

# 密云水库上游不同土地利用方式下的土壤侵蚀特征

樊登星, 余新晓, 贾国栋, 王贺年, 赵阳

(北京林业大学 水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 为了合理配置北京密云水库水土流失重点治理区的水土保持综合措施。[方法] 基于石匣小流域坡面径流小区定位观测资料, 分析了不同土地利用方式及水土保持措施的坡面土壤侵蚀特征。[结果] (1) 5 种土地利用方式的土壤侵蚀量差异明显, 与裸地相比较, 耕地、人工草地、封禁荒草地和林地的减沙率达 63.88%~99.63%; (2) 梯田比坡耕地措施小区的土壤侵蚀量减少了 95.62%, 起到了显著的水土保持作用; (3) 采用水平条和鱼鳞坑措施林地小区的减沙率分别为 83.56% 和 96.53%, 具有十分明显的减蚀作用; (4) 与人工草地相比较, 封禁荒草地的侵蚀产沙量减少了 98.25%, 可以有效地控制水土流失。[结论] 增加地表植被覆盖, 减少人为干扰以及合理地配置梯田、鱼鳞坑和水平条等水土保持工程措施具有良好的水土保持作用。

**关键词:** 径流小区; 土壤侵蚀; 土地利用方式; 水土保持措施; 密云水库

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)01-0005-04

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.002

## Characteristics of Soil Erosion Under Different Landuse Types in Upper Area of Miyun Reservoir

FAN Dengxing, YU Xinxiao, JIA Guodong, WANG He'nian, ZHAO Yang

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, 100083, China)

**Abstract:** [Objective] To configuring appropriate soil and water conservation measures for solving the problem of soil and water erosion in upper area of Miyun reservoir in Beijing City. [Methods] Based on the data of 13 different runoff plots in Shixia small watershed, the effects of different land use types and soil conservation measures were analyzed. [Results] Woodland was the most effective soil and water conservation measure at slope scale. The order of soil conservation benefits in five land use types was that: woodland > banned tending > artificial grassland > cropland > bare land, and the sediment was reduced by 63.88% to 99.63%. Compared with steep slope land, the sediments from terraces were reduced by 95.62%. Fish-scale pit and horizontal bars measures can effectively intercept surface runoff and control erosion. [Conclusion] Through establishing the mixed structure stand and configuring soil and water conservation engineering measures, such as fish-scale pit terraces and level strips, soil and water loss can be effectively controlled.

**Keywords:** runoff plots; soil erosion; landuse types; soil and water conservation measures; Miyun reservoir

坡面是地表过程发生发展的基础单元, 是土壤侵蚀的主要发生地和沟道泥沙的主要来源区<sup>[1-2]</sup>。坡面土地利用方式及水土保持综合措施的合理布置是控制水土流失最重要的影响因素<sup>[3]</sup>。通过调整合理的土地利用方式与配置适当的坡面水土保持措施可以有效地抑制地表水土流失。目前, 已有很多学者对中国不同水土流失重点防治区的坡面水土流失过程进行了研究, 并取得了重要的成果<sup>[4-9]</sup>。这些研究基于

大量的试验观测数据, 分析了不同土地利用方式的坡面水土流失效应及影响因素, 并针对土地利用格局演变条件下的土壤侵蚀规律做了大量而详细的分析<sup>[10-17]</sup>。然而, 这些研究多数集中于对不同土地利用方式水土流失效应的对比分析或者对不同水土保持措施的减水减沙效益进行评价, 很少有研究对土地利用方式和水土保持措施共同作用下的水土保持效果进行深入地探讨。

收稿日期: 2014-01-24

修回日期: 2014-03-01

资助项目: 北京林业大学科技创新计划“水土保持生态工程坡面稳定性机理研究”(TD2011-01); “十二五”国家科技支撑项目“三北地区水源涵养林体系构建技术与示范”(2011BAD38B05)

第一作者: 樊登星(1982—), 男(汉族), 河北省怀安县人, 博士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: fandengxing@126.com。

通信作者: 余新晓(1961—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态水文研究。E-mail: yuxinxiao111@126.com。

