

天津沼泽湿地芦苇叶片的碳稳定同位素比值分布特征及其环境影响因素

陈 清 王义东 郭长城 王中良*

天津师范大学天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387

摘 要 天津芦苇(*Phragmites australis*)沼泽具有重要的生态功能。目前天津地区水体咸化、氮污染和水资源短缺问题严重, 显著影响了芦苇湿地的植物生理生态过程。植物稳定碳同位素组成(碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$))能够记录与植物生长过程相关的环境变化信息, 反映植物对环境变化的生理生态适应特性。该研究调查了天津七里海、北大港和大黄堡湿地芦苇叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布特征, 探讨了影响该地区叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要因素。研究表明: 1)天津芦苇湿地植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围在 -26.3‰ – -23.6‰ 之间, 平均值为 -25.8‰ ; 2)芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与底泥相对含水量呈显著负相关关系, 与底泥有效氮和全氮含量呈显著正相关关系, 而与底泥盐度和磷含量没有显著相关关系; 水分条件和底泥氮营养状况是影响叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要因素; 3)淹水条件下, 芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片质量氮含量呈显著正相关关系, 与叶碳氮比呈显著负相关关系, 8月份七里海湿地干涸打破了此相关关系。当前环境压力下, 天津沼泽湿地干涸极大地改变了芦苇的氮、水平衡和植物对水、氮资源的利用策略, 而湿地干涸对该过程的影响要高于盐度和氮负荷增加。

关键词 碳稳定同位素比值, 氮, 盐度, 湿地干涸, 芦苇

引用格式: 陈清, 王义东, 郭长城, 王中良 (2015). 天津沼泽湿地芦苇叶片的碳稳定同位素比值分布特征及其环境影响因素. 植物生态学报, 39, 1044–1052. doi: 10.17521/cjpe.2015.0101

Foliar stable carbon isotope ratios of *Phragmites australis* and the relevant environmental factors in marsh wetlands in Tianjin

CHEN Qing, WANG Yi-Dong, GUO Chang-Cheng, and WANG Zhong-Liang*

Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract

Aims *Phragmites australis* marshes in Tianjin play an important role in ecosystem functioning. Wetlands of Tianjin municipality have been suffering from serious nitrogen loading, salinization and water shortage. The foliar stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) is a good parameter which records environmental change information associated with the plant growth process, and reflects physiological and ecological responses of plants to environment changes. The objective of this study is to investigate the effects of environment stress on the leaf $\delta^{13}\text{C}$ of *P. australis* in marsh wetlands in Tianjin municipality.

Methods This study was conducted in Qilihai, Beidagang, and Dahuangpu marsh wetlands. We investigated the foliar $\delta^{13}\text{C}$ of *P. australis* and sediment properties, and evaluated the relationships between the foliar $\delta^{13}\text{C}$ and sediment environmental factors.

Important findings 1) Foliar $\delta^{13}\text{C}$ ranged from -26.3‰ to -23.6‰ , with an average value of -25.8‰ . 2) Sediment water and nitrogen status were the important factors affecting reed foliar $\delta^{13}\text{C}$. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ was negatively correlated to sediment relative water content, and positively correlated to sediment total nitrogen and available nitrogen content. In contrast, foliar $\delta^{13}\text{C}$ was not significantly correlated to sediment salinity and phosphorus content. 3) Leaf $\delta^{13}\text{C}$ were significantly positively correlated with leaf nitrogen content, and negatively correlated with leaf carbon and nitrogen ratio across all site. However, these relationships were not detected due to the wetland drainage at Qilihai site in August. Wetland drainage changed the plant water and nitrogen balance, and further affected water and nitrogen utilization strategies of *P. australis*. Moreover, wetland drainage had stronger effects on these processes than nitrogen loading and salinization.

收稿日期Received: 2015-05-27 接受日期Accepted: 2015-10-04

* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: wangzhongliang@vip.skleg.cn)

Key words stable carbon isotope ratio, nitrogen, salinity, wetland drainage, *Phragmites australis*

Citation: Chen Q, Wang YD, Guo CC, Wang ZL (2015). Foliar stable carbon isotope ratios of *Phragmites australis* and the relevant environmental factors in marsh wetlands in Tianjin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 1044–1052. doi: 10.17521/cjpe.2015.0101

叶片是植物光合作用和物质生产的主要器官,也是植物与大气环境水气交换的主要器官。同时,叶片也是植物营养反应的最敏感器官,其营养动态变化可反馈植物养分的丰缺状况。植物叶片通过光合作用固定大气中的 CO_2 合成自身有机质的过程中,由于优先吸收 $^{12}\text{CO}_2$ 发生碳同位素(^{13}C 和 ^{12}C)分馏。 C_3 植物的碳同位素分馏与叶片胞间 CO_2 浓度和大气 CO_2 浓度的比值(C_i/C_a)具有明显的线性正相关关系,而 C_i/C_a 受光合速率和气孔导度的影响,因此,植物的稳定碳同位素组成(碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$))与植物光合和蒸腾等生理过程有密切的关系(Farquhar *et al.*, 1989)。植物碳同位素分馏除了受自身遗传因素影响外,还受到外界环境状况,如水分、养分、盐度、温度、海拔等的影响(Cernusak *et al.*, 2013)。因此,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 能够记录与植物生长过程相关联的一系列环境变化的信息,可以作为环境变化的指示参数,被广泛地应用于植物生理生态过程对环境变化响应的研究(刘贤赵等, 2014)。

