

农田水位管理系统地下排水磷淋失实验研究

胡亚琼¹, 许迪¹, Valero C S², A Madramootoo C², 王少丽¹

(1.中国水利水电科学研究院水利所, 北京 100044; 2.Department of Bioresource Engineering, McGill University, Montreal H9X 3V9, Canada)

摘要:农田控制排水对减少土壤养分淋失、保护农田水环境具有重要作用。为探讨影响地下排水磷淋失量的要素,基于田间实验小区观测资料,统计分析了玉米作物生长期间农田水位管理系统运行对地下排水量和磷淋失量的影响,结果表明,与暗管自由排水系统相比,农田水位管理系统下的累积排水总量约减少 1/3,但次地下排水磷淋失浓度和地下排水总磷累积淋失量均明显增高。农田水位管理系统下存在的土壤持续性饱和厌氧状态造成地下排水中氧化还原电位 Eh 的明显降低和 pH 值及可溶性 Mn 和 Fe 浓度的显著增大,这或许是导致该系统地下排水磷淋失量明显高于暗管自由排水系统的主要影响因素。

关键词:农田水位管理系统;暗管自由排水系统;地下排水;磷淋失;氧化还原电位

中图分类号:X523 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)08-1645-07

The Effects of Water Table Management on Phosphorus Leaching Loss in the Farmland Drainage

HU Ya-qiong¹, XU Di¹, Valero C S², A Madramootoo C², WANG Shao-li¹

(1.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2.Department of Bioresource Engineering, McGill University, Montreal H9X 3V9, Canada)

Abstract: It is significant that the nutrients loss could be reduced and the water environment could be protected via controlled drainage. The effects of water table management system on the outflow volumes of sub-surface drainage and phosphorous leaching loss were statistically analyzed during the growing season of corn. The results showed that the total outflow volumes were reduced about 1/3 from water table management system compared to free drainage system. However, the concentration of phosphorus (P) of drainage and the total phosphorus leaching loss were significant higher under water table management system than free drainage system. At the meantime, the oxidation-reduction potential (Eh) was lower and pH value and concentration of dissolved Mn and Fe were higher in water table management system compared to free drainage system. These results indicated that the increased P leaching loss in drainage under water table management system were most likely caused by an increase in P solubility due to continuously anaerobic condition which aroused the changes of values of Eh, pH and concentration of Mn and Fe.

Keywords: water table management (CI/SI); free drainage (FD); sub-surface drainage; phosphorus leaching loss; oxidation-reduction potential (Eh)

为了满足人口增长对粮食的需求,农业生产中广泛使用无机化肥。然而在地表径流和地下排水作用下,化肥中的氮、磷等养分经地表和土壤进入水体^[1],不仅造成作物生长营养物流失,还引起农田水环境恶化,氮磷流失已成为农业非点源污染的重要诱因^[2-3]。农田水位管理系统具备控制排水和地下灌溉的双重

功能,目前已在加拿大、美国等地得到实际应用^[4-6]。2000年以来,随着农田灌溉水资源供需矛盾及农业非点源污染问题的突出,国内不少地方也进行了田间控制排水试验^[7-8]。该系统不仅可满足作物生长对农田土壤水分状况的需求,还能明显减少地下排水氮素流失,降低对农田水环境产生的不利影响^[8-9],但其运行对地下排水磷淋失的影响作用却鲜见报道^[10-11]。本文基于田间实验小区观测资料,统计分析玉米作物生长期间农田水位管理系统运行对地下排水量和地下排水磷淋失量的影响,探讨影响地下排水磷淋失量的要素,为合理使用农田水位管理系统提供科学依据。

收稿日期:2011-01-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50639040,50739003);中国水利水电科学研究院科研专项(节集 0809)

作者简介:胡亚琼(1973—),女,青海西宁人,硕士,高级工程师,主要从事水环境及农田排水技术研究。E-mail:huyq@iwhr.com

1 材料与方法

1.1 实验地点

实验地点位于加拿大魁北克省,西经 $74^{\circ}11'15''$, 北纬 $45^{\circ}2'10''$ 。实验区总面积 4.2 hm^2 ,耕地平均坡度小于 0.5% ,以种植玉米为主。年均降水量 1231.7 mm ,年均最高气温和最低气温分别为 12.1°C 和 2.7°C ,土壤以砂壤土为主,0~25 cm 土层有机物含量 3.15% ,土层结构及土壤物理特性如表 1 所示。

