

梯级水电开发下黄河上游龙 - 刘河段 DOC 时空分布特征及通量研究

吴巍¹, 王嘉玮¹, 刘挺², 王浩², 李琛¹, 周孝德¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710024)

摘要: 针对梯级水电开发影响下河流生源物质循环的科学问题, 选取黄河上游梯级开发河段(龙羊峡 - 刘家峡段, 共5个水库)为研究区域, 以溶解性有机碳(DOC)为主要研究对象, 采用采样监测方法分析 DOC 以及理化指标的时空分布特征, 并且基于静态箱式算法模型估算各水库 DOC 的输移通量。结果表明: DOC 及常规理化指标存在明显的时空异质性, DOC 浓度呈现汛期(5.37 ~ 7.00 mg/L)高于非汛期(2.90 ~ 5.56 mg/L)的特征, 汛期由于水库出现垂向水温分层现象, DOC 在沿水深垂直方向上呈波动变化。在采样年里, 龙羊峡 - 刘家峡段 DOC 的年输入通量为 258.53 kt, 年输出通量为 192.23 kt, 拦截率为 25.6%, 具有拦截效应的水库为龙羊峡、公伯峡和刘家峡, 其余水库为输送效应。

关键词: 溶解性有机碳; 输移通量; 梯级水电开发; 黄河上游

中图分类号: TV697.3⁺9; X142

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0106-09

Temporal and spatial distribution characteristics and fluxes of dissolved organic carbon in the upper Yellow River (Longyangxia - Liujiaxia) under cascade hydropower development

WU Wei¹, WANG Jiawei¹, LIU Ting², WANG Hao², LI Chen¹, ZHOU Xiaode¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Hanjiang - to - Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Shaanxi Province, Xi'an 710024, China)

Abstract: Aiming at the problem of riparian biogenic material cycles brought upon by cascade hydropower development, the cascade hydropower development section of the upper Yellow River (Longyangxia - Liujiaxia section, a total of five reservoirs) was selected as the research area, and dissolved organic carbon (DOC) as the main research object. The distribution characteristics of DOC and physicochemical indicators were analyzed by sampling monitoring method, then the DOC transport flux in each reservoir was estimated based on the static box algorithm model. The results showed that DOC and conventional physicochemical indicators presented obvious spatiotemporal heterogeneity, and the concentration of DOC in the flood season (5.37 - 7.00 mg/L) was higher than that in the non-flood season (2.90 - 5.56 mg/L). Moreover, due to the vertical water temperature stratification of the reservoir, the DOC showed the characteristics of fluctuated change along the vertical direction of the water depth in the flood season. During the sampling year, the total input of DOC in the Long - Liu section was 258.53 kt, the total output was 192.23 kt, and the interception rate was 25.6%. The reservoirs which played the role of interception were Longyangxia, Gongboxia and Liujiaxia, and the rest were all transporters.

Key words: dissolved organic carbon (DOC); transport flux; cascade hydropower development; the upper Yellow River

收稿日期: 2021-06-22; 修回日期: 2021-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979222); 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91747206); 陕西省自然科学基金项目(2019JLM-62)

作者简介: 吴巍(1980-), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授, 研究方向为水环境生源物质循环及工程环境效应。

1 研究背景

水电能源是一种清洁、低碳、可再生能源,河流的梯级水电开发可充分发挥防洪发电、供水灌溉、景观旅游、改善气候等综合效益^[1-2]。然而,河流大规模梯级开发对生态环境造成的影响日益显著。梯级水电开发改变了河流下游水体和生源物质的流动输移方式,从而影响了生物地球化学循环和河流生态系统的动态平衡,阻断了河流沿程水体中生物和养分的输移及物质能量交换。因此,生态环境如何受到河流梯级水电开发的影响成为重点关注的问题。

溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)作为一项重要生源物质,其理化性质较敏感,在迁移过程中的不稳定性(易发生转化)影响着河流中的物质和能量循环,故成为天然水体水质的重要参数之一^[3]。另外,溶解性有机碳(DOC)是大部分水体中最大的还原性碳库,对环境变化的响应十分敏感。卢晓璇等^[4]通过对贵州省五里峡水库 DOC 分布特征的研究,得出库区水体受碳酸盐岩风化作用的控制,处于中营养级状态。Parks 等^[5]通过对 Verde 河上双水库系统 DOC 的来源和迁移的研究,得出两个水库产生了整个上游流域 41% 的 DOC。因此认识水体中 DOC 的时空动态变化对监测水体碳循环有着重要意义。

黄河上游有着极具环境特异性与敏感性的脆弱生态系统,水电工程梯级开发将会在一定程度上改变河道结构,影响河流物质能量输送和生态系统的结构功能,产生的负面生态环境效应具有累积性、放大性、潜在性等特点。其中,黄河上游以龙羊峡水库为首的河段是开发最早、格局最完善的梯级水电站群。之前的研究大多集中在黄河的入海通量估算,比如 Wang 等^[6]计算了 2009 年黄河 POC(particulate organic carbon)和 DOC 的年入海通量分别为 3.89×10^{11} 和 3.20×10^{10} g C/a。Zhang 等^[7]总结了黄河从上游至下游 DOC 的迁移特征,研究表明黄河干流中的 DOC 含量比其他河流少得多,其原因是黄土高原流域降水少、植被覆盖率低、有机质含量小,极高的总悬浮固体(total suspended solids, TSS)含量使 DOC 被吸附在颗粒上而导致低 DOC 浓度。然而,聚焦于黄河上游梯级开发河段 DOC 的通量估算的研究则较少。因此,亟需对黄河上游梯级开发河段 DOC 的输移特征和通量展开研究。

