

· 研究论文 ·

## 再生水补给河道内芦苇的光谱特征及其对水体氮和磷含量的响应

赵睿<sup>1,2</sup>, 卜红梅<sup>1\*</sup>, 宋献方<sup>1,2</sup>, 高融瑾<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101; <sup>2</sup>中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100049; <sup>3</sup>立命馆亚洲太平洋大学, 亚洲太平洋学院, 大分県別府市, 日本

**摘要** 再生水是城市景观河湖的重要补给水源, 然而再生水中含量较高的氮和磷营养盐会引起水体富营养化, 破坏水生态平衡。以再生水补给的潮白河为研究区, 运用高光谱技术分析了挺水植物芦苇(*Phragmites australis*)叶片的光谱特征, 并结合水质数据, 通过拟合模型, 探究了芦苇对再生水中氮和磷的响应关系。结果表明, 各采样点水体的总氮(TN)和总磷(TP)含量分别介于1.85–18.16 mg·L<sup>-1</sup>及0.01–0.36 mg·L<sup>-1</sup>之间, 叶绿素a (Chl a)和溶解氧(DO)含量的范围分别为0.60–47.45 μg·L<sup>-1</sup>与4.24–11.4 mg·L<sup>-1</sup>。水体富营养化较为严重, 但仍处于富氧环境。多重方差分析表明, 不同采样点之间水体的TN、TP和Chl a含量差异显著( $P<0.05$ )。由光谱反射率及反射率一阶导数曲线可知, 水体TN含量越高, 叶片光谱在可见光区的反射率越小, 红边位置也越向波长长的方向移动(即红移)。相关分析表明, 水体TN和TP含量与吸光度值 $\log(1/R)$ 在可见光区的相关性较强, 且TN与 $\log(1/R)$ 的相关系数高于TP。芦苇叶片光谱可在一定程度上区分水体TN含量差异, 但TP对光谱特征的影响模式不明显。光谱指数与水体TN含量之间的拟合模型中, 基于光化学指数(PRI)、修正叶绿素吸收指数(MCARI)和导数叶绿素指数(DCI)的模型能够解释水体TN含量变化的62.4%–70.9% ( $P<0.05$ ), 可用于再生水氮含量的定量监测。该研究证明了植物光谱技术在水体富营养化监测上的可行性, 为保障再生水修复河道水质和生态安全提供了科学依据。

**关键词** 再生水, 光谱反射率, 光谱指数, 氮和磷含量, 芦苇

赵睿, 卜红梅, 宋献方, 高融瑾 (2020). 再生水补给河道内芦苇的光谱特征及其对水体氮和磷含量的响应. 植物学报 55, 666–676.

再生水作为一种稳定的水源, 广泛应用于城市景观的河湖修复(Chang and Ma, 2012; Lyu et al., 2016)。然而, 再生水中氮、磷营养盐含量本底值高, 在温度和光照等环境条件适宜时, 以再生水为单一或主要水源的景观水体极易爆发藻类生长, 造成水体富营养化, 从而引起修复河道的生态系统失衡。因此, 对再生水补给河道水体的氮、磷营养盐监测是进行景观修复的前提。

研究表明, 芦苇(*Phragmites australis*)等挺水植物对氮和磷具有良好的吸收能力(Tanner, 1996; 刘瑞斌, 2019), 且其光谱特征会随着体内氮和磷的积累相应改变(薛利红等, 2006; 刘辉等, 2014)。基于此, Siciliano等(2008)和刘克等(2012)通过测量芦苇的光

谱特征监测了水体中氮和磷营养盐的含量。Siciliano等(2008)在野外监测中, 发现水体含氮量与芦苇叶片的光谱特征之间存在显著的相关关系, 芦苇光谱能反映出水体在一段时间内的综合营养元素水平。刘克等(2015)通过室内控制实验证明, 芦苇叶片在可见光区的反射率随着水体氮含量的增加明显降低。因此, 植物光谱具有对环境化学组分的指示作用, 可被用于水体富营养化监测。尤其在高氮再生水长期和持续补给情况下, 芦苇作为水生态修复中最常见的挺水植物之一, 利用其叶片光谱对水质的监测能力可实现对水生生态安全的预警(张茜等, 2020)。

在植物光谱信息提取上, 除了对原始反射率进行分析, 还常采用导数光谱和光谱指数等技术来挖掘光

收稿日期: 2020-05-15; 接受日期: 2020-07-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.41730749)和北京市自然科学基金(No.8172044)

\* 通讯作者。E-mail: buhm@igsnr.ac.cn

谱的隐含信息(迟光宇等, 2005)。植物冠层(或叶片)在可见光和近红外波段的反射率可被用于预测植物体内的氮素水平, 在农作物精细管理方面发挥了重要作用(Kokaly, 2001; 薛利红等, 2004)。光谱导数分析法有助于消除环境噪音的影响, 从而增强对植物生长状况诊断的准确性(Zarco-Tejada et al., 2002; Lamb et al., 2002)。构造光谱指数则能更全面地利用光谱信息, 得到的植物氮素预测模型精度也更高(薛利红等, 2006; Wu et al., 2008)。Gamon等(1997)发现, 光化学指数(photochemical reflectance index, PRI)对植物类胡萝卜素含量的变化非常敏感, 可用于监测植物在不同氮素水平下的光合辐射利用效率。Daughtry等(2000)构建了修正叶绿素吸收指数(modified chlorophyll absorption ratio index, MCARI), 提高了植物叶绿素含量反演的准确性。此外, 归一化叶绿素比值指数(normalized difference pigment index, NPCI)、修正归一化差值指数(modified normalized difference, mND<sub>705</sub>)、导数叶绿素指数(derivative chlorophyll index, DCI)和植被衰减指数(plant senescence reflectance index, PSRI)等光谱指数均被证明可反映出植物的生长状况, 在氮素反演上具有良好的适用性(Zarco-Tejada et al., 2002)。

