

DOI: 10.20103/j.stxb.202407061582

范家贞, 张陶, 蒲俊兵. 水位变动背景下三峡库区内、外水体新陈代谢过程及其对环境变化的响应. 生态学报, 2025, 45(15): 7202-7219.

Fan J Z, Zhang T, Pu J B. Metabolic processes and environmental responses of water bodies outside and inside the Three Gorges Reservoir Area under water level fluctuations. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(15): 7202-7219.

水位变动背景下三峡库区内、外水体新陈代谢过程及其对环境变化的响应

范家贞^{1,2}, 张陶^{1,2}, 蒲俊兵^{1,2,*}

1 重庆师范大学山区生态系统碳循环与碳调控重庆市重点实验室, 重庆 401331

2 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

摘要: 三峡水库水位的反季节变化使流域水环境发生巨大改变。为探究水位变动背景下的水体新陈代谢过程对水环境变化的响应及相关水体碳吸收与碳排放情况, 选取三峡库区干流上, 受水库不同蓄水程度影响的两个库内断面(寸滩(受水库高水位影响, 处于变动回水区)、晒网坝(常年受库区蓄水影响))及未受蓄水影响的库外断面(朱沱(自然河流))进行对比研究。根据各断面 2023 年相关水文水化学高频率监测数据, 基于单站明渠法计算水体新陈代谢量, 并利用分子扩散模型计算水体碳通量, 同时使用随机森林模型对影响净初级生产力(NEP)的环境因子进行重要度排序。结果表明:①水体初级生产力(GPP)为寸滩>朱沱>晒网坝断面, 而呼吸效率(ER)为晒网坝>朱沱>寸滩断面。受库区蓄水影响, 晒网坝断面在三个断面中光合效率最小, 而呼吸效率最大;②驱动各断面 NEP 变化的环境因子相似, 其中溶解氧(DO)、水温、水体二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)、光合有效辐射(PAR)和 pH 为主要贡献因子;③晒网坝断面水位与 NEP 变化无明显相关规律, 朱沱断面水位与 NEP 变化为相反趋势, 寸滩断面在汛期与蓄水初期水位与 NEP 变化为相反趋势, 而在蓄水末期、高水位期及消落初期无明显规律;④寸滩断面在春季为自养系统, 碳汇效应显著, 在其余季节为异养系统;朱沱与晒网坝断面在各季节都为净异养生态系统, 碳源效应显著。上述研究成果有助于揭示大型水库水位变动驱动的水环境和碳循环变化机制, 对水库水环境保护和碳循环过程揭示具有重要的意义。

关键词: 水体新陈代谢过程; 水体 CO_2 ; 水位变动; 环境影响; 三峡水库

Metabolic processes and environmental responses of water bodies outside and inside the Three Gorges Reservoir Area under water level fluctuations

FAN Jiazhen^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, PU Junbing^{1,2,*}

1 Chongqing Key Laboratory of Carbon Cycle and Carbon Regulation of Mountain Ecosystems, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

2 School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

Abstract: Anti-seasonal variations in water levels in the Three Gorges (TG) Reservoir have led to significant changes in the reservoir's hydrological environment. To explore the response of water metabolic processes in the reservoir under different water level fluctuation scenarios, their responses to environmental changes, and the carbon sequestration and emission in the water body, this study selected two transects (Cuntan transect and Shaiwangba transect) located within the TG reservoir, which are affected by different impounding degrees, and one transect (Zhutuo transect), located outside the TG reservoir, which is unaffected by impounding processes, along the main stream for comparison research. The Cuntan transect is located in a fluctuating backwater area and is affected by high water-level scenarios from the TG reservoir. The

基金项目: 国家高层次人才特殊支持计划青年拔尖人才计划项目(2022); 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-LZX0022, CSTB2022NSCQ-MSX0619); 国家自然科学基金项目(42377081)

收稿日期: 2024-07-06; 网络出版日期: 2025-06-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: junbingpu@163.com

Shaiwangba transect is affected by water storage from the TG reservoir year-round. The Zhutuo transect is a natural river transect. Based on high-frequency monitoring of hydrological and hydrochemical data collected in 2023, water metabolism was calculated using the single-station open channel method. A molecular diffusion model was employed to estimate carbon flux in the water body. Additionally, a random forest model was applied to rank the environmental factors influencing net ecosystem production (NEP) according to their importance. The results showed: ① Gross primary productivity (GPP) was the highest at Cuntan, followed by Zhutuo and Shaiwangba, while respiration (ER) was the highest at Shaiwangba, followed by Zhutuo and Cuntan. Due to reservoir impoundment, the Shaiwangba transect exhibited the lowest photosynthetic efficiency and the highest respiratory efficiency among the three transects. ② The environmental factors driving NEP changes at each transect were similar, with dissolved oxygen (DO), water temperature, partial pressure of carbon dioxide (pCO_2), photosynthetically active radiation (PAR) and pH being the primary contributing factors. ③ There was no clear correlation between water level and NEP changes at the Shaiwangba transect. The Zhutuo transect showed an opposite trend between the water level and NEP. The Cuntan transect exhibited an inverse trend between water level and NEP during the flood season and the initial impoundment phase, while it was no clear pattern during the later stages of impoundment, high water levels, and drawdown periods. ④ The Cuntan transect was autotrophic system in the spring season, exhibiting a significant carbon sink effect, and was heterotrophic system in other seasons, showing a significant carbon source effect. Both Zhutuo and Shaiwangba transects were heterotrophic systems throughout all seasons, with a prominent carbon source effect. These findings contribute to understanding the mechanisms of the water environment and carbon cycle changes driven by water level fluctuations in large reservoirs and are of significant importance for water environment protection and carbon cycle process research in reservoirs.

Key Words: aquatic metabolism processes; water body CO_2 ; water level fluctuations; environmental drivers; Three Gorges Reservoir

生态系统新陈代谢是指发生在生态系统中所有物理化学反应的总和,在水生生态系统中直观体现为水体中溶解氧(DO)和 CO_2 周期性产生和消耗^[1],能够衡量水体中有机碳的积累与消耗^[2]、反映系统的生态响应^[3]。通常以水体中的总初级生产力(Gross primary production, GPP)和生态系统呼吸作用(Ecosystem respiration, ER)量化表示,GPP与 ER 达到代谢平衡时($GPP-ER=NEP$)即为净生态系统生产量(Net ecosystem production, NEP)。NEP代表了水生系统将无机碳转化为有机碳的能力,当水体的初级生产水平较高($NEP>0$)时,水生系统产生更多的DO并大量消耗水中的 CO_2 ,可在水-气界面形成 CO_2 浓度差,使大气中的 CO_2 进入水中,表现为“碳汇”^[2],而当水体初级生产水平较低($NEP<0$)时,水中 CO_2 的消耗降低,但呼吸代谢又持续产生 CO_2 ,使水中 CO_2 不断向大气排放,形成“碳源”^[4]。受到自身特点和外源输入的共同影响,水体代谢过程对许多环境压力源都高度敏感,如水体营养状况、光照强度、水位和流量等^[5-6]。因此,掌握环境因子如何驱动和影响水生系统新陈代谢过程对评价水体功能及生态系统健康、了解区域甚至全球碳循环过程都具有十分重要的意义^[7]。

内陆水体是连接大气、陆地和海洋的重要纽带,Cole等^[8]曾保守估计全球内陆水体向大气中排放的 CO_2 约为750 Tg C/a,其中浮游植物初级生产力占到全球的50%^[9],在生态系统新陈代谢中占重要地位。水库约占内陆水体的8.14%^[10],其中 CO_2 排放量大约为272.7 Tg C/a^[11],作为内陆水体的重要组成部分,其发电、防洪、航运等功能的运行均会影响水体新陈代谢过程的变化。水库水生环境(如水文条件等)与自然河流相比存在较大差异^[12],如水库水位变动会影响垂直方向的物质转移,并通过水位周期性上升下降来接收陆地景观中的有机质和营养物质^[13],从而影响水体中的新陈代谢作用。除此之外,水库水体滞留时间长、更新缓慢,易富营养化等各种问题也会导致水库中的代谢特征与自然河流存在差异。但是当前大多数水体新陈代谢研究仍然更侧重于湖泊、河流或者河口,对水库水体新陈代谢过程研究较少,部分对水库的研究也多集中于小型水

库的垂向变化特征上^[14],对大型水库水位大幅度变动背景下水体新陈代谢过程其时空差异的研究较少。

三峡水库作为世界上最大的水库,具有重要的战略地位。拦河筑坝使得库区内河流水位抬升,河流型生态系统演变为水库型生态系统,改变了原有的水文环境及水动力条件^[15]。探究水库水位变动情况能够了解水体中的水动力演化及水环境变化特征,而揭示库区水体新陈代谢过程能够反映水库水环境的变化及对相关元素循环过程的影响^[4],因此在库区研究中将水位与新陈代谢过程结合起来,能够较全面的分析库区水环境变化。基于此,本研究选择三峡水库库区内外受水库水位变动影响程度不同的三个干流监测断面为研究对象(朱沱、寸滩和晒网坝),研究水位变动背景下库内、库外水体新陈代谢过程、时空差异及如何影响表层水体碳排放这一科学问题。对前述问题的研究,有助于为三峡库区的水体生态环境保护提供基础数据,为水库水生生态安全和保护等相关研究提供参考和借鉴,并能够为流域碳收支准确评估提供进一步的科学认识。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区是指受三峡工程淹没影响的地区^[16],为长江上游流域的下段部分,位于重庆市与湖北省的交汇处,是四川盆地与长江中下游平原的结合地带。库区内地貌复杂、地形起伏大,主要以山地和丘陵为主,河网密布、水系发达。根据库区自然特性和水文网展布,将其分为库首、库腹及库尾三部分,其中库首包括湖北省巴东县至三峡大坝前,库腹包括重庆市涪陵区至巫山县,库尾包括重庆市江津区至长寿区。三峡库区长江干流全长约 660km,按回水区对库区进行划分:涪陵至坝址河段属于常年回水区(从大坝前缘到 145 m 水位水面线的回水末端),长约 487 km;江津至涪陵河段属于变动回水区(常年回水区末端至水库的终点称变动回水区),长约 173 km^[17]。

三峡库区属于亚热带湿润季风气候,受气候影响,河流水位、流量及水体周边环境等都存在较大季节变化。夏季为库区河流的汛期(5—9月),而在春、秋冬季(10—次年4月)为非汛期^[18],因此按汛期非汛期的差异及水库运行特征,将水库运行周期划分为四个阶段:①排水期(3月—5月)、②低水位期(6月—8月)、③蓄水期(9月—10月)、④高水位期(11月—次年2月)^[19]。建库后年内水位变幅不超过 30m,比建库蓄水前水位变幅小^[20]。

