



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2017.02.012

赵刚, 徐宗学, 董晴晴, 等. 不同管理措施对密云水库流域水量水质变化的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 80-88. ZHAO Gang, XU Zong xue, DONG Qing qing, et al. Effects of different management measures on water quantity and quality of the Miyun Reservoir catchment[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 80-88. (in Chinese)

不同管理措施对密云水库流域水量水质变化的影响

赵刚, 徐宗学, 董晴晴, 史蓉, 徐茂森

(北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 在密云水库上游控制流域建立 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 水文模型, 根据实测水量-水质数据对模型的参数进行优化。识别流域土壤侵蚀和污染物关键区域, 并对不同管理措施对流域水量-水质的影响进行定量研究。研究表明: 密云水库流域土壤侵蚀强度较大的集中在流域中下游临近河道的区域; 潮河流域非点源污染状况较为严重, 潮河和白河总氮流失超高风险区分别占总面积的 62.62% 和 43.09%, 白河流域总磷均为低流失风险区, 潮河流域总磷高流失风险区占 17.81%; 等高耕作和梯田种植对于产沙量和污染物都有较好的去除效果, 其中等高耕作对于产沙量和总氮、总磷负荷的削减率, 潮河分别为 25.16%、10.79% 和 32.89%, 白河为 47.60%、34.92% 和 53.49%; 通过对比退耕还林和退耕还草措施得知, 退耕还林的效果更优。研究结果可为密云水库流域水土保持和水环境治理提供决策依据。

关键词: SWAT 模型; 密云水库; 水量水质; 管理措施

中图分类号: S127 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)02-0080-09

Effects of different management measures on water quantity and quality of the Miyun Reservoir catchment

ZHAO Gang, XU Zong xue, DONG Qing qing, SHI Rong, XU Mao sen

(Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education,

College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: A SWAT hydrological model was constructed on the Miyun Reservoir catchment, and the parameters of the model were adjusted according to the actual water quantity and quality data. Based on SWAT simulation results, the critical areas of soil erosion and pollution were identified, and the effects of different management measures on water quantity and quality were analyzed quantitatively. The results are as follows. The areas of intense soil erosion are concentrated near the river in the middle and lower reaches of the Miyun Reservoir catchment. The non point source pollution in the Chao River watershed is more serious. The areas with ultra high risk of TN loss in Chao River and Bai River watersheds respectively account for 62.62% and 43.09% of the total areas. Bai River watershed has low risk of TP loss, while in Chao River watershed, the areas with high risk of TP loss account for 17.81%; Contour farming and terraced planting are both effective in reducing the amount of runoff, sediments, and pollutant load. Contour farming has reduced 25.16% of sediments, 10.79% of TN, and 32.89% of TP in Chao River watershed, and 47.60% of sediments, 34.92% of TN, and 53.49% of TP in Bai River watershed. Returning farmland to forests is more effective in pollutant reduction than returning farmland to grasslands. The research results can provide basis for decision making in soil and water conservation and water environment rehabilitation in the Miyun Reservoir catchment. Key words:

Key words: SWAT model; Miyun Reservoir; water quantity and quality; management measures

收稿日期: 2016-09-17 修回日期: 2016-11-18 网络出版时间:

网络出版地址:

作者简介: 赵刚(1990), 男, 北京人, 主要从事水文模型研究。E-mail: gangzhao@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 徐宗学(1962), 男, 山东淄博人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

非点源污染是影响流域水环境的重要因素之一。因其具有分布广泛、污染物不确定、监测困难等特点,使其定量研究尚存在很多难点。非点源污染源不固定,极易受到了人类生产、生活以及农业生产活动等的影 响。定量分析人类活动对流域水量水质的影响,不仅可以有效治理与控制非点源污染,同时为流域水环境问题治理、资源合理规划与利用提供决策依据。

不同土地利用和管理措施对流域水量水质有着直接影响,有必要对其进行定量分析。对非点源污染的定量分析通常需要借助地理信息技术相支持,计算出整个流域内各个区域的非点源污染分布,然后与该区域的水质要求相结合,进而对其进行定量分析与情景模拟^[1]。SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型,因简单实用,广泛用于流域水循环模拟、流量预测以及非点源污染控制评价中^[2-3]。如: Ashok 采用 SWAT 模型对土地利用复杂的小流域氮磷污染物进行模拟并取得了较好效果^[4];之后 Mishra 和 Epelde 采用 SWAT 模型分别对不同流域农业措施与水量-水质关系进行研究^[5-6],表明了人类活动干扰与流域非点源污染物浓度的直接关系;国内亦有较多研究,如张建永^[7]利用 SWAT 模型研究了北京官厅水库流域径流、营养物流失等情况;秦耀民等^[8]以黑河为研究对象,采用 SWAT 模型研究了土地利用方式、土地覆盖情况两种因素对水质的影响;刘博等^[9]也采用 SWAT 模型,主要研究了土地利用情况、水质管理措施、水文环境等因素对北京沙河水库非点源污染的影响。针对密云水库流域非点源污染也有了相关研究^[10-12],如:王晓燕等^[13]和李明涛^[14]等在 SWAT 模型和 GIS 技术的支持下,分析了流域内非点源污染物的时间变化规律并都认为耕地面积对于流域内非点源污染的负荷贡献较高。徐宗学和庞靖鹏^[15-16]等以密云水库流域为研究对象,对径流和泥沙进行模拟,并对土壤侵蚀关键区进行识别;张平^[17]基于 SWAT 模型对于氮磷流失风险区进行了划分。以往的研究中,对不同管理措施对流域水量水质变化影响的进行模拟和分析较少,本文是对上述研究的深入与完善。