在水体富营养化监测中, 单次水质监测反映的是瞬时水质状况, 可能受到水力停留时间和异常气象事件等环境因素的影响, 故具有偶然性(Bricker et al., 2003), 需要结合周期性监测做出判断。而水生植物生长在被测水域中, 其生长状况反映的是与水体长期相互作用的结果, 能更综合性地反映水体的富营养化状况(Siciliano et al., 2008)。本研究以再生水补给河道内生长的芦苇为研究对象, 基于芦苇叶片的光谱反射率和反射率一阶导数, 分析光谱特征对水体中氮和磷含量的响应关系; 依据反射率和反射率一阶导数, 利用合适的光谱指数构建拟合模型, 探索植物光谱技术监测水体富营养化应用的可行性, 为保障再生水修复河道水质和生态安全提供科学依据。

## 1 材料与方法

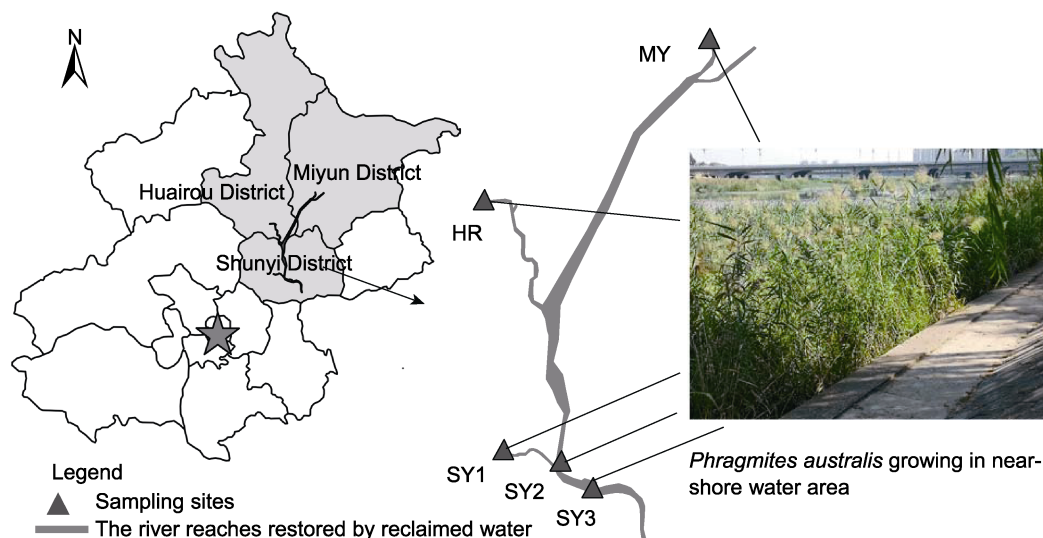
### 1.1 研究区概况

研究区位于再生水补给的潮白河, 再生水从北向南依次流经北京市密云区、怀柔区和顺义区(图1)。气候类

型为北温带半湿润大陆性季风气候。多年平均气温为11–12℃, 冬季寒冷干燥, 夏季炎热多雨。年内降水分配不均, 主要集中在夏季, 累积年最大降水量出现在7月。2007年, 温榆河的污水经过膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)工艺处理后, 引入潮白河(“引温济潮”工程)作为景观用水。再生水是研究区内最主要的水源, 在密云区、怀柔区以及顺义区各个出水口的水质不同。河道内河水的平均流速为0.065 m·s<sup>-1</sup>, 水流基本静止, 近似湖区。受试水段内水体的氮和磷含量偏高(Yang et al., 2016), 实施“引温济潮”工程后, 潮白河管理段沿河引种了芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), 以期改善河水水质。芦苇丛在潮白河密云段、怀柔段和顺义段均有分布, 主要生长在近岸浅水区(图1), 是河道内的优势挺水植物。

### 1.2 采样设计和实验方法

潮白河不同河道引水工程前期的防渗措施有差异, 致使不同河段再生水的氮和磷浓度显著不同(于一雷, 2013)。此外, 由于再生水水量有限且河道内多设置闸坝, 导致部分河段长期断流。尤其在密云和怀柔区河段, 考虑到河道形态、水流流通性和水源的复杂性, 这两个区的采样点仅设置在再生水的出水口附近, 确保受测芦苇长期受到再生水的影响。目前, 已有很多潮白河顺义段水质尤其是氮相关指标监测的研究, 结果均表明, 氮含量存在沿程降低的趋势(Yang et al., 2016; 顾永钢等, 2017)。为保证不同采样点芦苇叶片光谱有更强的区分度, 按照氮含量的差异性选择较为分散的采样点。另外, 由于芦苇沿河道分布范围有限, 故对采样点的选择有一定约束。本研究分别在潮白河的密云段、怀柔段和顺义段, 常年有水且有芦苇丛生长的河段设置5个采样点(图1), 分别位于密云段再生水出水口附近(MY)、怀柔段再生水出水口附近(HR)、顺义段再生水出水口附近(SY1)、顺义段减河公园内(SY2)和顺义段河南橡胶坝(SY3)。此采样方案既包含了对3个区域河段出水口附近及顺义段上、中和下游情况的比较, 又涵盖了河道中的重点位置, 对本研究区域情况有较好的代表性; 同时, 各采样点之间的流速和流量等水文条件及光照强度、大气CO<sub>2</sub>浓度和水分等自然条件均相似, 对芦苇的生长情况不会产生差异性影响。



审图号: 京s(2020)028号

图1 潮白河再生水补给区采样点分布图

MY: 密云段再生水出水口附近; HR: 怀柔段再生水出水口附近; SY1: 顺义段再生水出水口附近; SY2: 顺义段减河公园内; SY3: 顺义段河南橡胶坝

Figure 1 The sampling sites in Chaobai River restored by reclaimed water

MY: Reclaimed water outlet in Miyun District; HR: Reclaimed water outlet in Huairou District; SY1: Reclaimed water outlet in Shunyi District; SY2: Jian River Park in Shunyi District; SY3: Henan Rubber Dam in Shunyi District

植物在生长前期, 叶片发育尚未成熟, 其光谱特征还不能完全体现出生长环境内的氮和磷水平。因此, 本研究对芦苇叶片光谱的采样选择在2019年9月。此时研究区内芦苇的地上部体长为1.8–2.2 m, 已生长成熟, 光谱特征较为稳定。芦苇叶片光谱使用手持便携式地物波谱仪(Field Spec Handheld, ASD) (Analytical Spectral Device, USA)测量。该仪器探头视场角为25°, 波长观测范围为325–1 075 nm, 采样间隔1 nm。野外测量选择晴朗无风的天气, 为减少阳光散射的影响, 测量时间定为10:00–14:00。根据天气条件, 每隔10–15分钟进行1次标准白板校正(白板反射率视为1)。为保证样本量和增强数据的可靠性, 每个采样点选择多株生长状况具有代表性的芦苇, 分别在其上端、中端和下端对完全展开且不被遮挡的叶片进行测量。为降低噪声和随机性, 每个采样点读取30条光谱数据, 共采集150条。

