

盐地碱蓬养分重吸收对不同水盐交互梯度的响应*

王秋燕, 陈昱东, 吕光辉[†]

(新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 植物的养分重吸收是植物适应逆境的重要生态机制. 利用盆栽模拟试验, 设置28个水盐交互梯度, 研究典型盐生植物盐地碱蓬在不同生长发育阶段N、P、K、Na四种元素的重吸收特征. 结果表明: 盐地碱蓬营养生长阶段和繁殖生长阶段的养分重吸收效率均低于全球陆生植物水平, 且营养生长期高于繁殖生长期. N、P、K、Na元素的重吸收效率在营养生长期分别为51.90%、50.79%、28.79%、-19.58%, 在繁殖生长期分别为28.60%、27.75%、13.61%、-26.67%. 四种元素的重吸收响应水盐梯度的敏感性存在较大差异. 在营养生长期, 盐分和干旱对P的重吸收具有显著负效应, 干旱对K的重吸收具有正效应; 在繁殖生长期, 盐分对N的重吸收具有显著负效应, 对P、Na的重吸收具有正效应. 在不同生长阶段, 四种元素的重吸收对胁迫响应的差异, 体现了植物在抵御胁迫与增加生长的综合需求下, 体内元素的吸收、运移、分配策略不同.

关键词: 养分重吸收; 水盐梯度; 发育阶段; 盐地碱蓬

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2021.08.27.0001

中图分类号: Q948.118 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2022)04-0476-08

引文格式: 王秋燕, 陈昱东, 吕光辉. 盐地碱蓬养分重吸收对不同水盐交互梯度的响应[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 39(4): 476-483.

英文引文格式: WANG Qiuyan, CHEN Yudong, LYU Guanghui. Nutrient resorption response to different water-salt interaction gradients of *Suaeda salsa*[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2022, 39(4): 476-483.

Nutrient Resorption Response to Different Water-Salt Interaction Gradients of *Suaeda salsa*

WANG Qiuyan, CHEN Yudong, LYU Guanghui

(School of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

Abstract: The nutrient resorption is an important ecological mechanism for plants to adapt to adversity. In this study, a typical halophyte, *Suaeda salsa*, was selected for pot experiments to study the nitrogen, phosphorus, potassium and sodium resorption efficiency(NRE, PRE, KRE and NaRE) in response to salt and drought stress at different growth periods. The results showed that the nutrient resorption efficiency in vegetative period and reproductive period was lower than those of global terrestrial plants and vegetative period was higher than reproductive period. The resorption efficiency of nitrogen, phosphorus, potassium and sodium were 51.90%, 50.79%, 28.79%, -19.58% in vegetative period and 28.60%, 27.75%, 13.61%, -26.67% in reproductive period, respectively. The sensitivity of the element resorption efficiencies to different water-salt gradients was quite different. During vegetative period, salt and drought had a significant negative effect on PRE, while drought had a positive and negative effect on KRE; during the reproductive period, salt had a significant negative effect on NRE, and a positive effect on PRE and NaRE. The differences of element resorption response to stress at two growth stages reflected the different uptake, transport and distribution strategies of the elements in plants when responding to stress and meeting nutrient requirements for growth.

Key words: nutrient resorption; water-salt interaction gradient; developmental phase; *Suaeda salsa*

* 收稿日期: 2021-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(31560131).

作者简介: 王秋燕(1983-), 女, 博士生, 从事植物生态学的研究, E-mail: qiuyanw2015@163.com.

[†] 通讯作者: 吕光辉, 教授, 博士生导师, 主要从事植物生态学的研究, E-mail: guanghui_xju@sina.com.

0 引言

土壤盐渍化是全球性问题,在干旱区和半干旱区更为严峻^[1].干旱与盐胁迫通过降低土壤养分有效性、干扰植物对养分的吸收、利用,从而限制了植物生长^[2-4].氮、磷等养分循环与水分循环通过土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统密切耦联^[5],干旱降低了养分循环与水分循环的耦合度,影响养分矿化、根际环境以及植物对养分的吸收^[6-9].盐分引起非特异性渗透胁迫和特定离子效应^[10],导致植物生理干旱以及氮、磷、钾等养分失衡^[11].在逆境中,通过从衰老组织或器官中将养分运移到活跃组织或器官中的养分重吸收过程,实现养分在植物体内的重分配利用,是植物保存养分、提高养分利用效率的重要生态策略,降低了植物生长对外源养分供应的依赖性^[11-14],体现了植物在土壤养分限制时,对养分获取成本的权衡机制以及对环境的积极响应策略^[15-16].植物养分重吸收对环境的响应研究,多集中在纬度、温度、降雨格局等自然环境因子以及外源施肥等方面^[17-19],且较多关注典型植物类群.关于盐分或者水盐交互对植物养分重吸收的研究以及隐域植物类群的报道相对较少.盐地碱蓬是典型的盐生植物,广泛分布于盐渍生境,耐盐性极强,具有农业开发价值以及生态应用价值^[20].本文以盐地碱蓬为材料,利用荒漠土壤为种植基质,进行不同水盐交互梯度下的胁迫实验,分析盐地碱蓬在不同发育阶段的养分重吸收特征以及影响因素,探索盐生植物的养分保存策略,为盐生植物在农业和生态上的推广应用提供数据支持.

