

不同管理措施对黄壤坡耕地径流氮输出的控制效果

范成五¹, 罗 益², 王文华¹, 张邦喜¹, 秦 松^{1,3*}, 蔡景行⁴

(1.贵州省土壤肥料研究所/贵州省农业资源与环境工程研究中心, 贵阳 550006; 2.贵州大学, 贵阳 550025; 3.农业部(贵州)耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵阳 550006; 4.贵阳市土肥站, 贵阳 550081)

摘 要:以黔中黄壤坡耕地氮磷流失长期定位监测基地为平台,于2008—2012年连续5a进行观测,研究玉米-油菜种植模式下,6种管理措施对黄壤坡耕地地表径流、径流氮输出的控制效果。结果表明:黄壤坡耕地产流系数为15.1%~20.1%,平均18.1%;氮肥流失系数为0.81%~1.34%,平均0.99%;径流氮输出以颗粒态氮所占TN比例46.9%最高,可溶性总氮流失以硝态氮为主,占TN流失的31.1%。优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖+等高植物篱的耕作管理措施截流效果、氮输出控制效果最佳,产流量较CK减少25%;氮肥流失系数最小,为0.81%;TN平均输出总量最小,为4.63 kg·hm⁻²。顺坡常规耕作条件下,优化施肥与常规施肥径流量相当,TN输出量减少23.2%;优化施肥条件下,横坡垄作较顺坡常规耕作径流量减少6.7%,TN输出量减少7.3%;优化施肥+横坡垄作条件下,秸秆覆盖较无秸秆覆盖径流量减少4.8%,TN输出量减少3.4%;秸秆覆盖+等高植物篱较秸秆覆盖径流量减少11.6%,TN输出量减少6.8%。横坡垄作、优化施肥、秸秆覆盖、等高植物篱是控制黄壤坡耕地地表径流、径流中氮输出的有效措施。

关键词:坡耕地;径流;氮输出;管理措施;黄壤

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)10-1948-08 doi:10.11654/jaes.2014.10.011

Effects of Different Management Practices on Nitrogen Runoff Losses from Sloping Yellow Soil

FAN Cheng-wu¹, LUO Yi², WANG Wen-hua¹, ZHANG Bang-xi¹, QIN Song^{1,3*}, CAI Jing-hang⁴

(1. Guizhou Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Engineering Research Center of Agricultural Resources and Environment, Guiyang 550006, China; 2. Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agriculture Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture, Guiyang 550006, China; 4. Guiyang Station of Soil and Fertilizer, Guiyang 550081, China)

Abstract: Runoff losses of nutrients from soils have aggravated water environmental pollution. A long-term experiment with maize-rape rotation was conducted on sloping farming land of yellow soil in Central Guizhou Province from 2008 to 2012. The effects of six management practices on runoff and nitrogen runoff losses were examined. The average runoff coefficient was 18.1% with a range of 15.1%~20.1%. The coefficient of total nitrogen losses ranged from 0.81%~1.34%, with an average of 0.99%. The percentage of particulate N of total nitrogen losses from runoff was the highest (46.9%). Nitrate-N was the dominate form of total dissolved nitrogen with a 31.1% of total nitrogen loss. The best management practice (optimized fertilization+contour cultivation+straw mulch+contour hedgerow) could reduce total nitrogen losses effectively, resulting in 25% less runoff than CK. The total nitrogen runoff losses (4.63 kg·hm⁻²) and loss coefficient (0.81%) were both the lowest under this practice. Under conventional down the slope tillage, the runoff from optimized fertilization was almost the same as that from the conventional fertilization, but the former reduced total nitrogen runoff losses by 23.2%. Under optimized fertilization, the runoff and total nitrogen losses decreased by 6.7% and 7.3% respectively in contour cultivation, compared with conventional down the slope tillage. For the practice with optimized fertilization+contour cultivation, the runoff and total nitrogen losses decreased respectively by 4.8% and 3.4% in straw mulch as compared with no straw mulch. Under straw mulch+contour hedgerow, the runoff and total nitrogen losses were respectively 11.6% and 6.7% lower than those under straw mulch alone. Together, the present results suggest that optimized fertilization+contour cultivation+straw mulch+contour hedgerow would be effective management practice for reducing runoff and nitrogen losses in sloping farming land of yellow soil.

Keywords: sloping farmland; runoff; nitrogen losses; management practices; yellow soil

收稿日期:2014-03-06

基金项目:农业部公益性行业(农业)科研专项(2010 03014-6-2);贵州省科技计划[NY字(2009)3063号];贵州省创新能力建设专项[黔科合院所创新能力(2011)4002];中央补助地方科技基础条件专项[黔科条中补地(2012)4003号];贵州省科技计划黔科平台[2013]4002号

