

# 横坡耕作与优化施肥对缓坡地氮磷流失特征和土壤肥力的影响

龚尧, 杜文, 王宇寰, 李元, 陈建军

(云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

**摘要:** [目的] 分析在优化施肥和采取横坡耕作条件下, 缓坡耕地的氮磷流失特征和土壤肥力变化, 为减少氮磷流失, 控制面源防治提供依据, 为保护耕地资源、保持土壤肥力质量提供参考。[方法] 以云南省山地丘陵区缓坡地为研究对象, 在自然降雨条件下, 采用建立地表径流监测小区的方法, 设置顺坡耕作+常规施肥; 横坡耕作+常规施肥; 横坡耕作+优化施肥 3 种处理, 对 2019 年 1 月至 2021 年 12 月不同耕作与施肥方式下氮、磷流失特征进行了连续监测, 采用灰色关联法分析土壤肥力质量。[结果] 氮、磷流失量与降雨量、径流量间存在极显著 ( $p < 0.01$ ) 线性相关关系, 横坡耕作相比于顺坡耕作可以减少 20.46%~40.74% 的地表径流, 19.12%~33.71% 的总氮流失量, 33.33%~60.08% 的总磷流失量; 优化施肥相比于常规施肥可以减少 1.20%~51.71% 的总氮流失量; 各土壤肥力因子除硝态氮和有机质含量减少外, 其他均表现为不同程度的提高; 各处理下的灰色关联度均表现为不同程度的提高, 横坡耕作、优化施肥处理下灰色关联度提高显著 ( $p < 0.05$ ), 提高幅度达 26.63%。[结论] 横坡耕作对于拦截地表径流和减少氮、磷流失具有良好的效果。采用横坡耕作+优化施肥处理对于提高土壤肥力水平以及减少氮、磷流失量效果最优。

**关键词:** 耕作方式; 施肥方式; 氮磷流失; 土壤肥力; 灰色关联法

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)05-0053-09

**中图分类号:** S157.1, S158.5

**文献参数:** 龚尧, 杜文, 王宇寰, 等. 横坡耕作与优化施肥对缓坡地氮磷流失特征和土壤肥力的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 53-61. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.007; Gong Yao, Du Wen, Wang Yuhuan, et al. Effects of cross-slope tillage and increasing organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus loss characteristics and soil fertility on gentle slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 53-61.

## Effects of Cross-slope Tillage and Increasing Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Loss Characteristics and Soil Fertility on Gentle Slope

Gong Yao, Du Wen, Wang Yuhuan, Li Yuan, Chen Jianjun

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

**Abstract:** [Objective] Nitrogen and phosphorus loss characteristics and soil fertility changes on a gentle slope of cultivated land were analyzed under optimal fertilization and cross-slope tillage in order to provide a basis for reducing nitrogen and phosphorus losses, achieving non-point source prevention and treatment, protecting cultivated land resources, and maintaining soil fertility level. [Methods] The study was conducted on a gentle slope area of the mountain and hilly area in Yunnan Province under natural rainfall conditions. A surface runoff monitoring area was established with three treatments: down-slope tillage+conventional fertilization; cross-slope tillage+conventional fertilization; and cross-slope tillage+optimal fertilization. The characteristics of nitrogen and phosphorus loss under different tillage and fertilization methods were continuously monitored from January 2019 to December 2021, and soil fertility level was analyzed by the gray correlation method. [Results] There was a significant linear correlation between nitrogen and phosphorus losses and rainfall and

收稿日期: 2022-11-12

修回日期: 2023-01-15

资助项目: 农业农村部项目“全国农田氮磷流失等监测评价”(13220023)

第一作者: 龚尧(1998—), 男(汉族), 云南省玉溪市人, 硕士研究生, 研究方向为农业面源污染控制。Email: 190815289@qq.com。

通信作者: 陈建军(1970—), 男(汉族), 云南省昆明市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业面源污染控制研究。Email: chenjianjun94@126.com。

runoff ( $p < 0.01$ ). Compared with down-slope tillage, cross-slope tillage reduced surface runoff by 20.46%—40.74%, total nitrogen loss by 19.12%—33.71%, and total phosphorus loss by 33.33%—60.08%. Compared with conventional fertilization, optimized fertilization reduced total nitrogen loss by 1.20%—51.71%. All soil fertility factors showed different degrees of improvement except that the contents of nitrate nitrogen and organic matter decreased. The gray correlation degree of each treatment showed different degrees of improvement, and the gray correlation degree of the cross-slope tillage + optimized fertilization treatment increased significantly ( $p < 0.05$ ), with an increase of 26.63%. [Conclusion] Cross-slope tillage stopped surface runoff and reduced the loss of nitrogen and phosphorus. The application of cross-slope tillage and optimal fertilization application had the greatest effect on improving soil fertility level and reducing nitrogen and phosphorus losses.

**Keywords:** farming methods; fertilization pattern; nitrogen and phosphorus loss; soil fertility; gray correlation method

坡耕地水土流失是中国乃至全世界值得关注的生态环境问题,养分流失及土壤退化问题日益加剧,迫切需要更有力的防治措施。云南省地形地势复杂,坡耕地面积比重大,耕地资源稀缺。山地面积约占全省土地总面积的 94%,坡耕地占耕地面积的 80.61%,可供耕作的土地资源相对不足<sup>[1]</sup>。目前,全省水土流失面积  $1.34 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占全省总面积的 35%,年平均土壤流失量超过  $5.00 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[2]</sup>。一方面导致土壤肥力下降,另一方面氮、磷等养分流出农田汇入水体,引起水体污染。养分流失的主要载体是地表径流和径流中携的泥沙,影响因素包括降雨、植被、耕作方式、施肥方式及土地利用方式等,其中耕作方式与施肥方式对坡面养分流失是非常重要的因素。合理的耕作方式不仅可有效减少坡面水土流失,也有利于土壤养分固持。横坡耕作和施加有机肥是坡耕地面源污染防治的常用措施。横坡耕作作为良好的保护性耕作措施之一,能够有效控制地表径流,减少坡面养分流失,有利于土壤中氮、磷的积累<sup>[3]</sup>。横坡耕作相对于顺坡耕作能显著减少年径流总量 97.1%,泥沙总量 93.1%,减少 63.46%总氮流失,58.98%总磷流失<sup>[4-5]</sup>。另外,施肥方式对氮、磷流失也有重要影响。与单施化肥相比,单施、混施有机肥可显著减少土壤氮、磷的流失<sup>[6-7]</sup>,化肥减施和有机肥替代,可以保证作物产量和提高肥料利用率<sup>[8]</sup>。有机无机肥配施结合了化肥的速效性和有机肥的持久性特点,对提高土壤生产力和改善土壤理化性状能够起到明显的作用。施用化肥和有机肥能有效改善土壤肥力,增加土壤有机质和氮库<sup>[9]</sup>。但基于多年施肥及耕作条件下氮磷流失、土壤肥力变化情况相关研究鲜有报道。

