

马凡凡, 邢素林, 徐云连, 龚娟, 田艳, 马友华. 巢湖圩区农田排水沟渠氮磷时空分布及输出特征 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(5): 67-73.

巢湖圩区农田排水沟渠氮磷时空分布及输出特征

马凡凡, 邢素林, 徐云连, 龚娟, 田艳, 马友华
(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘要:【目的】以巢湖圩区农田排水沟渠为研究对象, 探讨圩区农田排水沟渠中氮磷的输出特征及时空分布规律。【方法】在 2015—2016 年间对巢湖圩区农田排水沟渠不同断面进行取样监测, 测定沟渠水体氮、磷含量。【结果】该区域沟渠水体氨态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 与硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 平均浓度分别为 1.1、1.3 mg/L, 均超过 III 类水质标准; 总氮 (TN) 浓度为 1.6~11.6 mg/L, TP 浓度为 0.1~1.0 mg/L, 平均浓度分别超过 V 类和 IV 类水质标准。农田沟渠水体氮磷浓度季节变化明显, 总磷 (TP) 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度夏秋季节较低, TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 则表现为春、夏浓度较高, 秋、冬较低的变化特征。【结论】农田排水沟渠对氮磷具有拦截净化作用, 沟渠水体氮磷浓度由高到低为蔬菜-水稻区沟渠、稻麦-居民区沟渠和稻麦种植区沟渠, 圩区排水氮磷浓度略低于农田沟渠排水, 但高于受纳河流鸡裕河河水。

关键词: 圩区; 沟渠; 种植方式; 径流; 氮磷; 水体富营养化

中图分类号: S276; X522

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2019) 05-0067-07

Temporal and Spatial Distribution and Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Farmland Drainage Ditch in Polder Area around Chaohu Lake

MA Fanfan, XING Sulin, XU Yunlian, GONG Juan, TIAN Yan, MA Youhua
(College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract:【Objective】Taking the farmland drainage ditches in the polder area of Chaohu Lake as the research object, the output characteristics and temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus in the farmland drainage ditches in the polder area was explored.【Method】From 2015 to 2016, different sections of farmland drainage ditches in the polder area of Chaohu Lake were sampled and monitored, and the nitrogen and phosphorus contents of water in the ditches were determined.【Result】The results showed that the average concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ of water in the drainage ditches were 1.1 mg/L and 1.3 mg/L, respectively, which were above the class III water quality standard. The TN concentration was 1.6-11.6 mg/L, the TP concentration was 0.1-1.0 mg/L, and the average concentrations of TN and TP exceeded the class V and IV water quality standards, respectively. The nitrogen and phosphorus concentrations in farmland ditches water change with season obviously. The concentrations of TP and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were lower in summer and autumn, and the concentrations of TN and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ were higher in spring and summer and lower in autumn and winter.【Conclusion】The farmland drainage ditch has the function of intercepting and purifying nitrogen and phosphorus. The nitrogen and phosphorus concentrations in the ditches of vegetable-rice area were highest, followed by those in ditches of rice-wheat-residential area and ditches of rice-wheat cultivation area. The concentrations of nitrogen and phosphorus in the drainage ditches of the polder area were slightly lower than those of the farmland ditches, but higher than those of the Jiyu River.

Key words: polder area; ditches; planting methods; runoff; nitrogen and phosphorus; water eutrophication

收稿日期: 2019-02-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAD15B03)

作者简介: 马凡凡 (1992—), 女, 在读硕士生, 研究方向为土壤生态质量与农业面源污染控制, E-mail: 1803694501@qq.com

通信作者: 马友华 (1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为农业资源环境与信息技术, E-mail: yhma@ahau.edu.cn

【研究意义】氮、磷是植物生长必需元素，也是引起水体富营养化的重要影响因素，防治水体富营养化的关键是控制水体中的氮磷含量。农田排水沟渠是连接农业排水、居民生活废水与河流湖泊的重要通道，具有河流和湿地的双重特征，既是农业面源污染的最初汇集地，又是下游河流、湖泊的外输口，起着蓄水、排水、净化水质等多种作用^[1-3]。农田排水沟渠径流氮、磷浓度变化既反映该沟渠氮、磷的输出负荷和对上游农田来水的消纳净化，也表明了沟渠对农田尾水的截留净化能力，是实现氮、磷功能转换的重要场所^[4-6]。

