

不同施肥模式对菜地氮素径流损失与表观平衡的影响

郭智, 刘红江, 张岳芳, 郑建初, 陈留根

(江苏省农业科学院循环农业研究中心, 南京 210014)

摘要: 采用田间小区定位试验(2014—2015 年)研究了自然降雨条件下农户习惯性施肥、减量施肥及减量施肥配施生物炭等不同施肥模式对太湖流域蔬菜地氮素径流流失、蔬菜产量及氮素表观平衡的影响。结果表明:甘蓝种植季内菜地径流水量达 $1\,729.20\text{ m}^3/\text{hm}^2$, 且与降雨量呈显著线性正相关关系。农户习惯性施肥(T1)处理条件下,菜地 TN 径流流失量达 $47.66\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。减量施肥(T2)和减量施肥配施生物炭(T3)处理显著减少了氮素径流流失量,分别达 13.95% 和 23.68%。与 T2 相比,配施生物炭(T3)可显著降低菜地氮素径流流失量达 11.31%。菜地径流氮素以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 损失为主,各处理条件下,其流失量占 TN 的比例达 81.11%~85.94%。菜地氮素平衡盈余量达 $158.24\text{ kg}/\text{hm}^2$, 且随着氮素输入量的减少,氮素盈余量显著降低。T2、T3 处理条件下,盈余量显著降低 29.03%~39.81%。同时,T2、T3 处理显著降低甘蓝叶球产量达 16.12%~19.11%, 而球形指数则显著增加 6.17%~7.41%, 氮素偏生产力也显著提高 24.39%~28.98%。与 T2 相比,配施生物炭(T3)处理可小幅提高甘蓝产量及氮肥偏生产力,但处理间差异不显著。

关键词: 蔬菜地; 氮; 地表径流; 氮素表观平衡

中图分类号: S157.1; S635.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0037-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.007

Effects of Different Fertilization Modes on Nitrogen Loss by Surface Runoff and the Apparent Nitrogen Balance in the Vegetable Fields of Taihu Lake Region, China

GUO Zhi, LIU Hongjiang, ZHANG Yuefang, ZHENG Jianchu, CHEN Liugen

(Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014)

Abstract: Under natural rainfall conditions, a field plot experiment (2014—2015) was conducted to study the effects of different fertilization modes (i. e. conventional fertiliser application, T1; reduced fertiliser application, T2; optimized fertiliser application, reduced fertiliser application and wheat straw biochar application, T3) on nitrogen (N) loss by surface runoff, the apparent N balance, and vegetable yield in the vegetable field of cabbage (*Brassica Oleracea* L.) in Taihu Lake Basin, China. The results showed that total volume of surface runoff reached up to $1\,729.20\text{ m}^3/\text{hm}^2$ during the vegetable growing season, which showed a significant positive linear correlation with rainfall capacity. In T1 treatment, total nitrogen (TN) loss by surface runoff reached up to $47.66\text{ kg}/\text{hm}^2$ during the vegetable growing season. Compared with T1, T2 and T3 significantly reduced TN losses by 13.95% and 23.68%, respectively. Compared with T2, TN loss decreased significantly by 11.31%, after application of wheat straw biochar (T3). The lost N was mainly nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), which accounted for 81.11%~85.94% of TN loss. Meanwhile, N surplus amount in the vegetable field of cabbage reached up to $158.24\text{ kg}/\text{hm}^2$ under T1 treatment. With decreasing N application in the vegetable field, N surplus significantly decreased. Compared with T1, N surplus decreased significantly by 29.03%~39.81%. Furthermore, T2, T3 significantly reduced cabbage head yield by 16.12%~19.11%, but the sphericity index increased significantly by 6.17%~7.41%, and the partial factor productivity of nitrogen (PFPN) for cabbage head increased significantly by 24.39%~28.98%. And, compared with T2 treatment, after application of wheat straw biochar (T3) in the vegetable field, cabbage head yield and PFPN increased slightly, but no significant difference was found.

Keywords: vegetable field; nitrogen (N); surface runoff; apparent N balance

收稿日期: 2018-02-24

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300206)

第一作者: 郭智(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事农业生态与资源利用研究。E-mail: Guozhi703@163.com

