

不同类型人工湿地对污染物的去除效果

徐 磊¹, 戴惠东², 彭剑峰^{1,3}, 原璐彬¹, 张 坚², 周姣艳²

(1. 清华苏州环境创新研究院, 江苏 苏州 215000; 2. 昆山市水务水文调度中心, 江苏 苏州 215300;
3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要:以昆山市水环境治理研究基地内 5 种类型中试湿地为研究对象。通过模拟不同质量浓度污水在不同条件下, 水生生态系统对水环境的修复效果及抗负荷能力, 考察不同类型湿地对污染物的去除效果。研究可为实际工程中湿地选型设计及运行提供理论指导。

关键词:人工湿地; 污水浓度; 净化效果

中图分类号: X703

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2022)12-0053-0005

Research on effectiveness of different types of artificial wetlands on pollutant removal

XU Lei¹, DAI Huidong², PENG Jianfeng^{1,3}, YUAN Lubin¹,
ZHANG Jian², ZHOU Jiaoyan²

(1. Research Institute for Environmental Innovation (Suzhou) Tsinghua, Suzhou 215000, China;
2. Water hydrology dispatching center in Kunshan, Suzhou 215300, China;
3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In this study, five different types of pilot wetlands in Kunshan Water Environment Research and Governance Research Base were studied. Through the simulation of different mass concentrations of sewage in different conditions, the restoration effect of water ecosystems on the water environment and the load resistance are studied, and the effect of different types of wetlands on pollutant removal are investigated. The study can provide theoretical guidance for the design and operation of wetland selection in practical projects.

Key words: artificial wetland; sewage concentration; purification effect

人工湿地主要利用填料、植物、微生物三者的协同作用对污水进行物理、化学、生物处理, 以达到水质净化效果。国内外针对某单一人工湿地研究较多^[1-7], 在中试规模下, 不同类型人工湿地对不同质量浓度污染物去除效果研究较少。

本研究着重探讨不同类型人工湿地在不同条

件下对水中氮磷污染物的消纳能力, 以期在城市污水人工湿地设计及管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 湿地工程简介

研究受试于昆山市水环境治理研究基地中构

收稿日期: 2022-02-24

基金项目: 苏州市不同类型城镇污水处理厂尾水湿地净化效能研究项目(2021014)

作者简介: 徐磊(1992—), 男, 硕士, 研究方向为水污染控制与生态修复。E-mail: xulei@tsinghua-riet.com

建的人工湿地中试系统,包含5种人工湿地,分别为垂直潜流湿地、潮汐流湿地、自然河道湿地、复合湿地、表流湿地。各湿地尺寸结构均为12.0 m×4.0 m×1.8 m,湿地结构见图1,湿地中填料均为1~3 cm砾石,根据湿地类型选择所加填料深度。

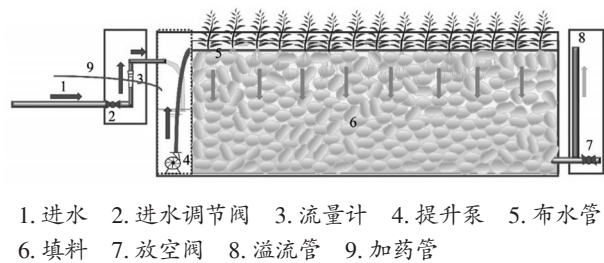


图1 人工湿地

1.2 湿地运行参数及植物选型

植物是湿地净化中的核心要素,人工湿地植物选型需要综合考虑当地气候、景观效果、处理效果、耐污能力等因素^[8]。不同植物适用于不同污水处理,郝明旭等^[9]研究表明风车草(*Cyperus alternifolius*)对猪场废水具有较强的耐受性及净化能力,长苞香蒲(*Typha domingensis*)对高重金属、高电导率、高pH的工业污水具有较好的净化效果^[10]。人工湿地植物选择要做到因地制宜,本研究中受试植物选择结合昆山市当地植物资源及水土气候条件,以鸢尾(*Iris wilsonii*)、菖蒲(*Acorus gramineus var. pusillus*)、睡莲(*Nymphaea alba tetragona*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、再力花(*Hardy canna*)、风车草、美人蕉(*Canna indica*)为受试植物,各湿地运行参数见表1所示。

