

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

袁京¹, 李国学^{1*}, 李荣花², 李宁³, 杨帆¹

(1.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2.房山区农业环境和生产监测站, 北京 102401; 3.孝感市环境保护局, 湖北 孝感 432100)

摘要:为粮田耕地污染监控预警及污染控制提供技术支持,以北京市房山区小麦/玉米轮作作为研究对象,采用陶土头负压法,通过2年的田间小区对比试验,以不施肥处理为对照,分析比较优化施肥和常规施肥对淋溶液水质的影响,并测算不同施肥处理的排污系数。研究表明:不同的施肥处理氮素淋溶量占总养分淋溶的76%~82%,氮素淋溶中以硝态氮为主,占总氮素淋溶的60%~70%,最高可达到90%;在氮磷钾养分施入量相同的情况下,优化施肥处理在不同程度上降低了养分淋溶量,可使总氮淋溶量减少23%~31%,总磷淋溶量减少32%~46%,硝态氮淋溶量减少22%~36%,在降雨量大时,优化施肥处理可明显减少铵态氮的淋溶;经测算,小麦/玉米轮作农田耕地排污系数(产出每公斤农产品养分淋溶排出量)常规施肥处理总氮、总磷、铵态氮及硝态氮的排放量分别为687.2、3.25、0.22、440 mg,优化施肥处理的排放量分别为348、0.87、0.38、205.9 mg。

关键词:小麦/玉米轮作;有机肥;养分淋溶;排污系数

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)04-0738-07 doi:10.11654/jaes.2015.04.019

Calculating Discharge Coefficients for Soil Nutrients in Wheat-Maize Rotation System Under Different Fertilization Practices

YUAN Jing¹, LI Guo-xue^{1*}, LI Rong-hua², LI Ning³, YANG Fan¹

(1.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2.Monitoring Station of Agricultural Environment and production, Beijing 102401, China; 3.Xiaogan Environment protect bureau, Xiaogan 432100, China)

Abstract: In order to find out nutrient leaching from different fertilization practices, a two-year nutrient leaching experiment was designed in a wheat-maize rotation farmland in Fangshan district, Beijing. Nutrient leaching was measured in optimized fertilization, traditional fertilization and no fertilization(control) fields using vacuum negative pressure. Results showed that TN leaching was accounted for 76%~82% of total nutrient leaching for all treatments. Nitrate nitrogen was the main component of TN losses, accounting for 60%~70% of TN leaching, with the highest of 90%. At the equal amounts of NPK, the optimized fertilization reduced TN leaching by 23%~31%, TP leaching by 32%~46%, and NO_3^- -N leaching by 22%~36%, compared with traditional fertilization. The reduction of NH_4^+ -N leaching by the optimized fertilization was more significant under greater rainfall. In wheat-maize rotation system, the discharge coefficient of production per kilogram agricultural products for TN, TP, NH_4^+ -N and NO_3^- -N was 687.2 mg, 3.25 mg, 0.22 mg and 440 mg for traditional fertilization and 348 mg, 0.87 mg, 0.38 mg and 205.9 mg for optimized fertilization, respectively. These results would provide technical support for pre-warning monitoring and pollution control of wheat-maize rotation system.

Keywords: wheat-maize rotation; organic fertilizer; nutrient leaching; discharge coefficient

土壤养分淋溶是指土壤营养元素随水垂直向下移动至植物根系活动层以下而造成的损失^[1],是农业

生产中影响肥料利用率的重要因素。我国粮食作物的肥料利用率很低,氮肥为11%~40%,磷肥为8%~20%,钾肥为21%~35%^[2]。养分淋溶流失不但会降低肥料利用率、消耗土壤养分库,而且会对农田生态环境和地下水产生严重影响^[3]。国内外大量资料表明,化肥的使用及灌溉已经导致农业生产区浅层地下水或地表水硝酸盐和磷的浓度不断升高^[4-7]。土壤中 NO_3^- -N的淋

收稿日期:2014-12-12

基金项目:国家“十二五”科技支撑项目“农业面源污染动态监测全程阻控减排技术与示范”(2012BAD15B01)

