

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)

2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)

上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)

外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)

泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)

锆、镧和镧锆改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)

生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)

基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)

养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)

粤港澳大湾区丘陵区地带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制

吴丹¹, 孙萍¹, 陈广琳¹, 陈友媛^{1,2*}, 彭昌盛^{1,2}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 入海河流中较高的氮、磷污染负荷严重影响近岸海域水质, 必须加强陆海统筹。但河口区受海水倒灌影响, 水体盐碱浓度高且变化范围大, 植物生长困难, 去除氮磷能力低, 提高植物生存能力是亟需解决的难题。本文通过添加适当浓度的 Ca^{2+} 和 K^{+} , 研究提高植物耐盐碱能力以及降低富营养化风险的可能性。结果表明, 在 pH 8、盐度 20‰ 条件下, 外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 浓度分别为 $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水培实验中, 碱蓬对总氮及总磷的去除效率均最高, 为对照组的 1.53 ~ 1.87 倍, 生长最好, 相对生长速率(RGR)为对照组的 2.4 倍和 2.0 倍, 同浓度 Ca^{2+} 的缓解作用大于 K^{+} 。外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 提高耐盐碱能力的机制体现在碱蓬渗透调节功能的提升: 无机渗透调节机制为平衡 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$, 提高碱蓬持水能力, 叶片与根系中无机离子含量与含水量相关性均在 0.966 以上; 有机渗透调节机制为促进甜菜碱等小分子有机物积累, 降低细胞膜脂过氧化作用, Ca^{2+} 和 K^{+} 缓解作用下叶片丙二醛含量最大降幅达 72.9% 和 61.7%。外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 能够增强碱蓬渗透调节能力, 提升耐盐碱能力, 促进碱蓬生长, 提高碱蓬对氮磷的去除率。

关键词: 碱蓬; 盐碱胁迫; 河口区; 无机离子; 小分子有机物

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5384-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906030

Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of *Suaeda salsa* in the Estuary Area

WU Dan¹, SUN Ping¹, CHEN Guang-lin¹, CHEN You-yuan^{1,2*}, PENG Chang-sheng^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The pollution load of nitrogen and phosphorus in pollutants entering the sea is high, which seriously affects the water quality of coastal water. It is necessary to strengthen land-sea coordination. However, affected by the seawater encroachment, the salt and alkali content of the water in the estuary area is high and the variation range is large, which leads to difficulty in plant growth. The ability of plants to remove nitrogen and phosphorus is reduced. How to improve the survival ability of plants is an urgent problem to be solved. In this study, the addition of appropriate concentrations of Ca^{2+} and K^{+} can improve the salinity tolerance of plants and reduce the risk of eutrophication. The results showed that under the condition of pH 8 and salinity 20‰, the removal efficiency of total nitrogen and total phosphorus was the highest in the hydroponic experiment with exogenous Ca^{2+} and K^{+} concentrations of $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ and $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, which were 1.53-1.87 times those in the control group. At this time, the growth rate of *Suaeda salsa* was the best, and the maximum relative growth rates (RGR) were 2.4 times and 2.0 times that of the control group, respectively. The remission effect of Ca^{2+} was greater than that of K^{+} at the same concentration. The mechanism by which exogenous Ca^{2+} and K^{+} improve the salt-alkali tolerance ability of *Suaeda salsa* was mainly manifested as improving osmotic regulation ability. In the aspect of inorganic osmotic regulation, exogenous ions improved the water-holding capacity of the plant, among which the correlation coefficients of inorganic ion content and water content in leaves and roots were all above 0.966. In terms of organic osmotic regulation, exogenous Ca^{2+} and K^{+} all promoted the accumulation of small molecular organic compounds such as betaine in *Suaeda salsa*, and alleviated plasma membrane peroxidation in leaves. Among them, the largest reductions of malondialdehyde content in leaves were 72.9% and 61.7%, respectively. Therefore, exogenous Ca^{2+} and K^{+} can enhance the osmotic adjustment ability and promote the growth of *Suaeda salsa*, thereby improving the removal rate of nitrogen and phosphorus. The results provide a theoretical basis for improving the water purification effect and reducing eutrophication risk in coastal waters.

Key words: *Suaeda salsa*; saline-alkali stress; estuary areas; inorganic ions; small organic molecule

入海河流污染是导致近海海域水环境问题的主要原因^[1], 其中总氮及总磷含量约占总入海通量的 39.8%^[2], 导致水体富营养化, 引发赤潮灾害。2018 年中国海洋生态环境状况公报显示无机氮及磷酸盐类物质是影响河口区及近岸海域水质变化的重要因素, 海水富营养化面积达 5.67 万 km^2 ^[3]。坚持陆海统筹, 需强化入海河流氮、磷等污染物质的去除, 减

缓近岸局部海域污染。

植物不仅具有景观美化效果, 还可通过根系直

收稿日期: 2019-06-03; 修订日期: 2019-07-05

基金项目: 山东省重点研发项目((2017GSF17119); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MD033)

作者简介: 吴丹(1983~), 男, 博士后, 主要研究方向为滨海湿地生态修复, E-mail: 15953251500@139.com

* 通信作者, E-mail: youyuan@ouc.edu.cn

接吸收利用氮磷等营养物质^[4],对水体富营养化有抑制与修复作用^[5].但是,频繁波动的淹水环境、海水入侵、地下水位较高等因素导致河口区水体盐碱浓度高、波动范围大,盐度高时达 20‰以上,pH 值高达 9,植物生长困难,净化水体效果差.盐与碱共同胁迫引起植物细胞离子失衡,极易产生高渗透胁迫,迅速伤害植物^[6].耐盐碱植物通过调节体内无机离子含量如 Na^{+} 和 K^{+} ,或分泌脯氨酸(proline,Pro)、甜菜碱(betaine,Bet)和可溶性糖(soluble sugar,SS)等小分子有机物进行渗透调节,响应盐碱胁迫^[7].但盐生植物的渗透调节功能存在极限,耐盐碱能力有限.因此,提高植物抵抗渗透胁迫的能力是解决盐碱限制植物生长和提高植物净化效果的关键.

目前研究报道显示,外源 Ca^{2+} 与 K^{+} 可提高作物耐盐碱能力,增加产量^[8].对植物根施或叶面喷施 Ca^{2+} ,可缓解植物受到的渗透伤害、离子毒害和氧化胁迫,提高 Ca^{2+} 的可利用性,促进 Ca^{2+} 的运输和向植物生长区域的迁移^[9],提升作物存活率;外源 Ca^{2+} ,如脱石膏可使盐碱土壤 Ca^{2+} 与 Na^{+} 离子交换,达到脱盐效果^[10],通过提高保护酶活性、叶片净光合速率、增加 Pro 含量等途径提高作物的耐盐碱能力,增加作物生产力^[11,12];此外,施用 K^{+} 肥可降低 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$,缓解环境中高 NaCl 浓度引起的植物缺钾症,同时提高作物对盐胁迫的耐受性^[13,14].外源 K^{+} 能够增加 Pro 和糖等渗透物质的积累,提高作物对氮的吸收和同化,缓解作物受到的盐碱胁迫^[15].同时,补充钙和钾能够提高番茄对碱度、盐度的耐受性,维持叶绿素水平,缓解氧化胁迫^[16].但是有关提高盐生植物耐盐碱能力的化学调控机制研究较少,而且外源 Ca^{2+} 与 K^{+} 是否可提高盐生植物的渗透调节能力,影响机制如何等相关研究还不

清晰.

