

DOI: 10.5846/stxb201705220952

赵德华, 吕丽萍, 刘哲, 张森, 安树青. 湿地植物供碳功能与优化. 生态学报, 2018, 38(16): - .

Zhao D H, Lv L P, Liu Z, Zhang M, An S Q. The carbon source function of constructed wetland macrophytes and its improvement strategy. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): - .

## 湿地植物供碳功能与优化

赵德华\*, 吕丽萍, 刘哲, 张森, 安树青

南京大学生命科学学院, 南京 210023

**摘要:**尾水湿地氮的反硝化去除往往受限于碳缺乏。综述了湿地植物供碳促反硝化的主要途径与影响因素, 构建了华东地区典型冷、暖季型湿地植物供碳的一般性季节动态模式, 以期发挥湿地植物稳定高效供碳功能、缓解尾水湿地碳缺乏问题提供解决思路。湿地植物的主要供碳途径包括根系分泌、地下有机质分解和地上有机质分解(淋溶)等, 湿地植物的供碳动态是物种和环境因子综合影响的结果, 存在极大的时空异质性。湿地植物具有很强的供碳促反硝化潜力, 地上最大生物量为  $5 \text{ kg/m}^2$  的芦苇全年脱氮潜力可高达  $0.57 \text{ kg N/m}^2$ 。在构建的湿地植物生物质积累量和供碳量的一般性模式中, 冷、暖季型湿地植物无论是生物质积累量(总生物量)和还是供碳量(分解部分+根系分泌物)均存在显著的季节性差异, 以及季节间的互补特征。因此, 冷、暖季型湿地植物间进行合理的配置, 是发挥湿地植物供碳功能且避免生物质分解引起二次污染的可行性措施。今后在湿地植物供碳定量化研究方法、多种供碳途径的定量化监测、供碳功能调控策略, 以及稳定高效供碳促反硝化人工湿地构建等方向需作进一步研究。

**关键词:**湿地; 尾水; 碳氮失衡; 湿地植物; 碳源

## The carbon source function of constructed wetland macrophytes and its improvement strategy

ZHAO Dehua\*, LV Liping, LIU Zhe, ZHANG Miao, AN Shuqing

Life school, Nanjing University, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Constructed Wetlands (CWs) have been widely used for the advanced treatment of the secondary wastewater from Waste Water Treatment Plant (WWTP). However, the pollutant, especially nitrogen, removal efficiency is greatly limited by the lack of carbon sources in the secondary effluent treatment of CWs because most Biochemical Oxygen Demand (BOD) matter has been removed in WWTP. The main pathway of carbon source supplied from CW macrophytes and its main influencing factors were reviewed in this paper. Furthermore, the universal seasonal dynamics and modes of organic matter supply quantities were established for CW macrophytes in East China. The main objective was to develop a novel strategy to stabilize the carbon-supply function of CW macrophytes for the improvement of pollutant removal efficiency and avoidance of secondary pollution in the decomposition process of macrophyte litter by the configuration of warm-season cold-season macrophyte species. The main pathway of carbon source supplied from CW macrophytes included root exudates, decomposition of under-ground biomass, and the decomposition (and leaching) of above-ground biomass. The CW macrophytes have a relatively high carbon supply for denitrification, which is closely correlated with macrophyte species and numerous environmental factors, and thus varies substantially in both time and space. As an example, *Phragmites australis* with a maximum above-ground biomass of  $5.0 \text{ kg/m}^2$  potentially supports a nitrate removal rate of  $0.57 \text{ kg N/m}^2$  in one year,

**基金项目:**国家科技重大专项《淮河流域重污染河流水质改善技术集成与综合示范》(2014ZX07204-002)

**收稿日期:**2017-05-22; **网络出版日期:**2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dhzhao@nju.edu.cn

which is much larger than the values estimated by the previous studies because most previous studies only accounted for the above-ground biomass and ignored other carbon-supply paths of CW macrophytes. Because of the seasonal variation of CW macrophyte carbon-supply function, the universal seasonal models of Biomass Accumulation (BA, the un-decomposed CW macrophyte biomass) and Organic Matter Supplied Quantity (OMSQ, the decomposed CW macrophyte biomass plus the root exudates) were established for representative warm-season and cold-season macrophytes species in East China, respectively. Warm-season and cold-season macrophytes showed significant seasonal complementarity characteristics in both BA and OMSQ. Therefore, the proper configuration of warm-season and cold-season macrophytes in a CW system can greatly stabilize the carbon-supply function of CW macrophytes and thus avoid the secondary pollution by the simultaneous decomposition of most macrophytes litter. The above-ground biomass harvest and return to CW after pretreatment can further improve the artificial management of the carbon-supply function and thus increase the denitrification stimulation function of CW macrophytes. In the future, the related research should be focused on (1) development of the quantitative analysis methodology of OMSQ supplied from CW macrophytes, (2) monitoring the dynamics of the OMSQ quantity and its possible regulation strategies and, (3) design of CW with the ability of supplying stable and high quantity carbon sources from itself as planted macrophytes for improving pollutant efficiency.

