

保护性耕作与氮肥后移对巢湖流域麦田磷素流失的影响

王 静^{1,2}, 郭熙盛^{1,2}, 王允青^{1,2}, 丁树文³

(1.安徽省农科院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2.安徽养分循环与资源环境省级实验室, 合肥 230031; 3.华中农业大学农业部亚热带农业资源与环境重点实验室, 武汉 430070)

摘 要:农田磷素随地表径流向水体迁移可导致磷肥利用率降低、生产成本上升和环境污染风险增加,源头控制农田磷素流失对于治理巢湖水体富营养化具有重要意义。采用野外定位观测结合室内分析的研究方法,对 2009—2010 年冬小麦生长期间的径流、泥沙和磷素进行了监测与测定分析,研究了保护性耕作和氮肥后移对巢湖流域麦田 P 素径流损失及其对环境的影响。结果表明,相对于传统耕作处理(T),传统耕作+秸秆还田处理(TS)、氮肥后移处理(NFP)和少免耕+秸秆还田+氮肥后移(NTS+NFP)径流量分别减少了 20%、10%和 22%,泥沙量分别减少了 30%、14%和 38%,表现出显著的水土保持作用。各处理径流液总磷(TP)浓度范围是 0.095~0.360 mg·L⁻¹,其中,颗粒态磷(PP)是磷素随地表径流迁移的主要形式,约占 TP 的 51%~69%。长期的保护性耕作提高径流液中溶解态磷(DP)的浓度,降低了 PP 的浓度,但 TP 浓度难以看出明显的变化规律,而氮肥后移降低了径流液中各形态磷的浓度。各处理 TP 流失量在 0.060~0.079 kg·hm⁻² 之间,约占当季施磷量的 0.2%。处理 TS、NFP 和 NTS+NFP 与处理 T 相比,TP 流失量分别减少了 20%、21%和 24%。作物生长情况显著影响土壤磷素的流失,地上部分生物量、地上部分吸磷量与径流 TP 的迁移量呈负相关关系。因此保护性耕作和氮肥后移可以作为源头控制农田磷素流失的较好措施加以推广。

关键词:保护性耕作;氮肥后移;磷素;径流;农业面源污染

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)06-1152-08

Effects of Conservation Tillage and Postponing N Application on Phosphorous Loss from Wheat Field in Chaohu Lake Region, China

WANG Jing^{1,2}, GUO Xi-sheng^{1,2}, WANG Yun-qing^{1,2}, DING Shu-wen³

(1. Institute of Soil & Fertilizer, Anhui Academy of Agriculture Sciences, Hefei 230031, China; 2. Provincial Key Lab of Nutrient Cycling, Resources & Environment, Hefei 230031, China; 3. Key Laboratory of Subtropical Agriculture and Environment, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The phosphorous loss via runoff from farmland to waters not only leads to the decline of the P fertilizer use efficiency, but also results in the increasing of farming cost, and the environmental pollution risk. Source control of the P loss from farmland plays an important role in remediation of the eutrophication of Chaohu Lake. The field experiments were carried out from 2009 to 2010 in Chaohu Lake region in order to evaluate the effects of conservation tillage and postponing N application on phosphorous loss via runoff from winter-wheat field and its potential environmental impact. The results showed that, compared with conventional tillage (T), the runoff from the treatments of conventional tillage+ straw returning (TS), the N fertilization postponed (NFP) and the non-tillage straw returning+N fertilization postponed (NTS+NFP) decreased by 20%, 10% and 22%, as well as the sediment by 30%, 14% and 38% respectively, which implied that conservation tillage and postponing N application had significant effects on soil and water conservation. The concentration of total phosphorous (TP) in

收稿日期: 2010-12-19

基金项目: 国家科技支撑计划项目“沿巢湖地区农田养分流失减控与面源污染防控技术集成与示范”(2007BAD87B06); 安徽省科技攻关计划项目(08010302160)

作者简介: 王 静(1982—), 女, 安徽萧县人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为土壤肥料与农业生态环境。E-mail: wangjing0553@sina.com

runoff was in range of $0.095\sim 0.360\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, in which the particulate phosphorous (PP), as the main form of P loss by runoff, accounted for 51%~69%. Although the conservation tillage increased the dissolved phosphorous (DP) concentration, decreased PP concentration, it had no significant influence on the TP concentration in the surface runoff. Postponing N application decreased the concentration of DP, PP and TP in the surface runoff. The phosphorous loads in runoff ranged between $0.060\sim 0.079\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, approximately 0.2% in the total applied phosphorous at the wheat cropping season. The phosphorous loads of TS, NFP and NTS+NFP declined by 20%, 21% and 24% over T on average. It was also found that the wheat growth affected considerably the loss of phosphorus. There was a negative correlation between the phosphorous loss and the aboveground biomass, or the phosphorous uptakes of wheat. Therefore, the conservation tillage and postponing N fertilization should be popularized for the source control of the phosphorous loss via runoff from wheat field.

