

# 植物篱和浅垄作对三峡库区坡耕地氮磷流失的影响

夏立忠, 马力, 杨林章, 刘国华, 李运东

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要:** 为明确三峡库区陡坡地耕作模式和植物篱防护系统对生态保护和水土环境治理的影响, 该文根据陡坡地特点构建了集浅垄作、少耕和残茬覆盖及残茬植物篱为一体的小麦—玉米生态耕作模式 (H1), 并与小麦—玉米间作香根草 (H2)、小麦—玉米间作紫花苜蓿等高植物篱 (H3) 及常规小麦—玉米管理 (H4), 就化肥氮磷养分利用和氮磷坡面流失变化特点展开连续 2 a 的小区试验。结果表明, 与常规管理相比, 坡耕地 H1 处理的作物生物产量、经济产量、肥料氮磷利用率显著提高。其中化肥磷素利用率提高 0.06 kg/kg。H2、H3 处理对作物生物、经济产量及氮磷利用率、农学效率均未产生显著影响。与 H4 处理相比, 坡耕地 H1、H2、H3 处理均能降低径流量, 显著减少坡面产沙量和泥沙态磷素流失量; 其中产沙量分别降低 48.46%、52.26% 和 58.59%, 泥沙态磷流失量分别降低 30.58%、47.70% 和 44.58%。研究结果可为三峡库区坡耕地的耕作模式和生态控制提供参考。

**关键词:** 氮, 磷, 径流, 陡坡地, 浅垄作, 植物篱

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.14.017

中图分类号: S158

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-14-0104-08

夏立忠, 马力, 杨林章, 等. 植物篱和浅垄作对三峡库区坡耕地氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 104-111.

Xia Lizhong, Ma Li, Yang Linzhang, et al. Effects of hedgerows and ridge cultivation on losses of nitrogen and phosphorus of slope land in Three Gorges Reservoir area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 104-111. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

三峡库区人口密度高, 人地关系十分紧张, 而且以山地资源为主, 是传统的农产区, 历史上由于不合理农业开发, 造成严重水土流失, 并引发剧烈山地生态退化。三峡蓄水水位到 175 m 最高水位线后, 低海拔区域优质良田、果园基本被淹没, 移民不得不依赖进一步的山地开发, 如果不采用合理的保护措施, 必将加剧脆弱山地的生态压力<sup>[1]</sup>。此外, 三峡蓄水以来, 由于水势变缓, 水体对污染物的稀释、扩散能力下降, 库区江段多数支流出现水华, 而研究表明, 来自农业的面源污染是三峡水华的重要诱因<sup>[2]</sup>。因此, 加强三峡库区坡耕地的生态保护, 对于库区坡耕地生态退化防治和农业面源污染治理具有重要的战略意义和实用价值。免少耕等保护性耕作技术在世界范围内得到广泛推广与应用<sup>[3-5]</sup>, 该类技术的应用必须与具体情况相结合, 才会显示出其应有的生态和经济效益。在三峡库区紫色土丘陵区, 聚土垄作、免耕技术和复合农林技术<sup>[6]</sup>得到较好地应用。云阳到秭归之间耕地主要为山地<sup>[7-8]</sup>, 坡度陡、土层薄, 复合农林技术和等高植物篱技术的研究和示范取得了一定进展<sup>[9-13]</sup>, 但鲜有关于生态耕作管理措施的深入研究。根据三峡库区陡坡地农

业利用特点, 进一步探索低成本、简便实用且能有效控制土壤和氮磷养分流失的生态耕作措施, 对于陡坡地可持续利用更具有重要的现实意义。本文基于库首山区坡耕地资源和农业利用特点构建了集等高浅垄作、残茬覆盖、残茬篱以及间套作技术为一体的复合生态耕作模式, 并通过与传统耕作方式和植物篱技术相比较, 探讨不同保护性管理模式下的肥料氮磷养分的作物利用与氮磷坡面流失的生态控制效应。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区域概况

试验在湖北省秭归县水田坝乡中国科学院三峡工程生态环境秭归实验站 (31°3.53'N, 110°40.55'E) 进行。区域以碳酸盐、侏罗系紫色砂页岩和碎屑岩交错分布的川鄂山地为主, 600 m 以下低海拔山地为柑桔产业带, 主要分布有脐橙类经济林果; 600 m 以上山地为传统农业产业分布区, 主要种植小麦、玉米、大豆、水稻类粮经作物, 此外, 还有部分林荒地。区域农用耕地以旱坡地为主, 平均坡度较高, 传统的粗放式农作管理, 加上耕地复种指数高, 作物收获和夏季作物播种期耕翻、施肥和低植被覆盖与强降雨相遇, 极易引发水土、养分流失。由于严重的水土流失, 区域坡耕地土壤生态退化严重, 薄层化、砂砾化、保水能力差、有机质和氮磷养分匮乏, 土地生产力低下。坡耕地养分流失还诱发水体富营养化, 三峡水库蓄水以来, 区域香溪河等诸多支流连年出现水华现象<sup>[14-16]</sup>。

收稿日期: 2011-11-17 修订日期: 2012-05-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (30870410) 和国务院三峡工程建设委员会生态环境监测系统 (SX-2009-009) 资助

作者简介: 夏立忠 (1964—), 男, 汉族, 安徽无为, 副研究员, 从事土壤生态系统养分循环和农业环境工程等方面的研究工作。南京 中国科学院南京土壤研究所, 210008。Email: lxia@issas.ac.cn

