

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.020

严磊, 吴田乡, 赵素雅, 等. 雨强及播栽方式对太湖地区麦田径流氮磷流失的影响. 土壤, 2022, 54(2): 358–364.

雨强及播栽方式对太湖地区麦田径流氮磷流失的影响^①

严磊^{1,2}, 吴田乡³, 赵素雅¹, 薛利红¹, 侯朋福^{1*}, 徐德福², 杨林章¹

(1 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 3 江苏省耕地质量与农业环境保护站, 南京 210036)

摘要: 为明确太湖地区麦田氮磷流失特征, 通过田间模拟试验研究了播栽方式(条播、撒播)和降雨强度(低, 30 mm/h; 中, 60 mm/h; 高, 90 mm/h)对麦田氮磷流失的影响。结果表明: 初始产流时间与雨强显著负相关, 而径流系数与雨强显著正相关($P<0.01$)。径流氮磷浓度在径流初期较高, 并随产流时间不断降低, 且均可用对数函数描述。氮磷流失率随产流时间呈“先升后降”的变化趋势, 中后期流失率最大。除中雨强下条播处理的氮素流失率最高外, 氮磷流失峰值浓度和流失率均随雨强增大而增加。受径流系数和流失率影响, 除中雨强下条播处理的氮素流失量最高外, 两种播栽方式下氮磷流失量均随雨强增大而显著增加。氮素流失以 NO_x^- -N 为主(40%~62%), 磷素流失以颗粒态磷为主(50%~71%)。另外, 等雨强下条播处理的径流系数和氮磷流失量高于撒播处理。综上, 降雨驱动的氮磷流失具有典型阶段特征, 径流初期的氮磷浓度较高而中后期流失率较大, 且条播麦田对雨强的响应更加强烈。

关键词: 面源污染; 旱地; 地表径流; 氮磷流失

中图分类号: S157 文献标志码: A

Effects of Rainfall Intensity and Sowing Method on Nitrogen and Phosphorus Losses by Surface Runoff from Wheat Field in Taihu Lake Region

YAN Lei^{1,2}, WU Tianxiang³, ZHAO Suyu¹, XUE Lihong¹, HOU Pengfu^{1*}, XU Defu², YANG Linzhang¹

(1 Key Lab of Agro-environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2 School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3 Jiangsu Station for Protection of Arable Land Quality and Agricultural Environment, Nanjing 210036, China)

Abstract: To clarify the properties of N and P losses in Taihu lake region, the effects of sowing method (PR, plant in rows; BS, broadcast sowing) and rainfall intensity (SI, 30 mm/h; MI, 60 mm/h; LI, 90 mm/h) on N and P losses from wheat field were investigated by field simulation trial. The results showed that “initial runoff time” was negatively correlated with rainfall intensity while runoff coefficient positively correlated with rainfall intensity ($P<0.01$). N and P loss concentrations peaked at the initial stage and decreased over time following a logarithmic-function relationship. The loss rates of N and P showed a trend of “rising and then falling” with runoff time, and were greatest during middle to late period. The peak concentrations and rates of N and P losses increased with rainfall intensity except for N loss rate was the highest under MI in PR trials. Affected by runoff coefficient and nutrient loss rate, N and P loss amounts were significantly increased with rainfall intensity except for N loss was the highest under MI in PR treatments. NO_x^- -N (40%–62%) and particulate phosphorus (50%–71%) were the main forms of N and P losses respectively. Also, the runoff coefficient and nutrient loss rate were higher in PR treatment than those in BS treatment under the same rainfall intensity. The results suggest that rainfall-driven N and P losses have typical phase characteristics. N and P concentrations peak during the initial runoff period, while N and P loss rates are the highest during the middle-late phase. The runoff from wheat field with PR mode is more likely to be affected by rainfall intensity.

