DOI: 10. 3969/j. issn. 1004 - 6933. 2013. 01. 001

湖荡湿地对输水河道磷的截留净化作用

王沛芳1,2,胡 斌1,2,王 超1,2,常 虹3,李丽娜1,2,钱 进1,2,侯 俊1,2

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省水利工程规划办公室, 江苏 南京 210029)

摘要:选取太湖流域望虞河沿线的鹅真荡和漕湖两个湖荡湿地分析湖荡湿地对水体中总磷、总溶解磷、颗粒磷以及正磷酸盐的截留净化作用和影响因子。结果表明:①湖荡湿地对输水河道中磷有不同程度的截留净化作用,对颗粒态磷和正磷酸盐的截留净化作用最为显著。②湖荡的面积、空间结构、河水在湖荡输入、输出点的位置以及水生植物分布在一定程度上影响湿地对磷的截留净化作用;③水温、pH、DO 浓度与 Chl-a 浓度均呈极显著页相关,水温、pH、DO 浓度与 Chl-a 浓度均呈极显著正相关,因此藻类是影响湖荡净化磷的重要因子。

关键词:湿地:输水河道:磷:截留净化:影响因子:鹅真荡:漕湖

中图分类号:X171.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2013)01-0001-05

Interception and decontamination of phosphorus in input watercourse with lake wetland

WANG Peifang^{1, 2}, HU Bin^{1, 2}, WANG Chao^{1, 2}, CHANG Hong³, LI Lina^{1, 2}, QIAN Jin^{1, 2}, HOU Jun^{1, 2}
(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

- Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
 - 3. Jiangsu Water Conservancy Planning Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: The interception and decontamination of TP, TDP, PP, and PO₄³⁻ and their impact factors were analyzed in Ezhen Lake and Caohu Lake, which are located in the waterway of the Wangyu River in the Taihu Basin. The main results are as follows: (1) The two lake wetlands can remove phosphorus, especially PP and PO₄³⁻, from the input watercourse by interception and decontamination. (2) Factors like the area and spatial shape of the lake, the location of sites of water input and output, and the distribution of hydrophytes in wetlands affect the removal rate of phosphorus. (3) Significantly negative correlations were found between water temperature, pH, DO concentration, Chl-a concentration, and phosphorus, while the correlations between water temperature, pH, DO concentration, and Chl-a concentration were significantly positive. Therefore, algae are a key factor influencing phosphorus removal.

Key words: wetland; input watercourse; phosphorus; interception and decontamination; impact factor; Ezhen Lake; Caohu Lake

近年来我国水体富营养化问题日趋严重,水华的频繁暴发给人们的生产和生活带来不利影响,尤其是太湖等大型淡水湖泊的富营养化问题[1]。磷是水体生态系统中初级生产力的主要影响因子之

一,且是控制水体富营养化的关键营养元素,其浓度 与水体的营养程度密切相关。

为缓解水体的富营养化状况,国内外展开了一系列的研究,其中湿地生态系统由于具有对磷进行

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2008CB418203);江苏省"333"高层次人才培养工程"项目(BRA2010121);水利部公益性行业科研专项(201101020);江苏省自然科学基金(BK2010076)

作者简介:王沛芳(1973 —),女,教授,主要从事水环境保护与生态修复研究。E-mail: pfwang2005@ hhu. edu. cn

通信作者:王超,教授。E-mail: cwang@ hhu. edu. cn

物理、化学和生物的处理能力,已被广泛采用。湿地生态系统分为人工湿地和自然湿地,研究表明,人工湿地在对生活污水、废水、入湖径流的处理以及河道生态的修复中具有一定的效果^[2-5],自然湿地如沟渠湿地、水塘湿地对农业非点源污染物有净化作用^[6-7]。湿地对河流污染物都有一定的截留作用^[8],然而针对湖荡湿地对天然输水河道中污染物的截留去除研究较少。

