DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.06.025
胡鑫隆, 齐继, 于千钧, 等. 黄河三角洲不同长势柽柳对土壤水盐异质性的影响. 土壤, 2022, 54(6): 1291–1299.

黄河三角洲不同长势柽柳对土壤水盐异质性的影响①

胡鑫隆[1,2], 齐 继[1,2], 于千钧[1,2], 刘金娣[1], 潘英华[1,2], 陈小兵[3], 胡秋丽[1,2*], 赵 英[1,2]

(1 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东烟台 264025; 2 烟台市滨海生态水文过程与环境安全重点实验室, 山东烟台 264025; 3 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

摘 要: 黄河三角洲土壤水盐变化剧烈, 为探究当地柽柳灌丛土壤水盐变化特征及其影响因素, 以恢复柽柳群落生态, 在黄河三角洲选定长势较差(N_1)和较好(N_2)的 2 处天然柽柳林, 对比分析两处地下水状况、土壤含水率、盐分富集率及 Cl^-、Na^+的时空变化。结果表明: ①N_2样地地下水平均埋深和矿化度都大于 N_1样地; ②雨季时 N_2样地土壤含水率高于 N_1样地, 旱季则相反, 尤以内围区(距植株水平距离 0 ~ 30 cm)更明显; ③两地土壤盐分皆随土壤深度增加而递减, 在雨季和旱季分布呈“盐谷”和“盐岛”特征, 且 N_2样地的“盐谷”效应强于 N_1样地; ④雨季时 N_2样地内围区 Cl^-、Na^+ 含量整体低于外围区(距植株水平距离 30 ~ 90 cm), 呈“左–右”空间分异, 而 N_1样地呈“上–下”空间分异, 再次说明 N_2样地雨季“盐谷”效应更强。综上, 柽柳形成“盐谷/岛”效应是其适应高盐环境的重要策略。因此, 通过柽柳适生种植, 促进柽柳冠层生长以增强“盐谷/岛”效应是确保柽柳群落恢复和稳定的有效措施。

关键词: 柽柳; 土壤水分; 土壤盐分; 时空变化; 黄河三角洲
中图分类号: S151.9 **文献标志码:** A

Effects of Different *Tamarix chinensis* Growth on Variability of Soil Moisture and Salinity in Yellow River Delta

HU Xinlong[1,2], QI Ji[1,2], YU Qianjun[1,2], LIU Jindi[1], PAN Yinghua[1,2], CHEN Xiaobing[3], HU Qiuli[1,2*], ZHAO Ying[1,2]
(1 *College of Resources and Environmental Engineering*, *Ludong University*, *Yantai*, *Shandong* 264025, *China*; 2 *Key Laboratory of Coastal Ecohydrological Processes and Environmental Security*, *Yantai*, *Shandong* 264025, *China*; 3 *Yantai Institute of Coastal Zone Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Yantai*, *Shandong* 264003, *China*)

Abstract: There is an apparently variation of soil moisture and salinity in the Yellow River Delta. In order to explore the characteristics and influencing factors of the variation to restore the ecology of local *Tamarix* community, the two natural *Tamarix* forests, poorly-developed (N_1) and well-developed (N_2) states were selected, the groundwater table depths and salinity, soil moistures and salinity, salt enrichment ratios and Cl^- and Na^+ contents at the two sites were compared and analyzed. The results show that the salinity of groundwater at N_2 site is higher than N_1 site, and its average groundwater table is lower than N_1 site. Soil moisture is higher at N_2 site than N_1 site in rainy season but lower at N_2 site than N_1 site in dry season, especially in the inner region (distance from the plant is 0–30 cm). Soil salinity is decreased with soil depth at the two sites, and “salt valley” and “salt island” is appeared in rainy and dry seasons, respectively. “Salt valley” at N_2 site is stronger than N_1 site. During the rainy season, the contents of Cl^- and Na^+ in the inner region is generally lower than those in the outer region (distance from the plant is 30–90 cm) with the “left-right” spatial distribution at N_2 site. Whereas, the “up-down” spatial distribution is appeared at N_1 site, which further illustrated that “salt valley” effect is more obvious at N_2 site in the rainy season. In conclusion, “salt valley” and “salt island” effects are the crucial strategy for *Tamarix Chinensis* adapting to heavily saline habitat. Therefore, it is an effective way to apply suitable planting regime for tamarisk, to promote the growth of canopy for enhancing “salt valley and island” effects, which are beneficial to the stability of tamarisk community and the restoration of saline-alkali soil.

Key words: *Tamarix chinensis*; Soil moisture; Soil salinity; Temporal and spatial variation; Yellow River Delta

---

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41901031)和山东省杰出青年基金项目(ZR2019JQ12)资助。
* 通讯作者(qiulihu@ldu.edu.cn)
作者简介: 胡鑫隆(1996—), 男, 陕西汉阴人, 硕士研究生, 研究方向为区域生态水文过程。E-mail: pluto3601@163.com

柽柳是柽柳科(*Tamaricaceae*)柽柳属(*Tamarix* Linn.)多年生灌木或小乔木，广泛分布在我国内陆盐碱地与北方滨海湿地。柽柳具有涵养土壤水分、降低土壤盐分的作用，能够有效改善盐碱地生态环境[1]。在滨海地区，柽柳是重要的抵抗海岸带侵蚀的植物，对维持滨海湿地生态系统稳定具有重要作用[2]。黄河三角洲是中国沿海柽柳的集中分布区，解放初期天然柽柳灌丛达 5.3 万 hm^2，至 21 世纪初减少到 8 126 hm^2，柽柳群落景观面临严重威胁[3-4]。因此，保护和恢复柽柳群落对黄河三角洲生态保护与湿地生态修复具有重要意义。