本研究选择滨海河口地区常见的盐生植物碱蓬(*Suaeda salsa*,*S. salsa*)作为供试植物.采用水培实验方法,添加适量 Ca^{2+} 和 K^{+} ,测定并分析碱蓬对水体中总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果,及叶片、根系中无机离子和有机溶质的含量和分布特征,探索 Ca^{2+} 和 K^{+} 对碱蓬净水效果的影响和耐盐碱能力提高的机制.主要达到以下 3 个目的:①盐碱胁迫下碱蓬生长得到缓解的最优 Ca^{2+} 和 K^{+} 浓度;②外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 促进碱蓬净化水中氮磷的效果;③外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 对碱蓬叶片及根系无机渗透调节与有机渗透调节的影响机制.研究结果为提高植物耐盐碱能力提供有效途径,以期植物净化滨海河口区盐碱水体,降低富营养化风险奠定理论基础.

1 材料与方法

1.1 供试植物

碱蓬:藜科,叶肉质化真盐生植物,分布于我国各地的沿海滩涂、盐碱地等区域.碱蓬具有重要的生态功能及药用价值,大面积播种可在每年 5、6 月形成红色景观效果.本实验选用的碱蓬采自青岛市李村河河口区.

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计与方法

(1) 盐碱胁迫预实验

采用水培实验,水培溶液营养盐组分浓度参考青岛市李村河河口区水质(表 1).NaCl 调整水体盐度分别为 0‰、6‰、12‰、18‰、24‰ 和 30‰,NaHCO₃ 调整水体 pH 值为 8,共计 6 个实验组,每组 3 个重复,另设一组盐度为 0‰和 pH 值为 7 的空白对照组.

表 1 水培溶液水质指标

Table 1 Water quality of the solutions used in the experiments

项目	盐度/‰	pH	总氮(TN)/mg·L ⁻¹	总磷(TP)/mg·L ⁻¹	Ca ²⁺ /mmol·L ⁻¹	K ⁺ /mmol·L ⁻¹
参数值	0~20	8.0	6.2	3.4	2.0	2.0

本实验容器高 20 cm,上口直径 10 cm,水体体积 1 L.将长势一致的植物随机分配到每个实验组中,每个容器种植 4~5 株,株高(30±2)cm,鲜重(7.0±0.2)g,种植密度 50 株·m⁻².每天用蒸馏水补充蒸发的水分,温度(24±2)℃,自然光照,实验周期 15 d.

(2) 外源 Ca^{2+} 与 K^{+} 促进碱蓬生长及氮磷去除的实验

采用水培实验,盐碱胁迫条件为预实验中最佳耐受盐碱度,CaCl₂ 和 KCl 调节水培溶液中 Ca^{2+} 和

K^{+} 浓度均为 0、2、4、6、8、10、15 和 20 mmol·L⁻¹.设 Ca^{2+} 、 K^{+} 浓度均为 2 mmol·L⁻¹ 的处理组为对照组(CK), Ca^{2+} 、 K^{+} 浓度均为 0 mmol·L⁻¹ 的处理组为空白对照组.TN 与 TP 浓度设置、实验装置、实验周期与实验条件均与预实验一致,实验结束测定 TN 和 TP 浓度.

1.2.2 指标测定方法

对于水体,监测实验前后水中 TN 和 TP 的浓度变化,并计算单位时间、单位质量植物对水体中氮和磷的去除量.总氮采用紫外分光光度法测定,总

磷采用钼酸铵分光光度法测定^[17]。

对于植物,实验后测定植物的鲜重、干重、新增叶片数等生长指标,并选取各组植物的相同部位测定生理指标. 植物无机离子 K^+ 和 Na^+ 含量采用离子色谱法测定;Pro 含量采用酸性茚三酮比色法测定;SS 含量采用蒽酮比色法测定;Bet 含量采用雷氏盐比色法测定^[18];丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[19];叶绿素含量采用乙醇提取法测定^[20];根系活力采用氯化三苯基四氮唑法测定^[21];叶片含水量采用烘干称重法测定^[21]。

1.2.3 数据处理与分析方法

相对生长速率(RGR)参考公式(1)计算。

$$RGR = \frac{\ln(W_2) - \ln(W_1)}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

式中, W_1 为初始时刻 t_1 (d) 植物干重(g); W_2 为结束时刻 t_2 (d) 植物干重(g)。

数据处理采用画图软件 Origin8.0 和统计软件 SPSS 16.0. 双因素方差分析比较各项测试指标在实验条件下的显著性差异,显著性水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 盐碱胁迫对植物的抑制作用

通过植物的生长和各项生理指标变化可表征植物的耐盐碱(pH = 8,不同盐度)极限(表 2)。

表 2 盐碱胁迫对碱蓬生长及生理的影响¹⁾

Table 2 Effects of saline-alkali stress on physiological indices of *S. salsa*

盐度 /%	pH	RGR / $mg \cdot (g \cdot d)^{-1}$	含水量 /%	叶绿素 / $mg \cdot g^{-1}$	根系活力 / $mg \cdot (g \cdot h)^{-1}$	MDA / $\mu mol \cdot g^{-1}$
0	7	20.9 ± 1.5a	90.2 ± 1.5a	1.2 ± 0.1a	1.2 ± 0.06a	0.01 ± 0.001a
0	8	20.9 ± 1.3a	89.4 ± 1.2a	1.1 ± 0.03a	1.2 ± 0.04a	0.01 ± 0.003a
6	8	20.8 ± 1.4a	89.0 ± 1.5a	1.1 ± 0.04a	1.1 ± 0.07a	0.01 ± 0.001a
12	8	17.8 ± 1.4b	87.8 ± 2.4b	1.1 ± 0.02ab	1.0 ± 0.08b	0.02 ± 0.002b
18	8	11.9 ± 1.1c	83.1 ± 1.4c	0.9 ± 0.04b	0.8 ± 0.03c	0.03 ± 0.002c
24	8	5.3 ± 1.4d	70.3 ± 1.4d	0.4 ± 0.03c	0.5 ± 0.06d	0.06 ± 0.004d
30	8	2.2 ± 0.8e	69.2 ± 2.5d	0.2 ± 0.02d	0.4 ± 0.02d	0.08 ± 0.006e

1) 数据为 3 个平行样的平均值 ± 标准偏差,每列数据后标有的不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异,下同

盐度的升高显著降低了 RGR,与空白对照组相比,盐度为 6‰ 时 RGR 无显著差异,盐度 12‰ 时显著降低 14.8%,盐度 18‰ 时降幅达 43.1%。盐度高于 18‰ 的胁迫同时显著降低了碱蓬的含水量、叶绿素含量和根系活力,表明盐碱胁迫对碱蓬的持水能力,光合作用及根系代谢等生理过程产生严重的抑制作用,碱蓬生长状况急剧变差。

MDA 含量随盐度的升高而升高,盐度高于 18‰ 时,比空白对照组高 160% 以上,表明此时碱蓬体内产生大量的活性氧等强氧化性物质,受到严重的氧化伤害. 可见,碱蓬能够短时耐受 pH 8、盐度

