

小叶碱蓬和白麻土壤—叶片生态化学计量学特征对不同盐生境的响应

杨欢^{1,2,3}, 何学敏^{1,2,3}, 热依汗·阿布力孜^{1,2,3},
李进宝^{1,2,3}, 胡其荣^{1,2,3}, 巴合别勒德^{1,2,3}

(1.新疆大学生态与环境学院, 新疆乌鲁木齐 830046; 2.绿洲生态教育部重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830046; 3.新疆精河温带荒漠生态系统教育部野外科学观测研究站, 新疆乌鲁木齐 830046)

摘要: [目的] 分析干旱区盐生植物生境土壤与叶片生态化学计量特征在不同盐生境下变化趋势及主要限制因子, 为研究干旱区盐生植物生长发育过程中养分限制因子和适应机制提供基础研究资料, 同时为荒漠植物的生态保育和恢复提供参考。[方法] 选取艾比湖湿地国家级自然保护区稀盐盐生植物小叶碱蓬 (*Suaeda microphylla*) 和拒盐盐生植物白麻 (*Apocynum pictum*), 测定其生境土壤 pH 值、含水量、盐分、速效磷、铵态氮、有机碳、全氮、全磷以及植物叶片有机碳、全氮、全磷, 分析两种植物叶片与生境土壤生态化学计量特征的关系, 探究植物叶片生态化学计量特征的土壤限制因子。[结果] ①随着盐分增加, 两种植物生境土壤磷下降, 有机碳、氮及化学计量比呈上升趋势, 土壤养分含量受盐渍化程度影响显著; ②两种植物叶片氮受土壤盐分影响显著, 随盐分降低呈下降趋势, 与土壤氮含量的变化趋势一致, 叶片 N/P 平均值均小于 14, 表明研究区两种植物均受土壤氮含量限制; ③RDA 分析表明, 影响小叶碱蓬叶片生态化学计量的主要因子为土壤 pH 值 ($p=0.034$)、含水量 ($p=0.002$), 而白麻主要受土壤磷 ($p=0.002$)、铵氮 ($p=0.048$) 影响。[结论] 不同类型盐生植物在土壤—植物生态化学计量特征耦合关系上存在差异。稀盐盐生植物小叶碱蓬主要受土壤 pH 值、含水量的影响, 拒盐盐生植物白麻主要受土壤磷、铵态氮含量影响。

关键词: 艾比湖; 生态化学计量; 盐生植物; 盐胁迫; 限制因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0045-08

中图分类号: S718.53

文献参数: 杨欢, 何学敏, 热依汗·阿布力孜, 等. 小叶碱蓬和白麻土壤—叶片生态化学计量学特征对不同盐生境的响应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 45-52. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.006; Yang Huan, He Xuemin, Reyihan·Abulizi, et al. Characteristics and response of soil-leaf ecological stoichiometry of *Suaeda microphylla* and *Apocynum pictum* under different salt habitats [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 45-52.

Characteristics and Response of Soil-leaf Ecological Stoichiometry of *Suaeda Microphylla* and *Apocynum Pictum* Under Different Salt Habitats

Yang Huan^{1,2,3}, He Xuemin^{1,2,3}, Reyihan·Abulizi^{1,2,3}, Li Jinbao^{1,2,3}, Hu Qirong^{1,2,3}, Bahebe Lede^{1,2,3}

(1.College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi,

Xinjiang 830046, China; 2.Key Laboratory of Oasis Ecology, ministry of Education,

Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 3.Xinjiang Jinghe Observation and

Resarch Station of Temperate Desert Ecosystem, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 833300, China)

Abstract: [Objective] The change trend and main limiting factors of the ecological stoichiometric characteristics of soil and leaves in different saline habitats were analyzed in order to provide basic research data for the study of nutrient limiting factors and adaptation mechanisms in the growth and development of halophytes in arid areas, and to provide references for ecological conservation and restoration of desert plants. [Methods]

收稿日期: 2022-11-09

修回日期: 2023-01-02

资助项目: 自治区研究生科研创新项目“艾比湖不同盐生境下三种盐生植物生物移盐能力评估”(XJ2022G066); 国家自然科学基金“荒漠胡杨林‘盐肥岛效应’下的土壤呼吸及养分盐分协同调控机制”、“再生水和清水灌溉组合模式对梭梭幼苗生理生态影响机理研究”(32101360; 31760168); 新疆维吾尔自治区中央引导地方科技发展资金项目(ZYYD2023A03)

第一作者: 杨欢(1997—), 女(汉族), 湖北省随州市人, 硕士研究生, 研究方向为盐生植物修复盐渍土。Email: yh0208@stu.xju.edu.cn。

通信作者: 何学敏(1986—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区奎屯市人, 博士, 副教授, 主要从事荒漠植物物质循环研究。Email: hxm@xju.edu.cn。

The euhalophyte *Suaeda microphylla* and the pseudohalophyte *Apocynum pictum* were selected from Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve. Soil pH value, water content, salinity, available phosphorus, ammonium nitrogen, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, plant leaf organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus were measured in the selected halophytes. The relationship between the ecological stoichiometry of the leaves of the two plants and the soil of their habitats was analyzed to investigate the soil limiting factors on the ecological stoichiometry of plant leaves. [Results] ① Soil phosphorus decreased with increasing salinity, organic carbon, nitrogen, and stoichiometric ratio showed an increasing trend. Salinization degree had a significant effect on soil nutrient content; ② Leaf nitrogen for the two plants was significantly affected by soil salt, and showed a decreasing trend with decreasing soil salt content, which was consistent with the change trend of soil nitrogen content. The mean value of leaf N/P was less than 14, indicating that both plants in the study area were limited by soil nitrogen content. [Conclusion] There were differences in the coupling relationship of soil-plant ecological stoichiometric characteristics among different types of halophytes. The euhalophyte *S. microphylla* was mainly affected by soil pH value and water content, while the pseudohalophyte *A. pictum* was mainly affected by soil phosphorus and ammonium nitrogen content.