黄河三角洲位于海陆交汇地带，地形平缓，海水入侵频繁，地下水埋深普遍较浅(平均约为 1.14 m)，且矿化度高。在季风气候控制下，区域内季节性蒸发强烈，土壤水盐垂直运动剧烈，导致土壤盐渍化问题严重[5]。此外，黄河三角洲水文地质条件复杂，地下水埋深与矿化度空间差异大，土壤水盐空间分布不均，形成了独特的植被群落空间分布格局[6-7]。黄河三角洲柽柳群落分布主要受土壤盐分的影响，柽柳多分布于高盐分、低水位的地区[8]。而柽柳作为黄河三角洲优势盐生植物，耐盐能力强，在适应高盐环境过程中也对土壤水盐分布及变化产生影响。研究表明，种植柽柳能够涵养土壤水分，增强土壤盐分淋洗，进而有效改良盐渍土[9]。同时，柽柳能够产生一定的环境效应，促进自身生长。张天举等[10]研究发现，黄河三角洲柽柳灌丛下的土壤盐分低于灌丛间，易形成“盐谷”效应。张立华等[11]基于土壤空间异质性研究表明，距柽柳植株越近，土壤盐分越高，发现柽柳对土壤盐分的富集效应，且不同离子富集程度不同。此外，还有研究指出，黄河三角洲柽柳土壤水盐变化与地下水状况相关。当地下水埋深小于 0.6 m 时，地下水通过毛管上升作用补给浅层土壤，并在蒸发作用下发生积盐[12]。同时，在区域气候干旱背景下，次生盐渍化加剧也是柽柳死亡和群落退化的重要原因[13]。可见，黄河三角洲柽柳群落生长退化与土壤水盐的关联极为密切[14]。

综上，柽柳作为黄河三角洲优势建群种，是实施“南红北柳”湿地修复工程的重要树种，对改善滨海湿地生态环境和维持海岸带稳定的作用不可替代。因此，本文针对黄河三角洲柽柳群落退化问题，对比分析两处不同长势的天然柽柳林土壤水盐分布与变化特征，并进一步探讨其影响因素，以期为黄河三角洲柽柳群落恢复及湿地生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲地区属暖温带季风气候半湿润区，雨热同期。当地多年平均气温 13℃，多年平均降水量 560 mm，65% 分布在夏季；年均蒸散量 750 ~ 2 400 mm，蒸降比约 4∶1。在黄河三角洲天然柽柳分布区选取 2 处试验样地，分别位于孤东油田(37.88°N, 119.02°E, 简称 N_1)与黄河三角洲自然保护区(37.76°N，119.16°E，简称 N_2)(图 1)。

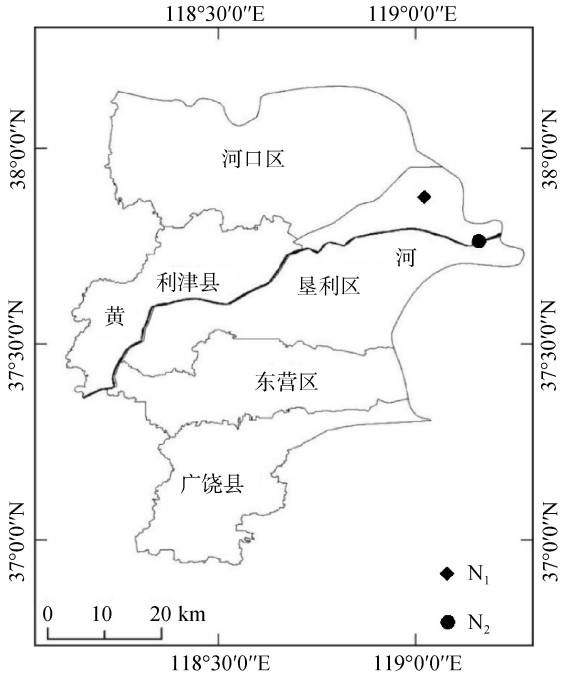


图 1 研究区位置
Fig. 1 Location of study area

于两处柽柳样地进行样方(10 m×10 m)调查发现，N_1 样地柽柳植株密度、林龄相对 N_2 样地更大，N_2 样地柽柳株高、冠幅更大，N_1 样地长势相对更好(表 1)。与柽柳伴生草本植物中，N_1 样地有盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、芦苇(*Phragmites australis*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)；N_2 样地除分布有盐地碱蓬、芦苇外，还有二色补血草(*Limonium bicolor*)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)。

在野外调查和采样时发现，两处样地的地下水状况、土壤物理性质均有较大差异。地下水埋深与矿化度季节变化如图 2 所示。两地地下水埋深浅，平均埋深 $N_1<N_2$，季节性波动大，N_1 样地最大变幅约 1 m，N_2 样地最大变幅近 2 m。N_1 样地地下水矿化度低于 N_2 样地，分别为 20.40 ~ 36.66、33.73 ~ 40.69 g/L，均属于咸水。两处样地土壤机械组成、容重与饱和导

表 1　柽柳样方调查结果

Table 1　Results of quadrat of *Tamarix chinensis* survey

样点	植株数	林龄 (a)	株高(cm)			南北冠幅(cm)			东西冠幅(cm)		
			平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
N_1	99	17	82.5	133.0	52.0	62.9	150.0	19.0	66.7	165.0	20.0
N_2	73	11	81.1	184.0	40.0	67.7	173.0	25.0	73.6	190.0	25.0

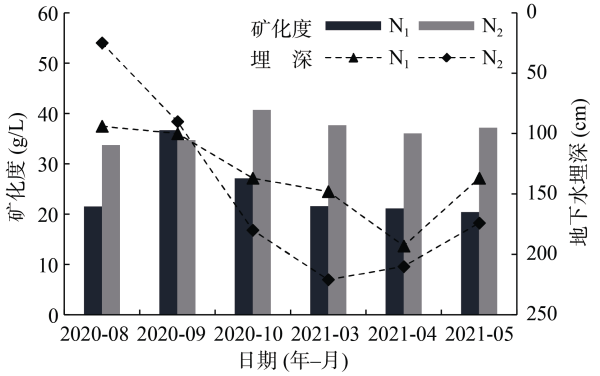


图 2　两地地下水埋深及矿化度的时间动态变化

Fig. 2　Temporal dynamic variation of groundwater table depth and salinity at two sites

