

不同碳氮比条件下 4 种可控因素对垂直流人工湿地总氮去除的影响

朱文玲¹, 郑离妮¹, 崔理华¹, 欧阳颖², 骆世明³, 汤仲恩⁴

(1. 华南农业大学环境科学与工程系, 广州 510642; 2. Department of Water Resources, St. Johns River Water Management District, Palatka, Florida 32178, USA; 3. 华南农业大学农学院, 广州 510642; 4. 上海伊世特科技管理有限公司, 上海 200001)

摘要:以模拟垂直流人工湿地为研究对象,采用正交试验法考查了在不同碳氮比(C/N)条件下,进水流量、水位高度、湿干比及运行周期 4 个可控因素对垂直流人工湿地脱氮的影响。结果表明,增加 C/N 可提高总氮去除效率,4 个可控因子对污水总氮的去除有显著影响,进水量是总氮去除最重要的影响因素,干湿比的影响强度随着 C/N 的增大而增加,当 C/N 为 1:1 和 3:1 时,总氮的去除效果最优组合为:水位高度为 50 cm,湿干比为 2:1,周期为 24 h 且进水流量为 80 cm³·d⁻¹;当 C/N 为 5:1 时,总氮的去除效果最优组合为:水位高度为 25 cm,湿干比为 1:1,周期为 24 h 且进水流量为 80 cm³·d⁻¹。

关键词:垂直流人工湿地;碳氮比;可控因素;总氮去除

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)06-1187-06

Vertical-flow Constructed Wetland De-nitrification Impact of Four Controllable Factors with Different C/N

ZHU Wen-ling¹, ZHEN Li-ni¹, CUI Li-hua¹, OUYANG Ying², LUO Shi-ming³, TANG Zhong-en⁴

(1. Department of Environmental Science and Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Department of Water Resources, St. Johns River Water Management District, Palatka, Florida 32178, USA; 3. College of Agronomy, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China; 4. ESD China Limited, Shanghai 200001, China)

Abstract: This study investigated the impacts of four different controllable factors, including inflow rate, water level, wet-to-dry ratio and operational cycle, upon the removal of nitrogen from the vertical-flow constructed wetlands under varying carbon-nitrogen (C/N) ratios, using the orthogonal experimental design. Results showed that removal efficiency of total nitrogen (TN) increased with C/N. The four different controllable factors had significant impacts on the TN removal and the inflow rate was the most important factor. The impacts of the wet-to-dry ratio increased with the C/N ratio. When the C/N ratios were 1:1 and 3:1, the optimal combination for best removal of TN was water level of 50 cm, wet-to-dry ratio of 2:1, operational cycle of 24 hours and inflow rate of 80 cm³·d⁻¹. When the C/N ratio was 5:1, the optimal combination for best removal of TN was water level of 25 cm, wet-to-dry ratio of 1:1, operational cycle of 24 hours and inflow rate of 80 cm³·d⁻¹.

Keywords: vertical-flow constructed wetland; carbon-nitrogen ratio; controllable factors; total nitrogen removal

人工湿地具有低投资、低能耗及低运行维护要求等优势,已经成为污水处理的有效方法。人工湿地去除氮素主要通过氨挥发、植物吸收、基质吸附沉淀、微生物分解等作用^[1]。影响人工湿地脱氮的因素很多,从湿地构成来说,脱氮主要内在因素是基质、植

物及微生物^[2],外界环境因素如水力负荷、水力停留时间、灌水周期、湿度、碳源、溶解氧、pH 等^[3-4]对氮的去除也起着重要的作用。此外,碳氮比(C/N)被认为是影响氮去除的关键因素^[5],有机碳源作为反硝化过程的电子供体,直接影响氮的去除。前人已经对基质、植物和微生物等脱氮的影响因素做了比较详尽的研究^[6-7],也对溶解氧、pH、温度等指标进行了测量与探讨^[8-10],然而,对外界影响因素特别是水力学相关因素的研究还相对缺乏。同时,在实际工程应用时,控制水力学条件来提高脱氮效果是重要的手段,对水力

收稿日期:2009-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(40871110,30828005);海外与港澳学者合作研究基金项目(30828005)

