

文章编号: 1674-5566(2010)02-0259-06

复合型人工湿地系统在农业面源 污染水处理上的应用

范志锋¹, 李平², 王丽卿¹, 季高华¹, 邱雪妹²

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 上海青浦区水利排灌管理署, 上海 201700)

摘要: 利用复合型人工湿地系统净化处理农业面源污染, 研究了湿地系统对营养物质、重金属的去除效果。结果表明, 在低污染负荷的运行情况下, 湿地系统对总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮的去除率分别为 44.11%、18.90%、52.86% 和 73.32%; 对总磷、高锰酸盐指数和叶绿素 a 的去除率为 49.46%、16.77% 和 75.82%; 处理后的水质较处理前可提高 1~2 个水质等级。湿地系统对有机物的去除效果不明显, 而对叶绿素的净化效果显著。湿地系统对重金属的去除有显著效果, 对铜、锌、砷、硒、汞、铬、铅的去除率分别为 74.7%、85.3%、21.2%、40.0%、30.4%、41.3% 和 33.5%。湿地系统对总磷和叶绿素 a 的去除呈极显著差异, 对亚硝态氮和 COD_{Mn} 呈显著差异。经湿地系统处理后, 出水水质完全达到温室蔬菜灌溉水环境质量标准的要求。

关键词: 复合型人工湿地系统; 农业灌溉用水; 水质净化; 去除率

中图分类号: S 181 文献标识码: A

Application of compound constructed wetland for treating agricultural non-point source pollution

FAN Zhi-feng¹, LI Ping², WANG Li-qing¹, JI Gao-hua¹, QIU Xue-mei²

(1. College of Fisheries and Life Science Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Qingpu District Irrigation and Drainage Management Bureau, Shanghai 201700, China)

Abstract: Compound constructed wetland was applied in treating agricultural irrigation polluted water studied the removal effect on nutrients and heavy metals influenced by it. The results indicated that in the case of low pollution load, the removal rate on total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH₃-N), nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) as well as nitrite nitrogen (NO₂⁻-N) in wetland system were 44.11%, 18.90%, 52.86% and 73.32% respectively. The removal rate on total phosphorus (TP), organic compounds (COD_{Mn}) and chlorophyll a (Chla) were 49.46%, 16.77% and 75.82%. Correspondingly, the water has improved 1-2 water quality grade compared with that of water before treatment. The removal effect on organic compounds was not significant while it had better purification effect on chlorophyll a. The removal effect on heavy metals such as Cu, Zn, As, Se, Hg, Cr and Pb were 74.7%, 85.3%, 21.2%, 40.0%, 30.4%, 41.3% and 33.5%. The total phosphorus and chlorophyll a showed an extreme significant difference, the nitrite nitrogen and organic

收稿日期: 2009-09-18

基金项目: 上海市重点学科水生生物学建设项目 (S30701); 上海市科委专项 (08D21981000)

作者简介: 范志锋 (1981-), 男, 助理实验师, 主要从事水生生物生态学及水域生态修复方面的研究。E-mail: zffan@shou.edu.cn

通讯作者: 王丽卿, E-mail: lqwang@shou.edu.cn

compounds showed significant difference after treatment by wetland system. The water quality of treated water could absolutely meet the environmental quality standard of irrigation water for greenhouse vegetables

Key words: compound constructed wetland system; agriculture irrigation water; water purification; removal rate

随着中国农村经济的发展,化肥、农药的大量使用,使得农业面源污染成为中国环境污染的首要问题^[1]。农业面源产生的主要污染物如化肥、农药、杀虫剂等,虽然一部分可被植物体吸收利用,但大部分却通过地表径流流入河流、湖泊等地表水体,造成受纳水体的富营养化^[2-3],丧失应有的水体功能。因此,寻求一种合适有效的水处理技术对农业面源污染进行处理,具有重要的现实意义和生态价值。

