

DOI:10.11686/cyxb2025271

http://cyxb.magtech.com.cn

吴逊文, 许银龙, 莫宇, 等. 内蒙古额尔古纳草甸草原植物器官热值研究. 草业学报, 2026, 35(6): 13-23.

WU Xun-wen, XU Yin-long, MO Yu, *et al.* Calorific values of plant organs of vegetation growing on the Erguna Meadow Steppe, Inner Mongolia. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(6): 13-23.

内蒙古额尔古纳草甸草原植物器官热值研究

吴逊文¹, 许银龙¹, 莫宇^{1,2}, 罗清¹, 李佳欣¹, 张伊琳¹, 于杰¹, 张靖¹, 赵钰¹, 鲍雅静^{1*}

(1. 大连民族大学环境与资源学院, 辽宁 大连 116600; 2. 内蒙古大学生态与环境学院, 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 内蒙古草地生态学重点实验室, 草原生态安全省部共建协同创新中心, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要: 为了探究草甸草原生态系统的能量固定与分配机制, 本研究通过对内蒙古额尔古纳草甸草原中的36种植物进行热值分析, 系统探讨了不同功能群(豆科、禾草、杂类草)及不同水分生态类型(旱生、中旱生、旱中生、中生、湿中生)及其植物器官的热值变化规律和能量分配。研究表明: 1) 36种植物的平均热值为 $17.31 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中植物器官果的平均热值最高, 花与叶的平均热值次之, 茎的平均热值最低, 且均呈现显著差异 ($P < 0.05$), 在主要科中, 豆科植物热值最高, 显著高于菊科、毛茛科、石蒜科等, 而蔷薇科植物热值则与石蒜科差异不显著。2) 在功能群中, 豆科热值显著高于禾草与杂类草 ($P < 0.05$), 其中豆科植物的叶热值显著高于其他器官 ($P < 0.05$), 禾草的叶热值高于茎, 而杂类草则是以花、果热值显著高于茎、叶 ($P < 0.05$)。3) 在不同水分生态功能群中, 植物整株热值之间并未表现出显著差异 ($P > 0.05$), 除中旱生植物外, 其他水分生态功能群均呈现花果热值显著高于茎叶 ($P < 0.05$) 的结果, 水分生态功能群中热值对于器官水平响应显著。4) 植物整株热值与碳含量呈显著正相关, 表明碳含量是影响植物能量储存的关键基础, 植物各器官热值与碳含量同样呈显著正相关, 但器官相关性强度不同 (花 $>$ 叶 $>$ 茎 $>$ 果), 其中花器官相关性最强 ($r = 0.91$), 果器官呈现相对较低的相关性 ($r = 0.79$)。

关键词: 草甸草原; 热值; 植物器官; 水分生态功能群; 碳含量

Calorific values of plant organs of vegetation growing on the Erguna Meadow Steppe, Inner Mongolia

WU Xun-wen¹, XU Yin-long¹, MO Yu^{1,2}, LUO Qing¹, LI Jia-xin¹, ZHANG Yi-lin¹, YU Jie¹, ZHANG Jing¹, ZHAO Yu¹, BAO Ya-jing^{1*}

1. School of Environment and Resources, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China; 2. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Key Laboratory of Mongolian Plateau Ecology and Resource Utilization, Ministry of Education, Inner Mongolia Key Laboratory of Grassland Ecology, Co-Innovation Center for Grassland Ecological Security, Jointly Supported by Ministry of Education and Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010021, China

Abstract: The aim of this study was to investigate the energy fixation and allocation mechanisms in meadow steppe ecosystems. To this end, we systematically analyzed the calorific values of 36 plant species growing on the Erguna Meadow Steppe, Inner Mongolia. We analyzed variations in calorific values and energy allocation patterns across plant organs, functional groups (Fabaceae, Poaceae, forbs), and hydric ecological types (xerophytes, meso-xerophytes, xero-mesophytes, mesophytes, wet-mesophytes). The results showed that: 1) The average calorific

收稿日期: 2025-07-02; 改回日期: 2025-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(32371639), 国家自然科学基金项目(31971464), 辽宁省科技计划联合计划项目(2024JH2/102600110)和中央高校基本科研业务费(044420250083)资助。

作者简介: 吴逊文(1997-), 男, 湖南邵阳人, 硕士。E-mail: 1169910906@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: byj@dlnu.edu.cn

value of the 36 plant species was $17.31 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$. Among the plant organs, fruit had the highest average calorific value, followed by flowers and leaves, while stems had the lowest, with all differences being significant ($P < 0.05$). Among the major families, Fabaceae exhibited the highest calorific values, significantly higher than those of Asteraceae, Ranunculaceae, and Amaryllidaceae ($P < 0.05$), but there was no significant difference in calorific value between Rosaceae and Amaryllidaceae. 2) Among the functional groups, Fabaceae had significantly higher calorific values than Poaceae and forbs ($P < 0.05$). In Fabaceae, calorific values were significantly higher for the leaf than for the other organs ($P < 0.05$). In Poaceae, the calorific values of the leaves were higher than those of the stems; in forbs, the calorific values of flowers and fruit were significantly higher than those of stems and leaves ($P < 0.05$). 3) The whole-plant calorific values did not differ significantly among hydric ecological types ($P > 0.05$). However, except for meso-xerophytes, all other hydric ecological types showed significantly higher calorific values for flowers and fruits than for stems and leaves ($P < 0.05$), indicating that calorific values in hydric ecological types respond significantly at the organ level. 4) Whole-plant calorific values were significantly positively correlated with carbon content, suggesting that carbon content is a key factor influencing plant energy storage. Similarly, calorific values of plant organs were also significantly positively correlated with carbon content, but the strength of the correlation varied among organs (flowers > leaves > stems > fruits), with the strongest correlation in flowers ($r = 0.91$) and the weakest in fruit ($r = 0.79$).

