

不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响

潘复燕^{1,3}, 薛利红^{2*}, 卢萍¹, 董元华^{1*}, 马资厚⁴, 杨林章²

(1.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2.江苏省农业科学院, 南京 210014; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.南京农业大学, 南京 210095)

摘要:为探讨土壤添加剂对太湖流域面源污染控制的效果,采用盆栽试验,选用树脂、生物炭和硝化抑制剂作为供试材料,研究其单独施用、两两配施以及三者同时施用对冬小麦产量、氮磷养分吸收、氮磷径流渗漏损失和土壤养分的影响。研究表明:各添加剂处理均促进了小麦的地上部生物量,除单施树脂处理外,其他添加剂处理的产量都比施肥对照有所增加,增加幅度为13%~133%,以添加剂的两两配施效果较佳;各添加剂处理均促进了小麦对氮素的吸收,除单施树脂处理外,其余处理均提高了氮肥利用效率,以两两配施效果最为显著,显著高于施肥处理;与施肥对照相比,生物炭和硝化抑制剂的单施及配施均降低了径流和渗漏液中TN和TP浓度,减少麦季氮流失57%~71%、磷流失26%~46%,而有树脂施入的处理其氮磷损失量有所提高。综合比较得出,施化肥的同时配施生物炭和硝化抑制剂,可显著增加小麦产量(增产103%),氮肥农学效率和生理效率显著提高,整个麦季通过径流和渗漏损失的氮磷分别减少了68.8%和26.1%,值得在太湖流域麦田的面源污染控制上进一步应用。

关键词:小麦;土壤添加剂;产量;氮肥利用率;径流;渗漏;氮磷损失

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0928-09 doi:10.11654/jaes.2015.05.016

Effects of Different Soil Additives on Wheat Yield and Nitrogen and Phosphorus Loss in Tai Lake Region

PAN Fu-yan^{1,3}, XUE Li-hong^{2*}, LU Ping¹, DONG Yuan-hua^{1*}, MA Zi-hou⁴, YANG Lin-zhang²

(1.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Nutrients in leaching and in surface runoffs from farmland are the major causes of eutrophication in the aquatic ecosystems in the Tai Lake region. Applying soil additives may minimize nutrient losses from farmland during wheat cropping season in winter. A pot experiment was conducted to study the effects of resin, biochar and nitrification inhibitor alone and in combination on wheat yield and nitrogen and phosphorus losses in the Tai Lake region. Nine treatments with three replicates were designed, including no nitrogen fertilizer (NF), traditional fertilizer (SF), fertilizer+biochar (FT), fertilizer+resin (FZ), fertilizer+nitrification inhibitor (FX), fertilizer+nitrification inhibitor+biochar (FTX), fertilizer + nitrification inhibitor+resin (FZX), fertilizer+resin+biochar (FZT), fertilizer+nitrification inhibitor+biochar+resin (FZXT). Grain yield of and nitrogen (N) and phosphorus (P) assimilated by wheat, N and P losses through runoff and leaching, and soil nutrient status were measured. Results showed that all treatments with soil additives promoted wheat aboveground biomass, and increased grain yield by 13%~133%, compared with the SF treatment except the FZ treatment. Wheat-assimilated N was also enhanced in all the treatments with soil additives, thus improving fertilizer N use efficiency, except the FZ treatment. However, wheat-assimilated P was inhibited by soil additives; and fertilizer P use efficiency was thus decreased in all the treatments with soil additives. Applications of biochar and nitrification inhibitor alone or both can decrease the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations in runoff and leaching water, thus reducing the

收稿日期:2014-12-29

基金项目:国家水专项(2012ZX07101-004);国家环保部行业项目(201309035-7);江苏省自主创新项目[cx(13)3039];太湖水污染治理招投标课题(JSZC-G2013-187)

作者简介:潘复燕(1988—),女,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事农业面源污染方面的研究。E-mail:pfy524488815@163.com

*通信作者:薛利红 E-mail:njxuelihong@gmail.com;董元华 E-mail:yhdong@issas.ac.cn

N loss by 57%~71% and the P loss by 26%~46% in comparison with the control(SF). However, increased N and P losses were observed in the treatments with resin applied. After harvest, soil TN content was significantly increased by the applications of all additives except the FX, but soil TP didn't significantly change in all treatments. We conclude that applying biochar and nitrification inhibitor along with fertilizer can significantly improve wheat yield and N use efficiency while reducing 68.8% of N loss and 26.1% of P loss during the whole wheat growth period. Therefore, it is promising to apply soil amendments to control the non-point source pollution during wheat growing season in the Tai Lake region.

Keywords: wheat; soil additive; yield; nitrogen use efficiency; runoff; leaching; nitrogen and phosphorus loss

农业面源污染是太湖流域水体环境恶化的主要原因之一,总氮的贡献在 34%~52%,总磷的贡献在 17%~54%^[1]。为减少农业面源污染,杨林章等^[2]提出了“源头减量-过程阻断-养分再利用-生态修复”的 4R 理论和技术体系,其中源头控制是防治农业面源污染的最佳对策和根本。目前,农业面源污染的源头控制技术主要集中在水肥的优化管理方面,通过减少肥料的用量以及减少排水量来达到减少面源污染的目的^[3]。其中肥料减量施用^[4]、有机无机肥配施^[5]以及缓控释肥的施用^[6]均可有效地降低农田氮素损失,达到保护环境的目的。我国人多地少,为了保障粮食安全,必须要保证作物高产,因此肥料的减量必须是适当的。如何在减少肥料用量的基础上,保障作物高产并最大化减少养分的流失,实现农田的可持续生产,是当前研究的热点。

