

不同耕作措施对棕壤氮磷淋失的影响

徐嘉翼, 隋世江, 陈 玥, 张艳君, 叶 鑫, 牛世伟*

(辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 沈阳 110161)

摘要:为探究不同耕作措施对氮磷淋失的调控作用,在东北棕壤区采用田间试验种植玉米研究不同处理(旋耕、免耕、翻耕及翻耕+秸秆还田)对土壤氮磷淋失、耕层养分库容及作物产量的影响。结果表明,与旋耕相比,免耕处理降低水分淋失和氮磷淋失,玉米产量有所下降。翻耕处理增加水分淋失风险,有效耕层养分库容和玉米产量均有所增加,对氮磷淋失具有一定调控作用。翻耕+秸秆还田处理降低水分淋失和氮磷淋失,且提升耕层养分库容和玉米产量。综上,免耕对棕壤氮磷淋失调控效果优于翻耕,翻耕结合秸秆还田更有利于降低氮磷淋失风险。

关键词:耕作措施;棕壤;氮;磷;淋失

中图分类号:S158

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2022)06-0053-06

Effects of Different Tillage Measures on Nitrogen and Phosphorus Leaching in the Burozem Cropland

XU Jiayi, SUI Shijiang, CHEN Yue, ZHANG Yanjun, YE Xin, NIU Shiwei*

(Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract:To investigate the effects of different tillage measures on maize yield and nitrogen (N) and phosphorus (P) leaching, the field experiment was conducted in the burozem cropland for single maize of Northeast China. Four treatments were designed, including rotary-tillage (RT), no-tillage (NT), deep ploughing-tillage (DT), and deep ploughing with straw incorporation (DTS). We determined the effects of different treatments on N and P leaching, nutrient pools in arable layer, and maize yield. The results showed that compared to RT, NT treatment decreased the flow amount of leaching and N/P leaching, while maize yield was reduced. DT treatment increased the flow amount of leaching, whereas nutrient pools in arable layer and maize yield were enhanced, indicating the regulating effect on N/P leaching. DTS treatment decreased the flow amount of leaching and N/P leaching, and additionally improved nutrient pools in arable layer and maize yield. In conclusion, the no-tillage measure was more effective for N/P leaching control than deep ploughing-tillage. Furthermore, the deep ploughing with straw incorporation was more beneficial for reducing the loss risk of N/P leaching.

Key words:Tillage measures; Burozem; Nitrogen; Phosphorus; Leaching

土壤氮磷淋失是农田系统养分损失的主要途径之一,也是威胁地下水环境质量安全的重要原因^[1],优化农艺管理措施能够从源头上降低氮磷淋失风险,对于农田面源污染防治意义重大。通过改善农艺措施,农田氮素流失削减率可达15%~92%^[2-5]。华北小麦-玉米轮作体系研究显示,农田

土壤水分渗漏和硝态氮淋失主要发生在高温多雨的玉米生长季,优化施肥处理使总氮淋失量降低23%~31%^[6]。在陕西长武春玉米旱田连续15年定位试验中,采用免耕地膜覆盖措施,0~200 cm土壤硝态氮累积量显著降低69.2%^[7]。目前,针对农田氮磷淋失防控的农艺措施多集中于减量施肥、节水灌溉、秸秆还田、增施生物炭等,有关耕作措施对氮磷淋失的调控作用还不够明确。

适宜的耕作措施能够改善土壤耕层结构,提高土壤保水保肥能力,促进作物生长及养分吸收。深松或翻耕耕作能够打破犁底层,增加有效耕层厚度,为玉米根系下扎提供更充足的生长空

收稿日期:2020-03-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800901)