**Key Words:** wetland; secondary wastewater, low C/N, constructed wetland macrophyte, carbon source

当前,污水处理厂尾水排放标准日趋严厉,湿地生态工程作为一种环境友好型的污水处理方法,可作为污水处理厂提标改造、提高尾水回用利用率或是排放标准的一个重要环节<sup>[1]</sup>。与常规污水处理技术相比,湿地生态工程技术具有投资少、运营成本低、不产生二次污染等优点,特别在低浓度污水的深度处理方面具有明显的优势。目前,尾水湿地生态工程在技术研发和应用方面均得到了迅猛发展<sup>[2-3]</sup>。但是,污水处理厂常采用 A/O 工艺,由于 A/O 工艺反应器消耗了大量的 COD,特别是其中的 BOD,使得湿地接受的有机物负荷相对较低,造成湿地来水 C/N 严重失衡,限制反硝化作用,降低湿地生态工程的净化功能<sup>[4-7]</sup>。

针对碳氮失衡尾水湿地氮去除效率低这一问题,国内外已发展了多种解决方案,如混合高碳氮比污水、添加低分子碳水化合物和添加植物秸秆<sup>[5,8]</sup>。但是,这些方法在实际应用过程中还存在明显的不足。湿地植物是人工湿地重要组成部分,当前,对于湿地植物的功能和作用途径却一直存在争议<sup>[9-10]</sup>。近期的一些研究认为,对于人工湿地氮的去除而言,水生植物的直接吸收作用几乎可以忽略不计<sup>[9,11]</sup>,而供碳促反硝化是湿地植物最重要的功能之一<sup>[12-13]</sup>。总体而言,虽然研究者已意识到湿地植物供碳功能的重要性,但对其供碳动态的定量化研究,以及其影响机制与调控方法的研究非常薄弱。

本文针对尾水湿地碳源严重不足问题,以提供高效、稳定碳源、降低湿地植物分解引起二次污染风险等为目标,提出基于湿地植物解决或缓解碳氮失衡湿地的解决方案:首先,综述了湿地植物供碳促反硝化的途径及其主要的影响因素,为湿地植物供碳促反硝化功能的提升与工程化应用提供理论基础或研究方向;然后,基于相关研究,构建冷、暖季型湿地植物生物量积累动态与供碳动态的一般性模式,提出通过湿地植物配置构建自供碳尾水湿地的方案及其供碳动态,为污水深度净化湿地的健康发展与利用提供理论依据。

## 1 湿地植物供碳途径

湿地植物通过光合作用生成有机物,而生成的有机物以枯叶落叶、死亡残体,以及分泌物等形式进入水体、土壤表层或被底泥覆盖,直接参与或间接影响微生物的多种生物过程,影响湿地多种元素的地球化学循环。湿地植物向湿地生态系统提供碳源是其最为重要的生态功能之一<sup>[13]</sup>。湿地植物可以通过多种途径向湿地生态系统供应碳源,从而促进反硝化作用和湿地氮去除,其供碳途径主要包括(图 1):

(1)根系分泌有机质。研究表明,湿地植物在生长过程中可向环境分泌大量有机物质,包括水溶性有机酸(如酒石酸和苹果酸)和糖类化合物、芳香族蛋白质,以及高分子的多糖和聚半乳糖醛酸粘液等<sup>[12, 14-16]</sup>。不

同的实验条件下及不同的植物类型,根系有机物分泌量差异很大,有研究表明 10%—40% 的光合固定碳通过根系释放在土壤中,其中,根系的呼吸消耗占近 10%—15%<sup>[17]</sup>,其余用于组成根系和以有机质分泌物形式进入土壤,而根系分泌有机质占总光合固定碳的 15%—25%<sup>[18]</sup>; Zhai 等<sup>[19]</sup>研究表明,占净总光合碳 0.6—4.8% 的有机物以根系分泌物的形式释放到环境中,尽管根系分泌有机碳占总光合作用的比例不高,但是这部分有机碳由于其分子量较小而且释放位置接近反硝化厌氧区域,其反硝化容量较高,初步估测,其释放的根系分泌物可促进每年 94—267 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> N hm<sup>-2</sup> 的反硝化作用。

(2) 根系自溶分解作用。与直立部分的地上部分不同,湿地植物根系生长在水中或土壤(底泥)中,根系释放的有机质可直接参与氮的反硝化作用。在生长期,除了根系分泌释放有机质外,随着新根的出现,老根的不断死亡与分解,根系脱落物和死亡老根通过自溶分解作用可以向土壤中释放大量的有机碳源,相对于植物地上部分,老根的死亡脱落可能并非是程序化事件,这一途径的碳源补充量主要是多种环境条件影响的结果<sup>[20]</sup>。而在凋亡期,死亡根系的分解可为反硝化作用直接提供碳源,湿地植物具有较高的地下生物量,这是湿地植物提供碳源的重要途径。不同湿地植物类型其地上干物质占总生物量的比值变异极大,多介于 18%—72.5% 之间<sup>[21-22]</sup>。由于根系位于缺氧或厌氧环境中,其分解速度相对较慢<sup>[23]</sup>,根系残体分解作用可长期为反硝化作用提供碳源。当前,有关生长期根系通过自溶分解供碳动态及其定量分析方面的研究相对较少,已有的研究大多集中在死亡根系的分解供碳<sup>[24]</sup>,而对于生长期根系脱落物分解供碳的研究相对较少。

(3) 地上干物质分解。生长期,湿地植物地上部分会通过程序化的死亡或对逆境的适应,产生枯枝落叶,分解(淋溶)后向湿地系统补充碳源<sup>[25]</sup>;植物茎叶的有机分泌物在雨水淋溶下也可补充部分有机质<sup>[26]</sup>。凋亡期,随着死亡残体的分解,湿地植物可向湿地系统中补充大量的碳源,由于地上部分干物质便于收割或打捞,其供碳过程人为调控性强,而且人工湿地地上干物质的积累量较大,因此地上干物质碳源供应特征及其调控受到极大的关注<sup>[13]</sup>。在自然湿地系统中,部分的地上干物质被好氧微生物分解和以腐殖质的形式较长期留存在土壤中,部分沥出物可直接作用微生物碳源。与陆生植物相比,湿地植物植株分解物微生物可利用性更高<sup>[27]</sup>。湿地植物地上干物质的分解过程可分为两个阶段:直立分解阶段和底泥表层分解阶段,其中,直立分解阶段的有机质分解速度相对较慢<sup>[28]</sup>,而且分解形成的小分子有机物进入水生态系统的比例相对较低。在人工湿地中,添加植物碳源(主要是植物地上部分)已成为提升氮去除率的一个重要的措施,得到了广泛的应用<sup>[29]</sup>,而且,通过适当的前处理或工程措施可提高地上干物质用于促进反硝化去氮率<sup>[29]</sup>。

