

有机肥施用量对滇中烤烟农田生态系统氮磷平衡的影响

张晓花¹, 王克勤¹, 宋娅丽¹, 温昌焘², 杨小倩¹, 唐倩¹

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224; 2.云南省玉溪市红塔区水土保持工作站, 云南 玉溪 653100)

摘要:为了探究不同有机肥施用量的输入对农田生态系统氮磷平衡中主要输入和输出的影响,以滇中二龙潭小流域烤烟农田生态系统为研究对象,设置 6 种有机肥施用量,分别为 CK(0.00 kg/m²), T₁(0.25 kg/m²), T₂(0.50 kg/m²), T₃(0.75 kg/m²), T₄(1.00 kg/m²)和 T₅(1.25 kg/m²),研究自然降雨条件下施用化肥后,不同有机肥施用量对烤烟农田生态系统径流泥沙氮磷流失量、土壤残留量以及烤烟氮磷吸收量之间平衡的影响。结果表明:(1)随着有机肥施用量的增加,不同处理下 4 场降雨径流和泥沙全氮、全磷流失浓度均值及径流、泥沙总氮、总磷流失量逐渐降低,均表现为 CK>T₁>T₂>T₃>T₄>T₅;(2)烤烟收获后,土壤全氮、碱解氮、全磷、有效磷含量均高于背景值,分别高出 20.53%~40.07%, 52.83%~209.44%, 19.53%~62.79%, 25.79%~205.11%;(3)烤烟茎、根和叶片含量均随有机肥施用量的增加而逐渐增加,当施用量达 1 kg/m²(T₄)时,烤烟各器官氮磷含量在此施肥区内达到峰值,各器官表现为茎<根<叶;(4)氮磷随径流占施肥输入氮磷量的 8.19%~56.91%和 15.28%~46.72%,随泥沙流失的量占 3.05%~9.21%和 16.14%~33.33%,土壤氮磷残留量占 0.39%~68.37%和 0.10%~64.21%,烤烟吸收量占 20.39%~33.49%和 11.83%~19.87%。综合考虑烤烟产量、成本投入及环境效益,T₄处理既能保证烤烟氮磷吸收量,又能显著降低氮磷径流流失,是一种环境友好型施肥方式。

关键词:氮磷平衡; 氮磷流失; 有机肥施用量; 土壤含量; 氮磷含量

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0028-09

Effects of Organic Fertilizer Application on Nitrogen and Phosphorus Balance in Flue-Cured Tobacco Sloping Farmland in Central Yunnan Province

ZHANG Xiaohua¹, WANG Kemin¹, SONG Yali¹, WEN Changtao², YANG Xiaoqian¹, TANG Qian¹

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2.Soil and Water Conservation Workstation, Hongta District, Yuxi, Yunnan 653100, China)

Abstract: In order to explore the effects of different organic fertilizer application inputs on the main input and output of nitrogen and phosphorus balance in the farmland ecosystem, tobacco farmland ecosystem in Erlongtan small watershed in central Yunnan Province was taken as the research site. Six kinds of organic fertilizer application amounts were CK (0.00 kg/m²), T₁(0.25 kg/m²), T₂(0.50 kg/m²), T₃(0.75 kg/m²), T₄(1.00 kg/m²) and T₅(1.25 kg/m²). The effects of six kinds of organic fertilizer application amounts on runoff, sediment loss, soil residual amount of nitrogen and phosphorus and tobacco absorption amount in flue-cured farmland ecosystem were studied after applying the chemical fertilizer under natural rainfall conditions. The results showed that: (1) with the increase of the application amount of organic fertilizer, the average concentration of total nitrogen and total phosphorus loss in runoff and sediment as well as the total nitrogen and phosphorus loss amounts in runoff and sediment decreased under four events of rainfall, which decreased in the order: CK>T₁>T₂>T₃>T₄>T₅; (2) after tobacco harvest, the contents of total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, total phosphorus and available phosphorus in soil were all higher than the background value, which were 20.53%~40.07%, 52.83%~209.44%, 19.53%~62.79% and 25.79%~205.11%

收稿日期:2019-12-02

修回日期:2019-12-28

资助项目:云南省重点研发计划(2018BC001);云南省应用基础研究青年项目(2016FD044);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(050005113111);云南省科技厅“三区”人才支持计划

第一作者:张晓花(1996—),女,贵州纳雍县人,硕士研究生,研究方向为生态恢复研究。E-mail:zxh1570494195@163.com

通信作者:宋娅丽(1985—),女,山西长治人,博士,主要从事生态系统功能研究。E-mail:songyali19851205@sina.com

higher than those of the background, respectively; (3) the contents of stems, roots and leaves of flue-cured tobacco increased gradually with the increase of the application amount of organic fertilizer; when the application amount reached 1 kg/m^2 (T_4), the nitrogen and phosphorus contents of flue-cured tobacco organs reached the peak within this fertilization interval; (4) nitrogen and phosphorus loss with runoff accounted for $8.19\% \sim 56.91\%$ and $15.28\% \sim 46.72\%$ of nitrogen and phosphorus input by fertilizer, sediment loss accounted for $3.05\% \sim 9.21\%$ and $16.14\% \sim 33.33\%$, soil nitrogen and phosphorus residues accounted for $0.39\% \sim 68.37\%$ and $0.10\% \sim 64.21\%$, and flue-cured tobacco absorption accounted for $20.39\% \sim 33.49\%$ and $11.83\% \sim 19.87\%$. Comprehensive consideration of tobacco production, cost input and environmental benefits, T_4 treatment can not only ensure the contents of nitrogen and phosphorus in flue-cured tobacco, but also significantly reduce the losses of nitrogen and phosphorus in runoff, which is an environmentally friendly fertilization method.

