

伏牛山区陶湾流域径流、泥沙及氮磷的输出动态

田耀武,李东升,王 宁,刘 晶,王 宇

(河南科技大学 林学院,河南 洛阳 471003)

摘 要:以伏牛山区陶湾流域为研究对象,预测和评价了不同农业管理措施下流域径流、泥沙、氮磷等的输出动态,以便采取更为有效的管理措施。选取了 5 种农耕模式:传统翻耕、免耕、等高种植、留茬覆盖、免耕并留茬覆盖;5 种施肥模式:现有量、85%现有量、70%现有量、50%现有量、35%现有量;5 种降雨模式:干旱年、偏少年、平水年、偏多年和丰水年,得到 125 种模式组合。调试 AnnAGNPS 模型,输出 125 组合下的陶湾流域径流、泥沙、氮磷输出量。结果表明,免耕模式可以削减泥沙输出的 34.9%,但却增加了径流、氮磷等的输出;施肥模式对径流和泥沙输出没有显著影响,但对氮磷输出呈强正相关关系($R>0.95$),50%现有量的 L3 模式可削减 81.8%氮和 63.7%磷;丰水年泥沙输出量为平水年的 4.7 倍,但氮的输出量与平水年差异不显著,磷的输出量略高于平水年;免耕与施肥模式相结合是陶湾流域削减泥沙和氮磷输出的有效方法之一。

关键词:伏牛山区;流域;径流;泥沙;氮磷;管理措施;AnnAGNPS 模型

中图分类号:S728.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)05-0142-06

Changes of Runoff, Sediment, Nitrogen and Phosphorus Exported from Taowan Watershed, Funiu Mountainous Area

TIAN Yao-wu, LI Dong-sheng, WANG Ning, LIU Jing, WANG Yu

(Forestry College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: In this study, a typical agroforestry Taowan watershed in Funiu Mountainous area was selected to investigate the changes of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus exports, so that the better watershed management measures could be applied. A total of 125 combinations of various management treatments including five tillage practice patterns (CT-conventional tillage, NT-no tillage, CS-contour strip cropping, RC-residue cover, NR- no tillage and residue cover), five fertilizer patterns (L0-existing, L1-85% of existing, L2-70% of existing, L3-50% of existing, L4-35% of existing), and five kinds of annual rainfall patterns (R1-deficit, R2-Less than normal, R3-normal, R4-more than normal, R5-abundant) were evaluated. The AnnAGNPS (Annualized AGricultural NonPoint Source) model was used to predict the runoff, sediment, nitrogen and phosphorus exported from Taowan watershed. The results indicated that conservation tillage could significantly affect the amount of sediment output, no-till could reduce sediment output by 34.9%, but increase runoff, nitrogen and phosphorus output; fertilization patterns had no effect on runoff and sediment output, nitrogen and phosphorus outputs strongly positive correlated with fertilization patterns ($R>0.95$); a sharp increase in sediment output in abundant year, it was 4.7 times than the normal year. Outputs of nitrogen were not significant between abundant year and normal year. And phosphorus output in a abundant year was slightly higher than the normal year; the L3 fertilization patterns could reduce nitrogen and phosphorus outputs by 81.8% and 63.7%, respectively. In view of feasibility and efficiency, the combi-

nation of L3+NT was found to be the best scenario as the reductions of nutrient losses and sediment yield were significantly.

Key words:Funiu Mountainous area; watershed; runoff; sediment; nitrogen and phosphorus; management practice; AnnAGNPS model

