

长江黄河上游地表水溶解氧时空分布特征研究

——以四川省为例

刘 壮, 魏 晓, 陈 强, 刘晓聪, 张李玲, 张静怡, 佟洪金

(四川省生态环境科学研究院, 成都 610046)

摘 要: 为了解长江黄河上游地表水中溶解氧(DO)的分布特征, 以四川省河流湖库作为研究对象, 通过收集整理四川省237个站点(断面)的DO逐月数据, 研究分析DO的时空分布特征及其与外界环境因素的相关性。结果表明, 四川省河湖DO在空间上总体呈现东高西低、南北高中部低的分布特征, 在时间上呈冬季>春季>秋季>夏季, 其中7月最低, 全年DO低于5 mg/L的月份主要出现在3—9月, 以春夏季为主, 发生率为0.83%。从与外界环境相关性上看, DO浓度平均值与河流海拔呈负相关, DO浓度最高值与社会经济发展呈正相关, DO浓度最低值与社会经济发展呈负相关。

关键词: 地表水; 溶解氧; 分布特征; 海拔; 社会经济

中图分类号: X824

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022070002

Spatial and temporal distribution characteristics of dissolved oxygen in surface water in the upper reaches of the Yangtze River and the Yellow River

——Taking Sichuan Province as an example

LIU Zhuang, WEI Yao, CHEN Qiang, LIU Xiaocong, ZHANG Liling, ZHANG Jingyi, TONG Hongjin

(Sichuan Academy of Eco-Environmental Sciences, Chengdu 610046, China)

Abstract: To understand the distribution characteristics of dissolved oxygen (DO) in surface water in the upper reaches of the Yangtze River and the Yellow River, rivers, lakes, and reservoirs in Sichuan Province were selected as the research objects. By collecting and arranging monthly DO data from 237 automatic water quality monitoring stations (water quality monitoring sections) in Sichuan Province, the temporal and spatial distribution characteristics of DO and the correlation with external environmental factors were studied and analyzed. The results reflected that the spatial distribution of DO in rivers and lakes in Sichuan Province was generally characterized with a high value in the East and a low value in the west, a high value in the north and south, and a low value in the middle. In terms of time, the DO content showed winter > spring > autumn > summer, and the lowest concentration was in July. The months with DO concentration below 5 mg/L mainly occurred from March to September, mostly during the spring and summer, with an occurrence frequency of 0.83%. In terms of relevance to the external environment, the average concentration of DO was negatively correlated with the river altitude. The highest DO concentration was positively correlated with socioeconomic development, while the lowest DO concentration was negatively correlated with it.

Keywords: surface water; dissolved oxygen; distribution characteristics; altitude; socioeconomic

CLC number: X824

溶解氧(DO)是评价地表水环境质量的重要指标, 对维持水生生态功能和水生生物多样性具有重要意义^[1], 过低的DO不仅会影响水生生物的正常生

命活动^[2-3], 降低地表水体的自净能力, 还会造成河道和水库底层呈现还原环境, 增加水体底泥中的营养物质和重金属等的溶解释放强度^[4]。水体中的氧

收稿日期: 2022-07-11

录用日期: 2022-09-09

基金项目: 四川省科技计划资助项目(2018SZDZX0025)

作者简介: 刘 壮(1995—), 男, 硕士、工程师。研究方向: 流域水环境治理。E-mail: 1449024926@qq.com

通信作者: 魏 晓(1984—), 男, 博士、高级工程师。研究方向: 流域水生态环境保护与污染治理。E-mail: 410066702@qq.com

引用格式: 刘 壮, 魏 晓, 陈 强, 等. 长江黄河上游地表水溶解氧时空分布特征研究——以四川省为例[J]. 环境保护科学, 2023, 49(3): 74-80.

气主要有 2 个来源: 一个是大气复氧; 一个是藻类及水生植物光合作用释放氧气。DO 的消耗途径主要有耗氧污染物(如有机物、氨氮)的氧化降解、水生生物呼吸作用和河湖底泥耗氧等^[5]。而在实际过程中, DO 的影响因素极为复杂, 大气复氧受大气压强^[6]、水温^[7]、盐度^[8]和流速^[9]等影响, 大气压强越低、流速越小、水温越高、盐度越高, 水中的 DO 含量越低; 藻类及水生植物的光合作用又与温度、光照和水质等有密切联系。同时, 随着人口快速增长和产业的不断集中, 大量携带高浓度污染物的生产生活废水集中进入地表水体, 污染物在水体中的分解造成了大量 DO 的消耗, 并加剧了沉积物中氮磷的释放, 水生态环境不断恶化^[10]。

