



呼伦贝尔草地植物茎秆和叶片中养分的时间动态与回收

张效境^{1,2} 梁潇洒^{1,2} 马 望¹ 王正文^{1*}

¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 额尔古纳森林草原过渡带生态系统研究站, 沈阳 110016; ²中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 明确植物不同器官中的养分回收状况对探究植物养分利用策略与养分循环有重要意义。以往关于养分回收的研究多聚焦于叶片, 而对于茎秆研究较少。此外, 以往研究对植物生长盛期的叶片取样均在同一时间完成, 忽略了不同物种养分峰值可能存在时间差异, 进而导致养分回收效率被低估。该研究以呼伦贝尔草地22种多年生草本植物为研究对象, 在生长季不同时期进行茎秆和叶片取样, 测定其氮(N)、磷(P)含量, 分析茎秆和叶片两类器官中的养分在生长季内的变化情况与养分回收效率。结果表明: 1)植物N、P含量在生长季内有明显的时间变化规律, 呈现出先增加后减少的趋势; 不同物种峰值对应时间存在显著差异, 大部分物种养分峰值出现于8月下旬。2)茎秆和叶片两类器官养分回收模式存在差异, 植物叶片的N回收效率高于茎秆, 但P回收效率两者差异不明显; 叶片中N、P回收效率显著正相关, 而两者关系在茎秆中不显著。3)枯叶中养分含量是回收效率重要的影响因子, 植物养分回收效率与枯叶期养分含量呈显著负相关关系, 与生长盛期养分含量无关。4)以往研究中不同植物种在生长盛期同一时间取样, 造成茎秆和叶片N、P回收效率被不同程度地低估。该研究重新审视了养分回收研究中的取样策略, 表明依据不同物种在生长季内养分含量峰值出现时间决定生长盛期成熟组织的取样时间, 能够增加养分回收效率计测的准确性和科学性。

关键词 草本植物; 元素含量; 时间动态; 植物器官; 养分回收

张效境, 梁潇洒, 马望, 王正文 (2021). 呼伦贝尔草地植物茎秆和叶片中养分的时间动态与回收. 植物生态学报, 45, 738-748. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0125

Temporal variation and resorption of nutrients in plant culms and leaves in Hulun Buir grassland

ZHANG Xiao-Jing^{1,2}, LIANG Xiao-Sa^{1,2}, MA Wang¹, and WANG Zheng-Wen^{1*}

¹Erguna Forest-Steppe Ecotone Research Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; and ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Nutrient resorption in different organs of plants is important for plant nutrient use strategies and elemental biogeochemical cycles. Previous researches on nutrient resorption have focused on leaves, but neglected culms. Additionally, leaves of different species have been collected at the same time during the peak growth stage in previous studies, ignoring the different peak times of nutrient content of different species, which leads to the underestimation of nutrient resorption efficiency.

Methods In order to explore the seasonal variation of nutrients and nutrient resorption efficiency in the culms and leaves of herbaceous plants, 22 common plants in Hulun Buir grassland were chosen as the research objects to determine the temporal dynamics of nutrient content during the growing season, and the resorption efficiency of nitrogen (N) and phosphorus (P) in plant culms and leaves.

Important findings The content of N, P in plants had obvious temporal dynamics during the growing season, showing an increasing trend first and then a decreasing trend. For most of the 22 species, the maximum content occurred in the middle and late August, but the peak time differed among different species. The resorption efficiency of N in leaves was higher than in culms, but that of P did not differ between leaves and culms. Nutrient resorption efficiency of plants was closely related to the nutrient content at the senescence stage, but not to that at

收稿日期Received: 2021-04-06 接受日期Accepted: 2021-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(31870422). Supported by the National Natural Science Foundation of China (31870422).

* 通信作者Corresponding author (wangzw@iae.ac.cn)

the growth stage. In previous studies, different plants were sampled at the same time during the growth stage, which led to underestimation of N and P resorption efficiency of culms and leaves. This study re-examined the sampling strategy in nutrient resorption studies, and showed that the sampling time of mature tissues in the growth stage could be determined according to the peak nutrient content time of different species.

Key words herbaceous; element content; temporal dynamics; plant organ; nutrient resorption

Zhang XJ, Liang XS, Ma W, Wang ZW (2021). Temporal variation and resorption of nutrients in plant culms and leaves in Hulun Buir grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 738-748. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0125

氮(N)、磷(P)在植物生长发育过程中起关键作用(Han *et al.*, 2005), 是陆地生态系统主要的限制性营养元素。植物中N、P养分主要源于两部分, 其一是直接吸收土壤中的有效矿质养分, 其二是养分回收。养分回收指养分从衰老的植物组织转移到新生组织或贮藏组织中再利用的过程(Killingbeck, 1986)。研究表明陆地植物叶片平均约62.1%的N和64.9%的P被回收至多年生组织或者器官中(Vergutz *et al.*, 2012), 因此养分回收不仅能降低植物对土壤养分供给的依赖(Aerts & Chapin III, 1999), 还能影响凋落物分解、养分循环等生态过程。衡量植物养分回收能力的指标有养分回收效率(叶片脱落前回收养分的比例)和养分回收能力(衰老过程中养分降低的水平)(Killingbeck, 1996)。在一个完整的生长周期内, 植物的N、P含量并不是一成不变的(Chapin III & Kedrowski, 1983; Estiarte & Peñuelas, 2015), 随着生育阶段的变化, 植物会调整养分的吸收及不同器官内养分的分配, 表现出明显的时间动态。由于不同植物养分含量达到峰值的时间不同, 传统的养分回收的测定方式可能导致对植物养分回收效率的估计存在偏差。

温带草地构成了我国草地的主体, 不仅发挥着重要的经济效益和社会效益(石岳等, 2013), 还是我国北方重要的生态屏障(沈海花等, 2016; 潘庆民等, 2018), 在生物多样性维持、碳固持等方面发挥着不可或缺的作用(方精云等, 2010)。养分是温带草地生态系统生产力重要的限制因子, 目前已有一些研究对温带草地植物的养分回收进行了探究(Huang *et al.*, 2012; Lü *et al.*, 2012), 然而这些研究只关注少数几个优势物种, 且研究对象集中于植物叶片。次有种及从属种在维持植物群落稳定的过程中发挥着重要作用, 尤其是当群落遭受环境胁迫时(Mariotte *et al.*, 2015), 而草地植物茎秆是植物体的重要组成部分(任海彦等, 2009), 在结构与功能上与叶片存在显著差异, 因此分析不同植物茎秆和叶片的养分回

收模式有助于我们进一步理解草地植物的生存与竞争策略(Eckstein *et al.*, 1999; Yuan & Chen, 2015), 同时也有助于生态系统养分循环过程与机制理论体系的优化和完善(McGroddy *et al.*, 2004; Vergutz *et al.*, 2012)。

本研究依托于中国科学院沈阳应用生态研究所额尔古纳森林草原过渡带生态系统研究站, 针对呼伦贝尔草甸草原22种常见植物, 在生长盛期与枯叶期进行多次取样, 分析该地区植物茎秆和叶片的N、P含量的季节动态与回收效率, 旨在探究植物成熟组织取样时间对回收效率计算的影响和茎秆与叶片养分回收模式的差异, 为养分回收研究方法和养分循环模型的优化完善提供实验依据和理论支持。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究地点位于内蒙古自治区额尔古纳市黑山头镇中国科学院额尔古纳森林草原过渡带生态系统研究站(50.16° N, 114.40° E, 海拔531 m)。该地区属于温带大陆性气候, 年平均气温-2.4 °C, 年降水量362 mm, 降水主要集中在6-8月, 约占全年降水量的66%。土壤类型为黑钙土, 表层土壤(0-10 cm)总氮、有效磷、有机质含量分别为1.8、0.45、18.9 mg·g⁻¹, 土壤pH为7.0-8.0。植被类型为典型草原, 优势物种包括羊草(*Leymus chinensis*)、狼针草(*Stipa baicalensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等。

1.2 样品采集、处理及测定

样品采集时间: 在植物生长盛期(7-9月)设置5个时间采集植物样品, 2020年7月31日第1次采样, 8月10日第2次采样, 8月20日第3次采样, 8月30日第4次采样, 9月9日第5次采样。枯叶期则于10月10日采集衰老叶片。

样品采集方法: 设置6块10 m × 10 m固定样方,

每个物种在固定样方内选取10株以上长势良好植株,采集地上部分,形成混合样。本研究共采集22种呼伦贝尔草原常见种,具体采样物种名称详见表1。

样品处理及测定方法:采集样品装入信封中,65℃下烘干48 h后分离茎、叶,经球磨机(Retsch MM 400, Retsch, Haan, Germany)研磨后用于N、P含量测定。使用C/N元素分析(Vario Micro Cube, Langensfeld, Germany)测定植物全N含量。取适量样品用H₂SO₄-H₂O₂消煮法进行消煮,使用全自动间断化学分析仪(Cleverchem 200+, DeChem-Tech GmbH, Hamburg, Germany)测定植物全P含量。

1.3 数据处理

植物养分回收效率为考虑质量损失校正因子(MLCF)的衰老组织和成熟组织相比养分含量下降的百分比(Kazakou *et al.*, 2007; Vergutz *et al.*, 2012; Yuan & Chen, 2015),具体公式如下:

$$NuRE = \left(1 - \frac{Nut_{senesced}}{Nut_{green}} MLCF \right) \times 100\%$$