因此,本文在抚仙湖北部山地进行连续 3 a 的氮磷流失监测,研究在优化施肥和采取横坡耕作条件下,缓坡耕地的氮磷流失特征和土壤肥力变化,以期减少氮磷流失、控制面源防治提供依据,为保护耕地资源和保持土壤肥力质量提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市澄江市( $24^{\circ}41'25'' \text{ N}$ ,  $102^{\circ}57'58'' \text{ E}$ )。研究区海拔 1 954 m,具有干湿分明,雨热同季,光热资源丰富的气候优势。雨量夏秋充沛,冬春较少,年均降水量 967.2 mm;日照冬春多,夏秋少,年平均日照时数 2 252.9 h,年平均气温  $22.1^{\circ}\text{C}$ ,土壤类型为红壤,肥力水平中等。

### 1.2 试验设计

本试验选择一个土壤肥力、质地具有代表性,坡度为  $14^{\circ}$  的缓坡地建立地表径流小区。设置 3 个处理:①顺坡种植,常规施肥(CK);②横坡种植,常规施肥(KF);③横坡种植,优化施肥(BMP)。每个处理设置 3 个重复。其中垄高都为 20 cm,顺坡垄宽 170 cm,垄间距 60 cm;横坡垄宽 170 cm,垄间距 66.7 cm。

试验小区的周年轮作模式为甘蓝—大豆轮作(品种为“牛心包”和“京滇鲜脆王”),甘蓝固定  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  株行距于每年 2 月中旬移栽,移栽前施基肥:CK, KF 每小区施普钙 2.16 kg,硫酸钾 0.27 kg,复合肥 1.6 kg,有机肥 54 kg;BMP 每小区施施尿素 0.08 kg,普钙 0.64 kg,硫酸钾 0.30 kg,有机肥 100 kg。3 月中旬开始第 1 次追肥:CK, KF 每小区施尿素 0.24 kg;BMP 每小区施尿素 0.16 kg。4 月上旬开始第 2 次追肥:CK, KF 每小区施尿素 0.42 kg,硫酸钾 0.4 kg,复合肥 0.8 kg;BMP 每小区施尿素 0.24 kg,硫酸钾 0.44 kg。4 月下旬开始第 3 次追肥:CK, KF 每小区施尿素 0.53 kg,硫酸钾 0.4 kg,复合肥 0.8 kg;BMP 每小区施尿素 0.33 kg,硫酸钾 0.44 kg。大豆固定  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  株行距于 6 月上旬开始播种,播种前施基肥:CK, KF 每小区施复合肥 0.54 kg,有机肥 8.1 kg;BMP 每小区施尿素 0.04 kg,硫酸钾 0.06 kg,普钙 0.61 kg,有机肥 27 kg。7 月下旬开始第一次追肥:CK, KF 每小区施复合肥 0.81 kg;

BMP 每小区施尿素 0.03 kg,硫酸钾 0.02 kg。施用的氮、磷、钾肥为尿素(N=46%)、普通过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=16%)、硫酸钾(K<sub>2</sub>O=50%)、复合肥(N:P:K=15:15:15),有机肥为猪粪,第一季甘蓝种植施用的猪粪含水率 14.59%,N=1.66%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=1.84%,K<sub>2</sub>O=1.06%;第二季大豆种植施用猪粪的含水率 60.08%,N=2.26%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=1.39%,K<sub>2</sub>O=2.13%,施肥方式为撒施,CK,KF 均采用当地农户常用的施肥量,BMP 处理减少了部分化肥投入量,增加了有机肥投入量,确保 3 种处理下的氮、磷、钾养分投入总量相同。各处理具体施肥量见表 1。

表 1 不同试验小区施肥量

Table 1 Fertilizer amount applied in different experimental plots

处理	种植季	化肥施入量/(kg·hm <sup>-2</sup> )			有机肥施入量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
CK	1	285.40	229.34	282.00	15 000.00
KF	1	285.40	229.34	282.00	15 000.00
BMP	1	104.23	28.53	166.31	27 779.17
CK	2	56.25	56.25	56.25	2 250.00
KF	2	56.25	56.25	56.25	2 250.00
BMP	2	8.85	27.15	11.70	7 500.00

1.3 采样及测定方法

2019—2021 年每年 11 月对每个小区按“梅花形布点”采集 0—20 cm 耕层土样,每个小区采集 1 kg,参照《土壤农化分析》<sup>[10]</sup>对有机质、全氮、全磷、有效磷、有效钾、全钾、铵态氮、硝态氮指标进行检测。

每次降雨形成径流后,在记录径流量后即可采集径流水样。取样后,对收集桶进行清洁,将剩余的径流泥沙倒掉,用清水将集流桶冲洗干净并放回原位,为下次采样和计量做好准备。对径流水中总氮、硝态氮、铵态氮、总磷、可溶性总磷、可溶性总氮进行测定。采用的方法为:总氮和可溶性氮使用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度比色法(HJ636-2012)进行测定;对水样中的总磷和可溶性总磷使用钼锑抗分光光度法(HJ632-2011)进行测定;铵态氮采用靛酚蓝比色法(FHZHJDQ0117)进行检测;硝态氮采用酚二磺酸比色法(GB7480-7)进行检测。

1.4 相关指标的计算

地表径流流失的氮、磷总量等于整个监测周期中(一个完整的周年)各次径流水中污染物浓度与体积乘积之和。计算公式为:

$$P=\sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

(1)

式中:P 为污染物流失量;C<sub>i</sub> 为第 i 次径流水中氮、磷等的浓度;V<sub>i</sub> 为第 i 次径流水的体积。

本文采用灰色关联法对该坡耕地土壤肥力质量

进行评价。其优点是方法简便、计算量小并且理论可靠,适用于多指标综合评价,以得出各评价单元按土壤肥力质量排序;本试验选择有机质、全氮、全磷、有效磷、有效钾、全钾、硝态氮、铵态氮这 8 项指标作为肥力因素,均为正向指标。评价指标的无量纲化,即将各指标的实际值转化为评价值,以消除各指标量纲带来的影响。

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}}{x_j^{\max}}$$

(2)

式中:x'<sub>ij</sub>为无量纲化值,即通过无量纲化使所有数据在 0~1 的区间之内;x<sub>ij</sub>为评价对象实际值,i=1,2,3…;x<sub>j</sub><sup>max</sup>为理想对象上限值。其中,x<sub>j</sub><sup>max</sup>表示第 j 个指标的最大值;x<sub>ij</sub>表示原始数据中第 i 个样本第 j 个指标的数据。x'<sub>ij</sub>代表标准化数据中第 i 个样本第 j 个指标的数据。

计算比较数列和参考数列的绝对差值:

$$\lceil |x_{ij}-x_{0j}| \triangleq \Delta_{0i}(j) \rceil_{n \times p}$$

(i=1,2…n; j=1,2…p)

(3)

式中:x<sub>ij</sub>代表比较序列;x<sub>0j</sub>代表参考序列;Δ<sub>0i</sub>(j)代表绝对差值,比较数列是指影响系统行为的因素组成的数据序列,它是用每个被评价对象的评价指标取值进行构建的。

灰色关联系数计算公式为:

$$\xi_{0j}(j)=\frac{\min \Delta_{0i}(j)+\rho \max \Delta_{0i}(j)}{\Delta_{0i}(j)+\rho \max \Delta_{0i}(j)}$$

(0<ρ<1)

(4)

