

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.06.002

## 排水条件下川西高原典型高寒沼泽湿地土壤氮素 空间变异特征研究

杨靖宇,余凌帆,鄢武先,曹小军,贾晨

(四川省林业科学研究院,四川成都 610081)

**摘要:**为探究排水条件下典型高寒沼泽湿地土壤氮素空间变异特征,2017年8月在若尔盖地区选择3种典型湿地类型,即泥炭沼泽(Peat marsh,PM)、沼泽草甸(Swamp meadow,SM)和草地草甸(Grass meadow,DM)为研究对象,对0~20 cm、20 cm~40 cm、40 cm~60 cm、60 cm~80 cm 4个层次土样进行测试分析,结果显示:各湿地类型土壤全氮(TN)、有效氮(EN)、硝态氮(NN)、有机氮(DON)具有显著的垂向空间变异规律,而且在各层次间都表现为PM>SM>GM的分布特征,而铵态氮的空间变异较大,呈无规律分布,TN、EN、NN、DON之间均具有显著的正相关关系。3种湿地类型不同土壤氮素含量空间分异特征表明,土壤有效氮(EN)、硝态氮(NN)、有机氮(DON)对指示高寒沼泽湿地退化具有重要意义。

**关键词:**排水;高寒沼泽湿地;土壤氮;变异特征

中图分类号:S153.6 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2018)06-0007-06

## A Study of Variation Character of Soil Nitrogen Compositions under Drainage Condition in Typical Alpine Marsh Wetlands of the Western Sichuan Plateau

YANG Jing-yu YU Ling-fan YAN Wu-xian CAO Xiao-jun Jia Chen

(Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** Aiming to understand the variation character of various nitrogen compositions in typical alpine swamp soil, three sites with different ground water tables in Zoige Plateau were selected as test objects in August 2017, soil samples from different layers (0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm) were determined. The result showed that there was significant vertical variation by soil profile in total nitrogen (TN), effective nitrogen (EN), nitrate nitrogen (NN), organic nitrogen (DON). In different layers, there was regular distribution (PM > SM > GM) by wetland types. Nevertheless, ammonia nitrogen (AN) showed considerable spatial variability and less distribution rules, there was significant positive relationship between any two of soil nitrogen compositions. In conclusion: EN, NN and DON will be of great importance in indicating the alpine swamp wetland degradation.

**Key words:** Drainage, Alpine marsh, Nitrogen compositions, Variation character

湿地被誉为“地球之肾”,是地球上除海洋、森林外的第三大生态系统,是人类赖以生存的重要环

境之一<sup>[1]</sup>。湿地在全球氮循环中起着重要作用,是氮素源与汇的转换器。湿地系统中氮素主要包括无

收稿日期:2018-11-13

基金项目:四川省省财政专项(2018CZZX05);森林和湿地恢复和保育四川省重点实验室资助项目。

作者简介:杨靖宇(1986-),男,助理研究员,博士,主要从事高寒湿地生态研究,e-mail:330286931@qq.com。

机形态的硝酸氮( $\text{NO}_3^-$ )、氨氮( $\text{NH}_4^+$ )和溶解态有机氮,还包括有机物质形成的颗粒氮等。湿地环境中氮的迁移和转化的过程显著影响着湿地生态系统的结构和功能。湿地环境中 $\text{N}_2\text{O}$ 等温室气体的排放会加剧全球变暖趋势,湿地环境中氮循环过程与全球气候变化密切相关<sup>[2]</sup>。因此,湿地土壤氮素研究备受关注。

沼泽湿地土壤氮素循环和分布特征既受土壤自身理化性质的影响,又受沼泽湿地外界环境因素的影响。湿地土壤理化特性对氮矿化有显著影响,如土壤pH值、容重、水位、水分、温度、有机质含量等。土壤氮在氧化与还原条件下矿化均可发生,在淹水湿地的土壤中,矿化氮主要以 $\text{NH}_4^+$ 的形式存在<sup>[2]</sup>。沼泽湿地外界环境条件如积水条件<sup>[3]</sup>、放牧干扰<sup>[4]</sup>、排水疏干<sup>[5]</sup>、植物入侵<sup>[6]</sup>等都会改变沼泽湿地土壤中氮含量分布和不同形态氮素的分异特征,进而影响土壤氮素平衡和循环过程。在沼泽湿地中,溶解态的氮是重要的氮循环产物。

