

## 专栏:南水北调中线水生态保护

【特约主持人】毕永红:中国科学院水生生物研究所藻类生物学及应用研究中心主任

【主持人按语】南水北调工程是目前世界上最大的跨流域水资源调配工程,是实现我国水资源优化配置、促进华北地区经济社会可持续发展、保障和改善民生的重大战略性基础工程。南水北调中线一期工程自 2014 年 12 月 12 日全线通水至今,已累计从丹江口水库调水近 540 亿  $m^3$ ,惠及沿线 24 座大中城市、200 多个县市区,直接受益人口达 8 500 万人。取得了重要的经济、社会和生态效应。为保障供水安全、水质安全,切实做好南水北调后续工程高质量发展,水源地和中线沿线的生态监测与研究工作的尤为重要。当前,南水北调中线源头到干渠的水生生物群落处于动态演变过程中,藻类作为水体初级生产者是水生态系统稳定的基石,鱼类处于食物网的顶端,二者均对水环境的稳定具有决定性影响,中线的藻类群落及鱼类资源的研究成果可支撑中线的科学管理,对于水质稳定和输水安全具有指导意义。

# 南水北调中线浮游植物群落分布特征及其影响因子

宋高飞<sup>1</sup>,张春梅<sup>1,2</sup>,朱宇轩<sup>1</sup>,张羽珩<sup>1,2</sup>,万栋<sup>1</sup>,刘洋<sup>3</sup>,毕永红<sup>1</sup>

(1.中国科学院淡水生态与生物技术国家重点实验室;水生生物研究所,武汉 430072;2.中国科学院大学,北京 100049;3.河南师范大学河南省丹江口水库水域生态系统野外科学观测研究站,河南 新乡 453007)

**摘要:**为探究南水北调中线干渠浮游植物群落沿线分布特征,于 2019 年夏季和冬季从源头的丹江口水库到干渠末端北京和天津开展原位调查,共鉴定浮游植物 7 门 76 属 128 种,其中硅藻 53 种,绿藻 46 种,蓝藻 16 种,隐藻、裸藻、甲藻、金藻较少。细胞密度变化范围为  $2.92 \times 10^5 \sim 2.78 \times 10^7 L^{-1}$ ,夏季细胞密度远高于冬季( $F=73.454, P=0.000$ ),以蓝藻和绿藻为主,冬季硅藻占优势;空间上丹江口水库 10 个样点与干渠 8 个样点细胞密度无显著差异( $F=0.093, P=0.763$ ), $\alpha$ 多样性分析显示,夏季的物种丰富度、Shannon-Wiener 指数和均匀性指数均高于冬季,且差异显著;但空间差异不显著。浮游植物群落在时间和空间上  $\beta$ 多样性差异显著(时间: $R=0.682, P=0.001$ ;空间: $R=0.497, P=0.001$ )。RDA 结果显示 TN、 $NO_3^- - N$ 、 $PO_4^{3-} - P$  是影响丹江口水库和干渠浮游植物群落组成的关键因子。

**关键词:**丹江口水库;中线干渠;浮游植物;群落结构

**中图分类号:**Q948.8

**文献标志码:**A

收稿日期:2023-03-27;修回日期:2023-05-16.

基金项目:国家重点研发计划资助(2021YFC3200900);国家自然科学基金(51609239);中国博士后科学基金面上基金(2016M602394)。

作者简介:宋高飞(1985—),女,河北邯郸人,中国科学院水生生物研究所实验师,博士,研究方向为水域生态学,E-mail: song@ihb.ac.cn.

通信作者:毕永红,E-mail:biyh@ihb.ac.cn.

南水北调工程作为目前世界上最大的跨流域水资源调配工程,是实现我国水资源优化配置、促进经济社会可持续发展、保障和改善民生的重大战略性基础工程<sup>[1]</sup>.南水北调中线干渠全长 1 432 km,横穿长江、淮河、黄河、海河四大流域,纵跨北亚热带、暖温带、温带三大气候带,自然条件差异巨大,以明渠为主,并建有隧洞、管道、暗涵和渡槽等工程设施,是一个全封闭的人工系统.全面通水以来,在水文水动力条件、营养盐含量等因素作用下,浮游生物群落结构处于动态演变的过程中,特定时段的特定类群快速增殖的现象频发,成为影响输水水质的潜在生态问题<sup>[2]</sup>.

浮游植物作为水生态系统中最主要的初级生产者和食物链的重要基础环节,是水环境变化最直接响应者,环境因子变化直接影响浮游植物丰度与群落结构的变化<sup>[3-5]</sup>.研究表明,浮游植物群落结构受到多种因子的共同调控,与营养盐、温度、光照、水动力等条件密切相关<sup>[6-8]</sup>.丹江口水库与中线干渠浮游植物群落组成已有一些报道<sup>[2,9-16]</sup>.自 1958 年至 2008 年,丹江口水库水体富营养化逐渐增加,浮游植物种类组成由硅藻-绿藻-蓝藻型逐渐发展为硅藻-甲藻-隐藻-蓝藻型<sup>[11]</sup>.一些研究发现丹江口水库于 2009 年至 2010 年已成为硅藻-蓝藻型水库<sup>[10]</sup>.已有研究多集中在不同年份丹江口水库环境因子、人类干扰活动对浮游植物群落组成的影响等方面<sup>[9-14]</sup>.而针对南水北调中线干渠浮游植物研究较少,目前仅有研究对其浮游植物群落特征、群落组装、时空格局及其决定因子进行了研究<sup>[2,15-16]</sup>.对南水北调中线从源头到输水末端的浮游植物群落分布特征的研究尚为空白.本研究通过开展中线沿线浮游植物群落与水体理化因子的同步调查,比较了源头和干渠两个区域的群落差异,探讨了浮游植物群落结构特征及其与水体理化因子的关系.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

于 2019 年 8 月(夏季)和 2019 年 12 月(冬季),分别对研究区域进行了采样调查.从丹江口水库沿中线干渠到北京惠南庄共设置 18 个采样点(图 1),丹江口水库的采样点命名为 S1~S10,干渠采样点命名为 G1~G8.

