

滇池流域坡耕地土壤氮磷流失效应

钟雄^{1,2}, 张丽^{1,2}, 张乃明^{1,2}, 年夫照¹, 贾广军¹, 岳献荣¹, 夏运生^{1,2}

(1. 云南农业大学, 昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201)

摘要: 为了揭示间作对坡耕地上不同类型土壤径流和侧渗氮(N)、磷(P)浓度的削减及作用机制, 通过径流和淋溶模拟试验, 设置不同类型土壤(红壤和紫色土)、坡度(8°和15°)和玉米(*Zea mays* L.)/大豆(*Glycine max* L.)间作及各自单作对照, 比较分析了各因素影响下径流和侧渗N、P浓度的变化情况。结果表明: (1)径流总氮(TN)、总磷(TP)在红壤不同坡度条件下, 与单作大豆处理相比较, 间作处理对径流TN浓度有不同程度的削减作用, 分别降低27.5%和30.8%, 且间作处理下TN浓度在坡度为8°时最低为0.75 mg/L; 在紫色土8°条件下, 与单作大豆、单作玉米相比, 间作处理对径流TN浓度的削减效应更为明显, 降幅分别为97.8%和89.8%, 与单作玉米处理相比较, 间作处理对径流TP浓度均有不同程度的削减作用; 从8°至15°处理, 径流TP浓度相应有所增加。(2)侧渗TN、TP在红壤8°和15°条件下, 与单作玉米相比, 间作处理对侧渗TN浓度也有较大的削减作用, 分别降低87.9%和86.8%, 且在8°时侧渗TN浓度最低为2.91 mg/L; 在紫色土8°和15°条件下, 与单作玉米处理相比, 间作处理对侧渗TN浓度有约50%和80%的降幅, 与单作玉米处理相比较, 间作处理对侧渗TP浓度亦有不同程度的削减作用; 其中红壤8°条件间作处理下侧渗TP浓度最高为0.25 mg/L, 15°条件间作处理下TP浓度最低为0.07 mg/L。不同坡度条件下, 土壤中N、P的输出量不同, 且随着坡度增大, 径流或侧渗中N、P总体的流失量也呈一定的增加趋势。玉米/大豆间作体系对径流和侧渗中的N、P有一定的削减作用; 对于红壤和紫色土, 由于其自身理化性质的不同, 对坡耕地土壤中N、P流失的削减效应也不尽相同。因此, 控制坡耕地氮、磷流失应综合考虑各种因素, 对于保护滇池流域水环境具有重要意义。

关键词: 间作; 坡耕地; 径流; 侧渗; 总氮; 总磷

中图分类号: S157.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0042-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.007

Soil N and P Loss in Slope Farmland of Dianchi Watershed

ZHONG Xiong^{1,2}, ZHANG Li^{1,2}, ZHANG Naiming^{1,2},

NIAN Fuzhao¹, JIA Guangjun¹, YUE Xianrong¹, XIA Yunsheng^{1,2}

(1. Yunnan Agricultural University, Kunming 650201;

2. Yunnan Engineering Laboratory of Soil Fertility and Pollution Remediation, Kunming 650201)

Abstract: The present study aimed to reveal the effects of intercropping on soil runoff and lateral seepage nitrogen (N), phosphorus (P) loss in different types of slope farmland. A runoff and leaching simulating experiment was conducted, different types of soil (red soil and purple soil) and slopes (8° and 15°) and planting patterns maize (*Zea mays* L.)/soybeans (*Glycine max* L.) intercropping and mono-maize and mono-soybeans were designed, the changes of N and P concentrations in runoff and lateral seepage under the influence of various factors were analyzed. The results showed that: (1) In the case of the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) of runoff; under different slope in red soil, compared with mono-soybean, intercropping has different reduction effect on TN, the reductions were 27.5% and 30.8%, respectively, and the TN under intercropping was the lowest, which was 0.75 mg/L at the slope of 8°. Under the slope of 8° in purple soil, compared with mono-soybeans and mono-maize, the reduction of intercropping on TN of runoff was more obvious, and the reductions were 97.8% and 89.8%, respectively. Compared with mono treatment, intercropping had the different reduction on TP of runoff. However, the TP of runoff increased from

收稿日期: 2017-11-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(41161041, 41561057); 院士专家工作站项目(2015IC022); 云南农业大学土壤资源利用与保护省创新团队开放基金项目(2015HC018)

