

## 内蒙古羊草草原植物营养元素的含量特征

母悦<sup>1,2</sup>, 耿元波<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 植物对营养元素的吸收利用是生态系统物质循环的关键过程, 同时也是退化草地生态系统恢复和重建的重要问题。为探讨草原生态系统植物对元素的吸收利用规律, 在内蒙古锡林河流域的羊草草原选取羊草(*Leymus chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、大针茅(*Stipa grandis*)、西伯利亚羽茅(*Achnatherum sibirica*)、芯芭(*Cymbaria dahurica*)、洽草(*Koeleria cristata*)等 11 种主要植物为研究对象, 分析比较了 10 种营养元素的含量特征。结果表明, (1) 研究区主要植物各元素含量特征属于  $w(K) > w(Ca) > w(Mg)$  型。元素的变异系数均小于 1, 元素种间差异不显著。(2) 相关性分析表明, C 和 Fe、C 和 Cu、N 和 K、N 和 Mg、P 和 K、P 和 Mg、Ca 和 Mg、Fe 和 Cu 均为极显著相关 ( $P \leq 0.01$ ), C 和 Fe、C 和 Cu 是负相关, 其它均为正相关; N 和 P、N 和 Ca、K 和 Mg 显著正相关 ( $P \leq 0.05$ )。(3) 禾本科植物具有低 N-P-K-Ca 特征, Fe、Cu 元素含量较高, 非禾本科物种 Mn、Zn、P、Mg、Ca、K、N、C 元素含量较高, 其中 Ca、K、Mg 元素达到极显著差异 ( $P \leq 0.01$ ), N 达到显著差异 ( $P \leq 0.05$ )。(4) 利用主成分分析法对植物营养元素水平进行综合评价, 表明芯芭、洽草、菊叶委陵菜的营养元素含量水平较高, 吸收营养元素的能力较强。

**关键词:** 羊草草原; 主要植物; 元素含量

**DOI:** 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.006

**中图分类号:** Q945.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2015) 07-1118-07

**引用格式:** 母悦, 耿元波. 内蒙古羊草草原植物营养元素的含量特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1118-1124.

MU Yue, GENG Yuanbo. The Element Content Characteristics of Main Species in *Leymus Chinensis* Grassland in Inner Mongolia, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1118-1124.

营养元素的吸收利用和流失是生态系统物质循环的关键过程 (Kozovits et al., 2007; 李博等, 2005), 营养元素的不足会限制植物生长和区域生态系统的生产力 (Du et al., 2011; 张信宝等, 2009)。所有必需的营养元素在植物生长和生态系统功能中都发挥特定作用, C 是植物各种生理生化过程的底物和能量来源, N 和 P 是被公认的限制植物生长的最重要的营养元素, 并在植物生长过程中协同变化 (Elser et al., 2007; 杨惠敏等, 2011)。Ca、Mg 等元素的缺乏影响植物生长和物质循环 (Lynch et al., 2004), 而微量元素是植物体内酶类、生长激素和维生素等重要组成成分, 直接参与有机体的代谢活动, 是植物生长必需的养分 (耿元波等, 2005; 陆继龙等, 2002)。此外, 植物的营养元素含量是评价牧草质量的重要指标, 并关系到动物的健康和品质, 也是牧草育种的重要标准 (郭彦军等, 2001; 秦彧等, 2010)。我国草原大部分都存在过度放牧和退化问题, 锡林郭勒盟草原作为中国北方干旱-半干旱草原的典型区, 草地总面积占全区总面积 86%以

上, 草原退化面积却达到了近 64% (胡云锋等, 2012; 杨光梅等, 2007), 而植物群落生产力低是造成草原退化的重要原因 (李政海等, 2008)。对该区植物营养元素特征的研究, 有利于进一步了解植物生长的生物地球化学过程, 同时对退化草地生态系统的恢复和保护有重要的理论和实践意义。

目前, 营养元素特征的研究主要集中在 N、P、K 等大量元素的研究 (Huang et al., 2012; Lu et al., 2013; Sardans et al., 2012; 陈佐忠等, 1985; 王振南等, 2013), 而对于 Fe、Mn、Cu、Zn 等微量元素的研究较为匮乏。国内许多研究者 (车宗玺等, 2015; 李小峰等, 2013; 罗绪强等, 2014; 杨成等, 2007) 分别研究了喀斯特地区、典型林区、百花湖水库常见植物的元素含量特征, 而对于温带半干旱草原植物元素含量研究甚少, 本文选取内蒙古锡林河流域分布面积最大的典型草原亚类——羊草草原为研究对象, 对该草原上主要植物中的 C、N、P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 10 种营养元素的含量进行研究, 为草原生态系统物质循环和牧草营养

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41071138)

