短花针茅荒漠草原不同斑块优势种植物的 C,N,P 化学计量特征

于瑞鑫[1,2]，王 磊[1,2,3]，杨新国[1,2]，田 娜[1,2]，王 兴[1,2]，宋乃平[1,2]

(1. 宁夏大学 西北土地退化与生态系统恢复省部共建国家重点实验室培育基地，宁夏 银川 750021；2. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室，宁夏 银川 750021；3. 南京大学 国际地球系统科学研究所，江苏 南京 210093)

摘 要：[目的] 研究斑块中优势种的生活史策略及对养分限制的响应，以及优势种生态化学计量学特征随季节变化的响应规律，为植物种群演替及变化过程研究提供科学依据。[方法] 确定 3 类典型斑块：斑块 A(短花针茅)、斑块 B(短花针茅＋草木樨状黄耆)、斑块 C(猪毛蒿＋苦豆子＋老瓜头)，测定优势种的全碳、全氮、全磷含量，计算 C∶N，C∶P，N∶P 并进行方差分析。采用线性回归分析法对不同斑块 C,N,P 化学计量进行逐步回归分析。[结果] 各斑块优势种的 C，N，P 及其计量比特征在生长季内的变化规律不同，且各指标季节间的变化特征在不同斑块之间也存在差异；植物 C 含量在不同优势种和不同斑块间的差异均不显著；短花针茅 N 含量显著小于其他优势种，导致斑块 A 的 N 含量总体显著小于另外两个斑块；植物 P 含量在斑块 A 中随着季节的变化表现为增长的趋势，而在斑块 C 中表现为先减小后增大的变化过程；斑块 A 植物的 C∶N 值无显著的季节变化，C∶P 和 N∶P 值在春季显著高于夏秋季；斑块 B 和斑块 C 不同优势种的 C∶N，C∶P 和 N∶P 值均表现出显著的差异性，但随季节变化过程不同，斑块 B 除 C∶N 值外均表现出下降的趋势，而斑块 C 各比值均表现出先增大后减小的变化规律。[结论] 3 种斑块 C,N,P 含量表现出不同的相关性；斑块 A 表现为防御性策略，斑块 B 表现为竞争性策略，而斑块 C 表现为竞争性和防御性策略共存。

关键词：C,N,P 化学计量特征；季节变化；优势种；荒漠草原

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)04-0036-08 **中图分类号**：Q948.1

文献参数：于瑞鑫，王磊，杨新国，等. 短花针茅荒漠草原不同斑块优势种植物的 C,N,P 化学计量特征[J]. 水土保持通报，2019，39(4)：36-43. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.006；Yu Ruixin，Wang Lei，Yang Xinguo，et al. C，N，P stoichiometric characteristics of different dominant species in *Stipa breviflora* desert steppe[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(4)：36-43.

C，N，P Stoichiometric Characteristics of Different Dominant Species in *Stipa Breviflora* Desert Steppe

Yu Ruixin[1,2]，Wang Lei[1,2,3]，Yang Xinguo[1,2]，Tian Na[1,2]，Wang Xing[1,2]，Song Naiping[1,2]

(1. *Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China，Ningxia University，Yinchuan，Ningxia* 750021，*China*；2. *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education，Ningxia University，Yinchuan，Ningxia* 750021，*China*；3. *International Institute for Earth System Science，Nanjing University，Nanjing，Jiangsu* 210093，*China*)

Abstract：[Objective] The life history strategies of dominant species in patches and their responses to nutrient restriction，stoichiometry characterization of dominant species were studied in response to seasonal variation，which was expected to provid a scientific basis for the study of plant population succession and change process. [Methods] 3 typical patches，patch A(*Stipa breviflora*)，patch B(*Stipa breviflora*＋*Astragalus*

收稿日期：2018-12-08 **修回日期**：2019-01-19

资助项目：国家重点研发计划专题“限制放牧退化草地补播和改良技术集成与示范”(2016YFC0500700)；国家自然科学基金项目“荒漠草原不同叶型草地群落冠层光谱尺度效应及叶面积指数反演”(31760707)；宁夏回族自治区西部一流学科建设项目(NXYLXK2017B06)

第一作者：于瑞鑫(1994—)，女(汉族)，内蒙古自治区呼伦贝尔市人，硕士研究生，研究方向为植物生态学。E-mail：Yuruixin5962@163.com。

通讯作者：王磊(1980—)，男(汉族)，宁夏回族自治区银川市人，博士，副教授，主要从事生态监测与评估的研究。E-mail：WL8999@163.com。

melilotoides), patch C(*Artemisia scoparia*+*Sophora alopecuroides*+*Cynanchum komarovii*) were recognized and in which the dominated species were sampled, and its total carbon, total nitrogen, and total phosphorus contents were measured. Ratios of C∶N, C∶P, N∶P were calculated and analysis of their variances were conducted. Stepwise linear regression analysis of stoichiometry of the patches was performed. [Results] The results showed that the changes of carbon(C), nitrogen(N), phosphorus(P) and their stoichiometry characterization of the dominant species in three patches were different during the growing season, and the seasonal variation characteristics were also different among the three patchesseason. The contents of C among the dominant species, and among the patches as well, had no significant differences. N content of *S. breviflora* was lower than than the values of other dominant species, which resulted to the significantly smaller level of the N content in patch A . P content of patch A increased along the growing season, while of patch C, it experienced an initial decrease and a succeeding increased. For patch A plants, there was no significant seasonal variation in C∶N values, the values of C∶P and N∶P were significantly higher in spring than those in summer and in autumn. C∶N, C∶P and N∶P values of the dominant species in patches B and C had significant differences. However, the seasonal variation was different: for patch B all values decreased except of C∶N value, C∶N, C∶P and N∶P values of patch C all increased first and then decreased. [Conclusion] The C, N, and P contents of three patches showed different correlations, patch A showed a defensive strategy, patch B showed a competitive strategy, while patch C showed a coexistence of competitive and defensive strategies.