Key words: Non-point pollution; Upland field; Surface runoff; Nitrogen and phosphorus losses

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700800)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX19(1007))资助。

* 通讯作者(pengfuhou100smby@163.com)

作者简介: 严磊(1995—), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 研究方向为农业面源污染控制。E-mail: yanleiwk@126.com

降水径流是农田氮磷输出的主要途径^[1]。《第二次全国污染源普查公报》数据显示，我国农业源总氮、总磷排放占比分别达 47% 和 67%，其中种植业在农业源中占比分别为 39% 和 36%。太湖地区是我国重要的稻麦轮作种植区，也是水资源最为丰富的地区。受亚热带季风气候影响，该地区降水资源丰富，是重要的径流易发区^[2]。可以预见，在未来极端气候变化导致的降水事件频次增加及降水强度增强的背景下，如不采取必要措施，该地区农田径流氮磷损失和污染规模也将呈现扩大和增加的趋势^[3]。因此，除采取必要的养分管理优化措施外，明确农田径流发生特征，是精准制定径流蓄存策略、降低面源污染发生风险的重要一环。

与稻田封闭径流体系不同，麦田土壤全生育期处于无水层状态，除受降水影响外，径流发生时受植被盖度和土壤含水量影响^[4]。然而，当前对于径流中氮磷流失的研究多集中于流失均值浓度和总流失量，对单次径流事件中氮磷流失的动态变化特征研究较少，且忽略了对植被盖度变化响应的考虑。严磊等^[5]通过历史降水资料和文献统计分析发现，2 月和 3 月是太湖地区麦田径流发生的高风险期。与水稻依赖分蘖发生进行群体构建不同^[6]，麦田主要通过高播种量保证小麦生产^[7]。2 月和 3 月小麦主要处于越冬期和返青期，此期小麦植被盖度低^[8]，地表裸露度受播栽方式影响大。如，撒播下麦苗分布相对均匀，而条播下麦苗相对集中，行间呈无植被裸露状态。然而，目前对不同播栽方式下麦田径流氮磷流失特征的研究较少，而不同播栽方式的植被分布差异同时也为开展降雨-植被盖度驱动的径流发生特征研究提供了可直接比较的自然样本。为此，本研究采用人工模拟降雨装置在太湖地区麦田径流发生的高风险期对氮磷流失特征进行研究，以阐明不同雨强和播栽方式下氮磷流失的过程特征，为该地区农田面源污染防控提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验于 2021 年在江苏省南京市江宁区阜庄村进行。该地区为典型亚热带季风气候，麦季年均降水量为 514.6 mm。由于播栽方式显著影响小麦植被分布和土壤裸露程度，尤其在生长前期，而此期(2 月和 3 月)是太湖地区小麦径流发生的高风险期^[5]，因此降雨模拟试验主要在此期进行。试验田土壤为长期水旱轮作水稻土，土壤类型为马肝土，土壤有机质、

全氮和有效磷含量分别为 29.22 g/kg、1.95 g/kg 和 6.87 mg/kg。

1.2 试验装置

本试验采用室外人工模拟降雨系统，其构造如图 1 所示。该系统由人工模拟降雨装置和径流收集装置构成。人工模拟降雨装置安装高度为 4 m，有效面积为 4 m×3 m，雨滴直径介于 1.0~5.0 mm，降雨均匀度约 86%。径流收集装置主要由 PVC 隔板和径流收集桶组成。小区四周用 PVC 隔板围挡并用土埂砌围，PVC 隔板高出地面 10 cm，入土 30 cm，其中一块 PVC 隔板开孔连接径流溢出管道，以保证径流发生后所有地表径流可汇入集流桶。

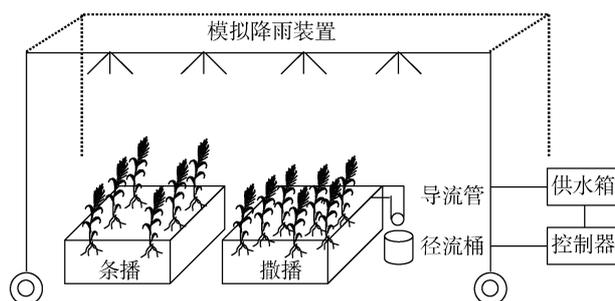


图 1 人工模拟降雨系统
Fig. 1 Simulated rainfall system

1.3 试验设计

本试验分别在条播(PR)和撒播(BS)下，设置 30 mm/h(低雨强，SI)、60 mm/h(中雨强，MI)和 90 mm/h(高雨强，LI)3 个雨强处理。为保证径流产流过程更具代表性，并对不同降雨强度进行直接比较，本研究将 3 种降雨强度的降水量统一设定为 60 mm(暴雨级别)。每个处理重复 3 次，共 18 个小区，每个小区长宽为 3 m×4 m。试验小麦品种为苏麦 188，播种量均为 375 kg/hm²，所有处理磷(P₂O₅)钾(K₂O)肥均在基肥时一次性施入，用量均为 96 kg/hm²。氮肥分基肥、返青肥、拔节肥 3 次施入，用量分别为 N 96、72、72 kg/hm²。