**作者简介:** 母悦 (1990 年生), 女 (羌族), 硕士, 研究方向环境生物地球化学。E-mail: muy.13s@igsnr.ac.cn

\*通讯作者: 耿元波, 副研究员, 研究方向环境生物地球化学。E-mail: gengyb@igsnr.ac.cn

**收稿日期:** 2015-04-03

价值评价提供数据支持。

## 1 研究区概况

锡林郭勒草原位于内蒙古高原中部, 北纬  $43^{\circ}16' \sim 44^{\circ}39'$ , 东经  $115^{\circ}32' \sim 117^{\circ}12'$ , 属于国际地圈-生物圈计划 (IGBP) 全球变化研究典型中国东北陆地样带 (NECT), 是内蒙古高原半干旱草原区的主体部分。锡林河流域属于中温带亚干旱大区, 其气候类型属于温带半干旱草原气候, 年平均气温为  $(0.3 \pm 0.1) ^{\circ}\text{C}$ , 全年光照为  $2\,603.8\text{ h}$ , 多年平均降水量为  $(347.0 \pm 79.6)\text{ mm}$ , 降水量年际变化较大, 主要集中在 6—9 月份, 约占全年降水量的 80% (陈佐忠, 1988)。

本研究选择的实验地点 (图 1) 位于内蒙古锡林郭勒草原锡林河流域中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站附近的羊草 99 样地 ( $43^{\circ}32'\text{N}$ ,  $116^{\circ}40'\text{E}$ ), 该样地自 1999 年起进行围栏封育。典型草原是锡林河流域面积最大分布最广的草原, 羊草草原在典型草原中最具代表性。实验样地内的建群种为根茎禾草羊草 (*Leymus chinensis*), 优势种包括冰草 (*Agropyron cristatum*) 和大针茅 (*Stipa grandis*) 等密丛禾草。牧草在 4 月中下旬返青, 生长期在  $150 \sim 160\text{ d}$  左右 (李博等, 1988)。主要的土壤类型为钙积干润均腐土, 土壤质地为砂壤质 (汪久文等, 1988)。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集

2014 年 8 月下旬在羊草 99 样地选取植物群落均一且植物种较为接近的地段, 平行设置 5 组  $1$

$\text{m} \times 1\text{ m}$  的样方, 每组 5 个, 共 25 个  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  样方, 分物种齐地面剪取植物地上部分, 将各样方里采取的植株按种均匀混合。选取 11 种主要植物作为测试样品, 包括禾本科的羊草 (*Leymus chinensis*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、大针茅 (*Stipa grandis*)、西伯利亚羽茅 (*Achnatherum sibirica*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、早熟禾 (*Poa annua*)、洽草 (*Koeleria cristata*), 玄参科的苕芭 (*Cymbaria dahurica*)、莎草科的黄囊苔草 (*Carex korshinskyi kom.*)、蔷薇科的菊叶委陵菜 (*Potentilla tanacetifolia*) 和二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*), 选取的植物生物量占羊草草原样方总生物量 80% 以上。采集的植物样品洗净后置于鼓风干燥箱中先在  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  下杀青  $30\text{ min}$ , 然后降温至  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干 (鲍士旦, 2008; 鲁如坤, 2000)。干燥后的样品先剪成  $1 \sim 2\text{ cm}$  的小段, 充分混合后, 用植物粉碎机粉碎, 装入密封袋内, 用于营养元素含量的测定。混合物包括样方内所有物种植物的混合, 采集和处理方式与前面一致。

### 2.2 样品分析与数据处理

植物 C、N 含量用元素分析仪 (Flash 2000) 测定, 待测的植物样品经 5 : 1 的混酸 ( $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4$ ) 消解后用 ICP-OES (Optima 5300DV) 测定元素含 K、Ca、Mg、Cu、Fe、Zn、Mn 量, 以植物成分分析标准物质 GBW (GSV-2) 作质量控制, 测定值在标准范围内, 平行样相对标准偏差小于 5%, 样品测试结果满足研究需要。使用 Microsoft Excel 2013、IBM SPSS Statistics 19.0 软件对实验数



图 1 研究样点的位置

Fig. 1 Location of study site

据进行处理和统计分析,运用 Origin 9.0 软件作图。

### 3 结果与分析

#### 3.1 植物营养元素含量特征

##### 3.1.1 营养元素的含量水平

植物营养元素含量是植物在一定生境条件下吸收养分的能力表现,植物从土壤中吸收营养元素,随着生长到死亡,最后在分解作用下,归还土壤,再被植物利用,完成元素的生物地球化学小循环(耿元波等,2005)。从表1可看出羊草草原主要植物营养元素的质量分数水平。植物10种营养元素中,C是植物生长的能量来源,质量分数在 $4 \times 10^5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上,平均质量分数在 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的元素有2个,即N、K,大小为 $w(\text{N}) > w(\text{K})$ ,平均质量分数在 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的元素有P、Ca、Mg,大小为 $w(\text{Ca}) > w(\text{Mg}) > w(\text{P})$ ,平均质量分数在 $100 \sim 1000 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 间的元素是Fe,平均质量分数在 $10 \sim 100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的有Cu、Zn、Mn,大小为 $w(\text{Cu}) > w(\text{Mn}) > w(\text{Zn})$ 。从营养元素的平均质量分数看,所测值与陈佐忠等(1985)羊草草原N、P、K、Ca、Fe质量分数基本一致。各元素质量分数从高到低依次为 $w(\text{C}) > w(\text{N}) > w(\text{K}) > w(\text{Ca}) > w(\text{Mg}) > w(\text{P}) > w(\text{Fe}) > w(\text{Cu}) > w(\text{Mn}) > w(\text{Zn})$ 。从整体上看羊草草原植物营养元素的质量分数特征是 $w(\text{N}) > w(\text{K}) > w(\text{Ca}) > w(\text{Mg})$ 、 $w(\text{Fe}) > w(\text{Mn})$ 型,与前人研究结果基本一致(Han et al., 2011; 陈佐忠等, 1985; 秦海等, 2010)。

