

长柔毛委陵菜两个种群对重金属富集和热值的影响

周小勇¹, 仇荣亮^{1,2,*}, 李清飞¹, 胡鹏杰¹, 应蓉蓉¹, 黄穗虹¹, 石 宁¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275)

摘要:测定了生长在云南省金顶铅锌矿的北厂和跑马坪矿段的 Zn 超富集植物长柔毛委陵菜野外植株的 Zn、Pb、Cd 等重金属含量和热值特征,并分析了重金属和热值之间的相关性。结果表明,北厂种群的叶片、叶柄和根中 Zn 的含量分别达到 6217.05、7679.86 mg·kg⁻¹和 4455.44 mg·kg⁻¹,分别是跑马坪种群的 3.2、2.4 倍和 2.2 倍;北厂种群叶片、叶柄和根的 Cd 含量分别为 170.17、242.51 mg·kg⁻¹和 244.45 mg·kg⁻¹,分别是跑马坪种群的 3.0、2.2 倍和 1.9 倍;而跑马坪种群叶片、叶柄和根的 Pb 含量分别达到 1042.49、829.27 mg·kg⁻¹和 2621.39 mg·kg⁻¹,分别是北厂种群的 1.2、1.0 倍和 1.2 倍;土壤中重金属含量的不同是造成两个种群富集 Zn、Pb 和 Cd 差异的原因。长柔毛委陵菜两个种群对相同重金属的转运和生物富集能力无显著差异,其中对重金属的转运能力呈现 Zn > Cd > Pb 的关系。同时,两个种群的叶片、叶柄和根中的灰分含量和去灰分热值都没有显著差异,其中根部的灰分含量最低,都小于 6%;北厂和跑马坪种群的所有部位的热值以叶片最高,其中去灰分热值分别达到 19.03 kJ·g⁻¹和 19.57 kJ·g⁻¹。Fe 和 Mn 对长柔毛委陵菜的热值累积有促进作用。

关键词:长柔毛委陵菜;种群;热值;重金属

Heavy metal accumulation and caloric value characteristics in two populations of *Potentilla griffithii* var. *velutina*

ZHOU Xiaoyong¹, QIU Rongliang^{1,2,*}, LI Qingfei¹, HU Pengjie¹, YING Rongrong¹, HUANG Shuihong¹, SHI Ning¹

¹ School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

² Guangdong Provincial Key Laboratory for Environmental Pollution Control and Remediation Technology Guangzhou 510275, China

Abstract: Concentrations of heavy metals and caloric values as well as their correlation relationship in two populations of Zn hyperaccumulator *Potentilla griffithii* var. *velutina* grown in two different sites, Beichang and Paomaping which located in Jinding Pb/Zn mining area, Yunnan Province, were analyzed. The results showed that in Beichang population, Zn concentration (mg kg⁻¹ of dry weight) reached 6217.05 in leaves, 7679.86 in leafstalks and 4455.44 in roots and it was 3.2, 2.4 and 2.2 times of Paomaping population, respectively; Similarly, Cd concentration in Beichang population was 170.17, 242.51 and 244.45 mg kg⁻¹ in leaves, leafstalks and roots, respectively, which was 3.0, 2.2 and 1.9 folds as much as those in Paomaping population, respectively. However, Pb concentration (mg kg⁻¹, DW) in Paomaping population which got 1042.49 in leaves, 829.27 in leafstalks and 2621.39 in roots were a little higher than those in Beichang population. Data showed that the concentration of Zn, Pb and Cd in both Beichang and Paomaping population was related to the concentration of heavy metals in soil. There was no significant difference in capacity of heavy metal translocation and bioaccumulation between these two populations. Both of them showed the same heavy metals translocation capacities which followed by the order of Zn > Cd > Pb. These two populations had no significant difference in ash content and ash-free caloric values in plant tissues. Ash content in roots accounted for smallest part in whole plant, which was less than 6%. Whereas leaves showed the highest caloric values in whole plant, which ash-free caloric value was up to 19.03

基金项目:国家 863 计划重点资助项目(2007AA061001);国家 863 计划探索性资助项目(2007AA06Z305);国家自然科学基金资助项目(40571144);广东省自然科学基金团队资助项目(06202438)

收稿日期:2008-09-08; **修订日期:**2009-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: eesqrl@mail.sysu.edu.cn

and 19.57 kJ g⁻¹ in Beichang and Paomaping population, respectively. In addition, energy storage of *P. griffithii* var. *velutina* was facilitated by iron and manganese.

