

大汶河典型干流段不同水平年溶解氧与氨氮时空分布特征研究

乔新贺¹,孙宇潇¹,张洁¹,李增斌³,段震^{2*},王刚^{1*}

1. 山东农业大学水利土木工程学院,山东 泰安 271018

2. 泰安市水文中心,山东 泰安 271001

3. 岱岳区水利局,山东 泰安 271001

摘要:为认识大汶河典型干流段不同水平年DO和NH₃-N的时空分布特征,研究基于EFDC模型构建了典型河段水动力水质模型,量化揭示了DO与NH₃-N浓度的时空分布规律,并识别了关键污染时段与河段。结果表明:在平水年份,DO浓度于8月降至全年最低值5 mg/L,NH₃-N则达到全年峰值0.3 mg/L;在枯水年份,NH₃-N浓度在3月达峰值0.843 mg/L,随4月降水量增加至42.2 mm后显著下降,DO浓度则维持在7.0-8.6 mg/L的稳定区间;在丰水年份,径流量相较于降水量存在约1个月的滞后响应,8月达降水峰值228 mm后,9月DO降至最低值6.3 mg/L,NH₃-N增至最高值0.318 mg/L,二者变化呈负相关。空间分布上,平水年份与枯水年份非汛期DO浓度由大汶口至河口整体呈递增趋势,增量约1.2-1.8 mg/L,丰水年份则在戴村坝区域聚集,中部较上下游高0.5-0.9 mg/L;平水年份汛期形成“大汶口>河口>中部”的结构,枯水年份戴村坝区域浓度较上下游高0.4-0.7 mg/L。NH₃-N浓度空间分布整体呈递减模式,大汶口至河口浓度降幅达48%-67%,仅丰水年份汛期在中游富集,较上下游高0.3-0.5 mg/L。受自然因素和人类活动的共同影响,河段水质在时空上均表现出不均匀性,研究结果为制定科学有效的水污染防治对策和水资源管理策略提供模型基础和科学依据。

关键词: EFDC模型; 大汶河水环境; DO; NH₃-N; 时空分布

中图分类号: TV143

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)02-0332-13

Study on Spatiotemporal Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Ammonia Nitrogen in Typical Mainstream Sections of the Dawen River in Different Level Years

QIAO Xin-he¹, SUN Yu-xiao¹, ZHANG Jie¹, LI Zeng-bin³, DUAN Zhen^{2*}, WANG Gang^{1*}

1. College of Water Conservancy and Civil Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. Tai'an Hydrological Center, Tai'an 271018, China

3. Daiyue District Water Conservancy Bureau, Tai'an 271018, China

Abstract: To understand the spatiotemporal distribution characteristics of DO and NH₃-N in the typical mainstream section of the Dawen River under different level years, this study constructs a hydrodynamic water quality model for the typical river section based on the EFDC model. It quantitatively reveals the spatiotemporal distribution patterns of DO and NH₃-N concentrations, and identifies the key pollution periods and river sections. The results show that in a normal year, DO concentration drops to its annual minimum of 5 mg/L in August, while NH₃-N reaches its peak of 0.3 mg/L. In a dry year, NH₃-N concentration reaches a peak of 0.843 mg/L in March, and decreases significantly with precipitation increased to 42.2 mm in April, while DO concentration remains stable within 7.0-8.6 mg/L. In a wet year, runoff lags behind precipitation by about one month; after precipitation peaks at 228 mm in August, DO drops to its lowest value of 6.3 mg/L in September, while NH₃-N increases to its highest value of 0.318 mg/L, showing a negative correlation between the two. Spatially, during the non-flood season, in normal and dry years, DO concentration generally increases from Dawenkou to the estuary, with an increase of about 1.2-1.8 mg/L, while in wet increases from Dawenkou to the estuary, with an increase of about 1.2-1.8 mg/L, while in wet years, DO is concentrated in the Daicun Dam area, with the midstream section being 0.5-0.9 mg/L higher than upstream and downstream sections. During the flood season, in normal years, DO shows a pattern of “Dawenkou > estuary > midstream”, while in dry

收稿日期: 2025-11-16

修回日期: 2026-03-18

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021MD119); 国家自然科学基金资助项目(41202174)

第1作者简介: 乔新贺(2001-),女,硕士研究生,研究方向:地表径流模拟。E-mail: 1253282609@qq.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: gwang@sdau.edu.cn; 252285195@qq.com

years, concentrations in the Daicun Dam area are 0.4-0.7 mg/L higher than in upstream and downstream sections. $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration generally exhibits a decreasing spatial pattern, with reductions of 48%-67% from Dawenkou to the estuary, except during the flood season in wet years when it is enriched in the midstream, exceeding upstream and downstream sections by 0.3-0.5 mg/L. Under the combined influence of natural factors and human activities, water quality in the river reach shows spatial and temporal heterogeneity. The study provides a modeling foundation and scientific basis for formulating effective water pollution control measures and water resource management strategies.

Keywords: EFDC model; Dawen River water environment; dissolved oxygen; ammonia nitrogen; spatial and temporal distribution

河流作为地表水系统的重要组成部分,不仅是维系流域生态系统健康的关键纽带,也是区域经济社会发展不可或缺的水资源载体^[1]。随着工业化、城镇化进程的加速和人类活动的加剧,许多河流面临着严峻的水环境问题,水质恶化、水生态功能退化等现象日益突出^[2]。2025年5月16日,经国务院同意,生态环境部、水利部等7个部门联合印发了《美丽河湖保护与建设行动方案(2025-2027年)》,明确了美丽河湖保护与建设总体要求、重点任务、组织实施等内容。全面推进美丽河湖保护与建设离不开水环境管理,而明晰河流水质的时空动态是水环境管理的基础^[3,4]。

河流水质受到自然因素(如水文情势、气候变化、地质背景)和人类活动(如点源污染排放、面源污染输入、土地利用变化、水利工程调控)的共同影响^[5],呈现出复杂的时间和空间变异性^[6]。例如,汛期和非汛期的水文条件差异巨大^[7],往往导致污染物浓度和通量的显著变化^[8];不同河段由于承接的污染负荷、水动力条件和自净能力不同,其水质状况也可能存在明显差异^[9]。水环境数学模型是定量描述水体中物理、化学及生物过程的有力工具^[10],能够模拟复杂水环境系统的动态变化,预测不同情景下水质的响应,为水环境管理和决策提供科学支撑^[11]。在众多水环境模型中,环境流体动力学模型(Environmental Fluid Dynamics Code, EFDC)以其强大的三维水动力、泥沙运输、水质及有毒物质迁移转化模拟能力^[12],被美国环保局(USEPA)推荐并在全球范围内广泛应用于河流、湖泊、水库、河口及近海水域的水环境模拟研究^[13]。EFDC模型能够精细刻画水体的三维流场结构,耦合复杂的水质生化反应过程,为揭示水质时空分布格局及其驱动机制提供了可能^[14]。目前,EFDC模型已被成功应用于各种水环境问题的研究。例如,江雨蒙等利用EFDC模型预测模拟了污水厂尾水中COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP等污染物在河道的迁移扩散情况及对苏

嘴断面的水质影响^[15]。赵长进等人运用EFDC模型,以华南地区典型重污染闸控河口—粤东地区的练江河口为研究对象,分析水质风险的季节性变化规律和对应的闸控调度策略^[16]。此外,Huakun等应用二维EFDC模型(或类似模型)研究了大型离岸人工岛(大连海上机场)建设对近岸海域水动力和水质(悬浮泥沙)的影响,为海岸工程的环境影响评价提供了案例^[17]。Á. Menéndez等利用水动力模型驱动EFDC水质模块,对拉普拉塔河沿岸区域进行了水质评估,并结合水质标准划定了不同用水功能的限制区域^[18]。EFDC模型在河流、湖泊、水库、河口及近海水域的水动力水质模拟中都取得了较好的研究效果。大汶河作为黄河下游的最大支流及南水北调东线蓄水区东平湖的重要输水河流,其水质状况直接关系到东平湖乃至黄河下游的水生态环境健康,对保障南水北调东线工程供水水质安全至关重要,明确其水质时空变化特征及规律具有重要意义^[19]。