本研究选取黄河上游梯级开发河段即龙羊峡-刘家峡段为研究区域,以 DOC 为主要研究对象。采

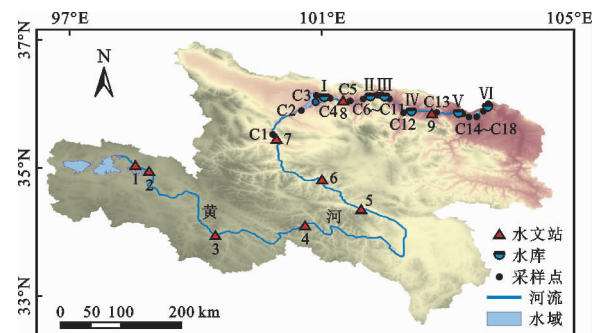
用采样监测方法,分析 DOC 以及常规理化指标的时空分布特征。基于静态箱式算法模型构建黄河上游梯级开发河段 DOC 通量模型,定量估算各水库 DOC 输移通量,解析梯级水库段对于 DOC 的拦截和输移过程,评估梯级开发河段 DOC 的源汇效应。以期为梯级水电开发河段的生态环境效应研究提供新的数据资源和支撑。

2 材料与方法

2.1 研究区域概况及样品采集

黄河是中国第二大河,发源于青藏高原地区的巴颜喀拉山脉。黄河上游流域为黄河主要产流区,占年总径流量的 53.9%,年平均降水量约为 520 mm,年平均气温为 $-5 \sim 2$ °C。本研究根据黄河上游梯级水电开发规划及现状,选取黄河上游中段影响程度高的龙羊峡、拉西瓦、李家峡、公伯峡和刘家峡 5 座典型水库(龙-刘家峡)进行采样工作。

课题组于 2019 年 11 月冬季(非汛期)和 2020 年 7 月夏季(汛期)对 5 座水库进行现场样品采集,分别在各个水库的库尾、库区、坝前和坝下布设采样点(采样点布置和具体信息如图 1 和表 1 所示),采集水库表层水和坝前分层水,同时监测水库现场环境参数。在 5 个水库内共布设横向断面点位 18 个,包括坝前垂向点位共计 35 个。采用有机玻璃采水器在水深为 0.5 m 处采集表层水样,同步采用丹麦 KC-Denmark 公司的 Niskin 分层采水器在断面垂线上沿水深分层采集水样(间隔为 5~10 m,视水深和水温分层状况加密),在现场采用 0.45 μm 醋酸纤维素滤膜对水样过滤,再按实验目的进行预处理,所有样品保存于 2~4 °C 的冷藏环境中并及时运回实验室进行分析测试。



水库: I 龙羊峡, II 拉西瓦, III 李家峡, IV 公伯峡, V 积石峡, VI 刘家峡
水文站: 1 玛多, 2 黄河沿, 3 吉迈, 4 门堂, 5 玛曲, 6 军功, 7 唐乃亥, 8 贵德, 9 循化

图 1 黄河上游梯级开发河段(龙羊峡-刘家峡段)概况及采样点布置

表1 水样采样点具体信息

水库	采样点	位置
龙羊峡	C1	100.15°E, 35.49°N
	C2	100.56°E, 35.88°N
	C3	100.84°E, 36.13°N
	C4	100.92°E, 36.12°N
拉西瓦	C5	101.13°E, 36.06°N
	C6	101.18°E, 36.07°N
	C7	101.19°E, 36.07°N
	C8	101.69°E, 36.16°N
李家峡	C9	101.76°E, 36.15°N
	C10	101.80°E, 36.11°N
	C11	101.83°E, 36.11°N
	C12	102.22°E, 35.87°N
公伯峡	C13	102.24°E, 35.88°N
	C14	102.71°E, 35.81°N
刘家峡	C15	103.06°E, 35.76°N
	C16	103.18°E, 35.82°N
	C17	103.34°E, 35.93°N
	C18	103.33°E, 35.93°N

采用 ADCP - M9 声学多普勒测流仪配合 YSI EXO2 多参数水质仪现场测定流速、流向等水文参数以及水温 (T)、溶解氧 (dissolved oxygen, DO)、pH、电导率 (electric conductivity, EC)、氧化还原电位 (oxidation-reduction potential, ORP)、碱度 (total alkalinity, $TALK$) 等主要常规理化指标。

2.2 溶解性有机碳 (DOC) 与理化指标分析

DOC 浓度采用有机碳分析仪 (Elementar Vario TOC, 德国) 测定; 使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB 11894—89) 和钼酸铵分光光度法 (GB 11893—89) 测定总氮 (TN)、总磷 (TP) 浓度; COD 浓度采用重铬酸钾滴定法测定; 采用连续流动注射分析仪 (SKALAR San⁺⁺, Netherlands) 测定水样中的

