

黄河口滨岸潮滩不同生境下翅碱蓬硫元素的季节变化

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

¹中国科学院烟台海岸带研究所滨海湿地生态实验室, 烟台 264003; ²厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 厦门 361005; ³中国科学院研究生院, 北京 100049; ⁴中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012

摘要 2008年5–11月, 对黄河口滨岸潮滩不同生境下翅碱蓬(*Suaeda salsa*)硫(S)的季节变化特征进行了研究。研究表明: 中潮滩翅碱蓬(JP1)和低潮滩翅碱蓬(JP2)各器官生物量均具有明显的季节变化特征, 总体表现为JP1 > JP2; JP1和JP2地上与地下部分比值的变化较为一致, 整体表现为JP2 > JP1; 二者枯落物量呈递增变化; JP1和JP2叶、茎和枯落物中的全硫(TS)含量在生长季波动变化明显, 整体呈先增后减变化, 而根中的TS含量在生长季呈递减变化, 符合指数衰减模型; 二者不同器官及枯落物的TS累积量和S累积速率(V_s)季节变化明显, JP1地上部分的TS累积量和 V_s 明显高于JP2, 且二者地上部分的TS累积量和 V_s 均明显高于地下; JP1和JP2不同部分的S分配比差异明显, 其中叶的分配比最高, 分别为(38.34 ± 16.19)%和(66.27 ± 12.09)%, 说明叶是翅碱蓬重要的S累积器官。结果显示, 翅碱蓬的生态学特性和其所处生境的水盐状况对JP1和JP2生物量、TS含量、累积量、累积速率、分配比均具有重要影响。

关键词 累积, 分配, 翅碱蓬, 硫, 黄河口

Seasonal variations of sulfur in *Suaeda salsa* under different habitats in the intertidal zone of Yellow River Estuary, China

SUN Wan-Long¹, SUN Zhi-Gao^{1,2*}, LIN Guang-Hui², MU Xiao-Jie^{1,3,4}, and WANG Ling-Ling^{1,3}

¹Laboratory of Coastal Wetland Ecology, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; ²Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, Xiamen University, Xiamen 361005, China; ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; and ⁴Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

Abstract

Aims Our objective was to determine the characteristics of sulfur (S) accumulation and allocation by *Suaeda salsa* in two different habitats of the intertidal zone in the Yellow River Estuary of China.

Methods We established two plots (30 m × 30 m) in two different tidal flats and collected different organs of *S. salsa* every 20 days from May to November 2008 from four or five sites selected at random from the two plots.

Important findings The biomass of different organs of *S. salsa* in middle tidal flat (JP1) and low tidal flat (JP2) showed significant seasonal dynamics, and the values of JP1 tended to be higher than those of JP2. For JP1 and JP2, the ratios of aboveground biomass to belowground biomass changed similarly, but the values of JP2 tended to be larger than those of JP1. The litter biomass of JP1 and JP2 increased exponentially during the growing season. Although the total sulfur (TS) contents in leaves, stems or litter of JP1 and JP2 fluctuated greatly during the growing season, they all initially increased and then decreased. In comparison, values in roots decreased at all times following an exponential decay model. The TS accumulation amount and rate (V_s) of different organs and litter also had seasonal changes, and the values of above-ground organs of JP1 were much higher than those of JP2. Moreover, the TS accumulation amount and V_s of above-ground parts were higher than those of below-ground parts. The S allocation ratios of different parts of JP1 and JP2 also had significant differences. Leaves had the highest allocation ratio, and values of JP1 and JP2 were (38.34 ± 16.19)% and (66.27 ± 12.09)%, respectively, indicating that leaves were the most important site of S storage.

Key words accumulation, allocation, *Suaeda salsa*, sulfur, Yellow River Estuary

硫(S)是继氮(N)、磷(P)、钾(K)之后第四位植物生长必需的营养元素, 它在植物生长发育及代谢过

程中参与重要的生理功能。研究湿地土壤中的S元素系统, 对进一步了解湿地生态系统生源元素的循

收稿日期Received: 2010-03-29 接受日期Accepted: 2010-12-12

* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: zgsun@yic.ac.cn)

环极为重要(Woodmansee & Duncan, 1980)。硫的生物地球化学过程在湿地生态系统中起着重要作用,它是与碳(C)矿化、水体酸化、黄铁矿的形成、金属元素循环以及大气S释放等一系列重要生态过程联系在一起(Thamdrup *et al.*, 1994),因此受到了广泛的关注(Luther & Church, 1988; Mandernack *et al.*, 2000)。国内对湿地的S循环开展了许多工作,如Zhang (1996)报道了红树林生态系统S的累积和循环,研究了S在土壤-植物系统内的小循环。李新华等(2007)对三江平原小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)湿地土壤S的形态分布和转化过程进行了系统的研究。当前国内外已对湿地植被S的累积与分配特征进行了较多研究,但关于同种植物在不同生长环境下S的累积与分配特征的对比研究比较缺乏。

