

非点源污染物在多水塘系统中的流失特征研究

毛战坡¹, 彭文启¹, 尹澄清², 李贵宝¹, 周怀东¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 采用现场布点采样及室内分析方法, 以位于巢湖流域的一个子流域——鲍家塘流域为例, 研究了传统灌溉系统——多水塘系统对农业流域非点源污染 TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等的产生、运移过程的影响, 以及流域不同土地利用类型在非点源污染物产生、运移过程中的生态功能。结果表明, 流域输出的氮素主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主, 在不同景观具有显著性差异; 施肥水田是流域最主要的“源”景观, 在降雨径流过程大量输出养分和悬浮物; 水塘、荒地、没有施肥水田持留养分和悬浮物, 是流域非点源污染物的“汇”景观; 多水塘系统的沟渠是污染物的主要运移通道。鲍家塘子流域中农田—渠道—水塘系统影响非点源污染物的产生、运移过程, 同时多水塘系统截留降雨径流, 减少流域非点源污染物的输出。

关键词: 景观; 多水塘系统; 非点源污染; 源; 汇

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 2043(2004)03 - 0530 - 06

Spatial Variability of Non - point Source Pollutants Within a Multi - pond System

MAO Zhan-po¹, PENG Wen-qi¹, YIN Cheng-qing², LI Gui-bao¹, ZHOU Huai-dong¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Research Center for Eco - Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: With point pollution controlled effectively, agricultural non - point source pollution (ANPS) became a main source affecting lake eutrophication. Many methods, such as wetland buffer strips, land management, were used to control AGNPS, whereas the functions of landscape intercepting pollutants were often neglected. The special landscape of field - channel - pond, multi - pond system, distributed in the low and middle reaches of Yangtze River, intercepted most surface runoff via connecting ponds scattered over the watershed to influence mass flow within agricultural ecosystem. Multi - pond system in Baojiatang sub - watershed, Anhui province, located in Chaohu watershed, was used to study its effects on the production and transportation of agricultural pollutants. The index of TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was measured to investigate the spatial variability of soil nutrients in different rice fields, including wasteland, fertilized rice fields and seeding fields; while TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, and TSS in the runoff was used to investigate the pollutants variability. The results revealed that: (1) The spatial variability of soil nutrients in the watershed was the comprehensive result of artificially interference and heterogeneous landscape, and there were significant differences in $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ among different rice fields, fertilized rice fields and wasteland; (2) Fertilized rice fields was the most important pollution sources and discharged larger pollutants during rain - runoff as “source” landscape; ponds, rice fields and wasteland retained pollutants as “sink” landscape; the channel within the multi - pond system mainly transported pollutants.

Keywords: landscape; multi - pond system; non - point source pollution; sources; sinks

农业流域输出的氮素是造成地表水体发生富营养化的主要原因^[1, 2]。在流域尺度上研究氮素随地表径流的流失是目前国内外研究的热点, 包括氮素来

源、输入输出机制、影响因素、通量模型及其估算以及控制措施方面^[3, 4]。农业流域流失的氮素负荷与流域土地利用类型以及农田在流域中的空间位置关系密切^[5], 同时养分在流域内的循环与流域景观结构特征具有密切联系^[6]。

非点源污染物的产生在流域尺度上具有空间异质性^[7], 景观结构(池塘、湿地、缓冲区域等)改变污染

收稿日期: 2003 - 09 - 29

基金项目: 国家自然科学基金资助(50179040)

作者简介: 毛战坡(1974—), 男, 博士, 主要从事非点源污染、水资源保护等研究。E - mail: maozb@iwhr. com

物的趋向,适当的景观格局降低污染物的输出^[8]。农田间的树篱、细沟促进水分、养分在农田景观中的迁移,坡地上的树篱减少降雨径流产生量,防止土壤侵蚀和保护土壤养分^[9,10]。沙地田、草、林体系景观模式增加景观异质性,拦蓄暴雨径流,改善土壤结构^[11]。在南方丘陵区域的多水塘系统,具有拦截地表径流、泥沙以及养分的重要生态功能,是流域水陆交错带的重要组成部分^[12]。傅伯杰等^[13]指出坡顶到坡底的林地-坡耕地-草地景观结构具有较好的土壤养分保持能力和水土保持效果,有效控制非点源污染。

