

DOI: 10.11686/cyxb2019523

http://cyxb.magtech.com.cn

万芳, 蒙仲举, 党晓宏, 等. 封育措施下荒漠草原针茅植物—土壤 C、N、P 化学计量特征. 草业学报, 2020, 29(9): 49—55.

Wan F, Meng Z J, Dang X H, *et al.* C, N and P ecological stoichiometry characteristics of a *Stipa* species plant—soil system subject to grazing exclusion in a desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(9): 49—55.

# 封育措施下荒漠草原针茅植物—土壤 C、N、P 化学计量特征

万芳<sup>1</sup>, 蒙仲举<sup>1,2\*</sup>, 党晓宏<sup>1,3</sup>, 王瑞东<sup>1</sup>, 张慧敏<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 中央与地方共建风沙物理重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018;  
3. 内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400)

**摘要:** 以内蒙古希拉穆仁典型荒漠草原封育措施(完全封育、季节封育)下优势植物短花针茅及克氏针茅为研究对象, 通过测定其叶片、枯落物和土壤 C、N、P 含量及化学计量特征, 分析封育措施下两种针茅养分变化特征及养分限制因素。结果表明: 1) 两种针茅叶片及枯落物 C、N、P 含量均表现为完全封育 > 季节封育, 土壤 N 含量为完全封育 ( $2.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) < 季节封育 ( $2.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 2) 两种针茅植物叶片 C/N、C/P 表现为季节封育 > 完全封育 ( $P < 0.05$ ), 说明完全封育降低了两种植物的固碳能力, 土壤 C/N 与 C/P 均表现为完全封育 (6.03、39.80) > 季节封育 (4.92、36.58) 且差异显著 ( $P < 0.05$ ); 3) 不同封育措施两种针茅叶片 N/P > 16, 说明封育下两种针茅植物在研究区内主要受 P 的限制。研究结果进一步为荒漠草原可持续恢复管理提供科学指导。

**关键词:** 叶片; 枯落物; 土壤; 生态化学计量; 希拉穆仁荒漠草原

## C, N and P ecological stoichiometry characteristics of a *Stipa* species plant—soil system subject to grazing exclusion in a desert steppe

WAN Fang<sup>1</sup>, MENG Zhong-ju<sup>1,2\*</sup>, DANG Xiao-hong<sup>1,3</sup>, WANG Rui-dong<sup>1</sup>, ZHANG Hui-min<sup>1</sup>

1. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Wind Erosion Key Laboratory of Central and Government, Hohhot 010018, China; 3. Inner Mongolia Hangjin Desert Ecological Position Research Station, Ordos 017400, China

**Abstract:** This research was conducted at Xilamuren in Inner Mongolia on typical desert steppe grassland dominated by *Stipa breviflora* and *Stipa krylovii* with the objective of defining the C, N, and P stoichiometry of leaves, litter and soil under two management regimes (year-round grazing exclusion and seasonal grazing exclusion). It was found that: 1) The content of C, N and P in the leaves and litter in year-round exclusion were all greater than in the seasonal exclusion, while the content of soil N in year-round exclusion ( $2.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) was less than that in the seasonal exclusion ( $2.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). 2) The C : N and C : P ratios of the leaves in seasonal exclusion was greater than that in the year-round exclusion, which showed that the carbon sequestration ability of the two grasses was reduced under year-round exclusion. However, the soil C : N and C : P ratios in seasonal exclusion (4.92 and 36.58, respectively) were less ( $P < 0.05$ ) than those in year-round exclusion (6.03 and

收稿日期: 2019-12-03; 改回日期: 2020-02-24

基金项目: 内蒙古中部荒漠草原微斑块发育与土壤优先流响应机制(51769019)和中央引导地方科技发展专项资金内蒙古荒漠化防治创新研究中心资助。

作者简介: 万芳(1993-), 女, 内蒙古阿拉善人, 在读硕士。E-mail: 1101837578@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: mengzhongju@126.com

39.80, respectively). 3) The N:P ratio of leaves were typically greater than 16. Therefore, this is an obvious indication that the two grasses studied were mainly restricted by lack of P at the study site. These results provide scientific data assist decisions on the sustainable recovery management of the desert grassland.