式中, Nut_{green} 指生长盛期叶片最高养分含量, $Nut_{senesced}$

衰老期叶片养分含量,MLCF是质量损失校正因子,指衰老叶片干质量与成熟叶片干质量的比值(Vergutz *et al.*, 2012)。本研究通过对植物生长盛期多次取样,获取养分含量最大值作为成熟叶片的养分含量计算养分回收效率,并使用禾草和非禾本科草本植物MLCF对不同类群植物的回收效率进行校正(Vergutz *et al.*, 2012)。植物茎秆的养分回收效率计算与叶片相同。

植物N、P含量和养分回收效率的计算采用质量含量。使用Shapiro-Wilk test进行正态性检验,对不符合正态分布数据进行对数转化。为探究植物茎秆和叶片中养分含量的季节变化,使用普通最小二乘法(OLS)进行一元二次方程拟合,取样时间为自变量,N、P含量为因变量。为探究植物N、P回收效率间的关系,对生长盛期和枯叶期养分含量与养分回收效率进行线性拟合。为探究生长盛期和枯叶期养分含量在不同器官之间的差异以及同一器官中养分含量的种间差异,对22种植物叶片与11种植物茎秆养分含量进行多重比较,方差齐性使用Duncan检验,非齐性使用Tamhane's T2法,显著性水平为 $p < 0.05$,

表1 呼伦贝尔地区取样物种名、功能类群与茎秆和叶片的区分

Table 1 Sampling species name, functional groups of plants in Hulun Buir area and whether culm and leaf were distinguished or not

| 物种 Species | 生活型 Life form | 区分茎秆和叶片 Distinguishing culm and leaf |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 羊草 <i>Leymus chinensis</i> | 多年生禾草 Perennial grasses | √ |
| 狼针草 <i>Stipa baicalensis</i> | 多年生禾草 Perennial grasses | × |
| 糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i> | 多年生禾草 Perennial grasses | √ |
| 落草 <i>Koeleria macrantha</i> | 多年生禾草 Perennial grasses | × |
| 柄状薹草 <i>Carex pediformis</i> | 多年生莎草 Perennial sedges | × |
| 寸草 <i>Carex duriuscula</i> | 多年生莎草 Perennial sedges | × |
| 广布野豌豆 <i>Vicia cracca</i> | 多年生豆科 Perennial legumes | √ |
| 披针叶野决明 <i>Thermopsis lanceolata</i> | 多年生豆科 Perennial legumes | √ |
| 狭叶沙参 <i>Adenophora gmelinii</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | √ |
| 龙蒿 <i>Artemisia dracunculus</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | √ |
| 阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | √ |
| 麻花头 <i>Klasea centauroides</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | √ |
| 裂叶蒿 <i>Artemisia tanacetifolia</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | × |
| 冷蒿 <i>Artemisia frigida</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | √ |
| 达乌里苣荬 <i>Cymbaria daurica</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | √ |
| 瓣蕊唐松草 <i>Thalictrum petaloideum</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | √ |
| 白头翁 <i>Pulsatilla chinensis</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | × |
| 二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | × |
| 星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | × |
| 菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | × |
| 野鸢尾 <i>Iris dichotoma</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | × |
| 囊花鸢尾 <i>Iris ventricosa</i> | 多年生杂草 Perennial forbs | × |

√, 区分茎秆和叶片; ×, 不区分茎秆和叶片。

√, distinguishing culm and leaf; ×, not distinguishing culm and leaf.

对部分数据进行对数转换以满足正态分布。为探究生长盛期同一时间采集植物成熟叶片对养分回收效率的估测偏差,使用配对 t 检验对基于生长盛期养分含量最大值计算的回收效率与基于8月20日养分含量计算的回收效率进行比较,其中数据均符合正态分布。为探究植物茎秆与叶片N、P回收效率之间的差异,对11种易于区分茎叶的植物不同器官间同种元素和同一器官中不同元素的养分回收效率进行配对 t 检验,数据亦符合正态分布。使用SPSS 19.0进行统计分析,使用R 4.0.5绘图。

2 结果和分析

2.1 生长季植物养分含量及其时间动态

对呼伦贝尔草原22种常见草本植物的茎秆和叶片中N、P含量的测定表明,生长盛期成熟叶片的N、P含量均显著高于茎秆的N、P含量($p < 0.05$),但在枯叶期,植物叶片N含量显著高于茎秆($p < 0.05$),P含量则差异不显著(表2)。生长盛期叶片N含量最大值为12.4–40.3 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 $(24.1 \pm 6.8) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,茎秆中N含量为6.65–18.94 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 $(12.46 \pm 3.94) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。叶片P含量最大值为0.77–3.65 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 $(2.07 \pm 0.71) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;茎秆中P含量为0.66–1.72 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 $(1.18 \pm 0.31) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。枯叶期,植物茎秆和叶片N含量分别为4.13–11.04和5.12–21.60 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 (12.34 ± 4.96) 和 $(7.32 \pm 2.55) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;P含量为0.23–1.52和0.15–0.99 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 (0.73 ± 0.39) 和 $(0.40 \pm 0.25) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

整个生长季中植物不同器官的N、P含量表现出先增加后降低的趋势,不同采样时间植物养分含量存在显著差异($p < 0.05$),但部分物种养分含量在时间上变化不明显。其中,达乌里苳芭(*Cymbaria daurica*)叶片与麻花头(*Klasea centauroides*)茎秆中N含量在生长季没有明显的变化趋势(图1),而麻花头与冷蒿茎秆P含量随时间变化不显著(图2)。尽管大

部分物种养分含量总体变化趋势一致,但不同物种养分含量的最大值出现在不同的采样时间,如麻花头叶片N含量比白头翁(*Pulsatilla chinensis*)早约30天达到峰值(图3A);隐子草茎秆N含量比龙蒿(*Artemisia dracuncululus*)早约30天达到峰值(图3B);披针叶野决明(*Thermopsis lanceolata*)叶片P含量则比达乌里苳芭早约40天达到峰值(图3C);龙蒿茎秆P含量比冷蒿早约40天达到峰值(图3D)。部分物种不同器官养分含量的变化趋势存在差异,如糙隐子草叶片中N、P含量随时间表现出先增加后减少的趋势,但在茎秆中却表现出随时间逐渐下降的趋势。

2.2 植物茎秆和叶片的养分回收效率

在植物茎秆与叶片中不同物种N、P回收效率存在显著差异,22种植物的茎秆和叶片的N回收效率分别为51.23%–68.29%和49.50%–83.24%,平均值分别为61.65%和66.75%;P的回收效率分别为63.04%–92.67%和61.69%–97.15%,平均值分别为78.33%和77.26% (附录I)。对11种易于区分茎叶物种不同器官中N、P回收效率进行比较发现,叶片N回收效率显著高于茎秆N回收效率($p < 0.05$),而P回收效率在两者间差异不显著($p = 0.189$);茎秆和叶片中的N回收效率均显著低于P回收效率($p < 0.05$),其中茎秆的N回收效率为P回收效率的79.28%,叶片的N回收效率约为P回收效率的86.59% (表3)。植物叶片中P回收效率与N回收效率之间呈现显著正相关关系($p < 0.05$),即N回收效率高的物种,其P回收效率也较高,但在茎秆中两者关系不显著(图4)。

2.3 生长盛期、枯叶期植物养分含量与回收效率间的关系

在植物叶片与茎秆中,生长盛期养分含量与枯叶期养分含量之间有显著正相关关系($p < 0.05$)。同时在生长盛期,植物茎秆和叶片中N、P含量之间均有显著的正相关关系($p < 0.05$),但在枯叶期仅叶片N、P含量正相关,茎秆N、P含量则不相关(附录II)。

表2 生长盛期与枯叶期茎秆和叶片养分含量(平均值±标准差)

Table 2 Nitrogen and phosphorus contents of culm and leaf at the growth and senescence stages (mean \pm SD)

| | 器官 Organ | 样本量 n | 氮含量 Nitrogen content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | 磷含量 Phosphorus content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) |
|----------------------|----------|---------|--|--|
| 生长盛期 Growth stage | 叶片 Leaf | 22 | 24.14 ± 6.69^a | 2.07 ± 0.71^a |
| | 茎秆 Culm | 11 | 12.46 ± 3.94^b | 1.18 ± 0.31^b |
| 枯叶期 Senescence stage | 叶片 Leaf | 22 | 12.34 ± 4.96^b | 0.73 ± 0.39^c |
| | 茎秆 Culm | 11 | 7.32 ± 2.55^c | 0.40 ± 0.25^c |