1.4 样品采集测定

模拟降雨前使用土钻采集耕层土壤，测定土壤含水量。试验开始后记录初始产流时间(Tr)，于径流发生后采集径流初期(IN, 0~5 min)、中期(MID, 5~15 min)、中后期(MTL, 15~30 min)和后期(LA, 30 min 后)各时段混合径流样并记录径流量(R)。每次试验前收集模拟雨水，以扣除雨水中氮磷背景值。试验结束后将样品带回实验室及时测定。

水样过 0.45 μm 滤纸后使用 AA3 流动分析仪测定总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO_x⁻-N)浓度，

使用钼酸铵分光光度法测定溶解性总磷(TDP)浓度。未过滤水质样品总磷(TP)测定采用钼酸铵分光光度法测定。

1.5 数据处理

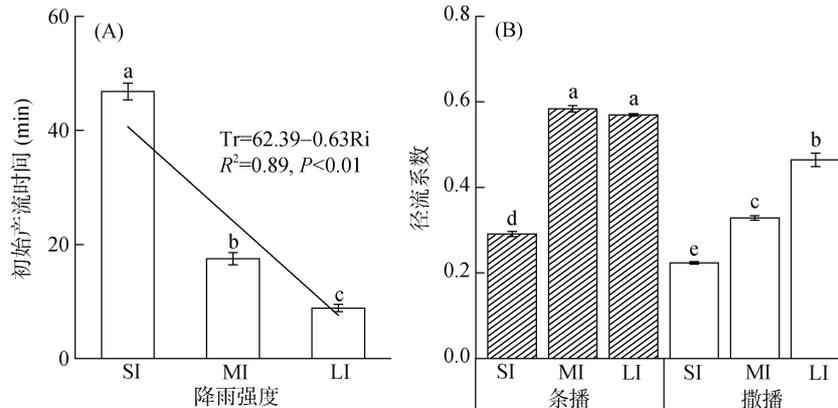
溶解性有机氮(DON)浓度为总氮(TN)浓度与铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)浓度差值。颗粒态磷(PP)浓度为总磷(TP)浓度与溶解性总磷(TDP)浓度的差值。径流系数为径流体积与降水体积之比。阶段径流率($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{hm}^2)$)和氮磷流失率($\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{hm}^2)$)分别为不同阶段径流体积和氮磷流失量与该阶段时间及田块面积的比值。氮磷流失量由各阶段流失量加和得出。

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据统计分析, SPSS 21.0 进行方差分析, Duncan 法进行差异显著性检验($P<0.05$), Pearson 法进行相关性分析($P<0.05$); 使用 Origin 8.0 进行函数模拟和绘图。

2 结果与分析

2.1 降雨强度和播栽方式对初始产流时间和径流系数的影响

试验结果表明,初始产流时间与播栽方式无显著相关性,但与降雨强度极显著负相关 ($P<0.01$)(表 1), 并随降雨强度增大而线性下降($\text{Tr} = 62.39 - 0.63\text{Ri}$, $P<0.01$)(图 2A)。此外, 径流系数与降雨强度显著正相关, 且受播栽方式影响显著(表 1)。相同雨强下, 条播处理的径流系数均显著高于撒播处理(图 2B),



(图中误差线表示标准误; SI: 低降雨强度, MI: 中降雨强度, LI: 高降雨强度, Tr: 初始产流时间, Ri: 降雨强度; 柱形图上方不同小写字母代表不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著; 下同)

图 2 不同处理对初始产流时间(A)和径流系数(B)的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on initial runoff time (A) and runoff coefficient (B)

