

磷在农田溪流中的动态变化

毛战坡¹, 单保庆¹, 尹澄清¹, 刘怀全¹, 方杨², 汪海波², 白颖² (1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 合肥市环境监测站, 合肥 230031)

摘要: 磷是水体富营养化的限制因子, 河流系统是农业非点源污染物的主要运移通道, 污染物在河流中的滞留控制着污染物向受纳水体的输出. 本次研究对象是巢湖流域一个长约 1.8 km 的农田源头溪流六岔河, 河流由 4 个渠道型、1 个水塘型和 3 个河口型断面构成, 长度分别为 1.3 km、0.15 km 和 0.36 km. 在河流上设置 9 个监测点研究总磷、磷酸盐和悬浮物在六岔河中的滞留空间特征, 评价人为严重干扰下的农田溪流在农业非点源污染物运移中的生态功能. 结果表明: 总磷、磷酸盐、悬浮物在溪流中的滞留和释放受溪流的渠道型、水塘型和河口型断面控制, 水塘型和河口型断面是污染物滞留的主要区域, 总磷、磷酸盐和悬浮物在水塘型、河口型断面内的滞留量分别占溪流滞留量的 58%、77% 和 58%; 污染物在降雨-径流过程中的滞留是溪流滞留的主要部分, 总磷、磷酸盐和悬浮物的滞留分别占溪流滞留量的 96%、98% 和 93%; 渠道型断面是溪流最主要的内在污染源, 总磷、磷酸盐和悬浮物的释放分别占溪流释放量的 93%、99% 和 94%; 养分和悬浮物在渠道型断面中具有不同的滞留特性, 而位于水塘前的渠道型断面在基流和降雨-径流过程中均能有效地滞留污染物.

关键词: 滞留; 释放; 磷; 空间变化; 河道形态

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)06-08-0001

Spatial Phosphorus Retention in an Agricultural Headwater Stream

Mao Zhanpo¹, Shan Baoqing¹, Yin Chengqing¹, Liu Huaiquan¹, Fang Yang², Wang Haibo², Bai Ying² (1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 2. Hefei Environmental Monitoring Stations, Hefei 230031, China)

Abstract: The spatial dynamics of phosphorus and suspended solids were investigated for two years in a 1.8 km agricultural headwater stream, located by Chaohu Lake, southeastern China. The stream form was greatly modified by human activities. The stream could be divided into 4 channelized reaches (1.3 km), a pond reach (0.15 km) and 3 estuary reaches (0.36 km). It was found that the retention of total phosphorus (TP), phosphate and total suspended solids (TSS) predominantly occurred in the pond reach and estuary reaches. TP, phosphate and TSS retained in the pond and estuary reaches accounted for more than 50% of those retained in whole stream. The retention mostly happened in the precipitation-runoff events and it was 10 to 27 times than that in baseflow. The results showed that channelized reaches were the most important source for pollutant release under either runoff or baseflow conditions, and it accounted for more than 90% of whole stream release. There was a high spatial variation of nutrient dynamics in different channelized reaches. The channelized reach directly discharging into the pond did always retain nutrients and TSS under base flow and runoff, whereas the other channelized reaches performed differently in different hydrological conditions. Stream forms, hydrological conditions, and nutrients characteristics controlled the high spatial variation of the nutrients and TSS in the stream, while the human practices would accelerate these spatial patterns.

Key words: retention; release; phosphorus; spatial variation; stream forms

农业非点源污染具有形成过程随机性大、复杂、机理模糊等特点, 是江河湖泊产生富营养化的主要原因^[1]. 流域内的河流沟渠系统是污染物的主要运移通道, 污染物在河流内的滞留影响污染物向下游的迁移形态和输出的时空变化^[2~4]. 流域内的溪流长度占河流总长的 70%

~80%, 收集河流 60% 左右的水量和养分, 同时具有较高的面积/体积比, 控制流域非点源污

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (项目编号 40171003)
作者简介: 毛战坡 (1974~), 男, 河南人, 博士, 主要从事水资源保护、湖泊富营养化控制等, 现在中国水利水电科学研究院工作.