Key words: meadow steppe; calorific value; plant organs; water ecological functional groups; carbon content

草原生态系统是全球重要的生态类型之一,是生物多样性的资源库,覆盖了全球40%的陆地面积与69%的农业用地^[1],受气候、土壤、植被等自然因素以及人类活动的影响,目前全球49%的草原生态系统正面临不同程度的破坏,草地能源问题也成了一个重要的生态问题^[2],生物质能(biomass energy)作为最广泛的可再生能源,在碳储存和能源储备方面发挥着重要作用,同时可持续的生物能源发展在全世界得到了广泛的认可^[3],其中草原作为一个巨大的生物质能库,对于可再生能源的产生与循环有着重要作用^[4],更能影响到草原食物的能量质量高低,潘庆民等^[5]指出在这种情况下,掌握并改善草原生态系统能源状况对于保障我国食物安全稳定和草原生态系统安全均具有重要意义^[6]。

生物质能作为重要的可再生能源,其能量利用效率与植物材料的热值密切相关,热值(calorific values)是指单位重量干物质完全燃烧后释放的热量^[7],同样热值也是能量研究的起点,是植物综合生长状态的一种体现,而植物热值作为衡量植物能源质量的指标,将植物的热值和干物质产量结合起来可以较好地评价生态系统中能量固定与分配状况^[8]。目前,学术界对热值的研究主要集中在森林、草原和沙地^[9]等生态系统上,有关草原的研究主要集中在典型草原、荒漠草原、高寒草原上揭示草本植物物种热值的本底状况^[10-11],然而在针对物种复杂,产量高的草甸草原这一重要生态类型的植物热值分布状况尚缺乏相关研究。

目前对植物热值的研究仍停留在植物整株上^[12-13],而从植物器官作为切入点的研究较少,Yan等^[14]对中国植物不同器官热值进行了探究,从目前的研究中能够看出植物各器官能够反映整株植物对环境资源的响应分配,这表明,通过分器官测定植物热值,可揭示整株水平热值分析中难以观测的潜在特征,为深入解析植物能量分配机制提供了新的研究维度,但对于在草甸草原上植物器官的热值尚缺乏系统性的探究。

有研究表明,不同生活型功能群植物的整株热值呈现显著差异^[8,13],其中豆科植物整株热值显著高于禾草和杂类草($P < 0.05$)。然而,现有研究多集中于整株尺度,而对功能群内植物器官的热值分配规律尚未系统解析,尤其缺乏对器官间热值分配格局的定量表征,这一研究空白提示,通过构建器官尺度的热值研究,能揭示整株水平能量分析中易被忽略的分配与固定特征。赵芳媛等^[15]认为内蒙古草原生态系统主要受水分条件主导,前人基于整株尺度对植物水分生态类型的热值进行了系统分析^[13,16],研究结果表明整株水分生态类型无显著差异($P > 0.05$),然而,针对草甸草原这一特定生境,不同水分生态类型植物器官的热值分配规律及其能量固定策略仍存在研究空白,尤其缺乏器官尺度热值特征与水分适应机制的关联性解析。目前关于植物热值与碳含量的相关性研

究多集中于整株尺度^[8,13,16-17],研究表明碳含量与热值呈显著正相关($P < 0.05$),而关于探索草甸草原中植物器官热值与碳含量的相关分析仍未系统揭示,这一研究缺失限制了碳在器官上的固定与分配规律解析,开展器官水平的热值与碳的关联研究,既可突破以往植物整株分析对能量的分配机制的表征瓶颈,又能为植物资源定向培育及重点能源植物筛选提供新的方向。

基于此,本研究以内蒙古额尔古纳草甸草原为研究区域,对样地内共计 36 种植物进行采集,并对其茎、叶、花、果器官进行热值测定与分析,本研究通过器官尺度的精细化能量评估,不仅为阐明植物能量分配的生态适应机制提供新视角,更为草原生物质能的高效开发与可持续利用提供科学依据,能推动草原管理从传统“整株生产力优先”向“器官差异化利用”转型,为兼顾生物质能开发与草原生态安全的可持续发展路径提供数据支撑与理论范本。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托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进行,野外围封控制试验在天然草原上进行,自 2013 年开始对样地进行围封,以防止牲畜放牧,其地理坐标为北纬 $50^{\circ}12'19''$,东经 $119^{\circ}30'28''$,海拔 523 m,该地区年平均降水量为 363 mm,年平均气温为 -2.45°C ,属于寒温带大陆性气候,主要特点是夏季短暂高温,冬季漫长寒冷。试验区内土壤类型为黑钙土^[18],该生态系统的优势种有羊草(*Leymus chinensis*)、狼针草(*Stipa baicalensis*)和披针叶野决明(*Thermopsis lanceolata*)。

1.2 试验设计

样品于 2023 与 2024 年 7—8 月植物群落地上生物量高峰期进行采集,每年选取了相同处理下 8 块自然样地,进行 8 个重复试验,布设每个样方的面积为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,在每个样方齐地面分物种剪取羊草、狼针草等共计 36 种植物样品。

1.3 样品收集与处理

采集样品带回实验室将有茎、叶、花、果的植物进行分类记录并装入信封袋,在电热鼓风干燥箱(BA0-150A,上海)中以 105°C 杀青 30 min 后,再以 65°C 烘干 24 h 去除水分至恒重,用天平称各植物茎、叶、花、果样本干物质重(dry weight),将烘干的植物器官使用混合型球磨机(MM400,德国)研磨成样品,通过全自动氧弹式热量计(Parr6400 美国)进行热值测量得出数据,再通过元素分析仪 C/N(EA3000,意大利)测量植物碳含量。

1.4 植物整株热值计算

将植物样品通过实验仪器处理后得出数据并记录,再将各器官数据进行热值测定计算。

$$C_{\text{整株}} = \sum_{k=1}^n C_k \times P_k$$

式中: $C_{\text{整株}}$ 代表植物整株的热值(单位: $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$), C_k 代表第 k 个器官的热值, P_k 代表第 k 个器官的干重占比, k 代表植物器官标识(茎、叶、花、果), n 代表器官种类总数。