密云水库作为北京市主要水源地,受气候变化和人类活动影响,近年来水环境也发生了变化。本研究采用 SWAT 模型,选择密云水库流域为研究对象,对流域水量-水质的参数进行调整,验证模型适用性。在此基础上,识别流域土壤侵蚀和污染物关键区域,并对不同管理措施对流域水量水质的影响进行定量化分析。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

密云水库控制流域位于潮白河境内,是北京市重要的水源地之一。其流域位于北纬 $40^{\circ}19' - 41^{\circ}38'$ 和东经 $115^{\circ}25' - 117^{\circ}35'$ 之间,流域面积为 $15\,788\text{ km}^2$,见图 1。整个流域的地形西北高、东南低,水流从西北部山地流入密云水库。流域以丘陵为主,山地面积占整个区域面积约三分之二。密云水库流域位于暖温带,降水主要集中在夏秋季,其中 6 月到 9 月为汛期,占到降水量的 80% 以上^[18],降水量空间分布呈东南多,西北少的特点。年平均气温 $9\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。土壤类型主要有四种类型:褐土、棕壤、草甸土和栗钙土。

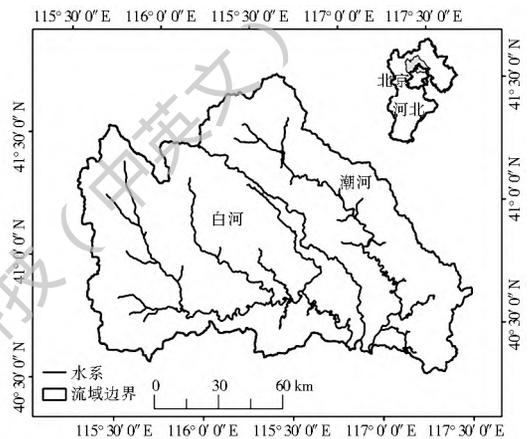


图 1 研究区示图

Fig. 1 Diagram of the study area

1.2 SWAT 模型简介

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型^[19]是由美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的半分布式流域水文模型,该模型基于 SWRRB,并吸取了 CREAMS、GLEAMS、EPIC 和 ROTO 的主要特征。20 世纪 90 年代开发以来,经历多次扩展和升级,在流域水文平衡、长期地表径流、日平均径流模拟以及泥沙侵蚀流失量、农药输移、非点源污染等方面得到了广泛应用。

SWAT 模型能够模拟流域内多种形式的氮和磷的迁移转化过程。由于模型输出结果中没有直接给出 TN 和 TP 的结果,本文采用以下公式进行计算:

$$TN_OUT = ORGN_OUT + NO_3_OUT + NH_4_OUT + NO_2_OUT \quad (1)$$

式中: TN_OUT 为流域出口总氮负荷(t); $ORGN_OUT$ 为流域出口有机氮(t); NO_3_OUT 为流域出口硝态氮(t); NH_4_OUT 为流域出口铵态氮(t); NO_2_OUT 为流域出口亚硝态氮(t)。

$$TP_OUT = ORGP_OUT + MINP_OUT \quad (2)$$

式中: TP_OUT 为流域出口总磷的负荷(t); $ORGP_OUT$ 为流域出口有机磷的负荷(t); $MINP_OUT$ 为流域出口无机磷的负荷(t)。

SWAT 模型首先进行子流域划分, 然后根据每个子流域内不同的土地利用方式、土壤类型、地形等将子流域划分出多个水文响应单元(HRUs)。SWAT 模型模拟分为两部分: 陆表过程和受纳水体过程, 前者控制每个水文响应单元内主河道的径流、沉积物、营养物和农药的输入量; 后者决定径流、沉积物等物质从河网向流域出口的输移运动^[20,21]。

1.3 数据来源与处理

构建 SWAT 模型所使用的数据主要有两种, 即空间数据和属性数据。空间数据主要包括高程、土地利用地图、土壤类型地图等几种。文中所采用 DEM 数据、土地利用数据、土壤数据见表 1。属性数据包括水文、气象、点源等相关资料。气象数据采用北京、承德、多伦、丰宁、怀来、遵化、张家口六个站点的最高、最低气温、日照时数、风速和相对湿度等资料, 由国家气象局提供。降水数据采用密云流域 1993 年到 2001 年 75 个站点日降水资料, 流量资料采用潮河下会站和白河张家坟站 1993 年- 2001 年日流量资料, 由密云流域管理局提供。密云水库流域以非点源污染为主, 模型输入中关于综合污水及固气物排放现状、化肥农药使用和分散式饲养畜禽废水等资料可详见文献[22]。

表 1 空间数据来源和介绍

Tab. 1 Description and sources of the spatial data

数据	比例尺	来源
DEM	1: 25 万	中国科学院资源环境科学数据中心
土地利用图	1: 10 万	中国科学院资源环境科学数据中心
土壤类型图	1: 100 万	中国科学院资源环境科学数据中心
水系图	1: 25 万	中国科学院资源环境科学数据中心

采用模型推荐的子流域划分阈值 12 000 ha, 潮河和白河流域分别划分为 33、31 个子流域, 将土地利用类型和土壤类型分类的阈值设置为 10%, 潮河流域划分为 327 个 HRUs, 白河流域划分为 241 个 HRUs, 共 568 个 HRUs, 子流域划分见图 2。

采用模拟结果月值的相关系数 R^2 和纳西效率系数 E_{ns} 评价模型精度。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})(Q_{sim} - Q_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{sim})^2}} \right]^2 \quad (6)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})^2} \quad (7)$$