## 2 影响湿地植物供碳量因子

湿地植物的供碳动态是植物类型、各种环境因子和人工管理措施等多种因素综合影响的结果,影响植物光合作用和植物残体分解的各种因素均可以影响湿地植物的供碳动态。因此,这里着重分析其主要的因素,或容易人为控制的因素,进而可为其工程化应用提供依据:

### 2.1 根系分泌物

影响根系有机质分泌的主要因素包括:

(1) 植物类型。植物类型是影响根系有机质分泌量最为重要的因素,不同植物类型由于其光合效率、生物积累、根系类型等方面存在很大的差异,根系有机质分泌物的量与质均存在很大的差异<sup>[30]</sup>,总体而言,与 C3 植物相比,C4 植物的根系有机质分配比率相对较低(与总生物量相比)<sup>[31]</sup>,但是,由于 C4 植物光合能力与

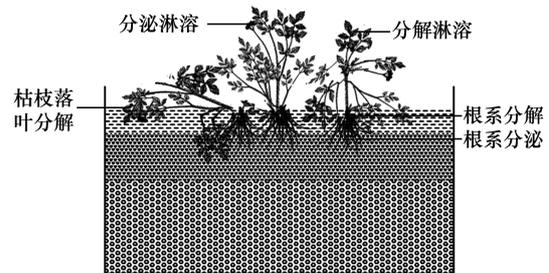


图1 生长期与凋亡期湿地植物为湿地反硝化提供有机碳途径

Fig.1 The main supplying pathway of organic carbon source from wetland macrophyte for denitrification during growth and withered period.

单位面积生物量显著大于 C3 植物, C4 植物根系有机质分泌也大于 C3 植物。

(2) 生长阶段。一般的研究认为, 幼嫩的根系有机物分泌最强, 随着根系的成熟与衰老, 单位重量根系的有机质分泌能力出现下降的趋势, 但是, 由于生长期植物根系生物量的快速增长, 植物根系有机质总分泌量在生长期仍然表现为不断增长的趋势<sup>[14, 31]</sup>。

(3) 土壤与水体理化性质。土壤有机质含量丰富的土壤其根系分泌有机质的量相对较小, 而有机质缺乏的土壤其根系分泌物有增加的趋势<sup>[32]</sup>。富营养化环境可加快植物光合作用, 提高根系分泌有机质<sup>[19]</sup>。而养分、水分和重金属污染等环境胁迫可显著提高植物根系分泌有机质的量<sup>[33]</sup>。

(4) 温度。温度可通过影响植物的光合作用效率来影响根系有机质分泌, 而且一个地区的温度与植物的物候阶段密切相关, 因此, 温度是影响根系有机质分泌的最为重要的因素之一, 温度对根系有机质分配的影响可用 Q10 值表征, 一些研究表明, 植物根系有机质分泌的 Q10 接近 2<sup>[19]</sup>。

## 2.2 地上部分分解供碳

木屑、农作物秸秆、湿地植物残体等多种形式的植物碳源被添加到人工湿地, 可显著提升人工湿地氮去除率<sup>[29, 34]</sup>。利用收获的地上部分作为碳源添加到人工湿地已成为一项提升湿地净化效率的重要工艺, 被广泛采用, 是利用湿地植物构建自供碳人工湿地相关领域的一个重要方向<sup>[13]</sup>, 当前, 湿地植物地上部分向湿地生态系统供碳影响因素及其调控的研究主要集中在两个方面:

(1) 植株地上部分分解过程。湿地植物生物质的分解过程是一个受植物类型、温度(气温和水温)、pH、水文周期、水体养分含量、盐度等多个方面因素影响的结果<sup>[35-37]</sup>。一般研究认为, 随着营养的添加, 植物残体有加快分解的趋势<sup>[36-37]</sup>; 温度和 pH 的升高同样可加速植物残体的分解<sup>[35]</sup>; 盐度的增加会降低植物残体的分解速度<sup>[38]</sup>。由于植物残体在分解释放碳源的过程中会同步释放 N、P 等营养元素, 造成二次污染, 植物残体分解过程中的 COD 和 N、P 等营养元素的同步释放是相关领域广受关注的一个方向<sup>[39-40]</sup>。此外, 植物类型与分解过程的关系方面有大量的研究报道, 研究认为, 不同植物类型及植株不同部位其 C/N、化学组成等存在较大差异, 导致其分解过程存在较大差异, 一般认为, 与挺水植物和陆生植物相比, 沉水植物由于其木质素含量较低, 表现为更快分解速度<sup>[41]</sup>; 与茎秆相比, 叶片中木质素含量较低, 其分解速度更快<sup>[42]</sup>。沉水植物、浮叶植物和挺水植物地上部分植物残体的分解过程存在显著差异, 但不同的研究结果差异较大; 李文朝等研究表明, 浮叶植物分解最快, 挺水植物次之, 而沉水植物最慢<sup>[43]</sup>; 曹培培等和曹勋等研究表明, 浮叶植物分解最快, 沉水植物次之, 而挺水植物最慢<sup>[44-45]</sup>。

