

# 不同施肥与耕作方式下土壤—径流氮磷变化特征

张海香, 李天阳, 何丙辉, 吴小雨, 杜映妮

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 为探讨长期不同施肥与耕作条件下土壤与径流中氮磷化学计量关系变化。在紫色土坡耕地设 5 个处理: 顺坡耕作无施肥(对照, CK)、顺坡耕作+化肥有机肥混施(T1)、顺坡耕作+单施化肥(T2)、顺坡耕作+1.5 倍单施化肥增量(T3)和横坡耕作+单施化肥措施(T4), 每个处理均设 3 个重复, 分析 2008—2017 年土壤总氮(TN<sub>s</sub>)、总磷(TP<sub>s</sub>)含量与化学计量 TN<sub>s</sub>: TP<sub>s</sub>, 以及 83 场产流事件径流总氮(TN<sub>w</sub>)、总磷(TP<sub>w</sub>)浓度及化学计量 TN<sub>w</sub>: TP<sub>w</sub> 的变化特征。结果表明: CK 处理 TN<sub>s</sub>、TP<sub>s</sub> 含量与 T1 处理差异不显著, 但显著低于 T2、T3、T4 处理, 主要是因为化肥施用显著提高土壤氮磷含量。各处理间 TN<sub>s</sub>: TP<sub>s</sub> 无显著差异, 其平均值为 3.55~4.79, CV 值为 0.39~0.94, 表明施肥对于多年间土壤氮磷比并无显著影响。CK 处理的 TN<sub>w</sub> 浓度显著高于其他施肥处理; T1 处理 TN<sub>w</sub> 浓度与 T2 处理差异不显著, 但显著高于 T3、T4 处理。CK 处理 TP<sub>w</sub> 浓度与 T2、T3、T4 处理差异不显著, 但显著低于 T1 处理。CK 处理的 TN<sub>w</sub>: TP<sub>w</sub> 显著高于各施肥处理, 而各施肥处理间 TN<sub>w</sub>: TP<sub>w</sub> 差异不显著, 各处理平均值为 25.48~56.83, CV 值为 1.11~1.80, 均属于强变异, 施肥显著降低径流氮磷比, 并稳定次降雨事件间的差异。年平均 TN<sub>w</sub> 与 TN<sub>s</sub>、TN<sub>w</sub> 与 TN<sub>s</sub>: TP<sub>s</sub>、TP<sub>w</sub> 与 TN<sub>s</sub>: TP<sub>s</sub> 之间均呈显著线性正相关, 径流 N 流失浓度受土壤 N 含量的显著影响, 但年平均 TN<sub>s</sub>: TP<sub>s</sub> 与 TN<sub>w</sub>: TP<sub>w</sub> 关系不显著。施肥与耕作可解耦土壤与径流氮磷化学计量关系, 研究结果可为农业面源污染防治提供理论依据。

**关键词:** 施肥与耕作; 土壤养分; 化学计量; 径流流失; 紫色土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0281-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.036

## Change Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Soil-Runoff Under Different Conditions of Fertilization and Tillage

ZHANG Haixiang, LI Tianyang, HE Binghui, WU Xiaoyu, DU Yingni

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

**Abstract:** In order to study the changes of nitrogen and phosphorus stoichiometry in soil and runoff under long-term fertilization and tillage, five treatments (three replicates were set in each treatment) were set up on the sloping land of purple soil: downslope tillage without fertilization (CK), downslope tillage with mixed application of chemical fertilizer and organic fertilizer (T1), downslope tillage with chemical fertilizer (T2), downslope tillage with 1.5 times increment of chemical fertilizer (T3), and contour tillage with fertilizer (T4), to analyze the change characteristics of soil total nitrogen (TN<sub>s</sub>), soil total phosphorus (TP<sub>s</sub>) and TN<sub>s</sub>: TP<sub>s</sub>, runoff total nitrogen (TN<sub>w</sub>), runoff total phosphorus (TP<sub>w</sub>) and TN<sub>w</sub>: TP<sub>w</sub> in 83 runoff-producing events during 2008—2017. The results showed that the contents of TN<sub>s</sub> and TP<sub>s</sub> in CK treatment were not significantly different from those in T1 treatment, but significantly lower than those in T2, T3 and T4 treatment. The main reason was that the application of chemical fertilizer significantly increased the content of nitrogen and phosphorus in soil. The mean value of TN<sub>s</sub>: TP<sub>s</sub> was 3.55~4.79, and the CV value was 0.39~0.94, indicating that fertilization had no significant effect on N/P ratio. The concentration of TN<sub>w</sub> in CK treatment was significantly higher than that in other fertilization treatments, and the concentration of TN<sub>w</sub> in T1 treatment was not significantly different from that in T2 treatment, but significantly higher than that in T3 and T4 treatment. The TP<sub>w</sub> concentration of CK treatment was not

收稿日期: 2022-10-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(U20A20326); 中央高校基本科研业务费专项(SWU-KT22060); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202100212)

第一作者: 张海香(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: zhx990119@163.com

通信作者: 何丙辉(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

significantly different from that in T2, T3, T4 treatment, but significantly lower than that in T1 treatment. The  $TN_w : TP_w$  of CK treatment was significantly higher than that in fertilization treatments, but there was no significant difference in  $TN_w : TP_w$  among fertilization treatments. The mean values of each treatment was 25.48~56.83, and the CV value was 1.11~1.80. Fertilization significantly reduced the N/P ratio in runoff and stabilized the difference between rainfall events. Annual mean  $TN_w$  and  $TP_w$  were both significantly positively correlated with annual mean  $TN_s$  and  $TN_s : TP_s$ , indicating runoff N loss concentration was significantly affected by soil N content, while annual mean  $TN_s : TP_s$  and  $TN_w : TP_w$  were not significantly correlated. Fertilization and tillage could decouple the relationship between nitrogen and phosphorus stoichiometry in soil and runoff. The results can provide theoretical basis for the prevention and control of agricultural non-point source pollution.