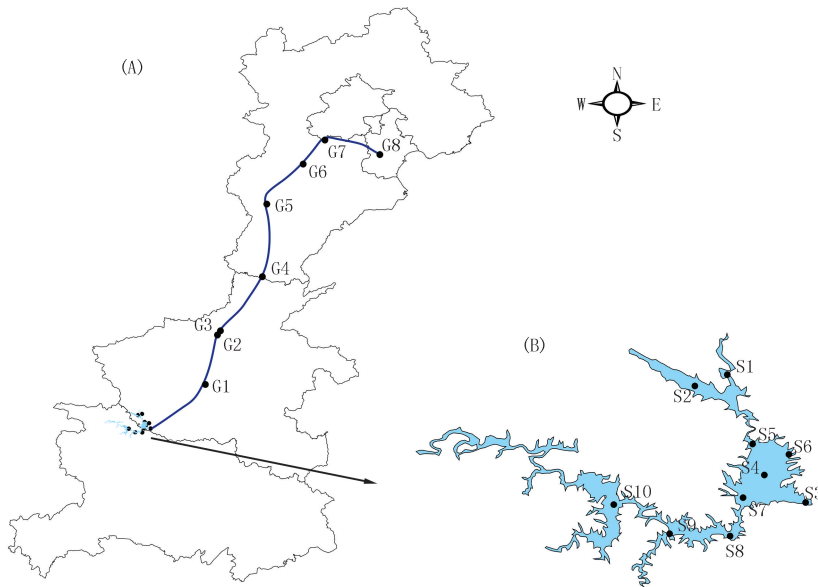


图1 丹江口水库及中线干渠采样点分布

Fig.1 Distribution of the sampling sites in Danjiang Reservoir and the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project (MRP)

### 1.2 水样采集与分析

现场使用 YSI Professional Plus 多参数仪(YSI, USA)测定水温(WT)、溶解氧(DO).采集表层水样测定总氮(TN)、总磷(TP)、铵盐( $\text{NH}_4^+$ -N)、硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ -N)、磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)、化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )和叶绿素  $a$ (Chl.  $a$ ),测定方法参考《水和废水监测分析方法(第四版)》进行测定<sup>[17]</sup>.总碳(TC)、无机碳(IC)、总有机碳

(TOC)则通过燃烧氧化-非分散红外吸收法利用 TOC 测定仪(Anlulikjena,multi N/C 3100)进行测定<sup>[18]</sup>.

### 1.3 浮游植物样品采集与分析

用 25 # 浮游生物网采集浮游植物定性样品,体积分数 4% 甲醛溶液固定.现场采集 1 L 水样装于塑料样品瓶,用于浮游植物的鉴定与定量计数,水样用鲁哥氏液(Lugol iodine solution)固定保存;静置 48 h,通过虹吸作用抽去多余的上清液,经沉淀后定容至 30 mL.充分震荡混匀,吸取 0.1 mL 滴到浮游植物计数框上,随后用显微镜(Olympus CX21, Japan)在放大倍数 400 倍下进行鉴定与计数,浮游植物鉴定参考文献[19-20],鉴定到种或属.

### 1.4 数据分析与统计

#### 1.4.1 多样性指数计算

采用物种丰富度(Taxa)、Shannon-Wiener 多样性指数(Shannon)、均匀性指数(Simpson)对浮游植物群落多样性进行分析评价,利用 Past version 2.17<sup>[21]</sup>计算各样本物种的多样性指数<sup>[22]</sup>.通过计算优势度确定优势种,优势度  $Y \geq 0.02$  即为优势种<sup>[23]</sup>.

#### 1.4.2 统计分析

在进行统计学分析前,除 pH 外其他理化因子及物种矩阵均经过  $\lg(x+1)$  转换及其标准化,在进行理化因子与物种的相关分析时,所有因子都进行了共线性检测.利用 Microsoft Excel、Spss statistics 17.0 和 Origin 2018 对浮游植物各类群密度数据进行了处理和制图.利用相似性分析(ANOSIM)对不同类群浮游动物群落结构进行差异显著性检验;利用变差分解分析(Variation partitioning analysis, VPA)对已筛选的理化因子和空间因子进行变差分解;利用 Canoco 4.5 软件对物种数据与理化因子数据进行去趋势对应分析(DCA)和冗余分析(RDA).其他统计分析和作图均在 R(version 3.6.2, <https://mirrors.tuna.tsinghua.edu.cn/CRAN/>)环境下完成,用到的程序包有 vegan、reshape2、ggplot2、tidyverse、corrplot、readxl、picante.

## 2 结 果

### 2.1 理化因子的季节和空间变化

南水北调中线各采样点理化因子比较见附表 I.单因素方差分析显示,在源头丹江口水库和干渠两个不同的区域,除  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  差异显著( $P < 0.05$ )外,其他因子均差异不显著( $P > 0.05$ );在季节上,除  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{N/P}$ 、 $\text{WT}$ 、 $\text{TOC}$  差异不显著( $P > 0.05$ )外,其他因子均差异显著( $P < 0.05$ ).在空间上,丹江口水库的  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  含量略高于中线干渠,其他理化因子无明显规律;在季节上,夏季多数采样点  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{TP}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{DO}$ 、 $\text{TC}$ 、 $\text{IC}$  含量低于冬季, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{Chl. } a$ 、 $\text{WT}$  则高于冬季,除  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  外,其他理化因子在夏季和冬季的变化趋势一致, $\text{WT}$  呈现从南到北逐渐递减的趋势.

