

闵 炬, 孙海军, 陈 贵, 等. 太湖地区集约化农田氮素减排增效技术实践[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2418–2426.

MIN Ju, SUN Hai-jun, CHEN Gui, et al. The practice of technologies for nitrogen emission reduction and efficiency increase in intensive farmland of Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2418–2426.

太湖地区集约化农田氮素减排增效技术实践

闵 炬¹, 孙海军², 陈 贵³, 姜振萃¹, 陆扣萍⁴, 纪荣婷¹, 施卫明^{1*}

(1. 中国科学院南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 南京林业大学林学院, 南京 210037; 3. 嘉兴市农业科学研究院, 浙江 嘉兴 314016; 4. 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

摘 要:通过开展氮高效水稻品种种植与化肥减施的增效减排技术、稻田生物炭应用增效减排技术、固氮作物养分减投与轮作制度调整技术、菜地机械起垄侧条施肥技术等研发和适地性研究,优化了技术参数,明确了技术效果:氮高效水稻品种生产单位产量谷物时稻田NH₃挥发量比常规水稻品种下降17.4%~27.3%(平均为21.3%),稻田氮素渗漏损失量下降6.08%~44.0%(平均为25.3%),稻田氮素径流损失量下降9.18%~28.7%;与单施尿素相比,稻田中施用0.5%(表层土壤质量百分比)的低温(500℃)制备生物炭,维持水稻高产且不增加单位产量氨挥发损失的同时,可显著减少土壤氮素径流损失13.9%~22.1%;传统的集约化蔬菜轮作中引入豆科作物金花菜,可减少周年总氮淋失约40%,并且可使经济效益提高29%;大白菜机械起垄侧条施肥的适宜垄宽为55 cm,在保证高产的同时,可减施化肥氮约30%,节本增效58.3%,并且减少50%以上的氨挥发。以上技术在集约化农田上的实践,有力地推动了国家化肥零增长战略和太湖地区农田面源污染防治。

关键词:水稻;蔬菜;淋洗;径流;氨挥发;经济效益;面源污染防治技术

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)11-2418-09 doi:10.11654/jaes.2018-1287

The practice of technologies for nitrogen emission reduction and efficiency increase in intensive farmland of Tai Lake region

MIN Ju¹, SUN Hai-jun², CHEN Gui³, JIANG Zhen-cui¹, LU Kou-ping⁴, JI Rong-ting¹, SHI Wei-ming^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Nanjing Forestry University, College of Forestry, Nanjing 210037, China; 3. Jiaying Academy of Agricultural Sciences, Jiaying 314016, China; 4. Zhejiang A&F University, School of Environmental & Resource Sciences, Lin'an 311300, China)

Abstract: In Tai Lake region, we conducted serial experiments to evaluate the efficiencies of following technologies including plantation of rice with high NUE, incorporation of biochar, optimization the rotation system with nitrogen fixing crops, and mechanical ridging and side-strip fertilization in vegetable fields, to improve nitrogen use efficiency and mitigate nitrogen losses to the water and atmosphere. Especially, we optimized the related technical parameters and clarified the efficiencies of each technology. The results suggested that: High nitrogen use efficiency (high-NUE) rice cultivars produced 17.4%~27.3% (21.3% on average) less amounts of NH₃ volatilization from paddy field, 6.08%~44.0% (25.3% on average) less N losses by soil leaching, and 9.18%~28.7% less N losses through runoff on a yield-scaled basis than the conventional cultivar. Compared with urea input alone, application of biochar pyrolyzed under a relative low temperature (500℃) and at a relative low rate (0.5% wt) can guarantee rice grain yield and significantly reduced ($P<0.05$) the runoff N losses by 13.9%~22.1%, without increases of yield-scale NH₃ losses. Optimization the vegetable rotation system with nitrogen fixing crop California bur clover (*Medicago hispida Gaertn L.*) reduced annual total N leaching losses by approximately 40.0% and increase the economic benefit by approximately by 29.0%. The appropriate width of ridge is 55 cm for mechanical ridging in cabbage plantation. Strip fertilization reduced about 30% N fertilizer, which saving the cost and increasing the efficiency by 58.3%. Moreover, this technology mitigated the NH₃ volatilization by more than 50%. The practices of aforementioned technologies in intensive farmland effectively promote the China national strategy of “Zero growth of chemical fertilizer use” and the control of non-point source pollution in Tai Lake region.

Keywords: rice; vegetable; leaching; runoff; NH₃ volatilization; economic benefit; control of non-point source pollution

收稿日期:2018-10-15 录用日期:2018-10-30

作者简介:闵 炬(1982—),女,新疆和硕人,副研究员,从事农田面源污染防治技术研究。E-mail:jmin@issas.ac.cn

*通信作者:施卫明 E-mail:wmsi@issas.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0801100)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2016YFD0801100)

太湖地区地处长江三角洲中心,以平原为主,水网交错,气候温暖多雨,年均降雨量1177 mm,且多集中在夏季^[1],该地区也是我国经济最发达、大中城市最密集的地区之一,其地理和战略优势突出。但近年来逐渐加重的全球性湖泊富营养化问题,给湖泊生态功能的发挥带来了前所未有的挑战^[2]。我国农业面源污染对水环境污染的贡献率年趋增大,污染源普查公报显示,农业面源污染成为我国水环境污染大户,其中的总氮(TN)、总磷(TP)排放量已分别占其排放总量的57.2%和67.4%^[3]。据报道,太湖营养盐浓度呈明显的季节变化,湖体TN、TP浓度峰值出现在7月,可达 $4.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[2]。

太湖地区耕地总面积约为 $151 \times 10^4 \text{ hm}^2$,农田集约化程度高,是我国三大粮食生产基地之一。截止2015年,区域内稻田种植面积 $1.24 \times 10^6 \text{ hm}^2$,菜地面积占该区域旱地面积的20.2%^[4]。20世纪90年代起,太湖地区粮食作物年施氮(N)量已高达500~600 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,蔬菜作物更是高达1000 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上^[5-6]。朱兆良^[7]报道,中国稻田碳铵的N肥表观利用率低于30%,尿素为30%~40%。对太湖地区的研究表明,集约化水稻的N肥利用率仅为19.9%^[8],显著低于全国平均水平。在集约化蔬菜栽培上,为提高产量而盲目、高量施肥(尤其是N肥)现象比较普遍。然而,N肥表观利用率不足10%^[9],土壤及蔬菜中硝酸盐累积,在0~100 cm土壤剖面发生明显的淋洗^[10],对周边环境造成严重威胁。