表1 各湿地运行参数

湿地类型	水力负荷/ (m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	流速/ (m ³ ·d ⁻¹)	停留时间/d
垂直潜流湿地	0.458	22	1.5
潮汐流湿地	0.458	22	1.5
自然河道	0.917	44	1.8
复合湿地	0.250	12	2.0
表流湿地	0.083	4	3.3

1.3 加药质量浓度配置

研究通过加入葡萄糖、KH₂PO₄、NH₄Cl、NaNO₃调节进水COD、PO₄³⁺、NH₄⁺-N、NO₃-N质量浓度。实验总共分为4个阶段,表2所示为各阶段指标进水质量浓度。

表2 各阶段人工湿地配水质量浓度 单位:mg/L

指标	NH ₄ ⁺ -N	COD	PO ₄ ³⁺	NO ₃ -N
第Ⅰ阶段	1.5	30	0.3	5
第Ⅱ阶段	2.0	40	0.3	10
第Ⅲ阶段	15.0	50	0.5	0
第Ⅳ阶段	20.0	70	1.0	0

1.4 检测指标及方法

对运行稳定后的进出水水样进行采样分析(n=6),指标、分析仪器及方法如表3所示。

表3 水质分析方法

指标	方法	仪器
COD	重铬酸钾氧化法(哈希)	DR2700
NH ₄ ⁺ -N	水杨酸法(哈希)	DR2700
TP	PhosVer®3 消解-抗坏血酸法(哈希)	DR2700
NO ₃ -N	氨基磺酸紫外分光光度法	DR2700
温度	哈希溶氧仪	HQ30d

1.5 数据分析

使用IBM SPSS Statistic中的t检验,检验进出水的差异性,当P<0.05即可认为差异显著,运用Origin软件制作箱图。

2 结果与讨论

2.1 垂直潜流湿地对污染物的削减效果

进水COD质量浓度由Ⅰ阶段的(28.67±6.41) mg/L增至Ⅳ阶段的(78.80±23.70) mg/L,而出水COD均能保持低于30 mg/L,优于国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准Ⅳ类水。该结果表明,垂直潜流湿地有良好的COD处理能力,且随着污水中COD质量浓度的提高,植物对其的消纳量逐渐增加。同时,NO₃⁻-N质量浓度亦显著降低(P<0.001),其平均去除率约为60%。由于人工湿地底部较深,当污水流至底部时DO质量浓度低,长期驯化后,可形成反硝化区间,消耗其中NO₃⁻-N污染物。该结果与汤显强等^[11]在对间歇曝气垂直潜流湿地氮磷去除研究中表明的厌氧环境利于NO₃⁻-N的去除的结论相一致。当NH₄⁺-N质量浓度大于(16.12±2.17) mg/L时,湿地处理效率呈下降趋势。然而,对于PO₄³⁻而言,当进水质量浓度为(0.39±0.19) mg/L时,去除率仅为(12.37±36.20)%,去除效果不明显。

但当进水质量浓度达到 (1.00 ± 0.24) mg/L时,去除率可达 $(70.90 \pm 1.98)\%$ 。由此可知,当 PO_4^{3-} 质量浓度低于0.3 mg/L时,其处理效率较低,随着进水 PO_4^{3-} 质量浓度的增加,处理效率越高,详见图2。

