

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 22 期
Vol.30 No.22
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 22 期 2010 年 11 月 (半月刊)

目 次

高温对水稻叶片蛋白质表达的影响·····	曹云英,段 骅,王志琴,等 (6009)
茶园间作柑桔杨梅或吊瓜对叶蝉及蜘蛛类群数量和空间格局的影响·····	叶火香,崔 林,何迅民,等 (6019)
鼠尾藻生长与生殖的权衡·····	张树宝,唐永政,王志芳,等 (6027)
不同氮素水平下超高产夏玉米冠层的高光谱特征·····	陈国庆,齐文增,李 振,等 (6035)
近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价 ·····	郑粉莉,张 锋,王 彬 (6044)
毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤养分的空间异质性·····	邱开阳,谢应忠,许冬梅,等 (6052)
CO ₂ 浓度倍增对干旱胁迫下黄瓜幼苗膜脂过氧化及抗氧化系统的影响 ·····	李清明,刘彬彬,艾希珍 (6063)
小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析·····	刘妍妍,金光泽 (6072)
光照对鄂东南 2 种落叶阔叶树种幼苗生长、光合特性和生物量分配的影响 ·····	杨 莹,王传华,刘艳红 (6082)
不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响·····	林超文,罗春燕,庞良玉,等 (6091)
黄土残塬沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应·····	王盛萍,张志强,张建军,等 (6102)
农村土地经营权流转对区域景观的影响——以北京市昌平区为例·····	刘 同,李 红,孙丹峰,等 (6113)
基于农户响应的北方农牧交错带生态改善策略·····	徐建英,柳文华,常 静,等 (6126)
滨岸不同植物配置模式的根系空间分布特征·····	仲启铖,杜 钦,张 超,等 (6135)
三江平原小叶章湿地剖面土壤微生物活性特征·····	杨桂生,宋长春,宋艳宇,等 (6146)
不同水分处理对湿地松幼苗生长与根部次生代谢物含量的影响·····	李昌晓,魏 虹,吕 茜,等 (6154)
生活污水慢渗生态处理对土壤及杨树生长的影响·····	白保勋,杨海青,樊 巍,等 (6163)
玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响·····	时 鹏,高 强,王淑平,等 (6173)
茶园 4 种半翅目主要害虫与其捕食性天敌的关系·····	周夏芝,毕守东,柯胜兵,等 (6183)
采煤塌陷地不同施肥处理对土壤微生物群落结构的影响·····	李金岚,洪坚平,谢英荷,等 (6193)
典型区域果园表层土壤 5 种重金属累积特征·····	杨世琦,刘国强,张爱平,等 (6201)
工业园区氮代谢——以江苏宜兴经济开发区为例·····	武娟妮,石 磊 (6208)
公路绿化带对路旁土壤重金属污染格局的影响及防护效应——以山西省主要公路为例·····	王 慧,郭晋平,张芸香,等 (6218)
奥运期间北京 PM _{2.5} 、NO _x 、CO 的动态特征及影响因素 ·····	曾 静,廖晓兰,任玉芬,等 (6227)
新疆绿洲农田土壤-棉花系统 9 种矿质元素生物循环特征 ·····	韩春丽,刘 娟,张旺锋,等 (6234)
甘肃省黄土高原旱作玉米水分适宜性评估·····	姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等 (6242)
基于粪便 DNA 的马鹿种群数量和性比 ·····	田新民,张明海 (6249)
专论与综述	
水生态功能分区研究中的基本问题·····	唐 涛,蔡庆华 (6255)
土壤水分遥感监测研究进展·····	杨 涛,官辉力,李小娟,等 (6264)
中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施·····	邓振镛,王 强,张 强,等 (6278)
问题讨论	
城市物质流分析框架及其指标体系构建·····	陈 波,杨建新,石 焱,等 (6289)
研究简报	
湖南会同不同退耕还林模式初期碳密度、碳贮量及其空间分布特征 ·····	田大伦,尹刚强,方 晰,等 (6297)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 32 * 2010-11

生活污水慢渗生态处理对土壤及杨树生长的影响

白保勋¹, 杨海青², 樊巍², 卞新民^{1,*}

(1. 南京农业大学, 南京 210095; 2. 河南省林业科学研究院, 郑州 450008)

摘要:为了观测生活污水杨树林地处理对土壤和林木生长的影响, 2008—2009 年在郑州市龙湖区, 采用不同水力负荷 (0、3、6、9、12、15 cm/周), 进行了污水慢渗生态处理试验。测定了污水处理期间杨树地上部分生长量, 对表层 (0—40cm) 和下层 (40—100cm) 土壤理化性质进行了分析。选用土壤容重、有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾作为土壤质量因子, 运用土壤质量综合指标评价不同处理表层土壤质量, 对下层土壤的理化性状的变化进行了研究。结果表明: 在 3—9 cm/周水力负荷时, 表层土壤质量综合指标值 (*QI* 值) 和杨树地上部分生长量均随着水力负荷的增加而增加, 在 9 cm/周水力负荷时达到最大; 水力负荷大于 9 cm/周, *QI* 值和杨树地上部分生长量随着水力负荷增加而降低。在水力负荷较低时, 污水处理对下层土壤性状影响较小, 水力负荷大于 9 cm/周, 污水处理对下层土壤性状产生了不良影响。生活污水杨树林地处理比较适宜的水力负荷是 6—9 cm/周。

