

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0138

任杰, 刘晓文, 吴颖欣, 等. 2020. 农闲期城郊农田灌溉水中典型污染物含量与评价——以西北江三角洲为例[J]. 环境科学学报, 40(11): 3990-4000

Ren J, Liu X W, Wu Y X, et al. 2020. The evaluation and content of typical contaminants in irrigation water during the slack season in the suburban areas of North River and West River Delta [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 40(11): 3990-4000

农闲期城郊农田灌溉水中典型污染物含量与评价 ——以西北江三角洲为例

任杰^{1,2}, 刘晓文^{2,*}, 吴颖欣², 张杰², 曹天轶¹, 李杰¹, 张永利³

1. 兰州交通大学, 环境与市政工程学院, 兰州 730070

2. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

摘要: 摸查了农田灌溉系统水环境经农(夏)闲期降水等外部强干预调理后的环境污染物质含量——该值理论上为环境自净作用之后的最不利值, 对农田灌溉系统水环境进行水质评价, 探究其对农田土壤质量的潜在污染风险。于 2019 年 6 月中旬—7 月下旬(降雨集中期), 分别在西北江三角洲城市(清远市、佛山市和江门市)实验基地周边筛选研究区, 并在雨后对覆盖水的水源区域、灌渠、蓄水池和田间水等采集上覆水, 共采得水样 27×2 份, 对其 pH 值、悬浮物(SS)、矿化度、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、Cd、As、Pb、Cu 和 Zn 的含量进行检测; 对各研究区 pH 值、SS 的成因和影响, 矿化度的等级, 重金属均值分布等进行分析; 对全样品 TP、NH₄⁺-N、重金属含量进行 Pearson 相关性分析和描述性特征分析; 通过单因子水质标识指数 P_i 和综合水质标识指数 P 分别对各采样点、各构成项目和各研究区进行水质评价。研究发现雨后农田灌溉系统水环境构成复杂, 物质呈无显著性差异的迁移, 灌溉沿程上覆水中大部分物质可能处于动态平衡, 受局部环境影响变小, TP、NH₄⁺-N 和重金属等迁移物质主要还是灌溉水体中原有的, 受外力驱动扰动后在水动力作用下可能以氮磷结合形态沿灌溉系统发生远距离迁移; 使用河流水质标识指数法评价农田灌溉系统水环境, 发现该法可以刻画局部灌溉的水质态势, 对农田灌溉系统水环境的含量特征评价做出科学、合理的解释, 也可以做出综合性定量评价。虽然灌溉水系统结构差异较大, 但是从整体上可以初步得出农闲期西北江三角洲农田灌溉水的灌溉风险不高的结论, 总体综合水质评价级别为 I 类~II 类, 达到水环境功能区的使用要求。

关键词: 农闲期; 西北江三角洲; 城郊农田; 灌溉系统; 水环境; 单因子标识指数法; 综合水质标识指数法

文章编号: 0253-2468(2020)11-3990-11

中图分类号: X53, X824

文献标识码: A

The evaluation and content of typical contaminants in irrigation water during the slack season in the suburban areas of North River and West River Delta

REN Jie^{1,2}, LIU Xiaowen^{2,*}, WU Yingxin², ZHANG Jie², CAO Tianyi¹, LI Jie¹, ZHANG Yongli³

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou JiaoTong University, Lanzhou 730070

2. Southern China Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640

Abstract: The contents of environmental contaminants in the water within the irrigation system during the (summer) slack season after intensive intervention, such as heavy precipitation, were investigated, which was theoretically the worst case after environmental self-purification. The quality of irrigation water was evaluated; and its potential pollution risk to farmland soil was explored. From mid-June to late July 2019 (Rainfall concentration period), the study areas were screened in the neighbouring of experimental field of Northwest River Delta cities (Foshan City, Jiangmen City and Qingyuan City), and the overlying water was collected from the water source areas, irrigation channels, cisterns and field after the rain. A total of 27×2 water samples were collected to detect the pH, suspended solids (SS), salinity, total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH₄⁺-N), Cd, As, Pb, Cu and Zn. The change of pH, the source and effect of SS, the grade of salinity, and the distribution of heavy metals in each study area were analyzed. Pearson correlation analysis and descriptive characterization of the contents of TP, NH₄⁺-N and heavy metals were conducted. Single factor water quality labeling index P_i and the comprehensive water quality labeling index P were used to evaluate the water quality of each sampling point, component item and research area. The irrigation water environment is complex and there is no significant difference in substance migration. Most of the substances in the

收稿日期: 2020-03-11

修回日期: 2020-04-16

录用日期: 2020-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2017YFD0801300)

作者简介: 任杰(1996—), 男, E-mail: 1536374112@qq.com; * 责任作者, E-mail: liuxiaowen@scies.org

overlying water of irrigation may be in dynamic equilibrium, which is less affected by local environment. TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, heavy metals and other migration substances are mainly original in irrigation water. After the disturbance by external force, it would migrate in a long distance along the irrigation system under the action of hydrodynamic force in combination with nitrogen and phosphorus. The river water quality index method was appropriate to evaluate the quality of irrigation water. It is found that this method can describe the water quality of local irrigation, and can make a scientific and reasonable evaluation of the water environment content of the farmland irrigation system, and also make a comprehensive quantitative evaluation. Although there is a large difference among the three studied irrigation systems, it can be preliminarily concluded that the ecological risk of farmland irrigation water is not high in the Northwest River Delta during the agricultural slack period. The overall comprehensive water quality evaluation level is class I~class II, which meets the requirements for the use of water environment function zones.

Keywords: slack farming period; North River and West River Delta; suburban farmlands; irrigation system; water environment; single factor identification index method; comprehensive water quality index method

1 引言 (Introduction)

我国是世界农业起源地之一,是历史悠久的农业大国,也是世界上人口、资源和环境形势最为严峻的国家之一,尤其是沿海省市的耕地资源最为严峻:人均不足 0.067 hm^2 ,部分地区仅为 $0.02 \sim 0.27 \text{ hm}^2$ (付红波,2009).自 20 世纪 60 年代末以来,耕地减少一直是我国社会面临的主要问题之一(傅超等,2007).近二三十年,珠三角地区尤其外缘区的耕地均呈减少的态势(王卫,2010).西江、北江在思贤窖河道交汇,形成西北江三角洲(谢平等,2010),其大部分位于珠三角外缘区,当地城市化和工业化发展迅速,耕地资源持续规模性减少,同时城乡结合部土壤肥力水平下降,土壤环境健康质量恶化态势不断加剧(钟晓兰等,2006).农田灌溉和排水是重要的污染物输入~输出途径之一,高度的城镇化和大规模的建桥设港、无序采砂、口门围垦、滩地占用等剧烈的人类活动,使得珠三角河网区自然条件和水文环境条件发生显著变化,引发了一系列的水安全问题,并成为影响当地人民生活质量、制约经济与社会持续发展的关键因素(徐林春,2014).水质问题的影响面很广,主要通过灌溉等形式对粮食安全和农业环境生态健康产生影响.西北江三角洲由于温度适宜、雨水充沛、地下水储量巨大和地表径流量大等自然条件,以及农产品市场需求大、农业经济效益高、政府政策导向良好等社会条件,其发展较为充分,形成了城乡一体集约化农业生产模式,对土壤环境质量具有迫切的需求.

