

DOI: 10.5846/stxb202009032290

宋红丽, 刘前进, 安娟, 王立志, 郁万妮. 水沙条件及氮输入对黄河口滨岸潮滩湿地碱蓬和土壤<sup>15</sup>N 吸收特征的影响. 生态学报, 2021, 41(21): 8507-8515.

Song H L, Liu Q J, An J, Wang L Z, Yu W N. <sup>15</sup>N absorption characteristics for *Suaeda salsa* and sediment under different water-sediment conditions and nitrogen input in the Yellow River delta. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8507-8515.

# 水沙条件及氮输入对黄河口滨岸潮滩湿地碱蓬和土壤<sup>15</sup>N 吸收特征的影响

宋红丽\*, 刘前进, 安娟, 王立志, 郁万妮

山东省水土保持与环境保育重点实验室/临沂大学资源环境学院, 临沂 276005

**摘要:**受自然及人为活动的影响,黄河三角洲水沙条件存在较大变化,由此带来的外源营养物质增加对潮滩湿地植被生长及元素吸收利用具有重要的影响。为此采用 3 因素 4 水平的正交试验,以黄河口滨岸潮滩湿地先锋物种碱蓬(*Suaeda salsa*)为研究对象,利用<sup>15</sup>N 示踪技术,研究了水沙条件及氮输入对碱蓬和土壤<sup>15</sup>N 吸收特征的影响。结果表明:淹水深度、泥沙沉积及氮输入对土壤全氮含量的影响不显著,但外源氮输入对土壤<sup>15</sup>N 固持量( $N_{\text{diff}}$ )和比例( $N_{\text{diff}}\%$ )的影响达到显著水平,且最大值(10.44 mg/kg 和 3.83%)均出现在  $W_4S_2N_3$ (30 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理;碱蓬叶和茎中全氮含量、<sup>15</sup>N 吸收量( $N_{\text{diff}}$ )及比例( $N_{\text{diff}}\%$ )在深淹水和泥沙沉积处理时较大,而根中全氮含量、 $N_{\text{diff}}$ 及  $N_{\text{diff}}\%$ 在高氮输入较大。且根  $N_{\text{diff}}$ 和  $N_{\text{diff}}\%$ 最大值(1.10 mg/kg 和 18.21%) 在  $W_1S_4N_4$ (2 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理时取得,此时碱蓬的生长情况最好,表明适当的淹水和泥沙埋深以及高氮输入(9 g/m<sup>2</sup>)有利于根系对外源氮的吸收,从而促进植株的生长。由此可见,在黄河三角洲水沙变化大的背景下,淹水、泥沙沉积和外源氮输入的适当把控,可促进碱蓬对外源氮的吸收利用而有助于其生长,从而对维护黄河三角洲潮滩湿地的健康具有重要作用。

**关键词:**淹水深度; 泥沙沉积; 氮输入; 潮滩湿地; 碱蓬

## <sup>15</sup>N absorption characteristics for *Suaeda salsa* and sediment under different water-sediment conditions and nitrogen input in the Yellow River delta

SONG Hongli\*, LIU Qianjin, AN Juan, WANG Lizhi, YU Wannan

Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection/College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276005, China

**Abstract:** Water and sediment condition changed greatly due to natural conditions and human activities, which brought sediment and exogenous substances input influenced on the vegetation growth and element absorption in the tidal flat wetland in the Yellow River delta. Orthogonal test with three factors and four levels were established, and we selected *Suaeda salsa* as study object to examine the <sup>15</sup>N absorption characteristics for *S. salsa* and sediment under different water-sediment conditions and nitrogen input using <sup>15</sup>N tracer technique. The results showed that the influence of water depth, sediment burial depth and nitrogen input on sediment total nitrogen content did not reach significant level, while nitrogen input had significant influence on sediment <sup>15</sup>N derived from fertilizer ( $N_{\text{diff}}$ ) and proportion ( $N_{\text{diff}}\%$ ), and the maximum values (10.44 mg/kg and 3.83%) were observed at  $W_4S_2N_3$ (30 cm water depth+3 cm sediment burial+6 g/m<sup>2</sup> nitrogen input) treatment. Stem and leaf total nitrogen content,  $N_{\text{diff}}\%$  and  $N_{\text{diff}}$  reached maximum value at higher water depth and sediment

**基金项目:**国家自然科学基金青年基金项目(41601086);山东省高等学校青创人才引进计划(QC2019YY144);国家自然科学基金面上项目(41977067)

收稿日期:2020-09-03; 网络出版日期:2021-07-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songhongli@lyu.edu.cn

burial level, while root total nitrogen content,  $N_{\text{diff}}\%$  and  $N_{\text{diff}}$  were higher at high nitrogen input level. The maximum values of root  $N_{\text{diff}}\%$  (18.21%) and  $N_{\text{diff}}$  (1.10 mg/kg) were observed at  $W_1S_4N_4$  (2 cm water depth+12 cm sediment burial +9 g/ $m^2$  nitrogen input) treatment, and the growth of *S. salsa* was best at this treatment. So we concluded that proper control of water depth, sediment burial, and high nitrogen input (9 g/ $m^2$ ) was conducive to nitrogen absorption by roots, and then promoting the *S. salsa* growth. Consequently, the control of water depth, sediment burial and nitrogen input plays an important role in maintaining the health of tidal flat wetland under the background of large variation of water and sediment condition in the Yellow River delta.

**Key Words:** water depth; sediment burial; nitrogen input; tidal wetland; *Suaeda salsa*

受自然条件和人为活动的影响,黄河流域水沙关系存在不协调现象<sup>[1]</sup>,一方面,受气候影响 7—10 月(汛期)是黄河下游的主要水流、泥沙输移和淤积期,期间约有 85% 的泥沙和 60% 的年径流量输送入海<sup>[2]</sup>。另一方面,受调水调沙等人为活动的影响,每年的 6 月中旬至 7 月初调水调沙期间,仅用 20 d 左右的时间通过人造洪峰的形式将大量径流(约 30%)和泥沙(约 50%)输送入海<sup>[3]</sup>。从而使得径流量及输沙量年内分配和年际变化幅度不均匀,造成了黄河三角洲水沙条件的剧烈变化。径流量及输沙量的变化尤其是调水调沙期间对三角洲稳定性带来巨大干扰,河口入海泥沙扩散及沉积<sup>[4-6]</sup>、元素运移及生物地球化学循环<sup>[7-8]</sup>以及湿地水文情势<sup>[9-11]</sup>等均发生不同程度的改变。目前针对水沙变化影响下黄河入海口处的河道及近海区域开展了大量的研究,而针对黄河三角洲滨岸潮滩湿地的研究较少,尤其是水沙条件及由水沙带来的外源营养物质的短时间增加,对潮滩湿地植被生长及元素吸收利用的影响研究有待于进一步加强。

