

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.039; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.039.

张董辉, 温昌焘, 王克勤, 等. 侵蚀降雨下厨余垃圾施用对滇中烤烟农田生态系统氮磷平衡特征的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 91-101.  
Zhang Donghui, Wen Changtao, Wang Keqin, et al. Effects of kitchen waste application on nitrogen and phosphorus balance characteristics of flue-cured tobacco farmland ecosystem in central Yunnan under erosive rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 91-101.

## 侵蚀降雨下厨余垃圾施用对滇中烤烟农田 生态系统氮磷平衡特征的影响

张董辉<sup>1</sup>, 温昌焘<sup>2</sup>, 王克勤<sup>1</sup>, 宋娅丽<sup>1</sup>, 陈雯<sup>3</sup>, 陈炳坤<sup>4</sup>

(1.西南林业大学 水土保持学院, 昆明 650224; 2.云南省玉溪市红塔区水利局水土保持工作站, 云南 玉溪 653100;  
3.西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224; 4.云南省玉溪市水利局, 云南 玉溪 653199)

**摘要:** [目的] 探究烤烟农田生态系统氮磷平衡特征, 阐明施用厨余垃圾堆肥施用量对烤烟农田生态系统氮磷的动态影响, 为优化施肥策略、改善生态环境和提升作物生产效率提供科学依据。 [方法] 以滇中二龙潭小流域烤烟农田生态系统为研究对象, 设置 8 种不同施肥方式, 分别为不施肥对照 CK、单施化肥 NPK (1 t/hm<sup>2</sup>)、单施厨余垃圾 FW (FWL: 12 t/hm<sup>2</sup>, FWM: 15 t/hm<sup>2</sup>, FWH: 18 t/hm<sup>2</sup>)、厨余垃圾配施化肥 FW-NPK (FWL-NPK: 12 t/hm<sup>2</sup> + 1 t/hm<sup>2</sup>, FWM-NPK: 15 t/hm<sup>2</sup> + 1 t/hm<sup>2</sup>, FWH-NPK: 18 t/hm<sup>2</sup> + 1 t/hm<sup>2</sup>), 研究厨余垃圾对烤烟农田生态系统径流泥沙氮磷流失量、土壤氮磷素残存量、烤烟氮磷素吸收量以及农田烤烟生态系统氮磷平衡的影响。 [结果] (1) 径流泥沙中的 TN 和 TP 含量随时间递减。FW 相较 CK, 径流 TN 流失量减少 31.26%~53.84%、TP 减少 13.44%~45.83%; 泥沙 TN 减少: 6.31%~120.74%、TP 减少: 5.22%~62.55%。(2) 在 4 个生长时期, FW, FW-NPK 和 NPK 处理均显著提高土壤 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量; FWH-NPK 处理显著提升土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 含量; FW 处理显著提升土壤 AP 含量。植株 TN 含量总体趋势表现为叶>茎>根, TP 含量表现为叶>根>茎, 每个器官 TN 和 TP 含量均随着 FW 施入量的增加而增加。(3) 各处理径流流失量分别占 N, P 输入量的 19.71%~43.09%, 0.88%~2.94%; 泥沙流失量分别占 2.51%~5.93%, 4.23%~18.64%; 土壤残存量分别占 19.83%~55.00%, 62.77%~85.45%; 植物吸收量分别占 22.79%~35.06%, 9.08%~15.65%; 土壤残存量占 N, P 输入量的主体部分。 [结论] FWH 处理能够有效维系烤烟农田生态系统 N, P 平衡, 增加植物吸收量和增强土壤 N, P 固定能力的同时, 能够有效降低 N, P 的流失量, 是一种环境友好型施肥方式。

**关键词:** 厨余垃圾; 农田生态系统; 烤烟; 氮磷平衡

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0091-11

## Effects of kitchen waste application on nitrogen and phosphorus balance characteristics of flue-cured tobacco farmland ecosystem in central Yunnan under erosive rainfall

Zhang Donghui<sup>1</sup>, Wen Changtao<sup>2</sup>, Wang Keqin<sup>1</sup>, Song Yali<sup>1</sup>, Chen Wen<sup>3</sup>, Chen Bingshen<sup>4</sup>

(1.College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;  
2.Soil and Water Conservation Workstation of Hongta District Water Conservancy Bureau, Yuxi,  
Yunnan 653100, China; 3.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University,  
Kunming 650224, China; 4.Yuxi City Water Conservancy Bureau of Yunnan Province, Yuxi, Yunnan 653199, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the characteristics of nitrogen and phosphorus balance in flue-cured tobacco farmland ecosystem, and to clarify the dynamic effects of kitchen waste composting on nitrogen and phosphorus in flue-cured tobacco farmland ecosystem, and to provide scientific basis for optimal fertilization

收稿日期: 2024-07-28

修回日期: 2024-09-02

接受日期: 2024-09-06

资助项目: 云南省科技计划项目“赤水河流域绿色治理和发展技术研究及应用示范”(202203AC100001-03); 云南省重点研发计划项目“坡耕地土壤肥力提升关键技术研究与集成”(2018BB018); 云南省一流学科建设项目(云教发[2022]号); 云南省水土保持与荒漠化防治学一流学科(SBK20240044)

第一作者: 张董辉(1999—), 男, 云南保山人, 在读硕士研究生, 研究方向为农田土壤生态修复。E-mail: zhangdonghui1119@163.com

通信作者: 宋娅丽(1985—), 女, 山西长治人, 博士, 硕士生导师, 研究方向为生态系统功能。E-mail: songyali19851205@sina.com

<http://stbj.paperonce.org>

strategy, improvement of environment, and enhancement of crop production efficiency. [Methods] The flue-cured tobacco farmland ecosystem in Erlongtan small watershed in central Yunnan was taken as the research object. Eight different fertilization methods were set up, namely, no fertilization control CK, single application of chemical fertilizer NPK (1 t/hm<sup>2</sup>), single application of food waste FW (FWL: 12 t/hm<sup>2</sup>, FWM: 15 t/hm<sup>2</sup>, FWH: 18 t/hm<sup>2</sup>), food waste combined with chemical fertilizer FW-NPK (FWL-NPK: 12 t/hm<sup>2</sup>+1 t/hm<sup>2</sup>, FWM-NPK: 15 t/hm<sup>2</sup>+1 t/hm<sup>2</sup>, FWH-NPK: 18 t/hm<sup>2</sup>+1 t/hm<sup>2</sup>). The effects of food waste on runoff and sediment nitrogen and phosphorus loss, soil nitrogen and phosphorus residue, nitrogen and phosphorus absorption of flue-cured tobacco and nitrogen and phosphorus balance of farmland flue-cured tobacco ecosystem were studied. [Results] (1) The total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents in runoff sediment decreased over time. Compared to CK, the loss of runoff TN in the FW treatments decreased by 31.26%~53.84%, and the loss of runoff TP decreased by 13.44%~45.83%. The loss of sediment TN decreased by 6.31%~120.74%, and loss of sediment TP decreased by 5.22%~62.55%. (2) During the four growth stages, the FW, FW-NPK, and NPK treatments significantly increased soil TN and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content. The FWH-NPK treatment significantly increased soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TP contents, and the FW treatment significantly increased soil available phosphorus (AP) content. The TN content in plants generally showed the trend: leaves>stems>roots, while TP content showed the trend: leaves>roots>stems. The TN and TP contents in each organ increased with the increase of FW application. (3) The losses of runoff TN and TP accounted for 19.71%~43.09% of the N input and 0.88%~2.94% of the P input, respectively, and the losses of sediment TN and TP accounted for 2.51%~5.93% of the N input and 4.23%~18.64% of the P input, respectively. The soil residual N and P accounted for 19.83%~55.00% of the N input and 62.77%~85.45% of the P input, respectively. The plant uptake N and P accounted for 22.79%~35.06% of the N input and 9.08%~15.65% of the P input, respectively. The soil residual N and P accounted for the majority of the N and P input. [Conclusion] FWH treatment can effectively maintain the N and P balance in tobacco farmland ecosystems, which increases plant uptake N and P, enhances soil N and P fixation, effectively reduces N and P loss, is an environmentally friendly fertilization method.