太湖流域稻田密布,主要采用稻麦轮作方式。郭智等对稻麦轮作氮素养分径流损失的研究表明,在稻季施氮量为 300 kg N·hm⁻² 时,TN 损失率为 3.8%^[7],麦季施氮量为 225 kg N·hm⁻² 时,TN 损失率达到 13.7%^[8]。赵旭等^[9]连续 3 年监测了太湖流域传统稻麦轮作下的径流渗漏损失量,发现每年径流渗漏损失总量为 55.3~93.1 kg N·hm⁻²,其中麦季损失占 57%~85%;径流损失占主导地位,占总损失的 82%~93%。稻季由于有田埂的存在,使得径流控制相对比较容易,可以通过增加田埂高度或者降低田面水高度(节水灌溉)等来有效减少径流损失。麦季要保证小麦正常生长,必须要开沟排渍,但这些田内开放的排水沟不仅造成降雨发生时大量养分随径流流失到田外,也破坏了稻季形成的犁底层结构,使养分很容易随渗漏流失到地下水中。因此,要有效减少太湖流域稻麦轮

作农田面源污染,必须有效控制麦季养分的径流和渗漏损失。目前已有研究报道表明,生物炭的施用可增加作物产量^[10],减少氮素损失^[11];硝化抑制剂可通过抑制氮素的硝化减少氮素的淋溶损失^[12]。但两者混合施用是否效果更佳,是否能在提高产量的同时减少氮素损失,还未有相关报道。树脂,又称保水剂,在干旱地区得到了广泛的应用,有保水保肥的功效,可提高氮肥利用率和作物产量^[13],但其能否应用于太湖流域麦田的面源污染控制,还有待于进一步研究证实。为此,本试验选择生物炭、硝化抑制剂和树脂这三种添加剂,研究其单独施用以及配合施用对小麦生长、产量、养分吸收利用与损失及土壤肥力等的影响,以期寻找集产量增加和减少氮磷损失于一身的最佳添加剂配施方案,为太湖流域稻田麦季的面源污染控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

采用盆栽试验,于 2013 年 11 月 27 日至 2014 年 5 月 23 日在中国科学院南京土壤研究所敞篷温室进行。供试土壤为水稻土,取自太湖流域苏州望亭镇,基本理化性质见表 1。供试小麦品种为绵阳 31 号。试验共设 9 个处理:不施肥(NF)、施肥对照(SF)、施肥+树脂(FZ)、施肥+生物炭(FT)、施肥+硝化抑制剂(FX)、施肥+树脂+生物炭(FZT)、施肥+树脂+硝化抑制剂(FZX)、施肥+生物炭+硝化抑制剂(FTX)、施肥+树脂+硝化抑制剂+生物炭(FZXT),每个处理 3 个重复,共 27 盆。氮肥采用减量施肥,用量为 180 kg N·hm⁻²,分 3 次施用,基肥、分蘖肥和穗肥的比例为 4:3:3。磷肥 80 kg·hm⁻²,钾肥 210 kg·hm⁻²,基施。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Basic physic-chemical properties of experimental soil

土壤 Soil	pH(1:2.5)	总氮 Total N/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Alkali- hydrolyzable N/mg·kg ⁻¹	总磷 Total P/ g·kg ⁻¹	有效磷 Olsen-P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Avail K/ mg·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹
水稻土 Paddy soil	5.11	2.22	177.1	0.63	35.4	174.0	26.2

试验用树脂为聚丙烯酰胺型保水剂(购买于任丘市华北化工有限公司),白色颗粒状,直径约0.84 mm,蒸馏水中吸水倍率为 $130\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,含氮量14.6%,含磷量0.3%,pH为中性,试验用量为0.2%(w/w)。生物炭为小麦秸秆炭,450℃煅烧,比表面积为 $7.37\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,孔容 $0.01\text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 、孔径6.25 nm,总氮含量为1.3%,pH为8.9,试验用量为1%(w/w)。硝化抑制剂采用双氰胺($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$)药品(分析纯),含氮量33.3%,试验用量为施氮量的4%。播种前将树脂和生物炭与土混匀后装入底部有孔的花盆中,花盆直径为0.25 m,高0.33 m,土层高度为0.25 m。双氰胺配成溶液后均匀喷洒于离土表面5 cm处,再用拌好的土覆盖,压实。试验径流液采用导管引流法收集,径流收集孔与土面平齐,直径1 cm,径流液通过硅胶管收集到置于地面的500 mL塑料瓶中,瓶口用塑料膜密封,防止雨水进入。渗漏液采用直接收集法,即在花盆底部放一托盘,待降雨发生渗漏时,将其取出即可。托盘与花盆的接口处用塑料膜封口,防止外部雨水等的进入和渗漏液的蒸发损失。盆栽水分管理同大田,在田面出现龟裂还未下雨时浇少量水分,保证小麦生长。收集的径流和渗漏液测定体积后带回实验室分析。

1.2 测定项目和分析方法

小麦成熟后,剪其地上部分,称取各处理生物量和每盆实际所得籽粒重量,计算收获指数(HI)。植株和籽粒烘干粉碎过筛后, $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,半自动凯氏定氮仪测定总氮含量,钼锑抗比色法测定总磷含量^[14],并计算每盆植物氮磷积累总量、氮肥恢复效率(REN)、氮肥农学效率(AEN)、氮肥生理效率(PEN)、氮收获指数(NHI)以及相对磷肥利用率,计算公式如下:

收获指数(HI)=实际所得籽粒重量/地上部生物量 $\times 100\%$,单位为%

植株氮积累总量=植株氮含量 $\times$ 地上部生物量,单位为 $\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$

植株磷积累总量=植株磷含量 $\times$ 地上部生物量,单位为 $\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$

氮肥恢复效率(REN)=(施氮处理氮积累总量-不施肥处理氮积累总量)/施氮量 $\times 100\%$,单位为%

氮肥生理效率(PEN)=(施氮处理籽粒重量-不施肥处理籽粒重量)/(施氮处理氮积累总量-不施肥处理氮积累总量),单位为 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$

氮肥农学效率(AEN)=(施氮处理籽粒重量-不施肥处理籽粒重量)/施氮量,单位为 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$