土壤氮素是植物生长发育所必需的营养要素,氮的有效性决定了植物生长的类型和植物的生产力<sup>[12]</sup>,研究表明氮素是黄河三角洲湿地尤其是碱蓬湿地主要限制养分<sup>[13]</sup>。然而近年来黄河三角洲的外源氮输入始终处于较高的水平。一方面,该区氮沉降量从 1980 年的 1—2 g  $m^{-2} a^{-1}$  增至 2010 年的 3—4.5 g  $m^{-2} a^{-1}$ <sup>[14]</sup>;另一方面,承接上游携带的大量含氮物质,黄河口营养盐入海通量一直保持在较高水平(1.41—4.22 $\times 10^4$  t)<sup>[15]</sup>,尤其是调水调沙期间短时间内会有大量的营养盐进入三角洲地区。研究发现三角洲地区调水调沙期间硝酸盐和无机氮是平时的 2—3 倍,调水调沙后亚硝酸盐和铵盐则增加 2—4 倍<sup>[7]</sup>。外源氮的输入给黄河三角洲地区产生较大影响,目前针对外源氮输入影响湿地土壤有机碳、磷、硫等形态分布<sup>[16-17]</sup>、温室气体排放<sup>[18]</sup>,尤其是植被的生长发育<sup>[19]</sup>等均开展了较多的研究,研究发现外源氮添加影响植物的丰度、物种组成、生物量分配以及各部分氮含量<sup>[20-22]</sup>。试验设计多为单因素氮输入或者氮输入与盐分、磷、硫等两因素带来的影响<sup>[23]</sup>。而针对上游水沙尤其是调水调沙期间带来的多因素变化对潮滩湿地的影响研究相对较少<sup>[24]</sup>,尤其缺乏淹水和泥沙沉积情况对植被氮元素吸收利用的影响研究。为此本研究以调水调沙期间水沙过程的三个关键因子(淹水、泥沙沉积和氮输入)为切入点,选取黄河三角洲潮滩湿地先锋物种碱蓬(*Suaeda Salsa*)为研究对象,利用<sup>15</sup>N 示踪方法研究水沙条件及氮输入对黄河口滨岸潮滩湿地碱蓬和土壤<sup>15</sup>N 吸收特征的影响,以期为进一步完善调水调沙工程的实施提供一定的数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄河三角洲是我国暖温带地区最完整、最广阔、最年轻的新生湿地生态系统,是由黄河携带的泥沙冲淤而成。该区年平均气温 12.1℃,无霜期 196 d,年均蒸发量 1962 mm,年均降水量为 551.6 mm,70% 的降水集中于 7、8 月份。黄河三角洲湿地可分为浅海湿地、滩涂/潮滩湿地、河流湿地和沼泽湿地等,其中浅海湿地面积最大(41.22%)、滩涂/潮滩湿地次之(24.64%)<sup>[25]</sup>。该区主要植被类型为芦苇(*Phragmites australis*)群落、芦苇-荻(*Triarrhena sacchariflora*)群落、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)群落、柽柳(*Tamarix chinensis*)群落、碱蓬群落(*S. salsa*)及补血草(*Limonium sinense*)群落等,其中芦苇群落、柽柳群落及碱蓬群落分布广泛。

## 1.2 供试材料与试验设计

### 1.2.1 供试种子及土壤

于 2016 年 11 月中旬在黄河三角洲潮滩湿地碱蓬群落采集试验供试碱蓬种子,带回实验室处理干净后将种子放置于 4℃ 的冰箱内保存备用。同时采集黄河三角洲碱蓬湿地(37°41'14"N, 118°47'3"E)0—30 cm 盐碱土(野外调查发现碱蓬的根系主要分布在 0—30 cm 的范围内)作为试验供试土壤。

### 1.2.2 试验设计

2017 年 4 月底试验于温室内(位于山东省水土保持与环境保育重点实验室)进行。选择直径为 25 cm,高为 30 cm 的花盆,装入质量相同的盐碱土,挑选 30 粒籽粒饱满的碱蓬种子均匀播种于花盆中,表面覆盖约 2 cm 的盐碱土(为保证试验的一致性,保证每盆质量相同)。按照已有关于模拟黄河三角洲碱蓬生长的补水方案<sup>[26]</sup>,精心管理待碱蓬萌发成长,在此过程中分三次去除长势不好的幼苗,直至每个花盆中留 6 株长势相近的碱蓬幼苗。

设置不同的淹水深度(W)、泥沙沉积厚度(S)和外源氮输入量(N)。其中(1)淹水深度:水平的设置考虑到碱蓬的生态阈值区间(-0.92—0.08 m)<sup>[27]</sup>、处理时碱蓬株高、已有研究关于调水调沙过程中核心区淹水深度(30 cm)<sup>[10-11]</sup>,为此本研究淹水深度取四个水平 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>和 W<sub>4</sub>,分别为 2 cm、8 cm、15 cm 和 30 cm,代表水位生态阈值内的值、生态阈值边界值、碱蓬在 6 月底 7 月初的株高均值以及核心区淹水深度。由于水是调水调沙过程中运输泥沙和氮进入湿地的载体,为此淹水深度的设置不能为 0;(2)泥沙沉积:水平的设置主要参考已有研究,泥沙埋深处理低于 2/3 株高能一定程度上促进碱蓬幼苗生长<sup>[28]</sup>(本研究处理时碱蓬幼苗平均株高为 18 cm),以及调水调沙期间潮滩湿地大约有 5—6 cm 的泥沙沉积<sup>[29]</sup>,为此泥沙沉积 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>和 S<sub>4</sub>的设置为:0 cm、3 cm、6 cm 和 12 cm,分别表征无泥沙沉积、轻微泥沙沉积、实际泥沙沉积以及对碱蓬起到促进作用的泥沙沉积厚度;(3)氮输入:水平的设定主要参考黄河三角洲陆源氮输入量 2.5—3.5 g/m<sup>2</sup><sup>[30]</sup>,N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>和 N<sub>4</sub>的值分别设置为:0 g/m<sup>2</sup>、3 g/m<sup>2</sup>、6 g/m<sup>2</sup>和 9 g/m<sup>2</sup>。利用三因素四水平正交实验,共 16 个处理(表 1),每个处理 3 个重复。依据上述实验设置,参考历年调水调沙时间,于 6 月 22 日对碱蓬进行处理。

表 1 水沙条件及氮输入对碱蓬和土壤氮吸收特征影响的正交实验设计

Table 1 The orthogonal experiment of *Suaeda salsa* and sediment for nitrogen absorption characteristics under different water depth, sediment burial and nitrogen input