植物叶片中的氮有70%以上集中于1,5-二磷酸羧化氧化酶(Rubisco)等与碳同化相关的酶及叶绿体中,影响植物的光合过程以及叶片碳同位素的分馏(郑淑霞和上官周平, 2007; Zhang *et al.*, 2015)。叶片质量氮含量可以反映植物碳、氮分配的经济性,其倒数或者碳氮比可以表征植物的长期氮素利用效率(展小云等, 2012)。而植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 可以作为替代指标被广泛地应用于估测植物的长期水分利用效率(Farquhar *et al.*, 1989; 曹生奎等, 2009)。因此,研究植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片质量氮含量和碳氮比的关系,对于理解植物的氮、水平衡关系及资源利用策略有重要意义。理论上, C_3 植物叶片的氮含量与植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈正相关关系(Cernusak *et al.*, 2013),与碳氮比(长期氮素利用效率)之间存在负相关关系(Gong *et al.*, 2011),但是该平衡过程受到环境因子强烈干扰(Sheng *et al.*, 2011)。目前,大量学者对草原、森林、农田等生态系统植物碳同位素进行了广泛研究(Gong *et al.*, 2011; 展小云等, 2012),而对芦苇湿地的研究鲜见报道。

天津芦苇沼泽是滨海地区生物多样性极为丰富的地区,也是东亚澳大利亚候鸟迁徙的必经之地(Barter *et al.*, 2001),在维持生物多样性等方面有着其他生态系统不可替代的作用。然而近几十年来,随着人口增加、城市拓展和人类不合理利用,水体富营养化、水体咸化,以及水资源匮乏已成为典型的水环境问题(李军等, 2010; Wu *et al.*, 2011; Xue *et al.*, 2014),显著影响天津湿地生态系统,成为芦苇沼泽湿地退化的主要原因。目前,天津水体氮负荷和咸化对芦苇沼泽植被生理生态的影响鲜见报道。了解天津沼泽湿地芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的分布特征,并分析其环境影响因素,有利于理解当前环境压力下天津芦苇湿地的植物生理生态响应机制,找到影响湿地退化的主要因素,对于理解天津芦苇湿地的退化机理有极为重要的指导意义。

1 材料和方法

1.1 试验样地概况

研究区选择在天津大黄堡、北大港和七里海自然保护区的芦苇沼泽湿地(图1)。天津地区地理位置 $116.42^\circ\text{--}118.03^\circ\text{E}$, $38.33^\circ\text{--}40.14^\circ\text{N}$,平均海拔高度为4 m。东临渤海,北依燕山,地处滨海平原、海河流域下游,具有丰富的湿地资源。年平均气温 $12\text{--}13^\circ\text{C}$,年降水量 $522\text{--}663\text{ mm}$,年蒸发量为 $1\,640\text{ mm}$ (郭军和杨艳娟, 2011)。大黄堡湿地自然保护区距渤海湾约60 km(图1),地貌类型为海积冲积平原,是我国北方地区原始地貌保存较好的典型芦苇湿地。北大港湿地自然保护区距渤海湾约24 km(图1),由海岸和退海岸成陆低平淤泥组成,是目前天津市最大的湿地自然保护区。七里海湿地保护区距渤海湾约38 km(图1),是自全新世晚期以来海退过程残留下来的潟湖之一,后演化为淡水沼泽湿地,是天津古海岸与湿地国家级自然保护区。3块湿地由于离海远近的不同,形成明显的盐度梯度(冯小平等, 2014)。芦苇是3块湿地的优势物种,其相对丰度超过90%。2013年5月,3块湿地均淹水,淹水深度约20 cm;8月底,七里海湿地几乎干涸,没有淹

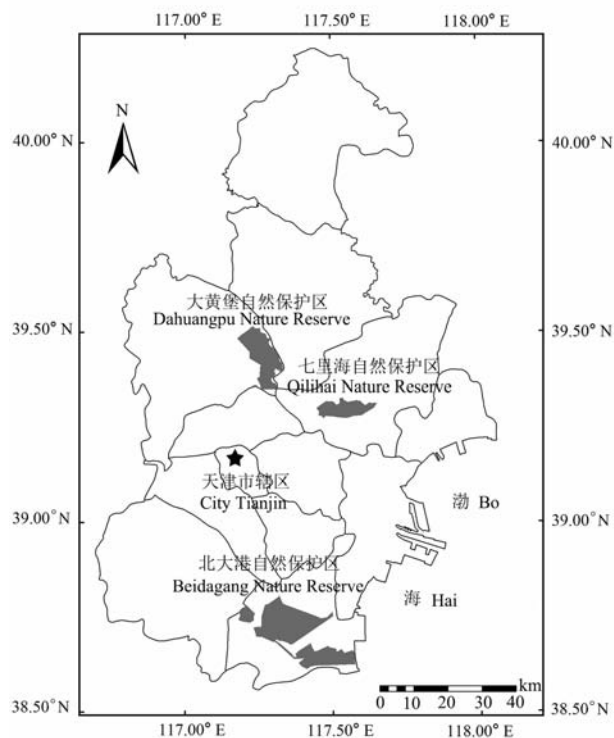


图1 天津湿地自然保护区分布图。

Fig. 1 Distribution of wetland natural reserves in Tianjin.

水,而北大港和大黄堡湿地淹水约30 cm。近几十年来,随着人口增加、城市拓展和人类不合理利用,天津芦苇湿地受到较为严重的破坏和退化(陈清等, 2014)。

1.2 采样与处理

芦苇地上部取样时间设为2013年5月初、8月底、11月初,每块样地选择有30年以上历史的未经人为破坏的芦苇田,避开点源污染处(如养鱼塘附近),且植物的长势均匀具有代表性的样点,每块样地设5–6次重复。芦苇地上生物量采用0.5 m × 0.5 m 样方收获法测定,将样方内植物齐地面剪下带回实验室。24 h内将每个植物样品中芦苇与其他物种分开,芦苇的茎和叶分开,之后将芦苇叶片用超纯水冲洗,75 °C烘干48 h后称定质量。采用混合球磨机(MM400, Retsch, Haan, Germany)将烘干后的植物叶片进行粉碎研磨,用于元素含量和同位素的测定。植物叶片的C、N含量使用元素分析仪(EA1108, Carlo Erba, Torino, Italy)测定;植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值使用本实验室同位素质谱仪(Horizon, Nu Instruments Ltd., Wrexham, England)测定。