农业生产活动中,土壤颗粒、氮磷、农药等物质通过地表径流的形式进入受纳水体所已造成较为严重的生态环境问题^[1]。农业流域中传统的翻耕和施肥模式是造成水体泥沙含量增加和富营养化的主要形式。保护性耕作措施、保护性工程措施和降低化肥农药使用量是削减泥沙和氮磷输出的主要措施。农业流域多采用实地监测^[2-3]和模型方法^[4-6]进行泥沙、氮磷等输出研究,这些研究肯定了流域尺度模型模拟研究方法的可行性。采取保护性农耕措施、降低化肥施用量,既是保持农业丰收,又是削减氮磷输出,降低水体富营养化的重要措施^[7]。AnnAGNPS是基于物理过程的参数分布式模型,对泥沙、氮磷输出的预测精度较高^[7-9]。以伏牛山区陶湾流域监测数据为基础,利用 AnnAGNPS 模型,预测和分析了 5 种耕作模式、5 种施肥模式和 5 种降雨模式 125 种管理组合时,流域径流、泥沙、氮磷输出的变化,以期 为评价伏牛山区农林流域农业管理措施,预测泥沙、氮磷的输出提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

陶湾流域位于河南省西部伏牛山区、伊河上游源头,包括河南省栾川县陶湾镇、石庙乡 2 个乡镇和栾川乡西半部,111°20′0″—111°35′55″E、33°43′0″~33°55′0″N,ArcGIS-AGNPS 集成模块模拟的流域面积为 329.92 km²,流域边界与实际行政区界略有差异。该流域属暖温带大陆性季风气候,年均气温 12.4℃,年日照 2 103 h,无霜期 198 d,多年平均降水量 812 mm。土壤类型有褐土性土、棕壤性土、棕壤和淋溶褐土等,棕壤植被以次生落叶阔叶混交林为主,间有草灌丛。褐土植被以夏绿阔叶林为主,伴有旱生森林、灌木、草本植物,具有疏林密灌的特点。

陶湾流域林地占 75.5%,农地占 20.7%,水域 0.32%,建设用地占 3.4%。

1.2 数据库的建立

数据库包括 DEM 和土地利用等地理数据,以及土壤属性和流域管理等^[8]。DEM 源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),水平精度 30 m,检验 DEM 采样精度和提取地面坡度的中误差^[10-11]。农作物参数和农业管理参数由模型手册并结合当地实际确定^[12-13]。AnnAGNPS 模型数据库详细构建方法参见有关文献^[8,12-14]。使用 2006—2007 年陶湾流域 22 次降雨径流、泥沙数据进行模型调试和参数率定^[15]。

1.3 流域农业管理措施

1.3.1 农耕模式 流域农地面积 68.29 km²,分布于河道两侧低山区,是泥沙、氮磷等物质的主要“源”,作物有小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、花生(*Archis hypogaea*)、红薯(*Ipomoea babatas*)、大豆(*Glycine max*)等,冬夏两季翻耕。根据相关文献报道的保护性农耕模式^[16-18],结合陶湾流域农业生产条件和群众可接受的程度,设计传统翻耕模式(CT),免耕(NT)、等高种植(CS)、留茬覆盖(RC)以及免耕+留茬覆盖(NR)等 5 种农耕模式。

1.3.2 施肥模式 流域以冬夏深耕施底肥、春秋追施为主。化肥为碳铵、硫酸铵、尿素、过磷酸钙等,较少施用农家肥。根据当地政府统计数据 and 现场调查,确定本流域小麦、玉米、花生、红薯、大豆、菜地等化肥使用量(换算为纯氮、磷量,全文同)(表 1)。根据当地化肥施用情况,设计现有施用模式(L0)、85%现有用量模式(L1)、70%现有量模式(L2)、50%现有量模式(L3)、30%现有量模式(L4)等 5 种施肥模式(表 2)。

Table 1 Fertilizer applications for Taowan watershed crops										(kg • hm ⁻²)
	L0		L1		L2		L3		L4	
	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
大豆	150	95	128	81	105	67	72	53	36	27
玉米	240	150	204	128	168	105	115	84	58	42
小麦	160	95	136	81	112	67	77	53	38	27
花生	210	120	179	102	147	84	101	67	50	34
红薯	220	130	187	111	154	91	106	73	53	36
菜地	300	130	255	111	210	91	144	73	72	36

