

不同猪粪施用量下红壤水稻土表层水氮磷动态^①

马晓焉^{1, 2}, 刘 明^{1, 2}, 李忠佩^{1, 2*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 土表水中养分含量变化不仅是土壤养分状况的直接反映, 也是土壤养分流失及其环境影响的间接测度。研究施肥条件下土表水中养分含量动态, 可为优化施肥管理措施提供科学参考。本研究通过布设 0~44.8 t/hm² 共 8 个猪粪施用量梯度的水稻盆栽试验, 通过定期采样监测, 试图探明不同猪粪施用量水平下红壤水稻土表层水氮磷含量动态。结果表明: 早稻季, 表层水总磷、总氮、铵态氮和有机氮的平均含量分别为 0.04~1.13、3.17~12.97、1.81~5.11 和 1.17~7.39 mg/L。晚稻季各养分平均含量水平升高, 分别为 0.13~7.98、3.17~25.57、1.21~10.41 和 1.87~15.35 mg/L, 其中磷的累积效应最明显, 较早稻季最大升高约 6 倍。各养分含量与猪粪施用量显著线性相关, 当猪粪施用量 ≥ 11.2 t/hm² 时, 表层水养分浓度显著升高并于施肥后第 4 天和第 14 天出现养分释放高峰。与单施化肥相比, 配施猪粪会使表层水养分形态以有机氮为主, 最高可占总养分的 66%, 同时养分大量释放期延长一周。连续大量施用产生的累积效应表明该施肥制度将导致土壤保肥能力趋于饱和, 养分流失风险激增, 实际生产中应考虑用量和频率的叠加效应。

关键词: 红壤水稻土; 猪粪; 施用量; 表层水; 氮磷含量

中图分类号: S153.6; X713

畜禽粪便常被作为有机肥还田以提高作物产量, 同时也是处理养殖粪污的主要途径。随着规模化畜禽养殖业的快速发展, 粪污产生量逐年增大^[1-2], 特别是南方红壤地区, 近年来耕地畜禽粪便施用量远高于全国平均水平, 且有持续增长之势^[2]。稻田作为该区重要的耕地类型之一, 是普遍的畜禽粪便消纳场所, 高强度的粪便投入很可能导致施用量超过土地的承载力^[3-4], 对稻田土壤理化性质产生显著影响^[5-6]。

稻田特殊的淹水环境使其表层水养分含量与土壤养分状况紧密相关。土壤肥力、质地等内在因素^[7], 降雨等环境因素^[8], 以及施肥、耕作等人为活动^[8]都会影响表层水养分浓度, 其中施肥会在短期内显著改变稻田表层水养分动态^[9]。以往针对此问题的研究多集中于施用化肥条件下^[10-14], 因化肥多为速效养分, 氮、磷溶出较快, 一般认为表层水养分浓度于施肥后急剧上升, 之后快速降低, 约一周左右降至稳定^[12-14]。而畜禽粪便类有机肥料养分组成复杂, 形态多样, 除了速效氮、磷外, 还含有大量较稳定有机养分^[15], 施用后的释放动态应有别于化肥处理。虽然土壤对养分投入有一定缓冲性^[16], 但在施用量达一定水平时, 表层水养分含量可能会激增^[10], 甚至造成流失引发

富营养化等环境问题^[17], 而以往研究并未明确表层水养分动态与粪肥有机肥用量的关系。表层水养分主要来自土壤中的可溶养分, 以及具有生物有效性的颗粒养分^[7], 其浓度可间接反映土壤养分的有效性。因此, 在粪污还田量持续增加的背景下, 探明不同畜禽粪便施用量水平下红壤水稻土表层水的养分动态, 将为规模养殖厂畜禽粪便的科学管理及合理施用提供依据。为此, 本研究设置 8 个猪粪施用量水平的双季稻盆栽试验, 通过定期监测红壤水稻土表层水氮、磷养分含量, 明确施用量与表层水养分含量变化的关系。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽土壤取自江西省鹰潭市余江县刘家站垦殖三分场。该地区为典型的亚热带季风气候, 年均温 17.6℃, 年均降水量 1 789 mm, 无霜期 258 天, 水田面积占耕地的 87.5%, 规模养猪场超过 400 家, 猪粪年产量 2.95×10^5 t^[18]。土壤发育于第四纪红黏土母质(表 1), 壤土, 砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 404.8、414.8 和 180.4 g/kg。猪粪取自当地典型规模(2 000 头)

①基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203050-3)和国家自然科学基金项目(41171233)资助。

* 通讯作者(zhpli@issas.ac.cn)

作者简介: 马晓焉(1988—), 男, 山东济南人, 博士研究生, 主要从事土壤微生物与有机质转化等方面的研究。E-mail: xyma@issas.ac.cn

表 1 盆栽试验土壤化学性质
Table 1 The chemical properties of soil used in pot experiment

土壤	pH	有机碳 (g/kg)	总 N (g/kg)	总 P (g/kg)	总 K (g/kg)	速效 N (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
水稻土	5.01	20.23	1.96	0.58	6.93	142.98	27.25	62.50

的集约化养猪场,该猪场的饲料主要为玉米、麦麸和豆粕,猪粪添加适量秸秆后经过约一个月的自然堆置并风干,所用猪粪含氮 20.42 g/kg,磷 21.46 g/kg,钾 8.66 g/kg。

