青藏高原3种生活型水生植物的热值及环境的影响

汪 洋 苗琳琳 于 丹 刘春花* 王 忠*

武汉大学生命科学学院, 武汉 430072

摘 要 热值反映了植物光合作用固定太阳辐射能的能力, 是从能量转化和储存角度理解植物对环境适应的可靠指标。为了探究青藏高原地区的水生植物叶片热值特征及其环境影响, 该研究采集了青藏高原地区143个位点的533个水生植物叶片样品, 进行了其热值含量的测定, 结合实测水体的pH值、溶氧量和盐度等指标, 分析环境因子对植物叶片热值的影响。结果表明: 在青藏高原地区, 3种生活型的水生植物叶片热值大小表现为挺水型植物>浮叶型植物>沉水型植物; 随纬度增加, 挺水型和沉水型植物叶片热值呈现显著增加的变化趋势; 而随海拔的升高, 挺水型植物叶片热值显著降低, 沉水型植物变化不显著。从环境因子影响来看, 随着气温的降低, 挺水型植物叶片热值显著增加, 沉水型植物变化不明显; 而随水体盐度的增加, 挺水型和沉水型植物叶片热值均呈显著增加的趋势; 溶解氧仅表现为与挺水型植物热值呈现负相关关系, pH值对两种生活型植物叶片热值均未表现出显著的影响。

关键词 热值; 水生植物; 青藏高原; 环境影响

引用格式: 汪洋, 苗琳琳, 于丹, 刘春花, 王忠 (2017). 青藏高原3种生活型水生植物的热值及环境的影响. 植物生态学报, 41, 209–218. doi: 10.17521/cjpe.2016.0043

Effects of environmental factors on gross caloric values of three life-forms aquatic plants on the Qinghai-Xizang Plateau, China

WANG Yang, MIAO Lin-Lin, YU Dan, LIU Chun-Hua*, and WANG Zhong*

College of Life Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract

Aims Gross caloric value (GCV) reflected plants' capability of converting solar energy. It provided a reliable indicator of plants' adaptations to environments in perspective of energy conversion and fixation. The aims of this study were (1) to illustrate the characteristics of GCV of aquatic plants on the Qinghai-Xizang Plateau, (2) to explore the geographical and environmental patterns and (3) to discuss the underlying mechanisms in forming the patterns.

Methods In July and August 2015, we collected 533 samples of aquatic plants' leaves in 143 field sites on the Qinghai-Xizang Plateau, and measured their GCV using SDACM-4000 oxygen bomb calorimeter. Together with mean annual temperature (MAT) of climatic factor and properties of water body, this study compared the differences of GCV among submerged, emergent and floating-leaved plants by analysis of variance (ANOVA) and Tukey's HSD. We further regressed GCV of submerged and emergent plants against geographical and climatic factors and properties of water body by simple regression to explore the relative effects of environmental factors on GCV.

Important findings On the Qinghai-Xizang Plateau, the mean GCV was $(15.95 \pm 3.90) \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$. Among the three life forms, the rank of GCV was the emergent plants $(18.10 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}) >$ the floating-leaved plants $(16.77 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}) >$ the submerged plants $(14.31 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1})$. With an increasing latitude, the GCV of emergent and submerged plants increased. Only GCV of emergent plants decreased with increasing altitude and temperature. The GCV of emergent and submerged plants increased with increased water salinity. Dissolved oxygen had significant negative effects on emergent plants, while pH value had no significant effects.

Key words caloric value; aquatic plant; Qinghai-Xizang Plateau; environmental effect

Citation: Wang Y, Miao LL, Yu D, Liu CH, Wang Z (2017). Effects of environmental factors on gross caloric values of three life-forms aquatic plants on the Qinghai-Xizang Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 209–218. doi: 10.17521/cjpe.2016.0043

收稿日期Received: 2016-01-22 接受日期Accepted: 2016-07-19

* 共同通信作者Co-author for correspondence (E-mail: liuchh@163.com, wangzhong@whu.edu.cn)

能量流动是维持生态系统功能的基本生态过程(李博, 2000)。生态系统需要持续的能量输入来维持稳定, 能量输入是由作为初级生产者的植物来完成的。热值(gross caloric value)是指单位质量干物质在恒容条件下完全燃烧所释放出的热量值, 植物热值反映了植物光合作用将光能转化为化学能的能力, 较之于质量能更直接地反映植物对太阳能的利用效率, 可以应用于生态系统能量学的研究(祖元刚, 1990)。同时, 植物热值可以反映环境因子对植物生长及其生理过程的影响, 是不同环境条件下植物生长状况的指标之一(林鹏和林光辉, 1991)。