1.5 数据分析

采用 EXCEL 2020 进行试验数据初步整理与作图,使用 IBM SPSS 26 进行数据处理和统计分析,采用 Origin 2022 进行频数分析并作图分析 36 种植物热值的基本特征。用 K-S 检验对原始数据是否符合正态分布进行检验,不符合正态分布的数据选择合适的方法进行转换。用单因素方差分析和 Fisher LSD 对物种丰富度、水分生态类型和群落热值的影响及植物功能群、种群和器官水平之间的植物热值差异进行检测,其中水分生态类型以《内蒙古植物志》^[19]为准,所有统计检验的显著水平以 $P < 0.05$ 为基准。

2 结果与分析

2.1 不同植物热值频数与器官分析

本次研究主要测定了内蒙古草甸草原中的 36 种植物,分属 15 个科,其主要物种和分类群及热值测定结果见表 1。对测定结果的频数分析发现,所有植物的平均热值为 $17.31\text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中,细叶鸢尾的热值为 15.79

表1 内蒙古草甸草原植物功能群分类

Table 1 Classification of plant functional groups in the meadow steppe of Inner Mongolia ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)

科 Family	学名 Scientific name	功能群 Functional group	水分生态类型 Water ecological type	平均热值 Average calorific value
石蒜科 Amaryllidaceae	野韭 <i>Allium ramosum</i>	F	XM	16.84±0.37
	细叶韭 <i>Allium tenuissimum</i>	F	X	16.65±0.17
唇形科 Lamiaceae	裂叶荆芥 <i>Schizonepeta tenuifolia</i>	F	M	16.96±0.39
豆科 Legumes	花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i>	L	MX	17.52±0.39
	草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	L	MX	17.79±0.29
	披针叶野决明 <i>Thermopsis lanceolata</i>	L	M	18.24±0.41
	野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	L	M	17.85±0.25
	斜茎黄芪 <i>Astragalus laxmannii</i>	L	MX	17.62±0.53
禾本科 Poaceae	早熟禾 <i>Poa annua</i>	P	M	16.98±0.17
	狼针草 <i>Stipa baicalensis</i>	P	X	17.78±0.23
	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	P	X	17.46±0.00
	洽草 <i>Koeleria macrantha</i>	P	X	17.25±0.33
	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	P	XM	17.48±0.24
	西伯利亚羽茅 <i>Achnatherum sibiricum</i>	P	X	17.54±0.37
桔梗科 Campanulaceae	长柱沙参 <i>Adenophora stenanthina</i>	F	M	17.40±0.25
菊科 Asteraceae	阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	F	MX	17.40±0.24
	艾 <i>Artemisia argyi</i>	F	M	17.88±0.00
	柔毛蒿 <i>Artemisia pubescens</i>	F	MX	18.00±0.05
	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	F	XM	17.55±0.40
	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	F	X	17.92±0.32
	裂叶蒿 <i>Artemisia tanacetifolia</i>	F	M	16.98±0.17
	麻花头 <i>Klasea centauroides</i>	F	MX	16.90±0.29
	狭叶青蒿 <i>Artemisia dracuncululus</i>	F	M	17.73±0.36
蓼科 Polygonaceae	叉分蓼 <i>Koenigia divaricata</i>	F	XM	16.56±0.26
毛茛科 Ranunculaceae	唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i>	F	M	17.24±0.31
	细叶白头翁 <i>Pulsatilla turczaninowii</i>	F	M	16.22±0.17
茜草科 Rubiaceae	蓬子菜 <i>Galium verum</i>	F	M	17.20±0.24
蔷薇科 Rosaceae	地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>	F	M	16.30±0.57
	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	F	X	16.65±0.35
	菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>	F	MX	16.49±0.32
伞形科 Apiaceae	线叶柴胡 <i>Bupleurum angustissimum</i>	F	X	17.81±0.39
	防风 <i>Saposhnikovia divaricata</i>	F	M	17.29±0.59
莎草科 Cyperaceae	寸草苔 <i>Carex duriuscula</i>	F	WM	17.31±0.31
玄参科 Scrophulariaceae	达乌里芯芭 <i>Cymbaria dahurica</i>	F	X	17.34±0.41
鸢尾科 Iridaceae	细叶鸢尾 <i>Iris tenuifolia</i>	F	M	15.79±0.77
大戟科 Euphorbiaceae	乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	F	XM	18.53±0.00

注: X: 旱生植物; MX: 中旱生植物; XM: 旱中生植物; M: 中生植物; WM: 湿中生植物; F: 杂类草; P: 禾草; L: 豆科; 数据为平均值±标准差, 部分植物由于样地标本缺少无相应标准差值。

Note: X: Xerophytes; MX: Meso-xerophytes; XM: Xero-mesophytes; M: Mesophytes; WM: Wet-mesophytes; F: Forbs; P: Poaceae; L: Legume. Data are presented as mean±standard deviation. Standard deviation values are missing for some plant species due to the lack of corresponding samples in the plots.

$\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, 在调查的所有物种中热值最低。其余物种的热值为 $16.22\sim 18.53\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, 乳浆大戟热值最高, 为 $18.53\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, 热值总体数据呈正态分布(图 1)。从测定的 36 种植物器官热值分析结果发现, 果 [$(18.39\pm 0.58)\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$] 的热值最高, 其次是花 [$(17.94\pm 0.78)\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$] 与叶 [$(17.51\pm 0.76)\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$], 茎 [$(17.11\pm 0.58)\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$] 的热值最低, 方差分析结果表明, 测定的植物器官热值均呈现出显著差异 ($P<0.05$, 图 2)。

根据物种的科属将 36 种植物分为 15 个不同的科, 从中选取 7 个主要科(每科种数至少 2 种)的植物热值进行方差分析, 主要包括: 豆科(5 种)、禾本科(6 种)、菊科(8 种)、蔷薇科(3 种)、伞形科(2 种)、毛茛科(2 种)、石蒜科(2 种)共 28 种植物。结果表明, 基于主要科的植物热值平均值的顺序为: 豆科($17.86\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 伞形科($17.63\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 禾本科($17.42\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) = 菊科($17.42\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 毛茛科($17.04\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 石蒜科($16.74\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 蔷薇科($16.50\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)。其中豆科植物的热值与伞形科差异不显著, 但显著高于其他 5 科植物 ($P<0.05$), 而蔷薇科植物的热值与石蒜科差异不显著 ($P>0.05$), 但显著低于其他 5 科植物, 禾本科和菊科植物的热值无显著差异 ($P>0.05$), 其余 5 个主要科的植物热值部分存在差异不显著 ($P>0.05$) 的结果(图 3)。