不同小写字母表示该指标差异显著($p < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

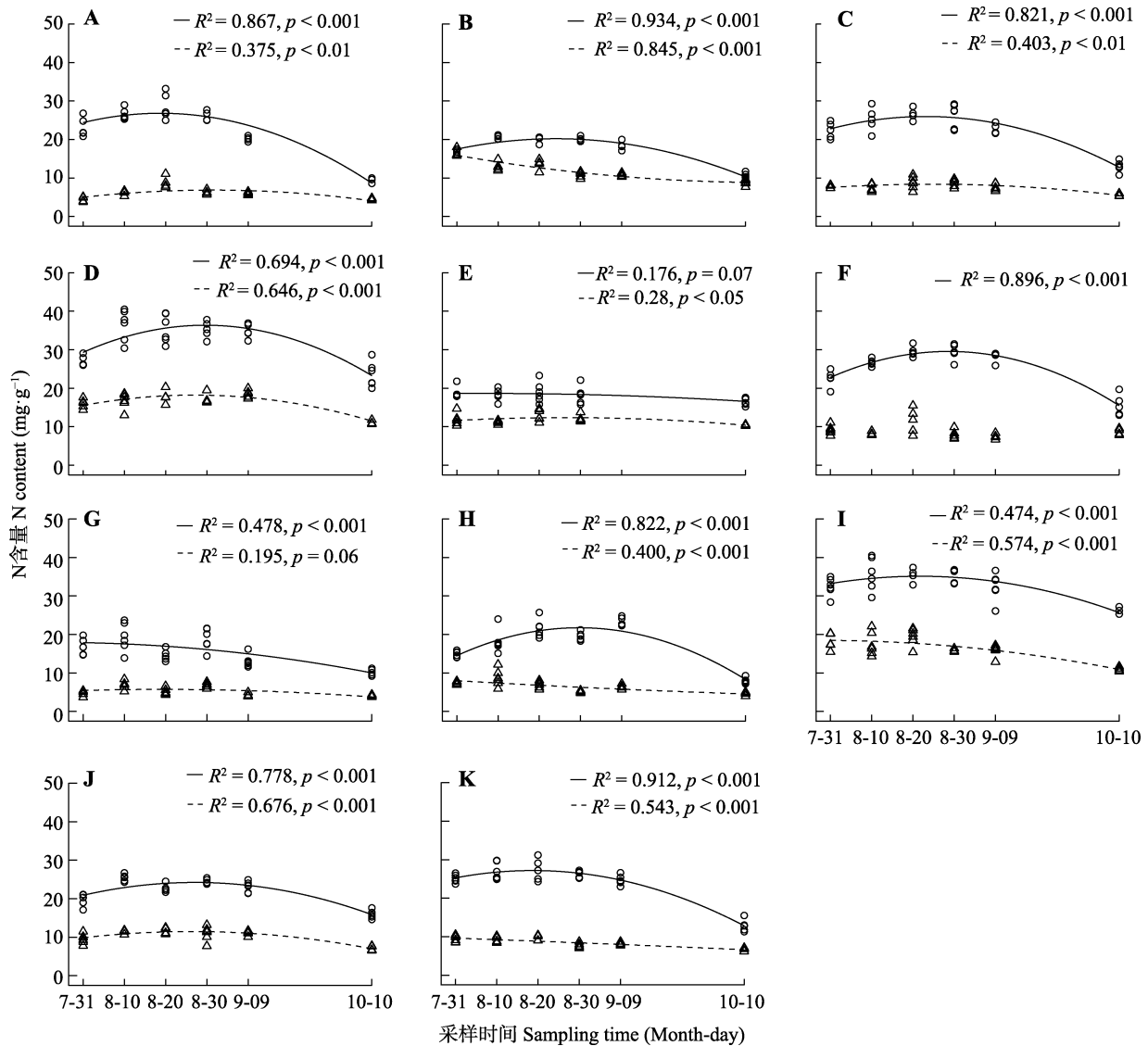


图1 植物茎秆和叶片氮(N)含量的时间动态。A, 龙蒿。B, 糙隐子草。C, 狭叶沙参。D, 广布野豌豆。E, 达乌里苳芭。F, 阿尔泰狗娃花。G, 麻花头。H, 羊草。I, 披针叶野决明。J, 冷蒿。K, 瓣蕊唐松草。圆形代表植物叶片; 三角形代表植物茎秆。实线表示叶片N含量与采样时间相关($p < 0.05$); 虚线表示茎秆中N含量与采样时间相关($p < 0.05$)。

Fig. 1 Temporal variation of nitrogen (N) content in leaves and culms. A, *Artemisia dracuncululus*. B, *Cleistogenes squarrosa*. C, *Adenophora gmelinii*. D, *Vicia cracca*. E, *Cymbaria daurica*. F, *Aster altaicus*. G, *Klasea centauroides*. H, *Leymus chinensis*. I, *Thermopsis lanceolata*. J, *Artemisia frigida*. K, *Thalictrum petaloideum*. Circle, leaves; triangle, culms. The solid line indicates that leaf N content is related to sampling time ($p < 0.05$); the dotted line indicates that culm N content is related to sampling time ($p < 0.05$).

在对养分回收效率与生长盛期、枯叶期养分含量相关关系分析中发现, 茎秆和叶片的养分回收效率与生长盛期植物养分含量均没有明显的相关关系, 而与枯叶期养分含量表现出较为显著的负相关关系($p < 0.05$), 唯一例外是茎秆的N回收效率与枯叶期N含量不相关(图5)。

3 讨论

3.1 养分时间动态与回收效率

叶片养分含量的变化由植物遗传因素、物候期

以及外界环境(如降水淋溶等)共同决定(刘佳庆等, 2015), 植物在生活史不同阶段由于生理过程不同导致养分含量呈现出明显的时间动态。本研究中22种草本植物叶片N、P含量在生长季节表现出先增加后减少的趋势, 这与孙书存和陈灵芝(2001)对辽东栎(*Quercus liaotungensis*)与刘佳庆等(2015)对3种木本植物N、P含量变化趋势的研究结果一致。生长季前期, 细胞分裂需要大量的蛋白质、核酸, 植物从土壤中吸收大量N、P, 导致植物组织N、P含量逐渐增加, 生长季后期, 细胞凋亡过程中蛋白质、核酸水解

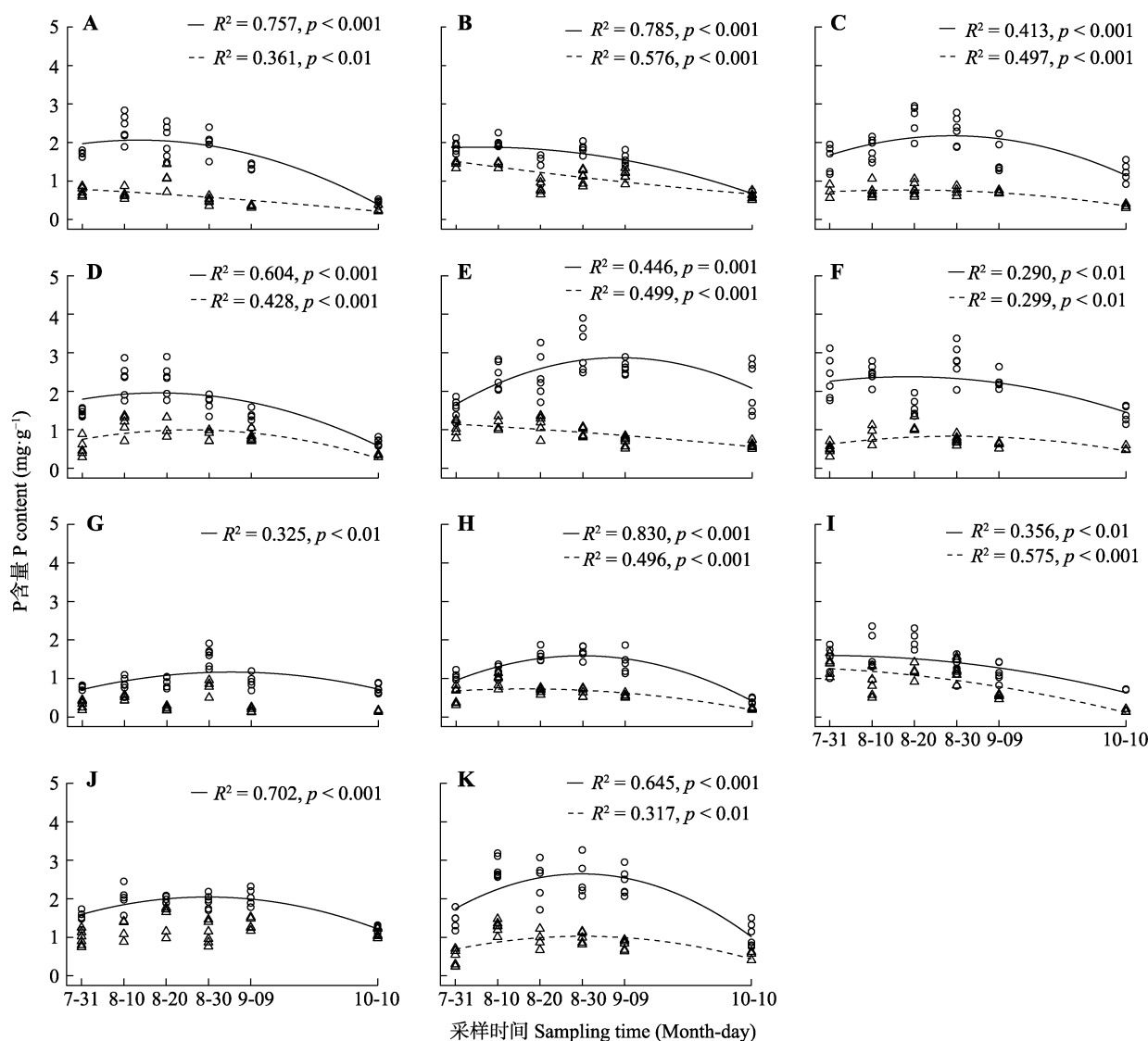


图2 植物茎秆和叶片磷(P)含量的时间动态。A, 龙蒿。B, 糙隐子草。C, 狭叶沙参。D, 广布野豌豆。E, 达乌里苳芭。F, 阿尔泰狗娃花。G, 麻花头。H, 羊草。I, 披针叶野决明。J, 冷蒿。K, 瓣蕊唐松草。圆形代表植物叶片; 三角形代表植物茎秆。实线表示叶片P含量与采样时间相关性显著($p < 0.05$); 虚线表示茎秆中P含量与采样时间相关性显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 Temporal variation of phosphorus (P) content in leaves and culms. A, *Artemisia dracunculus*. B, *Cleistogenes squarrosa*. C, *Adenophora gmelinii*. D, *Vicia cracca*. E, *Cymbaria daurica*. F, *Aster altaicus*. G, *Klasea centauroides*. H, *Leymus chinensis*. I, *Thermopsis lanceolata*. J, *Artemisia frigida*. K, *Thalictrum petaloideum*. Circle, leaves; triangle, culms. The solid line indicates that leaf P content is related to sampling time ($p < 0.05$); The dotted line indicates that culm P content is related to sampling time ($p < 0.05$).