笔者选取太湖"引江济太"工程主要输水河流 望虞河的鹅真荡、漕湖两个湖荡湿地作为研究对象, 分析湖荡湿地对天然输水河道中磷的截留净化作 用,旨在为"引江济太"工程提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鹅真荡位于无锡市和苏州市接合部,南北长约3.0 km,东西宽约2.9 km,面积约为5.4 km²。5 月份水生植物分布较为广泛,湖荡周边有芦苇、菖蒲以及菹草,主输水河道无水生植物生长;12 月份无大型水生植物生长。望虞河穿过鹅真荡中心。

漕湖位于江苏省苏州市相城区,平均水深 2.2 m,面积约为 4.5 km²,北部有大面积的围网养殖。5 月份漕湖周边有少量芦苇、菖蒲,主输水河道无水生植物生长;12 月份无大型水生植物生长。望虞河从漕湖西侧穿过漕湖,是主要的入湖、出湖河流。

1.2 采样点分布

选取太湖流域望虞河的鹅真荡、漕湖两个典型湖荡湿地作为研究对象,在2011年5月8—9日和12月29日采集了湖荡主输水河道的3层水样,由于5月9日风浪较大,采样点5和6只采集了表层水,采样点位置如图1所示。

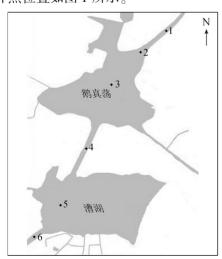


图 1 湖荡采样点分布示意图

1.3 样品的采集与分析方法

使用自制 5L 玻璃采水器采集水样,每个采样点

采集两瓶水,置于保温箱内,当天运回实验室置于 4℃下冷藏。现场测定了水温、浊度、DO、pH、电导 率等理化指标。

理化指标的测定采用 HACH 便携式测定仪,水中悬浮物 (SS)的测定采用重量法^[9],叶绿素 a (Chl-a)采用丙酮萃取-紫外光分光光度法^[9]测定浓度,总磷(TP)和总溶解磷(TDP)的浓度测定采用GB11893—89《钼酸铵分光光度法》,颗粒态磷(PP)浓度是 TP浓度和 TDP浓度之差,正磷酸盐(PO³⁻)的浓度测定采用德国 Seal 公司生产的连续流动分析仪,利用声学多普勒流速剖面仪测定输水河道横断面的流速、流量。

对样品做空白试验以及平行样分析,因此水体中磷形态测定结果具有较高的精度和稳定性。试验数据处理采用 Excel 2003 和 SPSS 分析软件。

2 结果和讨论

2.1 理化指标

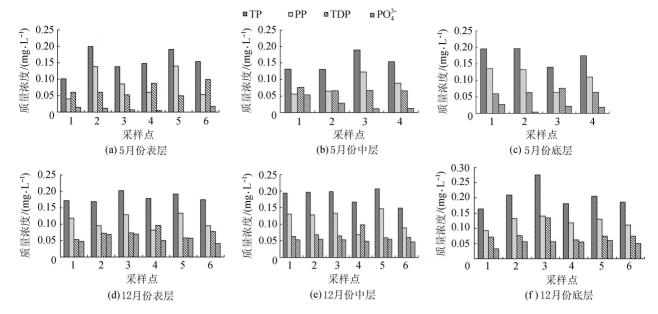
5月份鹅真荡不同水深的理化因子变化不大, 其中水温在 24.2℃左右;pH 在 8.2 左右;电导率在 456 μS/cm 左右;DO 质量浓度在 7.4 mg/L 左右;水体中 SS 浓度随着水深的增加而增加;Chl-a 的浓度中层水体最高,表层和中层水体高于底层水体。漕 湖表层水 SS 和 Chl-a 的浓度明显低于鹅真荡表层水,其他理化因子相差不大。

12 月份湖荡不同水深的理化因子变化不大,其中水温在 8.3℃左右,鹅真荡的水温略高于漕湖;漕湖的电导率略高于鹅真荡;pH 在 7.8 左右;DO 质量浓度在 6.0 mg/L 左右。湖荡不同水深 SS 浓度分布较均匀,沿主输水河道 SS 浓度沿程逐渐降低,且 12月份的 SS 浓度高于 5月份的湖荡水体。湖荡不同水深 Chl-a 的浓度相差不大,且浓度明显低于 5月份。

