

稻秸还田对油菜季径流氮磷及 COD 流失的影响

龚静静^{1,2}, 靳玉婷¹, 胡宏祥¹, 朱昌雄², 高梦瑶¹

(1.安徽农业大学资源与环境学院,合肥 230036;2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘要: 通过田间小区试验,设置 CK(无施肥+无秸秆)、F(常规施肥)、SF(秸秆还田+常规施肥)和 SFR(秸秆还田+常规施肥减 15%)4 个处理,研究在巢湖地区稻油轮作模式下,稻秸还田对油菜季农田径流氮磷及化学需氧量(COD)流失影响。结果表明,秸秆还田处理显著增加土壤微生物细菌、真菌和放线菌数量,显著降低径流总氮浓度,但增加总磷和 COD 含量,土壤微生物数量与径流氮磷及 COD 含量呈显著正相关关系。与 F 处理相比,SF、SFR 处理总氮流失量分别减少 16.9%~19.8%,27.1%~29.3%,总磷流失量分别降低 2.4%~4.0%,4.0%~5.6%,COD 流失量分别增加 6.1%~10.0%,2.8%~6.1%。研究结果为揭示土壤微生物数量与径流氮磷及 COD 流失的作用机理提供了参考,为合理利用秸秆还田技术提供了理论依据。

关键词: 秸秆还田;氮素;磷素;COD;流失;微生物数量

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)04-0024-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.004

Effects of Rice Straw Incorporation on Nitrogen, Phosphorus and COD Loss in Rape Seasonal Runoff

GONG Jingjing^{1,2}, JIN Yuting¹, HU Hongxiang¹, ZHU Changxiong², GAO Mengyao¹

(1.School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 2.Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In the field plot experiment, four treatments, including CK (no fertilization + no straw), F (conventional fertilization), SF (straw incorporation + conventional fertilization) and SFR (straw incorporation + conventional fertilization reduced by 15%) were set up to study the effects of rice straw incorporation on nitrogen, phosphorus and chemical oxygen demand (COD) loss through runoff in rapeseed season under rice-rape rotation mode in Chaohu Lake region. The results showed that straw incorporation treatment significantly increased the number of soil microbial bacteria, fungi and actinomycetes, significantly reduced the total nitrogen concentration in runoff, but increased the total phosphorus and COD contents. The number of soil microorganisms was positively correlated with the content of nitrogen, phosphorus and COD in runoff. Compared with F treatment, total nitrogen loss decreased by 16.9%~19.8% and 27.1%~29.3%, total phosphorus loss decreased by 2.4%~4.0% and 4.0%~5.6% in the SF treatment and SFR treatment, while the COD loss increased by 6.1%~10.0% and 2.8%~6.1%, respectively. The results provided a reference for revealing the mechanism of soil microbial biomass and the loss of nitrogen, phosphorus and COD in runoff, and provided a theoretical basis for the rational use of straw incorporation technology.

Keywords: straw incorporation; nitrogen; phosphorus; COD; loss; microbial quantity

巢湖地区是中国主要的作物产区之一,稻—油轮作是长江中下游地区典型的种植制度,每年产生大量的秸秆。而巢湖是全国富营养化最为严重的淡水湖之一,大面积蓝藻爆发现象频频发生。农田氮磷损失是巢湖富营养化的主要原因^[1]。

氮磷是植物营养生长所必需的养分,中国化肥氮

磷的总消费量分别占全球农业氮磷消费量的 35.1% 和 33.8%^[2]。化肥通过径流流失加速土壤氮磷养分的损失^[3-4],增加水体中总氮和总磷浓度。国内外学者对农田氮磷向水体迁移已做了较多研究,农田氮素通过渗透、径流、氨挥发、硝化—反硝化等多种途径损失^[5-6],磷素主要与地表径流有关^[7],土壤侵蚀是农田磷

收稿日期:2019-01-04

资助项目:国家“十三五”水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07603-02-02)