转化为氨基酸与无机磷, 经回收过程从衰老细胞中移出, 导致植物组织N、P含量下降(孙书存和陈灵芝, 2001; 刘佳庆等, 2015), 这可能是导致养分含量先增加后减少的原因。大部分植物茎秆中N、P含量时间动态与叶片类似, 但在研究中发现部分物种, 如糙隐子草、羊草等, 茎秆中养分含量在生长季中呈现出逐渐降低的趋势, 这表明部分物种的茎秆和叶片对养分的利用存在差异。

养分回收效率的计算基于生长盛期和枯叶期植物养分含量。本研究发现, 植物N、P含量在不同取

样时间存在显著差异($p < 0.05$), 且物种N、P含量最大值出现在不同的采样时间, 因此, 如果对不同物种生长盛期叶片的取样均在同一时间完成, 可能导致采集到的植物叶片N、P含量低于养分含量的实际最大值, 从而造成对养分回收效率的低估。在本研究中, 与基于成熟叶片养分含量的生长季最大值所计算的回收效率相比, 基于8月20日的成熟叶片养分含量所计算的茎秆和叶片N回收效率分别被低估2.93% ($p < 0.05$)和2.06% ($p < 0.05$), 而P回收效率则分别被低估7.39% ($p = 0.065$)和5.94% ($p = 0.073$)

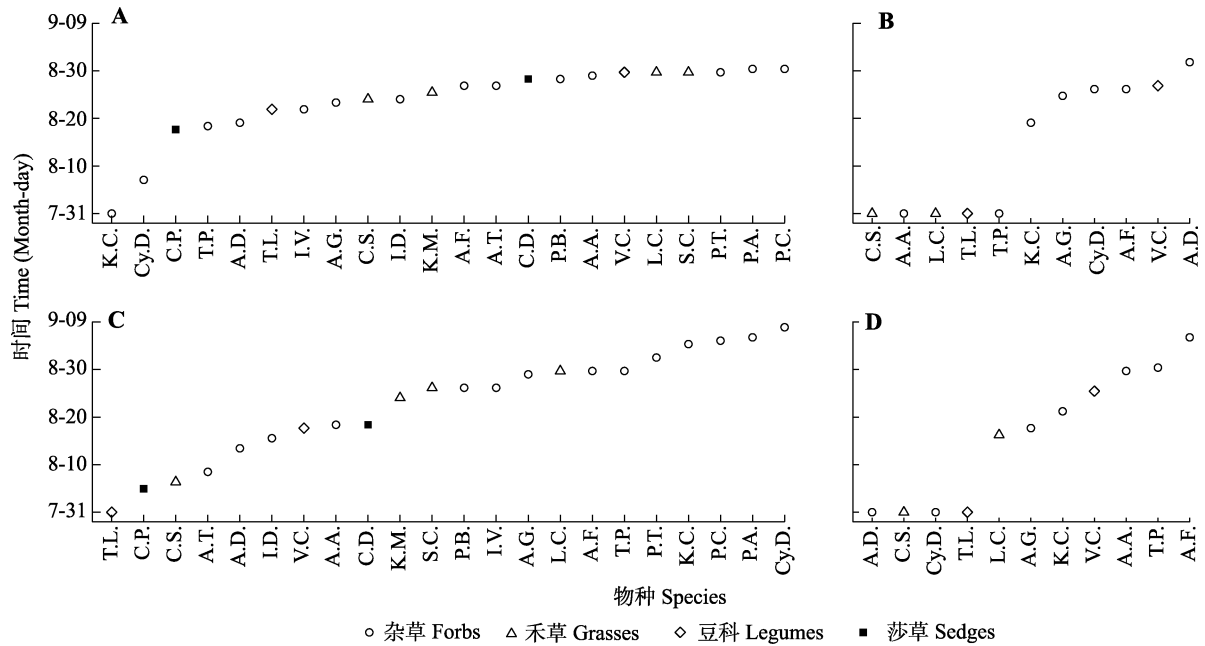


图3 植物养分含量达到峰值的时间。A, 叶片氮(N)含量。B, 茎秆氮(N)含量。C, 叶片磷(P)含量。D, 茎秆磷(P)含量。A.A., 阿尔泰狗娃花; A.D., 龙蒿; A.F., 冷蒿; A.G., 狭叶沙参; A.T., 裂叶蒿; C.D., 寸草; C.P., 柄状藁草; C.S., 糙隐子草; Cy.D., 达乌里苣荬; I.D., 野鸢尾; I.V., 囊花鸢尾; K.C., 麻花头; K.M., 落草; L.C., 羊草; P.A., 星毛委陵菜; P.B., 二裂委陵菜; P.C., 白头翁; P.T., 菊叶委陵菜; S.B., 狼针草; T.L., 披针叶野决明; T.P., 瓣蕊唐松草; V.C., 广布野豌豆。

Fig. 3 Time of the highest nutrient content in different plant species. A, Nitrogen (N) content of leaves. B, N content of culms. C, Phosphorus (P) content of leaves. D, P content of culms. A.A., *Aster altaicus*; A.D., *Artemisia dracunculus*; A.F., *Artemisia frigida*; A.G., *Adenophora gmelinii*; A.T., *Artemisia tanacetifolia*; C.D., *Carex duriuscula*; C.P., *Carex pediformis*; C.S., *Cleistogenes squarrosa*; Cy.D., *Cymbaria daurica*; I.D., *Iris dichotoma*; I.V., *Iris ventricosa*; K.C., *Klasea centauroides*; K.M., *Koeleria macrantha*; L.C., *Leymus chinensis*; P.A., *Potentilla acaulis*; P.B., *Potentilla bifurca*; P.C., *Pulsatilla chinensis*; P.T., *Potentilla tanacetifolia*; S.B., *Stipa baicalensis*; T.L., *Thermopsis lanceolata*; T.P., *Thalictrum petaloideum*; V.C., *Vicia cracca*.

表3 茎秆和叶片氮(N)、磷(P)回收效率的差异(平均值±标准差)
Table 3 Differences of nitrogen (N) and phosphorus (P) resorption efficiency in plant culm and leaf (mean ± SD)

| 器官 Organ | 样本量 n | N回收效率 N resorption efficiency (%) | P回收效率 P resorption efficiency (%) | 元素间差异 Differences between elements (p) |
|---|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 叶片 Leaf | 11 | 65.19 ± 8.21 | 75.58 ± 7.22 | p < 0.05 |
| 茎秆 Culm | 11 | 61.65 ± 4.24 | 78.33 ± 9.90 | p < 0.05 |
| 器官间差异 Differences between organs (p) | — | p < 0.05 | p = 0.189 | — |

表中p为配对t检验结果。
In the table, p are from paired t-tests.

(表4)。养分回收效率的计算不仅需要考虑衰老叶片生物量减少、叶面积减小与叶片淋溶等(Killingberk, 1984; van Heerwaarden *et al.*, 2003), 还需根据不同种植物相应养分含量的时间动态, 选择达到峰值时的养分含量作为生长盛期养分含量来计算养分回收效率, 因此, 针对不同物种选择合适的取样时间, 才能较为准确地获得植物的养分回收效率。

3.2 不同器官的养分回收效率

对于陆地植物而言, 养分回收是叶片凋亡过程中重要的生理过程, 一般认为约50%的养分可以通过回收途径被植物再利用(Aerts, 1996)。本研究中植

物叶片N、P回收效率分别为66.75%、77.26%, 高于Vergutz等(2012)基于全球陆地植物叶片的研究结果(62.1%、64.9%)。植物茎秆N、P回收效率为61.65%、78.33%, 与Freschet等(2010)对亚北极区38种维管束植物茎的研究(N, 48%; P, 56%)相比, N回收效率与P回收效率均更高。养分回收效率的比值能够反映植物养分状况和限制的梯度(Reed *et al.*, 2012), NRE/PRE > 1表示N限制大于P限制, 而NRE/PRE < 1则表示P限制大于N限制(Du *et al.*, 2020), 本研究茎秆和叶片中N回收效率与P回收效率的比值均小于1, 这与Du等(2020)对草地生态系统的研究结果

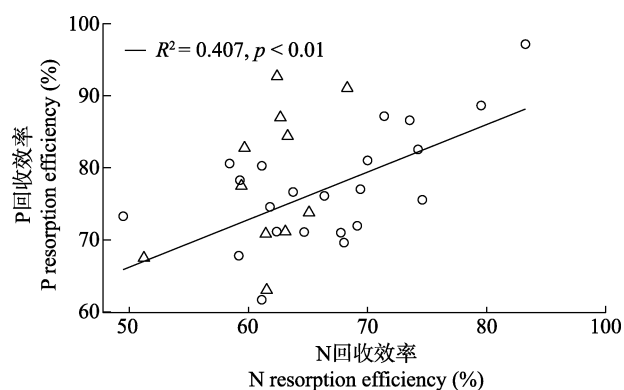


图4 氮(N)、磷(P)回收效率的相关关系。圆形代表植物叶片; 三角形代表植物茎秆。实线表示叶片N回收效率与P回收效率相关($p < 0.05$)。

Fig. 4 Correlations between nitrogen (N) and phosphorus (P) resorption efficiency. Circle, leaves; triangle, culms. The solid line indicates that leaf N resorption efficiency is related to P resorption efficiency ($p < 0.05$).