基于此,本研究在三峡库区内的常年回水区河段、变动回水区河段及自然河段中,分别选择晒网坝、寸滩及朱沱三个常规水文监测断面开展研究(见图 1),其基本信息见表 1。三个断面属于国家水文测验标准断面,其中朱沱断面位于四川省与重庆市交界附近,是长江进入库区前的最后一个监测站,能够反映上游干流入库水体情况;寸滩断面位于嘉陵江与长江汇合口下游约 7.5km 处,受上游洪水及库区蓄水的综合影响,在不同时期表现为不同的河流性质;晒网坝断面位于库腹人口密集城市,能够充分反映库区蓄水影响下的水环境状况,具有代表性。此外基于监测数据的完整性,选择了 2023 年数据进行分析。2023 年重庆市人民政府网公告汛期结束时间为 10 月 20 日,因此在本研究中将汛期扩展为 5—10 月。

表 1 监测站点基本信息

Table 1 Basic information on monitoring sites

站点名称 Site name	地点信息 Site information	所属河流 River	库区位置 Location in the reservoir	备注 Note
晒网坝	重庆市万州区	长江	库腹	常年受库区蓄水影响
寸滩	重庆市江北区	长江	库尾	受库区高水位影响
朱沱	重庆市永川区	长江	库外	不受库区蓄水影响

1.2 数据来源

水体理化参数能够反映水质情况以及水体物理化学特性,对驱动水生生物的新陈代谢活动及其碳循环过程具有重要作用。本研究中水环境参数来源于中国环境监测总站(<https://www.cnemc.cn/>),监测频次为 4 小

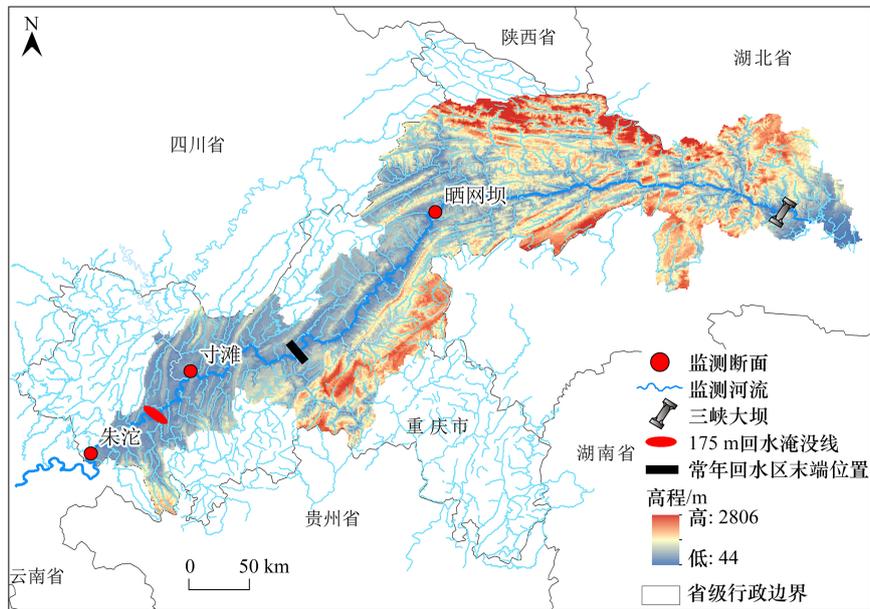


图1 研究区概况图

Fig.1 Study area

时一次,结合中国环境监测总站现有监测指标以及各参数的不同性质,选择水温(WT)、 pH 、 DO 、电导率(EC)、浊度(Tb)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)及总氮(TN)8个指标,另外再通过计算得到水体 HCO_3^- 离子浓度,以及 CO_2 分压(pCO_2)和 CO_2 交换通量($Flux$)指标数据。

气象参数既能直接影响水体新陈代谢,也能通过影响水体理化参数间接影响水体代谢,对于驱动代谢变化也具有重要影响。本研究中的气象数据主要来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),主要选择风速($Wind$)、降雨量($PRCP$)、相对湿度(RH)及气压(P)4项具有代表性指标,另外通过太阳辐射数据计算得到光合有效辐射(PAR)数据。

水位变化通常在库区内具有洪水预警、蓄排水管理等指示作用,驱动着水环境的变化。本研究的水位(WL)数据来源于全国水雨情信息发布平台(http://xxfb.mwr.cn/sq_dtex.html),监测时间为每日8点及14点各一次。

1.3 研究方法

1.3.1 水体新陈代谢计算

新陈代谢可以通过跟踪水生生态系统中氧气的产生和消耗速度来估计^[21]。根据单一的氧浓度曲线、气体传输速度等指标^[1],本研究基于单站明渠法使用 DO 浓度变化来估计河流、水库的净生产力,公式如下:

$$\frac{dC}{dt} = GPP - ER + F + A = NEP + F + A \quad (1)$$

式中, GPP 、 ER 与 NEP 单位均为($mg L^{-1} h^{-1}$); $\frac{dC}{dt}$ 是 DO 浓度随时间的变化率($mg L^{-1} h^{-1}$),由 NEP 以及 O_2 与大气扩散交换两个过程决定的; A 表示地下水的补给,通常在研究中忽略这部分; F 为一定时期内的 O_2 气体交换通量($mg L^{-1} h^{-1}$),通常可以是正值(水体中进入 O_2)或负值(水体中脱去 O_2),其计算公式为:

$$F = K(C_s - C) \quad (2)$$

式中, C 为溶解氧实测浓度, C_s 为给定温度下的饱和 DO 浓度, $C_s - C$ 为氧亏浓度, K 为给定温度下的 O_2 与大气交换系数(cm/h),由相关施密特系数(Sc)计算得出,其计算公式为:

$$K = K_{600} \times \left(\frac{S_c}{600} \right)^{-n} \quad (3)$$

$$K_{600} = 2.07 + (0.215 \times U_{10}^{1.7}) \quad (4)$$

式中, K_{600} 为假设水汽界面为稳定边界层时; U_{10} 水面上 10m 处的风速 (m/s), 当 $U_{10} < 3.7$ m/s 时, $n = 2/3$, 当 $U_{10} > 3.7$ m/s 时, $n = 1/2$ 。

其中饱和 DO 浓度 (C_s) 是根据监测时的温度计算得到, 其计算公式^[22] 为:

$$\ln C_s = -139 \cdot 34411 + (1.575701 \times 10^5 / T) - (6.642308 \times 10^7 / T^2) + (1.243800 \times 10^{10} / T^3) - (8.621949 \times 10^{11} / T^4) \quad (5)$$

式中, T 为开尔文温度 (K)。

白天在光照条件下, 光合作用、呼吸作用和大气复氧作用不断进行, 到夜间光合作用停止, 呼吸作用和复氧作用继续, 使得夜晚 GPP 几乎为 0, 因此根据白天观测的 NEP 值能够估计夜间的 ER_{night} 值:

$$\frac{dC}{dt} = K(C_s - C) + ER_{\text{night}} \quad (6)$$

其中白天的 ER_{day} 根据夜间的 ER_{night} 计算得到, 其公式为:

$$ER_{\text{day}} = ER_{\text{night}} \times (1.072^{T_i - T_{\text{night}}}) \quad (7)$$

其中 T_i 为实测温度, T_{night} 为每日夜间平均温度。

估算 GPP 公式为:

$$GPP = NEP + ER_{\text{day}} + ER_{\text{night}} \quad (8)$$

1.3.2 新陈代谢异常值消除

基于单站明渠法进行代谢计算主要有 3 个前提假设^[23]: ①一是在监测断面的水体混合良好, 监测器能够检测到整个水生系统中的 DO 变化。②二是在开放水域中的 DO 变化主要受生物代谢的影响, 其中的物理和化学过程干扰较小。如果在水域中的物理和化学过程对 DO 的影响远大于生物过程, 那么使用该方法时会导致 GPP 与 ER 出现负值, 在分析中将其视为无效值^[24]。③三是流经检测器探头的水流是匀速的。因此在上述三种情况下, 本研究排除了代谢异常估计值。

1.3.3 水-气界面 CO_2 脱气通量计算

使用分子扩散模型计算水-气界面 CO_2 交换通量 (正为释放、负为吸收), 其公式为^[25]:

$$\text{Flux} = k \times (C_{\text{water}} - C_{\text{air}}) \quad (9)$$

式中, Flux 为温室气体 CO_2 扩散通量 ($\text{mmol m}^{-2} \text{h}^{-1}$), k 为 CO_2 气体交换系数 (cm/h), C_{water} 为气体在水中的浓度 (mmol/L); C_{air} 为在给定温度下的 CO_2 饱和浓度 (mmol/L)。参考长江流域的相关研究, 本研究取大气 CO_2 浓度 390.5 mg/L。

使用淡水温度的相关施密特数对于交换系数 k 进行估算, 其公式为^[26]:

$$k = k_{600} \times (Sc_T / 600)^{-0.5} \quad (10)$$

$$Sc_T = 19.11.1 - 118.11T + 3.4527 T^2 - 0.04132 T^3 \quad (11)$$

式中, Sc_T 为给定温度 T ($^{\circ}\text{C}$) 下 CO_2 的施密特常数, k_{600} 为 20 $^{\circ}\text{C}$ 淡水中 CO_2 的交换系数 k (cm/h), 其公式为:

$$k_{600} = 4.46 + 7.11 \times U_{10} \quad (12)$$

2 结果与分析

2.1 各断面水位变化特征

受库区蓄水影响程度不同, 晒网坝、寸滩和朱沱断面的水位变化存在较大差异, 其中晒网坝与朱沱的水位变化呈相反的趋势 (图 2)。晒网坝全年受库区蓄水影响, 水位在 150—175.5m 之间变动, 表现为夏季低、冬季高的特征, 季节水位变幅较大。朱沱位于库外, 不受库区蓄水影响, 水位在 196.73—204.38m 之间变化, 表现

为夏季高、冬季低, 季节水位变幅相对较小。寸滩位于库尾的变动回水区, 在库区低水位时期表现为自然河流, 而在高水位时期体现出水库性质, 水位在 159.23—175.75m 之间变化, 其平均值在夏、冬季相似, 且变幅在晒网坝与朱沱之间。

