



不同干扰类型下滇西北高寒草甸土壤化学计量特征

刘莉 王明浩 杨蔚 任健 张冉 田健帆 许文花 马向丽

Soil stoichiometric characteristics of alpine meadow in northwest Yunnan under different disturbance types

LIU Li, WANG Minghao, YANG Wei, REN Jian, ZHANG Ran, TIAN Jianfan, XU Wenhua, MA Xiangli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0569>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

旅游干扰和海拔梯度对山地草甸植物叶片与土壤化学计量特征的影响

Effects of tourism disturbance and altitudinal gradient on leaf and soil ecological stoichiometry of a mountain meadow in Altai Mountains, China

草业科学. 2021, 38(3): 453 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0426>

放牧强度对高寒草甸群落碳氮磷化学计量特征的影响

Effects of grazing intensity on the ecological stoichiometry characteristics of alpine meadow

草业科学. 2017, 11(3): 449 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0329>

巢湖湖滨带不同植被类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征

Effect of vegetation type on the eco-stoichiometric characteristics of soils from around Chaohu Lake

草业科学. 2020, 37(8): 1448 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0633>

不同放牧模式下青藏高原高寒草甸植被群落和土壤差异

Differences in plant community and soil of alpine meadow under different grazing patterns on the QinghaiTibet Plateau

草业科学. 2021, 38(7): 1209 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0678>

干旱矿区不同干扰强度下土壤种子库特征

Characteristics of the soil seed bank under different disturbance intensities in an arid mining area

草业科学. 2021, 38(3): 443 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0400>

高寒草甸冷季放牧对凋落物分解及C、N、P化学计量特征的影响

Effect of grazing on chemical characteristics of litter in alpine grassland during the cold season

草业科学. 2017, 11(10): 2009 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0516>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0569

刘莉, 王明浩, 杨蔚, 任健, 张冉, 田健帆, 许文花, 马向丽. 不同干扰类型下滇西北高寒草甸土壤化学计量特征. 草业科学, 2022, 39(4): 634-644.

LIU L, WANG M H, YANG W, REN J, ZHANG R, TIAN J F, XU W H, MA X L. Soil stoichiometric characteristics of alpine meadow in northwest Yunnan under different disturbance types. Pratacultural Science, 2022, 39(4): 634-644.

不同干扰类型下滇西北高寒草甸土壤化学计量特征

刘莉¹, 王明浩¹, 杨蔚², 任健¹, 张冉¹, 田健帆¹, 许文花¹, 马向丽¹

(1. 云南农业大学动物科学技术学院, 云南 昆明 650201; 2. 红云红河集团昆明卷烟厂, 云南 昆明 650202)

摘要: 为了解不同干扰类型对土壤养分的影响, 本研究以云南迪庆州高寒草甸为对象, 分析了封育+火烧、封育+施肥、封育和放牧 4 种不同干扰类型下的土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)化学计量特征。结果表明: 1) 在同一类型干扰下, 土壤 C、N、P、K 浓度随着土层深度的增加而降低。土壤 C、N、P、K 浓度与土层深度表现为负相关关系, 均可用直线函数较好拟合。2) 土壤 C、N、P、K 浓度以封育+施肥、封育地较高, 其中, 在 0–30 cm 土层, 封育+施肥地土壤 C、N 浓度显著高于其他 3 种干扰 ($P < 0.05$); 在 0–10 cm 土层, 封育+施肥地土壤 P 浓度显著高于其他干扰。3) 在 0–40 cm 土层, 放牧与封育+火烧地 C、N、P、K 浓度大多低于其他两种干扰, 表明放牧和封育+火烧干扰下的土壤营养严重流失。4) 研究区域土壤中的 N 决定了该地草地生态系统中的化学计量学的过程变化。且土壤中 C:N 平均值为 29.34, 高于全国高寒草原平均水平 (13.6), 说明研究区域内土壤有机质分解速度较快, 有机质处于匮乏状态。故封育+施肥是该地区高寒草甸草地恢复以及放牧管理最佳措施。

关键词: 封育; 火烧; 施肥; 放牧; 土壤养分; 草地恢复; 放牧管理

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)04-0634-11

Soil stoichiometric characteristics of alpine meadow in northwest Yunnan under different disturbance types

LIU Li¹, WANG Minghao¹, YANG Wei², REN Jian¹, ZHANG Ran¹, TIAN Jianfan¹, XU Wenhua¹, MA Xiangli¹

(1. College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China;

2. Hongyun Honghe Group of Kunming Cigarette Factory, Kunming 650202, Yunnan, China)

Abstract: The effects of different disturbances (enclosure + fire, enclosure + fertilization, enclosure, and grazing) on soil nutrients and on the stoichiometric characteristics of soil C, N, P, and K in alpine meadows in Diqing Prefecture, Yunnan Province, were analyzed. The results were as follows: 1) Under the same type of disturbance, the concentrations of soil C, N, P, and K decreased with increasing soil depth. There was a negative correlation between soil C, N, P, and K concentrations and soil depth, which could be well fitted by a linear function. 2) The concentrations of C, N, P, and K were higher in the enclosure + fertilization, and grassland enclosure soil, at a depth of between 0 cm and 30 cm. The concentrations of C and N in the enclosure + fertilization soil were significantly higher than those in the other three types ($P < 0.05$). The P concentration in the enclosure + fertilization soil was significantly higher than that in the other soils at a depth of between 0 cm and 10 cm. 3) In the 0–40 cm soil layer, the concentrations of C, N, P, and K in grazing and enclosure + fire soil were

收稿日期: 2021-09-15 接受日期: 2021-12-02

基金项目: 云南省重点研发项目 (2018BB001); 云南省重大科技专项“绿色食品国际合作研究中心项目”(2019ZG009)

第一作者: 刘莉 (1998-), 女, 云南宣威人, 在读硕士生, 主要从事牧草种质资源与草地利用研究。E-mail: vorange2@126.com

通信作者: 马向丽 (1980-), 女, 湖北襄阳人, 副教授, 博士, 主要从事牧草种质资源与利用研究。E-mail: xfmxiangli@126.com

lower than that in the other two disturbances. This result indicated that there was a severe loss of soil nutrients after grazing and fire. 4) The N in the soil of the study area determined the change in chemometrics in the grassland ecosystem. The average value of soil N in our study was 29.34, which was higher than the national average level of N found in alpine plateaus (13.6). The results indicated that the decomposition rate of soil organic matter was high, and soil organic matter was scarce in the study area. Therefore, enclosure + fertilization is an ideal choice for alpine meadow grassland restoration and grazing management.