作者简介:朱文玲(1983—),女,广东人,博士研究生,主要研究方向为水污染治理。E-mail:wlzhu701@163.com

通讯作者:崔理华 E-mail:lihcu@scau.edu.cn

学各可控因子对脱氮的影响探讨意义重大。

本文以模拟垂直流人工湿地为研究对象,考察不同碳氮比条件下,进水流量、水位高度、湿干比及运行周期等4个水力学可控因素对垂直流人工湿地脱氮的影响,开展正交实验,以寻求最大影响因素及优化的因素组合,为人工湿地脱氮的机理研究提供基础依据,且对人工湿地的开发、推广及实际工程中的运行管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 人工湿地的构建

垂直流人工湿地选取PVC管共27个(高100 cm,外直径20 cm)为主体装置,基质填高90 cm,其中砾石(粒径1~3 cm)铺于底部以上10 cm,河砂(粒径为0.5~2 mm)铺于砾石以上80 cm,并在出水口连接一条水位控制软管,以调节水位高度(图1)。在PVC管顶端放置5 L贮水桶(底部穿孔,并连接输液管作为布水管)用来贮备污水,布水管尾端放在基质表面,根据设定的灌水量进行布水,通过安装在输液管上的滴水控制开关控制进、出水流量。

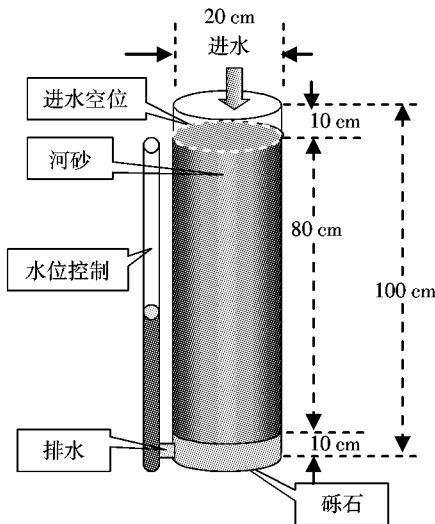


图1 人工湿地试验柱结构示意图
Figure 1 Schematic diagram of the experimental column

1.2 试验设计影响因素水平的确定

(1)碳源水平的确定:碳源水平的确定主要参考农村径流和典型城市生活污水水质,确定COD_G的3个水平为40、120、200 mg·L⁻¹。而由于采用的污水氮的水质为普通生活污水水平的浓度,从而确定C/N的条件为1:1、3:1、5:1。

(2)进水量的确定:进水流量是由水力负荷决定

的,本试验设定的水力负荷为20、40、80 cm·d⁻¹。在预备试验中,当水力负荷大于80 cm·d⁻¹时,系统内水疏导率不够高,系统易出现淹水环境,且漫水到柱外。另查阅前人研究经验^[1],故测定了这3个水力负荷,相应的进水量为3.53、7.06、14.12 L·d⁻¹。

(3)湿干比的确定:有学者认为湿干比较大的容易出现厌氧条件而有利于N的反硝化^[2],但也有研究发现,湿干比与总氮的去除呈负相关关系,湿干比越小则越有利于脱氮^[3],故测定湿干比在2:1、1:1、1:2的3个水平来观察湿干比的影响。

(4)水位高度的确定:设定低、中、高3种水位高度,柱高为1 m,基质高度为90 cm。为使高度分布均匀,故设定25、50、75 cm为水位高度水平。

(5)周期的确定:根据常用的数值范围确定,人工湿地在用于实际工程应用时,太长的周期会导致人工湿地利用率低,太短周期易使系统与污水接触时间过短,不易进行去污处理,通常在工程应用中,希望周期不要太长以增加污水处理量,故设定周期时间为12、24、48 h 3个水平进行研究。

1.3 试验设计及人工湿地的运行

设定3个碳氮比条件分别为1:1、3:1、5:1,根据进水流量、人工湿地的水位高度、人工湿地的淹水与落干的时间比例(湿干比)、一个干湿周期的时间长度等4个可控条件,设计4因素3水平正交试验。

用L₉(3⁴)正交表设计,每个碳氮比条件下各设置9个处理,并作3个重复,用人工污水开展试验。因素水平设置表可见表1。本试验运行时间为2009年5月10日至2009年9月30日。

表1 4因素3水平试验设计
Table 1 The 4-level and 3-factor table

编号	A 水位高度/ cm	B 湿干比 (湿时间:干时间)	C 周期/ h	D 进水量/ cm·d ⁻¹
1	25	2:1	12	20
2	25	1:1	24	40
3	25	1:2	48	80
4	50	2:1	24	80
5	50	1:1	48	20
6	50	1:2	12	40
7	75	2:1	48	40
8	75	1:1	12	80
9	75	1:2	24	20

