

绿狐尾藻生态沟渠在低温状态下对磷的去除

常小云, 张树楠, 张苗苗, 肖博仁, 陈均利

引用本文:

常小云, 张树楠, 张苗苗, 等. 绿狐尾藻生态沟渠在低温状态下对磷的去除[J]. [农业环境科学学报](#), 2021, 40(4): 852-858.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1196>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[农田汇水河道水生植物原位净化工程处理效果分析](#)

张迎颖, 闻学政, 姚一丹, 杨非, 王岩, 刘海琴, 张志勇

[农业环境科学学报](#). 2019, 38(7): 1607-1615 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1429>

[绿狐尾藻区域适应性与生态竞争力研究](#)

李裕元, 李希, 吴金水, 李宽意, 王伟波

[农业环境科学学报](#). 2018, 37(10): 2252-2261 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1036>

[水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响](#)

李红芳, 刘锋, 肖润林, 何洋, 王迪, 吴金水

[农业环境科学学报](#). 2016, 35(1): 157-163 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.021>

[不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究](#)

叶磊, 李希, 田日昌, 吴凤平, 孟岑, 夏梦华, 郭宁宁, 凡翔, 李裕元, 王辉

[农业环境科学学报](#). 2020, 39(10): 2409-2419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0761>

[水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较](#)

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

[农业环境科学学报](#). 2020, 39(10): 2397-2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

常小云, 张树楠, 张苗苗, 等. 绿狐尾藻生态沟渠在低温状态下对磷的去除[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 852–858.

CHANG Xiao-yun, ZHANG Shu-nan, ZHANG Miao-miao, et al. Phosphorus removal in *Myriophyllum aquaticum* ditch under low-temperature conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4): 852–858.



开放科学 OSID

绿狐尾藻生态沟渠在低温状态下对磷的去除

常小云¹, 张树楠², 张苗苗², 肖博仁^{4*}, 陈均利^{2,3,4*}

(1. 长江大学动物科学学院, 湖北 荆州 434000; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 湖南佳和智农技术咨询有限公司, 长沙 410199)

摘要:为解决冬季生态沟渠磷去除效率低的问题, 设置低、中、高水位下3条绿狐尾藻生态沟渠, 研究不同水位下绿狐尾藻生态沟渠在低温条件下的总磷(Total phosphorus, TP)去除表现。结果表明:绿狐尾藻生态沟渠在整个冬季均有较高的除磷效果, 平均TP去除率为61.9%~73.7%, 且在高水位条件下, 相对较高的水温和水下空间利于绿狐尾藻的生长, 从而促进了TP的去除; 而低水位下较高的溶氧(Dissolved oxygen, DO)浓度和根土界面利于基质对TP的吸附。根据磷质量平衡, 植物吸收和沉积物吸附分别占进水TP负荷的30.27%~48.75%和18.38%~24.95%。研究表明, 绿狐尾藻是一种适合种植于生态沟渠, 用于磷去除的耐寒水生植物。

关键词:绿狐尾藻; 生态沟渠; 磷; 低温

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)04-0852-07 doi:10.11654/jaes.2020-1196

Phosphorus removal in *Myriophyllum aquaticum* ditch under low-temperature conditions

CHANG Xiao-yun¹, ZHANG Shu-nan², ZHANG Miao-miao², XIAO Bo-ren^{4*}, CHEN Jun-li^{2,3,4*}

(1. College of Animal Science, Yangtze University, Jingzhou 434000, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Changsha Research Station for Agricultural and Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Hunan Jiahe Breeding Intelligence Service Co., Ltd., Changsha 410199, China)

Abstract: In order to solve the problem of inefficient phosphorus removal in vegetated ditches during winter, three *Myriophyllum aquaticum* ditches with low, medium, and high water levels were built to study total phosphorus (TP) removal performance under low-temperature conditions. The results showed that the *M. aquaticum* ditches had a high phosphorus removal effect throughout the winter, and the average TP removal rate was 61.9%~73.7%. Under high-water level conditions, relatively high water temperature and underwater space were conducive to the growth of *M. aquaticum*, thereby promoting the absorption of phosphorus by *M. aquaticum*, whereas under low-water level conditions, higher dissolved oxygen (DO) concentration and root-soil interface were conducive to adsorption of TP by sediments. According to the phosphorus mass balance, plant and sediment absorption accounted for 30.27%~48.75% and 18.38%~24.95% of the influent TP load, respectively. These results indicate that *M. aquaticum* is appropriate as a cold-resistant aquatic plant for TP removal in drainage ditches.

