

土壤氮磷供应变化条件下盐地碱蓬叶片 碳、氮和磷的化学计量特征

冉越男^{1,4}, 王光美^{1,3*}, 于君宝^{1,2*}, 吕梦雪⁵, 刘晓玲^{1,4}, 任 蕙⁶

(1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003;
2. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 3. 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室,
滨州学院, 山东 滨州 256600; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 青岛农业大学资源与环境学院,
山东 青岛 266109; 6. 内蒙古大学环境与资源学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要: 于2015年5~9月, 在黄河三角洲滨海湿地生态试验站设置的野外控制实验, 分析土壤氮磷供应比例、氮磷供应量及生长阶段下, 优势植物盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)叶片碳、氮和磷的化学计量特征。研究表明, 随着土壤氮磷供应量增大, 盐地碱蓬叶片氮、磷含量都显著增加, 碳氮比和碳磷比显著减小; 在土壤氮磷低供应量条件下, 叶片氮磷比显著低于中、高供应量条件下; 随着土壤氮磷供应比例增大, 叶片全氮含量、碳氮比和氮磷比显著增大, 全磷含量减小, 叶片碳磷比在土壤氮磷供应比例最大时才显著增大。在9倍土壤氮磷供应比例和供应量条件下, 盐地碱蓬生长阶段是影响其叶片碳、氮和磷化学计量特征的重要因子。

关键词: 盐地碱蓬; 土壤氮磷供应比例; 土壤氮磷供应量; 生长阶段; 生态化学计量特征
中图分类号: X142; X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-5948(2017)01-148-09

自工业革命以来, 人类活动已经对自然生态系统的碳、氮、磷循环产生了巨大影响, 土壤氮磷的不均衡输入已从绝对供应量和供应比例两方面改变了植物生长的氮、磷供应条件^[1]。为适应环境变化, 植物能够主动调整养分需求, 从而调整体内元素的丰度。基于植物碳、氮、磷生态化学计量特征的研究方法已成为植物养分吸收研究的重要手段, 并得到广泛应用^[2-4]。已有研究发现, 植物的氮含量和叶片干物质含量主要受土壤氮磷供应量的影响, 而叶片磷含量、氮磷比和氮磷吸收速率等主要受土壤氮磷供应比例的影响^[5-8]。目前, 相关研究主要集中在植物叶片氮、磷计量特征在不同土壤氮磷比和氮磷供应量条件下的变化。植物碳、氮、磷的组成和分配是相互联系不可分割的一个整体, 它们的相互作用以及与外界环境条件的关系共同决定植物的营养水平和生长发育过程^[9]。因此, 研究土壤氮磷供应条件对植物生长的影响,

需对植物的碳、氮、磷化学计量特征全面考虑。另一方面, 受植物自身养分需求规律调节, 随着植物形体大小和生长速率的变化, 植物的碳、氮、磷化学计量特征也会变化^[10-12]。目前, 已开展的植物氮、磷营养方面的研究, 多为某一生长阶段的一次性采样^[7,13-15], 不能明确营养条件改变和生长阶段对植物碳、氮、磷计量特征变化的影响。

近年来, 日益加剧的人为干扰对黄河三角洲滨海湿地的生态环境产生了巨大影响。黄河三角洲地区植物生长季的总氮沉降量已达2.26 g/m², 大气氮沉降成为该区土壤氮元素的主要来源之一^[16]。随着黄河三角洲开发利用强度的增加, 化肥的大量施用使养分状况显著变化, 土壤氮、磷总量和比例发生改变, 进而可能影响到黄河三角洲滨海湿地生态系统的结构和功能。目前, 该区相关研究多采用不同生境的原位取样^[17-20], 从生态化学计量学角度, 探讨土壤营养条件改变对植物生长影响

收稿日期: 2016-06-02; 修订日期: 2016-07-12

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-STS-127)、山东省高等学校优势学科人才团队培育计划项目和山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目(2011KFJJ03)资助。

作者简介: 冉越男(1992-), 女, 湖北省恩施人, 硕士研究生, 主要从事湿地生态学研究。E-mail: ynrn@yic.ac.cn

*通讯作者: 王光美, 副研究员; 于君宝, 研究员。E-mail: gmwang@yic.ac.cn; E-mail: junbao.yu@gmail.com

的研究相对缺乏,且该区典型优势植物对土壤氮磷供应比例和供应量变化的响应还有待研究。盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)是黄河三角洲滨海湿地的主要优势植物之一,对海岸带地区土壤营养物质的迁移转化有重要的调节作用,具有重要的生态功能。本研究以黄河三角洲滨海湿地盐地碱蓬为研究对象,采用野外定量控制研究方法,设置不同土壤氮磷供应比例和供应量,在盐地碱蓬不同生长阶段分别取样,分析土壤氮磷供应条件下盐地碱蓬叶片的碳、氮、磷生态化学计量特征变化,以期为该滨海湿地的保护和修复提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 采样地