密云水库是北京市唯一的地表饮用水源,水库及其上游地区多为土石山区和丘陵区,水土流失严重。有关研究表明,密云水库泥沙淤积量已达  $1.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 而由水土流失造成的径流泥沙是非点源污染物的主要载体,已经成为影响水库水质的重要污染源之一。本研究利用北京市密云县石匣小流域坡面径流试验小区的多年连续观测资料,分析了不同土地利用方式和不同水土保持措施共同作用下的坡面土壤侵蚀特征,以期对密云水库上游水土流失重点治理区水土保持综合治理措施的合理布局提供理论基础和科学依据。

## 1 研究区域概况

密云县石匣小流域地处北京市北部山区密云水库的东北方向,地理坐标为  $117^\circ 01' - 117^\circ 07' \text{ E}$  和  $43^\circ 32' - 43^\circ 38' \text{ N}$ 。按水系划分,该区属于潮河流域下游,隶属燕山山脉,为土石浅山丘陵区,地势北高南低。海拔高度  $150 \sim 390 \text{ m}$ ,沟壑密度  $0.2 \text{ km/km}^2$ 。坡面平缓,大于  $20^\circ$  的坡面仅占流域面积的  $16.2\%$ 。该流域总面积  $33 \text{ km}^2$ ,其中水土流失面积  $32.22 \text{ km}^2$ ,占总面

积的  $97.7\%$ ,土壤侵蚀模数为  $2500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。土壤类型为洪冲积物母质上发育的淋溶褐土。流域气候为暖温带季风气候,多年平均降水量为  $661.8 \text{ mm}$ ,降水分布不均, $80\%$ 集中在 6—9 月。该流域北部的植被以杂草灌木丛为主,覆盖度为  $80\%$ 。丘陵地带存在的植被多为人工种植的刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.)、油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 及一些经济林种等。

坡面径流小区布设在石匣小流域的中心示范区内,面积为  $2 \text{ km}^2$ 。选择坡向、坡度、坡长、工程措施、生物措施等试验因子进行布设(表 1)。小区的主要的观测指标包括降水量、降雨强度、径流量、泥沙冲刷量、径流含沙量、土壤含水量、植被覆盖度、树木成活率、地径、树高、郁闭度等。自建成径流小区以来,我们主要开展了不同林草覆盖措施、农作物管理措施和水土保持工程措施的水土保持效益监测以及不同坡度、坡长径流小区土壤侵蚀监测等方面的试验研究。主要的观测指标包括降水量、降雨强度、径流量、泥沙冲刷量、径流含沙量、土壤含水量、植被覆盖度、树木成活率、地径、树高、郁闭度等。

表 1 径流小区基本情况

小区序号	坡度/ $^\circ$	长度/m	宽度/m	土地利用方式	水土保持措施	土壤侵蚀量/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )
1	14.6	10	5	裸地	休闲坡耕地	2 155.97
2	16.8	10	5	耕地	坡耕地(玉米)	790.62
3	3.8	10	5	耕地	坡耕地(玉米)	1 146.93
4	3.8	10	5	耕地	梯田(玉米)	42.41
5	14.6	10	5	封禁荒草地	自然坡	27.73
6	27.0	10	5	封禁荒草地	自然坡	0.97
7	18.9	10	5	封禁荒草地	自然坡	0.20
8	6.0	10	5	封禁荒草地	自然坡	2.68
9	27.0	10	5	人工草地	沙打旺	453.48
10	16.8	10	5	林地	大水平条(栗树)	45.09
11	9.6	10	5	林地	大水平条(山楂)	2.34
12	27.0	10	5	林地	鱼鳞坑(刺槐)	0.09
13	17.2	10	5	林地	鱼鳞坑(油松、刺槐)	0.00

## 2 资料与方法

本文选取了 2000—2006 年 13 个不同水土保持措施径流小区的降水、径流和泥沙等观测数据与资料。其中,降雨观测中用虹吸式自记雨量计观测降雨量及降雨过程,降雨资料为每年 6—9 月有地表径流和泥沙记录的次降雨数据,研究时段内的总降雨量(产流降雨)为  $1740.25 \text{ mm}$ ;径流观测中径流量采用径流桶/分流桶测定;泥沙观测中含沙量采用传统搅拌取样,过滤烘干测定。