Keywords: *Myriophyllum aquaticum*; vegetated drainage ditch; phosphorus; low temperature

收稿日期: 2020-10-16 录用日期: 2020-12-25

作者简介: 常小云(1995—), 女, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要开展污水生物处理技术研究。E-mail: 738292468@qq.com

*通信作者: 肖博仁 E-mail: xiaoboren2008@126.com; 陈均利 E-mail: 1154223483@qq.com

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5636); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807056)

Project supported: The Young Scientists Fund of the Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ5636); The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41807056)

随着社会经济的快速发展,近年来许多发展中国家的农村地区污染越发严重,据《中国第一次全国污染源调查报告》显示,水污染占据农业面源污染的一半左右,占氮、磷污染总量的57%和67%,因此治理农业水污染已刻不容缓^[1]。

在大多数农村和偏远地区,由于缺乏相应的废水处理设施,生活和农田废水都是直接排放到地表水体,从而造成农村地区大范围的水体污染。考虑到发展中国家农村和偏远地区的经济问题,迫切需求一种经济高效的污水处理措施。而生态系统工程(如人工湿地、生态浮岛、河岸植被缓冲带、生态沟渠等)因其绿色环保、经济高效,被认为是一种十分适用于农村地区的环保措施^[2]。尤其是其中的生态沟渠,由于土地利用少、便于管理、具有溪流和湿地的双重特征,而被认为是减轻农业污染的一种最佳处理方式^[3]。

生态沟渠是一种能够从源头对农业流失养分进行有效处置的管理措施。在过去,生态沟渠由于其生态功能和污染物降解能力不显著而被忽视,后来人们发现生态沟渠其实有与人工湿地相当的污染物处理潜力,特别是对于不同土地利用形成的径流在进入水体前磷的拦截、净化都有良好的效果,因此近几年越来越受到重视。在许多国家,越来越多的研究人员关注于如何利用沟渠来降低水体磷含量以提高水质和环境效益,如李红芳等^[4]通过生态沟渠拦截系统在亚热带农业区源头治理农业面源污染方面取得了良好效果,显著降低了流域水体磷含量;Kröger等^[2]也发现生态沟渠对农业径流中磷的拦截作用,其大幅度减轻了密西西比河下游磷的污染压力;刘福兴等^[5]发现生态沟渠对降雨径流中的磷有良好的削减作用,这些结果都证明了生态沟渠对磷降解的积极作用。水生植物作为生态沟渠四大主要组成部分之一(沉积物、水、微生物和水生植物),在生态沟渠构成中与其他各部分有着密切关系,除自身的吸收拦截作用外,其还能间接促进生态沟渠其他部分的污染物去除过程^[6]。越来越多的证据表明,与无植物沟渠相比,水生植物生态沟渠有着更好的污染物去除效果,而且水生植物的物种类型、生长状态等也影响着磷的去除效果^[7]。如钱银飞等^[8]研究发现水生植物处于生长旺盛期时对沟渠水体中磷的去除效果最好;张树楠等^[9]研究发现不同水生植物对沟渠水体中磷的去除效果不同,在水生美人蕉(*Canna glauca*)、铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)、黑三棱(*Sparganium stoloniferum*)、绿狐尾藻

(*Myriophyllum aquaticum*)和灯心草(*Juncus effusus*)5种水生植物中,水生美人蕉和绿狐尾藻的除磷效果最好。此外,水生植物易受到季节温度的影响,尤其是在冬天。如Nsenga等^[11]研究发现种植水生美人蕉、油菜(*Hydrocotyle vulgaris*)、黑三棱和狐尾藻(*Myriophyllum* sp.)的生态沟渠在寒冷月份的磷去除效率较温暖月份更低;Wang等^[10]发现处理农村生活污水的生态沟渠系统冬季磷去除率为26.7%,远低于其他季节的51.9%~66.5%。这主要是由于沟渠植物在冬季会衰老腐烂,而植物释放的养分进一步污染沟渠水体,因此采取有效的沟渠控制措施来提高冬季磷去除效率是当先亟待解决的难题。

通常,季节性波动是影响废水处理效率的不可控因素,但是有研究表明可以通过沟渠设计和耐寒植物物种选择来提高沟渠冬季磷去除效率^[10-11]。绿狐尾藻具有较强的磷吸收能力,每年的磷吸收量高达15.1~40.9 g·m⁻²^[12],且能在低温流动水体下保持较强的生命力,特别是水下部分^[13]。在处理高浓度养殖废水时,两年的监测数据表明,绿狐尾藻在冬季的总磷(Total phosphorus, TP)平均去除效率达到79.2%~82.8%,证实了绿狐尾藻湿地可在冬季仍保持高效的除磷性能。为了探究绿狐尾藻生态沟渠在冬季应用的可能性,本研究在中国亚热带地区建造了3条中试规模的模拟沟渠,并在3条沟渠中种植绿狐尾藻以研究不同水位条件下绿狐尾藻生态沟渠在冬季的除磷表现,并分析了绿狐尾藻生态沟渠的主要磷去除途径,为生态沟渠在冬季的应用提供数据支撑和指导。

1 材料与方法

1.1 试验沟渠概况与运行

本研究试验沟渠位于中国科学院长沙农业环境观测研究站(27°55'~28°40'N, 112°56'~113°30'E)的示范区内,该区属于亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温17.7℃,年平均降水量1619 mm(湖南统计局)。试验区沟渠的试验废水主要为农村生活污水。