收稿日期: 2003-01-15; 修订日期: 2003-03-13

染物向受纳水体的输出^[5]。江淮地区是我国主要的水稻种植区域,流域内河流沟渠系统纵横交错,形成一个错综复杂的网络系统——多水塘系统。尹澄清等人发现多水塘系统能够有效地滞留非点源污染物^[6,7],减少流域径流和非点源污染物的输出。多水塘系统内的河流沟渠大多受农业活动严重干扰,河流形态发生变化,有必要在此区域内选择一个典型的农业流域,研究农业非点源污染物在人为严重干扰下的源头溪流中的空间变化,为控制农业流域的非点源污染和恢复河流生态系统提供参考。在本文研究过程中,选择总磷(TP)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)和悬浮物(TSS)作为研究对象,主要基于磷是湖泊富营养化的限制因子,尤其磷酸盐能够被水生生物直接吸收利用;悬浮物本身就是一种重要的非点源污染物,同时能够吸附其它非点源污染物,影响污染物在溪流中的迁移转化。本文研究内容为非点源污染物在农田溪流中不同断面内的滞留空间变化特征;确定滞留空间变化的影响因素,尤其是人为活动的影响。

1 研究区域

巢湖位于长江支流上,近10年来该湖表现出严重的富营养化状态^[6]。流域内河流沟渠系统纵横交错复杂,形成复杂的河网系统,为了研究非点源污染物在农田源头溪流中的滞留特征,选择巢湖北岸中庙附近的六岔河溪流作为代表进行详细研究。

六岔河流域位于安徽省巢湖中庙北岸,整个流域由12个子流域构成,流域面积6.91 km²。流域地貌以低山丘陵为主,地形呈阶梯状由北向南降低。流域最高点为四顶山,海拔高度174 m,最低点位于流域入湖口附近,海拔7 m。流域内河流沟渠系统密布,渠道总长约23 km,其中六岔河长约3 km,直接流入巢湖。流域气候属于亚热带和暖温带过渡性季风气候,多年平均降雨量940 mm,年均蒸发量1483 mm,多年平均气温16.3℃。流域内无工业生产,是江淮丘陵地区典型的农业流域,土壤以黄棕壤为主,土地利用类型主要有旱地、水稻田、村庄、森林和水塘等^[7]。流域内农田结构单调、均一,季

节规律明显。在长期的农业活动中,六岔河已经成为一条受人为活动严重干扰的农田溪流,河流形态发生极大变化。六岔河上游原来弯曲河流被人工取直,溪流长度缩短,溪流中的浅塘和浅滩大量消失,同时河流缓冲区域完全丧失。在靠近村庄的溪流中游修建水塘,为日常生活提供用水,河流断面急剧增加但破坏河岸原有植被。在溪流下游,深挖河道增加溪流在暴雨季节的泄洪量,溪流底部低于地表2.0~2.5 m,在河口处形成大面积的河口湿地。这些人为活动极大地改变溪流形态,进而改变溪流的水文过程、生态系统等。

2 材料和研究方法

在2001年7月~2002年7月,根据六岔河的地形、河流两岸土地利用和主要沟渠分布,在溪流中的中下游选取1.8 km进行研究。在溪流上设置9个监测点(图1),包括4个渠道型、1个水塘型和3个河口型河流断面,研究溪流在不同的水文条件下(基流、降雨-径流),TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和TSS在渠道型、水塘型、河口型断面中的空间变化特征以及影响因素。利用常规方法监测监测点处的河水流量和TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和TSS等污染物浓度,监测过程同时考虑溪流主要沟渠的入流(径流和水质)。在基流条件下每周采

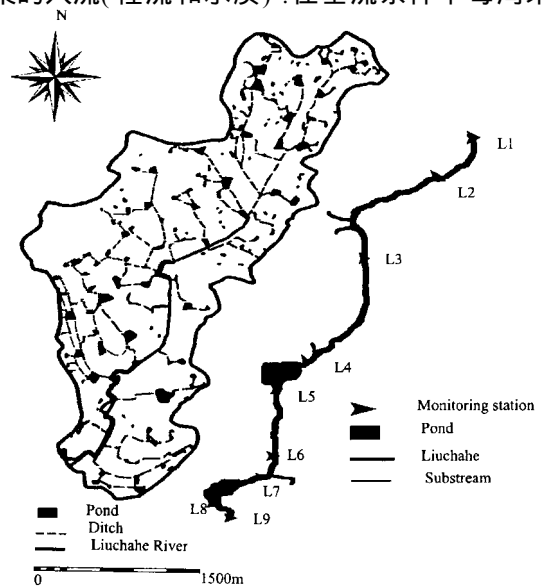


图1 六岔河流域多水塘系统

Fig.1 The multipond system in Liuchahe watershed

样 1 次,降雨-径流期间每 3h 取样 1 次,主要沟渠的采样时间根据流量决定,直到降雨-径流结束.冬天及早春不进行监测,这一段时期河流中仅有基流.