2.3 降雨强度和播栽方式对氮磷流失特征的影响

2.3.1 流失浓度 结果表明,不同处理均表现为径流初期氮磷浓度最高,并随产流时间逐渐下降(图 4),且可用对数函数拟合描述(表 2)。两种播栽方式下氮

但两种播栽方式下径流系数随雨强变化的表现不同。条播下,中、高雨强处理的径流系数相当并显著高于低雨强处理,而撒播下,径流系数随雨强增大显著增加。不同降雨强度下径流系数分别为: 0.29(SI)、0.58(MI)、0.57(LI)(条播), 0.22(SI)、0.33(MI)、0.46(LI)(撒播)。此外,试验期间,在土壤含水率 18.6%~29.5% 范围内,初始产流时间、径流系数与土壤含水量均无显著相关性。

表 1 径流发生参数与降雨强度、播栽方式及土壤含水量的相关性

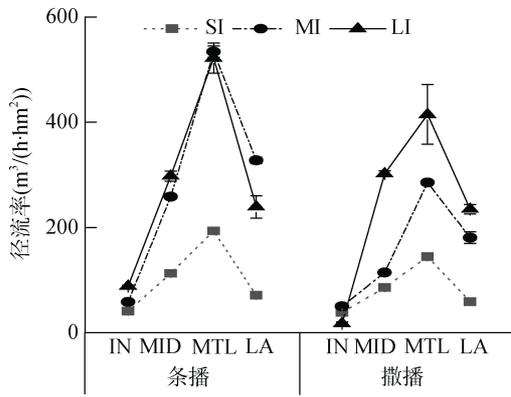
	初始产流时间	径流系数
降雨强度	-0.94**	0.77**
播栽方式	0.05	-0.51*
土壤含水率	-0.39	0.44

注: *, **分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关。

2.2 降雨强度和播栽方式对径流率的影响

径流率随产流时间的动态变化如图 3 所示,可见,不同播栽方式和雨强下径流率随产流时间均呈先上升后下降的趋势,峰值出现在径流发生中后期。除条播处理下中、高雨强的径流率峰值相当外,其他处理的径流率均随雨强增大而增加。此外,相同雨强下条播处理的径流率均高于撒播处理。低、中和高雨强的径流率峰值分别为: 193.27、533.96 和 521.83 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{hm}^2)$ (条播), 144.61、285.16 和 414.76 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{hm}^2)$ (撒播)。

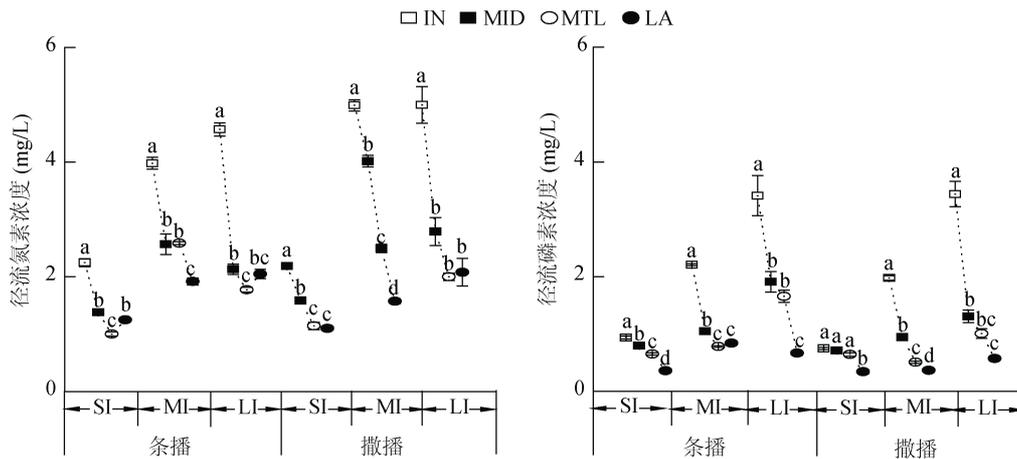
磷峰值浓度均随雨强增大而增加,但相同雨强下氮磷浓度在不同播栽方式的差异表现不同。中、高雨强下,条播处理的氮素峰值浓度低于撒播处理,低雨强下二者峰值浓度相当。与氮素表现不同,中、低雨强下,



(IN: 径流初期, MID: 径流中期, MTL: 径流中后期, LA: 径流后期; 下同)