Keywords: C, N, P stoichiometric characteristics; seasonal variations; dominant species; desert steppe

化学元素对植物的生长以及生理机制调节有着极其必要的作用,而其中具备首要作用的化学元素是C,N,P[1]。C 是植物体内各种生理过程的能量来源,N,P 元素是植物蛋白质和核酸的重要组成元素,且是限制植物生长发育的两个关键因子[2-3],而植物的 C∶N 和 C∶P 代表生物量与养分的比值关系,在一定程度上反映植物生长速度与养分利用效率的关系[4],植物叶片 N∶P 的临界值则是判断土壤对植物养分供应状况的指标[5]。因此,对植物 C,N,P 化学计量特征的研究在其生长及营养分配等方面均具有重要意义。

生态化学计量成为研究不同尺度植被 C,N,P 含量及分布的有力工具[6]。He 等[7-8]对不同生境、不同群落类型的中国草原植被的 C∶N,N∶P 化学计量比及其影响因子进行了分析,在大尺度研究草原群落的生态化学计量提供了依据。而小尺度上,生态化学计量特征随时间的变化过程以与环境因子的响应关系一直是研究的热点问题,牛得草等[9-10]以荒漠草原灌木植物及典型草原长芒草(*Stipa bungeana*)叶片碳氮磷化学计量特征随季节变化的响应规律,探讨了不同发育阶段 C,N,P 元素含量及其计量比的内稳性特征以及与生长速率的关系。王凯博等[11]分析了黄土丘陵区 8 种典型植物叶片化学计量随时间变化的特征,研究了不同植物类型的生长速率与生长适应策略的关系及其差异。通过生长速率理论可知,植物通过调整它们的 C∶N∶P 比值以适应生长速率的改变,在生活史过程中通过调整生长速率以适应外界环境的变化[12]。而作为斑块内优势种,不仅通过生态化学计量的变化改变自身的物质分配,还进一步影响斑块内植物的生态位策略;因此揭示优势种的化学计量特征及其生活史策略,对于群落稳定性的评价具有重要的指示价值[13]。

荒漠草原短花针茅草原多以斑块化镶嵌的形式存在,受不利环境条件的影响,斑块中优势种的生活史策略及养分限制严重影响着斑块化的群落稳定性及生长发育,因此在群落水平上深入研究优势种的 C,N,P 的季节变化,对揭示群落的演替及变化过程具有十分重要的意义。本研究选取荒漠草原 3 种不同典型斑块中优势种为研究对象,探讨不同斑块中优势种在不同发育阶段的 C,N,P 含量的变化特征及元素计量关系之间的关系,试图从生态化学计量的角度对群落养分的利用策略及生长过程进行初步探讨,分析不同群落类型稳定性维持的生态化学计量依据。

1　研究区概况及研究方法

1.1　研究区概况

研究区地处宁夏吴忠市盐池县(37°04′—38°10′N,106°30′—107°47′E),总面积约 6 744 km^2,为典型的中温带大陆性气候,是黄土高原向鄂尔多斯台地、半干旱区向干旱区、干旱草原向荒漠草原、农业种植区向牧区过渡的 4 个过渡带的重叠区[14],这种地理上

的过渡性造成了自然资源多样性和脆弱性的特点[15]。试验区年均气温为 8.4 ℃,年日照时数为 2 863 h,年均无霜期为 160 d,年均降水量 250～350 mm,主要集中在 7—9 月,蒸发量高达 2 139 mm,土壤主要以灰钙土、风沙土、黑垆土为主,试验区主要为发育在灰钙土上的以短花针茅(*Stipa breviflora*)为建群种,小面积斑块分布的猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)、草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*),山苦荬(*Ixeridium chinense*)等草本植物为主体[16]。

1.2 样品采集与分析

根据资料收集及现场勘踏,在盐池县皖记沟村封育围栏内选取具有代表性的群落结构斑块 33.34 hm^2,确定 3 类典型斑块:斑块 A(短花针茅)、斑块 B(短花针茅+草木樨状黄耆)、斑块 C(猪毛蒿+苦豆子+老瓜头),每处样地随机设置 5 个 1 m ×1 m 的样方分别于 2017 年的 6,7,8,9 和 10 月,采用收割法获取重要值大于 20%的群落优势种地上部分样品,每种植物类型获取 5 个重复样品。

将采回物样品清洗后装入纸袋,于烘箱中 105 ℃杀青 0.5 h,然后 75 ℃烘干至恒重。将烘干的植物样品经磨碎过 0.15 mm 筛后测定植物 C,N,P 的含量。使用元素分析仪(Elemental Analyzer, Vario MACRO)测定植物体中的碳、氮含量,采用钼锑抗比色法测定植物体中的磷含量[17]。每个样品测定重复 3 次,计算出植物 C,N,P 含量平均值后,再计算植物 C∶N,N∶P,C∶P 值。