关键词:慢渗生态处理系统; 水力负荷; 土壤性状; 杨树生长量

Effect of slow filtering eco-treatment with different hydraulic loading rates of domestic wastewater on soil and poplar growth

BAI Baoxun¹, YANG Haiqing², FAN Wei², BIAN Xinmin^{1,*}

1 Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 Henan Academy of Forestry, Zhengzhou 450008, China

Abstract: Along with the development of urbanization and the improvement of people's living standard, the domestic sewage is dramatically increased through time, resulting in serious environmental deteriorating in the water body. In order to decrease the pollution of surrounding water environment, the sewage treatment approaches through lands have been developed quickly and widely used. One of the most successful method is the slow filtering eco-treatment system, which lets sewage to go through the land planted with vegetation so that the sewage can be purified via flowing through the soil system. However, due to the high NaCl content in the domestic sewage, this treatment method may bring negative effects on the soil and plant. Accordingly, the hydraulic loading rate is the key parameter in slow filtering eco-treatment for the health of soil system and plant growth. To get a scientific and rational hydraulic loading rate is critical for sewage dispose and usage in land system.

Therefore, our objectives are to evaluate the impacts of sewage through slow filtering eco-treatment system on soil properties and poplar growth, as well as to choose a suitable hydraulic loading rate for poplar plantation. The slow filtering eco-treatment system for sewage treatment was carried out with five hydraulic loading rates (0, 3, 6, 9, 12, 15 cm/week) from 2008 to 2009 in Longhu town, Zhengzhou City, China. The aboveground biomass growth and the physicochemical properties of topsoil (0—40 cm) and subsoil (40—100cm) were investigated during the experiment duration. Eight soil properties were investigated, such as soil organic carbon (SOC), soil nitrogen (N), soil phosphorus (P) and soil potassium (K) and etc. In order to simplify the comparison of the differences in soil characteristics, an comprehensive quality index (*QI* value) was used for topsoil layer, while the subsoil properties were analyzed with the single soil

基金项目:国家“十一五”重大科技支撑项目(2006BAD03A1704); 国家林业局行业公益专项支撑项目(20070414)

收稿日期:2010-03-30; **修订日期:**2010-09-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bjxlm1@163.com

physicochemical property.

Our results showed significant differences in the effects of loading rates on soil quality and poplar growth. The *QI* value of topsoil and the poplar aboveground biomass increased along with the hydraulic loading rate increasing between the rates of 3 to 9 cm/week, and reached the maximum at 9 cm/week. When hydraulic loading rate outpaced 9 cm/week, the topsoil *QI* value and the poplar aboveground biomass growth decreased along with the increased hydraulic loading rate. There existed significant positive correlation between topsoil *QI* value and the poplar aboveground biomass growth, indicating the topsoil *QI* value representing soil fertility change. Sewage disposal had little impacts on the subsoil properties as hydraulic loading rate below 9 cm/week but produced harmful effects on subsoil properties as hydraulic loading rate above 9 cm/week. The higher sodium ion contents in topsoil and subsoil were one of the main reasons to the reduction of soil quality and poplar aboveground biomass growth. According to above results, the slow filtering eco-treatment of sewage obviously impacts soil properties and poplar aboveground biomass growth. The soil properties change is significantly correlated with the poplar growth. And the suitable hydraulic loading rate for domestic sewage treatment by poplar land is 6—9 cm/week.

Key Words: slow filtering eco-treatment system; hydraulic loading rates; soil properties; poplar aboveground growth

随着城市化的发展和人民生活水平的提高,城镇生活污水排放数量大,呈逐年增长趋势,且污水成分日趋复杂,是导致水体环境恶化的重要污染源,城镇生活污水迫切需要治理^[1]。从生态学的意义上,污水是具有可利用价值的资源^[2]。在当前水资源日益贫乏、紧缺的形势下,如何利用好这些污水,成为迫切需要解决的重要问题。污水生态处理技术的发展,为污水资源化利用提供了广阔的前景,有助于缓和缺水地区的水资源紧张局面,对减轻、消除富水地区水环境的污染也具有重要意义。慢渗生态处理系统是以表面布水或高压喷洒方式将污水投配到修复植物的土壤表面,污水在流经地表土壤-植物系统时得到充分净化的处理工艺类型。利用型慢渗生态处理技术可以在尽可能大的土地面积上利用污水,以便获取更大的植物生产量^[3]。

我国中北部地区水资源贫乏,生活污水污染严重。杨树人工林栽植面积大,但是杨树人工林的质量和生长量还处于较低的水平^[4]。杨树生长快、根系深、能够吸收大量水分和污染物,常常用于污水植物修复^[5]。污水杨树林地处理把人工林培育与污水植物修复结合在一起,利用自然的植物过程净化污水,林木可以利用污水中的养分与矿物质,提高杨树人工林的木材产量,同时可以防止污水污染河流与地下水^[6]。但是,生活污水中含有较高浓度的有害污染物,如较高浓度的氯化钠含量等,生活污水林地处理可能对土壤性质与林木生长产生不良影响。

水力负荷是慢渗生态处理系统的关键参数之一,只有这个参数比较科学合理,才能把污水处理和污水利用很好地结合起来^[7]。在污水土地处理的研究中,对污水土地处理的工艺原理与参数、污染物去除途径等研究较多^[8],但是对污水土地处理引起的土壤质量及植被生长量的变化研究较少。本研究的目的是:分析生活污水杨树林地慢渗生态处理对土壤理化性质的影响,量化研究不同水力负荷对土壤质量性状与林木生长的影响,为生活污水杨树林地慢速生态处理系统的构建与持续运行提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

