

柯内特环保大数据创新班课程论文

(大数据/人工智能项目工程实践)

题目四：河涌水质污染因子贡献度与水环境容量分析研究

学 院：_____

专 业：_____

学 号：_____

学生姓名：_____

指导教师：_____

二〇二三年六月

摘要

自从改革开放以来,我国的经济和城市化进程飞速发展,工业实力得到了极大的提升。然而,这个过程中也带来了严重的城市河涌水体污染问题,导致水体功能逐渐退化,对水体环境的生态平衡产生了巨大破坏。污染源广泛,内部水源受限,同时河涌自净能力也逐渐减弱,城市河涌环境状况变得越来越严峻。因此,恢复和提升水体自净能力,逐步改善水质环境,对保护生态环境至关重要。准确分析与识别水质污染的主要贡献因子,才能为环境污染防治和管理工作提供科学参考。对区域水环境容量进行分析,计算流域水环境容量和允许排放量是制定污染物排放控制方案的前提。

为了解决以上问题,本文利用广东省东莞市的4个国控断面水质数据进行相应的数据挖掘处理,从多维度对其水质状况、主要污染因子等进行分析,并建立一维水质模型对相应河流的水环境容量进行测算。最后将水环境容量、水质污染因子贡献度与水文经济等方面联系起来,建立污染物排放模型,做到合理的运用水环境量。

对于数据预处理,本文根据时间序列数据的特殊性对一般的缺失值使用附加的数据进行填补,补全时间序列。针对数据中的异常值,本文传统的 IQR 分析法,在时间窗口的约束下利用 LOF 算法对异常值进行检测,再使用 rolling 算法进行相应的平滑插值,可视化结果显示模型效果良好。最后针对部分水质类型缺失的数据,本文使用迁移学习的方法在进行相应的类别预测插值,模型在目标域中泛化效果良好。

对于东莞市整体水质的分析,本文对已经得到的数据进行可视化分析以及撰写分析报告。根据控制单元划分原则,将所检测河涌分为4个单元,并对每个单元的水质指标进行监测和评价。水质评价方面,本文根据国家标准对数值进行分类评价,结合各单元水质变化监测,石龙南河监测断面所在的东江南支流水质最好,旗岭监测断面所在的石马河流域所受水质污染最为严重;从空间分布来看,丰水期各类指标含量相比而言整体偏高,平水期各类指标与枯水期接近;从 Moran's I 来看,丰水期中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 呈现出一定的负相关性;平水期中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 表现出显著正相关性, CODMN 和 TP 呈现出类似的空间分布规律;枯水期中, CODMN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈现出一定的正相关性,而 TP 则与其他两个变量的相关性较小。

对于水质污染因子贡献度的分析,本文对4条河流的监测数据使用单因子污染指数法以及内梅罗污染指数法分别计算选取的高锰酸钾、氨氮、总磷、总氮4个指标水质污染指标的污染指数,将污染指数与相应污染指数分级标准进行对照并综合分析,分析结果认为总氮是这4条河流水质污染的主要因子,水质污染因子贡献度达到73.44%~79.71%。

对于水环境容量的计算,本文在已有数据的基础上选择了旗岭断面所在的河流进行分析,从河段概化与选定的一维水质方程的选择两方面确定目标方程,在通过降解系数的选取、目标断面的目标水质等级与相应的排污浓度进行约束条件的生成,建立了相应河段的水环境容量模型,模型在一定程度上考虑了水温、天气等重要因素对污染物降解系数的影响,为下文合理利用水环境容量建立坚实的基础。

对于污染物排污模型设计,本文综合考虑水质污染因子贡献度与水环境容量两者的约束,再引入水文经济及其它污染物存储价值方面的考量,制定污染物排放模型,综合环境污水治理成本与水质污染因子贡献度系数间的考量,在动态、充分的利用水环境容量条件下达到污染物安全排放的效果。

关键词: 时间窗口; LOF 算法; Moran's I; 单因子污染指数; 内梅罗污染指数; 水环境容量

目 录

1、 引言	1
1.1 背景及意义.....	1
1.2 研究思路.....	1
1.3 创新点	3
2、 数据预处理	4
2.1 缺失值填充.....	4
2.2 基于时间窗口的异常值处理.....	7
2.3 数据标准化.....	9
3、 水质概况	10
3.1 控制单元划分.....	10
3.2 水质评价.....	11
3.3 水质空间分布特征及异质性分析.....	14
4、 水质污染因子贡献度分析.....	17
4.1 评价方法.....	17
4.2 结果分析.....	18
5、 水环境容量计算模型建立.....	21
5.1 建模河段的选取.....	21
5.2 控制指标与水质模型选择.....	22
5.3 研究区域水域概化.....	22
5.4 基于一维水质方程的水环境容量模型建立.....	22
5.5 水质模型参数确定.....	23
5.6 模型验证与评估.....	25
6、 多指标融合下的污染物排放模型设计.....	25
6.1 模型的建立.....	25
6.2 相关参数的确定.....	26
6.3 模型的验证及评估.....	27
7、 指导建议	27
7.1 治理目标.....	27
7.2 采取综合治理措施，提高河道防洪能力.....	27
7.3 加强管理工业区，防治流域污染.....	27
7.4 建立流域污染防治体系，改善水环境.....	28
参考文献	30

典型河涌水质污染因子贡献度与水环境容量分析:以东莞市石马河等河涌为例

姓名: 宋琦斌 学号: 20200060315 班级: 2020 数据科学与大数据技术 3

姓名: 陈权寿 学号: 20200060318 班级: 2020 数据科学与大数据技术 3

姓名: 林佳豪 学号: 20200060321 班级: 2020 数据科学与大数据技术 3

1、引言

1.1 背景及意义

水资源是人类生存和发展的基础,然而随着我国工农业的发展,工业和农业污染也随之增加,超过了区域水体环境容量的允许范围,这引发了许多问题。一旦污染负荷超过水环境容量的允许范围,水体环境将逐渐恶化,可使用的水资源也会减少。此外,我国的水资源存在许多问题,例如人均可利用率低、时空分布不均匀,以及水资源利用效率低下和浪费现象严重。这些问题进一步凸显了我国水资源短缺的紧迫性。

河涌发生污染,导致水质黑臭,严重影响了城市形象,成为人们强烈关注的一个热点问题,因此改善水质、促使水质达到其规划功能,成为河涌整治的最终目标。在这一过程中,水体本身的自净能力会逐渐恢复,水质环境逐渐改善,这对于完善生态环境具有重要意义。

东莞市位于珠三角经济区中,近年来,随着东莞市经济的快速发展,城市生态环境压力也与日俱增,环境问题已成为制约经济社会发展的一大问题。虽然近年来各级政府及有关部门为保护水环境做了不少工作,开展了河涌整治,并取得了一定效果,但水污染形势依然严峻,治理任务仍十分艰巨。本文基于东莞市 4 个国控断面记录的近一年的相关河道的水质数据进行相应的数据挖掘工作,对东莞市水质进行多维度的数据分析,计算相关污染因子贡献度与水环境容量等,再利用环境-经济动态模型对污染物的实时排放量进行模型建立,并在上述分析的基础上给予相应的分析与建议。

1.2 研究思路

在现有的研究成果上,本文研究思路如下:利用东莞市国控断面的水质监测数据,在海量信息的时代背景下,运用信息处理技术手段评估东莞市 4 条河流的整体水质情况。为了解决该问题,从水质污染因子贡献度、水环境容量与相关排污与经济之间进行建立相关模型,达到充分利用水环境容量的目的。最后,基于以上评估结果,分析并总结提升水质质量的相应策略。研究思路总体如图 1-1 所示。

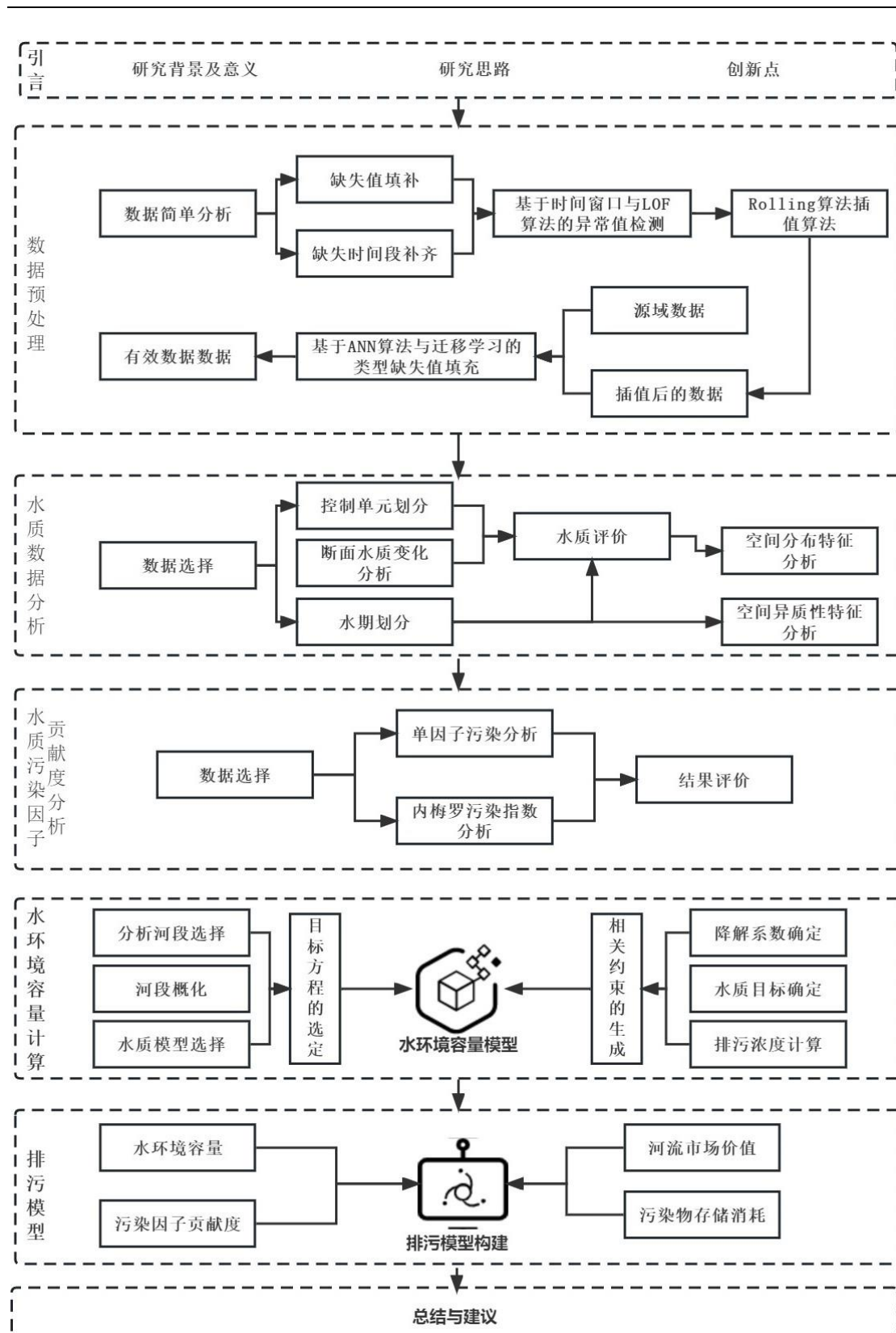


图 1-1 研究思路

1.3 创新点

（1）基于时间窗口对数据进行异常值检测

传统数据预处理过程，对于异常值一般使用 $1.5IQR$ 原则或者 3σ 原则，该类型的异常值检测算法在符合正态分布的数据集上能够取得较为良好的拟合效果，但本文使用的数据为现实中的水质数据，现实过程中会产生很多其它的问题导致数据偏离均值，但大部分都是正常变化。