作者简介:徐嘉翼(1989-),女,助理研究员,硕士,主要从事农业面源污染研究。

通讯作者:牛世伟,男,硕士,副研究员,E-mail: niushiwei@126.com

间^[8-9]。长期翻耕或翻免轮耕能够降低土壤容重,增加土壤的通气性^[10]。翻耕耕作结合秸秆还田有利于土壤养分固存,提高作物产量及氮磷吸收量^[11-14]。合理的耕作措施能够改善作物根系的生长环境,根系的生长分布与土壤养分淋失密切相关^[15-16],耕作措施对农田氮磷淋失的直接影响还有待验证。本试验基于东北典型棕壤玉米种植模式,通过田间试验探究不同耕作措施对氮磷淋失、耕层养分库容及作物产量的影响,明确不同的耕作措施对农田氮磷淋失的调控作用,以期对东北玉米种植生产及面源污染防控提供参考与指导。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于辽宁省铁岭市蔡牛镇张庄村(123°35'59'' E、42°21'12'' N),属半湿润大陆性季风气候,年均气温8.2℃,年均降雨量650 mm。该地区为典型的东北半湿润平原旱田农作区,当地种植结构以单季春玉米为主,长期实行连年旋耕(12~15 cm)作业,农民习惯施氮量为225~240 kg/hm²。试验地土壤类型为棕壤,耕层(0~20 cm)土壤基本理化性状为容重1.51 g/cm³、含水率17.4%、有机质16.2 g/kg、全氮1.63 g/kg、全磷0.41 g/kg、全钾21.9 g/kg、碱解氮84.2 g/kg、有效磷14.2 mg/kg、速效钾89.9 mg/kg、pH 5.42。

1.2 试验设计

采用田间试验,按照不同耕作方式,设置4个处理:旋耕处理(RT),免耕处理(NT),翻耕处理(DT),翻耕+秸秆还田处理(DTS)。每个处理3次重复,小区面积为60 m²。所有处理均施用复合肥(N:P₂O₅:K₂O=26:10:12),施肥量为N 195 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²,随播种机一次性基施。旋耕和翻耕深度分别为12~15 cm和25~30 cm。玉米品种选用铁研58,种植行距58 cm、株距28 cm,于2018年4月27日播种、9月29日收获和2019年4月25日播种、10月9日收获。试验区其他田间管理同当地大田一致。

本试验采用田间原位渗漏法收集淋失液,在各处理小区地下埋设田间淋失液收集装置,按照全国农田面源污染国控监测点标准统一建设。安装装置前,先将监测土体(小区中心区域)分层挖出,形成一个长方体土壤剖面(长150 cm×宽80 cm×高90 cm,长边垂直于作物种植行向),下部安装淋失液收集桶,并连接抽液管与通气管,再用

集液膜将土壤剖面四周及底部包裹,最后分层回填土壤、整平小区地表。为防止暴雨期小区之间、小区和周边地块之间发生串水现象,各小区之间进行田埂分隔。经过约半年的土壤自然沉积,于2018年4月投入试验。

1.3 样品采集与测定

每次降雨后均检查是否发生淋失,每次淋失事件均记录采样日期、单独计量淋失水量、采集淋失液样品。采样时期一般为降雨后7天内,若遇连续降雨,需间隔2~3天采样。采样时,将真空泵连接缓冲瓶,缓冲瓶连接采样瓶,采样瓶连接淋失液采集桶的抽液管,保证各接口处连接紧密,再启动真空泵将淋失液全部抽入采样瓶中,计量淋失液体积,并将采集的淋失液样品当天带回实验室进行分析测试。采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮(TN)浓度,采用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法测定总磷(TP)浓度^[17]。

玉米收获时,选取各小区中间两垄(约15 m²)进行测产,取10穗玉米和10株秸秆测定鲜重,马上晾晒风干,最终产量按照14%标准水进行折算。收获后第2天,各小区选取5点用卷尺测量有效耕层厚度,采用环刀法分层取样测定土壤容重及土壤含水率。采用多点混合取样法,各小区用土钻分层取样,将土样自然风干后过60目筛,测定土壤碱解氮和有效磷含量。采用碱解扩散法测定碱解氮含量、NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量^[17]。

1.4 数据处理与分析

耕层养分库容计算公式如下^[10]:

$$S = C \times B \times H \times 10^{-1}$$

式中,S为耕层碱解氮或有效磷库容(kg/hm²);C为耕层碱解氮或有效磷养分含量(mg/kg);B为耕层土壤容重(g/cm³);H为耕层厚度(cm)。

氮磷淋失负荷计算公式如下^[2]:

$$L = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i / 1000$$

式中,L为氮或磷淋失负荷(kg/hm²);C_i为第i次淋溶液氮或磷浓度(mg/L);V_i为第i次淋溶液量,即淋溶液体积(m³/hm²)。

降雨量来源于当地小型气象站的监测数据。由于2018年降雨较少,未监测到淋失事件,因此仅将2019年相关数据用以氮磷淋失分析,将2018、2019年两年数据用作耕层养分库容及玉米产量分析。采用Excel 2010、SigmaPlot 12.5软件进行数据处理,SAS 9.4软件对不同处理组之间的数

