

赖睿特, 杨涵博, 张克强, 等. 硝化/脲酶抑制剂和生物质炭联合施用对养殖肥液滴灌土壤氮淋失及油菜品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2808–2815.

LAI Rui-te, YANG Han-bo, ZHANG Ke-qiang, et al. Effects of combined application of nitrification/urease inhibitor and biochar on soil nitrogen leaching and quality of *Brassica campestris* after digested slurry drip irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2808–2815.

硝化/脲酶抑制剂和生物质炭联合施用对 养殖肥液滴灌土壤氮淋失及油菜品质的影响

赖睿特, 杨涵博, 张克强, 沈丰莉, 高文萱, 赵 迪, 梁军锋*, 王 风*

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要:为探究硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭的组合施用对养殖肥液滴灌后土壤不同形态氮素淋失及白菜型油菜品质的影响,采用土柱培养试验,设置不同硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭的组合方式,共6组处理:单施养殖肥液(CK),养殖肥液+表面活性剂+生物质炭(YB),养殖肥液+双氰胺+氢醌(DH),养殖肥液+双氰胺+氢醌+表面活性剂(DHY),养殖肥液+双氰胺+氢醌+生物质炭(DHB),养殖肥液+双氰胺+氢醌+生物质炭+表面活性剂(DHBY)。结果表明,土壤硝态氮淋失量呈现CK>YB>DH>DHY>DHBY>DHB,油菜的硝酸盐含量呈现CK>YB>DH>DHY>DHBY>DHB,DHB处理下土壤硝态氮的淋失减少27.62%,油菜鲜重和株高分别增加1.42倍和1.29倍,油菜硝酸盐含量降低32.25%。可见硝化/脲酶抑制剂和生物质炭组合模式能更好地防控养殖肥液滴灌过程中土壤氮素的淋失,减少作物中硝酸盐的积累,显著提高作物品质。

关键词:养殖肥液;硝化抑制剂;脲酶抑制剂;生物质炭;硝态氮淋失

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)12-2808-08 doi:10.11654/jaes.2019-0989

Effects of combined application of nitrification/urease inhibitor and biochar on soil nitrogen leaching and quality of *Brassica campestris* after digested slurry drip irrigation

LAI Rui-te, YANG Han-bo, ZHANG Ke-qiang, SHEN Feng-ju, GAO Wen-xuan, ZHAO Di, LIANG Jun-feng*, WANG Feng*
(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: To explore the effects of the combined application of nitrification/urease inhibitors, surfactants, and biochar on different forms of nitrogen leaching and plant quality in *Brassica campestris* after digested slurry drip irrigation, a soil column culture experiment was conducted with different combinations of application. A total of six treatments were performed with combinations of inhibitor, surfactant, and biomass carbon: single application of digested slurry (CK), digested slurry + surfactant + biochar (YB), digested slurry + dicyandiamide + hydroquinone (DH), digested slurry + dicyandiamide + hydroquinone + surfactant (DHY), digested slurry + dicyandiamide + hydroquinone + biochar (DHB), and digested slurry + dicyandiamide + hydroquinone + biochar + surfactant (DHBY). The amount of soil nitrate leaching showed the trend of CK>YB>DH>DHY>DHBY>DHB and the nitrate content in *Brassica campestris* showed the trend of CK>YB>DH>DHY>DHBY>DHB. Compared with CK, DHB treatment reduced soil nitrate leaching by 27.62% and the fresh weight of *Brassica campestris* was increased 1.42-fold and plant height by 1.29-fold; the nitrate content in *Brassica campestris* was decreased by 32.25%. It is suggested that the combination of nitrification/urease inhibitor and biochar is more effective in preventing and controlling soil nitrate leaching, reducing nitrate accumulation in crops, and significantly improving crop quality.

Keywords: digested slurry; nitrification inhibitors; urease inhibitors; biochar; nitrate leaching

收稿日期:2019-09-12 录用日期:2019-11-11

作者简介:赖睿特(1994—),男,硕士,从事养殖环境污染控制研究。E-mail:29602655@qq.com

*通信作者:梁军锋 E-mail:liangjunfeng2008@126.com;王 风 E-mail:wangfeng_530@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800403);天津市自然科学基金项目(16JCYBJC29700)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0800403); The Natural Science Foundation of Tianjin(16JCYBJC29700)

