

湿地退化条件下土壤碳氮磷储量与生态化学计量变化特征

叶 春<sup>1</sup>, 蒲玉琳<sup>1</sup>, 张世熔<sup>2</sup>, 王贵胤<sup>2</sup>, 王奥博<sup>1</sup>, 王 丹<sup>1</sup>, 贾永霞<sup>1</sup>, 徐小逊<sup>2</sup>

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 四川农业大学环境学院, 成都 611130)

**摘要:** 为了研究湿地退化过程中土壤碳氮磷储量与生态化学计量变化,明确碳氮“汇”功能的变化和土壤碳、氮、磷的平衡关系,采用实地采样调查、室内分析与数理统计法,研究了若尔盖自然湿地保护区内未退化湿地沼泽(MA)、沼泽化草甸(MM)、草甸(ME)3种不同退化程度湿地的典型样地在碳氮磷含量、储量以及生态化学计量的变化特征。结果表明,草甸化沼泽土与草甸土全剖面总有机碳、全氮含量较沼泽土分别降低了 29.55%,6.52%和 67.53%,40.04%,碳氮储量分别降低了 67.49%,60.10%和 85.14%,54.47%;3种土壤全磷剖面含量大小顺序为 MM>ME>MA,其储量高低顺序是 ME>MA>MM。随着土层深度的增加,沼泽土的总有机碳、全氮含量明显升高,全磷含量与草甸化沼泽土、草甸土的总有机碳、全氮、全磷含量均呈现降低趋势;3种土壤碳氮磷储量 40—100 cm 土层高于 0—40 cm 土层。沼泽土、草甸化沼泽土、草甸土 3 种不同类型土壤 C/N 分别为 40.38,31.70,23.26,C/P 分别为 409.52,247.46,113.07,N/P 分别为 10.43,7.90,5.02,土壤 C/N、C/P、N/P 均随湿地退化而减小,较高的 C/P 与 N/P<14 揭示氮磷元素均是影响植物生长的限制性因素,且受氮素限制高于磷素。因此,若尔盖湿地退化导致土壤碳氮含量与储量降低,碳氮“汇”功能减弱,尤其是碳“汇”。

**关键词:** 退化湿地; 碳氮磷; 生态化学计量学; 若尔盖

**中图分类号:** S153.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0181-07

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.031

Ecological Stoichiometry Characteristics and Storage of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus During the Wetland Degradation Process

YE Chun<sup>1</sup>, PU Yulin<sup>1</sup>, ZHANG Shirong<sup>2</sup>, WANG Guiyin<sup>2</sup>,  
WANG Aobo<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>1</sup>, JIA Yongxia<sup>1</sup>, XU Xiaoxun<sup>2</sup>

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130;  
2. College of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

**Abstract:** The aims of this study were to investigate the ecological stoichiometry characteristics during the process of wetland degradation, and clarify the relationship between the changes in C and N sink function of the soil and the balance in soil C, N and P. Soil C, N and P concentrations, storages and ecological stoichiometry in three kinds of wetland landscape with different degrees of degradation, i. e. marsh (MA), marsh meadow (MM) and meadow (ME) in the Zoige Wetland Nature Reserve, were studied by means of field investigation, laboratory analysis, and mathematical statistics. Compared with MA soil, total organic C and N concentrations in the whole soil profiles decreased by 29.55% and 6.52% in MM soil, and by 67.53% and 40.04% in ME soil; storages of C and N decreased by 67.49% and 60.10% in MM soil, and by 85.14% and 54.47% in ME soil, respectively. Total P concentration in the soil followed the order of MM>ME>MA, and P storage in the soil followed the order of ME>MA>MM. Both total organic C and N concentrations in the soil of MA increased obviously with increasing soil depth, while the concentrations of total organic C, N and P in the MM and ME soil decreased with increasing soil depth. For all three types of soil, C, N and P storages in the 40—100 cm layers were generally higher than those in the 0—40 cm layers. For the soil in the MA, MM and ME, C/N was 40.38, 31.70 and 23.26, while C/P was 409.52, 247.46 and 113.07, and N/P was 10.43,

收稿日期:2016-06-07  
资助项目:国家自然科学基金项目(41401328);四川省教育厅项目(14ZB0011)  
第一作者:叶春(1992—),女,四川绵阳人,硕士研究生,主要从事土壤碳氮养分循环研究。E-mail:zhizhike@sina.cn  
通信作者:蒲玉琳(1976—),女,四川成都人,副教授,硕士生导师,主要从事土壤碳氮养分循环研究。E-mail:pyllin@sicau.edu.cn

7.90 and 5.02, respectively, with C/N, C/P and N/P declining as the wetland degradation became intensified. When C/P is high and N/P is <14, both N and P are limiting factors for plant growth, and N is more limiting than P. In conclusion, degradation of the Zoige Wetland has led to decreased concentrations and storages of C and N in the soil, and the C and N sink function of the soil, in particular the C sink function, has been weakened during the wetland degradation process.