氮肥过量施用不仅造成农业生产成本增加,N肥利用率下降,作物产量、品质下降,而且会破坏生态环境,危害人类健康,对农业经济的可持续发展产生巨大障碍。太湖地区是我国化肥用量较高的地区之一,也是我国地表水体富营养化和农业面源污染较严重的区域之一^[11]。迄今为止,太湖地区农业面源污染治理研究虽已开展较多的工作,有相对较好的基础,研发的技术包括稻季优化施肥技术、种植制度优化调整、农田生态拦截沟渠等,建立了低浓度污水的人工湿地处理工程、稻/菜的面源污染三级防控示范工程等^[12-15]。但现有的农业面源污染防治技术多基于维持产量基础上最大化的进行减排,在增产增效上关注较少。此外,利于技术推广的适地性研发尚缺乏,技术落地的经济效益分析尚不足。为此,针对太湖地区稻田和菜地集约化程度高、N肥投入量大、区域降水集中、面源污染严重等问题,本文总结了近年来开展的一系列减排增效技术研究成果,为太湖地区集约化

农田减施-增效-减排技术的示范推广提供样板。

1 太湖地区集约化稻田

1.1 基于氮高效水稻品种的氮肥减施增效减排技术

为了提高水稻产量,提高单位面积耕地的水稻产量刻不容缓。传统的措施是增加化肥投入,特别是N肥。研究表明,1977—2005年,我国的年粮食产量从2.83亿t增加到4.84亿t,增长比例为71%,单位土地面积的谷物产量从2348 t增加到4642 t,增加比例为98%,然而在此期间化肥N的施用量从707万t增加2621万t,增加比例超过稻谷的增加比例,达271%,导致施入N肥的偏生产力从 $55 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降至 $20 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16-18]。与此同时,农田中化肥N的损失量却增加了约2倍^[7]。仅通过增施N肥来增加水稻单位土地面积的产量是不可行的。从环境和粮食安全角度出发,近年来,N高效水稻逐渐受到广泛关注。很多研究者认为N高效水稻不仅具有高产的特性,而且能够高效利用N素,有益于生态环境的可持续健康发展^[19-23]。随着粮食需求量的不断增加,以及人们对环境保护意识的增强,从N高效水稻品种入手,开展农田面源污染防治技术研发无疑是一种有利选择。

1.1.1 技术原理

N高效水稻是指在供N水平相等条件下,同一生育期的水稻稻谷产量高的水稻品种。因N高效水稻品种的N利用率高,减施N肥后仍能维持较高产量。因此,利用N高效水稻品种配合N肥减施,一方面降低肥料成本,另一方面减少N素损失。

1.1.2 技术参数优化

以太湖地区武运粳23号(W23)和镇稻11号(Z11)为供试N高效水稻品种,以太湖地区早期普栽品种武育粳3号(W3)为对照。设置3个施N水平分别为0(N0),200 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N200)和270 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N270)。NH₃挥发测定采用连续抽气-密闭室法,分别在基肥、分蘖肥、穗肥施用后的第1 d开始,连续采集直至施N处理吸收液颜色与不施N处理之间无明显差异为止。土壤渗漏液通过多孔渗漏管法收集,径流液通过采集中期、后期烤田产生的水样并采集由于降雨而引起的径流水样,通过电子流量计计算流量。渗漏水 and 径流水样品中TN浓度通过流动分析仪分析测定。待水稻成熟后各小区采集4 m²水稻籽粒(避免边际效应),脱粒后晒干,测定籽粒质量并计算产量。

1.1.3 技术效果

随施N量增加,稻田NH₃挥发量也增加,且挥发

量占施N量比例也呈增加趋势。当以生产单位产量谷物计算时,第一年稻季N高效水稻W23和Z11与W3相比在N200下稻田NH₃挥发损失量下降比例分别为21.6%和18.0%,N270处理下分别下降17.4%和19.8%;第二年稻季W23、Z11与W3相比在N200和N270下NH₃挥发量的下降比例分别为27.3%、21.3%和23.0%、22.2%,且均达显著差异水平(表1)。N高效水稻W23、Z11在N200下的稻田TN渗漏量要低于W3对照。稻田TN径流损失量亦随N肥施用量增加而增大。但不同N效率水稻W23、Z11和W3在N200或N270下的稻田TN径流损失量之间无一致趋势。当以生产单位产量谷物计算稻田TN渗漏、径流损失量时,N高效水稻W23、Z11与N低效水稻W3相比,在N200下稻田TN渗漏损失量下降比例更大,而且在N270下稻田TN渗漏损失也低于W3。对于稻田TN径流损失而言,W23和Z11在N200和N270下均低于W3(表1)。

1.2 生物炭应用增效减排技术

在面源污染治理过程中,源头减量技术至关重要。包括减少化肥投入量,施用肥料增效剂、土壤改良剂等增加土壤对养分的固持,从而从源头上减少养分流失^[24]。近年来,低成本土壤改良剂的研究开发,尤其是将农林废弃物及其改性产品作为土壤改良剂,已经引起了许多科技工作者的广泛关注^[25]。其中生物炭作为一种环境友好、低成本、具有优异表面特性

的炭基材料,得到了广泛的研究^[26]。李飞跃等^[27]以稻壳生物质为原材料在350℃和500℃温度条件下制备生物炭,其对氨氮的最大吸附量分别为5.82 mg·g⁻¹和6.51 mg·g⁻¹,表现出良好的吸附效果。另有研究表明,施用生物炭能够有效降低土壤中TN与TP的淋失风险,是控制菜地土壤中氮磷养分淋溶损失的有效措施^[28]。由此可见,将生物炭施用于高施氮的集约化农田土壤,可以利用其对不同形态氮磷等养分的吸附性能,减少其面源污染发生风险,实现减排增效。