传统施肥模式下组合施用硝化/脲酶抑制剂和生物质炭可以起到减少土壤硝态氮淋失、提高氮素利用率的作用。硝化抑制剂其作用是抑制土壤铵态氮转化为硝态氮,进而减少氮淋溶和气态损失^[1],对已有数百种硝化抑制剂研究发现^[2-3],只要抑制硝化过程中亚硝化反应或硝化反应,整个硝化过程就能被抑制^[4],如双氰胺就是通过抑制亚硝化细菌的活性^[5]而阻止 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 第一步氧化^[6]。脲酶抑制剂主要有无机物和有机物两大类^[7],应用较广的氢醌通过抑制脲酶活性从而抑制尿素由氨基甲酸水解成 NH_3 ^[8]。生物质炭是生物残体在缺氧情况下,经高温裂解产生的固体产物,其结构稳定、多孔、比表面积大,表面负电荷数量大、密度高,吸附阳离子能力强^[9-10]。有机硅表面活性剂主要包括农用配方助剂和喷雾助剂,其成分主要是乙氧基改性三硅氧烷化合物,可有效降低水的表面张力,具有极强的展布性^[11],扩大水分下渗半径且有机硅材料属于生理惰性物质毒性小、对环境安全、成本较低、减少用水量,符合长期环保要求。张忠亮等研究了6种有机硅表面活性剂对氟磺胺草醚的增效作用,测定了药液与有机硅助剂混匀后的扩展直径,比清水的扩展直径增大了45%~74%^[12]。硝化/脲酶抑制剂和生物质炭提高化肥氮利用率的研究较多,施用7~10 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 双氰胺土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失降低10%~26%^[13],氮素利用率提高25%^[14],应用脲酶抑制剂氮素利用率也能提高5.65%~19.4%^[15-16]。而硝化/脲酶抑制剂组合施用亦能有效延缓尿素水解、抑制硝化作用、减少N素径流或渗漏损失^[17],硝化/脲酶抑制剂使化肥氮表观损失降低27.65%^[18],氮素利用率提高14.94%^[19]。生物质炭的添加可以延缓 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶速度^[20],从而提高氮肥利用率^[21]。赖睿特等研究发现硝化/脲酶抑制剂及生物质炭组合施用更有利于防控养殖肥液灌溉过程土壤氮素的损失^[22],硝化抑制剂组合生物质炭小白菜鲜重和株高分别增加22.10%和84.00%^[23]。

大量研究结果已经证实化肥施用下组合施用硝化/脲酶抑制剂和生物质炭可以抑制铵态氮转化、减少土壤氮素淋失,从而提高氮素利用率和作物产量。目前,以养殖肥液为主体的新型肥料得到越来越广泛的应用,其在农田灌溉过程中会因为高浓度的速效氮素而转化为硝态氮通过淋溶损失。本研究拟通过油菜盆栽滴灌模拟试验,研究硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭的组合施加对养殖肥液应用后土壤不同形态氮素淋失及油菜产量的影响,以揭示有效控

制养殖肥液氮素损失的组合配施技术,为高效利用养殖肥液养分,减少氮素淋溶损失,提高作物利用效率提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试养殖肥液于2019年7月取自天津益利来养殖有限公司长期运行的塞流式厌氧反应器,肥液总氮浓度495.24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度384.37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度2.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH值为8.30。供试土壤采自天津市西青区设施蔬菜大棚0~20 cm表层土壤,土壤类型为壤土质褐土, pH值8.61, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量8.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量3.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总氮含量0.71 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤有机质24.13 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土样经风干、过2 mm筛、混匀后备用。

1.2 试验装置

淋溶模拟装置为PVC材质,内径19 cm,高30 cm。柱体内部下端铺有100目的尼龙网,起到初步过滤作用,柱体底部的出水管内装满脱水棉花,深度过滤水样。将土柱固定在稳定的钢架上,所有土柱保持与地面垂直,柱体出水口处接有容器收集土壤淋溶液,收集容器与淋溶柱口紧密相连以隔绝空气。土壤填装高度设计为20 cm,柱体上部空间用于滴灌。滴灌带平铺在柱口,滴孔间距25 cm,使用功率为2 W的潜水泵将养殖肥液均匀地输入到滴灌带中,保证滴孔滴灌高度、滴灌速率、水滴落点和滴灌量均匀一致。

1.3 试验设计

试验设6组处理:单施养殖肥液(CK),养殖肥液+表面活性剂+2%生物质炭(YB),养殖肥液+10%双氰胺+1%氢醌(DH),养殖肥液+10%双氰胺+1%氢醌+表面活性剂(DHY),养殖肥液+10%双氰胺+1%氢醌+2%生物质炭(DHB),养殖肥液+10%双氰胺+1%氢醌+2%生物质炭+表面活性剂(DHBY)。其中,双氰胺和氢醌以养殖肥液施入铵态氮量作为基数。生物质炭是由玉米秸秆制备并研磨过2 mm筛后备用,生物质炭施加量以土壤干质量为基数。表面活性剂1:750优化稀释倍数应用。每个处理重复3次。

施氮总量设置为300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,全部以养殖肥液滴灌追肥的方式投入,折算成等施氮量的养殖肥液共2800 mL,分7次滴灌,每次滴灌400 mL,滴速为每秒2滴,滴灌时长约为67 min。选用当地主栽的白菜型油菜品种傲绿101(*Brassia Campestris* L.),于2019年6月27日播种,每盆10粒,定苗一周后开始滴灌养殖肥液,滴灌间隔为2 d,滴灌试验周期21 d,栽培周期为

47 d, 8月12日收获, 收获后每个处理采集3株油菜进行品质指标测定。土壤淋溶液样品在滴灌当日采集, 土壤样品在培养试验结束后进行采集。

1.4 测定方法

养殖肥液、土壤淋溶液和土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量采用纳氏试剂法测定, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量采用紫外分光光度法测定, 总氮浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; 油菜中维生素C的含量采用2,6-二氯酚靛酚滴定法测定, 油菜中可溶性糖的含量采用蒽酮比色法测定, 油菜中硝酸盐的含量采用水杨酸-硫酸紫外分光光度法测定^[24]。