由于本文所选的 13 个径流小区具有不同的坡度,为了消除不同坡度对土壤侵蚀的影响,我们将各小区土壤侵蚀量转化到同一坡度( $15^\circ$ )上进行比较研究,以便在相同条件下对比不同土地利用和不同水土保持措施下的土壤侵蚀特征。参照前人研究结果<sup>[4-5]</sup>选用坡度公式对坡度加以修正,见式(1)—(3):

$$S = 10.8 \sin H + 0.03 \quad (H < 5^\circ) \quad (1)$$

$$S = 16.8 \sin H - 0.50 \quad (5^\circ \leq H < 10^\circ) \quad (2)$$

$$S = 21.91 \sin H - 0.96 \quad (H \geq 10^\circ) \quad (3)$$

式中: $S$ ——坡度因子; $H$ ——坡度( $^\circ$ )。

相对土壤侵蚀量  $A'_i$  为各径流小区土壤侵蚀量校正到  $15^\circ$  坡度上的相对值,其校正计算公式为:

$$A'_i = \frac{A_i}{S_i} \times S_{15} \quad (4)$$

式中:  $A'_i$ ——第  $i$  小区校正到  $15^\circ$  坡度上的土壤侵蚀量 [ $t/(km^2 \cdot a)$ ];  $A_i$ ——第  $i$  小区的土壤侵蚀量 [ $t/(km^2 \cdot a)$ ];  $S_{15}$ —— $15^\circ$  坡度的坡度因子;  $S_i$ ——第  $i$  小区的坡度因子。

利用 SPSS 18.0 进行土壤侵蚀特征的差异显著性检验。其中,应用最小显著性差异(LSD)方法检验不同土地利用方式之间土壤侵蚀特征的差异显著性;应用独立样本  $T$  检验方法检验不同水土保持措施之间土壤侵蚀特征的差异显著性。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 径流小区土壤侵蚀特征

基于 2000—2006 年 13 个不用水土保持措施径流小区的观测数据,对各径流小区的土壤侵蚀特征进行了分析。由表 1 可以看出,各小区土壤侵蚀量差异明显,其中 1 号标准小区(休闲坡耕地)的土壤侵蚀模数最大,达  $2\,155.97 t/(km^2 \cdot a)$ ;13 号林地(油松、刺槐)小区最小,没有产生泥沙。13 个小区按土壤侵蚀量的大小排序,前 3 位分别是 1 号标准小区(休闲坡耕地)、3 号坡耕地(玉米)和 2 号坡耕地(玉米),而土壤侵蚀量最小的 3 个小区分别是 7 号封禁(自然坡)、12 号林地(刺槐)、13 号林地(油松、刺槐)。在降雨、土壤类型、坡长、坡宽等影响因素相同的条件下,各径流小区土壤侵蚀量的差异主要是由不同的土地利用方式和不同的水土保持措施造成的。

#### 3.2 不同土地利用方式的土壤侵蚀特征

13 个径流小区主要有裸地、耕地、人工草地、林地和封禁荒草地 5 种不同的土地利用方式,不同土地利用方式小区的土壤侵蚀模数如图 1 所示。由图 1 可知,5 种不同土地利用方式的土壤侵蚀模数差异较大,其大小排序为:裸地 > 耕地 > 人工草地 > 封禁荒草地 > 林地。以 1 号裸地小区为对照,耕地的减沙率达到 63.88%,人工草地的减沙率为 78.97%,封禁荒草地的减沙率为 99.62%,林地的减沙率为 99.63%。各土地利用方式小区均表现出了不同程度的水土保持效益。不同土地利用方式的土壤侵蚀量差异性分析结果如表 2 所示。由表 2 可知,裸地产生的侵蚀量最大,并且裸地与其他 4 种土地利用方式的土壤侵蚀量差异性显著 ( $p < 0.001$ )。其余 4 种土地利用方式之间均差的  $p > 0.05$ ,说明这 4 种土地利用方式之间土壤侵蚀量的差异不明显。