2.1 材料和分析方法

径流水样采集和分析方法:在每场降雨-径流过程中,一般在每一个监测点采集 3~8 个水样,反映降雨径流过程线和污染物浓度过程线,测定 TP、PO₄-P 和 TSS 浓度.水样的 TP 直接测定;用 0.45μm 孔径的玻璃纤维滤膜过滤水样,滤液用于测定 PO₄-P,滤膜测定悬浮物.水样分析在合肥市监测站进行,水样监测前在

4℃条件下保存 6~30 h. TP、PO₄-P、TSS 的分析采用标准方法^[8]. 大多数情况下六岔河的水流量较小,根据流量大小,利用 2 种方法测定水流速度:低流量时利用染料示踪法测定;高流量时利用浮标示踪法测定^[9]. 根据标定断面,同步测定溪流流速和水位.同时根据溪流断面和植物生长情况,在每一个断面内选择不同数量样点,采集土样(0~5cm)分析底泥中的 TP、PO₄-P,分析方法见参考文献^[10]. 研究过程中,对每一断面内的植被类型进行详细调查,利用目测法估计覆盖面积,六岔河的监测断面和水生植被特性见表 1.

表 1 六岔河断面和水生植被特性

Table 1 The characteristics of Liuchahe and aquatic plant

断面类型 Reach types	断面特性 Characteristics of reach				水生植被特性 Characteristics of aquatic plant	
	断面 Reach	宽度 Width/ m	深度 Depth/ m	长度 Length/ m	优势种 Dominant	盖度 Coverage/ %
渠道型 Channelized reach	L1-2	2 ~ 10	1 .5 ~ 2	168	芦苇 (<i>Phragmites</i>)、菖蒲 (<i>Acorus cala mus</i>)	85
	L2-3	3 ~ 3.5	1 .5 ~ 2	378	空心莲子草 (<i>Alter nanthe ra philoxroi des</i>)	10
	L3-4	4 ~ 6.5	2 ~ 2.5	328	芦苇 (<i>Phragmites</i>)	78
	L5-6	5 ~ 6	0.5 ~ 1.0	404	芦苇 (<i>Phragmites</i>)、空心莲子草 (<i>Alter nanthe ra philoxroi des</i>)	92
水塘型 Pond reach	L4-5	30 ~ 55	0 .5 ~ 1.5	154	空心莲子草 (<i>Alter nanthe ra philoxroi des</i>)	70
河口型 Estuary reach	L6-7	10 ~ 35	0.5 ~ 0.8	102	空心莲子草 (<i>Alter nanthe ra philoxroi des</i>)、芦苇 (<i>Phragmites</i>)	95
	L7-8	25 ~ 45	0.5 ~ 0.8	254	空心莲子草 (<i>Alter nanthe ra philoxroi des</i>)、菖蒲 (<i>Acorus cala mus</i>)	90
	L8-9	45 ~ 50	0.5 ~ 0.8	50	菖蒲 (<i>Acorus cala mus</i>)	80

2.2 研究方法

由于 TP、PO₄-P 和 TSS 浓度的空间变化仅能揭示溪流形态对污染物滞留的影响,为了研究污染物在不同的水文条件下,污染物在溪流中的滞留特性以及确定内部因素的作用,而物质平衡则提供一个有利的工具.监测断面的非点源污染负荷根据同步流量和污染物浓度进行计算,J 种污染物在 I 断面的降雨径流负荷计算如下:

$$I_J = \int c_t(t) q_t(t) dt \approx \sum_{k=1}^{k=n-1} \Delta t_k \frac{c_k + c_{k+1}}{2} \times \left| \frac{q_k + q_{k+1}}{2} \right| \quad (1)$$

式中, c_t 是监测断面 I 在 t 时刻暴雨径流中 J 种污染物的浓度(mg/ L); q_t 是断面 I 在 t 时刻的径流流量(m³/ s); c_k 是 J 种污染物在样本 k 监测时的污染物浓度(mg/ L); q_k 是在 k 样本监测时的流量(m³/ s); Δt 是样本 k 和 k+1 的时间间隔(s).

J 种非点源污染物在 I 断面的负荷:

$$I_J = \sum_{x=1}^{x=m} i_j + \sum \bar{c} \times \bar{q} \quad (2)$$

式中,第 1 项是暴雨径流提供的非点源污染负荷(kg);第 2 项是基流提供的非点源污染负荷(kg); $\bar{c}$ 是基流中 J 种污染物的平均浓度(mg/ L); $\bar{q}$ 是基流的平均流量(m³/ s).

