

# 不同农作制对四川紫色丘陵区地表径流氮、磷流失的影响

杨皓宇<sup>1, 2</sup>, 赵小蓉<sup>1\*</sup>, 曾祥忠<sup>1</sup>, 蒲波<sup>2</sup>, 王昌桃<sup>1</sup>

1. 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 四川 成都 610066; 2. 四川省农业厅土壤肥料与生态建设处, 四川 成都 610041

**摘要:** 以小麦(*Triticum aestivum*)—玉米(*Zea mays*)轮作制为基础, 通过在仁寿县建立 18 个径流小区监测试验, 对 4 种不同农作制与 4 种施肥水平下各小区径流水样中的氮、磷含量进行了分析, 探讨了四川紫色丘陵区坡耕地氮、磷流失系数及其影响因素。结果表明, 氮流失总量随施氮量而增加, 在增量施肥+横坡种植方式下最大, 为 0.326 kg·hm<sup>-2</sup>; 氮流失总量和流失系数在优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖+植物篱方式下最小, 其流失总量为 0.270 kg·hm<sup>-2</sup>, 流失系数为 0.009%。磷流失总量和流失系数在不同处理方式下总体上虽较为接近, 但增量施肥+横坡种植方式下磷的流失总量最大, 为 0.020 kg·hm<sup>-2</sup>; 而优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖+植物篱最小, 为 0.015 kg·hm<sup>-2</sup>。研究表明, 优化施肥、横坡种植、秸秆覆盖和植物篱拦蓄地表径流作用明显, 是遏制耕地氮、磷流失的有效途径。

**关键词:** 四川紫色丘陵区; 坡耕地; 地表径流; 氮、磷流失系数

**中图分类号:** S157

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2009) 06-2344-05

长期以来, 人们普遍认为, 环境污染主要是工业造成的, 农业不过是环境污染的受害体, 农业环境保护的责任仅是防止农业生产受到工业污染的破坏。然而, 随着农田养分投入的不断加大和农田土壤养分流失量的不断增加, 农业生产和生活活动引起的农业面源污染, 已经成为水环境污染最重要的来源<sup>[1]</sup>。

影响农田土壤氮、磷流失的因素很多, 也很复杂, 如: 气候因子(包括降水量、降水强度、降水历程、蒸发量等)、土壤因子(土壤结构、质地、导水率、容重、有机质含量、土壤养分含量、pH 以及覆盖程度和表面粗糙度等)、水文地理因子(包括坡度、坡长、地下水位等)和农作管理因子(施肥数量、种类、方式及时间, 灌溉、耕作及轮作制度等)等<sup>[2,3,4,5,6,7]</sup>。

四川紫色土区是四川省农业的主体区域, 也是全国主要的农业商品生产基地之一。由于该区域雨量充沛且分布不均, 加上紫色土发育较浅、化肥施用不合理等问题, 造成农业面源污染问题日趋严重。目前对于该区域地表径流氮、磷流失研究主要集中在通过径流小区定位监测以及人工模拟降雨方法, 研究不同气候条件(雨量、雨强等)、土壤性质等自然因素对养分流失规律的影响<sup>[7,8,9]</sup>, 而关于耕作方式、施肥水平等可改变的人为管理措施对土壤养分流失的影响研究鲜见报道。

因此, 为了探讨该区域不同农作制对地表径流氮、磷流失影响及负荷, 以仁寿县珠加乡黑虎村为

研究对象, 在小麦(*Triticum aestivum*)—玉米(*Zea mays*)轮作制基础上, 设计不同施肥水平及不同耕作方式的处理, 通过对比分析, 对四川紫色丘陵区坡耕地氮、磷流失系数及其影响因素进行了初步研究。

## 1 实验地概况和研究方法

### 1.1 实验地概况

试验地点位于仁寿县珠加乡黑虎村 4 社, 地理坐标 104°11'19.9"E, 30°01'34.5"N, 海拔 483 m, 属浅丘中谷地貌, 径流小区坡度 15 度。属北亚热带湿润气候区, 四季分明, 雨热同季, 年均气温 17.4 °C, 多年 >10 °C 的平均积温 5 481.5 °C、多年平均无霜期为 307 d。土壤类型为侏罗系蓬莱镇组泥质母岩发育的棕紫泥土, 质地较粘重, pH8.18, 有机质含量 5.1 g·kg<sup>-1</sup>, 总氮 0.82 g·kg<sup>-1</sup>, 总磷和有效磷分别为 0.77 g·kg<sup>-1</sup> 和 4.02 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效钾为 96.48 mg·kg<sup>-1</sup>。土壤剖面基本性状情况见表 1。