第一作者: 钟雄(1993—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与环境保护研究。E-mail: zhongxiangyx@163.com

通信作者: 夏运生(1975—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业面源污染控制研究。E-mail: yshengxia@163.com

the slope of 8° to 15°. (2) For the lateral seepage TN, TP, under the slope of 8° and 15° in the red soil, compared with mono-maize, intercropping had a greater reduction of the lateral seepage TN, which had 87.9% and 86.8% reduction, respectively, as well as the lowest concentration of TN was 2.91 mg/L at 8°; under the slope of 8° and 15° in purple soil, the reduction of intercropping on TN of lateral seepage were 50% and 80%, respectively. Compared with mono-maize, intercropping also had the different reduction on TP of lateral seepage; and the TP under the slope of 8° in red soil of intercropping was the highest with 0.25 mg/L, and the TP under the slope of 15° red soil of intercropping was the lowest with 0.07 mg/L. The output of N and P in soil was different under different slope treatments and the total loss of N and P in runoff or lateral seepage would increase with the slope increasing. In conclusion, the maize/soybean intercropping system had a certain effect on the reduction of N and P concentration in the runoff and lateral seepage. For red soil and purple soil, the reduction of the loss of N and P in the soil of slope farmland might be different because of their physicochemical properties. Therefore, controlling the loss of N and P in slope farmland should consider all kinds of factors, which is of great significance to protect the water environment of Dianchi Watershed.

Keywords: intercropping; slope farmland; runoff; lateral seepage; total nitrogen (TN); total phosphorus (TP)

坡耕地土壤养分流失是由于降雨作用于表层土壤,引起表层土壤氮(N)、磷(P)等养分的溶解流失,或径流泥沙含有吸附的颗粒态养分,进入水体的过程^[1]。坡耕地养分流失一方面造成了土壤质量退化、土地生产力下降,另一方面养分进入河流、湖泊等水体,引发了水体富营养化等一系列问题。因此,开展坡耕地土壤养分流失的研究具有重要的现实意义。

N、P参与植物主要的生理及代谢活动,是植物生长所必需的元素之一,同时也是引发水体富营养化的一个关键元素。施用氮肥是促进植物生长和提高产量的重要措施之一。中国每年约消耗全球30%的氮肥,虽然氮肥的施用量在不断增加,但主要粮食作物氮肥利用率在1992年到2005年从35%降低到27.5%^[2],土壤中的N大多以地表径流、氨挥发、淋溶等形式流失,从而引发了各种生态环境问题^[3-5]。据Heckrath等^[6]报道,英国自然水体中约35%的P来自农业,德国的比例为38%,而丹麦达到70%。另据联合国粮农组织估计,中国农田P进入水体的量为每年19.5 kg/hm²^[7]。

间作的种植模式在我国具有悠久的历史,采用禾本科与豆科植物间作,不仅能够利用豆科植物的固氮作用,同时能将N向禾本科植物转移,提高其对N的

吸收利用率^[8-10];另外,该间作体系还能够提高P吸收量,具有明显的P间作优势^[11]。间作系统能够充分利用有限的耕地面积进而实现大幅度提高作物产量和质量的目标,在解决生态环境恶化和自然资源枯竭等方面具有重要的生态学意义^[12],能长期从地表径流和淋溶渗漏2方面有效地削减农田土壤累积N的流失^[13],并且可在一定程度上减少坡耕地红壤P的径流流失,对滇池流域农业非点源污染具有一定削减潜力^[14]。目前,国内外对豆科、非豆科间作模式中作物对N、P利用及影响因素方面开展了一系列研究工作^[15-17],然而针对坡耕地不同类型土壤上的N、P流失及削减因素研究少见报道。本文通过研究不同种植模式下不同类型坡地土壤N、P的迁移变化,以揭示坡耕地土壤N、P流失削减的关键因素,为滇池流域典型坡地土壤的面源污染控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的玉米品种为水果玉米“好滋味”,供试大豆品种为“滇豆4号”。供试红壤和紫色土分别采自于滇池流域晋宁县坡地和宝象水库附近坡地,基本情况见表1。

表1 供试土壤基本概况

土壤类型	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	总氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	总磷/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)
红壤	6.22	23.30	1.12	34.70	1.00	5.76
紫色土	7.51	24.81	1.15	45.50	0.16	5.94