**Keywords:** food waste; farmland ecosystem; flue-cured tobacco; nitrogen and phosphorus balance

在人口增长与城市化进程加速下,厨余垃圾作为城市固体废物中的重要组成部分,占垃圾总量的45%~65%<sup>[1-2]</sup>。这类垃圾通常含有高比例的有机物和水分,易在储存和运输过程中腐败分解,给废物处理和可持续发展带来挑战<sup>[1]</sup>。滇中地区是中国烤烟种植最优质的地区之一,烤烟是滇中地区的支柱产业,该地区被称为“云烟之乡”<sup>[3]</sup>。近年来,为了提高烤烟产量和质量,烟农大量施用化肥,但因为不科学的施用导致肥料利用率不高,损失高达70%,N、P的利用率仅为30%~35%和10%~20%<sup>[4-5]</sup>。降雨是造成区域水土流失的关键因素,尤其是侵蚀性降雨造成的击溅侵蚀和地表径流冲刷更易引发水土流失,导致土壤退化<sup>[6]</sup>。南方红壤区由于降水集中、降雨侵蚀力强和人为的不合理活动容易造成水土流失,从而影响到土壤的健康状况,成为农业生产的主要问题<sup>[7]</sup>。

在农业生产中,特别是烤烟种植业,厨余垃圾堆肥的应用可能代表了一种转变土壤肥力和生态系统健康管理的方法。堆肥的应用增加了土壤团聚体

的稳定性、持水能力和能够防止养分的淋溶,并对土壤的整体健康产生积极影响<sup>[8-9]</sup>。厨余垃圾堆肥的施用影响着土壤生态系统的多个方面,包括关键养分如N和P的流失、固定和吸收。例如,将堆肥与传统的氮磷肥料结合使用,已显示出显著提升土壤有机碳(↑44.69%~73.18%)、总氮(↑264.29%~518.18%)和有效磷(↑302.00%~785.72%)含量<sup>[10]</sup>。程学超等<sup>[11]</sup>研究发现厨余垃圾堆肥还田可改善生姜的根区环境,提高土壤氮(↑7.88%~55.15%)、磷(↑1.46%~25.21%)、钾(↑46.88%)含量和酶活性(↑35.28%~97.13%),促进生姜植株生长。张晓花等<sup>[12]</sup>研究表明厨余垃圾堆肥能够缓解土壤酸化促进部分酶活性和富养型细菌的繁殖,这表明厨余垃圾在农业系统中存在广泛应用的潜力。

农田养分平衡是评估农田生态系统中养分循环的重要方法,但目前研究主要集中于传统施肥对氮(N)和磷(P)平衡的影响,忽视了利用厨余垃圾作为肥料的潜在益处。在滇中红塔区,由于降雨时间较为

集中,在雨季容易导致养分流失,氮和磷的流失可能会降低土壤肥力和影响作物生长。本研究选取滇中二龙潭小流域的植烟农田作为研究对象,设置不同施肥方式:不施肥对照 CK、单施化肥 NPK、单施厨余垃圾 FW、厨余垃圾配施化肥 FW-NPK,探究侵蚀降雨下厨余垃圾对植烟农田径流和泥沙氮磷流失、土壤中氮磷残存量、烤烟吸收量以及整个农田生态系统的氮磷平衡的影响,为优化施肥策略、改善生态环境和提升作物生产效率提供科学依据。

## 1 材料和方法

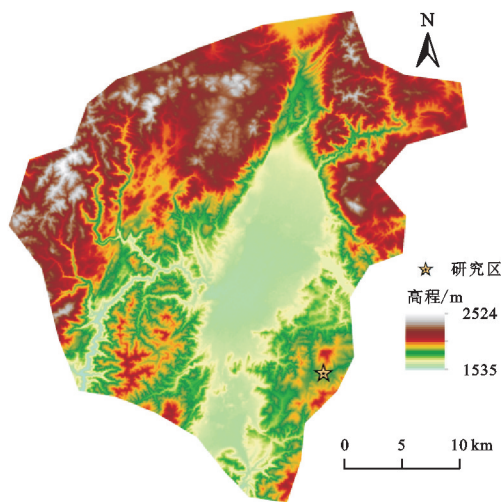
### 1.1 研究区概况

试验区位于云南省玉溪市红塔区高仓街道李井村,地势西北高东南低,自北向南海拔依次降低,烤烟试验田位于东经  $102^{\circ}34'48.21''$ ,北纬  $24^{\circ}17'09.46''$ ,海拔 1 910 m,研究区概况图如图 1 所示。气候为中亚热带半湿润冷冬高原气候,全年日照时数可达 1 947.5 h 及 44% 的日照率,多年平均降水量 909.1 mm,降水天数 130~150 d,试验区土壤为山地红壤,土壤中植物生长所需的氮、磷、钾养分含量较低。该地区种植农作物主要为烤烟、玉米和辣椒等。试验区土壤基本理化性质背景值如下:有机碳 13.33 g/kg、全氮 1.21 g/kg、全磷 1.35 g/kg、全钾 2.79 g/kg, pH 5.30。

### 1.2 试验设计

本研究以烤烟(品种为 K326)为试验材料,试验地

坡度为  $15^{\circ}$  的坡耕地,布设 24 个样方( $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ ),各样方间距大于 2 m,每个施肥量 3 个重复,样方随机排列。在烤烟种植期前与农户同一时间进行机器耕作后(深度 30—40 cm)布设样方并铺设薄膜,如图 2 所示。本研究以 70% 的蔬菜、水果等厨余垃圾混合 20% 的谷糠辅料,加入 5% 的过磷酸钙和 5% 的尿素进行堆肥,10~15 d 基本腐熟完成<sup>[12]</sup>。厨余垃圾测定的基本值为:有机质 464.42 g/kg、全氮 17.9 g/kg、全磷 1.82 g/kg、全钾 1.53 g/kg, pH 7.2~7.5。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,成图未做修改。

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

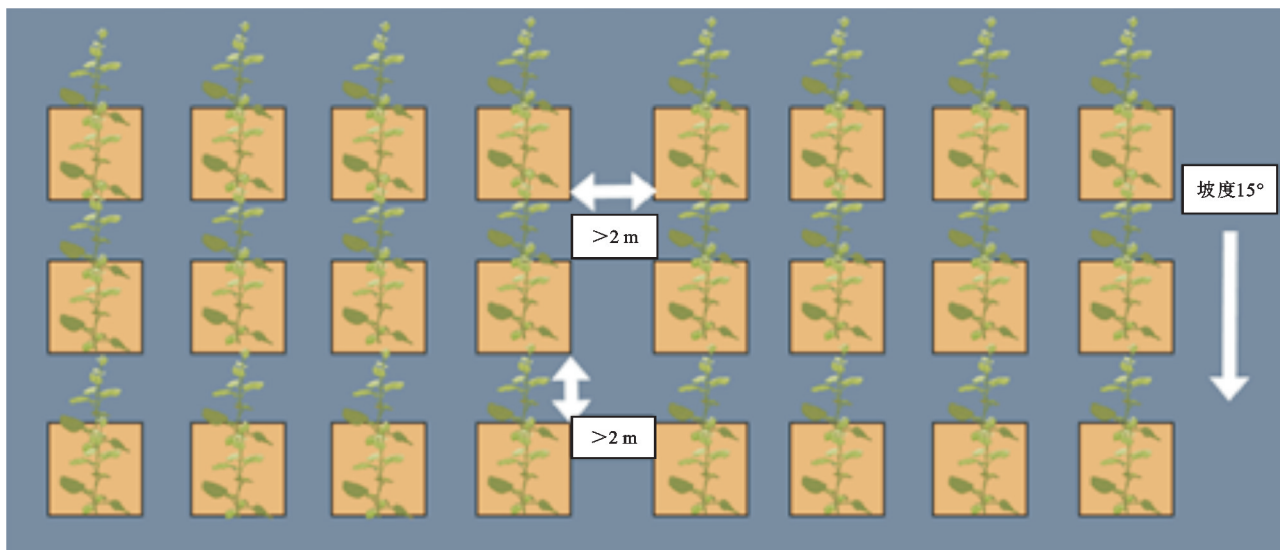


图 2 试验样地布设示意图

Fig. 2 Experimental plot layout diagram

化肥施用量同当地农户保持一致,移栽当日施入基肥,提苗肥为烤烟专用复合肥,7 d 后施入,追肥为烟草专用肥,20 d 后施入;提苗肥  $0.3\text{ t/hm}^2$ ,追肥  $0.45\text{ t/hm}^2$ (提苗肥和基肥  $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ :12:6:24;追肥  $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ :18:5:22)。8 种不同基肥

