

三江平原农田渠系中氮素的时空变化

陆琦¹, 马克明^{1*}, 卢涛¹, 张洁瑜¹, 倪红伟²

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 黑龙江省科学院自然资源研究所, 哈尔滨 150040)

摘要:以三江平原开发强度不同的浓江上游段和别拉洪河中游段的农田排水渠系为研究对象, 根据毛、农、斗、支、干 5 个渠道级别设采样点, 分析 TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在渠系中的时空变化规律及其影响机制. 结果表明, 别拉洪河中游段渠系中的 TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度大于浓江上游段; TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度峰值沿着渠系从低级向高级移动, 浓江上游段峰值出现的最高级别是干渠, 而别拉洪河中游段是斗渠; 多等级的排水渠系对氮素起到了一定的截留作用, 且别拉洪河中游段渠系对氮素的截留大于浓江上游段; 2 个渠系中的 TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的季节变化趋势相一致, 6~9 月逐月减少, 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的季节变化不明显且没有规律; TN 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈显著性正相关, 浓江上游段 TN 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 之间的关系适合幂函数模型, 而别拉洪河中游段适合三次曲线模型; 通过多元回归分析得到别拉洪河中游段渠系中的 TN 浓度与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 之间的关系模型可以解释 78% 的 TN 浓度.

关键词:氮素; 时空变化; 渠道级别; 截留; 农业开发

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)07-1560-07

Spatio-temporal Dynamics of Nitrogen in Agricultural Ditch Systems in Sanjiang Plain

LU Qi¹, MA Ke-ming¹, LU Tao¹, ZHANG Jie-yu¹, NI Hong-wei²

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Institute of Natural Resources, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China)

Abstract: Agricultural drainage water sampling was conducted along ditch systems from 1st order to 5th order in Nongjiang River and Bielalonghe River during June to September, 2005. The spatio-temporal dynamics of nitrogen concentrations in agricultural ditch systems were analyzed. Results showed that there were higher concentrations of nitrogen in Bielalonghe ditch system. Peak values of TN , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ moved from 1st order to 3rd and 5th order in Nongjiang and Bielalonghe ditch systems respectively. The retention of nitrogen in Bielalonghe ditch system was more than Nongjiang ditch system. The temporal dynamics of TN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were parallel in the two ditch systems, which decreased from June to September. But the temporal dynamics of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ had no obvious trend. The relationships between TN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ were positively correlated in both Nongjiang and Bielalonghe ditch systems, fitting for Power model and Cubic model respectively. The relationships between TN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ can be described by multi-variance linear regression, which explained 78% of TN concentration in Bielalonghe ditch system.

Key words: nitrogen; spatio-temporal dynamics; ditch level; retention; agriculture exploitation

研究氮素随地表径流的流失是目前国内外研究的热点, 包括: 氮素在农田溪流生态系统中的动态变化与河流形态、流域土地利用类型、流域景观结构特征的关系^[1~8]; 利用沟渠模型研究农田氮污染物的迁移和转化, 并对其进行定性、定量描述, 分析氮的来源和迁移特性^[9~14]; 沟渠通过底泥截留吸附、植物吸收和微生物降解净化农田排水汇集的非点源污染物^[15~19]. 然而, 有关氮素从农田经排水渠系到受纳水体整个系统中的迁移规律的研究缺乏, 也没有进行不同季节、不同干扰强度的比较研究, 还忽视了对其影响机制的探讨.

自 20 世纪 50 年代以来, 三江平原大力开挖排水渠道, 排干湿地造田, 这些排水渠道形成了错综复

杂的廊道网络系统, 成为污染物从农田向河流传输的通道, 影响了区域水环境和湿地生态系统健康. 本文以三江平原 2 个不同干扰强度的多等级沟渠系统作为对象, 主要研究氮素在渠系中的空间迁移、季节变化及其影响机制, 探讨了农田渠系在氮素传输过程中的功能, 以期为防止湿地生态退化和进行生态恢复调控提供参考.

