

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

土壤学报

第五十二卷

第一期

二〇一五年一月

科学出版社



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第52卷 第1期

Vol.52 No.1

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枏生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948 年创刊)

第 52 卷 第 1 期 2015 年 1 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 1 Jan., 2015

编 辑 《土 壤 学 报》编 辑 委 员 会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总 发 行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国 外 发 行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



0 1 >

9 770564 392156

湖区小麦-玉米轮作模式下不同施肥措施调控氮磷养分流失研究^{*}

谭德水¹ 江丽华¹ 谭淑樱² 徐 钰¹ 郑福丽¹ 李国生¹ 刘兆辉^{1†}

(1 山东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部黄淮海平原农业环境重点实验室, 济南 250100)

(2 山东省农业科学院试验基地服务中心, 济南 250100)

摘 要 针对我国南水北调东线过水区南四湖富营养化问题, 利用沿湖流域典型种植模式——小麦-玉米轮作体系, 选择材料易获取的几种施肥措施, 采用田间原位安装淋溶水采集器和地表水径流池收集水样, 室内分析不同处理防控氮磷养分流失的效果。结果表明: 各施肥措施在作物不同茬口均能降低氮磷养分的随水流失, 不同模式防控养分流失效果有差异; 氮径流损失中, 硝态氮占主要比例, 玉米季和小麦季分别为 82.7%~86.4% 和 94.2%~96.5%, 而淋溶途径中硝态氮比例略有下降; 径流为氮损失的主要途径, 玉米茬口氮损失比例占轮作周年的 67.0%~71.4%; 磷径流损失中可溶性磷和颗粒磷比例相当, 而淋溶磷以可溶性磷为主; 淋溶途径损失的磷养分比例稍高, 仍以玉米茬口总磷损失为主, 占 54.4%~63.1%; 防控氮磷流失结合周年作物产量, 玉米上使用减量控释氮肥或优化施肥配合秸秆还田、小麦上优化施肥或使用减量控释氮肥是相对理想的养分运筹搭配模式。

关键词 南四湖区; 小麦玉米轮作; 施肥措施; 氮磷流失; 调控

中图分类号 S512.1; S626 **文献标识码** A

受农业面源污染影响, 我国湖泊富营养化严重^[1]。南四湖是中国南水北调重大工程东线的过水区, 其水质好坏直接关系到南水北调工程的成败^[2]。南四湖属富营养湖类型, 其富营养化主要是氮、磷、悬浮物和其他有机物大量入湖引发的污染。该流域几乎所有区域的氮负荷超标, 40% 以上的区域磷负荷超标严重^[3], 农业生产中化肥不合理投入是造成农田土壤及水污染的主要原因^[4-5]; 农民片面追求经济利益, 氮磷肥施用比重过大以获取较高的产量目标^[6-7], 施入土壤中的肥料氮磷养分通过径流和淋溶途径损失给南四湖水带来了较大的影响。有研究表明: 南四湖流域种植业面源污染中由于降雨或灌溉对小麦-玉米轮作农田产生的地表径流对河流产生的污染贡献率占 50.2%^[8]。但若为减少氮磷流失污染而大量减少化肥投入, 则不能保证作物产量。因此在南四湖流域农区探索防控氮磷流失污染及保证作物产量双重目标的施肥模式

是湖区当前生产上的迫切需求。

目前在南四湖流域污染的研究主要集中在对湖区和几个主要入湖河流水质的监测评价或定性方面^[9-10], 综合考虑轮作作物不同茬口的养分流失特征及轮作作物对相同施肥措施调控的响应研究较少。目前国内外有通过保护性耕作、作物间作模式、土地利用模式、控制灌溉模式、生态拦截草带、沟渠系统等生态技术进行面源氮磷污染防治^[11-12], 就技术而论, 缺乏适合我国国情(人多地少、土地经营分散化等)和特定湖区流域内实用的农民易操作的农业面源污染控制技术。本研究通过设置肥料减量施用、施用控释氮肥及有机物料替代化学养分等不同的施肥措施, 研究作物不同茬口内氮磷养分径流、淋溶损失特征, 探索出适宜的周年防控技术措施, 从而为我国南水北调工程的水源质量提供保障。

^{*}公益性行业(农业)科研专项(201003014, 201203079)、国家自然科学基金项目(31101601)、山东省自主创新专项项目(2012CX90202)、山东省泰山学者“农业面源污染防治”岗位和国家小麦产业技术体系(CARS-03)联合资助

[†] 通讯作者, 刘兆辉, 博士, 研究员, 主要从事新型肥料研制和面源污染防治研究。E-mail: liuzhaohui6666@sina.com

作者简介: 谭德水(1978—), 男, 山东文登人, 博士, 研究方向为植物营养与施肥技术。E-mail: tandeshui@163.com

收稿日期: 2013-11-25; 收到修改稿日期: 2013-12-12

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南四湖位于鲁西南(34°27′~35°20′N,116°34′~117°21′E),大部分位于山东省济宁市微山县境内,既是南水北调输水干线,又是重要的调蓄水库。该地区属暖温带气候,年均气温 13.7℃,常年平均降水量为 550~720 mm,海拔 34~40 m,坡度较缓。流域内入湖河流有 53 条,其中集水面积超过 1 000 km²的河流有 10 条,新薛河是其中之一。该流域以农田生产为

主,耕地面积 187 万 hm²,旱田占 96%,主要种植制度为小麦/玉米和小麦/大豆。本试验点位于南四湖东岸昭阳街道办事处,处于新薛河西(该河水直接流入南四湖)。土壤类型为潮土,0~20 cm 土层有机质含量 15.3 g kg⁻¹,碱解氮 65.3 mg kg⁻¹,速效磷 9.3 mg kg⁻¹,速效钾 140.8mg kg⁻¹,pH 8.3。

1.2 试验设计

试验在 2009 年 6 月—2012 年 6 月期间进行,选择小麦、玉米轮作的典型种植制度,一年两熟。共设置 7 个处理,具体情况见表 1。

表 1 小麦季和玉米季各处理养分投入用量 (kg 667 m ⁻²)									
Table 1 Application rate of nutrient in each experimental treatment during wheat season and maize season									
处理 Treatment	小麦 Wheat				玉米 Maize				施用方法 Application method
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer	
CK	0	0	0	—	0	0	0	—	—
FP	16	11.5	0	—	23	0	0	—	氮肥底追比 1:1; 磷肥底施
PK	0	6	4	—	0	4.4	6.6	—	磷钾肥全部底施
OPT	12	6	4	—	12	4.4	6.6	—	氮肥底追比 1:1; 磷钾肥全部底施
CRF	9.6	6	4	—	9.6	4.4	6.6	—	氮磷钾全部底施
80% OPT + M	9.6	4.8	3.2	鸭粪 76.5	9.6	3.52	5.28	鸭粪 80	氮肥底追比 1:1; 磷钾肥、鸭粪全部底施
OPT + ST	12	6	4	玉米秸秆 500	12	4.4	6.6	小麦秸秆 400	氮肥底追比 1:1; 磷钾肥、秸秆全部底施