四川省是长江黄河上游重要的生态屏障和水源涵养地, 生态环境地位独特, 四川省的水生态环境质量关乎国家生态安全, 开展河湖 DO 的研究对全省水生态环境保护具有重要意义。本研究依据 2020 年全省水质自动站和手工监测断面水质数据, 探讨全省河湖 DO 的时空分布特征及影响因素, 以期为全省针对性开展水环境的评价、治理和保护提供相应的依据。

1 研究方法

1.1 研究区域

四川省地势和气候条件差异明显。地势西高东低, 处于青藏高原和长江中下游平原的过渡带, 西部为高原、山地, 海拔多在 3 000 m 以上; 东部为盆地、丘陵, 海拔多在 500 ~ 2 000 m 之间。气候气温差异大, 东部属中亚热带湿润气候区, 年均温 16 ~ 18 ℃, 川西南山地属亚热带半湿润气候区, 年均温 12 ~ 20 ℃, 川西北高山属高原高寒气候区, 年均温 4 ~ 12 ℃。河流水文特征差异大, 水位及流量季节变化大, 夏季降雨量占全年降雨量的一半以上, 集中降雨造成河流水位及流量急剧增加, 而冬季降雨量的不足全年的 1/10^[11], 河流水位和流量均较小; 部分中小河流上游与中下游流速差异大, 往往上游流速大, 下游流速较小; 东部和西南河流无冰封期, 川西北河流存在冰封期。

1.2 数据来源

收集 2020 年水质自动站及手工监测断面中 DO 数据比较齐全的 237 个站点(断面)逐月水质数据, 各水系站点数量, 见表 1。

表 1 四川省各水系监测站点(断面)统计

Table 1 The number of water quality monitoring stations(sections) in river system of Sichuan Province

流域	河流	湖库	小计
安宁河	6	1	7
赤水河	4	0	4
大渡河	10	0	10
涪江	17	2	19
黄河	3	0	3
嘉陵江	28	0	28
岷江	34	2	36
青衣江	8	0	8
琼江	5	0	5
渠江	24	0	24
沱江	49	3	52
雅砻江	5	2	7
长江(金沙江)	34	0	34
总计	227	10	237

部分缺少 1 个月 DO 数据的站点(断面), 采用插值法补齐。选取的站点(断面)涵盖全省 13 大主要流域的 126 条河流湖库, 其中河流型站点(断面) 227 个, 湖库型站点(断面)10 个, 站点分布见图 1。

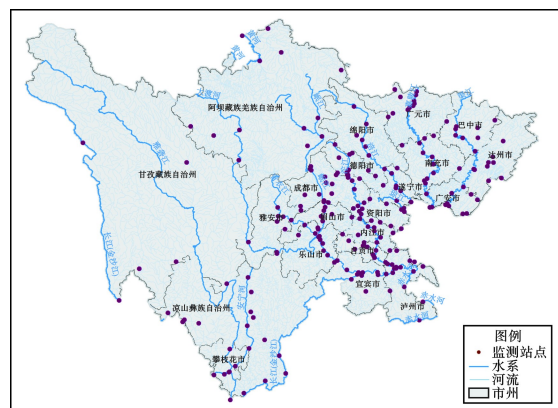


图 1 四川省水质监测站点(断面)分布

Fig. 1 Distribution of water quality monitoring stations (sections) in Sichuan Province

1.3 数据处理

使用 Arcgis 10.2 软件绘制四川省水质自动站(断面)分布情况, 使用 SPASS 17.0 软件分析 DO 与流域社会经济发展状况(人口密度、单位面积 GDP)、水资源状况(多年平均径流量)和地理环境(平均海拔、平均纬度)之间的相关性; 相关图表制作在 Origin 2021 与 Excel 2019 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 DO 的空间分布

2020 年四川省河湖 DO 浓度均值 8.39 mg/L。从十三大流域的年均 DO 浓度看,青衣江流域最

高,达到 8.86 mg/L;黄河流域最低,为 7.48 mg/L;青衣江、涪江、嘉陵江、大渡河、岷江和渠江六大流域 DO 浓度高于全省平均值,沱江、长江(金沙江)、赤水河、琼江、安宁河、雅砻江和黄河低于全省平均水平,见图 2。