河流断面测定的暴雨径流没有直接考虑次地表径流,但是基流包括在次地表径流内,式(2)表示河流的各项非点源污染输入(地表径流,次地表径流).根据物质平衡原理,非点源污染物在运移过程中发生的沉降、再悬浮等现象,以及污染物在断面内的再分配过程均可用2个断面的输入负荷差值表示,这个过程涉及到生物过程、物理化学过程,如磷酸盐被植物吸收,磷在底泥表面的吸附、水解过程等,本文没有对此进行详细研究,仅进行量化分析污染物在河流内持留的空间变化.非点源污染物在2个断面内的持留可利用下式计算:

$$W = I_j - (I + 1)_j \tag{3}$$

式中, W 是 j 种非点源污染物在 I 和 $I + 1$ 断面

内的持留量(kg),正值表示断面能够有效地持留污染物,负值表示断面释放污染物;其余符号意义同上.

3 结果

六岔河不同类型断面采集的底泥粒径组成和理化性质见表2和表3,可以看出河口型断面底泥中的大颗粒粒径数量(1 ~ 0.25 mm)高于渠道型、河口型断面,而水塘型、河口型断面中的细颗粒数量(< 0.001 mm)要高于渠道型断面.底泥中的TP含量在溪流不同断面间的差异较小(TP0.0628% ~ 0.0857%);PO₄-P含量在渠道型断面L1-4内的总体趋势是不断降低(12.53 ~ 7.05 mg/kg),而在断面L5-7内不断升高(7.07 ~ 10.72 mg/kg).

表2 六岔河底泥粒径组成/ %

Table 2 The particle composition of sediments in Liuchahe stream/ %

断面 Reach type	粒径/ mm Particle composition					
	1 ~ 0.25	0.25 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	0.005 ~ 0.001	< 0.001
渠道型 Channelized reach	1.4	8.2	24.5	21.9	16.1	27.9
水塘型 Pond reach	1.4	3.6	24.5	18.3	16.2	36.0
河口型 Estuary reach	2.8	7.6	29.3	13.7	14.0	37.6

表3 六岔河底泥理化性质

Table 3 Chemical indices of sampling plots in Liuchahe stream

断面 Reach	TP (Mean ± SD) / %	PO ₄ -P (Mean ± SD) / mg·kg ⁻¹
L1-2	0.068 ± 0.017	12.53 ± 5.14
L2-3	0.086 ± 0.036	12.59 ± 2.58
L3-4	0.081 ± 0.016	7.86 ± 6.69
L4-5	0.057 ± 0.016	7.07 ± 2.57
L5-6	0.071 ± 0.036	12.00 ± 7.21
L6-7	0.068 ± 0.022	9.78 ± 2.15
L7-8	0.086 ± 0.013	7.55 ± 4.55
L8-9	0.071 ± 0.015	10.72 ± 5.15

3.1 污染物浓度的空间变化

根据流量权重法得到监测断面的污染物平均浓度(径流),利用监测断面的平均浓度研究污染物在溪流中的空间变化特征^[2],揭示污染物在具有复杂景观结构溪流中的持留特征.

(1) TP 河水中TP浓度在六岔河中的空间变化趋势是河口型断面 > 渠道型断面 > 水塘型断面渠(图2),而TP在底泥中的空间变化趋势是渠道型河流断面 > 河口型河流断面 > 水塘

型河流断面.底泥的TP含量与溪流河水浓度呈逆相关分布关系(含量 = - 2.9788 × 浓度 + 0.9451, $r = - 0.55$).TP浓度在不同断面内的变化具有明显差异.在渠道型断面中,TP浓度具有高度的空间变化特征:TP浓度在L1-3中降低幅度较小,而在L5-6内急剧降低,但在L3-4中浓度反而升高.在水塘型断面L4-5中浓度缓慢降低,而底泥中的含量并没有显著增加,这可能与断面内的植物吸收以及生物过程有关.TP浓度在河口型断面L6-7中降低,而在L7-9中升高,主要是受农田径流(L7-8)和巢湖湖水的倒灌影响(L9).

(2) PO₄-P PO₄-P浓度在溪流中的空间变化趋势:河水PO₄-P浓度由高到低的顺序依次为河口型断面、渠道型断面和水塘型断面(图2),而河流底泥中PO₄-P含量为渠道型河流断面 > 水塘型河流断面 > 河口型河流断面(表3).河水PO₄-P浓度和底泥PO₄-P含量没有呈现出明显的相关关系,断面L1和L4的底泥

$\text{PO}_4\text{-P}$ 含量相差 $5.879 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而河水浓度仅相差 $0.001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度在渠道型断面 L1-4 和 L5-6 中缓慢降低.在水塘型断面 L4-5 内,虽然水流速度接近于 0,而溶解态的磷酸盐浓度只降低 0.001 mg/L .通常,湿地通过沉降、植物吸收能够有效的降低 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度(河口型断面 L6-7),而河口型断面 L7-9 受农田径流和回水的影响,浓度反而升高.

