中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

降雨对吉林省黑土区雨养春玉米农田氮磷淋溶的影响

焦云飞，李强，高洪军，王周，张秀芝，朱平，彭畅

引用本文:
焦云飞, 李强, 高洪军, 等. 降雨对吉林省黑土区雨养春玉米农田氮磷淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 19–28.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200571

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国北方主要农区农田氮磷淋溶特征与时空规律

Nitrogen and phosphorus leaching characteristics and temporal and spatial distribution patterns in northern China farmlands

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 11–18 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200572

施氮量对潮土区冬小麦–夏玉米轮作农田氮磷淋溶的影响

Effects of nitrogen application on nitrogen and phosphorus leaching in fluvo–aquic soil on a winter wheat–summer maize rotation farmland

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 29–37 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200548

黑土区农田氮磷淋溶消减措施

Mitigation of nitrogen and phosphorus leaching from black soil croplands in Northeast China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 113–118 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200496

中国北方农田氮磷淋溶损失污染与防控机制

Mitigation of nitrogen and phosphorus leaching from cropland in northern China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 1–10 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200910

华北潮土冬小麦–夏玉米轮作包气带氮素淋溶机制

Mechanism of nitrogen leaching in fluvo–aquic soil and deep vadose zone in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 53–65 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200644

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 1 月 第 29 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2021, 29(1): 19−28

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200571

焦云飞, 李强, 高洪军, 王周, 张秀芝, 朱平, 彭畅. 降雨对吉林省黑土区雨养春玉米农田氮磷淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 19−28

JIAO Y F, LI Q, GAO H J, WANG Z, ZHANG X Z, ZHU P, PENG C. Effects of rainfall on nitrogen and phosphorus leaching in rainfed spring maize black soil farmland in Jilin Province, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 19−28

降雨对吉林省黑土区雨养春玉米农田氮磷淋溶的影响*

焦云飞, 李 强, 高洪军, 王 周, 张秀芝, 朱 平, 彭 畅**

(吉林省农业科学院 长春 130033)

摘 要: 吉林省黑土区是我国玉米生产的重要基地, 农业集约化程度较高, 农业面源污染风险较大。因此, 掌握吉林省黑土区降雨与农田氮磷淋溶的关系, 对区域生态农业可持续发展意义重大。本研究基于吉林省 4 个面源污染监测点, 于 2016—2019 年春玉米季对降雨情况、淋溶量、淋溶液氮磷浓度及淋溶强度等进行了动态监测, 系统分析了吉林省黑土区自然降雨与农田氮磷淋溶的关系。结果表明: 1)吉林省黑土区降雨年际间和监测点间差异较大, 年际间波动在 424~554 mm, 春玉米全生育期平均降雨量为 475 mm; 不同监测点降雨量大小依次为通化(593~785 mm)>公主岭(512~699 mm)>梨树(305~434 mm)>农安(197~342 mm)。2)淋溶量和降雨强度呈极显著正相关关系, 降雨强度每增加 10 mm·(24h)$^{-1}$, 淋溶量增加 1.81 mm。全生育期(4—10 月)降雨量与淋溶次数、淋溶概率分别呈极显著和显著正相关, 降雨量每增加 100 mm, 淋溶次数约增加 3 次, 淋溶概率上升 6%。当全生育期降雨量超过 74 mm 时, 淋溶概率增加, 可能引起淋溶; 而当全生育期降雨量达到 217 mm 时, 淋溶次数增加, 可以发生淋溶。产生淋溶的降雨等级一般以中雨(10~24.9 mm)和大雨(25~49.9 mm)为主。3)淋溶量和淋溶液总氮浓度呈极显著正相关, 与总磷浓度无明显相关关系。4)总氮淋溶强度与降雨强度呈极显著正相关, 降雨强度每增加 10 mm·(24h)$^{-1}$, 总氮淋溶强度增加 0.73 kg·hm^{-2}, 而总磷淋溶强度与降雨强度无明显相关性。由此可见, 吉林省黑土区农田在春玉米雨养条件下以氮素淋溶为主, 且与降雨密切相关, 应因地制宜采取农艺措施在源头上阻控农业面源污染的发生, 为农业生态可持续发展提供有效途径。

关键词: 黑土区; 降雨; 氮磷淋溶; 春玉米

中图分类号: S157.1 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effects of rainfall on nitrogen and phosphorus leaching in rainfed spring maize black soil farmland in Jilin Province, China*

JIAO Yunfei, LI Qiang, GAO Hongjun, WANG Zhou, ZHANG Xiuzhi, ZHU Ping, PENG Chang**

(Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The black soil area of Jilin Province is important for maize production in China, where agricultural development and nonpoint source pollution risks are intensifying. Understanding the effects of nitrogen and phosphorus leaching from rainfed spring maize farmland is important for the sustainable development of the region. This study investigated rainfall and leaching amounts, nitrogen and phosphorus leachate concentrations, and leaching intensity from 2016 to 2019 at four nonpoint source pollution monitoring stations in Jilin Province, China, and analyzed the relationship between rainfall and farmland ni-

* 国家重点研发计划课题(2016YFD0800101, 2016YFD0300803)和吉林省重大科技专项课题(20200503004SF)资助

** 通信作者: 彭畅, 主要研究方向为黑土资源保护与农业面源污染控制。E-mail: pengchang2005@163.com

焦云飞, 主要研究方向为农业面源污染控制。E-mail: jyf20151029@163.com

收稿日期: 2020-07-14 接受日期: 2020-09-17

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0800101, 2016YFD0300803) and the Science and Technology Development Project of Jilin Province (20200503004SF).

** Corresponding author, E-mail: pengchang2005@163.com

Received Jul. 14, 2020; accepted Sep. 17, 2020

trogen and phosphorus leaching. The results showed that the inter-annual and inter-regional rainfall differences were large, ranging from 424 to 554 mm. The average rainfall during spring maize growth season was 475 mm. Tonghua monitoring station had the most rain (593–785 mm), followed by Gongzhuling station (512–699 mm) and Lishu station (305–434 mm); Nong'an station had the least rain (197–342 mm). Tonghua and Nong'an growth seasons had primarily light and moderate rain, and Gongzhuling and Lishu had moderate and heavy rain and thunderstorms. There was a significant positive correlation between the leaching amount and rain intensity (P<0.01). For every 10 mm·(24h)$^{-1}$ increase in rain intensity, the leaching amount increased by 1.81 mm. Rainfall during the spring maize growth season (April to October) was also significantly correlated with the leaching amount (P<0.05). For every 100 mm rain increase, the leached sample number and the leaching probability increased (3 times and 6%, respectively). When the growing season rainfall exceeded 74 mm, the leaching probability increased, and when it exceeded 217 mm, leaching could occur. Leaching occurred when rain levels were 10.0–24.9 mm (moderate rain) and 25.0–49.9 mm (heavy rain). There was a significant positive correlation between leaching amount and total nitrogen concentration, but no correlation with total phosphorus concentration. The total nitrogen leaching intensity had a strong positive correlation (P<0.01) with rain intensity; for every 10 mm·(24h)$^{-1}$ increase in rain intensity, the total nitrogen leaching intensity increased by 0.73 kg·hm^{-2}. The total phosphorus leaching intensity did not correlate with rain intensity. Nitrogen primarily leached from black soil area farmland in Jilin Province during the rainfed spring maize growth season and was correlated with rainfall. Agronomic measures should be adopted to prevent agricultural nonpoint source pollution at the source.