本文以大汶河干流大汶口水文站的控制断面(桩号85+100)为起点,东平湖东部河口(桩号0+000)为终点的河段为研究对象,基于EFDC模型构建该河段的水动力及水质模型,通过监测流量、DO(溶解氧)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (氨氮)数据对模型进行率定与验证,利用经验证的模型分析不同水平年份汛期与非汛期研究河段DO、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的时空分布特征与变化规律。通过阐明不同水平年水动力条件下大汶河干流水质在不同时空条件下的分布特征及其驱动机制,为大汶河干流水污染防治对策和水资源管理策略制定提供技术支撑,进而为黄河流域高质量发展提供科学依据,因此具有重要的理论与实践意义^[20]。

1 研究区域概况

大汶河位于黄河下游的山东省境内,自东向西依次流经济南、泰安、汶上、东平等县市,经东平湖最终流入黄河,大汶河干流河道长239 km,

上游段比降为1.23%，中游段比降为0.7%，流域总面积约9 098 km²，是黄河下游的最大支流。本研究河段位于鲁中山区西麓向鲁西平原过渡地带，是大汶河下游水沙的主要输送载体。河段处于暖温带半湿润季风性大陆气候区，年均气温约14.77℃，年均降水量约634.4 mm。降水与

气温时空分布不均，高度集中于汛期。该河段水文过程具有鲜明的季节性，汛期常受上游山区洪水快速汇流影响，流量暴涨暴落，洪峰显著；非汛期则流量锐减，水位较低。根据生态环境部门水质监测结果，大汶口水文站及戴村坝水文站两处的地表水水质满足Ⅲ类。

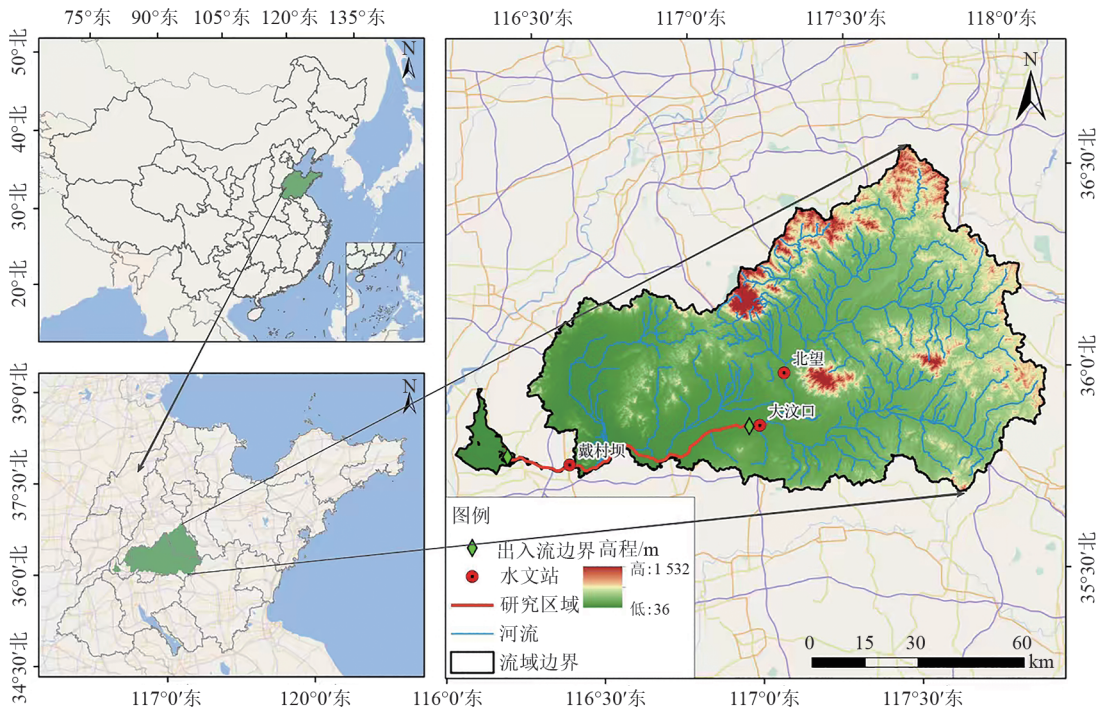


图1 大汶河流域分布图

Fig. 1 Distribution map of Dawen River Basin

注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2024)0650号标准地图制作。

Note: The map was produced based on Standard Map No. GS(2024)0650 from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources.

2 研究方法

2.1 模型原理

EFDC模型是由威廉玛丽大学维吉尼亚海洋科学研究所的John Hamrick等开发的三维地表水水质数学模型，是水环境生态模型之一，以水动力模块为基础，集成泥沙运移模块、水质与富营养化模块、有毒物质模块的综合性三维水环境模型。水质与富营养化模块是

EFDC模型的核心模块，其变量定义和动力学过程描述来源于CE-QUAL-ICM水质模型^[21]。EFDC模型水质模块变量关系结构如图2所示。

(1) 水动力计算原理 水动力模块是EFDC模型各子模型的运行基础，该模块产出的水动力信息为悬浮泥沙、营养物质、水溶性物质的迁移及扩散模拟提供了动力基础。

x方向的动量方程为：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y H u) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u u) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v u) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w u) - m_x m_y f H v - \left(v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H v = \\ & -m_y H \frac{\partial}{\partial x}(g \zeta + p + P_{atm}) - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{m_x m_y}{H} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) - m_x m_y c_p D_p u \sqrt{u^2 + v^2} + S_u \end{aligned} \tag{1}$$