Keywords: enclosure; fire; fertilization; grazing; soil nutrient; grassland restoration; grazing management

Corresponding author: MA Xiangli E-mail: xmaxiangli@126.com

高寒草甸生态系统是在寒冷湿润的气候条件下,由耐寒的多年生中生草本植物为建群种而形成的一种生态系统类型,主要分布于青藏高原,是高原畜牧业生产的物质基础,也是我国内陆及周边地区巨大的生态屏障^[1]。滇西北的高山地区也有部分高寒草甸生态系统,约占 1 400 km²,主要集中在香格里拉市^[2-3]。由于生长周期较短,高寒草甸生态系统相比其他生态系统更加脆弱。近年来,由于全球气候变暖和人类长期不合理的活动破坏等,导致高寒草甸生态系统退化严重,人草畜矛盾日益突出。退化草地生态系统修复的措施有草地植被的修复和土壤的修复。土壤是植物赖以生存的基础,是陆地生态系统中物质和能量交换的场所^[4]。较高的土壤质量可以有效保障植物健康的生长环境^[5]。因此,对其在不同干扰类型下的土壤化学计量特征的研究分析将会对草地生态系统恢复工作具有重要的意义。

人类在对草地生态系统管理实践中施加于草地的主要干扰类型有放牧、封育、施肥和火烧^[6]。不同干扰方式会不断影响土壤中营养元素组成,改变植物生长环境中的养分供应^[7]。要想使草地资源达到最大利用率就需要实施科学的放牧、管理系统^[8]。如适当的放牧利用可以增强土壤对环境变化的适应性,优化土壤结构,而不恰当的利用则会导致土壤质量下降、土地生产力等降低^[9]。封育不仅能改善土壤养分状况,减少土壤侵蚀,同时更多的凋落物和根系运输可以增加土壤养分输入,有助于提高土壤养分的有效性^[10]。而我国对火烧草地的认识还存在着争议,多数研究表明火烧后草地土壤表层有机质含量会下降^[11-13]。

研究多种化学元素碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)的质量平衡和对生态系统的交互作用称为生态化

学计量学^[14]。作为近年来生态研究的热点之一,广泛用于生态系统养分平衡研究^[15]。土壤 C、N、P、K 等作为土壤养分平衡的主要指标,可直接影响土壤肥力、透水性等^[16],在生态系统的 C、N、P、K 循环中也起到一定的指向作用^[17],且其比值可作为土壤内部养分转化和循环的主要指标。方昕等^[18]通过对滇西北高原泥炭沼泽土壤生态化学计量特征研究表明,放牧会降低 C、N 含量,增加 P 含量。陈芙蓉等^[6]以黄土区云雾山典型草原为研究对象,分析不同干扰方式对土壤理化性质的影响,发现放牧会导致 0–10 cm 所有养分含量显著降低。且在 0–50 cm 土层,土壤 N 和 K 含量随土层深度的增加而减少;除火烧地外, P 含量呈现先增加后减少的趋势。近年来围绕干扰管理对草地土壤的影响已有大量研究,但通常集中于单一的干扰对草地的影响,且不同干扰对滇西北高寒草甸土壤 C、N、P、K 生态化学计量特征研究匮乏。据此,本研究以小中甸镇高寒草甸为研究对象,研究在不同干扰类型下土壤的化学计量特征,了解不同干扰下土壤化学计量的变化,探究滇西北高寒草甸合理利用的问题,从而有针对性地对草地加以改善和改良,为高寒山区脆弱的草甸生态系统管理与可持续利用提供理论支持和技术参考。

1 材料与方法

1.1 采样区概述

研究区域位于云南省迪庆州香格里拉市小中甸镇国家级草原固定监测点(27°28'57"~27°29'00" N, 90°52'01"~90°52'16" E),海拔 3 200~3 400 m。年平均气温 5.8 °C,最低温度-19.4 °C,最高温度 25.6 °C。年平均降水量 849.8 mm,年蒸发量 1 162.1 mm,

年日照时数 2 167.9 h, 无霜期 131~146 d。该区域分为干湿两季, 降水集中在 7 月-8 月, 雨热同期。地势开阔平坦, 土壤为高山草甸土。草地全年放牧牦牛、犏牛和藏猪。草地主要植物有草地早熟禾 (*Poa pratensis*)、尼泊尔蓼 (*Polygonum nepalense*)、云雾苔草 (*Carex nubigena*)、车前 (*Plantago asiatica*)、发草 (*Deschampsia caespitosa*)、西南委陵菜 (*Potentilla lineata*) 和大狼毒 (*Euphorbia jolkinii*) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

在试验区内, 选取群落特征相似、植被分布均

匀、具有代表性的样地, 按不同干扰类型设置 4 个处理 (表 1)。采用裂区设计, 小区面积为 2 m × 2 m, 火烧区和未火烧区之间间隔 10 m 以上, 其他小区间距 3 m, 每种干扰类型设 3 个重复, 共有 15 个小区。试验期间, 放牧区除放牧活动外不施用农药、不人为灌溉, 各个处理之间的田间管理保持一致。在每个小区分别选取 3 个采样点进行土壤样本的采集, 用直径 5 cm 土钻采集 0-10、10-20、20-30、30-40 cm 土层的土壤, 把土样装入带标签的自封袋中并写明编号、采样地点、土壤类型等。土样拿回实验室剔除杂草和石块后, 置于阴凉处自然风干。土样风干后过 1 mm 筛, 用于土壤养分浓度的测定。

表 1 样地设置
Table 1 Plot settings

干扰类型 Disturbance type	利用与管理方式 Utilization and management mode
放牧 Grazing (M)	连续多年放牧利用, 载畜量为 4.0~4.5 只羊·hm ⁻² It has been used for grazing for many years, and the carrying capacity is 4.0~4.5 sheep·hm ⁻²
封育 Enclosure (F)	2012 年开始实施封育, 采取全年封育方式, 封育时间为 6 年 Enclosure was implemented in 2012. A year-round enclosure method was adopted and the enclosure was maintained for 6 years
封育 + 火烧 Enclosure + fire (YS)	在已封育 6 年的样地进行控制性火烧处理, 火烧比例 < 30% Controlled fire treatment was carried out on the plots that have been sealed for 6 years. The proportion of fire was less than 30%
封育 + 施肥 Enclosure + fertilization (YF)	在已封育 6 年的样地进行施肥处理, 2018 年 3 月于草地返青前一次性撒施氮、磷、钾复合肥 (N : P : K = 17 : 17 : 17), 施肥量 30 g·m ⁻² Fertilization treatment was carried out on the enclosed plot maintained 6 years. A compound fertilizer consisting of nitrogen, phosphorus, and potassium (N : P : K = 17 : 17 : 17) was sprayed at a time before the grassland turned green in March 2018. 30 g·m ⁻² of fertilizer was sprayed

