

# 北京市不同治理区水土流失的环境效应分析

和继军<sup>1,2,3</sup>, 曹温庆<sup>1</sup>, 蔡强国<sup>3</sup>

(1. 首都师范大学 初等教育学院, 北京 100048; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100; 3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘 要:** 降雨、地貌特征、植被覆盖是影响区域水土流失发生强度的主要因素。研究表明, 由于重点预防保护区植被覆盖度高, 受人类活动影响小, 其土壤流失强度受降雨年际变化的影响程度较小, 而重点治理区和重点监督区受其影响明显; 对于径流强度, 重点保护区和重点监督区随降雨年际间变化较大, 重点治理区相对较为稳定, 主要是由于该区坡面大量工程措施对径流的拦蓄能力加强。径流及泥沙是土壤污染物流失的主要动力和载体, 水土流失的强度直接影响到污染物的流失强度。该研究中总磷、总氮及  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的流失强度与径流及土壤流失强度的变化趋势基本一致, 且重点预防保护区 > 重点监督区 > 重点治理区。

**关键词:** 水土流失; 环境效应; 土壤流失强度; 土地利用

中图分类号: S157; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0035-05

## Study on Environmental Effect of Soil and Water Erosion in Different Control Areas of Beijing City

HE Jì-jūn<sup>1,2,3</sup>, CAO Wēn-qīng<sup>1</sup>, CAI Qiāng-guó<sup>3</sup>

(1. Capital Normal University, Elementary Educational College, Beijing 100048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Rainfall, morphologic feature and vegetational cover are the main factors affecting regional soil erosion. The results showed the rainfall between years had a less impact on soil erosion intensity in key protection region, mainly due to higher vegetation coverage and less human activities. However, soil erosion between key control region and monitoring region was largely dominated by the rainfall, and the soil erosion intensity of the two regions is much higher than the key protection region. For the protection area and key monitoring area, there were great changes about the annual runoff intensity between years, and the annual runoff intensity between years was relatively more stable in the emphasis control area, this is because a large number of engineering measures on the slope could enhance the role of control runoff. And the same time, the runoff and sediment is the main power and carrier of soil pollutants, the soil loss intensity directly affects the pollutant loss intensity. The study indicated that the loss intensity of total phosphorus, total nitrogen and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  had the same trend with the runoff and soil loss intensity between years, and the three regions were in order of key protection region > key monitoring region > emphasis control region.

**Key words:** soil and water erosion; environmental effect; soil loss intensity; land use

收稿日期: 2010-04-10

资助项目: 973 国家重点基础研究发展计划资助(2007CB407207); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金(10501-251)

作者简介: 和继军(1979-), 男, 河北邢台人, 博士, 主要从事土壤侵蚀、水土保持、流域侵蚀产沙模拟等方面研究。E-mail: hejiun\_200018@163.com

通信作者: 蔡强国(1946-), 男, 湖北省武汉市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀、水土保持、流域侵蚀产沙模拟和 GIS 应用等方面研究。E-mail: caiqg@igs.nrr.ac.cn

人类活动是影响区域水土流失的重要因素,其中人类主要通过改变土地利用结构及地表覆盖情况而直接或间接对水土流失的发生强度产生影响。土地利用结构的变化将导致地表植被覆盖度的增加或减少,从而产生对土壤侵蚀发生强度的作用。在一些经济发达地区,经济发展,城市扩张,使得耕地面积持续减少,山区陡坡开荒现象严重,导致大量森林植被遭到破坏,植被覆盖度降低,生态系统调节能力降低,由此引发的以水土流失为主的生态问题日益加重。

北京市作为中国经济最为发达和人口密度最为稠密的地区之一,水土资源异常紧张。其中人均水资源占有量为  $350\text{ m}^3$ ,不足世界人均水资源量的  $1/25$  和全国人均水资源量的  $1/6^{[1]}$ ,加之水土流失引起的地表水体的污染<sup>[2-3]</sup>,使得北京市水资源形势更加紧张。针对上述问题,北京市提出了以水资源保护为重点的水土流失综合治理模式,即根据地形、地表水体的范围及人类活动等特点,从区域尺度依次分为重点预防保护区、重点监督区和重点治理区进行分区治理,以实现生态环境的明显改善及水资源的可持续利用。因此,本文旨在研究不同治理区水土流失的综合治理及其环境效应,并对治理区之间的差异性及主要影响因素进行分析,以期为北方土石山区类似区的治理提供一定的理论参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