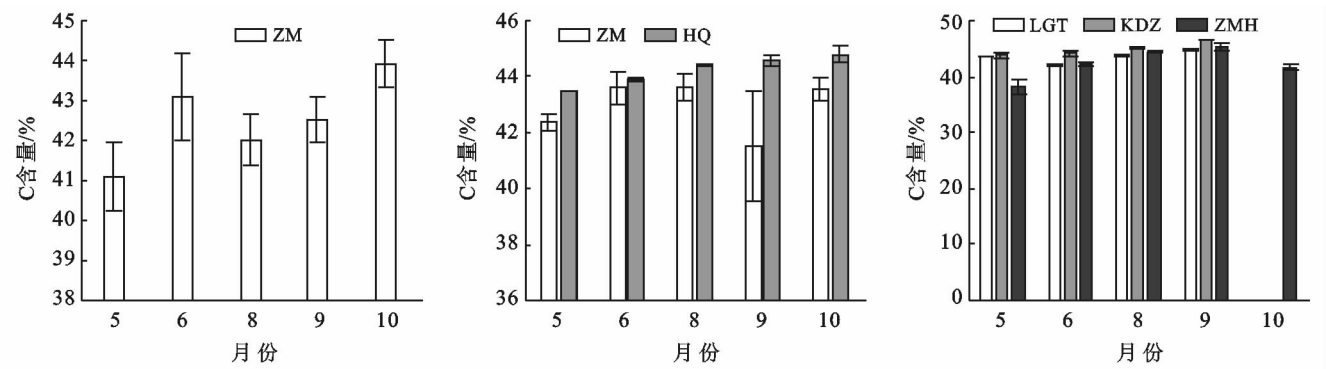
1.3 数据处理

采用 Excel 软件对数据进行处理、整理和绘图;用 SPSS 20.0 对 C,N,P 化学计量进行 one-way ANOVA 方法进行方差分析,均采用 LSD 方法进行多重比较;采用线性回归分析法对不同斑块 C,N,P 化学计量进行逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同斑块优势种植物 C,N,P 含量季节变化

不同斑块优势种植物的 C 含量随生长季的推移呈现不同变化特征(图 1)。斑块 A 的优势种短花针茅 C 含量受季节变化影响显著($p<0.01$),呈现先上升后缓慢下降,在生长季末期显著上升的趋势,10 月 C 含量达 43.93%。斑块 B 的优势种短花针茅随时间的变化趋势与斑块 A 基本一致,但随着生长季的变化不显著($p>0.05$),8 月为生长季 C 含量最高时段;草木樨状黄耆随生长季变化总体呈逐渐上升的趋势,生长季前期 C 含量显著低于生长季后期($p<0.01$)。斑块 C 的优势种呈现不同的变化趋势($p_{KDZ}<0.01$, $p_{LGT}<0.01$, $p<0.05$),老瓜头随生长季变化呈现先下降后上升的趋势,6 月达到最低 42.05%;苦豆子则呈现逐渐上升的趋势,9 月达到最大 45.21%;猪毛蒿呈现先上升后下降的趋势,9 月达到最大45.21%。



注:ZM:短花针茅;HQ:草木樨状黄耆;LGT:老瓜头;KDZ:苦豆子;ZMH:猪毛蒿。下同。

图 1 不同斑块优势种 C 含量动态特征

不同斑块优势种植物的 N 含量随生长季的推移呈现不同变化特征(图 2)。斑块 A 优势种短花针茅呈现先上升后下降,在生长季末期缓慢上升又略有下降的趋势,6 月达到最大($p<0.01$)。斑块 B 的优势种短花针茅变化趋势与斑块 A 相同($p<0.05$),6 月 N 含量最高 1.81%;草木樨状黄耆 N 含量随生长季变化呈现先上升后下降的趋势($p<0.01$),在 6 月达到最大 3.385%后,开始下降继而缓慢上升。斑块 C 优势种老瓜头 N 含量 5 月最高后逐渐下降($p<0.01$),生长季后期略有上升,但变化不显著;苦豆子生长季内呈现逐渐下降的趋势($p<0.01$);猪毛蒿随生长季变化呈先下降后上升继而持续下降的趋势,但受时间变化的影响不显著($p>0.05$)。

不同斑块优势种植物的 P 含量随生长季的推移呈

现不同变化特征(图 3)。斑块 A 优势种短花针茅随生长季变化呈现先上升后下降生长季末期缓慢上升的趋势($p<0.01$),8 月短花针茅的 P 含量最高为 0.60%。斑块 B 短花针茅在 6 月到第一个峰值0.24%,8 月略有下降后开始显著升高($p<0.01$);草木樨状黄耆的 P 含量随生长季的推移显著升高($p<0.01$),10 月含量最高 0.71%。斑块 C 中老瓜头在生长季初期 P 含量显著高于其他时段($p<0.01$),然后迅下降到生长季最低 0.23%,生长季后期缓慢上升;苦豆子在整个生长季范围内呈显著逐渐下降的趋势($p<0.05$),5 月最高 0.41%,9 月最低 0.17%;猪毛蒿 P 含量在生长季初期维持在较高的水平后显著下降($p<0.01$),8 月为生长季内最低 0.11%,生长季后期开始显著上升并在 10 月 P 含量达到了生长季的最高值 0.65%。