Keywords: conservation tillage; postponing N application; phosphorous; surface runoff; agriculture non-point source pollution

P是植物生长发育所必需的3大营养元素之一,也是引起水体富营养化的关键元素^[1-2]。近年来水体富营养化问题使人们对农田P素的关注已超出原来单纯的农学效应,其环境意义备受重视,因为农田土壤P素的大量输出是引起农业面源污染的主要原因之一^[3-4]。由于施入土壤的化学P肥极易被土壤所吸附固定,P肥的当季利用率仅为10%~25%^[5],大量未被利用的P素便以游离态或结合态滞留于土壤中,具有很高的流失潜能。当降雨径流发生时,土壤P便以溶解态和颗粒态形式随径流向水体迁移,成为水体中P的重要补给源。因此,研究农田P素径流损失特征对于控制农田P素流失具有重要意义。

国内外研究人员对农田P素向水体迁移已做了较多研究^[6-10],也提出了多种方法用于控制农田P素的流失,主要包括平衡施肥、土壤耕作管理、新型肥料、肥灌、缓冲带及人工湿地等技术^[11-12],也有学者提出了根据景观生态学原理和农田生态系统内部源汇型景观组合来控制农田养分流失^[13-14]。由于P素随地表径流流失机理的复杂性以及作物生长发育与土壤条件的区域性,使得不同土-水系统P素迁移过程存在明显差异^[15-16]。巢湖是全国富营养化最为严重的淡水湖泊之一,而农田P素的流失与其密切相关^[17]。但目前在该流域关于农田P素流失的报道不多,尤其是通过合理耕作和改善施肥措施来控制农田P素流失的研究则更少,而这部分的研究恰恰是了解巢湖流域农田P素流失的潜能、发生和控制的主要依据,因此这方面的研究亟待进一步补充和深入。为此,本文在巢湖流域采用野外径流小区试验,通过监测流域内典型种植模式下冬小麦整个生长期间的降雨、径流发生情况,对保护性耕作和氮肥后移条件下麦季土壤P素的径流损失特征进行了初步研究,旨在了解巢湖流域麦季P素径流流失浓度、流失量和流失形态,探讨保护性耕作与氮肥后移麦季土壤P素径流损失的影响,

以期源头控制农业面源污染,评价保护性耕作与氮肥后移的生态环境效应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在合肥市大杨镇进行,位于巢湖支流南淝河上游的一个闭合流域内,流域内没有任何工业活动,是我国江淮丘陵区典型的农业生态系统。流域地貌类型为低丘岗地,坡度较小,坡度约 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,坡顶和谷底相差约10~30 m。流域年平均气温 15.5°C ,平均降水量1 000 mm,多集中于6至8月,平均无霜期为226 d,平均日照为2 218 h。流域土壤以水稻土为主,农田系统结构比较单调,景观类型相对较少,主要种植水稻、小麦、油菜、棉花和玉米等。径流小区供试土壤为水稻土,质地为粘壤土,主要是稻油(麦)轮作,试验前0~20 cm土壤基本理化性质为:容重 $1.31\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、<0.002 mm粘粒40.3%,pH(水土比2.5:1)6.61、有机质 $17.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $60.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $10.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本试验为长期定位试验,从2007年6月夏玉米开始,为夏玉米-冬小麦-水稻-油菜-水稻-冬小麦轮作体系。本文讨论的是2009—2010年的小麦试验。冬小麦品种为扬麦13,2009年10月27日翻土播种,2010年5月30日收获。试验设4个处理,分别为:①传统耕作(T);②传统耕作+秸秆还田(TS);③氮肥后移(NFP);④少免耕+秸秆还田+氮肥后移(NTS+NFP),3次重复,完全随机区组排列。N肥品种为尿素(46%N),各个处理N肥用量均为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥(P_2O_5) $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,钾肥(K_2O) $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中处理1与处理2氮肥作为基肥一次性施入,处理3与处理4 60%氮肥作基肥,40%氮肥用作拔节肥,磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)作为基肥一次性施入小区。处理2

与处理 4 施水稻秸秆,将秸秆剪成 10~15 cm,于小麦播种后均匀覆盖于地表,用量为 3 000 kg·hm⁻²。各小区面积 20 m²,小区四周设 5 cm 厚的水泥挡板,地下部分埋深 25 cm,地上高 20 cm,互不渗漏,在其西侧建立径流池,以便收集降雨产流后的水样。小区中间设置标准雨量筒,用以进行降雨观测。

1.3 采样及分析方法

在 2009 年 10 月 27 日至 2010 年 5 月 31 日即整个冬小麦的生长季节内,于每次降雨产流后,立即测定每个径流池水位,计算径流量。将径流池内泥水充分混匀,采集泥水样,最后将径流池清洗干净,以备收集下次径流。采集径流池泥水样后,总磷(TP)采用过硫酸钾氧化-钼酸盐比色法测定(GB 11893—1989);溶解态磷(DP)由水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,测定方法与总磷相同;颗粒态磷(PP)为总磷浓度减去溶解态磷浓度。磷素流失量的计算方法为每次径流体积与磷流失浓度的乘积。水样取回后一般立即测定,少量不能测定的,滴加浓硫酸并冰冻保存,5 d 内测定完毕。