与陆生高等植物所需元素的合适平均质量分数水平相比较,C、P、Mg、Mn平均质量分数低于所报道的陆生植物合适组织质量分数水平,而K、Ca、Cu、Fe、Zn平均质量分数则高于陆生植物合适组织质量分数水平,其中大量元素C、N、K、Ca与报道值接近,P和Mg仅为报道值的一半左右;微量元素Mn、Zn与报道值接近,Cu高出已报道值近13倍,Fe高出3倍左右。锡林河流域羊草草原植物元素含量的这种特征,取决于羊草草原植被所处的土壤环境和基质质量(Ozier-Lafontaine et al.,

2014)。

##### 3.1.2 元素含量的变异特征

不同植物种对元素有不同的选择吸收能力,从而表现出不同植物对同一元素吸收含量的高低变化特性(杨菲等,2011)。从元素的变异系数来看(表1),从大到小依次为 $w(\text{Cu}) > w(\text{Ca}) > w(\text{Mn}) > w(\text{Mg}) > w(\text{K}) > w(\text{P}) > w(\text{Zn}) > w(\text{Fe}) > w(\text{N}) > w(\text{C})$ ,这种变异系数的大小特征也符合限制元素稳定性的假说,即自然界中越常见的限制元素,它的元素浓度越稳定,波动越小。N、P、K是3种最普遍的限制营养元素,它们的变异系数较低,而Mn过剩会造成植物中毒,它的变异系数较大,但各元素的变异系数均小于1,说明植物间元素的差异不明显。变异系数大于50%的元素有Cu、Ca、Mn、Mg,小于50%的元素有K、P、Fe、Zn、N、C,以Cu最大,达到93.1%,C最小,为2.2%,可见本研究区Cu元素的种间差异最大,C元素的种间差异最小。从元素含量最大值/最小值来看,依次为 $w(\text{Cu}) > w(\text{Ca}) > w(\text{Mn}) > w(\text{Mg}) > w(\text{K}) > w(\text{Fe}) > w(\text{P}) > w(\text{Zn}) > w(\text{N}) > w(\text{C})$ ,其中,最大值与最小值之比大于5倍元素有Cu、Ca、Mn,其余元素Mg、K、Fe、P、Zn、N、C的比值都小于5,以Cu最大,达11.04,C最小,为1.07。以上分析看出,元素最大值与最小值的比值和变异系数具有基本一致的变化特征且数值均较小,显示研究区主要植物的不同种对这些元素的选择吸收能力尽管有一定差异,但元素含量相对稳定。

#### 3.2 植物营养元素的相互关系

##### 3.2.1 元素的比值

植物健康生长必需保持足够浓度和相对稳定的营养比例(Marschner et al., 1988)。在植物体中,即使所有元素含量都达到正常含量范围,仍会出现某些元素相对缺乏的状态,元素间比值可以反映各元素之间对植物表现出的拮抗和协同两方面的作用关系。N、P是植物生长重要的限制元素, $w(\text{N})/w(\text{P})$ 是判断环境对植物生长养分供应状况的

表1 内蒙古羊草草原主要植物各营养元素的质量分数

Table 1 The element contents of main species of L. Chinensis grassland in Inner Mongolia

$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{DW}$

元素	极小值	极大值	中值	均值	标准偏差	变异系数/%	陆生植物含量(Taiz et al., 2009)
C( $\times 10^4$ )	42.3	45.2	44.2	44.0	1.0	2.2	45
N( $\times 10^4$ )	1.2	1.8	1.6	1.5	0.2	13.1	1.5
P	724	1 960	988	1 107	338	30.6	2 000
K	5 204	17 540	11 325	11 269	3 523	31.3	10 000
Ca	2 770	17 883	3 229	5 697	4 898	86.1	5 000
Mg	633	2 654	1 031	1 298	731	56.3	2 000
Cu	20	217	45	76	71	93.1	6
Fe	173	490	325	314	87	27.8	100
Zn	17	38	28	27	8	27.9	20
Mn	22	122	36	44	28	64.5	50

指标 (Güsewell, 2004), Koerselman et al. (1996) 指出陆地生态系统高等植物  $w(N)/w(P)$  的临界值是 14 和 16, 当  $w(N)/w(P)$  小于 14 时, 说明植物生长受到 N 含量限制, 当  $w(N)/w(P)$  大于 16 时, 植物生长受到 P 含量限制, 当  $w(N)/w(P)$  大于 14 小于 16 时, N 与 P 单独或共同影响植物生长。由表 2 可看出, 研究区植物中, 从 N 和 P 之间相对作用来看, 芯芭、糙隐子草、洽草、二裂委陵菜、冰草 5 种植物的  $w(N)/w(P)$  小于 14, 属于 N 制约型植物, 早熟禾、黄囊苔草、羊草的  $w(N)/w(P)$  大于 16, 属于 P 制约型植物, 大针茅、西伯利亚羽茅、菊叶委陵菜的  $w(N)/w(P)$  在 14 到 16 之间, 生长受到 N 与 P 单独或共同影响。然而, 羊草草原中所有植物的  $w(K)/w(P)$  比值均大于 Linder (1995) 提出的最适宜  $w(K)/w(P)$  比 (3.5)。