为 18‰ 的盐碱胁迫,高于此盐碱度会对碱蓬的生长生理过程产生显著破坏. 鉴于滨海河口区水体盐度高达 20‰,本研究选取盐度 20‰ 与 pH 8 的胁迫条件进行外源 Ca^{2+} 和 K^+ 影响碱蓬渗透调节作用机制的研究。

2.2 外源 Ca^{2+} 与 K^+ 提高碱蓬净化氮磷能力

盐碱胁迫下,外源 Ca^{2+} 与 K^+ 均能显著提高碱蓬对 TN 和 TP 的去除效果(图 1),在外源 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度分别为 8 $mmol \cdot L^{-1}$ 及 10 $mmol \cdot L^{-1}$ 时,TN 和 TP 的去除效率均最高,其中对 TN 的去除,与 CK 相比, Ca^{2+} 和 K^+ 作用分别提高 1.53 和 1.57 倍,对

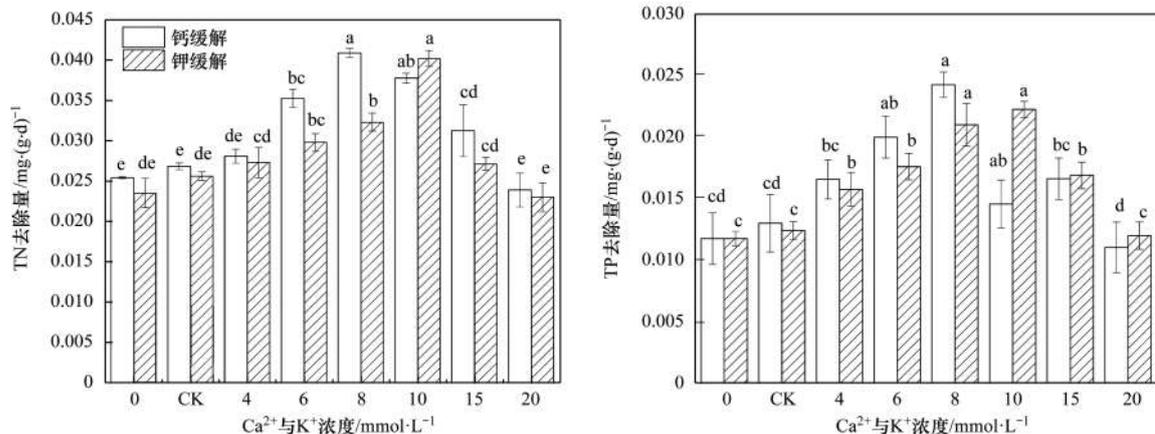


图 1 外源 Ca^{2+} 和 K^+ 对盐碱胁迫下碱蓬净化水体中氮和磷的影响

Fig. 1 Effect of exogenous Ca^{2+} and K^+ on TN and TP in the water of *S. salsa* under saline-alkali stress

TP, Ca^{2+} 和 K^+ 作用分别提高 1.87 和 1.80 倍. 有研究表明, 氮磷的积累能力与生长量具有很好的相关性, 植物对氮磷利用率增高与植物生长能力提高有关^[22].

但是, Ca^{2+} 和 K^+ 浓度分别高于 $8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 氮、磷的去除效率显著降低, 说明过量的 Ca^{2+} 和 K^+ 对碱蓬形成新的离子胁迫, 抑制碱蓬对氮磷的吸收利用. 正如李德燕^[23] 对钙影响马尾松生理生化特性的研究, 发现过量的钙导致马尾松对光能的吸收利用率降低, 光合能力降低; 同样, 过量外源钙导致茶苗细胞结构损伤, 生长阻滞^[24].

那么, 外源 Ca^{2+} 和 K^+ 作用下, 碱蓬生长能力得到提高, 在生长促进和生理缓解等代谢过程中的作用机制体现在以下方面.

2.3 外源 Ca^{2+} 与 K^+ 对碱蓬生长的促进作用

生长指标能直观地反映盐碱胁迫下 Ca^{2+} 与 K^+ 对碱蓬的缓解作用. RGR 随 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度的增加先升高后降低, Ca^{2+} 与 K^+ 浓度在 $4 \sim 15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 显著缓解了盐碱胁迫对碱蓬生长的抑制作

用, Ca^{2+} 的缓解作用强于同浓度下的 K^+ (表 3). Ca^{2+} 和 K^+ 浓度分别为 $8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 RGR 达最大, 为对照组 (CK) 的 2.4 倍和 2.0 倍, 与预实验中 6‰ 和 12‰ ~ 18‰ 盐胁迫下植株 RGR 水平持平. 结果表明外源离子缓解作用下, 碱蓬生长阻碍变小, 细胞分裂和增长等代谢过程对氮素和磷素的需求变高, 导致碱蓬对氮磷的吸收利用率变高, 生长状态变好. 但是, 当 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度达 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, RGR 比 CK 组低 14.1% 和 11.8%, 说明 Ca^{2+} 和 K^+ 过量对碱蓬的生长产生抑制作用; 空白对照组 RGR 比 CK 组低 54.1% 和 44.7%, 说明 Ca^{2+} 或 K^+ 缺失严重阻碍碱蓬的生长.

植物 RGR 的提高可表现为株高增加或新叶片数增加. Ca^{2+} 与 K^+ 浓度在 $4 \sim 15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内均促进碱蓬生出新叶片, 新增叶片数的变化趋势与 RGR 一致 (表 3). 而株高仅在 Ca^{2+} 与 K^+ 浓度为 $4 \sim 10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内有促进作用, 表明外源离子促进碱蓬生长的机制主要体现为新叶片数的增加.

表 3 外源 Ca^{2+} 与 K^+ 对盐碱胁迫下碱蓬生长的影响

Table 3 Effects of concentrations of Ca^{2+} and K^+ on the growth of *S. salsa* under saline-alkali stress

Ca^{2+} 与 K^+ 浓度 / $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	RGR/ $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$		新增叶片数/个·株 ⁻¹		株高净增长/ $\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$	
	Ca^{2+} 组	K^+ 组	Ca^{2+} 组	K^+ 组	Ca^{2+} 组	K^+ 组
0	3.9 ± 1.9f	4.7 ± 0.8g	0.3 ± 0.6f	0.3 ± 0.6f	0.0 ± 0.02e	0.0 ± 0.03f
2 (CK)	8.5 ± 1.3e	8.5 ± 1.0f	3.3 ± 1.1e	3.3 ± 0.6e	2.5 ± 0.3c	2.5 ± 0.2c
4	10.2 ± 1.8d	9.8 ± 1.8e	5.3 ± 0.6d	4.7 ± 0.6d	3.5 ± 0.6ab	3.1 ± 0.3b
6	14.4 ± 1.8c	11.5 ± 1.4d	8.3 ± 1.5c	7.0 ± 1.0c	4.0 ± 0.3a	3.3 ± 0.2a
8	20.8 ± 1.2a	15.6 ± 1.2b	10.0 ± 1.7a	8.0 ± 2.0b	4.0 ± 0.4a	3.3 ± 0.3a
10	18.3 ± 1.7b	17.1 ± 1.9a	9.7 ± 1.5b	9.3 ± 0.6a	3.3 ± 0.4b	3.3 ± 0.2a
15	13.5 ± 2.9cd	12.5 ± 1.1c	8.3 ± 1.5c	6.3 ± 2.1c	2.2 ± 0.3c	1.9 ± 0.1d
20	7.3 ± 2.7e	7.5 ± 1.9f	3.7 ± 1.5e	3.3 ± 1.5e	1.7 ± 0.2d	1.5 ± 0.1e

3 外源 Ca^{2+} 与 K^+ 影响碱蓬渗透调节的生理机制

3.1 无机渗透调节

3.1.1 影响效果

Ca^{2+} 与 K^+ 对碱蓬叶片与根系中 Na^+ 、 K^+ 含量与 Na^+/K^+ 的影响见图 2. 外源 Ca^{2+} 和 K^+ 在 $4 \sim 20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内降低碱蓬叶片与根系中的 Na^+ 含量, 叶片中最大降幅分别为 10.4% 和 8.4%, 根系中最大降幅分别为 15.3% 和 3.3%, 即外源 Ca^{2+} 对根系 Na^+ 含量的影响大于叶片, 而外源 K^+ 对根系 Na^+ 含量的影响小于叶片 [图 2(a) 和图 2(b)].