我国现有湿地面积6594万 $\text{hm}^2$ ,约占世界湿地总面积的1/10<sup>[7]</sup>。我国湿地资源类型十分丰富,除了《湿地公约》中的湿地类型之外,还拥有分布于青藏高原地区的独特湿地类型——高寒湿地。若尔盖高寒湿地就是其中的典型代表,若尔盖高寒湿地面积约为100万 $\text{hm}^2$ ,是世界上面积最大的高寒沼泽湿地<sup>[3]</sup>。近年来,在自然因素和人为因素的双重影响下,特别是人工开沟排水疏干等人为干扰导致若尔盖高寒沼泽湿地发生严重退化萎缩现象<sup>[8-10]</sup>。当前湿地生物地球化学领域的研究基本解释了湿地土壤中氮素的迁移转化机理<sup>[3-6,11]</sup>,但在高寒湿地生态系统中土壤氮素的分异特征、迁移转化过程和影响因素等方面的研究依然有限。

本研究以若尔盖县喀哈尔乔具有人工挖沟排水疏干历史特征的高寒沼泽湿地生态系统为研究对

象,选择泥炭沼泽(Peat marsh, PM)、沼泽草甸(Swamp meadow, SM)和草地草甸(Grass meadow, DM)3种典型高寒湿地类型的试验样地,以不同湿地类型、不同层次的湿地土壤为试验材料,探讨疏干排水背景下的典型高寒沼泽湿地氮素分异特征,以期为高寒沼泽湿地的监测、恢复和保护提供理论参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

若尔盖气候为典型的大陆性高原寒温带湿润半湿润季风气候,其高寒气候特征明显,长冬无夏、霜冻期长、干雨季分明。年平均气温 $0.7\text{ }^\circ\text{C} \sim 1.1\text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均降水量为 $647\text{ mm} \sim 753\text{ mm}$ ,是黄河流域的多雨区,并呈冬(11月—4月)干、夏(5月—10月)湿,雨热同季的特点。

研究区位于若尔盖县城以南13 km的班佑乡多玛村,属于四川喀哈尔乔湿地自然保护区实验区,区内地势以宽谷、缓丘为基本特征,由于地面平坦低洼,地表水排泄不畅,水流缓慢,形成了典型的高寒宽谷沼泽,区内分布有50多 km 的人工排水沟。

### 1.2 样地设置和土样采集

2017年8月,在研究区选择PM、SM、GM 3种湿地类型,调查访问每种湿地类型的水位情况、土壤类型、植被类型、植被盖度等基本概况,利用GPS测定经纬度、海拔(见表1)。每个湿地类型设置3个样地作为重复。每个样地均按 $0 \sim 20\text{ cm}$ 、 $20 \sim 40\text{ cm}$ 、 $40 \sim 60\text{ cm}$ 、 $60 \sim 80\text{ cm}$  4个层次分层取样,按梅花形采集5~7个土样进行混合,共采集PM、SM、GM 3种湿地类型4个土壤层次混合土样36个,混合均匀的土样装入自封袋运至室内阴凉处晾干过筛。

表1 样地基本概况

Tab. 1 The characterization of sample sites

| 样地 | 水位情况                                  | 经纬度   | 海拔      | 土壤类型  | 植被类型  |
|----|---------------------------------------|---|---------|-------|---|
| PM | 常年或季节性长期积水,平均淹水深度 $> 10\text{ cm}$ 。  | N: $102^\circ 59' 07''$<br>E: $33^\circ 27' 23''$ | 3 444 m | 泥炭土   | 以木里苔草( <i>Carex muliensis</i> )为优势种、伴生四川嵩草( <i>Kobresia setchwanensis</i> )等,植被盖度 $> 75\%$ 。  |
| SM | 无积水或季节性短期积水,平均淹水深度 $< 10\text{ cm}$ 。 | N: $102^\circ 58' 43''$<br>E: $33^\circ 27' 24''$ | 3 446 m | 沼泽土   | 以四川嵩草( <i>Kobresia setchwanensis</i> )为优势种,伴生有垂穗披碱草( <i>Elymus nutans</i> )、鹅绒委陵菜( <i>Potentilla anserina</i> )等,植被盖度 $> 80\%$ 。  |
| GM | 无积水,平均地下水深度 $> -50\text{ cm}$ 。       | N: $102^\circ 58' 12''$<br>E: $33^\circ 27' 28''$ | 3 447 m | 高山草甸土 | 以垂穗披碱草( <i>Elymus nutans</i> )、鹅绒委陵菜( <i>Potentilla anserina</i> )为主,分布有华丽龙胆( <i>Gentiana sino-ornata</i> Balf. f.)、甘肃马先蒿( <i>Pedicularis kansuensis</i> )等,植被盖度 $> 85\%$ 。 |

