中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

直灌咸水与施氮磷对滨海重盐碱地柽柳生长及养分分布的影响

邱发根，杨莉琳，刘　敏，朱向梅，陈淑伶

Impact of saline irrigation and application of N and P on growth and nutrient distribution of *Tamarix chinensis* planted in coastal saline-alkali soil

QIU Fagen, YANG Lilin, LIU Min, ZHU Xiangmei, and CHEN Shuling

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210209

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冬季咸水结冰灌溉对河套重盐碱地改良效果研究

Reclamation effect of freezing saline water irrigation in winter season on the heavy saline–alkali soil in Hetao Irrigation District

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(4): 640–648

地膜覆盖对春季咸水灌溉条件下滨海盐渍土水盐动态的影响

Effect of plastic film mulch on soil moisture and salt dynamics under saline water irrigation in coastal saline soils

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(12): 1761–1769

盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应

Soil improving effect of *Suaeda salsa* on heavy coastal saline–alkaline land

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(10): 1578–1586

轮作绿肥对盐碱地土壤性质、后作青贮玉米产量及品质的影响

Effects of green manure rotation on soil properties and yield and quality of silage maize in saline–alkali soils

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(6): 856–864

内蒙古河套灌区盐碱地治理中农户参与意识及其影响因素

Farmer's participation consciousness and the influencing factors in the reclamation of saline–alkali land in Hetao Irrigation Region, Inner Mongolia

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(4): 625–632

盐碱地水盐调控研究

Regulations of salt and water of saline–alkali soil: A review

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(10): 1528–1536

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 10 月 第 29 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2021, 29(10): 1712−1721

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210209

邱发根, 杨莉琳, 刘敏, 朱向梅, 陈淑伶. 直灌咸水与施氮磷对滨海重盐碱地柽柳生长及养分分布的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(10): 1712−1721

QIU F G, YANG L L, LIU M, ZHU X M, CHEN S L. Impact of saline irrigation and application of N and P on growth and nutrient distribution of *Tamarix chinensis* planted in coastal saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(10): 1712−1721

直灌咸水与施氮磷对滨海重盐碱地柽柳生长及养分分布的影响*

邱发根[1], 杨莉琳[1**], 刘 敏[1], 朱向梅[1], 陈淑伶[2]

(1. 铜仁学院农林工程与规划学院 铜仁 554300; 2. 河北省香河县农业农村局 香河 065400)

摘 要: 柽柳是滨海重盐碱地改良与景观绿化和固碳 (C) 的重要树种, 春季灌溉咸水被认为是快速缓解柽柳干旱与盐胁迫的有效措施。针对滨海重盐碱地土壤缺氮 (N)、贫磷 (P)、干旱与盐胁迫的突出问题, 以促进柽柳固碳排盐、快速生长、改良盐碱地为目标, 围绕利用当地咸水资源缓解春季干旱与返盐双重危害的核心问题开展研究。在华北低平原区的滨海重盐碱地布设了为期 4 年的咸水灌溉与施肥的 2 因素定位试验。试验设不灌水和灌溉地下咸水 (盐分为 8.02~9.34 g·L^{-1}, W) 条件下的不施肥 (CK、WCK), 单施氮 (N、WN) 和施氮磷 (NP、WNP) 共 6 个处理。研究结果表明: 柽柳的生长与蘖枝萌发主要发生在春—夏季, 长高、增粗与分蘖同期但不同步, 株高的生长速率呈斜坡状下降, 分蘖速率呈先升后降的趋势, 6 月达最高峰; 柽柳基茎增粗的速率先快后慢。首次灌溉咸水极显著地降低柽柳植株含水率、植株鲜重与叶干重, 但不影响茎干重; 连续 3 年灌溉咸水抑制柽柳长高与增粗, 降低茎杆与叶片的 N 含量, 但叶片 P 含量平均提高 11.8%, 柽柳的分蘖率显著提高。灌溉咸水条件下施氮磷肥 (WNP) 能减缓春—夏季 (5—6 月) 柽柳长高与增粗速率的下降, 加速蘖枝萌发, 提高叶片 N、K 含量, 促进 Ca^{2+}和 Mg^{2+}由茎杆向叶片转移, 改变 Ca^{2+}、Mg^{2+}离子在茎叶的分布。灌溉咸水条件下 WNP 处理可通过加速分蘖、促进养分吸收和盐基离子运输来缓解连续灌咸水抑制柽柳生长的负面影响。研究结果可为重盐碱地柽柳的合理灌溉咸水和科学施肥提供依据。

关键词: 柽柳; 生长节率; 灌溉咸水; NP 营养; 咸水耦合施肥; 离子

中图分类号: S153; S147.2; Q945.78 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Impact of saline irrigation and application of N and P on growth and nutrient distribution of *Tamarix chinensis* planted in coastal saline-alkali soil*

QIU Fagen[1], YANG Lilin[1**], LIU Min[1], ZHU Xiangmei[1], CHEN Shuling[2]

(1. College of Agroforestry Engineering and Planning, Tongren University, Tongren 554300, China; 2. Xianghe Agricultural and Rural Bureau, Xianghe 065400, China)

* 国家自然科学基金项目 (31270521)、贵州省教育厅创新群体重大研究项目 (黔教合 KY 字 [2016]053 号)、贵州省科技计划项目 (黔科合基础 [2019]1312)、铜仁学院博士基金项目 (trxyDH1525) 和农业生态创新团队 (CXTD[2020-10]) 资助

** 通信作者: 杨莉琳, 主要研究方向为土壤养分循环与环境生态。E-mail: yangllin@sjziam.ac.cn
邱发根, 主要研究方向为园林植物与环境生态。E-mail: 524291065@qq.com

收稿日期: 2021-04-07 接受日期: 2021-07-12

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31270521), the Major Research Project of Innovation Group for Guizhou Education Department (Qian Education No. [2016] 053), the Science and Technology Project of Guizhou Province (Qian Scienc No. [2019] 1312), the Doctoral Fund Project for Tongren University (trxyDH1525), and the Agro-ecological Innovation Research Group (CXTD[2020-10]).

** Corresponding author, E-mail: yangllin@sjziam.ac.cn

Received Apr. 7, 2021; accepted Jul. 12, 2021

Abstract: Saline irrigation is a highly effective method of elimination of salt and drought stress in spring in the coastal severe saline-alkali soils. *Tamarix chinensis*, a salt-tolerant plant, plays an important role in reforming the ecological landscape of the coastal wetlands in northern China. However, the responses of plant growing rhythm of *T. chinensis* to long-term saline irrigation-associated fertilization remain unclear. To promote the rapid growth of *T. chinensis* for carbon (C) fixation, landscape construction, and saline-alkali soils reclamation, an experiment involving irrigation with local phreatic saline resources and application of nitrogen (N) and phosphorus (P) was conducted to alleviate spring drought and salt stresses, and solve the prominent problems of soil N and P deficiencies in the coastal severe saline-alkali soil. The experiment was consisted of two factors of saline irrigation and N and P fertilization over a four-year period in the coastal saline-alkali soil in the low plain of North China. Six treatments included no fertilizer as control (CK, WCK), only applying N (N, WN), applying both N and P (NP, WNP), each corresponding to no irrigation (the first) and irrigation with local phreatic saline water containing 8.02−9.34 $g \cdot L^{-1}$ salt (the second), respectively. The results showed that the growth and resprouting of *T. chinensis* occurred mainly in spring till to summer, but plant height and diameter increase and resprouting did not synchronized simultaneously. The trends of rates of plant height growing, resporuting and stem diameter thickening of *T. chinensis* during the growth season were as sloping shapes, triangle, and up fast following down slowly, respectively. In the first year of saline irrigation, soil water content, fresh weight of plant and leaf dry weight of *T. chinensis* was reduced significantly ($P<0.01$); but the stem dry weight was not impacted. However, after three-year saline water irrigation, the plant height and diameter growth was inhibited, the N content of stem and leaf were decreased significantly ($P<0.05$), but the P content of leaf increased by 11.8% on average, and branch numbers of *T. chinensis* increased significantly ($P<0.05$). The WNP treatment, i.e. saline irrigation and applying NP, retarded the decline of growth rate of plant height and stem diamter during spring to summer (May−June), not only accelerated the resprouting rate, but also increased the N and K contents of leaves, and promoted the transfer of Ca^{2+} and Mg^{2+} from stem to leaves, which resulted in a distribution change of ion in stem and leaf. WNP can alleviated the negative effect of continuous saline irrigation on the growth of *T. chinensis* by accelerating resprouting, promoting nutrient absorption and ion transport. The results provides a support for rational saline water irrigation and fertilization for *T. chinensis* in the costal serious saline-alkali soil.

