

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.013

# 多级人工湿地对生活污水中磷素的去除规律

翟俊<sup>1</sup>, 翟豪冲<sup>1</sup>, 马宏璞<sup>1</sup>, 刘文博<sup>1</sup>, 成水平<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 以生活污水为处理对象,探究总磷、颗粒磷、可溶无机磷和可溶有机磷在多级人工湿地中的去除过程。结果表明,湿地对总磷的去除速率能够稳定达到  $0.83 \sim 0.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,总磷去除速率与污水总磷浓度显著正相关,第一级湿地能够去除 57% 的总磷。分析湿地进出水中磷的形态发现,湿地对污水中的颗粒磷和可溶无机磷的去除效果较好。污水中的颗粒磷和可溶有机磷主要在第一级湿地中被去除,而污水中的可溶无机磷在第二、三级湿地中被去除。因此,第一级湿地基质可采用廉价的碎石基质,而第二、三级湿地基质可采用对无机磷去除效果更好的基质。

**关键词:** 多级人工湿地; 生活污水; 磷素去除

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0075-05

## Mechanism of Phosphorus Removal from Domestic Sewage by Multi-stage Constructed Wetland

ZHAI Jun<sup>1</sup>, ZHAI Hao-chong<sup>1</sup>, MA Hong-pu<sup>1</sup>, LIU Wen-bo<sup>1</sup>, CHENG Shui-ping<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The removal of total phosphorus, particulate phosphorus, soluble inorganic phosphorus and soluble organic phosphorus from domestic sewage in a multi-stage constructed wetland was explored. The removal efficiency of total phosphorus per unit area of the wetland could stably reach  $0.83 \sim 0.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , and the total phosphorus removal efficiency per unit area was significantly positively correlated with the total phosphorus concentration in the sewage. In the first stage wetland, 57% of total phosphorus was removed. By analyzing different forms of phosphorus in the influent and effluent of the wetland, it was found that better removal efficiency of particulate phosphorus and soluble inorganic phosphorus was achieved in the wetland. Particulate phosphorus and soluble organic phosphorus in sewage were mainly removed in the first stage wetland, while soluble inorganic phosphorus was removed in the second and third stage wetland. Therefore, cheap gravel could be selected as matrix in the first stage wetland, and matrix with better removal efficiency of inorganic phosphorus could be applied in the second and third stage wetland.

**Key words:** multi-stage constructed wetland; domestic sewage; phosphorus removal

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878093)  
通信作者: 翟俊 E-mail: zhaijun99@126.com

控制城镇污水磷的排放是解决水体富营养化的有效途径,人工湿地不仅能够去除生活污水中的氮、磷,而且投资费用低、适应性好。湿地除磷主要由基质通过拦截吸附、沉淀和离子交换等作用完成,表面流人工湿地通过基质的吸附作用可以去除污水中40%的磷素<sup>[1]</sup>。虽然植物本身的除磷作用有限,但是在其发达的根系上可以附着大量微生物形成生物膜,植物表层的膜系统是重要的磷富集库<sup>[2]</sup>,植物根际分泌物能够促进微生物分泌胞外聚合物来降解污染物<sup>[3]</sup>。

传统单一人工湿地占地面积大、除磷效率低且不稳定,出水水质往往难以满足污水排放标准,生命周期在3~5年<sup>[4]</sup>。垂直流人工湿地水力负荷高、处理效果稳定、输氧能力强,多级人工湿地可以通过交替厌氧好氧环境提高污水中氮、磷的去除效果。复合垂直流人工湿地除磷稳定性高、出水磷浓度低,生命周期可达5~10年<sup>[4]</sup>。而多级人工湿地对于不同形态磷素的去除能力及其在应对易波动进水时磷素的去除规律尚不明晰。因此,笔者采用多级人工湿地处理学生宿舍生活污水,分析污水中磷素在湿地中的去除分布规律和沿程降解规律,以便为多级人工湿地的设计和在低能耗城镇污水厂的推广应用提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