### (2) 植物碳源前处理工艺与植物碳源的添加方式。

作为植物材料重要组成部分的木质素在自然条件下很难分解, 且影响纤维素和半纤维素等的分解, 因此在人为添加植物碳源湿地中, 需要先对植物材料进行前处理, 破坏木质素结构, 提高植物材料的分解供碳速率和效率, 已发展了较多的前处理工艺, 包括植物材料的机械粉碎、高压蒸煮和辐射处理等物理方法, 以及酸处理、碱处理和氧化处理等化学方法<sup>[29, 46-48]</sup>。此外, 植物碳源的添加方式会影响其供碳效率和湿地的净化效率, 如果将植物材料添加至人工湿地表层好氧区域, 不仅会造成植物材料的损失且抑制硝化作用, 造成反硝化底物不足, 降低总氮的去除, 因此, 一般认为, 直接将植物材料添加至人工湿地的厌氧区域, 直接为反硝化提供碳源是较为理想的添加方式<sup>[46, 49]</sup>。但是, 出于便捷性考虑, 也有研究认为, 可以将植物碳源溶解(分解)在水中后再添加的方式<sup>[50]</sup>。

## 2.3 根系自溶分解供碳

当前, 生长期老根死亡脱落分解的定量化观测及其影响因素的研究少见报道。有关根系自溶分解供碳影响因子的研究大多集中在植物根冠比<sup>[21-22]</sup>、根系积累量动态和根系有机质分解过程<sup>[24]</sup>等方面。死亡根系的分解过程也是环境因子和植物根系特征综合影响的结果。环境溶氧量是影响根系分解最为重要的因素之一, 总体而言, 相对于地上部分, 死亡根系主要处于缺氧或厌氧环境中, 其分解速度相对较慢<sup>[23]</sup>, 因此, 尽管根系的生物量低于地上生物量, 但是根系对于底泥有机碳变化的作用可能要大于地上部分<sup>[51]</sup>。而水深的增加会

降低表层底泥的溶氧量,降低好氧微生物活性,从而降低表层根系的分解速度,因此,持续处于淹水状态的湿地根系其分解速度小于周期性淹水湿地;而水深对深层根系的分解速度影响相对较小<sup>[24]</sup>。温度是影响根系分解速度的另一重要影响因子,温度对根系分解速度的影响可以用 Q10 来表征,根系分解的 Q10 在 2 左右<sup>[24]</sup>;但是,也有研究认为根系的分解速度对温度的变化不敏感<sup>[52]</sup>。不同来源植物根系由于其 C/N 和化学组成的差异较大,根系的分解速度也存在较大差异<sup>[24]</sup>;此外,受底泥性质影响,与粗根系相比,细根系的分解速度可能更慢<sup>[23]</sup>。

### 3 促反硝化潜力及其季节动态

#### 3.1 湿地植物促反硝化潜力

受生长条件和物种类型影响,湿地植物的光合能力与有机质生产能力必然存在剧烈的时空变异<sup>[13]</sup>,以常见湿地植物芦苇为例,根据上述的供碳途径可对其供碳量进行初步的估算:①地上生物量,研究表明,芦苇地上生物量可在 0.413—9.89 kg/m<sup>2</sup> 范围内宽幅波动,而常见的波动范围为 1.0—2.0 kg/m<sup>2</sup><sup>[53]</sup>,华东地区人工湿地芦苇地上最大生物量可达 6.6 kg/m<sup>2</sup><sup>[54]</sup>;②地下生物量,湿地植物地下与地上生物量之比(根冠比)可在 0.38—4.55<sup>[21-22]</sup>,甚至更大范围内宽幅波动<sup>[55]</sup>,芦苇的根冠比在自然湿地中一般大于 1,而在人工湿地中一般小于 1<sup>[55]</sup>,本文以冠根比 0.8 进行估算。③生长期的枯枝落叶和死亡根系,以生长期凋落物量占最大生物积累量的 19.7% 进行估算<sup>[56]</sup>。④根系分泌有机质量,以茭白、美人蕉和水柳生长期平均值 0.61 mg g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> 估算<sup>[14]</sup>。不同类型植物碳源的脱氮容量同样也存在较大差异,本文以脱氮容量为 0.05 估算湿地植物供碳促反硝化脱氮潜力<sup>[13, 19, 57-58]</sup>。因此,地上最大生物量为 5 kg/m<sup>2</sup> 的芦苇全年脱氮潜力可达 0.57 kg N m<sup>-2</sup>。这一数值高于前人对湿地植物供碳促反硝化潜力的估算,其主要原因在于前人的估算中只考虑湿地植物地上部分生物量,忽略了对地下生物量、生长期凋落物和根系有机质分泌的估算<sup>[13]</sup>。

#### 3.2 供碳促反硝化季节动态

湿地植物供碳促反硝化能力与生物量供应间存在密切相关性,因此,单位面积生物质积累季节变化规律可表征湿地植物供碳促反硝化动态特征。湿地植物生物质积累与分解动态受多种因素的影响,不仅受湿地植物类型、区域环境条件的影响,而且与湿地植物生长的小生境密切相关,人工湿地中湿地植物的供碳动态必然受湿地植物类型的选择、管理措施、基质选择、来水特征等多种因素的影响,因此,不同的人工湿地,湿地植物供碳动态必然存在极大的时空异质性。但是,根据已有的大量相关研究,仍然可归纳总结来一个相对普适性的规律或模式。以华东地区为例,该地区常见湿地植物可分为 2 类:一是以芦苇、菖蒲、鸢尾、美人蕉等为代表的暖季型人工湿地植物,二是以黑麦草、水芹、菹草等为代表的冷季型人工湿地植物。暖、冷季型湿地植物潜在可利用有机质量(地上和地下的当年积累有机质量+往年未分解有机质量+根系分泌物量)存在着季节性的波动(图 2),暖季型湿地植物可利用有机质在夏季和秋季较高,而在冬季和春季较低;而冷季型湿地植物可利用有机质量表现出相反的季节变化规律<sup>[35-36, 39, 40, 53-55, 59-60]</sup>。潜在可利用有机质量与实际有机质供应量(以可溶性的有机酸、糖和蛋白质等形式存在)季节间表现出显著差异<sup>[14-15, 24-25, 36, 43, 61-62]</sup>(图 3)。暖季型湿地植物实际有机质供应量在 10 月至 12 月间处于高位,6 月到 8 月处于低位;而冷季型湿地植物有机质供应量在 4 月至 9 月间位于年内高位,而其它月份相对较低。此外,暖、冷季型湿地植物提供的碳源中有近 10% 来自根系分泌的有机质。表明,在近自然不收割条件下,暖、冷季型湿地植物无论是潜在可利用有机质量,还是实际有机质供应量均存在显著的季节性互补性规律。

