

黄河流域动力系统泥沙时序混沌特征分析

——地理系统综合研究的一种尝试

马建华¹, 楚纯洁²

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004; 2. 平顶山学院环境与地理科学系, 河南 平顶山 467000)

摘要: 选取黄河头道拐、潼关、花园口和利津断面 1952~2000 年的泥沙含量为时序, 在 G-P 重构相空间的基础上, 分别计算了各断面泥沙时序的关联维(D_2)、 K_2 熵和 Hurst 指数。结果表明, 各断面的最小饱和镶嵌维(m)、 D_2 和 K_2 熵分别为 5、3.24 和 0.13, 说明黄河流域各级系统均具有混沌特征, 并且从上游到下游混沌特性逐渐增强。随着混沌特性的增强其平均可预报时间下降, 头道拐断面为 8 年, 其余断面为 3 年。各断面 Hurst 指数均大于 0.68, 在可预报时间内, 各断面泥沙时序具有持续性下降趋势, 并用 2001~2004 年实际数据得到了验证。文章还给出了黄河流域动力系统的一般形式, 该系统至少需要 8 个状态变量, 2 个控制变量。

关键词: 黄河流域动力系统; 泥沙时序; 混沌特征; 地理系统综合研究

文章编号: 1000-0585(2006)06-0949-10

1 问题的提出

地理学的根本任务在于综合研究地理系统各圈层之间的相互联系, 综合划分地表区域单位。这一观点早在 19 世纪末就已经被李希霍芬和洪堡等人所确立。近一二十年来, 国内外很多地理工作者都十分强调地理综合研究的重要性和必要性^[1~11]。我国著名地理学家黄秉维先生曾指出:“综合研究是发展自然地理学最主要的方向, 同时也是带动部门自然地理学最有效的途径”^[10];“没有综合性地理研究, 地理学便失去其存在的依据”^[11]。但是, 长期以来, 地理学先进的综合整体观与现实整体系统综合研究的高难度之间存在着巨大的矛盾^[12]。在世界范围内, 真正跨学科的综合地理研究进展不大。笔者认为, 出现这种局面的原因主要是缺乏综合研究地理系统的理论指导和技术方法, 同时也缺乏全面认识地理系统运动变化的观测数据。

随着现代系统科学的发展, 尤其是混沌和分形理论的日臻完善, 为地理系统综合研究提供了理论和技术支撑, 使我们看到了处理非线性复杂地理事物的曙光。在国际上, 20 世纪 80 年代产生于美国的地球系统科学就是运用系统科学的理论与方法, 综合研究地球系统运动变化规律的重大行动^[13]。在国内, 以黄秉维先生为首的一批地理科学工作者, 在吸收和借鉴地球系统科学先进思想的基础上, 提出首先建立陆地系统科学的设想, 并认为它是区域可持续发展的战略理论基础^[14~16]。我国很多地理学家纷纷发表意见, 认为地理系统是地球系统最重要的子系统之一, 应该凭借地球系统科学或陆地系统科学研究的东

收稿日期: 2006-05-08; 修订日期: 2006-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30570301)

作者简介: 马建华 (1958-), 男, 河南省清丰人, 教授, 博士生导师。主要从事自然地理学和环境科学研究, 已发表论文 50 余篇, 出版著作和教材 10 部。E-mail: mjh@henu.edu.cn

风, 推动地理学综合研究^[17,18]。

黄河流域是由自然、经济和社会等多种要素相互联系构成的、特色鲜明的地理单位。区域总面积 752 443 km², 涉及 9 个省区。黄河流域自然条件复杂多样, 东西跨越我国地貌三大阶梯; 既有湿润区、亚湿润区, 也有干旱区和半干旱区; 黄土覆盖区和高寒区面积广大。黄河流域还是中华民族的发祥地, 人类对自然环境的影响久远而深刻。从系统科学角度看, 黄河流域是一个组成要素众多、结构和联系十分复杂、具有非线性运动特征的复杂巨系统, 是开展地理系统综合研究的理想区域。

虽然建立黄河流域动力学模型是我们研究的最终目标, 但是目前还有很大困难。这是因为: 我们还不甚清楚描述黄河流域系统运动变化的状态变量和控制变量; 各状态变量之间以及它们与控制变量之间的定量关系, 还有很多工作要做; 各变量的现有数据尚不能满足综合研究的需要等等。在这种现实情况下, 我们只有应用“黑箱”方法, 忽略系统内部的组成、结构和联系, 从系统某些功能输出去反演系统的动力学特征。实质上, 系统任何一种时间序列都是在特定输入下经过系统内部复杂转换的一种外在反映, 即系统要素活动关系的综合表现^[19~21]。

如图 1 所示, 黄河含沙量时间序列 (以下简称泥沙时序) 就是系统内部自然、经济和社会多种因素相互作用的结果^[22~30], 其本身必然包含着黄河流域系统演化的某些信息。因此, 通过一定的系统分析方法, 从时间序列中提