**Keywords:** degraded wetland; C, N, P; ecological stoichiometry; Zoige

生态化学计量学将不同尺度、不同生物群系和不同研究领域的生物学研究在元素水平上统一了起来<sup>[1]</sup>,主要强调碳(C)、氮(N)、磷(P)3种元素,为生态学与生物化学、土壤化学等研究领域开辟了新方向。碳、氮、磷作为土壤中重要的生源要素,是表征土壤肥力水平的重要元素<sup>[2]</sup>,同时碳、氮、磷比是反映土壤内部碳氮磷循环的主要指标,在探究对土壤生产力起限制性作用的营养元素平衡过程中发挥着重要作用<sup>[3-4]</sup>。因此,研究土壤中碳、氮、磷生态化学计量学特征对揭示土壤养分的限制情况以及碳、氮、磷循环和平衡机制具有重要意义。

在自然因素与人为因素共同作用下,全球超过一半的湿地均出现了不同程度的退化,湿地退化会对植物生物群落、土壤、水文等带来不同程度的影响,甚至影响到整个湿地生态系统的平衡<sup>[5-6]</sup>。若尔盖高寒湿地是世界上著名的高原湿地,冷湿气候条件下沼泽发育强烈,分布着我国面积最大的泥炭地。但自20世纪60年代以来,该区湿地大面积退化,演替趋势大致为沼泽→沼泽化草甸→草甸<sup>[7]</sup>。植物群落以及生态景观的改变,对土壤中碳、氮、磷等要素的生物地球化学过程产生深刻影响,进而引起它们分布格局的变化,生态化学计量学正是反映这种变化的表现性指标<sup>[8]</sup>。湿地土壤中的碳、氮、磷元素是可以表征湿地生态系统生产力的重要因子,有机碳是表征土壤肥力大小的首要指标,并且碳是构成植物体干物质最主要的元素,氮和磷是植物生长最常见的限制性养分,三者密切相关<sup>[3,9]</sup>。目前,国内学者对湿地土壤生态系统碳、氮、磷生态化学计量学特征的研究主要集中在闽江河口等平原湿地和草海高原湿地<sup>[8, 10-11]</sup>,对若尔盖高寒湿地土壤碳、氮、磷等元素的研究,主要关注土壤有机碳及氮含量及剖面分布特征<sup>[12-14]</sup>,或不同梯度退化沼泽土壤氮磷的变化特征<sup>[15]</sup>,结合生态化学计量学的研究报道仅有局部区域,如花湖湿地保护区平坝与不同坡向山原土壤的碳、氮、磷计量特征<sup>[16]</sup>。但在若尔盖大面积湿地退化问题日益严重的情况下,选择多个典型区域的湿地退化系列土壤,明确湿地退化可能给土壤碳、氮、磷及其生态化学计量带来怎样的影响,值得深入研究。因此,本文通过化学计量理论,以若儿盖花湖、向东牧场、黑青乔、黑河牧场等多个典型区域的不同退化程度湿地为研

究对象,探讨由沼泽干化为沼泽化草甸、草甸后,土壤碳、氮、磷储量与化学计量比的变化特征,对于认识高寒湿地退化条件下土壤碳、氮、磷的平衡关系、土壤质量演替规律、碳氮“汇”功能变化具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于若尔盖县湿地保护区,地理位置为102°26′—102°56′E,33°23′—34°01′N,海拔3400~3900 m,行政上隶属于四川省阿坝藏族羌族自治州。地貌以宽谷缓丘为主,地形主要为丘陵、河谷与阶地等,水系有黄河支流与黑河水系。气候属高原寒温带湿润气候,降水多,湿度大,霜冻期长,年平均气温0.6~1.2℃,年降水量643.76 mm,主要集中在4—10月份,且降水量占年降水量的90%。由于气候变暖、开沟排水等因素的影响,从1974年到2007年,监测到有面积达0.47%的原生沼泽湿地出现不同程度的退化<sup>[17]</sup>,逐渐向沼泽化草甸或草甸演变。植被由此演替为以发草、蒿草等草甸植被为主,伴有少量沼生、湿生植被,如藁草、海韭菜等。相应的土壤类型则由沼泽土(含泥炭土)演替为草甸化沼泽土、草甸土。

### 1.2 土壤样品采集

选取若尔盖高原湿地比较集中的若尔盖湿地自然保护区为调查采样区。通过遥感影像图与实地勘测,在区域内选择沼泽景观样地3个、沼泽化草甸景观样地8个、草甸景观样地11个,共22个典型样地,分别作为未退化湿地、轻度退化湿地和中度退化湿地。每个样地在GPS定位并记录海拔及经纬度、植被类型与覆盖度、优势植物(表1)后,按1 m间隔选择3个样方,利用荷兰Eijkelpkamp原状土(内径8 cm)取土器采集0—100 m剖面样,按0—10,10—20,20—30,30—40,40—60,60—80,80—100 cm土层取样,将每个样方的同一层土样混合,缩分至1 kg,带回室内风干研磨过筛备用。同时,用荷兰Eijkelpkamp土壤环刀取土器(内径8 cm)按0—10,10—20,20—30,30—40,40—60,60—80,80—100 cm取环刀土样,用于测定土壤容重和自然含水量。土样采集时间为2015年6月,并于2015年8月进行室内分析测定。

### 1.3 测定方法

土壤总有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾容量法测定;全氮(TN)含量采用CuSO<sub>4</sub>—K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—Se(100:1:1)

消化半微量凯氏定氮法(半自动凯氏定氮仪 KDN—08C)测定;全磷(TP)含量采用  $\text{HClO}_4-\text{H}_2\text{SO}_4$  消化—钼锑抗比色法(紫外可见分光光度计 UV—1600)测定;容重采用环刀法测定;含水量采用烘干法测定<sup>[18]</sup>。

