

黄河口滨岸潮滩不同表现型翅碱蓬 K、Ca、Mg 含量与累积的季节变化

牟晓杰^{1,2}, 孙志高^{1,3*}, 王玲玲^{1,2}, 孙万龙⁴

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所 滨海湿地生态实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005; 4. 中国农业大学, 山东 烟台 264670)

摘要: 2008年5-11月,对黄河口滨岸潮滩2种表现型翅碱蓬的K、Ca、Mg含量与累积的季节变化进行了研究。结果表明,中潮滩翅碱蓬(JP1)和低潮滩翅碱蓬(JP2)不同器官生物量均具有明显季节动态,总体表现为JP1>JP2,且均符合抛物线模型。二者枯落物量均呈递增变化,符合指数增长模型;JP1、JP2不同部分K、Ca、Mg含量的变化模式差异较大,其中K含量大多符合抛物线/线性模型,而Ca、Mg含量大多呈Gauss曲线变化;JP1、JP2不同时期各部分的K、Ca、Mg含量差异明显,其中JP1根、叶和枯落物的K、Ca、Mg含量大多高于JP2,而JP2茎的Ca、Mg含量则高于JP1;JP1、JP2不同部分K、Ca、Mg的相关性、储量及累积速率差异明显,茎、叶分别为JP1、JP2 K的主要储库(43.02%±20.80%和48.03%±4.31%),而叶均是Ca、Mg的主要储库(40.38%±18.34%,50.58%±20.73%和62.96%±10.56%,58.02%±10.62%);JP1、JP2不同器官生物量及其K、Ca、Mg含量、储量、累积速率的变化及差异主要与其生态学特性、不同器官营养功能及所处生境的水盐状况有关。

关键词: K; Ca; Mg; 潮滩; 翅碱蓬湿地; 黄河口

中图分类号: S545; Q945.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5759(2010)03-0177-14

* 营养元素循环是现代湿地生态学研究热点^[1,2],K、Ca、Mg是湿地生态系统中非常重要的营养元素,对其进行深入研究对了解湿地系统的生态过程和生态功能具有重要意义^[3]。目前,国外学者已在湿地植物K、Ca、Mg的含量变化^[4,5]、累积特征^[6,8]、养分利用^[7,9]以及其对环境条件响应^[9]等方面进行了大量研究。国内也在湿地植物K、Ca、Mg累积特征^[10-12]、器官分布^[10,11]及生物循环特征^[12]等方面开展了相关工作。但是,国内关于植被对K、Ca、Mg等元素吸收、累积与分配的研究多集中在草地^[13-17]、森林^[18-21]和农田^[22-25]等领域,对湿地尤其是不同生境条件下同种湿地植被K、Ca、Mg含量变化与累积特征的研究还不多见。

黄河三角洲由黄河携带大量泥沙填充渤海淤积而成,是中国暖温带保存最完整、最广阔和最年轻的湿地生态系统。翅碱蓬(*Suaeda salsa*)为一年生植物,是黄河三角洲重要的盐生植被之一,而作为该区湿地系统演替先锋阶段的翅碱蓬盐沼,是黄河三角洲丹顶鹤、白鹭、鸬形目鸟类等的主要栖息地,同时还起着维持湿地系统正常演替,防风固堤,调节气候等多重功能。翅碱蓬常分布于海陆交互作用的潮滩地带,大面积翅碱蓬在潮滩分布形成奇特壮丽的“红地毯”景观。潮汐是影响潮滩湿地变化的重要驱动力,在海陆相互作用下,潮滩地带各种环境因素变化剧烈、频繁,湿地的稳定性、干扰程度及频率也在不断变换,湿地面貌和结构始终处于变化之中。在翅碱蓬分布区内,由于潮滩不同位置环境条件特别是水盐条件的差异,分别在中潮滩和低潮滩形成了2种不同表现型的翅碱蓬群落,其对盐分变化极为敏感。目前,国内关于不同盐分带上翅碱蓬不同器官K、Ca、Mg含量变化与累积特征的对比研究还未见报道。为此,本研究以位于黄河口滨岸中潮滩和低潮滩上的2种表现型翅碱蓬群落为对象,探讨其对K、Ca、Mg的累积与分配状况,及其对盐分指示敏感程度的差异,以期对2种翅碱蓬湿地营养物质循环

* 收稿日期: 2009-08-07; 改回日期: 2009-10-27

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223), 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者”科研启动基金项目(AJ0809BX-036), 国家自然科学基金项目(40803023), 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室高级访问学者基金(MELRS0918), 厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室基金(Cwel0903), 中国科学院烟台海岸带所前沿领域项目(HJ0810BX-047)和山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目(2007KFJJ01)资助。

作者简介: 牟晓杰(1982), 女, 山东栖霞人, 在读硕士。E-mail: xjmou@163.com

* 通讯作者。E-mail: zgsun@vic.ac.cn

和能量流动等研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2008 年 5–11 月在山东省黄河三角洲国家级自然保护区(东营)今黄河入海口滨岸潮滩进行。黄河三角洲自然保护区(37°40′~38°10′N, 118°41′~119°16′E)于 1992 年经国家林业局批准建立,是全国最大的河口三角洲自然保护区,在世界范围河口湿地生态系统中具有较强代表性,主要保护黄河口新生湿地系统和珍稀濒危鸟类。保护区属暖温带季风气候区,具有明显大陆性季风气候特点,雨热同期,四季分明,冷热干湿界限极为明显。该区年均气温 12.1℃,无霜期 196 d, ≥10℃年积温约 4 300℃,年均蒸发量 1 962 mm,年均降水量 551.6 mm,70%的降水集中于 7 和 8 月。保护区的土壤类型主要为隐域性潮土和盐土,主要植被类型为芦苇(*Phragmites australis*)群落、芦苇-荻(*Triarrhena sacchariflora*)群落、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)群落、柽柳(*Tamarix chinensis*)群落、翅碱蓬群落及补血草(*Limonium sinense*)群落等。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与测定 2008 年 5–11 月,采用定位研究方法,按照“典型性、代表性、一致性”的原则,在现黄河入海口滨岸潮滩翅碱蓬分布区内,选择中潮滩翅碱蓬群落(37°45′57.0″N, 119°09′40.7″E, JP1)和低潮滩翅碱蓬群落(37°46′38.9″N, 119°09′41.4″E, JP2)为研究对象,分别设置 30 m×30 m 样地,测定不同表现型翅碱蓬的地上、地下生物量及枯落物量。1)地上生物量采用收获法,即在典型样地按植物生长特点每 20 d 左右采样 1 次。采样时,随机选取 4~5 个 50 cm×50 cm 样方,用剪刀沿地面剪下地上部分,带回实验室,并将其分离为茎、叶。由于成熟期翅碱蓬的果实与小叶紧密相连,难以准确区分,所以实际为叶+果实。2)地下生物量采用挖掘法,并在地上生物量测定小区内进行测定。采样时,将样方内 0~40 cm 的根全部挖出,放在细纱网袋中将泥土冲洗干净至无。3)枯落物采样与生物量测定同步,随机选取 4~5 个 50 cm×50 cm 样方,割除地上部分,摘除立枯物(实验室进行)。同时,收集样方内散落在地面上的当年凋落物。由于研究地点为不规则半日浅海潮,部分植物体(主要为叶子)及枯落物可被潮汐带走或在潮滩上重新分配,所以本研究测定的生物量及枯落物量均为现存量。将采集的地上、地下植物及枯落物(立枯物+凋落物)样品先于 105℃下杀青,后于 80℃下烘干至恒重。称量后将样品粉碎,过 0.25 mm 筛后备用。植物样品用 HNO₃-HClO₄ 消解后,在等离子发射光谱仪 ICPS-7500 上测定 K、Ca、Mg 含量。

1.2.2 环境因子测定 试验进行的同时,采用常规方法定期测定生长季内不同翅碱蓬群落的环境因子,如不同深度地温、电导率和土壤含水量等。另外,采集不同层次土壤样品,测定其 pH、有机质、全氮、铵态氮和硝态氮含量。其中全氮采用凯氏定氮法测定,有机质采用重铬酸钾容量法测定,硝态氮和铵态氮采用氯化钾浸提-连续流动分析仪(SKALAR-SAN⁺⁺)测定。