1.2.1 技术原理

生物炭是生物有机物料(生物质)在缺氧或绝氧环境中,经高温热裂解后生成的固态产物。生物炭具有丰富的孔隙结构,比表面积大,吸附能力强,将生物炭施用于土壤后,能够改善土壤理化性质,为微生物提供良好的生存空间,从而吸附土壤中N、P等养分离子,减少其淋溶损失等,并能提高养分利用效率,增加作物产量。

1.2.2 技术参数优化

试验生物炭以锯末为制备原料(Sawdust biochar: SDB),设置不同热解温度(500℃和700℃)和施用量(0.5%和3%,炭土比)作为处理,同时布置不施氮肥对照(CK)和施尿素氮肥对照处理(CKU)。共计6个处理分别标记为:CK、CKU、SDB500-0.5%,SDB500-3%、SDB700-0.5%和SDB700-3%,每个处理设置3次重复。供试土壤为太湖地区典型水稻土,N肥施用量

表1 生产单位产量谷物时不同N效水稻的NH₃挥发量、TN渗漏和径流损失^[23]

Table 1 Nitrogen losses through NH₃ volatilization, N leaching, N runoff on a unit rice grain basis from the paddy field

稻季 Rice season	施N量 N rate/ kg N·hm ⁻²	水稻 品种 Rice cultivar	NH ₃ 挥发 NH ₃ volatilization/ kg N·t ⁻¹	与W3相比W23和Z11增/减 (+/-)比例 Increase or decrease proportion/%		TN 渗漏 TN leaching/ kg N·t ⁻¹	TN 径流 TN runoff/ kg N·t ⁻¹	与W3相比W23和Z11增/减 (+/-)比例 Increase or decrease proportion/%	
				NH ₃ 挥发 NH ₃ volatilization	TN 径流 TN runoff			TN 渗漏 TN leaching	TN 径流 TN runoff
第一年 First season	200	W3	3.26a	—	0.72a	0.89a	—	—	
		W23	2.56a	-21.6	0.46a	0.63b	-36.7	-28.7	
		Z11	2.67a	-18.0	0.40a	0.80a	-44.0	-9.72	
	270	W3	4.54a	—	0.84a	1.13a	—	—	
		W23	3.75a	-17.4	0.79a	1.03a	-6.08	-9.18	
		Z11	3.64a	-19.8	0.69a	1.00a	-17.8	-11.8	
第二年 Second season	200	W3	3.74a	—	0.68a	0.54a	—	—	
		W23	2.72b	-27.3	0.45 b	0.40a	-33.6	-26.3	
		Z11	2.95b	-21.3	0.48ab	0.45a	-29.4	-16.8	
	270	W3	5.39a	—	0.87a	0.63a	—	—	
		W23	4.15b	-23.0	0.69a	0.49a	-20.3	-22.2	
		Z11	4.20b	-22.2	0.74a	0.51a	-14.9	-18.4	

注:表中同列不同小写字母代表同一施N水平下不同水稻品种间差异达显著水平($P<0.05$)。

Note: The different letters in the same column indicate a significant difference ($P<0.05$) among different rice cultivars under the same N input level.

为 $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分基肥(BF, 40%)、蘖肥(SF1, 40%)和穗肥(SF2, 20%)3次施用^[29]。在N肥施用后一周,采用改进的连续动力抽气-密闭室法开展 NH_3 挥发监测^[24]。同时每天采集田面水,在每次施肥后一周和水稻收获期,采集表层(0~15 cm)土壤样品,分析田面水与土壤样品的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 TN 浓度。土壤样品用 $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提后,与田面水样一起,用流动注射分析仪测定其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 TN 浓度。试验结果表明:与对照处理(不添加生物炭)相比,生物炭施用可以有效降低水稻生长季3次N肥施用后田面水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度及 TN 浓度。降低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度比例为 7.3%~35.2%、16.3%~32.4% 和 12.2%~28.1%;降低 TN 浓度比例为 11.8%~27.1%、14.3%~36.5% 和 3.0%~19.6%。同时,生物炭施用可以提高表层(0~15 cm)土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。考虑到生物炭施用在一定程度上增加了氨挥发,建议以较低比例(0.5%)施用低温制备(500 °C)的生物炭,此为最优选择。

