

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.015

# 面向碳汇扩增的生态型城市水体沉水植物生长机制

田腾飞<sup>1,2</sup>, 刘梓珩<sup>3</sup>, 黄鹏<sup>1,2</sup>, 孙永利<sup>1,2</sup>, 李檬<sup>1,2</sup>, 赵青<sup>1,2</sup>,  
张岳<sup>1,2</sup>, 张玮嘉<sup>1,2</sup>, 冯天超<sup>1,2</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 天津市城镇排水系统重点实验室, 天津 300074; 3. 南昌大学 化学化工学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 水生植物尤其是沉水植物是城市水体的碳汇主体, 研究生态型水体中沉水植物碳排-碳汇规律和管理模式, 对合理估算水体碳汇当量和提高城市水体的碳汇能力有重要意义。为此, 选择苦草和金鱼藻两种常见的沉水植物, 采用静态箱法测定沉水植物在不同种植密度和生长温度条件下的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O通量; 根据气体的全球变暖潜能值(GWP)计算沉水植物产生的碳汇/碳排当量, 并推导城市水体中沉水植物年度全生命周期碳汇/碳排当量。结果表明, 在不同条件下, 以苦草和金鱼藻为代表的沉水植物群落表现出不同的碳排和碳汇现象, 碳汇当量最大种植密度为40株/m<sup>2</sup>, 最佳生长温度为25℃; 在GWP指数为25年尺度下, 苦草群落在最佳种植密度和生长温度条件下的碳汇当量为5 445.48 mg/(m<sup>2</sup>·a), 金鱼藻群落则为1 305.02 mg/(m<sup>2</sup>·a)。

**关键词:** 城市水体; 沉水植物; 碳汇当量; 种植密度; 生长温度

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0106-07

## Carbon Sink-driven Growth Dynamics of Submerged Macrophytes in Urban Ecological Water Bodies

TIAN Teng-fei<sup>1,2</sup>, LIU Zi-heng<sup>3</sup>, HUANG Peng<sup>1,2</sup>, SUN Yong-li<sup>1,2</sup>, LI Meng<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Qing<sup>1,2</sup>, ZHANG Yue<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei-jia<sup>1,2</sup>, FENG Tian-chao<sup>1,2</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Urban Drainage System, Tianjin 300074, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Aquatic plants, particularly submerged macrophytes, serve as the primary carbon sink in urban water bodies. Investigating the patterns of carbon emission and carbon sink, as well as the management modes of submerged macrophytes in ecological water bodies, is of significant importance for accurately estimating the carbon sink equivalents of water bodies and enhancing their overall carbon sink capacity. In this study, two commonly occurring submerged macrophytes, *Vallisneria natans* and *Ceratophyllum demersum*, were selected. The fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O associated with these submerged macrophytes were measured under varying plant densities and growth temperatures using the static chamber method. Based on the global warming potential (GWP) of each gas, the carbon sink and emission equivalents were calculated. These values were then used to estimate the annual net carbon sink

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(K20200594)

通信作者: 黄鹏 E-mail: siyanhp@126.com

and emission equivalents over the full life cycle of submerged macrophytes in urban water bodies. Under varying conditions, two types of submerged macrophyte communities exhibited distinct patterns of carbon emission and carbon sink. The maximum carbon sink equivalent was achieved at a plant density of 40 plant/m<sup>2</sup>, with an optimal growth temperature of 25 °C. Based on a GWP index over a 25-year time horizon, the carbon sink capacity of the *Vallisneria natans*-dominated community under optimal conditions was measured at 5 445.48 mg/(m<sup>2</sup>·a), whereas that of the *Ceratophyllum demersum*-dominated community was 1 305.02 mg/(m<sup>2</sup>·a).