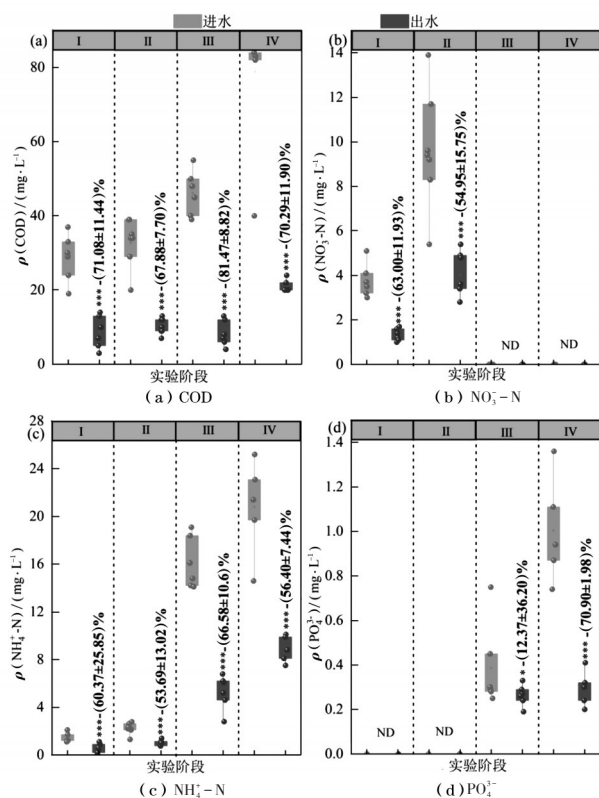


图2 垂直潜流湿地各阶段

聂志丹等^[12]在对3种不同类型人工湿地对富营养化水体的研究中发现,垂直潜流湿地对氮磷处理效率明显优于表面流与潜流人工湿地,该研究中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与TP去除率分别为33.2%与52.8%。明显低于本研究中的处理效率,这可能是由于池体设计及所种植的植物差异所引起的。

2.2 潮汐流湿地对污染物的削减效果

当COD进水质量浓度为 (41.83 ± 19.14) mg/L时,该人工湿地对COD表现出良好的去除效果。但当进水质量浓度为 (79.80 ± 12.26) mg/L(第IV阶段)时,出水质量浓度达到 (23.00 ± 3.32) mg/L,虽优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的准IV类水,但可推断随着进水质量浓度不断增加,湿地达到纳污极限,去除率下降。湿地对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除由进水质量浓度为 (4.23 ± 1.21) mg/L的 $(66.31 \pm 7.19)\%$ 降至进水质量浓度为 (9.27 ± 2.59) mg/L的 $(54.79 \pm 22.23)\%$,表明潮汐流湿地对硝酸盐的纳污量在高浓度下受到抑制。

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率先降低再升高。这可能是由于在湿地运行中,通过接触一段时间的污染物,植物

和内部微生物得到驯化,在此阶段中,湿地对该污染物的纳污能力逐渐提高。湿地 PO_4^{3-} 进出水质量浓度分别为 (0.33 ± 0.12) mg/L、 (0.25 ± 0.14) mg/L和 (1.04 ± 0.39) mg/L、 (0.29 ± 0.05) mg/L,出水均能达到IV类水标准,详见图3。

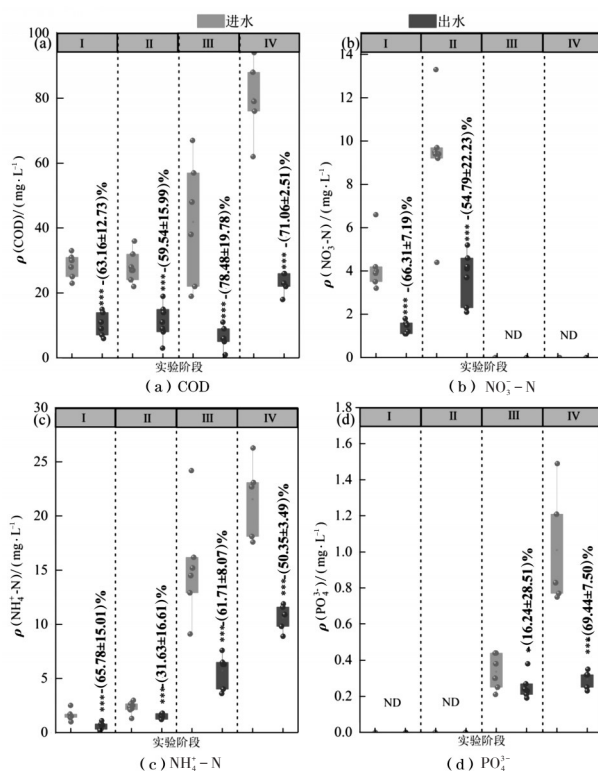


图3 潮汐流湿地各阶段

Li等^[13]对实验室规模的潮汐流湿地氮磷去除影响研究中表明,当总有机碳进水负荷为 $10 \sim 700$ g/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$), $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进水负荷为 17 g/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)时,其去除率均能达到95%。远远高于本中试研究结果,这是由于现场中试受外界多种环境因素影响,也难以将各方面因素控制至实验室水平。