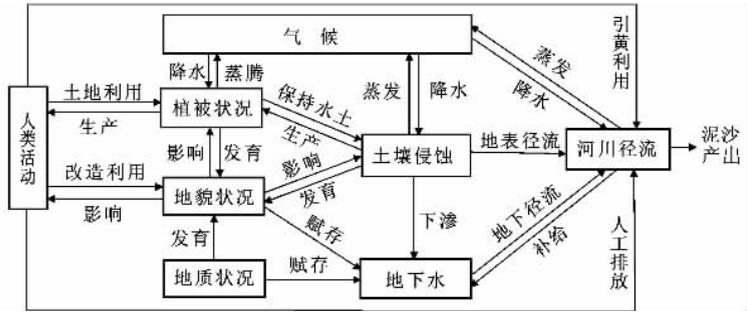


图 1 黄河含沙量影响因素分析

Fig. 1 Some factors relating to sandiness content of the Yellow River

取系统演化特征指标, 即可揭示黄河流域系统动力学行为与特征。

目前, 度量系统是否具有混沌特征的主要指标有奇怪吸引子的关联维 (D_2)、Lyapunov 指数、Kolmogorov 熵 (以下简称 K_2 熵) 和 Hurst 指数等。很多学者用这些指数中的一个或多个开展不同对象的混沌特征研究^[31~35]。然而, 在黄河流域系统混沌特征研究方面的成果很少, 只有作者对花园口断面多年平均径流量时间序列进行过初步研究^[36], 缺乏黄河沿程多断面混沌特征分析, 这不利于揭示黄河流域系统内部的动力学差异。本文应用单变量时间序列重构相空间技术, 以头道拐、潼关、花园口和利津 4 个断面的泥沙时序为基础, 通过计算各断面的 D_2 、 K_2 熵和 Hurst 指数, 探讨黄河流域非线性动力学特征, 并为地理系统综合研究提供借鉴和思考。

2 资料与方法

2.1 资料来源

为了全面了解黄河流域系统动力学特征及其内部差异, 作者从众多黄河水文观测断面中选择了 4 个断面作为研究对象。其中头道拐断面离河口镇 (黄河上游和中游分界线) 最近, 花园口断面离孟津或桃花峪 (黄河中游和下游分界线) 较近, 利津断面处于黄河入海口附近, 故选择它们作为研究黄河上游、中上游和整个黄河流域系统动力学特征的研究断面; 潼关断面是黄河接纳黄土高原主要支流后的一个断面, 在研究黄河泥沙动态变化方面

具有特殊意义。资料序列为1952~2000年年平均泥沙含量(kg/m^3),来源于国家水利部黄河水利委员会,可靠性强。图2是4个断面的年平均泥沙时序分布图。由图2可以看出,各断面泥沙含量的年际变化具有明显的随机性,大多数年份都是潼关断面>花园口断面>利津断面>头道拐断面。据计算,头道拐、潼关、花园口和利津断面历年平均含沙量分别为 $4.58 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $32.34 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $26.33 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $25.22 \text{ kg}/\text{m}^3$,相对偏差(C_v)分别为42.65%、41.35%、43.48%和38.61%。

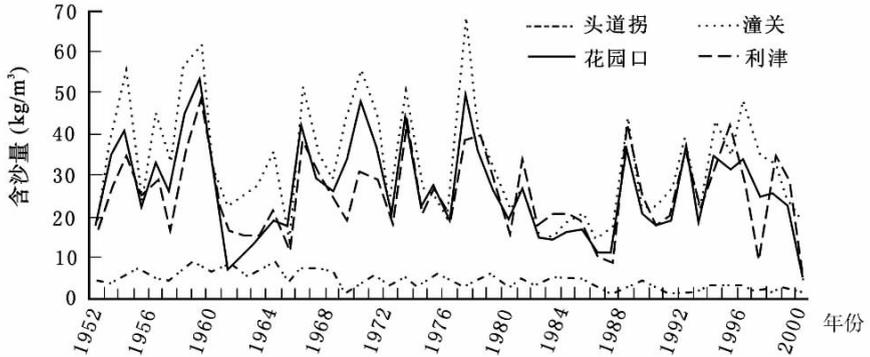


图2 研究断面1952~2000年泥沙量时序分布

Fig. 2 Distribution of the sandiness time series from 1952 to 2000 on the study sections

2.2 研究方法

2.2.1 关联维计算 关联维反映了奇怪吸引子的不规则程度,是混沌运动的特征参量之一^[21]。Packard、Crutchfield和Farmer等首次提出了单变量时间序列重构相空间技术^[37]。此后,Grassberger和Procaccia又提出了通过重构相空间计算单变量时序关联维的方法,被称为G-P算法^[38]。

假设有一时序 $\{x_i\}_{i=1}^n$,选定重构相空间镶嵌维数 m 和时间迟滞 τ (通常 $\tau=1$),重构相空间(R^m)。在重构的 m 维空间中,原始时序资料则表现为一个点集 $\{P_{i,m}\}_{i=1}^{n-m+1}$:

$$P_{i,m} = \{x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\}$$

关联函数 $C(r, m)$ 为:
$$C(r, m) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \theta(r - |P_i - P_j|)$$