1.2 试验设计

盆栽试验设置在余江县中国科学院红壤生态实验站温室内,每盆装有风干过筛(4 mm)土壤 10 kg,两季水稻分别种植于 2013 年 4 月和 8 月。化肥用量参照当地常规施肥量:1.45 g 尿素,2.78 g 钙镁磷肥和 1.11 g 氯化钾,相当于施氮 150 kg/hm²,磷 33 kg/hm²,钾 124 kg/hm²。参考当地有机肥施用量和养猪粪污的排放现状^[1-2],设置 8 个猪粪用量梯度,折算为猪粪干重约 0、0.7、1.4、2.8、5.6、11.2、22.4 和 44.8 t/hm²(对应编号分别为 CK、M1~M7),其中最高施用量接近南方亚热带地区最高粪肥耕地承载量(45 t/hm²)^[1],两季水稻施肥量相同。猪粪经研磨后与化肥一同拌入土中,不添加猪粪处理作为对照,每个处理 3 个重复,共 27 盆。施肥后立即灌水插秧,每日补水使水面高度维持在 5 cm。

1.3 表层水样采集及分析

于施肥后第 1、4、7、14、28 天通过 5 点取样法采集表层水共 50 ml,取样时尽量避免吸入表层土等杂质。水样采集后立即进行全磷(TP)、全氮(TN)、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的测定。TP 和 TN 分别采用硫酸-高氯酸氧化-钼蓝比色法和开氏法测定^[19],NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 利用 BRAN+LUEBBE AA3 型流动分析仪测定。总有机氮(TON)通过 TN 与 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的

差值计算得出。

1.4 数据分析

单因素方差分析及相关分析利用 SPSS 21.0 完成。主响应曲线(PRC)可综合反映多元数据随时间的变化规律,直观呈现出处理与对照在各时间点的差异,并能反映驱动该差异的主导因子^[20]。本研究将各处理在 5 个时期的 TP、TON、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 作为变量进行 PRC 分析,该分析通过 R3.0.0 中的 vegan 包完成。

2 结果与分析

2.1 表层水 TP 含量变化动态

早稻季,表层水 5 个取样时期的平均 TP 含量与猪粪施用量线性相关($R^2=0.994$, $P<0.001$),变化范围 0.04~1.13 mg/L,施用量 ≥ 11.2 t/hm²的处理(M5~M7)表层水平均 TP 含量较 CK 显著升高约 7~27 倍(图 1A,图 2A)。取样期内,M5~M7 处理表层水 TP 在施用后第 1 天就可达 0.6~2.2 mg/L,显著高于 CK ($P<0.05$)之后浓度降低,并于第 14 天明显回升,此时 M6 和 M7 处理表层水 TP 含量仍然显著高于 CK ($P<0.05$)。最大施肥量处理 M7 在各取样期 TP 浓度均高于其他处理($P<0.05$)。

晚稻季,表层水 5 个取样时期平均 TP 含量与猪粪施用量同样线性相关($R^2=0.968$, $P<0.001$)。与早稻季的线性模型相比,分段模型的拟合结果更符合晚稻季各处理平均 TP 含量与猪粪施用量的关系(图 2),两直线交点对应的施用量为 10.6 t/hm²,超过该用量后,

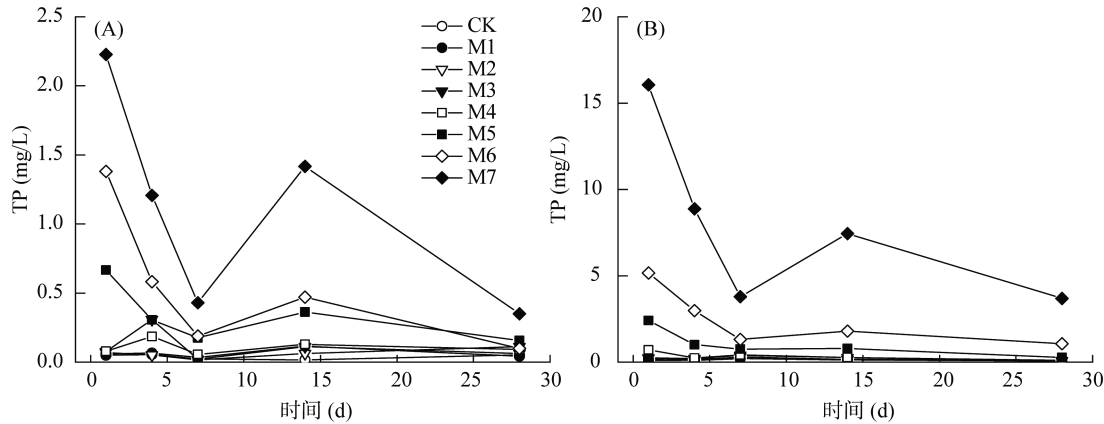


图 1 早(A)晚(B)稻季表层水 TP 含量变化动态
Fig. 1 Dynamics of TP in surface water in early (A) and late (B) rice seasons