2.3 自然河道湿地对污染物的削减效果

自然河道湿地对COD、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 PO_4^{3-} 的处理效率较低(图4),如各阶段COD处理效率仅为 $(32.74 \pm 15.90)\%$ (I)、 $(12.97 \pm 7.49)\%$ (II)、 $(69.04 \pm 11.10)\%$ (III)、 $(28.86 \pm 14.48)\%$ (IV)。除第III阶段外,各阶段出水COD均有大于30 mg/L的样点存在。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进水质量浓度为2~3 mg/L时,出水质量浓度难以降至准IV类水以下,且各指标出水水质不稳定。

2.4 复合湿地对污染物的削减效果

复合湿地各阶段中污染物出水相对稳定。COD去除率如图5所示。除第II阶段表现出与上述相同趋

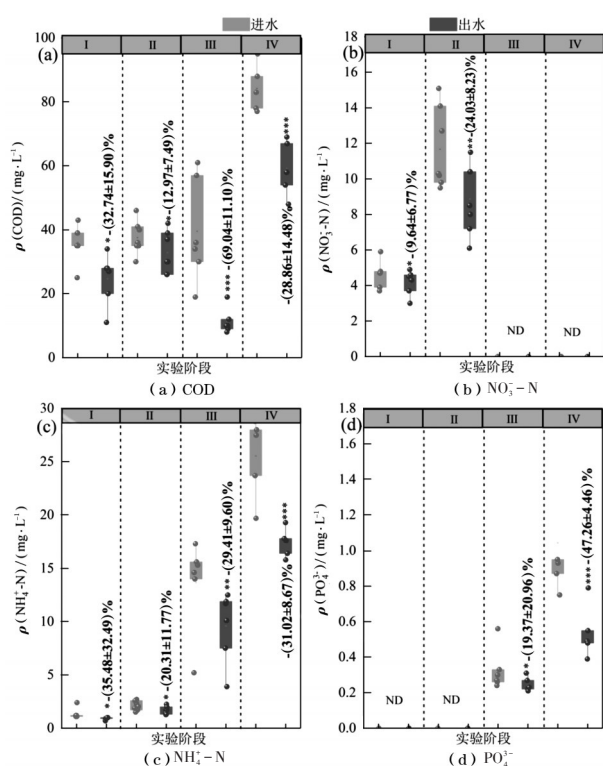


图4 自然河道湿地各阶段

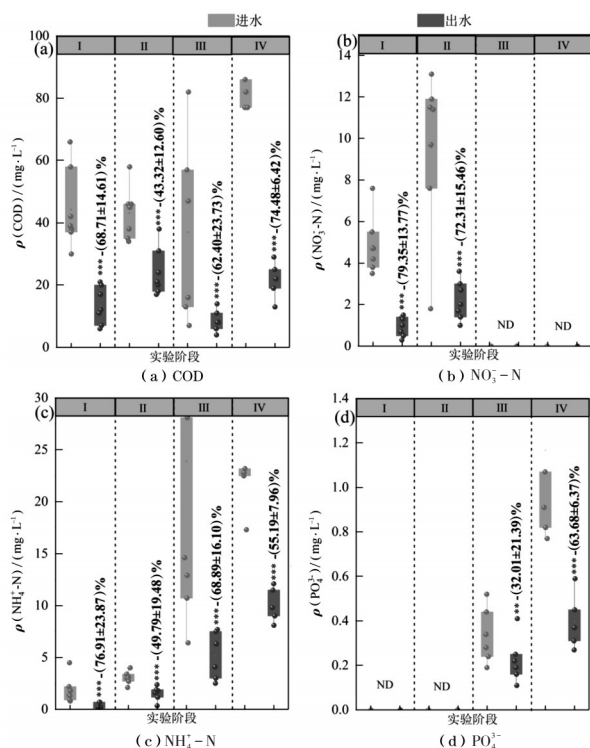


图5 复合湿地各阶段

势外,当进水COD质量浓度增加至 (85.80 ± 12.44) mg/L,并未出现去除率降低的现象。表明在此状态下,其对COD未达至纳污极限。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进水由第I阶段的 (4.86 ± 1.38) mg/L增至II阶段的 (9.57 ± 3.86) mg/L,分