表 1 实验区土层结构及土壤物理特性
Table 1 Soil physical properties at the study site

土层/ cm	不同颗粒百分比含量/%			土壤 质地	干容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	土壤饱和导 水率/ $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$
	粘粒	粉粒	砂粒			
0~25	10	34	56	砂壤土	1.63	0.45
25~50	20	22	58	砂粘壤土	1.60	0.35
50~75	39	28	33	粘壤土	1.49	0.13

1.2 农田排水方式与实验处理设计

1.2.1 农田排水方式

田间实验中采用两种形式的农田排水方式,其一为实际中广为应用的暗管自由排水系统 FD, 其二为农田水位管理系统 CD/SI。如图 1 所示,CD/SI 系统具

有控制排水 CD 和地下灌溉 SI 两种工作模式。根据当地玉米作物正常生长需求,农田地下水位要求控制在地下 60 cm 左右。当地下水位低于控制值时,系统进入地下灌溉工作模式,此时球形阀封闭,借助浮子保持一定水位,水流进入地下暗管,进行地下补灌,直至水位上升达到控制值,灌溉水源来自田边井水。当地下水位高于控制水位时,系统处于控制排水工作模式,此时球形阀打开,排水通过溢流管自由排出,直至水位下降到控制值。在收获作物和土地翻耕期间,停止使用 CD/SI 系统,而在降雨量较大时,为避免作物根区水量过多,应停用地下灌溉工作模式。

1.2.2 实验处理设计

如图 2 所示,整个实验区被划分为 A、B、C 3 个区域,各区域均由 8 个排水小区组成,其中 4 个小区用于田间实验,其余 4 个小区作为保护区,每个小区宽 15 m、长 75 m,采用塑料薄膜对各排水小区四壁进行防渗处理,埋深 1.5 m。在 24 个排水小区中央距地表 1 m 深处布设 1 条直径为 75 mm 的排水暗管,排水被汇入到位于地边的 2 个地下排水量观测站内,且在各实验小区分别装有 3 个深为 1.5 m 的地下水位观测孔。在 A、B、C 各实验区域内,针对 CD/SI 系统和 FD 系统两种农田排水方式,分别设置两组小区重复,