Keywords: Black soil area; Rainfall; Nitrogen and phosphorus leaching; Spring maize

中国黑土区是最大的粮食生产基地和商品粮输出基地，也是世界仅有的三大块黑土区之一，与同纬度的乌克兰玉米(*Zea mays*)带、美国玉米带并称为世界三大黄金玉米带。其中吉林省玉米播种面积稳定在 233 万 hm^{2}左右，玉米总产量约 1600 万 t，玉米单产水平、人均占有量、商品率及出口量均居全国首位，对保障国家粮食安全具有举足轻重的作用。在保障粮食安全的刚性需求下，化肥用量呈显著增加态势，从 2004 年至 2018 年吉林省的化肥用量从 304.7 万 t 增长至 424.0 万 t[1]，导致吉林省黑土区农田土壤单位面积的氮磷负荷显著增加[2]，引发了一系列的农业面源污染问题[3]。

而地下淋溶是旱地农田氮素淋溶的主要途径之一。淋溶一般多发生在强降雨或不合理灌溉条件下[4]。而吉林省年降雨分布不均，其中 70%左右集中在 6—9 月，农业面源污染风险较大，降雨量显著影响农田氮磷的运移动态和淋溶过程。因此，长期监测研究不同降雨强度下农田氮磷淋溶的变化，对于减少黑土区农业面源污染、保护生态环境具有十分重要的现实意义。

国内外相关研究表明，农田氮磷淋失除了受施肥量[5-6]、施肥方式[7-8]、耕作制度[9-10]、灌溉制度[11-12]、降雨量[13]、农作物类型、农田坡度、土壤类型和土壤质地[14-16]等影响外，与降雨强度密切相关，由于产流模式和产流量的差异性，不同降雨强度下氮磷淋失呈现不同特征[17]。近年来，许多学者开展了氮磷淋溶流失的相关研究，主要集中在不同降雨和灌溉模式对农田氮素淋溶淋失的影响[18]、施肥条件下农田硝态氮的淋失风险[7]、针对具体研究区域和作物进行的多年淋溶规律研究[19]，以及对农田土壤氮磷淋溶流失特点的研究[20-21]。但这些研究对农田土壤氮磷淋溶流失的影响因子与其之间的关系少有探讨。本研究通过对吉林省自然降雨和春玉米田氮磷淋溶状况连续 4 年的监测，定量分析了降雨强度与黑土区农田土壤氮磷淋溶的关系，为研究区氮磷淋溶风险预测和有效阻控提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本研究设置的 4 个监测点分别位于吉林省东、中、西的不同生态区，是国家首批投入运行的农业面源污染监测点。监测点均按《农田地下淋溶面源污染监测设施建设技术规范》布点原则(典型性、代表性、长期性和抗干扰性)统一布置，且种植模式均为东北平原区的春玉米一年 1 熟制。4 个监测点分别为吉林省西南部的梨树县(监测点简称“梨树”)、西部的农安县(监测点简称“农安”)、中部的公主岭市(监测点简称“公主岭”)和东南部的通化县(监测点简称“通化”)。各监测点分布和具体情况见图 1 和表 1。

1.2 试验设计

监测点于 2015 年建成，2016 年正式运行，通化监测点于 2019 年开始运行。每个监测点均设有常规施肥处理，3 次重复，共 3 个试验小区，采用随机区组排列，每个小区面积分别为 54 m^2(农安)、38 m^2(梨树)、2 m^2(公主岭)、54 m^2(通化)，各监测试验区四周设保护行。淋溶装置于 2015 年(通化 2019 年)在每个小区的中心位置安装，安装深度为 1.2 m，装置占地

(汇水)面积均为 2 m^2。试验区春玉米种植方式采用当地农民常规种植模式(种植密度为 60 000 株·hm^{-2}, 春玉米连作一年 1 季, 每年 5 月初播种, 9 月末收获)。全年无灌溉, 春天灭茬、施肥、起垄, 采用人工点播方式播种。小区基本情况及化肥施用量等信息见表 1。

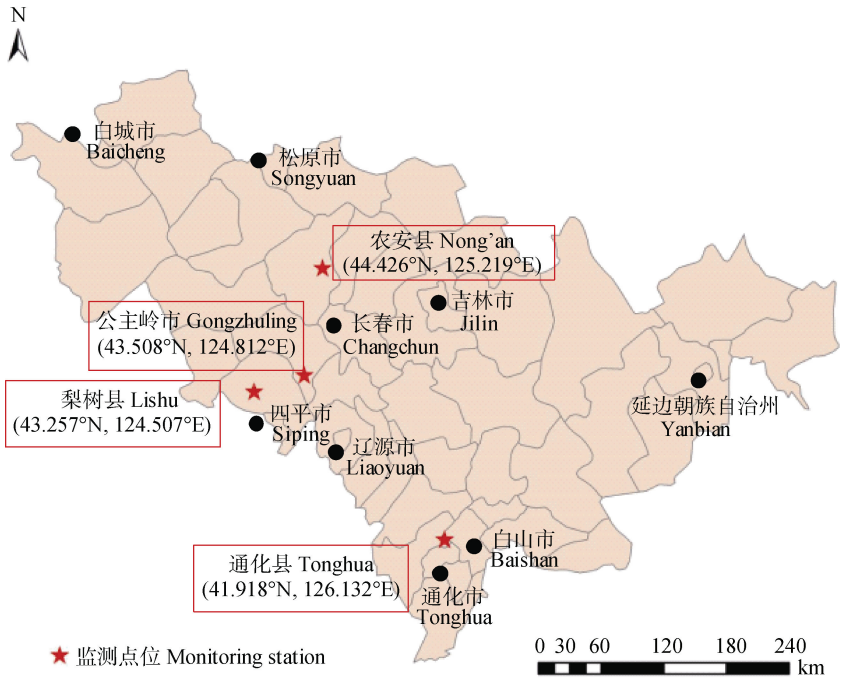

图 1　吉林省雨养春玉米氮磷淋溶监测点位分布图

Fig. 1　Distribution of monitoring stations for nitrogen and phosphorus leaching of rainfed spring maize in Jilin Province

