

密云水库流域非点源污染识别

苏保林¹, 王建平¹, 贾海峰¹, 程声通¹, 杨忠山², 武佃卫², 孙峰²

(1 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2 北京市水文总站, 北京 100038)

摘要: 采用经过参数率定和模型验证的密云水库流域非点源 SWAT 模型系统, 对非点源污染时空变化、负荷关键区进行了识别, 并针对不同的流域管理情景进行了情景分析。丰水年和平水年非点源污染流失主要发生在汛期, 在枯水年时汛期流失比例有所降低。农牧业活动发达的区域是非点源污染流失的关键区域, 森林和草地区域非点源污染流失则较低。削减畜禽养殖排放污染物和减少化肥的使用, 能有效地降低潮河流域 TN、TP 入库负荷, 并能一定程度上削减白河流域 TP 入库负荷, 但对 TN 入库负荷削减较少。削减大阁镇、赤城县城生活点源入河量对降低潮、白河 TN 入库负荷影响较小, 但对降低 TP 入库负荷影响较大。

关键词: 非点源; 时空变化; 负荷关键区; 情景分析

中图分类号: X 506

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2006)03-0360-06

Identification of non-point source pollution in the Miyun Reservoir watershed

SU Baolin¹, WANG Jianping¹, JIA Haifeng¹,
CHENG Shengtong¹, YANG Zhongshan², WU Dianwei², SUN Feng²

(1 Department of Environmental Science and Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 Hydrological Station of Beijing, Beijing 100038, China)

Abstract A non-point source (NPS) pollution modeling system, the soil water and assessment tools for the Miyun Reservoir watershed, was used to identify temporal and spatial variations of NPS pollution in the watershed and to evaluate three pollution control scenarios. Soil and nutrient losses predominantly occurs during the flooding season, with nutrient losses during the flooding season reduced in dry hydrological years. Developed areas of agricultural and livestock production are key areas for NPS loadings, while areas covered by forests and grassland contributing less to the NPS loadings. Cutting livestock discharges and reducing fertilizer applications can efficiently reduce total nitrogen and total phosphorous loadings in the Chao River sub-watershed and can partially reduce total phosphorous loadings in the Bai River sub-watershed, but will have little effect in the total nitrogen loadings. Cutting domestic point sources in the towns of Dage and Chicheng will reduce total phosphorous loadings, but will have less effect on total nitrogen loadings.

Key words: non-point source; temporal and spatial variation; nitrogen and phosphorous loadings; scenario analysis

现有关于密云水库流域的非点源污染研究^[1-3]主要集中在对库区周边小流域和密云水库北京市境内流域范围, 没有从全流域范围上识别和分析流域上游地区非点源污染流失的特征变化。而非点源模型系统^[4, 5]的应用主要包括: 模拟非点源污染负荷的时空变化, 为下游水库富营养化研究和水库水质模拟提供可靠的负荷输入数据; 揭示流域内非点源负荷空间分布特征, 识别非点源流失负荷关键区, 为流域污染控制和水库水质管理提供科学依据; 同时还可以借助情景分析手段, 探求流域非点源污染控制的措施和方案。本文利用相关研究建立的密云水库流域非点源模型系统^[6], 模拟重现 1997—2002 年密云水库潮、白河流域入库非点源污染负荷变化并就上述内容进行分析和讨论, 为密云水库流域非点源污染防治提供科学的依据。

1 非点源污染时空变化规律

1.1 时间变化

非点源污染的发生和输送与年内降雨的分布及地表径流产生量有直接的关系。降雨量增加, 地表径流产生量多, 则相应地水土流失、氮和磷流失量也增大。通过对流域内 39 个雨量站 1997—2002 年降雨数据的统计分析, 密云水库流域年平均降雨在 345 ~ 610 mm 之间, 且大部分降雨集中在汛期(6~ 9 月), 占 68% ~ 80% (表 1)。由于非点源污染物流失一般发生在降雨和地表径流产生期间, 因此汛期入库的污染负荷也将占有较大比例。