1.2 试验方法

本试验为三因素试验,影响试验的3个因素分别为土壤类型(红壤、紫色土)、种植模式(玉米/大豆间作处理、单作玉米和单作大豆)和坡度(8°,15°)。试

验盛土装置为铁皮制作的长方体,规格长、宽、高为90,30,30 cm,装等量0—25 cm耕层原状土壤,下装碎石,出水孔内侧与土壤接触界面用尼龙网封住,且在尼龙网与土壤接触面之间也填入一层小石子,以起

到过滤作用而避免土块随渗流水涌入渗流管内造成堵塞,用矿泉水瓶收集径流。

试验于 2016 年 5—10 月在云南农业大学科研设施大棚内完成。采用带状种植,间作处理种植玉米 1 列,大豆 2 列,玉米和大豆均为 6 行,列间距为 7.5 cm,行间距为 17 cm。单作玉米和单作大豆分别种植 2 列和 4 列,均为 6 行。单作玉米列间距为 10 cm,单作大豆列间距为 6 cm,单作处理行间距与间作处理相同。玉米和大豆每穴分别为 3,5 粒,后分别间苗至 1,2 株。上述每个处理重复 3 次。

播种前不施用基肥,为保证作物生长期免受养分缺失的胁迫,于植株生长中期分别以溶液的形式向土壤中进行追肥(N、P、K 为 60,30,90 mg),分别以 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 K_2SO_4 的形式加入。作物生长期进行浇水、除草、杀虫等一系列农事活动。每场降雨产生有效径流和侧渗水后采集水样,充分混匀后分别取 500 mL,加入 2 mL 浓 H_2SO_4 进行酸化处理后立即带回实验室,放冰箱冷冻保存,7 天内完成 N、P 测定。水质 TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光

光度法(GB 11894—1989)测定,TP 采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件对相关数据进行了基本统计分析,使用软件 SPSS 19.0 对不同因素间交互作用进行了分析和差异性 Duncan 检验,比较了 3 个因素间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同处理对坡耕地土壤径流总氮及总磷的影响

将径流 TN 及 TP 与各影响因素进行多因素交互作用分析。由表 2 可知,TN 和 TP 在土壤类型、坡度、种植模式处理之间交互作用极显著($P < 0.001$),其中 TN 浓度在土壤类型、种植模式和坡度两两因素处理间均有极显著的交互作用($P < 0.001$);TP 在土壤类型和种植模式间交互作用不显著,但在土壤类型和坡度处理间的交互作用极显著($P < 0.001$),且在坡度和种植模式处理间交互作用显著性一般($P < 0.05$)。

表 2 土壤径流总氮、总磷与各因素间的方差分析

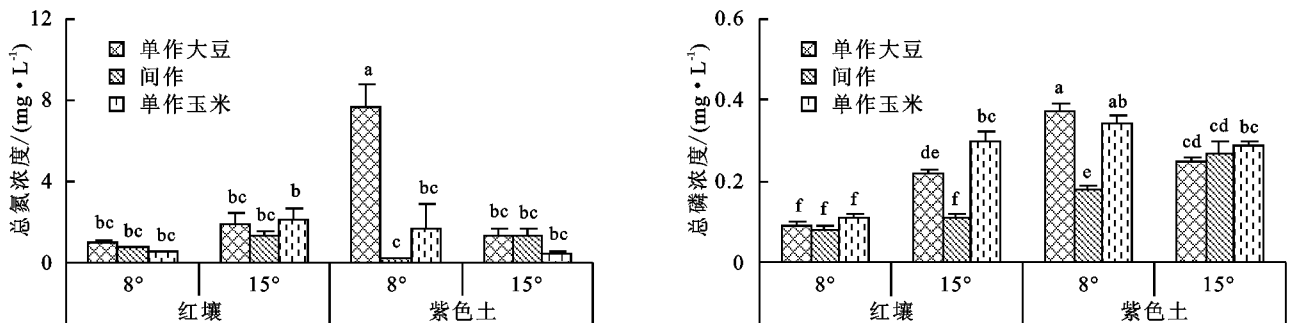
因素	土壤类型	坡度	种植模式	土壤类型×坡度	土壤类型×种植模式	坡度×种植模式	土壤类型×坡度×种植模式
总氮浓度	*	NS	***	***	***	***	***
总磷浓度	***	***	***	***	NS	*	***