沉积物样品的采集时间为8月底,采用直径3 cm的土钻在每个剪过植物样的地方随机取两个土

壤剖面(0–25 cm)混为一个样品,样品采集后迅速装入自封袋密封并标号带回实验室,土样分为两部分:一部分为新鲜土样,保存在4 °C的冰箱内,48 h之内完成浸提和土壤质量含水量测定。取新鲜土样12.00 g,采用60 mL 2 mol·L⁻¹ KCl溶液浸提,之后用流动分析仪(Auto Analyzer 3, Seal, Norderstedt, Germany)测定浸提液中NO₃-N和NH₄⁺-N的含量,土壤有效氮指NO₃-N与NH₄⁺-N的加和。土壤质量含水量通过称重法(108 °C烘24 h)测定,由于七里海湿地没有淹水,用直径8 cm的PVC管取3管0–25 cm的原状土,带回实验室后测定其饱和含水量,经测定,七里海湿地0–25 cm底泥的饱和含水量为48.14%。另一部分土样自然风干,剔除植物残茬、石块等侵入体,采用混合球磨机(MM400, Retsch, Haan, Germany)研磨后密封保存。对风干土样分别采用水土质量比5:1测定pH值、盐度和电导率(EC)。pH值、盐度和电导率采用水质参数仪(Star A 420C-01A, Thermo Orion, USA)测定;土壤全氮采用元素分析仪测定(EA1108, Carlo Erba, Torino, Italy),土壤速效氮、磷采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃钼锑抗比色法测定,土壤全磷采用HClO₄-H₂SO₄钼锑抗比色法测定。

1.3 数据分析

本实验数据统计采用SPASS 17.0分析软件进行单因素方差分析,并用Tucky的方法进行多重比较。由于底泥环境因子之间具有共变性,用简单相关分析方法分析叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与某个底泥环境因子的关系时可能会受到其他环境因素的影响,因此分别采用Pearson相关分析和偏相关分析法分析叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与底泥相对含水量、盐度和氮、磷含量的关系。偏相关分析中,当分析叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值与底泥氮、磷含量的关系时,盐度和相对含水量为控制因子;分析 $\delta^{13}\text{C}$ 值与水分关系时,盐度和氮含量为控制因子;分析 $\delta^{13}\text{C}$ 与盐度的关系时,相对含水量和氮含量为控制因子。底泥相对含水量(%)=底泥质量含水量/底泥全蓄水质量含水量×100%。采用Pearson相关分析法分析叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片氮含量和碳氮比的关系。使用Origin 8.0软件绘图。

2 结果

2.1 天津沼泽湿地芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的分布特征及叶片碳、氮含量

8月份,离海较远的大黄堡湿地0–25 cm层底泥

的盐度、电导率和pH值显著低于离海较近的七里海和北大港湿地(表1)。与七里海相比, 尽管北大港湿地距海更近, 但是由于七里海湿地出现了干涸, 其相对饱和含水量仅为70%, 明显低于北大港和大黄堡(淹水), 蒸发作用可能导致七里海湿地的底泥盐度和电导率明显高于北大港湿地。

表1 8月份天津3块沼泽湿地0–25 cm底泥基本性状(平均值±标准误差)
Table 1 Sediment basic properties in 0–25 cm soil layers in three marsh wetlands in Tianjin in August (mean ± SE)

	七里海 Qilihai	北大港 Beidagang	大黄堡 Dahuangpu
pH值 pH value	8.79 ± 0.06 ^a	8.91 ± 0.03 ^a	8.55 ± 0.04 ^b
盐度 Salinity (g·kg ⁻¹)	6.36 ± 0.38 ^a	4.24 ± 0.06 ^b	2.76 ± 0.17 ^c
电导率 Electrical conductivity (ms·cm ⁻¹)	2.38 ± 0.14 ^a	1.59 ± 0.02 ^b	1.02 ± 0.07 ^c
相对含水量 Relative soil moisture (%)	69.90 ± 2.25 ^b	100.00 ± 0.00 ^a	100.00 ± 0.00 ^a

不同小写字母代表样地间差异显著($p < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among sites ($p < 0.05$).

无论是5月还是8月, 北大港芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低, 显著低于七里海和大黄堡(表2)。5月份, 大黄堡湿地芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高, 明显高于七里海, 七里海显著高于北大港; 而到了8月底, 七里海湿地芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变为最高, 明显高于大黄堡, 大黄堡显著高于北大港湿地。北大港湿地芦苇叶片氮含量最低, 5月份, 七里海和大黄堡湿地的叶片N含量均显著高于北大港, 七里海和大黄堡之间差异不显著; 8月底, 七里海湿地芦苇叶片N含量下降, 显著低于大黄堡, 和北大港差异不显著。与叶氮含量相反, 5月份, 北大港叶片碳氮比最高, 显著高于七里海和大黄堡。8月份, 七里海湿地叶片碳氮比增加, 与北大港湿地差异不显著, 显著高于大黄堡。无论是5月还是8月, 北大港芦苇叶片C含量最低, 七里海和大黄堡差异不显著(表2)。

表2 天津3块沼泽湿地芦苇叶片碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)值、碳氮含量和碳氮比(平均值±标准误差)

Table 2 Leaf stable carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$), leaf C, N content and C and N ratio of *Phragmites australis* in three marsh wetlands in Tianjin (mean ± SE)

时间 Time	样地 Site	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	碳氮比 C and N ratio	氮含量 N content (%)	碳含量 C content (%)
5月	七里海 Qilihai	-25.26 ± 0.12 ^b	11.71 ± 0.16 ^b	3.99 ± 0.05 ^a	46.73 ± 0.22 ^a
May	北大港 Beidagang	-26.03 ± 0.13 ^c	13.44 ± 0.40 ^a	3.41 ± 0.12 ^b	45.61 ± 0.26 ^b
	大黄堡 Dahuangpu	-24.15 ± 0.22 ^a	11.64 ± 0.37 ^b	4.05 ± 0.13 ^a	46.94 ± 0.08 ^a
8月	七里海 Qilihai	-25.43 ± 0.12 ^a	23.90 ± 1.06 ^a	2.00 ± 0.09 ^b	47.42 ± 0.34 ^a
August	北大港 Beidagang	-26.17 ± 0.07 ^c	22.54 ± 0.36 ^a	2.06 ± 0.04 ^b	46.43 ± 0.12 ^b
	大黄堡 Dahuangpu	-25.79 ± 0.12 ^b	18.17 ± 0.41 ^b	2.59 ± 0.06 ^a	47.01 ± 0.18 ^{ab}

不同小写字母代表同一时间样地间差异显著($p < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among sites at same time ($p < 0.05$).