### 1.3 土壤指标测定

土壤各指标的测定或计算方法如下:土壤 pH 值采用电位法(水:土=2.5:1),土壤有机质(SOM)和有机碳(SOC)测定采用重铬酸钾氧化-外加热法,有效磷(AP)采用  $\text{NaHCO}_3$  浸提-钼锑钨比色法,速效钾(AK)采用  $\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提-火焰光度计法;全磷(TP)采用  $\text{NaOH}$  熔融-钼锑钨比色法,全钾(TK)采用  $\text{NaOH}$  熔融-火焰光度计法;全氮(TN)采用凯氏定氮法,有效氮(EN)采用碱解扩散法,铵态氮(AN)和硝态氮(NN)采用连续流动分析仪测定,溶解有机氮(DON)按“ $\text{DON} = \text{EN} - (\text{AN} - \text{NN})$ ”计算。

### 1.4 数据处理与分析

研究数据用 Excel 2010 (Microsoft<sup>2</sup> Excel versions 2010) 软件进行前期处理和图表绘制,运用 SPSS 19.0 (IBM<sup>®</sup> SPSS<sup>®</sup> Statistics 19) 进行统计分析。对 TN、EN、DON、NN、AN 数据采用单因素方差分析(One-way ANOVA),应用 LSD 多重比较法进行差异显著性分析( $p < 0.05$ ),应用 Pearson 检验法分析土壤不同理化性质与不同氮素组分之间的相关

性。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质空间变异特征

土壤样品的理化性质如表 2 所示,在本研究中不同湿地类型土壤各理化性质存在着明显的空间变异。土壤 pH 值在 5.92~8.18 的范围内随土壤类型的变化而降低,表现为  $\text{PM} > \text{SM} > \text{GM}$ ,而且在不同湿地类型中都是随着土壤层次的加深而升高,呈  $0 \sim 20 \text{ cm} < 20 \text{ cm} \sim 40 \text{ cm} < 40 \text{ cm} \sim 60 \text{ cm} < 60 \text{ cm} \sim 80 \text{ cm}$  的分布规律。土壤有机质在 3 种湿地类型土壤中均呈现逐层递减的变异特征,最高平均值( $399.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )出现在 SM 的  $0 \sim 20 \text{ cm}$  层次,在 PM 中除表层略低于 SM 外,其他各层次均在 3 种湿地类型中呈现最高水平含量。土壤全磷在 GM 中含量最低,而土壤全钾在 GM 中的含量高于其他类型湿地土壤,在土壤层次规律上,全磷总体表现出逐层递减的分布规律,表现为  $0 \sim 20 \text{ cm} > 20 \text{ cm} \sim 40 \text{ cm} > 40 \text{ cm} \sim 60 \text{ cm} > 60 \text{ cm} \sim 80 \text{ cm}$ 。全钾在 PM 土壤