式中: Q_{obs} 为观测值, Q_{avg} 为观测平均值, Q_{sim} 为预测值, Q_{sim} 为预测平均值。当 $Q_{obs} = Q_{sim}$ 时, $E_{ns} = 1$; 如果 E_{ns} 为负值, 则意味着模拟效果较差, 精度较低。

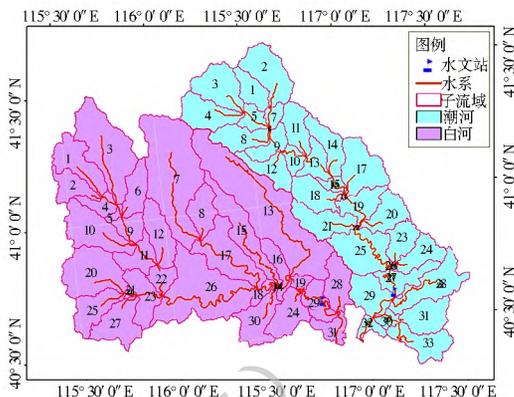


图 2 密云流域子流域划分

Fig. 2 Sub-catchment delineation in Miyun catchment

2 结果与分析

利用 SWAT 模型对密云水库流域水量、泥沙、TN 和 TP 的月值分别进行模拟, 模拟预热期为 1993 年- 1994 年, 1995 年- 1999 年期间为率定期, 验证期为 2000 年- 2001 年, 在参数率定过程中, 通过对较为敏感参数进行调整, 主要率定的参数有 Cn2、Esco、Sol_K、Spcon、Ch_N2、Ch_K2、Revapm、Sol_Z、Canmx 等, 对于其他参数采用模型默认值进行设置, 参数范围与其所代表的意义可详见模型应用手册^[20], 并采用上述指标对模型适用性进行验证, 表 2 和图 3- 图 6 为率定和验证结果。结果表明, SWAT 模型可以较好的模拟密云水库流域径流、泥沙、污染物迁移转化过程, 模型对径流的模拟效果最好, 泥沙次之, 总氮总磷效果差一些。SWAT 模型对密云流域的适用性较好, 可以满足模拟要求。

表 2 模型率定和验证结果

Tab. 2 Results of model calibration and validation

	潮河下会站		白河张家坟站	
	率定期	验证期	率定期	验证期
	R^2	E_{ns}	R^2	E_{ns}
径流	0.9	0.75	0.85	0.9
泥沙	0.9	0.86	0.7	0.78
总氮	0.96	0.79	0.61	0.66
总磷	0.83	0.61	0.85	0.82