1.2.3 计算方法 植物 K、Ca、Mg 累积速率(V_N , g/m²·d)可用下式计算^[26]:

$$V = \frac{dN}{dt} \quad V = \frac{N_{i+1} - N_i}{t_{i+1} - t_i}$$

式中, N_i 、 N_{i+1} 分别为 t_i 、 t_{i+1} 时刻 K、Ca、Mg 的累积量(g/m²)。

1.2.4 数据处理与统计 运用 Origin 8.0 对数据进行作图、计算和数学模拟,运用 SPSS 16.0 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 生物量、枯落物量变化特征

2.1.1 生物量 JP1、JP2 地上不同器官生物量在生长季均有明显季节变化,且变化规律差异较大(图 1)。二者地上器官生物量均从 4 月下旬植物萌发后随温度升高逐渐增加,并均于 8 月末取得最大值,但 JP1 地上器官生物量较大值持续时间较长。最大值过后,随秋季来临及温度降低,翅碱蓬光合能力减弱并渐趋衰老。此间营养物质不断溶失并开始转移,生物量逐渐降低。至 11 月中旬,随温度继续降低,翅碱蓬(特别是 JP1)地上部分几乎完全枯死并呈立枯状或被潮水冲刷以枯落物形式归还潮滩,此时二者地上生物量降至最低,其季节动态表现为不同单

峰型,反映出翅碱蓬生长节律与该区暖温带季风气候雨热同期的特点相适应。就地上生物量分配而言,茎对 JP1 地上生物量的平均贡献率最高(62.23% ± 16.24%),而叶对 JP2 地上生物量的平均贡献率占优(52.28% ± 8.02%)。另外,JP1、JP2 地下生物量亦具有明显季节动态。萌发初期,二者地下生物量最低,之后地下生物量逐渐增大,并均于 8 月取得最高值,但其最高值取得时间相差 20 d 左右。最大值过后,特别是到成熟期和生长末期,根系开始逐渐死亡、腐烂,地下生物量逐渐降低。比较而言,JP1 地上、地下生物量一般均明显大于 JP2,分别为 JP2 的 1.97~ 6.31 和 2.46~ 6.91 倍,原因可能主要与不同表现型翅碱蓬的生态学特性及所处生境有关。方差分析表明,2 种表现型翅碱蓬地上及茎生物量之间的差异均达到显著水平($P < 0.05$),而根生物量的差异则达到极显著水平($P < 0.01$)。模拟结果表明,JP1 不同器官生物量(y) 随时间(t) 均符合抛物线模型(JP2 叶的模拟较差)(表 1)。

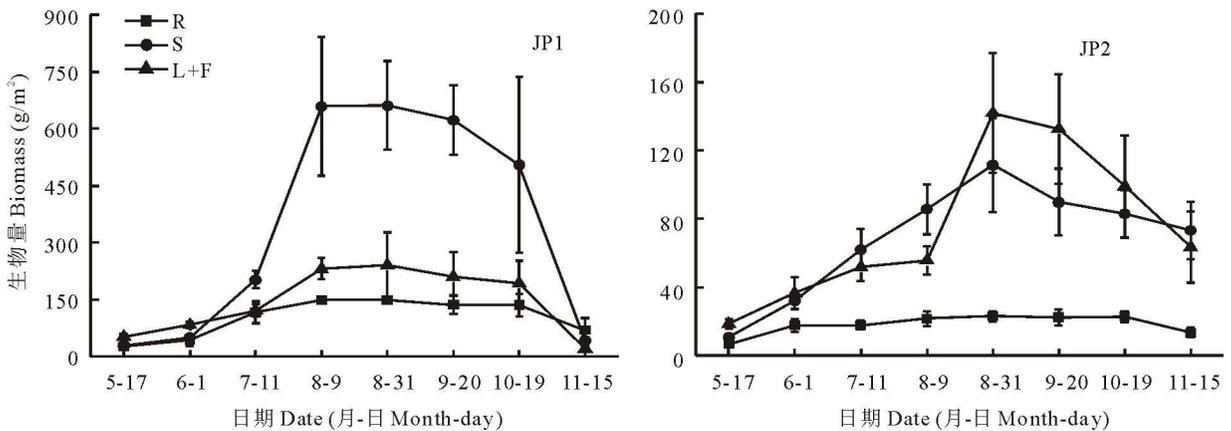


图 1 2 种翅碱蓬不同器官生物量季节变化

Fig. 1 Seasonal changes of different organ biomass of the two types of *S. salsa*

JP1: 中潮滩翅碱蓬 *S. salsa* in middle tidal flat; JP2: 低潮滩翅碱蓬 *S. salsa* in low tidal flat; R: 根 Root;

S: 茎 Stem; L+ F: 叶+ 果实 Leaf+ Fruit; 下同 The same below

表 1 生物量和枯落物量动态模拟模型

Table 1 Models simulating the dynamics of biomass and litter amount

类型 Type	项目 Item	模拟模型 Simulation model	R^2	P
JP1	茎 Stem	$y = - 514.433 5 + 17.538 3t - 0.068 5t^2$	0.813	< 0.05
	叶 Leaf	$y = - 99.146 1 + 5.312 9t - 0.021 8t^2$	0.827	< 0.05
	地上 Aboveground	$y = - 613.579 6 + 22.851 3t - 0.090 3t^2$	0.818	< 0.05
	地下 Below ground	$y = - 57.180 5 + 3.146 8t - 0.011 9t^2$	0.970	< 0.01
	枯落物 Litter	$y = 0.763 0 \exp(t/32.252 3) + 40.378 8$	0.877	< 0.01
JP2	茎 Stem	$y = - 33.012 7 + 1.767 2t - 0.006 1t^2$	0.944	< 0.01
	叶 Leaf*	$y = - 40.630 1 + 2.005 2t - 0.006 9t^2$	0.659	< 0.10
	地上 Aboveground	$y = - 73.642 8 + 0.332 6t - 0.001 3t^2$	0.829	< 0.05
	地下 Below ground	$y = 1.379 1 + 3.772 4t - 0.012 9t^2$	0.789	< 0.05
	枯落物 Litter	$y = 0.377 1 \exp(t/44.855 2) + 2.712 5$	0.899	< 0.01

* 模拟结果较差 Simulation result is not very good; 下同 The same below.

2.1.2 枯落物量 JP1、JP2 的枯落物量(主要为立枯物量)整体均随时间推移逐渐增加(图 2)。初期枯落物量很低,至生长季末,由于秋季来临和温度降低枯落物量迅速增加,并取得最大值。10 月中旬,JP1 的枯落物量明显降低,JP2 枯落物的增量亦不大,而理论上此间枯落物的产生量非常大,原因可能与此间潮汐较强的冲刷作用使得

枯落物现存量较低有关。比较而言,不同时期 JP1 的枯落物量均明显高于 JP2(为后者的 1.79~14.64 倍),原因不仅与二者自身组织结构(主要指器官分配比)的差异有关,同时也与 JP1 较高的生产力有关。方差分析表明,JP1、JP2 枯落物量的变化尽管存在一定差异,但并未达到显著水平($P > 0.05$)。模拟结果表明,2 种表现型翅碱蓬的枯落物量(y) 随时间(t) 均符合指数增长模型(表 1)。

2.2 K、Ca、Mg 含量变化特征

2.2.1 K 含量的变化特征

JP1、JP2 不同器官及枯落物的 K 含量均有明显季节变化(图 3),其中根、茎和枯落物的 K 含量变化具有较强一致性,而叶的 K 含量变化差异较大。生长初期的 5-6 月,JP1、JP2 根、茎和枯落物的 K 含量均较高,之后有所降低并呈不同变化模式。其中,根呈斜“S”型变化,茎整体呈递减变化,而枯落物整体呈降低-增加变化。JP1 叶的 K 含量整体呈“V”型变化,并分别于 8 月上旬和 11 月中旬取得最低值和最高值。而 JP2 叶的 K 含量在初期较高,之后变化虽有波动,但整体呈递减趋势,并于生长末期有所增加。总之,JP1 不同部分 K 含量在初期一般表现为茎 > 根 > 枯落物 > 叶,生长阶段为茎 > 叶 > 根 > 枯落物,末期为叶 > 茎 > 枯落物 > 根。与之相比,JP2 不同部分 K 含量在各时期差异较大,无明显规律性。比较而言,JP1 根、茎、叶和枯落物的 K 含量大多明显高于 JP2,分别为其 1.06~1.41,1.28~1.94,1.08~2.05 和 1.02~2.21 倍。方差分析表明,JP1、JP2 茎和叶的 K 含量均达到显著差异水平($P < 0.05$)。模拟结果表明,JP1、JP2 根的 K 含量(y) 随时间(t) 均符合三次多项式,茎符合线性模型,枯落物符合抛物线模型,而叶分别符合抛物线模型和线性模型(表 2)。