据进行差异显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对氮磷淋失的影响

2.1.1 不同处理对淋失水量的影响

2019年试验区玉米全生育期降雨量共计688 mm(图1),降雨主要集中在8月份,该月累积降雨量占总降雨量的55.0%。各处理均监测到9次淋失事件,淋失水总量为307~347 m^3/hm^2 (图2),其中8月份淋失水量最大,占比总量达83.2%,这是因为试验区8月份正值台风“利奇马”影响,其降雨频率、强度、持续时长及累积降雨量均为本年度峰值,而淋失水量与降雨情况密切相关。5~9月各处理均发生淋失事件,且当月淋失水量(5月份除外)与对应的月累积降雨量呈现正相关趋势。5月降雨量虽高于6、7月份,但淋失水量却低于两者,这可能与5月份试验区土壤含水率较低有关。水分淋失的前提是土壤水分达到饱和状态,在降雨或灌溉等外部驱动下才能产生多余水分向下运移^[18]。试验区5月前期降雨极少,且玉米春播期和苗期(4~5月)正值辽北春季大风干旱气候,该时期土壤含水率偏低^[19],6、7月降雨量虽低于5月份,但由于前期降雨持续累积,土壤含水率较高,在降雨的驱动下更易引起水分淋失^[20]。

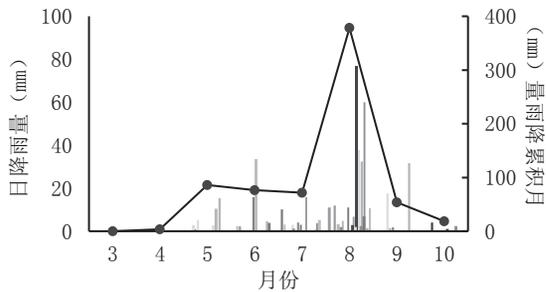
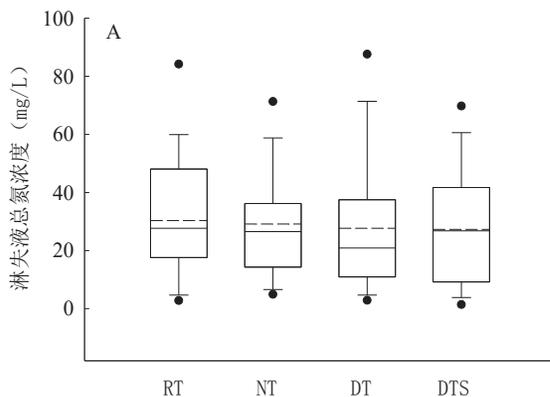


图1 2019年玉米生育期降雨量



由图2可知,不同处理之间DT处理淋失水量最高(347 m^3/hm^2),其次为RT处理(337 m^3/hm^2)和DTS处理(315 m^3/hm^2),NT处理淋失水量最低(307 m^3/hm^2)。在同一耕作方式下,DTS处理淋失水总量比DT处理降低9.22%。说明免耕耕作由于对耕层扰动较少,降低土壤水分淋失量,翻耕耕作在打破犁底层的同时,提高土壤水分入渗能力,增加淋失水量,但在秸秆还田条件下,有利于减缓土壤水分淋失。

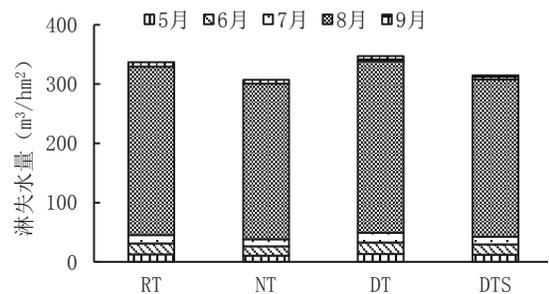


图2 不同处理对淋失水量的影响

2.1.2 不同处理对氮磷淋失负荷的影响

由于降雨等自然因素影响,不同淋失时期淋失液TN、TP浓度异质性较大。在2019年玉米全生育期,淋失液TN浓度为2.46~89.8 mg/L(图3A)、TP为0.04~0.38 mg/L(图3B)。所有处理中,DTS处理淋失液TN平均浓度最低,其TN最低浓度和最高浓度均低于其他处理,其次为DT处理,其淋失液TN平均浓度比RT和NT处理降低8.87%和5.14%;DT处理淋失液TP平均浓度最低,其TP最高浓度均低于其他处理、TP最低浓度低于RT和NT处理。