Keywords: balance of nitrogen and phosphorus; nitrogen and phosphorus loss; organic fertilizer application; soil content; contents of nitrogen and phosphorus

云南省总耕地面积 607.21 万 hm^2 , 坡耕地占总耕地面积的 57.39%^[1], 为云南省作物种植的主要土地利用类型。烤烟作为滇中地区的重要经济作物之一, 同样以坡耕地种植为主; 但坡耕地种植作物易发生严重的水土流失^[2], 造成大量氮、磷流失, 从而引起水体富营养化^[3]。在坡耕地烤烟农田生态系统中, 氮磷平衡中除了径流泥沙流失量外, 还包括肥料输入量、植物吸收量及土壤残留量等过程^[4]。而国内外现有的研究大多集中于氮磷平衡系统中的几个过程, 并未将上述过程统一考虑, 即不同耕作模式或施肥模式下, 植物对养分的吸收及生长量的变化特征、氮磷流失及产流产沙量特征等方面^[5-7]。如李娟等^[8]通过研究不同有机肥施用量和耕作方式对旱地土壤水分利用效率及春玉米生产力的影响, 表明施用高量有机肥和深松耕作处理可显著提高作物产量和纯收益; 舒晓等^[9]采用室内土柱模拟试验方法研究了减氮配施有机物对土壤氮素淋失的调控作用, 结果表明无机氮肥减 60% 基础上配施有机物, 可较好地抑制氮素下移, 降低氮素淋失风险; Zhang 等^[10]的研究表明施用有机肥可显著提高小麦产量, 增加土壤有机碳含量。

有机肥常被认为可提高作物产量, 减少氮磷流失^[11], 但有机肥的施用对滇中烤烟生态系统氮磷平衡中输入和输出调节的影响程度以及烤烟可达最优收获效益和生态效益时有机肥施用量的研究仍鲜见报道。因此, 本研究以滇中二龙潭小流域烤烟农田生态系统为研究对象, 设置 6 种有机肥施用量, 分别为 $CK(0.00 \text{ kg/m}^2)$, $T_1(0.25 \text{ kg/m}^2)$, $T_2(0.50 \text{ kg/m}^2)$, $T_3(0.75 \text{ kg/m}^2)$, $T_4(1.00 \text{ kg/m}^2)$ 和 $T_5(1.25 \text{ kg/m}^2)$, 研究自然降雨条件下施用化肥后, 不同有机肥施用量对烤烟农田生态系统径流泥沙氮磷流失量、烤烟氮磷吸收量以及土壤残留量之间平衡的影响, 以期合理

安排烤烟有机肥施用量和小流域农业面污染源源头控制体系提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本试验地位于云南省玉溪市红塔区高仓街道龙树村, 地处红塔区中南城郊结合部, 位于东经 $102^\circ 34' 12.30''$, 北纬 $24^\circ 17' 32.33''$, 海拔 1 625 m。全年日照时数有 1 947.5 h, 日照率 44%。霜降共 52 d, 多年平均降雨量 909.1 mm, 降雨天数有 130~150 d, 最大 24 h 降雨量为 41 mm, 属中亚热带半湿润冷冬高原季风气候, 干湿季分明, 雨季为 5 月—10 月, 暴雨多发于雨季。土壤中厚, 属山地红壤, 肥力低, 氮、磷、钾较缺, 呈强酸性—微酸性。其中土壤中的红壤土由砂页岩发育而成, 大多土层较为浅薄, 岩石裸露, 导致严重的水土流失。研究区内有林地面积为 383.07 hm^2 , 占流域总面积的 20.63%, 树种以云南松(*Pinus yunnanensis* Franch) 分布最为广泛, 其次有桉树(*Eucalyptus Labill*)、桤树(*Longpeduncled Alder*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* Hook)、栎类(*Quereus*) 等。

1.2 试验设计

试验材料为烤烟, 品种为 K326, 于 2018 年 4 月 18 日进行移栽, 材料由玉溪市烟草公司统一调入, 种植密度为 16 500 株/ hm^2 。在试验地选取坡度为 15° 的坡耕地, 布设 6 种有机肥施用量的样方(面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$), 各样方四周用铁皮隔开, 以防径流在各样方之间渗漏。在样方下部设置导管和塑料桶, 雨季每一场自然降雨后的田面径流通过导管流入塑料桶中。每个样方径流入水口高度保持一致。各样方之间相隔均大于 2 m, 每个处理 3 个重复, 各样方随机排列。化肥施用量根据当地农户烤烟种植习惯, 移栽

当日施入基肥,7 d 后施入烤烟专用复合肥作为提苗肥,20 d 后再次施入烟草专用肥作为追肥;基肥与提苗肥氮磷钾比例为 12:6:24,提苗肥氮磷钾比例为 28:0:5。烤烟移栽当日以 0.25 kg/m² 有机肥依次

递增的方式,与基肥一同施入各样方,有机肥施用量分别为 CK(0.00 kg/m²),T₁(0.25 kg/m²),T₂(0.50 kg/m²),T₃(0.75 kg/m²),T₄(1.00 kg/m²)和 T₅(1.25 kg/m²)。各样方施肥量见表 1。

表 1 各处理有机肥施用量

kg/m²

处理	基肥	提苗肥	追肥	折合纯氮	折合纯磷	有机肥	折合纯氮	折合纯磷
CK	0.09	0.015	0.24	0.0384	0.0192	0.00	0.00	0.00
T ₁	0.09	0.015	0.24	0.0384	0.0192	0.25	0.0125	0.00625
T ₂	0.09	0.015	0.24	0.0384	0.0192	0.50	0.025	0.0125
T ₃	0.09	0.015	0.24	0.0384	0.0192	0.75	0.0375	0.01875
T ₄	0.09	0.015	0.24	0.0384	0.0192	1.00	0.05	0.025
T ₅	0.09	0.015	0.24	0.0384	0.0192	1.25	0.0625	0.03125

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 样品的采集 降雨期间使用自计雨量计记录降雨量与降雨强度,各样方保持原有地貌。在 2018 年 6—8 月的 4 场具有较大产流的自然降雨条件下,将样方塑料桶内泥沙与水样混匀,测定泥沙含量,进行不同深度多点采样;并将各水样转入干净的矿泉水瓶中,取 500 ml 径流样品,将样品 4℃ 保存,在 24 h 内过滤后测定其中总氮和总磷含量。取完水样后,将径流放置沉淀,待径流澄清后,放掉上层清水,收集泥沙并称量,在避光条件下自然风干,用于测定泥沙全氮和全磷含量。在烤烟移栽前期及收获后,使用“对角线法”采集各样方表层(0—20 cm)土壤用于调查土壤养分背景值及土壤残留量。于烤烟收获后 9 月采集各样方内植物样的叶、茎、根,测定其全氮、全磷含量及生物量。

1.3.2 样品的测定 水样总氮采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法(GB11894—89)测定、总磷采用过硫酸钾消解—钼蓝比色法(GB11893—89)测定^[12]。泥沙和土壤的全氮采用凯氏定氮法测定、全磷采用高氯酸—硫酸消煮法测定。植株各部分全氮采用硫酸—过氧化氢消煮—靛酚蓝比色法测定,全磷采用钒钼黄吸光光度法测定。

1.3.3 径流和泥沙中氮磷流失量的计算 各场降雨中径流和泥沙中氮磷流失量、烤烟植株氮磷吸收量及土壤氮磷残留量由以下计算公式得到:

$$W_r = Q_{rk} \cdot c_r \quad (1)$$

$$W_s = Q_{sk} \cdot c_s \quad (2)$$

$$D = B \cdot c_f \quad (3)$$

$$W_a = W - W_{ck} = s \cdot h \cdot c \cdot \gamma - s \cdot h \cdot c_{ck} \cdot \gamma \quad (4)$$