作者简介:范成五(1977—),副研究员,从事农业面源污染防治与作物养分管理研究。E-mail:18985581415@189.cn

*通信作者:秦 松 E-mail:qs3761735@163.com

黄壤是我国的主要土壤类型之一。贵州黄壤面积占全国黄壤面积的 25.3%, 占全省土壤面积的 46.5%; 黄壤坡耕地约占全省耕地面积的 46.1%^[1-4], 是贵州主要的耕地资源。黄壤坡耕地不仅具有“粘、酸、瘦”的特点, 且水土流失普遍严重, 据水利部水土保持监测中心的监测资料表明^[5], 贵州水土流失面积 73 078.56 km², 占贵州土地总面积的 41.5%。水土流失是耕地养分流失的原因之一, 其中氮素养分是主要流失源^[6], 不仅造成耕地生产力下降, 还引起一系列环境问题^[7]。有研究表明^[8], 贵阳市两湖一库中约有 70% 的氮来源于农田土壤中氮的淋失和地表径流, 从而引起湖泊发生水体富营养化现象。

为应对坡耕地的养分流失, 国内外专家近年来已提出大量的保护性耕作管理措施, 其中以横坡垄作与高等植物篱耕作管理措施在坡耕地上的应用最为见效^[9-13], 而国内基于不同管理措施下较长期的黄壤坡耕地定位监测氮输出规律研究鲜见报道。本研究以黔中农业面源污染长期定位监测点为平台, 连续 5 a 在玉米-油菜种植模式下实施不同耕作管理措施, 分析天然降雨产流后径流中的氮素流失特征及氮素输出的控制效果, 以期有效控制黄壤坡耕地氮素流失、减轻农业面源污染负荷提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

监测基地所属的贵阳市郊区花溪区湖潮乡, 东经 106°31', 北纬 26°26', 距贵阳市 20 km, 交通便利。该区地处贵州中部, 常年气温温差不大, 年均气温 14.9 °C, 常年降雨量 1100~1200 mm, 属贵州的主要气候类型。监测基地地形为南方丘陵山腰旱坡地, 土壤为黄壤, 呈微酸性(表 1), 土种为黄粘泥土, 质地重壤, 耕种历史较长, 肥力中等, 坡向西南, 坡度 15.1°, 是贵州主要的旱坡耕地类型。监测的油菜-玉米轮作种植模

表 1 监测点土壤背景理化性状(土层 0~20 cm)

Table 1 Basic properties of soil in studied area(0~20 cm)					
有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	全磷/ g·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	有效钾/ mg·kg ⁻¹	pH
22.37	1.21	0.68	13.33	94.8	6.25

式是全省旱地最主要的种植模式类型, 监测点具有明显代表性。

1.2 径流小区设计

径流小区长 6.0 m、宽 3.5 m, 面积为 21 m², 每个径流小区的下端分别对应一个径流池(图 1), 径流小区四周设水泥板结构以防止监测区与周边地块及径流小区之间发生串水现象。水泥板厚度 5 cm、高度 90 cm, 埋深 40 cm, 露出地面 50 cm。

径流池垂直于坡面, 为水泥结构, 侧壁和池底做好防渗处理。径流池深地表以下 1 m, 为便于计量径流池内水量, 在池壁上做好刻度线标记。径流池表面铺设石棉瓦防雨设施, 防止雨水、灰尘落入, 防止人和动物不慎跌落。监测基地设置量雨器 1 个。

1.3 试验处理

本试验为耕作管理措施和施肥水平两因素试验, 耕作管理措施主要有顺坡常规耕作、横坡垄作、横坡垄作+秸秆覆盖、横坡垄作+秸秆覆盖+等高植物篱 4 种措施; 施肥水平为不施任何肥料、常规施肥、优化施肥 3 种水平, 试验设 6 个处理, 3 次重复, 随机区组排列(表 2)。

常规施肥, 按当地农民施肥习惯: 玉米施有机肥(圈肥)11 250 kg·hm⁻², 纯 N 225 kg·hm⁻²、P₂O₅ 135 kg·hm⁻²、K₂O 37.5 kg·hm⁻²; 油菜施有机肥(圈肥)5250 kg·hm⁻², 纯 N 120 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 30 kg·hm⁻²。优化施肥: 玉米施有机肥(圈肥)11 250 kg·hm⁻², 纯 N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 90 kg·hm⁻²; 油菜施有机肥(圈肥)5250 kg·hm⁻², 纯 N 120 kg·hm⁻²、P₂O₅ 60 kg·hm⁻²、K₂O 60 kg·hm⁻²。