生活污水杨树林地慢渗生态处理试验在郑州市龙湖大学城附近进行,该地位于郑州市南 5.5 km 处,地理坐标为东经 113°42'36",北纬 34°36'50",海拔 136 m,地下水位 8.59—9.30 m。暖温带大陆性气候,年平均气温 14.4℃,年平均降雨量 640.9 mm,无霜期 220 d。林地土壤类型为潮土,pH 值 8.4。

试验用生活污水来自于龙湖大学城排污口,其化学成分由郑州市环境监测中心按国标规定的方法测定(表 1)。生活污水中 COD、全氮和全磷含量超过了国标规定的三级标准。对污水中常见重金属元素含量也进行了监测,污水中汞、镉、铅的平均含量分别为 0.001、0.003、0.014 mg/L,其含量均未超过国标规定的标准值。

在生活污水林地处理系统建立之前,对郑州市杨树人工林栽培情况进行了调查,考虑到 I-72 杨在当地栽培面积较大,长势良好,4a 生时已经基本郁闭,即将进入速生期,杨树生长需要大量的水分与养分,所以选择了 4a 生的 I-72 (*Populus × euramericana* (Dode) cv. “SanMartino” I-72/58) 杨树人工林进行生活污水处理试验。选择的 I-72 杨树人工林密度为 2000 株/hm²左右,林相整齐,林地立地条件相近。

表 1 生活污水化学成分及含量

Table 1 Chemical composition of domestic wastewater

pH 值 pH value	五日生化需氧量 BOD ₅ /(mg/L)	化学需氧量 COD/(mg/L)	总氮 TN/(mg/L)	总磷 TP/(mg/L)	钠离子 Na ⁺ /(mg/L)	氯离子 Cl ⁻ /(mg/L)
7.5 ± 0.2	42.7 ± 8.6	743 ± 161	27.5 ± 5.8	2.8 ± 0.5	208 ± 16	629 ± 49

1.2 试验设计

试验样地规格为 20m × 20 m,样地采取随机抽样的方式布设,每个处理重复 3 次。污水生态处理系统田间配水工程包括沉淀池、田间垄沟等。对试验林地进行平整,垄沟呈南北向,沿垄沟供水。污水土地处理的工艺流程为:原污水→污水提升泵→沉淀池→林地输配水系统→土地-植物-微生物系统净化→补给地下水^[9]。

根据试验林地土壤渗透率计算污水每年处理水力负荷率^[7],然后再设计 5 个水力负荷梯度,计算每周污水处理水力负荷。生活污水林地处理在 2008 年与 2009 年 3 月 15 日至 11 月 15 日进行,生活污水每周投配 1 次^[6],水力负荷分别为 0 (CK)、3、6、9、12、15 (cm/周),采取地面布水的方式投配污水,根据天气状况与降雨量适当调整灌水时间。生活污水处理期间没有进行田间管理,充分利用杨树和草本植物吸收净化生活污水中的污染物。

1.3 研究方法

1.3.1 样品采集与测定

分别在 2008 和 2009 年 11 月中旬,在各样地按 S 形布点挖土壤剖面,采集表层 0—40 cm 和下层 40—100 cm 土层的土样,四分法充分混合后,装入封口塑封袋,按样地与样点号编号,带回实验室分析化验,土壤理化性质按常规方法测定^[10],用双环入渗仪分层测定土壤的渗透速率。土壤理化指标值均取 2a 测定结果的平均值进行研究。

2008 年 3 月上旬和 2009 年 11 月中旬,分别测定样地林木的胸径与树高,按径阶与树高分别选择 5 株平均木测定干与枝的生物量(试验开始前在试验区选平均木,试验结束后在各试验样地选择平均木)。分别测定平均木枝与干鲜重,并采集枝和干样品,测定样品的鲜重,把样品放在干燥箱中在 70℃ 烘至恒重,然后测定其干重,根据单位面积林木株数、平均木枝与干总鲜重、样品干鲜重,计算试验期间林木地上部分生长量。

1.3.2 土壤质量评价方法

土壤质量主要取决于土壤肥力,由于土壤肥力形成机制的复杂性,不同研究人员对土壤肥力的内涵和外延的理解不同,评价指标也不尽一致。考虑到生活污水林地处理的实际情况,参照尹刚强^[11]与刘世梁^[12]对土壤质量因子选择方法,本研究选用土壤容重、有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾作为指示土壤质量的因子。

由于土壤肥力因子的变化具有连续性,故各评价指标采用具有连续性的隶属度函数,并根据主成分因子负荷量值的正负性确定隶属度函数分布的升降性,这与各因子对植被的效应相符合^[13]。采用升型分布函数(1)式计算土壤各项养分因子,考虑到土壤容重增大土壤结构变差,所以采用降型分布函数(2)式计算土壤容重^[14]:

$$Q(x_i) = (x_i - x_{imin}) / (x_{imax} - x_{imin}) \quad (1)$$

$$Q(x_i) = (x_{imin} - x_i) / (x_{imax} - x_{imin}) \quad (2)$$

式中, $Q(x_i)$ 为各土壤肥力因子的隶属度值, x_i 为第 i 项土壤肥力因子值, x_{imax} 和 x_{imin} 分别为第 i 项土壤肥力因子的最大值和最小值。