1.2.2 测定项目和方法

土壤有机 C 浓度的测定采用重铬酸钾外加热氧化法^[19], 全 N 浓度的测定采用浓硫酸-催化剂消煮凯氏定氮法^[20], 全 P 采用 HClO₄-H₂SO₄ 硫酸银梯抗比色法^[21], 全 K 采用 NaOH 熔融-火焰光度法^[22]。其中 C、N、P、K 浓度采用 g·kg⁻¹ 表示, C : N、C : P、C : K、N : P、N : K、P : K 化学计量比值采用的是 4 个土层的平均值。

1.2.3 数据分析

使用 SPSS 19.0 进行数据统计分析。所有数据第一步进行单因素方差分析, LSD 多重比较, 用单因素独立样本 *t* 检验法分析数据差异显著性; 采用 Pearson 法进行植物-土壤化学计量特征间关联度分析。使用 Excel 2007 制作图表。

2 结果与分析

2.1 不同干扰类型对土壤化学计量特征的影响

2.1.1 不同干扰类型下土壤 C 浓度的变化

如图 1 所示, 在同一干扰类型下, 封育 + 火烧 10-20 和 20-30 cm 土层、放牧 0-10 和 10-20 cm 土层土壤 C 浓度差异不显著, 可见封育 + 火烧与放牧干扰对土壤 C 浓度的抑制作用主要表现在深层土壤中。其他 2 种干扰类型下土壤 C 浓度呈自上而下逐渐降低的趋势, 各土层间差异显著 (*P* < 0.05)。在不同干扰类型下, 0-30 cm 土层, 封育 + 施肥地土壤 C 浓度最高, 封育 + 火烧地土壤 C 浓度最低。在 30-40 cm 土层, 封育地土壤 C 浓度最高, 封育 + 火烧地土壤 C 浓度最低。说明封育 + 施肥有

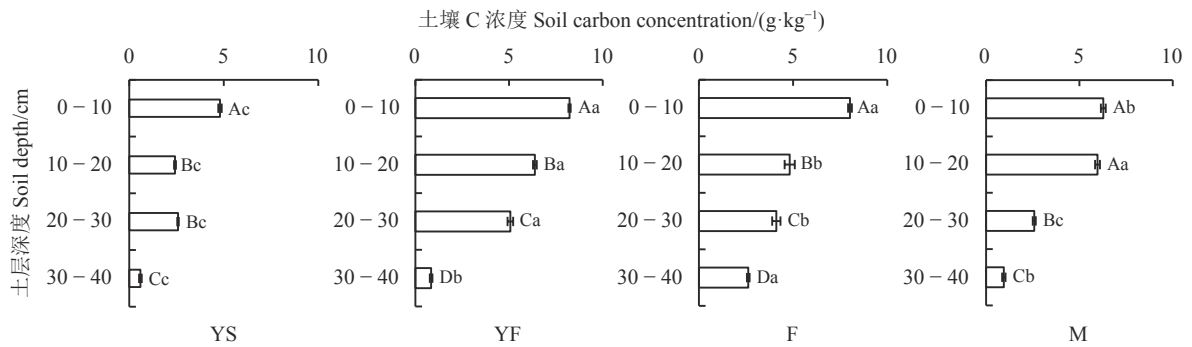


图 1 不同干扰类型各土层土壤 C 浓度变化

Figure 1 Changes in soil carbon content at different soil depths after disturbance

不同大小写字母分别表示同一干扰类型不同土层和不同干扰类型同一土层间在 0.05 水平下差异显著 ($P < 0.05$)。YS 为封育 + 火烧; YF 为封育 + 施肥; F 为封育; M 为放牧。下图同。

Different capital and lowercase letters indicate that the same disturbance type at different soil depths and different disturbance types at the same soil depth have significant differences at the 0.05 level. YS: enclosure + fire; YF: enclosure + fertilization; F: enclosure; M: grazing. This is applicable for the following figures as well.

利于表层土壤 C 的积累, 封育则更有利于深层土壤 C 的积累。反之, 与封育相比, 封育 + 火烧与放牧则分别会抑制土壤 C 的积累。

2.1.2 不同干扰类型下土壤 N 浓度的变化

如图 2 所示, 在同一干扰类型下随着土层的加深, 土壤 N 浓度呈显著下降的趋势 ($P < 0.05$)。在

0-30 cm 土层中, 以封育 + 施肥干扰下的 N 浓度最高, 其次为封育; 在 30-40 cm 土层中, 以封育地的 N 浓度最高, 封育 + 火烧次之。在所有土层, 均以放牧干扰下的 N 浓度较低, 除在 10-20 和 20-30 cm 土层, 封育 + 火烧地土壤 N 浓度与放牧地差异不显著外, 其余均差异显著 ($P < 0.05$)。

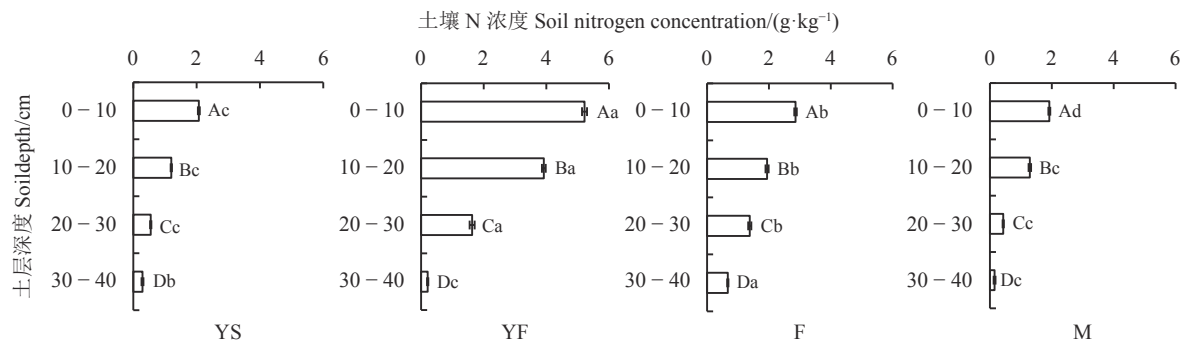


图 2 不同干扰类型各土层土壤 N 浓度变化

Figure 2 Changes in soil nitrogen content at different soil depths after disturbances

2.1.3 不同干扰类型下土壤 P 浓度的变化

如图 3 所示, 在同一干扰类型下, 土壤 P 浓度除封育 + 火烧与封育 + 施肥地的 20-30 和 30-40 cm 土层、放牧地的 10-20 和 20-30 cm 土层差异不显著外, 其余干扰类型下都呈现出随着土层加深土壤 P 浓度显著下降的趋势 ($P < 0.05$)。在 0-10 cm 土层, 封育 + 施肥地的 P 浓度显著高于其余干扰, 10-40 cm 土层则是封育地 P 浓度最高 ($P < 0.05$)。在 0-10 和 30-40 cm 土层下, 放牧地的 P 浓度显