2.2.2 Ca 含量的变化特征

JP1、JP2 不同器官 Ca 含量的季节变化差异较大,缺乏一致性(图 3)。JP1 根的 Ca 含量在 7 月中旬前呈增加趋势,之后则呈“W”型波动变化。与之相比,JP2 根的 Ca 含量除初期较高外,其他时期变化平缓。尽管 JP1 茎的 Ca 含量变化存在波动,但整体呈递减趋势,而 JP2 整体呈增加-递减的单峰变化。8 月末前,JP1 叶的 Ca 含量变化平缓,JP2 则呈增加-递减的单峰变化。8 月末后,JP1、JP2 叶的 Ca 含量呈相反变化趋势。JP1、JP2 枯落物的 Ca 含量变化具有较强一致性,8 月上旬前均呈单峰变化,之后均呈递减趋势。总之,JP1 不同部分 Ca 含量在 8 月上旬前均表现为枯落物 > 叶 > 茎 > 根,之后一般为枯落物 > 叶 > 根 > 茎,而 JP2 不同部分 Ca 含量在生长季一直表现为枯落物 > 叶 > 茎 > 根。比较而言,JP1 根、枯落物的 Ca 含量大多明显高于 JP2,分别为其 1.00~2.37 和 1.00~1.18 倍,而 JP2 茎、叶的 Ca 含量大多明显高于 JP1,分别为其 1.73~2.19 和 1.13~1.38 倍。方差分析表明,除根外,JP1、JP2 茎、叶和枯落物的 Ca 含量均未达到显著差异水平($P > 0.05$)。模拟结果表明,JP2 根的 Ca 含量变化无明显规律,除 JP1 茎的 Ca 含量(y) 随时间(t) 符合指数递减模型外(表 2),JP1 根、叶和枯落物以及 JP2 茎、叶和枯落物的 Ca 含量均符合 Gauss 曲线变化(表 3)。

2.2.3 Mg 含量的变化特征

JP1、JP2 不同器官和枯落物的 Mg 含量均具有明显季节变化(图 3),且叶和枯落物的 Mg 含量变化具有较强一致性。JP1 根的 Mg 含量在 7 月中旬前呈递减趋势,之后则与 Ca 含量变化相似,而 JP2 根的 Mg 含量变化与 Ca 含量一直具有较强一致性。与 JP1 茎的 Ca 含量变化相似,其 Mg 含量亦呈递减趋势,而 JP2 茎的 Mg 含量在 7 月中旬前呈单峰变化,之后则呈较缓波动趋势。与之相比,JP1、JP2 叶和枯落物的 Mg 含量在 8 月上旬前均呈单峰变化,之后则呈递减趋势。总之,JP1、JP2 不同部分的 Mg 含量在生长季一般均表现为叶 > 枯落物 > 茎 > 根。比较而言,JP1 根、叶和枯落物的 Mg 含量大多明显高于 JP2,分别为其 1.06~1.63,1.20~2.21 和 1.07~1.74 倍,而 JP2 茎的 Mg 含量均明显高于 JP1,分别为其 1.06~2.41 倍。方差分析表明,JP1、JP2 不同部分 Mg 含量均未达到显著差异水平($P > 0.05$)。模拟结果表明,除 JP1 茎的 Mg 含量(y) 随时间(t) 符合指数递减模型外(表 2),JP1 根、叶和枯落物以及 JP2 根、茎、叶和枯落物的 Mg 含量均符合 Gauss 曲线变化(表 3)。

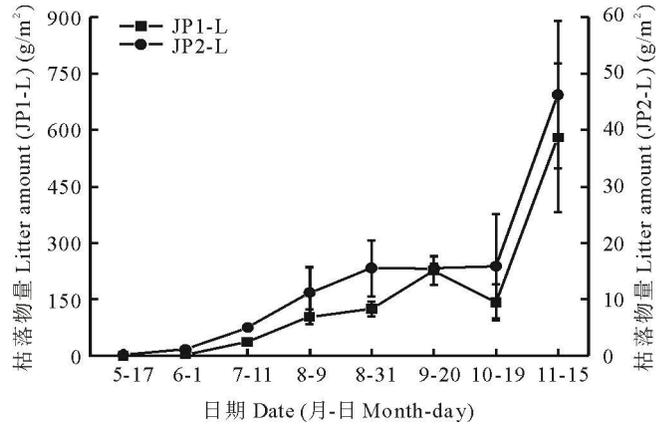


图 2 2 种翅碱蓬枯落物量季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of litter amount of the two types of *S. salsa*

L: 枯落物 Litter; 下同 The same below

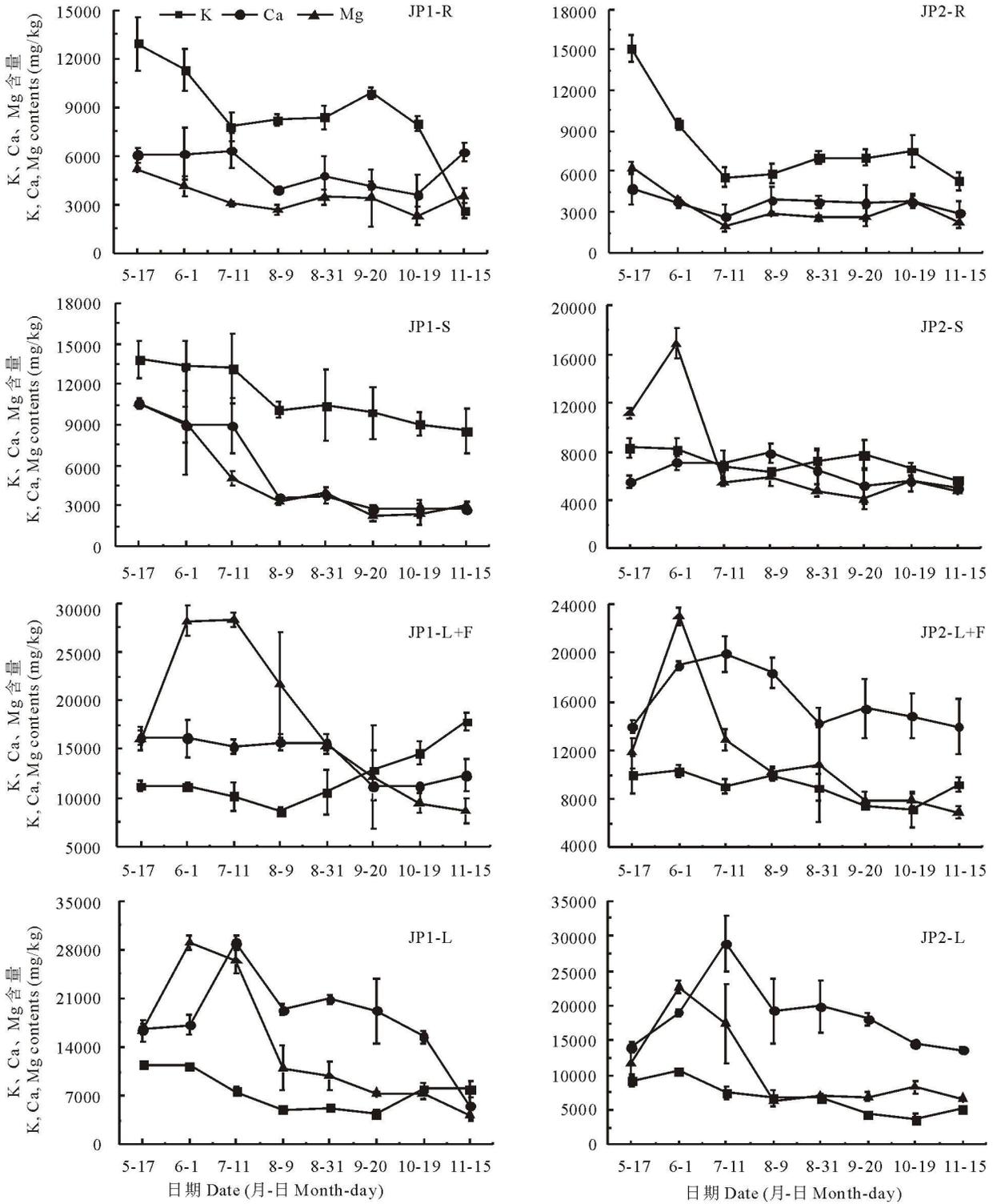


图 3 翅碱蓬不同部位中 K、Ca、Mg 含量变化

Fig. 3 Changes of potassium, calcium and magnesium contents in different parts of *S. salsa*