灌溉一直是经济发达地区农业环境研究中的关注焦点,伴随着农业科学技术及配套行业的发展,关注角度逐渐从量的讨论转变为质的讨论.近年来,我国学者在灌溉水/水源方面进行了相关研究工作,主要集中于水量、节水、适水、水肥和结构模式等方面的研究,也逐渐增加了重金属和氮磷等输

入、输出和过程净化的研究.对于环境中氮磷的迁移分布,目前研究发现,氮磷随降雨会出现规模性流失(王晓玲等,2019),高浓度区的损失更严重(王莺等,2018),随着降水的不断补充,水环境中氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)浓度逐渐降低,且在农闲期出现极小值(陈建平,2012),可见降雨是环境氮磷自净和再分布的重要方式,雨水冲刷是灌溉系统水环境水质更新和调整的有效途径.对于水体中的重金属,对某矿区的模型模拟和监测发现,降水阶段河水重金属含量显著升高,雨水冲刷是污染土壤中大量重金属迁移入河的重要途径(Meng *et al.*, 2018),同时水环境中重金属普遍具有隐蔽性、稳定性、易被富集性和难降解性等特点(Armitage, 2010; Yuan *et al.*, 2011; 张伟燕等, 2019).

近年来,华南地区加强水环境治理且收效良好,但是灌溉水环境方面的研究不多,涉及特殊农时的灌溉水污染特征方面更少.特别是珠三角夏季农闲期结束前,经频繁降雨冲刷后的灌渠及周边水体水质理论上受自然影响较大,对农田和水体质量较为不利,其污染特征亟需研究.因此,本文以农闲期灌渠及周边水体为研究对象,初步探究西北江三角洲地区不同灌溉模式水体污染特征;通过样品分析和评价,为西北江三角洲灌溉水污染状况和水质空间特征提供基础资料.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 西北江三角洲简介

珠江三角洲(简称“珠三角”)是世界上水系最复杂的三角洲之一,按照自然地理学的观点,是由西江、北江和东江及其支流潭江、绥江、增江带来的泥沙在珠江口河口湾内堆积而成的复合型三角洲(谢平等,2010).珠三角河网交汇贯通,流向大体为西北→东南,下游有 8 道入海口,其中江门市新会区崖门是最西边的入海口.清远市、佛山市和江门市均

属于珠三角城市群,其中,清远研究区、佛山研究区和江门研究区均属于西北江三角洲城市群.上述3个研究区分别位于西北江三角洲的上游、中游和下游区域.

2.2 各区简介与采样点布局

2.2.1 清远研究区

农用地面积约为 1.44 hm²;池塘面积约为 1.59 hm²,耕作类型以水稻田为主.采样期间正值池塘雨后排水,渠前蓄水池连续注水、排水,灌溉水处于连续流动状态.其采样点布置见图 1,其中 QY3F 为旱地,无田间上覆水,其余均为水田.研究区遍布大小不一的池塘,距离北江直线距离 6.15 km,北江是塘水的补充来源之一,灌溉水多直接取自池塘,池塘以中、小型居多(0.24~2.44 hm²),塘内偶有饲养水禽;农田四散分布,单块面积偏小,穿插于住宅、林地和荒地之间,通过灌渠与池塘紧密联系.蓄水池容积约为 3 m(l)×1 m(w)×1 m(d),起短期蓄水作用,位于高位点,农田退水等有限外源汇流对其影响不大.

灌溉模式:水泵提水~蓄水~土渠输送~自流灌溉.自流灌溉水渠,水位差形成的大水漫灌,以单方向流动为主.

潜在污染源:①居民生产生活废弃物;②已关停电子废弃物拆解厂堆渣;③道路雨水会对灌渠水质产生一定影响,主要集中在降雨初期.

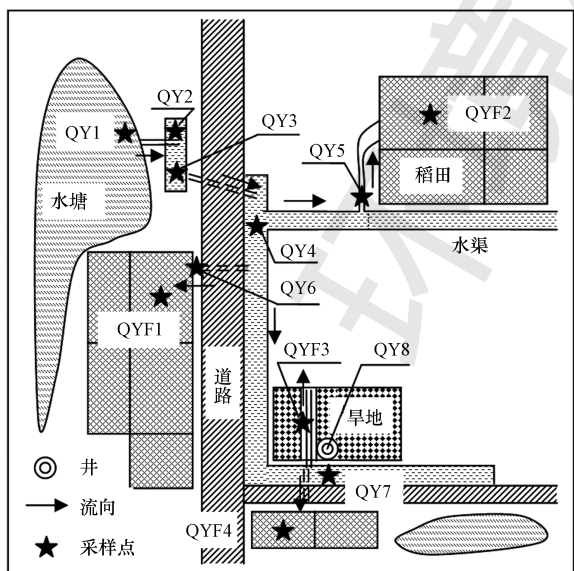


图 1 清远研究区采样点布置及周边环境示意图

Fig.1 Schematic layout of sampling sites & surrounding environment in the study area of Qingyuan City

2.2.2 佛山研究区

研究区包括江边(堤外)田和

堤内田两部分,面积约为 15.74 hm²,以旱地为主,种植瓜果类和叶菜类等蔬菜.采样点布置见图 2.采样期间雨水冲刷引起江水和蓄水池的局部扰动.江边农田以分散经营的模式为主,尤其是潮滩开垦的农田,工程保障措施和生产性建筑较少.蓄水池容积约为 3~5 m(l)×2~3 m(w)×1 m(d).

灌溉模式:水泵提水~管道输送~(蓄水)~喷灌.当地灌溉水来源多样:雨水、江水和地下水,取、用水形式多样,一般以一户或多户为单位,集中从西江输水或抽提地下水灌溉.

潜在污染源:①交通运输,研究区地处省道 S362、S269,县道 X496、X780 及其他乡镇道路交汇处;江面常年有大小船只往来;②有一工业入河排污口(坐标:112°49'7"E, 23°3'47"N).