NO_3^- 及 NH_4^+ 浓度。

2.3 溶解性有机碳 (DOC) 通量估算

本研究对各水库有机碳输移通量的计算采用生源物质稳态箱式算法模型。模型原理如图 2 所示。

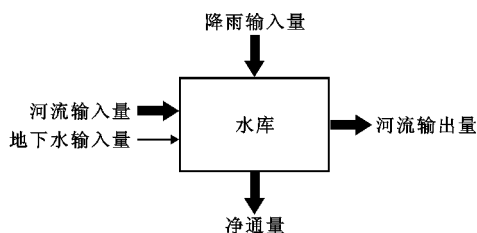


图2 DOC 通量箱式模型示意图

水库 DOC 净通量为水库入库 DOC 通量与出库 DOC 通量之差, 具体计算如以下公式所示。

$$F_{DOC} = \sum F_{input} - \sum F_{output} \quad (1)$$

$$F_{DOC} = V_{input} \cdot C_{input} - V_{output} \cdot C_{output} \quad (2)$$

式中: F_{DOC} 为 DOC 净通量, kt; F_{input} 和 F_{output} 分别为水库中 DOC 的输入通量和输出通量, kt。 V_{input} 和 V_{output} 分别为水库入库水量和出库水量, m^3 ; C_{input} 和 C_{output} 分别为 DOC 的入库浓度和出库浓度, mg/L 。若 F_{DOC} 值为正, 则筑坝对河流有机碳具有拦截滞留效应, 水库为有机碳的“汇”; 若 F_{DOC} 值为负, 则筑坝对河流有机碳具有随流输送效应, 水库为有机碳的“源”, 净通量与输入通量之比为水库效应对有机碳的拦截率或输送率。

在本研究中, 研究区出、入库流量资料来源于水利部黄河水利委员会网站 (<http://www.yrcc.gov.cn/>), 主要为研究时段内一个水文年的资料, 即在 2019 年 8 月至 2020 年 7 月这一时间段内的资料, 后根据公式 (3) 计算各水库的出、入库水量。各水库的出、入库水量如表 2 所示。

表2 研究时段内各水库河流量月出、入库水量

 10^9 m^3

月份	龙羊峡		拉西瓦		李家峡		公伯峡		刘家峡	
	入库	出库	入库	出库	入库	出库	入库	出库	入库	出库
1	0.73	1.38	1.40	1.40	1.36	1.36	1.39	1.39	1.80	1.42
2	0.61	1.27	1.27	1.26	1.22	1.21	1.25	1.25	1.54	1.21
3	0.81	1.49	1.49	1.49	1.43	1.44	1.48	1.48	1.80	1.68
4	1.38	2.20	2.23	2.24	2.16	2.19	2.23	2.23	2.54	3.08
5	2.30	2.68	2.70	2.69	2.65	2.61	2.65	2.64	3.35	3.68
6	4.26	3.47	3.40	3.40	3.32	3.35	3.47	3.49	4.08	4.15
7	5.39	5.15	4.80	4.80	5.04	5.07	5.00	5.01	6.22	6.05
8	4.38	4.30	4.19	4.17	4.24	4.23	4.30	4.32	4.82	4.72
9	4.64	2.34	2.34	2.34	2.37	2.36	2.48	2.48	3.63	3.35
10	3.71	2.87	2.92	2.92	3.00	3.00	2.97	2.97	3.77	4.42
11	1.97	1.93	1.96	1.96	1.96	1.98	1.98	1.99	2.43	2.67
12	0.88	1.52	1.58	1.40	1.55	1.53	1.54	1.53	2.03	1.53
总计	31.06	30.60	30.28	30.07	30.30	30.33	30.74	30.78	38.01	37.96

$$V = Q \cdot t \quad (3)$$

式中: V 为各水库出、入库径流量, m^3 ; Q 为流量, m^3/s ; t 为时间, s 。

2.4 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 25 和 Origin pro 9 等软件进行数据处理和图表绘制,通过 Pearson 相关分析研究 DOC 浓度与常规理化指标的关系,并进行线性回归拟合分析。在所有分析中, $P < 0.05$ 被认为是所测试因子的关系在统计学上显著相关。

3 结果与分析

3.1 DOC 浓度与常规理化指标沿程时空分布特征及相关性

黄河上游龙-刘段表层水中 DO、pH、 T 、 EC 、 TN 、 TP 、 NH_4^+-N 、 COD 和 DOC 浓度在不同水期(汛期、非汛期)的沿程分布存在一定的时空变化特征,具体见图 3 和 4。图 3 和 4 中的横坐标为“距离”,是指各采样点距刘家峡大坝的距离。