月模拟结果表明, 除枯水年外, 径流主要产生在汛期(占 58% ~ 78%)。汛期泥沙流失除 1999 年(枯水年)约占 58% 外, 其他年份汛期泥沙流失均占到

收稿日期: 2005-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50209007)

作者简介: 苏保林(1965-), 男(汉), 云南, 讲师。

E-mail: sb1@tsinghua.edu.cn

93% 以上。总氮流失负荷枯水年份(1999 年和 2002 年)汛期约占 27%~ 36%, 平水年和丰水年汛期占 51%~ 79%; 总磷负荷枯水年汛期约占 23%~ 35% 左右, 而平水年和丰水年汛期占 54%~ 84%。由此可见, 在丰水年(1998 年)和平水年时, 流域内非点源入库负荷大部分均发生在汛期, 其中丰水年汛期所占比例最大。

潮、白河径流、泥沙、总氮和总磷入库负荷贡献统计结果表明(表 2), 虽然潮河流域仅占整个流域面积约 40%, 总氮和总磷入库负荷在平水年和丰水

年却占整个流域入库负荷的 60% 以上(总氮占 60%~ 76%, 总磷占 67%~ 78%)。泥沙的流失量除 1999 年(枯水年)潮河流域贡献较小外(23.2%), 其他年份潮河流域贡献在 69%~ 96% 之间。由于潮河流域农牧业生产活动比白河流域发达, 而且白河流域中游和上游的白河堡、云州水库对各自上游污染物起到了截留作用, 使得白河流域非点源流失对入库负荷的贡献要远小于潮河流域。因此, 潮河流域是密云水库非点源污染控制中优先要考虑的支流流域。

表 1 年度降雨、径流实测数据和模拟的密云水库入库污染负荷及汛期所占比例

年度	水平年	降雨		径流		泥沙		总氮		总磷	
		降雨量	汛期所占	径流量	汛期所占	泥沙流量	汛期所占	负荷	汛期所占	负荷	汛期所占
		mm·年 ⁻¹	比例/%	万 m ³ ·年 ⁻¹	比例/%	万 t·年 ⁻¹	比例/%	t·a ⁻¹	比例/%	t·a ⁻¹	比例/%
1997	平水年	395	71.1	68 387	58.6	396.18	99.5	1 719.72	51.6	30.36	53.9
1998	丰水年	610	75.7	134 333	78.1	520.20	99.4	3 755.08	79.1	68.34	84.2
1999	枯水年	365	69.7	34 610	34.3	17.86	57.7	999.53	36.3	20.48	34.9
2000	平水年	430	68.0	23 202	67.1	61.38	99.5	633.66	64.3	12.58	57.7
2001	平水年	440	80.3	65 169	68.1	151.08	99.1	1 833.61	62.9	36.26	63.5
2002	枯水年	345	76.2	20 656	25.8	2.52	93.6	873.96	26.6	25.51	23.3

表 2 潮、白河入库污染负荷贡献比例(%)

年度	径流		泥沙		总氮		总磷	
	潮河	白河	潮河	白河	潮河	白河	潮河	白河
1997	71.9	28.1	88.9	11.1	76.1	23.9	77.4	22.6
1998	46.0	54.0	69.2	30.8	68.6	31.4	69.4	30.6
1999	57.6	42.4	23.2	76.8	63.4	36.6	64.8	35.2
2000	46.9	53.1	87.2	12.8	68.9	31.1	78.2	21.8
2001	50.9	49.1	95.7	4.3	60.1	39.9	67.0	33.0
2002	61.9	38.1	73.0	27.0	51.4	48.6	45.7	54.3

1.2 空间变化

非点源污染负荷的空间变化与土地利用、植被覆盖以及降雨量/降雨强度的空间分布有密切的关系。在模拟期间(1997—2002 年), 降雨的年际分布差异是明显的, 包括了 1 个丰水年(1998 年)和 2 个枯水年(1999 年和 2002 年)和 3 个平水年(1997、2000 和 2001 年)(表 1)。以下主要以丰水年(1998 年)为例来分析流域内非点源污染流失负荷的空间变化规律。