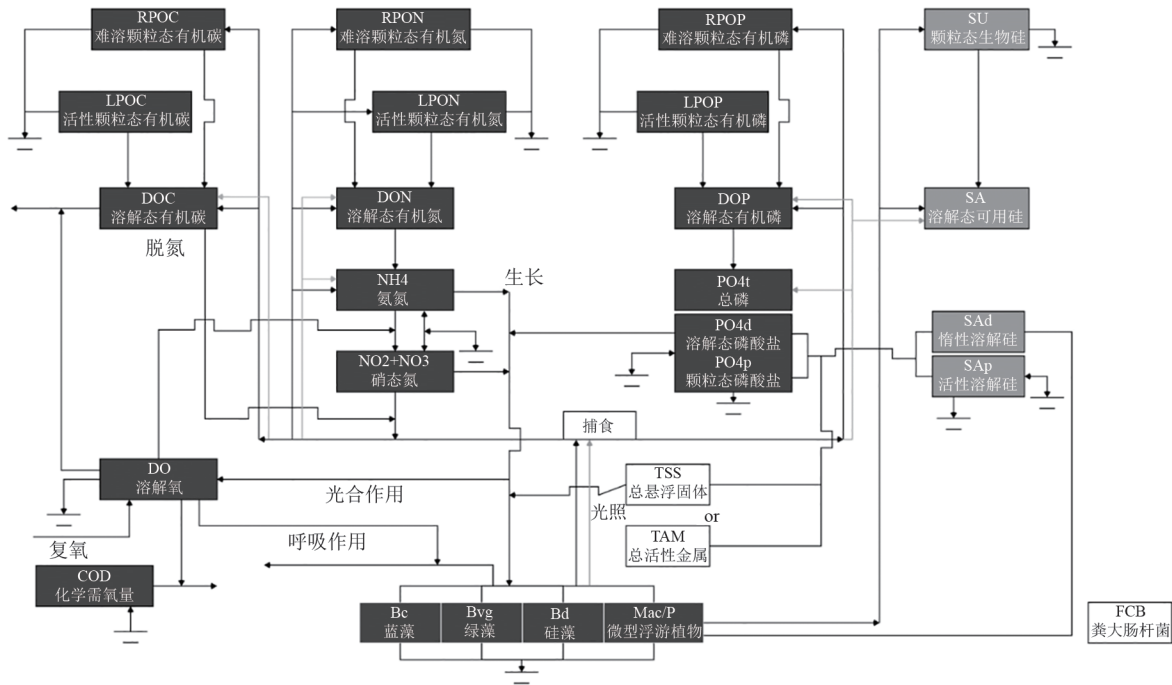


图 2 EFDC 水质模块变量关系结构图

Fig. 2 EFDC water quality module variable relationship structure diagram

y 方向的动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(m_x m_y H v) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u v) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v v) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w v) + m_x m_y f H u + \left(v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H u =$$

$$-m_x H \frac{\partial}{\partial y}(g \zeta + p + P_{atm}) - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{m_x m_y}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) - m_x m_y c_p D_p v \sqrt{u^2 + v^2} + S_v \quad (2)$$

z 方向的动量方程为:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g H \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = -g H b \quad (3)$$

式中: t —时间; (x, y) —水平方向的曲线-正交坐标; z —垂向坐标; (u, v, w) 流速在 (x, y, z) 方向的分量; H —总水深; m_x, m_y —坐标变换系数, 于笛卡尔坐标系下取 1; P_{atm} —大气压强; p —参考密度基准下的附加静水压; ρ —密度; ρ_0 —参考密度; b —浮力; f —科里奥利力系数; A_H —水平动量扩散系数; A_v —垂向紊动粘性系数; c_p —植被阻力系数; D_p —每单位水平面积的流量相交的投影植被区域; S_u, S_v — (x, y) 方向动量方程的源/汇项。

(2) 水质计算原理 水质与富营养化模块是 EFDC 模型的核心模块, 根据三维平流扩散方程, DO 和 NH_3-N 的迁移过程服从:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (u C)}{\partial x} + \frac{\partial (v C)}{\partial y} + \frac{\partial (w C)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_c \quad (4)$$

式中: C —水质因子浓度; K_x, K_y, K_z — x, y, z 方向的湍流扩散系数; S_c —源汇项(生化反应项)。

2.2 数据及来源

模型建立所需数据包括 DEM 数字高程数据、水体底床高程空间分布数据、气象数据、径流数据和水质数据。其中径流数据和水质数据选取了流域内戴村坝站和大汶口站(如图 1 所示)的实测流量数据和实测污染物浓度数据。具体数据内容及来源如表 1 所示。

2.3 模型构建

2.3.1 模型范围与边界 根据流域水文监测数据, 大汶口水文站控制断面以上集水面积达

表 1 数据及来源
Table 1 Data and sources

数据名称 Data name	格式 Format	数据内容 Data content	分辨率 Resolution	来源 Source
DEM	GRID	ASTER GDEM 数据	12.5 m	NASA 地球科学数据网站 https://nasadaacs.eos.nasa.gov/
河底高程	GRID	实测断面数据	15 弧秒	山东省水文年鉴(2018-2023)及黄河水利委员会测绘数据
气象数据	-	中国气象同化驱动数据集	逐日	国家青藏高原科学数据中心 https://data.tpcd.ac.cn/
水文数据	-	大汶口及戴村坝水文站实测径流数据与 实测水质数据	逐月	山东省水文资料汇编

5 287 km², 占全流域的 56.6%, 其径流量占干流总水量的 82% 左右。主要支流已在大汶口上游完成汇入, 下游段新增支流的年均流量贡献率不足 5%。因此本文选择起点为大汶河干流大汶口水文站的控制断面, 终点为东平湖东部河口的河段作为模型范围。以大汶口水文站位置作为模型的入流边界, 并在此设置水质边界, 以东平湖东部河口作为出流边界(见图 1)。模型上游流量边界采用大汶口水文站的径流数据, 水质边界采用大汶口水文站的 DO、NH₃-N 浓度数据, 模型率定和

验证采用戴村坝水文站的径流与水质数据, 模型下游水位边界采用水体底床高程空间分布数据。
2.3.2 模型网格 大汶河河道整体形状复杂蜿蜒, 沿河流行进方向, 河床高程呈自东向西递减的趋势。基于上述环境条件, 为适应河流边界的复杂地形并保证模型的正常运行, 本次模拟的垂直水层仅设单层, 并选取单元规格较小的直角均匀网格作为模型的网格类型, 模型的单元网格数量共计 2 813 格, 空间尺度为 150 m×150 m, 见图 3。

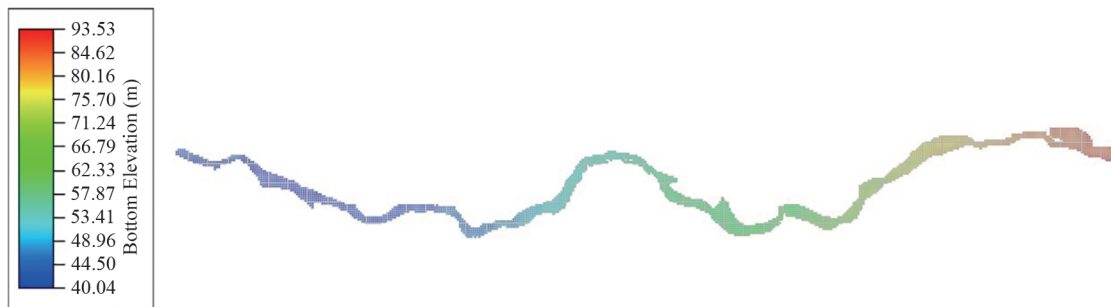


图 3 研究区模型网格及高程示分布图
Fig. 3 Model grid and elevation diagram of the study area

2.4 模型率定与验证

利用戴村坝水文站 1977-2023 年的长系列实测流量数据, 经频率分析相应丰水年 ($P=25%$)、平水年 ($P=50%$) 和枯水年 ($P=75%$) 特征。本次模拟选取 2018-2023 年实测水文水质监测数据进行模型的建立, 涵盖了平水年、枯水年以及丰水年三类水平年, 见表 2。2018-2020 年作为模型率定期, 2021-2023 年为模型验证期。选取这 6 年的戴村坝水文站实测流量、DO 和 NH₃-N 数据, 采用决定系数 (R^2)、纳什效率系数 (NSE) 指标进行模拟结果的验证与评价。

其中, 决定系数是常用于评价回归模型结果

与实际观测数据拟合优劣性的统计量, 其结果值展示了模型解释因变量方差的能力。决定系数的上下限介于 0 到 1 之间, 越接近于上限, 表示该模型对数据的拟合解释能力越强, 反之愈差。通常将 $R^2 > 0.6$ 作为实测值和模拟值相关程度的标准^[22]。

计算公式如下:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (5)$$

式中: Q_i ——实际观测值; S_i ——模型模拟值;
 \bar{Q} ——观测值平均值; \bar{S} ——模拟值平均值;
 n ——数据总量;