在生态学研究, 热值研究主要集中于陆生植物器官之间的差异(孙国夫等, 1993; 李意德等, 1996; 郭继勋等, 2001; 任海等, 2004; Lin & Cao, 2008; 高凯等, 2015; 何介南等, 2015)、物种之间的差异(林鹏和林光辉, 1991; 林益明等, 2001, 2004a)、群落组分之间的差异(林光辉和林鹏, 1988; 林益明等, 2003, 2004b)、不同群落演替阶段之间的差异(任海和彭少麟, 1999; 乔秀娟等, 2007)以及热值的季节动态差异(Singh, 1980; 苏智先和钟章成, 1994; 鲍雅静和李政海, 2003)等。

相对而言, 对环境梯度上植物热值的空间格局研究则较少。已有研究表明, 植物热值表现出随纬度和海拔升高而升高的格局(任海和彭少麟, 1999; Zhang *et al.*, 2012), 而环境因子如光照、辐射、温度、降水以及土壤条件等是形成这一格局的影响因素。一般认为, 植物往往以积累较多高能物质的形式来抵抗诸如低温(杨盛昌等, 2003; 林益明等, 2004b)、干旱(毕玉芬和车伟光, 2004)、强辐射(Golley, 1969)、盐胁迫(林鹏和王文卿, 1999)以及土壤贫瘠(Howard-Williams, 1974)等不利条件。因此, 高热值是植物适应胁迫环境的有利特征和生理基础。

从研究区域来看, 我国的植物热值研究主要集中在东部低海拔地区, 比如沿海地区(林益明等, 2004a; 任海等, 2004; 郝朝运和刘鹏, 2006)、内蒙古草原(鲍雅静和李政海, 2003; 高凯等, 2015)等, 而在高海拔地区仅有少量研究涉及(杨福国和何海菊, 1983; 龙瑞军等, 1993; 于应文等, 2000; 陈美玲和上官周平, 2009)。相对于陆生植物, 水生植物热值研究较少(由文辉和宋永昌, 1995; 房岩等, 2004), 或仅限于单个生境浮游植物热值的测定(由文辉, 1995), 或海洋植物热值动态的研究(林鹏和林光辉,

1991; 林益明等, 2000, 2004b; 杨贵福等, 2015), 而淡水生境下较大地理尺度上的研究则尚未见报道。水生植物作为淡水和湿地生态系统中的生产者, 对该生态系统的物质循环和能量流动起到重要作用。探讨水生植物热值随环境梯度的变化格局, 有助于从能量角度理解水生生态系统在环境变化条件下的稳定性。

青藏高原平均海拔超过4 000 m, 总面积达250万km², 是世界上海拔最高、面积最大的高原。低温、少雨、大风和强辐射等气候条件形成了青藏高原独特的高寒气候, 且由于高原面积广阔、地形起伏, 导致高原范围内不同地区气候差异明显(宋善允和王鹏祥, 2013), 为研究植物热值的环境(气候和生境)和地理(经度、纬度和海拔)格局提供了很好的平台。此外, 青藏高原河流纵横、湖泊众多、湿地广布, 是亚洲众多大江大河的发源地, 被誉为“亚洲水塔”, 且是我国三大湖群区之一(王苏民和窦鸿身, 1998), 其独特的高原水体环境为水生植物的生存、进化和分布提供了特殊的生境条件。Wang等(2015)从生态化学计量学角度对青藏高原水生植物的C:N:P元素分布格局进行了研究, 结果表明低温会导致水生植物叶片元素含量升高。相比于元素含量, 热值能更为直接地反映植物借助光合作用固定太阳辐射能的能力。因此, 本研究选择青藏高原的水生植物, 通过测定其热值, 试图分析: (1)水生植物不同生活型(沉水、浮叶、挺水)植物之间的热值差异; (2)热值随经度、纬度和海拔变化而产生的地理格局及其驱动因素, 为了解青藏高原水生植物的分布规律提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究地点概况

本研究区域位于青藏高原(27°–40° N, 75°–105° E), 并延伸到位于青藏高原东南缘的洱海, 采样范围为25.69°–38.08° N, 79.77°–101.56° E (图1)。青藏高原海拔较高, 地形上呈现出由东南部向西北部逐渐升高的趋势, 并由此导致不同区域气候差异明显。由于喜马拉雅山脉横亘高原南缘, 来自印度洋的暖湿气流只能由高原东南部的雅鲁藏布江河谷进入, 因此, 高原气候也呈现出由东南部向西北部气温降低、降水减少的雨热同期格局(宋善允和王鹏祥, 2013)。受气候影响, 高原植被也由东南部的森林植被逐渐过渡到中部的灌丛和高寒草甸植被, 直

至西北部的高寒草原和荒漠植被(中国科学院植物研究所, 1988)。水生植被受水体生境限制, 呈陆地岛状分布, 地域分布规律不明显, 但也表现出由东南向西北物种减少、挺水型植物少而沉水型植物较多的规律(王东, 2003)。

