

受淹农田土壤-上覆水氮磷迁移特征模拟研究

杨继伟^{1,2}, 汤广民^{1,2*}, 李如忠³, 袁先江^{1,2}, 袁宏伟^{1,2}, 蒋尚明^{1,2}

(1. 安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000;

2. 水利水資源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000; 3. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要:【目的】研究受涝农田土壤中氮磷流失规律及上覆排水中氮磷释放特征, 探求合理的排水时间。【方法】基于原状土试验测坑开展大豆淹水试验, 分析了淹水前后土壤中氮磷变化量、淹水过程中土壤pH值、*Eh*值以及上覆水中氮磷质量浓度的变化。【结果】随着淹水历时延长, 土壤氮磷损失率增加, 2次试验淹水结束较淹水前土壤全氮、全磷损失率均值约为7.63%和3.17%, 碱解氮降低17.84%, 有效磷增加8.65%; 上覆水中TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N质量浓度在淹水第1天增速较快, 分别达到0.405、0.192和0.209 mg/L, 2~4 d时间内TN质量浓度缓慢增加, NH₄⁺-N和NO₃⁻-N质量浓度之和减少为0.226 mg/L, 第4天至淹水结束, TN和NH₄⁺-N质量浓度增加, NO₃⁻-N质量浓度继续降低, 整个淹水过程无机氮质量浓度占总氮比例由98.5%降至54.4%; 淹水过程中上覆水含磷量不断增加, 呈现二次多项式变化特征, 淹水结束TP质量浓度为0.615 mg/L, 其中可溶性磷酸盐占TP质量浓度的80.5%~91.6%; 淹水后, 受试土壤的pH值和*Eh*值降低, 进一步增强了土壤中氮磷向上覆水迁移的能力。【结论】综合考虑受淹农田氮磷迁移特征和作物产量等因素, 农作物在受淹后应采取控制排水措施, 以减少氮磷随地面排水的流失。大豆花荚期受淹后第3天为最佳排水时机。

关键词:受淹试验; 农田土壤; 氮磷流失; 控制排水

中图分类号:S19

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.20180217

杨继伟, 汤广民, 李如忠, 等. 受淹农田土壤-上覆水氮磷迁移特征模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 71-77.

0 引言

涝渍是我国常见的自然灾害, 仅淮河流域平均每年易涝耕地面积多达185万hm²^[1]。涝渍灾害不仅导致农作物产量和品质下降, 还对农田水土环境造成影响^[2-6]。处于淹水状态下, 土壤的理化特性和作物生长的环境发生改变, 土壤pH值趋于中性变化, 含氧量和氧化还原电位(*Eh*)值降低, 土壤TOC的量减少, 而DOC量增加, 土壤中氮磷等养分的有效性或者迁移转化能力发生改变; 同时, 土壤中氮磷等物质通过土-水界面向上覆水中迁移, 使上覆水水质发生变化。农田排水作为农田除涝降渍的主要手段, 能够为农作物生长创造良好的环境条件, 然而排水的同时也会导致农田土壤中氮磷等养分的流失, 产生面源污染, 不合理排水加大了对周围水体的污染风险^[7-9]。

目前, 国内外学者基于实验室模拟研究土-水界面氮磷迁移转化较多, 或研究淹水环境下稻田土壤中氮磷流失特征及其排水对周围环境的影响^[8-10], 对旱作物农田受淹后土壤氮磷流失和上覆积水氮磷释放特征研究较少。此外, 传统的排水指标标准主要基于作物生长发育和产量因素制定^[1, 11-12], 而兼顾农田排水指标与标准, 采用专项设施进行室外测坑模拟雨后受淹农田土壤及水体中氮磷变化特征及其排水对水环境影响的试验研究尚不多见。近几年控制排水成为研究的热点, 不仅考虑作物生长、排水效率和水资源利用等因素, 而且开始关注控制排水对氮磷减排的影响^[13-14]。我国北方地区尤其是黄淮海平原农业种植以旱作物为主, 易涝洼地较多, 有必要开展旱作物专项淹水试验, 探求土壤氮磷流失规律及农田排水过程中上覆水氮磷释

收稿日期:2018-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51579061); 国家青年科学基金项目(51409002); 安徽省水利科技计划项目(slkj201603); 安徽省水利科学研究院青年创新基金项目(sk201708)