著最低 ($P < 0.05$), 10-20 cm 土层封育 + 火烧地显著最低 ($P < 0.05$)。表明放牧、火烧等措施降低了土壤 P 含量。

2.1.4 不同干扰类型下土壤 K 浓度的变化

如图 4 所示, 在同一干扰类型下, 土壤 K 浓度除封育 + 火烧地的 0-10 和 10-20 cm 土层、封育地的 20-30 和 30-40 cm 土层、放牧地的 10-20 和 20-30 cm 土层差异不显著外 ($P > 0.05$), 其余干扰类型下基本呈现出随着土层加深显著下降的趋势 ($P <$

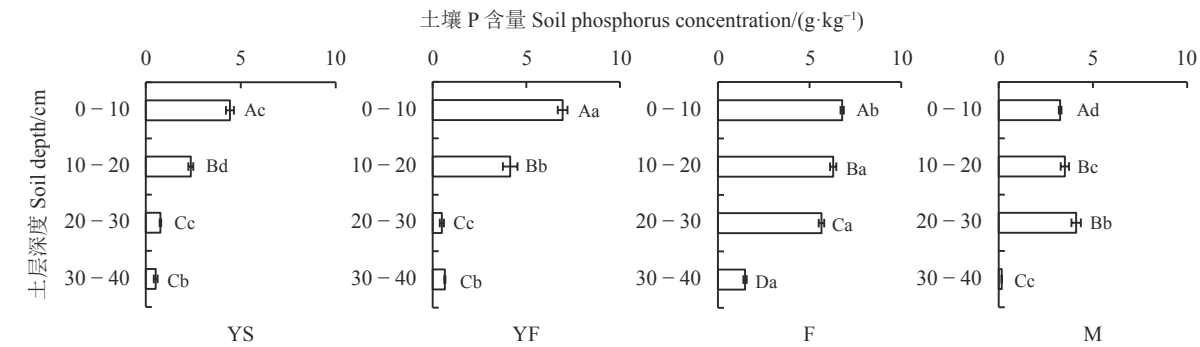


图 3 不同干扰类型各土层土壤 P 浓度变化
Figure 3 Changes in soil phosphorus content at different soil depths after disturbances

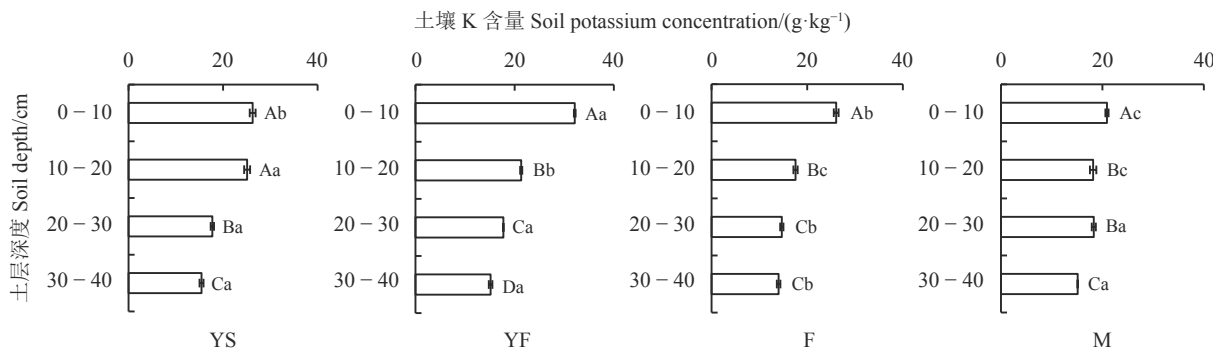


图 4 不同干扰类型各土层土壤 K 浓度变化
Figure 4 Changes in soil potassium content at different soil depths after disturbances

0.05)。在 0－10 cm 土层，封育＋施肥地的土壤 K 浓度显著高于同土层的其余干扰 ($P<0.05$)，在 10－20 cm 土层则是封育＋火烧显著高于同土层的其余干扰，在 30－40 cm 土层封育＋施肥、封育＋火烧与放牧 3 个干扰下的土壤 K 浓度差异不显著。在 0－10 cm 土层放牧地 K 浓度最低 ($P<0.05$)，10－20 cm 土层封育地与放牧地较低 ($P<0.05$)，30－40 cm 土层则封育地最低 ($P<0.05$)。表明封育＋施肥干扰有利于土

壤 K 的增加，封育＋火烧和放牧对深层土壤 (30－40 cm) 的 K 浓度也有一定的增加效果，而放牧干扰会降低土壤表层 (0－10 cm) 的 K 浓度，封育会降低深层土壤 (30－40 cm) K 的浓度。

2.1.5 不同干扰类型下土壤养分与土层深度的变化速率

不同干扰类型下土壤 C、N、P、K 的浓度随土壤深度的增加而减少的程度不同 (表 2)。土壤 C、N、

表 2 土壤养分与土层深度的关系
Table 2 The relationship between soil nutrients and soil depth

土壤养分 Soil nutrients	封育＋火烧 Enclosure＋fire	封育＋施肥 Enclosure＋fertilization	封育 Enclosure	放牧 Grazing
C	$y = -0.125x + 5.715$ $R^2 = 0.872$	$y = -0.235x + 11$ $R^2 = 0.932$	$y = -0.169x + 9.12$ $R^2 = 0.919$	$y = -0.194x + 8.79$ $R^2 = 0.921$
N	$y = -0.060x + 2.525$ $R^2 = 0.950$	$y = -0.173x + 7.075$ $R^2 = 0.988$	$y = -0.071x + 3.495$ $R^2 = 0.991$	$y = -0.062x + 2.49$ $R^2 = 0.968$
P	$y = -0.133x + 5.355$ $R^2 = 0.912$	$y = -0.225x + 8.685$ $R^2 = 0.886$	$y = -0.165x + 9.185$ $R^2 = 0.776$	$y = -0.087x + 4.935$ $R^2 = 0.403$
K	$y = -0.398x + 31.085$ $R^2 = 0.923$	$y = -0.545x + 35.205$ $R^2 = 0.888$	$y = -0.390x + 27.83$ $R^2 = 0.827$	$y = -0.172x + 22.425$ $R^2 = 0.883$