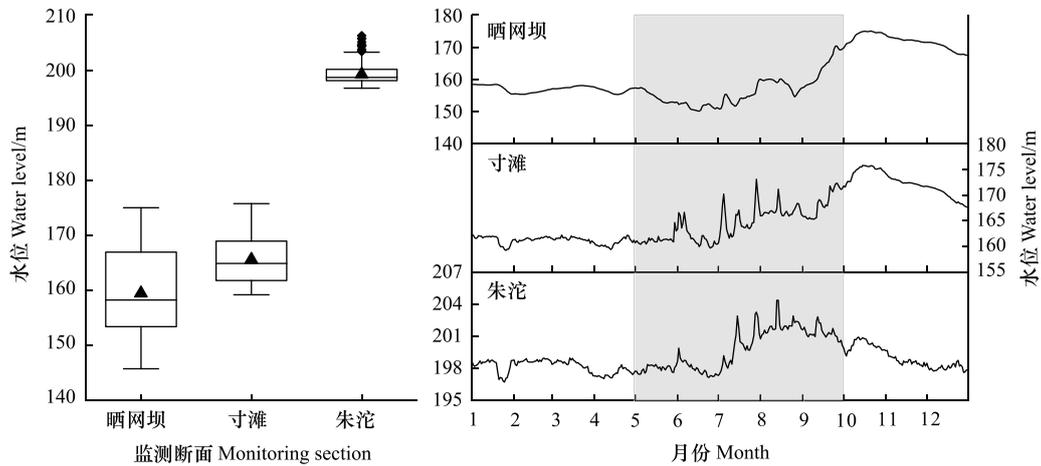


图 2 水位变化图

Fig.2 Water level changes

灰色背景为汛期

2.2 各断面水体新陈代谢变化特征

基于单站明渠法的三个前提假设, 在研究中去除了 $GPP < 0$ 以及 $ER > 0$ 的异常值, 即 GPP 为正值, 值越大初级生产力越强, ER 为负值, 值越小呼吸作用越强。三个断面的年变化范围及年均值见表 2, 变化趋势见图 3。对比发现各断面水体代谢存在较大差异, 其中晒网坝断面 GPP 在一年中出现一个峰值, 即 3 月份之后持续上升, 到夏季 7、8 月份到达一年中的最高值, 其次是春季 > 秋季 > 冬季, 这与朱永锋等^[27] 对库区香溪河的研究结果一致; 而朱沱断面 GPP 出现 4 个峰值, 主要分布在春季 3 至 4 月份、夏季 6 月 (缺 8 月数据)、秋季 11 月与冬季 1 月, 表现为夏季 > 春季 > 冬季 > 秋季, 与熊倩等^[28] 对三峡库区干流初级生产力的季节变化研究结果一致; 寸滩断面则出现 2 个峰值, 分别是春季 3 至 4 月、夏季 5 至 6 月, 整体上表现为春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季。 ER 在晒网坝与寸滩断面的季节变化趋势与 GPP 一致, 在晒网坝出现单一谷值, 在寸滩出现两个谷值。而在朱沱断面, ER 在春夏两季分别出现两次谷值, 而后在冬季出现持续相对低值。

表 2 各断面 GPP 、 ER 、 NEP 年变化范围及年均值

Table 2 Annual variation range and mean values of GPP , ER , and NEP at each transect

	晒网坝	寸滩	朱沱
总初级生产力 GPP	0.00—0.88 ^a	0.00—5.95	0.00—1.62
Gross primary production/($mg L^{-1} h^{-1}$)	(0.06) ^b [0.12] ^c	(0.23) [0.60]	(0.11) [0.20]
呼吸作用 ER	-2.35—0.00	-1.60—0.00	-1.24—0.00
Ecosystem respiration/($mg L^{-1} h^{-1}$)	(-0.67) [0.39]	(-0.31) [0.18]	(-0.40) [0.23]
净生态系统生产力 NEP	-2.23—0.67	-1.60—5.49	-1.18—2.16
Net ecosystem production/($mg L^{-1} h^{-1}$)	(-0.62) [0.39]	(-0.05) [0.63]	(-0.25) [0.33]

a 极小值—极大值, b 平均值, c 标准偏差

2.3 各断面环境参数变化特征

各断面环境参数的年变化范围及年均值见表 3。受季节气象因素变化控制, WT 、 RH 、 P 、 PAR 、 $PRCP$ 与 $Wind$ 指标在各断面之间差异较小, 而 DO 、 EC 、 Tb 、 COD_{Mn} 、 TP 、 TN 、 HCO_3^- 、 pCO_2 、 $Flux$ 与 pH 指标变化范围差异

较大。此外,寸滩与朱沱断面的 DO、*Tb*、TP 的变化范围及年平均值都显著大于受库区水位变动影响的晒网坝断面。

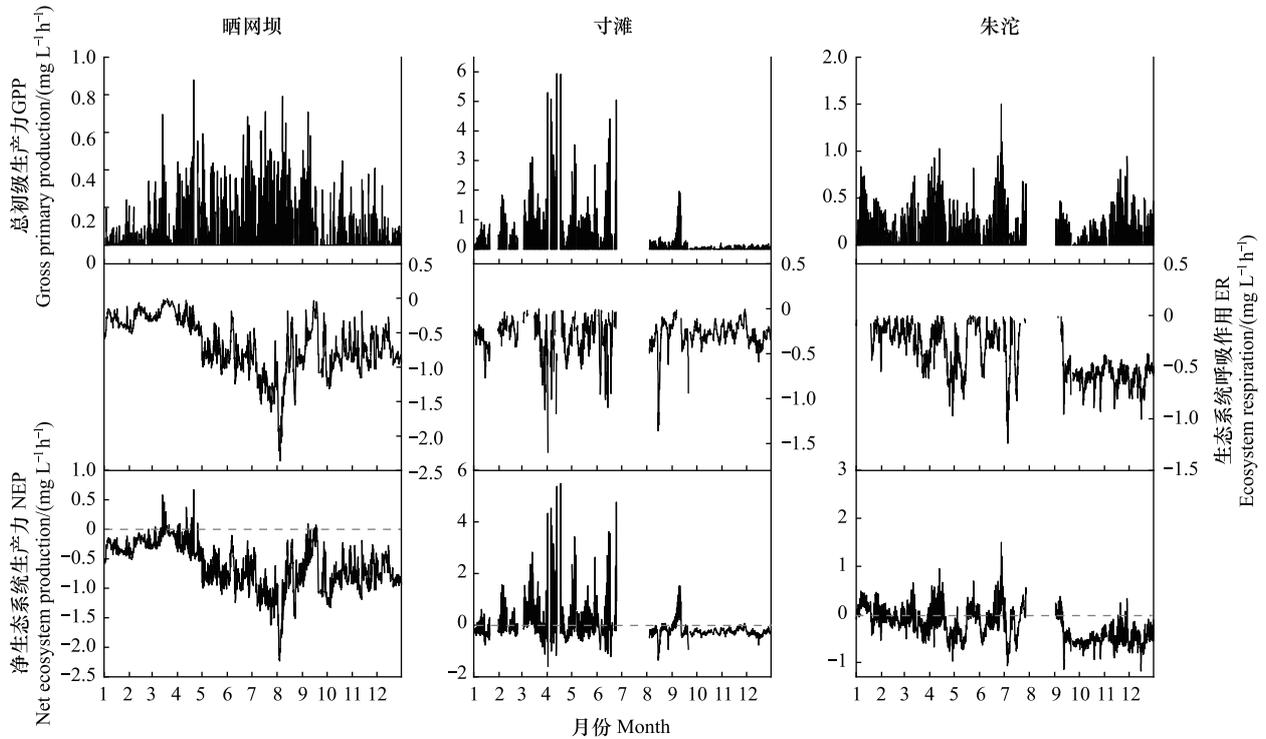


图3 各断面 GPP、ER、NEP 变化趋势图

Fig.3 Trends of GPP, ER and NEP at each transect

虚线表示净生态系统生产力零值

表3 基本环境参数

Table 3 Basic environment parameters

	晒网坝	寸滩	朱沱
水温 <i>WT</i>	12.81—29.5 ^a	12.82—29.01	12.16—29.1
Water temperature/°C	(20.78) ^b [4.52] ^c	(20.52) [4.00]	(19.69) [3.95]
溶解氧 DO	4.95—10.68	6.34—17.36	6.83—11.74
Dissolved oxygen/(mg/L)	(8.08) [1.17]	(8.94) [1.10]	(8.81) [0.86]
电导率 <i>EC</i>	297.67—499.06	284.27—513.92	374.32—533.96
Electrical conductivity/(μ S/cm)	(416.48) [43.14]	(426.94) [30.76]	(463.65) [32.92]
浊度 <i>Tb</i>	2.75—108.35	6.46—736.48	0.46—168.93
Turbidity/(NTU)	(14.07) [14.96]	(43.25) [64.08]	(20.99) [23.57]
高锰酸盐指数 COD_{Mn}	0.59—2.67	0.25—4.48	0.37—8.15
Permanganate index/(mg/L)	(1.27) [0.37]	(1.36) [0.58]	(1.19) [0.58]
总磷 TP	0.02—0.09	0.02—0.18	0.02—0.48
Total phosphorus/(mg/L)	(0.05) [0.01]	(0.06) [0.02]	(0.05) [0.03]
总氮 TN	1.02—3.10	0.16—3.4	0.42—3.29
Total nitrogen/(mg/L)	(1.64) [0.32]	(1.29) [0.35]	(1.23) [0.35]
HCO_3^- /(μ mol/L)	124.16—187.56	119.95—192.23	148.29—198.54
	(161.56) [13.58]	(164.85) [9.68]	(176.41) [10.37]
湿度 <i>RH</i>	22.81—100	28.74—100	30.92—100
Relative humidity/%	(77.14) [16.14]	(77.36) [16.12]	(76.43) [15.93]

