

基于小波和 GIS 分析的河川径流时空变化规律研究

景亚平¹, 张鑫², 冯天梅²

(1. 伊犁州水利局, 伊宁 835000; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 选用 Morlet 小波和 GIS 空间分析方法, 研究河川径流的时空变化规律, 对窟野河控制性水文测站 1956 - 2009 年径流序列的实例分析。结果表明: Morlet 小波能够较好的表征窟野河流域多年平均径流量的时 - 频局部化特性, 对径流时间序列的周期性和奇异性分析也较为准确; 而利用 GIS 空间插值功能也能够直观的分析出窟野河流域不同时间尺度的径流空间分布规律, 为后续开展相似研究提供了科学参考。

关键词: 径流; 小波分析; 地理信息系统; 空间差值; 窟野河流域

中图分类号: P333.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)03-0107-05

Study on variation law of time and space of runoff based on Wavelet and GIS analysis

JING Yaping¹, ZHANG Xin¹, FENG Tianmei²

(1. Yili Water Conservancy Bureau, Yining 835000, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The paper selected Wavelet and GIS analysis to research the law of temporal and spatial variation of runoff and analyzed the runoff series in controled hydrology station of Kuye river from 1956 to 2009. Results shows that Morlet wavelet can better characterize the time - frequency localization characteristics of average annual runoff and more accurately analyze the periodic and singularity of runoff time series; by use of powerful spatial interpolation function of GIS, it visually analyzed the spatial distribution regularity of runoff in Ku - ye river basin in different time scales. This method can provide a scientific reference for the development of similar study.

Key words: runoff; Wavelet analysis; GIS; space difference; Kuye river basin

径流时间序列是一个信息量有限的观测样本。由于受到多种复杂因素的综合影响, 径流序列不但具有趋势性、周期性等特征, 还存在随机性、突变性以及“多时间尺度”的结构, 具有多层次的演变规律。且受气候、降水因素以及地形、地貌等下垫面条件的影响, 往往研究区内河川径流的空间差异显著。所以在对河川径流量时间序列的变化研究中既要进行时域和频域的分析, 也要分析其空间分布的变化规律。小波变换具有的时频局部化特征, 能够揭示水文序列变化的多时间尺度结构、周期变化的局部化特征及周期随时间的变化情况^[1]。通过小波变换良好的时 - 频局部化特性, 既能确定某一频段对应的时间信息或某一时段内的频域信息, 也能确定

序列奇异点的分布、位置和强弱情况, 非常适合径流时间序列的周期特性分析和奇异性检测。而 GIS 具有强大的空间数据管理和分析功能, 在空间信息处理上有独到的优势, 是研究区域水资源及其利用空间差异的有力工具^[2]。

因此, 采用小波和 GIS 分析的方法结合多年实测资料研究流域河川径流的的时空变化规律, 对于区域水资源规划和管理以及经济社会的协调发展等都具有重要的作用和意义。

1 应用方法及原理介绍

1.1 小波分析的原理和方法

1.1.1 小波函数 小波是函数空间 $L^2(R)$ 中具有

收稿日期: 2015-10-05; 修回日期: 2016-01-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD29B01); 中央高校基本科研业务费科研创新重点项目(Z109021202)

作者简介: 景亚平(1985-), 男, 甘肃平凉人, 硕士, 工程师, 主要从事水文与水资源研究。

通讯作者: 张鑫(1968-), 男, 河南淅川人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源研究。

震荡特性且能够迅速衰减到零的一类函数的总称。若其 Fourier 变换 $\psi(x)$ 满足容许性条件 $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(x)|^2}{|x|} dx < +\infty$, 则称之为基本小波, 也叫母小波, 基本小波通过尺度的伸缩和时间轴上的平移即可派生出一簇函数 $\psi_{a,b}(x)$ 。

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), a, b \in R, a \neq 0 \quad (1)$$

式中: $\psi_{a,b}(x)$ 称为连续小波函数; a 为尺度因子或频率因子; b 为时间因子或平移因子。

1.1.2 小波变换 当 $\psi_{a,b}(x)$ 满足式(1)时, 对于能量有限信号或时间序列 $f(x)$, 可定义其连续小波变换为

$$W_f(a,b) = |a|^{1/2} \int_R f(x) \overline{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (2)$$

