

嘉陵江流域降水及径流演变规律分析

白桦¹, 穆兴民^{1,2}, 高鹏^{1,2}, 王飞^{1,2}

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:流域降水与径流演变规律的异同性,可有效表征人类活动对流域径流的影响。基于嘉陵江流域 1958—2008 年水文、气象资料,探寻流域年降水量、年径流量的空间分布规律,采用经验正交函数和时间序列分析法,研究年降水量、降水量年内分配指数和年径流量的演变规律,对比演变规律的同步及异步变化特征。结果表明:年降水量自流域东南向西北递减,年径流深分别于涪江、渠江上游和流域北部、涪江中游、流域中游干流段出现相对高值和低值。流域年降水量、降水量年内分配未呈现显著变化趋势,无突变点,把口站北碚站年径流量下降趋势明显,于 1990 年产生突变;年降水量和年径流量主周期一致,均为 35 a 和 21 a,但主周期显著程度不同;年降水量和年径流量于 2002—2008 年丰枯状态不同,径流相对于降水呈现强减少趋势。流域自然条件和水利水保措施、城市化等人类活动造成降水与径流主周期显著程度的差异,以及降水与径流趋势性、突变性及阶段性变化的不同步。

关键词:演变规律;降水;径流;嘉陵江;人类活动

中图分类号:P333.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)01-0102-05

Analysis on Spatio-temporal Variation of Precipitation and Streamflow in the Jialingjiang River Basin

BAI Hua¹, MU Xing-min^{1,2}, GAO Peng^{1,2}, WANG Fei^{1,2}

(1. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The differences between precipitation and streamflow can effectively represent the impact of human activities on changes of streamflow in a catchment. This study applies EOF and time series analysis method to investigate spatio-temporal variation of streamflow and precipitation based on long term hydrol-meteorological data in the Jialingjiang River Basin from 1958 to 2008. The results indicate that (1) the precipitation decreased from the southeast to the northwest in the basin and the runoff depth showed basically consistent gradient with precipitation; (2) Annual precipitation and its distribution indices do not present significant/evident trends and changing points. However, annual streamflow at Beibei station decreased significantly at 95% confidence level, and had a changing point in 1990. The wavelet analysis showed that the annual precipitation and streamflow had same periodical features (35 and 21 years). The annual streamflow showed relative drier condition compared with annual precipitation during 2002—2008. It is concluded that the natural condition, water conservation project and urbanization lead to differences of significance level between precipitation and runoff, as well as the temporal trend and changing point in the Jialingjiang River Basin.

Key words: variation; precipitation; streamflow; Jialingjiang River Basin; human activity

嘉陵江上游西汉水、白龙江及川中丘陵地区是长江上游的重点产沙区,流域集中了大量诸如长江上游水土保持重点防治工程(简称长治工程)^[1]的水土保持措施和以碧口水库、升钟水库、宝珠寺水库为代表

的水利工程,同时流域自 20 世纪 90 年代径流量剧烈减少^[2],2006 年和 2010 年连续发生严重水文干旱。因此,人类活动对流域径流演变规律的影响研究对自然灾害的预警和防治、水资源的可持续利用具有重要

收稿日期:2011-08-08

修回日期:2011-09-13

资助项目:国家基础研究“973”项目中“区域水土流失过程与趋势分析(2007CB407203)”;中国科学院国际合作项目“渭河流域水环境问题综合治理对策研究”

作者简介:白桦(1986—),男,河北省任丘市人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail:baihua1985@nwsuaf.edu.cn

通信作者:穆兴民(1961—),男,陕西省华阴市人,博士,研究员,博士生导师,研究方向为生态水文学。E-mail:xmmu@ms.iswc.ac.cn

的理论和实际意义。径流是降水和下垫面相作用的产物,在下垫面相对稳定前提下,降水与径流演变规律保持相对一致,而演变规律的差异性可表征人类活动的影响。已有研究更多地关注降水量对水沙数量的影响^[3-5],忽略降水年内分配的差异引起水沙数量的变化。本文基于流域降水、径流资料,探寻流域降水、径流、产流条件的空间分布特征,采用泰森多边形和经验正交函数对降水量进行面上综合,选取时间序列分析方法全面、系统地挖掘流域降水、降水年内分配、流域径流的演变规律,总结产生差异的原因。

