



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.01.019

刘亚琦, 刘加珍, 陈永金, 等. 黄河三角洲湿地柽柳灌丛周围有机质富集及水分运动研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 113-120. LIU Ya qi, LIU Jia zhen, CHEN Yong jin, et al. Study of the enrichment of soil organic matter and water movement around the *Tamarix chinensis* shrubs in the coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 113-120. (in Chinese)

黄河三角洲湿地柽柳灌丛周围有机质富集 及水分运动研究

刘亚琦, 刘加珍, 陈永金, 马春栋, 毛甘霖

(聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252000)

摘要: 为研究滨海湿地柽柳灌丛水分推动下的土壤养分富集作用, 对黄河三角洲单株柽柳个体周围不同位点、不同土层土壤有机质含量及土壤水、地表水和黄河水同位素进行分析。结果表明: (1) 土壤有机质在灌木主干周围出现富集现象, 形成深度为 20 cm, 半径为 1.5 m 的富集圈层, 有机质含量空间分布呈现冠幅下明显高于冠幅边缘和株间空地, 且随土层深度增加而降低, 表现出非常明显的肥岛效应。(2) 不同土壤剖面水分同位素值出现差异: 0~5 cm 表层土 $\delta D, \delta^{18}O$ 同位素值表现为冠幅下 > 冠幅边缘 > 株间空地, 而 5~10 cm 土层 $\delta D, \delta^{18}O$ 同位素值为冠幅下 < 冠幅边缘 < 株间空地。0~5 cm 表层土同位素值大于 5~10 cm 土层同位素值。(3) 水分运动对柽柳灌丛周围有机质含量产生影响, 沿灌木主干流下的雨水冲刷和黄河水侧渗作用是影响灌丛下土壤有机质含量冠幅下 > 冠幅边缘 > 株间空地的原因之一。有机质等土壤养分在肥岛效应及水分运动影响下向柽柳主干周围聚集, 这种土壤养分的小尺度空间异质性促进了柽柳自身及附近其他植物的生长, 改变了土壤的理化性质。本研究结果同时可以作为黄河三角洲盐碱地土壤改良和植被恢复的参考依据。

关键词: 黄河三角洲; 柽柳; 有机质; 氢氧同位素

中图分类号: Q143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0113-08

Study of the enrichment of soil organic matter and water movement around the *Tamarix chinensis* shrubs in the coastal wetlands of the Yellow River Delta

LIU Ya qi, LIU Jia zhen, CHEN Yong jin, MA Chun dong, MAO Gan lin

(College of Environment and Planning, Liaocheng University; Liaocheng 252000, China)

Abstract: To investigate the promoting effect of water movement on soil nutrients beneath the *Tamarix chinensis* shrubs in the coastal wetlands, we analyzed the soil organic matter at different locations and soil layers around a *Tamarix chinensis* and the isotopes of soil water, surface water, and Yellow River water. The results showed that: (1) Soil organic matter is enriched around the trunk of *Tamarix chinensis* shrubs, forming a 20 cm deep enriched circle layer with a 1.5 m radius. Soils under shrub canopy have significantly higher content of organic matter compared to those under the canopy edge and at the open spaces between plants. Deeper soils have less content, showing prominent "fertile island" effects. (2) The hydrogen and oxygen stable isotopes at different soil profiles were different. In the 0-5cm topsoil, the δD and $\delta^{18}O$ isotopic values are from large to small under shrub canopy, under canopy edge, and at the open spaces. In the 5-10cm soil layer, the δD and $\delta^{18}O$ isotopic values

收稿日期: 2016-06-01 修回日期: 2016-07-19 网络出版时间: 2017-01-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0932.013.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC15B02); 国家自然科学基金(40901276; 40871239); 聊城大学基金项目(318011407); 聊城大学大学生创新项目(SF2014078)

Fund: National Key Technology Research and Development Program (2014BAC15B02); National Natural Science Foundation of China (40901276; 40871239); Foundation Program of Liaocheng University (318011407); Innovative Project for Undergraduates in Liaocheng University (SF2014078)

作者简介: 刘亚琦(1991-), 女, 山东滕州人, 主要从事湿地环境与生态过程研究。E-mail: lyq8235@163.com

通讯作者: 刘加珍(1974-), 女, 四川遂宁人, 副教授, 博士, 主要从事陆面生态过程研究。E-mail: liujiazhen@lcu.edu.cn

are from small to large under shrub canopy, under canopy edge, and at the open spaces. The isotopic values in the 0~ 5 cm top soil are greater than those in the 5~ 10 cm soil layer. (3) Water movement has an effect on the content of organic matter. The nutrients carried by stemflow and the lateral seepage of the Yellow River are two of the reasons why the content of organic matter is from large to small under shrub canopy, under canopy edge, and at the open spaces. The enrichment of soil organic matter has changed the physicochemical properties of the soil around the plant. The small scale spatial heterogeneity of soil nutrients has promoted the growth of the *Tamarix chinensis* and the surrounding plants. The research results can provide reference for the saline soil reclamation and vegetation recovery in the Yellow River Delta.