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2018年在新疆乌鲁木齐县农业高新科技园的日光温室进行.土壤取自附近戈壁滩的荒漠.所用土壤装盆前用细孔筛过筛,以除去土壤杂物,如凋落物、石子等.然后混匀,随机抽取4份土用于理化性质检测和养分均一性检验,测定土壤pH值、田间持水量、含盐量、有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷8项指标(表1).

表 1 盐地碱蓬种植基质的理化性质

pH值	田间持水量 /%	土壤全盐 /g·kg ⁻¹	土壤有机质 /g·kg ⁻¹	土壤全氮 /g·kg ⁻¹	土壤速效氮 /mg·kg ⁻¹	土壤全磷 /g·kg ⁻¹	土壤速效磷 /mg·kg ⁻¹	
均值±标准误	7.37±0.02	26.81±1.33	1.21±0.07	3.28±0.32	0.34±0.03	29.47±2.07	0.30±0.02	32.52±1.67

选取籽粒饱满的盐地碱蓬种子,用升汞消毒后,播种于圆形塑料花盆内(上口径29 cm、下口径24 cm、高21.5 cm),每盆精确装入风干土7.00±0.01 kg.花盆底部带孔,并铺设纱网,防止土壤流出.播种前预先将土壤淋湿,每盆播种100粒,并用白色地膜覆盖,以减少蒸发,保证出苗整齐.5天后,待大部分种子发芽,去掉薄膜,继续培养.当幼苗长至4~5片真叶时,每盆保留长势均匀的幼苗20株,继续培养至株高为10~15 cm,进行胁迫处理.

盐胁迫采用分析纯NaCl,设置7个梯度水平,S1为1.21 g·kg⁻¹(土壤自然盐分,CK),S2为5 g·kg⁻¹(占土壤干重的百分比)、S3为10 g·kg⁻¹、S4为15 g·kg⁻¹、S5为20 g·kg⁻¹、S6为25 g·kg⁻¹、S7为30 g·kg⁻¹.计算每种处理需添加的NaCl总量,将其分别溶入均等的去离子水中,均分为6份,每隔1天浇灌1次,12天到达预设土壤含盐量.如有溶液渗出到花盆底部的托盘,将其倒回花盆土壤中,以防止水分和盐分的流失,待全部达到预定的盐浓度后开始进行水分控制.

表 2 胁迫试验设计

水分梯度	盐分梯度						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
W1	S1W1	S2W1	S3W1	S4W1	S5W1	S6W1	S7W1
W2	S1W2	S2W2	S3W2	S4W2	S5W2	S6W2	S7W2
W3	S1W3	S2W3	S3W3	S4W3	S5W3	S6W3	S7W3
W4	S1W4	S2W4	S3W4	S4W4	S5W4	S6W4	S7W4

注: S5W4、S6W4、S7W3、S7W4在营养生长期死亡率超过50%, S5W3、S6W2、S6W3、S7W2在繁殖生长期死亡率超过50%,均不列入后期数据统计.

水分梯度设置4个梯度水平,充分供水W1为 $60\pm 5\%$ (占土壤田间持水量的百分数)、轻度胁迫W2为 $50\pm 5\%$ 、中度胁迫W3为 $40\pm 5\%$ 、重度胁迫W4为 $30\pm 5\%$.采用称重法控制水分梯度,通过自然蒸散到达预定土壤水分.水盐交互试验共有28个处理(表2),每个处理种植9盆,合计252盆.

1.2 采样及指标测定

营养生长期、繁殖生长期和衰老期的采样工作分别于8月上旬、9月中旬和10月中旬进行.采样前,统计植株的死亡率,死亡率超过50%的处理,不进行后期统计分析.衰老期采样只收集枯黄叶子.土壤理化性质以及植物叶片元素的测定方法参照鲍士旦主编的《土壤农化分析》^[21].