1 资料与方法

嘉陵江流域位于 29° — 35° N 和 102° — 110° E,流域面积近 16 万 km^2 。本文基于嘉陵江流域 13 个国家气象台站和 9 个水文站 1958—2008 年月、年降水量和径流量数据,采用普通克里格^[6]方法对流域降水和径流进行空间插值,选取泰森多边形和经验正交函数分别计算流域面降水量和各站降水量主成分^[7],并利用 Mann—Kendall 趋势^[8-9]及突变点分析^[10](均取显著性水平为 0.05)、Morlet 复小波^[11]、累积距平曲线^[12]挖掘流域面降水量、各站降水量主成分、北碚站年降水量趋势、突变、周期及阶段性特征。

选取泰森多边形法计算流域年降水量,实质上是对各气象台站实测点降水量进行面积加权求和,计算

结果的准确度受地形等因素影响较大。泰森多边形法用于降水量年内分配指数的流域综合,没有明显的物理意义。考虑本文旨在探寻流域年降水量、降水量年内分配指数的演变过程,选取经验正交函数对各站年降水量、降水量年内分配指数进行流域综合,可有效印证流域年降水量和揭示降水量年内分配指数的演变规律。

2 结果与分析

2.1 流域降水量和径流量的空间分布

基于嘉陵江流域 13 个国家气象台站 1958—2008 年年降水量和 9 个水文站 1958—1983 年年径流量资料,计算多年平均径流量和多年平均径流深,并将各水文站径流深点绘于其所控制区域中心处。经 Kolmogorov—Smirnov 方法验证,各站对应年降水量和年径流深服从正态分布^[13],采用普通克里格方法对其进行空间插值,绘制流域多年平均降水量和多年平均径流深等值线,详见图 1。由图 1 可以看出,年降水量自流域东南向西北递减,年径流深于涪江和渠江上游出现相对高值,于流域北部和涪江中游及中游干流段出现相对低值。年降水量和径流深的空间比较可有效揭示流域不同区域的产流条件。分析认为,流域内,涪江上游和中游分别拥有相对较好和较差的产流条件。

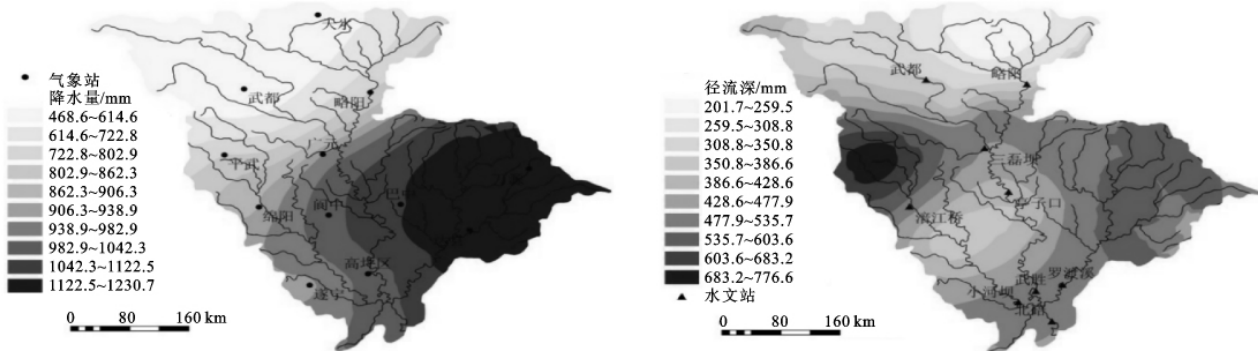


图 1 嘉陵江 1958—2008 年多年平均降水量、多年平均径流深等值线

2.2 流域降水和径流的演变规律

2.2.1 流域面平均降水量 选取 1958—2008 年各台站月、年降水量,根据泰森多边形法(见图 2)计算流域月、年降水量。选取经验正交函数方法提取各气象台站年降水量、降水量年内分配系数(变差系数和集中度)的主成分,计算嘉陵江年降水量、降水量年内分配系数(变差系数、集中度)方差和累积方差解释率(图 3),截取方差解释率大于 80%或者累积方差解释率大于 85%的模式代替原指标用于流域年降水量、降水量年内分配指数演变规律的分析。图 3 表明,各变量的第一模式可代替原指标。