水率如图 3 所示。根据美国农业部土壤质地分类，两地土壤质地均为粉质壤土，粉粒含量达到 70% 以上，砂粒含量次之，黏粒含量最低(图 3A、3B)。N_1、N_2 样地土壤饱和导水率随土壤深度变化呈相似的变化趋势，其中 N_1 样地土壤表面有结皮存在，饱和导水率在 0.01 ~ 0.13 mm/min，N_2 样地相对 N_1 样地导水率较高，在 0.05 ~ 0.20 mm/min(图 3C)。图 3D 呈现了两地土壤容重随土壤深度的变化情况，N_1 样地容重在 0 ~ 10 cm 深度范围内最大，随深度增加逐渐减小，至 110 cm 后略有增大，整体在 1.27 ~ 1.54 g/cm^3 范围内波动。N_2 样地容重在 1.23 ~ 1.39 g/cm^3 范围内变动，随深度增加略有增大趋势，在 70 cm 和 110 cm 深度处出现最大值。

1.2　研究方法

为获得 N_1、N_2 两地的基础土壤物理性质，用环刀法测定不同深度土壤容重，用激光粒度仪(Mastersize 3000)法测定土壤粒径分布，用环刀定水头法测得饱和导水率。

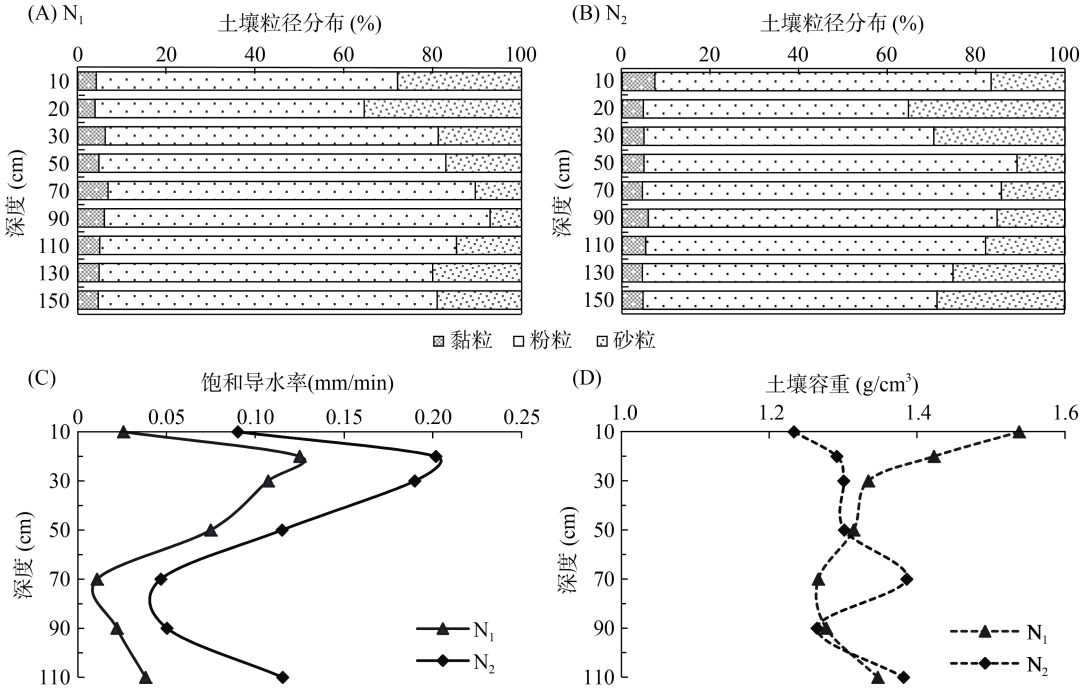


图 3　两个样地土壤物理性质随土壤深度的变化

Fig. 3　Variation of soil physical properties along with depth at two sites

在柽柳样地采集土壤水盐样品时，每次在两处样地各选择一株柽柳，对每株柽柳只采集一次土样，避免对柽柳根系损害过度而影响其正常生长。采样时间为 2020 年 8—10 月(其中 8 月代表雨季，10 月代表旱季)与 2021 年 3—5 月(旱季)和 7—8 月(雨季)。在不同月份采集的土壤样品既能反映土壤水盐季节变

化，又能作为试验重复，增强研究结果的可靠性。采样时，选择一株周围无其他植物生长的柽柳，避免其他植物对土壤水盐的影响。在距柽柳植株 10、30、50、70、90 cm 共 5 个水平距离处，用土钻采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 70、70 ~ 90、90 ~ 110、110 cm 直至土壤水分达到饱和深度的土样。同时测量地下水埋深，采集地下水样品。

采用烘干法(105℃、12 h)测定土壤质量含水率(θ_m)。用于盐分测定的土样在室内自然风干后过 2 mm 筛，制备水土质量比为 5∶1 的浸提液，利用离子色谱仪(Thermo Fisher ICS-2100)测定各离子含量，并将离子含量总和相加作为土壤总盐分含量。

1.3 数据处理

根据土壤质量含水率(θ_m)、土壤容重(ρ_b)和水的密度计算土壤体积含水率(θ_V)。

计算公式为：

$$\theta_V = \theta_m \cdot \frac{\rho_b}{\rho_w} \tag{1}$$

式中：θ_V、θ_m 分别是土壤体积含水率、土壤质量含水率；ρ_b、ρ_w 分别是土壤容重、水的密度。

由于黄河三角洲土壤盐分表聚性强，30 cm 深度以下土壤盐分相对稳定，而且柽柳植物根系主要分布在 0 ~ 30 cm 深度土层，该范围内土壤水盐变化对柽柳生长有直接影响。因此，本文计算浅层(0 ~ 30 cm)土壤平均盐分(S, g/kg)，并据此分析柽柳土壤盐分分布和变化。

计算公式为：

$$\overline{S} = w_{10} \cdot s_{10} + w_{20} \cdot s_{20} + w_{30} \cdot s_{30} \tag{2}$$

式中：w_{10}、w_{20}、w_{30} 分别是与 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层的容重(g/cm^3)和土层厚度(cm)相关的权重系数；s_{10}、s_{20}、s_{30} 分别为 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 深度土样的含盐量(g/kg)。