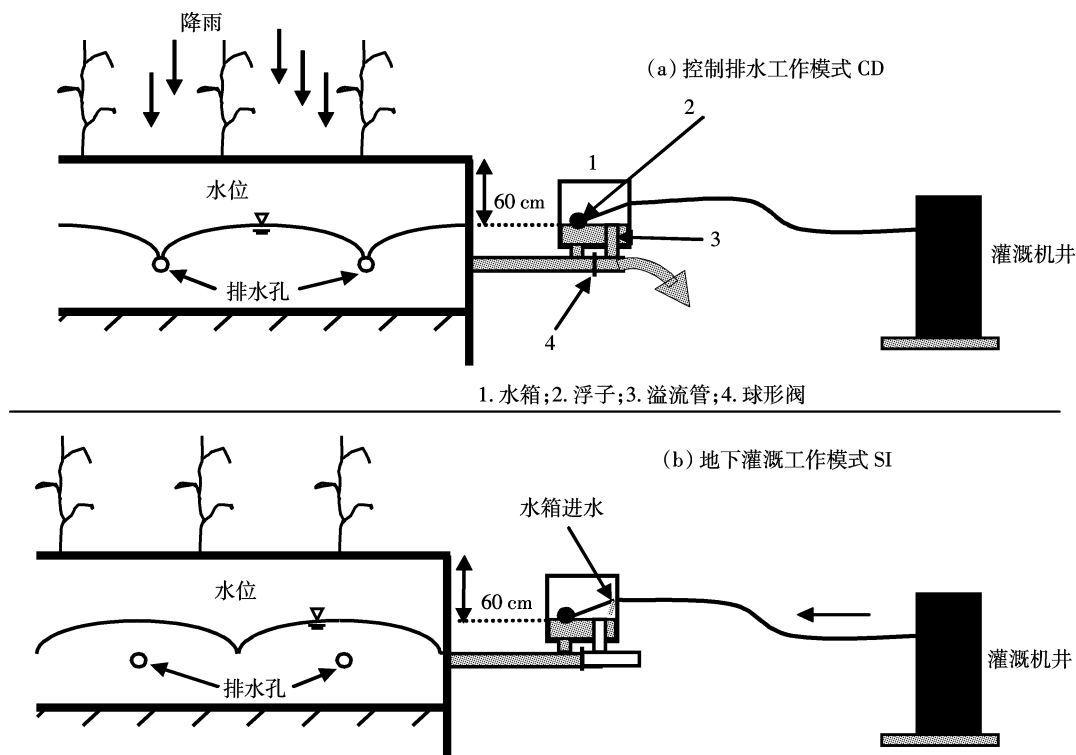


图 1 农田水位管理系统(CD/SI)工作模式示意图

Figure 1 Water table management system(adapted for Stampfli, 2003)

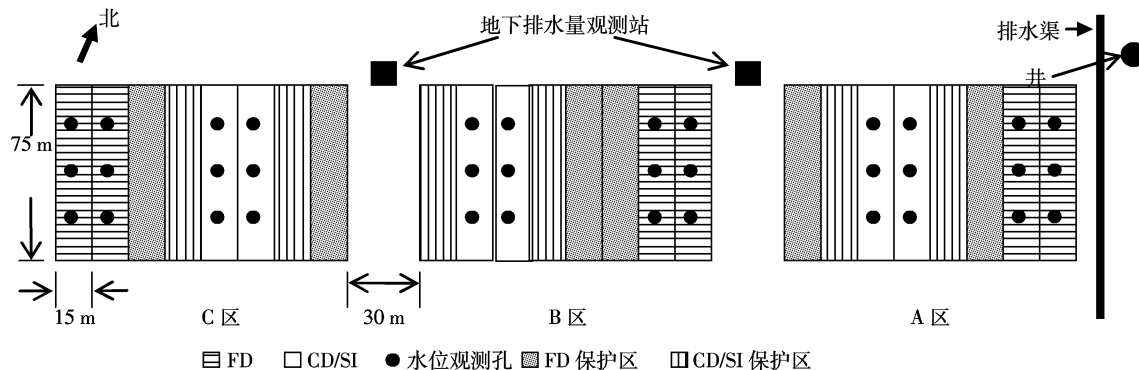


图2 田间实验处理与排水小区布设平面图

Figure 2 Field layout (adapted for Stampfli, 2003)

总数各为6组。各区域内种植的玉米种类和种植方式相同,施肥量均为 $111 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $38 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $25 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3 室内外实验观测与分析方法

1.3.1 实验过程与观测内容

农田排水实验在玉米生长期的2005年5月3日至11月1日开展,其中CD工作模式从5月19日起到10月6日止,SI工作模式从6月10日至8月30日期间运行。在田间实验期间进行了32次观测,共采集到18次地下排水样本。观测和测试的内容主要包括地下水位和地下排水量、地下排水磷淋失量、地下排水氧化还原电位 Eh 值和 pH 值以及可溶性锰(Mn)和铁(Fe)浓度等。在施肥前和作物收获后,在各实验小区不同土层内分别随机采集6个土样,监测0~20 cm 和 20~40 cm 土壤含磷量以及0~20 cm 土壤的 pH 值。

1.3.2 测试与分析方法

1.3.2.1 地下水位与地下排水量

采用水位探测尺,每周2次监测地下水位,对水位测深进行权重处理后,确定每种农田排水方式下的地下水位平均变化趋势。在地下排水量观测站内,利用翻斗器监测每次出现的地下排水量,对由自动取样系统收集的水量数据进行处理,得到每种农田排水方式下的日地下排水量平均变化趋势。

1.3.2.2 地下排水磷淋失量

对地下排水样本的总磷 TP、总可溶性磷 TDP 和溶解性可反应磷 DRP 进行室内测定。在高压蒸汽炉 121°C 下对地下排水样品进行处理并消化 30 min 后,利用比色法^[12]在流动注射自动分析仪上测试 TP 浓度;对经高温高压消化的水样进行 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,测定 TDP 浓度;对未经高温高压消化的水样,通过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,测定 DRP 浓度。次地下排

水量与水样中总磷浓度乘积的逐次累积即为地下水排水总磷累积淋失量。

1.3.2.3 地下排水氧化还原电位和 pH 值以及可溶性锰和铁

采用安装有铂金探测器的 Eh/pH 测量仪测试地下排水样本的氧化还原电位 Eh 和 pH 值;对未经高温高压消化的水样,经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,利用10%的硝酸进行酸化后,利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定样品中的可溶性 Mn 和 Fe 的浓度。