通信作者: 陈留根(1962—), 男, 硕士研究生, 主要从事耕作制度与农业生态研究。E-mail: chenliugen@sina.com

蔬菜地是太湖流域重要的土地利用方式之一^[1]。近年来,随着农业产业政策的大力支持和经济效益的不断提升,蔬菜种植面积持续扩大^[1]。据统计,2013年江苏省蔬菜种植面积约 1.36×10^6 hm²,占耕地面积比重约28.95%,其中,露地蔬菜种植面积约占蔬菜种植面积的56.52%^[2-3]。在蔬菜生产过程中,菜农往往施用过量化肥以追求更高蔬菜产量和经济效益^[4-5],不仅造成养分资源的极大浪费,而且肥料持续过量施用会导致农田土壤养分盈余和负荷增加^[6-7],进而势必增加土壤养分通过地表径流向地表水体排放的潜在风险。众所周知,氮和磷含量过高是导致水体富营养化的主要原因之一,而农田氮和磷流失是重要的面源污染源^[8]。据估计,农业面源排放氮、磷素对太湖水体的贡献率分别达37.5%和15.1%,其中农田流失量对面源污染贡献率分别约60%和20%^[9]。相关研究^[10]表明,太湖流域蔬菜、果树及花卉等经济作物农田(约占总面积的15%~35%)对该流域水体富营养化的贡献率与占农田总面积70%的稻麦等大田作物基本相当。可见,该流域中单位面积经济作物农田养分径流流失量远高于稻麦等大田作物。基于此,系统研究蔬菜地等土地利用方式下农田养分流失特征及其减排技术对于太湖流域水体生态环境健康和可持续发展具有重要意义。现有的研究大多针对肥料施用量或种植年限对蔬菜产量与养分吸收利用^[11-12]、菜地养分流失特征^[13]及菜地土壤养分累积^[14]等开展相关研究。然而,从蔬菜地养分减排等环境效应与蔬菜产量等农学效应协调统一的角度出发,系统研究农户习惯性施肥、减量施肥及生物炭配施等不同施肥模式对蔬菜产量、养分吸收利用、蔬菜地养分损失及养分表观平衡影响的研究报道较少。因此,本研究以太湖流域蔬菜地为研究对象,通过田间小区定位试验研究自然降雨条件下不同施肥模式对蔬菜产量、菜地氮素径流损失及氮素表观平衡的影响,以期以太湖流域农业面源污染源头控制技术体系提供一定的科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

本试验地设在江苏省南京市溧水县白马镇江苏省农业科学院植物科学基地(31°36'N,119°11'E),位于南京市溧水区东南部,属北亚热带向中亚热带的过渡区,年均气温15.5℃,年日照时间2 145.8 h,年降水量1 036.9 mm,年无霜期237 d。试验时间为2014年10月至2015年5月的蔬菜生长季。试验田土壤属黄棕壤,其基本理化性状为:pH(土:水比为1:5)6.21±0.05,有机质含量(16.62±3.15)g/kg,全N含量(0.87±0.01)g/kg,全P含量(0.24±0.01)g/kg,速效氮含量(35.16±1.58)mg/kg,速效磷含量(11.84±2.23)mg/kg,速效钾含量

(89.23±3.84)mg/kg。

为了防止小区间发生水分和养分的交换,采用水泥田埂将试验小区相互隔开,9个试验小区(7.5 m×4.0 m,长×宽)并排排列,且每个小区都设有单独的径流池。径流池的规格为4.0 m×1.0 m×1.0 m(长×宽×高)。径流池进水口高度与小区沟渠底面保持一致。同时,每个径流池配有彩钢盖板以防止雨水和杂物进入。

1.2 试验处理

根据当地农户蔬菜种植施肥水平与田间管理情况,设置3种施肥模式处理,具体为:

(1)农户习惯性施肥(T1):每个试验小区施用猪粪有机肥和复合肥(N,15%;P₂O₅,15%;K₂O,15%)作为基肥分别施入 1.50×10^4 ,750 kg/hm²,基施。另外,表施尿素(N,46.0%)300 kg/hm²作为追肥。

(2)减量施肥(T2):每个试验小区施用猪粪有机肥和复合肥(N,15%;P₂O₅,15%;K₂O,15%)作为基肥分别施入 1.13×10^4 ,525 kg/hm²,基施。另外,表施尿素(N,46.0%)150 kg/hm²作为追肥。

(3)减量施肥+生物炭施用(T3):每个试验小区施用猪粪有机肥和复合肥(N,15%;P₂O₅,15%;K₂O,15%)作为基肥分别施入 1.13×10^4 ,525 kg/hm²,配施麦秸生物炭 2.25×10^3 kg/hm²,基施。另外,表施尿素(N,46.0%)150 kg/hm²作为追肥。

蔬菜品种为中熟平头型春甘蓝“春眠”,2014年10月10日播种育苗,11月23日移栽,栽种规格为40 cm×30 cm,每穴1株。参照大田常规管理方式,蔬菜种植前翻土整地,所有处理均采用人工翻耕整平,耕翻层20 cm,每个小区各开两条排水沟渠(宽约20 cm,深约15 cm),种植后进行浇水、护育。采用江苏省农业科学院六合动物科学基地生产的猪粪有机肥,有机肥养分含量(干基)分别为TN(1.34%)、TP(1.21%)和K(1.96%);采用河南三利新能源公司生产的生物炭,其基本理化性状为:pH 9.18,全氮(N)0.50%,全磷(P₂O₅)0.06%,全钾(K₂O)2.60%,有机碳46.70%。基肥和追肥分别于2014年11月20日和2015年3月10日施入,基肥结合耕作整地施入,追肥表施。每个处理重复3次,共9个试验小区,随机排列。