Keywords: Ebinur Lake; ecological stoichiometry; saline plants; salt stress; limiting factors

目前,土壤盐渍化问题在全球范围内十分严峻,约有 60% 可利用土地受到盐渍化威胁^[1]。中国盐渍土面积占全球盐渍土的 10%,其中新疆是中国盐渍土最严重的地区之一^[-2-3]。盐碱胁迫会对植物产生离子毒害、渗透损伤及氧化胁迫,并抑制植物光合作用,最终影响植物对养分的吸收^[4]。植物碳、氮、磷含量状况可用来评估养分吸收利用程度,其比值可用作确定植物生长发育过程中的限制性因子^[-5-9]。植物从土壤中吸收养分用于生长发育,再以凋落物的形式归还于土壤,这些物质和元素的循环、转化和积累,维持着生态系统良性发展,叶片作为植物体内能量交换和光合作用的主要器官,也是生物地球化学循环中重要的元素库^[-10-13]。植物叶片化学计量特征主要受气候、土壤因子和植物物种差异影响,土壤中一些元素匮乏时,可能会导致植物叶片相应元素含量降低,从而影响植物生长发育^[-14-16]。叶片碳、氮、磷化学计量特征可以反映植物养分循环过程,其营养成分浓度是影响生态系统功能和动态的关键,对预测生态系统的功能和动态具有重要意义^[-17]。

藜科植物小叶碱蓬(*Suaeda microphylla*)和夹竹桃科白麻(*Apocynum pictum*)是新疆地区常见的荒漠盐生植物,分别属于稀盐盐生植物和拒盐盐生植物,作为当地的优势种植物,两种植物能够在盐浓度较高的环境中生长并完成生活史,且在干旱区极端生态环境中已形成了独特的耐干旱、耐盐碱适应机制。穆驰等^[-18]对盐生植物岩兰草的研究以及王雷等^[-19]对异子蓬的研究均表明土壤适当的盐分浓度可促进盐生植物生长发育,证明了盐生植物对盐渍环境有很强的适应能力。干旱区不同类型盐生植物在不同盐生境下叶片碳、氮、磷生态化学计量特征变化趋势及其主

要受哪些土壤环境因子影响的相关研究仍然较少^[-20]。

本研究选取艾比湖湿地国家级自然保护区两种典型盐生植物小叶碱蓬和白麻为研究对象,测定盐生植物叶片的碳、氮、磷含量以及植物生境土壤的各项理化性质指标,探讨以下问题:①不同盐生境下两种类型植物叶片生态化学计量特征与土壤养分元素之间存在的关系;②盐生植物叶片生长发育受哪些土壤环境因子限制? 以期为研究干旱区盐生植物生长发育过程中养分限制因子和适应机制提供基础参考资料,同时为荒漠植物的生态保育和恢复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆艾比湖湿地国家级自然保护区(东经 82° 33' 47"—83° 53' 21",北纬 44° 31' 05"—45° 09' 35"),该区域处于内陆干旱区及阿拉山口大风通道区,气候极端干旱,降水稀少,属典型温带大陆性干旱气候。极端最高气温 44 °C,最低气温 -33 °C,年平均气温 6.6~7.8 °C,年平均降水量 100 mm,年平均蒸发量 1 600 mm。土壤类型为灰漠土、灰棕漠土和风沙土,隐域性土壤以盐(盐渍化)土壤为主,草甸土、沼泽土和棕钙土为辅。艾比湖地区位于准噶尔盆地西南部最低洼地和水盐聚集中心的特殊地理位置,使该地形成盐湖、沼泽、滩涂、石漠、沙漠、盐漠等多种地类,植被被分为旱生、超旱生、沙生、盐生、湿生、水生等多种植物群落。流域植物以干旱荒漠植物为主,其中典型的植物主要有怪柳(*Tamarix chinensis*)、胡杨(*Populus euphratica*)、芦苇(*Phragmites australis*)、白麻(*Apocynum pictum*)、碱蓬(*Suaeda salsa*)、小叶碱蓬(*Suaeda microphylla*)等。

1.2 样方选择及试验设计

于2021年7—8月在艾比湖沿垂直于阿奇克苏河以北设立1条100 m×3 600 m的样带,从中选取2个100×100 m的样地,并将2个样地划分为400个5 m×5 m的样方,共计800个样方,其中含有小叶碱蓬的样方有52个,含有白麻的样方有203个。采用3点取样法采集0—30 cm的土样,一部分放在铝盒中称取湿重,另一部分放入自封袋中待风干后测定土壤理化性质,并摘取样方中小叶碱蓬和白麻的叶片放置在信封袋中,采集植物样品255个,土壤样品255个。通过实验室试验测定255个土壤样品含盐量,采用王水献等^[21]针对新疆硫酸盐—氯化物型盐渍化土壤的盐渍化划分等级标准(表1),以本研究植物生境土壤含盐量划分为重盐、中盐、低盐3个盐分梯度。

表1 硫酸盐—氯化物型盐渍土盐渍化等级划分标准

Table 1 Classification criteria for salinization of sulfate-chloride type saline soils