**Key words:** leanes; litter; soil; ecological stoichiometry; Xilamuren desert steppe

荒漠草原是草原的重要组成部分,属于草原向荒漠过渡的草原类型,是我国重要的生态屏障,而荒漠植被对荒漠草原生态系统的稳定起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。近年来,随着气候的变化,加之超载放牧等人为干扰,导致草地生态系统退化<sup>[2]</sup>。围栏封育是草地进行生态修复的一种重要技术手段,对退化草地具有一定的修复的作用,不仅影响着植物的群落结构、生物多样性和生态系统的稳定性,而且间接影响土壤的理化性质<sup>[3-5]</sup>,因为植物—土壤是一个整体,通常植物与土壤存在互馈关系<sup>[6]</sup>,而生态化学计量学为植物与土壤之间的相互作用提供了一种新的思路。

生态化学计量学是研究生态系统营养元素分配情况、循环过程和限制性元素判断的一种新兴手段<sup>[7]</sup>。C、N、P 作为植物生长发育的化学元素,共同参与植物的代谢过程,调节植物的生长,C、N、P 化学计量特征可以反映植物的生态策略<sup>[8]</sup>。目前,国内外学者关于草地生态系统的化学计量特征研究主要围绕高寒草原、东北草地、内蒙古典型草原在封育与放牧方式下植物叶片和土壤化学计量特征<sup>[9]</sup>,揭示两种方式下植物与土壤的养分含量差异及对化学计量特征的影响<sup>[6]</sup>。勒佳佳等<sup>[10]</sup>对高寒草原植物叶片和土壤化学计量特征研究发现,围封增加了植物叶片与土壤的 C、P 含量,降低了植物叶片的 C/N、C/P。Bai 等<sup>[11]</sup>通过研究内蒙草原围封对植物的影响表明,围封会降低植物 N 含量、增加植物的 C/N。范燕敏等<sup>[12]</sup>对荒漠生态系统的研究显示,封育对植被的 C/N 影响不大,但长期封育使根系固碳能力增强。现阶段,封育与放牧的研究主要是对单一组分(植被叶片或者土壤)或者两个组分组合(植物叶片和土壤)的 C、N、P 进行生态化学计量研究<sup>[13]</sup>,针对植物—枯落物—土壤形成的连续体化学计量特征的研究较少。

基于此,本研究以植物叶片—枯落物—土壤化学计量为切入点,研究荒漠草原完全封育与季节封育(冬季放牧)下两种优势植物短花针茅(*Stipa breviflora*)及克氏针茅(*Stipa krylovii*)叶片—枯落物—土壤的化学计量特征,分析不同封育措施下两种植物的 C、N、P 含量的变化及植物生长过程中的养分限制元素。从生态化学计量的角度阐明不同封育措施下两种植物的养分变化规律及限制因素,为典型荒漠草原植被的恢复提供合理的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古达拉特旗希拉穆仁草原(42°20′—42°40′ N, 109°16′—111°25′ E),属于温带大陆性季风气候,年平均降水量约为 280 mm,主要集中在 7—8 月,年平均气温 3.4℃,最高气温 32℃,最低气温 -31℃,无霜期 106 d,蒸发量大,年均蒸发量 2227 mm;地带性土壤为栗钙土,质地粗糙,土壤养分含量较低。由于旅游业的发展和过度放牧等人为干扰,造成土壤养分的损失,生物多样性减少,使得草原退化严重。自 2002 年封育,经过人为封禁(围封 17 年),围封面积 133 hm<sup>2</sup>,排除了放牧及人为干扰后,草地生态系统得到恢复。研究区植物耐旱、耐贫瘠、适应性强,主要建群植物有羊草(*Leymus chinensis*)、短花针茅、克氏针茅、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等,银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、赖草(*Leymus secalinus*)等分布也较为广泛,植被类型为典型荒漠草原特征。

### 1.2 采样地设置与样品采集

在试验区立地条件基本一致的地段,选取 2002 年开始禁牧的完全封育区和 2002 年开始以冬季放牧为主的季节封育区为研究对象,于 2018 年 8 月 20 日在希拉穆仁草原的完全封育区与季节性封育区设置 30 m×30 m 的典型样区,并在样区的四周及中心设 5 个 1 m×1 m 的草本样方。在每个样区的样方内收集短花针茅与克氏针茅的叶片和枯落物分别装进信封袋带回实验室作为叶片与枯落物样品。收集两种针茅植物叶片与枯落物后,在