元素比值可作为判断植物吸收营养元素能力的指标 (Liu 等, 2014)。由表 2 可看出, 与陆生高等植物比较, 羊草草原主要植物的  $w(N)/w(P)$ 、 $w(N)/w(Ca)$ 、 $w(N)/w(Mg)$ 、 $w(K)/w(P)$ 、 $w(Ca)/w(P)$ 、 $w(Mg)/w(P)$ 、 $w(K)/w(Mg)$ 、 $w(Ca)/w(Mg)$  比值高于陆

生高等植物相应元素含量间比值, 但高出倍数小于 2, 总体上植物吸收 N、K 元素能力相对较强。 $w(C)/w(N)$ 、 $w(N)/w(K)$ 、 $w(Ca)/w(K)$  值与已报道相应元素比值相当。混合物的营养元素含量代表羊草草原植物群落的含量水平, 对于混合物, 除  $w(N)/w(K)$ 、 $w(Mg)/w(P)$ 、 $w(Ca)/w(K)$  比值低于陆生植物元素比, 其它元素比则高于陆生植物相应元素比。此外, 尽管不同植物元素含量比值有一定差异, 但是它们的变异系数都很小, 均未超过 1, 说明植物吸收营养元素的能力比较均衡。

### 3.2.2 元素的相关性分析

植物生长受多个因子的交互作用 (Niinemets et al., 2005), 有研究者 (Li et al., 2015) 发现 N 添加会强烈影响植物对其他营养元素的吸收。元素的相关性分析可探讨植物选择吸收功能元素的生物地球化学特征。植物内元素间的相互作用过程相当复杂, 由表 3 可看出植物营养元素间的相关系数在较大范围内波动, 在这 55 个元素对中, 有 11 对元素相关性显著, 占总元素对的 20%。其中, 具有极显著相关关系的有 8 对 ( $P \leq 0.01$ ), 为 C 和 Fe、C

表 2 内蒙古羊草草原主要植物中各元素间的质量比

Table 2 The ratios of nutrient element contents in main species of *L. Chinensis* grassland in Inner Mongolia

植物名	$w(C)/w(N)$	$w(N)/w(P)$	$w(N)/w(K)$	$w(N)/w(Ca)$	$w(N)/w(Mg)$	$w(K)/w(P)$	$w(Ca)/w(P)$	$w(Mg)/w(P)$	$w(Ca)/w(K)$	$w(K)/w(Mg)$	$w(Ca)/w(Mg)$
芯芭	26.62	8.34	0.93	1.73	7.59	8.95	4.83	1.10	0.54	8.15	4.39
早熟禾	33.83	17.25	2.40	4.26	16.03	7.19	4.05	1.08	0.56	6.68	3.76
黄囊苔草	29.00	17.66	1.08	4.25	14.54	16.36	4.15	1.22	0.25	13.47	3.42
大针茅	32.62	15.10	1.60	4.95	18.84	9.41	3.05	0.80	0.32	11.74	3.80
羊草	28.45	16.42	1.40	5.21	15.29	11.77	3.15	1.07	0.27	10.96	2.93
糙隐子草	33.97	13.16	1.56	3.90	14.70	8.42	3.38	0.90	0.40	9.40	3.77
洽草	25.21	13.40	1.26	5.63	15.13	10.62	2.38	0.89	0.22	12.00	2.69
西伯利亚羽茅	28.00	15.45	1.42	4.89	18.24	10.86	3.16	0.85	0.29	12.82	3.73
菊叶委陵菜	24.45	14.25	1.29	1.01	6.78	11.01	14.16	2.10	1.29	5.24	6.74
二裂委陵菜	25.12	13.70	1.40	1.72	7.51	9.76	7.97	1.83	0.82	5.35	4.37
冰草	34.86	13.86	1.62	4.39	20.34	8.55	3.16	0.68	0.37	12.53	4.63
平均值	29.48	14.45	1.45	3.87	14.23	10.24	4.73	1.12	0.47	9.92	3.98
混合物	31.58	14.79	1.48	4.50	15.74	10.02	3.28	0.94	0.33	10.67	3.49
陆生植物	30.00	7.50	1.50	3.00	7.50	5.00	2.50	1.00	0.50	5.00	2.50
标准偏差	3.77	2.42	0.36	1.52	4.54	2.32	3.30	0.42	0.31	2.92	1.04
变异系数/%	12.80	16.77	24.91	39.30	31.94	22.61	69.86	37.84	65.45	29.44	26.12

陆生植物的比值根据泰兹和奇格尔 (Taiz et al., 2009) 的各元素所需值计算得到

表 3 内蒙古羊草草原主要植物营养元素间相互关系

Table 3 Correlations between the nutrient elements in main species of *L. Chinensis* grassland in Inner Mongolia