等级	总盐含量	盐渍化程度
5	<2	极轻
4	2.0~3.0	轻度
3	3.0~6.0	中度
2	6.0~10	重度
1	>10	盐土

1.3 测定方法

1.3.1 理化性质的测定 土壤pH值使用雷磁PHS-25型pH计测定,参考《土壤农化分析》^[22],土壤含水量(SWC)通过土壤湿重和干重测定,土壤水溶性盐(SA)含量采用水土比例1:5提取浸提液电导法,土壤速效磷(AP)测定采用钼锑抗比色法,土壤有机碳(soil SOC)和植物叶片有机碳(leaf SOC)含量测定采

用重铬酸钾氧化—容量法,土壤全磷(soil TP)和植物叶片全磷(leaf TP)测定采用钼锑抗比色法,土壤全氮(soil TN)和植物叶片全氮(leaf TN)采用凯式定氮法,土壤铵态氮(AN)采用靛酚蓝比色法。

1.3.2 数据分析 采用Excel 2021,SPSS 25.0软件对不同盐生境土壤、植物各指标数据进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同盐生境下土壤环境因子、植物叶片生态化学计量特征差异显著性;使用双因素方差分析(two-way ANOVA)比较分析植物类型和土壤盐渍化程度两种因素作用下土壤环境因子、植物叶片生态化学计量特征的差异显著性;利用Canoco 5.0软件以土壤环境因子为解释变量,植物叶片生态化学计量作为物种变量进行冗余分析(RDA);绘图使用Origin 2023完成。

2 结果与分析

2.1 小叶碱蓬和白麻生境特征及土壤生态化学计量分析

通过统计分析(表2)可知,随着生境土壤盐分提高,两种盐生植物生境土壤pH值、含水量、速效磷均呈现增长趋势,这与艾比湖流域的气候条件有关,水分不断由地下蒸发上升,在盐随水移的作用下形成土壤表层盐渍化,因此在研究区盐分高的地方,含水量、pH值也高。3种盐生境下,小叶碱蓬土壤速效磷、铵氮无显著差异($p>0.05$),而白麻在低盐生境下土壤速效磷、铵氮显著低于重盐、中盐生境($p<0.05$)。双因素方差表明土壤盐渍化程度对植物生境土壤pH值、含水量、速效磷均有极显著影响($p<0.001$),对土壤铵态氮含量具有显著影响($p<0.05$),而植物类型和盐渍化程度交互作用对土壤pH值、含水量、速效磷、铵态氮影响不显著。

表2 两种盐生植物生境土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of habitat soils of two species of saline plants

植物	盐渍化程度	pH值	SWC/(g·kg ⁻¹)	AP/(mg·kg ⁻¹)	AN/(mg·kg ⁻¹)
小叶碱蓬	重盐	8.14±0.34 ^a	13.5±2.53 ^a	33.62±13.07 ^a	2.38±0.96 ^a
	中盐	7.96±0.32 ^a	9.52±4.4 ^b	26.08±16.18 ^a	2.47±1.5 ^a
	低盐	7.63±0.3 ^b	7.36±5.7 ^b	19.36±30.52 ^a	2.03±0.77 ^a
白麻	重盐	8.2±0.3 ^a	13.22±3.59 ^a	35.86±14.55 ^a	2.67±1.25 ^a
	中盐	7.96±0.35 ^b	11.07±4.76 ^b	31.56±19.16 ^a	2.33±1.12 ^a
	低盐	7.69±0.3 ^c	5.86±5.46 ^c	12.98±21.63 ^b	1.72±0.57 ^b
two-way ANOVA	Plant	ns	ns	ns	ns
	SSD	***	***	***	*
	Plant×SSD	ns	ns	ns	ns

注:①不同小写字母表示不同盐生境下同种植物指标差异显著($p<0.05$)。②*,**,***分别代表 $p<0.05$, $p<0.01$, $p<0.001$;ns表示无显著性影响。③SWC为土壤含水量;AP为土壤速效磷;AN为土壤铵态氮;Plant为植物;SSD为土壤盐渍化程度;Plant×SSD为植物类型和土壤盐渍化程度交互作用。下同。

土壤的养分往往决定植物的生长状况。由表 3 可见,随着盐分的增加,两种植物生境土壤有机碳、氮、C/N、C/P、N/P 均呈上升趋势,相反,土壤磷含量随盐分增加而下降。小叶碱蓬在重盐生境下土壤有机碳显著高于低盐生境 ($p < 0.05$);重盐生境下土壤氮显著高于中盐、低盐生境 ($p < 0.05$);低盐生境下土壤磷显著高于重盐、中盐生境 ($p < 0.05$);土壤 C/N 对盐分梯度的响应同有机碳相似,而 C/P、N/P 随盐分增加而上升,且在 3 种盐生境下均呈现出显著差异 ($p < 0.05$)。白麻在低盐生境下土壤有机碳显著低于重盐、中盐生境 ($p < 0.05$);土壤氮、C/P、N/P 在 3 种

盐分梯度生境均存在显著差异 ($p < 0.05$);土壤磷随盐分增加而降低,且在 3 种盐分梯度下均存在显著差异 ($p < 0.05$);重盐生境下土壤 C/N 显著高于低盐生境 ($p < 0.05$)。由此表明,小叶碱蓬和白麻生长区土壤有机碳、氮、磷对盐分梯度敏感,在重盐和中盐生境下,白麻土壤磷对盐分梯度变化响应更明显,在 3 种盐生境下均存在显著差异 ($p < 0.05$),两种植物生境土壤 C/N、C/P、N/P 在不同盐分梯度下,变化趋势保持一致。双因素方差分析表明,土壤盐渍化程度对植物生境土壤碳、氮、磷及 C/P、N/P 比具有极显著影响 ($p < 0.001$),对土壤 C/N 有较显著影响 ($p < 0.01$)。