1.2 采样方法

本研究样品采集于2015年7月至8月之间。采集时按生活型的不同采用不同的采集方法。对于挺水型植物, 采集时选取叶片从顶端向下20 cm片段(如叶片长度不足20 cm则采集全叶); 对于浮叶型植物, 采集时选取全叶; 对于沉水型植物, 以植物分枝顶端向下20 cm作为叶片样品。采集时, 在生境内不同植株上进行随机采集, 选取生长健康且完整的叶片, 每个物种均采集30–60个叶片, 混合后作为该物种在该采样点的样品。最终, 本研究野外采集143个位点, 共采集到533个植物样品, 隶属于20个科30个属51个种。采集当天进行初步烘干保存, 带回实验室后在75 °C的烘箱下干燥48 h, 然后将干样品进行粉碎待用。

野外采样的同时用便携式水质检测仪(PRO-PLUS, YSI, Ohio, USA)测定水体生境参数, 包括水体pH值、盐度和溶解氧。同时, 使用手持式GPS (LeTrex H, GARMIN, 中国杭州)记录采样位点的经度、纬度和海拔。

1.3 热值测定

将粉碎待用的植物叶片样品在105 °C下烘干3–4 h, 冷却至室温后测定其热值。测量仪器为SDACM-4000型氧弹式量热仪(湖南三德科技股份有限公司, 长沙)。测定时, 参照祖元刚和张宏一(1986)的操作规范, 称取1.0–1.2 g的干样品, 放置于氧弹装置中, 拴好点火丝后, 再给氧弹装置内充满纯氧使样品能够充分燃烧。

植物叶片的热值($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$) = 充分燃烧释放的热量值/所称取的样品质量

1.4 数据分析

本研究分析了水生植物不同生活型之间植物热值的差异及其环境和地理格局。首先使用单因素方差分析和Tukey's HSD多重比较, 分析3种生活型

图1 采集样点地理位置分布图。

Fig. 1 Location of the sampling sites.

之间的热值差异。方差分析之前,进行了方差齐性检验,结果显示方差不齐($p < 0.05$),因此在方差分析时对热值数据进行了 $\log_{10}$ 对数转换。此外,本研究引入变异系数(CV)表示热值数据的差异程度,CV由标准偏差(SD)/平均值所得。然后,使用一元线性回归(simple regression)分析环境因子(温度和水体pH值、盐度和溶氧量)和地理因子(经度、纬度和海拔)对不同生活型植物热值的影响。分析中所使用的温度为该采样点的多年平均气温数值,是将采样点的经度、纬度和海拔数据代入气候拟合公式所得,而拟合公式由收集自全国气象站50余年的气象数据和地理坐标数据分地区拟合所得。由于浮叶型植物样品量较少,本研究着重分析了挺水型和沉水型植物热值与环境因子的关系。

数据分析通过SPSS分析软件完成。

2 研究结果

2.1 青藏高原水生植物叶片热值特征及生活型之间的差异

青藏高原水生植物热值为 $(15.95 \pm 3.90) \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,总体数据的CV为0.24。从不同生活型来看,挺水型植物的热值最高,为 $(18.10 \pm 4.03) \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,浮叶型植物次之,为 $(16.77 \pm 1.52) \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,二者无明显差异,但都显著高于沉水型植物热值($(14.31 \pm 3.03) \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)(表1)。

2.2 水生植物热值的地理格局

挺水型和沉水型两种生活型水生植物热值表现出了一致的地理格局(图2)。随海拔升高,挺水型植物热值显著降低($p < 0.001$,图2D),沉水型植物也有降低的趋势,但未达到显著水平($p = 0.088$,图2A)。随经度和纬度升高,两种生活型水生植物热值则均表现出显著增加的趋势($p < 0.001$,图2B、2C、2E、2F)。

2.3 环境因子对水生植物热值的影响

水体盐度对挺水型和沉水型两种生活型植物热

值有显著影响($p < 0.05$),热值随水体盐度的升高而升高;溶氧量只与挺水型植物的热值呈负相关关系($p = 0.010$),对沉水型植物影响不显著($p = 0.075$);而pH值则对两种生活型植物的热值都没有表现出显著的影响($p > 0.1$)(图3)。

气温对沉水型植物的热值影响不显著($R^2 = 0.011$, $p = 0.070$),但与挺水型植物热值呈明显的负相关关系($R^2 = 0.018$, $p = 0.045$)(图4)。

3 讨论

3.1 不同生活型水生植物之间热值的比较

青藏高原地区水生植物叶片的平均热值为 $(15.95 \pm 3.90) \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,而且热值由陆地向水体呈现出降低的趋势,即挺水型植物>浮叶型植物>沉水型植物。热值反映了植物将太阳能转化为化学能,并储存在体内含能有机物(如脂类、蛋白质和碳水化合物等)中的能力。因此,不同生活型水生植物热值直接受到体内含能有机物含量的影响(由文辉和宋永昌,1995)。碳(C)是构成植物体内含能有机物的碳骨架的必需元素,其含量综合反映了含能有机物的含量,与热值呈显著的正相关关系(孙国夫等,1993;徐永荣等,2003;杨贵福等,2015)。氮(N)则主要存在于蛋白质中,其含量一定程度上反映了植物体内蛋白质的含量,与热值呈正相关关系(杨贵福等,2015)。前期研究表明,青藏高原水生植物中挺水型植物的C和N含量显著高于沉水型植物(Wang *et al.*, 2015),两种生活型植物之间元素的差异在一定程度上解释了热值的差异。就两种生活型植物所处的环境来看,挺水型植物能够接受更多的光照辐射,固定更多的光能(何晓等,2007),且其环境昼夜温差较大,有利于植物降低夜间呼吸作用的能量消耗从而进行能量积累;而由于水体对太阳辐射的过滤作用和对气温的缓冲作用,沉水型植物可固定的光能相对较少,而呼吸消耗能量则相对较多,从而导致

