

DOI: 10.5846/stxb202004090851

王玉琴, 宋梅玲, 鲍根生, 尹亚丽, 王宏生. 防除狼毒对狼毒斑块植物-土壤 C、N、P 化学计量特征的影响. 生态学报, 2021, 41(15): 6280-6288.

Wang Y Q, Song M L, Bao G S, Ying Y L, Wang H S. Variation of C, N and P stoichiometry in plant and soil after removal *Stellera chamaejasme* in *Stellera chamaejasme* patches. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6280-6288.

防除狼毒对狼毒斑块植物-土壤 C、N、P 化学计量特征的影响

王玉琴^{1,2}, 宋梅玲^{1,2,*}, 鲍根生^{1,2}, 尹亚丽^{1,2}, 王宏生^{1,2}

1 青海大学畜牧兽医科学院(青海省畜牧兽医科学院), 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016

2 青海省畜牧兽医科学院, 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 西宁 810016

摘要: 使用化学除草剂防除狼毒能有效遏制狼毒种群的扩张, 对于防除狼毒后狼毒斑块的植被和土壤生态化学计量特征的研究鲜有报道。基于此, 本研究运用生态化学计量学的原理、方法, 以分枝数相同的单株狼毒(*Stellera chamaejasme*) 斑块为研究对象, 通过化学药剂防除狼毒后, 分析狼毒斑块内外植物-土壤 C、N、P 含量及其比值的变化, 探讨植物和土壤化学计量特征的内在联系以及狼毒斑块的养分循环规律, 为狼毒型退化草地的生态恢复及利用提供参考。结果表明: 防除狼毒后禾本科生物量有所增加, 豆科和杂类草地上生物量显著低于狼毒斑块内($P < 0.05$)。不同狼毒斑块的豆科植物 N 含量和杂类草 P 含量最高, 防除狼毒后植物 C、N 含量高于其他斑块; 禾本科 P 含量为狼毒斑块外显著高于狼毒斑块内($P < 0.05$); 狼毒斑块内外莎草科 C:N 显著高于防除狼毒($P < 0.05$); 莎草科和豆科 C:P 和 N:P 为防除狼毒显著高于狼毒斑块内和狼毒斑块外($P < 0.05$), 杂类草 C:P 和 N:P 为防除狼毒显著高于狼毒斑块外($P < 0.05$), 禾本科 C:P 为狼毒斑块内显著高于防除狼毒和狼毒斑块外($P < 0.05$)。不同狼毒斑块土壤 C、P 含量以及 C:P 表现为狼毒斑块内>狼毒斑块外>防除狼毒, N 含量和 N:P 为防除狼毒>狼毒斑块内>狼毒斑块外, C:N 表现为狼毒斑块内和狼毒斑块外显著高于防除狼毒($P < 0.05$)。冗余分析(RDA)结果显示植物与土壤的 C, C:N, C:P, N:P 两两显著正相关, N, P 两两显著负相关, 且防除狼毒后对植物和土壤的 N 含量, N:P 以及植物 P 含量影响较大。

关键词: 化学防除; 狼毒斑块; 土壤; 化学计量

Variation of C, N and P stoichiometry in plant and soil after removal *Stellera chamaejasme* in *Stellera chamaejasme* patches

WANG Yuqin^{1,2}, SONG Meiling^{1,2,*}, BAO Gensheng^{1,2}, YIN Yali^{1,2}, WANG Hongsheng^{1,2}

1 State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University of Animal Science and Veterinary Medicine (Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine), Xining 810016, China

2 Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Xining 810016, China

Abstract: The use of chemical herbicides is considered the effective methods to control the expansion of *Stellera chamaejasme*. Limited studies have been conducted on the vegetation and soil ecological stoichiometric characteristics of *S. chamaejasme* patches after removing *S. chamaejasme*. Therefore, the ecological stoichiometry of plant and soil C, N, P content and their ratios of different *S. chamaejasme* patches after removing *S. chamaejasme* by chemical herbicides were analyzed by selecting the same number of branches of *S. chamaejasme* using the principles and methods of ecological stoichiometry. In order to provide the reference for ecological restoration and utilization of degraded grassland of

基金项目: 青海省自然科学基金项目(2017-ZJ-918Q); 国家自然科学基金项目(31700098); 青海省科技成果转化专项(2019-SF-151)

收稿日期: 2020-04-09; **网络出版日期:** 2021-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: meilings@163.com

S. chamaejasme, we explored the interaction of plant and soil stoichiometric characteristics and nutrient circulation of *S. chamaejasme* patches. The results showed that the biomass of *Gramineae* increased after removing *S. chamaejasme* and the biomass of *Leguminosae* and Forbs were significantly lower than that within the *S. chamaejasme* patch ($P < 0.05$). N content of *Leguminosae* and P content of Forbs were the highest with different patches, and plant C, N content of removing *S. chamaejasme* were higher than that of other patches. P content of *Gramineae* was significantly higher outside the *S. chamaejasme* patch than within the *S. chamaejasme* patch ($P < 0.05$). The outside and within the *S. chamaejasme* patch C : N of *Cyperaceae* were significantly higher than that of removing *S. chamaejasme* ($P < 0.05$). The *Cyperaceae* and *Leguminosae* C : P and N : P of removing *S. chamaejasme* were significantly higher than that of outside and within the *S. chamaejasme* patch ($P < 0.05$), forbs of removing *S. chamaejasme* was significantly higher than that of outside the *S. chamaejasme* patch ($P < 0.05$), and C : P of *Gramineae* of within the *S. chamaejasme* patch was significantly higher than that of removing *S. chamaejasme* and outside the *S. chamaejasme* patch ($P < 0.05$). The C, P content and C : P of soil in different *S. chamaejasme* patches were within the *S. chamaejasme* patch > outside the *S. chamaejasme* patch > removing *S. chamaejasme*, and N content, N : P were removing *S. chamaejasme* > within the *S. chamaejasme* patch > outside the *S. chamaejasme* patch. The soil C : N of within and outside the *S. chamaejasme* patch were significantly higher than that of removing *S. chamaejasme* ($P < 0.05$). The redundancy analysis (RDA) showed that the plant and soil C, C : N, C : P, N : P were significantly positive correlation, while N, P were significantly negatively correlation. After removal *S. chamaejasme*, the N content, N : P and P content in plants and soil had a greater effect.