作者简介:杨继伟(1989-), 男, 安徽萧县人。硕士研究生, 主要从事农田灌排理论与农田水土环境保护研究。E-mail: yjwei1989@163.com

通信作者:汤广民(1965-), 男。教授级高级工程师, 主要从事农田灌溉排水理论与应用研究。E-mail: gmtang.19@163.com

放特征,为农田土壤保肥、农业节水减排和面源污染控制提供一定技术支撑,同时对农田排水指标的制定和控制排水也有实际意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究在安徽省水科院新马桥农水综合试验站开展,站区位于安徽省蚌固路距离蚌埠市中心 22 km 处,区域多年平均降水量为 900 mm 左右,且汛期雨量约占全年降水量的 70%。研究区域土壤为淮北平原区典型的砂姜黑土,该土壤以蒙脱石、伊利石等矿物为主,质地黏重,胀缩性强,遇到强降雨或连续降雨容易产生涝渍灾害。测坑土壤为原状砂浆黑土,试验前采集表层 0~20 cm 土壤,测得其理化性质见表 1。

表 1 供试土壤理化性质

指标	全氮量/ (g·kg ⁻¹)	全磷量/ (g·kg ⁻¹)	有机质量/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮量/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷量/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾量/ (mg·kg ⁻¹)	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	田间持水率/%
数值	1.01	0.58	14.78	64.52	50.94	48.52	1.4	28.0

1.2 试验方法与方案设计

本研究结合大豆受涝试验,2016 年和 2017 年利用试验站 16 个排水测坑开展淹水试验。每个测坑规格为 1.41 m×1.41 m×2.40 m(长×宽×高),其中上层为深度 2 m 的原状土,底部有 0.3 m 的滤层,测坑四周和底部隔绝外界水进入,上部设有防雨棚。测坑内水位调控范围为-230~15 cm(设测坑内土面标高为 0 cm)。大豆种植前以复合肥(N、P、K 量各 15%)为基肥,施肥量为 30 g/坑;2 次淹水试验时期均为大豆花荚期,在 2~9 d 时间区间设置不同淹水历时,淹水深度 10 cm,具体见表 2。淹水试验水源为深层地下水,从测坑上部人工计量灌水,通过计算机自控系统调节测坑地下水位高度。淹水结束,高于地表的上覆水从测坑上端人工排出,排水量约为 0.2 m³,地表以下的水从测坑下端自动排水系统排出,直至水位降至-150 cm。

表 2 淹水试验设计

处理	测坑编号	2016 年淹水历时/d	2017 年淹水历时/d
T1	P1、P3、P10	2	3
T2	P4、P5、P15	4	6
T3	P6、P8、P13	6	9
T4	P9、P12、P16	8	/
CK	P2、P7、P11、P14	0	0

注 CK 为正常地下水位-150 cm 的情况,淹水处理组均为地表淹水 10 cm 深度;“/”代表淹水深度 0 cm 处理。

淹水过程中每天上午 08:00 观测测坑内水温、土温、土壤 pH 值和 *Eh* 值,同时采集上覆水水样。淹水前和排水后 1 d 分别采集相应测坑表层 0~20 cm 土壤,风干后研磨,分析指标有全氮、全磷、碱解氮、有效磷,全氮采用凯氏定氮法,碱解氮采用碱解扩散法,全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮钼锑抗比色法,有效磷(Olsen-P)采用 NaHCO₃ 提取-钼锑抗比色法,测试方法依照《土壤农化分析》^[15]。另外每天采集的上覆水水样在 48 h 内完成测试,测试指标包括总氮(TN)、氨态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、可溶性磷酸盐(SRP)等,具体测试分析方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[16],采用 Smart chem 200 全自动化学分析仪、全自动凯氏定氮仪等仪器完成测试。