表 2 各水平年分类结果
Table 2 Classification results of each level year

水文站 Gaging station	水平年类型 Type of typical year	年份 Particular years	频率/% Frequency	年总径流/10 ⁸ m ³ Total annual runoff
戴村坝	偏枯水年	2019年	75.46	3.22
	平水年	2018年	51.33	6.14
	偏丰年	2023年	36.74	8.83
		2020年	23.53	11.32
	丰水年	2022年	6.26	19.41
		2021年	4	22.05

纳什效率系数主要用作验证模型模拟数值与观测数据间的一致性,介于负无穷到1之间,越接近上限越表明模拟数值与观测数据之间的吻合性越高。当NSE≤0.36时,认为模拟效果不好;当0.36<NSE<0.75时,认为模拟效果令人满意;当NSE≥0.75时,认为模拟的效果好^[23]。

计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (6)$$

(1) 水动力 图4给出了率定期和验证期流量过程,模拟河段内径流集中在汛期6-9月,在夏季径流高峰期,模拟结果与实测值之间存在较大差距,短时强降雨可能是导致径流峰值模拟失准的原因。基于验证指标R²高、NSE低的整

体差异,说明本模型能够较好地捕捉流量在时间上的总体变化趋势,但对整体均值的拟合度较弱,该模型在多数年的汛期,模拟流量的峰值低于实测数值,从而影响NSE指标的验证结果。

总体而言,模型在率定期和验证期,戴村坝站径流模拟值与实际值吻合度较高,变化趋势基本一致。从模型模拟评价结果(见表3)来看,率定期内各年份决定系数(R²)均大于0.9,纳什效率系数(NSE)均大于0.5,验证期内R²与NSE均大于0.85,不仅保持了率定期的良好水平,而且展现出更高的精度,满足模型的精度要求。总体评价该模型对研究区水体模拟效果良好,具有较好的水动力模拟适用性,模型可用于后续的水质模拟。

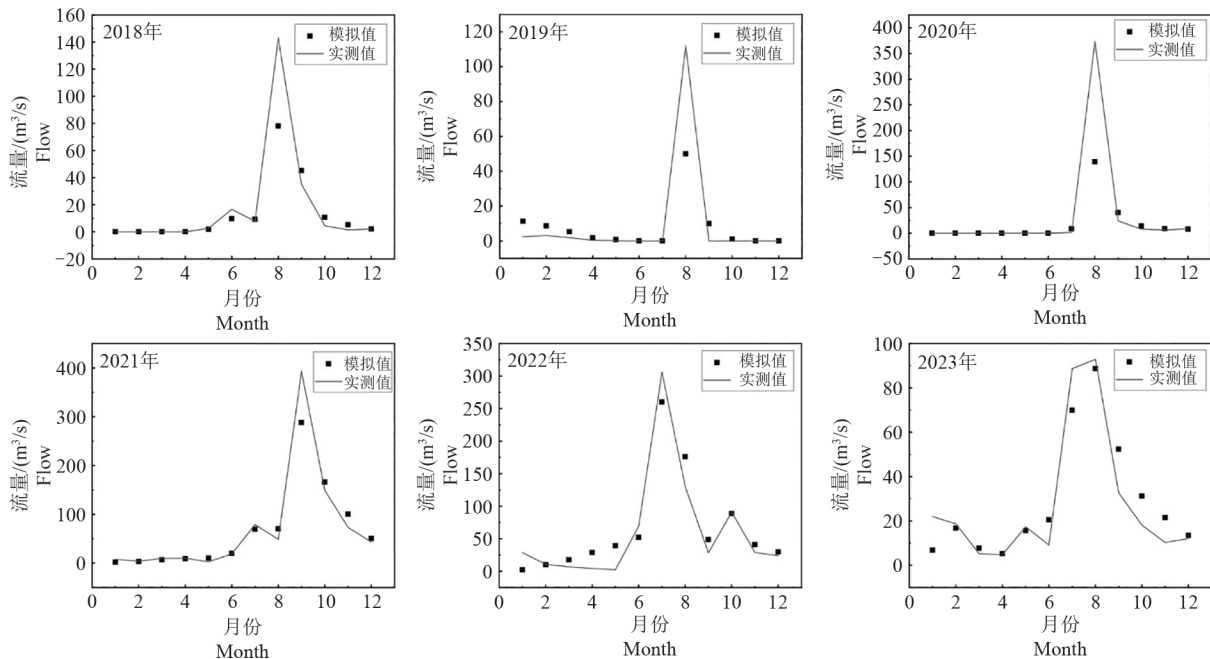


图4 戴村坝站流量模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of flow simulation value and measured value of Daicunba station

表 3 流量模拟结果
Table 3 Flow simulation results

	年份	R^2	NSE		年份	R^2	NSE
	Years				Years		
率定期	2018	0.90	0.76	验证期	2021	0.95	0.91
	2019	0.92	0.64		2022	0.91	0.90
	2020	0.95	0.56		2023	0.87	0.86

(2) 水质 DO 浓度和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度验证结果如图 5 所示。分析图 5 与表 4 可知,在模拟结果中,

戴村坝水文站位置的模拟 DO 浓度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度与实测值的拟合度较好,所有年份决定系数