P、K 的浓度均与土层深度呈负相关关系,可以用直线函数较好拟合。根据斜率大小可知,土壤 C 浓度在 0–40 cm 土层中递减速率依次为:封育+施肥>放牧>封育>封育+火烧。土壤 N 浓度在 0–40 cm 土层中递减速率依次为:封育+施肥>封育>放牧>封育+火烧。土壤 P 浓度在 0–40 cm 土层中递减速率依次为:封育+施肥>封育>封育+火烧>放牧。土壤 K 浓度在 0–40 cm 土层中递减速率依次为:封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧。表明在 0–40 cm 土层中,土壤 C、N、P、K 在封育+施肥干扰时的下降速率最大,土壤 C、N 在封育+火烧干扰时下降速率最小,土壤 P 和 K 则是在放牧干扰时下降速率达最小。

2.2 不同干扰类型下土壤 C、N、P 化学计量比的变化

2.2.1 不同干扰类型下土壤 C:N 的变化

如图 5 所示,不同干扰类型下土壤 C:N 的平均值为 29.34。除封育+火烧干扰下 C:N 在 20–30 cm 土层达到最大外,其余 3 种干扰下 C:N 均具有随土层深度增加而呈上升的趋势。在 0–40 cm 土层,放牧地的土壤 C:N 均显著高于其余 3 种干扰 ($P < 0.05$)。在 0–20 cm 土层中,封育+施肥干扰下的土壤 C:N 显著低于其余 3 种干扰 ($P < 0.05$),但是在 30–40 cm 土层中封育+施肥与封育差异不显著 ($P > 0.05$),表明封育+施肥与封育干扰对土壤 C:N 的影响主要集中在表层土壤中。

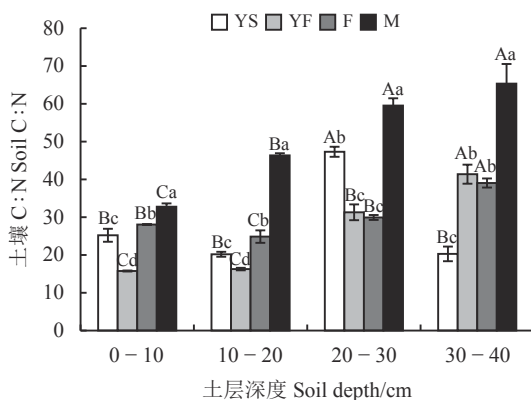


图 5 不同干扰类型对土壤 C:N 的影响
Figure 5 Effects of different interference types on the soil C:N

2.2.2 不同干扰类型下土壤 C:P 的变化

如图 6 所示,不同干扰类型下土壤 C:P 的平均

值为 16.93。封育+火烧、封育+施肥干扰下的 C:P 在 0–40 cm 土层呈现出先上升后下降的趋势,均在 20–30 cm 土层达到最大。封育与放牧干扰下的 C:P 在 0–40 cm 土层中存在先下降后上升的趋势,且均在 20–30 cm 土层达到最小。在 0–10 cm 与 30–40 cm 土层中,放牧地的 C:P 显著高于其余干扰 ($P < 0.05$)。

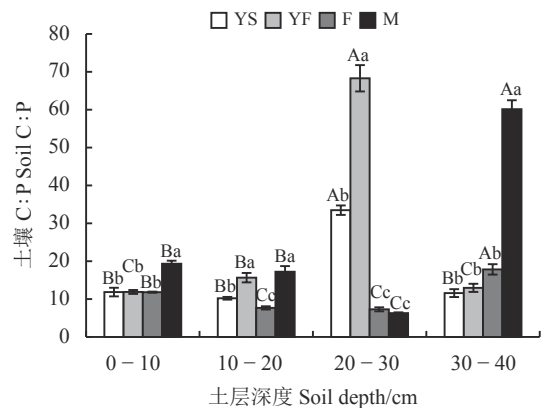


图 6 不同干扰类型对土壤 C:P 的影响
Figure 6 Effects of different interference types on the soil C:P

2.2.3 不同干扰类型下土壤 N:P 的变化

如图 7 所示,不同干扰类型下土壤 N:P 的平均值为 0.65。与 C:P 一样,随着土层的加深,封育+火烧与封育+施肥干扰下的土壤 N:P 随着土层的加深呈先上升后下降的趋势,均在 20–30 cm 处达到最大。而封育与放牧干扰下的土壤 N:P 呈先下降后上升的趋势,在 20–30 cm 处达到最小。对于 0–30 cm 土层而言,封育+施肥干扰下的土壤 N:P 显著高于其余 3 种干扰类型 ($P < 0.05$),其中在

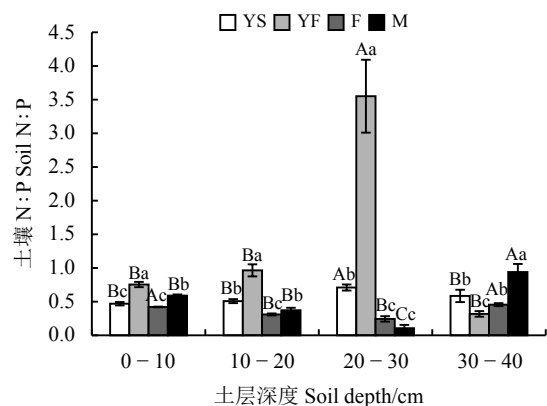


图 7 不同干扰类型对土壤 N:P 的影响
Figure 7 Effects of different interference types on the soil N:P

20–30 cm 土层, 封育 + 施肥干扰下的 N:P 显著最高。且封育与放牧干扰下的土壤 N:P 显著低于其余 2 种干扰类型 ($P < 0.05$), 其中以放牧干扰最低。在 30–40 cm 土层, 放牧地的土壤 N:P 显著高于其余 3 种干扰类型下的值, 封育 + 施肥干扰下的土壤 N:P 显著低于其余 3 种干扰类型。

2.3 土壤 C、N、P、K 及其化学计量比之间的相关性

由表 3 可知土壤 C 与 K 呈显著负相关关系, 与 C:P、C:K、N:K 呈显著正相关关系。N 与 K、N:P、

N:K 呈显著正相关关系, 与 C:N 呈显著负相关关系。P 与 C:P 呈显著负相关关系, 与 P:K 呈显著正相关关系。K 与 C:N、C:K、C:P 间均呈显著负相关关系, 因 K 与 P 之间不存在显著关联, 故 C 与 K 之间的负相关关系是影响 C:P 的主要因素。C:N 与 C:P、C:K 之间呈显著正相关关系, 且 C:N 和 C:P 的相关系数大于 C:N 和 C:K 的相关系数。C:P 与 C:K、N:P 之间存在显著正相关关系, N:P 与 N:K 也呈显著正相关关系。其中, 土壤 C 和 C:K、N 和 N:K、P 和 P:K 的相关性较高, 相关系数分别为 0.960、0.897 和 0.888。

表 3 土壤 C、N、P、K 及其化学计量比之间的相关性
Table 3 Correlation between soil C, N, P, K and their stoichiometric ratio