1.4 数据计算与统计分析方法

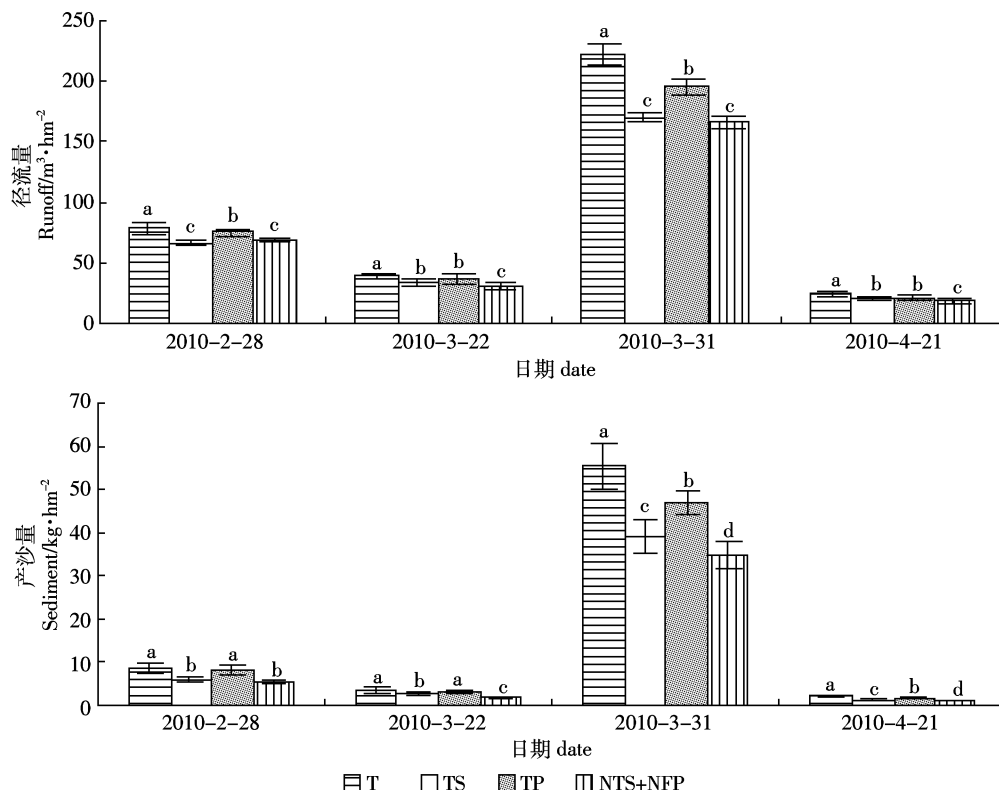
采用 Excel2003 和 DPSv7.05 进行数据处理分析,并用 LSD(Least significant difference test)进行样本平均数的差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理的产流产沙情况

小麦生长期共产生 4 次径流(由于偶然因素,未采集到积雪融水产生的径流),分别是在 2010 年的 2 月 28 日、3 月 22 日、3 月 31 日、4 月 21 日,对应的降雨量分别为:42.0、38.6、61.2、27.5 mm。一般来说,旱地小雨和中雨条件下很难产流,2010 年 4 月 21 日的降雨量虽然只有 27.5 mm,但前期频繁的小降雨使得前期土壤含水量较高,再加上本次降雨的瞬时降雨强度较大,所以仍有径流产生。

降雨径流和侵蚀产沙是养分流失的前提条件。不同处理的产流产沙情况见图 1,从总产流产沙量看,在整个冬小麦生长期,保护性耕作的 2 个处理 NTS+NFP 和 TS 总产流量分别为 285 m³·hm⁻² 和 290



方柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平,下同。

Different letters above the bars mean significant at 5% level. The same below.

图 1 不同处理的产流产沙情况

Figure 1 Characteristic of runoff and sediment under different treatments

$\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,与常规耕作 T($364 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)相比,分别减少了22%和20%;处理 NFP 总产流量是 $327 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,与 T 相比,减少了10%。处理 NTS+NFP 和 TS 总产沙量分别为 $43 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与 T($70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)相比,分别减少了38%和30%;处理 NFP 总产沙量是 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与 T 相比,减少了14%。由此可见,保护性耕作与氮肥后移均能有效的减少麦季土壤产流产沙量,表现出显著的水土保持作用。

2.2 径流液磷素浓度分析

各处理历次降雨径流液中总磷(TP)、溶解态磷(DP)和颗粒态磷(PP)浓度见表1。各处理径流液 TP、DP 和 PP 浓度范围分别是 $0.095 \sim 0.360$ 、 $0.037 \sim 0.142 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.054 \sim 0.248 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。同为一次性基施氮肥的处理 TS 径流液 DP 浓度显著高于处理 T,历次降雨径流液 DP 浓度分别提高了27%、28%、20%和25%,而 PP 浓度有所降低,降低幅度依次为27%、10%、4%和25%,TP 浓度变化没有明显规律。与此相似,同为氮肥后移的处理 NTS+NFP 径流液 DP 浓度显著高于处理 NFP,历次降雨径流液 DP 浓度分别提高了36%、42%、27%和42%,而 PP 浓度有所降低,降低幅度依次为6%、8%、5%和3%,TP 浓度变化没有明显规律。由此可以看出,长期的保护性耕作显著提高了麦地土

