

# 云南抚仙湖窑泥沟复合湿地的除氮效果\*

陈源高<sup>1,2</sup> 李文朝<sup>2</sup> 李荫玺<sup>3</sup> 侯长定<sup>3</sup> 吴献花<sup>4</sup> 孔志明<sup>1\* \*</sup>

(1: 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210093; 2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3: 云南省玉溪市环境科学研究所, 玉溪 653100; 4: 云南省玉溪师范学院, 玉溪 653100)

**提 要** 为了延缓抚仙湖局部湖湾水体富营养化趋势, 在北岸建设了净化面积 1hm<sup>2</sup> 的复合人工湿地。综合利用生物氧化塘、水平潜流湿地和表面流湿地治理技术, 对入湖河道窑泥沟污水中氮的去除效果进行了试验研究。试验结果表明, 湿地系统的除氮效果十分明显, 水力负荷年平均为 437mm/d, 氮负荷年平均为 3.315 g/(m<sup>2</sup>·d), 湿地系统氮滞留量年平均为 1.91g/(m<sup>2</sup>·d)。其中, 通过植物吸收同化作用除氮量为 0.142g/(m<sup>2</sup>·d), 占总氮滞留量的 7.5% 左右。湿地系统对污水中硝酸盐及亚硝酸盐氮(NO<sub>x</sub><sup>-</sup>)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、有机氮(TON)和总氮(TN)的去除率年平均分别为 62.7%、53.8%、62.4%和 57.5%。在湿地系统各功能区中, 表面流人工湿地除氮效果最佳, 氮去除率年平均为 39.4%, 硝化和反硝化作用均较强; 生物净化塘除氮效果次之, 氮去除率年平均为 18.5%; 潜流人工湿地氮去除率年平均为 10.6%; 沉淀池中氮去除率年平均只有 3.6%。

**关键词** 抚仙湖 人工湿地 除氮效果

**分类号** P343.3

人工湿地被认为是最为经济有效的减少湖泊面源污染的生态措施之一。有关潜流人工湿地、表面流人工湿地、生物净化塘的除氮效果以及应用研究, 国内外已经有很多报道<sup>[1-9]</sup>。但是, 把这几类类型湿地技术进行优化组合, 建设一个复合人工湿地, 用于湖泊径流区面源污染控制, 在国内外少见有应用报道。作者研究了抚仙湖窑泥沟复合湿地运行期间的除氮效果, 有关它的除磷效果另外发表。

## 1 材料和方法

### 1.1 抚仙湖窑泥沟复合人工湿地建设

抚仙湖的污染河流大多分布在北岸, 窑泥沟是抚仙湖北岸污染最严重的河道之一。为了寻求抚仙湖污染控制和治理的有效途径和措施, 于 2001 年 12 月在抚仙湖北岸湖滨滩地上建设了窑泥沟复合人工湿地, 占地面积 10060m<sup>2</sup>。

窑泥沟复合人工湿地分为沉淀池、生物净化塘、水平潜流湿地和表面流湿地等四个净化功能区。该湿地处理工程收集了抚仙湖人湖河道窑泥沟集水域内的农田径流污水和澄江县

\* 云南省玉溪市污染治理项目和国家和“863”计划项目(2002AA601013)联合资助。

2004-04-28 收稿, 2004-10-08 收修稿稿。陈源高, 男, 1964 年生, 副研究员, E-mail: ygch@niglas.ac.cn.

\* \* 通信联系人。

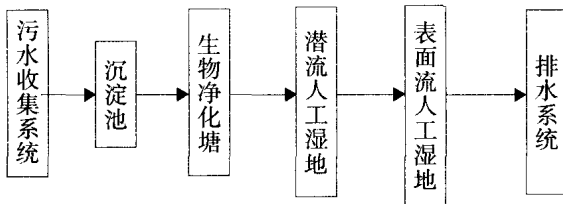


图 1 窑泥沟复合人工湿地工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of the Yaonigou constructed wetland

城部分生活污水,经过人工湿地系统,进行物理沉降、生物吸附、吸收和分解,最终达到净化去除污染物的目的,其工艺流程见图 1.

### 1.2 人工湿地栽种植物的选择

该人工湿地栽种植物以土著种为主,经济植物水芹菜 (*Oenanthe javanica*) 是其主要品种,栽种面积 5700m<sup>2</sup>,占整个湿地有效净化面积的 57% 左右(表 1). 在泥沙沉淀池,栽种有美人蕉 (*Canna indica*)、香蒲 (*Typha latifolia*) 等耐污性的植物. 生物净化塘由三个塘串联组合而成. 两个栽种水芹菜的净化塘,面积 3400m<sup>2</sup>;一个栽种睡莲 (*Nenuphar*) 和菱 (*Trapa*) 的净化塘,面积 1260m<sup>2</sup>.