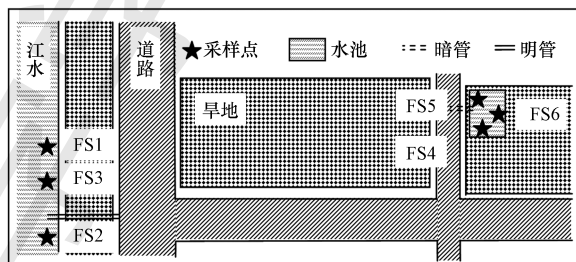


图 2 佛山研究区采样点布置及周边环境示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling site layout & surrounding environment in the study area of Foshan City

2.2.3 江门研究区

研究区总面积约 103.50 hm²,以水作——种植水稻和莲藕为主.当地农用地受政策因素影响,近年连续开展高标准农田建设(余富祥等,2019),具备农业规模化生产、机械化作业的条件.本文选取某靠近取水点的支渠配给的完整农田(面积约 2.92 hm²)系统,采样点布置见图 3.采样

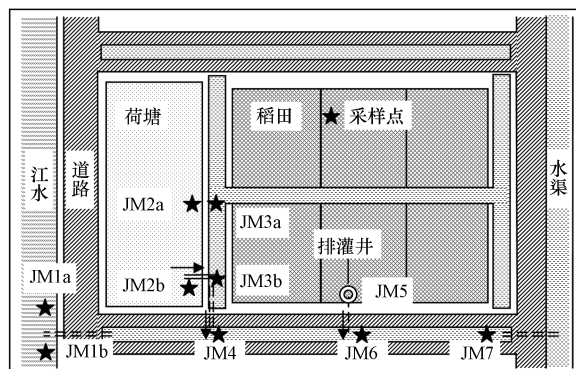


图 3 江门研究区采样点布置及周边环境示意图

Fig.3 Schematic diagram of sampling site layout & surrounding environment in the study area of Jiangmen City

期间灌渠无进水、排水,有积水,雨水扰动下支渠、次支渠和农田淹水形成的局部流动.灌溉干渠宽约 6 m,水深约 1 m,各端口均无排水;支渠水深约 0.7 m,次支渠水深约 0.9 m.

灌溉模式:水泵提水~蓄水~土渠输送~自流灌溉.整片研究区共用一套排灌结合渠.

潜在污染源:①交通运输,研究区距离最近的省道为 S271(直线距离 2.36 km);②研究区位于江门水道出水口和潭江交汇处的江心岛,上游冲刷而来的推移质会在江心岛边滩发生淤积,且在水体的冲污、冲淤等作用下,下游较上游的水体污染风险更大;③采样期间距离灌溉取水口较近处,有大型桥梁工程施工.

2.3 研究方法

根据《中国生态环境状态公报》(2015—2018),其中营养类总磷(TP)和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是我国地表水氮磷污染的主要污染指标.珠三角农用地呈现重金属元素复合污染,复合形式以 Cd-Cu、As-Cd-Pb 为主(周建军等,2014),悬浮物(SS)可能作为污染物质迁移的主要载体(郝立波等,2010).因此,为反映不同区域的污染特征,本文水质检测指标主要有 pH、SS、矿化度(\approx 总盐)、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Cd、As、Pb、Cu 和 Zn. TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Cd、As、Pb、Cu 和 Zn 等指标评价按照《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005),参考《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)五分法分级内容和 V 类水标准限值(TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 非农灌规定检测指标).SS 评价参考《农用地灌溉水质标准》(GB 5084—2005)旱地和水作的控制标准值,分别为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.矿化度参考广东省各级矿化度的等级标准(史栾生等,2005).

2.3.1 灌溉系统水环境概况 根据实际调查,2019 年 5 月中、下旬—2019 年 7 月下旬为研究区所在地的农闲待种期,研究区待种天数约 25~40 d,本研究选择农闲期末开展研究.通过 1961~2010 年广东省降水特征研究(郑腾飞等,2017)可见,降雨主要集中在 4—9 月,总降水量约占全年降水量的 80%,总降水日数约占全年降水日数的 74%,其中,6 月月均降水量和月均降水天数最高.相较死水,外力驱动下的灌渠活水会连续发生自然扰动,成为该时期自然源农田灌溉系统水环境的最不利情况.其中,湿沉降是影响营养盐含量的重要/显著相关性因素(Kang *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2017);降雨~径流引起的底泥扰动可能会增加沉积物的释放;雨水径流等外源

污染物的规模性“输入~再分布”会增加上覆水中污染物质的含量(祁闯等,2017).本研究采样对象为江水、池塘、蓄水池、灌渠系统等.考虑到灌溉进水、排水及周边水体可能对灌溉的影响,水体相互渗透的可能,因此对灌溉系统水环境的界限做出了适当的延伸——凡是具有向灌渠或农田汇聚趋势的具有稳定水源的灌渠及周边的地上和浅层地下水均视为灌溉系统水环境的一部分.

研究期间,3 个区域农耕阶段、降雨频度(降雨量分布、降雨比例分布和降雨日数分布)、待耕天数等相近,水源跨度(均属于珠三角下游区域,西北三角洲内河网区)不大但从北向南较为系统的覆盖了西北江三角洲内的主要河网,整体上自然条件相近,该批次跨区域水样可以在一定程度上反馈西北三角洲灌溉系统水环境的平均污染情况.进一步来看,该批次样品处于农闲期结束前,且自作物成熟期至下茬农田备耕、播种相隔约 1/3 个夏季休耕(夏闲)期,此间降水频繁,农田和灌溉水受自然影响较大而人为影响较小,水质样品分析可反映西北江三角洲农业污染状况发育差异下灌溉系统水环境的空间差异性.

2.3.2 评价方法选择 分别采用单因子水质标识指数法(徐祖信,2005a)、综合水质标识指数法(徐祖信,2005b)对清远、佛山和江门研究区的水环境质量进行评估.

单因子水质标识指数(P_i)是由整数位和两位或三位小数位组成,其结构为:

$$P_i = X_1 \cdot X_2 X_3 \quad (1)$$

综合水质标识指数(P)是由整数位和三位或四位小数位组成,其结构为:

$$P = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4 \quad (2)$$

式中, X_1 为总体的综合水质类别; X_2 为综合水质在 k 类水质变化区间内所处位置; X_3 为参与综合水质评价的水质指标中,劣于水环境功能区目标的单项指标个数; X_4 为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果,由一位或两位有效数字组成. X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 的计算方法、判定方法等,详见文献(徐祖信,2005a;2005b).

2.3.3 采样步骤 ①互联网获取信息,通过中国天气网公布的天气预报选取采样时间;②移动工具辅助采样,通过奥维互动地图浏览器(手机版)完成采样点布置和定位;并根据定位信息逐次采样;③样品测试方法:室外快速检测(pH 值)结合室内化验.

采样于6月底—7月底之间完成,选择雨后6~12 h,此时水质趋近稳定,且渠系等表生水环境仍具有一定流动性,能够更准确地反馈农田灌溉系统水环境的动态分布.所采集水样运回实验室之后,混匀分为两份($n=2$),并根据不同测试内容要求尽快完成前处理,于4℃冰箱中保存,在规定时间内尽快完成样品检测.

2.4 分析测试

水样 pH 值采用酸度计(STARTER 3100,上海奥豪斯仪器有限公司)测定. $\text{NH}_4^+\text{-N}$:纳氏试剂分光光度法;TP:钼酸铵分光光度法;均采用可见紫外分光光度计(UV-5100,上海元析仪器有限公司)测定.Cd、Pb、Cu、Zn 含量:样品消解按照 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 混合酸法,在电热板上加热消解;并采用原子吸收光谱仪(Pin AAcle 900T, PerkinElmer, USA)测定.As 含量:样品消解按照原子荧光测 As 的样品预处理方法(国家环境保护总局,2002),在电热板上加热消解;并采用原子荧光光谱仪(AFS9700,北京海光仪器有限公司)测定.