**Keywords:** fertilization and tillage; soil nutrient; stoichiometric characteristics; runoff loss; purple soil

施肥和耕作是提高农田作物产量最普遍的管理措施,对土壤氮(N)、磷(P)等养分含量具有直接影响<sup>[1-2]</sup>。在降雨径流驱动下,土壤 N、P 会迁移至下游水体,增加下游水体富营养化风险<sup>[3]</sup>。近年来,许多学者开展施肥和耕作方式对于土壤 N、P 含量以及径流 N、P 流失影响的研究。柳开楼等<sup>[4]</sup>研究表明,有机和无机肥配施显著增加土壤的 N、P 含量及其养分活化度;Qiao 等<sup>[5]</sup>研究发现,径流中的氮素流失与施氮量呈线性正相关,减量施肥可以显著提高氮肥利用率。另外,横坡耕作对于减少径流和可溶性养分的流失具有显著作用<sup>[6]</sup>。

生态化学计量常用于判别化学元素的平衡程度及养分限制因子<sup>[7]</sup>。受施肥和耕作的影响,土壤中 N、P 含量变化可引起其化学计量(N:P)发生改变<sup>[8]</sup>,并导致径流中 N、P 浓度及 N:P 发生显著变化<sup>[9]</sup>。宋亚辉等<sup>[10]</sup>在黄土高原开展研究表明,单施有机肥或有机肥氮肥混施会显著提高表层土壤 N:P,而氮磷肥配施可显著降低表层土壤的 N:P;Smith 等<sup>[11]</sup>通过对比研究不同施肥措施对径流 N、P 化学计量的影响发现,施用有机肥会显著降低径流 N:P。尽管已有较多研究关注施肥和耕作对土壤和径流中 N:P 变化的影响,但土壤 N:P 与径流 N:P 常被分开考虑,而对施肥和耕作影响下土壤 N:P 与径流 N:P 间耦合关系并不清楚。

紫色土坡耕地是西南地区主要的耕地类型。与黄土高原地区的黄土<sup>[10]</sup>、东北地区的黑土<sup>[12]</sup>以及南方丘陵区红壤<sup>[4]</sup>相比,紫色土表现出结构松散且养分含量高的特征。在高强度耕作扰动和降雨影响下,紫色土坡耕地 N、P 流失严重<sup>[13]</sup>。已有大量研究<sup>[14-15]</sup>关注紫色土坡耕地施肥和耕作对土壤或径流 N、P 变化的影响,而对长期施肥和耕作影响下土壤 N、P 与径流 N、P 的共同变化特征还并不清楚,此外,对于土壤与径流中 N、P 元素的化学计量耦合变化的研究很少见。基于紫色土坡耕地长期定位观测试验,

分析 2008—2017 年土壤 N、P 含量与化学计量、径流 N、P 浓度及化学计量的变化特征,探究年际土壤 N、P 含量及化学计量与径流 N、P 浓度及化学计量间的相关性,以期加深对紫色土坡耕地 N、P 迁移转化过程认识,为区域面源污染防治提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于重庆市北碚区西南大学水土保持试验园农业面源污染长期监测基地(29°48′42″N,106°24′20″E),属亚热带季风气候,年平均气温 18.3℃,年均降水量 1 100 mm,平均日照时间 1 270 h,无霜期约 334 天。土壤类型为紫色土,成土母质为中生代侏罗纪沙溪庙组紫色砂泥岩。试验点以坡耕地雨养农业为主,为区域主要的农业生产活动类型,具有较好的代表性。

### 1.2 试验设计

在坡度为 15°的紫色土坡耕地建立 15 个径流小区,各小区面积为 32 m<sup>2</sup>(8 m×4 m)(图 1)。各小区用水泥田埂隔开,地上埂宽和埂高分别为 25、20 cm。各径流小区下方设径流池和径流桶用于收集径流。各小区内种植农作物,为传统的冬小麦—夏玉米轮作模式。种植的小麦品种为“渝麦七号”,玉米品种为“中糯 309”。冬小麦于当年 11 月采用穴播进行播种,来年 5 月收获;夏玉米于当年 3 月育苗,4 月移栽,当年 7 月下旬至 8 月上旬收获。