1998 年的降雨主要分布于潮河流域及白河流域的汤河子流域和白河流域下游, 白河流域中的黑

河流域及下堡站以上集水区域降雨量均低于 400mm(图 1a)。在上述区域因降雨所造成的水土流失也有所不同。在降雨较多的潮河流域及白河流域的汤河子流域和白河下游等区域水土流失比较严重, 在其他区域水土流失则较轻(图 1b)。非点源污染流失不完全取决于降雨分布, 还与土地利用和植被覆盖有关。对比土地利用分布(图 2a)发现, 在降雨量大但植被覆盖较好的区域(如白河流域下游区域)非点源污染流失并不严重; 在降雨量大且土地利用类型为耕地的区域(如潮河流域上游大阁镇周边区域), 非点源污染流失则较为严重(图 1c 和 d)。

2 非点源污染负荷关键区识别

非点源污染负荷关键区是指在考虑降雨空间分布均匀的条件下, 由非点源模型识别出来的那些在整个流域范围内污染物流失潜力较大的区域。本节分别以丰水年(1998 年)、枯水年(1999 年)和平水年(2000 年)流域平均降雨量水平为 SWAT 模型的降雨输入(即以上述各典型年流域平均降雨替代各雨量站降雨数据), 在保持模型参数不变的前提下通过模型模拟来确定非点源污染关键区。