式中: $W_f(a,b)$ 为小波变换系数, 其大小随 a, b 取值的不同而发生变化; $\overline{\psi}(x)$ 为 $\psi(x)$ 的复共轭函数。水文观测中碰到的时间序列大多是离散的, 设函数 $f(k\Delta x)$, ($k = 1, 2, \dots, N$; Δx 为取样间隔), 则式(2)的离散小波变换形式为:

$$W_f(a,b) = |a|^{1/2} \Delta x \sum_{k=1}^N f(k\Delta x) \overline{\psi}\left(\frac{k\Delta x - b}{a}\right) \quad (3)$$

小波变换^[3] 本质上是原先的函数或者信号 $f(x)$ 在 $x = b$ 点附近按 $\psi_{a,b}(x)$ 进行加权的平均, 体现的是在 $\psi_{a,b}(x)$ 快慢标准下 $f(x)$ 的变化情况。其基本原理是通过增加或减小尺度因子 a 来得到信号或时间序列的低频或高频信息, 然后再通过描述信号的概貌或细节, 实现对信号不同时间尺度和空间局部特性的分析。水文时间序列研究中, 主要就是通过小波变换方程求得小波变换系数, 然后通过绘制小波系数图(实部、模和模平方)来分析序列的时频变化特征。

1.1.3 小波方差 在时间域 b 上将所有关于尺度 a 的小波系数模的平方积分, 即可得到小波方差

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (4)$$

同理, 设函数 $f(k\Delta x)$, ($k = 1, 2, \dots, N$; Δx 为取样间隔), 则式(4)的离散小波变换形式为:

$$\text{Var}(a) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^N W_f^2(a,b) \quad (5)$$

小波方差 $\text{Var}(a)$ 随尺度 a 的变化过程即称为小波方差图。用小波方差图可以方便的反映出水文时间序列中所包含的各种尺度(周期)的波动情况, 以及其能量大小随尺度 a 的变化特性。因此, 通过此图能够方便的查找出水文时间序列中起主要作用的

尺度(周期)。

1.2 GIS 空间分析的原理和方法

空间分析作为地理信息系统的主要功能是其区别于其它信息系统的一个显著标志。GIS 空间分析是基于地理对象的位置和形态特征的数据分析技术, 它能够方便的提取和传输地理数据的空间信息^[4]。

空间插值技术是 GIS 空间分析的一个重要工具, 可用于将实际测量的离散点数据序列转换为连续的统计表面, 进一步分析即可得出研究对象的整体或局部变化特性^[5]。根据已知水文气象数据对未知点进行插值分析是 20 世纪以来的地理科学研究的一个热点^[6]。

空间插值的理论假设是: 空间位置上越靠近的点, 越可能具有相似的特征值, 而距离越远的点, 其特征值相似的可能性越小^[7]。依据该假设理论, 空间插值可分为全局插值法和局部插值法两大类。其中, 全局插值法是利用研究区域现有的每个已知点数据进行全区域特征的拟合, 如边界内插法、趋势面分析法和回归模型方法等; 而局部插值法则是仅仅利用邻近点的数据样本来估算未知点的值, 如泰森多边形法、反距离加权平均法、样条函数插值法和克里金插值法等。

2 实例分析

窟野河是黄河中游榆林段的多泥沙支流之一, 发源于内蒙古伊克昭盟东胜市巴定沟, 也是榆林市风沙草滩区流量最大的河流。流经鄂尔多斯市东胜区、伊金霍洛旗、准格尔旗和榆林市的府谷、神木等 5 县(区、旗), 最后在神木县贺家川镇沙峁头村汇入黄河, 流域全长约 242 km, 流域面积 8 706 km², 河道平均比降 2.6‰。窟野河流域的地貌可分为风沙区和黄土丘陵沟壑区两大类, 神木以上为风沙区, 地势平坦; 神木以下为黄土丘陵沟壑区, 区内丘陵、沟壑遍布, 地形破碎, 且植被稀少, 水土流失问题严重, 详见图 1。因此, 结合实测资料合理分析其多年径流量的时空变化规律, 对于流域水资源规划、水土保持以及流域经济社会的协调发展等具有重要的意义。