每个样方内用环刀取土, 对角线的中心取 0~10 cm 土层的土样, 装进塑封袋。最后将样品带回实验室, 捡去植物叶片及枯落物中的杂质, 清洗干净植物及枯落物表面, 将处理好的植物和枯落物分别装进信封袋中放入烘箱中, 在 105 °C 下杀青 30 min, 然后在 65 °C 烘 48 h 至恒重, 以备测定植物叶片与枯落物养分含量。土壤样品经自然风干后进行养分的测定。

### 1.3 样品测定

将野外采集回来的针茅植物叶片和枯落物用粉碎机粉碎成粉末后过 0.15 mm 的筛, 测定其 C、N、P 的含量。植物、枯落物与土壤 C 含量采用重铬酸钾—外加热法测定; 植物 N、P 含量采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}_2$  消煮, 将消煮液分别用凯氏法测定 N 含量, 钒钼黄比色法测定 P 含量。土壤全 N 采用半微量凯氏法, 全 P 采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色—紫外分光光度法测定<sup>[14]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 23.0 统计分析软件对测定数据进行整理和分析。所有统计数据以平均值±标准差表示, 对不同封育措施两种针茅植被叶片、枯落物与土壤进行单因素方差分析(One-way ANOVA)以及多重比较分析, 探讨两种针茅植物叶片、枯落物与土壤的养分及生态化学计量学特征差异, 最后利用 Origin 2017 进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同封育措施下针茅叶片及枯落物 C、N、P 含量的变化

通过完全封育与季节封育对两种针茅植物的养分含量研究发现, 两种针茅植物叶片 C、N、P 含量均表现为完全封育>季节封育且差异显著( $P<0.05$ ), 其中季节封育短花针茅叶片的 C、N、P 含量较完全封育分别减少了 3.00%、18.37%、47.86%, 克氏针茅分别减少了 0.88%、11.26%、5.05%。两种针茅植物枯落物 C 含量表现为差异显著( $P<0.05$ ), 而 N 含量表现为差异不显著( $P>0.05$ ), 季节封育 P 含量(短花针茅、克氏针茅)较完全封育分别减少了 0.56、0.01  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 1)。

### 2.2 不同封育措施下两种针茅叶片及枯落物 C、N、P 生态化学计量特征

由于两种针茅植物叶片 C、N、P 含量在两种措施下差异显著, 导致两种针茅植物化学计量特征不相同。不同封育措施下两种针茅植物叶片的 C/N、C/P 表现为季节封育>完全封育且差异显著( $P<0.05$ ), 说明完全封育会降低植物的 C/N、C/P; 两种针茅植物叶片的 N/P>16 且差异显著( $P<0.05$ )。两种针茅植物枯落物在不同封育措施下 C/N 差异显著( $P<0.05$ ), 短花针茅枯落物 C/P、N/P 差异显著( $P<0.05$ ), 克氏针茅枯落物在不同封育措施下 C/P、N/P 变化相对较小且差异不显著( $P>0.05$ )(图 2)。

### 2.3 不同封育措施土壤 C、N、P 含量及化学计量特征的变化

不同封育措施下两种针茅植物土壤 C 与 P 含量均表现为完全封育>季节封育, 且季节封育较完全封育 C、P 含量分别减少了 1.18  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、0.02  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , N 含量增加了 0.21  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  且差异显著( $P<0.05$ ), 季节封育对 P 含量无显著影响。土壤 C/N、C/P 分别为 6.03、39.80(完全封育), 4.92、36.58(季节封育), 其表现为完全封育>季节封育且差异显著( $P<0.05$ ), N/P 表现出相反的趋势且差异不显著( $P>0.05$ )(表 1)。