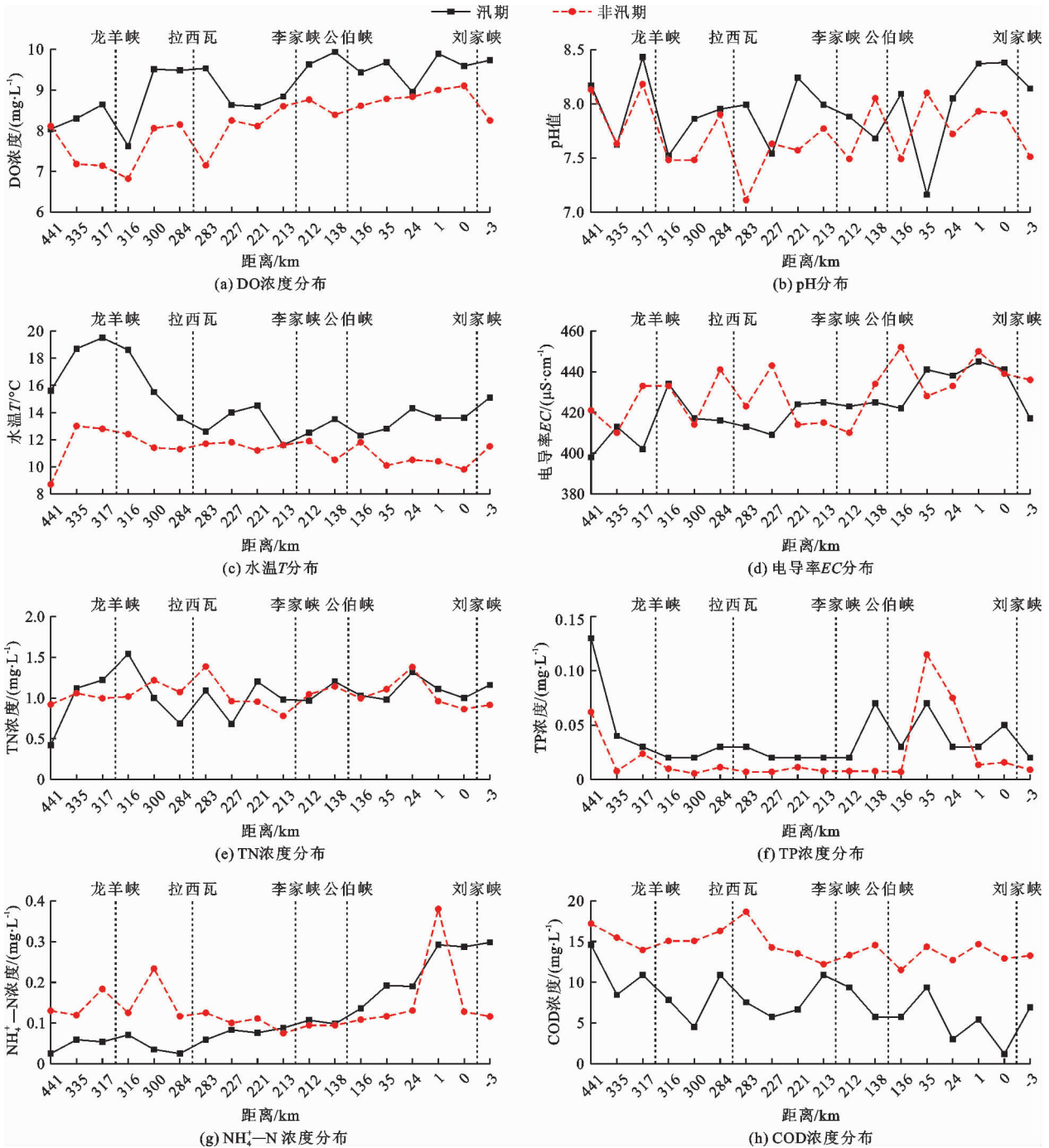


图 3 黄河上游梯级开发龙-刘段各理化指标沿程时空分布

由图3可以看出,在汛期,黄河龙-刘段自上游至下游表层水中DO浓度和EC呈逐渐增大趋势,pH均处于7以上,且沿程变化不大;T和COD浓度总体呈现降低趋势,NH₄⁺-N浓度呈现缓慢增大趋势;TN和TP浓度沿程变化不大,但龙羊峡和刘家峡的TP浓度偏高。在非汛期,黄河龙-刘段自上游至下游表层水中各理化指标沿程分布特征与汛期相似。对比两个水期各理化指标的平均值,DO浓度、TP浓度(个别测点除外)和T为汛期高于非汛期;COD浓度则为非汛期高于汛期;而两个水期的pH和TN、EC、NH₄⁺-N浓度基本相同。

由图4可以看出,在汛期与非汛期DOC浓度总体呈现波动变化的趋势。在汛期,DOC浓度的沿程

分布可分为2个波动式减小区间,第1个区间为龙羊峡库尾至李家峡库区,第2个区间为李家峡坝前至刘家峡坝下。在非汛期,DOC浓度的沿程分布可分为3个变化区间,第1个区间为自龙羊峡至拉西瓦呈波动减小趋势,第2个区间为自李家峡至公伯峡呈减小趋势,第3个区间为自公伯峡至刘家峡呈增大趋势,但在坝前处浓度降低(受洮河影响)。沿程各测点的DOC平均浓度均为汛期高于非汛期,汛期DOC浓度最高值出现在龙羊峡水库库尾,即唐乃亥水文站处,非汛期DOC浓度最高值出现在刘家峡水库的洮河汇入口处。

对汛期和非汛期的DOC浓度与各理化指标进行Pearson相关性分析,结果如表3、4所示。

表3 汛期DOC浓度与各理化指标之间相关性分析

指标	DOC	T	DO	pH	EC	ORP	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	COD
DOC	1.000									
T	0.145	1.000								
DO	-0.347	-0.161	1.000							
pH	0.098	0.319	0.111	1.000						
EC	-0.533*	-0.532*	0.494*	-0.143	1.000					
ORP	-0.477*	-0.256	0.436	0.184	0.464	1.000				
TN	0.147	-0.626**	0.060	-0.009	0.209	-0.236	1.000			
TP	-0.268	-0.150	-0.496*	-0.182	0.022	-0.034	-0.018	1.000		
NH ₄ ⁺ -N	0.814**	0.054	-0.117	-0.062	-0.349	-0.272	0.129	-0.322	1.000	
COD	-0.238	-0.090	0.510*	0.248	0.579*	0.398	0.230	-0.077	-0.093	1.000