河口滨海湿地是海陆相互作用的重要场所,连接海、陆两个生态系统,在海、陆相互作用下,潮滩地带的各种环境因素不断变换,整个区域环境状态始终处在变化中。翅碱蓬(*Suaeda salsa*)是河口该类潮滩地带的优势种,在其生长区内,由于生长地点环境条件的差异,形成了不同表现型的翅碱蓬群落,它们对于盐分变化极为敏感(牟晓杰等, 2010a)。本试验以位于不同生长环境下的翅碱蓬群落为对象,研究环境因素不同对湿地生态系统中S元素循环机制的影响,为进一步探讨湿地系统生源元素在土壤和植物之间的循环机制、能量流动及生态过程等提供依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

试验区在黄河三角洲国家级自然保护区黄河入海口滨岸潮滩(37°40′–38°10′ N, 118°41′–119°16′ E)进行。黄河三角洲属温带季风型大陆性气候,四季分明,光照充足,区内自然资源丰富。保护区总面积15.3万hm²,其中核心区面积5.8万hm²,缓冲区面积1.3万hm²,试验区面积8.2万hm²,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的代表性,主要保护河口新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类。保护区的土壤类型主要为隐域性潮土和盐土,芦苇(*Phragmites australis*)群落、柽柳(*Tamarix chinensis*)群落及翅碱蓬群落分布较广(牟晓杰等, 2010a)。

1.2 研究方法

1.2.1 植物样品采集与测定

采用定位研究方法,按照“典型性、代表性、一致性”的原则,在保护地翅碱蓬分布区内,选择中潮滩翅碱蓬(JP1)群落和低潮滩翅碱蓬(JP2)群落为研究对象,分别设置30 m × 30 m的样地,测定不同生境下翅碱蓬的地上、地下生物量及枯落物量(牟晓杰, 2010)。植物全硫的测定采用HNO₃-HClO₄消煮BaSO₄比浊法(李新华, 2007)。

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,如不同深度的地温、电导率、pH和土壤含水量等。

1.2.3 计算方法

植物S累积速率(V_s , mg·m⁻²·d⁻¹) (郝庆菊等, 2003):

$$V_s = \frac{dS}{dt} = \frac{S_{i+1} - S_i}{t_{i+1} - t_i}$$

式中, S_i 、 S_{i+1} 分别为 t_i 、 t_{i+1} 时刻的S累积量(mg·m⁻²)。

1.2.4 数据处理

运用Origin 8.0对数据进行作图、计算和数学模拟,运用SPSS 16.0对数据进行单因素方差分析。

2 结果和分析

2.1 生物量和枯落物量的季节动态

2.1.1 生物量

JP1和JP2各部分生物量在生长季内均具有明显的季节变化特征(图1)。

二者地上部分生物量的季节动态表现为不同单峰型,反映出其生长节律与该区暖温带季风气候雨热同期的特点相适应。生长季内植物体地上各器官(茎、叶)的生物量随着气温的上升和水热条件的改善而逐渐增加,分别于8月初和8月末达到最大值,秋季,翅碱蓬渐趋衰老,生理能力变弱,其地上生物量较最大值有不同程度的下降,到11月中下旬,二者地上生物量降至最低。JP1和JP2的地下生物量亦具有明显的季节动态变化。生长前期,二者地下生物量最低;随后地下生物量逐渐增大,于8月取得最高值;之后,植物根系开始逐渐死亡、腐烂,导致地下生物量逐渐降低。二者枯落物的产生具有相同的模式,均随生长时间的延长逐渐增加,

至生长季末(11月中旬)达到最大值。比较而言, JP1 产生立枯物的量明显高于JP2 (为后者的1.79倍到14.64倍)。

2.1.2 地上生物量与地下生物量的关系

由表1可知, 在生长季内, JP1和JP2地上与地下部分生物量比值的变化相一致, 均为先增加后降低。在生长初期, 地上生物量相对较小, 地上生物量与地下生物量的比值(rA/B值)较小, 之后随着水热条件的改善, 地上部分不断从地下部分吸收营养物质, 地上部分生物量增加的速率高于地下部分, 由此rA/B值也随着增加, 并在9月份达到最大值, 之后由于气温开始降低, 植物成熟并开始衰老, 生