第一作者:龚静静(1992—),女,河北张家口人,在读硕士研究生,主要从事农田生态环境保护研究。E-mail:965441525@qq.com

通信作者:胡宏祥(1971—),男,安徽合肥人,博士,教授,主要从事土壤养分循环与管理与资源利用与生态环境研究。E-mail:hongxianghu@163.com

流失的主要途径^[8], 随施氮量的增加, 磷损失略有增加^[9-10]。近年来, 关于秸秆还田对氮磷流失已有较多报道^[11-12]。秸秆还田配施化肥影响土壤养分循环和微生物数量及群落结构多样性^[13-14], 这些因素同时影响农田氮磷的流失^[15]。秸秆还田处理减轻雨水对土壤表面的冲刷, 减少产沙量^[12], 提高固氮能力^[16], 因而减少农田氮素流失。有研究^[17]认为, 若秸秆还田量太高, 易增加总氮浓度, 在降雨条件下增加氮素流失。Qiao 等^[18]研究发现, 施氮量与氮素损失呈显著的线性相关。但是由于磷素随地表径流流失机理的复杂性和土壤条件等的区域性, 农田径流磷素研究^[2, 12, 19]不一。然而关于秸秆还田对农田径流 COD 含量的影响却鲜有报道, 针对巢湖流域研究更少。

土壤微生物作为土壤有机质和养分循环的动力, 在土壤生态系统中具有非常重要的作用, 分解有机质和植物不易吸收的矿物质, 使其成为植物可吸收利用状态, 同化大气中游离的氮素, 以供给植物营养, 增加土壤团粒结构等^[20]。有研究^[21]表明, 秸秆还田可显著增加土壤微生物数量。因此, 本试验选择巢湖烔炀镇试验基地为研究对象, 通过监测油—稻轮作条件下秸秆还田对油菜季径流氮磷及 COD 流失情况, 研究农田径流氮磷及 COD 随地表径流的迁移特征及流失量, 以了解巢湖流域秸秆还田对水质的影响; 研究油菜不同生长期土壤微生物数量差异, 揭示土壤微生物数量与径流氮磷及 COD 含量的相关性, 为源头控制农业面源污染提供科学依据, 为秸秆还田技术的改进提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 年 11 月至 2018 年 5 月在安徽省巢湖市安徽农业大学实验基地(31°39'37"N, 117°41'37"E)进行。试验地属于北亚热带湿润季风气候区, 气候温和, 雨量充足, 光照充足, 年平均气温 15~16 °C, 年平均降水量 1 100 mm。土壤类型为水稻土, 耕层(0—20 cm)土壤 pH 6.03, 有机质含量 24.29 g/kg, 碱解氮含量 146.56 mg/kg, 速效磷含量 12.87 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置 4 个处理, 分别为: (1)CK, 无施肥+无秸秆; (2)F, 常规施肥; (3)SF, 秸秆还田+常规施肥; (4)SFR, 秸秆还田+常规施肥减 15%。每个处理 3 次重复。试验小区面积 30 m², 长 4 m, 宽 7.5 m。在田间布设长 2 m、宽 1 m、深 1.5 m 的径流池。常规施肥根据当地农民施肥习惯施肥, 复合肥(N、P₂O₅、K₂O 占比分别为 20—10—18)以 480 kg/hm²做基肥, 尿素(总氮≥46.4%)以 150 kg/hm²做追肥。油菜

(秦油 10 号)于 11 月中旬移栽, 次年 5 月中旬收获。秸秆还田方式为将上季作物秸秆人工切碎翻耕入土, 混匀。除草、病虫害防治等同当地常规管理。

1.3 样品采集与测试

每次降水产生径流后, 立即测量径流池水位, 计算径流量, 并采集地表径流水放入 500 mL 矿泉水瓶后立即放入冰箱冷冻。采用流动注射分析仪(AA3, 德国)测定径流水中总氮总磷浓度, 重铬酸钾法测定 COD 浓度。