续表

	晒网坝	寸滩	朱沱
大气压强 P	933.43—970.91	955.21—998.29	957.69—1001.71
Atmospheric pressure/(hPa)	(949.40) [7.94]	(973.66) [8.81]	(976.41) [8.94]
降雨量 PRCP	0—7.91	0—9.81	0—6.55
Precipitation/(mm/h)	(0.20) [0.61]	(0.18) [0.62]	(0.15) [0.50]
风速	0.1—4.38	0.04—6.02	0.02—5.9
Wind/(m/s)	(1.29) [0.64]	(1.59) [0.79]	(1.52) [0.79]
光合有效辐射 PAR	0—446.98	0—438.89	0—433.43
Photosynthetically active radiation/(W/m ²)	(78.40) [115.83]	(70.67) [107.91]	(71.78) [109.93]
二氧化碳分压 $p\text{CO}_2$	1073.51—5575.67	91.01—6636.37	771.74—7546.82
CO_2 partial pressure/(μatm)	(2194.07) [709.92]	(2038.25) [735.67]	(2900.46) [1060.28]
二氧化碳通量 Flux	1.53—34.07	-5.4—54.33	1.47—75.62
Carbon flux/(mmol m ⁻² h ⁻¹)	(10.14) [5.13]	(10.48) [6.12]	(16.31) [9.82]
pH	7.45—8.17	7.37—9.2	7.38—8.31
	(7.89) [0.14]	(7.94) [0.19]	(7.81) [0.16]

a 极小值—极大值, b 平均值, c 标准偏差

各环境参数之间的相关性矩阵见图 4, 而各断面环境参数与 NEP 的相关性矩阵见表 4。在水环境参数中, pH、DO、EC 和 HCO_3^- 与各断面的 NEP 呈显著正相关, 而 Tb 、 COD_{Mn} 、TP 和 TN 与 NEP 呈显著负相关, 其中 WT 与晒网坝断面 NEP 呈显著负相关, 而与寸滩断面为弱正相关和与朱沱断面无相关性。与水环境参数相比, 气象参数与 NEP 间的相关性要小得多, 且与水环境参数彼此之间的相关性也较小。三个断面中 $p\text{CO}_2$ 、Flux 与 NEP 都呈显著负相关, 但在不同季节 $p\text{CO}_2$ 、Flux 与 NEP 的相关性差异明显。晒网坝断面主要在春季与上述参数之间相关性最强, 而寸滩断面主要表现在冬季, 朱沱断面主要在夏季。相同的是三个断面 $p\text{CO}_2$ 、Flux 与 NEP 相关性最弱的季节都在秋季。

3 讨论

3.1 水体代谢过程对环境参数变化的响应

利用随机森林特征重要性评分(VIM)量化驱动 NEP 变化的环境因子, 并将其重要度进行排序(见图 5)。相关水环境参数的季节变化趋势见图 6。研究发现, DO 与 NEP 呈显著正相关, 且 DO 对 NEP 变化的贡献最大, 主要原因是水体代谢过程必须依赖水中的 O_2 进行^[29]。另外, $p\text{CO}_2$ 与 NEP 呈显著负相关, 也是影响代谢过程的另一个重要因子。当水生植物进行光合作用时增加水体 DO 浓度而降低 $p\text{CO}_2$, 当耗氧物质增加、异养生物呼吸作用加强时则会消耗 O_2 增加 $p\text{CO}_2$ ^[30]。与另外两个断面相比, 晒网坝断面 NEP 几乎全年为负(占比达到 97.75%), 并且氧亏正值(C_s-C)比例达到 97.57%, 即 DO 全年处于不饱和状态, 表明库腹河段呼吸作用强势, 为净异养生态系统, 在不同季节都可向大气中释放 CO_2 , 碳源效应显著。寸滩断面在春夏季出现自异养交替变化, 整体上在春季为自养系统, 碳汇效应显著, 但在其余季节平均为异养(负 NEP 比例为 75.91%), 碳源效应显著。朱沱断面虽然在春、夏季的部分日间表现为自养型, 但整体上各季节都为净异养生态系统(负 NEP 比例为 77.53%), 碳源效应显著。

除 DO 外, 水温、pH 与 PAR 在三个断面中也都贡献了较高的重要度。通常在一定范围内, 水温上升会促进水生光合生物繁殖, 提高系统生产力^[31], 但晒网坝断面的 NEP 在夏季与水温呈显著负相关。其主要原因为高水温在促进生产的同时也会增加水体中耗氧微生物和细菌的活性^[32], 增强水体呼吸作用, 本研究中晒网坝断面 ER 在夏季最为强盛(见图 3)也恰好体现了这一点。并且夏季汛期多伴随强降雨, 降雨径流携带大量面源污染物进入水体^[33], 进一步增加水中耗氧量, 汛期 TN、TP 浓度及 COD_{Mn} 在三个断面中都出现激增也证明这一情况(见图 6)。此外, PRCP 也在很大程度上减少白天光合有效辐射, 影响光合作用, 这也在一定程度

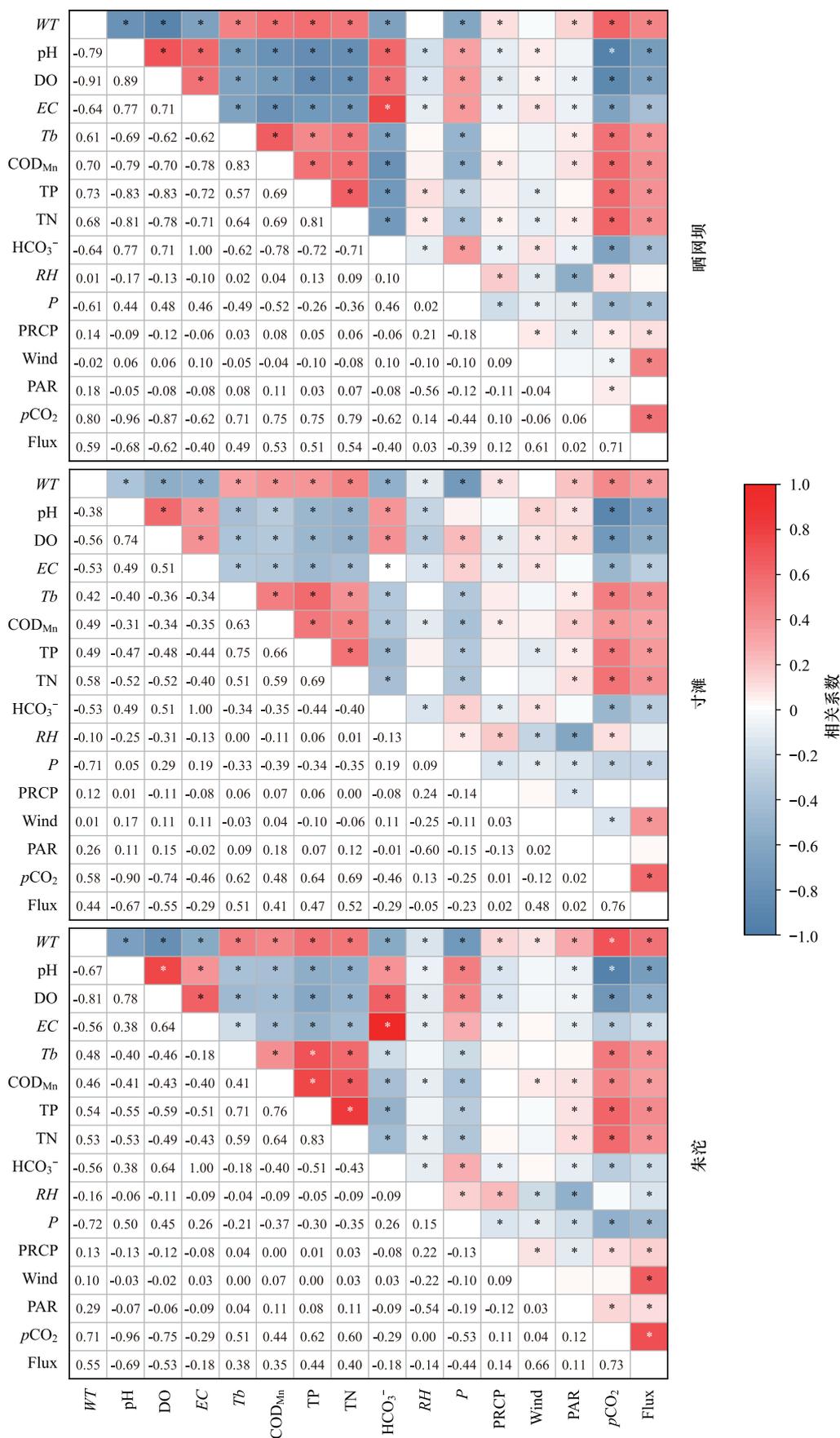


图 4 各断面基本环境参数之间相关性

Fig.4 Correlation between basic environmental parameters at each transect

表 4 各断面基本环境参数与水体 NEP 相关性
Table 4 Correlation between basic environmental parameters and water NEP at each transect

	朱沱													
	晒网坝						寸滩							
	净生态系统生产力 Net ecosystem production		净生态系统生产力 Net ecosystem production		净生态系统生产力 Net ecosystem production		净生态系统生产力 Net ecosystem production		净生态系统生产力 Net ecosystem production		净生态系统生产力 Net ecosystem production			
全年	春	夏	秋	冬	全年	春	夏	秋	冬	全年	春	夏	秋	冬
Full year	Spring	Summer	Autumn	Winter	Full year	Spring	Summer	Autumn	Winter	Full year	Spring	Summer	Autumn	Winter
水温 Water temperature	-0.61**	-0.70**	-0.31**	0.32**	-0.75**	0.08**	0.16**	0.32**	-0.05	0.00	0.22**	0.34**	0.40**	-0.37**
pH	0.82**	0.91**	0.69**	0.68**	0.60**	0.60**	0.55**	0.58**	0.75**	0.40**	0.54**	0.75**	0.29**	0.49**
溶解氧 Dissolved oxygen	0.87**	0.92**	0.93**	0.71**	0.94**	0.73**	0.85**	0.50**	0.85**	0.56**	0.56**	0.79**	0.46**	0.91**
电导率 Conductivity	0.61**	0.57**	0.22**	0.36**	0.32**	0.20**	0.01	0.54**	0.34**	0.29**	0.08	0.17**	0.51**	0.58**
浊度 Turbidity	-0.57**	-0.10	-0.47**	-0.23**	-0.56**	-0.17**	0.08	-0.18**	0.27**	-0.18**	-0.09	-0.17**	0.24**	-0.35**
高锰酸盐指数 Permanganate index	-0.57**	-0.27**	-0.35**	-0.34**	0.32**	-0.04	0.02	0.00	-0.33**	-0.14**	-0.14**	-0.35**	-0.02	-0.38**
总磷 Total phosphorus	-0.73**	-0.77**	-0.35**	-0.44**	-0.79**	-0.22**	-0.22	-0.50**	-0.23**	-0.32**	-0.28**	-0.49**	-0.12**	-0.70**
总氮 Total nitrogen	-0.75**	-0.77**	-0.52**	-0.49**	-0.70**	-0.18**	-0.08	-0.35**	-0.30**	-0.16**	-0.26**	-0.39**	-0.10	0.01
HCO ₃ ⁻	0.61**	0.57**	0.22**	0.36**	0.32**	0.20**	0.01	0.54**	0.34**	0.29**	0.08	0.17**	0.51**	0.58**
湿度 Relative humidity	-0.22**	-0.34**	-0.10	-0.37**	-0.04	-0.39**	-0.53**	-0.48**	-0.41**	-0.38**	-0.45**	-0.20**	-0.60**	-0.22**
气压 Atmospheric pressure	0.27**	0.21**	0.31**	-0.18**	-0.23**	-0.18**	-0.11	-0.36**	-0.27**	-0.22**	-0.23**	-0.27**	-0.40**	-0.09
降雨量 Precipitation	-0.09**	-0.12**	0.03	-0.11	-0.02	-0.04	-0.10	-0.15**	-0.15**	-0.05*	-0.04	-0.01	-0.25**	-0.05
风速 Wind	0.05*	-0.03	-0.01	-0.07	0.08	0.14**	0.15**	0.12	-0.03	0.00	-0.01	0.08	-0.17**	0.00
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	0.07**	0.15**	0.11*	0.29**	0.02	0.40**	0.58**	0.38**	0.44**	0.31**	0.37**	0.22**	0.36**	0.29**
二氧化碳分压 CO ₂ partial pressure	-0.80**	-0.90**	-0.72**	-0.58**	-0.61**	-0.46**	-0.50**	-0.33**	-0.70**	-0.34**	-0.55**	-0.62**	-0.07	-0.46**
碳通量 Carbon flux	-0.58**	-0.62**	-0.47**	-0.35**	-0.16**	-0.36**	-0.39**	-0.06	-0.52**	-0.26**	-0.35**	-0.41**	-0.16**	-0.28**