施肥方式如下:CK 为不进行施肥;NPK 为纯复合肥( $1\text{ t/hm}^2$ );FWL+NPK 为低量厨余垃圾堆沤肥+纯复合肥( $12\text{ t/hm}^2+1\text{ t/hm}^2$ );FWM+NPK 为中量厨余垃圾堆沤肥+纯复合肥( $15\text{ t/hm}^2+1\text{ t/hm}^2$ );FWH+NPK 为高量厨余垃圾堆沤肥+纯复合肥( $18\text{ t/hm}^2+$



1 t/hm<sup>2</sup>);FWL 为低量厨余垃圾堆沤肥(12 t/hm<sup>2</sup>); FWM 为中量厨余垃圾堆沤肥(15 t/hm<sup>2</sup>);FWH 为高量厨余垃圾堆沤肥(18 t/hm<sup>2</sup>)。各处理施肥量见表 1。

表 1 各处理施用量及折合量

Table 1 Application amount and conversion amount of each treatment t/hm<sup>2</sup>

处理	基肥 (化肥)	基肥 (厨余垃圾)	提苗肥	追肥	折合 纯氮	折合 纯磷
CK	0	0	0.3	0.45	0.117	0.009
NPK	1	0	0.3	0.45	0.237	0.022
FWL	0	12	0.3	0.45	0.296	0.014
FWM	0	15	0.3	0.45	0.386	0.015
FWH	0	18	0.3	0.45	0.440	0.016
FWL-NPK	1	12	0.3	0.45	0.416	0.027
FWM-NPK	1	15	0.3	0.45	0.506	0.028
FWH-NPK	1	18	0.3	0.45	0.560	0.029

### 1.3 样品的采集

1.3.1 径流、泥沙样品的采集 降雨期间降雨过程使用 RG2-M 自记雨量计(美国 AGR 公司)记录。在降雨过程停止后到样地进行查看,产生径流时首先将泥沙与水样在容器内充分混合,并将这些水样转移到清洁的集流瓶中,从每个集流瓶中取出 500 ml 的径流样本,并在 4℃ 的条件下保存,以确保样本的准确性。在 24 h 内,对这些样本进行过滤,然后测定其中的总氮、铵态氮、硝态氮、磷酸盐和总磷含量。完成水样的采集后,将径流样本静置沉淀,待其澄清后,去除上层的清水。随后,收集沉淀的泥沙,并进行称量。将收集到的泥沙在避光条件下自然风干,以便后续测定泥沙中的全氮和全磷含量。

1.3.2 土壤样品的采集 于施用基肥后的 4 个时期(团棵期、圆顶期、成熟期、撂荒期)在距植株根部 10 cm 内的范围进行 0—20 cm 土壤样品采集,初步处理后放置于自封袋中。后将样本用冰袋保存,立即送到实验室。新鲜土样使用 2 mm 筛进行分类后,放入 4℃ 冷藏箱中保存;自然风干土样后使用 2 mm,1 mm 和 0.25 mm 筛进行分离,室温保存。

1.3.3 植物样品的采集 于烤烟收获期(成熟期)采植物各器官(叶、茎、根),测定其生物量(干重、鲜重),及烘干后磨碎使用 0.25 mm 筛进行分离为全氮、全磷含量测定做准备。

### 1.4 样品的测定

径流总氮、硝态氮、铵态氮、总磷采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB1894—1989)、酚二磺酸分光光度法(GB7480—1987)、纳氏试剂比色法(GB7479—1987)和过硫酸钾消解—钼蓝比色法(GB1893—89)测定。

泥沙和土壤样全氮、全磷、硝态氮、有效磷、铵态氮采用自动定氮仪法(NY/T1 121.24—2012)、高氯酸—

硫酸消煮法、紫外分光光度法(GB/T32737—2016)、钼锑抗比色法和靛酚蓝比色法测定。植物样全氮和全磷采用自动定氮仪法(NY/T2419—2013)和钒钼黄吸光光度法测定。

### 1.5 数据处理分析

本试验土壤以成熟期样品为土壤现存量计算土壤残存量。径流和泥沙中流失量、烤烟土壤氮磷残留量及植株吸收量由以下计算公式得到:

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

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

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

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

式中: $W_r$ 为径流中氮磷流失量(mg/m<sup>2</sup>); $c_r$ 为径流平均氮磷浓度(mg/L); $Q_{rk}$ 为次降雨产流量(L/m<sup>2</sup>); $W_s$ 为泥沙中氮磷流失量(mg/m<sup>2</sup>); $c_s$ 为泥沙平均氮磷浓度(g/kg); $Q_{sk}$ 为次降雨产沙量(g/m<sup>2</sup>); $D$ 为烤烟植株氮磷吸收量(g/m<sup>2</sup>); $c_f$ 为植株平均氮磷含量(g/kg); $B$ 为烤烟植株生物量(kg/m<sup>2</sup>); $W_a$ 为土壤氮磷残留量(g/m<sup>2</sup>); $W$ 为土壤氮磷现存量(g/m<sup>2</sup>); $W_{ck}$ 为土壤氮磷背景值(g/m<sup>2</sup>); $c$ 为土壤现存氮磷含量(g/kg); $c_{ck}$ 为土壤背景氮磷含量(g/kg); $s$ 为土壤面积(m<sup>2</sup>); $h$ 为土壤厚度(以 0.2 m 为  $h$ ); $\gamma$ 为土壤容重(以当地平均值 1 290 kg/m<sup>3</sup>为  $\gamma$ )。

本文数据处理采用 Excel 2021 进行,Oringin 2021 进行图表绘制,并采用 SPSS 25.0 软件对数据进行分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验地 2022 年逐日降雨分析

根据年降雨过程观测结果(图 3)可知,2022 年降雨量为 522.00 mm,降雨量最大月份为 6 月份,降雨量为 181.40 mm;日降雨量最大为 6 月 10 日,降雨量为 118.20 mm;最大 30 min 雨强为 6 月 10 日,为 46 mm/h。2022 年降雨主要集中在 5 月下旬到 10 月份,占全年降雨量的 78.43%。其中在烤烟生长期记录产流 10 场,具有典型产流的共有 3 场,分别为 6 月 12 日、7 月 10 日及 8 月 8 日。

### 2.2 不同施肥处理下径流、泥沙氮磷流失特征

2.2.1 径流有效养分流失特征 从时间梯度上看,各处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 含量均呈现递减的趋势(图 4),其中 6 月 12 日单施厨余垃圾(FW)处理径流有效养分含量均低于 CK,而随着时间的持续,7 月 10 日和 8 月 8 日则表现为高于 CK,表明厨余垃圾养分释放具有持续性。从不同处理来看,流失浓度随着厨

余垃圾施用量增加而增加,其中FWH-NPK处理在不同时间下,径流有效养分均表现为高于其他处理,NPK处理总体高于FW处理。

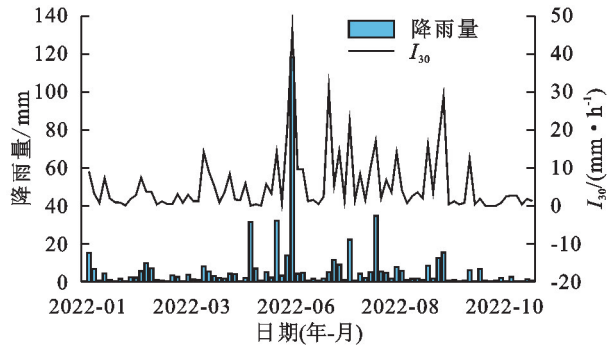


图3 2022年逐日降雨量及 $I_{30}$

Fig. 3 Daily rainfall and  $I_{30}$  in 2022

2.2.2 径流泥沙全量养分流失特征 3场降雨径流TN,TP流失浓度和流失量均呈现随时间递减的趋势(图5),尤其流失量6月12日显著高于7月10日和8月8日,约是最小值(8月8日)的5.05~46.22倍和2.39~8.66倍,因此应在6月12日对应的烤烟生长期加强对氮磷流失的防治。各处理中,厨余垃圾配施化肥(FW-NPK)处理在不同时间下均高于其他处理,FW处理6月12日TN和TP流失浓度均低于NPK处理(TN:48.98%~121.11%、TP:15.55%~47.25%),且流失量均小于CK(TN:31.26%~53.84%、TP:15.64%~84.78%),说明施用厨余垃圾能够降低径流中TN,TP含量。