本研究的野外控制实验在中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站(37°45'50"N, 118°59'24"E)内开展。采样地内植物呈斑块状分布,植物群落组成简单,以耐盐植物为主,优势种主要为盐地碱蓬、芦苇(*Phragmites australis*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)和白茅(*Imperata cylindrica*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

选用直径为 32 cm、高 25 cm、容积为 0.007 m³ 的塑料盆,栽种盐地碱蓬,并保证对植物的根系发育没有限制。参照 Güsewell S 的方法^[6-8],确定土壤氮磷供应比例和供应量。其中,氮磷供应比例设置为 5:1、15:1 和 45:1,分别代表氮限制、氮和磷共同限制和磷限制^[21-23]。在每一比例下,以 3 为倍数,设置低、中、高 3 种土壤氮磷供应量水平,共计 9 种处理。这种设置可以保证在评价土壤氮磷供应比例和供应量的效应时,供应比例和供应量之间不会相互影响^[5-8]。

各处理下,土壤氮磷供应量分别按照公式(1)和(2)计算^[6]:

$$N = L \times \sqrt{N/P} \quad (1)$$

$$P = L / \sqrt{N/P} \quad (2)$$

公式(1)和(2)中, $N(g)$ 为土壤氮供应量; $P(g)$ 为土壤磷供应量; $L(g)$ 为土壤氮磷供应总量,为土壤氮供应量与磷供应量的几何平均值。以氮、磷分别供应量的几何平均值而非算术平均值作为氮磷供应总量的度量,原因在于氮、磷元素对植物生长存在协同效应,氮、磷供应对植物生长的作用常常为乘积效应而非加和效应^[7,8]。

于 2015 年 5 月 26 日,在试验站内盐地碱蓬自然生长地,取实验用土,取土深度为 0~20 cm。取土时,将杂质挑出,并将土块粉碎,混合均匀。同时取部分土样,测定其相关理化指标。原始土壤的含盐量为 14.1‰,pH 为 7.95,全碳质量比为 13.05 mg/g,全氮质量比为 0.36 mg/g,全磷质量比为 0.65 mg/g,全钾质量比为 9.35 mg/g,速效氮质量比为 50.99 mg/g,速效磷质量比为 4.02 mg/kg。

取出鲜土混合均匀后,采用称重法,进行装盆。装土前,在塑料盆底铺尼龙网,防止排水孔堵塞和土壤漏出。装土时,填至土壤距盆口 2~3 cm,每盆装土鲜质量为 14 kg。装土过程中,每装好 9 盆,用土壤盒取样 1 次,共重复取 12 次土壤样品,利用烘干法,测得土壤含水量为 19.9%±0.9%,即每盆土壤干质量为 11.2 kg。

为保证实验可实施,以盆栽用土中速效磷含量(4.0 mg/kg)作为 45:1 氮磷比时,低供应水平处理的磷供应量,根据每盆土壤干质量 11.2 kg,计算出各处理下每盆植物的土壤氮磷供应量(表 1)。氮、磷元素分别选用尿素(含氮 46.4%)和 NaH₂PO₄·2H₂O(含磷 19.87%)来添加,添加量为设置土壤氮磷供应总量与土壤中原含量的差值。

装土完毕后,次日在土样地附近取 2~3 株长势一致的盐地碱蓬幼苗,移植入花盆。将花盆大部埋入地下,盆口距地面 1~2 cm,花盆间距离为 10 cm。幼苗缓苗成活后,定苗,每盆保留 1 株生长健壮的幼苗。6 月 22 日进行第 1 次施肥,施用量为

表 1 不同氮磷供应比例下的氮磷供应量

Table 1 The supply quantity of nitrogen and phosphorus under different ratios of nitrogen and phosphorus

氮磷供应比例	氮供应量(g)			磷供应量(g)		
	高供应量	中供应量	低供应量	高供应量	中供应量	低供应量
5:1	6.048	2.016	0.672	1.210	0.403	0.134
15:1	10.478	3.493	1.164	0.699	0.233	0.078
45:1	18.144	6.048	2.016	0.403	0.134	0.045

总添加量的1/3。待7月23日第1次采样结束后,将剩余肥料全部施入。实验期间各盆等量浇水,避免水分差异的影响。

1.2.2 样品采集与测定

于盐地碱蓬生长前期的2015年7月23日、生长中期的8月25日和生长后期的9月20日,在每个处理随机取4株植物样品,并选取3个相近测量值进行分析,尽可能减少误差影响,共计取样108组。已有研究表明,叶龄会影响植物的碳、氮、磷化学计量特征^[10]。为避免此影响,将植株整株取出,洗净,经105℃杀青30min后,在75℃下烘干至恒质量,将所有叶片粉碎研磨,并过100目筛,待测。

利用大进样量元素分析仪(vario MACRO cube, Elementa, Germany),测定叶片全碳和全氮含量。利用浓硫酸—高氯酸消煮—连续流动注射分析仪,测定叶片全磷含量。

