

黄土高原中部森林的流域水文效应研究^{*}

卢爱刚^{1,3}, 索安宁², 庞德谦³, 王天明¹

(1. 北京师范大学 生命学院, 北京 100875; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 3. 渭南师范学院 环境与生命科学系, 陕西 渭南 714000)

摘 要: 文章对黄土高原中部 24 个水文监测站点的河流水文过程特征与相应的流域森林覆盖比率之间的关系进行了统计分析研究。结果表明: 在黄土高原, 流域产流系数随流域内森林比率的增大, 具有明显的递减趋势, 森林面积的增加在一定程度上减少了流域的径流输出量, 也减缓了径流在汛期和枯季分配的不均匀程度, 具有调洪补枯的作用。在森林比率较高的黄土山区流域, 受降水量年际变异的影响径流的年际变化比森林比率低的流域大。流域森林比率的增加可以明显减少流域内土壤侵蚀模数, 当森林比率由 10% 增大了 20% 时, 流域平均土壤侵蚀模数减小了 46.19%。与森林比率较小的流域相比较, 森林比率大的流域侵蚀多由汛期的高强度降水引发, 表现为汛期侵蚀比例极高, 年际变化较大等特点。

关键词: 黄土高原; 森林比率; 流域; 水文过程

中图分类号: S715; S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0001-05

Effect of Forest on Watersheds Hydrological Process in Middle Loess Plateau

LU Ai-gang^{1,3}, SUO An-ning², PANG De-qian³, WANG Tian-ming¹

(1. Key Laboratory for Biodiversity Science and Engineering, Ministry of Education, College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. National Marine Environment Monitoring Center, Dalian, Liaoning 116023, China; 3. Department of Environment and Life Sciences, Weinan Teachers University, Weinan, Shaanxi 714000, China)

Abstract: River hydrological process and corresponding coverage of forest in watersheds in middle Loess Plateau were analyzed in this paper. The results showed that there was an obvious decline trend of runoff generation index with increasing of coverage of forest. Output of most runoff was kept and distribution of runoff in dry season and flood season turned to uniform with more forest in watershed. Influenced by variation of rainfall, interannual variation of runoff in mountain watersheds with more forest was greater than that with less forest. More soil was conserved with increase of forest area, erosion modulus decreased by 46.19% with forest ration changing from 10% to 20%. The soil erosion caused by high intensive rainfall was focused on flood season in more forest watersheds and companied with more interannual variation comparing with less forest watershed.

Key words: the Loess Plateau; coverage of forest; watershed; hydrological process

自 20 世纪 80 年代以来, 水文与生态过程的相互关系受到了越来越多的关注, 尤其是森林的生态水文关系。以往的森林生态水文研究主要集中于森林对产水量、蒸散和降水截留等方面的研究^[1-2]。近年来, 有关学者开始关注森林对径流调控、调洪补

枯、土壤侵蚀等方面的影响, 这有力的促进了森林生态水文学的发展^[3-5]。森林的生态水文效应, 不仅受森林系统本身的影响, 还受到降雨特征、土壤、地质地形等因素的影响, 这些都增加了森林流域水文效应与水文响应模式定量研究的难度。

^{*} 收稿日期: 2009-01-07

基金项目: 国家重大基础研究规划项目(2002CB111507); “十一五”科技支撑项目(2006BAD03A0206); 国家自然科学基金(40771187; 40830743); 国家科技部“973”项目(2005CB422004); 国家自然科学基金(40771187); 国家科技部“973”项目(2005CB422004); 中国博士后基金(20070420315); 陕西省教育厅科研计划项目(09JK429)