式中:ρ 为常数,通常情况下,ρ 取 0.5,本文中 ρ 等于 0.5。minΔ<sub>0i</sub>(j)代表绝对差值的最小值;maxΔ<sub>0i</sub>(j)为绝对差值的最大值,ξ<sub>0j</sub>(j)代表灰色关联系数。

计算灰色关联度并排列关联序:

$$\gamma_{0j}=\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \xi_{0j}(j) \quad (i=1 \cdots n)$$

(5)

式中:γ<sub>0j</sub>为第 i 个样本的灰色关联度;ω<sub>j</sub>为第 j 个指标的权重;p 代表指标的个数;n 代表样本的个数;ξ<sub>0j</sub>(j)为第 i 个样本第 j 个指标的灰色关联系数。

1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 软件进行处理。采用 Origin 2021 进行图表绘制,采用 SPSS 26 对数据进行相关性分析,采用 LSD,Duncan 模型进行组间的多重比较,显著水平取 p<0.05。

2 结果与分析

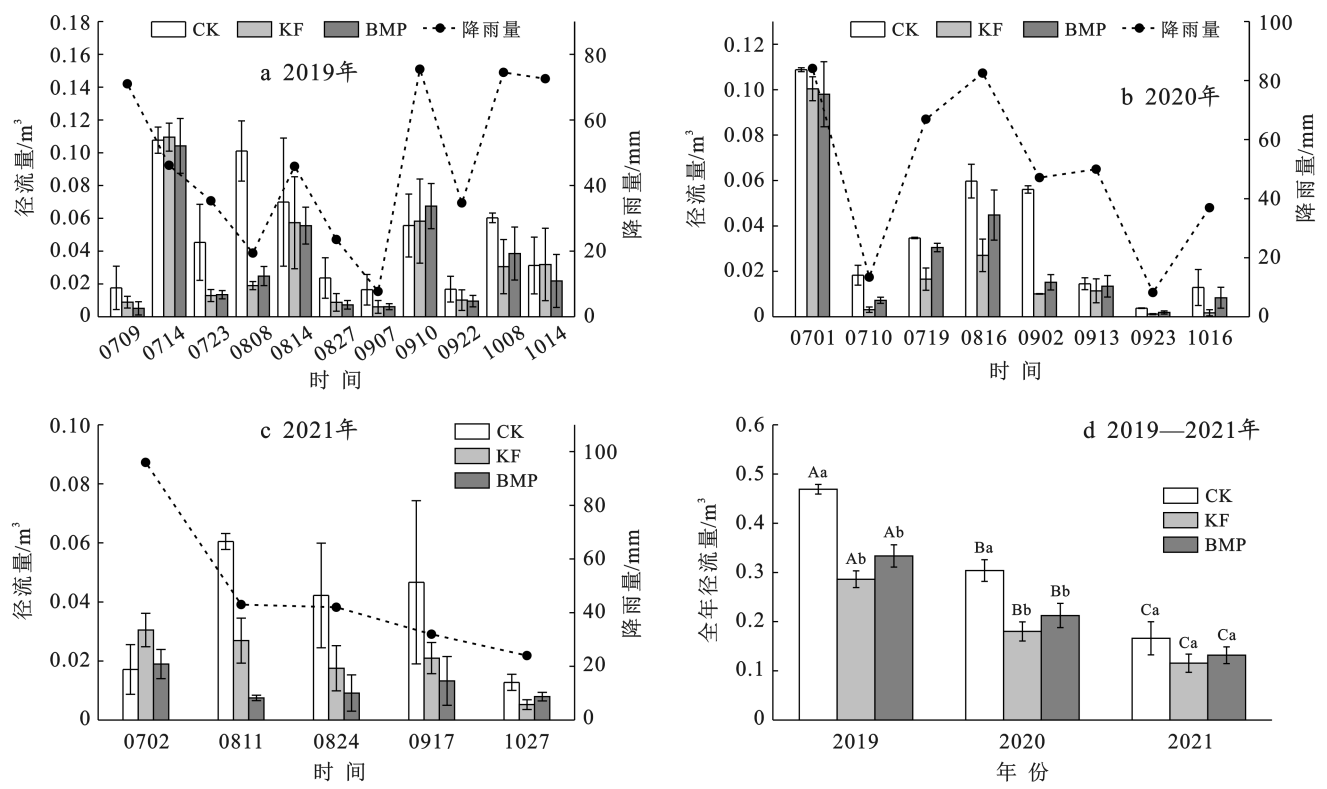
2.1 不同施肥模式和耕作方式下的地表径流特征

由图 1a—1c 可知,2019 年共产生 11 次降雨,全年总降雨量达 506 mm,降雨在 7—10 月较为平均分

布,以 7 月和 10 月较多(152 mm 和 147 mm),占全年降雨总量 59.17%。2020 年共产生 8 次降雨,全年总降雨量达 389 mm,降雨集中在 7 月和 9 月(164 mm 和 105 mm),占全年总降雨量 69.31%。2021 年共产生 5 次降雨,全年总降雨量达 237 mm,降雨主要集中在 7 月和 8 月(96 mm 和 85 mm),占全年总降雨量 76.37%。各处理下的单次地表径流量受降雨量影响较大,呈极显著( $p<0.01$ )线性相关,相

关系数为 0.383。

如图 1d 所示,随着年度时间的变化,径流量呈现整体减少的趋势,同一处理不同年份之间存在显著性差异( $p<0.05$ ),各处理下的最大值均出现在 2019 年,分别为  $0.469\text{ m}^3$  (CK), $0.286\text{ m}^3$  (KF)和  $0.333\text{ m}^3$  (BMP),同一年份不同处理间均呈现:CK>BMP>KF,2019,2020 年 CK 处理下的径流量显著高于 KF 和 BMP 处理。



注:①CK,KF,BMP 为试验处理(详见表 1);②不同大写字母表示同一处理不同年份在  $p<0.05$  水平差异显著;不同小写字母表示同一年份不同处理在  $p<0.05$  水平差异显著。下同。

图 1 2019—2021 年不同处理耕地上降雨量与径流量

Fig.1 Rainfall and runoff on cultivated land under different treatments from 2019 to 2021

## 2.2 不同处理下总氮流失量差异

由图 2a—2c 可知,2019 年次降雨条件下,各处理总氮流失量介于  $0.020\sim0.193\text{ kg/hm}^2$  (CK), $0.008\sim0.209\text{ kg/hm}^2$  (KF), $0.011\sim0.107\text{ kg/hm}^2$  (BMP);2020 年次降雨条件下,各处理总氮流失量介于  $0.016\sim0.105\text{ kg/hm}^2$  (CK), $0.007\sim0.166\text{ kg/hm}^2$  (KF), $0.008\sim0.109\text{ kg/hm}^2$  (BMP);2021 年次降雨条件下,各处理总氮流失量介于  $0.048\sim0.237\text{ kg/hm}^2$  (CK), $0.019\sim0.231\text{ kg/hm}^2$  (KF), $0.013\sim0.076\text{ kg/hm}^2$  (BMP),3 种处理下的总氮流失量在年内变化大致表现为先上升后降低。