1.3 测定指标与方法

(1)供试土壤(0—20 cm)。pH采用PHS-3C型pH计测定^[15];全N、全P、速效N、速效P和速效K及有机质含量等参照文献^[16]的方法测定。

(2)径流样品。降雨期间记录降雨量及菜地排水量,并采样。每次采集径流水样时,先测量径流水深,用以计算径流量。然后将径流池内的水搅拌均匀,每个径流池至少采集径流水样500 mL,带回实验室利用全自动流动分析仪(SKALAR San⁺⁺)及时测定

雨水和径流水中总氮(TN)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)及铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量。样品采集后排干径流水,并将径流池清洗干净,以备下一次径流收集和计量。

地表径流氮素流失总量(Q)计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i \times 10^{-3}$$

式中:Q为不同处理条件下蔬菜地地表径流氮素流失总量(kg/hm^2); C_i 为每次径流过程中径流水氮素浓度(mg/L); V_i 为每次径流过程中径流水体积(m^3/hm^2)。

(3)蔬菜产量及农艺性状。蔬菜收获时记载各处理小区经济产量和废弃物产量,主要包括甘蓝叶球数量、单球重、叶球高度和横径、叶球和废弃甘蓝叶片含水率等,同时多点混合采集植株样品。球形指数、叶球紧实度及收获指数等参照相关文献[17],计算公式为:

球形指数 = 叶球高度/叶球宽度

叶球紧实度 = 叶球重/[1/2(叶球高度+叶球宽度)]

收获指数(%) = 叶球产量/(叶球产量+废弃物产量)×100%

(4)植株氮素含量与氮素吸收。测产时采集植株样品经杀青、烘干至恒重后粉碎研磨,经 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消解后,采用全自动流动分析仪(SKALAR San⁺⁺)测定甘蓝经济产量部分和废弃物部分全氮(TN)含量。同时,植株氮素吸收量、氮素偏生产力等指标参照相关文献进行修正,计算公式为:

氮素累积吸收量(kg/hm^2) = 经济产量部分(kg/hm^2)×氮素含量(%) + 废弃物部分(kg/hm^2)×氮素含量(%)

氮素偏生产力(kg/kg) = 叶球产量(kg/hm^2)/氮素量(kg/hm^2)×100%^[18]

(5)氮素表观平衡计算。菜地氮素平衡等指标计算公式参照相关文献进行修正,分别为:

菜地氮素平衡盈余量(kg/hm^2) = 氮素收入(kg/hm^2) - 氮素支出(kg/hm^2)^[19]

菜地氮素平衡盈余率(%) = [氮素收入(kg/hm^2) - 氮素支出(kg/hm^2)]/氮素支出(kg/hm^2)×100%^[19]

蔬菜—土壤系统氮素来源主要包括肥料施用、灌溉水输入、大气干湿沉降输入等,肥料施用是菜地土壤氮素的主要来源^[20]。

本试验中,菜地氮素收入项主要包括肥料投入(包括有机肥和化学肥料)、降雨及生物炭施用3项,支出项主要包括作物移出(包括经济产量和废弃物部分)和地表径流两项,未考虑氨挥发和淋溶损失等支出项。

1.4 数据分析

采用Excel 2010和SPSS 13.0软件进行数据处理,文中所列数据均为3次重复平均值,各处理的比较采用最小显著差数(LSD)法,凡超过LSD_{0.05}(或LSD_{0.01})水平的视为显著(或极显著)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对蔬菜产量及其他农艺性状的影响

由表1可知,较农户习惯性施肥(T1),减量施肥(T2)和减量施肥配施生物炭(T3)处理显著降低甘蓝叶球产量达19.11%和16.12%,而单球重的显著降低是其主要原因。

表1 不同施肥模式对蔬菜产量及其构成因素的影响

处理	产量构成		蔬菜产量/ ($10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ FW)	含水量/%	蔬菜干物重/ ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ DW)
	叶球数量/ (10^4 个· hm^{-2})	单球重/ (kg FW)			
T1	8.33±0.00a	1.56±0.02a	13.03±0.18a	92.63±0.13a	9.60±0.13a
T2	8.33±0.00a	1.26±0.02b	10.54±0.14b	92.11±0.23a	8.32±0.11b
T3	8.33±0.00a	1.31±0.02b	10.93±0.18b	92.23±0.29a	8.50±0.14b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