顺坡常规耕作: 按当地农民习惯耕作方法, 沿顺

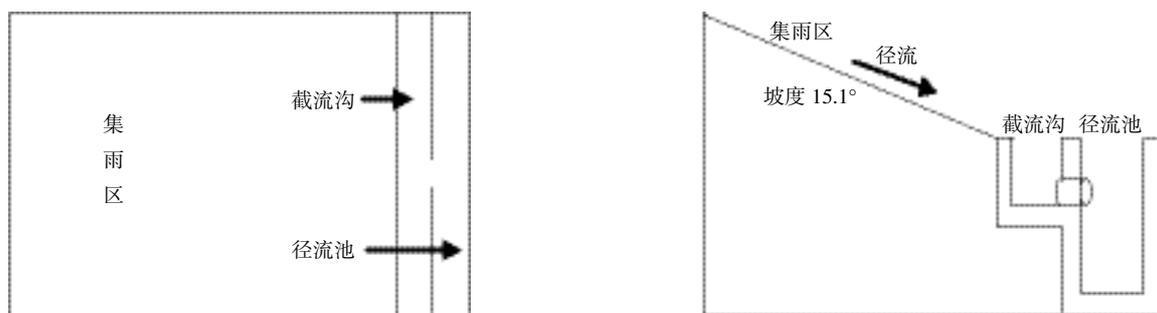


图 1 径流小区结构平面与剖面示意图

Figure 1 Diagram of runoff experimental plot

表2 径流小区各试验处理

Table 2 Experimental treatments for runoff plots

处理名称	处理设计	对应小区	肥料施用及作物种植
CK	不施任何肥料+顺坡常规耕作	3、10、18	肥料施用:磷、钾肥作底肥一次施用;玉米氮肥分三次施用,底肥 20%,第一次追肥 30%(拔节期),第二次追肥 50%(大喇叭口期);油菜氮肥分三次施用,底肥 20%,第一次追肥 40%(苗期),第二次追肥 40%(蕾薹期)
CON	常规施肥+顺坡常规耕作	5、7、16	
OPT	优化施肥+顺坡常规耕作	4、12、14	
OPT+TR	优化施肥+横坡垄作	2、11、13	作物种植:玉米,品种黔 259(黔 2237),顺坡种植:列距 70 cm,即 5 列·区 ⁻¹ ,株距 46 cm,即 13 穴·列 ⁻¹ (密度为 61 950 株·hm ⁻²);横坡种植:行距 70 cm,即 8 行·区 ⁻¹ ,株距 43 cm,即 8 穴·行 ⁻¹ (密度为 60 975 株·hm ⁻²)。油菜:品种为芥菜型油菜,株距均为 50 cm。顺坡种植 7 列·区 ⁻¹ ,横坡种植 12 行·区 ⁻¹ ,播种密度 30 万株·hm ²
OPT+TR+S	优化施肥+横坡垄作+ 秸秆覆盖	6、8、15	
OPT+TR+S+H	优化施肥+横坡垄作+ 秸秆覆盖+等高植物篱	1、9、17	

注:同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same row mean significant difference at 0.05 level.

坡方向中耕两次(结合氮肥追肥,进行两次中耕)。横坡垄作:横坡种植,玉米垄高 20~25 cm²,垄宽 40 cm;油菜垄高 20~25 cm,垄宽 30 cm。秸秆覆盖:春季种植玉米时,用稻草进行垄背覆盖,厚度 8~10 cm。等高植物篱:沿等高线种植两带黄花菜植物篱,每 3 m 一带,每带两行,行宽 25 cm,株距 15 cm,每穴两株,种植时施用有机肥及复合肥。

1.4 样品采集与测试项目

径流水样:在每次降雨产流后先测量径流水体积,用清洁竹棍搅匀径流池,然后采集混合样(水样与泥沙样),取 500~600 mL 置于塑料瓶速冻密闭保存,采样后抽干、洗净瓶子。若遇连绵雨季,则在径流池水量达到 80%后,采集混合样,最大采样间隔不长于 7 d。分析的指标有 pH、TN、TDN(溶解性总氮)、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、DON(可溶性有机氮)=TDN-(NO₃⁻-N+NH₄⁺-N)、PN(颗粒态氮)=TN-TDN。参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[9],pH 测定采用玻璃电极法;TN 测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;TDN 将径流样品通过 0.45 μm 滤膜过滤得到滤液,通过碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测得;NO₃⁻-N 测定采用酚二磺酸分光光度法;NH₄⁺-N 测定采用水杨酸分光光度法。

1.5 计算方法与数据分析

氮素年流失量:累计加和计算径流水中某形态氮的年流失总量,它等于整个监测周期中(一个完整的周年)每次径流水中某形态氮浓度与径流水体积乘积之和。计算公式^[9]如下:

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

式中: P 为氮素流失量,kg·hm⁻²; C_i 为第 i 次径流水中氮的浓度; V_i 为第 i 次径流水的体积; n 为径流水样次数。

氮肥流失系数:以流失率(%)表示,计算公式^[8]为:
氮肥流失系数(%)=

$$\frac{\text{施肥处理氮素流失量} - \text{对照处理氮素流失量}}{\text{氮肥施用总量}} \times 100$$

数据分析应用 DPS 软件与 Microsoft Office Excel 软件。

2 结果与分析

2.1 不同管理措施的截流效果

观测结果表明,5 a 间的降雨主要集中在 4—10 月,产流主要集中在玉米季的 5—7 月,其他月份径流量较少,5 a 平均产流系数变幅为 15.1%~20.1%,平均 18.1%。从不同年份来看,径流产生总量有所差异,2009、2012 年由于追肥进行中耕时遇到降雨分散,产生的径流总量较小,平均值分别为 78.86、89.26 mm;2008 年径流量最大,平均值为 170.54 mm。从 2008—2012 年的截流效果来看,所有处理的径流量较 CK 减少百分比平均值呈逐年上升的趋势,分别为 9.1%、12.7%、16.6%、16.7%、22.8%,表明随着时间的推移,耕作管理措施的截流效果越突出。从不同管理措施来看,截流效果从大到小的顺序为 OPT+TR+S+H>OPT+TR+S>OPT+TR>OPT>CON>CK,平均产流系数分别为 15.1%、16.3%、17.1%、18.3%、18.7%、20.1%(表 3)。从不同耕作措施来看,总的截流效应趋势为横坡垄作优于顺坡常规耕作,两者的 5 a 平均径流量分别为 112.3、132.5 mm,横坡垄作减少 15.2%。在顺坡耕作措施中,优化施肥与常规施肥的截流效果差异不显著,但优化施肥显著优于 CK,主要原因是优化施肥增强作物长势、增加作物覆盖率,从而提高截流效果。在横坡垄作措施中,仅增加秸秆覆盖,截流效果不明显;但在横坡垄作的基础上,种植植物篱的截流效果最好,

表3 不同管理措施的截流效果

Table 3 Effectiveness of runoff interception under different treatments

年份 Year	降雨量/mm Precipitation	截流效果 Interception effectiveness	CK	CON	OPT	OPT+TR	OPT+TR+S	OPT+TR+S+H
2008	558.8	径流量 Runoff/mm	184.56	173.50	172.50	170.20	163.94	158.56
		产流系数 Coefficient/%	33.05	31.07	30.89	30.48	29.36	28.40
		较 CK 减少 Decrease/%		6.0	6.5	7.8	11.2	14.1
2009	625.4	径流量 Runoff/mm	88.07	80.71	79.56	77.54	75.27	71.41
		产流系数 Coefficient/%	14.08	12.90	12.72	12.40	12.04	11.42
		较 CK 减少 Decrease/%		8.4	9.7	12.0	14.5	18.9
2010	709.6	径流量 Runoff/mm	155.38	149.38	140.22	125.17	118.91	114.08
		产流系数 Coefficient/%	21.90	21.05	19.76	17.64	16.76	16.08
		较 CK 减少 Decrease/%		3.9	9.8	19.4	23.5	26.6
2011	901.5	径流量 Runoff/mm	162.02	148.83	143.24	134.51	132.21	116.15
		产流系数 Coefficient/%	17.97	16.51	15.89	14.92	14.67	12.88
		较 CK 减少 Decrease/%		8.1	11.6	17.0	18.4	28.3
2012	683.5	径流量 Runoff/mm	110.15	97.69	101.28	86.54	75.05	64.89
		产流系数 Coefficient/%	16.12	14.29	14.82	12.66	10.98	9.49
		较 CK 减少 Decrease/%		11.3	8.1	21.4	31.9	41.1
平均 Average	695.7	径流量 Runoff/mm	140.0±39.67a	130.0±39.03ab	127.4±36.81bc	118.8±37.66cd	113.1±38.28de	105.0±38.12e
		产流系数 Coefficient/%	20.1±7.51a	18.7±7.33ab	18.3±7.21bc	17.1±7.49cd	16.3±7.39de	15.1±7.52e
		较 CK 减少 Decrease/%		7.1±2.79c	9.0±1.91c	15.2±5.59bc	19.2±8.11ab	25.0±10.31a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level.

显著优于 OPT+TR、OPT 与 CON, 较 CK 径流减少 25.0%。表明横坡垄作、地表覆盖与植物篱技术增加了地表径流入渗时间, 增强坡面径流的拦截和分散, 相对防止汇流进一步发展且减小流速, 入渗时间大幅度延长; 同时防止了暴雨直接冲击表土形成土壤结皮阻碍水分入渗, 从而减少径流的产生。

2.2 不同管理措施氮输出的控制效果

不同管理措施对黄壤坡耕地的 TN 流失量有不同程度的影响, 从 5 a 平均结果来看, TN 流失量以 CON 最大, CK 最小, 大小顺序依次为 CON>OPT>OPT+TR>OPT+TR+S>OPT+TR+S+H>CK, 流失量分别为 6.98、5.36、4.97、4.80、4.63、2.05 kg·hm⁻²(表 4)。CK 常年不施化肥与有机肥, 土地生产力下降, 养分趋于贫瘠, TN 的流失量随之减少。CON 按照当地农民习惯施肥, 属不合理过量施肥, 不仅没有获得相应的作物产量及经济效益, 反而增加 TN 流失量, 加大了环境污染风险。在顺坡常规耕作措施下, 优化施肥(OPT)与常规施肥(CON)的 TN 流失总量有显著性差异, 相比减少 23.2%。这表明优化施肥不仅可以保证作物产量, 并能明显减少黄壤坡耕地 TN 流失量, 降低农业面源污染风险。优化施肥条件下, TN 流失总量差异不显著,

