

# 黄河中上游地区半个世纪降水与温度变化分析

殷贺<sup>1,2</sup>, 王仰麟<sup>1</sup>, 彭建<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学 深圳研究生院 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055)

**摘要:**采用黄河流域中上游地区 85 个气象观测站点的逐月温度和降水数据(1956 年 1 月 - 2006 年 12 月), 依据小波变换, 对黄河流域中上游地区的气候因子进行不同时间尺度的分析。研究表明: 黄河流域中上游地区 51 a 的气温和降水变化存在随时间尺度而变化的规律, 不同时间尺度的规律相互作用, 共同构成黄河流域中上游地区气候变化特征。依据小波分析的结果, 定性预测未来黄河流域中上游地区的将继续升温, 降水略有增加。

**关键词:**气候因子; 时间尺度; 小波分析; 黄河流域

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)01-0069-05

## Variation Analysis on Precipitation and Temperature in Upper Reach of Yellow River Basin from 1956 to 2006

YIN He<sup>1,2</sup>, WANG Yang-lin<sup>1</sup>, PENG Jian<sup>1,2</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. The key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

**Abstract:** In this paper, Mexican Hat Wavelet was used to analyze the multi-scale characteristics of the climate change in the upper and middle reaches of Yellow River Basin, based on the monthly data of temperature and precipitation from 1956 to 2006 coming from the total 85 meteorological observation stations respectively. The results showed that there were different variation rules in climate factors during 51 years in the upper and middle reaches of Yellow River Basin with temporal scale changes. The interactions of rules had impact on changes of climate characteristics in this region. Meanwhile, the wavelet coefficients patterns exhibit a probable increasing trend in temperature and humidity in the following years.

**Key words:** climate factors; temporal scale; wavelet analysis; Yellow River Basin

流域的气候变化对流域水资源及其生态环境具有显著的影响, 黄河流域作为我国最主要的流域之一, 其气候的变化不仅直接影响到流域内水资源的利用与管理, 还会对黄河流域的生态环境产生深远的影响。目前, 区域尺度乃至全球的气候变化引发了一系列生态问题, 引起了政府、公众以及科学界的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。

气候系统是一个复杂的非线性系统, 具有多层次和多尺度结构<sup>[3]</sup>。黄河流域面积广阔, 所包含的地貌类型复杂多样, 控制流域各个地区的大气环流也不尽相同, 其气候系统更具有复杂性和不确定性。

从区域的视角出发, 对黄河流域中上游地区的气温和降水等主要气候因子进行时间多尺度分析, 对于解释和预测我国干旱区和半干旱区的气候变化特征, 了解区域水资源演变, 具有重要的意义。

小波分析是在 Fourier 分析基础上发展起来的一种新的时频局部化分析方法, 它对于一些多尺度、多层次、多分辨率问题的研究, 往往能得到令人满意的结果<sup>[5]</sup>。小波分析在气候系统上的应用极其广泛, 可借助小波变换的时频局部化优势准确地找到气候时间序列的大小时间尺度(周期)和突变点所在的位置, 对气候系统的周期性和演变趋势做出判断,

\* 收稿日期: 2008-09-09

基金项目: 国家科技支撑计划项目“综合生态与食物安全风险防范关键技术示范”(2006BAD20B07)

作者简介: 殷贺(1985-), 男, 山东徽山人, 硕士, 主要从事景观生态学与土地利用研究。E-mail: yinhe@pku.edu.cn

从而为气候系统分析、预测提供依据<sup>[6]</sup>。目前,一些学者已经应用小波分析在区域气候特征的研究上,主要是针对区域的气候特征,选择不同的小波变换函数,对区域的气候时间序列进行分解,揭示了气候变换及其主周期类型<sup>[7-12]</sup>。

