

温室中农村废水再生滴灌过程中 污染物的时空变化规律

裴亮^{1,2}, 麦荣幸^{1,2}, 孙莉英^{1,2}, 栗清亚^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在温室中采用土壤过滤系统处理后的农村废水进行滴灌, 分析灌溉后土壤和渗漏水中化学需氧量 COD_{Cr} 、生化需氧量 BOD_5 、全氮 TN、氨氮 $\text{NH}_3\text{—N}$ 和全磷 TP 的时空变化规律。在试验区滴头正下方 20 cm 深度处埋设一组负压计, 当负压计指示的土壤基质势低于 -25 kPa 时进行灌溉, 每次灌水量为 5 mm。实验结果表明: 不同季节土壤深层渗漏水中污染物浓度由高到低依次为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季; 污染物浓度随深度降低, 1.5 m 深度处深层渗漏水中, 发现 COD_{Cr} 、 BOD_5 、TN、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 和 TP 的最高截留率分别达到 76.3% ~ 88.1%、84.2% ~ 89.2%、69.3% ~ 76.8%、57.3% ~ 63.1% 和 69.8% ~ 78.6%; 在滴灌区域外边缘, 沿着水流的水平方向, 各污染物浓度衰减率逐渐增大; 采用农村废水再生滴灌, 深层渗漏水中 TN、TP 的浓度较低, 调节再生废水浓度, 可以控制污染物流入浅层地下水, 从而防止面源污染。

关键词: 温室; 农村废水; 滴灌; 污染物; 渗漏

中图分类号: X703.1; S607⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0233-04

Temporal and spatial variation of pollutants in the process of rural wastewater regenerated drip irrigation in greenhouse

PEI Liang^{1,2}, MAI Rongxing^{1,2}, SUN Liying^{1,2}, LI Qingya^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Rural wastewater treated by soil filtration system in greenhouse was used for drip irrigation, and the spatial and temporal variation rules of Chemical oxygen demand COD_{Cr} , biochemical oxygen demand BOD_5 , total nitrogen TN, ammonia nitrogen $\text{NH}_3\text{—N}$ and total phosphorus TP in the soil and seepage after irrigation were analyzed. A set of negative pressure meters was buried at a depth of 20 cm directly below the drop head in the test area. Irrigation was carried out when the soil substrate potential indicated by the negative pressure meter was lower than -25 kPa , and the irrigation volume was 5 mm each time. The experimental results showed that the concentration decreased with depth. The concentrations of substances in the deep seepage at the different seasons were successively from high to low ranked: summer > autumn > spring > winter. The maximum removal rates of COD_{Cr} , BOD_5 , TN, $\text{NH}_3\text{—N}$ and TP were found to be 76.3% ~ 88.1%, 84.2% ~ 89.2%, 69.3% ~ 76.8%, 57.3% ~ 63.1% and 69.8% ~ 78.6%, respectively, in the deep seepage at a depth of 1.5m. At the outer edge of the drip irrigation area, the attenuation rate of each substance increases gradually along the horizontal direction of water flow. Using agricultural wastewater regenerated drip irrigation, the concentration of TN and TP in deep seepage was low. By regulating the concentration of regenerated wastewater, pollutants can be controlled

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41471229, 51109197); 国务院南水北调办公室政策及技术研究中心委托项目

作者简介: 裴亮(1982-), 男, 江苏南京人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事污水处理、污水及污染物资源化、面源污染控制等研究。

通讯作者: 孙莉英(1978-), 女, 河北石家庄人, 博士, 副研究员, 教授, 硕士生导师, 主要从事污水资源化、面源污染控制等研究。

to flow into shallow groundwater to prevent non-point source pollution.