指标 Index	C	N	P	K	C:N	C:P	C:K	N:P	N:K	P:K
C	1.000	0.224	0.122	-0.659**	0.434	0.595*	0.960**	0.463	0.602*	0.371
N		1.000	0.445	0.571*	-0.673**	-0.139	-0.018	0.572*	0.897**	0.115
P			1.000	0.139	-0.425	-0.671**	0.134	-0.363	0.511	0.888**
K				1.000	-0.849**	-0.523*	-0.825**	0.121	0.162	-0.322
C:N					1.000	0.691**	0.585*	-0.082	-0.412	-0.029
C:P						1.000	0.543*	0.628*	0.035	-0.450
C:K							1.000	0.237	0.408	0.473
N:P								1.000	0.577*	-0.461
N:K									1.000	0.361
P:K										1.000

**表示在0.01水平(双侧)上显著相关; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。
** indicate significantly correlated at the 0.01 level (two-sided); * indicate significantly correlated at the 0.05 level (two-sided).

3 讨论

3.1 不同干扰类型对土壤养分的影响

组成土壤肥力的重要部分之一便是土壤养分, 其中 C、N、P、K 是在生态系统中发挥着重要作用的元素^[23]。本研究中, 不同干扰类型下表层土壤各养分浓度均显著高于深层土壤, 这与赵云飞等^[24]的研究结果一致。这种现象是由于土壤养分的来源都会先集中于土壤表层, 被分解之后才会随水分或其他介质向土壤下层迁移扩散^[25-27], 从而造成表层土壤养分浓度显著高于深层土壤的现象。

本研究结果显示在放牧干扰下土壤 C、N、P、K 的浓度明显降低了。这与李金芬等^[28]的研究结果

一致。造成这一现象的原因主要是放牧导致家畜对草地的采食量增加, 使植被盖度和地上生物量下降, 枯落物减少。但在放牧干扰下土壤 C、N、P、K 的浓度也并未表现出急剧下降, 主要是因为家畜对草地进行采食的同时排泄的粪便返回到草地中, 一定程度上为草地施加了有机肥。

封育 + 火烧干扰方式对 C、N、P 浓度在各土层中均表现出下降影响, 主要是由于火烧除去了枯落物, 使得地上生物量快速氧化分解, 导致土壤养分大幅减少。这与井光花^[29]在不同管理措施下对黄土高原半干旱地区草地群落结构和功能变化的研究结果相符合, 与陈芙蓉等^[30]在不同干扰下对黄土高原典型草原土壤有机 C 影响的研究相反。分析认

为火烧干扰后土壤养分是否损失与火烧强度及持续时间有关^[10]。有研究指出,2年一次火烧显著降低了土壤有机C浓度,4年一次火烧对土壤有机C含量增加影响不显著,而火烧10年后土壤有机C会恢复到较高水平^[31-32]。本研究样地于2018年进行火烧,2019年取样。火烧后恢复年限较短,且试验区域常年低温导致火烧后土壤恢复较慢是与其他学者研究结果不一致的重要原因。封育是一种公认的改善草原退化有效且简便易行的措施,可有效降低人为和牲畜对草地的影响,提高草地地上生物量,强有力地抵抗病虫害和风蚀,从而完成自我修复和重建^[33]。本研究结果表明,与其他干扰类型相比,封育显著增加了30–40 cm土层的C、N浓度和10–40 cm土层的P浓度。

施肥是人类在草地管理实践活动中施加于草地植被的主要干扰类型之一^[34]。本研究中,封育+施肥显著提高了C、N、P、K的浓度,这是因为封育措施阻止了家畜采食和践踏等干扰,使得植物生长加快,在改善了地上生物量的基础上再施肥就能更直接快速地给草地补充土壤养分。

3.2 不同干扰类型对土壤化学计量比的影响

与全国高寒草原C:N平均水平(13.6)相比^[35],研究区域表层土壤中C:N平均值(29.34)高于全国高寒草原平均水平,说明研究区域内土壤有机质的矿质化和腐殖质化速度较快,进而使得有机质处于匮乏状态。C:P是土壤磷素矿化能力的重要标志。土壤的物理结构、化学性质和土层厚度可对C:P产生一定影响^[36]。Bui和Henderson^[37]研究表明,一般当C:P小于200时土壤磷净矿化,C:P大于300时土壤磷净固持。土壤有机质的分解速率决定了磷的有效性高低,较高的C:P说明磷的有效性高,越有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放。研究区的C:P为16.93,低于我国高寒草原平均水平(62)^[35],说明研究区草地磷有效性低,处于累积状态。造成该现象的原因可能是由于研究区气温较低导致P的淋溶和风化作用较弱,从而造成P的积累。另外研究区的低气温会使土壤微生物的繁殖受限,但是却有利于矿化土壤有机质,具体原因有待进一步研究。N:P也是衡量土壤有效养分的重要指标之一,可以预测氮的饱和度^[38]。研究区的N:P为0.65,相比我国高寒草原平均水平(5.9)^[35]偏低,说明

该地区土壤中P浓度较高^[39],且影响土壤肥力的主要因素是N素^[40]。

3.3 土壤养分及其化学计量比之间的关系

土壤养分元素之间是相互耦合、密切相关的^[41],若只关注土壤的质量变化及各元素浓度之间的关系是不全面的,也应考虑土壤养分元素与其化学计量之间的相互关系。相关性大的变量对生态化学计量比的影响大于相关性较小的变量^[42]。

理论上,土壤N:P应该受到N和P的共同限制,本研究中,P和N:P相关系数的绝对值小于N和N:P的相关系数,说明N:P主要由N浓度决定。这与Tian等^[35]对中国土壤C:N:P变化的综合数据观测所得出土壤中N:P的比例主要由土壤N含量决定的结论相同。C:N和N相关系数的绝对值大于C:N和C的相关系数,说明C:N主要由N浓度决定而土壤有机碳对其影响较小。土壤养分大部分来源于土壤有机质的分解,这一情况说明土壤N浓度的相对缺乏主要指微生物对有机质分解能力较弱而并非土壤有机质不能提供足够的N^[43]。研究区P和C:P相关系数的绝对值大于C和C:P的相关系数,说明C:P主要是由P浓度决定,其比值在不同程度上调节着土壤的厌氧碳分解过程^[44]。

4 结论

在同一类型干扰下,随着土层的加深,土壤C、N、P、K呈现出随土层加深而显著降低的趋势,且封育与封育+施肥两种干扰方式下的各土层土壤C、N、P、K浓度均得到提高,其中以封育+施肥的促进效果更明显。与此相反,放牧与封育+火烧干扰方式打破了研究区土壤化学计量的收支平衡,造成土壤C、N、P流失,这两种干扰可能会加剧高寒草甸生态系统收支逆差,造成草甸退化等问题,且封育+火烧干扰下的流失情况更严重。