收稿日期: 2006-07-05; 修订日期: 2007-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671182)

作者简介: 陆琦(1981~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为景观生态学、水环境保护, E-mail: lu_67@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mkm@rcees.ac.cn

1 研究区域概况

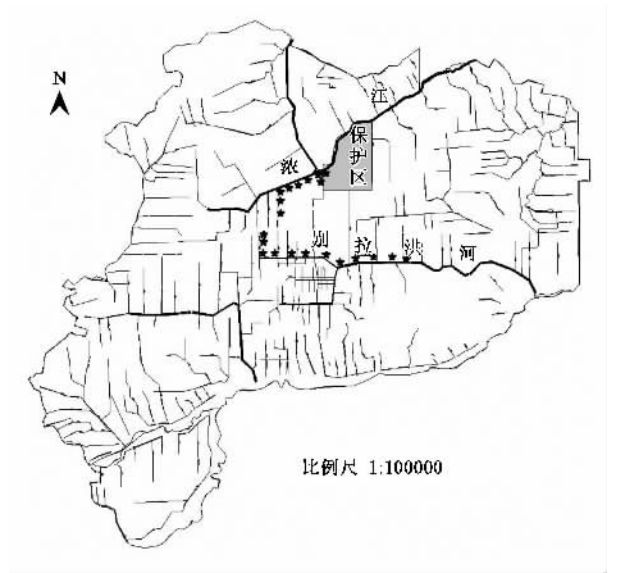
建三江垦区位于富锦、同江、抚远、饶河 2 市 2 县交界处的三江平原腹地,系黑龙江、松花江、乌苏里江汇流的河间地带(东经132°31′26″~134°22′26″,北纬46°49′42″~48°13′58″).辖区总面积 1.23×10^4 km²,占黑龙江垦区的 22%.建三江分局气候属于大陆性季风气候,为三江平原温和湿润气候区.年平均气温 1~2℃,平均降水量 500~600 mm,年平均日照 2 300~2 600 h.从总体上看,气候特点适宜水稻、大豆、小麦、玉米及各类瓜果蔬菜等的生长,农作物种植为一年一熟.建三江地势大致是西南稍高,东北稍低,由西南向东北倾斜,海拔 60~626 m,坡降为 1/5 000~1/12 000,绝大部分均为平原沼泽区.土壤类型有棕壤、白浆土、草甸土、黑土和沼泽土 5 大类,宜农土壤占土地总面积的 54%.境内主要河流有挠力河、外七星河、浓江河、鸭绿河、青龙河、别拉洪河等,总流域面积为11 330 km²,水资源丰富.本区农业污染源主要有肥料、农药及植物残体等.本区是以国营农场为主体的农业新垦区,畜牧业并不发达,多机耕机运,牧畜少,因而排泄废物有限.

2 材料与方法

2.1 实验设计与资料采集

2005-06~2005-09,选取浓江上游段和别拉洪河中游段 2 个排水渠系采集水样(图 1).从水田出发,根据毛、农、斗、支、干的级别设置采样点(每个级别的断面特性见表 1),每个级别的渠道分别设首、中、尾 3 个采样点,每个采样点设 3 个重复,每个月采

1 次,尽可能在同 1 地点(有的地方有的月份可能没水或极少水而无法采样).在每一个样点,先用水质检测仪(HORIBA U-10)当场测定水中 pH、温度(TEMP)、溶解氧(DO)、电导率(COND);然后用 500 mL 塑料瓶采集水样,由于水面不宽,于渠道中间水面下 10 cm 采水,盖严.水样于 24 h 内运回实验室,检测总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和总磷(TP).在每一样点采集水样后,记录渠道级别和位置,调查沟渠中及岸边植被,记录优势种并用目测法估计盖度.



星号代表不同渠系主要采样点
图 1 建三江研究区域采样点示意
Fig.1 Sampling spots along Nongjiang River and Bielalonghe River in Jiansanjiang

根据调查,浓江上游段开发强度小于别拉洪河

表 1 不同等级渠道断面和植被特性
Table 1 Characteristics of ditch system and aquatic plants

渠道类型	断面特性/m			渠道内及岸边植被特性			
	长	宽	高	浓江上游段		别拉洪河中游段	
				优势种	盖度/%	优势种	盖度/%
毛渠	30~50	0.4~0.8	0.05~0.1	—	0	—	0
				蒿草	1~5	芦苇、蒿草	5~10
农渠	60~80	1~2	0.15~0.2	芦苇	1~5	芦苇、香蒲	50~55
				芦苇	5~8	芦苇	20~30
斗渠	100~200	3~5	0.2~0.5	香蒲、芦苇	10~30	浮萍、芦苇、水葱	40~60
				柳	10~20	柳	50~60
支渠	500~1 000	5~8	0.5~0.8	水葱	5~10	香蒲、芦苇	65
				柳	10	芦苇	30~40
干渠	3 000~5 000	10~15	0.8~2.0	香蒲、水葱	5~8	香蒲、芦苇	40~50
				柳	5	柳	70~80