式中, N 为重构相空间的点对数, r 为标度值, $|P_i - P_j|$ 为欧式距离, $\theta(P)$ 为Heaviside阶跃函数。当 $|P_i - P_j| < r$ 时, $\theta(P) = 1$;当 $|P_i - P_j| > r$ 时, $\theta(P) = 0$ 。关联维(D_2)的计算公式为:

$$D_2(m) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log_2 C(r, m)}{\log_2 r}$$

随着 m 值的增加, D_2 也将逐渐增加并稳定下来,此时的 m 值为饱和镶嵌维, D_2 即为该时序的关联维数。通过绘制一系列 $\log_2 C(r, m) - \log_2 r$ 关系曲线,当发现直线部分的斜率不再变化时,该直线的斜率即为关联维数。

2.2.2 K_2 熵计算 K_2 熵是动力系统相空间轨道发散和收敛程度的一种度量,可以判断系统是否处于混沌状态及其混沌程度,也是混沌系统平均可预报时间估计的一个物理量^[39~41]。Grassberger和Procaccia首次提出基于单变量时间序列的 K 熵计算方法^[39],之后Cohen和Procaccia又对 K 熵计算进行了改进,但计算仍很复杂^[42]。赵贵兵等在G-P算法的基础上,提出了用最小二乘法同时回归出关联维和 K_2 熵的方法,并指出 K_2 熵是 K 熵的最优估计^[20]。本文采用这种方法进行 K_2 熵计算。

固定时滞 τ ，对某一镶嵌维 i ，在 $\log_2 C(r) - \log_2 r$ 关系曲线上的无标度区间内，令：

$$x_{ij} = [\log_2 r]_{ij}, y_{ij} = [\log_2 C(r, i)]_{ij}$$

则有： $y_{ij} = ax_{ij} - b_i$ 式中， $a = D_2$ 。

在嵌入维 i 和 $i + 1$ 下，有： $K_2 = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{b_i - b_{i+1}}{\tau}$

用最小二乘法得到 a 和 b_i 的最优估计为：

$$\hat{a}D = \frac{\sum_i \sum_j [(x_{ij} - \bar{x}_i)(y_{ij} - \bar{y}_i)]}{\sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}$$

$$\hat{b}_i = \bar{y}_i - \hat{a}\bar{x}_i$$

用 \hat{b} 即可求得 K_2 熵。

2.2.3 Hurst 指数计算 Hurst 指数 (H) 也是混沌运动的一个重要参数,反映了系统运动变化的长程相关性,与关联维有某种内在的联系^[31,32,41,43,44]。Hurst 指数的计算方法称 R/S 分析,是 Hurst 在分析尼罗河多年水文资料时提出的一种方法^[45],后来 Mandelbrot 和 Mcneod 又在此基础上进行了补充和完善^[46~49]。

考虑一个时序 $\{\xi(t)\}_{t=1}^n$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义均值序列:

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (\tau = 1, 2, \dots)$$

该序列的积累离差 ($X(t, \tau)$)、极差 ($R(\tau)$) 和标准差 ($S(\tau)$) 分别为:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t [\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau] \quad (1 \leq t \leq \tau)$$

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (\tau = 1, 2, \dots)$$

$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \langle \xi \rangle_t]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\tau = 1, 2, \dots)$$

经研究^[47], 存在下列关系: $R(\tau)/S(\tau) \propto \tau^H$, 故在双对数坐标系中 ($\ln \tau - \ln(R/S)$), 用最小二乘法拟合上式即可求得 H 。

3 结果与讨论

按照上述计算方法, 固定时序的时间迟滞 $\tau = 1$, 从 $m = 4$ 开始, 在 VB 程序设计的基础上, 计算镶嵌维 $4 \sim 14$ 的 $C(r)$, 绘制 $\log_2 C(r) - \log_2 r$ 关系图。图 3 是利津断面不同镶嵌维下的 $\log_2 C(r) - \log_2 r$ 关系图 (其他断面的关系图略)。由图 3 可以看出, 当 $m = 10$ 以后, 直线段的斜率已不再变化, 即到达无标度区间, 此时的斜率就是利津断面泥沙时序的关联维数值, 数值为 7.34。这种情况也可以从镶嵌维与关联维的变化曲线中得到验证。从图 4 中的 $D_2 - m$ 曲线可以看出, 当 $m = 10$ 以后, D_2 即稳定在 7.34 水平上。这说明, 再增加 m 已无意义, 此时的 m 即为饱和镶嵌维, 数值为 10。在饱和镶嵌维的 $\log_2 C(r) - \log_2 r$ 直线

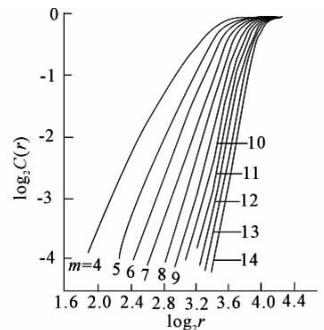


图 3 利津断面泥沙时序 $\log_2 C(r) - \log_2 r$ 关系图
Fig. 3 The $\log_2 C(r) - \log_2 r$ curves of the sandiness time series on Lijin section