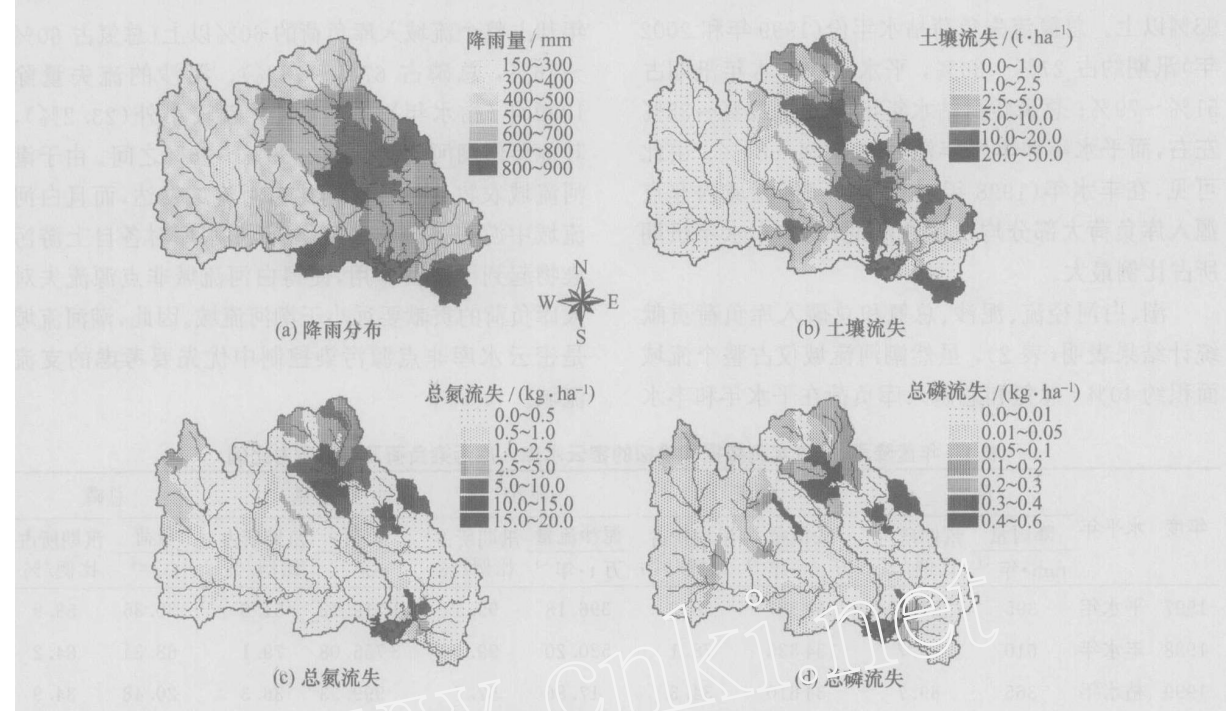


图1 1998年降雨和非点源污染流失空间分布比较

由于考虑到前期降雨和土湿条件对所设计的降雨水平年模拟的影响,在模拟中进行了连续6a的模拟(1997—2002年)。其中,1997—2001年的所有39个雨量站的降雨输入分别采用对应年度实际的流域平均日降雨,而第6a降雨输入分别采用不同降雨水平年(丰水年1998年、枯水年1999年和平水年2000年)的流域平均日降雨数据(即降雨在空间上是均匀分布的),从而可得到不同降雨水平年非点源污染流失模拟结果。该模拟结果反映了由于地形(坡度)、土地利用、土壤类型、以及降雨水平(丰、平、枯水年及其年内分布)的差异所造成的对非点源污染流失分布的影响。

为便于比较不同降雨水平年非点源流失的水平,须对各个子流域不同水平年模拟结果进行归一化处理。计算公式为

$$NI = S / S_{\max}, \tag{1}$$

式中:NI为非点源污染流失归一化指数,S为各子流域非点源污染流失模拟值, $S_{\max}$ 为所有子流域非点源污染流失模拟值的最大值。该归一化指数反映了非点源污染在不同降雨水平条件下的流失水平。

根据NI,可以以子流域为单元把非点源污染流失水平进行分级(表3)。

表3 非点源污染流失分级

分级	归一化指数NI	流失等级
1	0.0~0.2	轻微流失
2	0.2~0.4	一般流失
3	0.4~0.6	中度流失
4	0.6~0.8	较重流失
5	0.8~1.0	严重流失

2.1 土壤流失关键区

根据不同降雨水平年的模拟结果,可以对丰水年、平水年和枯水年条件下土壤流失区域进行分级(图2)。潮河流域中度以上土壤流失区域主要分布在水库周边各小流域的下游地区,以及潮河流域的上游地区。白河流域中度以上水土流失区域的分布虽然在丰、平和枯水年有所差异,但也主要是分布在白河赤城县境内的上游地区。对比流域土地利用分布(图2a)可见,这些区域内的土地利用类型主要为耕地,这说明,土壤流失较重的区域主要来源于农用耕地,而森林覆盖较好的区域土壤流失较轻。

2.2 总氮、总磷流失关键区

不同设计降雨水平年总氮、总磷流失水平分级结果见图3和图4。潮河流域内中度以上总氮、总磷流失区域与土壤流失分布是一致的,即也是主要分布在潮河下游水库周边各小流域的下游地区,以及

