

DOI: 10.11686/cyxb2020108

http://cyxb.magtech.com.cn

张静静, 刘尊驰, 鄢创, 等. 土壤pH值变化对3种草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. 草业学报, 2021, 30(2): 69—81.

ZHANG Jing-jing, LIU Zun-chi, YAN Chuang, *et al.* Effects of soil pH on soil carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry in three types of steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(2): 69—81.

## 土壤pH值变化对3种草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响

张静静<sup>1</sup>, 刘尊驰<sup>1</sup>, 鄢创<sup>2</sup>, 王云霞<sup>1</sup>, 刘凯<sup>1</sup>, 时新荣<sup>1,2</sup>, 袁志友<sup>1,2\*</sup>

(1. 西北农林科技大学, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 酸碱性是土壤的重要化学性质, 土壤pH值的升高和降低会影响土壤养分的分布及转化情况, 进而影响群落组成及生态系统的功能。全球变化和人类活动降低了草原生态系统的土壤pH值, 而不同草原类型的土壤碳氮磷生态化学计量特征对土壤pH值变化的响应尚不清楚。本研究以内蒙古自治区土壤酸碱性不同的荒漠草原、典型草原和草甸草原3种草原类型作为研究对象, 通过酸碱添加试验改变土壤pH值, 研究土壤碳氮磷生态化学计量特征的相应变化。结果表明: 1) 荒漠草原和典型草原0~10 cm土层的土壤pH值显著高于草甸草原, 3种草原类型10~30 cm土层的土壤pH值无显著差异; 荒漠草原土壤有机碳、全氮和全磷以及土壤碳氮比、氮磷比和碳磷比均低于典型草原和草甸草原, 除土壤全磷外均存在显著差异; 典型草原的土壤全氮在10~30 cm土层显著高于草甸草原; 草甸草原0~10 cm土层的碳氮比显著高于典型草原。2) 对于0~10 cm土层而言, 酸添加显著增加了荒漠草原的土壤有机碳、碳氮比和碳磷比; 碱添加显著降低了荒漠草原的土壤有机碳和氮磷比以及典型草原的土壤全氮和全磷, 升高了荒漠草原的土壤碳磷比。对于10~30 cm而言, 碱添加升高了荒漠草原的土壤碳氮比, 降低了典型草原的全氮和氮磷比以及草甸草原的碳磷比。3) 荒漠草原0~10 cm土层的土壤有机碳、全氮、碳磷比和氮磷比均与土壤pH值具有显著负相关关系; 典型草原和草甸草原的土壤碳氮磷生态化学计量特征与土壤pH值不存在显著相关关系。以上结果说明, 不同草原受土壤pH值改变的影响表现为荒漠草原>典型草原>草甸草原, 且表层土壤相比下层土壤受到的影响更为明显。酸碱添加对不同草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响揭示了生态系统对土壤pH值改变的短期响应。因此, 在全球气候变化和人为活动引起的土壤pH值发生变化的背景下, 草原生态系统在土壤退化后的恢复重建中应合理调节土壤pH值, 以保证土壤养分元素的平衡及循环过程。

**关键词:** 土壤pH值; 土壤碳氮磷生态化学计量; 荒漠草原; 典型草原; 草甸草原

## Effects of soil pH on soil carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry in three types of steppe

ZHANG Jing-jing<sup>1</sup>, LIU Zun-chi<sup>1</sup>, YAN Chuang<sup>2</sup>, WANG Yun-xia<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, SHI Xin-rong<sup>1,2</sup>, YUAN Zhi-you<sup>1,2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

**Abstract:** Soil acidity or alkalinity is one of the most important physico-chemical features of the soil, and affects the

收稿日期: 2020-03-12; 改回日期: 2020-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0600801), 陕西省百人计划(A289021701), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JZ3002)和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费(A314021403-C9)资助。

作者简介: 张静静(1994-), 女, 山西长治人, 在读硕士。E-mail: 920997668@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zzyuan@ms.iswc.ac.cn

ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus through its impact on physical, chemical and biological processes of an ecosystem. Accordingly, the soil pH in grassland ecosystems has changed as a result of climate change and human activities for decades or even centuries. Existing studies have generally focused on the changes in soil nutrients in response to grazing, fertilization, and altered temperature or precipitation. It remains unclear how ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in various categories of steppe responds to changing soil pH. In this study, three types of steppe (i. e. desert, typical and meadow steppe) with a range of pH values were selected and their soil acidity or alkalinity was altered through manipulative experiments by adding sulphuric acid or sodium hydroxide. We found that: 1) The soil pH values of the 0–10 cm layer in both desert and typical steppes were significantly higher than in meadow steppe. However, the soil pH values of the 10–30 cm layer in all three types of steppe were not significantly different. The values of soil organic carbon, total nitrogen and phosphorus, as well as the ratios of soil carbon to nitrogen, nitrogen to phosphorus and carbon to phosphorus in desert steppe were lower than in typical and meadow steppes. The soil total nitrogen in typical steppe was significantly higher than that in meadow steppe for the 10–30 cm layer. The ratio of carbon to nitrogen in the 0–10 cm layer in meadow steppe was significantly higher than in typical steppe. 2) For the 0–10 cm layer, the addition of acid significantly increased the soil organic carbon, the ratios of carbon to nitrogen and carbon to phosphorus in desert steppe. Soil organic carbon and the ratio of nitrogen to phosphorus in desert steppe, and soil total nitrogen and phosphorus in typical steppe were also significantly reduced by the addition of alkali. In contrast, the addition of alkali enhanced the ratio of soil carbon to phosphorus in desert steppe. For the 10–30 cm layer, the addition of alkali increased the ratio of soil carbon to nitrogen in desert steppe, but it decreased total nitrogen and the ratio of nitrogen to phosphorus in typical steppe. The ratio of carbon to phosphorus also declined in meadow steppe after adding alkali. 3) Soil organic carbon, total nitrogen, and the ratios of carbon to phosphorus and nitrogen to phosphorus at the 0–10 cm soil layer in desert steppe were negatively correlated with soil pH values. The correlations between soil pH and ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus did not differ significantly in typical steppe or in meadow steppe. These results indicate that the ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the three studied steppe types were affected by changing soil pH in the order: desert steppe > typical steppe > meadow steppe. The surface soil was more sensitive to the change in acidity or alkalinity than the subsoil. The similarities and differences of the results between variance and correlation analyses reflected the different effects of soil pH on the three types of steppe in short and long-term adaptation to a changing acidic or alkaline environment. Therefore, in the context of changes in soil pH caused by climate change and anthropogenic activities, grassland ecosystems are likely to adjust their soil pH during the restoration and reconstruction of soil degradation, in order to ensure a nutrient balance and cycling.