壤地表径流液 DP 的浓度,而降低了 PP 的浓度,对 TP 浓度影响没有明显规律。处理 T 径流液各形态 P 的浓度均高于处理 NFP,处理 T 历次径流液 TP、DP 和 PP 平均浓度分别为 0.227 、 $0.078 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.149 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,分别是 NFP 的1.18、1.06倍和1.25倍。由此可见,氮肥后移能够降低麦地土壤地表径流液各形态 P 的浓度。另外,研究发现,径流液中各形态 P 浓度随着时间的推移有逐渐降低的趋势,这主要与降雨强度、小麦生长对土壤 P 的吸收、土壤对 P 素的吸附固定以及 P 素的淋失有关。

2.3 径流液磷素形态分析

各处理历次地表径流液中各形态 P 所占比例见表2,各处理颗粒态磷占总磷(PP/TP)的比例在51%~69%之间,表明径流搬运的颗粒物(粒径 $\geq 0.45 \mu\text{m}$)是地表径流 P 迁移的主要载体,与之相结合的 P 是地表径流 P 素流失的主要形式,这与前人的研究结果一致^[18-19]。研究发现,处理 TS 和 T 相比,处理 NTS+NFP 和 NFP 相比,处理 NTS 和 T 相比,尽管 PP 仍然是地表径流 P 迁移的主要形式,但其所占比例却有降低的趋势,这也就意味着保护性耕作和氮肥后移不仅提高了径流液 DP 的浓度,而且提高了其所占 TP 的比例。研究同时发现,冬季麦田和夏季玉米田 P 素地表径流

表1 不同处理径流液中 TP、DP 和 PP 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 1 Concentration of TP, DP and PP in surface runoff under different treatments($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

处理 Treatments	28/Feb			22/Mar			31/Mar			21/Apr		
	TP	DP	PP	TP	DP	PP	TP	DP	PP	TP	DP	PP
T	0.360a	0.112b	0.248a	0.268ab	0.095b	0.173a	0.170a	0.069b	0.101a	0.111a	0.039c	0.072a
TS	0.322b	0.142a	0.180b	0.278a	0.121a	0.157ab	0.180a	0.082a	0.098a	0.102ab	0.048b	0.054b
NFP	0.286c	0.101b	0.185b	0.232c	0.089b	0.143bc	0.158b	0.067b	0.092a	0.095b	0.037c	0.057b
NTS+NFP	0.310b	0.138a	0.173b	0.258b	0.126a	0.132c	0.172a	0.085a	0.087a	0.108a	0.053a	0.055b

注:①TP、DP 和 PP 分别表示总磷、溶解态磷和颗粒态磷。

②同一列中不同字母表示差异达5%显著水平。下同。

Note:①TP, DP and PP indicate total phosphorous, dissolved phosphorous and particulate phosphorous respectively.

②Values followed by different letters in a column are significant at 5% level. The same below.

表2 不同处理径流液中各形态磷所占比例(%)

Table 2 Ratio of different P forms in surface runoff under different treatments(%)

处理 Treatments	28/Feb		22/Mar		31/Mar		21/Apr	
	DP/TP	PP/TP	DP/TP	PP/TP	DP/TP	PP/TP	DP/TP	PP/TP
T	31	69	35	65	40	60	35	65
TS	44	56	43	57	46	54	47	53
NFP	36	65	38	62	42	58	40	60
NTS+NFP	44	56	49	51	49	51	50	51

注:PP/TP 和 DP/TP 分别表示颗粒态磷和溶解态磷各自所占总磷的比例。

Note:PP/TP and DP/TP indicate the percentage of particle phosphorous and dissolved phosphorous against the total phosphorous, respectively.

迁移形态相比较,均以 PP 为主^[20],但是,冬季麦田径流中 PP 所占 TP 比例有降低的趋势,其主要原因可能是与冬夏季降雨特点有关。一般情况下,与夏季降雨相比,冬季降雨强度较小,而历时较长,地表径流形式主要为土壤饱和和扩张,降雨对地表的侵蚀作用比较小,因而随径流迁移的 PP 所占的比例相应的就会下降。

2.4 磷素径流流失量分析

各处理历次降雨径流 P 素流失负荷见图 2 和表 3。本试验未作标记试验,无法判断随径流迁移的 P 素究竟有多少来源于当季所施的 P 肥,假定径流损失的 P 全部来源于肥料 P。当地常规耕作处理条件下,麦季土壤 P 素径流损失量为 0.079 kg·hm⁻²,占当季施 P 量的 0.242%。与处理 T 相比,处理 TS、NTS 和 NTS+NFP 土壤 P 素径流损失量分别降低了 20%、21%和 24%。由此可见,保护性耕作和氮肥后移有助于减少麦地土壤 P 素径流损失量,其中少免耕覆盖配合氮肥后移效果最好。土壤 P 素随径流迁移量的多少是由径流量和浓度共同决定的。处理 TS 和 T 相比,历次降雨径流量分别减少了 16%、13%、23%和 17%,其浓度变化没有规律,但其 P 素流失负荷分别降低了 25%、10%、19%和 24%。与此相似,处理 NTS+NFP 和 T 相