基于此，本文在时间窗口的约束下使用 LOF 算法对数据进行检测，并利用 rolling 算法进行时间窗口平滑插值。从可视化结果看出异常值处理效果良好。

（1）基于迁移学习对部分数据进行缺失值填充

长尾型数据是机器学习中较难的挑战之一，本文研究的水质数据中，整体符合长尾型数据的具体特征，为了进一步对部分漏检的水质类别进行缺失值填补，本文利用 ANN 网络训练源域数据后进一步在目标域数据集上进行训练，更具测试结果显示，模型具有良好的泛化能力。

2、数据预处理

本文选取了东莞地区内“石马河”、“东莞运河”、“东江”以及“东江南支流”一共 4 条河流从 2022 年 5 月 1 日 0:00 到 2023 年 5 月 31 日 20:00 之间每隔 4 小时的水质监测数据进行研究。监测数据中包括监测时间、河流、断面名称、监测时间、水质类别、水温、pH、溶解氧、高锰酸钾、氨氮、总磷、总氮、电导率、浊度以及站点情况一共 14 个字段。

为了确保水质监测数据的准确性和一致性，下面对数据的缺失值和异常值等进行相应的处理操作。

2.1 缺失值填充

2.1.1 基于时间序列的缺失值填充

在处理过程中发现水质监测数据中存在两种情况的数值缺失，第一种情况是时间序列上的缺失（例如在 0:00 时刻到 8:00 时刻之间缺失了 4:00 时刻的所有数据），第二种情况是一行数据中存在个别数值的缺失，这可能是由于设备故障或其他因素导致的。这两种情况都可以采用将上一时刻的值用来填充当前时刻缺失值的方法，这利用了监测数据在时间上的连续性，因为相邻时刻的水质数据通常是相似的。假设数据集中的缺失值出现在第 t 个时刻，则使用 $t-1$ 时刻的值来填充该缺失值。

2.1.2 基于迁移学习的水质类别缺失值填充

由于水质检测设备部署条件较为恶劣且具有定期维护的相关要求，本文所用数据中存在部分时间点检测设备处于维护状况，但经深入分析数据发现处于维护情况下的机器并非直接停止工作，大部分数据仍然被正常的采集、传输，仅少部分数据处于空缺状态，而空缺的数据前文已使用相关算法进行填充。部分维护中的设备原始采集数据如表 2-1 所示，其中 NULL 则表示该部分为缺失值。

表 2-1 部分维护状态设备检测到的数据

水质类别	水温	PH	溶解氧	高锰酸钾	氨氮	总磷	总氮	电导率	浊度	站点情况
-3	18.46	7.508	7.214	2.599	0.1516	NULL	2.452	10603.49	11.86	维护
-3	18.39	7.483	7.232	2.502	0.1194	0.0504	2.443	11824.22	12.95	维护
-3	16.59	7.304	6.212	NULL	3.0198	0.4037	10.647	461.623	83.22	维护
-3	16.33	7.323	6.74	NULL	2.3831	0.364	10.445	471.285	75.77	维护
-3	17.01	7.13	8.379	1.238	0.025	NULL	2.081	167.017	11.10	维护

观察表 2-1 可得，当设备处于维护状态时，水质类别并不会直接被检测，而是返回 -3 作为状态码，本文将其视为缺失值并进行填充处理。

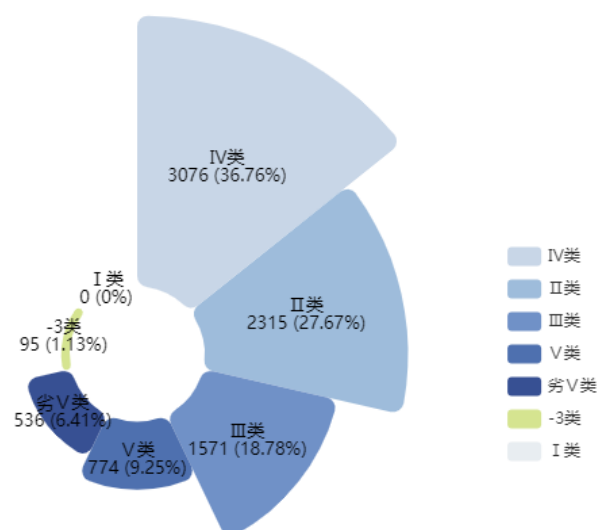


图 2-1 本文所用数据集水质类别分布

由图 2-1 观察可得，本文所使用的数据为长尾型数据，如果仅使用该部分数据去对-3类的数据进行建模填充是高度不准确的，不仅会对数据造成破坏，而且对后续模型准确性造成影响，基于此，本文提出基于迁移学习的水质类别缺失值填充模型。

（1）源域数据介绍

本文选取同处于珠江流域的贵州省安顺市与广东省佛山市的部分河涌断面收集的水质数据集作为源域数据集，共 8236 条，其与目标数据集数据采集标准、规格等都相同，并且除水质类别分布较均匀，整体与本文使用的东莞市相关数据集成互补关系，非常适合于模型的训练。具体源域数据域目标数据相关字段平均值差距如图 2-2 所示。

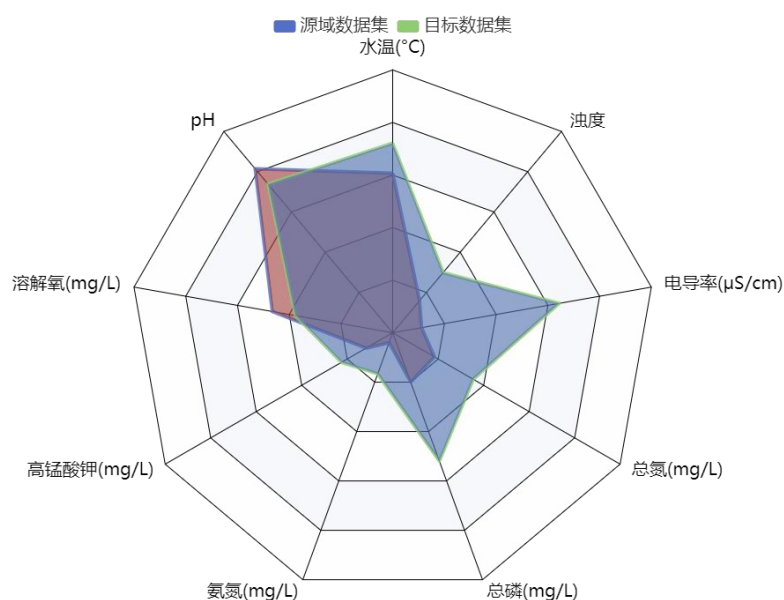


图 2-2 数据集对比

（2）基于 ANN 缺失值填充模型建立

本文在 Python 环境下利用 Pytorch 框架下实现对 ANN（Artificial Neural Network，人工神经网络）多分类模型的搭建。本次选取水温、pH、溶解氧、高锰酸钾、氨氮、总磷、总

氮、电导率、浊度以上 9 个指标作为特征作为对水质类别进行拟合预测。建模的详细过程及结果如下所示。

a) 对源域数据进行模型构建

对于源域数据集，出于本文拥有足够多的数据量考虑，为充分保证训练结果，本文对于其上存在缺失值、处于维护状态的机器采集的数据均采用删除处理，保证数据的可靠性与准确性。并对数据集采取一定的特征工程处理。具体模型建立参数及结果如表 2-2 所示。

表 2-2 源域数据集模型构建

训练轮数	全连接层数	激活函数	测试集损失值范围	测试集准确率范围
300	3	Sigmoid ReLU	0.6604~0.09	0.7755~0.9788

b) 基于迁移学习在目标数据集上进行模型构建

对上文中已经预处理好的目标域数据将待插值，即水质类别为“-3”的 95 条数据单独提取后将剩下的部分进行训练集、测试集的划分并进行标准化等操作，再利用上一步训练源域数据集的模型，对其进行冻结部分隐含层处理后，加入新的分类器，再用目标数据的训练集对模型进行低学习率的迭代与调优，具体参数及结果如表 2-3 所示。

表 2-3 迁移学习模型训练结果

训练轮数	冻结层数	新增层数	激活函数	测试集损失值范围	测试集准确率范围
100	1	1	Sigmoid ReLU	0.4662~0.1312	0.8293~0.9575

由表 2-3 可得模型再目标域数据测试集中的准确率高达 95%，本文认为其能够很好的应用在目标数据集的水质类别评价中。

(3) 插值结果分析

对数据中“水质类别”为-3 的数据进行与上文相同的标准化处理后利用建立好的模型对其进行缺失值填充处理，具体填充的水质类别结果如图 2-3 所示，其与原始数据有着高度的分布一致性。