1.3.2.4 土壤含磷量和 pH 值

将采集后的土样置于 $20\sim 25^\circ\text{C}$ 室温风干,基于 Mehlich-III 方法进行萃取^[13],采用比色法在流动注射自动分析仪上测试土壤总磷(TP)含量,利用自动吸收光谱测定法确定土壤铝(Al)含量,TP/Al 为土壤磷饱和率^[14],当 TP/Al 比值过高时,会引起地下排水可溶性磷浓度的明显增高^[15];按土壤和蒸馏水 1:2 比例配制溶液,测定 0~20 cm 土壤 pH 值。

1.3.3 统计分析

统计分析方法采用的是 SAS (Statistical Analysis System, SAS Institute Inc., 1999) 版本 8 中的 GLM (General Liner Model) 模型。当资料缺失时,由 SAS 进行预估。如缺失资料不能进行预估时,则由 SAS 中的 Lsmeans (Least-square means) 将缺失资料调整为均值。CD/SI 和 FD 两种处理下当 $P=0.05$ 时为水平差异显著。

2 结果与分析

2.1 农田排水方式对地下水位和地下排水量的影响

2.1.1 地下水位

图3显示出排水实验期间两种农田排水方式下的地下水位平均变化趋势大致相同,其中 CD/SI 系统

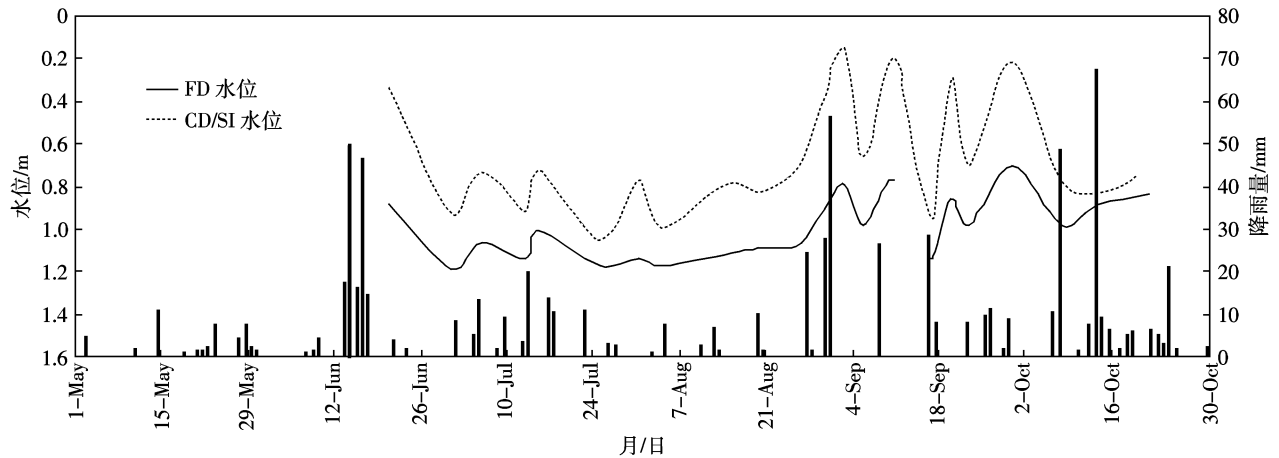


图 3 CD/SI 和 FD 系统下的地下水位平均变化趋势

Figure 3 Average fluctuation of groundwater table for CD/SI and FD system

的水位基本控制在 60 cm 左右,而 FD 系统则大致控制在 1 m 左右。CD/SI 系统的排水控制水位明显高于 FD 系统的相应值,二者间差异性显著($P<0.01$)。CD/SI 系统在保证玉米作物正常生长所需的地下排水控制水位同时,可基本满足作物补灌需求。由于加拿大魁北克地区土壤冰冻期相对较长,故未能正常观测玉米生长前期和末期的水位,导致地下水位观测资料缺失。

2.1.2 地下排水量

图 4 显示出排水实验期间两种农田排水方式下的日地下排水量平均变化趋势基本相近,但排水量间却存在显著差异($P<0.01$)。在整个农田排水实验期间,CD/SI 系统下的累积排水总量较 FD 系统减少 27%,排水主要集中在夏季的 7 月至 9 月期间,当 10 月初 CD/SI 系统停止运行后,两种排水方式下的日排