潮流流域的上游地区。白河流域内中度以上总氮、总氮流失区域分布虽然在丰、平和枯水年也有所差异,

但主要也是分布在白河赤城县境内的上游地区。这一分布特征同样与土地利用类型的分布密切相关。

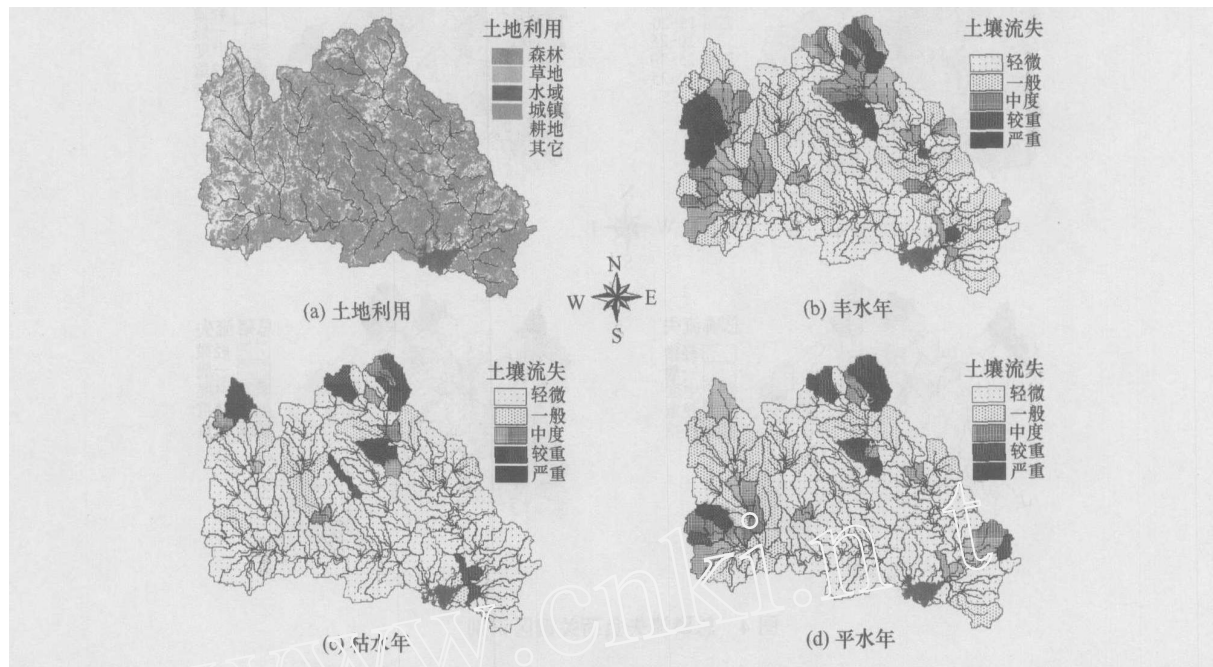


图2 土壤流失负荷关键区识别

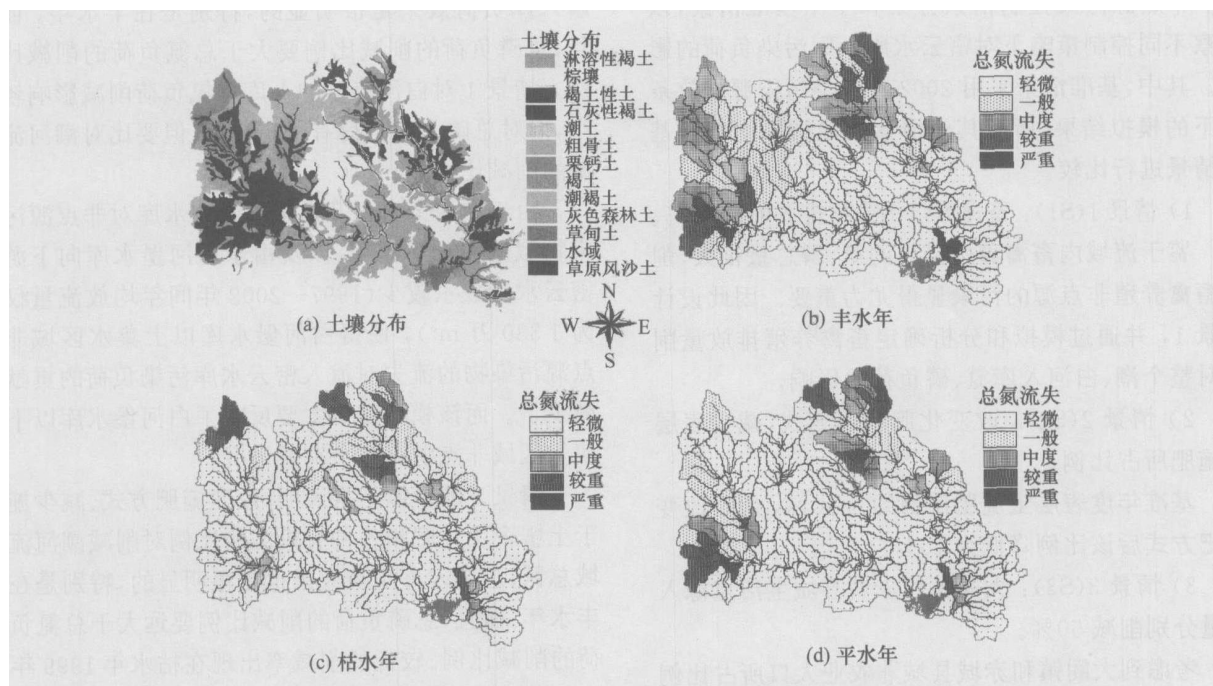


图3 总氮流失负荷关键区识别

3 非点源控制情景模拟分析

根据密云水库流域非点源和点源污染特征,结合流域内经济布局,设计不同的非点源污染控制情景,利用非点源模型对各种情景设计方案进行模拟和分析,得出不同非点源控制方案和措施对入库非