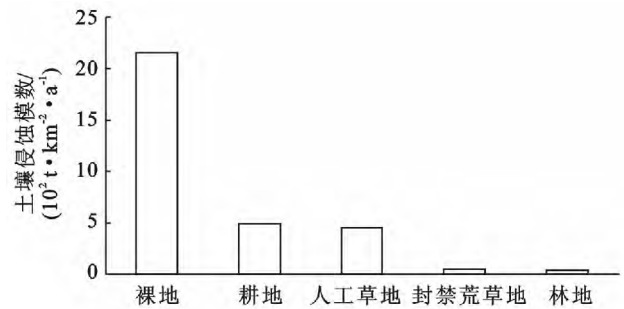


图 1 不同土地利用径流小区的土壤侵蚀模数

表 2 不同土地利用方式作用下的土壤侵蚀量均值方差矩阵  $t/(km^2 \cdot a)$

土地利用方式	裸地	耕地	人工草地	封禁荒草地	林地
裸地	—	1 495.98***	1 877.48***	2 148.07***	2 149.18***
耕地		—	381.50	652.09	653.20
人工草地			—	270.59	271.69
荒草地				—	1.10
林地					—

注:\*\*\*表示相关性达到显著水平( $p < 0.001$ )。

不同土地利用方式的水土保持作用表现出一定的差异,这主要与植被覆盖、水土保持措施类型以及人为活动干扰直接相关<sup>[1-3,10-13,18]</sup>。耕地与裸地相比,农作物的根系具有固土和改良土壤作用。农作物枝叶等地表覆盖物能够有效地减小地表径流的侵蚀力,从而起到了一定的保持水土作用。但与此同时,由于在耕地上定期从事的耕作、土地整理等活动也增加了对坡面土壤的人为干扰程度<sup>[3,12-14]</sup>,可能导致产生新的水土流失,因此耕地水土保持效果并不明显。在人工草地选择典型水土保持草本植物沙打旺,并同时采用小水平条措施,增加了地表覆盖度,在减少地表径流方面起到了较好的作用。但由于草本的盖度较低( $< 40\%$ ),同时受定期的小区人工作业处理影响,加大了对土壤的扰动,增加了土壤的不稳定性,产生了较大的土壤侵蚀量。封禁抚育是水土保持生态修复的重要措施之一<sup>[14-15]</sup>,灌草植物的密集根系具有良好的固土作用,通过封禁抚育措施可以充分发挥生态系统的自我修复能力并增强土壤抗蚀抗冲能力;同时,封禁处理有效地阻止了人类活动对坡面的扰动,增强了保水保土效果。林地可以有效地调控地表径流,阻滞泥沙,降低水土流失<sup>[5,18]</sup>,但由于不同林地受水土保持措施、林分年龄、密度、郁闭度、林下灌草盖度、地表枯落物层厚度等因素影响,使林地表现出不同的保水保土能力,但总体来看,其水土保持效果较显著。

#### 3.3 不同水土保持措施的土壤侵蚀特征

耕地的水土保持措施主要有坡耕地和梯田。这

2 种不同措施的土壤侵蚀特征如表 3 所示。与 1 号裸地小区相比较, 2 种措施小区的减沙率分别为 55.11% 和 98.03%。其中, 坡耕地措施小区的土壤侵蚀模数为 968.77 t/(km<sup>2</sup>·a), 远大于北方土石山区允许土壤流失量 200 t/(km<sup>2</sup>·a), 加剧了土壤侵蚀程度。梯田措施小区的土壤侵蚀模数为 42.41 t/(km<sup>2</sup>·a), 与坡耕地措施相比较, 梯田的土壤侵蚀量减少了 95.62%, 表现出了非常良好的水土保持效益。坡耕地与梯田的 *T* 检验 *p* 值小于 0.05, 表明两者差异性显著。梯田是控制水土流失的有效措施, 通过改变原有的小地形, 使坡面变平整, 截断原有的径流流线, 强化降水就地入渗拦蓄, 避免坡面径流的产生, 增加土壤水分含量, 有利于植被生长。同时发达的植被根系起到了固土减蚀作用, 起到了良好的保持水土的效果。