研究区影响土壤肥力的主要因素是N素。由于不同干扰方式下的土壤C:N存在明显差异,所以C:N可以作为评估该区的土壤质量的有效衡量指标。同时,研究区域表层土壤中C:N高于全国高寒草原平均水平(13.6),说明研究区域内土壤有机质分解速度较快,有机质处于匮乏状态。故封育+施肥是该地区高寒草甸恢复以及放牧管理最理想的措施。

参考文献 References:

- [1] 罗久富, 周金星, 赵文霞, 董林水, 郑景明. 围栏措施对青藏高原高寒草甸群落结构和稳定性的影响. *草业科学*, 2017, 34(3): 565-574.
LUO J F, ZHOU J X, ZHAO W X, DONG L S, ZHENG J M. Effect of fences on functional groups and stability of the alpine meadow plant community in the Qinghai-Tibet Plateau. *Pratacultural Science*, 2017, 34(3): 565-574.
- [2] 刘玲玲. 滇西北藏区不同管理利用草地植物多样性和生物量研究. 西双版纳: 中国科学院西双版纳热带植物园硕士学位论文, 2006.
LIU L L. A study on plant diversity and biomass of managed meadows in the Tibetan region, NW Yunnan, China. Master Thesis. Xishuangbanna: Xishuangbanna Tropical Botanico Garden, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [3] 刘钟龄. 中国草地资源现状与区域分析. 北京: 科学出版社, 2017.
LIU Z L. Current Status and Regional Analysis of Grassland Resources in China. Beijing: Science Press, 2017.
- [4] 汪攀, 王霖娇, 盛茂银. 西南喀斯特石漠化生态系统植物多样性、土壤生态化学计量特征及其相关性分析. *南方农业学报*, 2018, 49(10): 1959-1969.
WANG P, WANG L J, SHENG M Y. Plant diversity, ecological stoichiometry characteristics of soils and their correlation of the karst rocky desertification ecosystem in southwestern China. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(10): 1959-1969.
- [5] 孔祥斌, 张凤荣, 齐伟, 徐艳. 集约化农区土地利用变化对土壤养分的影响: 以河北省曲周县为例. *地理学报*, 2003, 58(3): 333-342.
KONG X B, ZHANG F R, QI W, XU Y. The influence of land use change on soil fertility in intensive agricultural region: A case study of Quzhou County, Hebei. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 333-342.
- [6] 陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 李媛, 马正锐, 魏琳. 不同干扰对黄土区典型草原土壤理化性质的影响. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 105-110.
CHEN F R, CHENG J M, LIU W, LI Y, MA Z R, WEI L. Effects of different disturbances on soil physical and chemical properties in the typical grassland of loess region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 105-110.
- [7] PERCIVAL H J, PARFITT R L, SCOTT N A. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: is clay content important. *Soli Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1623-1630.
- [8] 俞鸿千. 不同轮牧方式对荒漠草原土壤理化性状和碳平衡的影响. 银川: 宁夏大学硕士学位论文, 2014.
YU H Q. Effect of different grazing ways on soil physical and chemical propertices and carbon balance in steppe desert. Master Thesis. Yinchuan: Ningxia University, 2014.
- [9] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 李延梅, 黄志霖, 黄奕龙, 彭鸿嘉. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2292-2296.
GONG J, CHEN L D, FU B J, LI Y M, HUANG Z L, HUANG Y L, PENG H J. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2292-2296.
- [10] 李政海, 绛秋. 火烧对草原土壤养分状况的影响. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 1994, 25(4): 444-449.
LI Z H, JIANG Q. The effects of fire on the nutrient states of steppe soil. *Journal of Inner-Mongolia University (Natural Science Edition)*, 1994, 25(4): 444-449.
- [11] 闫东锋, 吴桂藏, 郭丹丹, 张振, 杨喜田. 中度火干扰对林草地土壤理化特性的短期影响. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4): 96-103.
YAN D F, WU G Z, GUO D D, ZHANG Z, YANG X T. Short-term effects of moderate fire disturbance on soil physical and chemical characteristics of woodlands and grasslands. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(4): 96-103.
- [12] 孟勖. 大兴安岭火烧迹地植被-土壤协同恢复机制. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文, 2020.
MENG M. The collaborative mechanism of vegetation-soil restoration in burned area of Daxing'anling. PhD Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [13] 罗朝逸. 火烧对北方封育草地植物-土壤生态系统化学计量及内稳性特征的影. 咸阳: 中国科学院大学硕士学位论文, 2021.
LUO Z Y. Effects of firing on stoichiometric characteristics and homeostasis of plant-soil system in fenced grassland of northern China. Master Thesis. Xianyang: The University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [14] 任璐璐, 张炳学, 韩凤鹏, 张兴昌. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 339-344.
REN L L, ZHANG B X, HAN F P, ZHANG X C. Ecological stoichiometric characteristics of soils in *Robinia pseudoacacia* forests