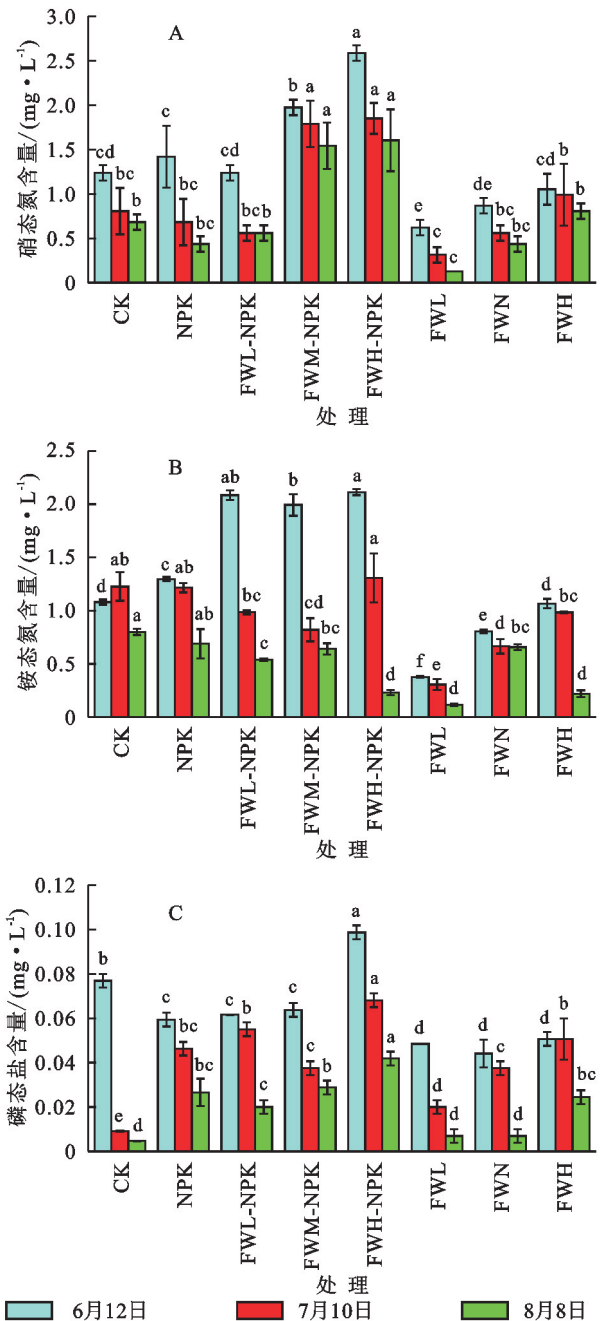
泥沙TN和TP流失浓度和流失量在时间梯度上均呈现递减的趋势(图6),总体变化趋势为FW-NPK>NPK>CK>FW,且流失量均在6月12日出现最大值(图6B,D),分别为8月8日的1.99~4.08倍和1.14~1.36倍。

从不同处理来看,不同时间下泥沙TN,TP流失量FW处理均小于CK(6月12日为TN:10.32%~32.44%、TP:12.53%~36.21%;7月10日为TN:6.32%~37.78%、TP:32.62%~62.73%;8月8日为TN:28.98%~120.75%、TP:5.23%~42.50%)。同时6月12日和7月10日流失浓度均小于NPK处理(6月12日:TN11.13%~17.53%、TP15.67%~35.67%;7月10日:TN18.64%~54.45%、TP9.52%~44.33%);FW-NPK处理则表现为流失浓度和流失量在不同时间下均高于其他处理。

### 2.3 不同施肥处理下土壤氮磷富集特征

图7反映了土壤氮素在烤烟生长期内的变化情况,从不同处理来看,FW处理在不同时期(团棵期、圆顶期、成熟期、撂荒期)相较于CK均提升了土壤TN, $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NH}_4^+$ -N含量,其中TN含量提升25.36%~49.10%,10.50%~13.47%,13.06%~30.83%,

6.83%~18.49%,提升幅度最大的为团棵期;FWH处理 $\text{NH}_4^+$ -N含量则提升(294.61%,90.00%,233.33%,200.00%),且仅在圆顶期与CK相比差异不显著( $P>0.05$ ),提升幅度最大的为团棵期; $\text{NO}_3^-$ -N含量提升幅度最大的则为圆顶期(253.84%)。FW-NPK处理相较于CK也显著提升了土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量(44.22%~48.77%,291.13%~317.52%,160.33%~221.09%,40.45%~380.28%)。



注:图中不同字母代表同一场降雨下径流养分不同处理间差异显著( $p<0.05$ ),6.12.7.10.8.8分别代表2022年6月12日、7月10日和8月8日,下同。