2.2 天津芦苇湿地叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的分布特征及其与环境因子的关系

底泥环境因子显著影响了芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值(图2; 表3)。简单相关分析结果表明: 芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与底泥相对含水量呈显著负相关(图2A), 与底泥的氮、磷含量呈显著正相关, 而与底泥盐度没有显著性相关(图2B)。考虑到底泥环境因子之间的共变性和相互影响, 进一步采用偏相关法进行分析(表3), 结果表明: 芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与底泥相对含水量呈显著负相关, 与底泥有效氮和总氮含量呈显著正相关, 与盐度、有效磷和总磷含量没有显著性相关。

芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与植物叶片的质量氮含量和碳氮比有明显的相关关系(图3)。5月份植物叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值和叶质量氮含量呈显著的正相关关系; 8月份, 当去掉七里海湿地, 芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和叶质量氮含量也呈显著的正相关关系。5月份芦苇叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值和叶碳氮比呈显著的负相关关系; 8月份, 当去掉七里海湿地, 芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和叶碳氮比也呈显著的负相关关系(图3)。

3 讨论

3.1 天津沼泽湿地芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的分布特征及其受底泥环境状况的影响

本研究结果证明, 天津沼泽湿地芦苇叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围在-26.3‰ – -23.6‰之间, 平均值为-25.8‰。该研究结果与长江口潮滩芦苇 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为相近, 平均值为-26.4‰ (王伟伟, 2011); 高于黄河三角洲芦苇 $\delta^{13}\text{C}$ 值-27.7‰ (王文文, 2012)。该差异可能是由于环境因子不同而引起, 比如天津地区和长江口水体富营养化较为严重, 可能导致其植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏高。天津沼泽湿地芦苇叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显受到底泥氮营养和水分等环境因子的影响。

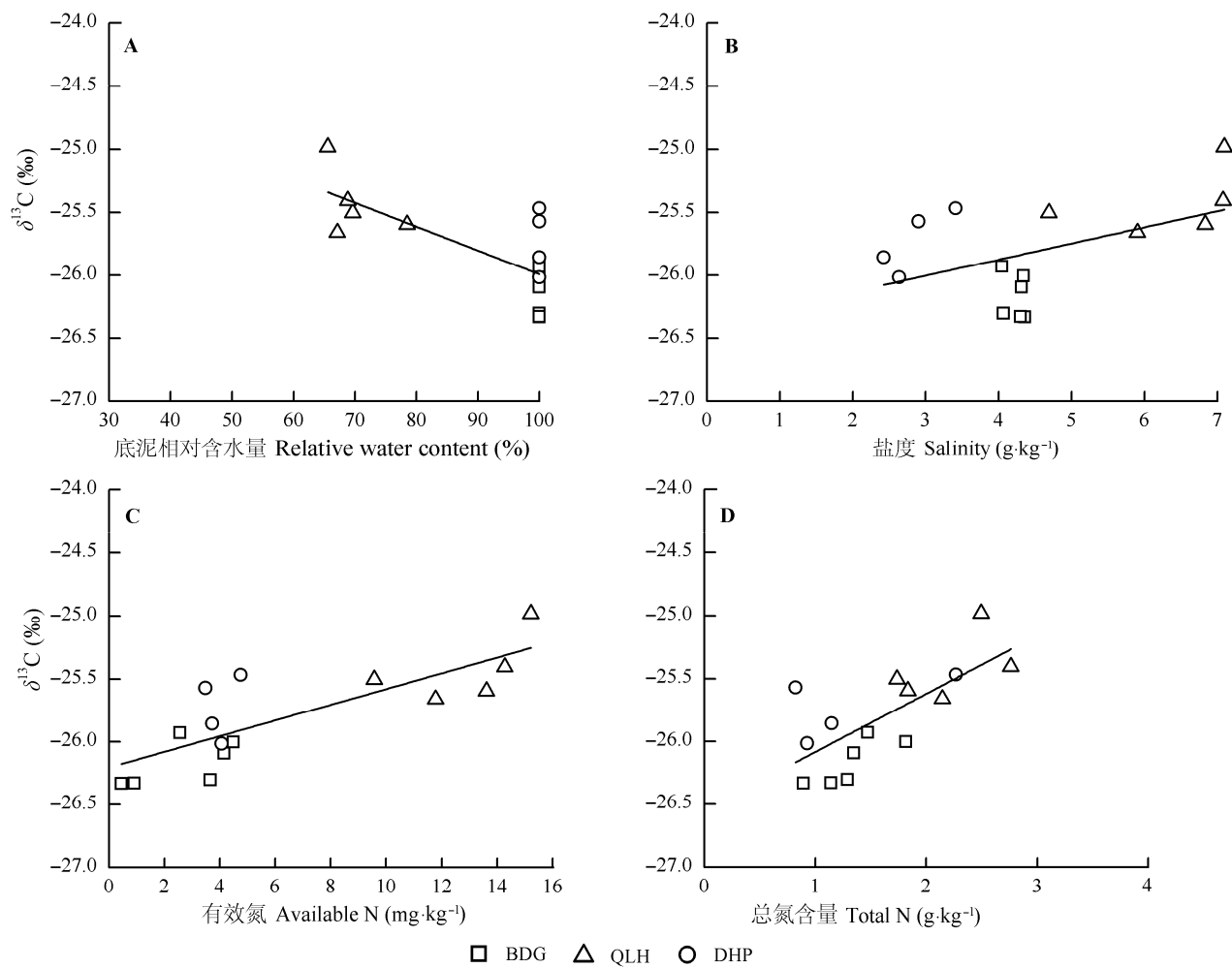


图2 8月份天津沼泽湿地芦苇叶片碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)与底泥相对含水量(A)、盐度(B)、有效氮(C)和总氮(D)的相关关系。BDG, 北大港沼泽湿地; DHP, 大黄堡沼泽湿地; QLH, 七里海沼泽湿地。相关分析的统计见表3 ($n = 15$)。
Fig. 2 Relationships between foliar stable carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) of *Phragmites australis* and sediment relative water content (A), salinity (B), available N (C) and total N (D) in marsh wetlands in Tianjin in August. BDG, Beidagang marsh wetlands; DHP, Dahuangpu marsh wetlands; QLH, Qilihai marsh wetlands. Correlation results were presented in Table 3 ($n = 15$).