1.5 数据分析

$$\text{维生素C含量}(\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}\text{样品}) = \frac{(V_1 - V_2) \times C \times T \times 100}{D \times W}$$

式中: V_1 为滴定样品所用染料毫升数; V_2 为滴定空白所用染料毫升数; C 为样品提取液的总毫升数; D 为样品测定时所用滤液毫升数; T 为1 mL染料所能氧化抗坏血酸的毫克数; W 为样品质量。

$$\text{可溶性糖含量} = \frac{(x/V_1) \times V_2 \times t}{W \times 10^6} \times 100\%$$

式中: x 为从回归方程求得糖的量; V_1 为吸取样品液的体积; V_2 为提取液量; t 为稀释倍数; W 为样品质量。

$$\text{单位鲜质量样品中硝态氮含量} = \frac{x \times V_1}{W \times V_2} (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$$

式中: x 为由回归方程计算出的硝态氮浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$; V_1 为样品定容体积; W 为样品质量; V_2 为测定取用的样品提取液体积。

1.6 数据处理

试验数据采用Excel 2010和SPSS 19.0软件进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

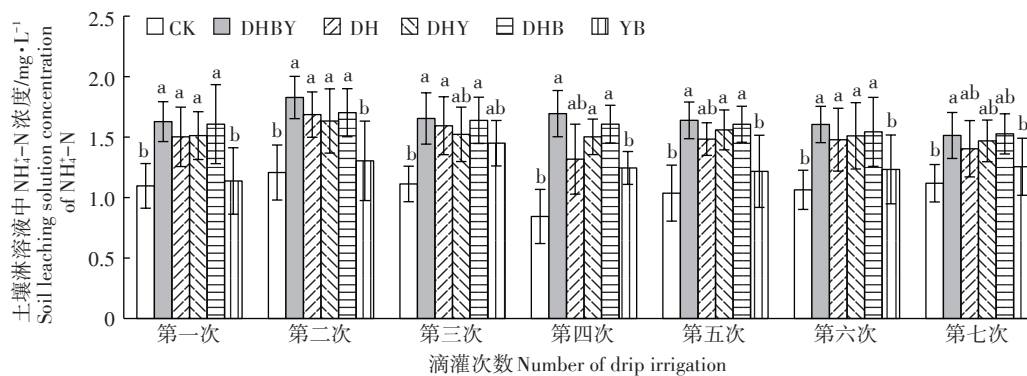
硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭联合施用土壤淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度如图1所示。7次滴灌过程中CK处理淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均最低, 而联用硝化/脲酶抑制剂处理(DH、DHY、DHB、DHYBY)淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度比CK增加31.27%~42.53%, 与CK相比均达到显著水平; 淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈现DHYBY>DHB>DHY>DH的趋势, 但处理间差异不显著; YB处理淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度平均比CK增加19.37%, 处理间差异不显著。

2.2 土壤淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度

硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭联合施用土壤淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度如图2所示。7次滴灌过程中CK处理土壤淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均最高, 其他处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度呈现YB>DH>DHY>DHYBY>DHB趋势, 与CK相比分别降低8.33%、16.58%、16.88%、27.07%和27.62%。CK和YB处理随滴灌次数增加土壤淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度逐渐增加。联用硝化/脲酶抑制剂处理(DHYBY、DHB、DH和DHY)在灌溉第4次后有浓度开始增加。

2.3 土壤淋溶液 TN 浓度

硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭联合施用土壤淋溶液 TN 浓度如图3所示。土壤淋溶液 TN 浓度的变化趋势与土壤淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 趋势基本一致。7次滴灌过程中CK处理土壤淋溶液 TN 浓度均最高, 其他处理 TN 浓度呈现YB>DH>DHY>DHYBY>DHB的趋势, 与CK相比分别降低6.41%、15.51%、15.81%、25.91%和26.42%。CK和YB处理随滴灌次数增加土壤淋溶液 TN 浓度逐渐增加。联用硝化/脲



不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Different letters mean significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 硝化/脲酶抑制剂、生物质炭和表面活性剂联合施用土壤淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

Figure 1 The concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in soil leaching solution applied by nitrification/urease inhibitors, biochar and surfactant

酶抑制剂处理(DHBY、DHB、DH和DHY)在灌溉第四次后有浓度开始增加。

2.4 淋溶液累计量与收获后土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量

硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭联合施用土壤淋溶液累计量如图4所示。土壤淋溶液累计量总体呈现 $\text{CK} > \text{YB}$ 、 $\text{DH} > \text{DHY}$ 、 DHB 、 DHBY 的趋势,联用硝化/脲酶抑制剂处理(DH、DHB、DHY和DHBY)与CK相比差异显著。油菜收获后土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量如图5所示。土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量呈现 $\text{DHBY} > \text{DH} > \text{DHY} > \text{DHB} > \text{CK} > \text{YB}$ 的趋势,且硝化/脲酶抑制剂处理(DH、DHB、DHY和DHBY)间差异不显著。