表中数字后的“*”、“**”分别表示相关关系在 0.05 和 0.01 水平上的显著性(双尾检验)

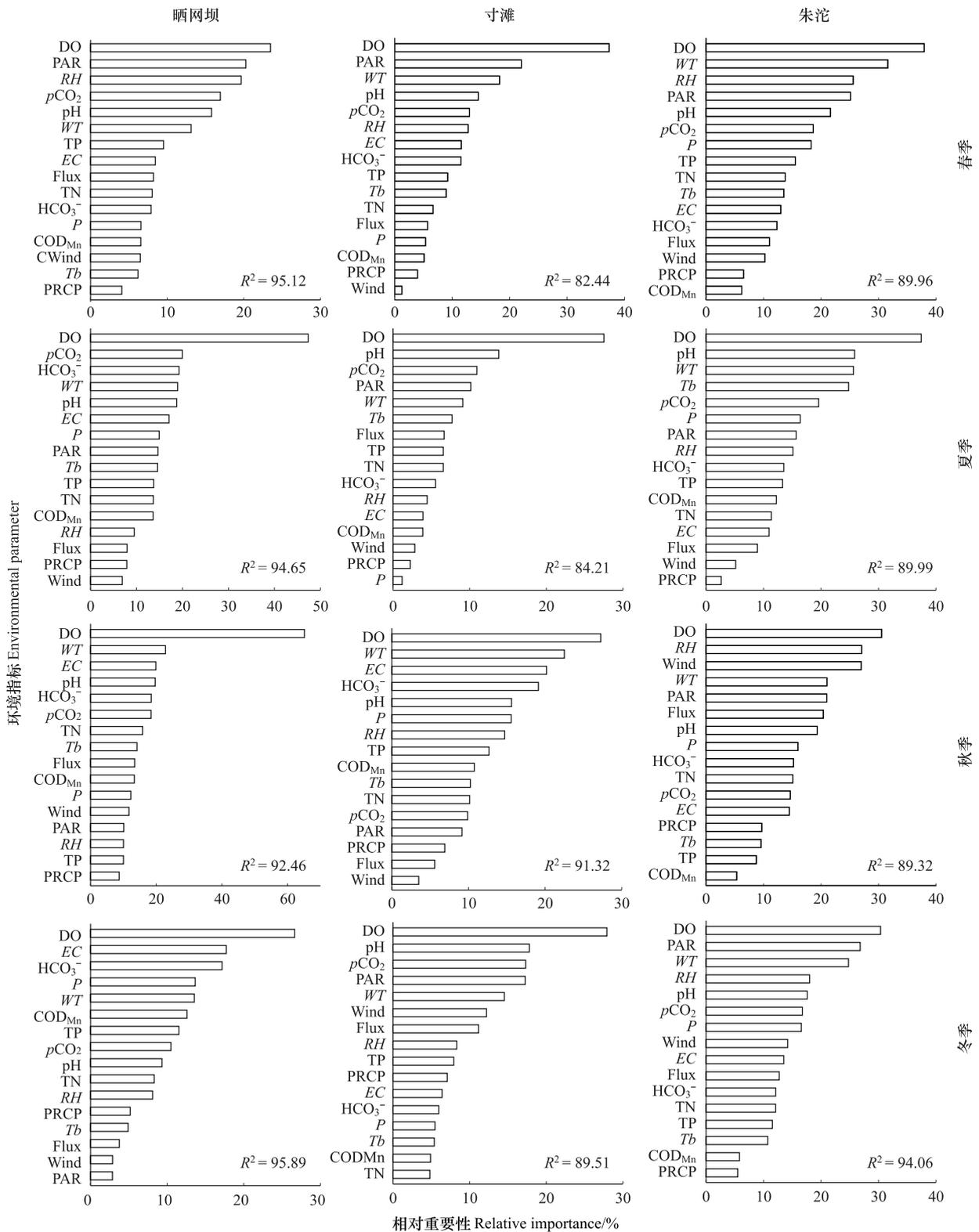


图5 各断面环境参数对水体 NEP 变化的随机森林特征重要性排序

Fig.5 Feature importance ranking of environmental parameters on water NEP changes at each transect based on random forest

上解释了各断面在夏秋季水温高但 NEP 却出现低值的情况。另外 pH 和 PAR 与各断面的新陈代谢变化呈显著正相关,对 NEP 增长有正向促进作用。pH 能够影响水中 CO_2 的浓度,影响水生植物光合作用所需原料浓

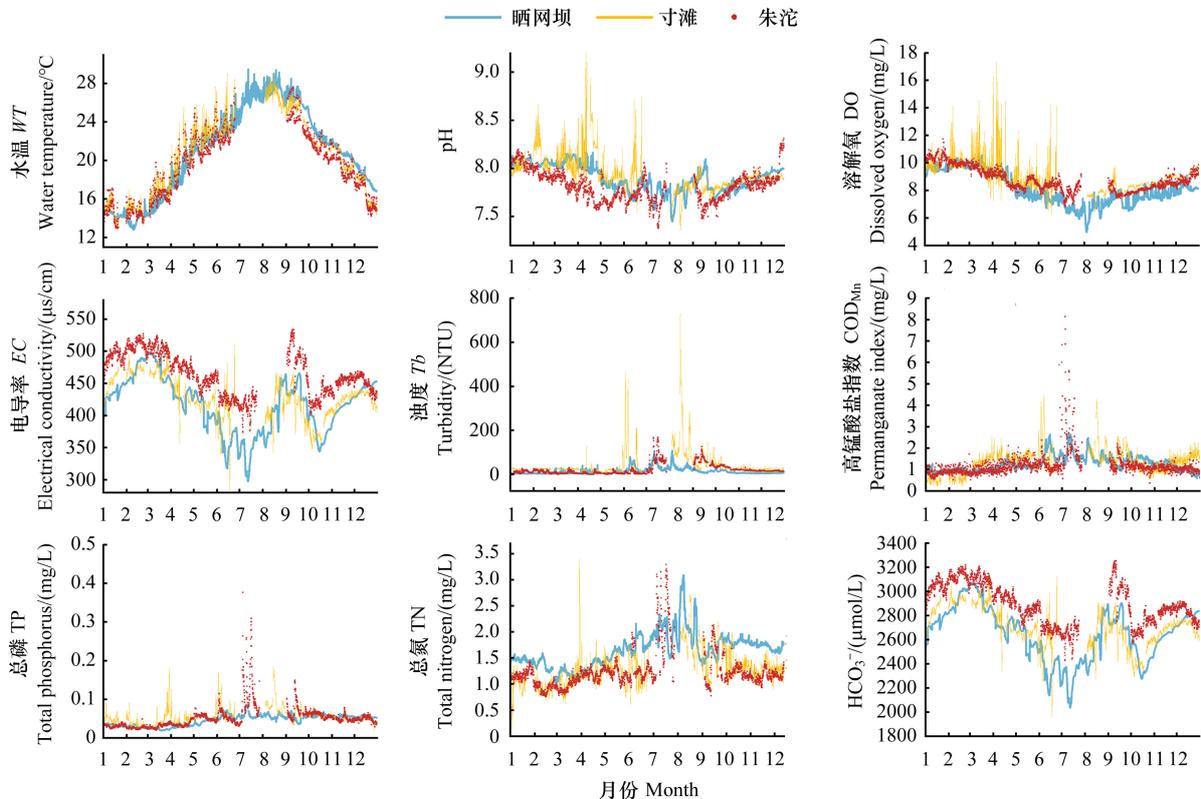


图6 各断面水环境参数的季节变化趋势

Fig.6 Seasonal trends of water environment parameters at transect

度,与水体 CO_2 源汇具有直接关联^[34],因此在各季节对驱动 NEP 的变化都具有重要贡献度。另外 pH 升高会积累水体中 HCO_3^- 离子^[35], HCO_3^- 主要通过电离反应与 CO_2 进行化学交换、为沉水植物和藻类提供 CO_2 浓缩机制^[36] 两种方式来促进植物光合作用。PAR 则直接控制水生植物的有效光合作用^[37],通常情况下夏季日照时间长、光照强度高,PAR 影响更强,但在本研究中发现除晒网坝断面外,寸滩和朱沱断面的 PAR 在冬季的贡献率强于或等于夏季。其主要原因是受到 T_b 影响,在本研究中寸滩和朱沱断面在汛期 T_b 浓度激增(见图6),且随机森林模型也显示夏季 T_b 对两个断面代谢具有主要贡献度,当河流水体 T_b 升高时会减弱进入水体的光照^[38],降低水中植物光合作用,使得夏季 PAR 的贡献度小于或等于冬季。