土壤样品在油菜生长期每 2 个月(现蕾期、开花期和成熟期)按“S”形多点采样法混合新鲜根际土壤, 冷存于 4 °C 冰箱, 并采用平板计数法测定土壤微生物数量, 细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基; 真菌采用马丁氏培养基; 放线菌采用高氏 1 号培养基。

1.4 数据处理

降雨径流事件氮、磷及 COD 径流流失量的计算公式为:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n (C_i \times V_i)$$

式中: Q_i 为径流事件径流水样中总氮、总磷及 COD 流失量(kg/hm²); C_i 为第 i 次径流事件径流水样中氮、磷及 COD 质量浓度(mg/L); V_i 为第 i 次径流事件中小区径流量(L); n 为 1 个完整的监测期(油菜季)的径流事件总数。

运用 Microsoft Excel 2016 处理数据, SPSS 19.0 系统软件分析数据, Duncan 进行样本平均数的差异显著性比较, Origin 9 软件作图。图表数据均为 3 次重复的平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 不同处理对径流氮磷浓度的影响

从图 1 可以看出, 不同处理总氮浓度变化基本呈前期快速下降、后期波动下降状态, 受施肥和降雨影响出现峰值, CK(无施肥+无秸秆)处理油菜生长前期作物较小, 降雨侵蚀严重, 呈波动下降趋势。总氮浓度呈 F(常规施肥) > SF(秸秆还田+常规施肥) > SFR(常规施肥+常规施肥减 15%) > CK(无施肥+无秸秆), 各个处理径流水中总氮浓度均超过 GB 3837—2002《地表水环境质量标准》^[22]中总氮 V 类标准限制 2 mg/L。其中, F(常规施肥)处理总氮浓度较 CK(无施肥+无秸秆)处理平均增加 51.2%, 最高达到 8.42 mg/L; SF(秸秆还田+常规施肥)、SFR(常规施肥+常规施肥减 15%)处理较 F(常规施肥)处理总氮含量分别平均减少 9.8% 和 20.2%。由此可知, 秸秆还田处理较常规施肥处理显著降低总氮浓度, 秸秆还田配施减量化肥最为显著。

不同处理总磷浓度基本呈波动下降趋势, 但在 2

月 21 日达到峰值。总磷浓度基本呈 SF(秸秆还田+常规施肥)>SFR(常规施肥+常规施肥减 15%)>F(常规施肥)>CK(无施肥+无秸秆),各处理径流中总磷浓度远高于诱发水体富营养化的磷浓度阈值 0.02 mg/L, SF(秸秆还田+常规施肥)处理总磷浓

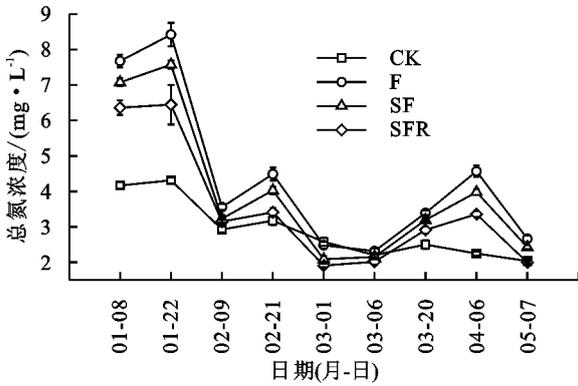


图 1 不同处理对农田径流总氮及总磷浓度的影响

2.2 不同处理对径流 COD 浓度的影响

从图 2 可以看出,不同处理 COD 浓度变化基本呈前期波动下降,后期波动稳定状态。COD 浓度呈 SF(秸秆还田+常规施肥)>SFR(常规施肥+常规施肥减 15%)>F(常规施肥)>CK(无施肥+无秸秆),各处理径流中 COD 浓度均超过 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》^[22]中 COD Ⅲ类标准限制 20 mg/L, 秸秆还田处理甚至达到Ⅳ类标准限制 30 mg/L。SF(秸秆还田+常规施肥)、SFR(常规施肥+常规施肥减 15%)处理较 F(常规施肥)处理相比, COD 浓度分别提高 24%和 19%。由此可知,增施化肥量和秸秆还田都会增加农田径流 COD 浓度。