段，按照前述 K_2 熵计算方法求得 K_2 熵。从图 4 中的 K_2-m 曲线可以看出，当 $m=10$ 以后， K_2 熵也趋于饱和，数值为 0.38。在 R/S 分析时，由于泥沙时序较短（只有 49 个），所以 τ 的取值从 2 到 12 依次进行计算，得到 Hurst 指数。图 5 是利津断面 $\ln\tau-\ln(R/S)$ 关系图，直线的斜率即为 H 值，等于 0.72。各断面泥沙时序的 D_2 、 K_2 和 H 列于表 1。

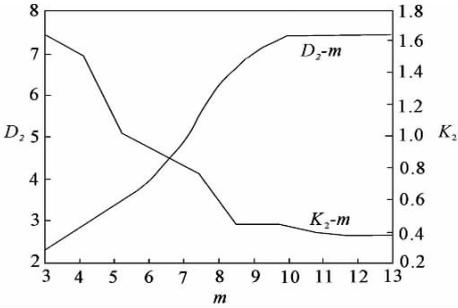


图 4 利津断面泥沙时序 D_2-m 和 K_2-m 关系图

Fig. 4 The D_2-m and K_2-m curves of the sandiness time series on Lijin section

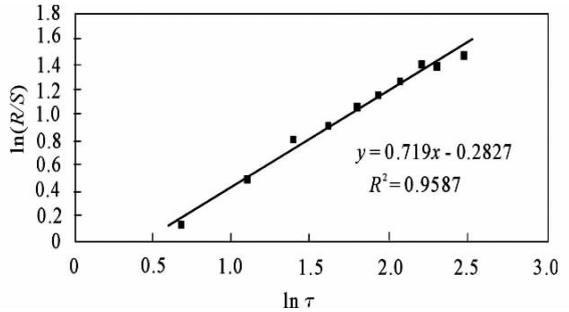


图 5 利津断面泥沙时序 $\ln\tau-\ln(R/S)$ 关系图及 K_2 熵计算

Fig. 5 The $\ln\tau-\ln(R/S)$ curve of the sandiness time series and K_2 entropy calculation on Lijin section

表 1 各断面泥沙时序混沌运动特征参数值

Tab. 1 Some chaotic parameters of the sandiness time series on the study sections

断面	D_2	K_2	H	饱和 m	D_2/m
头道拐	3.24	0.13	0.68	5	0.65
潼关	5.96	0.37	0.86	7	0.85
花园口	6.57	0.40	0.81	8	0.82
利津	7.34	0.38	0.72	10	0.73

3.1 黄河流域动力系统混沌特征分析

混沌运动是确定性动力系统所表现出的一种内在随机性运动，是 Lorenz 1963 在研究大气热对流运动时发现的^[50]。这种运动从整体上看是确定性的，表现为相轨道收敛于某一有限区域之内(吸引子)；但是从局部看却是非确定性的(随机的)，表现为吸引子中相轨道随机缠绕和折叠。混沌运动的随机性不是外界噪声随机干扰的结果，而是系统本身所具有的一种运动特征(内在随机性)。目前，混沌研究已从数学、天文学和地球科学渗透到物理、化学、生物学、经济学和艺术科学等许多领域，取得了一系列重要成果，使人类对世界的认识进一步加深^[51]。如果系统运动是混沌，那么其吸引子必然是奇怪吸引子(混沌吸引子)，奇怪吸引子的空间维也必然是分维^[21]。由 K 熵的原始定义可以看出， K_2 熵是吸引子轨道点空间分布的平均信息量，本质上反映了吸引子的发散与收敛程度(即混沌的强弱)^[39]。因此，分维和 K_2 熵就成了判断系统是否具有混沌特征及混沌程度的重要指标。

由表 1 可见，从头道拐到利津，关联维均为小数(分维)，证明黄河流域各断面所控制的流域系统均具有混沌特征。并且从上游到下游，各断面饱和镶嵌维、 D_2 和 K_2 熵都有不断增大的趋势，说明从上游到下游黄河流域动力系统的混沌运动趋于复杂。王文钧等在研究长江沿程径流时序混沌特征时也得到了相同的结论^[31]。黄河上游区域，年降水量较少，在 100~400 mm 之间，降水变率在 15%~25% 之间；地表覆盖要么是草原和森林，要么是裸露的坚硬岩石；河流补给主要是冰雪融水；人类活动影响轻微。这些地理要素的组合