表 2 不同湿地类型、不同层次土壤理化性质

Tab.2 Soil physicochemical properties in different soil layers in PM, SM and GM

| 类型 | 层次    | pH          | 有机质( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全磷( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全钾( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) |
|----|-------|-------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| PM | 0~20  | 7.77 ± 0.05 | 349.37 ± 5.45                          | 1.03 ± 0.04                           | 15.6 ± 0.51                           |
|    | 20~40 | 7.92 ± 0.07 | 331.46 ± 5.13                          | 0.92 ± 0.07                           | 18.82 ± 1.04                          |
|    | 40~60 | 8.05 ± 0.06 | 315.02 ± 5.55                          | 1.01 ± 0.12                           | 16.85 ± 1.33                          |
|    | 60~80 | 8.13 ± 0.04 | 296.13 ± 10.43                         | 0.98 ± 0.11                           | 17.54 ± 2.93                          |
| SM | 0~20  | 6.10 ± 0.11 | 399.26 ± 48.52                         | 1.37 ± 0.02                           | 16.33 ± 1.22                          |
|    | 20~40 | 6.55 ± 0.17 | 171.15 ± 23.57                         | 1.00 ± 0.12                           | 26.88 ± 2.75                          |
|    | 40~60 | 7.04 ± 0.41 | 84.36 ± 33.79                          | 0.66 ± 0.06                           | 30.27 ± 1.15                          |
| GM | 60~80 | 7.32 ± 0.43 | 35.88 ± 5.81                           | 0.62 ± 0.05                           | 31.02 ± 1.08                          |
|    | 0~20  | 6.11 ± 0.05 | 133.22 ± 18.72                         | 1.00 ± 0.03                           | 29.70 ± 0.99                          |
|    | 20~40 | 6.23 ± 0.05 | 39.12 ± 3.46                           | 0.82 ± 0.06                           | 33.68 ± 0.66                          |
|    | 40~60 | 6.39 ± 0.01 | 22.37 ± 3.19                           | 0.68 ± 0.04                           | 34.72 ± 0.71                          |
|    | 60~80 | 6.54 ± 0.06 | 14.67 ± 0.41                           | 0.61 ± 0.01                           | 34.86 ± 0.54                          |

中含量范围为  $15.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 0.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 18.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 1.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,层次间变异不大;而在 SM 和 GM 中最高平均值则达  $34.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 0.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,且明显呈现  $0 \sim 20 \text{ cm} < 20 \sim 40 \text{ cm} < 40 \sim 60 \text{ cm} < 60 \sim 80 \text{ cm}$  逐层递增的变异特征。

### 2.2 土壤 SOC、TN 和 C/N 空间变异特征

从图 1 可以看出,土壤 SOC 和 TN 含量随着土层深度的增加都呈现出递减趋势,表现出较强的空间变异特征。土壤 SOC 含量仅有 SM 在  $0 \sim 20 \text{ cm}$  层次达到最大值( $231.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 28.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),在其他层次都表现为 PM 含量最高,最低值

则出现在 GM 的  $60 \text{ cm} \sim 80 \text{ cm}$  层次,仅为  $8.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;TN 含量不同湿地类型表现出一致的土壤垂向变异规律,即  $0 \sim 20 \text{ cm} > 20 \text{ cm} \sim 40 \text{ cm} > 40 \text{ cm} \sim 60 \text{ cm} > 60 \text{ cm} \sim 80 \text{ cm}$ ,且在各个层次不同湿地类型间都表现为  $\text{PM} > \text{SM} > \text{GM}$ 。通过对相同层次不同湿地类型间的差异显著性分析得出,PM 土壤 SOC 和 TN 含量在各个层次均与 SM 和 GM 具有显著差异( $P < 0.05$ )。各湿地类型土壤 C/N 比值介于 8.29~26.27 之间,PM 整体上呈现较高的土壤 C/N 比值,SM 和 GM 土壤 C/N 比值一致表现为随土层加深而减低的垂向分异规律,而 PM 土