式中:W_r为径流中氮磷流失量(mg/m²);Q_{rk}为次降雨产流量(kg/m²);c_r为径流平均氮磷流失浓度

(mg/L);W_s为泥沙中氮磷流失量(mg/m²);Q_{sk}为次降雨产沙量(g/m²);c_s为泥沙平均氮磷浓度(g/kg);D为烤烟植株氮磷吸收量(mg/m²);B为烤烟植株生物量(kg/m²);c_f为植株平均氮磷浓度(mg/kg);W_a为土壤氮磷残留量(g/m²);W为土壤氮磷现存量(g/m²);W_{ck}为次土壤氮磷背景值(g/m²);s为土壤面积(1 m²);h为土壤厚度(0.2 m);c为土壤现存氮磷含量(g/kg);γ为土壤容重(当地平均值 1 290 kg/m³);c_{ck}为土壤背景氮磷含量(g/kg)。

1.4 数据处理

本文采用 Excel 2016 进行数据处理和图表绘制,并采用 SPSS 25.0 软件对研究区不同有机肥施用量下滇中红壤烤烟坡耕地肥料氮磷输入量、径流泥沙氮磷流失量、烤烟氮磷吸收量以及土壤残留量之间的差异性进行分析,方差分析采用最小显著性差异(LSD)法。

2 结果与分析

2.1 径流、泥沙中氮磷流失特征分析

2.1.1 不同降雨下各样方产流产沙特征 试验期间出现了 4 次较大的短期连续降雨,分别在 6 月 27 日、7 月 26 日、8 月 4 日和 8 月 9 日(表 2)。对径流量、产沙量与降雨量和施肥浓度进行线性单变量模型分析,表明径流量、产沙量与降雨量显著性概率 $p=0.002$ 和 $p=0.003 < 0.01$,表现为相关性极显著,说明降雨量对滇中烤烟坡耕地产流和产沙特征有显著影响;但随着有机肥施用量的增加,各处理的产流和产沙量无显著差异。当 6 月 27 日降雨强度达 24.02 mm/h 时,各处理土壤侵蚀量均值为 4.24 g/m²,为 7 月 26 日的 3.71 倍,说明较高的降雨强度增加了土壤侵蚀量的贡献率,两者相关性显著。

2.1.2 径流和泥沙中全氮流失浓度及流失量特征 从图 1 中可以看出,随着有机肥施用量的增加,不同

处理下4场降雨径流全氮(图1A)和泥沙全氮(图1B)流失浓度均值逐渐降低,与有机肥施用量呈负相关关系,均表现为 $CK > T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$,且差异性显著($p < 0.05$)。不同时间 T_5 处理下的径流和泥沙全氮浓度平均值分别比CK低50.20%~88.81%和9.43%~62.16%,说明施用有机肥显著降低了径流和泥沙中全氮流失浓度,且全氮流失浓度在径流中的降低幅度高于泥沙。泥沙全氮流失浓度为径流的80~90倍,说明氮素通过泥沙流失是稳定输出的途径,减少泥沙量有助于减少氮素流失。在烤烟生长期泥沙氮素流失浓度均在6月27日时呈现最大值,为氮素流失的高峰期,约为最小值(8月9日)的2倍,此时也是防治氮素流失的关键时期。各处理下径流和泥沙全氮流失浓度随时间推移以及降雨次数的增加逐渐降低,8月9日径流和泥沙各处理为6月27日的11.72%~48.91%和28.57%~63.79%。

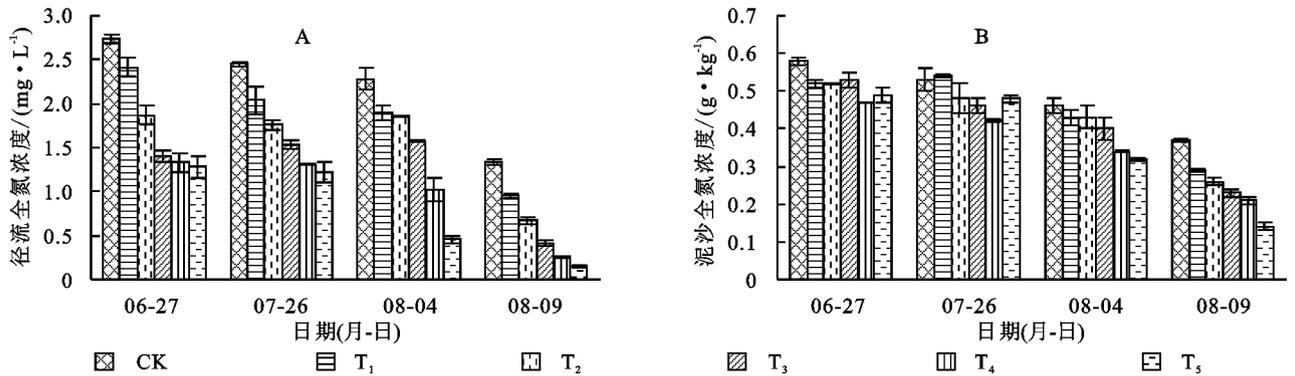


图1 不同有机肥施用量下径流全氮和泥沙全氮流失浓度特征

由表3可以看出,6月27日、7月26日、8月4日和8月9日各处理下径流中总氮流失量分别为4.38~9.73, 2.26~3.78, 2.65~11.66, 0.93~7.16 g/m²;泥沙中总氮流失量分别为1.87~2.58, 0.43~0.61, 0.91~1.31, 0.30~0.91 mg/m²。随着有机肥施用量的增加,4场降雨径流总氮流失量之和及泥沙总氮流失量之和逐渐降低,均表现为:CK>T₁>T₂>T₃>T₄>T₅,T₅处理下径流总氮流失量为CK的31.76%,泥沙总氮流失量为CK的73.13%,说明有机肥施用量的提高显著降低了农田中径流和泥沙中氮素的流失量。在4场降雨中坡耕地总氮流失以径流输出为主,占流失量的72.84%~86.64%;施用有机肥后8月9日,T₅处理径流和泥沙中总氮输出量较CK分别降低了7.69,3.03倍,有机肥的施用对径流总氮输出量降低效果优于泥沙。