氮收获指数(NHI)=籽粒氮积累总量/植株氮素积累总量 $\times 100\%$,单位为%

相对磷肥利用率=(其他施添加剂处理的吸磷量-施肥对照处理的吸磷量)/施肥对照处理的吸磷量 $\times 100\%$,单位为%

麦季共收集到径流液三次,收集日期分别是2014年2月14日、4月16日和4月22日;渗漏液六次,收集日期分别是2014年2月14日、2月18日、2月24日、2月26日、3月2日和4月22日。收集的径流和渗漏液用量筒测定其体积,德国Bran+Luebbe公司生产的AA3流动分析仪测定溶液中总氮和总磷浓度,计算径流液和渗漏液平均氮磷浓度以及径流和渗漏氮磷损失量。

采用三点法,用30 cm土钻取全土层土壤,风干后研磨过筛测定碱解态氮和有效磷含量(20目)以及全氮和全磷含量(100目)。采用碱解扩散法和碳酸氢钠法测定土壤碱解态氮和有效磷含量;开氏消煮-半自动凯氏定氮仪测定土壤总氮含量;酸溶-钼锑抗比色法测定全磷含量^[14]。

1.3 数据处理

使用Microsoft Excel对数据进行计算与绘图,SPSS对数据进行方差分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 地上部生物量和产量

添加剂的施用均增加了小麦地上部生物量(表2),其中, $\text{FT}<\text{FX}<\text{FZ}<\text{FZXT}<\text{FTX}<\text{FZT}<\text{FZX}$ 。可见,添加剂两两配施产生了协同作用,更有利于小麦生物量的增加,FZT、FZX和FTX处理分别较SF处理高38.8%、45.2%、25.9%;第三种添加剂的施用抑制了原来的正效应,不利于小麦生物量的增加,但还是较添加剂单施效果好。添加剂对小麦产量的作用与地上部生物量不同,单施树脂降低了小麦的产量,甚至低于NF处理,生物炭和硝化抑制剂单独施用增加了小麦的产量,硝化抑制剂的增产效果大于生物炭;当添加剂两两配施时,产量显著提高,FZT、FZX和FTX处理分别高出SF处理98.0%、132.7%、103.1%,说明添加剂的两两配施产生了明显的协同效应;三种添加剂同时施用产量又明显下降,表明三者之间发生了拮抗效应。与不施肥处理相比,施肥处理显著降低了收获指数(HI),添加剂施用除了树脂外均缓解了HI的降低趋势,以FTX及FZX配施效果最佳,显著高于施肥处理,且高于不施肥处理。

表 2 地上部生物量与每盆实收籽粒重量
Table 2 Aboveground biomass and grain weight of wheat
in pot experiment

处理 Treatment	地上部生物量 Aboveground biomass/ g·pot ⁻¹	籽粒重量 Grain weight/ g·pot ⁻¹	收获指数(HI) Harvest index/%
NF	20.44±0.59e	7.81±0.29bc	38.21±0.88ab
SF	32.34±0.46d	8.44±0.40bc	26.08±0.93c
FZ	36.22±0.05cd	5.01±0.27c	13.84±0.75d
FT	34.53±1.22cd	9.54±0.15b	27.68±0.52c
FX	34.67±2.86cd	10.41±0.71b	30.75±4.66bc
FZT	44.89±3.94ab	16.71±3.08a	36.62±4.53ab
FZX	46.95±3.52a	19.64±1.67a	41.77±0.44a
FTX	40.73±4.00abc	17.14±0.40a	42.91±4.23a
FZXT	38.52±0.46bcd	9.97±0.43b	25.88±0.85c

注:NF 为不施肥处理;SF 为施肥处理;FZ 为施肥+树脂处理;FT 为施肥+生物炭处理;FX 为施肥+硝化抑制剂处理;FZT 为施肥+树脂+生物炭处理;FZX 为施肥+树脂+硝化抑制剂处理;FTX 为施肥+生物炭+硝化抑制剂处理;FZXT 为施肥+树脂+硝化抑制剂+生物炭处理。下同。

Note;NF;No fertilizer treatment;SF;Fertilizer treatment;FZ;Fertilizer+ resin treatment;FT;Fertilizer + biochar treatment;FX;Fertilizer+ nitrification inhibitor treatment;FZT;Fertilizer + resin + biochar treatment;FZX;Fertilizer + resin + nitrification inhibitor treatment;FTX;Fertilizer + biochar + nitrification inhibitor treatment;FZXT;Fertilizer+ resin+nitrification inhibitor+ biochar treatment. The same as below.

2.2 养分吸收和利用

2.2.1 氮素吸收和利用

添加剂的施用均增加了小麦植株的氮含量,其中,FZX、FZXT、FX、FZ 和 FZT 处理的植株氮含量显著高于 SF 处理,分别较 SF 处理高 41.9%、40.8%、38.7%、33.0%和 27.4%(表 3)。三种添加剂单施均提高了籽粒氮含量,两两配施后籽粒氮含量却有所下降,三种添加剂同时施用籽粒氮含量又有所提高,

但所有试验处理与 SF 处理之间差异不显著。植株氮积累总量大小由地上部生物量和植株氮含量的乘积决定,添加剂的施用均显著提高了植株氮积累总量,添加剂两两配施时,发生了协同效应,其氮素积累总量均较单施处理高,当三种添加剂同时施用,氮素积累量略有下降。

添加剂施用对氮肥恢复效率(REN)的影响与氮积累总量一致,FZX、FZT、FZXT、FZ、FTX、FX 和 FT 处理 REN 分别是 SF 处理的 3.1、2.5、2.3、2.0、1.9、1.9 倍和 1.6 倍,以 FZX 氮肥利用率最大。由于树脂单施造成了小麦的减产,FZ 处理的氮肥生理效率(PEN)和氮肥农学效率(AEN)为负值,其他处理均为正值;添加剂两两配施较 SF 处理显著提高了 PEN 和 AEN,FZX、FZT 和 FTX 处理 PEN 和 AEN 分别是 SF 处理的 5.3、5.8、7.7 倍和 13.9、18.5、14.6 倍;三种添加剂同时施入又显著降低了 PEN 和 AEN。所有处理中,PEN 最大的是 FTX 处理,AEN 最大的是 FZX 处理。氮收获指数(NHI)是指氮素在籽粒中的分配比例,单施添加剂处理的 NHI 均低于 SF 处理,树脂单施达到了显著水平;添加剂的两两配施增加了 NHI 值,表现出添加剂之间的协同效应;三种添加剂同时施用则表现出了拮抗效应,NHI 明显降低。所有处理中,生物炭和硝化抑制剂的配施 NHI 值最大,为 69.5%。