随外源 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度的增加, 叶片与根系中的 K^+ 含量先升高后降低, 叶片中 K^+ 含量的最大增幅分别为 69.5% 和 51.4%, 根系中 K^+ 含量比叶片少, 最大增幅分别为 98.4% 和 24.1%, 说明外源 Ca^{2+} 对碱蓬 K^+ 积累的作用强于外源 K^+ , 且外源 Ca^{2+} 对根系中 K^+ 含量的影响比叶片大 [图 2(c) 和

图 2(d)].

随外源 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度增加, 叶片与根系中 Na^+/K^+ 先降低后升高, 叶片中 Na^+/K^+ 最大降幅分别为 47.1% 与 40.8%, 根系中最大降幅分别为 57.3% 与 31.9%. 外源 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度在 $4 \sim 20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时叶片与根系中 Na^+/K^+ 均比 CK 组低. Ca^{2+} 和 K^+ 缺失时, Na^+/K^+ 显著升高 [图 2(e) 和图 2(f)].

3.1.2 无机渗透调节的影响机制

在高盐环境中, 大多数植物的初始响应是增加细胞内的离子含量, 直到达渗透平衡^[25,26]. 高浓度的 Na^+ 产生离子毒害, 与 K^+ 有竞争性抑制, 阻碍植物对 K^+ 的吸收^[27]. 外源 Ca^{2+} 和 K^+ 在 $4 \sim 15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内促进碱蓬叶片对 K^+ 吸收, 说明外源 Ca^{2+} 和 K^+ 能够抑制 Na^+ 向上运输, 减缓 Na^+ 对叶片的毒害作用, 同时促进根系对 Na^+ 的外排. 叶片 Na^+ 总量没有显著降低, 可能与碱蓬叶片能够通过离子区室化作用将 Na^+ 隔离到液泡中有关^[28,29].

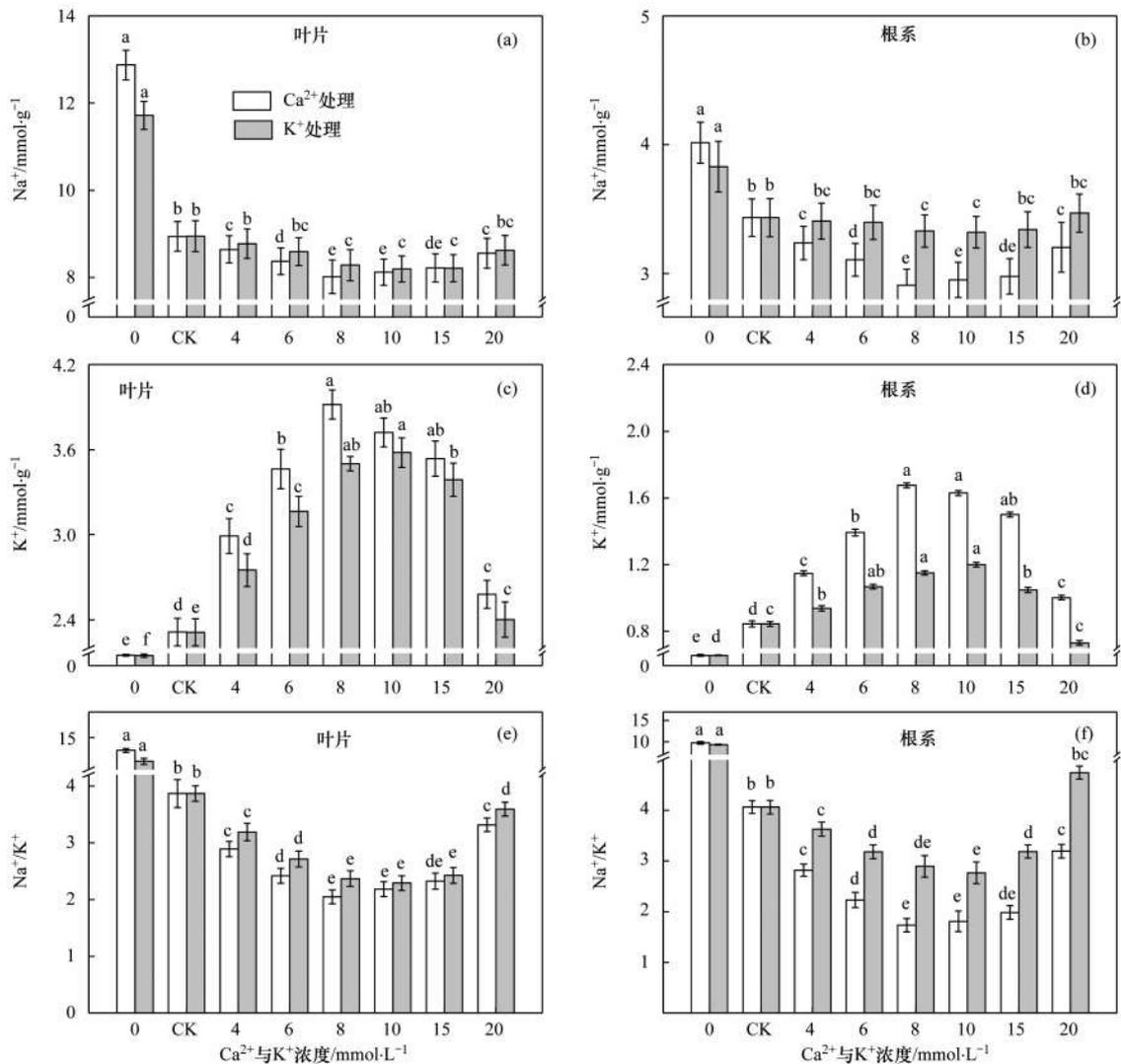


图2 外源 Ca^{2+} 与 K^{+} 处理对盐碱胁迫下碱蓬叶片与根系中 Na^{+} 、 K^{+} 含量与 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 的影响

Fig. 2 Effects of concentrations of Ca^{2+} and K^{+} on the contents of Na^{+} , K^{+} , and $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ in shoots and roots of *S. salsa* under saline-alkali stress

储存在液泡中的 Na^{+} 会提高细胞膨压,降低水势,有利于植物根系吸收水分抵抗渗透胁迫^[30]。因此本研究推测外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 影响碱蓬无机渗透调节的机制可能与无机离子含量及植株含水量有关。

