

麻雀坑水流域水土环境磷污染特征及来源分析

丁杰^{1*}, 何绍坤², 黄颖³, 王思颖¹, 王坤鑫⁴, 强耀辉⁵, 韩峰²

¹深圳市坪山区水务局, 广东 深圳

²南方科技大学环境科学与工程学院, 广东 深圳

³中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州

⁴中国科学院青藏高原研究所, 北京

⁵清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京

收稿日期: 2022年9月16日; 录用日期: 2022年11月25日; 发布日期: 2022年12月31日

摘要

随着经济发展和城市化进程加速, 磷污染成为我国河、湖水体污染的主要原因之一, 威胁着人民生产生活用水安全。本研究以深圳麻雀坑水流域为例, 通过实地采样和化学测量分析, 评估了不同来水和土地利用条件下水、土环境介质中的磷污染及其空间分布特征, 识别了磷污染的主要来源, 得出以下结论: 1) 麻雀坑水流域中磷的形态变化易受环境因素影响; 2) 磷的赋存形态随空间变化显著; 3) 面源污染和湿地内源是造成该流域磷污染的主要原因。

关键词

磷, 面源污染, 地表水, 地下水, 来源分析

Analysis on Characteristics and Sources of Phosphorus Pollution in the Soil and Water Environment of the Maquekeng Watershed

Jie Ding^{1*}, Shaokun He², Ying Huang³, Siying Wang¹, Kunxin Wang⁴, Yaohui Qiang⁵, Feng Han²

¹Water Authority of Pingshan District, Shenzhen Guangdong

²School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen Guangdong

³School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong

⁴Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing

⁵State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing

作者简介: 丁杰(1986-), 女, 湖南常德人, 博士, 主要研究方向为水文、水环境模拟, Email: jieding100@126.com

*通讯作者。

文章引用: 丁杰, 何绍坤, 黄颖, 王思颖, 王坤鑫, 强耀辉, 韩峰. 麻雀坑水流域水土环境磷污染特征及来源分析[J]. 水资源研究, 2022, 11(6): 572-579. DOI: 10.12677/jwrr.2022.116062

Received: Sep. 16th, 2022; accepted: Nov. 25th, 2022; published: Dec. 31st, 2022

Abstract

With the acceleration of economic development and urbanization, phosphorus (P) pollution has become one of the main causes of water pollution in rivers and lakes in China, threatening the water safety for production and domestic use. In this study, the characteristics of P pollution in the Maquekeng watershed were studied through field sampling and laboratory chemical analysis, in which the P content and its spatial distribution in the soil and water environment under different water and land use conditions were evaluated and the sources of P pollution were identified. The main conclusions are as follows. 1) The morphological change of P in this watershed is easily affected by environmental factors; 2) The forms of P change significantly with space; 3) Nonpoint source pollution and endogenous pollution (*i.e.*, wetlands) are the main causes of P pollution.

Keywords

Phosphorus, Nonpoint Source Pollution, Surface Water, Groundwater, Source Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磷是流域水生态系统的主要营养元素,除参与地球化学过程作用外,还与人类生活和生产活动息息相关。自改革开放以来,社会经济高速发展的同时也产生了严重的环境问题,如流域湖泊、土壤的富营养化等[1][2]。通过土壤侵蚀、地表径流等途径,以广域的、分散的、微量的形式进入地表水体的面源污染已成为流域水体富营养化的重要原因[3][4][5]。面源污染呈现出随机性、广泛性、滞后性、不确定性等特点[6][7]。准确评估流域面源污染难度较大[8]。已有研究表明,磷污染对我国水环境污染的贡献率高达93%[9],其原因主要包括农业耕作、施肥、养殖、工业生产等过程产生的面源污染[10][11][12][13]。为治理流域水体富营养化等问题,我国投入了大量的人力和财力来进行环境综合治理[2][14][15][16],同时出台了一系列的法律法规和指导方针,包括《关于加强重点湖泊水环境保护工作的意见》和《水污染控制行动计划》等。