作者简介:袁京(1988—),女,博士,研究方向为固体废弃物处理与资源化。E-mail:jingyuan@cau.edu.cn

*通信作者:李国学 E-mail:ligx@cau.edu.cn

溶是氮素损失的重要途径之一,是导致地下水硝酸盐污染的重要原因。施入农田中的氮肥有 30%~50%通过淋溶进入地下水,导致地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量增加^[8]。张维理等^[9]报道称京、津、唐地区半数以上地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量超过饮用标准限值 ($\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),高者达 $67.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。上世纪 90 年代以后,有关土壤中磷素淋溶的相关报道逐年增多。Heckrath 等^[10]在对英国洛桑试验站长期土肥试验地(始于 1843 年)65 cm 下排水管中排出水进行分析发现,水中所含磷浓度很高,可达近 $2 \text{ mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。许多国家均得出农田土壤中磷素以淋溶形式损失的量与以地表径流和土壤侵蚀形式损失的量相当或淋溶量更大的报道^[11-12]。

我国对农田养分淋失的环境风险已开展了大量的研究工作,主要采用土钻取样法和模拟土柱法^[13-16],利用排水采集器法多侧重于稻田^[17-19]和北方旱田单一肥料中氮素淋溶形态和过程^[20]。李宗新等^[21]在山东半湿润暖温带气候条件下研究表明,在夏玉米生长期 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累计淋溶量可占氮肥施入总量的 3.49%~11.35%,其与灌溉水量和降雨量正相关,在雨量充沛的条件下,渗滤池淋溶的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 高达 $85.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮肥淋失率高达 19.9%。张玉铭等^[22]在华北太行山前平原小麦/玉米轮作农田研究表明,土壤水分渗漏和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋溶损失主要发生在高温多雨的玉米生长季节,主要与降水有关。

产排污系数作为环境领域重要的基础数据,是世界各国掌握污染状况、制定防治政策和设计运行环境工程设施的重要依据^[23]。我国在产排污系数方面的相关报道主要集中在工业领域^[24-26],以排污系数来表征污染排放大小在工业行业已经成熟且数据较完整,而农业排污系数数据库尚不完整,近几年畜禽养殖业产排污系数方面的报道逐渐增多^[27-28]。尽管已有针对地下水通过淋溶方式被污染的相关研究,但有关种植业产排污系数科学和系统的研究还鲜有报道。关于粮食作物尤其是小麦/玉米两种粮食作物轮作下污染淋溶排污系数的研究更显缺乏,因此不能全面估算农业种

植业源淋溶氮磷对面源污染的贡献率。本研究通过对北京市小麦/玉米轮作下的污染物淋溶(排污系数)的监测及其数据分析,估算出主要粮食作物小麦和玉米农田污染物流失量,旨在为这两种粮食作物种植的科学管理及降低农业非点源污染提供技术支持,为种植业环境污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 自然概况

试验于 2011—2012 年在北京市房山区石楼镇夏村紫苏苗木种植公司蔬菜种植基地进行。该种植基地为北京市耕地污染监控预警点,位于北京市西南,华北平原与太行山脉交界地带,属北温带大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春季干旱多风,秋季秋高气爽而短促,年平均气温 $10\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该地多年平均降水量为 655 mm 左右,降水多集中于 6—8 月,约占全年降水量的 85%;降雨强度大,多冰雹、大风。该区主要的粮食种植方式为冬小麦/夏玉米轮作。供试土壤为棕壤,为碎块结构,土壤较松且比较潮湿,肥力水平偏上,基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

供试材料夏玉米品种为郑单 958,冬小麦品种为农大 175,均由北京市房山区农业环境保护监测站提供。2011—2012 年共种植小麦/玉米轮作 3 茬,试验共设 3 个处理,分别为空白、常规、优化处理:空白处理不施任何肥料和毒性高、难降解的农药;常规处理中肥料、农药的施用量、施用方法和施用时期完全遵照当地农民生产习惯;优化施肥处理将常规处理的氮素化肥(以氮素计)减半,另一半养分以经过高温堆肥生产的腐熟有机肥替代,实现氮、磷、钾等养分含量总量相等。

按照一年两季(一季冬小麦和一季夏玉米)进行轮作,以年总施肥量计算,年总氮施用量为 $360 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,总磷(P_2O_5 计) $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,总钾(K_2O 计) $360 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,小麦和玉米施肥量各占 50%。每个处理重复 3