Key words: Yellow River Delta; *Tamarix chinensis*; soil organic matter; hydrogen and oxygen stable isotopes

土壤养分在生物、非生物过程作用下易富集于灌丛周围^[1]。灌木通过改变冠层下物理环境,引起土壤资源分配发生变化^[2],并在局部形成了比周围环境更加温和的小气候,使得其影响范围内土壤养分逐渐富集^[3]。灌丛对土壤养分富集作用从土壤表层向深层递减,从中心向边缘递减,且土壤养分富集率与灌丛的基径、株高和冠幅有相关关系^[4]。有学者将土样养分在灌丛周围的富集现象称为肥岛现象^[5-7]。肥岛现象常出现在资源胁迫的生态系统中,越是在养分胁迫的土壤环境,灌木的肥岛效应越显著^[8]。

水是天然溶剂,水分在不断的循环运转中,溶解和携带着多种矿物质盐类及营养物质,构成一个运动着的、统一的物质流^[9]。其中,土壤水盐运移机理研究起步早^[10-11],不同假设条件下定量描述水盐运动的模型发展较为成熟^[12-14],而水循环大背景下,土壤中水分运动对养分的影响研究相对较少,在水分的横向与垂直运动过程中,水分的运动势必会推动土壤中的养分相互转移和转换。

柽柳为黄河三角洲湿地天然原生灌木,具有较强的耐盐、耐水湿、耐沙埋、耐贫瘠能力。在黄河三角洲湿地,柽柳的生长能够影响立地土壤状况,表现为土壤资源不断聚集于灌丛周围;而变化的立地土壤环境又增强柽柳对贫瘠盐碱地生态环境的适应性,促进柽柳自身的扩张。本文以黄河三角洲单株柽柳为研究对象,以土壤水、地表水及黄河水氢氧同位素值为指标,结合柽柳灌丛四周土壤有机质分布,分析柽柳灌丛肥岛效应及其形成机制,以期为研究河口湿地土壤营养元素分布和湿地生态系统的植被恢复与保护提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省东营市黄河入海口西南,黄河三角洲河口湿地。该区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温为 12.3℃,年均降水量为 542.3

mm,63.9%的降水集中在夏季^[15]。区域内土壤质地结构主要是轻壤土和中壤土,土壤类型则是以隐域性潮土和盐土为主^[16];地下水位埋深较浅,水质矿化度较高;植物群落的组成较为简单,以柽柳(*Tamarix chinensis*)、芦苇(*Phragmites communis*)、碱蓬(*Suaeda heteroptera*)等水生植物和耐盐植物为主,其分布主要受土壤的盐碱化程度影响^[17]。

1.2 样点布设与数据采集

样地布设在黄河三角洲湿地人为干扰较小的典型样区内,该样区以柽柳为建群种,形成柽柳群落,柽柳个体根据盐分含量的大小范围选择适宜自身生长的斑块繁殖。本研究在样地中随机选取长势优良的单株柽柳(图 1),该株柽柳周围地表受盐渍化影响,3 m 以内为裸地,其他植物极少,可排除其他植物对土壤有机质和水分的富集作用干扰。单株柽柳基径、株高和冠幅分别为 6 cm、1.8 m 和 2 m×2 m,植株位置采用 GPS 定位。在柽柳灌丛中心周围半径 3 m 以内,以其主干为中心点向正东、正西、正南、正北 4 个方向,分别在距中心点 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m 五个点位和中心点取样,编号为 CL-N(0.5)、CL-S(0.5)、CL-W(0.5)、CL-E(0.5)(图 1(b)),每个点位取 0~5、5~10、10~20、20~30、30~50 cm 五个土层,共采集土壤样品 105 个。土壤样品带回实验室,经自然风干后去除动植物残体和石块过筛装袋备用。根据常规国际标准采用重铬酸钾容量法测定有机质(SOM)含量。

对于同位素的测定,在距柽柳 1 m、2 m 和 3 m 处,选取 0~5 cm 和 5~10 cm 土层采集土样放入样品瓶,用封口膜密封带回实验室,采用真空蒸馏技术^[18]提取土壤水。在研究区内选取 4 处地表水(图 1(b)中 B1-4)和 4 处黄河水(图 1(a)中 H1-4),所有水样使用样品瓶采集,封口膜密封。将土壤水和水样过滤后,立即采用美国 Los Gatos Research 公司生产的激光液态水同位素分析仪(型号:912-0032)测量。

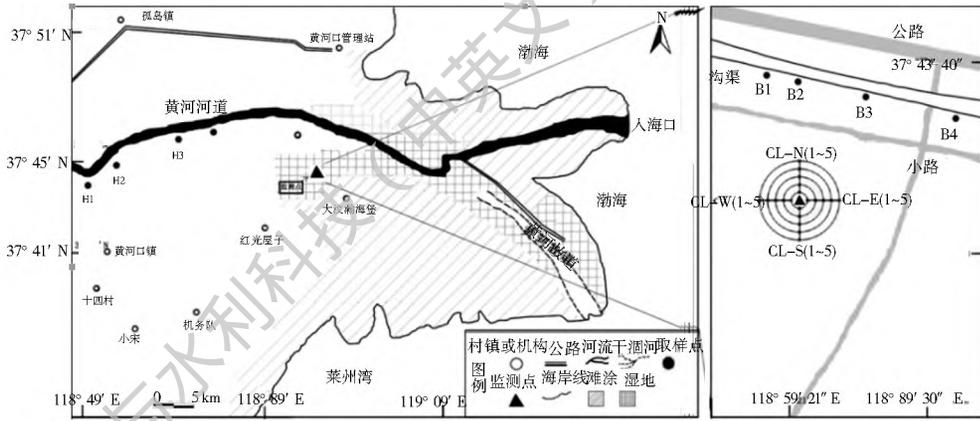


图 1 黄河三角洲研究区监测样地示意图

Fig. 1 Distribution of investigation sections in the Yellow River Delta

1.3 数据处理

1.3.1 有机质富集率及分布特征测定

采用富集率(Enrichment rate, E)来测算灌丛对土壤养分的富集作用,公式如下:

$$E_A = A/C$$

$$E_B = B/C$$

式中: E_A 表示灌丛中心富集率; E_B 表示灌丛边缘富集率; A 、 B 和 C 分别表示柽柳个体灌丛中心、灌丛边缘和株间空地的土壤有机质含量。 E 值越大,则表明柽柳灌木灌丛内外有机质含量的差异越大^[19],当 $E > 1$ 时,表示灌丛对土壤养分具有富集作用^[20]。

利用克里格空间插值分析灌丛周围土壤有机质富集程度的差异性,利用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同取样点有机质含量的显著性差异进行检验($\alpha = 0.05$)。空间克里格插值使用Surfer 8.0,单因素方差分析使用SPSS 17.0。

1.3.2 δD 、 $\delta^{18}O$ 值测定

为分析灌丛周围水分迁移机制,对不同来源水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值进行测定。同位素的测量采用样品的同位素比值与某种标准样品的同位素比值的千分偏差 δ 来表示同位素之间的差异,公式为:

$$\delta D(\text{‰}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$$

$$\delta^{18}O(\text{‰}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$$

式中: δD 和 $\delta^{18}O$ 分别为对应样品的氢和氧同位素值; R_{sample} 和 R_{standard} 分别为样品和国际通用标准物中元素的重轻同位素丰度之比(如 $^{18}O/^{16}O$)。精确度(1 δ) $^{18}O/^{16}O$ 优于0.1‰, D/H 优于0.3‰。 δD 值的测试误差不超过1‰, $\delta^{18}O$ 值的测试误差不超过0.2‰^[21]。

2 结果与分析

2.1 柽柳灌丛土壤有机质特征

2.1.1 不同方位上有机质的水平变化

由图2得出(图中0~10 cm处有机质含量为

0~5 cm和5~10 cm处平均值),土壤有机质含量在0.30%~1.40%之间。有机质变化以20 cm土层为分界线,在土层20 cm以上(图2(a)和图2(b))各方向折线由左上方向右下方倾斜,表现为距离灌丛中心越远,含量越低的特性;20 cm以下(图2(c)和图2(d))有机质含量随距灌丛中心的远近变化规律不明显。0~10 cm土层(图2(a)),除柽柳南边0.5 m处,基本表现为灌丛中心处有机质含量最高;10~20 cm土层(图2(b))距灌丛中心0.5 m处,有机质含量相对最高,而在20~30 cm土层(图2(c))和30~50 cm土层范围内,水平方向土壤有机质含量变化较小。

2.1.2 不同方位上有机质的垂直变化

将采样地点按距离灌丛中心远近分为三个部分,比较有机质垂直方向变化,其中0~0.5 m范围内称为冠幅下,0.5~1.5 m称为冠幅边缘,1.5~2.5 m称为株间空地。由图3可以看出,土壤表层有机质含量最高,随着土层的加深,柽柳个体周围不同方位有机质含量均降低,表现为右上向左下方倾斜。黄河三角洲是新生湿地,每年都产生新的泥沙淤积,区域内柽柳地下根系并不发达,随着土层的不断加深植物根系明显减少,土壤有机质含量也相对降低。

2.2 柽柳灌丛土壤有机质富集效应

2.2.1 冠幅下及边缘有机质富集率差异

本文用土壤有机质的富集率来反映其富集程度强弱差异。由表1可以看出,柽柳个体周围土壤在冠幅下有机质的富集率均大于1,冠幅边缘除20~30 cm处均大于1,表明有机质在冠幅下及冠幅边缘有聚集现象。每层土壤冠幅下的富集率大于冠幅边缘,5个土层从上到下,冠幅下分别比冠幅边缘提高了32.7%,4.2%,19.5%,31%和11.8%,水平