坪山河发源于三洲田的梅花尖,流经坪山区,是深圳市五大河流之一[17]。坪山河全长13.5 km,深圳市境内流域面积129.4 km²,约占坪山区面积77%[18]。随着1980年经济特区的成立,深圳的城市化水平显著提高,坪山河流域人口急剧增长,工业迅速发展,对城市的生态环境安全产生了严重挑战[19][20]。麻雀坑水属于坪山河一级支流,该流域也处在快速城镇化进程中,存在多个在建工程。流域内水、土环境受到土地利用变化和人类活动的巨大影响,例如施工导致的局部基坑水总磷污染严重。为厘清该区域磷的含量、分布和来源,本研究在麻雀坑水流域开展了水、土环境中营养物质的调查与评估,研究了地表水、地下水、土壤等多种环境介质中磷元素的分布特征,分析了区域磷浓度超标的原因,识别了磷污染的主要来源,为麻雀坑水流域磷污染的科学防控提供技术支持。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

麻雀坑水流域位于北回归线以南,属于亚热带季风气候区。河道发源于麻雀坑水库溢洪道,河道总长2.7

km, 流域面积 3.7 km², 属于雨源型河道。多年平均气温 22.0℃, 平均湿度 79%, 平均气压 101.08 kPa。年内降雨日约 140 天, 多年平均降雨量超过 2000 mm, 平均蒸发量 1345.7 mm。降雨量时空分配不平衡, 易形成局部暴雨和洪涝灾害, 夏季受台风侵袭。麻雀坑水汛期因有雨水补给, 河道水量较为丰富。非汛期河道基本无雨水补给, 河道基流和沿河支流补给均较少, 常出现河床裸露情况。

研究区域位于珠三角核心区, 是粤港澳大湾区建设的重要节点区域, 在各级政府的积极推动和引导下, 正在步入高质量可持续发展轨道。随着城市化进程的不断加快, 麻雀坑水流域的土地利用也快速变化, 主要表现为区域内建设用地面积的增加和农业用地的减少。受施工工地用水、沿河居民生活污水和农田排水等影响, 该流域水、土环境中各类营养物质的富集情况加剧。

2.2. 样品采集和分析方法

本研究分别于 2020 年 9 月(丰水期)和 2020 年 12 月(枯水期)在麻雀坑水流域水库坝前、麻雀坑水河道上、中、下游及入坪山河河口处进行地表水、地下水、土壤采样(图 1)。