本研究借鉴陈永金等[15]在黄河三角洲湿地柽柳“肥谷/岛”研究中采用“养分富集率”衡量柽柳灌丛的养分富集程度的方法定义了新指标——“盐分富集率”：首先，将距柽柳植株水平距离 0 ~ 30 cm 的区域作为“内围区”，距离 30 ~ 90 cm 的区域作为“外围区”，0 ~ 30 cm 深度范围内、外围区土壤平均盐分比值即为“盐分富集率(E)”，以此量化柽柳植株周围土壤盐分的富集程度。

计算公式为：

$$E = \frac{\overline{S}_{\text{内围区}}}{\overline{S}_{\text{外围区}}} = \frac{\overline{S}_{10} \cdot r_{10} + \overline{S}_{30} \cdot r_{30}}{\overline{S}_{50} \cdot r_{50} + \overline{S}_{70} \cdot r_{70} + \overline{S}_{90} \cdot r_{90}} \tag{3}$$

式中：$\overline{S}_{\text{内围区}}$、$\overline{S}_{\text{外围区}}$ 分别是内、外围区 0 ~ 30 cm 深度范围内的平均土壤盐分(g/kg)；$\overline{S}_{10}$、$\overline{S}_{30}$，$\overline{S}_{50}$、$\overline{S}_{70}$、$\overline{S}_{90}$ 分别是 0 ~ 10、10 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 70、70 ~ 90 cm 水平距离下 0 ~ 30 cm 深度范围内土层的平均盐分(g/kg)；r_{10}、r_{30} 为“内围区” 0 ~ 10、10 ~ 30 cm 水平距离内与取样单元面积相关的权重系数，r_{50}、r_{70}、r_{90} 为“外围区”30 ~ 50、50 ~ 70、70 ~ 90 cm 水平距离内与取样单元面积相关的权重系数。盐分富集率 E>1，表明土壤盐分呈“盐岛”分布特征，值越大“盐岛”效应越强；盐分富集率 E<1，表明土壤盐分呈“盐谷”分布特征，值越小“盐谷”效应越强。

2 结果与分析

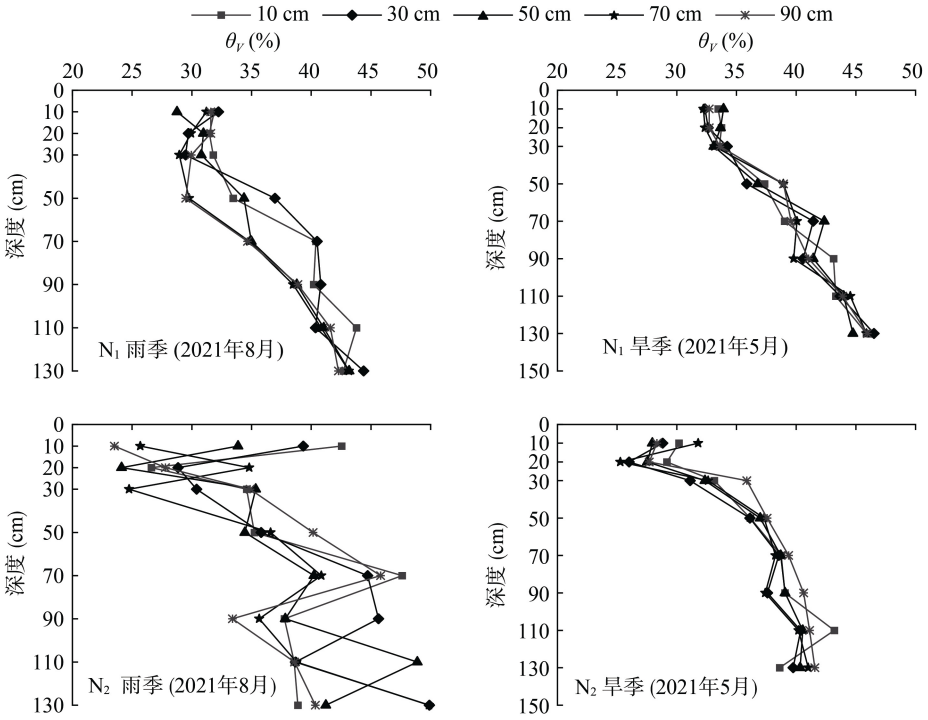
本研究所采集的土壤水盐样品涵盖了 2020 年雨季和 2021 年旱季及雨季，综合考虑数据的完整性和代表性，仅对比不同季节两处样地土壤水盐的分布与变化，因此下文以典型雨季和旱季月份的结果作为代表进行阐述。

2.1 柽柳样地土壤水分时空变化特征

两地土壤体积含水率(θ_V)变化如图 4 所示，一方面，两地含水率整体均随土壤深度增加而增大，N_1、N_2 样地含水率分别在 25% ~ 45%、20% ~ 50% 范围内波动，其中 N_2 样地的波动范围更大。在雨季，距柽柳植株水平距离为 10 cm 和 30 cm 的内围区土壤剖面 θ_V 较大，50 ~ 90 cm 水平距离的外围区土壤剖面 θ_V 相对较小，而且 N_2 样地含水率较 N_1 样地高，随水平距离的变化幅度更明显。旱季两地土壤剖面 θ_V 随距柽柳植株水平距离的变化较雨季更小，其中 N_2 样地 θ_V 整体低于 N_1 样地，且 0 ~ 20 cm 土层 θ_V 呈快速递减趋势。