由图 2d 可知,随着年度时间的变化,总氮流失量整体呈现减少的趋势。各处理下的最大值均出现在 2019 年,分别为  $0.850\text{ kg/hm}^2$  (CK), $0.664\text{ kg/hm}^2$  (KF), $0.481\text{ kg/hm}^2$  (BMP)。CK 和 BMP 处理下的最小值出现在 2021 年,分别为  $0.493,0.193\text{ kg/hm}^2$ ,KF 处理下最小值出现在 2020 年,流失量为  $0.353\text{ kg/hm}^2$ 。在 2019 年 CK 和 KF 总氮流失量显著( $p<0.05$ )高于 2020 年和 2021 年。

BMP 处理在不同年份存在显著性差异。同一年份不同处理之间总氮流失量均表现为:CK>KF>BMP,在 2019 年和 2021 年中,3 种处理存在显著性的差异。2020 年中 CK 处理显著高于 KF 和 BMP 处理。



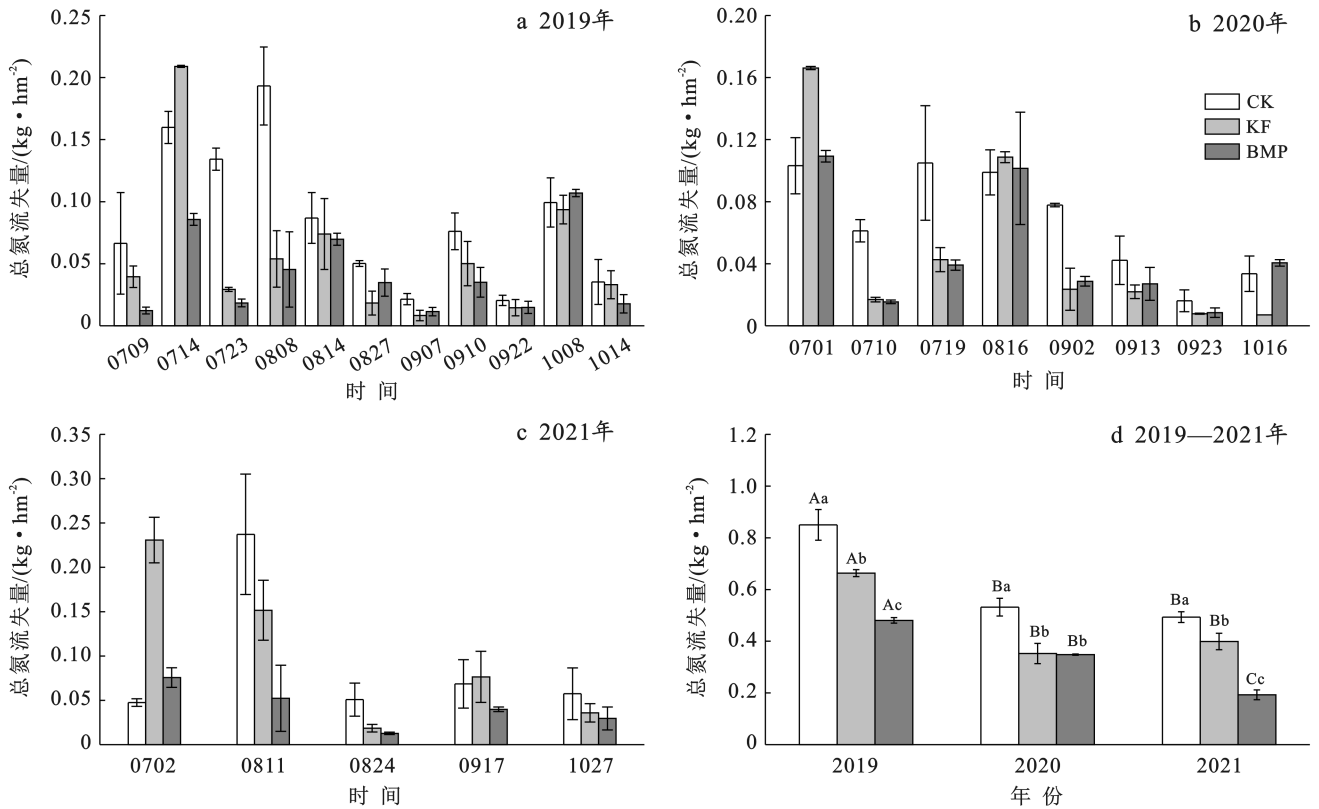


图 2 2019—2021 年不同处理耕地氮流失特征

Fig.2 Nitrogen loss characteristics of cultivated land under different treatments from 2019 to 2021

2.3 不同处理下总磷流失量差异

由图 3a—3c 可知,2019 年次降雨条件下,各处理总磷流失量介于 0.003~0.011 kg/hm<sup>2</sup> (CK),0.001~0.008 kg/hm<sup>2</sup> (KF),0.001~0.009 kg/hm<sup>2</sup> (BMP),3 种处理在年内表现为先升后降的变化趋势。2020 年次降雨条件下,各处理总磷流失量介于 0.001~0.039 kg/hm<sup>2</sup> (CK),0.001~0.019 kg/hm<sup>2</sup> (KF),0.001~0.022 kg/hm<sup>2</sup> (BMP),3 种处理在年内变化趋势波动较大,呈现先减少再增加后减少。2021 年次降雨条件下,各处理总磷流失量介于 0.003~0.018 kg/hm<sup>2</sup> (CK),0.002~0.008 kg/hm<sup>2</sup> (KF),0.001~0.005 kg/hm<sup>2</sup> (BMP),3 种处理在年内变化也大致表现为先增加后减少。在 2019—2021 年中,CK 的单次总磷流失量普遍要高于 KF 和 BMP。各处理下的单次总磷流失量受降雨量和径流量影响较大,呈极显著( $p<0.01$ )线性相关,相关系数分别为 0.403,0.721(见表 2)。

如图 3d 所示,各处理下的总磷流失量随着年度时间的变化呈现减少的趋势。CK 和 BMP 处理下的最大值均出现在 2020 年,分别为 0.097,0.046 kg/hm<sup>2</sup>。KF 处理下最大值出现在 2019 年为 0.042 kg/hm<sup>2</sup>。各处理下的最小值均出现在 2021 年,分别

为 0.042 kg/hm<sup>2</sup> (CK),0.026 kg/hm<sup>2</sup> (KF)和 0.015 kg/hm<sup>2</sup> (BMP)。

CK 总磷流失量在不同年份之间存在显著差异( $p<0.05$ ),2021 年 KF 和 BMP 总磷流失量显著低于 2019 年和 2020 年。同一年份中,CK 处理下的总磷流失量均显著高于 KF 和 BMP。

表 2 降雨量、径流量、总氮流失量和总磷流失量之间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis among rainfall, runoff, total nitrogen loss and total phosphorus loss				
指 标	降雨量	径流量	总氮流失量	总磷流失量
降雨量	1			
径流量	0.383**	1		
总氮流失量	0.364**	0.703**	1	
总磷流失量	0.403**	0.721**	0.583**	1

注: \* 和 \*\* 分别表示  $p<0.05$  水平显著相关和  $p<0.01$  水平显著极相关。

2.4 全年氮磷流失形态

由图 4a 可知,不同处理硝态氮 3 a 的流失均值占总氮比例大小顺序为:BMP(62.60%)>KF(52.27%)>CK(51.47%)。不同处理硝态氮占总氮比例大小