处理编号 Processing number	W <sub>1</sub> S <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	W <sub>1</sub> S <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	W <sub>1</sub> S <sub>3</sub> N <sub>3</sub>	W <sub>1</sub> S <sub>4</sub> N <sub>4</sub>	W <sub>2</sub> S <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	W <sub>2</sub> S <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	W <sub>2</sub> S <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	W <sub>2</sub> S <sub>4</sub> N <sub>3</sub>
淹水深度 Water depth/cm	2	2	2	2	8	8	8	8
泥沙沉积 Sediment burial/cm	0	3	6	12	0	3	6	12
外源氮输入 Nitrogen input/(g/m <sup>2</sup> )	0	3	6	9	3	0	9	6
	W <sub>3</sub> S <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	W <sub>3</sub> S <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	W <sub>3</sub> S <sub>3</sub> N <sub>1</sub>	W <sub>3</sub> S <sub>4</sub> N <sub>2</sub>	W <sub>4</sub> S <sub>1</sub> N <sub>4</sub>	W <sub>4</sub> S <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	W <sub>4</sub> S <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	W <sub>4</sub> S <sub>4</sub> N <sub>1</sub>
淹水深度 Water depth/cm	15	15	15	15	30	30	30	30
泥沙沉积 Sediment burial/cm	0	3	6	12	0	3	6	12
外源氮输入 Nitrogen input/(g/m <sup>2</sup> )	6	9	0	3	9	6	3	0

W<sub>1</sub>S<sub>1</sub>N<sub>1</sub>: 2 cm 淹水+0 cm 泥沙沉积+0 g/m<sup>2</sup>氮输入 2 cm water depth+0 cm sediment burial+0 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>1</sub>S<sub>2</sub>N<sub>2</sub>: 2 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+3 g/m<sup>2</sup>氮输入 2 cm water depth+3 cm sediment burial+3 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>1</sub>S<sub>3</sub>N<sub>3</sub>: 2 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入 2 cm water depth+6 cm sediment burial+6 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>1</sub>S<sub>4</sub>N<sub>4</sub>: 2 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入 2 cm water depth+12 cm sediment burial+9 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>2</sub>S<sub>1</sub>N<sub>2</sub>: 8 cm 淹水+0 cm 泥沙沉积+3 g/m<sup>2</sup>氮输入 8 cm water depth+0 cm sediment burial+3 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>2</sub>S<sub>2</sub>N<sub>1</sub>: 8 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+0 g/m<sup>2</sup>氮输入 8 cm water depth+3 cm sediment burial+0 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>2</sub>S<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: 8 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入 8 cm water depth+6 cm sediment burial+9 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>2</sub>S<sub>4</sub>N<sub>3</sub>: 8 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入 8 cm water depth+12 cm sediment burial+6 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>3</sub>S<sub>1</sub>N<sub>3</sub>: 15 cm 淹水+0 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入 15 cm water depth+0 cm sediment burial+6 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>3</sub>S<sub>2</sub>N<sub>4</sub>: 15 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入 15 cm water depth+3 cm sediment burial+9 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>3</sub>S<sub>3</sub>N<sub>1</sub>: 15 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+0 g/m<sup>2</sup>氮输入 15 cm water depth+6 cm sediment burial+0 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>3</sub>S<sub>4</sub>N<sub>2</sub>: 15 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+3 g/m<sup>2</sup>氮输入 15 cm water depth+12 cm sediment burial+3 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>4</sub>S<sub>1</sub>N<sub>4</sub>: 30 cm 淹水+0 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入 30 cm water depth+0 cm sediment burial+9 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>4</sub>S<sub>2</sub>N<sub>3</sub>: 30 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入 30 cm water depth+3 cm sediment burial+6 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>4</sub>S<sub>3</sub>N<sub>2</sub>: 30 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+3 g/m<sup>2</sup>氮输入 30 cm water depth+6 cm sediment burial+3 g/m<sup>2</sup> nitrogen input; W<sub>4</sub>S<sub>4</sub>N<sub>1</sub>: 30 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+0 g/m<sup>2</sup>氮输入 30 cm water depth+12 cm sediment burial+0 g/m<sup>2</sup> nitrogen input

泥沙沉积埋深用的泥沙均采集于黄河三角洲碱蓬湿地盐碱土,采用<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>Cl(丰度为 99%)进行氮添加,依据设定的添加量换算成相应的<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>Cl 重量进行添加。由于调水调沙输入到黄河三角洲的是淡水,为此采用暴晒过的自来水添加到相应深度模拟淹水,处理为期 18 d<sup>[24]</sup>。于 9 月 11 号结束本试验,用小铲将碱蓬植株小心从盆中取出,并用蒸馏水冲洗干净后分离为根、茎、叶。将根、茎和叶样品先于 105℃下杀青,后于 80℃下烘干至恒重,称量干重粉碎过筛备用,采集植物的同时进行盆中土壤样品的采集,风干研磨过筛备用。利用 vario PYRO cube 元素分析仪测定土壤和植被全氮含量,利用 ISOPRIME-100 稳定同位素质谱仪测定土壤和植被<sup>15</sup>N 丰度。

1.3 数据处理

采用 Origin 9.0 进行数据处理和作图,用 Spss 20.0 软件进行多因素方差分析,文中数据为平均值±标准误。 $N_{\text{dff}}$ (nitrogen derived from fertilizer)为样品所含氮中来自标记物氮的量; $N_{\text{dff}}\%$ 为样品所含氮中来自标记物氮的质量百分比;植物对<sup>15</sup>N 的吸收量( $N_{\text{dff}}$ )及比例( $N_{\text{dff}}\%$ )和土壤对<sup>15</sup>N 的固持量( $N_{\text{dff}}$ )及比例( $N_{\text{dff}}\%$ )计算公式如下<sup>[31-33]</sup>:

植物  $N_{\text{dff}}\% = (\text{植物样品 } ^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) / (\text{外源氮添加 } ^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) \times 100\%$ ;

植株  $N_{\text{dff}} = N_{\text{dff}}\% \times \text{器官全氮含量}$ ;

土壤  $N_{\text{dff}}\% = (\text{土壤样品 } ^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) / (\text{外源氮添加 } ^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) \times 100\%$ ;

土壤  $N_{\text{dff}} = N_{\text{dff}}\% \times \text{土壤全氮含量}$ ;其中<sup>15</sup>N 自然丰度为 0.3663。

2 结果与分析

2.1 碱蓬各器官及土壤全氮含量

所有处理土壤全氮含量的变化范围为(295.5±2.5)—(367.5±1.5) mg/kg(图 1),方差分析结果表明淹水深度、泥沙沉积及氮输入对土壤全氮含量的影响均未达到显著水平( $P>0.05$ )(表 2)。碱蓬根、茎和叶中全氮含量的变化范围分别为(4.64±0.46)—(6.98±0.33) g/kg、(4.01±0.40)—(11.38±0.67) g/kg 和(14.92±0.88)—(21.94±3.15) g/kg,其中根中全氮含量最大值出现在 W<sub>3</sub>S<sub>2</sub>N<sub>4</sub>(15 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理,茎和叶全氮含量最大值则出现在 W<sub>4</sub>S<sub>3</sub>N<sub>2</sub>(30 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+3 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理,根全氮含量的最小值出现在 W<sub>1</sub>S<sub>3</sub>N<sub>3</sub>(2 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理,茎和叶最小值则出现在 W<sub>1</sub>S<sub>1</sub>N<sub>1</sub>(2 cm 淹水+0 cm 泥沙沉积+0 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理。方差分析结果表明淹水和泥沙沉积对碱蓬茎中全氮含量的影响达到显著水平( $P<0.05$ ),而氮输入对根中全氮含量的影响达到显著水( $P<0.05$ )。