一致, 表明呼伦贝尔地区草本植物受P限制比N限制更严重。但是, 通过元素的化学计量比来反映养分限制状况, 即 $N:P < 14$ 通常表示N限制, $N:P > 16$

则表示P限制(Koerselman & Meuleman, 1996), Wang等(2018)的研究结果表明, 呼伦贝尔地区为N限制($N:P$ 约为12.5), 因此, 依据养分限制状况无法很好地解释该地区N、P回收效率间的差异。呼伦贝尔草地处于半干旱区, 较低降水量减少了有效氮的淋溶但会减缓P的释放(He *et al.*, 2008), 加之水分有效性对植物P吸收和转移的限制作用大于N (Lambers *et al.*, 2008), 同时由于土壤养分状况也会影响植物养分回收效率(Yuan & Chen, 2009), 而我国大部分地区土壤P含量处在较低水平, 植物P含量受土壤P含量的影响整体偏低(Han *et al.*, 2005), 使得植物获取的N相对充足而P相对匮乏, 导致该地区植物P回收效率高而N回收效率较低。对11种易于区分茎叶的多年生草本植物不同器官回收效率的对比, 发现茎秆的N回收效率显著低于叶片中的N回收效率($p < 0.05$), 而P回收效率在茎秆与叶片间差异不显著, 这与Freschet等(2010)、Brant和Chen (2015)的研究结果一致。养分回收过程中, N由蛋白质水解为氨

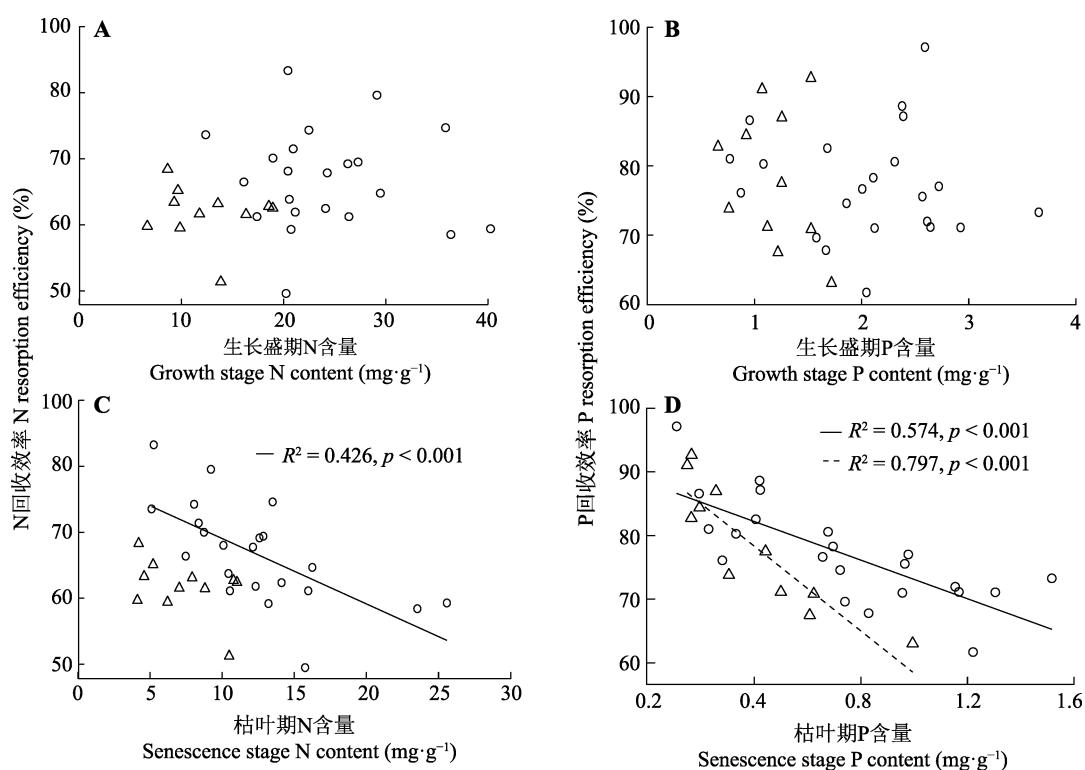


图5 植物生长盛期与枯叶期氮(N)、磷(P)含量与回收效率之间的关系。A, 生长盛期N含量与N回收效率。B, 生长盛期P含量与P回收效率。C, 枯叶期N含量与N回收效率。D, 枯叶期P含量与P回收效率。圆形代表植物叶片; 三角形代表植物茎秆。实线表示叶片养分回收效率与养分含量相关($p < 0.05$); 虚线表示茎秆养分回收效率与养分含量相关($p < 0.05$)。

Fig. 5 Correlations between nitrogen (N) and phosphorus (P) contents at the growth and senescence stages and nutrient resorption efficiency. A, N content and N resorption efficiency at the growth stage. B, P content and P resorption efficiency at the growth stage. C, N content and N resorption efficiency at the senescence stage. D, P content and P resorption efficiency at the senescence stage. Circle, leaves; triangle, culms. The solid line indicates that leaf resorption efficiency is related to nutrient content ($p < 0.05$); the dotted line indicates that culm resorption efficiency is related to nutrient content ($p < 0.05$).

表4 不同计算方法获得的呼伦贝尔草地植物茎秆和叶片氮(N)、磷(P)回收效率的差异状况(平均值±标准差)
Table 4 Difference in nitrogen (N) and phosphorus (P) resorption efficiency of Hulun Buir grassland plant culms and leaves obtained by different calculation methods (mean ± SD)

| 器官 Organ | 养分 Nutrient | 样本量 <i>n</i> | 回收效率 Resorption efficiency (%) | | 低估值 Underestimation value (%) |
|-------------|----------------|--------------|---|---|----------------------------------|
| | | | 基于养分最大含量 Based on maximum nutrient content | 基于8月20日养分含量 Based on nutrient content of August 20 | |
| 叶片 Leaf | N | 22 | 66.75 ± 7.70 | 64.69 ± 8.80 | 2.06 ± 3.31 |
| | P | 22 | 77.26 ± 7.97 | 71.32 ± 14.32 | 5.94 ± 9.35 |
| 茎秆 Culm | N | 11 | 61.65 ± 4.24 | 58.72 ± 6.55 | 2.93 ± 4.85 |
| | P | 11 | 78.33 ± 9.90 | 70.93 ± 15.33 | 7.39 ± 11.81 |

低估值中数值加粗表示配对 t 检验差异显著($p < 0.05$)。
Values in bold fonts mean significant underestimation values based on paired t -tests ($p < 0.05$).

氨基酸转移到植物多年生器官, P则由核酸、磷脂转化为无机磷从衰老器官中移出 (Chapin III & Kedrowski, 1983; 邢雪荣等, 2000), 元素的转化机制不同和器官的组成结构与功能差异共同作用可能会导致植物器官间养分回收模式存在差异。植物叶片N可以划分为代谢组分与结构组分(Charlesedwards *et al.*, 1987), 并且构成叶片N库的绝大部分化合物为蛋白质。Yasumura等(2006)对不同蛋白质组分季节变化的探究中发现, 占据夏季叶片大部分N的代谢蛋白有较高的回收效率, 能够充分解释叶片较高的回收效率, 而结构蛋白仅代表叶片N较小部分且对回收的贡献不大。尽管植物茎秆和叶片蛋白质N在总N库中所占比例相近 (Chapin III & Kedrowski, 1983), 但由于叶片具有更多的代谢蛋白, 可能会导致其N回收效率高于茎秆。无机P、核酸P和磷脂P在植物茎秆和叶片的P库中占据极高的比重(Chapin III & Kedrowski, 1983; Tsujii *et al.*, 2017), 尽管三者茎秆和叶片中所占比例不同, 但因其均具有较高的回收效率, 可能会导致茎秆和叶片之间P回收效率没有明显差异。本研究表明呼伦贝尔草原植物茎秆和叶片对N、P均具有较高的回收效率, 但不同器官的养分回收模式也存在差异, 在以后的研究中需要进一步加强植物不同器官对N、P以及其他元素回收模式的探究。

3.3 植物养分状况与养分回收效率

植物生长盛期养分状况与养分回收效率之间的关系一直饱受争议, 通常认为贫瘠生境中植物具有更高的养分回收效率(Aerts & Chapin III, 1999), 但基于不同的数据集得出的结论存在差异, 如Chapin III和Moilanen (1991)的研究表明, 植物成熟叶片养分状况不影响养分回收效率, Kobe等(2005)和Vergutz等(2012)的研究发现成熟叶片养分含量的增