Key words: greenhouse; rural wastewater; drip irrigation; pollutant; seepage

1 研究背景

农村废水再生滴灌模式是采用滴灌方式将经过处理的污水用于灌溉的现代灌溉模式,是当前节水和环保研究的热点^[1-2],很多的国内外学者在这方面已经做了大量的相关研究^[3-9],关于再生水灌溉条件下污染物在土壤-渗漏系统中的迁移转化取得了很多的研究成果^[4-7,9]。农村再生水滴灌的灌溉频率、灌溉时间、灌溉水量与地面灌溉等传统灌溉方式不同,土壤水分和溶质在土壤-渗漏系统中的分布与迁移也不相同。另外,再生水中含有大量的有害污染物,会随着再生水进入到土壤、作物体内和地下水中,对作物生长、周围环境及人体健康产生很大的影响^[10]。因此,有必要对污染物随再生水在土壤中的分布运移规律进行深入研究^[11]。当前的农村再生水灌溉研究大多为地面灌溉条件下污染物在土壤表层的分布和迁移,对滴灌模式的研究很少,研究内容多为重金属在作物根系层的分布以及对作物根系的影响,也很少涉及污染物在深层土壤和深层渗漏水中的分布和对地下水的影响^[12-13]。因此,需要对滴灌条件下污染物在土壤-渗漏系统中的分布运移特征进行详细研究。笔者等在农村废水再生滴灌方面进行了很多研究,主要集中在养分对作物产量和品质的影响、养分运移、养分胁迫等方面,对废水中各类污染物在土壤-渗漏系统中的分布运移情况还没有开展过相关研究^[14-17]。本研究是在前期研究的基础上,采用土壤过滤系统处理后的农村废水进行滴灌,分析灌溉后土壤-渗漏系统中化学需氧量 COD_{Cr}、生化需氧量 BOD₅、全氮 TN、氨氮 NH₃-N 和全磷 TP 的时空变化规律,为制定高效绿色的再生水灌溉制度、防治农业面源污染以及预防人体健康风险提供科学依据。

2 试验部分

2.1 试验地概况

研究区位于湖北省十堰市茅箭区南部山区,全年太阳辐射量为 106.6 kcal/cm²,年平均日照时数 1 655~1 958 h;年平均降雨量为 800 mm 以上,主要集中在 6~8 月。研究区的最低气温为 -13.2℃,最高气温为 41℃,常年平均气温为 15.3℃。本研究试验在大棚中开展,采用自然温度。试验地土壤

类型主要为沙壤土,土壤容重为 1.52~1.73 g/cm³,地下潜水水位埋深为 1.5~2 m。

2.2 试验布置

文献[14-17]中有类似实验设计,试验在 2015-2016 年进行。试验区作物耕作方式为垄作方式,垄肩宽 80 cm,两垄中心间距 180 cm,垄高 15 cm。每垄种植两行作物,在两行作物中间埋设一条滴头间距 20 cm、滴头流量 2.7 L/h 的滴灌带。在作物种植前,试验区每亩施复合肥 10 kg。该试验采用农村废水再生处理后的再生水为原水,原水水质和分析方法见表 1。根据不同作物滴灌灌溉制度制定灌溉计划^[18-19],在试验区滴头正下方 20 cm 深度处理设一组负压计,当负压计指示的土壤基质势低于 -25 kPa 时进行灌溉,每次灌水量为 5 mm。灌水后第 3、6、9、12、15d 用土钻对土壤进行采样,分别在 3 个滴灌点下土壤垂直方向 0、50、100、150 cm 处取样,在试验场边缘选择 3 个点水平方向 0、50、100、150 cm 取 10 cm 深度处土壤样。同时,采用深层渗漏采集装置在每个滴灌点 1.5 m 深度处进行渗漏水的采集。为了便于比较,土壤浓度采用同样体积淋洗液浓度表示。

表 1 原水水质及分析方法

项目	数值/(mg·L ⁻¹)	分析方法
COD _{Cr}	14~27	重铬酸盐法测定
BOD ₅	16~29	稀释接种法
TN	11~18	紫外分光光度法纳氏
NH ₃ -N	6~17	试剂法测定
TP	1.1~3.2	钼酸铵分光光度法

