

土地管理措施对营养物质排放的影响

许其功¹, 席北斗¹, 于会彬², 唐阵武³, 高如泰¹, 夏训峰¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 3. 华北电力大学能源与环境研究中心, 北京 102206)

摘要:采用分布式的非点源污染模型 SWAT(soil and water assessment tool), 结合 GIS 技术, 模拟了张家冲小流域化肥施用量变化、等高种植和退耕还林对营养物质氮磷排放的影响. 结果表明, 当农业用地的氮肥施用量由 630 kg/hm² 增加到 955 kg/hm², 磷肥施用量由 200 kg/hm² 增加到 300 kg/hm² 时, 氮、磷营养物质排放量也呈现增大的趋势. 其中, 硝态氮负荷达到了 3 776.59 kg, 增加了 19.7%, 变化率最大, 变化率最小的为无机磷, 仅增加了 2.7%. 采取等高种植的方式对氮、磷排放负荷的影响较小. 当小流域内坡度 > 25% 的坡耕地全部退耕还林后, 各种形态氮、磷排放负荷下降, 其中有机态磷下降 16.3%; 有机氮、氨氮和无机磷与退耕还林前相比, 分别降低了 22.7%, 25.4% 和 27.9%, 在张家冲小流域, 对坡度 > 25% 的坡耕地实行退耕还林、减少化肥施用量对减少氮磷负荷排放作用明显.

关键词: 非点源污染; 等高种植; 营养物质; 模拟; 土地利用

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3243-06

Effects of Land Management Measures on Nutrients Emission

XU Qi-gong¹, XI Bei-dou¹, YU Hui-bin², TANG Zhen-wu³, GAO Ru-tai¹, XIA Xun-feng¹

(1. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Energy and Environmental Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The SWAT model, coupled with a GIS, was applied to simulate the effects of fertilizer application, contour planting and returning land for farming to forestry on nutrients discharges. The results showed that when nitrogen fertilizer of agricultural land increased from 630 to 955 kg/hm², and phosphorus fertilizer increased from 200 to 300 kg/hm², nitrogen and phosphorus nutrient emissions have shown a growing trend. Nitrate nitrogen loads reached to 3 776.59 kg which increased 19.7% and the rate of changes was the largest. The change rate of inorganic phosphorus was the smallest which increased only 2.7%. The impact of emission loads on nitrogen and phosphorus was the smallest if contour planting was adopted. When slope farmland which slope is greater than 25% all returned land for farming to forestry, the emission loads of various forms of nitrogen and phosphorus decreased, organic phosphorus decreased 16.3% among them. Organic nitrogen, ammonia nitrogen and inorganic phosphorus compared with before returning land for farming to forestry, decreased 22.7%, 25.4% and 27.9% respectively. In small basin of Zhangjiachong, returning farmlands to forests and reducing the amount of chemical fertilizer on the slope farmlands which slopes are larger than 25% have played a prominent role.

Key words: non-point source pollution; contour planting; nutrients; simulation; land use

降雨和地表径流是氮磷流失的必要条件, 同时, 氮磷的流失量又与农事活动(灌溉、耕作等)密切相关. Schuman 等^[1]的研究表明, 在大量施肥的农田, 总磷流失是正常施肥条件下的 1.8 倍. Hubbard 等^[2]和 Sharpley 等^[3]在农业小流域的研究证明, 大量的沉积物和氮磷流失发生在作物非生长季节和几次大的暴雨过程, 暴雨径流中污染物的浓度比平时高得多. 我国的王晓燕等^[4]在密云水库进行了氮磷流失规律的研究, 字淑慧等^[5]研究了浑播草带对防治水土流失的效应. 表明了土地利用方式、植被覆盖、降雨强度、坡度等对土壤养分的流失起着非常关键的作用. 相对于耕地而言, 林地能够极大减低生态系统中的地表径流量和水土流失, 促进氮素在系统间的合理分配^[6,7].