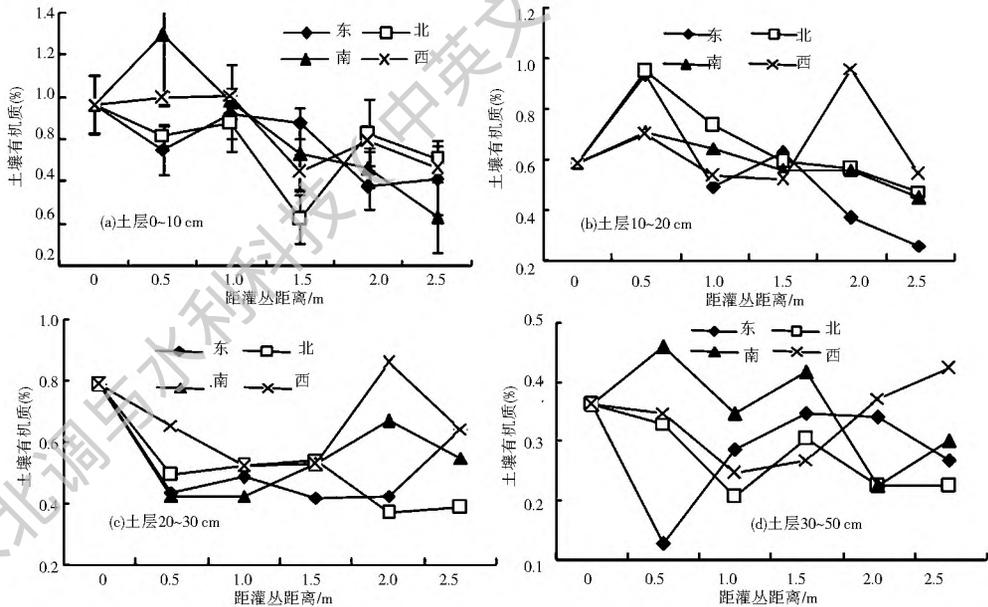


图 2 柽柳个体周围水平方向土壤有机质含量

Fig. 2 The content of soil organic matter around the *Tamarix chinensis* in the horizontal direction

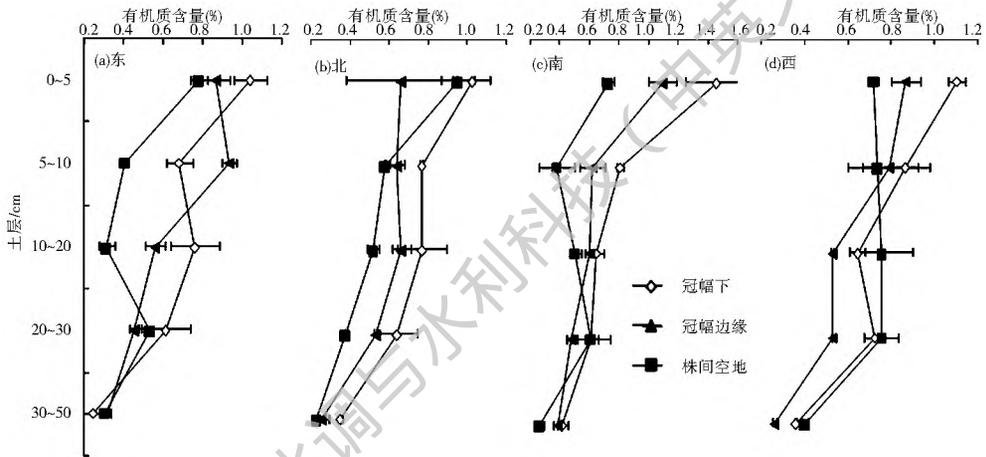


图 3 柽柳个体周围不同深度土壤有机质含量

Fig. 3 The content of soil organic matter around the *Tamarix chinensis* in the vertical direction

方向上形成最大聚集率在半径 0.5 m 的圈层; 垂直方向上, 5~ 10 cm 土层土壤有机质富集率最大, 其它层次随着土层的不断加深富集率减小。

表 1 柽柳灌丛土壤有机质富集率

Tab.1 The enrichment degree of soil organic matter under the *Tamarix chinensis* shrubs

土层/cm	富集率	
	冠幅下	冠幅边缘
0~ 5	1.46	1.10
5~ 10	1.49	1.43
10~ 20	1.35	1.13
20~ 30	1.14	0.87
30~ 50	1.14	1.02

2.2.2 柽柳灌丛土壤有机质空间富集差异

以灌木基部为轴心, 距离灌丛中心距离为 x

轴, 土层深度为 y 轴, 做图 4。浅色区域代表为有机质富集区, 深色部分为有机质含量相对较浅的区域。从图 4 中知, 该柽柳各方位有机质明显向冠幅下表层土壤聚集。垂直方向, 有机质在土壤表层北面、东面和西面形成高含量条带, 南面形成斑块状富集区, 各方向均呈现出表层聚集的特点; 随着土层的加深, 有机质含量降低, 在东、西、北三个方向 20 cm 处又出现一次聚集, 但富集程度小于 5 cm 处。不同深度同一水平面比较, 越靠近灌丛主干处富集度越高。比较四个方位的有机质富集程度发现, 灌丛东面富集范围较大, 南面克里格插值图颜色明显比其他方位深, 有机质含量少, 富集范围较小, 可能因南面接受阳光照射时间长, 有机质分解速度快。