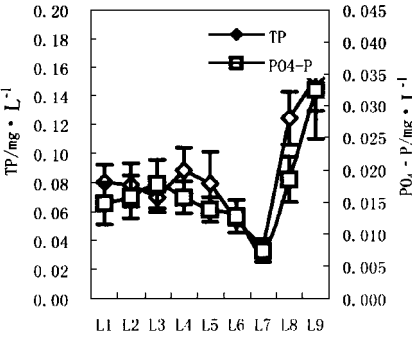


图 2 磷在六岔河中的空间变化

Fig. 2 The spatial variation of the phosphorous in Liuchahe stream

(3) TSS 河水中 TSS 在从断面 L1 向 L7 的运移过程中, TSS 浓度总体趋势是不断降低,但在断面 L7 后, TSS 浓度反而升高(图 3).在渠道型断面 L1-3 内,由于大型水生植物空心莲子草 (*Alternanthera philoxcroides*)、芦苇 (*Phragmites*) 等拦截径流,降低流速, TSS 大量沉降,断面 L4 处的 TSS 浓度升高主要是由于水塘(L4-5) 回水作用使部分河岸塌陷以及在河边采样造成.在水塘型断面 L4-5、渠道型断面 L5-6 和河口型断面 L6-7 中, TSS 浓度进一步降低,但是原因不同:径流流速在水塘型断面 L4-5 和河口型断面 L6-7 中的降低主要是由于过水面积增加,而在渠道型断面 L5-6 中是由于水塘截留径流引起流量降低,进而降低流速.在河口型断面 L7-9 中,受农田径流和湖水的影响,河床底部部分沉积物发生再悬浮,引起径流中 TSS 浓度升高.

3.2 污染物在溪流中滞留的空间变化

根据对六岔河在不同水文条件下的连续监测(基流、降雨-径流),利用(2)和(3)得到监测

断面在不同水文条件下的非点源污染物持留量.其中,溪流对某种污染物的持留量是正值,表示此河段能够有效地持留污染物,反之表示河段释放污染物.

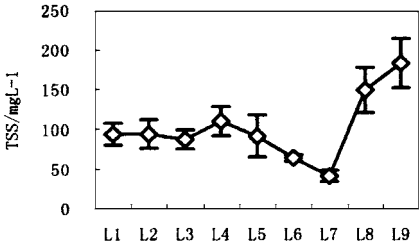


图 3 TSS 在六岔河中的空间变化

Fig. 3 The spatial variation of total suspended solids in Liuchahe stream

(1) TP 在不同的水文条件下, TP 在溪流中呈现出不同的持留特性.基流条件下, TP 持留量为 0.5 kg , 其中渠道型断面 L5-6、河口型断面 L7-8 分别为 0.4 kg 、 0.1 kg ,而水塘型断面 L4-5 中释放 $\text{TP} 0.5 \text{ kg}$ (图 4).在降雨-径流过程中, TP 持留量为 11 kg ,是基流持留量的 22 倍;持留主要发生在渠道型断面 L3-4、水塘型断面 L4-5 和河口型断面 L6-7,而渠道型断面 L2-3 的释放量高达 7.7 kg . TP 在水塘型、河口型断面的持留量占降雨-径流持留量的 58%,高于基流的 20%.基流条件下,水塘型断面 L4-5 和河口型断面 L6-7 释放 TP,而在降雨-径流过程中,这些断面有效地持留 TP.如果考虑溪流的释放, TP 在溪流中的持流总量仅有 3.1 kg ,其中渠道型、水塘型、河口型断面内的持留量分别为 -2.8 kg 、 3.4 kg 和 2.5 kg .