北京市位于北方土石山区下游,地处山地与平原的过渡地带,东北、北、西三面群山环绕,东南部是平缓地向渤海倾斜的平原,山地与平原之间过渡急剧,界线清晰。其中,山区面积  $10\,418\text{ km}^2$ ,占全市面积的  $62\%$ ,多为石质山区,坡度在  $25^\circ$  以上的陡坡面积占山区面积的  $46.65\%$ ,其中大于  $35^\circ$  的面积占山区面积的  $17.43\%$ ,高山至丘陵的地形变化急骤,落差大,河谷纵坡大;同时北京地区年降雨量的空间分布,季节分配极不均匀,全年  $75\% \sim 80\%$  以上的降雨集中在 6–9 月,因此,在特定地貌地形特征、降雨特征以及山区森林植被屡遭人为破坏的影响下,土壤蓄水能力降低,水土流失严重,至 2001 年,已综合治理水土流失面积  $2\,551\text{ km}^2$ ,全市年均土壤侵蚀模数  $1\,600\text{ t/km}^2$ ,年侵蚀量  $864.55\text{ 万 t}^{[1]}$ 。

北京市山区现有 10 个径流场,106 个径流小区,14 个小流域沟道控制站,分别分布在北京市北部山区和西部山区。其中北部山区 8 个径流场,分别位于潮白河流域、温榆河流域、妫水河流域和蓟云河流域;西部山区 3 个径流场,分别位于永定河流域和拒马河

流域。14 个小流域沟道控制站分别位于北部山区和西部山区,其中,北部山区 9 个小流域沟道控制断面,西部山区 5 个。

1.2 数据来源

该研究中所用的降雨、径流、泥沙及污染物数据主要来自于 2001–2006 年北京山区水土流失监测站和北京市水土保持公报,部分降雨数据来自于北京市及周边气象站和已发表的学术论文,其他相关数据来自北京市各个区县志。

1.3 水土流失不同治理区划分

北京市在水土流失综合治理实施和监测过程中,首先根据不同地区地貌特征、植被状况、社会经济特点,并结合北京市土壤侵蚀强度遥感调查的基础上,依次把整个治理区划分为重点预防保护区、重点监督区和重点治理区三个区域,并根据不同防治区的实际情况采用相应合适的水土保持措施,进行分区治理。目前,北京市水土流失重点防治区的总面积  $16\,807\text{ km}^2$ ,其中重点预防保护区为  $9\,549\text{ km}^2$ ,重点监督区为  $2\,862\text{ km}^2$ ,重点治理区为  $4\,396\text{ km}^2$ (表 1);北京市土壤侵蚀遥感调查结果显示,目前北京市的土壤侵蚀强度基本在中度侵蚀强度以下,侵蚀总面积为  $4\,089\text{ km}^2$ ,与北京市水土流失重点治理区的面积一致,此区是人类活动最频繁的地区,是治理的重中之重。

表 1 北京市水土流失重点防治区划分面积统计 $\text{km}^2$				
县区名称	重点预防保护区	重点监督区	重点治理区	区县面积
城近郊	724	601	45	1370
门头沟	400	117	814	1331
房山	739	530	598	1867
昌平	928	253	249	1430
顺义	911	50	19	980
通县	862	8	0	870
大兴	989	23	0	1012
平谷	451	294	330	1075
怀柔	1604	392	561	2557
密云	957	341	1037	2335
延庆	983	253	744	1980
合计	9549	2862	4396	16807

(资料来源:北京市 2001 年水土保持公报)

重点预防保护区主要分布在远山和深山区或地势平坦的平原地区,水土流失较轻,林草覆盖度较大,但存在潜在水土流失危险区域,采取的措施是重点保护好现有植被和水利水保设施,防止乱砍滥伐、陡坡开荒和生产建设挖砂采石堵塞河系水网等人为造成水土流失的发生,同时对局部地区做好土地复垦、植被恢复以及水资源保护;重点监督区主要分布在人口集中的城市中心区和村镇区,此区资源开发和基本建设活动较集中和频繁,原始地貌损坏程度较大,易造