表 2 淹水、泥沙沉积和氮输入对土壤、碱蓬叶、茎及根中氮含量、 $N_{\text{dff}}\%$ 、 $N_{\text{dff}}$ 影响的方差分析

Table 2 Result of variance analysis for sediment, leaf, stem and root nitrogen content,  $N_{\text{dff}}\%$ ,  $N_{\text{dff}}$  of *Suaeda salsa* under different water depth, sediment burial and nitrogen input

	淹水 Water depth		泥沙沉积 Sediment burial		氮输入 Nitrogen input	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
土壤氮含量 Sediment nitrogen content	0.718	0.552	1.773	0.182	1.087	0.375
茎氮含量 Stem nitrogen content	8.318	0.001	4.036	0.020	2.956	0.055
叶氮含量 Leaf nitrogen content	1.953	0.151	1.115	0.364	1.996	0.144
根氮含量 Root nitrogen content	3.373	0.037	1.156	0.349	8.470	0.001
土壤 $N_{\text{dff}}\%$ Sediment $N_{\text{dff}}\%$	1.607	0.216	3.085	0.048	12.418	0.000
茎 $N_{\text{dff}}\%$ Stem $N_{\text{dff}}\%$	4.327	0.015	3.785	0.025	45.290	0.000
叶 $N_{\text{dff}}\%$ Leaf $N_{\text{dff}}\%$	2.963	0.054	3.231	0.042	37.995	0.000
根 $N_{\text{dff}}\%$ Root $N_{\text{dff}}\%$	9.808	0.000	7.841	0.001	50.996	0.000
土壤 $N_{\text{dff}}$ Sediment $N_{\text{dff}}$	2.448	0.091	4.851	0.010	20.705	0.000
茎 $N_{\text{dff}}$ Stem $N_{\text{dff}}$	3.780	0.025	2.075	0.133	22.537	0.000
叶 $N_{\text{dff}}$ Leaf $N_{\text{dff}}$	1.926	0.155	2.645	0.074	27.327	0.000
根 $N_{\text{dff}}$ Root $N_{\text{dff}}$	5.218	0.007	6.344	0.003	45.713	0.000

$N_{\text{dff}}\%$ : 氮中来自氮标记物的百分数 Percentage of nitrogen derived from <sup>15</sup>N-marked fertilizer; $N_{\text{dff}}$ :氮中来自氮标记物的量 Nitrogen derived from <sup>15</sup>N-marked fertilizer



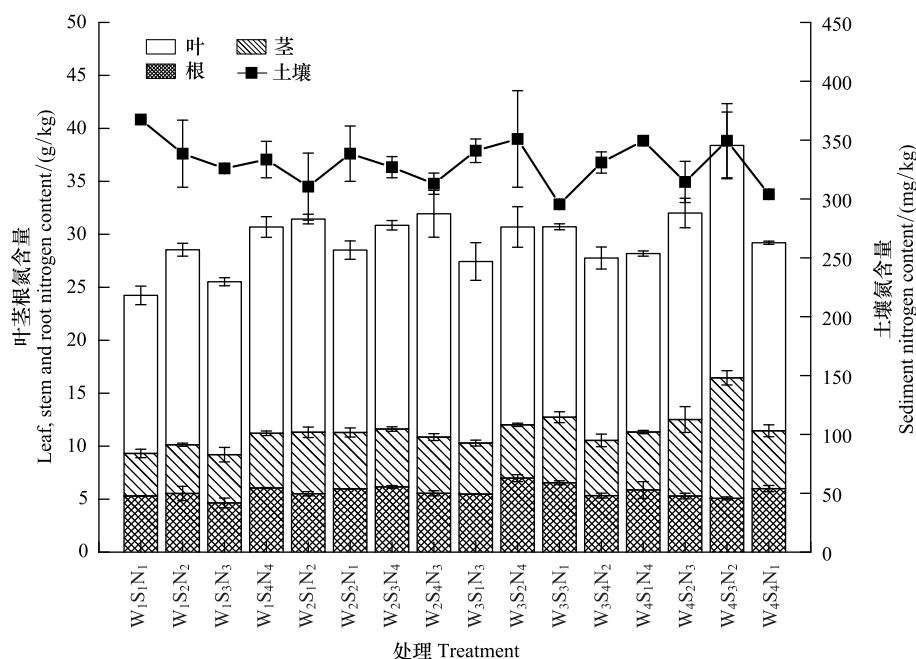


图1 淹水、泥沙沉积及氮输入对土壤、碱蓬叶、茎及根中氮含量的影响

Fig.1 Influence of water depth, sediment burial and nitrogen input on sediment, leaf, stem and root nitrogen content of *Suaeda salsa*

W<sub>1</sub>S<sub>1</sub>N<sub>1</sub>: 2 cm 淹水+0 cm 泥沙沉积+0 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>1</sub>S<sub>2</sub>N<sub>2</sub>: 2 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+3 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>1</sub>S<sub>3</sub>N<sub>3</sub>: 2 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>1</sub>S<sub>4</sub>N<sub>4</sub>: 2 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>2</sub>S<sub>1</sub>N<sub>2</sub>: 8 cm 淹水+0 cm 泥沙沉积+3 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>2</sub>S<sub>2</sub>N<sub>2</sub>: 8 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+0 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>2</sub>S<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: 8 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>2</sub>S<sub>4</sub>N<sub>3</sub>: 8 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>3</sub>S<sub>1</sub>N<sub>3</sub>: 15 cm 淹水+0 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>3</sub>S<sub>2</sub>N<sub>4</sub>: 15 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>3</sub>S<sub>3</sub>N<sub>1</sub>: 15 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+0 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>3</sub>S<sub>4</sub>N<sub>2</sub>: 15 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+3 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>4</sub>S<sub>1</sub>N<sub>4</sub>: 30 cm 淹水+0 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>4</sub>S<sub>2</sub>N<sub>3</sub>: 30 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>4</sub>S<sub>3</sub>N<sub>2</sub>: 30 cm 淹水+6 cm 泥沙沉积+3 g/m<sup>2</sup>氮输入; W<sub>4</sub>S<sub>4</sub>N<sub>1</sub>: 30 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+0 g/m<sup>2</sup>氮输入