Keywords: *Tamarix chinensis*; Growth rhythm; Saline irrigation; Nitrogen and phosphorus nutrients; Saline irrigation-associated fertilization; Ion

全球约有 9.5 亿 hm^2 盐碱地, 并以每年 133 万 hm^2 左右的速度持续增加。我国约有 1 亿 hm^2 盐碱地[1], 主要分布在东北、西北、华北、内蒙及东部滨海地区。随着全球气候的持续变暖这些盐碱地面积及盐碱化程度大概率还会加剧。地处华北低平原的环渤海区盐碱荒地广泛分布, 该区地下淡水资源严重匮乏, 而咸水资源丰富。受季风气候影响, 春季普遍大风、干旱, 极易导致高矿化度的浅层地下咸水向上运移造成土壤返盐, 加重了土壤的盐碱化程度, 而春季是植物生长发育的关键时期, 绝大多数植物都会遭受春旱、重度盐碱与土壤贫瘠等多重危害。

柽柳 (*Tamarix chinensis* L.) 属于泌盐植物, 具有根系丰富、发芽能力强、抗旱、耐盐碱、耐瘠薄、抗逆性强、防风固沙、保水保土以及生态适应性强等特点, 是改良盐碱地及滨海景观改造的重要树种[1]。柽柳的嫩枝叶是中药材; 柽柳叶富含蛋白质、脂肪和硫, 是优良饲料; 柽柳茎作为优质薪炭材, 是农村绿色能源的理想树种, 且具有越平茬生长越好的生长特性[2], 是优质的再生生物资源。针对重盐碱地区淡水缺乏而咸水资源极为丰富的特点[3], 许多学者开展了利用咸水结冰灌溉为植物春季萌发提供适宜土壤条件的研究[4-5], 及可灌溉咸水的矿化度[6-9]、柽柳耐受阈值[10]、灌溉量与灌溉时间等单纯的咸水灌溉技术等[11] 方面的研究探索。而针对重盐碱地栽植柽柳面临的土壤缺氮 (N)、贫磷 (P)、春旱和因返盐而加重盐害等关键问题的综合解决途径尚少见报道。

为此, 本研究开展了春季灌溉地下咸水与不同施肥的定位试验, 研究滨海重盐碱地区地下咸水资源直接灌溉利用能否缓解柽柳春旱与盐害, 咸水灌溉对柽柳生长、养分吸收、盐分平衡的影响以及施用氮磷肥与咸水的交互作用。旨在为滨海重盐碱地种植柽柳克服土壤贫瘠、春旱和盐碱等逆境障碍, 探索咸水就地利用, 实现障碍性资源高效循环、发展绿色能源植物, 实现生态恢复与重建提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验区设在河北省海兴县小山乡, 地处河北省东南部渤海低平原区, 地势低洼平坦, 属暖温带半湿润半干旱季风气候区, 年均气温 12.1 ℃, 1 月份均温 −4.5 ℃, 最低气温−19.9 ℃, 霜期和终霜期多分别出现在 10 月下旬和 4 月中旬; 年平均降水量为 582.3 mm, 6—8 月份降水量约占全年降水量的 74%, 冬春季降水极少。土壤为滨海砂壤质盐碱土, 0~100 cm 土层含盐量周年不低于 5 $g \cdot kg^{-1}$。地下水位埋深 1.5~2.0 m, 盐分为 8.02~9.34 $g \cdot L^{-1}$。

1.2　试验设计

定位试验始于 2008 年, 为期 4 年。供试柽柳品

种为人工栽植的 3 年生‘中华柽柳’, 试验开始当年平茬, 平茬高度为保留地上基茎 3 cm 以内, 以后每隔 1 年平茬 1 次。试验为水、肥 2 因素定位试验, 其中, 水处理设不灌水与灌咸水处理 (W); 肥料设不施肥 (CK)、单施氮肥 (N) 和施氮磷肥 (NP) 处理, 组成不灌水条件下的 CK、N、NP 和灌溉咸水条件下的 WCK、WN 和 WNP 共 6 个处理。灌咸水与施肥时间为春季最干旱时段的 3 月底至 4 月上旬, 直接抽提当地地下咸水漫灌, 灌水量为 750 $m^3 \cdot hm^{-2}$。施肥量为 N 75 $kg \cdot hm^{-2}$、P_2O_5 37.5 $kg \cdot hm^{-2}$, 肥料品种为尿素和二铵, 施肥方法采用穴施, 即围绕柽柳距树干 15 cm 地表处挖 10~15 cm 深的施肥穴 4~5 个, 施肥后立即覆土; 灌咸水处理在施肥后进行。试验第 4 年 (2011 年) 暂停咸水灌溉, 但施肥处理继续进行。

根据灌水与否作裂区设计, 每个区组内不同施肥处理顺序排列, 重复 3 次。区组间隔 0.9 m, 小区之间间隔 0.5 m, 小区南北向长 10 m, 东西走向宽 9 m, 小区面积 90 m^2, 柽柳株行距为 40 cm×70 cm。

1.3 调查测定项目与方法

调查时间: 于试验第 1 年 (2008 年) 的 7 月 3 日和 9 月 15 日分 2 次调查植株生长性状并采集植株样品用于测定鲜重、干重和植株含水量; 于第 4 年 (2011 年) 的 4 月 30 日、5 月 30 日、7 月 9 日、8 月 21 日和 11 月 7 日定株调查柽柳的生长动态, 并于 8 月 21 日采集植株样品, 用于养分和盐分的测定。

调查方法: 每个小区选取代表性柽柳植株 6 株挂牌, 定点测定挂牌植株的株高、地茎、分枝、冠幅等生长指标。

样品采集与处理: 每个处理小区采集 5 株长势均匀的地上部植株, 剪短, 将茎与叶分开, 于 105 ℃ 杀青 3 h, 75 ℃ 烘至恒量; 植株样品粉碎后过 60 目筛, 用于测定养分和盐分含量, 所有指标的测定方法参见《土壤农化分析》[12]。

1.4 数据分析

采用 SAS 9.1 软件对数据进行方差分析, 并用最小显著性差异法 (LSD) 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 灌溉咸水与施肥处理对柽柳植株生物学性状的影响