表 1　吉林省春玉米氮磷淋溶监测点基本情况

Table 1　Basic information of spring maize nitrogen and phosphorus leaching monitoring stations in Jilin Province

监测点 Monitoring station	小区面积 Plot area (m^2)	小区数量 Plot number	面积 Total area (m^2)	化肥施用量 Fertilization rate ($kg·hm^{-2}$)			基本情况 Basic situation
				N	P	K_2O	
农安 Nong'an	54	3	162	219	67.5	67.5	属中温带大陆性气候。主要土壤类型为黑土、黑钙土。It has a mid-temperate continental climate. The main soil types are black soil and chernozem.
梨树 Lishu	38	3	114	270	139.5	139.5	属北温带半湿润大陆季风性气候, 主要土壤类型有黑土、黑钙土、淡黑钙土、棕壤、白浆土等。It is a semi-humid northern temperate continental monsoon climate. The main soil types are black soil, chernozem, light chernozem, brown earth, albic soil, etc.
公主岭 Gongzhuling	2	3	6	240	90	90	属中温带湿润地区大陆性季风气候。主要土壤类型为黑土、黑钙土。It has a humid temperate continental monsoon climate. The main soil types are black soil and chernozem.
通化 Tonghua	54	3	162	240	114	120	属中温带湿润气候区, 主要土壤类型为黑土、暗棕壤。It is in the humid middle temperate zone. The main soil types are black soil and dark brown soil.

1.3　样品采集与分析测试方法

降雨采集: 降雨采样点均位于各监测点 10 m 范围内, 远离局部污染源, 四周无遮挡雪、雨的高大建筑物或树木, 通过自动式雨量计记录降雨量。每次降雨后将雨水样品移入洁净干燥的聚乙烯塑料瓶中。在样品瓶上贴上编号、标签, 同时记录采样地点、日期、起止时间、降水量等信息。24 h 降水量大于 5 mm 的水样, 作为一个样品测试; 24 h 降水量小于 5 mm 的水样, 将当月所有小于 5 mm 的降水水样混合成一个样品, 测试混合样的指标。样品采

集后，立即送检或冰冻保存(不超过 1 个月)。

淋溶水的样品采集参考《农田面源污染监测方法与实践》[22]中农田地下淋溶计量与样品采集方法。每次降雨后，如发生淋溶，用田间渗滤池装置(图 2)抽取土壤淋溶液，一次降雨采集完毕后记录淋溶量。淋溶液摇匀后，取 2 个混合水样；其一供分析测试用，另一为备用。每一水样量约 500 mL，如淋溶液不足 500 mL 则将全部淋溶液作为采集样品。

降雨及淋溶水样的总氮和总磷浓度分别采用凯氏定氮法和钼酸铵分光光度法测定[23]。

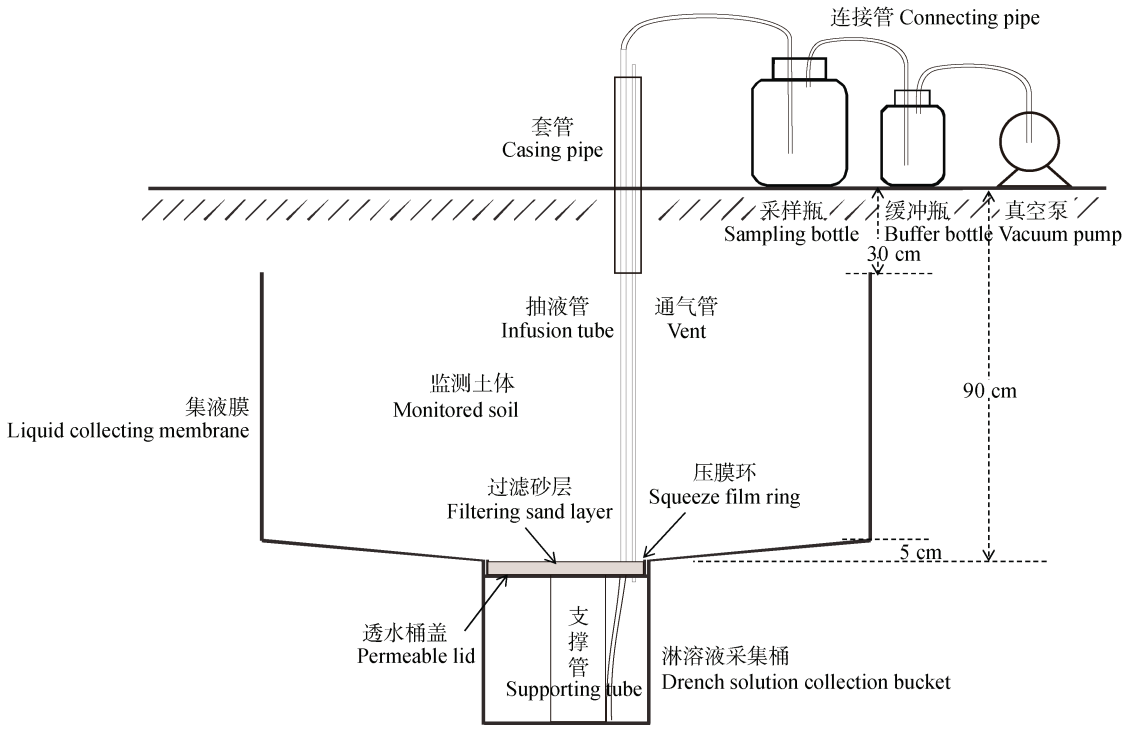

图 2 田间渗滤池(地下部分)及取水装置(地上部分)示意图

Fig. 2 Schematic diagram of field leakage pond (underground part) and water intake device (aboveground part)

1.4 数据分析与处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行分析和处理，采用 Excel 2016 和 Origin 9.0 进行制图。

年度氮/磷淋溶强度参考文献[24]计算。计算公式如下：

$$L=\sum_{i=1}^{n}\left(L_i\times D_i\right)/100 \quad (1)$$

式中：L 为年度淋溶氮/磷量(kg·hm^{-2})，L_i 为第 i 次淋溶量(mm)，D_i 为第 i 次淋溶液氮/磷浓度(mg·L^{-1})。

$$\text{产流概率}(\%)=\text{产流次数}/\text{降雨次数}\times 100 \quad (2)$$

$$\text{产流系数}(\%)=\text{产流量}(\text{mm})/\text{降雨量}(\text{mm})\times 100 \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 吉林省黑土区降雨总体特征

