

# 厦门市污水林地生态处理工程

谢海生, 胡宏友, 卢昌义

(厦门市环境保护局, 福建 厦门 361004; 厦门大学环境科学研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:**文章介绍了厦门市狐尾山原生生活污水林地生态处理工程依循“污水-土壤-植物”资源再生机制, 提出了“截流井+氧化塘(调节池)+污水动力输送、管网投配+林地+城市景观林地”的基本模式。

**关键词:**污水林地生态处理工程; 水力负荷; 原生生活污水

**中图分类号:**X171.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-5377 (2006) 09-0022-03

## Eco-treatment Engineering of Sewage Forest Land in Xiamen

XIE Hai-sheng, HU Hong-you, LU Chang-yi

厦门市属于淡水缺乏的海湾型城市, 主要饮用水源来自九龙江北溪。近年来, 厦门岛外周边地区新建开发区及城镇不断扩张, 农业及养殖业发展迅速。但由于生活污水及养殖加工业的污水没有得到有效治理, 加重了九龙江流域中下游水体的污染。为了寻求有效解决水环境污染的方法, 厦门市于2002年初在狐尾山建立了“引污水上山”的污水生态处理工程。

该工程占林地约4.2km<sup>2</sup>, 工程主体位于厦门市狐尾山西南端坡地, 此地区为以马尾松为主的针叶林地。污水截流井位于厦门市污水处理二厂进水泵房内。下水道生活污水经栅栏截取后, 经污水动力泵输送至前置池, 而后进入终端布水系统投配林地。该工程的实质就是依赖于污水-土壤-植物系统的资源再生过程消纳城市生活污水, 削减进入厦门海域的污水排放量, 改善厦门岛内外山体缺水缺肥状况, 达到处理污水、恢复植被, 并使植被能按南亚热带常绿阔叶林的方向正常演替的目的。系统运行四年来, 植被发育总体呈良性态势。

### 1 工程系统结构与功能特点

#### 1.1 工程系统主要组成

工程系统主要由污水源、林地、管道动力输送、林

地投配系统、调节池系统组成。原生生活污水源由厦门市污水处理二厂截留井提供, 主要为居民区的生活污水。该井污水流量为1500m<sup>3</sup>/d, 污水进入截流井前, 已经格栅除渣处理。由于是原生生活污水, 水质特点主要表现为SS、NH<sub>3</sub>-N、Cl<sup>-</sup>及粪大肠菌群含量较高。污水水质见下表。

厦门市原生生活污水水质指标

指标	测定值	范围
BOD (mg/L)	228	202~233
COD (mg/L)	655	612~673
SS (mg/L)	516.55	489.55~526.90
TN (g/L)	0.081	0.060~0.082
TP (g/L)	0.023	0.015~0.46
TK (g/L)	0.032	0.030~0.035
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	52.33	48.22~70.44
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	3.35	1.40~6.0
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	0.015	0.007~0.022
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	1.138	0.76~1.90
Cl <sup>-</sup> (‰)	0.788	0.506~0.805
粪大肠菌群(cfu/L)*	2380	-

\* 数据来源于厦门市环境监测中心站监测结果报告单, NO: 20030881 (2003年)。

管道动力输送是该工程的施工重点，包括主输送管、调节池和林地投配系统。该工程设计的每个调节池贮水量可达150t。林地是污灌工程处理污水的主体，对污灌区的马尾松次生林地群落调查表明，该林地植被是以马尾松为主的次林地，具有如下特点：林下层群落类型多样化；群落分布格局破碎化；山体贫瘠仍然严重；植被存在退化现象；人工绿化林逐渐取代了天然次生林。由此可见水分和养分缺乏是影响厦门市城区山地林发育的重要因素。由于生活污水中含有大量的水分和养分，所以如果合理回用，对林地发育是有益的。

总体而言，狐尾山原生生活污水林地生态处理工程依循的是“污水-土壤-植物”资源再生模式，其基本结构为“截流井+氧化塘（调节池）+污水动力输送、管网投配+城市景观林地”。结构模式如图1所示。