Key Words: *Potentilla griffithii* var. *velutina*; population; caloric value; heavy metals

生长在不同矿山或重金属污染土壤上的种群,甚至生长在同一矿山或重金属污染土壤上的不同个体间耐金属胁迫或富集金属的能力也不同^[1]。Zn/Cd 超富集植物 *Thlaspi caerulescens*、*Arabidopsis halleri* 和东南景天(*Sedum alfredii*)的不同种群对不同重金属的耐性和富集也存在显著差异^[2-4]。不同种群对重金属吸收的差别的对比研究,可以在生理和分子水平上为植物富集重金属的机制提供线索和有价值的材料^[2, 5-6]。以往只研究了 Zn 超富集植物长柔毛委陵菜(*Potentilla griffithii* var. *velutina*)的北厂和架崖山矿段种群的超富集 Zn 特征^[7],而未对跑马坪矿段种群的超富集 Zn 特性及其与北厂种群耐 Pb 和 Cd 特性进行分析。同时,热值作为植物生长状况的一个有效指标^[8],各种环境因子对植物生长的影响,可以从热值的变化上反映出来^[9-10],并且植物不同器官热值与营养元素特性的研究是揭示不同植物对环境生态适应性机制的有效途径^[11];但至今对超富集植物的热值及其与重金属的相关关系还未见报道。

本文以生长在不同采矿方式的矿段上的长柔毛委陵菜种群为研究对象,研究其对 Zn、Pb、Cd 富集和热值特征的影响,并探讨重金属含量与热值之间的关系,尝试性地从能量的角度来揭示超富集植物富集重金属的机理,为长柔毛委陵菜修复重金属污染土壤和能量循环提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 野外调查与采样

金顶铅锌矿位于云南省怒江州兰坪县,其地理位置为 98°58′—99°38′E、26°00′—27°05′N^[12],该矿由架崖山、北厂、蜂子山、南厂、白草坪、西坡和跑马坪 7 个矿段组成,其中北厂以露采为主,而跑马坪以矿采为主,两者相距 3 km 左右。2005 年 9 月分别在北厂和跑马坪两个矿段采集长柔毛委陵菜植株及其根际 0—20 cm 深的土壤样品各 16 个。植物样品先用自来水清洗,再用去离子水浸泡并清洗 3 次,然后分成叶片、叶柄和根等 3 个部位,烘干、粉碎。土壤样品先去除石块以及植物根系等杂物,自然风干后,过 100 目尼龙筛备用。

1.2 重金属含量测定

植物样品采用 HNO₃-HClO₄湿法消煮,土壤样品采用硝酸热法消煮;用去离子水定容。样品的重金属含量用 HITACHI(Z-5000)原子分光光度计测定。

1.3 热值测定

干重热值(gross caloric value, GCV)的测定:采用美国 Parr 仪器公司生产的 1281 型氧弹热值仪测定。由于植物样品的重量不大,因此在长柔毛委陵菜北厂和跑马坪种群中分别选取了 5 颗和 4 颗植株进行热值和灰分含量的测定,即称取 1.00 g 左右的长柔毛委陵菜各部位的粉碎样品,用压片机压成药片状,每个样品重复 2 次,保证充分燃烧的样品热值重复误差在 ±200J 的范围内,否则重新称样测定,取 2 次平均值。每次测定时用仪器配备苯甲酸对热值仪进行标定,测定环境用空调控温在 20℃ 左右。灰分含量用干灰化法进行测定:样品称重后在马福炉中 550℃ 灰化 5h,计算灰分含量;并通过以下公式求算样品去灰分热值(ash-free caloric value, AFCV):去灰分热值(kJ·g⁻¹) = 干重热值/(1 - 灰分含量)^[13]。