Key Words: chemical control; *Stellera chamaejasme* patches; soil; stoichiometry

碳(C)、氮(N)、磷(P)是植物的主要化学元素和物质基础,对植物的生长发育产生重要影响^[1]。C是植物体内各种生理生化过程的底物和能量来源,N、P是植物蛋白质和核酸的重要组成元素,三者与植物体内的代谢过程存在密切的联系^[2-5]。生态化学计量学是研究生态系统中能量平衡和多种关键化学元素平衡的科学^[6],为研究C、N、P等元素在生态系统过程中的耦合关系提供了一种综合方法^[7]。化学计量比特征是反映植物生长状态及相应代谢条件的重要指标,C : N和C : P比值表示植物生长速度与植物氮和磷的利用效率的关系以及植物吸收碳的能力^[2-3,8],是反映植物健康状况和生长状况的有效指标,N : P的临界值则是判断土壤对植物养分供应状况的指标^[8-10]。土壤是草地生态系统的重要组成部分,作为植物养分的主要来源,直接影响植物的生长发育^[11],且植物通过根系从土壤中吸收养分,叶片通过光合作用同化和积累养分后,又以凋落物形式将养分归还土壤^[12-13]。植物体的化学元素特征能够反映出土壤供给养分情况,因此,进行草地植物和土壤的C、N、P化学计量特征的研究,有助于了解植物的生长策略及其对环境变化和胁迫的适应能力,对于掌握草地生态系统植被生长、养分循环以及营养分配规律具有重要意义^[7]。

狼毒(*Stellera chamaejasme*)属瑞香科狼毒属的多年生草本有毒植物,由于其具有种子量多,根系发达,再生能力强以及异株克生现象^[14]等特点,与同生境中的其他植物争夺生长空间和营养空间,进而抑制了植被群落中优良牧草的正常生长发育,以及其具有很强的化感作用^[15],抑制优良牧草种子的萌发^[16],影响牧草的建植与分布,优良牧草产量及所占比例显著下降,形成了以狼毒为优势种的毒草型退化草地^[17]。另外,安冬云等^[18]研究表明瑞香狼毒能在一定程度上改善土壤理化性状,提高土壤生物学活性。鲍根生等^[19]的研究表明狼毒斑块内土壤养分含量总体比狼毒斑块外高,从侧面证实了狼毒斑块具有明显的“肥岛”效应。可见,狼毒植株在退化草地定植和扩散过程中,在一定程度上对同生境草地植被群落结构及草地土壤养分循环过程产生影响。由于C、N和P的化学计量比被认为是营养过剩/限制生态系统健康的良好指标^[20],因此国内外对于草地的化学计量特征进行了广泛探讨,包括不同尺度(放牧、演替阶段以及梯度等)^[21-24]和温带草原植物群落^[25]的生态化学计量学研究,但对于高寒草地的生态化学计量研究还比较缺乏,以及C : N : P的化学计量学在植物-土壤系统中的变化趋势和相互作用少见报道。同时,使用化学除草剂防除狼毒后的研究主要集中在

宏观的草地群落结构和土壤养分变化等方面,然而,以单株狼毒为微斑块研究对象,针对防除狼毒后狼毒斑块的植被和土壤的生态化学计量特征的研究鲜有报道。基于此,本研究以生长状况相同的单株狼毒为研究对象,使用化学药剂防除后,对狼毒斑块的植物和土壤的 C、N、P 含量及化学计量比进行研究,拟回答几个问题: 1) 防除狼毒后狼毒斑块植物-土壤 C、N、P 生态化学计量特征变化如何? 2) 防除狼毒后狼毒斑块植物-土壤 C、N、P 含量及其比值之间的关系如何? 探讨狼毒斑块的养分循环规律,以期对狼毒型退化草地的生态恢复及草地管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 自然概况

研究区位于青海省海北藏族自治州海晏县青海湖乡达玉德吉村(37°4'1"N, 100°52'48"E),海拔 3240 m 左右,属高原大陆性气候,春季干旱多风,夏季短促,冬季寒冷漫长。年均气温 0.20—3.4℃。年均降水量 277.8—499.5 mm。年均日照 2580—2750 h,年蒸发量为 1400 mm 左右,降水多集中在 5—9 月份,无绝对无霜期,牧草生长期短,为 120—140 d。样区草地类型以高寒草甸化草原,以线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)为主要优势种,伴生种为草地早熟禾(*Poa pratensis*)、羊茅(*Festuca sinensis*)、蒺藜豆(*Melilotoides ruthenica*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)等。放牧强度约为 7.94 羊单位/hm²,由于长期过度放牧导致狼毒种群密度持续增加,高达 3—8 株/m²。土壤类型为高山草甸土。