3 结果与分析

3.1 不同季节污染物在土壤中的截留情况

土壤 1.5 m 深度处深层渗漏水中污染物的浓度随季节发生变化,具体浓度数值见表 2。由表 2 可知,1.5 m 深度处深层渗漏水中 COD_{Cr}、BOD₅、TN、NH₃-N 和 TP 的浓度随季节的变化趋势较为一致,不同季节土壤深层渗漏水中污染物浓度由高到低依次为:夏季>秋季>春季>冬季。采用农村废水进行滴灌,COD_{Cr}在夏季和秋季的平均土壤截留率均为 88%左右,截留率最高;冬季为 77%左右,截留率最低;COD_{Cr}的土壤截留效果在季节间变化较小。

BOD₅ 在夏季的平均土壤截留率在 88% 以上,冬季为 85% 左右,季节间土壤截留效果差异较小。TN 在夏季的平均土壤截留率为 75% 左右,但冬季的截留率低于 70%,季节间土壤截留效果差异较大,整体的土壤截留率低于 COD_{Cr} 和 BOD₅。NH₃—N、TP 在土壤—渗漏系统中的截留率在季节间也有一定变化差异,NH₃—N、TP 在夏季的平均土壤截留率分别为 63% 和 78% 左右,截留率最高;NH₃—N、TP 在春季和秋季的土壤截留率分别在 50% 和 60% 以上;冬季的土壤截留率最低,NH₃—N 在冬季的土壤截留率为 45% 左右。

表 2 不同季节深层渗漏水中各污染物的平均浓度 mg/L

季节	COD _{Cr}	BOD ₅	TN	NH ₃ —N	TP
2015 年夏季	4.76	5.33	4.12	3.21	0.51
2015 年秋季	3.47	5.02	3.81	2.33	0.43
2015 年冬季	2.51	4.41	2.10	1.71	0.29
2016 年春季	3.98	4.99	3.12	2.57	0.42

3.2 污染物在土壤垂直方向的沿程变化规律

3.2.1 COD_{Cr} 和 BOD₅ 在土壤垂直方向的沿程变化规律 试验期间,各污染物在土壤垂向上的浓度分布在不同月份间的变化趋势基本一致,本文以 7 月份的实测数据结果为例进行分析。表 3 和表 4 分别为 COD_{Cr} 和 BOD₅ 在土壤垂向上各深度处的浓度分布。从表 3 中可以看出,再生水中 COD_{Cr} 浓度有一定的波动,但波动幅度较小;已知在夏季 COD_{Cr} 的平均土壤截留率为 88% 左右,土壤 1.5 m 深度处渗漏水中 COD_{Cr} 浓度稳定在 4.9 mg/L 以下,满足污水综合一级排放标准(GB 20426—2006)。COD_{Cr} 在土壤—渗漏系统前端(0~50 cm)的截留效果较明显,大约 55% 的 COD_{Cr} 被有效截留在土壤—渗漏系统的前 1/3 段。这是因为在滴灌条件下,水分在土壤中的分布主要集中在土壤表层和根系层中,再加上土壤和作物根系对 COD_{Cr} 的吸附性能较强,使得多数的 COD_{Cr} 被截留至上表层土壤中。同样,由表 4 可知,再生水中 BOD₅ 浓度有一定的波动,波动幅度较小;由于在夏季 BOD₅ 的平均土壤截留率在 88% 以上,土壤 1.5 m 深度处渗漏水中 BOD₅ 浓度稳定在 5.8 mg/L 以下,满足污水综合一级排放标准。BOD₅ 在土壤—渗漏系统 0~100 cm 深度内的截留效果较明显,大约 45% 的 BOD₅ 被截留在土壤—渗漏系统的前 1/3 段,75% 左右的 BOD₅ 被截留在土壤—渗漏系统的前 2/3 段。

3.2.2 TN 在土壤垂直方向的沿程变化规律 土壤中 TN 与 COD_{Cr} 及 BOD₅ 的垂直沿程变化规律相似,具体浓度数值见表 5。再生水中 TN 在土壤—渗漏系统的前 1/3 段截留效果比较显著,截留率高达 50%。在灌溉水入渗前期,水分入渗速度快,随着入渗深度的增加,入渗速度迅速减小,TN 在土壤中的运移速度也随深度增加迅速减小。TN 在土壤中的分布随着深度增加呈现递减的情况,递减速率随着深度增加逐渐减小。土壤 1.5 m 深度处渗漏水中的 TN 浓度稳定在 4.6 mg/L 以下,水质达到污水综合排放标准。