**Key words:** soil pH; ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus; desert steppe; typical steppe; meadow steppe

土壤 pH 值是土壤固相处于平衡状态时土壤溶液中  $H^+$  浓度的负对数,它是衡量土壤酸碱性的指标,过高或过低的土壤 pH 值都会通过对物理、化学及生物特性的影响来改变土壤养分的分布及转化情况,从而导致植物生长发育所需养分元素的有效性发生改变<sup>[1-2]</sup>。早期对土壤 pH 值的研究是源于酸雨对植被以及土壤的损害,如 Breen 等<sup>[3]</sup>对酸沉降的影响以及土壤酸化机理进行了剖析,Reuss 等<sup>[4]</sup>介绍了土壤酸化过程中化学过程的主导作用,但对于土壤 pH 值改变后土壤养分的短期响应及其长期适应的过程研究尚不清楚。

土壤 pH 值的改变过程受自然和人为两种因素影响,在干旱区和半干旱区,岩石和原生矿物的风化可提高土壤 pH 值,而在温暖湿润地区,会因植物吸收以及降水的淋溶作用导致盐基离子被植物消耗或者向土壤更深层淋

溶而引起土壤pH值降低。除此之外,受全球气候变化和人类活动的影响,大气中快速增加的活性氮氧化物和硫氧化物与水反应生成硝酸和硫酸,或者大部分氮磷硫肥料导致土壤系统的净质子输入<sup>[5-6]</sup>,也都会引起土壤pH值的改变。这些过程均说明全球变化会深刻影响土壤酸碱性,进而影响群落组成及生态系统的功能,然而目前全球变化背景下的相关研究还明显不足,阻碍了人们对土壤酸碱性变化影响生态系统的理解与认识。

生态化学计量学是将生态学、物理学以及化学计量学的基本原理相结合,研究生态系统多种化学元素平衡关系的一门学科<sup>[7]</sup>,它在研究植被组成、生态系统功能和养分限制等方面起着重要作用,可极大提高人们对陆地生态动态和过程的认识<sup>[8]</sup>。其中,碳、氮和磷3种元素的化学计量关系是研究各种生态过程的核心内容<sup>[9]</sup>。已有的一些研究利用区域或全球尺度的植物化学计量学模式来预测植被组成、动态以及养分限制<sup>[10]</sup>,如Bui等<sup>[11]</sup>关注了土壤碳、氮和磷浓度之间的平衡如何调节植被模式,Ren等<sup>[12]</sup>研究表明,土壤碳、氮和磷浓度的变化也会不可避免地导致养分化学计量关系的变化,土壤碳氮磷比直接反映土壤肥力,间接反映植物营养状况<sup>[13]</sup>,但在全球变化影响土壤酸碱性的情况下,土壤碳氮磷生态化学计量特征的相关研究尚不明确。

草原是陆地生态系统的重要组成部分,面积大约为 $44.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,占世界陆地面积的24%<sup>[14]</sup>。草原生态系统作为脆弱的开放系统,极易受到土壤pH值变化带来的伤害<sup>[15]</sup>。研究不同草原类型土壤pH值变化下的土壤碳氮磷生态化学计量特征,可以认识草原生态系统养分元素的循环及平衡机制,揭示土壤pH值改变后植物对养分的可获得性。目前,相关土壤碳氮磷化学计量特征的研究已有较多报道<sup>[16]</sup>,我国已有的研究主要集中在内蒙古单一草原不同淹水状态、水肥添加等方面的土壤碳氮磷生态化学计量特征<sup>[17-19]</sup>,而针对土壤pH值变化后不同草原类型的土壤碳氮磷生态化学计量特征研究尚还缺乏。为此,本研究以3种不同草原类型(即荒漠草原、典型草原和草甸草原)为对象,系统研究土壤pH值改变后3种草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的相应变化,为草原生态系统碳汇研究及土壤退化后恢复重建的草地管理工作提供科学的理论依据。主要拟回答以下问题:1)荒漠草原、典型草原和草甸草原的土壤碳氮磷生态化学计量特征有何差异? 2)酸碱添加试验对土壤碳氮磷生态化学计量特征有何影响? 3)不同草原类型的土壤碳氮磷生态化学计量特征与土壤pH值的相关关系如何?

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验研究区位于内蒙古自治区,基于该地区自西南至东北方向水热梯度变化特征依次布设3个研究站点,分别代表不同草原类型,草原类型的具体情况如下:

荒漠草原以杭锦旗( $108^{\circ}39'53'' \text{ E}$ ,  $39^{\circ}46'33'' \text{ N}$ )为研究站点,杭锦旗位于内蒙古自治区鄂尔多斯市西北部,属中温带半干旱大陆性气候,海拔1416 m,年平均气温为 $7.31^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量为275 mm,全年降水主要集中在6—8月,干旱指数为0.28,土壤类型为棕钙土。该研究区的建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*),伴生种有针茅(*Stipa klemenzii*),糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等。

典型草原以锡林浩特( $115^{\circ}51'37'' \text{ E}$ ,  $43^{\circ}56'28'' \text{ N}$ )为研究站点,锡林浩特位于内蒙古自治区锡林郭勒草原中部,属温带半干旱大陆性气候,海拔1091 m,年平均气温为 $2.47^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量为268 mm,干旱指数为0.33,土壤类型为栗钙土。该研究区的建群种为克氏针茅(*Stipa krylovii*)和羊草(*Leymus chinensis*),伴生种有冷蒿、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、麻花头(*Serratula centauroides*)等。

草甸草原以额尔古纳( $119^{\circ}23'43'' \text{ E}$ ,  $50^{\circ}10'23'' \text{ N}$ )为研究站点,额尔古纳位于内蒙古自治区呼伦贝尔市大兴安岭西北麓,海拔520 m,年平均气温为 $-1.54^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量为341 mm,干旱指数为0.50,土壤类型为黑钙土,该试验区常见优势种以多年丛生禾草以及根茎禾草为主,伴生种有细叶鸢尾(*Iris tenuifolia*)、裂叶蒿(*Artemisia tanacetifolia*)和白头翁(*Pulsatilla chinensis*)等。

### 1.2 研究方法

2017年5月在杭锦旗、锡林浩特和额尔古纳,分别选取地势平坦、植被均匀、具有代表性的地段作为试验样地,并对样地进行围封,大小为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。同时,根据已有的试验研究<sup>[20]</sup>在围栏内设置酸碱添加处理,分别如下:1)对照。2)酸添加,设置3个不同浓度梯度,即低、中和高浓度( $\text{H}^+$ 浓度分别为 $2.76$ 、 $8.28$ 和 $13.80 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ),

施加溶液为硫酸溶液,施加时将硫酸溶液溶于80 L水中,均匀喷洒。3)碱添加,设置3个不同浓度梯度,即低、中和高浓度(OH<sup>-</sup>浓度分别为2.76、8.28和13.80 mol·m<sup>-2</sup>),施加溶液为氢氧化钠溶液。施加时将氢氧化钠溶液溶于80 L水中,均匀喷洒。为降低水的影响,对照添加同等量(80 L)的水。对照和酸碱添加处理的3个水平梯度各设置3个重复,共设21个样方,样方大小2 m×2 m,随机排列,样方之间以2 m的缓冲带彼此隔开。

2018年8月,在各样方内随机选2个取样点,用内径7 cm的土钻按0~10 cm和10~30 cm进行分层取样(取样时去除土壤表层植物枯落物等),各样方采集相同土层的2份土壤进行混合,作为该样方测定的土样。采集的土样带回实验室后用4分法取适量,分别过0.15和1.00 mm的筛用于测定土壤养分和土壤pH值。土壤pH值采用水浸提电位法(水:土=2.5:1.0)测定;土壤有机碳采用重铬酸钾—外加加热法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定<sup>[21]</sup>。

### 1.3 气象数据获取

每个样地均布设了一个气象站,年降水量与年均温数据通过全自动气象仪获取,记录数据频率为15 min每次,并通过GPS仪将数据传送至终端。干旱指数是年降水量与潜在蒸发能力的比值,在CGIAR—CSI网站下载后再利用ArcGIS软件提取。

### 1.4 数据统计与分析

土壤有机碳、全氮和全磷均采用质量含量,土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比均采用质量比。对不同草原类型和土层之间的土壤碳氮磷生态化学计量特征的比较、酸碱添加试验后各草原类型的土壤碳氮磷生态化学计量特征进行方差分析,对不同草原类型的土壤碳氮磷及其化学计量比与土壤pH值进行相关分析。对土壤碳氮磷生态化学计量特征与年均温、年降水量、干旱指数、草原类型和酸碱添加等因子之间的相关性进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)。在进行数据分析之前,先对各数据进行正态分布及方差齐性检验。统计分析使用RGui 3.6.2,作图使用Origin 9.0和Canoco 5.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同草原类型土壤碳氮磷生态化学计量的差异