1.4 数据处理

数据采用 SPSS 软件中的 Duncan's 新复极差法(SSR)进行方差分析和在 $P=0.05$ 水平时的差异显著性检验;相关性分析采用 Pearson 相关系数,并用双尾(Two-tailed)进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 长柔毛委陵菜不同种群对 Zn、Pb、Cd 的富集特性

由图 1 可知,长柔毛委陵菜各部位的 Zn、Cd 含量都呈现北厂种群大于跑马坪种群,其中北厂种群的叶

片、叶柄和根中 Zn 的含量分别达到 6217.05、7679.86 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 4455.44 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是跑马坪种群的 3.2、2.4 倍和 2.2 倍; 同样北厂种群叶片、叶柄和根的 Cd 含量分别为 170.17、242.51 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 244.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是跑马坪种群的 3.0、2.2 倍和 1.9 倍。对 Pb 而言, 跑马坪种群各部位的含量高于北厂种群, 前者的叶片、叶柄和根的 Pb 含量分别达到 1042.49、829.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2621.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是北厂种群的 1.2、1.0 倍和 1.2 倍。北厂和跑马坪种群各部位的 Zn、Pb 和 Cd 含量差异主要与土壤中各重金属含量的差异有关。从表 1 可知, 北厂土壤中的 Zn 和 Cd 含量分别是跑马坪的 2.6 倍和 2.5 倍, 分别达到 33143.41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 312.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而跑马坪土壤中的 Pb 含量是北厂的 1.5 倍, 其高达 18895.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 这说明土壤与植株中各重金属含量的变化趋势相同。

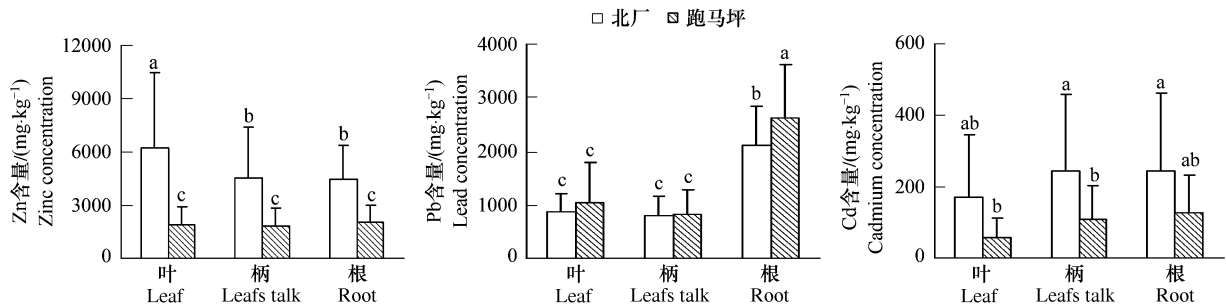


图 1 长柔毛委陵菜两个种群各部位的 Zn、Pb 和 Cd 含量

Fig. 1 Zinc, lead and cadmium concentration of different parts in two *P. griffithii* var. *velutina* populations

图中不同字母表示有显著差异 ($P < 0.05$); 下同

同时从表 1 可知, 长柔毛委陵菜不同种群对同一种重金属的转运和富集能力无显著差异。但这两个种群对重金属的转运系数显著呈现 $\text{Zn} > \text{Cd} > \text{Pb}$ 的关系, 其中 Zn 的转运系数都大于 1, 说明植物对 Zn 有较强的从根部向地上部转运能力。而它们对重金属的富集能力却呈现 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$ 的关系。

表 1 长柔毛委陵菜不同种群的 Zn、Pb 和 Cd 的转运系数和生物富集系数

Table 1 Translocation and bioaccumulation factor in different *P. griffithii* var. *velutina* populations