2.2 磷在湖荡中的形态和分布

为了解湖荡中磷的主要赋存形态以及不同形态 磷在湖荡中的分布规律,分析了5月份和12月份湖 荡水体各层水体不同形态磷的浓度分布,如图2 所示。

由图 2 可见,5 月份鹅真荡水体中主要以 TDP和 PP为主,其中 TDP的质量浓度变化不大,大多在0.06~0.07 mg/L之间;表层、中层水体 TDP和 PP浓度相近,底层水体磷以 PP为主,且 PP浓度明显高于表层和中层; PO³⁻在鹅真荡浓度较低,没有明显的分布规律。漕湖水体中磷主要以 TDP为主,磷形态分布没有明显规律。相比较而言,漕湖表层水体 TDP浓度明显高于鹅真荡表层水体, PP和 PO³⁻浓度低于鹅真荡。



2011 年 5 月、12 月磷在湖荡各层水体中的形态和分布

12 月份湖荡水体中主要以 PP 为主, TDP 主要 以 PO³ 为主。湖荡不同水深的 PP 浓度变化不大, 其中在湖荡出入湖口的表、中层水体 PP 浓度较低, 底层 PP 分布较均匀。湖荡水体中 TDP 和 PO3-的 浓度相近,各层水体 TDP 和 PO4 的分布波动不大。 对比来看,12 月份湖荡各层水体中的磷的浓度基本 高于5月份湖荡水体,尤其是水体中PO³⁻的浓度。

2.3 湖荡湿地对河道磷的截留效果

为了研究湖荡湿地对输水河道磷的截留作用, 对湖荡湿地出入湖口3点监测点(1、4、6)的各形态 磷的质量浓度进行监测,取采样点表层、中层、底层 水体平均浓度作为浓度数据,如表1、表2所示。

表 1 5 月份湖荡出入湖口磷的质量浓度

采样 点	ρ(TP)	ρ(TDP)	ρ(PP)	ρ(PO ₄ ³⁻)
1	0. 1427±0. 009	0.0655±0.0004	0. 0771±0. 009	0. 031 8±0. 000 5
4	0. 151±0. 003	0.0724±0.006	0.0786 ± 0.006	0.0119 ± 0.0007
6	0. 1537±0. 028	0. 085 5±0. 000 1	0.0682±0.028	0. 013 3±0. 001 2

12 月份湖荡出入湖口磷的质量浓度

采样 点	ρ(TP)	$\rho(\text{TDP})$	ρ(PP)	$ ho(\mathrm{PO_4^{3-}})$
1	0. 1768±0. 0118	0. 1139±0. 0087	0. 062 9±0. 003 6	0. 0447±0. 0007
4	0. 1756 ± 0.0152	0.0897 ± 0.0087	0.0859 ± 0.0044	0.0515 ± 0.0026
6	0 170.0+0 036	0.0988+0.016	0.0712+0.0135	0.0462±0.0007

再根据湖荡入湖口和出湖口横断面的流量数据 (表3),结合表1和表2中湖荡入湖、出湖口的各形 态磷的浓度,估算出采样当天各形态磷的入湖量、出 湖量和截留量,如表4和表5所示。

由表4可知,5月份鹅真荡对不同形态磷均有 一定截留作用,其中对PP、PO₄ 有较高的截留能力。 这是由于水体中大部分 PP 沉降,小部分 PP 被降解

湖荡入湖、出湖口横断面流量

kg/d

月份	采样点1	采样点4	采样点6
5	175. 40	141. 70	135. 10
12	87. 97	31. 47	78. 95

5月份磷的出入湖量和截留量

磷	鹅真荡				总截		
形态	入湖量	出湖量	截留量	入湖量	出湖量	截留量	留量
TP	2 162. 27	1 836. 41	325. 86	1 836. 41	1 793. 15	43. 26	369. 12
TDP	993. 16	886. 55	106.61	886. 55	998. 1	-111. 55	-4. 94
PP	1169. 11	962.69	206.42	962.69	796.04	166.65	373.06
PO_{4}^{3-}	481.58	145. 55	336.03	145. 55	213.49	-67. 94	268.09