2.5 土壤氮素淋失量

硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭联合施用对土壤氮素淋失量见表1。土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和TN淋失量总体呈现 $\text{CK} > \text{YB} > \text{DH}$ 、 $\text{DHY} > \text{DHBY}$ 、 DHB 的趋势,处理间差异达到显著水平。各处理中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 占TN淋失量的76.78%~82.33%。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失量总体呈现 DHBY 、 DHY 、 DH 、 $\text{DHB} > \text{YB}$ 、 CK 的趋势,各处理间差异不显著,淋溶液中铵态氮占总氮比率极低。

2.6 油菜生长和品质指标

硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭联合施用对油菜生长的影响见表2。油菜的鲜质量、叶宽均在DHB处理达到最大,分别比CK增加142.67%和98.65%,均达到显著水平;油菜的株高、叶片数均在DHBY处理达到最大,分别比CK增加131.69%和48.45%。其他处理鲜质量比CK处理增加13.34%~56.01%,株高增加27.28%~113.33%,叶宽增加9.12%~79.39%。

硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂和生物质炭联合施用对油菜品质的影响见表3,不同处理间油菜维生素C和可溶性糖含量差异不显著;油菜硝酸盐含量呈现 $\text{CK} > \text{YB}$ 、 $\text{DHY} > \text{DH}$ 、 DHBY 、 DHB 的趋势,CK与联用硝化/脲酶抑制剂处理间差异显著。

3 讨论

3.1 硝化/脲酶抑制剂和生物质炭联合施用对土壤氮素淋失的影响

与CK处理相比,硝化/脲酶抑制剂、表面活性剂

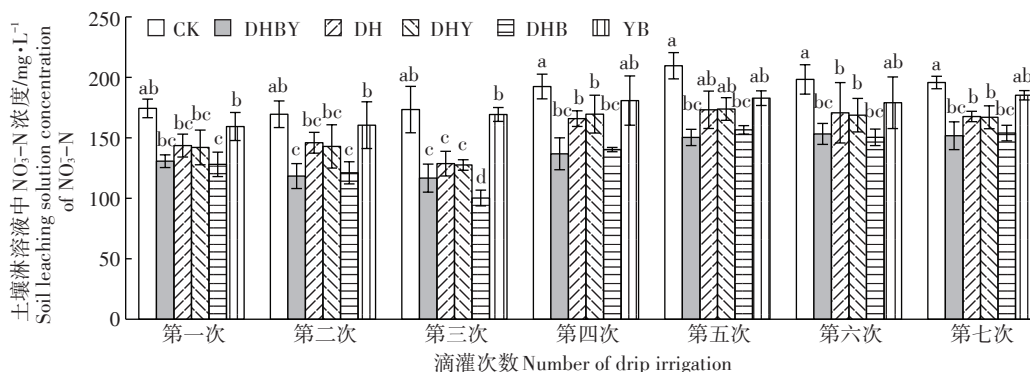


图2 硝化/脲酶抑制剂、生物质炭和表面活性剂联合施用土壤淋溶液 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度

Figure 2 The concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil leaching solution applied by nitrification/urease inhibitors, biochar and surfactant

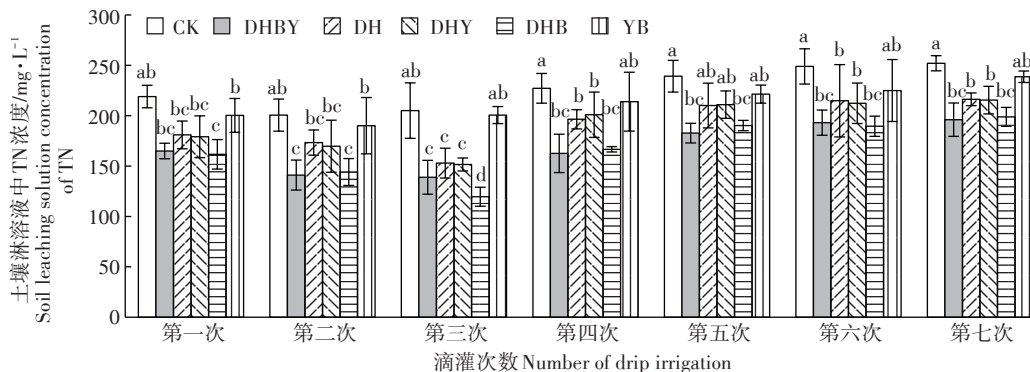


图3 硝化/脲酶抑制剂、生物质炭和表面活性剂联合施用土壤淋溶液TN含量

Figure 3 The concentration of TN in soil leaching solution applied by nitrification/urease inhibitors, biochar and surfactant