由表2可知,T2和T3处理对甘蓝叶球其他农艺形状也有显著影响,较T1处理而言,T2、T3显著降低叶球宽度和叶球紧实度分别达8.85%~9.06%和

10.87%~13.07%,叶球高度稍降2.16%~4.26%,而叶球形指数则显著增加6.17%~7.41%。同时,叶球收获指数稍降2.09%~3.84%,但处理间差异不显著。

表2 不同施肥模式对蔬菜其他农艺性状的影响

处理	叶球高度/cm	叶球宽度/cm	球形指数	叶球紧实度	收获指数
T1	15.27±0.14a	18.76±0.08a	0.81±0.01b	91.83±1.07a	59.90±0.58a
T2	14.62±0.09a	17.06±0.33b	0.86±0.01a	79.83±2.08b	57.60±1.76a
T3	14.94±0.29a	17.10±0.34b	0.87±0.01a	81.85±1.87b	58.65±1.64a

与T2处理相比,配施生物炭(T3)虽然增加甘蓝单球重、蔬菜产量、叶球高度、叶球宽度、球形指数、叶球紧实度及收获指数等分别达3.97%、3.70%、2.19%、0.23%、1.16%、2.53%和1.82%(表1、表2),但处

理间差异均不显著。

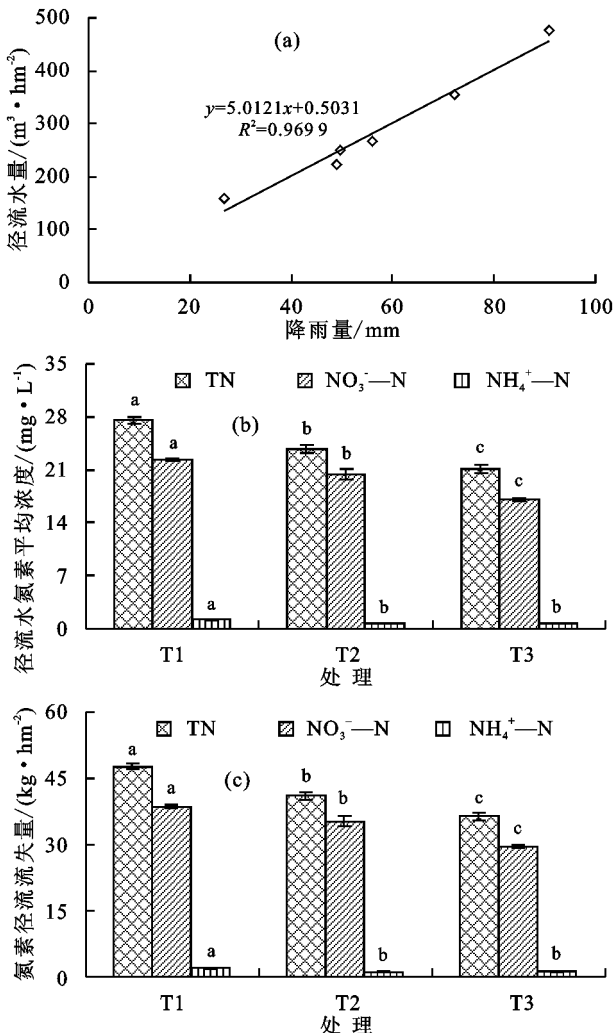
2.2 不同施肥模式对菜地氮素径流流失的影响

降雨是导致农田养分径流流失的主要原因,而径流量是其主要构成因素之一。2014—2015年蔬菜季监

测期间,共发生 6 次径流事件,分别对应 6 次降雨过程,分别于 2014 年 11 月 25 日、2014 年 12 月 1 日、2015 年 2 月 28 日、2015 年 3 月 20 日、2015 年 4 月 7 日和 2015 年 5 月 17 日取样,菜地径流水总量达 $1\,729.20\text{ m}^3/\text{hm}^2$,且各处理间水量基本保持一致。

同时,通过对菜地径流量(Y)和当地降雨量(x)进行相关性分析发现,二者呈显著线性正相关关系(图 1a),其相关方程为 $Y=5.0121x+0.5031(R^2=0.9699)$ 。

由图 1b 可知,农户习惯性施肥($T1$)处理条件下,菜地径流总氮(TN)、硝态氮(NO_3^--N)和铵态氮(NH_4^+-N)平均浓度分别达 $27.56, 22.36, 1.16\text{ mg/L}$ 。减量施肥($T2$)和减量施肥配施生物炭($T3$)处理显著降低径流氮素浓度,降幅分别达 $13.95\% \sim 23.68\%$, $8.82\% \sim 23.51\%$ 和 $41.42\% \sim 42.74\%$ 。同时,与 $T2$ 相比,配施生物炭($T3$)可显著降低菜地径流水 TN 和 NO_3^--N 平均浓度分别达 11.31% 和 16.12% 。