表 3 两种盐生植物不同生境下土壤碳、氮、磷含量及化学计量比差异性分析

Table 3 Differential analysis of soil C, N and P contents and stoichiometric ratios in different habitats of two saline plants

植物	盐渍化程度	SOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	C/N	C/P	N/P
小叶碱蓬	重盐	12.42±6.8 ^a	2.19±0.48 ^a	1.22±0.24 ^b	5.6±2.81 ^a	10±4.73 ^a	1.85±0.44 ^a
	中盐	8.24±6.23 ^{ab}	1.8±0.74 ^{ab}	4.17±5.92 ^b	4.29±2.3 ^{ab}	6.05±5.31 ^b	1.24±0.83 ^b
	低盐	4.31±3.68 ^b	1.43±0.83 ^b	9.76±8.48 ^a	3.18±2.62 ^b	2.22±2.85 ^c	0.52±0.64 ^c
白麻	重盐	9.12±4.49 ^a	2.06±0.64 ^a	1.24±0.21 ^c	4.52±1.95 ^a	7.32±3.28 ^a	1.68±0.51 ^a
	中盐	7.36±4.97 ^a	1.81±0.68 ^b	2.54±3.05 ^b	4.07±2.3 ^{ab}	5.61±4.31 ^b	1.34±0.75 ^b
	低盐	4.84±5.99 ^b	1.31±0.6 ^c	7.96±5.71 ^a	3.26±2.85 ^b	2.57±4.52 ^c	0.48±0.6 ^c
two-way ANOVA	Plant	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	SSD	***	***	***	**	***	***
	Plant×SSD	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注: SOC 为有机碳; TP 为全磷; TN 为全氮。下同。

2.2 不同盐生境下两种盐生植物叶片碳、氮、磷含量及化学计量比特征

由图 1 可知,小叶碱蓬下叶片有机碳含量随盐分增长表现为先增高后降低,但在 3 种盐分梯度下无显著性差异 ($p > 0.05$),同样,叶片磷在 3 种盐分梯度下也无显著性差异,叶片氮在低盐生境下显著低于重盐和中盐生境 ($p < 0.05$);重盐生境下叶片 C/N 显著低于低盐生境 ($p < 0.05$),且随着盐分增加叶 C/N 下降,叶 C/P 在盐分梯度下差异不显著 ($p > 0.05$),叶 N/P 在低盐生境 (8.72) 下显著低于重盐 (10.47)、中盐 (10.36) 生境。由此说明,小叶碱蓬 C/N 在 3 种盐分梯度下保持相对稳定。白麻叶片有机碳、氮、磷含量表现为重盐 > 中盐 > 低盐,叶片氮含量随盐分增加呈增长趋势,在重盐生境下显著高于中盐和低盐生境 ($p < 0.05$),叶片磷随盐分增加而增长,在低盐生境显著低于重盐和中盐生境 ($p < 0.05$);叶 C/N、C/P、N/P 在 3 种盐分梯度下均无差异显著 ($p > 0.05$)。由此可见,白麻 C/N、C/P、N/P 在 3 种盐分梯度下保持相对稳定。

在 3 种盐分梯度下小叶碱蓬叶片有机碳明显低于白麻,两植物间叶片氮无明显差异,低盐生境下小

叶碱蓬叶片磷高于白麻;小叶碱蓬叶片 C/N、C/P 在 3 种盐生境下均低于白麻,叶片 N/P 在低盐生境中明显低于白麻。双因素方差分析表明,植物类型对叶片有机碳含量、C/N、C/P 影响极显著 ($p < 0.001$),对叶片 N/P 影响显著 ($p < 0.05$),盐渍化程度对叶片氮含量有显著影响 ($p < 0.05$)。

2.3 两种植物叶片碳、氮、磷及化学计量比与土壤环境因子的关系

本研究分别对小叶碱蓬和白麻叶片生态化学计量特征与生境土壤环境因子进行冗余分析,其中小叶碱蓬 4 轴共解释了 20.62% 的变异,白麻 4 轴共解释了 8.55% 的变异。两种植物前 2 轴累计解释量分别达到 88.89%, 95.20%, 说明前 2 轴能较好的反映植物生境土壤环境因子与叶片生态化学计量之间的关系。结果表明,在第 I, II 轴小叶碱蓬 (图 2a) 土壤环境因子中 pH 值、含水量和磷的箭头连线最长,说明这 3 个因子对小叶碱蓬叶片生态化学计量变异起到了较好的解释,在第 I, II 轴白麻 (图 2b) 土壤含水量、铵态氮和磷的箭头连线最长,说明这 3 个因子对白麻叶片生态化学计量变异起到了较好的解释。