比, 历次降雨径流量分别减少了 13%、21%、25%和 22%,其浓度变化没有规律,但其 P 素流失负荷分别降低了 25%、24%、24%和 24%。由此可见,保护性耕作减少 P 素的流失主要是通过减少径流量来实现的。处理 NFP 和 T 相比, 历次降雨径流量分别减少了 5%、8%、12%和 14%,TP 浓度分别降低了 20%、14%、7%和 14%,在两者的共同作用下,P 素流失负荷分别降低了 24%、21%、18%和 26%。可见,氮肥后移减少 P 素流失负荷则是通过减少径流量和降低 P 素浓度来实现的。

2.5 作物生长对磷素流失的影响

不同处理的小麦生物学性状及地上部分吸磷量见表 4, 小麦地上部分生物量的大小顺序为 NTS+NFP>NFP>TS>T。相关分析表明,地上部分生物量与径流量和泥沙量的相关系数分别为-0.847 和-0.877,与径流 TP 迁移量的相关系数是-0.940, 这说明保护性耕作与氮肥后移增加了作物地上部分生物量,减少了水土流失,可在一定程度上减少 P 素的流失。不同处理小麦吸 P 量的大小顺序为 NFP>NTS+NFP>TS>T, 与常规耕作处理 T 相比, 处理 TS、NFP 和 NTS+NFP 的吸 P 量分别增加了 6%、12%和 9%, 地上部分吸 P 量与径流 TP 迁移量的相关系数为-0.890, 这说

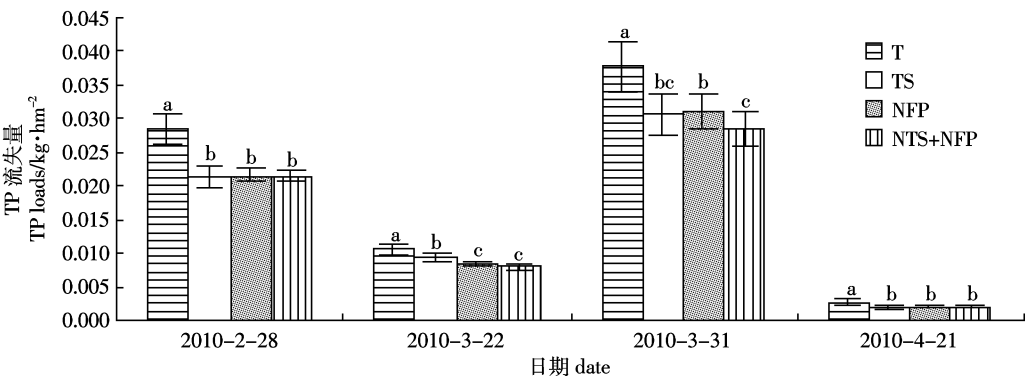


图 2 各处理地表径流磷流失负荷

Figure 2 Loading of P loss in surface runoff of different treatments

表 3 各处理地表径流 P 流失负荷及其占施肥量的比例
Table 3 Loading and ratios of fertilization of P loss in surface runoff under different treatments

处理 Treatments	流失量 P loss/kg·hm ⁻²	占施 P 比例 Percentage/%	减少 Decrease/%
T	0.079a	0.242	—
TS	0.063b	0.193	20
NFP	0.063b	0.191	21
NTS+NFP	0.060c	0.183	24

表 4 各处理小麦生物学性状及地上部分吸磷量
Table 4 Biological properties and aboveground P uptake under different treatments

处理 Treatments	地上部分生物量 Aboveground biomass/kg·hm ⁻²	地上部分吸磷量 Aboveground P uptake/kg·hm ⁻²	千粒重 1 000-grain weight/g	籽粒产量 Kernel yield/kg·hm ⁻²
T	9 582c	22.5c	36.8c	4 723c
TS	10 128b	24.0b	38.6b	4 948b
NFP	10 248b	25.2a	39.9a	5 232a
NTS+NFP	10 625a	24.5b	39.0ab	5 157a

明作物对土壤 P 素的吸收利用程度越高, P 素流失越少。地表覆盖度的增大和磷肥利用率的提高可能是保护性耕作与氮肥后移减少 P 素流失的主要原因。

3 讨论

3.1 保护性耕作与氮肥后移对产流产沙的影响

本试验结果表明,以秸秆还田和少免耕为主的保护性耕作和氮肥后移均能有效的减少产流产沙量,其原因可能是,秸秆还田消除或明显的减轻了雨水对土壤表面的打击和冲刷,在降雨过程中减弱或延缓了地表结皮的形成,延长了产流的时间,增加了入渗量,加强了渗透性和抗冲性;而氮肥后移减少水土流失的作用主要在于通过合理的氮肥运筹促进作物生长,一方面增加了地表的植被覆盖度,减少雨滴直接打击和径流冲刷的能量,延缓和阻碍了径流的形成和传递;另一方面,加强了根系对土壤的固结作用^[21]。即氮肥后移主要是通过促进作物生长而间接的减流减沙。