图 3 降雨强度和播栽方式对径流率的影响

Fig. 3 Effects of rainfall intensity and sowing method on runoff rate



(折线图上方不同小写字母代表相同播栽方式和雨强下不同时段径流氮素或磷素浓度在 $P < 0.05$ 水平差异显著)

图 4 降雨强度和播栽方式对径流氮磷流失浓度的影响

Fig. 4 Effects of rainfall intensity and sowing method on concentrations of nitrogen and phosphorus in runoff water

表 2 不同处理下径流氮磷浓度与产流时间的函数关系拟合

Table 2 Fitting relationship between nitrogen or phosphorus concentrations in runoff water and runoff time under different treatments

污染物	拟合公式	播栽方式	降雨强度	a	b	c	R^2	P
氮	$y=a-b\ln(x+c)$	条播	SI	1.25	0.062	-1	0.87	<0.01
			MI	2.71	0.43	-0.94	0.89	<0.01
			LI	2.03	0.07	-1	0.96	<0.01
		撒播	SI	1.52	0.29	-0.89	0.90	<0.01
			MI	5.15	2.04	0.05	0.94	<0.01
			LI	2.61	0.41	-0.99	0.84	<0.01
磷	$y=a-b\ln(x+c)$	条播	SI	2.29	0.84	4.02	0.96	<0.01
			MI	0.987	0.12	-0.99	0.97	<0.01
			LI	2.25	0.91	-0.71	0.84	<0.01
		撒播	SI	0.64	0.14	-0.88	0.79	<0.01
			MI	0.88	0.35	-0.95	0.97	<0.01
			LI	1.31	0.45	-0.99	0.94	<0.01

注: y , 径流氮、磷浓度; x , 产流时间。

条播处理的磷素峰值浓度高于撒播处理, 而高雨强下二者峰值浓度相当。

2.3.2 流失率 图 5 为氮、磷流失率随产流时间的动态变化, 可见, 两种播栽方式下氮磷流失率均随产流时间呈先上升后下降的趋势; 中高雨强下流失率变化剧烈, 低雨强下则相对平缓。不同雨强下氮磷流失率峰值均出现在径流中后期。同时, 相同雨强下条播处理的氮磷流失率峰值均高于撒播处理。除中雨强下条播处理的氮素流失率峰值最高外, 其他处理的氮磷流失率峰值均随雨强增大而增加。

2.4 降雨强度和播栽方式对氮磷流失量的影响

由图 6 可知, 除中雨强下条播处理的氮素流失量最高外, 两种播栽方式下氮素流失量均随雨强增大而

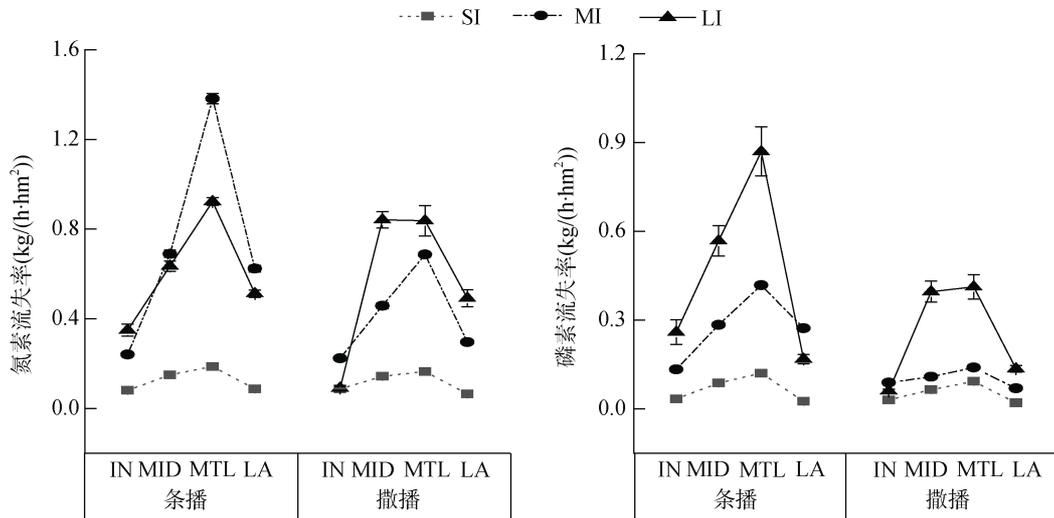


图 5 降雨强度和播栽方式对氮磷流失率的影响

Fig. 5 Effects of rainfall intensity and sowing method on loss rates of nitrogen and phosphorus