为充分体现研究区内水体的氮和磷营养盐含量, 分别于2019年3、5、7、9和11月进行了5次野外水样采集, 共采集25份水样。为避免降雨对水质测试结果的影响, 采样均避开雨期。由于研究区内芦苇集中生长在近岸浅水区, 水样也在近岸处且距离芦苇丛约

0.5 m的水域采集。用手持式水质分析仪, 现场测试水体中的溶解氧(dissolved oxygen, DO)含量(YSI Pro Plus, USA)。总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)和叶绿素a (Chl a)含量分别用带回实验室的水样测试。部分水样用过硫酸钾氧化法处理后, 在连续流动分析仪(Bran+Luebbe AutoAnalyzer 3, German)上测定TN; 部分水样用过硫酸钾消解法处理后, 在化学分析仪(Alliance Smart Chem200, France)上测定TP。部分水样用热乙醇法在分光光度计(HACH DR5000, USA)上测定Chl a (张丽彬等, 2008)。

### 1.3 数据处理

(1) 原始光谱数据处理 采集的叶片光谱数据中, 325–380 nm和900 nm之后的波段数据噪声较大, 故后续分析计算时去掉了这些波段。根据波长380–500 nm为蓝光波段、500–600 nm为绿光波段、600–700 nm为红光波段及700–900 nm为近红外光波段划分光谱波段(Osborne et al., 2002)。以每个采样点30条光谱反射率曲线的算术平均值作为该采样点芦苇叶片的反射率测量值。

(2) 反射率一阶导数计算 用ASD波谱仪自带软件计算光谱反射率的一阶导数, 该方法可有效减小外部环境条件对植被光谱的干扰, 反映出原始光谱中的隐藏信息(迟光宇等, 2005)。

(3) 单因素方差分析 对不同采样点水体的TN和TP含量做单因素方差分析, 并用Bonferroni方法校正。方差分析前, 用Shapiro-Wilk法检验数据的正态性, 用Bartlett法检验方差齐性。对不满足正态分布的数据, 进行自然对数变换。仍不满足正态分布的, 用非参数法Kruskal-Wallis秩和检验比较差异。

(4) 相关分析 采用芦苇叶片的原始反射率(reflectance, R)计算吸光度值 $\log(1/R)$ 是一种常见的光谱数据校正方法(Yoder and Pettigrew-Crosby, 1995; 李哲等, 2018)。本研究分别对水体TN和TP含量的年平均值与吸光度值进行相关分析, 绘制相关系数随波长变化曲线, 直观展现叶片光谱对水体氮和磷含量变化敏感的波段。

(5) 计算光谱指数并构建拟合模型 选择合适波段处的反射率和反射率一阶导数计算光谱指数, 构建光谱指数与水体TN含量回归模型, 定量化表示出芦苇光谱对水体氮含量的响应。选取的模型类型包括线性方程、指数方程、二次方程和对数方程。选取的光谱指数包括光化学指数(photochemical reflectance index, PRI)、修正叶绿素吸收指数(modified chlorophyll absorption ratio index, MCARI)、归一化色素比值指数(normalized difference pigment index, NPCI)和导数叶绿素指数(derivative chlorophyll index, DCI)。PRI、MCARI和NPCI由多个反射率组成, 能充分利用可见光区的光谱信息, 解决不同色素吸收区域重叠问题, 有效表征植物的生长状况(Li et al., 2010; Shrestha et al., 2012; 李哲等, 2018)。DCI由反射率一阶导数组成, 主要反映近红外波段的光谱信息(Zarco-Tejada et al., 2002)。

数据分析及制图应用Microsoft Excel、ViewSpec Pro\_6.2和R语言软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体富营养化特征

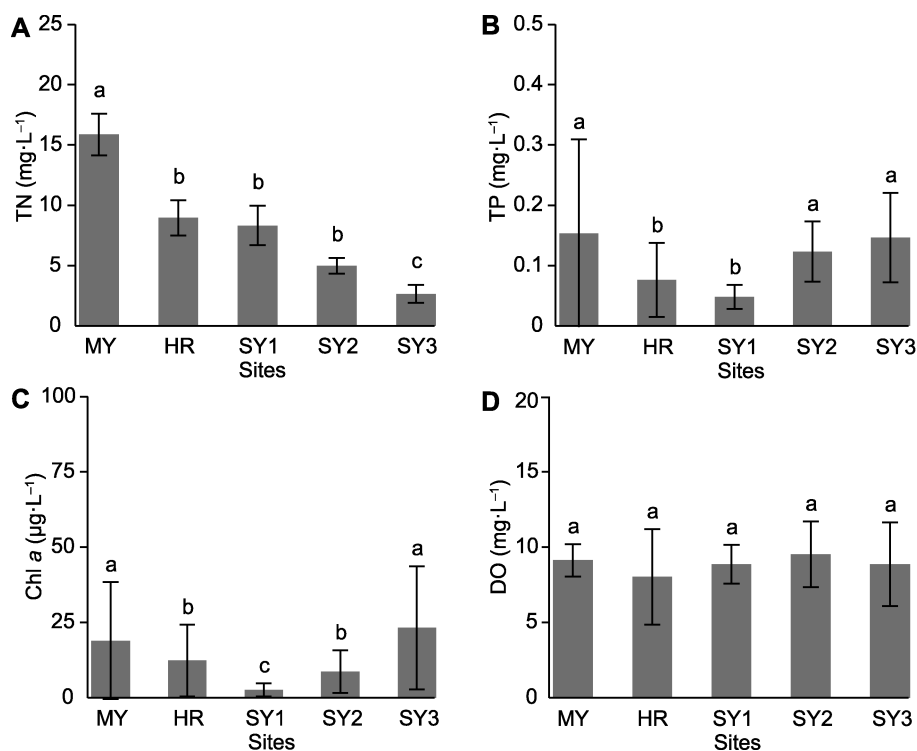
研究区内水体的TN含量介于 $1.85\text{--}18.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间(图2A), TP含量为 $0.01\text{--}0.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图2B)。多重方差