3.2 保护性耕作与氮肥后移对径流磷素浓度的影响

土壤 P 素流失过程的实质是土壤 P 素与降雨、径流相互作用的过程。本试验结果表明,长期的秸秆还田提高了麦地土壤地表径流液 DP 的浓度,降低了 PP 的浓度,而对 TP 浓度的影响没有明显的规律。径流液 DP 的浓度之所以提高,分析其原因,至少存在 3 种可能:首先,保护性耕作在增加雨水入渗和减流减沙的同时,加剧了径流与表层土壤的相互作用,相互作用的结果加速了土壤溶液中 DP 向径流的释放,使得溶解和解吸于单位径流中的 DP 含量增加;其次,秸秆在腐解过程中产生的有机酸通过竞争吸附、螯合和溶解等机制活化了部分难溶态 P^[22],从而提高了土壤中固定态 P 的有效性,形成一个缓释肥源;再次,长期的秸秆还田使得土壤 P 储量有所增加,提高了土壤的供 P 能力^[23],土壤中可供流失的 P 含量较多,此外秸秆腐解释放 P 也是一个方面。处理 NTS+NFP 径流液 DP 平均浓度显著高于处理 NFP,这是秸秆还田和少免耕综合作用的结果,一方面,如上所述,秸秆还田增加了径流液的 DP 浓度,另一方面,少免耕因对土壤扰动较少,施入的秸秆、肥料以及作物的根系主要集中在表层,易于造成养分表聚性和垂直分层^[24]。径流 PP 的含量主要受降雨溅蚀与径流侵蚀作用的影响,保护性耕作具有明显的减流减沙作用,削弱了降雨-径流过程对表层土壤 PP 的侵蚀,也就相应减少了随泥沙迁移的 PP 的含量。径流 TP 的浓度是由 PP 和 DP 的浓度共同决定的,保护性耕作一方面降低了径

流液 PP 的浓度,另一方面却提高了 DP 的浓度,两者综合作用的结果使得其对径流液 TP 浓度的影响表现出很大的不确定性。

氮肥后移能够降低麦地土壤地表径流液各形态 P 的浓度,其原因可能是:一方面,本试验供试土壤属中等肥力水平,小麦对肥料氮的依存率不是很高,在一定磷钾肥的基础上,适当减少基肥氮的施用比例,满足了小麦不同生育期对氮素的需求,促进了小麦生长发育,增强了作物根系觅寻养分和水分的能力,促进了作物对 P 素的吸收,从而提高了磷肥的利用率,而磷肥利用率的提高在一定程度上则降低了土壤中可供淋洗 P 的含量;另一方面,氮肥后移通过合理的氮肥运筹促进小麦的生长发育,提高了植被覆盖度,加强了根系对土壤的固结作用,具有明显的减流减沙作用,削弱了降雨-径流过程对表层土壤 PP 的侵蚀,也就相应减少了随泥沙迁移的 PP 的含量。

3.3 巢湖流域麦季磷素径流流失水平

在本试验条件下,巢湖流域麦季 P 素径流损失量在 0.062~0.079 kg·hm⁻² 之间。谢学俭等对江苏省高淳县稻麦轮作系统麦季土壤 P 素径流损失进行的研究表明,该地区麦季施磷量为 0、15、30、60、120 kg·hm⁻² 时,土壤 P 素的当季径流损失量分别为 0.623、0.703、1.062、2.337、6.823 kg·hm⁻²^[25];杨蓓蓓等对上海市嘉定区稻麦轮作系统中 P 素流失的研究结果表明,该地区麦季常规施肥和减量施肥处理 P 素径流流失量分别是 0.259 kg·hm⁻² 和 0.158 kg·hm⁻²^[26]。可以看出,不同地区稻麦轮作系统麦季土壤 P 素径流流失水平存在着差异,这主要与施肥水平、降雨发生时间以及土壤本身有关。与其他地区的研究结果相比较,本地区 2009—2010 年度冬季麦田 P 素径流流失负荷处于较低水平。分析其原因,笔者认为:其一,本地区磷肥施用量为中等偏下施肥水平,土壤 P 饱和度较低,且土壤质地又较为粘重,有较大的吸持能力,因此土壤对 P 素的吸附未达到饱和;其二,本试验所取得的 4 次径流均发生在小麦生长后期,径流-施肥时间间隔比较长,施入的磷肥经过小麦吸收、土壤的吸附固定以及淋失,土壤中可供淋洗的 P 比较少。因此,可以推断,如果降雨径流发生在施肥后的初期,将会提高 P 素流失潜能。降雨的随机性决定了不同年份的农田 P 素流失量差异比较大,要准确评估巢湖流域麦季土壤 P 素地表径流流失负荷尚需长期的监测研究。