注:“**”表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关(双侧);“*”表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关(双侧)。

表4 非汛期DOC浓度与各理化指标之间相关性分析

指标	DOC	T	DO	pH	EC	ORP	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	COD
DOC	1.000									
T	-0.252	1.000								
DO	0.227	-0.660**	1.000							
pH	0.102	-0.518*	0.369	1.000						
EC	0.332	-0.504*	0.074	0.390	1.000					
ORP	-0.066	0.289	-0.280	-0.134	0.284	1.000				
TN	0.009	0.087	-0.296	-0.528*	-0.152	-0.125	1.000			
TP	-0.015	-0.455	0.176	0.408	0.289	-0.322	0.078	1.000		
NH ₄ ⁺ -N	0.953**	-0.138	0.191	0.131	0.240	-0.071	-0.083	-0.058	1.000	
COD	0.124	-0.012	-0.585*	-0.171	0.224	0.028	0.513*	0.046	0.077	1.000

注:“**”表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关(双侧);“*”表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关(双侧)。

由表3、4可以看出,在汛期中,水库水体中的DOC浓度与EC和ORP呈显著负相关关系($P <$

0.05),与NH₄⁺-N浓度呈极显著正相关关系($P < 0.01$);在非汛期中,水库水体中DOC浓度与

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。

3.2 DOC 浓度与常规理化指标垂向时空分布特征

选取黄河上游龙-刘段的 3 个主要调节水库(龙羊峡、李家峡、刘家峡水库),对其坝前深水区域的理化指标 DO 浓度、水温 T 和 DOC 浓度沿水深进行垂向检测分析,结果如图 5 所示。

对图 5 中 3 个水库坝前的 DO 浓度、水温 T 和 DOC 浓度垂向分布特征分析如下:

在汛期,龙羊峡水库坝前 DO 浓度在水深 0~30 m 范围内随水深不断减小,在水深 30~100 m 范围内随水深不断增大,变化曲线呈“侧 V”形状,DO 浓度在 30 m 水深处达到极小值,为 6.80 mg/L;李家峡水库坝前 DO 浓度在 30 m 水深处出现最高值 9.56 mg/L,整体表现为深部 DO 浓度略高于表层;

刘家峡水库坝前 DO 浓度随水深呈波动减小趋势,在水深 0~30 m 范围内 DO 浓度从 9.59 mg/L 减小到 9.07 mg/L,直至底层水体的 DO 浓度依然较小。在非汛期,3 个水库坝前的 DO 浓度沿水深变化不大,表现出均匀混合状态。