源头丹江口水库理化因子的单因素方差分析显示,在空间上,各样点间理化因子差异均不显著;在季节上,除  $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{TOC}$  差异不显著外,其他理化因子均差异显著.中线干渠理化因子的单因素方差分析显示,在空间上,各个采样点理化因子的差异均不显著;在季节上,除  $\text{TP}$ 、 $\text{N/P}$ 、 $\text{Chl. } a$ 、 $\text{TOC}$  差异不显著外,其他理化因子均差异显著.

### 2.2 浮游植物群落组成

共鉴定浮游植物 7 门 76 属 128 种,硅藻种类最多,有 53 种,绿藻次之,为 46 种,蓝藻 16 种,隐藻、裸藻、甲藻、金藻较少(图 2).其中源头丹江口水库共鉴定浮游植物 79 种,绿藻种类最多,有 35 种,硅藻 21 种,蓝藻 13 种,隐藻、裸藻、甲藻、金藻共 10 种;干渠共鉴定 104 种,硅藻最多,有 46 种,绿藻 38 种,蓝藻 12 种,隐藻、裸藻、甲藻、金藻共 8 种.

细胞密度的变化范围为  $2.92 \times 10^5 \sim 2.78 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ ,夏季细胞密度远高于冬季.各采样位点夏季浮游植物细胞密度变化范围为  $6.34 \times 10^5 \sim 2.78 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ ,冬季为  $2.92 \times 10^5 \sim 2.63 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$ ,夏冬两季细胞密度差异显著( $F = 73.454, P = 0.000$ ).丹江口水库细胞密度变化范围为  $3.34 \times 10^5 \sim 2.78 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ ;夏季以蓝藻、绿藻、硅藻或蓝藻和绿藻共同占优势,冬季以硅藻和蓝藻占绝对优势.中线干渠细胞密度变化范围为  $2.92 \times 10^5 \sim 2.69 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ ;夏季以绿藻为主,个别样点蓝藻占优势,冬季以硅藻为主.丹江口水库与干渠细胞密度

无显著差异 ( $F=0.093, P=0.763$ ).

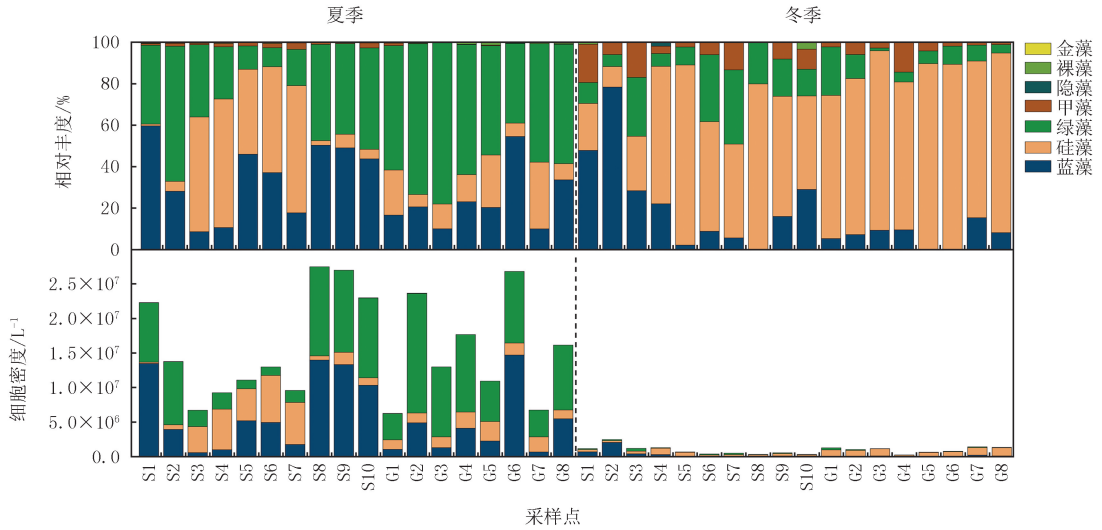


图2 南水北调中线浮游植物相对丰度和细胞密度

Fig.2 The relative abundance and cell density of phytoplankton at the phylum level in the MRP

南水北调中线夏季优势种主要集中在蓝藻、绿藻和硅藻,冬季优势种则集中在蓝藻、绿藻、硅藻和隐藻,隐藻仅在冬季成为优势种(附表 II).蓝藻优势种主要为微囊藻 *Microcystis* sp.、假鱼腥藻 *Pseudoanabaena* sp.、束丝藻 *Aphanizomenon* sp.;绿藻优势种主要为小球藻 *Chlorella* sp.、小空星藻 *Coelastrum microporum*、浮球藻 *Planktosphaeria gelatinosa*、单角盘星藻 *Pediastrum simplex*、衣藻 *Chlamydomonas* sp.、双对栅藻 *Scenedesmus bijuba*、栅藻 *Scenedesmus* sp.、游丝藻 *Planctonema* sp.;硅藻优势种主要为梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana*、克里特小环藻 *Cyclotella crecita*、颗粒直链藻 *Melosira granulata*、桥弯藻 *Cymbella* sp.、极小曲丝藻 *Achnantheidium minutissimum*、优美藻 *Delicata delicatula*、尖针杆藻 *Synedra acus*、肘状针杆藻 *Synedra ulna*;隐藻为斜结隐藻 *Plagioselmis* sp..