2.2 不同功能群与器官的热值分析

通过表 1 可知, 可将植物分为 3 个功能群: 豆科、禾草、杂类草。其中种类最多的为杂类草(25 种), 其次是禾草(6 种), 最少是豆科(5 种), 方差分析结果表明, 不同功能群之间的植物热值平均值的排序为豆科($17.86\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 禾草($17.42\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 杂类草($17.14\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$), 豆科植物热值最高, 且显著高于其他两类功能群(图 4)。其中, 豆科、禾草、杂类草 3 类植物热值均呈现出显著差异 ($P<0.05$)。

将 36 种植物分成 3 个功能群(豆科、禾草、杂类草)进行植物主要器官(茎、叶、花、果)热值分析。方差分析结果表明, 不同功能群植物器官热值呈显著规律性, 豆科与禾草均以叶为最高热值器官, 而杂类草植物器官则以果的热值居首(图 5)。不同功能群的相同器官比较中发现, 除花以外的器官热值均呈显著差异 ($P<0.05$), 豆科植物的茎和叶热值均显著高于禾草与杂类草 ($P<0.05$), 豆科与禾草的果热值无显著差异 ($P>0.05$), 而杂类草的果热值则显著高于豆科与禾草 ($P<0.05$)。统计分析结果进一步发现, 在同一功能群下的器官比较中, 豆科表现出叶热值显著高于其他器官 ($P<0.05$), 禾草表现出叶热值显著高于茎热值 ($P<0.05$),

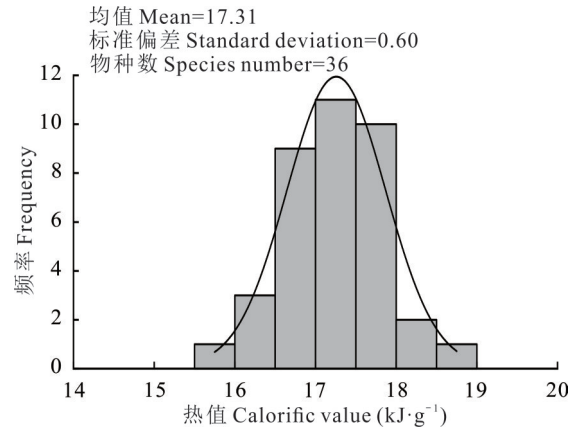


图 1 内蒙古草甸草原植物热值分布频率
Fig. 1 Distribution frequency of plant calorific values in the meadow steppe of Inner Mongolia

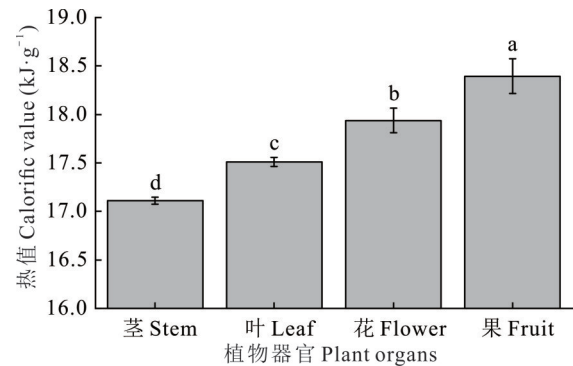


图 2 内蒙古草甸草原植物器官热值分析
Fig. 2 Analysis of calorific values in plant organs from the meadow steppe of Inner Mongolia

不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

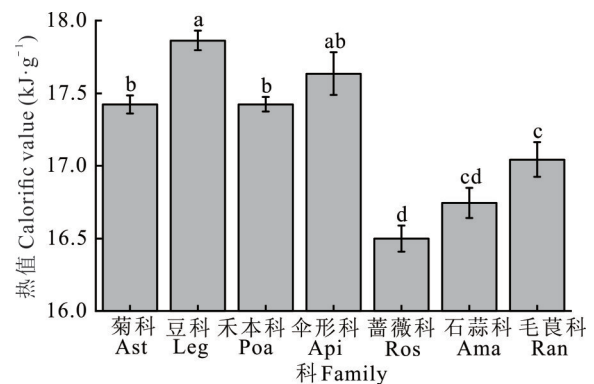


图 3 主要科的热值分析
Fig. 3 Analysis of calorific values of major families
Ast: Asteraceae; Leg: Legumes; Poa: Poaceae; Api: Apiaceae; Ros: Rosaceae; Ama: Amaryllidaceae; Ran: Ranunculaceae.

而其他器官之间并无显著的差异性($P>0.05$),杂类草则表现出显著的器官差异,呈果>花>叶>茎($P<0.05$)。

2.3 不同水分生态功能群之间的热值分析

通过表1物种的水分生态类型,可将植物分为5个水分生态功能群:旱生植物、中旱生植物、早中生植物、中生植物和湿中生植物,其中,中生植物(14种)和旱生植物(9种)相对较多,中旱生植物(7种)和早中生植物(5种)相对较少,而湿中生植物仅1种。方差分析测定结果表明,不同水分生态类型功能群植物热值最高的为旱生植物,中旱生植物热值略低于其他功能群,其他功能群的植物热值接近,表明其能量储存策略对水分梯度的响应具有趋同性,植物整株热值在不同水分生态功能群之间未呈现出显著差异($P>0.05$,图6)。