1.3.3 降雨模式 设计 340 mm 的干旱年(R1)、510 mm 的偏少年(2)、680 mm 的平水年(R3)、1 020 mm 的偏多年(R4)、1 280 mm 的丰水年(R5)等 5 种年降雨量模式。启动模型 GEM 气候模块,基于 R1、R2、R3、R4、R5 等 5 类气候数据,生成 5 个 Dayclim.inp 气候文件。对上述文件与实地监测降雨资料对比,使之符合陶湾流域降雨特征。

1.4 径流、泥沙、氮磷物质的输出

AnnAGNPS 模型前期调试、参数率定方法见 Bingner^[8] 等和 黄志霖^[15] 等。启动 AGNPS/Arv-View 界面,基于以上 5 种耕作方式和 5 种施肥模式,产生 25 个 AnnAGNPS.inp 模型文件。启动模型污染负荷模块,导入 AnnAGNPS.inp 和气候文件 Dayclim.inp,输出陶湾流域 125 个管理模式下的径流、泥沙、氮磷量。

2 结果与分析

2.1 农耕模式与径流、泥沙、氮磷等的输出

由图 1 可看出,5 类耕作方式下流域径流、泥沙、氮和磷输出均发生了变化。现有施肥模式下,

NT、CS、RC 和 NR 等保护性耕作模式与传统翻耕(CT)相比,径流量分别增加了 5.3%、-1.1%、1.6%、3.2%。免耕模式(NT)径流量增加最大,免耕可能减少了雨水的下渗量,增加了地表径流。

图 1 还表明,在 L0 施肥模式下,NT、CS、RC 和 NR 等耕作模式与传统翻耕(CT)相比,泥沙输出量减少了 34.9%、26.2%、21.3% 和 46.2%。CT 模式泥沙输出与其他模式差异显著($P<0.05$)。径流与泥沙输出规律并不完全相同,这说明径流与泥沙输出具有相对的独立性。

L0 施肥模式下,NT、CS、RC 和 NR 耕作模式与 CT 相比,氮的输出量增加了 14.4%、5.2%、3.8% 和 3.4%,磷的输出量增加了 6.9%、1.7%、8.6% 和 8.6%。在其他施肥模式下同样有此规律(图 1),这充分证明,免耕、等高种植、留茬覆盖等保护性耕作模式仅能削减泥沙的流失,不能削减径流和养分输出量,此结果与 McDowell^[16] 等、Alberts^[19] 等、Tripathi^[20] 等、Pandey^[18] 等、田耀武^[21] 等的研究结论一致。

