

三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响^{*}

张 洋 樊芳玲 周 川 倪九派[†] 谢德体

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘 要 为优化三峡库区紫色土旱坡地农桑配置方式, 提高库区水土保持效果和生态环境效益, 本试验通过采用三带等高桑+等高耕作、三带等高桑+交叉耕作、两带等高桑+等高耕作、两带等高桑+交叉耕作、传统等高耕作等5种处理研究了不同农桑配置方式对旱坡地地表氮磷流失的阻抗效果。结果表明, 农桑配置方式能够显著阻抗地表径流和氮磷流失, 但不同配置方式间存在显著性差异; 三带等高桑+交叉耕作方式较其他方式能更显著地降低地表径流中全氮(磷)、可溶性氮(磷)、颗粒态氮(磷)的流失和氮(磷)年流失负荷量, 地表径流中氮、磷流失分别以可溶性氮(约50.1%~60.2%)和颗粒态磷(约54.9%~59.6%)为主, 并且硝态氮的年流失负荷(约0.19~0.27 kg hm⁻² a⁻¹)高于铵态氮(约0.12~0.17 kg hm⁻² a⁻¹)。综上可知, 三带等高桑+交叉耕作对地表径流和氮、磷流失的阻抗效果更显著, 最符合三峡库区旱坡地开发利用的生态保护理念。

关键词 农桑配置; 氮磷流失; 地表径流; 紫色土; 三峡库区

中图分类号 S157.2 **文献标识码** A

农业面源污染是当今世界普遍存在的一个严重环境问题, 其主要表现为农田氮、磷等养分流失导致土壤质量退化和水体富营养化^[1-3]。研究表明, 全球50%的陆地面积和80%的水体受农业面源污染影响, 其中氮、磷贡献率为75%^[4]。随着对农业面源污染发生机制及控制措施等科学问题的重视, 国内外许多学者针对农业面源污染氮、磷排放规律及特征展开了大量研究^[5-8]。氮、磷排放量主要取决于土壤中氮、磷的浓度^[9], 而排放速率主要受降雨和地形等条件的影响, 与土壤氮、磷的基量相关性不显著^[10]。此外, 土壤氮、磷排放过程还与气候条件、土壤性质、地形地势及土地利用方式等因素有关^[11-13]。目前, 氮、磷流失发生机制及过程的研究已趋向成熟^[14-16], 而对旱坡地农作保护措施下土壤氮、磷输出负荷的研究较少。

植物篱养护是保持水土, 减弱氮、磷流失,

控制面源污染的重要举措。Wang等^[17]指出植物篱能够减少径流量和泥沙流失, 进而间接减少氮、磷营养损失, 保护生态环境。同时蒲玉琳等^[18]的研究也表明植物篱能够提高水土保持效益, 控制农业面源污染, 增强土壤抗侵蚀力和土地生产力, 具有良好的生态环境效益。此外, 合理的耕作方式也能在一定程度上控制土壤氮、磷流失, 减少面源污染。谢颂华等^[19]采用野外标准径流小区试验方法对南方红壤坡地常见的顺坡间作、横坡间作、果园清耕3种不同耕作方式下5年时间水土保持蓄水保土效应进行研究发现, 横坡间作和顺坡间作均能减弱径流量和流失泥沙量, 且横坡间作效果更显著。

桑树(*Morus alba* L.)为落叶乔木, 拥有极其发达的根系, 易栽培, 具有良好的生态适应性和抗逆能力, 已成为生态修复和环境保护的最优选择之一^[20]。三峡库区自古就有“种桑养蚕”的传统,

^{*} 国家科技支撑计划项目(2012BAD15B04-3)和中央高校基本科研业务费项目(XDJK2013A016)资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2012BAD15B04-3) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. XDJK2013A016)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: nijiupai@163.com

作者简介: 张 洋(1988—), 男, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要研究土壤环境与质量。E-mail: zhy2198@163.com

收稿日期: 2015-07-16; 收到修改稿日期: 2015-09-17

以桑树为植物篱,既符合三峡库区传统的农作习惯和因地制宜的生态理念,又能在库区的水土保持,面源污染防控等方面发挥重要作用^[21-22],因而在三峡库区得到了大力推广。目前“以桑为篱,农桑配置”的旱坡地农作保护模式已成为三峡库区最具潜力的耕作方式之一,然而如何实现最优的农桑配置方式还存在较大争议^[23]。

本文在径流小区中采用作物耕作与桑树种植相结合的方式,模拟紫色土旱坡地农桑配置耕作模式,研究了三峡库区紫色土旱坡地农桑配置模式下氮、磷输出特征,以期为优化三峡库区紫色土旱坡地农桑配置方式,提高库区水土保持效果和生态环境效益提供科学依据。

1 材料与方法

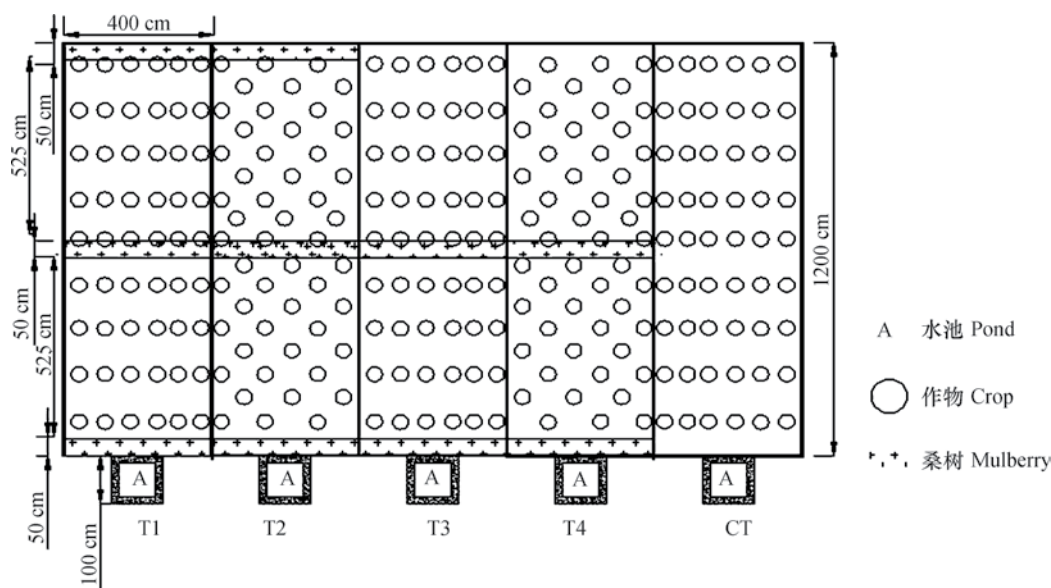
1.1 研究区概况

研究区位于重庆市涪陵区珍溪镇王家沟小流域,地理位置为北纬29° 30′,东经107° 18′,海拔330 m。该流域属于亚热带季风气候区,年均气温 22.1℃,月均最高气温 30℃,月均最低气温 8℃,年均降水量1 130 mm,年积温5 300℃,年