表3 8月份天津沼泽湿地芦苇叶片碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)与底泥各环境因子的简单相关分析以及偏相关分析
Table 3 Simple and partial correlation analyses of foliar stable carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) of *Phragmites australis* and sediment characters in marsh wetlands in Tianjin in August

		相对含水量 Relative soil moisture	盐度 Salinity	有效氮 Available N	总氮 Total N	速效磷 Available P	总磷 Total P
简单相关分析	r	-0.719**	0.501	0.798***	0.745***	0.655**	0.643**
Simple correlation	Sig.	0.003	0.057	0.000	0.001	0.008	0.010
偏相关分析	r	-0.599*	-0.507	0.646*	0.626*	0.264	0.118
Partial correlation	Sig.	0.030	0.077	0.017	0.022	0.383	0.700

r , 相关系数; Sig., 差异显著性, 在 $p < 0.05$ 时显著相关。***, $p < 0.001$; **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$ 。
 r , correlation coefficient; Sig., significant difference, correlations are significant at $p < 0.05$. ***, $p < 0.001$; **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$.

一般而言, 土壤养分高的环境中, 植物光合速率较快, 相对胞间 CO_2 浓度(C_i)较低, C_i/C_a 降低, 植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大(Domingues *et al.*, 2010)。本研究结

果也证实了这一点, 芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与底泥的有效氮和总氮含量呈显著的正相关关系(表3), 而芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与底泥速效磷和全磷含量没有显著性相关关

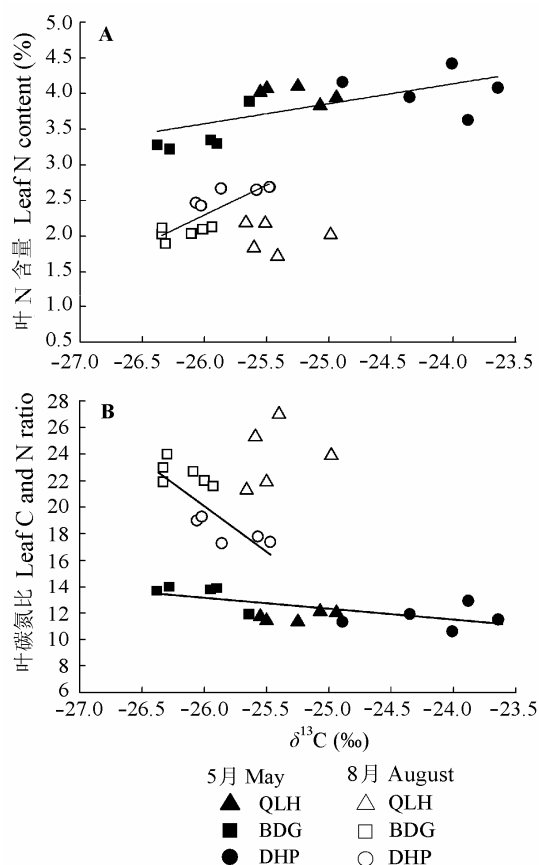


图3 天津芦苇湿地芦苇叶片碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)与叶片氮含量和叶碳氮比的相关关系。BDG, 北大港沼泽湿地; DHP, 大黄堡沼泽湿地; QLH, 七里海沼泽湿地。实心和空心标识符分别代表5月份和8月份的数据点。**A**, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶氮含量的相关关系: 5月份, $R^2 = 0.379$, $p = 0.009$; 8月份去掉七里海数据点, $R^2 = 0.628$, $p = 0.002$ 。**B**, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶碳氮比的相关关系: 5月份, $R^2 = 0.329$, $p = 0.015$; 8月份, 去掉七里海数据点, $R^2 = 0.611$, $p = 0.003$ 。

Fig. 3 Relationships between leaf stable carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) and leaf N content, leaf C and N ratio of *Phragmites australis* in marsh wetlands in Tianjin. BDG, Beidagang marsh wetlands; DHP, Dahuangpu marsh wetlands; QLH, Qilihai marsh wetlands. The solid symbols indicated data points from May, and the hollow ones indicated data points from August. **A**, the relationship between leaf $\delta^{13}\text{C}$ and N content, May: $R^2 = 0.379$, $p = 0.009$; August: after removing the data points at QLH, then $R^2 = 0.628$, $p = 0.002$. **B**, the relationship between leaf $\delta^{13}\text{C}$ and C and N ratio, May: $R^2 = 0.329$, $p = 0.015$; August: after removing the data points at QLH, then $R^2 = 0.611$, $p = 0.003$.