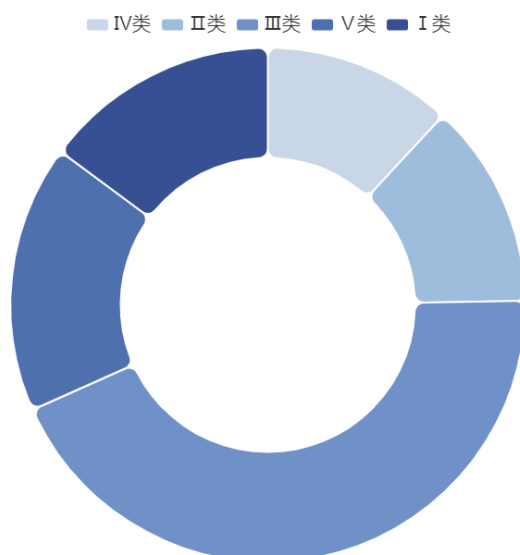


图 2-3 插值结果展示

2.2 基于时间窗口的异常值处理

在水质监测数据中出现异常值的原因可能有以下几种：

1、测量误差：在进行水质监测时，可能会发生测量仪器的误差，或者人为操作的错误，导致测量结果出现异常。

2、自然波动：水质参数在自然环境中可能会存在波动和变化，特别是受季节、天气、降雨等自然因素的影响，会导致水质参数出现临时的异常值。

3、污染事件：当发生水体污染事件时，例如工业废水、农药、重金属等污染物的排放，会导致水质参数出现明显的异常值。

4、数据采集错误：在数据采集和录入过程中，可能会出现错误或数据丢失，导致异常值的出现。

对于这种时间序列的数据异常问题，常规的箱线图方法、Z-score 方法仅能对全局进行一个大致的评估，忽略了时间序列数据可能具有的周期性、趋势型等。基于以上分析，本文提出基于时间窗口的 LOF 算法（Local Outlier Factor，局部异常因子算法）用于异常值检测，并通过 rolling 算法（Rolling Window Calculation/Analysis，滚动窗口计算）对异常点进行插值处理。

（1）LOF 异常值检测

经过若干次实验与现实情况，本文设置的 LOF 算法相关参数较为宽松，避免了大量误检的情况，同时也较符合现实复杂的情况。具体参数配置与相关备注如表 2-4 所示。

表 2-4 LOF 算法关键参数

参数名称	参数设置	备注
window	60	窗口大小，10 天的时间段。
k	6	LOF 算法的 k 值，对应 1 天内的时间段。
threshold	3	异常值阈值，关键参数。

经过多次调整选定了以上参数进行 LOF 模型建立，利用该模型对本文所用的数据进行

异常值检测，其中对樟村(家乐福)断面中高锰酸钾进行异常值检测结果如图 2-4 所示。

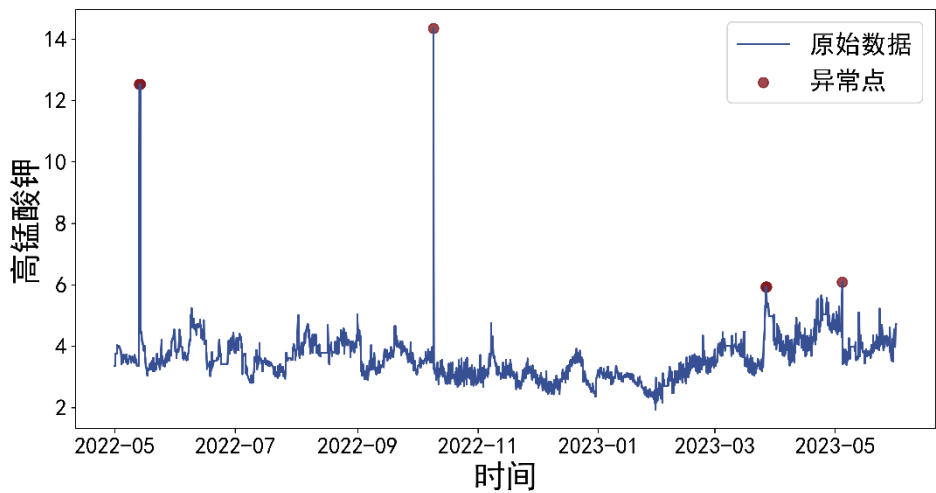


图 2-4 樟村(家乐福)断面高锰酸钾浓度异常值

(2) Rolling 插值

在 python 环境下的 pandas 库中直接调用 rolling 函数对数据进行异常点插值处理，其中时间窗口 window 设置为 18，最小窗口设置为 6。利用该算法对数据进行修正后可以看到数据间变得更为平滑流畅，插值效果良好。

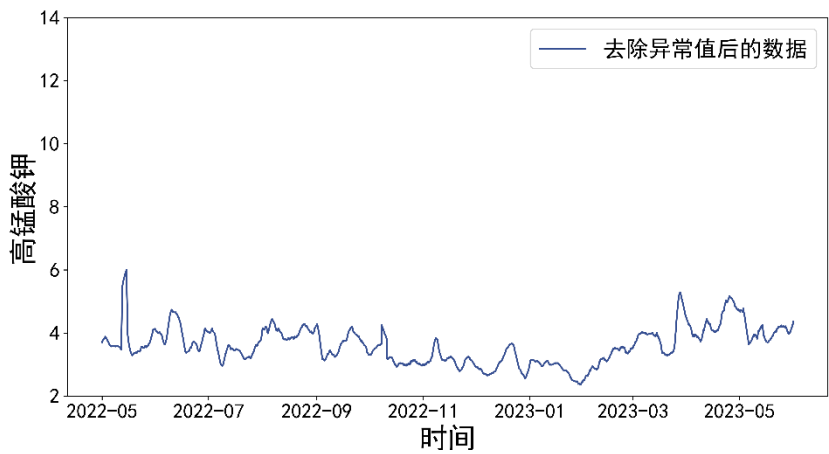


图 2-5 去除异常值效果

最终，每条河流不同指标的异常值检测数量如表 2-5 所示。

表 2-5 异常值检测结果

河流	水温	pH	溶解 氧	高锰 酸钾	氨氮	总磷	总氮	电导 率	浊度
石马河	0	10	3	17	14	34	4	6	24
东莞运河	0	4	0	9	8	13	5	0	11
东江	1	0	0	7	21	8	18	0	10
东江南支流	0	4	0	8	2	13	9	0	2

经过上面的处理，对检测出的异常值进行了相邻 6 个数据点插值替换，真正的异常值经过替换后得到处理，而错误检测的异常值经过线性插值不会发生改变，不影响数据的科

学性。

2.3 数据标准化

不同的指标数据往往具有不同的量纲和量纲单位，这样的情况通常会影响到数据分析的结果。本文使用的水质检测数据包含多种不同类型的指标，为了消除指标之间量纲的影响，需要进行数据标准化处理，以解决数据指标之间的可比性。原始数据经过数据标准化处理后，各指标处于同一数量级，适合进行综合对比评价，更有利于模型的构建。尽管上文中已经对异常值进行相应的检测并替换，但是数据中不可避免的依旧存在部分噪声数据，基于此，本文对数据 Z-score 标准法进行相关处理。

3、水质概况

3.1 控制单元划分

本章综合考虑东莞市内河涌水系分布、现状检测断面分布等，将东莞市河涌流域按照旗岭、樟村(家乐福)、沙田泗盛、石龙南河四个断面划分控制单元；同时根据以上断面所检测到的水质数据，分析评价东莞地区河涌水质，并掌握水质现状，为水环境容量研究提供支撑。根据东莞市河涌流域范围内不同控制单元的水环境容量计算结果和水质功能目标，来制定各控制单元污染物总量控制方案。

3.1.1 划分原则

(1) 便于管理

对于大面积、大范围的研究区，为了避免造成辖区行政混乱，便于辖区调整产业结构，划分控制单元不得跨越乡镇行政区域。根据城镇的水环境容量现状和经济发展现状，建立健全水环境管理体系。

(2) 突出重点

城镇作为行政单位的经济和活动中心，人口较为集中，故排污量较大且排污口多又集中，控制事应该将其作为重点对象。但对于流经镇域且长度较短的河段，在划分时应考虑整合控制单元，以提高区域环境质量。

(3) 水环境容量调配

控制单元的划分要以当地河涌分布现状情况为基础，准确抓住某个范围内水环境容量的影响因子，由此提出的水环境容量调配方式更符合河涌现状，也更加科学合理。

3.1.2 东莞市河涌断面相关水系情况

本文选取了东莞地区内“石马河”、“东莞运河”、“东江”以及“东江南支流”共 4 条河流，河流相关资料如表 3-1 所示。

表 3-1 东莞市内相关河流资料表

河涌名称	断面名称	总长度(公里)	流域面积
石马河	旗岭	67.5	601
东莞运河	樟村(家乐福)	103	981.2
东江	沙田泗盛	33	238
东江南支流	石龙南河	15	107

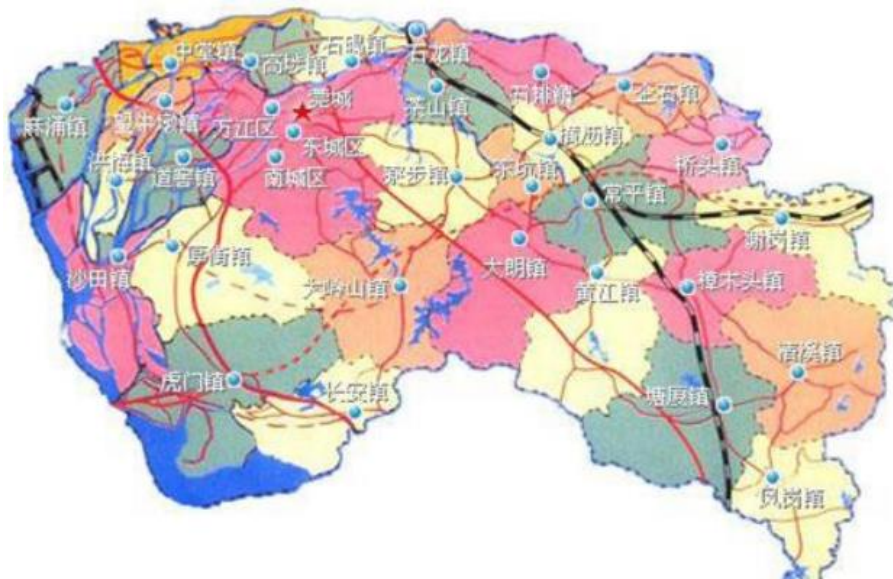


图 3-1 东莞市河涌水系分布图

3.1.3 东莞市河涌单元划分

水污染控制单元是污染源的组合和划分，这些污染源根据城市功能区划，工业布局，地面流域和下水道的趋势而相对集中在空间上并具有一定的相似性。为了削减重点污染物的排放，需要划分好控制单元和确定排污口位置。某一流域的控制单元由水域和污染源，根据使用功能和行政区划确定水域范围，污染源则是排放到水体的污染源的所有来源。

进行单元划分可以将相似类型的污染源相对集中在空间上，便于针对不同的污染源采取不同的治理措施；同时，也可避免不同断面的污染物相互干扰和影响，更容易有效地控制污染物排放；实现对各自污染源的精细监控和管理，降低环境风险，正对行地制定和实施水环境污染防护措施，促进水环境质量提升。本文以旗岭、樟村、沙田泗盛、石龙南河四个监测断面为基础，结合水污染控制单元特点、道路、建筑物等信息，将东莞地区划分成4个控制单元(R1-R4)。