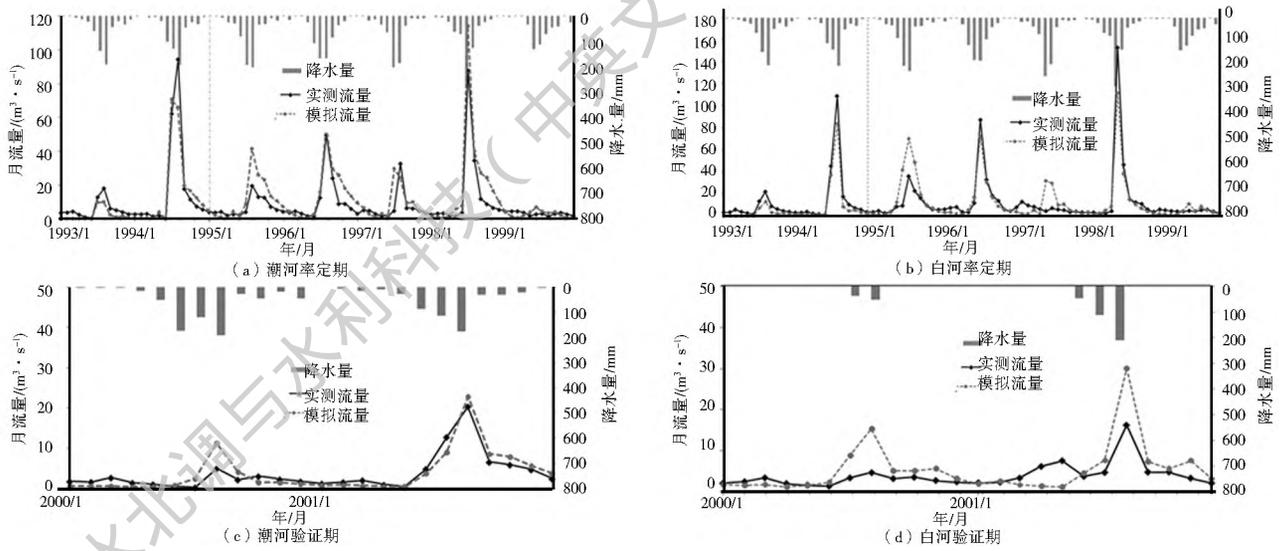


图3 月径流模拟效果

Fig. 3 Observed and simulated monthly runoff

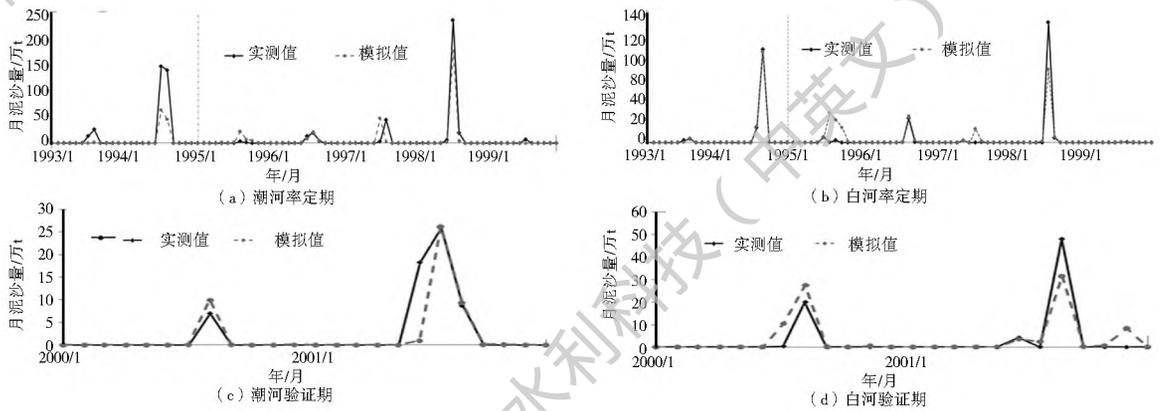


图4 月泥沙量模拟效果

Fig. 4 Observed and simulated monthly sediment loads

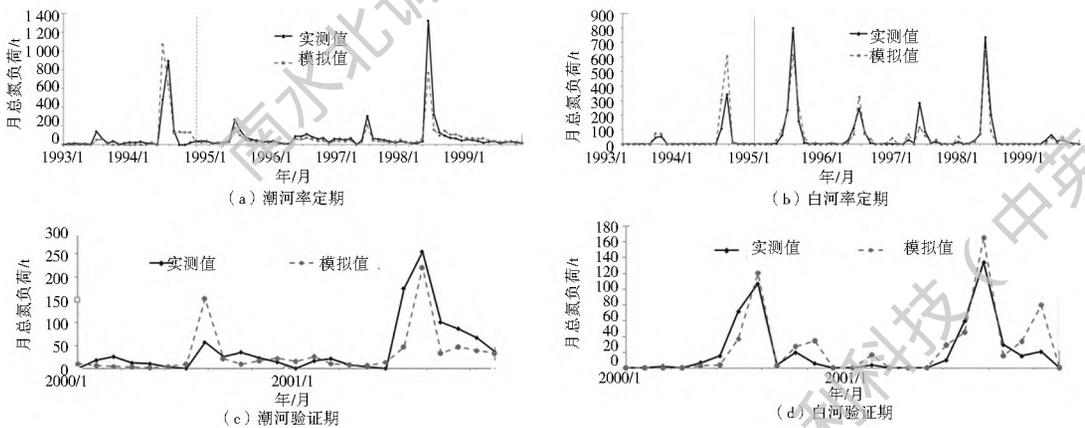


图5 月总氮负荷模拟效果

Fig. 5 Observed and simulated monthly TN loads

2.1 流域关键区识别

通过的密云水库流域1990年-2003年各子流域土壤侵蚀量计算土壤侵蚀模数,并参照土壤侵蚀强度分级标准^[23],分别标注为微度、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀,并计算土壤侵蚀面积占比:潮河流域微度、轻度、中度、强度侵蚀区分别占流域总面积的

68.74%、18.39%、11.49%、1.39%;白河流域的占比则是48.09%、26.56%、12.49%和12.86%。将不同的侵蚀程度使用不同的颜色表示,则可以得到图7中的分级图。侵蚀度较大区域集中在密云水库中下游临近河道的区域,这主要因为子流域径流深和植被覆盖对影响泥沙和氮磷的分布更为突出。