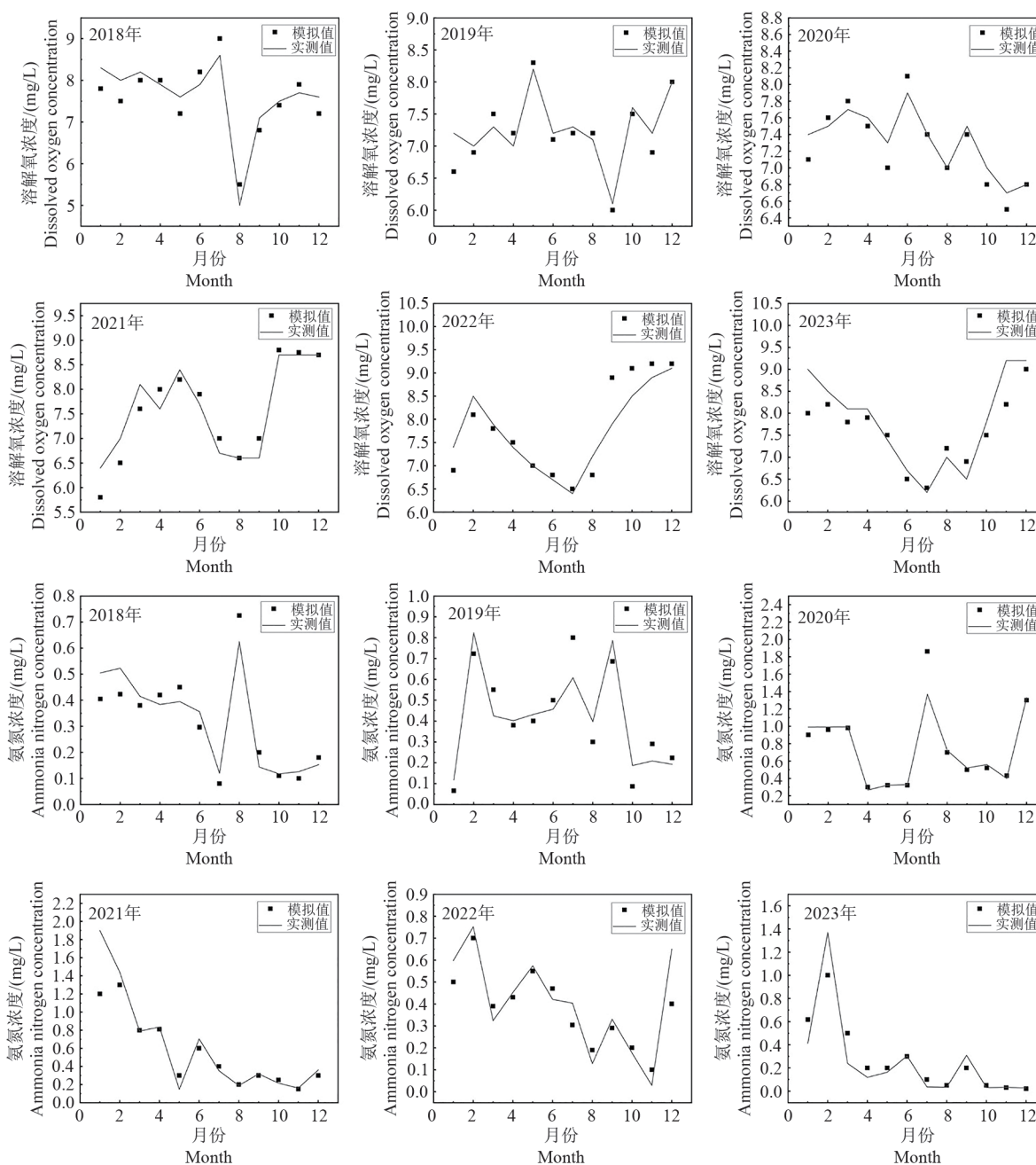


图 5 戴村坝站 DO 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度模拟值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured concentrations of DO and $\text{NH}_3\text{-N}$ at Daicunba station

表 4 DO 与 NH₃-N 模拟结果
Table 4 Simulation results of DO and NH₃-N

	年份	R ²	NSE		年份	R ²	NSE
	Years				Years		
DO 率定期	2018	0.84	0.84	DO 验证期	2021	0.87	0.85
	2019	0.87	0.80		2022	0.84	0.75
	2020	0.90	0.77		2023	0.88	0.79
	2018	0.89	0.88		2021	0.92	0.84
NH ₃ -N 率定期	2019	0.84	0.82	NH ₃ -N 验证期	2022	0.84	0.80
	2020	0.91	0.85		2023	0.84	0.82

(R²)均大于 0.8, 纳什效率系数(NSE)均大于 0.75, 在合理的误差范围内, 水质模型的模拟值与实测值之间能够进行相对较好的匹配契合, 整体满足精度要求。DO 与 NH₃-N 模拟性能的同步达标说明模型具备多种污染物同步模拟的能力, 为复杂水质管理提供了工具基础。水动力水质耦合机制的设置符合实际, 建立的 EFDC 模型能较好体现出模拟河段污染物的分布情况并反映其水动力水质的变化规律。

3 结果与分析

3.1 时间变化规律

选取平水年(2018年)、枯水年(2019年)、丰水年(2021年)三个典型水文年, 分析戴村坝水文站 DO、NH₃-N 平均浓度随降雨径流的变化关系。由图 6 分析可知, 在平水年(2018年), 降水总量为 876.4 mm, 降水主要集中在 8 月, 最大降水量为 445 mm, 高于枯水年(2019年)的 105.5 mm 及丰水年(2021年)的 228 mm, 大汶河流域在 2018 年曾受台风“温比亚”的影响, 发生强降水过程, 降水峰值较大的原因可能与此强降水有关。径流量变化与降水量较为一致, 非汛期降水量与径流量持续低值, DO 与 NH₃-N 浓度变化趋势不明显: 8 月降水陡增, 占全年降雨量的 51%, 同时 DO 浓度降至全年最低的 5 mg/L, NH₃-N 浓度达到全年最高的 0.3 mg/L。

由图 7 分析可知, 枯水年(2019年)降水总量为 425.1 mm, 降水主要集中在 6-8 月, 径流量与降水量峰值均出现在 8 月; 非汛期径流量极小, 甚至在冬季出现断流现象。作为典型的北方河流, 大汶河径流量受季节性降水影响显著, 枯水年的降水减少直接导致河道径流量锐减。并且在冬季, 气温偏低导致积雪融水补给不足, 进一

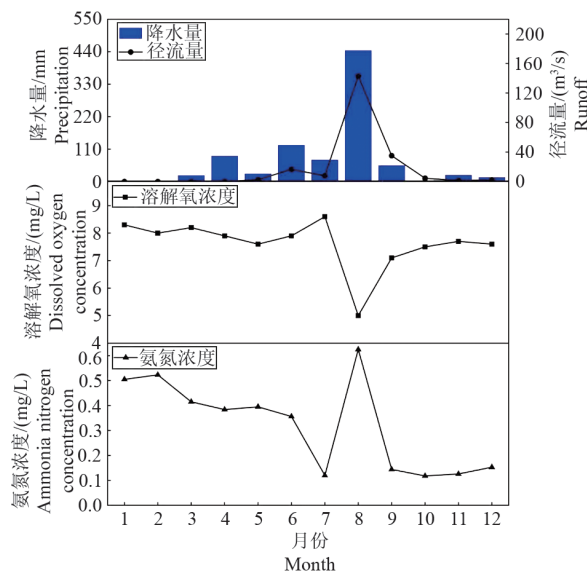


图 6 平水年降雨、径流、DO、NH₃-N 浓度变化规律
Fig. 6 Variation patterns of rainfall, runoff, DO, and NH₃-N concentrations in normal years

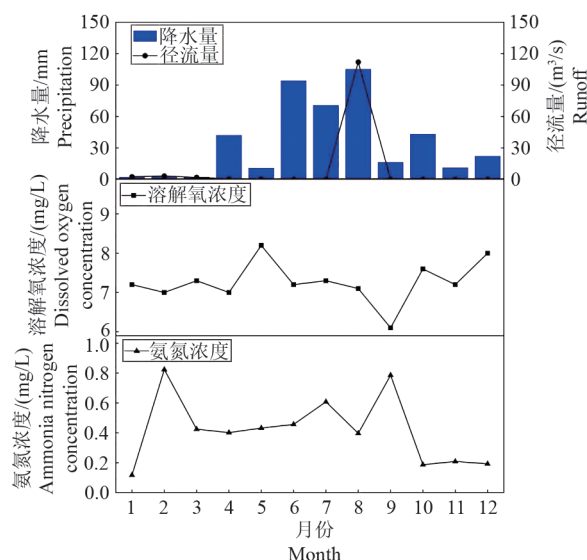


图 7 枯水年降雨、径流、DO、NH₃-N 浓度变化规律
Fig. 7 Variation patterns of rainfall, runoff, DO, and NH₃-N concentrations in dry years

步加剧了径流匮乏。据水文监测数据显示,该年大汶河径流量较多年均值下降超过 30%,部分时段甚至低于生态基流阈值,最终引发断流。该年 DO 浓度变化较平稳,变化范围为 7.0-8.6 mg/L,差异并不明显。NH₃-N 浓度在 2、3 月份均明显增加,并在 3 月份达到峰值 0.843 mg/L,明显高于平水年(2018 年)与丰水年(2021 年),4 月份降水量增加至 42.4 mm 后,NH₃-N 浓度开始降低,后期波动较为平稳。

由图 8 可知,丰水年(2021 年)降水总量为 956.8 mm,集中分布在 7 月到 9 月,8 月份降水量达到最大 228 mm,其次是 9 月份,降水量为 219.5 mm;径流量在 9 月达到峰值 393 m³/s,相对于降水量存在一定的滞后效应。降水的强度、历时和时空分布直接影响滞后效应,一般而言,高强度、短历时的暴雨,更容易产生快速的地表径流,滞后时间较短;而低强度、长历时的降雨,下渗比例高,主要通过地下径流缓慢补给河川,滞后时间则显著延长^[24]。2021 年大汶河 7-9 月的降水由多次连续降水事件构成,这种情况会拉长流域的产汇流过程,从而产生了峰值滞后效应。10 月份随降水量骤减径流量出现大幅下降,径流量与降水量总体趋势一致。DO 浓度随径流量在 9 月份达到峰值时降至最低值 6.3 mg/L,NH₃-