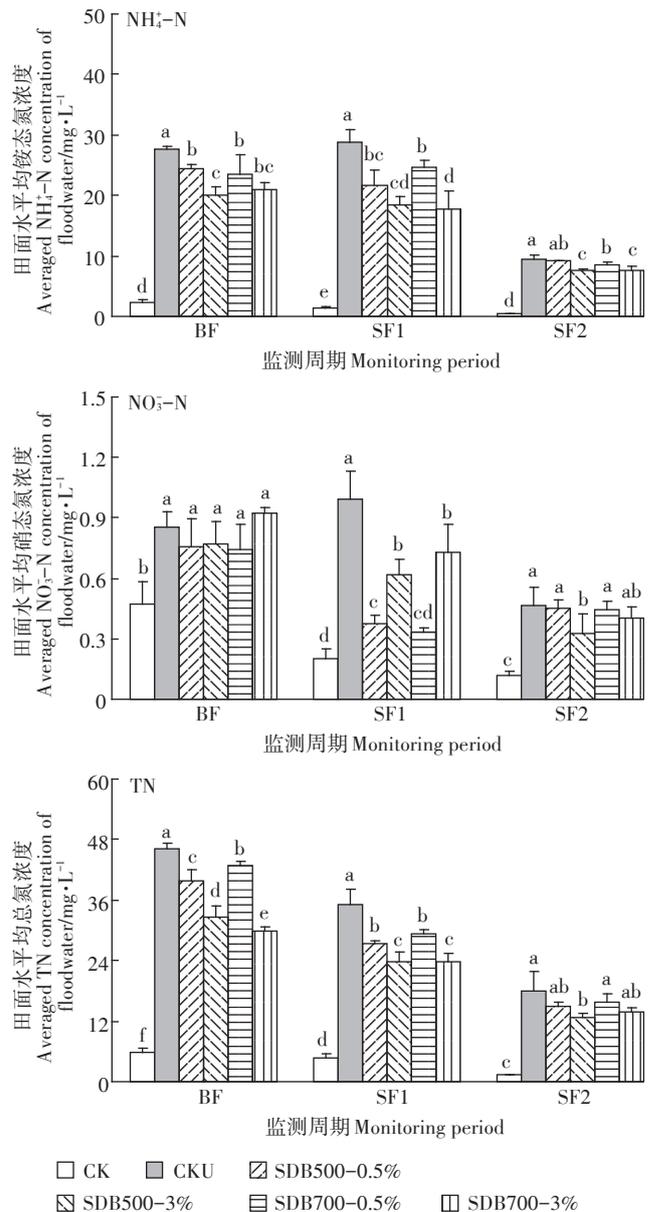
1.2.3 技术效果

稻季基肥(BF)、蘖肥(SF1)和穗肥(SF2)施用后一周内,田面水平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 TN 浓度如图1所示。显然,化肥N的施用显著提高了田面水不同形态的N浓度。在基肥和蘖肥施用后,CKU处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 $27.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $28.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,生物炭的施用可将其降至 $20.1 \sim 24.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $17.8 \sim 24.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这主要是因为生物炭具有对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的良好吸附效果。而且,3%生物炭处理的平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度要比0.5%生物炭处理的分别低 $2.7 \sim 4.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.4 \sim 6.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。穗肥施用后,田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $7.6 \sim 9.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,低于基肥和蘖肥阶段。在穗肥阶段,生物炭施用处理依然能有效降低3%~19.7%的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。

与CKU处理相比,生物炭处理在基肥和蘖肥阶段的TN浓度分别降低7.3%~35.2%和16.4%~32.4%(图2)。在穗肥阶段,生物炭处理田面水的平均TN浓度比CKU处理依然降低2.2~5.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。结果表明,生物炭处理能够显著降低稻季N肥施用后随径流损失的风险,利于面源污染控制。

三次施肥后一周及水稻收获期,表层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 4.2 、 5.2 、 1.2 、 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (图2)。生物炭处理的表层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度上升至 $4.3 \sim 4.6$ 、 $5.7 \sim 6.2$ 、 $1.2 \sim 1.3$ 、 $0.73 \sim 0.75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较低,且生物炭施用对其影响并不显著。表层土壤 TN 浓度相对稳定一致,生物炭处理有利于土壤N素的固持。

本研究中,稻季全生育期累积 NH_3 挥发损失为 $14.9 \sim 21.6 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,占肥料N投入的5.6%~8.0%。其中, NH_3 挥发主要发生于基肥阶段($4.1 \sim 10.3 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)和蘖肥阶段($8.4 \sim 10.5 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)。不利的一方面是生物炭施用会导致 NH_3 挥发增加26.7%~43.2%。这主要是由于生物炭施加导致田面水和表层土壤pH增加。一般而言,合理的生物炭添加可以增加水稻产



图中同组数据标注小写字母不同,表示不同施肥观测期各处理之间差异达显著水平($P < 0.05$)。图2同

Columns denoted by different letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments during different observing period. The same as figure 2

图1 生物炭施用对稻季田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 TN 浓度的影响
Figure 1 Effects of biochar application on the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN concentrations of surface floodwater of rice growth season

量,从粮食安全和环境保护双角度考虑,本研究计算了单位产量所付出的 NH_3 挥发代价(Yield-scale NH_3 losses)(表2)。结果表明,以较低施用量(0.5%)添加低温(500℃)制备的生物炭,可以实现在增加水稻产量的同时不以 NH_3 挥发急剧增加为代价。

综上,在土壤中施用0.5%(表层土壤质量百分比)的低温(500℃)制备生物炭是最优选择,该生物炭施用技术不但减少了土壤N素的径流损失,而且使土壤维持较高的含N量(相比单施尿素处理),保证水

稻高产的同时不以 NH_3 增加为代价。因此,该研究证明适宜的生物炭添加可有效减少农田N素损失,提高N肥利用率。

2 太湖地区集约化菜地

2.1 基于固氮作物养分减投的轮作制度调整技术

截止目前,太湖地区蔬菜地面积为5.53万 hm^2 ,占该区域旱地面积的20.2%。大多数新增的菜地由几十年种植历史的稻田改种而来,种植模式多以番茄-莴苣-芹菜轮作为主。太湖地区集约化菜地一年三季作物TN(以纯N计)投入达到900~1300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远远超出蔬菜作物的需求,造成土壤剖面 NO_3^- -N的过量累积,加之集约化菜地的分布区大多靠近河道水体,氮污染物进入水体的路径较短,由此引起的氮污染风险可能更为严重。由于不同作物在养分吸收利用上存在差异,通过合理配置轮作作物有利于控制集约化菜地土壤氮素淋失^[30]。

2.1.1 技术原理

金花菜及豆科植物主要分布于地处太湖地区的江浙沪一带,需肥量少且经济价值较高。豆科作物固氮能力强,种植豆科作物可培肥土壤、减少氮肥投入。

2.1.2 技术参数优化

以太湖地区的设施蔬菜试验点为研究平台,设置两种轮作制度:农民传统轮作模式(芹菜-番茄-莴苣)和优化轮作模式(金花菜-番茄-莴苣)。每种轮作模式下设置两种施氮处理:N1为农民习惯施氮处理,根据试验所在地农户的平均施氮水平确定,芹菜、金花菜、番茄、莴苣施氮量分别为620、190、370、490 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;N2为优化施氮处理,芹菜、金花菜、番茄、莴苣施氮量分别为500、150、280、420 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。淋洗液的收集与测定见陆扣萍等^[29]。

2.1.3 技术效果^[30]