## 2.2 碱蓬各器官及土壤对<sup>15</sup>N 的吸收比例

淹水、泥沙沉积及外源氮输入对土壤及碱蓬各器官中<sup>15</sup>N 所占百分比的影响较大,变化趋势相对一致(图2),方差分析结果表明除淹水对土壤及叶 N<sub>diff</sub>% 的影响未达到显著水平外( $P>0.05$ ),其余均达到显著水平( $P<0.05$ )(表2)。土壤、碱蓬叶、茎及根在 W<sub>1</sub>S<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>S<sub>2</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>3</sub>S<sub>3</sub>N<sub>1</sub>和 W<sub>4</sub>S<sub>4</sub>N<sub>1</sub>处理时 N<sub>diff</sub>% 的值均较低,即外源氮输入为 0 g/m<sup>2</sup>时土壤和碱蓬对<sup>15</sup>N 的吸收低。土壤和叶中 N<sub>diff</sub>% 的最大值(3.83%和 21.81%)均出现在 W<sub>4</sub>S<sub>2</sub>N<sub>3</sub>(30 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理,即较深的淹水处理时碱蓬叶中<sup>15</sup>N 的比例较高,其次 W<sub>1</sub>S<sub>3</sub>N<sub>3</sub>、W<sub>3</sub>S<sub>2</sub>N<sub>4</sub>、W<sub>2</sub>S<sub>3</sub>N<sub>4</sub>处理时 N<sub>diff</sub>% 值也相对较高;茎和根中 N<sub>diff</sub>% 的最大值(18.01%和 18.21%)出现在 W<sub>1</sub>S<sub>4</sub>N<sub>4</sub>(2 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理,即较深的泥沙沉积和高氮输入有利于茎和根对<sup>15</sup>N 的吸收,其次 W<sub>1</sub>S<sub>3</sub>N<sub>3</sub>、W<sub>2</sub>S<sub>3</sub>N<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>S<sub>2</sub>N<sub>3</sub>处理时 N<sub>diff</sub>% 的值相对较高。

与 N<sub>diff</sub>% 的变化趋势类似,土壤、碱蓬叶、茎及根<sup>15</sup>N 吸收量在 W<sub>1</sub>S<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>S<sub>2</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>3</sub>S<sub>3</sub>N<sub>1</sub>和 W<sub>4</sub>S<sub>4</sub>N<sub>1</sub>处理时较低(图3)。土壤<sup>15</sup>N 固持量的最大值(10.44 mg/kg)在 W<sub>4</sub>S<sub>2</sub>N<sub>3</sub>处理时取得,W<sub>3</sub>S<sub>2</sub>N<sub>4</sub>(8.06 mg/kg)和 W<sub>1</sub>S<sub>3</sub>N<sub>3</sub>(8.03 mg/kg)处理时次之。茎和叶<sup>15</sup>N 吸收量的最大值也出现在 W<sub>3</sub>S<sub>2</sub>N<sub>4</sub>处理,分别为 1.31 g/kg 和 4.28 g/kg,其次为 W<sub>2</sub>S<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(0.95 g/kg 和 3.62 g/kg)和 W<sub>1</sub>S<sub>4</sub>N<sub>4</sub>(0.93 g/kg 和 3.60 g/kg)处理。根<sup>15</sup>N 吸收量的最大值(1.10 g/kg)则出现在 W<sub>1</sub>S<sub>4</sub>N<sub>4</sub>处理,其次为 W<sub>2</sub>S<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(0.98 g/kg)和 W<sub>3</sub>S<sub>2</sub>N<sub>4</sub>(0.86 g/kg)处理。方差分析结果表明淹水对茎和根<sup>15</sup>N 吸收量、泥沙沉积对土壤和根<sup>15</sup>N 吸收量以及外源氮输入对土壤、叶、茎和根<sup>15</sup>N 吸收量均

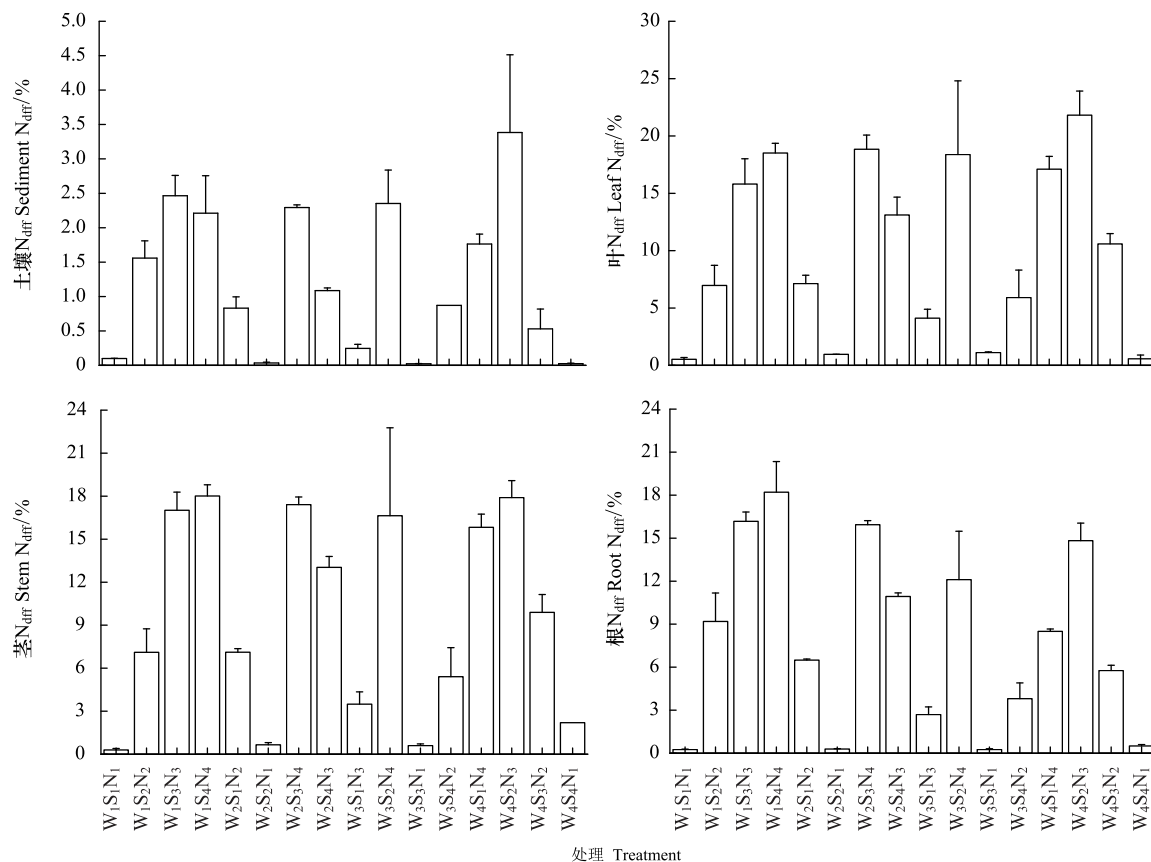


图2 淹水、泥沙沉积及氮输入对土壤、碱蓬叶、茎及根中  $N_{dff}$  %的影响

Fig.2 Influence of water depth, sediment burial and nitrogen input on sediment, leaf, stem and root  $N_{dff}$  % of *Suaeda salsa*