表1 青藏高原3种不同生活型水生植物热值特征

Table 1 Characteristics of gross caloric values of three life-forms of aquatic plants on the Qinghai-Xizang Plateau

生活型 Life-form	样品量 No. of samples	热值 Gross caloric values ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)		
		平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
沉水型 Submerged	295	14.31 ^a	3.03	0.21
浮叶型 Floating-leaved	20	16.77 ^b	1.52	0.09
挺水型 Emergent	218	18.10 ^b	4.03	0.22
总计 Total	533	15.95	3.90	0.24

不同小写字母表示不同生活型之间热值差异显著($p < 0.05$)。

Different small letters indicate significant differences between different life forms of aquatic plants ($p < 0.05$).

图2 两种生活型水生植物的热值随海拔、经度和纬度的变化格局。A–C, 沉水型植物, $n = 295$ 。D–F, 挺水型植物, $n = 218$ 。
Fig. 2 Geographic patterns of gross calorific values of submerged plants and emergent plants along altitudinal, longitudinal and latitudinal gradients. A–C, Submerged plants, $n = 295$. D–F, Emergent plants, $n = 218$.

体内储能较少(由文辉和宋永昌, 1995)。此外, 由于挺水型植物需要投入更多的结构组织以支撑植物体的生长, 而沉水型植物则由于水体浮力的因素而投入较少的结构组织(Xing *et al.*, 2013), 而结构组织由结构性碳水化合物等含能有机物组成, 因此挺水型植物热值高于沉水型植物。

3.2 不同生活型水生植物热值的地理分布格局及其环境影响

植物热值可以反映环境因子对植物生长及其生理过程的影响(林鹏和林光辉, 1991)。随着环境变化, 植物热值也表现出一定的空间格局(鲍雅静等, 2006; 何晓等, 2007)。从地理分布格局上来看, 随纬

图3 水体盐度、溶氧量和pH值对两种生活型植物热值的影响。A–C, 沉水型植物, $n = 295$ 。D–F, 挺水型植物, $n = 218$ 。
Fig. 3 Effects of waterbody properties on gross calorific value of submerged plants and emergent plants. A–C, Submerged plants, $n = 295$. D–F, Emergent plants, $n = 218$.

度增加和海拔升高, 植物热值有升高的趋势(Golley, 1969; 任海等, 2004; Zhang *et al.*, 2012)。本研究中, 水生植物叶片热值随纬度升高而升高, 与前人研究结果一致, 但在青藏高原范围内与海拔呈负相关关系, 与前人对于海拔升高有利于植物能量积累的认识不一致。从地形上看, 青藏高原东北部以柴达木

盆地为主, 海拔较低, 但干旱少雨, 昼夜温差较大, 导致植物叶片热值较高, 分析表明, 本研究中在柴达木盆地中分别采集挺水和沉水型植物样品31个和28个, 其热值平均值为 $24.18 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $16.79 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 均显著高于剩余其他采集地点样品的热值(挺水型植物 $n = 187$, 平均值 $17.08 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$; 沉水型植物 $n =$

图4 年平均气温(MAT)对两种生活型水生植物热值的影响。A, 沉水型植物, $n = 295$ 。B, 挺水型植物, $n = 218$ 。

Fig. 4 Effects of annual mean air temperature (MAT) on gross caloric values of submerged and emergent plants. A, Submerged plants, $n = 295$. B, Emergent plants, $n = 218$.

267, 平均值 $14.05 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。进一步分析表明, 若将柴达木盆地的采样点去除, 两种生活型水生植物热值与海拔之间的负相关关系消失, 变为无显著相关性($p > 0.1$), 热值与纬度仍然呈显著正相关关系($p < 0.05$)。因此, 柴达木盆地这一特殊地形的存在, 干扰了植物热值在青藏高原尺度上随海拔变化而变化的规律。