注:图中同一指标不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同施肥模式对菜地氮素径流流失的影响

由图 1c 可以看出,农户习惯性施肥($T1$)处理条件下,菜地氮素(TN)径流流失量达 $47.66\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

减量施肥($T2$)和减量施肥配施生物炭($T3$)处理显著减少氮素径流流失量分别达 13.95% 和 23.68% 。与 $T2$ 相比,配施生物炭($T3$)可显著降低菜地氮素径流流失量达 11.31% 。因此,菜地径流氮素以 NO_3^--N 损失为主,各处理条件下,其流失量占 TN 的比例高达 $81.11\% \sim 85.94\%$ 。

2.3 不同施肥模式对蔬菜氮素吸收的影响

由图 2a 可知,各处理条件下,甘蓝叶球氮素吸收量略低于废弃叶片氮素吸收量。减量施肥($T2$)和减量施肥配施生物炭($T3$)处理对甘蓝叶球及废弃叶片氮素吸收具有显著影响。较 $T1$ 处理而言, $T2, T3$ 显著降低叶球氮素吸收量达 $26.51\% \sim 30.26\%$,降低废弃叶片氮素吸收量达 $38.30\% \sim 40.41\%$ 。同时, $T2, T3$ 处理条件下,甘蓝叶球和废弃叶片氮素吸收量均基本相当,处理间无显著差异。氮素吸收量差异主要归因于各处理条件下甘蓝干物质质量的显著差异(表 1)。通过对甘蓝叶球和废弃叶片氮素吸收量(Y)及其各部分干物质质量(x)进行相关性分析发现,二者呈显著线性正相关关系,其相关方程为 $Y=0.0289x-171.26(R^2=0.7317)$ 。

由图 2b 可知,农户习惯性施肥($T1$)处理条件下,甘蓝氮素偏生产力达 $322.68\text{ kg}/\text{kg}$ 。减量施肥($T2$)和减量施肥配施生物炭($T3$)处理可显著提高甘蓝氮素偏生产力达 24.39% 和 28.98% 。同时,较 $T2$ 处理而言,增施生物炭($T3$)处理可小幅提高甘蓝氮肥偏生产力(3.69%),但处理间差异不显著。

2.4 不同施肥模式对菜地氮素表观平衡的影响

菜地氮素收入项主要包括肥料投入、降水及生物炭施入 3 项。其中,肥料施用是氮素收入的主要来源。 $T1 \sim T3$ 处理条件下,肥料施用带入氮素占菜地氮素收入的 $92.01\% \sim 97.22\%$ (表 3、表 4)。本试验中,由自然降水带入菜地氮素量达 $11.56\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。因此,该收入项也应引起足够重视。菜地氮素支出项主要包括植物吸收和地表径流两项。其中,地表径流是与农田周边水环境质量密切相关的氮素支出项。 $T1 \sim T3$ 处理条件下,地表径流氮素输出量占菜地氮素输出量的 $18.55\% \sim 22.92\%$ (表 4)。

通过对蔬菜地生态系统氮素输入、输出等过程及其循环利用规律进行系统分析,明确蔬菜地中氮素来源和去向并对其进行定量化,对于维持和提高蔬菜地生态系统生产力,提高氮肥资源利用效率具有重要意义^[21]。由表 4 可知,菜地氮素大量盈余,农户习惯性施肥($T1$)处理条件下,菜地氮素平衡盈余量达 $158.24\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。同时,随着氮素输入量的减少,氮素盈余量显著降低。减量施肥($T2$)和减量施肥且配施生物炭($T3$)处理条件下,菜地氮素平衡盈余量达 $95.25 \sim 112.30\text{ kg}/$

hm²,较 T1 处理显著降低 39.81%和 29.03%($p<0.05$)。从菜地氮素平衡盈余率的角度分析,T2 处理条件下,氮素盈余率较 T1 处理显著降低 13.58%,主要是由于氮素