注:***表示 $P < 0.001$ 水平显著;**表示 $P < 0.01$ 水平显著;*表示 $P < 0.05$ 水平显著;NS 表示不显著。下同。

由图 1 可知,在坡度为 8° 条件下,间作处理下红壤径流 TN 浓度明显高于紫色土;而在 15° 条件下,间作处理下的径流 TN 浓度在 2 种类型土壤中无明显差异。紫色土径流 TP 浓度均高于红壤,其中在 8° 和 15° 条件下,间作处理下紫色土径流 TP 浓度比红壤分别高出 125% 和 145.5%。无论土壤类型如何,间作条件下的径流 TN 浓度在 15° 处理中均高于 8° 处理。从 8° 处理到 15° 处理,在红壤条件下,间作处理 TN 浓度高出 70% 以上;在紫色土条件下,间作处理 TN 浓度则高出 700%。同样,无论土壤类型如何,从 8° 处理到 15° 处理,TP 浓度在间作条件下的变化趋势同 TN 浓度相似,在红壤条件下,TP 浓度高了 37.5%;紫色土条件下,TP 浓度明显高了 50%。在红壤— 8° 条件下,单作

大豆处理下的 TN 浓度最高、间作处理次之、单作玉米处理则最低;而在红壤— 15° 条件下,同单作大豆和玉米处理相比,间作处理对 TN 浓度有明显削减效应,均降低 30% 以上。在紫色土— 8° 条件下,间作处理下 TN 浓度为 0.17 mg/L,同样与单作处理相比,也明显降低了 TN 浓度;而在紫色土— 15° 条件下,间作处理下 TN 浓度同单作大豆比,无明显变化,而同单作玉米相比,则提高了 231.7%。

除紫色土— 15° 条件外,其他条件下间作处理与单作处理相比,均使 TP 浓度有所降低。且在红壤— 15° 和紫色土— 8° 条件下显著下降,其中间作处理较单作大豆处理分别降低约 50%;而与单作玉米处理相比则分别降低 63.3% 和 47.1%。



注:不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

图 1 不同处理对坡耕地土壤径流总氮及总磷的影响

2.2 不同处理对坡耕地土壤侧渗总氮及总磷的影响

将侧渗 TN 及 TP 与各影响因素进行多因素交互作用分析。由表 3 可知, TN 和 TP 在土壤类型、坡度、种植模式处理之间交互作用显著性一般 ($P < 0.05$), 其中 TN 在土壤类型和坡度间交互作用不显

表 3 土壤侧渗总氮、总磷与各因素间的方差分析

因素	土壤类型	坡度	种植模式	土壤类型×坡度	土壤类型×种植模式	坡度×种植模式	土壤类型×坡度×种植模式
总氮浓度	***	*	***	NS	**	**	*
总磷浓度	NS	**	NS	**	**	*	*

由图 2 可知, 在坡度为 8° 条件下, 间作处理红壤中的侧渗 TN 浓度明显低于紫色土, 约低 92%; 而在 15° 条件下, 紫色土上间作处理侧渗 TN 浓度同样高于红壤处理, 相应高出 141.3%。与红壤中的侧渗 TP 浓度相比, 在间作- 8° 处理下, 紫色土的 TP 浓度低了 56%; 反之在间作- 15° 处理下, 紫色土的 TP 浓度却高了 142.9%。

当土壤类型为红壤时, 在间作- 8° 处理下的 TN 浓度明显低于间作- 15° 处理下的 TN 浓度, 15° 处理下高出 120% 以上; 反之, 当土壤类型为紫色土时, 间作- 8° 处理下的 TP 浓度较间作- 15° 处理高出 130% 以上。当土壤类型为红壤时, TP 浓度从间作- 8° 处理到间作- 15° 处理低了 72%; 而当土壤类型为紫色土时,

但在土壤类型和种植模式处理间以及在坡度和种植模式处理间的交互作用显著 ($P < 0.01$); TP 浓度在土壤类型与种植模式、土壤类型与坡度处理间交互作用均显著 ($P < 0.01$), 在坡度和种植模式间交互作用显著性一般 ($P < 0.05$)。