元素	$w(C)$	$w(N)$	$w(P)$	$w(K)$	$w(Ca)$	$w(Mg)$	$w(Fe)$	$w(Cu)$	$w(Zn)$	$w(Mn)$
$w(C)$	1									
$w(N)$	0.121	1								
$w(P)$	-0.023	0.614*	1							
$w(K)$	-0.013	0.800**	0.801**	1						
$w(Ca)$	0.123	0.692*	0.558	0.538	1					
$w(Mg)$	0.110	0.810**	0.712**	0.689*	0.942**	1				
$w(Fe)$	-0.873**	-0.082	0.020	0.062	-0.092	-0.127	1			
$w(Cu)$	-0.899**	-0.148	-0.173	-0.205	-0.239	-0.213	0.846**	1		
$w(Zn)$	-0.400	-0.290	0.325	-0.085	0.010	0.074	0.391	0.388	1	
$w(Mn)$	0.127	0.573	0.240	0.269	0.385	0.565	-0.187	0.063	0.140	1

\* $P \leq 0.05$ ; \*\* $P \leq 0.01$

和 Cu、N 和 K、N 和 Mg、P 和 K、P 和 Mg、Ca 和 Mg、Fe 和 Cu, 相关系数分别为  $r_{C, Fe}=-0.873$ ,  $r_{C, Cu}=-0.899$ ,  $r_{N, K}=0.800$ ,  $r_{N, Mg}=0.810$ ,  $r_{P, K}=0.801$ ,  $r_{P, Mg}=0.712$ ,  $r_{Ca, Mg}=0.942$ ,  $r_{Fe, Cu}=0.846$ ; 具有显著关系的有 3 对 ( $P \leq 0.05$ ), 即 N 和 P、N 和 Ca、K 和 Mg ( $r_{N, P}=0.614$ ,  $r_{N, Ca}=0.692$ ,  $r_{K, Mg}=0.689$ ), 其他元素间相关关系不明显。N 是构成蛋白质和核酸的主要成分, 又参与光合作用; P 是核酸的重要成分, 并完成能量传递; Mg 是叶绿素的成分, 并参与植物体内磷酸的运转; K 在蛋白质合成中起一定作用, 并参与光合作用; Ca 参与细胞膜的形成, 维持正常的原生质 (商翎等, 1997)。基于各元素在植物生长过程中的特殊作用, 使元素之间出现以上的显著相关关系。Fe 和重金属之间存在着拮抗作用, 失绿症则是由于重金属过剩而引起的, Mn 的过剩会引起 Fe 的吸收和迁移减少, 并导致叶绿素的减少, Fe 和 Mn 存在一定的负相关。

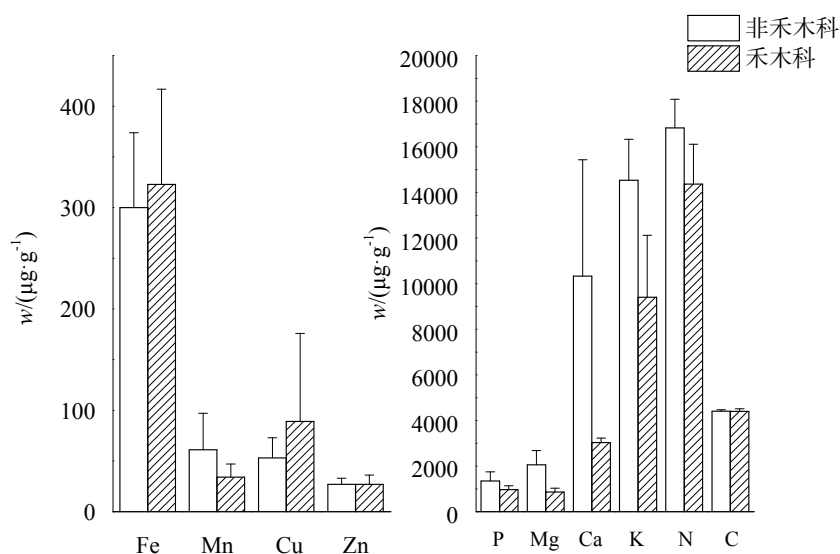
### 3.3 禾本和非禾本植物营养元素比较

同一植物对各营养元素的吸收能力不同, 不同类群植物对元素的吸收能力有很大差别。11 个物种共涉及 4 科, 禾草科的植物最多, 有 7 种, 占总物种 60% 左右, 玄参科和莎草科各 1 种, 蔷薇科 2 种。将这 11 个物种划为禾本科和非禾本科两个功能群, 比较它们植物营养元素的浓度特点 (图 2), 发现对于植物各营养元素浓度, Fe 和 Cu 在禾本科类物种的浓度高于非禾本科类物种浓度, Mn、Zn、P、Mg、Ca、K、N、C 8 种元素在非禾本科类物种的浓度较高, 其中 Ca、K、Mg 达到极显著差异 (其中  $F_{Ca}=11.696$ ,  $P_{Ca}=0.008$ ;  $F_K=10.598$ ,  $P_K=0.010$ ;