将36种植物基于水分生态适应性进行划分,因湿中生植物寸草苔为整株,无器官,故分为4个不同的水分生态功能群(旱生、中旱生、早中生、中生)并对其主要器官(茎、叶、花、果)热值进行分析。根据方差分析结果,各水分功能群均表现为繁殖器官热值高于营养器官。相同器官不同水分功能群之间比较发现,除叶以外的器官呈现部分不显著($P>0.05$),旱生植物的茎热值显著高于其他水分功能群,在器官花、果中,旱生植物与早中生无显著差异($P>0.05$),却显著高于中生植物($P<0.05$),从器官热值水平的分布特征中发现,茎热值最高的是旱生植物;叶热值最高的是中生植物;花热值最高的为早中生植物;果热值最高的是旱生植物。统计分析结果进一步表明,在同一功能群下中生、早中生、旱生植物中,花、果热值之间无显著差异($P>0.05$),却显著高于茎叶($P<0.05$),而中旱生植物却呈现出叶、花之间无显著差异($P>0.05$),却显著高于茎($P<0.05$,图7)。

2.4 植物器官热值与碳含量的相关性分析

为了探究内蒙古草甸草原植物及其器官热值与碳含量的关系,本研究对植物样品进行了碳含量的测定。36种植物的器官热值与碳含量的相关性分析结果显示,茎、叶、花的热值与碳含量呈极显著正相关($P<0.01$),果的热值与碳含量呈显著正相关($P<0.05$),且相关性强度呈现器官特异性,依次为花($r=0.91$)>叶($r=0.82$)>茎($r=0.80$)>果($r=0.79$)(图8)。

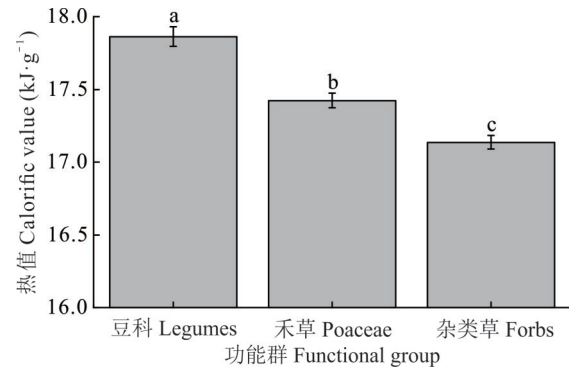


图4 基于不同功能群的热值分析

Fig. 4 Analysis of calorific values based on different functional groups

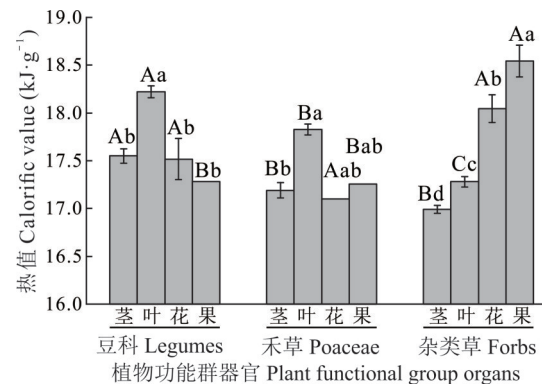


图5 基于不同功能群器官的热值分析

Fig. 5 Analysis of calorific values based on organs of different functional groups

大写字母表示同一器官下不同功能群间差异显著,小写字母表示同一功能群下不同器官间差异显著。Capital letters indicate significant differences among functional groups within the same plant organ, whereas lowercase letters indicate significant differences among plant organs within the same functional group. 茎: Stem; 叶: Leaf; 花: Flower; 果: Fruit. 下同。The same below.

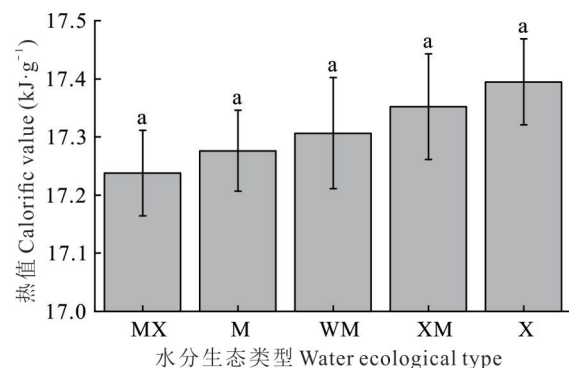


图6 基于不同水分生态功能群的热值分析

Fig. 6 Analysis of calorific values based on different water ecological functional groups

MX: 中旱生植物 Meso-xerophytes; M: 中生植物 Mesophytes; WM: 湿中生植物 Wet-mesophytes; XM: 早中生植物 Xero-mesophytes; X: 旱生植物 Xerophytes. 下同 The same below.

3 讨论

本研究通过区分器官测定了 36 种植物的茎、叶、花、果热值,研究发现了功能群、水分生态适应性及其碳含量的热值策略,同时揭示了在器官水平下的能量固定与分配规律。

在不同生活型功能群下,豆科植物的能量储存能力显著高于其他两类功能群^[20],豆科的高热值与其固氮共生特性、高纤维素及木质素含量驱动的碳代谢效率相关^[21],也反映出豆科植物作为高能效的生物质资源的突出潜力,可为生物质能的开发提供优选原料;禾草较高的热值则源于其纤维化茎叶结构对能量的高效储存^[22];杂类草热值最低,可能是不同功能群下物种组成复杂且代谢策略多样,导致整体能量分散。其中,豆科、禾草、杂类草 3 类均呈现出显著差异($P < 0.05$),反映了在适应环境过程中不同植物的能量分配权衡机制。

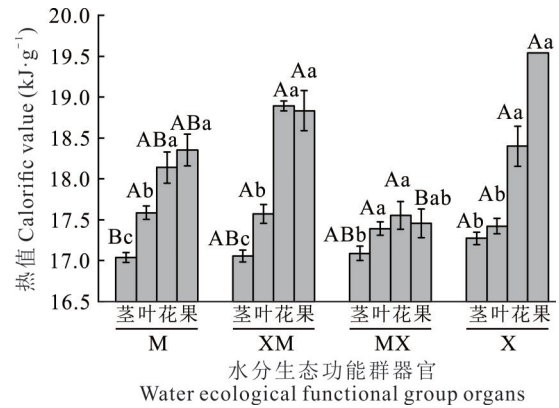


图 7 基于不同水分生态功能群的植物器官热值分析

Fig. 7 Analysis of calorific values in plant organs based on different water ecological functional groups

不同大写字母表示同一器官下不同水分生态类型间差异显著、不同小写字母表示同一水分生态类型下不同器官间差异显著。Different capital letters indicate significant differences among different water ecotypes within the same organ, while different lowercase letters indicate significant differences among different organs within the same water ecotype.