杨金玲^[8]和刘瑞民^[9]等多位学者模拟了土地利

用方式对水文、营养物质排放的影响, 结果表明, 土地利用方式与营养物质的排放密不可分. 因此, 加强管理是削减氮磷营养物排放的主要手段之一^[10,11], 为了模拟管理措施对氮磷等营养物的影响, 提高管理措施的效益并对削减效果进行评估, 国外学者^[12~14]利用模型模拟了土地管理措施对水文、营养物质排放的影响. 在我国, 近年来模型体系的应用越来越多^[15,16], 非点源模拟及管理措施对水文、泥沙和营养物质的影响研究也有了较大的发展, 2005 年, 张玉珍等^[17]在南方丘陵地区的农业小流域进行了最佳管理措施模拟评价, 郝芳华等^[18]模拟了土地利用

收稿日期: 2008-12-10; 修订日期: 2009-02-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07106-001-001)

作者简介: 许其功(1972~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为流域水污染防治, E-mail: xuqigong@tom.com

变化对产流和产沙的影响.

为探明土地利用方式对农业非点源的影响,本研究在三峡库区潮湿多雨的典型小流域,首次应用 SWAT 模型模拟了不同土地利用方式下营养物质的排放,以为管理者合理制定相关政策、减少农业非点源污染提供了科学依据.

1 研究区概况

张家冲小流域位于秭归县茅坪镇西南部,系茅坪河支流,距三峡大坝 5 km,距秭归新县城 8.5 km,在瓮桥沟汇集流入茅坪河.土地总面积 162 hm²,林草覆盖率达到 62.6%.共有耕地 43.2 hm²(坡度 > 25%的耕地 15.6 hm²),林地 98.1 hm²(其中疏幼林地 40.7 hm²,经果林 7.5 hm²),草地 3.3 hm²,荒山荒坡 8 hm²,非生产用地 9.3 hm².该流域属山地丘陵地貌,最低海拔 148 m,最高海拔 530 m.下部较为平缓,中上部坡度较陡.该流域属典型的花岗岩出露发育区域,土壤为花岗岩母质出露发育的石英砂土,植被以亚热带常绿、落叶阔叶林和针阔混交林为主,林业资源有低山河谷的柑桔,半高山的茶叶、板栗,高山的木材.研究区域地理位置见图 1.

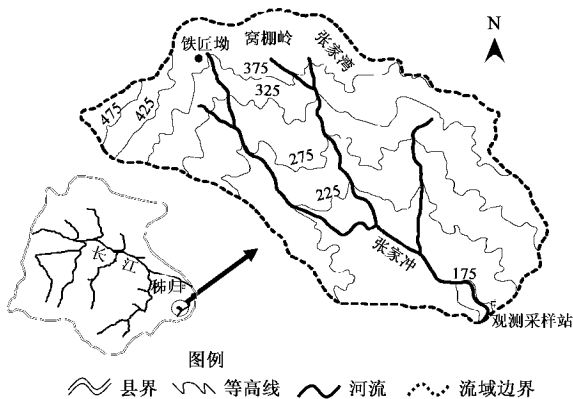


图 1 研究区域地理位置与特征示意

Fig.1 Location and characteristics of study area

2 材料与方法

2.1 模型概述

SWAT 模型是一个基于分布式、长时间序列的非点源污染模型^[19],用来模拟土壤、土地利用和管理措施对径流、土壤侵蚀和农田污染物迁移转化的影响.模型中应用的主要方程包括模拟水文循环的水平衡方程、SCS 曲线数方程和修正的通用土壤流失方程,其中,水平衡方程是 SWAT 模型模拟水文循

环的基本方程.模型采用了对每一个水文响应单元 (HRU)单独计算的方式,然后加和得出亚流域的土壤侵蚀和营养物质的通量,划分 HRU 不仅可以有效地利用由农业调查统计得来的非空间分布数据,而且还可以把大量具有相同性质的土壤和土地利用信息整合为一个单元,大大降低了模拟计算的成本^[20].

由于 SWAT 模型的率定较为方便,适用性强,因此在世界各地都得到了广泛的应用^[21~23].在我国,该模型也被成功应用于三峡库区几条主要支流农业非点源污染的研究^[24,25].除了流域非点源负荷的模拟外,该模型也用于模拟管理措施的影响,在美国的 TMDL (total maximum daily loads) 计划中该模型的应用十分普遍^[26~28].