别去除了 $(79.35 \pm 13.77)\%$ 与 $(72.31 \pm 15.46)\%$,均有较高的去除效果。复合湿地对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有稳定高效的去除效果,随质量浓度由低到高去除率分别为 $(76.91 \pm 23.87)\%$, $(49.79 \pm 19.48)\%$, $(68.89 \pm 16.10)\%$, $(55.19 \pm 7.96)\%$,表明复合湿地对低质量浓度 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 水体亦有较好的处理效果,针对高质量浓度含 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 水体处理效果也能达到50%以上。并且,复合湿地对 PO_4^{3-} 的去除由第III阶段的 $(32.01 \pm 21.39)\%$ 增至第IV阶段的 $(63.68 \pm 6.37)\%$ (图5d),且出水质量浓度均能达到IV类水标准。该结果表明复合湿地各指标均能达到稳定出水,且处理效率较高,生态结构稳固。

余俊霞等^[14]以表流-潜流-沉水植物塘的串联式人工湿地为研究对象,当复合湿地水力负荷在 $0.12 \sim 0.24 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水水质均能达到准IV类水标准, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果在 $36.94\% \sim 74.68\%$,与本研究结果大致相同。

2.5 表流湿地对各污染物的削减效果

如图6所示,表流人工湿地对高质量浓度COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 PO_4^{3-} 有去除效果显著,其去除率分别为 $(63.44 \pm 10.85)\%$, $(42.33 \pm 9.61)\%$, $(35.15 \pm 7.69)\%$ 。对 PO_4^{3-} 去除效果不佳,对高质量浓度COD有良好的去除效果。第I、II、III阶段的COD去除率仅为 $(36.51 \pm 22.58)\%$, $(26.99 \pm 10.02)\%$, $(30.20 \pm 14.44)\%$ 。

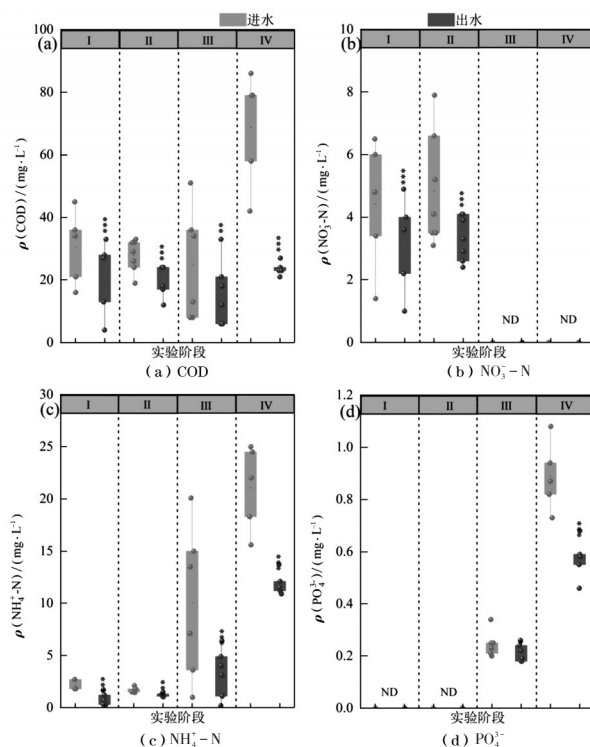


图6 表流湿地各阶段

反之, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 除在第Ⅱ阶段外,各阶段均保持良好去除率。表明在本研究中,以砾石为填料,以再力花、美人蕉、鸢尾为所培植物的表面流人工湿地在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 处理方面效果较好。