试验用氮来源于尿素(含 N≥46%)和树脂包膜控释氮肥(CRF,N≥42%),磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅≥44%),钾肥为氯化钾(K₂O≥60%),干鸭粪含 N 1.76%,P₂O₅ 2.50%,K₂O 1.50%,有机质含量为 16.5%。小麦秸秆含 N 0.34%,P 0.05%,K 1.68%,玉米秸秆含 N 0.95%,P 0.12%,K 2.08%。

供试小麦品种为济麦 22,均于 10 月 4 日播种,采用机械 25 cm 等行距播种,每 667 m²播种量为 12.5 kg;玉米品种为中玉 9 号,于 6 月 12 日播种,方式为点种,等行距播种,行距 60 cm,株距 25 cm。玉米秸秆还田后,小麦底肥为肥料撒施,机械旋耕 2 遍,小麦秸秆粉碎还田覆盖,玉米底肥为开沟均匀施入各种肥料及鸭粪,相应处理氮肥的追施均在小麦的拔节期及玉米大喇叭口期开沟进行。各小区

随机区组排列,每处理重复 3 次,小区面积 45 m²。各处理其他管理措施均等同于大田生产。试验期作物不同生育阶段的平均降水量如下:玉米茬口内总降水 468.1 mm(播种~拔节期 85.3 mm,拔节~喇叭口期 144.4 mm,喇叭口~开花期 67.5 mm,开花~乳熟期 107.2 mm,乳熟~完熟期 63.7 mm),小麦茬口内总降水 178.7 mm(播种~入冬 32.6 mm,入冬~返青期 35.4 mm,返青~拔节期 16.2 mm,拔节~扬花期 35.8 mm,扬花~成熟期 58.7 mm)。

1.3 小区淋溶及径流安装装置

各小区之间及周边垂直地面放置 60 cm 塑料膜填土,同时地表用砖抹上水泥加固隔离(小区之间和小区与周围地块间挖 60 cm 深沟,纵向放置塑料膜,后两边进行培土压实,贴地表放置 15 cm 高度红

砖形成田埂,将留在地表的塑料膜贴砖头一侧,后用水泥将薄膜和砖全部封住,田埂宽 12 cm),可防止互相串水串肥,使 60 cm 深度以上土壤水不会发生侧渗现象。各处理小区淋溶装置如图 1 所示,在不破坏土体垂直结构的前提下原位安装,从淋溶盘一侧进行土壤的剖面挖掘,安置接液瓶、抽液管,侧掏土放置淋溶盘,利用抽气泵抽气产生负压提取淋溶水。各处理小区径流装置如图 2 所示,种植小区

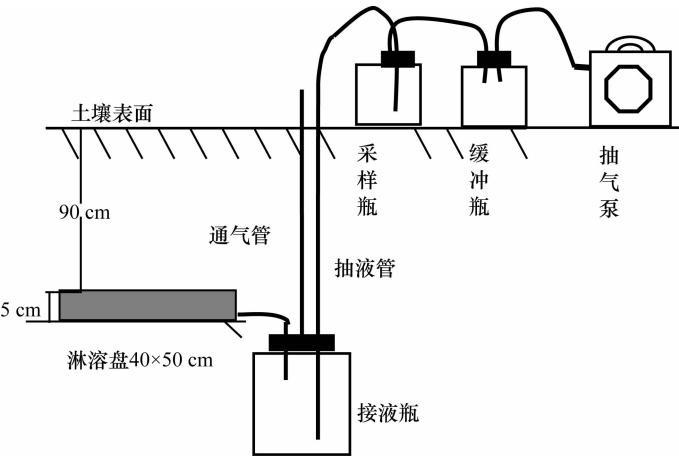


图 1 土壤淋溶水收集装置
Fig. 1 Installation of lysimeter

1.4 样品采集与分析

作物各生育期阶段内降水量通过安装在试验田附近(距离 50 m)的 SDM6A 型雨量器收集观测,玉米生长不同生育时期(拔节期、喇叭口期、开花期、乳熟期和完熟期)和小麦生长不同生育时期(入冬期、返青期、拔节期、扬花期和成熟期)将淋溶水和径流水收集,收集前后将水样混匀,并将淋溶接液瓶中的水和径流池中的水排空。收集到的水样立即放置 0℃ 以下保存或即时测定。

径流水体积采用容积法测定。径流(或淋溶)水中硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)浓度过 0.45 μm 滤膜后用全自动流动分析仪法测定;总磷和可溶性磷(可溶性磷需过 0.45 μm 滤膜)经过硫酸钾消化后再进行分光光度计比色,颗粒态磷等于总磷与可溶性磷之差。

1.5 数据处理

以地表径流(或地下淋溶)途径流失的养分数量等于整个监测周期中(一个完整的作物生长季)各次径流水(或收集到的淋溶水)中养分浓度与收集水体积乘积之和。计算公式如下:
$$P = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$
 式中, P 为氮或磷养分流失量; C_i 为第 i 次径流

不被破坏,均在小区一侧挖掘并构建宽 1 m 深 1 m 的径流池(径流池的位置设在小区坡面低处一侧,基本模拟了当地排水沟在农田的排布),贴小区一侧地面有直径为 5 cm 连接径流池内部的 PVC 管,用于排出小区内地表径流产生的水(各处理小区淋溶水和径流水氮磷受降水带来的影响因小区及淋溶盘面积相同认定等同)。