2.3 K、Ca、Mg 的相关关系

相关分析表明, JP1、JP2 不同部分中 K、Ca、Mg 间的相关性差异较大 (表 4), 其中 JP1 根和枯落物的 K 与 Ca 均呈负相关, 而 K 与 Mg、Ca 与 Mg 则呈正相关, 但相关不显著 ($P > 0.05$)。而叶中的 Ca 与 Mg 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。不同的是, JP1 茎的 K 与 Ca、K 与 Mg 以及 Ca 与 Mg 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而叶的 K 与 Ca、K 与 Mg 则呈显著负相关 ($P < 0.05$)。与之相比, JP2 不同部分中的 K 与 Ca、K 与 Mg 以及 Ca 与 Mg 均呈正相

表 2 不同部位 K、Ca、Mg 含量动态模拟模型

Table 2 Models simulating the dynamics of potassium, calcium and magnesium contents in different parts

元素 Elements	类型 Types	项目 Items	模拟模型 Simulation models	R	P
K	JP1	根 Root	$y = 22\ 131.010\ 6 - 421.099\ 8t + 3.922\ 0t^2 - 0.011\ 2t^3$	0.988	< 0.01
		茎 Stem	$y = 14\ 629.542\ 6 - 30.750\ 3t$	- 0.957	< 0.01
		叶 Leaf	$y = 13\ 735.695\ 3 - 95.931\ 0t + 0.553\ 6t^2$	0.973	< 0.01
		枯落物 Litter	$y = 16\ 136.653\ 0 - 160.564\ 8t + 0.590\ 7t^2$	0.944	< 0.01
	JP2	根 Root	$y = 26\ 110.785\ 4 - 548.163\ 6t + 4.551\ 0t^2 - 0.011\ 5t^3$	0.986	< 0.01
		茎 Stem	$y = 8\ 349.604\ 6 - 10.728\ 7t$	- 0.747	< 0.05
		叶 Leaf	$y = 10\ 412.780\ 9 - 12.088\ 5t$	- 0.676	< 0.10
		枯落物 Litter	$y = 11\ 802.992\ 3 - 61.816\ 2t + 0.125\ 7t^2$	0.921	< 0.01
Ca	JP1	茎 Stem	$y = 13\ 601.420\ 1e^{(-t/108.127)^0} + 119.513\ 6$	0.941	< 0.01
Mg	JP1	茎 Stem	$y = 15\ 050.265\ 0e^{(-t/47.384)^1} + 2\ 307.596$	0.986	< 0.01

表 3 不同部位 Ca、Mg 含量动态高斯模拟曲线

Table 3 Gauss curves simulating the dynamics of calcium and magnesium contents in different parts

元素 Elements	类型 Types	项目 Items	$y = -y_0 + \frac{A}{W} \frac{1}{\sqrt{\pi/2}} e^{-2\frac{(t-t_c)^2}{W^2}}$				
			y_0	t_c	W	A	R ²
Ca	JP1	根 Root	6 313.712	151.172	80.231	- 245 557.059	0.658
		叶 Leaf	16 000.252	179.871	61.190	- 417 842.937	0.884
		枯落物 Litter	- 38 581.138	97.122	279.692	21 866 965.749	0.799
	JP2	茎 Stem	4 989.399	82.914	82.914	274 434.706	0.763
		叶 Leaf	14 283.261	76.046	58.189	463 485.827	0.774
		枯落物 Litter	15 700.038	79.057	42.742	700 059.787	0.820
Mg	JP1	根 Root	15 477.932	147.041	410.637	- 6 505 556.223	0.696
		叶 Leaf	24 086.170	189.265	86.583	- 1 781 726.930	0.735
		枯落物 Litter	24 154.364	184.927	115.862	- 2 879 022.604	0.729
	JP2	根 Root	22 889.865	146.922	443.324	- 11 397 590.480	0.573
		茎 Stem	32 171.565	161.125	288.919	- 10 186 205.154	0.725
		叶 Leaf	17 918.042	189.879	152.094	- 2 074 646.481	0.589
		枯落物 Litter	18 163.978	167.580	116.062	- 1 831 363.418	0.598

y: 含量 Content; y_0 、A、W、 t_c : 常数 Constant; t: 时间 Time.

表 4 植物不同部位中 K、Ca、Mg 含量的相关关系

Table 4 Correlations of potassium, calcium and magnesium contents in different parts of plant

项目 Item	元素 Element	K	Ca	Mg	项目 Item	元素 Element	K	Ca	Mg
根 Root (n= 8)	K	1	- 0.023 ^{a)}	0.530 ^{a)}	叶 Leaf (n= 8)	K	1	- 0.741 ^{a)} *	- 0.730 ^{a)} *
	Ca	0.807 ^{b)} *	1	0.652 ^{a)}		Ca	0.353 ^{b)}	1	0.738 ^{a)} *
	Mg	0.959 ^{b)} **	0.847 ^{b)} **	1		Mg	0.620 ^{b)}	0.596 ^{b)}	1
茎 Stem (n= 8)	K	1	0.977 ^{a)} **	0.879 ^{a)} **	枯落物 Litter (n= 8)	K	1	- 0.222 ^{a)}	0.559 ^{a)}
	Ca	0.005 ^{b)}	1	0.910 ^{a)} **		Ca	0.242 ^{b)}	1	0.557 ^{a)}
	Mg	0.647 ^{b)}	0.255 ^{b)}	1		Mg	0.762 ^{b)} *	0.450 ^{b)}	1

a) 中潮滩翅碱蓬 *S. salsa* in middle tidal flat; b) 低潮滩翅碱蓬 *S. salsa* in low tidal flat * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

关,其中枯落物中 K 与 Mg 的相关性达到显著水平($P < 0.05$),而根中 K、Ca、Mg 间的正相关性均达到极显著水平($P < 0.01$)。

2.4 K、Ca、Mg 储量及累积速率变化特征

2.4.1 K、Ca、Mg 储量 JP1、JP2 因不同器官生物量/枯落物量以及 K、Ca、Mg 含量差异导致其在不同时期的储量差异较大(图 4)。二者地上器官 K、Ca、Mg 储量的变化较为相似,整体均自 5 月中旬开始逐渐增加,并在生长旺期/成熟期取得最大值,之后随各器官衰老及养分不断转移,地上器官 K、Ca、Mg 储量呈递减趋势,其变化整