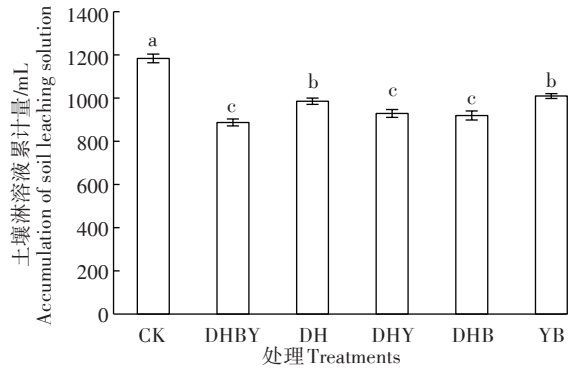


图4 土壤淋溶液累计量

Figure 4 Accumulation of soil leaching

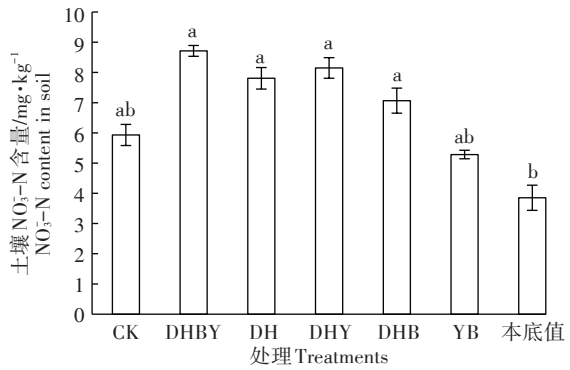


图5 收获后土壤NO₃-N含量

Figure 5 NO₃-N content in soil after harvest

表1 土壤氮素淋失量(kg·hm⁻²)

Table 1 Soil nitrogen loss applied by nitrification/urease inhibitors, biochar and surfactant (kg·hm⁻²)

处理 Treatments	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN
CK	3.12±0.56a	548.21±31.63a	664.99±39.95a
DHBY	3.61±0.38a	299.82±21.05d	369.23±30.46d
DH	3.49±0.53a	345.38±26.48c	448.60±38.37c
DHY	3.51±0.47a	337.71±27.84c	439.22±40.25c
DHB	3.44±0.45a	291.93±13.62d	359.54±19.88d
YB	3.14±0.62a	433.45±31.45b	530.77±45.55b

和生物质炭联合施用对养殖肥液滴灌后土壤NH₄⁺-N转化均起到了抑制作用,施加硝化/脲酶抑制剂的处理(DH、DHB、DHY和DHBY)间差异均不显著,但YB的抑制效果较差,原因是表面活性剂和生物质炭都无法将养殖肥液中的氮素以NH₄⁺-N的形式长时间存在于土壤中。生物质炭是通过物理吸附养殖肥液中的NH₄⁺-N,减少参与硝化反应的底物来间接减缓硝化反应的速率,张斌等证实生物质炭的添加使土壤溶液中无机氮减少抑制了硝化过程进行^[25]。表面活性剂可以扩大养殖肥液滴灌后的渗透半径,有利于作物更好地吸收利用NH₄⁺-N,但不能减缓NH₄⁺-N的转化。生物质炭对减缓养殖肥液滴灌后土壤NH₄⁺-N的转化效

果优于表面活性剂。DHBY和DH分别比YB处理显著增加,表明硝化/脲酶抑制剂组合施用抑制NH₄⁺-N转化效果更好。相比传统化学氮肥,养殖肥液中氮素主要形态是NH₄⁺-N,部分有机态氮和少量NO₃⁻-N。Wu等实验证明猪场肥水中TN的含量是903.4 mg·L⁻¹,肥水中NH₄⁺-N占TN的72.2%^[26];杨涵博等试验证明猪场肥水中NH₄⁺-N占TN的67.11%^[27];赖睿特等试验证明养殖肥液中NH₄⁺-N占TN的72.89%^[22]。试验养殖肥液TN含量为495.2 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N浓度384.4 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N占TN的77.61%。养殖肥液滴灌到土壤后氮素的主要存在形态仍为NH₄⁺-N,硝化/脲酶抑制剂组合相较于表面活性剂和生物质炭组合作用更加明显。李思平等^[23]也证实硝化/脲酶抑制剂与生物质炭组合添加相比单一添加生物质炭的抑制效果更优。

土壤淋溶液NO₃⁻-N浓度表明YB的抑制效果最差,因为表面活性剂仅扩大了养殖肥液滴灌后的渗透半径,对于减少NO₃⁻-N淋失的效果不明显。生物质炭对于NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的吸附达到吸附平衡后,吸附能力基本丧失,宋婷婷的研究可以证明这一点^[28]。本试验所用的生物质炭未改性也是吸附效果差的另一个原因,有研究证实未改性生物质炭对NO₃⁻-N吸

表2 硝化/脲酶抑制剂、生物质炭和表面活性剂联合施用对油菜生长的影响

Table 2 Effects of nitrification/urease inhibitors, biochar and surfactant on the growth of rapeseed

处理 Treatments	鲜质量/g·株 ⁻¹ Fresh weight/g·plant ⁻¹	株高 Plant height/cm	叶片数/片·株 ⁻¹ Leaf number/blade·plant ⁻¹	叶宽 Leaf width/cm
CK	15.89±0.53b	9.53±0.48b	11.0±0.86a	2.96±0.29b
DHBY	34.24±0.71a	21.85±0.51a	16.3±1.73a	5.31±0.34a
DH	24.79±1.17ab	15.70±0.26ab	10.7±1.24a	4.87±0.81ab
DHY	22.03±1.41ab	14.21±0.67ab	12.0±0.41a	4.33±0.41ab
DHB	38.56±0.43a	20.33±1.35a	15.0±1.63a	5.88±0.26a
YB	18.01±0.95b	12.13±0.85ab	11.0±0.29a	3.23±0.17b