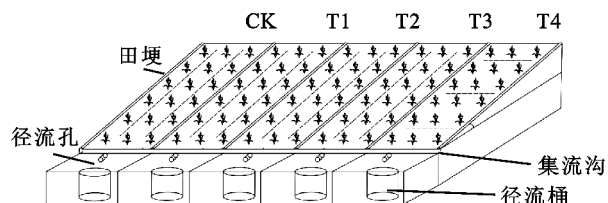


图 1 试验小区示意

试验设 5 个处理,各处理设 3 次重复,分别为:顺坡耕作无施肥对照(CK)、顺坡耕作化肥与有机肥混施(T1)、顺坡耕作单施化肥(T2)、顺坡耕作 1.5 倍单施化肥增量(T3)和横坡耕作单施化肥(T4)(图 1)。

各小区每年施肥方式一致,小麦季于 12 月上旬施基肥,包括氮、磷、钾肥和有机肥,来年 2 月上旬施追肥,包括氮肥和钾肥。玉米季于 4 月上旬施基肥,包括氮、磷、钾肥和有机肥,5 月下旬施追肥,包括氮肥和有机肥。其中,氮、磷、钾肥分别为尿素( $N\geq 46.4\%$ )、过磷酸钙( $P_2O_5\geq 12\%$ )和氯化钾( $K_2O\geq 60\%$ );有机肥为猪粪, $N$ 、 $P_2O_5$  和  $K_2O$  的含量分别为 0.24%,0.17%,0.21%,具体施肥量见表 1。

表 1 2008—2017 年间各处理养分输入情况 单位:kg

| 种植季 | 施肥时间       | 处理 | 各单位小区化肥营养输入量 |                                     |                       | 各单位小区有机肥营养输入量 |                                     |                       |
|-----|------------|----|--------------|-------------------------------------|-----------------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------|
|     |            |    | N(46.4%)     | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (12%) | K <sub>2</sub> O(60%) | N(46.4%)      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (12%) | K <sub>2</sub> O(60%) |
| 小麦  | 12 月上旬(基肥) | CK | 0            | 0                                   | 0                     |               |                                     |                       |
|     |            | T1 | 0.22         | 0.14                                | 0                     | 0.09          | 0.06                                | 0.08                  |
|     |            | T2 | 0.22         | 0.24                                | 0.34                  |               |                                     |                       |
|     |            | T3 | 0.32         | 0.36                                | 0.50                  |               |                                     |                       |
|     |            | T4 | 0.22         | 0.24                                | 0.34                  |               |                                     |                       |
|     | 2 月上旬(追肥)  | CK | 0            | 0                                   | 0                     |               |                                     |                       |
|     |            | T1 | 0.22         | 0                                   | 0                     |               |                                     |                       |
|     |            | T2 | 0.51         | 0                                   | 0.14                  |               |                                     |                       |
|     |            | T3 | 0.76         | 0                                   | 0.22                  |               |                                     |                       |
|     |            | T4 | 0.51         | 0                                   | 0.14                  |               |                                     |                       |
| 玉米  | 4 月上旬(基肥)  | CK | 0            | 0                                   | 0                     |               |                                     |                       |
|     |            | T1 | 0            | 0.17                                | 0                     | 0.09          | 0.06                                | 0.08                  |
|     |            | T2 | 0.20         | 0.29                                | 0.48                  |               |                                     |                       |
|     |            | T3 | 0.30         | 0.43                                | 0.72                  |               |                                     |                       |
|     |            | T4 | 0.20         | 0.29                                | 0.48                  |               |                                     |                       |
|     | 5 月下旬(追肥)  | CK | 0            | 0                                   | 0                     |               |                                     |                       |
|     |            | T1 | 0.71         | 0                                   | 0                     | 0.17          | 0.12                                | 0.15                  |
|     |            | T2 | 0.40         | 0                                   | 0                     |               |                                     |                       |
|     |            | T3 | 0.60         | 0                                   | 0                     |               |                                     |                       |
|     |            | T4 | 0.40         | 0                                   | 0                     |               |                                     |                       |

1.3 样品采集与分析

试验于 2008—2017 年每年 11 月冬小麦播种前采集土壤样品。在各小区利用梅花形布点法确定 5 个样点,分别采集 0—20 cm 土样,用四分法选取 1 kg 土样装入编号黑色塑料袋带回实验室,去除石砾、根系等杂物后风干研磨过 0.25 mm 筛以供测试。于当年测定土壤样品的全氮(TN<sub>s</sub>)和全磷(TP<sub>s</sub>)含量,TN<sub>s</sub> 采用半微量凯氏蒸馏法测定,TP<sub>s</sub> 采用钼蓝比色法<sup>[16]</sup>测定。

在 2008—2017 年间次降雨产流后测定径流总体积,并采集径流样品。用清洁竹竿充分搅匀径流水后,用水样润洗过的塑料瓶(500 mL)在不同深度和位置采集样品。采样结束后清洗径流桶和径流池便于下次采集样品。于当年测定径流样品的总氮(TN<sub>w</sub>)和总磷(TP<sub>w</sub>)浓度,TN<sub>w</sub> 采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定,TP<sub>w</sub> 采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法<sup>[17]</sup>确定。