表 1 试验地土壤理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

土层厚度/cm	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	硝态氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	铵态氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	EC/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$
0~20	30.82	1.46	0.24	4.49	12.09	10.23	6.49	0.18
20~40	27.26	0.92	0.19	4.87	42.87	30.89	6.68	0.18
40~60	22.22	0.77	0.14	5.12	44.53	11.64	6.77	0.23
60~80	19.27	0.75	0.13	5.34	54.18	8.59	6.79	0.24
80~100	18.14	0.7	0.03	5.61	7.13	11.35	6.86	0.17

次,随机排列,共9个试验小区。每个小区面积为 14.4 m^2 ,规格为 $4.8\text{ m}\times 3\text{ m}$,夏玉米种植密度为 $50\,000\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,冬小麦播种量为 $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。化肥中总氮按照1:2比例进行底肥和追肥施用,总磷及总钾以底肥形式全部施入,有机肥全部以底肥的形式施入。试验期间,氮、磷、钾肥料品种分别为尿素(含N 46%)、磷酸二铵(含P 37%)和氯化钾(含K 50%),总氮施入量由尿素和磷酸二铵两种肥料中总N含量计算。试验所用的有机肥养分含量为氮2.5%、磷1.35%、钾2.7%,年总施用有机肥量为 $7200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

小麦追肥在返青期施入,玉米追肥在大喇叭口期施入,均为开沟施入方式。在播种后及每次追肥后分别进行灌溉,灌溉水量为30 mm,其他栽培管理都按照常规方法进行。每茬作物收获后,测算其产量。

试验采用的获取淋溶水样方法为负压计法,分别在每块实验小区的中间安装陶土头,地表接淋溶采集瓶,在每次灌溉后或降雨后,采用特制的负压计通过密封的三角瓶抽气造成负压以便采集水样,用量筒测定水样体积并低温保存,于次日测定铵态氮、硝态氮、总氮、总磷及总钾的浓度。当地土壤质地比较均一,85~90 cm以上为壤质,此深度以下质地偏粗,为砂质壤土。经房山区农业研究所专家指导,建议陶土头不宜过深埋入,为了能顺利采取水样,结合质地和当地降雨量,选择埋深为85 cm。

1.3 分析方法

1.3.1 测定方法

每次降雨和灌溉后1~2 d,取淋溶水样测定总氮、总磷、总钾以及铵态氮和硝态氮的含量。铵态氮、硝态氮采用流动分析仪测定(Auto Analyzer 3, Seal, 德国),总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,水样总磷采用钼酸铵分光光度法测定,总钾采用ICP-OES电感耦合等离子体发射光谱仪测定。

1.3.2 分析计算方法

(1)产量计算

玉米收获后,在每行中选取代表性的一株玉米植株,每个小区共选取9株,称取鲜重后全部脱粒,晒干并计重。小麦收获后,在每个小区中选取两行,晒干、脱粒并计重。

(2)淋溶量计算

农田水分存在水分平衡,北京地处华北平原,经相关文献查阅,用FAO推荐的Penmen-Monteith公式计算土壤深层渗漏量^[29]:

$$D=I+P-R-ET-SW$$

式中: D 是深层渗漏量; I 是阶段灌水量; P 是降水量; R 是径流量; ET 是农田蒸散量; SW 是土壤剖面的水量变幅。式中各量单位为mm。

由于试验地地势平坦,根据观测, R 可以忽略不计,经过对剖面含水率的测定,土壤中含水量也没有明显的变化。据此,土壤深层的渗水量为降水量与灌水量之和减去农田蒸散量。

(3)养分淋溶量计算

养分淋溶量计算公式为: $W=D\cdot C$

式中: W 为养分淋溶量,mg; D 为深层渗漏量,L; C 为淋溶水样中养分浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

深层渗漏量也即淋溶量,上文已说明其计算方法,养分浓度 C 取多次淋溶水样的平均浓度。

(4)排污系数计算

排污系数即污染物排放系数,指在典型工况生产条件下,生产单位产品(实用单位原料等)所产生的污染物质经过末端治理设施削减后的残余量,或生产单位产品(实用单位原料)直接排放到环境中的污染物质。当污染物直排时,排污系数与产污系数相同。

$$Cv=A/B$$

式中: Cv 是排污系数; A 是治理后的污染物残余量或直接排放的污染物质,kg; B 是产品的产量,kg。

粮田养分淋溶排污系数的具体计算方法如下:

排污系数=(施肥处理污染物排放量-对照处理污染物排放量)/作物产量(kg) $\times 100\%$

2 结果与分析

2.1 铵态氮、硝态氮和总氮

图1为不同种植时期淋溶液中硝态氮、铵态氮以及总氮含量。土壤养分氮素的淋溶主要为 NO_3^- -N,淋溶液中 NO_3^- -N含量占总氮含量的63%~77%,有时甚至可达90%。 NH_4^+ -N含量较少,几乎不会超过总氮含量的1%。张福珠等^[30]早些年就发现土壤氮素淋溶以 NO_3^- 为主, NO_2^- 次之, NH_4^+ 仅占很小部分。农田土壤各种形态的氮素中, NO_3^- -N难以被土壤颗粒吸附,是土壤氮素转化、迁移过程中最活跃的氮素形态。优化施肥处理 NO_3^- -N含量为 $13\sim 28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,常规处理 NO_3^- -N含量为 $20\sim 37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对照我国《生活饮用水水质标准》,常规施肥处理 NO_3^- -N含量均超过二级标准限值($\leq 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。 NH_4^+ -N的淋溶量较少,一般都低于一级标准限值($\leq 0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),但也受降雨量的影响,在单次降雨量超过300 mm时,常规施肥处理淋溶液中 NH_4^+ -N含量为 $0.72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超过一级标准

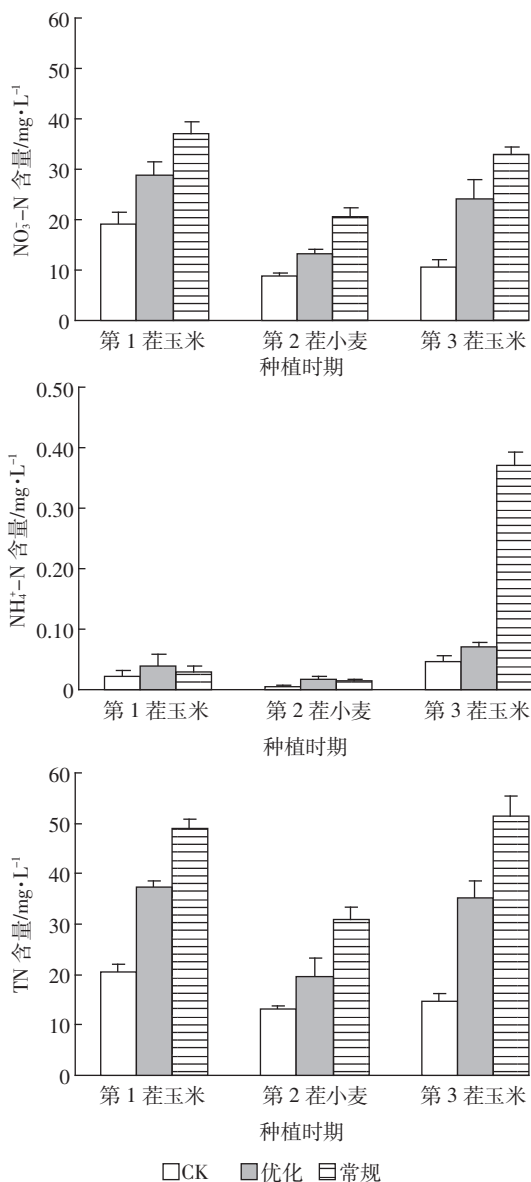


图1 淋溶液中铵态氮、硝态氮和总氮含量

Figure 1 Concentrations of NH_4^+-N , NO_3^--N and TN in leachates

而低于二级标准限值。不同时期3茬作物轮作优化施肥处理与常规处理相比,淋溶水样中总氮含量可分别减少约23.7%、36.0%和31.6%,3茬作物优化施肥处理与常规处理相比可减少硝态氮含量22.4%、36%和26%,表明有机肥的施用在一定程度上减少了硝态氮以及总氮的淋溶量。前2茬作物的种植期间铵态氮的含量都比较低,在 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,优化施肥处理略高于常规处理。在2012年第3茬夏玉米的种植期间,铵态氮的含量明显增加,优化施肥处理增加不显著,铵态氮含量为 $0.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,常规施肥处理铵态氮增加显著,达到 $0.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,是优化施肥处理的5.3倍,主要是由于2012年的强降雨所致(降雨量达到315

