

湿地系统蒸腾蒸发损失量及污染物去除规律研究

卢少勇, 张彭义, 余 刚, 祝万鹏, 向长生
(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘 要: 在人工湿地中试系统和实际规模的湿地系统中分别进行了冬季和春季土壤水分蒸腾蒸发损失量 (ET) 和污染物去除规律的试验。研究表明, 春季的 ET 约为冬季的 2 倍, 且自由水面蒸发量远远小于有植物存在时的 ET。在相同条件下, 有植物存在时湿地系统的 ET 量排序为: 芦苇 (挺水植物) > 茭草 (挺水植物) > 浮萍 (浮水植物), 且芦苇表面流湿地的 ET 要大于芦苇潜流湿地的。春季湿地系统的总氮、硝态氮、氨氮、总磷和 COD 去除率均高于冬季的, 这主要与植物的生长阶段和湿地的蒸腾蒸发损失量有关。若进水污染物浓度高, 则相应的去除率就高, 这是春季有机氮的去除率低于冬季的主要原因。

关键词: 湿地; 蒸腾蒸发损失量; 植物; 污染物去除

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2008)07-0085-04

Study on Contaminants Removal and Evapotranspiration from Constructed Wetland

LU Shao-yong, ZHANG Peng-yi, YU Gang, ZHU Wan-peng, XIANG Chang-sheng
(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084,
China)

Abstract: Contaminants removal efficiencies and evapotranspiration (ET) from pilot and field constructed wetlands (CW) in winter and spring were researched. The results show that the ET in spring is about two times of that in winter, and the evaporation from free water surface is lower than vegetative ET. Under the same condition, the order of vegetative ET from CW is *Phragmites australis* (emerged vegetation) > *Zizania caduciflora* (emerged vegetation) > duckweed (floating vegetation). The ET from surface CW with *Phragmites australis* is higher than that from subsurface CW with same vegetation. The removal rates of TN, nitrate nitrogen, ammonia nitrogen, TP and COD from CW in spring are higher than those in winter, which are related to vegetation growth period and wetland ET. When the contaminant concentration in the influent is higher, the relevant removal rate is higher, and this is one of the important reasons why the removal rate of organic nitrogen in spring is lower than that in winter.

Key words: constructed wetland; evapotranspiration; vegetation; contaminants removal

蒸腾蒸发损失量 (ET) 是湿地中水量平衡的重要考察因素, 也是湿地进水量不等于出水量的重要

原因, 从而影响着湿地的除污效率。植物是影响 ET 及湿地系统中污染物季节性去除规律的重要因

素^[1~7]。笔者研究了 2002 年 12 月和 2003 年 4 月(在昆明,12 月和 4 月都属于旱季月份)以芦苇和茭草为主体的实际规模湿地系统中的污染物去除规律,并分析了人工湿地中试系统中芦苇和茭草在春季和冬季的 ET,以供人工湿地的研究者和管理者借鉴和参考。

1 试验系统及方法

1.1 动态试验

塘—表面流实际规模湿地系统占地面积为

表 1 动态试验条件

Tab 1 Dynamic test conditions

项目	流量 / (m ³ · d ⁻¹)	水深 / cm	有效面积 / m ²	水力负荷 / (cm · d ⁻¹)	水力停留时间 / d	气温 (水温) /
冬季	144.9 ± 108.7	15 (100)	2 940 (200)	4.9 (72.4)	3.0 (1.4)	12.8 (12.4)
春季	120.6 ± 138.7	15 (100)	2 940 (200)	4.1 (60.3)	3.7 (1.7)	18.0 (15.1)

注: 括号内为沉淀塘数值,括号外为植物床数值。

1.2 静态试验

静态试验在人工湿地中试系统中进行。该系统位于新村下游,滇池东岸,与滇池相隔一条宽为 2.5 m 的沟渠,一条宽为 4.0 m 的马路和一个排涝泵站。在中试系统中开展了水量平衡的研究,即植物类型、季节气候和湿地类型对 ET 的影响。中试系统中各植物床宽度均为 1.0 m,且均采用聚乙烯膜防渗(渗漏量为零),其植物、湿地类型和试验条件见表 2。