3.2 水质评价

3.2.1 监测方法

本文所采集的数据均按照《地表水环境监测技术规范》(HJ 91.2—2022 部分代替 HJ/T 91—2002)规定方法进行监测。

选取高锰酸钾、氨氮、总磷为控制因子进行水质分析。按照《地表水环境质量标准》(GH3838-2002)规定方法及《环境监测规范》中规定的分析方法进行分析与检测。

3.2.2 断面水体质量变化监测

本文收集整理了东莞地区内旗岭、沙田泗盛、樟村(家乐福)和石龙南河 4 个监测断面从 2022 年 5 月 1 日到 2023 年 5 月 31 日的水质数据, 每个水质取样点, 监测频次为 4 小时, 选取水温、pH、溶解氧(DO)、高锰酸钾(CODMN)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、电导率、浊度 9 项数据进行分析。各断面编号和名称如图 3-2 所示, 监测断面位置见图 3-2。

表 3-2 断面信息表

编号	断面名称	设置目的
1#	旗岭	监测石马河流域水质
2#	樟村(家乐福)	监测东莞运河流域水质
3#	沙田泗盛	监测东江流域水质
4#	石龙南河	监测东江南支流流域水质



图 3-2 监测断面位置图

根据本文收集的从 2022 年 5 月 1 日至 2023 年 5 月 31 日总计 13 个月份的断面监测数据显示,旗岭、樟村(家乐福)、沙田泗盛、石龙南河 4 个断面污染指标随时间变化趋势如图 3-3、3-4、3-5 所示。

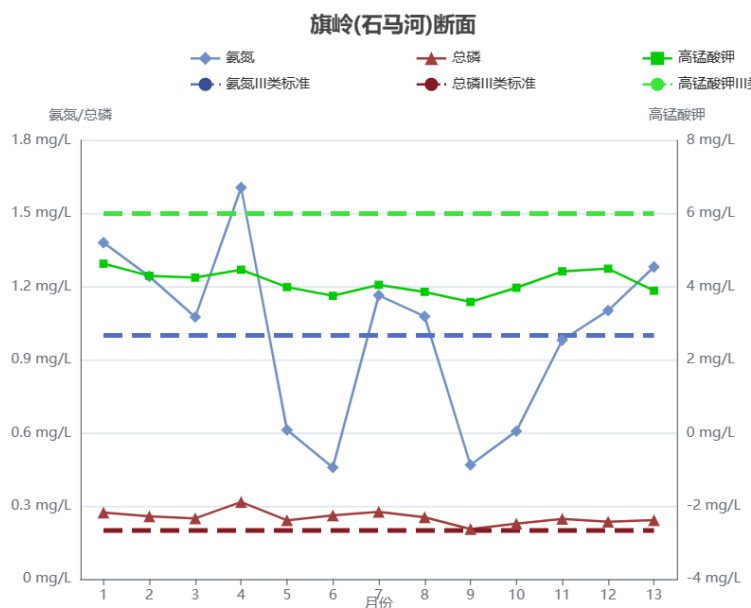


图 3-3 旗岭(石马河)断面 CODMN、NH₃-N、TP 变化趋势图

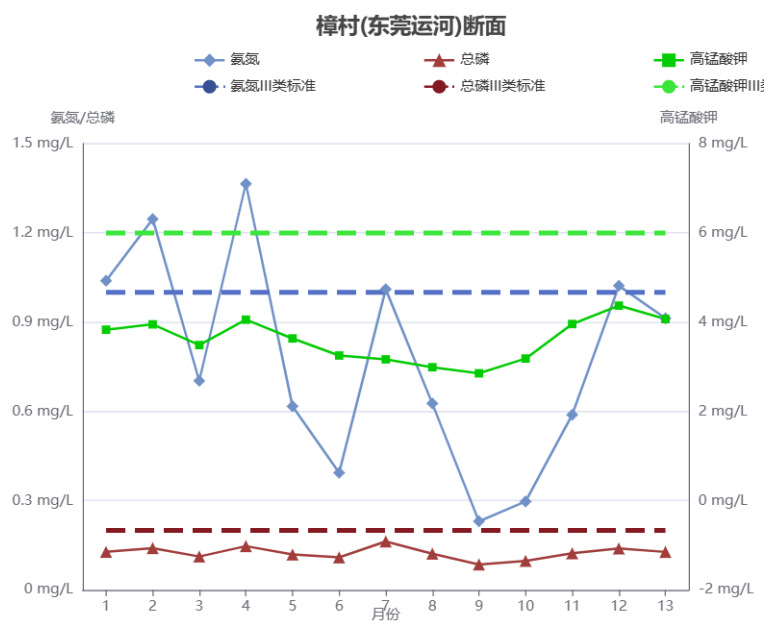


图 3-4 樟村(东莞运河)断面 CODMN、NH₃-N、TP 变化趋势图

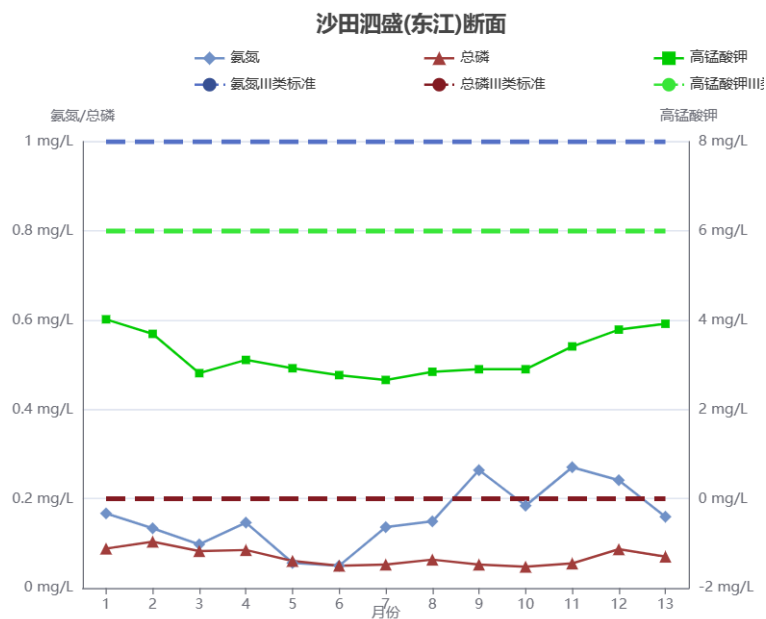


图 3-5 沙田泗盛(东江)断面 CODMN、NH₃-N、TP 变化趋势图

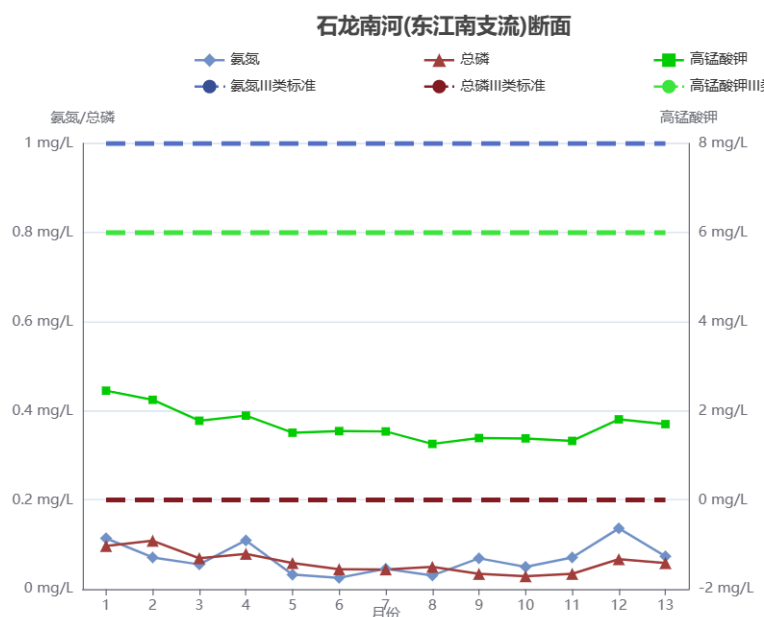


图 3-5 石龙南河(东江南支流)断面 CODMN、NH₃-N、TP 变化趋势图

3.2.3 水质分析

依据在东莞地区的 4 个监测断面的水质检测结果以及《地表水环境质量标准（GB3838-2002）》规定的水质评价指标来进行水质评价分析。其中，旗岭监测断面 TP 均超过 III 类水质标准，NH₃-N 在标准线上下浮动，超标月份集中于夏季，CODMN 达到 III 水质类标准；樟村监测断面 NH₃-N 于夏季存在超标情况，2022 年 9 月后大致达标，TP、CODMN 均达到水质 III 类标准；沙田泗盛监测断面 NH₃-N、TP、CODMN 均达到 III 类水质标准，但 NH₃-N、CODMN 存在上下波动情况；石龙南河监测断面 NH₃-N、TP、CODMN 波动平缓，且均达到 III 类水质标准；与其他监测断面相比，旗岭、樟村断面水质污染较为严重，且二者数据趋势存在一定的相似。

从监测断面分布图可知，樟村监测断面所在的东莞运河位于旗岭监测断面所在的石马河上游处，考虑上游河段的污染物、营养物输入和排污等因素可能会对下游断面的水体环境产生影响，使得两个断面的水质检测数据变化趋势相似。结合以上监测断面常规水质检测结果可见，樟村、旗岭监测断面所在的东莞运河和石马河已收到较严重污染，这主要是因为石马河流域以及东莞运河流域均存在众多的工业企业以及养殖场，企业排放物、化肥、畜禽粪便通过径流或直接排放污染石马河水质；多数城镇生活污水未经处理直接排放进入河流，加重水质污染，从而使各污染指标一直都保持在较高的水平。

3.3 水质空间分布特征及异质性分析

3.3.1 水期划分

根据东莞市水务局发布的 2020-2022 三年间《水资源公报》中的降雨量指标，本文将近年的 5 月至 8 月定义为东莞地区的丰水期，3 月至 4 月、9 月至 10 月为平水期，11 月至次年 2 月为枯水期。

3.3.2 水质空间分布特征及异质性分析方法

本文将东莞地区划分为 4 个控制单元(见 3.1.3)，在 SPSSAU 软件的支持下，利用莫兰

指数(Moran)分析功能,对水质指标空间相关性与聚集度状况进行分析,并对各断面水质指标的空间分布特征进行可视化。水质指标空间相关程度选用全局 Moran's I 来反映,当 Moran's I > 0 时,表明相关特征之间的空间自相关性比随机性强,这意味着如果样本值之间是空间相关的,则附近区域的值也更有可能是相似的;相反,当 Moran's I < 0 时,表明空间自相关性较弱,即样本值之间没有明显的空间相关性; Moran's I < 0 时,空间呈随机性;此外,如果 z 得分的绝对值越大,则表明 Moran's I 值离自然零点越远,即空间自相关性越强。p 值越小表明空间自相关性的显著性更高。