水量平均变化状况基本保持一致。

2.2 农田排水方式对地下排水磷淋失量的影响

2.2.1 次地下排水磷淋失浓度

表 2 列出排水实验期间两种农田排水方式下观测的次地下排水 TP、TDP 和 DRP 浓度的平均值,对其中 13 个采样日期获得的水样结果进行了统计分析,由于部分资料缺失,其余 5 个未做分析。从中可以看出,CD/SI 系统下的绝大多数次地下排水 TP、TDP 和 DRP 浓度均值都高于 FD 系统下的相应值,其间分别存在着显著性差异($P<0.05$)。从表 2 给出的观测结果还可看出,在两种农田排水方式下的次地下排水总磷(TP)中,有约 96%是总可溶性磷(TDP),而溶解性可反应磷(DRP)则构成 TDP 的主体,其中 CD/SI 系统下的 DRP 平均占 TDP 的 81%,而 FD 系统下为 70%。与 FD 系统相比,CD/SI 系统下 DRP 增加量(178%)大

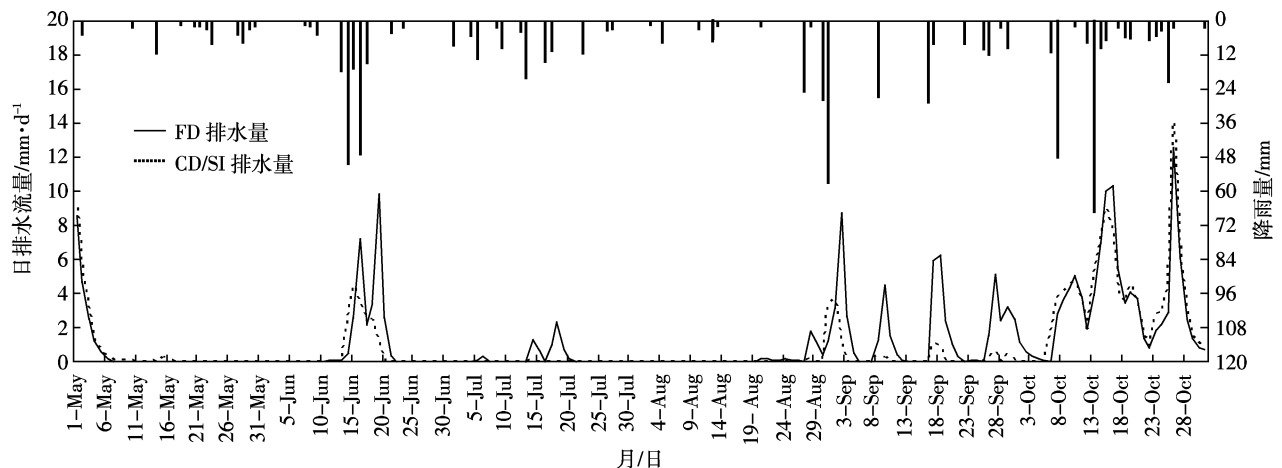


图 4 CD/SI 和 FD 系统下的日地下排水量平均变化趋势

Figure 4 Average fluctuation of daily drainage for CD/SI and FD system

表 2 排水实验期间观测的次地下排水总磷(TP)、总可溶性磷(TDP)和溶解性可反应磷(DRP)浓度均值

Table 2 Mean concentration of TP, TDP and DRP in drainage water from CD/SI and FD plots