为净化农村生活污水,在稻田旁建造了3条生态沟渠,每条沟渠长15.0 m、宽0.5 m,深度分别为10、25 cm和40 cm。沟渠基质为稻田土壤,土壤理化性质如下: NH₄-N 15.9 mg·kg⁻¹, NO₃-N 1.0 mg·kg⁻¹, 总氮(Total nitrogen, TN) 0.4 g·kg⁻¹, TP 0.6 g·kg⁻¹, 土壤有机碳 18.4 g·kg⁻¹。于2017年11月上旬从绿狐尾藻人工湿地收获20 cm的绿狐尾藻幼苗,将其种植在3条实

验沟渠中,植物覆盖密度为72株·m⁻²。

在正式试验之前,先将试验用绿狐尾藻在水中预培养3周。预培养结束后,通过蠕动泵(DZ25-6L,中国保定)以520 mL·min⁻¹的速度将自然排水沟中的污水泵入绿狐尾藻试验沟渠中。根据前期调查,考虑到当地沟渠的普遍水位为8.2~47.6 cm,试验3条沟渠的水位分别设置为:低水位(10 cm)、中水位(25 cm)、高水位(40 cm),水力停留时间分别为1、2.5、4 d。进水各组分浓度分别为:TP 0.78~1.96 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N 1.2~5.0 mg·L⁻¹,NO₃⁻-N 0.2~1.6 mg·L⁻¹,TN 2.3~5.9 mg·L⁻¹,溶解性有机碳 2.4~5.6 mg·L⁻¹。试验区域冬季为12、1月和2月,平均气温为7.4~8.2 ℃,因此本次试验在2017年12月开始运行。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 水、土壤和植物的采样和分析

当沟渠出水稳定后,在第1、3、6、14、21、27、31、35、42、48、56、62、70、84 d和90 d于距离沟渠0、1、3、6、9、12 m和15 m处各取水样100 mL。同时通过便携式水质测定仪(SG68-ELK-ISM,瑞士)现场测定水温。根据国家标准方法(GB/T 11893—1989)对水样进行分析测定^[14]。

在试验开始和结束时,分别从沟渠中取3份表层沉积物样品(0~10 cm),带到试验室进行冷冻干燥,磨成细粉,过0.15 mm筛,然后采用国家标准方法(GB 9837—1988)进行TP测定^[12]。

在沉积物取样当日,从沟渠中随机选择3个植物生长相对均匀的20 cm×20 cm的样地,采集绿狐尾藻样品。将新鲜样品在105 ℃烘30 min,然后在80 ℃下烘至恒质量。将干燥的植物样品研磨成粉末过1 mm筛,植株样品的磷经浓硫酸和过氧化氢消解后,有机态磷转化为无机态磷酸盐,磷质量浓度经钼锑抗显色后,用紫外分光光度计(UV2300)测定。

1.2.2 数据处理

沟渠TP质量负荷(QR, g·m⁻²·d⁻¹)、去除率(RE, %)和一级面积去除率常数(K_A, m·d⁻¹)的计算公式为:

$$QR = \frac{C_i \times Q}{L \times W}$$

$$RE = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100\%$$

$$K_A = \frac{Q}{L \times W} \times \ln \frac{C_i}{C_e}$$

式中: C_i为进水TP浓度, mg·L⁻¹; C_e为出水TP浓度, mg·L⁻¹; Q为沟渠进水量, m³·d⁻¹; L为沟渠长度, m; W为沟渠宽度, m。

2 结果与讨论

2.1 绿狐尾藻生态沟渠的除磷表现

在整个冬季监测期间,低、中、高3条试验沟渠均展现出了良好的除磷性能,其平均磷质量负荷分别为0.115、0.110 g·m⁻²·d⁻¹和0.116 g·m⁻²·d⁻¹。如图1所示,在进水TP浓度为0.78~1.96 mg·L⁻¹的条件下,低、中、高水位3条生态沟渠的平均出水TP浓度分别为0.40、0.34、0.31 mg·L⁻¹,整个观测期的TP平均去除率分别为61.9%、64.8%和73.7%,与Chung等^[15](54%~68%)、Wu等^[16](48%~67%)和朱晓瑞等^[17](56.5%)的