系,表明底泥氮营养而非磷是影响天津湿地芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的重要因素。水分是影响植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的又一重要因子,大量研究证明植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随可利用水分的增加而降低(Diefendorf *et al.*, 2010; Kohn, 2010)。水分缺乏的条件下,植物为了减少体内水分的蒸腾而关闭部分气孔,使气孔导度和

胞间 CO_2 浓度下降, C_i/C_a 减小,从而导致植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大(Farquhar *et al.*, 1989; Farquhar & Cernusak, 2012)。本研究也证明芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与底泥相对含水量呈显著的负相关关系(图2A),表明水分是影响天津沼泽湿地芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的重要因素。与淹水处理相比,当土壤相对含水量为60%–75%时,芦苇的气孔导度和胞间 CO_2 浓度会明显下降,光合速率显著降低(Yang *et al.*, 2014)。本研究中,8月份与淹水的其他湿地相比,七里海湿地底泥相对含水量仅为70%,七里海湿地干涸可能使芦苇的气孔导度和胞间 CO_2 浓度下降,促进芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加。8月份七里海湿地芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于北大港和大黄堡(表2),而3块湿地芦苇地上部生物量差异不显著(未发表数据)。其可能的原因是:1)七里海湿地干涸导致芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加,抑制植物碳的固定;2)七里海湿地具有较高的有效氮素,同样导致了叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加,然而,不同于湿地干涸,氮素增加促进了植物碳的固定。这两个过程同时作用,可能导致七里海湿地地上生物量没有降低,和其他两块湿地差异不显著。除氮素和水分外,盐度也是影响滨海地区植被生长的重要因子,比如黄河三角洲植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要受盐分影响(王文文, 2012)。当土壤盐度为7‰时,无论在淹水还是相对含水量为60%的土壤环境中,芦苇的气孔导度和胞间 CO_2 浓度会明显下降(Yang *et al.*, 2014), C_i/C_a 值变小, $\delta^{13}\text{C}$ 值增加。较多研究证明植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与盐度呈显著的正相关关系(Choi *et al.*, 2005; Winter *et al.*, 2005; Jiang *et al.*, 2006)。然而也有研究证明,有些物种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与盐度没有显著性相关(Gibberd *et al.*, 2002)。不同物种由于其对盐度的内在适应性不同,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值与盐度的关系存在差异(Wei *et al.*, 2008)。本研究中芦苇叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与底泥盐度没有显著性正相关关系(图2B; 表3),芦苇的耐盐性可能是其叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值没有受盐度显著影响的主要原因。芦苇是一种耐盐植物,可以在盐度为5‰–35‰的环境中生存(Marks *et al.*, 1994)。七里海和北大港湿地的芦苇长期处于盐度为4‰–7‰的环境中,长期的环境驯化可能导致七里海和北大港湿地的芦苇有较强的耐盐能力。与大黄堡相比,七里海和北大港4‰–7‰的盐度水平可能没有使芦苇的气孔导度和胞间 CO_2 浓度明显降低,因而,芦苇叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与底泥盐度没有呈现显著的正相关关系。然而由于本研究中我

们没有测定气孔导度和胞间 CO_2 浓度, 以上的推测仍然需要未来的试验做进一步验证。综上, 综合比较底泥盐度、水分和氮磷营养几个因子, 发现底泥的氮营养状况和水分条件是影响天津芦苇湿地叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要因素, 而底泥盐度和磷营养状况并不是芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要限制因子。

3.2 天津沼泽湿地芦苇叶片氮含量、碳氮比与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关性

C_3 植物叶片的氮含量与光合作用密切相关(Hamerlynck *et al.*, 2004)。与北大港相比, 七里海和大黄堡湿地的芦苇具有较高的叶氮含量。5月份, 七里海和大黄堡芦苇叶片氮含量显著高于北大港(表2); 8月底, 尽管七里海湿地具有较高的底泥有效氮(图2C), 但是七里海芦苇叶片氮含量下降, 显著低于大黄堡, 和北大港差异不显著(表2)。8月底七里海湿地干涸可能是引起8月份芦苇叶片氮含量下降的主要原因。干旱导致植物叶氮含量下降在其他研究中(Sardans *et al.*, 2008)也被证实。一方面, 适当的干旱可以促进氮素从源器官向库器官转移(许振柱等, 2007), 从而提高氮素利用效率。本研究也证实, 8月底, 七里海芦苇叶片氮含量虽然下降, 但是其茎的氮含量仍然较高(未发表数据)。另一方面, 叶片氮含量下降可能是芦苇对于干旱环境的一种响应, 七里海湿地芦苇植物叶片氮含量降低, 可能会导致芦苇光合速率和气孔导度下降(Hamerlynck *et al.*, 2004), 从而提高水分利用效率来适应水分缺乏的环境。

理论上, 气孔导度相同时, 当叶片氮含量高时, 植物光合速率快, 叶片细胞内外 CO_2 浓度的比值(C_i/C_a)降低, 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大。大量研究证明, 基于面积的叶片N含量与植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈正相关关系(Duursma & Marshall, 2006; Cernusak *et al.*, 2013); 而基于质量的叶片氮含量与植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值关系具有不确定性, 有研究认为二者显著正相关(Zhang *et al.*, 2015), 也有研究认为二者呈弱的负相关关系(Hultine & Marshall, 2000)。本研究指出: 5月份和8月份(北大港和大黄堡湿地), 芦苇叶片质量氮含量与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均呈显著的正相关关系。8月份七里海湿地干涸影响了淹水条件下芦苇叶片质量氮含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关性。七里海湿地干涸导致芦苇叶片质量氮含量降低, 但是叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值没有相应地降低, 反而增加, 显著高于北大港和大黄堡(表2)。该过程可能主要受到七里海淹水状况的影响。与淹水处理相