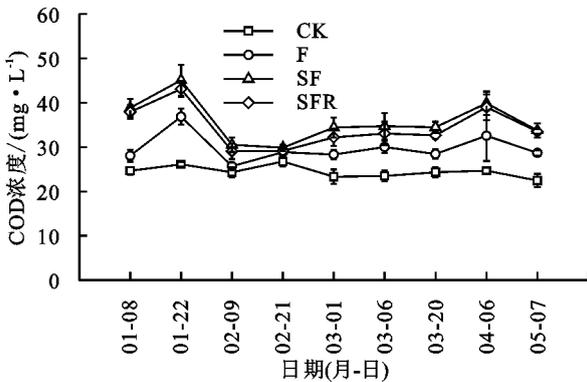
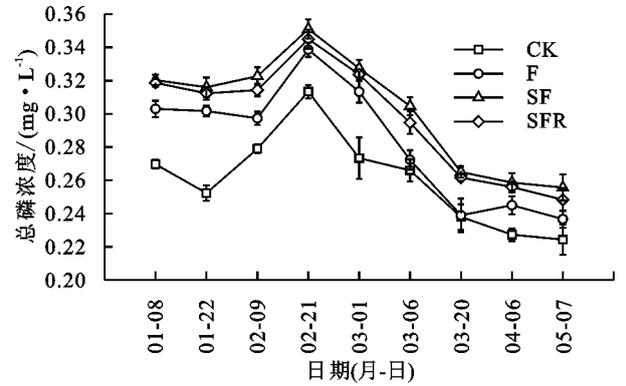


图 2 不同处理对农田径流 COD 浓度的影响

2.3 不同处理对农田径流氮磷及 COD 流失量的影响

从表 1 可以看出,秸秆还田处理显著降低总氮和总磷流失量,增加 COD 流失量。较 F(常规施肥)处理相比, SF(秸秆还田+常规施肥)、SFR(常规施肥+常规施肥减 15%)处理水体总氮流失量分别降低 16.9%~19.8%, 27.1%~29.3%, 总磷流失量分别降低 2.4%~4.0%, 4.0%~5.6%, COD 流失量分别增加 6.1%~10.0%, 2.8%~6.1%。不同处理之间达到

度最高达到 0.35 mg/L; SF(秸秆还田+常规施肥)、SFR(常规施肥+常规施肥减 15%)处理较 F(常规施肥)处理总磷平均浓度分别增加 6.7%和 4.9%。由此可知,秸秆还田处理和增施化肥均可以增加总磷浓度。



差异显著性水平。

表 1 不同处理对农田径流总氮、总磷及 COD 流失量影响 单位: kg/hm²

| 处理 | 总氮 | 总磷 | COD |
|-----|-------------|------------|--------------|
| CK | 13.36±0.27d | 1.16±0.02c | 109.22±2.25c |
| F | 20.49±0.15a | 1.26±0.00a | 132.09±0.64b |
| SF | 16.73±0.18b | 1.22±0.01b | 142.67±1.87a |
| SFR | 14.70±0.12c | 1.20±0.01b | 137.68±1.23a |