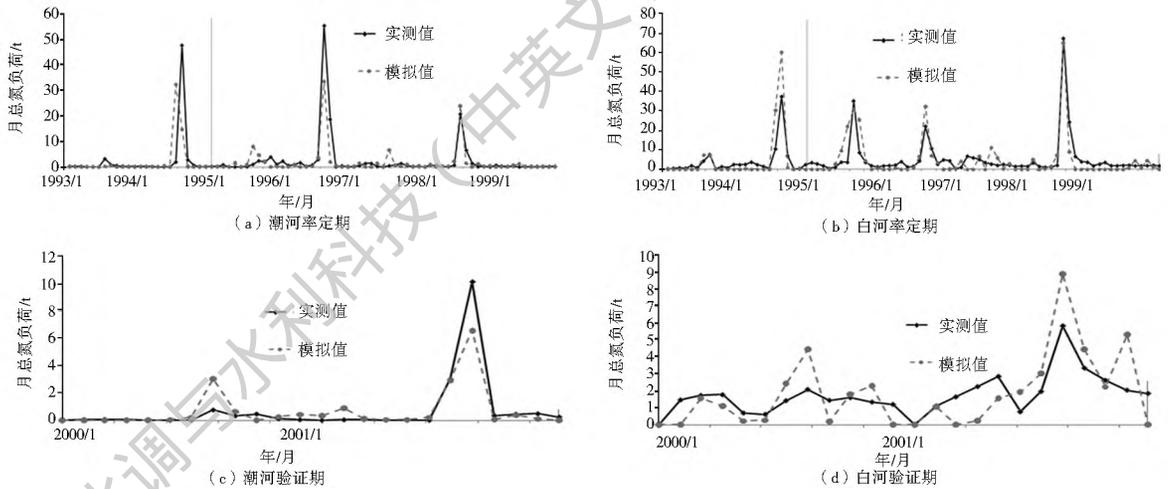


图 6 月总磷负荷模拟效果

Fig. 6 Observed and simulated monthly TP loads

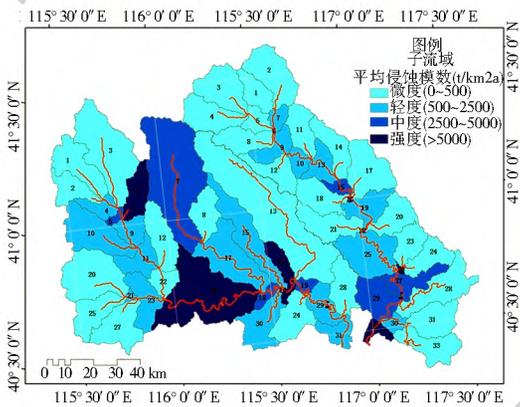


图 7 土壤侵蚀强度分级

Fig. 7 Classification of soil erosion intensity

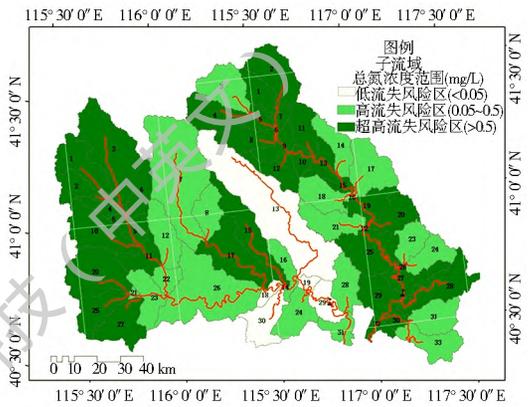


图 8 总氮浓度空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of TN

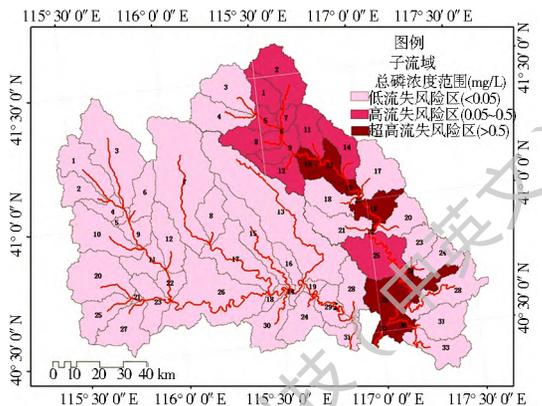


图 9 总磷浓度空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of TP

图 8 和图 9 分别为密云水库流域的总氮浓度空间分布图和总磷浓度空间分布图,使用国家水质分类标准^[24]对密云水库流域内 TN 和 TP 关键区进行识别,将氮磷流失风险区划分为 3 个级别,低流失风险区,高流失风险区和超高流失风险区。氮磷污染负荷关键区识别结果表明(图 8,图 9),潮河流域所有流域总氮均都在高风险浓度范围,潮河和白河总氮流失超高风险区分别占总面积的 62.62% 和 43.09%;总磷的流失程度总体比较小,白河流域均为低流失风险区,潮河流域 17.81% 为高流失风险区。总氮负荷较高的区域多集中在农业用地区域。潮河总磷污染状况较差,与相关文献[13,25]结果较为一致。

2.2 情景设置及分析

密云水库控制流域以非点源污染为主,对土壤侵蚀关键区和氮磷污染负荷关键区分别设置情景(表 3,表 4),探讨不同管理措施对流域水量水质的定量影响。利用率定和验证后的 SWAT 模型对梯田种植、等高种植、退耕还林还草措施分别进行模

拟,得到其在 2004 年-2013 年的年径流量、产沙量、TN 负荷、TP 负荷,并与基准情景相比计算变化率,即年均值减去基准值再除以基准值,若变化率为负值则表明对径流、泥沙等有去除作用,若为正则增加作用。

由表 5 可知,梯田种植可以有效防止水土流失及污染物负荷的产生。研究发现,坡度小于 2% 的区域多集中在临近河道的区域,这些区域通常以耕

表3 土壤侵蚀关键区情景设置方案

Tab.3 Scenarios in critical areas of soil erosion

情景	措施	说明
S1		坡度百分比: 0~ 2
S2	梯田种植	坡度百分比: > 2
S3		全部梯田耕作
S4		坡度百分比: 0~ 2
S5	等高种植	坡度百分比: > 2
S6		全部等高种植

地、居民用地为主,在非点源污染负荷中贡献率较高。其中坡度小于2%的面积占潮河总面积的7%,占白河总面积的8%。以白河为例,当坡度小于2%时(S1),梯田种植对径流、泥沙、总氮、总磷削减率分别为0.40%、1.08%、0.86%;对和0.81%;当坡度大于2%时(S2),梯田种植对径流、泥沙、总氮、总磷削减率分别为2.15%、43.53%、18.77%和

43.51%;当对土壤侵蚀关键区全部实施梯田种植时(S3),削减效果最好,径流、泥沙、总氮、总磷削减率分别达到2.54%、44.25%、19.45%和44.28%。因此,梯田种植对于产沙量和总磷负荷均有较好的削减作用,且白河流域效果在泥沙、总磷的削减上要优于潮河流域。

表4 土氮磷污染负荷关键区情景设置方案

Tab.4 Scenarios in critical areas of nitrogen and phosphorus pollution

情景	措施	说明
S7		坡坡度百分比: 0~ 2
S8	退耕还草	坡度百分比: > 2
S9		全部退耕还草
S10		坡度百分比: 0~ 2
S11	退耕还林	坡度百分比: > 2
S12		全部退耕还林

表5 梯田种植情景下年均径流量、产沙量和 TN、TP 负荷及其变化

Tab.5 Annual runoff, sediment yield, TN, TP and their changes in terraced planting scenario