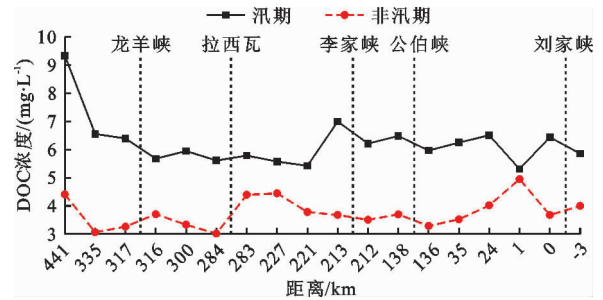


图 4 黄河上游梯级开发龙-刘段 DOC 浓度沿程时空分布

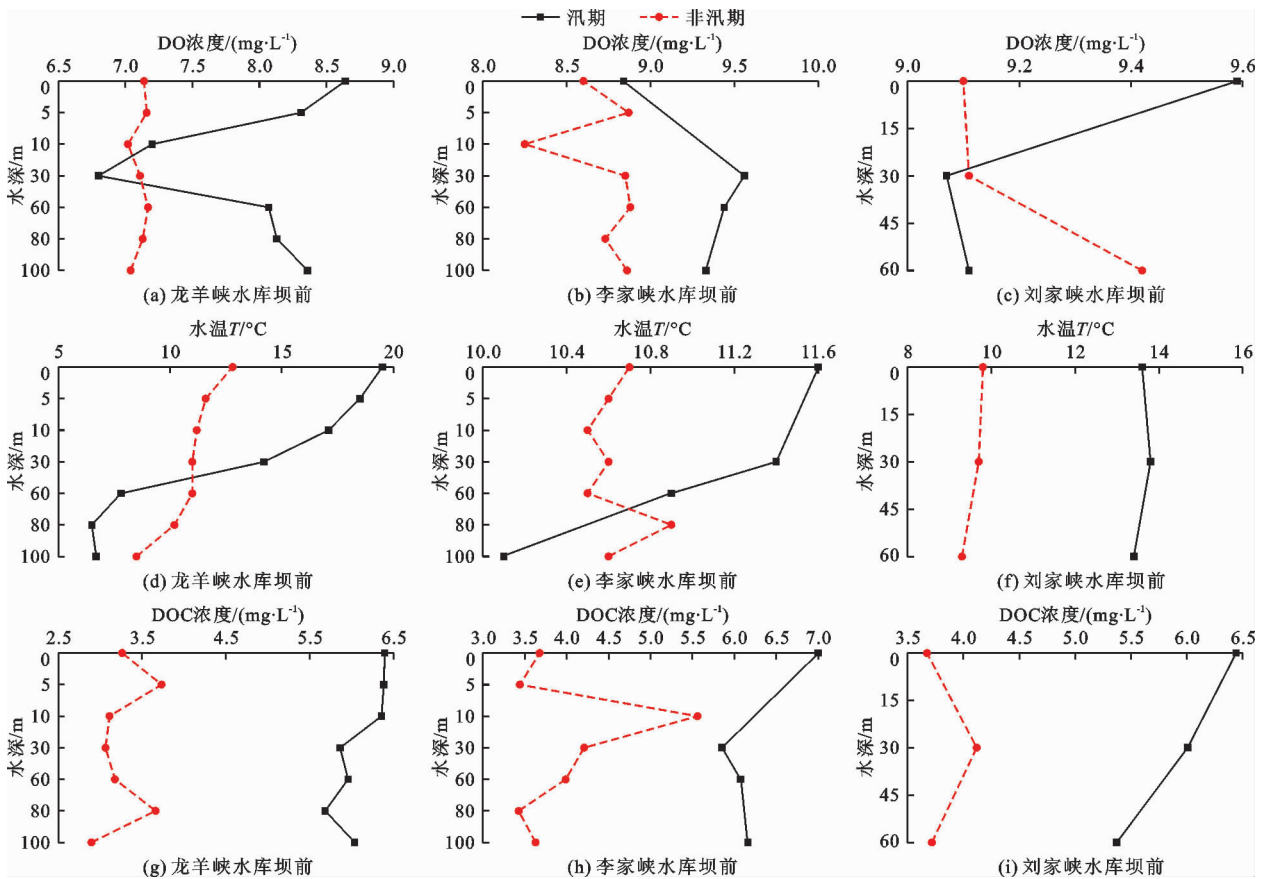


图 5 黄河上游龙羊峡水库、李家峡水库、刘家峡水库 DO 浓度、 T 和 DOC 浓度坝前垂向分布

在汛期,龙羊峡水库水温从表层至底层呈现逐渐降低的趋势,存在明显的水温分层现象,水体表、底温差达到 12 °C;李家峡水库表层水体温度高于底层,水温随水深呈降低趋势,但未出现明显的水温分层,水体表、底温差为 1.6 °C;刘家峡水库水温垂向无明显差别。在非汛期,3 个水库垂向水温均无分层,呈现均匀混合状态。

3 座水库的坝前 DOC 浓度总体表现为汛期比非汛期高的特征,这与 DOC 浓度在龙-刘段的沿程分布特征一致。从空间分布上看,龙羊峡水库坝前水体 DOC 浓度汛期在 5.69~6.40 mg/L 之间,非汛期在 2.90~3.73 mg/L 之间;两个水期的坝前水体 DOC 浓度随水深的增加总体均呈波动减小趋势,汛期在水深 0~10 m 内呈缓慢减小趋势,在水深 10~

30 m内降幅急剧增大,在30 m水深以下呈波动变化;非汛期DOC浓度在水深0~10 m内呈波动变化,在水深10~80 m内呈增大趋势,在80 m水深以下呈减小趋势。在李家峡水库坝前水体中,汛期DOC浓度在5.85~7.00 mg/L之间,非汛期在3.43~5.56 mg/L之间;汛期在水深0~30 m内DOC浓度呈减小趋势,在水深30~100 m内略有增加;非汛期在水深0~5 m内DOC浓度呈减小趋势,而在水深5~10 m内急剧增大达到峰值,在水深10~80 m内又持续减小,在水深80~100 m内略有回升。刘家峡水库坝前水体的DOC浓度汛期在5.37~6.44 mg/L之间,非汛期在3.68~4.12 mg/L之间,受采样点位数量的限制,其垂向分布的规律性不显著。

3.3 梯级水库(龙-刘段)DOC输运量时空特征

本研究对采样年黄河上游梯级开发龙-刘段各水库的DOC输入与输出通量按汛期和非汛期分别进行了估算,结果如图6所示。黄河上游枯水期在每年的1-4月及11-12月,丰水期在5-10月,故图6中以2019年11月和2020年7月的DOC含量分别代表黄河上游龙-刘段非汛期和汛期DOC的各月含量。

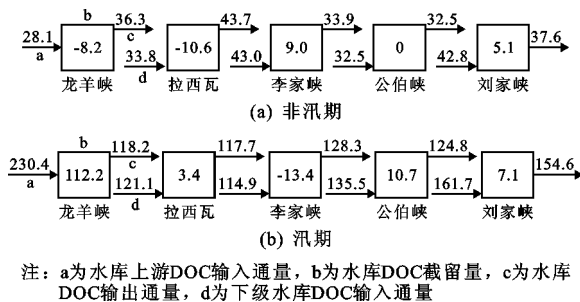


图6 黄河上游梯级开发龙-刘段不同水期DOC的输入与输出通量(单位:kt)

由图6可以看出,在非汛期,龙羊峡、拉西瓦水库的DOC输出通量大于输入通量,公伯峡水库的DOC输入通量与输出通量相等,李家峡和刘家峡水库的DOC输出通量小于输入通量;在汛期,只有李家峡水库的DOC输出通量大于输入通量,其余各水库均为输出通量小于输入通量。在非汛期,黄河上游梯级开发(龙-刘段)DOC输入通量为28.1 kt,输出通量为37.6 kt,表明在非汛期梯级水库段对DOC无截留;在汛期,黄河上游梯级开发(龙-刘段)DOC输入通量为230.4 kt,输出通量为154.6 kt,表明在汛期梯级水库段的DOC截留量较高。在采样期的完整水文年里,黄河上游梯级开发(龙-