图 2 嘉陵江流域气象站泰森多边形

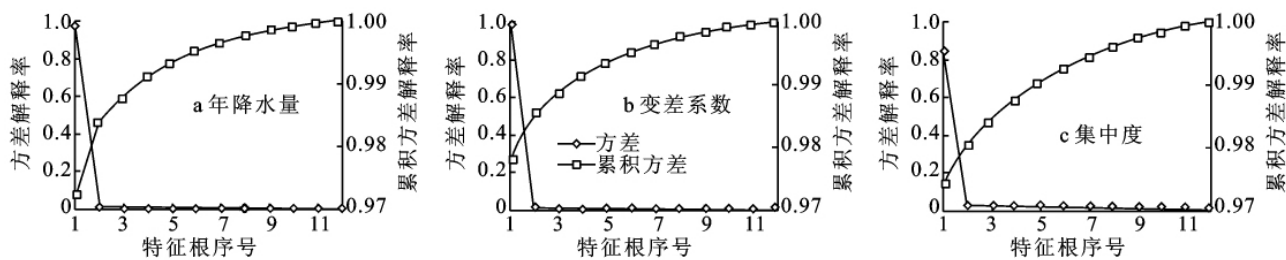


图 3 嘉陵江年降水量、年内分配系数各模态(累积)方差解释率

2.2.2 流域降水量、径流量的趋势性及突变性 采用 MK 方法,分别检验 1958—2008 年流域年降水量、各站年降水量第一主成分、流域把口站北碚站年径流量的趋势和突变点(图 4)及降水量年内分配系数第一主成分(变差系数和集中度)趋势。鉴于 MK 方法检验出的年降水量、各站年降水量第一主成分突变点存在明显的不合理点,选取 Pettitt 方法对其重新检验。经计算,仅北碚站年径流量呈现显著减少趋势。图 4 表明,北碚站年径流量于 1990 年突变,Pettitt 检验表明年降水量及其第一主成分没有统计意义上的突变点。因此,北碚站年径流量自 1990 年显著减小。

2.2.3 流域降水量、径流量的周期性 基于 1958—2008 年流域年降水量、各站年降水量第一主成分、北碚站年径流量,选取 Morlet 复小波对其进行一维连续小波变换,计算小波方差,并绘制小波方差图和小

波系数实部时频分布图(图 5—6)。图 5 分析表明,流域年降水量、各站年降水量第一主成分第一、二主周期分别为 35 a 和 21 a;北碚站年径流量第一、二主周期分别为 21 a 和 35 a。对比可知,流域年降水量和年径流量主周期一致,但是年降水量和年径流量分别在 35 a 和 21 a 时间尺度上周期成分相对显著。

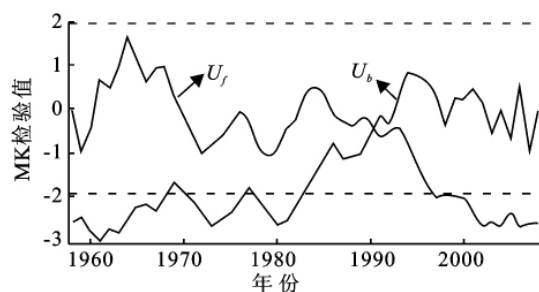


图 4 北碚站年径流量突变点分析(MK 方法)