空间变化导致的多种环境因子改变是产生植物热值地理分布格局的驱动因素。如纬度和海拔升高导致温度降低、纬度增加而光照时间变长, 海拔升高而辐射增强以及特殊地形(如盆地)导致干旱少雨等因素(毕玉芬和车伟光, 2004)都会导致植物热值增加。与低海拔地区相比, 青藏高原海拔高而辐射强, 因此, 该地区的强辐射也导致其植物热值高于中国东部低海拔地区的植物(由文辉和宋永昌, 1995; 房岩等, 2004)。研究表明, 随气温降低, 水生植物C、N、磷(P)等元素含量升高(Wang *et al.*, 2015), 使得结构性和非结构性碳水化合物以及以酶为主的蛋白质等含能有机物增加, 有利于植物抵消由低温导致的诸如酶活性降低等不利因素; 并且较高的热值可以增加植物的抗寒能力, 抵御低温造成的环境胁迫。本研究中, 挺水型植物表现为随气温降低而热值升高的规律, 说明相对于沉水型植物而言, 挺水型植物叶片绝大部分器官暴露在空气中, 缺少了水体对气温的缓冲作用, 更直接地受到气温的影响。此外, 气温降低, 昼夜温差加大, 呼吸作用减弱, 也是植物在低温条件下热值升高的原因(由文辉和宋永昌, 1995)。而沉水型植物随气温变化的规律不

明显可能是由于水体对气温的缓冲作用, 受到的影响较小。就不同地区水生植物来看, 淀山湖2种挺水型植物的热值平均值($18.30 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)(由文辉和宋永昌, 1995)高于本研究中的挺水型植物, 原因可能是其样品物种较少(仅有芦苇(*Phragmites communis*)和菰(*Zizania latifolia*)); 若以物种比较来看, 本研究中芦苇和菰叶片平均热值分别为 $23.73 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $19.54 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 高于淀山湖地区的芦苇($20.69 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)和菰($15.15 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。房岩等(2004)报道了吉林省长春南湖4种水生植物的热值, 其中挺水型植物芦苇的叶片在生长季的热值为 $18.18 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 低于本研究中芦苇叶片的平均热值($23.73 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$); 而两种浮叶型植物莲(*Nelumbo nucifera*)和莲叶荇菜(*Limnathemum nymphaeoides*)叶片热值分别为 $16.20 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $14.95 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 也略低于本研究浮叶型植物叶片的热值($16.77 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。因此, 本研究认为青藏高原地区的低温且昼夜温差较大是导致该地区水生植物热值高于中国东部地区的重要因素。何晓等(2007)总结了上述在淀山湖和长春南湖的研究, 认为水生植物的平均热值为 $16.0 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 虽然与本研究结果的 $15.95 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 接近, 但若得出进一步的结论, 则需要针对具体物种进行比较, 才能反映出物种对不同地区的环境在能量转化过程中表现出的不同适应性。

对水生植物来说, 水体盐度也是一种胁迫。随水体盐度的增加, 水生植物叶片的热值随之增高。本研究中柴达木盆地中样点(样点数为13个)的水体盐度平均值为 $0.60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著高于其他样点(样点数为130个)的水体盐度平均值($0.24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 植物体

热值升高不仅是对寒冷环境抵抗的一种机制,也是对盐度胁迫的一种适应机制。林鹏和王文卿(1999)在研究红树植物秋茄树的热值时也发现了相同的规律,并指出盐胁迫条件下,植物体的热值增长会有一定的阈值范围,一旦超过这个阈值就会使植物体的热值下降。前人针对水体pH值和溶氧量对水生植物能量积累的研究未见报道。本研究中,水体pH值对沉水型植物和挺水型植物热值没有显著影响,而溶氧量也仅对挺水型植物热值的影响达到显著水平。水体的理化性质是相互影响的,因此,还需要结合水体其他理化参数,如水体元素含量、基质土壤结构等指标,才能进一步确定水体理化性质对水生植物能量积累的共同影响。

4 结论

水生植物叶片热值大小表现为挺水型植物>浮叶型植物>沉水型植物。就大尺度环境和地理因子来看,挺水型植物和沉水型植物热值都与经度和纬度呈显著正相关关系,而挺水型植物与海拔呈显著的负相关关系,青藏高原北部柴达木盆地海拔较低、干旱少雨、昼夜温差大的极端条件可能是造成这一格局的原因。气温对沉水型植物的影响较弱,但对挺水型植物的影响显著,呈显著的负相关关系,这可能是挺水型植物大部分器官暴露在外,缺乏水体对低温的缓冲作用导致的;水体盐度对挺水型植物和沉水型植物的热值有显著影响,即热值随水体盐度升高而升高,pH值对其无显著影响,而溶氧量仅对挺水型植物有显著影响。本研究说明水生植物叶片热值作为叶片的功能性状之一,其分布规律受到了环境的显著影响,反映了植物对环境的适应,但仍需结合叶片其他功能性状(如灰分含量、元素含量和建成消耗等)对环境适应的研究,以便更全面地从能量转化和储存的角度了解水生植被的分布规律。