外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 浓度为 4 ~ 15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,碱蓬叶片和根系中的含水量较 CK 组高(表 4),分别在 8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达最大,根系含水量低于叶片,缺 Ca^{2+} 和 K^{+} 时叶片与根系中的含水量降幅均高于 20.0%,说明适宜浓度的 Ca^{2+} 和 K^{+} 能提高碱蓬叶片与根系的持水能力,提高比例在 24.6% ~ 69.2% 之间。对 Na^{+} 与 K^{+} 含量总和与含水量进行相关分析(表 5),碱蓬叶片和根系的含水量与无机离子的相关系数在 0.968 以上,进一步说明外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 作用下,无机渗透调节作用机制为降低 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$,增强植物持水能力,提高植物耐盐碱能力。

然而,值得注意的是, Ca^{2+} 和 K^{+} 浓度并不是越高越好,浓度增加到 20 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,离子稳态失衡,导致碱蓬的各项生理代谢过程受到较大的抑制。在对外源 Pro、精胺、亚精胺缓解盐胁迫的研究中也有类似的结果,外源物质的浓度仅在一定范围内能缓解植物受到盐胁迫的伤害,若超出该浓度,会加剧对植物体的损伤^[31, 32, 33]。

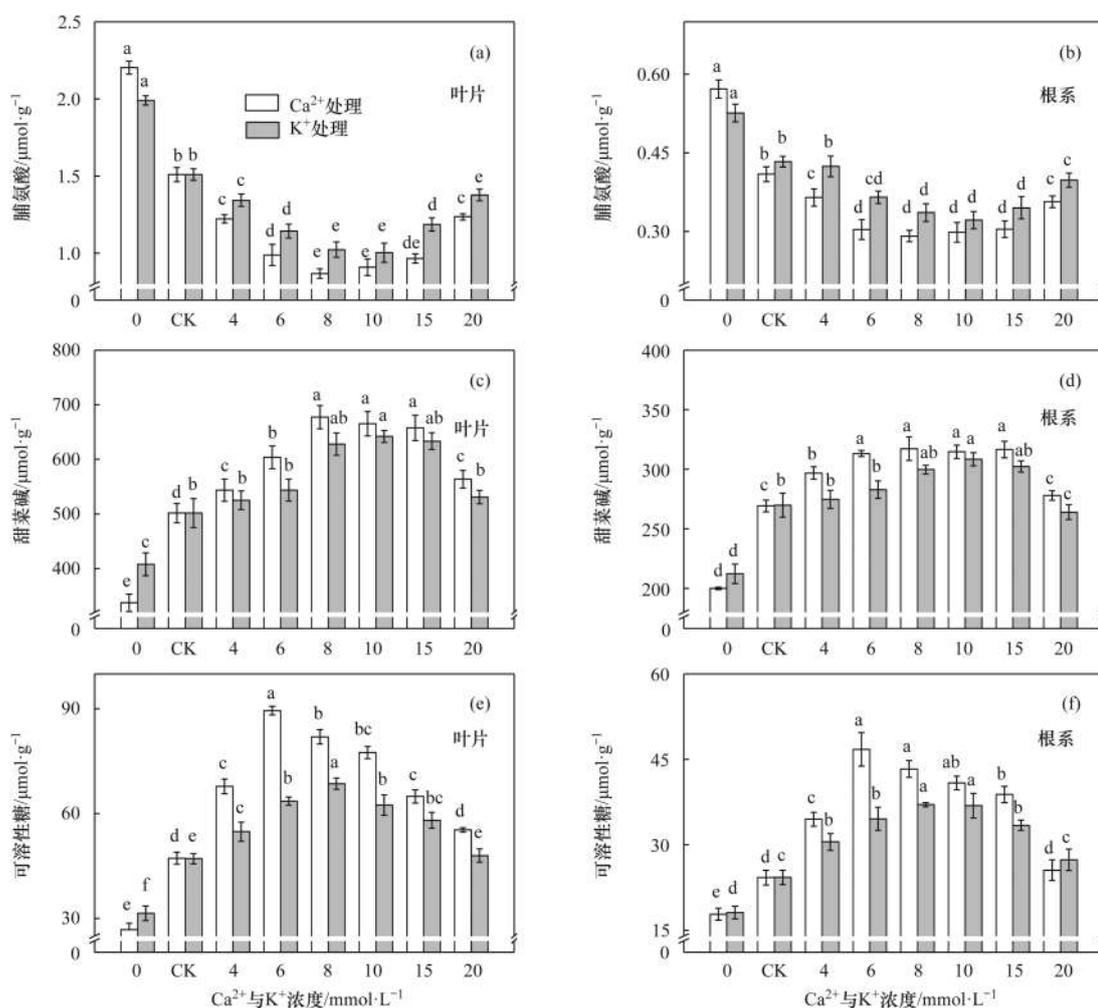
3.2 有机渗透调节

3.2.1 影响效果

Ca^{2+} 和 K^{+} 处理对碱蓬盐碱胁迫下叶片与根系中脯氨酸(Pro)、甜菜碱(Bet)与可溶性糖(SS)含量的影响见图 3。随着 Ca^{2+} 和 K^{+} 浓度的增加,叶片与根系中的 Pro 含量先减少后增加,浓度分别为 8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达最小值,叶片中 Pro 的最大降幅分别为 42.5% 和 33.6%,根系降幅相对较低,且在 Ca^{2+} 与 K^{+} 浓度为 8 ~ 15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围

表 4 Ca^{2+} 与 K^+ 处理对盐碱胁迫下碱蓬叶片和根系含水量的影响

Ca^{2+} 与 K^+ 浓度 / $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	Ca^{2+} 组的含水量/%		K^+ 组的含水量/%	
	叶片	根系	叶片	根系
0	27.4 ± 1.9d	38.5 ± 1.2e	33.2 ± 2.2d	42.6 ± 2.0d
2 (CK)	75.8 ± 2.6c	56.4 ± 1.8d	75.7 ± 1.6c	56.5 ± 1.8c
4	83.1 ± 2.7b	59.2 ± 1.8c	82.2 ± 1.7b	58.7 ± 1.9b
6	86.7 ± 2.8a	63.7 ± 1.9b	84.0 ± 2.7a	62.1 ± 2.0a
8	88.9 ± 2.8a	65.7 ± 2.2a	85.8 ± 2.7a	62.7 ± 2.1a
10	87.7 ± 2.8a	65.1 ± 2.0a	86.2 ± 2.8a	63.8 ± 2.1a
15	85.6 ± 2.7b	63.1 ± 2.0b	83.6 ± 2.2ab	60.1 ± 2.0b
20	74.6 ± 2.1c	55.5 ± 1.8d	73.4 ± 2.2c	54.9 ± 1.9c

图 3 Ca^{2+} 与 K^+ 处理对碱蓬盐碱胁迫下叶片与根系中 Pro、Bet 与 SS 含量的影响Fig. 3 Effects of Ca^{2+} and K^+ on the contents of proline, betaine and soluble carbohydrates in shoots and roots of *S. salsa* under saline-alkali stress

内,根系中 Pro 的差异不显著[图 3(a)和图 3(b)].

Ca^{2+} 与 K^+ 浓度升高均能促进碱蓬体内 Bet 的积累,叶片积累幅度较根系明显[图 3(c)和图 3(d)]. Ca^{2+} 浓度在 8 ~ 15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内叶片与根系中 Bet 含量均较高,最高分别高于对照组 35.0% 和 17.9%,各组间无显著差异. K^+ 浓度为 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时叶片与根系中 Bet 含量均最高,分别高于对照组 28.0% 和 14.3%.