通过对不同草原类型和土层的土壤碳氮磷生态化学计量的双因素方差分析结果可知,除土壤全磷以外,不同草原类型即荒漠草原、典型草原和草甸草原的土壤pH值、土壤有机碳、全氮、碳氮比、碳磷比和氮磷比均存在显著差异( $P<0.01$ ),而不同土层即0~10 cm和10~30 cm间除土壤全氮以外,均不存在显著差异。除此之外,不同草原类型和土层对土壤碳氮磷及其化学计量比也不存在明显的交互作用(表1)。

表1 不同草原类型和土层及其交互作用对土壤碳氮磷生态化学计量的双因素方差分析

Table 1 Results of two-way ANOVA for the effects of grassland types and soil layers on ecological stoichiometry of soil C, N, and P

因素 Factors	土壤 pH 值 Soil pH	有机碳 Organic C	全氮 Total N	全磷 Total P	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
草原类型 Grassland types (T)	9.22**	51.60***	57.30***	1.03	42.30***	77.40***	98.20***
土层 Soil layer (L)	1.75	4.15	5.47*	1.90	0.10	2.72	4.28
草原类型×土层 T×L	1.35	2.03	2.59	0.07	0.07	2.21	4.08

注:数值表示F值。“\*”,“\*\*”和“\*\*\*”分别表示相关性显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )和极显著( $P<0.001$ )。

Note: Values represent F value. “\*”, “\*\*” and “\*\*\*” mean significant correlations at level of  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.001$ , respectively.

草甸草原0~10 cm土层的土壤pH值显著低于荒漠草原和典型草原,3种草原类型10~30 cm土层的土壤pH值之间差异不显著(表2)。典型草原和草甸草原的土壤有机碳和全氮含量约为荒漠草原的2~5倍,与荒漠草原之间存在显著差异( $P<0.05$ )。典型草原和草甸草原0~10 cm土层的土壤有机碳、全氮以及10~30 cm土层的有机碳均不存在显著差异,而典型草原10~30 cm土层的土壤全氮含量显著高于草甸草原( $P<0.05$ )。3种草原之间的土壤全磷含量在0~10 cm和10~30 cm土层均不存在显著差异。

3种草原类型0~10 cm和10~30 cm土层的土壤碳氮比、碳磷比以及氮磷比均表现出同样的差异显著性,即草甸草原的土壤碳氮比显著高于荒漠草原和典型草原,典型草原和草甸草原的土壤碳磷比和氮磷比均显著高于荒漠草原。其中,典型草原和草甸草原的土壤碳磷比是荒漠草原的3~5倍,氮磷比是荒漠草原的2~3倍,而典型草原和草甸草原之间除土壤碳氮比存在显著差异外,碳磷比和氮磷比之间差异并不显著( $P<0.05$ )。

表2 不同草原类型的土壤碳氮磷生态化学计量特征

Table 2 Soil ecological stoichiometry of C, N and P in three types of steppes

项目 Items	土层 Soil layer					
	0~10 cm			10~30 cm		
	荒漠草原 Desert steppe	典型草原 Typical steppe	草甸草原 Meadow steppe	荒漠草原 Desert steppe	典型草原 Typical steppe	草甸草原 Meadow steppe
土壤 pH Soil pH	8.59±0.165Aa	8.51±0.214Aa	6.84±0.314Ab	8.64±0.065Aa	8.55±0.164Aa	7.83±1.340Aa
有机碳 Organic C ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	5.40±0.466Ab	22.30±6.000Aa	26.39±1.230Aa	5.83±0.460Ab	19.65±4.310Aa	19.35±2.430Ba
全氮 Total N ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.69±0.004Ab	2.42±0.448Aa	2.26±0.162Aa	0.74±0.109Ac	2.14±0.378Aa	1.61±0.205Bb
全磷 Total P ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.39±0.011Aa	0.41±0.079Aa	0.38±0.045Aa	0.35±0.012Aa	0.39±0.046Aa	0.35±0.044Aa
碳氮比 C/N	7.83±0.695Ab	9.18±1.560Ab	11.71±0.397Aa	7.89±0.558Ac	9.16±0.366Ab	12.00±0.144Aa
碳磷比 C/P	13.70±0.922Ab	54.30±11.600Aa	69.50±9.210Aa	16.40±0.759Ab	49.57±4.880Aa	55.40±6.650Aa
氮磷比 N/P	1.76±0.048Ab	5.89±0.281Aa	5.96±0.970Aa	2.09±0.238Ab	5.41±0.310Aa	4.62±0.610Aa

注:数据为平均值±标准偏差。同一行不同大写字母和小写字母分别表示两个土层之间和3种草原类型之间的土壤碳氮磷生态化学计量特征的差异显著( $P<0.05$ )。

Note: The data are means±standard deviation. Capital and lower letters indicate significant difference in soil ecological stoichiometry of C, N, and P between two soil layers and among three types of steppe, respectively ( $P<0.05$ ).

## 2.2 酸碱处理对不同草原类型土壤碳氮磷生态化学计量的影响

对酸碱添加处理后各草原的土壤pH值进行单因素方差分析和多重比较,3种草原类型0~10 cm土层的土壤pH值均随酸碱浓度的添加有不同程度的下降及上升的趋势(表3)。其中,低、中和高浓度酸均显著降低了典型草原0~10 cm土层的土壤pH值,中高浓度酸显著降低了荒漠草原和草甸草原0~10 cm土层的土壤pH值( $P<0.05$ )。碱添加处理中,高浓度碱均显著增加了3种草原类型0~10 cm土层的土壤pH值,中浓度碱显著增加了草甸草原0~10 cm土层的土壤pH值,而低浓度碱对3种草原类型0~10 cm土层的土壤pH值均不存在显著影响( $P<0.05$ )。相比0~10 cm土层,高浓度酸显著降低了荒漠草原10~30 cm土层的土壤pH值,中高浓度酸显著降低了典型草原10~30 cm土层的土壤pH值,中高浓度碱显著增加了荒漠草原10~30 cm土层的土壤pH值( $P<0.05$ )(表4)。

除中低浓度酸显著增加了荒漠草原0~10 cm土层的土壤有机碳含量外,不同水平的酸添加对荒漠草原的土壤全氮、全磷,典型草原和草甸草原的土壤有机碳、全氮和全磷均无显著影响( $P<0.05$ )(表3)。与酸添加处理不同,高浓度碱降低了荒漠草原0~10 cm土层的土壤有机碳;低、中和高浓度碱添加均降低了典型草原0~10 cm土层的土壤全氮和全磷,且中高浓度已经达到显著水平;草甸草原0~10 cm土层土壤有机碳、全氮和全磷均不受碱添加影响( $P<0.05$ )。相比土壤的0~10 cm土层,土壤10~30 cm土层受到酸碱添加处理的影响较小。高浓度碱显著降低了典型草原10~30 cm土层的土壤全氮以外,3种草原类型10~30 cm土层的其他养分含量均不受酸碱添加处理的影响( $P<0.05$ )(表4)。

不同水平的酸碱添加对典型草原和草甸草原0~10 cm土层的土壤碳氮磷比均无显著影响( $P<0.05$ )。荒漠草原0~10 cm土层的土壤碳氮比随酸碱添加浓度的上升而下降,且低浓度的酸碱对荒漠草原0~10 cm土层的土壤碳氮比存在显著影响。同时,低浓度酸和中浓度酸碱显著升高了荒漠草原0~10 cm土层的土壤碳磷比( $P<0.05$ )。不同水平的酸添加对荒漠草原0~10 cm土层的土壤氮磷比不存在显著影响,但高浓度碱显著降低了其土壤氮磷比( $P<0.05$ )。