1.4 数据处理与分析

土壤及径流氮磷化学计量比均为摩尔质量比,采用式(1)计算:

$$TN_j : TP_j = \frac{C_{TNj}/n_1}{C_{TPj}/n_2} \tag{1}$$

式中: $j$  为不同样品,当  $j$  取 S 时, $C_{TNj}$  为各处理土壤样品测得的 TN 含量(g/kg); $C_{TPj}$  为各处理土壤样品测得的 TP 含量(g/kg)。当  $j$  取 W 时, $C_{TNj}$  为各处理径流样品测得的 TN 浓度(mg/L); $C_{TPj}$  为各处理径流样品测得的 TP 浓度(mg/L); $n_1$  为 N 的相对原子质量, $n_1=14$ ;  $n_2$  为 P 的相对原子质量, $n_2=31$ 。

通过每年各处理的平均值计算土壤 TN 和 TP 的年平均含量,径流 TN 和 TP 的年平均浓度采用式(2)和(3)计算:

$$TN_{w年} = \sum_{i=1}^n C_i R_i / \sum_{i=1}^n R_i \tag{2}$$

$$TP_{w年} = \sum_{i=1}^n C_i R_i / \sum_{i=1}^n R_i \tag{3}$$

式中:TN<sub>w年</sub> 为径流样品 TN 的年平均浓度(mg/L);TP<sub>w年</sub> 为径流样品 TP 的年平均浓度(mg/L); $C_i$  为次降雨下径流 TN 或 TP 浓度(mg/L); $R_i$  为次降雨径流量(L); $i$  为次降雨事件编号; $n$  为次降雨事件总数, $n=83$ 。

采用变异系数(CV)评价土壤及径流中 N、P 化学计量比变异程度,当  $CV<0.15$  时为弱变异, $0.15<$

$CV < 0.75$  时为中等变异,  $CV > 0.75$  时为强变异<sup>[14]</sup>, 变异系数采用式(4)计算:

$$CV = \sigma / \bar{x} \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为各处理下土壤及径流中 N、P 化学计量比的标准偏差;  $\bar{x}$  为各处理下土壤及径流中 N、P 化学计量比的平均值。

采用单因素方差(One-way anova)检验各处理  $TN_s$ 、 $TP_s$ 、 $TN_s : TP_s$ 、 $TN_w$ 、 $TP_w$  及  $TN_w : TP_w$  差异性, 采用 Pearson 分析揭示各指标间的相关关系, 采用回归分析建立显著相关指标间的数学关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 $TN_s$ 、 $TP_s$ 含量及化学计量特征

由图 2 可知, 2008—2017 年各处理  $TN_s$ 、 $TP_s$  含

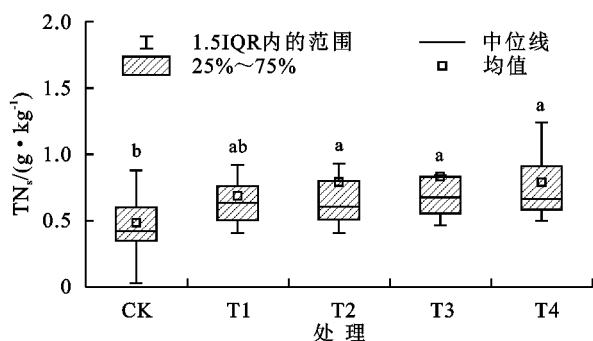


图 2 2008—2017 年各处理土壤  $TN_s$  和  $TP_s$  的含量变化

表 2 2008—2017 年各处理  $TN_s : TP_s$  变化特征

| 处理 | 最小值  | 最大值   | 平均值±标准差    | 变异系数 |
|----|------|-------|------------|------|
| CK | 0.18 | 13.22 | 3.94±2.86a | 0.73 |
| T1 | 0.66 | 6.91  | 3.55±1.39a | 0.39 |
| T2 | 0.66 | 7.92  | 3.98±2.19a | 0.55 |
| T3 | 0.74 | 15.52 | 4.79±4.51a | 0.94 |
| T4 | 0.70 | 8.01  | 3.59±1.74a | 0.48 |

### 2.2 径流 $TN_w$ 、 $TP_w$ 浓度及化学计量特征

由图 3 可知, 2008—2017 年各处理  $TN_w$ 、 $TP_w$  浓度变化。CK 处理的  $TN_w$  均显著高于 T1、T2、T3、T4 ( $p < 0.05$ ), 分别增加 31%, 41%, 63%, 58%。CK 处理的  $TP_w$  显著低于 T1, 减小 21%, 但与 T2、

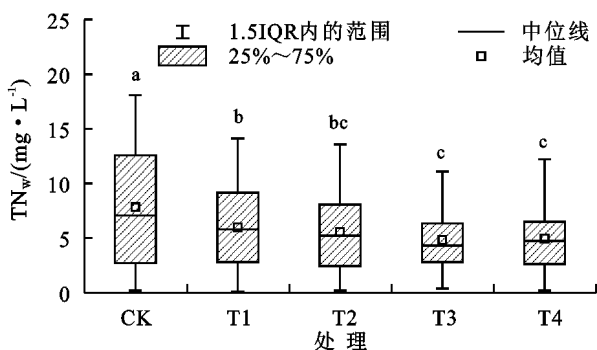


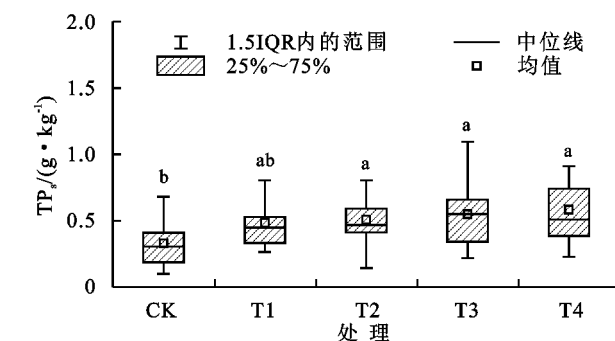
图 3 2008—2017 年各处理径流  $TN_w$  和  $TP_w$  浓度变化