比, 芦苇不淹水处理后其气孔导度可能下降(Waring & Maricle, 2012, 2013; Yang *et al.*, 2014), 水分利用效率增加。虽然七里海叶氮含量降低可能使芦苇的光合能力下降, 但是其气孔导度可能同时降低, 大气 CO_2 扩散到植物叶内的过程缓慢, C_i/C_a 的变化具有不确定性, 因此, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶氮含量的正相关关系会受到影响。自然条件下, 植物对水分与氮素的利用效率存在优化适应策略, 研究指出植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ (长期水分利用效率)与叶碳氮比(长期氮素利用效率)之间存在负相关关系, 拥有较高水分利用效率的植物是以低氮素利用效率为代价的。该理论在草原和森林生态系统中都得到验证(Gong *et al.*, 2011; 展小云等, 2012)。我们在天津芦苇湿地的研究也证实了这一理论。但是同样, 8月份七里海湿地干涸影响了淹水条件下芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶碳氮比的负相关关系, 改变了植物的水、氮平衡以及对水、氮资源的利用策略。然而, 淹水条件下, 尽管3块湿地具有不同盐度和氮梯度, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片氮含量和碳氮比仍然呈显著相关关系(5月和8月去掉七里海湿地)。表明淹水条件下, 天津湿地盐度和氮负荷的程度还没有显著改变芦苇的氮、水平衡关系。研究指出, 环境因子强烈干扰会影响植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶片氮含量和碳氮比的相关关系, 改变植物对水、氮资源的利用策略和营养元素的生物地球化学循环(Sheng *et al.*, 2011)。当前环境压力下, 天津沼泽湿地干涸极大地改变了芦苇的水、氮平衡关系, 以及对水、氮资源的利用策略, 而湿地干涸对该过程的影响要高于盐度和氮负荷增加。

4 结论

通过本项研究, 我们得出如下结论: 1)天津芦苇湿地植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 在 -26.17‰ – -24.15‰ 之间, 平均值为 -25.49‰ ; 2)底泥水分状况和氮营养状况是影响天津湿地芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的重要因子, 而底泥盐度和磷含量与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值没有显著性相关; 3)淹水条件下, 芦苇叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶氮含量呈显著正相关关系, 与叶碳氮比呈显著负相关关系, 而湿地干涸会打破此相关关系。当前环境压力下, 天津沼泽湿地干涸极大地改变了淹水条件下植物的氮、水平衡关系, 以及水、氮资源的利用策略, 而湿地干涸对该过程的影响要高于盐度和氮负荷增加。该研究结果对于理解当前环境压力下天津芦苇湿地的植物生

理生态响应机制有重要意义。

基金项目 天津市应用基础与前沿技术研究项目(15JCQNJC08100)、天津市高等学校创新团队培养计划“天津海岸带水资源与区域生态环境变迁研究”(TD12-5037)和天津师范大学校博士基金项目(52XB1209)。

参考文献

- Barter MA, Li ZW, Xu JL (2001). Shorebird numbers on the Tianjin Municipality coast in May 2000. *Stilt*, 39, 2–9.
- Cao SK, Feng Q, Si JH, Chang ZQ, Zuo MC, Xi HY, Su YH (2009). Summary on the plant water use efficiency at leaf level. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 3882–3892. (in Chinese with English abstract) [曹生奎, 冯起, 司建华, 常宗强, 卓玛措, 席海洋, 苏永红 (2009). 植物叶片水分利用效率研究综述. *生态学报*, 29, 3882–3892.]
- Cernusak, LA, Ubierna N, Winter K, Holtum JAM, Marshall JD, Farquhar GD (2013). Environmental and physiological determinants of carbon isotope discrimination in terrestrial plants. *New Phytologist*, 200, 950–965.
- Chen Q, Gao J, Wang ZL, Wang YD (2014). Variation characteristics of reed marshes in Tianjin and its cause during 1984–2009. *Wetland Science*, 12, 325–331. (in Chinese with English abstract) [陈清, 高军, 王中良, 王义东 (2014). 1984–2009 年天津市典型芦苇沼泽变化特征及成因分析. *湿地科学*, 12, 325–331.]
- Choi WJ, Ro HM, Chang SX (2005). Carbon isotope composition of *Phragmites australis* in a constructed saline wetland. *Aquatic Botany*, 82, 27–38.
- Diefendorf AF, Mueller KE, Wing SL, Koch PL, Freeman KH (2010). Global patterns in leaf ^{13}C discrimination and implications for studies of past and future climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 5738–5743.
- Domingues TF, Meir P, Feldpausch TR, Saiz G, Veenendaal EM, Schrodte F, Bird M, Djagbletey G, Hien F, Compaore H, Diallo A, Grace J, Lloyd J (2010). Co-limitation of photosynthetic capacity by nitrogen and phosphorus in West Africa woodlands. *Plant, Cell & Environment*, 33, 959–980.
- Duursma RA, Marshall JD (2006). Vertical canopy gradients in $\delta^{13}\text{C}$ correspond with leaf nitrogen content in a mixed-species conifer forest. *Trees*, 20, 496–506.
- Farquhar GD, Cernusak LA (2012). Ternary effects on the gas exchange of isotopologues of carbon dioxide. *Plant, Cell & Environment*, 35, 1221–1231.
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 503–537.
- Feng XP, Wang YD, Chen Q, Guo CC, Wang ZL (2014). Research on the spatial evolution regulations of soil salt of the coastal natural wetlands in Tianjin. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 34(2), 41–48. (in Chinese with English abstract) [冯小平, 王义东, 陈清, 郭长城, 王中良 (2014). 天津滨海湿地土壤盐分空间演变规律研究. *天津师范大学学报: (自然科学版)*, 34(2), 41–48.]
- Gibberd MR, Turner NC, Storey R (2002). Influence of saline irrigation on growth, ion accumulation and partitioning, and leaf gas exchange of carrot (*Daucus carota* L.). *Annals of Botany*, 90, 715–724.
- Gong XY, Chen Q, Lin S, Brueck H, Dittert K, Taube F, Schnyder H (2011). Tradeoffs between nitrogen- and water-use efficiency in dominant species of the semiarid steppe of Inner Mongolia. *Plant and Soil*, 340, 227–238.
- Guo J, Yang YJ (2011). The characteristics of precipitation changes in Tianjin in recent 20 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 25(7), 80–83. (in Chinese with English abstract) [郭军, 杨艳娟 (2011). 近20年来天津市降水资源的变化特征. *干旱区资源与环境*, 25(7), 80–83.]
- Hamerlynck EP, Huxman TE, McAuliffe JR, Smith SD (2004). Carbon isotope discrimination and foliar nutrient status of *Larrea tridentata* (creosote bush) in contrasting Mojave Desert soils. *Oecologia*, 138, 210–215.
- Hultine KR, Marshall JD (2000). Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition. *Oecologia*, 123, 32–40.
- Jiang QZ, Roche D, Monaco TA, Durham S (2006). Gas exchange, chlorophyll fluorescence parameters and carbon isotope discrimination of 14 barley genetic lines in response to salinity. *Field Crops Research*, 96, 269–278.
- Kohn MJ (2010). Carbon isotope compositions of terrestrial C_3 plants as indicators of (paleo) ecology and (paleo) climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 19691–19695.
- Li J, Liu CQ, Yue PJ, Zhu ZZ, Zhang GP, Xiang M, Li Y (2010). Hydrochemical evidence of surface water salinization process in the Tianjin coastal plain, China. *Environmental Chemistry*, 29, 285–289. (in Chinese with English abstract) [李军, 刘丛强, 岳甫均, 朱兆洲, 张国平, 项萌, 李勇 (2010). 天津地区地表水咸化的水化学证据. *环境化学*, 29, 285–289.]
- Liu XZ, Zhang Y, Su Q, Tian YL, Quan B, Wang GA (2014). Research progress in responses of modern terrestrial plant carbon isotope composition to climate change. *Advances in Earth Science*, 29, 1341–1354. (in Chinese with English abstract) [刘贤赵, 张勇, 宿庆, 田艳林, 全斌, 王国安 (2014). 现代陆生植物碳同位素组成对气候变化的响应研究进展. *地球科学进展*, 29, 1341–1354.]
- Marks M, Lapin B, Randall J (1994). *Phragmites australis* (P. communis): Threats, management and monitoring. *Natural*