mm)。降雨对于铵态氮的淋溶有显著影响,而有机肥的使用可降低铵态氮的淋溶。

2.2 总磷

不同种植时期淋溶液中总磷的含量见图2。与总氮相比,总磷淋溶量甚少。淋溶液中总磷的含量为 $0.08\sim 0.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。杨学云等^[31]曾报道,淋溶磷较容易被吸附到土壤交替上,土壤养分磷的淋溶很低。常规施肥处理总磷的淋溶量一般为 $0.16\sim 0.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,优化施肥处理较常规施肥处理相比,总磷的淋溶量较低,为 $0.1\sim 0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。3茬作物轮作优化施肥处理与常规处理相比,淋溶水样中总磷含量可分别减少约32.1%、40%和45.6%。土壤磷素淋溶临界值是土壤磷素沉淀-溶解、吸附-解吸反应的结果,主要受制于土壤中有有机质和活性铁铝的含量,本研究优化施肥处理中有机肥增加了土壤中有有机质的含量,在一定程度上减少了磷素的淋溶。

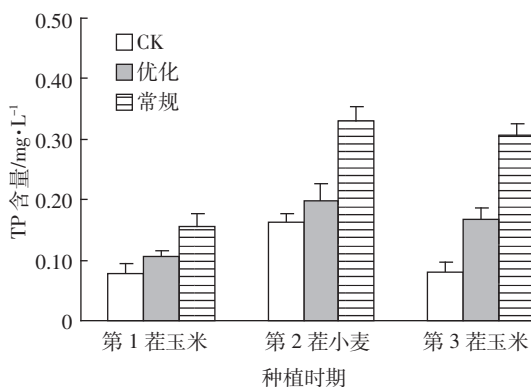


图2 淋溶液中总磷含量

Figure 2 Concentration of TP in leachates

2.3 总钾

不同种植时期淋溶液中总钾的含量见图3。淋溶液中总钾的含量为 $4\sim 32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,优化施肥处理略低于常规处理。第1茬夏玉米种植期间,三个不同施肥处理总钾含量均不高,且差异不显著。第3茬夏玉米种植期间,常规施肥处理总钾含量明显增加,常规施肥与优化施肥处理淋溶水样中总钾含量差异显著。优化施肥所用有机肥中钾在土壤中缓慢释放,可减少淋溶损失。任丽萍等^[32]通过农田1m深土层的模拟渗滤实验发现,钾肥的淋溶取决于施肥量,当施肥量在 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,钾的最大淋溶含量为 $14.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。本研究中淋溶深度为0.85m,施肥量为 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,钾的最大淋溶含量为 $32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。3茬作物轮作优化施肥处理与常规处理相比,淋溶水样中总钾的含量可分别减少约6.5%、24.5%和59%。

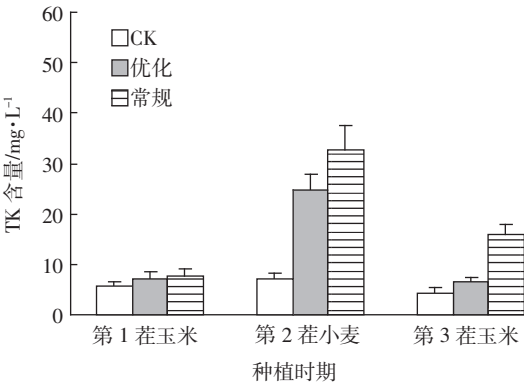


图 3 淋溶液中总钾含量

Figure 3 Concentration of TK in leachates

2.4 养分淋溶量

3 茬小麦/玉米轮作种植时期,进入土壤中雨水及灌溉水量见表 2。经计算,第 1 茬夏玉米的土壤淋溶量为 20.8 mm,第 2 茬冬小麦的土壤淋溶量为 13.75 mm,第 3 茬夏玉米种植期间由于遇百年一遇的强降雨,单次降雨量达到 315 mm,导致土壤淋溶量与往年相比剧增,达到 279 mm。

表 2 各个时期土壤淋溶量(mm)

Table 2 Amount of leached water during different periods(mm)

项目	时间	雨水+灌溉水量	蒸散量	淋溶量
第 1 茬玉米	2011.6—2011.10	288.10	267.30	20.80
第 2 茬小麦	2011.10—2012.6	229.20	215.45	13.75
第 3 茬玉米	2012.6—2012.10	652.00	372.95	279.05