2.3 柽柳灌丛周围水分运动规律

柽柳灌丛周围土壤和水分 δD 、 $\delta^{18}O$ 同位素对

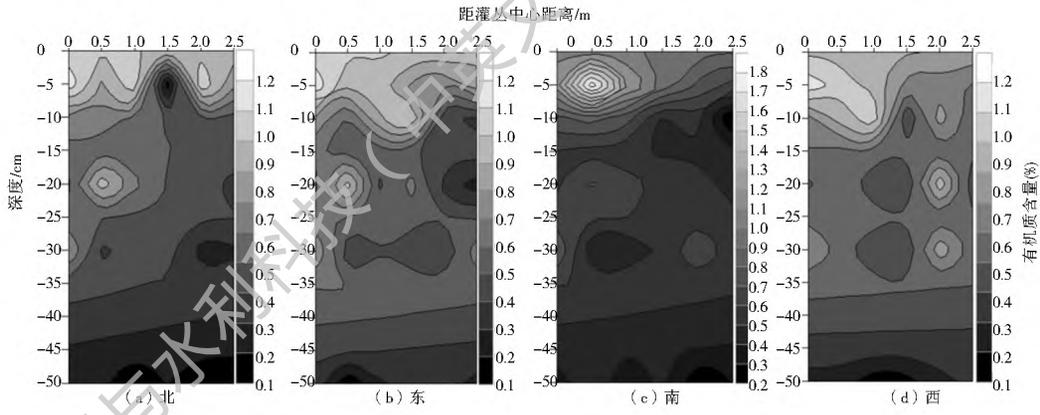


图4 土壤有机质含量克里格插值

Fig. 4 Kriging interpolation map of soil organic matter

比分析结果(表2)显示,地表水同位素值较大, δD 变化于 $-23.91\text{‰} \sim -30.03\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 变化于 $-1.63\text{‰} \sim -2.78\text{‰}$ 。黄河水同位素值较小, δD 变化于 $-51.73\text{‰} \sim -54.36\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 变化于 $-6.59\text{‰} \sim -7.22\text{‰}$ 。对比地表水、黄河水及土壤中氢氧同位素值,发现黄河水与土壤中氢氧同位素值更接近,其中5~10 cm 土层土壤中的氢氧同位素值与黄河水同位素值在0.05水平上无显著性差异,验证了研究区的形成为黄河携带大量泥沙在渤海凹陷处沉积所致。

水平方向上对比冠幅下、冠幅边缘和株间空地的

同位素值,发现0~5 cm 表层土 δD 值由冠幅下 -35.08‰ 减小到株间空地的 -44.90‰ , $\delta^{18}O$ 由 -3.48‰ 减小到 -4.54‰ , δD 、 $\delta^{18}O$ 同位素值冠幅下 > 冠幅边缘 > 株间空地;而5~10 cm 土层 δD 值则由冠幅下 -58.02‰ 增加到株间空地的 -49.77‰ , $\delta^{18}O$ 由 -7.87‰ 增加到 -5.77‰ , 同位素值冠幅下 < 冠幅边缘 < 株间空地。垂直方向上,0~5 cm 表层土 δD 介于 $-35.08\text{‰} \sim -44.90\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 介于 $-3.48\text{‰} \sim -4.54\text{‰}$, 5~10 cm 土层 δD 介于 $-49.77\text{‰} \sim -58.02\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 介于 $-5.77\text{‰} \sim -7.87\text{‰}$, 5~10 cm 土层中同位素值均小于0~5 cm 表层土。

表2 不同样品 δD 、 $\delta^{18}O$ 统计特征

Tab. 2 Statistical characteristics of δD 、 $\delta^{18}O$ in different samples

采样点	样品	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	采样点	样品	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)
0~5 cm 土层	冠幅下	-35.08b	-3.48b	0~15 cm 土层	冠幅下	-58.02a	-7.87a
	冠幅边缘	-41.28b	-3.73b		冠幅边缘	-55.44a	-7.09a
	株间空地	-44.90b	-4.54b		株间空地	-49.77a	-5.77a
地表水	B1	-28.30c	-2.59c	黄河水	H1	-51.73a	-6.59a
	B2	-27.56c	-2.42c		H2	-53.23a	-7.20a
	B3	-23.91c	-1.63c		H3	-54.26a	-7.22a
	B4	-30.03c	-2.78c		H4	-54.00a	-7.21a

注:小写字母 a, b, c 为 $P < 0.05$ 显著差异水平。

3 讨论

3.1 有机质富集的“肥岛”效应

本研究结果表明滨海湿地盐碱地区柽柳灌丛导致了土壤有机质在其冠下富集。运用方差分析对比灌丛周围有机质含量差异,由表3得出,在0.05显著性水平上,冠幅下与冠幅边缘稍有差异,而与株间空地差异较大,土层20 cm 上下差异显著,形成半径约1.5 m,深度约为20 cm 的肥沃地区,表现出典型的灌丛肥岛效应。植物从深层土壤和冠幅周围土壤

中吸收养分并积累在体内供地上部分生长,地上部

表3 土壤有机质变化单因素方差分析($P < 0.05$)

Tab. 3 ANOVA of soil organic matter ($P < 0.05$)

土层 / cm	有机质 (%)		
	冠幅下	冠幅边缘	株间空地
0~5	1.15 ± 0.35a	0.87 ± 0.29ab	0.79 ± 0.13b
5~10	0.78 ± 0.13a	0.74 ± 0.21a	0.52 ± 0.19b
10~20	0.77 ± 0.16a	0.59 ± 0.08b	0.61 ± 0.21b
20~30	0.56 ± 0.16a	0.50 ± 0.05a	0.57 ± 0.17a
30~50	0.33 ± 0.12a	0.30 ± 0.07a	0.30 ± 0.08a

注:小写字母 a, b 为 $P < 0.05$ 显著差异水平

分枯落后在土壤表层集聚分解,而植物残体的分解是陆地生态系统土壤有机质的主要来源^[22],故冠幅下土壤表层有机质含量高。

此外,有机质富集率表现为冠幅下高于冠幅边缘,这与植物根系的“营养泵”功能作用密切相关^[23],植物根系不断的代谢活动,活跃的向根外分泌着各种无机和有机物质,同时根表皮层物质的衰老以及毛细根系的死亡也分解转化为营养物质^[8],沉积在根际环境中,促进肥岛的发育^[24]。随着到灌丛中心距离的增大,其根系逐渐减少,植物的吸收累积作用减弱,富集率逐渐减小。