表 3 土壤垂直方向不同取样点 COD_{Cr} 的浓度 mg/L

土壤深度/cm	取样日期/(月—日)				
	07—06	07—09	07—12	07—15	07—18
0	26.5	25.9	26.1	25.4	23.9
50	12.3	11.3	13.1	12.0	10.8
100	5.2	5.4	6.1	5.7	6.1
150	4.9	4.82	4.6	4.6	3.8

表 4 土壤垂直方向不同取样点 BOD₅ 的浓度 mg/L

土壤深度/cm	取样日期/(月—日)				
	07—06	07—09	07—12	07—15	07—18
0	27.8	28.1	24.3	25.8	27.2
50	16.3	18.4	14.3	13.7	12.9
100	10.5	9.9	11.4	10.1	7.3
150	5.8	5.7	5.7	4.3	4.8

表 5 土壤垂直方向不同取样点全氮(TN)的浓度 mg/L

土壤深度/cm	取样日期/(月—日)				
	07—06	07—09	07—12	07—15	07—18
0	18.2	17.3	16.6	16.7	16.2
50	8.6	8.9	9.1	10.3	8.9
100	6.3	6.4	5.8	6.4	6.2
150	4.3	4.6	4.2	4.4	4.1

3.2.3 NH₃—N 和 TP 在土壤垂直方向的沿程变化规律 土壤中 NH₃—N 和全磷(TP)浓度沿垂直方向的变化情况见表 6 和 7。土壤 1.5 m 深度处渗漏水中 NH₃—N 浓度低于 3.5 mg/L,满足污水综合一级排放标准。NH₃—N 在土壤中的含量沿垂直方向从上到下依次递减,大约 35% 的 NH₃—N 被截留在土壤—渗漏系统的前 1/3 段;在 50~150 cm 土壤深度范围内,NH₃—N 的浓度降低幅度较小。再生水

中 TP 浓度的波动幅度较大,但在夏季土壤截留效果较为显著,土壤中 TP 浓度沿垂直方向从上到下逐渐降低,在土壤-渗漏系统中 TP 浓度降低的幅度较为均匀,各土层稳定在 25% 左右。这可能是因为土壤对 TP 的吸附能力有限,各深度土层对 TP 的吸附速率相近,当 TP 浓度较大时,上层土壤和下层土壤对 TP 的吸附量相差不大。土壤 1.5 m 深度处渗漏水中 TP 浓度低于 0.6 mg/L,满足污水综合二级排放标准。

表 6 土壤垂直方向不同取样点 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的浓度 mg/L

土壤深度/cm	取样日期/(月-日)				
	07-06	07-09	07-12	07-15	07-18
0	16.2	11.9	9.3	8.8	9.3
50	8.9	8.5	7.2	7.3	6.7
100	4.8	5.1	4.7	4.7	3.8
150	3.3	3.5	3.1	2.4	2.2

表 7 土壤垂直方向不同取样点全磷(TP)的浓度 mg/L

土壤深度/cm	取样日期/(月-日)				
	07-06	07-09	07-12	07-15	07-18
0	1.8	3.2	2.3	2.7	3.0
50	1.1	1.4	1.7	1.6	1.9
100	0.8	0.9	0.6	0.8	1.0
150	0.6	0.4	0.5	0.3	0.3

从以上对各污染物在土壤垂直方向上的变化分析可知,虽然再生水中各类污染物浓度不相同,但其垂直变化规律相似,各污染物的含量沿垂直方向从上到下逐渐减小;除了 TP 之外,其他污染物在土壤-渗漏系统前端(0~50 cm)的截留效果最好,中端(50~100 cm)的截留效果次之,后端(100~150 cm)的截留效果最差。这可能是因为相对于其他污染物土壤对 TP 的吸附能力较弱,当 TP 浓度较高时,各土层对 TP 的吸附量相近。在各类污染物中,土壤-渗漏系统对 COD_{Cr} 和 BOD_5 的截留率最高,其次是 TN 和 TP, $\text{NH}_3\text{—N}$ 的截留率最低。土壤-渗漏系统对污染物截留率的高低主要取决于土壤对污染物的吸附能力,吸附能力越强,截留率越高。