1.3 数据分析

采用 Excel 2007 和 Spss22.0 数据处理软件对该文中数据进行统计分析并作图。

2 结果与分析

2.1 淹水对土壤氮磷养分的影响

为对比不同淹水历时条件下淹水前后土壤氮磷的变化特征,分别对 2 次淹水试验土壤全氮、碱解氮、全磷及 Olsen-P 的量进行统计分析,结果见图 1(图中采用 Duncan’s multiple range test 分析方法,同处理不同字母表示淹水后较淹水前土壤氮磷差异显著性(*P*<0.05)。。由图 1 可知,淹水处理组土壤中全氮、碱解氮和全磷在淹水排除后均有不同程度的降低,且随着淹水历时的延长,降低幅度逐渐增大,而 CK 变化量很小。2016 年试验处理淹水后较淹水前土壤全氮、碱解氮和全磷损失出现显著差异的时间分别为淹水 4、2 和 6 d,其相应氮磷损失率分别为 5.56%、17.57%和 1.07%;2017 年试验处理全氮、碱解氮和全磷淹水后较淹水前达

到显著差异的时间分别为淹水6、9和6 d,其相应损失率分别为2.45%、14.16%和1.98%。虽然淹水后土壤氮磷损失出现显著差异的淹水历时长有所差别,但2次试验淹水历时最长的处理(2016年T4,2017年T3,下同)淹水后较淹水前土壤全氮、全磷损失率均值为7.63%和3.17%,碱解氮降低约17.84%,表明农田在淹水-排水过程中造成了土壤氮磷的损失,且氮磷损失率随淹水历时的延长而增大。