种群 Population	重金属 Heavy metal	重金属含量 Heavy metal concentration/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)			系数 Factor	
		地上部 Shoot	根部 Root	土壤 Soil	S/R	BF
北厂 Beichang	Zn	5410.77 $\pm$ 3550.29a	4455.44 $\pm$ 1924.41a	33143.41 $\pm$ 12776.30a	1.19 $\pm$ 0.34a	0.17 $\pm$ 0.10b
	Pb	825.09 $\pm$ 291.08c	2119.89 $\pm$ 719.08b	12940.60 $\pm$ 5830.65c	0.41 $\pm$ 0.14d	0.07 $\pm$ 0.03b
	Cd	206.31 $\pm$ 192.86d	244.45 $\pm$ 218.73c	312.52 $\pm$ 327.21d	0.84 $\pm$ 0.15bc	0.77 $\pm$ 0.38a
跑马坪 Paomaping	Zn	1873.08 $\pm$ 945.36b	2012.23 $\pm$ 1005.73b	12745.73 $\pm$ 11175.73c	1.04 $\pm$ 0.49ab	0.23 $\pm$ 0.19b
	Pb	931.77 $\pm$ 555.07c	2621.40 $\pm$ 989.76b	18895.58 $\pm$ 7752.55b	0.38 $\pm$ 0.21d	0.05 $\pm$ 0.03b
	Cd	82.55 $\pm$ 72.53d	126.31 $\pm$ 105.01c	124.69 $\pm$ 105.96d	0.65 $\pm$ 0.18c	0.94 $\pm$ 0.88a

表中数据为平均值 $\pm$ 标准差 ($n = 16$), 同列数据中的不同字母表示有显著差异 ($P < 0.05$); 转运系数 (S/R) = 植物地上部与根部金属含量比值; 生物富集系数 (BF) = 植物地上部与土壤金属含量比值

2.2 长柔毛委陵菜不同种群的能量特征

由图 2 可知, 两个种群的叶、柄和根中的灰分含量没有显著差异。两个种群各部位的灰分含量呈现叶片 $>$ 叶柄 $>$ 根的关系, 其中北厂和跑马坪种群的叶片灰分含量分别达到 9.12% 和达到 8.81%, 而它们根中的灰分含量都显著低于叶片和叶柄, 都小于 6%。

除叶片干重热值外, 两个种群相同部位的干重热值和去灰分热值没有显著差异, 这说明北厂和跑马坪种群对能量的储存能力没有显著不同。其中干重热值和去灰分热值分别介于 16.08—17.85 $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 17.45—19.57 $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。两个种群中都以叶片的热值最高, 且显著高于其它部位; 而去灰分热值都以根部最低。这说明长柔毛委陵菜把较多的能量储存在叶片中, 而根部存留较少。

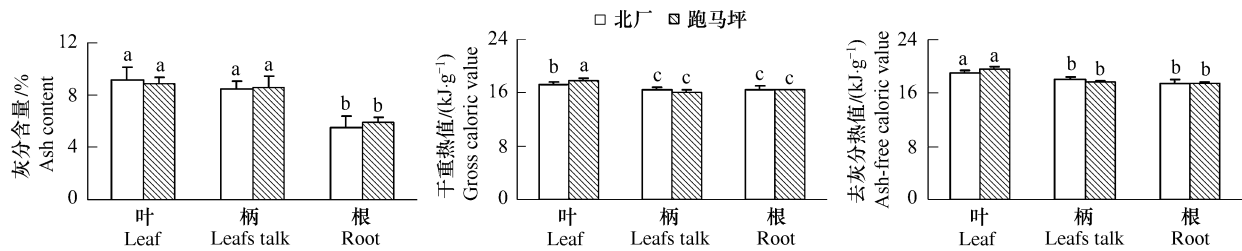


图2 长柔毛委陵菜两个种群各部位的灰分含量、干重热值和去灰分热值

Fig. 2 Ash content, gross caloric value and ash-free caloric value of all parts in two *P. griffithii* var. *velutina* populations

2.3 植物热值与重金属元素之间的相关性分析

为了解植物热值与其重金属含量的关系,对它们之间的相关性进行分析。如表2所示,在两个种群中,去灰分热值与干重热值之间都达到极显著正相关水平,并且北厂种群的去灰分热值与灰分含量之间也呈极显著正相关。在与重金属的相关性中,两个种群的干重热值和去灰分热值都与Fe、Mg、Mn和K呈正相关,其中两个种群的热值都与Fe和Mn达到显著或极显著水平;而两个种群的干重热值和去灰分热值都与Ca、Pb、Cd和Cu都呈现负相关,其中跑马坪种群的干重热值和去灰分热值分布与Ca和Cd达到显著水平。由此看来,在本实验中,一定量的Fe、Mg、Mn和K对长柔毛委陵菜的热值有促进作用。