**Key words:** urban water body; submerged macrophyte; carbon sink equivalent; plant density; growth temperature

有研究表明,水生植物尤其是沉水植物主要呈现碳汇现象<sup>[1-3]</sup>,并且固碳效果是同面积陆上绿地的几倍甚至几十倍<sup>[4]</sup>。在“双碳”战略的强烈需求和城市陆地碳汇当量达到瓶颈的情况下,有必要研究城市中生态型水体的碳汇规律。基于我国实施的城市黑臭水体整治工程广泛采用水生植物尤其是沉水植物构建水体生态系统的实际情况<sup>[5-6]</sup>,明确以沉水植物为主体的碳排-碳汇规律,并通过合理工程手段提高水体的碳汇能力具有重要价值,也可为进一步探究复杂型城市水体的碳汇当量打下基础。

城市水体是指在城市建成区及周边范围内,自然形成或人工建造的各类水域,其生态环境状况受到人为干预的程度较高。由于对城市水体沉水植物群落碳汇规律的研究较少,沉水植物吸收水体中的CO<sub>2</sub>量及对底泥氧化还原状况改善而减少的碳排量等仍未经过核算确定,因此笼统地应用种植沉水植物的水体碳排和碳汇效果确定排放因子,对于统计城市河湖的碳汇当量准确度有较大影响<sup>[7]</sup>。尤其不同种类的沉水植物在不同环境条件下的碳排-碳汇能力不同,因此需要对现有排放因子的误差进行评估,并通过合理的优化,使测算结果更接近水体中沉水植物碳排和碳汇能力的真实值。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验方法

为明晰沉水植物碳排-碳汇规律,并计算沉水植物年度全生命周期内的碳汇/碳排当量,在城市水体水质和水动力条件相对稳定的前提下,需要明确不同种植密度的沉水植物在一年内不同季节温度阶段的碳汇规律。因此分别在不同种植密度和生长温度下对沉水植物进行模拟试验。

种植密度模拟试验设置9个反应器,其中4个

为苦草试验组、4个为金鱼藻试验组、1个为空白组,试验组中苦草/金鱼藻的种植密度分别为20、40、60和80株/m<sup>2</sup>,空白组不种植任何植物。沉水植物均匀种植在反应器中,种植后缓慢加入经太阳曝晒24 h的自来水,加水过程中避免对底泥造成扰动,直至液位距离反应器侧边挡板上部5 cm处停止加水。反应器置于室外阳光直射时长超过3 h处,通风条件良好,为沉水植物生长营造自然环境。添加上覆水后稳定7 d以上,观察沉水植物生长情况,若植株茎叶出现发黄、发黑或植株漂浮等现象,则重新挑选合适植株进行补种。植株正常生长后,定期补水,选择阳光充足的天气进行气体采集工作。

生长温度模拟试验设置4个反应器,其中2个为苦草组(1个空白反应器和1个试验反应器),另外2个为金鱼藻组。试验反应器中分别均匀种植5株苦草和金鱼藻,种植密度约为40株/m<sup>2</sup>。加水后将2组反应器分别放置于光照培养箱中,并设为持续光照模式,自然通风状态。植株正常生长后,定期补水,调整光照培养箱程序进行试验,设置光照条件为12 h光照和12 h无光交替,控制培养箱中空气温度使水温分别为15、20、25、30 °C。当水体达到预设温度后,稳定1 d以上再进行集气工作。冰冻期开始时,将反应器置于室外自然条件下冰冻,冰冻后维持60 d,随后将反应器缓慢移至光照培养箱中,移除水体表面冰层,立即开始集气。

### 1.2 试验装置及植物

#### 1.2.1 生态型水体模拟装置

试验装置如图1所示,选择材质不透光的硬质塑料筐作为反应器,不同种植密度工况下反应器的尺寸为45 cm×60 cm×30 cm,不同生长温度工况下反应器的尺寸为40 cm×30 cm×30 cm。试验装置顶

部预留集气空间,水体中设置水温传感器,底部填充两层性质不同的底泥,下层为自然河岸黄土,上层为自然河道经过清淤后重新淤积的黑色表层底泥。上下两层底泥均匀平整填充于反应器底部,填充高度均为3 cm,底泥总高度保持在(6±1) cm范围内。上层底泥参数:有机质含量为18.2%,pH为7.2~8.7,TN和TP含量分别为(0.347±0.07)、(1.445±0.23) g/kg,呈深黑色;下层底泥参数:有机质含量为4.6%,pH为7.7~9.1,TN和TP含量分别为(0.273±0.05)、(0.973±0.16) g/kg,呈浅黄色。