与联系较为简单,系统镶嵌维为 5, D_2 为 3.24, K_2 熵为 0.13。黄河中游区域,年降水量在 500~600 mm 之间,降水变率在 20%~25% 之间;黄土覆盖面积较大,水土流失较为严重;有众多支流汇入,径流量增加;人类活动历史悠久而且强烈,农田面积比重大,蓄水引水工程多。这些地理要素的组合与联系较为复杂,与上游区域复合在一起构成黄河中上游流域系统,该系统的镶嵌维为 8, D_2 为 6.57, K_2 熵为 0.40。黄河下游区域面积小;年降水量在 600~800 mm 之间,降水变率在 20% 左右;地表覆被主要为农田;河流补给较少;人类活动强烈,引黄量巨大。这些地理要素的组合与联系更为复杂,与中上游区域复合在一起构成整个黄河流域系统,该系统的镶嵌维为 10, D_2 为 7.34, K_2 熵为 0.38。利津断面 K_2 熵比花园口小 0.02 的原因,可能与黄河下游泥沙来源少,引黄量大有关。

3.2 黄河泥沙含量可预报性分析

3.2.1 黄河泥沙含量平均可预报时间

混沌运动的最大特征是对初始值的强烈敏感依赖性,初始值的稍微改变可以被放大,导致系统发生重大变化,即“蝴蝶效应”^[51]。正由于“蝴蝶效应”的存在,混沌运动的长期行为是不可以准确预测的。但是,混沌运动整体上又是确定的,属于周期性随机现象,其短期行为还是可以比较准确预测的^[21,51]。

Eckmanm 指出, Lyapunov 指数反映了吸引子在各个方向的总体膨胀性,其倒数可以作为系统平均预报时间($T = 1/\sum \lambda_i$)^[52]。根据这种思想,周寅康等人认为, K_2 熵反映了吸引子相邻点对所处轨道段的平均发散率,其倒数也可作为系统平均预报时间($T = 1/K_2$)^[53]。之后,谢正栋和赵晶等也用该方法进行过混沌事物的短期预报^[54,55]。实质上,按照信息熵的定义,当 $K_2 = 0$ 时,系统是完全确定的,可以准确预测; $K_2 \rightarrow \infty$ 时,系统是完全随机的,可以进行统计平均预测;当 K_2 等于某个有限值时,系统是混沌的, $T = 1/K_2$ 就是平均可预报时间尺度^[55]。

根据表 1 中的 K_2 熵数据,我们得到头道拐、潼关、花园口和利津断面的平均可预报时间分别为 7.69 年、2.70 年、2.50 年和 2.63 年,取整数后分别为 8 年、3 年、3 年和 3 年。可见,系统的混沌程度与可预报时间呈反相关关系。系统混沌性越强,对初始值的敏感依赖性就越强,可预报时间尺度就越短。还需要特别指出,上述可预报时间是建立在现有泥沙序列基础上的,如果流域系统自然和人类活动发生变化,各断面的可预报时间也必然会发生改变,这是混沌系统对初始值的改变具有强烈敏感依赖性所决定的。

3.2.2 黄河泥沙含量变化的趋势性分析

Hurst 指数也称分数阶布朗运动指数。据研究,混沌运动关联函数($C(r)$)与 Hurst 指数存在下列关系^[40,41,46]: $C(r) = 2^{2H-1} - 1$

可以看出,当 $H=1/2$ 时, $C(r)=0$,吸引子点对之间均不相关,时序彼此独立,完全随机,对应于布朗运动或白噪声,时序对系统演化历史无记忆,所以不能开展趋势性分析。当 $H=1$ 时, $C(r)=1$,吸引子点对完全相关,为确定性系统。当 $0 < H < 1/2$ 或 $1/2 < H < 1$ 时, $0 < C(r) < 1$,对应分数阶布朗运动,时序对系统演化历史有记忆,因此系统具有长程相关性,可以开展趋势性分析。其中,当 $1/2 < H < 1$ 时,时序未来的变化与过去的变化呈正相关或具有持续性(persistence), H 数值越大,正相关的可靠性越强;当 $0 < H < 1/2$ 时,系统未来变化与过去的变化呈反相关或具有反持续性(anti-persistence), H 数值越小,反相关的可靠性越强。据此可以开展系统趋势性分析。

由表 1 可见,各断面时序的 H 值均大于 0.6,说明都存在着明显的长程正相关性。近 50 年来,黄河流域各断面泥沙含量存在明显的递减趋势(图 1),这与解放后人民生活水平不断提高,重视水土保持工作,大型水利工程先后投入使用有关。那么,未来各断面泥沙

含量在前述可预报时段内(头道拐未来8年内,其他断面未来3年内)还将继续递减。根据黄河水利委员会在网上公布的2001~2004年数据^[56],可以得到验证。图6是潼关、花园口和利津三断面1990~2004年泥沙时序分布。对比原有时序可以看出,各断面2001~2004年泥沙含量在原有基础上进一步波动性递减。头道拐断面也具有这种趋势。由于各断面控制的流域系统混沌特征不同,所以各断面泥沙含量递减趋势的可靠性也有一定差异。其中,以潼关断面的可靠性最大, $H=0.86$;以头道拐断面的可靠性最差, $H=0.68$ 。