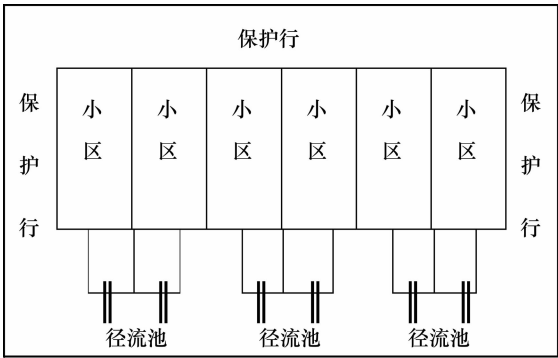


图 2 小区径流水收集装置
Fig. 2 Installation of runoff pooling tank

(或淋溶)水中某种养分的浓度; V_i 为第 i 次径流(或淋溶)水的体积。

利用 DPS 7.05 软件(LSD $p < 0.05$)进行显著性差异分析,用 Excel2007 进行处理及作图。

2 结 果

2.1 不同施肥措施下无机氮养分周年损失特征

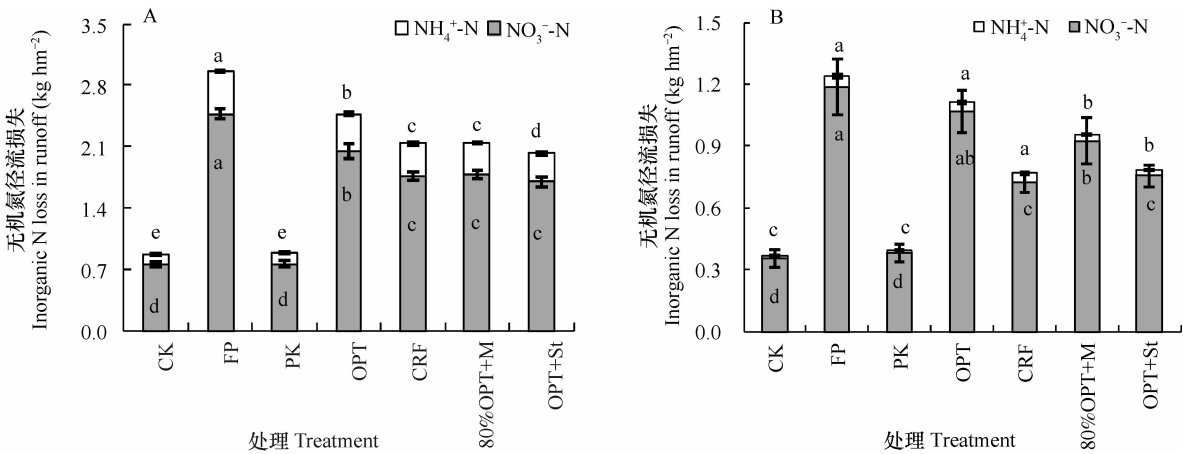
2.1.1 不同施肥措施对无机氮径流损失的影响

玉米季内各处理通过径流途径损失的确态氮量见图 3A。硝态氮与铵态氮径流损失量表现趋势基本一致:FP 处理两种形态氮损失量均表现最高,分别达到 2.464 kg hm^{-2} 和 0.493 kg hm^{-2} ,显著高于其他处理,其次为 OPT 处理,CRF、80% OPT + M 和 OPT + St 处理的氮径流损失量显著低于 FP 和 OPT 处理,在有氮投入处理中,OPT + St 处理的确态氮和铵态氮径流损失较小。玉米季内氮的径流损失中,硝态氮占主要形态(82.7%~86.4%)。

小麦季内通过径流途径损失的无机氮情况见图 3B,硝态氮亦是氮流失的主要形态,在各处理中占无机氮损失总量的 94.2%~96.5%。FP 与 OPT 处理的两种形态氮损失量在各处理中表现较高,其

次为 80% OPT + M 处理,OPT + St 和 CRF 处理硝态氮损失相对较小,与其他有氮投入处理差异达显著

水平。对比图 3 和图 4,同一处理在小麦季内的径流硝态氮和铵态氮数量均低于玉米季。



注:同一类型柱不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,下同 Note: Different lowercase letters in the same type column indicate significant difference at 0.05 level. The same below

图 3 各处理硝铵态氮径流损失量(3 年平均,A,玉米季,B,小麦季)

Fig. 3 NO₃⁻-N and NH₄⁺-N losses via surface runoff in the treatment (3 years average, A, Maize season, B, Wheat season)

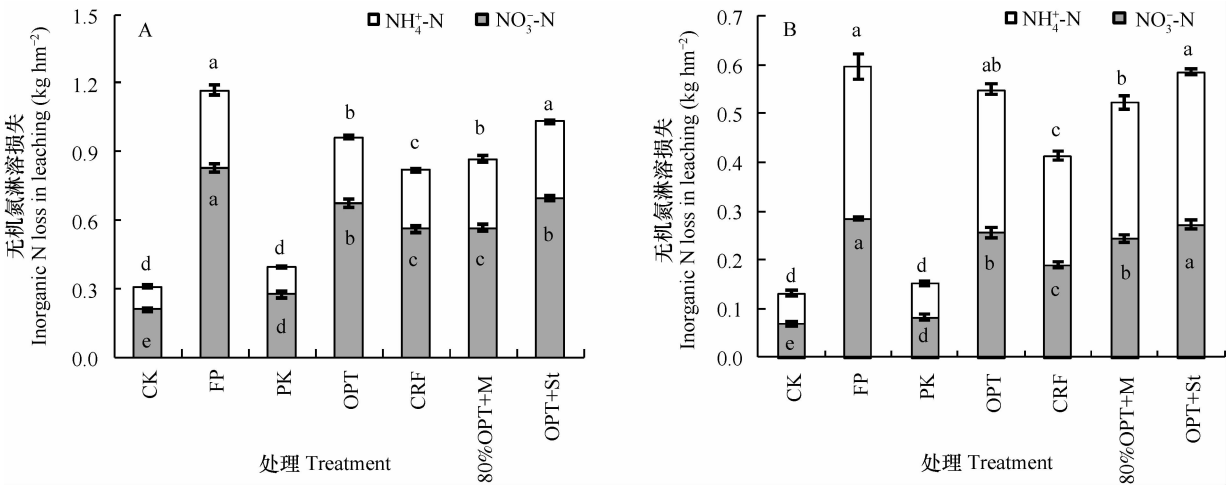


图 4 各处理硝铵态氮淋溶损失量(3 年平均,A,玉米季,B,小麦季)

Fig. 4 NO₃⁻-N and NH₄⁺-N losses via leaching in the treatment (3 years average, A, Maize season, B, Wheat season)

2.1.2 不同施肥措施对无机氮淋溶损失的影响

随水淋溶至到 90 cm 深度土层的硝态氮和铵态氮数量见图 4。

在玉米季,不同施肥措施对无机氮淋溶量的影响显著,FP 处理两种形态氮淋溶量均在各处理中表现最高,总量可达 1.167 kg hm⁻²,其中硝态氮淋溶量显著高于其他处理,CRF 和 80% OPT + M 处理硝铵态氮淋溶量均低于其他有氮投入处理,其中硝态氮淋溶量与另外三个有氮处理(FP、OPT + ST、OPT)差异显著,无氮投入两处理(CK 和 PK)硝、铵态氮淋溶损失量均最低。从玉米季硝铵态氮淋溶

比例看,硝态氮占 65%~70%,是无机氮淋溶损失的主要形态。

在小麦整个生育季,两种形态氮的淋溶损失量相当(各处理硝态氮平均淋溶量占无机氮总淋溶量的 48.7%)。FP 处理的硝铵态氮损失量均表现最高,为 0.597 kg hm⁻²,OPT + St 处理的硝态氮和铵态氮淋溶量仅次于 FP 处理,却显著高于其他处理,CRF 处理的硝、铵态氮淋溶量均显著低于其他四个有氮处理。

综合比较,同一处理在玉米季和小麦季通过淋溶损失的铵态氮数量相当,但损失的硝态氮数量玉

米季内明显高于小麦季。

2.1.3 无机氮随水溶液损失的周年分布特征

通过径流和淋溶途径损失的水溶液无机氮数量在小麦和玉米茬口分布见图 5。在整个轮作周期内,FP 处理无机氮损失数量最高,达 5.96 kg hm^{-2} ,其次为 OPT 处理,而 CRF、80% OPT + M 和 OPT + St 处理的无机氮损失量相当,均低于 FP 和 OPT 处理,