人工湿地是 20 世纪 70 年代新兴的污水处理技术,它利用土壤、人工填料和湿地植物组成的独特生态系统中的物理、化学和生物的三重作用,通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解来实现对污水的高效净化。人工湿地水处理技术广泛应用于城市污水^[4]、工业废水^[5]、暴雨径流^[6]等水体的处理,具有良好的净化效果。建设复合型人工湿地系统对上海市青浦区农业园区内接受面源污染的河道水体进行净化处理,处理后的水应用于园区大棚蔬菜生产,实现水资源的循环利用,同时为安全、安心的生态农产品生产提供洁净的水源。本文对复合型人工湿地系统的水质净化效果进行研究,以期因地制宜建设人工湿地进行农业面源污染的生态补偿提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验场所及复合型人工湿地系统组成

复合型人工湿地系统位于上海市青浦现代

农业园区,园区内有稻田、菜地、还有精养鱼塘,存在一定的农业面源污染。园区内地处洼地的 5 条相对封闭河道,是面源污染的受纳水体。复合型人工湿地系统位于连接中北河和蒸中河的河道内,由水平流潜流湿地(4 个单元,两两串联)、垂直流潜流湿地(3 个单元)以及表面流湿地组成(图 1)。复合湿地系统总面积为 1 044 m²,其中水平流湿地 548 m²,潜流湿地 600 m²(表 1)。潜流湿地填料为 3 种不同粒径的滤料组成,填料总高度为 0.9 m,分 3 层平铺,上、中、下 3 层滤料粒径分别为 1.2、2.4、3.8 cm。湿地系统水力停留时间为 3.5 h 水力负荷为 16.9 m³/d。潜流湿地植物分别种植美人蕉、千屈菜、石菖蒲、黄花鸢尾、旱伞草等,表面流湿地为芦苇、水葱、香蒲等挺水植物和苦草、轮叶黑藻、伊乐藻等沉水植物。湿地系统通过动力可以实现园区内河道水体的单向流动;该系统由蒸中河进水,经垂直流—水平流—表面流—水平流—垂直流湿地,由中北河出水(图 1)。

1.2 试验条件和方法

本试验于 2008 年 8—9 月期间进行,取样时水温为 23.0~25.5℃。

在湿地连续运行期间,隔天在湿地系统的进水、出水口取样进行水质测定,连续取样测定 6 次。测定指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、亚硝态氮(NO₂-N)、硝态氮(NO₃-N)和叶绿素 a(Chla),测定方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[7]。

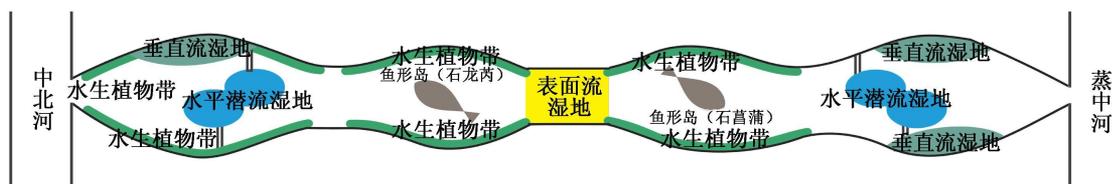


图 1 复合型人工湿地系统平面图

Fig 1 The planar graph of compound constructed wetland

表 1 青浦农业园区复合型人工湿地系统结构组成
Tab. 1 The constructed wetland structure composition of Q ingpu agriculture park

人工湿地类型	面积 (m ²)	湿地植物配置
垂直流潜流湿地 1	50	美人蕉 (黄花)
垂直流潜流湿地 2	85	旱伞草 + 美人蕉 (红花)
水平流潜流湿地 1	77	菖蒲
水平流潜流湿地 2	77	千屈菜
水平流潜流湿地 3	52.5	石菖蒲
表面流湿地 1	548	芦苇, 水葱, 香蒲
水平流潜流湿地 4	52.5	石龙瑞 + 水毛茛
水平流潜流湿地 5	77	黄花鸢尾
水平流潜流湿地 6	77	千屈菜
垂直流潜流湿地 3	53	亚菊

在湿地系统连续运行的第 9 天, 取样测定进出水口重金属含量, 测定指标包括铜、锌、砷、硒、汞、铬 (六价)、铅, 测定方法参照国家地表水环境质量标准规定方法^[7]。