周年三季作物收获后,无论是传统轮作模式还是优化轮作模式,习惯施氮处理(N1)下TN淋失量均显著高于优化施氮处理(N2),N2处理可分别减少传统轮作模式、优化轮作模式全年TN淋失量23.4%和19.3%(表3)。不同蔬菜生长期均以传统轮作下N1处理的TN淋失量达到最高,分别为38.1、42.3、52.4 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从时间上看,一年三季作物生长期TN淋失量表现为第三茬(秋季)>第二茬(春季)>第一茬(冬季),其中以莴苣季TN淋失量达到最高,分别占全年淋失量的39.5%、39.6%、46.9%和49.0%。与传统轮作模式相比,优化轮作模式可分别减少N1和N2处理下全

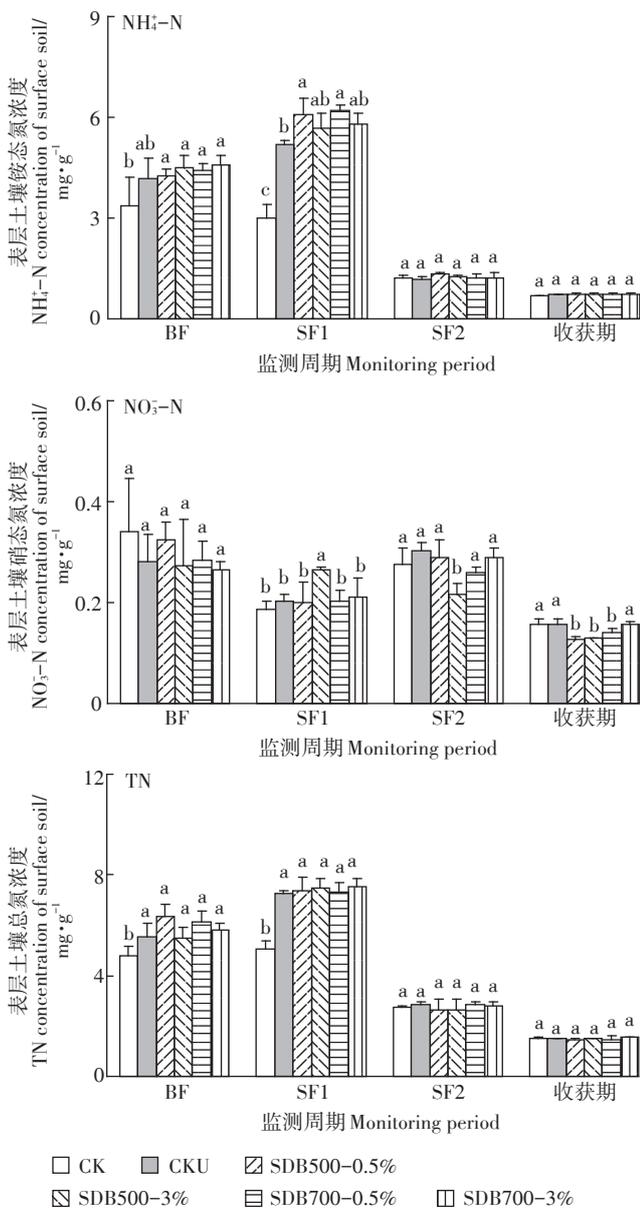


图2 生物炭施用对稻季不同生育期表层(0~15 cm)土壤中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N及TN浓度的影响

Figure 2 Effects of biochar application on the NH_4^+ -N, NO_3^- -N and TN concentrations of surface (0~15 cm) soil of rice growth season

表2 生物炭施用对稻季不同肥期及全生育期氨挥发累积损失量的影响

Table 2 Effects of biochar application on the NH₃ volatilization and yield-scale NH₃ losses from rice paddy soils

处理 Treatments	氨挥发损失 NH ₃ volatilization losses/kg N·hm ⁻²				单位产量NH ₃ 挥发损失量 Yield-scale NH ₃ volatilization losses/kg·t ⁻¹
	基肥期BF	蘖肥期SF1	穗肥期SF2	全生育期Total	
CK	1.40±0.67c	0.43±0.13c	0.62±0.17c	2.45±0.55(-)c	0.45±0.10c
CKU	4.07±0.30b	8.84±1.40ab	2.94±0.19a	15.85±1.28(5.58%)b	2.22±0.17b
SDB500-0.5%	7.92±0.82a	9.56±0.61ab	1.93±0.30b	19.41±0.55(7.07%)a	2.50±0.06ab
SDB500-3%	10.26±2.30a	9.03±0.21ab	2.33±0.58ab	21.63±2.99(7.99%)a	2.74±0.22a
SDB700-0.5%	8.90±1.48a	10.54±0.83a	2.00±0.50b	21.44±2.76(7.91%)a	2.65±0.35a
SDB700-3%	10.06±0.88a	8.38±1.40b	1.92±0.46b	20.36±1.84(7.46%)a	2.74±0.25a

注:表中同列不同小写字母代表不同处理间氨挥发量差异达显著水平($P<0.05$)。括号内数字代表稻季氨挥发量占施N量的比例。

Notes: The different letters in the same column indicate a significant difference ($P<0.05$) among the NH₃ volatilization load under different treatments. The data in bracket refer to the ratio of NH₃ volatilization losses to N input in rice growth season.

表3 不同轮作模式下各生长期总氮淋失量变化

Table 3 The total N leaching loss at the different vegetable growth season

轮作模式 Rotation pattern	处理 Treatments	全年 Total	TN淋失量 TN leaching amount/kg·hm ⁻²		
			芹菜/金花菜 Celery/Bur clover	番茄 Tomato	莴苣 Lettuce
传统 Traditional	N1	132.8±24.5a	38.1±6.5a	42.3±5.8a	52.4±5.9a
	N2	101.7±12.1b	29.5±4.5b	31.9±7.3b	40.3±3.5b
优化 Optimize	N1	78.1±12.6c	16.2±3.0c	25.3±7.6c	36.6±1.6c
	N2	63.0±14.3d	13.9±4.3d	18.2±4.9d	30.9±6.3d

注:芹菜/金花菜、番茄和莴苣生长期分别为:2009年11月24日—2010年3月30日,2010年4月15日—7月25日,2010年9月17日—12月20日。同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平。