$F_{Mg}=19.226$ ,  $P_{Mg}=0.002$ ), N 达到显著差异 ( $F_N=5.624$ ,  $P_N=0.042$ )。禾本科植物具有低氮磷钾钙特征, 植物种间差异最初体现在科属上,  $Ca^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  均以离子状态通过根系吸收被植物利用, 禾本科植物根部交换容量小 (商翎等, 1997), 对  $Ca^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  的吸收小于根部容量较大的非禾本科植物, 且差异显著。植物对元素的吸收与蛋白质合成强度有关, N 是生成蛋白质和氨基酸的基础, 故在禾本科和非禾本科间达到显著差异。Fe 和 Cu 在禾本科类物种的浓度较高, 原因可能是 Fe 和 Cu 在植物中主要以螯合态存在, 禾本科植物能在体内合成大量的植物铁载体, 分泌到根际土壤与  $Fe^{3+}$  结合, 以螯合态形式转运到植物细胞, 再释放  $Fe^{3+}$  供吸收利用 (吴慧兰等, 2008), 使得禾本科植物 Fe 含量较高。

### 3.4 植物营养元素主成分分析

植物对不同营养元素的吸收能力不同, 为了解羊草草原各植物营养元素含量水平, 利用主成分分析法对植物营养元素水平进行综合评价。选取 4 个主成分, 累积贡献率达 89.437%。由 4 个主成分因子旋转后的载荷矩阵 (表 4), 第一主成分方差贡献率是 43.409%, 主要与 N、P、K、Ca、Mg 有关, 它们对营养元素水平评价具有决定的意义, 并且这几个元素与 PC1 有较强的相关性, 说明它们在 PC1 中有较强的共变关系, 这组元素主要与植物蛋白质和重要化合物生成以及能量传递有关, 是植物生长必不可少的大量元素反映。第二主成分的方差贡献率是 26.638%, 主要与 Cu 和 Fe 有关, Cu 和 Fe 在植物光合作用中有重要作用, 且植物中 Cu 高会减



Fe、Mn、Cu、Zn 使用左坐标轴, 其余用右坐标轴, C 元素浓度为缩小 100 倍的值

图 2 羊草草原禾本科草和非禾本科草植物的营养元素浓度比较

Fig. 2 Nutrient concentration of grasses and herbs in L.Chinensis grassland in Inner Mongolia

表 4 旋转后四主成分的旋转矩阵  
Table 4 Rotated component matrix of four principal components

元素	成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4
C	0.017	-0.955	0.086	-0.146
N	0.843	-0.026	0.382	-0.32
P	0.871	-0.041	-0.047	0.375
K	0.933	0.034	-0.045	-0.104
Ca	0.766	-0.131	0.348	0.057
Mg	0.849	-0.119	0.436	0.101
Cu	-0.302	0.866	0.163	0.046
Zn	0.03	0.3	0.084	0.945
Fe	0.115	0.869	-0.18	0.162
Mn	0.276	-0.059	0.907	0.069

少叶绿体 Fe 的含量，具有明显的拮抗作用，这组元素与植物中元素的拮抗作用有关。第三主成分的方差贡献率是 9.857%，主要与 C 和 Mn 有关，C 主要通过植物的光合作用获得，叶绿体对 Mn 的缺乏最为敏感，这组元素与植物叶绿体密切相关。第四主成分的方差贡献率是 9.534%，主要反映 Zn 的信息。根据主成分数学模型原理，将综合因子得分表达为： $F=0.38271 \times F_1+0.25445 \times F_2+0.13571 \times F_3+0.12150 \times F_4$  并排序，主成分综合得分越大营养元素含量水平越高，排序结果如表 5。通过综合因子得分排名，排在前三的依次为苳芭、洽草、菊叶委陵菜，营养元素含量较高。营养元素含量高低在一定程度上反应植物的吸收能力水平，因此，在羊草草原，苳芭、洽草、菊叶委陵菜对元素的吸收能力高于其它植物。

表 5 主成分因子得分表  
Table 5 Score of principal component factors

植物名	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	排名
苳芭	1.962	-0.044	-1.266	1.598	1
早熟禾	-1.356	1.386	0.476	0.721	6
黄囊苔草	0.040	0.510	-0.268	-0.950	5
大针茅	-0.650	-0.949	-0.713	-0.692	12
羊草	-0.082	-0.751	-0.507	-1.212	10
糙隐子草	-0.733	0.155	-0.125	1.587	7
洽草	0.453	2.094	0.316	-0.311	2
西伯利亚羽茅	-0.037	-0.435	-0.653	-1.000	9
菊叶委陵菜	1.575	0.150	0.424	-0.628	3
二裂委陵菜	0.500	-1.221	2.699	0.294	4
冰草	-0.887	-1.023	-0.548	0.930	11
混合物	-0.786	0.438	0.165	-0.338	8

## 4 结论

(1) 研究区各元素平均质量分数从高到低依次为  $w(C) > w(N) > w(K) > w(Ca) > w(Mg) > w(P) > w(Fe) > w(Cu) > w(Mn) > w(Zn)$ ，属于  $w(N) > w(K) > w(Ca)$  型。N、K、Ca、Cu、Fe、Zn 平均质量分数高于陆生植物合适质量分数水平，其余元素低于陆