12 月份磷的出入湖量和截留量

kg/d

	磷	鹅真荡				 总截		
开	多态	入湖量	出湖量	截留量	入湖量	出湖量	截留量	留量
	TP	1 343. 79	477. 46	866. 33	477. 46	1135. 38	-657. 92	208. 41
	PP	865.71	243.90	621.81	243. 90	659.86	-415.96	205.85
T	TDP	478. 08	233. 56	244. 52	233. 56	475. 52	-241.96	2.56
P	O_4^{3-}	339. 75	140. 03	199.72	140. 03	308. 56	-168.53	31. 19

转变为 TDP;湖荡湿地中水生生物对 PO³⁻ 的吸收利 用导致。然而 TDP 的截留量相对来说较低,猜测为 湖荡湿地岸边区域围网养殖以及生活污水的排放, 增加了水体中溶解态有机磷的浓度。

5月份漕湖对水体中的 PP 有一定的截留净化 作用。漕湖水体中 TDP 和 PO³⁻ 浓度增加,一方面 是由于漕湖湖区周边有大面积的围网养殖使水体中 PO³⁻、TDP、PP浓度较高,同时部分PP被微生物以 及水生植物等水生生物降解为 PO³⁻ 和 TDP, 使水体 中 PO₄ 和 TDP 浓度上升。

由表5可知,12月份鹅真荡对磷有显著的截留 净化作用,尤其是沉降作用对 PP 的截留。漕湖由 于围网养殖、含磷河水(废水)流入等因素,磷的出 湖量远高于入湖量。总体而言,经过鹅真荡和漕湖两个湖荡后,湖荡对水体的磷有一定的截留净化,特别是对 PP 的截留作用最为显著。

对比 5 月份和 12 月份的出入湖量和截留量发现,12 月份鹅真荡对磷的截留净化作用明显好于 5 月份,尤其是沉降作用对 PP 的截留。这可能是由于 5 月份主输水河道输水量较大,流速较快,PP 不易沉降。由于 5 月份湖荡中的水生植物、藻类、微生物较活跃,吸收利用 PO³⁻,以及 12 月份水体中磷负荷较高,因此 5 月份湖荡对 PO³⁻ 的净化作用明显好于 12 月份。总体而言,经过鹅真荡和漕湖两个湖荡后,5 月份湖荡对磷的截留作用比 12 月份略强。

对比发现,鹅真荡对磷的截留能力明显高于漕湖。结合湖荡的实际情况可以知道:①望虞河穿过鹅真荡中心,鹅真荡水体交换周期短,部分地区水力停留时间相对较长,便于磷的去除。而输水河道位于漕湖西侧,水体交换周期长,东部地区水力停留时间过长,不利于磷的去除,这与王世和等[10]的人工湿地模拟实验结果相似。②鹅真荡相对于漕湖,空间结构更紧凑、多端。LI等[11]的研究表明这有利于湿地对磷的去除,而且鹅真荡的面积大于漕湖的面积,研究表明面积与去除率呈幂函数关系[12],面积较大的湿地具有更高的去除能力。③漕湖东侧地区有大面积的围网养殖,人类活动量大,外界含磷营养盐水流汇入漕湖,使进入漕湖的磷负荷增加,不利于磷的去除[13]。④鹅真荡水生植物分布面积比漕湖广,有利于TDP和PO3-1的去除。

2.4 湖荡湿地不同水深对河道磷的净化作用

湖荡湿地在不同水深水体中,由于理化因子等环境因素的不同,对磷的净化效果也大不同。因此

进一步分析 5 月和 12 月鹅真荡 3 层水体对河道中磷的净化作用,结果如图 3 所示。

图 3 分析表明,5 月份鹅真荡表层水体中 PP 浓度降低了 8.4%, PO₄³⁻ 浓度降低了 66.7%。鹅真荡中层水体中 TDP 浓度降低了 14.2%, PP 浓度升高了 59.5%, PO₄³⁻ 浓度降低了 76.9%。鹅真荡底层水体中 TP 浓度降低了 10.6%, PP 浓度降低了 18.7%, PO₄³⁻ 浓度降低了 33.3%。