2.2 柽柳样地土壤盐分时空变化特征

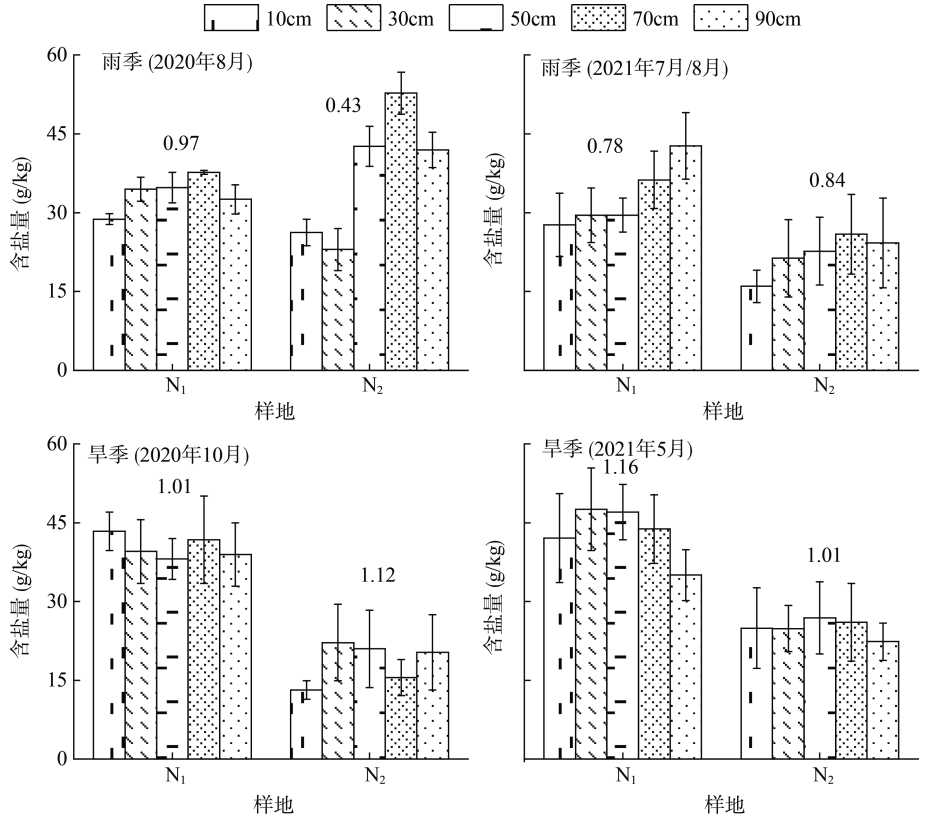
两地 0 ~ 30 cm 土层平均盐分含量随距柽柳植株水平距离的变化如图 5 所示，两地内、外围区土壤盐分在相同季节的总体变化趋势相同，但盐分富集率(E)不同。一方面，雨季两地内围区土壤盐分低于外围区，E<1，土壤盐分均呈“盐谷”分布特征。旱季两地内围区土壤盐分高于外围区，E>1，土壤盐分均呈“盐岛”分布特征。另一方面，N_1 样地 E 极差为 0.38，N_2 样地为 0.69，说明 N_2 样地土壤盐分分布季节性波动较强，E 变动范围更大。其次，雨季 N_1 样地 E 平均为 0.88，N_2 样地为 0.64，说明雨季 N_2 样地“盐谷”效应更强。而旱季 N_1、N_2 样地 E 平均分别为 1.09、1.07，两地“盐岛”效应强度相近。



(图例表示距柽柳植株的水平距离)

图 4　不同季节两地土壤体积含水率变化

Fig. 4　Variation of volumetric soil moistures at two sites in different seasons



(图例为距柽柳植株的水平距离；柱图上方数字为盐分富集率 *E*；由于 2021 年 6 月，N_2 样地被淹，无法采样，N_1 样地完好，故当年两处样地雨季采样时间不一致，2021 年 7 月为 N_1 样地采样时间，代表雨季；2021 年 8 月为 N_2 样地采样时间，代表雨季)

图 5　不同季节两地土壤盐分变化特征

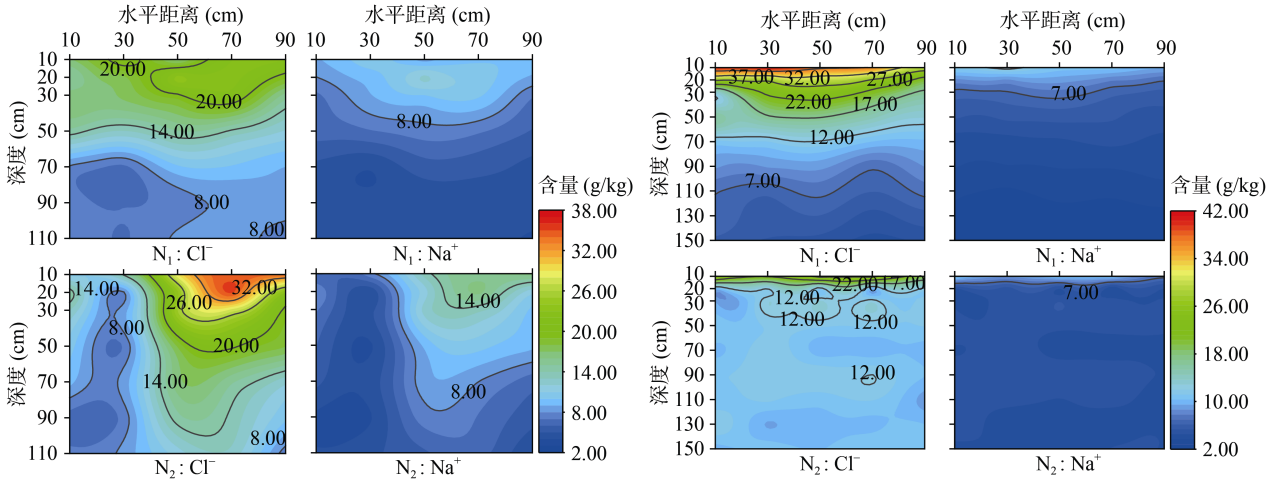
Fig. 5　Variation characteristics of soil salinity at two sites in different seasons

综合以上结果，土壤水盐含量及分布的时空变化在两处样地既表现出相似性又各具不同点。相似性为两地土壤 θ_V 垂直变化趋势相同，雨季内围区 θ_V 高于外围区，旱季则反之。土壤盐分分布随季节整体呈“盐谷/岛”特征。不同点表现在与 N_1 样地相比，N_2 样地 θ_V 与 E 的变动范围更大，两地“盐谷/岛”效应强弱不同。

2.3 柽柳样地土壤 Cl^-、Na^+ 时空变化特征

黄河三角洲滨海盐渍土为氯化物型，土壤盐分主要为 NaCl，本研究中 Cl^- 含量占阴离子组成达 90.91%，Na^+ 含量占阳离子组成达 79.27%。因此本文以 Cl^-、Na^+ 测定结果为代表，分析两地土壤盐分离子的时空变化特征。