1.2 试验设计

选择实验站边连片面积大且坡度变化小的坡地，采取人工整理，修建坡度一致的径流观测场。径流观测场于 2009 年 5 月建成，共 12 个小区，小区间用水泥预制板隔开，设有独立出水口和集水池。各小区占地面积为 10.00 m×2.59 m，由于预制板和下沿汇水引流沟道设置，实际试验坡面面积为 9.67 m×2.49 m，坡度为 20°（随着 25°以上坡耕地退耕还林，20°左右坡耕地仍然占有较高比例，且水土流失和面源污染问题较为严重，故选择 20°

坡度开展试验），坡长为 10.29 m（相关研究认为，当坡度达 20°时，坡地细沟发育的侵蚀临界坡长仅为 2.77 m<sup>[17]</sup>，本研究设计坡长已经完全能够满足坡地田间尺度耕作措施及植物篱技术对水土和养分流失的控制效应研究的要求）。各小区均等高排列。为了确保试验精度和不同处理间的可比性，坡地 0~20 cm 土层土壤人工混匀后重新布设，以确保试验土壤分布均匀且各小区坡度一致。供试土壤为侏罗纪紫色砂岩发育的紫色土，其土壤成分与组成见表 1。

表 1 供试土壤养分质量分数与颗粒组成  
Table 1 Test soil nutrients contents and particles constituent

指标	有机质质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	土壤颗粒组成/%		
								2~0.05 mm	>0.05~0.002 mm	<0.002 mm
均值	6.66	0.42	0.33	21.06	29.06	16.65	166.25	52.03	32.53	15.43
标准差	1.11	0.07	0.06	1.17	5.32	12.74	35.70	3.96	2.26	2.72

试验设 4 个处理，分别是：

H1 生态耕作模式：根据区域气候、地形和土壤条件，针对目前耕翻频次高、肥料撒施和作物品种单一存在的问题，集浅垄作、少耕和残茬覆盖及残茬植物篱为一体的小麦—玉米生态耕作模式：1) 少耕，采用秋冬季（10 月中旬至 11 月初）深翻、雨季（6 月前）免耕、作物点播；2) 浅垄作，秋冬季耕翻后，1 m 间隔等高起垄，垄高 15 cm，垄面宽 80 cm，沟宽 20 cm；结合耕翻将凋落物、覆盖秸秆、残茬和基肥沿等高沟部距地表 5~10 cm 集中埋施；垄作带状小麦，沟作蚕豆收鲜豆后压青；3) 轮作套种与残茬覆盖、残茬植物篱组合型保护措施，蚕豆收获后，沿沟部浅翻，施基肥后等高穴播玉米，将残茬覆盖垄坡；结合灌溉或非侵蚀性降水开浅沟追施肥料。小麦收获后留 15 cm 高残茬，垄部免耕。如图 1 所示。

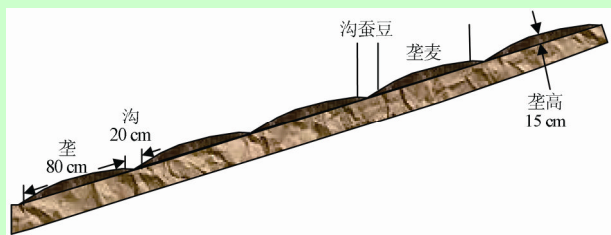
H2 小麦—玉米常规耕作：套种香根草等高植物篱，

篱带宽 15 cm，株距 10 cm，双行交错栽植，顺坡植物篱间距为 5 m。

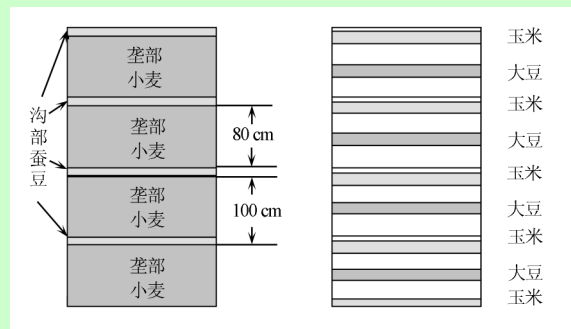
H3 小麦—玉米常规耕作：套种紫花苜蓿等高植物篱，篱带宽 10 cm，株距 5 cm，顺坡植物篱间距 5 m。

H4 小麦—玉米常规耕作：为对照。

每个处理设 3 个重复，各处理小区随机排列；其中常规耕作在年度 10 月和 5 月 2 次耕翻，11 月份播种小麦，5 月中旬至 6 月初播种玉米。H1 生态耕作模式是集现有植物篱技术、间作套种技术和免耕技术构建的生态耕作模式试验开始于 2009 年 6 月。连续开展玉米-小麦 2 个轮作周期试验，其中小麦 11 月份播种次年 5 月收获，玉米 6 月播种当年 10 月收获。供试玉米品种为农大 95，大豆为鄂豆 4 号，小麦品种为西科麦 4 号，蚕豆为宜都青胡豆。麦季施肥量分别为：N 120.01 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 77.32 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 77.32 kg/hm<sup>2</sup>；玉米茬施肥量分别为，N 130.81 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 74.75 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 74.75 kg/hm<sup>2</sup>。



a. 垄沟结构剖面图



b. 麦季垄部小麦

c. 玉米茬垄部大豆、沟部玉米

注：顺坡面小区作物分布；坡度为 20°，沿坡面垄沟土壤厚度差为 15 cm；每年 11 月份耕翻 1 次，麦季留残茬免耕，蚕豆秸秆覆盖垄部；11 月份玉米茬大豆秸秆翻压埋置垄底。