12 月份鹅真荡表层水体中 PP 浓度降低了30.1%,PO₄-浓度升高了5.2%。鹅真荡中层水体中 TP 浓度降低了13.89%,PP 浓度降低了38.6%,PO₄-浓度降低了8.4%。鹅真荡底层水体中 TDP 浓度降低了11.8%,PP 浓度升高27.2%,PO₄-浓度升高了69.2%。

对比 3 层水体对不同形态磷的影响作用,可以发现,5 月份鹅真荡表层、中层水体对 PO¾- 都有明显的净化作用,底层对 PO¾- 也有较高的净化作用,这是因为水生植物、藻类、微生物吸收利用 PO¾- 的结果;底层对 PP 有着显著的净化作用。这是因为底层流速减缓导致悬浮颗粒沉降,从而使得 PP 在沉降作用下积累到沉积物中。由于 12 月份主输水河道输水量相对较少,流速减缓,PP 易随悬浮物质沉降,12 月份鹅真荡表层、中层水体对 PP 有明显的净化作用;12 月份湖荡各层水体对 PO¾- 均没有较好的净化作用,这是由于 12 月份水体中无水生植物以及藻类、微生物不活跃导致。

2.5 环境因子与磷的相关性分析

水体中磷的变化受水温、pH、SS、Chl-a、DO 等多种因素的影响,水体中的 SS 变化会导致光在水下的

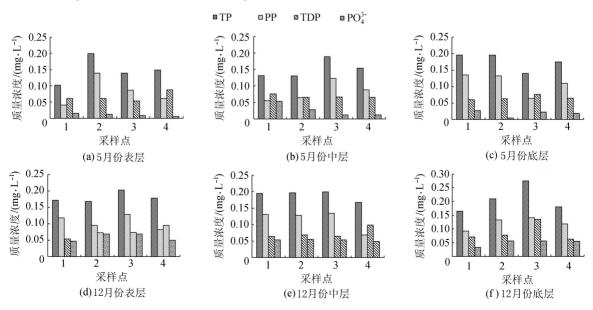


图 3 2011 年 5 月、12 月鹅真荡各层水体中磷的形态和分布

表 6 上覆水磷与环境因子之间相关性分析(n=94)

因子	$\rho(\text{TP})$	$\rho(PP)$	$\rho(\text{TDP})$	$\rho(\mathrm{PO_4^{3-}})$	$\rho(DO)$	рН	$\rho(SS)$	ho(Chl-a)	水温
$\rho(\text{TP})$	1								
$\rho(PP)$	0. 837 **	1							
$\rho(\text{TDP})$	0. 243 *	-0. 327 **	1						
$ ho(\mathrm{PO_4^{3-}})$	0. 350 **	0. 233 *	0. 194	1					
$\rho(DO)$	-0. 364 **	-0. 290 **	-0. 114	-0.757 **	1				
pН	-0. 359 **	-0. 284 **	-0. 117	-0. 819 **	0. 852 **	1			
ho(SS)	0. 348 **	0. 251 *	0. 157	0. 182	-0. 228 *	-0.074	1		
ho(Chl-a)	-0. 359 **	-0. 313 **	-0.068	-0. 769 **	0. 823 **	0. 891 **	-0. 345 **	1	
水温	-0. 405 **	-0. 292 **	-0. 181	-0. 856 **	0. 805 **	0. 878 **	-0. 123	0. 799 **	1

注:*表示在0.05 水平上显著相关,**表示在0.01 水平上显著相关。

辐射变化,进而影响藻类的生长;水温、pH、DO 能够 影响水体中藻类和微生物的生长状况。下面用 Pearson 相关系数检验法对 5 月和 12 月不同形态的 磷与环境因素进行相关性分析,结果见表 6。

水体中磷以 PP 为主,所以 TP 与 PP 呈极显著 正相关。研究表明,水体中的悬浮物质能够吸附或者 释放磷^[14],因此 PP 与 SS 呈显著正相关。水体中 SS 的变化会导致水下辐射的变化,进而影响藻类的生 长,故 SS 浓度与 Chl-a 浓度呈显著负相关。