湿地进水来自学生宿舍的生活污水,具体水质:COD为100~614 mg/L,平均值为(422.28±159.62) mg/L;TN为10.6~87.3 mg/L,平均值为(58.71±23.24) mg/L;TP为1.40~20.69 mg/L,平均值为(9.69±4.60) mg/L;SS为21.4~327.3 mg/L,平均值为(168.68±108.15) mg/L;DO为0.25~4.32 mg/L,平均值为(1.23±1.28) mg/L;pH值为6.54~8.10,平均值为7.66±0.38。湿地基质选用碎石,碎石中含有SiO<sub>2</sub>,可以与磷酸根形成沉淀<sup>[5]</sup>,粒径为30~50 mm。基质层厚度为1.1 m,水深为1.0 m。植物选用风车草和黄花鸢尾。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 实验装置

实验装置主要包括调节池、多级人工湿地、反冲洗和回流系统(见图1)。实验分为2组,除植物分别栽种风车草和黄花鸢尾外,其他单元相同。多级人工湿地由3个有底无盖的圆柱形塑料反应器串联

而成,单个反应器的直径为1.3 m,高为1.5 m。每个反应器设有取样口,单个反应器内水流的形式为上进下出。

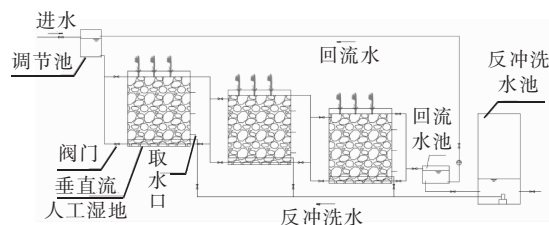


图1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

#### 1.2.2 装置运行与检测分析方法

湿地系统采用24 h连续流进水,水力停留时间为4 d,进水流量为0.65 m<sup>3</sup>/d,水力负荷为0.47 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)。实验期间,采集湿地进水和3个反应器出水各100 mL,周期为14 d,检测总磷、可溶性总磷及可溶性正磷酸盐浓度,测定方法参照《水和废水监测分析方法》(第4版)。

#### 1.3 数据处理与统计分析

所有数据均采用Microsoft Excel 2010 进行统计分析,采用Origin 2019 软件作图。

采用单位面积磷素去除速率来综合评价湿地的除磷性能,见式(1)。

$$K = \frac{Q \times (C_0 - C_i)}{A} \quad (1)$$

式中: $K$ 为单位面积磷素去除速率,g/(m<sup>2</sup>·d); $C_0$ 和 $C_i$ 分别为进、出水磷素浓度,mg/L; $Q$ 为进水流量,m<sup>3</sup>/d; $A$ 为湿地面积,m<sup>2</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对磷素的去除效果

湿地总磷浓度的变化如图2所示。可以看出,风车草组和黄花鸢尾组湿地出水总磷浓度平均值分别为(3.50±2.21)和(2.89±1.95) mg/L,分别能够去除污水中63.9%和70.1%的总磷, $K$ 值分别为1.01和1.11 g/(m<sup>2</sup>·d),范宏英<sup>[6]</sup>的研究表明,复合垂直流人工湿地处理生活污水过程中 $K$ 值约为0.48 g/(m<sup>2</sup>·d),本实验可达其约2.2倍。在湿地运行前期,湿地基质表面吸附位点多,固相与液相间磷素浓度梯度大,进水磷素被基质快速拦截吸附,湿地能够去除污水中90%的总磷,风车草组和黄花鸢尾组湿地的 $K$ 值分别达到1.71和1.77 g/(m<sup>2</sup>·d)。虽然基质对磷素的吸附速度快,但是由于湿地