图4 径流氮磷有效养分含量

Fig. 4 Effective nutrient content of nitrogen and phosphorus in runoff

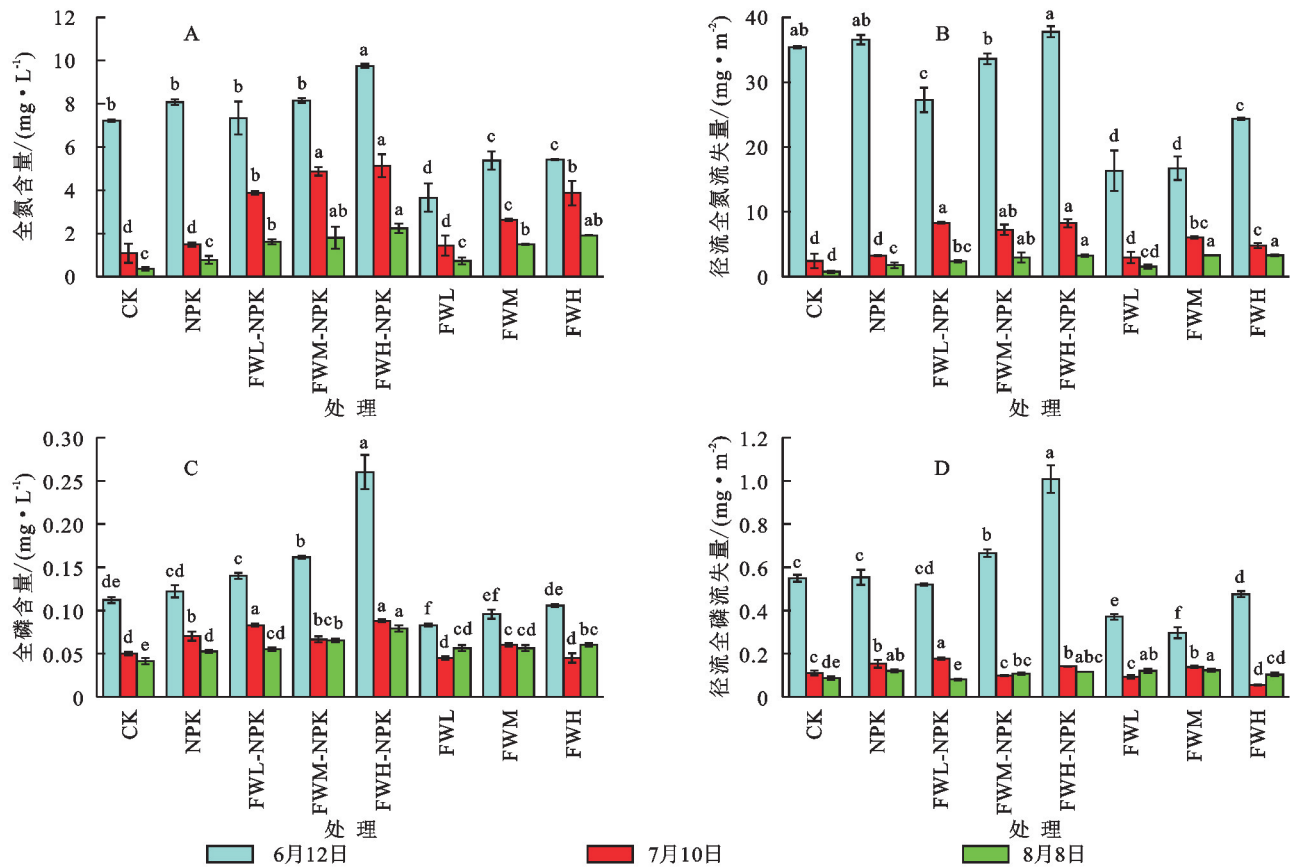


图 5 径流全量养分含量及流失量

Fig. 5 Total nutrient content and loss of runoff

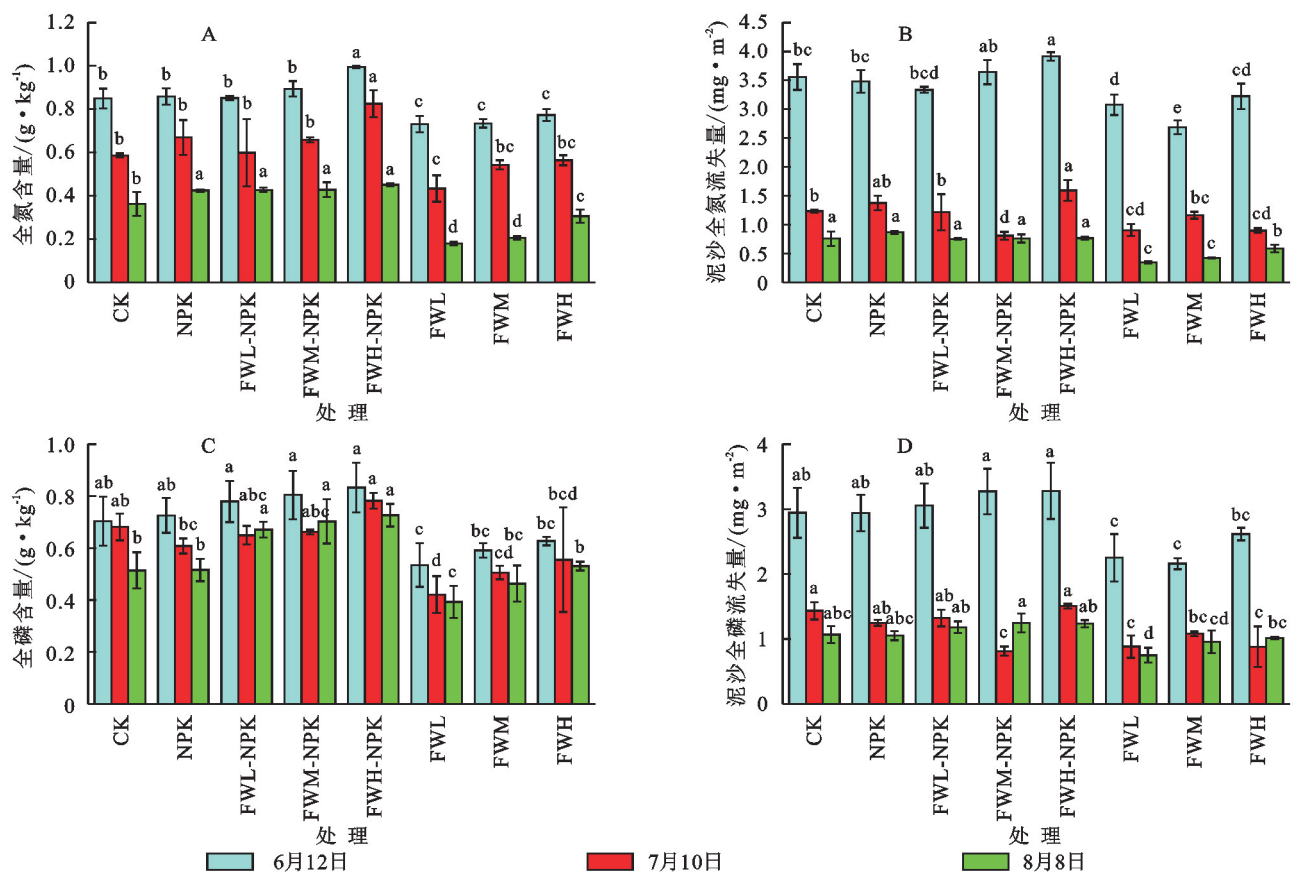


图 6 泥沙全量养分含量及流失量

Fig. 6 Nitrogen and phosphorus content and loss of sediment

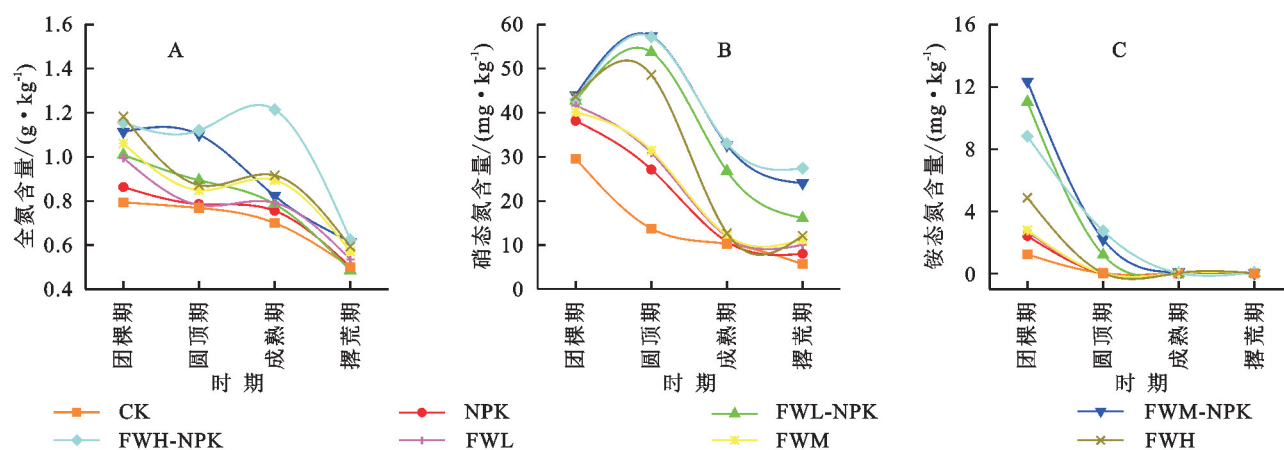


图7 土壤氮含量

Fig. 7 Soil nitrogen content

从不同时期来看,土壤 TP 含量在 4 个时期呈现出先增加后降低的趋势,在成熟期出现峰值(图 8A),具体趋势为 FWH-NPK>FWM-NPK>FWH>FWL-NPK>FWM>FWL>NPK>CK。土壤 AP 含量则呈现出积累逐渐降低的趋势,但在撂荒期积累量有所回升(图 8B),在团棵期出现峰值,具体趋势为 FW-NPK>FW>NPK>CK。还是从不同处理来看,厨余垃圾无

论是单施或者配施化肥,相较于 CK 对 4 个时期土壤 TP 和 AP 含量均有提升,其中 FWH 处理相较于 CK 土壤 TP 含量提升(团棵期:29.69%、圆顶期:36.60%、成熟期:38.46%、撂荒期:31.40%);AP 则提升(19.73%~112.35%),同时 FWM 处理(18.21%~105.26)和 FW-NPK(68.28%~190.21%)处理 AP 含量也均有所提升,且在每个时期对比与 CK 差异均显著( $p<0.05$ )。

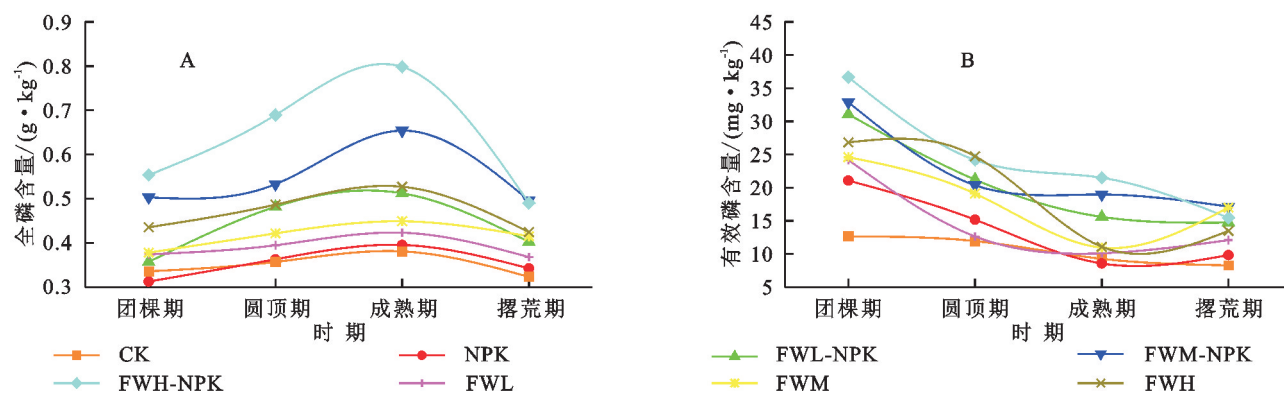


图8 土壤磷含量

Fig. 8 Soil phosphorus content

## 2.4 不同施肥处理下植物氮磷吸收特征

根据表 2 可知 TN 含量总体趋势表现为叶>茎>根,TP 含量表现为叶>根>茎,且在每个器官中 TN 和 TP 含量均随着 FW 施入量的增加而增加。相较于 CK,FW-NPK,FW,NPK 处理下根、茎、叶 TN 含量分别增加 3.98%~68.65%,5.36%~25.67%,15.65%~53.62%;根、茎、叶 TP 含量分别增加 4.66%~79.59%,16.16%~136.66%,15.47%~139.10%。其中 FWH 处理在各个器官 TN,TP 均著高于 CK( $p<0.05$ )。