从表1还可以看出,各断面时序的关联维与其饱和镶嵌维的比值(D_2/m)与Hurst指数几乎相等。这与王文钧等在研究长江径流时序混沌特征时得到的结论是一致的^[31]。这一规律不仅进一步阐明了Hurst指数的混沌意义,也为该指数的计算提供了一种便捷方法。

3.3 关于黄河流域非线性动力学系统构建的思考

黄河流域非线性动力学系统十分复杂,我们还不知道它的具体数学形式,但是它对于我们深刻认识该系统状态和演化又非常必要,是未来地理学综合研究的必然趋势。通过对单变量时序重构相空间的混沌特征分析,可以为非线性动力学系统构建提供某些借鉴。

分维值是确定奇怪吸引子中任何一点所需要的最少的独立坐标数,而饱和镶嵌维是描述混沌运动所需要的最多的变量自由度数目,因此分维和镶嵌维数目就是非线性动力学系统中应包含状态变量数目的下限和上限。对于黄河流域动力系统来说,自上游到下游不同研究断面所控制的流域系统,应包含的最少状态变量数目依次为4、6、7和8,应包含的最多状态变量数目依次为5、7、8和10。这在一定程度上降低了构建动力学系统的难度。为了全面刻画系统分叉与突变行为,动力学系统除包含状态变量外,还应包括若干个控制变量。控制变量数目的确定是一个十分复杂的问题,但一般数目较少,至少应大于或等于 $m-D_2$ 。鉴于以上考虑,我们提出利津断面控制的整个黄河流域动力系统的一般形式为:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_8; \lambda_1, \lambda_2) \\ \frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2, \dots, x_8; \lambda_1, \lambda_2) \\ \dots \\ \frac{dx_8}{dt} = f_8(x_1, x_2, \dots, x_8; \lambda_1, \lambda_2) \end{cases}$$

式中, x 为状态变量, λ 为控制变量, f 为非线性函数。可以看出,黄河流域动力系统是一个高维非线性动力系统,十分复杂。就目前情况看,要想建立黄河流域动力系统的数值模型,还有大量工作要做。例如,模型的状态变量究竟包括哪些(从图1可能得到一些有益思考),控制系统运动变化的控制变量又是什么,变量之间的非线性关系是怎样的等等,目前还不甚清楚,还需要开展进一步观测和研究工作。这是因为获得黄河泥沙运动具有独立意义的状态变量,不能定性地判断,而要开展大量的相关分析,并且需要大量的

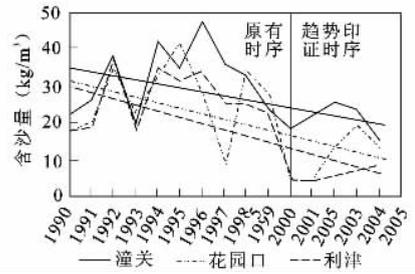


图6 潼关、花园口和利津断面泥沙含量递减趋势

Fig. 6 Descending trends of the sandiness time series on Tongguan, Huayankou and Lijin sections

观测数据支持；控制变量一般是在系统演化过程中新形成的具有综合意义的变量，多数情况下并不是某个具体变量，需要进行深入的理论分析和计算^[21]。

黄建平曾提出一种利用单变量时间序列，重构低维动力系统（小于 3 维）的方法^[57]，彭永清等用这种方法重建了广州月平均气温变化动力学模型^[58]，周寅康等也在假设淮河洪涝变化是低维动力系统的情况下，开展了尝试性研究^[34]。这种方法在低维动力系统构建方面可能很有前景，但对高维动力系统的构建仍需付出艰辛的努力。

4 结论

(1) 黄河泥沙变化是黄河流域系统自然、经济和社会等多种因素共同作用的结果，它可以反演该系统动力学特征。

(2) 黄河各断面泥沙时序均具有混沌特征，并且从上游到下游混沌运动趋于复杂。在 4 个研究断面中，饱和关联维在 5~10 之间， D_2 在 3.24~7.34 之间， K_2 在 0.13~0.38 之间。

(3) 黄河各研究断面泥沙时序的 Hurst 指数均大于 0.6，具有长程相关的持续性递减趋势。上游控制断面泥沙时序平均可预报时间为 8 年，其他断面为 3 年。

(4) 构建整个黄河流域非线性动力系统时，最少需要 8 个状态变量，2 个控制变量。

(5) 今后需要进一步研究的工作有：开展黄河流域自然、经济和社会等多种要素的联合观测，积累资料，明确黄河流域动力系统的状态变量和控制变量；开展黄河其他时间序列混沌特征分析，进一步验证本项研究的结论；开展黄河泥沙预测模型的研究，对本项研究的可预报时间进行实证分析；积极探讨从单变量时间序列重构黄河流域高维动力学模型的有效方法。