3.3.3 水质空间分布特征

东莞地区四个监测断面水质指标空间分布特征见图 3-6。由分析结果可知,丰水期高锰酸钾含量整体偏高,但均未超出 III 类水质标准,旗岭、樟村、沙田泗盛监测断面高锰酸钾指数显著高于石龙南河监测断面;丰水期旗岭、樟村监测断面均出现氨氮指数超出 III 水质指标情况,平水期与枯水期也显著高于其余监测断面;旗岭在三个水期中均出现总磷指数超出 III 类水质标准,且显著高于其余监测断面;整体来看,旗岭、樟村监测断面所在流域受到水质污染较为严重,水质较差。

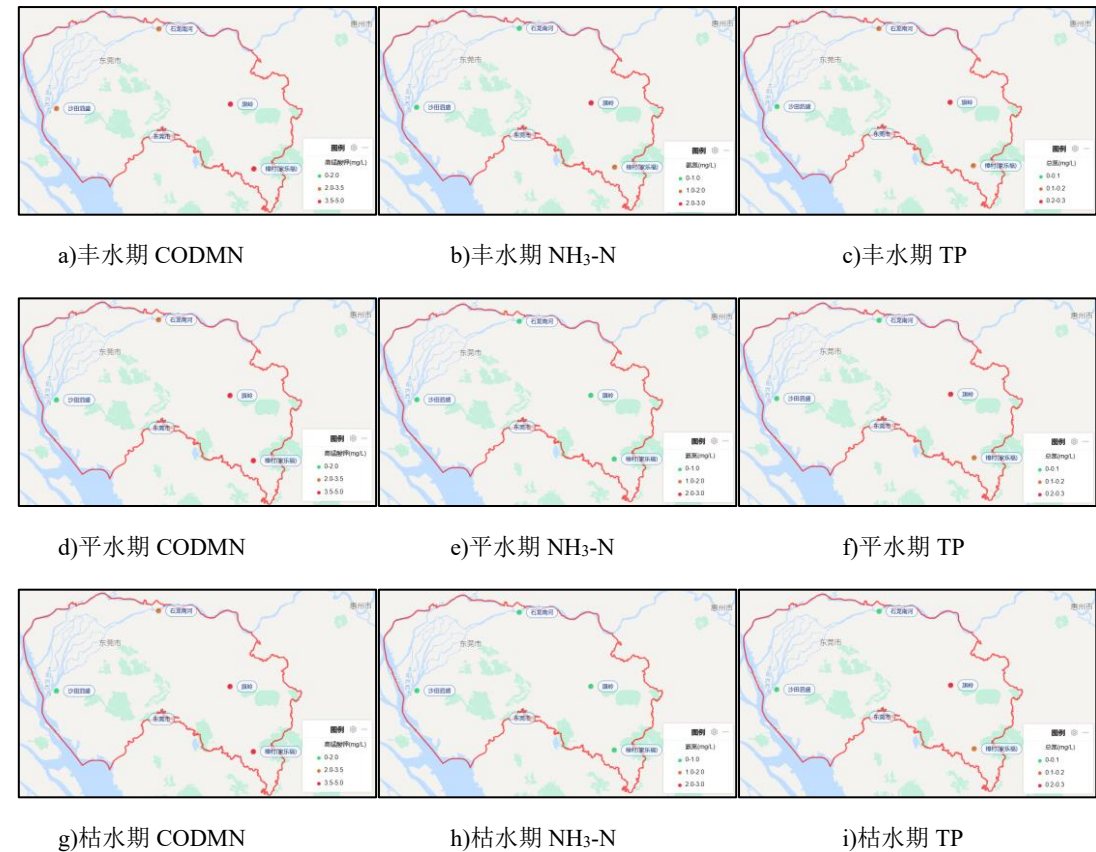


图 3-6 水质指标空间分布

东莞地区丰、平、枯水期各项水质指标的全局 Moran's I 指数见表 3-3。计算结果显示,在丰水期中, NH3-N、TP 的 Moran's I 值均为负数,这意味着该区域内不同位置之间水质指标的差异程度较大,可能存在不同类型的水源输入、水体混合或者局部受人为干扰等情况。平水期中, NH3-N 的 Moran's I 值达 0.934, z 得分高达 2.126, p 值达到了 0.017,表明其具有较高的空间自相关性以及显著性。CODMN 和 TP 呈现出类似的空间分布规律;枯水期中, CODMN 和 NH3-N 呈现出一定的正相关性,而 TP 则与其他两个变量的相关性较小。

表 3-3 东莞地区水质全局 Moran's I

水期	项目	CODMN	NH ₃ -N	TP
丰水期	Moran 指数 I	0.186	-0.987	-0.178
	z	0.871	-1.097	0.261
	p	0.192	0.136	0.397
平水期	Moran 指数 I	0.269	0.934	0.356
	z	1.010	2.126	1.156
	p	0.156	0.017	0.124
枯水期	Moran 指数 I	0.142	0.730	0.386
	z	0.797	1.784	1.206
	p	0.213	0.037	0.114

4、水质污染因子贡献度分析

在本文的水质监测数据各项指标中，通常认为高锰酸钾、氨氮、总磷、总氮是水质污染因子指标，这些指标被用来评估水质的污染程度。其余指标如水温、pH 值、溶解氧、电导率和浊度通常用来描述水体的物理和化学性质，但不直接用于评估水质污染程度。

4.1 评价方法

4.1.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法是一种常用的评价水质污染程度的方法。它通过对每个水质指标的测量值与相应的水质标准进行对比，计算出每个指标的污染指数，进而评估其对整体水质的贡献度。污染指数的计算通常基于一定的标准限值和加权系数，这些系数反映了不同指标对水质影响的重要程度。通过单因子污染指数法，可以确定每个因子在整体水质中的相对贡献度，帮助识别主要的水质污染因子。具体计算公式^[8]如下：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (4-1)$$

其中 P_i 为单因子污染指数， C_i 为水质污染因子的测量值， S_i 为水质标准限值，本文采用的水质标准限值评价标准为《地表水环境质量标准（GB3838-2002）》，部分标准限值如表 4-1 所示。

表 4-1 水质评价指标 《地表水环境质量标准（GB3838-2002）》

指标\水质类别		I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
高锰酸盐指数 (CODMN) (mg/L)	≤	2	4	6	10	15
氨氮 (NH ₃ N) (mg/L)	≤	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
总磷 (TP) (以 P 计) (mg/L)	≤	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4
总氮 (TN) (以 N 计) (mg/L)	≤	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0

4.1.2 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法是一种综合考虑多个水质指标的评价方法。它通过将每个水质指标的测量值与相应的水质标准进行对比，计算过程中兼顾了单因子污染指数的平均值和最大值，并突出最大值的贡献度。内梅罗污染指数综合考虑了多个指标的影响，反映了不同指标对水质的综合贡献度。通过内梅罗污染指数评价法，可以较全面地评估水质污染因子的重要性和贡献度。具体计算公式^[8]如下：

$$N_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (4-2)$$

$$N_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (4-3)$$

$$N = \sqrt{\frac{N_{avg}^2 + N_{max}^2}{2}} \quad (4-4)$$

其中 C_i 为水质污染因子的测量值， S_i 为水质标准限值，水质标准限值评价标准如表 4-1 所示， N_{avg} 为 N_i 的平均值， N_{max} 为 N_i 的最大值， n 为水质污染因子数量， N 为内梅罗污染指数法的综合值。

4.2 结果分析

4.2.1 单因子污染指数结果分析

通过单因子污染指数法计算出每条河流中高锰酸钾、氨氮、总磷以及总氮 4 个污染因子指标的单因子污染指数如表 4-2 所示。

表 4-2 单因子污染指数计算结果

河流\指标	高锰酸钾	氨氮	总磷	总氮
东江	0.214326	0.079199	0.173658	1.291736
东江南支流	0.112085	0.034106	0.149401	1.116683
东莞运河	0.240139	0.387537	0.311143	3.688529
石马河	0.274974	0.503481	0.632601	4.532435

从表 4-2 的计算结果中可以看出四条河流中污染指数最高的指标均为总氮，在单因子污染指数法中，通常使用最差的指标的污染指数来代表整体的污染指数，所以可以认为总氮的单因子污染指数在一定程度上代表了四条河流的污染程度，根据单因子污染指数分级标准^[8]（见表 4-3）可以看出东江和东江南支流的单因子污染指数在 1 到 2 之间，污染级别为轻污染，污染程度较低；而东莞运河和石马河的单因子污染指数均大于 3，污染级别为重污染，污染程度较高。

表 4-3 单因子污染指数分级标准

P_i	污染水平
$P_i \leq 1$	非污染
$1 < P_i \leq 2$	轻污染
$2 < P_i \leq 3$	中污染
$P_i > 3$	重污染