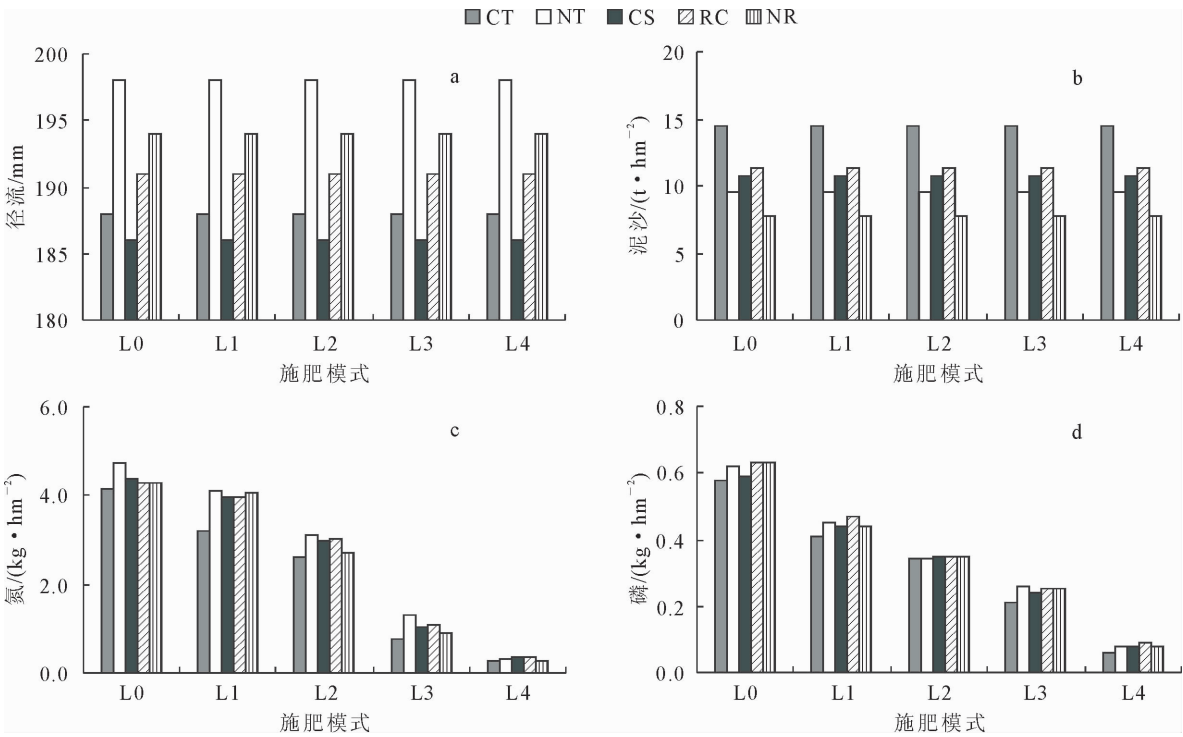


图 1 平水年耕作模式对径流、泥沙、氮磷输出的影响

Fig. 1 Effect of tillage practice patterns on runoff, sediment, nitrogen and phosphorus in rainfall-normal year

2.2 施肥模式与径流、泥沙、氮磷等的输出

不同的农耕模式中,施肥模式对径流和泥沙输出均没有影响(图 2)。施肥模式对氮磷输出影响差异极为显著($P<0.01$),氮与磷施入量与输出量强烈正相关,相关系数分别为 0.95 和 0.93。流域在

现有耕作条件下,L1~L4 模式与 L0 相比,氮输出量分别下降 22.8%、36.4%、81.8%、93.9%,磷输出量分别下降 29.3%、41.4%、63.7%、89.6%。氮磷输出量随施入量的下降而迅速下降。流域 2007 年地表水在现有耕作管理条件下,可以达到《地表水

环境质量标准(GB3838-2002)》中的Ⅱ类以上。但是当地群众常在夏末秋初大量追施化肥,导致9—10月水质最差,有时还达不到Ⅴ类标准。

CT、NT、CS、RC、NR 等耕作模式在 L3 施肥水平时,平水年流域氮输出量分别为 0.75、1.31、1.04、1.08 kg·hm⁻²和 0.69 kg·hm⁻²,磷的输出量分别为 0.34、0.34、0.32、0.15 kg·hm⁻²和 0.11 kg·hm⁻²。很显然,免耕等保护性耕作措施并不能削减氮的输出,甚至还导致氮输出的增加;免耕等措施对磷削减作用较明显,NR 模式时,磷的削减达到

了 67.6%。当降低化肥施用量时,泥沙及氮磷输出的削减效果尤为明显,削减率高于 Pandey^[18]等、田耀武^[7]、黄志霖^[22]等的研究,这可能的原因是流域农地面积较小,森林覆盖率较大,农地坡度较小,也可能与模型的适用尺度有关。

L4 模式氮磷输出量极小,水质完全达到国家有关要求。但该模式下作物产量下降,影响农民增收和农业效益。在 L3 施肥模式下,氮、氮输出下降了 81.8%和 63.7%,该模式基本能保证作物产量,推荐 L3 作为最优施肥模式。