成严重的水土流失,采用的主要措施是加强水土保持方案管理和水土保持监督执法工作;重点治理区主要分布在土地利用以坡耕地为主的山区,是水土流失发生的主要策源地,对当地和下游的水土保持环境危害较大,主要通过合理配置水土保持工程措施和生物措施,有计划地开展以小流域为单元的水土保持生态环境建设。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同治理区水土流失效应分析

从北京市不同水土流失治理区 2002–2006 年的监测数据的分析结果(图 1 和图 2)可知,年与年相比,重点预防保护区和重点监督区间的年径流强度远高于重点治理区。其中,重点预防保护区的年径流强度在年际之间呈交替变化,在多年平均尺度上趋于稳定,重点监督区和重点治理区的年径流强度值在年际间尽管相差较大,但变化趋势基本相同;三大治理区年际之间土壤流失强度的大小顺序依次是重点治理区>重点监督区>重点预防保护区。其中,2002–2003 年两个年度内重点预防保护区和重点监督区年与年相比土壤流失强度相差不大,2004–2006 年三个年度内重点治理区和重点监督区年与年相比土壤流失强度差异较小,年际之间变化趋势一致,并远高于重点预防保护区。整体而言,重点治理区和重点监督区土壤流失强度年际之间差别较大,重点预防保护区土壤流失强度年际之间差异较小,总体变化趋势稳定。

北京市水土流失不同防治区间的年土壤流失强度存在明显差异的主要原因是由土地利用方式、地貌特征以及人类活动影响程度不同造成的。大量研究表明,通过调整土地利用方式、增加植被覆盖、减少人类破坏、保护原始地表形态可以显著抑制水土流失的发生强度<sup>[4-5]</sup>。重点预防保护区内主要位于远山深山区或平原区,其中深山区森林植被覆盖度高、人类活动少,地表原始状况保存率高,抗侵蚀力强,并且该区是北京市重要的水源地涵养区,严禁陡坡开荒及乱砍滥伐,而平原地区地势平坦,是泥沙的主要沉积区,因此尽管年径流量较大,但水土流失并不严重,远低于 1997 年中华人民共和国水利部发布的北方土石山区允许土壤流失量  $200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;重点监督区是人类主要生活区域,资源开发、基础建设活动频繁,对原始地面破坏程度大,大量的建筑、资源开发的废弃物很容易被径流带走,在径流量强度较大时容易形成严重的水土流失,大部分年份的土壤流失强度高于  $200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;重点治理区主要位于山区人口相对集中的村镇周围,是北京市坡耕地的主要分布区,地面

植被覆盖度低,加上陡坡开荒及不合理的耕作方式,导致土壤结构差、抗蚀能力降低,在汛期易形成严重的水土流失,2003–2006 年的土壤流失强度均在  $250 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上,明显高于土壤允许流失强度  $200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (图 1 和图 2)。