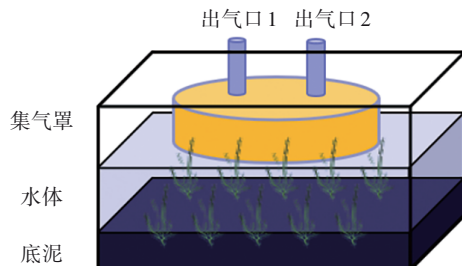


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

### 1.2.2 沉水植物

试验选用苦草和金鱼藻分别代表沉水植物中叶片和丝状条形种类。苦草植株选择根茎发达、叶片面积大且伸展性好的本地生长植株,统一保留3个完整叶片,修剪植株后叶片长度均为10 cm左右。金鱼藻选择本地自然水体中生长态势良好的植株,保留根茎部分及3个健康分支,修剪植株后根茎长度为10 cm左右。苦草和金鱼藻经自来水清洗后,种植于试验装置中。

### 1.2.3 气体收集装置

集气装置采用半圆式透明材质集气罩,避免在气体采集过程遮挡沉水植物光照。种植密度装置的集气罩直径为30 cm,单次最大集气量为7 L;生长温度装置的集气罩直径为20 cm,单次最大集气量为4 L。采集气体期间,将集气罩漂浮于水体表面,确保集气罩底部边缘位于水面以下。气体收集完毕后采用抽气泵将集气罩内气体抽至储气袋。

### 1.3 气体收集及计算方法

采用静态箱法<sup>[8]</sup>收集气体,并送至检测机构进行检测,检测设备为岛津气相色谱分析仪,检测气体包括CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O。气体释放速率计算方法如下:

$$F = \rho \frac{V \cdot P \cdot T_0 \cdot dC_t}{A \cdot P_0 \cdot T \cdot dt} \quad (1)$$

式中: $F$ 为标准状态下的气体释放速率; $\rho$ 为标准状态下被测气体的密度; $A$ 为静态箱覆盖面积; $V$ 为箱内空气体积; $T_0$ 和 $P_0$ 分别为标准状态下空气的绝对温度和气压; $C$ 为 $t$ 时刻箱内被测气体的浓度; $t$ 为时间; $P$ 为采样地点的气压; $T$ 为采样时的绝对温度。

### 1.4 沉水植物群落碳汇当量

针对CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的气体通量和全球变暖潜能值(GWP),碳汇当量为正值表示沉水植物水体表现出净碳汇的综合现象,负值表示沉水植物水体表现出净碳排的综合现象。

$$C_D = -E_{CO_2} - E_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} - E_{N_2O} \cdot GWP_{N_2O} \quad (2)$$

式中: $C_D$ 为沉水植物在一定种植密度下的碳汇当量; $E_i$ 为温室气体的气体通量; $GWP_i$ 为气体的GWP指数值。

在种植密度确定的条件下,沉水植物年度全生命周期碳汇当量计算方法如下:

$$C_{yr} = \sum(C_{Ti} \cdot d_{Ti}) \quad (3)$$

式中: $C_{yr}$ 为沉水植物在一定种植密度下的年度碳汇当量; $i$ 为人为划分的温度范围阶段; $C_{Ti}$ 为日均温度 $T$ 在一年内 $i$ 范围的碳汇当量; $d_{Ti}$ 为日均温度 $T$ 在一年内 $i$ 范围的天数。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 种植密度对沉水植物群落碳汇的影响

种植不同密度沉水植物的水体中温室气体的净通量如图2所示。种植苦草和金鱼藻后,均表现为对CO<sub>2</sub>气体的净吸收;并且随着种植密度的增加,沉水植物水体吸收CO<sub>2</sub>的能力逐渐增加。不同种植密度条件下,苦草和金鱼藻对CH<sub>4</sub>的吸收和释放情况差别较大,当种植密度为40株/m<sup>2</sup>时,种植苦草的水体对CH<sub>4</sub>气体表现为净吸收,吸收净通量为0.0015 mg/(m<sup>2</sup>·h),此时苦草对CH<sub>4</sub>的吸收能力最强;试验种植密度范围内,金鱼藻始终保持对CH<sub>4</sub>的净吸收,当种植密度为60株/m<sup>2</sup>时,种植金鱼藻的水体对CH<sub>4</sub>的净吸收通量值达到最大。从N<sub>2</sub>O的净通量情况可以发现,随着种植密度的增加,苦草和金鱼藻产生的N<sub>2</sub>O气体量呈增加趋势。综合植物生长过程发现,若种植密度过大,由于单位植株的营养面积过小,种植后恢复时间延长,长势不良,并且通风条件差,易造成厌、缺氧环境,形成水体局部黑臭;若种