加会导致回收效率下降。本研究对22种草本植物养分含量与养分回收效率进行相关性分析, 发现植物生长盛期养分状况与回收效率间没有显著的相关关系, 这与Kazakou等(2007)对18种草本植物与Hättenschwiler等(2008)对45种木本植物的研究结果一致, 而养分回收效率与枯叶期养分含量有较显著的负相关关系($p < 0.05$), 即养分回收能力高(枯叶中养分含量低)会导致较高的养分回收效率, 这与宗宁等(2017)对北方山区森林的研究结果一致, 所以枯叶中养分含量可能是养分回收效率重要的影响因素, 但Kobe等(2005)对木本植物研究中指出枯叶中较低的养分含量仅能表明成熟叶片中养分含量较低, 而无法说明植物通过提高养分回收能力而增加养分回收效率, 尽管一些较大尺度的研究表明, 植物生长盛期养分含量与回收效率间存在负相关关系, 但气候、土壤养分状况和植物组成等因素的多重耦合, 造成自然生境中探究植物养分状况与养分回收效率关系时很难将营养状况与其他协变量的影响分开(Yuan & Chen, 2015), 植物养分状况与回收效率之间的关系仍存在争议。本研究基于较小尺度, 发现养分回收效率与生长盛期养分含量在不同物种之间存在较大差异, 表明同一生境下不同植物在适应环境时, 养分获取和养分回收存在多样化的适应策略(Hättenschwiler *et al.*, 2008), 因此, 在探究植物养分状况与回收效率间的关系时应该考虑较小区域内植物养分回收效率的种间差异。

4 结论

本研究针对呼伦贝尔草地22种多年生草本植物对茎秆和叶片两类器官N、P含量的时间动态与养分回收模式进行了探究, 结果表明, 呼伦贝尔地区不同物种N、P含量达到峰值的时间存在差异, 通过植

物生长盛期一次取样会造成茎秆和叶片N、P回收效率不同程度的低估。因此, 建议在以后对植物养分回收特征的研究中, 生长盛期的取样要针对不同物种相应养分含量的时间动态, 在到达生长季峰值时进行取样, 以更准确、科学地获取植物养分回收的相关参数。同时本研究还发现, 草本植物茎秆的养分回收模式与叶片存在差异, N回收效率在叶片中更高, P回收效率在茎秆和叶片间无显著差异, 进一步证实了不同植物组织的N回收效率因其组成、结构和功能不同而存在差异。此外, 叶片中N、P回收效率之间显著相关, 而茎秆中则无明显相关关系, 说明茎秆和叶片中N、P回收效率的耦合关系性质或强度存在差异, 丰富了不同组织N、P回收效率间耦合关系的研究。本研究准确量化了呼伦贝尔草原植物茎秆和叶片N、P的回收效率, 指出了茎秆和叶片两类器官N、P回收模式的差异, 并表明依据植物生长季内养分含量峰值的采集成熟组织的取样策略, 能够更为准确地计算养分回收效率, 为生物地球化学模型的优化完善以及关于养分回收的理论发展提供实验证据。

致谢 感谢中国科学院沈阳应用生态研究所吕晓涛研究员对文章提供的宝贵意见和郭佳、张炳川、胡嘉芯在物种调查与样品采集工作中给予的帮助。

参考文献

- Aerts R (1996). Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: Are there general patterns? *Journal of Ecology*, 84, 597-608.
- Aerts R, Chapin III FS (1999). The mineral nutrition of wild plants revisited: are-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 30, 1-67.
- Brant AN, Chen HYH (2015). Patterns and mechanisms of nutrient resorption in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34, 471-486.
- Chapin III FS, Kedrowski RA (1983). Seasonal-changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous taiga trees. *Ecology*, 64, 376-391.
- Chapin III FS, Moilanen L (1991). Nutritional controls over nitrogen and phosphorus resorption from *Alaskan birch* leaves. *Ecology*, 72, 709-715.
- Charlesedwards DA, Stutzel H, Ferraris R, Beech DF (1987). An analysis of spatial variation in the nitrogen-content of leaves from different horizons within a canopy. *Annals of Botany*, 60, 421-426.
- Du EZ, Terrer C, Pellegrini AFA, Ahlström A, van Lissa CJ, Zhao X, Xia N, Wu XH, Jackson RB (2020). Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation. *Nature Geoscience*, 13, 221-226.
- Eckstein RL, Karlsson PS, Weih M (1999). Leaf life span and nutrient resorption as determinants of plant nutrient conservation in temperate-arctic regions. *New Phytologist*, 143, 177-189.
- Estiarte M, Peñuelas J (2015). Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency. *Global Change Biology*, 21, 1005-1017.
- Fang JY, Yang YH, Ma WH, Mohammad A, Shen HH (2010). Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science China Life Sciences*, 40, 566-576. [方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花 (2010). 中国草地生态系统碳库及其变化. *中国科学: 生命科学*, 40, 566-576.]
- Freschet GT, Cornelissen JHC, van Logtestijn RSP, Aerts R (2010). Substantial nutrient resorption from leaves, stems and roots in a subarctic flora: What is the link with other resource economics traits? *New Phytologist*, 186, 879-889.
- Han WX, Fang JY, Guo DL, Zhang Y (2005). Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 168, 377-385.
- Hättenschwiler S, Aeschlimann B, Coûteaux MM, Roy J, Bonal D (2008). High variation in foliage and leaf litter chemistry among 45 tree species of a neotropical rainforest community. *New Phytologist*, 179, 165-175.
- He JS, Wang L, Flynn DFB, Wang XP, Ma WH, Fang JY (2008). Leaf nitrogen:phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, 155, 301-310.
- Huang JY, Yu HL, Wang B, Li LH, Xiao GJ, Yuan ZY (2012). Nutrient resorption based on different estimations of five perennial herbaceous species from the grassland in Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 76, 1-8.
- Kazakou E, Garnier E, Navas ML, Roumet C, Collin C, Laurent G (2007). Components of nutrient residence time and the leaf economics spectrum in species from Mediterranean old-fields differing in successional status. *Functional Ecology*, 21, 235-245.
- Killingbeck KT (1984). Nitrogen and phosphorus resorption dynamics of five tree species in a Kansas gallery forest. *American Midland Naturalist*, 111, 155-164.
- Killingbeck KT (1986). Litterfall dynamics and element use efficiency in a Kansas gallery forest. *American Midland Naturalist*, 116, 180-189.
- Killingbeck KT (1996). Nutrients in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency. *Ecology*, 77, 1716-1727.
- Kobe RK, Lepczyk CA, Iyer M (2005). Resorption efficiency decreases with increasing green leaf nutrients in a global data set. *Ecology*, 86, 2780-2792.
- Koerselman W, Meuleman AFM (1996). The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 33, 1441-1450.

- Lambers H, Chapin III FS, Pons TL (2008). *Plant Physiological Ecology*. Springer, New York. 163-223.
- Liu JQ, Wang XY, Guo Y, Wang SL, Zhou L, Dai LM, Yu DP (2015). Seasonal dynamics and resorption efficiencies of foliar nutrients in three dominant woody plants that grow at the treeline on Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 165-171. [刘佳庆, 王晓雨, 郭焱, 王守乐, 周莉, 代力民, 于大炮 (2015). 长白山林线主要木本植物叶片养分的季节动态及回收效率. 生态学报, 35, 165-171.]
- Lü XT, Freschet GT, Flynn DFB, Han XG (2012). Plasticity in leaf and stem nutrient resorption proficiency potentially reinforces plant-soil feedbacks and microscale heterogeneity in a semi-arid grassland. *Journal of Ecology*, 100, 144-150.
- Mariotte P, Robroek BJM, Jassey VEJ, Buttler A (2015). Subordinate plants mitigate drought effects on soil ecosystem processes by stimulating fungi. *Functional Ecology*, 29, 1578-1586.
- McGroddy ME, Daufresne T, Hedin LO (2004). Scaling of C:N stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios. *Ecology*, 85, 2390-2401.
- Pan QM, Xue JG, Tao J, Xu MY, Zhang WH (2018). Current status of grassland degradation and measures for grassland restoration in Northern China. *Chinese Science Bulletin*, 63, 1642-1650. [潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩 (2018). 中国北方草原退化现状与恢复技术. 科学通报, 63, 1642-1650.]
- Reed SC, Townsend AR, Davidson EA, Cleveland CC (2012). Stoichiometric patterns in foliar nutrient resorption across multiple scales. *New Phytologist*, 196, 173-180.
- Ren HY, Zheng SX, Bai YF (2009). Effects of grazing on foliage biomass allocation of grassland communities in Xilin River basin, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 1065-1074. [任海彦, 郑淑霞, 白永飞 (2009). 放牧对内蒙古锡林河流域草地群落植物茎叶生物量资源分配的影响. 植物生态学报, 33, 1065-1074.]
- Shen HH, Zhu YK, Zhao X, Geng XQ, Gao SQ, Fang JY (2016). Analysis of current grassland resources in China. *Chinese Science Bulletin*, 61, 139-154. [沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云 (2016). 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 61, 139-154.]
- Shi Y, Ma YL, Ma WH, Liang CZ, Zhao XQ, Fang JY, He JS (2013). Large scale patterns of forage yield and quality across Chinese grasslands. *Chinese Science Bulletin*, 58, 226-239. [石岳, 马殷雷, 马文红, 梁存柱, 赵新全, 方精云, 贺金生 (2013). 中国草地的产草量和牧草品质: 格局及其与环境因子之间的关系. 科学通报, 58, 226-239.]
- Sun SC, Chen LZ (2001). Leaf nutrient dynamics and resorption efficiency of *Quercus liaotungensis* in the Dongling Mountain region. *Acta Phytocologica Sinica*, 25, 76-82. [孙书存, 陈灵芝 (2001). 东灵山地区辽东栎叶养分的季节动态与回收效率. 植物生态学报, 25, 76-82.]
- Tsujii Y, Onoda Y, Kitayama K (2017). Phosphorus and nitrogen resorption from different chemical fractions in senescing leaves of tropical tree species on Mount Kinabalu, Borneo. *Oecologia*, 185, 171-180.
- van Heerwaarden LM, Toet S, Aerts R (2003). Current measures of nutrient resorption efficiency lead to a substantial underestimation of real resorption efficiency: facts and solutions. *Oikos*, 101, 664-669.
- Vergutz L, Manzoni S, Porporato A, Novais RF, Jackson RB (2012). Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants. *Ecological Monographs*, 82, 205-220.
- Wang HY, Wang ZW, Ding R, Hou SL, Yang GJ, Lü XT, Han XG (2018). The impacts of nitrogen deposition on community N:P stoichiometry do not depend on phosphorus availability in a temperate meadow steppe. *Environmental Pollution*, 242, 82-89.
- Xing XR, Han XG, Chen LZ (2000). A review on research of plant nutrient use efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11, 785-790. [邢雪荣, 韩兴国, 陈灵芝 (2000). 植物养分利用效率研究综述. 应用生态学报, 11, 785-790.]
- Yasumura Y, Hikosaka K, Hirose T (2006). Seasonal changes in photosynthesis, nitrogen content and nitrogen partitioning in *Lindera umbellata* leaves grown in high or low irradiance. *Tree Physiology*, 26, 1315-1323.
- Yuan ZY, Chen HYH (2009). Global-scale patterns of nutrient resorption associated with latitude, temperature and precipitation. *Global Ecology and Biogeography*, 18, 11-18.
- Yuan ZY, Chen HYH (2015). Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption. *Ecology*, 96, 373-380.
- Zong N, Shi PL, Geng SB, Ma WL (2017). Nitrogen and phosphorus resorption efficiency of forests in North China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 25, 520-529. [宗宁, 石培礼, 耿守保, 马维玲 (2017). 北方山区主要森林类型树木叶片氮、磷回收效率研究. 中国生态农业学报, 25, 520-529.]