点源负荷的影响, 为水库水质模型提供负荷输入和流域非点源控制规划提供科学的决策依据。

3.1 情景设计

由污染源调查和估算结果可知,流域内的氮、磷污染主要是来源于畜禽养殖、农用化肥的流失和乡

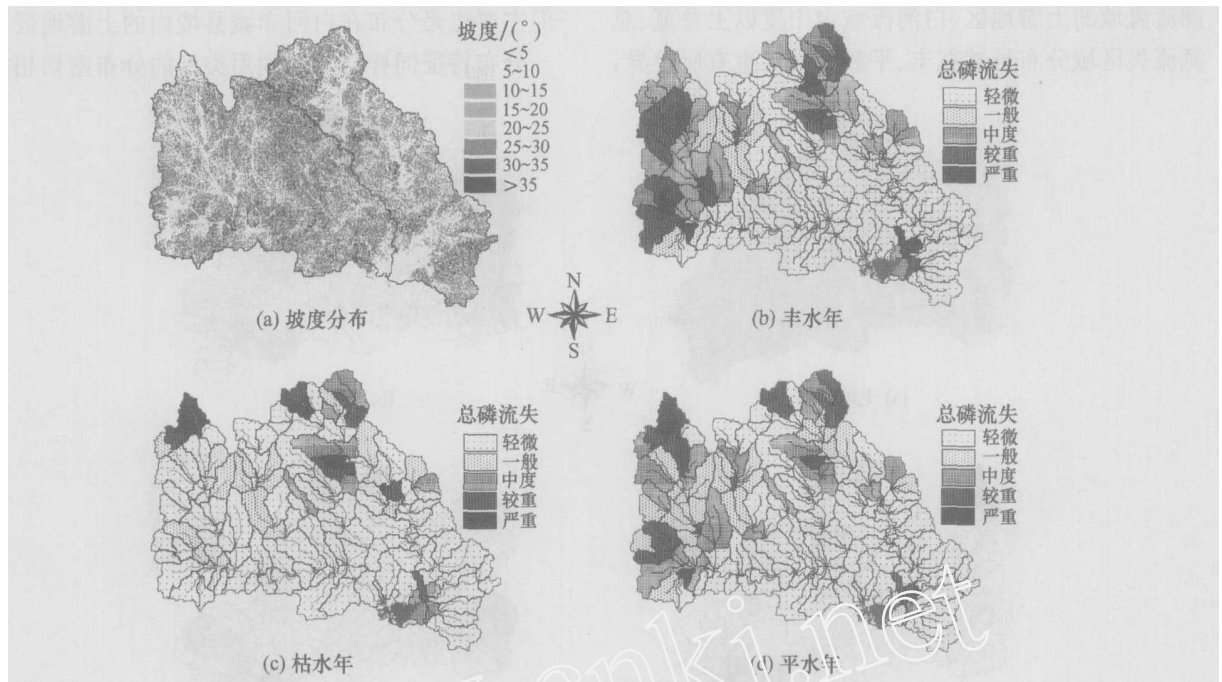


图4 总磷流失负荷关键区识别

镇生活污染源排放。针对这一特点,本研究设计以下3个非点源污染控制情景方案和1个基准情景,以考察不同控制策略下对密云水库入库污染负荷的影响。其中,基准情景采用2002年各类污染源排放条件下的模拟结果,所有其他情景模拟结果均与该基准情景进行比较。