1.3 数据分析

叶片养分重吸收效率(Nutrient Resorption Efficiency, NuRE)的计算公式为: $NuRE=(1-Nu_{senescence}/Nu_{green})\times 100\%$,式中: Nu_{green} 、 $Nu_{senescence}$ 分别为成熟绿色叶片和衰老叶中的N、P、K、Na浓度($g\cdot kg^{-1}$);养分重吸收度(Resorption Proficiency, RP)以衰老叶片的养分浓度衡量,浓度越高,重吸收度越小.

相关性采用Pearson相关系数法分析;双因素、多因素方差利用软件内置程序分析;水盐三维图利用Scatter-plot 3d程序包绘制;多重比较采用Tukey检验法进行对比,以上均在R语言(R3.4.2)中进行.其余图形和表格的绘制均在Origin 2018和Excel 16.0中进行.

2 结果与分析

2.1 不同生长期叶片的元素特征

盐地碱蓬N、P、K、Na四种元素在营养生长期、繁殖生长期和衰老期内呈现不同的变化趋势(图1).N、P两种元素含量在三个生长期内均有显著差异,表现为营养生长期>繁殖生长期>衰老期.K在营养生长期和繁殖生长期的含量显著高于衰老期.Na在三个生长期内无显著差异,且在不同水盐梯度下的变异均大于其它三种元素.图1(A~D)分别为叶片N、P、K、Na在营养生长期、繁殖生长期、衰老期的含量,横坐标元素右下角的vp代表营养生长期、pp代表繁殖生长期、se代表衰老期;箱线图顶端相同的小写字母代表在 $P=0.05$ 时无显著差异,多重比较采用Tukey法检验.

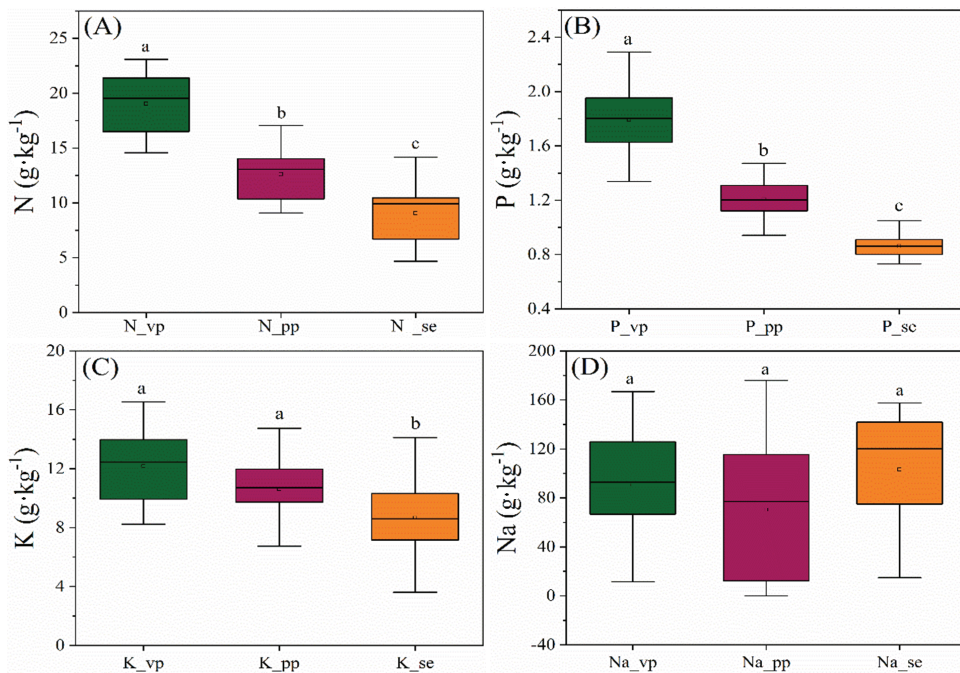


图1 盐地碱蓬不同生长期叶片的养分含量

2.2 不同时期养分的重吸收特征

盐地碱蓬养分重吸收效率在营养生长期高于繁殖生长期,N、P、K元素的重吸收效率在营养生长期分别为51.90%、50.79%、28.79%;在繁殖生长期养分重吸收效率显著降低,分别为28.60%、27.75%、13.61%(图2);同时,N、P元素的重吸收效率在两个生长期几乎相等.N、P、K的平均重吸收效率为正值,说明执行严格的养

分重吸收, 即养分由衰老叶片向成熟叶转移. 而Na元素在两个生长期的重吸收效率均为负值, 分别为-19.58%、-26.67%, 说明Na倾向于更多积累在衰老叶片中.