长江中下游地区是我国淡水湖泊的主要分布区域,也是我国主要的水稻种植区域,流域内河流沟渠纵横交错,形成一个错综复杂的河流网络系统。随着经济和社会的发展,大量农业非点源污染物进入地表水体,造成大量湖泊严重富营养化,制约着区域经济的可持续发展^[14]。我国对湖泊富营养化治理进行了大量试验、实践与探索,但效果并不明显,在这些研究中往往忽略复杂景观结构对非点源污染物产生、运移过程的影响。遍布长江中下游区域的多水塘系统,在流域内形成一个巨大的物质循环流动体系^[12]。研究非点源污染物在复杂景观结构——多水塘系统中的形成、运移,确定不同景观(水田、沟渠、水塘等)在非点源污染物产生、运移过程中的生态功能,寻求一种有利于非点源污染物滞留的景观格局,对控制农业流域的非点源污染具有重要意义。

1 研究区域

六岔河流域位于安徽省巢湖北岸中庙附近,气候

属于亚热带和暖温带过渡性季风气候区域,多年平均降雨量 960 mm,主要分布在 5—8 月,约占年降雨量的 52%。六岔河流域是典型的南方高产农业流域,土地利用类型主要有村庄、旱地、水稻田、林地和水塘。流域内分布着 193 个水塘,面积从 100 ~ 10 000 m² 不等。流域内的水塘通过沟渠相互连接,形成一个错综复杂的灌溉系统——多水塘系统,主要收集村庄、农田的降雨径流和农田排水用于灌溉。

六岔河流域地貌以低山丘陵为主。岗地、圩田间隔分布,相对高程在 20 ~ 40 m 之间,地表坡度范围 2° ~ 6°。流域土壤主要有黄棕壤、水稻土、黄棕土,石灰岩土和紫色土零星分布。在 2002 年 4 月—7 月,在六岔河流域中选择其一个子流域——鲍家塘流域作为研究对象,研究非点源污染物在复杂景观——多水塘系统中的产生、迁移过程。鲍家塘子流域内分布有 10 个水塘,主要有山冲塘、杨家塘、鲍家塘、化应塘、大唤塘,水塘随流域海拔梯度依次递降排列,成链状分布。鲍家塘子流域的土地利用类型和主要水塘特性分别见表 1、表 2。

表 1 鲍家塘子流域土地利用类型

Table 1 Land use in Baojiatang sub-watershed

土地利用类型	面积 / × 10 ⁴ m ²	比例 / %
森林	8.06	21.00
水田	20.57	53.60
旱田	6.68	17.41
水塘	3.06	7.97
合计	38.37	100.00

表 2 鲍家塘子流域水塘特性

Table 2 Characteristics of multi-pond system in Baojiatang sub-watershed

水塘	面积 / m ²	海拔 / m	深度 / m	底泥厚度 / m	邻近土地利用	TN / g · kg ⁻¹
山冲塘	2 275	36.1	1.51	0.10 ~ 0.18	森林、水田	11.1 ± 4.9
杨家塘	2 480	29.0	1.50	0.15 ~ 0.25	水田	13.2 ± 6.2
鲍家塘	7 550	23.0	1.48	0.20 ~ 0.30	水田	13.5 ± 5.7
化应塘	5 850	17.1	1.43	0.20 ~ 0.29	水田	17.2 ± 6.0
大唤塘	6 500	13.8	1.45	0.15 ~ 0.28	水田	20.2 ± 4.3

2 材料和研究方法

在 2002 年 4 月—9 月,根据鲍家塘子流域的地形,在主要水塘(山冲塘、杨家塘、鲍家塘、化应塘、大唤塘)入口、中心、出口设置监测断面,监测降雨径流和污染物;同时根据流域内主要的土地利用类型(水田、施肥水田、秧田、荒地、山地),设置监测断面监测

径流浓度,分析污染物的产生、运移特性。

鲍家塘子流域中没有明显的河流,在降雨径流过程中,按照由上游到下游的顺序依次在主要渠道中采样。在降雨径流期间每隔 3 h 取样一次,直到降雨径流结束。在没有降雨径流时,每隔一周在山冲塘、杨家塘、鲍家塘、化应塘和大唤塘中取样,分析总氮(TN)、氨态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和悬浮物