2.2 模型验证

2.2.1 数据来源

用于模型验证的流量和氮磷负荷数据均来自于现场实测,2004 年 5 月~2006 年 6 月,在流域出口和铁匠坳各设置一个雨量器(图 1),记录流域的日降雨量,其中,流域出口处为雨量自动观测仪,可实时记录任一时刻的降雨量.为准确观测流域的径流过程和流量,在流域出口处设置矩形堰,矩形堰的长、宽和深度分别为 5、0.5 和 0.5 m,矩形堰的底面和侧面平整、光滑,不会对水流产生大的影响,在矩形堰内监测断面设置水位自动监测仪,实时记录水位变化,根据水位-流量关系曲线可查得实时流量.

对于氮磷浓度的测定,于 2005 年 8 月~2006 年 6 月,根据降雨量和降雨强度决定径流量观测次数,一般情况下,降雨时开始采样,采样时间间隔为 1 h,当降雨强度较大或降雨时间较长时,增加采样频次,采样时间间隔调整为 5~30 min,采样至降雨结束,水位回复到基流水位时为止.水样分析在秭归县环境监测站进行,水样测定前在 4℃ 条件下保存 8~24 h,水样中各污染物测定方法:总氮(TN)用过硫酸钾氧化消解法,总磷(TP)用过硫酸钾氧化消解法,氨氮(NH₄⁺-N)用那氏试剂比色法,硝态氮利用紫外分光光度法^[29].

2.2.2 模拟效率评价

模拟的效率评价采用效率系数 (R) 来衡量模拟值与观测值之间的拟合度.效率系数是 Nash 等^[30]于 1970 年提出的,可用来评价模型模拟的精度.另外,本研究还采用相关系数和 t 检验来验证模拟值和实测值的接近程度及相关性.

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim}, i} - Q_{\text{mea}, i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{mea}, i} - \bar{Q}_{\text{mea}})^2} \quad (1)$$

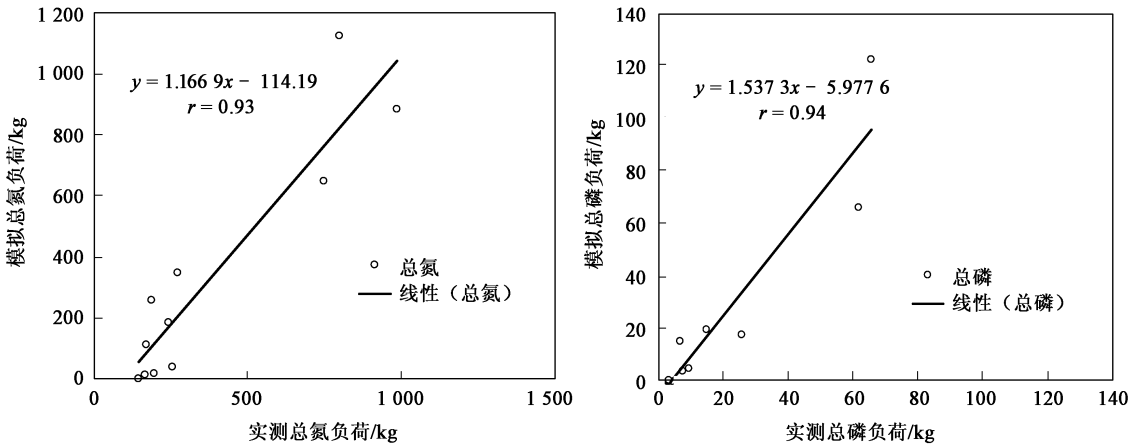


图 2 总氮、总磷实测值与模拟值散点图

Fig. 2 Scattergram of simulated and measured TN and TP

对总氮负荷模拟的结果表明,模拟值和实测值取得了较好的一致性(表 1),其效率系数和相关系数分别为 0.72 和 0.93,相对误差也仅为 13.4%.在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下,检验统计量小于分布临界值,模拟值和实测值之间不存在显著性差异,证明了模拟结果的准确性.

2.2.3 验证结论

2005 年 8 月 ~ 2006 年 6 月总氮和总磷的实测月均值和模拟值对模型进行了验证,模拟结果见图 2.