通过对各个时期土壤淋溶总量的计算以及淋溶水中各养分含量的测定,分别计算了不同施肥处理不同时期各养分淋溶总量(表 3)。总体可看出,优化施肥处理各养分排放量低于常规施肥处理,且第 3 茬玉米时期,由于强降雨,使其养分淋溶量显著高于其他时期,基本超过前两茬作物养分淋溶量的 10 倍。降雨量是影响土壤养分淋溶的主要原因,进而引起地下水严重污染。2012 年单次强降雨造成的养分淋溶损失可能达到以往近 10 年的累积养分淋溶量。

对于总氮淋溶量,优化施肥较常规施肥相比可使总氮排放量减少 23%~36%;总磷排放量减少 32%~45%;总钾排放量减少 6%~59%;硝态氮排放量减少 22%~36%。而铵态氮的排放,2011 年为优化施肥处理最高,2012 年强降雨后常规处理铵态氮排放急剧增加。可见,有机肥在一定程度上降低了养分淋溶量,对地下水贡献最大的污染物质为硝态氮,铵态氮的淋溶量极少,只有在降雨量非常大的时候才会增加。

表 3 养分淋溶量(kg·hm⁻²)

Table 3 Amount of nutrients in leachates(kg·hm⁻²)

项目	时间	CK	常规	优化
总 氮	第 1 茬玉米	4.268	10.177	7.760
	第 2 茬小麦	1.803	4.239	2.712
	第 3 茬玉米	41.048	143.599	98.254
总 磷	第 1 茬玉米	0.016	0.032	0.022
	第 2 茬小麦	0.022	0.045	0.027
	第 3 茬玉米	0.226	0.857	0.466
总 钾	第 1 茬玉米	1.179	1.572	1.471
	第 2 茬小麦	0.993	4.483	3.383
	第 3 茬玉米	12.139	44.648	18.306
氨 氮	第 1 茬玉米	0.005	0.006	0.008
	第 2 茬小麦	0.001	0.002	0.002
	第 3 茬玉米	0.128	1.035	0.195
硝 氮	第 1 茬玉米	3.994	7.717	5.990
	第 2 茬小麦	1.202	2.826	1.808
	第 3 茬玉米	29.551	91.724	67.656

2.5 养分淋溶排污系数

根据排污系数计算公式,由单位土壤面积及单位产量分别计算了小麦/玉米轮作 3 茬的污染物排污系数(表 4)。污染物指标包括总氮、总磷、铵态氮和硝态氮。由于第 3 茬玉米种植期间降雨量为多年鲜见强降雨,排污系数与往年相比极高。这种强降雨的特殊情况,使一季作物的排污系数可达到正常降雨量排污系数的 10~40 倍,对地下水污染的影响非常严重,可能是近 10 年污染物排放的总量,必须引起特殊的关注。排除偶然的强降雨情况,正常降雨情况下,由 2011 年夏玉米和冬小麦两季作物计算夏玉米和冬小麦轮作下年平均排污系数。优化施肥处理平均每千克粮食作物产量排放的总氮、总磷、铵态氮、硝态氮等污染物质较常规施肥可分别减少 49%、73%、-77%、53%,对于主要的污染物质硝态氮的减排量可达到 50%以上,而对于铵态氮的排放,优化施肥处理与常规处理相比排放量增加。

表 4 结果为依据作物产量计算的排污系数,养分淋溶对于土壤及地下水的污染也可以通过耕地面积计算,依据耕地面积计算的排污系数见表 5。

3 结论

(1)在小麦/玉米轮作下,不同的施肥处理氮素淋溶量占总养分淋溶的 76%~82%,氮素淋溶中又以硝态氮为主,占总氮素淋溶的 60%~70%,最高可达到

表 4 按产量计算的排污系数($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 4 Discharge coefficients based on crop yield($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

项目	总氮		总磷		铵态氮		硝态氮	
	常规	优化	常规	优化	常规	优化	常规	优化
第 1 茬玉米	727.12	424.06	2.02	0.74	0.17	0.42	458.13	242.47
第 2 茬小麦	606.45	206.27	5.76	1.13	0.31	0.34	404.30	137.51
第 3 茬玉米	13 549.52	7 009.17	83.56	29.40	119.89	8.27	8 214.51	4 668.79
年平均	687.20	348.11	3.25	0.87	0.22	0.39	440.32	205.87

表 5 按面积计算的排污系数($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)Table 5 Discharge coefficients based on land area($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