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

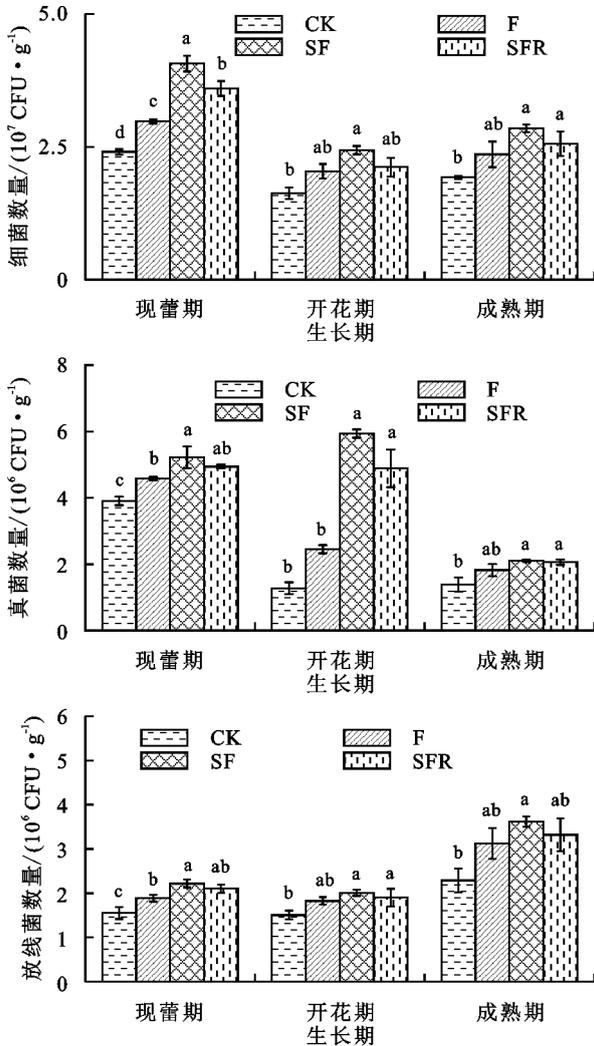
2.4 不同处理对微生物数量的影响

细菌、真菌和放线菌作为土壤微生物主要组成类群,是维持土壤资源持续性和生态系统功能的关键因素。由图 3 可知,细菌数量在油菜现蕾期最大,开花期和成熟期有所下降并趋于稳定;真菌数量呈现出无秸秆还田处理随生长期不断降低,而秸秆还田处理数量呈现出开花期>现蕾期>成熟期;放线菌数量随油菜生长期的推进不断增加。不同生长期的油菜根际土壤微生物数量均表现为 SF(秸秆还田+常规施肥)>SFR(常规施肥+常规施肥减 15%)>F(常规施肥)>CK(无施肥+无秸秆),在现蕾期差异显著。较 F(常规施肥)处理相比, SF(秸秆还田+常规施肥)、SFR(常规施肥+常规施肥减 15%)处理细菌数量平均分别增加 26.8%, 12.2%, 真菌数量平均分别增加 49.8%, 34.2%, 放线菌数量平均分别增加 14.5%, 7.0%。由此可知,增施化肥和秸秆还田处理均在一定程度上提高了土壤微生物数量,从影响程度来看,表现为真菌>细菌>放线菌。

2.5 土壤微生物数量与农田径流氮磷及 COD 含量的相关性

由表 2 可知,总磷、COD 含量与土壤微生物数量

呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 且相关性较强。总氮含量与土壤微生物数量相关性一般, 与细菌、放线菌数量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 相关性一般, 但与真菌数量相关性不显著。由此可知, 农田径流水氮磷及 COD 的含量受到土壤微生物数量的影响, 尤其是总磷和 COD 含量。



注: 图中不同小写字母表示同一生长期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同处理对农田土壤微生物数量的影响

表 2 土壤微生物数量与径流总氮、总磷及 COD 含量的 Pearson 相关系数

| 因子 | 细菌 | 真菌 | 放线菌 |
|-----|----------|----------|----------|
| 总氮 | 0.623 * | 0.405 | 0.587 * |
| 总磷 | 0.880 ** | 0.919 ** | 0.887 ** |
| COD | 0.888 ** | 0.968 ** | 0.943 ** |

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论

同其他学者^[2,12,17]研究一致, 本研究表明, 秸秆还田方式可以有效减少农田总氮浓度, 降低氮素流失风险。各处理总氮浓度随着油菜生长期的推进而波动下降, 总氮浓度均超过 GB 3838—2002《地表水环