前人在研究中认为共同环境因素是驱动新陈代谢机制变化的基础^[39],但理清其因果关系十分困难。在本研究中,除去 DO、 $p\text{CO}_2$ 、水温、pH 及 PAR 等因子外,其余环境因子也相应的为 NEP 变化提供了不同程度的贡献率。EC 影响水中生物生长繁殖的离子浓度^[40],在研究中发现 EC 在 8—9 月出现异常升高情况,并且对驱动该时期晒网坝与寸滩断面的 NEP 变化具有主要贡献度。TN、TP 与 COD_{Mn} 都能反映水体富营养化程度,其中 COD_{Mn} 能够衡量污染程度,影响水体 DO 浓度,但不直接参与水体代谢过程,因此在本研究中 COD_{Mn} 对各断面的贡献度都靠后,而氮磷是浮游植物生长的关键元素,浓度过高时导致藻类过度繁殖,也会消耗大量 DO。 RH 升高减缓浮游植物的蒸腾作用^[41],在春季, RH 是驱动三个断面 NEP 变化的主要环境因子,而到夏季温度升高后 RH 的重要度就显著降低。 P 升高促进 $p\text{CO}_2$ 、 O_2 在水中溶解,提升水中 DO 浓度和 $p\text{CO}_2$ ^[42]。Wind 增加水体与空气接触面积,影响 O_2 、 CO_2 气体扩散的强度^[43],其在朱沱断面的秋季与寸滩断面的冬季对 NEP 有重要贡献度,但整体上在大部分季节 Wind 都对各断面 NEP 变化无太大影响。此外,进行相关性分析中发现部分气象参数(如 PRCP、Wind 等)与各断面 NEP 相关性较小(表4),对 NEP 变化的贡献率中也相对靠后(图5),其原因主要是高风速、高降雨等现象发生时段较少,只能在特定时段下对代谢产生影响,并且气象参

数在变化过程中先影响水环境因子(如水温、pH等),再由水环境改变进一步影响水体代谢^[44],因此部分气象因子与代谢指标的相关性较弱,但在代谢变化中依然提供重要贡献度,不可忽视。

3.2 水位变动背景下水体代谢的差异变化

熊倩等^[28]研究表明河流型水库因水体流动等水文变化影响,其内的初级生产通常发生在 2m 水深以内,而在本研究中各断面所处河段都超过了这个深度,因此在本研究中认为底栖植物初级生产力较小,河流的 GPP 主要产生于表层水生光合生物^[45-46]。因代谢指标时间监测频率与水位监测频率存在时间差,因此在讨论时将新陈代谢指标与水位数据都换算为一日一次。

3.2.1 库内、库外水体新陈代谢特征

研究发现库腹晒网坝断面各季节的 GPP 都显著低于其他断面(表 5),表明库区内浮游植物相对较少,这与黄宇波等^[47]认为高水位降低水生植物生物量结果一致;但 ER 却相反,在各季节都显著高于其他两个断面,表明晒网坝异养生物量大、水体呼吸作用强,并且其冬季 GPP 平均只有 $0.68 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$,为各断面监测周期中的最低值(表 5),其除了受到冬季较低的水温和光照影响外,可能还受到了“反季节”水位波动的影响。当冬春季水位处于高位状态时,近岸带挺水植物繁殖体被淹没难以萌发、沉水植物在较深的湖底难以获得足够的光照,整体上就会降低水体生产力^[48]。

表 5 各断面不同季节 GPP 与 ER 均值对比

Table 5 Comparisons of mean value of GPP and ER in different seasons for each transect

		晒网坝	寸滩	朱沱
总初级生产力 GPP Gross primary production/($\text{mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	春季	1.98	12.18	3.04
	夏季	2.42	6.11	3.39
	秋季	1.65	1.95	2
	冬季	0.68	3.24	2.68
呼吸作用 ER Ecosystem respiration/($\text{mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	春季	-10.38	-5.22	-6.7
	夏季	-24.88	-6.98	-5.17
	秋季	-18.18	-5.12	-12.02
	冬季	-10.84	-7.39	-5.97
净生态系统生产力 NEP Net ecosystem production/($\text{mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	春季	-8.4	6.96	-3.66
	夏季	-22.46	-0.87	-1.78
	秋季	-16.53	-3.17	-10.02
	冬季	-10.16	-4.15	-3.29

通常情况下生长季节(春、夏季)能够积累更多有机质,NEP 相对较高^[49],而晒网坝断面却出现部分夏季(7月、8月初)NEP 低于秋季(9—10月)的现象,主要原因为 9—10 月为水库蓄水期,蓄水过程中水位上升,大量的土壤、植被、人工结构被淹没,干支流水体混合,带入了不同的溶解物质和盐类,促进水体新陈代谢作用^[50],在研究中发现驱动该时期 NEP 变化的主要因子为 TN、EC、 HCO_3^- 也证明了这一点。并且水位上升使得富含土壤 CO_2 的“老水”进入河流,增加水体中 $p\text{CO}_2$ 和 Flux^[51],影响水生植物的繁殖,使得初秋的 NEP 高于夏季。此外,夏季光合作用强的同时,水体中的呼吸作用在水温合适的情况下也会增强^[32],降低 NEP。

在朱沱与寸滩中发现两个断面在 3—4 月份的 NEP 变化趋势高度一致,但是朱沱整体表现为异养生态系统,而寸滩断面却为自养。该时期驱动两个断面 NEP 变化的主要环境因子都为 DO、PAR、水温、pH、RH、 $p\text{CO}_2$,说明该时期两个断面的外界环境相似(图 3 中 GPP 与 ER 变化趋势一致也能进一步证明)。此外,该时期两个断面的 ER 相差不大,但寸滩断面的 GPP 却是朱沱断面的 4 倍之高,可知寸滩断面的水生植物群落生长发育更加旺盛(与图 6 中 DO 在此期间的变化趋势一致)。此外,3—4 月份虽然为水库的消落期,但这个时期在水库调度下寸滩断面水位几乎稳定无变化,水文环境相对稳定,为水生生物提供了较稳定的生长环境。此外,寸滩与朱沱两个断面皆出现冬季生产力大于秋季的情况,熊倩等^[28]在采样过程中发现冬季水温大于秋

季时会出现此类情况,而在本研究中无季节水温颠倒情况出现,因此其特殊现象还需结合更多环境因子进行分析。汪益斌等^[52]在对淀山湖浮游植物初级生产力季节变化研究中也出现了相似的情况,认为这与浮游植物群落结构和优势种更替有较大关系。

3.2.2 水位变化对库内、库外水体新陈代谢过程的影响差异

晒网坝断面水位在各季节变化平缓、无突增骤减情况出现,NEP 与其相比无明显规律可循。但研究发现汛期的低 NEP 明显受到水中高浊度影响,6—8 月份出现的三次浊度突增情况下都对应着同期的 NEP 骤减,而突增的浊度又对应着相对下降的水位(见图 7)。一般情况下库区水位对降雨的反应具有滞后性^[53],通常表现为在降雨结束后一段时间内下降,此时的低水位往往对应着同时期的高浊度,而浊度增加使水体中的透明度降低,降低水生植物的光合作用,进一步降低 NEP。

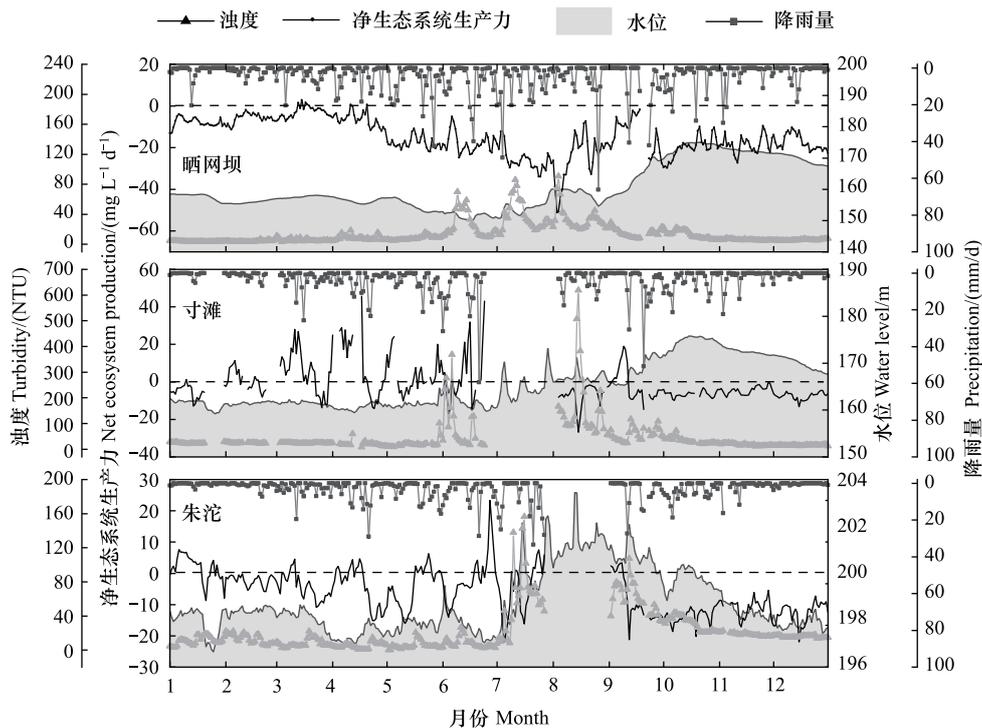


图 7 水位与代谢变化图

Fig.7 Trends of water level and NEP

虚线表示净生态系统生产力零值

朱沱断面位于库外与库尾的交界处,水文条件主要受气候影响,遵循自然河流变化特征。对比 NEP 与水位变化趋势,发现朱沱断面水位下降时 NEP 会出现相应的升高,在春、夏两季尤为明显(如 4—7 月,缺失 8 月数据)(图 7)。与晒网坝断面相反,朱沱断面汛期的高浊度出现在高水位时段,主要原因为自然河流在降雨后接纳径流、支流中的水体和携带的泥沙,使得水位与浊度同时升高^[54]。

寸滩断面位于变动回水区,在水库低水位时期表现为自然河流,而在高水位时期受到库区蓄水影响表现为水库型河流。其夏季(低水位期 6、8 月,缺失 7 月份数据)与初秋(蓄水初期 9 月)的 NEP 变化与水位呈相反趋势(图 7),且在汛期突增的 Tb 值也对应着高水位时段,整体上与朱沱断面一致,而秋末和冬季(蓄水末期 10 月、高水位时期 11—12 月、消落初期 1 月)与水位变化无明显关系,与晒网坝断面一致。

通过库内、库外水体对 Tb 与 PRCP 的接纳特征差异的分析,发现不同河流性质以及不同水位变动都会对水环境产生不同的影响,并且寸滩断面水位与 NEP 之间相关性的差异变化恰好与寸滩受库区蓄排水影响的时间段吻合,即证明库区水位变化在一定程度上会影响水体新陈代谢过程。

