

扎龙河滨湿地对地表径流氮磷污染物的净化作用

郭跃东¹, 何岩², 邓伟¹, 章光新¹, 潘继花¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院, 北京 100864)

摘要: 通过对扎龙河滨湿地内龙安桥及水库桥河段水体空间采样分析, 研究了 2 个典型河滨湿地对地表径流中 TN、TP 及 PO_4^{3-} 的净化作用规律. 应用空间净化方程分析表明, 2 个河段河滨湿地在春、夏、秋 3 季对水体 TP 及 PO_4^{3-} 有持续净化能力, TP 净化系数范围为 $0.00186 \sim 0.01175 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$, PO_4^{3-} 净化系数范围为 $2.5\text{E-}4 \sim 0.00704 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$. 而河滨湿地对 TN 的净化作用仅出现在春、夏 2 季, 且夏季净化作用最明显, 净化系数达 $0.07354 \sim 0.16036 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$; 在秋季则出现 TN 沿径流向下游累积输出的特征, 输出能力最高达 $0.48175 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$. 2 河段的径流量及氮磷污染物输入浓度特征分析表明了河滨湿地对水体 TN、TP 及 PO_4^{3-} 的净化作用受到这 2 种因素的综合影响而表现出季节性规律特征.

关键词: 扎龙湿地; TN; TP; PO_4^{3-} ; 净化作用; 净化系数

中图分类号: X26 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)03-0049-07

Purification of Surface Water Nitrogen and Phosphorus Pollutants by Zhalong Riparian Wetland

GUO Yue-dong¹, HE Yan², DENG Wei¹, ZHANG Guang-xin¹, PAN Ji-hua¹

(1. Northeast Institute of Geography & Agro-ecology, CAS, Changchun, 130012; 2. CAS, Beijing, 100864)

Abstract: The laws of purification of stream nitrogen and phosphorus by riparian wetland was studied by sampling in Long'an Bridge and Shuike Bridge reaches in Zhalong Wetland. Results from the spatial purifying equations show that two reaches exhibited persistent capability of purification of TP and PO_4^{3-} through out the seasons of spring, summer and fall, and the purifying coefficient of TP fluctuates from 0.00186 to $0.01175 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$ while the PO_4^{3-} 's was from $2.5\text{E-}4$ to $0.00704 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$. As to TN, the purification occurred only in the seasons of spring and summer while in fall it experienced accumulation downwards along the streamflow, and the output capability was up to $0.48175 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$. Analysis of effect factors show runoff and input concentration have a certain influence on the purification capability.

Key words: Zhalong Wetland; TN; TP; PO_4^{3-} ; purification; purifying coefficient

河滨湿地是流域内典型的水陆过渡型生态系统, 其对地表径流中污染物的净化作用是调节流域水系统生物地球化学循环、维系水生态系统健康的重要保障, 已成为国际湿地科学研究的热点^[1]. 湿地系统具有很强的净化水体污染物潜力, 尤其对农耕区河流氮磷营养物质有较好的净化效果. Chescheir(1991)报道, 240hm^2 的湿地能将 $1\ 250\text{hm}^2$ 农业流域径流中的 TN、 NO_3^- 、N、P 及其他颗粒物去除 79% 以上^[2, 3]. 湿地主要通过土壤-植被系统的过滤和吸收、物理吸附和交换、微生物降解和沉淀作用净化水体污染物, 净化作用的机理研究已趋渐成熟^[4, 5], 并逐渐把湿地净化作用应用于河流生态系统恢复及水环境保护实践中^[6, 7]. 但在实践中发现, 河滨湿地对污染物的净化效果在自然状态下有一定的波动和不稳定性, 且受到水文、气候条件及湿地发育程度的影响而产生地域差异^[8]. 自然状态下河滨湿地净化作用的规律研究仍有待深入, 湿地较大尺度的净化模型也有待完善^[9].

本文以扎龙湿地典型河段为研究区, 建立湿地空间净化模型, 研究了湿地对补给径流中 TN、TP 及 PO_4^{3-} 净化作用的时空变化规律, 分析了影响湿地净化效率的主要因素, 为在充分发挥扎龙湿地自身生态水文功能基础上开展湿地水环境恢复工作提供科学依据.