降雨强度为单位时段内的降雨量，降雨强度能够反映一次降水过程的快慢缓急程度，是描述降雨特征的重要指标[25]，也是决定径流、淋溶流失的重要因素[13]。参考降雨量等级划分国家标准(GB/T 28592—2012)，按照 24 h 降雨量的不同，降雨等级划分为小雨(<9.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)、暴雨(50.0~99.9 mm)、大暴雨(100.0~249.9 mm)、特大暴雨(≥250.0 mm)[26-27]。4 个监测点 2016—2019 年春玉米全生育期(4—10 月)平均降雨量为 475 mm，变化范围在 424~554 mm；年际间波动较大，变异系数为 12.2%。4 个监测点 2016—2019 年春玉米全生育期平均发生降雨 24.9 次，其中小雨 11.3 次，中雨 9 次，大雨 2.7 次，暴雨 1.8 次，大暴雨 0.1 次，其降雨占总降雨量的比例分别为 13.86%、29.73%、21.89%、27.05%、7.48%。可以看出，春玉米生育期小雨和中雨虽然发生次数较多，但中雨和暴雨降雨量占比较大，达 50%以上，是生育期降雨的主要来源。

从各监测点来看(图 3、表 2)，2016—2019 年春玉米全生育期平均降雨量最多的为通化监测点，降雨量为 593~785 mm，其小雨和中雨发生次数(19 次和 12 次)和降雨占总降雨量比例(28.94%和 40.15%)均较大，是通化春玉米生育期降雨的主要来源；其次为公主岭和梨树(降雨量为 512~699 mm、305~434 mm)，其中小雨和中雨发生次数较多，但中雨、大雨和暴

雨降雨量占比较大(70.89%和 94.35%)，是公主岭和梨树春玉米生育期降雨的主要来源；降雨量最少的为农安监测点，降雨量为 197~342 mm，春玉米生育期降雨的主要来源为小雨和中雨，降雨次数和降雨占比分别为 6 次和 9 次、19.57%和 56.72%。

2.2　降雨强度与淋溶量之间的关系

吉林省 4 个监测点 2016—2019 年的降雨-淋溶关系可以看出(表 3)，在春玉米雨养条件下，吉林省黑土区降雨强度和淋溶量呈极显著正相关关系(P<0.01)，降雨强度每增加 10.0 mm·(24h)$^{-1}$，淋溶量增加 1.81 mm。根据降雨强度和淋溶量关系的拟合方程(y=0.181x+2.4433，r=0.546**)，当降雨强度在 9.9 mm·(24h)$^{-1}$(小雨)以下时，淋溶量基本在 4.24 mm 以下；降雨强度为 10.0~24.9 mm·(24h)$^{-1}$(中雨)时，淋溶量为 4.25~6.95 mm；降雨强度为 25.0~49.9 mm·(24h)$^{-1}$(大雨)时，淋溶量明显增加，一般介于 6.97~11.48 mm；当降雨强度超过 50.0 mm·(24h)$^{-1}$ 时(暴雨)，淋溶量增加更明显，个别点达 25 mm 和 32 mm，淋溶系数达 25.8%和 45.7%。

从各监测点来看(表 3)，公主岭和农安降雨强度和淋溶量呈极显著正相关关系(P<0.01)，通化降雨强度和淋溶量呈显著正相关(P<0.05)，梨树监测点二者无显著相关性。降雨强度每增加 10.0 mm·(24h)$^{-1}$，各监测点淋溶量分别增加 0.35 mm(公主岭)、1.08 mm (梨树)、2.43 mm(农安)、0.95 mm(通化)，其中农安监测点增加的淋溶量最多。也有一些点位虽然单次降雨强度不高，但是淋溶前一直有持续降雨，导致土壤水分饱和，因此导致较小的降雨强度也可以引起淋溶。

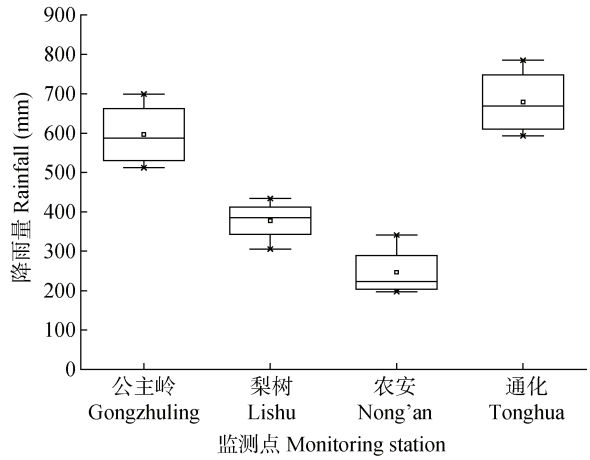

图 3　2016—2019 年吉林省 4 个监测点雨养春玉米生育期降雨量变化

Fig. 3　Variations of rainfall during rainfed spring maize growth season in four monitoring stations in Jilin Province from 2016 to 2019

表 2　2016—2019 年吉林省 4 个监测点雨养春玉米生育期降雨统计

Table 2　Statistical analysis of rainfall during rainfed spring maize growth season in different monitoring stations in Jilin Province from 2016 to 2019

监测点 Monitoring station	等级 Level	年均降雨次数 Annual average rainfall times	年均降雨量 Annual mean rainfall (mm)	最大日降雨量 Max daily rainfall (mm)
公主岭 Gongzhuling	小雨 Light rain	16.8	87.9	9.7
	中雨 Moderate rain	8.8	134.9	24.4
	大雨 Heavy rain	5.8	191.0	43.8
	暴雨 Thunderstorm	2.8	155.4	81.0
	大暴雨 Torrential rain	0.3	27.4	109.7
梨树 Lishu	小雨 Light rain	3.3	21.7	9.7
	中雨 Moderate rain	6.0	98.3	24.0
	大雨 Heavy rain	2.5	80.9	40.0
	暴雨 Thunderstorm	2.8	183.3	86.7
农安 Nong'an	小雨 Light rain	6.0	48.2	9.8
	中雨 Moderate rain	9.0	139.7	23.9
	大雨 Heavy rain	1.0	30.0	33.0
	暴雨 Thunderstorm	0.5	28.4	63.5
通化 Tonghua	小雨 Light rain	19.0	181.7	9.7
	中雨 Moderate rain	12.0	251.9	24.8
	大雨 Heavy rain	1.5	76.0	33.8
	暴雨 Thunderstorm	1.2	118.1	52.5

除通化为 2019 年降雨数据外，其他监测点均为 2016—2019 年数据。The rainfall data are from 2016 to 2019 except Tonghua, where the rainfall data is in 2019.