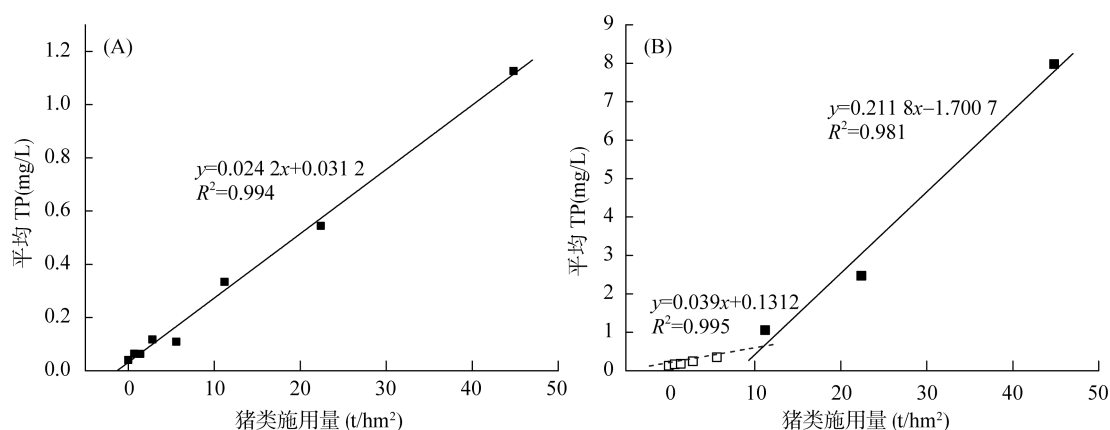


图 2 早(A)晚(B)稻季各处理表层水 5 个时期平均 TP 含量与猪粪施用量关系

Fig. 2 Relationships between the average TP of 5 sampling times in surface water for each treatment and the swine manure application rate in early (A) and late (B) rice seasons

表层水 TP 含量增长率提高近 4.5 倍。各处理表层水 TP 浓度变化范围 0.13 ~ 7.98 mg/L, 较早稻季大幅上升, 最大升高约 6 倍。M5 ~ M7 处理表层水 TP 含量较 CK 显著升高约 7 ~ 62 倍。晚稻季 TP 的时间动态与早稻季相似(图 1B)。

2.2 表层水 TN 含量变化动态

早稻季, 表层水 5 个取样时期的平均 TN 含量与猪粪施用量线性相关($R^2=0.947$, $P<0.001$), 变化范围 3.17 ~ 12.97 mg/L, M5 ~ M7 处理平均 TN 含量较 CK 显著升高约 1 ~ 3 倍。表层水 TN 释放动态总体呈现先上升后降低趋势(图 3A), 第 4 天达峰值, 浓度与施肥量呈正相关。除第 28 天外, M5 ~ M7 处理各时期表层水 TN 含量高于 CK($P<0.05$), 特别是最大施肥量处理 M7, 在第 4 和 14 天分别是 CK 的 4 和 5 倍, 且高于 M6 处理约 90%。各处理 5 个时期平均氮磷比(N/P)变化范围 16 ~ 116, N/P 与猪粪施用量呈负相关($R^2=-0.79$, $P=0.02$), 施肥后第 7 天出现 N/P 高峰, 施用量 ≥ 5.6 t/hm² 的处理(M4 ~ M7)表层水平均

N/P 显著低于 CK(图 4A)。

晚稻季, 表层水平均 TN 含量与猪粪施用量同样呈线性关系($R^2=0.980$, $P<0.001$), 变化范围 3.17 ~ 25.57 mg/L, 较早稻季最大升高约 1 倍, M5 ~ M7 处理平均 TN 含量较 CK 显著升高约 2 ~ 7 倍。除最高施用量 M7 处理外, TN 动态同样呈现先上升后下降趋势(图 3B), M5 ~ M7 处理在各取样期 TN 浓度均高于 CK($P<0.05$)。M7 处理在第 14 天出现明显峰值, TN 浓度是 CK 的 10 倍。晚稻季各处理 5 个时期平均 N/P 变化范围 4 ~ 25, 约是早稻季的 1/4, 同样与猪粪施用量呈负相关($R^2=-0.911$, $P=0.002$), M5 ~ M7 处理在第 4 ~ 28 天的 N/P 显著低于 CK(图 4B)。

2.3 表层水 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量变化动态

早稻季, 表层水 5 个取样时期的平均 NH₄⁺-N 含量与猪粪施用量线性相关($R^2=0.936$, $P<0.001$), 变化范围 1.81 ~ 5.11 mg/L, M5 ~ M7 处理平均 NH₄⁺-N 含量较 CK 显著升高约 0.5 ~ 2 倍。表层水 NH₄⁺-N 含量大致呈现先升高后降低趋势(图 5A), 处理 CK ~ M5