控制情景 梯田种植	潮河流域				白河流域			
	年径流量/万 m ³	年均泥沙量/万 t	TN/t	TP/t	年径流量/万 m ³	年均泥沙量/万 t	TN/t	TP/t
S0	55 205.08	116.73	918.83	34.64	48 634.94	41.99	587.66	15.53
S1	54 902.64	115.44	866.70	30.62	48 438.50	41.54	582.63	15.40
S2	54 637.77	88.61	787.79	24.22	47 587.26	23.71	477.34	8.77
S3	54 290.60	86.48	818.81	23.05	47 400.16	23.41	473.38	8.65
变化率								
S1	- 0.55%	- 1.11%	- 5.67%	- 11.60%	- 0.40%	- 1.08%	- 0.86%	- 0.81%
S2	- 1.03%	- 24.09%	- 14.26%	- 30.07%	- 2.15%	- 43.53%	- 18.77%	- 43.51%
S3	- 1.66%	- 25.92%	- 10.89%	- 33.44%	- 2.54%	- 44.25%	- 19.45%	- 44.28%

由表6可知,等高耕作对于减少水土流失及总氮总磷负荷的效果非常好。以潮河为例,当坡度小于2%时(S4),等高种植对分别为0.56%,1.15%,5.74%和11.63%;当坡度大于2%时(S5),径流、泥沙、总氮、总磷的削减率分别为1.12%,24.33%,8.89%和22.87%;当对土壤侵蚀关键区全部实施等高种植时(S6),削减效果最好,削减率分别可达到1.67%,25.16%,10.79%和32.89%。

等高耕作和梯田种植情景都是在土壤侵蚀关键区进行设置的,对比二者对于产流量、产沙量和污染物负荷量的削减效果,等高耕作和梯田种植对平均径流量、产沙量和总氮负荷的效果接近,且都可以起到很好的水土保持效果,尤其是对于产沙量和总氮负荷的减少效果更为显著。根据有关研究^[26],等高种植成本要明显低于梯田种植,故流域采取等高种植更好。

表6 等高种植情景下年均径流量、产沙量和 TN、TP 负荷及其变化

Tab.6 Annual runoff, sediment yield, TN, TP and their changes in contour farming scenario

控制情景 梯田种植	潮河流域				白河流域			
	年径流量/万 m ³	年均泥沙量/万 t	TN/t	TP/t	年径流量/万 m ³	年均泥沙量/万 t	TN/t	TP/t
S0	55 205.08	116.738	918.835	34.640	48 634.94	41.995	587.659	15.529
S4	54 897.07	115.40	866.09	30.61	48 205.07	40.97	538.75	12.92
S5	54 585.73	88.33	837.11	26.72	47 525.13	22.31	464.71	8.14
S6	54 283.72	87.37	819.66	23.25	47 344.03	22.01	382.45	7.22
变化率								
S4	- 0.56%	- 1.15%	- 5.74%	- 11.63%	- 0.88%	- 2.44%	- 8.32%	- 16.82%
S5	- 1.12%	- 24.33%	- 8.89%	- 22.87%	- 2.28%	- 46.87%	- 20.92%	- 47.58%
S6	- 1.67%	- 25.16%	- 10.79%	- 32.89%	- 2.65%	- 47.60%	- 34.92%	- 53.49%

由表 7、8 可以看出,退耕还林还草对径流量、产沙量与总氮负荷的影响较大。全部还林还草对于产流、产沙、产污的削减效果要好于部分还林还草,这主要是由于全部还林还草后植被覆盖度更高。退耕还林总体对于氮磷污染物的削减作用优于退耕还草,这主要是因为林地相比于草地对污染物的截留作用更明显。关键区农田全部还林时(S9),潮河流域径流量、产沙量、总氮、总磷分别减少 1.88%, 48.09%, 44.30% 和 64.09%;白河流域对应为 1.37%, 58.39%, 37.80% 和 68.07%;关键区农田全部还草(S12)时,潮河流域四者对应较少减少 2.66%, 50.32%, 39.42% 和 56.77%;白河流域则为 2.03%, 57.79%, 26.42% 和 59.15%。

表 7 还林情景下年均径流量、产沙量和 TN、TP 负荷及其变化

Tab. 7 Annual runoff, sediment yield, TN, TP and their changes in the scenario of returning farmland to forests

控制情景 退耕还草	潮河流域				白河流域			
	年径流量/万 m ³	年均泥沙量/万 t	TN/t	TP/t	年径流量/万 m ³	年均泥沙量/万 t	TN/t	TP/t
S0	55 205.08	116.74	918.84	34.64	48 634.94	41.99	587.66	15.53
S7	55 001.56	105.63	885.45	29.12	48 705.43	30.89	554.27	13.60
S8	54 484.23	70.11	603.21	15.99	49 104.23	19.75	272.03	6.00
S9	54 166.80	60.60	511.76	12.30	49 299.47	17.47	365.53	4.96
变化率								
S7	- 0.37%	- 9.52%	- 3.63%	- 15.94%	0.14%	- 26.45%	- 5.68%	- 12.44%
S8	- 1.31%	- 39.94%	- 34.35%	- 53.84%	0.96%	- 52.96%	- 53.71%	- 61.34%
S9	- 1.88%	- 48.09%	- 44.30%	- 64.49%	1.37%	- 58.39%	- 37.80%	- 68.07%

表 8 还草情景下年均径流量、产沙量和 TN、TP 负荷及其变化

Tab. 8 Annual runoff, sediment yield, TN, TP and their changes in the scenario of returning farmland to grasslands