【前人研究进展】相比点源污染，农业面源污染对水体质量安全构成了更严重的威胁，也是湖泊流域水污染治理的难点^[7-8]，而农田排水沟渠中氮磷的迁移和转化在农业面源污染的控制和管理中起着重要作用，对农业面源污染防控具有重要意义。近年来，国内外专家学者对农田沟渠中氮、磷的迁移转化和生态拦截功能进行了大量研究^[9-11]。如 Zhang 等^[7]研究发现沟渠湿地系统能够有效降解、去除水体中的营养物质，降低其进入下游河网的氮、磷含量。生态沟渠由于独特的水生植物-底泥-微生物系统，通过植物吸收拦截、底泥吸附以及微生物降解的综合作用下，总氮、总磷去除率可分别高达 64% 和 70%^[12]， NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的平均去除率分别为 77.9% 和 63.7%^[13]。然而，氮、磷在沟渠系统中的迁移转化非常复杂，受温度、季节、植物种类、沟渠结构等众多因素的影响，农田排水沟渠氮磷迁移转化、时空分布输出的不确定性也随之增加^[2, 14-16]。

巢湖沿岸圩区集中，多数以种植业为主，农业生产强度较大，水体环境相对封闭，高浓度氮磷水体未经处理直接排入巢湖，加重了巢湖水体富营养化^[17]。巢湖流域粮食作物以小麦和水稻为主，氮磷化学肥料施用量过多，且地表径流是农业化肥养分流失的主要途径，加剧了氮磷养分流失的风险。储茵等^[18]通过研究巢湖沿岸圩区稻季排水氮磷浓度特征发现，圩区排水的总氮、总磷平均浓度分别为 4.28、0.3 mg/L，达到富营养化甚至超富营养化水平，且均高于接纳河流水质。稻麦轮作地表径流总氮流失量为 45.27~101.38 kg/hm²，总磷流失量为 0.30~0.61 kg/hm²，氮、磷等污染物随地表径流排入沟渠及下游水体，对巢湖水体富营养化的贡献不可忽视^[19]。【本研究切入点】目前，

巢湖流域的研究主要集中在农田地表径流氮磷流失特征及河流营养盐的输出动态^[20-21]，但经由农田流失的氮磷在沟渠中的时空转化、分布及其向巢湖水体的输送特征研究相对薄弱。【拟解决的关键问题】因此，本研究对巢湖圩区农田排水沟渠进行调查，分析沟渠水体氮磷时空分布特征及输入巢湖的风险，为改善沟渠水体氮磷污染和控制巢湖流域污染源头提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在巢湖市烔炀镇西宋圩区农田示范基地 (117° 40' 59" E, 31° 39' 43" N) 进行，距巢湖湖区约 560 m。巢湖流域属于亚热带湿润性季风气候，年均气温 16.1 °C，相对湿度 76%，年均降水量 1 215 mm。降雨量年内分配较不均匀，多集中于夏季 (6—8 月)，12 月份最少。试验区作为一个典型圩区，地势平坦，由于降雨径流长期冲刷，自然土质沟渠纵横交错，沟渠主要接纳农田排水和居民区生活污水，其中沟渠中植物可以沉降泥沙，减缓流速，具有一定的拦截净化能力。沟渠排水汇入排灌站，通过排灌站与临近河流—鸡裕河相连，最终流入巢湖。试验区主要种植作物为蔬菜—水稻、小麦—水稻轮作。作物施肥情况见表 1。监测期内，小麦一般 10 月下旬栽种，5 月下旬收割，期间施肥 2 次；水稻一般 6 月上旬插秧，9 月下旬收割，期间施肥 3 次。

表 1 监测期内作物施肥量

Table 1 Crop fertilization during the monitoring period

作物 Crop	基肥 Base fertilizer (kg/hm ²)			追肥 Top dressing (kg/hm ²)			
	有机肥 Organic fertilizer	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
蔬菜 Vegetable	11250	164.7	270	252	237.3	143.9	270
小麦 Wheat		144	72	83	96		
水稻 Rice		106	48	58	86		25

1.2 采样点设置及样品采集

在研究区域选取 3 条沟渠，沿水流方向并根据沟渠长度，在沟渠的上游、中段、下游断面分别设置 3 个采样点，标记为 S1~S9。其中沟渠 1 连接蔬菜—水稻种植区，沟渠 2 连接居民区及小麦—水稻种植区，沟渠 3 周边是小麦—水稻种植区，面积分别为 10.6、6.9、13.7 hm²。在沟渠系统的

出水口—排灌站排水口和鸡裕河河水分别布点采样, 标记为 S10~S11 (图 1)。根据试验区的自然环境及代表性, 分别于 2015 年 3 月 (春季)、2015 年 6 月 (夏季)、2016 年 9 月 (秋季)、2016 年 12 月 (冬季) 的 15 日前后采集水样, 并在降雨时加采一次, 每次取样 500 mL, 保存在聚乙烯塑料瓶, 准确标记后立即带回实验室进行处理, 并尽快测定。