采样日期	总磷 TP/mg·L ⁻¹		总可溶性磷 TDP/mg·L ⁻¹		溶解性可反应磷 DRP/mg·L ⁻¹	
	FD	CD/SI	FD	CD/SI	FD	CD/SI
5 月 3 日	0.041a	0.055a	0.032a	0.044a	0.028a	0.035b
6 月 13 日	0.040 a	0.042a	0.032a	0.035a	0.026a	0.032b
6 月 17 日	0.061a	0.122b	0.054a	0.113b	0.049a	0.110b
6 月 20 日	0.045	0.099	0.045	0.099	0.041	0.088
7 月 12 日	0.040	0.036	0.040	0.036	0.017	0.014
7 月 21 日	0.032	0.084	0.032	0.084	0.015	0.070
8 月 22 日	0.035	N/A	0.035	N/A	0.020	N/A
8 月 31 日	0.041a	0.107b	0.041a	0.107b	0.021a	0.064b
9 月 5 日	0.039a	0.088b	0.039a	0.088b	0.022a	0.072b
9 月 13 日	0.016a	0.056b	0.016a	0.056b	0.010a	0.051b
9 月 19 日	0.016a	0.060b	0.016a	0.060b	0.008a	0.046b
9 月 27 日	0.018a	0.067b	0.018a	0.067b	0.015a	0.069b
9 月 30 日	0.016a	0.069b	0.016a	0.069b	0.015a	0.069b
10 月 7 日	0.011a	0.103b	0.011a	0.103b	0.007a	0.050b
10 月 12 日	N/A	0.034	N/A	0.034	N/A	0.037
10 月 21 日	0.010a	0.037b	0.010a	0.037b	0.008a	0.030b
10 月 26 日	0.014a	0.037b	0.014a	0.037b	0.011a	0.032b
11 月 1 日	0.013a	0.031b	0.013a	0.031b	0.011a	0.031b
平均值	0.029	0.066	0.027	0.065	0.019	0.053
CD/SI 相应于 FD 的增加量/%	131		136		178	

注:FD 和 CD/SI 的数据进行两两比较,不同字母标注的数值在 $P=0.05$ 水平差异显著,无字母标注的数值不能做统计分析,N/A 表示数据缺失。

于 TDP 增长量(136%)的结果表明,该系统增加了地下排水磷淋失浓度,而这部分正是作物最易吸收的溶解性可反应磷(DRP)。

2.2.2 地下排水总磷累积淋失量

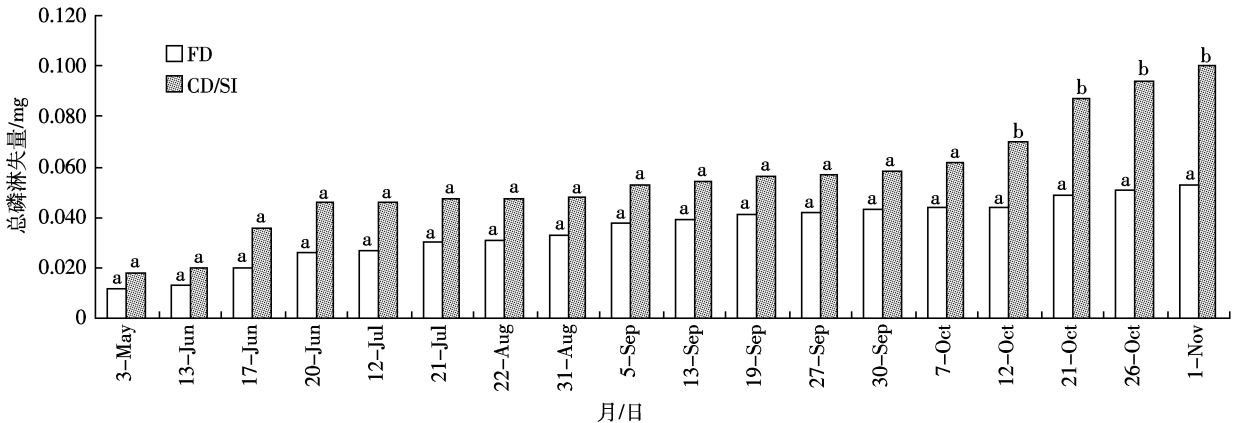
图 5 显示出排水实验期间两种农田排水方式下的地下排水总磷累积淋失量变化趋势。其中 CD/SI 系统的地下排水总磷累积淋失量在春季、夏季的增长趋

势都大于 FD 系统,但未呈现出显著差异,而到秋季后期,两系统间的差异却达到显著水平($P<0.05$),CD/SI 系统下的地下排水总磷累积淋失量增加 90%。

2.3 影响农田地下排水磷淋失量的要素

2.3.1 土壤总磷含量 TP、土壤磷饱和率 TP/Al 以及土壤 pH 值

表 3 给出施肥前(5 月)和作物收获后(11 月)测



FD 和 CD/SI 的数据进行两两比较,不同字母标注的数值在 $P=0.05$ 水平差异显著

图 5 CD/SI 和 FD 两种处理下的地下排水总磷累积淋失量变化趋势

Figure 5 Average concentration of TP in drainage water from CD/SI and FD

表 3 施肥前和作物收获后测定的土壤总磷含量(TP)、土壤磷饱和率(TP/Al)和土壤 pH 均值

Table 3 Mean soil concentration of TP, TP/Al and pH at the study site before fertilizing and after harvesting