表 3 2016—2019 年吉林省 4 个监测点春玉米生育期降雨强度(*x*)与淋溶量(*y*)的关系

Table 3 Relationship between rainfall intensity (*x*) and leaching amount (*y*) during rainfed spring maize growth season in four monitoring stations in Jilin Province from 2016 to 2019

监测点 Monitoring station	拟合方程 Fitted equation	样本量 Sample size	*r*
公主岭 Gongzhuling	y=0.0348x+1.7318	61	0.5102**
梨树 Lishu	y=0.1079x+6.7734	11	0.2980
农安 Nong'an	y=0.2427x+5.5176	14	0.6963**
通化 Tonghua	y=0.0946x+5.0444	43	0.3829*
所有点 Four stations	y=0.1810x+2.4433	133	0.5460**

和*分别表示拟合方程在 P<0.01 和 P<0.05 水平显著。 and * mean significance at P<0.01 and P<0.05 levels of the fitted equations, respectively.

随全生育期(4—10 月)降雨量的增加，淋溶概率和淋溶次数(图 4a，b)分别呈显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)线性增加趋势。降雨量每增加 100 mm，淋溶次数约增加 3 次，淋溶概率上升 6%。当全生育期降雨量超过 74 mm 时，淋溶概率增加，可能引起淋溶；而当全生育期降雨量达 217 mm 时，淋溶次数增加，可以发生淋溶。

从图 4c 可以看出，产生淋溶的降雨等级一般以中雨(10.0~24.9 mm)和大雨(25.0~49.9 mm)为主，淋溶次数约占总淋溶次数的 57%；小雨和暴雨分别占 24%和 19%；由于春玉米区暴雨和大暴雨的几率较低，导致次数占比较低，而如果是暴雨以上等级，淋溶的概率则是 100%。

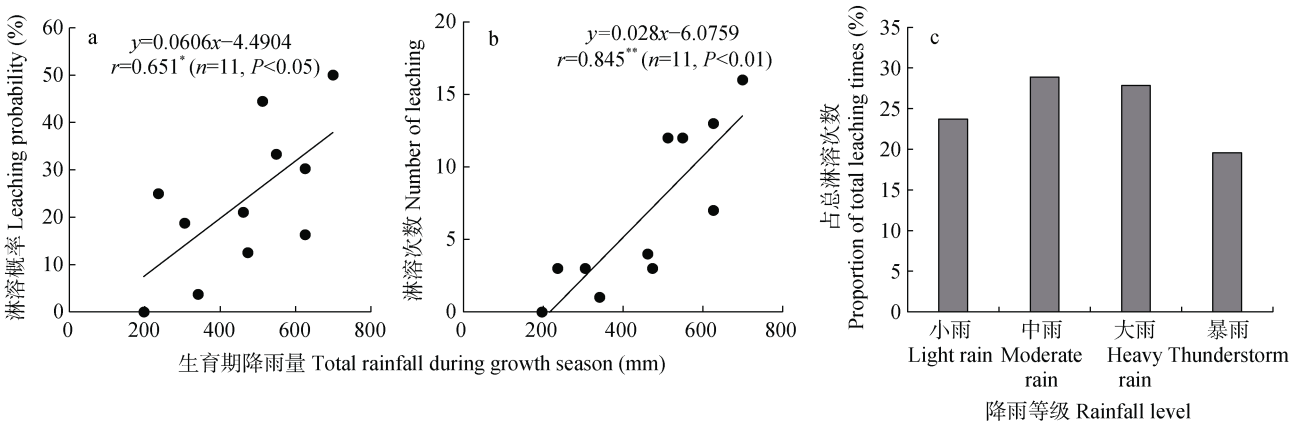

图 4 吉林省 4 个监测点春玉米生育期降雨量与淋溶概率(a)和淋溶次数(b)的关系及不同降雨强度下淋溶次数分布(c)

Fig. 4 Relationship between rainfall and leaching probability (a) and leaching times (b), and proportions of leaching times of different rainfall levels to total leaching times (c) during rainfed spring maize growth season in four monitoring stations of Jilin Province

2.3 淋溶量与淋溶液氮磷浓度之间的关系

2.3.1 淋溶量与氮浓度的关系

由表 4 可知，在春玉米雨养条件下，吉林省黑土区淋溶量和淋溶液总氮浓度呈极显著正相关关系(P<0.01)。根据拟合方程，淋溶量每增加 10 mm，淋溶液总氮浓度增加 12.91 mg·L^{-1}。当淋溶量在 15 mm 以下时，总氮浓度多在 30 mg·L^{-1} 以下水平；淋溶量在 15~20 mm 时，总氮浓度明显增加，在 28.28~34.73 mg·L^{-1} 水平；当超过 20 mm 时，总氮浓度个别点达到 42.48 mg·L^{-1}。

不同监测点淋溶量和总氮浓度呈现不同规律(表 4)，公主岭、梨树和通化监测点淋溶量和总氮浓度呈正相关关系，农安监测点呈负相关关系，但相关性均未达显著水平。淋溶量每增加 10 mm，各监测点总氮溶度分别增加 14.09 mg·L^{-1} (公主岭)、6.28 mg·L^{-1} (梨树)、2.07 mg·L^{-1} (通化)和−2.98 mg·L^{-1} (农安)。

表 4 2016—2019 年吉林省 4 个监测点春玉米生育期淋溶量(*x*)与淋溶液总氮浓度(*y*)的关系

Table 4 Relationship between leaching amount (*x*) and total nitrogen concentration of leachate (*y*) during rainfed spring maize growth season in four monitoring stations in Jilin Province from 2016 to 2019

监测点 Monitoring station	拟合方程 Fitted equation	样本量 Sample size	*r*
公主岭 Gongzhuling	y=1.4092x+5.0456	63	0.2771
梨树 Lishu	y=0.6281x+44.842	9	0.1691
农安 Nong'an	y=−0.2984x+24.682	15	0.7345
通化 Tonghua	y=0.2073x+12.934	42	0.1153
所有点 Four stations	y=1.2910x+8.9103	128	0.4548**

表示拟合方程在 P<0.05 水平显著。 means significance at P<0.05 level of the fitted equations.