2.1 基于小波变换的窟野河年径流量分析

河川径流时间序列是水文研究中的一个重要变量, 而多时间尺度是径流演化过程中存在的重要特征。小波分析的优势在于它为水文时间序列分析提供了一种客观的多时间尺度分析方法^[8]。因此本文即按照这种多时间尺度法, 通过绘制和分析小波

变换系数图以及小波方差图揭示窟野河径流 1956-2009 年的序列年代变化特性。

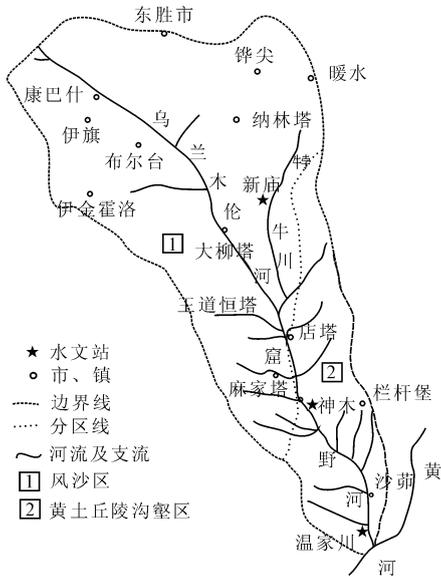


图1 窟野河流域水系图

由于复数小波能更真实的反映径流的各尺度周期性的尺寸以及这些周期在时域中的分布^[9]。因此,将窟野河标准化年平均径流过程 $f(k\Delta x)$, ($k = 1, 2, \dots, 27$; $\Delta x = 2$ 和 Morlet 小波代入式(3),取不同的 a 和 b 值,计算窟野河对应的小波系数结合 Matlab 程序计算并绘制小波变换系数的模平方、方差和实部的二维等值线图,详见图 2、3 及 4。

2.1.1 窟野河年径流序列的周期变化分析 图 2 是窟野河年径流标准化序列小波变换模平方的时频分布图,该图可以用来分析窟野河年径流序列在特征时间尺度内波动能量强弱的变化特性,从而反映出时间域上主导窟野河年径流序列发生波动变化的能量聚集中心亦即主周期的分布情况。

由图 2 可见,窟野河多年径流序列主要存在 3 个比较明显的年代际时间尺度变化特征,按时间尺度能量波动的强弱依次可分为 15~27、5~10 和 1~5 a 左右的周期变化。整个研究时段内以 15~27 a 为周期的时间尺度变化最为强烈,振荡中心的时间尺度为 27 a 左右,波动能量最强信号在时域上的影响范围主要包括 1965-1978、1980-1995 和 1997-2009 年期间,振荡中心分别位于 1973、1988 和 2004 年;以 5~10 a 为周期的时间尺度变化次之,振荡中心的时间尺度为 7 a 左右,波动能量最强信号在时域上的影响范围主要包括 1956-1958、1959-1962、1963-1967、1968-1972、1971-1977 和 1978-1981 a 期间,振荡中心分别位于 1957、1961、

1965、1969、1974 和 1979 年;以 1~5 a 为周期的时间尺度变化最次,振荡中心的时间尺度为 3 a 左右,波动能量较强信号在时域上的影响范围包括 1958-1960 年、1962-1964 年、1966-1970 年、1981-1986 和 1987-1990 年,振荡中心分别位于 1959、1963、1968、1985 和 1988 年。由以上分析可知,窟野河年径流序列在整个时间域上主要存在以 3、7 和 27 a 左右为主周期的尺度变化特征。