物量随之降低, rA/B值也开始下降。比较两种生境下翅碱蓬的rA/B值发现, 在整个生长季, JP2的rA/B值均高于JP1, 这也从侧面证明: 中潮滩翅碱蓬的根系相对发达与其生长在盐度较低的环境有关。其中, JP2在11月份rA/B值比较反常, 这可能是根系在该生境下死亡、腐烂比较迅速, 由此导致地下生物量逐渐降低的缘故。

2.2 植物体及枯落物S含量

由图2可知, 两种翅碱蓬群落各器官的全硫(TS)含量均具有明显的季节变化特征。JP1、JP2地上器官的TS含量随季节的变化趋势较为一致, 整体呈倒“V”型波动变化, 生长初期较低, 随着植物生

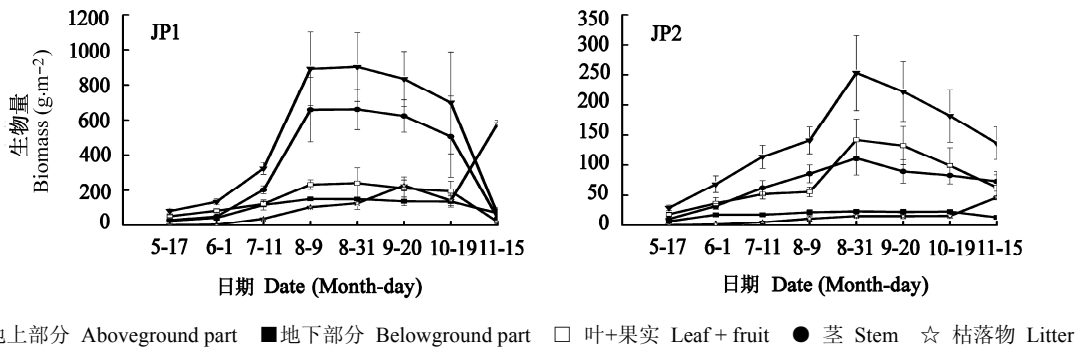


图1 翅碱蓬地上和地下部分及不同器官生物量季节动态。JP1, 中潮滩翅碱蓬; JP2, 低潮滩翅碱蓬。
 Fig. 1 Seasonal dynamics of aboveground and belowground biomass of different organs of *Suaeda salsa*. JP1, *Suaeda salsa* in middle tidal flat; JP2, *S. salsa* in low tidal flat.

表1 地上生物量与地下生物量的比值(rA/B)

Table 1 Ratios (rA/B) of aboveground biomass to belowground biomass of *Suaeda salsa*

月份 Month	5月 May	6月 June	7月 July	8月 Aug.	9月 Sept.	10月 Oct.	11月 Nov.
JP1	3.067	3.095	4.780	5.999	6.104	5.170	0.903
JP2	3.863	4.359	6.427	8.735	9.958	7.975	8.194

JP1, 中潮滩翅碱蓬; JP2, 低潮滩翅碱蓬。
 JP1, *Suaeda salsa* in middle tidal flat; JP2, *S. salsa* in low tidal flat.

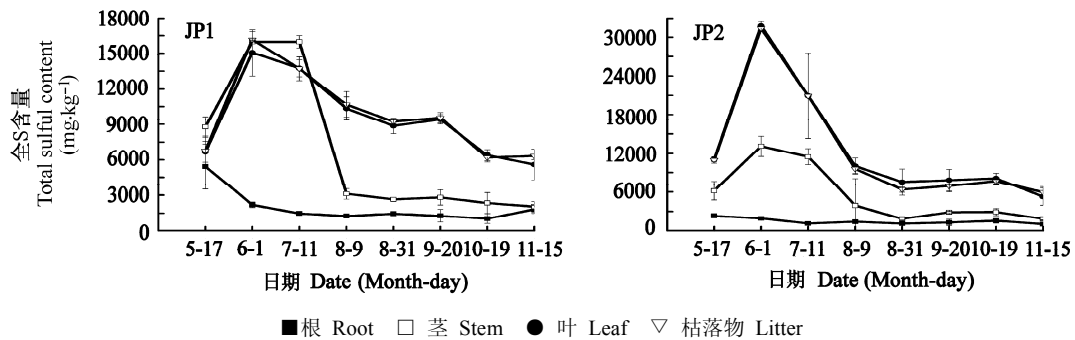


图2 翅碱蓬根、茎、叶以及枯落物中全硫含量的变化。JP1, 中潮滩翅碱蓬; JP2, 低潮滩翅碱蓬。
 Fig. 2 Changes of total sulfur content in roots, stem, leaves and litter of *Suaeda salsa*. JP1, *Suaeda salsa* in middle tidal flat; JP2, *S. salsa* in low tidal flat.