日照时数1 055 h,无霜期331 d。试验区土壤类型为紫色土,土壤容重为1.45 g cm⁻³,pH 5.4,有机质14.7 g kg⁻¹,全氮1.04 g kg⁻¹,全磷0.77 g kg⁻¹,全钾19.7 g kg⁻¹,碱解氮91.1 mg kg⁻¹,有效磷27.2 mg kg⁻¹,速效钾93.5 mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验共设5个处理:三带等高桑(带宽0.50 m,带间距5.25 m)+等高耕作(T1)、三带等高桑(带宽0.50 m,带间距5.25 m)+交叉耕作(T2)、两带等高桑(带宽0.50 m,带间距5.25 m)+等高耕作(T3)、两带等高桑(带宽0.50 m,带间距5.25 m)+交叉耕作(T4)、传统等高耕作(CT),具体设计如图1所示。每个处理均分为3个小区,各处理小区修建坡度均为9°,四周用水泥墙分隔,长12.00 m、宽4.00 m、高0.75 m。每个小区下设蓄水池(1.00 m×1.00 m×1.00 m)一个,分别与各小区相连,用于截留小区内的土壤径流水,每个蓄水池上面分别用石棉瓦盖住,防止降雨及其他因素干扰。各处理桑树均为2011年10月种植,至2014年采样时,各桑树坡耕系统已基本形成生物梯田格局。各处理的种植制度均为玉米/榨菜轮作(玉米于2014年4月19日挖穴点播,2014年



注: T1: 三带等高桑+等高耕作; T2: 三带等高桑+交叉耕作; T3: 两带等高桑+等高耕作; T4: 两带等高桑+交叉耕作; CT: 传统等高耕作,下同 Note: T1: Contour tillage with contour mulberry tree lines on upper-slope, middle-slope and lower-slope; T2: Cross cultivation with contour mulberry tree lines on upper-slope, middle-slope and lower-slope; T3: Contour tillage with contour mulberry tree lines on middle-slope and lower-slopes; T4: Cross cultivation with contour mulberry tree lines on middle-slope and lower-slopes;

CT: Conventional contour tillage. The same below

图1 试验小区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment

8月16日收获；榨菜于2014年9月23日挖穴点播，2015年2月17日收获），施肥方式采用施后浅翻，施肥量为常规施肥量（三峡库区旱坡地一般施肥水平），即尿素（含N 46%）1 250 kg hm⁻²和复合肥（N：P₂O₅：K₂O=15：15：15）2 150 kg hm⁻²，玉米与榨菜的施肥量分别占当年施肥总量的40%和60%，施肥时间分别为2014年6月30日和12月5日。桑树、玉米和榨菜品种分别为“嘉陵20号”、“渝糯7号”和“永安少叶”。

1.3 样品采集与分析

重庆市涪陵区气象局数据显示：2014年1月1日至2014年12月31日，王家沟流域共产生降雨142次，其中小雨116次，中雨23次，大雨1次，暴雨2次。其中3次降雨产生径流进入蓄水池，分别为2014年3月20日（日降雨量44.2 mm，历时13 h），2014年8月11日（日降雨量为53.9 mm，历时18 h）和2014年9月18日（日降雨量为122.4 mm，历时24 h）。分别于2014年3月22日、2014年8月13日及2014年9月20日到试验区取样，每次取样前均需测量蓄水池中水深，并且将蓄水池中水沙混匀，用1 L预先泡酸、清洗干净且烘干的聚乙烯塑料样品瓶盛放，样品采集后立即送至实验室，保存于4℃冰箱内，并于48 h内分析完毕。此外，每次取样后均需将蓄水池清洗干净，且用石棉瓦封盖严实。

对所收集的样品进行径流量（Q）、全氮（TN）、全磷（TP）、硝态氮（NO₃-N）、铵态氮（NH₄⁺-N）、可溶性氮（DN）、可溶性磷（DP）以及颗粒态氮（PN）和颗粒态磷（PP）等指标测定。其中径流量（Q）用体积法测定；全氮（TN）和可溶性氮（DN）分别利用原液和过滤液（原液经0.45μm滤膜过滤）经K₂S₂O₈处理，然后用紫外分光光度法测定；全磷（TP）和可溶性磷（DP）分别利用原液和过滤液（原液经0.45μm滤膜过滤）用K₂S₂O₈处理，经全自动间断化学分析仪（型号：SmartChem200，产地：法国）进行测定；硝态氮（NO₃-N）、铵态氮（NH₄⁺-N）直接采用全自动间断化学分析仪测定。颗粒态氮（PN）和颗粒态磷（PP）采用差减法求得，即：全氮（磷）与可溶性氮（磷）之差。

1.4 数据处理

1.4.1 单位面积氮（磷）年流失负荷（Ly）计算

场次降雨地表径流氮（磷）流失浓度表示一场降雨事件中地表径流全过程排放的氮（磷）平均浓

度^[24-25]，其中场次降雨小区内氮（磷）平均径流浓度（EMC）可用式（1）求得：

$$EMC = \frac{\int_0^t C(t) Q(t) dt}{\int_0^t Q(t) dt} = \frac{M}{Q} = C \quad (1)$$

式中，EMC表示小区内氮（磷）径流浓度（mg L⁻¹），M为小区内氮（磷）排放通量（g），Q为小区内径流通量（m³），C（t）表示t时刻氮（磷）径流浓度（mg L⁻¹），Q（t）为t时刻地表径流量（m³），C为蓄水池径流中氮（磷）浓度（mg L⁻¹），t为降雨历时，下同。

氮（磷）年流失负荷（Ly）表示全年降雨产生的氮（磷）流失负荷总和，是衡量水土保持和农业面源污染控制效果的重要指标^[26]，可用式（2）求得：

$$Ly = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\alpha A} = \frac{\lambda \sum_{i=1}^n EMC_i Q_i}{\alpha A} = \frac{\lambda \sum_{i=1}^n C_i V_i}{\alpha A} \quad (2)$$