1) 情景1(S1): 畜禽养殖污染物排放削减50%。

鉴于流域内畜禽养殖排放的氮、磷总量很大,削减畜禽养殖非点源的污染显得尤为重要。因此设计情景1,并通过模拟和分析确定畜禽养殖排放量削减对整个潮、白河入库氮、磷负荷的影响。

2) 情景2(S2): 改变化肥施用方式,减少表层土施肥所占比例。

基准年度表层土施肥比例约为50%,假设改变施肥方式后该比例降低为10%。

3) 情景3(S3): 大阁镇和赤城县城生活点源入河量分别削减50%。

考虑到大阁镇和赤城县城非农业人口所占比例较高(分别为50.4%和44.2%),其排放的生活污水会直接进入河道系统,对污染的贡献率较高。因此,设计此情景以考察这两大城镇生活污水对密云水库入库负荷的影响。

3.2 情景模拟和分析

不同情景模拟的潮、白河流域入库污染负荷削减情况参见图5和表4。由情景1模拟结果可见,削

减畜禽养殖污染物排放量对削减潮河流域总氮、总磷入库负荷效果是很明显的,特别是在丰水年。而且,总磷负荷的削减比例要大于总氮负荷的削减比例。情景1对白河流域的入库总氮负荷削减影响较小,但对总磷入库负荷有一定影响,但要比对潮河流域的削减比例低。

由于白河堡水库及上游的云州水库对非点源污染物截留和降解作用,以及由于白河堡水库向下游密云水库放水较少(1997—2002年间年均放流量仅为1330万 m^3),使得白河堡水库以上集水区域非点源污染物的流失对流入密云水库污染负荷的贡献减少了。而该模拟结果主要反映了白河堡水库以下集水区域非点源流失负荷的情况。

情景2的模拟结果表明,改变施肥方式,减少施于土壤表层化肥和各种有机肥的比例对削减潮河流域总氮、总磷入库负荷效果也是很明显的,特别是在丰水年。而且,总磷负荷的削减比例要远大于总氮负荷的削减比例。较低的削减率出现在枯水年1999年和2002年,而最高的削减率出现在丰水年1998年。这是由于在丰水年有较多的地表径流产生,导致了较高的水土流失和总氮、总磷的流失,在枯水年则相反(图5)。情景2对白河流域的入库总氮负荷削减影响较小,但对总磷入库负荷有一定影响,特别是在丰水年份,但总体要比潮河流域的削减比例低得多。

情景3的模拟结果表明,减少潮河流域上游大阁镇生活点源入河量对削减潮河流域总氮、总磷入

库负荷效果是直接而明显的。因为进入河道的总氮、总磷在向下游迁移的过程中除了会随泥沙沉降而有所减少外, 其余的部分大都会随水流一直输送到水库入口。因而减少直接入河的污染物质, 将直接降低下游的入库负荷。情景 3 对总磷负荷的削减比例要

远大于总氮负荷的削减比例。

情景 3 对白河流域的入库总氮、总磷负荷削减影响较小。降低赤城县城生活点源入河量对白河流域入库负荷的削减要比降低大阁镇生活点源入河量对潮河流域入库负荷的削减效果差。