### 2.3 土壤 $TN_s$ 、 $TP_s$ 和径流 $TN_w$ 、 $TP_w$ 间的关系

由表 4 可知, 2008—2017 年土壤  $TN_{s年}$ 、 $TP_{s年}$  含量、

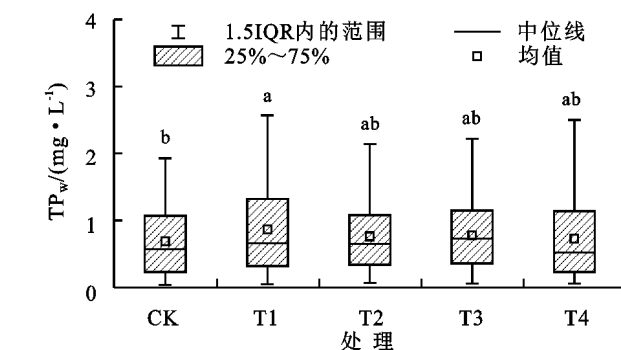
量变化。CK 处理的  $TN_s$  与 T1 处理差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 但显著低于 T2、T3、T4 处理 ( $p < 0.05$ ), 分别比 T2、T3、T4 减小 39%, 42%, 39%。各处理  $TP_s$  变化规律与  $TN_s$  相同, CK 处理的  $TP_s$  比 T2、T3、T4 分别减小 35%, 40%, 44%。

由表 2 可知, 各处理  $TN_s : TP_s$  的变化。各处理间  $TN_s : TP_s$  差异不显著 ( $p > 0.05$ )。2008—2017 年间, CK、T1、T2、T3、T4 处理的  $TN_s : TP_s$  的变化范围分别为 0.18~13.22, 0.66~6.91, 0.66~7.92, 0.74~15.52, 0.70~8.01, 其平均值为 3.55~4.79。此外, CK、T1、T2、T4 处理 CV 值均  $< 0.75$ , 属中等变异, T3 处理下 CV 值为 0.94, 属强变异; 变异程度表现为  $T3 > CK > T2 > T4 > T1$ 。



T3、T4 处理差异不显著 ( $p > 0.05$ )。此外, T1、T2、T3、T4 处理间的  $TP_w$  差异不显著 ( $p > 0.05$ )。

由表 3 可知, 各处理  $TN_w : TP_w$  的变化。CK 处理的  $TN_w : TP_w$  显著高于 T1、T2、T3、T4 ( $p > 0.05$ ), 且分别提高 109%, 92%, 123%, 76%。2008—2017 年间 83 场产流事件下, CK、T1、T2、T3、T4 的  $TN_w : TP_w$  的变化范围分别为 1.83~965.98, 1.05~197.81, 0.32~231.87, 0.73~155.20, 0.53~218.38, 平均值为 25.48~56.83。同时, 各处理  $TN_w : TP_w$  的 CV 值为 1.11~1.80, 均属于强变异, 变异程度表现为  $CK > T2 > T1 > T3 > T4$ 。



径流  $TN_{w年}$ 、 $TP_{w年}$  浓度以及化学计量  $TN_{s年} : TP_{s年}$ 、 $TN_{w年} : TP_{w年}$  之间的相关系数。  $TN_{w年}$  与  $TN_{s年}$  存



在极显著正相关( $p<0.01$ ),与  $TN_{S年} : TP_{S年}$  存在显著正相关( $p<0.05$ )。  $TP_{W年}$  与  $TN_{S年}$  存在极显著正相关( $p<0.01$ ),与年平均  $TN_{S年} : TP_{S年}$  之间均呈显著正相关( $p<0.05$ )。

由图 4 可知,各处理下相关指标之间函数关系。 T2、T3、T4 处理下  $TN_{W年}$  与  $TN_{S年}$  和  $TN_{S年} : TP_{S年}$  均呈显著线性正相关( $p<0.05$ )。 CK 处理  $TP_{S年}$  与

$TN_{S年}$  之间呈显著线性正相关( $p<0.05$ )。

表 3 2008—2017 年各处理  $TN_w : TP_w$  变化特征

| 处理 | 最小值  | 最大值    | 平均值±标准差       | 变异系数 |
|----|------|--------|---------------|------|
| CK | 1.83 | 965.98 | 56.83±102.17a | 1.80 |
| T1 | 1.05 | 197.81 | 27.20±32.62b  | 1.20 |
| T2 | 0.32 | 231.87 | 29.53±37.18b  | 1.26 |
| T3 | 0.73 | 155.20 | 25.48±28.97b  | 1.14 |
| T4 | 0.53 | 218.38 | 32.35±35.94b  | 1.11 |