表 1 不同类型土壤分布区域与优势植物

| 景观类型    | 土壤类型   | 分布区域                             | 优势植被                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|--------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 沼泽、泥炭沼泽 | 沼泽土    | 花湖景区、黑青乔、向东牧场                    | 杉叶蕨( <i>Hippuris vulgaris</i> L.)、乌拉草( <i>Carex meyeriana</i> K.)、毛藓草( <i>Carex lasiocarpa</i> E.)、木里藓草( <i>Carex muliensis</i> H.)、海韭菜( <i>Triglochin maritimum</i> L.)、异枝狸藻( <i>Utricularia intermedia</i> H.)、眼子菜( <i>Potamogeton distinctus</i> A.)、睡菜( <i>Menyanthes trifoliata</i> L.)                                                 |
| 沼泽化草甸   | 草甸化沼泽土 | 花湖景区、阿西牧场、辖曼牧场、黑青乔、唐克镇、黑河牧场、向东牧场 | 木里藓草( <i>Carex muliensis</i> H.)、乌拉草( <i>Carex meyeriana</i> K.)、睡菜( <i>Menyanthes trifoliata</i> L.)、发草( <i>Deschampsia caespitosa</i> L.)、华扁穗草( <i>Blymmus sinocompressus</i> T.)、矮地榆( <i>Sanguisorba filiformis</i> H.)                                                                                                                   |
| 草甸      | 草甸土    | 花湖景区、向东牧场、黑河牧场、唐克镇               | 发草( <i>Deschampsia caespitosa</i> L.)、华扁穗草( <i>Blymmus sinocompressus</i> T.)、矮地榆( <i>Sanguisorba filiformis</i> H.)、四川嵩草( <i>Kobresia setchwanensis</i> H.)、龙胆( <i>Gentiana scabra</i> B.)、鹅绒委陵菜( <i>Potentilla anserina</i> L.)、垂头菊( <i>Cremanthodium reniforme</i> D.)、毛茛( <i>Ranunculus japonicus</i> T.)、高山紫菀( <i>Aster alpinus</i> L.) |

1.4 数据计算与处理

土壤有机碳(全氮或全磷)密度计算公式为:

$$\text{SOCD} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times \rho_b \times d_i}{100} \quad (1)$$

式中:SOCD 为研究区域 0—100 cm 深度土壤的有机碳(全氮或全磷)储量(kg/m<sup>2</sup>);*i* 为土层深度;*C<sub>i</sub>* 为第 *i* 层土壤有机碳(氮或磷)含量(g/kg);*ρ<sub>b</sub>* 为第 *i* 层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);*d<sub>i</sub>* 为第 *i* 层土层厚度(cm)。

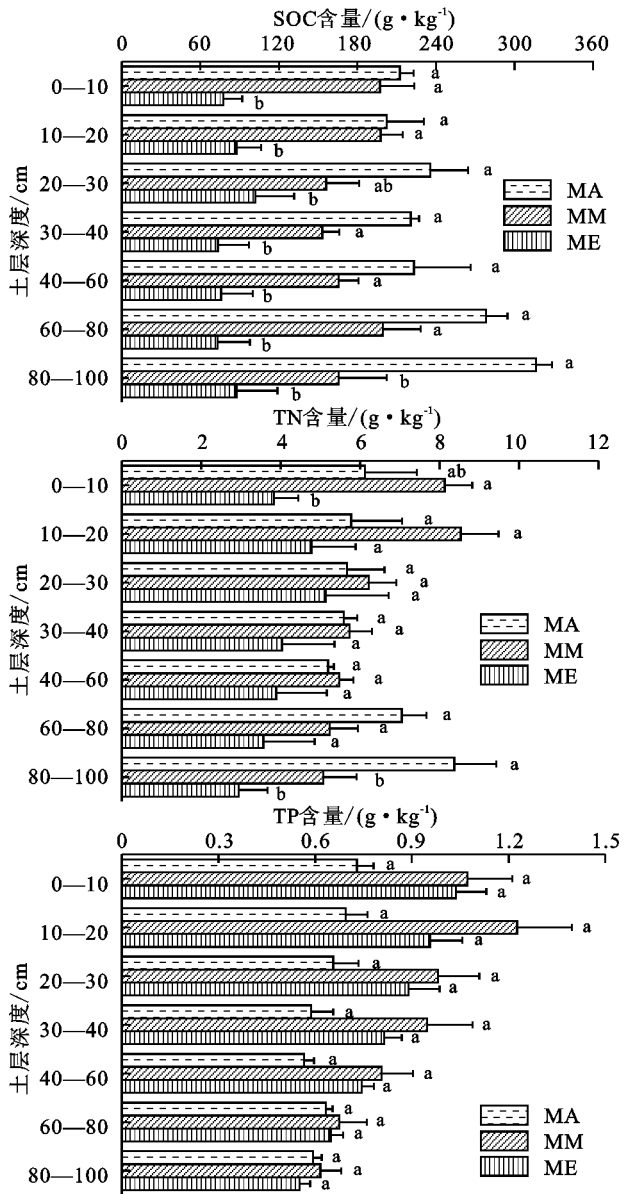
采用 Excel 2007 与 SPSS 17.0 对数据进行整理,用 Origin 8.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 湿地退化条件下土壤碳氮磷含量及垂直分布特征