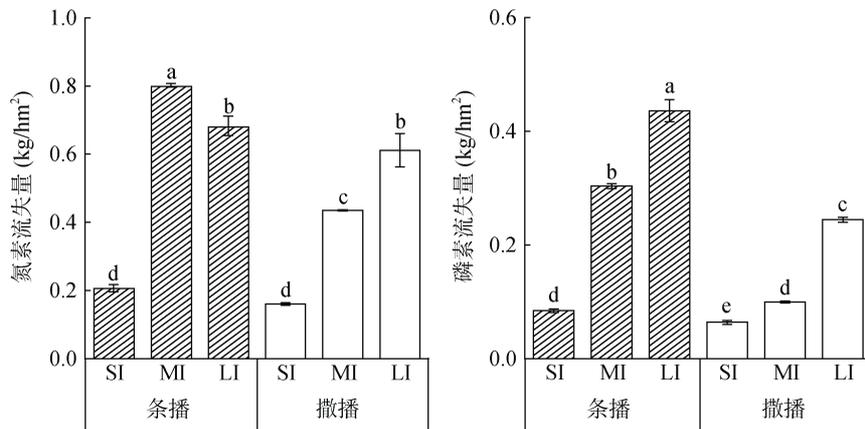


图 6 降雨强度和播栽方式对径流氮磷流失量的影响

Fig. 6 Effects of rainfall intensity and sowing method on runoff loss amounts of nitrogen and phosphorus

显著增加。相同雨强下,条播处理的氮素流失量较撒播处理有增加趋势,且中雨强下差异显著。条播处理下氮素流失量分别为 0.21 (SI)、0.80 (MI)和 0.68 kg/hm² (LI),而撒播处理下氮素流失量分别为 0.16 (SI)、0.43 (MI)和 0.61 kg/hm² (LI)。此外,两种播栽方式下磷素流失量均随雨强增大而显著增加。相同雨强下条播处理的磷素流失量显著高于撒播处理。两种播栽方式下磷流失量分别为: 0.08 (SI)、0.30 (MI)、0.44 kg/hm² (LI)(条播), 0.03 (SI)、0.10 (MI)、0.24 kg/hm² (LI) (撒播)。

2.5 降雨强度和播栽方式对氮磷流失形态的影响

氮磷流失形态分析结果表明,麦田径流氮素流失以无机态氮为主,且 NO_x-N 占比较高(图 7)。条播下中高雨强处理的无机态氮占比低于低雨强处理,而撒播下 3 种雨强处理的无机态氮和溶解性有机氮占比相当,相同雨强下撒播处理的无机态氮占比均高于条播处理。麦田径流磷流失以颗粒态磷(PP)为主。条播

下,随雨强增大,PP 占比增加,低、中、高 3 种雨强处理的 PP 占比分别为 50%、71%、70%;撒播下,低、中、高 3 种雨强处理的 PP 和 TDP(溶解性总磷)占比则较为接近(50%~55%)。此外,随雨强增加,条播处理的 PP 占比表现出高于撒播处理的趋势。

3 讨论

3.1 水分流失特征

本研究表明,麦田初始产流时间与雨强显著负相关。这与径流发生需要满足的产流条件有关。雨强较小时,水分迁移以下渗为主,随着降雨进行,雨水下渗至犁底层后滞水作用明显,径流随之发生。而在较高雨强下,尤其当降雨强度超过土壤下渗率时,短时间内即可形成积水层并驱动径流发生^[9]。因此,径流发生的延迟效应随雨强的增大而减弱。受产流时间和单位时间降水量影响,麦田径流发生系数与雨强显著正相关。