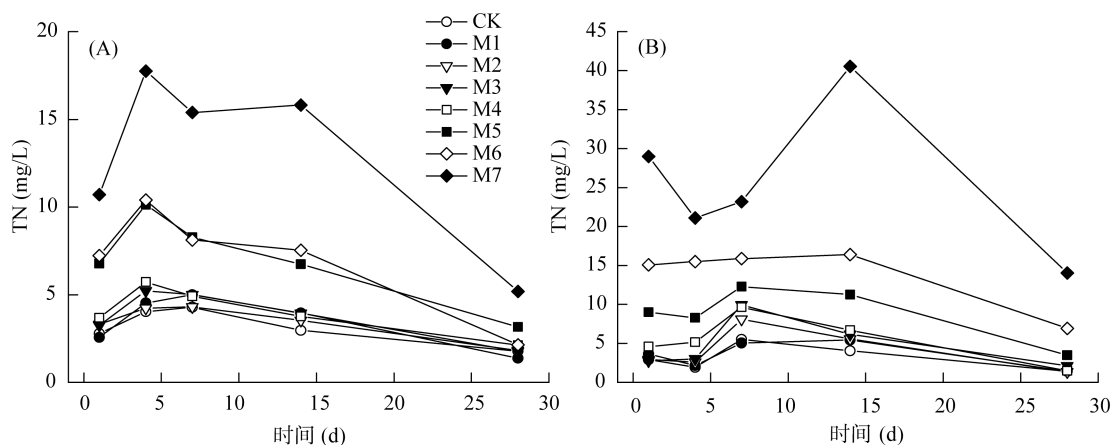


图 3 早(A)晚(B)稻季表层水 TN 含量变化动态

Fig. 3 Dynamics of TN in surface water in early (A) and late (B) rice seasons

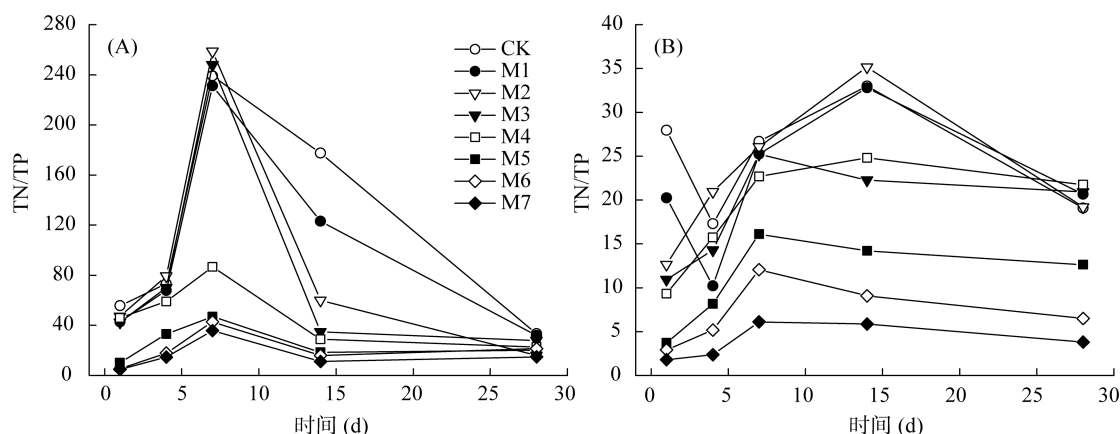
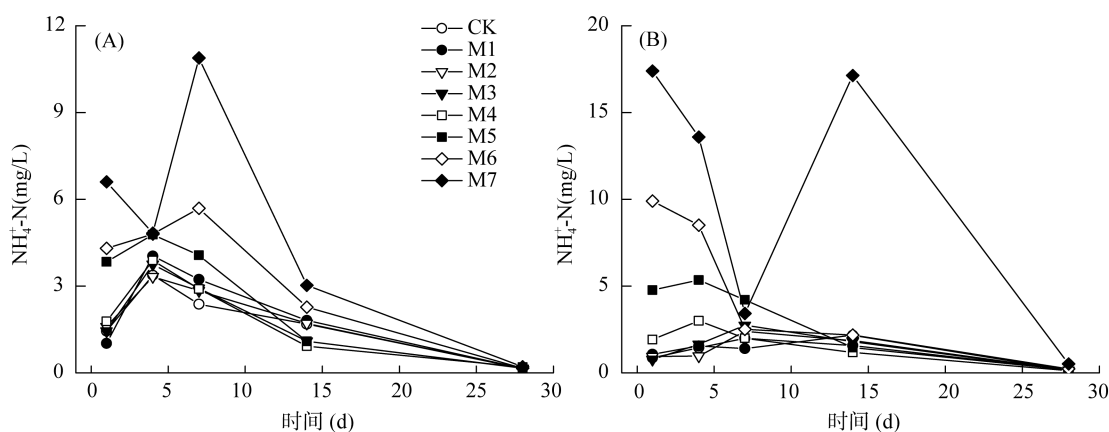


图 4 早(A)晚(B)稻季表层水 TN 与 TP 含量比值的变化动态

Fig. 4 Dynamics of TN to TP ratios in surface water in early (A) and late (B) rice seasons

图 5 早(A)晚(B)稻季表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量变化动态Fig. 5 Dynamics of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in surface water in early (A) and late (B) rice seasons

于第 4 天出现峰值,其余在第 7 天出现峰值。第 1 天时, M5 ~ M7 处理导致表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于 CK 及其他处理($P<0.05$),第 7 和 14 天时, M6 和 M7 处理高于 CK($P<0.05$)。