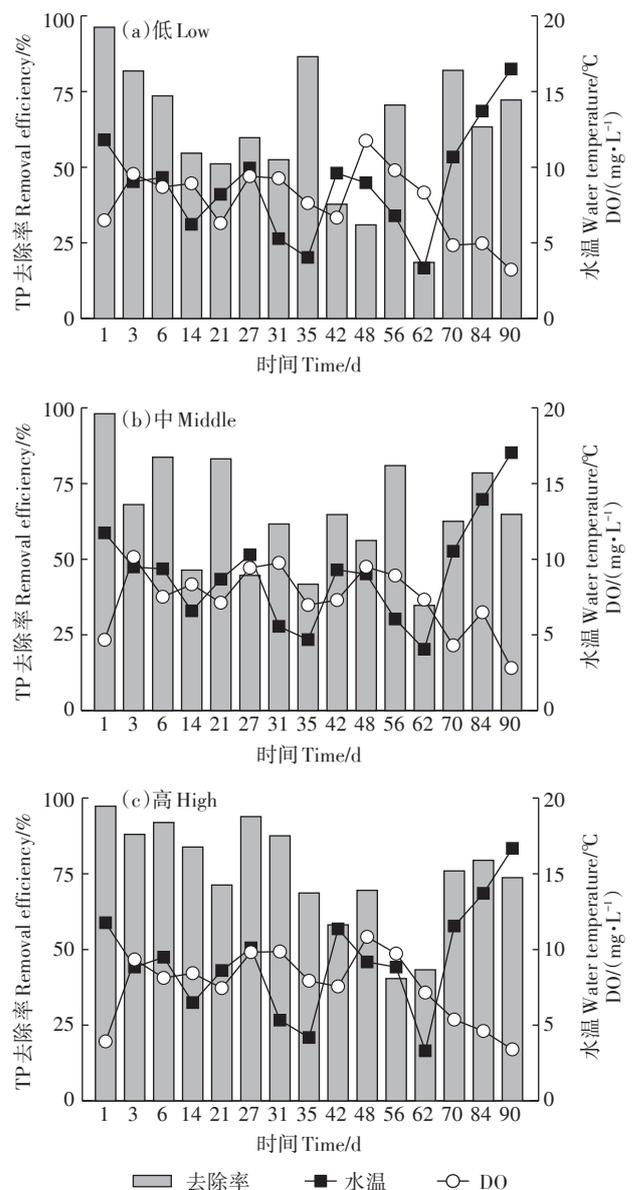


图1 生态沟渠对农业废水TP的去除

Figure 1 The TP removal performance of rural wastewater by the vegetated drainage ditch

结果相当,高于 Klomjek 等^[18](36.6%)和顾兆俊等^[19](2.73%)的结果。此外,低、中、高3条生态沟渠在整个冬季的平均TP质量负荷去除速率分别为0.071、0.072 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和0.085 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,这与其他水生植物生态沟渠非冬季阶段处理效果接近,如 Poach 等^[20]的0.10 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 Reddy 等^[21]的0.029~0.041 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,但低于由绿狐尾藻、西伯利亚鸢尾(*Iris sibirica*)和石菖蒲(*Acorus gramineus*)混和搭配的冬季生态沟渠(0.28 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)^[1],这表明绿狐尾藻生态沟渠确实可以用于冬季处理农村生活污水,而且与其他可越冬湿地植物进行组合搭配除磷效果更好。

不同水位对于绿狐尾藻生态沟渠除磷效果有显著影响,采用一级动力学模型对绿狐尾藻生态沟渠的除磷速率常数进行计算,得出低、中、高水位绿狐尾藻生态沟渠的一阶TP去除速率常数分别为0.096、0.104 $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 和0.133 $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$,高于人工湿地观测到的0.05~0.08 $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[22]。有研究表明,水位对污染物去除的影响主要是通过间接影响水生植物和微生物的生长环境,如水体温度、水下生长空间、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)等^[22]。生态沟渠对于磷的去除大部分依赖于植物的吸收,而温度又是影响植物生长的重要因素,因此本研究对不同水位下的水温进行了分析(图2),结果表明3类生态沟渠中高水位水温>中水位水温>低水位水温,该结果与 Zhang 等^[22]的结论一致,高水位有着比低水位更高的水体温度。刘锋等^[23]的研究表明绿狐尾藻较适宜的生长温度为5℃以上,高水位条件下整个冬季阶段的水温大多高于5℃,而大气温度为-3~16℃,这表明高水位对绿狐尾藻在低温环境下的生长有保护作用。

此外,也有研究表明DO是沟渠水体磷去除的重要影响因素^[24],因此本研究也对不同水位下的DO浓度变化进行了分析。DO对于生态沟渠除磷效果的影响主要是改变聚磷菌对磷的吸收和释放。由于聚磷菌在好氧条件下会过量吸收磷,而在厌氧条件下会释放磷,因此高DO条件有利于沟渠基质中聚磷菌对磷的吸收。由图2可知,在不同水位中,以低水位DO浓度最高,根据亨利定律,DO在一定范围内会随着温度的降低而升高^[25],而低水位的水温更低,这就导致了低水位条件下的DO浓度更高(图1和图2)。此外,绿狐尾藻的根系泌氧作用也对沟渠底部DO浓度的增加起到了促进作用^[23],所以相比于中、高水位条件,低水位条件下的聚磷菌会过量吸收更多的磷。但沟渠中聚磷菌多数存在于沟渠底部基质,而且对磷是以过