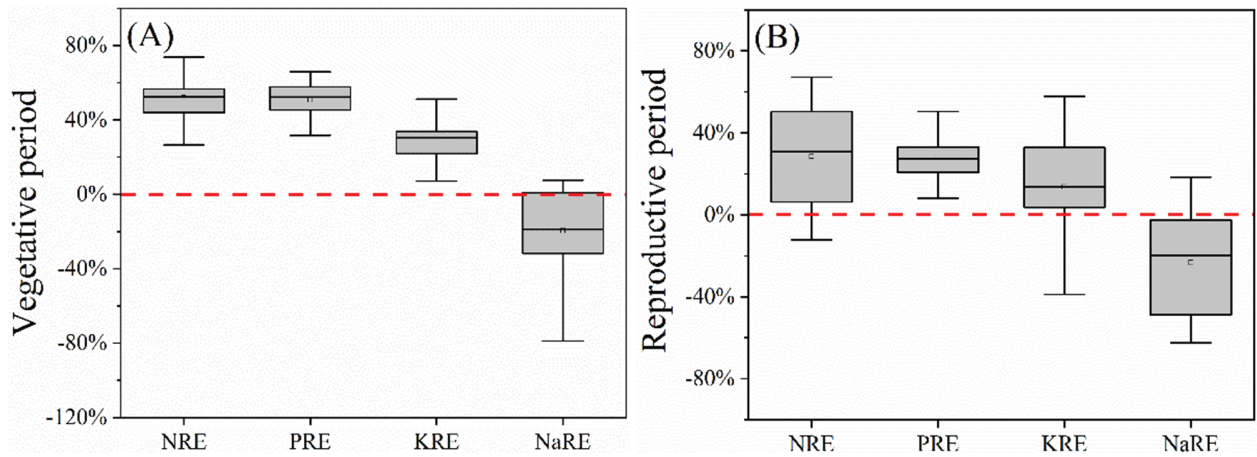


图 2 盐地碱蓬不同生长期养分重吸收效率

2.3 养分的重吸收效率与叶片元素含量的相关性分析

营养生长期N的重吸收效率与老叶N含量显著负相关. 老叶N含量能直观表征养分重吸收度, N含量越高、其重吸收度越低, 说明NRE与重吸收度正相关. P的重吸收效率分别与成熟叶P含量高度正相关, 与老叶N、P含量显著负相关; K的重吸收效率与老叶K含量负相关; Na的重吸收效率与成熟叶Na含量正相关, 与衰老叶片P含量负相关(表3).

表 3 盐地碱蓬营养生长期养分重吸收效率与叶片养分相关性分析

	N_vp	P_vp	K_vp	Na_vp	N_se	P_se	K_se	Na_se
NRE	0.31	0.26	0.30	-0.17	-0.82***	-0.17	0.38	-0.16
PRE	-0.22	0.87***	-0.20	-0.29	-0.44*	-0.70***	0.16	-0.39
KRE	-0.27	-0.38	0.04	0.04	0.04	0.12	-0.71***	-0.03
NaRE	0.27	-0.05	0.05	0.53**	0.15	-0.64***	0.06	0.25

注: ***为 $P < 0.001$, **为 $P < 0.01$, *为 $P < 0.05$; 下同.

繁殖生长期NRE与成熟叶N含量正相关, 与成熟叶Na含量、老叶N、Na含量负相关; PRE分别与成熟叶P、Na含量高度正相关、与老叶P含量显著负相关; KRE与老叶K含量负相关; NaRE与成熟叶Na含量正相关, 与衰老叶片P含量负相关(表4).

表 4 盐地碱蓬繁殖生长期养分重吸收效率与叶片养分相关性分析

	N_pp	P_pp	K_pp	Na_pp	N_se	P_se	K_se	Na_se
NRE	0.77***	-0.16	0.04	-0.64**	-0.83***	0.15	0.09	-0.61***
PRE	-0.25	0.79***	-0.27	0.46*	0.01	-0.64***	0.02	0.38
KRE	0.06	-0.02	0.38	0.05	0.06	0.03	-0.78***	-0.13
NaRE	-0.26	0.31	0.01	0.77***	0.68***	-0.25	-0.18	0.48*

2.4 水盐及发育阶段对盐地碱蓬养分及重吸收的影响

盐分显著影响了营养生长期和繁殖生长期叶片N、P、Na以及衰老期N、Na的积累; 水分对繁殖生长期叶片N、衰老期P含量有显著影响; 水盐交互效应仅对营养生长期和衰老期的K含量有显著影响(表5). 通过构建水盐双因子的三维回归拟合图(图3(A~D))发现, N、Na随盐胁迫强度的增加, 在老叶中积累增多, 重吸收度降低, P和K则呈现相反的趋势; N、K、Na在老叶中的积累随土壤含水量提高而增加, P则相反, 说明干旱提高了前三种元素的养分重吸收度, 降低了P的养分重吸收度, 可能是不同元素对胁迫的敏感性不一致.