1.3 数据处理

利用三因素方差分析方法,分析土壤氮磷供应比例、氮磷供应量和生长阶段对盐地碱蓬叶片碳、氮、磷元素含量和比例的影响。利用Bonferroni法,进行多重比较。分析前,对原始数据进行正态及方差齐性检验,根据检验结果,对叶片碳、氮、磷含量及碳氮磷之比进行对数变换,以满足数据分析要求。

利用Excel 2010软件和SPSS 20.0软件,进行数据前期处理和统计分析。利用Sigmaplot 12.5软件,进行绘图。

2 结果与分析

2.1 盐地碱蓬叶片碳、氮、磷含量

图1显示,在低氮磷供应量下,7月23日盐地碱蓬叶片全碳含量最低,8月25日全碳含量最高;9月20日叶片全氮含量最低,7月23日叶片全氮含量最高;7月23日叶片全磷含量最低,9月20日最高。在中氮磷供应量下,8月25日叶片全碳含量最高,最低值出现在7月23日的中供应比例下;7月23日叶片全氮含量最高,9月20日叶片全氮含量最低,但3种供应比例下差异不显著;叶片全磷含量最大值和最小值都在9月20日,分别在低、高氮磷供应比例下。在高氮磷供应量下,8月25日叶片全碳含量最高,最低值出现在9月20日的中供应比例下;9月20日叶片全氮含量最低,7月23

日和8月25日叶片全氮含量差异不大;7月23日叶片全磷含量最低,8月25日叶片全磷含量最高。

三因素方差分析结果表明,土壤氮磷供应比例、供应量和盐地碱蓬的生长阶段对叶片中氮、磷含量都有显著影响,以氮磷供应量影响最大,其次为生长阶段,土壤氮磷供应比例影响最小(表2)。从方差分析的 F 值看,各因子对叶片氮含量的影响比对磷含量的影响更为显著。同时,三因子两两之间以及三者对叶片磷含量影响的交互作用显著,对叶片氮含量的影响只有土壤氮磷供应量和生长阶段有显著交互作用。叶片碳含量只受生长阶段的影响,但土壤氮磷供应量与生长阶段的交互作用显著。叶片氮含量随着其不断生长显著下降,随着土壤氮磷供应量和氮磷供应比例增加显著上升。叶片磷含量随着土壤氮磷供应量增加显著升高,随着氮磷供应比例升高显著下降,随着其生长先上升后下降。

2.2 盐地碱蓬叶片碳、氮、磷化学计量比

图2显示,在低氮磷供应量下,7月23日盐地碱蓬叶片碳氮比最小,9月20日叶片碳氮比最大,且随供应比例增大而减小;在中氮磷供应量下,7月23日叶片碳氮比最小,9月20日最大;在高氮磷供应量下,9月20日碳氮比最大。在低氮磷供应量下,叶片碳磷比高于中、高供应量下,其最大值在9月20日。在低氮磷供应量下,叶片氮磷比低于中、高供应量下,后两者之间差异不显著。

土壤氮磷供应比例、供应量和生长阶段对盐地碱蓬叶片的碳氮比、碳磷比和氮磷比都有显著影响。土壤氮磷供应量对叶片碳氮比和碳磷比的贡献率最高,其次为生长阶段,土壤氮磷供应比例影响最小(表3)。土壤氮磷供应量对叶片碳氮比的贡献率与生长阶段差距不大,都达到40%以上。土壤氮磷供应量对叶片碳磷比的贡献率比碳氮比低,但与生长阶段的贡献率差距大,约为生长阶段贡献率的2倍。土壤氮磷供应比例对叶片碳氮比的贡献率只有5.2%,对叶片碳磷比的贡献则略有提高。叶片氮磷比受生长阶段影响最大,其次为土壤氮磷供应比例,土壤氮磷供应量贡献率最低。土壤氮磷供应比例和供应量对叶片碳磷比和氮磷比的交互作用影响显著,但贡献率较小(分别为4.3%和4.5%),对叶片碳氮比的交互作用不显著。