表 2 静态试验条件

Tab 2 Static test conditions

项目	湿地类型	主体植物	平均水温 /	平均气温 /	天气情况	降雨量 / (mm · d ⁻¹)	植物高度 / m
冬季	表面流	茭草	12.5	10.4	晴,无风	0	1.13 ~ 1.35
	表面流	芦苇					1.18 ~ 1.39
	潜流	芦苇					0.76 ~ 1.05
春季	表面流	茭草	18.2	18.4	晴,风力 2~3 级	0	1.03 ~ 1.43
	表面流	芦苇					1.28 ~ 1.60

在冬季(2002 年 12 月 11 日—12 月 15 日,植物衰亡期)和春季(2003 年 4 月 9 日—4 月 13 日,植物萌芽期)各进行一组静态试验,即湿地先进满水,然后测定水面高度随时间的变化情况。分别在 24、48、72 和 96 h 时测定床内水面下降高度、气温和水温,以及风力和降雨情况。

1.3 分析测定方法

COD、总氮、氨氮、硝态氮和总磷均采用国家标准分析方法测定^[8]。鉴于亚硝态氮含量很低,有机氮数值近似按照从总氮中减去氨氮和硝态氮计算得到。水温 and 气温采用温度计测定。进水流量由安装

4 200 m²,位于昆明市呈贡县大渔乡新村,与滇池仅隔一条沟渠(宽为 2.5 m)和一条马路(宽为 4.0 m)。其中塘的面积为 200 m²,湿地的面积为 4 000 m²。塘中种植水葫芦和浮萍,表面流人工湿地中种植芦苇和茭草,伴生水花生、菖蒲、水芹和红廖等。塘和湿地在 2001 年底和 2002 年初平整场地时采用人工夯实,该湿地用于接纳和处理上游农田灌渠中的污水,因此在该人工湿地系统中进行了污染物去除规律的研究即动态试验,其试验条件见表 1。

在进水堰中的超声波流量计计量,出水流量由安装在出水堰中的水表计量。

2 湿地系统水量平衡原理

湿地水量平衡计算公式^[2,9,10]为:

$$Q_1 + P(A + \psi A_c) = ET(A) + Q_{GW} + Q_E \pm S$$
(1)

式中 Q_1 ——进水量, m³ / d
 P ——降水量, m / d
 A ——湿地表面积, m²
 ψ ——径流系数
 S ——湿地累积水量, m³ / d
 A_c ——汇水面积, m²
 Q_{GW} ——湿地与周边环境的渗透作用综合量, m³ / d
 Q_E ——出水量, m³ / d

湿地水量模型反映了湿地中水的进出平衡。湿地与外界水面的交换量(含垂直下渗)也是湿地生态系统保持健康状态的关键^[11]。

中试湿地系统底部均采用聚乙烯膜作防渗,且由于中试外墙高于地面 5 cm,在未降暴雨时可忽略汇水量。那么式(1)可简化为:

$$ET(A) \pm S = 0$$
(2)

3 结果和讨论

3.1 蒸腾蒸发损失量试验

测定期间无降雨,中试各床因防渗而渗漏量为零,因此试验条件下损失的水量即由蒸腾蒸发作用引起,测定结果见表 3、4。

表 3 冬季时中试系统的水量损失测定结果

Tab 3 Measurement results of water loss of pilot wetland in winter

项 目	面积 / m ²	初始水 深 /cm	ET/ (cm · d ⁻¹)	水量损 耗率 / %	单位面积上的 水量损耗 / (10 ⁻³ m ³ · m ⁻² · d ⁻¹)
空白床	1. 00	55. 0	0. 11	0. 20	1. 1
茭草表面流	4. 88	20. 0	0. 35	1. 75	3. 5
芦苇表面流	4. 90	20. 0	0. 57	2. 85	5. 7
浮萍表面流	5. 13	20. 0	0. 26	1. 30	2. 6
芦苇潜流	4. 58	10. 0	0. 53	5. 30	5. 3