分析结果表明, 5个采样点水体的TN和TP含量的年平均值存在显著差异( $P<0.05$ )。水体中TN最高含量出现在MY, 年平均值高达 $(15.87\pm 1.53)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (平均值 $\pm$ 标准差)。HR、SY1和SY2水体的TN含量无显著差异, 分别为 $(8.95\pm 1.30)$ 、 $(4.97\pm 0.57)$ 和 $(8.31\pm 1.47)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水体中TN最低含量出现在SY3, 仅为 $(2.65\pm 0.66)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因此, 按照水体TN含量水平划分, MY为高氮区, HR、SY1和SY2为中氮区, SY3为低氮区。MY、SY2和SY3水体的TP含量无显著差异, 平均值分别为 $(0.15\pm 0.14)$ 、 $(0.12\pm 0.04)$ 以及 $(0.15\pm 0.07)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。HR以及SY1水体的TP含量较低( $P<0.05$ ), 分别为 $(0.08\pm 0.05)$ 和 $(0.05\pm 0.02)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因此, 按照水体TP含量高低, MY、SY2和SY3为高磷区, HR和SY1则为低磷区。MY、HR和SY1分别位于密云、怀柔 and 顺义的再生水出水口附近, 这3个点的氮和磷含量差异主要与不同再生水厂的处理工艺以及河道的防渗措施有关。密云段河道由于进行了底部衬砌, 水体中TN和TP含量都最高。

研究区内各采样点水体中Chl *a*含量介于 $0.60\text{--}47.45\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $13.17\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图2C)。各采样点Chl *a*含量存在显著差异( $P<0.05$ )。MY和SY3水体中Chl *a*含量最高, 平均值分别为 $(18.90\pm 0.14)$ 和 $(23.25\pm 18.32)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。HY和SY2水体中Chl *a*含量无显著差异, 平均值分别为 $(12.38\pm 10.63)$ 和 $(8.68\pm 6.36)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而SY1水体中Chl *a*含量最低, 平均值仅为 $(2.64\pm 1.96)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水体中DO含量介于 $4.24\text{--}11.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $8.84\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图2D)。MY、HR、SY1、SY2和SY3水体中DO平均值分别为 $(9.12\pm 0.96)$ 、 $(8.03\pm 2.83)$ 、 $(8.87\pm 1.45)$ 、 $(9.32\pm 1.68)$ 以及 $(8.86\pm 2.48)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 各采样点之间无显著差异。尽管总体上研究区内水体的富营养化严重, 但是各采样点水体中的DO平均值均较高, 满足《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水的要求, 不会造成芦苇在缺氧条件下生长。

### 2.2 芦苇叶片光谱反射率特征

芦苇叶片光谱在可见光区的反射率均值如图3所示。由于叶绿素等光合色素作用, 绿色植物在可见光区对辐射能量吸收强烈, 表现出较低的反射率(Knipling, 1970)。本研究显示, 芦苇叶片光谱在可见光波段的蓝光区和红光区反射率都很低, 形成“蓝谷”和“红



**图2** 潮白河再生水补给区各采样点水体中TN (A)、TP (B)、Chl a (C)和DO含量(D)

TN: 全氮; TP: 全磷; DO: 溶解氧。MY、HR、SY1、SY2和SY3同图1。不同小写字母表示不同采样点之间平均值的显著性差异。

**Figure 2** The contents of TN (A), TP (B), Chl a (C) and DO (D) at different sampling sites in Chaobai River restored by reclaimed water

TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; DO: Dissolved oxygen. MY, HR, SY1, SY2 and SY3 see Figure 1. Different lowercase letters indicate significant differences between sampling sites.

谷”，在绿光区反射率相对较高，形成“绿峰”，表明芦苇生长状况良好，未发生病变。另外，不同叶片反射率曲线在形状上大致相同，而反射率大小存在差异(图3)。SY3水体中的芦苇叶片光谱具有最高反射率，MY水体中的具有最低反射率，HR、SY1和SY2水体中的反射率则相近。

### 2.3 芦苇叶片反射率一阶导数特征

不同采样点芦苇叶片的光谱反射率一阶导数如图3所示。一阶导数曲线有2个区域(500–540 nm和680–750 nm)出现明显的峰值。500–540 nm间的峰值是因为光谱反射率曲线从蓝光区到绿光区出现拐点(图3)，该峰值被称为“蓝边”。而从红光区到近红外区，光谱反射率曲线急剧升高，680–750 nm之间斜率最大(即反射率一阶导数最大)的点被称为“红边”(Horler et al., 1983)，其对应的波长被称为红边位置( $\lambda_{red}$ )。根据一阶导数运算结果可知，5个采样点的红边位置分

别约为724 (MY)、717 (HR)、719 (SY1)、717 (SY2)和708 nm (SY3)。

### 2.4 水体氮和磷含量与反射率的相关性

分别对水体TN和TP含量的年平均值与 $\log(1/R)$ 进行相关性分析，得到不同波段的相关系数(图4)。结果表明，各波段有明显不同。蓝光区水体TN与 $\log(1/R)$ 的相关系数为0.56–0.74，绿光区、红光区和近红外光区的相关系数分别为0.30–0.61、0.37–0.71以及0.33–0.35。水体TP与 $\log(1/R)$ 的相关系数曲线有相似的变化趋势，但在可见光波段其相关系数较低，蓝光区、绿光区、红光区和近红外光区的相关系数分别为0.46–0.61、0.18–0.47、0.16–0.56和–0.28–0.16。水体TN和TP含量与 $\log(1/R)$ 之间在可见光区部分波段呈显著正相关( $P < 0.05$ )，且在红光波段和蓝光波段的相关系数高于绿光波段；在近红外光波段转为负相关关系。上述结果表明，在可见光波段，水体中TN