## 3 讨论

### 3.1 不同封育措施下两种针茅叶片及其枯落物 C、N、P 含量特征

本研究中不同封育措施下的两种针茅植物平均 C 含量(410.39、402.02  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 低于全球水平草原 C 含量(438.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[15]</sup>, 表明完全封育与季节封育两种植物具有相对较低的 C 含量。两种植物平均 N 含量(20.83、18.14  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 低于内蒙古草原(26.80  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和青藏高原草地(24.86  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[15]</sup>。两种针茅植被的 P 含量(1.08、0.80  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 小于全球尺度 P 的平均含量(1.42  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[16]</sup>, 叶片 P 含量较低与研究区内土壤 P 含量的缺乏有关。枯落物是将养分归还土壤的重要途径<sup>[17]</sup>, 有研究发现, 枯落物 N、P 含量在一定程度上可以反映植物对养分的利用效率以及土壤养分的供应状况<sup>[18]</sup>, 不同封育措施下两种针茅植物的 N 含量高说明短花

针茅与克氏针茅在不同的封育方式下体内 N 含量的养分利用效率较高,证明植物在干旱条件下具有较高的适应能力。

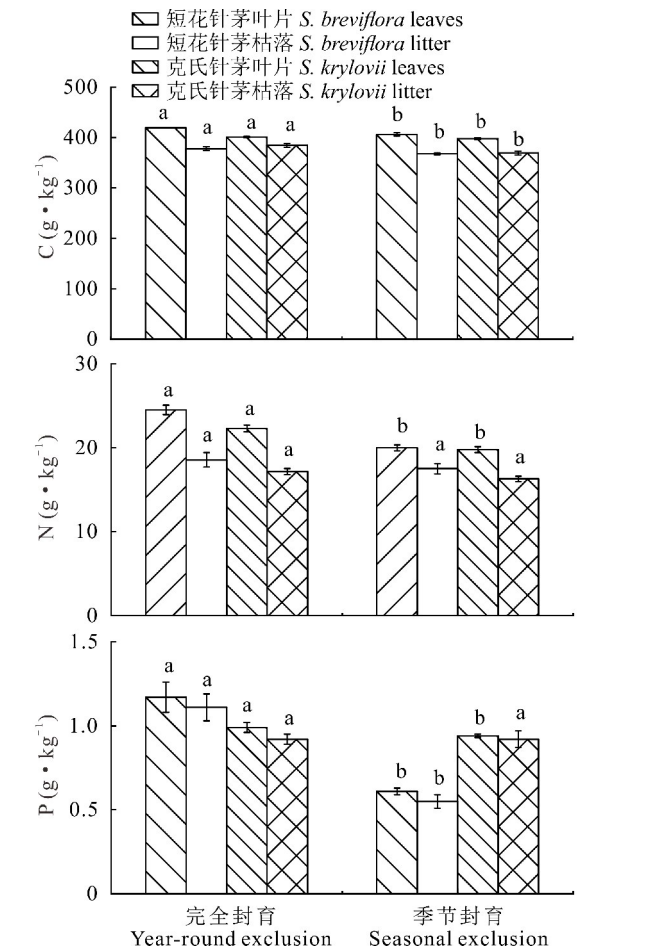


图 1 不同封育措施下两种植物叶片及枯落物的 C、N、P 含量

Fig. 1 C, N and P content in leaves and litter of two plants under different exclusion measures