浮游植物  $\alpha$  多样性指数包括物种丰富度(Taxa)、Shannon-Wiener 指数(Shannon)和均匀性指数(Simpson),如图 3 所示,中线干渠沿程和源头丹江口水库物种数分别为 9~41 和 10~43,两区域物种丰富度差异不显著( $F=1.963, P=0.170$ );Shannon-Wiener 指数范围分别在 2.19~3.71 和 2.30~3.75 之间,干渠的 Shannon-Wiener 指数要略高于丹江口水库,但两区域差异不显著( $F=1.323, P=0.258$ );均匀度分别在 0.89~0.98 和 0.90~0.98 之间,两区域各样点的物种个体数分布差异不显著( $F=0.348, P=0.559$ ).在季节上,物种丰富度、Shannon-Wiener 指数和均匀性指数均为夏季高于冬季,且差异显著( $P<0.01$ ).

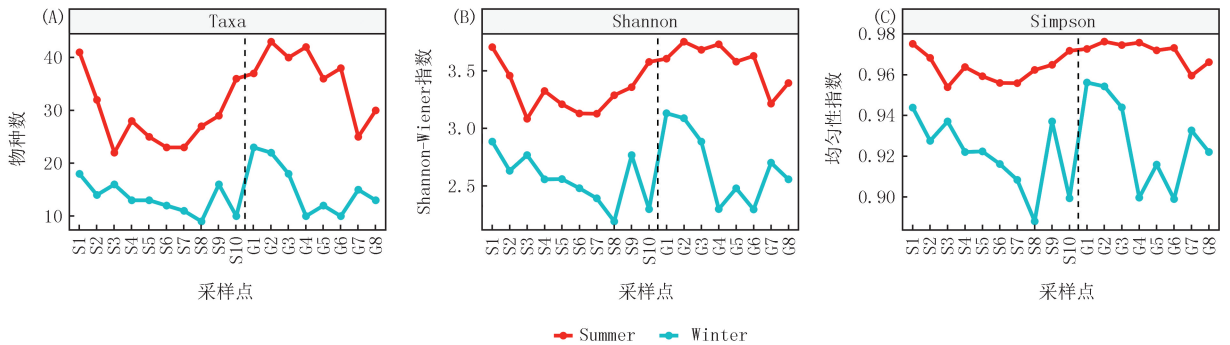


图3 南水北调中线浮游植物  $\alpha$  多样性指数

Fig.3 The alpha diversity indices of phytoplankton at the phylum level in the MRP

通过 Anosim 分析了南水北调中线源头丹江口水库和干渠不同区域和季节浮游植物的  $\beta$  多样性(图 4),结果显示两区域群落结构差异显著( $R=0.497, P=0.001$ ),不同季节群落结构差异同样显著( $R=0.682, P=0.001$ ).

## 2.4 浮游植物群落与理化因子的关系

VPA 结果显示,在夏季水体理化因子与空间变量对浮游植物群落结构的解释度分别为 12% 和 2%,共同解释度为 16%,未解释度为 70%;在冬季理化因子和空间变量对浮游植物的解释度分别为 13% 和 15%,共同解释度为 3%,未解释度为 69%(图 5)。

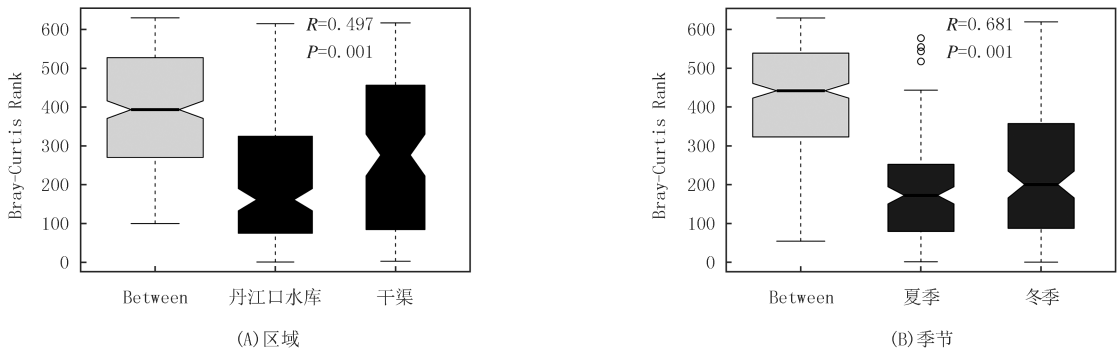


图4 浮游植物群落结构ANOSIM分析

Fig.4 Analysis of similarities(ANOSIM) of the phytoplankton community structure between the source Danjiangkou Reservoir

基于浮游植物细胞丰度 DCA 分析显示第一轴的长度为 3.076,表明使用 RDA 分析能够准确地研究限制性因子对丹江口水库及干渠浮游植物群落结构的影响(图 6)。根据蒙特卡洛前向选择方法,共筛选出 4 个环境变量用来解释浮游植物群落结构变异,包括 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、WT,共解释浮游植物群落结构 38.5% 的变异。在时间尺度上,夏季和冬季浮游植物的群落组成明显分开,其显著影响因子为 WT;在空间尺度上,丹江口水库和中线干渠也明显分成两个类群,其显著影响因子为 TN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、 $\text{NO}_3^-$ -N。