水平潜流人工湿地由 4 个 15m × 15m 的单元并联组成,单元格内填充 60cm 厚的砾石或煤渣,砾石规格 1-2cm 和 3-5cm 的两个单元格中种植旱伞草和香蒲,砾石规格 0.2-0.5cm 的单元格和煤渣单元格中种植芦苇 (*Phragmites communis*).

表面流人工湿地由两级组成:第一级栽种水芹,面积 2300m<sup>2</sup>;第二级栽种莲 (*Nelumbo nucifera*) 和茨菇 (*Sagittaria sagittifolia*),面积 1300m<sup>2</sup>.

表 1 湿地系统水生植物及管理

Tab. 1 The design of characteristics in the wetland system

功能区	面积(m <sup>2</sup> )	植物品种	管理方式
沉淀池	900	美人蕉、香蒲	打捞和沉降
生物净化塘	4660	水芹、菱、睡莲	三级串联
潜流人工湿地	900	香蒲、芦苇、旱伞草	四级并联
表面流人工湿地	3600	水芹、莲、茨菇	二级串联

### 1.3 样品采集和测定

自人工湿地系统建成之后,每月定期监测各功能区进出水,监测时间为一年,分析项目有总氮(TN),氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>),亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>),硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>),悬浮物(TSS)、溶解氧(DO)和水温等,监测该湿地系统内植物生物量及其生长情况,以及进入湿地系统的水力负荷,比较各功能区的除氮效果,以及湿地系统中氮滞留量.

## 2 结果与讨论

### 2.1 湿地系统的除氮效果

在沉淀池前段有个固体垃圾打捞区,通过网栅拦截并打捞河道中的固体垃圾,年打捞垃圾约为 750t,其干物质含氮率 1.314%,年截流入湖氮负荷约为 990kg.

在复合人工湿地的运行及试验期间,进入湿地系统的原水 TN 浓度为 4.6-14.9mg/L,年平均值为 7.533mg/L,其中有机氮(TON)占 14.2%,无机氮占 85.8%,以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 为主. 湿地系统出水 TN 浓度为 1.0-5.6mg/L,年平均值为 3.203mg/L. 人工湿地系统对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、TON 和 TN 的去除率年平均值分别为 62.7%、53.8%、62.4% 和 57.5% (表 2).

表 2 湿地系统各功能区的除氮效果

Tab. 2 Efficiencies of nitrogen removal in the wetland system

不同形态氮	NO <sub>x</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	TON	TN
进水(mg/L)	2.10	4.362	1.071	7.533
沉淀池出水(mg/L)	2.12	4.059	1.082	7.261
生物净化塘出水(mg/L)	1.569	3.907	0.442	5.918
潜流湿地出水(mg/L)	1.473	3.208	0.607	5.288
表面流湿地出水(mg/L)	0.783	2.017	0.403	3.203
去除率(%)	62.7	53.8	62.4	57.5

人工湿地除氮的主要途径包含有机氮的矿化作用,氨气的挥发作用,生物的同化作用,基质对氮离子的吸附作用,以及硝化和反硝化作用等,其中,硝化和反硝化作用是除氮的最基本方式<sup>[10-12]</sup>.在窑泥沟湿地系统中,由于水平潜流人工湿地建设时间较短,基质生物膜还未发育完善,微生物的硝化和反硝化作用还不强,导致除氮效果不佳,另外,污水停留时间较短也是除氮效果不佳的主要原因之一.除氮的主要途径是生物同化、基质吸附和沉降作用.虽然水平潜流人工湿地和沉淀池两个功能区除氮效果不佳,但是对 TSS 的去除效果却较理想,分别达到 73% 和 54%.

生物净化塘和表面流人工湿地除氮效果较佳,除了与这两个功能区净化面积较大,污水停留时间较长有关外,水芹等湿地植物生长旺盛,植物根区和土壤中的微生物和附着生物的丰富,是其除氮效果强的主要原因.从湿地系统对 NO<sub>x</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 去除的数据分析,表面流人工湿地对两者的去除效果均较好,分别达到 46.8% 和 37.1%,溶解氧(DO)一般大于 5mg/L,说明在该功能区内微生物的硝化和反硝化作用均较强,尤其是在夏季温度较高时,微生物活动旺盛,对无机氮的净化效果更佳;而生物净化塘只对 NO<sub>x</sub><sup>-</sup> 有较好的去除,达到 26%,对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的去除率只有 3.7%.净化塘中 DO 监测数据小于 2mg/L,而且底层大多处于厌氧状态,是导致其反硝化作用较强,而硝化作用较弱的主要原因.