在采样过程中发现,灌丛中心处土壤有湿生虫等土壤动物在活动,夜晚尤为频繁,灌丛下的动物排泄物可肥沃土壤,提高土壤养分水平,而灌木下的动物洞穴可增加土壤的通透性和渗透性,适宜土壤微生物生长,加速营养物质循环,为肥岛机制的形成提供条件,其中洞穴对肥岛中的养分水平,特别是氮有重要的影响^[25]。徐文轩^[26]等研究表明,有大沙鼠定居柽柳沙包比无大沙鼠定居的柽柳沙包出现更为明显的肥岛效应,且有大沙鼠定居柽柳沙包下土壤养分含量显著高于丘间对照地。

3.2 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素富集效应

土壤同位素组成依赖于水分混合过程的频率和效率^[27]。0~5 cm 表层土冠幅下、冠幅边缘和株间空地 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值依次减小, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素表现为冠幅下富集。降雨时,树冠截留雨水,雨水经过截流再分配沿灌木主干流下,形成灌丛主干径流^[8],径流对从冠幅下到株间空地 0~5 cm 表层土的影响依次减弱,且雨水(地表水)中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素偏大,使得同位素值冠幅下 > 冠幅边缘 > 株间空地。而在 5~10 cm 土层,受植物根系对水分的滞留作用,冠幅下处根系发达,滞留作用最强,株间空地几乎无植被根系,滞留作用最弱。土壤中水分在蒸发作用下,重同位素富集,轻同位素分馏^[28],同时受植物根系的滞留作用,造成 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值冠幅下 < 冠幅边缘 < 株间空地, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素表现为株间空地富集。

垂直方向,0~5 cm 表层土同位素值大于 5~10 cm 土层,大气降水是地表水的主要来源^[29],0~5 cm 表层土直接受降雨影响,在无雨情况下受雨水堆积形成的地表水影响,地表水中同位素值偏大,地表水不断渗入与土壤水分混合,提升表层土同位素值。5~10 cm 土层在植物根系吸水作用下主要受地下水影响,因 5~10 cm 土层的氢氧同位素值与黄河水同位素值在 0.05 水平上无显著性差异,故河水为地

下水水源,黄河水中同位素值偏小,受黄河水影响 5~10 cm 土层中同位素值小于 0~5 cm 表层土。

3.3 柽柳灌丛周围水分运动与有机质变化

水循环是有机质变化的外部推动力,柽柳灌丛周围水分运动的同时会对土壤有机质产生影响。在 0~5 cm 表层土, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和有机质含量变化走势相同(图 5(a)和图 5(b)),灌丛主干径流富集水分的同时通过淋溶植物组织上的营养物质、淋洗林冠上的尘埃颗粒,在冠幅下富集土壤养分等资源^[30],使得表层土 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素和有机质含量表现为冠幅下 > 冠幅边缘 > 株间空地。5~10 cm 土层, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和有机质含量变化走势相反(图 5(c)和图 5(d)),经分析得知该土层土壤水分由黄河水补给,黄河水在缓慢渗透补给地下水的过程中携带大量营养元素,补充土壤中的养分。柽柳灌丛冠幅下根系发达,黄河水长期缓慢的侧渗作用将土壤养分推动到灌丛附近时,根系吸收水分,水分携带养分富集到冠幅下,使得有机质含量冠幅下最大。而 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素受冠幅下发达根系的滞留作用,且冠幅下蒸发作用最弱,使得 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值冠幅下最小。

4 结论

(1) 柽柳灌丛地上部分凋落物在地表聚集分解补充土壤养分,地下部分受冠幅下发达根系吸收累积养分作用,以及根系及其周围土壤生物的生命代谢活动,使得黄河三角洲盐碱地内有机质的富集具有表聚性,柽柳灌丛周围土壤有机质含量表现为冠幅下高于冠幅边缘高于株间空地。

(2) 因柽柳灌丛周围水分运动,不同土层同位素的富集区域出现差异:0~5 cm 表层土受大气降水影响,在灌丛主干径流作用下,径流对从冠幅下到株间空地 0~5 cm 表层土的影响依次减弱, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素在冠幅下富集;5~10 cm 土层受植物根系对水分的滞留作用和蒸发作用,株间空地植物根系的滞留作用最弱、蒸发作用最强, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素在株间空地富集。且 5~10 cm 土层中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值小于 0~5 cm 表层土。

(3) 有机质等土壤养分在肥岛效应影响下向柽柳主干周围聚集,这种土壤养分的小尺度空间异质性促进了柽柳自身的扩张,增强了柽柳对贫瘠盐碱地生态环境的适应性。同时,在水循环背景下,水分运动是土壤养分的重要推动力,土壤营养元素受水分推动作用在柽柳植株附近聚集,对柽柳个体及周围其他植被生长产生重要促进作用。