表3 酸碱处理对各草原类型0~10 cm土层土壤碳氮磷化学计量的影响

Table 3 Effects of acid and alkali treatments on ecological stoichiometry of C, N, and P in 0~10 cm soil layer of three types of steppe

草原类型 Types of grassland	处理 Treatments	土壤pH值 Soil pH	有机碳 Organic C (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g·kg <sup>-1</sup> )	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
荒漠草原 Desert steppe	对照 C	8.59±0.165Ab	5.40±0.47Bb	0.69±0.004Aa	0.393±0.011Aa	7.83±0.70Bb	13.7±0.92Bbc	1.76±0.048Aa
	低酸 LA	8.53±0.121A	6.43±0.33A	0.64±0.042A	0.380±0.021A	10.00±0.50A	16.9±1.11A	1.69±0.057A
	中酸 MA	8.23±0.195B	6.58±0.53A	0.69±0.036A	0.370±0.006A	9.56±1.20AB	17.8±1.33A	1.87±0.123A
	高酸 HA	8.24±0.186B	5.66±0.79B	0.65±0.026A	0.374±0.020A	8.74±1.57AB	15.1±1.53AB	1.75±0.154A
	低碱 LAL	8.70±0.057b	6.90±0.87a	0.69±0.049a	0.405±0.014a	10.00±0.59a	17.0±1.75ab	1.69±0.077a
	中碱 MAL	8.76±0.242b	7.23±0.37a	0.74±0.108a	0.376±0.039a	9.93±1.09a	19.4±2.86a	1.97±0.312a
	高碱 HAL	9.69±0.120a	3.88±0.38c	0.46±0.105a	0.363±0.010a	8.55±1.27ab	10.7±0.76c	1.27±0.250b
典型草原 Typical steppe	对照 C	8.51±0.214Ab	22.30±6.00Aa	2.42±0.448Aa	0.412±0.079Aa	9.18±1.56Aa	54.3±11.61Aab	5.89±0.281Aab
	低酸 LA	7.46±0.133B	17.41±1.02A	1.89±0.151A	0.320±0.007A	9.19±0.44A	54.3±2.25A	5.91±0.342A
	中酸 MA	6.66±0.201C	17.12±0.78A	1.88±0.173A	0.319±0.016A	9.19±1.23A	53.8±4.94A	5.88±0.258A
	高酸 HA	6.63±0.128C	20.51±3.30A	2.22±0.302A	0.375±0.049A	9.18±0.32A	54.4±2.40A	5.93±0.053A
	低碱 LAL	8.62±0.186b	16.90±2.64a	1.86±0.093a	0.353±0.027a	9.04±1.00a	47.8±4.23b	5.29±0.144b
	中碱 MAL	8.82±0.032b	17.79±1.37a	1.88±0.169a	0.287±0.054b	9.49±0.44a	63.0±7.50a	6.65±0.886a
	高碱 HAL	9.48±0.131a	15.82±1.34a	1.80±0.146b	0.323±0.024b	8.76±0.22a	49.0±3.22b	5.59±0.233b
草甸草原 Meadow steppe	对照 C	6.84±0.314Ac	26.38±1.23Aa	2.26±0.162Aa	0.383±0.045Aa	11.71±0.40Aa	69.5±9.21Aa	5.96±0.970Aa
	低酸 LA	6.62±0.265AB	25.91±1.27A	2.13±0.126A	0.418±0.030A	12.13±0.27A	62.1±5.74A	5.12±0.406A
	中酸 MA	6.17±0.380BC	26.70±0.68A	2.20±0.107A	0.450±0.010A	12.24±0.90A	59.5±2.79A	4.90±0.132A
	高酸 HA	5.61±0.207C	26.41±3.77A	2.24±0.313A	0.392±0.067A	11.83±0.12A	67.5±2.28A	5.74±0.248A
	低碱 LAL	7.21±0.182c	26.77±2.20a	2.17±0.252a	0.416±0.010a	12.40±0.68a	64.4±6.78a	5.21±0.728a
	中碱 MAL	7.38±0.186b	25.02±4.01a	2.13±0.414a	0.428±0.035a	11.82±0.47a	58.2±6.78a	4.96±0.680a
	高碱 HAL	8.17±0.179a	24.04±3.48a	2.24±0.135a	0.397±0.043a	10.71±0.99a	60.6±7.38a	5.67±0.564a

C:对照 Control;LA:低酸处理 Low acid addition;MA:中酸处理 Medium acid addition;HA:高酸处理 High acid addition;LAL:低碱处理 Low alkali addition;MAL:中碱处理 Medium alkali addition;HAL:高碱处理 High alkali addition。数据为平均值±标准偏差。同一列不同大小字母分别表示各草原类型酸处理、碱处理之间的土壤养分差异显著,下同。The data are means ± standard deviation. Capital letters and lowercase letters represent significant differences in soil nutrients between acid and alkali treatments of different steppe types, the same below.

相比0~10 cm土层的土壤碳氮磷生态化学计量比的变化,土壤10~30 cm土层受到的影响更小。酸添加对3种草原类型10~30 cm土层的土壤碳氮磷比均不存在显著影响,碱添加对典型草原和草甸草原10~30 cm土层的土壤碳氮比不存在显著影响,但荒漠草原10~30 cm土层的土壤碳氮比随碱添加水平的升高而下降,且低浓度碱显著升高了土壤碳氮比( $P<0.05$ )。碱添加对荒漠草原和典型草原10~30 cm土层的土壤碳磷比不存在显著影响,同时也对荒漠草原和草甸草原10~30 cm土层的土壤氮磷比不存在显著影响( $P<0.05$ )。典型草原10~30 cm土层的土壤氮磷比随碱添加水平的上升而下降,且高浓度碱添加显著降低了土壤氮磷比( $P<0.05$ )。草甸草原10~30 cm土层的土壤碳磷比随碱添加水平的上升而升高,且低浓度碱显著降低了土壤碳磷比( $P<0.05$ )。

### 2.3 不同草原类型土壤碳氮磷生态化学计量和土壤pH值的相关性

通过对荒漠草原、典型草原以及草甸草原的土壤养分和土壤pH值进行相关性分析(图1),仅荒漠草原0~10 cm土层的土壤有机碳和全氮与土壤pH值具有极显著负相关关系,相关系数分别为0.451和0.678( $P<0.01$ )。典型草原和草甸草原0~10 cm土层的土壤有机碳和全氮含量均高于荒漠草原,但与土壤pH值不具有相关关系。荒漠草原、典型草原和草甸草原0~10 cm土层的土壤全磷含量均在0.30~0.45 g·kg<sup>-1</sup>,同样与土壤pH值无显著相关关系。

表4 酸碱处理对草原10~30 cm土层土壤碳氮磷化学计量的影响

Table 4 Effects of acid and alkali treatments on ecological stoichiometry of C, N, and P in 10~30 cm soil layer of three types of steppe