2.1.1 土壤有机碳含量及垂直分布特征 从图 1 可以看出,未退化湿地沼泽(MA)、沼泽化草甸(MM)与草甸(ME)土壤 1 m 以内各土层总有机碳(SOC)含量大小均为 MA>MM>ME,即与 MA 相比,MM 与 ME 各土层土壤 SOC 含量均降低,降幅分别为 7.12%~47.60%和 56.73%~73.75%。差异显著性结果显示,在 80—100 cm 土层,MM 与 MA 的土壤 SOC 含量达显著水平(*p*<0.05);在 0—100 cm 所有土层,ME 与 MA 的土壤 SOC 含量均达显著水平(*p*<0.05);在 0—20,30—80 cm 土层,MM 与 ME 的土壤 SOC 含量达显著水平(*p*<0.05)。说明随着湿地退化程度的加剧,土壤 SOC 含量越低,MM、ME 全剖面土壤 SOC 含量分别比 MA(250.6 g/kg)降低 29.55%和 67.53%。

随着土层深度增加,MA 土壤 SOC 含量大体呈现出逐渐上升的趋势,并在 80—100 cm 土层达最高;MM 的则呈先降低后升高的逆“抛物线”形变化,在 60—80 cm SOC 含量达最高(199.29 g/kg);ME 的呈先升高后降低的“单峰”形变化,在 20—30 cm 土层含量达最高(102.00 g/kg)。



注:图柱上方不同小写字母代表同一土层不同类型土壤差异显著水平(*P*<0.05)。

图 1 不同退化程度湿地土壤碳氮磷含量及垂直分布特征

2.1.2 土壤全氮含量及垂直分布特征 从图 1 可

知,0—60 cm 土层,3 种景观土壤全氮(TN)含量高低顺序为 MM>MA>ME,其中 MM 与 ME 的土壤的 TN 含量在 0—10 cm 土层差异达显著水平( $p<0.05$ );60—100 cm 土层,3 种景观土壤 TN 含量大小表现为 MA>MM>ME,其中 MA 与 MM、ME 的土壤 TN 含量在 80—100 cm 土层差异达显著水平( $p<0.05$ )。虽然 MA 的 0—60 cm 土层土壤 TN 含量低于 MM,其全剖面土壤 TN 含量为 6.44 g/kg,比 MM 的高出 6.52%,比 ME 高 40.04%。说明湿地退化导致土壤 TN 含量降低,而且降低的幅度随退化程度增加而增大。MA 与 ME 土壤 TN 垂直分布特征与其 SOC 的基本一致,最高值分别出现在 80—100 cm 土层(8.38 g/kg)和 20—30 cm(5.14 g/kg);MM 呈先增加后降低的“单峰”形变化,在 10—20 cm 最高,达 8.54 g/kg。

2.1.3 土壤全磷含量及垂直分布特征 从图 1 还可看出,3 种景观类型土壤全磷(TP)大小差异为 0—60 cm 土层,表现为 MM>ME>MA;60—80 cm 土层,表现为 MM>ME≈MA;80—100 cm,表现为 MM>MA>ME。3 种景观类型土壤 TP 含量的差异均随土层深度增加而减小,近乎为零;TP 含量变幅也较

小,为 0.55~1.23 g/kg,各景观类型的同一土层土壤 TP 含量无显著差异( $p>0.05$ )。MA 土壤 TP 含量垂直变化总体较小,仅在 30—60 cm 土层小幅降低;MM 的与其 TN 一致,在 10—20 cm 最高,达 1.22 g/kg;ME 的随着土层深度增加而降低。

2.2 湿地退化条件下土壤碳氮磷储量变化特征

2.2.1 湿地退化条件下土壤容重变化特征 若尔盖湿地从 MA 向 MM、ME 演替过程中,土壤容重也发生着变化(表 2)。MA 土壤剖面各层平均容重的变化范围在 0.40~0.58 g/cm<sup>3</sup>,MM 土壤剖面各层平均容重的变化范围在 0.21~0.36 g/cm<sup>3</sup>,ME 土壤剖面各层平均容重的变化范围在 0.41~0.81 g/cm<sup>3</sup>。3 种景观类型土壤 0—100 cm 剖面的容重平均值大小顺序为 ME(0.50 g/cm<sup>3</sup>)>MA(0.28 g/cm<sup>3</sup>)>MM(0.70 g/cm<sup>3</sup>)。其中,除在 20—30 cm 土层,ME 土壤的容重均显著高于 MM 的( $p<0.05$ );0—20 cm 与 40—60 cm 土层,MA 的与 MM 达显著水平( $p<0.05$ )。3 种景观类型土壤随着土层深度的增加,底层 30—100 cm 土层土壤的容重大部分高于 0—30 cm 土层,且各类型土壤均在 80—100 cm 土层达最高。

| 表 2 不同类型土壤容重 |            |            |             |            |            |             |             | g/cm <sup>3</sup> |
|--------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------------|
| 土壤类型         | 0—10 cm    | 10—20 cm   | 20—30 cm    | 30—40 cm   | 40—60 cm   | 60—80 cm    | 80—100 cm   |                   |
| 沼泽土          | 0.46±0.05a | 0.46±0.07a | 0.45±0.07ab | 0.40±0.08a | 0.56±0.08a | 0.48±0.09ab | 0.58±0.07ab |                   |
| 草甸化沼泽土       | 0.22±0.03b | 0.21±0.02b | 0.24±0.04b  | 0.34±0.09a | 0.28±0.04b | 0.27±0.05b  | 0.36±0.11b  |                   |
| 草甸土          | 0.41±0.06a | 0.51±0.07a | 0.58±0.07a  | 0.63±0.07a | 0.76±0.03a | 0.70±0.08a  | 0.81±0.06a  |                   |