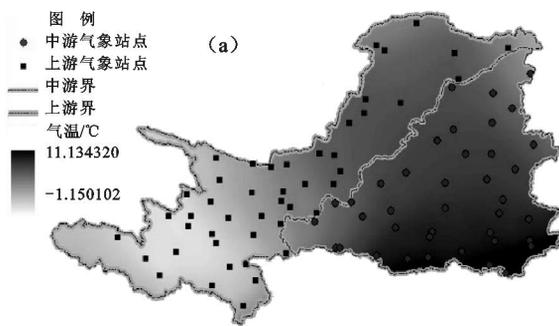
通过小波分析,对黄河流域中上游地区 1956 - 2006 年逐月的气温和降水时间序列进行尺度变换,分析其尺度规律,检验流域气象发生突变点,依照发生周期及对未来的趋势做出判断,进而揭示黄河流域中上游地区气候特征,为干旱区和半干旱区水资源管理提供决策依据。

## 1 研究区域及方法

### 1.1 研究区概况

黄河流域西起巴颜喀拉山,东临渤海,北抵阴山,南达秦岭。东西长 1 900 km,南北宽 1 100 km,位于 95°53' - 119°05' E,32°10' - 41°50' N,横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原等 4 个地貌单元,流域总面积达 79.5 万 km<sup>2</sup> (含内流区面积 4.2 万 km<sup>2</sup>)。以黄河流域中上游地区为研究区域,研究区西起黄河源头,东至华北平原西部边界,南至秦岭北麓,北至阴山,地理坐标 95°53' - 113°35' E,32°12' - 41°50' N,东西长约 1 540 km,南北宽约 1 100 km,面积为 72.31 万 km<sup>2</sup>。

研究区深居内陆内部,气候、降水、蒸发、光热资



源及无霜期等有较大差异。流域内气候类型主要是干旱、半干旱气候,西部和北部地区干旱,东部及南部地区相对湿润。黄河上游区域多年平均气温 1 ~ 8,中游区域 8 ~ 14。中游无霜期 150 ~ 180 d,上游以上区域为 50 ~ 100 d。区域内气温差异明显,青藏高原高海拔区年均气温较低,黄河中游地区气温较高。区域内年均温最高的站点是山西运城站,达到 13.9;气温最低的是青海中心站,多年平均温为 - 2.9。研究区多年平均降水量达 370 mm,多年平均蒸发量为 700 ~ 1 800 mm。区域内的降水分布也不均衡,呈现出南部多,北部少的特点,降水呈现出由东南向西北递减的特点,区域内降水最多的站点是河南栾川站,多年平均降水量达到 708 mm;北部内蒙古河套地区降水最少,其中最低的站点是内蒙古的杭锦后旗站,多年平均降水量仅为 116 mm。

### 1.2 研究数据及处理

本文采用的黄河流域中上游地区逐月温度和降水数据(1956 年 1 月 - 2006 年 12 月)是由国家气象局国家气象数据分享服务系统(<http://www.cma.gov.cn/>)所提供的,来自黄河流域中上游地区 8 个省、自治区所分布的 85 个气象观测站点。首先对数据进行预处理,为了消除月份变化的影响,对每月气温和降水数据进行距平,同时采用 5 a 距平的方式,对 51 年的气温和降水数据进行分析(表 1)。

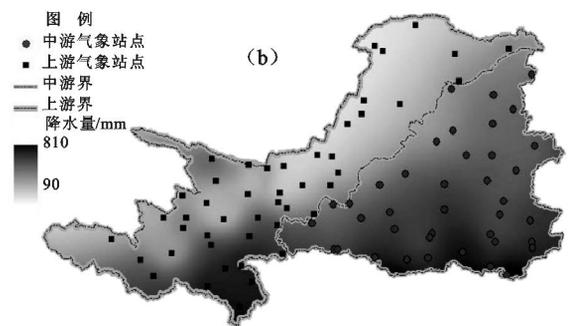


图 1 黄河流域中上游地区温度(a)、降水(b)分布图

表 1 1956 - 2006 年不同时期黄河流域中上游地区温度、降水距平值

时期	1956 - 1960 年	1961 - 1965 年	1966 - 1970 年	1971 - 1975 年	1976 - 1980 年
温度距平	- 0.33	- 0.25	- 0.57	- 0.21	- 0.29
降水量距平	44.98	51.58	8.18	14.98	2.98
时期	1981 - 1985 年	1986 - 1990 年	1991 - 1995 年	1996 - 2000 年	2001 - 2006 年
温度距平	- 0.37	0.07	0.17	0.71	0.89
降水量距平	15.98	- 29.22	- 43.42	- 35.62	- 25.38