TN淋失负荷为8.59~10.2 kg/hm^2 (图4A),TP淋失负荷为43.7~49.3 g/hm^2 (图4B),TN淋失负荷远超过TP,这是因为磷比氮更易被土壤固定,迁移性较弱。不同处理之间比较,TN淋失负荷大小依次为RT>DT>NT>DTS,与常规耕作RT处理相

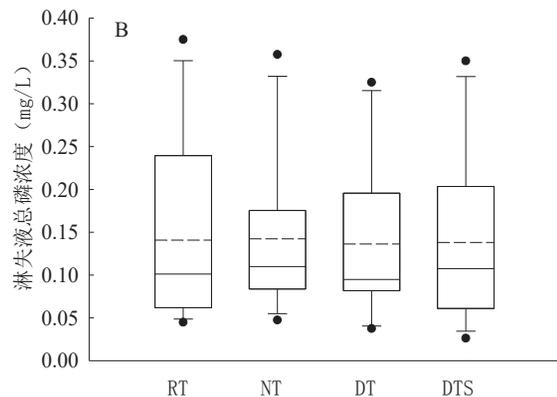


图3 不同处理对淋失液总氮、总磷浓度的影响

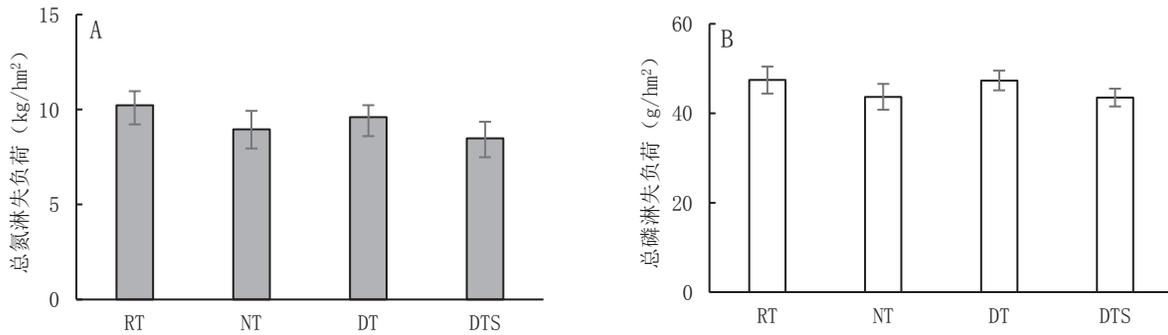


图4 不同处理对氮磷淋失负荷的影响

比,DT、NT和DTS处理分别减少6.05%、12.4%和15.9%。在TP淋失负荷方面,与常规耕作RT处理相比,DT处理略有降低、NT处理降低7.89%、DTS处理降低8.25%。可见,免耕和翻耕耕作均不同程度地削减氮磷淋失,其中免耕耕作削减效果优于翻耕,在翻耕耕作结合秸秆还田条件下,氮磷淋失负荷进一步降低。