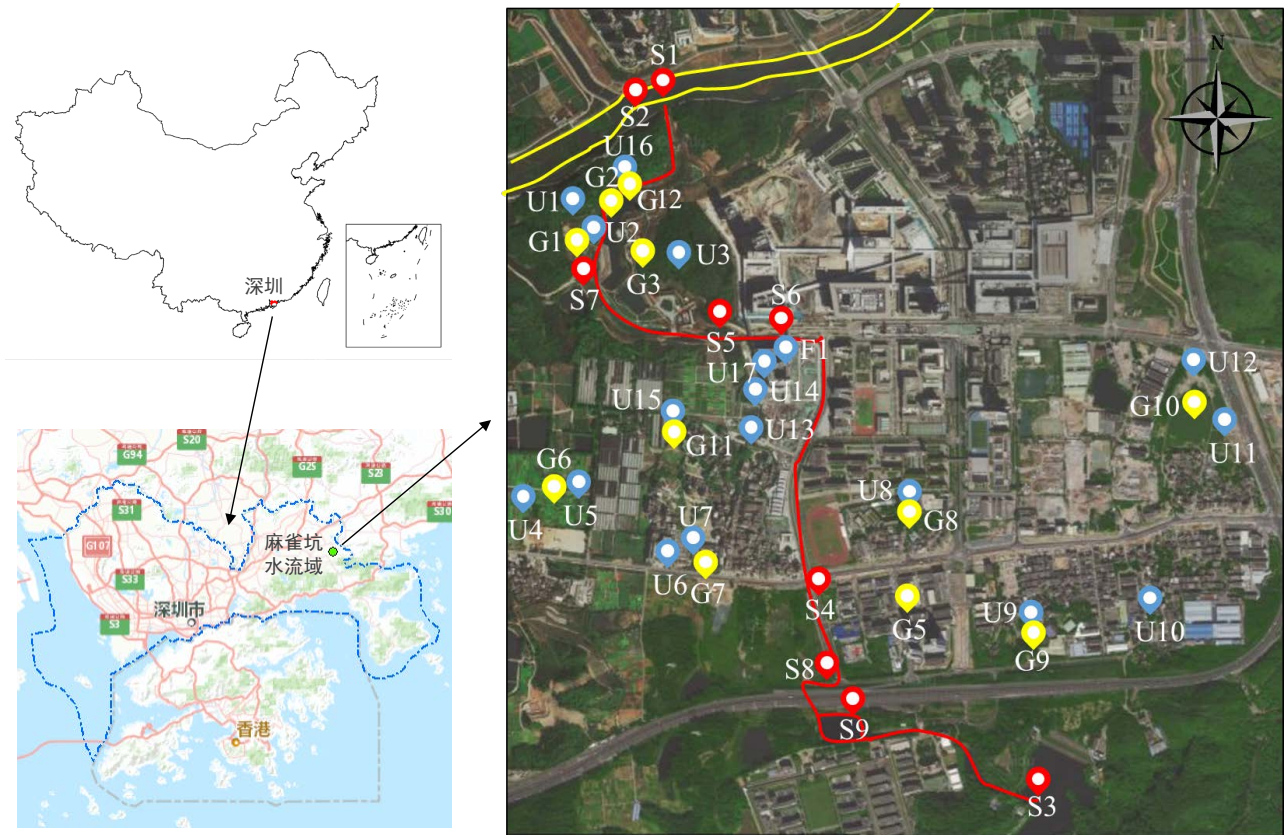


Figure 1. Location of Maquekeng watershed and spatial distribution of sampling sites

图 1. 麻雀坑水流域位置和采样点空间分布

其中, 土壤与地下水采样点的设置考虑了麻雀坑水流域的土地利用类型(水田、林地和水库坑塘等), 在不同土地利用类型均设置了采样点。其中, 丰水期采集了 4 个点位(图 1 中的 S1~S4)的地表水样, 枯水期采集了 9 个点位的地表水样(图 1 中的 S1~S9)。水样均在水深 0.5 m 处采集。地下水方面, 丰水期共设置 15 个采样点(图 1 中的 U1~U15), 枯水期共设置 13 个采样点(图 1 中的 U4~U7、U9~U15、U17、U18)。基坑水设置一个采样点(图 1 中的 U16)。此外, 还在荒地、桉树林、原生林、废弃荔枝林等样地采集了 12 个土样(图 1 中的 G1~G12)。

为两层土壤采样。表层土壤为 0~20 cm，深层土壤为 40~60 cm。G6~G12 为多层土壤采样，采样深度根据地下水埋深而定。采集间隔为 0~20 cm、40~60 cm、60~80 cm、90~110 cm、140~155 cm、155~170 cm、170~190 cm 和 190~210 cm。每个样品采集土壤 500 g。

水样和土样的检测和分析按照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91-2002)规范中的方法完成。水样测定中，总磷(TP)测定采用过硫酸钾氧化-分光光度比色法，磷酸根(PO_4^{3-})通过离子色谱(ICS900)测定，颗粒磷(PP)采用差减法，即 TP-溶解性总磷(DIP)，计算得到。土样中 TP 的测定方法为 ICP-OES (PE5300DV)。