总磷污染负荷高和基质吸附能力差导致基质的吸附位点被迅速耗尽,湿地吸附期的快速高效除磷通常是短暂的,本实验中其仅维持 30 d。Chang 等<sup>[7]</sup>的研究表明,垂直流湿地处理两种类型废水时高效吸附除磷效果保持了 10 d 左右,之后除磷性能开始下降,湿地由吸附期向稳定期过渡。湿地运行期间基质吸附除磷量所占总除磷量比例较小,与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等金属阳离子发生络合和沉淀反应生成固体磷酸盐相才是基质除磷的主要途径<sup>[8]</sup>,然而碎石中这些矿物质的含量通常较低,导致在湿地稳定期时总磷去除率降低且变化很大。在前期尽管基质看似饱和,但其实并不是,在之后的实验中,随着植物不断生长和生物膜逐渐形成,多级人工湿地去除了大量磷,风车草组和黄花鸢尾组湿地总磷去除  $K$  值分别达到 0.83 和 0.93  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

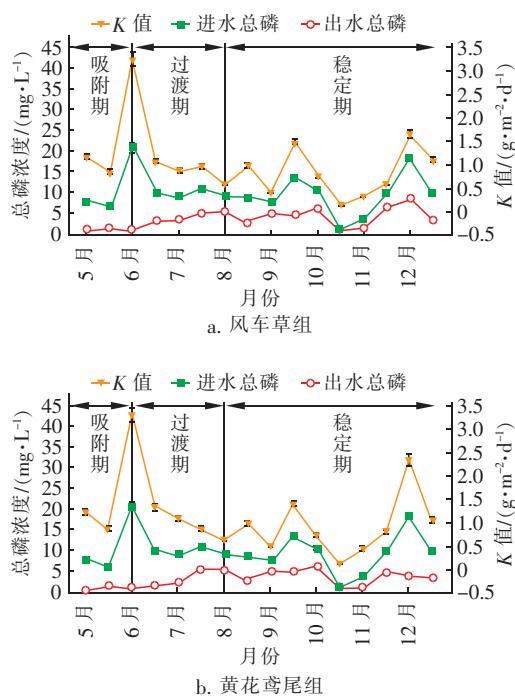


图2 湿地总磷浓度的变化

Fig. 2 Variation of total phosphorus in wetland

$K$  值和进水总磷浓度的相关性分析表明,  $K$  值的变化与进水总磷浓度呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 这说明高浓度进水总磷有利于提高湿地系统的  $K$  值。湿地进水中高浓度磷素有助于湿地基质快速吸附和系统内部微生物群落的生长发育, 进一步提高湿地的除磷能力和稳定性。可见, 该多级人工湿地可以应对进水磷浓度的大幅度波动, 并保持稳定高效的除磷能力。

## 2.2 湿地总磷的沿程变化

湿地总磷的沿程变化如图 3 所示。可知, 经过第一级湿地处理后风车草组和黄花鸢尾组湿地的平均出水总磷浓度分别为  $(6.17 \pm 3.13)$  以及  $(5.83 \pm 2.95)$   $\text{mg/L}$ , 对总磷去除的贡献率分别为 56.9% 和 56.8%,  $K$  值分别达到 1.72 和 1.89  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。风车草组第二级和第三级湿地平均出水总磷浓度分别为  $(5.01 \pm 3.08)$  和  $(3.50 \pm 2.21)$   $\text{mg/L}$ , 对总磷去除的贡献率分别为 18.7% 和 24.3%,  $K$  值分别为 0.57 和 0.74  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。黄花鸢尾组第二级和第三级湿地平均出水总磷浓度分别为  $(4.42 \pm 2.52)$  和  $(2.89 \pm 1.95)$   $\text{mg/L}$ , 对总磷去除的贡献率分别为 20.7% 和 22.5%,  $K$  值分别为 0.69 和 0.75  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。因此, 多级人工湿地对总磷的去除主要在第一级完成, 占总磷去除量的 57%, 第二级约占 20%, 第三级约占 23%; 在相同的占地面积下, 第一级湿地的  $K$  值是第二级和第三级的 2.3 ~ 3.0 倍。