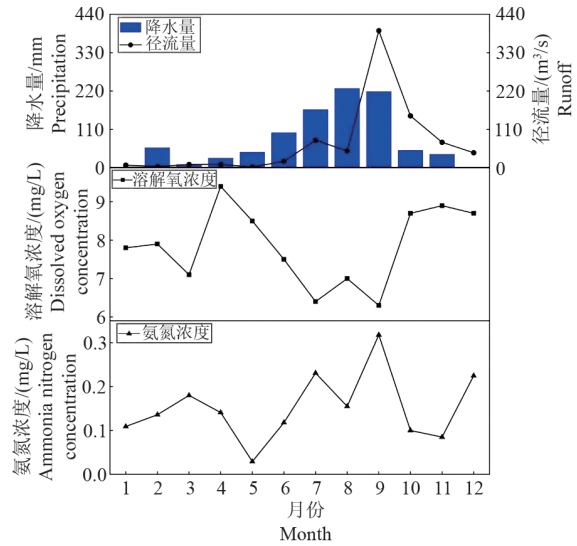


图 8 丰水年降雨、径流、DO、NH₃-N 浓度变化规律
Fig. 8 Variation patterns of rainfall, runoff, DO, and NH₃-N concentrations in wet years

N 浓度达到最高值 0.318 mg/L,全年 DO 与 NH₃-N 浓度变化整体呈相反趋势。

3.2 空间变化规律

3.2.1 DO 空间变化规律 选择非汛期代表月 2 月,汛期代表月 8 月,大汶河干流三个典型水文年的 DO 浓度变化如图 9 与图 10 所示,可以看到在非汛期(2 月)时,DO 浓度在平水年(2018 年)与枯水年(2019 年)从大汶口站到河口逐渐增加,

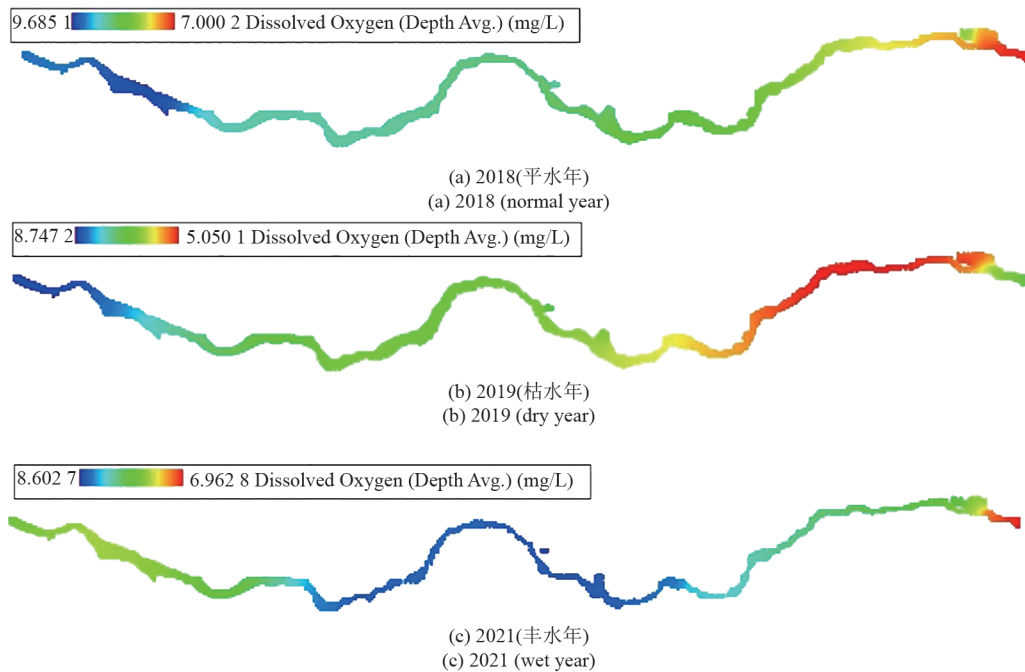


图 9 三个典型水文年非汛期(2 月)的 DO 浓度变化图

Fig. 9 DO concentration variation in three typical hydrological years during the non-flood season (February)

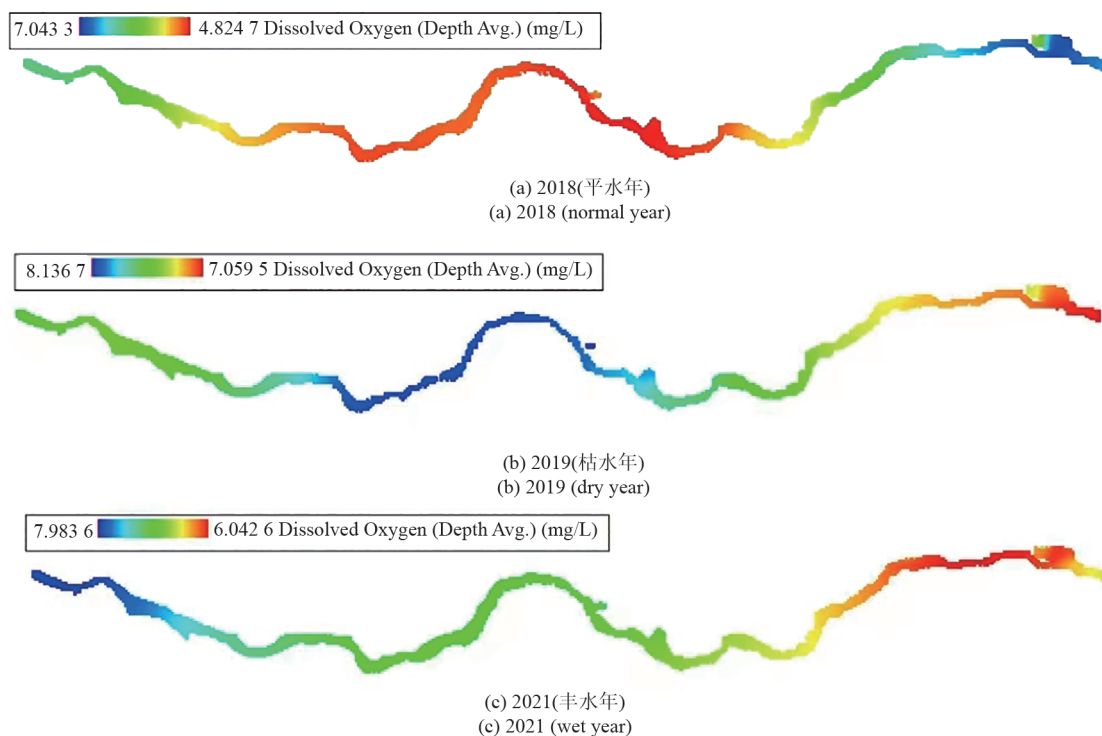


图 10 三个典型水文年汛期(8月)的 DO 浓度变化图

Fig. 10 Dissolved oxygen (DO) concentration variation in three typical hydrological years during the flood season (August)

丰水年(2021年)在戴村坝站附近聚集,呈现中部高两端低的分布格局。在汛期(8月),DO浓度在平水年(2018年)中部区域最低,河口处次之,大汶口站附近最高;枯水年(2019年)与丰水年(2021年)整体浓度差异不大,枯水年DO浓度在戴村坝站附近较高,大汶口站附近较低,丰水年(2021年)DO浓度从大汶口站到河口逐渐增加。