3. 结果与讨论

3.1. 地表水磷含量分析

地表水中磷的浓度分布如图 2 所示。

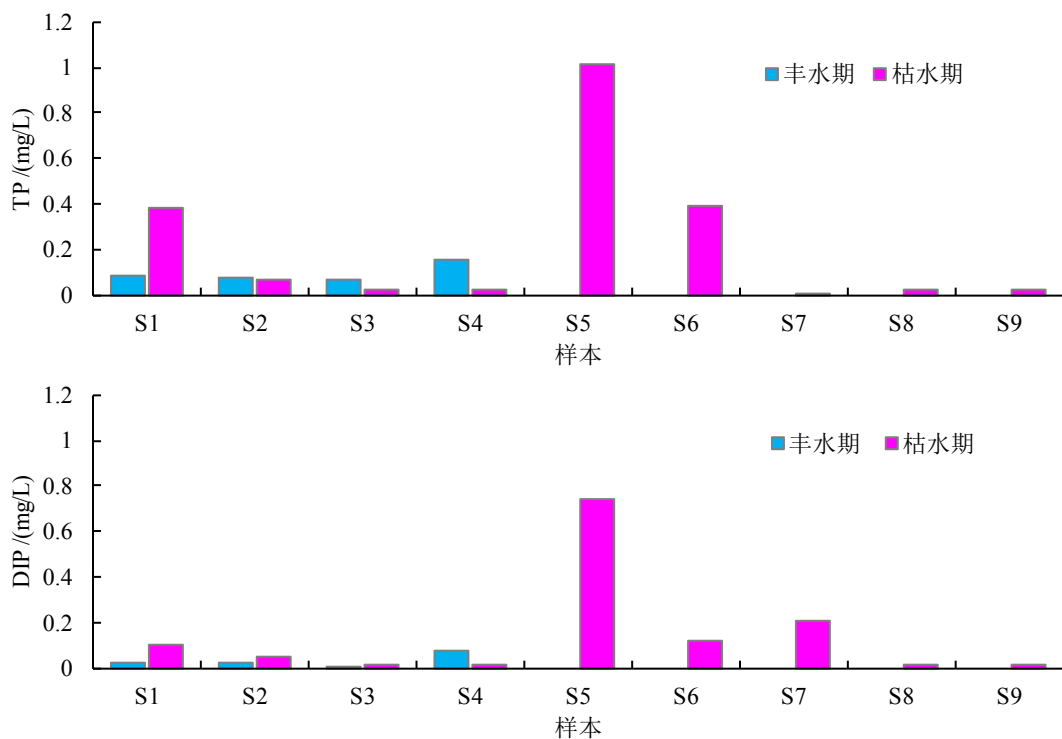


Figure 2. Concentration of total phosphorus (TP) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) in surface water
图 2. 地表水中总磷(TP)和溶解态无机磷(DIP)浓度

根据 9 个采样点处检测结果，丰水期地表水中的 TP 浓度在 0.05~0.16 mg/L 之间，DIP 的平均浓度为 0.03 mg/L。尽管在不同点位，DIP 占 TP 的百分比有所不同，表现出赋存形态的较大差异。但总体来看，丰水期地表水中 P 元素总体含量较低，符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) II 类水标准。PP 浓度与水体中悬浮泥沙含量关系密切。由于麻雀坑水的人工整治和改道，泥沙含量较低，PP 浓度也较低。在枯水期，TP 的浓度在 0.01~1.01 mg/L 之间，其中 S5 处的 TP 浓度最高，超过了地表水 V 类标准限值(0.4 mg/L)，其次是 S6 和 S1 点位，根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)为 V 类水。DIP 浓度在 0.01~0.74 mg/L 之间，最高浓度出现在入河口的采样点 S5。磷元素在地表水中的浓度分布情况表明流域下游入河口处的水质较差，有磷污染现象，且主要以 DIP 形态存在。

3.2. 地下水磷含量分析

地下水中磷的浓度分布如图 3 所示。丰水期的地下水样中，TP 和 PP 的平均浓度分别为 0.08 mg/L 和 0.04

mg/L。DIP 的浓度在 0.003~0.12 mg/L 之间, 均值为 0.04 mg/L。从形态分布上看, 磷的主要赋存形态随不同点位变化较大。而在枯水期, TP 平均值略高于丰水期, 约为 0.18 mg/L。U17 处的 TP 浓度最高, 为 0.87 mg/L。DIP 的平均值为 0.07 mg/L。U5 处浓度最高, 为 0.38 mg/L。约 46% 的地下水样中, DIP 含量为 0.01 mg/L, 处于较低水平。此外, U17 的 DIP 浓度仅占到 TP 的 2%, 说明该处磷元素以 PP 占主导。而总体来说地下水中 PP 浓度处于较低水平。地下水中 TP 与 PP 空间分布的差异说明麻雀坑水流域不同空间磷污染来源不完全相同。