顺序为:CK(5.44%)>KF(4.97%)>BMP(4.65%)。各处理下的总氮流失主要以硝态氮为主,铵态氮流失占较小比例。由图 4b 可知,从磷流失形态的 3 a 流失均值来看,不同处理可溶态磷占总磷流失比例大

小顺序为:KF(71.14%)>BMP(69.07%)>CK(61.37%),不同处理颗粒态磷占总磷流失比例大小顺序为:CK(38.63%)>BMP(30.93%)>KF(28.86%),各处理下的总磷流失主要以可溶态总磷为主。

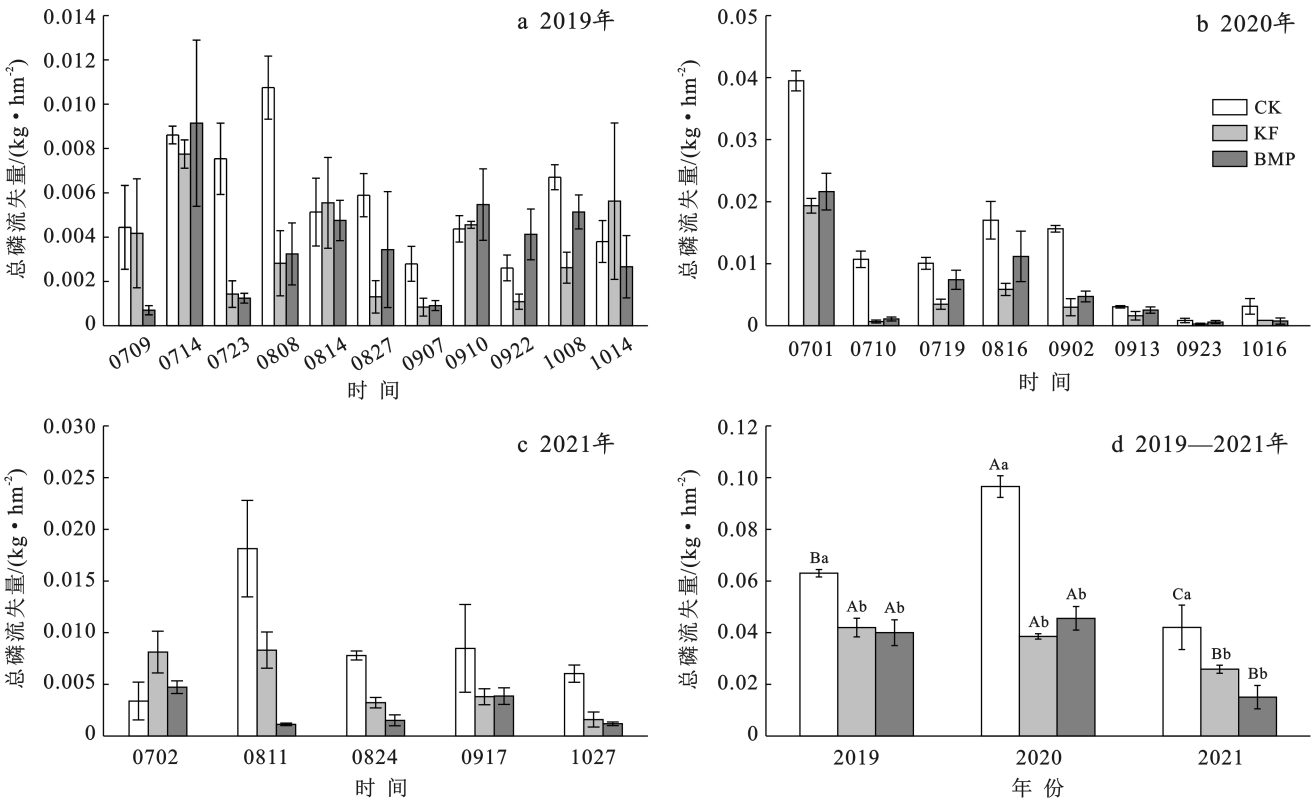


图 3 2019—2021 年不同处理耕地磷流失特征

Fig.3 Phosphorus loss characteristics of cultivated land under different treatments from 2019 to 2021

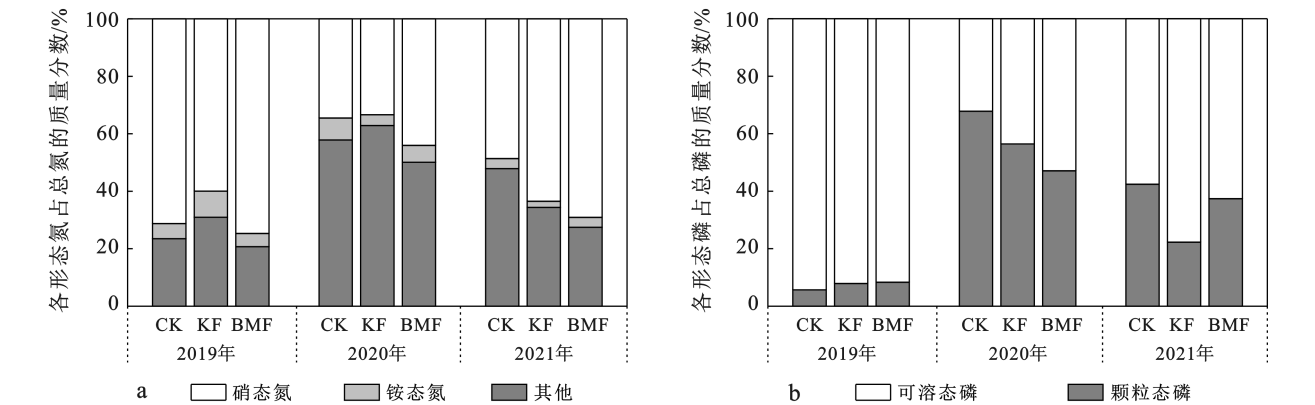


图 4 2019—2021 年不同处理耕地不同形态氮及磷的含量

Fig.4 Contents of nitrogen and phosphorus in different forms of cultivated land under different treatments from 2019 to 2021

2.5 2019—2021 年土壤肥力变化

由表 3 可知,2021 年与 2019 年硝态氮含量相比,CK,KF 和 BMP 变化幅度分别降低 78.01%,78.57%和 82.04%;与 2019 年相比,2021 年 CK,KF 和 BMP 处理下土壤铵态氮含量分别提高了 9 385.33%,

7 017.52%和 8 025.87%;与 2019 年相比,2021 年 CK,KF 和 BMP 处理下土壤有机质含量分别降低了 6.78%,8.30%和 0.33%;与 2019 年相比,2021 年 CK,KF 和 BMP 处理下土壤全氮含量分别提高了 127.37%,151.69%和 183.83%;与 2019 年相比,