试验当年 (2008 年)7 月初调查结果表明 (表 1), 灌咸水极显著地影响柽柳植株含水率, 比不灌咸水

表 1 第 1 年咸水灌溉与施肥处理对柽柳植株生物学性状的影响 (单株)

Table 1 Effect of different treatments of fertilization and saline irrigation on biological characteristics of *Tamarix chinensis* (per plant) in the first year

日期(月-日) Date (month-day)	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	蘖数 Tiller number	鲜重 Fresh weight (g)	干重 Dry weight (g)	叶干重 Leaf dry weight (g)	茎干重 Stem dry weight (g)	含水率 Water content (%)
07-03	CK	125.5±2.56B	0.80±0.02	8.6±0.22a	284.5±29.60b	117.1±14.79B	—	—	143.6±1.53B
	N	133.8±6.53AB	0.86±0.05	10.2±0.59a	419.2±44.19ab	163.6±6.13AB	—	—	155.2±2.88A
	NP	147.1±4.63A	0.89±0.07	10.8±1.31a	507.9±47.39a	198.6±20.97A	—	—	154.1±1.47A
	WCK	120.8±7.75b	0.74±0.07b	9.1±0.68a	272.9±26.81b	114.3±13.39B	—	—	137.8±0.95B
	WN	137.0±6.20ab	0.93±0.02a	9.4±1.18a	384.0±39.37ab	163.5±10.71AB	—	—	126.5±1.90C
	WNP	143.1±1.91a	0.94±0.02a	11.6±0.91a	478.0±36.58a	192.4±15.18A	—	—	148.6±1.18A
	2因素方差分析差异来源 Two-factorial analysis of variance								
	W	ns	ns	ns	ns	ns	—	—	***
	F	*	*	*	**	**	—	—	***
	W×F	ns	ns	ns	ns	**	—	—	***
09-15	CK	125.7±2.17B	0.89±0.03B	4.3±0.44b	275.2±30.88b	130.3±14.24B	55.5±6.54b	74.8±8.98b	110.7±4.10a
	N	140.5±5.22AB	1.15±0.04A	6.1±0.59a	466.8±40.09a	223.4±17.41A	87.1±7.25ab	136.2±10.89a	108.3±2.65a
	NP	151.3±3.72A	1.18±0.05A	7.2±0.76a	575.1±44.28a	269.3±21.53A	107.6±7.23a	161.7±15.52a	114.1±4.02a
	WCK	123.1±5.75B	0.86±0.04B	4.8±0.38b	244.8±37.16b	126.5±18.21B	47.5±7.50b	78.9±11.14b	92.0±2.53b
	WN	140.3±5.11AB	1.10±0.04A	6.6±0.62a	429.1±30.26a	213.5±14.15A	76.8±6.26a	136.7±9.13a	100.6±1.88a
	WNP	149.8±4.99A	1.17±0.04A	7.1±0.82a	517.3±34.20a	257.5±16.96A	95.1±8.34a	162.3±12.69a	101.2±3.18a
	2因素方差分析差异来源 Two-factorial analysis of variance								
	W	ns	ns	ns	*	ns	*	**	**
	F	**	**	*	***	***	***	***	ns
	W×F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

CK: 不灌咸水不施肥; N: 不灌咸水施N; NP: 不灌咸水施NP; WCK: 灌咸水不施肥; WN: 灌咸水施N; WNP: 灌咸水施NP; W: 灌水处理; F: 施肥处理; W×F: 二者的交互效应; 表中数据为平均值±SE (n=3)。同列同一日期2个水处理组内的不同小写和大写字母分别表示不同施肥处理间在P<0.05和P<0.01水平差异显著。*、**和***分别表示在P<0.05、P<0.01和P<0.001水平差异显著; ns表示差异不显著。CK: neither irrigation nor fertilization; N: N fertilization without irrigation; NP: N and P fertilization without irrigation; WCK: saline irrigation without fertilization; WN: saline irrigation with N fertilization; WNP: saline irrigation with N and P fertilization; W: saline irrigation; F: fertilization; W×F: interaction of the two factors. Values are means±SE (n=3). Different lowercase letters and uppercase letters in the same column and in same date indicate significant differences at P<0.05 and P<0.01 level, respectively, among different treatments. *, ** and *** indicate significant differences at P<0.05, P<0.01, and P<0.001 levels, respectively. “ns” indicates no significant differences.

的处理平均减少 13.3 个百分点 (P<0.001), 但对春夏季柽柳的株高、茎粗、分蘖数和鲜重等没有显著影响 (表 1); 施肥显著促进柽柳的生长, 与对照 CK 相比, N 与 NP 处理的株高平均增长 6.6% 与 17.2% (P<0.01), 鲜重增加 47.3% 和 82.5% (P<0.05), 干重提高 39.7% 与 69.6% (P<0.01), 含水率提高 11.6 与 10.5 个百分点 (P<0.01)。咸水灌溉下, 与对照 WCK 相比, WN 与 WNP 处理的株高分别增长 13.4% 与 18.4% (P<0.05), 基茎增粗 25.7% 与 27.0% (P<0.05), 蘖枝数变化不显著, 鲜重增加 40.7%与 75.2% (P<0.05), 干重分别提高 43.0% 与 68.0% (P<0.01)。灌咸水与施肥的交互作用对柽柳植株干重 (P<0.01) 和含水率 (P<0.001) 有极显著影响。

试验当年 (2008 年) 秋季 (9 月中旬) 调查结果表明, 与不灌咸水相比, 灌咸水显著影响柽柳植株鲜重、茎与叶的干重及植株含水率, 植株平均鲜重与叶干重分别下降 9.5% 和 12.3% (P<0.05), 而茎干重平均增加 2.1% (P<0.01), 植株含水率下降 13.1 个百分点 (P<0.01)。与对照 CK 相比, N 与 NP 处理的株高分别增加 11.8% 与 20.4% (P<0.01), 茎增粗 29.2% 与 32.6% (P<0.01), 鲜重增加 69.6% 与 1.09 倍 (P<0.05), 蘖枝数增加 41.8% 与 67.4% (P<0.05), 柽柳叶干重增加 56.9% 与 93.9% (P<0.05), 茎干重增加 82.1% 与 1.16 倍 (P<0.05), 植株干重分别提高 71.5% 与 1.07 倍 (P<0.01); 灌咸水条件下, 与对照 WCK 相比, WN 与 WNP 处理的株高分别增加 14.0% 与 21.7% (P<0.01), 茎增粗 27.9% 与 36.0% (P<0.01), 蘖枝数增加 37.5% 与 47.9% (P<0.05), 柽柳鲜重增加 75.3% 与 1.11 倍 (P<0.05), 柽柳叶干重增加 61.7% 与 1.00 倍 (P<0.05), 茎干重增加 73.3% 与 1.06 倍 (P<0.05), 植株干重分别提高 68.8% 与 1.04 倍 (P<0.01)。

2.2　不同水肥处理对柽柳植株生长动态的影响

对柽柳的生长动态调查结果显示 (图 1), NP 处理能显著促进柽柳株高、茎粗和冠幅, 比单施氮肥 (N) 和 CK 处理株高平均增加 19.6 cm 和 29.4 cm, 茎粗增加 0.9 mm 和 2.7 mm, 冠幅增加 10.5 cm 和 17.4 cm; 比灌溉咸水处理 (WNP) 的株高、茎粗和冠幅平均分别增加 18.9 cm、2 mm 和 14.2 cm。4—11 月的生育期内灌溉咸水组各施肥处理的柽柳株高、茎粗和冠幅比不灌咸水组相对应处理平均下降 8.0 cm、1.2 mm 和 4.86 cm, 特别是只灌咸水不施肥处理 (WCK) 生长状况最差; 但是, 灌溉咸水条件的 WN 和 WNP 处理的株高、茎粗和冠幅均比 WCK 显著提高, 尤其是 WNP 处理对柽柳分蘖有极显著的促进作用, 整个生