输入量的显著降低所致。然而,T3 处理条件下,氮素盈余率较 T1 处理则稍增 5.31%,主要是由于氮素输入量与输出量同步显著降低相互作用所致。

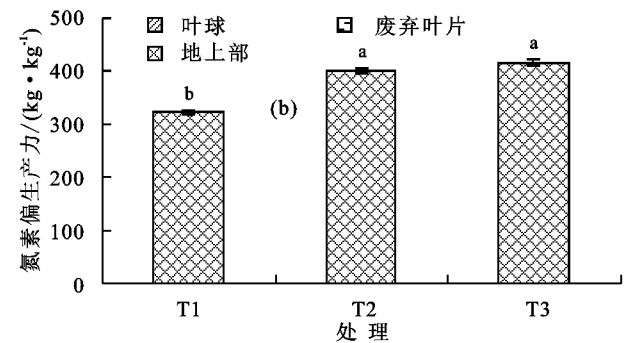
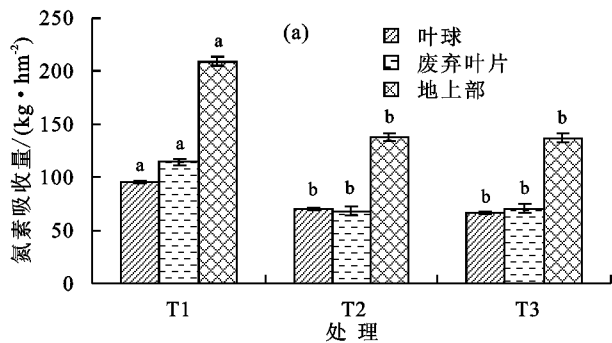


图2 不同施肥模式对蔬菜氮素吸收与氮素偏生产力的影响

表3 菜地氮素收入项与输入量

处理	肥料施用						自然降水			生物炭施用		
	有机肥			化学肥料	肥料		降雨量/ mm	氮含量/ (mg·L ⁻¹)	降水氮输入/ (kg·hm ⁻²)	施入量/ (kg·hm ⁻²)	氮含量/ %	氮输入/ (kg·hm ⁻²)
	施入量/ (kg·hm ⁻²)	含水量/ %	氮含量/ %	氮输入/ (kg·hm ⁻²)	氮输入/ (kg·hm ⁻²)	氮输入/ (kg·hm ⁻²)						
T1	1.50×10 ⁴	23.8	1.34	153.15	250.50	403.65	550.4	2.10	11.56	—	—	—
T2	1.13×10 ⁴	23.8	1.34	114.90	147.75	262.65	550.4	2.10	11.56	—	—	—
T3	1.13×10 ⁴	23.8	1.34	114.90	147.75	262.65	550.4	2.10	11.56	2.25×10 ³	0.5	11.25

表4 菜地氮素表观平衡

处理	氮输入/(kg·hm ⁻²)			氮输出/(kg·hm ⁻²)		氮素平衡盈余量/ (kg·hm ⁻²)	氮素平衡 盈余率/%
	肥料	降水	生物炭	植物吸收	地表径流		
T1	403.65	11.56	—	209.31	47.66	+158.24	61.58
T2	262.65	11.56	—	137.94	41.02	+95.25	53.22
T3	262.65	11.56	11.25	136.78	36.38	+112.30	64.85

3 讨论

菜地长期处于肥料投入量超出蔬菜实际需求量的状态是导致菜地表层土壤养分富集与盈余量增加的主要原因^[22]。冀宏杰等^[23]对太湖流域农田养分投入与平衡状况进行详细调查发现,太湖流域现有蔬菜种植模式中,大多数种植模式下菜地氮素盈余超过 200 kg/hm²,部分模式甚至超过 1 000 kg/hm²。本研究通过差值法对不同施肥模式下菜地氮素平衡状况进行了初步分析,发现菜地氮素单季平衡盈余量达 158.24 kg/hm²,表面上看盈余量较小,但是其占氮素投入量的比例高达 38.11%,平衡盈余率也高达 61.58%。据相关研究^[24]报道,农田氮素平衡盈余超过 20%以上时,即可能引起氮素对环境的潜在威胁,且这种环境风险可能会随种植年限的延长而急剧增加。同时,通过氮素投入量与菜地氮素盈余量进行相关性分析发现,菜地氮素投入量与平衡盈余量间呈显著正相关关系($R^2=0.9633$)。

菜地土壤养分盈余量的增加势必增加其通过地表径流等途径向农田周边水体排放的潜在风险,主要表现在氮素流失浓度和流失绝对量两个方面。本研究发现,

蔬菜生育期内,菜地土壤氮素径流流失浓度高达 27.56 mg/L,极显著高于我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中规定的V类水标准限值(2 mg/L)。然而,径流水在向地表水体输移过程中,经过排水沟渠中水生植物、微生物和底泥等共同作用而发生的矿化、硝化—反硝化、植物吸收和底泥吸附等系列理化反应,氮素浓度会极显著降低^[25],进而降低其环境风险。然而,径流排水输移过程中养分阻控/降解作用、效果及机制尚需进一步深入研究。从菜地流失量角度考量,王春梅等^[13]报道太湖流域菜地氮素径流流失量达 45.76~60.45 kg/hm²。本研究也发现,农户习惯性施肥(T1)条件下,菜地氮素径流流失量高达 47.66 kg/hm²,与课题组前期研究报道^[26]中流失量基本相当(38.55~71.79 kg/hm²)。可见,太湖流域菜地氮素径流流失量较大,其排放负荷显著高于该流域稻麦轮作农田(34.1 kg/hm²)^[27]。考虑到菜地养分流失对周边水体环境的负面影响,应加强径流养分的实时监控、过程拦截及原位减排技术的配套研究。