2021 年CK,KF 和 BMP 处理下土壤全磷含量分别提高了 413.71%,163.43% 和 192.06%;与 2019 年相比,2021 年 CK,KF 和 BMP 处理下土壤全钾含量分别提高了 8.42%,4.20% 和 95.08%;与 2019 年相比,2021 年 CK,KF 和 BMP 处理下土壤有效磷变化幅度分别为-45.89%,-41.07% 和 +25.82%;与 2019 年相比,2021 年 CK,KF 和 BMP 处理下土壤有效钾含

量分别提高了 68.51%,11.04% 和 162.96%。

经过 3 a 的时间,在经历了 3 个雨季之后,在评价土壤肥力的各项指标当中,硝态氮和有机质的含量均有降低,对照 CK 和处理 KF 有效磷的含量降低,其他指标均有一定程度的提高。这说明缓坡耕地在受降雨侵蚀的同时,伴随了一定土壤养分的流失,但土壤养分也存在盈余。

表 3 2019—2020 年不同处理土壤肥力指标  
Table 3 Soil fertility index of different treatments from 2019 to 2021

年份	处理	硝态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
2019	CK	13.93±1.31	0.88±0.06	30.50±0.92	0.72±0.04	0.37±0.06	14.37±0.21	208.20±1.13	326.00±77.62
	KF	13.36±2.38	1.56±0.04	30.13±2.40	0.77±0.08	0.62±0.01	15.07±0.25	170.27±1.16	317.00±60.63
	BMP	14.94±2.29	1.43±0.06	30.53±4.03	0.80±0.14	0.62±0.01	13.53±0.35	82.23±0.40	153.33±24.01
2020	CK	1.77±0.65	110.33±6.66	28.50±1.48	1.30±0.41	2.16±0.12	10.74±0.86	96.57±6.34	351.67±24.83
	KF	2.03±0.23	123.00±7.00	28.17±1.86	1.27±0.24	1.95±0.36	10.03±1.00	92.30±17.04	353.33±25.01
	BMP	2.91±0.62	139.67±12.66	28.70±1.84	1.38±0.25	1.58±0.48	10.10±0.33	94.77±4.10	342.67±32.59
2021	CK	3.06±1.30	83.23±3.98	28.43±1.21	1.64±0.12	1.89±0.44	15.58±1.98	112.67±13.32	549.33±92.32
	KF	2.86±0.82	111.03±23.60	27.63±1.21	1.94±0.33	1.64±0.24	15.70±0.41	100.33±1.53	352.00±40.73
	BMP	2.68±1.14	116.20±53.60	30.43±4.36	2.27±0.25	1.81±0.33	26.40±17.46	103.47±12.00	402.33±78.42

通过对土壤肥力的各项指标进行灰色关联分析,得到了不同耕作方式、施肥模式下土壤肥力质量与理想情况下的灰色关联度,选取各项土壤指标中的最大值构建“理想对象”,评价对象的灰色关联度越高,则说明与理想对象越接近,土壤肥力质量越高。由图 5a 可

知,参考 2021 年资料,对数据的关联度进行排序,结果表明 BMP 处理下的灰色关联度最高(为 0.641),其次为 CK(0.591)、KF(0.557)。横坡耕作、优化施肥处理的灰色关联度与参考对象最为接近,表明在缓坡耕地,长期增施有机肥,进行横坡耕作可以更好地维持土壤肥力。

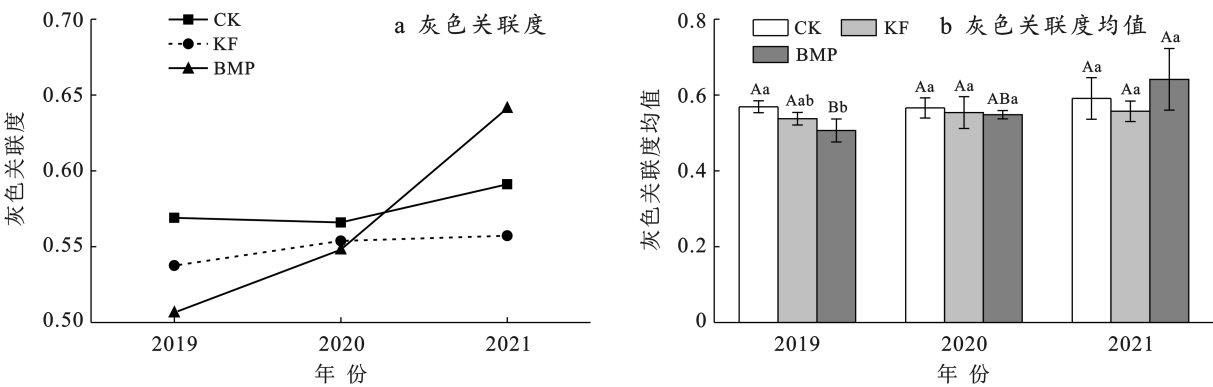


图 5 2019—2021 年不同处理土壤肥力的各项指标灰色关联分析  
Fig.5 Grey correlation analysis of soil fertility indexes under different treatments from 2019 to 2021

连续 3 a 施肥后,各处理下的关联度均发生不同的变化,整体来看 CK,KF 处理下整体保持不变,BMP 处理下从 2019—2021 年关联度逐年提高。其中 CK 处理下,从 2019 年(0.569)小幅降低后又小幅上升在 2021 年达到最大值(0.591),KF 处理下,从 2019 年(0.538)逐年小幅升高,在 2021 年达到最大值

(0.557)。BMP 处理下,从 2019 年(0.507)逐年升高,在 2021 年达到最大值(0.641),各处理下的关联度最大值都出现在 2021 年。与 2019 年相比,2021 年 CK 关联度提高 3.87%,KF 提高 3.67%,BMP 提高 26.63%,从 3 a 的试验研究成果来看,各处理下灰色关联度均呈现不同程度的提高,其中以 BMP 处理增

幅最大。由图 5b 可知,2019—2021 年,CK,KF 同一处理下的灰色关联度均未表现出显著的变化,BMP 处理下,则显著提高土壤肥力质量的关联度( $p<0.05$ ),说明采用横坡耕作、优化施肥处理可以提高土壤肥力。

### 3 讨论

#### 3.1 不同施肥模式和耕作方式对地表径流量的影响

在本研究中,自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式下的地表径流产生量具有较大差异,但均集中于每年 7—10 月降雨高发时期。单次降雨条件下,不同处理下径流产生量不同,总体呈现 CK 处理要高于 KF 与 BMP 处理,从全年总径流量来看,同样体现这一规律。并且在 2019,2020 年产生了显著性的差异,横坡种植在减少地表径流量方面,效果良好,相比于 CK 处理,KF 处理减少了 30.46%~40.74% 地表径流,BMP 处理减少 20.71%~30.11% 地表径流量,毛妍婷等<sup>[11]</sup>研究也同样表明,横坡耕作与顺坡耕作相比,径流极显著( $p<0.01$ )减少了 49.57%~52.13%。受降雨量的影响,在降雨量较大的年份,横坡与顺坡耕作产生的地表径流量整体都表现为增加。范成五等<sup>[12]</sup>在坡耕地地表径流流失的研究发现横坡耕作与顺坡耕作相比,可以减少 25% 的地表径流量。而同为横坡耕作的 KF 和 BMP 处理之间,地表径流量并未产生显著差异,提高有机肥的施入量对于减少地表径流量并未产生明显的效果,这与何石福等<sup>[13]</sup>的研究结果不同,原因是旱地径流与种植季节的施氮量和降水量有关<sup>[14]</sup>,3 种处理下的氮、磷、钾养分总投入量是相同的,因此横坡处理下的两种施肥模式对于地表径流的拦截能力没有差异。