$N_{dff}$  %: 氮中来自氮标记物的百分数 Percentage of nitrogen derived from  $^{15}\text{N}$ -marked fertilizer;  $N_{dff}$ : 氮中来自氮标记物的量 Nitrogen derived from  $^{15}\text{N}$ -marked fertilizer

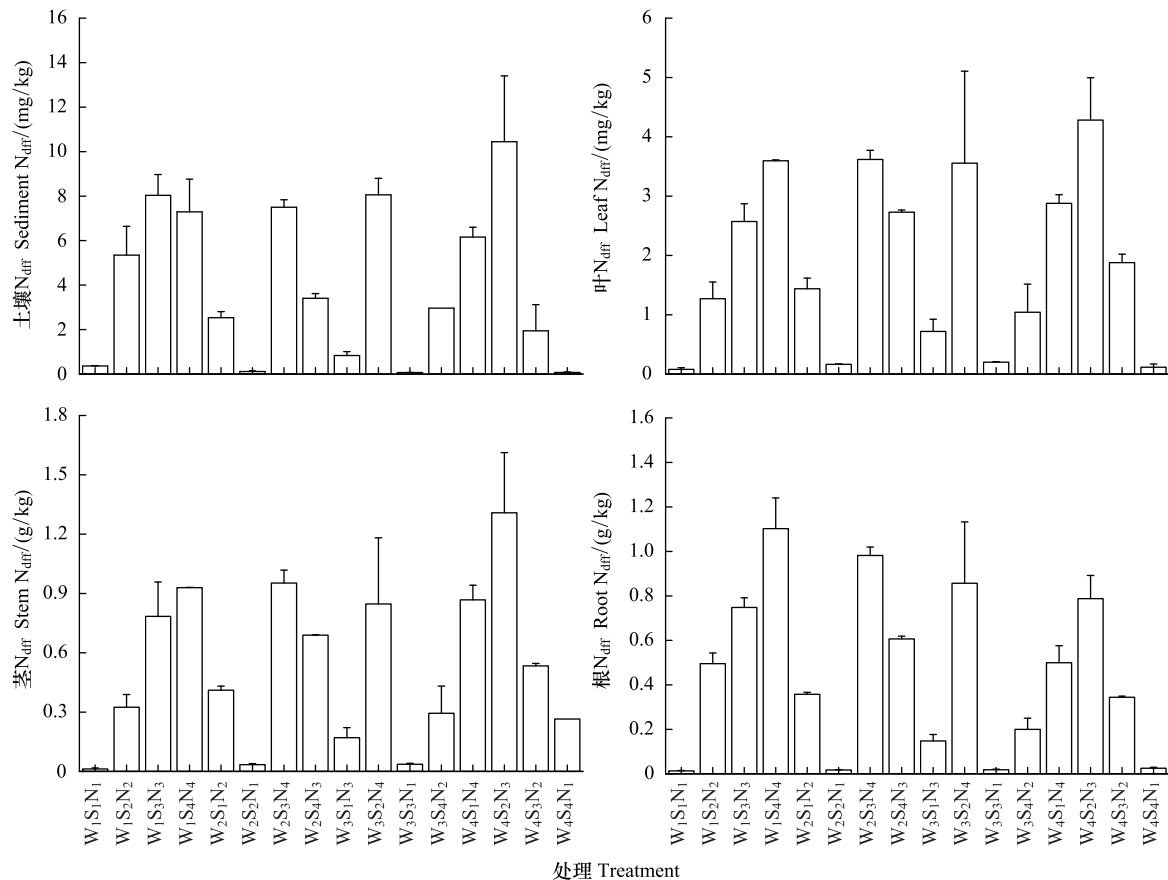
达到显著水平 ( $P < 0.05$ ) (表 2)。

### 3 讨论

#### 3.1 对土壤氮的影响

外源氮添加对土壤氮含量有一定的影响, Hu 等研究表明长时间氮添加对落叶松人工林表层土壤 (0—20 cm) 总氮含量的影响不显著, 但影响土壤的理化性质, 会明显增加  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度, 减小 pH 和有效磷的含量<sup>[34]</sup>。淹水时土壤处于厌氧环境, 微生物活性较低, 残体分解和养分释放缓慢, 导致土壤中全氮含量较低<sup>[35]</sup>。泥沙沉积对土壤全氮的影响目前尚未可知, 但可以通过影响植被的生长间接影响土壤全氮含量。但在本研究中发现淹水深度、泥沙沉积及氮输入对土壤全氮含量的影响均不显著 ( $P > 0.05$ )。土壤氮含量主要取决于有机物质输入量与输出量的相对大小, 本研究中由于采取温室模拟实验, 输入量为  $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$  的添加量和微量泥沙沉积添加时土壤包含的氮, 输出量则为碱蓬的吸收利用量, 在淹水深度、泥沙沉积及氮输入共同作用下土壤全氮输入量和输入量大小虽有所不同, 但共同决定土壤全氮含量相对稳定, 使得本研究中不同处理土壤全氮含量的差异不显著。

有别于土壤全氮, 淹水深度及泥沙沉积对土壤  $^{15}\text{N}$  的吸收比例和固持量的影响不显著 ( $P > 0.05$ ), 而外源氮输入对其影响达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 并表现为外源氮输入水平较高时土壤  $N_{dff}$  % 及  $N_{dff}$  相对较高。但两者的最大值均出现在  $W_4S_2N_3$  (30 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入) 处理, 而不是外源氮输入最大的  $N_4$

图3 淹水、泥沙沉积及氮输入对土壤、碱蓬叶、茎及根中  $N_{\text{dif}}$  的影响Fig.3 Influence of water depth, sediment burial and nitrogen input on sediment, leaf, stem and root  $N_{\text{dif}}$  of *Suaeda salsa*

(9 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理,主要原因在于碱蓬对<sup>15</sup>N 吸收作用,本研究中碱蓬在  $N_4$ 处理时叶、茎及根中  $N_{\text{dif}}\%$  及  $N_{\text{dif}}$  较高,由此造成土壤  $N_{\text{dif}}\%$  及  $N_{\text{dif}}$  在高氮( $N_4$ )处理时不取得最大值。