参考文献：

- [1] B. B. 索恰瓦. 地理系统学说导论. 李世玠译. 北京: 商务印书馆, 1991.
- [2] 吴传钧, 张家桢. 我国 20 世纪地理科学发展回顾及新世纪前景展望. 地理学报, 1999, 54(5): 385~390.
- [3] 陆大道. 关于地理学“人—地系统”理论研究. 地理研究, 2002, 21(2): 135~145.
- [4] 陆大道. 中国地理学发展若干值得思考的问题. 地理学报, 2003, 58(1): 2~8.
- [5] 葛全胜, 吴绍洪, 朱立平, 等. 21 世纪中国地理学发展的若干思考. 地理研究, 2003, 22(4): 406~415.
- [6] 倪绍祥. 地理学综合研究的新进展. 地理科学进展, 2003, 22(4): 335~341.
- [7] 杨勤业, 郑度, 吴绍洪, 等. 20 世纪 50 年代以来中国综合自然地理学研究进展. 地理研究, 2005, 24(6): 899~910.
- [8] 蔡运龙, 陆大道, 周一星, 等. 地理科学的中国进展与国际趋势. 地理学报, 2004, 59(6): 803~810.
- [9] 宋长青, 冷疏影. 21 世纪中国地理学综合研究的主要领域. 地理学报, 2005, 60(4): 546~552.
- [10] 黄秉维. 自然地理学一些主要的趋势. 地理学报, 1960, 26(3): 149~154.
- [11] 《黄秉维文集》编辑组. 自然地理工作六十年——黄秉维文集. 北京: 科学出版社, 1993.
- [12] 黄秉维, 郑度, 赵名茶. 现代自然地理. 北京: 科学出版社, 1999.
- [13] 美国国家航空和宇航管理局地球系统科学委员会. 地球系统科学. 陈泮勳等译. 北京: 地震出版社, 1992.
- [14] 黄秉维. 可持续发展战略的理论基础——建立地球系统科学的基本设想. 中国环境报, 1996-04-13.
- [15] 黄秉维. 论地球系统科学与可持续发展战略科学基础. 地理学报, 1996, 51(4): 350~356.
- [16] 黄秉维. 区域可持续发展的理论基础——陆地系统科学. 地理学报, 1996, 51(5): 445~453.
- [17] 杨勤业. 地理综合研究与陆地系统科学——祝黄秉维院士八十五寿辰. 地理研究, 1997, 16(4): 1~6.
- [18] 《地理学报》编辑部. 地球系统科学——庆贺黄秉维院士八十五华诞. 地理学报, 1998, 53(1): 1~12.
- [19] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [20] 赵贵兵, 石炎福, 等. 从混沌时间序列同时计算关联维和 Kolmogorov 熵. 计算物理, 1999, 16(3): 309~315.
- [21] 马建华, 管华. 系统科学及其在地理学中的应用. 北京: 科学出版社, 2002.