中游段, 渠系周边农田结构单调、均一, 季节规律明显. 2 个渠系各等级渠道的物理结构相似, 但由于人为干扰的强度不同, 渠道系统有所差别, 主要表现在水生植物、水流及岸边带的植物群落(表 1). 随着季节的变化, 植被盖度与群落组成略有差异. 渠道中的水生植物主要有: 芦苇(*Phragmites australis*)、水问荆(*Equisetum fluviatile*)、香蒲(*Typha angustifolia*)、浮萍(*Lemna minor*)、水葱(*Scirpus tabernaemontani*)等, 岸边的优势种有: 蒿草(*Artemisia* sp.)、柳(*Salix brachypoda*)、松(*Pinus tabulaeformis*)等.

2.2 分析方法

水样中 TN 的测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的测定采用纳氏试剂比色法(GB 7479-87), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的测定采用离子色谱法(GB/T 14642-1993, 最低检测限 0.018 mg/L), TP 的测定采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89).

用 SPSS11.5 和 Microsoft Excel 统计软件对数据进行统计分析.

3 结果与讨论

3.1 氮素在 2 个渠系中的空间变化

由表 2 可知, 2 个渠系中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的最小值接近, 但其在别拉洪河中游段渠系中的平均值和最大值都大于浓江上游段, 表明人为干扰和农业活动的强度增加是水体氮素浓度增高的直接导因. 别拉洪河中游段有洪河农场和前锋农场, 大量湿地被开垦, 农田面积不断增加, 沟渠以网络状大面积扩张, 汇集了更多的污染物. 相对来说, 浓江上游段渠道中的氮素浓度较小, 但由于浓江通过洪河国家级自然保护区, 一旦浓江受污染, 将对保护区的生态环境造成直接破坏. 2 个渠系中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 与水稻田施用尿素和碳酸氢铵有一定的关系. 水稻田长期施用无机氮肥, 田间硝化细菌相对不活跃, 硝化过程比较缓慢, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在未转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之前便可能淋失了, 导致农田排水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较高、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较低. 渠系中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度低, 还与沟渠中的挺水植物吸收、反硝化作用以及水流的停留时间较长等因素有关^[20].

6~9 月, TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的空间变化并不是沿着渠道级别的增加单调递增或递减, 而是浓度峰值在渠系中从低级向高级移动(图 2). 开发强度不同的 2 个渠系中氮素的迁移转化有明显区别: 浓江上游段 TN 的峰值变化为毛渠(6 月)、斗渠