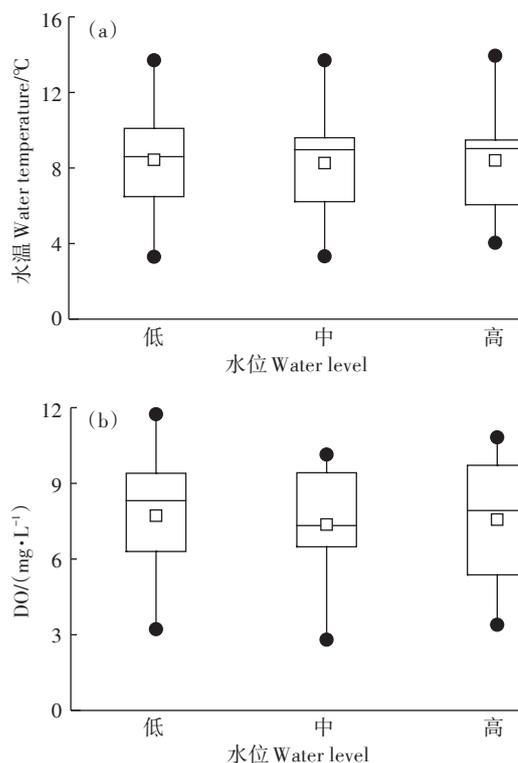


图2 绿狐尾藻生态沟渠低、中、高水位下水温和DO

Figure 2 Water temperature and DO in the *M. aquaticum* ditches under low, medium, and high water levels

量吸收积累的形式而不是直接去除,即体现在沟渠基质的磷含量增加上,因此把聚磷菌的磷吸收划分至基质吸附部分。

2.2 沟渠中TP的时空变化规律

如图1所示,低、中、高3条绿狐尾藻生态沟渠在冬季起始的第1~6 d都有较高的TP去除率,分别为83.9%、83.3%和92.4%,而第14~62 d,随着水温的下降(3.3~9.3℃),3条沟渠的TP去除率开始下降,分别为51.4%、57.1%和68.5%。从第70 d至整个观测期结束,3条沟渠的水温再次升高(10.5~17.0℃),TP去除率也再次升高,分别达到72%、68.6%和76.3%。绿狐尾藻生态沟渠在冬季前后段TP去除率较为稳定,去除率较高,但在冬季中段第27~59 d中的个别天数TP去除率较前后时间段有明显的下降(7.8%~32.5%),同时还观测到3条沟渠在冬季前期和后期的水温显著高于冬季中期,这表明冬季中期相对较低的TP去除率可能是由于该时间段较低的水温(3.3~9.3℃)抑制了绿狐尾藻的生长发育,从而影响了磷的去除,TP去除率与水温波动趋势基本一致证明了这一点。相比于高温,大部分湿地植物都对低温更为敏感,有研究表明温度低于10℃就会显著抑制水芹菜、

黑藻、金鱼藻等湿地植物的生长^[26],如果温度低于6.4℃甚至能引起环境耐受植物水葫芦的枯萎死亡^[27],因此湿地或生态沟渠冬季的应用一直是水生态修复的难题,而绿狐尾藻在3.3℃的低水温下依旧能够生存,并维持较高的TP去除率,表明绿狐尾藻是一种适合冬季除磷的湿地植物。

为了分析生态沟渠中废水TP浓度的空间变化,本研究还采用了线性模型对TP浓度变化与绿狐尾藻沟渠长度的关系进行了拟合。由图3可以看出,3条生态沟渠的进水TP浓度随着沟距增加而显著降低,该结论与Luo等^[12]的研究结果相似,在处理生猪养殖废水的绿狐尾藻人工湿地中进水TP浓度随着湿地长度增加而降低。同时基于基建成本考虑,该模型对于绿狐尾藻生态沟渠的建设也具有一定指导意义。由模型公式得出,要使10、25 cm和40 cm水深的绿狐尾藻生态沟渠出水达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类(TP 0.2 mg·L⁻¹),只需将沟渠长度分别修建为22.0、20.8 m和16.8 m。

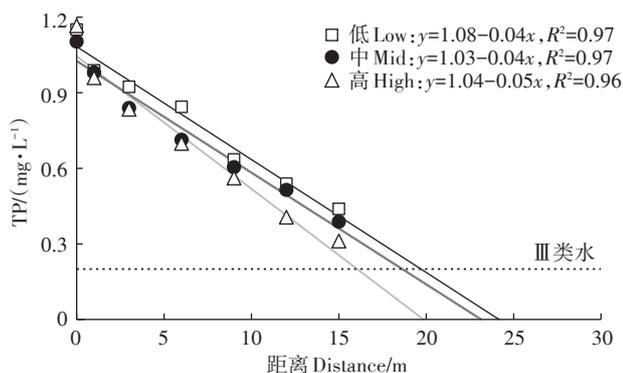


图3 绿狐尾藻生态沟渠中TP浓度随距离的空间变化

Figure 3 Spatial variation of the TP concentrations in the *M. aquaticum* ditches with increasing distance