表 5 盐地碱蓬不同生长期叶片养分的双因素方差分析

发育阶段	因素	N	P	K	Na
营养生长期	盐分	17.71***	14.88***	2.73	45.94***
	水分	2.23	1.50	0.17	0.64
	盐分×水分	2.49	2.85	7.99*	0.93
繁殖生长期	盐分	4.42*	6.88*	3.96	72.19***
	水分	8.84**	0.01	0.23	0.67
	盐分×水分	0.09	0.25	3.93	0.47
衰老期	盐分	18.67***	0.58	3.52	51.94***
	水分	1.07	7.36*	3.00	0.99
	盐分×水分	0.70	1.37	10.73**	0.56

注: 数值为F检验值.

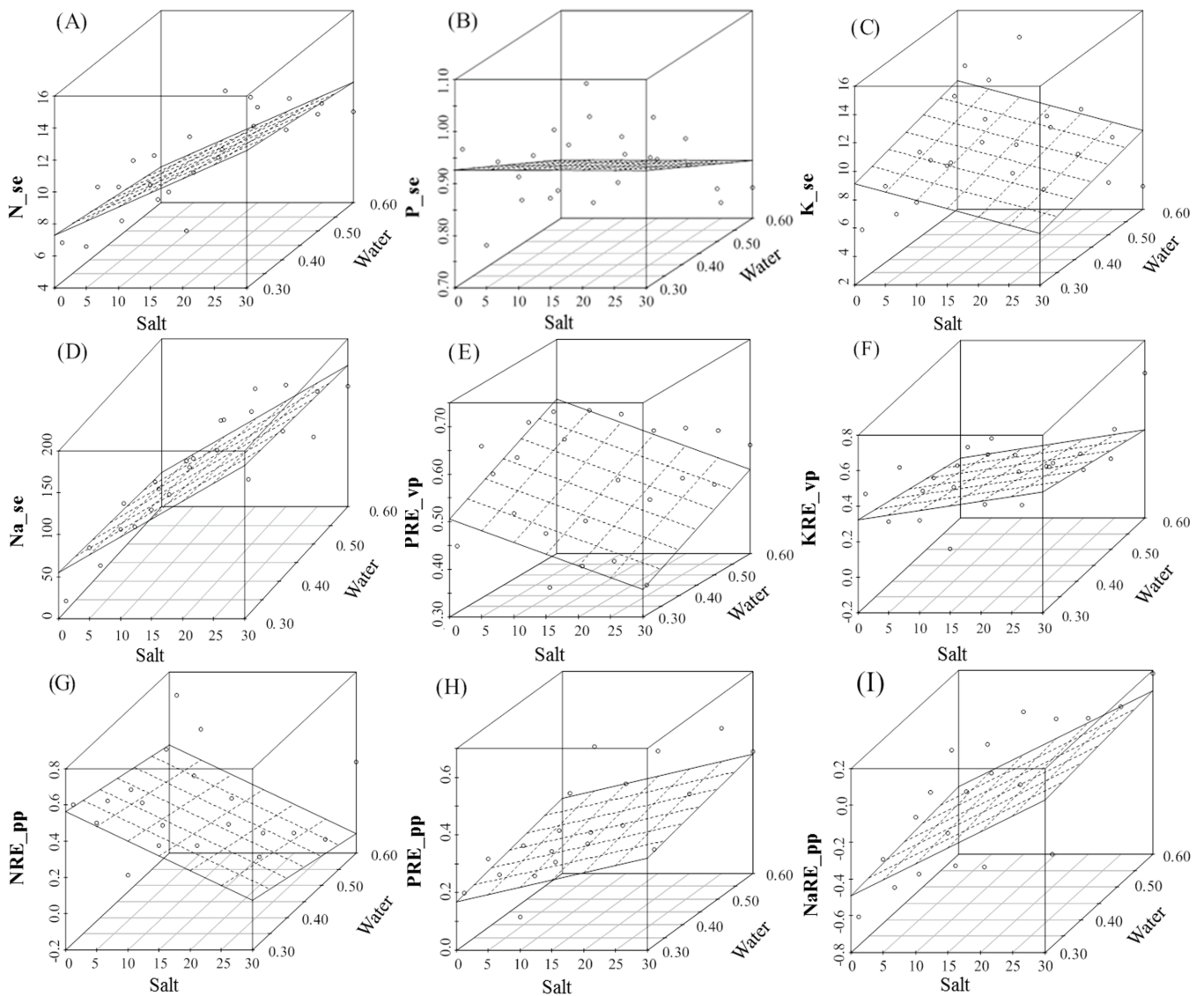


图 3 盐地碱蓬在水盐梯度上的养分重吸收特征

注: (A~D) 为衰老期叶片的N、P、K、Na含量; (E~F) 为营养生长期P的重吸收效率、K的重吸收效率; (G~I) 为繁殖生长期N的重吸收效率、P的重吸收效率、Na的重吸收效率.

营养生长期, 盐分显著降低了P的重吸收效率(表6, 图3(E)), 水分显著提高了P的重吸收效率, 降低了K的重吸收效率(表6, 图3(E~F)); 繁殖生长期, 盐分对N、P、Na的重吸收效率有显著影响(表6), 盐分增加了Na、P的重吸收效率, 降低了N的重吸收效率(图3(G~I)).

表6 盐地碱蓬养分重吸收效率的方差分析

发育阶段	因素	NRE	PRE	KRE	NaRE
营养生长期	盐分	1.86	4.68*	1.21	2.94
	水分	2.20	6.58*	5.07*	1.31
	盐分×水分	0	4.32	1.99	3.64