综上所述，可以初步判断东莞地区的河流水质均存在不同程度的污染，特别是东莞运河和石马河的总氮指标大大超出了评价标准，需要采取相应的措施来改善和保护水质环境。

4.2.2 内梅罗污染指数结果分析

通过内梅罗污染指数法计算出每条河流中高锰酸钾、氨氮、总磷以及总氮 4 个污染因子指标的内梅罗污染指数随月份的变化如图 4-1 所示。

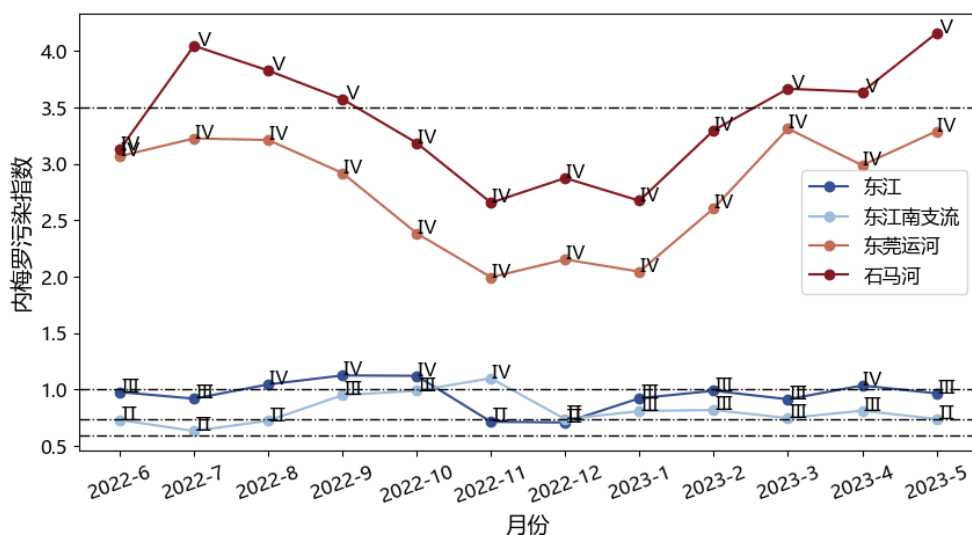


图 4-1 内梅罗污染指数随月份的变化

从图 4-1 可以看出东江和东江南支流的内梅罗污染指数整体保持在相对较低的水平，根据内梅罗污染指数分级标准^[1]（见表 4-4），只有个别月份达到了IV级的污染标准，其余大部分月份的污染指数都保持在II到III级的污染等级水平，其中东江在2022年5月到10月期间的污染指数稍高，在10月时达到最高值（1.123512，IV级），到2022年末稍稍下降，在12月时达到最低值（0.706797，II级），到2023年之后又开始缓慢上升；东江南支流的污染指数从2022年5月到11月一直波动上升，在6月时达到最低值（0.631102，II级），在11月时达到最高值（1.098459，IV级），之后又下降到较低水平。而东莞运河和石马河的内梅罗污染指数则整体保持在较高的水平，其中东莞运河所有月份的污染指数都保持在IV级污染标准区间内，从2022年7月到11月逐渐下降，在11月时达到最低值（1.994459，IV级），在2022年12月以及2023年1月相对平稳，之后又开始波动上升，在2023年3月时达到最高值（3.312400，IV级）；石马河有6个月的污染指数等级达到了V级，从2022年7月到11月逐渐下降，在11月时达到最低值（2.655556，IV级），在2022年12月以及2023年1月相对平稳，之后也是开始波动上升，在2023年5月达到最高值（4.158454，V级）。

表 4-4 内梅罗污染指数分级标准

<i>N</i>	污染等级
$N \leq 0.59$	I级
$0.59 \leq N < 0.74$	II级
$0.74 \leq N < 1.00$	III级
$1.00 \leq N < 3.50$	IV级
$N \geq 3.50$	V级

综上所述，可以发现本节的内梅罗污染指数评价法与上节的单因子污染指数法得到的结果是比较一致的，在东莞区域的四条河流中，东江和东江南支流的整体污染程度较低，而东莞运河和石马河的整体污染程度已经比较严重了，东莞市政府亟需采取相关措施来减少企业排污、生活排污等，改善水体污染情况。

4.2.3 污染因子贡献度结果分析

污染因子贡献度是指每个评价指标在综合污染指数（本文使用的综合污染指数为内梅罗污染指数）中所占的比重或贡献率。具体计算污染贡献率的方法可以有多种，以下是一种常用的方法。

首先将各个评价指标的综合污染指数进行归一化处理，使其范围在 0 到 1 之间。可以使用线性归一化或者其他方法将指标的综合污染指数映射到 0 到 1 的范围内。然后计算每个评价指标的污染贡献率，即归一化后的综合污染指数除以所有评价指标的归一化综合污染指数之和。通过这样的计算，可以得到每个评价指标的污染贡献度，表示该指标对整体污染水平的贡献程度。

根据以上方法计算出四条河流各水质污染因子指标的污染因子贡献度如表 4-5 所示。

表 4-5 每条河流各指标的污染因子贡献度

河流\指标	高锰酸钾	氨氮	总磷	总氮
东江	12.19%	4.50%	9.87%	73.44%
东江南支流	7.94%	2.41%	10.58%	79.07%
东莞运河	5.19%	8.38%	6.72%	79.71%
石马河	4.63%	8.47%	10.64%	76.26%

根据表 4-5 中的污染因子贡献度结果，可以进行以下分析：

（1）在东江中，总氮的贡献度最高，占据了整体的大部分（约 73.44%），其次是高锰酸钾（约 12.19%）、总磷（约 9.87%）和氨氮（约 4.50%）。这表明总氮是东江水质污染的主要因子，其他污染因子的贡献度相对较低。

（2）在东江南支流中，总氮的贡献度同样最高，占据了整体的大部分（约 79.07%），其次是总磷（约 10.58%）、高锰酸钾（约 7.94%）和氨氮（约 2.41%）。这也表明总氮是该支流水质污染的主要因子。

（3）在东莞运河中，总氮的贡献度也是最高，占据了整体的大部分（约 79.71%），其次是氨氮（约 8.38%）、总磷（约 6.72%）和高锰酸钾（约 5.19%）。这再次强调了总氮在该河流的水质污染中是主要的影响因素。

（4）在石马河中，总氮的贡献度依然最高，占据了整体的大部分（约 76.26%），其次是总磷（约 10.64%）、氨氮（约 8.47%）和高锰酸钾（约 4.63%）。这表明总氮是该河流水质的主要污染因子之一。

综上所述，总氮是这四条河流水质污染的主要因子，对水质产生了较大的影响。在水质监测和管理中，应重点关注和控制总氮的浓度，以改善和保护水体的水质状况。其他污染因子如总磷、高锰酸钾和氨氮也需要被考虑，但相对而言其对水质的贡献度较低。

5、水环境容量计算模型建立

5.1 建模河段的选取

东莞地处珠江流域中，河网错综复杂，基于现有的数据与建模复杂度考量，本文选取石马河流域进行进一步水环境容量的分析。近年来，虽然东莞市政府对石马河的治理工作取得一定的突破，但由于缺乏系统治理，碎片化治理现象突出，水污染问题依然较为严重。



图 5-1 石马河主干流经的东莞区域

石马河流经东莞多镇区，由上图 5-1 可以清楚的看到其几乎将樟木头镇进行了二等分处理，该情况利于本文在考虑上下游公平发展，共同利用水环境容量资源的前提下进行模型构建。综合以上分析，本文选定石马河中流经东莞樟木头镇的一段流域进行水容量模型建立与探讨分析。具体河段如图 5-2 所示。



图 5-2 控制断面位置

上图 5-2 中为本次主要分析的河段，其中旗岭断面为国控断面，目标断面为本文根据

行政区域进行的断面划分，并无法验证其存在性。

5.2 控制指标与水质模型选择

5.2.1 控制指标选择

《全国水环境容量核定技术指南》中规定，在进行水环境容量与水环境总量控制时，河流一般选择化学需氧量与氨氮作为水质控制指标，湖库相应增加总氮、总磷、叶绿素 a 等其他指标。同时根据东莞市“十四五”节能减排实施方案中对氨氮、氮氧化物等指标均有相应的减排目标。

综上，综合上文中对石马河流域的数据分析与污染物贡献度分析，本文最终选定高锰酸钾、氨氮、总磷和总氮 4 个指标为控制指标，进行水环境容量模型的构建。

5.2.2 水质模型选择

石马河属于中小型河流，其宽深比不大，具体数据为：河长 34.8 千米，平均宽 80 米，河床坡降 1.5%。河流的水质变化主要体现再纵向沿程的变化上，整体污染物由上游（旗岭断面）向下游（目标断面）迁移运送，污染物浓度整体在横向和垂向的变化不显著。综合水质管理与精度的控制要求，本次对研究的单一河段河流选择一维稳态模型。

5.3 研究区域水域概化

水域概化是指通过将研究水域进行预先规定或者处理，使水质变化规律可以利用简单的数学模型来进行描述。水域概化主要遵守如下原则：①将天然水域概化成计算水域，例如天然河道可概化成顺直河道，复杂的河道地形可进行简化处理，非稳态水流可简化为稳态水流等；②需对支流、排污口、取水口等进行概化。

本次研究的河段总长约 1.87 千米，宽度约 70 米，涉及流域范围以及排污范围的规模相对较小，故概化该河段较为简单，具体概化结构如图 5-3 所示。

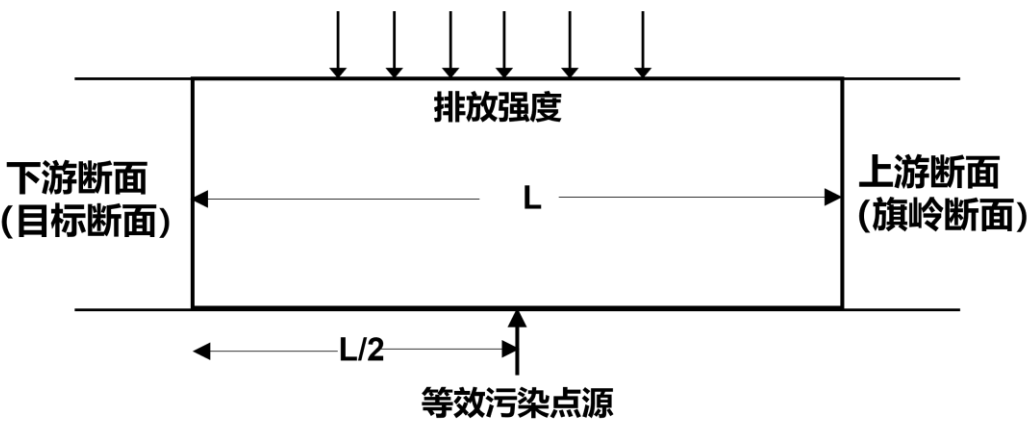


图 5-3 河段概化处理

在图 5-3 中，本文将河段概化为排放强度固定，等效污染源概化点在河段中间的直线型河段。

5.4 基于一维水质方程的水环境容量模型建立

在选定研究河段之后，以目标断面达标为原则，充分利用水环境容量，在计算时使得目标监控段面水质刚好达标为约束条件。

对本文研究的石马河河段，考虑纵向弥散的单一河段水质模拟方程建立数学模型，具体如下式(5-1)。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) - \frac{\partial u_x C}{\partial x} - KC \quad (5-1)$$

式中， C 为水体中污染物的浓度（mg/l）； t 为污染物排放量在水体中流经的时间（d）； D_x 为纵向弥散系数（ m^2/s ）， u_x 为河流的平均流速（m/s）； K 为污染物综合降解系数（ d^{-1} ）。

由于所研究的河段地处东莞，地势平坦，一般视为均匀流场，所以上式中 D_x 和 u_x 可以视为常数，进一步可化简为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u_x \frac{\partial C}{\partial x} - KC \quad (5-2)$$

在河流概化时，通常考虑稳态条件，即 $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ ，同时给定初始条件 $t = 0$ ， $C = C'$ 时，可进一步将式（5-3）化简为：

$$C = C' \exp \left[\frac{u_x}{2D_x} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4KDx}{u_x^2}} \right) \right] \quad (5-3)$$