植密度过小,则无法形成聚集效应和竞争优势,在与藻类和其他植物群体竞争中处于不利地位,无法获取充足的养分,造成沉水植物生长状态差,反而会向水体和底泥中释放储存的碳。

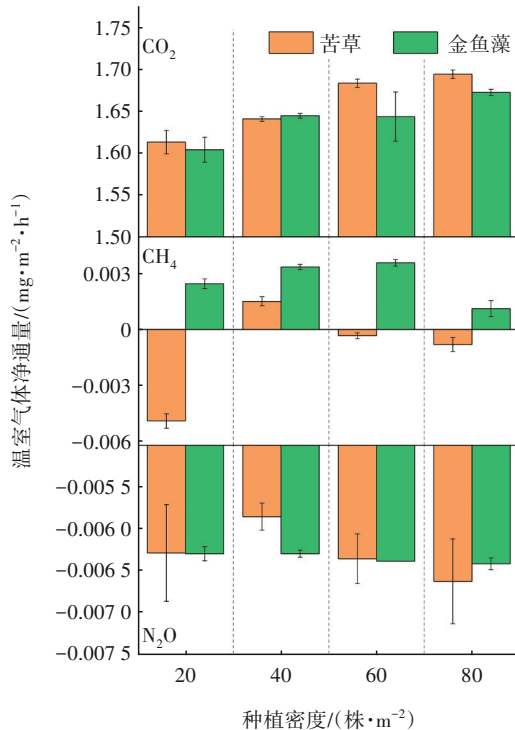


图2 不同种植密度下苦草和金鱼藻的温室气体净通量  
Fig.2 Net fluxes of greenhouse gases of *Vallisneria natans* and *Ceratophyllum demersum* at different planting densities

种植低密度的沉水植物对增强水体的CO<sub>2</sub>吸收能力有限,并且由于无法有效改善水体底泥的厌氧环境,反而会增加水体中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的释放;当种植高密度的沉水植物时,虽然增强了水体吸收CO<sub>2</sub>的作用,但同时也增加了CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的释放量。

不同种植密度下苦草和金鱼藻的碳汇当量如图3所示。可以看出,在25年尺度下,水体中20和80株/m<sup>2</sup>的苦草和金鱼藻群落的碳汇当量均为负值;当种植密度为40株/m<sup>2</sup>时,苦草和金鱼藻群落的碳汇当量均为正值,分别为1.38、1.63 mg/(m<sup>2</sup>·d)。数据表明,20株/m<sup>2</sup>的沉水植物群落对城市水体底泥碳排的改善能力较小,种植密度太低;而80株/m<sup>2</sup>的沉水植物群落增加了城市水体的碳排当量,种植密度过大。从25年和100年尺度整体来看,城市水体在沉水植物种植密度较低时,呈现明显的碳排现象;随着沉水植物种植密度的增加,城市水体碳汇当量逐渐增加;但当沉水植物种植密度过高

时,又会出现明显的碳排现象。在500年尺度下,无论沉水植物的种植密度为多少,生态型水体均表现为碳汇现象,而且当种植密度为40株/m<sup>2</sup>时,沉水植物的碳汇当量最大。因此,在以增强水体碳汇能力为目标导向下,沉水植物存在最优种植密度,苦草和金鱼藻的最佳种植密度均为40株/m<sup>2</sup>。