式中，Ly为单位面积氮（磷）年流失负荷（kg hm⁻² a⁻¹），λ为负荷转换系数（10⁻¹），α表示年数（a⁻¹，本试验中取值为1），A为小区面积（m²），M_i表示第i次降雨小区内氮（磷）排放通量（g），EMC_i为第i次降雨小区内氮（磷）径流浓度（mg L⁻¹），Q_i为第i次降雨产生的总径流量（m³），C_i表示第i次降雨蓄水池径流中氮、磷浓度（mg L⁻¹），V_i表示第i次降雨蓄水池中径流体积（m³），n表示全年共有n次降雨。本试验中142次降雨中只有3场降雨产生地表径流，其余降雨未产生地表径流（地表氮、磷流失负荷忽略不计），故Ly为3次降雨中地表氮（磷）流失负荷之和。

1.4.2 数据分析 试验数据采用Excel 2013和SPSS 21.0软件进行统计分析，用LSD法进行多重比较，差异显著性用不同小写字母表示（p < 0.05），同时用双因素方差分析研究耕作方式、等高桑带及其交互作用对氮（磷）流失负荷的作用，图形采用SigmaPlot 12.5进行绘制。

2 结 果

2.1 2014年月降雨量与多年月均降雨量

王家沟流域降雨多集中在4—10月份（图2）。2014年月均降雨量为74.37 mm，低于多年月均降雨量91.17 mm。2014年月降雨量中除3月和9月

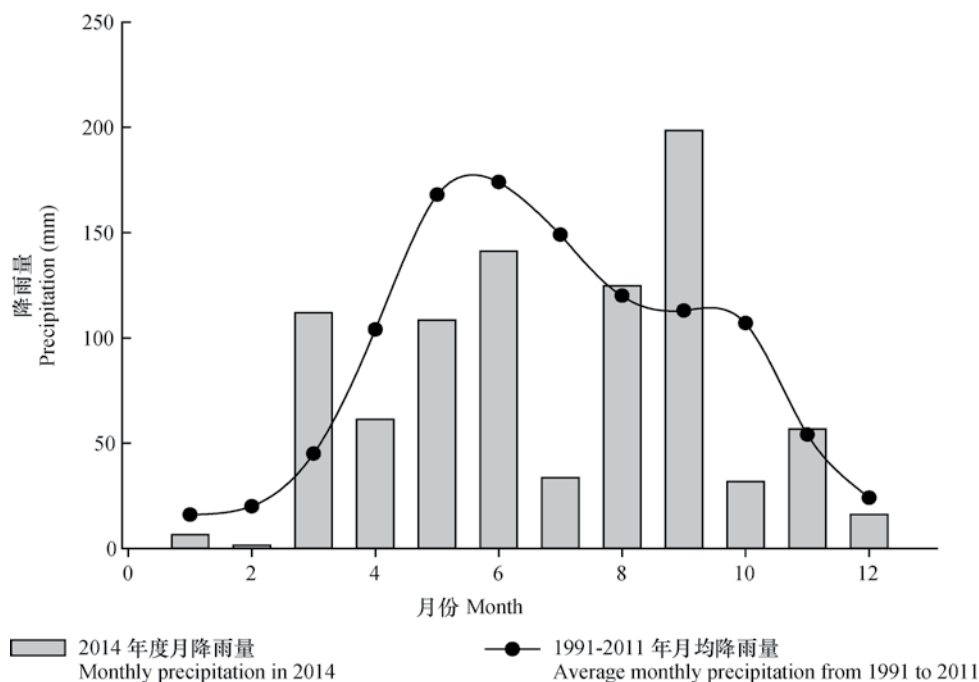


图2 2014年月降雨量与1991-2011年月均降雨量

Fig. 2 Monthly precipitation in 2014 and average monthly precipitation from 1991 to 2011

外，其他月份降雨量均低于或持平于多年月均降雨量。2014年全年降雨量最多的月份是9月，这与多年月均降雨量中最大月份存在差异，这是由于2014年9月18日发生的大暴雨（日降雨量为122.4 mm）使本月降雨量增大。

2.2 场次降雨小区地表径流量

雨强是影响地表径流的重要因素，地表径流量随着雨强的增大而增加。从表1可以看出，在高雨强（122.4 mm d⁻¹）下产生的地表径流量是中低雨强（53.9 mm d⁻¹和44.2 mm d⁻¹）下产生地表径流量的1.6倍~2.6倍。同时表1表明，农桑配置方式能够显著降低地表径流量，但不同配置方式间存在显著性差异。三带等高桑+交叉耕作（T2）在全年中降低地表径流量的效果最显著，其次为两带等高桑+交叉耕作（T4）和两带等高桑+等高耕作（T3），而三带等高桑+等高耕作（T1）全年中降低地表径流量的效果最小。此外，通过表2还可以发现，等高桑带及其与耕作方式的交互作用在各种雨强下均对地表径流有显著影响，而耕作方式在高雨强（122.4 mm d⁻¹）下对地表径流无显著影响。

2.3 场次降雨小区地表氮（磷）径流浓度

农桑配置方式能够显著减少地表各形态氮（磷）的流失，但在不同的雨强下，各配置方式对

降低地表各形态氮（磷）流失的效果存在显著性差异（表3）。低雨强（44.2 mm d⁻¹）下，三带等高桑+交叉耕作（T2）能够显著降低地表硝态氮、可溶性氮（磷）、颗粒态氮（磷）及全氮（磷）的径流浓度，而对降低铵态氮的效果不显著；两带等高桑+等高耕作（T3）能在一定程度上降低地表各形态磷流失，但对除铵态氮外的其他形态氮流失影响较小；三带等高桑+等高耕作（T1）对地表各形态氮流失均有一定的阻抗作用（尤其是对铵态氮的阻抗效果更显著），但对地表各形态磷流失影响较小。中雨强（53.9 mm d⁻¹）下，三带等高桑+交叉耕作（T2）能够显著降低各种形态氮（磷）流失，两带等高桑+交叉耕作（T4）和三带等高桑+等高耕作（T1）也能在一定程度上降低地表各形态氮（磷）流失（尤其对硝态氮和铵态氮流失的阻抗效果更显著）。高雨强（122.4 mm d⁻¹）下，三带等高桑+交叉耕作（T2）能够显著降低地表各形态氮（磷）的流失；三带等高桑+等高耕作（T1）和两带等高桑+交叉耕作（T4）对降低地表全氮（磷），可溶性氮（磷）和颗粒态氮（磷）流失效果显著，对铵态氮和硝态氮的影响较小，而两带等高桑+等高耕作（T3）的作用效果恰好相反。场次降雨中地表各形态氮流失主要以可溶性氮为主（约