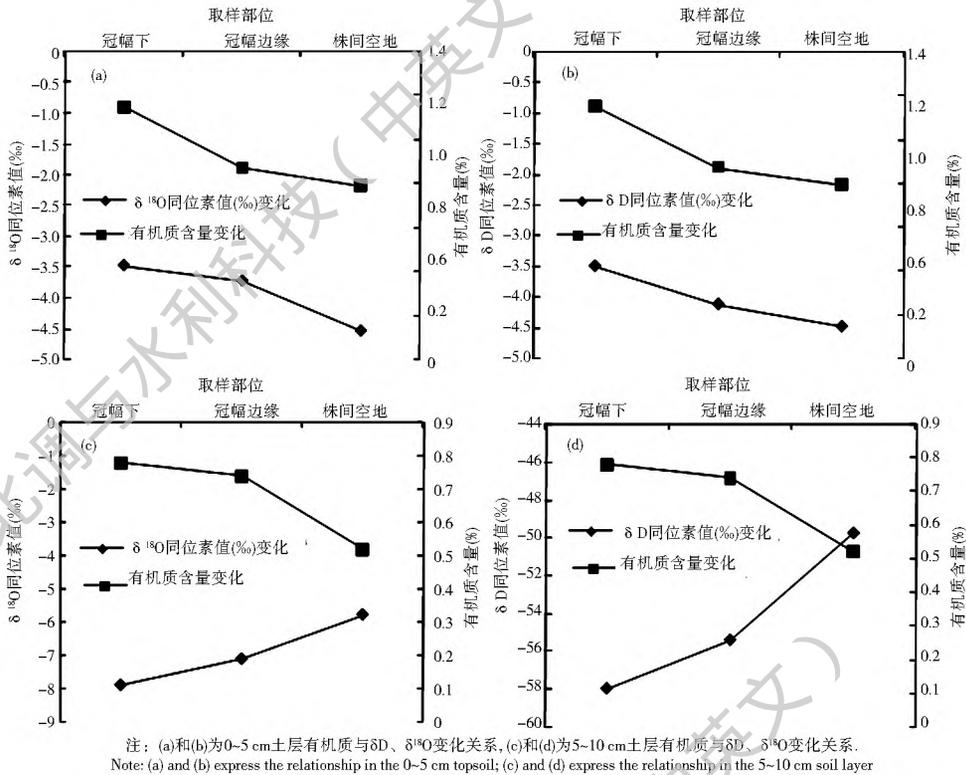


图5 不同土层有机质与δD、δ¹⁸O变化关系

Fig. 5 The relationship between soil organic matter variation and δD, δ¹⁸O variations

参考文献(References):

[1] 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. (LI Jun, ZHAO Cheng yi, ZHU Hong, et al. Species effect of *Tamarix* spp. and *Haloxylon ammodendron* on shrub "fertile island" [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5138-5147. (in Chinese))

[2] 尹传华, 冯固, 田长彦, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘柽柳灌丛肥岛效应的变化规律及其生态学意义[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(1): 52-57. (YIN Chuang hua, FENG Gu, TIAN Chang yan, et al. Variations of the fertile island effects beneath *tamarisk* in northern Taklamakan Desert, northwestern China and its implication to desertification process [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(1): 52-57. (in Chinese)) DOI: 10.13332/j.1000-1522.2008.01.020

[3] Franco Pizal a J, Fulbright T E, Gardiner D T. Spatial relations between shrubs and *Prosopis glandulosa* canopies [J]. Journal of Vegetation Science, 1995, 6(1): 73-78. DOI: 10.2307/3236258

[4] 刘耘华, 杨玉玲, 盛建东, 等. 北疆荒漠植被梭梭立地土壤养分“肥岛”特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 545-554. (LIU Yun hua, YANG Yu ling, SHENG Jian dong, et al. "Fertile island" characteristics of soil nutrients in *Haloxylon ammodendron* land in North Xinjiang [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 545-554. (in Chinese)) DOI: 10.11766/trxb2010470322

[5] Charley J L, West N E. Plant-induced soil chemical patterns in some shrub dominated semi desert ecosystems in Utah [J]. The Journal of Ecology, 1975, 63(3): 945-963. DOI: 10.2307/2258613

[6] Klemmedson J O, Barth R C. Distribution and balance of biomass and nutrients in desert shrub ecosystems. U S/IBP Desert Biome Research Memo [J]. Logan: Utah State University Press, 1975, 75: 5: 1-18

[7] Reynolds J F, Virginia R A, Kemp P R., et al. Impact of drought on desert shrubs: effect of seasonality and degree of resource island development [J]. Ecological Monographs, 1999, 69(1): 69-106. DOI: 10.2307/2657195

[8] 李从娟, 马健, 李彦, 等. 梭梭和白梭梭主根周围土壤养分的梯度分布[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1174-1180. (LI Cong jian, MA Jian, LI Yan, et al. Nutrient gradient distribution in soil around tap roots of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(5): 1174-1180. (in Chinese))

[9] 黄领梅, 沈冰. 水盐运动研究述评[J]. 西北水资源与水工程, 2000, 11(1): 6-12. (HUANG Ling mei, SHEN Bing. Review on advance in water and salt dynamics studies [J]. Water Resources & Water Engineering, 2000, 11(1): 6-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-643X.2000.01.002

[10] Buckingham. Studies on the movement of soil water, Bull. 38, 61 pp., U. S. Dep. of Agric., Washington, D. C., 1907.

[11] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333. DOI: 10.1063/1.1745010

[12] Bresler E, McNeal B L, Carter D L. Saline and sodic soils: principles dynamics modelling [M], Advanced Series in Agriculture Science, 1982: 10. DOI: 10.1007/978-3-642-68324-4.