控制情景 退耕还草	潮河流域				白河流域			
	年径流量/万 m ³	年均泥沙量/万 t	TN/t	TP/t	年径流量/万 m ³	年均泥沙量/万 t	TN/t	TP/t
S0	55 205.08	116.74	918.84	34.64	48 634.94	41.99	587.66	15.53
S10	55 004.23	101.21	888.33	29.89	48 883.76	38.38	557.15	14.23
S11	53 998.77	67.78	675.88	17.79	49 511.45	19.58	344.70	8.99
S12	53 734.05	57.99	556.65	14.97	49 621.28	17.73	432.40	6.34
变化率								
S10	- 0.36%	- 13.30%	- 3.32%	- 13.71%	0.51%	- 8.61%	- 5.19%	- 8.37%
S11	- 2.19%	- 41.94%	- 26.44%	- 48.64%	1.80%	- 53.38%	- 41.34%	- 42.08%
S12	- 2.66%	- 50.32%	- 39.42%	- 56.77%	2.03%	- 57.79%	- 26.42%	- 59.15%

3 结论与讨论

通过 SWAT 对密云水库流域水量和水质变化的模拟,识别流域土壤侵蚀和污染物关键区,对不同管理措施的定量影响进行分析,得出以下结论:

(1) 径流、泥沙、营养物的模拟在率定期和验证期的 E_{ns} 和 R^2 均大于 0.6,表明 SWAT 模型的在研究区域水量-水质的模拟效果较好,且水量和泥沙模

拟效果优于总氮和总磷。坡度大于 2% 的农田进行退耕还林或还草的效果优于坡度小于 2% 的农田退耕还林或还草,主要因为关键区坡度大于 2% 的区域面积要大于坡度小于 2% 的区域面积。

许其功等^[27]认为退耕还林还草导致径流量减少主要有 2 方面原因:一是 CN 值的变化引起表面径流量变化,根据 SCS-CN 模型原理,CN 值越大,表面径流量越大;二是随草地或林地面积的增加,冠盖层截留量以及枯枝落叶层的容水量增大,从而提高了土壤持水量,减少了径流量。植被对地表的保护作用也得到了学者^[28]的认可,还林和还草措施,可以减少水分流失,以及降水等对地表的破坏,减少泥沙量,通过降低该负荷,可以减少对水域的污染。

拟效果优于总氮和总磷。

(2) 根据土壤侵蚀模数识别土壤侵蚀关键区,参照国家地表水环境质量标准识别总氮和总磷关键区。侵蚀度较大区域集中在密云水库中下游临近河道的区域;氮磷污染负荷关键区识别表明,潮河非点源污染状况较为严重,潮河和白河总氮流失超高风险区分别占总面积的 62.62% 和 43.09%;白河流域总磷均为低流失风险区,潮河流域总磷高流失风险

区占 17.81%, 故白河流域可不采用总磷控制措施, 潮河流域应在关键区采取总磷控制措施。

(3) 在土壤侵蚀关键区, 等高耕作和梯田种植对于产沙量和污染物的都有较好的去除效果。在总氮关键区, 全部还林还草对于产流、产沙、产污的削减效果要好于部分还林还草; 退耕还林对于非点源污染的削减率要高于退耕还草。

密云水库控制流域的主要污染来源于非点源污染, 推广等高种植、梯田种植、免耕、休耕等耕作方式, 加强农田管理, 控制农田径流量和产沙量, 可减少污染物流失。本文控制情景的效果评价仅从对于污染物的影响方面考虑, 尚未对社会、经济、技术等多方面因素综合考量, 结合生态补偿、民众意愿等建立完善的非点源污染控制情景指标体系, 仍需深入研究。

参考文献:

- [1] 黄金良, 洪华生, 张珞平. 基于 GIS 和模型的流域非点源污染控制区划 [J]. 环境科学研究, 2006, 19(04): 119-124. (HUANG Jinliang, HONG Huasheng, ZHANG Luoping. Control Divisions of agricultural nonpoint source pollution at watershed scale based on GIS and models [J], 2006, 19(04): 119-124. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.res.2006.04.121. huangjl.024
- [2] Drole A, Koncan J Z. Estimation of sources of total phosphorus in a river basin and assessment of alternatives for river pollution reduction [J]. Environment International, 2002, 28(5): 393-400. DOI: 10.1016/S01604120(02)000624
- [3] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions [J]. Journal of hydrology, 2005, 312(1): 207-222. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.017
- [4] Ashok M, Rajendra S, Vijay P S. Evaluation of nonpoint source N and P loads in a small mixed land use land cover watershed [J]. Journal of Water Resource and Protection, 2010, 2(4): 362-372. DOI: 10.4236/jwarp.2010.24042
- [5] Mishra A, Kar S. Modeling hydrologic processes and NPS pollution in a small watershed in subhumid subtropics using SWAT [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(3): 445-454. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943.5584.0000458
- [6] Epelde A M, Cerro I, Sanchez P rez J M, et al. Application of the SWAT model to assess the impact of changes in agricultural management practices on water quality [J]. Hydrological Sciences Journal, 2015, 60(5): 825-843. DOI: 10.1080/02626667.2014.967692
- [7] 张建永. 基于 SWAT 模型的官厅水库流域非点源污染模拟与评价 [D]. 北京: 北京师范大学, 2002. (ZHANG Jianyong. SWAT-based simulation on nonpoint source pollution in the watershed of Guanting Reservoir [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2002. (in Chinese))
- [8] 秦耀民, 胥彦玲, 李怀恩. 基 SWAT 模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 440-448. (QIN Yaomin, XU Yarrling, LI Huaen. SWAT model of non point source pollution under different land use scenarios in the Heihe river basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(2): 440-448. (in Chinese)) DOI: 10.13671/j.hjkx.xb.2009.02.026
- [9] 刘博, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的北京沙河水库流域非点源污染模拟 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 52-61. (LIU Bo, XU Zongxue. Simulation of nonpoint source pollution in the沙河 Reservoir catchment in Beijing by using SWAT model [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 52-61. (in Chinese)) DOI: 1002-6819(2011)-05-0052-10
- [10] 周为峰, 吴炳方. 基于遥感和 GIS 的密云水库上游土壤侵蚀定量估算 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 46-50. (ZHOU Weifeng, WU Bingfang. Soil erosion estimation of the upriver areas of Miyun Reservoir located on the Chaobai River using remote sensing and GIS [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 46-50. (in Chinese)) DOI: 1002-6819(2005)10-0046-05
- [11] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 290-298. (PANG Jingpeng, LIU Changming, XU Zongxue. Impact of land use change on runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(3): 290-298. (in Chinese))
- [12] 苏保林, 王建平, 贾海峰, 等. 密云水库流域非点源污染识别 [J]. 清华大学学报, 2006, 46(3): 360-365. (SU Baolin, WANG Jianping, JIA Haifeng, et al. Identification of nonpoint source pollution in the Miyun Reservoir watershed [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2006, 46(3): 360-365. (in Chinese)) DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2006.03.013
- [13] 王晓燕, 秦福来, 欧洋, 薛亦峰. 基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟——以密云水库北部流域为例 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(03): 1098-1105. (WANG Xiaoyan, QIN Fula, OU Yang, XUE Yifeng. SWAT-Based Simulation on Nonpoint Source Pollution in the Northern Watershed of Miyun Reservoir [J]. Journal of Agro Environment Science, 2008, 27(03): 1098-1105. (in Chinese)) DOI: 1672-2043(2008)03-1098-08
- [14] 李明涛. 密云水库流域土地利用与气候变化对非点源氮、磷污染的影响研究 [D]. 首都师范大学, 2014. (LI Mingtao. Impacts of land use and climate changes on nonpoint source nitrogen and phosphorus pollution in the Miyun reservoir watershed [D]. Capital Normal University, 2014. (in Chinese))
- [15] Xu Z X, Pang J P, Liu C M, et al. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model [J]. Hydrological processes, 2009, 23(25): 3619-3630. DOI: 10.1002/hyp.7475
- [16] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(06): 88-93. (PANG