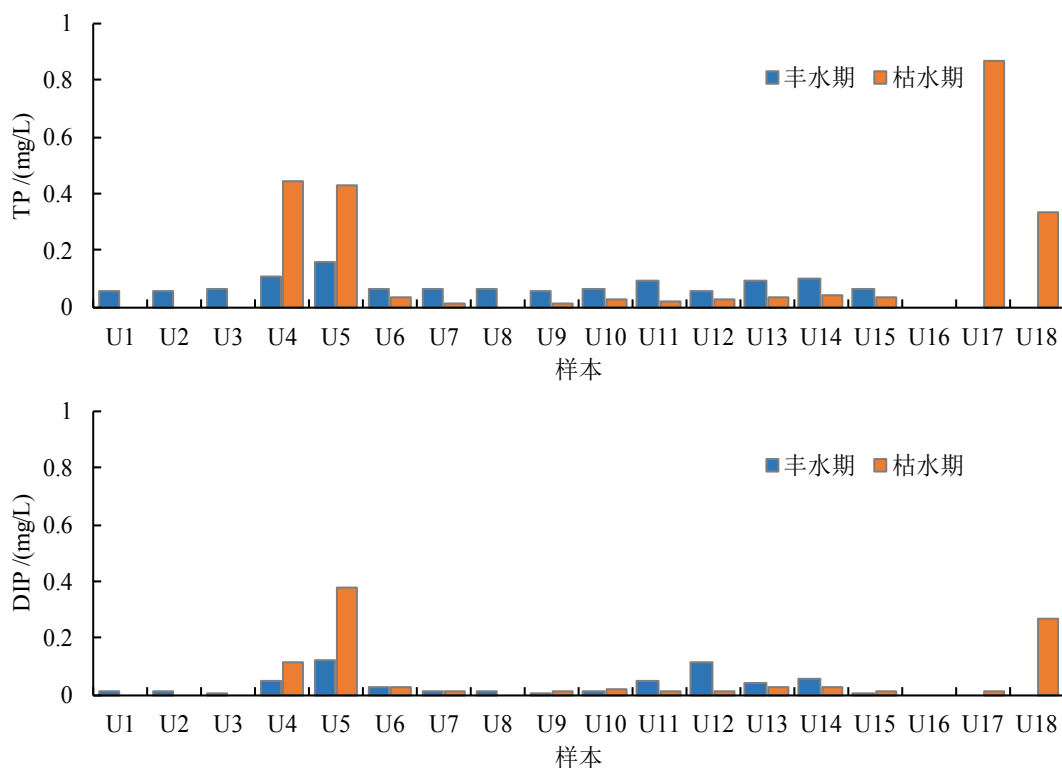


Figure 3. Concentration of total phosphorus (TP) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) in groundwater
图 3. 地下水中总磷(TP)和溶解态无机磷(DIP)浓度

基坑水(U16 点位)磷浓度采用每 2 h 一次频率进行观测, 连续观测 24 h。观测结果如图 4 所示。结果表明, 丰水期和枯水期的 TP 浓度平均值分别为 2.12 mg/L 和 1.87 mg/L。DIP 是 P 的主要赋存形态。无论是 TP 还是 DIP, 其浓度水平保持相对稳定, 在平均值附近波动。U16 基坑水超过了《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) V 类水的标准限值(0.4 mg/L), 表明该处有磷污染现象, 水质较差, 且磷污染源较为稳定。

3.3. 土壤磷含量分析

图 5 展示 12 个土样中的磷含量检测结果。

对比 5 个两层采样点位的 TP 含量可以看出, 表层土壤 TP 含量大于深层土壤 TP 含量, 说明磷含量在土壤中垂向上有较大的变化。这是因为作物生长消耗了深层土壤大量的营养物质。多层土壤采样的总磷含量在各深度分布不均, 整体上表现为先减少后增加特点。这与磷的性质有关, 磷可以以稳定形态存在于土壤中。从 TP 的空间分布来看, 表层土壤的 TP 含量从上游到下游呈增加趋势, 中游有着较大的波动, 下游 TP 含量出现较高值。G12 处表层土壤 TP 含量较高, 这可能是由于当地养猪粪便的面源污染造成的。猪的粪便里富含磷, 污染了表层土壤。