[13] 杨玉建, 杨劲松. 土壤水盐运动的时空模式化研究[J]. 土壤,

- 2004, 36(3): 283-288. (YANG Yurjian, YANG Jing song. Temporal-spatial modeling of soil water and salt movement [J]. Soils, 2004, 36(3): 283-288. (in Chinese)) DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2004.03.010
- [14] 屈忠义, 陈亚新, 杨靖宇. 人工神经网络在冻土水盐空间变异与条件模拟中的应用比较[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 48-53. (QU Zhong yi, CHEN Ya xin, YANG Jing yu. Application and comparison research of artificial neural network on conditional simulation and space variability of water salt for frozen earth[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 48-53. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2007.07.009
- [15] 王丹, 陈永金, 裴巍, 等. 黄河三角洲湿地芦苇和棉田土样呼吸试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 49-54, 69. (WANG Dan, CHEN Yong jin, PEI wei, et al. Soil respiration of reed and cotton fields in Yellow river delta wetland[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 49-54, 69. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.02.010
- [16] 王永丽, 于君宝, 董洪芳, 等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 717-724. (WANG Yong li, YU Jun bao, DONG Hong fang, et al. Spatial evolution of landscape pattern of coastal wetlands in Yellow River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(6): 717-724. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.06.013
- [17] 张绪良, 肖滋民, 徐宗军, 等. 黄河三角洲滨海湿地的生物多样性特征及保护对策[J]. 湿地科学, 2011, 9(2): 125-131. (ZHANG Xu liang, XIAO Zi min, XU Zong jun, et al. Biodiversity characteristics and protection countermeasures of the coastal wetlands in the Yellow River Delta[J]. Wetland Science, 2011, 9(2): 125-131. (in Chinese)) DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2011.02.005
- [18] West A G, Patrickson S J, Ehleringer J R. Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2006, 20(8): 1317-1321. DOI: 10.1002/rcm.2456
- [19] Wezel A, Rajot J L, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agroecosystems in semi arid Niger[J]. Journal of Arid Environments, 2000, 44(4): 383-398. DOI: 10.1006/jare.1999.0609.
- [20] 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 红砂灌丛对土壤盐分和养分的富集作用[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 115-119. (HE Yu hui, LIU Xin ping, XIE Zhong kui. Enrichment of soil salinity and nutrients under desertification shrub *Reaumuria soongorica*[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(3): 115-119. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2015.090
- [21] 刘树宝. 基于稳定同位素技术的荒漠河岸林胡杨水分来源研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014. (LIU Shu bao. Study of water sources of *Populus euphratica* based on the stable isotope techniques in desert riparian forest[D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2014. (in Chinese))
- [22] 于君宝, 陈小兵, 孙志高, 等. 黄河三角洲新生滨海湿地土壤营养元素空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 855-861. (YU Jun bao, CHEN Xiao bing, SUN Zhi gao, et al. The spatial distribution characteristics of soil nutrients in new-born coastal wetland in the Yellow River delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(4): 855-861. (in Chinese)) DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2010.04.028
- [23] 陈广生, 曾德慧, 陈伏生. 干旱和半干旱地区灌木下土壤“肥岛”研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2295-2300. (CHEN Guang sheng, ZENG De hui, CHEN Fu sheng, et al. A research review on "fertile islands" of soils under shrub canopy in arid and semi arid regions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2295-2300. (in Chinese)) DOI: 10.13287/j.1001-9332.2003.0507
- [24] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 802-806. (SU Yong zhong, ZHAO Ha lin, ZHANG Tong hui. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(7): 802-806. (in Chinese)) DOI: 10.13287/j.1001-9332.2002.0190
- [25] 高军. 新疆典型荒漠植物胡杨“肥岛”特征与生态学意义[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008. (GAO Jun. "Fertile island" characteristics and ecological significance of *Populus euphratica* in Xinjiang[D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2008. (in Chinese))
- [26] 徐文轩, 刘伟, 杨维康, 等. 大沙鼠在柽柳沙包“肥岛”形成过程中的作用[J]. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1756-1762. (XU Wen xuan, LIU Wei, YANG Wei kang, et al. Role of *Rhombomys opimus* in the development of "fertile island" in tam ar risk mounds in Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(7): 1756-1762. (in Chinese)) DOI: 10.13292/j.1000-4890.2012.0311
- [27] Tang K, Feng X. The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 185(3-4): 355-367. DOI: 10.1016/S0012-821X(00)00385-X
- [28] 靳宇蓉, 鲁克新, 李鹏, 等. 基于稳定同位素的土壤水分运动特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 792-801. (JIN Yu rong, LU Ke xin, LI Peng, et al. Research on soil water movement based on stable isotopes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 792-801. (in Chinese)) DOI: 10.11766/trxb201411130509
- [29] 丁梯平, 高建飞, 石国钰, 等. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(5): 661-676. (DING Ti ping, GAO Jian fei, SHI Guo yu, et al. Spatial and temporal variations of and isotope compositions of the Yangtze river water and their environmental implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(5): 661-676. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0001-5717.2013.05.005
- [30] 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): 4819-48. (LI Cong juan, LEI Jia qiang, XU Xin wen, et al. The effects of stemflow on the formation of "Fertile Island" and "Salt Island" for *Haloxydon ammodendron* Bge [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4819-4826. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201107181069