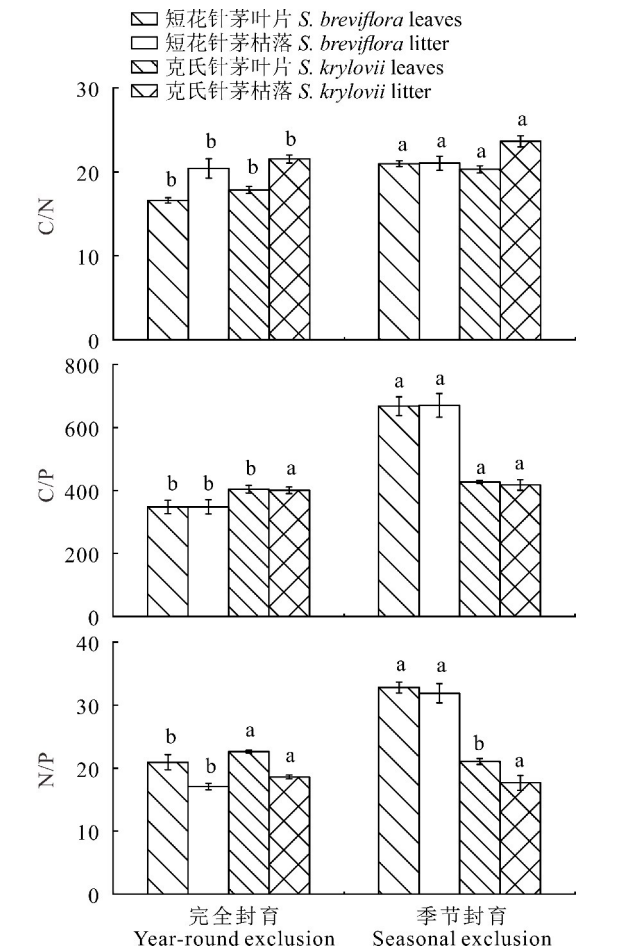


图 2 不同封育措施下的两种植物叶片及枯落物化学计量特征

Fig. 2 Stoichiometric characteristics of leaves and litter of two plants under different exclusion measures

不同小写字母表示不同封育措施相同植物叶片或枯落物差异显著( $P<0.05$ )。下同。Different lowercase letters indicate significant differences between different exclusion measure in the leaves or litter at the same species ( $P<0.05$ ). The same below.

表 1 不同封育措施下的土壤 C、N、P 含量及化学计量特征						
Table 1 Soil C, N, P content and stoichiometric characteristics under different exclusion measures						
封育方式	碳含量	氮含量	磷含量	C/N	C/P	N/P
Exclusion measures	C content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	N content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	P content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			
完全封育 Year-round exclusion	15.34±0.43a	2.54±0.07b	0.39±0.01a	6.03±0.23a	39.80±1.85a	6.60±0.17a
季节封育 Seasonal exclusion	13.53±0.31b	2.75±0.02a	0.37±0.01a	4.92±0.12b	36.58±0.67b	7.43±0.28a

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ( $P<0.05$ ).

3.2 不同封育措施下针茅叶片及其枯落物 C 积累与 N、P 格局限制

植物叶片吸收营养元素时所能同化碳的能力一般常采用 C/N、C/P 表征<sup>[19]</sup>,具有一定的生态学意义。本研究结果显示,围封显著降低了两种针茅植物的 C/N、C/P,这表明其降低了两种针茅植物同化碳的能力和固碳效



率。N 和 P 含量是植物生长过程中的主要限制元素,在植物体内 N、P 含量的多少对植物的生长有一定的影响<sup>[20]</sup>。N/P 是限制陆地生态系统植物生长的重要指标,反映环境对植物生长的养分供应状况<sup>[21]</sup>。植物生长受 N 和 P 限制的 N/P 阈值为 14 和 16, N/P 大于 16 时植物主要受 P 的限制,小于 14 时主要受 N 的限制,介于 14~16 主要受 N 和 P 的共同限制<sup>[21]</sup>。本研究结果表明,在不同封育措施下两种植被 N/P 大于 16,高于全球尺度的 N/P(13.8)说明植物受 P 的限制<sup>[22]</sup>,这与 Han 等<sup>[13]</sup>、任书杰等<sup>[23]</sup>、Reich 等<sup>[24]</sup>的研究结果相一致。枯落物 N/P 是影响枯落物分解和养分归还速率的重要因素之一<sup>[25]</sup>,不同封育措施下的两种枯落物 N/P 的平均值低于全球尺度(45.52)<sup>[26]</sup>,枯落物 N/P>25 时分解主要受 P 限制<sup>[25]</sup>,本研究中两种针茅枯落物 N/P 低于 25,说明枯落物的分解主要受 N 限制。