水体中 DO 浓度和 Chl-a 浓度均与不同形态的 磷浓度呈负相关,其中均与 PO³⁻ 浓度呈极显著负相 关,主要是因为 DO 能够影响水体中藻类、微生物的 生长,而藻类、微生物能够利用水体中的磷,尤其是 PO³⁻。水体中的生物在生化过程中会消耗 DO,但是 藻类的光合作用会提高水体中的 DO 浓度,故 Chl-a 浓度与 DO 浓度呈极显著正相关。

pH 与水体的酸碱度有关,能够影响水体中磷的 赋存形态,也会影响沉积物和悬浮物对磷的吸附和 释放,因此 pH 与不同形态磷浓度均呈负相关。研究表明, pH 在偏碱性条件下,更利于藻类的生长^[15],而且藻类光合作用大量消耗 CO₂ 会使水体 pH 有一定比例增加,故 pH 与 Chl-a 浓度呈极显著正相关。

水温对水体中的磷有着直接或者间接的影响,水温较高,水体的富氧能力弱,生物化学耗氧反应速率加快,但是水温较高导致水体中的生物活性高,因此水温与 DO 浓度和 Chl-a 浓度均呈极显著正相关,与不同形态的磷浓度均呈显著负相关。

3 结 论

- **a.** 湖荡湿地对输水河道中磷有一定的截留净化作用,主要是通过对 PP 和 PO³⁻ 的截留,且湖荡对 PO³⁻ 的净化有季节性差异。由于人类活动等影响对 TDP 的去除效果不明显。
- **b.** 湖荡湿地的面积、空间结构、水生植物分布以及输水河道经过湖荡的位置在一定程度上影响了

湿地对磷的截留净化作用。

- **c.** 5 月份湖荡湿地各层水体对 PO³⁻ 有明显净化作用,底层对 PP 有较高的净化作用。12 月份湖荡湿地表层、中层水体对 PP 有明显净化作用。
- **d.** 水温、pH、DO 浓度和 Chl-a 浓度与水体中的 磷浓度呈极显著负相关,水温、pH、DO 浓度与 Chl-a 浓度均呈极显著正相关。藻类是影响湖荡净化磷的 重要因子。

参考文献:

- [1] LE C, ZHA Y, LI Y, et al. Eutrophication of lake water in china; cost, cause, and control [J]. Environment Management, 2010, 45:662-668.
- [2] 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,2001,25(1):28-36.(WU Zhenbin, CHEN Huirong, HE Feng, et al. Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system [J]. Acta Hydribiologica Sinica, 2001, 25 (1): 28-36. (in Chinese))
- [3] KADLEC R H. Phosphorus removal in emergent free surface wetlands[J]. Environmental Science and Health, 2005,40:1293-1306.
- [4]高海鹰,刘佳,徐进. 湖滨带复合型人工湿地氮磷的去除效果[J]. 生态环境,2007,16(4):1160-1165. (GAO Haiying, LIU Jia, XU Jin. Removal efficiency of nitrogen and phosphorus in integrated constructed lake-side wetlands[J]. Ecology and Environment, 2007,16(4): 1160-1165. (in Chinese))
- [5] 陈世朋,姜夕奎,张景来. 人工湿地在河道生态修复应用中的进展及优化[J]. 污染防治技术,2009,22(5):63-68. (CHEN Shipeng, JIANG Xikui, ZHANG Jinglai. Development and optimization of constructed wetland applied to ecological remediation of river course [J]. Pollution Control Technology, 2009, 22(5):63-68. (in Chinese))
- [6] 姜翠玲. 沟渠湿地对农业非点源污染物的截留和去除效应[D]. 南京:河海大学,2003.