2.5 质量保证

实验中每批样品均做试剂空白和20%平行样,重金属空白或样品加标回收率控制在10%以内,各样品多次重复测试的相对标准误差小于2%,所有检测项目标准曲线的 R^2 值均高于0.995,数据精度

和准确度均符合要求.实验试剂均为优级纯,实验室器皿在使用前均用10%硝酸浸泡24 h以上,使用前用高纯水冲洗干净.

2.6 数据处理

数据统计分析及制图等采用 Microsoft Excel 2016、SPSS 22.0 和 Origin 9.0.

3 结果与讨论(Results and discussion)

三个研究区采样点 SS、矿化度、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量见图4, Cd、As、Pb、Cu 和 Zn 含量见图5.各检测指标分析结果可知大部分采样点的 pH 值为6~8, SS 超标10倍以上,田间水的矿化度普遍高于渠道水和水源水的矿化度,氮磷指标普遍达标.对上述指标与上覆水重金属含量进行线性拟合,结果表明均非雨后上覆水重金属沿程迁移的决定指标;结合水流通道的特殊性(局部土渠环境的复杂性构成和沿程无规律性外源污染水体的多元性汇流),雨水和重力驱动迁移的重金属受水环境等诸多因素复合影响.其中需要注意的是,对照珠江水系平均水平(张丹阳,2018),3个研究区 SS 均超标严重,且并非由雨水扰动所致,主要是水源 SS 的含量极高,沿程输送有逐渐减少的趋势,但是并不能够完全确保入田达标,建议可在农田入水口增设过滤构筑物拦截.

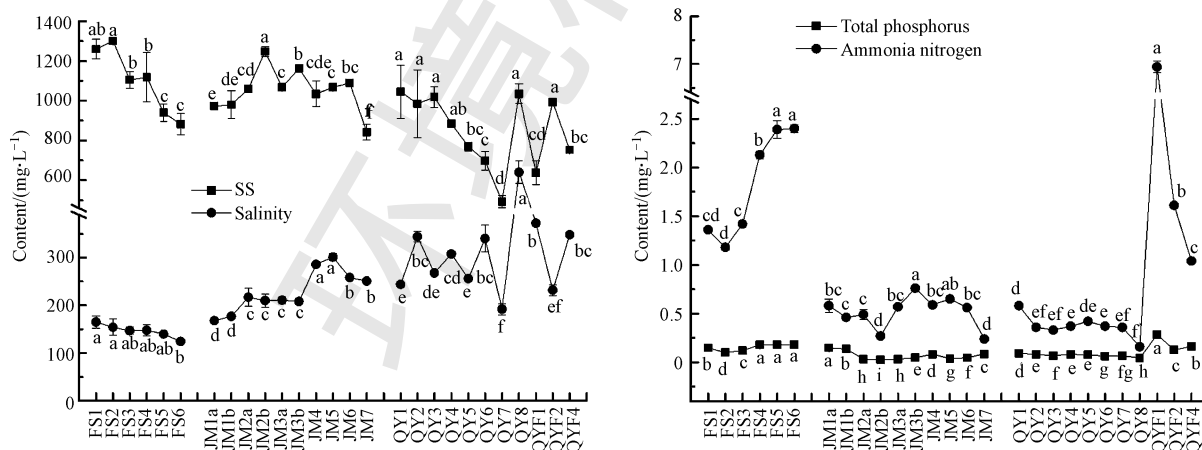


图4 采样点 SS、矿化度、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量(图中数据均为均值±标准差;数据之间的显著性差异用 Duncan's 检验,同研究区同指标不同小写字母表示不同取样点位的含量显著差异($p<0.05$);字母相同表示无显著差异,下同)

Fig.4 Contents of SS, salinity, TP and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ at sampling points

3.1 pH 值

佛山研究区江水区域 pH 值为(7.36±0.01)~(7.64±0.05);田中蓄水池 pH 值为(9.49±0.02)~(9.59±0.06).江门研究区水源区域 pH 值为(6.14±

0.04)~(6.19±0.03);灌渠 pH 值为(6.14±0.02)~(6.34±0.04);田间水 pH 值为(6.31±0.04)~(6.41±0.02).清远研究区池塘水平平均 pH 值为(6.14±0.04),井水平平均 pH 值为(7.15±0.03);引水渠前蓄

水池 pH 值为(6.71±0.01) ~ (6.72±0.03);灌渠 pH

值为(6.69±0.06) ~ (6.76±0.03);田间水 pH 值为

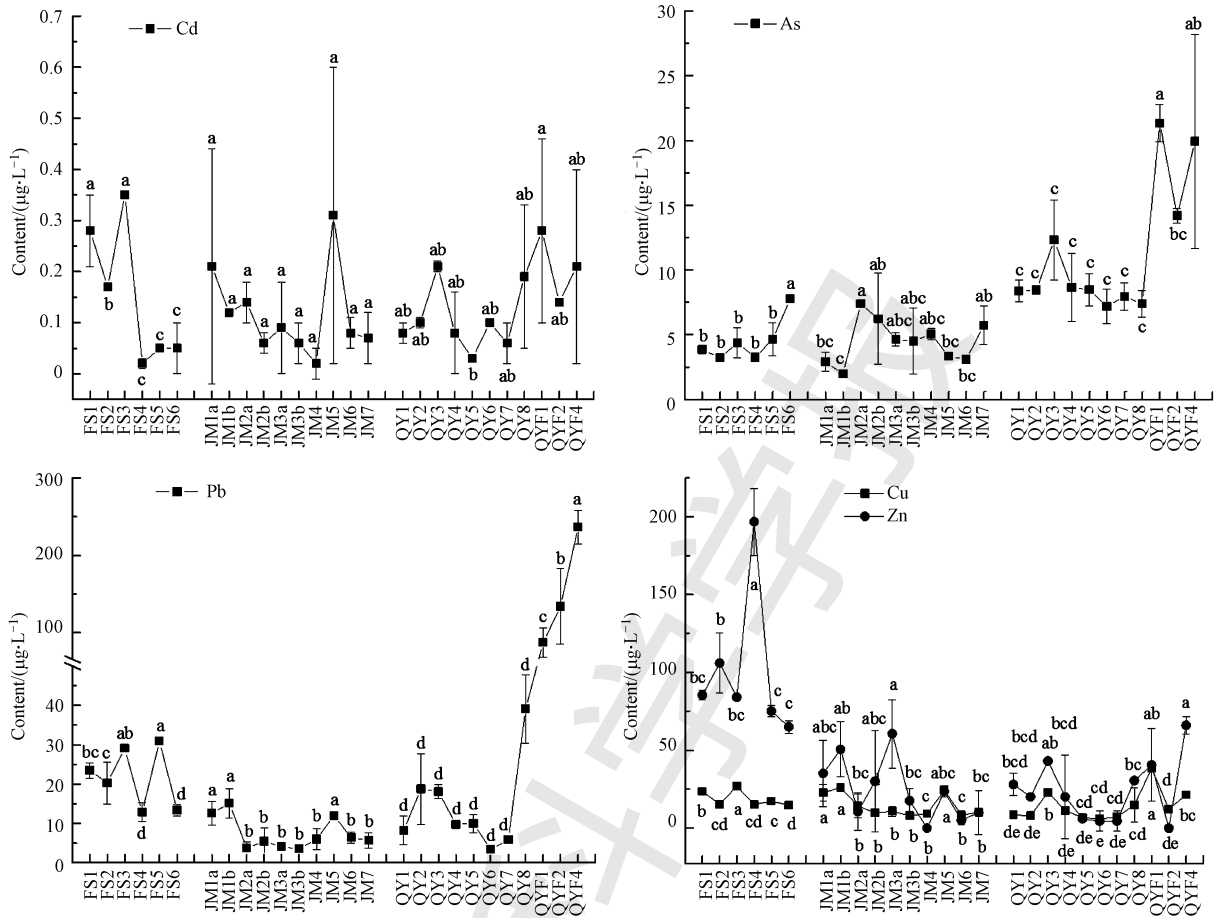


图 5 采样点 Cd、As、Pb、Cu 和 Zn 的含量

Fig.5 Contents of Cd, As, Pb, Cu and Zn at sampling points

(6.43±0.04) ~ (6.65±0.04).