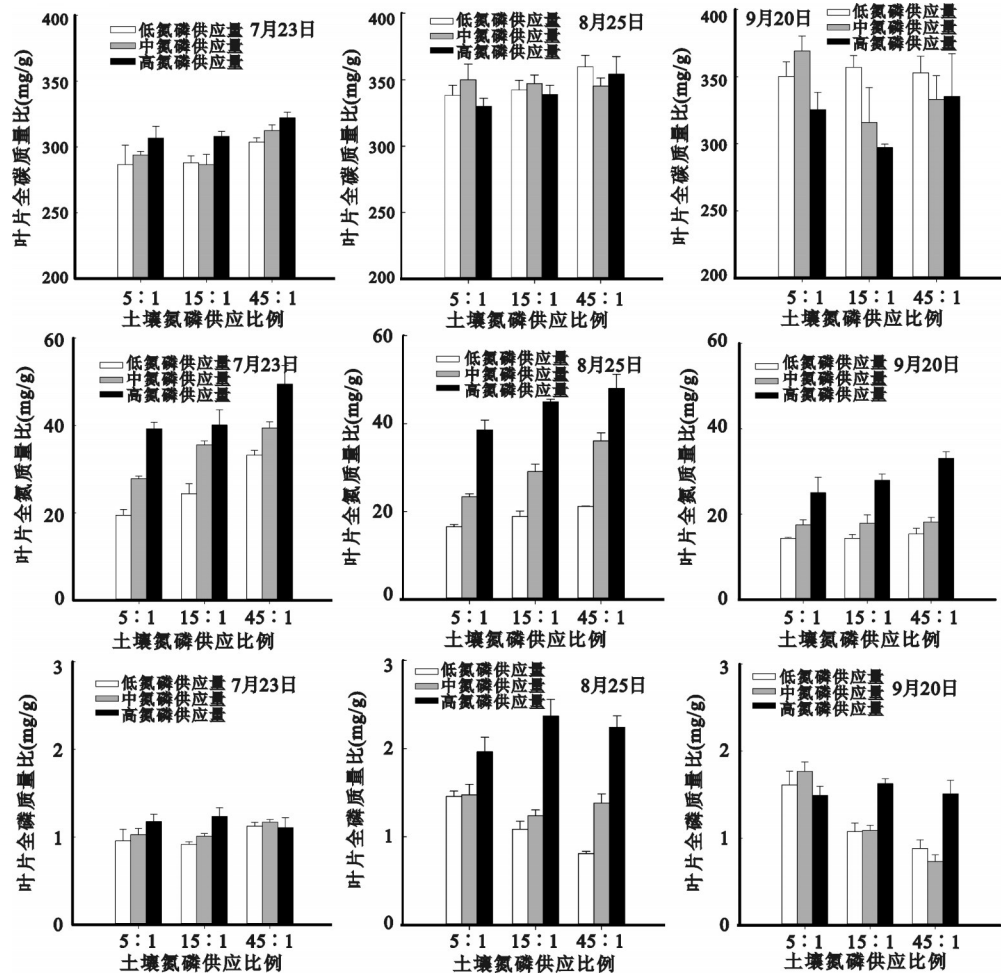


图1 不同生长阶段不同土壤氮磷供应条件下盐地碱蓬叶片碳、氮、磷含量

Fig.1 The concentration of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves of *Suaeda salsa* under different supply conditions of soils at different growth phases

表2 土壤氮磷供应比例、供应量和生长阶段与盐地碱蓬叶片碳、氮、磷含量的方差分析结果

Table 2 The results of variance analysis of ratios of nitrogen and phosphorus supply, supply quantity of nitrogen and phosphorus of soils, growth phases, and concentration of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves of *Suaeda salsa*

项目	df	碳含量		氮含量		磷含量	
		F	SS(%)	F	SS(%)	F	SS(%)
土壤氮磷供应比例	2	3.1 ^{ns}	4.0	42.0 ^{***}	6.4	16.0 ^{***}	6.1
土壤氮磷供应量	2	0.5 ^{ns}	0.6	296.8 ^{***}	45.3	80.9 ^{***}	30.6
生长阶段	2	28.1 ^{***}	36.9	260.9 ^{***}	39.8	64.2 ^{***}	24.3
土壤氮磷供应比例×土壤氮磷供应量	4	1.6 ^{ns}	4.3	0.6 ^{ns}	0.2	5.6 ^{***}	4.2
土壤氮磷供应比例×生长阶段	4	1.8 ^{ns}	4.6	1.9 ^{ns}	0.6	12.0 ^{***}	9.1
土壤氮磷供应量×生长阶段	4	3.5 [*]	9.3	7.5 ^{***}	2.3	9.5 ^{***}	7.2
土壤氮磷供应比例×土壤氮磷供应量×生长阶段	8	0.9 ^{ns}	4.8	2.0 ^{ns}	1.2	5.5 ^{***}	8.3

注:SS(%)为碳、氮、磷含量经对数变换后,进行三因素方差分析的F值及平方和的解释比例;***表示在p<0.001水平显著相关;**表示在p<0.01水平显著相关;*表示在p<0.05水平显著相关;ns表示p>0.05,不相关。下同。