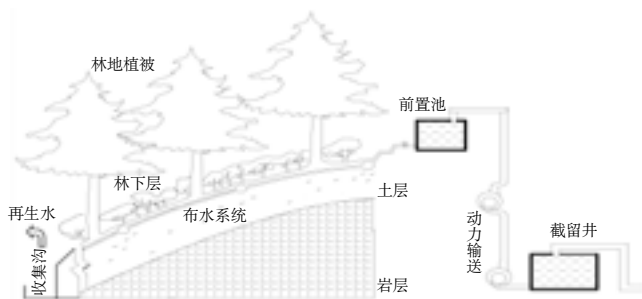


图1 厦门市狐尾山污水林地生态处理工程结构

### 1.2 工程系统各结构的功能特点

根据对系统不同环节污水中N元素损失比例的监测（以截流井污水中TN为基准），各结构组成对污染物的去除有不同功效：前置氧化塘为主要前处理结构，适合高浓度原生污水中污染物的削减；林地为工程消纳污水的主体结构，适合削减后污水的深度处理；污水动力输送、投配系统为工程的投资主体和运行的关键；处理系统的末端可以根据工程需要添加再生水回收系统，用于再生水资源的回用。

## 2 污水对山地林土壤-植物系统的影响

为了探讨污灌对山地林土壤-植物系统的影响，设三种污灌强度：（1）基本灌溉量：污水投配量按城市绿地核算平均浇灌水量（ $2L/m^2 \cdot d$ ，相当于 $2mm/d$ ）投配污水，投配量为 $730mm/a$ 。核算运行期间（按实际可运行225d计）实际投配量为 $3.24 mm/d$ ；（2）平衡灌溉量：污水投配量按厦门可能的潜在蒸发量 $1711.5mm/a$ 计算，

核算运行期间的实际投配量为 $7.61mm/d$ ；（3）饱和灌溉量：本研究按饱和灌溉量约为厦门年潜在蒸发量的一倍核算，为 $3400mm/a$ ，据此计算运行期的平均污灌量为 $15.11mm/d$ 。

对狐尾山污水生态处理工程林地进行污灌实验。实验结果表明：污水对山地林土壤-植物系统的影响主要表现为，高强度（ $15.11mm/d$ ）污灌处理并未明显影响成熟林地（24龄）马尾松生长及叶绿素含量，却显著促进了林下层（石斑木）的生长，提高了林下层植物叶片叶绿素的含量和林地幼苗（石斑木及其它种苗）的萌发密度，有利于针叶林的进展演替。高强度处理促进了人工巨尾桉林的胸径生长，并对间伐再生条生长有一定的促进作用。高强度处理显著地提高了林地土壤的养分和微生物数量，促进了土壤酶活性。对敏感植物污灌实验亦表明，污水具有一定的盐分胁迫作用，但因水肥供给等有利因素大于不利因素，对敏感植物生长并没有明显不利效应。综合分析表明在合理制定污灌量、安排污灌轮灌同期时，原生生活污水对林地植被发育的影响是良性的。

## 3 工程水力负荷的核算

### 3.1 工程水力负荷限制因子的筛选

根据工程结构特点，林地污水投配包括三种水力负荷值：（1）基于土壤水分入渗量的水力负荷值；（2）基于P元素限制的水力负荷值；（3）基于N元素限制的水力负荷值。

土壤入渗研究结果表明，要达到稳定入渗林地的入渗速率为 $0.34 \sim 5.04mm/min$ ，平均为 $1.53mm/min$ 。按每天灌溉4h计，即使不考虑林地蒸散，灌溉的水量也可达 $367.28mm/d$ 。显然，这一土壤入渗量要远大于基于N、P核算的水力负荷值。因此，土壤入渗速率不会成为水力负荷的限制因子。

工程林地土壤对P元素的等温吸附、渗滤截留能力较强，系列实验研究结果均表明，林地土壤 $PO_4^{3-}$ 和 $NH_3-N$ 的理论最大吸附量分别为 $625mg/kg$ 和 $555.6mg/kg$ 。这体现了南方赤红壤林地对P吸附较强的特点。此外，由于南方赤红壤缺P的影响，土壤中生物固P的需求量显然大于 $NH_3-N$ 。而工程系统污水中P元素浓度（ $1.138 mg/L$ ）远小于N元素浓度（ $52.23mg/L$ ），因此，按工程物料衡算的原理，P元素不应成为工程的水力负荷限制因子。

综上所述，由于原生生活污水中较高浓度N元素的

限制和南方区域性土壤的理化水文性的影响，P元素和林地土壤水分渗透速率均不会成为核算工程水力负荷的限制因子。因此，在进行污水水力负荷核算时，应以基于N元素的水力负荷核算为准。