- Areas Journal*, 14, 285–294.
- Sardans J, Penñuuelas J, Estiarte M, Prieto P (2008). Warming and drought alter C and N concentration, allocation and accumulation in a Mediterranean shrubland. *Global Change Biology*, 14, 2304–2316.
- Sheng WP, Ren SJ, Yu GR, Fang HJ, Jiang CM, Zhang M (2011). Patterns and driving factors of WUE and NUE in natural forest ecosystems along the Northsouth Transect of Eastern China. *Journal of Geographical Sciences*, 21, 651–665.
- Wang WW (2011). *Nutrient Dynamic and Stable Isotope Indicators in Tidal Flats of the Yangtze Estuary*. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [王伟伟 (2011). 长江口潮滩营养动态与稳定同位素指示研究. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海. 77–87.]
- Wang WW (2012). *Response of $\delta^{13}\text{C}$ Values of Wetland Ecosystem Plants to Soil Salinity in Yellow River Delta*. Master degree dissertation, Ludong University, Yantai, Shandong. (in Chinese with English abstract) [王文文 (2012). 黄河三角洲湿地生态系统植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值对土壤盐分的响应. 硕士学位论文, 鲁东大学, 山东烟台. 22–51.]
- Waring EF, Maricle BR (2012). Photosynthetic variation and carbon isotope discrimination in invasive wetland grasses in response to flooding. *Environmental and Experimental Botany*, 77, 77–86.
- Waring EF, Maricle BR (2013). Stomatal conductance correlates with flooding tolerance in *Phragmites australis* and *Sorghum halepense*. *Transactions of the Kansas Academy of Science*, 115, 161–166.
- Wei L, Yan CL, Guo XY, Ye BB (2008). Variation in the $\delta^{13}\text{C}$ of two mangrove plants is correlated with stomatal response to salinity. *Journal of Plant Growth Regulation*, 27, 263–269.
- Winter K, Aranda J, Holtum JAM (2005). Carbon isotope composition and water-use efficiency in plants with crassulacean acid metabolism. *Functional Plant Biology*, 32, 381–388.
- Wu GH, Chen SR, Su RX, Jia MQ, Li WQ (2011). Temporal trend in surface water resources in Tianjin in the Haihe River Basin, China. *Hydrological Processes*, 25, 2141–2151.
- Xu ZZ, Zhou GS, Wang YH (2007). Effects of drought and rewetting on carbon and nitrogen allocations in *Leymus chinensis* grass. *Journal of Meteorology and Environment*, 23(3), 65–71. (in Chinese with English abstract) [许振柱, 周广胜, 王玉辉 (2007). 干旱和复水对羊草碳氮分配的影响. 气象与环境学报, 23(3), 65–71.]
- Xue DM, Boeckx P, Wang ZL (2014). Nitrate sources and dynamics in the salinized rivers and estuaries—A $\delta^{15}\text{N}$ - and $\delta^{18}\text{O}$ - NO_3^- isotope approach. *Biogeosciences Discussions*, 11, 4563–4589.
- Yang ZF, Xie T, Liu Q (2014). Physiological responses of *Phragmites australis* to the combined effects of water and salinity stress. *Ecohydrology*, 7, 420–426.
- Zhan XY, Yu GR, Sheng WP, Fang HJ (2012). Foliar water use efficiency and nitrogen use efficiency of dominant plant species in main forests along the Northsouth Transect of East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 587–594. (in Chinese with English abstract) [展小云, 于贵瑞, 盛文萍, 方华军 (2012). 中国东部南北样带森林优势植物叶片的水分利用效率和氮素利用效率. 应用生态学报, 23, 587–594.]
- Zhang J, Gu L, Bao F, Cao Y, Hao Y, He J, Li J, Li Y, Ren Y, Wang F, Wu R, Yao B, Zhao Y, Lin G, Wu B, Lu Q, Meng P (2015). Nitrogen control of ^{13}C enrichment in heterotrophic organs relative to leaves in a landscape-building desert plant species. *Biogeosciences*, 12, 15–27.
- Zheng SX, Shanguan, ZP (2007). Photosynthetic characteristics and the ir relationships with leaf nitrogen content and leaf mass per area in different plant functional types. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 58171–594181. (in Chinese with English abstract) [郑淑霞, 上官周平 (2007). 不同功能型植物光合特性及其与叶氮含量、比叶重的关系. 生态学报, 27, 58171–181594.]

责任编辑: 罗天祥 责任编辑: 王 葳