1.4 供试污水特性

供试污水由人工配制而成。投加尿素、磷酸二氢

钙、硫酸铵、可溶性淀粉、碳酸钠和奶粉等至自来水中配成中等浓度的人工污水，药品等级为化学分析纯。TN 浓度范围为 49.47~52.79 mg·L⁻¹，碳源浓度可通过添加淀粉及奶粉等进行调节。

1.5 分析方法

总氮(TN)测定采用过硫酸钾消解,紫外分光光度法^[14]。数据统计采用 SAS9.0 及 SPSS16.0 进行多重比较及多因子方差分析。

2 结果与分析

2.1 3 种碳氮比条件下各处理对总氮的去除效果

9 个处理对总氮的去除情况可见表 2 和图 2。除 9 号处理外,出水的总氮浓度随着 C/N 增加出现降低的趋势。碳源的增加为微生物的生长提供更多的养分,微生物大量繁殖,消耗氧气,分解有机物,使系统中出现厌氧环境。而人工湿地中 TN 的去除主要是通过微生物的硝化、反硝化作用来完成^[15],其中反硝化作用是氮得到最终去除的主要途径,反硝化作用一般在缺氧条件进行,在进水总氮浓度一定的情况下,进水有机物浓度的增加有利于反硝化过程的顺利进行^[16]。故随着 C/N 的增加,出水的总氮浓度相应会有所降低。

本试验条件下,进水量增加有利于总氮的去除。总氮的去除率大小,大部分处理呈现随 C/N 增加去除率也增加的趋势。C/N 为 1:1 的条件下,1、6、7、8、9 号处理的出水总氮含量无显著性差异,而均与 3 号、4 号处理出水存在显著性差异($P<0.05$)。3、4 号处理出水中的总氮浓度小于其他处理系统,而随着 C/N 的增加,各处理的差异更加明显。

2.2 正交试验分析

极差分析结果见表 3,表中 T1、T2、T3 分别代表不同因素同一水平结果的平均值, R 表示极差。

进水量对总氮的影响最大,而随着 C/N 增加,湿干比的影响力也逐渐显露。当 C/N 为 1:1 和 3:1 时,

表 2 出水总氮浓度(mg·L ⁻¹)				
Table 2 The effluent concentration of total nitrogen(mg·L ⁻¹)				
处理	样品数	C/N=1:1	C/N=3:1	C/N=5:1
1	15	31.51±1.68ab	31.83±0.93b	31.33±0.67a
2	15	29.79±1.08bc	29.94±0.89c	21.99±1.34c
3	15	29.52±1.27c	26.4±1.4e	25.42±0.67bc
4	15	24.81±2.38d	22.88±1.44f	23.9±0.57c
5	15	32.66±1.08a	31.69±1.42b	31.48±0.91a
6	15	32.08±1.65abc	32.18±1.36a	31.63±0.32a
7	15	31.96±2.75ab	29.14±1.08cd	27.65±0.86b
8	15	31.76±1.07abc	27.89±0.55de	22.36±0.9c
9	15	32.87±1.15a	29.45±1.06cd	32.54±1.2a

注:表中结果为所有样本平均值,表述为平均值±标准误差,表中
所标字母采用 Duncan 法进行多重比较;同一列中含有相同字母者表示
差异不显著($P=0.05$)。

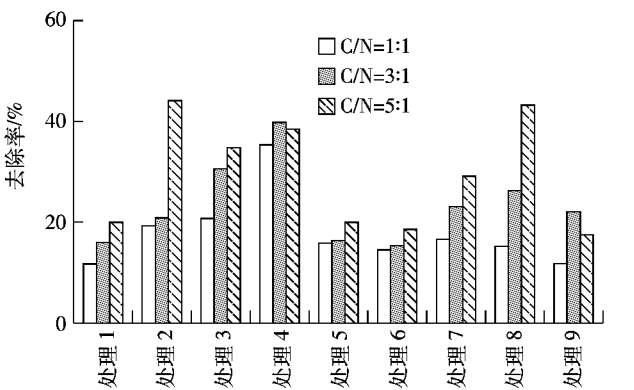


图 2 各处理对 TN 去除率比较
Figure 2 TN removal rate of different treatment

当水位在 50 cm,湿干比为 2:1,周期为 24 h,且进水量为 14.12 L·d⁻¹ 时,对总氮的去除率可达到最高。而当 C/N 为 5:1 时,水位在 25 cm,湿干比为 1:1,周期为 24 h,且进水量为 14.12 L·d⁻¹ 时,对总氮的去除率可达到最高。