#### 3.2 不同施肥模式和耕作方式对氮磷流失的影响

2019—2021 年全年总氮流失量都呈现 CK>KF>BMP 的规律,在 2019 年和 2021 年之间 3 种处理下的总氮流失量产生了显著的差异,与 CK 相比,KF 减少了 19.12%~33.71% 的总氮流失量,BMP 减少了 34.51%~60.95% 的总氮流失量,说明采用横坡种植可以有效减少总氮流失量。杜映妮等<sup>[15]</sup>在研究结论表明,在缓坡地同样化肥施用量下,横坡耕作的径流中全氮流失量比顺坡耕作可减少 58.57%。与 KF 相比,BMP 处理可以减少 1.20%~51.71% 的总氮流失量,说明采用优化施肥处理可以在减少总氮流失方面取得良好效果。裘培栋等<sup>[16]</sup>研究也表明,配施有机肥和横坡耕作能明显减少径流中的 N、P 流失量,且在小降雨强度条件下保持水土,减少 N、P 流失的效果最为明显。总氮流失受地表径流量影响较大,在 2019 年整体的地表径流量要大于 2020 年和 2021 年,

3 种处理的总氮流失量最大值也出现在 2019 年,同时单次总氮流失量与地表径流量呈极显著( $p<0.01$ )线性相关关系,表明在地表径流量增加的同时,总氮流失量也在增加。钱婧等<sup>[17]</sup>通过人工模拟降雨试验发现,总氮流失主要以径流携带为主,径流是总氮流失的主要形式。各处理下的总氮流失主要以硝态氮为主,铵态氮流失占较小比例。说明地表径流中的总氮主要以硝态氮的形态流失。程鹏等<sup>[18]</sup>研究也表明,坡耕地地表径流氮流失形态以硝态氮为主,占地表径流总氮含量的 58.32%~63.12%。BMP 处理下的硝态氮流失比例在 3 a 的研究中都高于 KF 和 CK 处理,说明有机肥替代化肥施入农田中有流失较多的硝态氮的风险。

单次总磷流失量大多体现出 CK 大于 KF 和 BMP 处理的规律。全年总磷流失总量中,这一规律更为明显,CK 处理要显著高于 KF 和 BMP 处理,KF 和 BMP 处理之间的总磷流失量并未产生明显的差异,与 CK 相比,KF 减少了 33.33%~60.08% 的总磷流失量,BMP 减少了 36.51%~64.15% 的总磷流失量,说明采用横坡耕作可以在控制磷流失方面取得良好成效,优化施肥处理对于减少地表径流中磷流失并未产生明显的效果,分析其原因是磷素流失量由径流量和径流磷素流失浓度共同决定,对照处理由于不施用任何肥料,坡面产流量较大,横坡耕作改变了坡面的微地形地貌,大量的径流及泥沙在地垄处淤积,增加了土壤对磷的吸附,从而减轻了磷的流失<sup>[19]</sup>。猪粪中的磷素含量较高,非反刍动物粪肥中磷素含量高于反刍动物,易分解,也可以很快地释放活性磷<sup>[20]</sup>,韩笑等<sup>[21]</sup>研究结果与本文相似,随着有机肥施入量的增加,地表径流中的总磷浓度也会提高。单次总磷流失量与地表径流量极显著( $p<0.01$ )正相关,表明在地表径流量增加的同时,总磷流失量也在增加。白怡婧等<sup>[22]</sup>研究表明,磷流失量受地表径流量影响较大,二者之间呈极显著正相关,相关系数达 0.928。

#### 3.3 土壤肥力变化

经过 3 a 的研究发现,3 种处理下的研究区土壤肥力指标中硝态氮和有机质含量都出现了不同程度的降低,其中 3 种处理下硝态氮降低幅度呈现 BMP>KF>CK,同时从地表径流中总氮流失形态来看,BMP 处理下流失的硝态氮比例相比 KF 和 CK 要高,说明优化施肥处理会增加硝态氮的流失风险,3 种处理下的有机质降低幅度体现为:KF>CK>BMP,说明 BMP 处理,可以减少有机质的流失,稳固土壤肥力。有相关学者研究表明,增加有机肥的施用量可以缓解了化肥对土壤的退化作用和有机质流失<sup>[23]</sup>。同



时,CK 和 KF 处理下的有效磷含量也出现不同程度的降低,BMP 处理则表现为大幅提高,说明增加有机肥的施入量,可以提高土壤中的有效磷含量,从而提高土壤肥力。廖逸宁等<sup>[24]</sup>研究表明有机—无机肥配施,且能显著提高土壤速效养分含量( $p<0.05$ ),铵态氮、全氮、全磷、全钾、有效钾含量都表现出不同程度的提高,原因可能是 3 种处理下,向土壤中施入的养分较多,补充了土壤流失的养分,导致土壤中的余留养分较多。这与俄胜哲等<sup>[25]</sup>研究结果相似,长期秸秆还田、施用有机肥及有机肥与化肥配施作可提高土壤有机质和全氮含量,提升土壤肥力质量。

在采用灰色关联法对研究区 3 a 的土壤肥力质量进行分析后发现,2021 年各处理下的灰色关联度呈现  $BMP>CK>KF$ 。从 3 a 的各处理下的灰色关联度变化幅度来看同样也体现出这一规律。与 2019 年相比,2021 年 BMP 处理下灰色关联度显著提高( $p<0.05$ ),提高幅度达 26.63%。这说明采用横坡耕作、优化施肥处理可以提高土壤肥力。郭龙等<sup>[26]</sup>研究也表明,30%~50%猪粪有机养分替代在降低麦田氮径流流失量且维持较低磷径流流失量前提下有助于提高土壤肥力和肥料利用率。

## 4 结 论

(1) 径流量受降雨量影响较大,具有极显著的正相关关系( $p<0.01$ )采用横坡耕作可以有效拦截地表径流,相比于顺坡耕作,可以减少 30.46%~40.74%的地表径流量。

(2) 同一年份不用处理之间总氮流失量均表现为  $CK>KF>BMP$ ,采用横坡耕作可以显著( $p<0.05$ )减少缓坡地总氮、总磷流失量,优化施肥相比常规施肥可以显著减少总氮流失量。