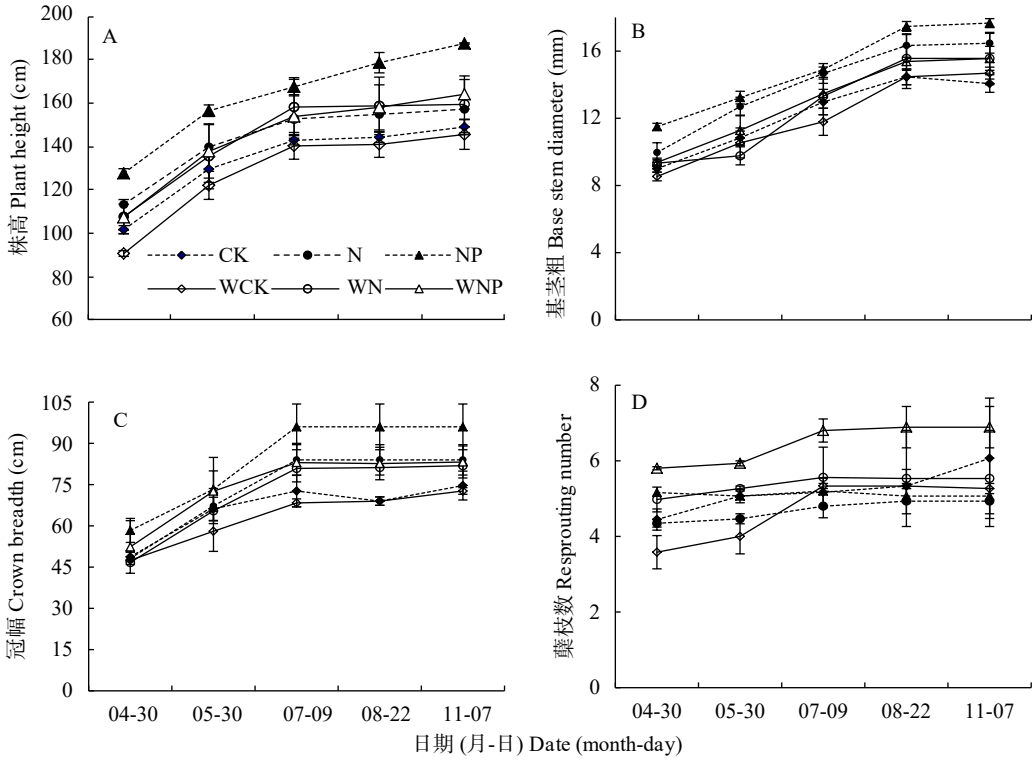

图 1　咸水灌溉与施肥处理下柽柳株高 (A)、茎粗 (B)、冠幅 (C) 和分蘖 (D) 的生长动态

Fig. 1　Dynamics of plant height (A), stem diameter (B), crown breadth (C), tillering number (D) of *Tamarix chinensis* under different treatments of fertilization and irrigation of saline water

CK: 不灌咸水不施肥; N: 不灌咸水施 N; NP: 不灌咸水施 NP; WCK: 灌咸水不施肥; WN: 灌咸水施 N; WNP: 灌咸水施 NP。CK: neither irrigation nor fertilization; N: N fertilization without irrigation; NP: N and P fertilization without irrigation; WCK: saline irrigation without fertilization; WN: saline irrigation with N fertilization; WNP: saline irrigation with N and P fertilization.

育期的蘖枝数均显著高于其他处理 (P<0.05), 比不灌咸水的 NP 处理增加 27.1%, 比 CK 和 WCK 分别增加 24.6% 和 38.2%, 比 N 和 WN 分别增加 38.4% 和 20.9%。

2.3 不同水肥处理的柽柳植株生长速率

柽柳株高在春季—初冬生育期内的生长速率的变化呈坡状下降趋势 (图 2A)。以春季生长最快, 之后总体呈急剧下降趋势, 7—8 月间, 柽柳株高增长几乎停止, 8 月下旬, 株高的生长率呈缓慢回升态势, 灌溉咸水能显著减缓柽柳株高生长速率的下降。不灌咸水的 NP 处理在春季的生长率下降最快, 但株高生长速率下降的拐点比其他处理提前 1 个月, 之后株高平稳生长, 至 11 月初仍能保持 1.84 mm·d^{-1} 生长速率; 其他处理的株高生长率持续下降, 在 7 月中旬出现拐点值, 同期 NP 处理的生长速率 (2.58 mm·d^{-1}) 是 WNP 处理拐点值 (0.98 mm·d^{-1}) 的 2.65 倍, 是不施肥 (CK、WCK) 和单施氮处理 (N、WN) 的 5~20 倍。

柽柳茎的增粗主要在春—夏末 (4—8 月), 这一时段茎粗保持相对较高的增速 (图 2B), 8 月入秋之后柽柳增粗的速率急剧下降, 8 月下旬以后增粗停滞。不同处理对柽柳茎粗增长速率影响差异较大, 不灌咸水 N 处理茎增粗速率最高点发生在春季, 之后呈急剧下降; NP 和 WCK 处理的茎在 5—6 月的增粗速率呈下降趋势, 但在暑期 (7—8 月) 增粗速率明显回升; WN 处理在春季增粗速率低于其他处理, 但在春—夏季迅速增粗, 夏季来临前茎粗增速达最大值, 之后进入下降趋势; WNP 处理在春—初冬季的生育期内呈下降趋势, 但 4—6 月间茎增粗速率显著高于不灌水的 NP 处理, 暑期 (7—8 月) 反被 NP 处理超越, 8 月入秋以后增粗速率急剧下降。