壤则表现出逐层递增的趋势。

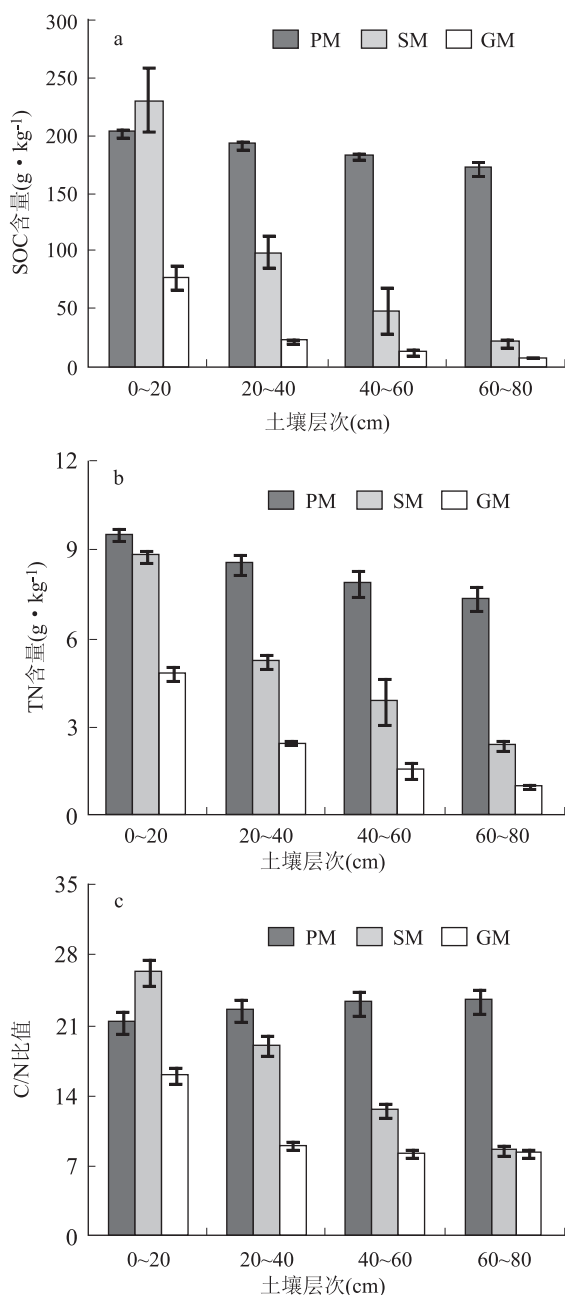


图1 不同土壤层次各湿地类型 SOC、TN 和 C/N 比值变异特征

Fig. 1 Variation character of SOC (a), TN (b) and C/N ratio (c) in different soil layers in PM, SM and GM

### 2.3 土壤 EN、AN、NN 和 DON 变异特征

图2所示为不同湿地类型土壤各层次 EN、AN、NN 和 DON 含量特征。

EN 在不同类型湿地土壤中均表现出逐层递减的垂直变异特征(见图 2a)。各层含量水平均以 PM 为最高,GM 为最低;除在 0~20 cm 层次 PM 与 SM 未表现出显著差异( $P > 0.05$ )外,在其他土壤层次

各类型间都具有显著差异( $P < 0.05$ )。

AN 在不同湿地类型土壤中并未表现出明显的垂直分异规律(见图 2b)。在 SM、GM 中最高值出现在表层,具有明显的表层富集特征,而在 PM 中最高值却出现在最下层。在各个层次,PM 与 SM 均没有显著性差异( $P > 0.05$ ),除 60 cm~80 cm 层次外,PM 与 GM 皆具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

NN 总体呈现明显的土壤层次间垂直变异规律(见图 2c),总体含量在  $43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 4.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 383.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 36.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,各层次以 PM 为最高,GM 为最低。同一土壤层次,SM 与 GM 多表现为差异不显著( $P > 0.05$ ),其他各湿地类型间多表现出显著性差异( $P < 0.05$ )。

DON 在不同湿地类型中表现出逐层递减的垂直变异规律(见图 2d)。DON 含量水平在各个土壤层次均为 PM 最高,GM 最低;除在 0~20 cm 层次 PM 与 SM 未表现出显著差异( $P > 0.05$ )外,在其他土壤层次各类型间都具有显著差异( $P < 0.05$ )(见表 3)。

### 2.4 不同氮素组分与土壤理化性质间相关性

TN、EN、NN、DON 均与 pH、SOC、TP、TK 表现出显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),而 AN 则表现出与 pH 值的负相关关系,与 TP 和 SOC 没有显著相关关系。在不同氮组分之间,TN 与 EN、NN、DON 均具有显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),AN 与其他组分没有显著相关关系,EN 与 NN、DON 具有显著相关关系( $P < 0.01$ )(见表 3)。

## 3 结论与讨论

湿地土壤氮素主要来源于生态系统内植物新陈代谢和固氮作用、动物及微生物排泄物或残体,部分氮素来源于地表径流、降水以及大气沉降。因此,土壤氮素主要分布于生物活动和大气沉降的表层区域,常常富集在垂直剖面的表层,例如在高寒地区泥炭沼泽和沼泽草甸 0~30 cm 土层的氮储量占 100 cm 土壤层次氮储量的一半以上<sup>[12]</sup>。一般来说,上层土壤氮素的含量多受气候、植被、水分等因素的影响,而下层土壤主要受土壤结构、性质及成土母质的影响<sup>[13]</sup>。在本研究中,在草地草甸土壤中由于泥炭层很薄(<30 cm),且下层开始出现砂质土壤层,其全氮及氮组分含量相对泥炭沼泽都处于很低水平。