doi: 10.3724/SP.J.1258.2011.00303

长逐渐增高, 到生长旺期达到最高(6、7月份), 之后逐渐下降, 并于11月中旬达到最低值; 而根在生长初期的TS含量均较高, 之后逐渐下降, 但整体变化较为平缓。JP1、JP2枯落物的TS含量均在生长初期较低, 生长期其变化表现为先增加后降低。比较而言, JP1茎、根各个时期的S含量大多明显高于JP2, 分别为JP2的1.09-1.42倍和1.14-2.35倍; 叶的含量相差不大, 基本处于相同水平, 而二者枯落物中的TS含量在生长前中期(5-8月)表现为JP2 > JP1, 生

长后期则表现为JP1 > JP2, 末期二者的TS含量趋于相等水平。方差分析表明, 二者各器官及枯落物的S含量变化均差异显著($n = 8, p < 0.05$)。模拟结果表明, 二者茎、叶的S含量(y)随生长天数(t)均符合三次多项式, 根呈指数递减模型, 而枯落物中S含量的变化符合抛物线模型(表2)。

2.3 S累积量及累积速率的季节动态

2.3.1 S累积量

从表3可知, 生长季内JP1、JP2地上器官的S累

表2 翅碱蓬不同部分全硫含量的动态模拟模型

Table 2 Models of simulating the dynamics of total sulfur content in different parts of *Suaeda salsa*

类型 Type	项目 Item	模拟模型 Simulation model	R ²	p
JP1	茎 Stem	$Y = 0.017t^3 - 5.9340t^2 + 508.6t + 1362$	0.760 7	<0.01
	叶 Leaf	$Y = 0.0101t^3 - 4.0105t^2 + 426.94t + 208.93$	0.707 5	<0.01
	根 Root	$Y = 3176.9\exp(-0.0053t) + 119.5136$	0.433 0	<0.01
	枯落物 Litter	$Y = 189531.3871\exp(-t/10.6423) + 10602.3751$	0.838 0	<0.05
JP2	茎 Stem	$Y = 0.0122t^3 - 4.2986t^2 + 373.86t + 1278.7$	0.730 5	<0.01
	叶 Leaf	$Y = 0.0220t^3 - 7.8066t^2 + 682.4t + 5135.4$	0.610 9	<0.01
	根 Root	$Y = 2109.6\exp(-0.0031t) + 207.596$	0.489 2	<0.05
	枯落物 Litter	$Y = 39293.4172\exp(-t/23.0488) + 8266.8818$	0.816 0	<0.05

JP1, 中潮滩翅碱蓬; JP2, 低潮滩翅碱蓬。

JP1, *Suaeda salsa* in middle tidal flat; JP2, *S. salsa* in low tidal flat.

表3 翅碱蓬不同部分S累积量与累积速率的变化

Table 3 Variations of sulfur accumulation amount and accumulation rate in different parts of *Suaeda salsa*

类型 Type	日期 Date (month-day)	根 Root		茎 Stem		叶+果实 Leaf + fruit		枯落物 Litter		总计 Total	
		A	B (×10 ⁻³)	A	B (×10 ⁻³)	A	B (×10 ⁻³)	A	B (×10 ⁻³)	A	B (×10 ⁻³)
JP1	5-17	0.15	5.69	0.25	9.27	0.36	13.38	0.01	0.09	0.76	28.43
	6-1	0.11	-3.10	0.69	-3.80	1.26	26.80	0.06	3.76	2.12	16.70
	7-11	0.19	1.96	2.41	43.13	1.72	11.48	0.52	11.55	4.84	68.12
	8-9	0.20	0.46	2.30	31.06	2.49	64.05	1.10	20.04	6.09	95.77
	8-31	0.19	-0.40	1.92	-17.50	2.36	-6.20	1.15	2.55	5.62	-21.15
	9-20	0.19	-0.10	2.20	14.31	2.41	2.81	2.17	50.60	6.97	67.72
	10-19	0.12	-2.50	1.25	-31.80	1.74	-22.40	0.88	-1 286.00	3.99	-1 342.70
	11-15	0.13	0.53	0.09	-41.40	0.13	-57.60	3.67	99.76	4.02	0.76
JP2	5-17	0.02	0.61	0.07	2.58	0.21	2.58	0.01	0.07	0.30	5.23
	6-1	0.04	1.42	0.43	25.55	1.22	72.40	0.37	26.07	2.05	125.44
	7-11	0.02	-0.40	0.75	8.00	3.60	59.49	0.11	-6.55	4.48	60.94
	8-9	0.03	0.38	0.37	-12.90	0.59	-103.80	0.12	0.07	1.09	-116.63
	8-31	0.03	-0.20	0.25	-5.80	1.12	24.04	0.09	-0.36	1.49	17.88
	9-20	0.03	-0.04	0.26	0.47	1.10	-1.20	0.11	0.41	1.49	-0.84
	10-19	0.04	0.29	0.20	-1.90	0.90	-6.70	0.12	0.49	1.26	-8.60
	11-15	0.01	-0.80	0.15	-1.80	0.37	-19.00	0.28	5.45	0.81	-15.35

A, 累积量; B, 累积速率。JP1, 中潮滩翅碱蓬; JP2, 低潮滩翅碱蓬。

A, accumulation amount; B, accumulation rate. JP1, *Suaeda salsa* in middle tidal flat; JP2, *S. salsa* in low tidal flat.