表3 硝化/脲酶抑制剂、生物质炭和表面活性剂联合施用对油菜品质的影响

Table 3 Effects of nitrification/urease inhibitors, biochar and surfactant on the quality of rapeseed

处理 Treatments	维生素 C Vitamin C/mg·100 g ⁻¹	可溶性糖 Soluble sugar/mg·g ⁻¹	硝酸盐 Nitrate/mg·kg ⁻¹
CK	41.57±1.28a	78.72±3.44a	365.41±13.66a
DHBY	44.82±2.56a	77.03±1.34a	268.74±12.57c
DH	42.13±1.21a	77.51±1.27a	278.27±13.28c
DHY	43.29±1.65a	75.44±2.28a	291.22±9.11b
DHB	45.44±2.32a	76.57±3.66a	247.56±10.82c
YB	43.81±1.17a	73.49±2.81a	304.53±7.51b

附量为零^[29]。处理 DHBY 与 YB 和 DH 与 YB 之间差异均显著,表明硝化/脲酶抑制剂组合施用对于减少土壤 NO₃-N 淋失效果较优。通过图 2 可知,CK 和 YB 随着滴灌次数增加土壤淋溶液 NO₃-N 浓度整体呈现上升的趋势,而施加硝化/脲酶抑制剂的处理整体呈现先下降后上升的趋势。可能因为 NH₄⁺-N 进入土壤后在 1~2 周就可以完全被硝化^[30],而本试验的滴灌间隔是 2 d,符合这一规律,同时硝化/脲酶抑制剂的加入也减缓了 NH₄⁺-N 的硝化反应。因此,施加硝化/脲酶抑制剂处理会呈现先下降后上升的趋势,单施养殖肥液或组合施用表面活性剂和生物质炭的处理 CK 和 YB 会持续上升。通过图 3 和表 1 发现各处理土壤 TN 淋失量的趋势与土壤 NO₃-N 淋失量的趋势一致,各处理中 NO₃-N 占 TN 淋失量的 76.78%~82.33%,说明在养殖肥液滴灌条件下 NO₃-N 仍然是土壤氮素淋失的主要形态。且硝化产物 NO₃-N 淋溶量远高于 NH₄⁺-N^[31],成为淋溶液中最主要的氮素形态^[32]。通过图 5 发现收获后土壤 NO₃-N 含量最高的是联用硝化/脲酶抑制剂的处理,是因为硝化/脲酶抑制剂的组合施加抑制硝化反应的进行^[30]。

研究表明,作物鲜质量越大对水分的吸收利用率越高^[33],导致各处理下累计土壤淋溶液体积差异显著。与 CK 相比,硝化/脲酶抑制剂、生物质炭和表面活性剂联合施用增加土壤 NO₃-N 含量。硝化/脲酶抑制剂的抑制效果取决于抑制剂的有效抑制时间,DCD 的抑制效果为 14 d^[23];HQ 的抑制效果在 7 d 内有抑制效果,14 d 后基本失效^[34]。

3.2 表面活性剂对土壤氮素淋失

处理 DHBY 与 DHB 和 DH 与 DHY 淋溶液 NO₃-N 浓度间差异不显著。本试验中的有机硅表面活性剂由青岛农业大学研制,具备调节水分在土壤中运移的作用,但对于减少土壤 NO₃-N 淋失的效果一般,有以下几点原因:灌溉量的控制,表面活性剂只有在局部灌溉中才会有相应的作用,如果是足量灌溉,甚至是过量灌溉,对于调节水分在土壤剖面的分布意义不

大;本试验为土柱淋溶试验,土柱管径小,可能会影响到水分的扩散过程,影响水分的分布特征,导致试验结果不具有代表性。表面活性剂的施用是否有利于防控土壤氮素淋失还需进一步的研究。

3.3 硝化/脲酶抑制剂和生物质炭联合施用对油菜生长和品质的影响

油菜的鲜质量、叶宽均在 DHB 处理下最大,较 CK 分别提高 1.43 倍和 0.99 倍;油菜的株高、叶片数均在 DHBY 处理下最大,较 CK 分别提高 1.32 倍和 0.48 倍。原因是在硝化/脲酶抑制剂和生物质炭的联合作用下,养殖肥液滴灌到土壤后氮素的主要存在形态仍为 NH₄⁺-N 且保持一段时间供作物吸收利用,速效氮素供应充足有利于作物生长。

油菜中维生素 C 含量和可溶性糖含量在 6 组处理间差异均不显著。作物中硝酸盐含量是衡量蔬菜品质优劣的一个重要指标。施加硝化/脲酶抑制剂处理的油菜硝酸盐含量最少。研究表明作物积累硝酸盐的根本在于其吸收量超过还原同化的量^[35]。硝化/脲酶抑制剂和生物质炭的组合施用抑制 NH₄⁺-N 的转化,养殖肥液滴灌到土壤后氮素的主要存在形态仍为 NH₄⁺-N 且保持一段时间供作物吸收利用;未施加硝化/脲酶抑制剂处理 NH₄⁺-N 会快速地进行硝化反应,待硝化反应底物耗尽,作物只能吸收利用硝化产物 NO₃-N,导致作物中硝酸盐积累。有研究表明应用硝化抑制剂使生菜硝酸盐含量降低 24%^[36],小青菜硝酸盐降低 7.90%^[37],油菜降低 30.51%^[38]。所有处理均未超过《农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1—2001)规定的限值,油菜硝酸盐含量较低可能与养殖肥液输入的氮素形态以铵态氮为主有关。