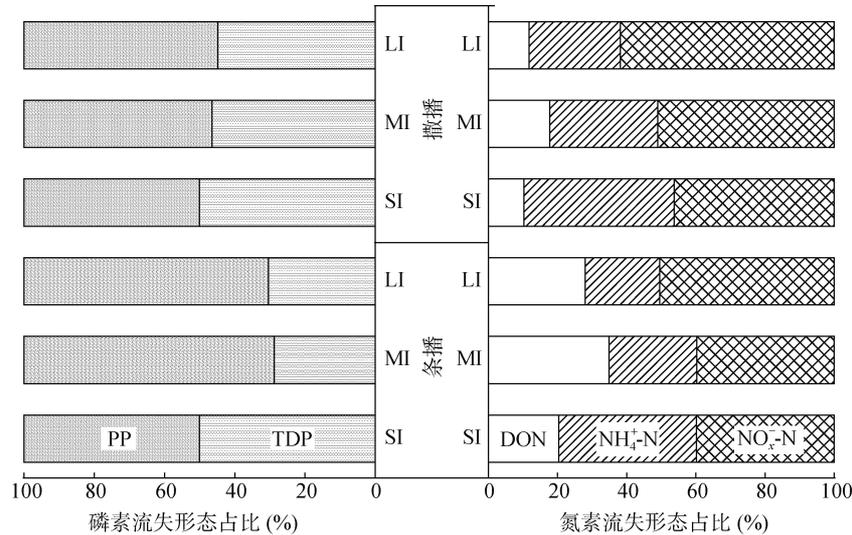


图 7 降雨强度和播栽方式对径流氮磷流失形态占比的影响

Fig. 7 Effects of rainfall intensity and sowing method on loss proportions of nitrogen and phosphorus

相关分析还表明,径流系数同时受播栽方式影响显著,等雨强下撒播处理的径流系数显著低于条播处理。这可能与不同播栽方式的地表裸露程度有关。撒播下麦苗分布相对均匀,滞水能力高,能够通过提高土壤入渗降低径流发生;条播下由于行间呈无植被裸露状态,这可能会利于径流的更快发生^[10]。此外,本研究初始产流时间、径流系数均与试验期间土壤含水量无显著相关关系。这可能与试验雨强的选择及长期植稻土壤犁底层对水分下移的阻滞效应有关^[11]。另外,不同处理下径流率均随产流时间呈先上升后下降的趋势,峰值出现在中后期。这主要与径流中后期土壤相对饱和,降雨转化为径流的效率较高有关^[11]。

3.2 氮磷流失特征

本研究表明,不同处理初始径流的氮磷浓度均最高,并随产流时间下降。径流初期,土壤中的氮素由于雨滴动能的扰动迅速溶出,磷也在雨滴冲击下被泥沙裹挟迁移。随降雨进行,地表积水层的形成能够减弱雨滴的击溅作用,且径流中氮磷也随径流率增加而进一步稀释^[12]。这可能是氮磷浓度初期较高而随产流时间下降的主要原因。此外,由于条播麦田的地表裸露度高,产流快^[10],条播处理的氮素峰值浓度低于撒播处理,尤其在中高雨强下。而磷流失以颗粒态为主,并与降雨冲刷密切相关^[13],因此中低雨强下,条播处理的磷素峰值浓度高于撒播处理;但高雨强下降雨的强冲刷能够抵消这种差异。

氮磷流失率受氮磷浓度和径流率叠加影响^[11]。本研究表明,不同处理下氮磷流失率峰值均集中在径流中后期,且等雨强下条播处理的氮磷流失率高于撒

播处理。这主要与不同处理下径流率的响应差异有关(图 3)。此外,条播下中雨强处理的氮素流失率峰值明显高于高雨强和低雨强处理。这可能与高裸露地表(条播)下不同雨强的雨滴动能有关。低雨强下雨滴动能较小,水分下渗高于中、高雨强,而中、高雨强下雨滴动能较大,土壤结皮的形成可能阻滞水分下渗,但在高雨强下随着雨滴动能的增加,可能会降低土壤结皮的阻滞作用,同样较中雨强增加了水分下渗能力^[14-15]。结果说明,降雨驱动的水分下渗速率和地表流失率可能存在对雨强(雨滴动能)的响应阈值,这一现象值得在今后研究中关注。受氮素流失率影响,除中雨强下条播处理的氮素流失量最高外,两种播栽方式下氮磷流失负荷均随雨强增大而增加。相同雨强下条播处理的氮、磷流失量均高于撒播处理。