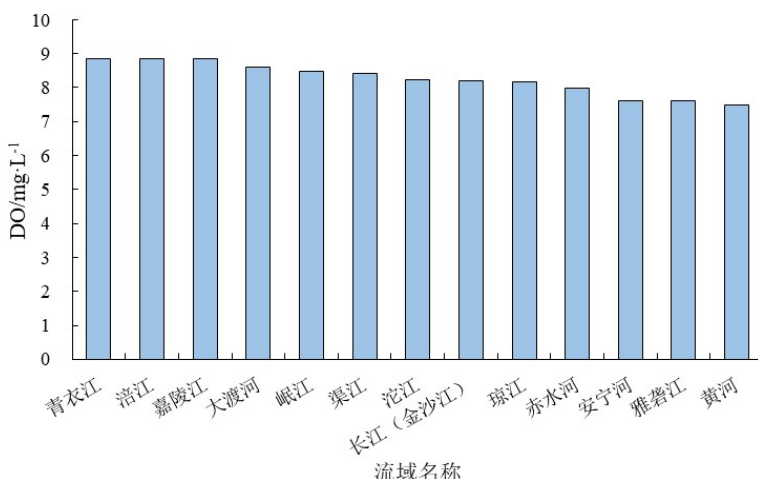
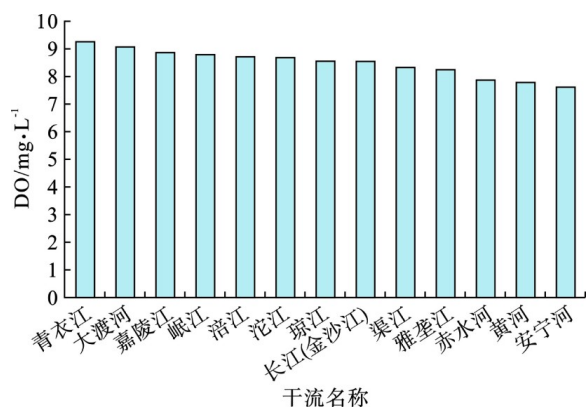


图 2 四川省各流域年均 DO 浓度分布

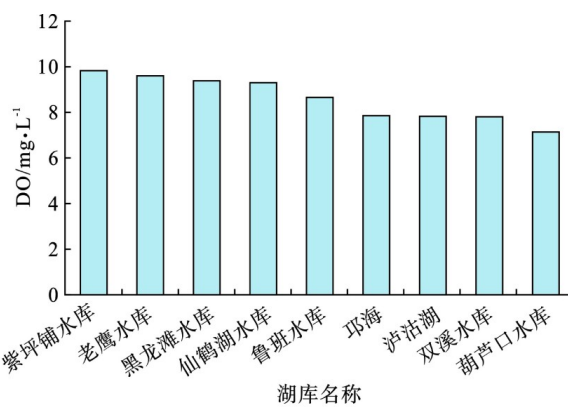
Fig. 2 Distribution of annual average DO concentration in river basin

从各流域干流和重点湖库的年均 DO 浓度看,各流域干流 DO 浓度均值为 8.64 mg/L,略高于重点湖库浓度均值(8.54 mg/L)。十三大河流干流 DO 浓度中,青衣江干流最高,达到 9.26 mg/L;安宁

河干流最低,为 7.61 mg/L,见图 3(a)。9 大重点湖库中,紫坪铺水库年均 DO 最高,达 9.84 mg/L;葫芦口水库最低,为 7.18 mg/L,见图 3(b)。



(a) 各流域干流年均浓度



(b) 各重点湖库年均浓度

图 3 四川省各流域干流及重点湖库年均 DO 浓度分布

Fig. 3 Distribution of annual average DO concentration in main rivers and key reservoirs

2.1.1 DO 年均值空间分布 四川省河湖 DO 年均值总体呈现由东向西、由北向南的递减趋势,表现为 DO 年均浓度由东北向西南递减,DO 年均浓度高值区主要分布在渠江、嘉陵江、涪江流域及岷江、沱江流域上游,低值区主要分布在金沙江、雅砻江流域川藏、川滇界及安宁河下游,见图 4。

2.1.2 DO 最高值空间分布 DO 最高值分布与

DO 年均值分布相似,总体呈现由东向西、由北向南的递减趋势,表现为年均浓度由东北向西南递减,高值区主要分布在成都平原及川东的渠江、嘉陵江、涪江、琼江、沱江中上游和岷江中上游,低值区分布在川西南的长江(金沙江)、雅砻江下游和安宁河流域,见图 5。