草原类型 Types of grassland	处理 Treatments	土壤pH值 Soil pH	有机碳 Organic C (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g·kg <sup>-1</sup> )	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
荒漠草原 Desert steppe	对照 C	8.64±0.065Ac	5.83±0.46Aa	0.74±0.109ABa	0.355±0.012Aa	7.89±0.56Ab	16.4±0.76Aa	2.09±0.238ABa
	低酸 LA	8.55±0.025AB	5.82±0.52A	0.63±0.042B	0.354±0.023A	9.24±0.22A	16.5±1.99A	1.78±0.178B
	中酸 MA	8.54±0.035AB	6.32±0.48A	0.81±0.007A	0.368±0.012A	7.79±0.64A	17.2±1.77A	2.21±0.052A
	高酸 HA	8.42±0.136B	6.35±0.56A	0.82±0.072A	0.381±0.020A	7.83±1.31A	16.7±1.96A	2.15±0.238AB
	低碱 LAL	8.66±0.040c	6.64±0.46a	0.69±0.078a	0.375±0.045a	9.71±0.49a	17.8±1.47a	1.83±0.081a
	中碱 MAL	8.87±0.136b	6.63±1.20a	0.81±0.105a	0.367±0.011a	8.22±1.02ab	18.0±2.99a	2.19±0.227a
	高碱 HAL	9.24±0.061a	6.78±0.53a	0.81±0.058a	0.376±0.033a	8.48±1.30ab	18.1±2.46a	2.15±0.244a
典型草原 Typical steppe	对照 C	8.55±0.164Aa	19.7±4.31Aa	2.14±0.378Aa	0.393±0.046Aa	9.16±0.37Aa	49.6±4.88Aa	5.41±0.310Aa
	低酸 LA	8.16±0.244AB	16.2±1.89A	1.87±0.139A	0.342±0.040A	8.65±0.73A	47.4±0.16A	5.50±0.468A
	中酸 MA	7.85±0.501BC	17.5±2.51A	1.99±0.131A	0.329±0.067A	8.74±0.75A	53.8±5.94A	6.22±1.170A
	高酸 HA	7.35±0.182C	19.0±1.98A	1.95±0.121A	0.373±0.013A	9.74±0.45A	50.9±3.61A	5.22±0.143A
	低碱 LAL	8.39±0.192a	15.5±1.43a	1.74±0.057ab	0.303±0.016a	8.90±0.60a	51.0±2.89a	5.74±0.126a
	中碱 MAL	8.48±0.341a	16.7±1.14a	1.83±0.131ab	0.322±0.002a	9.14±0.30a	51.9±3.22a	5.69±0.363a
	高碱 HAL	8.76±0.125a	16.3±0.73a	1.69±0.122b	0.344±0.022a	9.66±0.36a	47.3±0.94a	4.90±0.112b
草甸草原 Meadow steppe	对照 C	7.83±1.336Aa	19.4±2.43Aa	1.61±0.205Aab	0.351±0.044Aa	12.01±0.14Aa	55.4±6.65Aa	4.62±0.610Aab
	低酸 LA	7.71±1.093A	17.0±0.83A	1.42±0.062A	0.350±0.026A	12.02±0.84A	48.6±4.42A	4.06±0.137A
	中酸 MA	7.40±0.315A	17.4±2.71A	1.49±0.096A	0.340±0.016A	11.60±1.15A	51.1±7.20A	4.39±0.182A
	高酸 HA	6.95±0.451A	17.8±2.31A	1.61±0.339A	0.347±0.071A	11.19±1.34A	52.0±7.11A	4.64±0.147A
	低碱 LAL	8.37±1.033a	15.9±0.97a	1.42±0.118b	0.363±0.013a	11.24±1.35a	43.8±3.91b	3.92±0.416b
	中碱 MAL	8.39±0.392a	17.7±1.78a	1.40±0.168b	0.343±0.047a	12.71±0.53a	51.8±2.30ab	4.09±0.132b
	高碱 HAL	8.74±0.796a	19.0±1.82a	1.73±0.038a	0.353±0.016a	11.02±1.02a	54.0±7.44ab	4.90±0.248a

相比土壤上层,土壤下层的土壤养分含量无太大波动。3种草原类型10~30 cm土层的土壤有机碳、全氮和全磷的含量差异与0~10 cm土层的相同,但3种草原类型10~30 cm土层的土壤有机碳、全氮和全磷均与土壤pH值不存在显著的相关关系(图2)。通过不同草原类型土壤pH值与土壤碳氮磷生态化学计量比的相关性分析可知,仅荒漠草原0~10 cm土层的土壤碳磷比和氮磷比与土壤pH值呈显著负相关关系( $P < 0.05$ ,表5)。荒漠草原的土壤碳氮比以及典型草原和草甸草原的碳氮比、碳磷比和氮磷比均与土壤pH值不存在相关关系。同时,对土壤碳氮磷化学计量特征及环境因子之间做冗余分析(图3),实心箭头代表土壤碳氮磷生态化学计量特征,空心箭头则代表环境因子,通过酸碱添加水平、土壤pH值和土壤养分的夹角可知酸碱添加和土壤pH值对土壤碳氮磷计量特征的影响不同,说明土壤碳氮磷化学计量特征对于土壤pH值的改变可能存在短期响应和长期适应的不同。

### 3 讨论

#### 3.1 不同草原类型的土壤碳氮磷生态化学计量特征

相比典型草原和草甸草原,荒漠草原植被覆盖率和生产力的下降必然会导致土壤养分的流失,且随恶劣环境条件的不断侵袭,草地土壤退化越发严重<sup>[22]</sup>。刘伟等<sup>[23]</sup>通过对黄土高原水平方向的草地生态系统土壤有机碳分布的研究表明,不同草原类型土壤有机碳含量不同,高山草甸草原、典型草原和荒漠草原之间差异显著,同时这种差异会随土层的加深逐渐变小。高安社等<sup>[24]</sup>研究不同草原类型土壤有机碳和全氮的差异时发现,荒漠草原的养分状况不及典型草原。本研究草甸草原和典型草原的土壤碳氮含量显著高于荒漠草原的结果与其基本一致,

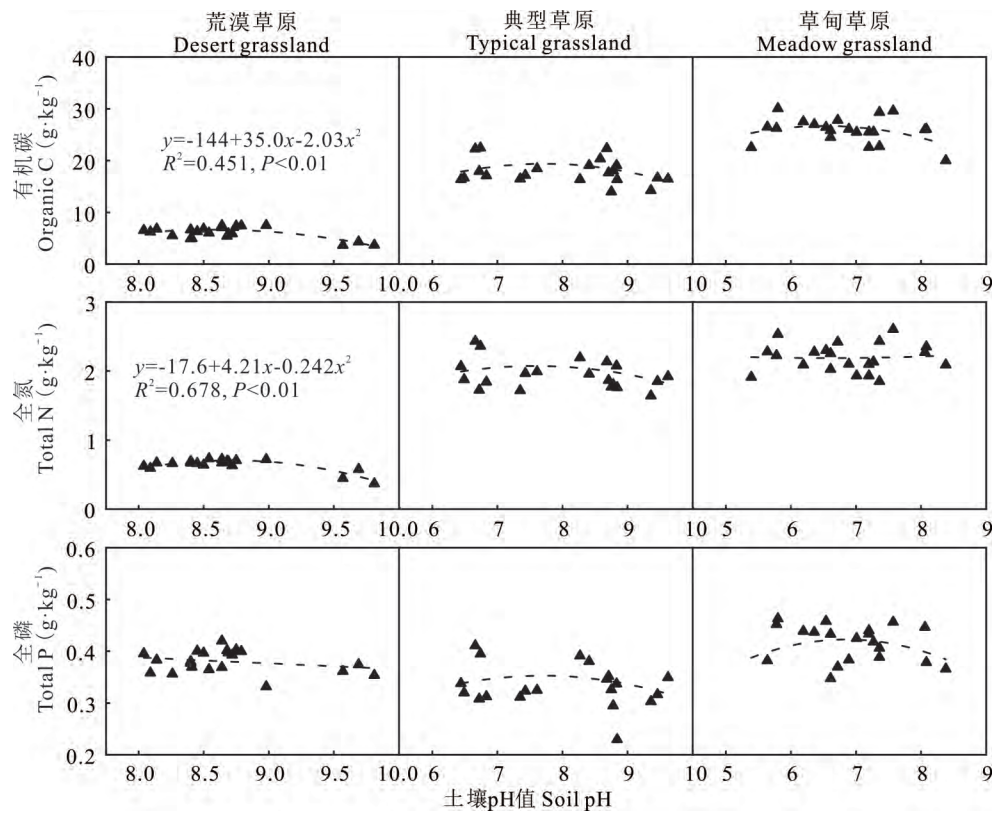


图1 不同草原类型0-10 cm 土层的土壤碳、氮和磷随土壤 pH 值的变化趋势

Fig. 1 Variations of soil C, N, and P in 0-10 cm soil layers in three types of steppe in relation to soil pH