表 2 2 个渠系中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的统计特征值

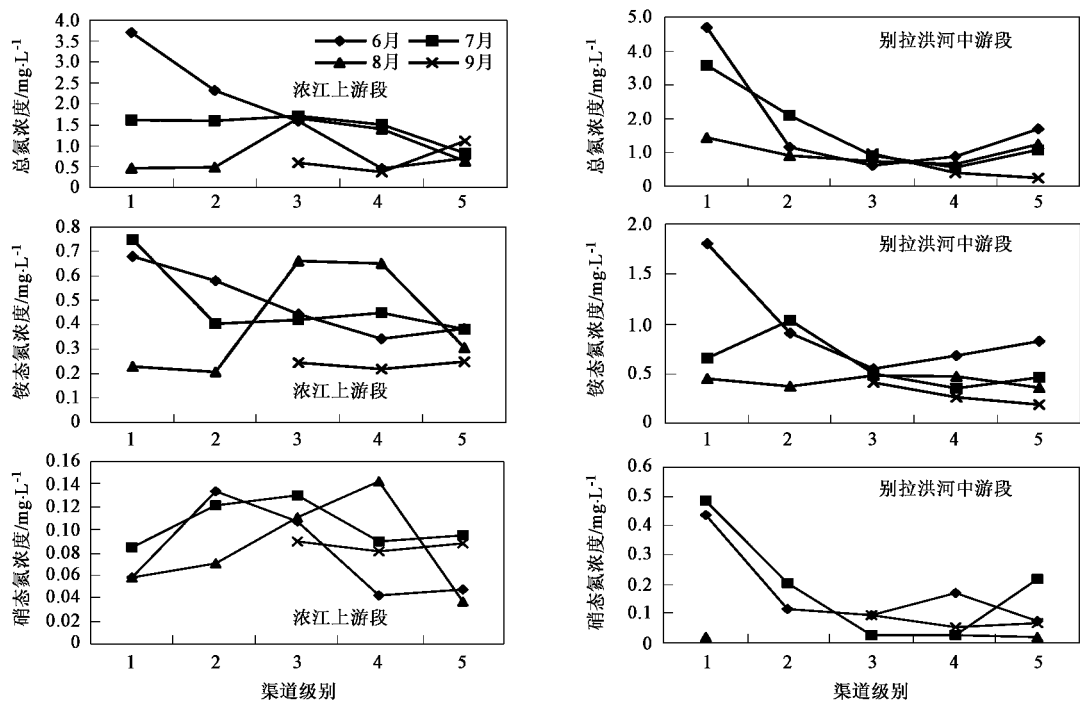
Table 2 Descriptive statistics of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the two ditch systems					
项目	渠系	样点 数	范围 /mg·L ⁻¹	平均值 /mg·L ⁻¹	标准差 /mg·L ⁻¹
TN	浓江上游段	32	0.24~3.71	1.11	0.74
	别拉洪河中游段	34	0.24~4.70	1.12	0.92
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	浓江上游段	32	0.18~0.75	0.39	0.16
	别拉洪河中游段	34	0.18~1.81	0.54	0.31
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	浓江上游段	31	0.03~0.14	0.08	0.03
	别拉洪河中游段	27	0.02~0.48	0.12	0.12

(7、8 月)、干渠(9 月), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的峰值变化为毛渠(6、7 月)、斗渠(8、9 月), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的峰值变化为农渠(6 月)、斗渠(7 月)、支渠(8 月)、干渠(9 月); 别拉洪河中游段 TN 的峰值变化为毛渠(6~8 月)、斗渠(9 月), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的峰值变化为毛渠(6 月)、农渠(7 月)、斗渠(8、9 月), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的峰值变化为毛渠(6~8 月)、斗渠(9 月).

沟渠中的 TN 浓度主要与农业活动以及降雨量有关. 由于 6 月的降雨量较少, 农田中施加的氮大量在土壤中累积, 在农田排水条件下, 使得低级别的沟渠中总氮浓度较高, 向高级别沟渠的迁移较少; 随着 7、8 月降雨量的增加, 在降雨径流的作用下, 低级别沟渠向高级别输出的 TN 浓度逐渐增加, 峰值向高级别沟渠迁移. 总的来看, 氮素在浓江上游段的传输要比别拉洪河中游段快且远, 前者峰值出现的最高级别是干渠, 后者则是斗渠. 这与渠道本身的特性有关, 如物理结构、水深、水生植物、岸边带等^[21]. 浓江上游段随着渠道级别的增加, 渠道中水生植物的盖度减少, 岸边带的宽度增加、坡度降低; 而别拉洪河中游段渠道中的水生植物盖度较大, 渠道较窄, 有利于氮素的截留.

2 个渠系中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的峰值都只有迁移到斗渠, 说明土壤颗粒和土壤胶体对 NH_4^+ 具有很强的吸附作用, 使得大部分可交换态铵得以保存在土壤中. 由于农田大量集中施肥, 而土壤的吸附容量有限, 在一定的排水与降雨径流条件下使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 易于迁移, 进入低级别沟渠中, 但是因为土壤的吸附作用, 使得低级别沟渠中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不能快速向更高级别的沟渠运移.

相对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 来说, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在 2 个渠系中都迁移得更快. 因土壤带负电荷, 对 NO_3^- 的吸附甚微, 故 NO_3^- 易在降雨和排水的作用下从农田进入沟渠并



1 为毛渠;2 为农渠;3 为斗渠;4 为支渠;5 为干渠
图 2 总氮、铵态氮、硝态氮在 2 个渠系中的空间变化

Fig.2 Spatial dynamics of TN, NH_4^+ -N and NO_3^- -N in the two ditch systems

较快地向高级别沟渠运移.农田施肥并不是沟渠中氮素的唯一来源^[7],高级别沟渠中较高的 NO_3^- -N 浓度还有可能与大气沉降和土壤有机质的矿化有关.