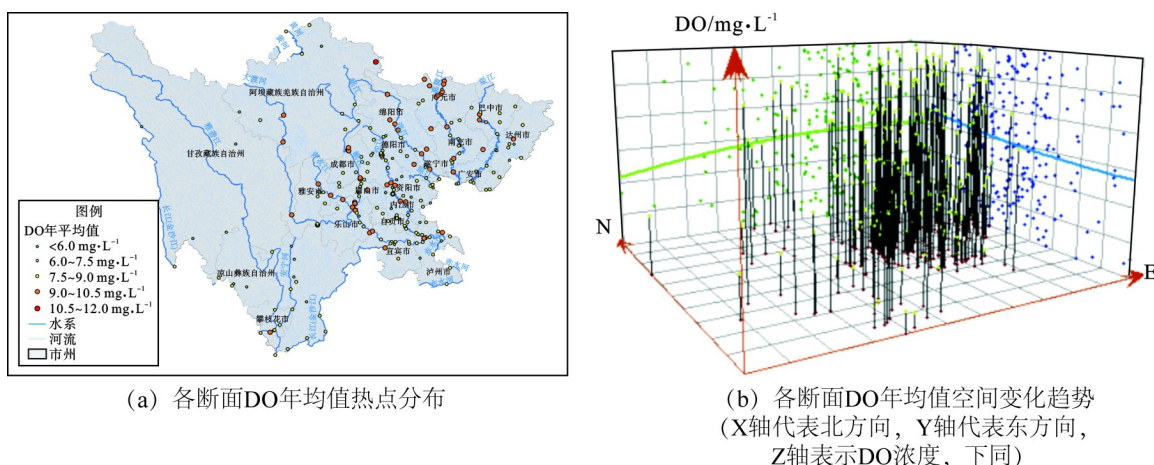


图4 四川省河湖 DO 年均值热点分布和空间变化趋势

Fig. 4 Distribution and spatial change trend of annual average DO concentration in rivers and reservoirs

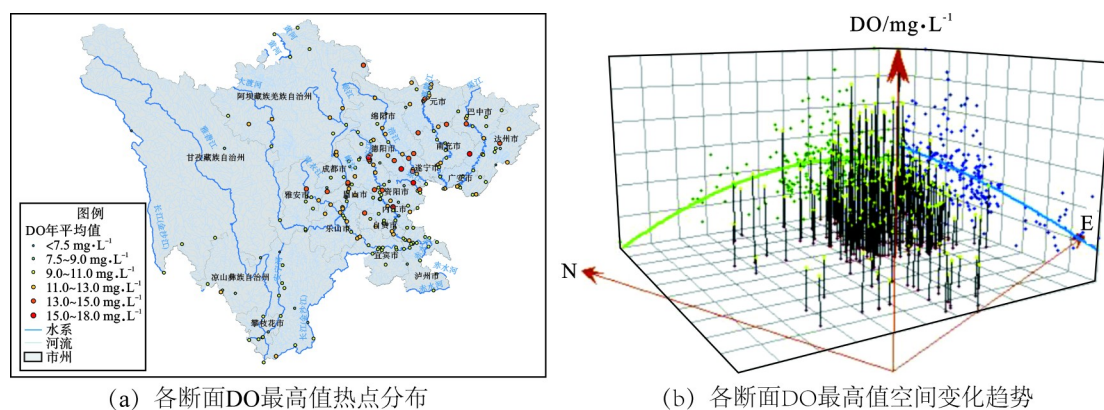


图5 四川省河湖 DO 最高值热点分布和空间变化趋势

Fig. 5 Distribution and spatial change trend of the highest DO concentration in rivers and reservoirs

