen fractions; Nitrogen accumulation; Nitrogen availability

(责任编辑：陈荣府)