图 1 H1 浅垄作、少耕、残茬覆盖和残茬植物篱麦（蚕豆）—玉米（大豆）生态耕作模式

Fig.1 Rotation of wheat (horse bean) and maize (soybean) with shallow ridge cultivation, less tillage and straw mulching

1.3 测定项目

每茬试验分小区分别测定小麦、蚕豆、玉米和大豆的秸秆与籽粒的干物质量，计算作物经济产量、秸秆产量和干物质总量。采集根、茎、叶和玉米、小麦、胡豆

及蚕豆样品，测定氮磷含量，计算作物氮磷利用量。观测每次降雨径流池水深，计算径流量。人工混匀池中水体后采集径流混合样 1 L、静置 30 min 后放水，采集泥沙样。利用混合样过滤后烘干法测定径流泥沙含量，室内

分析径流水体和泥沙的氮磷含量。土壤、径流泥沙态氮采用半微量凯氏法，土壤、泥沙态全磷采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法，碱解氮采用扩散滴定法，速效磷采用碳酸氢钠提取钼锑抗比色法，水体总氮采用过硫酸钾消煮-紫外分光光度法，水体总磷采用过硫酸钾消煮-钼酸铵分光光度法，水体泥沙含量采用重量法测定。植株样品采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮，全氮采用半微量蒸馏滴定法测定，全磷采用钼钒黄比色法测定。

氮磷利用率

$$U = (S - S_0) / F \quad (1)$$

式中， $U$  为氮磷利用率， $kg/kg$ ； $S$  与  $S_0$  分别表示处理小区和对照小区作物利用的氮磷量， $kg$ ； $F$  表示处理小区的氮磷施用量， $kg$ 。以不同处理养分利用效率与常规处理之间差值比较不同处理对养分利用效率的影响。如 H1 处理与 H4 对照的氮素利用率差绝对值为

$$U_{N1} - U_{N4} = (S_{N1} - S_0) / F_N - (S_{N4} - S_0) / F_N = (S_{N1} - S_{N4}) / F_N \quad (3)$$

式中， $U_{N1}$ 、 $U_{N4}$  表示 H1 和 H4 处理平均氮素利用率， $S_{N1}$ 、 $S_{N4}$ 、 $S_0$  分别表示 H4 和 H2 处理及对照处理氮素利用量，其中对照处理氮素利用量在运算中被消除； $F_N$  表示氮肥施用量。

3 个处理 (H1、H2 和 H3) 与 H4 之间氮磷农学效率差值采取同样方法计算。

本文利用 SPSS11.0 软件对 2009—2011 年小麦—玉米轮作试验不同处理产量、氮磷利用与流失量进行单因素方差分析和多重比较分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物篱与生态耕作措施对作物氮磷利用与产量的影响

由表 2 可以看到，与 H4 相比，采用植物篱措施对 2 茬作物的生物、经济产量均未产生负面影响。香根草是理想的生物篱笆植物，不仅保水固土，还具有不与作物竞争生长的特点，紫花苜蓿为固氮高蛋白饲草植物，二者在春季生长阶段显著滞后于小麦生育期，在 4 月份后期进入雨季后进入快速生长阶段，因而不会对作物生长构成竞争<sup>[18-19]</sup>。期间浅垄作生态耕作模式处理的连续 4 茬作物总经济产量、生物产量均显著高于其它 3 个处理，2 茬麦季生物产量也显著高于其它 3 个处理，说明采用生态耕作模式有利于提高作物经济产量和生物产量。已有研究认为垄作改善了作物根际水热条件、土壤结构状况和养分供应<sup>[20-22]</sup>，本试验显示这一效果对于麦茬作物比较明显。一方面试验区域冬春季降水少、温度低，作物容易遭受旱灾和冻害，而垄作可避免在小雨情况下降水流失，且垄面容易接受光照增高地温，从而保墒保温促进作物生长；其次采用生长高峰期错开的小麦—蚕豆间作可以减少轮作间隙时间，增加光能资源利用效率，从而有效增加生物产量，提高经济产量。玉米间作大豆是一种理想的高产间作模式，但垄作条件下，2 种作物物候期设计必须既能避开伏旱，又能获得最高生物、经济产量累积，从本项试验结果来看，2 种作物茬口计划还需进一步优化<sup>[23-25]</sup>。

表 2 不同处理小麦—玉米轮作生物经济产量比较

Table 2 Comparison of biological and economic yields of wheat -maize rotation of different tillage treatments

茬口		干物质产量/( $kg \cdot hm^{-2}$ )			
		H1	H2	H3	H4
玉米 (大豆) (2009-06-2009-09)	经济产量	4.31±0.34	3.92±0.14	4.25±0.09	4.04±0.14
	生物产量	13.34±1.02	12.32±1.16	12.42±0.22	12.77±0.83
小麦 (蚕豆) (2009-10-2010-05)	经济产量	3.84±0.59	3.14±0.58	2.67±0.30	3.19±0.29
	生物产量	7.98±0.46 <sup>a</sup>	6.04±0.54 <sup>b</sup>	5.46±0.38 <sup>b</sup>	6.00±0.15 <sup>b</sup>
玉米 (大豆) (2010-06-2010-09)	经济产量	4.29±0.52	3.51±0.54	3.82±0.30	3.47±0.18
	生物产量	10.40±0.56	9.61±0.78	9.93±0.18	9.57±0.13
小麦 (蚕豆) (2010-10-2011-05)	经济产量	4.57±0.40	3.93±0.37	3.69±0.09	3.87±0.48
	生物产量	9.60±1.01 <sup>a</sup>	6.78±0.73 <sup>b</sup>	6.33±0.32 <sup>b</sup>	7.05±0.95 <sup>b</sup>
4 茬总产量	经济产量	17.01±0.65 <sup>a</sup>	14.50±0.50 <sup>b</sup>	14.43±0.98 <sup>b</sup>	14.57±0.71 <sup>b</sup>
	生物产量	41.32±1.56 <sup>a</sup>	34.75±0.70 <sup>b</sup>	34.14±1.96 <sup>b</sup>	35.39±1.57 <sup>b</sup>