1.2 研究方法

2016 年 7 月中旬狼毒盛花期,选取地势平坦,狼毒分布较为均匀的区域,建立 80 m×80 m 的围封试验区。依据邢福和宋日^[17]以及赵成章等^[26]的研究结果选取生长年限较长(枝条数≥20—25)的狼毒,以狼毒基部为中心,冠幅直径 25—30 cm 的范围划定为狼毒斑块内(SPW)。同时,将冠幅、生长年限相近的两株狼毒斑块间的区域划定为狼毒斑块外(SPO)。选取 20 株狼毒斑块内的狼毒在基部用木桩进行定点标记后,采用青海省畜牧兽医科学院研制的“狼毒净”对狼毒进行点喷防除^[27]。2017 年 6 月牧草返青期对标记点狼毒返青情况调查发现,狼毒死亡率高达 98%以上,将防除后狼毒斑块定义为防除狼毒(SR)。

1.3 样品的采集与分析

2017 年 8 月初,采用直径为 30 cm 的样圈对斑块内、斑块外及防除区进行植被调查,采用分种收获法采集样圈内出现的牧草以及用孔径 4 cm 的土钻采集样圈内 0—20 cm 土壤,每样圈取 3 钻混合成 1 个土样,带回实验室后,牧草在烘箱中 105℃杀青 30 min,再在 65℃下烘干至恒重,测定地上生物量^[28]后,将植物样品磨碎过 0.15 mm 筛后测定植物 C、N、P 的含量。捡除土壤中的枯物、石粒及植物根系等,在室内风干过 2 mm 筛后,用于土壤 C、N、P 的含量的测定。植物和土壤的 C 含量采用重铬酸钾—硫酸容量法测定,植物 N 含量采用 H₂SO₄-H₂O₂消化蒸馏法,土壤 N 含量采用 Clever Chem Anna 全自动间断化学分析仪测定,植物 P 含量采用钒钼黄比色法,土壤 P 含量采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法^[29]。每个样品测定重复 3 次,测定出 C、N、P 含量后,再计算 C:N、N:P、C:P 值。

1.4 数据分析

通过 Microsoft Excel 2019 进行试验数据整理;采用 SPSS 22.0 软件对不同狼毒斑块间地上生物量及 C、N、P 含量及化学计量比进行方差分析;采用 CANOCO 4.5 软件进行不同狼毒斑块植物-土壤 C、N、P 含量及化学计量比的 RDA 分析;采用 SigmaPlot 14 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同狼毒斑块植物地上生物量的变化

由图 1 可知,防除狼毒后总地上生物量有所下降,但禾本科生物量较狼毒斑块内有所增高,差异不显著($P>0.05$),莎草科生物量变化不明显,豆科和杂类草地上生物量显著低于狼毒斑块内($P<0.05$)。狼毒斑块内

外除了杂类草地上生物量差异显著($P<0.05$)外,其余功能群地上生物量差异均不显著($P>0.05$)。

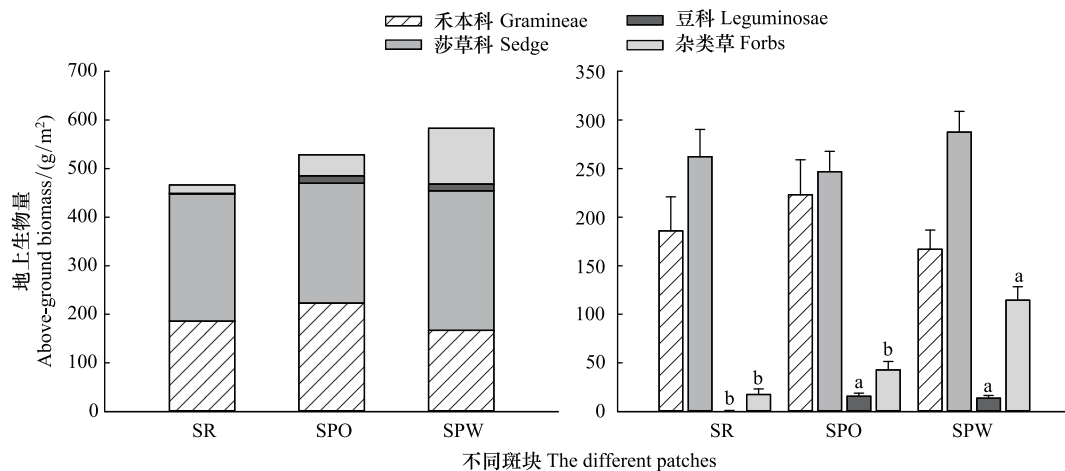


图 1 不同狼毒斑块功能群地上生物量

Fig.1 Above-ground biomass of functional groups with different *S. chamaejasme* patches

SR;防除狼毒 Removed *S. chamaejasme*;SPO;狼毒斑块外 Outside the *S. chamaejasme* patch;SPW;狼毒斑块内 Within the *S. chamaejasme* patch;不同小写字母表示不同狼毒斑块间差异显著($P<0.05$)

2.2 不同狼毒斑块植物 C、N、P 含量及化学计量比

由图 2 可知,不同狼毒斑块的各功能群植物 C、N、P 含量有一定差异,豆科植物 N 含量和杂类草 P 含量最高。各斑块植物 C 含量在各功能群差异均不显著($P>0.05$),总体来说防除狼毒后植物 C 含量高于其他斑块;N 含量也为防除狼毒高于其他斑块,且莎草科 N 含量显著高于其他斑块($P<0.05$);P 含量总体表现为狼毒斑块外高于防除狼毒和狼毒斑块内,禾本科 P 含量为狼毒斑块外显著高于狼毒斑块内($P<0.05$),莎草科 P 含量为狼毒斑块内最高,但差异度不显著($P>0.05$),豆科 P 含量为狼毒斑块内和狼毒斑块外显著高于防除狼毒($P<0.05$),杂类草 P 含量为狼毒斑块外高于其他斑块。