(TSS)。

在降雨径流过程中,一般在每一个样点采集2~4个样,测定TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TSS。水样测定时, TN直接测定;用0.45 μm 孔径的玻璃纤维滤膜过滤水样,滤液测定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,滤膜测定TSS。TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的分析分别采用过硫酸钾紫外法、钠试剂比色法和紫外法光度法^[15]。根据径流流量大小,利用两种方法测定水流速度:低流量时利用染料示踪法测定;高流量时利用浮标法测定^[16]。

随流域海拔位置的降低(从四顶山至大唤塘),在流域中从上到下选取5种主要土地利用类型:坡地、水田(施肥、没施肥)、荒地、秧田(废弃、使用)、水塘(山冲塘、杨家塘、鲍家塘、化应塘、大唤塘),在每一种土地利用类型中选取3个样点,分两层取样(0~10 cm, 10~20 cm),分析土样中的TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ^[17]。根据水塘中的水生植物生长情况,在每一个水塘内选择数量不等的样点,采集土样分析底泥的TN含量,具体分析方法见参考文献[17]。鲍家塘子流域土壤样点位置见表3,采用单因素方差(ANNOVA)分析不同土地利用类型土壤的养分差异,以及同一种土地利用类型的不同层土壤间的差异。

3 结果

3.1 土壤养分空间动态变化

鲍家塘子流域中水塘底泥的TN含量具有明显的

空间异质性(表2),山冲塘、杨家塘、鲍家塘、化应塘、大唤塘底泥的TN含量随海拔位置降低而增加,相关关系方程式如下:

$$\text{TN} = 94.5 h^{-0.5981} \quad r^2 = 0.96$$

式中: h 为鲍家塘子流域中水塘的海拔高度。

鲍家塘子流域不同样点的土壤养分含量见表3。TN在荒地、水田、秧田土壤中的分布没有呈现出显著性差异(0~10 cm, 10~20 cm)(ANNOVA, $P > 0.2674$);水田、秧田土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量高于山地、荒地($P < 0.01$),但上下层土壤之间没有呈现出明显规律($P > 0.128$),荒地的上层土壤含量高于下层土壤($P < 0.01$);土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量呈现出水田 > 秧田 > 荒地 > 山地,同时山地和荒地上层土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量较高($P < 0.01$),这可能与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的迁移途径、转化形态、土壤施肥等方式有密切关系。

3.2 降雨径流过程中污染物在多水塘系统中的动态变化

杨家塘、鲍家塘、化应塘的TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度从入口至中心降低,而山冲塘和大唤塘呈现出增加趋势,但没有达到显著性水平($P > 0.4$)(图1)。水塘入口、中心处的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度与TN浓度呈明显相关关系($\text{NH}_4^+ - \text{N} = 0.6165 \times \text{TN}$, $r^2 = 0.898$; $\text{NH}_4^+ - \text{N} = 0.5443 \times r^2 = 0.7484$,表明在降雨径流过程中,水塘滞留大量的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (图1)。在水塘入口处, TN和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度之间没有显著性差异($P >$