刘段)DOC年输入通量为258.5 kt,输出通量为192.2 kt,表明2019-2020年梯级水库段对DOC截留总量较高。

4 讨论

水电站大坝的修筑阻断了天然河流的连续性,使水库逐渐转型为湖泊的环境条件,但水电站的水资源调节作用又使其不同于天然湖泊。“湖沼学反应”是河流-水库环境与天然河流环境间存在的差异,水库中水体的季节性分层现象造成了垂向剖面上水体物化特性的不同,从而影响河流-水库中输移物质的水化学过程,最终水库效应对下游河流的直接影响表现为物质通量的变化。已有研究表明,河流主要生源物质碳、氮、磷在河流-水库体系中呈不稳定形态,水库使河流生源要素的赋存特征和输移通量发生改变^[8]。

本研究中,在采样年份内,各水库对DOC的拦截率及输送率,如图7所示。

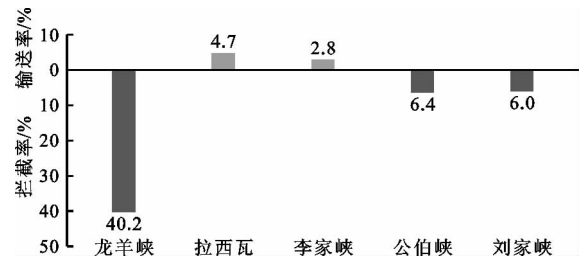


图7 各水库对DOC的拦截率及输送率

由图7可以看出,自上游至下游,龙羊峡水库对DOC的拦截率为40.2%,呈现显著的拦截效应;拉西瓦水库和李家峡水库对DOC的输送率分别为4.7%和2.8%,呈现输送效应;公伯峡水库和刘家峡水库对DOC的拦截率分别为6.4%和6.0%,呈现拦截效应。相比而言,龙羊峡水库对DOC的拦截效应最显著,拉西瓦水库对DOC的输送效应最显著。梯级水库对河流主要生源物质的输移通量均会产生影响,表现为筑坝后水库可大量拦截有机物质,通过物理沉降和生物吸收作用使其在库内累积,导致河流通量下降。黄河上游梯级水库总体表现为该区域河流-水库体系DOC的“汇”,即梯级水库作用过程中拦截了输入河流-水库体系的DOC,5个梯级水库的总拦截率为25.6%。尤其是成熟期和有效库容大的水库,库内的生态系统过程逐渐接近于天然湖泊,其拦截效应更为显著,如龙羊峡水库对于DOC的拦截率达40.2%。

河流梯级开发阻碍了DOC沿河网的正常流动,

物质的转化和去除过程得以加强,通过泥沙沉降过程,增加了水库中的 DOC 和众多养分的保留量^[19]。水库热分层改变了不同区域的限制性营养元素^[10],对水体中 DOC 浓度同样具有重要的控制作用。本文所研究的各水库均具有季节性和空间变化性的热分层现象(图5),这可能是造成黄河上游梯级开发下各个水库对 DOC 表现出不同效应的原因之一。梯级水库虽然表现为上游水库泄水直接补给下游水库,但由于各水库营养状况不同,内部水生生物产生的 DOC 含量也不尽相同,水库内部浮游植物通过光合作用固定碳,可以看作为水库碳循环的重要驱动力,并且对 CO_2 和 HCO_3^- 等的生物可利用性同样影响了浮游植物初级生产力和群落演替。本文中拉西瓦和李家峡两个水库拥有相对较高的 DOC 含量,通过相关性分析得出 DOC 含量与 NH_4^+-N 等具有显著的正相关性,因此可以认为较高浓度的 DOC 含量以及水库自身的营养状态可能掩盖了对水库 DOC 的拦截效应,从而呈现输送效应。将本研究区域与国内其他主要流域的 DOC 年输运量进行对比,如表5所示。

表5 国内主要河流-水库系统 DOC 年输出通量对比

研究区域	DOC 年输出总量/kt
长江大通站	1620 ^[11]
闽江竹岐站	110 ^[12]
长江三峡水库	514 ^[13]
黄河三门峡水库	76 ^[14]
乌江乌江渡水库	12.4 ^[15]
本研究	192.2

分析表5中不同研究区域的 DOC 年输出总量数据认为,在河流-水库体系中,本文的研究对象为黄河上游流域的梯级水库群,区别于黄河中下游的干流水体,上游的泥沙含量相对较少,颗粒态有机碳(POC)含量相对较低,使 DOC 的输出通量处于相对较高的水平。另外,梯级水库的沉降作用使库区内形成一个独立完整的水环境体系,水库内的水温、微生物的降解作用、光解作用和 POC 的沉淀作用都会导致库区内 DOC 的累积^[16-17],之后 DOC 会随着水库泄洪进入下游河流。与黄河中游三门峡水库的 DOC 输出通量相比,上游水库的 DOC 输出通量仍较高,这可能有以下几个原因:(1)本文研究区域黄河上游处于高海拔、日照辐射强的地理位置;(2)黄河源区冻土中经冻融循环后有大量的 DOC 释放到