3.2 氮素在 2 个渠系中的截留

从表 3 可以看出,多等级的排水渠系对氮素起到了一定的截留作用,且别拉洪河中游段渠系对氮素的截留大于浓江上游段.氮在河流中的截留主要受悬浮物沉降、脱氮和植物吸收等过程控制,其中脱氮过程是氮从水体中的永久性去除,其余过程是氮的暂时截留过程^[1].别拉洪河中游段渠系中的水生植物盖度大,水力停留时间较长,微生物硝化反硝化进行得较完全,脱氮效果较好.氮素的截留还与沟渠

的大小成反比^[22].浓江上游段渠系对氮素的截留小于别拉洪河中游段,这与浓江上游段沟渠较宽、水较深有关.随着 7、8 月降雨量的增加,沟渠水量增加,氮素在渠系中的截留较 6 月迅速减少. NH_4^+ -N 的吸收和去除过程主要发生在泥沙、底泥表面. Peterson 等^[23]研究发现 20%~30% 左右的 NH_4^+ -N 去除是由于脱氮作用,其余部分都被泥沙吸附.别拉洪河中游段渠系的水深较浅,底部有大量泥沙,有利于 NH_4^+ -N 的截留.大量研究发现 NO_3^- -N 的截留依赖于脱氮过程和植物吸收^[1],水生植物盖度大的别拉洪河中游段更有利于 NO_3^- -N 的截留.

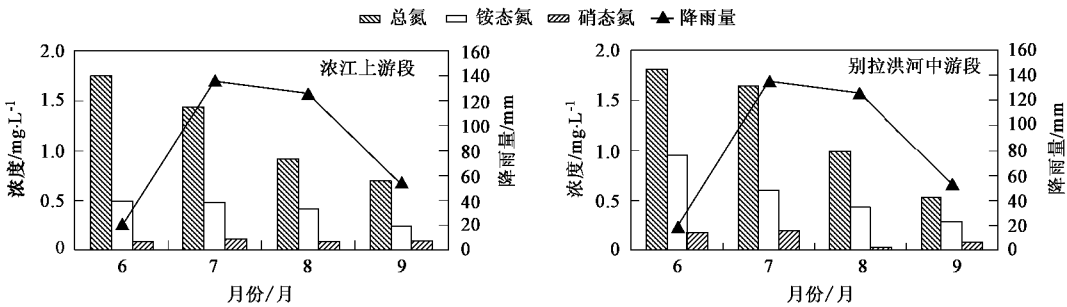
表 3 2 个渠系对 TN 、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 的截留率

Table 3 TN, NH ₄ ⁺ -N and NO ₃ ⁻ -N retention rates by the two ditch systems							
渠系	月份/月	TN		NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N	
		起始浓度/mg•L ⁻¹	截留率/%	起始浓度/mg•L ⁻¹	截留率/%	起始浓度/mg•L ⁻¹	截留率/%
浓江上游段	6	3.71	81.1	0.68	43.5	0.06	18.6
	7	1.61	49.1	0.75	49.0	0.08	- 12.1
	8	0.46	- 36.6	0.23	- 33.9	0.06	36.0
别拉洪河中游段	6	4.70	63.9	1.81	54.2	0.44	83.6
	7	3.58	69.9	0.66	29.3	0.48	55.6
	8	1.44	14.0	0.45	20.4	0.02	13.6

3.3 氮素在渠系中的季节变化

从图 3 可以看出,2 个渠系中的 TN、NH₄⁺-N 的季节变化趋势相一致,6~9 月逐月减少;而 NO₃⁻-N 的季节变化不明显且没有规律.氮素在渠系中的季节变化,受到农田施肥情况与降雨量的影响.建三江地区水稻田施用的氮肥主要是尿素和碳酸氢铵(150~250 kg/hm²),06-15 前施完,水稻田增加灌溉和排水,农田表层土壤中累积大量的氮随排水向渠道中运移,渠道中的氮素浓度增高.该区年降水量 565~600 mm,60%集中在 7、8 月,这段时间水田已停止大