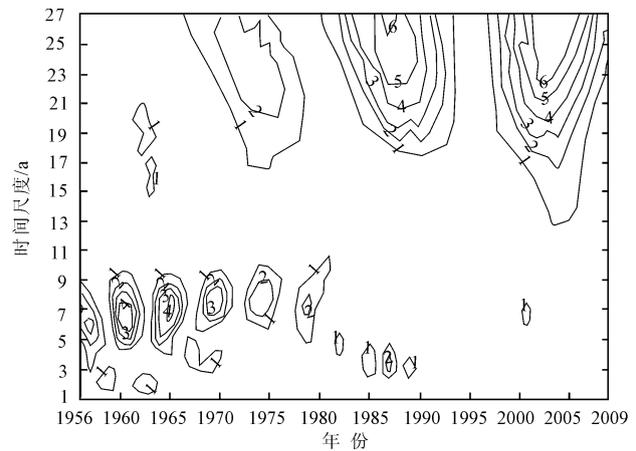


图2 年径流标准化序列小波变换模平方时频分布图

为了进一步确定窟野河年径流时间序列中存在的周期随时间变化的规律,通过小波方差图对窟野河年径流时间序列继续进行更深入的研究和分析。由图 3 可见,窟野河年径流标准化序列 3、7 和 27 a 左右时间尺度的小波方差极值比较明显。这说明该河年径流序列存在 3、7 和 27 a 左右的主要周期变化,其中以 27 a 左右时间尺度的周期过程线波动最为剧烈,表现为第 1 主周期;7 和 3 a 左右的时间尺度依次为第 2 和第 3 主周期。

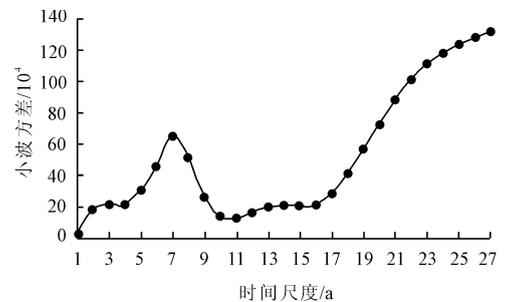


图3 年径流标准化序列小波变换方差图

2.1.2 窟野河年径流序列的丰枯变化和突变分析 图 4 是窟野河年径流标准化序列的小波变换实部时频分布图,该图能够反映不同尺度下小波变换系数所表征的年径流量随时间丰枯交替变化的特性以及各突变点的位置。图中表述为:正位相的小波

系数与丰水期相对应;负位相的小波系数与枯水期相对应;小波系数为零则表示突变点位置,具体分析如下。

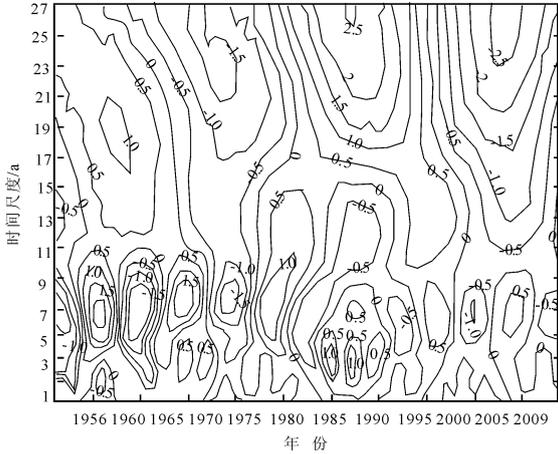


图4 年径流标准化序列小波变换实部等值线图

由图4可看出,窟野河年径流存在明显的年际年代丰枯变化。分析27 a左右强周期对应的位相结构,正负位相以27 a左右的时间振荡,在1956-1963和1980-1995年期间各时段为正位相表示丰水期,径流量偏多;而1965-1978和1997-2009年

期间各时段为负位相表示枯水期、径流量偏少。突变点位于1964、1979和1996年。此外,7 a左右的周期丰枯变化也比较明显,正负相位以7 a左右的时间振荡,有5个偏丰期,6个偏枯期;2 a左右的周期丰枯变化大体存在4个偏丰期,和5个偏枯期。由此可见,窟野河的年代际流变化具有明显的突变特征,多年径流量的丰枯变化显著。

2.2 窟野河年径流量空间变化规律分析

为了揭示区内窟野河径流的空间分布规律,本文以径流深来表征径流的空间分布程度^[10]。采用黄河水利委员会提供的研究区内水文测站1956-2009年的年径流序列资料(已通过还原计算分析,一致性较好)进行分析。