晚稻季,表层水平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与猪粪施用量同样呈线性相关($R^2=0.983$, $P<0.001$),变化范围 1.21 ~ 10.41 mg/L,最大超过早稻季近 1 倍, M5 ~ M7 处理平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较 CK 显著升高约 2 ~ 8 倍。表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 动态较早稻季有所不同(图 5B), M6 和 M7 处理在第 1 ~ 7 天 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度大幅降低,其他处理在此期间出现峰值,且最大施肥量 M7 处理下,表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度于第 14 天急剧回升,是 CK 的 11 倍。施肥初期(第 1 ~ 4 天), M5 ~ M7 处理表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高于 CK($P<0.05$)。相比 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,两季盆栽表层水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量极低,最大值均低于 0.4 mg/L,早晚稻季峰值均出现于第 4 天,其他时期浓度趋近于 0 mg/L。

2.4 表层水 TON 含量变化动态

早稻季,表层水 5 个取样时期的平均 TON 含量

与猪粪施用量线性相关($R^2=0.935$, $P<0.001$),变化范围 1.17 ~ 7.39 mg/L, M5 ~ M7 处理平均 TON 含量较 CK 显著升高约 2 ~ 5 倍,且其表层水 TON 含量分别于第 4 天和 14 天出现两个高峰(图 6A)。除第 28 天外, M5 ~ M7 处理表层水 TON 含量于各时期超出 CK 及其他处理($P<0.05$),其中最高施肥量 M7 处理效应尤为显著,TON 在两个释放高峰期浓度分别是 CK 的 34 倍和 12 倍。5 个取样时期 TON 占 TN 的比例(TON/TN)平均变化范围为 43% ~ 62%,施用量 $\geq 2.8 \text{ t/hm}^2$ 的处理(M3 ~ M7)TON 占 TN 的 50%以上。与 TON 的变化动态相比,该比值自施肥后第 14 天起持续上升(图 7A)。第 4 天 TON 释放高峰期, M4 ~ M7 处理 TON/TN 显著高于 CK,第 14 天的高峰期 M3 ~ M7 处理 TON/TN 显著高于 CK。

晚稻季,表层水平均 TON 含量与猪粪施用量同样呈线性相关($R^2=0.950$, $P<0.001$),变化范围 1.87 ~ 15.35 mg/L,较早稻季最大升高约 1 倍, M5 ~ M7 处理平均 TON 含量较 CK 显著升高约 2 ~ 7 倍。表层水 TON 动态有所不同(图 6B), M5 ~ M7 处理只在第 14

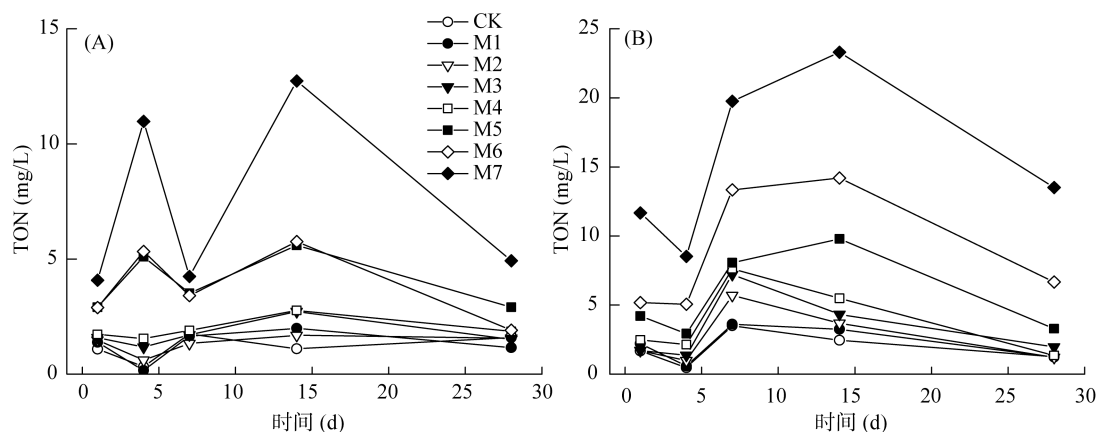


图6 早(A)晚(B)稻季表层水 TON 含量的变化动态
Fig. 6 Dynamics of TON in surface water in early (A) and late (B) rice seasons

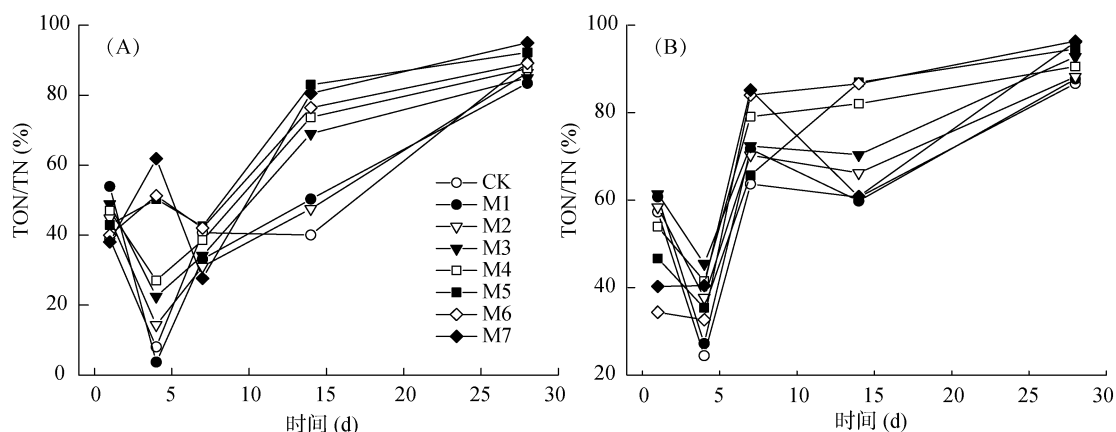


图7 早(A)晚(B)稻季表层水 TON 与 TN 含量比值的变化动态
Fig. 7 Dynamics of TON to TN ratios in surface water in early (A) and late (B) rice seasons