积量分别为0.22–4.79和0.52–4.35 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 地下部分分别为0.11–0.20和0.01–0.04 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。除11月中旬外, JP1地上器官(茎、叶)的S累积量均明显高于JP2, 为JP2的1.60–8.45倍和1.71–4.22倍, 而根在生长季内均表现为JP1 > JP2, 为JP2的2.75–13.0倍。具体而言, 不同生境下翅碱蓬地上器官S累积量自5月中旬开始逐渐增加, 并于生长旺期或成熟期取得最大值。之后, 随各器官枯萎和S向地下转移, 地上器官S累积量整体降低。二者不同部分S累积量及累积变化趋势整体比较一致, 生长初期均取得最低值, 之后整体上在略微波动中增加, 最大值均出现在生长季节末。两种翅碱蓬地上器官S累积量自5月中旬开始逐渐增加, 生长季节中期取得最大值。之后, 各器官枯萎, S向地下转移, 地上器官S累积量整体降低。二者根的S累积量整体具有先增加后减少的变化趋势, 但变化模式差异较大, 且累积量低于地上器官。总体上, 二者不同器官的S累积量表现为叶>茎 \approx 根, 说明叶和茎是S主要的储存器官。生长季内, 除11月中旬外, JP1的地上器官(茎、叶)的S累积量均明显高于JP2, 而根在生长季内均表现为JP1 > JP2。

2.3.2 S累积速率

从表3可知, JP1地上部分叶的 V_s 变化最为明显, 除8月末和10月、11月中旬为负值外, 其他时间均为正值, 这与叶是S的重要储存库, 并且叶器官结构功能受季节影响较大有关。JP2地上部分的 V_s 也以叶的波动变化最为明显。但JP2叶+果实的 V_s 在8月上旬为较大负值, 8月末为正值, 其他时间的变化特征均与JP1相近。二者茎的 V_s 虽整体上低于其叶+果实, 但变化趋势较为一致。二者地下部分 V_s 的变化相对于茎、叶+果实而言较为平缓。JP1和JP2枯落物的 V_s 变化存在较大差异(表3)。

2.4 不同生境下翅碱蓬各器官的S分配

从表4可知, JP1和JP2不同部分的S分配比在不同生长期均有明显差异。具体来说, JP1的地上部分的S分配比在生长前中期波动平缓, 生长末期出现较大波动。地下部分的S分配比在生长季内变化不明显, 整体递减, 但在末期略有增加。叶与地上部分S分配比的变化均为双峰型, 茎则呈“抛物线”型变化, 而枯落物的S分配比与叶和地上部分大致呈相反的变化趋势。与之相比, JP2地下S分配比整体

表4 不同生境下翅碱蓬各器官的S分配

Table 4 Sulfur allocation in different parts of *Suaeda salsa* in different habitats (%)

类型 Type	日期 Date	地上部分 Aboveground		合计 Total	地下部分 Belowground		枯落物 Litter	总计 Sum
		茎 Stem	叶+果实 Leaf + fruit		根 Root			
JP1	5-17	32.64	47.09	79.73	20.01	>0.26	100	
	6-1	32.50	59.66	92.16	5.23	>2.61	100	
	7-11	49.87	35.52	85.40	3.91	>10.70	100	
	8-9	37.74	40.92	78.67	3.32	>18.02	100	
	8-31	34.08	41.96	76.04	3.43	>20.53	100	
	9-20	31.57	34.63	66.21	2.72	>31.07	100	
	10-19	31.29	43.72	75.01	2.90	>22.09	100	
	11-15	2.14	3.21	5.34	3.25	>91.41	100	
JP2	5-17	23.35	70.44	93.79	5.53	>0.67	100	
	6-1	20.78	59.57	80.37	1.78	>17.86	100	
	7-11	16.70	80.48	97.18	0.48	>2.35	100	
	8-9	33.82	53.60	87.42	2.92	>9.65	100	
	8-31	16.62	75.41	92.04	1.92	>6.04	100	
	9-20	17.25	73.72	90.97	1.85	>7.18	100	
	10-19	15.96	71.46	87.42	2.88	>9.70	100	
	11-15	18.69	45.49	64.17	1.81	>34.02	100	

JP1, 中潮滩翅碱蓬; JP2, 低潮滩翅碱蓬。

JP1, *Suaeda salsa* in middle tidal flat; JP2, *S. salsa* in low tidal flat.