P 素作物面源污染物的产生过程和迁移途径比较复杂,它受降雨过程(降雨类型、强度及降雨历时)

和流域下垫面因素(地形、地貌、土壤的化学和物理状况、植被和作物特征以及农业实践措施等)的综合影响^[27-28]。在这些因素当中,合理的耕作方式和养分管理可以有效减少水土流失和养分损失。在本试验条件下,保护性耕作和氮肥后移均能有效的减少水土流失和 P 素的流失。保护性耕作的主要作用在于通过增加地表面的覆盖、截获和促进作物生长,从而间接地减少水土流失和 P 素流失;氮肥后移则主要是通过合理的氮肥运筹促进作物生长,通过提高磷素利用率和减流减沙作用来减少 P 素的径流损失。因此,可以认为保护性耕作和氮肥后移能成为巢湖流域源头控制麦田 P 素流失的较好措施。考虑到以秸秆还田和少免耕覆盖为主的保护性耕作对冬小麦出苗有不利影响,建议生产中加大播种量和选用分蘖能力强的小麦品种,以保证基本苗和总穗数。另外,还要掌握一定的栽培技术,这样既能促进农田生态系统良性循环,又能提高作物产量,实现较好的经济和生态环境效益。“氮肥后移”技术在实际生产中必须灵活运用,依据土壤肥力条件调整氮肥的基追比例和施肥时期,达到提高肥料利用率和环境保护的双赢目的,实现农业的可持续发展。

4 结论

(1)保护性耕作与氮肥后移能显著影响麦季土壤产流产沙量。径流量分别减少了 20%、10%和 22%,泥沙量分别减少了 30%、14%和 38%,表现出显著的水土保持作用。

(2)各处理径流液总磷(TP)浓度范围是 0.095~0.360 mg·L⁻¹,其中,颗粒态磷(PP)是 P 素随地表径流迁移的主要形式,约占 TP 的 51%~69%。长期的保护性耕作提高了径流液中 DP 的浓度,降低了 PP 的浓度,而 TP 浓度难以看出明显的变化规律,氮肥后移能降低径流液中各形态磷的浓度。

(3)各处理 TP 流失量在 0.060~0.079 kg·hm⁻²之间,占当季施磷量的 0.2%。处理 TS、NFP 和 NTS+NFP 与处理 T 相比,TP 流失量分别减少了 20%、21%和 24%。说明保护性耕作和氮肥后移均能有效降低麦季土壤 P 素径流流失负荷。

(4)作物生长情况显著影响土壤 P 素的流失,地上部分生物量、地上部分吸 P 量与径流总 P 的迁移量呈负相关关系。

参考文献:

[1] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management

- at the watershed scale: A modification of the phosphorus index[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 130-144.
- [2] 全为民, 严力蛟. 农田面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. *生态学报*, 2002, 22(3): 291-299.
- QUAN W M, YAN L J. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 291-299.
- [3] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1008-1033.
- ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agriculture non-point source pollution in China and the alleviating strategies I: Estimation of agriculture non-point source pollution in China in early 21 century.[J]. *Science Agricultura Sinica*, 2004, 37 (7): 1008-1033.
- [4] Sharpley A N. Soil mixing to decrease surface stratification of phosphorus in manured soils[J]. *J Environ Qual*, 2003, 32: 1375-1384.
- [5] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. *磷肥与复肥*, 2003, 18(1): 4-8.
- LU Ru-kun. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4-8.
- [6] Nash D, Hannah M, Clemow L, et al. Afield study of phosphorus mobilization from commercial fertilizers[J]. *Aust J Soil Res*, 2004, 42: 313-320.
- [7] Chambers B J, Garwood T W D, Unwin R J. Controlling soil water erosion and phosphorus losses from arable land in England and Wales[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 145-150.
- [8] Pierson S T, Cabrera M L, Evanylo G K, et al. Phosphorus and ammonium concentrations in surface runoff from grasslands fertilized with broiler litter[J]. *J Environ Qual*, 2001, 30: 1784-1789.
- [9] 高超, 朱继业, 朱建国, 等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(11): 1543-1549.
- GAO Chao, ZHU Ji-ye, ZHU Jian-guo, et al. Phosphorus exports via overland runoff under different land uses and their seasonal pattern[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11): 1543-1549.
- [10] 张志剑, 朱荫渭, 王珂, 等. 水稻田土-水系统中磷素行为及其环境影响研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(2): 229-232.
- ZHANG Zhi-jian, ZHU Yin-mei, WANG Ke, et al. Phosphorus behavior in soil-water system of paddy field and its environmental impact[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 229-232.
- [11] 章明奎. 农业系统中氮磷的最佳管理实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- ZHANG Ming-kui. Best management practice of nitrogen and phosphorus in agricultural systems[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005.
- [12] 陶春, 高明, 徐畅, 等. 农业面源污染影响因子及控制技术的研究现状与展望[J]. *土壤*, 2010, 42(3): 336-343.
- TAO Chun, GAO Ming, XU Chang, et al. Research status and prospect on influential factors and control technology of agricultural non-point source pollution: A review[J]. *Soils*, 2010, 42(3): 336-343.
- [13] 刘世梁, 傅伯杰. 景观生态学原理在土壤学中的应用[J]. *水土保持学*