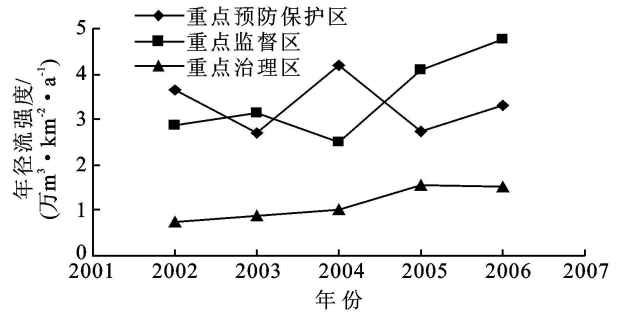


图 1 水土流失不同防治区年径流强度

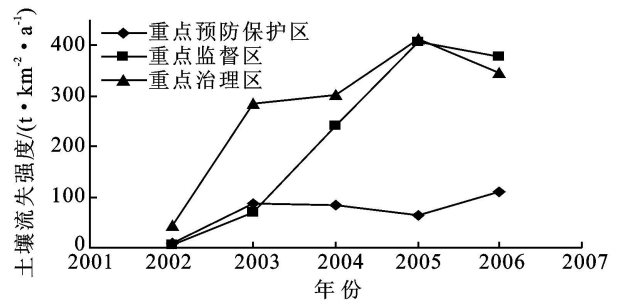


图 2 水土流失不同防治区年土壤流失强度

通过上述分析说明,减少人类活动,充分发挥生态环境自身的恢复能力,提高植被覆盖度可以起到有效抑制水土流失强度的作用,且植被生长时间越长,覆盖度越高,就越可以在较大范围内长期起到作用,所以恢复植被是水土流失治理的根本措施<sup>[6]</sup>。另一方面也受到降雨特征的时空差异的影响(表 2),2004–2006 年的产流降雨量和最大降雨量都均大于 2002 年和 2003 年的,导致水土流失重点治理区和重点监督区后三年的土壤流失强度明显大于前两年的土壤流失强度。其中 2003 年重点治理区土壤流失强度过大主要是由局部地区年降雨量和最大降雨量过大造成的,由于重点治理区主要分布在山区,特别是密云、延庆、平谷等县区,而从表 2 中可以看出,密云县的石匣、延庆县的上辛庄、平谷县的挂甲峪等监测点 2003 年的产流降雨量和最大降雨量均明显大于其它监测点的监测数据,而研究表明,北方地区的年土壤流失量往往决定于几场暴雨<sup>[7]</sup>。

重点预防保护区和监督区的径流强度明显大于重点治理区的主要原因同样受下垫面条件和降雨特征的时空差异两方面影响。重点治理区位于山区,尽管坡度较大,但是土壤疏松有利于降雨入渗,加上水土保持措施拦蓄作用,径流强度大大降低;重点预防保护区尽管植被覆盖度高,但研究表明植被措施对径流的拦蓄

效果相对较低<sup>[8]</sup>, 加上地面粗糙度较小, 使得该区域年径流强度相对较高; 而重点监督区主要分布在中心城区以及村镇, 地面硬化程度高, 不利用降雨入渗, 同时地表摩擦力小, 加强了径流的形成, 因此重点监督区的径流强度明显变大。对北京市城区与郊区的径流特征的研究也证明了这一点, 从表 3 可以明显看出,

表 2 北京市山区水土流失监测点不同年份降雨 mm

监测点	2002 年		2003 年		2004 年		2005 年		2006 年	
	汛期降雨量	最大降雨量	产流降雨量	最大降雨量	产流降雨量	最大降雨量	产流降雨量	最大降雨量	产流降雨量	最大降雨量
石匣	238.0	60.2	197.5	55.4	254.1	49.7	223.8	66.1	232.1	57.5
汤河口	264.7	35.7	116.8	23.4	180.7	48.0	110.5	55.5	86.5	39.6
上辛庄	165.9	44.1	294.6	46.2	466.9	92.2	303.8	64.1	284.5	44.0
下口	362.0	56.5	155.0	41.7	190.9	63.6	228.5	95.3	349.8	48.0
挂甲峪	303.8	37.7	83.7	53.2	335.5	61.8	384.1	41.0	247.4	55.9
蒲洼	339.9	48.6	258.5	26.4	256.8	48.0	204.6	71.7	309.9	40.4
清水	342.3	42.6	23.6	23.6	27.5	27.5	93.5	82.5	52.1	37.0

表 3 北京中心区和郊区径流特征对比<sup>[9]</sup> mm

位置	降雨量	径流总量	地表径流	地下径流	蒸发量
北京中心区	675	405	337	68	270
北京郊区	644	267	96	171	377

2.2 不同治理区污染物流失效应分析

面源污染的产生和迁移与降雨-产流-下垫面条件密切相关, 降雨特征及形成的地表和地下径流是面源污染物产生的主要动力, 而随之产生的水土流失不仅是一种重要的面源污染, 而且也是其它类型面源污染物进入水体的载体和重要途径<sup>[10-11]</sup>。从三大水土流失防治区年磷流失强度、年氮流失强度和年 CODMn 流失强度(图 3)的年际变化趋势可以看出, 基本与年径流强度(图 1)的年际之间的变化趋势一致, 即径流量强度大的年份污染物的流失强度也大, 说明污染物的流失强度主要受产流强度的影响。在降雨条件下, 特别是大暴雨, 地表径流迅速增加, 对地面的冲刷作用明显加强, 并与表土充分混合, 使得养分交换过程也较充分, 最终致使随径流流失的氮、磷等营养元素的流失量也显著增加<sup>[12-13]</sup>。由于污染物的监测数据主要来源于地表径流中的污染物和悬浮物, 因此, 三大重点防治区污染物的流失强度的年际变化趋势与土壤的流失强度年际变化情况差异较大(见图 2)。