林地土地利用方式下的主要水土保持措施有鱼鳞坑和水平条。2 种不同措施下的土壤侵蚀特征如表 3 所示。与 1 号裸地小区相比较, 2 种不同措施小区的减沙率均在 99% 以上, 其中, 鱼鳞坑措施林地的土壤侵蚀量为 0.03 t/(km<sup>2</sup>·a), 基本无侵蚀发生, 而水平条措施小区林地的土壤侵蚀量为 15.81 t/(km<sup>2</sup>·a)。水平条与鱼鳞坑的 *T* 检验 *p* 值大于 0.05, 表明两者差异性不显著。采取鱼鳞坑措施的林地土壤侵蚀量最小, 具有最大的减蚀作用。鱼鳞坑的埂中间高两边低, 截断了径流通道, 避免了径流的集中, 增加降水的就地入渗拦蓄及土壤水分含量。另外受到鱼鳞坑的调节, 径流的冲刷能力也相应减弱。由此可见, 通过适当的工程整地措施进行人工造林能够有效地拦蓄降雨, 防治水土流失。

表 3 不同水土保持措施的土壤侵蚀特征

土地类型	水土保持措施	土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
耕地	坡耕地	968.77
	梯田	42.41
林地	水平条	15.81
	鱼鳞坑	0.03
草地	人工种草	453.48
	封禁	7.89

草地的水土保持措施有封禁和人工种草。这 2 种不同措施的土壤侵蚀量分别为 7.89 和 453.58 t/(km<sup>2</sup>·a)。在相同的降水和立地条件下, 人工草地的土壤侵蚀量是封禁荒草地的 57 倍。人工种草与封禁措施的 *T* 检验 *p* 值小于 0.05, 表明两者差异性显著。与人工草地相比较, 采用封禁措施而形成的自然

荒草地的侵蚀产沙量有明显的减少, 发挥了更好的水土保持效应。这主要是由于封禁自然荒草地避免了人为活动对坡面土壤层的干扰。

## 4 结论

(1) 5 种土地利用方式的多年平均土壤侵蚀量之间的差异明显, 各土地利用方式的土壤侵蚀模数大小排序为: 裸地 > 耕地 > 人工草地 > 林地 > 封禁荒草地。耕地、人工草地、林地和封禁荒草地均发挥了不同程度的水土保持作用, 与裸地相比较, 其减沙率达 63.88%~99.63%。在 5 种土地利用方式中, 封禁荒草地和林地具有较高的植被覆盖度, 能够有效地防止对坡面的人为扰动, 因此其水土保持作用最明显。

(2) 采用梯田措施小区的耕地土壤侵蚀量最小, 与坡耕地措施相比较, 其土壤侵蚀量减少了 95.62%。梯田可以有效地拦蓄坡面径流, 减少土壤侵蚀, 是控制坡面水土流失最为有效的水土保持农业措施之一。

(3) 采用水平条和鱼鳞坑措施的林地土壤侵蚀量较小, 具有十分明显的减蚀作用。合理的林分结构与合适地配置鱼鳞坑和水平条等水土保持工程措施, 能够有效地拦蓄降雨, 起到良好的保持水土的效果作用。

### [参 考 文 献]

- [1] 徐海燕, 赵文武, 刘国彬, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土地利用格局变化对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 49-52.
- [2] 傅伯杰, 邱扬. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722.
- [3] 和继军, 蔡强国, 路炳军, 等. 密云水库上游石匣小流域水土流失综合治理措施研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 375-382.
- [4] Liu Baoyuan, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [5] 路炳军, 段淑怀, 袁爱萍, 等. 官厅水库上游地区植被覆盖对面源污染影响的定量研究[J]. 资源科学, 2006, 28(5): 196-200.
- [6] 蔡强国, 吴淑安. 紫色土陡坡地不同土地利用对水土流失过程的影响[J]. 水土保持通报, 1998, 18(2): 1-8.
- [7] 袁希平, 雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 296-300.
- [8] 卫伟, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响[J]. 干旱区地理, 2008, 30(6): 896-901.