由于土壤各个肥力因子对土壤综合质量指数的重要性与贡献不同,所以通常用权重系数来表示各个因子的重要性。本研究利用 SPSS16.0 软件计算各因子主成分的贡献率和累计贡献率,通过主成分分析的因子负荷量,计算各因子在土壤质量中的作用大小,确定它们的权重^[11]:

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

式中, C_i 为第 i 个土壤肥力因子的因子负荷量。

不同水力负荷的土壤质量综合指标值(QI)的计算参考张庆费^[13]的土壤肥力综合指标公式,对各个土壤因子的指标值采用乘法进行合成,各土地利用土壤综合质量指数值(QI)的计算公式为:

$$QI = \sum_{j=1}^n W_j \times Q(x_j) \quad (4)$$

QI 值越大,土壤质量越高;相反,土壤质量越差。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质的变化

生活污水林地处理增加了表层土壤含水量,随着水力负荷的增加,土壤含水量增加。土壤容重影响土体中水、肥、气、热的变化与协调,是表征土壤质量的重要参数^[15-16]。土壤容重随着水力负荷增加而降低,3—6 cm/周处理容重较小,对照与较大水力负荷的土壤容重较大(表2)。由于高的土壤容重值通常表明土壤有退化的趋势^[17],所以水力负荷过大使土壤退化。土壤总孔隙度影响土壤与大气之间水和气体的交换以及植物体对土壤中水分和养分的吸收^[18],试验结果表明表层土壤总孔隙度随着水力负荷增加而增大,在6 cm/周水力负荷时达到最大值,然后又随着水力负荷的增加而降低,土壤渗透速率变化规律和土壤孔隙度相似(表2)。表层土壤含水量与容重在水力负荷之间有显著差异,而孔隙度与渗透速率无显著差异。

表2 土壤物理性质
Table 2 Soil physical properties

土层 Soil layers /cm	水力负荷 Hydraulic loading rate /(cm/周)	含水量 Moisture content /%	容重 Bulk density /(g/cm ³)	总孔隙度 Porosity /%	渗透速率 Permeability rate /(cm/d)
0—40	0 (CK)	7.44	1.47	37.99	18.36
	3	9.18	1.42	39.58	18.93
	6	10.16	1.38	40.79	19.92
	9	11.65	1.52	35.58	17.38
	12	12.83	1.56	34.44	16.19
	15	16.09	1.58	34.45	16.13
	P	<0.01	<0.05	>0.05	>0.05
40—100	0 (CK)	6.92	1.52	37.24	17.66
	3	8.26	1.50	38.69	18.05
	6	9.14	1.49	39.38	18.39
	9	10.49	1.54	37.49	17.44
	12	11.81	1.58	36.38	16.96
	15	14.97	1.61	35.92	16.37
	P	<0.01	>0.05	>0.05	>0.05

下层土壤的含水量、容重、孔隙度和渗透速率变化规律和表层土壤相似,但是容重在对照与各处理之间无显著差异,下层土壤的容重大于表层土壤,而含水量、孔隙度、渗透速率小于表层土壤。

土壤容重、土壤孔隙度和渗透速率的变化规律表明,适量的水力负荷有助于改善土壤结构,如果水力负荷过大,土壤渗透速率降低,发生了堵塞现象,使土壤物理性质恶化。

2.2 土壤化学性质的变化

试验结果表明(表3),试验区土壤均呈碱性,在对照与各处理之间差异不显著。表层土壤有机质含量随

着水力负荷的增加而增加,在 9 cm/周水力负荷时达到最大值,然后又随着水力负荷增加而减少,污水处理的土壤有机质含量均高于对照,在水力负荷较大时,污水中颗粒较大的有机物被表层土壤截留、吸附,将导致表层土壤堵塞、渗透速率下降;全氮、速效氮、全磷、速效磷含量变化趋势与有机质相似;土壤中全钾的含量随着水力负荷的增加而增加,在 6 cm/周水力负荷时土壤全钾含量最高,然后全钾含量又随着水力负荷的增加而增减;随着水力负荷的增加,土壤速效钾含量增加,在 12 cm/周水力负荷时达到最大值,然后又有所下降;土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷在各处理与对照之间有极显著差异。下层土壤有机质含量、全氮、全磷含量与全钾含量变化趋势和上层土壤相似,但是其含量均低于上层。

表 3 土壤化学性质

Table 3 Soil chemical properties

土层 Soil layers /cm	水力负荷 Hydraulic loading rate/(cm/周)	pH	有机质 Organic matter /(g/kg)	全氮 Total N /(g/kg)	全磷 Total P /(g/kg)	全钾 Total K /(g/kg)
0—40	0	8.38	3.67	0.34	0.40	17.38
	3	8.36	4.11	0.41	0.44	18.40
	6	8.37	4.59	0.46	0.42	19.12
	9	8.31	8.53	0.59	0.45	18.59
	12	8.35	6.64	0.47	0.46	18.91
	15	8.33	5.33	0.43	0.44	18.13
	<i>P</i>	>0.05	<0.01	<0.01	>0.05	>0.05
40—100	0	8.36	2.29	0.24	0.33	17.28
	3	8.39	2.45	0.29	0.40	18.91
	6	8.38	3.67	0.33	0.46	19.16
	9	8.33	3.91	0.38	0.42	18.76
	12	8.37	3.83	0.42	0.44	18.25
	15	8.30	3.88	0.47	0.42	18.04
	<i>P</i>	>0.05	<0.01	<0.01	>0.05	>0.05
土层 Soil layers /cm	水力负荷 Hydraulic loading rate/(cm/周)	速效氮 Availabe N /(mg/kg)	速效磷 Availabe P /(mg/kg)	速效钾 Availabe K /(mg/kg)	钠离子 Na ⁺ /(mg/kg)	氯离子 Cl ⁻ /(mg/kg)
0—40	0	19.56	1.99	88.08	9.42	16.57
	3	20.96	2.97	93.28	28.06	22.10
	6	25.15	3.61	94.28	37.61	26.24
	9	29.34	7.76	97.08	44.28	22.06
	12	23.75	6.76	108.41	49.83	16.52
	15	16.77	5.12	100.85	40.52	15.19
	<i>P</i>	<0.01	<0.01	>0.05	<0.01	<0.01
40—100	0	—	—	—	20.26	12.28
	3	—	—	—	31.83	15.19
	6	—	—	—	38.86	15.30
	9	—	—	—	47.06	16.04
	12	—	—	—	51.80	15.40
	15	—	—	—	21.77	12.23
	<i>P</i>	—	—	—	<0.01	<0.01