因区内窟野河上游地形复杂,测站稀少,且大多资料序列偏短,为保证窟野河年径流资料的一致性和完整性,尽可能准确的反映整个区域空间上的状况,同时减少或者消除因测站欠缺导致的分析误差,借助ARCGIS10.0软件提供的空间插值功能,选用反距离加权平均法对窟野河的径流深进行插值分析^[11],即可得到区内不同时期总体和窟野河的年径流深变化特性,详见图5。

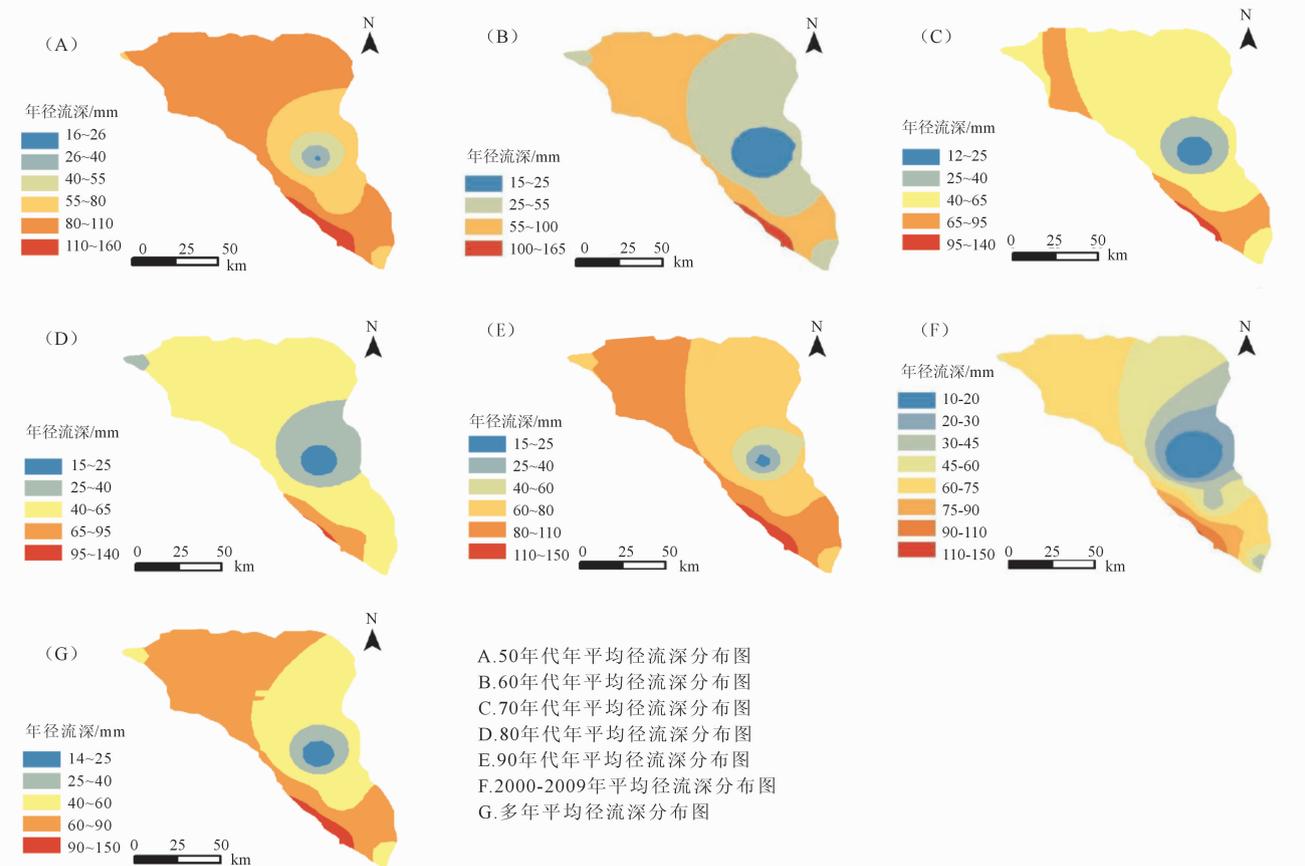


图5 基于GIS空间插值的窟野河流域年径流深多时间尺度分布图

由图5可见,由于受气候、降水因素和地形、下垫面条件的影响,不同时期窟野河年平均径流深的区域性差异显著。

从窟野河多年平均径流深等值线图可知,窟野

河多年平均径流深为55 mm,且南北差异较大,最高值出现在流域上游地区,年平均径流深达61~79 mm,最低值出现在流域中下游地区,年平均径流深为39~43 mm。按时间尺度变化情况详见表1。

表1 窟野河流域多年平均径流深按时间尺度变化情况表

时序	平均径流深/mm	空间分布差异	高值区	平均径流深范围/mm	低值区	平均径流深范围/mm	
50年代	56	较大	上游地区	63~82	中下游地区	40~45	
60年代	57	较均匀	上游偏北和下游局部地区	69~87	中游地区	49~57	
20世纪	70年代	60	较大	下游局部地区	69~87	中游局部地区	43~49
	80年代	65	较大	下游局部地区	75~91	中游局部地区	47~54
	90年代	54	较大	中下游地区	59~76	中游局部地区	38~42
2000-2009	39	较大	上游偏北和下游局部地区	47~56	中游地区	10~22	

由以上对年径流深多时间尺度的空间分析可见,窟野河不同时期的径流空间分布差异较大,但总体来说,流域中游的局部地区年径流深最小,远低于其他区域。

3 结论

(1)本文选用Morlet小波和GIS空间分析方法研究了河川径流的时空变化规律,并结合实测资料对窟野河年径流序列进行了多时间尺度的特性分析。经Morlet小波分析表明窟野河年径流序列大体存在25、7和3 a左右的周期变化特性,且径流年际变化具有明显的突变特征,多年径流量的丰枯变化规律显著;

(2)经GIS空间插值分析表明窟野河年径流深在空间分布上总体呈现出自东南向西北减少的变化规律,且东西部的年径流深空间分布差异显著,不同时期的径流空间分布差异较大。总体来说,窟野河流域中游局部地区的年径流深最小,远低于其他区域。