表 1 土壤剖面基本性状情况  
Table 1 The basic traits of soil profile cases

剖面性 状描述	发生 层次	土层厚度 /cm	质地	坚实度	根系	石灰 反应	湿润度
	表土层	0~20	重壤	稍紧	多量	强	润
犁底层	20~36	重壤	紧实	中量	强	潮	
心土层	36以下	重壤	紧实	少量	中	湿	

### 1.2 实验设计

本试验为耕作方式和施肥水平的两因素实验, 耕作方式主要有顺坡种植、横坡种植+秸秆覆盖、横坡种植和横坡种植+秸秆覆盖+植物篱 4 种处理;

基金项目: 国家支撑计划项目 (2007BAD89B15; 2006BAC10B04-3; 2008BAD98B02)

作者简介: 杨皓宇 (1983 年生), 男, 硕士, 主要从事水土保持与节水农业研究。E-mail: smoller206@163.com

\*通讯作者, E-mail: xrzhao@sohu.com

收稿日期: 2009-09-12

施肥水平为无肥、常规施肥、增量施肥、优化施肥 4 种处理，试验设计为 6 个处理，3 次重复，共有试验小区 18 个，每个径流小区面积 9 m×3.5 m=31.5 m<sup>2</sup>。供试作物小麦品种为川麦 42；玉米品种为成单 30。径流场的各处理设置如下表 2。

表2 径流场各处理实验设计  
Table 2 The experimental design of the run-off fields

处理编号	处理方式	对应小区	处理描述
1	无肥处理+顺坡种植	1、7、13	对照，不施任何农药和肥料。
2	常规施肥+顺坡种植	2、8、14	农药按常规施用；小麦每公顷施用纯 N 150 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 45 kg；玉米每公顷施用纯 N 225 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 90 kg。
3	优化施肥+顺坡种植	3、9、15	农药按常规施用；小麦每公顷施用纯 N 180 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 75 kg；玉米每公顷施用纯 N 187.5 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 90 kg。
4	增量施肥+横坡种植	4、10、16	农药按常规施用；小麦在优化施肥用量基础上增加20%施肥量；每公顷施用纯 N 216 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 90 kg；玉米在优化施肥用量基础上增加50%施肥量；每公顷施用纯 N 282 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 135 kg
5	优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖	5、11、17	农药按常规施用；小麦每公顷施用纯 N 180 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 75 kg；玉米每公顷施用纯 N 187.5 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 90 kg
6	优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖+植物篱	6、12、18	农药按常规施用；小麦每公顷施用纯 N 180 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 75 kg；玉米每公顷施用纯 N 187.5 kg、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 90 kg

存，每瓶水样不少于 500 ml，一个供分析测试，另一个作为备用。分析指标为总氮、硝态氮、铵态氮、总磷和可溶性磷。

总氮测定采用碱性过硫酸钾消解分光光度法；硝态氮、铵态氮测定采用流动分析仪法；总磷测定采用钼酸铵分光光度法；可溶性磷测定采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法。

1.3.2 计算方法

以地表径流途径流失的氮、磷数量等于整个监测周期中（一个周年）各次径流水中污染物浓度与径流水（或淋溶水）体积乘积之和。计算公式如下：

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

其中：P 为污染物流失量；C<sub>i</sub> 为第 i 次径流（或淋溶）水中氮、磷的浓度；V<sub>i</sub> 为第 i 次径流（或淋溶）水的体积；n 为径流水样次数。

氮、磷相对流失量以 kg·hm<sup>-2</sup> 表示。以氮素为例，相对流失量计算公式如下：

$$\text{氮素相对流失量 (kg·hm}^{-2}\text{)} = \frac{\text{不同处理下氮肥流失量} - \text{对照处理氮肥流失量}}{\text{该处理下氮肥施用量}} \quad (2)$$

氮、磷流失系数以流失率（%）表示。以氮素为例，计算公式如下：

$$\text{氮肥流失率 (\%)} = \frac{\text{不同处理下氮肥流失量} - \text{对照处理氮肥流失量}}{\text{该处理下氮肥施用量}} \times 100\% \quad (3)$$