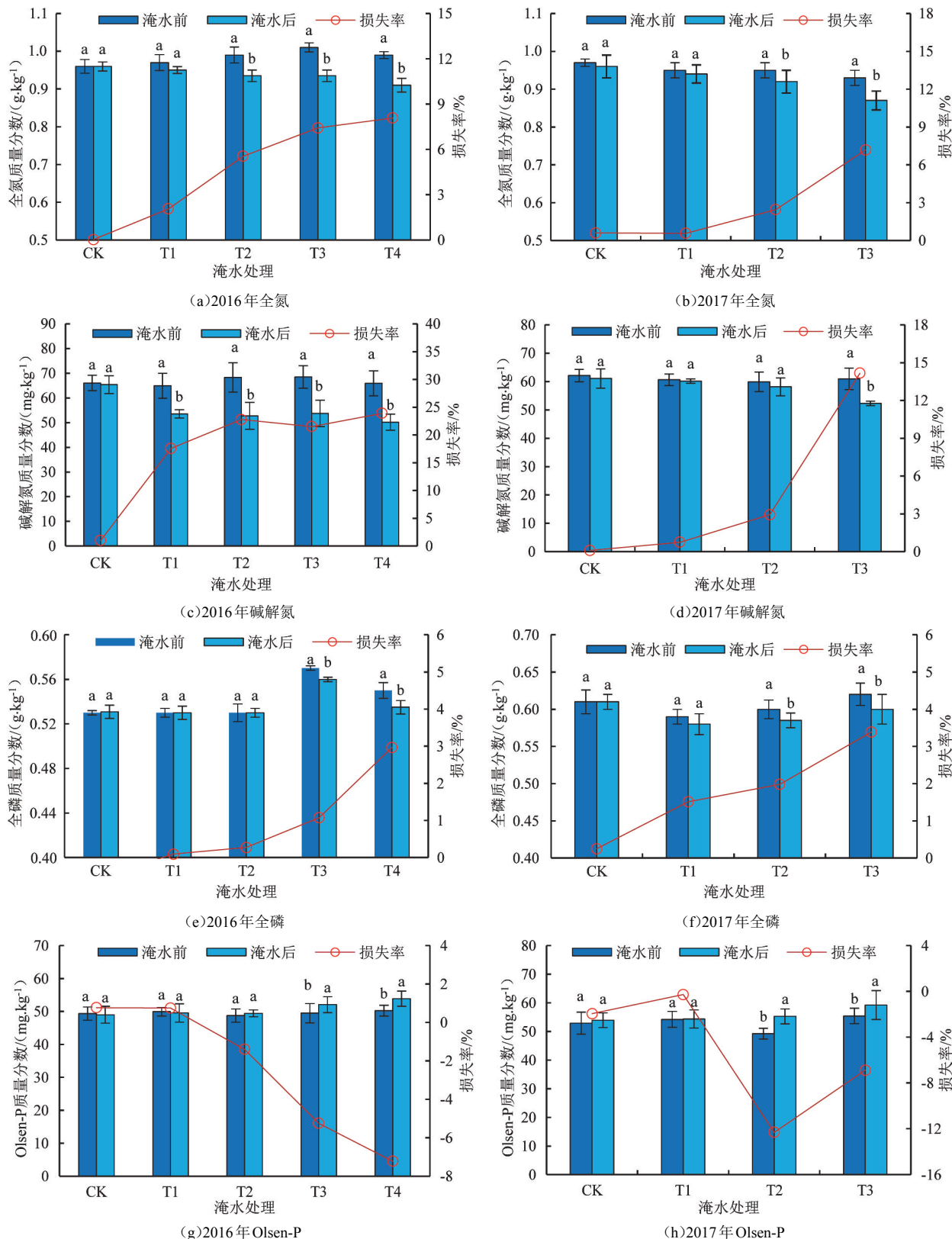


图1 淹水前后土壤氮磷变化特征

由图1(g)和图1(h)可看出,淹水组Olsen-P损失率表现为负值,而CK的变化很小,意味着淹水后土壤Olsen-P增大。2016年淹水试验随着淹水历时延长土壤Olsen-P增加趋势较为明显,且淹水6、8 d处理达到

显著差异;2017年各处理土壤Olsen-P虽然出现起伏变化,但总体呈增加趋势,在淹水6 d后Olsen-P的量较淹水前达到显著差异,且该处理的增量甚至超过10%。2次试验淹水历时最长的处理淹水后较淹水前土壤Olsen-P平均增加8.65%,表明农田短期涝渍有助于提高土壤磷的有效性。

2.2 上覆水中氮磷变化特征

通过对2次淹水试验各处理上覆水中氮、磷相关指标的数据分析,发现不同淹水历时处理组之间同一指标质量浓度随着淹水历时延长变化趋势基本一致。为便于结果分析,选择2次淹水试验中淹水历时最长的处理组(即2016年T4和2017年T3)作为代表,反映上覆水中氮、磷质量浓度随淹水历时的变化特征,结果见图2,其中灌水水质氮磷背景值为图中淹水历时0 d对应的质量浓度值。