1 研究区概况

扎龙湿地保护区位于松嫩平原西部乌裕尔河流域下游, 属典型的河滨湿地, 沼泽面积达 $1\ 400\text{km}^2$ 以上. 本地区地势低洼平坦, 地表水排泄缓慢, 主要沼泽植被为芦苇 (*Phragmites communis*)、苔草 (*Carex*). 扎龙湿地属于中温带大陆性季风性气候, 年平均降水量 420mm , 年平均蒸发量 $1\ 489\text{mm}$. 近年来, 流域内大规模的水土资源开发活动已经导致了

收稿日期: 2004-07-02; 修订日期: 2004-10-18

基金项目: 中国科学院知识创新项目 (KZCXZ-SW-320-2)

作者简介: 郭跃东 (1978-), 男, 博士研究生, 主要从事水生态环境方向研究.

径流污染的加剧,使扎龙湿地水体富营养化现象频繁出现,严重威胁湿地生物栖息地安全,对扎龙湿地水环境的研究工作亟待开展^[10].

2 研究方法

2.1 采样及测试

根据 LandSat/ TM(2002) 影像的解译分析,将扎龙河滨湿地划分为自然径流区和水文控制区 2 部分:自然径流区是指东胜水库以上湿地部分,该区湿地水文补给不受水利工程等设施影响;水文控制区是指东胜水库以下的湿地区域,该区被东胜水库、301 公路阻隔,水文补给严格受到东胜水库的控制(图 1).

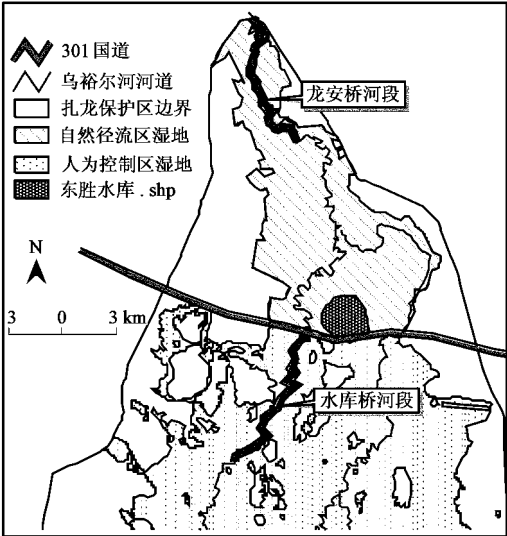


图 1 扎龙湿地典型河段采样位置
Fig.1 Sampling position of typical reaches
in Zhalong Wetland

在 2 个水文情势区,选择龙安桥及水库桥河段作为典型湿地研究区进行采样.龙安桥采样河段位于自然径流区龙安桥以下至 6.0 km 范围内,水库桥河段位于水文控制区东胜水库以西水库桥以下至 7.0 km 范围内,2 河段地貌及植被特征如表 1.分别在 2002、2004 年春季(5 月下旬)、2002、2003 年夏季(7 月下旬)及 2002、2003 年秋季(9 月下旬)对上述 2 河段采样,采样时以桥头为起点沿径流向以下以 1~1.2 km 间隔采集湿地地表水样,每个河段分别采集 7 个样点水样,每个样点取小范围内 3~5 处瞬时水样混合.为避免高污染负荷冲击的影响,每次采样都保证近一个星期内流域中下游没有较大规模降水及突发污染事故发生.

表 1 采样河段地貌及生态特征
Table 1 Characters of landform and ecology
in the sampling reaches

河段	主河道 宽/ m	湿地发育 宽度/ km	主要植 被类型	植被密度 (夏季)/ 株·m ⁻²
龙安桥河段	5~7	1.8~2.2	芦苇	130~150
水库桥河段	3~5	1.5~2.0	芦苇	110~130

采集的水样加入缓冲剂浓 H₂SO₄ 后带回实验室,用 0.45 μm 滤膜过滤后,测试 TN、TP 及 PO₄³⁻. TN 应用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定:取 10 mL 水样加入 5 mL 碱性过硫酸钾溶液(40 g·L⁻¹),在 120℃~124℃ 下水域加热 30 min,后加 1 mL 稀盐酸,定容至 25 mL,在 220 nm、275 nm 波长下测定吸光度;TP 的测定:取 25 mL 水样,加入 2 mL 高氯酸、5 mL 浓硝酸,加热消解至 3~4 mL,定容 25 mL 后放入 SKALAR SAN⁺⁺ 型连续流动分析仪测定;PO₄³⁻ 直接用该流动分析仪测定.对于 TN、TP、PO₄³⁻ 含量平均值分别为 1.515 mg/L、0.110 mg/L 及 0.065 mg/L 的水样平行样(8 个)平均值标准误差分别为 0.00151、613 mg/L 及 56.6 mg/L.