河流中;(3)黄河上游流经多放牧的草原和草甸,沿岸林区和灌木枯落物中的 DOC 释放进入河流等。

通过本文的研究可以认为,河流的梯级开发改变了原有 DOC 的输移过程,针对此类情况,在未来的大坝建设中应充分考虑其对 DOC 和养分循环的影响,在梯级开发规划阶段应评价预测水库各个阶段物质的生物地球化学过程,并对水力停留时间、水库热分层等因素与 DOC 迁移转化之间的关系进行进一步的论证分析,从而尽可能地减少河流梯级开发对 DOC 等物质通量的影响。

5 结论

本文选取黄河上游水利工程梯级开发河段(龙-刘段)为研究区域,以溶解性有机碳(DOC)为研究对象。分析了梯级水库水体中 DOC 浓度及常规理化指标的沿程以及垂向时空分布特征。采用生源物质稳态箱式算法模型估算了不同水库的 DOC 物质通量。通过解析不同水库对 DOC 物质的拦截和输送,评估了黄河上游梯级开发(龙-刘段)对 DOC 的源汇效应。具体结论如下:

(1)纵向时空分布表明:在汛期和非汛期,DO、电导率 EC 和 NH_4^+-N 浓度沿程呈逐渐增大趋势, pH 均处于 7 以上,水温 T 和 COD 浓度沿程呈现逐渐下降趋势, TN 和 TP 浓度沿程变化不大,两个水期 DOC 浓度总体呈现波动变化趋势。对比两个水期的理化指标及 DOC 的平均浓度,其中 DO 浓度、 TP 浓度(个别测点除外)、水温 T 和 DOC 浓度为汛期高于非汛期, COD 浓度则为非汛期高于汛期。相关性分析表明,在汛期,水库水体中的 DOC 浓度与电导率(EC)和氧化还原电位(ORP)呈显著负相关关系($P < 0.05$);在非汛期,DOC 浓度与 NH_4^+-N 浓度呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。

(2)垂向时空分布表明:在汛期,龙羊峡水库存在水温分层现象,DO 浓度呈现“侧 V”分布。李家峡和刘家峡水库表层至底层水温无明显差别,DO 浓度逐渐降低。在非汛期,龙羊峡、李家峡和刘家峡水库水温和 DO 浓度垂向上均无明显差异,呈现均匀混合状态。该 3 座水库的 DOC 浓度总体均表现为汛期比非汛期高的特征。

(3)DOC 输移通量估算结果表明:在采样期的完整水文年里,DOC 在黄河上游梯级开发河段(龙-刘段)年输入通量为 258.5 kt,年输出通量为 192.2 kt,总拦截率为 25.6%。呈现拦截效应的水库为龙羊峡、公伯峡和刘家峡,呈现输送效应的水库

为拉西瓦和李家峡。

参考文献:

- [1] 王超. “西南水电高坝大库梯级开发的生态保护与恢复”研究构想[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 19-26.
- [2] 黄海涛. 水电开发中的生态风险评价与管理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [3] BIRKEL C, SOULSBY C, TETZLAFF D. Integrating parsimonious models of hydrological connectivity and soil biogeochemistry to simulate stream DOC dynamics[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(5): 1030-1047.
- [4] 卢晓漩, 李强, 靳振江, 等. 桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2075-2085.
- [5] PARKS S J, BAKER L A. Sources and transport of organic carbon in an Arizona river - reservoir system[J]. Water Research, 1997, 31(7): 1751-1759.
- [6] WANG Xuchen, MA Haiqing, LI Ronghua, et al. Seasonal fluxes and source variation of organic carbon transported by two major Chinese Rivers: The Yellow River and Changjiang (Yangtze) River[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(2): GB2025.
- [7] ZHANG Longjun, WANG Liang, CAI Wenjie, et al. Impact of human activities on organic carbon transport in the Yellow River[J]. Biogeosciences, 2013, 10(4): 2513-2524.
- [8] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 384-396.
- [9] MAAVARA T, CHEN Qiuwen, VAN METER K, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1: 103-116.
- [10] WANG Fushun. Impact of a large sub-tropical reservoir on the cycling of nutrients in a river[J]. Water Research, 2020, 186: 116363.
- [11] 刘东. 基于遥感与实测资料的河流有机碳通量估算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [12] 钱伟, 陈莹, 杨柳明, 等. 闽江下游不同碳组分及其通量特征[J]. 环境科学研究, 2019, 32(4): 647-653.
- [13] 周子然. 三峡库区典型支流溶解有机碳季节变化规律及其对长江干流碳通量的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [14] 张永领, 董玉龙, 张东. 在三门峡水库影响下黄河有机碳的输送特征[J]. 地理科学, 2015, 35(7): 912-918.
- [15] 彭希, 刘丛强, 汪福顺, 等. 河流-水库体系水体表层 $p\text{CO}_2$ 时空变化特征及其扩散通量——以六冲河、洪家渡水库、红枫湖为例[J]. 地球与环境, 2013, 41(2): 97-103.
- [16] GOBLER C J, SAÑUDO-WILHELMY S A. Cycling of colloidal organic carbon and nitrogen during an estuarine phytoplankton bloom[J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(6): 2314-2320.
- [17] HASTIE A, LAUERWALD R, CIAIS P, et al. Aquatic carbon fluxes dampen the overall variation of net ecosystem productivity in the Amazon basin: An analysis of the interannual variability in the boundless carbon cycle[J]. Global Change Biology, 2019, 25(6): 2094-2111.