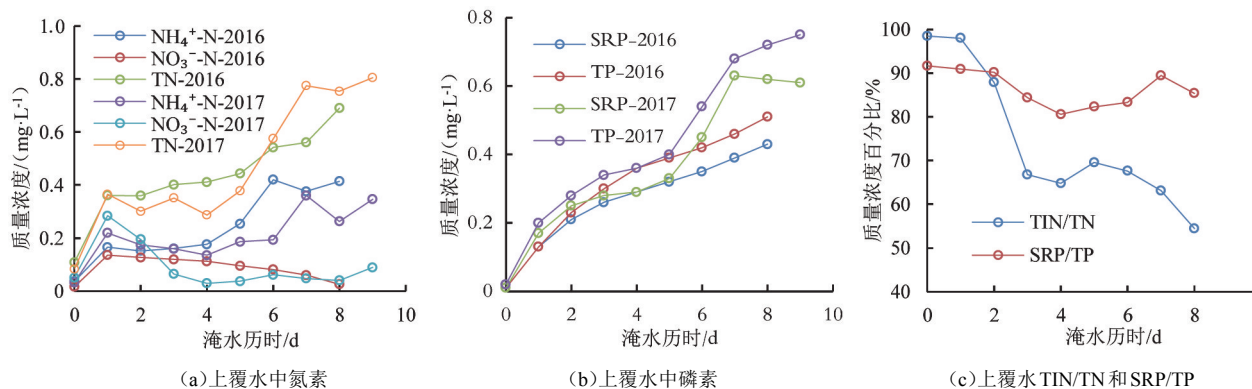


图2 上覆水中氮磷的变化特征

从图2(a)可以看出,2次淹水试验上覆水中TN质量浓度在淹水第1天增速较快,由灌水背景值0.057 mg/L增加到0.405 mg/L,超出氮素水体富营养化临界值0.20 mg/L的水平;在淹水2~4 d增长缓慢,4 d后又出现快速增加,尤其2017年TN在淹水4 d后增加幅度较大,2次淹水结束上覆水TN质量浓度分为0.689 mg/L和0.805 mg/L,均超出地表水Ⅲ类水质标准^[17]。NH₄⁺-N和NO₃⁻-N质量浓度同样在第1天内快速增加,峰值质量浓度分别达到0.192 mg/L和0.209 mg/L,而后出现下降,不同的是NH₄⁺-N下降幅度较小且在淹水4 d后继续增长,而NO₃⁻-N则一直呈降低趋势。自然水体中无机氮主要以NH₄⁺-N和NO₃⁻-N形式存在,二者质量浓度之和常作为总无机氮(Total Inorganic Nitrogen, TIN),除淹水初始值外,2次淹水试验TIN的最小值出现在淹水第4天,质量浓度为0.226 mg/L。由此可见,在淹水条件下土壤中的氮素向上覆水中转移,受环境影响其变化特征较为复杂。

从图2(b)可以看出,上覆水中TP和SRP的变化趋势一致,随着淹水历时延长磷素质量浓度呈现增大趋势,且前期增速较快,后期增速放缓。淹水0~8 d时间,SRP质量浓度均值分别由0.005 mg/L增加到0.525 mg/L,TP由0.006 mg/L增加到0.615 mg/L,最终值远超出了水体富营养化临界值0.02 mg/L水平,甚至超出地表水Ⅴ类水的标准^[17]。通过对2次试验TP均值和SRP均值与淹水历时分别进行回归分析,TP质量浓度 C 与淹水历时 t 的关系为: $C_{TP} = -0.0024t^2 + 0.0885t + 0.0545$, $R^2 = 0.9777$,SRP质量浓度 C 与淹水历时 t 的关系为: $C_{SRP} = -0.0016t^2 + 0.0719t + 0.0479$, $R^2 = 0.9624$,表明土壤磷向上覆水迁移转化符合二次多项式变化特征。

大量研究证明,无机氮和SRP是自然水体中水生植物和藻类的直接氮磷营养源^[18-19],因此农田出排水中的TIN和SRP质量浓度越低越好。经过对2次试验淹水0~8 d数据取均值分别计算TIN/TN和SRP/TP值,结果见图2(c)。从图2(c)可以看出,上覆水中TIN/TN的值随着淹水历时延长呈减小趋势,淹水期内由98.5%变为54.4%,而SRP/TP始终在80.5%~91.6%范围内,表明淹水条件下土壤氮磷的转移特征有较大差别,淹水初期土壤转移至上覆水中的氮素以无机氮为主,随着淹水历时延长无机氮比例降低,且淹水2~3 d下降速度最快,而磷素则主要以SRP的形式存在和转移,且试验期内质量浓度持续上升。

2.3 土-水界面氮磷运移相关性分析

2次淹水试验上覆水中氮磷质量浓度变化量与之对应测坑土壤氮磷流失率及土壤 E_h 值和pH值相关性分析结果见表3。由表3可知,上覆水中NH₄⁺-N与土壤碱解氮、全氮损失率正相关,相关系数分别为0.689和0.882;上覆水中SRP和TP分别与土壤全磷损失率正相关,相关系数分别为0.850和0.880。这进一步说明了淹水条件下土壤中的氮磷向上覆水中迁移。

土壤全氮和全磷损失率的相关系数为0.63,NH₄⁺-N与SRP和TP相关系数分别为0.878和0.813,TN与

SRP和TP的相关系数分别为0.864和0.979,表明本试验中氮磷流失出现协同效应。水体氮磷比作为富营养化的重要指标,常用于自然水体中主要限制营养因子的识别与评价标准^[18-19]。经计算上覆水中氮磷比平均值2.6:1,根据水体富营养化氮磷比判别标准,本试验上覆水中表现为氮素为营养限制因子,磷素较为富足。由于磷素不像氮素可被底泥、水生植物、微生物固定转化为气态释放到空气中,彻底离开受纳水体,一般只能通过底泥物理性吸附或者植物、微生物拦截吸收,条件适宜有再次释放的风险^[20]。因此,受淹农田排水过程中应该监测上覆水磷的质量浓度变化特征,选择适宜的排水时机和方式。

此外,淹水后土壤pH值和Eh值的变化与土壤氮磷流失存在明显负相关性,其中土壤pH值与全氮、全磷的相关系数为0.702和0.764,Eh值与全氮、全磷的相关系数为0.860和0.763,表明淹水条件下土壤pH值和Eh的变化可能会影响到土-水氮磷迁移转化,进一步促进土壤氮磷的释放和流失。