考虑对于稳态条件下的河段，其污染物的推移作用远远大于弥散作用，所以本文忽略弥散系数的影响，则有：

$$C = C' \exp \left(-\frac{Kx}{u_x} \right) \quad (5-4)$$

式中， x 为河流距离排放口的纵向距离（m）。其中 C' 为河段的起始处的初始浓度，由于河段的长度远大于河流的混合区长度，所以 C' 可以按下式进行计算：

$$C' = \frac{QC_0 + qC_1}{Q + q} \quad (5-5)$$

Q 为上游河段的来流流量（ m^3/s ）； q 为排入河流中污水的流量（ m^3/s ）， C_0 为河流中污染物的本底浓度（mg/l）； C_1 为排放污水中的污染物浓度（mg/l）。

将 C' 代入式（5-4）中可得下式：

$$C = \frac{QC_0 + qC_1}{Q + q} \exp \left(-\frac{Kx}{u_x} \right) \quad (5-6)$$

最终，可以得到单一河段，即符合本文所研究河段的水环境容量模型，以吨/年（t/y）为单位，具体如下所示：

$$W = 31.536 \times \left[C_s(Q + q) \exp \left(\frac{Kx}{86400u_x} \right) - QC_0 \right] \quad (5-7)$$

上式中， W 即为该河段的水环境容量（t/y）， Q 为上游断面的入流流量（ m^3/s ）； q 为排放废水的流量（ m^3/s ）； C_s 为目标浓度（mg/l）； C_0 为上游来水污染物浓度（mg/l）； K 为污染物综合降解系数（ d^{-1} ）； x 为河段长度（m）； u_x 为平均流速（m/s）。31.536与86400均为转换系数，其中：1g/s = 31.536t/y，1d = 86400s。

5.5 水质模型参数确定

5.5.1 河流综合降解系数

不同种类的污染物在水体中的迁移规律转化会互相影响，导致定量对某种污染物进行描述是非常困难的，综合各种文献查阅结果，本文选取综合降解系数，即 K 值，作为衡量

水体中污染物在多种作用下的降解速率指标。

国内学者李寅田等^[6]在对四川山丘区中小流域河流进行水环境容量研究时提出了综合考虑水流流速、水深和水利半径等因素，利用最小二乘法进行多元回归分析，最后得出各种污染物的降解系数模型，大量的数据证明该方法的计算结果在大多数方面均优于基于国家推荐方法计算的水环境容量。国外同样有学者将温度与降解系数的计算进行分析，得到了学术界一致的认可。

基于以上两者的启发，对河流中污染物的降解过程，一般认为其符合一级反应动力学方程，根据上下游监测断面的浓度和上下游断面的采样时间间隔，来计算降解系数值，具体计算公式如下：

$$C(x) = C_0 \exp(-Kx/u) \quad (5-8)$$

化简后得到：

$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C(x)} \quad (5-9)$$

上式中， K 即表示污染物的降解系数 (d^{-1})， t 表示时间间隔 (h)， C_0 上游监测断面的污染物浓度 (mg/L)， $C(x)$ 表示下游断面污染物的浓度 (mg/L)。

5.5.2 初始河段污染物浓度

本文选取的研究河段中初始断面（旗岭断面）存在连续的监测数据，即可以根据更具体的需求使用当前时间段监测的数据或者日、月、年平均值，即本底浓度，来确定初始河段的浓度 C_0 。

基于本文需要建立的为动态水环境容量方程来对污染物等排放有更细粒度的标准，本文选取当前时间段监测的具体数值当作本底浓度。

5.5.3 水质目标

水质目标是水环境容量实现总量控制与达标排放的关键因素，是水环境容量计算模型中的约束条件，其水质目标的高低直接影响着对应水体的环境容量。在 2022 年 8 月东莞市政府发布的文章^[7]提到石马河水质治理取得明显好转，国考断面水质达到IV类。再基于东莞市近年来“以绿色发展、生态优先理念引领产业结构调整 and 经济发展”的目标，本文将研究河段水质目标同样设置为IV类。

5.5.4 排污浓度

污染源分为点源污染与面源污染。点源污染的来源主要是市政污水和工业废水经过收集后的有组织排放；面源污染有所不同，排污口位置随机，更难控制。面源污染的主要源头为农业面源。

在河流概化过程中本文将面污染源概化为点污染源，显著简化了计算模型，政府组织的废水排放有相关数据可循，但其并未向公众开放具体的数据。至于面污染源的污染排放则估计则更为困难，相关学者从土地利用类型、畜禽养殖数量、农业种植与常驻人口数量等方面去对数据进行一个预估。由于时间与数据源的考量，本文并未对其展开相应的建模探索。

5.6 模型验证与评估

在本次研究中，尽管本文相关人员不断的在网络上搜索、与东莞市政府相关公司等进
行邮件沟通，但遗憾的是在本文截稿前仍然未获得足够的数据进行模型的验证。但本章所
提出的水环境容量模型计算方法均来源于文献中的介绍与合理的扩展创新，具有一定的实
际价值。

验证本章模型所需要的所有数据及获取情况如表 5-1 所示。

表 5-1 建模所需数据及获取情况		
参数	参数名称	备注
Q	入流日流量	已获得，来源：WheatA 小 麦芽
q	排放废水的流量	未获得
C_s	目标浓度	已获得，来自国家标准
C_0	上游污染物浓度	已获得，旗岭断面监测
x	河段长度	已获得，百度地图标注
u_x	平均流速	未获得
h	平均水深	未获得
无	其它人口、农业数据	未获得，用于推测面污染源 污染量

6、多指标融合下的污染物排放模型设计

排污与水环境间的探讨，正如金山银山与绿水青山之间的权衡。近年来国家政策方向
要求企业在追求经济效益的同时，也要积极应对环境污染问题，尽可能地减少对水环境的
影响。这一方向不仅是为了保护环境，更是为了保障公民的健康和生命安全。而本文在该
部分着重于建立相应排污模型，综合环境污水治理成本与水质污染因子贡献度系数间的考
量，在动态、充分的利用水环境容量条件下达到污染物安全排放的效果。

6.1 模型的建立

6.1.1 单一污染物造成的水体污染损失模型

某种污染物引起的水体价值损失与水体总价值之比定义为该污染物对水体造成的价值
损失率。设 C_{i0} 为水体中第 i 种污染物对水体引起损失时的临界浓度，即上文中计算的污
染物的水环容量， C_i 为当前断面监测到的第 i 种污染物的浓度， X_i 为当前河段需要排放的第 i
种污染物浓度，那么价值损失率 B_i 可表示如下式（6-1）所示。

$$B_i = \frac{1}{1 + A_i * \exp(-B_i * \frac{C_i + X_i}{C_{i0}})}$$

(6-1)

式中 A_i 和 B_i 为待估参数。上式为仅考虑该污染物造成的经济效益损失率，结合上文分

析的当前河段水质污染因子贡献度，即可得相关因子在当前河段的综合环境-经济损失率，如下式(6-2)所示：

$$R_i = \frac{E_i}{1 + A_i * \exp(-B_i * \frac{C_i + X_i}{C_{i0}})} \quad (6-2)$$

上式中 E_i 为第 i 种污染物在当前河段的污染因子贡献度（无量纲）。

6.1.2 复合污染物造成的水体污染损失模型

本文在上文水质概化中假设水体中的污染物基本不存在拮抗或协同作用，即可以将各种污染物看作相互独立的，故水体中整体污染损失率满足下式：

$$R' = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (6-3)$$

上式中， n 为水体中的污染物种类； R_i 为单一污染物 i 对水体造成的环境-价值损失率， R' 为复合污染物造成的价值损失率。

最终可得复合污染物对水体造成的环境-价值损失如下式所示：

$$S = kR' \quad (6-4)$$

其中 S 为水体整体环境-价值损失， k 为水体污染前的价值，可通过市场价值法确定。

具体的将上式展开，即本章部分建模详细的目标函数如下式所示。

$$MIN S(X_i) = k \left[1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{E_i}{1 + A_i * \exp(-B_i * \frac{C_i + X_i}{C_{i0}})} \right) \right] + f(X_i) \quad (6-5)$$

上式中相关参数均在上文有提及，建模目标为环境损失达到最小值，即通过 C_{i0} （当前河段水环境容量）与 X_i 当前污染物排放浓度间相关协调达到动态平衡的效果。其中， $f(X_i)$ 为污染物存储、不进行排放造成的相关经济损失，本次不进行相关讨论。

最后，可以通过相关搜索算法，如遗传算法、蚁群算法等对最优解进行一个评估计算，对相关污染物的排放进行一个指导。

6.2 相关参数的确定

6.2.1 参数 A_i 和 B_i 的确定

只有当水体污染物超过一定的阈值时，水体的环境价值才会造成损失，通常假定污染浓度是临界状态时，价值损失率为1%，污染物浓度达到极限状态时，环境价值损失率为99%，临界浓度取上文的计算得出的相关污染物的水环境容量，极限浓度 C_{MAX_i} ，即当前断面监测浓度与待排放污染物的浓度之和，一般取 C_{i0} 的5到10倍。不妨设 $X_{MAX_i} = \frac{C_{MAX_i}}{C_{i0}}$ ，将所有假设条件代入（6-1）中可得：

$$\begin{cases} A_i = 99^{(X_{MAX_i}+1)/(X_{MAX_i}-1)} \\ B_i = 2\ln 99 / (X_{MAX_i} - 1) \end{cases} \quad (6-6)$$

6.2.2 参数 k 的确定

参数 k ，即水体污染前的价值，该参数一般通过市场调研而进行确定，涉及该河段沿途的功能判定，对该地区常住人口数据、工业数据及政府用地规划均有涉及。一般研究者

均采用类别接用法来进行参数的确定，考虑本次研究时长及数据获取难度，本文并没有展开相关的研究。

6.3 模型的验证及评估

本章建模涉及到的大部分数据均没有对公众开放，且本章模型依赖于上文中的水环境容量具体计算，故本章与上文相同均存在因为数据不存在等问题而无法对模型进行一个具体的验证及评估。

同上文，本章节在建模过程大量参考相关论文研究并进行合理的改进，涉及的字段也偏少，搜索算法收敛的速度等均有相应的保证

7、指导建议

通过上述分析，可知在本文所研究的 4 条河流中，石马河所面临的水环境污染问题相对来说是最严重的。通过对石马河的治理，不仅可以为解决其他类似地区水环境污染问题提供经验和参考，也可以将其作为一个典型案例对研究河涌水质污染治理具有较大的实用意义和理论价值。因此，本文以石马河为例，针对实际问题提出了针对性的治理技术思路。