复合型人工湿地系统对不同营养物质的去除效果利用 SPSS 16.0 统计软件进行显著性方差分析 (ANOVA)。

2 结果

2.1 复合型人工湿地系统对不同营养物质的去除效果

受蒸中河河道水质变化的影响, 湿地系统进水水质不稳定, 进水主要水质参数变化范围为 TN 0.25~0.62 mg/L, TP 0.10~0.19 mg/L, COD_{Mn} 8.1~11.0 mg/L。根据《地表水环境质量标准基本项目标准限值》(GB3838-2002), 该进水水质处于 III~V 类水。

2.1.1 复合型人工湿地系统对水体中氮的去除效果

复合型人工湿地进、出水中氮素营养物质浓度变化见图 2。从中可知: 湿地系统对水体 TN 的去除效果不稳定, 其中系统运行的第 5 天和第 9 天去除率较低, 平均去除率为 44.11%, 变幅 11.47%~77.42%; 湿地系统对氨氮的去除则比较稳定, 但去除率较低, 为 5.86%~25.34%, 在系统开放的第 9 天效果较差, 去除率只有 5.86%, 这可能与进水的氨氮浓度较低有关, 其他时间测定的去除率都在 21.15% 左右, 经过复合型人工湿地系统处理后的总氮和氨氮指标可达到地表水 II 类水质标准。湿地系统对硝态氮的去除效果比较明显, 最高可达 75.97%, 平均去除率为

52.86%, 从图中可以看出, 在系统连续运行的第 7 天, 去除率反而比之前降低, 这可能与进水硝态氮的浓度较高有关, 其他时间的硝态氮的进水浓度都较低。湿地系统对亚硝态氮的去除率是 3 种形态氮中最高的, 去除率平均高达 73.73%, 变幅为 52.08%~97.05%, 且对亚硝态氮的去除比较稳定。

人工湿地去除氮的主要方式包括物理、化学和生物 3 个方面, 物理方式为挥发、吸附, 化学方式主要为氨化、硝化、反硝化和植物摄取^[8]。一般认为, 表面流湿地通过湿地植物吸收、根系微生物降解的方式实现, 潜流湿地以硝化、反硝化作用作为氮的主要去除机理。表面流湿地中沉水植物通过根系作用对营养物质吸收净化, 可以对水质中营养物质的去除达到很好的效果^[9], 而潜流湿地主要通过湿地植物的吸收和不同粒径的填料表面形成的生物膜来吸附、降解有机物和氮磷营养物质。湿地系统对总氮去除率不高, 主要因为湿地系统的进水浓度较低, 污染负荷较低。研究表明, 低污染负荷的人工湿地对氮磷营养物质的去除率要低于高污染负荷^[10]。湿地系统对硝态氮和亚硝态氮的去除效果明显, 这可能由于潜流湿地的面积大 (占 43.3%), 湿地进水污染负荷小, 潜流湿地溶氧充足, 湿地植物在此季节生长旺盛, 植物通过蒸腾作用, 加上湿地填料微生物活性较强, 从而硝化和反硝化能力较强。硝态氮既可以被湿地中沉水植物群落直接吸收利用, 也可以被潜流湿地填料中的微生物通过硝化和反硝化作用去除。

2.1.2 复合型人工湿地系统对磷的去除效果

湿地系统对总磷的去除效果明显 (图 3), 平均去除率为 49.46%, 湿地运行初期, 总磷的去除率只有 28.7%, 随着系统的连续运行, 去除率逐步升高。Tanner 等研究表明, 潜流湿地运行初期对磷的去除率不高, 有时甚至会出现负值, 可能与湿地填料初期的磷的释放有关^[11], 吴振斌也有类似报道^[12]。本试验虽然没有出现负值情况, 但运行初期对磷的去除率低, 与前人研究结果相符。人工湿地对磷的去除主要是通过湿地填料的吸附和微生物生物膜的降解作用来实现的^[13]。湿地系统潜流湿地填料为砾石, 具有很高的磷吸附能力^[14], 加上潜流湿地有效体积大 (为 377.1 m³), 因此, 湿地系统对总磷的去除效果明显。尽