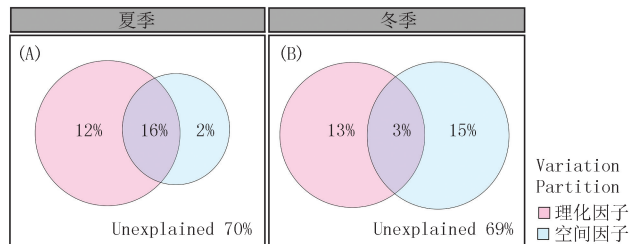


图5 南水北调中线浮游植物VPA分析

Fig.5 VPA of phytoplankton communities in the MRP

在空间尺度上,夏季和冬季浮游植物的群落组成明显分开,其显著影响因子为 WT;在空间尺度上,丹江口水库和中线干渠也明显分成两个类群,其显著影响因子为 TN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、 $\text{NO}_3^-$ -N。

## 3 讨论

浮游植物群落结构受其生物学特性、水温、营养盐含量等条件共同影响,外界条件的变化会打破原有的平衡,通过群落演替进而达到新的平衡<sup>[24]</sup>。南水北调中线源头丹江口水库浮游植物组成夏季为绿藻型,冬季为硅藻型;中线干渠浮游植物物种组成夏季为绿藻-硅藻型,冬季为硅藻型。南水北调中线干渠及源头丹江口水库各采样位点浮游植物群落组成显示季节性差异大于空间性差异,这一模式与目前关于丹江口水库及中线干渠的研究结果一致<sup>[2,9-16]</sup>。生态学代谢理论认为,生理耐受范围内更高的温度导致更高的代谢率、物种形成率和世代周转率<sup>[25]</sup>。由于浮游植物细胞的诸多代谢过程为酶促反应,其过程受酶活性的影响,而温度对酶活性具有决定作用,且不同物种在水温适应性上存在差异,导致优势类群随着水温变化而改变<sup>[26]</sup>。南水北调中线水温范围为 5.1~30.4 °C,夏季水温 30 °C 左右,冬季水温 10 °C 左右,由于蓝藻、绿藻较硅藻更适宜高温环境,所以夏季主要以适宜高温的微囊藻、小空星藻、栅藻等蓝、绿藻为主,当冬季温度变低时,则使得硅藻成为优势类群,主要以尖针杆藻、颗粒直链藻、优美藻、曲丝藻等为主。因此,水温影响和决定着不同季节丹江口水库及干渠浮游植物群落以及优势类群的演变。

同一季节丹江口水库和中线干渠群落  $\alpha$  多样性虽无显著差异,但  $\beta$  多样性却差异显著。这种现象与三峡水库和密西西比河中微生物的分布特征一致<sup>[27-28]</sup>。一般情况下,在较小的空间尺度,由于较小的传播限制,群落的差异可能是各物种丰度上的,而不是物种种类上的<sup>[29]</sup>。中线干渠流经四大流域,纵跨三个气候带,并建有多种工程设施,导致干渠不同样点的水环境具有一定差异。

除了温度,营养盐含量也会导致生物群落组成的重构<sup>[7,26]</sup>.本研究中 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 对两区域的浮游植物群落组成具有显著影响,丹江口水库浮游植物群落组成与 TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 具有显著正相关关系,中线干渠浮游植物组成与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量具有显著的正相关关系.营养物质是浮游植物生长繁殖所必需的,浮游植物通过大量吸收水体中 N、P 等营养物质使其迅速增殖.由于不同的物种和功能群在不同条件下对不同营养盐的选择性和吸收率不同,水体中营养盐含量会直接影响到水体浮游植物的生长和群落结构<sup>[24,30-32]</sup>.因此,不同的营养条件下会产生不同的优势物种和功能群,从而造成丹江口水库和中线干渠的浮游植物群落存在差异.

## 4 结 论

1) 丹江口水库浮游植物组成夏季为绿

藻型,冬季为硅藻型;中线干渠浮游植物物种组成夏季为绿藻-硅藻型,冬季为硅藻型.

2) 丹江口水库和中线干渠浮游植物的  $\alpha$  多样性差异不显著 ( $P > 0.05$ ),  $\beta$  多样性差异显著 ( $R = 0.497$ ,  $P = 0.001$ ).

3) TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 是影响两区域浮游植物群落组成的主要因素;WT 是影响夏冬两季浮游植物群落组成的主要因素.

## 附 录

附表 I、II 见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.04.003).

## 参 考 文 献

- [1] 唐剑锋,肖新宗,王英才,等.南水北调中线干渠生态系统结构与功能分析[J].中国环境科学,2020,40(12):5391-5402.  
TANG J F, XIAO X Z, WANG Y C, et al. Ecosystem structure and function of the main channel of the middle route of south-north water diversion project[J]. China Environmental Science, 2020, 40(12): 5391-5402.
- [2] 张春梅,朱宇轩,宋高飞,等.南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子[J].湖泊科学,2021,33(3):675-686.  
ZHANG C M, ZHU Y X, SONG G F, et al. Spatiotemporal pattern of phytoplankton community structure and its determining factors in the channel of the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 675-686.
- [3] HULYAL S B, KALI WAL B B. Dynamics of phytoplankton in relation to physico-chemical factors of Almatti reservoir of Bijapur District, Karnataka State[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 153(1/2/3/4): 45-59.
- [4] SCHAGERL M, BLOCH I, ANGELER D G, et al. The use of urban clay-pit ponds for human recreation: assessment of impacts on water quality and phytoplankton assemblages[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 165(1/2/3/4): 283-293.
- [5] 施军琼,何书哈,欧阳添,等.三峡库区支流花溪河浮游植物种间关联及影响因子分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(5): 110-116.  
SHI J Q, HE S H, OUYANG T, et al. Analysis of phytoplankton interspecific association and its influencing factor in Huaxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2022, 50(5): 110-116.
- [6] ZHANG M, SHI X L, YANG Z, et al. Long-term dynamics and drivers of phytoplankton biomass in eutrophic Lake Taihu[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 645: 876-886.
- [7] BECKER V, CAPUTO L, ORDÓÑEZ J, et al. Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir

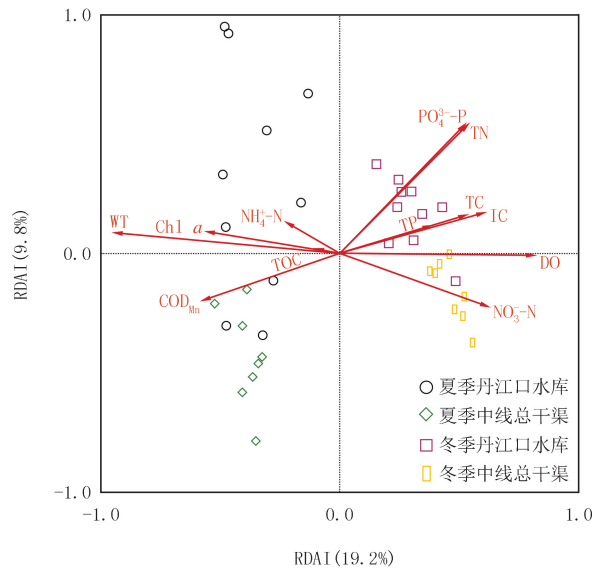


图6 浮游植物群落组成与理化因子的RDA排序图

Fig. 6 Biplot diagram for RDA of the relationship between phytoplankton communities and physics and chemistry index

- [J]. *Water Research*, 2010, 44(11): 3345-3354.
- [8] VOGT R, SHARMA S, LEAVITT P. Decadal regulation of phytoplankton abundance and water clarity in a large continental reservoir by climatic, hydrologic and trophic processes[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, 41(S2): 81-90.
- [9] 赵丽英, 张乃群, 杜瑞卿. 丹江口水库环境因子对浮游植物生长影响的综合相关系数分析[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(4): 128-132.
- ZHAO L Y, ZHANG N Q, DU R Q. Integrated correlation coefficient analysis of environmental factors of Danjiangkou Reservoir on growth of plankton[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2009, 37(4): 128-132.
- [10] 谭香, 夏小玲, 程晓莉, 等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. *环境科学*, 2011, 32(10): 2875-2882.
- TAN X, XIA X L, CHENG X L, et al. Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, 32(10): 2875-2882.
- [11] 申恒伦, 徐耀阳, 王岚, 等. 丹江口水库浮游植物时空动态及影响因素[J]. *植物科学学报*, 2011, 29(6): 683-690.
- SHEN H L, XU Y Y, WANG L, et al. Spatial and temporal variations of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir and its affecting factors[J]. *Plant Science Journal*, 2011, 29(6): 683-690.
- [12] 王英华, 陈雷, 牛远, 等. 丹江口水库浮游植物时空变化特征[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(5): 1057-1065.
- WANG Y H, CHEN L, NIU Y, et al. Spatio-temporal variation in phytoplankton community and its influencing factors in Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(5): 1057-1065.
- [13] 闫雪燕, 张黎, 李玉英, 等. 动态调水过程水文和理化因子共同驱动丹江口水库库湾浮游植物季节变化[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(5): 1350-1363.
- YAN X Y, ZHANG Y, LI Y Y, et al. Hydrologic and physicochemical factors co-drive seasonal changes of phytoplankton during dynamic water diversion processes in the Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(5): 1350-1363.
- [14] 肖玉娜, 程靖华, 莫晓聪, 等. 丹江口水库浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 821-832.
- XIAO Y N, CHENG J H, MO X C, et al. Spatio-temporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 821-832.
- [15] 张春梅, 米武娟, 许元钊, 等. 南水北调中线总干渠浮游植物群落特征及水环境评价[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(3): 47-54.
- ZHANG C M, MI W J, XU Y Z, et al. Phytoplankton community characteristics and water environment assessment in the main channel of the middle route of the south-to-north water diversion project[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(3): 47-54.
- [16] ZHANG C M, ZHU F X, WANG Y Z, et al. Assembly processes of eukaryotic plankton communities in the world's largest drinking water diversion project[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 163665.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 宋高飞, 朱宇轩, 米武娟, 等. 武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 135-142.
- SONG G F, ZHU Y X, MI W J, et al. Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2022, 50(3): 135-142.
- [19] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [20] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [21] HAMMER O, HARPER D A T, RYAN P D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis[J]. *Palaeontologia Electronica*, 2001, 4(1): 9.
- [22] 董雅欠, 赵文, 季世琛, 等. 北京潮白河水系浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(3): 424-431.
- DONG Y Q, ZHAO W, JI S C, et al. Community structure of zooplankton and water quality evaluation in Chaobai River system in Beijing[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2020, 35(3): 424-431.
- [23] 郝媛媛, 孙国钧, 张立勋, 等. 黑河流域浮游植物群落特征与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 121-130.
- HAO Y Y, SUN G J, ZHANG L X, et al. Relationship between community characteristics of the phytoplankton and environmental factors in Heihe River Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 121-130.
- [24] 张辉, 彭宇琼, 邹贤妮, 等. 新丰江水库浮游植物功能分组特征及其与环境因子的关系[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1): 380-392.
- ZHANG H, PENG Y Q, ZOU X N, et al. Characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Xinfengjiang Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(1): 380-392.
- [25] BROWN J H, GILLOOLY J F, ALLEN A P, et al. Toward a Metabolic Theory of Ecology[J]. *Ecology*, 2004, 85(7): 1771-1789.
- [26] FUHRMAN J A, CRAM J A, NEEDHAM D M. Marine microbial community dynamics and their ecological interpretation[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2015, 13(3): 133-146.
- [27] WANG S, HOU W, JIANG H, et al. Microbial diversity accumulates in a downstream direction in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 101: 156-167.
- [28] MASON O U, CANTER E J, GILLIES L E, et al. Mississippi River Plume Enriches Microbial Diversity in the Northern Gulf of Mexico[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1048.