注:\$U_f\$ 和 \$U_b\$ 分别代表正序和逆序 MK 检验值序列

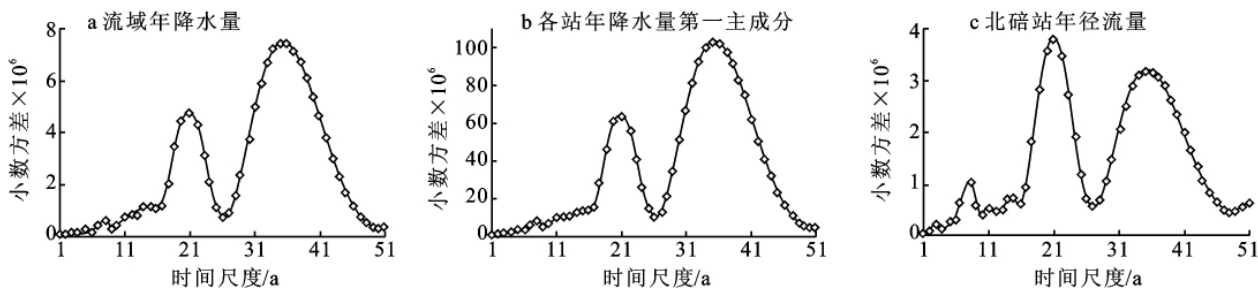


图 5 嘉陵江流域年降水量及年径流量小波方差

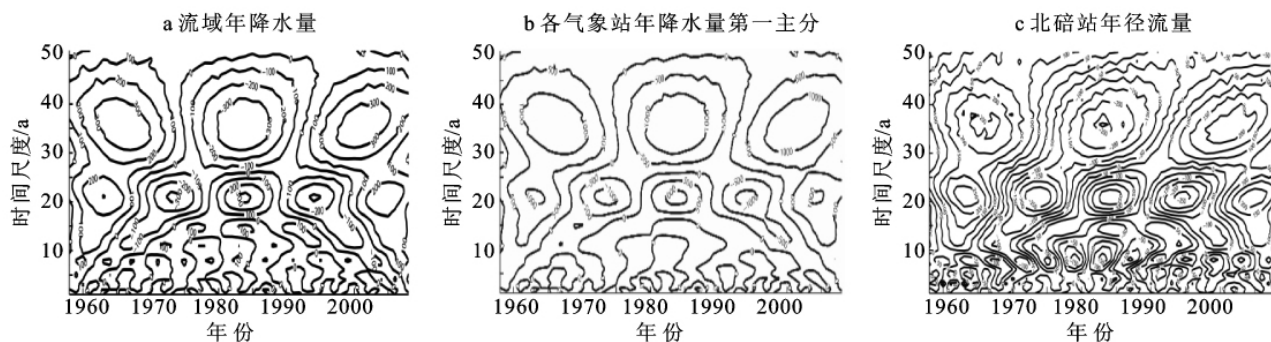


图 6 嘉陵江流域年降水量及年径流量小波系数实部时频分布

2.2.4 流域降水量、径流量的阶段性 随机变量的小波系数实部和累积距平的演变过程可分别有效揭示原变量在不同时间尺度及总体上表现出来的阶段性特征。选取流域年降水量、各气象站降水量第一主

成分、北碚站年径流量主周期对应小波系数实部随时间的变化过程(图 6)及各随机变量累积距平曲线(图 7)表征流域降水量、径流量的丰枯变化。图 6 表明,流域年降水量、各站年降水量第一主成分丰枯变化一

致,在 35 a(第一主周期)尺度上,两个随机变量于 1958—1975—1992—2008 年呈现丰—枯—丰状态;在 21 a(第二主周期)尺度上,两个随机变量于 1958—1968—1978—1989—1999—2008 年呈现丰—枯—丰—枯—丰状态。北碚站年径流量阶段性变化特征与流域降水量相似,在 21 a(第一主周期)尺度上,北碚站年径流量于 1958—1968—1979—1989—1999—2008 年呈现丰—枯—丰—枯—丰状态;在 35 a(第二主周期)尺度上,北碚站年径流量于 1958—1975—1992—2008 年呈现丰—枯—丰状态。

由图 7 可以看出,流域年降水量和各站年降水量第一主成分总体上阶段性变化规律一致,均于 1960—1968—1979—1985—1993—2002—2008 年呈现丰—平—丰—平—枯—平的变化状态;北碚站年径流量于 1960—1968—1979—1985—1993—2008 年呈现丰—平—丰—平—枯的变化状态。流域年降水量、各站年降水量主成分阶段性变化一致,和北碚站年径流量阶段性变化相似,但是流域降水量和径流量于 2002—2008 年丰枯阶段不一致,径流相对于降水呈现强减少趋势。