注:“—”表示该项目未测定

由于生活污水中氯化钠含量较高,生活污水林地处理增加了土壤上下两层钠离子含量,随着水力负荷的增加,土壤的钠离子含量逐步增加,在 12 cm/周水力负荷时达到最大值,然后又有所下降,在对照与各处理之间,钠离子含量有极显著差异,下层土壤钠含量高于表层(15 cm/周水力负荷除外),氯离子含量均低于表层(表 3)。虽然土壤胶体对钠离子的吸收能力较弱,但是如果钠离子在土壤中饱和度较大也可以被土壤胶体吸附^[19],所以随着水力负荷的增加,土壤中钠离子含量增大。表层土壤杨树根系比下层多,吸收的钠离子也较

多,因此表层土壤中钠离子含量比下层低。土壤氯离子含量随着水力负荷的增加而增加,在 6 cm/周水力负荷时达到最大值,然后又随着水力负荷增加而减少,氯离子含量在对照与各处理之间有极显著差异(表 3)。由于氯离子很少被土壤吸附,常存在于土壤溶液中,容易随着水分下渗^[19],所以在污水处理量较大时,土壤中氯离子的含量并不高(表 3)。

生活污水杨树林地慢渗生态处理明显增加了土壤中有机质、全氮、速效氮、速效磷的含量,也显著增加了钠离子与氯离子的含量。土壤有机质、全氮等营养物资的增加有利于提高土壤肥力,在水力负荷较大时,表层土壤有机质含量急剧增加会导致土壤堵塞,钠离子与氯离子的大幅度增加对将对土壤性状产生不良影响。

2.3 表层土壤质量综合指标

表层 0—40 cm 土壤是杨树根系,尤其是细根集中分布的层次^[20],杨树根量大,小于 1 mm 的细根所占比例大,可以为土壤微生物提供很好的生长界面,促进土壤微生物的发育^[21],对污水处理具有重要作用,该层次土壤理化学性质对土壤性状和杨树生长影响较大,所以选择比较稳定的土壤理化性质,采用主成分分析法对表层土壤质量进行综合评价,定量化研究生活污水杨树林地慢渗生态处理对表层土壤性状的影响。

选用 8 个土壤指标作为指示土壤质量的指示因子(表 4),主要用以指示土壤肥力水平。一些土壤特性如 pH 值等没有列入公式是因为它们在指示土壤质量中有不确定性^[14]。在土壤中钠离子含量较小时,对土壤质量可能没有明显影响,含量较高时破坏土壤结构,使土壤容重增大。土壤中氯离子很少被土壤吸附,在水力负荷较大时含量反而降低。土壤钠与氯离子对土壤的影响也具有不确定性,所以均未作为土壤质量因子。

土壤质量综合指标反映了不同水力负荷的土壤质量的相对值。利用公式(1)和(2),计算土壤质量因子的隶属度值(表 4)。

表 4 上层土壤质量因子的隶属度值
Table 4 Membership function value of topsoil quality factors

水力负荷 Hydraulic loading rate /(cm/周)	0(CK)	3	6	9	12	15
容重 Bulk density	0.55	0.80	1.00	0.30	0.10	0.00
有机质 Organic matter	0.00	0.09	0.19	1.00	0.61	0.34
全氮 Total N	0.00	0.28	0.48	1.00	0.52	0.36
全磷 Total P	0.00	0.67	0.33	0.83	1.00	0.67
全钾 Total K	0.00	0.59	1.00	0.70	0.88	0.43
速效氮 Availabe N	0.22	0.33	0.67	1.00	0.56	0.00
速效磷 Availabe P	0.00	0.17	0.28	1.00	0.83	0.54
速效钾 Availabe P	0.00	0.26	0.30	0.44	1.00	0.63

表 5 给出了不同土壤质量因子主成分分析的结果,从因子主成分的贡献率来看,第一主成分的贡献率最大,第一主成分包括速效磷、有机质、全氮,它们具有较大的荷载,分别为 0.979、0.938、0.901。但是第一主成分的贡献率不能完全代表原变量的信息,所以计算中用了第一、第二主成分的值。权重系数是利用第一、第二主成分的值来求出公式(3),通过公式(4)求出土壤质量综合指标值。