### 1.3 小波分析

小波就是函数空间  $L^2(R)$  中满足下述条件的一个函数或者信号  $(x)$ 。

$$C = \frac{1}{R^*} \int_{R^*} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (1)$$

式中:  $R^* = R - \{0\}$  表示非零实数全体,有时,  $(x)$

也称为小波函数。对于任意的实数对  $(a, b)$ , 其中, 参数  $a$  必须为非零实数, 称如式(2)的函数:

$$a, b(X) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \left( \frac{x-b}{a} \right) \quad (2)$$

由小波母函数  $\psi(x)$  生成的依赖于参数  $(a, b)$  的连续小波函数, 简称为小波。

小波变换的多尺度分析是一种对函数空间的逐级剖分, 多尺度的尺度空间域是由一特定尺度的函数在不同尺度上“拉伸”所构成的。因此, 需要对小波尺度因子  $a$  进行定义,  $a$  越小, 分辨率越大。小波尺度  $a$  到实际尺度需要一个转换过程, 可以利用转换公式将小波尺度转化为实际研究对象的真实尺度。

$$F = \frac{F_c}{\cdot} \quad (3)$$

式中:  $\cdot$ ——实际采样的周期,  $F$ ——实际代表的真实尺度,  $F_c$ ——采样的频率(小波变换尺度);  $\cdot$ ——小波的中心频率。本文的数据是逐月数据,  $\cdot$  为 12; 小波变换尺度  $F$  为 1~128, 步长为 2; 在 MATLAB7.3 中, 通过 centfrq 函数可以求出在 8 次迭代的情况下墨西哥小帽函数的中心频率为 0.25。通过计算, 可以将小波尺度转换成真实尺度, 实际尺度为  $1/3 \sim 42$  a, 取前 32 个尺度, 实际尺度为  $1/32 \sim 21$  a。在母小波的选择上, 由于墨西哥帽小波在检测时间序列的奇异性方面表现出良好的性能, 因此本文选择墨西哥帽小波为母小波。

通过 Matlab7.3 编程, 将黄河流域中上游地区气温和降水两个时间序列墨西哥小帽函数相内积, 得到不同尺度下的小波系数, 并对小波系数作二维图。为更加清楚地显示时间序列的变化周期, 对逐尺度小波方差作图, 进而确定其优势尺度。

## 2 结果分析

### 2.1 气候系统时间序列的距平分析

从 1956 - 2006 年, 研究区域温度总体呈上升趋势, 降水总体呈下降趋势, 不同时期的气温和降水也存在着不同的震荡趋势。

20 世纪 60 年代黄河流域中上游地区的气温较低, 尤其在 1966 - 1970 年, 气温下降趋势明显, 70 年代的黄河流域中上游地区, 气温开始回升; 80 年代前期, 气温开始震荡下降, 80 年代后期出现回升; 进入 90 年代以后, 气温的升高趋势明显, 1995 年以后的黄河流域中上游地区气温开始加速升高, 2001 - 2006 年的 6 a 距平达到 0.89。和气温相类似, 黄河流域中上游地区的降雨也出现震荡波动的局面, 50 年代后期到 60 年代前期, 黄河流域中上游地区

的降水颇为充沛, 60 年代后期开始, 黄河流域中上游地区出现降水大幅减少, 到 80 年代前期, 降水又略有增加; 进入 90 年代以后, 降水逐渐在波动中不断下降。总体而言, 黄河流域中上游地区的气温呈现出波动中升高的趋势, 降水则在不断的高、低震荡中减少。

### 2.2 温度序列小波系数分析

在 MATLAB 7.3 中, 通过 Data Cursor 功能, 追踪温度序列小波系数(图 2)的变化, 发现研究区域温度时间序列小波系数存在着 3 个主要波动周期: 3~5 a、8~10 a 和 18~20 a, 长周期之中蕴含着更短的周期, 具有一定的自相似特征, 表明黄河流域中上游地区的气温特征具有一定的规律。