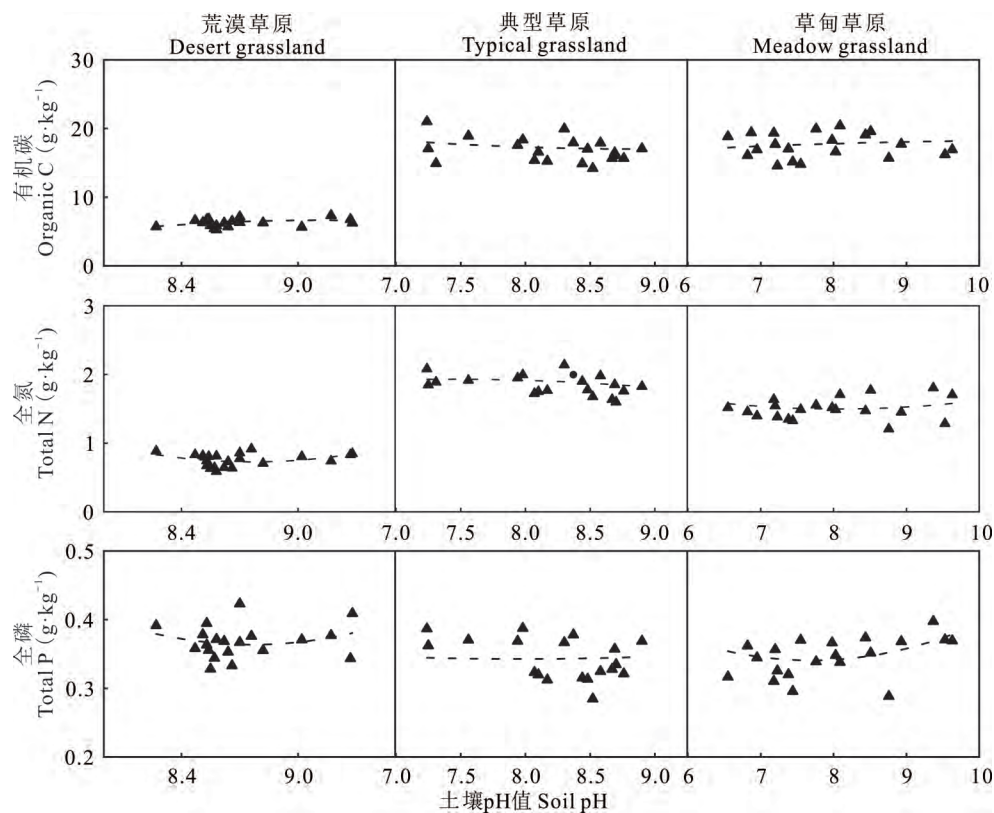


图2 不同草原类型10-30 cm 土层的土壤碳氮磷随土壤 pH 值的变化趋势

Fig. 2 Variations of soil C, N, and P in 10-30 cm soil layers in three types of steppe in relation to soil pH



但本研究中草甸草原和典型草原之间0~10 cm土层的土壤有机碳和全氮差异均不显著,这一结果的出现可能是因为本研究选择的草甸草原海拔较低,气温较高,有机质分解速度相比较快,碳氮养分积累较少<sup>[25]</sup>。

典型草原10~30 cm土层的全氮显著高于草甸草原和荒漠草原,这一现象的原因可能是草甸草原与典型草原的土壤养分均随土层的加深而减少<sup>[26]</sup>,而这两者表层土壤中的全氮含量并无差异,反而典型草原海拔较高,使得其在枯落物分解以及植物的吸收利用后10~30 cm土层的土壤全氮含量积累较多,从而高于草甸草原。不同草原类型的土壤全磷不存在显著差异,这主要是因为土壤磷素受土壤母质的影响较大,所以变异性较小<sup>[27]</sup>。草地沙化会改变土壤养分,并且导致土壤碳氮磷生态化学计量关系发生改变<sup>[21]</sup>。

表5 不同草原类型土壤pH值与土壤碳氮磷化学计量比之间的相关性分析

Table 5 Pearson correlation analysis of soil pH and stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in different grassland types

草原类型 Grassland types	土层 Soil layer (cm)	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
荒漠草原 Desert steppe	0~10	-0.265	-0.469*	-0.450*
典型草原 Typical steppe	10~30	0.322	0.113	0.293
草甸草原 Meadow steppe	0~10	-0.062	-0.022	-0.002
	10~30	0.295	0.269	-0.124
	0~10	-0.400	-0.243	0.008
	10~30	0.182	-0.045	-0.191

注:数值表示相关系数。“\*”表示相关性显著( $P < 0.05$ )。

Note: Values are the coefficients of pearson correlation. “\*” means significant correlation at level of  $P < 0.05$ .

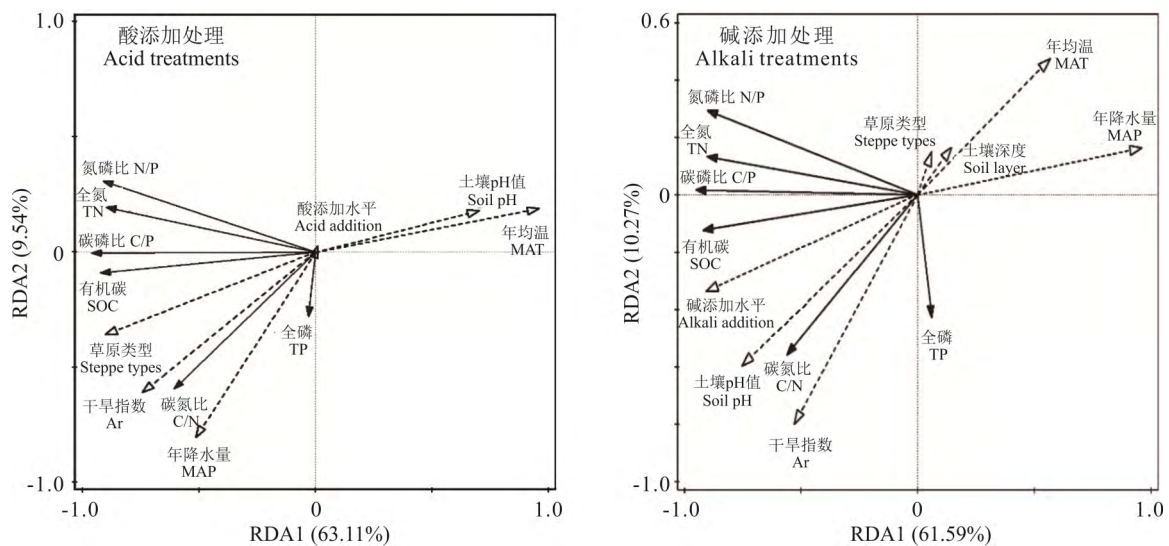


图3 土壤碳氮磷化学计量特征与环境因子的RDA排序

Fig. 3 Redundancy analysis of soil C, N, and P stoichiometry and environmental factors

TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; SOC: 有机碳 Soil organic carbon; MAT: 年均温 Mean average temperature; MAP: 年降水量 Mean average precipitation; Ar: 干旱指数 Aridity index; N/P: 氮磷比 Nitrogen phosphorus ratio; C/P: 碳磷比 Carbon phosphorus ratio; C/N: 碳氮比 Carbon nitrogen ratio.