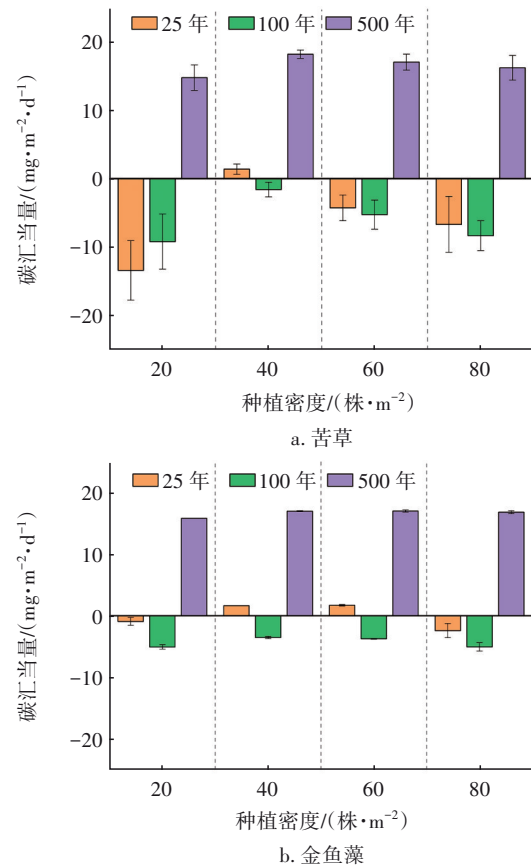


图3 不同种植密度下苦草和金鱼藻的碳汇当量  
Fig.3 Carbon sink equivalents of *Vallisneria natans* and *Ceratophyllum demersum* at different planting densities

## 2.2 生长温度对沉水植物群落碳汇的影响

在除冰冻期外的不同水体温度下,生态型水体中温室气体的净通量如图4所示。随着温度的变化,种植苦草和金鱼藻的水体中温室气体的净通量呈现出基本一致的变化趋势,均表现为在25℃时吸收CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O气体的净通量达到最大。并且随着水体温度的降低(<25℃),苦草和金鱼藻对CO<sub>2</sub>的净通量降低,同时水体中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的释放通量增加,金鱼藻的N<sub>2</sub>O释放通量最大达到0.008 mg/(m<sup>2</sup>·h);相比于25℃,气温达到30℃时生态水体吸收CO<sub>2</sub>的净通量降低,但水体排放CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的净通量增加。

结合沉水植物生长特性,当温度较低时,沉水

植物活性差,进行呼吸作用的同时光合作用受到限制,导致沉水植物周围为还原性环境,使得水体和底泥厌氧情况加剧,最终造成水体和底泥增加向外释放温室气体的量;随着温度达到 25 °C 时,沉水植物的光合作用达到最强,此时沉水植物周围还原性环境范围变小,因此吸收 CO<sub>2</sub> 的量增加,释放 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的量减少;当生长温度继续升高至 30 °C 时,沉水植物光合酶的活性(如 RuBisCO)提高,光合作用虽然增强,但同时呼吸耗氧量也显著增加<sup>[9-10]</sup>,尤其在夜间(无光合作用产氧时),并且水温升高会降低水体溶解氧(DO)浓度,进而加剧了植物内部缺氧,最终造成沉水植物的碳汇能力降低。

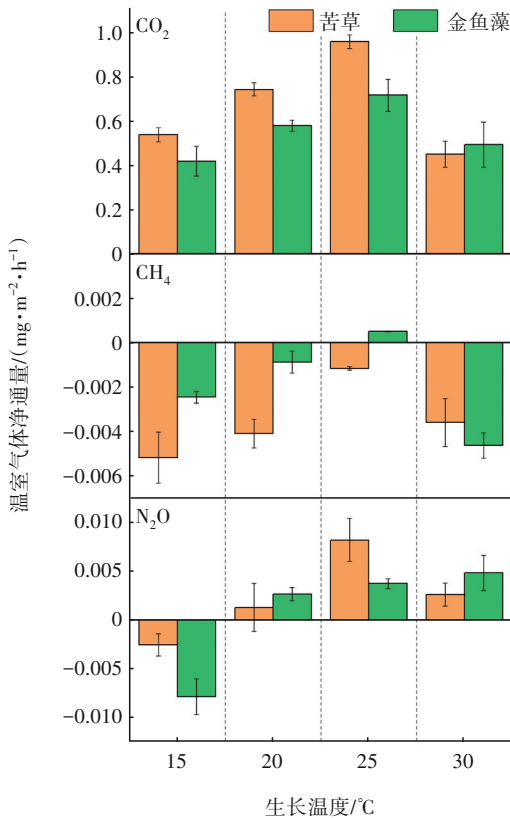


图 4 不同生长温度下苦草和金鱼藻的温室气体净通量  
Fig.4 Net fluxes of greenhouse gases of *Vallisneria natans* and *Ceratophyllum demersum* at different temperatures