冠幅增加速率与株高相近, 冠幅增大速率与株高生长速率几乎同步呈坡状下降趋势 (图 2C)。WNP

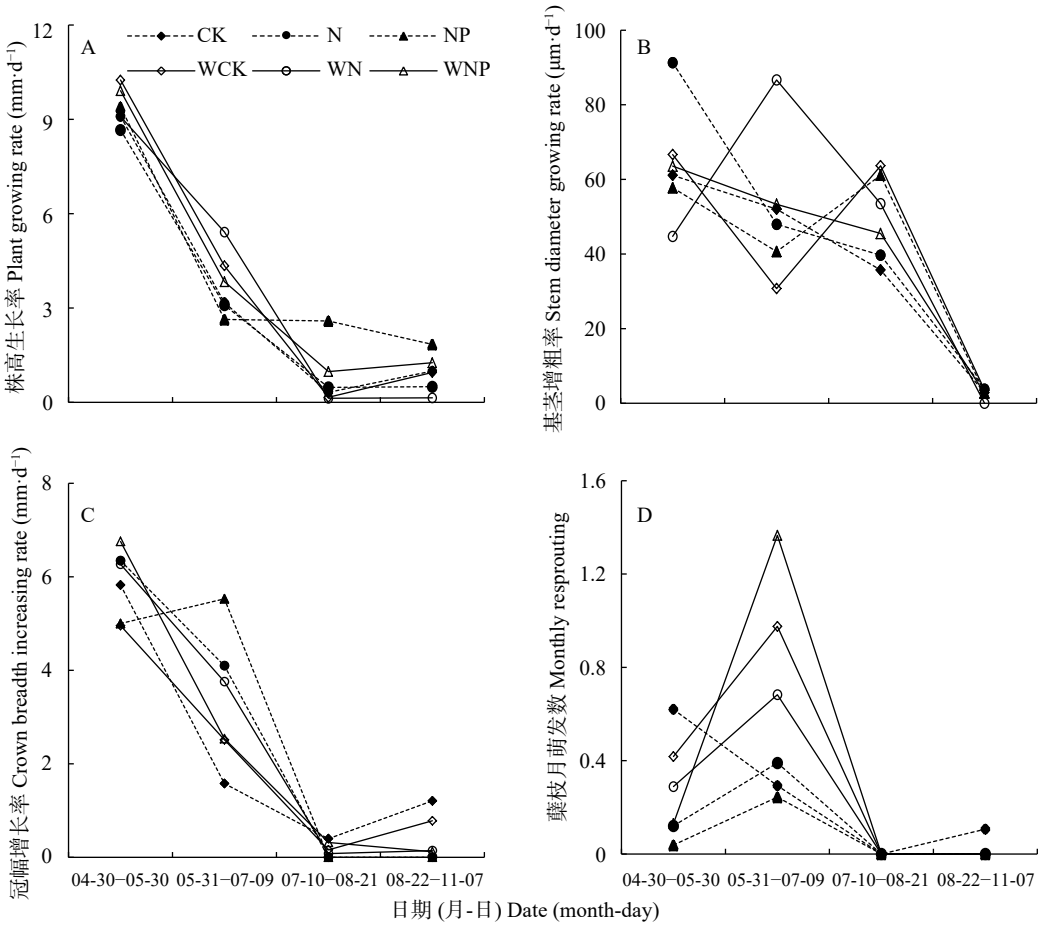

图 2 咸水灌溉与施肥处理对柽柳株高 (A)、茎粗 (B)、冠幅 (C)、分蘖 (D) 增长速率的影响

Fig. 2 Growing speeds of plant height (A), stem diameter (B), crown breadth (C), tillering number (D) of *Tamarix chinensis* under different treatments of fertilization and irrigation of saline water

CK: 不灌咸水不施肥; N: 不灌咸水施 N; NP: 不灌咸水施 NP; WCK: 灌咸水不施肥; WN: 灌咸水施 N; WNP: 灌咸水施 NP。CK: neither irrigation nor fertilization; N: N fertilization without irrigation; NP: N and P fertilization without irrigation; WCK: saline irrigation without fertilization; WN: saline irrigation with N fertilization; WNP: saline irrigation with N and P fertilization.

处理在早春冠幅增加速率最高, 但随后冠幅的增加率迅速下降; 而 NP 处理的冠幅增长速率在春季最低, 与 WCK 的生长速率相同, 但在春—夏季有短暂的增加趋势, 7—8 月暑期冠幅不再增大, 8 月下旬以后随株高生长而缓慢增长。

柽柳蘖枝的萌发速率呈先升后降的趋势, 春季分蘖速率并不高, 但春—夏季 (5—6 月) 分蘖迅速升高, 至 6 月中旬分蘖速率达高峰, 之后迅速下降, 进入暑期 (7—8 月) 分蘖停止。4—5 月间 CK 和 WCK 处理的分蘖速率最高。初夏季 (6 月) 灌溉咸水组各处理的蘖枝萌发率比不灌咸水平均提高 3.26 倍, 此时 WNP 处理蘖枝萌发速率是 NP 处理的 5.6 倍 (图 2D)。

2.4　不同水肥处理对柽柳茎杆和叶片养分的影响

灌咸水与施肥处理均对柽柳茎杆的 N 含量有极显著影响 (表 2)。灌咸水柽柳茎杆的 N 含量比不灌咸水处理平均下降 13.2% (P<0.01); 不灌咸水情况下 N 或 NP 处理分别比 CK 提高茎杆 N 含量 44.0% 和 22.0% (P<0.01); 灌溉咸水条件下的 WN 和 WNP 处理分别比 WCK 处理可提高柽柳茎杆 N 含量 14.3% 和 12.2% (P<0.01); WCK、WN 和 WNP 处理比不灌咸水的 CK、N 与 NP 处理的茎杆氮含量分别下降 2.0%、23.6% 和 11.5% (P<0.05)。灌咸水对柽柳茎杆的 P、K 和 C 含量没有显著影响, 但是灌溉咸水同时施肥则对茎杆有机碳含量产生一定影响 (P<0.1)。

表 2　咸水灌溉与施肥处理对柽柳茎叶养分和碳含量的影响

Table 2　Nutrients and C contents of stem and leaf of *Tamarix chinensis* under different treatments fertilization and irrigation of saline water　$g \cdot kg^{-1}$

部位 Organ	处理 Treatment	N	P	K	C
茎杆 Stem	CK	5.0±0.02C	2.6±0.10	7.3±0.38	431.0±4.01
	N	7.2±0.08A	2.4±0.21	8.3±0.60	429.8±1.72
	NP	6.1±0.27B	2.4±0.20	7.5±0.39	426.7±0.66
	WCK	4.9±0.07b	2.5±0.12	7.2±0.16	429.4±5.15
	WN	5.5±0.24a	2.2±0.32	7.4±0.15	411.3±3.11
	WNP	5.4±0.07a	2.3±0.07	7.8±0.30	431.1±9.10
	2因素方差分析差异来源 Two-factorial analysis of variance				
	W	**	ns	ns	ns
	F	***	ns	ns	#
	W×F	*	ns	ns	#
叶片 Leaf	CK	19.9±0.22b	3.7±0.14	10.31±0.46	382.6±6.11
	N	23.5±0.82a	3.9±0.15	10.74±0.40	384.2±5.49
	NP	23.0±1.20ab	3.6±0.06	9.99±0.46	382.2±4.49
	WCK	20.1±0.27b	4.2±0.06	9.70±0.33b	380.8±2.79
	WN	20.9±0.49ab	4.1±0.08	10.90±0.24a	375.6±8.65
	WNP	21.9±0.31a	4.2±0.14	10.40±0.20ab	374.2±6.88
	2因素方差分析差异来源 Two-factorial analysis of variance				
	W	*	**	ns	ns
	F	*	ns	#	ns
	W×F	*	ns	*	ns

CK: 不灌咸水不施肥; N: 不灌咸水施N; NP: 不灌咸水施NP; WCK: 灌咸水不施肥; WN: 灌咸水施N; WNP: 灌咸水施NP; W: 灌咸水处理; F: 施肥处理; W×F: 二者的交互效应; 表中数据为平均值±SE (n=3)。同一部位同列不同水处理组内的不同小写和大写字母分别表示不同处理在P<0.05和P<0.01水平差异显著。#、*、**和***分别表示在P<0.1、P<0.05、P<0.01和P<0.001水平差异显著; ns表示差异不显著。CK: neither irrigation nor fertilization; N: N fertilization without irrigation; NP: N and P fertilization without irrigation; WCK: saline irrigation without fertilization; WN: saline irrigation with N fertilization; WNP: saline irrigation with N and P fertilization; W: saline irrigation; F: fertilization; W×F: interaction of the two factors. Values are means±SE (n=3). Different lowercase letters and uppercase letters respectively, in the same column and of the same organ indicate significant differences at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively, among different treatments. #, *, ** and *** indicate significant differences at P<0.1, P<0.05, P<0.01, and P<0.001 levels, respectively; "ns" indicates no significant differences.