## 2.2 湿地系统除氮效果的影响因素

湿地系统除氮效果的影响因素有温度、污水滞留时间以及氮负荷等,另外,Craft 研究表明人工湿地中氮去除还受到氧化还原电位和有机碳获得量的影响,在厌氧条件下天然湿地中氮去除也受到硝酸盐获得量的制约<sup>[13]</sup>.在本试验中,研究了温度、污染物浓度以及水力负荷对除氮效果的影响.

**2.2.1 温度** 人工湿地中生物除氮较佳的温度范围是 20-25℃<sup>[14]</sup>,低于 15℃ 或高于 30℃,生物除氮效果就会降低<sup>[15]</sup>.随着季节的变化,窑泥沟人工湿地水温呈现一定幅度(11.7-23.6℃)的波动,氮去除率也呈现相应波动.如 4-9 月份气温较高(19.7-23.6℃)时,氮去除率相对较好(图 2).只是 7,8 月份正直云南当地的雨季,水力负荷较大,去除率受到一定影响,只有 50% 左右.另外,在 10 月份,水芹菜处于新老过渡的休眠期,生长状态差,人工湿地系统的氮去除率也明显下降.但是到了次年 3 月,随着水温升高,水芹等湿地植物生长旺盛,人工湿地系统的氮去除率又很快提高.

**2.2.2 氮负荷** 进入湿地的原水 TN 浓度最高 14.9mg/L,最低 4.6mg/L,平均值 7.533mg/L,单位面积的氮负荷为 3.315g/(m<sup>2</sup>·d),氨氮是其主要存在形态.该人工湿地对氨氮和硝态氮

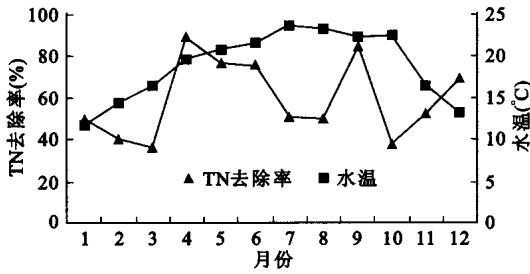


图2 湿地系统中氮去除率和温度的周年变化  
Fig. 2 Yearly variation of TN removal rate and temperature in the wetland

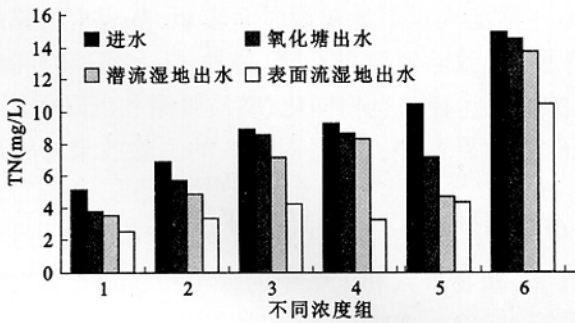


图3 不同污水浓度的除氮效果  
Fig. 3 Efficiencies of nitrogen removal varying with the concentration of TN

的去除效果较好,均达到 60% 以上. 不同的氮负荷在湿地系统中的去除效果见图 3. 试验结果表明, TN 浓度在 5-11mg/L 时, 湿地系统及各功能区净化效果较好, 尤其是 TN 浓度为 8-11mg/L 时效果最佳; TN 浓度超过 11mg/L 或低于 5mg/L 时, 去除率就开始下降, 当 TN 浓度为 14.93mg/L 时, 去除率只有 30.3%.