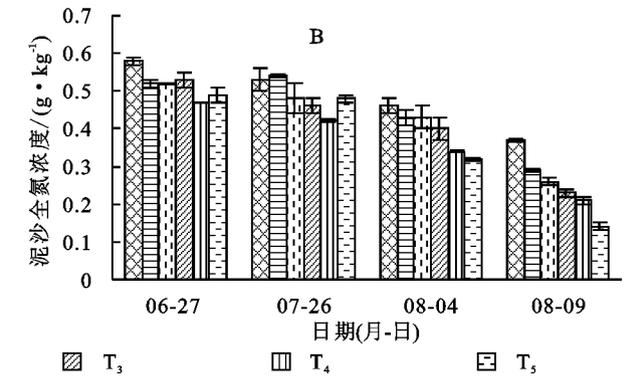
2.1.3 径流和泥沙中全磷流失浓度及流失量特征

由表4可以看出,随着有机肥施用量的增加,不同处理下,4场降雨均值比较,径流和泥沙全磷流失浓度

表2 试验地4场降雨及产流产沙特征

测定指标	6月27日	7月26日	8月4日	8月9日	
降雨量/mm	30.81	11.05	35.62	32.24	
降雨强度/(mm·h ⁻¹)	24.02	7.42	11.31	10.82	
平均径流量/(kg·m ⁻²)	CK	3.55±0.02a	1.95±0.17a	5.05±0.35a	6.09±0.36a
	T ₁	3.63±0.25a	1.43±0.12a	5.58±0.35a	5.83±0.50a
	T ₂	4.11±0.32a	1.75±0.07a	6.27±0.54a	6.12±0.46a
	T ₃	3.78±0.23a	1.85±0.12a	5.69±0.57a	5.91±0.31a
	T ₄	3.74±0.17a	2.31±0.19a	6.10±0.06a	5.33±0.28a
	T ₅	3.42±0.21a	1.85±0.01a	5.75±0.29a	6.17±0.19a
平均产沙量/(g·m ⁻²)	CK	4.48±0.28a	1.09±0.09a	2.65±0.15a	2.47±0.25a
	T ₁	3.65±0.14a	0.91±0.05a	3.04±0.19a	2.19±0.19a
	T ₂	4.21±0.35a	1.27±0.07a	2.31±0.16a	2.36±0.16a
	T ₃	4.87±0.16a	0.93±0.01a	3.05±0.25a	2.24±0.22a
	T ₄	3.98±0.28a	1.04±0.05a	3.02±0.21a	1.98±0.09a
	T ₅	4.23±0.17a	1.11±0.14a	2.85±0.12a	2.11±0.14a

注:各处理数值均为平均值±标准差,表中不同小写字母表示同一时间不同有机肥施用量下径流量之间或产沙量之间差异性显著($p < 0.05$)。下表同。



逐渐降低,均表现为 $CK > T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$,且差异性显著($p < 0.05$)。与氮素相同,径流、泥沙中磷素流失浓度与有机肥施用量呈负相关关系,不同时间 T_5 处理下的径流和泥沙全磷浓度平均值分别比CK低35.09%~55.71%和16.10%~32.71%,说明施用有机肥显著降低了径流和泥沙中全磷流失浓度,且径流全磷浓度降低幅度高于泥沙。各处理下径流全磷流失浓度随着时间的推移逐渐降低,8月9日径流全磷浓度各处理为6月27日的39.61%~52.37%;而泥沙全磷流失浓度并未随着时间的推移呈现显著的降低趋势,而与降雨量变化一致,8月4日降雨量(35.62 mm)最高时,泥沙全磷流失浓度为6月27日的2.26~2.92倍。

由表5可以看出,6月27日、7月26日、8月4日和8月9日各处理下径流中总磷流失量分别为2.87~5.08, 1.15~2.73, 2.42~3.89, 2.28~3.47 g/m²;泥沙中总磷流失量分别为2.04~2.87, 0.67~0.98, 3.39~5.35, 2.53~3.63 g/m²。随着施肥量的增加,不同降雨条件下径流和泥沙中总磷流失量逐渐

降低,4 场降雨径流总磷流失量之和及泥沙总磷流失量之和在 T_5 处理下分别为 CK 的 57.48%,76.94%,说明有机肥施用量的提高显著降低了农田中径流和泥沙中磷素的流失量。

表 3 不同有机肥施用量下径流和泥沙中氮素流失量特征

测定指标	6月27日	7月26日	8月4日	8月9日	
径流全氮 流失量/ ($g \cdot m^{-2}$)	CK	9.73±0.15a	3.78±0.32a	11.51±0.83a	7.16±0.26a
	T_1	8.75±0.24b	2.92±0.14b	10.60±0.74a	5.54±0.31b
	T_2	7.69±0.57c	3.08±0.33b	11.66±0.98a	4.10±0.25b
	T_3	5.29±0.31d	2.85±0.06b	8.93±0.34b	2.42±0.13c
	T_4	4.97±0.22d	3.03±0.21b	6.22±0.36c	1.39±0.11c
	T_5	4.38±0.09d	2.26±0.12c	2.65±0.16d	0.93±0.05c
泥沙全氮 流失量/ ($g \cdot m^{-2}$)	CK	2.50±0.12a	0.58±0.05a	1.22±0.06a	0.91±0.03a
	T_1	1.90±0.08a	0.44±0.03b	1.31±0.11a	0.64±0.01b
	T_2	2.19±0.11a	0.61±0.02a	0.99±0.04a	0.61±0.05b
	T_3	2.58±0.07a	0.43±0.01b	1.22±0.08	0.52±0.02b
	T_4	1.87±0.09a	0.44±0.02b	1.03±0.09a	0.42±0.03c
	T_5	2.07±0.15a	0.53±0.03a	0.91±0.05a	0.30±0.01c

表 4 不同有机肥施用量下径流全磷和泥沙全磷流失浓度特征

测定指标	6月27日	7月26日	8月4日	8月9日	
径流全磷 流失浓度/ ($mg \cdot L^{-1}$)	CK	1.43±0.12a	1.40±0.11a	0.77±0.03a	0.57±0.03a
	T_1	1.26±0.09a	0.96±0.03b	0.53±0.04b	0.50±0.01a
	T_2	0.95±0.03b	0.78±0.05c	0.50±0.03b	0.50±0.02a
	T_3	0.94±0.04b	0.66±0.03c	0.50±0.02b	0.49±0.03a
	T_4	0.94±0.02b	0.65±0.01c	0.43±0.01b	0.45±0.03a
	T_5	0.84±0.05b	0.62±0.05c	0.42±0.02b	0.37±0.01b
泥沙全磷 流失浓度/ ($g \cdot kg^{-1}$)	CK	0.64±0.03a	0.74±0.04a	1.76±0.11a	1.47±0.15a
	T_1	0.60±0.04a	0.74±0.03a	1.76±0.08a	1.43±0.08a
	T_2	0.56±0.01a	0.73±0.01a	1.55±0.08a	1.42±0.12a
	T_3	0.56±0.02a	0.72±0.05a	1.40±0.11a	1.36±0.09a
	T_4	0.51±0.03a	0.67±0.06a	1.33±0.09a	1.28±0.12a
	T_5	0.53±0.04a	0.61±0.02a	1.19±0.13a	1.23±0.07a