根据图 9 可知,各处理径流流失量占 N,P 输入量的 19.71%~43.09%,0.88%~2.94%;泥沙流失量占 2.51%~5.93%,4.23%~18.64%;土壤残存量占 19.83%~55.00%,62.77%~85.45%;植物吸收量占 22.79%~35.06%,9.08%~15.65%。数据表明,土壤残存量占 N,P 输入量的主体部分。N 的流失以径流为主,

而 P 的流失以泥沙为主,径流和泥沙流失之和占 N,P 输入量的 22.22%~49.02%,5.12%~21.58%。

FWH-NPK 处理径流泥沙流失量之和占 N,P 输入量的 22.22%,5.12%,但不能仅考虑百分占比而忽视实际流失量,其流失量之和为各处理间的最大值。FW 处理 TN,TP 流失量和输入总量的比值低于 CK (63.54%,26.87%),且随着厨余垃圾施入量的增加而降低,说明施用厨余垃圾能够减少养分的流失率。FWH 处理相比于 CK 降低了流失量(TN:18.84%、TP:20.35%),且土壤残存量为 CK 的 12.20 倍和 3.73 倍,植物吸收量为 CK 的 2.21 倍和 3.26 倍。综上,FWH 处理能够有效维系烤烟农田生态系统 N,P 平衡,增加植物吸收量和增强土壤 N,P 固定能力的同时,能够有效降低 N,P 的流失量,是一种环境友好型施肥方式。



表 2 植株氮磷含量  
Table 2 Plant nitrogen and phosphorus content

处理	TN/(g · kg <sup>-1</sup> )			TP/(g · kg <sup>-1</sup> )		
	根	茎	叶	根	茎	叶
CK	5.275±0.485e	7.159±0.042d	7.131±0.539d	1.155±0.017e	0.802±0.03c	1.124±0.333d
NPK	5.485±0.096e	7.543±0.264cd	8.805±0.195bc	1.224±0.09de	0.932±0.174c	1.298±0.622d
FWL-NPK	6.756±0.381cd	8.156±0.223b	9.327±0.727bc	1.695±0.062bc	1.538±0.13ab	1.646±0.062cd
FWM-NPK	7.269±0.261bc	8.796±0.289a	10.625±1.359a	1.933±0.107ab	1.824±0.083a	2.118±0.016bc
FWH-NPK	8.897±0.255a	8.997±0.539a	10.955±0.255a	2.002±0.08a	1.898±0.104a	2.688±0.13a
FWL	6.683±0.073d	7.817±0.158bc	8.247±0.145cd	1.167±0.171de	0.985±0.024c	1.335±0.044d
FWM	7.003±0.195cd	7.973±0.18bc	8.979±0.655bc	1.427±0.168cd	1.191±0.465bc	1.594±0.13cd
FWH	7.589±0.286b	8.165±0.12b	9.83±0.261ab	1.9±0.232ab	1.518±0.154ab	2.236±0.147ab

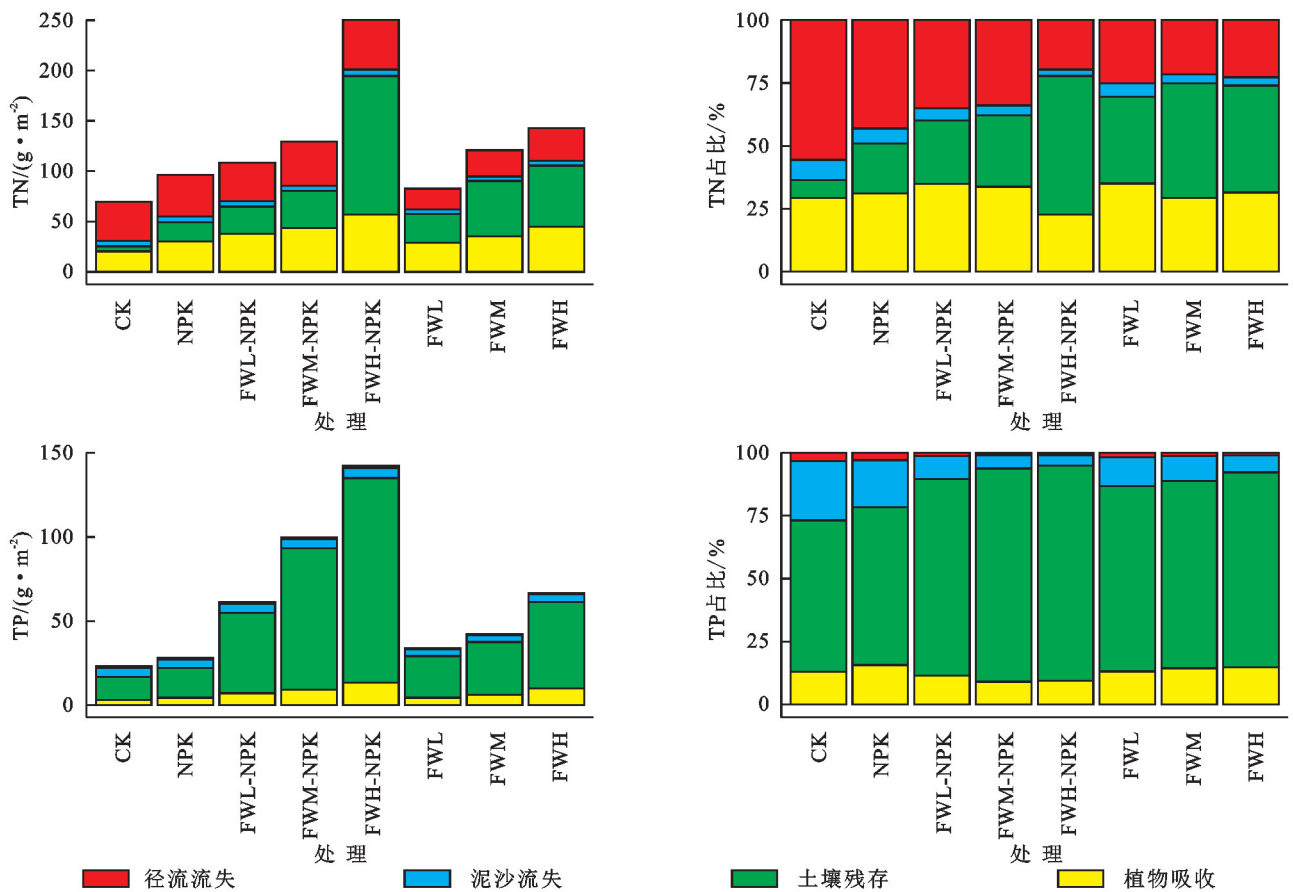


图 9 氮磷平衡特征

Fig. 9 Nitrogen and phosphorus balance characteristics

### 3 讨论

#### 3.1 侵蚀降雨下径流、泥沙氮磷迁移分析

3.1.1 侵蚀降雨下径流泥沙氮素迁移分析 本研究中径流泥沙氮素浓度在不同处理条件下呈现出随时间递减的趋势,可能是因为烤烟生长前期对土壤中氮素吸收能力弱,但随着生长季的推移,烤烟植物对氮素的吸收利用率增加,从而减少了土壤表层氮素的含量,进一步导致径流泥沙中氮素含量的减少。在 6 月 12 日产生的径流中,FW 处理下 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均低于 CK 和 NPK 处理,这可能是由于厨余垃圾作为有机肥料能够提供充足的碳源,促进了反硝化