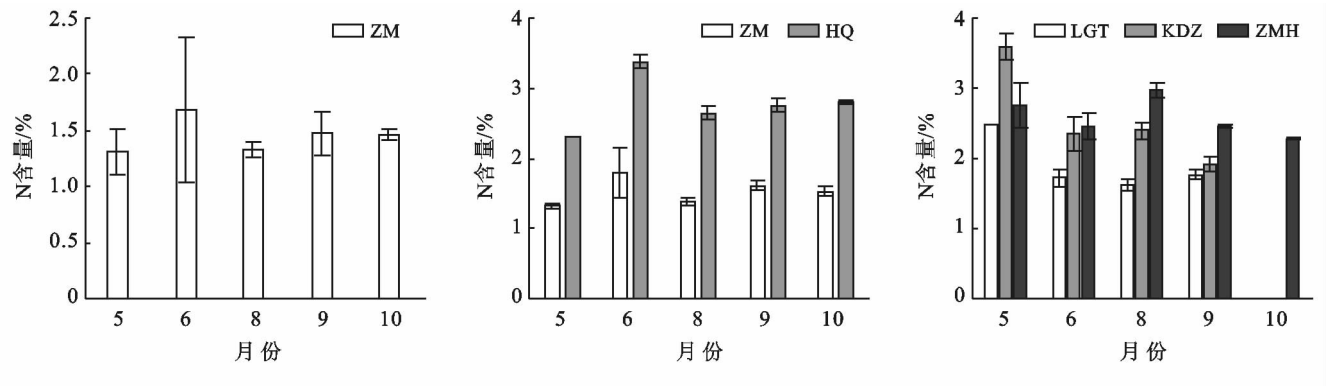


图 2　不同斑块优势种 N 含量动态特征

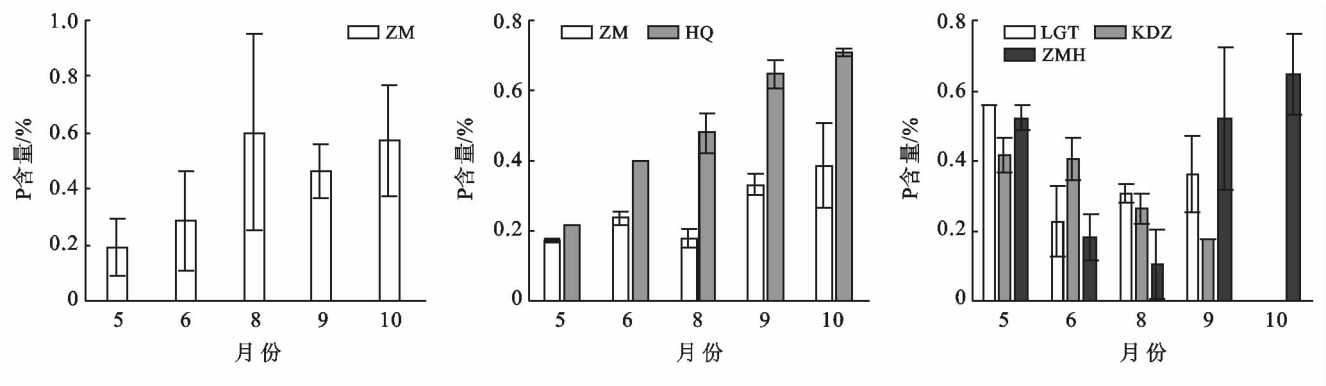


图 3　不同斑块优势种 P 含量动态特征

2.2　不同斑块优势种植物 C,N,P 计量比特征的季节变化

随着植物生长季的延长,斑块 A 内优势种短花针茅的 C∶N 变化表现出先降低后上升,8 月后再次下降的趋势,但在生长季内变化不显著($p>0.05$),短花针茅的 C∶P 表现出持续降低的趋势,5 月和 6 月显著高于其他月份($p<0.01$),N∶P 不同月份间表现出与 C∶N 相反的规律性,5—6 月逐渐增加,6 月达到最大值,然后显著降低($p<0.01$),9 月略有升高后再次降低(图 4)。斑块 B 内优势种短花针茅 C∶N 的变化表现出先降低后上升,8 月后再次下降的趋势,且生长季内变化不显著($p>0.05$),短花针茅的 C∶P表现出与 C∶N 相同的变化趋势,5 月和 8 月显著高于其他月份($p<0.01$),短花针茅的 N∶P 不同月份间表现出先上升后下降的趋势,但生长季内变化不显著($p>0.05$);草木樨状黄耆 C∶N 的变化呈先下降后上升的趋势,5 月到 6 月的变化显著($p<0.01$),C∶P,N∶P 表现出不断下降的趋势,5 月显著高于其他月份($p_{C:P}<0.01$,$p_{N:P}<0.0.(1)$(图 5)。斑块 C 内优势种老瓜头 C∶N 的变化表现出先升高后降低的趋势,5 月显著低于其他月份($p<0.01$),老瓜头 C∶P,N∶P 表现出相同的变化趋势,都在 9 月达到了最高,分别为 202.20,7.99;苦豆子 C∶N 的变化表现出先升高后降低再升高的趋势,5 月显著低于其他月份,C∶P 呈逐渐上升的趋势 N∶P 不同月份间表现出先上升后下降的趋势,但生长季内变化不显著($p_{C:P}>0.05$,$p_{N:P}>0.05$);苦豆子 C∶N 的变化呈先下降后上升的趋势($p<0.01$),9 月达到最高值,N∶P 则呈现出与 C∶N 相反的趋势,生长季内变化不显著($p_{N:P}>0.05$);猪毛蒿生长季内的 C∶N,C∶P,N∶P 变化不显著($p_{C:N}>0.05$,$p_{C:P}>0.05$,$p_{N:P}>0.05$),C∶N 呈现出先上升后下降再持续上升的趋势,C∶P,N∶P 呈现出先上升,在 8 月达到最高后,10 月降到生长季最低(图 6)。