#### 3.3 湿地植物供碳促反硝化功能调控

影响湿地植物供碳功能的因子很多,对于人工湿地而言,植物种类的选择是调控湿地植物供碳功能最为常用的措施<sup>[13, 55]</sup>。但是,湿地植物体内含有大量的矿质养分,管理不当容易引起二次污染<sup>[55]</sup>。例如,芦苇植株含氮量可在 0.35%—2.69% 范围内宽幅波动,平均值为 1.0%—1.5%<sup>[63]</sup>,也即植株重返生态系统氮量占其供碳促反硝化脱氮量的 20%—30%。因此,按湿地系统反硝化需求定量供给湿地植物生物量,避免湿地植物产

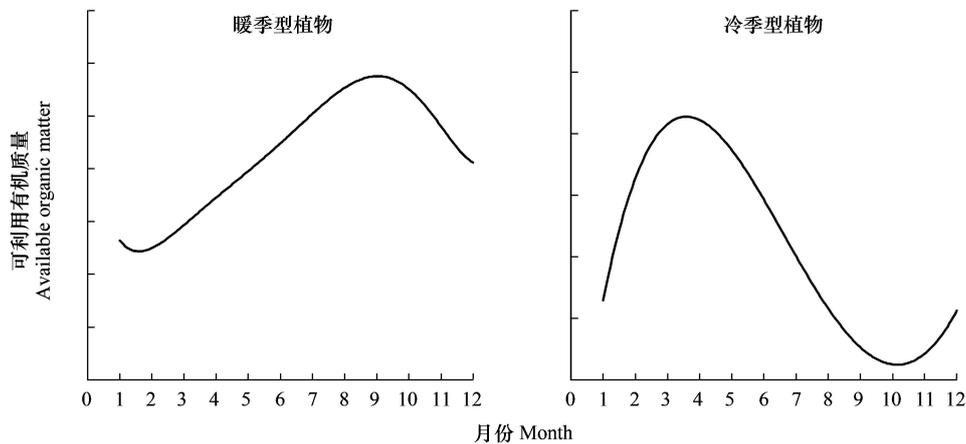


图2 华东地区典型暖季型和冷季型湿地植物可利用有机质季节变化动态。

Fig.2 The universal seasonal dynamics of available organic matter accumulation for the representative warm- season and cold- season wetland macrophytes in East China.

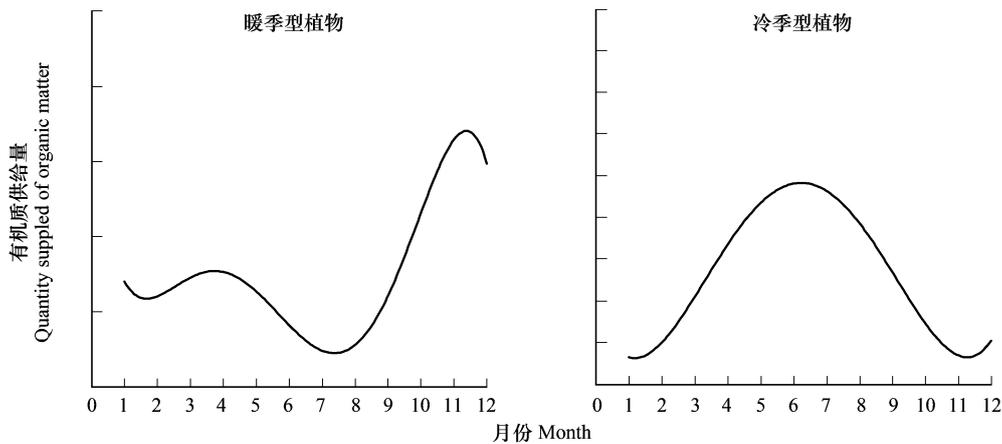


图3 华东地区典型暖季型和冷季型湿地植物有机质供给量季节变化动态。

Fig.3 The universal seasonal dynamics of organic matter quantity supplied from the representative warm- season and cold- season constructed wetland macrophytes in East China.

生二次污染就尤为重要。如前所述,湿地植物的潜在可利用有机质量和实际有机质供应量均存在显著的季节性波动,运用不当可能会造成一些时期二次污染的发生。如图2—3所示,暖季型和冷季型湿地植物间存在显著的季节互补作用。因此,在同一湿地生态系统将暖、冷季型湿地植物进行合理的配置,可为生态系统提供稳定的碳源,提升供碳促反硝化能力,降低植物残体集中分解引发的二次污染风险<sup>[64]</sup>。辅以收割和前处理后回用等措施将进一步调控湿地植物的供碳能力<sup>[8, 13]</sup>。此外,在湿地生态系统中暖、冷季型湿地植物配置,两个方面的问题需引起关注:一方面,由于暖、冷季型湿地植物物候方面的差异,可提高生态系统单位年生产量,从而进一步提升供碳促反硝化能力<sup>[65]</sup>;另一方面,暖、冷季型湿地植物物候期存在部分重叠,而且两种类型植物可能产生复杂的相互影响<sup>[66]</sup>。