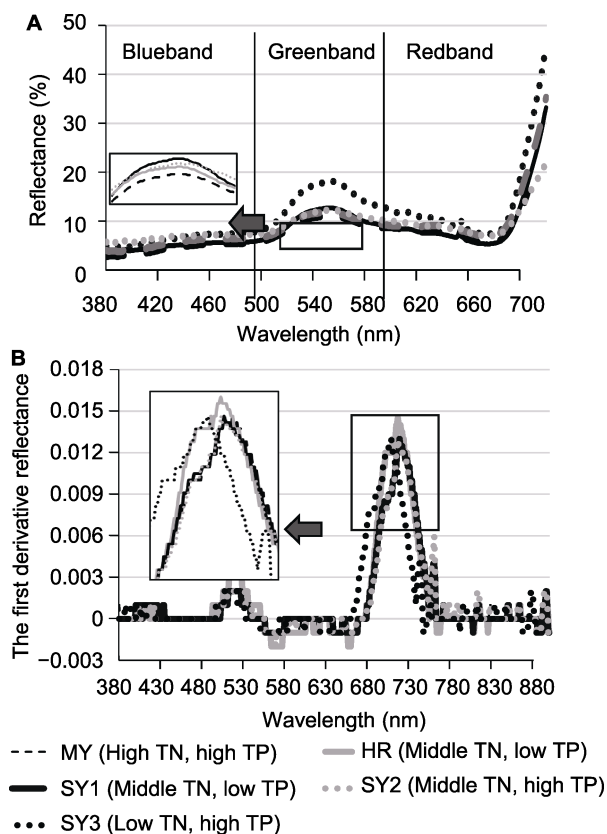


图3 潮白河再生水补给区各采样点芦苇叶片光谱反射率(A)及反射率一阶导数(B) TN和TP同图2。MY、HR、SY1、SY2和SY3同图1。

**Figure 3** Spectral reflectance (A) and the first derivative reflectance (B) of *Phragmites australis* leaves at different sampling sites in the Chaobai River restored by reclaimed water TN and TP see Figure 2. MY, HR, SY1, SY2 and SY3 see Figure 1.

和TP含量越高, 吸光值就越大, 叶片反射率也就越低; 近红外光波段则相反。

## 2.5 光谱指数与水体TN含量的定量关系

潮白河以再生水为主要补给水源, 再生水的出水水质对河水水质有重要影响。根据本研究的水质数据和该地区以往的水质监测结果可知, 再生水中TN含量超标程度远高于TP (图2) (王健等, 2014)。尽管氮和磷含量均被认为是引起水体富营养化的指标, 但在本研究区内, TN含量是影响水体富营养化程度的主要指标。因此, 利用芦苇叶片光谱重点监测水体TN含量变化具有必要性。此外, 从相关分析可知, 水体TN含量

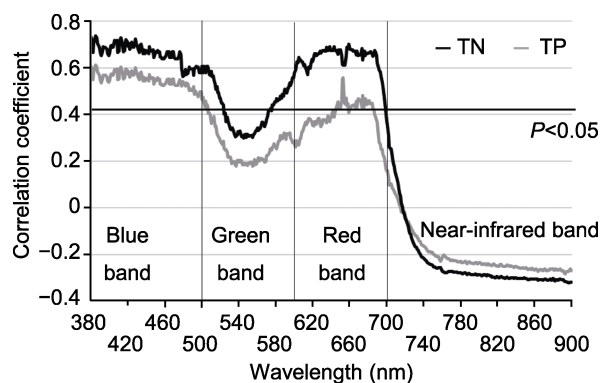


图4 潮白河再生水补给区水体TN和TP含量与芦苇叶片吸光度值 $\log(1/R)$ 的相关系数 TN和TP同图2。

**Figure 4** Correlation coefficients between contents of riverine TN and TP and absorbance values of *Phragmites australis* leaves in Chaobai River restored by reclaimed water TN and TP see Figure 2.

与叶片光谱的相关性较高(图4); 且芦苇叶片的光谱反射率和反射率一阶导数曲线也证明, 光谱信息能够在一定程度上体现水体TN含量变化(图3)。这意味着, 再生水补给河道内芦苇的光谱指数与水体TN含量间具有相应的定量关系。

鉴于此, 建立光谱指数与水体TN含量年平均值之间的拟合模型, 可量化表达芦苇光谱对水体氮含量的响应。选择合适的光谱指数和拟合方程可提高预测模型的精度。本研究发现, 基于不同光谱指数构建的不同类型拟合方程之间, 调整 $R^2$ 值有较大差异(表1)。其中, 基于MCARI的指数方程拟合精度最高, 调整 $R^2$ 值为0.709 ( $P < 0.05$ ), 所表征的水体TN含量为 $2.01\text{--}20.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。基于PRI和DCI的指数方程也通过了显著性检验, 调整 $R^2$ 值分别为0.693以及0.624 ( $P < 0.05$ ), 表征的水体TN含量则分别为 $1.94\text{--}19.22$ 和 $3.21\text{--}17.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

## 3 讨论

### 3.1 芦苇叶片反射率对水体氮和磷含量的响应

研究区内, 5个采样点水体TN含量的年平均值均超过了《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) V类水体上限( $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 且由于不同采样点之间的TN含量存在较大差异, 使得芦苇叶片的光谱反射率产生明显差异。结合各个采样点可见光区的反射率和水体TN含



量水平可知,高氮(样点MY)、中氮(样点HR、SY1和SY2)和低氮水平(样点SY3)的采样点之间反射率存在差异;且水体含氮水平越高,反射率越小,同为中氮水平采样点的反射率接近(图3)。环境中的氮素水平会影响芦苇的生长(Mykleby et al., 2015; Eller et al., 2017)。供氮水平对叶片反射率影响的研究普遍认为,供氮充足时,叶片中叶绿素含量增加,光合有效辐射(photosynthetically active radiation)增强,可见光波段的反射率随之减小(Gitelson and Merzlyak, 1997; Siciliano et al., 2008; 刘克等, 2012),与本研究结果一致。

磷是影响植物叶片光谱的重要营养元素。但在本研究中,芦苇叶片光谱反射率的相对大小无法反映出TP浓度差异的高低。这与磷本身在植物体内的作用机理以及环境中磷的含量有关。磷元素通过参与植物中富磷核糖体的合成来控制植物的叶绿素含量(Ågren, 2004; 李玲玉等, 2017),从而对叶片的反射率产生影响,是一种间接影响机制。植物正常生长对氮的需求远高于磷(Ågren, 2008),特别是在水体TN含量远高于TP的情况下(图2)。光谱诊断对磷的敏感性较差;