表1 不同处理间场次降雨小区地表径流量

处理 Treatments	日降雨量 Precipitation		
	44.2	53.9	122.4
T1	0.26 ± 0.02c	0.32 ± 0.03c	0.51 ± 0.04c
T2	0.18 ± 0.01a	0.22 ± 0.02a	0.43 ± 0.03a
T3	0.18 ± 0.01a	0.25 ± 0.02b	0.47 ± 0.04b
T4	0.21 ± 0.02b	0.26 ± 0.02b	0.53 ± 0.04c
CT	0.27 ± 0.02d	0.33 ± 0.03c	0.57 ± 0.04d

注：表中数据为平均值 ± 标准误（ $n=3$ ），不同小写字母表示相同降雨期不同处理之间差异显著（ $p<0.05$ ）。日降雨量44.2 mm d⁻¹、53.9 mm d⁻¹和122.4 mm d⁻¹分别表示2014年3月20日历时13 h降雨量44.2 mm、2014年8月11日历时18 h降雨量53.9 mm及2014年9月18日历时24 h降雨量122.4 mm，耕作方式包括等高耕作（T1和T3）和交叉耕作（T2和T4），等高桑带包括三带等高桑（T1和T2）和两带等高桑（T3和T4），下同 Note: Data in table are means ± standard errors ($n=3$). Different lowercase letters mean significant difference between different treatments under rainfalls the same in intensity at $p<0.05$. Precipitations (44.2 mm d⁻¹, 53.9 mm d⁻¹ and 122.4 mm d⁻¹) mean precipitation of 44.2 mm for 13 h in March 20, 2014, precipitation of 53.9 mm for 18 h in August 11, 2014, and precipitation of 122.4 mm for 24 h in September 18, 2014. Tillage practices include contour tillage (T1 & T3) and cross cultivation (T2 & T4) and arrangement of contour mulberry tree lines includes contour mulberry tree lines on upper-slope, middle-slope and lower-slope (T1 & T2) and contour mulberry tree lines on middle-slope and lower-slopes (T3 & T4). The same below

表2 耕作方式和等高桑带对场次降雨小区地表径流量的影响（双因素方差分析）

Table 2 Effects of tillage practices and contour mulberry tree lines on surface runoff caused by each rainfall event (Two-way ANOVA)

处理 Treatments	F值 F value		
	44.2	53.9	122.4
耕作方式 Tillage practices	29.28**	44.92**	0.6291
等高桑带 Mulberry strips	50.84**	24.71**	20.96**
耕作方式 × 等高桑带 Tillage practices × Mulberry strips	133.8**	91.22**	40.28**

注：**表示1%水平上的显著性作用，下同 Note: ** for two-way ANOVA mean level of significance ($p<0.01$). The same below

占地表氮流失量的53.6%~67.9%），而地表各形态磷流失主要以颗粒态磷（PP）为主（约占全磷流失量的53.6%~63.1%）。

此外，通过对耕作方式和等高桑带进行双因素方差分析（表4）可以发现，低雨强下，耕作方式对硝态氮、可溶性氮（磷）、颗粒态氮（磷）及全磷有极显著影响，而对铵态氮和全氮影响不显著；等高桑带对除铵态氮以外的其他形态氮（磷）均有极显著影响；同时耕作方式和等高桑带的交互作用对各种形态氮（磷）均有极显著影响。中雨强下，等高桑带对除硝态氮外的其他形态氮（磷）有极显著影响；耕作方式对各种形态氮（磷）均有极显著影响；耕作方式与等高桑带的交互作用对除全氮外的其他形态氮（磷）也均有极显著影响。高雨强

下，耕作方式、等高桑带及其交互作用对各种形态氮（磷）均有极显著影响。

2.4 不同处理地表氮（磷）年流失负荷估算

农桑配置方式能够显著降低流域内地表氮（磷）年流失负荷（表5），其中铵态氮降低幅度为5.88%~29.4%，硝态氮22.2%~29.6%，全氮12.8%~43.6%，可溶性氮20.2%~45.7%，颗粒态氮19.8%~39.3%，颗粒态磷25.2%~60.9%，全磷19.3%~58.6%，可溶性磷10.7%~55.7%。通过表5可以发现，不同处理间流域内地表氮（磷）年流失负荷存在显著性差异。三带等高桑+交叉耕作（T2）对全氮（磷）、可溶性氮（磷）及颗粒态氮（磷）年流失负荷具有显著的阻抗效果，其次为三带等高桑+等高耕作（T1）和两带等高桑+交叉