#### 4 研究展望

(1) 湿地植物供碳促反硝化量化研究及其调控有待加强。当前,有关植物残体分解过程的研究较多,这些研究可为凋亡期的供碳规律提供参考;而对于生长期的湿地植物供碳功能研究相对较少。如前所述,湿地反硝化作用与温度密切相关,因此碳氮失衡湿地的碳缺乏问题在春、夏温度较高时表现尤为突出;而芦苇、

菖蒲等夏季型植物在人工湿地中应用最为广泛,春、夏季为这类植物的主要生长期,其实际供碳能力却相对较弱,因此,湿地植物在生长期的供碳促反硝化作用尤为重要。当前,对于湿地植物生长期的供碳研究,如量化研究生长期湿地植物通过枯枝落叶或老根系脱落分解供碳的量化研究方面少见报道。此外,根系分泌有机质是湿地植物供碳的重要途径,而当前对根系有机质的分泌的研究主要侧重于其成分分析与生态学作用的研究,对其作为湿地碳源供应功能的研究也相对较少。而湿地植物的供碳过程和能量是由光合作用、碳水化合物分配和有机质分解等过程综合作用的结果,表现出很强的可控性,有关湿地植物供碳功能的量化研究,特别是生长期供碳功能的调控及其工程化应用方面有待于加强。

(2)湿地植物供碳量化研究方法上存在较大的不确定性。当前,对于根系有机质分泌动态的研究多采用室内水培法,或者是通过分析根系在超纯水中短期分泌量来进行定量分析,研究的是水体中有机质严重缺乏条件下的分泌动态,这一研究结果与自然条件下湿地植物根系有机质的分泌动态必然差异较大;有关湿地植物残体分解动态的研究多采用将烘干样品装袋后放置水中或埋于土中进行观测的方法,这与自然条件下的分解过程也必然差异极大<sup>[67]</sup>;而有关湿地植物根系分解过程的研究,出于操作性考虑,样品多为生长期采集的活体根系,研究的周期也与自然条件下的分解周期差异较大<sup>[68-69]</sup>。此外,湿地植物可利用有机质量和有机质供应量不仅与植物的光合过程和分解过程有关,还会受水流、水位等多因素影响。因此,有必要发展新的研究方法,分析近自然条件下的湿地植物的供碳动态,为量化分析湿地植物供碳动态,构建自供碳人工湿地提供依据。

(3)稳定高效供碳促反硝化人工湿地构建技术有待于进一步优化。湿地植物供碳促反硝化能力与动态是多种因素综合影响下的结果,当前,与供碳动态密切相关的湿地植物光合作用、根系有机质分泌和有机质分解的影响因子的研究报道很多,如温度、光照、水分、重金属、物种、管理措施等,但是,人工湿地的运行过程中,有些因素的人为调控能力有限,其影响机制的实用性不足;而有些因素,如物种、水分状况、收割等,人为调控相对便捷,如何调控湿地植物的供碳过程是相关领域的相对薄弱之处。本文研究表明,不同物种的供碳动态存在较大差异且存在季节性的互补特征,通过物候组合可实现稳定的碳源供应和构建自供碳人工湿地,从而解决一些湿地系统碳缺乏引起的氮去除问题。当前,虽然有关人工湿地中湿地植物的配置研究很多,但大多基于景观、群落稳定性等角度考虑,存在目标模糊、效益提升有限等问题。有必要加强湿地植物供碳与植物配置关系,以及不同物候类型湿地植物间的互作关系的研究。此外,进一步整合物种配置和其它调控因子,构建更加高效、稳定供碳促反硝化人工湿地有待于进一步研究。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 陈晶, 邓文, 陈萍, 周新程, 张文艺. 反硝化细菌强化潜流湿地的污水处理厂尾水脱氮试验. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 262-266.
- [ 2 ] 曹燕, 孙景宽, 李田, 陆兆华, 谷广义. 基于城市尾水深度净化和湿地生态恢复的水资源循环利用模式. 水土保持学报, 2015, 29(6): 307-310.
- [ 3 ] 李洁, 吕锡武, 谢静. 水培番茄滤床-折流板式潜流湿地深度净化农村生活污水. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4018-4024.
- [ 4 ] 郑晓英, 朱星, 周翔, 徐亚东, 王菊, 韦诚, 高雅洁, 周薇. 铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果. 环境科学, 2017, 38(6): 2412-2418.
- [ 5 ] 姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌.  $\text{NO}_3^-$ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响. 环境科学, 2017, 38(5): 1898-1903.
- [ 6 ] Chang J J, Ma L Y, Chen J Q, Lu Y F, Wang X Y. Greenhouse wastewater treatment by baffled subsurface-flow constructed wetlands supplemented with flower straws as carbon source in different modes. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(2): 1578-1587.
- [ 7 ] 陈亮, 刘锋, 肖润林, 吴金水. 人工湿地氮去除关键功能微生物生态学研究进展. 生态学报, 2017, 37(18): 6265-6274.
- [ 8 ] 晋凯迪, 于鲁冀, 陈涛, 柏义生, 范鹏宇, 李阳阳. 植物碳源调控对人工湿地脱氮效果的影响. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5611-5616.
- [ 9 ] Brisson J, Chazarenc F. Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: should we pay more attention to macrophyte species selection? Science of the Total Environment, 2009, 407(13): 3923-3930.
- [ 10 ] Liu J K, Liu J L, Zhang R, Zou Y Q, Wang H H, Zhang Z M. Impacts of aquatic macrophytes configuration modes on water quality. Water Science & Technology, 2014, 69(2): 253-261.
- [ 11 ] Cardinal P, Anderson J C, Carlson J C, Low J E, Challis J K, Beattie S A, Bartel C N, Elliott A D, Montero O F, Lokesh S, Favreau A, Kozlova