灌溉水整体上呈现为中性,大体上 pH 值为 6~8,达到农田灌溉系统水环境标准的要求.佛山研究区田中蓄水池出现池水碱化的情况,可能与较长时间池水未更新和池内氮磷的分解等有关;在恢复正常灌溉作业之后,池水的频繁更新可以一定程度降低池水中氮磷的浓度,但是届时要关注池水酸碱度的问题,以免对作物和农用地产生破坏作用.

3.2 矿化度

佛山研究区江水区域矿化度为(147.00±7.07) ~ (165.00±2.73) mg·L⁻¹;田中蓄水池矿化度为(124.00±2.83) ~ (148.00±1.31) mg·L⁻¹;水源区域矿化度>蓄水池矿化度.江门研究区水源区域矿化度为(168.00±2.83) ~ (177.00±4.24) mg·L⁻¹;灌渠矿化度为(208.00±5.66) ~ (286.00±5.66) mg·L⁻¹;田间水矿化度为(210.00±4.14) ~ (301.00±7.07)

mg·L⁻¹.JM2a>JM3a、JM2b>JM3b 和 JM5>JM6,可见田间水的矿化度略大于灌渠的矿化度,沿局部水流呈下降趋势.清远研究区池塘水平均矿化度为(244.00±5.66) mg·L⁻¹,井水平均矿化度为(640.00±56.57) mg·L⁻¹;引水渠前蓄水池矿化度为(268.00±5.66) ~ (344.00±11.31) mg·L⁻¹;灌渠矿化度为(192.00±11.31) ~ (340.00±28.28) mg·L⁻¹;田间水矿化度为(232.00±11.31) ~ (372.00±5.66) mg·L⁻¹.QYF1>QY6、QYF4>QY7 和 QYF2 略小于 QY5,可见田间水矿化度普遍大于灌渠水矿化度.

广东省天然本底水质属低矿化度水,其中佛山研究区水源区域和田中蓄水池的矿化度均为二级;江门研究区水源区域和灌渠的矿化度均为二级;田间水矿化度少部分为三级,大部分优于三级(史奕生等,2005).清远池塘水源区域的矿化度为二级;引水渠前蓄水池、灌渠和田间水的矿化度为 190~350

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;矿化度为二级~三级;其中井水的平均矿化度为四级,可能与广东省高温多雨的气候条件有关。

3.3 SS的成因和影响

SS是评价水体污染程度的重要指标,并非决定因子,受水量、降雨等自然因素的影响较大;同时也用于分析水体的流动、扰动情况。珠江河流悬浮物的浓度变化范围为 $8\sim 944\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (2015年),该成果反映了西江水质的整体水平(张丹阳,2018)。

成因:QY6>QYF1,呈现平铺式的流入,流速变缓,对流入水体的扰动不大;QY5<QYF2, QY7<QYF4, JM2a<JM3a, JM2b<JM3b, JM5<JM6,呈现点源式流入,流速较急,易引起局部潜水紊流,对流入水体产生较大的“点源”扰动,提供给局部水体如悬浮颗粒等较大的动能。

对比《农用地灌溉水质标准》(GB 5084—2005),雨后3处研究区灌溉水源的SS含量远远大于控制标准值,佛山研究区超标11.00~13.00倍,可能与降雨过程和雨水汇入有较大的关系;江门研究区超标12.16~12.25倍,可能与降雨过程和雨水汇入有较大的关系;清远研究区超标6.16~13.06倍,可能与提水过程的机械扰动、雨水汇入或池塘水的富营养化等有关。

雨后的佛山研究区、雨水驱动形成的局部水体缓流的江门研究区和重力自流的清远研究区的研究发现,雨水引发的局部缓流较重力自流段SS无明显数量级上的跃升,可见雨后形成的水体缓流和机械提水重力自流对渠系内物质输送具有相似规律:QY1~QY3~QY4~QY5~QY6~QY7和JM4、JM6~JM7两条干渠随输送距离增加,流速逐渐减小和SS含量逐渐减小。

3.4 各研究区重金属含量分布

佛山研究区重金属含量分布及24h未降雨(8月、9月和11月)与雨后(7月)江水样品Cd含量对比均远小于《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)控制标准值(图6)。江水Cd、As、Pb、Cu、Zn的均值分别为 (0.27 ± 0.02) 、 (3.80 ± 0.35) 、 (24.32 ± 1.11) 、 (21.94 ± 0.10) 、 $(91.78\pm 7.95)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;田中蓄水池Cd、As、Pb、Cu、Zn的均值分别为 (0.04 ± 0.01) 、 (5.21 ± 0.33) 、 (19.04 ± 1.02) 、 (15.71 ± 0.79) 、 $(113.67\pm 9.33)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中,田中蓄水池的As、Pb、Cu、Zn并未因碱性水质影响出现大幅度的下降,对比其他物质的含量和相关性,其可能与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形成悬浮颗粒形态。