表3 不同处理间场次降雨小区地表氮、磷径流浓度

Table 3 Nitrogen and phosphorus concentration in surface runoff caused by each rainfall event in different treatments (mg L ⁻¹)											
日降雨量 Precipitation (mm d ⁻¹)	处理 Treatments	铵态氮	硝态氮	全氮		可溶性氮		颗粒态氮		全磷	可溶性磷
		NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total nitrogen	Dissolved nitrogen	Dissolved nitrogen	Particulate nitrogen	Particulate phosphorus	Total phosphorus		
44.2	T1	0.72 ± 0.02c	1.05 ± 0.03b	6.79 ± 0.15b	3.87 ± 0.08b	2.92 ± 0.06ab		0.66 ± 0.01b		1.20 ± 0.03b	0.54 ± 0.01a
	T2	0.87 ± 0.02a	0.99 ± 0.01c	5.75 ± 0.12c	3.62 ± 0.08b	2.13 ± 0.05c		0.39 ± 0.01e		0.69 ± 0.02e	0.31 ± 0.01c
	T3	0.78 ± 0.02b	0.83 ± 0.02a	7.04 ± 0.17a	4.03 ± 0.11a	3.01 ± 0.07a		0.49 ± 0.01d		0.85 ± 0.02d	0.36 ± 0.01b
	T4	0.89 ± 0.02a	0.83 ± 0.02a	6.48 ± 0.14b	3.76 ± 0.08b	2.72 ± 0.06b		0.60 ± 0.01c		1.11 ± 0.02c	0.51 ± 0.01a
	CT	0.91 ± 0.02a	1.12 ± 0.02a	7.12 ± 0.15a	3.93 ± 0.10a	3.19 ± 0.05a		0.74 ± 0.02a		1.27 ± 0.03a	0.53 ± 0.01a
53.9	T1	0.61 ± 0.01d	0.73 ± 0.02d	5.41 ± 0.12b	3.02 ± 0.06b	2.39 ± 0.05b		0.23 ± 0.01c		0.37 ± 0.01c	0.14 ± 0.00c
	T2	0.89 ± 0.02b	0.92 ± 0.02b	4.24 ± 0.09c	2.45 ± 0.05c	1.79 ± 0.04c		0.21 ± 0.01d		0.32 ± 0.01d	0.12 ± 0.00d
	T3	0.96 ± 0.02a	1.07 ± 0.02ab	5.65 ± 0.14ba	3.06 ± 0.09b	2.59 ± 0.06a		0.27 ± 0.00b		0.47 ± 0.01b	0.21 ± 0.01a
	T4	0.76 ± 0.02c	0.85 ± 0.02c	5.42 ± 0.12b	2.91 ± 0.06b	2.51 ± 0.05ab		0.19 ± 0.00d		0.33 ± 0.01d	0.14 ± 0.01c
	CT	0.91 ± 0.04a	1.13 ± 0.03a	5.71 ± 0.12a	3.29 ± 0.08a	2.42 ± 0.05b		0.36 ± 0.01a		0.54 ± 0.01a	0.17 ± 0.00b
122.4	T1	0.83 ± 0.02b	0.86 ± 0.02c	4.52 ± 0.10b	2.53 ± 0.05b	1.98 ± 0.04b		0.18 ± 0.00c		0.32 ± 0.01c	0.14 ± 0.00c
	T2	0.39 ± 0.02d	0.44 ± 0.02e	3.83 ± 0.08c	2.22 ± 0.05c	1.61 ± 0.03c		0.15 ± 0.00d		0.30 ± 0.01c	0.13 ± 0.00cd
	T3	0.51 ± 0.01c	0.65 ± 0.01d	6.96 ± 0.15a	3.84 ± 0.08a	3.12 ± 0.07a		0.31 ± 0.01b		0.58 ± 0.01b	0.27 ± 0.01b
	T4	0.95 ± 0.03a	0.96 ± 0.03b	4.10 ± 0.09c	2.21 ± 0.05c	1.89 ± 0.05b		0.19 ± 0.00c		0.32 ± 0.01c	0.12 ± 0.00d
	CT	1.05 ± 0.02a	1.34 ± 0.06a	7.14 ± 0.14a	3.88 ± 0.08a	3.26 ± 0.06a		0.41 ± 0.01a		0.69 ± 0.02a	0.29 ± 0.01a

表4 耕作方式和等高桑带对降雨小区地表氮、磷径流浓度的影响 (双因素方差分析)

Table 4 Effects of tillage practices and mulberry tree lines on nitrogen and phosphorus concentration in surface runoff relative to rainfall intensity and treatment (Two-way ANOVA)									
日降雨量 Precipitation (mm d ⁻¹)	处理 Treatments	F值 F value							
		铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	全氮 Total nitrogen	可溶性氮 Dissolved nitrogen	颗粒氮 Particulate nitrogen	颗粒态磷 Particulate phosphorus	全磷 Total phosphorus	可溶性磷 Dissolved phosphorus
44.2	耕作方式 Tillage practices	1.319	35.12**	3.181	27.22**	13.58**	6.488**	36.18**	135.3**
	等高桑带 Mulberry strips	3.015	151.1**	23.19**	27.53**	43.08**	253.0**	164.9**	62.70**
	耕作方式 × 等高桑带 Tillage practices × Mulberry strips	60.12**	24.86**	79.65**	63.26**	108.0**	82.75**	111.4**	164.5**
53.9	耕作方式 Tillage practices	53.62**	37.11**	103.7**	120.3**	82.54**	243.1**	199.2**	179.7**
	等高桑带 Mulberry strips	391.4**	0.1611	71.71**	105.0**	37.23**	627.4**	577.5**	558.1**
	耕作方式 × 等高桑带 Tillage practices × Mulberry strips	247.7**	89.74**	0.0981	18.54**	25.96**	157.8**	196.4**	291.4**
122.4	耕作方式 Tillage practices	57.23**	90.31**	140.5**	100.4**	202.1**	225.4**	193.9**	394.6**
	等高桑带 Mulberry strips	26.84**	48.38**	275.1**	292.7**	254.6**	197.7**	173.0**	143.2**
	耕作方式 × 等高桑带 Tillage practices × Mulberry strips	824.9**	492.6**	90.35**	104.9**	72.86**	47.46**	32.49**	17.29**

表5 不同处理氮、磷年流失负荷估算

Table 5 Estimated annual loading of N and P loss in different treatments (kg hm ⁻² a ⁻¹)																
处理 Treatments	铵态氮		硝态氮		全氮		可溶性氮		颗粒氮		颗粒态磷		全磷		可溶性磷	
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total nitrogen	Dissolved nitrogen	Particulate nitrogen	Particulate phosphorus	Total phosphorus	Dissolved phosphorus								
T1	0.12 ± 0.02b	0.21 ± 0.02ab	1.19 ± 0.23c	0.70 ± 0.14c	0.49 ± 0.10b	0.08 ± 0.02c	0.13 ± 0.03c	0.06 ± 0.01c								
T2	0.16 ± 0.03a	0.19 ± 0.02b	0.88 ± 0.17d	0.51 ± 0.10d	0.37 ± 0.07c	0.05 ± 0.01d	0.09 ± 0.02d	0.04 ± 0.01d								
T3	0.13 ± 0.03b	0.20 ± 0.02b	1.36 ± 0.27b	0.75 ± 0.15b	0.61 ± 0.12a	0.10 ± 0.02b	0.18 ± 0.04b	0.08 ± 0.02b								
T4	0.16 ± 0.03a	0.20 ± 0.02b	0.91 ± 0.18d	0.52 ± 0.10d	0.39 ± 0.08c	0.07 ± 0.01c	0.13 ± 0.03c	0.06 ± 0.01c								
CT	0.17 ± 0.03a	0.27 ± 0.03a	1.56 ± 0.31a	0.94 ± 0.19a	0.61 ± 0.12a	0.14 ± 0.03a	0.23 ± 0.05a	0.09 ± 0.02a								

表6 耕作方式和等高桑带对氮、磷年流失负荷的影响（双因素方差分析）

Table 6 Effects of tillage practices and contour mulberry tree lines on annual loading of N and P loss (Two-way ANOVA)								
		F值 F value						
处理 Treatments	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	全氮 Total nitrogen	可溶性氮 Dissolved nitrogen	颗粒氮 Particulate nitrogen	颗粒态磷 Particulate phosphorus	全磷 Total phosphorus	可溶性磷 Dissolved phosphorus
耕作方式 Tillage practices	1.852	0.7820	15.92**	5.046*	41.09**	114.0**	155.2**	225.8**
等高桑带 Mulberry strips	1.891	229.7**	141.4**	171.5**	107.2**	442.9**	387.0**	323.1**
耕作方式 × 等高桑带 Tillage practices × Mulberry strips	128.5**	7.061*	220.2**	193.1**	259.9**	197.5**	191.2**	187.2**