境质量标准》^[22]中总氮 V 类标准限制 2 mg/L, 但秸秆还田处理总氮浓度低于无秸秆还田处理。这是因为秸秆在降解过程中, 因纤维素和木质素降解难易程度不同, 导致秸秆呈“疏松多孔”结构, 易于吸附部分营养元素^[11]; 秸秆还田有利于减少地表径流和侵蚀^[23-24], 增加土壤有机碳含量, 增强土壤吸附性能, 增强对土壤氮素的固定作用, 减少土壤中硝态氮的残留^[25]; 秸秆中氮素主要以稳定的有机形态存在, 短期内通过矿化作用转化为无机氮的量较少^[26]; 秸秆还田通过提高土壤微生物活性, 调节矿质氮的固持转化^[27], 将易流失的无机氮转化为相对稳定的有机氮, 从而降低农田氮素损失^[28]; 秸秆还田方式提高了作物产量和作物含氮量, 增加了作物携出氮量^[29]。

同其他研究^[2,12]一致, 本研究表明, 秸秆还田增加径流中总磷浓度, 不同处理径流水中总磷浓度均高于诱发水体富营养化的磷浓度阈值 0.02 mg/L^[30]。秸秆的添加补充土壤有机碳源, 降低黏质土壤对磷素的吸附力, 促进土壤微生物呼吸, 提高土壤磷素活性, 降低土壤对磷素的固定作用^[31]; 秸秆还田提高土壤温度^[32], 促进土壤酸化, 作物根系释放更多的分泌物^[29], 促进磷的溶解; 多施的氮肥占据了土壤胶体或铁、铝氧化物表面的吸附点位后, 土壤对磷的吸持能力下降, 磷素溶解于水, 增加总磷含量^[31]; 高强度降雨条件易增加颗粒态磷的流失^[29]; Zhao 等^[33]认为, 当磷浓度超过一定水平时, 磷的损失将增加; Wang 等^[12]研究认为, 秸秆还田对总磷流失量影响较小, 本研究表明, 秸秆还田方式减少了总磷流失量。这可能是由于虽然秸秆还田处理增加了径流水中总磷浓度, 但秸秆的添加, 减少了地表径流和农田泥沙流失, 由于降雨强度不同, 对水土流失影响不同, 使得径流流失量的差异影响了总磷流失量。

同时, 本研究表明, 不同处理农田径流中 COD 含量随着作物生长的推进基本呈前期波动下降、后期处于稳定波动状态。秸秆的添加增加了农田径流 COD 流失风险。这是因为随着微生物分解秸秆中纤维素、半纤维素等组分, 以及本身的新陈代谢、死亡等增加了 COD 含量, 同时, 随着微生物的繁殖, 降解秸秆中纤维素、半纤维素, 以及水溶液中 COD 含量, 在作物生长后期, COD 含量降低^[34]。

土壤微生物在土壤生态系统中扮演重要角色, 影响着土壤的形成发育、物质循环和作物的生长发育。本研究表明, 细菌数量在油菜现蕾期最多, 而后数量下降并趋于稳定, 这与李华兴等^[35]研究一致。这是由于在油菜生长发育旺盛期根系释放大量分泌物, 提

供了丰富的能源,在油菜现蕾期土壤中细菌大量繁殖;而在开花期和成熟期由于能量消耗殆尽、养分消耗、氧化还原环境急剧变化等因素综合作用,导致细菌数量有所减少^[36],真菌数量呈现出无秸秆还田处理数量随生长期的推进不断降低,而秸秆还田处理在油菜开花期数量达到最大,与温晓霞等^[37]的研究相似。真菌作为异养性微生物,有机物有利于真菌的繁殖。而放线菌呈现出不同处理随油菜生长期不断增加趋势。付学琴等^[36]认为,在作物生长旺盛阶段,根系分泌作用较强,由于细菌对根系分泌物的利用率和敏感性超过放线菌,放线菌具有相对劣势的微生物生态位,在作物生长后期,根系分泌物减少,细菌数量迅速减少,放线菌具有较强的竞争优势,放线菌数量增加。同赵亚丽等^[38]研究一致,本研究表明,在不同生长期内秸秆还田处理微生物数量均高于其他处理,尤其是在作物生长前中期,这是因为秸秆的添加增加了土壤有机物质能量,刺激土壤微生物的繁殖,另外秸秆还田本身带入一部分微生物,大幅度丰富了土壤微生物群体^[20]。