1.3 测定项目及方法

本研究测定指标为总磷 (TP)、总氮 (TN)、

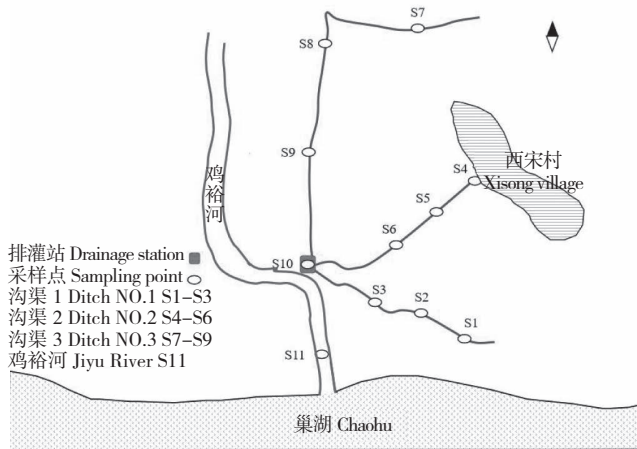


图 1 沟渠采样点分布示意图

Fig. 1 Diagram of distribution of sampling points in the ditches

氨态氮 (NH_4^+-N)、硝态氮 (NO_3^--N)。TP 采用钼酸铵分光光度法流动分析仪测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法流动分析仪测定, NH_4^+-N 采用水杨酸分光光度法流动分析仪测定, NO_3^--N 采用硫酸肼还原法流动分析仪测定。所用仪器均为 AA3 流动注射分析仪。

试验数据采用 Excel 软件处理并作图, 根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 判断沟渠水质。

2 结果与分析

2.1 农田排水沟渠水体氮磷浓度分布特征

从表 2 可以看出, 沟渠水体氮磷浓度差异显著, NH_4^+-N 浓度为 0.3~4.7 mg/L, 平均值为 1.1 mg/L; NO_3^--N 浓度为 0.4~2.8 mg/L, 平均值为 1.3 mg/L。与地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 比较可知, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 平均浓度均高于 III 类水质标准。农田排水沟渠 TN 浓度范围在 1.6~11.6 mg/L, 平均浓度为 4.2 mg/L, 是 V 类水质标准 (2.0 mg/L) 的 2.1 倍。农田排水沟渠 TP 浓度范围在 0.1~1.0 mg/L, 平均浓度为 0.3 mg/L, TP 平均浓度超过 IV 类水质标准, 且全部水体 TP 含量超过了水体富营养化 (0.02 mg/L) 的标准, 甚

表 2 农田排水沟渠水体氮磷浓度分布特征

Table 2 Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus concentrations in water of farmland drainage ditch

排水沟渠 Drainage ditch	统计值 Statistic value	TP (mg/L)	TN (mg/L)	NH_4^+-N (mg/L)	NO_3^--N (mg/L)
沟渠 1 Ditch NO.1	最小值 Min	0.2	2.6	0.5	0.6
	最大值 Max	0.6	11.6	4.7	2.8
	平均值 Mean	0.4	5.3	1.6	1.7
	标准差 STD	0.1	3.6	1.7	0.8
	变异系数 RSD (%)	35.9	67.9	103.9	46.6
沟渠 2 Ditch NO.2	最小值 Min	0.1	1.9	0.4	0.5
	最大值 Max	1.0	7.6	2.0	2.4
	平均值 Mean	0.3	3.9	0.9	1.2
	标准差 STD	0.2	2.1	0.6	0.7
	变异系数 RSD (%)	73.6	55.2	70.6	53.5
沟渠 3 Ditch NO.3	最小值 Min	0.1	1.6	0.3	0.4
	最大值 Max	0.4	7.1	1.8	2.1
	平均值 Mean	0.2	3.5	0.7	1.1
	标准差 STD	0.1	2.0	0.6	0.6
	变异系数 RSD (%)	54.6	57.0	77.5	56.8
合计 Total	最小值 Min	0.1	1.6	0.3	0.4
	最大值 Max	1.0	11.6	4.7	2.8
	平均值 Mean	0.3	4.2	1.1	1.3
	标准差 STD	0.2	2.7	1.1	0.7
	变异系数 RSD (%)	57.3	63.9	81.5	53.6

至有些超过了V类水质标准。巢湖圩区水稻生长期排水 TN、TP 浓度一般为 4.3、0.3 mg/L^[9]，本研究沟渠水中 TN 浓度略低于稻田排水浓度，TP 浓度则略高于稻田排水浓度。