2.2 空间模型分析

湿地河段对水体氮磷污染物的净化作用直观的表现是氮磷沿径流方向上逐渐消减,国外大多数相关研究应用进水断面及出水断面水体氮磷浓度的比值关系,对净化效率进行量化研究,其主要不足就是难以反映单位空间测度上湿地的净化能力及难以在不同区域进行比较^[11,12].因此,本文采用直线空间净化方程对 2 个河段氮磷的净化规律进行模拟,其基本方程形式如下:

$$Y(x) = -\alpha \cdot X + \beta \tag{1}$$

式中,α 表示空间净化系数,即单位距离水体氮磷浓度的变化,正值表示污染物的净化吸收,负值表示向下游的累积输出,单位:mg·(L·km)⁻¹;β 为方程截距,mg·L⁻¹;X 表示以进水断面为起点的径流传输距离,km;Y 表示相应点位上水体氮磷浓度,mg·L⁻¹.

3 结果与分析

龙安桥及水库桥河段湿地水体 TN 的空间净化特征如图 2 所示(线性回归样本量 n=7,α=0.05).图 2 表明,扎龙湿地龙安桥河段及水库桥河段对地表径流中 TN 存在一定程度的净化作用,2 河段存在明显相似的季节性变化特征.在春季和夏季,2 湿地河段对水体 TN 的净化作用比较明显:春季,龙安

桥及水库桥河段 2 年间平均净化系数分别达到 $0.0956 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$ 和 $0.05783 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$; 夏季, 龙安桥和水库桥河段 2 年间平均净化系数分别为 0.1236 和 $0.07753 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$, 明显高于春季 2 湿地河段相应的平均净化系数, 说明总体上夏季湿地河段对水体 TN 的净化能力要高于春季. 然而在秋季, 2 湿地河段对水中 TN 的净化特征明显区别于春夏 2 季, 从净化系数来看, 2 河段不仅对

水中 TN 没有净化作用, 反而向下游逐渐累积和输出氮污染物. 同时, 2 年间 2 河段水体 TN 的输出趋势有较大波动变化, 2002 年秋季龙安桥、水库桥河段净化系数分别为 -0.48175 和 $-0.18479 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$, 平均值为 $-0.33327 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$, 显著低于 2004 年秋季 (2004 年秋季 2 河段的净化系数平均值为 $-0.14938 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$). 另一方面, 处于自然径流区的龙安桥河段与处