基金项目 国家自然科学基金(31300296)。

参考文献

- Bao YJ, Li ZH (2003). Dynamic of caloric values of major species in *Leymus chinensis* steppe of Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 606–613. (in Chinese with English abstract) [鲍雅静, 李政海 (2003). 内蒙古羊草草原群落主要植物的热值动态. 生态学报, 23, 606–613.]
- Bao YJ, Li ZH, Han XG, Song GB, Yang XH, Lü HY (2006). Plant caloric value and its bio-ecological attributes. *Chinese Journal of Ecology*, 25, 1095–1103. (in Chinese with English abstract) [鲍雅静, 李政海, 韩兴国, 宋国宝, 杨晓慧, 吕海燕 (2006). 植物热值及其生物生态学属性. 生态学杂志, 25, 1095–1103]
- Bi YF, Che WG (2004). Studies on the calorific value of *Medicago* population. *Acta Agrestia Sinica*, 10, 265–269. (in Chinese with English abstract) [毕玉芬, 车伟光 (2004). 几种苜蓿属植物植株热值研究. 草地学报, 10, 265–269.]
- Chen ML, Shangguan ZP (2009). Caloric value and nutrient characteristics of dominant plant species of six typical vegetation communities in Ziwoiling forest area of the Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(3), 140–144. (in Chinese with English abstract) [陈美玲, 上官周平 (2009). 黄土高原子午岭林区6个典型群落优势种的热值和养分特征. 林业科学, 45(3), 140–144.]
- Fang Y, Xu SM, Sun G (2004). Primary production of the aquatic ecosystem of the Nanhu lake in Changchun II—Periphyton and macrophyte. *Journal of Jilin Agricultural University*, 26(1), 46–49. (in Chinese with English abstract) [房岩, 徐淑敏, 孙刚 (2004). 长春南湖水生生态系统的初级生产II——附生藻类与大型水生植物. 吉林农业大学学报, 26(1), 46–49.]
- Gao K, Han GD, Yu YQ, Zhang LJ (2015). Characterization of caloric values in 14 plant species in Hunshandake Sandy Land. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 341–346. (in Chinese with English abstract) [高凯, 韩国栋, 于永奇, 张丽娟 (2015). 浑善达克沙地14种植物热值特征. 生态学杂志, 34, 341–346.]
- Gao YX, Jiang SK, Zhang YG (1984). *Xizang Climate*. Science Press, Beijing. 84. (in Chinese) [高由禧, 蒋世逵, 张谊光 (1984). 西藏气候. 科学出版社, 北京. 84.]
- Golley FB (1969). Caloric value of wet tropical forest vegetation. *Ecology*, 50, 517–519.
- Guo JX, Wang RD, Bao GZ (2001). Caloric value of northeast *Aneurolepidium chinense* grassland species. *Acta Phytocologica Sinica*, 25, 746–750. (in Chinese with English abstract) [郭继勋, 王若丹, 包国章 (2001). 东北羊草草原主要植物热值. 植物生态学报, 25, 746–750.]
- Hao CY, Liu P (2006). The caloric value of the dominant plant species of a *Heptacodium miconioides* forest at Bei Mountain, Zhejiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 1709–1717. (in Chinese with English abstract) [郝朝运, 刘鹏 (2006). 浙江北山七子花群落主要植物叶热值. 生态学报, 26, 1709–1717.]
- He JN, Kang WX, Wang D (2015). The plant calorific value in the Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations at different ages. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 449–459. (in Chinese with English abstract) [何介南, 康文星, 王东 (2015). 不同年龄阶段杉木人工林植物热值分析. 生态