作者简介: 卢爱刚(1968-), 男, 陕西富平人, 博士, 副教授, 主要从事全球变化区域响应研究。E-mail: lagx1088@163.com

黄土高原的森林面积比较少, 现有的天然林区主要集中在六盘山、子午岭、黄龙山等黄土高原的岛状山地地带。许多研究表明黄土高原的森林在蓄水保土、截留降水、减少地表径流和拦截泥沙等方面发挥着重要的生态作用^[5-7]。但目前对森林流域水文效应的研究, 尤其是黄土高原森林植被对流域径流和输沙过程的调控效应等问题尚缺乏系统的定量研究。刘昌明等对黄土高原不同森林覆盖率的流域年流量研究认为黄土高原森林覆盖率的增加可以明显减少流域的径流量^[2]。黄明斌等对黄土高原森林和相邻的非森林流域径流的对比分析认为黄土高原森林具有很好的调洪补枯作用^[4]。这些研究对黄土高原森林面积与流域径流量的关系给予了较大关注, 而对森林在流域径流上的调控作用、森林对流域土壤侵蚀的作用缺少系统的、定量的探讨。在半干旱、半湿润的黄土高原地区, 由于土层深厚, 气候干燥, 森林的蒸腾耗水强烈, 森林流域常形成巨大的水分亏缺, 流域总径流量减少。然而, 由于流域空间变异性大, 土层厚度深浅不一, 裂隙垂直发育, 森林拦蓄的降雨也有可能转化为地下径流, 补充枯水季节的流量。但是在流域尺度, 这种调节作用究竟有多大, 黄土高原退耕还林能否平衡流域丰水季节和枯水季节的径流分配矛盾和减少土壤流失, 达到增加下游水量、保持上游土壤的目的, 目前还没有见到系统的相关报道。本文选择黄土高原中部具有不同森林覆盖率的 24 个流域, 通过分析随森林覆盖率的增大, 流域径流、输沙的演化过程, 以期揭示黄土高原森林对流域径流、输沙的调控规律, 为黄土高原退耕还林建设和流域水环境演变研究提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原中部的陇东黄土高原及邻近地区, 处于六盘山区和子午岭之间。发源于六盘山区的泾河及其支流与发源于子午岭山区的葫芦河是研究区的主要水系。研究区内总体地势是西北高, 东南低, 地形由东北西三面向南倾斜。泾河、葫芦河及各级支流均深切于梁、塬、峁和黄土沟壑镶嵌的黄土地貌景观中, 形成 30 个流域面积在 800 ~ 5 000 km² 不等的流域, 其中有 24 个流域下游的出水口附近具有长期的水文观测记录。由于处于六盘山和子午岭的山区地带, 这些流域的上游都具有面积不一的森林分布。流域中下游受长期的人类活动干扰多被开垦为农田或退化为草地。

研究区气候为典型的温带大陆性气候, 处于温

带半湿润向半干旱气候的过渡地带, 多年平均气温 8℃, 最冷月平均气温 - 8 ~ - 10℃, 最热月平均温度 22 ~ 24℃, 年降水量在 350 ~ 600 mm 之间, 主要集中在夏季, 夏季降水量一般占到年降水量的 50% 以上, 且降水强度大, 年际变化也大。

研究区为典型的黄土高原区, 黄土层深厚, 一般在 50 ~ 80 m 不等, 部分黄土残塬黄土厚达 100 m 以上。土壤为黄绵土和黑垆土, 结构疏松, 极易塌陷、流失。植被为温带森林草原过渡类型, 北部为典型温带草原, 由于开发历史早, 自然植被受人类活动破坏大, 植被退化严重。

1.2 研究方法

选取黄土高原中部长期有水文监测数据的 24 个流域, 统计流域出水口监测站点以上的各种林地 (林地、灌木林地、疏林地和园林地) 占流域总的百分比。为了表征 24 个流域的水文过程特征的流域差异, 采用多年平均降水量、多年平均径流深度和多年平均侵蚀模数表示降水、径流和侵蚀的多年平均情况; 采用降水年际变异系数、径流年际变异系数和侵蚀年际变异系数来表示降水、径流和侵蚀的年际变化特征; 采用降水分配系数、径流分配系数和侵蚀分配系数表示降水、径流和侵蚀在年内各个月份的分配均匀程度。多年平均值用式 (1) 计算, 年际变异系数用式 (2) 计算, 年内分配系数用式 (3) 计算。

$$\bar{A} = (\sum_{i=1}^n A_i) / n \quad (1)$$

$$C_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2 / (n - 1)} \quad (2)$$

$$C_{vy} = \sqrt{\sum_{j=1}^{12} (\frac{K_j}{K} - 1)^2 / 12} \quad (3)$$

式中: n ——观测年数; A_i ——第 i 年的降水量 (或径流或侵蚀模数); \bar{A} ——多年平均值; C_v ——年际变异系数; C_{vy} ——年内分配系数; K_i ——第 i 年的径流变率, 即第 i 年平均径流量与多年平均径流量的比值; K_j ——第 j 月份的径流量占年径流量的百分比; K ——各个月平均径流量占全年的百分比, C_v 和 C_{vy} 值越大表示年降水量、径流量、侵蚀模数的年际、年内变化越大, 以上指标越小, 表示相反趋势。