2.2 不同土地利用方式沟渠水体氮磷浓度比较

从表 2 还可以看出，3 种土地利用方式农田排水沟渠的氮磷浓度差异显著，不同沟渠水体氮磷浓度的变异系数较大，表现出较大的分散性。就磷素而言，沟渠 1 中 TP 平均浓度最高，达到 0.4 mg/L，沟渠 2 和沟渠 3 的 TP 平均浓度较低，分别为 0.3、0.2 mg/L。就氮素而言，沟渠 1、沟渠 2、沟渠 3 TN 平均浓度分别为 5.3、3.9、3.5 mg/L；NH₄⁺-N 平均浓度分别为 1.6、0.9、0.7 mg/L；NO₃⁻-N 平均浓度分别为 1.7、1.2、1.1 mg/L。总体上，农田沟渠氮磷浓度表现为沟渠 1（蔬菜-水稻种植区）最高，沟渠 2（居民区-小麦-水稻种植区）和沟渠 3（小麦-水稻种植区）氮磷浓度较低，但沟渠 2 和沟渠 3 氮磷浓度差异不显著（图 2）。蔬菜-水稻种植区施肥量较高，径流中氮磷浓度相应增加，这可能是沟渠 1 中氮磷浓度最高的主要原因。同时沟渠 2 不仅接纳居民区未经处理的高氮磷的生活废水，还接纳周边的农田降雨及其灌溉水，而沟渠 3 仅接受较低施肥量的农田排水，因此氮磷浓度相对较低。

2.3 农田排水沟渠水体氮磷时空分布特征

受大气降水及农田施肥影响，沟渠水体氮磷季节性变化很大。对不同季节沟渠水体中氮磷浓度比较（图 2）可知，TP 浓度（图 2A）冬季明显高于春季和夏秋季节，可能是夏秋两季雨水充沛，径流量大，可以更好地稀释污染物。同时，夏季和春季温度适宜，植物生长旺盛，对沟渠中磷的净化效果较显著。TN（图 2B）和 NO₃⁻-N（图 2D）浓度季节分布表现一致，均是春、夏浓度较高，秋、冬较低。可能是这些沟渠主要流经农业耕作区，而夏季是农业施肥的集中时期，随着大量含氮肥料的施用，致使径流中 TN 浓度较高。另外，由于土壤颗粒和胶体一般带负电荷，在降雨冲刷和水土流失作用下，对 NO₃⁻-N 的吸附作用较弱，农田中的硝酸盐易随径流进入沟渠中，从而导致 NO₃⁻-N 浓度较高^[22]。NH₄⁺-N（图 2C）浓度则表现为春季明显高于夏秋两季，这主要是春季有利于微生物活动，有机氮可在有氧条件下在转化为 NH₄⁺-N，因此 NH₄⁺-N 浓度较高^[23]，这与寇永珍等^[24]关于贵州高海拔地区 NH₄⁺-N 浓度春季低于夏季的研究相反，主要是高海拔地区农业生产时间较巢湖平原地区相对较后。

此外，沿沟渠水流方向，由于农田沟渠自身净化以及植物的吸收，沟渠对水体中氮磷有明

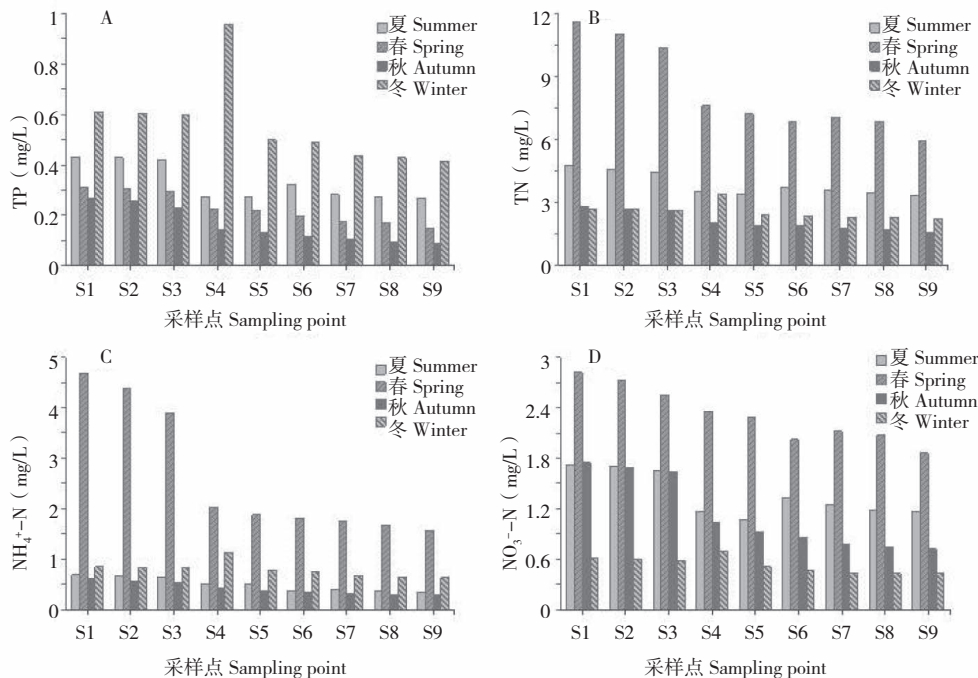


图 2 农田排水沟渠各点位氮磷浓度时空分布特征

Fig. 2 Spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus concentrations in various farmland drainage ditches