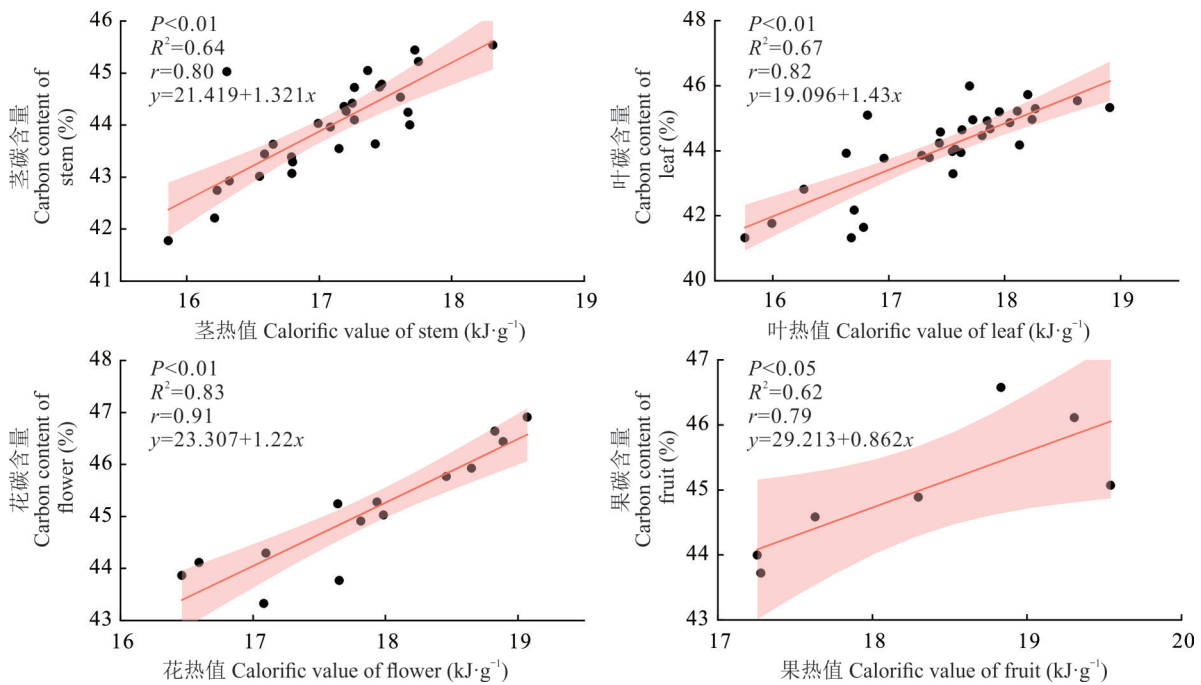


图 8 植物器官热值与碳含量的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between calorific value and carbon content in plant organs

杂类草整株热值低于豆科,但果实热值却显著高于豆科叶片,表明仅依赖整株数据可能严重低估繁殖器官的能值贡献,这一发现解释了为何在相同整株热值下,不同物种的生态功能存在显著差异,为生态系统的精细化研究提供了依据,植物整株热值无法真实反映核心能量储存器官的作用。豆科与禾草植物以叶片热值最高,与典型草原的“叶主导”能量分配模式一致,这说明豆科植物通过共生固氮提高氮素利用效率,促进叶片光合产物的积累^[23],禾草植物的纤维化叶片结构可能增强能量储存稳定性,同时也表明在稳定或资源竞争较弱的环境中,能量优先分配给叶片以维持光合作用,支持植物长期生长,这一发现不仅支持前言中“器官差异化利用”的核心论点,

更能为生物质能开发提供精准靶点;而杂类草植物则表现出独特的“果热值优先”策略,其果实热值甚至超过豆科叶片,这与杂类草在适应多变生境时为了强化后代存活的繁殖保障策略相同,需要通过高能种子提高后代存活率,体现其对繁殖器官的能量优先分配策略^[24],这种差异可能源于生态位竞争压力下的功能群适应性策略分化,禾草作为优势种,通过高叶热值优化光合碳同化效率以维持竞争优势,豆科与其氮素利用策略有关^[25],而杂类草在资源受限生境中倾向于向繁殖器官分配更多的能量,以保障种群更新、繁殖^[26],果实所带来的高能特性凸显了在能源化利用中的独特价值,而杂类草的热值分异(果>花>叶>茎)暗示次生代谢产物的调控作用^[27]。

从水分生态功能群视角看,前人研究多关注植物整株热值的差异^[13,16],却未能揭示植物器官水平的适应策略。在前人的研究文献中,不同水分功能群植物的整株热值之间不存在显著差异,但本研究却发现不同水分生态类型的植物器官热值之间存在着显著差异($P<0.05$),且水分生态类型的器官响应规律进一步验证了能量分配的适应性本质^[28]:早生植物表现出对干旱环境的极端适应策略,其果实热值显著高于其他器官,通过高能量储存保障种子在干旱条件下的存活与萌发^[29],这与植物在资源有限环境下优先“繁殖保障”策略一致,将能量集中于繁殖器官以提高后代存活概率;中生植物叶与果热值趋同,将能量优先分配至叶片,在中生环境水分充足条件下,光合作用的高效运行和叶片的快速生长需求相关^[30],反映了稳定生境中的能量均衡分配^[31];中早生与早中生植物则呈现“过渡性”策略,中早生植物的花热值最高($17.55\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$),早中生植物的花热值进一步升高($18.89\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$),表明中等干旱胁迫下植物可能通过强化繁殖器官的高能量吸引传粉者或延长花期用以应对周围的环境波动。这些结果证明,仅通过整株热值评估植物对水分梯度的适应性可能会掩盖关键的器官水平权衡机制。