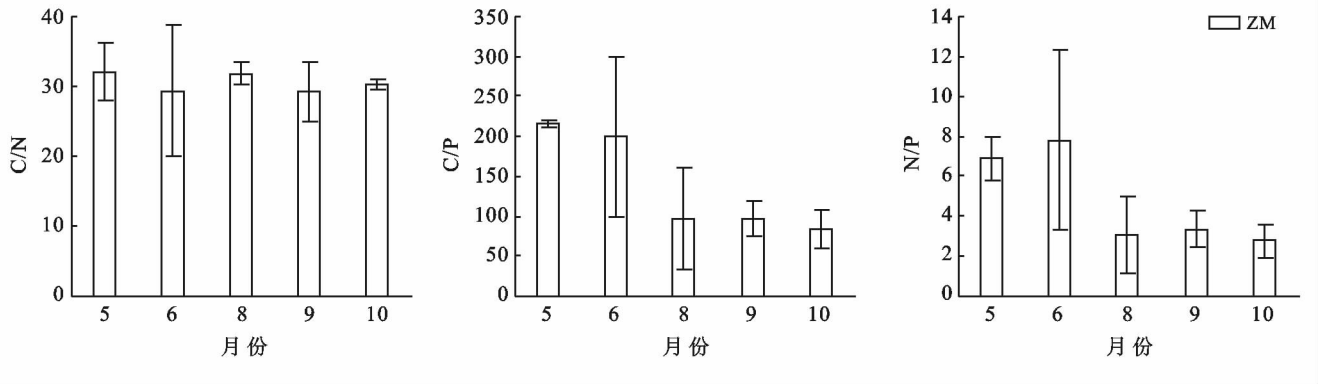


图 4 斑块 A 优势种 C,N,P 计量比特征

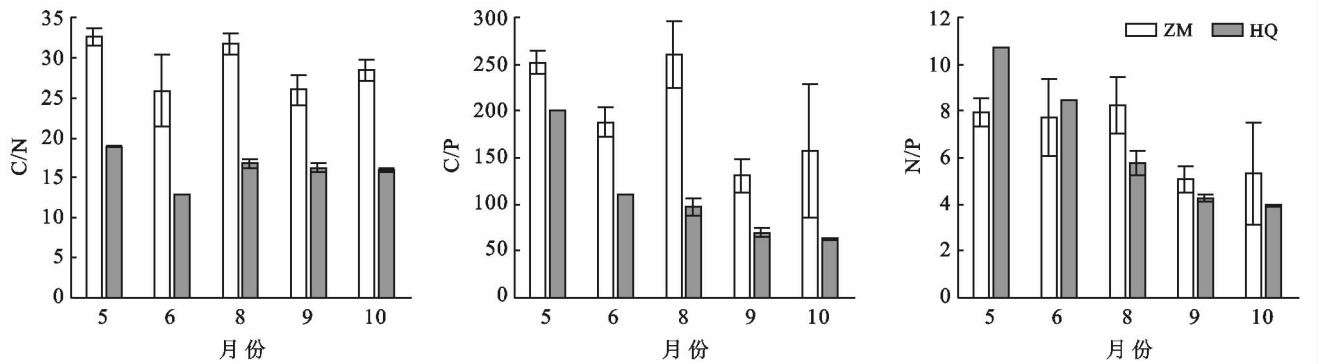


图 5 斑块 B 优势种 C,N,P 计量比特征

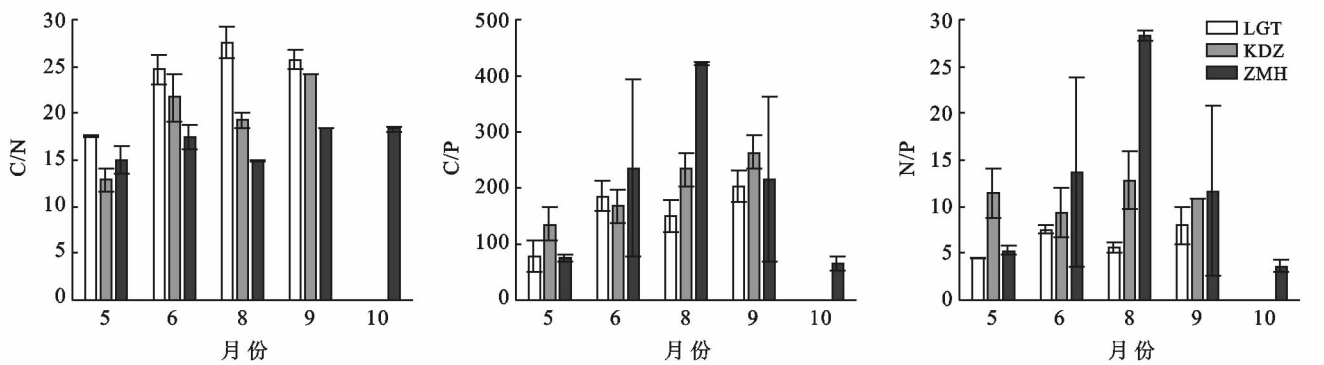


图 6 斑块 C 优势种 C,N,P 计量比特征

2.3 不同斑块优势种植物 C,N,P 化学计量的相关性

斑块 A 优势种植物 C 含量、N 含量、P 含量不相关(图 7);斑块 B 优势种植物 C 含量与 N 含量、P 含量呈极显著负相关,N 含量与 P 含量呈极显著正相关(图 8);斑块 C 优势种植物 C 含量与 N 含量、P 含量显著负相关,N 含量与 P 含量不相关(图 9)。