天出现一个高峰,显著高于CK,其他于第7天出现峰值。晚稻季,各处理5个取样时期 TON/TN 的平均值升高,变化范围 59%~69%,总体呈现先下降后上升趋势(图 7B)。在第 14 天的 TON 释放高峰期, M4~M6 处理 TON/TN 显著高于 CK,而最高施肥量处理 M7 因 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的急剧升高, TON/TN 下降。

2.5 表层水养分含量变化动态的 PRC 分析

本研究包含两个水稻种植季,处理数量多,测定了多种养分指标在多个时期的含量,且不同养分随时间的动态变化各异,因此不易综合判断不同施用量处理下,表层水养分随取样时间的动态变化差异。而 PRC 分析具备了冗余分析的降维功能,特别适用于反映各处理随时间的综合变化规律。纵轴为 0 的实线代表 CK,其他折线反映了粪肥处理相对 CK 在各个时期的变化。右侧纵轴反映了各因子的得分,当因子与曲线位于对照实线同侧时,分值越高表明该因子对变化动态的贡献越大,得分接近 0 则表明该因子与曲线的变化不相关。本试验早稻季(图 8A), M5~M7 处理表层水养分动态明显有别于 CK,主要体现在施

肥后第 4 天和第 14 天,最高施用量 M7 处理响应尤为强烈。晚稻季(图 8B),表层水养分含量与猪粪施用量表现出更为直观的正相关性,最高施用量 M7 处理响应最为突出,在第 14 天出现养分释放峰值,其他处理表层水养分动态变化较平稳。两季水稻期, TON 都是猪粪处理表层水养分的主要形态,但晚稻季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 对表层水养分动态的贡献升高。

3 讨论

早晚稻季高施肥量处理显著提高了表层水 TP 含量,特别是施肥后第 1 天,猪粪中的易溶性磷大量释放,导致 TP 浓度显著升高^[21],然而,土壤对磷的强烈吸附使表层水 TP 浓度逐渐下降。之后,土壤吸附能力逐渐饱和,而猪粪中不断释放的易溶性磷及不溶性有机磷的矿化导致表层水 TP 浓度于第 14 天出现第二个高峰,该效应在最高施肥量处理中最为明显,其峰值出现时间与此前研究结果类似^[22]。之后,因水稻吸收及猪粪中易溶性磷的耗竭,TP 浓度再次降低。由于土壤磷的损失途径少,移动性差,与 TN

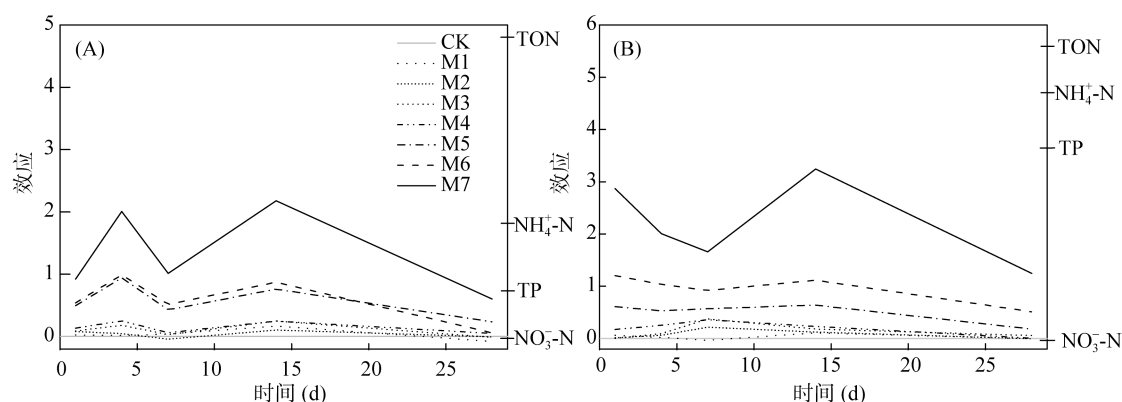


图 8 早(A)晚(B)稻季表层水养分含量变化动态的 PRC 分析

Fig. 8 PRC analysis of the dynamics of nutrients in surface water in early (A) and late (B) rice seasons

相比,晚稻季表层水 TP 表现出更强烈的累积效应,直接导致了晚稻季 N/P 的大幅降低。表层水 P 含量激增时对应的施磷量为 227 kg/hm^2 ,远低于能够引起表层水 TP 含量激增的化肥磷用量($400 \sim 800 \text{ kg/hm}^2$)^[10]。因此,与单施化肥相比,连续配施高量猪粪可能更易导致稻田土壤 TP 的有效性大增,产生潜在环境风险。