项目	总氮		总磷		铵态氮		硝态氮	
	常规	优化	常规	优化	常规	优化	常规	优化
第 1 茬玉米	5.909	3.492	0.016	0.006	0.001	0.004	3.723	1.997
第 2 茬小麦	2.437	0.910	0.023	0.005	0.001	0.002	1.625	0.606
第 3 茬玉米	102.551	57.205	0.631	0.240	0.907	0.067	62.172	38.104
年平均	8.346	4.402	0.040	0.011	0.003	0.005	5.348	2.603

90%。铵态氮的淋溶量较低,在 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,降雨量较大时,铵态氮淋溶量明显增加。

(2)在同等量的氮、磷、钾养分的施入下,与常规施肥相比,一半的氮肥用有机肥替代的优化施肥处理在不同程度上降低了养分淋溶量,可使总氮淋溶量减少约 23%~31%,总磷淋溶减少约 32%~46%,硝态氮减少约 22%~36%;在降雨量大时,优化施肥处理可明显减少铵态氮的淋溶。

(3)小麦/玉米轮作农田耕地排污系数为产出每公斤产品的养分(污染物)淋溶排出量。常规施肥处理总氮、总磷、铵态氮及硝态氮的排放量分别为 687.2、3.25、0.22、440 mg;优化施肥处理总氮、总磷、铵态氮及硝态氮的排放量分别为 348、0.87、0.38、205.9 mg。

参考文献:

- [1] 林清火, 罗 微, 林钊沐, 等. 砖红壤地区旱地土壤肥料养分淋失研究进展[J]. 热带农业科学, 2003, 23(1): 61-66.
LIN Qing-huo, LUO Wei, LIN Zhou-mu, et al. Research advances on leaching of fertilizer nutrients in the Latosol Areas[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2003, 23(1): 61-66.
- [2] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [3] 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 Xin-xiang, MA Xing-wang. Research advances leaching of fertilizer nutrients from agricultural soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3): 451-456.
- [4] Power J, Schepers J. Nitrate contamination of groundwater in North-American[J]. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 1989, 26(3-4): 165-187.
- [5] 张维理, 田哲旭, 张 宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 82-89.
ZHANG Wei-li, TIAN Zhe-xu, ZHANG Ning, et al. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1(2): 82-89.
- [6] Sharpley A, McDowell R, Kleinman P. Phosphorus loss from land to water: Integrating agricultural and environmental management[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 287-307.
- [7] Zhang H, Cao F, Fang S, et al. Effects of agricultural production on phosphorus losses from paddy soils: A case study in the Taihu Lake Region of China[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2005, 13(1): 25-33.
- [8] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Science*, 2000, 9(1): 1-6.
- [9] 张维理, 林 葆, 李家康. 西欧发达国家提高化肥利用率的途径[J]. 土壤肥料, 1998(5): 3-9.
ZHANG Wei-li, LIN Bao, LI Jia-kang. Ways to increase the utilization ratio of fertilizers are in western developed countries[J]. *Soil Fertilizer*, 1998(5): 3-9.
- [10] Heckrath G, Brookes P, Poulton P, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broadbalk experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 904-910.
- [11] McDowell R, Sharpley A. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 508-520.
- [12] 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.
- [13] 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):5-10.
ZHANG Yun-gui, LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, et al. Study of nitrate leaching potential from agricultural land in Northern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6):5-10.
- [14] 孙波, 王兴祥, 张桃林. 红壤养分淋失的影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3):257-262.
SUN Bo, WANG Xing-xiang, ZHANG Tao-lin. Influencing factors of leaching nutrients in red soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):257-262.
- [15] 习金根, 周建斌. 不同灌溉施肥方式下尿素态氮在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3):271-275.
XI Jin-gen, ZHOU Jian-bin. Leaching and transforming characteristics of urea-N added by different ways of fertigation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3):271-275.
- [16] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 江西余江县高产水稻土有机碳和养分含量变化[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2):324-330.
LI Zhong-pe, ZHANG Tao-lin, CHEN Bi-yun. Changes of organic carbon and nutrient contents in highly productive paddy soils in Yujiang County of Jiangxi Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2):324-330.
- [17] 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 Jia-yu, WANG Sheng-jia, CHEN Yi, et al. Study on the nitrogen leaching in rich fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1):28-36.
- [18] 薛峰, 颜廷梅, 乔俊, 等. 太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4):26-31.
XUE Feng, YAN Ting-mei, QIAO Jun, et al. Economic and environmental benefits of lower fertilizer application rate in paddy fields in Taihu area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4):26-31.
- [19] 余贵芬, 吴泓涛, 魏永胜, 等. 氮在紫色土中的移动和水稻氮素利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4):316-320.
YU Gui-fen, WU Hong-tao, WEI Yong-sheng, et al. Study on nitrogen migration in purple soil and nitrogen uptake by rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4):316-320.
- [20] 连纲, 王德建, 林静慧, 等. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11):1879-1883.
LIAN Gang, WANG De-jian, LIN Jing-hui, et al. Characteristics of nutrient leaching from paddy field in Taihu Lake area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1879-1883.
- [21] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1):65-70.
LI Zong-xin, DONG Shu-ting, WANG Kong-jun, et al. Soil nutrient leaching pattern in maize field under different fertilizations an in situ study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1):65-70.
- [22] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 太行山前平原农田生态系统氮素循环与平衡研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1):5-11.
ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-Bao, et al. Nitrogen cycling and balance in agricultural ecosystem in pied montplain of Taihang Mountains[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1):5-11.
- [23] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):303-308.
DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, HUANG Hong-kun, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1):303-308.
- [24] 曹群, 郭正, 潘琼, 等. 生活源产排污系数在污染源普查中的应用分析[J]. 企业技术开发, 2008, 27(12):21-22.
CAO Qun, GUO Zheng, PAN Qiong, et al. Applied analysis of domestic pollution sources pollutants producing and bowdown coefficient in pollution sources census [J]. *Technologica Development of Enterprise*, 2008, 27(12):21-22.
- [25] 段宁, 郭庭政, 孙启宏, 等. 国内外产排污系数开发现状及其启示[J]. 环境科学研究, 2009, 22(5):622-626.
DUAN Ning, GUO Ting-Zheng, SUN Qi-hong, et al. Development and enlightenment of pollutant generation and discharge coefficients at home and abroad[J]. *Research of Environmental Science*, 2009, 22(5):622-626.
- [26] 金瑜. 浅谈工业源产排污系数的应用[J]. 污染防治技术, 2009, 22(5):88-90.
JIN Yu. Application of pollutant emission coefficients of industrial sources[J]. *Pollution Control Technology*, 2009, 22(5):88-90.
- [27] 栾冬梅, 李士平, 马君, 等. 规模化奶牛场育成牛和泌乳牛产排污系数的测算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16):185-189.
LUAN Dong-mei, LI Shi-ping, MA Jun, et al. Calculation of pollutants producing and discharging coefficients of heifers and lactating dairy cows in large-scale dairy farms[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultura Engineering*, 2012, 28(16):185-189.
- [28] 何志平, 曾凯, 李正确, 等. 四川规模猪场产排污系数测定[J]. 中国沼气, 2010, 28(4):10-14.
HE Zhi-ping, ZENG Kai, LI Zheng-que, et al. Measurement of pollutants producing and discharging coefficient on large scale pig farm in Sichuan[J]. *China Biogas*, 2010, 28(4):10-14.
- [29] 姜东, 戴廷波, 荆奇, 等. 有机无机肥长期配合施用对冬小麦籽粒品质的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(7):1548-1555.
JIANG Dong, DAI Ting-bo, JING Qi, et al. Effects of long-term application of manure and fertilizers on grain quality and yield of winter wheat[J]. *ACTA Ecologica Sinica*, 2004, 24(7):1548-1555.
- [30] 张福珠, 熊先哲, 戴同顺, 等. 应用¹⁵N研究土壤-植物系统中氮素淋失动态[J]. 环境科学, 1984, 5(1):21-24.
ZHANG Fu-zhu, XIONG Xian-zhe, DAI Tong-shun, et al. Study of nitrogen leaching in soil-plant system dynamics by ¹⁵N[J]. *Environmental Science*, 1984, 5(1):21-24.
- [31] 杨学云, 古巧珍, 马路军, 等. 壤土磷素淋移的形态研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(5):90-96.
YANG Xue-yun, GU Qiao-zhen, MA Lu-jun, et al. Forms of phosphorus leaching in loessial soil[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 2005, 42(5):90-96.
- [32] 任丽萍, 宋玉芳, 许华夏, 等. 旱田养分淋溶规律及对地下水影响的研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3):133-136.
REN Li-ping, SONG Yu-fang, XU Hua-xia, et al. Eluviation of nutrients in Glebe-soil and its influence on Groundwater[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(3):133-136.