显的拦截作用, 农田沟渠下游断面氮磷浓度总体呈逐渐降低趋势。从图 2 可以看出, 沟渠 1 表现为冬季 TP 浓度显著高于夏、秋两季, 而 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度则是春季较高, 沟渠 2 和沟渠 3 也表现为相似规律。值得注意的是, 沟渠 2 上游断面 (S4) 冬季 TP、TN 浓度最高, 达到 0.1、3.4 mg/L, 与秋季相比, TP 浓度升高 5.9 倍、TN 浓度升高 69.8%, 且显著高于沟渠 1 和沟渠 3 的上游断面。这可能是沟渠 2 上游断面主要接纳居民区的生活废水和街道降雨径流, 雨季降雨对污水有一定的稀释作用, 而冬季枯水季节, 高浓度的生活废水直接排入沟渠, 此时为作物生长后期, 沟渠 1 及沟渠 3 则主要接受较低浓度的农田径流, 因此沟渠 2 上游水体中氮磷浓度最高。此外, 夏季沟渠 2 下游断面 TP、TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较高, 可能是巢湖地区夏季作物施肥期集中在 5—6 月, 导致农田径流中氮磷含量较高。

2.4 圩区入河排水氮磷含量特征

圩区排水通过排灌站排入鸡裕河, 鸡裕河入河口距入巢湖口约 200 m。通过对排灌站排水 (S10) 采样分析 (表 3) 可知, 圩区排水 TP 和 TN 平均浓度分别为 0.3、3.8 mg/L, 与沟渠水 TP、TN 平均值 0.3、4.2 mg/L 相比, TP 浓度降低 9.4%, TN 浓度降低 9.2%。

尽管水体混合稀释以及沟渠的净化拦截, 致使排灌站排水氮磷浓度有所降低, 但与入湖河流鸡裕河河水 (S11) 相比, 圩区排水 TP 和 TN 浓度分别高出 16%、6.1%。与地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 比较可知, 圩区排水 TP 超过 IV 类水标准, TN 含量超过 V 类水标准, 巢湖圩区农田氮磷输出风险依然严峻。

表 3 入河排水氮磷含量特征

Table 3 Characteristics of nitrogen and phosphorus contents in river drainage in polder area

采样点 Sampling point	TP (mg/L)			TN (mg/L)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
S10 排灌站 S10 Drainage station	0.1	0.5	0.3	0.5	7.6	3.8
S11 鸡裕河 S11 Jiyu River	0.1	0.5	0.2	0.5	7.4	3.6

3 讨论

影响农田排水沟渠水体中氮磷含量的因素有

很多。首先, 不同的水肥条件是影响沟渠系统氮磷含量的主要因素, 不同的土地利用方式也会导致沟渠系统接受周边的径流流失和污水强度有所不同^[25-27]。本研究结果表明, 相同降雨条件下, 连接蔬菜种植区的沟渠径流氮磷含量总体上高于居民-稻麦区和稻麦区沟渠, 这是由于蔬菜季施肥量较高, 在降水过程中, 氮磷随地下淋溶和地表径流中向沟渠流失较多。此外, 夏季沟渠水体中 TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较高, 而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较低。这可能是夏季是农业种植的集中时期, 雨水充沛, 大量氮肥在雨水淋溶和水土流失作用下进入沟渠中, 同时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在厌氧微生物作用下转化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 降雨又一定程度上稀释了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度, 从而导致 TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量升高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降低。同时, 夏秋季节为丰水期, 温度适宜植物生长, 对沟渠中磷的净化效果更好, 因此沟渠水体中 TP 含量较冬季低。

其次, 植物是沟渠系统的初级生产者之一, 既可以直接吸收底泥和水体中的氮、磷等营养物质, 氧气还可以通过茎和叶转移到根区, 促进根区周围形成微氧环境, 为微生物提供适宜的生长环境, 能够有效去除水体中氮磷^[28-31]。同时受温度和季节影响, 沟渠去除氮磷的速率有所差异。夏季温度有利于植物进行光合作用, 生长速度加快, 对氮磷的净化效果也更加明显。与之相反, 冬季气温较低, 植物地上部分枯萎凋落, 植物体内的氮磷释放进入水体和底泥中, 则会导致氮磷浓度升高^[14,32]。因此总体上, 沿沟渠水流方向, TN、TP 浓度逐渐降低。但冬季农田径流中氮磷削减效率较低, 且沟渠 2 中 TP、TN 浓度最高 (S4), 这不仅与居民区高氮磷生活污水的大量排放有关, 同时冬季沟渠中水生植物凋落, 生态化水平较低, 从而降低了沟渠对氮磷的截留削减能力^[33]。