### 3.2 对碱蓬氮吸收利用的影响

碱蓬对氮元素的吸收利用与生长节律、生理生态特征以及土壤营养水平密切相关<sup>[13]</sup>。本研究中淹水深度和泥沙沉积对茎全氮含量以及氮输入对根全氮含量的影响达到显著水平( $P<0.05$ ),且根全氮的最大值出现在  $W_3S_2N_4$ 处理,茎和叶的最大值则出现在  $W_4S_3N_2$ 处理,即高浓度氮输入时根全氮含量高,而较深淹水和泥沙沉积时,叶和茎的全氮含量高。Grechi 等<sup>[36]</sup>和 Wang 等<sup>[37]</sup>研究发现植物会分配较多的氮给生长旺盛的器官,生长相对不旺盛的器官获得的氮较少。淹水和泥沙埋深,尤其是过量的淹水和泥沙埋深会抑制碱蓬的生长, $W_4S_3N_2$ 处理(淹水 30 cm)超过了碱蓬水分生态阈值区间( $-0.92\sim-0.08$  m)<sup>[27]</sup>。研究发现水深与湿地植物株高、生物量、生物量分配、叶绿素含量、最大光化学效率以及光化学性能均存在相关性,且持续的淹水会减低根冠比<sup>[38]</sup>,可能的原因是降低地下生物量以减少根系的呼吸消耗<sup>[39]</sup>,同时增加地上生物量以提高光合与呼吸效率来适应淹水生境<sup>[40]</sup>。为此叶成为淹水时较为活跃的器官,会分配更多的氮元素,从而使得本研究中较深淹水和泥沙沉积时,叶和茎的全氮含量高。

总体上外源氮的添加会促进植被对氮的吸收,但研究发现氮输入处理后,植物地下部分的氮含量和地上部分变化并不一致。其中氮输入对茭草(*Zizania caduciflora*)地上部分氮吸收的影响比地下部分显著。N 添加为 20 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 时对水葱(*Scirpus validus*)地下部分的氮吸收影响比地上部分显著,N 添加为 40 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 时对水葱地上部分的氮吸收影响比地下部分显著<sup>[19]</sup>。在本研究中也同样发现高氮输入条件下碱蓬根对氮的吸收

作用显著。

与全氮含量相似的是,根中  $N_{\text{dff}}\%$  及  $N_{\text{dff}}$  在较高氮输入较大,而叶和茎中  $N_{\text{dff}}\%$  及  $N_{\text{dff}}$  在较高淹水和泥沙沉积时较大;与之不同的是叶  $N_{\text{dff}}\%$  及  $N_{\text{dff}}$  最大值在  $W_4S_2N_3$  处理取得,茎  $N_{\text{dff}}\%$  及  $N_{\text{dff}}$  最大值分别在  $W_1S_4N_4$  和  $W_4S_2N_3$  处理取得,根  $N_{\text{dff}}\%$  及  $N_{\text{dff}}$  最大值在  $W_1S_4N_4$  处理取得,即淹水、泥沙沉积和氮输入对外源氮( $^{15}\text{N}$ )吸收利用的影响会区别于总氮的吸收利用。研究发现, $W_1S_4N_4$ (2 cm 淹水+12 cm 泥沙沉积+9 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理即适当的淹水和泥沙沉积及高氮输入,最有利于碱蓬的生长<sup>[24]</sup>,而在此处理时根对外源氮的吸收也最大,由此可见根对外源氮的吸收利用对于碱蓬生长具有较大的作用。

综上,淹水、泥沙沉积和氮输入对碱蓬和土壤氮吸收特征具有一定的影响。在黄河三角洲水沙变化大的背景下,碱蓬湿地生态系统健康必定会受到一定程度的影响。本研究发现不同水沙条件及氮输入条件下碱蓬叶、茎和根对外源氮的吸收利用特征有所不同,且适当的淹水和泥沙沉积条件可促进对外源氮的吸收利用,有助于碱蓬的生长,从而增强对复杂多变的外界环境的适应。为此在调水调沙过程中,适度把控淹水、泥沙沉积和氮输入有利于维护黄河三角洲碱蓬湿地的健康。

#### 4 结论

(1) 外源氮输入对土壤<sup>15</sup>N 吸收比例和固持量的影响达到显著水平,且土壤  $N_{\text{dff}}\%$  及  $N_{\text{dff}}$  的最大值(3.83% 和 10.44 mg/kg)均出现在  $W_4S_2N_3$ (30 cm 淹水+3 cm 泥沙沉积+6 g/m<sup>2</sup>氮输入)处理;

(2) 根中全氮含量、 $N_{\text{dff}}\%$  及  $N_{\text{dff}}$  在较高氮输入较大,而在较深淹水和泥沙沉积时,碱蓬会将更多的氮分配给生长活跃的器官(叶和茎)以适应环境,为此叶和茎中全氮含量、 $N_{\text{dff}}\%$  及  $N_{\text{dff}}$  在较深淹水和泥沙沉积时较大;

(3) 根  $N_{\text{dff}}\%$  及  $N_{\text{dff}}$  最大值(18.21%和 1.10 mg/kg)在  $W_1S_4N_4$  处理取得时,此处理时碱蓬的生长情况最好,表明根对外源氮的吸收情况对碱蓬生长的影响较大,且适当的淹水和泥沙埋深以及高氮输入(9 g/m<sup>2</sup>)处理有利于根系对外源氮的吸收,从而促进植株的生长。

#### 参考文献(References):

- [1] Li G Y, Sheng L X. Model of water-sediment regulation in Yellow River and its effect. *Science China Technological Science*, 2011, 54(4): 924-930.
- [2] Guo Q C, Zheng Z, Hunag L M, Deng A J. Regularity of sediment transport and sedimentation during floods in the lower Yellow River, China. *International Journal of Sediment Research*, 2020, 35(1): 97-104.
- [3] Wang H J, Wu X, Bi N S, Li S, Yuan P, Wang A M, Syvitski J P M, Saito Y, Yang Z S, Liu S M, Nitttrouer J. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): a review. *Global and Planetary Change*, 2017, 157: 93-113.
- [4] Wang H J, Bi N S, Saito Y, Wang Y, Sun X X, Zhang J, Yang Z S. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: causes and environmental implications in its estuary. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(3/4): 302-313.
- [5] Bi N S, Wang H J, Yang Z S. Recent changes in the erosion-accretion patterns of the active Huanghe (Yellow River) delta lobe caused by human activities. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 70-78.
- [6] 于帅, 毕乃双, 王厚杰, 赵博. 黄河调水调沙影响下河口入海泥沙扩散及沉积效应. *海洋湖沼通报*, 2015, (2): 155-163.
- [7] Liu S M, Li L W, Zhang G L, Liu Z, Yu Z G, Ren J L. Impacts of human activities on nutrient transports in the Huanghe (Yellow River) Estuary. *Journal of Hydrology*, 2012, 430-431: 103-110.
- [8] Zhang L J, Wang L, Cai W J, Liu D M, Yu Z G. Impact of human activities on organic carbon transport in the Yellow River. *Biogeosciences*, 2013, 10(4): 2513-2524.
- [9] 李国英, 盛连喜. 黄河调水调沙的模式及其效果. *中国科学*, 2011, 41(6): 826-832.
- [10] 薛小杰, 巩琳琳, 白涛, 蒋晓辉. 小浪底水库对黄河三角洲湿地水分条件和景观格局的影响. *水土保持通报*, 2012, 32(4): 232-236.
- [11] 刘昀, 孙佳秀, 刘安国, 张明. 小浪底水库“调水调沙”对黄河三角洲湿地生态补水的探讨//湖泊保护与生态文明建设—第四届中国湖泊论坛论文集. 合肥: 安徽省科学技术协会学会部, 2014.
- [12] Kiba T, Krapp A. Plant nitrogen acquisition under low availability: regulation of uptake and root architecture. *Plant and Cell physiology*, 2016, 57(4): 707-714.