且磷的转移性较强,植物缺磷时的相应症状显露较为迟缓,及时性较差(任红艳等, 2008)。此外,Osborne等(2002)研究表明,植物在不同生长时期对磷含量变化的敏感性不同,生长早期可进行磷的光谱诊断,晚期则不适宜。可见,磷元素用于光谱诊断受影响因素较多且局限性较大。

3.2 芦苇叶片反射率一阶导数对水体氮和磷含量的响应

“红边”是绿色植物特有的光谱特征。大量实验表明,植物的红边位置与其叶绿素含量显著相关(Horler et al., 1983)。而叶绿素含量是植物光合作用能力和生长发育情况的良好指示器(Wu et al., 2008)。植物生长状况良好时,红边位置会发生“红移”(向长波方向移动),反之则出现“蓝移”(向短波方向移动)。结合水体TN含量和反射率一阶导数图像可以看出,含氮水平越高,红边波长就越大;同为中氮水平的样点HR、SY1和SY2,红边波长接近一致(图3),说明芦苇的长势随水体含氮量的增加而转好。与反射率特征相同,红边位置的差异主要说明水体TN含量的变化,而未

表1 芦苇叶片光谱指数与水体总氮(TN)含量的拟合模型

Table 1 Fitting models between spectral indexes of *Phragmites australis* leaves and riverine total nitrogen (TN) contents

Spectral indexes and expressions	Model types	Fitting equations	Adjusted $R^2$
PRI (R531-R570)/(R531+R570)	Linear equation	$y=5.243x+5.685$	0.042
	Exponential equation	$y=6.914e^{1.102x}$	<b>0.693*</b>
	Quadratic equation	$y=1.254x^2+0.489x-0.156$	0.219
	Logarithmic equation	$y=0.492\ln x-0.641$	0.038
MCARI [(R700-R670)-0.2(R700-R550)] (R700/R670)	Linear equation	$y=-3.122x+7.396$	0.119
	Exponential equation	$y=8.854e^{-0.105x}$	<b>0.709*</b>
	Quadratic equation	$y=-0.595x^2+1.821x+2.608$	0.426
	Logarithmic equation	$y=-0.567\ln x+1.614$	0.092
NPCl (R680-R430)/(R680+R430)	Linear equation	$y=4.915x+7.725$	0.110
	Exponential equation	$y=9.940e^{0.008x}$	0.507
	Quadratic equation	$y=1.285x^2+0.518x-0.087$	0.209
	Logarithmic equation	$y=1.043\ln x+0.168$	0.093
DCI D725/D705	Linear equation	$y=2.485x+3.498$	0.038
	Exponential equation	$y=5.197e^{0.164x}$	<b>0.624*</b>
	Quadratic equation	$y=2.703x^2-3.752x+1.854$	0.478
	Logarithmic equation	$y=2.07\ln x-1.019$	0.096

PRI: 光化学植被指数; MCARI: 修正叶绿素吸收指数; NPCI: 归一化叶绿素比值指数; DCI: 导数叶绿素指数; x: 光谱指数; y: 水体总氮(TN)含量。通过显著性检验的调整 $R^2$ 值用加粗标出(\* $P<0.05$ )

PRI: Photochemical reflectance index; MCARI: Modified chlorophyll absorption ratio index; NPCI: Normalized difference pigment index; DCI: Derivative chlorophyll index; x: Spectral indexes; y: Total nitrogen (TN) contents. Bold values of adjusted  $R^2$  with \*  $P<0.05$ .

体现TP的影响。这再次证明, 研究区内芦苇的生长状况主要对水体的氮含量水平有指示作用。

本研究中, 同为中氮水平的3个采样点, 芦苇叶片有相似的反射率和红边位置, 说明要引起明显的叶片光谱差异需要一定程度的供氮水平差距。室内控制实验, 可以预先设置好供氮水平梯度(刘克等, 2015)。但在野外监测中, 如遇到水体营养盐含量相差不大的情况, 植物光谱反射率和红边位置的相对大小就难以作为区分的依据。因此, 需对光谱信息做进一步的定量分析, 进而挖掘出更多隐含信息。

### 3.3 光谱指数预测水体TN含量的适用性分析

MCARI光谱指数主要利用的是红光区光谱信息, 由550、670和700 nm处的反射率构成。已有研究表明, MCARI对叶片叶绿素含量的预测优于其它光谱指数(Eitel et al., 2008; Wu et al., 2008)。本研究中, 水体TN含量与 $\log(1/R)$ 在红光波段具有显著的相关关系( $P<0.05$ ), 可能是由于基于MCARI的指数拟合方程精度最高。

PRI是由波长531和570 nm处的反射率组成的归一化植被指数。这2个波段的反射率与叶黄素循环有密切关系, 可用于表征植物光合有效辐射利用效率的高低(Siciliano et al., 2008)。基于PRI的指数方程表明, 水体TN含量越高, PRI就越高(表1), 体现了植物光能利用率随着氮含量提高而增加(Gamon et al., 1997; 张璐和何新华, 2020)。Tilley等(2003)研究表明, 控制水体TP含量的变化范围有助于提高PRI与水体氮含量之间的正相关性。因此, 在以氮污染为主且磷污染较小的潮白河水质条件下, PRI对监测水体TN含量表现出良好的适用性。

基于DCI的指数方程表明, DCI与水体TN含量之间也呈正相关(表1)。植物光谱的反射率一阶导数曲线在红边区域(680–760 nm)一般有2个主要的峰值, 前峰约在705 nm处, 后峰则出现在约725 nm处(Zarco-Tejada et al., 2003)。DCI光谱指数即基于这2个潜在峰值构建。DCI越高(即后峰峰值高于前峰峰值), 植物的生长状况越好。然而, Siciliano等(2008)研究指出, DCI对水体TN含量的预测可能存在“饱和阈值”。当水体TN含量过高时, 植物不能继续吸收氮素, TN的升高反而引起DCI降低。植物吸收氮素的上限与植物种类及其生境特点有关。有研究表明, 当水体TN含量

介于12–20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间时, 植物可能出现氮素吸收饱和的现象(Siciliano et al., 2008; 宫兆宁等, 2016)。因此, 对氮含量高于普通河道的再生水补给区, 应用DCI监测水体的富营养化时需要考虑芦苇吸收氮素的上限。