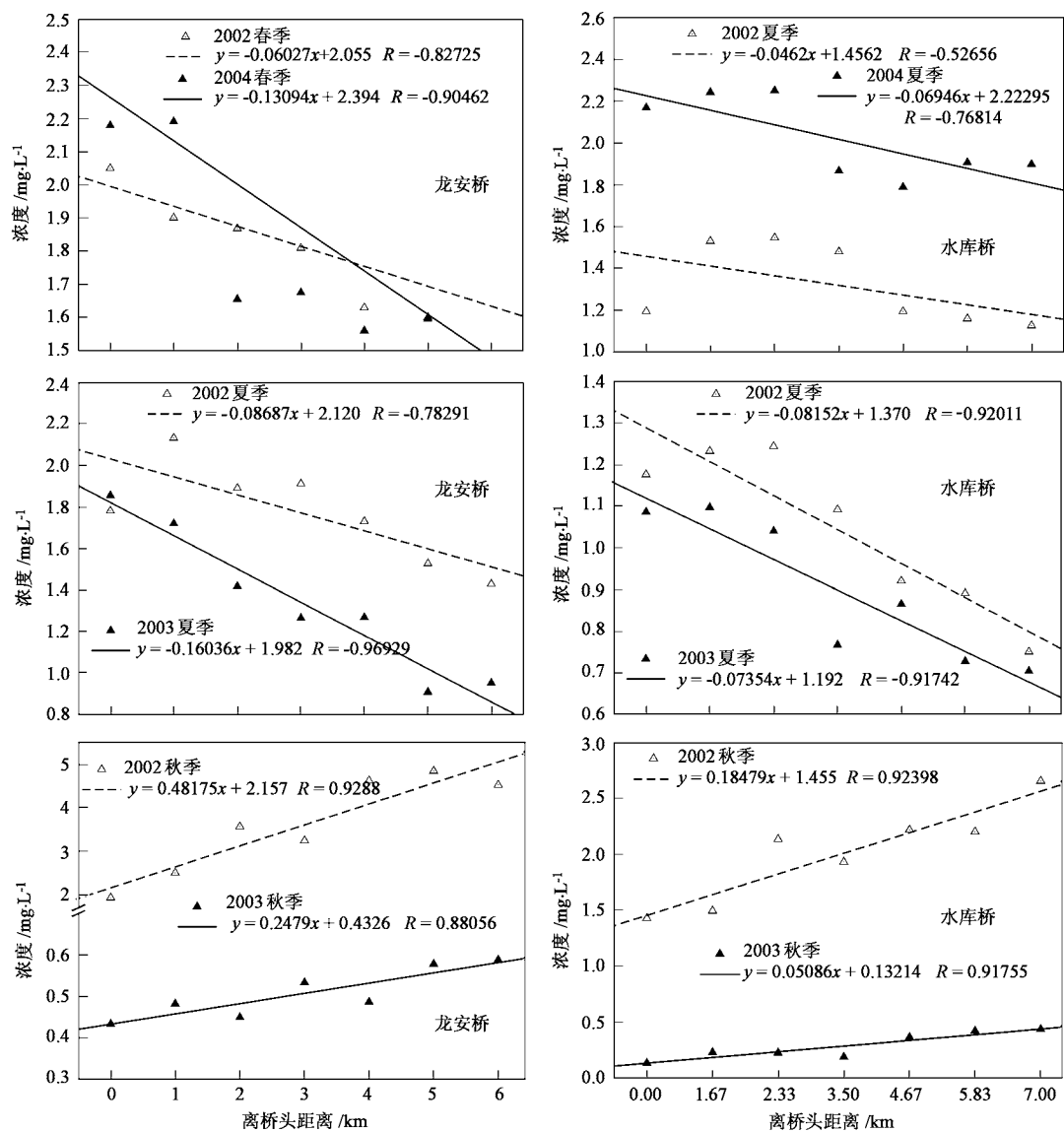


图 2 龙安桥河段和水库桥河段湿地对水中 TN 的空间净化特征

Fig. 2 Purifying characteristics of water TN through the Long'an Bridge and Shuiku bridge wetland reaches

于水文控制区的水库桥河段存在较显著的差别: 春夏 2 季, 龙安桥河段 2 年 TN 净化系数平均值均高于水库桥河段, 表明龙安桥河段的总体净化能力强与水库

桥河段; 而秋季, 龙安桥河段 2 年内净化系数平均值为 $-0.36483 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$, 明显的低于水库桥河段相应净化系数 [$-0.11938 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$], 说明秋季

龙安桥湿地河段水中氮污染物沿径流向下游累积输出的程度大于水库桥河段。

龙安桥及水库桥湿地河段水体 TP 的空间净化特征如图 3 所示(线性回归样本量 $n = 7$, $\alpha = 0.05$)。图 3 表明 2 湿地河段对径流水体 TP 的净化作用在整年内都表现的非常显著。从监测结果的 2 年平均值来看,2 河段 TP 净化规律与 TN 相似:夏季最大,春季次之,秋季最小。春夏 2 季,2 年间龙安桥河段

湿地对 TP 的平均净化能力大于水库桥河段,春季龙安桥河段及水库桥河段水体 TP 净化系数 2 年平均值分别为 $0.00607 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$ 和 $0.00476 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$,夏季相应的水体 TP 净化系数平均值分别为 $0.01018 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$ 、 $0.005345 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$,而秋季 2 河段 TP 空间净化特征不明显,没有一致的规律。