雨季时，两地土壤 Cl^-、Na^+ 含量及其分布格局如图 6A 所示，N_1 样地土壤 Cl^- 含量(6.75 ~ 23.50 g/kg)低于 N_2 样地(6.60 ~ 35.40 g/kg)，两地 Na^+ 含量较接近，分别为 3.80 ~ 12.32、3.80 ~ 16.45 g/kg。在分布格局上，两地土壤 Cl^-、Na^+ 含量均随土壤深度增加而递减，且 Cl^- 变化更突出。此外，N_2 样地内围区土壤 Cl^-、Na^+ 含量整体低于外围区，呈“左–右”空间分异，而 N_1 样地土壤 Cl^-、Na^+ 呈现“上–下”空间分异，这说明 N_2 样地土壤 Cl^-、Na^+ 在雨季发生的淋洗作用比较强烈，与图 5 中雨季 N_2 样地盐分富集率更低(E = 0.43)，“盐谷”效应更强相对应。由图 6B 可知，旱季两地土壤 Cl^-、Na^+ 含量及其分布格局较雨季存在差异。在含量上，N_1 样地土壤 Cl^- 高于 N_2 样地，分别为 4.20 ~ 41.70、9.00 ~ 28.80 g/kg；Na^+ 含量仍较接近，分别为 2.10 ~ 12.60、3.60 ~ 11.40 g/kg。同时，两地土壤 Cl^- 含量及其差值仍均高于 Na^+。在分布上，两地土壤 Cl^-、Na^+ 含量随土壤深度增加而递减，且均呈“上–下”空间分异，但两处样地也有所不同。N_1 样地土壤 Cl^- 含量更高，在 0 ~ 50 cm 深度范围内有剧烈变化，N_2 样地土壤 Cl^- 更集中分布在 0 ~ 20 cm 深度范围内，说明 N_2 样地土壤盐分表聚更显著，这是由于 N_2 样地土壤表面未形成盐结皮，旱季蒸发旺盛，水盐运动剧烈所导致的。



(A) 雨季 (2020年8月) (B) 旱季 (2021年5月)

(2020 年 8 月采样深度为 0 ~ 110 cm，2021 年 5 月采样深度为 0 ~ 150 cm)

图 6 两地土壤 Cl^-、Na^+ 含量及分布的时空变化

Fig. 6 Temporal and spatial variation of Cl^- and Na^+ contents in soil profiles at two sites

本研究中土壤 Cl^- 占总盐分组成超过 60%，与土壤总盐分布的趋势更相近。表 2 对比了旱季(2021 年 5 月)相对前一雨季(2020 年 8 月)土壤剖面 Cl^- 含量的变化，结果表明，N_1 样地土壤 Cl^- 在旱季相对雨季明显增加，仅有个别采样深度 Cl^- 含量相对减少，距离植株较近的内围区平均增加了 37.1%，外围区增加了 10.9%。N_2 样地内围区 Cl^- 含量在旱季也相对增加，且较 N_1 样地增加比例更大，平均为 47.0%，再次说明 N_2 样地内围区雨季脱盐旱季积盐现象显著。而在 N_2 样地外围区，旱季 Cl^- 相对前一雨季基本全部呈减少趋势，平均减少 24.5%。结合图 4 中旱季 N_2 样地 0 ~ 20 cm 土层 θ_V 剧减现象推测，可能是由于根系吸水使根系周围离子随水分向内围区富集相关。

3 讨论

3.1 土壤水分影响因素

黄河三角洲地下水埋深较小，土壤水分分布与地下水埋深变化密切相关。本研究中两处柽柳样地深层土壤含水率(θ_V)均高于浅层，整体均随土壤深度增加而增大。已有研究表明，深层土壤水分易受浅层地下

表 2　两地土壤 Cl^-含量在旱季相对前一雨季的变化量(%)

Table 2　Changes of soil Cl^- contents at two sites in dry season compared to previous rainy season

土壤深度 (cm)	N_1 样地					N_2 样地				
	内围区		外围区			内围区		外围区		
	0 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	30 ~ 50 cm	50 ~ 70 cm	70 ~ 90 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	30 ~ 50 cm	50 ~ 70 cm	70 ~ 90 cm
10	139.3	97.3	128.6	67.6	33.6	155.7	58.5	–0.8	–16.3	–40.6
20	86.9	54.9	26.5	19.2	4.7	–33.7	50.5	–55.3	–74.3	–49.8
30	–21.2	32.9	25.7	–2.3	6.5	–26.5	51.4	–47.4	–52.9	–40.5
50	11.3	28.8	14.4	7.6	8.4	5.3	59.6	–37.3	–43.9	–37.9
70	39.0	64.0	20.7	4.2	13.1	8.0	38.3	–40.7	–35.4	–18.7
90	15.2	26.7	20.3	–11.0	–1.4	68.3	57.7	–18.8	–11.9	1.6
110	–8.4	–7.5	–10.7	–29.2	3.7	47.4	35.6	–7.2	–11.1	23.2
加权平均	37.1		10.9			47.0		–24.5		

注：雨季采样深度仅达 110 cm，故不讨论 110 ~ 150 cm 深度土层的变化量。正值表示旱季较雨季 Cl^-含量增加，负值表示减少。

水毛管上升作用的补给，因此水分含量较高。而浅层土壤水分因超过地下水上升临界深度，难以被地下水补给[12]。同时，浅层土壤在蒸发作用下水分更易散失，导致土壤水分含量减小。另外，浅层土壤含水率较低还与柽柳根系分布及水分利用有关。黄河三角洲柽柳灌丛呈聚集型分布，其根系大部分集中于 0 ~ 60 cm 土层，在 0 ~ 30 cm 土层中根系生物量约占 70%[16-17]。柽柳根系为避免厌氧环境和高盐胁迫而更倾向于吸收非饱和区低盐浓度水[18]，在与本研究相关的柽柳根系试验中也发现两地柽柳细根(d<2 mm)根长密度在浅层土壤中占比更大，在深层土壤中分布较少，而且由于深层土壤水分被高矿化度地下水补给后超出了柽柳根系的耐盐限度，因此柽柳对深层土壤水分吸收利用较少。