在研究碳与热值的关系上,前人研究发现植物整株热值与碳含量呈显著正相关^[13,16,32],表明碳含量是影响植物能量储存的关键基础,本研究表明,植物各器官热值与碳含量同样呈显著正相关,但相关性强度不同(花>叶>茎>果),显示植物通过提高碳含量强化能量储存的策略具有器官差异性,其中花的高相关性可能与繁殖器官的能量分配优先策略相关,叶片作为光合作用的核心器官,对于碳积累有着重要作用,果的热值与碳含量的相关性较弱则与果实中代谢产物的多样性有关,以禾草果实为例,其碳含量虽高于杂类草果实,但热值反而较低,这可能因储存物质类型不同产生差异,禾草果实以淀粉为主,而杂类草果实富含脂类^[33],1 g脂肪完全燃烧释放的热量是碳水化合物的2.3倍,但其碳含量显著高于碳水化合物,可能源于高脂类(低碳高热值)储能策略^[34]。

本研究对于草原管理实践具有双重启示:一方面,豆科植物叶片与杂类草果实的高热值特性,暗示着草甸草原可能通过杂类草繁殖器官的能量富集维持生态系统能量稳定性,这对于其在生物质能开发中有着优先利用的价值,同时应该警惕过度收割这些器官可能会对植物繁殖和能量循环平衡产生负面影响;另一方面,禾草茎的低热值可能限制其作为饲草的能量供给效率,需结合叶、果热值优化放牧策略(如控制茎叶比)^[35],这种精细化的测算可优化草场的轮牧方案,例如在果期避免收割杂类草果实以维持种群更新,同时在营养期优先利用豆科叶片提升饲草品质,这些发现超越了传统以整株生产力为核心的管理框架,推动草原利用向“器官差异化利用”转型。

4 结论

本研究通过器官尺度系统解析了内蒙古草甸草原上36种植物的能量分配策略,揭示了植物功能群与水分生态适应性中能量储存模式的变化规律和能量分配。结果表明,豆科与禾草以营养器官(茎、叶)为核心能量储存位点,其中豆科叶片热值($18.22\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)显著高于杂类草($P<0.05$),其高效特性与共生固氮密切相关;杂类草则优先通过繁殖器官(花、果)分配能量,果实热值($18.54\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)显著高于豆科与禾草($P<0.05$),体现其对不稳定生境的“繁殖保障”策略。水分适应性进一步驱动器官的能量分配响应,早生植物果实热值最高($19.54\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$),叶片热值最高的为中生植物($17.59\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$),而中早生与早中生植物则强化花器官能量积累($17.55\sim 18.89\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$),揭示中等干旱条件下繁殖投入的适应性权衡。各器官热值与碳含量均呈显著正相关($P<0.05$),相关性强度依次为花($r=0.91$)>叶($r=0.82$)>茎($r=0.80$)>果($r=0.79$)。本研究阐明了草甸草原植物能量分配的器官尺度适应机制,为优化生态系统能量模型、筛选高效生物质资源(如豆科叶片、杂类草果实)及制定差异化植物恢复策略提供依据,同时能推动草原管理从传统“整株生产力优先”向“器官差异化利用”转型,更能凸显器官尺度研究在解析植物环境适应策略中的关键作用。

参考文献 References:

- [1] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, *et al.* Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10): 720–735.
- [2] Zhao H L, Zhou R L, Zhang T H, *et al.* Range vegetation, and its characteristics, ecological-problems in the northern agri-pastoral transition zone, China. *Chinese Journal of Grassland*, 2003, 25(3): 2–9.
赵哈林, 周瑞莲, 张铜会, 等. 我国北方农牧交错带的草地植被类型、特征及其生态问题. *中国草地*, 2003, 25(3): 2–9.
- [3] Lewandowski I, Scurlock J M O, Lindvall E, *et al.* The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass & Bioenergy*, 2003, 25(4): 335–361.
- [4] Yan P, Xiao C W, Xu L, *et al.* Biomass energy in China's terrestrial ecosystems: Insights into the nation's sustainable energy supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 127: 109857.
- [5] Pan Q M, Yang Y H, Huang J H. Limiting factors of degraded grassland restoration in China and related basic scientific issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(4): 571–579.
潘庆民, 杨元合, 黄建辉. 我国退化草原恢复的限制因子及需要解决的基础科学问题. *中国科学基金*, 2023, 37(4): 571–579.
- [6] Li B. The rangeland degradation in north China and its preventive strategy. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(6): 2–10.
李博. 中国北方草地退化及其防治对策. *中国农业科学*, 1997, 30(6): 2–10.
- [7] Guan L L, Zhou X Y, Luo Y. A review on the study of plant caloric value in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 452–457.
官丽莉, 周小勇, 罗艳. 我国植物热值研究综述. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 452–457.
- [8] Bao Y J, Li Z H, Han X G, *et al.* Plant caloric value and its bio-ecological attributes. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(9): 1095–1103.
鲍雅静, 李政海, 韩兴国, 等. 植物热值及其生物生态学属性. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1095–1103.
- [9] Huang S Y. Characteristics and influencing factors of surface energy balance in an *Artemisia ordosica* shrub ecosystem in the Mu Us Desert. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
黄松宇. 毛乌素沙地油蒿灌丛生态系统表面能量平衡特征及影响因素. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [10] Yang F L, Zhou G S. Characteristics and driving factors of energy budget over a temperate desert steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5769–5780.
阳伏林, 周广胜. 内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子. *生态学报*, 2010, 30(21): 5769–5780.
- [11] Qu G H, Wen M Z, Guo J X. Energy accumulation and allocation of main plant populations in *Aneurolepidium chinense* grassland in Songnen Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 685–689.
曲国辉, 温明章, 郭继勋. 松嫩平原羊草草甸草原主要植物种群能量积累和分配. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 685–689.
- [12] Bao Y J, Li Z H, Han X G, *et al.* The caloric content of plant species and its role in a *Leymus chinensis* steppe community of Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4443–4451.
鲍雅静, 李政海, 韩兴国, 等. 内蒙古羊草草原植物种能量含量及其在群落中的作用. *生态学报*, 2007, 27(11): 4443–4451.
- [13] Tan Y C, Bao Y J, Li Z H, *et al.* Calorific values of grassland plant population and functional groups in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia and Liaoning Province border. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(1): 15–21.
谭嫣辞, 鲍雅静, 李政海, 等. 蒙辽农牧交错区草地植物种群和功能群热值研究. *草地学报*, 2019, 27(1): 15–21.
- [14] Yan P, Li X, He N P. Variation in the calorific values of different plants organs in China. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0199762.
- [15] Zhao F Y, Wei C Z, Lv X T, *et al.* Responses of plant species with different genome size to water and nitrogen addition in Inner Mongolia Grassland, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(8): 2675–2681.
赵芳媛, 魏存争, 吕晓涛, 等. 内蒙古草原不同基因组大小植物对氨水添加的响应. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2675–2681.
- [16] Long S Y, Bao Y J, Li Z H, *et al.* The carbon contents and the relationship with the calorific values of 67 plant species in Inner Mongolia grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1): 112–119.
龙世友, 鲍雅静, 李政海, 等. 内蒙古草原 67 种植物碳含量分析及与热值的关系研究. *草业学报*, 2013, 22(1): 112–119.