- [13] Sun Z G, Mou X J, Sun J K, Song H L, Yu X, Wang L L, Jiang H H, Sun W L, Sun W G. Nitrogen biological cycle characteristics of Seepweed (*Suaeda salsa*) wetland in intertidal zone of Huanghe (Yellow) River estuary. *Chinese Geographical Science*, 2012, 22(1): 15-28.
- [14] 逯超普, 颜晓元. 基于氮排放数据的中国大陆大气氮素湿沉降量估算. *农业环境科学学报*, 2010, 29(8): 1606-1611.
- [15] Sun Z G, Sun W G, Tong C, Zeng C S, Yu X, Mou X J. China's coastal wetlands: conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement. *Environment International*, 2015, 79(10): 25-41.
- [16] 陈冰冰, 孙志高, 孙文广, 王华, 俞琳莺. 外源氮输入对生长季黄河口碱蓬湿地土壤无机硫形态变化特征的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 277-286.
- [17] 俞琳莺, 孙志高, 孙文广, 胡星云, 陈冰冰. 外源氮输入对生长季黄河口碱蓬-土壤系统磷分布规律的影响. *环境科学研究*, 2019, 32(6): 1052-1062.
- [18] Song L, Tian P, Zhang J B, Jin G Z. Effects of three years of simulated nitrogen deposition on soil nitrogen dynamics and greenhouse gas emissions in a Korean pine plantation of northeast China. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1303-1311.
- [19] 孙大成, 郭雪莲, 解成杰, 余磊朝, 许静. 氮输入对沼泽湿地植物生长和氮吸收的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1317-1321.
- [20] Vojtíšková L, Munzarová E, Votrubová O, Řihová A, Juřicová B. Growth and biomass allocation of sweet flag (*Acorus calamus* L.) under different nutrient conditions. *Hydrobiologia*, 2004, 518(1/3): 9-22.
- [21] Zhang ZH, Rengel Z, Meney K. Interactive effects of N and P on growth but not on resource allocation of *Canna indica* in wetland microcosms. *Aquatic Botany*, 2008, 89(3): 317-323.
- [22] He K J, Qi Y, Huang Y M, Chen H Y, Sheng Z L, Xu X, Duan L. Response of aboveground biomass and diversity to nitrogen addition-a five-year experiment in semi-arid grassland of Inner Mongolia, China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31919.
- [23] 郝婧, 李洪远. 氮输入与其他营养因子交互作用对滨海湿地生态系统影响的研究进展. *生态学杂志*, 2019, 38(9): 2850-2857.
- [24] 宋红丽, 韩洪军, 郁万妮, 王立志. 黄河三角洲滨岸潮滩湿地碱蓬对水沙条件及氮输入的适应性. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1333-1340.
- [25] 田家怡, 王秀凤, 蔡学军. 黄河三角洲湿地生态系统保护与恢复技术. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- [26] Sun Z G, Song H L, Sun J K, Sun W G. Effects of continual burial by sediment on seedling emergence and morphology of *Suaeda salsa* in the coastal marsh of the Yellow River estuary, China. *Journal of Environmental Management*, 2014, 135: 27-35.
- [27] 崔保山, 贺强, 赵欣胜. 水盐环境梯度下翅碱蓬(*Suaeda salsa*)的生态阈值. *生态学报*, 2008, 28(4): 1408-1418.
- [28] Sun Z G, Song H L, Sun W G, Sun J K. Effects of continual burial by sediment on morphological traits and dry mass allocation of *Suaeda salsa* seedlings in the Yellow River estuary: an experimental study. *Ecological Engineering*, 2014, 68: 176-183.
- [29] 牟晓杰. 黄河口滨岸潮滩湿地系统氮生物循环特征与循环模式研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2010.
- [30] 胡星云, 孙志高, 孙文广, 王苗苗, 王伟, 田莉萍. 黄河口新生湿地碱蓬生物量及氮累积与分配对外源氮输入的响应. *生态学报*, 2017, 37(1): 226-237.
- [31] Muñoz N, Guerri J, Legaz F, Primo-Millo E. Seasonal uptake of <sup>15</sup>N-nitrate and distribution of absorbed nitrogen in peach trees. *Plant and Soil*, 1993, 150(2): 263-269.
- [32] 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 万新军. 应用<sup>15</sup>N 示踪技术研究水稻对氮肥的吸收和分配. *核农学报*, 2009, 23(3): 487-491, 496-496.
- [33] 许堃, 党秀丽, 董旭, 丛源欣, 陈璐, 张兴, 吕金朔. <sup>15</sup>N 示踪法研究生物炭施用对油菜氮素吸收和转运的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 197-201, 207-207.
- [34] Hu Y L, Zeng D H, Liu Y X, Zhang Y L, Chen Z H, Wang Z Q. Responses of soil chemical and biological properties to nitrogen addition in a Dahurian larch plantation in northeast china. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 81-92.
- [35] 王杰, 孙志高, 李家兵, 何涛, 范爱连, 高会, 王华. 2015 年 7 月末不同淹水条件下闽江河口沼泽土壤中有有机碳和氮的分布. *湿地科学*, 2018, 16(4): 559-567.
- [36] Grechi I, Vivin P, Hilbert G, Milin S, Robert T, Gaudillere J P. Effect of light and nitrogen supply on internal C: N balance and control of root-to-shoot biomass allocation in grapevine. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2): 139-149.
- [37] Wang G G, Bauerle W L, Mudder B T. Effects of light acclimation on the photosynthesis, growth, and biomass allocation in American chestnut (*Castanea dentata*) seedlings. *Forest Ecology and Management*, 2006, 226(1/3): 173-180.
- [38] Lan Z C, Huang H, Chen Y S, Liu J S, Chen J G, Li L, Li L, Jin B S, Chen J K. Testing mechanisms underlying responses of plant functional traits to flooding duration gradient in a lakeshore meadow. *Journal of Freshwater Ecology*, 2019, 34(1): 481-495.
- [39] 罗文泊, 谢永宏, 宋凤斌. 洪水条件下湿地植物的生存策略. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1478-1485.
- [40] Kim D H, Kim H T, Kim J G. Effects of water level and soil type on the survival and growth of *Pericaria thunbergii* during early growth stages. *Ecological Engineering*, 2013, 61: 90-93.