## 4 结论

本研究分析了再生水补给河道内水体氮、磷含量及芦苇叶片的光谱信息, 探究了芦苇光谱特征对再生水中氮和磷含量的响应关系。芦苇叶片的光谱分析表明, 水体TN含量越高, 可见光区的反射率越小。反射率一阶导数曲线表明, 随着水体TN含量的增加, 芦苇叶片光谱的红边位置发生“红移”。相关分析显示, 水体TN和TP含量与 $\log(1/R)$ 在可见光区的相关性较好, 但TN与 $\log(1/R)$ 的相关系数高于TP。本研究发现, 芦苇光谱可有效区分再生水水体中TN含量的变化, 但对污染情况相对较轻的TP不敏感。借助光谱曲线比较水体氮含量仅在水体TN含量差异较大时适用(较小时则难以作为区分的依据)。另外, 基于PRI、MCARI和DCI的指数模型, 我们定量预测了光谱指数与TN含量之间的关系( $P<0.05$ ), 可以用于水体TN含量为2.01–20.07、1.94–19.22和3.21–17.39  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 情况下, 再生水补给河道内氮含量监测。

随着再生水补给景观河湖应用的进一步扩大, 植物光谱对再生水在大尺度上的富营养化监测将有良好的应用前景。例如, 利用光谱遥感来解译环境特征及发展反演算法。高光谱仪能即时得到植物的光谱数据, 在大面积监测时更能体现出效率高和成本低的优势。本研究证明了利用水生植物光谱监测再生水水质的可行性, 为进一步完善理论研究奠定基础, 也为后期大规模推广应用提供了科学依据。

## 参考文献

- 迟光宇, 刘新会, 刘素红, 杨志峰 (2005). 环境污染监测中的植物光谱效应研究. 环境科学与技术 28(S1), 16–19.
- 宫兆宁, 范云豹, 刘辉, 赵文吉 (2016). 不同水氮梯度下典型挺水植物叶绿素荧光的响应特性. 植物学报 51, 631–638.
- 顾永钢, 吴晓辉, 李兆欣, 赵立新, 刘操 (2017). 潮白河再生水受水区水体水质沿程变化规律研究. 北京水务 (1), 29–35.
- 李玲玉, 杨浩萌, 任为波, 吴新宏, 黄芳 (2017). 利用叶绿素



- 荧光评估草原植物羊草缺磷缺氮状况. 植物学报 **52**, 271–277.
- 李哲, 张飞, 陈丽华, 张海威 (2018). 光谱指数的植物叶片叶绿素含量估算模型. 光谱学与光谱分析 **38**, 1533–1539.
- 刘辉, 宫兆宁, 赵文吉 (2014). 基于挺水植物高光谱信息的再生水总氮含量估测——以北京市门城湖湿地公园为例. 应用生态学报 **25**, 3609–3618.
- 刘克, 唐新明, 赵文吉, 雷兵, 郭道宇, 宫兆宁 (2015). 水体总氮浓度与湿地芦苇叶片高光谱特征关系研究. 地理与地理信息科学 **31**(2), 24–28.
- 刘克, 赵文吉, 郭道宇, 王翊虹, 孙永华, 苗茜, 王京萌 (2012). 基于湿地植物光谱的水体总氮估测. 生态学报 **32**, 2410–2419.
- 刘瑞斌 (2019). 人工湿地植物群落造景艺术研究——评《人工湿地植物配置与管理》. 植物学报 **54**, 674.
- 任红艳, 庄大方, 潘剑君, 邱冬生, 张佳宝 (2008). 磷营养胁迫对冬小麦冠层光谱的影响. 土壤通报 **39**, 1326–1330.
- 王健, 何江涛, 刘玉梅, 姜烈 (2014). 潮白河再生水受水区水质变化特征多元统计分析. 环境科学与技术 **37**(6), 171–176.
- 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 张宪 (2004). 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究. 植物生态学报 **28**, 172–177.
- 薛利红, 卢萍, 杨林章, 单玉华, 范晓晖, 韩勇 (2006). 利用水稻冠层光谱特征诊断土壤氮素营养状况. 植物生态学报 **30**, 675–681.
- 于一雷 (2013). 河道景观再生水对地下水影响研究——以潮白河北京段为例. 博士论文. 北京: 中国科学院大学. pp. 18–20.
- 张丽彬, 王启山, 徐新惠, 丁丽丽, 任洪强 (2008). 乙醇法测定浮游植物叶绿素a含量的讨论. 中国环境监测 **24**(6), 9–10.
- 张璐, 何新华 (2020). C<sub>3</sub>和C<sub>4</sub>植物的氮素利用机制. 植物学报 **55**, 228–239.
- 张茜, 裘天航, 王安安, 周华健, 袁敏, 李利, 白素兰, 崔素霞 (2020). 北京地区芦苇资源状态及其多样性. 植物学报 **55**, 693–704.
- Ågren GI (2004). The C:N:P stoichiometry of autotrophs—theory and observations. *Ecol Lett* **7**, 185–191.
- Ågren GI (2008). Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annu Rev Ecol Evol Syst* **39**, 153–170.
- Bricker SB, Ferreira JG, Simas T (2003). An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status. *Ecol Modell* **169**, 39–60.
- Chang DH, Ma Z (2012). Wastewater reclamation and reuse in Beijing: influence factors and policy implications. *Desalination* **297**, 72–78.
- Daughtry CST, Walthall CL, Kim MS, De Colstoun EB, McMurtrey III JE (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens Environ* **74**, 229–239.
- Eitel JUH, Long DS, Gessler PE, Hunt ER (2008). Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat. *Agron J* **100**, 1694–1702.
- Eller F, Skálová H, Caplan JS, Bhattarai GP, Burger MK, Cronin JT, Guo WY, Guo X, Hazelton ELG, Kettenring KM, Lambertini C, McCormick MK, Meyerson LA, Mozdzer TJ, Pyšek P, Sorrell BK, Whigham DF, Brix H (2017). Cosmopolitan species as models for ecophysiological responses to global change: the common reed *Phragmites australis*. *Front Plant Sci* **8**, 1833.
- Gamon JA, Serrano L, Surfus JS (1997). The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia* **112**, 492–501.
- Gitelson AA, Merzlyak MN (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int J Remote Sens* **18**, 2691–2697.
- Horler DNH, Dockray M, Barber J (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *Int J Remote Sens* **4**, 273–288.
- Knipling EB (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sens Environ* **1**, 155–159.
- Kokaly RF (2001). Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration. *Remote Sens Environ* **75**, 153–161.
- Lamb DW, Steyn-Ross M, Schaare P, Hanna MM, Silvester W, Steyn-Ross A (2002). Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: theoretical modelling and experimental observations. *Int J Remote Sens* **23**, 3619–3648.
- Li F, Miao YX, Hennig SD, Gnyp ML, Chen XP, Jia LL, Bareth G (2010). Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. *Precision Agric* **11**, 335–357.
- Lyu S, Chen WP, Zhang WL, Fan YP, Jiao WT (2016). Wastewater reclamation and reuse in China: opportunities and challenges. *J Environ Sci* **39**, 86–96.
- Mykleby PM, Awada T, Lenters JD, Bihmidine S, Yarina