图 4(线性回归样本量 $n = 7$, $\alpha = 0.05$)所示的 2

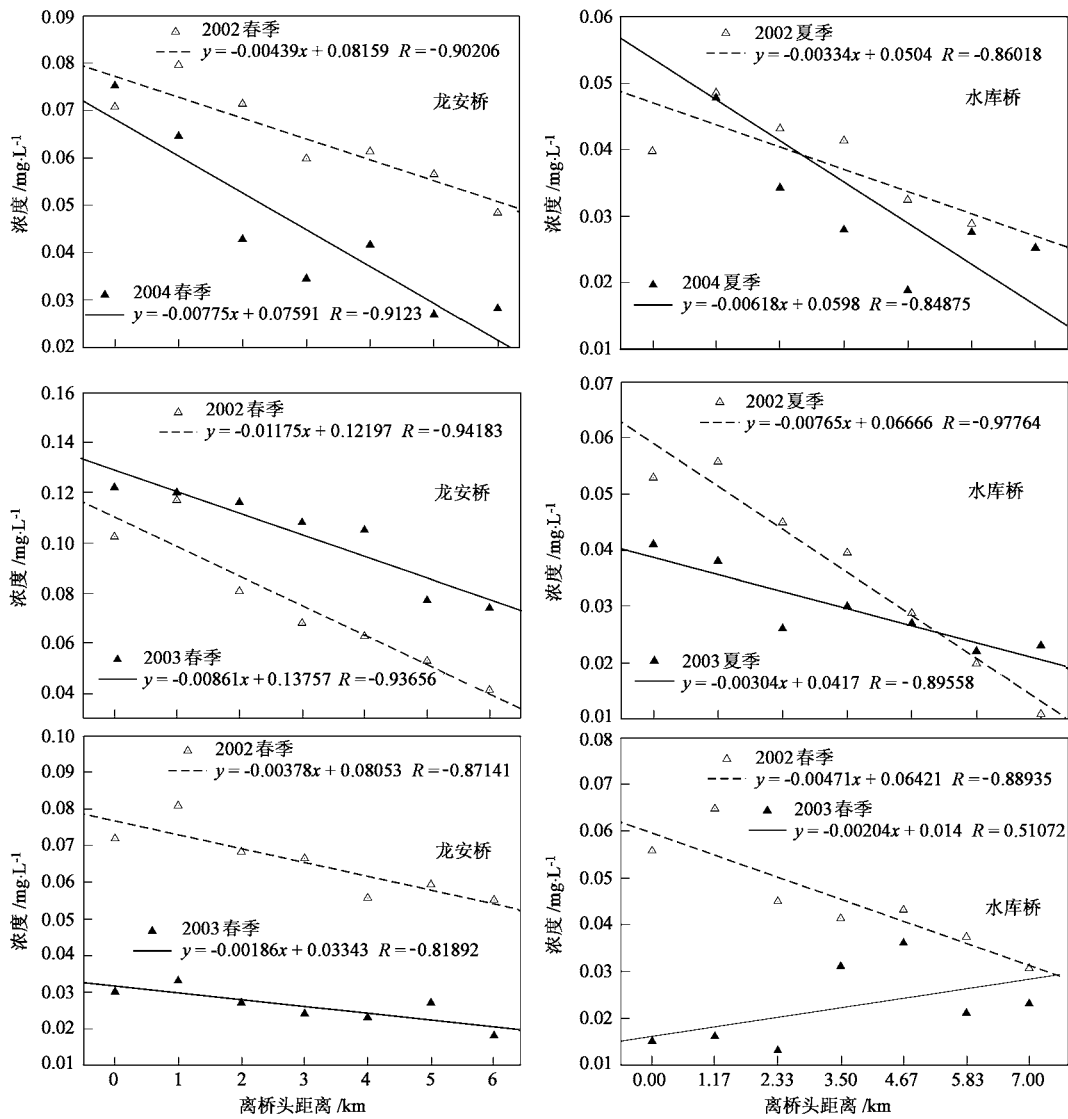


图 3 龙安桥河段和水库桥河段湿地对水中 TP 的空间净化特征

Fig.3 Purifying characteristics of water TP through the Long'an Bridge and Shuiku Bridge wetland reaches

河段对水中 PO_4^{3-} 的净化特征与 TP 有极其相似的年季变化规律。整年内,2 湿地河段对水中 PO_4^{3-} 有持续的净化作用,其中春夏 2 季净化能力较为显著:春季龙安桥和水库桥湿地河段 PO_4^{3-} 平均净化系数

依次为 $0.002985 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$ 和 $0.002394 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$,夏季相应分别为 $0.00582 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$ 和 $0.00166 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$;而秋季 2 湿地河段对水中 PO_4^{3-} 的净化作用有较大的下降趋

势,尤其是 2003 年秋季,2 河段 PO_4^{3-} 没有明显的空间净化特征.2 河段比较来看,龙安桥河段夏季对水

体磷酸盐污染物的净化能力最高,而水库桥河段净化能力最高在春季.