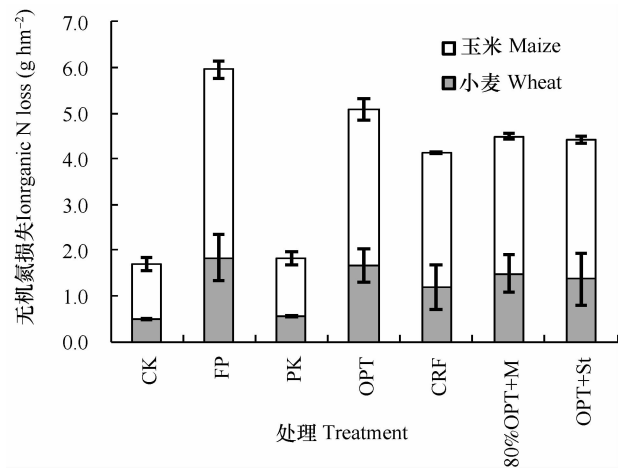


图 5 不同作物茬口无机氮损失情况(3 年平均)
Fig. 5 Inorganic N losses in the maize and wheat seasons (3 years average)

2.2 不同施肥措施下磷养分周年损失特征

2.2.1 不同施肥措施对磷径流损失的影响

玉米季内各施肥处理通过径流途径损失的颗粒态磷和可溶性磷比例基本各半(如图 7A)。PK 处理的可溶性磷径流损失量最高,其次为 80% OPT + M 处理,CK 处理最低,处理间颗粒态磷损失与可溶性磷一致。除

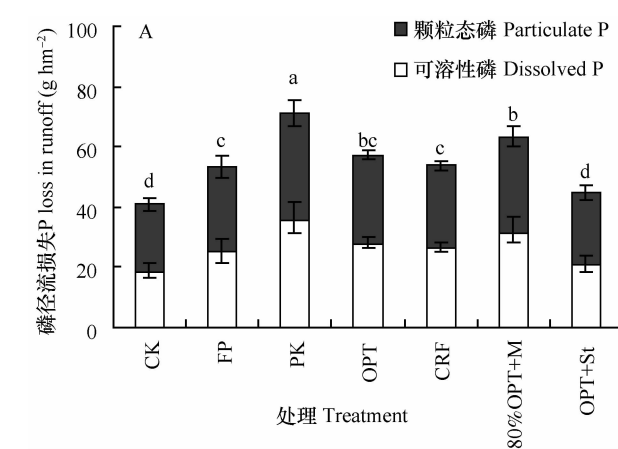


图 7 各处理不同形态磷径流损失量(3 年平均,A,玉米季,B,小麦季)
Fig. 7 Losses of different forms of P via surface runoff in the treatment (3 years average, A, Maize season, B, Wheat season)

CRF 处理在所有有氮投入处理中损失量最低,仅占 FP 处理损失量的 69.4%。玉米季无机氮损失量高于小麦季,玉米季损失占整个轮作周期损失量的 67.0%~71.4%。就损失途径而言,通过径流损失的无机氮数量占 63.4%~73.8%(图 6),OPT + St 处理通过径流途径损失比例最小,CK 处理径流损失所占比例最大。

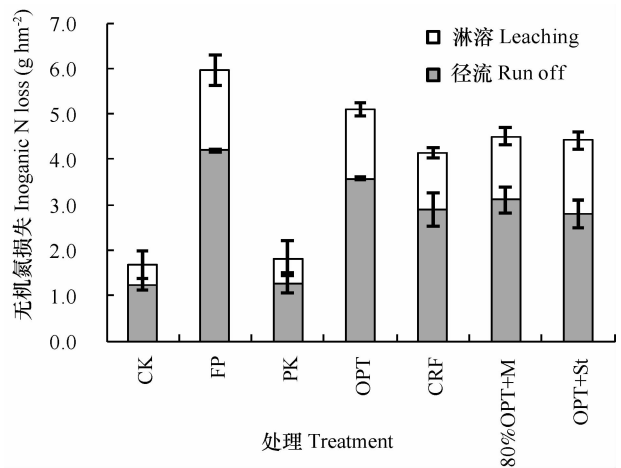
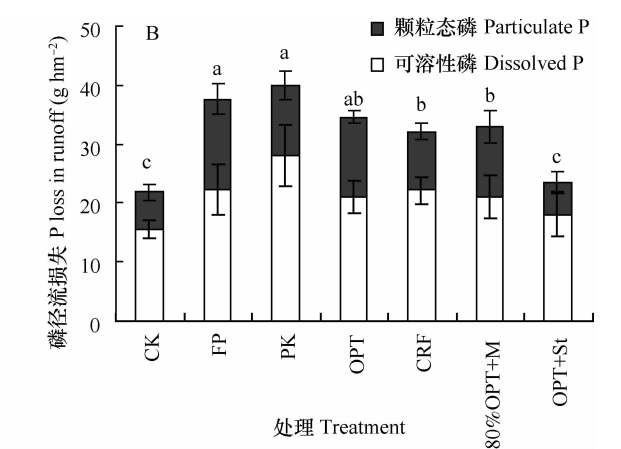
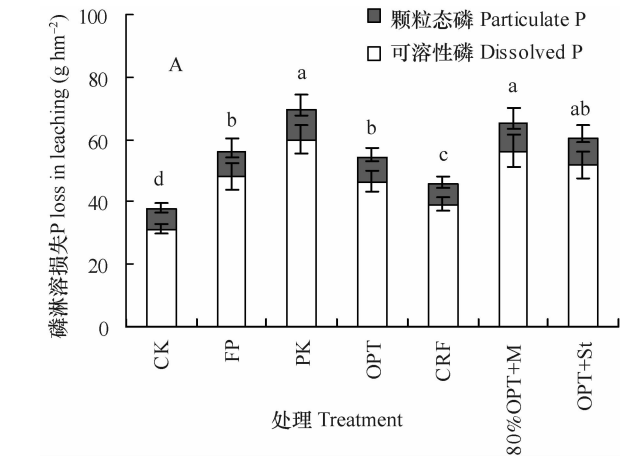


图 6 轮作周年内不同途径无机氮损失情况(3 年平均)
Fig. 6 Inorganic N loss via leaching and runoff in a year (3 years average)

CK 外,OPT + St 处理的可溶性磷和颗粒态磷损失量在所有有氮投入处理中均表现最低。从总磷损失分析,PK 处理总磷损失量最高,可达 71.0 g hm^{-2} ,显著高于其他处理,80% OPT + M 处理损失量次之,OPT、CRF 与 FP 处理的总磷损失量差异不显著,OPT + St 处理总磷损失量显著低于其他处理。



小麦季内各施肥处理通过径流途径损失的不同形态磷比例与玉米季明显不同(图 7B),其中可溶性磷占有较大比例(占总磷径流损失量的 59.2%~76.1%)。PK 处理的可溶性磷损失量最高,其次为是 FP 处理,OPT + St 在所有施肥处理中损失量最低;FP 和 OPT 处理的颗粒态磷径流损失量高于其他处理,OPT + St 处理的颗粒态磷损失最低。小麦季内 PK 和 FP 处理的总磷径流损失量高于其他处理,与 CRF,80% OPT + M 和 OPT + St 处理差异达显著水平。对比茬口间总磷径流损失,玉米季损失量高于小麦季相应施肥处理。