随外源 Ca^{2+} 与 K^+ 浓度的增加,叶片与根系中 SS 含量先增加后减少[图 3(e)和图 3(f)]. Ca^{2+} 浓度为 6 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 K^+ 浓度为 8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,碱蓬叶片与根系中 SS 含量最高,叶片中最高分别比 CK 高 43.3% 和 33.1%,根系中分别高 26.5% 和 25.4%.

由以上结果可知,面对高盐碱胁迫,外源 Ca^{2+} 与 K^+ 促使碱蓬合成一些可溶性溶质作为调节剂来

缓解盐碱伤害,叶片中合成量更大. 本文初步猜测这些可溶性小分子有机物通过对活性氧物质的解毒作用来保护碱蓬免受盐碱伤害.

3.2.2 有机渗透调节的影响机制

为明确外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 对碱蓬有机渗透调节的缓解机制,本文从以下两方面分别验证以上猜想. 首先,盐碱等逆境胁迫会破坏活性氧代谢平衡,引起活性氧积累,导致膜脂过氧化^[34, 35],产生 MDA,因此,MDA 含量可直接鉴定植物体内膜脂分解状况. 其次,逆境中活性氧主要在细胞器中生成,Bet 合成主要在叶绿体中,Pro 合成主要在线粒体中^[36],叶片光合作用指标叶绿素含量的高低与根系呼吸作用指标根系活力的强弱可间接证明有机渗透调节物质与膜脂过氧化的关系.

3.2.2.1 MDA

外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 浓度在 4 ~ 15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,叶片与根系中的 MDA 含量均低于 CK 组(图

4). 在 Ca^{2+} 和 K^{+} 浓度分别为 8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶片及根系中 MDA 含量最低,叶片最大降幅为 72.9% 和 61.7%,根系中最大降幅为 23.3% 和 13.2%. 对碱蓬叶片与根系中小分子有机物与 MDA 之间的相关性分析可知(表 5),小分子有机物与 MDA 相关性较强,相关系数达 0.966 以上,尤其 Bet 与 MDA 呈显著负相关,相关系数达 0.989 以上,说明外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 缓解作用下碱蓬合成的小分子有机物对细胞膜有较强的保护作用. 与本文观点类似,Amanifar 等^[37]认为 Bet 等有机渗透调节物质不但能够降低细胞水势,保护和稳定细胞内酶系统,而且对维持细胞膜系统在逆境中的稳定性,降低膜脂过氧化有重要作用;Nedjimi 等^[38]认为外源 Ca^{2+} 对盐胁迫下的植物膜透性有改善作用. 因此,盐碱胁迫下外源 Ca^{2+} 与 K^{+} 对碱蓬有机渗透调节作用的影响机制与降低细胞膜脂过氧化作用有关.

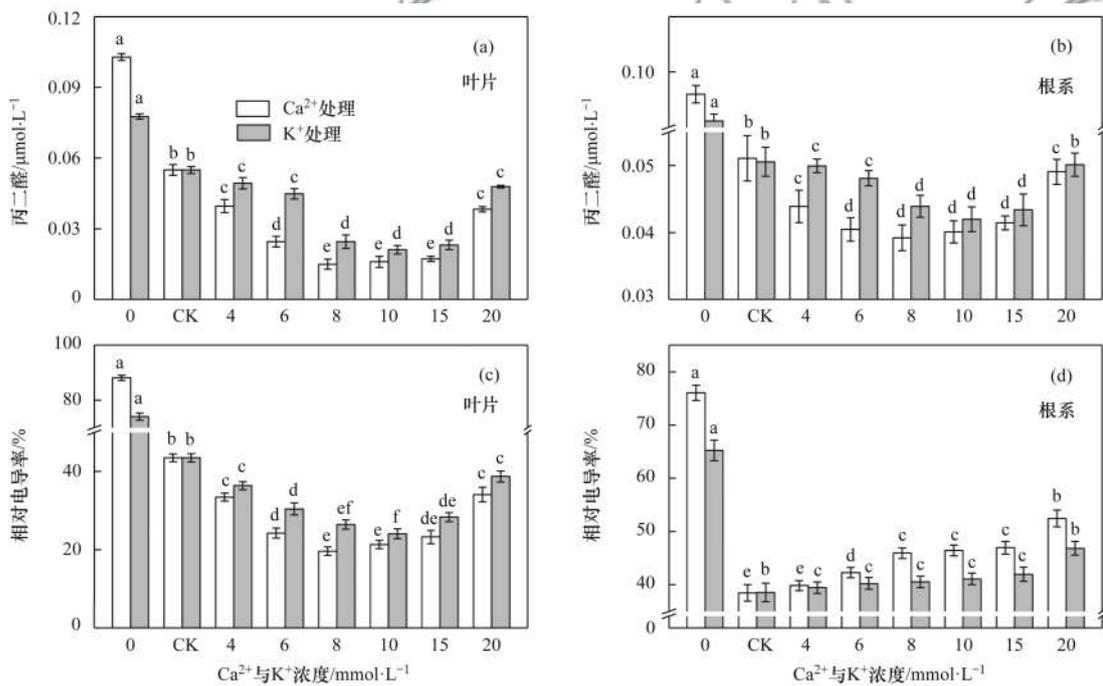


图 4 外源 Ca^{2+} 与 K^{+} 对碱蓬盐碱胁迫下叶片与根系中 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effects of concentrations of Ca^{2+} and K^{+} on the malonaldehyde in shoots and roots of *S. salsa* under saline-alkali stress

表 5 碱蓬的 Na^{+} 、 K^{+} 、Pro、Bet、SS 与含水量、MDA 含量之间的相关性¹⁾

Table 5 Correlation analysis between contents of Na^{+} , K^{+} , proline, betaine, soluble carbohydrates and water content, and malonaldehyde in shoots and roots of *S. salsa*

项目		Na^{+}	K^{+}	无机离子	Pro	Bet	SS	小分子有机物
MDA	叶	0.976 **	-0.754 *	-0.754 **	0.936 **	-0.991 **	-0.741 *	-0.991 **
	根	0.816 **	-0.841 **	-0.841 **	0.942 **	-0.989 **	-0.724 *	-0.966 **
含水量	叶	-0.809 **	0.982 **	0.982 **	-0.887 **	0.923 **	0.843 **	0.873 **
	根	-0.874 **	0.968 **	0.968 **	-0.841 **	0.910 **	0.921 **	0.880 **

1) * 表示相关性在 0.05 水平显著, ** 表示相关性在 0.01 水平显著

3.2.2.2 叶绿素与根系活力

外源 Ca^{2+} 和 K^{+} 能促进叶绿素的合成,提高根

系活力,浓度过高则效果降低(图 5). 在 Ca^{2+} 和 K^{+} 浓度分别为 8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时均有最佳

促进效果,其中叶绿素最高值分别为 CK 的 2.0 倍和 1.3 倍,根系活力最高值分别为 CK 组的 2.3 倍和 1.7 倍. 对碱蓬的叶绿素含量、根系活力与 MDA 进行相关性分析,结果发现叶片中 MDA 和叶绿素呈显著负相关(相关系数 0.939),根系中 MDA 与根系活力显著负相关(相关系数 0.882),说明光合作用、根系活力与膜脂过氧化存在密切关系. 有研究

表明,盐碱胁迫降低活性氧解毒酶的活性,活性氧过量积累导致光化学损失,使叶绿体蛋白下调,光合作用受到影响^[39,40]. 本研究中适宜浓度外源 Ca^{2+} 和 K^+ 对盐碱胁迫下碱蓬有机渗透调节的缓解作用机制为:促进合成有机渗透物质,抑制活性氧的产生,减缓膜脂过氧化,最终通过叶绿素含量的增加与根系活力增强表现出来.