(下转第9页)

- 以北京市为例[J]. 南水北调与水利科技,2004,2(4): 34-35. (ZENG Changyun, LI Guibao, FU Hua. Study on water environment security and Its evaluation Index system: a case study of Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2004,2(4): 34-35. (in Chinese))
- [2] HAN Yuping, RUAN Benqing. Research on Evaluation Index System of Water Safety [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(2):267-272.
- [3] 孙海龙,姚卫星. 区间数排序方法评述[J]. 系统工程学报, 2010, 25 (3): 304-312。(SUN Hailong, YAO Weixing. Comments on methods for ranking interval numbers[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25 (3): 304-312. (in Chinese))
- [4] 耿雷华, 卞锦宇, 徐澎波, 等. 水资源合理配置评价指标体系研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008:158-170.
- [5] 畅明琦,刘俊平.水资源安全基本概念与研究进展[J]. 中国安全科学学报,2008,18(8):12-19. (CHANG Mingqi, LIU junping. Basic concept of water resources security and its research development[J]. China Safety

- Science Journal, 2008, 18(8):12-19. (in Chinese))
- [6] 胡启洲,张卫华. 区间数理论的研究及其应用[M]. 北京:科学出版社,2010:9-12.
- [7] 张吉军,樊玉英. 权重为区间数的多指标决策问题的逼近理想点法[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(11): 76-77 (ZHANG Jijun, FAN Yuying. Topsis of multiple attribute decision making problem with interval-valued weight[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002,24 (11):76-77. (in Chinese))
- [8] 徐良芳,冯国章,刘俊民. 区域水资源可持续利用及其评价指标体系研究[J]. 西北农林科技大学学报,2002,30(2):119-122. (XU Liangfang, FENG Guozhang, LIU Junmin. Sustainable utilization and evaluation index system for regional water resources [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2002,30(2):119-122. (in Chinese))
- [9] 李祚泳,丁晶,彭荔红.环境质量评价原理与方法[M]. 北京:化学工业出版社,2004:35-67.
- [10] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社,2004:105-115.

(收稿日期:2012-09-23 编辑:徐 娟)

(上接第5页)

- [7] 王沛芳,王超,徐海波. 自然水塘湿地系统对农业非点源氮的净化截留效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2006,25(3):782-785. (WANG Peifang, WANG Chao, XU Haibo. Effectiveness of nutrient retention and purification in natural ponds [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25 (3):782-785. (in Chinese))
- [8] KRIEGER K A. Effectiveness of a coastal wetland in reducing pollution of a Lanurentian great lake: hydrology, sediment, and nutrients [J]. Wetlands, 2003, 23(4):778-791.
- [9] 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]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社,2002;105-107,607.
- [10] 王世和,王薇,俞燕. 水利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):359-362. (WANG Shihe, WANG Wei, YU Yan. Influence of hydraulic condition on treatment effect of constructed wetland[J]. Journal of Southeast University: Natural Science,2003,33(3):359-362. (in Chinese))
- [11] LI Xiuzhen, ROB J, Xiao Duning, et al. The effect of spatial pattern on nutrient removal of a wetland landscape [J]. Landscape and Urban Planning, 2002, 60:27-41.
- [12] KADLEC R H, KNIGHT R L. Treatment Wetlands [M]. Boca Raton; CRC Press, 1996.
- [13] 陈博谦,王星,尹澄清. 湿地土壤因素对污水处理作用的模拟研究[J]. 城市环境与城市生态,1999,12(1):

- 19-21. (CHEN Boqian, WANG Xing, YIN Chenqing.

 The role of soils in wastewater treatment in a simulated constructed wetland [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 1999, 12(1):19-21. (in Chinese))
- [14] WAN Jun, WANG Ze, YUAN Hezhong. Characteristics of phosphorus fractionated from sediment resuspension in abrupt expansion flow experiments [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(10):1519-1526.
- [15] 陈建中,刘志礼,李晓明,等. 温度、pH 和氮、磷含量对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 海洋与湖沼,2010,41 (5): 714-718. (CHEN Jianzhong, LIU Zhili, LI Xiaoming, et al. Effect of temperature, pH, nitrogen and phsophorus on growth on Microcystis aeruginosa [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica,2010,41(5):714-718. (in Chinese))

(收稿日期:2012-02-30 编辑:徐 娟)