- 学报, 35, 449–459.]
- He X, Bao WK, Gu B, Zheng WJ, Leng L (2007). The characteristic of gross caloric value of higher plants in China. *Ecology and Environment*, 16, 973–981. (in Chinese with English abstract) [何晓, 包维楷, 辜彬, 郑帷婕, 冷俐 (2007). 中国高等植物干质量热值特点. 生态环境, 16, 973–981.]
- Howard-Williams C (1974). Nutritional quality and calorific value of Amazonian forest litter. *Amazoniana*, 5(1), 67–75.
- Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (1988). *Xizang Vegetation*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院植物研究所 (1988). 西藏植被. 科学出版社, 北京.]
- Li B (2000). *Ecology*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [李博 (2000). 生态学. 高等教育出版社, 北京.]
- Li YD, Wu ZM, Zeng QB, Zhou GY, Chen BF (1996). Caloric values of main species in a tropical mountain rain forest at Jianfengling, Hainan Island. *Acta Phytocologica Sinica*, 20, 1–10 (in Chinese with English abstract) [李意德, 吴仲民, 曾庆波, 周光益, 陈步峰 (1996). 尖峰岭热带山地雨林主要种类能量背景值测定分析. 植物生态学报, 20, 1–10.]
- Lin GH, Lin P (1988). Studies on energy in two mangrove communities, *Bruguiera sexangula* and *Kandelia candel*, in China. *Acta Phytocological and Geobotanica Sinica*, 12, 31–39. (in Chinese with English abstract) [林光辉, 林鹏 (1988). 海莲、秋茄两种红树群落能量的研究. 植物生态学与地植物学学报, 12, 31–39.]
- Lin H, Cao M (2008). Plant energy storage strategy and caloric value. *Ecological Modelling*, 217, 132–138.
- Lin P, Lin GH (1991). Study on the caloric value and ash content of some mangrove species in China. *Acta Phytocologica and Geobotanica Sinica*, 15, 114–120. (in Chinese with English abstract) [林鹏, 林光辉 (1991). 几种红树植物的热值和灰分含量研究. 植物生态学与地植物学学报, 15, 114–120.]
- Lin P, Wang WQ (1999). Changes in the caloric values of *Kandelia candel* seedlings under salt stress. *Acta Phytocologica Sinica*, 23, 466–470. (in Chinese with English abstract) [林鹏, 王文卿 (1999). 盐胁迫下红树植物秋茄(*Kandelia candel*)热值变化的研究. 植物生态学报, 23, 466–470.]
- Lin YM, Guo QR, Ye GF, Lin L, Lin P (2004a). Characteristics of matter and energy of some *Casuarinaceae* species in Dongshan County, Fujian Province. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 2217–2224. (in Chinese with English abstract) [林益明, 郭启荣, 叶功富, 林玲, 林鹏 (2004). 福建东山几种木麻黄的物质与能量特征. 生态学报, 24, 2217–2224.]
- Lin YM, Li ZB, Chen YY, Lin P (2001). Caloric value in leaves of some bamboo species in the bamboo garden of Hua'an County, Fujian. *Chinese Bulletin of Botany*, 18, 356–362. (in Chinese with English abstract) [林益明, 黎中宝, 陈奕源, 林鹏 (2001). 福建华安竹园一些竹类植物叶的热值研究. 植物学报, 18, 356–362.]
- Lin YM, Lin P, Wang T (2000). Caloric values and ash contents of some mangrove woods. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11, 181–184. (in Chinese with English abstract) [林益明, 林鹏, 王通 (2000). 几种红树植物木材热值和灰分含量的研究. 应用生态学报, 11, 181–184.]
- Lin YM, Wang ZC, Ke LN, Lin P, Tan ZQ, Ding YL (2003). Monthly changes in the caloric values of the leaves of four shrubby and four tree-dwelling *Palmae* species. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1117–1124. (in Chinese with English abstract) [林益明, 王湛昌, 柯莉娜, 林鹏, 谭忠奇, 丁印龙 (2003). 四种灌木状与四种乔木状棕榈植物热值的月变化. 生态学报, 23, 1117–1124.]
- Lin YM, Xiang P, Lin P (2004b). Caloric values of propagules and leaves at the different development stages of mangrove species at Futian, Shenzhen. *Marine Science*, 28(2), 43–48. (in Chinese with English abstract) [林益明, 向平, 林鹏 (2004b). 深圳福田几种红树植物繁殖体与不同发育阶段叶片热值研究. 海洋科学, 28(2), 43–48.]
- Long RJ, Xu CL, Hu ZZ, Ding WG, Zhang YS, Kang TF (1993). Calorific value and its seasonal dynamics of fodder shrub species on Tianzhu alpine grasslands. *Chinese Journal of Ecology*, 12(5), 13–16. (in Chinese with English abstract) [龙瑞军, 徐长林, 胡自治, 丁文广, 张映生, 康天福 (1993). 天祝高山草原15种饲用灌木的热值及季节动态. 生态学杂志, 12(5), 13–16.]
- Qiao XJ, Cao M, Lin H (2007). Caloric value allocation of dominant species in four secondary forests at different ages in Xishuangbanna, Southwest China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 326–332. (in Chinese with English abstract) [乔秀娟, 曹敏, 林华 (2007). 西双版纳不同林龄次生植物群落优势树种的热值. 植物生态学报, 31, 326–332.]
- Ren H, Peng SL (1999). The characteristics of ecological energetics of the forest ecosystem in the successional process in Dinghushan, Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica*, 19, 817–822. (in Chinese with English abstract) [任海, 彭少麟 (1999). 鼎湖山森林生态系统演替过程中的能量生态特征. 生态学报, 19, 817–822.]
- Ren H, Peng SL, Liu HX, Cao HL, Huang ZL (2004). The caloric value of main plant species at Dinghushan, Guangdong, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 23, 148–154. (in Chinese with English abstract) [任海, 彭少麟, 刘鸿先, 曹洪麟, 黄忠良 (2004). 鼎湖山植物群落及其主要植物的热值研究. 植物生态学报, 23, 148–154.]