单一的因子评价的重点常集中在土壤有机质或氮磷钾含量变化上,由于对照土壤的不同,不同研究者的结果十分难以对比,且土壤质量变化难以精确的评价比较^[22]。由于土壤质量因子的多样性,许多研究者提出了不同的综合方法来将其定量化来描述土壤质量的变化^[23]。

本研究计算出的 *QI* 值反映了生活污水林地对表层土壤质量的影响。图 1 显示不同污水处理量的 *QI* 值。0—15cm/周处理土壤的 *QI* 值分别是 0.359、0.904、1.458、1.646、1.037 和 0.375。*QI* 值随着污水处理量增加而增加,在 9 cm/周水力负荷达到最大值,是对照土壤的 4.5 倍,然后又随着水力负荷的增加而降低,与 9 cm/周水力负荷相比,在最大水力负荷时其土壤土壤质量指标降低了 73%,稍高于对照土壤综合质量指数值。适当的污水处理量提高了土壤质量,但是如果处理量太大,将导致土壤质量下降。

表 5 上层土壤质量因子主成分分析

Table 5 Analysis of principal components of topsoil quality factors

主成分 Component number	1	2	3	4	5	6	7	8
贡献率 Percent of variance	63.92	22.14	10.84	2.02	1.08	0	0	0
累计贡献率 Cumulative percentage	63.92	86.06	96.90	98.92	100	100	100	100
第一主成分因子负荷量 First component capacity	-0.10	0.18	0.18	0.17	0.13	0.13	0.19	0.15
第二主成分因子负荷量 Second component capacity	0.46	0.02	0.19	-0.13	0.26	0.40	-0.07	-0.25
第一主成分因子权重 First component weight	-0.10	0.17	0.17	0.17	0.13	0.13	0.18	0.15
第二主成分因子权重 Second component weight	0.52	0.02	0.22	-0.15	0.30	0.45	-0.08	-0.28

2.4 杨树地上部分生长量变化

在试验期间,0—15cm/周处理杨树地上部分的生长量分别是8.33,12.27,16.19,18.77,12.41和11.47($t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。生活污水林地处理增加了杨树生长量,与对照相比,用生活污水处理 I-72 杨树人工林,5 个处理的年平均地上部分生长量增加了 70.7%(图 2)。当生活污水每周水力负荷为 3—9 cm 时,地上部分的生长量随着水力负荷的增加而增加,并与对照有显著差异,在 9 cm/周水力负荷时,杨树地上部分生长量最大,当每周水力负荷达到 12—15 cm 时,地上部分生长量明显降低。

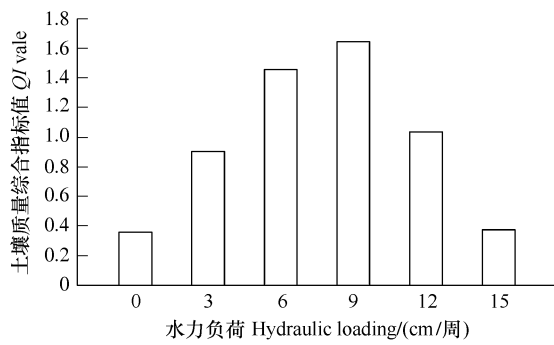


图 1 不同水力负荷土壤综合质量指标

Fig. 1 Soil integrated quality index treated with different hydraulic loading rate of domestic wastewater

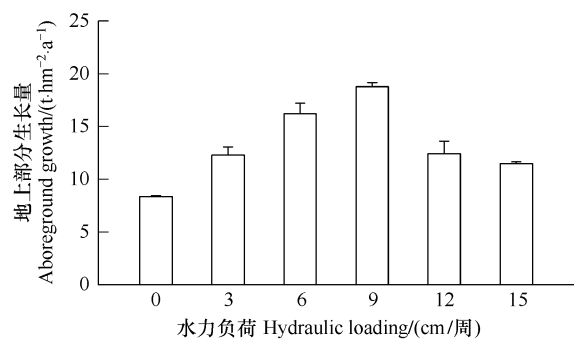


图 2 不同水力负荷杨树人工林地上部分生长量

Fig. 2 Aboveground growth of poplar plantation treated with different hydraulic rate loading of domestic wastewater

由于土壤与降水可以稀释生活污水,因此在水力负荷较小时,其中的氯化钠含量较低,不会对林木生长造成严重的危害,污水中的养分促进了杨树的生长。但是如果大量污水输入林地,土壤处于厌气状态,嫌气分解作用强烈,土壤中速效养分含量下降,再加上土壤氯化钠的含量急剧增加,对杨树的生长产生了胁迫作用,使杨树的生长量降低。

3 结论与讨论

3.1 污水处理对土壤物理性质的影响

土壤容重、孔隙度与渗透速率的变化规律表明,如果水力负荷过大,将导致土壤物理性质恶化。随着水力负荷的增加与土地处理系统运行时间的延长,土壤中 Na^+ 的含量急剧增加,可能导致土壤钠质化。在钠质化土壤中,团聚体和粘粒的分散导致土壤大孔隙和小孔隙的崩塌,因而阻碍气体和水分的运动,导致土壤干燥时强度增大^[24]。土壤结构与水力传导度紧密相连,团聚体的碎散和/或容重的增加都可能引起水力传导度的降低^[25],粘粒的分散和膨胀均可能降低水力传导度,膨胀减小土壤孔隙的孔径,而分散性粘粒堵塞孔隙,土壤渗