土壤有机碳分布对氮素的垂直分布具有显著影响,土壤垂直空间上层有机质含量相对丰富,其氮素

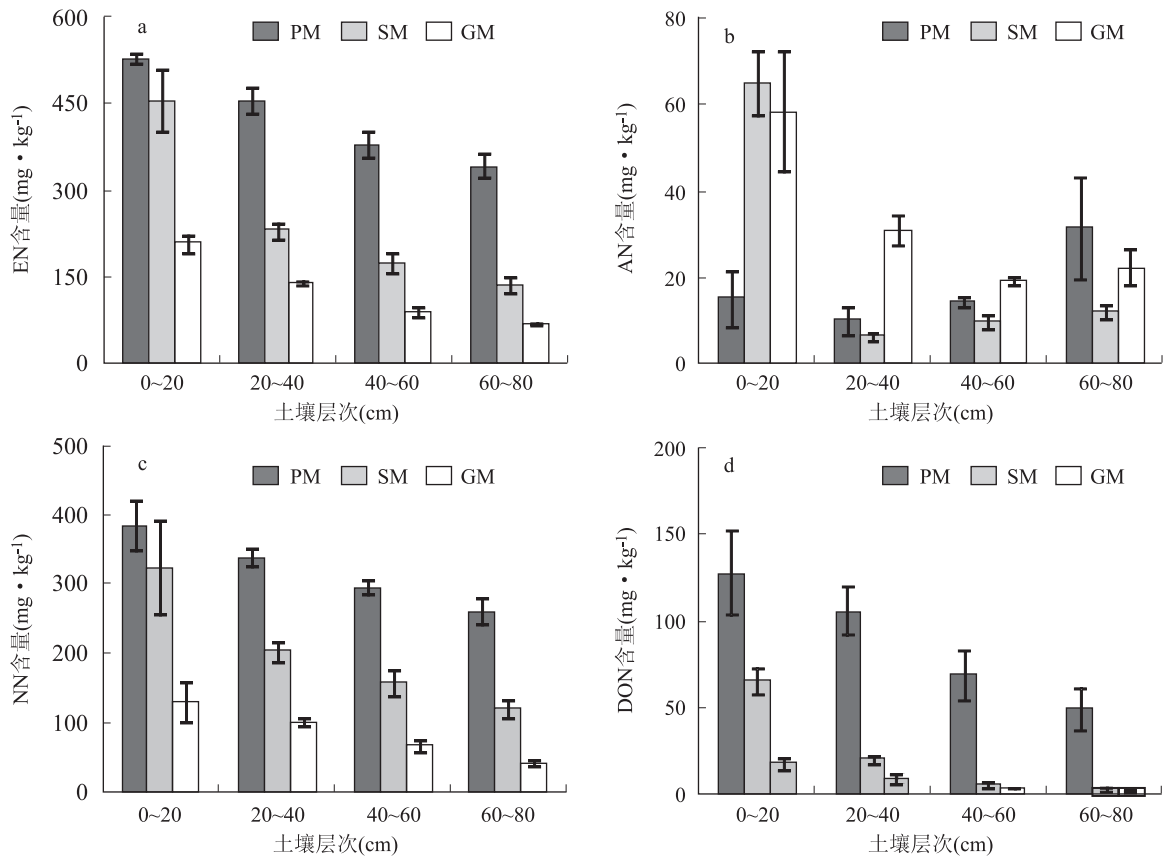


图 2 不同土壤层次各湿地类型 EN、AN、NN 和 DON 变异特征

Fig. 2 Variation character of EN (a), AN (b), NN (c) and DON (d) in different soil layers in PM, SM and GM