表3 淹水条件下土-水氮磷运移相关性分析结果

指标	上覆水水质指标					土壤养分损失率及其他指标					
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	SRP	TP	碱解氮	全氮	Olsen-P	全磷	Eh	pH值
NH ₄ ⁺ -N	1										
NO ₃ ⁻ -N	0.091	1									
TN	0.642	0.272	1								
SRP	0.878**	0.286	0.864**	1							
TP	0.813**	0.265	0.922**	0.979**	1						
碱解氮	0.689*	0.296	0.19	0.612	0.52	1					
全氮	0.882**	0.066	0.498	0.816**	0.781*	0.842**	1				
Olsen-P	-0.883**	0.256	-0.381	-0.721*	-0.643	-0.685*	-0.890**	1			
全磷	0.747*	-0.045	0.884**	0.850**	0.880**	0.25	0.63	-0.635	1		
Eh	-0.858**	-0.17	-0.648	-0.899**	-0.844**	-0.627	-0.860**	0.625*	-0.763*	1	
pH值	-0.736*	-0.49	-0.892**	-0.959**	-0.963**	-0.549	-0.702*	0.761*	-0.764*	0.809**	1

注 “**”表示在置信度(双测)为0.01时显著;“*”表示在显著性水平(双测)为0.05时显著。

3 讨 论

农田土壤中的氮素由有机氮和无机氮组成,其有效态氮主要以氨态氮和硝态氮为主,大多数研究表明土壤中的铵根离子带正电,容易被胶体吸附迁移能力较弱,而硝酸根不易被吸附,且受雨水或者灌溉等条件影响迁移能力强,容易随地表径流或下渗造成流失^[8,13]。本研究发现,淹水初期土壤氮素迁移转化特征符合上述规律,上覆水中以NO₃⁻-N和NH₄⁺-N为主,且前者质量浓度值略大于后者。随着淹水时间延长,土壤氮素的迁移转化特征发生变化,由上覆水中NO₃⁻-N和NH₄⁺-N的变化可以看出,淹水1 d后至淹水结束NO₃⁻-N质量浓度持续下降,而NH₄⁺-N先降低后增加。出现这种现象的原因应该与特殊的环境有关,由于长时间淹水导致Eh降低,作物根系呼吸加速了土壤缺氧状况,土壤中硝化作用受到抑制,反硝化作用增强,硝态氮降低,向上覆水的迁移量减少。缺氧的环境导致上覆水中有一部分NO₃⁻-N通过反硝化作用而减少,NH₄⁺-N量因挥发和微生物利用出现降低,使得无机氮在淹水第4天出现最低值。整个淹水期上覆水中无机氮比例下降,TN却继续增加,甚至后期NH₄⁺-N也有一定增加,意味着土壤中有机氮向上覆水中转移。张敬智等^[4]研究表明农田由旱田转为淹水环境,土壤中有机质矿化分解速度增加,其中一些可溶性的有机氮或者氨基离子向上覆水中转移,也会促使排水中无机氮比例下降,有机氮比例上升。

土壤磷素淋溶能力对上覆水中磷素的增加起着决定性作用。土壤磷素的淋溶能力与土壤有效磷背景值相关,当土壤中Olsen-P超过某一特定临界值,土壤磷素淋溶能力迅速增强^[21-22]。本试验供试土壤为砂姜黑土,Olsen-P的背景均值为50.940 mg/kg,耿若楠^[21]测得该类型土壤磷素淋溶临界值37.423 mg/kg,其研究区域与本试验站仅相距19 km。由此可见本研究中受试土壤是该地区土壤淋溶临界值的1.4倍,土壤磷素淋溶风险较大,淹水后土壤中磷素极易向上覆水迁移。

土壤磷素淋溶能力不仅与土壤Olsen-P背景值大小有关,还受环境因素影响。砂姜黑土属于中性到石灰性土壤,该土壤磷素以无机磷为主,且以钙、铁结合态的磷酸盐形式存在,干旱时土壤中磷的有效性较低。通过原位测试淹水过程中pH值和Eh,发现该土壤的pH值降低并趋向于中性变化,Eh降低,该结论与其他研究基本一致^[5-6]。在此环境下土壤中钙结合的PO₄³⁻转化为HPO₄²⁻、H₂PO₄⁻,离子交换作用增强,促使钙、