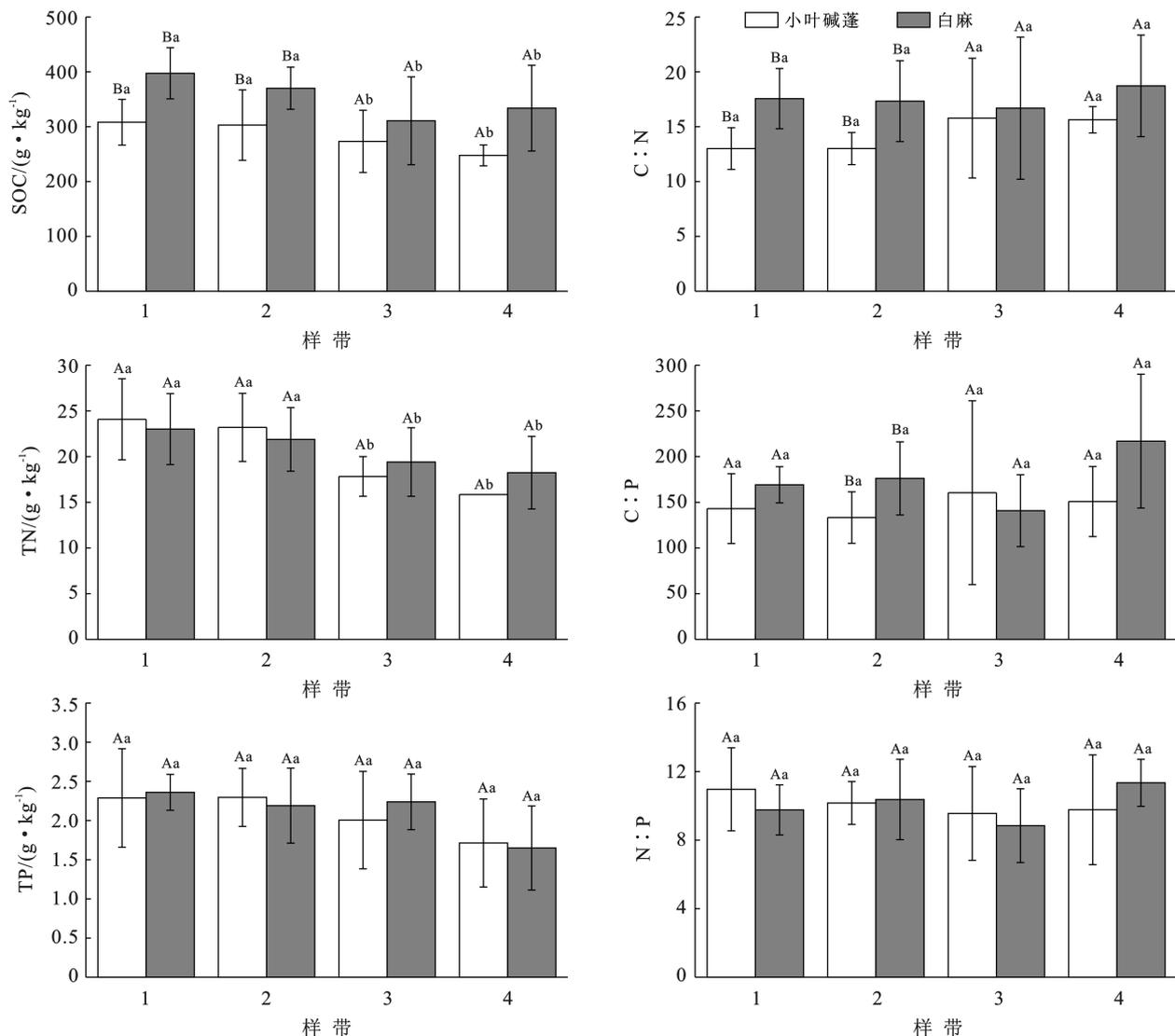
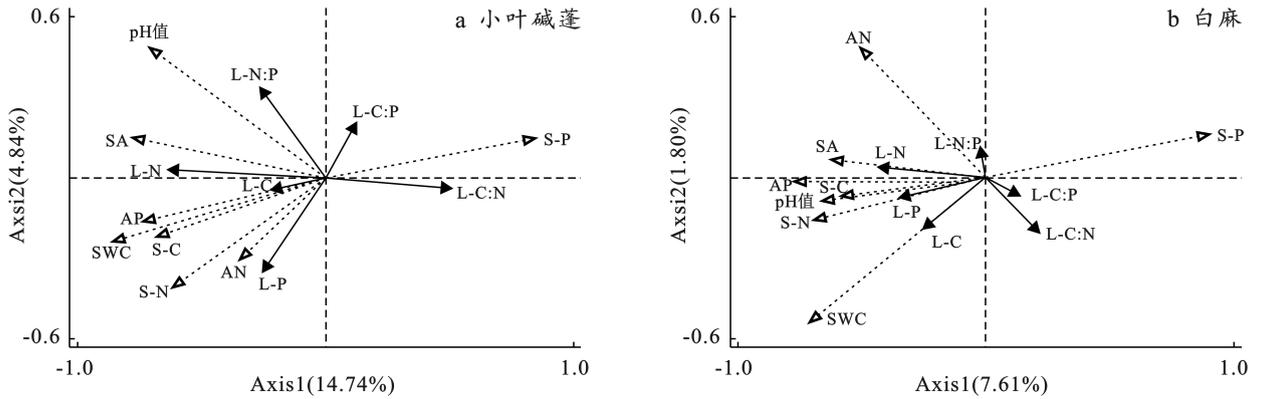