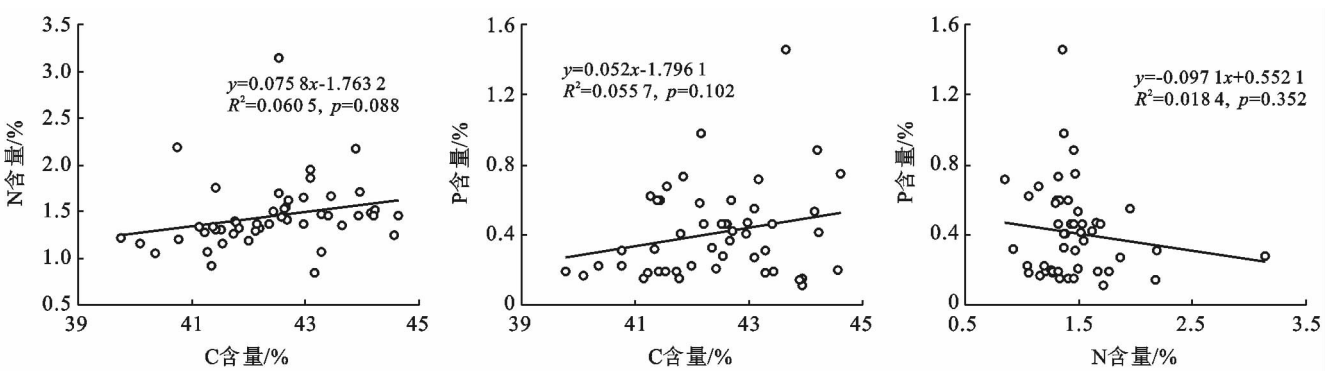


图 7 斑块 A 优势种 C,N,P 之间的关系(n=49)

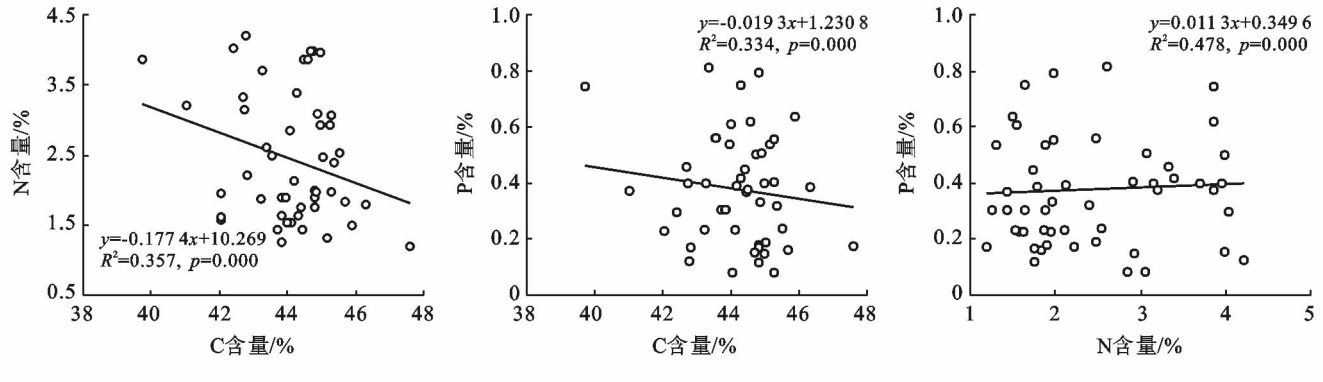


图 8　斑块 B 优势种 C,N,P 之间的关系(n=54)

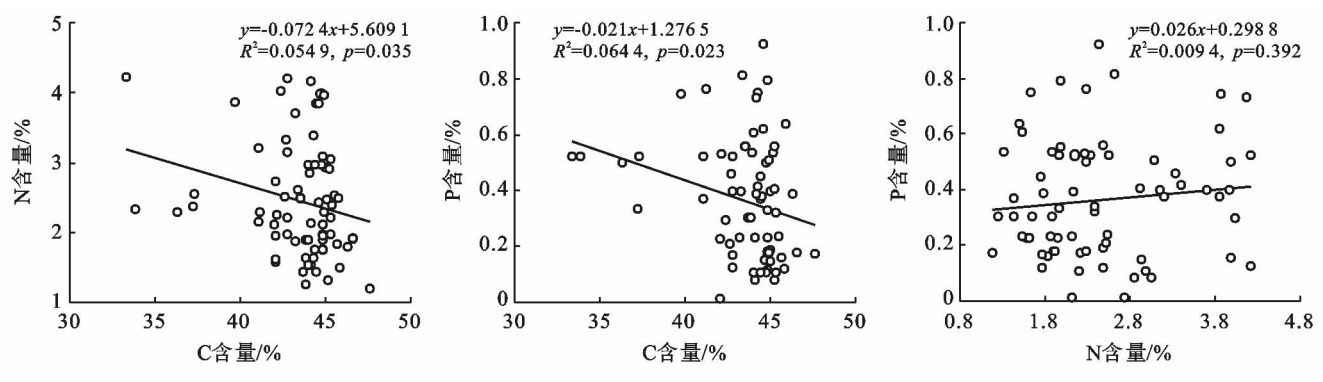


图 9　斑块 C 优势种 C,N,P 之间的关系(n=80)