表 4 各指标之间的 Pearson 相关性分析

| 项目                  | $TN_{W年}$ | $TP_{W年}$ | $TN_{S年}$ | $TP_{S年}$ | $TN_{W年} : TP_{W年}$ | $TN_{S年} : TP_{S年}$ |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|---------------------|
| $TN_{W年}$           | 1         | 0.196     | 0.375**   | -0.194    | —                   | 0.293*              |
| $TP_{W年}$           |           | 1         | 0.399**   | 0.018     | —                   | 0.326*              |
| $TN_{S年}$           |           |           | 1         | 0.049     | -0.119              | —                   |
| $TP_{S年}$           |           |           |           | 1         | -0.224              | —                   |
| $TN_{W年} : TP_{W年}$ |           |           |           |           | 1                   | -0.031              |
| $TN_{S年} : TP_{S年}$ |           |           |           |           |                     | 1                   |

注: \*\* 表示 0.01 级别(双尾)相关性显著; \* 表示 0.05 级别(双尾)相关性显著; “—”表示存在自相关关系。

3 讨论

3.1 不同施肥与耕作对土壤  $TN_s$ 、 $TP_s$  含量及化学计量的影响

与无施肥处理相比,有机肥和化肥配施未显著增加  $TN_s$  含量,可能与有机肥中氮素向土壤释放分解过程的延长有关<sup>[18]</sup>。此外,化肥与有机肥配施处理促进作物生长及其对土壤养分的吸收,使得该处理下土壤  $TN_s$ 、 $TP_s$  含量较低。谢军等<sup>[19]</sup>研究表明,有机肥与化肥配施可以显著提高玉米地上生物量,减少氮素进入环境; Hooda 等<sup>[20]</sup>研究发现,长期施用有机肥会导致土壤磷含量的显著降低,与本试验结果类似。与单施化肥处理相比,增量单施化肥增加  $TN_s$  含量但并不显著,可能因为随着单施化肥用量的增加,养分元素淋失水平显著提高<sup>[21]</sup>。各单施化肥处理均显著增加  $TN_s$ 、 $TP_s$  含量,与前人<sup>[14]</sup>研究结果一致。

各处理  $TN_s : TP_s$  为 3.55~4.79,均低于中国土壤平均  $N : P$ <sup>[22]</sup>,表明研究区土壤可能处于氮限制。此外,各施肥处理对  $TN_s : TP_s$  无显著影响,与卓志清等<sup>[12]</sup>在东北旱作区发现,不同化肥施用强度对  $TN_s : TP_s$  没有显著影响的研究结果一致。增量施肥处理下,  $TN_s : TP_s$  的变异系数最大(0.94),表明该处理下土壤氮磷比年际变化大,可能与施肥年限影响小麦和玉米的氮、磷吸收量有关<sup>[23]</sup>,而每年降雨特性的差异也影响土壤氮磷的流失状况,可导致土壤  $TN_s : TP_s$  年际差异大。有机肥与化肥配施处理下,  $TN_s : TP_s$  的变异系数最小,表明多年施肥条件下该处理的  $TN_s : TP_s$  处于相对稳定的状态。与顺坡耕作单施化肥处理相比,横坡耕作单施化肥处理下,  $TN_s : TP_s$  的变异系数相对较小,可能由于横坡耕作拦截泥沙和径流的作用减少 N、P 的径流

流失<sup>[6]</sup>,土壤中 N、P 含量相对稳定,因此,年际间  $TN_s : TP_s$  差异较小。与其他处理相比,有机肥化肥配施下,  $TN_s : TP_s$  的变异系数最小,说明有机肥化肥配施有助于稳定土壤氮、磷化学计量平衡。

3.2 不同施肥与耕作对径流  $TN_w$ 、 $TP_w$  浓度及化学计量的影响

如果降雨事件发生在施肥后不久,施肥处理下的氮流失将显著高于未施肥处理<sup>[24]</sup>,但多年间降雨事件发生频率高,距离施肥时间较远,因此,肥料养分多被植物吸收利用,增加的作物地上、地下生物量所形成根—土复合体能有效削减径流导致的养分流失<sup>[25]</sup>。因此,本研究结果表明,在这种“长期效应”下,各施肥处理的  $TN_w$  浓度显著降低。同时,施肥也可以显著增加固氮微生物丰度<sup>[26]</sup>,进一步增强土壤的固氮作用。Zanon 等<sup>[27]</sup>研究也表明,施肥对氮流失浓度并无显著影响。有研究<sup>[6,15]</sup>表明,横坡垄作对于氮磷流失有显著的阻控作用,但本研究在在施肥量相同的情况下,横坡单施化肥处理并没有显著降低  $TN_w$ 、 $TP_w$  流失浓度。有机肥化肥配施处理下,  $TP_w$  浓度显著高于不施肥处理和其他施肥处理,与 Smith 等<sup>[11]</sup>发现,施用畜禽有机肥增加径流磷流失的结果一致。谢真越等<sup>[28]</sup>研究表明,常规施肥与减量施肥处理下 P 流失浓度并无明显差异,与本研究结果类似。

5 个处理下的径流氮磷比  $TN_w : TP_w$  都属于强变异,可能是由于降雨强度及降雨历时等次降雨特性不同,导致不同降雨事件下的  $TN_w : TP_w$  有较大差异。施肥显著降低不同年份、不同降雨事件下的  $TN_w : TP_w$ ,主要因为本试验中施肥导致径流  $TN_w$  的显著降低以及  $TP_w$  的显著增加。无施肥对照处理下  $TN_w : TP_w$  较高,说明该处理下氮的流失风险大于磷。