作用,改变土壤的碳氮比,从而促进土壤团聚体的形成,对养分进行吸附,减少径流产生,降低了氮素的流失;而化肥中的氮素大部分以易溶性形态存在,容易随水分运移而导致径流中氮素含量增加<sup>[13-14]</sup>。同样吴迪等<sup>[15]</sup>研究发现秸秆腐熟还田与常规施肥处理相比,地表径流 TN 含量分别下降 5.10%~10.90%,这与本研究结果一致。7 月 10 日和 8 月 8 日 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量则表现为 FW 处理高于 CK 和 NPK,这可能是由于厨余垃圾作为有机肥料的缓释作用在每个时期均能够提供养分。

在 3 场降雨下泥沙 TN 含量均表现为 FW 低于 CK(6.32%~120.75%),这可能是由于厨余垃圾能够



提供大量的有机质,促进土壤水稳性团聚体的形成,非毛管孔隙度得以增加,改善了土壤的孔隙结构,增加了土壤入渗效率,从而减少了TN的流失<sup>[8-9]</sup>。唐倩等<sup>[16]</sup>研究发现施用有机肥料处理泥沙TN含量是CK的37.84%~90.57%,这与本研究结果相似。在本研究中径流泥沙TN流失量均在6月12日呈现最大值,此时也是防治氮素流失的最重要时期。6月12日是烤烟生长前期,在烤烟生长的初期,植物对养分的需求量相对较小,这导致土壤中积累了大量未被植物吸收的养分,同时因为烤烟生长初期植株幼小,地表裸露面积大,随着雨水的冲刷,这些养分可能会随径流而流失,这与张晓花等<sup>[17]</sup>研究结果相似。

**3.1.2 侵蚀降雨下径流泥沙磷素迁移分析** 本研究发现径流TP、 $\text{PO}_4^{3-}$ 和泥沙TP的含量随着时间变化而逐渐递减,这可能是前期烤烟生长需要磷素较少,土壤中磷含量增加导致流失增加,但随着植物生长季节的进展,土壤中磷的吸收和利用效率增加,导致TP和 $\text{PO}_4^{3-}$ 流失降低。

在6月12日和7月10日径流TP和 $\text{PO}_4^{3-}$ 含量FW处理均低于NPK处理,且不同时间下泥沙TP流失量FW处理均小于CK。这可能是因为有机肥料(如厨余垃圾)的施用可以通过增加土壤有机质,促进磷的吸附和固定,进而减少磷的流失<sup>[18]</sup>。这与唐倩等<sup>[16]</sup>(有机肥处理TP含量下降了16.10%~32.71%)和张晓花等<sup>[17]</sup>(施用有机肥显著降低了泥沙中TP氮流失浓度,泥沙降低20.83%)研究结果相似。但7月10日和8月8日TP含量FW处理高于CK处理,这可能是因为随着时间的推移,有机质的降解增加了有机酸的含量,促进微生物的活性,增加磷的溶解导致FW磷含量高于CK,同时厨余垃圾能提供缓释养分,减少淋失,增加保水,改善土壤结构导致FW磷含量低于NPK<sup>[19-20]</sup>。Hong等<sup>[21]</sup>研究结果认为施用有机肥和化肥增加径流磷流失浓度,这与本研究结果相似。FW-NPK处理P在3场降雨事件中均高于其他处理,尤其是FWH-NPK处理,这可能是因为厨余垃圾的高量施用提供了较多的有机物质,其分解过程中释放了大量的磷,而化肥的施用则增加了土壤中易流失的磷形态,从而导致泥沙中磷含量及其流失量增加<sup>[22]</sup>。相比之下,FW处理效果表明,适度的有机物质施用可以促进土壤结构和微生物活性的改善,从而在一定程度上减少磷的流失<sup>[23]</sup>。

本研究结果表明在烤烟生长季节初期(6月12日)径流和泥沙磷素流失量最大,约是最小值(8月8日)的2.39~8.66倍和1.14~1.36倍。植被盖度是决定磷流失程度的一个重要因素。在6月12日,烤

烟处于其生长周期的早期阶段,此时植被覆盖度不高,雨水的冲刷作用能够迅速改变土壤颗粒的结构,导致原本附着在土壤微粒和细小团聚体上的磷元素得以释放<sup>[17]</sup>。此外,径流的冲刷效应进一步加剧了土壤侵蚀,导致颗粒态磷随着泥沙被侵蚀而流失,从而使得流失的总磷质量浓度增加<sup>[17]</sup>。7月12日和8月8日两次降雨下径流和泥沙TP流失量均低于6月12日,通过改善施肥时间和施肥量,尤其是减少生长季节初期的磷肥施用量,可以有效减少磷的损失。

### 3.2 厨余垃圾堆肥施用下土壤氮磷富集及植物吸收特征影响分析

本研究发现施用厨余垃圾能够增加土壤N、P养分的积累和促进植物的吸收,这可能是因为厨余垃圾堆肥腐熟后含有丰富的C、N、P,相比于化肥同样能够提供植物生长所需的必要养分,同时能够改良土壤,增加养分积累。FW处理增加土壤N积累的效果要明显优于NPK处理;土壤 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NH}_4^+$ -N含量在FWH处理4个时期相较于CK均有所提升,这与Wang等<sup>[24]</sup>研究结果一致,这可能是因为有机物料会增加微生物降解有机物料的氮源,改变碳氮比,使其更有利于土壤微生物发育,并提高微生物活性从而增加供氮能力<sup>[25]</sup>。

研究表明,土壤中TP含量和AP含量的变化受施肥类型和施肥量的影响。施用厨余垃圾对TP含量提升明显,FWH和FWH-NPK处理在4个时期相较于CK均有所提升(29.69%~38.46%,51.73%~109.67%),这可能是由于有机物料(如厨余垃圾)的施用提高了土壤中有机质的含量,促进了磷的矿化过程,从而增加了TP含量<sup>[26]</sup>。此外,土壤中AP含量的变化反映了磷肥的即时可用性及其对作物生长的直接影响,土壤AP含量的逐渐降低趋势及撂荒期的回升可能与作物对磷的吸收和土壤磷的再矿化有关。

植物器官中TN和TP含量的分布模式反映了氮和磷在植物体内的功能和需求差异,本研究中TN含量表现为叶>茎>根,TP含量表现为叶>根>茎。叶片TN和TP含量高于其他器官是由于叶片作为光合作用的主要场所,需要大量的氮来合成叶绿素和其他光合酶,以及磷来支持能量转换过程<sup>[27]</sup>。厨余垃圾提供的有机物质促进了土壤微生物活性,进而加快了氮和磷的矿化过程,使得更多的氮和磷以植物可利用的形式存在<sup>[26]</sup>;同时,化肥的施用提供了快速可用的无机氮和磷源,满足了作物对即时营养的需求。FW处理不仅提高了当前作物的营养状况,还对土壤长期肥力有积极影响,然而,氮和磷的管理需要考虑其环境影响。氮富集可能通过改变土壤微生物

群落而削弱生态系统的碳固定能力<sup>[28]</sup>,因此在研究施肥对 N、P 平衡特征的影响之外,还需考虑 N、P 积累对其他土壤健康因素的影响。

### 3.3 厨余垃圾堆肥施用下氮磷平衡特征

本研究结果显示,施用厨余垃圾能够有效改善烤烟农田生态系统的 N、P 平衡状况,在增加植物吸收量的同时减少流失量。本研究表明,土壤残存量占 N、P 输入量的主体部分(19.83%~55.00%,62.77%~85.45%)。这一结果与 Guo 等<sup>[29]</sup>的研究一致,他们发现有机废物施用能够显著提高土壤的 N、P 含量。FW 处理 TN、TP 流失量占比 25.14%~30.42%,7.73%~13.28%,低于 CK (63.54%,26.87%),且流失量占比随着厨余垃圾施入量的增加而降低,这表明厨余垃圾的施用在减少 N、P 流失方面具有显著效果。这与 Mandal 等<sup>[30]</sup>的研究结果相符,他们指出有机物料能够改善土壤结构,减少土壤失水,从而减少养分的流失。此外,有机物质还能增加土壤对 N、P 的吸附能力<sup>[13-14]</sup>。径流是 TN 流失的主要途径,而 TP 则主要通过泥沙流失,这与唐倩等<sup>[16]</sup>的研究结果一致,他们研究发现径流是农田 TN 流失的主要形式,而泥沙流失则相对较少,TP 则相反。