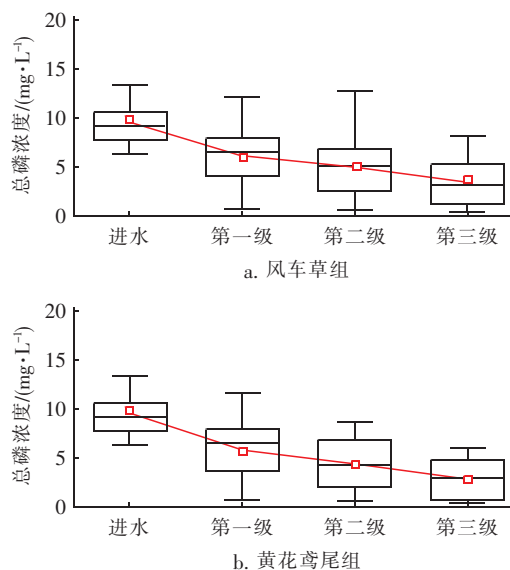


图3 湿地总磷的沿程变化

Fig. 3 Variation of total phosphorus along the wetland

## 2.3 不同形态的磷在湿地中的去除过程

两组湿地主要去除污水中的颗粒磷, 其次是可溶无机磷, 对可溶有机磷的去除量最少, 如图 4 所示 (负值代表出水比进水浓度高, 大于 100% 代表本形态磷去除量大于总磷去除量)。多级人工湿地对颗粒磷的去除占污水总磷去除量的 63%, 对可溶无机磷的去除占 33% ~ 36%。基质对无机磷的吸附沉淀过程是可逆的, 当外界环境和操作条件发生变化时, 平衡被破坏, 基质中的无机磷能够被释放再次回

到水体中,最终导致湿地运行过程中存在出水可溶无机磷浓度上升的情况。生物除磷是短期储磷,在其腐烂分解后返还到湿地系统,导致出水中可溶有机磷浓度增加。

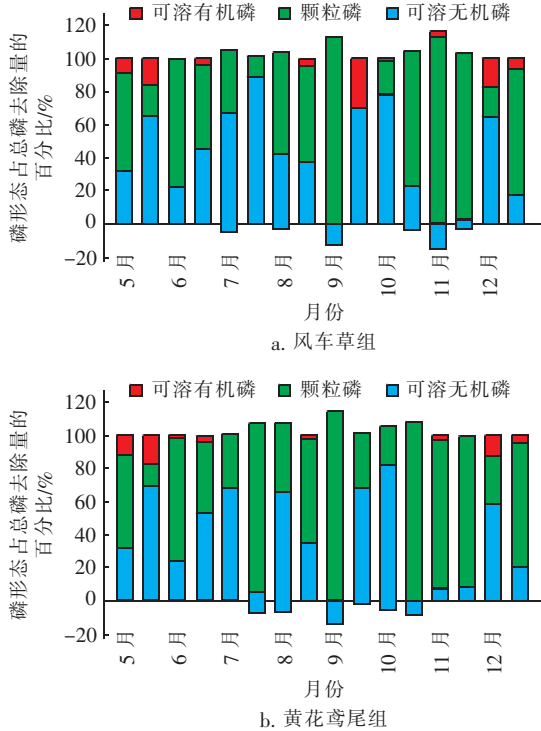


图4 不同磷形态占总磷去除量的百分比

Fig.4 Contribution of different phosphorus form in the removal of total phosphorus