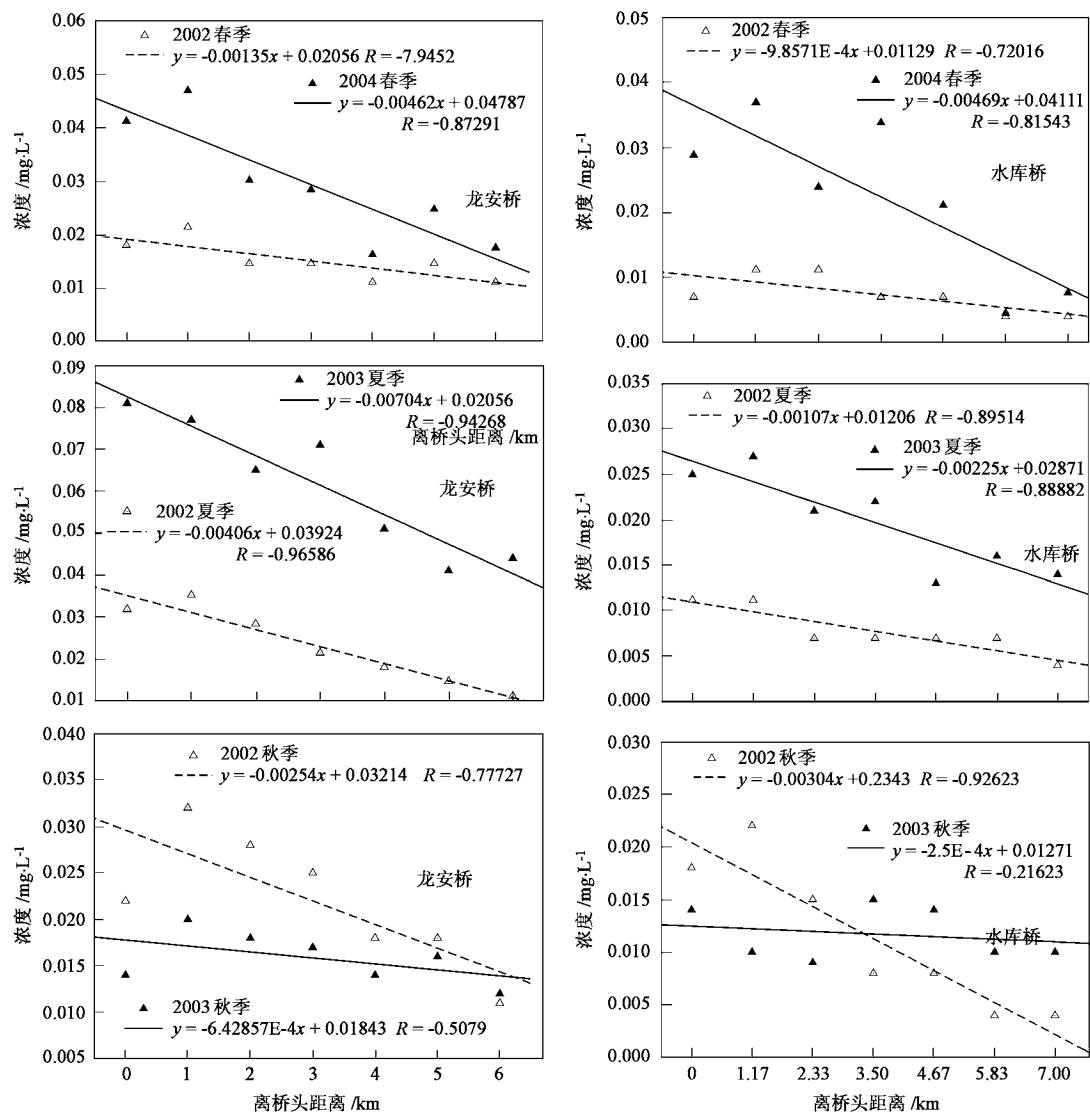


图 4 龙安桥河段和水库桥河段湿地对水中 PO_4^{3-} 的空间净化特征

Fig. 4 Purifying characteristics of water PO_4^{3-} through the Long'an Bridge and Shuiku Bridge wetland reaches

比较 2 湿地河段对水体 TN 和 TP、 PO_4^{3-} 的净化特征发现,湿地的净化作用存在较大年际波动性, PO_4^{3-} 波动最为显著,2 河段 3 季 PO_4^{3-} 平均变化率为 156 %,TN 次之,变化率为 64 %,TP 最小亦达到 59 % (以 2002 年为准).同时,2 河段对氮磷污染物的净化能力有一定的季节相似性和差异性:春夏 2 季,龙安桥、水库桥 2 河段对水体氮磷污染物都存在较明显的净化作用,而秋季却呈现不同规律,秋季 2 湿地河段对水体磷污染物仍有净化能力,却丧失了对水体氮污染物的净化能力,使水体 TN 在 2 河段

内表现出明显的累积输出特征.秋季磷污染物净化作用的下降及氮净化能力的丧失,是与温度相关的物理、化学和生物过程的综合结果,湿地秋季 9 月下旬平均气温和水温仅分别为 10.0℃和 9.3℃,氮磷污染物的降解和生物吸收过程缓慢,在污染物持续输入的情况下,湿地净化能力的阈值下降,造成累积^[13].