表3 鲍家塘子流域土壤样点养分含量

Table 3 Soil Nutrients of the sampling sites in Baojiatang sub-watershed

水塘名称	土地利用类型	土层深度/cm	TN/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
山冲塘	山地	0~10	1.23 ± 0.07	8.673 ± 0.440	1.173 ± 0.084
		10~20	0.76 ± 0.11	2.493 ± 0.435	0.548 ± 0.117
杨家塘	荒地	0~10	1.52 ± 0.31	3.808 ± 0.715	0.569 ± 0.119
		10~20	1.13 ± 0.28	8.682 ± 0.383	0.986 ± 0.124
	水田 ^①	0~10	0.43 ± 1.55	16.11 ± 3.03	2.198 ± 0.285
		10~20	1.55 ± 0.45	3.193 ± 0.305	2.734 ± 0.521
鲍家塘	荒地	0~10	1.30 ± 0.56	2.231 ± 0.030	2.192 ± 0.142
		10~20	0.89 ± 0.11	3.200 ± 0.303	0.827 ± 0.172
	水田 ^②	0~10	1.55 ± 0.27	14.01 ± 1.62	1.151 ± 0.088
		10~20	1.40 ± 0.13	6.748 ± 0.682	0.548 ± 0.088
化应塘	水田 ^③	0~10	1.61 ± 0.25	11.64 ± 1.21	2.469 ± 0.114
		10~20	2.10 ± 0.41	2.887 ± 0.325	1.363 ± 0.190
	秧田 ^④	0~10	1.83 ± 0.31	33.83 ± 1.801	1.015 ± 0.117
		10~20	1.93 ± 0.67	23.08 ± 2.14	3.570 ± 0.545
大唤塘	水田 ^⑤	0~10	1.83 ± 0.31	7.303 ± 0.971	1.343 ± 0.182
		10~20	1.73 ± 0.31	12.55 ± 0.605	2.229 ± 0.278
	秧田 ^⑥	0~10	1.83 ± 0.31	14.983 ± 0.55	1.659 ± 0.289
		10~20	1.67 ± 0.19	18.66 ± 0.38	1.076 ± 0.088

注:①水田种植水稻,表面施肥(5 d);②水田底肥施肥(10 d);③水田施肥(15 d);④秧田在雨前施肥;⑤水田底肥施肥(15 d);⑥废弃秧田。

0.01), 而水塘中心处的 TN 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度间存在显著性差异 ($P < 0.01$)。经过多水塘系统的滞留, $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 的比值发生变化, 其中杨家塘、鲍家塘、大唤塘比值降低, 而山冲塘、化应塘比值增加。同时, 山冲塘、鲍家塘的无机氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}$)/TN 降低, 而杨家塘、大唤塘比值增加, 化应塘没有明显变化。上述结果表明, 经过水塘的滞留, 无机氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}$) 部分被水塘持留以及氮的形态发生变化。

在水塘入口处, 流域的 TSS 浓度没有呈现出明显规律, 而水塘中心处的 TSS 浓度随水塘海拔位置的降低逐渐降低。鲍家塘、大唤塘的 TSS 浓度从入口至中心降低, 而山冲塘、化应塘 TSS 浓度升高, 杨家塘没有明显变化(图 2)。

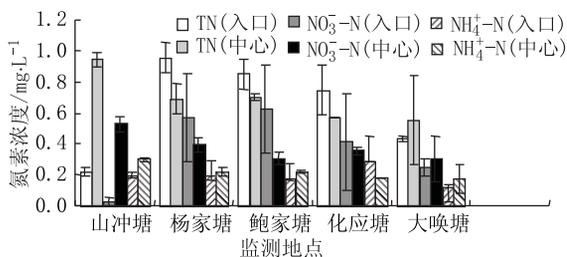
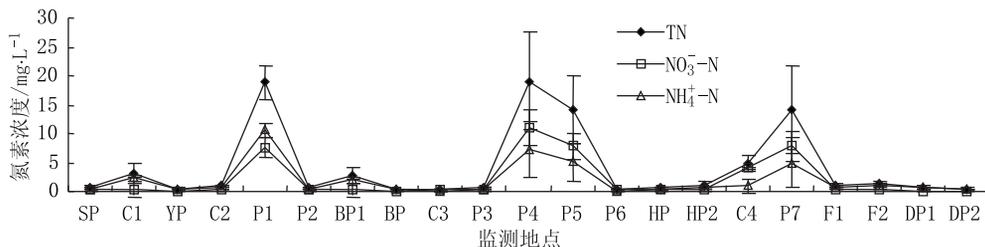


图 1 TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在鲍家塘子流域多水塘系统中的动态变化

Figure 1 Dynamics of TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in multi-pond system in Baojiatang sub-watershed

3.3 养分在鲍家塘子流域景观结构中的动态变化

水塘、沟渠、水田、秧田和荒地 在流域内的随机镶嵌, 形成复杂的景观结构(农田-沟渠-水塘)——多水塘系统, 多水塘系统能够有效地截留降雨径流, 在流域内形成两种径流模式: 连续流、间断流。间断流指在流域的上游和中游区域产生径流, 但径流量小于径流所流经水塘的空余容量, 径流没有进入主要河流断面。连续流指流域的大部分区域产生地表径流, 径流