雨季时，两柽柳样地内围区土壤含水率均高于外围区，且 N_2 样地含水率整体高于 N_1 样地，而在旱季又整体低于 N_1 样地。原因是 N_2 样地柽柳冠幅更大，根据 Thompson 等[19]发现的降雨入渗量与植株生物量呈正向相关关系，可知 N_2 样地柽柳内围区降雨入渗更多，因而雨季土壤含水率更大。不降雨时冠层遮阴抑制蒸发，减少土壤水分散失。这说明雨季柽柳在形成“盐谷”效应降低根区盐分胁迫时，其冠层遮阴也能增强土壤水分有效性，最终促进柽柳生长。旱季时，降水大大减少，N_2 样地柽柳对土壤水分的消耗较 N_1 样地更多，致使土壤含水率整体低于 N_1 样地。进一步分析发现，N_2 样地土壤 θ_V 变化还较 N_1 样地更复杂。N_2 样地含水率在雨季随土壤深度与距柽柳植株距离的变化而波动较大，在旱季 0 ~ 20 cm 土层出现了剧减趋势。这与两地不同土壤表面性状所导致的土壤水分运移和再分配的差异相关。N_1 样地土壤表面存在结皮，土壤结皮能够减少近地面土壤水热交换，影响土壤水分入渗和蒸发[20-21]。N_1 样地 0 ~ 10 cm 土层在结皮覆盖下饱和导水率仅为 0.03 mm/min，无土壤结皮覆盖的导水率增加了 1 倍，为 0.06 mm/min。而 N_2 样地不存在结皮，0 ~ 10 cm 土层的导水率为 0.09 mm/min，降雨时土壤水分更易发生入渗，蒸发时表层土壤水分也更易散失。除此之外，土壤水分运移和再分配还与土壤质地等其他土壤性质有关。本研究中，N_1 样地土壤的砂粒含量整体低于 N_2 样地，限制了土壤中的大孔隙分布，进而使饱和导水率也低于 N_2 样地(图 3C)。

3.2　土壤盐分影响因素

本研究结果表明，柽柳土壤盐分分布随距柽柳植株水平距离和土壤深度变化具有时空异质性。随距柽柳植株距离的变化表现为：两地柽柳植株内围区土壤盐分在雨季均低于外围区，呈“盐谷”特征，至旱季则转呈“盐岛”特征。随土壤深度的变化表现为：两地土壤盐分均随土壤深度增加而递减，且浅层土壤盐分变化较大，深层相对稳定。旱季时，受蒸发的影响，N_1 样地土壤 Cl^-含量在 0 ~ 50 cm 深度范围内变化，而 N_2 样地土壤 Cl^- 在 0 ~ 20 cm 深度范围内变化，N_2 样地土壤盐分表聚性更强。雨季时，两地“盐谷/岛”效应强度(盐分富集率 E)呈现差异。其中，N_2 样地柽柳植株地上部长势更好，冠幅大，能截留更多的降雨，对土壤盐分淋洗作用强。上述 2.3 节中 N_2 样地内围区土壤 Cl^-、Na^+ 含量整体低于外围区，呈“左–右”分异格局印证了这一点。李君等[22]和许婕等[23]研究也表明，柽柳多枝、半球状的树冠紧贴地表，降雨时通过截留降雨形成树干径流，加大对冠下土壤盐分的淋洗。而 N_1 样地柽柳生长状况较差，树冠相对较小，

盐谷效应较弱。在不降雨时，柽柳冠层遮阴作用抑制土壤蒸发，减少内围区土壤积盐[24]。值得注意的是，柽柳腾发对土壤水盐分布也具有重要作用，蒸腾耗水是根系吸收利用水分的综合体现，后续还应继续探索柽柳腾发量的局部变化对土壤水盐分布的影响。可见，柽柳冠层是影响柽柳土壤盐分分布的重要因素之一。柽柳冠层长势愈好，愈能促进土壤盐分淋洗和抑制土壤返盐，“盐谷”效应强，柽柳所面临的土壤水盐胁迫愈小，最终又促进柽柳生长。

盐生植物周围“盐谷/岛”效应及盐分离子分布与盐生植物的耐盐机理、生长状况等生物因素和离子特性、气候条件、土壤性质及水文地质条件等非生物因素有关。生物因素方面，柽柳属泌盐植物，枝叶中含有大量盐分，在自然条件下以凋落物的形式返回地表后就地分解，形成生物积盐，使冠下土壤盐分增大[25-26]。李丛娟等[27]在对梭梭的研究中发现，凋落物被树干径流冲刷至植株外围而发生积盐，内围区的盐分被淋洗，同时因得不到凋落物盐分的补充而形成低盐区。就根系而言，根系生物量的分配模式影响植物对土壤养分、盐分的吸收。黄河三角洲柽柳呈水平根型特征，在根际盐分富集作用下浅层土壤盐分增大，而根系分泌物释放的 Ca^{2+} 替换 Na^{+} 会促进盐分淋洗[28-29]。非生物因素方面，地下水埋深及矿化度、气候条件(降雨、蒸发等)、离子特性及相互作用是影响土壤水盐运移的重要因子。本研究区夏季降雨集中，土壤盐分因淋洗作用呈降低趋势。地下水则主要通过毛管上升作用补给包气带土壤水分而影响土壤盐分[30]。“盐谷/岛”现象及其强度变化说明黄河三角洲植被群落建成时对土壤水盐运移水平维度上的影响也是盐碱地水盐运移研究的重要方向。离子特性方面，柽柳植株周围形成“盐谷/岛”效应与土壤盐分离子组成和类型相关。本研究中，Cl^{-}含量最高，与土壤盐分总体分布趋势更相近。张立华等[11]研究也发现，不同离子在土壤中的含量与迁移存在差异，柽柳对不同阳离子富集程度依次为 $K^{+}>Na^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$，对不同阴离子富集程度依次为 $HCO_3^{-}>Cl^{-}>SO_4^{2-}$。