水文数据由黄河水利委员会水文局提供, 包括研究区 24 个流域出水口水文站点的月、年径流量和输沙量, 其中 14 个站点数据为 1970 - 2003 年, 10 个站点是 1981 - 2003 年的数据。

森林覆盖面积情况采用中国科学院“八五”重大应用项目“国家资源环境遥感宏观调查与动态研究”的成果, 主要利用黄土高原中部地区 2000 年的 32 个县级行政单元的 1 : 10 万比例尺的土地利用/土

地覆被分类数据, 将该数据中的林地部分提取出来, 以流域为单位进行统计。

利用统计分析中的多种趋势分析方法和回归拟合方法作主要的分析方法。文中所有统计分析都是在 Statistica6.0 下完成(Statistica for Windows)。

2 结果分析

2.1 黄土高原森林对流域径流的作用

为了探讨黄土高原森林对流域径流的影响, 对黄土高原中部 24 个流域的径流和森林覆盖率进行了相关分析。降水是影响径流形成的重要因素, 考虑到研究区各个流域降水量的差异性, 剔除北部几个特别干旱流域, 并利用年径流系数来剔除降水的流域差异, 做径流对森林覆盖率的响应分析。由图 1 可见, 在森林比率小于 20% 的各流域径流系数都在 6.0 以上, 森林比率增大到 40% 左右时, 径流系数减小为 5.5, 流域径流系数随森林比率减少出现明显的递减趋势, 二者之间存在着显著的线性相关 ($F=42.92, P<0.001$)。

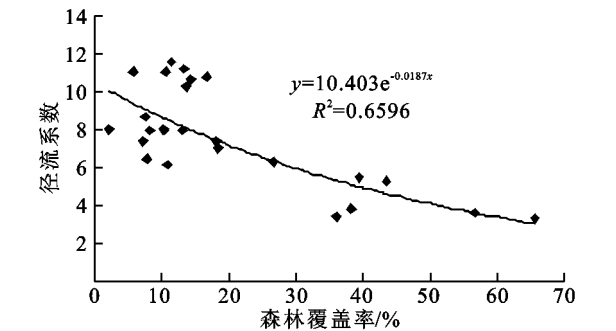


图 1 流域径流系数对森林覆盖率的响应

用森林覆盖率较大流域的径流深度与森林覆盖率较小流域的径流深度进行比较(不考虑其它自然条件引起的差异), 森林覆盖率较小的流域为较大流

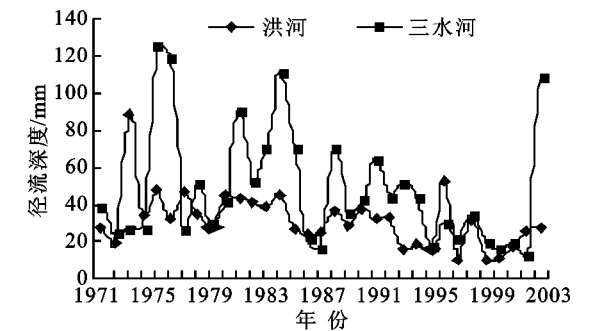


图 2 黄土高原流域径流年际变化对森林覆盖率的响应

域。黄土高原径流的年内分配主要受到河川补给的影响, 而河川补给主要来源于降水。因此, 黄土高原流域径流年内分配与降水的年内分布基本一致, 但不同流域径流年内格局又有差异。表 2 表明: 森林覆盖

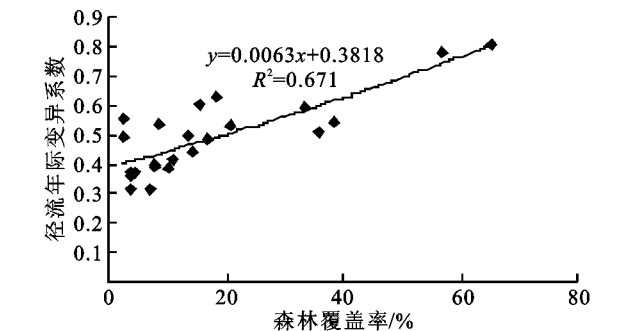
率的 1.2~1.5 倍, 径流量减少 25%~45%(表 1)。

降水是黄土高原径流形成的主要来源, 研究证明森林覆盖率较高的流域年降水量一般都大于森林覆盖率较低的流域^[2], 森林流域是黄土高原多雨中心, 而森林覆盖率高的流域的径流系数小于森林覆盖率高的流域, 说明黄土高原森林流域的降水-产流比例小, 径流量小。这进一步证实了刘昌明的研究结论^[2]。