注：采用 SPSS11.0 软件进行单因素方差分析，LSD 法多重比较，同行比较，不同字母表示差异达到  $p < 0.05$  显著水平。H1 生态耕作模式；H2 小麦—玉米套种香根草等高植物篱；H3 小麦—玉米套种紫花苜蓿等高植物篱；H4 小麦—玉米常规耕作，下同。

从不同轮作阶段来看，不同处理间 2 个麦季氮素利用量差异均显著，且均以 H1 处理显著高于其余 3 个处理，而 H2、H3 和 H4 处理间无显著性差异。2009 年玉米茬不同处理间氮素利用达到显著性差异，而 2010 年玉米茬因为大豆幼苗遭受虫害失收，玉米氮利用虽然具有一定差异，但均未达到显著性水平。

不同处理 2 个麦季磷素利用量差异均显著或极显著，而 2 个玉米茬磷素利用量均未达到显著性差异 (表 3)。如前所述，与常规对照相比，麦季采用垄沟耕作粮豆套作，提高了作物的生物经济产量，也明显提高了氮磷利用量；

而玉米茬不同处理对生物经济产量的影响不显著，且对氮磷利用的影响也不显著或效果不稳定。按 2 个轮作周期计算 (表 4)，H1 处理的氮磷利用率显著高于其余 3 个处理，其中，第一轮作周期氮素利用率提高  $0.26 kg/kg$ ，第二轮作周期提高  $0.14 kg/kg$ ；2 个轮作周期磷素利用率均提高  $0.06 kg/kg$ ，豆类固氮效应是氮素利用率提高的主要原因，因此并不能说明化肥氮素利用率增高，只能算是表观利用率；作物磷素来自土壤和化肥，因此磷素利用率是明显提高的，可见采用生态耕作模式明显提高了磷素利用率。已有研究表明，禾谷类粮食作物与豆科固氮作物间作，氮肥

过量施用不利于豆科作物生长，增施磷肥有利于豆科作物固氮，同时有利于 2 种作物增产<sup>[25]</sup>。虽然本试验只对小麦、玉米采用集中施肥措施，而在一定磷肥施用量条件下，禾谷类作物与豆科作物之间对磷素吸收构成竞争关系。因此

采用农作生态耕作模式改善了作物生长条件后，明显提高肥料磷素利用效率，必须在进一步改善氮素供应条件下，适量增加磷肥施用量，协调氮磷平衡，从而有利于进一步提高经济效益。

表 3 小麦—玉米 2 个轮作周期内不同处理氮磷利用量

处理	玉米茬 (2009-06—2009-09)		小麦茬 (2009-10—2010-05)		玉米茬 (2010-06—2010-09)		小麦茬 (2010-10—2011-05)	
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	H1	154.33±10.33 <sup>a</sup>	59.00±4.54	131.74±9.28 <sup>a</sup>	36.78±3.30 <sup>a</sup>	112.38±8.01	54.83±5.01	154.66±17.10 <sup>a</sup>
H2	126.96±10.97 <sup>b</sup>	57.14±3.81	101.40±16.52 <sup>b</sup>	28.85±4.81 <sup>b</sup>	100.37±8.33	47.32±5.21	115.14±14.08 <sup>b</sup>	31.05±2.96 <sup>b</sup>
H3	129.19±2.35 <sup>b</sup>	59.47±1.14	90.07±10.45 <sup>b</sup>	25.44±2.90 <sup>b</sup>	105.10±4.60	50.28±2.87	113.53±8.45 <sup>b</sup>	29.15±0.71 <sup>b</sup>
H4	131.50±5.98 <sup>b</sup>	59.08±2.48	101.32±4.28 <sup>b</sup>	28.90±1.46 <sup>b</sup>	99.64±2.73	46.87±1.71	111.69±22.94 <sup>b</sup>	30.58±3.76 <sup>b</sup>

注：采用 SPSS11.0 软件进行单因素方差分析，LSD 法多重比较，同列比较，不同字母表示差异达到  $p < 0.05$  水平显著。

表 4 小麦—玉米 2 个轮作周期内不同处理氮磷相对利用效率比较

处理	第 1 轮作周期的氮利用率	第 1 轮作周期的磷利用率	第 2 轮作周期的氮利用率	第 2 轮作周期的磷利用率
H1	0.21±0.08 <sup>a</sup>	0.06±0.05 <sup>a</sup>	0.14±0.06 <sup>a</sup>	0.06±1.60 <sup>a</sup>
H2	-0.02±0.11 <sup>b</sup>	0.00±0.02 <sup>b</sup>	-0.07±0.07 <sup>b</sup>	-0.05±0.03 <sup>b</sup>
H3	-0.05±0.06 <sup>b</sup>	-0.00±0.03 <sup>b</sup>	-0.07±0.02 <sup>b</sup>	-0.05±0.02 <sup>b</sup>
H4	0.00±0.01 <sup>b</sup>	0.01±0.01 <sup>b</sup>	0.02±0.11 <sup>b</sup>	-0.02±0.05 <sup>b</sup>