横坡垄作与顺坡常规耕作相比, TN 流失总量均有所减少, OPT+TR 减少 7.3%, OPT+TR+S 减少 10.5%, OPT+TR+S+H 减少 13.7%。由此可见, 优化施肥、横坡垄作、秸秆覆盖、等高植物篱是控制黄壤坡耕地氮源污染物随地表径流流失的有效管理措施。主要因为优化施肥可有效减低径流中的养分浓度, 横坡垄作、秸秆覆盖、等高植物篱可降低径流的产生, 从而减少氮素养分的流失。

从不同年份的 TN 流失量来看, 平均 TN 流失量有所差异。其中以 2010 年最高, 所有处理的平均 TN 流失量为 6.74 kg·hm⁻², 主要因 2010 年玉米季种植期, 在施肥不久后降雨产生径流, 增加了地表径流中氮的流失量; 以 2009 年最低, 所有处理的平均 TN 流失量为 2.76 kg·hm⁻², 主要原因为 2009 年的产流量最小。以 2008—2012 年的单次产流所有处理的平均径流量为自变量, 对不同年份单次产流所有处理的 TN 流失总量进行线性回归分析, 得到回归方程:

$$Y=0.031X+0.977(R^2=0.965, P=0.0012)$$

该方程表明黄壤坡耕地产流量对氮输出总量影响显著。

表4 不同管理措施下氮输出的控制效果

Table 4 Total nitrogen losses under different treatments

处理 Treatment	平均径流量 Runoff/ mm	TN 流失量/kg·hm ⁻²					TN 年均流失量/ kg·hm ⁻² Average
		2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	
CK	140.03	2.99	0.96	3.80	1.66	0.84	2.05±1.30c
CON	130.02	8.10	3.87	10.87	6.28	5.78	6.98±2.65a
OPT	127.36	6.03	2.99	7.43	5.16	5.19	5.36±1.61b
OPT+TR	118.79	5.99	2.94	6.39	5.03	4.51	4.97±1.36b
OPT+TR+S	113.08	5.90	2.91	6.26	4.77	4.13	4.80±1.35b
OPT+TR+S+H	105.02	5.84	2.89	5.70	4.59	4.10	4.63±1.22b

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level.

2.3 不同管理措施的不同形态氮素流失特征

不同管理措施下,不同形态氮素流失量不同,占TN的流失比例不同。从单一流失形态来看, NO_3^-/TN 以CK最高,CON最低,变幅为26.6%~35.3%,平均为31.1%; NH_4^+/TN 以CK最高,CON最低,变幅为6.9%~14.6%,平均为9.4%; DON/TN 以OPT、OPT+TR最高,CON最低,变幅为10.5%~14.2%,平均为12.6%; PN/TN 以CK最低,CON最高,变幅为37.7%~56.0%,平均为46.9%。各种流失形态的氮素中,5a平均流失的 NO_3^-/N 与DON在各个处理之间差异不显著, NH_4^+/N 流失以CK显著高于CON、OPT+TR+S、OPT+TR+S+H,PN流失以CON显著高于CK,其他处理间差异不显著(表5)。

从氮素流失形态构成特征来看,以PN流失形态为主,所占比例最高,约占TN流失量的1/2,其次为 NO_3^-/N ,而 NH_4^+/N 与DON流失比例基本相同,流失比例变幅分别为37.7%~56.0%、26.6%~35.3%、10.5%~14.2%和6.8%~14.6%,平均流失比例分别为46.90%、31.10%、12.58%和9.42%(图2)。

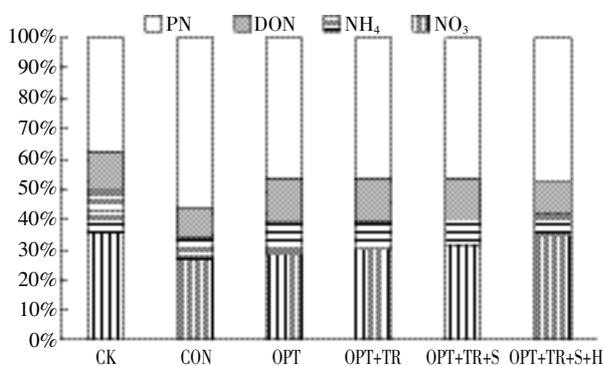


图2 不同氮素流失形态构成特征

Figure 2 Distribution of different nitrogen forms in total nitrogen losses

2.4 不同管理措施的氮肥流失系数

不同管理措施氮肥流失系数不同,5种管理措施的流失系数变幅为0.81%~1.34%,平均0.99%,以习惯性施肥+顺坡常规耕作(CON)的流失系数最高,优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖+高等植物篱(OPT+TR+S+H)的最低(表6)。在顺坡常规耕作条件下,农民习惯性施肥(CON)的氮肥流失系数较优化施肥(OPT)高出24.0%,未达到显著水平,但CON的流失系数均显著高于横坡垄作的3个处理;在优化施肥条件下,横坡垄作的OPT+TR、OPT+TR+S、OPT+TR+S+H较顺坡耕作OPT降低10.7%、15.7%、20.5%,表明优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖+高等植物篱管理措施的氮输出控制效果最佳。