Pearson 相关性分析表明,土壤微生物数量与农田径流总氮、总磷及 COD 含量均存在不同程度的正相关性,且相关性较为显著。细菌是土壤微生物中最大的类群,个体小、代谢强、繁殖快,与土壤接触面积大,分解有机物质较为活跃。真菌参与有机物质的分解,对无机营养的吸收也有明显的影响,并能使残落物中的蛋白质形成可溶性氮素、氨基酸和铵盐等^[39]。放线菌主要参与后期有机物质的分解,对木质素的分解起着非常重要的作用^[40]。土壤微生物数量的提高增加了土壤中有有机态氮磷养分的分解和有机质的增加,因而径流中总氮、总磷及 COD 含量增加。

4 结论

(1)不同处理总氮浓度变化基本呈前期快速下降,后期波动下降状态,秸秆还田处理较常规施肥处理显著降低了总氮浓度,且秸秆还田配施减量化肥最为显著;不同处理总磷浓度基本呈波动下降趋势,秸秆还田处理和增施化肥均可以增加总磷浓度;不同处理 COD 浓度变化基本呈前期波动下降,后期浓度波动上升状态,增施化肥和秸秆还田都会增加农田径流 COD 浓度。

(2)较 F(常规施肥)处理相比,SF(秸秆还田+常规施肥)处理总氮流失量降低了 16.9%~19.8%,总磷流失量降低了 2.4%~4.0%,COD 流失量增加 6.1%~10.0%,SFR(常规施肥+常规施肥减 15%)处理总氮流失量降低了 27.1%~29.3%,总磷流失量降低 4.0%~5.6%,COD 流失量增加 2.8%~6.1%。

(3)增施化肥和秸秆还田处理均可在一定程度上提高土壤细菌、真菌和放线菌数量。土壤微生物数量与径流总氮、总磷及 COD 含量之间存在显著正相关性。

(4)综合不同处理对径流水氮磷及 COD 流失的影响来看,秸秆还田配施减量化肥是当地推荐的一种还田方式。

参考文献:

- [1] Yang L, Lei K, Wei M, et al. Temporal and spatial changes in nutrients and chlorophyll-a in a shallow lake, Lake Chaohu, China: An 11-year investigation[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(6): 1117-1123.
- [2] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 141: 66-73.
- [3] Feyereisen G W, Kleinman P J A, Folmar G J, et al. Effect of direct incorporation of poultry litter on phosphorus leaching from coastal plain soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 65(4): 243-251.
- [4] Kopacek J, Hejzlar J, Posch M. Factors controlling the export of nitrogen from agricultural land in a large central European catchment during 1900—2010[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(12): 6400-6407.
- [5] Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different-water and nitrogen managements[J]. *Paddy and Water Environment*, 2011, 9(3): 333-342.
- [6] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1-6.
- [7] Cherobim V F, Huang C H, Favaretto N. Tillage system and time post-liquid dairy manure: Effects on runoff, sediment and nutrients losses[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 96-103.
- [8] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Phosphorus loss from land to water: Integrating agricultural and environmental management[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 287-307.
- [9] Zhao M Q, Chen X, Shi Y, et al. Phosphorous loss potential of lowland rice soil in Liaohe River Plain of Northeast China under effects of phosphorous fertilization[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, 18(11A): 2146-2150.
- [10] Shan Y H, Yang L Z, Yan T M, et al. Downward movement of phosphorus in paddy soil installed in large-scale monolith lysimeters[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 111(1): 270-278.
- [11] 朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 等. 秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(11): 1626-1634.