量施肥,只在 7 月追施 3 次叶面肥,大量的降水稀释了沟渠中氮素的浓度.9 月水稻停灌,停止排水且降雨量较少,向渠道中运移的氮素含量减少.由于厌氧的水田环境中硝化作用缓慢,所以水田排水中以 NH₄⁺-N 为主,NO₃⁻-N 较少.水田土壤含水量较高,NO₃⁻-N 可能通过渗滤向地下水流失,受降雨量和农田施肥活动的影响较小,沟渠中的 NO₃⁻-N 浓度没有明显变化.另外,NO₃⁻-N 浓度很低,在渠系中的季节变化受系统内部的过程影响更大些,与植物吸收、微生物同化以及水体与土壤的交换等内部过程有密切



降雨量数据来源于三江平原沼泽湿地生态站

图 3 总氮、铵态氮、硝态氮在 2 个渠系中的季节变化

Fig.3 Seasonal dynamics of TN, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in the two ditch systems

关系^[24].

3.4 氮素及各水质指标的相关关系

Spearman 相关分析结果显示(表 4 和表 5),浓江上游段: TN 与 NH₄⁺-N、TP 呈显著性正相关($p < 0.01$),与溶解氧呈显著性负相关($p < 0.01$); NH₄⁺-N 与水温呈显著性正相关($p < 0.01$),与溶解氧呈显著性负相关($p < 0.01$).别拉洪河中游段: TN 与 TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 呈显著性正相关($p < 0.01$); NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 呈显著性正相关($p < 0.01$),与溶解氧呈显著性负相关($p < 0.01$).TN 与 TP 显著正相关,说

明有机氮是 TN 的重要成分,有机氮的矿化与 TP 的可利用性有关^[24].NH₄⁺-N 与溶解氧呈负相关,说明水体曝气能力越差,氧化还原电位越低,越不利于硝化细菌生长和繁殖,硝化作用速度越慢,也进一步解释了 2 个渠系中较低的 NO₃⁻-N 浓度.

TN 与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 呈显著正相关关系,以此为基础进行拟合发现,浓江上游段 TN 与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 之间的关系适合幂函数模型,而别拉洪河中游段 TN 与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 之间的关系适合三次曲线模型.从图4可以看出,别拉洪河渠系中的TN随

表 4 浓江上游段渠系中各水质指标相关系数矩阵¹⁾

Table 4 Matrix of correlation coefficient between water quality indexes in Nongjiang drainage systems

	总氮	总磷	铵态氮	硝态氮	pH	溶解氧	电导率	水温
总氮	1							
总磷	0.726**	1						
铵态氮	0.768**	0.734**	1					
硝态氮	0.440*	0.254	0.390*	1				
pH	-0.006	-0.202	-0.263	0.035	1			
溶解氧	-0.455**	-0.635**	-0.543**	-0.068	0.065	1		
电导率	0.294	0.455**	0.222	0.077	0.004	-0.371*	1	
水温	0.252	0.424*	0.454**	-0.267	-0.186	-0.707**	0.287	1

1) ** 表示 $p < 0.01$; * 表示 $p < 0.05$,下同

表 5 别拉洪河中游段渠系中水质指标相关系数矩阵

Table 5 Matrix of correlation coefficient between water quality indexes in Bielahong drainage systems

	总氮	总磷	铵态氮	硝态氮	pH	溶解氧	电导率	水温
总氮	1							
总磷	0.551 **	1						
铵态氮	0.781 **	0.677 **	1					
硝态氮	0.768 **	0.577 **	0.573 **	1				
pH	0.124	-0.139	0.205	-0.037	1			
溶解氧	-0.368 *	-0.771 **	-0.530 **	-0.337	-0.020	1		
电导率	0.426 *	0.238	0.357 *	0.313	0.038	-0.189	1	
水温	0.084	-0.019	0.111	-0.085	0.404 *	-0.247	0.192	1