2.2.2 磷素吸收和利用

添加剂施用对磷素吸收的影响与氮素有所不同(表 4),添加剂的施用降低了植株和籽粒磷含量以及植株磷积累总量。FZXT、FTX、FZT、FZ 和 FZX 处理的植株磷含量分别是 SF 处理的 74.7%、66.7%、62.3%、

表 3 氮素吸收利用相关指标
Table 3 Indicators of nitrogen uptake and utilization by wheat

处理 Treatment	植株氮含量 Plant nitrogen content/ mg·g ⁻¹	籽粒氮含量 Grain nitrogen content/ mg·g ⁻¹	植株氮积累总量 Plant nitrogen accumulation/ mg·pot ⁻¹	氮肥恢复效率 (REN)Recovery efficiency of nitrogen/%	氮肥生理效率 (PEN)Physiological efficiency of nitrogen/kg·kg ⁻¹	氮肥农学效率 (AEN)Agronomic efficiency of nitrogen/kg·kg ⁻¹	氮收获指数(NHI) Harvest index of nitrogen/%
NF	12.49±0.50c	22.73±0.73d	254.91±5.44f	—	—	—	—
SF	15.89±1.51bc	34.08±0.22abc	514.95±54.78e	13.00±2.74d	2.51±1.37b	0.32±0.20bc	57.06 ±6.34abc
FZ	21.14±0.18a	38.44±0.54a	765.56±7.02bed	25.53±0.35bc	-5.48±0.53c	-1.40±0.13c	25.14±1.07e
FT	19.58±0.85ab	35.88±1.27ab	678.17±53.68d	21.16±2.68c	4.14±0.17b	0.87±0.08b	50.78±1.61bcd
FX	22.04±3.05a	35.58±2.63ab	746.85±45.47cd	24.60±2.27bc	5.31±1.26b	1.30±0.35b	49.60±4.04cd
FZT	20.25±0.90a	32.87±1.72bc	902.11±42.06b	32.36±2.10b	13.31±4.30a	4.45±1.54a	59.34±7.08abc
FZX	22.55±0.35a	34.25±0.25abc	1 056.73±64.67a	40.09±3.23a	14.62±0.92a	5.92±0.84a	63.50±1.90ab
FTX	18.62±0.17ab	30.48±1.69c	758.25±74.74bcd	25.17±3.74bc	19.40±2.88a	4.67±0.20a	69.53±3.54a
FZXT	22.37±0.38a	37.17±0.91ab	861.37±7.54bc	30.32±0.37b	3.59±0.75b	1.09±0.22b	42.97±1.08d

表 4 磷素吸收利用相关指标

Table 4 Indicators of phosphorus uptake and utilization by wheat

处理 Treatment	植株磷含量 Plant phosphorus content/mg·g ⁻¹	籽粒磷含量 Grain phosphorus content/mg·g ⁻¹	植株磷积累总 量 Plant phosphorus accumulation/ mg·pot ⁻¹	相对磷肥利用 率 Relative efficiency of phosphorous/%
NF	1.35±0.03ab	1.82±0.03ab	27.48±0.46c	—
SF	1.62±0.19a	2.00±0.01a	52.55±6.75a	—
FZ	0.93±0.04cd	1.68±0.05ab	33.71±1.51bc	-35.84±2.87b
FT	1.40±0.09ab	1.98±0.07a	48.58±4.07a	-7.56±7.76a
FX	1.27±0.14abc	1.77±0.21ab	43.42±3.08ab	-17.38±5.86ab
FZT	1.01±0.20bed	1.52±0.15b	43.76±4.81ab	-16.73±9.16ab
FZX	0.71±0.05d	1.23±0.05b	32.94±0.68bc	-37.31±1.30b
FTX	1.08±0.12bcd	1.58±0.07b	43.52±4.64ab	-17.18±8.83ab
FZXT	1.21±0.05bc	1.68±0.08ab	46.62±1.83a	-11.29±3.47a

57.4%和 43.8%，显著低于 SF 处理，以 FZX 处理降低程度最大。籽粒磷含量则表现为添加剂的两两配施处理显著降低，FZX 处理降幅最大，达 38.5%。植株磷积累量则只有 FZ 和 FZX 两种处理较 SF 处理表现出了显著的降低作用，降幅为 35.9%和 37.3%。相对磷肥利用率全部为负值，说明不同添加剂处理均抑制了磷素的吸收，以 FZX 处理抑制作用最为严重。

2.3 氮磷养分流失

2.3.1 径流量和渗漏量

添加剂的施用对整个麦季的径流量并无显著影响(图 1)，除 FZX 处理径流量略高于 SF 处理外，其他处理均低于 SF 处理。添加剂的施用均降低了渗漏量，其中 FT 和 FX 处理达到了显著水平，分别是 SF 处理的 84.4%和 83.1%，但 FTX 处理与 SF 处理之间并无显著差异。