箱体内的实线和虚线分别表示中值和平均值。箱体的上边缘线、下边缘线、上误差线、下误差线、上圆点、下圆点分别表示第25、75、5、95、0.5、0.95百分位数。

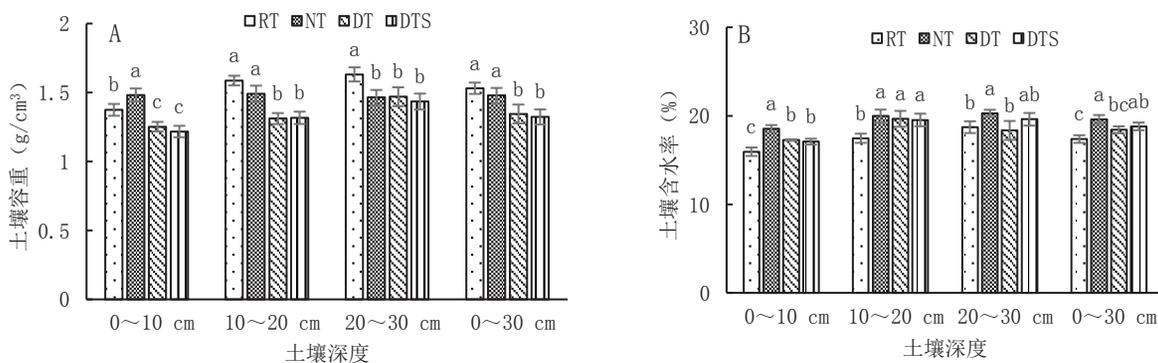
2.2 不同处理对耕层养分库容的影响

2.2.1 不同处理对土壤容重及含水率的影响

不同处理对土壤容重产生一定影响(图5A)。DT处理0~30 cm土壤容重比RT和NT处理显著下降12.2%和9.10%,尤其在玉米根系生长最密集的0~20 cm耕层中,DT处理土壤容重均显著低于RT和NT处理,使其土壤容重值(1.34 g/cm³)处于作物生长最适范围;NT处理在0~10 cm土壤容重最

高,比RT处理显著增加7.87%,随着土壤深度增加,其土壤容重呈现下降趋势,尤其在20~30 cm耕层中,比RT处理显著降低10.2%,这是由于免耕耕作基本未扰动表层土壤,表层土壤容重有所增加,该试验区长期实行浅旋耕作,导致犁底层上移、土壤耕层逐年变浅,较深土层土壤容重逐年增加。同一耕作方式下,DTS处理土壤容重略低于DT,两者之间无显著差异。可见,翻耕耕作及其结合秸秆还田措施均降低耕层土壤容重,有利于改善耕层土壤结构。

不同处理土壤含水率也存在差异(图5B)。NT处理0~30 cm土壤含水率最大,尤其在0~10 cm耕层中,比RT、DT和DTS处理显著增加2.59、1.26和1.25个百分点。RT处理0~30 cm土壤含水率最小,低于其他处理。DTS处理土壤含水率略高于DT,但未达到显著差异。可见,免耕耕作由于对耕层土壤扰动较少,避免土壤失水跑墒,因此土壤含水率最高;翻耕耕作结合秸秆还田有利于土壤蓄水保墒,土壤含水率也呈现较高水平。



注:不同小写字母表示同一土壤深度处理间差异显著($P<0.05$)

图5 不同处理对土壤容重及含水率的影响

2.2.2 不同处理对有效耕层养分库容的影响

不同处理对有效耕层厚度产生一定影响(表1),与RT处理相比,NT处理有效耕层厚度降低6.77%,DT和DTS处理则显著增加30.1%和36.1%。NT处理耕层碱解氮和有效磷含量最高,

其次为DTS处理,处理间无显著差异。在有效耕层养分库容方面,DTS处理最多,NT处理最少。与RT和NT处理相比,DT处理碱解氮养分库容增加11.7%和17.3%($P<0.05$)、有效磷养分库容增加7.96%和10.9%,DTS处理碱解氮养分库容显著增

表1 不同处理对有效耕层养分库容量的影响

处理	有效耕层厚度	容重(g/cm ³)	养分含量(mg/kg)		养分库容量(kg/hm ²)	
			碱解氮	有效磷	碱解氮	有效磷
RT	13.3 ± 1.01b	1.53 ± 0.04a	92.7 ± 2.08a	5.55 ± 0.74a	188 ± 6.73bc	11.3 ± 1.37 b
NT	12.4 ± 1.14b	1.48 ± 0.04a	97.7 ± 3.51a	6.03 ± 0.81a	179 ± 8.65c	11.0 ± 1.63b
DT	17.3 ± 2.09a	1.34 ± 0.06b	91.0 ± 6.08a	5.29 ± 0.70a	210 ± 12.3ab	12.2 ± 1.69ab
DTS	18.1 ± 1.58a	1.32 ± 0.05b	95.0 ± 6.56a	6.05 ± 0.58a	227 ± 26.7a	14.5 ± 1.81a