表 1 黄土高原不同森林比率的径流比较

流域名称	流域面积/km ²	林地比率/%	径流深度/mm	径流系数
洪河	1307.0	2.22	34.67	6.43
茹河	3167.0	3.45	23.62	4.69
蒲河	4061.9	3.95	28.14	6.26
合水川	807.0	35.97	18.45	3.40
九龙川	621.4	38.15	20.66	3.61
葫芦河	4722.0	65.30	18.73	3.30

为了进一步说明森林对流域径流的调控作用, 对不同森林覆盖率的各子流域多年径流量的年际动态进行分析, 采用径流年际变异系数(多年径流量的平均值与其标准差的比值)来作为衡量流域径流年际变化的一个指标。由图 2 可以看出, 在森林覆盖率比较小的流域, 径流年际变化明显比较小, 随着森林覆盖率的增加, 流域径流量的年际变化出现逐渐增大趋势, 两者之间具有较为显著的相关性 ($F=44.86, P<0.001$)。对森林覆盖率较高的三水河流域与森林覆盖率低的洪河流域比较发现, 三水河流域径流年际变化较洪河流域年径流深度的年际变化要大, 其径流年际变异系数分别为 0.792 和 0.483。这可能主要与森林流域多年平均降水量大, 降水的年际变异大有关。



率小于 20% 的环江上游、东川、蒲河、茹河和洪河流域全年径流量主要集中在汛期的 6-9 月, 这些流域多年汛期平均径流量占到多年平均总径流量的 60% 以上, 年内径流分配极不均匀。森林覆盖率大于 20%

的葫芦河、三水河、合水川和达奚河流域的年内径流分配比较均衡,多年汛期径流发生在 7~10 月,而 6~9 月平均径流量只占到多年平均总径流量的 43.28%~51.47%。森林覆盖率较小流域的汛期径流量普遍大于森林覆盖率较大流域的汛期径流量,与森林覆盖率较小的流域相比,森林覆盖率较大的流域 6~9 月径流量减少了 10.0~15.0 mm,而枯水季节的 11 月

至次年 1 月,森林流域多年月平均径流深度是非森林流域的 1.2~1.5 倍,补枯效果较为明显。还可以看出,各流域汛期径流系数都大于枯季径流系数,而且森林流域的汛期降水-产流比例显著小于非森林流域,而枯季的差异却不是很显著。可见森林植被对流域径流有一定的调洪补枯作用,其调亏程度与流域森林覆盖率有关。

表 2 黄土高原各子流域的汛、枯期径流比较

流 域	汛期降 比例/%	汛期径 比例/%	汛期径流 系数	枯季降水 比例/%	枯季径流 比例/%	枯季径流 系数	年径流 系数
环江上游	71.59	76.27	5.56	29.41	6.82	3.46	4.70
东 川	71.68	65.44	7.25	29.32	16.69	4.55	6.41
蒲 河	68.64	67.33	7.44	31.36	21.40	5.07	6.26
茹 河	66.67	70.38	5.83	33.33	12.76	3.29	4.69
洪 河	68.06	61.67	6.87	31.94	18.66	4.35	6.43
合水川	67.90	51.47	4.90	32.10	28.85	3.27	3.40
达奚河	54.45	43.28	7.90	45.55	20.14	4.91	6.15
三水河	56.87	48.38	5.50	43.13	30.40	3.17	3.62
葫芦河	57.98	48.40	4.80	42.02	28.25	2.04	3.29

2.2 黄土高原森林对流域土壤的保持作用

植被,尤其是森林植被在防止土壤侵蚀、控制泥沙方面明显的生态效益已被很多研究所证实^[8-9]。当前在流域产沙量的计算与模拟方面主要有:经验相关法、概念模型法、单位线法等,但这些方法很少考虑森林植被在流域产沙中的作用,对于我们研究黄土高原森林对流域侵蚀量的作用都不适宜。研究认为影响流域侵蚀量的主要因子有:降水总量、径流深度、流域形状系数、森林比率和流域面积,对于黄土高原大尺度范围的自然流域,我们在以年为时间单位研究森林比率与流域侵蚀之间的关系时,假设其它条件一致,只考虑森林比率和单位面积的泥沙侵蚀量——侵蚀模数。对黄土高原中部 24 个流域森林分布比例与流域多年平均侵蚀模数进行分析(图 3),发现在森林覆盖率小于 5% 的北部各流域,