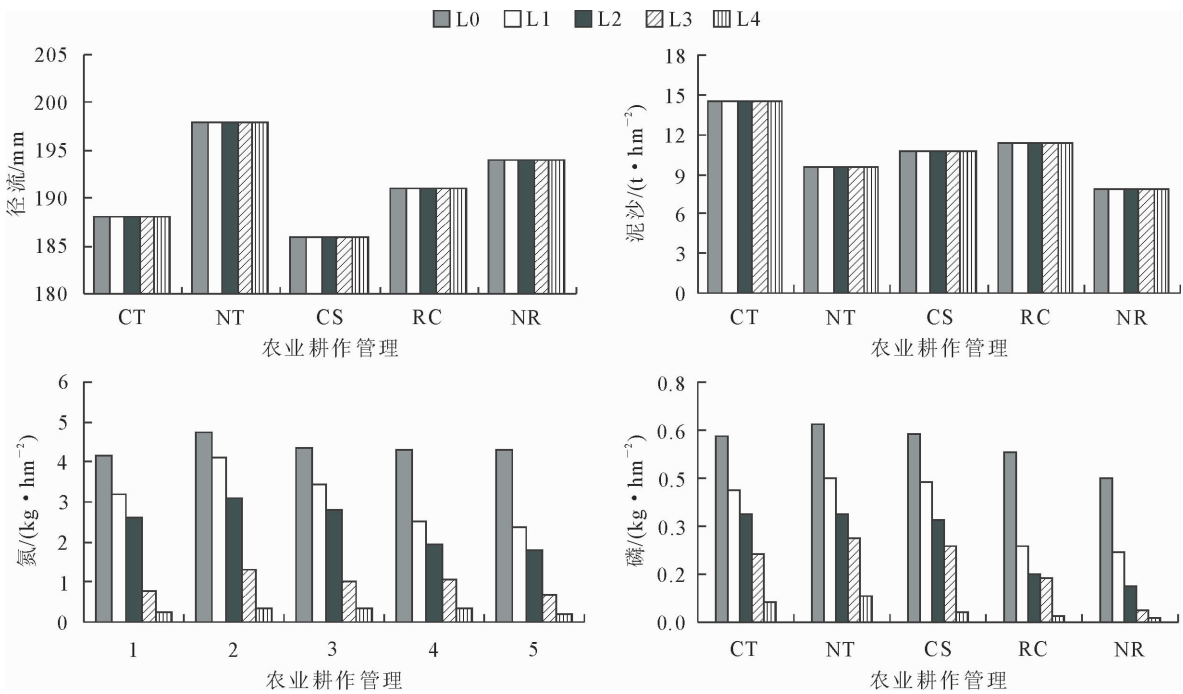


图 2 平水年施肥模式对流域径流、泥沙、氮磷等输出的影响

Fig. 2 Effect of fertilizer treatment on runoff, sediment, nitrogen and phosphorus export in rainfall-normal year

2.3 径流、泥沙、氮磷输出的变化

图 3 为干旱年 R1、偏少年 R2、平水年 R3、偏多年 R4 和丰水年 R5 中, AnnAGNPS 模型预测的径流、泥沙、氮磷的输出量。R2~R4 与 R1 相比,径流量分别增加了 1.82、2.91、4.70 倍和 7.04 倍,泥沙量分别增加了 1.52、1.93、5.45 倍和 9.13 倍,氮输出量分别增加了 1.04、1.38、1.48 倍和 1.48 倍,磷输出分别增加了 1.31、1.52、1.58 倍和 1.62 倍。氮磷在平水年、偏多年、丰水年输出量差异并不显著 ($P>0.05$),而丰水年与干旱年差异显著 ($P<0.05$)。年份降雨模式对泥沙量的影响最为显著,对氮输出影响最小。

3 结论与讨论

3.1 AnnAGNPS 模型的适用条件

本文构建干旱年、偏少年、平水年、偏多年和丰水年等 5 种年降雨模式文件,选择了 AnnAGNPS

模型,从流域尺度预测了耕作模式、施肥模式下的径流、泥沙、氮磷等的动态变化。黄志霖^[15]等评估了 AnnAGNPS 模型在三峡库区小流域的径流、泥沙、氮磷的预测效果,认为模型对径流量预测误差在可接受的范围内,对泥沙预测精度较径流低,预测小型泥沙流失事件值偏高,大型泥沙流失事件值偏低,对氮磷预测的不确定性更大,但是径流、泥沙、氮磷的预测误差呈现一定的变化趋势,模型可以在三峡库区农林复合流域条件下应用。我们也发现了模型预测泥沙的误差规律,但误差均低于黄志霖^[15]等的研究,这可能基于流域不同的地理条件。黄志霖^[15]等选取的流域面积只有 1.44 km²、坡度较大,农地面积占 31%;本文流域面积为 329.92 km²,农地面积占 20.1%,平均坡度较小;模型开发者认为模型适用面积为 3 000 km² 以下的流域,模型可能对中尺度流域有着更好的预测结果,该结论是否具有普遍性还需进一步研究。