(3)研究结果表明:采用Morlet小波分析能够较好的表征窟野河流域多年平均径流量的时-频局部化特性,对径流时间序列的周期性和奇异性分析也较为准确;而GIS强大的空间插值功能也能够较为直观的分析出窟野河流域不同时间尺度的径流空间分布规律,本文采用的研究方法也为相似区域开展河川径流的变化研究提供了科学参考。

参考文献:

- [1] 王富强,李红霞. 基于小波网络的径流多时间尺度分析及预报方法研究[J]. 水力发电,2010,36(5):17-20.
- [2] 王小军. 基于GIS的榆林市河川径流演变规律及其驱动力研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [3] 王文圣,丁晶,向红莲. 水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J]. 四川大学学报(工程科学版),2002,34(6):14-17.
- [4] 姜亚莉,张延辉. GIS空间分析的应用领域[J]. 四川测绘,2004,27(3):99-102.
- [5] 胡文敏. 基于多元统计分析和GIS空间分析的闲置土地利用研究——以长沙市先导区为例[D]. 长沙:湖南农业大学,2011.
- [6] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall[J]. Journal of hydrology, 2000,228(1-2):113-129.
- [7] 朱求安,张万昌,余钧辉. 基于GIS的空间插值方法研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版),2004,28(2):183-188.
- [8] 王文圣,丁晶,衡彤. 水文序列周期成分和突变特性识别的小波分析法[J]. 工程勘察,2003(1):32-35.
- [9] 刘建梅,王安志,裴铁瑶,等. 杂谷脑河径流趋势及周期变化特征的小波分析[J]. 北京林业大学学报,2005,27(4):49-55.
- [10] 常亮和,张茂省. 陕北能源化工基地河川径流特征和产流机理[J]. 地质通报,2008,27(8):1143-1150.
- [11] 粟晓玲,康绍忠,魏晓妹,等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(2):153-159.