图 1 两种盐生植物碳、氮、磷含量及化学计量比

Fig.1 C, N, P contents and stoichiometric ratios of two saline plants

图 2 为两种植物叶片生态化学计量特征与土壤环境因子关系的二维排序图。除生境土壤磷含量,两盐生植物生境土壤环境因子与叶片有机碳、氮、磷呈正相关,其中叶片氮与这些土壤环境因子的相关性最高,叶片有机碳相关性最低,植物叶 C/P, N/P 均与土壤环境因子相关性较低。两植物叶片生态化学计量对土壤环境因子的响应存在一定差异,土壤环境因子对小叶碱蓬叶片有机碳、磷含量影响较小,白麻与之相反,均表现出较大的相关性,同时,土壤环境因子与小叶碱蓬叶片 C/N 相关性较大,白麻则较小。由此表明,白麻叶片营养元素均与土壤环境因子保持较大相关性,小叶碱蓬仅有叶片氮对土壤环境因子的变化更敏感,白麻叶片生态化学计量在土壤环境因子共同作用下,相对更稳定。

由表 4 蒙特卡洛检验结果可知,土壤环境因子对小叶碱蓬叶片生态化学计量解释率表现为:SWC > pH 值 > SOC > TN > SA = TP = AN > AP, 土壤 pH 值 ($p = 0.034$)、SWC ($p = 0.002$) 与叶片生态化学计量呈显著相关。土壤环境因子对白麻叶片生态化学计量解释率表现为:TP > AN > SWC > TN > AP > SA = SOC > pH 值, 土壤 TP ($p = 0.002$), AN ($p = 0.048$) 与叶片生态化学计量呈显著相关。结果表明,小叶碱蓬叶片生态化学计量与土壤养分之间的相关性不显著,与 pH 值、含水量相关性显著,说明土壤养分对小叶碱蓬叶片生态化学计量并未起主要作用,小叶碱蓬主要受土壤 pH 值、含水量的影响,而白麻叶片与土壤养分 (TP, AN) 相关性更显著,说明白麻更易受土壤磷、铵态氮含量影响。



注:①SA 为土壤含盐量;SC 为土壤有机碳含量;SN 为土壤氮含量;SP 为土壤磷含量。②虚线带空心箭头为植物叶片生态化学计量;实线带实心箭头为土壤环境因子。下同。

图 2 两种盐生植物叶片生态化学计量与土壤环境因子的冗余分析

Fig.2 Redundancy analysis of leaf ecological stoichiometry and soil environmental factors of two saline plants

表 4 土壤环境因子蒙特卡罗检验结果

Table 4 Monte Carlo test of edaphic factor of soil environmental factors

土壤环境因子	小叶碱蓬				白麻			
	解释率/%	贡献率/%	F	P	解释率/%	贡献率/%	F	P
pH 值	5	22	2.9	0.034	0.1	1.4	0.4	0.858
SWC	11.3	49.6	6.2	0.002	1	10.2	1.7	0.09
SA	0.9	4.1	0.5	0.624	0.2	4.2	0.8	0.742
SOC	1.5	6.8	0.9	0.476	0.2	2.5	0.5	0.662
TN	1.3	5.9	0.8	0.52	0.7	7.1	1.6	0.216
TP	0.9	4.1	0.3	0.636	6.2	62.8	13.4	0.002
AP	0.8	3.5	0.4	0.696	0.3	2.7	0.6	0.62
AN	0.9	4.1	0.5	0.642	1.1	11.4	2.4	0.048

3 讨论

3.1 3 种盐分梯度下小叶碱蓬和白麻生境土壤生态化学计量特征

本研究中,盐分对两种植物生境土壤碳、氮、磷生态化学计量特征影响显著,其中土壤有机碳、氮随着盐分梯度由高到低依次减少,适当提高土壤含水量及盐分,有机质增高,土壤透气透水性改善,氮含量就越高^[23]。土壤磷含量随着盐分下降明显增高,这可能是土壤含水量、pH 值降低,导致土壤磷素的有效性及磷的养分循环受影响,也可能和干旱区气候因子有关,由于水热条件对土壤风化速率和磷素流失的限制^[24-26]。

土壤 C/N, C/P 可以反映土壤有机质的分解与积累,通常被用作预测土壤分解速率^[27],土壤 N/P 可反映植物生长发育过程中土壤养分元素的供应状况,可用于确定养分限制的阈值^[20,28]。本研究中两种植物生境土壤 C/N, C/P, N/P 随着盐分增加而上升,表现为重盐>中盐>低盐,且土壤 C/P, N/P 在 3 种盐分梯度下均存在显著差异($p < 0.05$),可能是有机碳和氮含量增加而磷含量降低所导致,同时,说明两种盐

生植物生境表层土壤稳定性较差^[29]。

3.2 3 种盐分梯度下两种盐生植物叶片生态化学特征

碳、氮、磷是植物生长发育过程中的重要元素^[30]。本研究两种盐生植物叶片有机碳、氮、磷含量随着水盐含量增高,不同程度的积累,可能和它们较强的耐盐碱能力有关,具有独特的耐盐机制,盐分的适度增加也会使植物光合器官增加有机碳、氮、磷含量。叶片有机碳含量更易受植物类型影响,表明不同植物对碳的吸收和利用具有一定差异性,叶片氮含量则更易受生境土壤盐分影响。小叶碱蓬叶片氮在重盐生境下显著高于中盐、低盐生境($p < 0.05$),可能是植物为促进叶片光合作用,自主适应提高叶片氮含量。在 3 种盐分梯度下小叶碱蓬叶片有机碳均显著低于白麻,这和许文静^[31]稀盐盐生植物叶片有机碳含量低于拒盐盐生植物的研究结果一致。

植物生长发育通过调整碳、氮、磷化学计量比来适应自身生长速率的改变,植物的 C/N 和 C/P 一定程度上能体现植物对养分的利用效率,并估算植物养分限制^[32-34]。本研究发现小叶碱蓬在重盐生境下叶片 C/N 显著低于低盐生境($p < 0.05$),叶 N/P 在重