农田排水方式	土壤总磷 TP/kg P·hm ⁻²				土壤磷饱和率(TP/Al)/%				土壤 pH	
	5 月		11 月		5 月		11 月		5 月	11 月
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	0~20 cm
FD	240a	86a	198a	85a	24a	9a	17a	7a	7.3a	7.2a
CD/SI	264a	82a	225a	87a	27a	8a	19a	7a	7.4a	7.5b

注:相同土壤深度下标有相同字母的均值表示不同排水方式在 P=0.05 水平无显著性差异。

定的实验小区不同土层土壤总磷含量、土壤磷饱和率和土壤 pH 值,其中两种农田排水方式下的土壤总磷含量和土壤磷饱和率在施肥前及作物收获后均未出现显著性差异,而表层土壤 pH 值在作物收获后显示出一定的差异性。这表明造成 CD/SI 系统地下排水总磷累积淋失量显著高于 FD 系统的状况,并非由于不同农田排水方式下土壤含磷总量和土壤磷饱和率间出现的差异所引起,而应归因于不同农田排水方式下的特定水土环境条件差别。

2.3.2 地下排水氧化还原电位 Eh 和 pH 值以及可溶性 Mn 和 Fe

表 4 列出排水实验期间两种农田排水方式下观测的地下排水氧化还原电位 Eh 和 pH 值以及可溶性 Mn 和 Fe 浓度均值,其中 FD 系统下的 Eh 值明显大于 CD/SI 系统,而 CD/SI 系统下的 pH 值和 Mn 和 Fe 浓度却显著高于 FD 系统,这或许是造成 CD/SI 系统地下排水中总磷累积淋失量显著高于 FD 系统的原因所在。

2.3.3 影响要素分析

表 4 给出的结果表明 CD/SI 系统下的地下排水氧化还原电位 Eh 值明显低于 FD 系统,而 FD 系统下的地下排水 pH 值及可溶性 Mn 和 Fe 浓度则显著低于 CD/SI 系统。与暗管自由排水系统 FD 相比,高地下水位运行状态下的农田水位管理系统 CD/SI 常导致 60~100 cm 的土壤处于连续饱和和厌氧状态(图 3),使得地下排水中的 Eh 值明显降低和 pH 值显著

增加,引起可溶性磷含量的增高。此外,随着地下排水中磷酸金属化合物三价 Fe 和 Mn 的还原转化,在增加二价可溶性 Mn 和 Fe 浓度的同时,释放出更多的可溶性磷,从而增高总磷累积淋失量。相关研究结果表明,湿地和洪水沉积物中较低的氧化还原电位通常会引起排水中磷浓度的增加并加大可溶性 Mn 和 Fe 离子浓度^[16],可溶性磷浓度随 Eh 值的减少呈增加趋势^[17],且土壤饱和厌氧状态将导致 pH 值增加^[18],引起排水溶液中 H⁺/OH⁻的改变,使得磷酸根离子浓度亦发生变化。

3 结论

本文针对加拿大南部地区玉米生长期间不同农田排水运行方式开展田间小区实验研究,统计分析农田水位管理系统运行对地下排水量和地下排水磷淋失量的影响,探讨影响地下排水磷淋失量的主要原因。从本研究中可得出以下结论:

(1)尽管农田水位管理系统 CD/SI 具有控制地下水位与排水量和从事地下灌溉的双重功效,但观测的次地下排水磷淋失浓度和地下排水总磷累积淋失量均明显高于暗管自由排水系统 FD。其原因或许是 CD/SI 系统下较高的地下水位运行状况造成土壤处于稳定饱和和厌氧状态,使得地下排水中的氧化还原电位 Eh 值明显降低而 pH 值和可溶性 Mn 和 Fe 浓度显著增大,从而导致地下排水中可溶性磷含量的增高。

(2)暗管自由排水系统下的土壤厌氧条件受到地下水位变化的影响处于交替变动状态,相对较高的 Eh 值致使地下排水中的可溶性磷相对下降。

(3)由于本实验是在特定气候、土壤、作物等条件下开展,获得的初步结果可能具有一定局限性,最终结论尚待进一步实验研究。

参考文献:

[1] 焦平金, 许迪, 王少丽, 等. 自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 534-540.