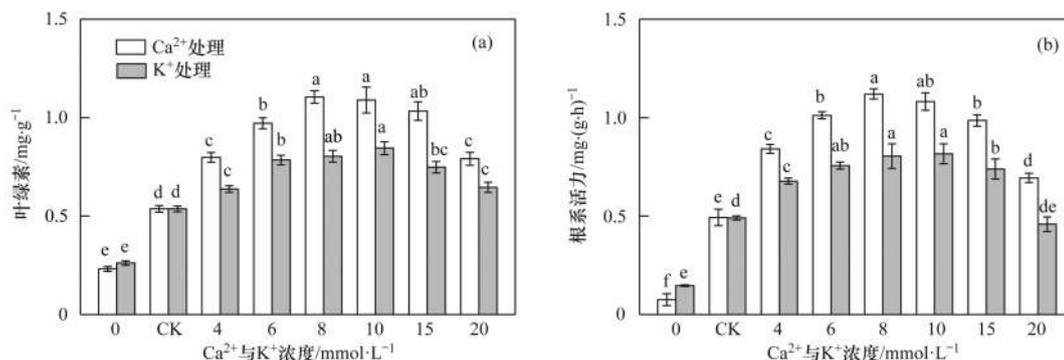


图5 外源 Ca^{2+} 与 K^+ 对碱蓬盐碱胁迫下叶绿素含量与根系活力的影响

Fig. 5 Effects of concentrations of Ca^{2+} and K^+ on the chlorophyll-a content and root viability of *S. salsa* under saline-alkali stress

综上所述,外源 Ca^{2+} 和 K^+ 通过促进碱蓬生长,提高碱蓬对氮磷的去除能力. 盐碱胁迫下,外源 Ca^{2+} 和 K^+ 促进碱蓬生长的机制为提高相对生长速率,增加新叶片数目;对碱蓬生理的影响机制表现在无机渗透调节与有机渗透调节两方面(图6),无机渗透调节中, Ca^{2+} 和 K^+ 主要通过促进水分吸收,提高细胞含水量来缓解盐碱胁迫,

并将 Na^+ 隔离到液泡中降低盐碱伤害,达到调节细胞内外渗透势、维持细胞内的离子稳态和减缓离子毒害作用. 有机渗透调节中, Ca^{2+} 和 K^+ 主要通过分泌有机渗透调节物质,缓解膜脂过氧化作用,实现碱蓬叶片光合作用与根系呼吸作用的增强,提高氮磷等物质的吸收利用,最终降低水体富营养化风险.

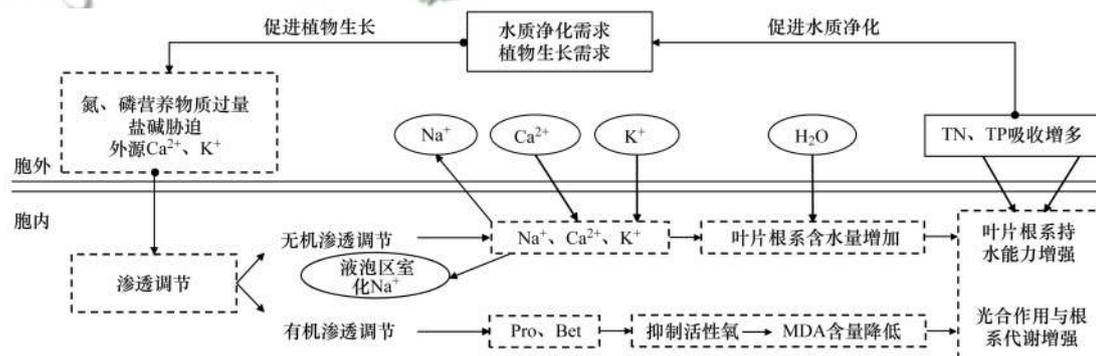


图6 外源 Ca^{2+} 和 K^+ 对盐碱胁迫下碱蓬叶片及根系渗透调节作用机制及提高水质净化效果

Fig. 6 Mechanism of exogenous Ca^{2+} and K^+ on osmotic adjustment of leaves and roots of *S. salsa* under saline-alkali stress

4 结论

(1) 外源 Ca^{2+} 和 K^+ 提高碱蓬对 TN 和 TP 的去除能力的适宜浓度范围为 4 ~ 15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; 在外源 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度分别为 8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,碱蓬对 TN 和 TP 去除率提高一倍以上.

(2) 盐碱胁迫下碱蓬生长得到缓解的最优 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度为 8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 外源 Ca^{2+} 和 K^+ 主要通过促进生成新叶片,提高碱蓬

相对生长速率.

(3) 外源 Ca^{2+} 和 K^+ 缓解作用下,碱蓬叶片及根系的无机渗透调节机制为促进 Na^+ 和 K^+ 的选择性吸收、提高碱蓬持水能力. 无机离子对根系的调节作用强于叶片,且外源 Ca^{2+} 对碱蓬 Na^+/K^+ 的调节能力强于外源 K^+ . 有机渗透调节机制为促进小分子有机物如 Pro 和 Bet 的合成,缓解植物细胞膜脂过氧化作用,降低 MDA 含量,提高植物叶片叶绿素含量,提升根系活力. 小分子有机物对叶片的调

节作用优于根系.

参考文献:

- [1] 张雷, 曹伟, 马迎群, 等. 大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1677-1684.
Zhang L, Cao W, Ma Y Q, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in the tidal reach and estuary of the Daliao River and analysis of potential eutrophication[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1677-1684.
- [2] 李斌, 谭趣孜, 李蕾鲜, 等. 2014 年北部湾主要河流污染状况及污染物入海通量[J]. 广西科学, 2018, **25**(2): 172-180.
Li B, Tan Q Z, Li L X, *et al.* The research on contaminative conditions and pollutants fluxing into sea of major river in Guangxi Beibu Gulf in 2014[J]. Guangxi Sciences, 2018, **25**(2): 172-180.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2018 年中国海洋生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019.
- [4] 陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 等. 微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2850-2858.
Chen Y Y, Wu Y D, Sun P, *et al.* Purification of slightly salt-alkaline water bodies by microorganism enhanced combined floating bed[J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2850-2858.
- [5] Zhang J L, Shi H Z. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance [J]. Photosynthesis Research, 2013, **115**(1): 1-22.
- [6] 李瑞利. 两种典型盐生植物耐盐机理及应用耐盐植物改良盐渍土研究[D]. 天津: 南开大学, 2010.
Li R L. Studies on the mechanism of salt resistance of two halophytes and amelioration of saline soil by salt-resistance plants [D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [7] Liang W J, Ma X L, Wan P, *et al.* Plant salt-tolerance mechanism: a review[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, **495**(1): 286-291.
- [8] 曾后清, 张夏俊, 张亚仙, 等. 植物类钙调素生理功能的研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2016, **46**(6): 705-715.
Zeng H Q, Zhang X J, Zhang Y X, *et al.* Physiological functions of calmodulin-like proteins in plants[J]. Scientia Sinica Vitae, 2016, **46**(6): 705-715.
- [9] Tahjib-Ul-Arif M, Roy P R, Sohag A A M, *et al.* Exogenous calcium supplementation improves salinity tolerance in *BRR1 Dhan28*; a salt-susceptible High-Yielding *Oryza Sativa* cultivar [J]. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2018, **21**(4): 383-394.
- [10] Wang S J, Chen Q, Li Y, *et al.* Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, **121**: 82-92.
- [11] 毛玉梅, 李小平. 烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 225-231.
Mao Y M, Li X P. Amelioration of flue gas desulfurization gypsum on saline-sodic soil of tidal flats and its effects on plant growth[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 225-231.
- [12] 石婧, 黄超, 刘娟, 等. 脱硫石膏不同施用量对新疆盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J]. 环境工程学报, 2018, **12**(6): 1800-1807.
Shi J, Huang C, Liu J, *et al.* Effects of different application amount of flue gas desulfurization gypsum on amelioration of saline-alkali soil and crop yield in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, **12**(6): 1800-1807.
- [13] Elhindi K M, El-Hendawy S, Abdel-Salam E, *et al.* Foliar application of potassium nitrate affects the growth and photosynthesis in coriander (*Coriander sativum* L.) plants under salinity[J]. Progress in Nutrition, 2016, **18**(1): 63-73.
- [14] Shabala S, Demidchik V, Shabala, L, *et al.* Extracellular Ca²⁺ ameliorates NaCl-induced K⁺ loss from Arabidopsis root and leaf cells by controlling plasma membrane K⁺-permeable channels [J]. Plant Physiology, 2006, **141**(4): 1653-1665.
- [15] Ahanger M A, Agarwal R M. Salinity stress induced alterations in antioxidant metabolism and nitrogen assimilation in wheat (*Triticum aestivum* L.) as influenced by potassium supplementation[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, **115**: 449-460.
- [16] Capula-Rodríguez R, Valdez-Aguilar L A, Cartmill D L, *et al.* Supplementary calcium and potassium improve the response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to simultaneous alkalinity, salinity, and boron Stress[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, **47**(4): 505-514.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 12-13.
- [18] Kumar P, Sharma V, Atmaram C K, *et al.* Regulated partitioning of fixed carbon (¹⁴C), sodium (Na⁺), potassium (K⁺) and glycine betaine determined salinity stress tolerance of gamma irradiated pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(8): 7285-7297.
- [19] Chen T X, Johnson R, Chen S H, *et al.* Infection by the fungal endophyte *Epichloë bromicola* enhances the tolerance of wild barley (*Hordeum brevisubulatum*) to salt and alkali stresses[J]. Plant and Soil, 2018, **428**(1-2): 353-370.
- [20] 董树刚, 吴以平. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国海洋大学出版社, 2006. 33-34.
- [21] 郝建军, 刘延吉. 植物生理学实验技术[M]. (第二版). 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001. 56-57.
- [22] 陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等. 亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 585-591.
Chen Y H, Wu X F, Hao J, *et al.* Selection and purification potential evaluation of woody plant in vertical flow constructed wetlands in the subtropical area[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 585-591.
- [23] 李德燕. 马尾松苗钙素作用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
Li D Y. Study on the effect of calcium on *Pinus massoniana* seedlings[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [24] 杨训, 耿耿, 马儒泉, 等. 外源钙对镉胁迫下茶苗的缓解作用及茶叶品质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2017, **44**(6): 953-958.
Yang X, Geng G, Ma R X, *et al.* Effects of exogenous calcium on the growth of tea seedling and the quality of tea under cadmium stress [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, **44**(6): 953-958.
- [25] 赵可夫. 植物抗盐生理[M]. 北京: 中国科技出版社, 1999. 22-23.
- [26] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, *et al.* Plant salt-tolerance mechanisms[J]. Trends in Plant Science, 2014, **19**(6): 371-379.
- [27] Katschnig D, Broekman R, Rozema J. Salt tolerance in the halophyte *Salicornia dolichostachya* Moss: growth, morphology

- and physiology [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, **92**: 32-42.
- [28] Rozema J, Schat H. Salt tolerance of halophytes, research questions reviewed in the perspective of saline agriculture [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, **92**: 83-95.
- [29] García-Morales S, Gómez-Merino F C, Trejo-Téllez L I, *et al.* Osmotic stress affects growth, content of chlorophyll, abscisic acid, Na^+ , and K^+ , and expression of novel *NAC* genes in contrasting rice cultivars [J]. *Biologia Plantarum*, 2018, **62** (2): 307-317.
- [30] 李乐攻, 殷奎德, 颜季琼, 等. 烟草愈伤组织细胞质膜 K^+ 通道盐适应机理的研究 [J]. *科学通报*, 1996, **41** (18): 1707-1711.
- [31] Shu S, Guo S R, Sun J, *et al.* Effects of salt stress on the structure and function of the photosynthetic apparatus in *Cucumis sativus* and its protection by exogenous putrescine [J]. *Physiologia Plantarum*, 2012, **146** (3): 285-296.
- [32] Yi Z, Li S, Liang Y, *et al.* Effects of exogenous spermidine and elevated CO_2 on physiological and biochemical changes in tomato plants under Iso-osmotic salt stress [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2018, **37** (4): 1222-1234.
- [33] Gong B, Li X, Bloszies S, *et al.* Sodic alkaline stress mitigation by interaction of nitric oxide and polyamines involves antioxidants and physiological strategies in *Solanum lycopersicum* [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2014, **71**: 36-48.
- [34] Siddiqui N, Mostofa M G, Akter M, *et al.* Impact of salt-induced toxicity on growth and yield-potential of local wheat cultivars; oxidative stress and ion toxicity are among the major determinants of salt-tolerant capacity [J]. *Chemosphere*, 2017, **187**: 385-394.
- [35] Mostofa M G, Hossain M A, Siddiqui M N, *et al.* Phenotypical, physiological and biochemical analyses provide insight into selenium-induced phytotoxicity in rice plants [J]. *Chemosphere*, 2017, **178**: 212-223.
- [36] Glenn E P, Brown J J, Blumwald E. Salt tolerance and crop potential of halophytes [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1999, **18** (2): 227-255.
- [37] Amanifar S, Khodabandelo M, Fard E M, *et al.* Alleviation of salt stress and changes in glycyrrhizin accumulation by arbuscular mycorrhiza in liquorice (*Glycyrrhiza glabra*) grown under salinity stress [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, **160**: 25-34.
- [38] Nedjimi B, Daoud Y. Ameliorative effect of CaCl_2 on growth, membrane permeability and nutrient uptake in *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* grown at high (NaCl) salinity [J]. *Desalination*, 2009, **249** (1): 163-166.
- [39] Kumar V, Wani S H, Suprasanna P, *et al.* Salinity responses and tolerance in plants, volume 1: targeting sensory, transport and signaling mechanisms [M]. Cham: Springer, 2018. 85-136.
- [40] Shores M, Spivak M, Bernstein N. Involvement of calcium-mediated effects on ROS metabolism in the regulation of growth improvement under salinity [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2011, **51** (6): 1221-1234.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cblL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)