作为污染物传输的重要通道, 沟渠系统不仅影响当地居民的生产生活用水, 还会对巢湖水质造成潜在威胁。因此, 有必要对巢湖沿岸农田排水沟渠进行整治。一方面, 由于农田施肥量较高及生活污水排放使得沟渠水体中氮磷含量较高, 因此完善居民区及集镇的基础设施, 提高生活污水处理能力; 另一方面, 自然沟渠植物覆盖度较低, 生态化水平不高, 对氮磷的净化能力有限, 利用水生植物、底泥和微生物的协同作用, 构建生态沟渠系统, 提高农田沟渠的水质净化能力可

作为该区域控制面源污染的研究方向。

4 结论

(1) 农田排水沟渠水体 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 平均浓度分别为 1.1、1.3 mg/L; TP、TN 浓度范围分别为 0.1~1.0、1.6~11.6 mg/L, TP 平均浓度超过 IV 类水质标准, 且全部超过水体富营养化标准, TN 平均含量是 V 类水质标准的 2.1 倍。

(2) 受降雨强度及农田施肥影响, 农田排水沟渠中氮磷时空变化显著。沟渠水体 TN 和 NO_3^--N 春夏两季浓度较高, TP 和 NH_4^+-N 则是夏秋浓度较低。另土地利用方式对沟渠水体氮磷含量具有显著影响, 蔬菜-水稻种植区沟渠水体氮磷含量高于居民-稻麦区和稻麦区沟渠, 且整体从上游断面到下游, 氮磷浓度逐渐降低, 具有一定的拦截效果。

(3) 农田圩区排水 TP 和 TN 平均浓度分别为 0.3、3.8 mg/L, 比入湖鸡裕河河水 TP 和 TN 分别高出 16%、6.1%, 农田圩区排水 TP 浓度超过 IV 类水标准, TN 浓度超过 V 类水标准, 对巢湖水体富营养化的贡献不容忽视。

参考文献 (References):

- [1] 赵原, 王彦, 汪涛, 朱波. 川中丘陵区高富集氮、磷沟渠植物的筛选[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(10): 12-16. doi:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.10.003.
ZHAO Y, WANG Y, WANG T, ZHU B. Screening of highly enriched nitrogen and phosphorus ditch plants in hilly area of central Sichuan [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015,37(10):12-16. doi:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.10.003.
- [2] GUO L, MA K M. Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus in water and sediment of a multi-level ditch system in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2011,21(4):437-445.
- [3] LIANG Q, ZHANG Z, LIU Y X, DAI J H, JIANG Z J, PAN L P, LU S Y, LAN X. Integrated control of agricultural non-point source pollution to provide safe and healthy drinking water for rural areas [J]. *Asian Agricultural Research*, 2017,9(9):28-30, 35. doi:10.19601/j.cnki.issn1943-9903.2017.09.009.
- [4] 吴晓妮, 付登高, 段昌群, 闫曦, 蒋霞. 柴河流域种植方式与沟渠类型对农田径流氮、磷含量的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 38-42. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2016.06.007.
WU X N, FU D G, DUAN C Q, YAN W, JIANG X. Effects of planting ways and ditch types on nitrogen and phosphorus contents in runoff of Chaihe River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(6): 38-42. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2016.06.007.
- [5] ZHANG Z Y, KONG L L, ZHU L, Mwiya, R M. Effect of drainage ditch layout on nitrogen loss by runoff from an agricultural watershed