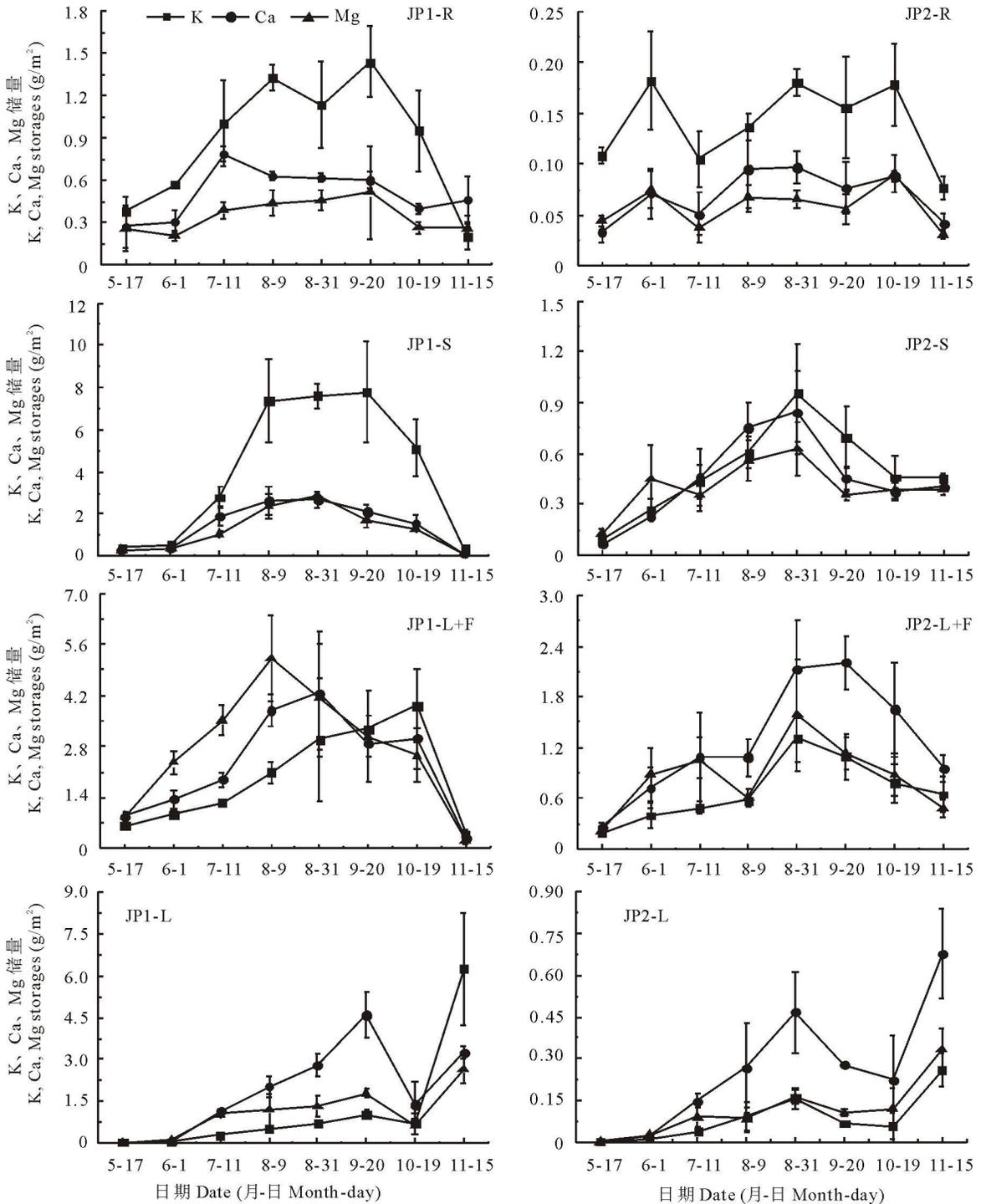


图 4 翅碱蓬不同部位中 K、Ca、Mg 储量变化

Fig. 4 Changes of potassium, calcium and magnesium storages in different parts of *S. salsa*

体均呈单峰曲线,但峰型差异较大。比较而言,JP1 根的 K、Ca、Mg 储量变化差异较大,其中 JP1 根的 K 储量呈双峰变化,而 JP2 呈波动变化,且其变化比前者更为明显。JP1 根的 Ca、Mg 储量整体虽均呈单峰变化,但变化模式差异较大。与之相比,JP2 根的 Ca、Mg 储量均呈波动变化,且变化模式具有较强一致性。二者枯落物的 K、Ca、Mg 储量变化亦具有较强一致性,除 JP1 在 10 月中旬、JP2 在 9 月下旬-10 月中旬取得明显低值外,其他时期的 K、Ca、Mg 储量均一直呈增加趋势。如前所述,二者枯落物的 K、Ca、Mg 储量在 10 月中旬的明显降低可能主要与此间较低的 K、Ca、Mg 含量以及潮汐较强的冲刷作用使得枯落物现存量较低有关。总之,JP1 不同器官 K 储量在生长期表现为茎>叶>根, Ca、Mg 储量表现为叶>茎>根,而 JP2 不同器官的 K、Ca、Mg 储量在生长期均表现为叶>茎>根,说明茎、叶分别为 JP1、JP2 K 的主要储库(43.02%±20.80%和 48.03%±4.31%),而叶均是 Ca、Mg 的主要储库(40.38%±18.34%, 50.58%±20.73%和 62.96%±10.56%, 58.02%±10.62%)(表 5)。另外,二者枯落物的 K、Ca、Mg 储量除生长末期较高外,其他时期一般明显低于不同器官的相应储量。比较而言,JP1 根、茎和枯落物的 K、Ca、Mg 储量比例一般均高于 JP2,但叶则相反(表 5)。

表 5 不同部位 K、Ca、Mg 储量的比例

Table 5 Proportions of potassium, calcium and magnesium storage of different parts (mean±SD) %

项目 Item	K		Ca		Mg	
	JP1	JP2	JP1	JP2	JP1	JP2
根 Root	14.53±8.92	12.48±7.69	10.39±4.85	4.30±2.52	7.73±4.12	4.88±2.97
茎 Stem	43.02±20.80	34.06±5.97	21.89±9.02	21.73±6.36	20.53±9.07	29.20±6.64
叶 Leaf	27.61±13.31	48.03±4.31	40.38±18.34	62.96±10.56	50.58±20.73	58.02±10.62
枯落物 Litter	14.85±29.01	5.43±5.49	27.34±25.17	11.01±9.76	21.16±25.66	7.90±8.17

2.4.2 K、Ca、Mg 累积速率 JP1、JP2 不同器官及枯落物 K、Ca、Mg 累积速率(V_K 、 V_{Ca} 、 V_{Mg})的变化如图 5 所示。JP1 根的 V_K 、 V_{Ca} 、 V_{Mg} 变化差异较大,其中 V_K 除 8 月末和生长末期为负值外,其他时期均为正值。 V_{Ca} 除初期和末期为正值外,其他时期均为负值。而 V_{Mg} 除初期和末期的个别时段为负值外,其他时期均为正值。不同的是,JP2 根的 V_K 、 V_{Ca} 、 V_{Mg} 变化较为一致,除初期为较高正值外,其他时期均呈正负交替波动变化。JP1、JP2 地上器官的 V_K 、 V_{Ca} 、 V_{Mg} 在成熟期之前一般均为正值,生长末期则为负值。初期至成熟期,地上器官对 K、Ca、Mg 的需求量均较大,由此使得 V_K 、 V_{Ca} 、 V_{Mg} 一般均为正值。生长末期,随秋季来临和温度降低,植物不断枯萎,此间地上部分的 K 也开始不断转移,由此使得 V_K 为负值。JP1、JP2 枯落物的 V_K 、 V_{Ca} 、 V_{Mg} 变化基本一致,除 JP1 在 10 月中旬、JP2 在 9 月下旬-10 月中旬取得明显低值外,三者在其他时期均为正值,且整体呈增加趋势。如前所述,二者枯落物 V_K 、 V_{Ca} 、 V_{Mg} 明显负值的取得更主要与此间潮汐较强的冲刷作用使得枯落物现存量较低有关。对比研究发现,JP1、JP2 地上与地下器官在不同时期 V_K 、 V_{Ca} 、 V_{Mg} 的变化可在一定程度上反映其在 K、Ca、Mg 养分供给方面的密切联系。总之,JP1、JP2 不同部分 V_K 、 V_{Ca} 、 V_{Mg} 的变化及差异除与其生态学特性有关外,其所处生境差异可能也是重要原因。

3 讨论

3.1 生物量变化及差异

本研究表明,黄河口滨岸潮滩 JP1、JP2 不同器官生物量均具有明显季节变化特征,且差异明显,总体表现为 JP1>JP2。水盐梯度是黄河口滨岸潮滩湿地最典型的环境因子,是决定植被分布与演替的关键因素^[27]。已有研究表明,水分、盐分条件可直接影响植物生物量及其分配的变化,王鑫等^[28]的研究表明,土壤含水量和速效氮含量对新疆巴音布鲁克高寒草地植物地上生物量的影响最大,是决定地上生物量的主要因子。王齐等^[29]的研究发现,重度水分胁迫明显抑制了结缕草(*Zoysia*)生物量的累积。王丽等^[30]的研究则表明,水分梯度及不同水分梯度下的土壤环境条件是影响三江平原典型小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)生物量分异的主要原因。贺海波和李彦^[31]还探讨了盐分胁迫对猪毛菜(*Salsola nitraria*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)2 种盐生植物生长和生