- AJ, Young SL** (2015). Responses of common reed (*Phragmites australis*) to nitrogen and temperature manipulations. *Great Plains Research* **25**, 63–74.
- Osborne SL, Schepers JS, Francis DD, Schlemmer MR** (2002). Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agron J* **94**, 1215–1221.
- Shrestha S, Brueck H, Asch F** (2012). Chlorophyll index, photochemical reflectance index and chlorophyll fluorescence measurements of rice leaves supplied with different N levels. *J Photochem Photobiol B* **113**, 7–13.
- Siciliano D, Wasson K, Potts DC, Olsen RC** (2008). Evaluating hyperspectral imaging of wetland vegetation as a tool for detecting estuarine nutrient enrichment. *Remote Sens Environ* **112**, 4020–4033.
- Tanner CC** (1996). Plants for constructed wetland treatment systems—a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecol Eng* **7**, 59–83.
- Tilley DR, Ahmed M, Son JH, Badrinarayanan H** (2003). Hyperspectral reflectance of emergent macrophytes as an indicator of water column ammonia in an oligohaline, subtropical marsh. *Ecol Eng* **21**, 153–163.
- Wu CY, Niu Z, Tang Q, Huang WJ** (2008). Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation. *Agric For Meteorol* **148**, 1230–1241.
- Yang L, He JT, Liu YM, Wang J, Jiang L, Wang GC** (2016). Characteristics of change in water quality along reclaimed water intake area of the Chaobai River in Beijing, China. *J Environ Sci* **50**, 93–102.
- Yoder BJ, Pettigrew-Crosby RE** (1995). Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400–2 500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sens Environ* **53**, 199–211.
- Zarco-Tejada PJ, Miller JR, Mohammed GH, Noland TL, Sampson PH** (2002). Vegetation stress detection through chlorophyll *a* + *b* estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. *J Environ Qual* **31**, 1433–1441.
- Zarco-Tejada PJ, Pushnik JC, Dobrowski S, Ustin SL** (2003). Steady-state chlorophyll *a* fluorescence detection from canopy derivative reflectance and *double-peak* red-edge effects. *Remote Sens Environ* **84**, 283–294.

## Spectral Characteristics of *Phragmites australis* and Its Response to Riverine Nitrogen and Phosphorus Contents in River Reaches Restored by Reclaimed Water

Rui Zhao<sup>1,2</sup>, Hongmei Bu<sup>1\*</sup>, Xianfang Song<sup>1,2</sup>, Rongjin Gao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Water Cycle and Related Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>2</sup>College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>3</sup>College of Asia Pacific Studies, Ritsumeikan Asia Pacific University, Oita Beppu, Japan

**Abstract** Reclaimed water is an important water source replenishing rivers and lakes for urban landscape. Higher contents of nitrogen and phosphorus in reclaimed water will cause eutrophication, disrupting the balance of hydro-ecology. Hyperspectral technology was applied to analyze the spectral characteristics of the emergent plant *Phragmites australis*, and the spectral characteristics response of *P. australis* leaf to nitrogen and phosphorus contents were explored in the Chaobai River restored by reclaimed water. Results showed that concentrations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chlorophyll a (Chl a), and dissolved oxygen (DO) were 1.85–18.16 mg·L<sup>-1</sup>, 0.01–0.36 mg·L<sup>-1</sup>, 0.60–47.45 µg·L<sup>-1</sup>, and 4.24–11.4 mg·L<sup>-1</sup>, respectively. Although the river water eutrophication was serious, it was still in an oxygen-rich environment. The results showed that there were significant differences in the concentrations of TN, TP, and Chl a among sampling sites ( $P<0.05$ ) in multiple analysis of variance. With the increasing of riverine TN concentrations, the reflectance of leaf spectrum in the visible band lowered and the position of red edge also moved towards higher wavelength (i.e., redshift). The riverine TN and TP contents had significant correlations with the absorbance value  $\log(1/R)$  in the visible band in correlation analysis, and the correlation coefficients between TN and  $\log(1/R)$  were higher than that of TP. The difference of TN concentrations could be inferred by the spectrum of *P. australis* leaf to a certain extent, while the effect of TP on spectral characteristics was weaker than TN. TN was selected to establish fitting models with different spectral indices. Based on the photochemical reflectance index (PRI), the modified chlorophyll absorption ratio index (MCARI) and the derivative chlorophyll index (DCI), the exponential equations explained 62.4%–70.9% of TN ( $P<0.05$ ), which could be useful for quantitatively monitoring of nitrogen contents in reclaimed water. This research proved practicability of plant spectrum technology in water eutrophication monitoring, providing a scientific basis for ensuring water quality safety and ecological security in rivers and lakes restored by reclaimed water.

**Key words** reclaimed water, spectral reflectance, spectral index, nitrogen and phosphorus contents, *Phragmites australis*

**Zhao R, Bu HM, Song XF, Gao RJ** (2020). Spectral characteristics of *Phragmites australis* and its response to riverine nitrogen and phosphorus contents in river reaches restored by reclaimed water. *Chin Bull Bot* **55**, 666–676.

\* Author for correspondence. E-mail: buhm@igsnr.ac.cn

(责任编辑: 孙冬花)