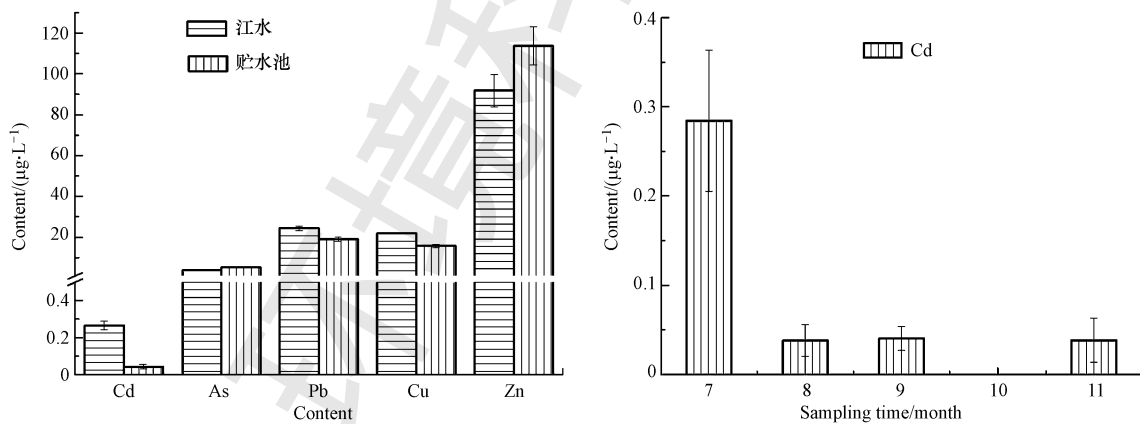


图6 佛山灌溉系统水样重金属含量分布

Fig.6 Mean contents of heavy metals in irrigation water samples in Foshan

江门研究区的重金属含量,见图7a,均远小于《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)控制标准值。江水Cd、As、Pb、Cu、Zn的均值分别为 (0.17 ± 0.12) 、 (2.43 ± 0.47) 、 (13.88 ± 3.41) 、 (24.36 ± 3.49) 、 $(42.75\pm 19.45)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;灌溉水Cd、As、Pb、Cu、Zn的均值分别为 (0.06 ± 0.00) 、 (4.59 ± 0.75) 、 (5.13 ± 0.64) 、 (9.27 ± 0.27) 、 $(20.10\pm 7.21)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;荷花上覆水Cd、As、Pb、Cu、Zn的均值分别为 (0.10 ± 0.01) 、

(6.80 ± 1.73) 、 (4.58 ± 0.91) 、 (11.99 ± 2.80) 、 $(20.25\pm 10.25)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;稻田排水口Cd、As、Pb、Cu、Zn的均值分别为 (0.31 ± 0.29) 、 (3.33 ± 0.20) 、 (11.93 ± 1.00) 、 (24.18 ± 0.12) 、 $(23.50\pm 3.54)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中,江水的Cd、Pb、Cu、Zn的含量高于灌区和水田含量,TP含量明显高于其他采样点,江水中重金属可能依附于含磷悬浮颗粒。

清远研究区的重金属含量,见图7b,除稻田上

覆水 Pb 含量之外,均远小于《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)控制标准值.池塘水 Cd、As、Pb、Cu、Zn 的均值分别为 (0.08 ± 0.02) 、 (8.38 ± 0.83) 、 (8.22 ± 3.72) 、 (8.27 ± 0.96) 、 (28.00 ± 7.07) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;灌溉水 Cd、As、Pb、Cu、Zn 的均值分别为 (0.05 ± 0.05) 、 (8.06 ± 0.94) 、 (7.24 ± 0.41) 、 (7.74 ± 1.06) 、 (8.75 ± 9.90) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;蓄水池上覆水 Cd、As、Pb、Cu、Zn 的均值分别为 (0.16 ± 0.01) 、 (10.38 ± 1.55) 、 (18.41 ± 3.57) 、 (15.43 ± 0.31) 、 (31.50 ± 0.71) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;田中井 Cd、As、Pb、Cu、Zn 的均值分别为 (0.19 ± 0.14) 、 (7.39 ± 1.04) 、 (39.08 ± 8.70) 、 (14.90 ± 10.88) 、 (30.50 ± 0.71) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;稻田上覆水 Cd、As、

Pb、Cu、Zn 的均值分别为 (0.21 ± 0.12) 、 (18.48 ± 3.04) 、 (152.33 ± 17.39) 、 (23.98 ± 0.20) 、 (35.83 ± 6.36) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.其中,蓄水池和井水重金属含量比较相近,对比两者的 pH 值和矿化度大小:井水的 pH 值和矿化度在该研究区均属于最高水平,蓄水池的 pH 值和矿化度在该研究区属于平均水平,可见上覆水重金属含量受水环境 pH 值和矿化度影响不大;两者间 TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的相差也较大.农田上覆水重金属含量较其他构成项目普遍高出,结合水流方向和沿程各物质含量变化,推断灌溉水输送的重金属经农田土壤淋滤和蒸发等散失作用,可能会在灌溉上覆水出现富集现象.

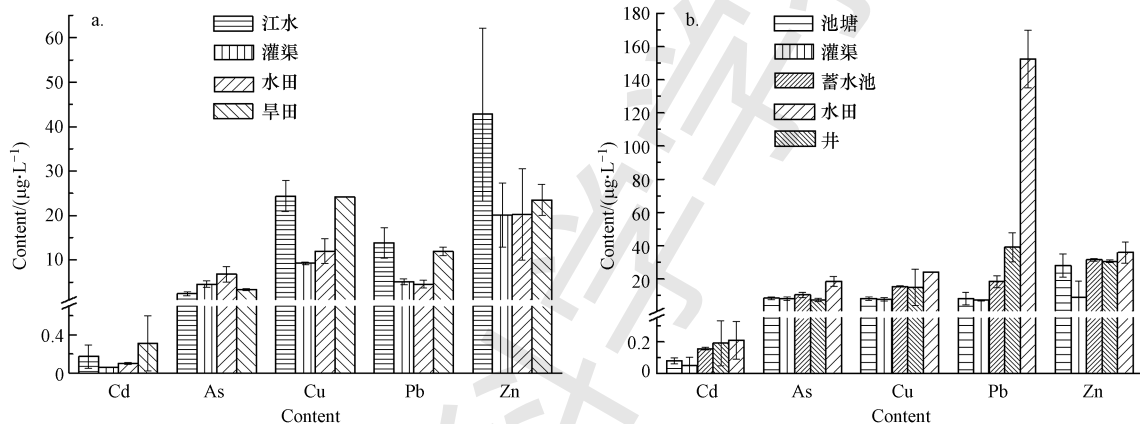


图7 江门(a)和清远(b)灌溉系统水样重金属含量分布

Fig.7 Average contents of heavy metals in Jiangmen (a) and Qingyuan (b) irrigation water samples

3.5 各采样点 TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与重金属含量分析

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的超标主要与农田氮磷的迁移有显著的关系,其表现如下:①佛山研究区蓄水池的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较地表 V 类水标准限值高出 $0.13 \sim 0.40$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可能与佛山研究区水源区域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高 ($1.18 \sim 1.42$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 有关,江边田氮磷物质的迁移可能是当地江水氮磷的主要贡献来源.②清远研究区 QYF1 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量是地表 V 类水标准限值的 3.5 倍,可能与上一茬氮肥施加量以及大量的碎秸秆回填有关.其余研究区各区域 TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均符合地表 V 类水标准限值.井水的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的含量大于灌渠水的含量,QYF2 和 QYF4 的田间水含 Pb 量较地表 V 类水标准限值高出几十乃至上百 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,可能会影响农田周边水塘生态系统安全.对 FS1~FS6、JM1a~JM7、QY1~QYF4 的取样点位置与各指标含量分批进行了显著性分析(图 4、图 5),发现不同位置的某些指标含量间无显著性差异,可能

在雨水的驱动之下,灌溉水处于流动状态或物质动态平衡条件,各指标含量受局部影响变小;绝大部分连通的采样点位之间,物质含量随位置变化呈现无显著差异的迁移.