对于化学计量比来说(图 2),不同狼毒斑块的 C:N 表现为狼毒斑块外>狼毒斑块内>防除狼毒,且狼毒斑块外莎草科 C:N 显著高于防除狼毒($P<0.05$);植物 C:P 和 N:P 在各斑块内无明显变化规律,禾本科 C:P 为狼毒斑块内显著高于防除狼毒和狼毒斑块外($P<0.05$),N:P 为狼毒斑块内显著高于狼毒斑块外($P<0.05$),与防除狼毒差异不显著($P>0.05$);在莎草科和豆科 C:P 和 N:P 为防除狼毒显著高于狼毒斑块内和狼毒斑块外($P<0.05$),杂类草 C:P 和 N:P 为防除狼毒显著高于狼毒斑块外($P<0.05$),但斑块内外差异不显著($P>0.05$)。

2.3 不同狼毒斑块土壤 C、N、P 含量及化学计量比

不同狼毒斑块土壤 C、N、P 含量及比值变化如图 3 所示,C 含量、P 含量以及 C:P 表现为狼毒斑块内>狼毒斑块外>防除狼毒,N 含量和 N:P 为防除狼毒>狼毒斑块内>狼毒斑块外,但差异均不显著($P>0.05$);C:N 表现为狼毒斑块内和狼毒斑块外显著高于防除狼毒($P<0.05$)。

2.4 不同狼毒斑块植物-土壤 C、N、P 含量及化学计量比的相关分析和 RDA 分析

由表 1 可知,在不同斑块内,植物和土壤 C、N、P 含量及化学计量比有一定的相关性,其中防除狼毒后植物 N/P 与土壤 N/P 显著正相关;狼毒斑块内的植物 P 与土壤 C/N 显著负相关,而植物 N/P 与土壤 C/N 显著正相关;狼毒斑块外表现为植物 N/P 与土壤 C/N 显著正相关。

RDA 分析结果显示(图 4),植物与土壤 C、C:N、C:P、N:P 之间夹角小于 90° ,表现两两显著正相关,且植物 N:P 的箭头较土壤的长,表明植物对土壤 N:P 具有正面影响。相反,植物与土壤的 N、P 之间夹角均大于 90° ,两两显著负相关,其中 P 的夹角较大,表明相关性更强,且植物 N 的箭头相对较长,对土壤 N 的负面影响

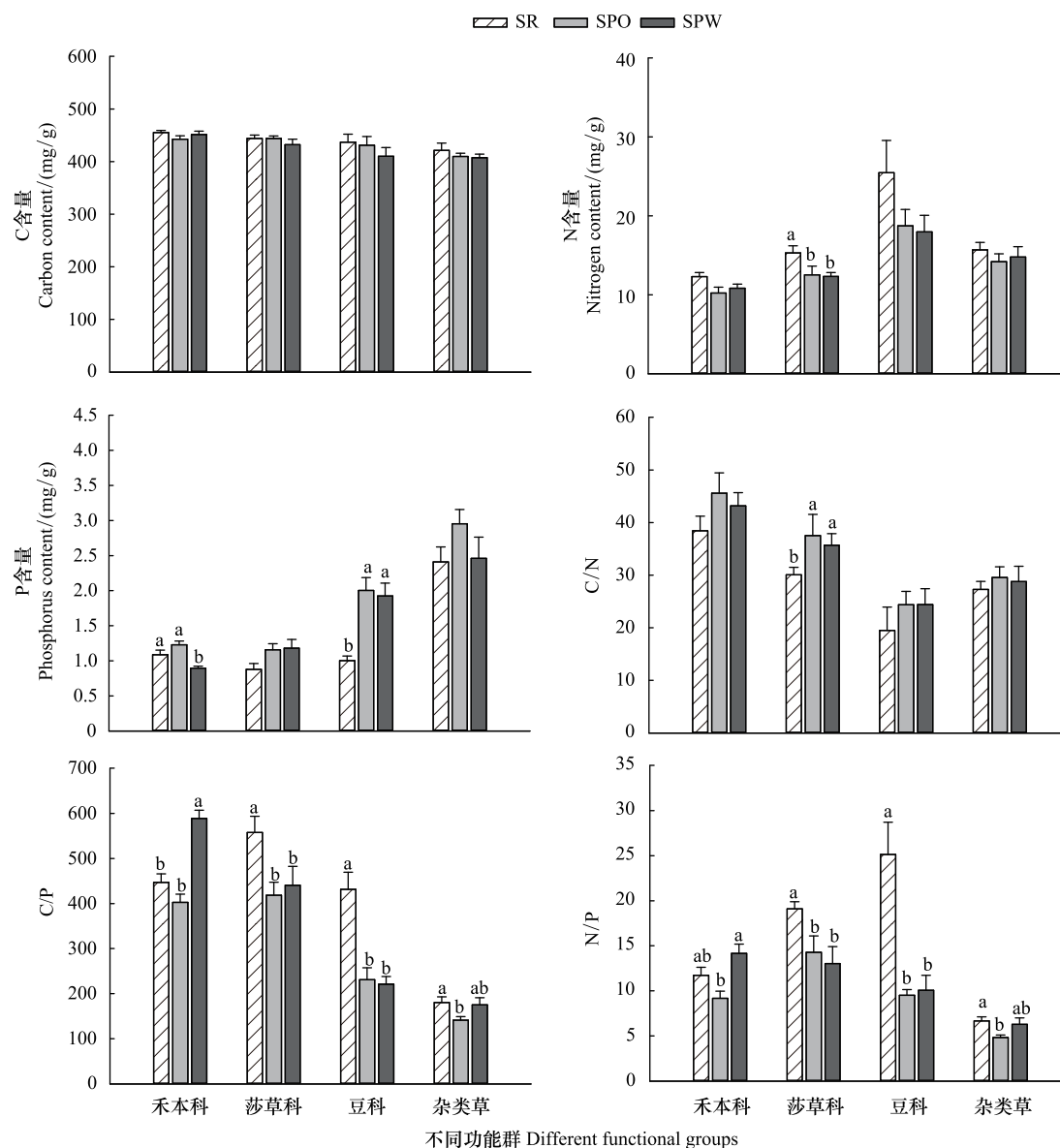


图2 不同狼毒斑块植被功能群 C、N、P 含量及化学计量比

Fig.2 C、N、P content and stoichiometric ratio of plant functional groups with different *S. chamaejasme* patches