2.3.2 淋溶量与磷浓度的关系

在春玉米雨养条件下，吉林省黑土区淋溶量和淋溶液总磷浓度无明显相关性(图 5a)。吉林省 4 个监测点 2016—2019 年淋溶液总磷浓度依次为梨树(0.148~0.346 mg·L^{-1})>通化(0.073~0.228 mg·L^{-1})>公

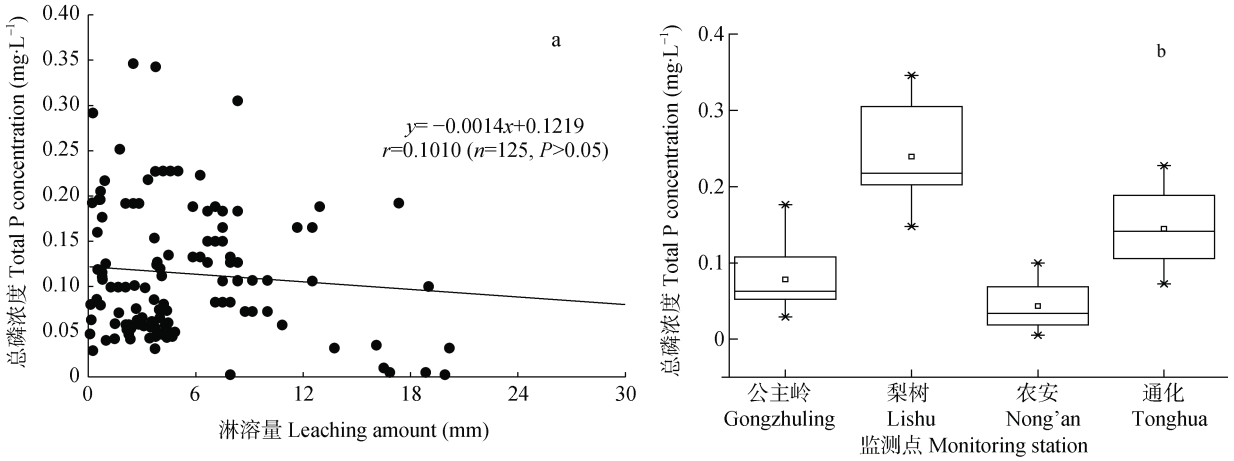

图 5　2016—2019 年吉林省 4 个监测点春玉米生育期淋溶量与淋溶液总磷浓度的关系(a)及总磷浓度比较(b)

Fig. 5　Relationship between leaching amount and total phosphorus (TP) concentration of leachate (a) and TP concentration of leachate (b) during rainfed spring maize growth season in four monitoring stations in Jilin Province from 2016 to 2019

主岭(0.029~0.177 mg·L^{-1})>农安(0.005~0.100 mg·L^{-1})(图 5b)。根据《水环境监测与分析技术》[28]中《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002), 梨树地下淋溶液的水质在地表水Ⅲ类到Ⅴ类之间, 通化和公主岭地下淋溶液的水质在地表水Ⅱ类到Ⅳ类之间, 农安地下淋溶液的水质在地表水Ⅱ类以下。

2.4　降雨强度与氮磷淋溶强度之间的关系

2.4.1　降雨强度与总氮淋溶强度的关系

在春玉米雨养条件下, 吉林省 4 个监测点 2016—2019 年的降雨强度和总氮淋溶强度呈极显著正相关关系(P<0.01)(表 5)。通过降雨强度和总氮淋溶强度关系的拟合方程(y=0.0732x−0.2046, r=0.4950**)可以看出, 降雨强度每增加 10 mm·(24h)$^{-1}$, 总氮淋溶强度增加 0.73 kg·hm^{-2}; 当降雨强度在 9.9 mm·(24h)$^{-1}$(小雨)以下时, 总氮淋溶强度基本在 0.52 kg·hm^{-2} 以下, 占施氮量(4 个监测点平均施氮量 242 kg·hm^{-2})的 0.2%; 降雨强度在 10.0~24.9 mm·(24h)$^{-1}$(中雨)时, 总氮淋溶强度为 0.53~1.62 kg·hm^{-2}, 占施氮量的 0.2%~0.7%; 当降雨强度在 25.0~49.9 mm·(24h)$^{-1}$(大雨)时, 总氮淋溶强度明显增加, 一般介于 1.63~3.45 kg·hm^{-2}, 占施氮量的 0.7%~1.4%; 当超过 50.0 mm·(24h)$^{-1}$ 时(暴雨), 总氮淋溶强度增加更明显, 个别点超过 12 kg·hm^{-2}, 占施氮量的 5.0%。可以看出, 降雨等级在中雨以下时, 总氮淋溶强度一般不会超过 2 kg·hm^{-2}, 总氮量仅损失不足 1%; 当降雨等级为大雨时, 总氮淋溶强度在 4 kg·hm^{-2} 以下, 总氮量损失在 2%以下。

各监测点总氮淋溶强度随降雨强度的增加有增加的趋势(表 5), 降雨强度每增加 10 mm·(24h)$^{-1}$, 各监测点总氮淋溶强度分别增加 0.03 kg·hm^{-2} (公主岭)、0.90 kg·hm^{-2} (梨树)、0.28 kg·hm^{-2} (农安)、0.17 kg·hm^{-2} (通化)。

2.4.2　降雨强度与总磷淋溶强度的关系

从表 5 可知, 研究区降雨条件下, 雨养春玉米总磷淋溶风险较低(0~0.064 kg·hm^{-2}), 降雨强度和总磷淋溶强度无明显相关性。从不同监测点来看, 随着降雨量增加, 公主岭和梨树监测点总磷淋溶强度有逐渐增加趋势, 农安和通化监测点总磷淋溶强度有逐渐减少趋势, 但相关性均未达显著水平。

表 5　2016—2019 年吉林省 4 个监测点春玉米生育期降雨强度(x)与总氮及总磷淋溶强度(y)的关系

Table 5　Relationship between rainfall intensity (x) and total nitrogen or total phosphorus leaching intensity (y) during rainfed spring maize growth season in four monitoring stations in Jilin Province from 2016 to 2019

监测点 Monitoring station	总氮淋溶强度 Total nitrogen leaching intensity			总磷淋溶强度 Total phosphorus leaching intensity		
	拟合方程 Fitted equation	样本量 Sample size	r	拟合方程 Fitted equation	样本量 Sample size	r
公主岭 Gongzhuling	y=0.0027x+0.19	63	0.2119	y=4E−05x+0.0015	63	0.2575
梨树 Lishu	y=0.0899x+1.5586	9	0.3531	y=4E−05x+0.0092	11	0.0566
农安 Nong'an	y=0.0280x+2.7903	12	0.4126	y=−9E−05x+0.0124	14	0.1562
通化 Tonghua	y=0.0167x+0.6838	9	0.2993	y=−1E−05x+0.0095	42	0.0283
所有点 Four stations	y=0.0732x−0.2046	122	0.4950**	y=4E−05x+0.0053	126	0.1030

3 讨论

3.1 吉林省黑土区降雨总体特征

吉林省黑土区降雨年际间波动较大，这与前人研究降雨规律大体一致[29]。区域间从东向西降雨量呈现逐渐减少趋势，且农安和通化生育期降雨以中雨和小雨为主，而公主岭和梨树则以中雨、大雨和暴雨占较大比例，其中公主岭和梨树短时、集中的降雨特点更易增加农业面源污染的发生风险。因此，明确吉林省黑土区降雨的总体特征对区域农业面源污染风险的防控具有重要意义。