3.2.2 $\text{NH}_3\text{-N}$ 空间变化规律 由图 11 与图 12 分析可知,在不同水文年的不同水期, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度大部分呈现从大汶口站到河口逐渐降低的趋势,这与常规水文条件下的污染物迁移规律相符,在流量相对稳定的平枯年份,河流自净作用得以有效发挥。仅丰水年(2021年)汛期呈现中部高两端低的分布格局,这种现象源于大汶口站以上河段流经地区以低山丘陵为主,耕地分布相对零散,农业集约化程度较低。而戴村坝所在的中游地区,正是大汶河干流进入广阔冲积平原的过渡地带。该区域地势平坦、土地肥沃,是流域内集约化农业(如小麦、玉米轮作)的核心区,化肥施用量大。在 2021 年汛期降水量较多年均值偏高 42% 的强降雨驱动下,该区域产生并汇入河流的农业面源污染通量远高于上游地区。强降雨引

发的农田径流携带大量 $\text{NH}_3\text{-N}$ 直排入河,形成了 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度中部高两端低的分布格局。同时,多项针对大汶河流域的研究表明,在农业集约化发展的中游平原区,农业面源污染是水体中氮、磷等污染物的主要来源。例如,在牟汶河流域,研究发现耕地对非点源总氮污染的贡献率高达 70.52%^[25]。这直接说明了农业活动在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放中的主导地位,印证了农业活动在该区域面源污染中的核心角色。

4 讨论

通过构建大汶河典型干流段 EFDC 水动力和水质模型,并对 DO、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的模拟结果进行分析,对本研究讨论如下:

EFDC 模型能够较好地模拟大汶河干流的径流及污染物迁移过程。河段内戴村坝站在水动力模拟中率定期内各年份决定系数(R^2)均大于 0.9,纳什效率系数(NSE)均大于 0.5,验证期内 R^2 与 NSE 均大于 0.85;在水质模拟中所有年份决定系数(R^2)均大于 0.8,纳什效率系数(NSE)均大于 0.75。结果表明 EFDC 模型对研究区水体具有较好的水动力与水质模拟的适用性,但在

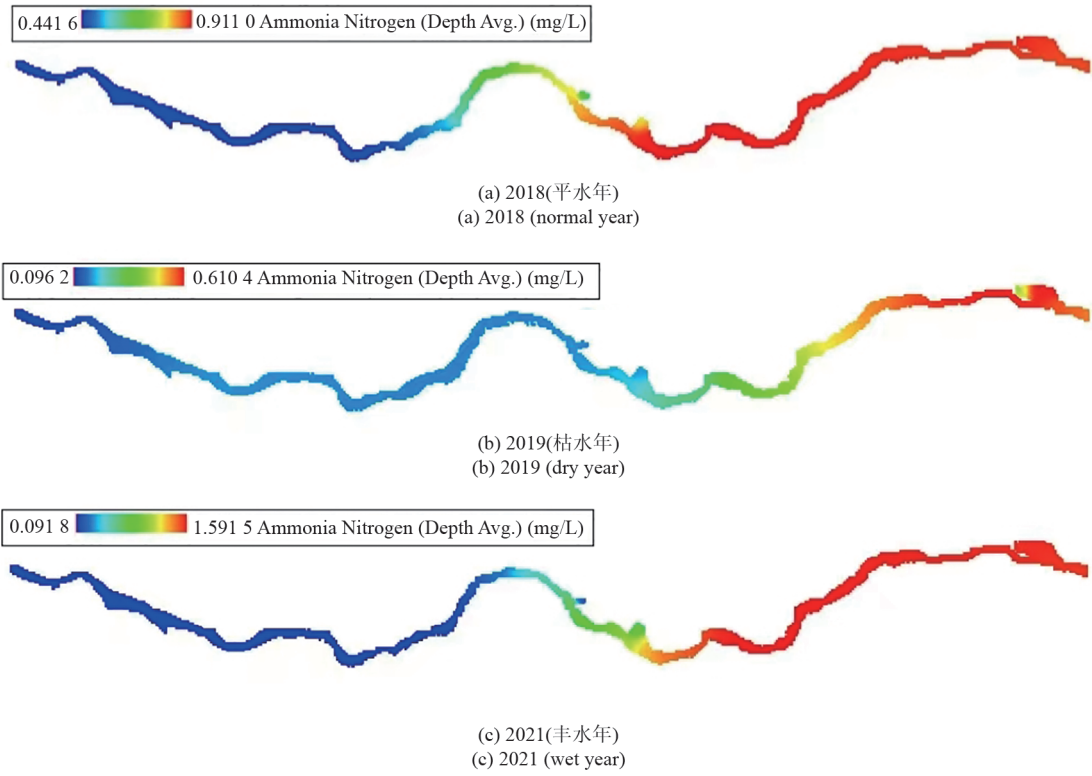


图 11 三个典型水文年非汛期(2月)的NH₃-N 浓度变化图

Fig. 11 NH₃-N concentration variation in three typical hydrological years during the non-flood season (February)

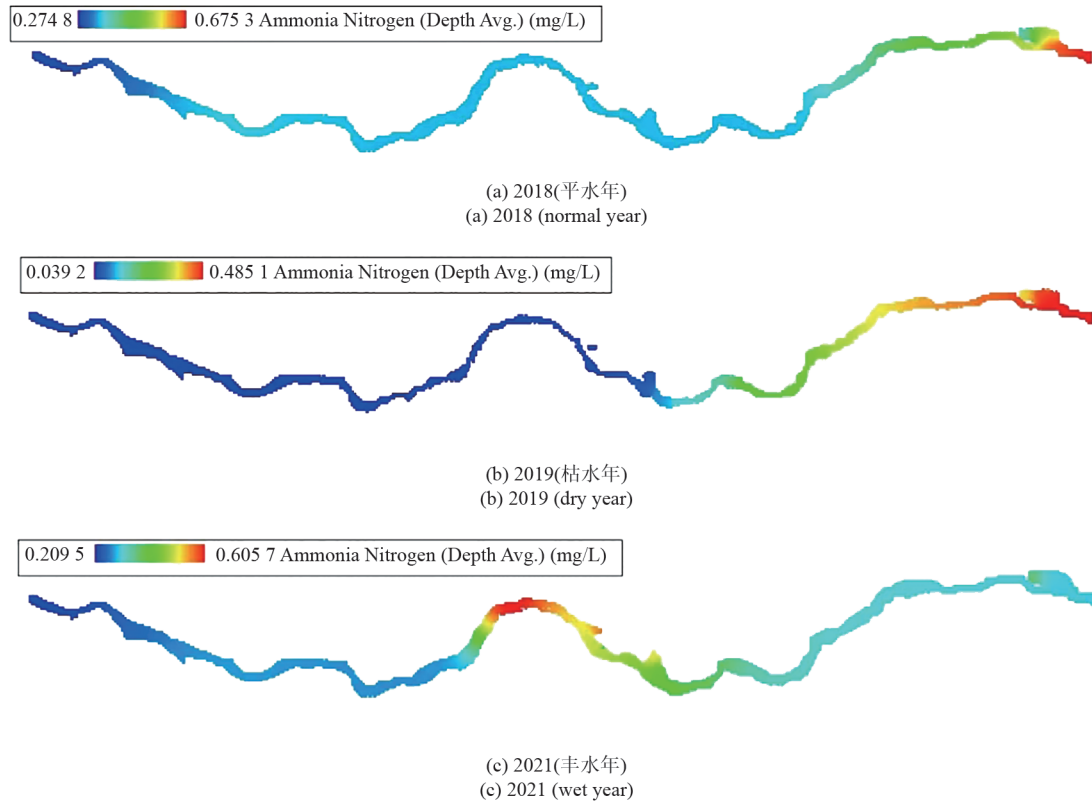


图 12 三个典型水文年汛期(8月)的NH₃-N 浓度变化图

Fig. 12 NH₃-N concentration variation in three typical hydrological years during the flood season (August)