- [17] Gao K, Xie Z B, Xu S T, *et al.* Characterization of caloric value in fifteen plant species in *Leymus chinensis* steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 588–594.
高凯, 谢中兵, 徐苏铁, 等. 内蒙古锡林河流域羊草草原15种植物热值特征. *生态学报*, 2012, 32(2): 588–594.
- [18] Du P C, Pan Y Z, Hou S L, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on litter decomposition in Hulunber steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(2): 44–53.
杜鹏冲, 潘昱臻, 侯双利, 等. 氮磷添加对呼伦贝尔草地凋落物分解的影响. *草业学报*, 2023, 32(2): 44–53.
- [19] Zhao Y Z, Zhao L Q, Cao R. *Flora intramongolica* (the third edition). Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 2020.
赵一之, 赵利清, 曹瑞. 内蒙古植物志(第三版). 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2020.
- [20] Guo J X, Wang R D, Bao G Z. Caloric value of northeast *Aneurolepidium chinense* grassland species. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(6): 746–750.
郭继勋, 王若丹, 包国章. 东北羊草草原主要植物热值. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 746–750.
- [21] Zhao Y Z, Wang H M, Wang Z Q. The role of leguminous plants and rhizobium in ecological environment. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(4): 7–12.
赵叶舟, 王浩铭, 汪自强. 豆科植物和根瘤菌在生态环境中的地位和作用. *农业环境与发展*, 2013, 30(4): 7–12.
- [22] Xiao Y B. Interspecific competition for nutrients and nitrogen transfer between the intercropped legume and cereal. Beijing: China Agricultural University, 2003.
肖焱波. 豆科/禾本科间作体系中养分竞争和氮素转移研究. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [23] Zhu X Q, Wang C Y, Sheng M, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on calorific value and contents of carbon and ash in *Robinia pseudoacacia*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(11): 1028–1034.
朱晓琴, 王春燕, 盛敏, 等. 丛枝菌根真菌对刺槐热值、碳和灰分含量的影响. *植物生态学报*, 2013, 37(11): 1028–1034.
- [24] Hu H Y, Zhang Z C, Li X. Influences of salinity on mass and energy dynamics during decomposition of *Kandelia candel* leaf litter. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(12): 1377–1385.
胡宏友, 张朝潮, 李雄. 盐度对秋茄凋落叶分解过程中物质与能量动态的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(12): 1377–1385.
- [25] Weng R X. The photosynthetic characteristics of *Miscanthus* species in Taiwan. *Grassland of China*, 1994(1): 14–25, 34.
翁仁宪. 台湾芒草之光合作用特性. *中国草地*, 1994(1): 14–25, 34.
- [26] Chen S P, Bai Y F, Han X G, *et al.* Variations in foliar carbon isotope composition and adaptive strategies of *Carex korshinskyi* along a soil moisture gradient. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(4): 515–522.
陈世苹, 白永飞, 韩兴国, 等. 沿土壤水分梯度黄囊苔草碳同位素组成及其适应策略的变化. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 515–522.
- [27] Blank L, Rozenberg G, Gafni R. Spatial and temporal aspects of weeds distribution within agricultural fields—A review. *Crop Protection*, 2023, 172(000): 8.
- [28] Hou J, Du L T, Liu K, *et al.* Characteristics of vegetation activity and its responses to climate change in desert/grassland biome transition zones in the last 30 years based on GIMMS3g. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136: 915–928.
- [29] Lloret F, Verdu' M, Flores-Herna' ndez N, *et al.* Fire and resprouting in Mediterranean ecosystems: insights from an external biogeographical region, the mexical shrubland. *American Journal of Botany*, 1999, 86(12): 1655–1661.
- [30] Chen X, Li B L. Spatial variability of plant functional types of trees along Northeast China Transect. *Applied Ecology & Environmental Research*, 2005, 3(2): 39–49.
- [31] Yang L M, Han M, Lin H M. Study on biomass changes of plant ecological type groups in the *Leymus chinensis* communities along Northeast China Transect. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2005, 27(5): 46–50.
杨利民, 韩梅, 林红梅. 中国东北样带羊草群落植物水分生态类型功能群生物量变化研究. *吉林农业大学学报*, 2005, 27(5): 46–50.
- [32] Bao Y J, Li Z H. Caloric values of steppe plant populations and functional groups in Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Journal of Dalian Nationalities University*, 2008, 10(3): 197–202.
鲍雅静, 李政海. 内蒙古锡林河流域草原植物种群和功能群热值研究. *大连民族大学学报*, 2008, 10(3): 197–202.
- [33] Zhao N, Yu G R, He N P, *et al.* Coordinated pattern of multi-element variability in leaves and roots across Chinese forest

- biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(3): 359–367.
- [34] Xu Z W, Yu G R, Zhang X Y, *et al.* Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC). *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104: 152–163.
- [35] Wang R L, Yu G R, He N P, *et al.* Latitudinal variation of leaf morphological traits from species to communities along a forest transect in eastern China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(1): 15–26.