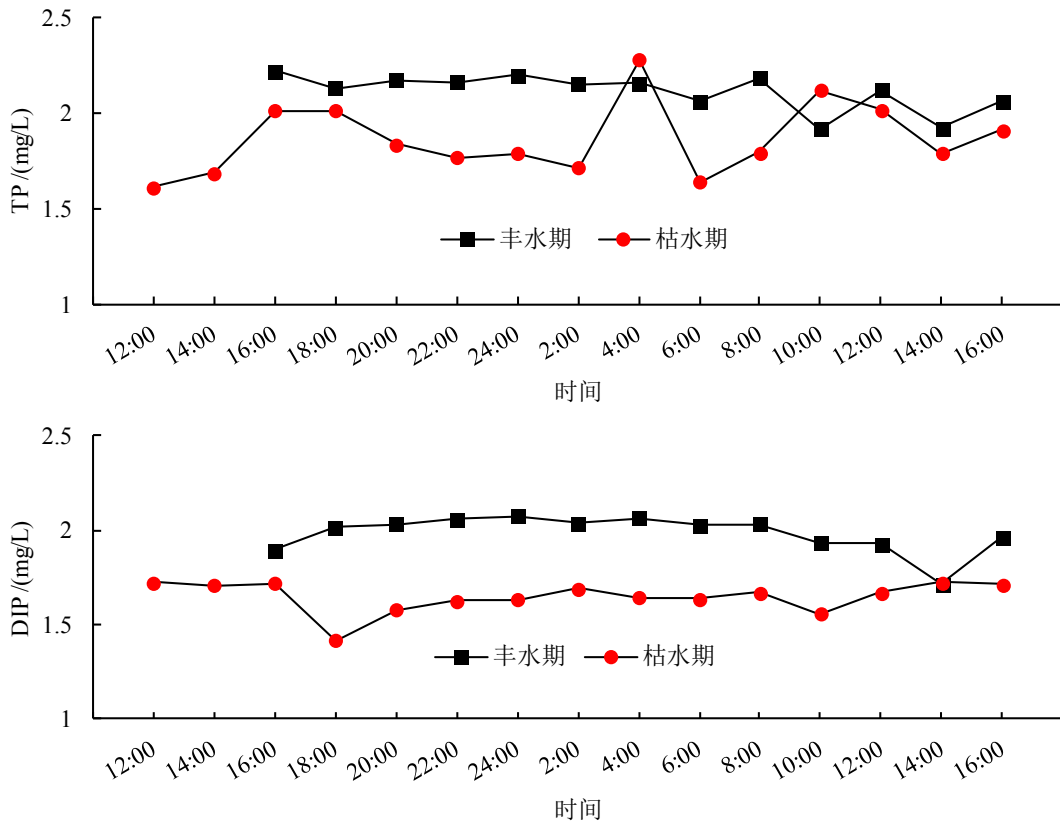


Figure 4. Diurnal variation of total phosphorus (TP) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) in foundation pit water

图 4. 基坑水总磷(TP)和溶解态无机磷(DIP)的日内变化

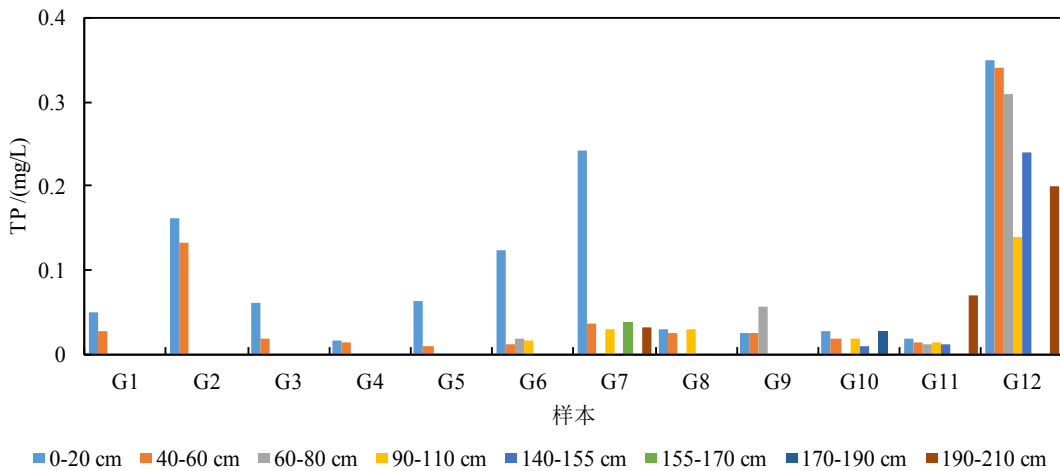


Figure 5. Vertical distribution of total phosphorus (TP) concentration in soil samples