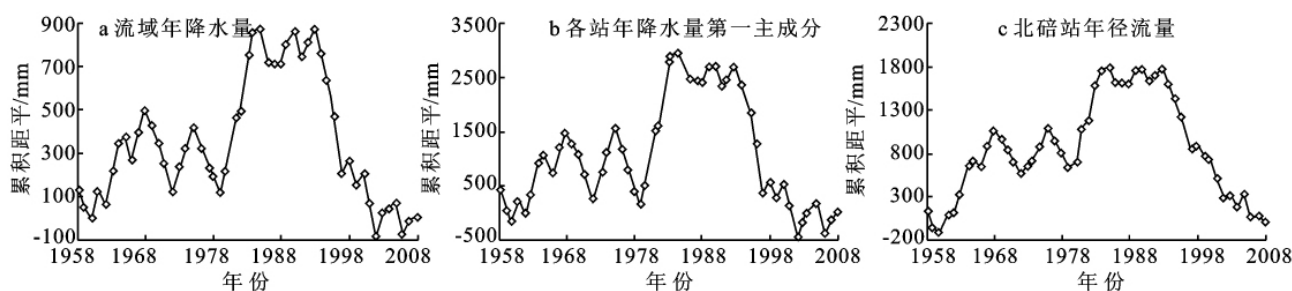


图 7 嘉陵江流域年降水量及年径流量累积距平曲线

2.3 降水与径流演变规律异同比较及原因分析

降水是径流的基本来源,两变量演变规律应表现出一定程度的相似性,其差异性主要来源于下垫面的改变,在不考虑嘉陵江流域 2008 年之前的地质地貌变化前提下,流域降水与径流在周期、趋势、突变、阶段特性的差异可表征人类活动的影响。

2.3.1 流域降水与径流周期特性差异及原因分析

嘉陵江流域降水与径流主成分一致,但主成分显著程度不同。究其原因,嘉陵江流域是一个宽扁状扇形流域^[14],径流易集中,各支流径流易在同一时间到达流域出口断面。年降水量自流域东南向西北递减,高值区靠近下游。流域径流容易集中和年降水量临近下游等流域自然因素造成流域调蓄能力有限,对较小频率对应年径流量(此处频率指大于等于某年径流量的频率)影响相对较小。嘉陵江建设了诸如碧口水库、升钟水库、宝珠寺水库等大量水利工程,水库尤其是多年调节水库,相对于建库前,可减小较小频率年径流量,增大较大频率年径流量,使天然状态下的年径流量波动程度降低、周期变化规律明显。但是,水利工程调节能力有限,对于大洪水虽有削峰作用,但对规模较大洪水的洪水总量和频率较小的年径流量调节作用有限。频率较小的年径流量对应较大的重现期或者周期,水利工程对频率较小的年径流量有限的调节作用造成其对年径流量较大周期的作用不明显。水土保持措施对规模较大洪水和频率较小的年径流量作用相对有限,却可减少频率较大的年径流量。嘉陵江水土保持措施使流域水土流失面积自 1980s 晚

期的 82 830 km²(占流域总面积的 52.1%)降至 2005 年的 62 662 km²(占流域面积的 39.4%)^[15-16]。其中,针对重点产沙区,国家于 1989—1995 年开始实施长江上游水土保持重点防治工程(简称长治工程)^[1]。以长治工程为代表的水土保持措施于 1989—1996 年底控制了 2.136 万 km² 水土流失面积,治理程度 25.8%^[17],引起了输沙量和径流量的减少^[18]。因此,嘉陵江流域的自然条件、水利水保措施等对较小周期对应的年径流量作用效果大于较大周期对应的年径流量,造成降水与径流主周期显著的差异。

2.3.2 流域降水与径流趋势、突变、阶段特性差异及原因分析 水利工程大量建设,库区水深较建库前增大,导致库区水头增加,从而增大了渗漏损失;自由蒸发水面面积增大,蒸发量较建库前增加^[19]。流域水土保持措施尤其是林草措施的增加增大了流域涵养水源的能力,使水分更多地在流域内被耗散和利用^[20]。自改革开放以来,嘉陵江流域经济发展速度快、人口膨胀,水资源利用量相应增大;城市化进程加快,不透水面积增加,城市热岛效应日趋显著^[21],减少了城市地下水入渗量^[22],增大了流域的蒸、散发能力。因此,人类活动使流域出口断面径流量减少,其水文效应通过流域降水与径流趋势性、突变性及阶段性变化特征的差异表现出来,即在年降水量、降水量年内分配没有明显趋势和突变的条件下,径流于 1990 年显著减少;年降水量和年径流量阶段性变化与 2002—2008 年丰枯阶段不一致,期间,年径流相对于年降水呈现强减少趋势。