3 讨论

植被覆盖可有效减少坡耕地水土流失,相应减少养分流失量。蔡崇法等^[15]对三峡库区紫色土坡地养分流失的研究指出,地表植被覆盖度增加,坡地地表径流减少。本研究结果与其相似,CON与OPT处理,玉米、油菜植株生长茂盛,冠层覆盖度增大,相应减少了产流量。而秸秆覆盖与植物篱技术管理措施进一步提高植被覆盖度,大幅度减少径流的产生,较CK降低25%的产流量,从而达到控制黄壤坡耕地氮素养分输出的效果,本研究以OPT+TR+S+H管理措施下氮素流失量最低,与辛艳等^[16]的研究结果一致。

本研究结果表明黄壤坡耕地氮输出总量与产流量极显著正相关,相关系数0.965,与鲁耀等^[9]对云南红壤坡耕地地表径流养分流失特征研究结果类似,但其研究指出不施肥条件下总氮输出最大,而本研究结果为CK管理措施下总氮输出最小。这可能与黄壤本底养分“瘦”这一特有性质有关。美国环保组织规定人畜饮水中的硝态氮质量浓度不能超过 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,当水

表5 不同形态氮占氮总流失量的比例(%)

Table 5 Percentages of different nitrogen forms of total nitrogen losses under different treatments(%)

年份 Year	流失形态比例 Percentage	CK	CON	OPT	OPT+TR	OPT+TR+S	OPT+TR+S+H
2008	NO ₃ ⁻ -N/TN	46.32	23.45	31.44	36.60	38.37	38.41
	NH ₄ ⁺ -N/TN	8.05	7.37	7.32	7.03	5.77	6.97
	DON/TN	16.31	9.24	13.34	15.09	21.45	13.34
	PN/TN	29.30	60.00	47.90	41.30	34.40	41.30
2009	NO ₃ ⁻ -N/TN	31.56	23.40	33.45	33.26	25.69	27.93
	NH ₄ ⁺ -N/TN	16.09	8.19	11.09	9.94	10.57	9.68
	DON/TN	12.25	8.78	14.38	12.73	10.88	11.28
	PN/TN	40.10	59.60	41.10	44.10	52.90	51.10
2010	NO ₃ ⁻ -N/TN	10.87	10.00	3.17	6.53	6.17	9.26
	NH ₄ ⁺ -N/TN	14.75	6.79	10.64	5.24	3.81	4.65
	DON/TN	4.76	5.04	4.14	3.53	2.99	6.35
	PN/TN	69.60	78.20	82.00	84.70	87.00	79.70
2011	NO ₃ ⁻ -N/TN	45.30	47.06	35.91	40.03	39.99	47.29
	NH ₄ ⁺ -N/TN	5.96	3.48	3.27	2.39	3.22	1.57
	DON/TN	17.92	19.99	25.45	24.69	23.27	16.01
	PN/TN	30.80	29.50	35.40	32.90	33.50	35.10
2012	NO ₃ ⁻ -N/TN	42.38	29.21	37.39	34.42	47.54	50.70
	NH ₄ ⁺ -N/TN	28.29	8.83	22.79	20.18	17.44	11.10
	DON/TN	10.73	9.40	13.70	15.14	9.09	6.24
	PN/TN	18.60	52.60	26.10	30.30	25.90	32.00
平均 Average	NO ₃ ⁻ -N/TN	35.29±14.85a	26.62±13.42a	28.27±14.22a	30.17±13.46a	31.55±16.21a	34.72±16.74a
	NH ₄ ⁺ -N/TN	14.63±8.76a	6.93±2.08b	11.02±7.29ab	8.96±6.85ab	8.16±5.93b	6.79±3.83b
	DON/TN	12.40±5.17a	10.49±5.61a	14.20±7.56a	14.24±7.54a	13.53±8.59a	10.64±4.31a
	PN/TN	37.70±19.41b	56.00±17.58a	46.50±21.39ab	46.60±22.02ab	46.80±24.60ab	47.80±19.25ab

注:同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same row mean significant difference at 0.05 level.

表6 氮肥流失系数

Table 6 Coefficients of total nitrogen losses

处理 Treatment	流失系数/%					年平均 Average
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	
CK	—	—	—	—	—	—
CON	1.911	0.716	1.738	1.136	1.213	1.343±0.48a
OPT	1.369	0.561	1.005	0.966	1.202	1.021±0.30ab
OPT+TR	1.350	0.547	0.716	0.931	1.012	0.911±0.31b
OPT+TR+S	1.310	0.540	0.681	0.861	0.909	0.860±0.29b
OPT+TR+S+H	1.284	0.535	0.525	0.810	0.901	0.811±0.31b

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level.