注：**、*分别表示1%和5%水平上的显著性作用 Note: **, * for two-way ANOVA mean level of significance (p < 0.01, p < 0.05, respectively)

耕作 (T4), 而两带等高桑+等高耕作 (T3) 的阻抗效果较小。然而, 两带等高桑+等高耕作 (T3) 对铵态氮和硝态氮的阻抗效果较好。同时, 从表5可以发现, 氮年流失负荷主要以可溶性氮为主 (约占50.1%~60.2%), 且硝态氮年流失负荷高于铵态氮年流失负荷, 而磷年流失负荷主要以颗粒态磷为主 (约占54.9%~59.6%)。

此外, 表6表明, 耕作方式对全氮 (磷)、颗粒态氮 (磷) 及可溶性磷的年流失负荷具有极显著影响, 而对铵态氮和硝态氮影响不显著; 等高桑带对除铵态氮外的其他氮 (磷) 形态年流失负荷均有极显著影响; 耕作方式与等高桑带的交互作用对各种氮 (磷) 形态年流失负荷也均具有显著影响。

3 讨 论

降雨量是影响地表径流和氮、磷流失的重要原因^[27]。本试验表明, 高降雨量极易引发地表径流氮、磷的流失, 但农桑配置可以在一定程度上阻抗这种趋势 (表3), 这与蒲玉琳等^[28]研究结果相似。双因素方差分析表明, 由于耕作方式、等高桑带及其交互作用对地表径流中氮、磷形态的影响不同, 而使不同农桑配置方式对地表氮、磷流失的阻抗效果存在显著性差异 (表4)。在中低雨强 (44.2 mm d⁻¹ 和 53.9 mm d⁻¹) 下, 三带等高桑+交叉耕作 (T2) 对地表径流中全氮 (磷)、可溶性氮 (磷)、颗粒态氮 (磷) 的阻抗效果最好, 这主要是因为三带等高桑在小区上、中、下位置分别形成保护“墙”, 一方面通过桑树根系改善“墙”周围土壤团聚体、孔隙度等土壤物理特性, 形成良好的土壤结构体, 增加地表径流中氮、磷滞留机会, 阻止地表径流中氮、磷的流失^[29-30]; 另一方面交叉耕作能够延长径流横向运移时间, 增加径流中氮、磷的纵向运输, 进而间接降低地表氮、磷流失的风险^[31-32]。在高雨强 (122.4 mm d⁻¹) 下, 三带等高桑+交叉耕作 (T2) 和两带等高桑+交叉耕作 (T4) 对地表径流中全氮 (磷)、可溶性氮 (磷)、颗粒态氮 (磷) 的阻抗效果最好, 这主要是由于高雨强初始冲刷效应较强, 且对地表土壤产生较大破坏, 剥离土壤表层养分, 增加径流中氮、磷的浓度, 但是交叉耕作可以延长径流的运移时间, 增加氮、磷的纵向运输和优势流发生的机会, 在一定程度上减缓初始冲刷效应, 降低地表径

流氮、磷流失^[31-33]。此外, 张展羽等^[27]指出降雨量与地表径流量存在显著正相关, 但本试验却发现, 降雨量并不是影响地表径流氮、磷流失的唯一因素, 地表径流氮、磷流失是多种因素综合作用的结果。3月20日降雨量 (44.2 mm d⁻¹) 小于8月11日降雨量 (53.9 mm d⁻¹), 但其地表氮、磷流失负荷却显著高于8月11日降雨产生的地表氮、磷流失负荷 (表5), 这主要是因为3月份榨菜刚收获完, 地表中氮、磷残留量较多, 且地表覆盖度较低。高残留、低覆盖的环境使之降雨量即使很小, 也会产生较大的氮、磷流失量^[34]。

由于降雨条件及人类活动 (如施肥、耕作) 强度等因素的影响, 场次降雨径流的氮、磷流失浓度波动较大, 所以降雨径流氮、磷年流失负荷 (即年排放通量) 更具代表性, 实际应用中也常用氮、磷年流失负荷来表征某一流域降雨径流中氮、磷流失状况^[35]。本试验显示, 农桑配置方式均可显著降低地表氮、磷年流失负荷, 但不同配置方式间存在显著性差异 (表5), 其中三带等高桑+交叉耕作 (T2) 由于多重利好因素 (包括三带等高桑树根系改善土壤结构^[28], 拦截泥沙和径流量^[30], 提高生物丰度, 增加土壤氮、磷固持量^[36], 以及交叉耕作使作物错开种植, 改变径流路径, 延长径流时间^[32], 增加氮、磷的纵向运移与沉积^[36]等) 的综合作用对径流中氮、磷 (除铵态氮外) 年流失负荷的阻抗效果最好; 而两带等高桑+等高耕作 (T3) 由于缺乏有效的阻抗措施和机制, 使径流中氮、磷 (除铵态氮和硝态氮外) 年流失负荷的阻抗效果不如其他配置方式明显。同时本试验数据还表明, 地表径流中氮、磷年流失负荷分别以可溶性氮和颗粒态磷为主, 并且硝态氮年流失负荷高于铵态氮, 这与陈志良等^[37]的研究结果一致。此外, 本次试验氮、磷流失及其负荷的计算主要关注地表径流中氮、磷形态的损失, 对壤中流的流失考虑较少, 需要在后续工作中进一步完善。

4 结 论

流域内氮、磷流失主要以可溶性氮和颗粒态磷为主, 且硝态氮的流失量大于铵态氮。农桑配置方式能在一定程度上阻抗地表径流和氮、磷流失, 降低地表径流中氮、磷年流失负荷。但由于耕作方式、等高桑带及其交互作用对地表径流氮、磷形态

和流失量的影响不同, 使不同农桑配置方式对地表径流氮、磷流失的阻抗效果存在显著性差异, 其中三带等高桑+交叉耕作对全氮(磷)、可溶性氮(磷)和颗粒态氮(磷)流失具有显著的阻抗效果, 其次为三带等高桑+等高耕作和两带等高桑+交叉耕作, 而两带等高桑+等高耕作的阻抗效果较小。因此建议在三峡库区旱坡地开发利用的过程中, 采用三带等高桑+交叉耕作的配置方式来控制水土流失, 保护生态环境。