Note: The growth periods of Celery/Bur clover, tomato and lettuce were from Nov. 24, 2009 to Mar. 30, 2010, Apr. 15 to Jul. 25, 2010 and Sept. 17 to Dec. 20, 2010. Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

年TN淋失量41%和38%。与减量施氮措施相比,改变轮作模式对TN淋失量的阻控效果更加显著。

与N1处理相比,N2处理可显著提高农民传统轮作模式下一年三季作物产量,增产幅度分别为10.4%、9.6%和3.6%;优化轮作模式下也表现出同样的增产趋势,三季作物可分别增产13.5%、3.2%和5.5%(表4)。从全年经济效益来看,在相同施氮处理下,优化轮作模式的经济效益显著高于传统轮作模式,其中以优化轮作模式+减量施氮处理最高,达 5.19×10^5 元·hm⁻²,与传统轮作模式+习惯施氮处理相比,可直接增加经济效益 1.17×10^5 元·hm⁻²,最大经济效益提高29%。

2.2 机械起垄侧条施肥技术

蔬菜产业高投入高产出的密集型生产特点,导致蔬菜生产过程中需要大量的肥料和劳动力投入。太湖地区菜地每季蔬菜作物N肥施用量为600~750 kg N·hm⁻²[31],周年施氮量高达1800~2250 kg N·hm⁻²,是该地区稻麦轮作体系500~600 kg N·hm⁻²下的3~4倍[32]。施入土壤中的化肥N仅10%~18%被蔬菜作物吸收利用,45%~50%流失进入环境,对环境造成严重

威胁[33]。有研究表明N肥起垄条施可提高肥料利用率,增加水稻、小麦、夏玉米、油菜等大田作物产量,减少氨挥发,且不同垄宽对作物产量也有显著影响[34-35]。N肥起垄条施管理措施在露天菜地化肥减施增效上应用潜力巨大,但对劳动力需求增多,与农村劳动力日益匮乏的现状相冲突。在日本等农业发达国家,农业机械化高度发展,而国内适用于蔬菜作物的机械化技术相对短缺。为发展资源节约、环境友好的现代农业,我国农业部提出推广机械深施等技术。然而,该技术在我国蔬菜生产体系应用的适地性、经济和环境效应如何尚不清楚。为此,以我国大面积栽培的蔬菜品种大白菜为供试蔬菜作物,通过连续两年的田间试验,研究机械起垄侧条施肥技术在太湖地区大白菜生产中合适的垄宽和该垄宽下对大白菜产量、经济效益和氨挥发的影响[36]。

2.2.1 技术原理

用侧条施肥机械将肥料一次集中施于作物根系一侧5~8 cm深处,使肥料呈条状集中而不分散,形成一个贮肥库逐渐释放供给作物生育需求。

2.2.2 技术参数优化[36]

表4 不同轮作模式下蔬菜产量和年经济效益
Table 4 Vegetable yields and economic benefit at the different growth season

轮作模式 Rotation pattern	处理 Treatments	产量 Yield/t·hm ⁻²			年经济效益 Economic benefit/×10 ⁵ 元·m ⁻²
		芹菜/金花菜 Celery/Bur clover	番茄 Tomato	莴苣 Lettuce	
传统 Traditional	N1	89.5±8.2b	67.9±7.1b	53.2±2.1b	4.02
	N2	98.8±2.1a	74.4±3.2a	55.1±2.8a	4.38
优化 Optimize	N1	63.5±1.7b	76.1±2.9a	52.7±1.8b	4.82
	N2	72.1±1.5a	78.5±4.4a	55.6±3.2a	5.19

注:芹菜 1.5 元·kg⁻¹,金花菜 3.0 元·kg⁻¹,番茄 1.6 元·kg⁻¹,莴苣 1.2 元·kg⁻¹。同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

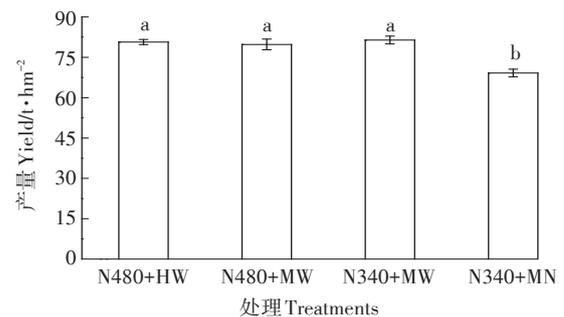
Note: Prices of celery, burclover, tomato and lettuce are 1.5, 3.0, 1.6 and 1.2 Yuan·kg⁻¹, respectively. Values followed by different letters in a column are significant differences among treatments at the 5% level.

2015 年田间试验设置 4 个处理:习惯施氮量下,人工起宽垄撒施处理(N480+HW);习惯施氮量下,机械起宽垄侧条施处理(N480+MW);减氮处理下,机械起宽垄侧条施处理(N340+MW);减氮处理下,机械起窄垄侧条施处理(N340+MN);其中,习惯施氮量和减氮处理的施氮量分别为 340 kg N·hm⁻²和 480 kg N·hm⁻²;宽垄和窄垄的垄宽设置分别为 55 cm 和 35 cm。2016 年田间试验设置了 4 个处理:不施化肥氮(N0+HW);习惯施氮处理(N480+HW);减氮处理(N340+HW)和机械起垄侧条施+减氮处理(N340+MW)。每个处理 3 次重复,随机区组排列。两年的基施氮肥均为复合肥(N-P₂O₅-K₂O 含量为 10%-10%-10%),各处理有机肥、磷和钾肥用量相同,起垄前按腐熟鸡粪(含 N 2.2%)120 kg N·hm⁻²、280 kg P₂O₅·hm⁻²(钙镁磷肥)和 280 kg K₂O·hm⁻²(硫酸钾)作基肥一次性施入,大白菜莲座期各小区人工追施 1 次尿素,用量为 200 kg N·hm⁻²。收获时大白菜每小区全部称重计产,采用 PVC 管双层海绵吸收-通气法测定土壤氨挥发^[44]。

2.2.3 技术效果^[36]