铁结合态的磷游离活化;淹水后 Eh 降低,导致土壤中 Fe^{3+} 转化为 Fe^{2+} ,使 Fe 结合态磷活性增强,也促进了土壤磷的活化。由大豆淹水后土壤速效磷变化特征也可看出,土壤 Olsen-P 淹水后较淹水前提高。此外,土壤 Olsen-P 的浸提试验表明,水温对其结果影响很大,且在 $25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 磷的释放性最强^[15,23]。本研究中大豆淹水试验在 8 月进行,日平均气温基本上处于 $25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区范围,有利于磷的解吸和释放,进一步增强了土壤磷素向上覆水转移的能力。

基于以上对 2 次淹水试验土壤及上覆水氮磷变化特征结果分析,该类型土壤排水的最佳时期应该在淹水 3~4 d,此时土壤氮磷流失率比较低,上覆水中无机氮质量浓度最低,总磷质量浓度也相对较低。排水作为农田除涝降渍的有效手段,不仅要考虑节能减排,更重要的是考虑作物产量因素。袁宏伟等^[2]在该试验项目中对花荚期大豆淹水试验表明,随着淹水历时延长减产率增大,在淹水 0~3 d 时间大豆减产率为 2.29%,而 4~5 d 减产率则达到 23.31%。综合受淹条件下氮磷迁移特征和影响作物生长淹水时间分析,在淹水深度较浅情况下,建议农作物淹水后根据实际情况可采取控制排水措施,减少地表水的排放,花荚期大豆在淹水后第 3 天排水为最佳时期。

4 结论与建议

1)在淹水环境下,土壤中的氮、磷因向上覆水中迁移而损失,且随着淹水历时的延长,氮磷损失率呈增加趋势;不同的淹水-排水方式,氮磷损失率不同;由旱田转为淹水环境,土壤有效磷量增加。

2)上覆水中氮素质量浓度在淹水第 1 天时间内快速上升,淹水 2~4 d 时间 TN 缓慢增加, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 则出现降低,淹水 4 d 至结束(8~9 d)TN 和 NH_4^+-N 增加, NO_3^--N 继续降低;整个淹水过程无机氮所占比例呈下降趋势。

3)大豆淹水期间,上覆水中磷的质量浓度随着淹水历时延长持续增加,且以 SRP 形态磷为主,前期增速较快,后期增速降低,短期内符合二次多项式曲线的变化特征。

4)淹水后,受试土壤的 pH 值和 Eh 降低,其变化趋势与土壤氮磷损失率表现为负相关关系,进一步增强了土壤中氮磷向上覆水迁移的能力。

5)综合考虑受淹农田氮磷迁移特征和影响作物产量的淹水时间等因素,建议农作物受淹后可根据实际情况采取控制排水措施,减少地表水的排放,以减少氮磷流失。根据本试验结果和讨论分析,大豆花荚期受淹后第 3 天为排水最佳时期。

参考文献:

- [1] 夏广义,李燕. 安徽省淮河流域易涝洼地涝灾及其损失研究[J]. 水利规划与设计, 2013(1): 28-29, 47.
- [2] 袁宏伟,袁先江,汤广民,等. 花荚期涝渍胁迫对大豆生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 27-30.
- [3] 王晓森,邓忠,张文正,等. 棉花不同生育期淹水历时对其生长状况和产量构成的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 1-6.
- [4] 张敬智,马超,邵红建. 淹水和好气条件下东北稻田黑土有机碳矿化和微生物群落演变规律[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1 160-1 166.
- [5] 朱丹妹,刘岩,张丽,等. 不同类型土壤淹水对 pH、 Eh 、Fe 及有效态 Cd 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1 508-1 517.
- [6] 王明,张晴雯,杨正礼,等. 宁夏引黄灌区干湿交替过程中土壤 Eh 的动态变化及影响因素[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 47-51.
- [7] 张露萍,朱建强,吴启侠,等. 花铃期减量施肥对棉田径流养分流失的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 51-55.
- [8] 杨瑞,童菊秀,李佳韵,等. 稻田地表径流氮素流失量数值模拟及淋失规律[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 63-69.
- [9] 刘汝亮,王芳,张爱平,等. 引黄灌区不同肥料类型和施肥技术对稻田氮磷流失的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(9): 46-49.
- [10] 田娟,刘凌,丁海山,等. 淹水土壤土-水界面磷素迁移转化研究[J]. 环境科学, 2008(7): 1 818-1 823.
- [11] 晏军,吴启侠,朱建强,等. 中稻灌浆期对淹水胁迫的响应及排水指标研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 59-65.
- [12] 杨威,朱建强,吴启侠,等. 油菜对渍涝胁迫的响应及排水指标研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 27-30.
- [13] 王苏胜,周明耀,刘璐嘉,等. 农田排水策略对氮素流失影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 138-140.
- [14] 刘馨井雨,王修贵,田英,等. 基于湿地和生态沟处理的稻田排水水质模拟[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 101-107.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 中国环境科学研究院. 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.
- [18] SIRPAR Lehtinen, TIMO Tamminen, ROBERT Ptacnik, et al. Phytoplankton species richness, evenness, and production in relation to nutrient availability and imbalance[J]. Limnology and Oceanography, 2017, 62(4): 1 393-1 408.
- [19] 孟顺龙,袁丽萍,胡庚东,等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1 438-1 444.
- [20] 王晓玲,郑晓通,李松敏,等. 农田排水沟渠底泥-间隙水-上覆水氮磷迁移转化规律研究[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1 410-1 418.

- [21] 耿若楠. 淮北地区典型人工林地土壤氮磷形态及流失风险分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [22] XI Bin, ZHAI Limei, LIU Jian, et al. Long-term phosphorus accumulation and agronomic and environmental critical phosphorus levels in haplic luvisol soil, Northern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1): 200-208.
- [23] SÁNCHEZ M, BOLL J. The effect of flow path and mixing layer on phosphorus release: physical mechanisms and temperature effects[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(5): 1 600-1 609.

Loss of Nitrogen and Phosphorus From Soil and Surface Water in Flooded Cropland

YANG Jiwei^{1,2}, TANG Guangmin^{1,2*}, LI Ruzhong³, YUAN Xianjiang^{1,2}, YUAN Hongwei^{1,2}, JIANG Shangming^{1,2}

(1. Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu 233000, China; 2. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Bengbu 233000, China; 3. Department of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: **【Objective】** This paper studies the loss of nitrogen and phosphorus from soil and surface water in flooded cropland in attempts provide data to help design drainage strategies. **【Method】** The experiment was conducted in a lysimeter filled with undisturbed soil and grown with soybean. During the experiment, nitrogen, phosphorus, pH and *Eh* in the soil as well as nitrogen and phosphorus in the overlying surface water were measured. **【Result】** The loss of N and P from the soil increased with the duration of surface ponding; compared with their values prior to flooding, the average TN and TP loss from the soil was approximately 7.63% and 3.17% at ease of the flooding respectively, in which alkali-hydrolyzable nitrogen reduced by 17.84% while Olsen-P increased by 8.65%. Following the flooding, the concentration of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the surface water increased fast, reaching 0.405, 0.192 and 0.209 mg/L respectively one day after the flooding. Two to four days after the flooding, TN concentration still increased with time but at a decreasing rate with the concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ reduced to 0.226 mg/L. Four days after the flooding eased, both TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ increased while $\text{NO}_3^-\text{-N}$ decreased. The ratio of inorganic nitrogen to TN decreased from 98.5% to 54.4% during the flooding duration, while the phosphorus content increased monotonically. The TP content was 0.615 mg/L at the end of flooding with SRP accounting for 80.5%~91.6%. Both pH and *Eh* dropped following the flooding, thereby enhancing migration of nitrogen and phosphorus from the soil to the overlying surface water. **【Conclusion】** Considering N and P loss from soil and crop yield, timely drainage is essential to reduce nutrient loss without scarifying yield. For the case studied in this work, instigating drainage three days after the flooding appears to be the best compromise. **Key words:** flooding test; farmland soil; nitrogen and phosphorus loss; controlled drainage

责任编辑: 陆红飞