2.3.2 氮素流失

所有处理渗漏总氮浓度均明显高于径流氮浓度(图 2)。树脂的施用显著增加了小麦径流和渗漏液中

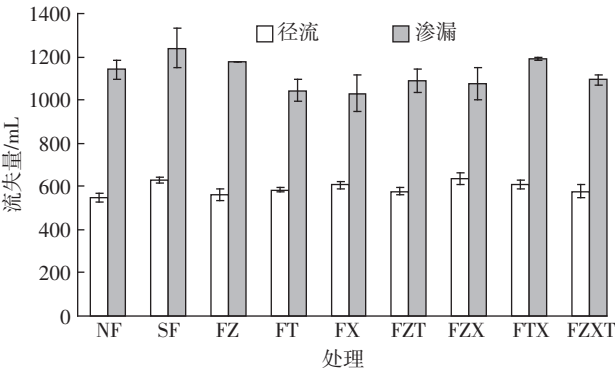


图 1 径流和渗漏量

Figure 1 Runoff and leaching volume

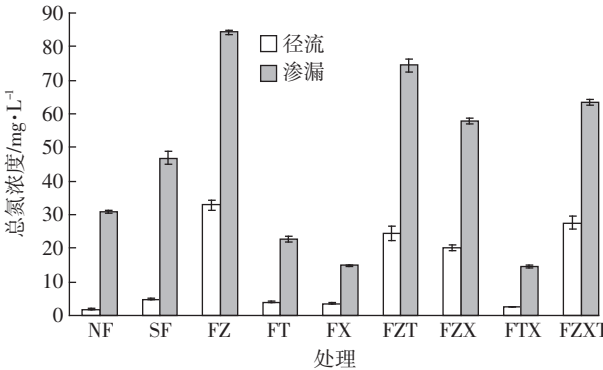


图 2 径流和渗漏液总氮浓度

Figure 2 Total nitrogen concentrations in runoff and leaching water

总氮的浓度，FZ、FZT、FZX 和 FZXT 处理径流和渗漏液中总氮浓度分别是 SF 处理的 6.8、5.0、4.2、5.7 倍和 1.8、1.6、1.2、1.3 倍，FZ 处理的氮浓度最大。生物炭和硝化抑制剂单施或者两者配施均降低了径流和渗漏液中总氮的浓度，以 FTX 处理降幅最为明显，分别为 46.7%和 68.8%。FT、FX 和 FTX 处理径流液总氮浓度与 SF 处理没有显著差异，但所有添加剂处理的渗漏液总氮浓度与 SF 处理均有显著的差异。

总氮损失量等于流失体积与流失液总氮浓度的乘积。可以看出，渗漏损失是麦季氮流失的主要形式，占总损失量的 80%以上，NF 处理和 SF 处理分别达到了 97.3%和 95.0%(图 3)。与氮浓度一样，树脂的施用均增加了径流和渗漏的氮素损失量，FZ、FZT、FZX 和 FZXT 通过径流和渗漏损失的氮分别是 SF 处理的 6.1、4.6、4.2、5.3 倍和 1.7、1.4、1.1、1.2 倍，其中，除 FZX 处理渗漏液总氮损失与 SF 处理无显著差异外，其他径流和渗漏氮损失均与 SF 处理差异显著。生物炭和硝化抑制剂的施用降低了氮素损失，FT、FX 和 FTX 处理的径流和渗漏损失比 SF 处理分别降低了 23.8%、27.7%、48.2%和 59.0%、73.7%、69.9%，三种处

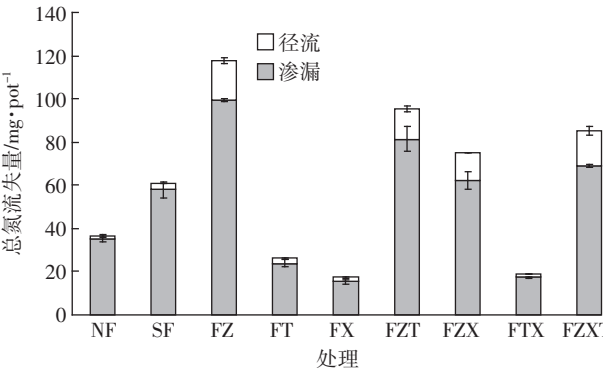


图 3 径流和渗漏总氮损失量

Figure 3 Total nitrogen loss in runoff and leaching water

理径流氮损失量与 SF 处理差异不显著, 渗漏氮损失均显著降低。所有处理中, FTX 处理的径流氮素损失降幅最大, FX 处理的渗漏氮损失最少。整个麦季氮损失总量以 FX 处理最低, 比 SF 处理降低了 71.4%, 其次是 FTX 和 FT 处理, 分别比 SF 处理降低了 68.8% 和 57.3%, 但这三种处理之间没有显著差异性。

2.3.3 磷素流失

与氮素流失不同, 树脂的施用并没有提高径流液中总磷的浓度(图 4), 除 FT 处理总磷浓度略高于 SF 处理外, 其他处理均略低于 SF 处理, FTX 处理的径流液总磷浓度最低, 是 SF 处理的 63.3%, 所有处理径流总磷浓度与 SF 处理均没有显著性差异。树脂的施用提高了渗漏液中总磷的浓度, 除 FZXT 处理与 SF 处理差异不显著外, 其他施加树脂的处理均达显著水平。生物炭和硝化抑制剂的施用降低了渗漏液中磷的浓度, FT、FX、FTX 处理总磷浓度分别是 SF 处理的 50.8%、78.0% 和 78.0%, 以 FT 处理的效果最佳, 显著低于 SF 处理。

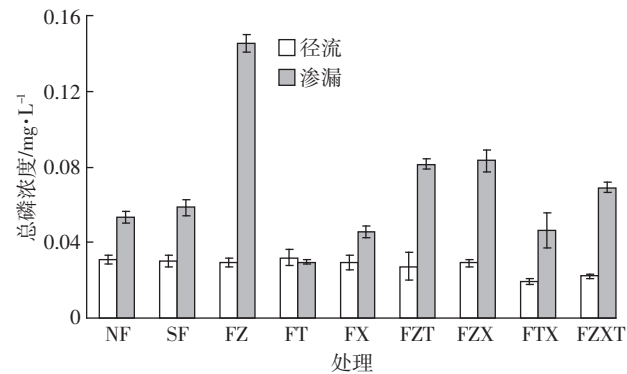


图 4 径流和渗漏液总磷浓度

Figure 4 Total phosphorus content in runoff and leaching water

添加剂的施用减少了径流磷损失(图 5), 其中 FTX 处理效果最明显, 降低了 36.8%, 但所有处理与 SF 处理均没有显著差异。磷素渗漏损失与径流略有不同, 树脂的施入增加了磷素渗漏损失, FZ、FZT、FZX 和 FZXT 处理分别是 SF 处理的 2.4、1.2、1.2 倍和 1.1 倍, 其中 FZ 处理与 SF 处理差异达到显著水平。而生物炭和硝化抑制剂的施用降低了磷素渗漏损失, FT、FX 和 FTX 处理磷损失量仅为 SF 处理的 43.1%、65.3% 和 76.4%, FT 和 FX 处理与 SF 处理差异显著。整个麦季磷素损失量最少的是 FT 处理, 较施肥处理减少了 45.6%, 其次为 FX 和 FTX 处理, 分别较 SF 处理降低了 28.7% 和 26.1%, 且均达到了显著水平。