- [29] MARTINY J B H, BOHANNAN B J M, BROWN J H, et al. Microbial biogeography: putting microorganisms on the map[J]. *Nature Reviews Microbiology*. 2006, 4(2): 102-112.
- [30] LI J, ZHANG J, HUANG W, et al. Comparative bioavailability of ammonium, nitrate, nitrite and urea to typically harmful cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*[J]. *Marine Pollution Bulletin*. 2016, 110(1): 93-98.
- [31] RENGFORNS K, PETTERSSON K, BLENCKNER T, et al. Species-specific alkaline phosphatase activity in freshwater spring phytoplankton: application of a novel method[J]. *Journal of Plankton Research*. 2001, 23(4): 435-443.
- [32] 张立香. 磷调控下九龙江北溪库区浮游植物群落演替研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- ZHANG L X. Succession of phytoplankton community in Beixi reservoir area of Jiulong River under phosphorus regulation[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2019.

## Distribution characteristics of phytoplankton communities and their influencing factors along the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

Song Gaofei<sup>1</sup>, Zhang Chunmei<sup>1,2</sup>, Zhu Yuxuan<sup>1</sup>, Zhang Yuheng<sup>1,2</sup>, Wan Dong<sup>1</sup>, Liu Yang<sup>3</sup>, Bi Yonghong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fresh Water Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Observation and Research Station on Water Ecosystem in Danjiangkou Reservoir of Henan Province, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** To study the community structure of phytoplankton along the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project(MRP), and the changes in phytoplankton species in the MRP, a field investigation was conducted from the source Danjiangkou Reservoir to the end of channel in Beijing and Tianjin during summer and winter 2019. Here we tracked the spatial-temporal variation in phytoplankton composition, abundance and diversity in the MRP. A total of 128 phytoplankton species were identified, including 53 species of Bacillariophyta, 46 species of Chlorophyta, and 16 species as Cyanophyta. The cell density of phytoplankton in the MRP varied from  $2.92 \times 10^5$  to  $2.78 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ , with a higher density in summer than in winter ( $F=73.454$ ,  $P=0.000$ ). In summer, Cyanophyta and Chlorophyta were dominant, while in winter, Bacillariophyta were dominant. There was no significant difference in cell density between the source Danjiangkou Reservoir and the channel ( $F=0.093$ ,  $P=0.763$ ). Cyanophyta, Chlorophyta and Bacillariophyta dominated the Danjiangkou Reservoir, while Chlorophyta and Bacillariophyta dominated the channel. The  $\alpha$  diversity analysis showed that species richness, Shannon-Wiener index and Evenness index were higher in summer than in winter, and the difference was significant, but there was no significant difference between the two regions spatially. The  $\beta$  diversity analysis showed that the phytoplankton community was significantly different temporally and spatially (temporal:  $R=0.682$ ,  $P=0.001$ ; spatial:  $R=0.497$ ,  $P=0.001$ ). The redundancy analysis showed that TN,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$  were the key factors explaining the differences in phytoplankton community structure between the two regions.

**Keywords:** Danjiangkou Reservoir; the MRP; phytoplankton; community structure

[责任编辑 赵晓华 杨浦]



附表 I 南水北调中线理化因子状况

Attached Tab. I Means(minimum-maximum)of physics and chemistry index in the MRP

	平均值	最大值	最小值	南水北调中线		源头丹江口水库		干渠	
				区域	季节	样点	季节	样点	季节
TN/(mg · L <sup>-1</sup> )	1.030	1.726	0.645	0.071	<b>0.001</b>	0.409	0.059	0.933	<b>0.000</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.812	1.309	0.066	0.683	<b>0.000</b>	0.716	<b>0.000</b>	0.984	<b>0.000</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.040	0.095	0.001	0.446	0.500	0.539	0.823	0.992	<b>0.000</b>
TP/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.019	0.059	0.008	0.218	<b>0.008</b>	0.661	<b>0.011</b>	0.524	0.111
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.014	0.032	0.001	<b>0.000</b>	<b>0.001</b>	0.967	<b>0.001</b>	0.829	<b>0.000</b>
N/P	63.591	159.210	23.588	0.364	0.201	0.451	<b>0.023</b>	0.526	0.127
COD <sub>Mn</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	2.593	4.750	0.826	<b>0.028</b>	<b>0.000</b>	0.999	<b>0.000</b>	0.856	<b>0.005</b>
Chl <i>a</i> /(μg · L <sup>-1</sup> )	5.790	26.695	1.333	0.918	<b>0.018</b>	0.777	<b>0.006</b>	0.243	0.981
WT/°C	19.067	30.400	5.100	0.292	0.201	1.000	<b>0.000</b>	1.000	<b>0.000</b>
DO/(mg · L <sup>-1</sup> )	8.047	13.030	5.600	0.145	<b>0.000</b>	0.999	<b>0.000</b>	0.983	<b>0.000</b>
TC/(mg · L <sup>-1</sup> )	29.611	65.730	18.200	0.982	<b>0.000</b>	0.261	<b>0.036</b>	0.827	<b>0.001</b>
IC/(mg · L <sup>-1</sup> )	27.568	54.320	17.030	0.911	<b>0.000</b>	0.333	<b>0.013</b>	0.859	<b>0.001</b>
TOC/(mg · L <sup>-1</sup> )	2.043	12.020	0.007	0.123	0.318	0.200	0.408	0.075	0.474

注:加粗字体表示差异显著( $P < 0.05$ ).