山冲塘(SP); 沟渠(C1); 杨家塘(YP); 沟渠(C2); 水田(P1); 水田(P2); 鲍家塘(BP1); 沟渠(C3); 秧田(P3); 水田(P4); 水田(P5); 水田(P6); 化应塘(HP1); 化应塘出口(HP2); 沟渠(C4); 水田(P7); 荒地(F1); 荒地(F2); 大唤塘入口(DP1); 大唤塘(DP2)

图 3 氮在鲍家塘子流域景观结构中的动态变化

Figure 3 Dynamics of TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in Baojiatang sub-watershed

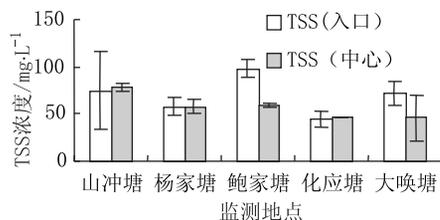
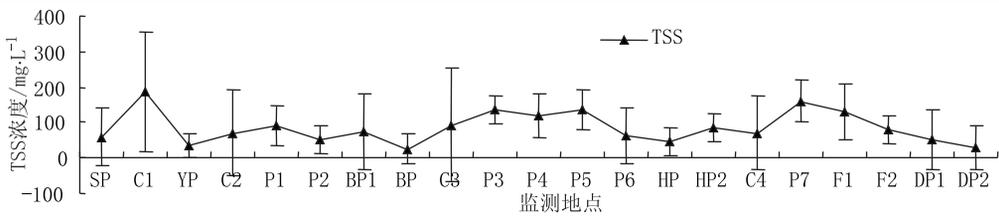


图 2 TSS 在鲍家塘子流域多水塘系统中的动态变化

Figure 2 Dynamics of TSS in multi-pond system in Baojiatang sub-watershed

量大于水塘的空余容量, 径流能够进入主要的河流断面, 径流在水塘系统内呈现一种动态的变化, 进而引起 TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在流域空间的动态变化。TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在流域内具有类似的空间动态变化 ($P > 0.2$): TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在水田中浓度急剧增加, 而在水塘中急剧降低(化应塘除外), 但在沟渠中没有明显变化(图 3)。山冲塘、杨家塘、鲍家塘中的 TN 主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 存在, 但化应塘、大唤塘中的 TN 主要以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 存在。TN 在施肥水田中浓度较高(水田 P1, P4), 而在水田 P2, P6 和荒地 F1 中急剧降低。山冲塘、杨家塘、鲍家塘的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低, 而施肥水田的浓度较高。养分形态在流域不同位置的沟渠也呈现出不同的特性: 靠近流域上游的沟渠 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 比值较低, 而在中、下游沟渠比值较高, 主要与流域的土地利用类型等有关。流域土壤中养分的空间异质性影响非点源污染物产生的空间特性, 而流域复杂的景观结构进一步影响养分的运移形态, 加剧非点源污染物在流域尺度上产生、运移的空间异质性。

TSS 在沟渠(C1, C2, C3)、水田(P1, P4, P7)中浓度升高, 是流域非点源污染物的“源”景观, 而水塘(杨家塘、鲍家塘、大唤塘)、荒地有效地降低 TSS 浓度, 是流域内污染物的“汇”景观。位于流域不同位置的水田在非点源污染物的产生、运移过程中具有不同的特性: P1, P3, P7 增加 TSS 浓度, 而位于其下游的水田降低 TSS 浓度(图 4)。



各采样地点代号含义与图3同

图4 TSS在鲍家塘流域景观结构中的动态变化

Figure 4 Dynamics of TSS in Baojiatang sub-watershed

结果表明,施肥水田是流域中主要的非点源污染物产生区域;水塘、荒地是流域污染物滞留的主要区域;水塘具有稳定的滞留功能,可有效地滞留非点源污染物,同时影响非点源污染物的运移形态;没有施肥的水田具有双重性质:滞留污染物、释放污染物;流域沟渠系统是污染物的主要运移通道;在降雨径流过程中大量运移污染物。流域内由污染物的“源”、“汇”景观构成的复杂景观结构以及景观格局,不仅影响非点源污染物的产生、运移,也影响污染物的运移形态和污染物在流域中的趋向。