3 讨论

3.1 污染物输入浓度的影响

氮磷污染物输入浓度决定了河滨湿地系统的营养状态,直接影响净化潜力的发挥,与湿地的总体净化效果密切相关^[14].研究区2河段TN、TP及 PO_4^{3-} 的输入浓度与相应净化系数的总体相关特征如图5所示,图5表明随着输入浓度的增高,湿地河段对水体TN、TP及 PO_4^{3-} 的净化能力有不同程度增加,其中TP和 PO_4^{3-} 的净化效果与输入浓度的正相关性较为明显, R 值分别达到0.7857和0.89831,即在磷污染物输入浓度较高时期,湿地仍然能将其净化

到较低的浓度水平,说明在一定污染负荷波动范围内研究区湿地河段对水体磷污染物仍然有较强的净化能力.而TN输入浓度与净化系数的相关性相对较低,说明了在该浓度范围内氮污染物输入浓度对湿地净化作用影响较小,氮输入浓度不是决定湿地净化作用的主要因素.

3.2 径流量的影响

河滨湿地对水中氮磷污染物的净化作用是湿地生态过程与水文过程耦合的结果,受到生态水文因子时空变化的综合影响,径流的补给特征就是主要因素之一.径流补给量的大小及季节性变化,决定了生态水文过程对水体氮磷污染物净化作用的调节能力,在相同条件及一定生态阈值内,径流补给越充沛,越稳定,湿地河段对氮磷污染物的净化能力越强,相反则越弱^[15].研究区内龙安桥及水库桥湿地河段,径流动态特征差异明显,自然径流区的龙安桥河段径流量较大且存在明显的季节性波动特征,而水库桥河段由于东胜水库的补给控制,年内大多时间径流量较小($0.5\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以下),但流量较为平稳(图6).因此,2湿地河段各自的径流优势特征,保证了2河段对水体氮磷污染物都存在一定的持续净化能力,尤其对磷污染物的净化效果较好.但是,龙安桥湿地河段自然状态径流特征对湿地净化能力的发挥更有明显的促进作用,从图2~图4可以看到,在绝大多数时间里,龙安桥湿地河段对水体TN、TP及 PO_4^{3-} 的净化能力均高于水库桥河段,年际间TN、TP及 PO_4^{3-} 的净化系数变化也要比水库桥河段稳定,说明自然径流特征对湿地净化作用的发挥有一定优势.

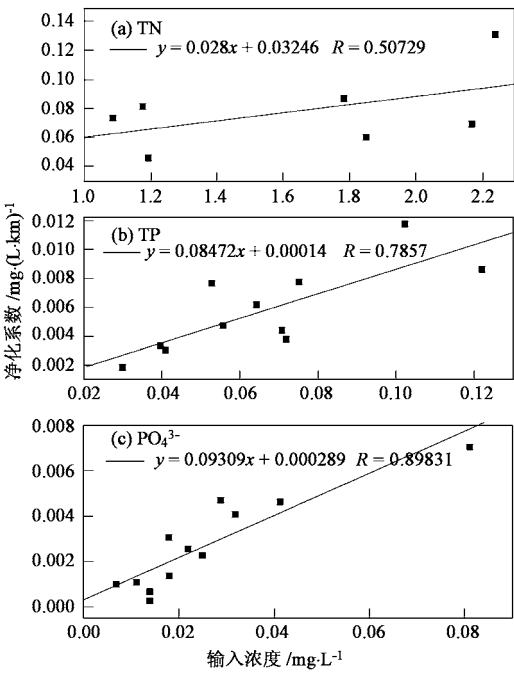


图5 氮磷污染物输入浓度与净化系数间的关系
Fig.5 Relations between purifying coefficient and input concentration of N and P