图 5. 土样中总磷(TP)浓度的垂直分布

3.4. 磷污染来源分析

经实地调查分析, 麻雀坑流域内土地利用类型主要有农田、林地、住宅用地和公共管理与公共服务用地等。根据流域磷来源解析, 造成流域磷浓度超标的原因主要为面源污染和内源污染。面源污染包括农田排水和初期雨水污染, 其中排水渠排放的农田菜地灌溉排水是该流域最重要的农业面源污染。施用的氮肥和磷肥部分

会被农作物吸收,但仍有相当一部分残留在农田土壤中。这部分磷元素会随农田淋灌溶解或降雨径流流入河道。另外,流域内局部区域存在雨污混流问题,受到强对流天气影响,暴雨时污水漫流,存在初期雨水污染。因此,控制面源污染尤其是农业面源污染是防治麻雀坑水河道磷浓度超标的关键。第二,该流域内的湿地为重要的潜在内源,磷浓度高,且释放风险大。由于局部地区土壤磷高富集,受到人类活动以及水环境和水动力变化的影响,可能会引起磷的再释放和迁移,水环境中氧化还原状态改变引起的铁锰氧化物还原溶解也会同时释放其吸附的磷,使得地表水、地下水中磷浓度增加造成污染。

4. 结论

通过对麻雀坑水流域丰水期和枯水期水、土环境介质的采样分析,探讨了麻雀坑水流域磷营养物质的主要分布及来源,得出以下结论:

1) 麻雀坑水流域地表水中磷的形态变化容易受到环境因素影响。流域中排水渠的水质较差,存在磷污染现象,且主要以溶解态无机磷形态存在。

2) 地下水采样结果表明流域内自发进行的氧化还原反应较为剧烈,磷的主要赋存形态随空间变化较大,枯水期的总磷浓度略高于丰水期。

3) 土壤磷含量分析结果表明,表层总磷含量高于深层,其原因为作物生长消耗了深层土壤大量的营养物质。而在空间分布上,总磷含量从上游到下游增加。

4) 造成麻雀坑水流域磷污染的主要原因为面源污染和内源污染,其中湿地是重要的潜在内源,磷浓度高,释放风险大。此外,流域水体中的自发进行的氧化还原反应也会导致磷释放造成污染。

基金项目

国家自然科学基金(41801051)。

参考文献

- [1] BU, H., ZHANG, Y., MENG, W., et al. Effects of land-use patterns on in-stream nitrogen in a highly-polluted river basin in Northeast China. *Science of the Total Environment*, 2016, 553(15): 232-242. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.104>
- [2] ZHOU, J., GU, B., SCHLESINGER, W. H., et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25088. <https://doi.org/10.1038/srep25088>
- [3] ZHANG, S., LI, Y., FAN, W., et al. Impacts of rainfall, soil type, and land-use change on soil erosion in the Liusha River watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, 22(4): 04016062. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001479](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001479)
- [4] 王宝山. 城市雨水径流污染物输移规律研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
WANG Baoshan. Study on urban stormwater pollutants transportation processes. Ph.D. Thesis, Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- [5] CHEN, J., ADAMS, B. J. Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and wash off processes. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(10): 1314-1330. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2006\)132:10\(1314\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:10(1314))
- [6] 刘之杰, 路竟华, 方皓, 等. 非点源污染的类型、特征、来源及控制技术[J]. *安徽农学通报*, 2009, 15(5): 98-101.
LIU Zhijie, LU Jinghua, FANG Hao, et al. Types, characteristics, sources of non-point source pollution and its control technology. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009, 15(5): 98-101. (in Chinese)
- [7] 王龙, 黄跃飞, 王光谦. 城市非点源污染模型研究进展[J]. *环境科学*, 2010, 31(10): 2532-2540.
WANG Long, HUANG Yuefei and WANG Guangqian. Review of urban nonpoint source pollution models. *Environmental Science*, 2010, 31(10): 2532-2540. (in Chinese)
- [8] SRINIVAS, R., SINGH, A. P., DHADSE, K., et al. An evidence based integrated watershed modelling system to assess the impact of non-point source pollution in the riverine ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246(10): 118963. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118963>
- [9] ONGLEY, E. D., ZHANG, X. and YU, T. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159-1168. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.047>