模拟复杂水文条件时(如极端洪水或干旱),还有不足之处,因此在未来研究中可将EFDC模型与流域分布式水文模型(如SWAT)进行耦合,有望更精确地刻画由高强度降水产生的径流过程与污染负荷,从而提升对极端水文事件下水质突变风险的预测能力。

从时间变化来看,DO与NH₃-N浓度在汛期呈现显著负相关,如丰水年8-9月DO降至最低(6.3 mg/L)而NH₃-N升至最高(0.318 mg/L)。这一现象主要源于两方面机制:其一,汛期强降雨径流携带大量耗氧有机物与NH₃-N进入河道,加剧了水体的耗氧过程;其二,同期水温升高促进了微生物的硝化作用,进一步消耗溶解氧。在枯水年3月,NH₃-N浓度出现全年峰值(0.843 mg/L),该时段径流量极低(<3.5 m³/s),水体自净能力显著减弱,加之春季农业追肥活动导致面源污染集中输入,污染物难以被有效稀释与迁移,从而在河段中累积。这与赵长进^[16]等在南方闸控河口的研究结论类似,表明水文条件是调控水体环境容量的关键阈值。

在空间分布上,NH₃-N浓度自大汶口至河口总体呈现递减趋势(降幅48%-67%),符合污染物在迁移过程中随水体稀释、扩散与降解的一般规律。然而,丰水年汛期在中游河段出现了NH₃-N富集现象,浓度较上下游高0.3-0.5 mg/L。此现象印证了于新雨^[24]关于大汶河流域农业面源污染的研究,表明中游平原区高强度的农业活动是主要污染源。强降雨形成的地表径流将农田中的氮素集中输入河道,而该河段相对平缓的水动力条件暂时不足以将此类冲击性负荷完全输移,从而形成局部富集。

5 结论

通过本研究基于EFDC模型构建了大汶河典型干流段的水动力与水质模型,系统揭示了大汶河典型河段在不同水平年下DO与NH₃-N的时空分布特征与变化规律。模型率定与验证结果表明,该模型能较好地模拟研究河段的水动力过程与水质变化,具备应用于本区域水环境管理的可靠性。研究结果表明,DO与NH₃-N浓度在时间上呈显著负相关,其极值通常出现于汛期。枯水年春季因农业活动导致NH₃-N偏高;丰水年则呈现径流滞后及中游NH₃-N富集特征。空间

上,NH₃-N浓度整体呈现从大汶口至河口沿程递减的趋势(降幅48%-67%),符合污染物在迁移过程中的一般规律,而DO分布格局受水期与水文年型影响更加显著。研究明确了该河段的水动力水质变化主要受水文过程(汛期/非汛期)与人类活动的共同调控,研究成果可为该流域实施分时段、分河段的精准水环境管理与污染防治策略提供科学依据和模型基础。

参考文献

- [1] 马小雪,龚畅,王丽,等.不同水期秦淮河流域水污染分布特征及来源解析[J].长江流域资源与环境,2021,30(12):2949-2961.
- [2] Ksuar F, Qadir A, Ahmad S R, et al. Evaluation of surface water quality on spatiotemporal gradient using multivariate statistical techniques: A case study of River Chenab, Pakistan[J]. Polish Journal of Environmental Studies,2019,28(4):2645-2657.
- [3] Benariba H, Habi M, Morsli B, et al. Assessment of surface water quality in a semi-arid Mediterranean region. Case study of Sikkak Dam (north-western Algeria) [J]. Water Practice and Technology, 2022, 17(5):1177-1196.
- [4] Ma X, Wang L, Yang H, et al. Spatiotemporal analysis of water quality using multivariate statistical techniques and the water quality identification index for the Qinhuai River Basin, East China[J]. Water, 2020,12(10):2764-2773.
- [5] Xia J. Spatiotemporal characteristics of the water quality and its multiscale relationship with land use in the Yangtze River Basin[J].Remote Sensing,2021, 13(16):3309-3318.
- [6] Dong B, Qin T, Wang Y, et al. Spatiotemporal variation of nitrogen and phosphorus and its main influencing factors in Huangshui River Basin[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2021,193(5):292-299.
- [7] 范家贞,李荣荣,席宁哲,等.2010—2021年重庆市主要河流水质时空变化特征分析[J].人民长江,2024, 55(06):22-29.
- [8] Tian H, Yu GA, Tong L, et al. Water quality of the Mun River in Thailand-spatiotemporal variations and potential causes[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2019,16(20):3906-3914.
- [9] Abate B B, Sendekie A K, Alamaw A W, et al. Prevalence, determinants, and complications of

- adolescent pregnancy: an umbrella review of systematic reviews and meta-analyses[J]. *AJOG Global Reports*, 2025,5(1):1-9.
- [10] 任 鹏,范中亚,杨忠勇,等.沿江城市中小型闸控通江湖泊总磷变化特征及成因分析——以安庆市石塘湖为例[J]. *湖泊科学*,2023,35(04):1359-1369.
- [11] 荣 易,秦成新,孙 傅,等. SWAT 模型在我国流域水环境模拟应用中的评估验证过程评价[J]. *环境科学研究*,2020,33(11):2571-2580.
- [12] 刘夏明,李俊清,豆小敏,等. EFDC 模型在河口水环境模拟中的应用及进展[J]. *环境科学与技术*,2011,34(S1): 136-140+360.
- [13] 龚 然,何 跃,徐力刚,等. EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)模型在湖库水环境模拟中的应用进展[J]. *海洋湖沼通报*,2016(06):12-19.
- [14] 潘 炜. 基于 EFDC 的长江常州段污水排江浓度场数值模拟[J]. *环境监控与预警*,2015,7(01):5-9.
- [15] 江雨蒙,逢 勇,马秋霞,等. 基于 EFDC 的排污口设置对淮河入海水道水环境影响研究[J]. *环境科技*, 2023,36(05):7-12.
- [16] 赵长进,陈 钢,杨汉杰,等. 南方典型闸控河口水质风险演变及调度策略[J]. *中国环境科学*,2023,43(07):3644-3654.
- [17] Yan H K, Wang N, Yu T L, et al. Hydrodynamic behavior and the effects of water pollution from Dalian's Large-Scale offshore airport island in Jinzhou Bay, China[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean*,2015,141(1):1-10.
- [18] Menendez A N, Badano N D, Lopolito M F, et al. Water quality assessment for a coastal zone through numerical modeling[J]. *Journal of Applied Water Engineering & Research*,2013,1(1):8-16.
- [19] 王有良,齐建国,李玉石,等. 东平湖水质现状分析与评价[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*,2018,49(03): 414-416.
- [20] 李勇刚,赵 龙,李建新,等. 黄河下游大汶河流域水文要素演变特征研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*,2023,54(01): 104-111.
- [21] Park K, Jung H, Kim H S, et al. Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea[J]. *Marine Environmental Research*,2005,60(2):171-193.
- [22] 雒艳玲,乔新贺,徐植信,等. 大汶河流域水文要素时空分布特征研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*,2024,55(04):613-626.
- [23] Geza M, Mccray J E. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008,88(3):393-406.
- [24] 杨林沛,李金文,沈根祥,等. 基于高频数据的旱地降雨径流污染物输出特征研究[J]. *浙江农业学报*, 2024,36(02):391-403.
- [25] 于新雨. 流域非点源污染特征研究——以大汶河支流牟汶河流域为例[D]. 泰安:山东农业大学,2021.