### 3.3 不同封育措施下土壤 C、N、P 含量及化学计量特征

土壤作为植物营养元素的主要来源之一,其养分的多少对植物的生长发育产生很大的影响<sup>[21]</sup>。完全封育区土壤 C 含量高于季节性封育且差异显著,土壤中 C 含量主要来源于地上生物量和根系生物量的归还<sup>[27]</sup>,因完全封育区围封年限较长,植被恢复较好,提高了地表生物量及枯落物的量,使得归还到土壤中的 C 含量增加。由于季节封育区牲畜的排泄物中含有大量的 N 素,使得土壤表层增加了 N 含量,致使季节封育 N 含量大于完全封育<sup>[28]</sup>。完全封育与季节封育区 P 含量较少且相差很小,二者未达到显著性水平,因为土壤中的 P 是一种沉积性元素,受成土母质、气候等的影响,主要来源于岩石分化<sup>[29]</sup>。由于研究区内干旱降水量小,不利于岩石的风化导致土壤中 P 元素较少,说明植物贮存土壤中 P 的能力较差。土壤化学计量特征是表征土壤内部 C、N、P 元素循环的重要指标<sup>[30-31]</sup>。通常土壤 C/N、C/P 反映有机质的分解与积累,其数值在一定范围内可以作为评价土壤肥力的指标,影响着植物体的养分积累和分配<sup>[1]</sup>。本研究表明季节封育 C/N、C/P 要小于完全封育,主要的原因可能是季节封育改变了土壤呼吸的微环境,使土壤的物理性质发生改变,增加了 N、P 矿化,另一方面,由于家畜排泄物含有 N、P 元素,使微生物的活性增强,N、P 矿化作用加强<sup>[32]</sup>。季节封育土壤 N/P>完全封育,说明冬季放牧季节封育增加了土壤 N 含量,对 P 含量无显著影响。

## 4 结论

1)不同封育措施下的两种针茅 C、N、P 含量均表现为完全封育>季节封育,从化学计量比可以得出,完全封育降低了两种针茅植物的固碳能力;两种针茅植物的 N/P>16,说明植物在生长过程中应主要受 P 元素的限制,因此,在植被恢复过程中应适当施加 P 肥,弥补土壤中缺 P 的现象。

2)完全封育显著增加了土壤的 C 含量,季节封育显著增加了土壤 N 含量,而两种措施对土壤 P 含量无显著影响,说明在植物生长过程中土壤 P 元素较少供给植物的生长,而更多是受植物自身遗传特性的影响。

## 参考文献 References:

- [1] An Y, An H, Li S B. Effects of grazing on ecological stoichiometry of soil and dominant plants in desert grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(12): 94-102.  
安钰, 安慧, 李生兵. 放牧对荒漠草原土壤和优势植物生态化学计量特征的影响. *草业学报*, 2018, 27(12): 94-102.
- [2] Niu Y J, Yang S W, Wang G Z, *et al.* Evaluation and selection of species diversity index under grazing disturbance in alpine meadow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1824-1832.  
牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 等. 放牧干扰下高寒草甸物种多样性指数评价与选择. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1824-1832.
- [3] Cao J J, Holden N M, Lü X T, *et al.* The effect of grazing management on plant species richness on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Grass and Forage Science*, 2011, 66(3): 333-336.
- [4] Zhai X J, Huang D, Wang K. Effects of fencing and grazing on vegetation and soil in typical grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(6): 73-78.  
翟夏杰, 黄顶, 王堃. 围封与放牧对典型草原植被和土壤的影响. *中国草地学报*, 2015, 37(6): 73-78.
- [5] Evans C R W, Krzic M, Broersma K, *et al.* Long-term grazing effects on grassland soil properties in southern British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(4): 685-693.
- [6] Xu X B, Cao J J, Yang L, *et al.* Effects of grazing and enclosure on foliar and soil stoichiometry of grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(5): 1349-1355.