注:表中数字后不同小写字母代表同一土层不同类型土壤差异显著水平( $p<0.05$ )。

2.2.2 湿地退化条件下土壤碳氮磷储量变化特征 从图 2 可以看出,3 种景观类型土壤全剖面有机碳储量变化趋势为 MA>MM>ME,其中 MM 与 ME 的与 MA 相比,分别显著降低了 67.49%,85.14%;全剖面平均氮储量大小为 MA>ME≈MM,其中 MM 与 ME 的分别比 MA 显著降低了 60.10%,54.47%。说明随着湿地退化程度加剧,土壤有机碳、氮储量不断减小。3 种景观类型土壤的磷储量与碳氮储量表现为 ME>MA>MM,这是由于 ME 土壤容重较高,使其全磷储量分别比 MA 和 MM 的高 30.73%,51.39%。

3 种土壤碳氮磷储量的剖面变化规律为 MA 与 MM 土壤的碳氮磷储量均是 40—100 cm 土层(碳氮磷储量分别占全剖面的 70.46%和 62.08%,69.77%和 54.46%,61.75%和 54.33%)高于 0—40 cm 土层。其中,碳氮储量在 MA 土壤的 80—100 cm 土层达最高,分别达到 40.79,1.08 kg/m<sup>2</sup>;ME 土壤的氮磷储量也表现出同样的规律,而且磷储量在 ME 土壤的 40—60 cm 土层达最高。表明 3 种土壤下部土层(40—100 cm)土壤的碳氮磷“汇”的功能高于上部土壤(0—40 cm)。

### 2.3 湿地退化条件下土壤碳氮磷化学计量比变化及垂直分布特征

2.3.1 土壤碳氮化学计量比变化及垂直分布特征 MA、

MM、ME 3 种景观类型土壤的 C/N 变化范围分别是 38.0~44.0,24.8~41.3,18.9~26.6,均值分别为 40.3,30.1,22.8,变异系数分别为 5.0%,18.9%,10.8%。从图 3 可以看出,不同景观类型的同一土层土壤 C/N 高低顺序大致表现为 MA>MM>ME。其中 10—60 cm 土层,MA 土壤 C/N 与 MM、ME 的差异达显著水平( $p<0.05$ );30—40 cm 土层,MM 与 ME 的达显著水平( $p<0.05$ )。说明土壤 C/N 随着湿地退化加剧而减小,MM 与 ME 土壤的全剖面 C/N 相较于 MA 的降幅分别是 25.5%,43.4%。3 种景观类型土壤 C/N 剖面变化有所不同:随着土层深度的增加,MA 与 ME 土壤的 C/N 均呈先增加后降低再增加的“波浪”形变化;MM 的为先增加后降低,并在 60—80 cm 土层 C/N 达到最大值。

#### 2.3.2 土壤碳磷的化学计量比变化及垂直分布特征

3 种景观类型土壤的 C/P 变化范围分别是 289.1~536.2,174.4~333.0,80.5~159.4,均值分别为 387.9,230.5,109.4,变异系数分别为 20.5%,24.7%,22.8%。从图 3 可以看出,不同景观类型土壤各土层的 C/P 大小均为 MA>MM>ME。其中,MA 的 30—60 cm 土层土壤 C/P 与 MM 的差异达显著水平( $p<0.05$ ),MA 的 0—10,30—100 cm 土层土壤 C/P 与 ME 的差异也达

显著水平( $p<0.05$ );MM 的 0—10,60—80 cm 土层土壤 C/P 与 ME 的达显著水平( $p<0.05$ )。表明土壤 C/P 随着湿地退化加剧而减小。随着土层深度的增加,MA 的 C/P 呈不断上升的趋势,并在 80—100 cm 土层达到最高;MM 的 C/P 呈先缓慢降低后迅速增加再降低,与 C/N 相同在 60—80 cm 达到最大值;ME 的 C/P 与 C/N 趋势大致相同。