方差分析表明(表 4)当 C/N 为 1:1 时,水位、进水量和周期时间对总氮的去除有极显著意义;当 C/N 为

表 3 总氮去除率正交试验直观分析表(%)
Table 3 Orthogonal visual analysis of TN removal rate(%)

	水位			湿干比			周期			进水量		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
T1	17.24	22.50	32.97	21.25	26.30	29.19	13.84	19.23	27.23	13.12	18.16	19.12
T2	21.92	23.86	25.66	16.79	21.18	35.75	22.12	27.60	33.36	16.81	19.80	30.61
T3	14.55	23.83	29.94	15.67	22.72	23.63	17.75	23.37	27.97	23.78	32.23	38.84
R	7.37	1.51	7.31	5.58	5.13	12.13	8.28	9.92	6.12	10.66	14.06	19.72

注:(1)(2)(3)分别代表 C/N 为 1:1、3:1、5:1 的情况。

表4 方差分析表

Table 4 The variance analysis table

		离差平方和	自由度	均方	F值	P值
水位	C/N=1:1	262.70	2	131.35	6.36	0.008**
	C/N=3:1	27.07	2	13.53	0.51	0.61
	C/N=5:1	239.06	2	119.53	7.55	0.004*
湿干比	C/N=1:1	60.95	2	30.47	1.48	0.255
	C/N=3:1	122.00	2	61.00	2.29	0.13
	C/N=5:1	667.55	2	333.78	21.08	0.000**
周期时间	C/N=1:1	336.50	2	168.25	8.14	0.003**
	C/N=3:1	1 330.18	2	665.09	24.95	0.000**
	C/N=5:1	1 825.93	2	912.97	57.65	0.000**
进水量	C/N=1:1	560.62	2	280.31	13.57	0.000**
	C/N=3:1	380.51	2	190.25	7.14	0.005*
	C/N=5:1	218.36	2	109.18	6.89	0.006

3:1时,进水量对总氮的去除有显著意义,周期时间有极显著意义;当C/N为5:1时,水位对总氮的去除有显著意义,干湿比和周期时间有极显著意义。

2.3 试验结果验证

由于优化组合是通过统计分析获得,有必要进行试验结果验证,于2009年10月1日至12月4日进行了由正交试验分析得到的最优组合的验证试验。验证试验表明,当C/N为5:1时,正交试验统计出的最优组合去除率为52.17%。大于此C/N下的试验最优处理(处理2),其去除效率为44.18%。当C/N为1:1和3:1时,由于得出的最优组合与正交试验中处理4的水平设置一致,在这两种C/N条件下,其结果与正交试验处理4的结果基本一致。

3 讨论

3.1 C/N对总氮去除的影响

本试验发现,C/N影响系统对总氮的去除。随着C/N增加,总氮的去除效率增加,这与Baker等^[17]早在1998年的研究结果一致,其研究发现,当C:N>5:1时,反硝化效率达到最高值。在人工湿地中,氮的最终去除是依靠微生物的反硝化作用使其转化为气体逸出系统。反硝化菌是兼性厌氧菌,有机碳源不足是抑制其作用的关键因素,在进水总氮浓度一致的情况下,进水有机物浓度的增加有利于反硝化过程的顺利进行^[18]。

本试验设定的C/N达到5:1时,总氮的去除率达到最高值。随着碳氮比的进一步增加,总氮的去除效果是否会继续增加还是会降低,是需要进一步研究的问题。

3.2 进水量对总氮去除的影响

本试验在一定的进水量(20~80 cm·d⁻¹)条件下,进水量增加有利于总氮的去除。从表4可看出,进水量在C/N为1:1和1:3的条件下对总氮有着显著的影响。C/N越低,进水量对总氮去除的影响越显著,这与贺峰等^[11]试验结果一致。而陈娟等^[19]发现随着进水流量的增大,对TN的去除率出现降低的情况,这可能与他们设定的水力负荷条件有关(其设定进水量为28.8~86.4 L·d⁻¹),进水负荷过大易引起停留时间、出水速率和出水量的下降,过小则不能充分发挥湿地净化潜力,故适当的进水负荷则可增强湿地脱氮效果。

3.3 湿干比对总氮去除的影响

随着C/N增加,湿干比的影响力也逐渐显露。如前所述,当C/N=5:1时,其影响重要性已排到第2位,湿干比的大小决定着系统复氧强度大小,也是保持人工湿地高效、稳定运行的关键。