早稻季初期,表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的升高除了来自猪粪及土壤本身的 NH_4^+ 释放,还源于猪粪中有机氮的不断矿化。最高施肥量处理第 4 ~ 7 天表层水 TON 的大量分解导致了该时间段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的大幅升高。晚稻季,施用量 22.4 和 44.8 t/hm^2 的处理表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在第 1 ~ 4 天降低可能是因早稻季高量施肥处理显著提高了土壤 pH($0.5 \sim 1.1$),加之晚稻季正值高温期,再次施入大量猪粪($\text{pH}=7.4$)导致高浓度的 NH_4^+ 快速转化为氨气挥发^[23]。最高施肥量下表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度自第 7 天的上升可能是此时 NH_4^+ 浓度较低,加之 pH 因前期 NH_4^+ 损失导致的 H^+ 积累再次降低,氨挥发作用减弱,而堆肥猪粪中稳定性有机氮大量矿化产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 超过了挥发损失及作物吸收^[24]。该时段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的持续累积也导致了同时期 TON/TN 的降低。相比于有机肥,单施化肥氮后表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度一般呈持续下降趋势^[13],这可能是因化肥氮形态单一,极易分解造成的。因水稻是喜铵作物,早晚季取样中后期表层水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的降低还可归因于水稻返青后对 NH_4^+ 的大量吸收。本研究中硝化作用效果不明显, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量低于施用尿素后同时期表层水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度^[13]。

高施肥量下,表层水 TON 含量在早稻季出现两个高峰。其中第 4 天的增长很可能是大量猪粪在短期内集中释放的易溶性氮超过了微生物的分解能力,导致暂时累积,而第 14 天的峰值可能是大分子较稳定有机氮逐渐分解为可溶性小分子有机氮的结果^[15-24]。相比之下,低施肥量处理表层水 TON 在前 4 天小幅

下降,之后升高,这可能是因为低量肥料释放的速效有机氮含量有限,大部分被微生物迅速分解。后期的上升则同样由于占主导的不溶性有机氮持续分解为可溶性有机氮。晚稻季第 1 ~ 4 天表层水 TON 含量持续下降,这可能是因为早稻季后,各处理土壤微生物量显著上升(数据未列出),当再次投入养分后,大量的土壤微生物迅速利用前期释放的易溶性氮,导致 TON 含量不升反降。此后 TON 含量的持续上升可能是表层水中易被微生物利用的有机氮消耗,而生物有效性较低的有机氮逐步积累造成的。

与单施化肥相比,配施猪粪引起的水稻土表层水养分动态有着明显不同。首先,施用尿素后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是表层水养分的主要形态^[25-26],释放高峰期甚至能占 TN 的 90% 以上^[13-14],而施用猪粪施后有机氮成为首要形态。该特点在早稻季尤为明显,晚稻季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量虽有提升,但整个取样期内,施用猪粪后表层水 TON 含量仍显著高于单施化肥处理。这主要是因猪粪中氮素以有机态为主,且种类复杂,生物有效性各异^[15-24],导致释放转化强度高,持续时间长造成的。其次,高施肥量下土壤养分的释放不只集中在前 7 天^[12-14],而是延续至半个月左右,这可能是猪粪中大量无机养分溶出和各类有机养分持续矿化的综合效果。本研究观察到的养分释放时期长于此田间条件下施用猪粪得到的结果^[3],这可能是因田间条件下,表层水养分浓度受降雨、养分下渗及侧渗等各类因素的影响迅速下降,而盆栽试验中养分损失途径较少,只有氮能以气态形式挥发。虽然本试验设置的施肥量梯度没有超出南方地区畜禽粪便耕地最高负荷^[1],但施用量 $\geq 11.2 \text{ t/hm}^2$ 时引起的土壤氮磷养分的显著释放应作为制定合理施肥量的参考,据此参照,我国南方地区的耕地粪便施用量($15 \sim 45 \text{ t/hm}^2$)^[1]普遍过高,很可能造成施肥后养分的大量溶出,加大损失风险。最后,连续大量施用猪粪产生的累积效应暗示该施肥

制度将导致土壤保肥能力趋于饱和。虽然本研究中 $<11.2\text{ t/hm}^2$ 的施肥量没有产生显著的累积效应,但长期效应未必如此,尤其是较易累积的磷元素。因此,科学的畜禽粪便施用方法除考虑土壤肥力背景及作物氮素需求外,还应将粪肥磷素投入控制在作物需求范围内。

4 结论

1) 有机氮是施用猪粪条件下水稻土表层水的主要养分形态,短期猪粪施用量 $\geq 11.2\text{ t/hm}^2$ 会造成表层水氮磷含量的显著升高,甚至导致表层水磷含量的激增。

2) 与单施化肥相比,配施高量猪粪造成的土壤养分大量释放期可持续半个月,其中前4天和14天左右是养分释放高峰期。

3) 表层水养分含量随种植季的累积表明生产中应考虑猪粪用量和频率的叠加效应,避免连续高量施用。

参考文献:

- [1] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 马林, 刘小利, 许俊香, 张福锁. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614–617
- [2] 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2766–2774
- [3] 刘天晶, 包旭华, 汪斯洁, 周吉, 王波, 卞新民. 稻田持续处理规模化养殖场废弃物能力及安全性研究[J]. 江西农业学报, 2008, 20(9): 126–130, 133
- [4] 张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 843–850
- [5] 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 余喜初, 叶会财, 徐小林, 胡惠文, 王赛莲. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 303–313
- [6] Maillard E, Angers DA. Animal manure application and soil organic carbon stocks: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2014, 20(2): 666–679
- [7] Sharpley AN, Chapra S, Wedepohl R, Sims J, Daniel TC, Reddy K. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(3): 437–451
- [8] Wang K, Zhang Z, Zhu Y, Wang G, Shi D, Christie P. Surface water phosphorus dynamics in rice fields receiving fertiliser and manure phosphorus[J]. Chemosphere, 2001, 42(2): 209–214
- [9] 朱利群, 田一丹, 李慧, 卞新民. 不同农艺措施条件下稻田田面水总氮动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(06): 85–89
- [10] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 史奕, 陈欣. 施磷对稻田土壤及田面水磷浓度影响的模拟[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1845–1848
- [11] 赵建宁, 沈其荣, 冉炜. 太湖地区侧渗水稻土连续施磷处理下稻田磷的径流损失[J]. 农村生态环境, 2005, 21(3): 29–33
- [12] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 陈长青, 卞新民. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 21–25
- [13] 金洁, 杨京平, 施洪鑫, 陈俊, 郑洪福. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 357–361
- [14] 张志剑, 董亮, 朱荫湄. 水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4): 475–480
- [15] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 关连珠. 不同畜禽粪便堆肥过程中有机氮形态的动态变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 930–936
- [16] Van Rees KCJ, Comerford NB, Rao PSC. Defining soil buffer power: implications for ion diffusion and nutrient uptake modeling[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(5): 1505–1507
- [17] Harmel RD, Smith DR, Haney RL, Dozier M. Nitrogen and phosphorus runoff from cropland and pasture fields fertilized with poultry litter[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 64(6): 400–412
- [18] 周志高, 李忠佩, 何园球, 王兴祥. 红壤丘陵区生猪规模化养殖及其对土壤与水环境的影响——以江西省余江县为例[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 703–711
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [20] Van Den Brink PJ, Braak CJFT. Principal response curves: Analysis of time-dependent multivariate responses of biological community to stress[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, 18(2): 138–148
- [21] 罗春燕, 冀宏杰, 张维理, 徐爱国. 鸭粪和猪粪中易溶性磷含量特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1320–1325
- [22] 孙瑞娟, 王德建, 林静慧, 杨林章. 有机肥施用对水田土壤溶液氮磷动态变化及环境的潜在影响[J]. 土壤, 2009, 41(6): 907–911
- [23] 曹凑贵, 李成芳, 寇志奎, 杨金花, 汪金平. 不同类型氮肥和耕作方式对稻田土壤氮挥发的影响[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(5): 881–886
- [24] Paré T, Diné H, Schnitzer M, Dumontet S. Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 26(3): 173–178
- [25] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 薛峰, 杨林章. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 743–749
- [26] 纪雄辉, 郑圣先, 刘强, 廖育林, 吴家梅, 鲁艳红. 施用猪粪和化肥对稻田土壤表面水氮磷动态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 29–35

Dynamics of N and P in Surface Water of Paddy Soil in Subtropical China Under Different Rates of Swine Manure Application

MA Xiao-yan^{1,2}, LIU Ming^{1,2}, LI Zhong-pei^{1,2*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, China)

Abstract: The nutrient content in soil surface water indicate the nutrient levels in soil and could be used to estimate nutrient loss and its environmental effects. Study of the nutrient dynamics in soil surface water under fertilization provides fundamental information for optimizing fertilization practices. In order to investigate the responses of N and P in surface water of paddy soils to different rates of swine manure application, a pot experiment was conducted by using double-rice amended with eight rates of swine manure from 0–44.8 t/hm², and nutrient contents were measured periodically. Results showed that the average contents of total P, total N, ammonium N and organic N in surface water in early rice season ranged from 0.04–1.13, 3.17–12.97, 1.81–5.11 and 1.17–7.39 mg/L, respectively. The contents increased in late rice season and ranged from 0.13–7.98, 3.17–25.57, 1.21–10.41 and 1.87–15.35 mg/L, respectively, in which total P was prone to accumulate with a maximum increase of 6 folds compared to the early rice season. The nutrient content correlated linearly ($P < 0.001$) with the application rate, and increased significantly when the application rate reached 11.2 t/hm². The nutrient content reached its peak in the first 4 d and 14 d after manure application. Compared with chemical fertilizer, the amendment of swine manure resulted in the domination of organic nitrogen, which can account for 66% of the total nutrient in surface water, and extended the intensive nutrient releasing period for one week. The accumulation effect suggests that consecutive application of swine manure at high rate could result in the saturation of the nutrient preserving capacity of soil, thus increasing the risk of nutrient loss. Therefore, attention should be paid to the combined effects of both application rate and frequency.

Key words: Paddy soil; Swine manure; Application rate; Surface water; N and P contents