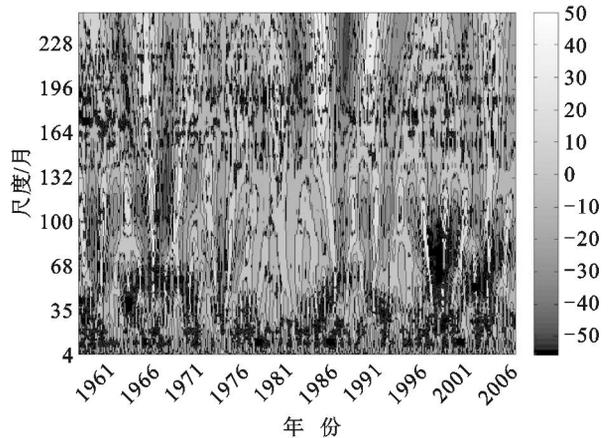


图 2 黄河流域中上游地区温度序列小波系数图

(1) 在 3~5 a 的波动周期上, 反映为 50 年代后期到 60 年代前期的正向震荡, 60 年代后期的负向震荡, 70 年代前期的正向震荡, 70 年代后期到 80 年代前期的负向震荡, 到 80 年代以后为正向震荡。从图 2 小波变化域的能量波动看, 主要的能量聚集中心主要有 11 个, 代表气温波动能量变化的特性。能量的极值点分别对应的是 1961 年、1966 年、1973 年、1978 年、1982 年、1987 年、1990 年、1994 年、1998 年、2002 年和 2006 年。围绕 11 个能量聚集点, 黄河流域中上游地区的气温在高、低起伏中不断波动。

(2) 在 8~10 a 的波动周期上, 黄河流域中上游地区气温的整体趋势是围绕着 1965 年、1973 年、1982 年、1990 年、1998 年和 2005 年等 6 个波动中心不断波动起伏。20 世纪 50 年代后期到 60 年代前期黄河流域中上游地区为相对暖期, 60 年后后期到 70 年代前期为相对冷期, 此后, 黄河流域中上游地区暖期和冷期相互交替。2005 年以后, 黄河流域中上游地区进入新一轮暖期。从能量的密度分布来看, 1963 - 1968 年以及 1998 - 2004 年的密度较高,

反映出这两个时期气温变化较为剧烈。

(3) 在 18 ~ 20 a 的波动周期上,1961 年、1979 和 1998 年的能量密度最大,影响到了整个时间域。20 世纪 60 年代到 80 年代中期,黄河流域中上游地区为一个较大尺度的暖期,80 年代中后期一直到 21 世纪初期,黄河流域中上游地区又处于一个气温相对较低的冷期,21 世纪以后,黄河流域中上游地区进入一个新的暖期。

### 2.3 降水序列小波系数分析

通过对降水序列小波系数(图 3)的数据追踪,可以发现研究区域降水时间序列存在着两个明确的优势尺度:3 a 左右的尺度和 12 a 左右的尺度,3 a 的尺度内嵌在 12 a 的尺度之中,呈现出复杂波动的趋势。除了 3 a 和 12 a 两个优势尺度以外,根据小波方差最后不断的上升趋势判断,可能存在一个更长的时间尺度,主导着区域降水量在一个更长的时间范围内高低波动。

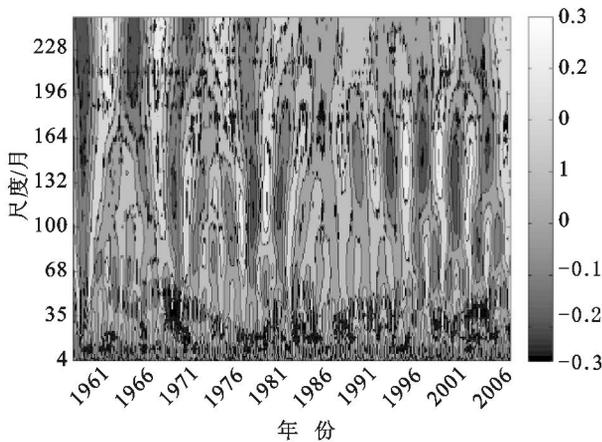


图 3 黄河流域中上游地区降水系列小波系数图

(1) 在 3 a 左右的波动周期上,黄河流域中上游地区降水量围绕着 1958 年、1961 年、1964 年、1967 年、1971 年、1973 年等 16 个波动中心进行干、湿波动,进入 21 世纪以后,干、湿波动趋于更加明显,总体降水量也呈现下降趋势。