对总磷负荷的模拟结果表明(表 1),实测值和模拟值的一致性低于总氮,其效率系数和相关系数分别达到了 0.38 和 0.94,虽然效率系数并不高,但实测值和模拟值的相对误差仅为 17.8%,表明了该模型可以对张家冲流域的总磷进行较好的模拟,另外, t 检验的结果也表明了 在 0.05 的显著性水平

表 1 总氮和总磷模拟效率评价

Table 1 Efficiency assessment of TN and TP loads

营养物质	实测值 /kg	模拟值 /kg	相对误差 / %	相关 系数	效率系数 (R^2)	检验 统计量(t)	t 分布 临界值(C)
总氮	379.89	329.11	13.40	0.93	0.72	1.09	2.23
总磷	18.63	22.67	17.80	0.94	0.38	0.75	2.23

下,模拟值和实测值不存在显著性差异.

3 结果与讨论

3.1 化肥施用量对氮磷排放的影响

张家冲小流域属典型的花岗岩出露发育区域,土壤为花岗岩母质出露发育的石英砂土,含沙量较高,营养物质较易随水土流失,因此该流域的化肥施用量也较大,经过现场调查,确定不同的化肥施用方案,模拟不同化肥施用量对非点源污染物氮、磷流失的影响,各施肥量模拟方案见表 2.

保持模型其它参数不变,分别将不同的化肥施用量输入模型,运行得到 5 种不同施肥量情况下各形态氮磷的输出结果见表 3. 流域内耕地化肥施用

表 2 化肥施用量方案设置/kg·hm⁻²

Table 2 Fertilizer application scenarios/kg·hm⁻²

化肥	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
碳铵	380.00	430.00	480.00	530.00	575.00
尿素	250.00	290.00	320.00	350.00	380.00
磷肥	200.00	225.00	250.00	275.00	300.00

量的增加对径流量未产生任何影响,对泥沙负荷的影响也很小,方案 1 和方案 5 之间泥沙负荷变化率仅为 0.2%.随着化肥施用量的增加,氮、磷物质排放量也呈现增大的趋势,其中,硝态氮负荷增加了 19.7%,变化率最大,变化率最小的为无机磷,仅增加了 2.7%.

表 3 不同施肥方案下营养物质负荷

Table 3 Nutrients loads in different fertilizer application scenarios						
项目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	变化率 /%
径流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00
泥沙负荷/t	267.83	267.73	267.89	267.84	268.21	0.20
有机氮/kg	189.59	197.10	200.40	201.00	203.19	7.20
氨氮/kg	151.52	155.83	162.25	162.71	164.34	8.50
硝态氮/kg	3 154.94	3 147.37	3 156.41	3 777.52	3 776.59	19.70
有机态磷/kg	11.03	11.29	11.49	11.34	11.52	4.40
无机磷/kg	232.70	236.83	237.88	238.10	239.07	2.70

3.2 等高种植对氮磷排放的影响

SWAT 模型中定义了等高种植条件下、不同坡度耕地的支持措施因子值,通过对该因子值的调整,可模拟等高种植对非点源污染物排放的影响.当坡度位于 3% ~ 8% 之间时,采用等高种植的方式可有效地防止水土流失,随着坡度的增大,支持措施因子值也越来越大,当坡度 > 25% 时,模型几乎无法模拟等高种植对防止水土流失的作用.

模拟中将张家冲流域划分为 31 个子流域,坡度

< 25% 的子流域有 6 个,最小坡度为 16%,将该子流域的支持措施因子值调整为 0.7,其余 5 个子流域的支持措施因子值调整为 0.9,对张家冲流域等高种植进行模拟,采取等高种植前、后坡度最小的子流域模拟结果见表 4. 在张家冲流域,当坡度位于 13% ~ 16% 之间时,采取等高种植的方式可有效地防止水土流失,泥沙负荷与采取等高种植前相比减少了 29.8%,但对氮、磷排放负荷的影响较小,变化率最大的是有机态磷,减少了 9.1%.

3.3 退耕还林对氮磷排放的影响

Chaplot^[31] 利用该模型模拟了施肥量和作物变化对硝态氮排放的影响,当氮素施用量分别增加 20%、40% 和 60% 时,对流域水文和泥沙年负荷量没有产生显著影响;采用冬小麦取代玉米-蚕豆轮作的方案后,硝态氮负荷量随即呈现增大的趋势;利用草地取代耕地后,径流量、硝态氮和泥沙负荷分别减少了 58%、97% 和 50%. 对张家冲流域坡度 > 25% 的耕地进行退耕还林,模拟耕地退耕还林对农业非点源污染负荷的影响.