土壤侵蚀模数都在 10 000 t/km² 以上,随着流域森林覆盖率的增大,土壤侵蚀模数急剧递减,当森林覆盖率增大到 20% 以上时,侵蚀模数递减速率变缓,土壤侵蚀模数随流域森林覆盖率的增加呈指数递减趋势,二者之间相关非常显著($F=125.39$, $P<0.001$)。

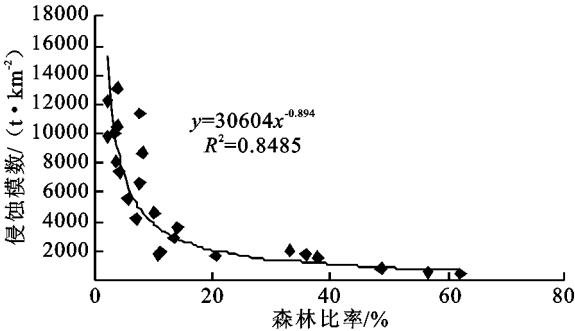


图 3 黄土高原森林覆盖率与流域侵蚀量之间的关系

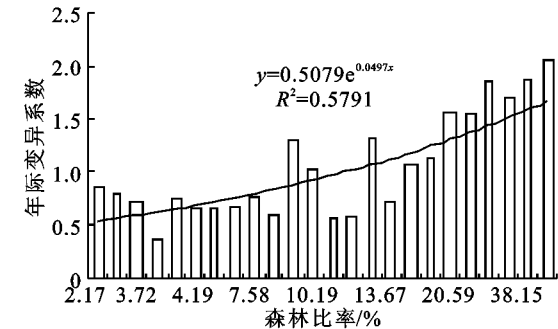


图 4 流域森林覆盖率与土壤侵蚀年际变化

对不同森林覆盖率流域的侵蚀年际变化作用的分析表明(图 4),森林覆盖率小于 5% 的各流域侵蚀

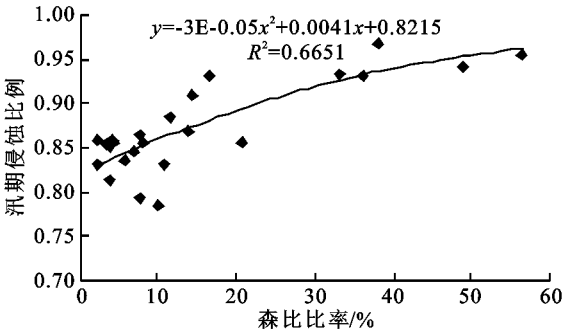


图 5 流域森林覆盖率与土壤侵蚀年内分配

年际变异系数都在 1.0 以下,随着森林覆盖率的增加,侵蚀的年际变化加大,侵蚀年际变化随流域森林

覆盖率的增加呈直线增大趋势,二者之间相关极显著($F=78.54$, $P<0.001$)。这主要是由于森林覆盖率高的各流域多年平均降水量较大,降水的年际变化也很显著,降水又是黄土高原土壤侵蚀最主要和直接的动因,降水的显著年际变化直接导致了土壤侵蚀的年际差异。在森林覆盖率较小的北部各流域,多年平均降水量普遍较小,年际变化相对较小,而且由于地表长期干旱,低强度的降水多渗入地下,形成地下径流,只有汛期高强度的降水才能形成径流,冲击、携带地表土壤产生泥沙输移,因此,森林覆盖率低的各流域土壤侵蚀年际变化较小。