- of differentages on the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 339-344.
- [15] 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.
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.
- [16] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998.
LU R K. Principles of Soil-Plant Nutrition and Fertilization. Beijing: Chemical Industry Press, 1998.
- [17] 陶冶, 刘耀斌, 吴甘霖, 张元明. 准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局. *草业学报*, 2016, 25(7): 13-23.
TAO Y, LIU Y B, WU G L, ZHANG Y M. Regional-scale ecological stoichiometric characteristics and spatial distribution patterns of key elements in surface soils in the Junggar Desert, China. *Acta Prataculurae Sinica*, 2016, 25(7): 13-23.
- [18] 方昕, 郭雪莲, 郑荣波, 付倩. 不同放牧干扰对滇西北高原泥炭沼泽土壤生态化学计量特征的影响. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 9-14.
FANG X, GUO X L, ZHENG R B, FU Q. Effect of difference grazing distributions on soil ecological stoichiometric characteristics in peatland of northwest Yunnan plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(2): 9-14.
- [19] 罗富成, 毕玉芬, 黄必志. 草业科学实践教学指导书. 昆明: 云南科技出版社, 2008.
LUO F C, BI Y F, HUANG B Z. Pratacultural Science Practice Teaching Guide. Kunming: Yunnan Science Press, 2008.
- [20] 李辉, 高强, 张晋京. 土壤中有机氮形态及测定方法的研究进展. *中国农学通报*, 2014, 30(21): 24-28.
LI H, GAO Q, ZHANG J J. Advances of soil organic nitrogen forms and testing methods. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(21): 24-28.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil Agrochemical Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [22] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范第2版. 北京: 中国农业出版社, 2006.
DU S, GAO X Z. Technical Specifications for Soil Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [23] 何贵永, 孙浩智, 史小明, 齐威, 杜国祯. 青藏高原高寒湿地不同季节土壤理化性质对放牧模式的响应. *草业学报*, 2015, 24(4): 12-20.
HE G Y, SUN H Z, SHI X M, QI W, DU G Z. Soil properties of Tibetan Plateau alpine wetland affected by grazing and season. *Acta Prataculurae Sinica*, 2015, 24(4): 12-20.
- [24] 赵云飞, 洪苗苗, 欧延升, 黄政, 张洋洋, 汪霞. 青藏高原东部山地草地土壤碳、氮、磷元素计量特征. *生态科学*, 2018, 37(5): 25-32.
ZHAO Y F, HONG M M, OU Y S, HUANG Z, ZHANG Y Y, WANG X. The stoichiometric characteristics of soil C, N, P in mountain steppe of eastern Tibetan Plateau. *Ecological Science*, 2018, 37(5): 25-32.
- [25] XI N X, CARRÈRE P, BLOOR J M G. Plant community responses to precipitation and spatial pattern of nitrogen supply in an experimental grassland ecosystem. *Oecologia*, 2015, 178(2): 329-338.
- [26] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 孙彦敏, 易惟熙, 李英年. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征. *地理学报*, 2006, 61(7): 720-728.
TAO Z, SHEN C D, GAO Q Z, SUN Y M, YI W X, LI Y N. Soil organic carbon storage and vertical distribution of alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 720-728.
- [27] 李梦天, 秦燕燕, 曹建军, 许雪赞, 杨书荣, 张小芳, 龚毅帆. 青藏高原草地管理方式对土壤化学计量特征的影响. *生态学报*, 2018, 37(8): 2262-2268.
LI M T, QIN Y Y, CAO J J, XU X B, YANG S R, ZHANG X F, GONG Y F. Effects of grassland management patterns on soil stoichiometry on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Ecological*, 2018, 37(8): 2262-2268.
- [28] 李金芬, 程积民, 刘伟, 古晓林. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征. *草地学报*, 2010, 18(5): 661-668.
LI J F, CHENG J M, LIU W, GU X L. Distribution of soil organic carbon and total nitrogen of grassland in Yunwu mountain of Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(5): 661-668.
- [29] 井光花. 黄土高原半干旱区草地群落结构和功能对管理措施的响应特征. 咸阳: 中国科学院大学博士学位论文, 2017.
JING G H. Responses of grassland community structure and functions to management practices on the semi-arid area of Loess Plateau. PhD Thesis. Xianyang: The University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [30] 陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 李媛, 陈奥, 赵新宇. 不同干扰对黄土高原典型草原土壤有机碳的影响. *草地学报*, 2012, 20(2): 298-311.
CHEN F R, CHENG J M, LIU W, LI Y, CHEN A, ZHAO X Y. Effects of disturbances on organic soil carbon in the typical

- grassland of Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(2): 298-311.
- [31] 张宇婧. 火干扰下大兴安岭森林土壤有机碳含量估算: 以呼中区为例. 南昌: 江西师范大学硕士学位论文, 2019.
ZHANG Y J. Estimation of forest soil organic carbon content after fire disturbance in the Great Hinggan Mountains: A case study in Huzhong. Master Thesis. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2019.
- [32] 贺海升, 王琼, 王其兵, 王文杰. 火烧频率对草原土壤养分及球囊霉素相关土壤蛋白含量的影响. *安徽农业科学*, 2016, 44(31): 131-134.
HE H S, WANG Q, WANG Q B, WANG W J. Impact of burning frequency on soil nutrients and Glomalin related soil protein in grassland. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(31): 131-134.
- [33] 贺海生. 不同管理模式对内蒙古典型草原土壤质量影响综合评价研究. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文, 2019.
HE H S. Comprehensive soil quality evaluations of Inner-mongolia typical grassland under different management modes. PhD Thesis. Haerbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [34] 李佶恺, 孙涛, 旺扎, 李洪影, 崔国文. 西藏地区燕麦与箭筈豌豆不同混播比例对牧草产量和质量的影响. *草地学报*, 2011, 19(5): 830-833.
LI J K, SUN T, WANG Z, LI H Y, CUI G W. Effects on mixture sowing ratio on the yield and quality of both vetch and oat in Tibet. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(5): 830-833.
- [35] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, JERRY M M, CHARLES A S H. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1-3): 139-151.
- [36] 王建林, 钟志明, 王忠红, 陈宝雄, 余成群, 胡兴祥, 沈振西, 大次卓嘎, 张宪洲. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征. *生态学报*, 2014, 34(22): 6678-6691.
WANG J L, ZHONG Z M, WANG Z H, CHEN B X, YU C Q, HU X X, SHEN Z X, Dacizhuoga, ZHANG X Z. Soil C/N distribution characteristics of alpine steppe ecosystem in Qinhai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6678-6691.
- [37] 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.
- [38] 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.
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [39] 杜威, 王紫泉, 和文祥, 高亚军, 曹卫东. 豆科绿肥对渭北旱塬土壤养分及生态化学计量学特征影响. *土壤学报*, 2017, 54(4): 999-1008.
DU W, WANG Z Q, HE W X, GAO Y J, CAO W D. Effects of Leguminous green manure on soil nutrients and their ecological stoichiometry characteristics in Weibei rainfed highland, *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 999-1008.
- [40] 谭秋锦, 宋同清, 曾馥平, 彭晚霞, 杨钙仁, 杜虎. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤养分及其生态化学计量特征. *农业现代化研究*, 2014, 35(2): 225-228.
TAN Q J, SONG T Q, ZENG F P, PENG W X, YANG G R, DU H. Soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics under different ecosystems in Karst canyon region. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(2): 225-228.
- [41] PETER M V, STEPHAN H, LYDIA O, STEVEN A. Nitrogen and nature. *Ambio*, 2002, 31(2): 97-101.
- [42] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2239-2248.
TAO Y, ZHANG Y M, ZHOU X B. Ecological stoichiometry of surface soil nutrient and its influencing factors in the wild fruit forest in Yili region, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2239-2248.
- [43] 敖伊敏. 不同围封年限下典型草原土壤生态化学计量特征研究. 呼和浩特: 内蒙古师范大学硕士学位论文, 2012.
AO Y M. Study on soil ecological stoichiometry of enclosing life in typical steppe. Master Thesis. Huhehaote: Inner Mongolia Normal University, 2012.
- [44] 张全军, 于秀波, 钱建鑫, 熊挺. 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征. *生态学报*, 2012, 32(12): 3656-3669.
ZHANG Q J, YU X B, QIAN J X, XIONG T. Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12): 3656-3669.

(责任编辑 张瑾)