盐、中盐生境下显著高于低盐($p < 0.05$),可能是低盐生境土壤氮含量较低,导致小叶碱蓬在低盐生境表现出受氮的限制。白麻叶片 C/N, C/P, N/P 在 3 种盐生境下均无显著差异,可能白麻长期在水盐胁迫下已经形成了一套相对稳定的适应对策。两种植物叶生态化学计量比表现出来的差异,这体现出不同类型盐生植物对盐胁迫响应方式不同。

3.3 艾比湖流域两种盐生植物叶片碳、氮、磷计量水平及限制性

研究区内小叶碱蓬叶有机碳、氮、磷含量平均值分别为 288.70, 21.8, 2.24 g/kg, 白麻叶有机碳、氮、磷含量平均值分别为 363.71, 22.17, 2.14 g/kg, 两种植物叶片有机碳含量均远低于艾比湖流域植物叶片平均值(428.60 g/kg)和全球植物叶片平均值(464 g/kg), 说明研究区小叶碱蓬和白麻光合器官有机化合物含量比较低, 两种植物叶氮、磷平均值高于艾比湖流域植物叶片平均值(20.52, 0.93 g/kg), 而低盐生境下小叶碱蓬叶氮(19.22 g/kg)略低于艾比湖流域植物, 可能和土壤水分含量有关, 水分会影响沙漠土壤 pH 值及养分的有效性, 从而限制植物对氮的吸收和积累^[26]。

Koerselman 研究表明, 植物生长受 N/P 限制阈值为 14, 16。当 N/P < 14 时, 群落水平上的植物生长主要受氮限制, 当 N/P > 16 时, 植物生长主要受磷限制^[35]。研究区内小叶碱蓬叶和白麻 N/P 平均值分别为 10.06, 10.71, 均小于 14, 且显著低于艾比湖自然保护区 20 种典型植物叶片 N/P 平均值(25.64)^[36], 说明研究区两种植物生长更易受氮的限制, 其原因可能是两种植物叶片具有较高的磷含量, 导致叶 N/P 较低。

3.4 影响两种盐生植物叶片生态化学计量的主要土壤环境因子

土壤养分是植物群落营养元素的主要来源, 其中碳、氮、磷是植物生长发育及物质循环必需的化学元素^[37-38]。而植物的碳、氮、磷及化学计量比也被证实受环境因子影响^[39]。本研究表明, 土壤 pH 值、含水量是影响小叶碱蓬叶片生态化学计量的驱动因子, 白麻叶片化学计量主要受土壤磷、铵态氮影响。

两种植物叶片生态化学计量受主要影响的土壤环境因子不同, 随着土壤水分、pH 值的增加, 小叶碱蓬叶片氮、磷含量以及 C/N, N/P 呈现了一定的变化规律, 说明土壤含水量、pH 值的增加促进了小叶碱蓬对氮元素的吸收, 同时, 小叶碱蓬属于稀盐植物, 通过叶肉质化在体内储存大量水分稀释盐浓度, 使其不受毒害, 因此小叶碱蓬更易受到土壤含水量的限制。植物的氮含量主要来源于土壤的有效氮, 随着土壤铵态氮的增加白麻叶片氮含量显著增加($p < 0.05$), 土壤

磷与叶片有机碳、氮、磷负相关性较高, 这可能是干旱区土壤类型(碱性土壤)、水热条件影响磷素的有效性, 影响植物吸收利用, 因此, 土壤氮和磷含量是影响艾比湖地区白麻生长的主要影响因子。

4 结论

(1) 随着生境土壤盐分梯度由高到低, 两种植物生境土壤有机碳、氮、C/N, C/P, N/P 呈下降趋势, 相反, 土壤磷随盐分的升高而降低。土壤养分含量受盐渍化程度影响显著, 受植物类型和盐渍化程度交互作用影响不显著。

(2) 本研究两种植物叶片有机碳受植物类型影响极显著, 远低于艾比湖流域植物叶片平均值, 叶片有机化合物含量较低。两种植物叶片氮受土壤盐分影响显著, 随盐分降低呈下降趋势, 与土壤氮的变化趋势一致, 同时叶 N/P 平均值均小于 14, 远低于艾比湖保护区叶 N/P 平均值, 土壤氮是两种植物最主要的限制因子。

(3) 两种植物叶片生态化学计量特征受多种土壤环境因子的影响, 小叶碱蓬主要受土壤 pH 值、含水量的影响, 白麻主要受土壤磷、铵态氮含量影响。两种植物叶片生态化学计量特征主要土壤影响因子不同, 体现出同一生态系统中不同类型植物应对生境变化的叶片元素含量差异。

[参 考 文 献]

- [1] 柳鑫鹏, 臧淑英, 智刚, 等. 盐碱土耐盐碱细菌筛选及其植物促生能力研究[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 567-576.
- [2] He Kang, He Guo, Wang Congpeng, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes miscanthus growth in a coastal saline-alkali soil [J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103674.
- [3] 魏云杰, 许模. 新疆土壤盐渍化成因及其防治对策研究[J]. 地球与环境, 2005, 33(S1): 593-597.
- [4] Liu Guangming, Zhang Xuechen, Wang Xiuping, et al. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 237: 274-279.
- [5] 赵培, 王群盈, 刘志鹏. 秦岭山区沟渠植物和土壤 CNP 生态化学计量特征[J]. 山地学报, 2017, 35(5): 753-760.
- [6] 卞福花, 吴秋堂, 吴梦迪, 等. 不同水盐生境下芦苇湿地植被及土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 385-396.
- [7] Yan Kai, Duan Changqun, Fu Denggao, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of plant communities in geochemically phosphorus-enriched soils in a subtropical mountainous region, SW China [J]. Envi-