4 结论

(1)硝化/脲酶抑制剂与生物质炭联用后,土壤 NO₃-N 淋失减少 27.62%,土壤 NH₄⁺-N 硝化过程被减缓。养殖肥液作为追肥施用,与硝化/脲酶抑制剂和生物质炭联合施用可以减少土壤 NO₃-N 淋溶损

失,不会增加土壤硝态氮累积。

(2)硝化/脲酶抑制剂和生物质炭联合养殖肥液滴灌施用后,油菜鲜质量和株高分别提高1.42倍和1.29倍,同时油菜硝酸盐含量降低32.25%,在叶菜类蔬菜硝酸盐含量限值标准内。

参考文献:

- [1] 石艳星. 脲酶/硝化双抑制剂缓释肥对番茄产量、品质及氮素利用率的影响研究[D]. 保定:河北农业大学, 2014.
SHI Yan-xing. Effect of urease/nitrification inhibitor application on tomato yield, quality and the influence of nitrogen[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014.
- [2] Mc Carty G W. Modes of action of nitrification inhibitors[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29: 1-9.
- [3] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 土壤硝化作用的抑制剂调控及其机理[J]. 应用生态学报, 2008(6): 1389-1395.
SUN Zhi-mei, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Regulation of soil nitrification with nitrification inhibitors and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008(6): 1389-1395.
- [4] 倪秀菊, 李玉中, 徐春英, 等. 土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 145-149.
NI Xiu-ju, LI Yu-zhong, XU Chun-ying, et al. Advance of research on urease inhibitor and nitrification inhibitor in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(12): 145-149.
- [5] 张苗苗, 沈菊培, 贺纪正, 等. 硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2077-2083.
ZHANG Miao-miao, SHEN Ju-pei, HE Ji-zheng, et al. Microbial mechanisms of nitrification inhibitors and their application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2077-2083.
- [6] Amberger A. Research on dicyandiamide as a nitrification inhibitor and future outlook[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1989, 20(19/20): 1933-1955.
- [7] Bremner J M, Douglas L A. Inhibition of urease activity in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1971, 3: 297-307.
- [8] 刘玉学, 刘 微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.
LIU Yu-xue, LIU Wei, WU Wei-xiang, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 977-982.
- [9] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresour Technology*, 2004, 95(3): 255-257.
- [10] 李 君, 刘 涛, 褚贵新. 脲酶抑制剂对石灰性土壤尿素转化及 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1866-1872.
LI Jun, LIU Tao, CHU Gui-xin. Responses of urea transformation dynamics and nitrous oxide to three urease inhibitors in calcareous soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9): 1866-1872.
- [11] 鲁洪斌. 有机硅表面活性剂作为农药助剂的原理及应用[J]. 河北农业, 2019(4): 40-41.
LU Hong-bin. The principle and application of organosilicon surfac-
- tant as pesticide assistant[J]. *Hebei Agriculture*, 2019(4): 40-41.
- [12] 张忠亮, 李相全, 王 欢, 等. 六种有机硅助剂对氟磺胺草醚的增效作用及其增效机理初探[J]. 农药学报, 2015, 17(1): 115-118.
ZHANG Zhong-liang, LI Xiang-quan, WANG Huan, et al. Preliminary studies on synergism and mechanisms of six organosilicon additives on fomesafen[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2015, 17(1): 115-118.
- [13] Zaman M, Blennerhassett J D. Effects of the different rates of urease and nitrification inhibitors on gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, nitrate leaching and pasture production from urine patches in an intensive grazed pasture system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 136(3): 236-246.
- [14] Leandro C G, João L N C, Bruna G de O, et al. Crop residue removal and nitrification inhibitor application as strategies to mitigate N_2O emissions in sugarcane fields[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2018, 119: 206-216.
- [15] Tao R, Li J, Guan Y, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on the soil mineral nitrogen dynamics and nitrous oxide (N_2O) emissions on calcareous soil[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2018, 25(9): 1-10.
- [16] 串丽敏. 硝化/脲酶抑制剂对土壤氮素迁移转化及油菜生长的影响[D]. 保定:河北农业大学, 2010.
CHUAN Li-min. Effects of nitrification/urease inhibitors on nitrogen migration, transformation and rape growth[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010.
- [17] 周 旋, 吴良欢, 戴 锋, 等. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季田面水及渗漏液氮素动态变化的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 434-441.
ZHOU Xuan, WU Liang-huan, DAI Feng, et al. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on nitrogen dynamics in surface water and leachate from yellow clayey paddy field[J]. *Soils*, 2019, 51(3): 434-441.
- [18] 鲁艳红, 聂 军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95-104.
LU Yan-hong, NIE Jun, LIAO Yu-lin, et al. Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(1): 95-104.
- [19] 姚云柯, 徐卫红, 周 豪, 等. 脲酶/硝化抑制剂缓释肥对番茄养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(4): 748-753.
YAO Yun-ke, XU Wei-hong, ZHOU Hao, et al. Effect of special slow release fertilizer containing urease/nitrification inhibitor on nutrient uptake of tomato and soil fertility[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(4): 748-753.
- [20] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonia and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467-1471.
- [21] 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.