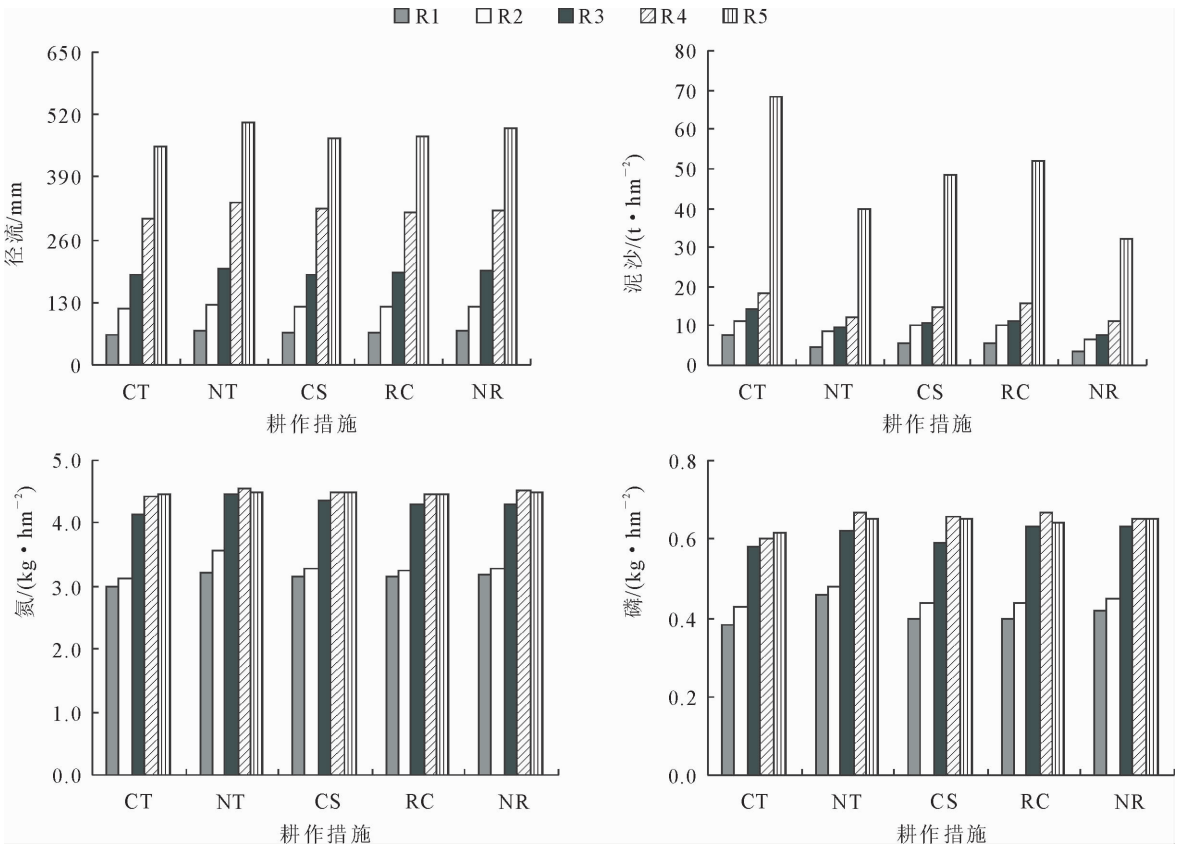


图3 径流、泥沙、氮和磷输出的年动态

Fig. 3 Dynamic changes of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus exports