7.1 治理目标

针对石马河治理，需要明确治理目标并紧密协作推进，包括提高水质、改善生态环境和河道景观、控制污染物排放、提高防洪排涝能力和建立监测网络。我们将从源头减少排放，提升污水处置能力，加强保洁，建设生态景观带和加强环保宣传教育等方面入手，实现基本消除河水黑臭、把旗岭监测断面水质全面提升至Ⅳ类水质标准，并确保石马河流域水资源、环境、生态和景观文化功能的正常发挥。

7.2 采取综合治理措施，提高河道防洪能力

针对石马河的水环境容量污染问题，我们需要依据环保和生态原则采取措施，包括清淤石马河干流底泥，修建河道缓冲带和湿地工程，拆除河道内违章建筑物和废弃桥梁堰坝等措施，以提高河道行洪能力和防洪标准。同时，需要采取综合治理措施，加强河道整治、清淤护堤、加强沙排、舒缓河床坡度、扩大河道断面和增加河堤高度和宽度，建设泄洪闸门等工程措施，以增强水流抗涝能力。另外，可以建设高效节能的降水利用系统，以无雨为管、有雨为汇，结合生态资源建设，利用雨水进行净化、回收和利用。我们还将加强对河道的科学监测和预警，加强环保宣传教育等措施，以进一步提升河道防洪能力，减轻洪涝灾害损失。

7.3 加强管理工业区，防治流域污染

东莞地区持有排污许可企业的分布热力图见图 7-1。分析可知，石马河流域中存在较多的排污许可证持有企业，从而导致“微容量，重负荷”的现状，为解决石马河流域劳动密集型企业、重污染企业造成的结构性污染问题，需做好产业转型升级，旨在从源头上控制污染。

首先，应该严格控制企业进入该区域的准入门槛，切实防止新增污染源的增加。对于已有的企业要进行研究并制定相关政策，例如实行排污总量控制等措施，只减排放量不增加。同时，需要对劳动密集型企业 and 重污染企业进行产业转型升级，改变其生产方式，减少对环境的损害。

其次，应该依法依规淘汰产能过剩、技术落后的企业，并推进该地区的清洁生产和提标改造。这将有助于减少企业排放的污染物，提高生产效率，实现经济可持续发展。

其三，需要进一步完善落后产能退出机制，对于落后、污染严重的企业实施淘汰，优化企业产业结构和布局。这将有利于减轻石马河流域的污染负荷，缓解水生态系统受到的压力。

最后，应当加强对企业排放情况的监管力度，建立更加严密的监管措施和行政处罚机制，对污染源采取严厉的制裁措施，确保企业符合排放标准，不得超标排放。同时，要加强公众监督和参与，引导企业树立环保意识，逐步改变对环境的不良行为和态度，共同推动石马河流域的生态环境建设。

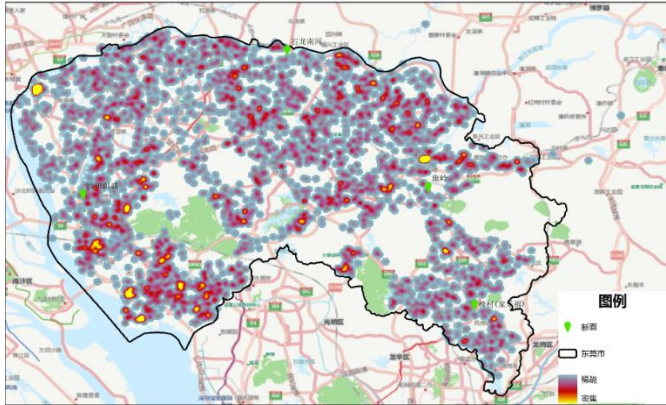


图 7-1 持有排污许可企业分布

7.4 建立流域污染防治体系，改善水环境

针对石马河流域的水环境污染问题，需要建立一个综合的流域污染防治体系，以实现水环境的改善和保护。以下是对建立流域污染防治体系的一些建议和措施：

（1）加强跨部门协作：建立起跨部门、跨领域的合作机制，包括环保、水利、城建、农业、工商等相关部门的协调合作。通过协作，可以整合资源，形成合力，共同推进石马河流域的污染防治工作。

（2）完善法律法规和政策措施：制定和完善相关的法律法规和政策措施，明确责任主体和责任分工，确保各方履行污染防治的职责。同时，建立激励机制和奖惩措施，鼓励企业和个人参与污染防治工作，并惩罚违法行为。

（3）加强监测和评估：建立健全的水质监测网络，包括常规水质监测、生态监测、排污口监测等。及时准确地监测数据为决策提供科学依据，发现问题并采取相应的治理措施。

（4）推动科技创新：加强科技研发和创新，推动石马河流域的污染防治技术和设备的更新和应用。通过引入先进的污水处理技术、污染物监测技术等，提高治理效果和效率。

（5）加强宣传教育：加强对公众和企业的环保意识和责任意识的宣传教育。通过开展环保宣传活动、举办培训班和讲座等方式，提高公众和企业对水环境保护的重视程度。

（6）加强国际合作：与国际合作伙伴建立合作关系，借鉴国际经验和先进技术，共同推进石马河流域的污染防治工作。可以开展技术交流、经验分享等合作项目，提高污染防治的水平和效果。

（7）制定流域污染防治规划和强化污染源控制：建立流域污染防治规划，明确治理目标、措施和时间表。强化对流域内各类污染源的管控，建立排污许可制度，严格控制污染

源的排放，推动清洁生产和减少污染物排放。

（8）推动生态修复和水资源管理：加强对流域内生态系统的保护和修复工作，重建湿地、植被带等生态功能区，提高水体的自净能力。同时，加强对水资源的管理和调配，确保合理的水资源利用和分配。

通过采取上述措施建立石马河流域污染防治体系（如图 7-2），可以整合各方资源，协同推进水环境治理工作。同时，要注重与相关部门、地方政府、企事业单位以及社会组织等的密切合作，形成合力，共同推动水环境改善，实现流域内水资源的可持续利用和生态环境的良性循环。这对于石马河流域以及其他类似地区的水环境治理具有一定的参考价值，并能够为相关研究提供实际经验和部分借鉴。

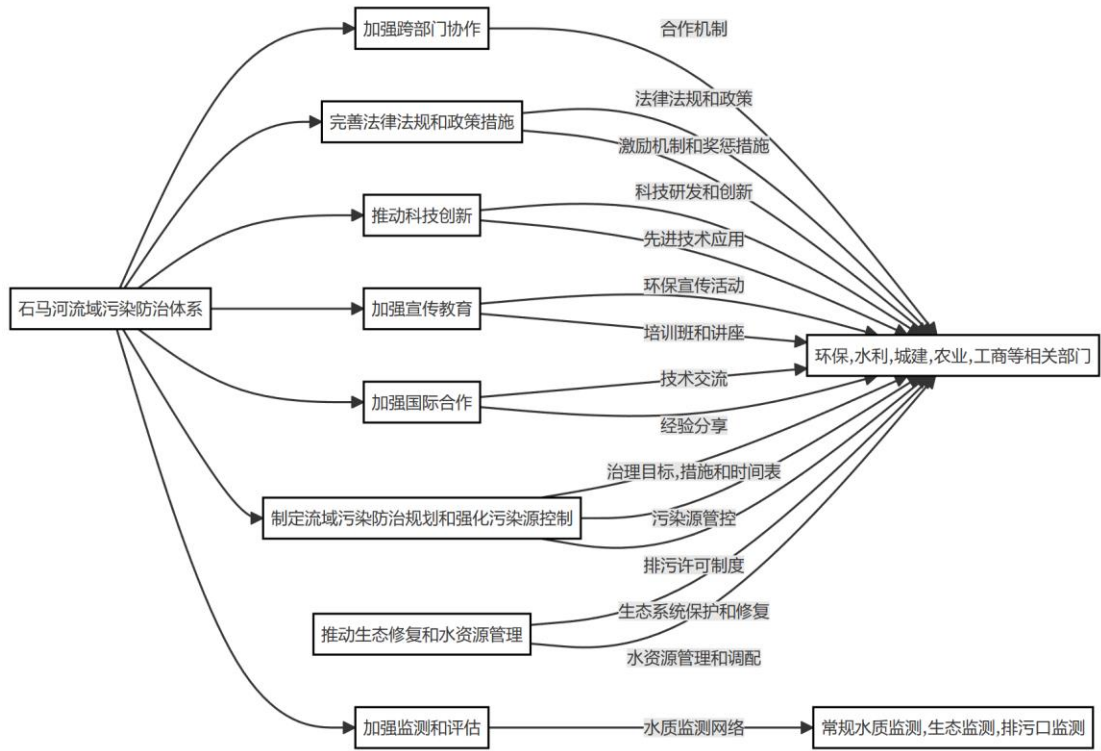


图 7-2 石马河流域污染防治体系结构图

参考文献

- [1] 林晓文. 东莞市河涌水环境治理修复对策研究[J]. 陕西水利,2022(6):92-93,96.
- [2] 陈程. 钱塘江流域水质时间序列数据清洗及预警研究[D]. 杭州电子科技大学,2022.
- [3] 涂吉昌. 基于混合模型的水源地水质预测与评价研究[D]. 陕西:西安工业大学,2020.
- [4] 刘李凌君. 黑龙江省水环境容量测算方法及应用研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2020.
- [5] 郭振. 石马河流域水环境综合治理方案研究[J]. 水资源开发与管理,2022,8(10):55-60. DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.10.09.
- [6] 李寅田,李乃稳,华国春,等. 基于河流水文特征得中小型河流水环境容量计算方法探讨[J]. 四川环境,2023,42(2):129-137. DOI:10.14034/j.cnki.schj.2023.02.019.
- [7] 东莞市人民政府办公室. "石马河三年多建成 60 公里优美碧道."
http://www.dg.gov.cn/gkmlpt/content/3/3858/post_3858773.html#703
- [8] 唐功政,刘国栋,高润青,等. 利用单因子污染指数与内梅罗综合指数 进行土壤重金属污染程度评级[J]. 科技风,2019(13):125-126. DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.201913107.
- [9] 贾子书. 改进内梅罗指数评价法在东方红湿地水质评价中的应用[D]. 黑龙江:东北林业大学,2017.
- [10] 季兴财. 莆田市平海湾地下水质量现状及污染因子贡献度分析[J]. 黑龙江环境通报,2019,43(4):23-26,59. DOI:10.3969/j.issn.1674-263X.2019.04.008.
- [11] 苏芬芬,韩帅,顾嘉嘉,等. 典型河流的水质评价及影响因素分析:以深圳龙西河和丁山河为例[J]. 净水技术,2023,42(4):62-72. DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2023.04.008.