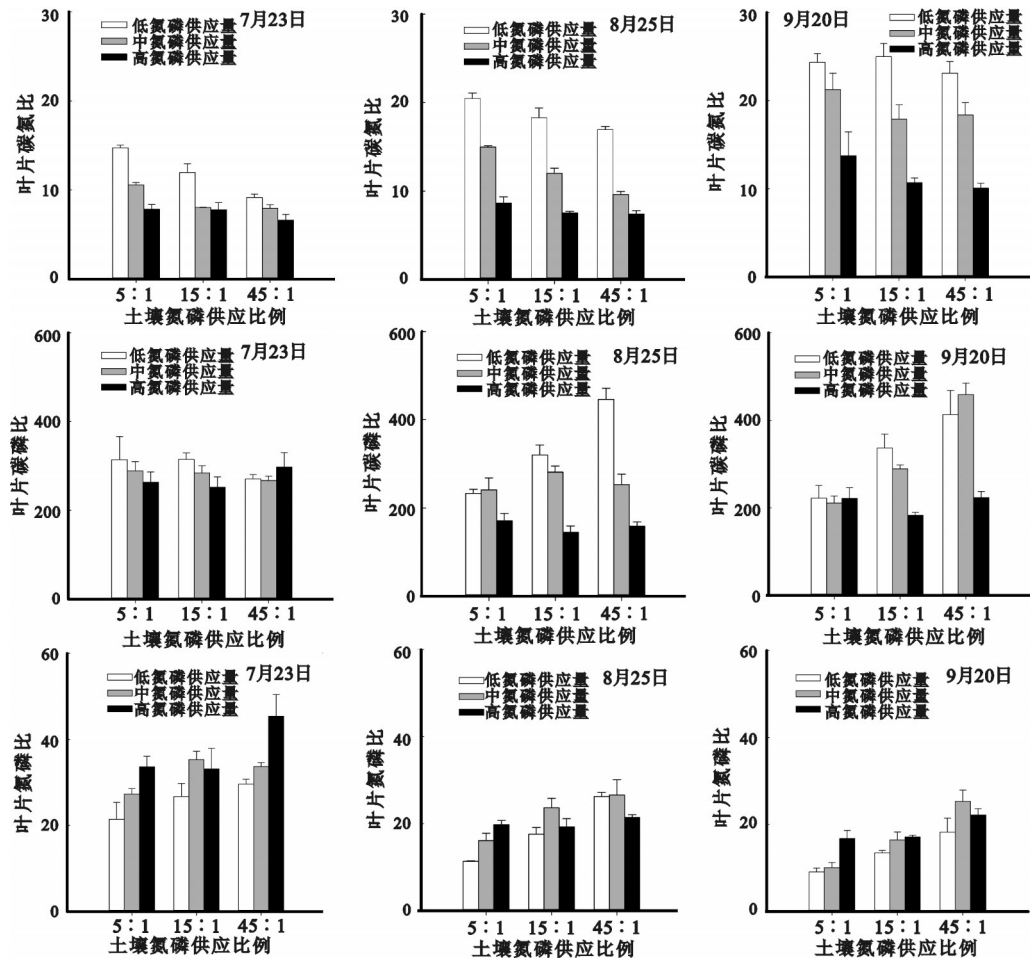


图2 不同生长阶段不同土壤氮磷供应条件下盐地碱蓬叶片碳氮比、碳磷比和氮磷比

Fig.2 The ratios of carbon and nitrogen, carbon and phosphorus, nitrogen and phosphorus in leaves of *Suaeda salsa* under different supply conditions of soils at different growth phases

表3 土壤氮磷供应比例、供应量和生长阶段与盐地碱蓬叶片碳、氮、磷比例的分差分析结果

Table 3 The results of variance analysis of ratios of nitrogen and phosphorus supply, supply quantity of nitrogen and phosphorus of soils, growth phases, and ratios of carbon, nitrogen, and phosphorus in leaves of *Suaeda salsa*

项目	df	碳氮比		碳磷比		氮磷比	
		F	SS(%)	F	SS(%)	F	SS(%)
土壤氮磷供应比例	2	33.7***	5.2	17.1***	7.8	64.9***	27.2
土壤氮磷供应量	2	286.4***	44.1	74.6***	33.9	19.7***	8.3
生长阶段	2	263.1***	40.5	33.8***	15.4	95.5***	40.1
土壤氮磷供应比例×土壤氮磷供应量	4	1.6 ^{ns}	0.5	4.8**	4.3	5.3***	4.5
土壤氮磷供应比例×生长阶段	4	0.6 ^{ns}	0.2	7.9***	7.2	4.4**	3.7
土壤氮磷供应量×生长阶段	4	13.1***	4.0	12.4***	11.3	1.9 ^{ns}	1.6
土壤氮磷供应比例×土壤氮磷供应量×生长阶段	8	2.1*	1.3	4.4***	7.9	2.0 ^{ns}	3.4

3 讨论

3.1 土壤氮磷供应比例和供应量与盐地碱蓬叶片碳、氮、磷含量的关系

本研究结果表明,土壤氮磷供应比例和供应

量对盐地碱蓬叶片碳含量无显著影响(表2)。施加氮和磷对巨桉(*Eucalyptus grandis*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)叶片碳含量无显著影响^[13,24];在不同氮供应量水平下,四翅滨藜(*Atriplex canescens*)、

牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、针茅(*Stipa capillata*)和老瓜头(*Cynanchum komarovii*)等植物叶片碳含量无显著差异^[25,26],而白花(*Sophora davidii*)和长芒草(*Stipa bungeana*)叶片碳含量会因为氮添加而显著上升^[27,28]。植物叶片的碳含量反映了其固碳能力,另一方面,植物对叶片的碳分配也与生活史有关^[29,30]。植物种类可能是决定其叶片碳含量的首要因素,其含量变化主要受其自身生长发育规律的控制,体现了植物物种对元素吸收利用的特异性,对外界营养条件的响应可能因物种而异。

盐地碱蓬叶片氮、磷含量受土壤氮磷供应比例和供应量影响显著,供应量的影响较高。本研究的结果与前人研究^[5,7,8]存在一定的差异,可能与实验采用的氮、磷供给方式以及氮磷供应量和供应比例的设置有关。植物对氮、磷的吸收模式存在差异,对氮是按需吸收,当吸收的氮可以满足其本身需要时,即使环境中仍存在大量可利用氮,也不再继续吸收;植物对磷的吸收量主要取决于环境中可利用磷的量^[7,31,32]。已有的研究^[5,7,8]采用砂培方式,氮、磷完全利用营养液供给,在供应比例上控制相对准确;氮磷供应比例共设置5个梯度,最高比例是最低比例的81倍,而供应量设置2个或3个梯度,最高水平是最低水平的3或9倍。土壤氮磷供应比例和供应量水平的不均衡设置,在一定程度上弱化了供应量的影响,因此植物叶片磷含量主要受氮磷供应比例影响。本研究考虑盐地碱蓬主要在盐碱地上分布,利用砂培模式会改变其自然生存状态,因此选用了原土栽培,利用水溶添加氮、磷的方法。同时,本研究在土壤氮磷供应比例和供应量上都设置3个梯度,比例和供应量的差距都为9倍。考虑到实验的可操作性,本研究利用土壤中速效磷含量设置氮磷供应比例和供应量的方法,虽然能反映土壤氮磷供应比例的梯度,但比例不能做到准确控制,其最高比例和最低比例相差不到9倍。本研究营养添加方式以及设置的氮磷供应比例梯度可能更接近于现实情况,在一定程度上强化了对氮磷供应量的影响。因此,本研究土壤氮磷供应比例和供应量对叶片氮含量的影响与以往研究的结论一致,对叶片磷含量的影响有差异。这也说明,在分析土壤氮磷供应比例和供应量对叶片氮、磷含量的影响时,需要对具体范围进行具体分析。

3.2 土壤氮磷供应比例和供应量与盐地碱蓬叶片碳、氮、磷比例的关系

土壤氮磷供应比例和供应量对盐地碱蓬叶片碳氮比和碳磷比都有显著影响,供应量的影响最大,变化规律与氮、磷含量的变化规律相反。由于其叶片碳含量受土壤氮磷供应比例和供应量影响较小,碳氮比与碳磷比的变化取决于叶片氮、磷含量的变化,这体现了植物叶片氮、磷含量对叶片碳氮比和碳磷比的主导作用,与自然环境下的研究结果一致^[30,33,34]。植物叶片碳氮比和碳磷比是其吸收营养同化碳能力的重要表征,在一定程度上反映了植物的营养利用效率和单位养分供应量所能达到的生产力^[35,36]。盐地碱蓬叶片碳氮比和碳磷比随着土壤中氮磷供应量的升高而减小,说明在高营养条件下,其竞争能力可能会相对减弱,反映了盐地碱蓬更适应相对贫瘠的环境条件^[19]。在各氮磷供应比例下,盐地碱蓬叶片碳氮比都有显著差异,随着土壤氮磷供应比例升高而减小;碳磷比只在高供应比例下显著增大,在中、低比例下差异并不显著,这也反映了盐地碱蓬在可利用磷丰富(相对氮而言)的情况下,仍能维持较高的吸收能力^[9]。叶片氮磷比受土壤氮磷供应比例的影响比供应量高,这与前人研究的结果一致^[7,9];在中、高氮磷供应量下,叶片氮磷比无显著差异,既体现了植物对氮、磷吸收模式的差异,也说明了磷在氮磷比中的主导地位^[30,37]。

3.3 不同生长阶段盐地碱蓬碳、氮、磷含量及比例的动态变化

植物叶片元素特征受其自身结构特点的显著影响,与生长规律关系密切^[23]。在不同的生长阶段,常表现出很大的差异,这在自然条件下的很多研究中已有报道^[12,22,38]。本研究结果表明,即使在设置9倍土壤氮磷供应比例和供应量的情况下,生长阶段对盐地碱蓬叶片碳、氮、磷元素特征的变化仍有较大贡献。生长阶段对盐地碱蓬叶片碳含量和氮磷比的变化影响最大,对氮、磷含量和碳氮比的影响较低。由此可见,即使在土壤氮磷比和供应量剧烈变化的条件下,盐地碱蓬自身的生长节律仍是控制其叶片碳、氮、磷元素变化的重要因素。盐地碱蓬叶片碳、氮、磷元素特征的变化仍会受到土壤氮磷供应条件的影响,高供应量下叶片氮含量和碳氮比与中、低供应量下有明显差异。叶片磷含量在各供应条件下都是在8月25日最