表5 两种类型翅碱蓬的湿地环境条件对比

Table 5 Comparisons of environmental conditions of two types of *Suaeda salsa* wetland

类型 Type	层次 Layer (cm)	电导率 Electrical conductivity ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	土壤温度 Soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)	有机质 Organic matter (%)	水分 Water (%)	pH	$\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总氮 Total N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
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

JP1, 中潮滩翅碱蓬; JP2, 低潮滩翅碱蓬。

JP1, *Suaeda salsa* in middle tidal flat; JP2, *S. salsa* in low tidal flat.

呈不规则波动变化, 地上部分在5–8月呈折线型变化, 生长前中期变化平缓, 9月中旬之后则迅速降低。JP2枯落物的S分配比与茎整体呈相同变化趋势。总的说来, JP1地下部分S分配比明显高于JP2, 前者为后者的1.01–8.15倍, 而地上部分正好相反, 后者为前者的1.11–12.02倍, 枯落物S分配比则除生长初期外, 均表现为JP1 > JP2, 前者为后者的1.87–4.55倍。二者不同部分S分配比对照显示, 除生长末期外, 叶的S分配比均高于其他部分, 其分配比分别高达(38.34 ± 16.19)%和(66.27 ± 12.09)%, 表明叶是二者不同时期的重要的S储存库。

3 讨论

3.1 植物生物量变化

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的季节变化特征, 且差异明显, 总体表现为JP1 > JP2; 生长季内, JP1和JP2地上与地下部分比值的变化一致, 但JP2 > JP1。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(王海梅等, 2006)。所以水分、盐分条件可能直接影响到植物生物量及其分配的变化。本研究发现盐分胁迫和水分梯度2种环境因子对植物生物量及其分配具有重要影响。国内外相关研究也得到类似结果。唐罗忠等(1998)的研究发现, 淹水胁迫明显抑制了杨树(*Populus* sp.)生物量的累积。贺海波和李彦(2008)对猪毛菜(*Salsola nitraria*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*) 2种盐生植物的研究结果表明, 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。相对于JP1, JP2不仅面临盐分胁迫, 而且还受到海

水渍涝等带来的综合逆境胁迫, 导致JP2的植株矮小, 光合作用速率低(刘彧等, 2006), 根系发育相对弱, 所以rA/B较大。另外, JP1、JP2不同器官生物量累积、分配及其差异亦可能与其所处生境养分状况有关。牟晓杰(2010)的研究表明, JP1的N/P为(9.87 ± 3.47) < 14, 其生长受N限制, JP2的N/P为(15.73 ± 5.00) < 16, 其生长同时受N、P限制, 更受P限制。由此可见, 二者养分元素的受限及其限制程度可能影响到生物量的差异。P在植物体内主要与其他有机物结合形成磷脂、核酸和辅酶等, 其植物生理意义与N差异较大(章文龙等, 2009)。可能正是由于N、P在植物生理意义上的差异, 以及JP1、JP2湿地养分限制状况的差异, 使得二者的生物量及其分配在一定程度上产生了较大分异。

3.2 植物中S含量、储量及累积速率变化

本研究表明, 黄河口滨岸潮滩不同生境下翅碱蓬不同器官的S含量、储量、累积速率均有明显的季节变化, 且不同时期的差异明显(图1, 图2)。这与李新华(2007)对三江平原典型草甸小叶章和沼泽化草甸小叶章的研究结果相似。导致上述S含量季节变化及累积特征差异的原因, 一方面可能与二者的生长节律及生态学特性有关; 另一方面, 可能与不同时期S的营养功能差异有关。Handoo和Kaul(1982)研究发现, 湿地植被不同器官的S含量随生长节律表现出明显的季节变化特征。另外, 不同时期二者地上器官S含量的局部波动及差异, 主要与地上器官生物量迅速增加时各器官S含量在不同时期表现出的“稀释效应”差异有关。一般而言, S优先分配给植物最幼嫩的部位, 且随着植物生长不断向代谢作用最旺盛的部位转移。10月中旬之前, 由于