较大。另外,防除狼毒后对植物和土壤的 N 含量, N:P 以及植物 P 含量影响较大,狼毒斑块内对植物和土壤 P 含量比较敏感。

3 讨论

狼毒作为天然草原上的主要有毒植物,既直接与周围其它植物竞争空间和营养,又通过释放化感物质直接或间接地影响周围植物的生长发育^[15]。在本研究中通过测定不同狼毒斑块的地上生物量可知,狼毒斑块内的总地上生物量最高,这有可能跟狼毒具有一定的“肥岛”效应有关^[19],狼毒富集大量的营养物质,致使狼毒株系周围的植物营养丰富,植物生长较好,同时狼毒斑块内的杂类草地上生物量显著高于狼毒斑块外和防除狼毒,这说明狼毒对禾本科和莎草科等优势种具有一定的抑制作用,同时也为杂类草生长提供了大量空间。而防除狼毒后解除了狼毒的抑制作用,禾本科地上生物量有所升高,而豆科和杂类草地上生物量显著减少,这有可能是防除狼毒后禾本科等优势植物生长限制解除,重新与豆科和杂类草竞争生长空间,导致阔叶类植物

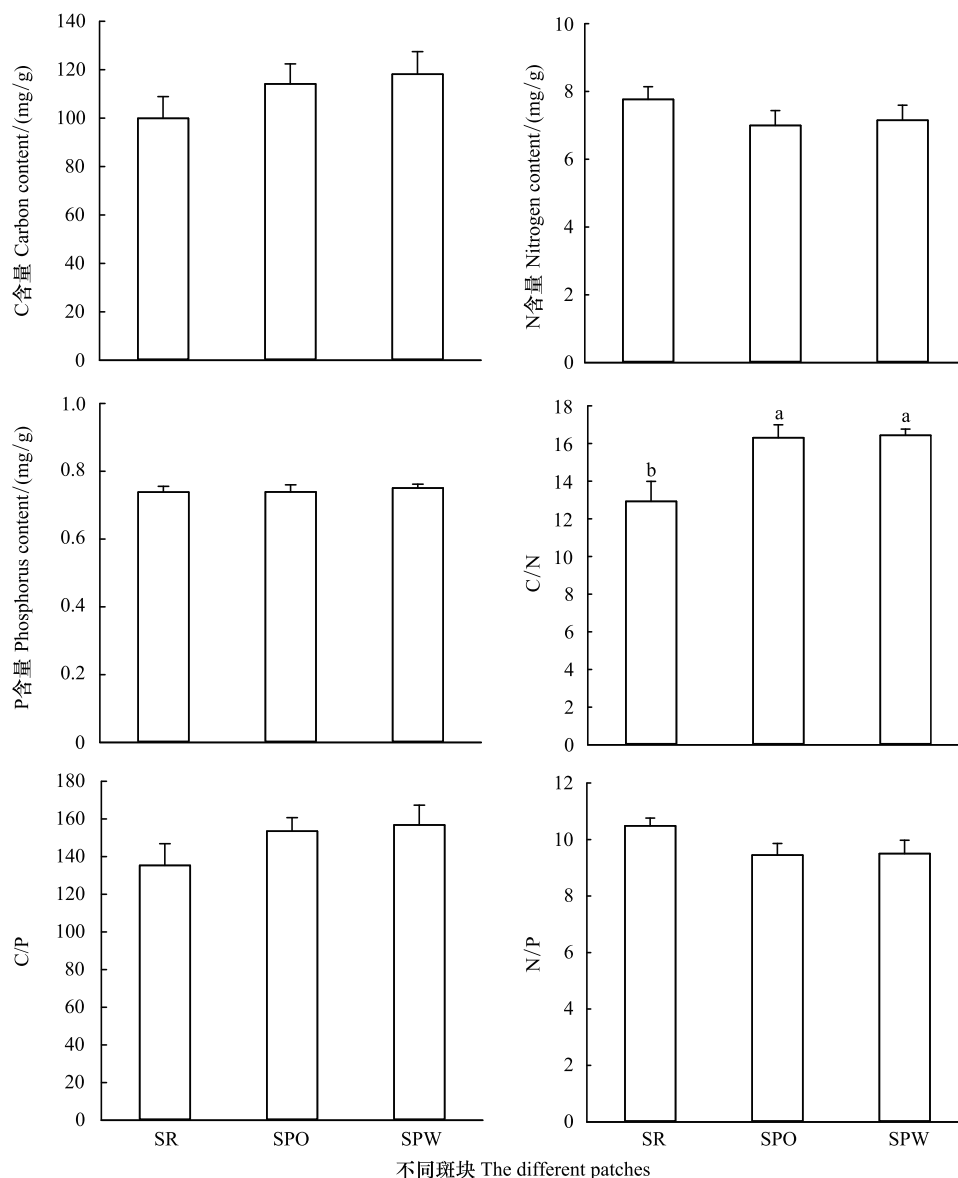


图3 不同狼毒斑块土壤 C、N、P 含量及化学计量比

Fig.3 C、N、P conten and stoichiometric ratio of soil with different *S. chamaejasme* patches