## 2.4 不同形态磷的沿程变化

不同形态磷的沿程变化如图5所示。可以看出,污水中的颗粒磷主要在一级湿地中被去除,进水中的颗粒磷经过一级湿地处理后由 $(4.70 \pm 3.70)$  mg/L降低为 $(0.90 \pm 0.56)$  mg/L(风车草组)和 $(1.40 \pm 0.78)$  mg/L(黄花鸢尾组),去除率分别达到80.9%和70.2%, $K$ 值分别达到1.86和1.61  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。经过二级和三级湿地处理后颗粒磷浓度分别为 $(0.30 \pm 0.22)$ 和 $(0.30 \pm 0.38)$  mg/L, $K$ 值分别为0.15和0.27  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,远低于一级湿地的 $K$ 值。由于湿地基质为碎石,基质间孔隙较大,适合处理进水中含有较多颗粒磷的生活污水。大部分颗粒磷被一级湿地截留到基质内部,被拦截的颗粒磷又能进一步拦截后续进水中的磷素。一级湿地出水中颗粒磷浓度骤减,而基质孔隙较大,导致第二、三级湿地去除颗粒磷的效果较差。

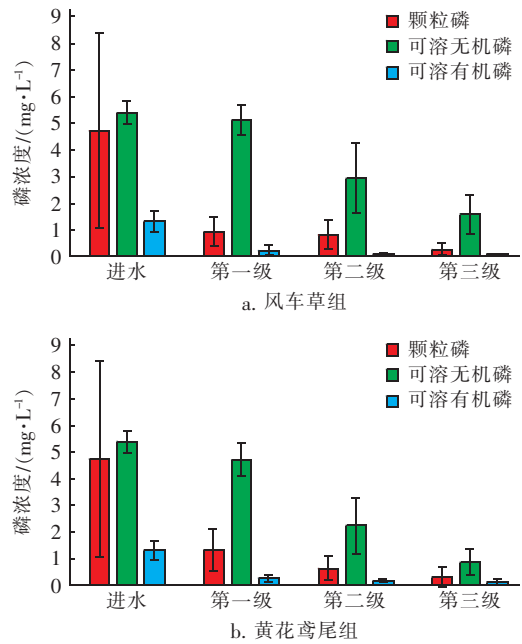


图5 不同形态磷的沿程变化

Fig.5 Variation of different phosphorus form along the wetland

可溶有机磷的去除过程与颗粒磷相似,经过一级湿地处理后,可溶有机磷浓度从 $(1.32 \pm 0.39)$  mg/L分别降到 $(0.25 \pm 0.20)$  mg/L(风车草组)和 $(0.22 \pm 0.13)$  mg/L(黄花鸢尾组),一级湿地去除污水中约81.5%的可溶有机磷,而二级和三级湿地出水中可溶有机磷的浓度变化不大。可溶无机磷的沿程变化规律与颗粒磷和可溶有机磷相反,可溶无机磷在一级湿地中的去除效果较差,其主要在二级和三级中被去除。经过两组湿地一级处理后污水中的可溶无机磷仅从 $(5.40 \pm 0.42)$  mg/L分别降至 $(5.11 \pm 0.60)$  mg/L(风车草组)和 $(4.70 \pm 0.60)$  mg/L(黄花鸢尾组),经过二级处理后分别迅速降至 $(2.94 \pm 1.37)$ 和 $(2.24 \pm 1.06)$  mg/L,最终的出水浓度分别为 $(1.59 \pm 0.74)$  mg/L和 $(0.88 \pm 0.50)$  mg/L。风车草组第二、三级湿地的 $K$ 值分别为1.06和0.66  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,而一级湿地 $K$ 值仅为0.14  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;黄花鸢尾组第二、三级湿地的 $K$ 值分别可达1.21、0.67  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,而一级湿地 $K$ 值只能达到0.34  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

湿地基质上层中植物根系密集,可以促进微生物的生长和胞外酶的分泌。一级湿地进水中有机质和总磷浓度较高,基质中磷酸酶活性升高,污水中有机磷被磷酸酶水解为无机磷化合物,一级湿地