体中无机态总氮含量达到 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、磷酸根离子质量浓度达到 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,就会引起“藻华”现象的发生^[7]。在本研究中,各管理措施的总氮平均流失浓度分别为 1.52 、 5.73 、 4.50 、 4.49 、 4.56 、 $4.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,虽然硝态氮平均流失浓度没有超过上述标准,但总氮流失

浓度已经严重超过此标准。黄壤坡耕地地表径流氮可成为农业面源污染的重要风险源,应当引起人们重视。

有关坡地氮素养分流失形态的研究较多,一些学者认为以颗粒态为主,如黄满湘等^[18];但另一些研究结果认为耕地中氮素养分流失以溶解态为主,如徐泰平、朱波等^[19]。在本研究中,黄壤坡耕地氮素流失以颗粒形态所占比例最大,约占总氮流失量的 $1/2$,可能是黄壤质地粘重、盐基饱和度小等性质所致。由于土壤总氮多为有机氮且与土壤颗粒紧密结合^[20],质地粘重又制约着氮素的坡面降雨-入渗迁移过程,黄壤坡耕地氮素养分以颗粒态流失为主。各管理措施平均流失的可溶性总氮中硝态氮流失量较大,占总氮流失量的 31.1% ,与其他学者的研究结果相近^[21-23]。

5a的监测结果表明,黔中黄壤坡耕地油菜-玉米轮作种植模式下,几种管理措施的平均氮肥流失系数在 $0.81\% \sim 1.34\%$ 之间,平均值 0.99% ,在优化施肥+横

坡垄作+秸秆覆盖+高等植物篱管理措施下氮肥流失系数最低。这与其他研究结果一致,但流失系数数值比王云等^[24]对江西红壤坡地氮素流失的研究中的数值大得多,说明黄壤坡耕地比紫色土、红壤坡耕地的氮素养分输出情况还要严重。主要原因可能是本研究的坡耕地坡度大(15.1°)造成的,而江西红壤坡地氮素流失研究的坡耕地坡度为7°。刘秉正等^[25]认为,养分流失量随坡度的增加而增大,当坡度小于12°时,养分流失量与坡度的关系为线性;当大于12°时则为幂函数关系。

4 结论

(1)地表径流主要产生于玉米季的5—7月,径流系数15.1%~20.1%,平均18.1%;以优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖+高等植物篱的截流效果最好,产流量64.9 mm,较CK减少25.0%。

(2)黄壤坡耕地总氮输出量变幅为2.05~6.98 kg·hm⁻²,与径流量呈极显著正相关;优化施肥、横坡垄作显著降低氮输出总量,优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖+高等植物篱的氮输出控制效果最佳。

(3)黄壤坡耕地流失的不同形态氮素中以PN最高,占总氮流失量的46.9%;在可溶性总氮(TDN)流失中,以NO₃-N流失为主,占TN流失量的31.1%,而NH₄⁺-N与DON差异不显著。

(4)黄壤坡耕地的平均氮肥流失系数为0.81%~1.34%,平均为0.99%;顺坡常规耕作的CON管理措施氮肥流失系数显著高于横坡垄作,以优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖+高等植物篱最低,为0.81%。横坡垄作、优化施肥、秸秆覆盖、高等植物篱是控制黄壤坡耕地地表径流产生、降低总氮输出、降低农业面源污染风险的有效措施。

参考文献:

- [1] 贵州土壤普查办公室. 贵州省土壤[M]. 贵阳:贵州科技出版社, 1994. Guizhou Bureau of General Detailed Soil Survey. Guizhou soils[M]. Guiyang: Guizhou Technology Press, 1994.
- [2] 林昌虎, 解德蕴, 涂成龙, 等. 贵州山区坡耕地综合利用与整治[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3):211-213. LIN Chang-hu, XIE De-yun, TU Cheng-long, et al. Comprehensive exploitation and renovation on the slope farmland in Guizhou mountain region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3):211-213.
- [3] 尹迪信, 唐华彬, 罗红军, 等. 植物篱技术发展回顾和贵州省的研究进展[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1):15-18. YIN Di-xin, TANG Hua-bin, LUO Hong-jun, et al. Review of research on hedgerows technology and new development in Guizhou Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1):15-18.
- [4] 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(1):37-40. LIU Fang, HUANG Chang-yong, HE Teng-bing, et al. Phosphorus loss by runoff in various dryland from yellow soil and its affecting factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1):37-40.
- [5] 王魁, 马祖陆, 蔡德所, 等. 我国岩溶地区水土流失研究进展及发展趋势[J]. 中国水土保持, 2011(9):32-41. WANG Kui, MA Zu-lu, CAI De-suo, et al. Research progress and development tendency on soil and water loss of karst region in China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2011(9):32-41.
- [6] 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 Hong-mei, ZHU Bo. Research progress on non-point source pollution of nitrogen in agro-ecosystem[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(3):349-352.
- [7] 宋涛, 成杰民, 李彦, 等. 农业面源污染防治研究进展[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(2):39-40. SONG Tao, CHENG Jie-ming, LI Yan, et al. The research of agriculture non-point source pollution[J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(2):39-40.
- [8] 范菲菲, 范成五, 秦松. 贵州农业土壤氮素流失对环境的影响及防治对策[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(7):106-110. FAN Fei-fei, FAN Cheng-wu, QIN Song. Environmental impact of nitrogen loss from arable land in Guizhou and control techniques[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(7):106-110.
- [9] 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. LU Yao, HU Wan-li, LEI Bao-kun, et al. The monitoring of nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in sloping red soil fields of Yunnan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8):1544-1553.
- [10] 杨皓宇, 赵小蓉, 曾祥忠, 等. 不同农作制对四川紫色丘陵区地表径流氮、磷流失的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6):2344-2348. YANG Hao-yu, ZHAO Xiao-rong, ZENG Xiang-zhong, et al. Effects of different farming systems on nitrogen and phosphorus loss from surface runoff in purple hilly region in Sichuan[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6):2344-2348.
- [11] 孙辉, 唐亚, 陈克明, 等. 等高固氮植物篱控制坡耕地地表径流的效果[J]. 水土保持通报, 2001, 21(2):48-51. SUN Hui, TANG Ya, CHEN Ke-ming, et al. Effects of contour hedgerow intercropping on surface flow control of sloping cropland[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(2):48-51.
- [12] 郑子成, 吴发启, 何淑勤. 耕作措施对产流作用的研究[J]. 土壤, 2004, 36(3):327-330. ZHENG Zi-cheng, WU Fa-qi, HE Shu-qin. Effects of cultivation management on runoff[J]. *Soils*, 2004, 36(3):327-330.
- [13] 吴电明, 夏立忠, 俞元春, 等. 坡耕地氮磷流失及其控制技术进展[J]. 土壤, 2009, 41(6):857-861. WU Dian-ming, XIA Li-zhong, YU Yuan-chun, et al. Reviews on mechanisms of nitrogen, phosphorus losses from sloping farmland and