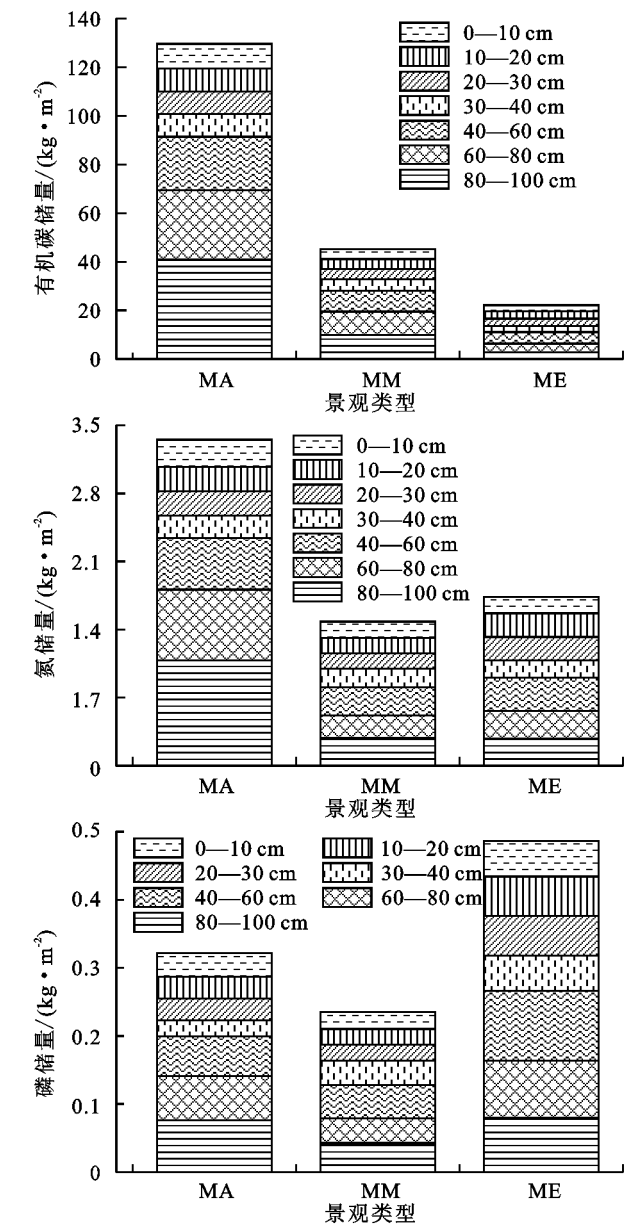


图 2 不同退化程度湿地土壤碳氮磷储量

2.3.3 土壤氮磷化学计量比变化及垂直分布特征 3 种景观类型土壤的 N/P 变化范围分别是 8.2~14.3, 6.8~8.7, 3.8~6.1, 均值分别为 10.0, 7.7, 5.0, 变异系数分别为 20.3%, 10.0%, 12.5%。从图 3 可以看出,不同景观类型土壤各土层的 N/P 大小差异表现为:0—10 cm 土层,MA≈MM>ME;10—100 cm 土层,MA>MM>ME。差异显著性结果显示,MA 土壤的 N/P 在 20—30, 80—100 cm 土层显著高于 MM 与 ME 的 ( $p<0.05$ ),并在 0—10 cm 土层,其

N/P 显著高于 ME ( $p<0.05$ );0—10 cm,MM 土壤的 N/P 与 ME 的达显著水平( $p<0.05$ )。表明随着湿地退化加剧,N/P 呈现出减小的趋势,MM 与 ME 土壤的 N/P 相较于 MA 的降幅分别是 22.1%, 49.7%。随着土层深度增加,MA 土壤的 N/P 升高;MM 的先降低后增加,变化幅度小;ME 的呈先增加后降低的“单峰”形变化,在 20—30 cm 最高。

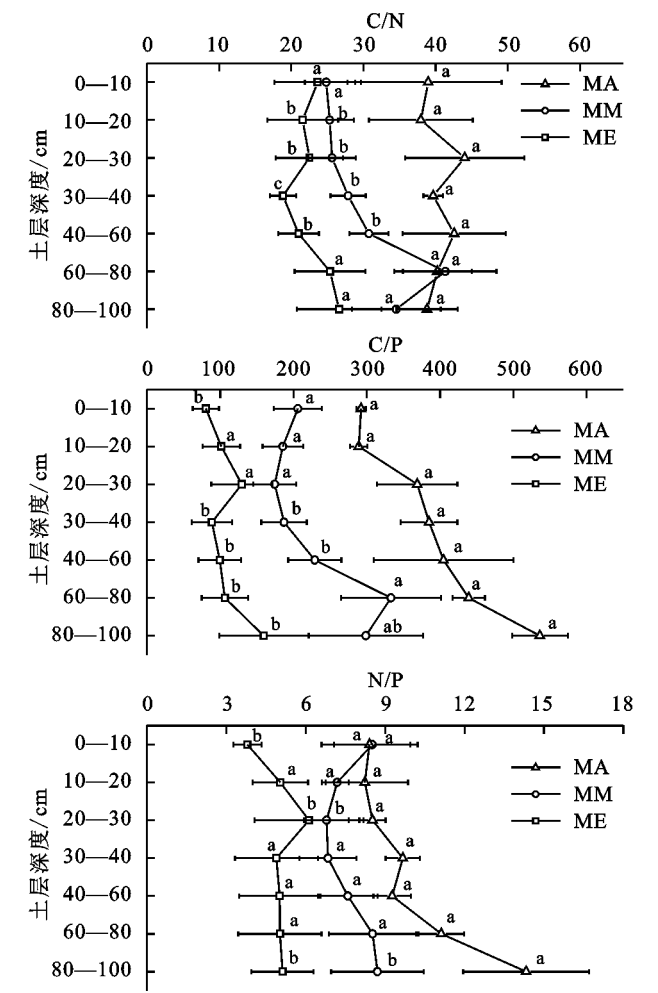


图 3 不同退化程度湿地土壤碳氮磷比变化及垂直分布特征

### 3 讨论

3.1 湿地退化对土壤碳氮磷含量及其剖面分布的影响 土壤碳氮主要来源于残落物与根系及其分泌物,这些残落物与根系等又受植物群落、水分、温度、地形地貌等的影响<sup>[19-20]</sup>,湿地土壤碳氮含量及剖面分布也如此<sup>[21]</sup>。本研究 3 种不同类型土壤分别是沼泽土、草甸化沼泽土以及草甸土,其不同的水文特征、植被类型等导致其碳氮含量空间分异明显。3 种土壤 SOC、TN 含量大小均表现为 MA>MM>ME,这与田应兵等<sup>[22]</sup>研究结果一致。这是因为:一方面 MA 的成土过程主要是腐殖化、泥炭化和潜育化,其中前两个过程尤为明显,当 MA 逐渐干化,向 MM 和 ME 退化,这些成土过程就会减弱或完全终止,不利于有机质积累;另一方面,沼泽干化,地上沼泽植物群落演