4 讨论

流域是有一系列不同景观构成的景观结构,景观格局影响养分在流域中的运移过程。水田、水塘、荒地等景观滞留非点源污染物(“汇”景观),而施肥水田等景观产生大量非点源污染物(“源”景观),使养分在流域中的产生、迁移具有空间异质性,而人为活动进一步加剧这种空间异质性^[5,18]。

污染物在鲍家塘子流域不同土地利用类型(水田、秧田、荒地、水塘)内的产生具有明显的差异性,同时土壤养分含量也具有空间异质性,这是自然因素和人为因素共同作用的结果^[19]。自然条件下,土壤养分和径流浓度在流域内的变异性主要依赖于流域的植被、枯枝落叶、有机物含量、土地利用等因素^[20,21]。自然条件下,荒地的TN含量较高^[13],而鲍家塘子流域内的荒地土壤养分含量较低(相对于水田、秧田),主要是经过几年休耕,土壤中累积的养分被植物、生物所消耗^[22],而水田、秧田又不断大量施肥,增加土壤中的养分含量。TN,NO₃⁻-N,NH₄⁺-N在流域不同土地利用类型中的分布具有一定的随机性,但也呈现出一定的规律:NO₃⁻-N,NH₄⁺-N在不同土地利用类型的土壤中具有显著性差异,同时NH₄⁺-N在土壤上、下层间也存在一定的差异性(秧田下层土壤的NH₄⁺-N含量明显高于上层),可能与植物根孔、虫孔等孔隙作用使得NH₄⁺-N在土壤下层累积有关,同时硝化作

用降低上层土壤中的NH₄⁺-N含量^[23]。

废弃秧田由于施肥时间较长,而NO₃⁻-N具有淋溶性,使得NO₃⁻-N在下层土壤中不断累积,同时水田-人工湿地有助于NH₄⁺-N的硝化作用,降低土壤中的NH₄⁺-N含量而增加NO₃⁻-N含量^[24]。

流域内不同位置的水塘底泥厚度和TN含量并不相同,这主要与水塘周围的土地利用类型有关。山冲塘主要拦截森林的降雨径流,森林的土层较薄和养分含量较低(TN为0.56 g·kg⁻¹),同时植被覆盖较好,在降雨径流过程中,径流的悬浮物和养分浓度较低(TN为0.218±0.004 mg·L⁻¹)。位于水田之间的杨家塘、鲍家塘、化应塘、山冲塘,在降雨径流过程中水田产生的污染物迅速进入水塘,同时含有大量细颗粒悬浮物和养分的农田排水也排入水塘,导致悬浮物和养分在水塘底泥中大量累积。

多数降雨径流被水塘拦截,导致非点源污染物在多水塘系统内大量滞留。同时,水塘蓄水在干旱季节用于农田灌溉,养分在农田生态系统中循环利用,减少农业流域养分的输出。农业非点源污染的实质是农业生态系统的养分失衡,导致养分大量向外界生态系统转移,控制非点源污染的有效方法是增加养分在生态系统中的循环利用^[25]。多水塘系统利用农田-沟渠-水塘独特的景观结构改变养分的运移形态以及运移途径,使养分在农业生态系统中循环利用,减少非点源污染物的输出。

多数水塘在降雨径流过程借助巨大的蓄水量,有效地截留降雨径流,通过沉降、氧化还原、植物吸收等改变养分形态;水塘横断面积急剧增加,导致径流流速和水流的挟沙能力降低,使悬浮物在水塘中大量沉降。鲍家塘子流域的水田主要位于流域低洼地,来自森林、旱地等不同景观的降雨径流以串流或者汇流方式进入水田,在水田中稀释或被土壤吸附、水稻吸收,是流域的“汇”;大量施肥的水田土壤中含有大量养分,在降雨径流过程中,养分大量输出,是流域中最大的污染源。因此,水田这种双重性质对于流域非点

源污染的产生和控制具有重要作用,而其空间分布也直接影响污染物和养分运移的空间格局。

流域内不同土地利用以及多水塘系统形成的景观格局,导致养分和悬浮物浓度在流域中呈现出明显的空间异质性。因此,非点源污染的形成主要取决于流域各种景观在流域空间的分布,流域内污染物的“源”、“汇”景观交错分布,以及人为活动(修建水塘、施肥等)等进一步加剧流域非点源污染物产生、运移过程的异质性,影响非点源污染的形成以及养分的迁移过程^[7]。