- control techniques[J]. *Soils*, 2009, 41(6):857-861.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration of China(SEPA). Monitoring and analyzing methods of water & wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] 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 Chong-fa, DING Shu-wen, ZHANG Guang-yuan, et al. A preliminary study on the conditions and losses of nutrients of purple soils in Three Gorge Reservoir Area(TGRA)[J]. *Geographical Research*, 1996, 15(3):77-84.
- [16] 辛 艳, 王 瑄, 邱 野, 等. 坡耕地不同耕作模式下土壤养分流失特征研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(3):346-350.
- XIN Yan, WANG Xuan, QIU Ye, et al. Discipline of nutrient losses from slope cropland in Liaoning Province under different cropping mode[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(3):346-350.
- [17] Lal R. Soil erosion on alfisols in Western Nigeria; Nutrient elements losses in runoff and eroded sediments[J]. *Geoderma*, 1986, 16:403-417.
- [18] 黄满湘, 章 申, 张国梁, 等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 2003, 58(1):147-154.
- HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, ZHANG Guo-liang, et al. Losses of nitrogen nutrient in overland flow from farmland in Beijing under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1):147-154.
- [19] 徐泰平, 朱 波, 汪 涛, 等. 不同降雨侵蚀力条件下紫色土坡耕地的养分流失[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6):139-141.
- XU Tai-ping, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Nutrient loss from slope cropland of purple soil under different rainfall erosivities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6):139-141.
- [20] 张兴昌, 邵明安. 黄土丘陵区小流域土壤氮素流失规律[J]. 地理学报, 2000, 55(5):617-626.
- ZHANG Xing-chang, SHAO Ming-an. Soil nitrogen loss by erosion as affected by vegetation cover and comprehensive managements in Zhifanggou Catchment of Hilly Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5):617-626.
- [21] 郭云周, 刘建香, 贾秋鸿, 等. 不同农艺措施组合对云南红壤坡耕地氮素平衡和流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4):723-728.
- GUO Yun-zhou, LIU Jian-xiang, JIA Qiu-hong, et al. Effect of different integrate agronomic measures on nitrogen balance and loss of red soil on sloping farm-land in Yunnan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):723-728.
- [22] 陈 琨, 赵小蓉, 王昌全, 等. 成都平原不同施肥水平下稻田地表径流氮、磷流失初探[J]. 西南农业学报, 2009, 22(3):685-689.
- CHEN Kun, ZHAO Xiao-rong, WANG Chang-quan, et al. Nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in different fertilization levels in Chengdu Plain[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(3):685-689.
- [23] 马 琨, 王兆骞, 陈 欣, 等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3):16-19.
- MA Kun, WANG Zhao-qian, CHEN Xin, et al. Study on properties of nutrient loss from red soil in sloping land under different rainfall intensities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(3):16-19.
- [24] 王 云, 徐昌旭, 汪怀建, 等. 施肥与耕作对红壤坡地养分流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):500-507.
- WANG Yun, XU Chang-xu, WANG Huai-jian, et al. Effect of fertilizer levels and tillage methods on nutrient loss of red soil slope[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):500-507.
- [25] 刘秉正, 李光录, 吴发启, 等. 黄土高原南部土壤养分流失规律[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2):77-86.
- LIU Bing-zheng, LI Guang-lu, WU Fa-qi, et al. The regular patterns of the loss of soil nutrients on Southern Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(2):77-86.