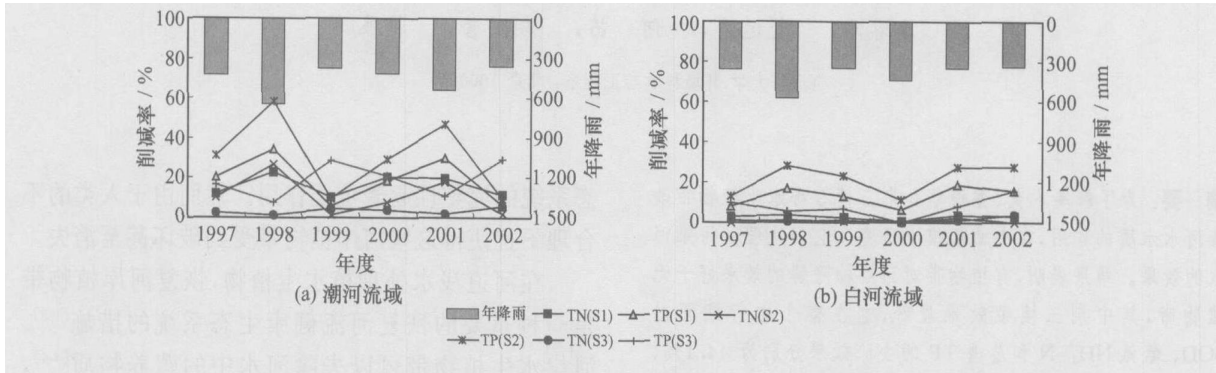


图 5 情景模拟结果

表 4 氮、磷入库负荷削减比例(%)

情景	潮河流域		白河流域	
	TN	TP	TN	TP
S1	9.8~23.0	5.7~34.4	0.8~3.9	6.3~19.0
S2	1.1~26.7	9.2~58.4	0.02~2.3	11.5~28.0
S3	1.2~5.7	7.7~29.1	0.0~3.8	0.05~15.9

4 结 论

密云水库流域土壤流失绝大部分发生在汛期, 总氮和总磷污染负荷也主要发生在汛期。潮河流域对密云水库的污染负荷贡献比白河流域大得多, 是密云水库非点源污染控制中优先要考虑的子流域。

虽然不同降雨水平年模拟结果稍有差异, 但非点源流失关键区域的分布主要位于农牧业活动发达(即耕地较多)的区域, 而森林和草地大量分布覆盖的区域非点源污染流失则较轻。

改变农业化肥施肥方式, 减少施用于土壤表层的化肥量, 可以有效地减少因土壤流失造成的营物流失, 特别是降低磷的流失; 另外, 削减畜禽养殖污染物同样能有效地减少入库的营养负荷。削减大阁、赤城县城生活点源直接入河量对减少潮、白河流域总氮入库负荷影响不大, 但对降低总磷入库负荷影响也较大, 特别是对于潮河流域。这说明, 虽然流域上游大部分工业点源得到了有效控制, 但生活点源污染的问题应该得到重视。

参考文献 (References)

[1] 王晓燕, 王一响, 蔡新广, 等. 北京密云水库流域非点源污染现状研究 [J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 1~3
WANG Xiaoyan, WANG Yixun, CAI Xinguang, et al. Investigation of non-point source pollution in the Miyun Reservoir watershed of Beijing, [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(4): 1~3 (in Chinese)

[2] 王晓燕, 郭芳, 蔡新广, 等. 密云水库潮白河流域非点源污染负荷 [J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(1): 31~33
WANG Xiaoyan, GUO Fang, CAI Xinguang, et al. Non-point source pollution loading of the Miyun Reservoir watershed, Beijing [J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2003, 16(1): 31~33 (in Chinese)

[3] 王晓燕, 王一响, 王晓峰, 等. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律 [J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 30~33
WANG Xiaoyan, WANG Yixun, WANG Xiaofeng, et al. The character of nutrient loss and land use in a small watershed of Miyun Reservoir [J]. Research of Envir Sci, 2003, 16(1): 30~33 (in Chinese)

[4] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (Version 2000) [R]. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas TWRI Report TR-192, 2001.

[5] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool User's Manual (Version 2000) [Z]. Blackland Research Center, Agricultural Research Service, Texas, USA, 2001.

[6] 苏保林, 王建平, 贾海峰, 等. 密云水库流域非点源模型系统 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(3): 355~359
SU Baolin, WANG Jianping, JIA Haifeng, et al. Non-point source modeling system of the Miyun Reservoir watershed [J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2006, 46(3): 355~359 (in Chinese)