灌咸水比不灌咸水处理的柽柳叶片 N 含量平均下降 5.3%, WN 与 WNP 处理比 N 与 NP 处理的叶片 N 含量分别下降 11.1% 和 8.7% (P<0.05); 而叶片 P 含量平均提高 11.8% (P<0.01)。施肥显著提高柽柳叶片的 N、K 含量, N 和 NP 处理比 CK 的叶片 N 含量提高 18.1% 和 15.7%; WN 和 WNP 处理分别比 WCK 处理的 N 含量提高 4.4% 和 9.1%, 同时 K 含量提高 12.7% 和 8.0%。与不灌咸水相比, 灌溉咸水与施肥的交互作用对叶片 N、K 含量影响显著 (P<0.05), 但对叶片 P 和 C 含量影响不显著。不灌溉咸水时柽柳叶片的 N、P、K 含量分别是茎杆的 3.62 倍、1.51 倍和 1.34 倍, 灌溉咸水后分别上升至 3.92 倍、1.79

倍和 1.38 倍; 而 C 含量变化不明显。

2.5 不同水肥处理对柽柳茎杆和叶片盐分离子的影响

灌咸水与施肥对柽柳茎杆 Na^+没有显著影响, 但灌溉咸水的柽柳茎杆 Ca^{2+}与 Mg^{2+}含量分别比不灌咸水平均降低 12.8% (P<0.05) 与 21.0% (P<0.01); 相同施肥处理下, WN 比 N 的茎杆 Mg^{2+}下降 22.4% (P<0.01), WNP 比 NP 处理的茎杆 Mg^{2+}下降 20.4% (P<0.05); WN 和 WNP 处理比 WCK 处理的茎杆 Ca^{2+}分别提高 32.5% 和 26.7% (P<0.05), Mg^{2+}分别提高 22.4% 和 11.2% (P<0.05); 不灌咸水条件下施 N 与 NP 处理比对照 CK 茎杆 Mg^{2+}含量分别提高 25.2% 与 11.3%(P<0.05)。灌溉咸水和施肥打破了柽柳茎杆的盐分离子的平衡 (表 3)。

表 3 咸水灌溉与施肥处理对柽柳茎杆盐基离子含量及离子比的影响

Table 3 Effect of fertilization and irrigation of saline water on stem ions contents and ions ratios of *Tamarix chinensis*

部位 Organ	处理 Treatment	Na^+ (mg·g^{-1})	Ca^{2+} (mg·g^{-1})	Mg^{2+} (mg·g^{-1})	K/Na	Na/Ca	Ca/Mg	K/Ca
茎杆 Stem	CK	3.75±0.17	1.65±0.03a	1.23±0.03b	1.95	2.27	1.34	4.42
	N	4.14±0.19	1.66±0.08a	1.53±0.13a	2.00	2.49	1.08	5.00
	NP	3.51±0.20	1.51±0.08a	1.37±0.07ab	2.14	2.32	1.10	4.97
	WCK	3.45±0.12	1.20±0.05b	0.98±0.11b	2.09	2.88	1.22	6.00
	WN	3.74±0.24	1.59±0.10a	1.20±0.07a	1.98	2.35	1.33	4.65
	WNP	3.86±0.26	1.52±0.21ab	1.09±0.08ab	2.02	2.54	1.39	5.13
	2因素方差分析差异来源 Two-factorial analysis of variance							
	W	ns	*	**				
	F	ns	ns	*				
	W×F	ns	ns	ns				
叶片 Leaf	CK	9.20±0.72B	13.26±0.62b	5.18±0.06	1.12	0.69	2.56	0.78
	N	11.61±1.09A	14.04±0.47ab	5.34±0.11	0.93	0.83	2.63	0.76
	NP	12.22±2.34A	15.34±0.10a	5.64±0.09	0.82	0.80	2.72	0.65
	WCK	9.58±0.32B	15.71±0.34b	5.19±0.02b	1.01	0.61	3.03	0.62
	WN	11.75±1.41A	16.89±6.64ab	6.13±0.31ab	1.01	0.64	2.76	0.65
	WNP	11.54±1.23A	18.04±1.10a	6.37±0.26a	0.90	0.64	2.83	0.58
	2因素方差分析差异来源 Two-factorial analysis of variance							
	W	ns	***	**				
	F	**	**	**				
	W×F	#	ns	ns				

CK: 不灌咸水不施肥; N: 不灌咸水施N; NP: 不灌咸水施NP; WCK: 灌咸水不施肥; WN: 灌咸水施N; WNP: 灌咸水施NP; W: 灌咸水处理; F: 施肥处理; W×F: 二者的交互效应; 表中数据为平均值±SE (n=3)。同一部位同列不同水处理组内的不同小写和大写字母分别表示不同处理在P<0.05和P<0.01水平差异显著。#、*、**和***分别表示在P<0.1、P<0.05、P<0.01和P<0.001水平差异显著; ns表示差异不显著。CK: neither irrigation nor fertilization; N: N fertilization without irrigation; NP: N and P fertilization without irrigation; WCK: saline irrigation without fertilization; WN: saline irrigation with N fertilization; WNP: saline irrigation with N and P fertilization; W: saline irrigation; F: fertilization; W×F: interaction of the two factors. Values are means±SE (n=3). Different lowercase letters and uppercase letters in the same column and of the same organ indicate significant differences at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively, among different treatments. #, *, ** and *** indicate significant differences at P<0.1, P<0.05, P<0.01, and P<0.001 levels, respectively; "ns" indicates no significant differences.

从表 3 中的离子比也可以看出, 灌溉咸水柽柳叶片 Na/Ca 和 K/Ca 比下降, 而 Ca/Mg 上升, 其中, 灌溉咸水的 WNP 处理比 WCK 的柽柳叶片 K/Na、K/Ca 和 Ca/Mg 均有下降的趋势。不灌咸水条件的 N 和 NP 处理比 CK 的茎杆 K/Na、Na/Ca 和 K/Ca 比上升, 而 Ca/Mg 下降; 相反, 灌溉咸水后的 WN 与 WNP 比 WCK 处理的茎杆 K/Na、Na/Ca 和 K/Ca 比均下降, 而 Ca/Mg 上升的趋势。

从表 3 可知, 灌溉咸水对叶片 Na^+含量没显著影响, 但施肥均显著提高了柽柳叶片的 Na^+含量 (P<0.01), N 与 NP 处理分别比 CK 处理的柽柳叶片 Na^+含量提高 26.2% 与 32.8% (P<0.01), WN 和 WNP 处理分别比 WCK 处理的叶片 Na^+含量提高 22.7% 与 20.5% (P<0.01)。灌溉咸水比不灌溉咸水的柽柳叶片 Ca^{2+}含量平均提高 18.8% (P<0.001), 不灌溉咸水条件下, N 和 NP 处理分别比 CK 处理的柽柳叶片 Ca^{2+}含量提高 5.88% 和 15.6% (P<0.05), 灌溉咸水条件下 WN 和 WNP 处理比 WCK 处理的叶片 Ca^{2+}分别提高 7.5% 和 14.8% (P<0.05)。施肥处理相同条件下, WN 与 WNP 处理分别比 N 与 NP 处理的叶片 Ca^{2+}提高 20.3% 和 17.6% (P<0.01)。灌溉咸水比不灌咸水的柽柳叶片 Mg^{2+}平均提高 9.3% (P<0.01), 灌溉咸水条件下的 WN 与 WNP 处理比对照 WCK 的柽柳叶片的 Mg^{2+}含量分别提高 17.9% 和 22.7% (P<0.05), 不灌