### 3.2 工程的水力负荷

基于N元素进行水力负荷核算，根据物料衡算方程，推导出厦门市污水林地生态处理工程污水投配量估算方程式如下：

$$Q=8.130+23.260 \times C_L \times \exp(0.2290 C_L-2.4845)$$

式中， $Q$  为工程的水力负荷，mm/d； $C_L$  为允许渗漏的TN浓度，mg/L。

在水质稳定、林地生态系统及土壤亦保持正常功能的情况下，污水投配量与出水TN浓度成倍乘指数复合关系。这也说明，当投配量超过某一极限值后，投配量增加，将使水质迅速恶化。投配量与允许渗漏浓度关系见图2所示。

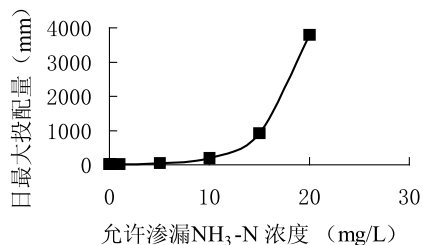


图2 渗漏浓度与日最大投配量关系

如果令 $C_L=0$ (理论上没有N元素的渗漏)，投配量 $Q$ 为8.130mm/d。可计算出年投配量为3033mm/a。如果允许NH<sub>3</sub>-N渗漏，取 $C_L$ 为0~25mg/L，则投配量 $Q$ 为8.130~3789.98mm/d。进一步分析表明，日投配水量提高，将大大增高N元素的泄漏风险。如果日投配量为10.57、38.60、199.62、910.74mm/d，渗出液的N元素浓度(以NH<sub>3</sub>-N计)将分别达到1、5、10、15mg/L，去除率分别达到97.67%、88.36%、76.74%、65.10%。这也说明，林地在高污水投配量下，主要发挥的是土壤的截留过滤作用，相当于人工快渗系统。根据上述分析，为了提高FLTS的处理能力，又不过分降低出水质量，以97.67%的N元素去除率作为最低的渗滤水质要求，由此可计算出投配量达3858mm/a。

### 4 轮灌期的制定

由于林地是旱生环境，因此要有一定的轮灌期，土

壤张力范围为0.96~81kPa；林地土壤水分特性曲线表明，轮灌或间歇污灌时，使土壤水分含量降至16.84%~19.53%，是一个较为安全的选择，不会造成林地土壤水渍或过干状况；根据土壤水分特性曲线估算本研究工程的轮灌期为3~5天。

### 5 结语

工程的基本结构包括“截流井+氧化塘(调节池)+污水动力输送、管网投配+林地+城市景观林地”。由于生活污水中N元素是主要削减指标和排污限制性因子，工程处理能力多以N的削减能力为处理功能划分依据。据此，将狐尾山原生生活污水林地生态处理工程划分为不同部分，并明确提出前置氧化塘(调节池)适合高浓度原生污水中污染物的削减，林地适合污染物削减后污水的深度处理，污水动力输送、投配系统是工程的投资主体和运行关键，是科学认识林地生态处理工程结构，提高工程处理效能的重要方面。此外，工程末端结构——再生水回收系统是用于再生水资源的回用，针对山地特点具有一定的坡度，适合建设成较为封闭的处理回收系统。因此，工程系统结构设计要因地制宜。

污水对林地的影响是个长期的过程。由于该工程运行期较短，因此需开展污水对植被发育、土壤酶等的影响研究。该群落为次生林，通过对林地土壤理化、群落生物学特征、生长及植被演替进展的调查结果分析表明，提高林地水肥供给，将极大提高该群落生长速度，有利于群落的良性演替进程，实验期间的污灌对林地植被影响监测亦证实了这一观点。该工程采用轮灌的方法，保证了林地土壤环境的好氧物性，这对维持林地系统的稳定性是相当重要的。本研究提出了科学的污灌核算方法，并计算出了合理的污灌量，这是保证系统稳定的又一前提。尽管与其它生态处理工程相比，该工程负荷偏小，但由于林地面积较大，地下水位较深，因此并不影响总的处理量。所以，在轮灌的前提下，按照核算的污灌量处理运行，从长期的角度分析，厦门市污水林地生态处理工程对林地的影响整体上将是良性的。当然污水林地生态处理工程还涉及到工程环境控制、工程经济效益核算、工程运行维护方法、林种优化等诸多问题，这些还有待进一步深入研究。

参考文献：(略)