- 许雪贇, 曹建军, 杨淋, 等. 放牧与围封对青藏高原草地土壤和植物叶片化学计量学特征的影响. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1349—1355.
- [7] Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(6): 1007—1019.  
曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007—1019.
- [8] Yang J, Xie Y Z, Wu X D, *et al.* Stoichiometry characteristics of plant and soil in alfalfa grassland with different growing years. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(2): 340—345.  
杨菁, 谢应忠, 吴旭东, 等. 不同种植年限人工苜蓿草地植物和土壤化学计量特征. 草业学报, 2014, 23(2): 340—345.
- [9] Yin X R, Liang C Z, Wang L X, *et al.* Ecological stoichiometry of plant nutrients at different restoration succession stages in typical steppe of Inner Mongolia. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 39—47.  
银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 等. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学. 植物生态学报, 2010, 34(1): 39—47.
- [10] Le J J, Su Y, Luo Y, *et al.* Effects of grazing and enclosure on leaves of four plants and soil stoichiometry in alpine grassland of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1621—1628.  
勒佳佳, 苏原, 罗艳, 等. 放牧与围封对天山高寒草原 4 种植物叶片和土壤化学计量学特征的影响. 生态学报, 2020, 40(5): 1621—1628.
- [11] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, *et al.* Grazing alters ecosystem functioning and C/N/P stoichiometry of grasslands. Journal of Applied Ecology, 2012, 49(6): 1204—1215.
- [12] Fan Y M, Wu H Q, Jin G L, *et al.* Effects of enclosure on stoichiometric characteristics of C, N, P in desert grassland ecosystem. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(3): 76—81.  
范燕敏, 武红旗, 靳瑰丽, 等. 封育对荒漠草地生态系统 C、N、P 化学计量特征的影响. 中国草地学报, 2018, 40(3): 76—81.
- [13] Han W X, Fang J Y, Guo D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168(2): 377—385.
- [14] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2005: 45—52.  
鲍士旦. 土壤农化分析(第 3 版). 北京: 中国农业出版社, 2005: 45—52.
- [15] He J S, Fang J Y, Wang Z H, *et al.* Stoichiometry and large scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. Oecologia, 2006, 149(1): 115—122.
- [16] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, *et al.* Nutritional constraints interrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408: 578—580.
- [17] Elser J J, Urabe J. The stoichiometry of consumer—driven nutrient recycling: Theory, observations, and consequence. Ecology, 1999, 80(3): 735—751.
- [18] Ren Y, Gao G L, Ding G D, *et al.* Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 743—750.  
任悦, 高广磊, 丁国栋, 等. 沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤氮磷化学计量特征. 应用生态学报, 2019, 30(3): 743—750.
- [19] He J S, Han X G. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2—6.  
贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2—6.
- [20] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. New Phytologist, 2004, 164(2): 243—266.
- [21] Wang W Q, Xu L L, Zeng C S, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratio among live plant—litter—soil systems in estuarine wetland. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7119—7124.  
王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31(23): 7119—7124.
- [22] Zeng D P, Jiang L L, Zeng C S, *et al.* Reviews on the eco-logical stoichiometry characteristics and its applications. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5484—5492.  
曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. 生态学报, 2013, 33(18): 5484—5492.
- [23] Ren S J, Yu G R, Tao B, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC. Environmental Science, 2007, 28(12): 2665—2673.  
任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, 2007, 28(12): 2665—2673.

- [24] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001—11006.
- [25] Pan F J, Zhang W, Wang K L, *et al.* Litter C : N : P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 335—343.  
潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C : N : P 生态化学计量特征. *生态学报*, 2011, 31(2): 335—343.
- [26] Ma R T, Fang Y, An S S. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, phosphorus and C : N : P in shoots and litter of plants in grassland Yunwu Mountain. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1170—1180.  
马任甜, 方瑛, 安韶山. 云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷生态化学计量特征. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1170—1180.
- [27] Xue R, Zheng S X, Bai Y F. Impacts of grazing intensity and management regimes on above ground primary productivity and compensatory growth of grassland ecosystems in Inner Mongolia. *Biodiversity Science*, 2010, 18(3): 300—311.  
薛睿, 郑淑霞, 白永飞. 不同利用方式和载畜率对内蒙古典型草原群落初级生产力和植物补偿性生长的影响. *生物多样性*, 2010, 18(3): 300—311.
- [28] Ding X H, Gong L, Wang D B, *et al.* Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4722—4730.  
丁小慧, 宫立, 王东波, 等. 放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响. *生态学报*, 2012, 32(15): 4722—4730.
- [29] Cheng M, An S S. Responses of soil nitrogen, phosphorous and organic matter to vegetation succession on the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(2): 216—223.
- [30] Li Y Q, Zhao X Y, Zhang F X, *et al.* Accumulation of soil organic carbon during natural restoration of desertified grassland in China's Horqin Sandy Land. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(3): 328—340.
- [31] Zhang G S, Deng H J, Du K, *et al.* Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of amountain in an area with high frequency debris flow: A case study in Xiaojiang Watershed Yunnan. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 675—687.  
张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征—以云南省小江流域为例. *生态学报*, 2016, 36(3): 675—687.
- [32] Li X Z, Chen Z Z. Influences of stocking rates on C, N, P contents in plant-soil system. *Acta Agrestia Sinica*, 1998, 6(2): 90—98.  
李香真, 陈佐忠. 不同放牧率对草原植物与土壤 C、N、P 含量的影响. *草地学报*, 1998, 6(2): 90—98.