5 结论

流域非点源污染不仅与农田施肥、耕作方式、地形条件等因素密切相关,而且在很大程度上受控于流域的各种景观的空间格局。通过研究土壤养分、径流浓度在鲍家塘子流域的空间分布,分析养分在复杂景观结构中的动态变化特征。主要结论如下:

(1) 水塘、荒地、没有施肥的水田是流域中主要的养分持留区域,大量施肥的水田、秧田是主要的非点源污染物产生区域,流域内的沟渠系统是非点源污染物的主要运移通道。

(2) 流域内“源”(水塘、荒地等)、汇(秧田、施肥水田等)景观形成的复杂景观结构——多水塘系统,对非点源污染物的产生、运移过程具有较大的影响,水塘具有稳定的持留特性,有效地降低流域非点源污染物的输出。

(3) 非点源污染物在流域内产生、运移的空间异质性是自然、人为活动的综合作用结果,合理地设计流域景观格局,以及适当的施肥措施,能够有效地控制流域非点源污染,减少流域污染物输出。

参考文献:

[1] Novotny V. Diffuse pollution from agriculture - a worldwide outlook [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 39(3): 1 - 13.

[2] Parry R. Agricultural phosphorus and water quality: a U. S. Environmental Protection Agency perspective[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 258 - 261.

[3] Gopal B. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems[J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 40(2): 27 - 35.

[4] Addiscott T M, Mirza N A. Modeling contaminant transport at catchment or regional scale[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, 67: 211 - 221.

[5] Tufford D L, Mckellar H N, Hussey J R. In - stream nonpoint source prediction with land - use proximity and seasonality[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 100 - 111.

[6] 陈利顶,傅伯杰,张淑荣,等. 异质景观中非点源污染动态变化研究[J]. *生态学报*, 2002, 22(6): 808 - 816.

[7] Vendsen S M, Kronvang B. Retention of nitrogen and phosphorus in a Danish lowland river system: implications for the export from the watershed[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 251: 123 - 135.

[8] 唐涛,蔡庆华,刘健康. 河流生态系统健康及其评价[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1191 - 1194.

[9] 陈吉泉. 河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用[J]. *应用生态学报*, 1996, 7(4): 439 - 448.

[10] 肖笃宁. “三北”防护林工程的生态环境评估[A]. 牛文元. 绿色战略[C]. 青岛: 青岛出版社, 1997.

[11] Yin C Q, Zhao M, Jin W G, Lan Z W. A multi - pond system as a protective zone for the management of lakes in China[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 251: 321 - 329.

[12] Fu B J, Ma K M, Zhou H F, et al. The effect of land - use structure on the distribution of soil nutrients in the hilly area of the loess plateau, China[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1999, 44(8): 732 - 736.

[13] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(3): 193 - 202.

[14] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[15] Eillis C, Stefan H G. Low - velocity measurements in water[J]. *Water Res*, 1986, 22: 1480 - 1486.

[16] 劳家柱. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1998.

[17] 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.

[18] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征 - 变异函数与 Kriging 函数分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 555 - 566.

[19] Fu B J, Chen L D, Ma K M, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shanxi, China[J]. *Catena*, 2000, 39: 69 - 78.

[20] Smith R A, Schwarz G E, Alexander R B. Regional interpretation of water - quality monitoring data[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(12): 2781 - 2798.

[21] Sharply A, Foy B, Withers P. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: an overview[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 1 - 9.

[22] Estevez B A, N' daysegamiye A, Coderre D. The effect on earthworm abundance and selected soil properties after 14 years of solid cattle manure and NPKMg fertilizer application[J]. *Can J Soil Sci*, 1996, 76: 351 - 355.

[23] Frossard E, Condron L M, Oberson A, et al. Processes governing phosphorus availability in temperate soils [J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 15 - 23.

[24] Yan W J, Yin C Q, Tang H X. Nutrient retention by multipond systems: mechanisms for the control of nonpoint source pollution[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 1009 - 1017.

[25] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J]. *Science*, 1997, 277: 494 - 499.