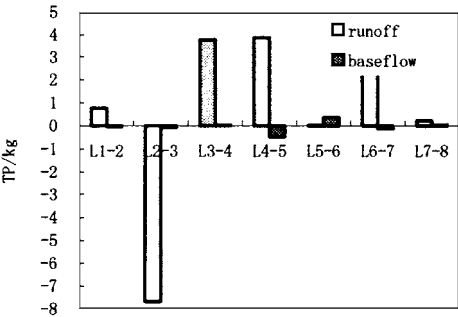


图 4 TP 在六岔河中滞留的空间变化

Fig. 4 The spatial variability of total phosphorus retention in Liuchahe stream

(3) $\text{PO}_4\text{-P}$ 在基流状态下, $\text{PO}_4\text{-P}$ 持留量为 0.2 kg, 发生在渠道型断面 L1-3 和河口型断面 L7-8; 而其余断面释放 $\text{PO}_4\text{-P}$ (图 5). 在降雨-径流过程中, $\text{PO}_4\text{-P}$ 持留量 2.2 kg, 是基流持留量的 11 倍, 主要发生在渠道型断面 L1-2、水塘型断面 L4-5 和河口型断面 L6-7, 其中水塘型、河口型断面的持留量占降雨-径流过程中持留量的 77%, 而渠道型断面 L2-3 释放量高达 1.5 kg, 是基流过程中释放量的 14 倍. $\text{PO}_4\text{-P}$ 的持留总量为 2.4 kg (基流和径流持留量之和), 仅占 TP 持流量的 20%, 这与河水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度仅占 TP 浓度的 20% 相符合. 在不同的水文条件下, 水塘型断面 L4-5 呈现出不同的持留特性: 基流条件下, 水塘型断面释放污染物-溪流的源, 而在降雨径流过程中, 持留污染物-溪流的汇. 考虑 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在溪流中的释放, 持留总量仅有 0.7 kg, 仅占 TP 持留总量的 23%, 而渠道型断面的释放量高达 1.5 kg.

(3) TSS 在基流条件下, TSS 在溪流中的持留量为 566 kg, 主要发生水塘型断面 L4-5 (图 6). TSS 在水塘型、河口型断面内的持留量占基流持留量的 92%. 在降雨-径流过程中, 持留量高达 15152 kg, 但在渠道型、水塘型、河口型断面间没有明显差异. 其中, 水塘型、河口型断面内的持留量仅占降雨径流持留量的 58%, 低于基流过程. 渠道型断面 L1-2 在基流条件下释放污染物, 而在降雨径流过程中持留污染物, 由源转化为汇. 断面 L2-3 在降雨径流过程继续释放污染物, 是溪流的一个主要内在污染源. TSS 的持留总量高达 15264 kg (仅考虑正持留), 其中渠道型、水塘型、河口型断面内的持留量分别为 6447 kg、4196 kg 和 4621 kg, 水塘型、河口型断面内的持留量占持留总量的 58%. 考虑溪流的释放, TSS 的持留总量仅有 9634 kg, 其中渠道型、水塘型、河口型断面的持留量分别为 -4856 kg、3624 kg 和 4479 kg.

TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 TSS 在溪流不同断面 (渠道型、水塘型和河口型断面) 的持留结果 (考虑持留和释放) 见表 4. 污染物在溪流中持留量由高到低依次为 $\text{TSS} > \text{TP} > \text{PO}_4\text{-P}$, 这与污染

物在径流中的浓度顺序相一致. 渠道型断面是溪流的主要内在污染源, TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 TSS 的释放量分别为 2.8 kg、1.1 kg 和 4856 kg. 污染物在水塘型、河口型断面显示出不同的持留特性. 首先, TSS 在河口型断面中的持留量高于水塘型断面, 而两者面积接近. 其次, TP 持留量仅有 3.1 kg, 水塘型断面内的持留量高于河口型断面, 两者持留量相差 0.4 kg. 最后, $\text{PO}_4\text{-P}$ 在水塘型断面内的持留量高于河口型断面内的持留量, 与 TP 的持留变化特征相同.

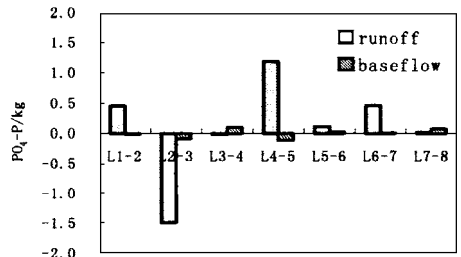


图 5 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在六岔河中持留的空间变化

Fig. 5 The spatial variation of phosphate retention in Liuchahe stream

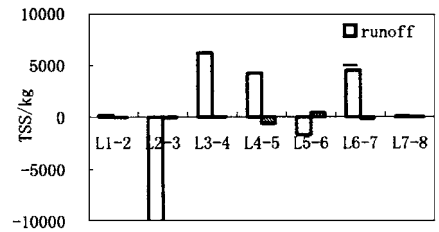


图 6 TSS 在六岔河中持留的空间变化

Fig. 6 The spatial variation of total suspended solids retention in Liuchahe stream

4 讨论

在近 10 年, 溪流在养分运移过程中的作用日益得到重视^[11,12]. 养分在溪流中的运移、持留和输出是溪流的一个基本生态功能, 也是评价溪流生态系统健康的主要指标之一^[11]. 以前研究主要侧重于养分在贫乏的森林源头溪流和沙漠溪流中的动态变化, 较少研究养分在人类严重干扰下的农田溪流中的持留^[13,14].

TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 TSS 浓度在农田源头溪流-六岔河的空间变化呈现出一种波动形式, 并不遵循源头溪流的指数变化^[15], 这是河流形态、水文条件以及人为干扰下溪流生态系统的一种

表 4 污染物在六岔河中的持留量¹⁾

Table 4 Pollutants retention variation in Liuchahe stream

断面类型 Reach type	单位面积负荷		单位面积负荷		单位面积负荷	
	TP/ kg	Unit area load/ g·m ⁻²	PO ₄ -P/ kg	Unit area load/ g·m ⁻²	TSS / kg	Unit area load/ g·m ⁻²
渠道型断面 Channelized reach	- 2.80	- 0.49	- 1.10	- 0.19	- 4856	- 842
水塘型断面 Pond reach	3.40	0.52	1.10	0.17	3624	553
河口型断面 Estuary reach	2.50	0.14	0.70	0.11	4479	728
六岔河 Liuchahe stream	3.10	0.17	0.70	0.04	3247	728

1) 六岔河的持留量是渠道型、水塘型和河口型断面的持留量和释放量之和;单位面积负荷是污染物在河流断面内的持留量除以对应的河流断面面积。

综合响应过程,渠道型、水塘型和河口型断面在六岔河中形成错综复杂的景观结构,以及景观结构在不同水文条件下的动态变化,影响养分在溪流内的运移以及生物交换过程^[16,17]。PO₄-P浓度在渠道型断面 L1-2 中的增加,主要是由于流速较高引起底泥中细颗粒的植物碎屑再悬浮,而大型水生植物减缓流速促使泥沙颗粒吸附的 TP 随泥沙沉降,降低水体中 TP、TSS 浓度;断面 L2-3 由于农民挖掘河道破坏河底生物膜,引起底泥中 PO₄-P 在降雨-径流过程中向水体释放,而 TP、TSS 浓度能够得到部分降低^[18]。水塘型、河口型断面内的水体与泥沙接触面积超过 6000 m²,同时河流横断面增加降低流速,从而增加污染物与泥沙、植物或者生物膜的接触时间,以及水塘型断面、河口型断面内分布的大型水生植物提供大量有机物,形成适宜的物理环境,促使污染物浓度急剧降低^[19~21]。

溪流的物质平衡表明养分在不同水文条件下具有不同的持留特性^[22],污染物在六岔河内的持留主要发生在水塘型、河口型断面内,主要原因是断面具有较高的面积/容积比和比较完整的生态系统。因此,水塘型、河口型断面在降雨-径流和人为干扰下(日常生活大量输入养分),呈现出一种稳定的持留特性;人为严重干扰下的渠道型断面在不同的水文条件下对污染物的持留表现出明显的无规律性,主要是人为活动严重破坏溪流原有的生态系统,导致系统持留污染物的能力降低。位于水塘型断面前的渠道型河流断面 L3-4 在基流和降雨径流过程

中均能有效地持留污染物,断面的河流形态和植物分布与其它河流断面并没有明显差异,分析原因可能是由于水塘出口处 L5 修建的人工水坝的作用,因为水坝升高水塘型断面 L4-5 和渠道型断面 L3-4 的水位,减缓径流流速,增加水体与泥沙的接触面积,促进污染物在断面内的持留。污染物在降雨-径流过程中的持留占持留总量的 95%,说明降雨-径流过程不仅是农业非点源污染物的主要运移时期,也是污染物在溪流中持留的主要阶段,进一步说明恢复溪流生态系统的功能抵御外界干扰(养分大量输入、降雨-径流等)的必要性^[23]。养分和悬浮物在溪流中持留空间的高度变化,也与溪流的植物吸收、微生物同化、沉降以及水体与土壤的交换等内部过程具有密切关系^[24]。在养分浓度较低的基流条件下,底泥中累积大量养分的水塘型断面 L4-5 和河口型断面 L6-7,泥沙、孔隙水中的 TP、PO₄-P 向水体大量扩散^[25];在降雨径流过程中,水塘型断面和河口型断面内的水生植物一方面降低流速,加速 TSS、养分沉降,另一方面挺水植物和沉水植物分泌大量有机物,使得细颗粒泥沙不断沉降,而底泥中的细颗粒泥沙(<0.001 mm)又有效地吸附 TP 和 PO₄-P,促进污染物在断面内大量持留^[26,27]。

5 结论

本文根据 2001~2002 年对源头农田溪流六岔河的连续监测,研究非点源污染物 TP、PO₄-P 和 TSS 在溪流中的空间变化以及在不同水文条件下非点源污染物的持留特性。研究结果表明受溪流中渠道型、水塘型和河口型断

面的复杂景观结构和人为活动影响,污染物在溪流中呈现出高度的空间变化特性.在不同的水文条件下(基流和降雨径流),非点源污染物均能在溪流中得到持留,而降雨-径流过程中的持留是污染物的主要持留过程;渠道型河流断面在不同水文条件下(基流、降雨径流)具有不同的持留特性;污染物的源、汇相互转变;污染物的持留主要发生在具有较高泥沙分布面积的水塘型、河口型断面内.