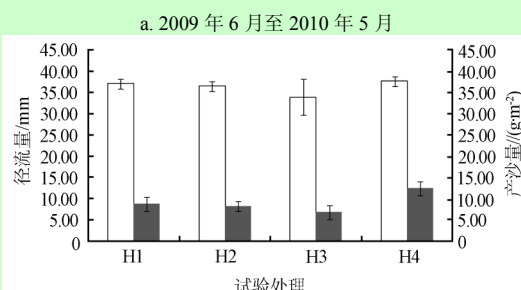
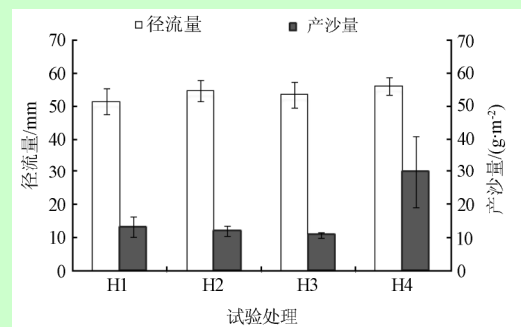
注：采用 SPSS11.0 软件进行单因素方差分析，LSD 法多重比较，同列比较，不同字母表示差异达到  $p < 0.05$  水平显著；相对利用率指 H1、H2、H3 和 H4 氮磷利用率与 H4 平均利用率之差。

单纯采用植物篱技术虽然可拦截径流增加入渗，引起径流携带颗粒在篱笆上沿沉积，逐步局地改善土壤水热及养分条件<sup>[10-12]</sup>；但难以在短期内改善小区土壤肥力，初期试验不会对作物的氮磷利用产生影响，与本试验的结果基本吻合。

## 2.2 植物篱与生态耕作措施对坡面水土流失的影响

从图 2 可以看出，2009 年 6 月至 2010 年 5 月不同处理玉米—小麦两季作物小区尺度坡面降雨径流量均值为 51~57 mm 之间，各处理间差异不显著。但与常规管理 H4 处理相比，H1、H2、H3 处理径流量有降低的趋势，分别降低 10.42%、2.67%和 4.97%，以 H1 处理最低。各处理小区平均产沙量为 10.82~29.94 g/m<sup>2</sup>，以对照处理 H4 产沙量最高，达 (29.94±10.90) g/m<sup>2</sup>；H1、H2、H3 和产沙量分别为 (13.15±3.11)、(11.97±1.41) 和 (10.82±0.83) g/m<sup>2</sup>，显著低于 H4 处理，分别较 H4 处理降低 56.08%、60.02%和 63.86%，H1、H2 和 H3 处理之间产沙量无明显差异。2010 年 6 月至 2011 年 5 月玉米—小麦两茬作物监测结果呈同样变化趋势，各处理间径流量差异不显著。与 H4 处理相比，H1、H2 和 H3 处理的平均径流量分别仅降低 1.44%、3.11%和 9.84%，而平均产沙量分别减少 48.46%、52.26%和 58.59%。连续 2 个轮作周期，与 H4 处理相比，H1、H2 和 H3 处理的平均径流量分别降低 5.57%、2.80%和 6.78，坡面产沙量降低 48.46%、52.26%和 58.59%，仍以坡面产沙量降幅显著。坡地等高垄沟结构有利于增高地面粗糙度，由于填洼集水，增加入渗，降低径流；同时垄部植被覆盖可以降低雨滴溅蚀，残茬根系有利于固土，降低径流冲刷；垄沟填洼可有效减缓流速，增加泥沙沉积，从而减少产沙量<sup>[26]</sup>，但其对坡面产流和产沙的控制效应因受坡度、土壤、覆盖以及降雨量、降雨强度

等因素影响。等高植物篱通过篱笆植物基部发达的枝叶阻滞径流，从而降低径流流速和夹沙能力，在增加入渗的同时拦截径流土壤颗粒，从而保土蓄水<sup>[27-28]</sup>。本项试验得到较好的验证。因此，将可用于坡面耕作管理保护的等高浅垄作少耕和残茬覆盖技术与一定坡长等高植物篱技术结合起来，可望更为有效地减少坡耕地水土流失。



注：采用单因素方差分析，多重比较法分析。不同处理产沙量 0.05 水平差异显著，不同水平分别用 a 和 b 表示。

图 2 不同处理小麦—玉米 2 个轮作周期的年径流深和产沙量

Fig.2 Runoff depth and sediment yield of 2 rotations of wheat—maize of different treatments

前后2个轮作周期期间径流量、产沙量具有一定的差异, 主要与2个轮作周期之间降雨量、时段雨强及产流降雨分布的差异, 尤其是收获、耕作期间的降水的差异有关。

### 2.3 植物篱与生态耕作措施坡面氮磷流失的影响

从表5可以看出小麦—玉米2个轮作周期坡面径流氮素流失总量为83~133 mg/m<sup>2</sup>, 平均为105.48 mg/m<sup>2</sup>; 其中泥沙氮素流失量为38~64 mg/m<sup>2</sup>占坡面氮素流失总量43%~51%, 平均占48%; 水体氮素流失量为45~74 mg/m<sup>2</sup>, 占坡面氮素流失总量的49%~57%, 平均占52%。2009年6月至2010年5月连续2茬各处理间坡面氮素流失总量、泥沙氮素和水体氮素流失量差异均不显著, 而2010年6月至2011年5月连续2茬不同处理间泥沙氮素和氮素流失总量以H4对照处理显著高于其