减量施肥作为一项有效的农田养分原位减排技术,目前已被广泛应用于生产实践中^[27-28],且取得了

显著成效。于红梅等^[11]通过比较优化水氮管理和传统水氮管理两种生产模式下氮素损失、蔬菜产量及氮素利用效率,研究发现虽然两种模式下蔬菜产量无显著差异,但优化水氮管理模式可显著降低氮素损失(82%~91%),并提高蔬菜氮素利用效率(1.7~3.2倍)。然而,本研究中,减量施肥条件下菜地氮素径流损失和菜地氮素平衡盈余量均极显著下降,但蔬菜经济产量也相应下降,可能与菜地土壤养分背景、种植年限及蔬菜种类等有关。但是,减量施肥却显著提高蔬菜叶球氮素偏生产力(24.39%~28.98%),且球形指数也显著增加 6.17%~7.41%,表明蔬菜商品性状显著改善。同时,生物炭的农田施用具有提高作物产量^[29]、改善土壤理化性状^[30]、农田养分减排^[31]等积极效应,但较多研究中田间应用大量生物炭^[32],可能对农田养分利用及生态环境造成潜在的负面效应^[32-34]。本研究在减量施肥基础上,配施有机肥用量 20%的生物炭可显著降低菜地氮素径流流失量达 11.31%,且可小幅提高甘蓝产量及氮肥偏生产力,但处理间差异不显著,说明蔬菜生产过程中在减量施肥基础上适量配施生物炭具有良好的经济效应和环境效应。同时,本研究中这种配施方式的长期效应(产量效应、环境效应)尚需定位试验进一步深入系统研究。

4 结论

(1)本研究区蔬菜地径流水量可达 1 729.20 m³/hm²,且与降雨量呈显著线性正相关关系。径流总氮浓度高达 27.56 mg/L,远超我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅴ类水标准限值(2 mg/L)。菜地氮素径流流失量高达 47.66 kg/hm²。减量施肥和减量施肥配施生物炭处理显著减少氮素径流流失量分别达 13.95%和 23.68%。菜地径流氮素以硝态氮损失为主,其流失量占 TN 的比例达 81.11%~85.94%。

(2)菜地氮素平衡盈余量达 158.24 kg/hm²,且随着氮素输入量的减少,氮素盈余量显著降低。减量施肥和减量施肥配施生物炭处理条件下,盈余量显著降低 29.03%~39.81%,且甘蓝叶球产量下降 16.12%~19.11%,而球形指数则显著增加 6.17%~7.41%,氮素偏生产力也显著提高 24.39%~28.98%。与减量施肥处理相比,进一步增施生物炭可小幅提高甘蓝产量及氮肥偏生产力,但处理间差异不显著。

参考文献:

[1] 王彩绒,吕家珑,胡正义,等.太湖流域典型蔬菜地土壤氮及 pH 空间变异特征[J].水土保持学报,2005,19(3):17-20.
[2] 严建民,柳军,罗克勇,等.江苏设施蔬菜机械化生产发

展思路探讨[J].江苏农业学报,2014,30(6):1480-1483.
[3] 杨意成,梁燕,傅俊毅,等.江苏“菜篮子”工程蔬菜基地建设的思考[J].长江蔬菜,2014(22):72-75.
[4] 谢建昌,陈际型.菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥[M].南京:河海大学出版社,1997:41-46.
[5] 赵其国.发展与创新现代土壤科学[J].土壤学报,2003,40(3):321-327.
[6] 杨林章.中国农田生态系统养分循环与平衡及其管理[M].北京:科学出版社,2008.
[7] 王敬国,林杉,李保国.氮循环与中国农业氮管理[J].中国农业科学,2016,49(3):503-517.
[8] Boesch D F, Brinsfield R B, Magnien R E. Chesapeake bay eutrophication: Scientific understanding, ecosystem restoration, and challenges for agriculture[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 30(2): 303-320.
[9] 金相灿,叶春,颜昌宙,等.太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J].环境科学研究,1999,12(5):1-5.
[10] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
[11] 于红梅,李子忠,龚元石.传统和优化水氮管理对蔬菜地土壤氮素损失与利用效率的影响[J].农业工程学报,2007,23(2):54-59.
[12] 姜慧敏,张建峰,李玲玲,等.优化施氮模式下设施菜地氮素的利用及去向[J].植物营养与肥料学报,2013,19(5):1146-1154.
[13] 王春梅,蒋治国,赵言文.太湖流域典型蔬菜地地表径流氮磷流失[J].水土保持学报,2011,25(4):36-40.
[14] 李艾芬,章明奎.浙北平原不同种植年限蔬菜地土壤氮磷的积累及环境风险评价[J].农业环境科学学报,2010,29(1):122-127.
[15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
[17] 朱莲,杨春霞,柳林景,等.氮、钾肥用量对春甘蓝产量和品质的影响[J].蔬菜,2002(1):29-31.
[18] 孙传范,曹卫星,戴廷波.土壤—作物系统中氮肥利用率的研究进展[J].土壤,2001,33(2):64-69.
[19] 姜甜甜,高如泰,夏训峰,等.北京市农田生态系统氮素养分平衡与负荷研究:以密云县和房山区为例[J].农业环境科学学报,2009,28(11):2428-2435.
[20] 黄东风,王果,李卫华,等.菜地土壤氮磷面源污染现状、机制及控制技术[J].应用生态学报,2009,20(4):991-1001.
[21] 郭智,刘红江,陈留根,等.不同施肥模式对冬瓜氮素利用及菜地氮素表现平衡的影响[J].上海农业学报,2016,32(4):92-98.