叶是二者地上部分代谢作用最为活跃的器官, 而S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, 而这可能是导致此间二者叶中S含量在不同时期因代谢强弱的波动而变化差异最为明显的重要原因。与之相比, 根中S含量的变化主要同地上与地下部分的养分供给关系, 以及土壤中S养分含量有关。JP1根中的S含量在6、7月的降低是因为植物处于生长高峰期, 地上器官对S的需求量很大, 根作为S的重要输出库, 必须在生长高峰期将大量S转移到地上。之后, 地上器官对S的需求量相对降低, 根中S含量变化趋于平缓。相对于JP1, JP2所处环境的水分含量很高, 不易发生脱S反应(李新华, 2007), 土壤中的S营养相对丰富, 可充分满足植物的需求, 而这可能是导致JP2根系中S含量变化相对平缓的重要原因。另外, 由于JP1与JP2分别处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两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、叶片色素积累及光合特性(刘彧等, 2006)、叶片抗氧化系统(王琳等, 2008)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S累积与分配特征的差异。

3.3 环境条件对植物S含量、储量及累积速率的影响

表5为生长季内不同翅碱蓬湿地环境条件的对比。从表5可知, 黄河口滨岸低潮滩与中潮滩湿地的土壤理化性质、土壤温度、水分条件及养分条件等均存在较为明显的差异, 而这些环境因素的差异均可能对不同生境下翅碱蓬S的吸收、利用状况及其差异产生重要影响。相关研究已表明湿地环境条件(如水盐条件)对植物S含量与累积特征具有重要影响, 例如, 李新华(2007)通过对三江平原不同类型小叶章的研究表明, 水分条件对植物S含量的变化及分配具有重要影响。而在盐分胁迫下, 植物在吸收矿物元素的过程中盐离子与各种营养元素相互竞争, 造成矿质营养胁迫, 打破了植物体内的离子平衡, 如Cl⁻能抑制植物对NO₃⁻及H₂PO₄⁻的吸收(张新春等, 2002), 由此可推测, 以SO₄²⁻为主要存在形式的S元素的吸收可能也受此影响。另外, 高盐分可降低植物的光合作用, 而S正是合成蛋白质、进行光合作用不可缺少的元素(周卫和林葆, 1997), 光合作

用的降低必然导致S在植物体内的形态转换, 影响不同器官中S元素的累积和分配。可见, 黄河口滨岸潮滩两种翅碱蓬不同器官的S含量、储量及累积速率存在不同程度差异的原因, 除了与前述植物生态学特性及不同时期S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。另外, 潮滩湿地的热量条件、水分条件等大多直接影响湿地植物的生长节律和生态学特性, 从而影响其对S的累积与分配。总之, 不同生境下翅碱蓬的S含量、累积量、累积速率及分配特征变化及差异, 在很大程度上取决于上述环境因素的综合影响。

4 结论

4.1 JP1和JP2地上、地下部分及各器官生物量均具有明显的季节变化特征, 总体表现为JP1 > JP2; 二者地上、地下部分及不同器官生物量最大峰值均在8月份取得; 二者枯落物量均呈递增变化; 生长季内, JP1和JP2地上与地下部分生物量比值的变化均为先增加后降低, 但整体上JP1大于JP2。

4.2 JP1和JP2叶、茎和枯落物中的TS含量在生长季均呈先增后减变化, 波动变化较为明显; 根中TS含量在生长季呈递减变化, 符合指数衰减模型; 二者不同器官的TS含量均表现为叶>茎>根, 说明叶是S的主要累积器官。

4.3 JP1和JP2不同器官及枯落物S累积量和V_s季节变化明显, 二者各器官的S累积量整体表现为先增后减的变化趋势, 而枯落物S累积量逐渐增加, JP1枯落物的S累积量均明显高于JP2; 二者地上器官的V_s以叶的波动变化最为明显, 地下部分V_s的变化较为平缓。

4.4 JP1和JP2不同器官及枯落物的S分配比在各时期均存在明显差异, 其总体表现为叶>茎>根, 说明叶是不同时期的重要S储库, 分配比分别高达(38.34 ± 16.19)%和(66.27 ± 12.09)%; JP1地下部分及枯落物S分配比整体上均明显高于JP2, 地上部分则相反。

4.5 JP1和JP2的生物量、S元素分布差异主要与其本身的生理特性及所处环境状况有关。

致谢 国家自然科学基金(40803023)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223)、山东省自然科学基金重点项目(ZR2010DZ001)和厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室基金

(Cwel0903)资助。

参考文献

Hao QJ (郝庆菊), Wang QC (王起超), Wang YS (王跃思) (2003). The content characteristics of sulfur in typical wetland ecologies of Sanjiang Plain. *Ecology and Environment* (生态环境), 12, 401–404. (in Chinese with English abstract)

He HB (贺海波), Li Y (李彦) (2008). Study on measures of biomass allocation of two desert halophyte species under drought and salt stress. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 25, 242–247. (in Chinese with English abstract)

Handoo JK, Kaul V (1982). Standing crop and nutrient dynamics in *Sparganium ramosum* Huds. in Kashmir. *Aquatic Botany*, 12, 375–387.