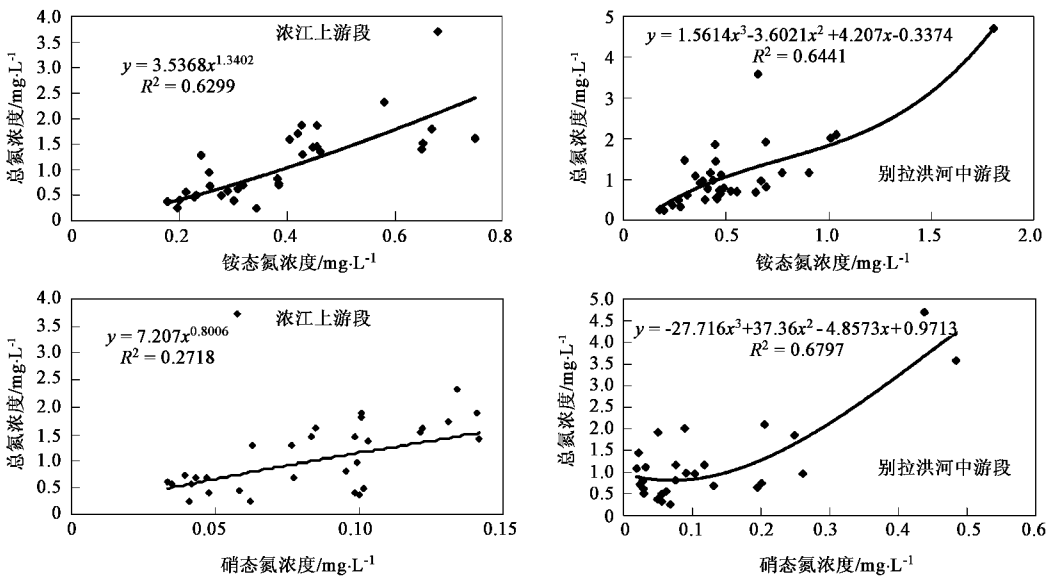


图 4 2 个渠系中总氮与铵态氮、硝态氮的关系

Fig.4 Relationships between TN and NH₄⁺-N, NO₃⁻-N in the two ditch systems

NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 的增加而增加的速度更快,说明渠系中的氮素主要来源于农田排水,受农业活动影响更强,反映了别拉洪河中游段受干扰强度大于浓江上游段.利用 Stepwise 方法进一步分析,将别拉洪河渠系中的 TN 作为因变量,NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP、pH、DO、电导率、水温作为自变量,进行逐步回归分析发现,TN 与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 可以建立最优模型,它们之间的关系如下:

$$\text{TN} = 1.603[\text{NH}_4^+ - \text{N}] + 3.835[\text{NO}_3^- - \text{N}] - 0.184$$
$$R^2 = 0.780 \quad (n = 26)$$

这个模型可以解释 78% 的总氮浓度,说明别拉洪河中游段渠系中的 TN 浓度由 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 共同决定,施肥、排水等农业活动是影响沟渠水体中 TN 浓度的主要因子.

4 结论

- (1) 别拉洪河中游段渠系中的 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度大于浓江上游段,主要是由于前者的开发强度大于后者.
- (2) 6~9 月,TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的浓度峰值在渠系从低级向高级移动,主要受农业活动与降雨量的影响;氮素在浓江上游段的传输要比别拉洪河中游段快且远,这与渠道的物理结构、渠道内水生植物及岸边带有关.
- (3) 多等级的排水渠系对氮素起到了一定的截留作用,且别拉洪河中游段渠系对氮素的截留大于浓江上游段,说明沟渠对氮素的截留与沟渠的特性有关.

(4) 2 个渠系中的 TN 、 NH_4^+ -N 的季节变化趋势相一致, 6~9 月逐月减少; 而 NO_3^- -N 的季节变化不明显且没有规律. 这与农田施肥情况、降雨量有关.

(5) TN 与 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 呈显著性正相关, 浓江上游段 TN 与 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 之间的关系适合幂函数模型, 而别拉洪河中游段适合三次曲线模型. 通过多元回归分析各指标与 TN 的关系, 发现别拉洪河中游段渠系中的 TN 浓度由 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 共同决定, 建立多元回归方程, 可以解释 78% 的总氮浓度.