- Singh AK (1980). Energy dynamics in a savanna ecosystem in India. *Japanese Journal of Ecology*, 30, 295–305.
- Song SY, Wang PX (2013). *Xizang Climate*. Meteorological Press, Beijing. (in Chinese) [宋善允, 王鹏祥 (2013). 西藏气候. 气象出版社, 北京.]
- Su ZX, Zhong ZC (1994). Studies on the energy of *Neosinocalamus affinis* clonal population. *Acta Ecologica Sinica*, 14, 142–148. (in Chinese with English abstract) [苏智先, 钟章成 (1994). 慈竹克隆种群能量动态研究. 生态学报, 14, 142–148.]
- Sun GF, Zheng ZM, Wang ZQ (1993). Dynamics of calorific values of rice. *Chinese Journal of Ecology*, 2, 218–220. (in Chinese with English abstract) [孙国夫, 郑志明, 王兆骞 (1993). 水稻热值的动态变化研究. 生态学杂志, 2, 218–220.]
- Wang D (2003). *The Geography of Aquatic Vascular Plants of Qinghai-Xizang Plateau*. PhD dissertation, Wuhan University, Wuhan. (in Chinese with English abstract) [王东 (2003). 青藏高原水生植物地理研究. 博士学位论文, 武汉大学, 武汉.]
- Wang SM, Dou HS (1998). *Lakes in China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王苏民, 窦鸿身 (1998). 中国湖泊志. 科学出版社, 北京.]
- Wang Z, Xia CX, Yu D, Wu ZG (2015). Low-temperature induced leaf elements accumulation in aquatic macrophytes across Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 75, 1–8.
- Xing W, Wu HP, Hao BB, Liu GH (2013). Stoichiometric characteristics and responses of submerged macrophytes to eutrophication in lakes along the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Ecological Engineering*, 54(5), 16–21.
- Xu YR, Zhang WJ, Feng ZW, Zhang JL (2003). Caloric values, elemental contents and correlations between them of some plants on sea beach salinity soil in Tianjin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 450–455. (in Chinese with English abstract) [徐永荣, 张万钧, 冯宗炜, 张金龙 (2003). 天津滨海盐渍土上几种植物的热值和元素含量及其相关性. 生态学报, 23, 450–455.]
- Yang FT, He HJ (1983). A preliminary study on caloric value of common plants in alpine meadow. *Acta Phytocological and Geobotanica Sinica*, 7, 280–288. (in Chinese with English abstract) [杨福囤, 何海菊 (1983). 高寒草甸地区常见植物热值的初步研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 7, 280–288.]
- Yang GF, Xing K, Li G, Liu HY, Pan YZ, Zhang L (2015). Caloric values, element contents (carbon, nitrogen, and phosphorus) of *Zostera marina* and their correlation. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 46(1), 212–220. (in Chinese with English abstract) [杨贵福, 邢坤, 李耕, 刘海映, 潘玉州, 张力 (2015). 大叶藻(*Zostera marina*)的热值和元素含量(碳、氮、磷)及其相关性. 海洋与湖沼, 46(1), 212–220.]
- Yang SC, Li YB, Lin P (2003). Change of leaf caloric value from *Avicennia marina* and *Aegiceras corniculatum* mangrove plants under cold stress. *Journal of Applied Oceanography*, 22(1), 46–52. (in Chinese with English abstract) [杨盛昌, 李云波, 林鹏 (2003). 冷胁迫下红树植物白骨壤和桐花树叶片热值的变化. 应用海洋学报, 22(1), 46–52.]
- You WH (1995). A study on phytoplankton and its energy production in Dianshan Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1, 47–53. (in Chinese with English abstract) [由文辉 (1995). 淀山湖的浮游植物及其能量生产. 海洋湖沼通报, 1, 47–53.]
- You WH, Song YC (1995). A study on energy in vascular aquatic macrophytes communities in Dianshan Lake. *Acta Phytocologica Sinica*, 19, 208–216. (in Chinese with English abstract) [由文辉, 宋永昌 (1995). 淀山湖水生维管束植物群落能量的研究. 植物生态学报, 19, 208–216.]
- Yu YW, Hu ZZ, Zhang DG, Xu CL (2000). Caloric value and its seasonal dynamics of *Dasiphora (Potentilla) fruticosa* in alpine area of Jinqiang River of Tianzhu County. *Pratacultural Science*, 17(2), 1–4. (in Chinese with English abstract) [于应文, 胡自治, 张德罡, 徐长林 (2000). 天祝金强河高寒地区金露梅的热值及其季节动态. 草业科学, 17(2), 1–4.]
- Zhang SB, Zhang JL, Slik JWF, Cao KF (2012). Leaf element concentrations of terrestrial plants across China are influenced by taxonomy and the environment. *Global Ecology & Biogeography*, 21, 809–818.
- Zu YG (1990). *Introduction to Energy Ecology*. Jilin Science & Technology Publishing House, Changchun. (in Chinese) [祖元刚 (1990). 能量生态学导论. 吉林科学技术出版社, 长春.]
- Zu YG, Zhang HY (1986). Several technical problems in the measurement of plants' caloric value. *Chinese Journal of Ecology*, 12(1), 1–4. (in Chinese) [祖元刚, 张宏一 (1986). 植物热值测定中的若干技术问题. 生态学杂志, 12(1), 1–4.]

责任编辑: 贺金生 责任编辑: 李 敏

植物生态学报官网

微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布

微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览