2.3 磷质量平衡

生态沟渠对于磷的去除主要包括物理化学吸附、沉淀、沟渠植物吸收和基质堆积沉积(聚磷菌过量吸收直接归类到基质吸附),而所有的去除过程主要是依赖于水生植物和沟渠基质两种介质,因此基质和植物对生态沟渠TP的去除尤为重要。

3条生态沟渠的填充基质对TP的吸附量随水位的变化而变化,分别为24.49、13.48 g和19.50 g,其中以低水位生态沟渠对磷的吸附量最高,占进水TP质量的31.58%,高水位生态沟渠次之(图4),这可能归结于3点:(1)在低水位时,绿狐尾藻根部与底层基质

接触形成根-土界面(观测到低水位绿狐尾藻扎根到基质中),从而增加了泥沙拦截量和TP吸附效率;(2)绿狐尾藻的植物根系分泌物和根系泌氧促进了沟渠基质中微生物的活动,尤其是聚磷菌的活动;(3)低水位条件下的低水温有利于DO进入水体,促进了聚磷菌的好氧聚磷功能的发挥。徐红灯等^[28]也发现在人工湿地或生态沟渠中,水生植物的存在会加速磷的界面交换和传递,从而促进磷的截留和吸附。而高水位生态沟渠基质相对较强的磷吸附沉积能力,可能是由于高水位在冬季有更适宜绿狐尾藻生长的水温和空间,从而生物量更大,这促进了磷的拦截和沉积,该结论与张树楠等^[9]的结果相似,同等条件下生物量大的生态沟渠泥沙沉降效果更好。

此外,植物吸收是生态沟渠磷去除的另一重要途径,但植物的养分吸收速率受其净生长力(生长速率、生物量)和植物组织中养分浓度的限制^[12,29]。在本研究中,低、中、高3条生态沟渠在整个冬季刈割的绿狐尾藻干物质量分别为215.1、380.7 g和403.7 g,基于植物刈割去除的TP质量分别为23.48、33.71 g和38.10 g,占进水TP质量的30.27%~48.75%(图4),与Greenway等^[30]24%~80%的TP吸收量和Zhang等^[31]4%~39%的TP吸收量相近,但低于Kumwimba等^[32]的59.7%。在各项研究中,湿地或生态沟渠种植的水生植物因品种、环境养分含量和气候的不同也会导致植物吸收养分的方式和内部养分的浓度发生变化^[1],但不可否认植物在生态沟渠中对营养物质的去除发挥着重要作用,尤其是磷的去除。因为磷元素不同于氮元素,不能以气态形式去除,因此只能通过植物吸收或者基质吸附、沉淀等方式去除。

本研究通过磷质量平衡发现绿狐尾藻生态沟渠

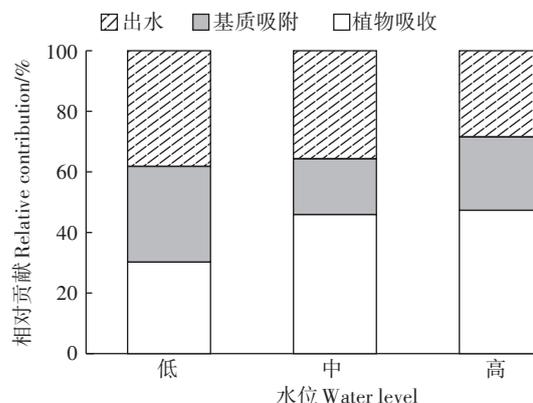


图4 各部分对TP去除的相对贡献

Figure 4 The relative contribution of each part to TP removal

TP的去除也主要依赖于绿狐尾藻的吸收和基质的沉积吸附,而且相比于基质的沉积吸附(18.38%~31.58%),植物吸收贡献更大(30.27%~48.75%)(图4和图5)。在冬季低水位条件下生态沟渠植物TP吸收量虽然低于中水位和高水位,但是其基质吸附量却相反。常规状态下,绿狐尾藻一直是作为一种半沉水植物应用于人工湿地或生态沟渠,由于水位较高其根部很难扎进土壤,但是在本研究中发现,绿狐尾藻在冬季低水位状态下可扎根于土壤基质,通过根系分泌和拦截来提高基质对磷的吸附,因此低水位(61.86%)和中水位(64.82%)有相似的TP去除率(图5)。沟渠基质中的聚磷菌虽然能在高DO状态下过量吸收磷,但在低DO状态也有重新释放体内磷的风险^[23],因此通过提高DO浓度来提高沟渠水体TP去除率还需要慎重对待。此外,植物根系分泌物的絮凝作用也有可能是低水位绿狐尾藻生态沟渠基质磷吸附量更高的另一个重要原因。郑明杨等^[33]发现湿地植物水葫芦的根系分泌物有与微生物胞外聚合物类似的成分和絮凝作用,对水体悬浮物有良好的絮凝效果^[34],而目前对于绿狐尾藻根系分泌物的絮凝作用相关研究较少,因此将在后续试验中进一步研究。