责任编辑: 韩文轩 责任编辑: 李 敏

附录I 植物茎秆和叶片养分生长盛期含量最大值、枯叶期含量和回收效率

Supplement I Nutrient content of culm and leaf at growth and senescence stage and resorption efficiency

<https://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2021.0125-S1.pdf>

附录II 植物生长盛期与枯叶期养分含量的相关关系

Supplement II Correlations of nutrient content in plant growth and senescence stage

<https://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2021.0125-S2.pdf>

www.plant-ecology.com

张效境, 梁潇洒, 马望, 王正文 (2021). 呼伦贝尔草地植物茎秆和叶片中养分的时间动态与回收. 植物生态学报, 45, 738-748. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0125

Zhang XJ, Liang XS, Ma W, Wang ZW (2021). Temporal variation and resorption of nutrients in plant culms and leaves in Hulun Buir grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 738-748. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0125

<https://www.plant-ecology.com/CN/10.17521/cjpe.2021.0125>

附录I 植物茎秆和叶片养分生长盛期含量最大值、枯叶期含量和回收效率

Supplement I Nutrient concentration of culm and leaf at growth and senescence stage and resorption efficiency

| 物种 Species | 器官 Organ | 氮(N)含量最大值 Maximum Nitrogen (N) concentration (mg g ⁻¹) | 枯叶期N含量 N concentration in senescence stage (mg g ⁻¹) | N回收效率 N resorption efficiency (%) | 磷(P)含量最大值 Maximum Phosphorus (P) concentration (mg·g ⁻¹) | 枯叶期P含量 P concentration in senescence stage (mg·g ⁻¹) | P回收效率 P resorption efficiency (%) |
|---------------------------------|-------------|---|---|---|--|---|---|
| 寸草 | 叶片 | 18.95 ^{efgh} | 8.75 ^{efg} | 70.00 ^{bcdef} | 0.77 ^h | 0.23 ^h | 81.02 ^{bcde} |
| <i>Carex duriuscula</i> | Leaf | | | | | | |
| 柄状薹草 | 叶片 | 17.38 ^{efgh} | 10.55 ^{cdef} | 61.13 ^{fghi} | 1.08 ^{fgh} | 0.33 ^{fgh} | 80.27 ^{bcdef} |
| <i>Carex pediformis</i> | Leaf | | | | | | |
| 狼针草 | 叶片 | 16.10 ^{gh} | 7.48 ^{fg} | 66.37 ^{cdefgh} | 0.87 ^{gh} | 0.28 ^{gh} | 76.10 ^{cdefg} |
| <i>Stipa baicalensis</i> | Leaf | | | | | | |
| 二裂委陵菜 | 叶片 | 21.13 ^{defg} | 12.33 ^{bcdef} | 61.81 ^{efgh} | 1.86 ^{cdef} | 0.72 ^{defg} | 74.58 ^{defg} |
| <i>Potentilla bifurca</i> | Leaf | | | | | | |
| 野鸢尾 | 叶片 | 20.42 ^{defg} | 5.27 ^g | 83.24 ^a | 2.59 ^{bc} | 0.11 ^h | 97.15 ^a |
| <i>Iris dichotoma</i> | Leaf | | | | | | |
| 龙蒿 | 叶片 | 29.13 ^{bc} | 9.23 ^{defg} | 79.52 ^{ab} | 2.38 ^{bcde} | 0.42 ^{fgh} | 88.64 ^{ab} |
| <i>Artemisia dracunculus</i> | Leaf | | | | | | |
| 糙隐子草 | 叶片 | 20.55 ^{defg} | 10.45 ^{cdef} | 63.75 ^{efgh} | 2.01 ^{cdef} | 0.66 ^{efg} | 76.65 ^{cdef} |
| <i>Cleistogenes squarrosa</i> | Leaf | | | | | | |
| 落草 | 叶片 | 20.93 ^{defg} | 8.38 ^{efg} | 71.39 ^{bcde} | 2.39 ^{bcd} | 0.42 ^{fgh} | 87.16 ^{ab} |
| <i>Koeleria macrantha</i> | Leaf | | | | | | |
| 狭叶沙参 | 叶片 | 26.28 ^{cde} | 12.60 ^{bcdef} | 69.14 ^{cdefg} | 2.61 ^{bc} | 1.15 ^{abcd} | 71.95 ^{efg} |
| <i>Adenophora gmelinii</i> | Leaf | | | | | | |
| 广布野豌豆 | 叶片 | 36.37 ^{ab} | 23.55 ^a | 58.42 ^{hi} | 2.31 ^{bcde} | 0.68 ^{efg} | 80.59 ^{bcde} |
| <i>Vicia cracca</i> | Leaf | | | | | | |
| 达乌里苾苳 | 叶片 | 20.23 ^{defgh} | 15.77 ^{bc} | 49.50 ⁱ | 3.65 ^a | 1.52 ^a | 73.28 ^{defg} |
| <i>Cymbaria daurica</i> | Leaf | | | | | | |
| 阿尔泰狗娃花 | 叶片 | 29.47 ^{bc} | 16.27 ^b | 64.68 ^{defgh} | 2.92 ^{ab} | 1.30 ^{ab} | 71.08 ^{efgh} |
| <i>Aster altaicus</i> | Leaf | | | | | | |
| 囊花鸢尾 | 叶片 | 12.37 ^h | 5.12 ^g | 73.53 ^{bcd} | 0.95 ^{gh} | 0.19 ^h | 86.59 ^{bc} |
| <i>Iris ventricosa</i> | Leaf | | | | | | |
| 星毛委陵菜 | 叶片 | 24.10 ^{cdef} | 14.13 ^{bcd} | 62.37 ^{efgh} | 2.64 ^{abc} | 1.17 ^{abcd} | 71.15 ^{efgh} |
| <i>Potentilla acaulis</i> | Leaf | | | | | | |
| 麻花头 | 叶片 | 20.42 ^{defg} | 10.10 ^{cdefg} | 68.02 ^{cdefgh} | 1.58 ^{efgh} | 0.74 ^{def} | 69.62 ^{fgh} |
| <i>Klasea centauroides</i> | Leaf | | | | | | |
| 羊草 | 叶片 | 22.47 ^{cdefg} | 8.07 ^{fg} | 74.23 ^{abcd} | 1.68 ^{defg} | 0.41 ^{fgh} | 82.55 ^{bcd} |
| <i>Leymus chinensis</i> | Leaf | | | | | | |
| 披针叶野决明 | 叶片 | 40.25 ^a | 25.60 ^a | 59.29 ^{fghi} | 2.11 ^{bcde} | 0.70 ^{efg} | 78.28 ^{cdefg} |
| <i>Thermopsis lanceolata</i> | Leaf | | | | | | |
| 裂叶蒿 | 叶片 | 24.27 ^{cdef} | 12.15 ^{bcdef} | 67.75 ^{cdefgh} | 2.12 ^{bcde} | 0.96 ^{bcde} | 71.00 ^{efgh} |
| <i>Artemisia tanacetifolia</i> | Leaf | | | | | | |
| 冷蒿 | 叶片 | 26.38 ^{cd} | 15.98 ^b | 61.12 ^{fghi} | 2.04 ^{cdef} | 1.22 ^{abc} | 61.69 ^h |
| <i>Artemisia frigida</i> | Leaf | | | | | | |
| 瓣蕊唐松草 | 叶片 | 27.28 ^{cd} | 12.87 ^{bcdef} | 69.40 ^{cdefg} | 2.72 ^{abc} | 0.98 ^{bcde} | 77.03 ^{cdefg} |
| <i>Thalictrum petaloideum</i> | Leaf | | | | | | |
| 白头翁 | 叶片 | 20.73 ^{defg} | 13.23 ^{bcdef} | 59.19 ^{ghi} | 1.67 ^{defgh} | 0.83 ^{cdef} | 67.80 ^{gh} |
| <i>Pulsatilla chinensis</i> | Leaf | | | | | | |
| 菊叶委陵菜 | 叶片 | 35.85 ^{ab} | 13.52 ^{bcde} | 74.59 ^{abc} | 2.57 ^{bc} | 0.96 ^{bcde} | 75.56 ^{defg} |
| <i>Potentilla tanacetifolia</i> | Leaf | | | | | | |
| 龙蒿 | 茎秆 | 8.64 ^{cd} | 4.22 ^d | 68.29 ^a | 1.07 ^{bcde} | 0.15 ^e | 91.06 ^{ab} |
| <i>Artemisia dracunculus</i> | Culm | | | | | | |
| 糙隐子草 | 茎秆 | 16.32 ^{ab} | 8.82 ^{abc} | 61.46 ^b | 1.53 ^{ab} | 0.62 ^b | 70.83 ^{cde} |
| <i>Cleistogenes squarrosa</i> | Culm | | | | | | |
| 狭叶沙参 | 茎秆 | 9.65 ^{cd} | 5.23 ^d | 65.09 ^{ab} | 0.76 ^{de} | 0.31 ^{cde} | 73.79 ^{cde} |
| <i>Adenophora gmelinii</i> | Culm | | | | | | |
| 广布野豌豆 | 茎秆 | 18.55 ^a | 10.80 ^a | 60.68 ^b | 1.26 ^{abc} | 0.26 ^{de} | 86.97 ^{ab} |
| <i>Vicia cracca</i> | Culm | | | | | | |
| 达乌里苾苳 | 茎秆 | 13.85 ^{abc} | 10.50 ^{ab} | 51.23 ^c | 1.22 ^{abcd} | 0.61 ^{bc} | 67.48 ^e |
| <i>Cymbaria daurica</i> | Culm | | | | | | |