咸水条件下施肥对 Mg^{2+}含量影响不显著 (表 3)。施肥处理相同条件下, WN 与 WNP 处理分别比 N 与 NP 处理的叶片 Mg^{2+}含量提高 14.7% 和 13.0% ($P<0.01$)。

灌溉咸水和施肥后柽柳茎杆与叶的盐分比例发生改变。不灌溉咸水时柽柳叶片的 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}含量分别是茎杆的 2.92 倍、8.88 倍和 3.94 倍, 灌溉咸水后分别为 2.88 倍、11.86 倍和 5.41 倍。可见, 灌溉咸水后叶片中的 Ca^{2+}、Mg^{2+}明显提高, Na^+略有下降 (表 3)。

3　讨论

3.1　灌溉咸水与施 NP 对柽柳生物学性状的影响

与之前的报道一致[13], 本研究也发现灌溉咸水引起柽柳植株鲜重与叶干重的显著下降, 但柽柳的茎干重显著增加, 表明叶片比茎杆受咸水的影响大; 灌溉咸水的柽柳植株含水率在 7 月与 9 月平均分别下降 13.3 个和 13.1 个百分点。植株受盐胁迫失水, 与蒸腾作用及光合作用密切相关, 因为植株叶片通过气孔进行 CO_2/H_2O 气体交换, 实现植株体内的 H_2O 与环境 CO_2 的相互作用; 盐胁迫条件下植株完成光合作用获得最终产物的过程是以失去更多水分为代价, 即通过加大蒸腾来促使有机碳积累和植株生长[14]。本研究结果中灌溉咸水的柽柳茎杆与叶片 C 含量没有明显变化, 植株干重不减反增, 也证实了为保证固碳量和茎干重不减, 柽柳是以加大植株蒸腾失水为代价的, 植株失水首先受影响的就是叶片, 这也就解释了灌溉咸水柽柳叶片干重降低的原因。

传统理论认为, N 素对植物营养贡献最大, 因为 N 与植株 C 固持的相关性最大[15]。滨海重盐碱地人工柽柳灌溉咸水条件下的现有施肥技术也仅施氮肥[16]。然而, 本研究中灌溉咸水条件下的 WNP 处理的柽柳株高、茎粗、分蘖、植株干重及含水率均显著高于 WN 处理 (表 1), 本研究结果与 Warren 等[17]报道一致, 在佐证 P 对树木植株不可或缺的作用同时, 并对滨海重盐碱地人工柽柳现有的单施氮肥的技术提出质疑。

3.2　灌溉咸水与施肥处理对柽柳生长发育动态的影响

本研究发现, 春季是柽柳生长的最佳时节, 植株长高、茎增粗、冠幅增大和分蘖主要发生在春—夏季, 但并不是同步进行 (图 2)。柽柳的生长与蘖枝萌发速率不同步归因于各组织器官发育成长需要独特的温度所驱动[18]。而灌咸水与 NP 处理直接影响柽柳生长与分蘖的速率。相同施肥处理条件下灌溉咸水处理的柽柳长势 (株高、茎粗) 明显低于不灌咸水处理 (图 1), 表明连续灌溉咸水加剧了柽柳的盐胁迫, 这可以从土壤盐分含量上升得到解释 (数据待发表)。但施 NP 能显著缓解盐胁迫, 表现在不灌水条件下的 NP 处理的柽柳长势 (株高、茎粗、冠幅) 明显优于其他处理 (图 1), 且灌溉咸水条件下的 WNP 可延缓株高和茎粗在春—夏时段内 (5—6 月) 生长速率下降, 但能加速这一时段蘖枝萌发 (图 2)。表明在连续灌溉咸水盐胁迫加剧条件下, WNP 处理以加速萌发蘖枝补偿长高和增粗受到的抑制, 或者说受连续灌溉咸水胁迫时, 柽柳利用 WNP 的条件蘖枝优先萌发, 以使后代能适应新的水盐环境。华北地区春季气候回升, 极易返盐, 春季灌溉地下咸水可稀释土壤表层高浓度的盐分, 有效缓解春旱; 其次, 灌溉咸水土壤湿度增加利于养分吸收, 特别是 P 营养的吸收, 这与灌溉咸水处理提高柽柳叶片 P 含量相互印证 (表 2)。反过来, 土壤 N、P 营养及咸水中必需盐基离子对植株的及时供给, 使得柽柳生长速率的下降可得到有效缓解。此前也有研究报道, 在盐碱地灌溉微咸水后柽柳的生长、光合能力、蒸腾耗水量和水分利用效率均比淡水效果显著[19]。

3.3　灌溉咸水与施肥处理对植株茎杆和叶片养分、有机碳与盐分含量的影响

灌溉咸水与施肥处理均对柽柳茎杆的 N 含量有极显著影响 (表 1)。灌溉咸水处理的柽柳茎杆和叶片的 N 含量显著下降。尽管施 N 或 NP 可提高茎杆与叶片的 N 含量, 但相同施肥量下咸水灌溉处理的茎杆和叶片 N 含量显著下降, 但 WNP 处理的下降幅度低于 WN 处理。可见, 灌溉咸水下的施 NP 可缓解咸水对 N 吸收的抑制, 即灌溉咸水条件下更需要增施磷肥以增加柽柳对 N 的吸收。这是因为 N 的作用与土壤 P 含量密切相关[19], 土壤 P 不足会限制 N 的吸收及光合作用的功能发挥[19-21], 反过来, 增施磷肥则利于 N 的吸收和光合作用。

灌溉咸水对柽柳茎杆的 P、K 和 C 含量没有显著影响, 但柽柳叶片 P 含量显著提高。由于土壤 P 含量直接关系叶片 P 和叶片 N 的含量[19,22], 那么灌溉咸水是土壤难溶性 P 得以活化还是促进了 P 的吸收并向叶片转移值得进一步研究。

Zhu[23] 认为, 盐胁迫条件下植株大量吸收 Na^+, 并取代 K^+, 导致 K^+下降, Na/K 比提高。本研究中从施肥后叶片 Na^+与 K^+含量的提升比例可以看出, 柽柳叶片 Na^+含量提升高于 K^+, 但在茎杆中不明显。K^+既是重要的营养元素, 同时也具有渗透调节作用, 不是所

有部位都因土壤溶液中 Na^+多而大量吸收或以 Na^+代 K^+，这与 Wright 等[24] 的研究结果一致。

与不灌咸水相比，灌咸水后柽柳茎杆 Ca^{2+}与 Mg^{2+}含量显著降低，但叶片 Ca^{2+}与 Mg^{2+}含量提高(表 3)。表明 WNP 处理促进 Ca^{2+}和 Mg^{2+}从茎杆向叶片转移，打破了这 2 种离子在柽柳茎杆与叶片分布的平衡。这印证了灌溉咸水引起柽柳植株失水是因为蒸腾量加大的报道[14]，水分蒸腾过程中同时装载更多 Ca^{2+}和 Mg^{2+}从茎杆向叶片运转。表明柽柳植株对盐基离子 Ca^{2+}、Mg^{2+}和 Na^+运输具有选择性[25-26]。结合灌溉咸水叶片 P 含量的显著提升，可以推侧 PO_4^{2-}可能与 Ca^{2+}和 Mg^{2+}同时借蒸腾作用被运输到叶片，但这些离子是否协同吸收、运转还需通过进一步研究证实。