3　讨 论

N,P 是限制陆地生态系统植物生长的主要元素[2,18-20],也是植物体内容易发生短缺的元素[21],植物体中的 N∶P 作为判断环境对植物生长的养分供应状况和植物的生长速率的重要指标[5],研究区域、生长阶段、植物种类的不同,都会影响 N∶P 临界值的变化[18]。

研究表明,当植物的 N∶P<14 时,群落水平上植物生长主要受 N 限制;N∶P>16 时,植物生长主要受 P 限制;当 14<N∶P<16 时,植物生长受 N 和 P 共同限制[11,22]。本研究中的 5 个优势种的 N∶P 的平均值低于全国平均水平[23]和全球平均水平[24],且只有斑块 C 中的猪毛蒿在生长最旺盛的 8 月 N∶P 大于 16,其余的 4 种植物在不同时段的N∶P均小于 14,说明此研究区内的植物生长过程中总体受 N 含量限制,而生长旺盛期的猪毛蒿主要受 P 含量的限制。因此,综合判断短花针茅荒漠草原较低的 N 含量和 N∶P 是限制群落稳定生长发育的原因之一。

植物叶片 C 含量与 N 含量、P 含量的显著负相关性以及叶 N 含量与 P 含量的正相关性,是高等陆生植物 C,N,P 化学计量的普遍特征之一,许多学者[21,25-26]已对不同地域植被化学计量特征进行研究,并验证了这一规律,但斑块 A 中短花针茅 C,N,P 含量之间无相关性,其原因可能是斑块 A 中不能给优势种群提供植物生长发育的稳定环境,而斑块 B,C 内优势种植物生长情况更稳定[26]。植物叶片 C 含量高则意味着其比叶重大,光合速率较低,生长速率慢,对外界不利环境的防御能力强,而 N,P 含量高,意味着其光合速率较高,生长速率快,对生长所需资源的竞争能力强[27-29]。

因此,群落优势种 C∶N∶P 比值的季节变化,反映不同时段群落的生活史策略。不同斑块的植物在生长季初期体内 C 含量基本都处在整个生长季的较低水平,斑块 A,B 植物的 N,P 含量也基本处于相对较低的水平,斑块 C 植物的 N,P 含量则处于较高水平,说明不同斑块类型在生长季的初期对荒漠草原区的不利的气候变化都具有较高的抵抗能力,与此同时,斑块 C 中的苦豆子、猪毛蒿、老瓜头能更早的适应环境的变化,早于短花针茅、草木樨状黄耆进入的生长繁殖期,占据生长所需的资源。

5—6 月水分的蒸腾速率及消耗开始加快,斑块 A,B 的 C,N,P 含量都不同程度的开始上升,一段时间内保持在一个较高的水平。短花针茅与草木樨状

黄耆开始进入生长繁殖期，斑块 C 优势种 C 含量开始上升，N，P 含量降低，生长速率降低，对资源的竞争能力开始减弱。斑块 A 优势种短花针茅的 C，N 含量在 6—8 月这个时段开始下降，P 含量仍然保持上升趋势，C∶P 不断下降，生长速率减弱，竞争能力减弱；斑块 B 中短花针茅 C 含量则继续保持相对较高的水平，N，P 则开始下降，造成这种原因可能是由于短花针茅与草木樨状黄耆之间相互作用的结果，使斑块 B 此时对外界不良环境仍保持较高的抵御能力，在此过程中，短花针茅 C∶P 上升，草木樨状黄耆 C∶P 下降，说明短花针茅的竞争能力高于草木樨状黄耆；斑块 C 中优势种 C 含量上升、C∶P 基本维持在一个叫高水平，具有较高的竞争能力。因此，处于生长旺盛期的植物群落，其优势物种竞争能力与防御能力对群落的稳定性起着十分重要的作用。

随着植物的成熟和衰老，斑块 A 中短花针茅的 C 含量持续升高，对外界的抵御能力增强，9—10 月 C∶P小幅上升后降到最低，此时短花针茅开始出现返青现象，生长速率略有加快；斑块 B 中草木樨状黄耆 C 含量持续升高，C∶P 下降，在整个生长季草木樨状黄耆都保持着较高的防御能力，而短花针茅由于繁殖策略的改变，9 月 C 含量、C∶P 降到生长季的最低，生长速率减缓，竞争能力下降；斑块 C 中苦豆子和老瓜头在前期以较高的防御能力快速完成生长繁殖，占据生长空间，来适应贫瘠的土壤环境，这与崔东等[30]研究结果一致，并在 9 月完成生长周期，猪毛蒿在整个生长季对环境的适应性都保持在很高的水平，在 8 月生长旺盛期过后，生长速率逐渐减缓。