2.1.3 DO 最低值空间分布 DO 最低值总体呈现东高西低、南北高中部低的分布特征, 高值区分布在

嘉陵江和涪江流域上游, 较低值区分布在沱江流域中下游、长江(金沙江)四川段及嘉陵江下游, 见图6。

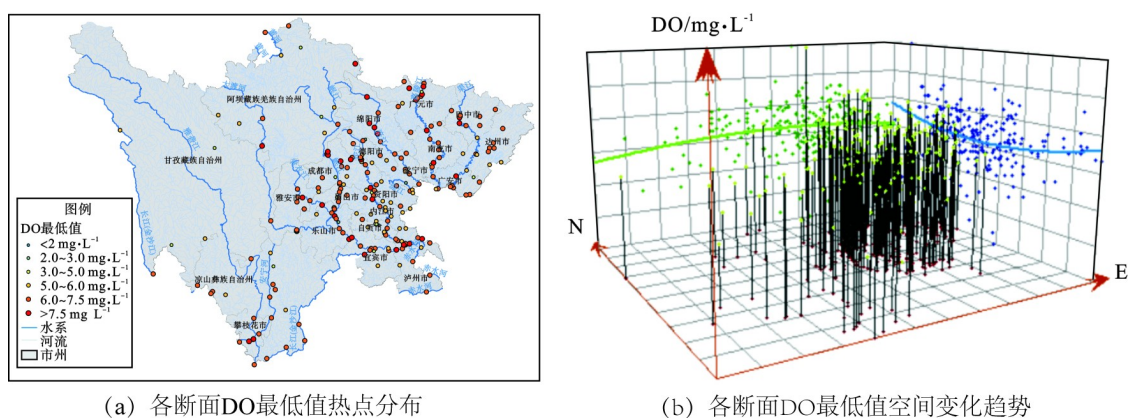


图6 四川省河湖 DO 最低值热点分布和空间变化趋势

Fig. 6 Distribution and spatial change trend of the lowest DO concentration in rivers and reservoirs

2.2 DO 的时间分布

四川省河湖 DO 月均浓度分布呈冬季高、夏季低的特点。其中 1 月平均浓度最高, 达 9.78 mg/L, 此后呈降低趋势; 到 7 月达到最低, 为 7.42 mg/L;

此后逐步升高, 到 12 月升至 9.17 mg/L。DO 月均浓度冬季高、夏季低可能与饱和 DO 随气温、水温升高而降低有关, 见图7。

各流域 DO 浓度最低值出现月份不同, 见图8。

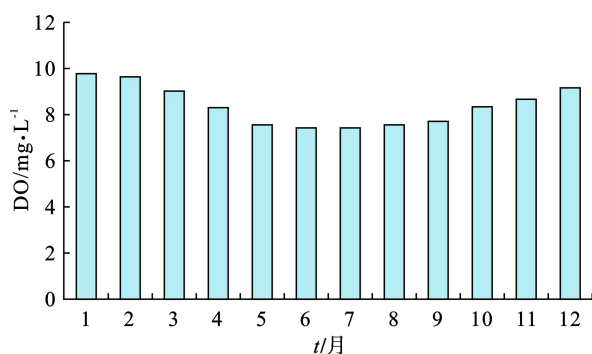
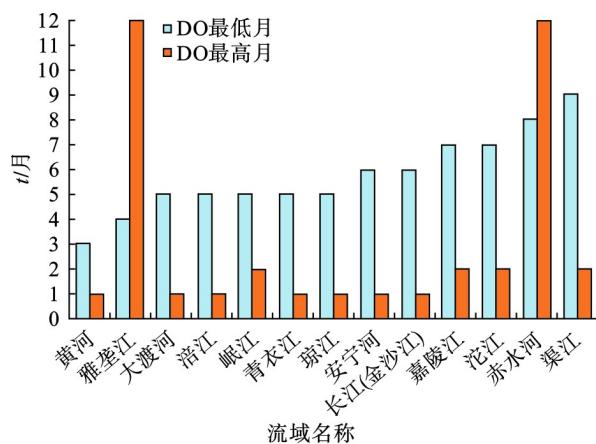


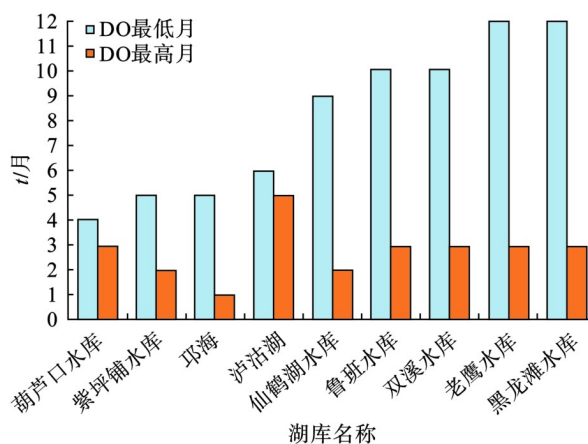
图 7 四川省河湖月均 DO 变化趋势

Fig. 7 Trend of monthly average DO concentration in rivers and reservoirs

图 8(a)可知, 黄河流域出现最早, 在初春 3 月, 雅砻江流域在 4 月, 大渡河、涪江、岷江、青衣江和



(a) 各流域DO最高和最低浓度出现月份



(b) 湖库DO最高和最低浓度出现月份

图 8 四川各流域和重点湖库 DO 最高月和最低月分布情况

Fig. 8 Distribution of the highest and lowest DO concentration in rivers and key reservoirs

3 讨论

3.1 低 DO 现象分布特征

3.1.1 低 DO 现象发生率 以《地表水环境质量标准: GB 3838—2002》中各类水体 DO 浓度限值为划分依据, 将 DO 浓度低于 5 mg/L 的样本定义为发生低 DO 现象。