3.2 降雨强度与氮磷淋溶参数的关系

农业面源污染是引起地表水富营养化、地下水硝酸盐及其污染物超标的主要原因，对区域性水资源安全构成严重威胁[30-32]。土壤中的氮素淋溶是导致面源污染的主要因素之一[33]。土壤氮流失方式主要包括随地表径流和沉积物的横向迁移即养分流失，随水流下渗的纵向迁移即养分淋失[34]。土壤氮淋溶主要取决于土壤溶液中氮的含量和土壤水分的运动情况[19]。农田氮淋溶主要受作物种类、施肥情况、耕作灌溉制度、土壤及降水因素影响。在降雨强度与氮浓度和氮淋溶强度关系的研究中，潘忠成等[34]采用人工模拟降雨的方法对黏质土坡面上氮流失过程进行研究，结果表明降雨强度和坡度与单位面积氮素淋溶强度有显著线性正相关关系，且在相同条件下，降雨强度对氮素淋溶强度的影响比坡度大，随降雨强度增加，氮素淋溶强度和浓度均有增加趋势。吴希媛等[35]采用模拟降雨手段对红黄壤坡地氮素流失研究结果也证实了这一点，随着降雨强度的增加，氮流失的强度和浓度都会相应增加。这与本研究在降雨强度与总氮淋溶强度关系的结果一致，降雨强度与总氮淋溶强度呈正相关关系，其原因可能是土壤胶粒携带负电荷，土壤中的 NO_3^--N 不易被土壤胶粒吸附[36]，在降雨作用下，容易使土壤中 NO_3^--N 向下迁移，且当水分达到饱和时，发生养分淋失[37]，因此，降雨强度的增加导致总氮流失强度的增加。

本研究结果表明，降雨强度和总磷淋溶强度、淋溶量和淋溶总磷浓度均无明显相关关系。而梁新强等[38]在降雨径流中发现，径流液总磷浓度随着降雨量及施肥量的增加而增大，这是由于大雨的雨滴对表层土壤的击打能力增强[39]，而土壤磷素主要吸附于土壤层表面，较强的冲击动能引起土壤吸附磷的流失是径流磷素流失的主要形式，因此磷素地表径流流失的形态主要以颗粒态占较大比例，而可溶性磷素比例较少。而本研究磷素的淋溶损失是磷素在土壤剖面的垂向移动损失，更多研究表明土壤磷易吸附到土壤胶体上[40-45]，形成难溶的土壤磷素形态，是导致磷素淋溶较低，且受降雨等因素影响较小的主要原因。农田土壤氮磷的淋溶是一个复杂的过程，除降雨强度外，还与施肥情况、耕作和灌溉情况、农作物类型、土壤类型和土壤质地等因素密切相关，因此关于农田氮磷淋溶与各影响因子的关系还待进一步的研究和探讨。

4 结论

吉林省黑土区 4 个监测点春玉米全生育期年均降雨量为 475 mm，变化范围为 424~554 mm，时空变异较大。不同监测点降雨量依次为通化>公主岭>梨树>农安，其中通化和农安生育期降雨以小雨和中雨为主，公主岭和梨树生育期降雨以中雨、大雨和暴雨为主。

春玉米雨养条件下，淋溶量和降雨强度呈极显著正相关关系(P<0.01)，降雨强度每增加 10 mm·(24h)$^{-1}$，淋溶量增加 1.81 mm。当降雨等级超过大雨时，淋溶量明显增加，范围为 6.97~11.48 mm；当降雨等级超过暴雨时，淋溶量增加更明显。生育期降雨量与淋溶次数和淋溶概率呈显著线性正相关，生育期降雨量每增加 100 mm，淋溶次数约增加 3 次，淋溶概率上升 6%。吉林省黑土区淋溶量和淋溶液总氮浓度呈极显著正相关关系(P<0.01)，与总磷浓度无明显相关关系。

总氮淋溶强度均与降雨强度呈极显著正相关(P<0.01)，降雨强度每增加 10 mm·(24h)$^{-1}$，总氮淋溶强度增加 0.73 kg·hm^{-2}。当降雨等级超过大雨时，总氮淋溶强度明显增加，范围为 1.63~3.45 kg·hm^{-2}，氮淋溶强度约占施氮量的 0.7%~1.4%；当降雨等级超过暴雨时，总氮淋溶强度增加更明显，总氮淋溶强度为 12 kg·hm^{-2}，占施氮量的 5.0%。降雨强度和总磷淋溶强度无明显相关性。

总体来看，春玉米雨养条件下，吉林省黑土区农田以氮素淋溶为主，且与降雨密切相关，磷素淋溶不明显。因此，我们应因地制宜采取农艺措施在源头上阻控农业面源污染的发生，为农业生态可持续发展提供有效途径。

参考文献 References

[1] 吉林省统计局，国家统计局吉林调查总队. 吉林统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社, 2018
Jilin Provincial Bureau of Statistics, Jilin Investigation Team of National Bureau of Statistics. Jilin Statistical Yearbook[M].

Beijing: China Statistical Publication, 2018

[2] 彭畅, 朱平, 牛红红, 等. 农田氮磷流失与农业非点源污染及其防治[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 508−512
PENG C, ZHU P, NIU H H, et al. Nitrogen and phosphorus loss of farmland agricultural non-point source pollution and its prevention[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2): 508−512

[3] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 61−64
WANG H, WANG Q J, SHAO M A. Characteristics of nitrogen leaching from sloping land on Loess Plateau under rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 61−64

[4] CARPENTER S R, CARACO N F, CORRELL D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 559−568

[5] 胡春胜, 程一松, 于贵瑞. 华北平原施氮对农田土壤溶液中硝态氮含量的影响[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 46–48
HU C S, CHENG Y S, YU G R. Effects of nitrogenous fertilizer application on nitrate N concentration of soil solution in North China Plain[J]. Resources Science, 2001, 23(6): 46–48

[6] 王欢元, 胡克林, 李保国, 等. 不同管理模式下农田水氮利用效率及其环境效应[J]. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2701–2710
WANG H Y, HU K L, LI B G, et al. Analysis of water and nitrogen use efficiencies and their environmental impact under different water and nitrogen management practices[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(13): 2701–2710

[7] 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 等. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 711–716
ZHANG Y G, LIU H B, LI Z H, et al. Study of nitrate leaching potential from agricultural land in Northern China under long-term fertilization conditions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6): 711–716

[8] 卢艳丽, 白由路, 王磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 209–215
LU Y L, BAI Y L, WANG L, et al. Efficiency analysis of slow/controlled release fertilizer on wheat-maize in North China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(1): 209–215

[9] 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
HU L F, HU C S, AN Z M, et al. Effects of different tillage patterns on crop yields and nitrate leaching in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 186–189