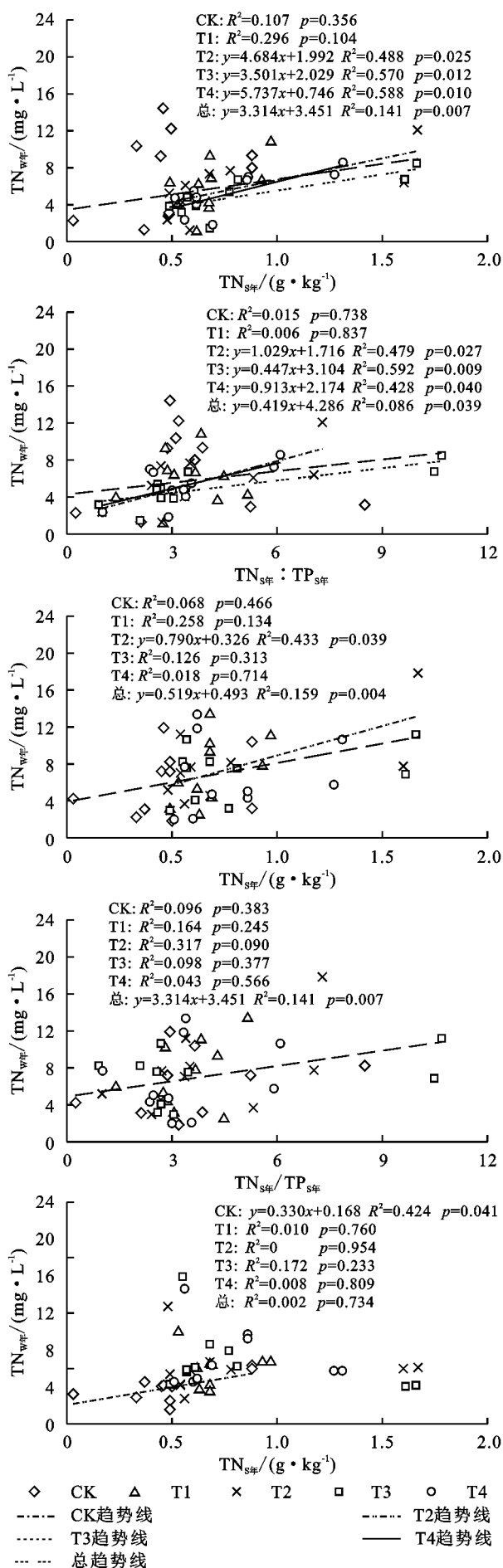


图 4 各处理相关指标间的回归关系

横坡单施化肥处理下,  $TN_w : TP_w$  变异系数最小, 表明横坡垄作对于稳定不同降雨条件下径流的  $TN_w : TP_w$  有一定的作用。无施肥对照处理与横坡单施化肥处理下的径流  $TN_w : TP_w > 30$ , 处于磷限制状态<sup>[29]</sup>; 其余 3 个施肥处理的径流  $TN_w : TP_w$  为 7~30, 其径流养分不受限制。

研究区土壤处于氮限制, 但坡面径流处于或接近磷限制, 主要因为水土流失过程中泥沙迁移量少, 而水土保持措施(如横坡耕作等)显著降低侵蚀泥沙量, 同时, 氮多以溶解态流失, 磷多以颗粒态流失<sup>[30]</sup>, 因此, 径流处于磷限制状态。说明水土流失过程和水土保持措施可能在一定程度上导致径流磷限制。

### 3.3 不同施肥与耕作对土壤 $TN_s$ 、 $TP_s$ 和径流 $TN_w$ 、 $TP_w$ 间关系的影响

Smith 等<sup>[11]</sup>分别探究不同施肥措施对土壤及径流化学计量比的作用, 但并未对土壤和径流之间的关系进行分析。Yates 等<sup>[9]</sup>进一步将土壤和径流中的指标进行相关分析发现, 土壤 C : N 与径流 DOC : DON、DOC : DOP 之间均具有显著相关关系, 表明土壤 C : N 可以作为径流 DOM 化学计量比的指标。但本试验表明,  $TN_w : TP_w$  与  $TN_s : TP_s$  之间关系不显著, 可能与施肥方式、种植模式等条件相关, 因此, 关于土壤和径流中的化学计量比之间的关系还需进一步探究。顺坡单施化肥、顺坡单施化肥增量和横坡单施化肥 3 个处理下,  $TN_{w年}$  均随着  $TN_{s年}$  增加而显著增加, 说明径流 N 流失浓度受土壤 N 含量的显著影响。同时, 横坡单施化肥处理下,  $TN_{w年}$  的流失浓度随土壤 N 含量变化速率比顺坡单施化肥更快, 可能因为相比顺坡耕作, 横坡延长径流与土壤的接触时间<sup>[31]</sup>, 增加土壤中可溶性氮的含量。顺坡增量单施化肥处理下,  $TN_{w年}$  流失浓度总是比顺坡单施化肥处理的浓度更小且增长速率更慢, 可能与增量单施氮肥下氮更容易淋失而非通过径流流失有关<sup>[24]</sup>。另外, 本研究表明, 在不施肥的自然条件下, 土壤磷含量与氮含量显著相关, 是自然条件下土壤氮、磷循环与作物根系吸收共同作用的结果, 与朱秋莲等<sup>[7]</sup>的研究结果相似。