表2 长柔毛委陵菜北厂和跑马坪种群的热值与金属元素含量的相关性

Table 2 Correlation coefficients between caloric values and metal concentration in two *P. griffithii* var. *velutina* populations

种群 Population		GCV	AFCV	Zn	Pb	Cd	Cu	Fe	Mg	Mn	K	Ca
北厂	AC	0.458	0.770 **	0.225	-0.472	-0.224	-0.298	0.765 **	0.440	0.668 **	0.764 **	0.282
Beichang	GCV		0.920 **	0.407	-0.272	-0.432	-0.226	0.700 **	0.410	0.625 *	0.259	-0.370
	AFCV			0.399	-0.399	-0.402	-0.277	0.847 **	0.491	0.751 **	0.520 *	-0.152
跑马坪	AC	0.266	0.528	-0.272	-0.876 **	-0.489	-0.369	0.472	0.594	0.581	0.912 **	0.185
Paomaping	GCV		0.959 **	-0.131	-0.293	-0.581	-0.241	0.692 **	0.405	0.661 *	0.059	-0.607 *
	AFCV			-0.199	-0.515	-0.657 *	-0.321	0.747 **	0.532	0.753 **	0.320	-0.481

AC、GCV和AFCV分别表示灰分含量、干重热值和去灰分热值; *和**分别表示在0.05和0.01水平上相关性显著; 北厂 $n=15$, 跑马坪 $n=12$

3 讨论

同种植物由于长期分布和生长在不同的环境条件下,在生态适应过程中,植物的生理、生化和遗传特征都发生了相应的变化,从而形成了不同的种群或生态型;环境条件差异越大,选择压力越强,种群的差异分化就越明显^[1]。不同重金属超富集植物的不同种群也产生分化现象。虽然Baker等^[14]发现 *T. caerulescens* 的5个英国种群对Zn、Cd、Co、Mn和Ni的吸收和耐性没有明显差异,但Lombi等^[2]却发现该植物的4个种群对Cd的富集能力存在显著差异,其中法国南部的2个种群对Cd的富集能力比利时的Prayon种群和英国的Whitesike种群更强,并且Whitesike种群对Cd的吸收能力大于Prayon种群^[5]。同样,Zn/Cd超富集植物 *A. halleri* 不同种群对Zn呈现相似的富集能力,而对Cd的富集表现非常大的差异^[4]。东南景天不同种群对重金属的吸收也表现出较大差异^[3],虽然东南景天生长在Zn、Cd和Pb含量相近的Pb/Zn矿上,但其4个种群对Zn、Cd和Pb含量有显著差异^[15]。超富集植物的不同种群对重金属吸收的差异不但与土壤性质如pH、有机质和电导率等有关^[15],而且可能与金属转运基因的差异表达和植物根细胞膜上重金属转运位点多少有关^[2, 16]。长柔毛委陵菜的北厂和跑马坪种群对Zn、Pb和Cd的富集存在差异,这种差异与土壤中对重金属的含量相对应,说明土壤中重金属含量的不同可能是导致长柔毛委陵菜不同种群植株重金属含量产生差异的原因。至于长柔毛委陵菜的这两个种群富集重金属的差异是否是其固有特性,有待进一步证实。

灰分是指植物体矿物元素氧化物的总和。灰分含量的高低不但与植物吸收的元素量和生长的土壤条件

有关,而且灰分含量高低可指示植物富集元素的作用^[17-18]。长柔毛委陵菜的北场和跑马坪种群各部位的灰分含量没有显著差异,这表明两者的矿物元素氧化物含量没有显著差异。同时,长柔毛委陵菜根部的灰分含量显著低于地上部的叶片和叶柄,这说明根部吸收的矿物质较少或者吸收的矿物质主要输送到地上部,根部富集较少,以此减少包括重金属在内的矿物质对根部的毒害,提高其对重金属等物质的耐性。这可能是其适应重金属高污染土壤的表现。