Tian等<sup>[28]</sup>研究表明,中国土壤的碳氮比、碳磷比和氮磷比的平均值分别为11.9、61.0和5.2。本研究中,荒漠草原的土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比最低,典型草原次之,均低于中国土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比的平均值,而草甸草原则与中国土壤的平均值水平相近,这是因为生物地球化学过程对氮和磷供应的控制程度不同,因此土壤氮和磷的有效性会受到不同环境的影响。

### 3.2 酸碱添加对不同草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响

土壤养分在调控草原生态系统组成以及生态稳定性方面扮演着重要角色,而不同草原类型在酸碱添加试验后土壤碳氮磷生态化学计量特征的快速响应是不同的。在本研究中,低、中浓度酸和高浓度碱均显著影响荒漠草原0~10 cm土层的土壤有机碳,且均表现为土壤pH值降低时土壤有机碳含量升高。这与薛冬等<sup>[29]</sup>的土壤有机碳与土壤pH值呈相反的变化趋势的结果一致。土壤有机碳是土壤微生物对进入到土壤中的植物残体分解所得,

荒漠草原的地表裸露,植被覆盖率较低,适当调整土壤pH值会促进微生物加快对有机质的分解进而产生更多的有机碳<sup>[30]</sup>。

草原生态系统土壤氮的积累和消耗主要取决于氮素的硝化和反硝化、矿化、固定以及植物吸收等过程。王启基等<sup>[31]</sup>在研究柴达木盆地时发现,土地盐碱化会导致土壤全氮和全磷含量降低。在本研究中,典型草原0~10 cm土层的土壤全氮和全磷含量随碱添加浓度的升高而降低,这意味着土壤pH值的改变限制典型草原的土壤全氮和全磷含量,因此要减轻典型草原土壤盐碱化程度以保证典型草原土壤养分平衡。草甸草原0~10 cm土层的土壤养分均不受酸碱添加的影响,这可能是因为草甸草原的雨水充沛,植物生长旺盛且生产力高,土壤可通过改变自身的化学元素含量来适应土壤pH值的改变,这说明土壤pH值的短期改变不会影响草甸草原土壤养分含量。对于草原的10~30 cm土层而言,荒漠草原和草甸草原的土壤养分均不受酸碱添加的影响。典型草原10~30 cm土层高浓度碱添加显著降低土壤全氮,说明典型草原的土壤养分对短期碱添加反应较为敏感,表层和下层的土壤均会受到土壤pH值的影响。

土壤碳氮比可以判断土壤质量状况,反映土壤有机质状态、碳沉降以及微生物活性。土壤碳氮比表征土壤有机碳矿化速率情况,碳氮比偏高时,微生物活性会相对较低,土壤矿化速率较慢,土壤有机碳相对增加,土壤碳氮比偏低时则相反<sup>[32]</sup>。土壤碳磷比是判断有机碳在矿化过程中衡量磷素释放与吸收的一个重要指标,土壤碳磷比较高时表示微生物将磷固持在土壤中的能力较强,土壤碳磷比较低时则表示微生物释放磷素的能力较强<sup>[33]</sup>。土壤氮磷比可以反映磷活性,氮磷比较高时则磷活性较低,其较低时表示磷活性较高。在本研究中,典型草原和草甸草原0~10 cm土层的土壤碳氮磷生态化学计量比均不受酸碱添加的影响,而荒漠草原的土壤碳氮比和碳磷比随酸添加先升高后降低,氮磷比在高浓度碱添加下显著降低,说明荒漠草原0~10 cm土层的微生物活性会受到酸添加的影响,但这种影响会因浓度的差别表现不同的趋势,高浓度碱使得荒漠草原0~10 cm土层的土壤磷活性降低。典型草原和草甸草原0~10 cm土层的碳氮磷比保持在相对稳定的情况可能是因为其物种丰富度较高,生态系统结构复杂且稳定,能够有效保持自身的结构和功能状态<sup>[34]</sup>。

相比0~10 cm土层,土壤碳氮磷比在10~30 cm土层受到酸碱添加的影响更小。酸添加对3种草原类型10~30 cm土层的土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比均不存在显著影响,碱添加则对3种草原类型碳氮磷比影响不同,荒漠草原下层土壤碳氮比受到碱添加的影响,可能是微生物种类以及活动范围不同等造成的差异。典型草原表层的土壤全氮和全磷均受碱添加影响,所以氮磷比不存在差异,但是10~30 cm土层的土壤全氮受到碱添加影响,而土壤全磷并没有,所以下层的土壤氮磷比会在碱添加后产生差异。草甸草原的低浓度碱降低了土壤碳磷比,说明低浓度碱调动了下层土壤微生物的活性,造成磷释放量增多,从而碳磷比降低。

### 3.3 不同草原类型的土壤碳氮磷生态化学计量和土壤pH值的相关关系

在本研究中,仅荒漠草原0~10 cm土层的土壤有机碳和全氮与土壤pH值呈显著负相关关系。在土壤pH值为9.6左右时,土壤有机碳和全氮含量呈现最低的状态,说明在荒漠草原土壤pH值的升高会降低土壤有机碳和全氮。这与王燕等<sup>[35]</sup>研究随盐渍程度的加剧,土壤有机碳和全氮含量降低的结果一致。而典型草原和草甸草原不受影响可能是因为植被较多,水热条件较好,植被凋落物数量作为土壤有机质的重要来源之一,不足以让土壤pH值的改变影响到土壤中的养分含量。土壤碳磷比和氮磷比经常被用来判断限制性养分元素<sup>[36]</sup>,不同草原中仅荒漠草原0~10 cm土层的土壤碳磷比和氮磷比与土壤pH值相关,这是因为土壤pH变化后仅荒漠草原0~10 cm土层的土壤有机碳和全氮发生显著变化,全磷没有发生变化,所以碳磷比和氮磷比与土壤pH值呈显著相关关系。

不同草原类型的土壤养分特征对酸碱添加处理的响应以及其和土壤pH值相关性的趋势情况表现出不同的研究结果,可能是因为酸碱添加试验反映了土壤碳氮磷化学计量特征对于土壤pH值变化的真实快速的反应,而土壤碳氮磷化学计量特征随土壤pH值的变化趋势则是草原生态系统土壤养分长期适应的一种结果。在RDA分析中也可以看出,酸碱添加水平和土壤pH值对土壤碳氮磷化学计量的解释结果也是不同的。事实上,这些差异导致了关于自然群落控制试验结果相关性的争论,如Yuan等<sup>[37]</sup>研究认为,土壤养分含量与气候变化的关系在不同试验方法下可能得到相悖的结论。所以了解这些明显冲突的背后的机制是朝着发展群落过程中土壤养分理论

研究迈出的重要一步<sup>[38]</sup>。

#### 4 结论

本研究通过酸碱控制试验,分析了土壤pH值变化对3种草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响。可以看出,荒漠草原的土壤pH值显著高于草甸草原,土壤有机碳、全氮和土壤碳氮磷比均显著低于典型草原和草甸草原。3种草原类型的土壤碳氮磷生态化学计量特征会受到土壤pH值改变的影响,并且表层土壤相比下层土壤受到的影响更加明显。因此,在全球气候变化和人为活动引起的土壤pH值发生变化的背景下,草原生态系统在土壤退化后的恢复重建中应综合土壤pH值变化程度,合理施肥、围封和放牧等,保证土壤养分元素的平衡及循环过程,为草地综合管理提供科学理论依据。