恢复溪流生态系统的正常功能和结构,使之再现一个自然的、自我调节的生态系统,并与所处的流域景观形成一个统一、完整的整体,对于控制流域的非点源污染具有重要作用和现实意义.

参考文献:

- Corwin D L, Wagenet R J. Application of GIS to the Modeling of Nonpoint Source Pollutions in the Vadose Zone: A Conference Overview. *J. Environ. Qual.*, 1996, **25** (3): 403 ~ 411.
- House W A et al. Nutrient transport in the Humber rivers. *The Science of the Total Environment*, 1997, **194/195**: 303 ~ 320.
- Behrendt H, Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load. *Hydrobiologia*, 2000, **410**: 111 ~ 122.
- Faafeng B, Roseth R. Retention of nitrogen in small streams artificially polluted with nitrate. *Hydrobiologia*, 1993, **251**: 111 ~ 122.
- Peterson B J et al. Control of nitrogen export from watershed by headwater streams. *Science*, 2001, **292**: 86 ~ 90.
- Yin C Q et al. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China. *Hydrobiologia*, 1993, **251**: 321 ~ 329.
- Yan W J, Yin C Q, Zhang S. Nutrient budgets and biogeochemistry in an experimental agricultural watershed in South-eastern China. *Biogeochemistry*, 1999, **45**: 1 ~ 19.
- 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 114 ~ 134.
- Eillis C, Stefan H G. Low-velocity measurements in water. *Water. Res.*, 1986, **22**: 1480 ~ 1486.
- 劳家柱. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社, 1998. 204 ~ 213, 229 ~ 275.
- Fisher S G et al. Material spiraling in stream corridors: a telescoping ecosystem model. *Ecosystems*, 1998, **1**: 19 ~ 34.
- Munn N L, Meyer J L. Habitat specific solute retention in two small streams: an intersite comparison. *Ecology*, 1990, **71**: 2069 ~ 2082.
- Grimm N B, Fisher S G, Minckley W L. Nitrogen and phosphorus dynamics in hot desert streams of southwestern USA. *Hydrobiologia*, 1981, **83**: 303 ~ 312.
- Grimm N B. Nitrogen dynamics during succession in a desert stream. *Ecology*, 1987, **68**: 1157 ~ 1170.
- Newbold J D et al. Measuring nutrient spiraling in streams. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1981, **38**: 860 ~ 863.
- Haag D, Kaupenjohann M. Landscape fate of nitrate fluxes and emissions in Central Europe a critical review of concepts, data, and models for transport and retention. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2001, **86**: 1 ~ 21.
- Naiman R, Décamps H. The ecology of interfaces: riparian zones. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1997, **28**: 621 ~ 658.
- Fennessy M S, Cronk J K. The effectiveness and restoration potential of riparian ecotones for the management of nonpoint source pollution, particularly nitrate. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1997, **27** (4): 285 ~ 317.
- Reddy K R et al. Phosphorus retention in streams and wetlands: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1999, **29** (1): 83 ~ 146.
- Fleischer S et al. Nitrogen removal in created ponds. *AMBIO*, 1994, **23** (6): 349 ~ 357.
- Johnston C A. Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: effects on surface water quality. *Critical Reviews in Environmental Control*, 1991, **21** (5, 6): 491 ~ 565.
- House W A, Warwick M S. A mass-balance approach to quantifying the importance of in-stream processes during nutrient transport in a large river catchment. *The Science of the Total Environment*, 1998, **210/211**: 139 ~ 152.
- David M et al. Nitrogen balance in and export from an agricultural watershed. *J. Environ. Qual.*, 1997, **26**: 1038 ~ 1048.
- Meyer J L, Likens G E. Transport and transformation of phosphorus in a forest stream ecosystem. *Ecology*, 1979, **60**: 1255 ~ 1269.
- Richardson C J. Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands. *Science*, 1985, **228**: 1424 ~ 1426.
- Bowes M J, House W A. Phosphorus and dissolved silicon dynamics in the river Swale catchment, UK: a mass-balance approach. *Hydrological Processes*, 2001, **15**: 161 ~ 280.
- Weisner S E B et al. Influence of macrophytes on nitrate removal in wetlands. *AMBIO*, 1994, **23** (6): 363 ~ 366.