(3) 不同处理氮、磷流失主要集中在 7—10 月降雨时期,表明 7—10 月是南方山地丘陵区缓坡地防控氮、磷流失的关键时间点。

(4) 不同处理下,评价土壤肥力的关联度逐年提高,相比常规施肥,优化施肥处理可以显著提高土壤肥力水平。

### [参 考 文 献]

- [1] 王伟,贺莉莎.云南省坡耕地现状调查及分析[J].中国水土保持,2019(4):20-23.
- [2] 和俊.云南省坡耕地水土流失综合治理的探索与实践[J].中国水土保持,2011(2):11-13.
- [3] 杜映妮,李天阳,何丙辉,等.长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征[J].环境科学,2020,41(1):394-402.
- [4] 盖浩,刘平奇,张梦璇,等.黑土坡耕地横坡垄作对减少径流及土壤有机碳流失的作用[J].水土保持学报,2022,36(2):300-304.
- [5] 鲁耀,胡万里,雷宝坤,等.云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测[J].农业环境科学学报,2012,31(8):1544-1553.
- [6] 韩晓飞,高明,谢德体,等.减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J].环境科学,2016,37(7):2770-2778.
- [7] Zhao Zheng, Yue Yubo, Sha Zhimin, et al. Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation [J]. Atmospheric Environment, 2015, 119:393-401.
- [8] 黄璐璐,王站付,施俭,等.化肥减量对小麦产量和肥料利用率影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2019,37(6):229-234.
- [9] 温延臣,李燕青,袁亮,等.长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J].农业工程学报,2015,31(7):91-99.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [11] 毛妍婷,刘宏斌,郭树芳,等.耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):26-33.
- [12] 范成五,罗益,王文华,等.不同管理措施对黄壤坡耕地径流氮输出的控制效果[J].农业环境科学学报,2014,33(10):1948-1955.
- [13] 何石福,荣湘民,李艳,等.有机肥替代和稻草覆盖对中南丘陵茶园氮磷径流损失的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):120-126.
- [14] Hou Pengfu, Jiang Yu, Yan Lei, et al. Effect of fertilization on nitrogen losses through surface runoffs in Chinese farmlands: a meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2021,793:148554.
- [15] 杜映妮,李天阳,何丙辉.不同施肥和耕作处理紫色土坡耕地碳、氮、磷流失特征[J].植物营养与肥科学报,2021,27(12):2149-2159.
- [16] 裘培栋,张鹏程,何为媛,等.模拟降雨下不同农作措施紫色土坡耕地氮磷流失特征[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(6):69-76.
- [17] 钱婧,张丽萍,王文艳,等.施肥条件下坡面菜地径流携氮流失模拟降雨试验[J].水土保持学报,2015,29(5):248-253.
- [18] 程鹏,廖超林,肖其亮,等.横坡垄作和秸秆覆盖对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(5):1036-1046.
- [19] 闫建梅,何丙辉,田太强,等.施肥水平与耕作模式对紫色土坡耕地地表径流磷素流失的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):132-136.

- 2020,18(6):140-146.
- [17] Li Yong, Mo Yaqi, Are K S, et al. Sugarcane planting patterns control ephemeral gully erosion and associated nutrient losses: evidence from hillslope observation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 309:107289.
- [18] 黄俣晴,陈婷婷,李勇,等.流域沟渠植草拦截农田氮磷入河污染的有效性研究[J].*植物营养与肥料学报*, 2021,27(11):1993-2000.
- [19] Levavasseur F, Biarnès A, Bailly J S, et al. Time-varying impacts of different management regimes on vegetation cover in agricultural ditches [J]. *Agricultural Water Management*, 2014,140:14-19.
- [20] 李炳杨.广西甘蔗种植现状、问题及对策[J].*热带农业科学*,2018,38(4):119-127.
- [21] Li Yong, Tang Cheng, Huang Zhigang, et al. Increase in farm size significantly accelerated stream channel erosion and associated nutrient losses from an intensive agricultural watershed [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020,295:106900.
- [22] 马博英.香根草逆境生理生态适应研究进展[J].*生物学杂志*,2009,26(1):65-68.
- [23] Li Y, Yu H Q, Zhou N, et al. Linking fine root and understory vegetation to channel erosion in forested hillslopes of Southwestern China [J]. *Plant and Soil*, 2015,389(1):323-334.
- [24] 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.
- [25] Puigdefàbregas J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005,30(2):133-147.
- [26] 杨翠红,周小淇,郭豪,等.甘蔗种植配置模式对坡面沟蚀及土壤有机碳流失的影响研究[J/OL].*江苏农业科学*:1-10 [2023-03-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1214.S.20230104.1127.003.html>
- [27] 王京行,吕刚,李晗,等.排土场边坡土壤侵蚀特征对雨强和植被覆盖度的响应[J].*灌溉排水学报*,2021,40(S1):36-39.
- [28] 唐诚.广西集约化蔗区沟渠侵蚀及其污染物输移与控制措施[D].广西 南宁:广西大学,2021.
- [29] 彭琼,刘宝元,曹琦,等.作物覆盖度对土壤侵蚀的影响[J].*水土保持学报*,2022,36(5):97-103.
- [30] 安瞳昕,周锋,吴珍珍,等.坡耕地间作作物群体水土保持耕作措施[J].*水土保持研究*,2019,26(2):17-22.
- [31] Baker D W, Bledsoe B P, Price J M. Stream nitrate uptake and transient storage over a gradient of geomorphic complexity, north-central Colorado, USA [J]. *Hydrological Processes*,2012,26(21):3241-3252.
- [32] da Fonseca A F, Melfi A J, Monteiro F A, et al. Treated sewage effluent as a source of water and nitrogen for Tifton 85 bermudagrass [J]. *Agricultural Water Management*, 2007,87(3):328-336.
- [33] Su Yuanyi, Zhang Yang, Wang Huanyuan, et al. Interactive effects of rainfall intensity and initial thaw depth on slope erosion [J]. *Sustainability*, 2022,14(6):3172.
- [34] Li Yong, Are K S, Huang Zhigang, et al. Particulate N and P exports from sugarcane growing watershed are more influenced by surface runoff than fertilization [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020,302:107087.
- [35] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review [J]. *Progress in Physical Geography (Earth and Environment)*, 2005,29(2):189-217.
- [36] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].*土壤学报*,2010,47(3):401-407.
- [37] Stanley W Trimble, Alexandra C. Mendel. The cow as a geomorphic agent: a critical review [J]. *Geomorphology*, 1995,13(1/4):233-253.

(上接第 61 页)

- [20] Pagliari P H, Laboski C A M. Investigation of the inorganic and organic phosphorus forms in animal manure [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012,41(3):901-910.
- [21] 韩笑,席运官,田伟,等.有机肥施用模式对环水有机蔬菜种植氮磷径流的影响[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2021,29(3):465-473.
- [22] 白怡婧,李渝,黄兴成,等.保护性耕作对黄壤坡耕地水土流失及作物产量的影响[J].*水土保持通报*,2019,39(6):16-20.
- [23] Dunjana N, Nyamugafata P, Shumba A, et al. Effects of cattle manure on selected soil physical properties of smallholder farms on two soils of Murewa, Zimbabwe [J]. *Soil Use and Management*, 2012,28(2):221-228.
- [24] 廖逸宁,郭素娟,王芳芳,等.有机—无机肥配施对板栗园土壤肥力及根系功能性状的影响[J].*南京林业大学学报(自然科学版)*,2021,45(5):84-92.
- [25] 俄胜哲,丁宁平,李利利,等.黄土高原黑垆土施肥的作物累积产量及土壤肥力贡献[J].*土壤学报*,2019,56(1):195-206.
- [26] 郭龙,骆美,常珺枫,等.有机养分替代对小麦产量、土壤肥力及麦田氮磷径流流失的影响[J].*核农学报*,2022,36(10):2063-2071.