4 结论

首次灌溉咸水极显著地降低柽柳植株含水率、植株鲜重与叶干重，但不影响茎干重。连续灌溉咸水抑制柽柳生长，但蘖枝萌发率显著提高，茎杆与叶片的 N 含量显著下降，但柽柳叶 P 含量平均提高 11.8%。灌溉咸水条件下施氮磷肥 (WNP) 处理可减缓春—夏季 (5—6 月) 柽柳长高与增粗速率的下降，加速蘖枝萌发，提高叶片 N、K 含量，促进 Ca^{2+}和 Mg^{2+}从茎杆向叶片转移，改变 Ca^{2+}和 Mg^{2+}离子在茎叶的分布。连续灌咸水抑制柽柳生长的负面作用不可忽视，但灌溉咸水条件下 WNP 处理可通过加速分蘖、促进养分吸收和盐基离子运输来缓解其负面影响。

致谢: 感谢中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心张秀梅高级工程师协助调查采集部分植株数据！

参考文献 References

[1] 肖克飚，吴普特，雷金银，等. 不同类型耐盐植物对盐碱土生物改良研究[J]. 农业环境科学学报，2012，31(12): 2433−2440
XIAO K B, WU P T, LEI J Y, et al. Bio-reclamation of different halophytes on saline-alkali soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(12): 2433−2440

[2] XIE L P, WANG B D, XIN M, et al. Impacts of coppicing on *Tamarix chinensis* growth and carbon stocks in coastal wetlands in northern China[J]. Ecological Engineering, 2020, 147: 1−8

[3] XU X L, MA K M, FU B J, et al. Relationships between vegetation and soil and topography in a dry warm river valley, SW China[J]. CATENA, 2008, 75(2): 138−145

[4] 程文娟，潘洁，肖辉，等. 咸水结冰灌溉结合改良剂对滨海盐土的改良作用[J]. 中国生态农业学报，2011，19(4): 778−782
CHENG W J, PAN J, XIAO H, et al. Effect of combined frozen saline water irrigation and soil amendment on coastal saline land reclamation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 778−782

[5] 魏新燕，刘小京. 咸水结冰灌溉对滨海盐碱地不同植被根区土壤微生物的影响[J]. 河北农业大学学报，2014，37(1): 22−26
WEI X Y, LIU X J. Microbial ecological characteristics of planted saline-alkali soil in coastal saline area by freezing saline water irrigation[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2014, 37(1): 22−26

[6] 王鹏，赵成义，李君. 地下水埋深及矿化度对多枝柽柳幼苗光合特征及生长的影响[J]. 水土保持通报，2012，32(2): 84−89
WANG P, ZHAO C Y, LI J. Effects of groundwater depth and mineralization degree on photosynthesis and growth of *Tamarix ramosissima* seedlings[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 84−89

[7] 马学喜，李生宇，徐新文，等. 咸水灌溉对三种柽柳幼苗成活和生长状况的影响[J]. 干旱区资源与环境，2016，30(1): 185−190
MA X X, LI S Y, XU X W, et al. Effects of different mineralized irrigation water on seedling survival and growth of three species of *Tamarix* in Taklimakan desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(1): 185−190

[8] XIA J B, ZHAO X M, REN J Y, et al. Photosynthetic and water physiological characteristics of *Tamarix chinensis* under different groundwater salinity conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 138: 173−183

[9] 汪宗飞，何新林，张明. 幼年期柽柳对不同矿化度微咸水灌溉响应的初步研究[J]. 节水灌溉，2011，(1): 6−9
WANG Z F, HE X L, ZHANG M. Priliminary study on respond of tamarxi ramossisima in young period to irrigation with different salinity slightly saline water[J]. Water Saving Irrigation, 2011, (1): 6−9

[10] LIU Z Y, LI X P, ZHANG T Q, et al. Overexpression of $ThMYB_8$ mediates salt stress tolerance by directly activating stress-responsive gene expression[J]. Plant Science, 2021, 302: 1−33

[11] 解婷婷，张希明，单立山，等. 灌溉量对多枝柽柳水分生理及生长的影响[J]. 干旱区研究，2008，25(6): 802−807
XIE T T, ZHANG X M, SHAN L S, et al. Effect of irrigation volume on the water physiological characters and growth of *Tamarix ramosissima* shelter belts along the Tarim desert highway[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(6): 802−807

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社，2007: 264–270
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 264–270

[13] LIU J H, XIA J B, FANG Y M, et al. Effects of salt-drought stress on growth and physiobiochemical characteristics of *Tamarix chinensis* seedlings[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 1−7

[14] REYNOLDS L L, JOHNSON B R, PFEIFER-MEISTER L, et

al. Soil respiration response to climate change in Pacific Northwest prairies is mediated by a regional Mediterranean climate gradient[J]. Global Change Biology, 2015, 21(1): 487−500

[15] CONROY J P, MILHAM P J, REED M L, et al. Increases in phosphorus requirements for CO_2-enriched pine species[J]. Plant Physiology, 1990, 92(4): 977−982

[16] 中国科学院遗传与发育生物学研究所. 滨海重盐碱地柽柳直接扦插成林的方法: 中国, 201110231187.2[P/OL]. [2013-01-02]. http://www.soopat.com/Patent/201110231187?lx=FMSQ Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences. Method for planting *Tamarix chinensis* cutting in coastal saline soil: China, 201110231187.2[P/OL]. [2013-01-02]. http://www.soopat.com/Patent/201110231187?lx=FMSQ

[17] WARREN C R, MCGRATH J F, ADAMS M A. Differential effects of N, P and K on photosynthesis and partitioning of N in *Pinus pinaster* needles[J]. Annals of Forest Science, 2005, 62(1): 1−8

[18] XIA J B, ZHANG S Y, GUO J, et al. Critical effects of gas exchange parameters in *Tamarix chinensis* Lour on soil water and its relevant environmental factors on a shell ridge island in China's Yellow River Delta[J]. Ecological Engineering, 2015, 76: 36−46

[19] REICH P B, OLEKSYN J, WRIGHT I J. Leaf phosphorus influences the photosynthesis-nitrogen relation: a cross-biome analysis of 314 species[J]. Oecologia, 2009, 160(2): 207−212

[20] REICH P B, TJOELKER M G, PREGITZER K S, et al. Scaling of respiration to nitrogen in leaves, stems and roots of higher land plants[J]. Ecology Letters, 2008, 11(8): 793−801

[21] JOHNSON A H, FRIZANO J, VANN D R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure[J]. Oecologia, 2003, 135(4): 487−499

[22] CLEVELAND C C, TOWNSEND A R, TAYLOR P, et al. Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: a pan-tropical analysis[J]. Ecology Letters, 2011, 14(9): 939−947

[23] ZHU J K. Regulation of ion homeostasis under salt stress[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 6(5): 441−445

[24] WRIGHT S J, YAVITT J B, WURZBURGER N, et al. Potassium, phosphorus, or nitrogen limit root allocation, tree growth, or litter production in a lowland tropical forest[J]. Ecology, 2011, 92(8): 1616−1625

[25] LI X Q, XIA J B, ZHAO X M, et al. Effects of planting *Tamarix chinensis* on shallow soil water and salt content under different groundwater depths in the Yellow River Delta[J]. Geoderma, 2019, 335: 104−111

[26] ZHAO X M, XIA J B, CHEN W F, et al. Transport characteristics of salt ions in soil columns planted with *Tamarix chinensis* under different groundwater levels[J]. PLoS One, 2019, 14(4): 1−17