从图 3 还可以看出, 不同水土流失治理区间的年污染物流失强度差异较大, 年与年及年际之间的流失强度由大到小依次为重点治理区>重点监督区>重点预防保护区。其中, 重点治理区和重点监督区年污染物流失强度年际间的变化趋势相似, 而重点预防保护区的污染物流失强度年际之间变化较小, 基本在一

在降雨量相差不大的条件下, 北京市中心区的径流总量和地表径流量都要远远大于郊区, 地下径流则小于郊区。另一方面是由于降雨特征的时空差异造成的, 从表 2 可以看出在相同年份里不同监测点的汛期降雨量和最大降雨量差异性明显, 在年际之间同一监测点的汛期降雨量和最大降雨量同样变异性很大。

个稳定范围内波动, 受径流影响较小, 与年土壤流失强度的年际变化趋势一致。造成上述差异的原因主要与不同水土流失治理区的土地利用结构有关。重点预防保护区植被覆盖高, 对径流泥沙的拦蓄、过滤的作用强, 加上原始地面扰动较小, 可以明显降低径流对地表的冲刷, 避免表层土壤与径流充分混合, 降低径流中的养分含量, 从而可以有效抑制污染物的流失。许多研究表明, 通过提高植物覆盖度可以显著改善土壤的结构和理化性质, 从而对化肥、农药、重金属等污染物的植物吸收、微生物降解、化学降解等迁移途径具有显著的正向促进作用, 可减少污染源系统的污染物通量<sup>[14]</sup>。重点治理区坡耕地分布广, 植被覆盖度低, 加之耕地中大量实施氮肥磷肥及频繁耕作导致的表层土壤疏松, 有利于土壤和径流的充分混合, 最终导致各种污染物流失强度最大, 这不仅造成土壤养分的大量流失, 一旦进入水体还会严重影响到水质。对陕西省黑河流域的研究表明, 植被覆盖率低, 坡耕地所占面积比例大和耕地大量施肥是造成严重侵蚀性面源污染的主要原因<sup>[15]</sup>。而重点监督区的各种污染物的流失强度大则主要是由建筑、矿场松散的废弃物以及生活垃圾在径流冲刷、混合条件下形成的。通过对比不同治理区年与年氮磷流失强度(图 3)发现, 总氮流失强度明显高于总磷流失强度, 分析原因除了耕地氮肥使用量大于磷肥使用量外, 还与氮磷元素随径流的流失规律有关。研究表明, 氮的流失是以溶解态为主, 磷的流失则是以与泥沙结合态磷为主<sup>[16]</sup>, 而本研究中的各种污染物流失强度测定主要以地表径流以及悬浮物中污染物含量为基础, 因此导致不同治理区内的年总氮流失强度大于年总磷流失强度。