2.2.2 不同施肥措施对磷淋溶损失的影响 从图 8A 可以看出,在玉米季通过淋溶途径损失的可溶性磷占有绝对比例(占 82.8%~86.2%),是玉米季磷素淋溶损失的主要形态。PK 处理的可溶性磷损失量最高,CRF 处理的淋溶损失量较低;各处理颗粒态磷淋溶损失量在 6.4~9.8 g hm⁻²,处理间差异与可溶性磷淋溶特征一致。CRF 处理磷素淋溶总损失量显著低于其他施肥处理,其次为 OPT 处理,而 80% OPT + M 和 OPT + St 处理的总磷淋溶量较高。

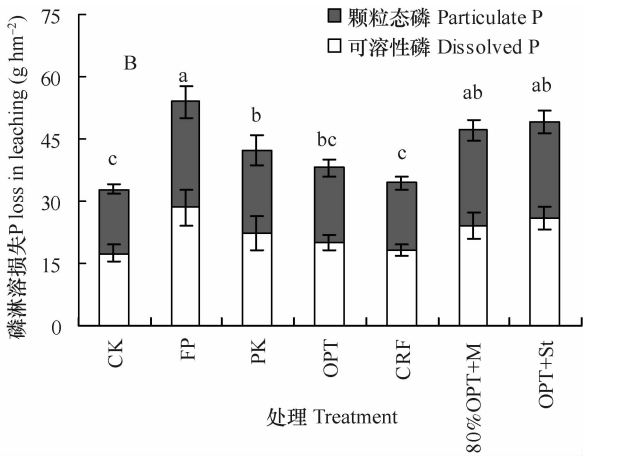


图 8 各处理不同形态磷淋溶损失量(3 年平均,A,玉米季,B,小麦季)
Fig. 8 Losses of different forms of P via leaching in the treatment (3 years average, A, Maize season, B, Wheat season)

小麦季内相应处理总磷淋溶量略低于玉米季(图 8B)。FP 处理总磷损失量在所有处理中表现最高,与 OPT 和 CRF 处理差异达显著水平,80% OPT + M 和 OPT + St 处理也表现较高的总磷损失。两种形态磷损失比例相当,在不同处理中表现基本一致:均为 FP 处理最高,CRF 在所有施肥处理中表现最低。

2.2.3 磷随水溶液损失的周年分布特征 玉米季内通过淋溶和径流损失的总磷量高于小麦季,玉米季总磷损失占全年的 54.4%~63.1%(图 9)。除 PK 外,80% OPT + M 和 FP 处理的总磷损失量在所有施肥处理中表现最高,达 200 g hm⁻² 以上,CRF 处理的总磷损失较低。小麦季各施肥处理磷素损失差异不大,FP 处理总磷损失最高;玉米季则是 80% OPT + M 处理损失最高(PK 除外),CRF 两季损失量均表现最低。

在轮作周年内,通过淋溶途径损失的总磷量略高于径流途径(图 10),淋溶损失总磷比例占 48.3%~61.5%,平均 53.1%。除 CK 外,OPT + St

处理的径流磷损失明显低于其他处理,而 CRF 处理的淋溶磷损失量最低。

2.3 不同施肥措施对小麦玉米周年产量的影响

通过对三个轮作周期的作物产量分析,不同处理玉米和小麦产量有明显差别(表 2)。

小麦作物 FP 处理产量最高,相比 FP 处理,OPT、CRF、80% OPT + M 和 OPT + St 处理分别增产 -5.41%、-10.25%、-12.68% 和 -11.23%,由于小麦季氮磷投入量大量减少,小麦各施肥处理产量较 FP 处理均有不同程度的下降,其中 OPT 处理减产幅度最小,与 FP 差异不显著;玉米作物 OPT + St 处理产量最高,相比 FP 处理,OPT、CRF、80% OPT + M 和 OPT + St 处理分别增产 1.52%、0.33%、-2.71% 和 3.73%,处理间差异不显著。综合三季作物产量,在小麦作物上采用优化施肥或应用减量控释氮肥、在玉米作物上采用优化施肥或配合小麦秸秆还田及施用减量控释氮肥是相对理想的周年养分运筹模式。

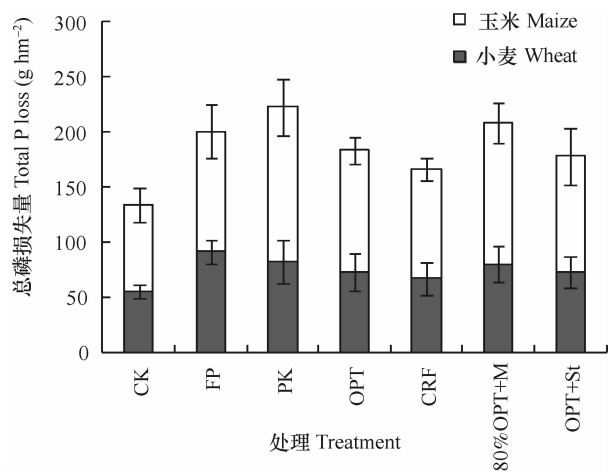


图 9 不同作物茬口总磷损失情况(3 年平均)
Fig. 9 Total P losses in the maize and wheat seasons
(3 years average)

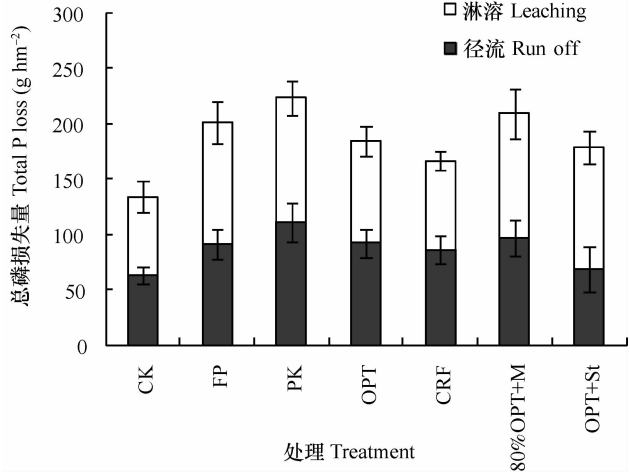


图 10 轮作周年内不同途径总磷损失情况(3 年平均)
Fig. 10 Total P loss via leaching and surface runoff in a full rotation
(3 years average)

表 2 小麦玉米轮作周年不同施肥措施对产量的影响
Table 2 Effect of fertilization pattern on crop production of a full rotation year

处理 Treatment	小麦 Wheat		玉米 Maize	
	产量	较 FP 增产	产量	较 FP 增产
	Yield (kg hm ⁻²)	Yield increase (%)	Yield (kg hm ⁻²)	Yield increase (%)
CK	1 455c	—	5 286b	—
FP	6 902a	—	9 688a	—
PK	1 327c	—	5 490b	—
OPT	6 529ab	-5.41	9 835a	1.52
CRF	6 195b	-10.25	9 720a	0.33
80% OPT + M	6 027b	-12.68	9 426a	-2.71
OPT + St	6 127b	-11.23	10 050a	3.73