3.3 污染物在灌溉区边缘水平方向的沿程变化规律

滴灌区边缘水平方向不同距离各污染物浓度见表 8。从表 8 看出,滴灌试验区外边缘水平方向 0~150 cm、深度 10 cm 处的土壤中各污染物浓度随水平距离增加而减小。在滴灌条件下,土壤水分在水平方向上水力梯度较小,且水平距离越大,水力梯度

越小;土壤水分在水平方向上的扩散距离较短。而污染物主要随着水分在土壤中进行迁移,在 0~50 cm 水平距离内,污染物迁移速度较快,污染物浓度较高;在 50~100 cm 内,污染物迁移速度慢,污染物浓度较低;在 150 cm 处,运移至此的灌溉水分极少,大部分的污染物已被截留在 0~100 cm 内,污染物浓度极低。

表 8 滴灌区边缘水平方向不同距离各污染物浓度 mg/L

水平距离/cm	COD_{Cr}	BOD_5	TN	$\text{NH}_3\text{—N}$	TP
0	26.2	27.3	18.9	12.1	3.3
50	10.9	12.8	9.2	6.2	1.6
100	5.2	5.1	4.1	2.1	0.4
150	2.7	1.3	1.4	0.9	0.2

注:各水平距离测点均在土壤深度 10 cm 处。

4 结 论

(1)不同季节土壤 1.5 m 深度处深层渗漏水中污染物浓度由高到低依次为:夏季>秋季>春季>冬季。

(2)在 1.5 m 深度处深层渗漏水中, COD_{Cr} 、 BOD_5 、TN、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 和 TP 的最高截留率分别达到 76.3%~88.1%、84.2%~89.2%、69.3%~76.8%、57.3%~63.1% 和 69.8%~78.6%;污染物浓度随深度降低;在滴灌区域外边缘,沿着水流的水平方向,各污染物衰减率逐渐增大。

(3)采用农村废水再生滴灌,深层渗漏水中养分物质 TN、TP 的浓度较低,调节再生废水浓度,可以控制污染物流入深层地下水,从而防止面源污染。

参考文献:

- [1] 洋韩,齐学斌,李平,等.再生水灌溉对作物及土壤安全性影响研究进展[J].中国农学通报,2018,34(20):96-100.
- [2] 李久生,李益农,栗岩峰,等.现代灌溉水肥精量调控原理与应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(5):373-384.
- [3] 郭魏,齐学斌,李平,等.再生水灌溉对土壤氮素与生物有效性影响的研究进展[J].中国农学通报,2015,31(35):181-186.
- [4] 周媛,齐学斌,李平,等.再生水灌溉对作物生长及土壤养分影响研究进展[J].中国农学通报,2015,31(12):247-251.
- [5] 裴亮,廖晓勇.再生水滴灌土壤中砷(As)时空分布规律试验研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(2):236-239.

(下转第 243 页)