2020 年四川省低 DO 发生率为 0.83%, 总体较低; 其中湖库未发生低 DO 现象, 河流发生率为 0.87%。出现低 DO 现象的河流共 17 条, 其中, 长江(金沙江)流域最多, 有 5 条; 沱江流域其次, 有 3 条; 安宁河、岷江流域各有 2 条; 涪江、黄河、嘉陵江、琼江和雅砻江流域各有 1 条。

从全年的低 DO 发生率看, 琼江、黄河流域发生率最高, 达 2.78%; 沱江、安宁河、雅砻江和岷江流域较高, 在 1.02%~2.78% 之间; 嘉陵江、涪江和长江(金沙江)流域较低, 发生率<1%; 赤水河、大渡河、青衣江和渠江流域无低 DO 现象发生, 见图 9。

琼江均出现在 5 月; 5 个流域出现在夏季, 其中安宁河、长江(金沙江)出现在 6 月, 嘉陵江、沱江出现在 7 月, 赤水河出现在 8 月; 渠江出现秋季的 9 月。除琼江流域 DO 浓度最高值出现在春季 3 月以外, 其他流域均出现在 12、1 和 2 月的冬季。

9 个重点湖库中 DO 浓度最低值出现月份差别较大, 图 8(b)可知, 葫芦口水库、紫坪铺水库和邛海出现在春季, 泸沽湖出现在夏季, 仙鹤湖水库、鲁班水库和双溪水库出现在秋季, 老鹰水库、黑龙滩水库出现在冬季。除紫坪铺水库、邛海和仙鹤湖水库 DO 浓度最高值出现在冬季以外, 其余水库均出现在春季。

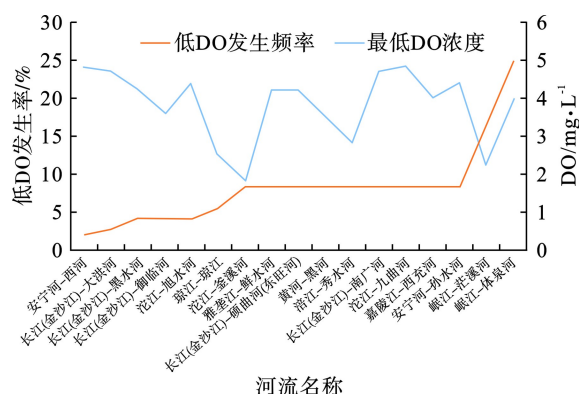


图 9 各流域低 DO 发生率

Fig. 9 The incidence of low DO in each river basin

3.1.2 低 DO 程度 从低 DO 发生率和最低 DO 浓度两方面看河流的低 DO 程度, 见图 10。

图 10 可知, 低 DO 发生率方面, 岷江体泉河、茫溪河低 DO 发生率较高, 分别为 25% 和 16.7%; 沱江釜溪河、九曲河, 黄河黑河, 长江(金沙江)南广河、硕曲河(东旺河), 安宁河孙水河, 嘉陵江西充

河,雅砻江鲜水河,涪江秀水河发生率 8.3%;安宁河西河,长江(金沙江)大洪河、黑水河、御临河,沱江旭水河,琼江发生率在 2.1%~5.6% 之间。最低 DO 浓度方面,沱江釜溪河最低,为 1.8 mg/L,DO 不足问题最为严重;岷江茫溪河、琼江、涪江秀水河、黄河黑河和长江(金沙江)御临河最低 DO 在 2.26~3.6 mg/L;其他河流在 4.01~4.83 mg/L 之间。

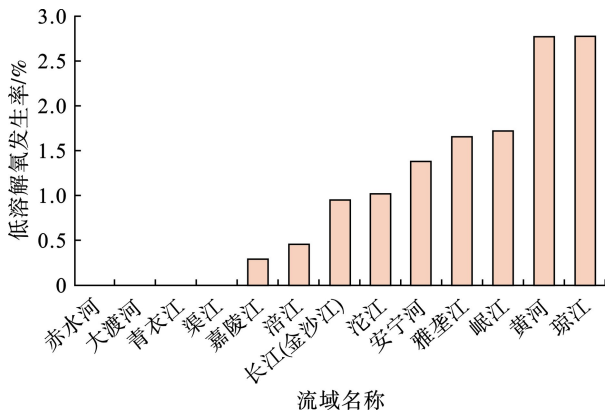


图 10 河流低 DO 发生率及最低 DO 浓度
Fig. 10 The incidence of low DO and the minimum DO concentration in rivers