表 3 土壤理化性质与不同氮素组间 Pearson 相关性分析

Tab. 3 Pearson correlation between soil physicochemical properties and nitrogen compositions

|     | pH        | TP        | TK        | SOC       | TN        | EN        | AN        | NN        | DON       |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| pH  | 1         | -0.033    | -0.527 ** | 0.425 **  | 0.464 **  | 0.477 **  | -0.456 ** | 0.537 **  | 0.509 **  |
| TP  | -0.033    | 1         | -0.675 ** | 0.765 **  | 0.751 **  | 0.717 **  | 0.523 **  | 0.513 **  | 0.664 **  |
| TK  | -0.527 ** | -0.675 ** | 1         | -0.950 ** | -0.927 ** | -0.903 ** | -0.061    | -0.805 ** | -0.881 ** |
| SOC | 0.425 **  | 0.765 **  | -0.950 ** | 1         | 0.966 **  | 0.932 **  | 0.190     | 0.831 **  | 0.888 **  |
| TN  | 0.464 **  | 0.751 **  | -0.927 ** | 0.966 **  | 1         | 0.976 **  | 0.132     | 0.859 **  | 0.945 **  |
| EN  | 0.477 **  | 0.717 **  | -0.903 ** | 0.932 **  | 0.976 **  | 1         | 0.085     | 0.887 **  | 0.975 **  |
| AN  | -0.456 ** | 0.523 **  | -0.061    | 0.190     | 0.132     | 0.085     | 1         | -0.007    | -0.060    |
| NN  | 0.537 **  | 0.513 **  | -0.805 ** | 0.831 **  | 0.859 **  | 0.887 **  | -0.007    | 1         | 0.798 **  |
| DON | 0.509 **  | 0.664 **  | -0.881 ** | 0.888 **  | 0.945 **  | 0.975 **  | -0.060    | 0.798 **  | 1         |

\*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

各组分含量也高<sup>[14]</sup>。本研究结果显示土壤氮素各组分均与 SOC 呈显著的正相关关系,同时土壤全氮与有机碳含量在不同类型湿地均表现出一致的垂向变异变化规律,这与李丽等人的研究结果相一致<sup>[15]</sup>。

有研究认为,土壤 C/N 比值小于 30 时,有机碳会成为土壤异养呼吸的限制因子<sup>[16]</sup>。当土壤 C/N 比值介于 20~30 之间,氮的固持和矿化过程处于相对平衡状态;当 C/N 比值低于 20 时,氮的矿化作用

占优势<sup>[17]</sup>。已有研究发现无机氮增加可能减缓泥炭沼泽土壤有机碳的矿化,无机氮增加直接导致 C/N 比值的降低,说明 C/N 比值较低时更不利于土壤碳库的稳定性<sup>[18]</sup>。本研究结果显示泥炭沼泽的 C/N 比值最高,其碳库也最稳定,而处于湿地退化逆向演替环节的草地草甸中 C/N 比值低至 8.29,说明其土壤有机碳很容易分解矿化成为碳源,同时,氮也很容易矿化损失。因此,C/N 比值作为沼泽湿地的退化具有一定指示作用。

土壤有效氮的空间分布特征反映了湿地氮素的整体供给情况,在一定程度上对湿地植被群落的生长与构成、生态系统的稳定性具有重要影响[ c ]。本研究结果表明泥炭沼泽具有更高的有效氮含量,也说明氮养分供给能力较强,因此,泥炭沼泽通常具有更丰富的生物多样性和更高的生物量<sup>[19]</sup>。

硝态氮和铵态氮既是氮矿化作用和硝化作用的产物,又是大气氮沉降的两种主要氮素形态,具有较大的空间变异性,两者在土壤中空间分布会对土壤理化性质产生一定影响,并导致土壤微生物及酶活性产生不同的响应,最终影响或改变湿地土壤有机碳矿化及氮素循环过程<sup>[18,20]</sup>。本研究结果显示,铵态氮相对硝态氮具有更大的空间异质性,且相对其他氮组分没有明显的土壤层次分布规律和湿地类型间差异(图 2b)。因此,如果作为湿地生态系统评价指标因子的话,硝态氮具有更好的指示作用。

由于 DON 极易随水分运移而发生迁移,因此,人为干扰下的湿地旱化(如人为开沟排水疏干),不仅导致土壤 DON 含量下降,还会加速土壤中 DON 的流失<sup>[21]</sup>。因此,DON 还具有环境指示意义,特别是在湿地退化的逆向演替过程中,对其退化状态具有很好的指示作用。胡金明等对纳帕海湿地 4 种不同退化程度湿地土壤 DON 研究发现,土壤水分条件越差 DON 含量越低<sup>[17]</sup>。本研究中基于疏干排水背景下水分梯度的 3 种湿地类型就表现出泥炭沼泽 DON 含量最高,随湿地水分特征而降低的规律性分异特征。