植物热值是植物干物质完全燃烧后所释放出来的能量值,它是能量的尺度,可以用来表示植物在光合作用过程中将太阳能转化成化学能的效率;同时它比单纯用干物质量更能反映植物对自然资源(尤其是太阳能)的利用情况^[19]。研究植物组织热值变化的最重要意义在于热值能反映组织中各种生命活动的变化和植物生长状况的差异^[9]。在长柔毛委陵菜两个种群的干重热值和去灰分热值中,都以叶片中较高,而叶柄和根中较低,说明长柔毛委陵菜不同器官在能量利用策略上存在差异。这种能量分布格局与大多数研究结果相同^[20-21]。其原因与植物结构和植物各器官的生理作用及功能有关:叶片是植物体生理活动最活跃的器官,含有较多的高能化合物如蛋白质和脂肪等物质,另外它自身还能合成高能有机物,导致叶的热值一般较高;叶柄和根是植物的支持和运输器官,生理活性较低,且较多地含有热值相对比蛋白质和脂肪低的纤维素和木质素,故较叶片的热值低^[10, 21-22]。本实验所采的长柔毛委陵菜为野外多年生植株,其地上部每年都要更新,而根系随时间越长越大,其根部热值可能象白三叶(*Trifolium repens*)的根部和木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)人工林细根的热值一样随年龄的增加而增加^[23-24];并且一般认为灰分含量越低,干重热值越高^[18, 25],而长柔毛委陵菜的根部灰分含量在所有部位中是最低的,其热值应该较高。但从实验结果来看,根部的去灰分热值低于地上部的叶片和叶柄,这可能的原因是植物根部为了抵抗土壤重金属的毒害,动用自身的能量贮备来达到能量平衡,导致根部热值降低^[18]。长柔毛委陵菜根部的低热值可能是适应重金属严重污染环境的反应。

长柔毛委陵菜北厂和跑马坪种群的平均干重热值分别达到 $17.29 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $17.85 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,都高于同属的生长在草原上的星毛委陵菜(*P. acaulis*)、蔓委陵菜(*P. flagellaris*)、沙地委陵菜(*P. filipendula*)、二裂委陵菜(*P. bifurca*)、菊叶委陵菜(*P. tanacetifolia*)和轮叶委陵菜(*P. verticillaris*)的叶片和地上部的干重热值^[20, 26],其地上部热值也高于金华市郊 10 种杂草的热值^[27]和高山杂类草的平均热值($16.18 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)^[28]。还有研究表明植物叶片的较高热值是植物适应高寒气候、贫瘠土壤和盐胁迫的生理基础^[22, 29-30],长柔毛委陵菜较高的叶片热值可能也是适应重金属(尤其是 Zn)富集的需要。这种植物对环境的特殊适应也反映它主动适应环境的能力,是植物自身的高能量对物质的一种补偿作用^[18, 29]。

热值的高低受多种因素的影响,是各种因素综合作用的结果^[18]。其中碳素含量、有机物的化学组成和灰分含量是植物热值高低的内在决定因素^[8, 10, 21, 31];同时植物热值还受到光强、日照时数、养分含量、土壤类型、季节等外部环境因子的影响^[21, 32-33]。长柔毛委陵菜的北厂和跑马坪种群的热值基本没有显著差异,这不仅与两者的灰分含量无显著差异有关,还可能与热值密切相关的碳素和有机物等物质成分含量^[9, 13]相似有关,也说明这两个种群的分化程度可能不大。徐永荣等^[13]研究表明生长在滨海盐渍土的 9 种植物的干重热值与 Na、Mg、Cl 含量呈极显著的负相关、与 Ca 含量呈显著负相关。但长柔毛委陵菜两个种群的热值与植物非必需元素 Cd、Pb 和毒性较强元素 Cu 及 Ca 呈负相关,其中跑马坪种群的干重热值和去灰分热值分别与 Ca 和 Cd 呈显著负相关;而与植物生长所需的元素 Fe、K、Mg 和 Mn 呈正相关,其中与 Fe 和 Mn 的相关性达到显著水平。这表明生长所需元素 Fe 和 Mn 对长柔毛委陵菜的能量累积起促进作用,不过这两种元素对长柔毛委陵菜热值表现有利作用的原因还需进一步研究。

References:

- [1] Lefebvre C, Vernet P. Microevolutionary processes on contaminated deposits // Shaw A J ed. Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1990: 285-300.
- [2] Lombi E, Zhao F J, Dunham S J. Cadmium accumulation in populations of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi goesingense*. New Phytologist, 2000, 145: 11-20.