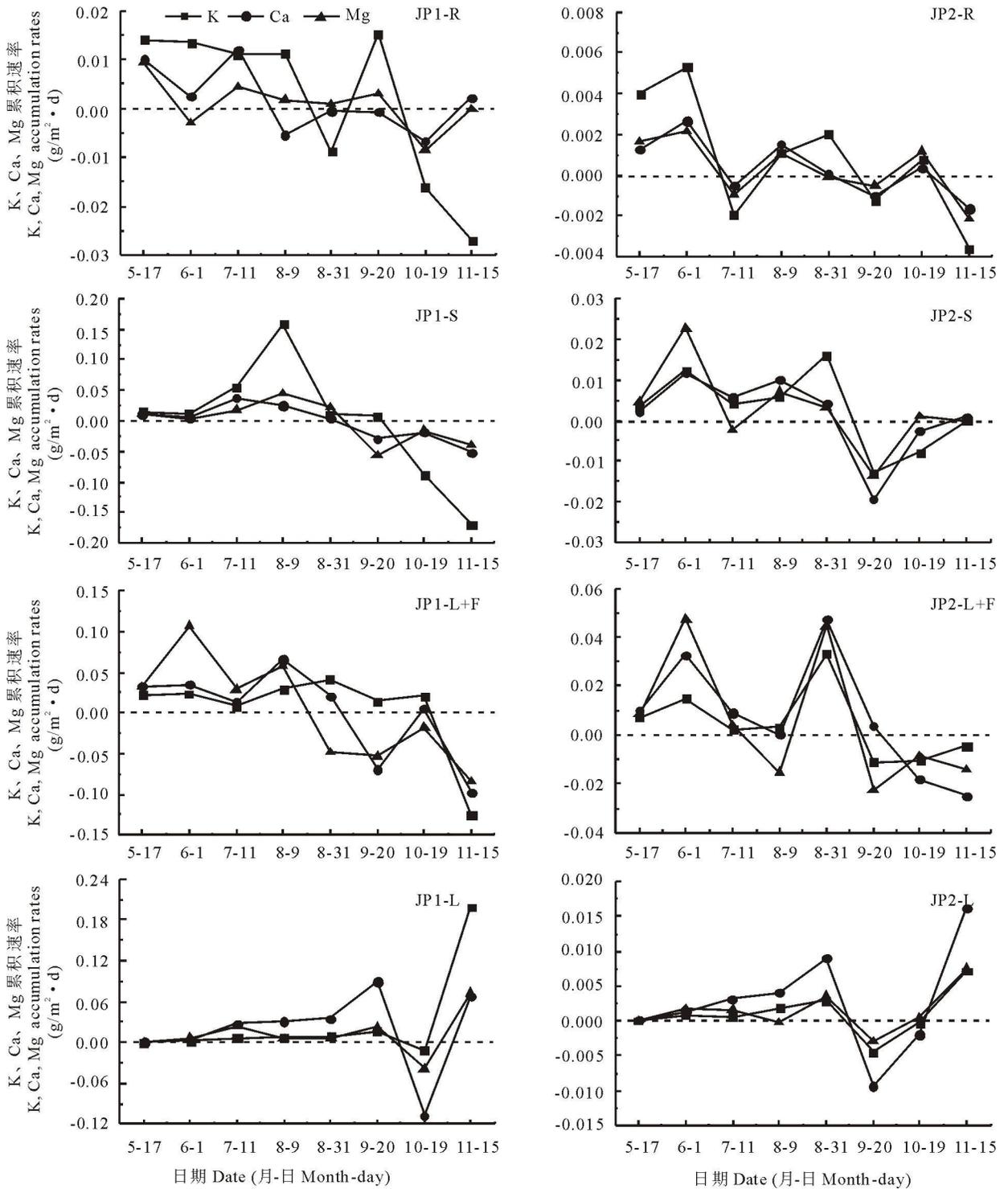


图 5 翅碱蓬不同部位中 K、Ca、Mg 累积速率变化

Fig. 5 Changes of potassium, calcium and magnesium accumulation rates in different parts of *S. salsa*

物量分配的影响。结果发现, 盐分胁迫显著影响了 2 种盐生植物的生长、生物量积累和生物量分配。Rawat 和 Banerjee^[32] 的研究也发现, 盐分对印度黄檀 (*Dalbergia sissoo*) 幼苗的生物量累积与分配具有重要影响, 低盐能促进植物生长及生物量累积, 而高盐则抑制了植物各器官生物量的累积与分配。本研究中, 黄河口滨岸中潮滩翅碱蓬 (JP1) 和低潮滩翅碱蓬 (JP2) 主要受盐分胁迫和水分梯度 2 种环境因子的影响。相对于 JP1, JP2 由于经常受到海流、潮汐等海洋作用力的影响, 不仅面临盐分胁迫, 而且还同时受到海水渍涝等带来的综合逆境胁迫, 由此导致 JP2 的植株矮小、叶片肥厚呈紫红色, 光合作用速率低^[33], 生物量小。当然, JP1、JP2 不同器官生物量累积、分配

及其差异亦受到其所处生境养分状况、地形和地貌等因素不同程度的影响。

3.2 K、Ca、Mg 含量、储量和累积速率变化及差异

本研究表明,黄河口滨岸潮滩 2 种表现型翅碱蓬不同器官的 K、Ca、Mg 含量、储量、累积速率均具有明显季节变化,且不同时期差异明显(图 3~5),原因可能主要有 2 个方面:1) 与 2 种表现型翅碱蓬自身生态学特性的差异有关。由于 JP1、JP2 分别处在不同的水盐梯度带上,其所处生境的差异导致翅碱蓬群落形成了绿色和紫红色 2 种具有不同特性的表现型,而相关研究发现,二者叶片肉质化程度^[34]、叶片色素积累及光合特性^[33]、叶片抗氧化系统^[35]等均具有明显差异,内部组织结构的差异必然影响植物对营养元素的吸收状况,进而导致二者 K、Ca、Mg 累积与分配特征的差异。孙志高等^[36]对三江平原典型草甸小叶章和沼泽化草甸小叶章的研究也发现,2 种表现型小叶章 K、Ca、Mg 的累积与分配特征存在很大差异。另外,相关研究也表明,植物生长节律及生态学特性可明显影响 K、Ca、Mg 的含量变化及累积特征。Handoo 和 Kaul^[4]的研究发现,湿地植被不同器官的 K、Ca、Mg 含量随生长节律表现出明显季节变化特征。Peverly 等^[7]的研究也发现,生长节律对人工湿地植被芦苇 K、Ca、Mg 等元素吸收与累积的影响极为明显。Bragato 等^[8]对意大利东北部不同人工湿地植被养分的研究还发现,不同植被生态学特性的差异明显影响着其对 N、P、K 等的累积状况。2) 与不同时期 K、Ca、Mg 的植物营养功能有关。前述研究可知,2 种表现型翅碱蓬地上器官 K 含量均呈不同波动变化特征,其中叶的变化差异最为明显,原因可能在于:一是与地上器官生物量迅速增加时,各器官 K 含量在不同时期表现出的“稀释效应”差异有关;二是与 K 在植物体内较强的流动性有关。与 N、P 养分相比,K 在植物体内不形成稳定化合物,呈离子状态存在,十分活跃,且有随植物生长中心而转移的特点。随植物生长,K 不断向代谢作用最旺盛的部位转移^[37]。10 月中旬前,由于叶是二者地上部分代谢作用最为活跃的器官,而 K 对促进叶绿素和蛋白质合成、改善叶绿体结构、促进叶片对 CO₂ 同化及光合产物运输等方面均有极为重要的营养功能^[37],而这可能是导致此间二者叶中 K 含量在不同时期因代谢强弱而波动变化差异最为明显的重要原因。10 月中旬之后,2 种表现型翅碱蓬的果实开始发育,此间根、茎中的 K 开始不断向果实转移,由此使得二者根、茎中的 K 含量迅速降低,而叶+果实中的 K 含量迅速增加(图 3)。与之相比,根中 K 含量的波动变化主要与 K 的较强流动性以及地上与地下的养分供给关系有关。8 月末正是 2 种表现型翅碱蓬的生长高峰期(图 1),此间地上器官对 K 的需求量很大。根中 K 含量在 6~7 月迅速降低说明,根作为 K 的重要输出库,必须在生长高峰期将大量 K 营养转移到地上。之后,地上器官对 K 的需求量相对降低,且 K 也开始向地下转移,由此导致根中 K 含量又迅速增加。生长末期,二者根的 K 含量均迅速降低,原因主要与前述 K 营养不断转移至地上以供果实发育有关。与 K 含量变化相比,2 种表现型翅碱蓬不同器官 Ca 含量的季节变化模式差异较大,缺乏一致性。相对于 JP1、JP2 根、茎中 Ca 含量的变化相对平缓,而叶中 Ca 含量则波动较大。由于植物中绝大部分 Ca 以构成细胞壁果胶质的结构成分存在于细胞壁中,所以 JP2 根、茎中 Ca 含量的较小幅度变化主要与其所处盐分较高、潮汐作用强烈的生境有关。在这种生境条件下,其根、茎在生长过程中相对于 JP1 很少死亡(采样时发现的确如此),存在于根、茎细胞壁中的果胶酸钙相对于 JP1 可能更为稳定有关^[37]。Ca 同时也是细胞分裂所必须的成分,其对于促进细胞伸长的作用明显^[37]。由于叶是植物生长非常旺盛的部位,所以为了满足叶生长的需要,植物需从外界吸收大量的 Ca 以满足其细胞分裂和细胞伸长的需要。JP1、JP2 叶中 Ca 含量变化的较大差异可能主要与其所处不同生境条件对 Ca 吸收与利用状况的差异有关。另外,JP1、JP2 根中 Ca 含量在 7~8 或 6~7 月的明显降低主要与其在生长旺期向地上的养分转移机制有关。与 K、Ca 含量变化相似,2 种表现型翅碱蓬不同器官 Mg 含量变化亦缺乏较强一致性,其中茎、叶的波动变化最为明显,根则相对平缓。由于 Mg 在植物韧皮部中的移动性很强,且储存在营养体或其他器官中的 Mg 也可被重新分配或利用^[37],所以茎中 Mg 含量的较大波动主要与其较强移动性有关。另因叶是地上代谢作用较为活跃的器官,而 Mg 对促进叶绿素和蛋白质合成、激活酶活性以及参与 CO₂ 同化反应等方面均具有重要营养功能^[37],所以不同时期叶因代谢强弱而对 Mg 的分配与利用程度可能是导致其含量波动变化的重要原因。与 Ca 含量变化相似,JP1、JP2 根中 Mg 含量在 7~8 或 6~7 月的明显降低可能主要与其较强流动性以及地上与地下的养分供给与转移机制有关。