3 组 55 cm 宽垄处理(N480+HW、N480+MW 和 N340+MW)的产量都显著高于 35 cm 窄垄处理 N340+HW,同等施肥量条件下 55 cm 宽垄种植模式可以显著提高大白菜产量 15.4%(图 3)。与农户传统习惯施肥处理 N480+HW 相比,机械起垄侧条施肥处理 N340+MW 可以在减少 30% 化肥氮的基础上保证大白菜产量。综合以上结果可以初步判定机械起垄侧条施肥技术适用于太湖地区露天大白菜生产,55 cm 垄宽为当地最适生产参数。

与不施化肥氮对照处理相比,施用化肥氮处理的土壤氨挥发累积量显著增加 15.4~86.9 kg N·hm⁻²,农民传统施肥方式 N480+HW 处理,氨挥发损失量为 101.5 kg N·hm⁻²,占总施氮量的 16.9%。N340+HW 处理的氨挥发损失为 61.3 kg N·hm⁻²,比农民传统施肥



图中不同小写字母代表各处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。图 4 同
The different letters indicate a significant difference ($P < 0.05$) among treatments. The same as figure 4

图 3 不同处理下大白菜的产量

Figure 3 Yield of Chinese cabbage in different treatments

方式减少氨挥发损失 40.2 kg·hm⁻²,表明减少施肥量可显著降低太湖地区蔬菜体系的氨挥发损失。N340+MW 处理氨挥发较 N480+HW 和 N340+HW 处理分别降低了 70.5% 和 51.1%,表明机械起垄侧条施肥技术可显著降低太湖地区蔬菜体系的氨挥发损失(图 4)。

2.2.4 经济效益

在大规模种植条件下,与传统人工种植方式相比,机械起垄侧条施肥可显著降低生产成本(表 5),

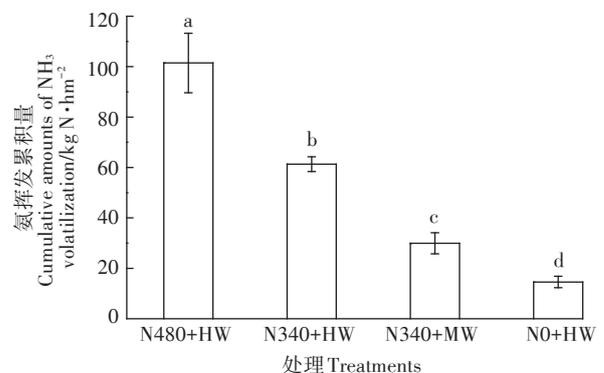


图 4 不同处理氨挥发

Figure 4 Ammonia volatilization in different treatments

表5 不同处理的经济效益比较

Table 5 Economic profit comparisons in different treatments

处理 Treatments	肥料费 Fertilizer cost/元·hm ⁻²	机械费 Machine cost/元·hm ⁻²	人工费 Labor cost/元·hm ⁻²	产值 Profit/元·hm ⁻²	纯利润 Net profit/元·hm ⁻²	增收 Profit increase
N480+HW	22 473	—	3600	45 627	19 554	—
N340+MW	18 879	2000		51 838	30 959	58.3%
N340+HW	18 879	—	3600	43 324	20 844	6.6%
N0+HW	10 153	—	3600	25 848	12 095	-38.1%

注:有机肥价格(含N 2.2%)0.6元·kg⁻¹,化肥价格(N-P₂O₅-K₂O=10%-10%-10%)4元·kg⁻¹,钙镁磷肥价格(P₂O₅=12%)1元·kg⁻¹,硫酸钾价格(K₂O=50%)4元·kg⁻¹;大白菜售价1.2元·kg⁻¹;人工费每天100元。

Note: Price of organic fertilizer (N 2.2%) is 0.6 yuan · kg⁻¹, price of chemical fertilizer (N-P₂O₅-K₂O=10% -10% -10%) is 4 yuan · kg⁻¹, Calcium Magnesium Phosphate Price (P₂O₅ = 12%) is 1 yuan · kg⁻¹, Potassium sulfate price (K₂O = 50%) is 4 yuan · kg⁻¹; cabbage price is 1.2 yuan · kg⁻¹; labor costs 100 yuan per day.

与农户传统施肥处理N480+HW相比,N340+MW处理减少30%化肥氮使用,每公顷减少肥料成本投入3594元,每公顷减少劳动力成本投入1600元。在降低生产成本的同时,N340+MW处理获得最大商品产量,产值最高。与传统种植方式N480+HW相比,机械起垄侧条施肥N340+MW处理纯利润增加58.3%,实现了太湖地区露天大白菜生产体系的氮肥减施减排增效。

参考文献:

- 黄俊雄,徐宗学.太湖流域1954—2006年气候变化及其演变趋势[J].长江流域资源与环境,2009,18(1):33-40.
HUANG Jun-xiong, XU Zong-xue. Spatial-temporal characteristics of long-term trends for climate change in the Taihu basin during 1954 to 2006[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(1):33-40.
- 查慧铭,朱梦圆,朱广伟,等.太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析[J].环境科学,2018,39(3):1102-1112.
ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, et al. Seasonal difference in water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1102 - 1112.
- 中华人民共和国环境保护部.第一次全国污染源普查公报[M].北京:中华人民共和国国家统计局,2010.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. First national survey of pollution sources[M]. Beijing: National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, 2010.
- 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——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.
- 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 and Environment*, 2012, 156:1-11.
- 闵 炬,陆扣萍,陆玉芳,等.太湖地区大棚菜地土壤养分与地下水水质调查[J].土壤,2012,44(2):213-217.
MIN Ju, LU Kou-ping, LU Yu-fang, et al. Investigation of soil fertility and quality of ground water in greenhouse vegetable fields of Tai Lake region[J]. *Soils*, 2012, 44(2):213-217.
- 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.
ZHU Zhao-liang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):778-783.
- 乔 俊,颜廷梅,薛 峰,等.太湖地区稻田不同轮作制度下的氮肥减量研究[J].中国生态农业学报,2011,19(1):24-31.
QIAO Jun, YAN Ting-mei, XUE Feng, et al. Reduction of nitrogen fertilizer application under different crop rotation systems in paddy fields of Taihu area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1):24-31.
- Zhu J H, Li X L, Christie P, et al. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 112/3/4:70-80.
- Min J, Zhang H L, Shi W M. Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 111:53-59.
- 谢文明,于 飞,冯晓宇,等.太湖流域农村地区典型村镇土壤养分和水体污染现状调查[J].土壤,2014,46(4):613-617.
XIE Wen-ming, YU Fei, FENG Xiao-yu, et al. Investigation status of soil fertility and water pollution in representative villages of Taihu Lake watershed rural area[J]. *Soils*, 2014, 46(4):613-617.
- 薛利红,杨林章,施卫明,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——源头减量技术[J].农业环境科学学报,2013,31(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, 31(5):881-888.
- 施卫明,薛利红,王建国,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——生态拦截技术[J].农业环境科学学报,2013,32(9):1697-1704.
SHI Wei-ming, XUE Li-hong, WANG Jian-guo, et al. A reduce-retain-reuse-restore technology for controlling rural non-point pollution in China: Eco-retain technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9):1697-1704.
- 杨林章,薛利红,施卫明,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工