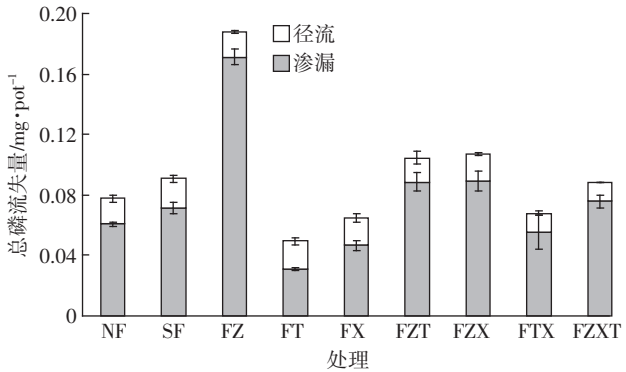


图 5 径流和渗漏总磷损失量

Figure 5 Total phosphorus loss in runoff and leaching water

2.4 收获后土壤养分状况

小麦收获后土壤总氮含量除 FX 处理略低于 SF 处理外, 其他处理均高于 SF 处理(表 5), 除 FZ 和 FX 处理外, 其他处理均与 SF 处理有显著差异。土壤中总氮含量与添加剂种类有关, 添加剂种类越多, 土壤总氮含量越高, 三种添加剂同时施用的土壤总氮含量最大。FTX 处理降低了土壤碱解氮含量, 其他处理则略高于 SF 处理。土壤中总磷含量受土壤添加剂的影响较小, 处理间差异均不显著。土壤有效磷受土壤添加剂的影响相对较大, 其中, FZXT 处理显著提高了土壤有效磷含量, 而 FZ 和 FZT 处理则显著降低了土壤有效磷含量。

3 讨论

添加剂的施用均增加了小麦地上部生物量, 除树脂外, 其他处理均有增产效果。施用树脂的减产效应可能与树脂的添加量和施用的地区差异性有关。以往研究发现, 随着树脂添加量的增大, 作物产量会出现

表 5 收获后各处理土壤养分状况

Table 5 Soil nutrient status in different treatments after harvesting

处理 Treatment	总氮 Total N/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Alkali- hydrolyzable N/ mg·kg ⁻¹	总磷 Total P/ g·kg ⁻¹	有效磷 Olsen-P/ mg·kg ⁻¹
NF	2.21±0.02d	180.44±1.12ab	0.62±0.01b	6.01±0.43d
SF	2.27±0.02cd	179.67±3.78ab	0.69±0.01a	13.36±1.26b
FZ	2.32±0.03bc	186.08±2.96a	0.66±0.02ab	9.22±0.53c
FT	2.35±0.03ab	183.52±2.60a	0.65±0.02ab	13.42±1.22b
FX	2.22±0.02d	182.75±3.78a	0.66±0.02ab	12.63±0.24b
FZT	2.36±0.01ab	180.18±5.01ab	0.67±0.01ab	9.40±0.32c
FZX	2.34±0.02ab	183.77±2.53a	0.70±0.01a	13.23±0.46b
FTX	2.36±0.01ab	170.68±2.19b	0.69±0.00a	14.43±1.64ab
FZXT	2.40±0.01a	179.92±4.45ab	0.69±0.04a	16.62±0.47a

先增加后降低的趋势^[15];另外,树脂可提高土壤含水率^[16],当土壤中含水率过高时,会降低小麦根干重和根长^[17],抑制小麦对水分的吸收,当植株的蒸腾速率超过根系吸水速率时导致作物水分缺失,从而使产量受到限制。试验中发现单施树脂的 FZ 处理小麦生育期延缓,不能在正常时期抽穗、开花和灌浆,在收获时甚至出现贪青的现象。尽管其生物量、植株氮素含量和氮素积累量均比施肥处理有所提高,但氮素向籽粒的转运过程却明显受到了阻碍,氮生理效率表现为负值, NHI 和 HI 仅为施肥处理的 44% 和 53%。但当树脂与其他添加剂配施时,没有出现此现象,这可能与生物炭和硝化抑制剂加入引起的小麦根际养分含量变化有关。生物炭含有一定量的矿质养分,施入土壤后可增加土壤中矿质养分含量,生物炭还具有较大石灰当量值^[18],能够提高酸性土壤 pH 和有效养分含量^[19-20];硝化抑制剂可抑制硝态氮的产生,使得土壤中氮主要以铵态氮形式存在,以延长或者调整氮供应时间^[21];而保水剂的吸水倍率受离子浓度影响较大,随离子浓度的增加而显著降低^[22],生物炭和硝化抑制剂加入引起的养分离子增加抑制了树脂对水分的剧烈吸收,使小麦根际水分含量较树脂单施有所降低,从而使小麦因水分蒸腾和根吸收水分之间造成的不平衡有所改善,继而使产量提高。生物炭对小麦的增产效应与以往研究一致^[23],这与生物炭对酸性土壤的改良作用有关,生物炭可增加土壤碱解氮和有效磷含量,改良酸性土壤一些养分的有效性^[24]。硝化抑制剂增产是因为硝化抑制剂双氰胺抑制了土壤铵态氮的硝化作用,减少了硝态氮的向下淋溶损失;同时抑制剂的施用增加了微生物在小麦生长初期对有效态 N 的固持,有利于后期土壤有效态 N 的矿化^[25]。生物炭和硝化抑制剂配施时,产生了正协同效应。硝化抑制剂抑制了土壤氨氮向硝氮的转化,生物炭则将氨根离子紧密吸附在生物炭上,从而起到了养分缓慢释放的作用,更好地实现了作物养分需求与土壤养分供应之间的平衡,提高了肥料利用率,促进了作物产量。三种添加剂同时施用时,地上部生物量与产量均低于两两配施处理,这可能是由于生物炭和硝化抑制剂的共同施用导致了土壤离子浓度的降低,对树脂的吸水抑制作用减弱。