生植物合适水平。元素的变异系数为  $w(Cu) > w(Ca) > w(Mn) > w(Mg) > w(K) > w(P) > w(Zn) > w(Fe) > w(N) > w(C)$ ，变异系数均小于 1，元素种间差异不显著。

(2) 元素间相关关系表明，C 和 Fe、C 和 Cu、N 和 K、N 和 Mg、P 和 K、P 和 Mg、Ca 和 Mg、Fe 和 Cu 均为极显著相关 ( $P \leq 0.01$ )，C 和 Fe、C 和 Cu 是负相关，其它均为正相关；N 和 P、N 和 Ca、K 和 Mg 显著相关 ( $P \leq 0.05$ )，均为正相关。

(3) 羊草草原上禾本科植物具有低氮磷钾钙特征，Fe、Cu 元素浓度较高，非禾本科物种 Mn、Zn、P、Mg、Ca、K、N、C 元素浓度较高，其中 Ca、K、Mg 元素达到极显著差异 (其中  $F_{Ca}=11.696$ ,  $P_{Ca}=0.008$ ;  $F_K=10.598$ ,  $P_K=0.010$ ;  $F_{Mg}=19.226$ ,  $P_{Mg}=0.002$ )，N 达到显著差异 ( $F_N=5.624$ ,  $P_N=0.042$ )。

(4) 利用主成分分析法对植物营养元素水平进行综合评价，选取 4 个主成分因子，通过综合排名，结果表明苳芭、洽草、菊叶委陵菜的营养元素水平较高，吸收营养元素的能力较强。

## 参考文献:

- DU Y, PANG, LI L, et al. 2011. Leaf N/P ratio and nutrient reuse between dominant species and stands: predicting phosphorus deficiencies in Karst ecosystems, southwestern China [J]. Environmental Earth Sciences, 64(2): 299-309.
- ELSER J J, BRAKEN M E, CLELAND E E, et al. 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecology letters, 10(12): 1135-1142.
- GÜSEWELL S. 2004. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. New Phytologist, 164(2): 243-266.
- HAN W, FANG J, REICH P B, et al. 2011. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China [J]. Ecology Letters, 14(8): 788-796.
- HUANG J, YU H, WANG B, et al. 2012. Nutrient resorption based on different estimations of five perennial herbaceous species from the grassland in inner Mongolia, China [J]. Journal of Arid Environments, 76: 1-8.
- KOERSELMAN W, MEULEMAN A F. 1996. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. Journal of applied Ecology, 33(6): 1441-1450.
- KOZOVITS A, BUSTAMANTE M, GAROFALO C, et al. 2007. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna [J]. Functional Ecology, 21(6): 1034-1043.
- LI X, LIU J, FAN J, et al. 2015. Combined effects of nitrogen addition and litter manipulation on nutrient resorption of *Leymus chinensis* in a semi-arid grassland of northern China [J]. Plant Biology, 17(1): 9-15.
- LINDER S. 1995. Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce [J]. Ecological Bulletins, 44: 178-190.
- LIU C, LIU Y, GUO K, et al. 2014. Concentrations and resorption patterns of 13 nutrients in different plant functional types in the karst region of south-western China [J]. Annals of botany, 113(5): 873-885.
- LU X T, REED S, YU Q, et al. 2013. Convergent responses of nitrogen and phosphorus resorption to nitrogen inputs in a semiarid grassland [J]. Global Change Biology, 19(9): 2775-2784.