- (21):4454-4463.
- [6] 顾天真,徐云,张琪,等.基于气象因子的启东市土壤墒情预报研究[J].安徽农业科学,2016,44(34):174-176.
- [7] 舒素芳,钱华峰,邱小伟.基于气象因子的金华市土壤墒情预测模型[J].中国农业气象,2009,30(2):180-184.
- [8] PRASAD R, DEO R C, LI Y, et al. Ensemble committee-based data intelligent approach for generating soil moisture forecasts with multivariate hydro-meteorological predictors[J]. Soil and Tillage Research, 2018,181:63-81.
- [9] HUANG Caojun, LI Lin, REN Souhua, et al. Research of soil moisture content forecast model based on genetic algorithm BP Neural Network[M]// Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. Springer, Berlin, Heidelberg: 2011.
- [10] BAI Dongmei, GUO Zhongsheng, GUO Mancai. Application of wavelet analysis and narx neural network in the forecast of soil moisture[C]// Science and Engineering Research Center. International Conference on Advances in Management Science and Engineering. Destech Publications. 2015:145-149.
- [11] LIU Min, HE Zhimin. Research and prediction of yellow soil moisture content in Guizhou province based on arima model[J]. Advanced Materials Research, 2013, 690-693:3076-3081.
- [12] 张和喜,杨静,方小宇,等.时间序列分析在土壤墒情预测中的应用研究[J].水土保持研究,2008,15(4):82-84.
- [13] BHUIYAN H, MCNAIRN H, POWERS J, et al. Application of HEC-HMS in a cold region watershed and use of RADARSAT-2 soil moisture in initializing the model[J]. Hydrology, 2017,4(1):1-19.
- [14] 白燕英,魏占民,刘全明,等.基于ETM+遥感影像的农田土壤含水率反演研究[J].灌溉排水学报,2013,32(4):76-78+102.
- [15] 张成才,吴泽宁,余弘婧.遥感计算土壤含水量方法的比较研究[J].灌溉排水学报,2004,23(2):69-72.
- [16] 彭致功,刘钰,许迪,等.基于遥感ET数据的区域水资源状况及典型农作物耗水分析[J].灌溉排水学报,2008,27(6):6-9.
- [17] 胡玮,严昌荣,李迎春,等.气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J].生态学报,2014,34(9):2367-2377.
- [18] 刘荣花,朱自玺,方文松,等.冬小麦根系分布规律[J].生态学杂志,2008,27(11):2024-2027.

(上接第236页)

- [6] 裴亮,廖晓勇,孙莉英.再生水滴灌土壤重金属Cd分布运移实验研究[J].中国农村水利水电,2018(5):74-77.
- [7] 裴亮,廖晓勇,孙莉英.再生水滴灌土壤和植物中重金属积累分布研究[J].节水灌溉,2018(3):42-45.
- [8] TERNES T A, BONERZ M, HERRMANN N, et al. Irrigation of treated wastewater in Braunschweig, Germany: An option to remove pharmaceuticals and musk fragrances[J]. Chemosphere, 2007,66(5):894-904.
- [9] ELGALLAL M, FLETCHER L, EVANS B. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review[J]. Agricultural Water Management, 2016,177:419-431.
- [10] 刘源,崔二苹,李中阳,等.再生水和养殖废水灌溉下土壤-植物系统养分和重金属迁移特征[J].灌溉排水学报,2018,37(2):45-51.
- [11] 王志超,史海滨,李仙岳,等.回填土下再生水灌溉对玉米生长及土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):196-202+277.
- [12] WANG Jianhua, LU Shibao, PEI Liang, et al. Study on rules of dynamic variation of nitrogen in soil after reclaimed water drip irrigation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016,41(35):15938-15943.
- [13] 胡超,徐国华,齐学斌,等.再生水分根交替地下滴灌对马铃薯品质和重金属积累影响[J].灌溉排水学报,2011,30(3):43-46.
- [14] 裴亮,周翀,梁晶,等.再生水滴灌对作物品质和产量的影响研究——以菠菜为例[J].节水灌溉,2013(7):7-9.
- [15] 裴亮,孙莉英,张体彬.再生水滴灌对蔬菜根际土壤微生物的影响研究[J].中国农村水利水电,2015(11):39-42.
- [16] 裴亮,张体彬,梁晶,等.再生水滴灌土壤中氮素的动态变化规律[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):70-74.
- [17] 裴亮,刘荣豪,薛铸,等.再生水滴灌作物生育期内土壤氮素动态变化规律研究[J].水利水电技术,2013,44(10):34-36+40.
- [18] KANG Yaohu, WANG Fengxin, LIU Haijun, et al. Potato evapotranspiration and yield under different drip irrigation regimes[J]. Irrigation Science, 2004,23(3):133-143.
- [19] 王凤新,康跃虎.用负压计拟定滴灌马铃薯灌溉计划的方法研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(3):58-64.
- [20] 国家环境保护总局.污水综合排放标准:GB 20426-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.