- ronmental Earth Sciences, 2015, 74(5):3867-3876.
- [8] 邓婷婷, 招礼军, 朱栗琼, 等. 广西喀斯特区 3 种核桃土壤、叶片碳氮磷生态化学计量特征[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(8):33-40.
- [9] Chen Yahan, Han Wenxuan, Tang Luying, et al. Leaf nitrogen and phosphorus concentrations of woody plants differ in responses to climate, soil and plant growth form [J]. *Ecography*, 2013, 36(2):178-184.
- [10] 苏宇航, 宋晓倩, 郑晶文, 等. 呼伦贝尔盐生藜科植物不同器官 C、N、P 生态化学计量特征及其与土壤因子的关系[J]. 植物研究, 2022, 42(5):910-920.
- [11] 李宗泰, 战丽杰, 梁燕, 等. 山东省赤松林叶片化学计量特征及其与林分特征和土壤养分的关系[J]. 中国农学通报, 2022, 38(22):20-30.
- [12] Fan Houbao, Wu Jianping, Liu Wenfei, et al. Linkages of plant and soil C: N: P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. *Plant and Soil*, 2015, 392(1):127-138.
- [13] 汪宗飞, 郑粉莉, 黄土高原子午岭地区人工油松林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(19):6870-6880.
- [14] 陈昊轩, 刘欣蕊, 孙天雨, 等. 太白山栎属树种叶片生态化学计量特征沿海拔梯度的变化规律[J]. 生态学报, 2021, 41(11):4503-4512.
- [15] 丁凡, 廉培勇, 曾德慧. 松嫩平原草甸三种植物叶片 N、P 化学计量特征及其与土壤 N、P 浓度的关系[J]. 生态学杂志, 2011, 30(1):77-81.
- [16] 郁国梁, 王军强, 马紫荆, 等. 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的季节动态及其影响因素[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(5):9-18.
- [17] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. *Nature*, 2000, 408(6812):578-580.
- [18] 穆驰, 王曙光. 西北干旱区岩兰草对不同盐分浓度胁迫的响应特征研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2019, 4(8):43-50.
- [19] 王雷, 姜黎, 田长彦. 盐分对异子蓬异型种子植株生长和矿质营养的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3):510-514.
- [20] 龚雪伟, 吕光辉, 马玉, 等. 艾比湖流域 2 种典型荒漠盐生植物冠下土与叶片的生态化学计量特征[J]. 林业科学, 2017, 53(4):28-36.
- [21] 王水献, 董新光, 杜卫东. 新疆阿瓦提灌区土壤盐渍化现状及特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5):170-175.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 张雪梅. 干旱区盐生植物的土壤氮素特征研究[D]. 新疆乌鲁木齐: 新疆大学, 2011.
- [24] Li Wenjing, Li Yan, Lv Jie, et al. Rhizosphere effect alters the soil microbiome composition and C, N transformation in an arid ecosystem [J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 170:104296.
- [25] 肖颖, 吉使阿微, 赵文学, 等. 青藏高原东缘不同人工草地土壤养分、酶活性及微生物生物量特征[J]. 中国草地学报, 2022, 44(9):90-99.
- [26] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(6):945-952.
- [27] 梁嘉玲, 莫维维, 谢伟东, 等. 3 个核桃品种叶及土壤 C、N 和 P 化学计量特征[J]. 广西林业科学, 2022, 51(4):475-481.
- [28] 张萍, 章广琦, 赵一娉, 等. 黄土丘陵区不同森林类型叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(14):5087-5098.
- [29] 韩华, 王昊彬, 余华光, 等. 崇明滩涂湿地不同盐度梯度下芦苇种群及土壤的生态化学计量学特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5):816-823.
- [30] Shi Lijuan, Li Qingkang, Fu Xiaoli, et al. Foliar, root and rhizospheric soil C: N: P stoichiometries of overstory and understory species in subtropical plantations [J]. *Catena*, 2021, 198:105020.
- [31] 许文静. 氮磷添加对不同类型盐生植物生态化学计量特征的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2022.
- [32] Elser J J, Acharya K, Kyle M, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota [J]. *Ecology Letters*, 2003, 6(10):936-943.
- [33] Liu Yongjie, Li Guoe, Wang Mingxia, et al. Effects of water supply on plant stoichiometry of C, N, P in Inner Mongolia grasslands [J]. *Plant and Soil*, 2022:1-18.
- [34] 肖钰鑫, 王明明, 郭惠安, 等. 古尔班通古特沙漠水热梯度变化对短命植物生态化学计量特征影响[J]. 植物科学学报, 2022, 40(4):492-504.
- [35] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6):1441.
- [36] 阿布里孜·阿不都热合曼, 吕光辉, 张雪妮, 等. 新疆艾比湖流域植物光合器官碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8):2123-2130.
- [37] 邓小军, 朱柳霏, 宋贤冲, 等. 猫儿山自然保护区不同林分类型土壤生态化学计量特征[J]. 土壤通报, 2022, 53(2):366-373.
- [38] 张萌, 卢杰, 张新生, 等. 色季拉山林线典型植被下土壤生态化学计量特征[J]. 高原农业, 2022, 6(4):332-341.
- [39] He Wenqi, Liu Hongyan, Shi Liang, et al. Climate and soil change nutrient element allocation of Siberian larch in the Mongolian semiarid forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 315:108825.