李杨克等^[15]对昆山市滨河城市广场一表面流人工湿地进行长达18个月的调研,发现当停留时间为15 h时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TP去除效率为38.4%和35.6%, TP去除与本研究高质量浓度磷去除效果相当,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率却较本研究低。

3 结 论

本研究通过现场中试实验,发现不同类型湿地对不同质量浓度污染物去除率大多呈现出随污染物浓度的增加先有略微降低再升高,最后达到纳污饱和而降低的趋势。经综合评估,本研究中各湿地对污染物削减能力强弱如下:复合湿地>垂直潜流湿地≈潮汐流湿地>表流湿地>自然仿真河道湿地。复合湿地对各污染物的去除效果稳定高效,其对各指标去除效率均能达到60%以上。另外,复合湿地具有较强的抗负荷能力,能有效应对各污染物变化带来的冲击。

参考文献

- [4] 李小艳,丁爱中,郑蕾,等. 1990—2015年人工湿地在我国污水处理中的应用分析[J]. 环境工程,2018,36(4): 11-18.
- [5] CARVALHO P N, ARIAS C A, BRIX H. Constructed wetlands for water treatment: new developments [J]. Water, 2017,9(6):397.
- [6] BADEJO A A, OMOLE D O, NDAMBUKI J M, et al. Municipal wastewater treatment using sequential activated sludge reactor and vegetated submerged bed constructed wetland planted with *Vetiveria zizanioides* [J]. Ecological Engineering, 2017(99):525-529.
- [7] 魏俊,赵梦飞,刘伟荣,等. 我国尾水型人工湿地发展现状[J]. 中国给水排水,2019,35(2):29-33.
- [8] 王婷,耿绍波,常高峰. 人工湿地植物对生活污水净化作用的研究进展[J]. 环境科学与技术,2013(增刊1): 210-212,227.
- [9] 郝明旭,霍莉莉,吴珊珊. 人工湿地植物水体净化效能研究进展[J]. 环境工程,2017,35(8):5-10.
- [10] MAINE M A, SUNE N, HADAD H, et al. Removal efficiency of a constructed wetland for wastewater treatment according to vegetation dominance [J]. Chemosphere, 2007,68(6):1105-1113.
- [11] 汤显强,李金中,李学菊,等. 间歇曝气对人工垂直潜流湿地氮磷去除性能的影响[J]. 环境科学,2008,29(4): 896-901.
- [12] 聂志丹,年跃刚,金相灿,等. 3种类型人工湿地处理富营养化水体中试比较研究[J]. 环境科学,2007(8): 1675-1680.
- [13] Li C Y, Wu S B, Dong R J. Dynamics of organic matter, nitrogen and phosphorus removal and their interactions in a tidal operated constructed wetland [J]. Journal of Environmental Management, 2015(151):310-316.
- [14] 余俊霞,陈双荣,刘凌言,等. 复合人工湿地系统对低污染水总氮的净化效果及其微生物群落结构特征[J]. 环境工程,2022,40(1):13-20.
- [15] 李杨克,郑夕春,费一鸣,等. 滨河城市广场表面流人工湿地的水质净化效能[J]. 中国给水排水,2017,33(5): 55-60.
- [6] 陈钟,陈星辰,陈凯. 安全生产标准化“1+N”模型的建立与应用[J]. 水利建设与管理,2020,40(5):67-71.
- [7] 程江洲,朱偲,付文龙,等. 基于贝叶斯网络的水力发电系统动态风险评估方法[J]. 水利学报,2019,50(5): 631-640.
- [8] 金远征,崔守臣,赵礼,等. 基于改进LEC法的水利施工安全风险评估与管控[J]. 人民长江,2018,49(19): 63-66.
- [9] 徐铭,陈凯,施翔,等. 安全生产网格化监管在基层水管单位的应用实践[J]. 江苏水利,2019(12):63-65.
- [10] 张甲,裴晓. 巴基斯坦码头项目风险管理分析和策略分析[J]. 中国设备工程,2021(2):245-246.
- [11] 秦根泉,田慧,苏晓林. 土坝渗压分析一元线性回归模型构建与应用[J]. 水利建设与管理,2022,42(3): 73-80.

(上接第48页)