表 4 春季时中试系统的水量损失测定结果

Tab 4 Measurement results of water loss of pilot wetland in spring

项 目	面积 / m ²	初始水 深 / cm	ET/ (cm · d ⁻¹)	水量损 耗率 / %	单位面积上的 水量损耗 / (10 ⁻³ m ³ · m ⁻² · d ⁻¹)
空白床	4. 90	20. 0	0. 27	1. 36	2. 7
茭草表面流	5. 07	20. 0	0. 93	4. 63	9. 3
芦苇表面流	5. 14	20. 0	1. 06	5. 31	10. 6

由表 3、4可知,冬季和春季的自由水面蒸发量分别为 0. 11和 0. 27 cm/d,远小于有植物存在时的 ET,可见植物蒸腾作用是 ET的主要因素之一。

有研究报道,芦苇的 ET大约为开阔水面 ET的 2. 1~2. 4倍。由表 3可见,潜流湿地中芦苇的 ET比表面流湿地中芦苇的 ET小 0. 04 cm/d,其重要原因在于试验期间芦苇的株高小,总叶面面积小,而植物蒸腾作用绝大部分是通过叶表面的气孔向外蒸腾^[1]。另外,所考察的 3种植物的 ET量从大到小排序为:芦苇>茭草>浮萍,即挺水植物的 ET大于浮水植物的。不同植物的 ET差异主要是由于植物蒸腾作用的差异造成,株高、叶面大小等均会影响其蒸腾作用。

由表 4可见,春季期间,茭草的 ET是开阔水面潜流床 ET的 3. 4倍,芦苇的 ET是开阔水面 ET的 3. 9倍,高于文献报道值,这可能和昆明适宜于植物生长的气候条件有关。

对比表 3和表 4可知,春季 ET量约为冬季的 2倍,这主要是由于:植物所处阶段的差别,4月份芦苇和茭草均处于生长发育初期,而 12月份芦苇和茭草均处于衰亡期,茭草的枯黄率>90%,芦苇的枯黄率>50%;测定期间的气温差别,4月的气温比 12月的高;测定期间的风力差别,4月的风力比

12月的大。
3. 2 污染物去除规律试验

2002年 12月和 2003年 4月实际规模湿地系统的进、出水水质和对污染物的去除率见表 5。

表 5 实际规模湿地系统对污染物的去除效果

Tab 5 Contaminants removal efficiency by constructed wetland

项 目		总氮	硝态氮	氨氮	有机氮	总磷	COD
进水 / (mg · L ⁻¹)	冬季	11. 3	0. 31	2. 63	8. 36	0. 68	67. 4
	春季	9. 76	2. 82	5. 58	1. 36	1. 47	158
出水 / (mg · L ⁻¹)	冬季	4. 76	1. 71	0. 75	2. 3	0. 23	27. 7
	春季	4. 07	2. 23	1. 24	0. 6	0. 33	51. 0
去除率 / %	冬季	57. 7	-	71. 5	72. 5	65. 8	58. 9
	春季	58. 3	21. 0	77. 8	55. 9	77. 8	67. 6

由表 5可知,就进水水质而言,春季的总氮和有机氮浓度低于冬季,春季的总磷、COD、硝态氮和氨氮浓度高于冬季,这和冬季大多数植物处于枯萎期而春季植物处于或接近快速生长期有关。

冬季湿地除污效果下降的原因有:植物处于衰亡期,对氮和磷的同化量降低;植物枯萎严重,可释放部分污染物;冬季水温低于春季,因此微生物的活性低;冬季的水力负荷高;在对湿地有机物去除率进行计算时,由于蒸腾蒸发损失作用的存在,湿地的出水量低于进水量,实际的出水浓度值高于通常假设时的理论出水浓度值。在以上影响因素的综合作用下,春季的总氮、硝态氮、氨氮、总磷和 COD去除率均高于冬季的。

春季的有机氮去除率低于冬季,其原因主要是冬季进水的有机氮浓度远远高于春季(前者约为后者的 6. 1倍),同一工艺中进水浓度高通常去除率就高。

4 结论

春季的 ET约为冬季的 2倍,且自由水面蒸发量远远小于有植物存在时的 ET。在相同条件下,有植物存在时湿地 ET量的排序为:芦苇(挺水植物)>茭草(挺水植物)>浮萍(浮水植物),且芦苇表面流湿地的 ET要大于芦苇潜流湿地的。