表 4 不同种植方式下子流域模型输出结果

Table 4 Sub-watershed results in different planting types						
种植方式	径流 /mm	泥沙负荷 / $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	有机氮 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	有机态磷 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	溶解磷 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	颗粒态磷 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
顺坡种植	363.54	26.54	5.27	1.76	0.01	0.27
等高种植	362.64	18.63	5.22	1.60	0.01	0.26
变化率 /%	-0.25	-29.80	-0.95	-9.10	-6.36	-1.87

(1) 利用 GIS 技术设计了 4 种退耕还林方案.即实行退耕还林政策后,在流域内逐步、分批地实行退耕还林(图 3). 4 种方案的耕地面积分别比实际耕

地面积减少了 3.79、8.61、14.43 和 18.23 hm^2 (表 5),减少率分别为 4.2%、9.6%、16.1% 和 20.4%,模拟结果见表 6.

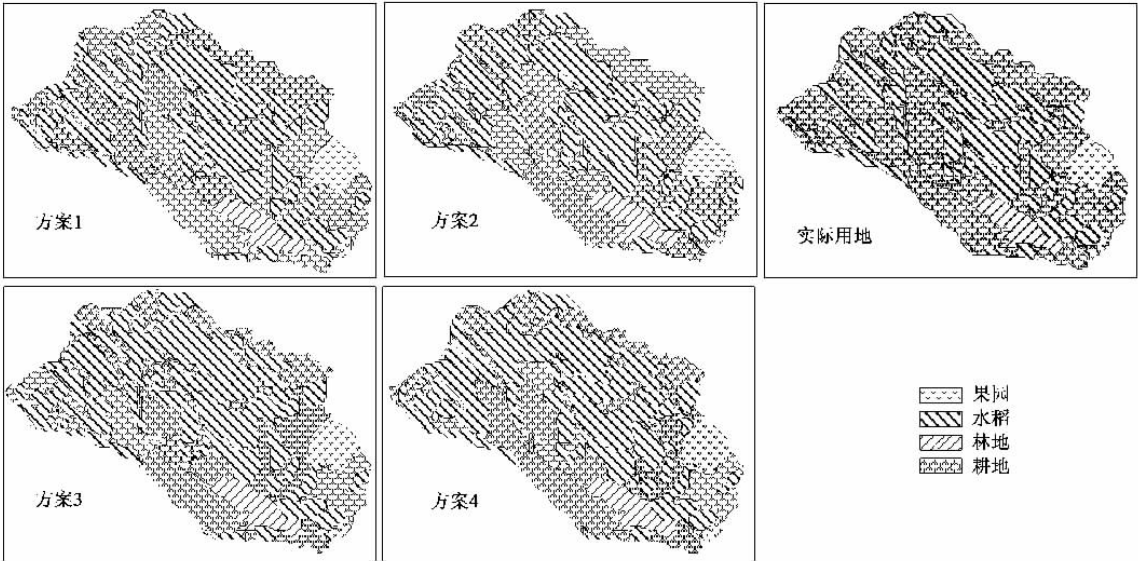


图 3 不同土地利用方案

Fig. 3 Different land use scenarios

表 5 不同方案土地利用面积变化

Table 5 Land use area change in different scenarios					
方案	项目	耕地	林地	果园	水田
1	实际用地/hm ²	89.52	69.91	7.32	7.20
	还林后/hm ²	85.73	73.70	7.32	7.20
	差值/hm ²	- 3.79	3.79	0	0
	变化率/%	- 4.20	5.40	0	0
2	还林后/hm ²	80.92	78.51	7.32	7.20
	差值/hm ²	- 8.60	8.60	0	0
	变化率/%	- 9.60	12.30	0	0
	还林后/hm ²	75.09	84.34	7.32	7.20
3	差值/hm ²	- 14.43	14.43	0	0
	变化率/%	- 16.10	20.60	0	0
	还林后/hm ²	71.29	88.14	7.32	7.20
	差值/hm ²	- 18.23	18.23	0	0
4	变化率/%	- 20.40	26.10	0	0

(2)退耕还林减少了径流量和泥沙负荷量,随着退耕还林面积的增大,径流量和泥沙负荷量都呈现下降的趋势,退耕还林的面积越大,径流量和泥沙负荷量的下降比率越高.退耕还林导致径流量减少主要有以下 2 个方面的原因:一是径流曲线数(CN)值的变化引起的表面径流量的变化,在张家冲流域,林地和耕地的 CN 值分别为 73 和 83,由 SWAT 模型中计算表面径流的 SCS 方程可知,CN 值越大,则表面径流量越大;二是随着林地面积的增加,植被冠盖面积增大,导致冠盖层截留量和枯枝落叶层的容水量增大,提高了流域土壤的持水量,引起流域出口径流量的下降.