3 讨 论

南四湖地区处于一个特殊的地理位置,在南四湖流域粮食产量是农民生产目标首选,生产上习惯大量投入氮磷肥以保证产量,这种方式大大增加氮磷在土体中的积累,随降雨和灌溉产生径流和淋溶损失^[13],从而对地表水和地下水造成污染,流入南四湖使之富营养化。研究该流域农田氮磷地表径流和地下淋溶损失特征对选择合理的施肥模式、减轻农业面源污染、提高水源质量具有重要意义^[14]。针对该流域气候及农业生产特点(该流域夏季降雨强度大、频率高,春季相对少雨^[15],农田土壤表层砂粒多,下层黏粒含量高。),本研究通过运用不同的施肥措施(鸭粪、秸秆等物料容易获取)探明其在氮磷流失方面的防控作用。

在相同气候条件和土壤类型下,对地表是否耕作、有无覆盖物、植被生物量多少是影响水流失量的主要原因^[16],而养分投入量、养分投入方式及养分源类型则是影响水溶液氮磷养分浓度高低的主要原因^[17-18]。本研究发现:由于秸秆还田、施用有机物料与土壤混合后有较大孔隙,表层土壤质地疏松,一定程度上阻止降水在地表横向流动,增加水向下的淋溶效果,这与前人观点基本一致^[19-20],有秸秆还田的 OPT + St 处理径流养分量较低,而淋溶养分量却高,特别是氮养分上表现尤其明显;而后期的农事操作(个别施肥处理需开沟追肥等)产生粗糙的土壤表面,增加了土壤孔隙度,使土壤水流沿土壤孔隙下渗^[21],因此径流和淋溶水量产生了差异,这也是 CRF 处理(后期不进行追肥)减氮却没有显著降低氮径流数量的原因。研究发现,由于径流过程发生在土壤表面,受硝化作用及铵固定作用

影响^[22],使通过径流途径损失的氮主要是硝态氮形态,而淋溶途径的铵态氮形态比例略有上升。磷养分流失表现与氮不一致的特点,由于添加了有机物料(鸭粪),受物料分解过程中产生的有机酸影响,减少了磷素在土壤中的固定^[23],因此 80% OPT + M 处理依然在磷的径流损失和淋溶损失上高于 OPT 等处理。可见,根据湖区降水特点,应有选择的采用不同耕作措施,调节径流量,以减少地表径流养分量。

从茬口养分流失分布及损失途径分析,由于季节降雨特点^[15]决定了玉米季养分流失占有较大比例,同时也决定了径流途径是该试验条件下养分随水溶液流失的主要途径。磷养分的径流损失和淋溶损失相当,这是由于磷素移动性差容易被土壤黏粒固定的特点决定的^[24],这也解释了径流损失中可溶性磷和颗粒磷比例相当而淋溶损失中主要以可溶性磷形态为主的原因。小麦季内降雨特点决定了该茬口内磷素损失以可溶性磷为主。

目前我国农业生产条件下不能以牺牲产量及经济效益为代价而进行安全生态的养分运筹,如何根据作物茬口及氮磷损失途径统筹兼顾作物产量与降低养分损失是本研究的关键^[25]。本研究提供的 4 种施肥措施在小麦和玉米上表现较大的产量差异,在小麦季运用平衡施肥技术(OPT)与较高氮磷投入的习惯施肥处理(FP)相比无显著减产,而另外 3 个处理没有表现产量优势;在玉米季除 80% OPT + St 处理外,均表现不同幅度的增产趋势,其中 OPT + St 和 OPT 处理增产幅度较大,可见作物类型及生育期长短对同一施肥措施的反应有较大差异。结合氮磷养分流失特征,在玉米季施用控释氮肥或优化施肥配合秸秆还田、在小麦季进行优化施肥或施用控释氮肥是该流域种植制度下相对理想的养分运筹模式,而根据习惯施肥氮磷流失特征(磷流失绝对量较少)及减排效果(相比 FP 处理,养分运筹搭配模式对氮流失平均降低 25.8%,对磷流失平均降低 14.4%),这种养分运筹模式对氮流失防控效果较好。

但有机肥替代及两季作物秸秆还田措施还需更长的时间才能发挥其培肥地力稳产增产的作用,其效果还有待于验证^[26],另外为最大程度减少氮磷流失,上述几种措施配合合理的耕作制度也是下一步继续研究的方面。

4 结 论

南四湖流域小麦玉米轮作制度下,周年内氮养分流失远高于磷流失,氮养分随水溶液流失以径流途径为主,其中玉米季氮损失在轮作周年内占较大比例(67.0%~71.4%),磷养分随水流失中径流和淋溶比例相当,仍以玉米季损失为主(占 54.4%~63.1%);相比农民习惯施肥,各施肥模式在不同茬口均能降低氮磷养分流失,结合周年产量结果,在玉米季减量施用控释氮肥或优化施肥配合秸秆还田、小麦季进行优化施肥或减量施用控释氮肥是相对理想的养分运筹模式;针对湖区气候特点及养分流失特征,玉米季茬口及径流途径是防控氮磷养分流失的关键,配套的耕作措施是下一步的研究方面。

参 考 文 献

- [1] 黄代中,万群,李利强,等. 洞庭湖近 20 年水质与富营养化状态变化. 环境科学研究,2013,26(1):27—33. Huang D Z, Wan Q, Li L Q, et al. Changes of water quality and eutrophic state in recent 20 years of Dongting Lake (In Chinese). Research of Environmental Sciences, 2013, 26(1): 27—33
- [2] 武周虎,杨连宽,金玲仁,等. 南四湖水体富营养化时空比较分析与评价. 青岛理工大学学报,2012,33(3):1—7. Wu Z H, Yang L K, Jin L R, et al. Spatial-time comparative analysis and evaluation of eutrophication level of Nansi Lake (In Chinese). Journal of Qingdao Technological University, 2012, 33(3): 1—7
- [3] 李爽,张祖陆,孙媛媛. 基于 SWAT 模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟. 湖泊科学,2013,25(2):236—242. Li S, Zhang Z L, Sun Y Y. Simulation of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus in Lake Nansi watershed using SWAT model (In Chinese). Journal of Lake Science, 2013, 25(2): 236—242
- [4] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1996, 59(3): 223—231
- [5] Liu G Z, Wu W L, Zhang J. Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture-derived nitrate nitrogen in groundwater in northern China. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 107(2/3): 211—220
- [6] Guo H Y, Wang X R, Zhu J G. Quantification and index of non-point source pollution in Taihu Lake region with GIS. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26(2): 147—156
- [7] 胡斌,和树庄,陈春瑜,等. 滇池流域土壤氮磷分布特征及关键影响因素研究. 土壤学报,2012,49(6):1178—1184. Hu B, He S Z, Chen C Y, et al. Distributions of soil nitrogen and phosphorus in Dianchi watershed and their key influencing factors (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6):