- 水流水力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 50-54.
- [15] Ali M, Sterk G, Seeger M, et al. Effect of flow discharge and median grain size on mean flow velocity under overland flow[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 452/453(1):150-160.
- [16] 翟艳宾, 吴发启, 张一, 等. 人工模拟粗糙度对坡面阻力的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1):93-95.
- [17] 姚文艺. 坡面流流速计算的研究[J]. 中国水土保持, 1993(3):21-25.
- [18] Zhang G H, Luo R T, Ying C, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 389(1/2):205-213.
- [19] 江忠善, 宋文经. 坡面流速的试验研究[J]. 水土保持研究, 1988(1):46-52.
- [20] Meyer L D, Foster G R, Huggins L F. A laboratory study of rill hydraulics: 1. Velocity relationships[J]. *Transactions of the Asabe*, 1984, 27(3):790-796.
- [21] 赵春红, 高建恩, 徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1):113-121.
- [22] 杨帆, 张宽地, 杨明义, 等. 植物茎秆影响坡面径流水动力学特性研究[J]. 泥沙研究, 2016(4):22-27.
- [23] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of no cohesive sediment by shallow overland flow [J]. *Water Resources Research*, 2010, 29(5):1415-1424.
- [24] 施明新, 吴发启, 田国成, 等. 地表粗糙度对坡面流动力学参数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7):83-87.
- [25] 高延良, 董旭, 杨帆, 等. 坡面植被水流水动力学特性研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(9):38-47.
- [26] 张宽地. 坡面径流水动力学特性及挟沙机理研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [27] 刘文剑, 张会兰, 王玉杰, 等. 模拟植被地表覆盖率和粗糙度对坡面流水动力学特性的影响[J]. 水土保持报, 2017, 31(6):1-7.
- [28] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(6):825-834.
- [29] Abrahams A D, Parsons A J, Wainwright J. Resistance to overland flow on semiarid grassland and shrub land hillslopes, Walnut Gulch, southern Arizona[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 156(1/4):431-446.
- [30] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3):14-19.
- [31] Zhao C H, Gao J N, Huang Y F, et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges [J]. *Land Degradation and Development*, 2016, 27(3):748-757.
- (上接第 42 页)
- [22] 王辉, 董元华, 安琼, 等. 高度集约化利用下蔬菜地土壤养分累积状况: 以南京市南郊为例[J]. 土壤, 2006, 38(1):61-65.
- [23] 冀宏杰, 张认连, 武淑霞, 等. 太湖流域农田肥料投入与养分平衡状况分析[J]. 中国土壤与肥料, 2008(5):70-75.
- [24] 鲁如坤, 刘鸿祥, 闻大钟, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 IV. 农田养分平衡的评价方法和原则[J]. 土壤通报, 1996, 27(5):197-199.
- [25] 李强坤, 胡亚伟, 孙娟. 农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):210-214.
- [26] 郑少文, 郭智, 王子臣, 等. 太湖流域典型蔬菜地氮素径流流失特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):204-208.
- [27] 吴永红, 胡正义, 杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源—拦截—修复”(3R)理论与实践[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5):1-6.
- [28] 张刚, 王德建, 陈效民. 稻田化肥减量施用的环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2):327-330.
- [29] 李大伟, 周加顺, 潘根兴, 等. 生物质炭基肥施用对蔬菜产量和品质以及氮素农学利用率的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(3):433-440.
- [30] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1):68-79.
- [31] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2013, 89(11):1467-1471.
- [32] 贾俊香, 熊正琴. 秸秆生物炭对菜地 N_2O 、 CO_2 与 CH_4 排放及土壤化学性质的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(2):283-288.
- [33] 仓龙, 朱向东, 汪玉, 等. 生物质炭中的污染物含量及其田间施用的环境风险预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15):163-167.
- [34] 石红蕾, 周启星. 生物炭对污染物的土壤环境行为影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2):486-494.