- [22] 赖睿特, 杨涵博, 张克强, 等. 硝化/脲酶抑制剂及生物质炭对养殖肥液灌溉土壤氮素转化的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020(待发表).
- LAI Rui-te, YANG Han-bo, ZHANG Ke-qiang, et al. Effects of nitrification/urease inhibitors and biochar on nitrogen conversion in soil irrigated with biomass slurry[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, in Press.
- [23] 李思平, 曾路生, 李旭霖, 等. 不同配方生物炭改良盐渍土对小白菜和棉花生长及光合作用的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2):363-368.
- LI Si-ping, ZENG Lu-sheng, LI Xu-lin, et al. Amelioration of saline soil with different biochar fertilization formulas and its effects on growth and photosynthesis of *Brassica chinensis* and cotton[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2):363-368.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- LI He-sheng. The principle and technology of plant physiology and biochemistry experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [25] 张 斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23):4844-4853.
- ZHANG Bin, LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23):4844-4853.
- [26] Wu J, Yang Q, Yang G, et al. Effects of biogas slurry on yield and quality of oil-seed rape[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2013, 44:117-121.
- [27] 杨涵博, 赖睿特, 张克强, 等. 硝化抑制剂阻控养殖肥液灌溉土壤氮素淋失[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8):1751-1758.
- YANG Han-bo, LAI Rui-te, ZHANG Ke-qiang, et al. Nitrification inhibitors prevent nitrogen leaching in soil irrigated by biomass slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1751-1758.
- [28] 宋婷婷. 生物炭吸附无机氮特性及其对种苗发育和土壤微生物的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2018.
- SONG Ting-ting. Impact of biochar on adsorbed properties of inorganic nitrogen, seedling development and soil microbes[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [29] 王 静, 付伟章, 葛晓红, 等. 玉米生物炭和改性炭对土壤无机氮磷淋失影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12):2810-2820.
- WANG Jing, FU Wei-zhang, GE Xiao-hong, et al. Effects of corn biochar and modified carbon on leaching of inorganic nitrogen and phosphorus in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12):2810-2820.
- [30] 谢红梅, 朱 波, 朱钟麟. 无机与有机肥配施麦田(紫色土)铵态氮及硝态氮的时空变异[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1):118-121.
- XIE Hong-mei, ZHU Bo, ZHU Zhong-lin. Temporal-spatial variations of ammonia and nitrate under application of inorganic and organic fertilizers in purple soil of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1):118-121.
- [31] 杜 军, 杨培岭, 李云开, 等. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):57-64.
- DU Jun, YANG Pei-ling, LI Yun-kai, et al. Influence of the irrigation, fertilization and groundwater depth on wheat yield and nitrate nitrogen leaching[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2):57-64.
- [32] 吴晓荣, 张蓓蓓, 余云飞, 等. 硝化抑制剂对典型茶园土壤尿素硝化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10):2063-2070.
- WU Xiao-rong, ZHANG Bei-bei, YU Yun-fei, et al. Effects of nitrification inhibitors on nitrification rate of urea in four typical tea soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10):2063-2070.
- [33] 伍少福, 吴良欢, 石其伟. 硝化抑制剂对降低蔬菜硝酸盐积累的影响及其影响因素的研究进展[J]. 土壤通报, 2006(6):1236-1242.
- WU Shao-fu, WU Liang-huan, SHI Qi-wei. Research progress of nitrification inhibitors on decreasing vegetable nitrate accumulation and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006(6):1236-1242.
- [34] 陈 欢. 脲酶/硝化抑制剂的效果比较及DMPP对氮素肥际与小麦根系微域分布的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2010.
- CHEN Huan. Comparison of urease/nitrification inhibitors and the influence of DMPP on nitrogen patch and wheat root micro-distribution [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [35] 闵 炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1):151-157.
- MIN Ju, SHI Wei-ming. Effects of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality of vegetables cultivated in plastic greenhouse in Taihu Lake region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(1):151-157.
- [36] Montemurro F. Effects of urease and nitrification inhibitors application on urea fate in soil and nitrate accumulation in lettuce[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21:245-252.
- [37] 许 超, 吴良欢, 巨晓棠, 等. 田间施用硝化抑制剂DMPP对小青菜贮藏过程中硝酸盐与Vc含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):630-632.
- XU Chao, WU Liang-huan, JU Xiao-tang, et al. Effects of nitrification inhibitor DMPP (3, 4 - Dimethylpyrazole Phosphate) on nitrate and vitamin C (Vc) concentrations in greengrocery (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*) during storage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):630-632.
- [38] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 添加硝化抑制剂双氰胺对油菜生长及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):870-874.
- CHUAN Li-min, ZHAO Tong-ke, AN Zhi-zhuang, et al. Effects of adding a nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on the growth and quality of rape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):870-874.