表 5 不同有机肥施用量下径流和泥沙中磷素流失量特征

测定指标	6月27日	7月26日	8月4日	8月9日	
径流全磷 流失量/ ($g \cdot m^{-2}$)	CK	5.08±0.34a	2.73±0.13a	3.89±0.13a	3.47±0.15a
	T_1	4.57±0.21a	1.37±0.10b	2.96±0.06b	2.92±0.09a
	T_2	3.90±0.19ab	1.37±0.09b	3.14±0.21ab	3.06±0.21a
	T_3	3.55±0.26b	1.22±0.05b	2.85±0.14b	2.90±0.04a
	T_4	3.52±0.17b	1.50±0.03b	2.62±0.09b	2.40±0.17ab
	T_5	2.87±0.12c	1.15±0.13b	2.42±0.14b	2.28±0.05ab
泥沙全磷 流失量/ ($g \cdot m^{-2}$)	CK	2.87±0.11a	0.81±0.04a	4.66±0.19ab	3.63±0.33a
	T_1	2.19±0.17ab	0.67±0.03a	5.35±0.36a	3.13±0.27ab
	T_2	2.36±0.09a	0.93±0.08a	3.58±0.16c	3.35±0.15a
	T_3	2.73±0.21a	0.67±0.01a	4.27±0.22b	3.05±0.19ab
	T_4	2.03±0.15b	0.70±0.02a	4.02±0.15b	2.53±0.07b
	T_5	2.24±0.08ab	0.98±0.02a	3.39±0.23c	2.60±0.12b

2.2 土壤中氮磷储存特征

试验区施肥前 0—20 cm 的土壤背景值分别为:全氮 690 mg/kg、碱解氮 25.63 mg/kg、全磷 580 mg/kg、

有效磷 28 mg/kg,该区土壤中的有效磷含量较低,而土壤中氮磷元素含量的高低是植物生长发育是否良好的重要因素。在烤烟收获后,各处理表层土壤养分含量见表 6,全氮、碱解氮、全磷、有效磷含量均高于背景值,分别高出 20.53%~40.07%,52.83%~209.44%,19.53%~62.79%,25.79%~205.11%,说明氮磷随径流泥沙流失后,土壤养分含量在施用化肥和有机肥后仍有显著增加。随着有机肥施用量的增加,土壤养分含量均随之增加, T_5 处理的全氮、碱解氮、全磷、有效磷相较于 CK 处理分别增加了 32.60%,18.75%,30.56%,142.33%。

表 6 不同有机肥施用量下土壤养分含量特征

处理	mg/kg			
	全氮	碱解氮	全磷	有效磷
CK	868.27±28.39c	66.79±15.04b	724.53±10.93b	35.22±1.18c
T_1	882.75±49.32c	39.17±15.23c	693.26±23.47b	17.93±0.30d
T_2	884.50±10.45c	62.76±5.73b	750.12±41.26b	18.87±1.04d
T_3	877.33±28.40c	58.41±4.61b	881.63±31.31a	69.18±2.87b
T_4	994.40±17.31b	81.53±37.17a	760.43±29.35b	56.56±3.68b
T_5	1151.30±22.47a	79.31±9.78a	944.17±30.23a	85.43±3.75a

2.3 植物体内氮磷吸收量

由图 2 可以看出,在收获期,烤烟茎、根和叶片氮磷含量均随有机肥施用量的增加而逐渐增加,有机肥施用量增加到 T_3 (0.75 kg/m^2) 时,氮磷含量有显著提高 ($p < 0.05$),说明增加有机肥施用量有效提高了烤烟植株的平均氮含量和磷含量。当施用量达 1 kg/m^2 (T_4) 时,烤烟各器官氮磷含量在此施肥区间内达到峰值,各器官表现为茎<根<叶。此外,烤烟各器官吸收的全氮含量远高于全磷含量,说明植物吸收的氮含量较高。

2.4 烤烟坡耕地氮磷平衡关系

由表 7 可以看出,化肥施用量一定的情况下,有机肥氮素输入量的增加可显著降低径流和泥沙氮素流失量(分别降低 13.57%~68.24%和 8.83%~27.83%),增加土壤残留量及烤烟吸收量(分别增加 81.83~387.86 倍和 1.21%~34.37%)。土壤氮磷残留量增加显著说明有机肥的施用可有效改善土壤结构,促进形成土壤团粒结构,提高土壤团聚体对氮磷元素的吸附能力,从而降低氮磷的流失浓度的流失。

根据宋娅丽^[4]对农田生态系统氮磷平衡的计算公式,化肥及有机肥氮磷输入量=径流与泥沙氮磷流失量+土壤残留氮磷量+烤烟吸收量,表 7 中氮素随径流和泥沙流失的量占施肥输入氮素量的 8.19%~56.91%和 3.05%~9.21%,占比随有机肥施用量的增加而逐渐降低,说明有机肥的施用可显著减少径流和泥沙氮素流失;土壤氮素残留量占施肥输入的氮素量的 0.39%~