参考文献:

- [1] 毛战坡, 尹澄清, 王雨春, 等. 污染物在农田溪流生态系统中的动态变化[J]. 生态学报, 2003, **23**(12): 2614 ~ 2623.
- [2] 毛战坡, 彭文启, 尹澄清, 等. 非点源污染物在有多水塘系统中的流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(3): 530 ~ 535.
- [3] 牟溥, 王庆成, Hershey A E, 等. 土地利用、溪流级别与溪流河水理化性质的关系[J]. 生态学报, 2004, **24**(7): 1486 ~ 1492.
- [4] 于兴修, 杨桂山. 典型流域土地利用/覆被变化及对水质的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2003, **12**(3): 211 ~ 217.
- [5] 于兴修, 杨桂山, 欧维新. 非点源污染对太湖上游西溪流域水环境的影响[J]. 湖泊科学, 2003, **15**(1): 49 ~ 55.
- [6] Scholz M, Prepel M. Water quality characteristics of vegetated groundwater-fed ditches in a riparian peatland [J]. Science of the Total Environment, 2004, **332**: 109 ~ 122.
- [7] Hooda P S, Moynagh M, Svoboda I F, *et al.* Streamwater nitrate concentrations in six agricultural catchments in Scotland [J]. Science of the Total Environment, 1997, **201**: 63 ~ 78.
- [8] Wang X H, Yin C Q, Shan B Q. The role of diversified landscape buffer structures for water quality improvement in an agricultural watershed, North China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, **107**: 381 ~ 396.
- [9] Janse J H, Puijenbroek V. Effect of eutrophication in drainage ditches [J]. Environmental Pollution, 1998, **102**: 547 ~ 552.
- [10] Wade A J, Whitehead P G, Jarvie H P, *et al.* Nutrient monitoring, simulation and management within a major lowland UK river system: the Kennet [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004, **64**: 307 ~ 317.
- [11] Nikolaidis N P, Heng H, Semagin R, *et al.* Non-linear response of a mixed land use watershed to nitrogen loading [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1998, **67**: 251 ~ 265.
- [12] Carluer N, Marsily G D. Assessment and modeling of the influence of man-made networks on the hydrology of a small watershed: implications for fast flow components, water quality and landscape management [J]. Journal of Hydrology, 2004, **285**: 76 ~ 95.
- [13] Wriedt G, Rode M. Modelling nitrate transport and turnover in a lowland catchment system [J]. Journal of Hydrology, 2006, **328**: 157 ~ 176.
- [14] Birkinshaw S J, Ewen J. Nitrogen transformation component for SHETRAN catchment nitrate transport modeling [J]. Journal of Hydrology, 2000, **23**: 1 ~ 17.
- [15] 姜翠玲, 范晓秋, 章亦兵. 非点源污染物在沟渠湿地中的累积和植物吸收净化[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(7): 1351 ~ 1354.
- [16] 晏维金, 尹澄清, 孙濮, 等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. 应用生态学报, 1999, **10**(3): 312 ~ 316.
- [17] 姜翠玲, 崔广柏, 范晓秋, 等. 沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(2): 125 ~ 128.
- [18] Tanner C C, Nguyen M L, Sukias J P S. Nutrient removal by a constructed wetland treating subsurface drainage from grazed dairy pasture [J]. Agriculture, Ecosystem and Environment, 2005, **105**: 145 ~ 162.
- [19] 姜翠玲, 范晓秋, 章亦兵. 农田沟渠挺水植物对 N、P 的吸收及二次污染防治[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(6): 702 ~ 706.
- [20] 张荣社, 周琪, 张建, 等. 潜流构造湿地去除农田排水中氮的研究[J]. 环境科学, 2003, **24**(1): 113 ~ 116.
- [21] Kyllmar K, Carlsson C, Gustafson A, *et al.* Nutrient discharge from small agricultural catchments in Sweden Characterisation and trends [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, **115**: 15 ~ 26.
- [22] Stålnacke P, Grimvall A, Libiseller C, *et al.* Trends in nutrient concentrations in Latvian rivers and the response to the dramatic change in agriculture [J]. Journal of Hydrology, 2003, **283**: 184 ~ 205.
- [23] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, *et al.* Control of nitrogen export from watershed by headwater streams [J]. Science, 2001, **292**: 86 ~ 90.
- [24] Turner B L, Baxter R, Whitton B A. Nitrogen and phosphorus in soil solutions and drainage streams in Upper Teesdale, northern England: implications of organic compounds for biological nutrient limitation [J]. Science of the Total Environment, 2003, **314/316**: 153 ~ 170.