繁殖生长期	盐分	10.91*	6.42*	0.01	7.36*
	水分	1.56	2.38	0.70	0.15
	盐分×水分	0.01	0.16	2.98	0.01
	盐分	10.33**	1.92	0.90	10.23**
全部阶段	水分	0.96	6.47*	4.22*	1.26
	发育阶段	36.67***	77.38***	5.32*	0.48
	盐分×水分	0.68	2.05	4.20*	1.16
	盐分×发育阶段	16.80***	8.57**	0.37	1.95
	水分×发育阶段	5.95*	0.01	0.28	0.31
	盐分×水分×发育阶段	1.30	0.29	1.18	1.31

整合盐分、水分和发育阶段三种因素对养分重吸收的影响,发现发育阶段是造成N、P、K重吸收差异的主要因素,盐分是影响Na重吸收效率的主要因素.此外,N的重吸收效率还受到盐分、盐分与发育阶段交互效应以及水分与发育阶段交互效应的显著影响;P的重吸收效率受到水分、盐分与发育阶段交互效应的显著影响;K的重吸收效率受到水分、水分与盐分交互效应的显著影响(表6).

3 讨论

盐地碱蓬从营养生长、繁殖生长到衰老的发育过程中,叶片N、P、K、Na浓度表现出明显的动态变化,元素的重吸收也相应表现出生长阶段的差异以及对水盐响应强度的差异.通过一项关于陆生植物养分重吸收的荟萃分析发现,N、P、K在全球尺度上的平均重吸收效率分别为62.1%、64.9%、70.1%^[19],盐地碱蓬在胁迫下N、P、K三种元素的重吸收效率均低于此水平,Na的重吸收效率也低于文献报道的真盐生植物Na的重吸收效率^[22].盐地碱蓬种植在养分较贫乏的荒漠土中,且外源施加不同强度的盐旱胁迫,其养分重吸收特征较为复杂,土壤基质、胁迫、发育阶段等都可能引起盐地碱蓬养分重吸收效率的差异.