- 报, 2001, 15(3):102-106.
- LIU Shi-liang, FU Bo-jie. Application of landscape ecology principle in soil science[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15(3): 102-106.
- [14] 章明奎, 王丽平, 张慧敏. 利用农田系统中源汇型景观组合控制面源磷污染[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(3):46-50.
- ZHANG Ming-kui, WANG Li-ping, ZHANG Hui-min. Use of the spatial satching of source and sink landscapes to control non-point source P pollution in agricultural watershed[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(3):46-50.
- [15] 刘 方, 罗海波, 舒英格, 等. 黄壤旱地-水系统中磷释放及影响因素的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1):118-124.
- LIU Fang, LUO Hai-bo, SHU Ying-ge, et al. Soil phosphorus release to the water bodies in the upland fields of yellow soil areas and the influencing factors[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(1):118-124.
- [16] 张志剑, 王 珂, 朱荫涓, 等. 浙北水稻主产区田间土-水磷素流失潜能[J]. 环境科学, 2001, 22(1):97-101.
- ZHANG Zhi-jian, WANG Ke, ZHU Yin-mei, et al. Phosphorus loss potential of soil-water in sites of the main rice-yield area in the northern Zhejiang[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2001, 22(1):97-101.
- [17] 李如忠, 汪家权, 钱家忠. 巢湖流域非点源营养物控制对策研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1):119-121, 129.
- LI Ru-zhong, WANG Jia-quan, QIAN Jia-zhong. Countermeasures of non-point nutrient control of Chaohu Lake Basin [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(1):119-121, 129.
- [18] 段 亮, 段增强, 常 江. 地表管理与施肥方式对太湖流域旱地磷素流失的影响 [J]. 农业环境科学学报. 2007, 26(1):24-28.
- DUAN Liang, DUAN Zeng-qiang, CHANG Jiang. Surface managements and fertilization modes on phosphorus runoff from upland in Taihu Lake Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 24-28.
- [19] 张红爱, 张焕朝, 钟 萍. 太湖地区典型水稻土稻-麦轮作地表径流中磷的变动规律[J]. 生态科学, 2008, 27(1):17-23.
- ZHANG Hong-ai, ZHANG Huan-chao, ZHONG Ping. Study on phosphorus concentrations in runoff from paddy soils of rice-wheat double cropping system in Taihu Lake region[J]. *Ecological Science*, 2008, 27(1):17-23.
- [20] 王 静, 郭熙盛, 王允青. 自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3):492-495.
- WANG Jing, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing. Effect of straw mulch on nitrogen and phosphorus loss from farmlands in Chaohu Lake Region under natural rainfall condition[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3):492-495.
- [21] 张兴昌, 邵明安. 植被覆盖度对流域有机质和氮素径流流失的影响[J]. 草地学报, 2000, 8(3):198-202.
- ZHANG Xing-chang, SHAO Ming-an. Soil organic matter and nitrogen losses by erosion in little catchment model as effected by vegetation coverage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2000, 8(3):198-202.
- [22] 彭 娜, 王凯荣, Buresh R J, 等. 不同水分条件下施用稻草对土壤有机酸和有效磷的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(2):347-351.
- PENG Na, WANG Kai-rong, Buresh R J, et al. Effect of rice straw incorporation on concentration of organic acids and available phosphorus in soil under different water regimes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2):347-351.
- [23] 康 轩, 黄 景, 吕巨智, 等. 保护性耕作对土壤养分及有机碳库的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6):2339-2343.
- KANG Xuan, HUANG Jing, LV Ju-zhi, et al. Effects of conservation tillage on soil nutrient and organic carbon pool[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6):2339-2343.
- [24] 兰全美, 张锡洲, 李廷轩. 水旱轮作条件下免耕土壤主要理化特性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1):145-149.
- LAN Quan-mei, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan. Study on main physicochemical properties in no-tillage soil under paddy-upland rotation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1):145-149.
- [25] 谢学俭, 陈晶中, 宋玉芝, 等. 磷肥施用量对稻麦轮作土壤中麦季磷素及氮素径流损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6):2156-2161.
- XIE Xue-jian, CHEN Jing-zhong, SONG Yu-zhi, et al. Effects of phosphorus application rates on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during wheat season in rice-wheat rotation field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2156-2161.
- [26] 杨蓓蓓, 刘 敏, 张丽佳, 等. 稻麦轮作农田系统中磷素流失研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2009(6):56-63.
- YANG Bei-bei, LIU Min, ZHANG Li-jia, et al. Study on the phosphorus loss in soil with rice-wheat rotation system[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2009(6):56-63.
- [27] Mitsch W J, Horne A J, Nairn R W. Nitrogen and phosphorus retention wetlands-ecological approaches to solving excess nutrient problems[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14:1-7.
- [28] Casey R E, Taylor M D, Klaine S J. Mechanisms of nutrient attenuation in a subsurface flow riparian wetland[J]. *J Environ Qual*, 2001, 30:1732-1737.