3.3 环境条件对 K、Ca、Mg 含量、储量及累积速率的影响

本研究表明,黄河口滨岸潮滩 2 种表现型翅碱蓬不同器官的 K、Ca、Mg 含量、储量及累积速率均存在不同程度差异,原因除了与前述植物生态学特性及不同时期 K、Ca、Mg 植物营养功能的差异有关外,二者所处环境条件的差异可能也是重要原因。黄河口滨岸低潮滩与中潮滩湿地土壤的电导率、温度、水分条件及养分条件等均存在较为明显差异(表 6),而这些环境因素差异均会对 2 种表型翅碱蓬 K、Ca、Mg 的吸收利用状况及其差异产生重要影响。水盐梯度是黄河口滨岸潮滩湿地最具典型的环境因子,是决定植被分布与演替的关键因素^[27]。相关研究表明,湿地环境条件(如水分状况)对植物 K、Ca、Mg 含量与累积特征具有重要影响。Chen 等^[9]的研究表明,美国西部湿地入侵物种独行菜(*Lepidium latifolium*)对养分的吸收与累积受淹水条件的影响极为明显。50 d 后,淹水植被叶中 N、P、K、Zn 的含量明显低于未淹水植被,而根中 N、P、K、Zn 的含量则略高于未淹水植被。Braekke^[6]的研究则表明,排干对森林湿地植物地上 N、K、Ca、Mg、P 等元素的累积尽管可产生明显影响,但不同元素在地上器官中的累积量均可用曲线回归模型来模拟。另外,黄河口滨岸低潮滩湿地相对于中潮滩湿地经常受到海流、潮汐等海洋作用力的影响,盐度相对较高,盐碱化现象较为严重。而相关研究表明,盐分胁迫会对植物 N、K、Ca、Mg 等养分的累积与分配特征产生重要影响。Mashhday 等^[38]研究了水分和盐分胁迫对小麦(*Triticum aestivum* L.)和黑小麦(*Triticale rimpau*)不同养分累积特征的影响,结果发现,盐分和水分显著影响了植物的生长以及对养分的吸收,随着盐分增加植物养分累积量逐渐降低,且高水分条件可增加植物对盐分的耐受限度。侯振安等^[39]的研究则表明,盐分胁迫对羊草(*Leymus chinensis*) N、P、K 的吸收具有很强抑制作用。Jie 等^[40]的研究则发现,盐分增加明显抑制了翅碱蓬叶中养分的累积,不同浓度 NaCl 处理下,JP1 叶中的盐分浓度明显高于 JP2。另外,潮滩湿地热量条件、水分条件等大多通过影响湿地植物生长节律和生态学特性而影响其对 K、Ca、Mg 的累积与分配。总之,2 种表现型翅碱蓬的 K、Ca、Mg 含量、累积量、累积速率及分配特征的变化及差异很大程度上取决于上述环境因素的综合影响。

表 6 不同翅碱蓬湿地环境条件对比

Table 6 Comparison of environmental conditions of the two types of *S. salsa* wetland

类型	土层	电导率*	土壤温度*	有机质**	水分*	pH**	NO ₃ ⁻ - N**	NH ₄ ⁺ - N**	TN**
Type	Layer	Electronic conductivity	Soil temperature	Organic matter	Water content		(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
	(cm)	(μs/cm)	(°C)	(%)	(m ³ /m ³)				
JP1	0	5.58±2.80	22.45±2.68	1.01	31.42±3.90	8.49	1.40	3.47	576.69
	10	11.52±2.29	16.61±1.57	0.48	42.80±1.20	8.61	0.90	1.87	293.83
	20	9.83±0.94	13.43±0.51	0.46	43.97±1.03	9.44	0.44	1.40	245.01
JP2	0	18.07±0.43	23.63±1.14	0.63	36.27±1.61	8.82	1.18	1.70	371.80
	10	7.85±0.75	21.10±0.94	1.13	46.66±0.87	8.89	1.82	3.77	617.97
	20	6.96±0.84	16.08±0.67	0.39	45.08±1.14	9.05	0.72	1.66	263.92

* 生长季均值 Mean values in growth season; ** 生长旺期(8月)测定值 Values measured in growth midseason (in August).

3.4 K、Ca、Mg 的相关关系

前述研究可知,JP1、JP2 不同器官中 K、Ca、Mg 的相关性差异较大(表 4)。由于 K、Ca、Mg 在促进植物生长发育、发挥植物生理功能等方面均具有一定相似性(如均能激活酶活性)^[37],由此导致其在植物体内往往具有一定的正相关性。但研究发现,JP1 根、叶的 K 与 Ca 以及叶的 K 与 Mg 均呈不同程度的负相关,原因在于 Ca 常与细胞膜表面磷脂和蛋白质的负电荷相结合,这就提高了细胞膜的稳定性和疏水性,进而增强了细胞膜对 K⁺、Na⁺ 等离子的吸收和选择性^[37],而可能正是由于细胞膜这种对上述离子选择机制的存在,才使得不同器官的 K 与 Ca、Ca 与 Mg 呈一定负相关。同时,由于 K 是 2 种植物体内的大量营养元素且其在植物体内呈离子状态存在,所以当不同时期 K⁺ 浓度很高时,它还会对 Mg²⁺ 的吸收具有较强的拮抗作用^[37],由此导致 K 与 Mg 在一些

器官中呈一定的负相关。总之, K、Ca、Mg 在 JP1、JP2 中相关性的差异除了与前述各自生物学机制有关外, 其在不同植物内的化学转化机制以及影响三者吸收与利用的外部生境条件可能也是重要原因。另外, 枯落物中 K、Ca、Mg 的相关研究表明, 除 JP1 的 K 与 Ca 呈一定负相关外, JP2 的 K 与 Ca 以及 JP1、JP2 的 K 与 Mg、Ca 与 Mg 均呈一定正相关。原因可能主要有两方面: 一是与上述不同植物对 K、Ca、Mg 的吸收与利用程度以及死亡前植物对三者的滞留与转移机制有关; 二是与枯落物分解(主要为初期淋溶)有关。由于 JP1、JP2 分别位于中潮滩和低潮滩, 相对于 JP1, JP2 受到的潮汐作用更为频繁和强烈, 由此使得其枯落物早期淋溶作用极为迅速, 大量 K、Ca、Mg 不断被淋溶而被潮水带走。可能主要是由于这种早期分解程度的差异使得二者枯落物中 K、Ca、Mg 间相关性的差异极为明显。

参考文献:

- [1] William J M, James G G J. Wetland[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993: 3-24.
- [2] 章家恩, 徐琪. 现代生态学研究的几大热点问题透视[J]. 地理科学进展, 1997, 16(3): 29-37.
- [3] Woodmansee R G, Duncan D A. Nitrogen and phosphorus dynamics and budgets in annual grasslands[J]. Ecology, 1980, 6: 893-904.
- [4] Handoo J K, Kaul V. Standing crop and nutrient dynamics in *Sparganium ramosum* Huds. in Kashmir[J]. Aquatic Botany, 1982, 12: 375-387.
- [5] Verhoeven J T A. Nutrient dynamics in minerotrophic peat mires[J]. Aquatic Botany, 1986, 25: 117-137.
- [6] Braekke F H. Nutrient accumulation and role of atmospheric deposition in coniferous stands[J]. Forest Ecology and Management, 1990, 30(1-4): 351-359.
- [7] Pevery J H, Surface J M, Wang T G. Growth and trace metal absorption by *Phragmites australis* in wetlands constructed for landfill leachate treatment[J]. Ecological Engineering, 1995, 5(1): 21-35.
- [8] Bragato C, Brix H, Malagoli M. Accumulation of nutrients and heavy metals in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel and *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla in a constructed wetland of the Venice lagoon watershed[J]. Environmental Pollution, 2006, 144: 967-975.
- [9] Chen H J, Qualls R G, Blank R R. Effect of soil flooding on photosynthesis, carbohydrate partitioning and nutrient uptake in the invasive exotic *Lepidium latifolium* [J]. Aquatic Botany, 2005, 82: 250-268.
- [10] 白燕, 郎惠卿. 小兴安岭森林沼泽植物营养元素积累与分配规律的研究[J]. 东北师范大学学报(自然科学版), 1995, 24(4): 93-97.
- [11] 何池全, 赵魁义. 毛茛苔草湿地营养元素的积累、分配及其生物循环特征[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2074-2080.
- [12] 杨永兴, 王世岩, 何太蓉. 三江平原湿地生态系统 P、K 分布特征及季节动态研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 522-526.
- [13] 李文西, 鲁剑巍, 杨娟. 苏丹草-黑麦草轮作制中施肥对饲草产量及养分吸收的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 165-170.
- [14] 张小川, 蔡蔚祺, 徐琪, 等. 草原生态系统土壤-植被组分中氮、磷、钾、钙和镁的循环[J]. 土壤学报, 1990, 26(2): 140-150.
- [15] 钟华平, 杜占池. 红三叶 N、P、K、Ca、Mg 元素含量与动态研究[J]. 草地学报, 1995, 3(2): 87-94.
- [16] 刘艺杉, 刘自学, 李晓光, 等. 北京地区 3 种冷季型禾本科草坪草生物量及养分吸收动态的研究[J]. 草业科学, 2008, 25(4): 88-94.
- [17] 杜占池, 樊江文, 钟华平. 红三叶和鸭茅化学元素的生物吸收能力研究[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 47-53.
- [18] 刘文耀, 谢寿昌, 谢克金, 等. 哀牢山北部木果石栎林的元素积累及循环[J]. 云南植物研究, 1995, 17(2): 175-181.
- [19] 林益明, 林鹏, 李振基, 等. 武夷山甜槠群落的钾、钠累积和循环[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1998, 37(2): 283-288.
- [20] 陈少良, 李金克, 尹伟伦, 等. 盐胁迫条件下杨树组织及细胞中钾、钙、镁的变化[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 84-88.
- [21] Liu J S, Yu J B. Element cycling in the dominant plant community in the *Alpine tundra* zone of Changbai Mountains, China[J].

Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(3): 521-525.

- [22] 杨庆, 金华斌. 铝胁迫对花生吸收氮、磷、钙的影响[J]. 中国油料作物学报, 2000, 22(2): 68-73.
- [23] 杨利华, 郭丽敏, 傅万鑫. 玉米施镁对氮磷钾肥料利用率及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 78-80.
- [24] 郭熙盛, 朱宏斌, 叶舒娅, 等. 钾肥品种与用量对黄瓜养分吸收和分配的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2004, 31(4): 398-401.
- [25] 梁太波, 王振林, 刘兰兰, 等. 腐殖酸钾对生姜生长、钾素吸收及钾肥利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 87-90.
- [26] 秦胜金, 刘景双, 孙志高. 三江平原湿地小叶章群落磷素积累动态与生物量动态分析[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 646-651.
- [27] 王海梅, 李政海, 宋国宝, 等. 黄河三角洲植被分布、土地利用类型与土壤理化性状关系的初步研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2006, 37(1): 69-75.
- [28] 王鑫, 胡玉昆, 热合木都拉·阿迪拉, 等. 高寒草地主要类型土壤因子特征及对地上生物量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3): 196-200.
- [29] 王齐, 孙吉雄, 安渊. 水分胁迫对结缕草种群特征和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 33-38.
- [30] 王丽, 胡金明, 宋长春, 等. 水分梯度对三江平原典型湿地植物小叶章地上生物量的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(4): 19-25.
- [31] 贺海波, 李彦. 干旱、盐胁迫条件下两种盐生植物生物量分配对策的研究[J]. 干旱区研究, 2008, 25(2): 242-247.
- [32] Rawat J S, Banerjee S P. The influence of salinity on growth, biomass production and photosynthesis of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. and *Dalbergia sissoo* Roxb. seedlings[J]. Plant and Soil, 1998, 205: 163-169.
- [33] 阮圆, 刘彧, 王宝山. 不同自然盐渍生境下盐地碱蓬叶片色素积累及光合特性的研究[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2008, 23(1): 115-117.
- [34] 刘彧, 丁同楼, 王宝山. 不同自然盐渍生境下盐地碱蓬叶片肉质化研究[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2006, 21(2): 102-104.
- [35] 王琳, 岳晓翔, 王宝山. 不同生境下两种表型盐地碱蓬叶片 POD 比较研究[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2008, 23(4): 103-105.
- [36] 孙志高, 刘景双, 于君宝, 等. 三江平原小叶章钾、钙、镁含量与累积的季节变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1051-1059.
- [37] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 48-72.
- [38] Mashhday A S, Sayed H I, Heakal M S. Effect of soil salinity and water stresses on growth and content of nitrogen, chloride and phosphate of wheat and triticale[J]. Plant and Soil, 1982, 68: 207-216.
- [39] 侯振安, 李品芳, 龚元石. 盐渍土壤环境对羊草生长与养分吸收的效应[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2001, 5(1): 6-10.
- [40] Song J, Chen M, Feng G, et al. Effect of salinity on growth, ion accumulation and the roles of ions in osmotic adjustment of two populations of *Suaeda salsa*[J]. Plant and Soil, 2009, 314: 133-141.

Seasonal changes of potassium, calcium, and magnesium and their accumulation in different phenotype *Suaeda salsa* communities in a tidal flat of the Yellow River estuary

MOU Xiaojie^{1,2}, SUN Zhi-gao^{1,3}, WANG Ling-ling^{1,2}, SUN Wan-long⁴

(1. Laboratory of Coastal Wetland Ecology, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100039, China; 3. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 4. China Agricultural University, Yantai 264670, China)

Abstract: The seasonal changes of potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg) and their accumulation in different phenotypes of *Suaeda salsa* in the intertidal zone of the Yellow River estuary were studied from May to November 2008. The biomass of different organs of *S. salsa* in the middle (JP1) and low (JP2) tidal flats showed significant seasonal dynamics, and the values of JP1 were generally greater than those of JP2, according to a parabola model. The amounts of JP1 and JP2 bulk litter increased during the growing season, and could be described by an exponential growth model. The changing patterns of K, Ca, and Mg content in different parts of JP1 and JP2 were different: Changes of K content almost accorded with parabola or linear models, while changes of Ca and Mg contents generally accorded with Gauss curves. The K, Ca, and Mg contents in different parts of JP1 and JP2 at different time periods were significantly different, and the values in the root, leaf and litter of JP1 were much greater than those of JP2, while the Ca, Mg contents in the stem of JP2 were much greater than those of JP1. In addition, the correlations, storage, and accumulation rates of K, Ca, and Mg in different plant parts were also significantly different. In general, the stem and leaf were the main K storage sites, providing 43.02% \pm 20.80% of total storage in JP1 and 48.03% \pm 4.31% in JP2. The leaf was the main storage site for Ca and Mg, providing 40.38% \pm 18.34% and 50.58% \pm 20.73% of the total storage in JP1 and 62.96% \pm 10.56% and 58.02% \pm 10.62% in JP2. Further studies indicated that the differences of biomass, nutrient (K, Ca, Mg) content, storage and accumulation rate in different plant parts between JP1 and JP2 were mainly due to their ecological characteristics, nutrient function of the different organs, and the water or salinity status in the *S. salsa* habitat.

Key words: potassium; calcium; magnesium; tidal flat; *Suaeda salsa* wetland; Yellow River estuary