## 4 结论

(1) 施肥显著增加土壤氮磷含量, 但对于多年间土壤氮磷比并没有显著影响。有机肥化肥配施下 CV 值最小(0.39), 稳定土壤氮磷比的年际变化效果更好。

(2) 施肥与横坡耕作并未显著提高氮磷流失浓度, 表明施肥并不一定会提高氮磷流失水平。施肥与横坡垄作显著降低径流氮磷比, 并有助于平衡次降雨事件间的氮磷比差异。

(3) 径流氮磷比与土壤氮磷比之间的关系受影响因素较多, 还需进一步探究两者之间的相关机制。

## 参考文献:

- [1] 徐强,李周晶,胡克林,等.基于密切值法和水氮管理模型的华北平原农田水氮优化管理[J].农业工程学报,2017,33(14):152-158.
- [2] Zhao Z G, Qin X, Wang E L, et al. Modelling to increase the eco-efficiency of a wheat-maize double cropping system[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 210: 36-46.
- [3] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(19): 3041-3046.
- [4] 柳开楼,胡志华,叶会财,等.双季玉米种植下长期施肥改变红壤氮磷活化能力[J].水土保持学报,2016,30(2): 187-192, 207.
- [5] Qiao J, Yang L Z, Zhao D. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 146(1): 103-112.
- [6] Guo S F, Zhai L M, Lei Q L. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping farmlands in southern hilly regions of China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 48-56.
- [7] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15): 4674-4682.
- [8] Liu Q, Xu H W, Yi H J. Impact of fertilizer on crop yield and C : N : P stoichiometry in arid and semi-arid soil[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(8): e4341.
- [9] Yates C A, Johnes P J, Owen A T, et al. Variation in dissolved organic matter (DOM) stoichiometry in U.K. freshwaters: Assessing the influence of land cover and soil C : N ratio on DOM composition[J]. Limnology and Oceanography, 2019, 64(6): 2328-2340.
- [10] 宋亚辉,艾泽民,乔磊磊,等.施肥对黄土高原农地土壤碳氮磷生态化学计量比的影响[J].水土保持研究,2019,26(6): 38-45, 52.
- [11] Smith D R, Jarvie H P, Harmel R D. The role of field-scale management on soil and surface runoff C/N/P stoichiometry[J]. Journal of Environmental Quality, 2019, 48(5): 1543-1548.
- [12] 卓志清,李勇,兴安,等.东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素[J].农业机械学报,2019,50(10): 259-268, 336.
- [13] 中国科学院成都分院土壤研究室.中国紫色土(上篇)[M].北京:科学出版社,1991.
- [14] 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.
- [15] 闫建梅,何丙辉,田太强.不同施肥与耕作对紫色土坡耕地土壤侵蚀及氮素流失的影响[J].中国农业科学,2014,47(20): 4027-4035.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [17] 国家环境保护局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002: 243-258.
- [18] 张若扬,郝鲜俊,韩阳,等.不同有机肥对采煤塌陷区土壤氮素矿化动态特征研究[J].水土保持学报,2020,34(2): 188-194.
- [19] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20): 3934-3943.
- [20] Hooda P S, Truesdale V W, Edwards A C, et al. Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications[J]. Advances in Environmental Research, 2001, 5(1): 13-21.
- [21] 周慧,史海滨,张文聪,等.有机无机氮配施对玉米产量和硝态氮淋失的影响[J].农业机械学报,2021,52(9): 291-301, 249.
- [22] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's Soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [23] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等.长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1): 71-78.
- [24] 严坤,王玉宽,刘勤,等.三峡库区规模化顺坡沟垄果园氮、磷输出过程及流失负荷[J].环境科学,2020,41(8): 3646-3656.
- [25] 褚军,薛建辉,金梅娟,等.杨麦间作系统对太湖流域土壤氮流失的削减效应[J].农业工程学报,2015,31(16): 167-177.
- [26] 马瑞萍,戴相林,刘国一,等.施肥模式对青稞田土壤潜在固氮速率和自生固氮微生物群落结构的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(10): 1692-1703.
- [27] Zanon J A, Favaretto N, Goularte G D, et al. Manure application at long-term in no-till: Effects on runoff, sediment and nutrients losses in high rainfall events[J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: e105908.
- [28] 谢真越,卓慕宁,李定强,等.不同施肥水平下菜地径流氮磷流失特征[J].生态环境学报,2013,22(8): 1423-1427.
- [29] 彭近新,陈慧君.水质富营养化与防治[M].北京:中国环境科学出版社,1988: 15-47.
- [30] Li Z W, Zhang G H, Yu X X, et al. Phosphorus loss and its estimation in a small watershed of the Yimeng mountainous area, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(3): 1205-1216.
- [31] Fan J, Yan L J, Zhang P, et al. Effects of grass contour hedgerow systems on controlling soil erosion in red soil hilly areas, Southeast China[J]. International Journal of Sediment Research, 2015, 30(2): 107-116.