间作- 8° 处理下的 TP 浓度较间作- 15° 处理则低了 35.3%。无论何种土壤类型及坡度, 间作对土壤侧渗 TN 及 TP 均有不同程度的影响。在红壤- 8° 条件下, 间作处理下的 TN 浓度较单作大豆和单作玉米处理, 分别降低 56.8% 和 87.9%。而在红壤- 15° 和紫色土- 8° 条件下, 间作处理下的 TN 浓度均高于单作大豆处理, 却低于单作玉米处理。在紫色土- 15° 条件下, 与单作大豆和单作玉米处理相比, 间作处理下的 TN 浓度显著降低, 分别低约 66% 和 84%。在红壤- 8° 条件下, 间作处理 TP 浓度较单作大豆处理提高 177.8%, 而较单作玉米处理则降低 34.2%。在红壤- 15° 和紫色土- 8° 条件下, 间作均对 TP 浓度有明显的削减作用。

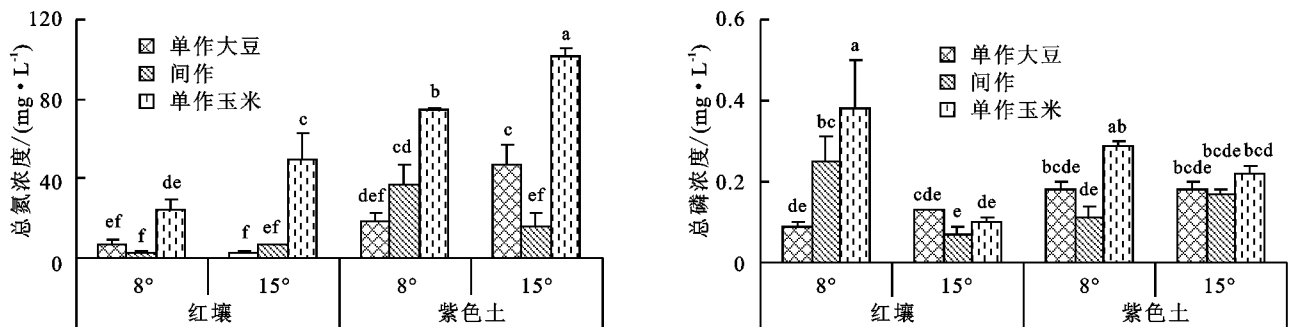


图 2 不同处理对坡耕地土壤侧渗总氮及总磷的影响

3 讨论

3.1 不同处理对坡耕地土壤径流养分的影响

影响径流中 TN 浓度的因素主要有降雨条件、植被覆盖度、坡度、土壤类型、施肥量等^[18]。就坡度而言, 随着坡度的增大, 地表有效承雨面积减少, 坡面承接雨量也随之减少, 同时由于积水势能的增加, 导致坡面上产流产沙量均增加, 从而造成径流养分的流失。王丽等^[19]研究表明, 10° 坡面产流时间最早, 这说明 5° 到 10° 坡面产流时间主要由积水势能决定, 坡度越大, 积水势能越大, 产流时间越短, 从而导致增加径流量, 土壤中的养分流失量随之增加。这与本研究结果相一致, 随着坡度的增加, 径流 TN、TP 的流失总量也随之上升, 说明坡度的增大会加剧养分的流失。其中对于本研究涉及两类土壤, 由于红壤

呈酸性, 土壤养分贫瘠, 加之红壤地区降水丰沛, 土壤淋溶作用强, 土壤有效孔隙度相对较大, 易于形成径流^[20]。而紫色土土层浅薄, 有机质少, 水稳性弱, 易分散悬浮, 抗冲力弱。同时容蓄水量少, 渗透率低, 下为透水性差的基岩, 导致径流系数高, 以坡面侵蚀为主^[21]。总之, 无论哪种土壤类型其径流量大泥沙流失量就大, 进而养分流失量也随之增大。Li 等^[22]研究表明, 地表径流对土壤养分的流失起着决定性作用。这与本试验在模拟不同坡度及土壤类型条件下所得结果相契合, 随着坡度的增加, 径流及土壤流失量也随之增加, 进而导致土壤氮、磷养分流失的增加。前人^[23-24]已经证明, 采用合理的间作种植模式, 可以有效降低坡耕地上土壤侵蚀量, 同时缓解径流的产生。在红壤坡地上进行农业生产活动将导致土壤 P 的流失, 其