不同温度条件下苦草和金鱼藻的碳汇当量如图 5 所示。可以看出,当温度为 15 °C 时,苦草和金鱼藻水体在不同时间尺度下的碳汇当量基本均为负值,表明生态型城市水体在水温较低时呈现碳排现象。随着温度的增加,不同时间尺度下苦草和金鱼藻水体的碳汇当量均为正值,并且当温度为 25 °C 时生态型水体的碳汇当量达到最大。在 25 年尺度

下,当温度为 25 °C 时苦草和金鱼藻水体的碳汇当量分别可达到 77.52、43.69 mg/(m<sup>2</sup>·d)。因此,在以增强水体碳汇能力为目标导向下,苦草和金鱼藻的最佳生长温度为 25 °C,并且均呈现碳汇现象。

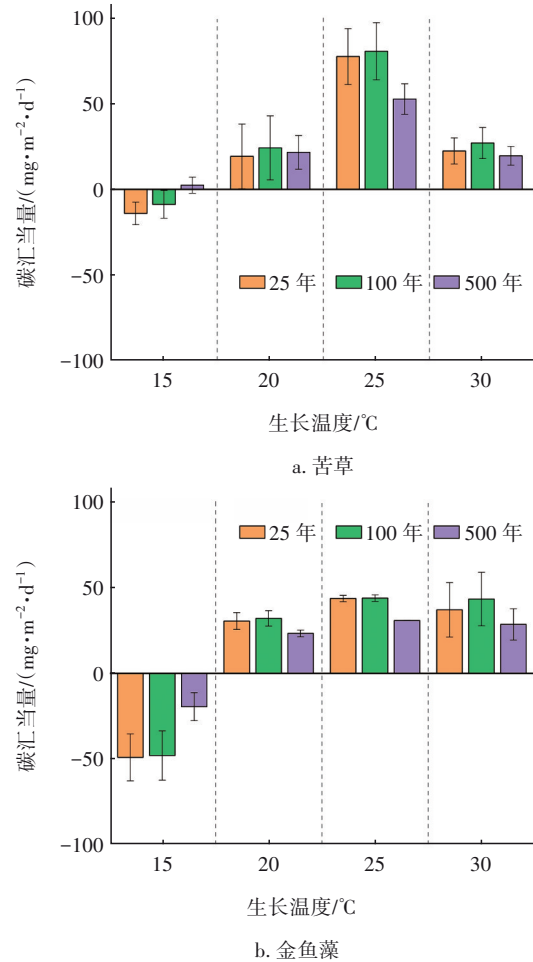


图 5 不同温度条件下苦草和金鱼藻的碳汇当量  
Fig.5 Carbon sink equivalents of *Vallisneria natans* and *Ceratophyllum demersum* at different temperatures

冰冻期后,水体表面冰层融化,种植密度为 40 株/m<sup>2</sup>时苦草和金鱼藻水体均呈现明显的碳排现象,在 25 年尺度下,苦草和金鱼藻水体的碳排当量分别为 40.37 和 20.04 mg/(m<sup>2</sup>·d),在 100 年尺度下分别为 12.55 和 5.33 mg/(m<sup>2</sup>·d),在 500 年尺度下分别为 10.89 和 8.73 mg/(m<sup>2</sup>·d)。在冰冻期,生态型水体表层结冰,沉水植物叶片出现枯黄及腐烂,大量植物残体缠绕在根茎旁或直接悬浮于水体中,水体水质恶化。沉水植物被低温冻伤,发生快速衰老和凋亡的情况。沉水植物自身出现茎叶腐烂、变质现象,无法有效进行光合作用吸收空气中的 CO<sub>2</sub>。同时,

腐烂的植物残体由于厌氧环境而产生大量的温室气体,进一步增加了碳排效应。另外,部分温室气体聚集于冰层下方,冰面气体通量极小,当冰层融化时,水体及底泥中的温室气体加速释放。