盐地碱蓬不同元素重吸收效率受盐分和水分的的影响效应不同,说明其对胁迫的响应程度不一致.营养生长期,P在盐分胁迫下重吸收效率降低,其余元素的重吸收并未受到显著影响.P在此阶段的重吸收效率主要受到成熟叶片P含量的影响,土壤中的高盐分限制了植物对P的吸收,导致叶片P随盐分增加而降低^[23-24],重吸收效率也降低.繁殖生长期,N、P、Na的重吸收效率都受到盐分的影响.N的重吸收效率随盐分增加而降低,可能是因为盐分通过推迟繁殖发育、延缓植株衰老,影响养分“源-库”关系的转化^[16],衰老缓慢的叶片养分内循环速度降低.繁殖器官的发育增加了植物对P的需求,而盐分降低了土壤P的可利用性,因此,通过提高重吸收以增加对P的获取利用.养分在器官中的分配差异也可能影响P的重吸收效率.繁殖发育较晚的植株可能分配到繁殖器官的P更少,分配到叶片的P更多^[25-26],导致P的重吸收效率与盐分正相关.Na⁺在植物叶片液泡中的区隔化,是盐生植物提高耐盐性的重要策略^[27-28],而Na⁺向液泡的转运则需要依赖一系列转运酶、载体、离子通道^[28].Na的重吸收效率随盐分增加而提高,但是整体上仍然为负值,说明老叶富集Na⁺的总量高于成熟叶片.然而由于盐分对老叶酶活性和丰度的抑制效应大于成熟叶片,导致老叶富集Na⁺的速度降低,成熟叶片受盐分的影响相对较小,两者Na⁺富集总量的差距降低,其重吸收效率提高.水分对重吸收的影响主要发生在营养生长期,此阶段水分对P、K的重吸收效率均有显著影响,但效应却截然相反,水分对P的重吸收效率有促进作用,却降低了K的重吸收效率,说明水分对不同元素的获取与维持策略的效应具有差异性^[29].荒漠土壤K含量较高^[30-31],且K⁺在土壤中流动性较强,水分较高时,更容易从土壤中获取,减少了从衰老叶中的获取量.由于土壤P匮乏以及盐分降低其可利用性,重吸收成为P的关键来源.在土壤水分提高时,植物快速生长加大了对P的需求,驱动了P的重吸收策略^[29,32].

发育阶段是影响N、P、K重吸收效率最关键的因素,三种元素的重吸收效率都随发育阶段的推进而降低,

营养生长阶段高于繁殖生长阶段. 重吸收效率是由成熟叶片的养分含量决定的, 营养生长期叶片较高的养分含量决定了较高的重吸收效率. 而繁殖生长期养分优先分配到花、种子等繁殖器官, 导致了叶片养分含量的降低^[25-26], 从而影响重吸收效率. 由于栽培基质养分含量较低, 且盐胁迫降低了土壤养分的可利用性, 导致植物生长受土壤养分的限制^[33-34]. 在资源有限的条件下, 养分分配策略的调整影响重吸收效率. 同时, 植物从老叶中获取养分并不是无限制的, 盐地碱蓬与其它植物一样, 可能存在一个重吸收的限度^[16,35]. 盐地碱蓬叶片对Na⁺的富集持续整个生长周期, 富集量受叶片年龄的影响. 繁殖期的衰老叶片富集更多的Na⁺, 重吸收效率降低.

4 结论

盐地碱蓬养分重吸收受水、盐、发育阶段等因素的共同影响, 呈现出复杂的特征, 以响应环境胁迫、土壤养分匮乏以及满足不同发育阶段的养分需求.

(1) 总体上, 盐地碱蓬叶片的重吸收效率均受发育阶段的显著影响, 营养生长期大于繁殖生长期. 以上两个生长阶段, N与P的重吸收效率几乎相等, 且都高于K的重吸收效率. 叶片对Na⁺的持续富集, 是盐地碱蓬重要的耐盐策略, 导致Na均表现为负的重吸收.

(2) 不同元素的重吸收效率在每个发育阶段响应水盐的程度不同. 营养生长期, 盐分或干旱对P、K的重吸收效率有显著效应; 繁殖生长期, 盐分对N、P、Na的重吸收效率均有显著的效应.

参考文献:

- [1] 刘勤, 王宏卫, 丁建丽, 等. 干旱区区域土壤盐渍化监测研究进展及其未来热点[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2014, 31(1): 108-115.
- [2] ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, SCHWARZ D, et al. Plant responses to drought stress[M]. Berlin: Springer, 2012.
- [3] BHADURI D, MEENA H N, CHAKRABORTY K. Variation in phosphorus accumulation in groundnut cultivars as influenced by water salinity[J]. Legume Research, 2016, 39: 215-220.
- [4] HASANUZZAMAN M, FUJITA M, OKU H, et al. Plant nutrients and abiotic stress tolerance, ionic basis of salt tolerance in plants: nutrient homeostasis and oxidative stress tolerance[M]. Singapore: Springer, 2018.
- [5] 于贵瑞, 高扬, 王秋凤, 等. 陆地生态系统碳氮水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 1-13.
- [6] 樊利华, 周星梅, 吴淑兰, 等. 干旱胁迫对植物根际环境影响的研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(5): 1244-1251.
- [7] 王德福, 段洪浪, 黄国敏, 等. 高温和干旱胁迫对西红柿幼苗生长、养分含量及元素利用效率的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3199-3209.
- [8] 李磊, 王岩, 胡姝娅, 等. 草甸草原土壤碳/氮矿化潜力及土壤微生物水分敏感性对极端干旱的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 122-128.
- [9] BISTA D R, HECKATHORN S A, JAYAWARDENA D M, et al. Effect of drought and carbon dioxide on nutrient uptake and levels of nutrient-uptake proteins in roots of barley[J]. American Journal of Botany, 2020, 107(10): 1-9.
- [10] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.
- [11] CHAKRABORTY K, BHADURI D, MEENA H N, et al. External potassium(K⁺) application improves salinity tolerance by promoting Na⁺-exclusion, K⁺-accumulation and osmotic adjustment in contrasting peanut cultivars[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 103: 143-153.
- [12] KILLINGBECK K T. The terminological jungle revisited: making a case for use of the term resorption[J]. Oikos, 1986, 46: 263-264.
- [13] AERTS R, CHAPIN F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns[J]. Advances in Ecological Research, 2000, 30: 1-67.
- [14] ECKSTEIN R L, KARLSSON P, WEIH M. Leaf life span and nutrient resorption as determinants of plant nutrient conservation in temperate-arctic regions[J]. New Phytologist, 1999, 143(1): 177-189.
- [15] KOU L, WANG H M, GAO W L, et al. Nitrogen addition regulates tradeoff between root capture and foliar resorption of nitrogen and phosphorus in a subtropical pine plantation[J]. Trees, 2017, 31(1): 77-91.
- [16] 陆姣云, 段兵红, 杨梅, 等. 植物叶片氮磷养分重吸收规律及其调控机制研究进展[J]. 草业学报, 2018, 27(4): 178-188.
- [17] LU X T, CUI Q, WANG Q B, et al. Nutrient resorption response to fire and nitrogen addition in a semi-arid grassland[J]. Ecological

- Engineering, 2011, 37(3): 534-538.
- [18] YUAN Z Y, CHEN H. Global-scale patterns of nutrient resorption associated with latitude, temperature and precipitation[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2009, 18(1): 11-18.
- [19] VERGUTZ L, MANZONI S, PORPORATO A, et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants[J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82(2): 205-220.
- [20] SONG J, WANG B. Using euhalophytes to understand salt tolerance and to develop saline agriculture: *Suaeda salsa* as a promising model[J]. *Annals of Botany*, 2015, 115(3): 541-553.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] WANG L L, WANG L, HE W L, et al. Nutrient resorption or accumulation of desert plants with contrasting sodium regulation strategies[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 17035.
- [23] RONG Q Q, LIU J T, CAI Y P, et al. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay coastal wetland, China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 57-65.
- [24] 韩博, 李广, 卓玛草, 等. 燕麦碳氮磷含量及化学计量比对盐胁迫的响应[J]. *草业科学*, 2020, 37(12): 2497-2506.
- [25] YASUMURA Y. The effect of altered sink-source relations on photosynthetic traits and matter transport during the phase of reproductive growth in the annual herb *Chenopodium album*[J]. *Photosynthetica*, 2009, 47(2): 263-270.
- [26] TULLY K L, WOOD T E, LAWRENCE S D. Soil nutrient availability and reproductive effort drive patterns in nutrient resorption in *Pentaclethra acroloba*[J]. *Ecology*, 2013, 94(4): 930-940.
- [27] 陈敏, 彭建云, 王宝山. 整株水平上Na⁺转运体与植物的抗盐性[J]. *植物学通报*, 2008, 25(4): 381-391.
- [28] 赵可夫, 李法曾, 张福锁. 中国盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [29] XU M P, ZHONG Z K, SUN Z Y, et al. Soil available phosphorus and moisture drive nutrient resorption patterns in plantations on the Loess Plateau[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 461: 117910.
- [30] 陈荣毅, 张元明, 潘伯荣, 等. 古尔班通古特沙漠土壤养分空间分异与干扰的关系[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 257-265.
- [31] 韩丽, 贡璐, 朱美玲. 克里雅河流域于田绿洲土壤养分与水盐因子相关关系研究[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2013, 30(3): 257-261+379.
- [32] ZHANG J L, ZHANG S B, CHEN Y J, et al. Nutrient resorption is associated with leaf vein density and growth performance of dipterocarp tree species[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(3): 541-549.
- [33] 刘建国, 林喆, 刘卫国, 等. 短命植物叶片生源要素的化学计量特征及异速关系[J]. *西北植物学报*, 2016, 36(11): 2291-2299.
- [34] 何茂松, 罗艳, 彭庆文, 等. 新疆67种荒漠植物叶碳氮磷计量特征及其与气候的关系[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2171-2180.
- [35] KILLINGBECK K T. Nutrients in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency[J]. *Ecology*, 1996, 77(6): 1716-1727.

责任编辑: 张自强