春季湿地系统对总氮、硝态氮、氨氮、总磷和 COD的去除率均高于冬季的,这主要与植物的生长阶段和湿地的蒸腾蒸发损失量有关。若进水污染物浓度高,则相应的去除率就高,这是春季对有机氮的去除率低于冬季的主要原因。

(下转第 91页)

地构建复杂的城市排水管网模型,准确提取排水管网的空间结构,并使得其中大部分属性数据具有很强的物理意义,提高了模型预测分析的准确性,为模型的进一步深入应用奠定了基础,对其他分布式水文模型的空间结构和属性数据的获取也有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 董欣,陈吉宁,赵冬泉. SWMM模型在城市排水系统规划中的应用[J]. 给水排水, 2006, 32(5): 106 - 109.
- [2] Campbell C W, Sullivan S M. Simulating time-varying cave flow and water levels using the Storm Water Management Model[J]. Engineering Geology, 2002, 65(8): 133 - 139.
- [3] Zaghoul N A, M A Abu Kiefa. Neural network solution of inverse parameters used in the sensitivity-calibration analyses of the SWMM model simulations[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(7): 587 - 595.
- [4] Burian S J, Streit G E, McPherson T N, et al. Modeling the atmospheric deposition and stormwater washoff of ni-

trogen compounds[J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16(5): 467 - 479.

- [5] 刘俊,徐向阳. 城市雨洪模型在天津市区排水分析计算中的应用[J]. 海河水利, 2001, (1): 9 - 11.
- [6] 任伯帜,邓仁健,李文健. SWMM模型原理及其在霞凝港区的应用[J]. 水运工程, 2006, (4): 41 - 44.
- [7] 丛翔宇,倪广恒,惠士博,等. 基于 SWMM的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析[J]. 水利水电技术, 2006, 37(4): 64 - 67.
- [8] 刘俊,郭亮辉,张建涛,等. 基于 SWMM模拟上海市区排水及地面淹水过程[J]. 中国给水排水, 2006, 22(21): 64 - 70.
- [9] He C S, Cwoley I T E. Application of a distributed large basin runoff model in the Great Lakes basin[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(8): 1001 - 1011.
- [10] Huber W C, Dickinson R E. Storm Water Management Model User's Manual (4th version) [R]. Georgia: Environmental Protection Agency, 1992.

电话: 13811786308

E - mail: whz@mail. bjenv. com

收稿日期: 2007 - 12 - 20

(上接第 87页)

参考文献:

- [1] 周云龙. 植物生物学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [2] 高拯民,李宪法,王绍堂,等. 城市污水土地处理利用设计手册[M]. 北京:中国标准出版社, 1990.
- [3] Pauliukonis N, Schneider R. Temporal patterns in evapotranspiration from lysimeters with three common wetland plant species in the eastern United States[J]. Aquatic Botany, 2001, 71(1): 35 - 46.
- [4] Idso S B. Relative rates of evaporative water loss from open and vegetation covered water bodies[J]. Water Resour Bull, 1981, 17(1): 46 - 48.
- [5] Wenker A G, Dougherty J M, McHenry J L, et al. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates[J]. Ecol Eng, 2002, 19(1): 1 - 11.
- [6] Glenn E, Thompson T L, Frye R, et al. Effects of salinity on growth and evapotranspiration of Typha domingensis Pers[J]. Aquatic Botany, 1995, 52(1): 75 - 91.

- [7] Lafluer P M. Evapotranspiration from sedge-dominated wetland surfaces[J]. Aquatic Botany, 1990, 37(2): 341 - 353.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [9] Meulenan A F M, van Logtestijn R, Rijs G B J, et al. Water and mass budgets of a vertical-flow constructed wetland used for wastewater treatment[J]. Ecol Eng, 2003, 20(1): 31 - 44.
- [10] 崔保山,杨志峰. 湿地生态系统模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 353 - 358.
- [11] 毛战坡,尹澄清,单保庆,等. 研究湿地有效面积对暴雨径流调控作用的多因子模型[J]. 水利学报, 2002, (7): 57 - 63.

电话: 13621168562

E - mail: lsy01@mails. tsinghua. edu. cn

收稿日期: 2007 - 12 - 20