3 结论

(1)在低温条件下,绿狐尾藻生态沟渠可以有效去除农业废水中的TP,整个冬季的平均TP去除率为61.9%~73.7%。

(2)高水位由于更高的水温和水下生长空间,而显著提高绿狐尾藻的生长活性和生物量,从而促进TP的去除。依据线性拟合模型,低、中、高水位沟渠分别修建长度为22.0、20.8 m和16.8 m,出水即能达

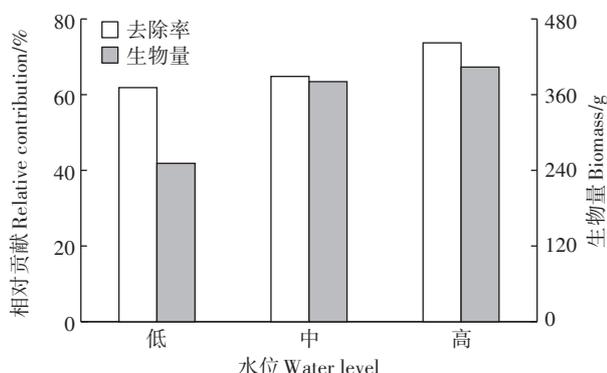


图5 绿狐尾藻干物质生物量与TP去除率

Figure 5 The relationship between dry biomass of *M. aquaticum* and TP removal efficiency

到《地表水环境质量标准》Ⅲ类。

(3)依据磷质量平衡,农村生活污水中TP的去除主要依赖于绿狐尾藻的吸收,其次为沟渠基质的吸附沉淀,其中低水位沟渠有更好的TP拦截和吸附效果。

参考文献:

- [1] Nsenga Kumwimba M, Zhu B, Wang T, et al. Nutrient dynamics and retention in a vegetated drainage ditch receiving nutrient-rich sewage at low temperatures[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 741: 140268.
- [2] Kröger R, Moore M T. Phosphorus dynamics within agricultural drainage ditches in the lower Mississippi Alluvial Valley[J]. *Ecol Eng*, 2011, 37(11): 1905-1909.
- [3] Kumwimba M N, Zhu B. Effectiveness of vegetated drainage ditches for domestic sewage effluent mitigation[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2017, 98(5): 682-689.
- [4] 李红芳, 刘锋, 肖润林, 等. 水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1): 157-163. LI Hong-fang, LIU Feng, XIAO Run-lin, et al. Effects of aquatic plants on phosphorus adsorption characteristics by sediments in ecological ditches[J]. *Journal of Agro-Environment Sciences*, 2016, 35(1): 157-163.
- [5] 刘福兴, 陈桂发, 付子轼, 等. 不同构造生态沟渠的农田面源污染物处理能力及应用效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(6): 787-794. LIU Fu-xing, CHEN Gui-fa, FU Zi-shi, et al. Comparison on effects of practical application of ecological ditches with different construction in treating agricultural non-point pollutants[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(6): 787-794.
- [6] Tyler H L, Moore M T, Locke M A. Influence of three aquatic macrophytes on mitigation of nitrogen species from agricultural runoff[J]. *Water Air Soil Poll*, 2012, 223(6): 3227-3236.
- [7] Moore M T, Denton D L, Cooper C M, et al. Use of vegetated agricultural drainage ditches to decrease pesticide transport from tomato and alfalfa fields in California, USA[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2011, 30(5): 1044-1049.
- [8] 钱银飞, 邓国强, 陈先茂, 等. 沟渠不同水生植物对双季稻田氮磷污染物净化效果的研究[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(12): 103-106. QIAN Yin-fei, DENG Guo-qiang, CHEN Xian-mao, et al. Purifying effects of different aquatic macrophytes in ditch on nitrogen and phosphorus pollutants from paddy field of double-cropping rice[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2015, 27(12): 103-106.
- [9] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. *环境科学*, 2015, 36(12): 4516-4522. ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, et al. Interception effect of ecological ditches on nitrogen and phosphorus pollutants[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12): 4516-4522.
- [10] Wang T, Zhu B, Zhou M. Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage in the hilly area of the central Sichuan basin, China[J]. *J Hydrol*, 2019, 570: 839-849.
- [11] Kumwimba M N, Zhu B, Muyembe D K, et al. Growth characteristics and nutrient removal capability of eco-ditch plants in mesocosm sediment receiving primary domestic wastewater[J]. *Environmental Sci-*