### 2.3 碳汇指标相关性

对苦草和金鱼藻群落在不同种植密度条件下的碳排、碳汇相关指标进行相关性分析,结果见图6(显示同一种沉水植物之间的指标相关性关系,并且仅显示 $p < 0.05$ 的结果)。可以看出,在不同种植密度下,苦草和金鱼藻水体的 $\text{CH}_4$ 净通量与碳汇当量呈显著正相关性, Pearson 相关系数达到0.92以上,表明在温度稳定期间,沉水植物碳汇当量主要受到 $\text{CH}_4$ 净通量的影响。随着种植密度的变化,沉水植物群落的碳汇当量发生变化,主要是因为沉水植物改善了底泥的厌氧状态,由于不同种植密度沉水植物群落的光合作用能力不同,对水体和底泥中输送的氧气量也不同,造成水体和底泥中的氧气浓度不同,从而影响水体和底泥中发生的产甲烷过程。这也说明在夏季沉水植物快速生长期和冬季衰亡期,可以采取向水体中曝气或降低水位的措施,针对性调节水体和底泥的氧含量状态。

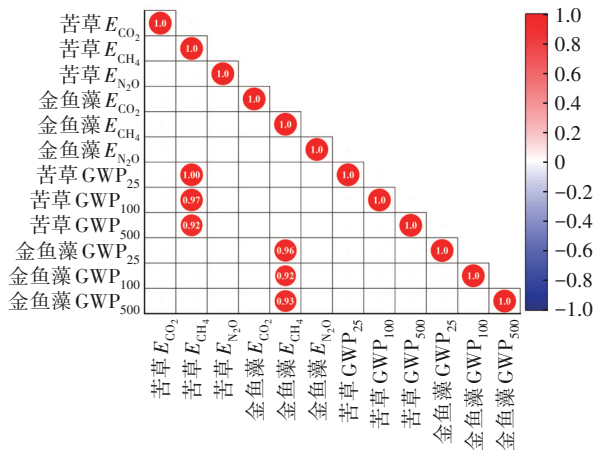


图6 不同种植密度下温室气体净通量和碳汇当量相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of net fluxes of greenhouse gases and GWP index at different planting densities

另外,在不同生长温度下,苦草和金鱼藻水体中的 $\text{N}_2\text{O}$ 净通量与碳汇当量呈正相关性, Pearson 相关系数达到0.99以上。这表明在种植密度一定的情况下,沉水植物群落的碳汇当量发生变化主要受到 $\text{N}_2\text{O}$ 净通量的影响。在沉水植物生长稳定期,生长过程中温度的变化主要对沉水植物光合作用和

呼吸作用产生影响,进而影响底泥和上覆水体中的氧气含量,从而影响底泥和上覆水体的氧化还原电位(ORP)。随着温度的上升,植物呼吸作用增强,在无光条件下大量消耗水体和底泥中的氧,造成底泥和水体的ORP降低,从而为 $\text{N}_2\text{O}$ 的产生提供了还原环境。因此,在春季和秋季沉水植物处于慢速生长期和稳定期时,可以采取定期收割和降低水位的措施,增加沉水植物接受光照的时长,提高到达沉水植物叶片的光照强度,并增强水体自然复氧能力。

### 2.4 沉水植物群落全生命周期碳汇当量

基于苦草和金鱼藻群落在不同种植密度和生长温度条件下的碳汇当量,参考北京市2024年全年日均温度历史数据(北京市南郊观象台发布数据),各个温度范围内的具体天数如下: $<0$ 、 $0\sim 15$ 、 $15\sim 20$ 、 $20\sim 25$ 、 $25\sim 30$ 、 $>30$  °C的天数分别为68、69、59、56、71、42 d,以苦草和金鱼藻种植密度 $40$  株/ $\text{m}^2$ 为例,计算沉水植物全生命周期内的碳汇当量。冰冻期沉水植物水体的碳排和碳汇当量较小,可以忽略不计。在25年和100年尺度下,城市水体中苦草群落产生的最大碳汇当量分别为 $5\ 445.48$ 、 $6\ 437.74$   $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,金鱼藻群落产生的最大碳汇当量分别为 $1\ 305.02$ 、 $1\ 704.67$   $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。同等生物量条件下,苦草群落产生的碳汇当量大于金鱼藻群落,说明苦草更具有吸收 $\text{CO}_2$ 和改善城市水体底泥状态的能力。在实际环境中,生态型水体中生物种类众多,并且沉水植物并不以单个生物种群出现,碳汇情况更加复杂。

## 3 结论

① 在以碳汇当量扩增为导向的前提下,以苦草和金鱼藻为代表的沉水植物最佳种植密度为 $40$  株/ $\text{m}^2$ ,最佳生长温度为 $25$  °C。