透速率下降。适度的土壤孔隙堵塞能扩大土地处理系统内部的非饱和流动区域,提高处理效果,但过度的堵塞将使污水难以通过土壤层,从而降低系统的水力负荷和有效容积。因此,对土壤堵塞的预防与控制是维持土地处理工艺长效运行的关键^[26]。在利用钠质水灌溉情况下,分散性粘粒对土壤孔隙的堵塞是表层土壤水力传导度降低的一个主要原因^[27]。可见,生活污水中较高的钠离子含量是限制污水杨树林地处理水力负荷的主要因素之一。

3.2 污水处理对土壤化学性质的影响

生活污水杨树林地处理对土壤化学性质产生了明显的影响,在较小水力负荷时,土壤对多种有机物有强烈的吸附作用,使之固定于土层中,通过微生物的生物氧化,转化为易被植物吸收的低分子有机物或无机质。过高的污水负荷与有机负荷,较大的有机物颗粒堵塞表层土壤孔隙,易造成土壤厌氧条件,处理效果下降且产生异味。土壤对污水中的氮有一定的吸附能力,有机氮化物通过土壤微生物作用,可迅速转化为氨氮(NH_3)。一部分氨氮为土壤吸附,另一部分通过硝化作用,转化为硝氮(NO_3),氨氮与硝氮可以被植物根系吸收,剩余部分随水流向下层渗滤;在水力负荷较高时,污水中有机污染物在土壤反硝化菌的作用下生成氮气(N_2),释放于大气中。污水中磷化物(以正磷酸盐为主)可以增加土壤中速效磷的含量;污水中有机物在有机磷微生物的作用下,经过分解可以逐渐转化为植物可以利用的无机磷化物,也可以增加土壤中的速效磷含量。污水中的可交换的阳离子包括钠离子、钙离子和镁离子随污水进入土壤后,通过土壤的离子交换作用而被土壤吸收^[28]。

如果水力负荷适当,污水为土壤发育提供了适宜的水分与养分,有利于污染物的分解与有效化,速效养分的增加有利于促进林木生长。在水力负荷较大时,污水中有机物堵塞了表层土壤孔隙,土壤中以嫌气分解为主,养分利用率低,加上通气不良,杨树根系进行无氧呼吸,不利于杨树生长。土壤中较高钠离子含量使钾的有效性降低,将抑制杨树的生长。

3.3 土壤性质变化与杨树的生长量的关系

相关性分析结果表明,杨树地上部分生长量和表层土壤质量综合指标值(QI)之间具有极显著的线性关系($r=0.94, P<0.01$)。杨树是污水林地生态处理系统的优势植物群落,对养分与水分循环具有重要的作用,其根系,尤其是细根,主要分布在表层土壤,杨树生长状况也可以反映表层土壤质量水平,用土壤质量综合指标评价生活污水杨树林地处理后表层土壤质量的变化是比较准确的。

在生活污水杨树林地慢渗生态处理过程中,杨树的生长状况、污水处理、土壤肥力三者之间密切相关。适量的生活污水为林木生长提供了必要的养分与水分,提高了土壤肥力,有助于林木生长,林木生长需要消耗大量养分,可以吸收土壤中的污染物,但是如果水力负荷率过大,土壤中钠离子含量急剧增加,将导致土壤肥力下降,抑制林木的生长,降低林地处理系统的处理效率。

在杨树林地慢渗生态处理系统中,表层土壤质量和杨树的生长量随着水力负荷增加而增加,在水力负荷为 9 cm/周时达到最大值,然后又随着水力负荷增加而降低;在较高水力负荷时,土壤中氯化钠等有害物质含量急剧增加、物理性质恶化、土壤中速效养分含量下降,是导致表层土壤质量下降和杨树生长量降低的主要原因之一。在水力负荷较小时,污水中的污染物被表层土壤吸附,经过土壤微生物分解,被林木吸收,对下层土壤性质影响较小;在较高水力负荷时(>9 cm/周),污水中的污染物沿着土壤孔隙随着水分下渗,下层土壤中有机质、全氮、全磷和钠离子含量增加,较高钠离子含量对下层土壤产生了不良影响。在水力负荷为 3 cm/周时,污水处理量较小,不能充分发挥杨树林地的对生活污水的处理作用,在水力负荷较大于 9 cm/周时,土壤质量和林木生长量急剧下降,不利于处理系统的持续运行,所以杨树林地慢速渗滤生态处理系统的最适宜的水力负荷应为 6—9 cm/周。

References:

- [1] Zhang K S, Zhou Q X, Sun T H. Advances in treatment technology of urban domestic wastewater. Research and Development of World Science and