- 程实践——案例分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 2309-2315.
- YANG Lin-zhang, XUE Li-hong, SHI Wei-ming, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: A case study[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 2309-2315.
- [15] 刘福兴, 宋祥甫, 邹国燕, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——水环境生态修复技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2105-2111.
- LIU Fu-xing, SONG Xiang-fu, ZOU Guo-yan, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: Eco-restoration technology [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2105-2111.
- [16] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 117-127.
- [17] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *PNAS*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [18] 陈 贵, 陈 莹, 施卫明. 太湖地区主栽高产水稻的氮素利用特性 [J]. 江苏农业学报, 2013, 29(5): 928-937.
- CHEN Gui, CHEN Ying, SHI Wei-ming. Nitrogen use efficiency in major rice cultivars with high yield in Taihu Lake region[J]. *Jiangsu Journal of Agriculture Science*, 2013, 29(5): 928-937.
- [19] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 等. 不同基因型水稻利用效率的差异及评价[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 267-273.
- ZHANG Ya-li, FAN Jian-bo, DUAN Ying-hua, et al. Variation of nitrogen use efficiency of rice different in genotype and its evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 267-273.
- [20] 崔世友, 缪亚梅, 史传怀, 等. 氮高效水稻育种研究及展望[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(6): 47-51.
- CUI Shi-you, MIAO Ya-mei, SHI Chuan-huai, et al. Research and prospects of breeding for nitrogen efficiency in rice[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2006, 8(6): 47-51.
- [21] Shi W M, Xu W F, Li S M, et al. Responses of two rice cultivars differing in seedling-stage nitrogen use efficiency to growth under low-nitrogen condition[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326: 291-302.
- [22] 陈 贵, 陈 莹, 施卫明. 氮肥对水稻不同生长期土壤不同深度氮素渗漏的影响[J]. 土壤, 2013, 45(5): 809-814.
- CHEN Gui, CHEN Ying, SHI Wei-ming. Effect of fertilizer N on N leaching at different soil depths during growth periods of rice[J]. *Soils*, 2013, 45(5): 809-814.
- [23] Chen G, Chen Y, Zhao G H, et al. Do high nitrogen use efficiency rice cultivars reduce nitrogen losses from paddy fields? [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209: 26-33.
- [24] 孙海军, 闵 炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1027-1033.
- SUN Hai-jun, MIN Ju, SHI Wei-ming, et al. Effects of nitrification inhibitor on rice production and ammonia volatilization in paddy rice field[J]. *Soils*, 2015, 47(6): 1027-1033.
- [25] 冯彦房, 薛利红, 杨 帆, 等. 载钼生物炭的优化制备及其对水体中砷的吸附[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2433-2441.
- FENG Yan-fang, XUE Li-hong, YANG Bei, et al. Optimized preparation of lanthanum uploaded biochar and its application in adsorbing pentavalent arsenic ions[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(8): 2433-2441.
- [26] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [27] 李飞跃, 谢 越, 石 磊, 等. 稻壳生物质炭对水中氨氮的吸附[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3): 1221-1226.
- LI Fei-yue, XIE Yue, SHI Lei, et al. Adsorption of ammonia nitrogen in wastewater using rice husks derived biochar[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(3): 1221-1226.
- [28] 李卓瑞, 韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 333-338.
- LI Zhuo-rui, WEI Gao-ling. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2): 333-338.
- [29] 陆扣萍, 闵 炬, 施卫明, 等. 不同轮作模式对太湖地区大栅菜地土壤氮淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 689-697.
- LU Kou-ping, MIN Ju, SHI Wei-ming, et al. Effect of rotation patterns on nitrogen leaching loss from protected vegetable soil in Tai Lake region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 689-697.
- [30] Feng Y F, Sun H J, Xue L H, et al. Sawdust biochar application to rice paddy field: Reduced nitrogen loss in floodwater accompanied with increased NH₃ volatilization[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 8388-8395.
- [31] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83(1): 73-84
- [32] Xing G X, Shi S L, Shen G Y, et al. Nitrous oxide emissions from paddy soil in three rice-based cropping systems in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64(1/2): 135-143
- [33] Min J, Zhao X, Shi W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in Southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 464-472.
- [34] 温 樱, 王 东. 底肥分层条施提高冬小麦干物质积累及产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1387-1393.
- WEN Ying, WANG Dong. Basal fertilization in strips at different soil depths to increase dry matter accumulation and yield of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1387-1393.
- [35] 张岳芳, 周 炜, 王子臣, 等. 氮肥施用方式对油菜生长季氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1690-1696.
- ZHANG Yue-fang, ZHOU Wei, WANG Zi-cheng, et al. Effects of nitrogen fertilizer application modes on nitrous oxide emissions during growing season of oilseed rape (*Brassica napus*) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1690-1696
- [36] 姜振萃. 太湖地区菜地机械施肥和有机替代技术应用及环境效应评价[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- JIANG Zhen-cui. Application of mechanical fertilization and organic alternative technology and evaluation of its environmental effect in vegetable fields in Taihu Lake region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2018.