管湿地系统的表面流的水生植物占有面积很大,但植物对磷净化效果作用较小^[15]。湿地系统运行到第7天,进水总磷浓度达到地表水 IV类标

准,但出水水质还能控制在 II类,因此,湿地系统在稳定的情况下,尽管进水浓度可能升高,但出水水质仍然可以得到保证。

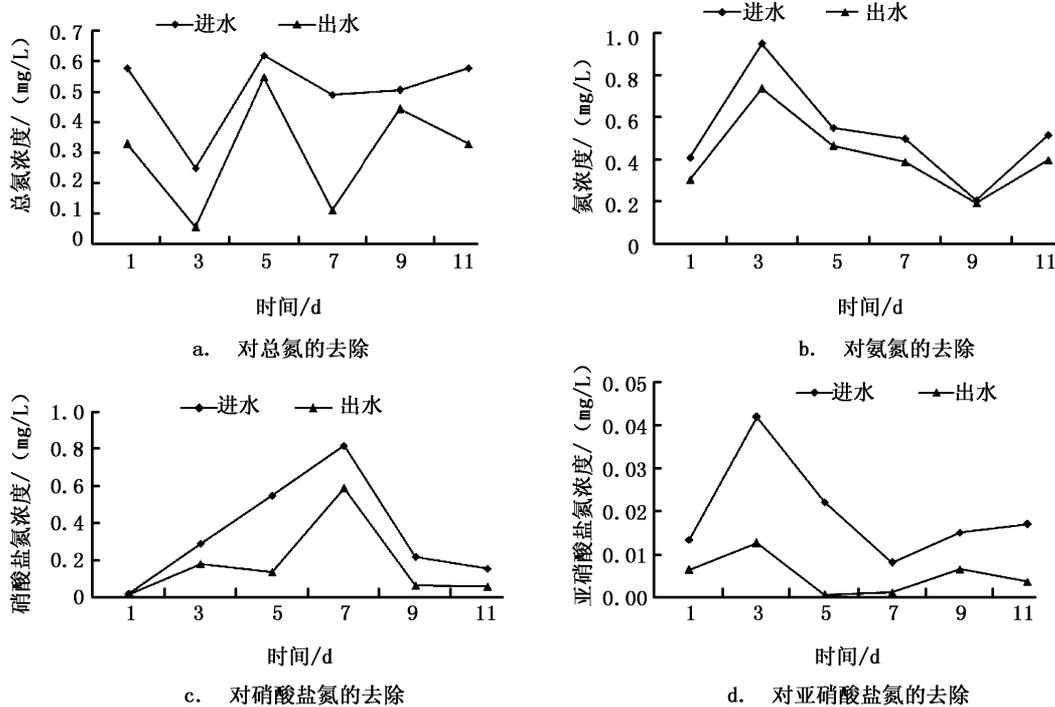


图 2 湿地系统对总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮的去除效果

Fig 2 The removal effect on TN, NH₃-N, NO₂-N and NO₃-N in wetland system

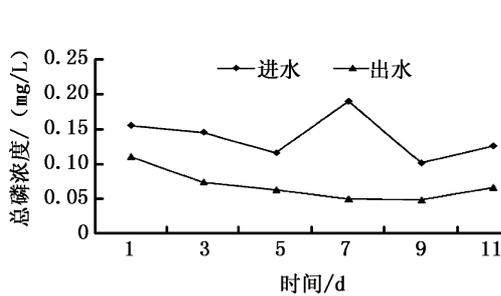


图 3 湿地系统对总磷的去除效果

Fig 3 The removal effect on TP in wetland system

2.1.3 复合型人工湿地系统对水体有机物 (以 COD_{Mn}表示) 的去除效果

湿地系统对有机物去除效果不显著(图 4),去除率最高只有 25.87%,出水水质达地表水 IV类 COD_{Mn}标准。湿地系统运行 3天后去除率有所下降,之后又反弹,变化规律不明显。这可能与表面流湿地的沉水植物对水体中 COD_{Mn}的去除效果不明显^[9]有很大关系。