- [J]. *Pedosphere*, 2013,23(2):256-264. doi:10.1016/S1002-0160(13)60014-4.
- [6] 宋常吉, 李强坤, 王云玲. 农田排水沟渠的生态环境效应研究综述[J]. 现代农业科技, 2014(16): 201-203, 206.
SONG C J, LI Q K, WANG Y L. A review of the ecological environmental effects of farmland drainage ditches [J]. *Modern agricultural technology*, 2014(16):201-203, 206.
- [7] ZHANG J. Control of TN and TP by the Pond and Wetland Integrated System [C]. *Forestry Measures for Ecologically Controlling Non-Point Source Pollution in Taihu Lake Watershed, China*, 2016:213-233. doi:10.1007/978-981-10-1850-3-14.
- [8] Chen C J, Zhao T C, Liu R L, L L G. Performance of five plant species in removal of nitrogen and phosphorus from an experimental phytoremediation system in the Ningxia irrigation area [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017 189:497. doi:10.1007/s10661-017-6213-y.
- [9] Kumwimba M N, Zhu B, Suanon F, Muyembe D K, Dzakupasu M. Long-term impact of primary domestic sewage on metal/loid accumulation in drainage ditch sediments, plants and water: Implications for phytoremediation and restoration [J]. *Science of the Total Environment*, 2017(581):773-781. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.007.
- [10] 余红兵, 戴桂金. 氮磷面源污染在沟渠中的迁移转化机理 [J]. 南方农业, 2018, 12(31): 103-105. doi:10.19415/j.cnki.1673-890X.2018.31.030.
YU H B, DAI G J. Mechanism of migration and transformation of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in trenches [J]. *Southern agriculture*, 2018,12(31):103-105. doi:10.19415/j.cnki.1673-890X.2018.31.030.
- [11] LI Q K, SONG C J, HU Y W, PENG C, MA Q, JIANG Z X, JU Y R. Transformation of non-point source soluble nitrogen in Simulated Drainage Ditch [J]. *Environmental science*, 2016,37(2):520-526. doi:10.13227/j.hjcx.2016.02.016.
- [12] 余红兵, 肖润林, 杨知建, 张树楠, 刘锋. 灌溉和降雨条件下生态沟渠氮、磷输出特征研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 686-692.
YU H B, XIAO R L, YANG Z J, ZHANG S N, LIU F. Study on nitrogen and phosphorus output characteristics of ecological ditches under irrigation and rainfall conditions [J]. *Journal of Yangtze River Basin Resources and Environment*, 2014,23(5):686-692.
- [13] CHEN L, LIU F, WANG Y, LI X, ZHANG S N, LI Y. Nitrogen removal in an ecological ditch receiving agricultural drainage in subtropical central China [J]. *Ecological Engineering*, 2015,82:487-492. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.05.012.
- [14] KUMWIMBA, M N, ZHU B, MUYEMBE D K. Assessing the influence of different plant species in drainage ditches on mitigation of non-point source pollutants (N, P, and sediments) in the Purple Sichuan Basin [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017,189: 267. doi: 10.1007/s10661-017-5965-8.
- [15] LI S M, WANG X L, TU, J M, QIAO B, LI J S. Nitrogen Removal in an ecological ditch based on an orthogonal test [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227(11): 396. doi:10.1007/s11270-016-3085-7.
- [16] 唐少霞, 王子爱, 魏伊宁, 傅雨萱, 袁莹, 郑苗, 张波. 高位虾池养殖水对沟渠土营养盐的影响 [J]. 广东农业科学, 2018, 45(10): 128-133. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2018.10.020.
TANG S X, WANG Z A, WEI Y N, FU Y Q, YUAN Y, ZHENG M,