1.3 材料、测试项目及计算方法

1.3.1 径流水样的采集与分析

取样时，先用径流水洗净取样瓶（本试验为预先进行了编号的矿泉水瓶），在记录径流量后即行在产生径流的小区采集 2 个平行径流水样后冷冻保

2 结果与分析

2.1 不同农作制对径流量的影响

通过 2007 年 11 月—2008 年 11 月的周年监测，径流量随雨量的变化趋势如表 3 所示。从各处理间径流量产出情况来看，常规施肥+顺坡种植 > 无肥

表3 小区地表径流分月比重分析结果

Table 3 The result of plot surface run-off by the analysis of the sub-month proportion

时期	降雨量 /mm	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6
		径流量 /L	径流量 /L	径流量 /L	径流量 /L	径流量 /L	径流量 /L
5 月	69.2	23.7	22.2	22.7	20.3	12.6	9.1
6 月	123.2	39.8	40.0	39.6	34.2	19.4	10.9
7 月	165.7	53.2	52.3	46.4	36.3	27.7	17.5
8 月	207.4	201.6	203.8	196.8	185.6	157.8	128.0
9 月	228.0	435.2	445.1	430.8	427.0	398.3	382.6
合计	793.5	753.5	763.4	736.3	703.4	615.8	548.1

2007-11—2008-04 与 2008-11 无径流产生

处理+顺坡种植（对照）> 优化施肥+顺坡种植 > 增量施肥+横坡种植 > 优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖 > 优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖+植物篱。常规施肥+顺坡种植略高于无肥处理+顺坡种植（对照），可能是因为新建径流小区隔墙下部可能与外界存在串水现象，对径流量产生了一定影响。在相同的降雨强度及降雨量下，前 3 个处理的径流量产出大于后 3 个处理，这主要是由于各处理的耕作方式不同造成。前 3 个处理均为顺坡种植，后 3 个处理则为横坡种植，说明横坡种植更利于减少径流。在 6

个处理当中,优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖和优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖+植物篱的总径流量较无肥处理+顺坡种植(对照)分别下降了18%和27%,这是由于后两个处理在横坡种植的基础上,采用了秸秆覆盖和植物篱措施,减轻雨水溅蚀和提高了径流入渗率,从而使得径流量减少。蔡崇法等人<sup>[10]</sup>的研究中也指出,紫色土养分流失有随植被覆盖度增加而减少的趋势。这也就说明了横坡种植、秸秆覆盖和植物篱拦蓄地表径流作用明显,是遏制耕地水土流失的有效途径。

## 2.2 不同处理方式养分流失系数分析

根据公式2和公式3可计算出各处理每次径流样品中氮、磷流失量和周年氮、磷流失总量,并计算出氮、磷相对流失(总)量和氮、磷流失系数。从表4中可知,在各不同耕作方式下,有秸秆覆盖

的处理中氮的流失量要小于其他肥料处理。这可能是由于在秸秆覆盖条件下,秸秆在早期分解过程中存在与土壤“夺氮”的现象;而秸秆中的氮在释放过程中又需要一个降解和活化的过程,所以表现出氮的流失量相对较少。

在增量施肥情况下,氮的流失总量最高,这与司友斌等<sup>[5]</sup>耕地上肥料氮流失所占比重随施氮量而增加的研究结果一致;而在相同施肥水平下,氮的流失总量及流失系数依次为:顺坡种植>横坡种植+秸秆覆盖>横坡种植+秸秆覆盖+植物篱处理,这说明横坡种植、秸秆覆盖和植物篱方式对有效减少氮的流失量具有重要作用。

在各种处理下磷的流失量相对较接近,这是由于土壤对磷具有强固定作用,使磷在土壤中扩散能力极弱,流失载体主要为泥沙<sup>[11]</sup>。将磷施在耕作层,

表4 不同处理方式氮、磷流失结果  
Table 4 The results of nitrogen and phosphorus loss on different treatment

地块名称	处理编号	氮肥施用总量 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	磷肥施用总量 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	氮流失总量 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	磷流失总量 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	氮相对流失总量 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	磷相对流失总量 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	氮流失系数 /%	磷流失系数 /%
仁寿重点 监测点	1	0	0	0.237	0.014	0	0	-	-
	2	375.0	135	0.323	0.018	0.086	0.004	0.023	0.003
	3	367.5	165	0.302	0.018	0.065	0.004	0.018	0.002
	4	498.0	225	0.326	0.020	0.089	0.006	0.018	0.003
	5	367.5	165	0.293	0.017	0.056	0.003	0.015	0.002
	6	367.5	165	0.270	0.015	0.033	0.001	0.009	0.001