表 4 排水实验期间观测的地下排水氧化还原电位 Eh 和 pH 值以及可溶性 Mn 和 Fe 均值

Table 4 Mean value of Eh, pH, dissolved Mn and Fe in

drainage water

农田排水方式	氧化还原电位 Eh/mV	pH	可溶性 Mn/ μg·L ⁻¹	可溶性 Fe/ μg·L ⁻¹
FD	204a	6.9a	0.6a	16.8a
CD/SI	44b	7.3b	19.7b	27.4b

注:相同测定指标下标有不同字母的均值表示不同排水方式在 P=0.05 水平差异性显著。

- JIAO Ping-jin, XU Di, WANG Shao-li, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland under nature rainfall[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3):534-540.
- [2] 唐 莲, 白 丹. 农业活动非点源污染与水环境恶化[J]. 环境保护, 2003, 3:18-20.
- TANG Lian, BAI Dan. Effect of agricultural non-point source pollution on water environment[J]. *Environmental Protection*, 2003, 3:18-20.
- [3] Pitois S, Jackson M H, Wood B T B. Sources of the eutrophication problems associated with toxic algae: An overview[J]. *J Environ Health*, 2001, 64(5):25-32.
- [4] Ayars J E, Christen E W, Hornbuckle J W, et al. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86(1):128-139.
- [5] Shirmohammadi A, Camp C R, Thomas D L. Water table management for field-sized areas in the Atlantic Coastal Plain[J]. *J Soil Water Conserv*, 1992, 47(1):52-57.
- [6] Zimmer D, Madramootoo C A. Management of agricultural drainage water quality[ROL]/FAO Water reports Retrieved Aug 27, 2007, <http://www.fao.org/docrep/W7224E/w7224e07.htm>.
- [7] 罗 纭, 贾忠华, 方树星, 等. 灌区稻田控制排水对排水量及盐分影响的试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(5):608-612.
- LUO Wan, JIA Zhong-hua, FANG Shu-xing, et al. Effect of drainage control on salt and water balance in rice field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(5):608-612.
- [8] 殷国玺, 张展羽, 郭相平, 等. 减少氮流失的田间地表控制排水措施研究[J]. 水利学报, 2006, 37(8):926-931.
- YIN Guo-xi, ZHANG Zhan-yu, GUO Xiang-ping, et al. Effect of drainage controlling devices on nitrogen losses in surface runoff of farmland[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(8):926-931.
- [9] Wright J A, Shirmohammadi A, Magette W L, et al. Water table management practice effects on water quality[J]. *American Society of Agricultural Engineers*, 1992, 35:823-831.
- [10] Stämpfli N, Madramootoo C A. Water table management: a technology for achieving more crop per drop[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2006, 20:41-55.
- [11] 李强坤, 胡亚伟, 孙 娟, 等. 控制排水条件下农业非点源污染物流失特征[J]. 农业工程学报, 2010, 12(增2):182-187.
- LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SUN Juan, et al. Loss characteristics of agricultural non-point source pollutants under controlled drainage[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(Suppl 2):182-187.
- [12] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters[J]. *Anal Chim Acta*, 1962, 27:31-36.
- [13] Mehlich A. Mehlich III soil extractant: A modification of Mehlich II extractant[J]. *Soil Sci Plant Anal*, 1984, 15:1409-1416.
- [14] Beauchemin S, Simard R R. Soil phosphorus saturation degree: review of some indices and their suitability for P management in Quebec[J]. *Canada Can J Soil Science*, 1999, 79(4):615-625.
- [15] Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24(5):920-926.
- [16] Haggard B E, Moore P A DeLaune. Phosphorus flux from bottom sediments in Lake Eucha Oklahoma[J]. *J Environ Qual*, 2005, 34(4):724-728.
- [17] Shenker M, Seitelbach S, Brand S, et al. Redox reactions and phosphorus release in re-flooded soils of an altered wetland [J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56:515-525.
- [18] Sallade Y E, Sims J T. Phosphorus transformations in sediments of Delaware's agricultural drainageways; II. Effect of reducing conditions on phosphorus release[J]. *J Environ Qual*, 1997, 26(10):1579-1588.