- 1178—1184
- [8] 刘静,路凤,杨延钊,等. 南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究. 环境科学,2012,33(9):3070—3075. Liu J, Lu F, Yang Y Z, et al. Source apportionment of nitrogen and phosphorus from cropping non-point source pollution in Nansi Lake basin (In Chinese). Environmental Science, 2012, 33(9): 3070—3075
- [9] 辛颖,武周虎,慕金波,等. 南四湖入湖、入干线河流与输水干线的水质动态分析. 安全与环境工程,2013,20(3):36—41. Xin Y, Wu Z H, Mu J B, et al. Dynamic analysis of the water quality of the rivers around Nansi Lake (In Chinese). Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(3): 36—41.
- [10] 张伟,杨丽原. 南四湖主要入湖河流水质评价. 海洋湖沼通报,2011(1):141—146. Zhang W, Yang L Y. Water quality evaluation for the main inflow rivers of Nansihu Lake (In Chinese). Transactions of Oceanology and Limnology, 2011(1): 141—146
- [11] Gimay G, Singh B R, Nyssen J, et al. Runoff and sediment associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. Journal of Hydrology, 2009, 376(1/2): 70—80
- [12] 黄东风,李卫华,王利民,等. 水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响. 水土保持学报,2013,27(2):62—66. Huang D F, Li W H, Wang L M, et al. Effects of water and fertilizer managements on yield, nutrition uptake of rice and losses of nitrogen and phosphorus by runoff from paddy field (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 62—66
- [13] Han J G, Lee Y K, Kim T H, et al. Analysis of seasonal water pollution based on rainfall feature at Anyang River basin in Korea. Environmental Geology, 2005, 48(4/5): 599—608
- [14] 焦平金,许迪,王少丽. 汛期不同作物种植模式下地表径流氮磷流失研究. 水土保持学报,2009,23(2):15—20. Jiao P J, Xu D, Wang S L. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland as affected by cropping pattern during flood season (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 15—20
- [15] 刘友春,孟昭强,李飞. 南四湖流域降水时空特征分析. 海洋湖沼通报,2013(2):31—36. Liu Y C, Meng Z Q, Li F. Analysis of temporal and spatial characteristics of Nansi Lake precipitation (In Chinese). Transactions of Oceanology and Limnology, 2013(2): 31—36
- [16] Ludwig J A, Wilcox B P, Breshears D D, et al. Vegetation patches and runoff-erosion as interesting ecohydrological processes in semiarid landscapes. Ecology, 2005, 86(2): 288—297
- [17] Park J H, Matzner E. Detrital control on the release of dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved inorganic nitrogen (DIN) from the forest floor under chronic N deposition. Environmental Pollution, 2006, 143(1): 178—185
- [18] 俞映琼,薛利红,杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响. 土壤学报,2011,48(5):988—995. Yu Y L, Xue L H, Yang L Z. Effects of nitrogen management on nitrogen leaching of paddy soil in Taihu Lake region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5): 988—995
- [19] 李宗新,董树亭,王空军,等. 不同肥料运筹对夏玉米田间土壤氮素淋溶与挥发影响的原位研究. 植物营养与肥料学报,2007,13(6):998—1005. Li Z X, Dong S T, Wang K J, et al. In situ study on influence of different fertilization for summer maize on soil nitrogen leaching and volatilization (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 998—1005
- [20] 吕美蓉,李增嘉,张涛,等. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响. 农业工程学报,2010,26(1):41—46. Lü M R, Li Z J, Zhang T, et al. Effects of minimum or no-tillage and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 41—46
- [21] 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. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 111(1/4): 292—310
- [22] Drury C F, Beauchamp E G, Evans L J. Fixation and immobilization of recently applied $^{15}\text{NH}_4^+$ in selected Ontario and Quebec soils. Canadian Journal of Soil Science, 1989, 69(2): 391—400
- [23] Johnson S E, Loeppert R H. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(1):222—234
- [24] 安迪,杨令,王冠达,等. 磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用. 化工进展,2013,32(8):1967—1973. An D, Yang L, Wang G D, et al. Mechanisms of phosphorus fixation in soils and efficient utilization of phosphate fertilizer (In Chinese). Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(8): 1967—1973
- [25] 郭智,周炜,陈留根,等. 稻麦两熟农田茬口衔接期养分径流流失特征. 水土保持学报,2012,26(4):86—89. Guo Z, Zhou W, Chen L G, et al. Characteristics of surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during the rice-wheat-rice connection periods in intensive rice-wheat rotation field (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 86—89
- [26] 李玲玲,李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展. 植物营养与肥料学报,2012,18(3):749—757. Li L L, Li S T. A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 749—757

EFFECTS OF FERTILIZATION CONTROLLING NITROGEN
AND PHOSPHORUS LOSS FROM FARMLAND
UNDER WHEAT-MAIZE ROTATION IN NANSI LAKE REGION

Tan Deshui¹ Jiang Lihua¹ Tan Shuying² Xu Yu¹ Zheng Fuli¹ Li Guosheng¹ Liu Zhaohui^{1†}

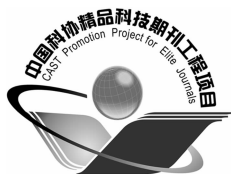
(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agricultural Environment
of Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture, Jinan 250100, China)

(2 Service Center of Test Base, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract To tackle the problem of water eutrophication of the Nansi Lake along the eastern line of the South-North Water Diversion Project in China, field experiments were carried out on fertilization in farmland under wheat-maize rotation, typical of the region, to explore its effect of controlling S and P loss. In the experiments, market-available fertilizers were used and in-situ lysimeters and surface runoff pools were set up to collect leachate and runoff for lab analysis. Results show that fertilization, regardless of its method, reduced nitrogen and phosphorus loss with water in both crop seasons. The effect varied with fertilization method. NO_3^- -N was the main form of nitrogen lost with runoff water, accounting for 82.7%~86.4% in the maize season and for 94.2%~96.5% in the wheat season, however, it declined slightly in leachate, which suggests that surface runoff is the main route of nitrogen loss. Nitrogen loss during the maize season amounted to 67.0%~71.4% of the total of a year. P loss via surface runoff consisted almost equally of dissolved phosphorus and particulate phosphorus, while P loss via leaching was dominated with dissolved phosphorus, and accounted for a larger proportion of the total. A greater proportion, 54.4%~63.1% of the P loss of a year occurred during the maize growing season. Taking into account both control of N and P loss and crop production of a year, it is advisable to apply decrement controlled-release nitrogen fertilizer or optimize fertilization coupled with straw incorporation for maize season, and optimize fertilization or apply decrement controlled-release nitrogen fertilizer for wheat.

Key words Nansi Lake region; Wheat-maize rotation system; Fertilization pattern; Nitrogen and phosphorus loss; Regulation

(责任编辑:卢 萍)



综述与评论

农业土壤学研究:侯光炯学术思想形成之考察——纪念侯光炯先生诞辰 110 周年..... 申丽娟 丁恩俊 陈绍兰等(1)

土壤多样性研究趋势与未来挑战 任圆圆 张学雷(9)

土壤磷酸盐氧同位素分析方法和应用研究进展 张 晗 王佳妮 郭庆军等(19)

研究论文

土壤制图多等级代表性采样与分层随机采样的对比研究 杨 琳 朱阿兴 张淑杰等(28)

河南省典型淋溶土土系划分研究 鞠 兵 吴克宁 李 玲等(38)

黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟 吴淑芳 刘政鸿 霍云云等(48)

黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征 高晓东 吴普特 张宝庆等(57)

科尔沁沙丘-草甸相间地区表土饱和和导水率的土壤传递函数研究 孙 丽 刘廷玺 段利民等(68)

砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响 张 磊 齐瑞鹏 张应龙等(77)