在黄土高原,年土壤侵蚀量常是由几次大暴雨产生的洪水侵蚀造成的,据研究报道,黄土高原一次大暴雨的侵蚀产沙量可达到全年总产沙量的40%~86%^[3,7],因此,侵蚀的年内分配极不均匀。对不同森林覆盖率的流域汛期侵蚀比例分析发现,森林覆盖率较小的流域汛期侵蚀比例较小,随着森林比率增大,汛期侵蚀比例增大,二者之间有显著的线性相关($F=48.71$, $P<0.001$) (图5)。说明在森林比率低的流域,土壤侵蚀量大,虽然80%以上发生在降水集中的6~9月,但由于植被稀疏,土壤疏松,汛期以外时间的低强度降水也会产生土壤侵蚀,而森林比率高的流域,森林植被对地表覆盖比较好,低强度的降水一般不会导致侵蚀的发生,侵蚀只发生在汛期降水强度极大的暴雨发生过程中及其以后,土壤侵蚀相对较小。

2.3 森林水土保持作用的定量分析

为了推求黄土高原水土流失随流域森林覆盖率变化的规律,分析黄土高原水土流失-流域森林覆盖率关系曲线(图2-5)。这些曲线都呈现出不同的变化形式,可能由于森林覆盖率的森林郁闭情况不同和其它自然地理因素的影响所造成的。为了计算森林对流域水土流失量的影响,对流域森林覆盖率与水土流失的各项指标之间进行回归分析,森林覆盖率与流域径流深度的关系如式(4)。

$$R = 10.587e^{-0.02f} (F = 42.92, P < 0.001) \quad (4)$$

式中: f ——流域森林比率; R ——流域径流系数。

由公式(4)可以得出,当流域森林比率为 $f=0$ (无森林)时,流域径流系数为 $R=10.587$;当流域森林比率 $f=50\%$ 时,流域径流系数 $R=3.891$;当流域森林比率 $f=100\%$ 时,径流系数 $R=1.433$ 。

假设某个流域多年平均降水量650 mm,森林比率由原来的80%降低到40%,则该流域年径流深

度会增大1.23倍。

森林覆盖率与流域土地侵蚀模数的关系:

$$E = 30604f^{-0.894} (F = 125.39, P < 0.001) \quad (5)$$

式中: f ——流域森林比率; E ——流域侵蚀模数。

同样由式(5)可以得出,当流域森林比率 $f=0$ 时,流域的平均侵蚀模数 $R=30604 \text{ t/km}^2$;当森林覆盖率由10%增加到20%时,侵蚀模数可减少46.19%当流域森林比率达到 $f=60\%$ 时,侵蚀模数 $E=787.25 \text{ t/km}^2$,达到了微弱侵蚀等级。

3 结论

通过对黄土高原中部24个流域的森林比率与多年水文观测资料之间的关系进行分析,发现黄土高原流域降水-径流比例随森林比率的增大,具有明显的递减趋势,森林面积的增加在一定程度上减少了流域的径流输出量,减缓了径流在汛期和枯季分配的不均匀程度,具有调洪补枯的作用。森林比率较高的山区流域,受降水量年际变异的影响径流的年际变化比森林比率低的流域大。流域森林比率的增加可以明显减少土壤侵蚀模数,当森林比率由10%增大了20%时,流域平均土壤侵蚀模数减小了46.19%,与森林比率小的流域相比较,森林比率大的流域侵蚀多由汛期的高强度降水引发,表现为汛期侵蚀比例极高,年际变化较大等特点。

参考文献:

- [1] 王礼先,张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 1998, 6(2): 14-21.
- [2] 刘昌明,钟骏襄. 黄土高原森林对年径流量影响的初步分析[J]. 地理学报, 1978, 33(2): 112-126.
- [3] 余新晓,毕华兴,朱金兆,等. 黄土地区森林植被水土保持作用研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(5): 433-440.
- [4] 黄明斌,刘贤赵. 黄土高原森林植被对流域径流的调节作用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1057-1060.
- [5] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬. 黄土高原森林植被水土保持机理研究[J]. 林业科学, 2001, 37(5): 140-144.
- [6] 王万忠,焦菊英. 黄土高原侵蚀产沙强度的时空变化特征[J]. 地理学报, 2002, 57(2): 210-217.
- [7] 余新晓,毕华兴,朱金兆,等. 晋西黄土高原次暴雨侵蚀产沙规律与森林植被减沙效益研究[C]//中国黄土高原治山技术培训项目合作研究论文集. 北京:中国林业科学出版社, 1994.
- [8] 王晗生,刘国彬,王青宁. 流域植被整体防蚀作用及景观结构剖析[J]. 水土保持学报, 2000, 14(5): 73-97.
- [9] 唐克丽. 黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M]. 北京:科学技术出版社, 1993.