2.2.3 水力负荷 窑泥沟由于受季节及农事影响进水流量变化幅度较大, 范围在 0-7750 mm/d 之间. 将窑泥沟污水引入湿地处理系统, 进水流量通过溢流堰调控, 随着水力负荷而变化(表 3). 湿地系统设计处理污水能力只有 497 mm/d, 停留时间为 48h. 当进水流量最大时, 高出处理能力 15.6 倍, 停留时间仅为 3h, 相应的处理效果较差, 只有通过分流部分污水措施, 减轻系统负荷, 才能保证湿地系统的正常安全运行. 在雨季由于污水流量较大, 有时会超过 600mm/d, 但此时人工湿地的除氮效果明显较差, 一般时间均控制在 500mm/d 以内; 而在旱季缺水的条件下, 污水在湿地系统内的停留时间可达 6d 之久, 虽然进入污水量低于设计要求, 处理效果较好; 在一年大部分时间里, 处理系统水力负荷变动范围为 149-1090 mm/d, 平均为 437mm/d, 停留时间为 51.8h, 湿地系统能够正常的运行.

表3 湿地系统除氮效果随水力负荷变化

Tab. 3 Efficiencies of nitrogen removal varying with the hydrologic budgets

水力负荷 (mm/d)	129	179	645	497	596	656	537
进水 (TN, mg/L)	12.39	8.32	6.87	8.90	8.93	14.93	5.13
出水 (TN, mg/L)	1.35	2.24	4.37	4.24	5.58	11.41	2.53
去除率 (%)	89.1	73.1	36.4	52.4	37.5	23.6	50.7

### 2.3 湿地系统氮滞留量及植物同化除氮率

人工湿地中氮的滞留或去除途径主要有悬浮物、生物残体的沉降, 氨气、氮气的挥发, 湿地植物的吸收同化, 以及渗漏等. 据报道, 湿地系统氮滞留量一般在 6-4000mg/(m<sup>2</sup>·d), 通过植物和微生物的同化作用以及氨去除的异化作用除氮比例约为总氮去除量的 1%-34%, 而硝化和反硝化作用除氮占总除氮量的 60%-95%<sup>(16-19)</sup>. 窑泥沟人工湿地总氮的平均滞留量为 1.91g/(m<sup>2</sup>·d). 其中, 通过植物吸收同化作用除氮量为 0.142mg/(m<sup>2</sup>·d), 占

总氮滞留量的 7.5% 左右(表 4).

表 4 湿地系统中植物的生物量以及氮滞留量

Tab. 4 Biomass and nitrogen retention of plants in the wetland

功能区	植物	栽种面积 (m <sup>2</sup> )	年生长量 (kg/m <sup>2</sup> )	干物质含氮量 (%)	氮年滞留量 (kg)
沉淀池	香蒲	400	15.6	1.193	7.3
生物净化塘	水芹	2720	45	2.964	232.2
	菱	1260	12.8	3.881	48.2
潜流人工湿地	芦苇	450	2.7	1.316	7.5
	香蒲	450	13.2	1.193	6.9
表面流人工湿地	水芹	2300	36.4	2.690	196.1
	莲	1300	6.8	3.465	27.6

### 3 结论

窑泥沟人工湿地氮负荷年平均为 3.315g/(m<sup>2</sup>·d),水力负荷年平均为 437mm/d,氮滞留量为 1.91g/(m<sup>2</sup>·d),其中因植物同化作用除氮率占 7.5%,滞留量为 142 mg/(m<sup>2</sup>·d).在湿地系统四个功能区中,表面流人工湿地除氮效果最佳,氮去除率年平均为 39.4%,硝化和反硝化作用均较强;生物净化塘除氮效果次之,氮去除率年平均为 18.5%;潜流人工湿地氮去除率年平均为 10.6%,沉淀池中氮去除率年平均只有 3.6%.

湿地系统除氮效果的影响因素很多,主要有氮负荷、停留时间、温度以及湿地植物的生长状况等.在氮负荷小于 5g/(m<sup>2</sup>·d),水力负荷小于 500mm/d 时,由于 4-9 月份温度适宜,湿地植物生长旺盛,窑泥沟湿地系统的除氮效果最佳,均达到 75% 以上.湿地系统氮的总去除率周年平均为 57.5%.