替为草甸植被,放牧强度增大,草甸植被在生长初期就被消耗,使得有机物生产量和输入量减少;同时,干化的 MM 和 ME 土壤与 MA 相比,具有较好的透气性,微生物数量与多样性增加,活性也随之增强,促进了有机质的分解。所以,湿地退化后,有机物不仅积累减少,而且分解量大,最终导致土壤 SOC 含量大幅降低,并且随着退化程度加剧,减少量愈多的趋势。土壤 TN 的来源与被分解状况类同 SOC,因此,3 种土壤 TN 含量的差异与 SOC 相似,这与林丽等<sup>[23]</sup>研究结果一致。值得注意的是,MA 土壤在 0—30 cm 土层的 TN 含量都明显低于 MM 的,可能是由于 MA 常年积水,较为严格的嫌气环境促进了氮的反硝化作用,导致其含量降低。

土壤生态系统中磷的来源首先是母质,其次是地上植被枯落物与地下根系,故土壤磷含量高低受母质的影响较大<sup>[24]</sup>。而若尔盖高寒湿地由于其特殊的地质地貌特征和发达的水系,成土母质主要为冲积、洪积和黄土母质,磷含量较少,导致 3 种景观 MA、MM 与 ME 土壤 TP 含量均较低,全剖面均值分别是 0.63, 0.84, 0.75 g/kg。同一研究区成土母质无差异的背景下,局地微环境和植被类型的差异使得 3 种景观土壤 TP 含量在 0—60 cm 土层具有较为规律的差异,表现为 MM>ME>MA, 60—100 cm 土层的差异甚小。其中,MM 大部分土层土壤的 TP 含量高于 ME 的,同时二者都高于 MA 的。究其原因,一是随着湿地干化后,MA 的植物群落数量少于 MM 和 ME,造成 MA 的磷归还量减少;二是 MA 在向 MM 退化过程中,出现了磷在 MM 土壤中生物富集,最终使得 MA 土壤的 TP 含量低于 MM 和 ME;而 ME 土壤在放牧干扰下,磷归还量降低,又使 ME 土壤的 TP 含量低于 MA。

本研究中,随着土层深度的增加,MA 土壤的 SOC 和 TN 含量在 60—100 cm 土层明显高于 0—40 cm 土层,是由于 MA 土壤剖面下部的土层在腐殖化过程中经长时间累积发育成了腐殖质层和泥炭层, SOC 含量高达 316.30 g/kg,而相对较少的地上植被使得表层有机物生产量和输入量减少,最终导致下部土层土壤 SOC 含量高于上部土层。MM 与 ME 土壤的 SOC 与 TN 含量大体呈现出随着土层的加深而降低的趋势,这与卜晓燕等<sup>[25]</sup>研究结果一致。全磷在剖面上含量变化随着土层加深呈减小趋势,垂直分布差异也不大,这与潘军等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。

### 3.2 湿地退化对土壤碳氮磷储量的影响

土壤碳氮磷储量除了受到碳氮磷含量的影响,土壤容重也是一个重要影响因素,而容重与土壤质地、有机质含量和孔隙度的关系密切<sup>[15]</sup>。沼泽向草甸退化演替过程中,土壤孔隙度降低,水分减少,植被群落

改变,有机质含量下降,导致土壤容重增大,所以, MA 与 MM 容重低,ME 容重较高。MA 土壤容重虽然低于 ME,但较高的 SOC、TN 含量使其碳、氮储量最高;同样的原因使得 MM 碳储量高于 ME,氮储量低于 ME;不同类型土壤间 TP 含量变异性小,含量的大小与容重的共同作用导致土壤的磷储量大小表现为 ME>MA>MM。3 种景观土壤碳氮储量都表现出 MA 大于 MM、ME,磷储量则是 ME 最高。表明若尔盖湿地的退化,导致对碳氮“汇”功能的减弱,这与 Huo 等<sup>[7]</sup>研究结果一致,这可能会加剧温室效应。土壤剖面不同土层的碳氮磷储量也受到土层容重与碳氮磷含量大小的影响。随着土层深度增加,土壤容重不断增大,土壤碳氮磷储量表现出的趋势与容重相同,与曹生奎等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。

### 3.3 湿地退化对土壤碳氮磷化学计量比的影响

土壤 C/N、C/P 和 N/P 是碳、氮、磷元素总质量的比值,湿地退化对土壤碳、氮、磷元素含量及储量有着深刻地影响,碳氮磷化学计量随之发生变化。3 种土壤 C/N、C/P 和 N/P 的变异系数变化范围分别为 5.04%~18.74%, 20.48%~24.76% 和 10.02%~20.29%,说明若尔盖湿地土壤 C/N、C/P、N/P 都存在较大的空间变异性,这主要是由于区域内不同类型土壤的微环境和人为活动等影响到碳氮磷总量,导致空间变异性大<sup>[3]</sup>。相较于 C/P、N/P, C/N 值随着剖面变化而波动的趋势更平稳,变异系数较小,可能与碳氮元素间紧密的联系和对环境同步的响应有关,这与张向茹等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。有机质的分解速率确定磷的有效性高低,土壤 C/P 低,磷的有效性高<sup>[3]</sup>;土壤 N/P 指示植物生长过程中,土壤营养成分的供应情况,当土壤 N/P<14,表现为氮素供应不足,影响植被生长<sup>[9]</sup>。本研究中的 C/P 值均较高,说明研究区土壤受到磷素的限制;不同生态演替阶段的大多数土层(除 MA 土壤的 80—100 cm 土层外)的 N/P 值都<14,说明土壤对植被生长的所需的氮元素供应不足。由于土壤 TN 含量在湿地退化演替过程中大量流失,TP 变化趋势不大,说明在湿地退化过程中,植物生长受氮素的限制高于磷。这也证明了氮与磷通常被认为是陆地生态系统,特别是高寒生态系统中的限制因素<sup>[29]</sup>。