附表 II 南水北调中线浮游植物优势种及优势度  
Attached Tab. II Dominant species of phytoplankton in the MRP

门	属种	拉丁名	优势度			
			丹江口水库夏季	丹江口水库冬季	干渠夏季	干渠冬季
蓝藻	微囊藻	<i>Microcystis</i> sp.	0.233	0.104	0.116	0.026
	假鱼腥藻	<i>Pseudoanabaena</i> sp.	—	—	0.054	—
	束丝藻	<i>Aphanizomenon</i> sp.	0.034	0.059	—	—
绿藻	小球藻	<i>Chlorella</i> sp.	—	0.029	—	—
	小空星藻	<i>Coelastrum microporum</i>	—	—	0.172	—
	浮球藻	<i>Planktosphaeria gelatinosa</i>	0.022	—	—	—
	单角盘星藻	<i>Pediastrum simplex</i>	—	—	0.026	—
	衣藻	<i>Chlamydomonas</i> sp.	—	—	0.036	—
	双对栅藻	<i>Scenedesmus bijuba</i>	0.147	—	—	—
	栅藻	<i>Scenedesmus</i> sp.	—	0.051	0.111	0.024
	游丝藻	<i>Planctonema</i> sp.	0.023	—	—	—
硅藻	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.113	0.04	0.045	0.05
	克里特小环藻	<i>Cyclotella crecita</i>	0.026	0.052	0.028	0.039
	颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>	—	0.158	—	—
	桥弯藻	<i>Cymbella</i> sp.	—	—	0.023	—
	极小曲丝藻	<i>Achnantheidium minutissimum</i>	—	—	—	0.098
	优美藻	<i>Delicata delicatula</i>	—	—	—	0.142
	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>	—	—	—	0.129
	肘状杆藻	<i>Synedra ulna</i>	—	—	—	0.037
隐藻	斜结隐藻	<i>Plagioselmis</i> sp.	—	0.039	—	0.03

注：“—”表示优势度  $Y < 0.02$ .

## 本期优秀校友、专家介绍



江玉海,上海科技大学教授,博士生导师,博士毕业于德国柏林自由大学物理系,先后在德国海德堡马普核物理研究所做博士后、项目主持人(PI),先后应聘为中国科学院上海高等研究院研究员,中国科学院大学岗位教授,中国原子分子专业委员会委员.1992年/1995年本科/硕士毕业于河南师范大学物理系,从事飞秒红外、自由电子激光在原子分子以及纳米材料中应用的实验和理论研究,发表论文150余篇.是世界上第一批利用自由电子激光研究原子分子超快过程的实验专家,成功研制了冷原子显微反应成像谱仪,以及太赫兹泵浦探测等科学研究平台,提供一系列探索原子分子与纳米材料物理机制和化学反应的手段.主持国家重大基础设施建设自由电子激光束线专项 AMO 实验站建设、科技部重点研发课题、基金委重大仪器、基金委重点国际合作、中国科学院仪器装备、上海市科委重大科技攻关等国家和省部级项目20多项.

常钦,河南省特聘教授,博士生导师,教育部长江学者奖励计划—青年长江学者,全国百篇优秀博士学位论文奖获得者,全国优秀教师,河南省优秀青年科技专家,河南省五四青年奖章获得者,河南省高校科技创新人才,河南省高校科技创新团队带头人,中原青年拔尖人才,全国高能物理学会常务理事.2003年,本科毕业于河南师范大学物理与信息工程学院,现任职于河南师范大学物理学院,曾在美国斯坦福大学 SLAC 国家实验室从事访问学者研究工作.主要从事高能物理、粒子物理理论研究,具体研究方向包括:重味物理、新物理唯象、微扰和非微扰 QCD 计算、光前量子化、光前全息 QCD 等.先后主持国家自然科学基金项目5项,全国百优博士学位论文作者专项、河南省高校科技创新团队、教育部博士点专项、河南省高校科技创新人才资助计划、“中原千人计划”—中原青年拔尖人才、河南省自然科学基金—杰出青年项目等省部级项目8项.近年来,在 *Journal of High Energy Physics*, *Phys Rev D*, *Phys Lett B*, *Eur Phys J C*, *Nucl Phys B*, *J Phys G* 等国际知名学术期刊发表 SCI 论文70余篇,被引用1000余次,其中被国际高能物理实验组的实验报告引用70余次.



毕永红,中国科学院水生生物研究所研究员,博士,博士生导师,藻类生态学学科带头人,藻类生物学及应用研究中心主任.1998年本科毕业于华中农业大学,2001年硕士毕业于上海海洋大学,2004年在中国科学院水生生物研究所获博士学位.2009年至2010年在德国环境健康研究中心开展为期2年的访学.研究方向为水域生态学、藻类生理生态学.主持和承担国家自然科学基金、国家重点研发计划课题等项目40余项,发表研究论文160余篇,其中SCI论文70余篇,获得国家授权发明专利10件,出版专著1部,参编(译)专著3部.目前兼任中国藻类学会副秘书长、中国海洋湖沼学会湖泊分会常务理事、水产学会生物饵料专委会委员、水利学会生态水利工程专委会委员、国家知识产权局中国专利审查技术专家,曾入选南京市321人才计划.担任《水生生物学报》,《湖泊科学》,《生态学杂志》, *Water biology & security*, *Frontiers*, *Water*, *Scientific Reports*, *Vegetos* 等国内外期刊编委.