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同

加20.7%和26.8%、有效磷养分库容显著增加28.3%和31.8%。可见,翻耕耕作及其结合秸秆还田措施均增加有效耕层速效养分库容,这种耕层养分扩容主要是因为翻耕耕作打破犁底层,增加有效耕层厚度。

2.3 不同处理对作物产量的影响

不同处理之间比较,玉米籽粒产量大小依次表现为DTS>DT>RT>NT,未达到显著差异水平(表

2)。所有处理中,DTS处理玉米穗长、穗粗、百粒重、籽粒产量和秸秆生物量均优于其他处理,其中籽粒产量比RT、NT和DT处理增加8.75%、12.7%和3.59%,秸秆生物量比NT处理显著增加18.4%。尽管各耕作措施未表现出显著的产量效应,但本试验结果显示,翻耕及其结合秸秆还田措施促进玉米地上部生物量增加,有利于玉米产量增产。

表2 不同处理对玉米产量和穗部性状的影响

处理	穗长(cm)	穗粗(mm)	百粒重(g)	籽粒产量(kg/hm ²)	秸秆生物量(kg/hm ²)
RT	19.1 ± 0.87a	46.7 ± 2.51a	39.4 ± 1.37a	9 889 ± 668a	10 724 ± 648ab
NT	18.9 ± 0.75a	47.4 ± 1.86a	38.7 ± 0.35a	9 539 ± 988a	10 347 ± 1 040b
DT	18.6 ± 0.86a	45.9 ± 1.91a	39.0 ± 0.51a	10 381 ± 1012a	11 606 ± 1 351ab
DTS	19.9 ± 0.90a	47.8 ± 1.95a	39.9 ± 1.48a	10 754 ± 733a	12 249 ± 669a

3 结论与讨论

在本试验中,免耕由于对耕层扰动较少,有利于土壤蓄水保墒,对于水分淋失具有一定削减效果,这与前人研究结果一致^[21]。翻耕处理土壤氮磷淋失呈下降趋势(6.05%),这可能是因为翻耕耕作的深度达25~30 cm,有效打破原有犁底层,显著增加有效耕层厚度(30.1%),降低土壤容重(12.2%),为玉米根系下扎提供更充足的生长空间,已有研究表明增加根系生长空间有利于降低养分淋失。在根系生长垂直深度对硝态氮淋失影响的研究发现,当玉米根系的垂直生长空间增至40 cm以上时,土壤硝态氮淋失累积明显减少^[15]。在设施蔬菜地利用秸秆还田或土壤调理剂等调控措施,促进填闲作物根系下扎与生长,使0~100 cm土层硝态氮残留量显著降低^[16]。此外,由于有效耕层厚度的增加,翻耕耕作扩充碱解氮和有效磷养分库容(11.7%和7.96%),为玉米生长提供良好养分条件,使得玉米地上部生物量有所提高,间接增加作物氮磷养分输出量,降低土壤氮磷淋失风险。研究表明,在同等条件下裸地农田氮磷流失量远远超出种植作物的耕地^[22],且作物收获

时,其携带的氮磷养分输出量越多,越有利于降低农田氮磷流失风险^[23-24]。可见,翻耕耕作改善耕层土壤结构,扩充有效耕层速效养分库容,有利于促进玉米根系下扎和养分吸收,提高玉米地上部生物量及养分输出量,对于土壤氮磷淋失具有一定调控作用,但由于其打破犁底层,增加土壤水分入渗,在一定程度上也加大氮磷淋失风险。

在翻耕基础上结合秸秆还田措施,土壤水分淋失有所下降,且氮素淋失明显降低(15.9%),这可能是由于秸秆具有吸水性,可延缓土壤含水率到达饱和状态^[25],减缓土壤因含水饱和而引起多余水分向下运移,同时秸秆作为阻隔缓冲层,能够缓解雨滴对土壤的冲击^[26],减缓因雨水冲刷造成耕层结构受损而引起淋失。而且,玉米秸秆能够促进土壤团聚体形成与稳定^[27],提升土壤吸附性能,增强土壤养分的固定作用,且秸秆作为碳源,能够调节土壤氮的固持转化^[28-29],将易流失的矿质氮转化为相对稳定的结合态氮,有利于降低氮素淋失。