他处理, 而其余3个处理的水体氮素流失量差异仍然不显著。由表5可知, 各处理坡面磷素流失总量为19~39 mg/m<sup>2</sup>, 平均为26.67 mg/m<sup>2</sup>; 其中泥沙磷素流失量为14~31 mg/m<sup>2</sup>, 平均为20.21 mg/m<sup>2</sup>; 水体磷素流失总量为3~11 mg/m<sup>2</sup>, 平均为6.46 mg/m<sup>2</sup>; 泥沙磷素和水体磷素流失量分别平均占坡面磷素流失量的76%和24%。2009年6月至2010年5月, 以H4处理泥沙态磷素流失量显著高于其余各处理; 而其他3个不同处理磷素流失总量差异不显著, 主要与水体磷素流失量占有较高比例有关。2a平均不同处理间泥沙态磷素流失以对照处理H4显著高于其他处理, 与H4相比, H1、H2、H3和泥沙磷流失量分别降低30.58%、47.70%和44.58%; 但各处理水体磷素流失量差异不显著。

表5 不同处理氮磷流失形态与数量比较

Table 5 Forms and amounts of nitrogen and phosphorus losses under different tillage treatments

		mg·m <sup>-2</sup>			
年度	养分流失	H1	H2	H3	H4
2009年6月—2010年5月	泥沙氮素	52.12±6.96	56.42±3.41	58.62±3.61	63.39±18.88
	泥沙磷素	21.83±6.28 <sup>b</sup>	14.85±5.60 <sup>b</sup>	14.79±3.57 <sup>b</sup>	30.67±4.81 <sup>a</sup>
	水体氮素	55.29±0.88	73.29±15.49	62.20±24.57	61.43±13.72
	水体磷素	10.18±3.07	6.29±5.13	9.36±4.71	7.51±3.72
	氮素总量	107.42±6.08	121.70±20.17	120.82±28.17	132.49±19.94
	磷素总量	32.02±9.90	21.11±10.72	24.15±3.16	38.18±6.69
2010年6月—2011年5月	泥沙氮素	38.00±5.01 <sup>b</sup>	37.67±7.64 <sup>b</sup>	47.88±7.88 <sup>b</sup>	58.56±5.21 <sup>a</sup>
	泥沙磷素	18.67±1.97 <sup>b</sup>	15.66±5.02 <sup>b</sup>	17.54±6.75 <sup>b</sup>	27.67±1.30 <sup>a</sup>
	水体氮素	49.34±5.04	45.11±7.53	48.10±10.11	62.22±9.45
	水体磷素	3.62±0.68	4.24±0.69	4.17±0.96	6.27±1.94
	氮素总量	87.34±1.57 <sup>b</sup>	82.78±15.14 <sup>b</sup>	95.99±17.90 <sup>b</sup>	120.81±9.11 <sup>a</sup>
	磷素总量	22.30±2.44 <sup>b</sup>	19.90±4.60 <sup>b</sup>	21.70±7.40 <sup>b</sup>	33.94±1.67 <sup>a</sup>

注: 采用SPSS11.0软件进行单因素方差分析, LSD法多重比较, 同行比较, 不同字母表示差异达到 $p < 0.05$ 水平显著。

试验表明生态耕作模式和植物篱技术主要通过控制产沙形成的氮磷流失降低坡面氮磷流失, 前者通过垄沟组合和沟部泥沙沉降降低产沙量, 后者通过地表茎叶形成的篱墙栏滤径流泥沙控制坡面产沙。生态耕作模式采用集中穴施的施肥措施和地面残茬覆盖提高了氮磷利用效率, 也有利于降低侵蚀和溶失的风险, 但本试验中垄部小麦残茬分散, 且蚕豆秸秆覆盖有限, 没能有效控制土壤养分向径流扩散而溶失。因此必须进一步优化小麦和蚕豆播种时间调节、小麦品种选用和垄部播种密度分布调节, 一方面增强小麦残茬固土拦截效应, 另一方面提高豆科作物生物量以增加雨季地面残茬覆盖度。相对而言本试验的垄沟结构的截滤泥沙减少氮磷流失的功能更为明显。

### 2.4 讨论

本研究仅限于探讨坡面田间不同尺度耕作管理措施对坡面面蚀和细沟侵蚀引起的土壤和氮磷流失的影响, 并不反映山地侵蚀全过程及入渗等其它途径的损失。另一方面, 供试土壤低氮、少磷, 且试验施肥量参照农民针对该类土壤施肥的调查数据确定, 接近专家推荐施肥量250 kg/hm<sup>2</sup>[29], 施肥量偏低。如玉米施氮量为130.8 kg/hm<sup>2</sup>, 远低于秭归县玉米平均施氮量

234.4 kg/hm<sup>2</sup>[30]。因此坡面产沙量、氮磷流失量显然有异于宏观侵蚀模数和区域氮磷流失通量, 研究结果与国内同类研究一致[10]。

## 3 结论

与常规管理相比, 坡耕地小麦—玉米采用浅垄作生态耕作模式、间作香根草植物篱、间作紫花苜蓿植物篱连续2个轮作周期坡面产沙量分别降低48.46%、52.26%和58.59%, 泥沙态磷素流失量分别降低30.58%、47.70%和44.58%。可见, 浅垄作生态耕作和植物篱技术均有利于坡耕地氮磷流失的控制。

致谢: 衷心感谢南京土壤研究所宗海宏高级实验师, 在他的协助下, 课题组完成了大量室内分析。秭归县农业局向家奉副局长和水田坝乡周宗义先生在试验工作开展过程中完成了很多田间管理和试验观测, 在此一并致谢!