(下转第 255 页)

- [14] 魏彬,杨校生,吴明,等.生态安全评价方法研究进展[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2009,35(5):572-579.
- [15] Galicia L, García-Romero A. Land use and land cover change in highland temperate forests in the Izta-Popo National Park, Central Mexico[J]. Mountain Research and Development, 2007,27(1):48-57.
- [16] Gao Yao, Wu Zhifeng, Lou Quansheng, et al. Landscape ecological security assessment based on projection pursuit in Pearl River Delta [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012,184(4):2307-2319.
- [17] 吴健生,张理卿,彭建,等.深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J].生态学报,2013,33(13):4125-4133.
- [18] 汤萃文,张忠明,苏研科,等.石羊河上游林区景观空间邻接特征及生态安全分析[J].干旱区地理,2013,36(2):311-317.
- [19] Nash M S, Heggem D T, Ebert D, et al. Multi-scale landscape factors influencing stream water quality in the state of Oregon[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009,156(1/4):343-360.
- [20] 关文彬,谢春华,马克明,等.景观生态恢复与重建是区域生态安全格局构建的关键途径[J].生态学报,2003,23(1):64-73.
- [21] 李康.西部大开发中的生态安全问题[J].环境科学研究,2001,14(1):1-3.
- [22] 岳德鹏,王计平,刘永兵,等. GIS 与 RS 技术支持下的北京西北地区景观格局优化[J].地理学报,2007,62(11):1223-1231.
- [23] 谢霞,塔西甫拉提·特依拜.艾比湖流域绿洲化与荒漠化过程时空演变研究[J].中国沙漠,2013,33(1):38-45.
- [24] 陈明星,陆大道,张华.中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J].地理学报,2009,64(4):387-398.
- [25] 陈东景,徐中民.西北内陆河流域生态安全评价研究:以黑河流域中游张掖地区为例[J].干旱区地理,2002,25(3):219-224.
- [26] 吉冬青,文雅,魏建兵,等.流溪河流域土地利用景观生态安全动态分析[J].热带地理,2013,33(3):299-306.
- [27] 冉圣宏,曾思育,薛纪渝.脆弱生态区适度经济开发的评价与调控[J].干旱区资源与环境,2002,16(3):1-6.
- [28] 高吉喜.可持续发展理论探索:生态承载力理论、方法与应用[M].北京:中国环境科学出版社,2001:22-27.
- [29] 张宝秀,熊黑钢,徐长春.新疆于田绿洲生态弹性度与景观环境分析[J].水土保持研究,2008,15(6):112-114.
- [30] 刘冰.平顶山景观变化对其生态安全的影响[D].郑州:郑州大学,2007.
- [31] Farina A. Principles and methods in landscape ecology: Towards a science of the landscape [M]. London: Chapman, 2006.

(上接第 8 页)

- [9] 甘卓亭,叶佳,周旗,等.模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J].生态学报,2010,30(9):2387-2396.
- [10] 赵护兵,刘国彬,曹清玉,等.黄土高原丘陵区不同土地利用方式水土流失及养分保蓄效应研究[J].水土保持学报,2006,20(1):20-24.
- [11] 索安宁,李金朝,王天明,等.黄土高原流域土地利用变化的水土流失效应[J].水利学报,2008,39(7):767-772.
- [12] 谢颂华,曾建玲,杨洁,等.南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J].农业工程学报,2010(9):81-86.
- [13] 王健,吴发启,孟秦倩.农业耕作措施蓄水保土效益试验研究[J].水土保持通报,2004,24(5):39-41.
- [14] 李子君,于兴修.冀北土石山区坡面尺度径流特征及其影响因素[J].农业工程学报,2012,28(17):109-116.
- [15] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.
- [16] 方海燕,蔡强国,李秋艳.黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究[J].地理研究,2009(3):583-591.
- [17] Mah M G C, Douglas L A, Ringrose-Voase A J. Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall[J]. Soil Science, 1992,154(1):37-43.
- [18] 蔡新广.石匣小流域水土保持措施蓄水保土效益试验研究[J].资源科学,2004,26(1):144-150.