基于对土壤氮素不同组分空间分布特征的研究,还需一步开展高寒沼泽湿地氮素的迁移运输、碳氮循环耦合机制、氮素在湿地内部要素之间的循环机制等方面的研究,进而为退化高寒沼泽湿地的生态修复与保护实践提供更多的数据参考和理论支撑。

#### 参考文献:

- [1] 雷昆,张明祥. 中国的湿地资源及其保护建议[J]. 湿地科学, 2005,3(2):81~86.
- [2] 王洋,刘景双,孙志高,等. 湿地系统氮的生物地球化学研究概述[J]. 湿地科学,2006(04):311~320.
- [3] 张晓堂,田昆,袁杰,等. 积水条件对若尔盖典型高寒沼泽碳氮垂直分布的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2017,37(02):116~121.
- [4] 王雪,郭雪莲,郑荣波,等. 放牧对滇西北高原纳帕海沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响[J]. 生态学报,2018,38(07):2308~2314.
- [5] 王玉博,赵光影,臧淑英,等. 小兴安岭不同类型沼泽湿地土壤碳氮分布特征[J]. 安徽农业科学,2017,45(04):47~50,91.
- [6] 金宝石,闫鸿远,章文龙,等. 互花米草入侵下闽江河口沼泽土壤中各形态氮含量和储量[J]. 湿地科学,2017,15(03):375~384.
- [7] 徐慧博,乔红娟,雷茵茹. 中国湿地保护现状问题及对策分析[J]. 南方农业,2018,12(19):19~20,23.
- [8] 张骁栋,康晓明,李春义,等. 排水对三江平原和若尔盖沼泽生态影响的比较[J]. 生态学杂志,2015(7):2030~2040.
- [9] 张明,扎科,王乾,等. 若尔盖高寒湿地排水沟壑填堵工程定性评价[J]. 四川林勘设计,2010(4):15~19.
- [10] 张晓云,吕宪国,顾海军. 若尔盖湿地面临的威胁、保护现状及对策分析[J]. 湿地科学,2005,3(4):292~297.
- [11] 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[J]. 环境科学,2009,30(8):2216~2220.
- [12] 马坤,张颖,唐素贤,等. 若尔盖高寒湿地土壤全氮空间分布特征[J]. 生态学杂志,2016,5(8):1988~1995.
- [13] 孙志高,刘景双. 三江平原典型小叶樟湿地土壤氮的垂直分布特征[J]. 土壤通报,2009,40(6):1342~1348.
- [14] 肖焯,黄志刚,武海涛,等. 三江平原 4 种典型湿地土壤碳氮分布差异和微生物特征[J]. 应用生态学报,2014,25(10):2847~2854.
- [15] 李丽,高俊琴,雷光春,等. 若尔盖不同地下水位泥炭湿地土壤有机碳和全氮分布规律[J]. 生态学杂志,2011,30(11):2449~2455.
- [16] Kaye J P, Hart S C. Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms[J]. Trends in Ecology & Evolution,1997,12(4):139~143.
- [17] 胡金明,董云霞,袁寒,等. 纳帕海湿地不同退化状态下土壤氮素的分异特征[J]. 土壤通报,2012,3(3):690~695.
- [18] 陶宝先,宋长春. 氮素形态对泥炭沼泽土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态环境学报,2015(3):372~377.
- [19] 马维伟,王辉,李广,等. 甘南尕斯湖湿地退化过程中植被生物量变化及其季节动态[J]. 生态学报,2017,37(15):5091~5101.
- [20] Min K, Kang H, Lee D. Effects of ammonium and nitrate additions on carbon mineralization in wetland soils[J]. Soil Biology & Biochemistry,2011,43(12):2461~2469.
- [21] Jones D L, Shannon D, Murphy D V, et al. Role of dissolved organic nitrogen (DON) in soil N cycling in grassland soils[J]. Soil Biology & Biochemistry,2004,36(5):749~756.