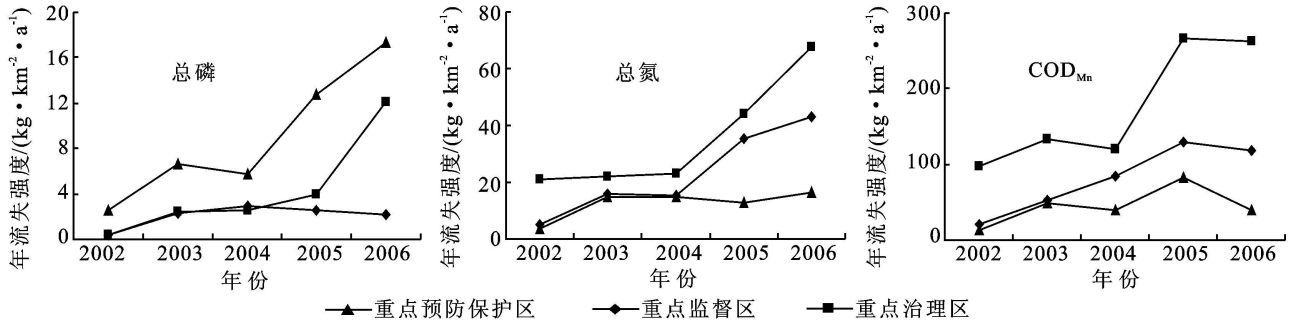


图 3 水土流失不同治理区年总磷、总氮、COD<sub>Mn</sub>流失强度

### 3 结论

降雨、地貌特征、植被覆盖是影响区域水土流失发生强度的主要因素。而通过调整土地利用结构,提高地面植被覆盖度可以有效控制降雨及地貌因素对水土流失的影响程度。研究表明,重点预防保护区的年径流强度在年际之间呈交替变化,总体趋势比较稳定,说明增加植被覆盖度可以显著提高对径流的调控能力,重点监督区和重点治理区的年径流强度值在年际间尽管相差较大,但变化趋势基本相同,受降雨影响明显。重点预防保护区和重点监督区间的年径流强度远高于重点治理区,这主要是由于地面植被覆盖度、人为破坏和硬化程度以及地形坡度的差异性造成的。土壤流失强度的大小顺序依次是重点治理区>重点监督区>重点预防保护区。其中,2002-2003年两个年度内重点预防保护区和重点监督区年与年相比土壤流失强度相差不大,2004-2006年三个年度内重点治理区和重点监督区年与年相比土壤流失强度差异较小,年际之间变化趋势一致,并远高于重点预防保护区。

径流及泥沙是土壤污染物流失的主要动力和载体,水土流失的强度直接影响到污染物的流失强度,研究表明,总磷、总氮及 COD<sub>Mn</sub>的流失强度与径流及土壤流失强度的变化趋势基本一致,且重点预防保护区<重点监督区<重点治理区。其中,重点治理区和重点监督区年污染物流失强度年际间的变化趋势相似,而重点预防保护区的污染物流失强度年际间变化不大,受径流影响较小,与土壤流失强度的年际变化趋势一致。

#### 参考文献:

[1] 陈家琦,王浩,杨小柳. 水资源学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 25-26.  
 [2] 杜桂森,孟繁艳,李学东,等. 密云水库水质现状及发展趋势[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 110-112.  
 [3] 于秀玲. 非点源污染对密云水库水质的影响[C]//中国环境科学研究院环境科学论文集(1980-1990). 北京: 中

国环境科学出版社, 1990: 27-31.

[4] 曹世雄,陈莉,高旺盛. 黄土丘陵区路面种草对水土保持的影响及成本效益分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 73-76.  
 [5] Fu B J, Chen L D, Ma K M, et al. The relationship between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China[J]. Catena, 2000, 39: 69-78.  
 [6] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 60-61.  
 [7] Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Temporal changes in suspended sediment transport in a gullied loess basin: the lower Chabagou Creek on the Loess Plateau in China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008. (DOI: 10. 1002/ esp. 1649)  
 [8] 朱钟麟,卿明福,刘定辉,等. 蕨草根系特征及蕨草经济植物埂的水土保持功能[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 164-167.  
 [9] 李文玲,田耀武,郑根宝. 城市森林水流失率与水土流失率的探讨[J]. 水土保持通报, 2005, 25(2): 57-59.  
 [10] 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: 自然科学版, 2006, 46(3): 360-365.  
 [11] 杨爱民,王浩,孟莉. 水土保持对水资源量与水质的影响研究[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 72-76.  
 [12] Abdul G, Jensen J R, Borggaard O K, et al. Runoff and losses of soil and nutrients from small watersheds under shifting cultivation in the Chittagong Hill Tract of Bangladesh[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279: 293-309.  
 [13] 高超,朱继业,朱建国,等. 极端降水事件对农业非点源污染物迁移的影响[J]. 地理学报, 2005, 60(6): 991-997.  
 [14] Gustafson A, Fleischer S, Joelsson A. A catchment-oriented and cost-effective policy for water protection[J]. Ecological Engineering, 2000, 14(4): 419-427.  
 [15] 胥彦玲,李怀恩,贾海娟,等. 陕西省黑河流域水土流失型非点源污染估算[J]. 水土保持通报, 2005, 25(5): 78-80.  
 [16] 黄满湘,章申,张国梁,等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 147-154.