树脂、生物炭和硝化抑制剂的施用增加了小麦植株氮含量,提高了氮肥利用率,这与前人研究结果一致^[11,13,26];但轻微降低了小麦植株磷含量,表现出对磷素吸收的抑制趋势,这方面的研究结果目前还鲜有报

道。添加剂两两配施明显促进了氮肥利用率和氮肥收获指数,对磷素吸收的抑制作用表现的也更明显;三种添加剂同时施用时氮肥利用率较两两配施处理有所降低,对磷吸收的抑制作用却较两两配施有所减缓。这表明,添加剂的施入可能打破了小麦对氮磷吸收的平衡,促进了对氮素的吸收,却抑制了磷的吸收,具体原因还有待于进一步的研究。

树脂的施用显著地提高了径流和渗漏液中的氮浓度及氮素总损失量,这与其他研究^[27]结果相反,可能是树脂在小麦生育期发生了分解,这与树脂的种类和施用环境有关。聚丙烯酰胺型树脂是以丙烯酰胺(C_3H_5NO)为单体合成的高聚物,一般被认为是稳定的,但其中易被微生物降解的酰胺键在有水存在的环境下可能被微生物作用、吸收代谢,从而使高分子主链断裂、分子量逐渐变小,最终成为单体或代谢成 CO_2 和 H_2O ^[28];添加树脂处理的植株氮积累量和收获后土壤氮含量均高于 SF 处理,氮损失也高于 SF 处理;另一方面,如果作物整个生长季节供应过多的氮素,则常常使作物贪青晚熟,小麦生育期的延缓和晚熟也说明了树脂可能发生了分解。树脂处理增加了磷的损失量,这与王旭东^[29]的结果一致,可能是聚丙烯酰胺树脂减少了土壤对磷的吸附,促进磷向下迁移,增加了淋溶液中磷的浓度和磷损失量。生物炭和硝化抑制剂降低了径流液氮浓度以及氮损失量,同时显著降低了渗漏液氮浓度以及氮损失量,这与其他学者^[11,30-31]研究结果一致。生物炭和硝化抑制剂均可延缓氮素在土壤中的淋洗速度,减少氮素的流失。生物炭和硝化抑制剂的配施在氮素流失方面有协同作用,有效降低了氮素的损失,这主要是因为硝化抑制剂的施用降低了土壤硝态氮含量,减少了硝酸根向下淋洗的风险;而生物炭则将氨根离子紧密吸附在生物炭上,减少了土壤溶液中的氨氮浓度,进一步降低了径流中总氮浓度及其流失风险。

4 结论

(1)各添加剂处理均促进了小麦的地上部生物量。树脂单施造成小麦产量的减产,但当树脂与其他添加剂配施时,此现象被消除,小麦产量显著提高。地上部生物量、籽粒产量和收获指数均以添加剂的两两配施效果较佳。

(2)生物炭和硝化抑制剂的单施以及与树脂的配施均促进了小麦对氮素的吸收和利用,提高了氮肥利用效率,却轻微抑制了作物对磷素的吸收;树脂单施

的减产效应使得该处理的氮肥生理效率和氮肥农学效率表现为负值。氮素吸收利用较佳的是添加剂的两两配施处理。

(3)生物炭和硝化抑制剂的单施和配施降低了径流和渗漏液中氮素的浓度以及渗漏液中磷素的浓度,可减少麦田氮流失 57%~71%、磷流失 26%~46%,起到了控制麦田面源污染的作用。施加树脂的各处理径流和渗漏液氮流失量增加,增加了农业面源污染的风险。

(4)生物炭和硝化抑制剂配施不仅显著增加小麦产量,而且显著提高了氮肥的利用率,使整个麦季氮磷损失分别减少了 68.8%和 26.1%,并能维持土壤肥力,值得应用于太湖流域麦田的面源污染控制上。其在大田的应用效果还有待于进一步验证。

参考文献:

- [1] 闫丽珍,石敏俊,王磊.太湖流域农业面源污染及控制研究进展[J].中国人口·资源与环境,2010,20(1):99-107.
YAN Li-zhen, SHI Min-jun, WANG Lei. Review of agricultural non-point pollution in Taihu Lake and Taihu Basin[J]. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(1):99-107.
- [2] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与实践:总体思路与“4R”治理技术[J].农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):1-8.
- [3] 薛利红,杨林章,施卫明,等.农村面源污染治理的“4R”理论与实践:源头减量技术[J].农业环境科学学报,2013,32(5):881-888.
XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):881-888.
- [4] 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[J].土壤学报,2011,48(5):988-995.
YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Effects of nitrogen management on nitrogen leaching of paddy soil in Taihu Lake Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(5):988-995.
- [5] 廖义善,卓慕宁,李定强,等.适当化肥配施有机肥减少稻田氮磷损失及提高产量[J].农业工程学报,2013,29(25):210-217.
LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, et al. Formulated fertilization for reducing nitrogen and phosphorus losses from paddy fields and increasing rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(25):210-217.
- [6] 高杨,王霞,宋付朋,等.模拟降雨条件下树脂包膜控释尿素对土壤氮素流失的控制效应[J].水土保持学报,2010,24(3):9-12.
GAO Yang, WANG Xia, SONG Fu-peng, et al. Effects of controlled release urea coated by polymer on nitrogen loss of soil under simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3):9-12.
- [7] 郭智,肖敏,陈留根,等.稻麦两熟农田稻季养分径流流失特征[J].生态环境学报,2010,19(7):1622-1627.
GUO Zhi, XIAO Min, CHEN Liu-gen, et al. The characteristics of surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during rice season in intensive rice-wheat rotation field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7):1622-1627.
- [8] 郭智,周炜,陈留根,等.稻秸还田对稻麦两熟农田麦季养分径流流失的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):17-20,25.
GUO Zhi, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen, et al. Effects of rice straw return on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during wheat growing season in intensive rice-wheat rotation field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4):17-20, 25.
- [9] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 156:1-11.
- [10] 勾芒芒,屈忠义.土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J].生态环境学报,2013,22(8):1348-1352.
GOU Mang-mang, QU Zhong-yi. Effect of biochar on root distribution and yield of tomato in sandy loam soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8):1348-1352.
- [11] 高德才,张蕾,刘强,等.旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J].农业工程学报,2014,30(6):54-61.
GAO De-cai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6):54-61.
- [12] 郭艳杰,李博文,张丽娟,等.不同水氮条件下双氰胺对设施番茄生长发育和土壤氮素淋失的影响[J].水土保持学报,2013,27(1):6-11.
GUO Yan-jie, LI Bo-wen, ZHANG Li-juan, et al. Effects of dicyandiamide on tomato growth and nitrogen leaching from soil in intensive greenhouse under different irrigation and nitrogen managements[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1):6-11.
- [13] 岳征文,王百田,王红柳,等.复合营养长效保肥保水剂应用及其缓释节肥效果[J].农业工程学报,2011,27(8):56-62.
YUE Zheng-wen, WANG Bai-tian, WANG Hong-liu, et al. Application of nutrient and super absorbent polymer compound and effect of fertilizer slow-release[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8):56-62.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].中国农业科技出版社,2000.
LU Ru-kun. The analysis method of soil agricultural chemistry[M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] 吴娜,赵宝平,曾昭海,等.两种灌溉方式下保水剂用量对裸燕麦产量和品质的影响[J].作物学报,2009,35(8):1552-1557.
WU Na, ZHAO Bao-ping, ZENG Zhao-hai, et al. Effects of super absorbent polymer application rate on yield and quality of naked oat (*Avena nuda* L.) in two irrigation systems[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(8):1552-1557.

- [16] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 19-26.
YANG Yong-hui, WU Pu-te, WU Ji-cheng, et al. Impacts of water-retaining agent on soil moisture and water use in different growth stages of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(12): 19-26.
- [17] 梁银丽. 土壤水分和氮磷营养对冬小麦根系生长及水分利用的调节[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 258-264.
LIANG Yin-li. The adjustment of soil water and nitrogen phosphorus nutrition on root system growth of wheat and water use[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(3): 258-264.
- [18] 何绪生, 耿增超, 余 雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 1-7.
- [19] 张 祥, 王 典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 979-984.
ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cun-cang, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8): 979-984.
- [20] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6534-6542.
CHEN Xin-xiang, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [21] 戴 宇, 贺纪正, 沈菊培. 双氰胺在农业生态系统中的应用效果及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 279-286.
DAI Yu, HE Ji-zheng, SHEN Ju-pei. Effects and influence factors of dicyandiamide (DCD) application in agricultural ecosystem[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 279-286.
- [22] 苟春林, 王新爱, 李永胜, 等. 保水剂与氮肥的相互影响及节水保肥效果[J]. 中国农业科学, 2011, 44(19): 4015-4021.
GOU Chun-lin, WANG Xin-ai, LI Yong-sheng, et al. Interaction between water retaining agent and nitrogen fertilizers and the effect of water and fertilizer conservation[J]. *China Agriculture Science*, 2011, 44(19): 4015-4021.
- [23] Devereux R C, Sturrock C J, Mooney S J. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2012, 103(1): 13-18.
- [24] Masulili A, Utomo W H, Syechfani M S. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2010, 2(1): 39-47.
- [25] 焦晓光, 梁文举, 陈利军, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1903-1906.
JIAO Xiao-guang, LIANG Wen-ju, CHEN Li-jun, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on soil available N and microbial biomass N and on N uptake of wheat[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1903-1906.
- [26] 刘建涛, 张会永, 王 雪, 等. 氮肥调控剂施用对小麦生长、氮素利用及氮素表观平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 209-214.
LIU Jian-tao, ZHANG Hui-yong, WANG Xue, et al. Effects of nitrogen regulator on wheat growth, nitrogen use efficiency and apparent nitrogen balance[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 209-214.
- [27] 廖人宽, 杨培岭, 任树梅. 高吸水树脂保水剂提高肥效及减少农业面源污染[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 1-10.
LIAO Ren-kuan, YANG Pei-ling, REN Shu-mei. Review on super absorbent polymer application for improving fertilizer efficiency and controlling agricultural non-point source pollutions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(17): 1-10.
- [28] 包木太, 彭 杰, 陈庆国. 微生物对聚丙烯酰胺降解作用的研究进展[J]. 化工进展, 2011, 30(9): 2080-2086.
BAO Mu-tai, PENG Jie, CHEN Qing-guo. Research progress of biodegradation of polyacrylamide by microorganisms[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(9): 2080-2086.
- [29] 王旭东, 杨雪芹. 聚丙烯酰胺对磷素在土壤中吸附-解析与迁移的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 300-305.
WANG Xu-dong, YANG Xue-qin. Effect of polyacrylamide on phosphorus adsorption, desorption and translocation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(2): 300-305.
- [30] 串丽敏, 安志装, 杜连凤, 等. 脲酶/硝化抑制剂对壤质潮土氮素淋溶影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(19): 4007-4014.
CHUAN Li-min, AN Zhi-zhuang, DU Lian-feng, et al. Effects of urease/nitrification inhibitor on soil nitrogen leaching loss in loamy fluvo-aquic soil[J]. *China Agriculture Science*, 2011, 44(19): 4007-4014.
- [31] Hu Y, Schraml M, Von Tucher S, et al. Influence of nitrification inhibitors on yields of arable crops: A meta-analysis of recent studies in Germany[J]. *International Journal of Plant Production*, 2014, 8(1): 33-50.