(2) 在 12 a 左右的波动周期上,黄河流域中上游地区的降水小波系数能量最大值位于 1964 年、1978 年、1990 年、2002 年,在 51 a 的观测时间段上,黄河流域中上游地区的降水围绕着这几年高低波动,1956 - 1964 年为黄河流域中上游地区相对湿润期,1965 - 1976 年为黄河流域中上游地区相对干旱期,1977 - 1990 年为相对湿润期,1991 - 2002 年黄河流域中上游地区进入干旱期,2003 年以后进入新一轮的湿润期。从波动的周期长短来看,黄河流域中上游地区降水的周期呈衰减趋势,周期波动的长度由 60 年代到 70 年代的 14 a 逐渐缩短至 90 年代

以后的 11 a。

(3) 对于可能出现的更大时间尺度,由于数据样本时间段的限制,尚且无法得知其波动中心及其波动范围,只能推测黄河流域中上游地区降水尚存在着一个大于 21 a 的波动尺度。

### 2.4 气候系统小波方差分析

为了更加清楚的显示出黄河流域中上游地区气候变化的主周期,本研究进行了小波方差分析(图 4)。小波方差图反映了小波系数能量在不同尺度上的分布情况,可以确定时间序列中各种尺度所对应的强度大小,通过判断拐点的位置来识别序列的主要时间尺度,进而测算出时间序列的主要周期。在黄河流域中上游地区温度系列小波方差图上,能够清楚地显示出黄河流域中上游地区温度变化的优势尺度:3 a 左右、8 ~ 10 a 和 18 ~ 20 a,而黄河流域中上游地区降水变化的优势尺度为 3 a 左右和 12 a 左右;这与上文小波系数的分析基本一致。

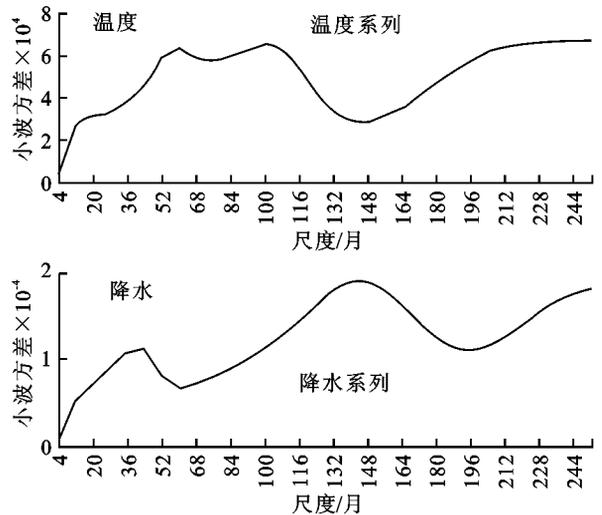


图 4 1956 - 2006 年黄河流域中上游地区气候系统小波方差图

## 3 结论

(1) 对黄河流域中上游地区逐月温度和降水时间序列进行小波变换,从中分解出黄河流域中上游地区温度和降水的周期变化尺度。黄河流域中上游地区有 3 种尺度的冷暖波动:3 a 左右的周期波动、8 ~ 10 a 的周期波动和 18 ~ 20 a 的周期波动。因此,在 20 世纪中期以后,黄河流域中上游地区出现了冷暖交替的波动规律,出现了 2 个明显的升温期:20 世纪 70 年代前期和 90 年代中后期。在对黄河流域中上游地区降水规律分析的基础上,通过小波变换,可以将黄河流域中上游地区气候干湿的波动尺度分解,其波动周期是 3 a 左右和 12 a 左右。在这两个波动尺度的控制下,黄河流域中上游地区在过去的