可见,免耕和翻耕耕作均不同程度地削减氮磷淋失,其中免耕耕作削减效果优于翻耕,在翻耕耕作结合秸秆还田条件下,更有利于降低氮磷

淋失风险。由于农田土壤氮磷淋失受区域水文条件、土壤属性、种植模式等多种因素影响,该结果仍需在大田试验中进一步验证。

参考文献:

- [1] 孙 铖,周华真,陈 磊,等.东北三省农田化肥氮地下淋溶污染等级评估[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):405-411.
- [2] 彭 畅,朱 平,张秀芝,等.基于渗漏池法研究施肥对东北中部雨养区玉米氮素地下淋溶的影响[J].玉米科学,2015,23(6):125-130.
- [3] Cui F, Zheng X H, Liu C Y, et al. Assessing biogeochemical effects and best management practice for a wheat-maize cropping system using the DNDC model[J]. Biogeosciences, 2014, 11(1): 91-107.
- [4] Ruidisch M, Bartsch S, Kettering J, et al. The effect of fertilizer best management practices on nitrate leaching in a plastic mulched ridge cultivation system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 169: 21-32.
- [5] 沈 晨,颜 鹏,魏吉鹏,等.生物质炭对土壤硝态氮淋洗的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(4):292-300.
- [6] 袁 京,李国学,李荣花,等.小麦/玉米轮作体系中不同施肥方法下的养分淋溶排污系数测算[J].农业环境科学学报,2015,34(4):738-744.
- [7] 胡锦昇,樊 军,付 威,等.保护性耕作措施对旱地春玉米土壤水分和硝态氮淋溶累积的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1188-1198.
- [8] 李 华,逢焕成,任天志,等.深旋松耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响[J].中国农业科学,2013,46(3):647-656.
- [9] 闫伟平,边少锋,赵洪祥,等.半干旱区深松垄作对春玉米生长及产量的影响[J].东北农业科学,2016,41(6):21-25.
- [10] 汤文光,肖小平,张海林,等.轮耕对双季稻田耕层土壤养分库容及Cd含量的影响[J].作物学报,2018,44(1):105-114.
- [11] 赵士诚,曹彩云,李科江,等.长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1441-1449.
- [12] 徐永刚,马 强,周 桦,等.秸秆还田与深松对土壤理化性状和玉米产量的影响[J].土壤通报,2015,46(2):428-432.
- [13] 冯 晔,王春雷,张玉霞,等.深松对干旱灌区玉米光合特性及产量的影响[J].吉林农业科学,2015,40(1):23-28.
- [14] 黄婷苗,郑险峰,侯仰毅,等.秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):853-863.
- [15] Feng G Z, He X L, Coulter J A, et al. Effect of limiting vertical root growth on maize yield and nitrate migration in clay and sandy soils in Northeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 195: 104407.
- [16] 吉艳芝,刘辰琛,巨晓棠,等.根层调控对填闲作物消减设施蔬菜土壤累积硝态氮的影响[J].中国农业科学,2010,43(24):5063-5072.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:41-49,71-79.
- [18] 杨宪龙,路永莉,同延安,等.施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J].土壤学报,2013,5(3):564-573.
- [19] 黄 毅,张玉龙,邹洪涛,等.辽西北旱农区的气候特点与土壤墒情调控[J].水土保持通报,2007,27(6):203-206.
- [20] 赵 野,苏芳莉,崔 彬,等.土壤前期含水量对棕壤土坡耕地养分流失的影响[J].水土保持学报,2011,25(1):25-29.
- [21] 胡立峰,胡春胜,安忠民,等.不同土壤耕作法对作物产量及土壤硝态氮淋失的影响[J].水土保持学报,2005,19(6):186-189.
- [22] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review[J]. Annals of Applied Biology, 2013, 162: 145-173.
- [23] 张 丹,付 斌,胡万里,等.秸秆还田提高水稻-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.
- [24] 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.
- [25] 邱立春,孙跃龙,王瑞丽,等.秸秆深还对土壤水分转移及产量的影响[J].玉米科学,2015,23(6):84-91.
- [26] Wang J, Lu 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.
- [27] 梁 卫,袁静超,张洪喜,等.东北地区玉米秸秆还田培肥机理及相关技术研究进展[J].东北农业科学,2016,41(2):44-49.
- [28] 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.
- [29] Shan J, Yan X. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. Atmospheric Environment, 2013, 71(3): 170-175.

(责任编辑:王 昱)