综上，柽柳形成“盐谷/岛”效应是其适应高盐环境的重要策略。雨季“盐谷”效应效保证了根区土壤水分的有效性，促进柽柳生长；旱季“盐岛”效应则可抑制个体周围其他植物生长，减弱种间资源竞争。柽柳土壤水盐时空变化是生物和非生物因素共同影响的结果，后续应综合考虑植物腾发、根系穿插等作用对土壤水盐运移的影响，深入剖析黄河三角洲柽柳生境土壤水盐分布差异的原因，揭示“盐谷/岛”效应的发生机制及主控因子，进一步为黄河三角洲柽柳群落景观恢复与湿地生态修复提供科学指导。

4 结论

本研究针对黄河三角洲两处长势不同的天然柽柳样地的地下水状况、土壤性质、土壤水盐分布等开展研究，发现在柽柳植株尺度上的土壤水盐异质性——“盐谷/岛”效应是柽柳适应高盐环境的重要生存策略。

1)黄河三角洲天然柽柳分布区地下水埋深浅，季节波动大，矿化度高，水质类型为咸水。长势较好的柽柳样地地下水埋深较浅，水位较低。

2)土壤体积含水率(θ_V)均随土壤深度增加而增加，柽柳植株的内围区土壤含水率高于外围区。土壤性质差异造成两地土壤水分蒸发和入渗差异，进而导致土壤水分再分配态势不同。

3)土壤盐分随土壤深度增加而降低，浅层土壤盐分表聚突出且空间分布不均，深层土壤盐分相对稳定。盐分组成以 Cl^{-}、Na^{+}为主，两地 Cl^{-}分布格局与变化范围不同。

4)土壤盐分富集率(E)随季节发生变化。雨季 $E<1$，土壤盐分均呈“盐谷”特征，旱季 $E>1$，土壤盐分均呈“盐岛”特征，而且长势较好的柽柳样地“盐谷”效应更强。

参考文献：

[1] 何秀平, 王保栋, 谢琳萍. 柽柳对盐碱地生态环境的影响[J]. 海洋科学, 2014, 38(1): 96–101.

[2] Cao D. Seasonal changes in and relationship between soil microbial and microfaunal communities in a *Tamarix chinensis* community in the Yellow River Delta[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(80): 18425–18432.

[3] 赵欣胜, 崔保山, 孙涛, 等. 不同生境条件下中国柽柳空间分布点格局分析[J]. 生态科学, 2011, 30(2): 142–149.

[4] 杨全刚, 范利荣, 冯文杰, 等. 黄河三角洲盐碱地林木衰退原因及对策[J]. 世界林业研究, 2021, 34(2): 80–84.

[5] 马海丽. 黄河三角洲典型区地下水动态及其与土壤盐渍化的关系[D]. 济南: 济南大学, 2015.

[6] 王雪宏, 栗云召, 孟焕, 等. 黄河三角洲新生湿地植物群落分布格局[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 1021–1026.

[7] 安乐生, 周葆华, 赵全升, 等. 黄河三角洲植被空间分布特征及其环境解释[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6809–6817.

[8] 宋香静. 黄河三角洲湿地不同盐分条件对柽柳根系的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.

[9] 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.
[10] 张天举, 陈永金, 刘加珍, 等. 黄河三角洲柽柳灌丛对土壤盐分养分的影响[J]. 人民黄河, 2019, 41(1): 70–74.
[11] 张立华, 陈沛海, 李健, 等. 黄河三角洲柽柳植株周围土壤盐分离子的分布[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5741–5749.
[12] 苏丽, 董波涛, 孙佳, 等. 地下水位对黄河三角洲柽柳根系生长的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3794–3804.
[13] 徐梦辰, 刘加珍, 陈永金. 黄河三角洲湿地柽柳群落退化特征分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(7): 85–89.
[14] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2423–2430.
[15] 陈永金, 刘加珍, 靖淑慧, 等. 黄河三角洲湿地柽柳冠下“肥岛/谷”现象研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(1): 56–64.
[16] Imada S, Taniguchi T, Acharya K, et al. Vertical distribution of fine roots of *Tamarix ramosissima* in an arid region of southern Nevada[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 92: 46–52.
[17] Yu T F, Feng Q, Si J H, et al. Patterns, magnitude, and controlling factors of hydraulic redistribution of soil water by *Tamarix ramosissima* roots[J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(3): 396–407.
[18] Hsueh Y H, Chambers J L, Krauss K W, et al. Hydrologic exchanges and baldcypress water use on deltaic hummocks, Louisiana, USA[J]. Ecohydrology, 2016, 9(8): 1452–1463.
[19] Thompson S E, Harman C J, Heine P, et al. Vegetation-infiltration relationships across climatic and soil type gradients[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2010, 115(G2): G02023.
[20] 赵晓乐, 王琦, 周旭姣, 等. 生物炭–土壤结皮对土壤水分入渗和蒸发特征的影响[J]. 草原与草坪, 2021, 41(2): 11–18.
[21] 刘翔, 周宏飞, 刘昊, 等. 不同类型生物土壤结皮覆盖下风沙土的入渗特征及模拟[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5820–5826.
[22] 李君, 赵成义, 朱宏, 等. 柽柳(*Tamarix* spp.)和梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的“肥岛”效应[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5138–5147.
[23] 许婕, 陈永金, 刘加珍. 盐生植物灌丛对土壤养分和盐分空间分布的影响及其机制研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(1): 19–23, 69.
[24] 张立华, 陈小兵. 盐碱地柽柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 653–658.
[25] 张立宾, 宋曰荣, 吴霞. 柽柳的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(13): 5424–5426.
[26] 弋良朋, 马健, 李彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3565–3571.
[27] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等. 树干径流对梭梭“肥岛”和“盐岛”效应的作用机制[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4819–4826.
[28] 李加宏, 俞仁培. 土壤–作物根际系统中离子的迁移[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 186–194.
[29] Zhao C Y, Wang Y, Song Y D, et al. Biological drainage characteristics of alakalized desert soils in north-western China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 56(1): 1–9.
[30] 吕真真, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1377–1385.