- [3] Yang X E, Long X X, Ni W Z, Ni S F. Zinc tolerance and hyperaccumulation in a new ecotype of *sedum alfredii* Hance. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(6): 665-672.
- [4] Bert V, Bonnin I, Saumitou-Laprade P, de Laguérie P, Petit D. Do *Arabidopsis halleri* from nonmetalliferous populations accumulate zinc and cadmium more effectively than those from metalliferous populations? *New Phytologist*, 2002, 155: 47-57.
- [5] McGrath S P, Dunham S J, Correll R L. Potential for phytoextraction of zinc and cadmium from soils using hyperaccumulator plants//Terry N, Banuelos G, Vangronsveld J, eds. *Phytoremediation of contaminated soil and water*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press Inc. , 2000: 111-130.
- [6] Boyd R S, Davis M A, Balkwill K. Elemental patterns in Ni hyperaccumulating and non-hyperaccumulating ultramafic soil populations of *Senecio coronatus*. *South African Journal of Botany*, 2008, 74(1): 158-162.
- [7] Qiu R L, Fang X H, Tang Y T, Du S J, Zeng X W, Brewer E. Zinc hyperaccumulation and uptake by *Potentilla griffithii* hook. *International Journal of Phytoremediation*, 2006, 8(4): 299-310.
- [8] Lin P, Lin G H. Study on the Calorific value and ash content of some mangrove species in China. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1991, 15(1): 114-120.
- [9] Sun G F, Zheng Z M, Wang Z Q. Dynamics of calorific values of rice. *Chinese Journal of Ecology*, 1993, 12(1): 1-4.
- [10] Bao Y J, Li Z H, Han X G, Song G B, Yang X H, Lü H Y. Plant caloric value and its bioecological attributes. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(9): 1095-1103.
- [11] Chen M L, Shangguan Z P. Characteristics of caloric value and nutrient content of four garden tree species. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 747-751.
- [12] Xue C J, Zeng R, Liu S W, Chi G X, Qing H R, Chen Y C, Yang J M, Wang D H. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China; A review. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1-4): 337-359.
- [13] Xu Y R, Zhang W J, Feng Z W, Zhang J L. Caloric values, elemental contents and correlations between them of some plants on sea-beach salinity soil in Tianjin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 450-455.
- [14] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in british populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae). *New Phytologist*, 1994, 127: 61-68.
- [15] Deng D M, Deng J M, Li J T, Zhang J, Hu M, Lin Z, Liao B. Accumulation of zinc, cadmium, and lead in four populations of *Sedum alfredii* growing on lead/zinc mine spoils. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(6): 691-698.
- [16] Assunção A G L, Bookum W M, Nelissen H J M, Vooius R, Schat H, Ernst W H O. Differential metal-specific tolerance and accumulation patterns among *Thlaspi caerulescens* populations originating from different soil types. *New Phytologist*, 2003, 159: 411-419.
- [17] Lin Y M, Zheng M Z, Lin P, Chen S H. Ash content and caloric value in leaves of garden bamboo species. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2000, 39(1): 136-140.
- [18] Lin Y M, Guo Q R, Ye G F, Lin L, Lin P. Characteristics of matter and energy of some Casuarinaceae species in Dongshan County, Fujian Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2217-2223.
- [19] Jordan C F. Productivity of a tropical forest and its relation to a world pattern of energy storage. *Ecology*, 1971, 59: 127-142.
- [20] Guo J X, Wang R D, Bao G Z. Caloric value of northeast *Aneurolepidium chinese* grassland species. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(6): 746-750.
- [21] 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.
- [22] Golley F B. Caloric value of wet tropical forest vegetation. *Ecology*, 1969, 50: 517-519.
- [23] Hu B Z, Liu D, Zhou Y L, Feng T. Resource sharing by the different clonal white clover population. *Journal of Northeast Forestry University*, 1998, 26(2): 25-28.
- [24] Ye G F, Zhang L H, Lin Y M, Hou J, Lu C Y, Zeng G Q. Dynamics of nutrient and energy for fine roots of *Casuarina equisetifolia* plantations on coastal sandy soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3874-3882.
- [25] Lin C C. Calorific values and nutrient composition of the leaves of monsoon evergreen broad-leaved forest and some forest-edge plants on Gushan Mountain in Fuzhou. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 832-836.
- [26] 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.
- [27] Guo S L, Hang H, Chao K, Zhu Y J. On caloric values and ash contents of ten weed species in Jinhua suburb and its adaptive significances. *Bulletin of Botanical Research*, 2005, 25(4): 460-464.
- [28] Smith D R. Gross energy value of aboveground parts of alpine plants. *Journal of Range Management*, 1967, 20: 179-180.
- [29] Howards-Williams C. Nutrient quality and caloric value of Amazonian forest litter. *Amazonisana*, 1974, 1: 67-75.
- [30] Lin P Wang W Q. Change in the caloric values of *Kandella candel* seedlings under salt stress. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(5):