流失的程度与坡地利用方式、土壤 P 状况、施肥水平密切相关,在多雨季节所进行的耕作、施肥、种植等农事活动是导致土壤 P 流失的主要因素^[25]。本试验与 Himmatrao 等^[1]对坡耕地土壤养分流失的研究结果相一致,间作能有效减少坡耕地土壤 N、P 的流失。主要因为间作种植模式可以有效拦截降雨,避免或削弱雨滴对地面的冲击,并且密集生长的植物增加了地面的粗糙度,阻缓径流,减小径流流速,拦截泥沙,防止或减弱径流的冲刷能力,降低径流的泥沙携带能力,从而减少土壤中 N、P 含量的流失^[25-28]。

3.2 不同处理对坡耕地土壤侧渗养分的影响

坡度影响红壤坡耕地地表径流和壤中流产流,随着坡度增大壤中流开始产流时间先减小后增大^[29],从而也验证了本试验中侧渗水中养分浓度变化不一致的结果。此外,由于豆科作物的生物固氮作用,豆科与非豆科作物间作在间作种植模式中占绝对统治地位,对其研究相对较多,已有研究^[30-31]表明,养分吸收与间作的产量优势之间存在明显的正相关关系。在一定条件下,豆科与禾本科间作可以显著提高植物 N 的利用效率,表现出一定的间作优势^[32]。Cong 等^[33]、宋日等^[34]研究表明,对玉米、大豆间作条件下,有利于 2 种作物根系的生长。所以,较单作种植模式下土壤 N 由于灌水和降水等因素向地表深层渗漏快,而间作体系由于 2 种作物根系的相互促进与互补作用导致土壤 N 向深层渗漏缓慢^[24],即间作处理的侧渗水中 TN 浓度明显低于单作玉米。土壤颗粒粒径的大小对土壤颗粒间的结合、孔隙大小、数量及几何形态都起着决定作用,黏粒含量越高,质地越细、分形维数越高,土壤抗侵蚀能力越强^[35],P 越不易流失。从本试验中可知,紫色土侧渗水中 TN、TP 浓度总体高于红壤,说明紫色土中养分易于流失。另外,由于大豆的种植,其根系能够在土壤中产生较大的孔隙,从而加速 P 的侧向流失。本试验研究与前人研究结果相一致,间作大豆吸 P 量有所减少,而玉米吸 P 量则有所增加,所以侧渗水中 TP 浓度从高到低依次表现为单作玉米、单作大豆、玉米/大豆间作。何淑勤等^[36]研究表明,由于玉米根系发达,在降雨过程中易在土壤内部形成导流,利于水分下渗,而在玉米根系周围残留大量前期施入未被吸收利用的磷肥,所以壤中流磷素浓度普遍偏高。由此可见,间作处理能够有效地促进养分的吸收,减少侧渗养分的流失。

4 结论

(1)不同坡度处理下土壤 N、P 的输出量不同。随着坡度增大,径流或侧渗水中 N、P 总体的流失量

也随之增加。

(2)在玉米—大豆间作模式下,与单作处理相比较,间作处理均能在一定程度上降低径流或侧渗水中 TN、TP 浓度。可见采用间作的种植模式,对于土壤中氮磷养分的流失具有一定的控制效果。

(3)控制坡耕地土壤养分的流失,建议不仅要采取合理的间作种植模式、选择缓坡种植等措施来降低径流水中养分的流失,还需提高土壤的持水能力,减少侧渗水中养分的携带输出。

参考文献:

- [1] Himmatrao M S, Raghavaiah R, Kadasiddappa M, et al. Influence of row ratio and zinc nutrition on yield, nutrient uptake and soil fertility status of maize (*Zea mays*)-soybean (*Glycine max*) intercropping systems under rainfed conditions [J]. *Environment & Ecology*, 2014, 32: 169-173.
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].*土壤学报*,2008,45(5):915-924.
- [3] Pappa V A, Rees R M, Walker R L, et al. Nitrous oxide emissions and nitrate leaching in an arable rotation resulting from the presence of an intercrop [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 141(1): 153-161.
- [4] Luo S, Yu L, Liu Y, et al. Effects of reduced nitrogen input on productivity and N₂O emissions in a sugarcane/soybean intercropping system [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 81: 78-85.
- [5] Dang T H, Cai G X, Guo S L, et al. Effect of nitrogen management on yield and water use efficiency of rainfed wheat and maize in northwest China [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 495-504.
- [6] Heckrath G, Bechmann M, Ekholm P, et al. Review of indexing tools for identifying high risk areas of phosphorus loss in Nordic catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(1): 68-87.
- [7] 颜晓,王德建,张刚,等.长期施磷稻田土壤磷素累积及其潜在环境风险[J].*中国生态农业学报*,2013,21(4): 393-400.
- [8] 安瞳昕,李彩虹,吴伯志,等.玉米不同间作方式对坡耕地水土流失的影响[J].*水土保持学报*,2007,21(5):18-20.
- [9] Hauggaardnielsen H, Gooding M, Ambus P, et al. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N-2-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2009, 113: 64-71.
- [10] Song Y N, Zhang F S, Marschner P, et al. Effect of intercropping on crop yield and chemical and microbio-

- logical properties in rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.), and faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Biology and Fertility of soils*, 2007, 43(5): 565-574.
- [11] Li L, Zhang F S, Li X L, et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65(1): 61-71.
- [12] 汪新月,张仕颖,岳献荣,等. 隔根与接种 FM 对红壤上玉米/大豆植株生长及氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 1022-1029.
- [13] 叶优良,孙建好,李隆,等. 小麦/玉米间作根系相互作用对氮素吸收和土壤硝态氮含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(11): 33-37.
- [14] 张丽,贾广军,夏运生,等. 菌根和间作对滇池流域红壤磷素迁移的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(5): 760-766.
- [15] Latati M, Aouiche A, Tellah S, et al. Intercropping maize and common bean enhances microbial carbon and nitrogen availability in low phosphorus soil under Mediterranean conditions [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2017, 80: 9-18.
- [16] 李淑敏,武帆. 大豆/玉米间作体系中接种 AM 真菌和根瘤菌对氮素吸收的促进作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 110-116.
- [17] Christosa D, Christos S. Safflower yield, chlorophyll content, photosynthesis, and water use efficiency response to nitrogen fertilization under rainfed conditions[J]. *Industrial Crops & Products*, 2008, 27(1): 75-85.
- [18] 宋娅丽,王克勤,王萍,等. 自然降雨条件下氮素输入对滇中坡耕地氮素流失特征的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(6): 27-31.
- [19] 王丽,王力,王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 69-75.
- [20] 郑海金,胡建民,黄鹏飞,等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 41-45, 70.
- [21] 何长高,尹忠东. 紫色土区土壤侵蚀对土地生产潜力的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 110-114.
- [22] Li L, Davis A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(6): 3403-3410.
- [23] Cheng Y, Cai Z C, Chang S X, et al. Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N₂O production in a cultivated Black Chernozem [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(8): 941-946.
- [24] Cowell L E, Bremer E, Van K C. Yield and N₂ fixation of pea and lentil as affected by intercropping and N application [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1989, 69(2): 243-251.
- [25] 陈欣,王兆骞,杨武德,等. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响[J]. *生态学报*, 2000, 20(3): 374-377.
- [26] 史静,卢谡,张乃明. 混播草带控制水源区坡地土壤氮、磷流失效应[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4): 151-156.
- [27] 程文娟,史静,夏运生,等. 滇池流域农田土壤氮磷流失分析研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 52-55.
- [28] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [29] 陈晓安,杨洁,汤崇军,等. 雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(9): 141-146.
- [30] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: Non-nitrogen nutrition [J]. *Field Crops Research*, 1993, 34: 319-334.
- [31] Liang X Q, Li H, Chen Y X, et al. Nitrogen loss through lateral seepage in near-trench paddy fields [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(2): 712-717.
- [32] Zhou X L, Madramootoo C A, Mackenzie A F, et al. Corn yield and fertilizer N recovery in water-table-controlled corn-rye-grass systems [J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 12: 83-92.
- [33] Cong W F, Hoffland E, Li L, et al. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1715-1726.
- [34] 宋日,牟瑛,王玉兰,等. 玉米、大豆间作对两种作物根系形态特征的影响[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2002, 34(3): 83-86.
- [35] 黄冠华,詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. *土壤学报*, 2002, 39(4): 490-497.
- [36] 何淑勤,宫渊波,郑子成. 紫色土区坡耕地壤中流磷素流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 20-24.