对犁底层以下土壤性质的影响没有那么强烈,只有当过量施磷使土壤固定达到饱和后,才容易发生磷素流失<sup>[12]</sup>。

从氮、磷流失系数来看,常规施肥+顺坡种植处理的流失系数最大,且高于增量施肥,主要是因为紫色土土层较薄,顺坡种植更易形成地表径流,使土壤养分流失量相对增加。而优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖+植物篱处理的氮、磷流失系数最小,一方面是由于优化施肥下作物长势好,吸收量大,另一方面是因为径流的减少间接地降低了肥料的损失。

## 2.3 氮、磷流失影响因素分析

### 2.3.1 不同农作制

从各处理间雨季径流量监测情况来看,顺坡种植>横坡种植的径流产生量;在相同的施肥水平下,顺坡种植的氮、磷流失总量和流失系数均大于横坡种植,说明横坡种植更利于保水保肥。在横坡种植下,采用秸秆覆盖和秸秆覆盖+植物篱,其径流量比对照处理分别下降了18%和27%;且在相同施肥水平下,秸秆覆盖、植物篱更能有效地减少氮、磷流失量,表明横坡种植下秸秆覆盖和植物篱对拦蓄地表径流作用明显,是遏制耕地水土流失的有效途径。

### 2.3.2 肥料施用量

从试验结果可知,在不同处理方式下,随着氮肥施用量的增加,氮流失总量明显增加;而磷肥施用量的增加对磷流失系数及流失总量的影响并不明显,主要由于土壤对磷的强固定作用,使磷在地表径流中的溶解能力较弱所致。

## 3 结论

通过以上试验监测分析,可以初步得到以下结论:

(1) 在相同降雨量下,不同处理方式的径流产生量依次为:常规施肥+顺坡种植>无肥处理+顺坡种植(对照)>优化施肥+顺坡种植>增量施肥+横坡种植>优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖>优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖+植物篱。横坡种植下采用秸秆覆盖和秸秆覆盖+植物篱处理,其径流量比对照处理分别下降了18%和27%,说明了在横坡种植条件下秸秆覆盖和植物篱对拦蓄地表径流作用明显,是遏制耕地水土流失的有效途径。

(2) 氮流失总量以增量施肥+横坡种植方式下最大,其流失总量为0.326 kg·hm<sup>-2</sup>;优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖+植物篱氮流失系数和流失总量最小,其流失总量为0.270 kg·hm<sup>-2</sup>,流失系数为

0.009%; 尽管不同处理方式的磷流失总量与流失系数均较接近, 但增量施肥+横坡种植的流失总量最大, 为  $0.020 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 而优化施肥+横坡种植+秸秆覆盖+植物篱为最小, 仅  $0.015 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(3) 氮素流失量与其施用量关系密切, 施肥量增加, 氮流失量明显增加; 磷肥施用量的增加对磷流失系数及流失量虽有影响, 但并不明显, 可能是由于土壤对磷具有强固定作用所致; 在相同施肥水平下, 顺坡种植>横坡种植+秸秆覆盖>横坡种植+秸秆覆盖+植物篱处理的流失总量及流失系数, 这说明横坡种植、秸秆覆盖、植物篱对减少氮、磷流失有重要作用。

地表径流氮、磷流失受许多不可控因素的影响。本年度试验中, 由于试验时间较短, 对照处理的土壤肥力尚未明显下降, 有可能导致氮、磷损失偏小。同时, 由于径流小区是新建, 对土壤扰动较大, 容易形成壤中流, 对计算结果也存在一定影响。因此, 在继续深入地进行地表径流对氮、磷流失影响研究的同时, 还应加强对地下径流中氮、磷流失影响机理的研究。