## 4 结论

(1) 径流、泥沙中的 TN 和 TP 含量随时间递减,6 月 12 日达到峰值,烤烟生长初期流失量最高,是防治 N 和 P 流失的关键时期。单施厨余垃圾显著降低了 N 和 P 流失量,而高量厨余垃圾配施化肥增加了 N、P 的流失量(25.84%,17.64%)。

(2) 高量厨余垃圾和高量厨余垃圾配施化肥均显著增加了土壤和植物 N、P 含量,各器官 TN 和 TP 含量随着厨余垃圾施入量的增加而增加,其中叶的含量最高,施用厨余垃圾能增加植物对 N、P 的吸收。

(3) 径流流失量占 N、P 输入量的 19.71%~43.09%,0.88%~2.94%;泥沙流失量占 2.51%~5.93%,4.23%~18.64%;土壤残存量占 19.83%~55.00%,62.77%~85.45%;植物吸收量占 22.79%~35.06%,9.08%~15.65%。综合考虑下,施用高量厨余垃圾能显著减少 N 和 P 的流失(18.84%和 20.35%)且能为烤烟提供充足养分,在实际农业应用中,可作为有效的施肥策略,以平衡养分提升与流失控制之间的关系。

### 参考文献(References):

- [1] 席爽,周小娟,龙思杰.厨余垃圾资源化处理技术研究进展[J].绿色科技,2022,24(8):189-193.  
Xi S, Zhou X J, Long S J. Research progress on resource treatment technology of food waste[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022,24(8):189-193.
- [2] Yang F, Li G X, Shi H, et al. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. Waste Management, 2015,36:70-76.
- [3] 王秀珍,景元书,谢新乔,等.玉溪烤烟低温冷害风险评价与区划[J].河南农业大学学报,2020,54(4):704-710.  
Wang X Z, Jing Y S, Xie X Q, et al. Risk evaluation and zonation of chilling damage to tobacco in Yuxi[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020,54(4):704-710.
- [4] 何阳,王秀荣,陈新平.缓/控释肥料研究进展及其对农田氮素流失的防控效果[J].安徽农业科学,2021,49(21):7-10,14.  
He Y, Wang X R, Chen X P. Review of slow/controlled release fertilizer and its prevention and control effects of farmland nitrogen loss[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021,49(21):7-10,14.
- [5] Yu C Q, Huang X, Chen H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. Nature, 2019,567(7749):516-520.
- [6] 龙训建,翁薛柔,叶琰,等.近 10 年重庆市降雨侵蚀力时空分布特征[J].西南大学学报:自然科学版,2022,44(6):171-184.  
Long X J, Weng X R, Ye Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall erosivity in Chongqing in recent 10 years[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2022,44(6):171-184.
- [7] Liu Y J, Hu J M, Wang T W, et al. Effects of vegetation cover and road-concentrated flow on hillslope erosion in rainfall and scouring simulation tests in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena, 2016,136:108-117.
- [8] Jain M S, Kalamdhad A S. Soil revitalization via waste utilization: Compost effects on soil organic properties, nutritional, sorption and physical properties[J]. Environmental Technology & Innovation, 2020,18:100668.
- [9] Willekens K, Vandecasteele B, Buchan D, et al. Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system[J]. Applied Soil Ecology, 2014,82:61-71.
- [10] Kabato W, Ergudo T, Mutum L, et al. Correction to: Response of wheat to combined application of nitrogen and phosphorus along with compost[J]. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2022,25(5):621.
- [11] 程学超,李衍素,闫妍,等.番茄和黄瓜茎秆堆肥还田对生姜生长及根区环境的影响[J].新疆农业科学,2019,56(10):1921-1928.  
Cheng X C, Li Y S, Yan Y, et al. Effects of tomato and cucumber stalk compost returning to fields on

- growth and root zone environment of ginger[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019,56(10):1921-1928.
- [12] 张晓花,王克勤,宋娅丽,等.厨余垃圾堆肥对烤烟土壤酶活性和细菌群落结构的影响[J].*土壤*,2023,55(2):321-330.
- Zhang X H, Wang K Q, Song Y L, et al. Effect of food waste composting on enzyme activity and bacterial community structure of flue-cured tobacco soil [J]. *Soils*, 2023,55(2):321-330.
- [13] Zhang J, Sun H M, Wang W G, et al. Enhancement of surface flow constructed wetlands performance at low temperature through seasonal plant collocation [J]. *Bioresource Technology*, 2017,224:222-228.
- [14] Zhang D, Wang C, Zhou Q H, et al. Sediments nitrogen cycling influenced by submerged macrophytes growing in winter[J]. *Water Science and Technology*, 2021,83(7):1728-1738.
- [15] 吴迪,李家逵,白继元,等.蚕豆秸秆还田减施氮肥对烟田氮流失控制及氮素利用效率的影响[J].*西南农业学报*,2023,36(11):2367-2373.
- Wu D, Li J K, Bai J Y, et al. Effects of faba bean straw returning and nitrogen fertilizer reduction on nitrogen loss control and nutrient utilization in tobacco-planted fields[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023,36(11):2367-2373.
- [16] 唐倩,王克勤,宋娅丽,等.有机肥对滇中红壤烤烟坡耕地氮磷流失的影响[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2020,48(6):106-116.
- Tang Q, Wang K Q, Song Y L, et al. Effects of organic fertilizer on nitrogen and phosphorus loss in flue-cured sloping farmland of red soil in central Yunnan [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2020,48(6):106-116.
- [17] 张晓花,王克勤,宋娅丽,等.有机肥施用量对滇中烤烟农田生态系统氮磷平衡的影响[J].*水土保持研究*, 2020,27(6):28-36.
- Zhang X H, Wang K Q, Song Y L, et al. Effects of organic fertilizer application on nitrogen and phosphorus balance in flue-cured tobacco sloping farmland in central Yunnan Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020,27(6):28-36.
- [18] Jones D L, Cross P, Withers P J A, et al. Review: Nutrient stripping: The global disparity between food security and soil nutrient stocks[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013,50(4):851-862.
- [19] Lechtenfeld O J, Kattner G, Flerus R, et al. Molecular transformation and degradation of refractory dissolved organic matter in the Atlantic and Southern Ocean[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014,126:321-337.
- [20] Barzee T J, Edalati A, El-Mashad H, et al. Digestate biofertilizers support similar or higher tomato yields and quality than mineral fertilizer in a subsurface drip fertigation system [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2019,3:58.
- [21] Xia H X, Zhu Q H, Wang S M, et al. Effect of organic fertilizers on nitrogen and phosphorus runoff in purple soil farmland[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021,657(1):012015.
- [22] Zhao J, Ni T, Li J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016,99:1-12.
- [23] He Y H, Zhou X H, Jiang L L, et al. Effects of bio-char application on soil greenhouse gas fluxes: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2017,9(4):743-755.
- [24] Wang J, Wang F, Sha Z M, et al. Enhancing soil nitrogen supply and maintaining rice yield through partial replacement of chemical nitrogen with food waste-derived organic fertilizer[J]. *Plant and Soil*, 2023,492(1):625-639.
- [25] Pinggera J, Geisseler D, Piepho H P, et al. Effect of substrate quality on the N uptake routes of soil microorganisms in different soil depths[J]. *Pedobiologia*, 2015,58(5/6):211-218.
- [26] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2016,6:166-171.
- [27] 王琪,徐程扬.氮磷对植物光合作用及碳分配的影响[J].*山东林业科技*,2005,35(5):59-62.
- Wang Q, Xu C Y. Affects of Nitrogen and phosphorus on plant leaf photosynthesis and carbon partitioning [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2005,35(5):59-62.
- [28] 戴辉,曾泉鑫,周嘉聪,等.罗浮栲林土壤微生物碳利用效率对短期氮添加的响应[J].*应用生态学报*,2022,33(10):2611-2618.
- Dai H, Zeng Q X, Zhou J C, et al. Responses of soil microbial carbon use efficiency to short-term nitrogen addition in *Castanopsis fabri* forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,33(10):2611-2618.
- [29] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010,327(5968):1008-1010.
- [30] Mandal A, Patra A K, Singh D, et al. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages [J]. *Bioresource Technology*, 2007,98(18):3585-3592.