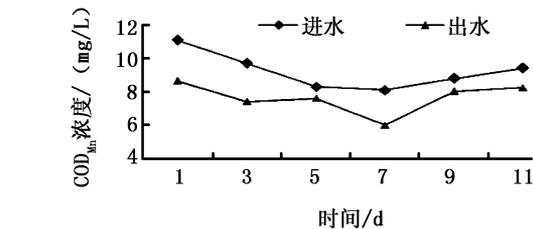


图 4 湿地系统对 COD_{Mn}的去除效果

Fig 4 The removal effect on COD_{Mn} in wetland system

2.1.4 复合型人工湿地系统对水体中叶绿素 a (Chla)的影响

如图 5所示,湿地系统能够明显降低 Chla含量,去除率为 53.6%~84.0%,系统开放前 5天,系统对 Chla的去除率逐渐升高,5天以后去除率一直维持在 80%以上。这说明,潜流湿地填料的过滤、沉降作用是 Chla含量降低的重要原因,同时湿地系统中的沉水植物对浮游藻类有一定的抑制作用^[16];湿地系统进水 Chla均值为 26.43 μg/L,根据我国湖泊富营养化评价标准^[17],该水

体为中富营养型,出水 Chla 均含量为 $7.14 \mu\text{g/L}$,属中营养型,因此,湿地系统可有效净化富营养化水体。

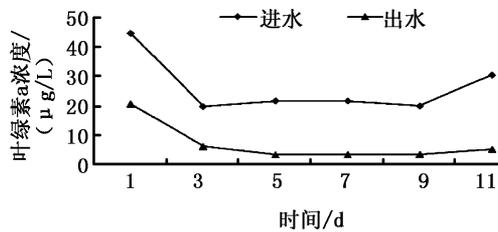


图 5 湿地系统对叶绿素 a 的去除效果

Fig. 5 The removal effect on Chl a in wetland system

2.2 湿地系统对重金属的去除效果

在湿地系统运行第 9 天,从系统的进、出水口分别取水样进行重金属的检测,并计算各个指标的去除率,如表 2 所示。

表 2 湿地系统对重金属物质的去除效果
Tab. 2 The removal effect on heavy metal in wetlands system

指标	进水 /mg/L	出水 /mg/L	去除率
铜	0.003 36	0.002 51	74. 7%
锌	0.001 76	0.001 5	85. 3%
砷	0.002 6	0.000 55	21. 2%
硒	0.000 21	0.000 084	40. 0%
汞	0.000 056	0.000 017	30. 4%
铬(六价)	0.001 09	0.000 45	41. 3%
铅	0.002 36	0.000 79	33. 5%

表 3 湿地系统不同水质因子进、出水的显著性差异检验

Tab. 3 The significance difference test for different water quality before and after treatment in wetland system

显著性检验	总氮	氨氮	硝态氮	亚硝态氮	总磷	COD _{Mn}	叶绿素 a
F 值	4. 498	0. 735	1. 317	7. 786*	19. 800**	7. 178*	15. 816**

注: * 表示 $P < 0. 05$; ** 表示 $P < 0. 01$; $d_f = 1$; $d_E = 10$ 。

3 结论

复合型人工湿地系统能有效地去除 N、P 等营养物质,处理低污染负荷的农业面源污染水体,总氮、总磷去除率可达 44. 1% 和 49. 5%,出水水质比进水可提高 1~2 个地表水水质等级;但对有机物质的去除率不高,仅为 16. 8%;湿地系统对 Chla 的去除效率高达 75. 8%。

复合型人工湿地系统在水力负荷为 $16. 9 \text{ m}^3/\text{d}$ 水力停留时间为 3. 5 h 的条件下,系统对低污染负荷的河道水体的去除率不高,低污染负荷是影响湿地系统去除效果的主要因素。农业园区的湿地系统连续运行 10 d 后对水体营养物质的去