- LYNCH J P, CLAIR S B S. 2004. Mineral stress: the missing link in understanding how global climate change will affect plants in real world soils [J]. *Field Crops Research*, 90(1): 101-115.
- MARSCHNER H, RIMMINGTON G. 1988. Mineral nutrition of higher plants [J]. *Plant Cell Environ*, 11: 147-148.
- NIINEMETS Ü, KULL K. 2005. Co-limitation of plant primary productivity by nitrogen and phosphorus in a species-rich wooded meadow on calcareous soils [J]. *Acta Oecologica*, 28(3): 345-356.
- OZIER-LAFONTAINE H, LESUEUR-JANNOYER M. 2014. Sustainable Agriculture Reviews 14 [M]. Springer.
- SARDANS J, RIVAS-UBACH A, PEÑUELAS J. 2012. The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 14(1): 33-47.
- 鲍士旦. 2008. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社: 243.
- 车宗玺, 刘贤德, 潘欣, 等. 2015. 甘肃省典型林区主要优势树种养分含量变化特征分析[J]. *生态环境学报*, 24(2): 237-243.
- 陈佐忠, 黄德华, 张鸿芳. 1985. 内蒙古锡林河流域 122 种植物的元素化学特征[C]//草原生态系统研究(第 1 集). 北京: 科学出版社: 112-130.
- 陈佐忠. 1988. 锡林河流域地形与气候概况. 草原生态系统研究(第三集)[M]. 北京: 科学出版社: 13-22.
- 耿元波, 章中, 董云社, 等. 2005. Fe、Mn、Cu 在锡林河流域温带草原植被中的含量特征[J]. *地理研究*, 24(3): 379-386.
- 郭彦军, 龙瑞军, 张德罡, 等. 2001. 东祁连山高寒草甸灌木和牧草营养成分含量季节变化动态[J]. *草业科学*, 18(6): 36-39.
- 胡云锋, 艳燕, 于国茂, 等. 2012. 1975—2009 年锡林郭勒盟生态系统宏观格局及其动态变化[J]. *地理科学*, 32(9): 1125-1130.
- 李博, 雍世鹏, 李忠厚. 1988. 锡林河流域植被及其利用[C]//草原生态系统研究(第 3 集). 北京: 科学出版社: 84-183.
- 李博, 赵斌, 彭容豪. 2005. 陆地生态系统生态学原理[M]. 北京: 高等教育出版社: 151-189.
- 李小峰, 李秋华, 秦好丽, 等. 2013. 百花湖消落带常见植物氮磷钾营养元素含量分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 33(4): 1089-1097.
- 李政海, 鲍雅静, 王海梅, 等. 2008. 锡林郭勒草原荒漠化状况及原因分析[J]. *生态环境*, 17(6): 2312-2318.
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社: 299.
- 陆继龙, 周云轩. 2002. 吉林省黑土某些微量元素环境地球化学特征[J]. *土壤通报*, 33(5): 365-368.
- 罗绪强, 张桂玲, 杜雪莲, 等. 2014. 茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征[J]. *生态环境学报*, 23(7): 1121-1129.
- 秦海, 李俊祥, 高三平, 等. 2010. 中国 660 种陆生植物叶片 8 种元素含量特征[J]. *生态学报*, 30(5): 1247-1257.
- 秦或, 李晓忠, 姜文清, 等. 2010. 西藏主要作物与牧草营养成分及其营养类型研究[J]. *草业学报*, 19(5): 122-129.
- 商翎, 提福魁, 王淑华, 等. 1997. 元素生态地球化学及其应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社: 20-95.
- TAIZ L, ZEIGER E. 2009. 植物生理学 [M]. 第 4 版. 宋纯鹏, 王学路, 译. 北京: 科学出版社: 60-75.
- 汪久文, 蔡蔚祺. 1988. 锡林河流域土壤的发生类型及其性质的研究. 草原生态系统研究(第三集)[M]. 北京: 科学出版社: 23-83.
- 王振南, 杨惠敏. 2013. 植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应[J]. *草业科学*, 30(6): 927-934.
- 吴慧兰, 王宁, 凌宏清. 2008. 植物铁吸收、转运和调控的分子机制研究进展[J]. *植物学通报*, 24(6): 779-788.
- 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 等. 2007. 贵州喀斯特山区植物营养元素含量特征[J]. *生态环境*, 16(2): 503-508.
- 杨菲, 肖唐付. 2011. 铜矿尾矿库无土修复植物营养元素含量特征[J]. *地球与环境*, 39(4): 464-468.
- 杨光梅, 闵庆文, 李文华. 2007. 锡林郭勒草原退化的经济损失估算及启示[J]. *中国草地学报*, 29(1): 44-49.
- 杨惠敏, 王冬梅. 2011. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J]. *草业学报*, 20(2): 244.
- 张信宝, 王克林. 2009. 西南碳酸盐岩石质山地土壤-植被系统中矿质养分不足问题的思考[J]. *地球与环境*, 37(4): 337-341.

## The Element Content Characteristics of Main Species in *Leymus Chinensis* Grassland in Inner Mongolia, China

MU Yue<sup>1,2</sup>, GENG Yuanbo<sup>1\*</sup>

1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The absorption and utilization of plant nutrients is the key process of ecosystem material cycle, and it's also a important issue for the restoration and reconstruction of degraded ecosystem. To explore the absorption and utilization regularities on nutrients in the grassland ecosystem plants, the characteristics of 10 elements in 11 main species such as *Leymus Chinensis*, *Agropyron cristatum*, *Stipa grandis*, *Achnatherum sibirica*, *Cymbaria dahurica*, *Koeleria cristata*, etc., collected in the Xilin River Basin, were investigated. The results showed that: (1) The contents of plant elements in the study area belongs to (K) > (Ca) > (Mg) type. The coefficients of variation of elements contents were less than 1, indicated there were no obvious differences among plant elements of different species. (2) Correlation analysis among plant elements indicated N and K, N and Mg, P and K, P and Mg, Ca and Mg, Fe and Cu were of markedly positive correlation ( $P \leq 0.01$ ), but C and Fe, C and Cu were of negative correlation; N and P, N and Ca, K and Mg were statistically significant ( $P \leq 0.05$ ). (3) Gramineous plants have lower N、P、K、Ca and higher Fe, Cu content, but Mn, Zn, P, Mg, Ca, K, N, C in non-gramineous plants were higher, while Ca, K, Mg were statistically most significant difference ( $P \leq 0.01$ ), as well as N ( $P \leq 0.05$ ). And (4) we used principal component analysis to evaluate the level of plant nutrients, as a result, *Cymbaria dahurica* L., *Koeleria cristata* and *Potentilla tanacetifolia* had higher nutrients content, so they had a better ability to absorb nutrients.

**Key words:** *Leymus Chinensis* grassland; main species; element contents