- [12] Wang J, Lü G A, Guo X S, et al. Conservation tillage and optimized fertilization reduce winter runoff losses of nitrogen and phosphorus from farmland in the Chaohu Lake region, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1): 93-106.
- [13] Shan Y H, Cai Z C, Han Y, et al. Organic acid accumulation under flooded soil conditions in relation to the incorporation of wheat and rice straws with different C : N ratios[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 54(1): 46-56.
- [14] Hansen E M, Munkholm L J, Melander B, et al. Can non-inversion tillage and straw retainment reduce N leaching in cereal-based crop rotations? [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 109(1): 1-8.
- [15] Qiu S, McComb A, Bell R, et al. Leaf-litter application to a sandy soil modifies phosphorus leaching over the wet season of southwestern Australia[J]. *Hydrobiologia*, 2005, 545(1): 33-44.
- [16] 张丹, 付斌, 胡万里, 等. 稻秸还田提高水稻—油菜轮作土壤固氮能力及作物产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(9): 133-140.
- [17] Yang H S, Xu M M, Koide R T, et al. Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(4): 1141-1149.
- [18] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2012, 146(1): 103-112.
- [19] 郭智, 周炜, 陈留根, 等. 稻秸还田对稻麦两熟农田麦季养分径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 17-20, 25.
- [20] 尚志强, 徐刚, 许志强, 等. 稻秸还田对烤烟根际微生物种群数量的影响[J]. *内蒙古农业科技*, 2011(5): 63-66.
- [21] 钱海燕, 杨滨娟, 黄国勤, 等. 稻秸还田配施化肥及微生物菌剂对水田土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(3): 440-445.
- [22] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准(GB 3838—2002)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] Jordán A, Zavala L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain[J]. *Catena*, 2010, 81(1): 77-85.
- [24] Won C H, Yong H C, Min H S, et al. Effects of rice straw mats on runoff and sediment discharge in a laboratory rainfall simulation [J]. *Geoderma*, 2012, 189/190: 164-169.
- [25] 张宏威, 康凌云, 梁斌, 等. 长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 99-107.
- [26] 余坤, 冯浩, 赵英, 等. 氮化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 103-111.
- [27] Gentile R, Vanlauwe B, Chivenge P, et al. Trade-offs between the short- and long-term effects of residue quality on soil C and N dynamics[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2): 159-169.
- [28] Shan J, Yan X. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71(3): 170-175.
- [29] Ai L, Kohyama K. Estimating nitrogen and phosphorus losses from lowland paddy rice fields during cropping seasons and its application for life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 963-979.
- [30] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 1125-1135.
- [31] Hahn C, Prasuhn V, Stamm C, et al. Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2012, 153(10): 65-74.
- [32] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 稻秸还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 150-157.
- [33] Zhao X R, Zhong X Y, Bao H J, et al. Relating soil P concentrations at which P movement occurs to soil properties in Chinese agricultural soils[J]. *Geoderma*, 2007, 142(3): 237-244.
- [34] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 37-40.
- [35] 李华兴, 卢维盛, 刘远金, 等. 不同耕作方法对水稻生长和土壤生态的影响[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 553-556.
- [36] 付学琴, 刘琚珥, 黄文新. 不同生长期东乡野生稻根际土壤微生物数量及土壤酶活性研究[J]. *江西农业大学学报*, 2014, 36(6): 1191-1195.
- [37] 温晓霞, 殷瑞敬, 高茂盛, 等. 不同覆盖模式下旱作苹果园土壤酶活性和微生物数量时空动态研究[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(11): 82-88.
- [38] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与稻秸还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1785-1792.
- [39] 刘佳斌, 李传宝, 王宏燕. 稻秸还田不同处理方式对黑土微生物数量和土壤酶活性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(9): 5285-5287.
- [40] 许仁良, 王建峰, 张国良, 等. 稻秸、有机肥及氮肥配合使用对水稻土微生物和有机质含量的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(13): 3584-3590.