3.1.3 低 DO 现象出现季节 河流低 DO 发生月份分布情况,见图 11。

图 11 可知,低 DO 现象主要出现在春、夏、秋季的 3—9 月,冬季未出现低 DO。出现低 DO 的月份中,4 月最多,有 9 次;5—7 月较多,分别有 5、

3 和 4 次;3、8 和 9 月分别有 1 次。安宁河、涪江、黄河和雅砻江流域均只有 1 个月出现了低 DO 现象,其他流域多个月份出现低 DO 现象。出现低 DO 现象最早的是黄河流域的黑河,出现在 3 月;出现最晚的是长江(金沙江)流域的大洪河,出现在 9 月;沱江流域的釜溪河低 DO 持续月份最长,出现在 4—7 月的 4 个月中。

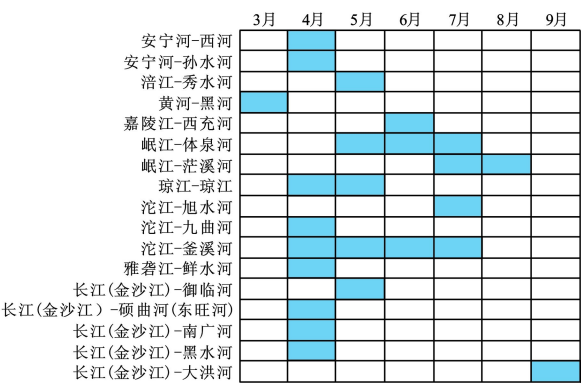


图 11 河流低 DO 发生月份分布
Fig. 11 Months when low DO occurs in rivers

3.2 相关性分析

十三大流域 DO 平均值(DO_{mean})、DO 最大值(DO_{max})和 DO 最小值(DO_{min})与流域社会经济发展状况(人口密度、单位面积 GDP)、水资源状况(多年平均径流量)和地理环境(平均海拔、平均纬度)之间的相关性,见表 2。

表 2 DO 与各因素相关性分析
Table 2 Correlation of DO with various factors

相关系数	DO_{mean}	DO_{max}	DO_{min}	人口密度	单位面积GDP	多年平均径流量	平均海拔	平均纬度
DO_{mean}	1	0.654*	0.092	0.318	0.241	0.389	-0.619*	0.264
DO_{max}	0.654*	1	-0.379	0.762**	0.579*	-0.023	-0.645*	0.391
DO_{min}	0.092	-0.379	1	-0.598*	-0.585*	0.567*	0.058	-0.204
人口密度	0.318	0.762**	-0.598*	1	0.930**	-0.167	-0.679*	0.063
单位面积GDP	0.241	0.579*	-0.585*	0.930**	1	-0.107	-0.560*	-0.028
多年平均径流量	0.389	-0.023	0.567*	-0.167	-0.107	1	-0.25	-0.346
平均海拔	-0.619*	-0.645*	0.058	-0.679*	-0.560*	-0.25	1	0.313
平均纬度	0.264	0.391	-0.204	0.063	-0.028	-0.346	0.313	1

注: **表示在 $\alpha=0.01$ 水平下显著相关(双侧检验); *表示在 $\alpha=0.05$ 水平下显著相关(双侧检验)。

DO_{mean} 与流域地理环境中的平均海拔呈显著负相关关系。流域所处的海拔越高,气压越低,受气体的溶解平衡影响,水体中 DO 浓度较低^[12]。表现为西部山地、高原流域由于海拔相对较高,

DO_{mean} 较低,中、东部流域海拔相对低, DO_{mean} 较高的分布特征。

DO_{max} 与流域社会经济发展状况的人口密度、单位面积 GDP 呈显著正相关关系。从 2020 年四

四川省生态环境质量公报也可以看出,四川省水质Ⅱ类及以上断面多位于经济发展状况较差、人口密度较小的金沙江及黄河流域,而未达Ⅲ类水质断面全部位于四川省经济发达、人口密度大的岷江、沱江流域,岷江流域主要污染指标为总磷,沱江流域主要污染指标为化学需氧量、总磷和高锰酸盐指数。这表明在四川地区,社会经济发展水平较高的区域,污染物排放强度相对较大,河流污染相对较重,由此带来的河流富营养化问题也更为突出,河流中藻类密度更大,在光照、温度适宜时其 DO 产生率也大于其他区域。DO_{max} 与地理环境中的平均海拔呈显著负相关关系。这主要由于四川地区社会经济发展更好的流域多处于川中、东部丘陵地区,这些地区海拔相对较低,而经济发展较差流域多位于西部山地、高原,这些地区海拔相对较高。