466-470.

- [31] Neitzke M. Changes in energy fixation and efficiency of energy capture in aboveground biomass along an environmental gradient in calcareous grasslands. *Flora*, 2002, 197: 103-117.
- [32] Golley F G. Energy values of ecological materials. *Ecology*, 1961, 42(3): 581-584.
- [33] Hadley N F, Tinkle D W. Lizard reproductive effect: caloric estimates and comments on its evolution. *Ecology*, 1975, 56(3): 427-434.

参考文献:

- [3] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 倪士峰. 古老铅锌矿山生态型东南景天对锌耐性及超积累特性的研究. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 665-672.
- [8] 林鹏, 林光辉. 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*, 1991, 15(1): 114-120.
- [9] 孙国夫, 郑志明, 王兆骞. 水稻热值的动态变化研究. *生态学杂志*, 1993, 12(1): 1-4.
- [10] 鲍雅静, 李政海, 韩兴国, 宋国宝, 杨晓慧, 吕海燕. 植物热值及其生物生态学属性. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1095-1103.
- [11] 陈美玲, 上官周平. 四种园林植物的热值与养分特征. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 747-751.
- [13] 徐永荣, 张万均, 冯宗炜, 张金龙. 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*, 2003, 23(3): 450-455.
- [17] 林益明, 郑茂钟, 林鹏, 陈松河. 园林竹类植物叶的热值和灰分含量研究. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2000, 39(1): 136-140.
- [18] 林益明, 郭启荣, 叶功富, 林玲, 林鹏. 福建东山几种木麻黄的物质与能量特征. *生态学报*, 2004, 24(10): 2217-2223.
- [20] 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] 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.
- [23] 胡宝忠, 刘娣, 周以良, 冯桐. 白三叶无性系植物种群分株间的资源分配. *东北林业大学学报*, 1998, 26(2): 25-28.
- [24] 叶功富, 张立华, 林益明, 侯杰, 卢昌义, 曾国强. 滨海沙地木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)人工林细根养分与能量动态. *生态学报*, 2007, 27(9): 3874-3882.
- [25] 林承超. 福州鼓山季风常绿阔叶林及其林缘几种植物叶热值和营养成分. *生态学报*, 1999, 19(6): 832-836.
- [26] 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. *大连民族学院学报*, 2008, 10(3): 197-202.
- [27] 郭水良, 黄华, 晁柯, 朱亦君. 金华市郊10种杂草的热值和灰分含量及其适应意义. *植物研究*, 2005, 25(4): 460-464.
- [30] 林鹏, 王文卿. 盐胁迫下红树林植物秋茄(*Kandelia candel*)热值变化的研究. *植物生态学报*, 1999, 23(5): 466-470.