#### 参考文献 References:

- [1] Xu K J, Shi L L, Wang Y F, *et al.* Effect of the pH value on switchgrass seedling growth and development in hydroponics. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23): 107–115.  
徐开杰, 史丽丽, 王勇锋, 等. 水培条件下pH值对柳枝稷幼苗生长发育的影响. *生态学报*, 2015, 35(23): 107–115.
- [2] Mueller K E, Eissenstat D M, Hobbie S E, *et al.* Tree species effects on coupled cycles of carbon, nitrogen, and acidity in mineral soils at a common garden experiment. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/2/3): 601–614.
- [3] Breemen N V, Driscoll C T, Mulder J. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters. *Nature*, 1984, 307(5952): 599–604.
- [4] Reuss J O, Cosby B J, Wright R F. Chemical processes governing soil and water acidification. *Nature*, 1987, 329(6134): 27–32.
- [5] Kou X R. Research progresses in soil acidification and its control. *Soils*, 2015, 47(2): 238–244.
- [6] Likens G E, Driscoll C T, Buso D C. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem. *Science*, 1996, 272(5259): 244–246.
- [7] Cheng B, Zhao Y J, Zhang W G, *et al.* The research advances and prospect of ecological stoichiometry. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(6): 1628–1637.  
程滨, 赵永军, 张文广, 等. 生态化学计量学研究进展. *生态学报*, 2010, 30(6): 1628–1637.
- [8] Wang M, Moore T R. Carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometry in an ombrotrophic peatland reflects plant functional type. *Ecosystems*, 2014, 17(4): 673–684.
- [9] Yang H M, Wang D M. Advances in the study on ecological stoichiometry in grass-environment system and its response to environmental factors. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(2): 244–252.  
杨惠敏, 王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展. *草业学报*, 2011, 20(2): 244–252.
- [10] Heuck C, Weig A, Spohn M. Soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 85: 119–129.
- [11] Bui E N, Henderson B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 553–568.
- [12] Ren Z, Niu D C, Ma P P, *et al.* Cascading influences of grassland degradation on nutrient limitation in a high mountain lake and its inflow streams. *Ecology*, 2019, 100(8): e02755.
- [13] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10–21.
- [14] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* A comparative study on soil respiration between grazing and fenced typical *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1611–1615.  
贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 等. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1611–1615.
- [15] Yan Z Q, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Nitrogen cycling in grassland ecosystems in response to climate change and human activities. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(6): 279–292.  
闫钟清, 齐玉春, 董云社, 等. 草地生态系统氮循环关键过程对全球变化及人类活动的响应与机制. *草业学报*, 2014, 23(6): 279–292.
- [16] Zeng Z X, Wang K L, Liu X L, *et al.* Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of

- North-west Guangxi. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(7): 682–693.
- 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 682–693.
- [17] Zhu L B, Zheng Y, Zeng Z H, *et al.* Study on the vegetation and soil characteristics of different vegetation types in Hulunbeier typical steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(3): 32–36.
- 朱立博, 郑勇, 曾昭海, 等. 呼伦贝尔典型草原不同植被类型植被与土壤特征研究. *中国草地学报*, 2008, 30(3): 32–36.
- [18] Zhou J D, Shi R J, Zhao F, *et al.* Effects of the frequency and intensity of nitrogen addition on soil pH, the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in temperate steppe in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2467–2476.
- 周纪东, 史荣久, 赵峰, 等. 施氮频率和强度对内蒙古温带草原土壤pH及碳、氮、磷含量的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2467–2476.
- [19] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, *et al.* Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: Evidence from Inner Mongolia Grasslands. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 358–372.
- [20] Chen D M, Lan Z C, Bai X, *et al.* Evidence that acidification-induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe. *Journal of Ecology*, 2013, 101(5): 1322–1334.
- [21] Bao S D. *Soil agrochemical analysis (The third edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- 鲍士旦. *土壤农化分析(第三版)*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] An H, Tang Z S, Keesstra S, *et al.* Impact of desertification on soil and plant nutrient stoichiometry in a desert grassland. *Scientific Reports*, 2019, 9: 9422.
- [23] Liu W, Cheng J M, Gao Y, *et al.* Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influencing factors. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 68–76.
- 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. *土壤学报*, 2012, 49(1): 68–76.
- [24] Gao A S, Zheng S H, Zhao M L, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen content in different steppes. *Chinese Journal of Grassland*, 2005, 27(6): 44–48.
- 高安社, 郑淑华, 赵萌莉, 等. 不同草原类型土壤有机碳和全氮的差异. *中国草地学报*, 2005, 27(6): 44–48.
- [25] Xiao H L. Climate change in relation to soil organic matter. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(4): 304.
- 肖辉林. 气候变化与土壤有机质的关系. *土壤与环境*, 1999, 8(4): 304.
- [26] Tian L M, Zhao L, Wu X D, *et al.* Vertical patterns and controls of soil nutrients in alpine grassland: Implications for nutrient uptake. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 855–864.
- [27] Yang Z P, Baoyin T, Minggagud H, *et al.* Recovery succession drives the convergence, and grazing versus fencing drives the divergence of plant and soil N/P stoichiometry in a semiarid steppe of Inner Mongolia. *Plant and Soil*, 2017, 420(1/2): 303–314.
- [28] Tian H, Chen G, Zhang C, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/2/3): 139–151.
- [29] Xue D, Yao H Y, Huang C Y. Study on soil microbial properties and enzyme activities in tea gardens. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 84–87.
- 薛冬, 姚槐应, 黄昌勇. 植茶年龄对茶园土壤微生物特性及酶活性的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 84–87
- [30] Shi M, Wang R, Sun Q, *et al.* Vegetation restoration and soil nutrient changes in edge of tengger desert. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(6): 107–111.
- 施明, 王锐, 孙权, 等. 腾格里沙漠边缘区植被恢复与土壤养分变化研究. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 107–111.
- [31] Wang Q J, Wang W Y, Wang F G, *et al.* Forming factors and saline-geochemical features of deserted farmland in Qaidam Basin. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 44–49.
- 王启基, 王文颖, 王发刚, 等. 柴达木盆地弃耕地成因及其土壤盐渍地球化学特征. *土壤学报*, 2004, 41(1): 44–49.
- [32] Zhang C, Jamieson R C, Meng F R, *et al.* Projecting in-stream dissolved organic carbon and total mercury concentrations in small watersheds following forest growth and clearcutting. *Water Air & Soil Pollution*, 2016, 227(9): 323. 1-323. 13.
- [33] Nambu K, Yonebayashi K. Role of dissolved organic matter in translocation of nutrient cations from organic layer materials in coniferous and broad leaf forests. *Soil Science and Plant nutrition*, 1999, 45(2): 307–319.
- [34] Mcgrady-Steed J P, Harris P M, Morin P J. Biodiversity regulates ecosystem predictability. *Nature*, 1997, 390(6656): 162–165.

- [35] Wang Y, Zhao H L, Dong Z B, *et al.* The change characteristics of soil organic carbon and soil total nitrogen in farmland salinization in Arid Oasis. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 200–205.  
王燕, 赵哈林, 董治宝, 等. 荒漠绿洲农田盐渍化过程中土壤有机碳和全氮变化特征. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 200–205.
- [36] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937–3947.  
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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [37] Yuan Z Y, Jiao F, Shi X R, *et al.* Experimental and observational studies find contrasting responses of soil nutrients to climate change. *Elife*, 2017, 6: e23255.
- [38] Li Z Y, Liu Z C, Yan C, *et al.* The biomass-diversity relationship depends upon soil pH variations in Inner Mongolian grasslands: Insight from comparison between gradient observations and manipulative experiments. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(1): 38–49.  
李子雁, 刘尊驰, 鄢创, 等. 内蒙古草原不同土壤pH条件下植物生物量和多样性的关系: 样带调查和控制实验的比较研究. *草业学报*, 2020, 29(1): 38–49.