3.3 氮磷流失形态

本研究发现,麦田氮流失以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为主,且占比随雨强的增大而增加。这是由于旱地条件下土壤疏松透气的环境利于硝化作用进行,而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 所带负电荷与土壤颗粒存在排斥作用,具有更大的移动性,且易溶于水而随水流失^[16]。此外,受降雨冲刷和高径流率影响,条播处理的无机氮占比低于撒播处理,但溶解性有机氮占比增加。这说明,条播处理的氮素流失负荷增加主要与溶解性有机氮的损失增加有关。

本研究还发现,麦田磷流失以颗粒态磷为主,这是由于土壤中的磷以无机磷为主,且多以矿物态存在,易在降雨冲刷下以泥沙为载体随径流流出^[13]。此外,与撒播下不同雨强处理的颗粒态磷占比相近不

同,条播下中高雨强处理颗粒态磷的占比明显高于低雨强处理,尤其是中雨强处理。前述分析表明,低雨强下雨滴动能较小,水分下渗要高于中、高雨强,而中、高雨强下雨滴动能较大,土壤结皮的形成可能阻滞水分下渗,但在高雨强下随着雨滴动能的增加,可能会降低土壤结皮的阻滞作用,同样较中雨强增加了水分下渗能力^[14-15]。这说明,颗粒态磷的损失与降水冲刷引起的水分运移差异密切相关。

综合本研究结果,如不考虑作物生产力,撒播处理对于降雨的消能和拦截作用优于条播处理。因此,从水土保持的角度应优选撒播作为小麦播种的推荐方式。如选择条播方式,应重点关注降雨后径流发生的初期及中后期,特别是径流初期高浓度氮磷的蓄存拦截。

4 结论

麦田初始产流时间与降雨强度显著相关,而径流系数受播栽方式和降雨强度共同影响。降雨驱动的氮磷流失具有典型阶段特征,径流初期的氮磷浓度较高而中后期流失率较大。雨强显著影响氮磷流失,等雨强下条播处理的氮磷流失高于撒播处理,且主要与冲刷引起的溶解性有机氮和颗粒态磷损失增加有关。

参考文献:

- [1] Hou P F, Jiang Y, Yan L, et al. Effect of fertilization on nitrogen losses through surface runoffs in Chinese farmlands: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148554.
- [2] 张小林. 对水土保持规划中划分水土流失易发区的初步思考[J]. *中国水土保持*, 2013(1): 9-11.
- [3] 周天军, 任俐文, 张文霞. 2020 年梅雨期极端降水的归因探讨和未来风险预估研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(10): 1637-1649.
- [4] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. *土壤*, 2000, 32(4): 188-193.
- [5] 严磊, 薛利红, 侯朋福, 等. 太湖典型地区雨养麦田的径流发生时间特征[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 1043-1050.
- [6] 王建, 许蓓蓓, 丁艳锋, 等. 种植密度对粳稻群体内部生态因子的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(1): 1-9.
- [7] 周延辉, 朱新开, 郭文善, 等. 稻茬小麦中高产水平下产量及其构成因素分析[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(3): 293-297.
- [8] 刘峻明, 李曼曼, 王鹏新, 等. 基于 LAI 时间序列重构数据的冬小麦物候监测[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 120-129.
- [9] Badorreck A, Gerke H H, Hüttl R F. Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 129: 1-8.
- [10] Pan C Z, Ma L, Wainwright J. Particle selectivity of sediment deposited over grass barriers and the effect of rainfall[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(10): 7963-7979.
- [11] Yan L, Xue L H, Petropoulos E, et al. Nutrient loss by runoff from rice-wheat rotation during the wheat season is dictated by rainfall duration[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285: 117382.
- [12] Wang L H, Yen H, Wang X, et al. Deposition- and transport-dominated erosion regime effects on the loss of dissolved and sediment-bound organic carbon: Evaluation in a cultivated soil with laboratory rainfall simulations[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141717.
- [13] 王小治, 曹志洪, 盛海君, 等. 太湖地区渗育性水稻土径流中磷组分的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 278-284.
- [14] 李文杰, 李丹勋, 王兴奎. 雨滴溅蚀模型研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(5): 689-699.
- [15] 李浩宏, 王占礼, 申楠, 等. 土壤结皮研究进展[J]. *人民黄河*, 2015, 37(10): 92-98.
- [16] 张金波, 程谊, 蔡祖聪. 土壤调配氮素迁移转化的机理[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(1): 11-19.