#### 参考文献:

- [1] 王欧, 方炎. 农业面源污染的综合防治与补偿经济制的建立[J]. 农业面源污染与综合防治, 2004, (11): 18-19.  
WANG Ou, FANG Yan. Study on integrated control of agricultural non-point source pollution and establishment of economic compensation system[J]. Agricultural Non-point Source Pollution and Integrated Control, 2004, (11): 18-19.
- [2] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998, 6: 291-297.  
ZHANG Guoliang, ZHANG Shen. Research progress on nitrogen leaching loss in farmland[J]. Soil, 1998, 6: 291-297.
- [3] 谢红梅, 朱波. 农田非点源氮污染研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 349-352.  
XIE Hongmei, ZHU Bo. Research progress on non-point source pollution of nitrogen in agro-ecosystem[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(3): 349-352.
- [4] 周萍. 土壤磷素流失影响因子及流失潜力评价指标研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007: 3-4.  
ZHOU Ping. Study on impact factors and potential evaluation index of soil P loss in runoff[D]. Chong Qing: Southwest University, 2007, 3-4.
- [5] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2004, 4: 188-192.  
SI Youbin, WANG Shenqiang, CHEN Huaiman. Research on nitrogen, phosphorus loss and water eutrophication in farmland[J]. Soil, 2004, 4: 188-192.
- [6] 马琨, 陈欣, 王兆寿. 模拟暴雨下红壤坡面产流产沙及养分流失特征研究[J]. 宁夏大学学报: 农业科学版, 2004, 25(1): 1-4.  
MA Kun, CHEN Xin, WANG Zhaoqian. The properties of runoff, sediment and nutrient loss under simulated rainstorm in slope land of red soil area[J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2004, 25(1): 1-4.
- [7] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋, 等. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 536-543.  
KANG Lingling, ZHU Xiaoyong, WANG Yunzhang, et al. Research on nutrient loss from a loessial soil under different rainfall intensities[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(4): 536-543.
- [8] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74.  
FU Tao, NI Jiupai, WEI Chaofu, et al. Research on the nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(1): 71-74.
- [9] 贾海燕, 雷阿林, 雷俊山, 等. 紫色土地区水文特征对硝态氮流失的影响研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1658-1664.  
JIA Haiyan, LEI Alin, LEI Junshan, et al. Nitrate-N loss effected by the runoff process in purple soil-a simulation study[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(10): 1658-1664.
- [10] 蔡崇法, 丁树文, 张光远, 等. 三峡库区紫色土坡地养分状况及养分流失[J]. 地理研究, 1996, 15(3): 77-84.  
CAI Chongfa, DING Shuwen, ZHANG Guangyuan, et al. A preliminary study on the conditions and losses of nutrients of purple soils in three gorge reservoir area[J]. Geographical Research, 1996, 15(3): 77-84.
- [11] EBLERS W. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled losses soil[J]. Soil Science, 1975, 119: 242-249.
- [12] 李可芳, 黄霞. 磷肥的使用与农业面源污染[J]. 环境科学与技术, 2004, 27 增刊: 189-190.  
LI Kefang, HANG Xia. Research on application of phosphate fertilizer and agricultural non-point source pollution[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 27: 189-190.

## Effects of different farming systems on nitrogen and phosphorus loss from surface runoff in purple hilly region in Sichuan

YANG Haoyu<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaorong<sup>1\*</sup>, ZENG Xiangzhong<sup>1</sup>, PU Bo<sup>2</sup>, WANG Changtao<sup>1</sup>

1. Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China;

2. Soil Manure and Ecological Department of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

**Abstract:** Based on the wheat (*Triticum aestivum*) maize (*Zea mays*) rotation pattern, we studied the nitrogen and phosphorus loss coefficient and its influencing factors in Shichuan purple hilly region through the monitoring test in eighteen runoff plots located in Renshou County. We analyzed nitrogen and phosphorus content in different water samples collected in different runoff plots from regions where four different cultivation patterns and four different fertilization standard were applied. The results showed that it produced the maximal total amount of nitrogen loss under the condition of incremental fertilization plus cross-slope cultivation; the total loss is 0.326 kg per ha. It produced the minimal total amount of nitrogen loss and the loss coefficient under the condition of optimal fertilization plus cross-slope cultivation plus straw mulch plus economic hedgerow; the total loss is 0.270 kg per ha and the loss coefficient is 0.009%. Although the total amount of phosphorus loss and the loss coefficient are closer in different treatments, it produced the maximal total amount of phosphorus loss 0.020 kg per ha under the condition of incremental fertilization plus cross-slope cultivation and the minimal total amount of phosphorus loss under the condition of optimal fertilization plus cross-slope cultivation plus straw mulch plus economic hedgerow; the total loss is 0.015 kg per ha. This study indicated that optimal fertilization, cross-slope cultivation, straw mulch and economic hedgerow showed evident effect on reducing surface runoff. These measures are effective to decrease the nitrogen and phosphorus loss.

**key words:** purple hilly region; sloping land; Surface runoff; nitrogen and phosphorus loss coefficient