参考文献

- [1] 许开平, 吴家森, 黄程鹏, 等. 不同植物篱在减少雷竹林氮磷渗漏流失中的作用. 土壤学报, 2012, 49(5): 980—987
Xu K P, Wu J S, Huang C P, et al. Effect of hedgerows reducing of nitrogen and phosphorus leaching loss from *Phyllostachys praecox* stands (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 980—987
- [2] Bouwman L, Goldewijk K K, van Der Hoek K W, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900—2050 period. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(52): 20882—20887
- [3] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, 323(5917): 1014—1015
- [4] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 559—568
- [5] Treseder K K, Vitousek P M. Effects of soil nutrient availability on investment in acquisition of N and P in Hawaiian rain forests. *Ecology*, 2001, 82(4): 946—954
- [6] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量. 水利学报, 2009, 40(6): 659—666
Jiang R, Zhu B, Tang J L, et al. Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorous through storm runoff in a typical small watershed in the hilly area of purple soil (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(6): 659—666
- [7] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应. 环境科学, 2012, 33(10): 3390—3396
Zeng L X, Huang Z L, Xiao W F, et al. Nitrogen and phosphorus loss in different land use types and its response to environmental factors in the Three Gorges Reservoir Area (In Chinese). *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(10): 3390—3396
- [8] Grüneberg B, Dadi T, Lindim C, et al. Effects of nitrogen and phosphorus load reduction on benthic phosphorus release in a riverine lake. *Biogeochemistry*, 2015, 123(2): 185—202
- [9] Wit M D, Behrendt H. Nitrogen and phosphorus emissions from soil to surface water in the rhine and elbe basins. *Water Science & Technology*, 1999, 39(12): 109—116
- [10] Guo H Y, Zhu J G, Wang X R, et al. Case study on nitrogen and phosphorus emissions from paddy field in Taihu region. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2): 209—219
- [11] Andrew N S, Richard W M, Peter J A K. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 287—307
- [12] Li Y Y, Jiao J X, Wang Y, et al. Characteristics of nitrogen loading and its influencing factors in several typical agricultural watersheds of subtropical China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(3): 1831—1840
- [13] 刘静, 路凤, 杨延钊, 等. 南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究. 环境科学, 2012, 33(9): 3070—3075
Liu J, Lu F, Yang Y Z, et al. Source apportionment of nitrogen and phosphorus from cropping non-point source pollution in Nansi Lake basin (In Chinese). *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(9): 3070—3075
- [14] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 菜地土壤氮磷面源污染现状、机制及控制技术. 应用生态学报, 2009, 20(4): 991—1001
Huang D F, Wang G, Li W H, et al. Present status, mechanisms, and control techniques of nitrogen and phosphorus non-point source pollution from vegetable fields (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 991—1001
- [15] Dorioz J M. Mechanisms and control of agricultural diffuse pollution: the case of phosphorus. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2013, 17(1): 277—291
- [16] 石峰, 杜鹏飞, 张大伟, 等. 滇池流域大棚种植区面源污染模拟. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(3): 363—366

- Shi F, Du P F, Zhang D W, et al. Nonpoint source pollution simulation in greenhouse region of Dianchi Basin (In Chinese). *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2005, 45 (3): 363—366
- [17] Wang T, Zhu B, Xia L. Effects of contour hedgerow intercropping on nutrient losses from the sloping farmland in the Three Gorges Area, China. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9 (1): 105—114
- [18] 蒲玉琳, 谢德体, 倪九派, 等. 紫色土区坡耕地植物篱模式综合生态效益评价. *中国生态农业学报*, 2014, 22 (1): 44—51
- Pu Y L, Xie D T, Ni J P, et al. Evaluation on comprehensive ecological benefits of different hedgerow patterns on slope-farmland in purple soil area (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22 (1): 44—51
- [19] 谢颂华, 曾建玲, 杨洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应. *农业工程学报*, 2010, 26 (9): 81—86
- Xie S H, Zeng J L, Yang J, et al. Effects of different tillage measures on soil and water conservation in slope farmland of red soil in Southern China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (9): 81—86
- [20] 秦俭, 何宁佳, 黄先智, 等. 桑树生态产业与蚕丝业的发展. *蚕业科学*, 2010, 36 (6): 984—989
- Qin J, He N J, Huang X Z, et al. Development of mulberry ecological industry and sericulture (In Chinese). *Acta Sericologica Sinica*, 2010, 36 (6): 984—989
- [21] 缪驰远, 陈田飞, 何丙辉, 等. 桑树在紫色土水土保持效应方面研究. *水土保持学报*, 2005, 19 (1): 117—119
- Miao C Y, Chen T F, He B H, et al. Study on mulberry effect of soil and water conservation applying in purple soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (1): 117—119
- [22] 郭天雷, 史东梅, 胡雪琴, 等. 三峡库区消落带不同高程桑树林地土壤抗蚀性及影响因素. *中国生态农业学报*, 2015, 23 (2): 191—198
- Guo T L, Shi D M, Hu X Q, et al. Characteristics and soil anti-erodibility effects of mulberry forest lands at different altitudes of water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23 (2): 191—198
- [23] 张洋, 倪九派, 周川, 等. 三峡库区紫色土旱坡地桑树配置模式对土壤微生物生物量碳氮的影响. *中国生态农业学报*, 2014, 22 (7): 766—773
- Zhang Y, Ni J P, Zhou C, et al. Effects of configuration mode of crop-mulberry system in purple arid hillside field on SMBC and SMBN in the Three Gorges Reservoir (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22 (7): 766—773
- [24] 巩万合, 顾培, 沈仁芳. 长江三角洲地区竹林经营中的氮磷流失负荷概算. *土壤*, 2007, 39 (6): 874—878
- Gong W H, Gu P, Shen R F. Estimation of nitrogen and phosphorus losses from bamboo forest in Yangtze River Delta (In Chinese). *Soils*, 2007, 39 (6): 874—878
- [25] Brezonik P L, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of storm water runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. *Water Research*, 2002, 36 (7): 1743—1757
- [26] Powers S M, Robertson D M, Stanley E H. Effects of lakes and reservoirs on annual river nitrogen, phosphorus, and sediment export in agricultural and forested landscapes. *Hydrological Processes*, 2014, 28 (24): 5919—5937
- [27] 张展羽, 司涵, 孔莉莉. 基于SWAT模型的小流域非点源氮磷迁移规律研究. *农业工程学报*, 2013, 29 (2): 93—100
- Zhang Z Y, Si H, Kong L L. Migration of non-point source nitrogen and phosphorus in small watershed based on SWAT model (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (2): 93—100
- [28] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 等. 紫色土区不同植物篱模式控制坡耕地氮素流失效应. *农业工程学报*, 2014, 30 (23): 138—147
- Pu Y L, Xie D T, Lin C W, et al. Effect of hedgerow patterns controlling nitrogen loss of slope farmland in purple soil area (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (23): 138—147
- [29] Bučienė D A, Antanaitis S, Mašauskienė A, et al. Nitrogen and phosphorus losses with drainage runoff and field balance as a result of crop management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38 (15): 2177—2195
- [30] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 等. 植物篱-农作模式坡耕地土壤综合抗蚀性特征. *农业工程学报*, 2013, 29 (18): 125—135
- Pu Y L, Xie D T, Lin C W, et al. Characteristics of soil comprehensive anti-erodibility under sloped cropland with hedgerows (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (18): 125—135