- Technology, 2003, 20(5): 5.
- [2] Marcucci M. and Tognotti L. Reuse of wastewater for industrial needs: the Pontedera case. *Resources, Conservation and Recycling*, 2002, 34: 249-259.
- [3] Sun T H, Zhou Q X, Zhang K S. Wastewater eco-treatment technology system and application. *Water Resources Protection*, 2002, 3: 6-7.
- [4] Zheng S C, Gao R T, Liu F J, Zheng D P. The High-yield Cultivation of Poplar Plantation. Beijing: Jindun Publishing House, 2007:35.
- [5] Isebrands JG, Karnosky DF. Environmental benefits of poplar culture. NRC Research Press, 2001: 207-218.
- [6] Jill A Z, Ronald S Z, David R C, David R C, Richard B H. Growth and biomass of *Populus* irrigated with landfill leachate. *Forest Ecology and Management*, 2007, 248:143-152.
- [7] Cai S Y, Zheng Z H, Lu H, Yang H, Zhang J F. Study on hydraulic loading in slow rate land system in Tianjin. *China Environmental Science*, 1992, 12(6): 438-442.
- [8] Wang S W, Liu Q Y, Jiao Y Z, Sun T H. The latest progress in soil infiltration treatment of sewage in situ. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(3): 5-9.
- [9] Gao C M, Li X F. Natural System for Waste Management & Treatment. Beijing: Standards Press of China, 1991:16-25, 251-272.
- [10] Institute of Soil Science, CAS. Physical and Chemical Analysis of Soil. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [11] Yin G Q, Tian D L, Fang X, Hong Y. Effects of land use types on soil quality of the hilly area in central Hunan Province. *Science Silvae Sinicae*, 2008, 44(8): 10-14.
- [12] Liu S L, Fu B J, Lu Y H, Chen L D, Ma K M. Assessment of soil quality in relation to land use and landscape position on slope. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 414-420.
- [13] Zhang Q F, Song Y C, You W H. Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 174-178.
- [14] Liu S L, Fu B J, Chen L D, Qiu J, Lv Y H. Comparison of two quantitative methods in assessing soil quality in different land uses. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(5): 422-426.
- [15] Acosta-Martinez V, Reicher Z, Bischoff M, Turco R F. The role of tree leaf mulch and nitrogen fertilizer on turf grass soil quality. *Biology Fertility of Soils*, 1999, 29: 55-61.
- [16] Whalley W R, Dumitru E, Dexter A R. Biological effects of soil compaction. *Soil Tillage Research*, 1995, 35: 53-68.
- [17] Gao X S, Deng L J, Zhang S R. Soil physical properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(2): 53-60, 79.
- [18] Zheng Y S, Ding Y X. Effect of mixed forests of Chinese fir and Tsoong's tree on soil properties. *Pedosphere*, 1998, 8(2): 161-168.
- [19] Sun X Y. Soil Sciences. Beijing: Chinese Forestry Press, 2005: 319, 208-209.
- [20] Cui L J, Liang Z S, Han R L, Yang J W. Biomass, soil and root system distribution characteristics of seabuckthorn poplar mixed forestry. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(6): 1-7.
- [21] Louis A L, Isebrands J G. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. *Biomass & Bioenergy*, 2005, 28: 203-2018.
- [22] Townsend A R, Vitousek P M, Trumbore S E. Soil organic matter dynamics along gradients in temperature and land use on the island of Hawaii. *Ecology*, 1995, 76: 721-733.
- [23] Adejuwon J O, Ekanade O. A comparison of soil properties under different land use types in a part of the Nigerian Cocoa Belt. *Catena*, 1988, 15: 319-331.
- [24] Rengasamy P, Olsson K A. Sodicity and soil structure. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29: 935-952.
- [25] So H B, Aylmore L A G. How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behavior. *Australian Journal of Soil Research*, 1993, 31, 761-777.
- [26] Kong H N, Kimochi Y, Mizuochi M, Inamori R, Inamori Y. Study of the characteristics of CH₄ and N₂O emission and methods of controlling their emission in the soil-trench wastewater treatment process. *The Science of the Total Environment*, 2002, 290: 59-67.
- [27] Frenkel H, Goertzen J O, Rhoades J D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Science*, 1978, 42: 32-39.
- [28] Jiang P C. Environmental Engineering. Beijing: Higher Education Press, 1992: 199-205.

参考文献:

- [1] 张凯松,周启星,孙铁珩. 城镇生活污水处理技术研究进展. 世界科技研究与发展,2003,20(5):5.
- [3] 孙铁珩,周启星,张凯松. 污水生态处理技术体系及应用. 水资源保护, 2002,3:6-7.
- [4] 郑世锴,高瑞桐,刘奉觉,曾大鹏. 杨树丰产栽培. 北京:金盾出版社,2007:8-11.
- [7] 蔡思义,郑振华,陆华,杨虹,张金凤. 天津市污水慢渗土地处理系统水力负荷研究. 中国环境科学,1992,12(6):438-442.
- [8] 王书文,刘庆玉,焦银珠,孙铁珩. 生活污水土壤渗滤就地处理技术研究进展. 水处理技术,2006,32(3):5-9.
- [9] 高拯民,李宪法. 城市污水土地处理利用设计手册. 北京:中国标准出版社,1991:16-25,251-272.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [11] 尹刚强,田大伦,方晰,洪瑜. 不同土地利用方式对湘中丘陵区土壤质量的影响. 林业科学,2008,44(8):10-14.
- [12] 刘世梁,傅伯杰,吕一河,陈利顶,马克明. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响. 生态学报,2003,23(3):414-420.
- [13] 张庆费,宋永吕,由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系. 生态学报,1999,19(2):174-178.
- [14] 刘世梁,傅伯杰,陈利顶,丘君,吕一河. 两种土壤质量变化的定量评价方法比较. 长江流域资源与环境,2003,12(5):422-426.
- [17] 高雪松,邓良基,张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析. 水土保持学报,2005,19(2):53-60,79.
- [19] 孙向阳. 土壤学. 北京:中国林业出版社,2005:319,208-209.
- [20] 崔浪军,梁宗锁,韩蕊莲,杨建伟. 沙棘-杨树混交林生物量、林地土壤特性及其根系分布特征研究. 林业科学,2003,39(6):1-7.
- [28] 蒋展鹏. 环境工程学. 北京:高等教育出版社,1992:199-205.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 22 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 22 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元