高,这与自然条件下盐地碱蓬的研究结果有所不同。在盐城滨海湿地^[39]和在本区的研究结果^[22]显示,叶片磷含量在各生长阶段无显著差异。研究结果的差异是受营养添加方式的影响所致,由于本研究设置的土壤氮磷供应量较高,营养添加分两次实施,第二次施肥在生长前期采样以后进行,且添加量为总添加量的2/3,从而使外部环境中可利用的磷大幅上升,使8月25日的叶片磷含量上升,显著高于其他两个时期。本研究还发现,盐地碱蓬叶片碳含量和碳磷比虽然受土壤氮磷供应条件影响,但无明显变化规律;在中供应量和低、高供应量下,叶片氮磷比变化存在显著差异。上述现象说明营养条件变化对植物碳、氮、磷元素特征变化的影响较为复杂,仍需进一步开展更为深入的研究。

4 结 论

在黄河三角洲滨海湿地,随着土壤氮磷供应量增大,盐地碱蓬叶片氮、磷含量显著升高,碳氮比和碳磷比显著减小,低氮磷供应量条件下叶片氮磷比显著低于中、高供应量条件下;随着土壤氮磷供应比例升高,叶片氮含量、碳氮比和氮磷比显著升高,磷含量降低,碳磷比在氮磷供应比例最大时才显著升高。

在本研究设置的9倍土壤氮磷供应比例和供应量条件下,盐地碱蓬生长阶段是影响其叶片碳、氮和磷化学计量特征的重要因子。

土壤氮磷供应条件的变化会影响盐地碱蓬叶片碳、氮、磷元素特征的变化,但无明显变化规律,说明营养条件变化对植物碳、氮、磷元素特征变化的影响较为复杂,仍需进一步开展更为深入的研究。

参 考 文 献

- [1]Peñuelas J, Sardans J, Albert Rivas-ubach, *et al.* The human-induced imbalance between C, N and P in Earth's life system[J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(1): 3-6.
- [2]Sturner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [3]曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(6): 1007-1019.
- [4]贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(1): 2-6.
- [5]Güsewell S, Bollens U. Composition of plant species mixtures grown at various N:P ratios and levels of nutrient supply[J]. *Basic & Applied Ecology*, 2003, **4**(5): 453-466.
- [6]Güsewell S. High nitrogen : phosphorus ratios reduce nutrient retention and second-year growth of wetland sedges[J]. *New Phytologist*, 2005, **166**(2): 537-550.
- [7]Güsewell S. Responses of wetland graminoids to the relative supply of nitrogen and phosphorus[J]. *Plant Ecology*, 2005, **176**(1): 35-55.
- [8]Venterink H O, Güsewell S. Competitive interactions between two meadow grasses under nitrogen and phosphorus limitation[J]. *Functional Ecology*, 2010, **24**(4): 877-886.
- [9]Güsewell S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, **164**(2): 243-266.
- [10]Zhang H Y, Wu H H, Yu Q, *et al.* Sampling date, leaf age and root size: implications for the study of plant C:N:P stoichiometry [J]. *Plos One*, 2013, **8**(4): e60360.
- [11]曾从盛, 张林海, 仝川. 闽江河口湿地芦苇和互花米草氮、磷养分季节动态[J]. *湿地科学*, 2009, **7**(1): 16-24.
- [12]Beardall J, Allen D, Bragg J, *et al.* Allometry and stoichiometry of unicellular, colonial and multicellular phytoplankton[J]. *New Phytologist*, 2009, **181**(2): 295-309.
- [13]刘洋, 张健, 陈亚梅, 等. 氮磷添加对巨桉幼苗生物量分配和 C:N:P 化学计量特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, **37**(10): 933-941.
- [14]Du E Z, Liu X Y, Fang J Y. Effects of nitrogen additions on biomass, stoichiometry and nutrient pools of moss *Rhytidium rugosum*, in a boreal forest in Northeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **188**(5): 166-171.
- [15]杨晓霞, 任飞, 周华坤, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应[J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(2): 159-166.
- [16]宁凯, 于君宝, 屈凡柱, 等. 黄河三角洲滨海地区植物生长季大气氮沉降动态[J]. *地理科学*, 2015, **35**(2): 218-223.
- [17]Mou X J, Sun Z G, Wang L L, *et al.* Nitrogen cycle of a typical *Suaeda salsa* marsh ecosystem in the Yellow River estuary[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(6): 958-967.
- [18]牟晓杰, 孙志高, 王玲玲, 等. 黄河口滨岸潮滩不同生境下翅碱蓬氮的累积与分配特征[J]. *湿地科学*, 2010, **8**(1): 57-66.
- [19]Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 1999, **30**(1): 1-67.
- [20]Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**(6): 1441-1450.
- [21]Qu F Z, Yu J B, Du S Y, *et al.* Influences of anthropogenic cultivation on C, N and P stoichiometry of reed-dominated coastal wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Geoderma*, 2014, **235**:

- 227-232.
- [22] Liu F D, Liu Y H, Wang G M, *et al.* Seasonal variations of C: N: P stoichiometry and their trade-offs in different organs of *Suaeda salsa* in coastal wetland of Yellow River Delta, China[J]. Plos One, 2015, **10**(9): e0138169.
- [23] Yuan Y F, Guo W H, Ding W J, *et al.* Competitive interaction between the exotic plant *Rhus typhina*, L. and the native tree *Quercus acutissima*, Carr. in Northern China under different soil N:P ratios[J]. Plant & Soil, 2013, **372**(1-2): 389-400.
- [24] 宾振钧, 张仁懿, 张文鹏, 等. 氮磷硅添加对青藏高原高寒草甸垂穗披碱草叶片碳氮磷的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(14): 4699-4706.
- [25] 黄菊莹, 余海龙, 陈卫民. 四翅滨藜叶片C、N、P生态化学计量特征对N添加的响应[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(7): 1421-1426.
- [26] 黄菊莹, 赖荣生, 余海龙, 等. N添加对宁夏荒漠草原植物和土壤C:N:P生态化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(11): 2850-2856.
- [27] 吴福忠, 包维楷, 吴宁. 外源施N对干旱河谷白刺花(*Sophora davidii*)幼苗生长、生物量及C、N、P积累与分配的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3817-3824.
- [28] 安卓, 牛得草, 文海燕, 等. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及C:N:P化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(8): 801-807.
- [29] Poorter L, Bongers F. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species[J]. Ecology, 2006, **87**(7): 1733-1743.
- [30] Shipley B, Lechowicz M J, Wright I, *et al.* Fundamental trade-offs generating the worldwide leaf economics spectrum[J]. Ecology, 2006, **87**(3): 535-541.
- [31] 牛得草, 李茜, 江世高, 等. 阿拉善荒漠区6种主要灌木植物叶片C:N:P化学计量比的季节变化[J]. 植物生态学报, 2013, **37**(4): 317-325.
- [32] Imsande J, Touraine B. N Demand and the regulation of nitrate uptake[J]. Plant Physiology, 1994, **105**(1): 3-7.
- [33] Schachtman D P, Reid R J, Ayling S M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell[J]. Plant Physiology, 1998, **116**(2): 447-453.
- [34] 杨阔, 黄建辉, 董丹, 等. 青藏高原草地植物群落冠层叶片氮磷化学计量学分析[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(1): 17-22.
- [35] 张文彦, 樊江文, 钟华平, 等. 中国典型草原优势植物功能群氮磷化学计量学特征研究[J]. 草地学报, 2010, **18**(4): 503-509.
- [36] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency[J]. American Naturalist, 1982, **119**(4): 553-573.
- [37] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences[J]. Science, 2004, **305**(5683): 509-513.
- [38] Vanni M J, Flecker A S, Hood J M, *et al.* Stoichiometry of nutrient recycling by vertebrates in a tropical stream: linking biodiversity and ecosystem function[J]. Ecology Letters, 2002, **5**(5): 285-293.
- [39] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片C、N、P化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(10): 1054-1061.

Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaves of *Suaeda Salsa* under Different Supply Conditions of Nitrogen and Phosphorus of Soils

RAN Yuenan^{1,4}, WANG Guangmei^{1,3}, YU Junbao^{1,2}, LU Mengxue⁵, LIU Xiaoling^{1,4}, REN Wei⁶

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, P.R.China; 2. College of Resource and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, P.R.China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta(Binzhou University), Binzhou 256600, Shandong, P.R.China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China; 5. College of Resources and Environmental Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, P.R.China; 6. College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, Inner Mongolia Autonomous Region, P.R.China)

Abstract: To explore the effects of relative supply of nitrogen and phosphorus of soils on the carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of leaves of *Suaeda salsa*, in Yellow River Delta coastal wetland, a field control experiment was conducted in the Yellow River Delta ecological research station of coastal wetland. Changes of carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and ratios of carbon, nitrogen and phosphorus were examined at three supply ratios (5, 15, and 45) of nitrogen and phosphorus combined with three levels of supply (geometric means of nitrogen and phosphorus supply) at three growth phases. The results showed that with supply ratio of nitrogen and phosphorus of soils increased, the nitrogen concentration, the ratio of carbon and nitrogen, carbon and phosphorus of leaves rose while the phosphorus concentration declined. The ratio of carbon and phosphorus had no significant change from low to medium supply ratio of nitrogen and phosphorus of soils but rose significantly in high supply ratio status. Even under the circumstance that being 9-folds differences of supply ratio of nitrogen and phosphorus and supply quantity of nitrogen and phosphorus of soils, growth phase of the plants also contributed most to the stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus.

Keywords: *Suaeda salsa*; supply ratio of nitrogen and phosphorus of soils; supply quantity of nitrogen and phosphorus of soils; growth phase; stoichiometric characteristics