3.3 各断面水体新陈代谢与碳循环的关系

水-气界面 CO_2 交换通量在一定程度上可表征水体新陈代谢情况。据前人调查,世界上大部分河流和水库的 $p\text{CO}_2$ 都高于与大气的平衡值,且 CO_2 交换通量大于 0 表现为大气 CO_2 源^[55],这与本研究中各断面的 CO_2 交换通量情况基本一致。对各断面的 $p\text{CO}_2$ 和 Flux 分别与 NEP 进行相关性拟合,发现二次多项式拟合所得相关趋势最强及显著(见图 8),整体都呈现出负相关的态势,即意味着随着 NEP 的增加,各断面中的 $p\text{CO}_2$ 与 Flux 均呈现出先期减小的趋势,而当 NEP 增大到某阈值后 $p\text{CO}_2$ 与 Flux 值出现不变或回升趋势。初期水生植物光合作用固定有机碳,导致 $p\text{CO}_2$ 不断降低,Flux 也表现为从大气向水体的净流入;随着 NEP 的进一步增加,水中的生物量也增多,呼吸作用及微生物分解也不断增强,生态系统结构功能发生改变,此时 $p\text{CO}_2$ 浓度开始达到平衡甚至上升,Flux 也发生逆转^[56]。

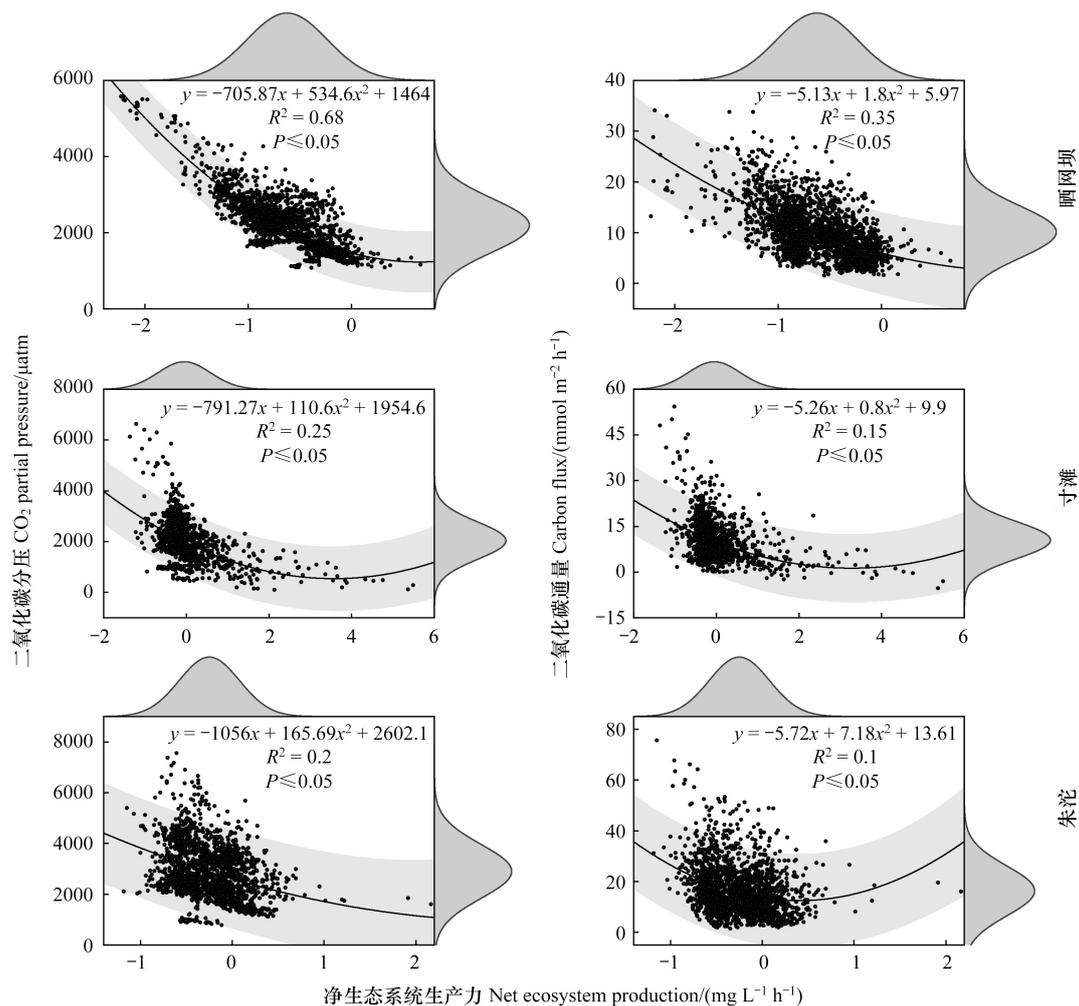


图 8 各断面 $p\text{CO}_2$ 、 CO_2 交换通量与 NEP 之间的变化关系图

Fig. 8 The variation relationship between $p\text{CO}_2$, CO_2 flux and NEP at each transect

浅灰色背景为 95% 置信区间;深灰色背景为边缘密度图,表示变量分布情况

除晒网坝外的其余两个断面的 NEP 与 $p\text{CO}_2$ 和 Flux 的相关性仍然较低。通常昼夜尺度上的 $p\text{CO}_2$ 和 Flux 特征与水生生物的新陈代谢过程(光合作用和呼吸作用)密切相关^[22],白天太阳辐射和温度激增使得水生植物光合作用强度增加、水体中 $p\text{CO}_2$ 减少,而夜间为生物的呼吸作用主导、水体 $p\text{CO}_2$ 增加^[22,57]。在季节变化上,研究发现,由于气候条件的差异,降雨量以及水温、水位、流量等一系列的环境变化会共同驱动河流水-气

界面 CO_2 脱气发生改变^[58]。在这些因子的共同影响下, 水生新陈代谢过程作为其中的一个驱动因子直接或间接的影响碳通量, 无法主导 CO_2 脱气变化。晒网坝断面 NEP 与 $p\text{CO}_2$ 和 Flux 关系明显, 推测原因与库内河段水文条件变化缓慢、水环境稳定具有一定关系, 但各环境因子复杂多变且相互影响, 具体如何影响水体中的碳收支和排放还需要进一步讨论分析。

4 结论

(1) GPP 为寸滩>朱沱>晒网坝断面, 而 ER 为晒网坝>朱沱>寸滩断面。晒网坝断面的 NEP、ER 与 GPP 年变化范围分别为 $-2.23—0.67$ 、 $-2.35—-0.0$ 、 $0—0.88 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 年均值分别为 -0.62 、 -0.67 、 $0.66 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$; 寸滩断面为: $-1.6—5.49$ 、 $-1.6—-0.003$ 、 $0—5.95 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 年均值为 -0.05 、 -0.31 、 $0.23 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$; 朱沱断面为: $-1.18—2.16$ 、 $-1.24—-0.00$ 、 $0—1.62 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 年均值为 -0.25 、 -0.40 、 $0.11 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。其中晒网坝断面为库区河流, 受水库蓄水影响, 在三个断面中的平均光合效率最小、呼吸效率最大。

(2) 驱动各断面 NEP 变化的环境因子相似, 只在不同季节中存在差异。其中 DO、水温、 $p\text{CO}_2$ 、PAR、pH 是驱动各断面 NEP 变化的主要贡献因子, 另外 RH 在春季三个断面中都为主要贡献因子, Tb 在夏季寸滩与朱沱断面为主要贡献因子, EC 在秋冬季晒网坝与寸滩断面为主要贡献因子。

(3) 自然河段、变动回水区河段及水库型河段的水体代谢过程具有明显的差异。晒网坝断面水位与 NEP 相比无明显规律, 朱沱断面水位与 NEP 具有明显相反趋势。寸滩断面在夏季与初秋时期 NEP 与水位变化呈相反趋势(与朱沱断面一致), 在秋末和冬季时期无明显关系(与晒网坝断面一致), 与库区蓄排水时间段吻合, 证明了库区水位变化在一定程度上影响水体代谢过程。

(4) 寸滩断面在春夏季出现自异养交替变化, 但整体在春季为自养系统, 碳汇效应显著, 在其余季节均为异养, 碳源效应显著; 而朱沱与晒网坝断面在各季节都为净异养生态系统, 碳源效应显著。

(5) 各断面的 NEP 与 $p\text{CO}_2$ 和 Flux 遵循二次函数的变化规律, 整体上为负相关关系, 表现为随着 NEP 的增加, $p\text{CO}_2$ 与 Flux 出现先减小后回升或不变的趋势。但除晒网坝外, 其余两个断面的 NEP 与 $p\text{CO}_2$ 和 CO_2 交换通量的相关性较低。

参考文献 (References):

- [1] Odum H T. Primary production in flowing Waters I. Limnology and Oceanography, 1956, 1(2): 102-117.
- [2] Harvey J W, Choi J, Quion K. Metabolism regimes in regulated rivers of the Illinois River Basin, USA. Scientific Data, 2024, 11(1): 211.
- [3] Bernhardt E S, Savoy P, Vlah M J, Appling A P, Koenig L E, Hall R O Jr, Arroita M, Blaszcak J R, Carter A M, Cohen M, Harvey J W, Heffernan J B, Helton A M, Hosen J D, Kirk L, McDowell W H, Stanley E H, Yackulic C B, Grimm N B. Light and flow regimes regulate the metabolism of rivers. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(8): e2121976119.
- [4] Fernández Castro B, Chmiel H E, Minaudo C, Krishna S, Perolo P, Rasconi S, Wüest A. Primary and net ecosystem production in a large lake diagnosed from high-resolution oxygen measurements. Water Resources Research, 2021, 57(5): e2020WR029283.
- [5] Izagirre O, Bermejo M, Pozo J, Eloegi A. RIVERMET: an Excel-based tool to calculate river metabolism from diel oxygen-concentration curves. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(1): 24-32.
- [6] Bernot M J, Sobota D J, Hall R O JR, Mulholland P J, Dodds W K, Webster J R, Tank J L, Ashkenas L R, Cooper L W, Dahm C N, Gregory S V, Grimm N B, Hamilton S K, Johnson S L, McDowell W H, Meyer J L, Peterson B, Poole G C, Valett H M, Arango C, Beaulieu J J, Burgin A J, Crenshaw C, Helton A M, Johnson L, Merriam J, Niederlehner B R, O'Brien J M, Potter J D, Sheibley R W, Thomas S M, Wilson K. Inter-regional comparison of land-use effects on stream metabolism. Freshwater Biology, 2010, 55(9): 1874-1890.
- [7] Bernhardt E S, Heffernan J B, Grimm N B, Stanley E H, Harvey J W, Arroita M, Appling A P, Cohen M J, McDowell W H, Hall R O Jr, Read J S, Roberts B J, Stets E G, Yackulic C B. The metabolic regimes of flowing waters. Limnology and Oceanography, 2018, 63(S1): S99-S118.
- [8] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, McDowell W H, Tranvik L J, Striegl R G, Duarte C M, Kortelainen P, Downing J A, Middelburg J J, Melack J. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. Ecosystems, 2007, 10(1): 172-185.
- [9] Bauer B, Sommer U, Gaedke U. High predictability of spring phytoplankton biomass in mesocosms at the species, functional group and community level. Freshwater Biology, 2013, 58(3): 588-596.