68.37%,说明有机肥施用量的提高更有利于土壤固定氮素;烤烟吸收量占施肥输入的氮素量 20.39%~

33.49%,由于该区烤烟生长对化肥的吸收量较低,而有机肥的施用可改善烤烟对氮素的吸收状况。

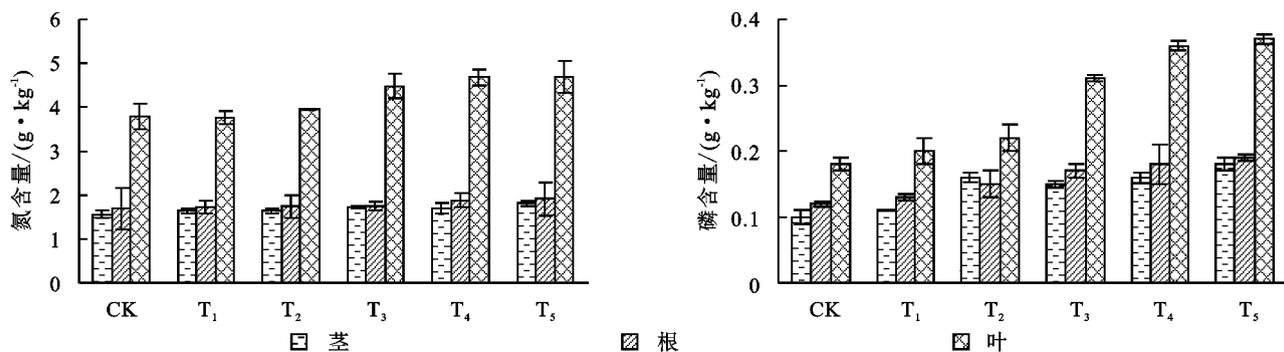


图 2 不同有机肥施用量下烤烟各器官氮磷浓度

表 7 不同有机肥施用量下滇中烤烟农田生态系统中氮素平衡关系

处理	径流氮素 流失量/ (g·m ⁻²)	径流氮素 流失量/ 施肥量/%	泥沙氮素 流失量/ (g·m ⁻²)	泥沙氮素 流失量/ 施肥量/%	土壤残留 氮素量/ (g·m ⁻²)	土壤氮素 残留量/ 施肥量/%	烤烟吸收 氮素量/ (g·m ⁻²)	植物氮素 吸收量/ 施肥量/%
CK	32.18	56.91	5.21	9.21	0.22	0.39	18.94	33.49
T ₁	27.81	40.21	4.29	6.20	17.89	25.87	19.17	27.72
T ₂	26.53	32.29	4.40	5.35	31.49	38.32	19.75	24.04
T ₃	19.49	19.89	4.75	4.85	50.56	51.60	23.18	23.66
T ₄	15.61	13.94	3.76	3.36	67.82	60.54	24.83	22.17
T ₅	10.22	8.19	3.81	3.05	85.33	68.37	25.45	20.39

由表 8 可以看出,有机肥磷素输入量的增加可显著降低径流磷素流失量(降低 5.82%~21.93%),同时也可增加土壤残留量及烤烟吸收量(分别增加 25%~200%和 4.84%~42.11%)。磷素随径流和泥沙流失的量占施肥输入磷素量的 15.28%~46.72%

和 16.14%~33.33%,占比随有机肥施用量的增加而逐渐降低,说明有机肥的施用可显著减少径流和泥沙磷素流失;土壤磷素残留量占施肥输入的磷素量的 0.10%~64.21%,烤烟吸收量占施肥输入的磷素量 11.83%~19.87%。

表 8 不同有机肥施用量下滇中烤烟农田生态系统中磷素平衡关系

处理	径流磷素 流失量/ (g·m ⁻²)	径流磷素 流失量/ 施肥量/%	泥沙磷素 流失量/ (g·m ⁻²)	泥沙磷素 流失量/ 施肥量/%	土壤残留 磷素量/ (g·m ⁻²)	土壤磷素 残留量/ 施肥量/%	烤烟吸收 磷素量/ (g·m ⁻²)	植物磷素 吸收量/ 施肥量/%
CK	11.17	46.72	7.97	33.33	0.02	0.08	4.75	19.87
T ₁	11.82	38.91	11.34	37.33	2.24	7.37	4.98	16.39
T ₂	11.47	31.05	10.22	27.67	9.93	26.88	5.32	14.40
T ₃	10.52	24.28	10.72	24.75	16.62	38.37	5.46	12.60
T ₄	10.04	19.96	9.28	18.45	24.78	49.25	6.21	12.34
T ₅	8.72	15.28	9.21	16.14	32.40	56.76	6.75	11.83

3 讨论

(1) 有机肥的施用量对氮流失的削减效果。长期以来,有机肥在培肥地力、改善土壤结构及促进养分再循环等方面具有积极作用已被广泛证实^[13]。本研究中,随着有机肥施用量的增加,不同处理下 4 场降雨径流和泥沙全氮流失浓度均值逐渐降低,说明施用有机肥可显著降低径流和泥沙中全氮流失浓度,且全氮流失浓度在径流中的降低幅度高于泥沙(径流降

低 69.63%,泥沙降低 34.55%)。对比地表水环境质量标准,CK 下不同降雨径流样品的总氮浓度均超过 V 类水标准限值(2.0 mg/L),具有一定的环境污染风险。在施用化肥的基础上配施有机肥也是国内外农业生产实践中普遍采用的养管理措施之一,可通过有效提高氮肥利用率和农作物产量来降低养分流失。

另外,本试验中有机肥施用量的提高显著降低了农田中径流和泥沙中氮素的流失量。同样闻轶^[14]发现有机肥处理组的氮素流失量比无机肥处理组降低

39.70%，说明有机肥的缓释作用有效降低了氮素的径流损失。这与本试验结果相似，在本试验中 T_1 — T_5 处理与 CK 相比，氮素流失总量降低了 14.15%~48.19%，有机肥的施用对氮素削减效果明显，这表明化肥和有机肥配施能有效降低径流中氮素损失。黄东风等^[11]的研究同样表明，化肥和有机肥各半能明显减少蔬菜种植期间菜地氮磷随地表径流的流失量，从而减少了菜地土壤造成的农业面源污染。

本研究中氮素流失量与降雨量和降雨强度呈正比，降雨量和降雨强度较大时，径流量和泥沙量较大，导致径流和泥沙中带走的氮素含量增加。此外，在本试验中烤烟坡耕地的氮素流失还与生长期有关，6月27日烤烟仍处于生长前期，这一阶段对养分的需求量较少，这就导致大量养分存留在土壤中，烤烟仍未吸收就随径流流失。虽有机—无机配施可有效降低氮素流失量，但并不能解决烤烟生长前期阶段氮素流失较大的问题。这与姚金玲等^[15]研究结果相似，水稻处于发芽和生长前期与施用基肥时间间隔较短，这一阶段氮素损失量为总损失量的 64.78%~70.50%。在烤烟生长期泥沙氮素流失浓度均在 6月27日时呈现最大值，为氮素流失的高峰期，约为最小值(8月9日)的 2 倍，此时也是防治氮素流失的关键时期。

(2) 有机肥的施用量对磷流失的削减效果。磷是导致水体富营养化的限制因子，导致农田径流泥沙磷素流失的因素包括降雨特征(降雨量、降雨强度)、植被覆盖和施肥措施等因素^[16]。本研究中，施用有机肥显著降低了径流和泥沙中全磷氮流失浓度，且径流全磷浓度降低幅度高于泥沙(径流降低 44.36%、泥沙降低 20.83%)。李盟军等^[17]的研究同样表明，优化施用有机肥后菜地径流全磷浓度与单施化肥相比显著降低。但本研究中泥沙全磷流失浓度并未随时间的推移呈现显著的降低趋势，而是与降雨量及降雨强度变化一致。这主要是由于施入土壤的磷与土壤物质作用形成难溶性的磷酸盐或很快被吸附到土壤颗粒表面，导致土壤中的磷不易被迁移和释放^[18]。而在降雨与地表土壤的共同作用下，土壤中溶解态磷和颗粒态磷发生迁移和流失，其流失量与降雨量和降雨强度均呈显著正相关关系^[19]。