(3)随着退耕还林面积的不断增大,氮、磷营养物质的排放逐渐减少.首先,径流量的减小引起营

表 6 不同方案模拟结果

Table 6 Simulation results in different land use scenarios								
方案	项目	径流 /m ³ ·s ⁻¹	泥沙 /t	有机氮 /kg	氨氮 /kg	硝态氮 /kg	有机态磷 /kg	无机磷 /kg
1	实际用地	0.025 2	267.89	200.40	162.25	3 156.41	11.49	237.88
	还林后	0.025 1	265.04	190.60	151.73	3 014.64	11.05	222.30
	差值	- 0.000 1	- 2.85	- 9.80	- 10.52	- 141.77	- 0.44	- 15.58
	变化率/%	- 0.40	- 1.10	- 5.00	- 6.50	- 4.50	- 3.80	- 6.50
2	还林后	0.025 0	262.19	189.71	151.44	2 917.55	10.73	209.90
	差值	- 0.000 2	- 5.70	- 10.69	- 10.81	- 238.86	- 0.76	- 27.98
	变化率/%	- 0.80	- 2.10	- 5.30	- 6.70	- 7.60	- 6.60	- 11.80
	还林后	0.024 9	261.30	179.11	135.82	2647.50	10.17	191.80
3	差值	- 0.000 3	- 6.59	- 21.29	- 26.43	- 508.91	- 1.32	- 46.08
	变化率/%	- 1.10	- 2.50	- 10.60	- 16.30	- 16.10	- 11.50	- 19.40
	还林后	0.024 9	259.13	154.98	120.96	2467.09	9.62	171.57
	差值	- 0.000 3	- 8.76	- 39.74	- 41.29	- 702.16	- 1.87	- 66.31
4	变化率/%	- 1.20	- 3.30	- 22.70	- 25.40	- 21.80	- 16.30	- 27.90

养物质负荷量的下降;其次,泥沙负荷量的降低减少了附着在泥沙上颗粒态氮、磷的负荷量;最后,化肥施用量的减少是氮、磷负荷排放量降低的本质原因.在 4 种模拟方案中,耕地面积分别减少了 3.79、8.61、14.43 和 18.23 hm²,氮肥施用量则减少了 3.03~14.58 t.方案 4 的结果表明,在张家冲流域实行坡度在 25% 以上坡耕地全部退耕还林的方案实施后,耕地面积减少了 18.23 hm²,使得各种形态氮、磷排放负荷下降,除有机态磷下降 16.3% 以外,其余的营养物质都降低了 20% 以上,通过 4 种方案的模拟结果,验证了在张家冲流域,实行坡度在 25% 以上坡耕地退耕还林的可行性.

4 结论

(1)减少化肥施用量是减少研究区域非点源污

染物排放的主要方法,随着化肥施用量的减少,径流量和泥沙负荷呈现轻微下降趋势,但氮、磷负荷呈现明显下降的趋势.

(2)在张家冲流域,随着退耕还林面积的增加,径流量和泥沙负荷呈现下降趋势,但变化幅度较小,氮、磷排放负荷下降的趋势明显.

(3)当坡度 > 25% 以上时,采取等高种植的方式无法起到防止水土流失,减少氮、磷营养物质排放的作用;在张家冲流域,当坡度位于 13%~16% 之间时,采取等高种植的方式可有效地防止水土流失,泥沙负荷与采取等高种植前相比减少了 29.8%,有机态磷负荷减少了 9.1%.