减少^[30]。从研究结果来看,狼毒主要通过对禾本科植物产生影响来影响草地植被,而对莎草科植物影响不大。

C 是植物体内的结构性物质^[21];而 N、P 是影响植物和生态系统功能的限制性基本元素,不仅在植物个体发育中起着关键作用,而且直接影响植物群落组成和植物生理活动,决定着生态系统的结构、功能和生产力^[31]。对同一物种来说,结构性物质受生境的影响较小,且含量稳定,但功能性和贮藏性物质的含量很容易受外界环境的影响,且变化较大^[32]。在本研究中,不同狼毒斑块的不同功能群 C 含量变化均不显著,而 N、P 含量变化明显,其中防除狼毒后莎草科的 N 含量显著高于其他斑块,豆科植物的 N 含量明显高于其他功能群植物,这可能与豆科植物的固氮作用有关^[33];豆科植物 P 含量表现为防除狼毒显著低于狼毒斑块内外,而禾本科植物 P 含量表现为狼毒斑块内显著低于防除狼毒和狼毒斑块外。防除狼毒后植物功能群的 C/N 均低于狼毒斑块内外,其中莎草科植物的 C/N 显著较低,这可能是由于防除狼毒后各功能群植物生长速率增加,需要大量的核糖体 RNA 合成蛋白质,由于核糖体 RNA 中含有大量 P,从而使得各功能群植物具有较低的 P 含

表 1 不同狼毒斑块植物-土壤 C、N、P 含量及化学计量比的相关分析

Table 1 Plant and soil C, N, and P content and stoichiometric ratios correlation analysis in different *S. chamaejasme* patches

处理 Treatment		PC	PN	PP	PC/N	PC/P	PN/P
SR	SC	0.675	-0.699	-0.488	0.726	0.668	-0.067
	SN	0.606	0.55	-0.891	-0.232	0.75	0.888
	SP	0.64	0.446	-0.737	-0.075	0.538	0.662
	SC/N	0.473	-0.833	-0.214	0.764	0.432	-0.318
	SC/P	0.577	-0.727	-0.395	0.705	0.598	-0.131
	SN/P	0.55	0.547	-0.924	-0.29	0.838	0.951 *
SPW	SC	0.626	-0.175	-0.774	0.397	0.653	0.843
	SN	0.479	0.008	-0.628	0.235	0.501	0.713
	SP	0.491	-0.064	-0.724	0.246	0.542	0.813
	SC/N	0.853	-0.624	-0.978 *	0.72	0.893	0.990 **
	SC/P	0.667	-0.221	-0.779	0.45	0.685	0.838
	SN/P	0.451	0.035	-0.547	0.224	0.457	0.624
SPO	SC	0.379	0.142	-0.319	0.125	0.179	-0.031
	SN	-0.13	0.218	0.178	-0.071	-0.28	-0.543
	SP	0.596	-0.017	-0.546	0.306	0.42	0.189
	SC/N	0.795	-0.214	-0.8	0.319	0.792	0.987 *
	SC/P	0.255	0.228	-0.191	0.022	0.046	-0.144
	SN/P	-0.379	0.274	0.42	-0.2	-0.498	-0.737

* * 表示极显著相关 ($P < 0.01$); * 表示显著相关 ($P < 0.05$); SR: 防除狼毒 Removed *S. chamaejasme*; SPO: 狼毒斑块外 Outside the *S. chamaejasme* patch; SPW: 狼毒斑块内 Within the *S. chamaejasme* patch; PC: 植物碳含量 Plant carbon content; PN: 植物氮含量 Plant nitrogen content; PP: 植物磷含量 Plant phosphorus content; PC/N: 植物碳/氮比 Plant carbon/nitrogen ratio; PC/P: 植物碳/磷比 Plant carbon/phosphorus ratio; PN/P: 植物氮/磷比 Plant nitrogen/phosphorus ratio; SC: 土壤碳含量 Soil carbon content; SN: 土壤氮含量 Soil nitrogen content; SP: 土壤磷含量 Soil phosphorus content; SC/N: 土壤碳/氮比 Soil carbon/nitrogen ratio; SC/P: 土壤碳/磷比 Soil carbon/phosphorus ratio; SN/P: 土壤氮/磷比 Soil nitrogen/phosphorus ratio

量以及 C/N, 这与 Sterner 等^[34]提出的生长率假说一致。而对于 C/P 和 N/P 值, 防除狼毒后莎草科、豆科和杂类草的值显著高于其他斑块, 其原因可能是防除狼毒释放了大量养分和空间, 莎草科、豆科和杂类草需要吸收大量的 C、N 来促进生长, 这与 Elser 等^[4]研究结果快速生长的植物一般有较低的 C/P 和 N/P 比相反, 这可能是在防除狼毒斑块内莎草科、豆科和杂类草的 P 含量较低, 受 P 限制有关。Aerts 等^[10]研究表明 N/P 化学计量比可作为植物限制性养分判断的指标之一。Drenovsky 等^[35]研究表明植物 N/P < 14 反映植物生长受 N 限制, N/P > 16 反映植物受 P 限制, 14 < N/P < 16 反映植物受 N 和 P 的共同限制。在本研究中, 防除狼毒后莎草科和豆科的 N/P > 16, 说明植物受 P 限制, 进一步解释了防除狼毒后莎草科、豆科 N/P 值显著高于其他斑块这一结论。