本试验设定湿干比为2:1、1:1、1:2 3种水平。结果发现,当湿干比为2:1时,在C/N为1:1、3:1条件下对总氮的去除效果最好,而在C/N为5:1条件下湿干比为1:1时效果最好,与崔理华等的研究结果相符^[2]。

在本试验中,湿干比较大的条件下,其总氮去除效率较高,说明在此条件下系统内硝化、反硝化能力较为平衡。当C/N为5:1时,由于系统内有机质增加,系统孔隙被有机物填充,孔隙变小,复氧能量减弱,持续厌氧条件,故若湿干比过大,不利系统复氧,当湿干比为1:1时,其脱氮效果最佳。

3.4 水位和周期对总氮去除的影响

当设定好干湿比时,周期决定了系统的间歇运行时间,间歇运行会产生大气复氧,比连续进水系统更能提高污染物的去除效率^[20]。对于相同水力负荷,周期时间短,则进水频率相对较高,高频率的进水可提高系统内水力停留时间,但对于系统复氧不利^[21]。

本试验发现在3个C/N条件下,周期为24 h时,各系统对总氮的去除最佳(见表3)。周期过长,则连续进水或停留时间相应延长,可能会引起滞留现象,影响出水效果,而周期过短,则不能给净化提供足够的时间^[22]。

湿地中水深与水力负荷、水力停留时间一样,是影响湿地运行的三大要素之一,在实际运行中均存在一个最佳值^[23]。在本试验条件下,水位对氮去除的影响不大(见表3),而当C/N为1:1及3:1时,最佳水位高度为50 cm。由于本试验并无种植植物,无根系泌氧,所以低C/N条件下系统过高的水位可能引起系统

缺氧而引起硝化强度不足,过低的水位不能提供足够的厌氧条件进行反硝化作用。而黄娟等研究表明,种植植物条件下,水位越高系统脱氮效果越好,当水位为 60 cm 时对总氮的去除率较高^[24]。当 C/N 为 5:1 时,最佳水位 25 cm,这可能因为在此条件下,进入系统的有机物大大增加,微生物分解有机物加快系统内氧气消耗,且大量有机物被上层河砂截留,引起系统内部厌氧环境扩大,水位过高不利于硝化作用的顺利进行,而在低水位条件下系统复氧程度较高,氨氮的充分硝化,使脱氮效果增强。

4 结论

4 种可控因素对总氮的去除均有重要影响。当 C/N 为 1:1 时,对总氮去除影响的重要性的可控因素排列顺序是:进水量>周期>水位>湿干比;当 C/N 为 3:1 时,排序为:进水量>周期>湿干比>水位;而当 C/N 为 5:1 时,排序为:进水量>湿干比>水位>周期。

正交试验直观分析与验证试验结果表明,总氮去除率的决定性因素是进水量,当 C/N 为 1:1 和 3:1 时,去除总氮的最佳组合为:水位高度为 50 cm,湿干比为 2:1,周期为 24 h 且进水流量为 $80 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。当 C/N 为 5:1 时,去除总氮的最佳组合为:水位高度为 25 cm,湿干比为 1:1,周期为 24 h 且进水流量为 $80 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。验证试验表明,当 C/N 为 5:1 时最佳组合去除率达到 52.17%,随着 C/N 的增加,湿干比的影响重要性增大。

低 C/N 条件下,总氮的去除率较低,而随着 C/N 增大,总氮的去除得到增加,在 C/N 为 5:1 时,其最佳 TN 去除率为 52.17%。

参考文献:

- [1] Romero J A, Comin F A, Garcia C. Restored wetlands as filters to remove nitrogen[J]. *Chemosphere*, 1999, 39: 323–332.
- [2] 张政,付融冰,顾国维,等. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析[J]. *生态环境*, 2006, 15(6): 1385–1390.
ZHANG Zhen, FU Rong-bing, GU Guo-wei, et al. Analyse of nitrogen removal pathways and their effect factors in constructed wetland[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1385–1390.
- [3] Cheng H S, Mohd K Y, Brian S, et al. Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88: 307–317.
- [4] Sami U, Stephen P Faulkner. Use of cotton gin trash to enhance de-nitrification in restored forested wetlands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 237: 557–563.
- [5] 秦志伟,洪剑明. 人工湿地不同的水流方式和基质对氮和磷的净化的比较[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 102–106.
QIN Zhi-wei, HONG Jian-ming. Comparison on the different stuffing and flow style removal of nitrogen and phosphorus in constructed wet-lands[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2006, 27(5): 102–106.
- [6] 殷峻,闻岳. 人工湿地中微生物生态的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(1): 108–110.
YIN Jun, WEN Yue. Microbial characteristics of constructed wetlands[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(1): 108–110.
- [7] Liang W, Wu Z B, Cheng S P, et al. Roles of substrate microorganisms and urease activities in wastewater purification in a constructed wetland system[J]. *Ecological Engineering*, 2003, 21: 191–195.
- [8] Christos S Akkratos, Vassilios A. Tsihrintzis. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29: 173–191.
- [9] Tee H C, Seng C E, Noor A Md, et al. Performance comparison of constructed wetlands with gravel and rice husk-based media for phenol and nitrogen removal[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407: 3563–3571.
- [10] Chungak C, Wuy, Tamn FY, et al. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32: 81–89.
- [11] 贺锋,吴振斌,成水平,等. 复合垂直流人工湿地对氮的净化效果[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(10): 18–21.
HE Feng, WU Zhen-bin, CHENG Shui-ping, et al. Effect of integrated vertical-flow constructed wetland on nitrogen removal [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(10): 18–21.
- [12] 崔理华,朱夕珍,骆世明,等. 煤渣-草炭基质垂直流人工湿地系统对城市污水的净化效果[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4): 597–600.
CUI Li-hua, ZHU Xi-zheng, LUO Shi-ming, et al. Purification efficiency of vertical-flow wetland system constructed by cinder and turf substrate on municipal wastewater[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4): 597–600.
- [13] 郭劲松,王春燕,方芳,等. 湿干比对人工快渗系统除污性能的影响[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(17): 9–17.
GUO Jin-song, WANG Chun-yan, FANG Fang, et al. Influence of Wet/Dry ratio on pollutants removal performance by rapid infiltration system [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(17): 9–17.
- [14] 国家环境保护总局. 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Environmental Protection Agency of National. The monitoring and analytical methods for water and wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] Sun G G, Austin D. Completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite in lab-scale constructed wetlands: Evidence from a mass balance study[J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 1120–1128.
- [16] Fuerhacker M, Baver H, Ellinger R, et al. Approach for a novel control strategy for simultaneous nitrification/de-nitrification in activated sludge reactors[J]. *Water Research*, 2000, 34(9): 2499–2506.
- [17] Baker L A. Design considerations and applications for wetland treat-

- ment of high nitrate waters[J]. *Water Science and Technology*, 1998, 38(1):389-395.
- [18] 雒维国, 王世和, 黄娟, 等. 潜流型人工湿地低温域脱氮效果研究[J]. 中国给水排水, 2005, 21(8):37-40.
LUO Wei-guo, WANG Shi-he, HUANG Juan, et al. Denitrification by using subsurface constructed wetland in low temperature[J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21(8):37-40.
- [19] 陈娟, 丁为民, 张迎颖. 人工湿地中不同因素处理氮磷效果的试验研究[J]. 江苏农业科学, 2005(5):290-292.
CHEN Juan, DING Wei-min, ZHANG Ying-ying. Constructed wetland treatment of different factors in the effect of nitrogen and phosphorus[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2005(5):290-292.
- [20] Caselles-Osorio A, García J. Impact of different feeding strategies and plant presence on the performance of shallow horizontal subsurface-flow constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007(378):253-262.
- [21] Molle P, Lénard A, Grasmick A, et al. Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetland under hydraulic overloads[J]. *Water Research*, 2006(40):606-612.
- [22] 周金娥, 唐立峰. 人工湿地系统的除污机理及影响因素探讨[J]. 土壤, 2009, 41(4):520-524.
ZHOU Jing-e, TANG Li-feng. On purification mechanism and influential factors of constructed wetland system[J]. *Soils*, 2009, 41(4):520-524.
- [23] 王世和, 王薇, 俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3):359-326.
WANG Shi-he, WANG Wei, YU Yan. Influence of hydraulic condition on treatment effect of constructed wetland[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2003, 33(3):359-326.
- [24] 黄娟, 王世和, 雒维国, 等. 基于遗传神经网络的人工湿地脱氮效果影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(9):10-14.
HUANG Juan, WANG Shi-he, LUO Wei-guo, et al. Study on influencing factors of nitrogen removal effect in constructed wetland based on genetic neural network[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(9):10-14.