- [31] Xia L, Liu G, Ma L, et al. The effects of contour hedges and reduced tillage with ridge furrow cultivation on nitrogen and phosphorus losses from sloping arable land. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14 (3) : 462—470
- [32] 冯国祿, 杨仁斌. 不同耕作模式下稻田水中氮磷动态特征及减排潜力. *生态学报*, 2011, 31 (15) : 4235—4243
- Feng G L, Yang R B. Dynamic changes in nitrogen and phosphorus concentrations and emission reduction potentials in paddy field water under different tillage models (In Chinese) . *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (15) : 4235—4243
- [33] Chen N, Hong H. Nitrogen export by surface runoff from a small agricultural watershed in southeast China: seasonal pattern and primary mechanism. *Biogeochemistry*, 2011, 106 (3) : 311—321
- [34] Gao Y, Zhu B, Zhou P, et al. Effects of vegetation cover on phosphorus loss from a hillslope cropland of purple soil under simulated rainfall: a case study in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85 (3) : 263—273
- [35] Wu L, Long T Y, Cooper W J. Temporal and spatial simulation of adsorbed nitrogen and phosphorus nonpoint source pollution load in Xiaojiang Watershed of Three Gorges Reservoir Area, China. *Environmental Engineering Science*, 2012, 29 (4) : 238—247
- [36] Quinton J N, Govers G, van Oost K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geoscience*, 2010, 3 (5) : 311—314
- [37] 陈志良, 程炯, 刘平, 等. 暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响. *水土保持学报*, 2008, 22 (5) : 30—33
- Chen Z L, Cheng J, Liu P, et al. An experiment on influence of storm on nitrogen loss and phosphorus loss under different land use in river basin (In Chinese) . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22 (5) : 30—33

Effects of Crop/Mulberry Intercropping on Surface Nitrogen and Phosphorus Losses in Three Gorges Reservoir Area

ZHANG Yang FAN Fangling ZHOU Chuan NI Jiupa[†] XIE Deti

(College of resources and environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract Aquatic ecosystems are seriously threatened because of fragile Eco-environment and severe non-point pollution in Three Gorges Reservoir Area of China. Crop/mulberry intercropping is popular because of efficiency to reduce nitrogen (N) and phosphorus (P) loss and control agricultural non-point source pollution. However, there is a huge controversy to achieve optimal crop/mulberry intercropping in the Three Gorges Reservoir Area. In order to optimize the crop/mulberry intercropping pattern in purple dry slope-land so as to improve its effects of soil and water conservation and eco-environment benefits in the Three Gorges Reservoir Area, an experiment with five treatments (i.e. Treatment I: Contour tillage with contour mulberry tree lines on upper-slope, middle-slope and lower-slope, Treatment II: Cross cultivation with contour mulberry tree lines on upper-slope, middle-slope and lower-slope, Treatment III: Contour tillage with contour mulberry tree lines on middle-slope and lower-slopes, Treatment IV: Cross cultivation with contour mulberry tree lines on middle-slope and lower-slopes and Treatment V: Conventional contour tillage.) was carried out in Wangjiagou catchment of the Three Gorges Reservoir Area from January 1, 2014 to December 31, 2014. N and P in surface runoffs was analyzed for forms (ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen (TN) , dissolved nitrogen (DN) , particulate nitrogen (PN) and total phosphorus (TP) , dissolved phosphorus (DP) , particulate phosphorus (PP)) and annual loading of N and P loss with surface runoff was assessed. Results showed that on the whole, crop/mulberry intercropping significantly retarded N and P losses with surface runoffs, but the effect varied sharply with rainfall intensity and pattern of the intercropping. Treatment II was the most effective in retarding the loss of TN, DN, PN, TP, DP and

PP, regardless of rainfall intensity and Treatment III came the next. However, under rainfalls moderate or low in intensity (44.2 mm d^{-1} and 53.9 mm d^{-1}), Treatment I was the most effective in retarding the loss of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen, while under rainfalls high in intensity (122.4 mm d^{-1}), Treatment I was obviously lower than Treatment II and Treatment III in such an effect. Furthermore, the treatments also differed sharply in annual loading of N and P loss with surface runoff because the effects of cultivation practice, location of contour mulberry tree lines, and their interactions on N and P losses were different. Compared with Treatment V, Treatment III reduced TN by 12.8%, TP by 19.3%, DN by 20.2%, DP by 10.9% and PP by 25.7%; Treatment IV reduced TN by 41.7%, TP by 44.7%, DN by 44.7%, DP by 38.1%, PN by 36.1% and PP by 48.5%; Treatment I reduced TN by 23.7%, TP by 42.5%, DN by 25.5%, DP by 40.2%, PN by 19.7% and PP by 44.1%; and Treatment II reduced TN by 43.6%, TP by 58.8%, DN by 45.7%, DP by 55.4%, PN by 39.3% and PP by 61.1%. The nitrogen and phosphorus lost with runoff were dominated with DN (approximately 50.1% ~ 60.2%) and PP (approximately 54.9% ~ 59.6%), and the annual loading of NO_3^- -N loss (approximately $0.19 \sim 0.27 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) was higher than that of NH_4^+ -N loss (approximately $0.12 \sim 0.17 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$). In conclusion, because of combined effects of cultivation practice, location of contour mulberry tree lines, and their interactions on surface N and P losses, four kinds of crop/mulberry intercropping practices reduced surface runoffs, N and P concentration in surface runoff caused by each rainfall event, and N and P annual loading. But treatment II (cross cultivation with contour mulberry tree lines on upper-slope, middle-slope and lower-slope) is more pronounced in retarding and controlling N and P loss with surface runoff, and therefore it is an optimal intercropping pattern for exploiting the resources of purple dry slope-land in the Three Gorges Reservoir Area of China.

Key words Crop/mulberry intercropping; Nitrogen and phosphorus losses; Surface runoff; Purple soil; Three Gorges Reservoir Area

(责任编辑: 陈荣府)