不同有机肥施用量下，径流中磷素流失量随着有机肥施用量的增加而逐渐降低，在 T_5 处理下降低 21.93%，说明有机肥施用量较高能够增加土壤对磷素的吸附，减少磷素随径流的流失；而泥沙中磷素流失量并无显著变化趋势。6—8 月为烤烟生长阶段，

这个阶段降雨量集中、湿度大，土壤中磷素的矿化作用明显，过多的磷素会随径流流失(径流流失磷素占 48.63%~55.90%)。但是由于施用有机肥各处理中总磷输入量较高，磷素削减效果不佳，因此施用有机肥需要调整有机肥中氮磷的配比，以减少有效养分的损失。本试验中，总磷流失量在 6月27日最高，此时降雨强度达到 24.02 mm/h，主要是由于随着降雨强度的增加，雨水对土壤表面的冲击能量增加，降雨强度较高的暴雨对土壤表面的冲击能量更大，导致径流泥沙流失量较高。

除降雨强度的影响外，植物覆盖度也是影响磷素流失的主要因素之一，6月27日烤烟处于生长前期，植物覆盖度较低，雨滴击溅能够很快改变土壤颗粒大小，解析吸附在土壤小颗粒和微团聚体上的结合态磷，同时径流的冲刷作用加剧了土壤侵蚀，颗粒态磷随泥沙侵蚀进一步流失，使径流中总磷质量浓度升高；7—8 月是烤烟生长的旺盛期，烤烟叶肥大，叶面直径可达 35 cm，叶长可达 65 cm 左右，植被覆盖度较高，极大地减弱了降雨对土壤表面的冲刷力，产流量较低，使径流中磷素流失量降低。

(3) 有机肥的施用量对土壤氮磷含量及植物氮磷吸收量的影响。长期过量施肥可导致表层土中氮素的累积，增加氮素淋溶流失的风险^[20]，而本研究中有机肥氮素输入量的增加可显著降低径流和泥沙氮素流失量(分别降低 13.57%~68.24%和 8.83%~27.83%)。试验施肥前土壤全氮含量 690 mg/kg，施肥后土壤全氮含量平均增加 38.85%，烤烟生物量平均增加 30%，说明土壤中氮素积累量高于植物吸收量。影响土壤磷流失的首要因子是土壤的有效磷含量，即土壤有效磷含量越高，土壤磷素的流失潜能越大^[19]。本试验中，供试土壤有效磷含量为 28 mg/kg，属于二级水平，含量相对丰富。因此，即使不施肥情况下，对照处理土壤也存在较大的磷流失潜能。

增加有机肥施用量有效提高了烤烟植株的平均氮含量和磷含量， T_4 和 T_5 处理(1, 1.25 kg/m²)下烤烟各器官氮磷含量在此施肥区间内达到峰值，说明有机肥矿化释放的养分对烤烟的增产作用显著，而植物氮磷含量及生物量较高，对降低氮磷流失亦起到关键作用。无机化肥具有肥效快、养分释放快的特点，在无机化肥的基础上施用有机肥在促进植物生长发育、养分吸收及产量形成方面存在协同作用^[21]。董春华等^[22]的研究也表明，长期有机—无机配施可提高水稻产量，增加土壤肥力，但是短期施用有机肥并

不能显示出有机肥对土壤肥力的提升。这是由于有机肥中养分释放速率较慢,难以及时补充作物生长需求。颜明娟等^[23]同样发现,在习惯施氮量的基础上减氮20%并配施有机肥能够提高茶叶产量和品质,有机无机肥料配合施用后第二年产量比习惯施肥提高6.8%,说明有机肥的缓释效应在下个生长季显现出来。因此施用有机肥第二年对烤烟产量的影响有待于进一步研究。

(4) 有机肥的施用量对坡耕地农田生态系统氮磷平衡的影响。有机肥氮素输入量的增加可显著降低径流和泥沙氮素流失量(分别降低13.57%~68.24%和8.83%~27.83%),增加土壤残留量及烤烟吸收量(分别增加81.83~387.86倍和1.21%~34.37%);有机肥磷素输入量的增加可显著降低径流磷素流失量(降低5.82%~21.93%),同时也可增加土壤残留量及烤烟吸收量(分别增加25%~200%和4.84%~42.11%)。不同处理下烤烟农田生态系统总氮和总磷流失量分别为14.03~37.39,17.93~23.16 g/m²,占肥料中总氮量和总磷量的11.24%~66.12%和31.41%~80.05%,显著高于水稻生长季不同施肥方式下总氮流失总量占肥料中总氮量比例(3.24%~8.91%,2.58%~4.96%)^[22,24]。这是由于本试验中滇中农田生态系统大多为坡耕地,氮磷极易流失,氮磷流失总量及施肥量显著高于以上两个研究结果。而有机肥施用量增加至T₄和T₅时,总氮和总磷占肥料中氮磷比例较CK显著降低,土壤残留量有轻微上升趋势,有机肥改善了该区土壤的养分条件及土壤结构。该区烤烟生长对化肥的吸收量较低,而有机肥的施用可改善烤烟对氮磷的吸收。

如何做到经济效益和环境效益的双赢,是当前国内外农田养分管理的重要课题。本试验中,与CK相比,施用有机肥可显著增加烤烟氮磷吸收量;从氮磷流失角度上讲,T₄和T₅处理在增加烤烟氮磷吸收量的同时降低氮磷流失效果显著。综合考虑烤烟产量、成本投入及环境效益,T₄处理是烤烟养分管理中既能保证烤烟产量,又能显著降低氮磷径流流失,从而缓解水体富营养化,是一种环境友好型施肥方式。

4 结论

(1) 随着有机肥施用量的增加,不同处理下4场降雨径流和泥沙全氮、全磷流失浓度均值、及径流、泥沙总氮、总磷流失量逐渐降低,均表现为CK>T₁>T₂>T₃>T₄>T₅,施用有机肥显著降低了径流和泥沙中全氮、全

磷流失浓度及流失量;总氮、总磷流失浓度在径流中的降低幅度高于泥沙,总氮流失量以径流输出为主,占流失量的72.84%~86.64%;总磷流失量在径流和泥沙中分别占48.63%~55.90%和44.10%~51.36%。