- ZHANG B. Effects of high shrimp pond culture water on nutrient salt in ditch soil [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(10): 128-133. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2018.10.020.
- [17] 尚广萍, 徐振宇, 李玉成, 邹爱红. 巢湖西半湖富营养化时空变化趋势与成因分析 [J]. *生物学杂志*, 2010, 27(5): 56-59.
- SHANG G P, XU Z Y, LI Y C, ZHOU A H. Study on the temporal and spatial trends and genesis of eutrophication in the west lake of Chaohu Lake [J]. *Biology Journal*, 2010, 27(5): 56-59.
- [18] 储茵, 汪丽婷, 马友华, 胡宏祥, 张丽娟. 巢湖沿岸典型圩区夏季水稻长期营养盐输出特征研究 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 135-140. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2010.05.037.
- CHU Y, WANG L T, MA Y H, HU H X, ZHANG L J. Study on nutrient output characteristics of summer rice growing season in typical reclamation area along Chaohu Lake [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 135-140. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2010.05.037.
- [19] 王桂苓, 马友华, 孙兴旺, 宋法龙, 张丽娟, 徐宏军, 肖圣辉. 巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 6-10, 29. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2010.02.010.
- WANG G L, MA Y H, SUN X W, SONG F L, ZHANG L J, XU H J, XIAO S H. Study on nitrogen and phosphorus loss in runoff of wheat and rice rotation in Chaohu Lake basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 6-10, 29. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2010.02.010.
- [20] 汪丽婷, 马友华, 储茵, 张丽娟, 朱小红, 孙丽, 胡鹏. 巢湖流域不同施肥措施下稻田氮磷流失特征与产量研究 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 40-43. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2011.05.025.
- WANG L T, MA Y H, CHU Y, ZHANG L J, ZHU X H, SUN Li, HU P. Study on nitrogen and phosphorus loss characteristics and yield of paddy field under different fertilization measures in Chaohu Lake Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 40-43. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2011.05.025.
- [21] 储茵, 潮洪武, 马友华, 郑珊珊, 潘应生. 巢湖流域丰乐河洪水事件营养盐输出动态研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(8): 1072-1080.
- CHU Y, SHI H W, MA Y H, ZHENG S S, PAN Y S. Dynamics of nutrient output in flood events of Fengle River in Chaohu Lake Basin [J]. *RESOURCES AND ENVIRONMENT IN THE YANGTZE BASIN*, 2013, 22(8): 1072-1080.
- [22] 奚姗姗, 周春财, 刘桂建, 吴蕾, 王培华. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 [J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 542-547. doi:10.13227/j.hjks.2016.02.019.
- XI S S, ZHOU C C, LIU G J, W L, WANG P. Spatiotemporal distribution of nitrogen and phosphorus nutrients in Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2): 542-547. doi:10.13227/j.hjks.2016.02.019.
- [23] ZHAO Y Q, XIA Y Q, KANA T M, WU Y C, LI X B, YAN X Y. Seasonal variation and controlling factors of anaerobic ammonium oxidation in freshwater river sediments in the Taihu Lake region of China [J]. *Chemosphere*, 2013, 93(9): 2124-2131. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.07.063.
- [24] 寇永珍, 林陶, 夏品华. 贵州草海湿地农田沟渠水质污染特征及其治理研究 [J]. *广东农业科学*, 2015, 42(14): 120-125. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2015.14.004.
- KOU Y Z, LIN T, XIA P H. Water pollution characteristics and treatment of farmland ditch in Caohai Wetland, Guizhou [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(14): 120-125. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2015.14.004.
- [25] 文国樑, 李卓佳, 曹煜成, 杨铿, 陈永青, 杨莺莺. 对虾集约化养殖废水排放沟渠生态处理技术 [J]. *广东农业科学*, 2009(9): 16-18. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2009.09.009.
- WEN G L, LI Z J, CAO Y C, YANG J, CHEN Y Q, YANG Y Y. Ecological treatment technology for intensive aquaculture wastewater discharge ditches of shrimp [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2009(9): 16-18. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2009.09.009.
- [26] 温胜芳, 单保庆, 张洪. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 [J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2322-2329. doi:10.13227/j.hjks.2012.07.034.
- WEN S F, SHAN B Q, ZHANG H. Study on the spatial distribution difference of phosphorus in surface sediments of Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2322-2329. doi:10.13227/j.hjks.2012.07.034.
- [27] 陆彬, 张晓平, 梁爱珍, 贾淑霞, 陈学文, 陈升龙, 刘四义. 农田土壤 N₂O 排放过程及硝态氮淋失简述 [J]. *土壤与作物*, 2015, 4(4): 168-175.
- LU B, ZHANG X P, LIANG A Z, JIA S X, CHEN X W, CHEN S L, LIU S Y. N₂O Emission Process and Nitrate Nitrogen Leaching in Farmland Soil [J]. *Soil and Crop*, 2015, 4(4): 168-175.
- [28] TYLER H L, MOORE M T, LOCKE M A, et al. Potential for phosphate mitigation from agricultural runoff by three aquatic macrophytes [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012 223(7): 4557-4564. doi:10.1007/s11270-012-1217-2.
- [29] KIRK G J D, KRONZUCKER H J. The potential for nitrification and nitrate uptake in the rhizosphere of wetland plants: a modelling study [J]. *Annals of Botany*, 2005, 96(4): 639-646. doi:10.1093/aob/mci216.
- [30] 郝明旭, 霍莉莉, 吴珊珊. 人工湿地植物水体净化效能研究进展 [J]. *环境工程*, 2017, 35(8): 5-10, 24. doi:10.13205/j.hjgc.201708002.
- HAO M X, HU L L, WU S S. Research progress on water purification efficiency of constructed wetland plants [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(8): 5-10, 24. doi:10.13205/j.hjgc.201708002.
- [31] KROGER R, MOORE M T, LOCKE M A, CULLUM R F, STEINRIEDE R W, TESTA S, BRYANT C T, COOPER C M. Evaluating the influence of wetland vegetation on chemical residence time in Mississippi Delta drainage ditches [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7): 1175-1179. doi:10.1016/j.agwat.2009.03.002.
- [32] 王迪, 李红芳, 刘锋, 王毅, 钟元春, 何洋, 肖润林, 吴金水. 亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 [J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1717-1723. doi:10.13227/j.hjks.2016.05.016.
- WANG D, LI H F, LIU F, WANG Y, ZHONG Y C, HE Y, XIAO R L, WU J S. Interception effects of ecological ditches in subtropical agricultural areas on nitrogen migration in agricultural runoff [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1717-1723. doi:10.13227/j.hjks.2016.05.016.
- [33] 罗专溪, 朱波, 唐家良, 汪涛, 张剑, 王振华. 自然沟渠控制村镇降雨径流中氮磷污染的主要作用机制 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(3): 561-568. doi:10.13671/j.hjksxb.2009.03.018.
- LUO Z X, ZHU B, TANG J L, WNAG T, ZHANG J, WANG J H. The main mechanism of nitrogen and phosphorus pollution in rainfall runoff controlled by natural ditches [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 29(3): 561-568. doi:10.13671/j.hjksxb.2009.03.018.