② 当种植密度发生变化时,苦草和金鱼藻水体中的碳汇当量主要受 $\text{CH}_4$ 产生量的影响;当生长温度发生变化时,苦草和金鱼藻水体中的碳汇当量主要受 $\text{N}_2\text{O}$ 产生量的影响。

③ 在25年和100年尺度下,城市生态型水体中苦草群落产生的最大碳汇当量分别为 $5\ 445.48$ 和 $6\ 437.74$   $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,金鱼藻群落产生的最大碳汇当量分别为 $1\ 305.02$ 和 $1\ 704.67$   $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

### 参考文献:

[1] 郑冰清,孙彩云,符洪铭,等. 沉水植物水生态修复工

- 程的水-气界面CO<sub>2</sub>通量及生态效益研究——以武汉东湖为例[J]. 环境科学学报, 2024, 44(5): 496-506.  
ZHENG Bingqing, SUN Caiyun, FU Hongming, *et al.* Ecological restoration of submerged aquatic macrophytes can reduce CO<sub>2</sub> emission and increase ecological benefits: a case study of Lake Donghu, Wuhan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(5): 496-506 (in Chinese).
- [ 2 ] 樊施明, 顾于, 陈鹤, 等. 沉水植物恢复对典型城市湖泊玄武湖甲烷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2025, 37(3): 784-797.  
FAN Shiming, GU Yu, CHEN He, *et al.* Effects of submerged plant restoration on methane release in Lake Xuanwu, a typical urban lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(3): 784-797 (in Chinese).
- [ 3 ] 朱江龙. 根际促生菌对沉水植物恢复及温室气体排放的效应研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2024.  
ZHU Jianglong. Effects of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on the Restoration of Submerged Macrophytes and Their Greenhouse Gas Emissions [D]. Wuhan: Hubei University, 2024 (in Chinese).
- [ 4 ] CHEN H, XING P, KAO S, *et al.* Macrophyte restoration promotes lake microbial carbon pump to enhance aquatic carbon sequestration [J]. *Global Change Biology*, 2025. DOI:10.1111/gcb.70086.
- [ 5 ] 梁伟龙. 河道黑臭水体生态修复实施效果研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(10): 9-12.  
LIANG Weilong. Study on the implementation effect of ecological restoration of black and smelly water body in river channels [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2024, 7(10): 9-12 (in Chinese).
- [ 6 ] 蒋丽娜. 黑臭河流底泥原位修复生物-生态组合修复技术研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(10): 154-158.  
JIANG Lina. Study on biological-ecological combined remediation technology of black and smelly river sediment [J]. *Environmental Science and Management*, 2024, 49(10): 154-158 (in Chinese).
- [ 7 ] 张发兵, 胡维平, 胡雄星, 等. 太湖湖泊水体碳循环模型研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 171-178.  
ZHANG Fabing, HU Weiping, HU Xiongxing, *et al.* Study on the model of carbon cycle in the water of Taihu Lake [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(2): 171-178 (in Chinese).
- [ 8 ] 聂兰琴, 付姗, 吴琴, 等. 鄱阳湖典型沉水植物分布区CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>释放日变化特征[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 429-433.  
NIE Lanqin, FU Shan, WU Qin, *et al.* The diurnal variation of carbon dioxide and methane emission from typical submerged plant zone in Poyang Lake [J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science)*, 2014, 38(4): 429-433 (in Chinese).
- [ 9 ] 祁闻. 模拟增温对青海湖流域两种类型草地光合作用的影响[D]. 西宁: 青海师范大学, 2023.  
QI Wen. Effects of Simulated Warming on Photosynthesis in Two Types of Grassland in the Qinghai Lake Basin [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2023 (in Chinese).
- [ 10 ] 房蕊, 于镇华, 李彦生, 等. 大气CO<sub>2</sub>浓度和温度升高对农田土壤碳库及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3666-3679.  
FANG Rui, YU Zhenhua, LI Yansheng, *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and warming on soil carbon pools and microbial community composition in farming soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3666-3679 (in Chinese).

作者简介: 田腾飞(1993- ), 男, 河南济源人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水污染治理、水生态修复和市政给水排水。

E-mail: 18302269080@163.com

收稿日期: 2025-03-17

修回日期: 2025-06-20

(编辑: 刘贵春)