(2) 烤烟收获后,土壤全氮、碱解氮、全磷、有效磷含量均高于背景值,分别高出20.53%~40.07%,52.83%~209.44%,19.53%~62.79%,25.79%~205.11%,说明氮磷随径流泥沙流失后,土壤养分含量在施用化肥和有机肥后仍有显著增加;随着有机肥施用量的增加,土壤养分含量也随之增加,T₅处理的全氮、碱解氮、全磷、有效磷相较于CK处理分别增加了32.60%,18.75%,30.56%,142.33%。

(3) 在收获期,烤烟茎、根和叶片氮磷含量均随有机肥施用量的增加而逐渐增加,当施用量达1 kg/m²(T₄)时,烤烟各器官氮磷含量在此施肥区间内达到峰值,各器官表现为茎<根<叶;烤烟各器官吸收的全氮含量远高于全磷含量。

(4) 氮素随径流和泥沙流失的量占施肥输入氮素量的8.19%~56.91%和3.05%~9.21%,土壤氮素残留量占施肥输入的氮素量的0.39%~68.37%,烤烟吸收量占施肥输入的氮素量20.39%~33.49%;磷素随径流和泥沙流失的量占施肥输入磷素量的15.28%~46.72%和16.14%~33.33%,土壤磷素残留量占施肥输入的磷素量的0.10%~64.21%,烤烟吸收量占施肥输入的氮素量11.83%~19.87%。综合考虑烤烟产量、成本投入及环境效益,T₄处理既能保证烤烟产量,又能显著降低氮磷径流流失,是一种环境友好型施肥方式。

参考文献:

- [1] 赵成,顾小华,姜宏雷,等.云南省坡耕地现状及水土流失综合治理探索[J].中国水土保持,2015(4):11-12.
- [2] 何淑勤,宫渊波,武万华,等.不同坡度下玉米生长期紫色土坡面径流及其可溶性有机碳流失特征[J].水土保持学报,2019,33(1):91-97.
- [3] 冯国禄.减排降污控制稻田面源污染物排放总量的技术研究[D].长沙:湖南农业大学,2011.
- [4] 宋娅丽.滇中坡耕地农田生态系统氮磷平衡特征[D].昆明:西南林业大学,2010.
- [5] 董坤.不同施肥模式对蔬菜地中氮素流失影响研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [6] 任雨之,郑江坤,付滢,等.不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(2):30-38.
- [7] 彭石磊.自然降雨条件下长期施肥和耕作对坡耕地紫色土壤肥力的影响[D].重庆:西南大学,2018.

- [8] 李娟,葛磊,曹婷婷,等.有机肥施用量和耕作方式对旱地土壤水分利用效率及作物生产力的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):121-127.
- [9] 舒晓晓,门杰,马阳,等.减氮配施有机物质对土壤氮素淋失的调控作用[J].水土保持学报,2019,33(1):186-191.
- [10] Zhang H, Xu M, Zhang F. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China[J]. the Journal of Agricultural Science, 2009,147(1):31-42.
- [11] 黄东风,王果,李卫华,等.不同施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及菜地氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):5-10.
- [12] 王晓龙,李辉信,胡锋,等.红壤小流域不同土地利用方式下土壤 N、P 流失特征研究[J].水土保持学报,2005,19(5):31-34,55.
- [13] Zhang G H, Liu G B, Wang G L. Effects of *Caragana Korshinskii* Kom. cover on runoff, sediment yield and nitrogen loss [J]. International Journal of Sediment Research, 2010,25(3):245-257.
- [14] 闻轶.稻田氮素流失特征及土壤微生物多样性的研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [15] 姚金玲,张克强,郭海刚,等.不同施肥方式下洱河流域水稻一大蒜轮作体系氮磷径流损失研究[J].农业环境科学学报,2017,36(11):2287-2296.
- [16] 王全九,杨婷,刘艳丽,等.土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J].农业机械学报,2016,47(6):67-82.
- [17] 李盟军,艾绍英,宁建凤,等.不同养分管理措施下常年菜地磷、钾养分径流流失特征[J].农业资源与环境学报,2019,36(1):33-42.
- [18] 华元刚,潘长兵,贝美容,等.橡胶园砖红壤中磷和钾素径流流失特征研究[J].热带作物学报,2012,33(9):1540-1547.
- [19] 刘方,黄昌勇,何腾兵,等.不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素分析[J].水土保持学报,2001,15(2):37-40.
- [20] 李顺江,山楠,杜连凤,等.不同施肥模式对土壤氮磷含量及作物吸收特征的影响[J].中国蔬菜,2013(22):59-63.
- [21] 陆景陵.植物营养学(上册)[M].北京:中国农业大学出版社,1994.
- [22] 董春华,高菊生,曾希柏,等.长期有机无机肥配施下红壤性稻田水稻产量及土壤有机碳变化特征[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):336-345.
- [23] 颜明娟,林琼,吴一群,等.不同施氮措施对茶叶品质及茶园土壤环境的影响[J].生态环境学报,2014,23(3):452-456.
- [24] 李娟.不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响[D].杭州:浙江大学,2016.

(上接第 27 页)

- [16] 刘栋,崔政军,高玉红,等.不同轮作序列对旱地胡麻土壤有机碳稳定性的影响[J].草业学报,2018,27(12):45-57.
- [17] 孙娇,赵发珠,韩新辉,等.不同林龄刺槐林土壤团聚体化学计量特征及其与土壤养分的关系[J].生态学报,2016,36(21):6879-6888.
- [18] 周学雅,陈志杰,耿世聪,等.氮沉降对长白山森林土壤团聚体内碳、氮含量的影响[J].应用生态学报,2019,30(5):1543-1552.
- [19] 朱秋丽,曾冬萍,王纯,等.废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响[J].环境科学学报,2016,36(8):3000-3008.
- [20] 蔡晓布,彭岳林.西藏退化高寒草原土壤团聚体有机碳的变化特征[J].环境科学研究,2018,31(2):310-319.
- [21] 徐国鑫,王子芳,高明,等.秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J].环境科学,2018,39(1):355-362.
- [22] 区晓琳,陈志彪,陈志强,等.亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J].土壤学报,2018,55(5):1156-1167.
- [23] 曹伟,李露,赵鹏志,等.坡地黑土碳氮分布及其与团聚体稳定性的关系[J].北京林业大学学报,2018,40(8):56-63.
- [24] 安婉丽,高灯州,潘婷,等.水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J].环境科学学报,2016,36(5):1833-1840.
- [25] 陆太伟,蔡岸冬,徐明岗,等.施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2183-2193.
- [26] 安艳,姬强,赵世翔,等.生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J].环境科学,2016,37(1):293-300.