参考文献:

[1] Schuman G E, Spomer R G, Piest R F. Phosphorous losses from

- agricultural watersheds on Missouri Valley loess[J]. Soil Science Society of American Journal, 1973, **37**(3):424-427.
- [2] Hubbard R K, Erickson A E, Ellis B G, *et al.* Influence of macrophytes on nitrate removal in wetlands[J]. Ambio, 1982, **23**(6):363-366.
- [3] Sharpley A N, Gburek W J, Folmar G, *et al.* Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania [J]. Agricultural Water Management, 1999, **41**(2):77-89.
- [4] 王晓燕,胡秋菊,朱风云,等.密云水库流域降雨径流土壤中氮磷流失规律——以石匣试验区为例[J].首都师范大学学报(自然科学版), 2001, **22**(2):79-85.
- [5] 字淑慧,段青松,吴伯志.混播草带防治坡耕地水土流失效应的研究[J].农业工程学报, 2006, **22**(5): 61-65.
- [6] 马杏,许建初,董秀颖,等.西庄流域土地覆被变化及其水文响应模拟研究[J].水文, 2008, **28**(4):70-76.
- [7] 彭奎,欧阳华,朱波,等.典型农林复合系统氮素平衡污染与管理研究[J].农业环境科学学报, 2004, **23**(3):488-493.
- [8] 杨金玲,张甘霖,张华,等.丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J].环境科学, 2003, **24**(1):16-23.
- [9] 刘瑞民,丁晓雯,杨志峰,等.土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J].环境科学, 2006, **27**(12):2407-2414.
- [10] Owino J O, Owido S F O, Chemelil M C. Nutrients in runoff from a clay loam soil protected by narrow grass strips[J]. Soil & Tillage Research, 2006, **88**(1-2):116-122.
- [11] 陈利顶,傅伯杰.农田生态系统管理与非点源污染控制[J].环境科学, 2000, **21**(2):98-100.
- [12] Lenhart T, Fohrer N, Frede H D. Effects of land use changes on the nutrient balance in mesoscale catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, **28**(33-36):1301-1309.
- [13] Heuvelmans G, Muys B, Feyen J. Evaluation of hydrological model parameter transferability for simulating the impact of land use on catchment hydrology [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, **29**(11-12):739-747.
- [14] Muttiah R S, Wurbs R A. Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2002, **256**(3-4):264-285.
- [15] 王建平,苏保林,贾海峰,等.密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究[J].环境科学, 2006, **27**(7):1286-1291.
- [16] 刘建昌,张珞平,张玉珍,等.控制农业非点源污染的最佳管理措施的优化设计[J].厦门大学学报(自然科学版), 2004, **43**(增刊):269-274.
- [17] 张玉珍,陈能汪,曹文志,等.南方丘陵地区农业小流域最佳管理措施模拟评价[J].资源科学, 2005, **11**(6):151-155.
- [18] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等.土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J].水土保持学报, 2004, **18**(3):5-8.
- [19] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, *et al.* Large area hydrologic modeling and Assessment part I : model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, **34**(1):73-89.
- [20] Eileen C, Mackay D S. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural non-point source pollution model [J]. Journal of Hydrology, 2004, **295**(1-4):211-224.
- [21] Schuol J, Abbaspour K C, Srinivasan R, *et al.* Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model[J].Journal of Hydrology, 2008, **352**(1-2):30-49.
- [22] Wu K S, Johnston C A. Hydrologic response to climatic variability in a Great Lakes Watershed: A case study with the SWAT model [J]. Journal of Hydrology, 2007, **337**(1-2):187-199.
- [23] Holvoet K, Griensven A, Gevaert V, *et al.* Modifications to the SWAT code for modeling direct pesticide losses [J]. Environmental Modelling Software, 2008, **23**(1):72-81.
- [24] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等.茅坪河流域非点源污染负荷模拟[J].环境科学, 2006, **27**(11):2176-2181.
- [25] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等.参数空间分布对非点源污染模拟的影响[J].环境科学, 2007, **28**(7):1425-1429.
- [26] Barlund I, Kirkkala T, Malve O, *et al.* Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment [J]. Environmental Modelling Software, 2007, **22**(5):719-724.
- [27] Kang M S, Park S W, Lee J J, *et al.* Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields [J]. Agricultural Water Management, 2006, **79**(1):72-92.
- [28] Parajuli P B, Mankin K R, Barnes P L. Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT[J]. Agricultural Water Management, 2008, **95**(10):1189-1200.
- [29] 魏复盛.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002. 243-285.
- [30] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, **10**(3):282-290.
- [31] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO_3^- -N loads predictions [J]. Journal of Hydrology, 2005, **312**(1-4):207-222.