土壤作为草地生态系统中植物的生存场所, 为植物源源不断的提供生长生活所必需的营养元素, 同时土壤又是一个巨大的微生物库, 这使得养分能在植物和土壤之间完成转化, 其中 C、N、P 是植物和土壤之间转化的主要元素^[36]。勒佳佳等^[37]和刘海威等^[38]研究表明草本植物多样性及丰富度均能够显著影响土壤养分含量, 而植物-土壤与环境不同的互作过程和方式也显著的影响着土壤 C:N:P 化学计量学特征。在本研究中不同狼毒斑块的土壤 C、N、P 含量差异不显著, 但 C 含量为防除狼毒后最低, 而 N 含量为防除狼毒后最高, 这可能是由于防除狼毒后植物从土壤中吸收 C 元素导致 C 含量下降, 而防除狼毒后豆科植物生物量显著降低, 影响土壤中氮的固定。植物对土壤养分的利用方式和过程显著的影响土壤化学计量比^[8], 防除狼毒后的 C/N 值显著低于狼毒斑块内外, 这说明防除狼毒后植物具有较高的生长速率, 对土壤有机质的利用率高, 进而导致土壤相对贫瘠^[39], 这也证实了 Bowman 的研究中提到的植物在自身养分贫瘠的情况下往往具有较高的养分

利用效率,是植物适应贫瘠养分状态的一种策略^[40]。土壤 N 和 P 养分是决定植物生产力的重要环境因子,是土壤肥力高低的重要指标^[41]。在本研究中 N/P 值在防除狼毒斑块内的大于 10,说明防除狼毒斑块土壤受 N 和 P 共同限制,而狼毒斑块内外的 N/P 值均小于 10,说明土壤主要受 N 限制。

在草地生态系统中,土壤和植物之间的 C、N、P 差异代表生产者及土壤微生物为维持生态平衡面临的养分竞争格局^[42]。本研究显示不同狼毒斑块植物和土壤 C、N、P 含量及化学计量比具有一定的相关性,但植物和土壤的 C、N、P 含量的相关性均不显著,这说明植物中的养分不是单一的来自于土壤,比如植物本身的光合作用和固氮作用也是其养分的一部分来源^[43]。防除狼毒后植物 N/P 与土壤 N/P 显著正相关,这与上述的防除狼毒后植物和土壤的 N/P 说明的问题一致,均受到 P 的限制。而 RDA 分析结果也表明植物对土壤 N:P 具有正面影响,且植物和土壤的 P 相关性更强,这也进一步加深了上述的结论,也说明了防除狼毒后土壤中的 P 元素可能是限制植物生长的主要因子,这与 Vitousek & Howarth 研究显示的土壤中 N、P 含量的多少作为判断植物生长是否受限制的两种营养元素一致^[44]。由此可知,植物通过从土壤中不断的吸取养分来维持自身的生长发育,又通过凋落物等方式将养分归还给土壤,总体上实现了 C、N、P 养分在狼毒型退化草地中植物库和土壤库之间的循环和流动。

4 结论

狼毒主要通过对禾本科植物产生影响来影响草地植被,植物体内的 N、P 含量变化明显,防除狼毒后植物具有较高的生长速率会从土壤中吸收大量的养分,对养分的利用率较高,进而导致植物和土壤的 C/N 值显著低于狼毒斑块内外,且狼毒防除后植物对土壤 N:P 具有正面影响,且植物和土壤的 P 相关性更强。因此,探讨植物-土壤的相互作用及其生态化学计量关系特征,可以从生态化学计量特征的角度了解养分循环途径,为促进生态化学计量学理论的发展提供新的科学依据,也为毒草性退化草地的恢复和利用提供新的思路。

参考文献 (References):

- [1] 牛得草,李茜,江世高,常佩静,傅华.阿拉善荒漠区6种主要灌木植物叶片C:N:P化学计量比的季节变化.植物生态学报,2013,37(4):317-325.
- [2] 戚德辉,温仲明,王红霞,郭茹,杨士梭.黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应.生态学报,2016,36(20):6420-6430.
- [3] Niklas K J, Cobb E D. N, P, and C stoichiometry of *Eranthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth. American Journal of Botany, 2005, 92(8):1256-1263.
- [4] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. Ecology Letters, 2007, 10(12):1135-1142.
- [5] 余淑凤,胡玉福,舒向阳,严星,李智,王琴,何佳,贾安都.川西北高寒沙地不同年限高山柳林下优势植物碳、氮、磷生态化学计量特征.草业学报,2018,27(4):123-130.
- [6] Reich P B, Tjoelker M G, Machado J L, Oleksyn J. Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants. Nature, 2006, 439(7075):457-461.

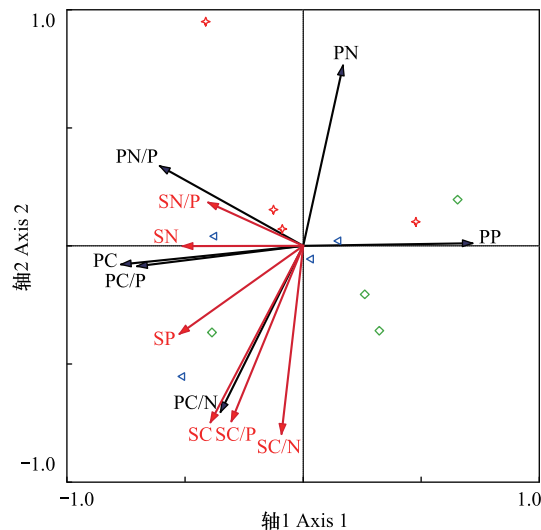


图4 不同狼毒斑块植物-土壤 C、N、P 含量及化学计量比的 RDA 分析

Fig.4 Redundancy analysis of plant and soil C、N、P content and stoichiometric ratio in different *S. chamaejasme* patches