51 a 出现了几个明显的降水减少期:20 世纪 60 年代后期、80 年代后期以及 90 年代后期到 21 世纪初,这 3 个时期干旱特征比较明显。

(2) 由于黄河流域中上游地区温度小波系数波动能量空间没有完全封闭,最后一个暖期波动仍在继续,预计在 2006 年以后的黄河流域中上游地区温度将在上下波动中继续上升,这与 2007 年 11 月 IPCC 对亚洲中部与北部未来气温上升的预测相一致。根据黄河流域中上游地区降水序列小波变换的结果,黄河流域中上游地区降水小波系数波动能量空间刚刚封闭,最近的一个干旱周期刚刚结束,可以预见的是,预计 2006 年以后黄河流域中上游地区总体的降水将在波动中呈相对增加的趋势,这与国内学者运用 HadCM3 等模型进行黄河流域中上游地区降水模拟的结果基本一致<sup>[13]</sup>。

(3) 基于气温和降水两大关键气候特征时间序列的小波变换,将具有复杂特征的气候系统时间序列进行多尺度分解,可以揭示黄河流域中上游地区气候特征的变化周期,检验突变年份,进而识别区域内干旱、洪涝等自然气候灾害的高发时间段,并对未来气候特征的发展趋势做出预测。同时,针对气候特征的不同变化,提出相应的流域水资源管理对策,对于黄河流域中上游地区灾年的防范、预警以及区域水资源利用和管理的优化协调都具有十分重要的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] 张强,韩永翔,宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展,2002,24(4):335-343.
- [2] 韩添丁,叶柏生,丁永建. 近 40 a 来黄河上游径流变化特征研究[J]. 干旱区地理,2004,27(4):553-557.
- [3] 杨培才,周秀骥. 气候系统的非平稳行为和预测理论[J]. 气象学报,2005,63(5):556-570.
- [4] 谭克龙,任志远,王全九. 黄河中上游流域生态综合评价研究[J]. 水土保持学报,2007,21(4):173-176.
- [5] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002:419-426.
- [6] 王文圣,丁晶,向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展,2002,13(4):515-520.
- [7] 陈克龙,李双成,周富富,等. 江河源区达日县近 50 年气候变化的多尺度分析[J]. 地理研究,2007,26(3):526-532.
- [8] 严华生,万云霞,邓自旺,等. 用正交小波分析近百年来中国降水气候变化[J]. 大气科学,2004,28(1):151-157.
- [9] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报:自然科学版,2006,42(4):503-509.
- [10] Gaucherel C. Use of wavelet transform for temporal characterization of remote watersheds [J]. Journal of Hydrology,2002,269(3/4):101-121.
- [11] Margriet N. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climate from anthropogenic patterns [J]. Environmental Modelling & Software,1999,14(4):283-295.
- [12] 严汾,蒙吉军. 贵州省清镇市近 50 年来气候系统的多时间尺度分析[J]. 水土保持研究,2005,12(4):93-118.
- [13] 张光辉. 全球气候变化对黄河流域天然径流量影响的情景分析[J]. 地理研究,2006,26(3):268-275.

(上接第 68 页)

#### 参考文献:

- [1] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [2] 肖笃宁. 景观生态学研究进展[M]. 湖南:湖南科学技术出版社,1999.
- [3] 傅伯杰,陈利项,马克明,等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [4] 陈志彪. 花岗岩侵蚀山地生态重建及其生态环境效应[D]. 福州:福建师范大学,2005.
- [5] 赵明华,杨树佳,牟文龙. 山东半岛县域土地利用景观格局分析:以招远市为例[J]. 水土保持研究,2007,14(3):155-157.
- [6] 吴志杰,陈松林. 基于 TM 遥感影像的闽西山区土地利用景观格局分析[J]. 东华理工学院学报,2007,30(2):171-176.
- [7] 刘瑞芳. 基于 3S 技术的平顶山市土地利用景观格局分析[J]. 平顶山工学院学报,2007,16(1):1-3.
- [8] 辜世贤,徐霞. 重庆市生态修复示范区土地利用景观格局分析[J]. 水土保持研究,2006,13(2):244-249.
- [9] 唐宽金,郑新奇. 平阳县中部低山丘陵区土地利用景观格局分析[J]. 水土保持研究,2007,14(6):332-334.