- ence & Pollution Research*, 2017, 24(4): 23926–23938.
- [12] Luo P, Liu F, Liu X, et al. Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum*[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 576:490–497.
- [13] Liu F, Zhang S, Luo P, et al. Purification and reuse of non-point source wastewater via *Myriophyllum*-based integrative biotechnology: A review[J]. *Bioresource Technol*, 2018, 248:3–11.
- [14] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. National Environmental Protection Administration Book Edition Committee. Water and wastewater monitoring and analysis methods[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] Chung A K C, Wu Y, Tam N F Y, et al. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater[J]. *Ecol Eng*, 2008, 32(1): 81–89.
- [16] Wu H, Zhang J, Li P, et al. Nutrient removal in constructed microcosm wetlands for treating polluted river water in northern China[J]. *Ecol Eng*, 2011, 37(4): 560–568.
- [17] 朱晓瑞, 张春雪, 郑向群, 等. 天津地区生态沟渠不同植物配置对氮磷去除效果研究[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(2): 170–175. ZHU Xiao-rui, ZHANG Chun-xue, ZHENG Xiang-qun, et al. Study on nitrogen and phosphorus purification effect of different plant configurations in ecological ditch in Tianjin area[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(2): 170–175.
- [18] Klomjek P, Nitisoravut S. Constructed treatment wetland: A study of eight plant species under saline conditions[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(5): 585–593.
- [19] 顾兆俊, 刘兴国, 程果锋, 等. 淡水池塘4种生态沟渠净化效果研究[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(13): 285–291. GU Zhao-jun, LIU Xing-guo, CHENG Guo-feng, et al. Study on purification effect of four ecological ditches of freshwater ponds[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(13): 285–291.
- [20] Poach M E, Hunt P G, Reddy G B, et al. Swine wastewater treatment by marsh-pond-marsh constructed wetlands under varying nitrogen loads[J]. *Ecol Eng*, 2004, 23(3): 165–175.
- [21] Reddy G B, Hunt P G, Phillips R, et al. Treatment of swine wastewater in marsh-pond-marsh constructed wetlands[J]. *Water Sci Technol*, 2001, 44(11/12): 545–550.
- [22] Zhang S, Liu F, Huang Z, et al. Are vegetated drainage ditches effective for nitrogen removal under cold temperatures? [J]. *Bioresource Technol*, 2020, 301: 122744.
- [23] 刘锋, 罗沛, 刘新亮, 等. 绿狐尾藻生态湿地处理污染水体的研究评述[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1020–1029. LIU Feng, LUO Pei, LIU Xin-liang, et al. Research advances of *Myriophyllum* spp.: Based wetland for wastewater treatment and resource utilization [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6): 1020–1029.
- [24] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 380(1/2/3): 48–65.
- [25] He W, Luo J, Xing L, et al. Effects of temperature-control curtain on algae biomass and dissolved oxygen in a large stratified reservoir: Sanbanxi reservoir case study[J]. *J Environ Manage*, 2019, 248: 109250.
- [26] 周金波, 金树权, 姚永如, 等. 冬季低温条件下6种水生植物水质氮、磷净化能力比较[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(2): 369–372. ZHOU Jin-bo, JIN Shu-quan, YAO Yong-ru, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus purification ability of six aquatic macrophytes under low temperature in winter[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, 23(2): 369–372.
- [27] 林海, 薛宇航, 董颖博, 等. 低温下湿地植物修复微污染水体技术研究进展[J]. 环境科技, 2019, 32(3): 68–72. LIN Hai, XUE Yu-hang, DONG Ying-bo, et al. Review of wetland phytoremediation of micro-polluted water at low temperature[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 32(3): 68–72.
- [28] 徐红灯, 席北斗, 王京刚, 等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应[J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 84–88. XU Hong-deng, XI Bei-dou, WANG Jing-gang, et al. Study on the interception of nitrogen and phosphorus by macrophyte in agriculture drainage ditch[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(2): 84–88.
- [29] Luo P, Liu F, Zhang S, et al. Nitrogen removal and recovery from lagoon-pretreated swine wastewater by constructed wetlands under sustainable plant harvesting management[J]. *Bioresource Technol*, 2018, 258: 247–254.
- [30] Greenway M, Woolley A. Changes in plant biomass and nutrient removal over 3 years in a constructed wetland in Cairns, Australia[J]. *Water Sci Technol*, 2001, 44(11/12): 303–310.
- [31] Zhang Z, Rengel Z, Meney K. Interactive effects of nitrogen and phosphorus loadings on nutrient removal from simulated wastewater using *Schoenoplectus validus* in wetland microcosms[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(11): 1823–1828.
- [32] Kumwimba M N, Zhu B, Muyembe D K. Estimation of the removal efficiency of heavy metals and nutrients from ecological drainage ditches treating town sewage during dry and wet seasons[J]. *Environ Monit Assess*, 2017, 189(9): 434.
- [33] 郑明扬, 陈邵柠, 宋慧娟, 等. 水葫芦促进农田灌溉水中悬浮态镉沉降性能研究[J]. 湖南农业科学, 2020(9): 42–46. ZHENG Ming-yang, CHEN Shao-ning, SONG Hui-juan, et al. Enhanced removal of suspended cadmium from farmland irrigation water by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. *Human Agricultural Sciences*, 2020(9): 42–46.
- [34] More T T, Yadav J S S, Yan S, et al. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications[J]. *J Environ Manage*, 2014, 144: 1–25.