3.6 背景特征和水质评价(全水样)

3.6.1 特征分析 根据 Pearson 相关性分析结果(表 1),Cd、As、Pb、Cu、Zn 5 种重金属中,除 Cd 与 Cu、As 与 Pb 在 $p < 0.01$ 水平上显著正相关外,其余均不具有显著相关性.Cd 与 Cu、As 与 Pb 在 $p < 0.01$ 水平上显著正相关,TP 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Cu 在 $p < 0.01$ 水平呈显著正相关,TP 与 As、Pb、Zn 在 $p < 0.05$ 水平呈显著正相关, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 As、Cu 在 $p < 0.01$ 水平呈显著正相关,说明其可能存在相同的来源.不同空间来源的研究水样分析结果表明,As、Pb、Cu、Zn 与 TP 含量之间存在着显著正相关.以磷为例,有文献指出地表水中 TP 以小颗粒形态远距离迁移(王晓玲等,2019),某河口沉积物磷向水体的释放主要来自铁/锰结合态的磷、钙结合态磷和有机磷(金晓丹等,

2015),某湖水体的研究发现磷主要为颗粒态(王书航等,2014);也有学者指出含水层中As与溶解性有机物络合远距离输送(鲁宗杰等,2017),可见灌溉水中重金属具有以结合形态发生同源远距离迁移的可能.结合氮磷来源(灌溉系统水环境、降水、农

田退水、道路径流等)及周边环境特征(农田状况差异,外源的汇入路径等)的综合对照,判断雨后灌溉水中TP、NH₄⁺-N和重金属主要还是灌溉水体中原有的,受外力驱动扰动后在水动力作用下可能以氮磷结合形态沿灌溉系统发生迁移.

表1 全部水样TP、NH₄⁺-N、重金属含量之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients among TP, NH₄⁺-N and heavy metal total contents in all water samples

Content	TP	NH ₄ ⁺ -N	Cd	As	Pb	Cu	Zn
TP	1						
NH ₄ ⁺ -N	0.818**	1					
Cd	0.237	0.280	1				
As	0.394*	0.497**	0.205	1			
Pb	0.429*	0.313	0.327	0.745**	1		
Cu	0.636**	0.617**	0.797**	0.279	0.336	1	
Zn	0.474*	0.309	0.151	-0.184	0.078	0.358	1

注: ** 为在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 为在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

变异系数(CV)可以用来描述每个样本间元素的离散程度,CV值的大小与离散程度成正比,一般CV<10%为弱变异水平,10%≤CV≤100%为中等变异水平,CV>100%为强变异水平(Zhou *et al.*, 2016;张伟燕等,2019).由表2可知,TP的变异系数为60.05%,处于中等变异水平;NH₄⁺-N的变异系数为126.97%,处于高等变异水平;重金属含量的变异系数为52.27%~174.84%,均处于中高等变异水平,其中Pb、Zn的变异系数均大于100%;尤以Pb的变异系数最大为174.84%,与张伟燕等对博尔塔拉河地表水重金属的变异分析结果相同;Pb的变异系数最大(张伟燕等,2019).博尔塔拉河地区交通运输频繁,这一点与西北江三角洲地区具有一致性.博尔塔拉河的研究也指出Pb、Zn主要来源于交通排放(张伟燕等,2019).还有,对某市区街道扬尘中十余种金属/重金属的多元统计发现,其中Pb的迁移活性最强,与交通、自然土壤颗粒和工业活动有关(Behnam *et al.*, 2015).某城市矿区、畜禽养殖区、郊区和控制区4类污染区土壤进行3类输入源重金属(Cd、Pb、As)的监测发现,大气沉降输入通量占总输入通量的51.21%~94.74%,均显著高于化肥和灌溉水(Yi *et al.*, 2018).综上所述,Pb、Zn的变异性受环境变化的显著影响,大气迁移是其在地表表生环境自由分布的重要影响因素.

结合样品的分布特征,大致发现在降水等外加驱动频繁引发地表渠道系统单方向流动的状态下,沿程采样点的变异系数相对稳定,耕作施肥和工农

业活动在渠系之中的点源影响已经降至最低.结合各区实际情况,Pb的强变异性主要受稻田上覆水样品影响,Zn的强变异性主要受佛山样品影响.全样品的TP、NH₄⁺-N和重金属含量存在较大差异,初步反馈了西北江三角洲农业污染状况发育差异、自然最不利情况下灌溉系统水环境的空间差异性.

表2 TP、NH₄⁺-N、重金属含量的描述性特征

Table 2 Descriptive characteristics of TP, NH₄⁺-N, and heavy metal contents

参数	最小值	最大值	标准差	均值	CV
TP/(mg·L ⁻¹)	0.027	0.284	0.06	0.10	60.05%
NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	0.163	6.943	1.34	1.06	126.97%
Cd/(μg·L ⁻¹)	0.016	0.346	0.09	0.13	72.96%
As/(μg·L ⁻¹)	1.97	21.32	4.81	7.26	66.24%
Pb/(μg·L ⁻¹)	3.36	236.40	50.17	28.69	174.84%
Cu/(μg·L ⁻¹)	5.86	38.36	8.00	15.30	52.27%
Zn/(μg·L ⁻¹)	0	196.67	42.84	41.39	103.50%

3.6.2 水环境质量评价 根据图4和图5可知,利用单因子水质标识指数法和综合水质标识指数法对各采样点、各构成项目和各研究区(表3)进行评价.QY1~QYF4的TP评价按湖、库标准执行.对同一水域兼有多类使用功能的,执行最高功能对应的标准值.

各研究区评价结果,详见表3.单因子水质标识指数都小于6;综合水质评价结果为I类~II类,达到水环境功能区的使用要求.对比《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的评价结果,NH₄⁺-N和Pb

略高,由于采样点位置远离居民生活区和饮用水源,可见灌溉水局部迁移对研究区生活饮用水/水源的污染风险不高。

同理,各采样点的评价结果:根据单因子水质标识指数法的分析, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是主要影响因子,FS4~FS6 和 QYF1 这 4 个采样点的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 单因子水质标识指数都大于 6,为劣 V 类水;除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 外,TP 和 Pb 也有个别采样点超标,主要集中于农用地上覆水样品;综合水质评价结果为 I 类~III 类,其中 QYF1、

QYF2、QYF4 为 III 类,其余各采样点为 I 类(以江门研究区为主)、II 类,达到水环境功能区的使用要求。

各构成项目的评价结果: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是主要影响因子,FS 水池和 QY 稻田的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 单因子水质标识指数都大于 6,为劣 V 类水;除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 外,QY 稻田的 Pb 单因子水质标识指数也大于 6;综合水质评价结果为 I 类~III 类,其中 JM 灌渠、JM 荷花为 I 类,QY 稻田为 III 类,其余各构成项目均为 II 类,达到水环境功能区的使用要求。

表 3 各研究区评价结果

Table 3 Evaluation results of each research area

研究区	单因子水质标识指数 P_i							综合水质评价		
	TP	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	Cd	As	Pb	Cu	Zn	P	水质级别	功能区评价
佛山农田灌溉系统水环境	3.50	5.60	1.20	1.10	3.30	2.00	2.10	2.700	II 类	达标
江门农田灌溉系统水环境	2.60	3.00	1.20	1.10	1.90	2.00	1.50	1.900	I 类	达标
清远农田灌溉系统水环境	4.90	3.90	1.10	1.20	3.90	2.00	1.50	2.600	II 类	达标
研究区总评	3.00	4.10	1.10	1.10	3.50	2.00	1.80	2.400	II 类	达标
生活饮用水标准值	/	3.00	3.00	1.20	2.00	3.00	3.00	/	/	/