除趋向稳定。从表 2 中可以看出,进水重金属含量均较低,除汞浓度达到 II 类地表水汞的标准外,其他指标均小于 I 类地表水标准上限值。但是,尽管重金属含量低,湿地系统对铜、锌的去除效果还是非常显著,分别达到 74. 70% 和 85. 23%,对其他几种指标的去除率也较显著,湿地系统对汞的去除率为 30. 36%,出水浓度为 $0. 000 017 \text{ mg/L}$ 。经过复合型人工湿地处理,水体中重金属含量均达到国家地表水环境质量 I 类水质标准。研究指出,湿地植物(如美人蕉等)对金属铬有较好的去除能力^[18],湿地系统对汞的吸收主要通过植物体对汞的富集来实现^[19],本湿地系统中的湿地植物对重金属吸收富集以后,通过收割进行转移,从而达到移位生态修复的目的。以上结果表明,湿地系统能有效地去除水体中的重金属。

2.3 湿地系统对各水质因子进、出水的显著性差异检验

通过 SPSS 16. 0 统计软件显著性方差分析得出,经湿地系统处理后,出水总磷和叶绿素 a 与进水相比呈极显著差异 ($P < 0. 01$),亚硝态氮和 COD_{Mn} 呈显著差异 ($P < 0. 01$),其他水质因子均无显著性差异。

除趋向稳定。

复合型人工湿地系统使灌溉用水中重金属物质含量的大幅下降,出水浓度大大低于 I 类地表水标准的上限,根据《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ333-2006),处理后的水完全符合温室蔬菜灌溉水环境质量标准,该人工湿地系统的建设不仅为农业面源污染实现了生态补偿,还可实现水资源的循环利用。

参考文献:

- [1] 李海鹏,张俊麟. 中国农业面源污染的区域分异研究 [J]. 生态保护, 2009, (4): 43-45.
- [2] 潘少军. 农业面源污染亟待治理 [N]. 人民日报, 2008-4

- 15(10).
- [3] 朱兆良,孙波. 中国农业面源污染控制对策研究 [J]. 污染减排, 2008, 394: 4-6.
- [4] 曹优明. 人工湿地对城市生活污水的净化研究 [J]. 水处理技术, 2008, 34(9): 26-29.
- [5] 藉国东,孙铁珩,李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 224-228.
- [6] 张荣社,李广贺,周琪等. 潜流湿地控制暴雨径流中氮磷冲击负荷中试研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(1): 64-68.
- [7] 国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 123-207, 344-391.
- [8] 卢少勇,金相灿,余刚. 人工湿地的氮去除机理 [J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2670-2676.
- [9] 王丽卿,李燕,张瑞雷. 6种沉水植物系统对淀山湖水质净化效果研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1134-1139.
- [10] 向长生,张彭义,卢少勇,等. 以马蹄莲为主体植物的人工湿地处理低浓度污水中试研究 [J]. 生态环境, 2007, 26(5): 1368-1371.
- [11] Tanner C G, Clayton J S, Upsdell M P. Effect of Loading Rate and Planting in Constructed Wetlands-II Removal of Nitrogen and Phosphorus [J]. *Water Res* 1993, 29(1): 27-34.
- [12] 吴振斌,陈辉蓉,贺锋,等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果 [J]. 水生生物学报, 2002, 25(1): 28-35.
- [13] 帖靖玺,钟云,郑正,等. 二级串联人工湿地处理农村污水的脱氮除磷研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(1): 88-96.
- [14] 郭本华,宋志文,李捷,等. 3种不同基质潜流湿地对磷的去除效果 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(1): 110-113.
- [15] Mcjannet C L. Nitrogen and phosphorus tissue concentrations in 41 wetland plants: a comparison across habitats and functional groups [J]. *Functional Ecology*, 1995, 9(5): 231-238.
- [16] 由文辉. 我国利用水生植物监测和净化污水的研究进展 [J]. 环境科学动态, 1993, (2): 8-11.
- [17] 舒金华. 我国湖泊富营养化程度评价方法的探讨 [J]. 环境污染与防治, 1990, 12(5): 2-7.
- [18] 张超兰,陈文慧,韦必帽,等. 几种湿地植物对重金属铬胁迫的生理生化响应 [J]. 生态环境, 2008, 27(4): 1458-1461.
- [19] 王起超,刘汝海,吕宪国,等. 湿地汞环境过程研究进展 [J]. 地球科学进展, 2002, 27(6): 881-885.