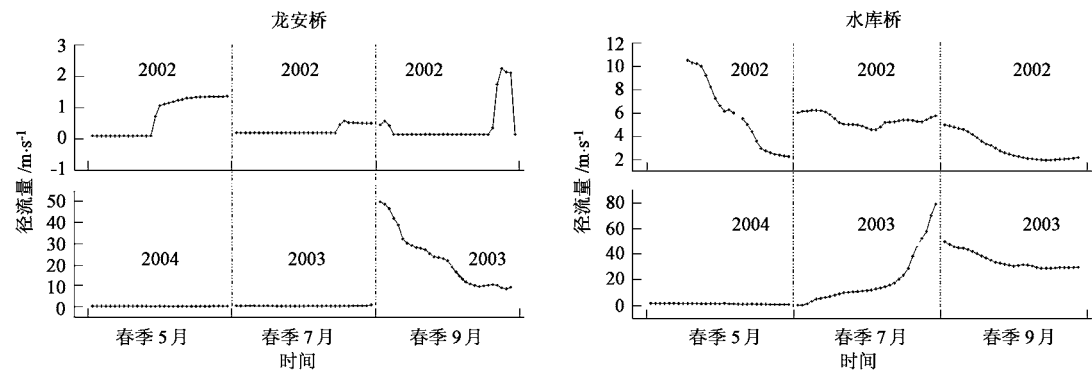


图6 龙安桥和水库桥河段径流量季节变化特征

Fig.6 Seasonal variation of runoff in Long'an Bridge reach and Shuiku Bridge reach

4 结论

对扎龙河滨湿地水体氮磷污染物净化作用的研究,通过空间净化模型的建立初步得出了扎龙河滨湿地对径流 TN、TP 及 PO_4^{3-} 的季节性净化规律,证明了河滨湿地的重要生态环境功能.然而,湿地系统的环境功能存在一定的阈值,流域大规模的水土资源开发及水利工程建设带来的生态压力已经对扎龙湿地产生明显的累积影响,已表现出生态环境功能下降的趋势.影响因素的分析,有助于在充分认识净化规律基础上,通过调节生态水文因子来缓解河滨湿地环境功能退化趋势,进而充分利用湿地生态系统自身的生态规律,进行科学的河滨湿地管理.

参考文献:

[1] Mitsch W J, Gosselink J G. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting[J]. Ecol. Econ., 2000, **35** (1): 25 ~ 33.

[2] Jansson A, Folke C, Langaas S. Quantifying the nitrogen retention capacity of natural wetlands in the large-scale drainage basin of the Baltic Sea[J]. Landscape Ecol., 1998, **13**: 249 ~ 262.

[3] Mwanuzi F, Aalderink H, Mdamo L. Simulation of pollution buffering capacity of wetlands fringing the Lake Victoria[J]. Environment International, 2003, **29**(1): 95 ~ 103.

[4] Martin J F, Reddy K R. Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen processes[J]. Ecological Modelling, 1997, **105**: 1 ~ 21.

[5] 梁威, 吴振宾. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J]. 环境科学动态, 2000, **3**: 32 ~ 37.

[6] Trepel M, Palmeri L. Quantifying nitrogen retention in surface flow wetlands for environmental planning at the landscape-scale[J]. Ecological Engineering, 2002, **19**: 127 ~ 140.

[7] Zacharias I, Dimitriou E, Koussouris T H. Integrated water management scenarios for wetland protection: application in Trichonis Lake[J]. Environmental Modelling & Software, 2004, **20**(2): 177 ~ 185.

[8] Arheimer B, Wittgren H B. Modelling nitrogen removal in potential wetlands at the catchment scale[J]. Ecological Engineering, 2002, **19**: 63 ~ 80.

[9] Kadlec R H. The inadequacy of first-order treatment wetland models[J]. Ecol. Eng., 2000, **15**: 105 ~ 119.

[10] 吴长申. 扎龙国家级自然保护区自然资源研究与管理[M]. 哈尔滨: 东北林大出版社, 1999: 1 ~ 19.

[11] Raisin G W, Mitchell D S. The use of wetlands for the control of non-point source pollution[J]. Wat. Sci. Tech., 1995, **32** (3): 177 ~ 186.

[12] 李秀珍, 肖笃宁, 胡远满, 等. 湿地养分截留功能的空间模拟: I 模型的概念和方法[J]. 生态学报, 2002, **22** (3): 300 ~ 310.

[13] Braskerud B C. Factors affecting nitrogen retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution[J]. Ecological Engineering, 2002, **18**(3): 357 ~ 370.

[14] Loïc Marion, Luc Brient. Wetland effects on water quality: input-output studies of suspended particulate matter, nitrogen (N) and phosphorus (P) in Grand-Lieu, a natural plain lake[J]. Hydrobiologia, 1998, **373/374**: 217 ~ 235.

[15] Sutula M A. Factors affecting spatial and temporal variability in material exchange between the Southern Everglades wetlands and Florida Bay (USA)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, **57**(2): 757 ~ 781.