3 结 论

(1)年降水量自流域东南向西北递减,年径流深于涪江和渠江上游出现相对高值,于流域北部和涪江中游及流域中游干流段出现相对低值。

(2)基于各台站 1958—2008 年月、年降水量和径流量数据,根据泰森多边形法计算流域月、年降水量;采用经验正交函数方法提取各变量主成分,经证实,第一模态可代替原指标,用于分析并印证年降水量、变差系数、集中度的演变规律。流域年降水量、降水量年内分配未呈现显著趋势,无突变点;北碚站年径流量于 1990 年显著减少。流域年降水量和年径流量主周期一致,均为 35 a 和 21 a,但是年降水量和年径流量分别在 35 a 和 21 a 时间尺度上周期成分更加显著。流域年降水量、各站年降水量主成分阶段性变化一致,和北碚站年径流量阶段性变化相似,但是流域降水量和径流量于 2002—2008 年丰枯状态不同,径流相对于降水呈现强减少趋势。

(3)嘉陵江流域的自然条件、水利水保措施等对较小周期对应年径流量作用效果大于较大周期对应年径流量,造成降水与径流主周期显著的差异。以水利水保措施、城市化为代表的人类活动使流域出口断面径流量减少,其水文效应通过流域降水与径流趋势性、突变性及阶段性变化特征的差异表现出来。

参考文献:

- [1] 毛红梅,裴明胜. 近期人类活动对嘉陵江流域水沙量影响[J]. 水土保持学报,2002,16(5):101-104.
- [2] 戴明龙,张明波,叶莉莉. 长江流域典型河流水沙过程变异研究[J]. 水文,2009,29(2):55-58.
- [3] 张信宝,文安邦. 长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因[J]. 水利学报,2002,33(4):56-59.
- [4] 许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响[J]. 地理科学,2006,26(4):432-437.
- [5] 高鹏,穆兴民,王炜. 长江支流嘉陵江水沙变化趋势及其驱动因素分析[J]. 水土保持研究,2010,17(4):57-66.
- [6] 陈晓宏,张蕾,时钟. 珠江三角洲河网区水位特征空间变异性研究[J]. 水利学报,2004,35(10):36-42.
- [7] 钱维宏,刘大庆. 中国北方百年四季降水趋势与海平面气压形式[J]. 地理学报,2003,58(S):49-60.
- [8] 徐利岗,周宏飞,李彦,等. 中国北方荒漠区降水稳定性与趋势分析[J]. 水科学进展,2008,19(6):792-799.
- [9] Mu Xingmin, Zhang Lu, McVicar T R, et al. Estimating the impact of conservation measures on stream-flow regime in catchments of the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Progress,2007,21(16):2124-2134.
- [10] 穆兴民,巴桑赤烈, Zhang Lu. 黄河河口镇到龙门区间来水来沙变化及其对水利水保工程的响应[J]. 泥沙研究,2007(2):36-41.
- [11] 郭文献,夏自强,王鸿翔,等. 近 50 年来长江宜昌站水温变化的多尺度分析[J]. 水利学报,2008,39(11):1197-1203.
- [12] 穆兴民,李靖. 黄河天然径流量年际变化过程分析[J]. 干旱区资源与环境,2003,17(2):1-5.
- [13] 王景雷,孙景生,刘祖贵,等. 作物需水量观测站点的优化设计[J]. 水利学报,2005,36(2):1-9.
- [14] 殷建国. 嘉陵江上游暴雨洪水特性分析[J]. 灾害学,2008,23(S):66-70.
- [15] 黄胜. 嘉陵江流域北碚站年输沙量的变化规律及预测研究[J]. 泥沙研究,2008(4):28-30.
- [16] 王莉. “3S”技术在嘉陵江流域水土流失监测中应用[J]. 水土保持应用技术,2007(2):26-28.
- [17] 杨泉,何文社. 嘉陵江水土保持对三峡工程水沙的影响[J]. 兰州交通大学学报:自然科学版,2005,24(3):37-40.
- [18] 马炼,张明波,郭海晋,等. 嘉陵江流域水保治理前后沿程水沙变化研究[J]. 水文,2002,22(1):27-31.
- [19] 贾绍凤,张士锋. 黄河流域可供水量究竟有多少[J]. 自然资源学报,2001,16(6):547-551.
- [20] 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.
- [21] 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,等. 城市热岛的生态环境效应[J]. 生态学报,2005,25(8):2055-2060.
- [22] 陈宝冲. 城市化可能引起地貌灾害及其防治[J]. 灾害学,1990(2):23-28.