### [参考文献]

- [1] 冯仁国, 王黎明, 杨燕风, 等. 三峡库区坡耕地退耕与粮食安全的空间分异[J]. 山地学报, 2001, 19(4): 306—311.

- Feng Renguo, Wang Liming, Yang Yanfeng, et al. Spatial distribution of slope cultivated land conversion into forests and the food safety[J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(4): 306—311. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘光德, 李其林, 黄昀. 三峡库区面源污染现状与对策研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(5): 422—426. Liu Guangde, Li Qilin, Huang Yun. Research on status of non-point source pollution in Three Gorges Region and the countermeasures[J]. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(5): 422—426. (in Chinese with English abstract)
- [3] You Jiao, Joann K Whalen, William HHendershot. No-tillage and manure applications increase aggregation and improve nutrient retention in a sandy-loam soil[J]. *Geoderma*, 2010, 134(1): 24—33.
- [4] Kushwaha C P, Tripathi S K, Singh K P. Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in a tropical dryland agroecosystem[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16(3): 229—241.
- [5] Rhoton F E. Influence of time on soil response to no-till practices[J]. *Soil Science. Soil Sciety of America*[J]. 2000, 64(2): 700—709.
- [6] 王同朝, 王燕, 卫丽, 等. 作物垄作栽培法研究进展[J]. *河南农业大学学报*, 2005, 39(4): 377—382. Wand Tongchao, Wang Yan, Wang Junzhong, et al. Advance of crops ridge planting[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, 39(4): 377—382. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张磊, 董立新, 吴炳方, 等. 三峡水库建设前后库区 10 年土地覆盖变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(1): 107—112. Zhang Lei, Dong Lixin, Wu Bingfang, et al. Changes of the land cover in Three Gorges Reservoir Area 10 years after inundation[J]. *Resource and environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 107—112. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 土地利用/土地覆被变化对长江流域水环境的影响研究[J]. *地域研究与开发*, 2003, 22(1): 69—72. Zhang Dianfa, Wang Shijie, Li Ruilin. Changes of land use and land cover on water environment of the Yangtze River[J]. *Regional Research and Development*, 2003, 22(1): 69—72. (in Chinese with English abstract)
- [9] 申元村. 三峡库区植物篱坡地农业技术提高土地生产潜力的研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(1): 56—59. Shen Yuancun. Research on contour hedges technology for raising potential slop land productivity[J]. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(1): 56—59. (in Chinese with English abstract)
- [10] 卜崇峰, 蔡强国, 袁再健. 湿润区坡地香根草植物篱农作措施对土壤侵蚀和养分的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 55—59. Bu Chongfeng, Cai Qiangguo, Yuan Zaijian. Erosion and nutrient cycling in the *Vetiveria zizanioides* hedgerow intercropping system with fertilization or mulching measures in humid slope land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(5): 55—59. (in Chinese with English abstract)
- [11] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 等高植物篱控制紫色土坡耕地侵蚀的特点[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 71—80. Xu Feng, Cai Qiangguo, Wu Shuan, et al. Characteristics of contour hedges on controlling soil erosion from purple soil slope land[J]. *Acta Pedologic Sinica*, 2002, 39(1): 71—80. (in Chinese with English abstract)
- [12] 朱远达, 蔡强国, 张光远, 等. 植物篱对土壤养分流失的控制机理研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(4): 345—351. Zhu Yuanda, Cai Qiangguo, Zhang Guangyuan, et al. Mechanism of hedges on reducing soil and nutrients losses[J]. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(4): 345—351. (in Chinese with English abstract)
- [13] 夏立忠, 杨林章, 李运东. 生草覆盖与植物篱技术防治紫色土坡地土壤侵蚀与养分流失初步研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 28—35. Xia Lizhong, Yang Linzhang, Li Yundong. Primary research of herb mulching and hedgerows on reducing soil and nutrients losses from purple soil slope land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 28—35. (in Chinese with English abstract)
- [14] 中国科学院学部. 关于加强三峡库区生态与环境问题及对策研究的建议[J]. *中国科学院院刊*, 2008, 23(1): 58—61. Faculty of Chinese Academy of Sciences, Suggestion of intensifying research on eco-environmental problems and the countermeasures[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2008, 23(1): 58—61. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘传江, 朱劲松. 三峡库区土地资源承载力现状与可持续发展对策[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(4): 522—528. Liu Chuanjiang, Zhu Jingsong. Status of land resource capacity in three gorges region and sustainable development[J]. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(4): 522—528. (in Chinese with English abstract)
- [16] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 7—11. Cai Qinghua, Hu Zhengyu. Eutrophication of Three Gorges Reservoir and the countermeasures[J]. *Acta Hydrobiologic Sinica*, 2006, 30(1): 7—11. (in Chinese with English abstract)