- Jing peng, LIU Chang-ming, XU Zong-xue. Streamflow and Soil Erosion Simulation Based on SWAT Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(06): 88-93. (in Chinese): DOI: 1005-3409(2007)06-0088-06
- [17] 张平, 刘云慧, 肖禾, 宇振荣. 基于 SWAT 模型的北京密云水库沿湖区氮磷流失风险分区[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(03): 53-59. (ZHANG Ping, LIU Yunhui, XIAO He, YU Zherong. Identification of the risk area of nitrogen and phosphorus loss at lakeshore of Miyun Reservoir by using SWAT model [J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(03): 53-59. (in Chinese) DOI: 1007-4333(2011)03-0053-07
- [18] 夏军, 李璐, 严茂超, 等. 气候变化对密云水库水资源的影响及其适应性管理对策[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(6): 319-323. (XIA Jun, LI Lu, Yan Mao-chao, et al. Impacts of climate change on water resource of Miyun Reservoir and adaptation managements [J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4(6): 319-323. (in Chinese) DOI: 1673-1719 (2008) 06-0319-05
- [19] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- [20] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual [M]. Temple: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 2002
- [21] Gassman P, Reyes M, Green C H, et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1211-1250. DOI: 10.13031/2013.23637 • Source: RePEc
- [22] 庞靖鹏. 非点源污染分布式模拟—以密云水库水源地保护为例[D]. 北京师范大学, 2007. (PANG Jing-peng. The research of water quality protection on water source areas based on the distributed nonpoint pollution model [D]. Beijing normal university, 2007. (in Chinese))
- [23] SL 190-2007. 土壤侵蚀分类分级标准[S]. (SL 190-2007. Standards for classification and gradation of soil erosion[S]. (in Chinese))
- [24] GB 3838-2002. 地表水环境质量标准[S]. (GB 3838-2002. Environmental quality standards for surface water[S]. (in Chinese))
- [25] 张微微, 孙丹峰, 李红, 周连第. 北京密云水库流域 1980-2003 年地表水质评价[J]. 环境科学, 2010, 31(07): 1483-1491. (ZHANG Wei-wei, SUN Dan-feng, LI Hong, ZHOU Liang-di. Surface water quality assessment in Miyun Reservoir watershed, Beijing in the period 1980-2003 [J]. Environmental Science, 2010, 31(07): 1483-1491. (in Chinese) DOI: 10.13227/j.issn1001-7498.2010.07.1483-09
- [26] 徐华山. 强烈人类活动影响流域 TMDL 关键技术研究—以漳卫南运河流域为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2012. (XU Huashan. Key technologies study on total maximum daily load in river basin strongly interfered by human activities A case study in the Zhangweinan River Basin [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2012. (in Chinese))
- [27] 许其功, 席北斗, 于会彬, 等. 土地管理措施对营养物质排放的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3243-3248. (XU Qigong, Xi Beidou, Yu Hui bin, et al. Effects of land management measures on nutrients emission [J]. Environmental Science, 2009, 30(11): 3243-3248. (in Chinese): DOI: 10.13227/j.issn1001-7498.2009.11.3243-06
- [28] 吴钦孝, 赵鸿雁, 汪有科. 黄土高原油松林地产生流沙及其过程研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 151-157. (WU Qinxiao, ZHAO Hongyan, WANG Youke. Flow production and sediment production and their processes in Chinese pine woodlands in the loess plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(2): 151-157. (in Chinese))