[10] HANSEN E M, MUNKHOLM L J, MELANDER B, et al. Can non-inversion tillage and straw retainment reduce N leaching in cereal-based crop rotations[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 109(1): 1–8

[11] 陈淑峰, 吴文良, 胡克林, 等. 华北平原高产粮区不同水氮管理下农田氮素的淋失特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 65–73
CHEN S F, WU W L, HU K L, et al. Characteristics of nitrate leaching in high yield farmland under different irrigation and fertilization managements in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 65–73

[12] MACK U D, FEGER K H, GONG Y S, et al. Soil water balance and nitrate leaching in winter wheat-summer maize double-cropping systems with different irrigation and N fertilization in the North China Plain[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168(4): 454–460

[13] SUN H Y, SHEN Y J, YU Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1139–1145

[14] BEAUDOIN N, SAAD J K, VAN LAETHEM C, et al. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 111(1/4): 292–310

[15] HE Y, HU K L, WANG H, et al. Modeling of water and nitrogen utilization of layered soil profiles under a wheat-maize cropping system[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 596−605

[16] MILROY S P, ASSENG S, POOLE M L. Systems analysis of wheat production on low water-holding soils in a Mediterranean-type environment: Ⅱ. Drainage and nitrate leaching[J]. Field Crops Research, 2008, 107(3): 211–220

[17] REN Y B, REN N Q, LI X K, et al. Efficiency of urban wetlands in removing agricultural non-point source pollution[J]. Asian Journal of Chemistry, 2013, 25(9): 4726–4730

[18] 李桂花, 张艳萍, 胡克林. 不同降雨和灌溉模式对作物产量及农田氮素淋失的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 545–554
LI G H, ZHANG Y P, HU K L. Modeling the effect of rainfall and irrigation on nitrate leaching and crop yield in wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(3): 545–554

[19] 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
PENG C, ZHU P, ZHANG X Z, et al. Study of the influence of fertilization on nitrogen leaching underground in northeast central raining area by percolating pools[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(6): 125–130

[20] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2689–2701
LYU J L. Phosphorus leaching from agricultural soils and its prediction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2689–2701

[21] 项大力. 关中农田土壤磷素淋失研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009
XIANG D L. study on phosphorus leaching losses in a soil of Guanzhong farmland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019

[22] 刘宏斌, 邹国元, 范先鹏, 等. 农田面源污染监测方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 33–37
LIU H B, ZOU G Y, FAN X P, et al. Establishment and Ap-

plication of Monitoring Technology on Nonpoint Pollution from Arable Land[M]. Beijing: Science Press, 2015: 33–37

[23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
LU R K. Soil and Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000

[24] THOMAS J D. The role of dissolved organic matter, particularly free amino acids and humic substances, in freshwater ecosystems[J]. Freshwater Biology, 1997, 38(1): 1–36

[25] 方如康. 环境学词典[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 398
FANG R K. Dictionary of Environmental Science[M]. Beijing: Science Press, 2003: 398

[26] 李宗勋, 李启艳, 侯晓龙, 等. 不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 27–33
LI Z X, LI Q Y, HOU X L, et al. Characteristics of soil and water loss under different natural rainfall grades of *Pinus massoniana* forest with different canopy density[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 27–33

[27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 28592—2012 降水量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. GB/T 28592—2012 Grade of Precipitation[S]. Beijing: China Standard Press, 2012

[28] 王子东, 邵黎歌. 水环境监测与分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 17
WANG Z D, SHAO L G. Water Environment Monitoring and Analysis Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 17

[29] 彭畅, 牛红红, 李强, 等. 吉林省中部农田生态系统降雨湿沉降氮特征[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 955–961
PENG C, NIU H H, LI Q, et al. Nitrogen of atmospheric wet deposition in the central Jilin ecological system[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(4): 955–961

[30] 康智明, 张荣霞, 叶玉珍, 等. 基于GIS的福建农田氮磷地表径流流失与污染风险评估[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1887–1897
KANG Z M, ZHANG R X, YE Y Z, et al. GIS-based pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff in farmlands in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1887–1897

[31] ZHANG B L, CUI B H, ZHANG S M, et al. Source apportionment of nitrogen and phosphorus from non-point source pollution in Nansi Lake Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(19): 19101–19113

[32] LU H, XIE H L. Impact of changes in labor resources and transfers of land use rights on agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province, China[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 207: 134–140

[33] 苑韶峰, 吕军, 俞劲炎. 氮、磷的农业非点源污染防治方法[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 122–125
YUAN S F, LYU J, YU J Y. Methods of prevention and cure to ANPSP caused by nitrogen and phosphorous[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 122–125

[34] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 9–13
PAN Z C, YUAN X, LI M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil nitrogen loss[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 9–13

[35] 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙, 等. 不同雨强下坡地氮流失特征[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4576–4582
WU X Y, ZHANG L P, ZHANG M X, et al. Research on characteristics of nitrogen loss in sloping land under different rainfall intensities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4576–4582

[36] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 等. 稻田土壤中氮素淋失的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 28–36
WANG J Y, WANG S J, CHEN Y, et al. Study on the nitrogen leaching in rice fields[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(1): 28–36

[37] 牛新湘, 马兴旺. 农田土壤养分淋溶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 451–456
NIU X X, MA X W. Research advances on leaching of fertilizer nutrients from agricultural soils[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 451–456

[38] 梁新强, 田光明, 李华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 59–63
LIANG X Q, TIAN G M, LI H, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 59–63

[39] 王辉, 王全九, 邵明安, 等. 表土结皮影响坡地产流产沙及养分流失的试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 62–83
WANG H, WANG Q J, SHAO M A, et al. Impact of soil crust on runoff, sediment and nutrient loss from sloping land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 62–83

[40] 杨学云, 古巧珍, 马路军, 等. 塿土磷素淋移的形态研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 792–798
YANG X Y, GU Q Z, MA L J, et al. Forms of phosphorus leaching in loessial soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 792–798

[41] ABEKOE M K, SAHRAWAT K L. Phosphate retention and extractability in soils of the humid zone in West Africa[J]. Geoderma, 2001, 102(1/2): 175–187

[42] COOKE C M, GOVE L, NICHOLSON F A, et al. Effect of drying and composting biosolids on the movement of nitrate and phosphate through repacked soil columns under steady-state hydrological conditions[J]. Chemosphere, 2001, 44(4): 797–804

[43] HANSEN J C, STRAWN D G. Kinetics of phosphorus release from manure-amended alkaline soil[J]. Soil Science, 2003, 168(12): 869–879

[44] MCDOWELL R, SHARPLEY A, BROOKES P, et al. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution[J]. Soil Science, 2001, 166(2): 137–149

[45] TUNESI S, POGGI V, GESSA C. Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils: The role of calcium ions in solution and carbonate minerals[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1999, 53(3): 219–227