黑线表示植物各含量及化学计量比;红线表示土壤各含量及化学计量比;红色星形表示防除狼毒;绿色菱形表示狼毒斑块内;蓝色三角形表示狼毒斑块外

- [7] 李明军, 喻理飞, 杜明凤, 黄宗胜, 石建华. 不同林龄杉木人工林植物-凋落叶-土壤 C、N、P 化学计量特征及互作关系. 生态学报, 2018, 38(21): 7772-7781.
- [8] Rong Q Q, Liu J T, Cai Y P, Lu Z H, Zhao Z Z, Yue W C, Xia J B. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay coastal wetland, China. Ecological Engineering, 2015, 76: 57-65.
- [9] 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [10] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. Advances in Ecological Research, 1999, 30: 1-67.
- [11] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 文丽, 范夫静. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.
- [12] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 王芳. 不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征. 生态学报, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [13] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 仝川, 张林海. 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.
- [14] 刘英, 龙瑞军, 姚拓. 草地狼毒研究进展. 草业科学, 2004, 21(6): 55-61.
- [15] 程巍, 仲波, 徐良英, 杜林方, 孙庚. 不同年龄瑞香狼毒的根水提液对青藏高原高寒草甸 4 种常见植物的化感作用. 生态科学, 2017, 36(4): 1-11.
- [16] 刘雅婧, 蒙仲举, 党晓宏, 宋文娟, 翟波. 狼毒浸提液对 3 种牧草种子萌发和幼苗生长的影响. 草业学报, 2019, 28(8): 130-138.
- [17] 邢福, 宋日. 草地有毒植物狼毒种群分布格局及动态. 草业科学, 2002, 19(1): 16-19.
- [18] 安冬云, 韩蕾, 武菊英, 陈洁, 姜圆圆, 刘洋, 王庆海. 瑞香狼毒对农牧交错带草原土壤特性的影响. 草地学报, 2016, 24(3): 559-567.
- [19] 鲍根生, 王玉琴, 宋梅玲, 王宏生, 尹亚丽, 刘生财, 杨有武, 杨铭. 狼毒斑块对狼毒型退化草地植被和土壤理化性质影响的研究. 草业学报, 2019, 28(3): 51-61.
- [20] Wang N, Fu F Z, Wang B T, Wang R J. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus tabulaeformis* forest ecosystems in warm temperate Shanxi Province, North China. Journal of Forestry Research, 2018, 29(6): 1665-1673.
- [21] 高巧静, 朱文琰, 侯将将, 王娅琳, 赵新全, 徐世晓, 孙平. 放牧强度对高寒草甸植物叶片生态化学计量特征的影响. 中国草地学报, 2019, 41(3): 45-50.
- [22] 杨林, 马秀枝, 李依倩. 放牧对荒漠草原克氏针茅种群和土壤生态化学计量特征的影响. 西北植物学报, 2020, 40(2): 328-334.
- [23] 赵一赢, 李月芬, 王月娇, 梁硕. 草地退化演替阶段羊草叶片碳氮磷化学计量学研究. 中国农学通报, 2016, 32(11): 73-77.
- [24] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, Sun H Y, Luo J, Wang J P, Yu D. Stoichiometric variation of carbon, nitrogen, and phosphorus in soils and its implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of Eastern Tibetan Plateau. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(2): 405-416.
- [25] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547.
- [26] 赵成章, 高福元, 王小鹏, 盛亚萍, 石福习. 黑河上游高寒退化草地狼毒种群小尺度点格局分析. 植物生态学报, 2010, 34(11): 1319-1326.
- [27] 鲍根生, 王宏生, 曾辉. 有机硅助剂对“狼毒净”防除狼毒效果及草地植物群落多样性的影响. 草业科学, 2015, 32(2): 263-268.
- [28] 王玉琴, 鲍根生, 宋梅玲, 尹亚丽, 刘生财, 杨有武, 杨铭, 王宏生. 两种措施下施氮肥对狼毒型退化草地群落及营养品质的影响. 草业学报, 2018, 27(12): 177-186.
- [29] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [30] 王福山, 何永涛, 石培礼, 牛犇, 张宪洲, 徐兴良. 狼毒对西藏高原高寒草甸退化的指示作用. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 567-572.
- [31] Fan J W, Harris W, Zhong H P. Stoichiometry of leaf nitrogen and phosphorus of grasslands of the Inner Mongolian and Qinghai-Tibet Plateaus in relation to climatic variables and vegetation organization levels. Ecological Research, 2016, 31(6): 821-829.
- [32] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3): 523-534.
- [33] 樊江文, 高永革. 混播草地中豆科牧草的固氮作用. 中国草地, 1994, (6): 64-69, 73.
- [34] Sterner R W, Elsaer J J. Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [35] Drenovsky R E, Richards J H. Critical N:P values: predicting nutrient deficiencies in desert shrublands. Plant and Soil, 2004, 259(1): 59-69.
- [36] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用. 生态学报, 2014, 34(14): 3807-3819.
- [37] 勒佳佳, 苏原, 罗艳, 耿凤展, 朱玉梅, 李凯辉, 刘学军. 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.
- [38] 刘海威, 张少康, 焦峰. 氮磷添加对不同退耕年限草本植被群落及土壤化学计量特征的影响. 水土保持学报, 2017, 31(2): 333-338.
- [39] 张光德, 赵传燕, 戎战磊, 毛亚花. 祁连山中部不同植被类型土壤生态化学计量特征研究. 兰州大学学报: 自然科学版, 2019, 55(4): 533-540.
- [40] Bowman W D. Accumulation and use of nitrogen and phosphorus following fertilization in two alpine tundra communities. Oikos, 1994, 70(2): 261-270.
- [41] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.
- [42] Williams M A, Jangid K, Shanmugam S G, Whitman W B. Bacterial communities in soil mimic patterns of vegetative succession and ecosystem climax but are resilient to change between seasons. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 749-757.
- [43] 李慧, 许亚东, 王涛, 杨改河. 不同林龄刺槐人工林植物与土壤 C、N、P 化学计量特征演变. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1651-1659.
- [44] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur?. Biogeochemistry, 1991, 13(2): 87-115.