附录I (续) Supplement I (Continued)

| 物种 Species | 器官 Organ | 氮(N)含量最大值 Maximum Nitrogen (N) concentration (mg g ⁻¹) | 枯叶期N含量 N concentration in senescence stage (mg g ⁻¹) | N回收效率 N resorption efficiency (%) | 磷(P)含量最大值 Maximum Phosphorus (P) concentration (mg·g ⁻¹) | 枯叶期P含量 P concentration in senescence stage (mg·g ⁻¹) | P回收效率 P resorption efficiency (%) |
|--|-------------|---|---|---|--|---|---|
| 阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i> | 茎秆 Culm | 13.57 ^{abc} | 7.93 ^{abcd} | 63.10 ^{ab} | 1.12 ^{bcd} | 0.5 ^{bcd} | 71.13 ^{de} |
| 麻花头 <i>Klasea centauroides</i> | 茎秆 Culm | 6.65 ^d | 4.13 ^d | 59.68 ^b | 0.66 ^e | 0.16 ^e | 82.75 ^{abcd} |
| 羊草 <i>Leymus chinensis</i> | 茎秆 Culm | 9.28 ^{cd} | 4.60 ^d | 63.29 ^{ab} | 0.92 ^{cde} | 0.20 ^{de} | 84.39 ^{abc} |
| 披针叶野决明 <i>Thermopsis lanceolata</i> | 茎秆 Culm | 18.94 ^a | 11.04 ^a | 61.41 ^b | 1.53 ^{ab} | 0.17 ^e | 92.67 ^a |
| 冷蒿 <i>Artemisia frigida</i> | 茎秆 Culm | 11.76 ^{bcd} | 7.04 ^{bcd} | 61.53 ^{ab} | 1.72 ^a | 0.99 ^a | 63.04 ^e |
| 瓣蕊唐松草 <i>Thalictrum petaloideum</i> | 茎秆 Culm | 9.85 ^{cd} | 6.23 ^{cd} | 59.41 ^b | 1.25 ^{abc} | 0.44 ^{bcd} | 77.49 ^{bcd} |

表中数据为平均值。数据标注不同小写字母表示在相同器官中该指标差异显著($p < 0.05$)。
Data in the table is mean. Different lowercase indicate significant differences within the same organ ($p < 0.05$).

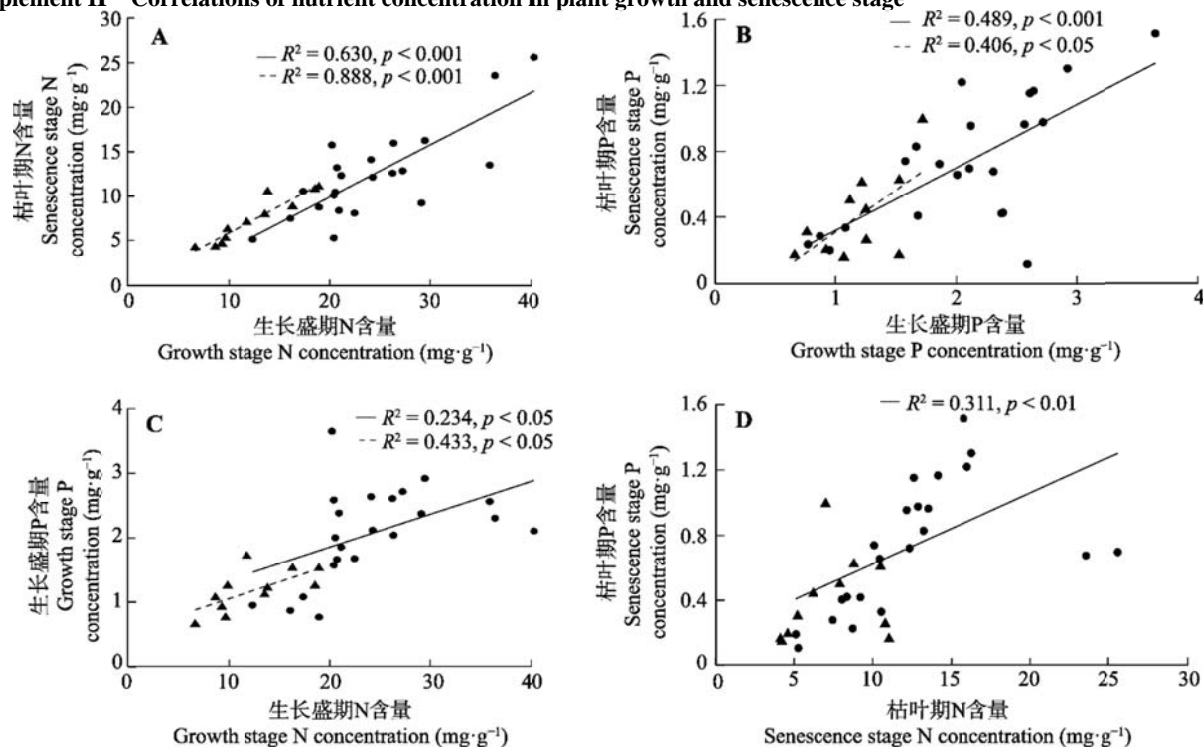
张效境, 梁潇洒, 马望, 王正文 (2021). 呼伦贝尔草地植物茎秆和叶片中养分的时间动态与回收. 植物生态学报, 45, 738-748. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0125

Zhang XJ, Liang XS, Ma W, Wang ZW (2021). Temporal variation and resorption of nutrients in plant culms and leaves in Hulun Buir grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 738-748. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0125

<https://www.plant-ecology.com/CN/10.17521/cjpe.2021.0125>

附录II 植物生长盛期与枯叶期养分含量的相关关系

Supplement II Correlations of nutrient concentration in plant growth and senescence stage



A, 生长盛期氮(N)含量与枯叶期N含量。 **B**, 生长盛期磷(P)含量与枯叶期P含量。 **C**, 生长盛期N含量与生长盛期P含量。 **D**, 枯叶期N含量与枯叶期P含量。圆形代表植物叶片; 三角形代表植物茎秆。实线表示叶片养分回收效率与养分含量相关($p < 0.05$); 虚线表示茎秆养分回收效率与养分含量相关($p < 0.05$)。

A, Nitrogen (N) concentration in growth stage and senescence stage. **B**, Phosphorus (P) concentration in growth stage and senescence stage. **C**, N concentration and P concentration in growth stage. **D**, N concentration and P concentration in senescence stage. Circle, leaves; triangle, culms. The solid line indicates that leaf resorption efficiency is related to nutrient concentration ($p < 0.05$); the dotted line indicates that culm resorption efficiency is related to nutrient concentration ($p < 0.05$).