整体而言，5 种优势种植物的限制性生长主要元素为 N 元素，C，N，P 含量存在一定相关性。以短花针茅为单优优势种的群落采取的是防御性生活史策略。短花针茅＋草木樨状黄耆的群落则表现为竞争性策略。以猪毛蒿＋苦豆子＋老瓜头为优势种的群落，猪毛蒿表现为竞争性策略，苦豆子、老瓜头表现为防御性策略。

4 结 论

(1) 不同类型斑块 C、N、P 含量及 C∶N∶P 化学计量比在生长季内表现出不同的变化趋势，优势种植物的限制性生长主要元素为 N 元素，C，N，P 含量存在一定的相关性。

(2) 不同斑块的优势种 C、N、P 化学计量存在显著的季节差异，使其表现为不同的生活史策略，表明荒漠草原地区水土要素及其时空动态对植被的约束显著，不同优势种对外界因子产出了不同的适应策略。

(3) 荒漠草原干旱的环境不利于枯落物的分解，土壤有机质含量低，N 元素成为该区域植物生长速率和养分供应状况的主要限制因子，进而对不同群落的多样性及稳定性产生影响。

[参 考 文 献]

[1] Reich P B, Tjoelker M G, Machado J L, et al. Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants[J]. Nature, 2006,439(7075):457-461.

[2] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in fresh water, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecology Letters, 2007,10(12):1135-1142.

[3] Vitousek P M, Howarth V R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? [J]. Biogeochemistry, 1991,13(2):87-115.

[4] Vitousek, P M. Nutrient cycling and nutrient use efficiency [J]. The American Naturalist, 1982,119(4):553-572.

[5] 佘淑凤，胡玉福，舒向阳，等. 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[J]. 草业学报，2018,27(4):123-130.

[6] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000,3(6):540-550.

[7] He Jinsheng, Fang Jingyun, Wang Zhiheng, et al. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China[J]. Oecologia, 2006,149(1):115-122.

[8] He Jinsheng, Wang Liang, Flynn D F B, et al. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes[J]. Oecologia, 2008,155(2):301-310.

[9] 牛得草，董晓玉，傅华. 长芒草不同季节碳氮磷生态化学计量特征[J]. 草业科学，2011,28(6):915-920.

[10] 牛得草，李茜，江世高，等. 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[J]. 植物生态学报，2013,37(4):317-325.

[11] 王凯博，上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C，N，P 化学计量特征季节变化. 生态学报，2011,31(17):4985-4991.

[12] Göran I A. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities[J]. Annual Review of Ecology Evolution & Systematics, 2008,39(39):153-170.

[13] Yu Qiang, Chen Quansheng, Elser J J, et al. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning, and stability[J]. Ecology Letters, 2010,13(11):1390-1399.

[14] 赵爱桃，郭思加. 宁夏草地类型、特点及其利用[J]. 中国草地，1996(6):18-22.

[15] 沈彦. 宁夏盐池沙化草地植被动态特征及围封效应研

究[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[16] 郝心敏. 沙漠草原的中草药分布[J]. 内蒙古中医药,1999(3):17-19.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[18] Güsewell S. N∶P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2010, 164(2):243-266.

[19] Craine J M, Jackson R D. Plant nitrogen and phosphorus limitation in 98 North American grassland soils [J]. Plant and Soil, 2010,334(1/2):73-84.

[20] Harpole W S, Ngai J T, Cleland E E, et al. Nutrient co-limitation of primary producer communities [J]. Ecology Letters, 2011,14(9):852-862.

[21] 张珂,何明珠,李新荣,等. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报,2014,34(22):6538-6547.

[22] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns[J]. Advances in Ecological Research, 2000,30(3):1-67.

[23] Han Wenxuan, Fang Jingyun, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across753 terrestrial plant species in China [J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.

[24] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000,408(6812):578-580.

[25] 阎凯,付登高,何峰,等. 滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征[J]. 植物生态学报,2011,35(4):353-361.

[26] 李征,韩琳,刘玉虹,等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C,N,P 化学计量特征[J]. 植物生态学报,2012. 36(10):1054-1061.

[27] Poorter L, Bongers F. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species[J]. Ecology, 2006,87(7):1733-1743.

[28] Shipley B, Lechowicz M J, Wright I, et al. Fundamental trade-offs generating the worldwide leaf economics spectrum[J]. Ecology, 2006,87(3):535-541.

[29] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. Nature, 2004,428(6985):821-827.

[30] 崔东,陈亚宁,李卫红,等. 伊犁河谷苦豆子 C,N,P 含量变化及化学计量特征[J]. 生态学报,2018,38(17):6163-6170.

(上接第 16 页)

[32] 田晓瑞,舒立福,赵凤君,等. 中国主要生态地理区的林火动态特征分析[J]. 林业科学,2015,51(9):71-77.

[33] 李兴华,武文杰,张存厚,等. 气候变化对内蒙古东北部森林草原火灾的影响[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(11):114-119.

[34] Wragg P D, Mielke T, Tilman D. Forbs, grasses, and grassland fire behaviour[J]. Journal of Ecology, 2018, 106(5):1983-2001.

[35] Johnson E A, Miyanishi k. Forest fires Behavior and Ecological Effects [M]// Nelsonn R M. Water Relations of Forest Fuels. Academic Press, 2001.

[36] 李晓炜,赵刚,于秀波,等. 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型[J]. 生态学报,2013,33(4):1219-1229.

[37] Schrier V D G, Barichivich J, Briffa K R, et al. A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901—2009[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013,118(10):4025-4048.