一般来讲,土壤 C/N 与有机质分解速率成反比,并影响碳氮的矿化速率,是土壤质量变化的敏感指标<sup>[8]</sup>。本研究中 3 种景观土壤的 C/N 值随着湿地退化程度加剧而减小,其中,MA 土壤的 C/N 值为 31.45,高于全球有机土壤 C/N 值 29.80<sup>[30]</sup>,说明 MA 土壤有机质含量高,碳氮矿化速率低,具有较高的碳氮固存潜力;而随着 MA 向 MM、ME 退化过程中,土壤 C/N 减小,有机质的分解速率加快,含量不断降低,同时加

速了氮的矿化释放。说明与 MA 相比,MM 与 ME 的 C/N 降低,土壤碳氮大量流失,土壤碳氮“汇”能力减弱。C/P 值大小趋势与 C/N 一致,结合磷含量特征,表明湿地退化后,碳“汇”功能大大降低,这与王维奇等<sup>[8]</sup>的研究结果一致。

## 4 结论

(1)若尔盖湿地退化条件下,未退化湿地沼泽、沼泽化草甸与草甸 3 种景观土壤剖面的 SOC、TN 含量均随着湿地退化的加剧而降低,TP 表现为沼泽高于草甸高于沼泽化草甸;剖面变化规律大致为随着土层深度的增加,沼泽土壤的 SOC 和 TN 含量在 60—100 cm 土层明显高于 0—40 cm 土层,沼泽化草甸与草甸土壤的 SOC 与 TN 含量大体呈现出降低的趋势,3 种土壤 TP 含量变化均随土层深度的增加而减小。

(2)3 种景观土壤碳储量大小顺序为沼泽远高于沼泽化草甸,二者均高于草甸,氮表现为沼泽>沼泽化草甸≈草甸,磷表现为草甸>沼泽>沼泽化草甸;大体上,下部土层土壤(40—100 cm)的碳氮磷储量高于上部土壤(0—40 cm)。

(3)3 种景观土壤的碳氮磷化学计量比值均表现为沼泽>沼泽化草甸>草甸,随湿地退化而减小。随着湿地退化加剧,土壤碳氮“汇”功能减弱,特别是碳“汇”。氮磷元素均是影响植物生长的限制性因素,受氮素的限制高于磷素。

### 参考文献:

- [1] Michaels A F. Review: The ratios of life[J]. Science, 2003,300(5621):906-907.
- [2] Spieles D J, Mitsch W J. Macroinvertebrate community structure in high-and low-nutrient constructed wetlands[J]. Wetlands, 2000,20(4):716-729.
- [3] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [4] Güsewell S. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164(2):243-266.
- [5] Wang Y, Liu J S, Wang J D, et al. Effects of wetland reclamation on soil nutrient losses and reserves in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012,11(3):512-520.
- [6] 韩大勇,杨永兴,杨杨,等. 湿地退化研究进展[J]. 生态学报,2012,32(4):1293-1307.
- [7] Huo L L, Chen Z K, Zou Y C, et al. Effect of Zoige alpine wetland degradation on the density and fractions of soil organic carbon[J]. Ecological Engineering, 2013,51(1):287-295.
- [8] 王维奇,曾从盛,钟春棋,等. 人类干扰对闽江河口湿地

土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. 环境科学,2010,31(10):2411-2416.

- [9] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2007,10(12):1135-1142.
- [10] 王维奇,王纯,曾从盛,等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2012, 32(13):4087-4093.
- [11] 张珍明,林绍霞,张清海,等. 不同土地利用方式下草海高原湿地土壤碳、氮、磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2013,27(6):199-204.
- [12] 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[J]. 水土保持学报,2006,20(1):76-79.
- [13] 高俊琴,雷光春,李丽,等. 若尔盖高原三种湿地土壤有机碳分布特征[J]. 湿地科学,2010,8(4):327-330.
- [14] 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.
- [15] 李珂,杨永兴,杨杨,等. 放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子[J]. 生态学报,2011,31(20): 5956-5969.
- [16] 青焯,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[J]. 草业学报,2015,24(3):38-47.
- [17] 蒋锦刚,李爱农,边金虎,等. 1974—2007 年若尔盖县湿地变化研究[J]. 湿地科学,2012,10(3):318-326.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [19] Tanner C C, Eugenio J D, McBride G B, et al. Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms[J]. Ecological Engineering, 1999,12(1/2):67-92.
- [20] Iost S, Landgraf D, Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province P. R. China[J]. Geoderma, 2007,142(3/4):245-250.
- [21] 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):48-54.
- [22] 田应兵,熊明彪,宋光煜. 若尔盖高原湿地生态恢复过程中土壤有机质的变化研究[J]. 湿地科学,2004(2): 88-93.
- [23] 林丽,张法伟,李以康,等. 高寒矮嵩草草甸退化过程土壤碳氮储量及 C/N 化学计量学特征[J]. 中国草地学报,2012,34(3):42-47.
- [24] 周正虎,王传宽,张全智. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响[J]. 生态学报,2015,35(20):6694-6702.
- [25] 卜晓燕,米文宝,许浩,等. 宁夏平原不同类型湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2016,42(1):107-118.

(下转第 192 页)