注:加粗字体为各研究区内单因子水质标识指数中计算结果较大的两个项目。

4 结论(Conclusions)

1) 灌溉水所受沿程影响——呈现的断面动态指标与水源指标存在一定差异;底泥对灌渠死水尤其是对氮磷和悬浮颗粒的影响较大;雨水冲刷会显著影响江河湖泊水体污染物质的再分布,亦会对灌渠及其周边水环境产生一定影响.Pearson 相关性分析结果显示,As、Pb、Cu、Zn 与 TP 为同源迁移,As、Cu 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为同源迁移.结合氮磷含量、来源和周边环境特征,可以判断雨后灌溉水中 TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和重金属的含量主要还是灌溉水体中原有的,受外力驱动扰动后在水动力作用下可能以氮磷结合形态沿灌溉系统发生远距离迁移,根据 CV 系数可见 Cd、As、Cu、TP 处于中等变异水平,可看出西北江三角洲地区灌溉水中大部分污染物质处于相对稳定的状态——基础生态环境能够自我净化的环境允许含量。

2) 西北江三角洲灌溉系统水环境本底值不高,研究区总体综合水质评价级别为 I 类~II 类,达到水环境功能区的使用要求,灌溉和灌溉排水不会对农田灌溉系统水环境产生较大影响.其中需要注意的是, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 Pb 含量相对较高,主要为农田和田中蓄水池的上覆水,部分取样点单因子指数评价结果为劣 V 类.根据生活饮用水标准值单因子水质标

识指数,从各研究区的各个构成项目来看, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 Pb 的含量也相对较高,尤其是 Pb,对农田灌溉系统水环境和周边饮用水源存在一定生态风险,不利于人、牲畜饮用和家禽养殖.因此,应加强农田排水口和田中蓄水池中 Pb 的监控力度,科学合理地布设农田排水稳定塘,保证灌溉系统水环境和居民饮用水源安全。

参考文献(References):

- Armitage P D, Bowes M J, Vincent H M. 2010. Long-term changes in macroinvertebrate communities of a heavy metal polluted stream: the river Nent (Cumbria, UK) after 28 years [J]. *River Research and Applications*, 23(9): 997-1015
- Behnam K, Zahra T, Mohammad A R, et al. 2015. Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran [J]. *Atmospheric Environment*, 119(8): 1-10
- 陈建平, 李艳, 董思宏, 等. 2012. 江西千烟洲农业生态系统水环境氮污染研究[J]. *水资源与水工程学报*, 23(6): 51-54
- 傅超, 郑娟尔, 吴次芳. 2007. 建国以来我国耕地数量变化的历史考察与启示[J]. *国土资源科技管理*, (6): 68-72
- 付红波. 2009. 珠三角滩涂围垦农田土壤和农作物重金属污染特征与评价[D]. 广州: 暨南大学
- 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 2015. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. *环境科学*, 36(2): 448-456
- 国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北

- 京: 中国环境科学出版社
- 郝立波, 孙立吉, 陆继龙, 等. 2010. 第二松花江中上游悬浮物重金属元素分布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(2): 327-330+336
- Kang J W, Byung C C, Lee C B. 2010. Atmospheric transport of water-soluble ions (NO_3^- , NH_4^+ and nss-SO_4^{2-}) to the southern East Sea (Sea of Japan)[J]. *Science of the Total Environment*, 408(11): 2369-2377
- Li Y, Zhang Y, Shi K, *et al.* 2017. Monitoring spatiotemporal variations in nutrients in a large drinking water reservoir and their relationships with hydrological and meteorological conditions based on Landsat 8 imagery[J]. *Science of the Total Environment*, 599-600:1705-1717
- 鲁宗杰, 邓娅敏, 杜尧, 等. 2017. 江汉平原高砷地下水中 DOM 三维荧光特征及其指示意义[J]. 地球科学, 42(5): 771-782
- Meng Y B, Zhou L F, He S L, *et al.* 2018. A heavy metal module coupled with the SWAT model and its preliminary application in a mine-impacted watershed in China [J]. *Science of the Total Environment*, 613-614: 1207-1219
- 农殷璇. 2018. 珠三角地区农户耕地保护意愿及影响因素研究 [D]. 广州: 华南理工大学
- 祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 等. 2017. 太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应[J]. 环境科学, 38(1): 95-103
- 史栾生, 黄小兰. 2005. 广东省地表水水化学特征分析[J]. 广东水利水电, (2): 78-80
- 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 2014. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析[J]. 中国环境科学, 34(5): 1268-1276
- 王卫. 2010. 珠三角核心区与外缘区土地利用变化及对比分析 [D]. 广州: 广州大学
- 王晓玲, 张福超, 李松敏, 等. 2019. 稳定塘内稻田降雨径流中氮磷输移的三维数值模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 52(6): 649-660
- 王莺, 陆荣杰, 吴家森, 等. 2018. 山核桃林闭合区内径流氮磷流失特征[J]. 浙江农林大学学报, 35(5): 802-809
- 徐林春. 2014. 人类活动影响下的珠三角水安全研究 [D]. 武汉: 武汉大学
- 谢平, 唐亚松, 陈广才, 等. 2010. 西北江三角洲水文泥沙序列变异分析——以马口站和三水站为例 [J]. 泥沙研究, (5): 26-31
- 徐祖信. 2005a. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 33(3): 321-325
- 徐祖信. 2005b. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 33(4): 482-488
- 余富祥, 胡月明, 郭泰圣, 等. 2019. 经济快速发展地区农用地整治项目时空分异特征分析——以珠三角为例 [J]. 江苏农业科学, 47(16): 286-292
- Yi K, Fan W, Chen J, *et al.* 2018. Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of contaminated areas in Hunan Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 634:67-76
- Yuan G L, Liu C, Chen L, *et al.* 2011. Inputting history of heavy metals into the inland lake recorded in sediment profiles: Poyang Lake in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1): 336-345
- 张丹阳. 2018. 珠江水系河水中悬浮物及黑碳的地球化学特征 [D]. 北京: 中国地质大学
- Zhou J, Feng K, Pei Z, *et al.* 2016. Pollution assessment and spatial variation of soil heavy metals in Lixia River Region of Eastern China [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 16(3): 1- 8
- 周建军, 周桔, 冯仁国. 2014. 我国土壤重金属污染现状及治理战略 [J]. 中国科学院院刊, 29(3): 315-320+350+272
- 郑腾飞, 刘显通, 万齐林, 等. 2017. 近 50 年广东省分级降水的时空分布特征及其变化趋势的研究[J]. 热带气象学报, 33(2): 212-220
- 张伟燕, 马龙, 吉力力阿不都外力, 等. 2019. 博尔塔拉河地表水重金属来源分析及其污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 33(7): 100-106
- 钟晓兰, 周生路, 赵其国. 2006. 城乡结合部土壤污染及其生态环境效应[J]. 土壤, 38(2): 122-129