3.2 农耕模式与泥沙、氮磷的输出

农业生产活动是流域土壤侵蚀、氮磷养分流失的最要原因。减少水壤侵蚀的重要措施是采用保护性耕作措施、实施水土保持工程等,其中成效最为显著的是最佳管理措施(BMPs),其目的是减少泥沙和氮磷进入地表水体,且措施切实可行^[23-24]。Walker^[1]评估了等高种植、农业轮作的方案效果, Schmitt^[24]等评估了植物过滤带宽度对水土保持的影响,李德荣^[25]等评估果园水土保持措施的施用效果, Santhi^[9]等评估了管理措施对流域水质影响, 张心昱^[26]等评估了管理措施对流域土壤质量的影响, 许其功^[27]等评估了农业耕作对土壤养分流失的影响。但我们还发现保护性农耕模式如免耕等只能削减土壤的流失,并不能削减氮磷的输出。减少氮磷施用量,采用缓释性肥料是控制流域接纳水体水质的主要手段。

3.3 施肥模式与泥沙、氮磷的输出

可行的流域管理方式是不降低作物产量,最大限度地减少泥沙、养分及其他元素的流失。减少化肥使用量是降低氮磷输出的主要方式,这与黄志霖^[15]等的结论一致。我国目前正在山区有条件的流域推广退耕还林工程措施,该工程对削减径流、泥沙、氮磷等输出效果非常明显。但该工程可能会损

伤农民收入,而且投入成本较大,在所有流域推广退耕还林可能性较小。农业流域首先应控制无机化肥施用量,并推广当地群众可以接受的保护性管理模式。本研究施肥模式 L3 可削减 81. 8% 的氮、63. 7% 的磷,实施保护性耕作、合理使用化肥是陶湾流域农业管理的出发点。

参考文献:

[1] WALKER J F, GRACZYK D J. Preliminary evaluation of effects of BMPs in the black earth creek, wisconsin, priority watershed[J]. Water Science Technology, 1993, 28(4): 539-548.

[2] 王秀娟,刘瑞民,宫永伟,等. 香溪河流域土地利用格局演变对非点源污染的影响研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(5): 1194-1200. WANG X J, LIU R M, GONG Y W, et al. Simulation of the effect of land use/cover change on non-point source pollution load in Xiangxi river watershed[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(5): 1194-1200. (in Chinese)

[3] 黄志霖,田耀武,肖文发,等. 农业管理措施对三峡库区流域非点源污染削减效果评价[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1530-1536. HUANG Z L, TUAN Y W, XIAN W F, et al. Reduction effects of agricultural management practices on non-point source pollution in a watershed in Three Gorges Reservoir Area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(6): 1530-1536. (in Chinese)

[4] INAMDAR S P, MOSTAGHIMI S, MCCLELLAN P W, et al. BMP impacts on sediment and nutrient yields from an agricul-

tural watershed in the coastal plain region[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, 2001, 44 (5):1191-1200.

[5] BAGINSKA B, MILNE-HOME W, CORNISH P S. Modeling nutrient transport in currency creek, NSW with AnnAGNPS and PEST[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18 (8):801-808.

[6] OUYANG W, HAO F H, WANG X L, *et al.* Non-point source pollution responses simulation for conversion cropland to forest in mountains by SWAT in China[J]. Environmental Management, 2008, 41(1):79-89.

[7] 田耀武, 黄志霖, 肖文发. 三峡库区黑沟小流域非点源污染物输出的动态变化[J]. 环境科学, 2011, 32(2):423-427.

TIAN Y W, HUANG Z L, XIAN W F, *et al.* Dynamic change of non-point source pollution exported from Heigou watershed in Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2011, 32(2):423-427.

[8] BINGNER R L, THEURER F D. AnnAGNPS technical processes[J]. Documentation Version, 2001(2).

[9] SANTHI C, SRINIVASAN R, ARNOLD J G, *et al.* A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(8):1141-1157.

[10] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. 地理学报, 2003, 58(6):824-830.