- [10] Feng M, Sexton J O, Channan S, Townshend J R. A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: first results of a topographic-spectral classification algorithm. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(2): 113-133.
- [11] Lehner B, Liermann C R, Revenga C, Vörösmarty C, Fekete B, Crouzet P, Döll P, Endejan M, Frenken K, Magome J, Nilsson C, Robertson J C, Rödel R, Sindorf N, Wisser D. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(9): 494-502.
- [12] 陈森, 苏晓磊, 党成强, 高婷, 黄慧敏, 董蓉, 陶建平. 三峡水库河流生境评价指标体系构建及应用. *生态学报*, 2017, 37(24): 8433-8444.
- [13] Wang K, Li P H, He C, Shi Q, He D. Density currents affect the vertical evolution of dissolved organic matter chemistry in a large tributary of the Three Gorges Reservoir during the water-level rising period. *Water Research*, 2021, 204: 117609.
- [14] Ye L, Cai Q H, Zhang M, Tan L, Shen H L. Ecosystem metabolism and the driving factors in Xiangxi bay of Three Gorges Reservoir, China. *Freshwater Science*, 2016, 35(3): 826-833.
- [15] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 马骏. 防控支流库湾水华的三峡水库潮汐式生态调度可行性研究. *水电能源科学*, 2015, 33(12): 48-50, 109.
- [16] 陈森, 苏晓磊, 黄慧敏, 高婷, 党成强, 董蓉, 曾波, 陶建平. 三峡库区河流生境质量评价. *生态学报*, 2019, 39(1): 192-201.
- [17] Xiao Y, Yang F S, Su L, Li J W. Fluvial sedimentation of the permanent backwater zone in the Three Gorges Reservoir, China. *Lake and Reservoir Management*, 2015, 31(4): 324-338.
- [18] 刘晓冉, 程炳岩, 杨茜, 郭渠, 张天宇. 近 50a 三峡库区汛期极端降水事件的时空变化. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 244-251.
- [19] Xiang R, Wang L J, Li H, Tian Z B, Zheng B H. Water quality variation in tributaries of the Three Gorges Reservoir from 2000 to 2015. *Water Research*, 2021, 195: 116993.
- [20] 郑瑶. 三峡库区重庆段水环境容量及其分配方案研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [21] Alfonso M B, Vitale A J, Menéndez M C, Perillo V L, Piccolo M C, Perillo G M E. Estimation of ecosystem metabolism from diel oxygen technique in a saline shallow lake; La Salada (Argentina). *Hydrobiologia*, 2015, 752(1): 223-237.
- [22] Pu J B, Li J H, Khadka M B, Martin J B, Zhang T, Yu S, Yuan D X. In-stream metabolism and atmospheric carbon sequestration in a groundwater-fed Karst stream. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1343-1355.
- [23] Shen X M, Cai Y P, Su M R, Wan H, Shen Y M, Yang Z F. High discharge intensified low net ecosystem productivity, hypoxia, and acidification at three outlets of the Pearl River Estuary, China. *Water Research*, 2022, 214: 118171.
- [24] Shen X M, Sun T, Liu F F, Xu J, Pang A P. Aquatic metabolism response to the hydrologic alteration in the Yellow River estuary, China. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 42-54.
- [25] 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏. 三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 通量支流对比及影响机制初探. *环境科学*, 2022, 43(1): 377-386.
- [26] Raymond P A, Zappa C J, Butman D, Bott T L, Potter J, Mulholland P, Laursen A E, McDowell W H, Newbold D. Scaling the gas transfer velocity and hydraulic geometry in streams and small rivers. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 2012, 2(1): 41-53.
- [27] 朱永锋, 谭路, 蔡庆华, 叶麟. 基于高频溶氧的浮游植物初级生产力季节变化及驱动因子——以神农南坡香溪河库湾为例. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(6): 1472-1479.
- [28] 熊倩, 黄立成, 叶少文, 李林, 宋立荣, 吴月. 三峡水库浮游植物初级生产力的季节变化与空间分布. *水生生物学报*, 2015, 39(5): 853-860.
- [29] 赵桂侠. 紊流扰动对大型浅水湖泊藻类影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [30] He H B, Liu Z H, Chen C Y, Wei Y, Bao Q, Sun H L, Hu Y D, Yan H. Influence of the biological carbon pump effect on the sources and deposition of organic matter in Fuxian Lake, a deep oligotrophic lake in southwest China. *Acta Geochimica*, 2019, 38(5): 613-626.
- [31] 王锦旗, 宋玉芝, 黄进. 水温升高对水体性质及水生生物的影响研究进展. *水生态学杂志*, 2020, 41(1): 100-109.
- [32] 杨平, 全川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展. *生态学报*, 2015, 35(20): 6868-6880.
- [33] 李乐, 刘常富. 三峡库区面源污染研究进展. *生态科学*, 2020, 39(2): 215-226.
- [34] Quiñones-Rivera Z J, Finlay K, Vogt R J, Leavitt P R, Wissel B. Hydrologic, metabolic and chemical regulation of water-column metabolism and atmospheric CO₂ exchange in a large continental reservoir during spring and summer. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, 41: 144-154.
- [35] Stirling A. HCO₃⁻ Formation from CO₂ at High pH: Ab Initio Molecular Dynamics Study. *Journal of Physical Chemistry B*, 2011, 115(49): 14683-14687.
- [36] Aho K S, Hosen J D, Logozzo L A, McGillis W R, Raymond P A. Highest rates of gross primary productivity maintained despite CO₂ depletion in a temperate river network. *Limnology and Oceanography Letters*, 2021, 6(4): 200-206.
- [37] Gong D H, Guo Z Q, Wei W X, Bi J, Wang Z Z, Ji X. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Nanhai lake. *Diversity-Basel*, 2022, 14(11).

- [38] 邵田田, 宋开山, 丁智, 赵莹, 王铭, 杜嘉, 张柏. 辽河水体光学吸收特性的季节变化. 生态学报, 2016, 36(7): 1861-1871.
- [39] Battin T J, Lauerwald R, Bernhardt E S, Bertuzzo E, Gener L G, Hall R O Jr, Hotchkiss E R, Maavara T, Pavelsky T M, Ran L S, Raymond P, Rosentreter J A, Regnier P. River ecosystem metabolism and carbon biogeochemistry in a changing world. *Nature*, 2023, 613(7944): 449-459.
- [40] 王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛. 太湖不同介质电导率时空变化特征. 环境科学, 2019, 40(10): 4469-4477.
- [41] Ferrante A, Mariani L. Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses: high and low values of temperature, light intensity, and relative humidity. *Horticulturae*, 2018, 4(3).
- [42] 黎煜昭, 刘启亮, 邓敏, 徐锐, 王茂洋, 杨海南. 基于物理约束 GRU 神经网络的河流水质预测模型. 地球信息科学学报, 2023, 25(1): 102-114.
- [43] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2014, 12: 351-362.
- [44] 胡奇红. 复合流动形式地表水体的热承载能力研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.
- [45] Engel F, Fischer H. Effect of thermal stratification on phytoplankton and nutrient dynamics in a regulated river (Saar, Germany). *River Research and Applications*, 2017, 33(1): 135-146.
- [46] Engel F, Attermeyer K, Ayala A I, Fischer H, Kirchesch V, Pierson D C, Weyhenmeyer G A. Phytoplankton gross primary production increases along cascading impoundments in a temperate, low-discharge river: Insights from high frequency water quality monitoring. *Scientific Reports*, 2019, 9: 6701.
- [47] 黄宇波, 杨霞, 向波. 水位变化对三峡水库小江蓝藻水华的影响. 四川环境, 2020, 39(6): 115-121.
- [48] Tan Z Q, Jiang J H. Spatial-temporal dynamics of wetland vegetation related to water level fluctuations in Poyang Lake, China. *Water*, 2016, 8(9).
- [49] 王远飞, 周存通, 赵增辉, 林植华. 亚热带水库浮游植物季节动态及其与环境因子的关系. 生态学报, 2021, 41(10): 4010-4022.
- [50] Valdespino-Castillo P M, Merino-Ibarra M, Jiménez-Contreras J, Castillo-Sandoval F S, Ramirez-Zierold J A. Community metabolism in a deep (stratified) tropical reservoir during a period of high water-level fluctuations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(10): 6505-6520.
- [51] Zhang T, Li J H, Pu J B, Martin J B, Wang S N, Yuan D X. Rainfall possibly disturbs the diurnal pattern of CO₂ degassing in the Lijiang River, SW China. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125540.
- [52] 汪益斌, 张维砚, 徐春燕, 胡雪芹, 童琰, 由文辉. 淀山湖浮游植物初级生产力及其影响因子. 环境科学, 2011, 32(5): 1249-1256.
- [53] 余正源, 黄耀英, 费大伟, 丁倩, 包腾飞. 基于滞后效应函数的土石坝渗流统计模型分析. 中国农村水利水电, 2022, (6): 227-232.
- [54] 刘文强, 郁达伟, 李昆, 郑利兵, 朱利英, 桂双林, 魏源送. 降雨特征对赣江南昌段河流断面不同水期的水质影响分析. 环境工程, 2023, 41(8): 91-99.
- [55] 倪茂飞, 李思悦. 典型喀斯特河流二氧化碳分压及交换通量季节变化. 第四纪研究, 2023, 43(2): 412-424.
- [56] Lai C W, Liu Z H, Yu Q C, Sun H L, Xia F, He X J, Ma Z, Han Y Q, Liu X, Hao P Y, Bao Q, Shao M Y, He H B. Control of carbon dioxide exchange fluxes by rainfall and biological carbon pump in Karst river-lake systems. *Science of the Total Environment*, 2024, 937: 173486.
- [57] Zhang T, Li J H, Pu J B, Martin J B, Khadka M B, Wu F H, Li L, Jiang F, Huang S Y, Yuan D X. River sequesters atmospheric carbon and limits the CO₂ degassing in Karst area, southwest China. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 92-101.
- [58] 叶昕霞, 张陶, 蒲俊兵, 李建鸿. 河流水-气界面 CO₂ 脱气时间尺度变化研究进展. 湖泊科学, 2023, 35(3): 795-807.