DO_{min} 与社会经济发展状况的人口密度、单位面积 GDP 呈显著负相关关系。DO_{min} 一般出现在春夏季,流域人口、经济发展强度大,对流域水资源占用越大,水体及沉积物污染相对较重^[13],随着春夏季升温,微生物耗氧分解作用增强,会出现光合作用产生的氧气难以补充 DO 消耗的问题,河流 DO 出现较大幅度下降。DO_{min} 与多年平均径流量呈显著正相关关系。多年平均径流量较大的流域,水资源量更加丰富,河流的流动性更好,纳污能力更大,水质更好,且污染物不容易沉积在河道内,春夏季微生物耗氧量低于 DO 产生量^[14]。黄河流域 DO_{min} 较低可能与冬季结冰影响大气复氧有关^[15]。

4 结论

(1)四川省河湖 DO 年均值和最高值总体均呈现东高西低,北高南低的趋势,最低值呈现东高西低、南北高、中部低的分布特征,DO 最低值的较低值区分布在沱江流域中下游、长江四川段及嘉陵江下游;在时间分布上,DO 月均浓度冬高夏低,呈现冬季>春季>秋季>夏季,具体到月份,1 月平均浓度最高,7 月最低。

(2)四川省低 DO 发生的时间主要为 3~9 月,春夏季出现较多,发生率为 0.83%,其中琼江、黄河流域发生率最高,达 2.78%;从低 DO 发生的程度上看,沱江流域釜溪河低 DO 持续月份最长,DO 不足

问题最为严重,最低浓度仅为 1.8 mg/L。

(3)从与外界环境的相关性上看,DO_{mean} 与流域平均海拔呈负相关关系;DO_{max} 与流域社会经济发展状况呈正相关关系,与平均海拔呈负相关关系;DO_{min} 与流域社会经济发展状况呈负相关关系,与多年平均径流量正相关关系。

参考文献

- [1] FAN C W, KAO S J. Effects of climate events driven hydrodynamics on dissolved oxygen in a subtropical deep reservoir in Taiwan[J]. *Science of the total environment*, 2008, 393(2-3): 326-332.
- [2] 黄炜惠, 马春子, 李文攀, 等. 我国地表水溶解氧时空变化及其对全球变暖的响应[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(5): 1970-1980.
- [3] GAUNS M, MOCHEMADKAR S, PRATIHARYA A, et al. Phytoplankton associated with seasonal oxygen depletion in waters of the western continental shelf of India[J]. *Journal of marine systems*, 2020, 204: 103308.
- [4] RABALAIS N N, CAI W J, CARSTENSEN J, et al. Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean[J]. *Oceanography*, 2014, 27(1): 172-183.
- [5] 王话祥. 上海城市地表水溶解氧时空分布特征及影响因素探讨[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [6] 胡鹏, 杨庆, 杨泽凡, 等. 水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(6): 679-686.
- [7] 沈忱, 吕平毓, 冯顺新, 等. 向家坝水库蓄水对下游江段溶解氧饱和度影响研究[J]. *淡水渔业*, 2014(6): 31-36.
- [8] 孙毅, 吕方辉, 陈钊, 等. 长江口邻近海域溶解氧的时空分布及影响因素研究[J]. *海洋科学*, 2021, 45(12): 86-96.
- [9] 王浩百. 城市河道水体流速激励引发湍流复氧变化规律研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [10] VAN M K J, BASU N B, VAN C P. Two centuries of nitrogen dynamics: Legacy sources and sinks in the Mississippi and Susquehanna River Basins[J]. *Global biogeochemical cycles*, 2017, 31(1): 2-23.
- [11] 蒋吉发, 王正勇. 四川省地表水资源量变化趋势分析[J]. *四川水利*, 2022, 43(1): 47-52.
- [12] 吕琳莉, 李朝霞, 崔崇雨. 高原河流溶解氧变化规律研究[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(7): 133-140.
- [13] 王话翔, 初晓治, 陈莹, 等. 特大城市地表水环境溶解氧时空分布特征探究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2020(6): 154-163.
- [14] 包小波, 陈洁. 城市河道水流溶解氧分布影响分析[J]. *中国水能及电气化*, 2017(4): 57-60.
- [15] 白乙拉, 李慧莹, 李志军. 寒区结冰湖冰盖下溶解氧垂直分布数值模型[J]. *水利学报*, 2017, 48(3): 373-377.