- T A, Knapp C W, Hanson M L, Wong C S. Macrophytes may not contribute significantly to removal of nutrients, pharmaceuticals, and antibiotic resistance in model surface constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 2014, 482-483: 294-304.
- [12] Wu H L, Wang X Z, He X J, Zhang S B, Liang R B, Shen J. Effects of root exudates on denitrifier gene abundance, community structure and activity in a micro-polluted constructed wetland. *Science of the Total Environment*, 2017, 598: 697-703.
- [13] Zhang C C, Yin Q, Wen Y, Guo W R, Liu C, Zhou Q. Enhanced nitrate removal in self-supplying carbon source constructed wetlands treating secondary effluent: the roles of plants and plant fermentation broth. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 310-316.
- [14] 陆松柳, 胡洪营, 孙迎雪, 杨佳. 3种湿地植物在水培条件下的生长状况及根系分泌物研究. *环境科学*, 2009, 30(7): 1901-1905.
- [15] 王震宇, 温胜芳, 罗先香, 李爱峰, 邢宝山, 李锋民. 2种水生植物根际溶液磷素时空变异及有机酸分泌. *环境科学*, 2009, 30(8): 2248-2252.
- [16] Sun L, Lu Y F, Kronzucker H J, Shi W M. Quantification and enzyme targets of fatty acid amides from duckweed root exudates involved in the stimulation of denitrification. *Journal of Plant Physiology*, 2016, 198: 81-88.
- [17] Warembourg F R, Roumet C, Lafont F. Differences in rhizosphere carbon-partitioning among plant species of different families. *Plant and Soil*, 2003, 256(2): 347-357.
- [18] Van Veen J A, Liljeroth E, Lekkerkerk L J A, Van De Geijn S C. Carbon fluxes in plant-soil systems at elevated atmospheric CO<sub>2</sub> levels. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 175-181.
- [19] Zhai X, Piwpuan N, Arias C A, Headley T, Brix H. Can root exudates from emergent wetland plants fuel denitrification in subsurface flow constructed wetland systems? *Ecological Engineering*, 2013, 61: 555-563.
- [20] 陈文岭, 靳孟贵, 刘延锋, 鲜阳, 黄金瓿. 微根管法监测膜下滴灌棉花根系生长动态. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 87-93.
- [21] 胡世琴. 人工湿地不同植被净化污水效果及其氮磷累积研究. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 200-206.
- [22] 王庆海, 段留生, 武菊英, 阳娟. 北京地区人工湿地植物活力及污染物去除能力. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1131-1137.
- [23] Chimner R A, Ewel K C. A tropical freshwater wetland; II. Production, decomposition, and peat formation. *Wetlands Ecology and Management*, 2005, 13(6): 671-684.
- [24] Guo X L, Lu X G, Tong S Z, Dai G H. Influence of environment and substrate quality on the decomposition of wetland plant root in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(12): 1445-1452.
- [25] 郭继勋, 祝廷成. 羊草草原枯枝落叶积累的研究——自然状态下枯枝落叶的积累及放牧、割草对积累量的影响. *生态学报*, 1994, 14(3): 255-259.
- [26] 梁敏, 赵伟, 郭志华, 关澄澄, 颜宏. 碱地肤叶茎水浸提物化感效应的分析和鉴定. *草地学报*, 2013, 21(5): 950-957.
- [27] Mann C J, Wetzel R G. Loading and utilization of dissolved organic carbon from emergent macrophytes. *Aquatic Botany*, 1996, 53(1/2): 61-72.
- [28] Zhang L H, Tong C, Marrs R, Wang T E, Zhang W J, Zeng C S. Comparing litter dynamics of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in a sub-tropical Chinese estuary: contrasts in early and late decomposition. *Aquatic Botany*, 2014, 117: 1-11.
- [29] Hang Q Y, Wang H Y, Chu Z S, Ye B B, Li C M, Hou Z Y. Application of plant carbon source for denitrification by constructed wetland and bioreactor: review of recent development. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(9): 8260-8274.
- [30] 陆松柳, 张辰, 徐俊伟. 植物根系分泌物分析及对湿地微生物群落的影响研究. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 676-680.
- [31] Kuzyakov Y. Review: factors affecting rhizosphere priming effects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 165(4): 382-396.
- [32] Warembourg F R, Estelrich H D. Plant phenology and soil fertility effects on below-ground carbon allocation for an annual (*Bromus madritensis*) and a perennial (*Bromus erectus*) grass species. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(10): 1291-1303.
- [33] 赵宽, 周葆华, 马万征, 羊礼敏. 不同环境胁迫对根系分泌有机酸的影响研究进展. *土壤*, 2016, 48(2): 235-240.
- [34] Lu S L, Hu H Y, Sun Y X, Yang J. Effect of carbon source on the denitrification in constructed wetlands. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(8): 1036-1043.
- [35] Gingerich R T, Merovich G, Anderson J T. Influence of environmental parameters on litter decomposition in wetlands in West Virginia, USA. *Journal of Freshwater Ecology*, 2014, 29(4): 535-549.
- [36] Li X, Cui B S, Yang Q C, Lan Y, Wang T T, Han Z. Effects of plant species on macrophyte decomposition under three nutrient conditions in a eutrophic shallow lake, North China. *Ecological Modelling*, 2013, 252: 121-128.
- [37] Song C C, Liu D Y, Yang G S, Song Y Y, Mao R. Effect of nitrogen addition on decomposition of *Calamagrostis angustifolia* litters from freshwater marshes of Northeast China. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1578-1582.
- [38] Morrissey E M, Gillespie J L, Morina J C, Franklin R B. Salinity affects microbial activity and soil organic matter content in tidal wetlands. *Global Change Biology*, 2014, 20(4): 1351-1362.
- [39] Kuehn K A, Suberkropp K. Decomposition of standing litter of the freshwater emergent macrophyte *Juncus effusus*. *Freshwater Biology*, 1998, 40(4): 717-727.