TANG G A, ZHAO M D, LI T W, *et al.* Modeling slope uncertainty derived from DEMs in Loess Plateau DEM[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6):824-830. (in Chinese)

[11] 国家测绘局. 基础地理信息数字产品(1:10 000 1:50 000)生产技术规程 第 2 部分:数字高程模型(DEM)[M]. 北京:中国测绘出版社, 2012.

[12] 贾宁凤, 李旭霖, 陈焕伟, 等. AnnAGNPS 模型数据库的建立——以黄土丘陵沟壑区砖窑沟流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2):436-441.

JIA N F, LI X L, CHEN H W, *et al.* Database construction for AnnAGNPS model—case study of Zhuanyaogou watershed in hilly-gully Loess Plateau[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(2):436-441. (in Chinese)

[13] 郑粉莉, 高学田, 李靖. 农业非点源污染模型(AGNPS)用户指南与操作手册[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2008.

[14] 黄志霖, 田耀武, 曾立雄, 等. 森林土壤有机碳模型评述与应用[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(5):50-56.

HUANG Z L, TIAN Y W, ZENG L X, *et al.* Assessment and application analysis on forest soil organic carbon models[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5):50-56. (in Chinese)

[15] 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等. 非点源污染模型 AnnAGNPS 在三峡库区林农复合小流域模拟效果评定[J]. 环境科学, 2009, 30(10):2872-2878.

HUANG Z L, TIAN Y W, XIAN W F, *et al.* Nonpoint source pollution model, AnnAGNPS, assessment for a mixed forested watershed in Three Gorges Reservoir Area conditions[J]. Environmental Science, 2009, 30(10):2872-2878. (in Chinese)

[16] MCDOWELL L L, MCGREGOR K C. Plant nutrient losses in runoff from conservation tillage on corn[J]. Soil & Tillage Research, 1984, 4(1):79-91.

[17] MOSTAGHIMI S, PARK S W, COOKE R A, *et al.* Assessment of management alternatives on a small agricultural watershed[J]. Water Research, 1997, 31(8):1867-1878.

[18] PANDEY V K, PANDA S N, PANDEY A, *et al.* Evaluation of effective management plan for an agricultural watershed using AVSWAT model, remote sensing and GIS[J]. Environmental Geology, 2008, 56(5):993-1008.

[19] ALBERTS E E, SPOMER R G. Dissolved nitrogen and phosphorus in runoff from watersheds in conservation and conventional tillage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1985, 40(1):153-157.

[20] TRIPATHI M P, PANDA R K, RAGHUWANSHI N S. Development of effective management plan for critical subwatersheds using SWAT model[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3):809-826.

[21] 田耀武, 黄志霖, 曾立雄, 等. DEM 网格尺度对 AnnAGNPS 预测山地小流域径流和物质输出的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4):846-853.

TIAN Y W, HUANG Z L, ZENG L X, *et al.* Impact of DEM mesh size on AnnAGNPS runoff and sediment predictions for a small-scale hilly watershed[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(4):846-853. (in Chinese)

[22] 黄志霖, 田耀武, 肖文发. AGNPS 模型机理与预测偏差影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10):1806-1813.

[23] 王晓燕. 非点源污染及其管理[M]. 北京:海洋出版社, 2003.

[24] SCHMITT T J, DOSSKEY M G, HOAGLAND K D. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths and contaminants[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(9):1479-1489.

[25] 杨晓菲, 鲁绍伟, 饶良懿, 等. 中国森林生态系统碳储量及其影响因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3):73-78.

YANG X F, LU S W, RAO L Y, *et al.* Advances in the researches of carbon storage of forest ecology and related factors in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3):73-78. (in Chinese)

[26] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 农田生态系统不同土地利用方式与管理措施对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2):303-309.

ZHANG X Y, CHEN L D, FU B J, *et al.* Effects of land use and management practice on farmland soil quality in Yanhuai basin of Beijing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2):303-309. (in Chinese)

[27] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2):326-331.

XU Q G, LIU H L, SHEN Y Z, *et al.* Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir Area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(2):326-331. (in Chinese)