Luther GW, Church TM (1988). Seasonal cycling of sulfur and iron in porewaters of a Delaware salt marsh. *Marine Chemistry*, 33, 295–309.

Li XH (李新华) (2007). *Study on Speciation Distribution and Transformation Processes of Sulfur in D. angustifolia Wetland Soils in Sanjiang Plain* (三江平原小叶章湿地土壤硫的形态分布和转化过程研究). PhD dissertation, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun. (in Chinese with English abstract)

Li XH (李新华), Liu JS (刘景双), Sun ZG (孙志高) (2007). Distribution and seasonal dynamics of sulfur in the plant-soil system in the *Calamagrostis angustifolia* wetland in the Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 38(1), 85–88. (in Chinese with English abstract)

Liu Y (刘彥), Ding TL (丁同楼), Wang BS (王宝山) (2006). Study on the leaf succulence of *Suaeda salsa* under different natural saline environments. *Journal of Shandong Normal University (Natural Sciences Edition)* (山东师范大学学报(自然科学版)), 21, 102–104. (in Chinese with English abstract)

Mandernack KW, Lynch L, Krouse HR, Morgan MD (2000). Sulfur cycling in wetland peat of the New Jersey Pine-lands and its effect on stream water chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 3949–3964.

Mu XJ (牟晓杰), Sun ZG (孙志高), Wang LL (王玲玲), Sun WL (孙万龙) (2010a). Seasonal changes of potassium, calcium and magnesium content and accumulation in different ecotype *Suaeda salsa* communities in tidal flat of Yellow River Estuary. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 19, 177–190. (in Chinese with English abstract)

Mu XJ (牟晓杰), Sun ZG (孙志高), Wang LL (王玲玲), Dong HF (董洪芳) (2010b). Characteristics of nitrogen accumulation and allocation of *Suaeda salsa* in different growth conditions of intertidal zone in Yellow River Estuary. *Wetland Science* (湿地科学), 8, 57–66. (in Chinese with English abstract)

Mu XJ (牟晓杰) (2010). *Study on the Nitrogen Biological Cycling Characteristics and Cycling Model of Tidal Wetland Ecosystem in Yellow River Estuary* (黄河口滨岸潮滩湿地系统氮生物循环特征与循环模式研究). Master degree dissertation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai. (in Chinese)

Tang LZ (唐罗忠), Xu XZ (徐锡增), Cheng SW (程淑婉) (1998). Effects of flooding stresses on biomass and physiological properties of poplar clones. *Journal of Nanjing Forestry University* (南京林业大学学报), 22(2), 14–18. (in Chinese with English abstract)

Thamdrup B, Fossing H, Jorgensen BB (1994). Manganese, iron and sulfur cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 5115–5129.

Woodmansee RG, Duncan DA (1980). Nitrogen and phosphorus dynamics and budgets in annual grasslands. *Ecology*, 6, 893–904.

Wang HM (王海梅), Li ZH (李政海), Song GB (宋国宝), Gao JX (高吉喜), Yan J (闫军) (2006). The correlation among vegetation distribution, land use type and soil character in Yellow River Delta. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol* (内蒙古大学学报(自然科学版)), 37, 69–75. (in Chinese with English abstract)

Wang L (王琳), Yue XX (岳晓翔), Wang BS (王宝山) (2008). The comparative study on POD in the leaves of two different phenotype of *Suaeda salsa* L. grown under different natural conditions. *Journal of Shandong Normal University (Natural Sciences Edition)*. (山东师范大学学报(自然科学版)), 23(4), 103–105. (in Chinese with English abstract)

Zhang RG (1996). Study on sulfur accumulation and cycling in Mangrove forest in pear River mouth. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 5(5), 67–73.

Zhang WL (章文龙), Zeng CS (曾从盛), Zhang LH (张林海), Wang WQ (王维奇), Lin Y (林燕), Ai JQ (艾金泉) (2009). Seasonal dynamics of nitrogen- and phosphorus-absorption efficiency of wetland plants in Minjiang River Estuary. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 20, 1317–1322. (in Chinese with English abstract)

Zhang XC (张新春), Zhuang BC (庄炳昌), Li ZC (李自超) (2002). Advances in study of salt-stress tolerance in plants. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 10(1), 50–56. (in Chinese with English abstract)

Zhou W (周卫), Lin B (林葆) (1997). The research of sulfur behavior in soils and plants. *Soil and Fertilizers* (土壤肥料), (5), 8–11. (in Chinese)

责任编辑: 王政权 责任编辑: 王 蔚