- [40] Liao C Z, Luo Y Q, Fang C M, Chen J K, Li B. Litter pool sizes, decomposition, and nitrogen dynamics in *Spartina alterniflora*-invaded and native coastal marshlands of the Yangtze Estuary. *Oecologia*, 2008, 156(3): 589-600.
- [41] Bastviken S K, Eriksson P G, Premrov A, Tonderski K. Potential denitrification in wetland sediments with different plant species detritus. *Ecological Engineering*, 2005, 25(2): 183-190.
- [42] Zhang M L, Zhao L F, Mei C H, Yi L, Hua G F. Effects of plant material as carbon sources on TN removal efficiency and  $N_2O$  flux in vertical-flow-constructed wetlands. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225(11): 2181.
- [43] 李文朝, 陈开宁, 吴庆龙, 潘继征. 东太湖水生植物生物物质腐烂分解实验. *湖泊科学*, 2001, 13(4): 331-336.
- [44] 曹培培, 刘茂松, 唐金艳, 滕漱清, 徐驰. 几种水生植物腐解过程的比较研究. *生态学报*, 2014, 34(14): 3848-3858.
- [45] 曹勋, 韩睿明, 章婷曦, 王国祥, 魏宏农, 马月, 冀峰, 马杰. 冬季水生植物分解过程及其对水质的影响研究. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2): 361-369.
- [46] 杨玉婷, 何小娟, 苏跃龙, 王欣泽. 外加植物碳源强化人工湿地脱氮的研究进展. *水处理技术*, 2015, 41(5): 1-4, 10-10.
- [47] Chen Y, Wen Y, Cheng J, Xue C H, Yang D H, Zhou Q. Effects of dissolved oxygen on extracellular enzymes activities and transformation of carbon sources from plant biomass: implications for denitrification in constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2433-2440.
- [48] Chen Y, Wen Y, Zhou Q, Vymazal J. Effects of plant biomass on nitrogen transformation in subsurface-batch constructed wetlands: a stable isotope and mass balance assessment. *Water Research*, 2014, 63: 158-167.
- [49] Chen Y, Wen Y, Zhou Q, Vymazal J. Effects of plant biomass on denitrifying genes in subsurface-flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 2014, 157: 341-345.
- [50] 丁怡, 王玮, 王宇晖, 宋新山. 不同进水碳氮比对水平潜流人工湿地脱氮效果的影响. *工业水处理*, 2014, 34(10): 29-32.
- [51] Chen R H, Twilley R R. A simulation model of organic matter and nutrient accumulation in mangrove wetland soils. *Biogeochemistry*, 1999, 44(1): 93-118.
- [52] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 13-31.
- [53] Vymazal J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 2005, 25(5): 478-490.
- [54] 吴淑杭, 徐亚同, 姜震方, 周德平, 凌云. 梦清园人工湿地芦苇的氮磷和生物量动态及其适宜收割期的研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(6): 1594-1597.
- [55] Vymazal J. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 2011, 674(1): 133-156.
- [56] 陈为峰. 黄河三角洲新生湿地生态过程研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- [57] 钟胜强, 杨扬, 陶然, 李丽, 张敏, 赵建成. 5种植物材料的水解释碳性能及反硝化效率. *环境工程学报*, 2014, 8(5): 1817-1824.
- [58] 孙金昭, 李明杰, 林恒兆, 卢星星, 成功, 谢冰. 湿地植物作为低 C/N 比生活污水反硝化碳源的研究. *环境污染与防治*, 2016, 38(10): 28-32.
- [59] 管肖肖, 徐宾铎, 任一平, 王小林, 蔡星媛. 青岛大沽河河口湿地芦苇的生长及生物量动态研究. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(11): 27-33.
- [60] 陈洪达. 菹草的生活史、生物量和断枝的无性繁殖. *水生生物学报*, 1985, 9(1): 32-39.
- [61] 王新刚, 吕锡武, 张圣菊. 水生植物分解过程中生物质及氮磷释放规律研究. *安全与环境学报*, 2011, 11(5): 82-85.
- [62] 辛国荣, 杨中艺. "黑麦草-水稻"草田轮作系统研究Ⅶ黑麦草残留物的田间分解及营养元素的释放动态. *草业学报*, 2004, 13(3): 80-84.
- [63] 冯大兰, 刘芸, 黄建国. 三峡库区消落带土壤不同含水量条件下芦苇的氮素与生物量动态变化. *环境科学学报*, 2009, 29(9): 2003-2009.
- [64] 张惠, 汪鹏合, 张文娟, 左杰, 邹祥旭, 季军, 安树青, 赵德华. 利用不同物候期水生植物配置提高浮床人工湿地的除氮效果. *湖泊科学*, 2017, 29(3): 575-584.
- [65] Zhu S X, Ge H L, Ge Y, Cao H Q, Liu D, Chang J, Zhang C B, Gu B J, Chang S X. Effects of plant diversity on biomass production and substrate nitrogen in a subsurface vertical flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10): 1307-1313.
- [66] Johansson J, Kristensen N P, Nilsson J Å, Jonzén N. The eco-evolutionary consequences of interspecific phenological asynchrony—a theoretical perspective. *Oikos*, 2015, 124(1): 102-112.
- [67] Reddy K, Newman S, Osborne T Z, White J R, Fitz H C. Phosphorous cycling in the greater Everglades ecosystem: legacy phosphorous implications for management and restoration. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(S1): 149-186.
- [68] 刘景双, 孙志高, 秦胜金. 湿地水分变化对小叶章根系分解及氮素动态的影响. *北京林业大学学报*, 2008, 30(6): 41-51.
- [69] 彭姿, 李志刚, 何冰, 李素丽, 杨平飞, 李正文, 梁和. 薹米人工湿地根系分解及其铬元素的释放和化学形态变化. *环境科学学报*, 2015, 35(1): 238-244.