稳定同位素²⁰²Hg 稀释技术测定土壤汞有效性——与化学提取方法比较 郑顺安 徐志宇 王 飞等(87)

土壤提取液中酰基高丝氨酸内酯的气相色谱-质谱检测方法优化 生弘杰 宋 洋 卞永荣等(95)

复合污染土壤中土霉素的吸附行为及其对土壤重金属解吸影响的研究 陈励科 马婷婷 潘 霞等(104)

污染区千金子和酢浆草根际土壤中 PAHs 结合态残留的梯度分布 王意泽 高彦征 彭安萍等(112)

土壤磷解吸特性对菜稻轮作田间渗漏水总磷浓度的影响 章明清 李 娟 孔庆波(120)

湖区小麦-玉米轮作模式下不同施肥措施调控氮磷养分流失研究 谭德水 江丽华 谭淑樱等(128)

鄱阳湖洲滩湿地土壤-水-植物系统中磷的静态迁移研究 徐 进 徐力刚 丁克强等(138)

菇菜套作对土壤微生物群落的影响 陈 敏 王军涛 冯有智等(145)

黄土高原油松根际土壤酶活性及真菌群落多样性研究——以黄龙山林场为例 褚洪龙 李 莎 唐 明(154)

硅介导番茄青枯病抗性的土壤定量蛋白质组学研究 陈玉婷 林威鹏 范雪滢等(162)

有机无机肥配施对红壤旱地花生生理特性、产量及品质的影响 许小伟 樊剑波 陈 晏等(174)

氮素富集对青藏高原高寒草甸土壤有机碳迁移和累积过程的影响 李林森 程淑兰 方华军等(183)

长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究 何翠翠 王立刚 王迎春等(194)

火烧和保留采伐剩余物对土壤有机碳矿化的影响 吴君君 杨智杰 刘小飞等(203)

研究简报

碳氮稳定同位素检测能力的验证——2013 年实验室间比对分析结果的汇总 曹亚澄 韩 勇 唐昊冶等(212)

土壤厚度的划分标准与案例研究 易 晨 李德成 张甘霖等(220)

积盐条件下土壤酸化过程的特异性研究 王媛华 段增强 赵 宇等(228)

四川省不同区域水稻氮肥施用效果研究 张 智 王伟妮 李 昆等(234)

小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响 李宗超 胡 霞(242)

信息

《土壤学报》2013 年度优秀论文评选揭晓 (241)

封面图片:黄土坡面细沟形态发育过程(由吴淑芳提供)

CONTENTS

Reviews and Comments

Agricultural soil science research: Formation of Hou Kuangchun's academic thought—Celebrate 110th anniversary of Mr Hou Kuangchun's birth	Shen Lijuan, Ding Enjun, Chen Shaolan, et al. (8)
Study on pedodiversity: Status quo and future challenges	Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei(17)
Advance in study on method for oxygen isotopic analysis of phosphate in soil and its application	Zhang Han, Wang Jiani, Guo Qingjun, et al. (26)

Research Articles

A comparative study of multi-grade representative sampling and stratified random sampling for soil mapping	Yang Lin, Zhu A-xing, Zhang Shujie, et al. (37)
Classification of Typical Argosols of Henan Province at soil series level of Chinese Soil Taxonomy	Ju Bing, Wu Kening, Li Ling, et al. (47)
Development of rill erosion on loess slope and its simulation	Wu Shufang, Liu Zhenghong, Huo Yunyun, et al. (55)
Spatial variability of available soil moisture and its seasonality in a small watershed in the hilly region of the Loess Plateau	Gao Xiaodong, Wu Pute, Zhang Baoqing, et al. (66)
Prediction of saturated hydraulic conductivity of surface soil in sand-dune-and-meadow interlaced region of Horqin with pedo-transfer functions method	Sun Li, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. (75)
Effects of amendment of aeolian sandy soil and loess with soft sandstone on soil water retention curve and evaporation	Zhang Lei, Qi Ruipeng, Zhang Yinglong, et al. (85)
Comparison between stale isotope ²⁰² Hg dilution technique and chemical extraction in determining Hg availability in two typical soils of China	Zheng Shunan, Xu Zhiyu, Wang Fei, et al. (94)
Optimization of determination of N-acyl-homoserine lactones in soil solution with Gas-Chromatography-Mass Spectrometry	Sheng Hongjie, Song Yang, Bian Yongrong, et al. (102)
Sorption behavior of oxytetracycline in complex contaminated soil and its effects on desorption of heavy metals in the soil	Chen Like, Ma Tingting, Pan Xia, et al. (111)
Gradient distribution of bound-PAH residues in different layers of rhizosphere soils of moleplant and wood sorrel growing in polluted regions	Wang Yize, Gao Yanzheng, Peng Anping, et al. (118)
Soil P desorption characteristics and their effects on total P concentration in percolating water in fields under vegetable-rice rotation system	Zhang Mingqing, Li Juan, Kong Qingbo(127)
Effects of fertilization controlling nitrogen and phosphorus loss from farmland under wheat-maize rotation in Nansi Lake region	Tan Deshui, Jiang Lihua, Tan Shuying, et al. (137)
Static transfer of phosphorus in the soil-water-plant system of beach wetlands in Poyang Lake	Xu Jin, Xu Ligang, Ding Keqiang, et al. (144)
Changes in soil microbial community in response to tomato- <i>Agaricus bisporus</i> interplanting	Chen Min, Wang Juntao, Feng Youzhi, et al. (152)
Soil enzyme activity and fungal community diversity in rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr. growing on Loess Plateau— A case study of Huanglongshan forest farm	Chu Honglong, Li Sha, Tang Ming(161)
Soil quantitative proteomic analysis of silicon-mediated resistance of tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>) to <i>Ralstonia solanacearum</i>	Chen Yuting, Lin Weipeng, Fan Xueying, et al. (172)
Effect of manure combined with chemical fertilizer application on yield, kernel quality and physiological characteristics of peanut to red soil in subtropical China	Xu Xiaowei, Fan Jianbo, Chen Yan, et al. (181)
Effects of nitrogen enrichment on transfer and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau	Li Linsen, Cheng Shulan, Fang Huajun, et al. (192)
Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil	He Cuicui, Wang Ligang, Wang Yingchun, et al. (202)
Effect of prescribed burning and reservation of logging residues on soil organic carbon mineralization	Wu Junjun, Yang Zhijie, Liu Xiaofei, et al. (210)

Research Notes

Testing of proficiency for measurement of carbon and nitrogen stable isotopes ...	Cao Yacheng, Han Yong, Tang Haoye, et al. (218)
Criteria for partition of soil thickness and case studies	Yi Chen, Li Decheng, Zhang Ganlin, et al. (227)
Specificity of soil acidification affected by salt accumulation	Wang Aihua, Duan Zengqiang, Zhao Yu, et al. (233)
Effects of nitrogen fertilization on rice in different regions of Sichuan Province	Zhang Zhi, Wang Weini, Li Kun, et al. (240)
Effects of shrub (<i>Caragana microphylla</i> Lam) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland	Li Zongchao, Hu Xia(248)

Cover Picture: Rill morphological development process on loess slope (by Wu Shufang)