- [17] 严冬春, 文安邦, 史忠林, 等. 川中紫色丘陵坡耕地细沟发生临界坡长及其控制探讨[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 1—4.  
Yan Dongchun, Wen Anbang, et al. Exploring on critical slope length for rill flow erosion on hill slope and controlling[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(6): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [18] 田潇, 周运超, 刘晓芸, 等. 物种配置植物篱对坡耕地营养元素拦截效应[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 89—93.  
Tian Xiao, Zhou Yunchao, Liu Xiaoyun, et al. Plant species assembling for hedgerows on interception of nutrients losses by runoff[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 89—93. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘尚蔚, 何大川. 香根草在生态水利工程中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(3): 126—129.  
Liu Shangwei, He Dachuan. Application of vetiver zizanioides on ecohydrological engineering[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, 32(3): 126—129. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郑毅, 张福锁. 土壤结构和耕作对根际微生态系统的影响[J]. 云南农业大学学报, 2003, 18(2): 193—197.  
Zheng Yi, Zhang Fusuo. Influence of soil structure and tillage on root micro-ecosystem[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2003, 18(2): 193—197. (in Chinese with English abstract)
- [21] 林立金, 朱雪梅, 邵继荣, 等. 紫色土坡耕地横坡垄作的水土流失特征及作物产量效应[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 254—255, 258.  
Lin Lijin, Zhu Xuemei, Shao Jirong, et al. Characteristic of soil and water losses of ridge cultivation across slope and effects on crop yield[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 254—255, 258. (in Chinese with English abstract)
- [22] 廖晓勇, 陈治谏, 刘绍权, 等. 三峡库区坡耕地粮经果复合垄作技术效益评价[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 37—40.  
Liao Xiaoyong, Chen Zhijian, Liu Shaoquan, et al. Assessment of the benefit of ridge cultivation for slope land food crops and cash crops[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 37—40. (in Chinese with English abstract)
- [23] 齐林, 陈雨海, 周勋波. 冬小麦种植模式与水肥利用效率研究进展[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2011, 42(1): 159—162.  
Qi Lin, Chen Yuhai, Zhou Yunbo, et al. Advance of research on models and water and fertilizer utilization of winter wheat[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2011, 42(1): 159—162. (in Chinese with English abstract)
- [24] 高阳, 段爱旺, 邱新强, 等. 玉米/大豆间作条件下作物生物量积累模型[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 965—968.  
Gao Yang, Duan Aiwang, Qiu Xinqiang, et al. Models of biological accumulation of corn intercropping with beans[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2010, 18(5): 965—968. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孙建好, 李隆, 李娟. 小麦/大豆间作氮磷肥效的双变量分析[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 183—186.  
Sun Jianhao, Li Long, Li Juan. Bivariate analysis of the efficiency of chemical nitrogen and phosphorus in wheat intercropping with soybean system[J]. Arid Agriculture Research, 2007, 25(4): 183—186. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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 Zicheng, Wu Qifa, He Shuqin. Tillages on rainfall runoff[J]. Soils, 2004, 36(3): 327—330. (in Chinese with English abstract)
- [27] 林超文, 涂仕华, 黄晶晶, 等. 植物篱对紫色土区坡耕地水土流失及土壤肥力的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2191—2198.  
Lin Chaowen, Tu Shihua, Huang Jingjing, et al. Hedgerows on purple soil slope land soil erosion and soil fertility[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6): 2191—2198. (in Chinese with English abstract)
- [28] 吴电明, 夏立忠, 俞元春, 等. 三峡库区坡耕地脐橙园保护性措施对土壤团聚体结构及碳、氮、磷含量的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 996—1005.  
Wu Dianming, Xia Lizhong, Yu Yuanchun, et al. Influence of protective management practices on soil integrate structure and carbon, nitrogen and phosphorus contents[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5): 996—1005. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要作物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.  
Zhang Fusuo, Wang Jiqing, Zhang Weifeng, et al. The status of chemical fertilizer utilization and the approaches to increase the fertilizer utilization efficiency[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915—924. (in Chinese with English abstract)
- [30] 徐祥玉, 彭成林, 袁家富, 等. 秭归县玉米产量及施肥现状调查与分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(7): 59—62.  
Xu Xiangyu, Peng Chenglin, Yuan Jiafu, et al. Investigation on chemical fertilizer application and yield of corn in Zigui county[J]. Chinese Agriculture Science Bulletin, 2011, 27(7): 59—62. (in Chinese with English abstract)

## Effects of hedgerows and ridge cultivation on losses of nitrogen and phosphorus of slope land in Three Gorges Reservoir area

Xia Lizhong, Ma Li, Yang Linzhang, Liu Guohua, Li Yundong

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Protective management of arable slope land plays an important role in protection of land resource and aquatic environment in Three Gorges region, China. Base on the regional natural conditions and the utilization of the arable slope land, four tillage modes with H1 (rotation of wheat and maize, wheat intercropped with horse bean, less tillage and ridge cultivation), H2 (rotation of wheat and maize, with *Vetiveria ziz anioides* contour hedges intercropped at slop length interval of 5m), H3 (rotation of wheat and maize, with *alfalfa* contour hedges intercropped at slop length interval of 5m), H4 (rotation of wheat and maize, conventional management) were conducted from Oct. 2009 to Oct. 2011. The differences of apparent recovery efficiency and Agronomic efficiency of applied nitrogen and phosphorus between treatments were discussed, as well as nitrogen and phosphorus losses through slope land surface runoff were analyzed. The results showed that compared with H4, H1 increased phosphorus use efficiency by 0.06 kg/kg. No significant difference of biological and economic production, apparent recovery efficiency and agronomic efficiency of applied nitrogen and phosphorus was observed among H2、H3 and H4, which showed intercropping with *Vetiveria ziz anioides* or *alfalfa* contour hedges wouldn't lead to the reduction of production. Furthermore significant effects on reducing soil erosion and sediment phosphorus loss were observed for H1、H2 and H3. Compared with H4, and sediment losses for H1, H2 and H3 decreased by 48.46%, 52.26% and 58.59% respectively, and sediment phosphorus losses decreased by 30.58%, 47.70% and 44.58% respectively.

**Key words:** nitrogen, phosphorus, runoff, slope land, shallow ridge cultivation, contour hedges