### 参 考 文 献

- 1 丁树荣,程树培,胡志明.利用人工基质无土栽培多花黑麦草净化缙丝废水的研究.中国环境科学,1992,12(1):9-15
- 2 戴全裕,陈源高,魏云等.水培经济植物对酿酒废水净化与资源化生态工程研究.科学通报,1996,41(6):547-551
- 3 皮宇,戴全裕,陈源高.水蕹菜对含银废水的净化功能研究.植物生态学与地植物学学报,1992,16(2):167-173
- 4 成水平,夏宜琤.香蒲、灯心草人工湿地的研究——I.污水的净化效果.湖泊科学,1997,9(4):351-358
- 5 朱彤,许振成,胡康萍等.人工湿地污水处理系统应用研究.环境科学研究,1991,4(5):17-22
- 6 刘文祥.人工湿地在农业面源污染控制中的应用研究.环境科学研究,1997,10(4):15-19
- 7 陈桂珠,马曼杰,蓝崇钰等.香蒲植物净化塘生态系统调查研究.生态学杂志,1990,9(4):11-15
- 8 Drizo A, Frost C A, Grace J, Smith K A. Phosphate and ammonium distribution in a pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. *Wat Res*, 2000, 34(9): 2483-2490
- 9 James J S, Joan S T, Larry B B, David E S. Investigation of nitrogen transformations in a southern California constructed wastewater treatment wetland. *Ecol Eng*, 2000, 14: 49-65
- 10 Neely R K, Baker J L. Nitrogen and phosphorus dynamics and the fate of agricultural runoff. In: van der Valk A G Ed. *Northern Prairie Wetlands*. Ames: Iowa State University Press, 1989: 92-131
- 11 Brix H, Schierup H. The use of aquatic macrophytes in water pollution control. *Ambio*, 1989, 18: 100-107
- 12 Reddy K R, D'Angelo E M. Soil processes regulating water quality in wetlands. In: Mitsch W J Ed. *Global Wetlands: Old World and New*. Amsterdam: Elsevier, 1994: 309-324

- 13 Craft C B. Dynamics of nitrogen and phosphorus retention during wetland ecosystem succession. *Wet Ecol Manag*, 1997, 4: 177 – 187
- 14 Gersberg R M, Elkins B V, Goldman C R. Use of artificial wetlands to remove nitrogen from wastewater. *J Wat Pollut Control Fed*, 1984, 56: 152 – 156
- 15 Sutton P M, Murphy K L, Dawson R N. Low-temperature biological denitrification of wastewater. *J Wat Pollut Control Fed*, 1975, 47: 122 – 134.
- 16 Mitch W J, Horne A J, Nairn R W. Nitrogen and phosphorus retention in wetlands – ecological approaches to solving excess nutrient problems. *Ecol Eng*, 2000, 14: 1 – 7
- 17 Bartlett M S, Brown L C, Hanes N B, Nickerson N H. Denitrification in freshwater wetland soil. *J Environ Qual*, 1979, 8: 460 – 464
- 18 Stengel E, Carduck W, Jebesen C. Evidence for denitrification in artificial wetlands. In: Reddy K R, Smith W H Eds. *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*. Orlando: Magnolia Publishing, 1987: 543 – 550
- 19 Cooke J G. Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment. *Wat Sci Technol*, 1994, 29: 209 – 217

## Nitrogen Removal Efficiency of Yaonigou Integrated Constructed Wetland on the Bank of Lake Fuxian, Yunnan Province

CHEN Yuangao<sup>1,2</sup>, LI Wenchao<sup>2</sup>, LI Yinxi<sup>3</sup>, HOU Changding<sup>3</sup>, WU Xianhua<sup>4</sup> & KONG Zhiming<sup>1</sup>

( 1: State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China;

2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China;

3: Yuxi Institute of Environmental Science Research, Yuxi 653100, P. R. China;

4: Yuxi Normal College, Yuxi 653100, P. R. China )

### Abstract

The 1hm<sup>2</sup> integrated constructed wetland was built on the northern bank of Lake Fuxian, Yunnan Province, for reducing and controlling the development of its eutrophic state. Efficiencies of nitrogen removal of the wastewater from the Yaonigou river were investigated by using the integrated constructed wetland including the function parts of precipitation pond, oxidation ponds, constructed wetlands subsurface flow and surface flow. The results demonstrate that there was a very high capacity of nitrogen removal in the wetland. The average hydrologic budget was 437 mm/d. The average nitrogen loading was 3.315 g/(m<sup>2</sup> · d). The nitrogen retention was 1.91 g/(m<sup>2</sup> · d). Nitrogen retention through plant uptake was 142 mg/(m<sup>2</sup> · d). It was about 7.5% of total retention. The average removal rates of the constructed wetland for different species of nitrogen were 62.7% (NO<sub>x</sub><sup>-</sup>), 53.8% (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 62.4% (TON) and 57.5% (TN), respectively. The average removal rates of nitrogen were 39.4%, 18.5%, 10.6% and 3.6% in the surface flow constructed wetland, the oxidation ponds, the subsurface flow constructed wetland and the precipitation pond, respectively.

**Keywords:** Lake Fuxian; constructed wetland; efficiencies of nitrogen removal