对无机磷的实际去除量要大于进出水中无机磷浓度的差值。垂直流人工湿地中聚磷酸盐激酶(PPK)活性与总磷去除率呈显著正相关关系,其活性对溶解氧具有敏感性<sup>[9]</sup>。三级湿地单元均为下行流,第一级湿地进水中DO较低,导致PPK活性表达较低,生物吸磷过程较弱,而后在第一级湿地出水流入第二级湿地时,会在空气中进行部分复氧,DO升高,PPK活性升高,生物除磷作用增强。DO增加也会导致湿地床内的氧化还原电位增加,无机磷沉淀量增加。因此,建议第一级湿地质基采用廉价的碎石去除污水中的颗粒磷和有机磷,而第二、三级湿地可采用去除无机磷性能较好的基质材料。

### 3 结论

该多级人工湿地单位面积总磷去除速率可维持在 $0.83 \sim 0.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,除磷过程主要在第一级湿地完成,占总磷去除量的57%。多级人工湿地可应对进水磷浓度波动带来的影响,单位面积总磷去除速率与进水总磷浓度呈显著正相关关系。第一级湿地去除颗粒磷和可溶有机磷,而可溶无机磷在第二、三级湿地中去除。

### 参考文献:

- [1] Wu H M, Zhang J, Li P Z, *et al.* Nutrient removal in constructed microcosm wetlands for treating polluted river water in northern China [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(4): 560–568.
- [2] 张华. 生物膜与水生植物耦合作用提升城市河道水质的技术研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2013.  
Zhang Hua. Study on Purifying Urban River Waters by Biofilm Coupled with Aquatic Plant [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2013 (in Chinese).
- [3] 高续涛,何珊,丁彦礼,等. 植物根际对人工湿地系统中微生物的影响[J]. *工业安全与环保*, 2019, 45(3): 84–87.  
Gao Xutao, He Shan, Ding Yanli, *et al.* Effect of plant rhizosphere on microorganism in constructed wetland system [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2019, 45(3): 84–87 (in Chinese).
- [4] 王淼,田军仓. 农村绿色建筑分散型生活污水处理研究综述[J]. *中国农村水利水电*, 2014(9): 64–67.  
Wang Miao, Tian Juncang. A summary of study on decentralize domestic sewage treatment of the rural green building [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014 (9): 64–67 (in Chinese).
- [5] 曹飞华,何琴. 三种人工湿地填料的除磷效果研究[J]. *绿色科技*, 2015(3): 217–219.  
Cao Feihua, He Qin. The research on phosphorus removal effect of three kinds of constructed wetland padding [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2015 (3): 217–219 (in Chinese).
- [6] 范英宏. 复合垂直流人工湿地处理生活污水的试验研究[J]. *北京交通大学学报*, 2018, 42(6): 41–47.  
Fan Yinghong. Experimental study on the treatment of sewage by hybrid vertical constructed wetland [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2018, 42 (6): 41–47 (in Chinese).
- [7] Chang J J, Wu S Q, Zhang S Y, *et al.* Comparative evaluation of total phosphorus removal performances for treatment of domestic and secondary wastewater using integrated vertical-flow constructed wetlands: two years' experience [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 56(5): 1379–1388.
- [8] Harouiya N, Prost-Boucle S, Morlay C, *et al.* Performance evaluation of phosphorus removal by apatite in constructed wetlands treating domestic wastewater: column and pilot experiments [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2011, 91(7/8): 740–752.
- [9] Du L, Chen Q R, Liu P P, *et al.* Phosphorus removal performance and biological dephosphorization process in treating reclaimed water by integrated vertical-flow constructed wetlands (IVCWs) [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 243: 204–211.



作者简介:翟俊(1977—),男,江苏溧阳人,博士,教授,研究方向为废水处理理论与技术。

E-mail: zhajun99@126.com

收稿日期:2019-06-05