- [10] ZHAO, X, CHRISTIANSON, L. E., HARMEL, D., et al. Assessment of drainage nitrogen losses on a yield-scaled basis. *Field Crops Research*, 2016, 199: 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.015>
- [11] HOWARTH, R., CHAN, F., CONLEY, D. J., et al. Coupled biogeochemical cycles: Eutrophication and hypoxia in temperate estuaries and coastal marine ecosystems. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2011, 9(1): 18-26. <https://doi.org/10.1890/100008>
- [12] 张世杰. 黄河下游非点源污染负荷及临界输沙量研究[J]. *水资源研究*, 2018, 7(2): 199-206.
ZHANG Shijie. Non-point source pollution and critical sediment in the lower reaches of the Yellow river. *Journal of Water Resources Research*, 2018, 7(2): 199-206. (in Chinese)
- [13] 宋大平, 庞敏晖, 李红, 等. 安徽省农业面源污染及健康风险评估研究[J]. *水资源研究*, 2019, 8(3): 290-303.
SONG Daping, PANG Minhui, LI Hong, et al. Agricultural non-point source pollution and health risk assessment in Anhui Province. *Journal of Water Resources Research*, 2019, 8(3): 290-303. (in Chinese)
- [14] 段亮, 段增强, 夏四清. 太湖旱地非点源污染量化研究[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(6): 40-43.
DUAN Liang, DUAN Zengqiang and XIA Siqing. Quantification of non-point pollution from uplands in Taihu lake catchment. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(6): 40-43. (in Chinese)
- [15] 曹杰君, 高扬, 黄海波, 等. 长三角典型村域次降雨条件下氮素非点源输出特征[J]. *环境科学*, 2010, 31(11): 2587-2593.
CAO Jiejun, GAO Yang, HUANG Haibo, et al. Output characteristics of non-point nitrogen from a typical village region in Yangtze Delta under an individual rainfall event. *Environmental Science*, 2010, 31(11): 2587-2593. (in Chinese)
- [16] 郭泽慧, 刘洋, 黄懿梅, 等. 降雨和施肥对秦岭北麓俞家河水质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(1): 158-166.
GUO Zehui, LIU Yang, HUANG Yimei, et al. Effects of rainfall and fertilization on water quality of the Yujia River watershed in the northern Qinling mountains. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 158-166. (in Chinese)
- [17] 刘琳, 陈松, 管梓含, 等. 水环境治理项目的雨水控制方案——以坪山河为例[J]. *能源与环境*, 2020(6): 87-89+97.
LIU Lin, CHEN Song, GUAN Zihan, et al. Rainwater control method in water environment control project: A case study of the Pingshan River. *Energy and Environment*, 2020(6): 87-89+97. (in Chinese)
- [18] 申小艾, 宁天竹, 奚晓伟. 深圳市坪山河流域智慧水务建设方案研究[J]. *中国水利*, 2018(5): 50-54.
SHEN Xiaoi, NING Tianzhu and XI Xiaowei. Research on the construction scheme of smart water affairs in Pingshan river basin of Shenzhen city. *China Water Resources*, 2018(5): 50-54. (in Chinese)
- [19] 熊纓, 苏志刚, 张英玲, 等. 深圳市坪山河水污染现状分析及评价[J]. *环境科学导刊*, 2010, 29(5): 79-81.
XIONG Ying, SU Zhigang, ZHANG Yingling, et al. Evaluation of water pollution of the Pingshan river in Shenzhen. *Environmental Science Survey*, 2010, 29(5): 79-81. (in Chinese)
- [20] 黄奕龙, 王仰麟. 深圳市河流水质退化及其驱动机制研究[J]. *中国农村水利水电*, 2007(7): 10-13.
HUANG Yilong, WANG Yanglin. River water quality degradation in Shenzhen city and its influencing mechanisms. *China Rural Water and Hydropower*, 2007(7): 10-13. (in Chinese)