- [22] 许炯心. 黄河下游历史泥沙灾害的宏观特征及其与流域因素和人类活动的关系——历史气候及植被因素的影响. 自然灾害学报, 2001, 10(2): 7~11.
- [23] 许炯心. 黄河下游历史泥沙灾害的宏观特征及其与流域因素和人类活动的关系——人类活动、历史地震及地形因子的影响. 自然灾害学报, 2001, 10(3): 7~12.
- [24] 许炯心. 流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响. 中国科学(D辑), 2004, 38(8): 775~781.
- [25] 许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施的响应. 地理学报, 2004, 59(6): 972~981.
- [26] 金德龙, 师长兴, 陈浩, 等. 人为动力泥沙灾害类型及其特征研究. 地理科学进展, 2000, 19(4): 317~326.
- [27] 景可, 等. 我国土壤侵蚀与地理环境的关系. 地理研究, 1999, 9(2): 29~38.
- [28] 卢金发. 黄河中游流域地貌形态对流域产沙的影响. 地理研究, 2002, 21(2): 171~178.
- [29] 陈浩, 等. 黄河中游流域环境要素对水沙变异的影响. 地理研究, 2002, 21(2): 179~187.
- [30] 卢金发. 土地覆被对黄河中游流域泥沙产生的影响. 地理研究, 2003, 22(5): 571~578.
- [31] 王文均, 叶敏, 陈显维. 长江径流时间序列混沌特性的定量分析. 水科学进展, 1994, 5(2): 87~94.
- [32] 王良健, 彭补拙. 分形方法在洪涝灾害预测中的应用——以广西梧州为例. 地理科学, 1998, 18(3): 242~248.
- [33] 周寅康, 包浩生, 张捷. 淮河流域洪涝变化混沌演化特征研究. 地球信息科学, 1999, 1(2): 8~11.
- [34] 周寅康, 王腊春, 许有鹏, 等. 淮河流域洪涝变化动力系统研究. 地理科学, 2001, 21(1): 41~45.
- [35] 魏一鸣, 等. 1949~1994年中国洪水灾害成灾面积的时序分形特征. 自然灾害学报, 1998, 7(1): 83~86, 93.
- [36] 马建华, 楚纯洁. 花园口断面年径流量时间序列混沌特性分析. 人民黄河, 2006, 28(1): 18~20.
- [37] Packard N H, Crutchfield J R, Farmer J D, *et al.* Geometry from a time series. Phys. Rev. Lett., 1980, 45(9): 712~716.
- [38] Grassberger P, Procaccia I. Characterization of strange attractors. Phys. Rev. Lett., 1983, 50(5): 346~349.
- [39] Grassberger P, Procaccia I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal. Phys Rev A, 1983, 28(4): 2591~2593.
- [40] Feder J. Fractals. New York: Plenum Press, 1988.
- [41] 黄登仕, 李自强. 分形几何学、R/S分析与分式布朗运动. 自然杂志, 1990, 13(8): 477~482.
- [42] Cohen A, Procaccia I. Computing the Kolmogorov entropy from time signals of dissipative conservative dynamical system. Phys. Rev. A., 1985, 31(3): 1872~1882.
- [43] 周寅康, 张捷, 王腊春, 等. 长江下游地区近五百年洪涝序列的R/S分析. 自然资源学报, 1997, 6(2): 78~84.
- [44] 郝柏林. 分形和分维. 科学杂志, 1986, 38(1): 9~17.
- [45] Hurst H E. Long-Term Storage: An Experimental Study. London: Constable, 1965.
- [46] Mandelbrot B B, Van Ness J W. Fractional brownian motion, fractional noise and application. SIAM Review, 1968, 10: 422~437.
- [47] Mandelbrot B B, Wallis J R. Some long-run properties of geophysical records. Water Resources Research, 1969a, 5(2): 321~340.
- [48] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long-run statistical dependence. Water Resources Research, 1969b, 5(4): 967~988.
- [49] Mcheod A I, Hipel K W. Preservation of rescaled adjusted range. Water Resources Research, 1978, 14(3): 491~518.
- [50] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. J. Atmos. Sci., 1963, 20: 130~141.
- [51] E. N. 洛伦兹. 混沌的本质. 刘式达, 刘式适, 严中伟译. 北京: 气象出版社, 1997.
- [52] Reckmann J P. Ergodic theory of chaos and strange attractors. Review Modern Physics, 1985, 57: 617~655.
- [53] 周寅康, 付重林, 王腊春, 等. 淮河流域洪涝变化可预报时间研究. 自然灾害学报, 1999, 8(4): 118~122.
- [54] 谢正栋, 等. 淮河流域洪水的分形特征及可预报时间研究. 南京大学学报(自然科学版), 2003, 39(1): 113~119.
- [55] 赵晶, 徐建华. 1950~1997年我国洪涝灾害成灾面积的分形特征研究. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 31~35.
- [56] http://www.yellowriver.gov.cn/lib/ggl/2005-08-24/jj_160400119297.html.
- [57] 黄建平, 衣育红. 利用观测资料反演非线性动力模型. 中国科学(B), 1991, (3): 331~336.
- [58] 彭永青, 育峰, 严绍瑾. 利用一维时间序列重建动力系统的初步研究. 应用气象学报, 1993, 4(增刊): 31~38.

Chaotic characters of dynamic system of the Yellow River basin from sandiness time series: an integrative research attempt to geographic system

MA Jian-hua¹, CHU Chun-jie²

(1. Institute of Natural Resources and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475001, China;

2. Department of Environment and Geography, Pingdingshan Henan, 467000, China)

Abstract: The sandiness content on every section of the Yellow River relates all the factors that are interactive in many ways, so it includes some evolution information of the system controlled by monitoring section. We can infer the dynamic characters of the system from the sandiness time series based on the techniques of phase space reconstruction and the picking-up methods for chaos indexes. Sandiness contents from 1952 to 2000 were chosen as the time series on Toudaoguai section, Tongguan section, Huayuankou section and Lijin section along the Yellow River. Correlation dimension (D_2) was calculated according to Grassberger-Procaccia arithmetic, Kolmogorov entropy (K_2) according to Zhao Gui-bing arithmetic, and Hurst index (H) according to Rescaled Range Analysis (R/S). The results are shown as follows: (1) The correlation dimension on Toudaoguai section is 3.24, Tongguan section is 5.69, Huayuankou section is 6.57 and Lijin section is 7.34. We can see that all the dimensions are fractal dimensions, so the dynamic systems controlled by different sections of the Yellow River basin are chaotic systems and the chaotic degrees heighten gradually from upper section to lower section. (2) Forecast time of the time series was calculated by $1/K_2$. On Toudaoguai section, the forecast time of the sandiness time series is about 8 years, and the other sections are 3 years. The more obvious the chaos is, the shorter the forecast time is. (3) Hurst indexes on all the study sections are more than 0.5, the maximum is 0.86 on Tongguan section and the minimum is 0.68 on Toudaoguai section, which indicates that the changes of the time series have persistence trends in the average forecasting time. The past trends of the time series from 1952 to 2000 on all the sections were wavelike descending, so that the future trends of the time series will go on wavelike descending too. Compared with the time series from 1999 to 2000, the future trends was validated with the time series from 2001 to 2004 on Tongguan section, Huayuankou section and Lijin section. (4) We can get some information from correlation dimensions and saturated inlay dimensions to construct useful dynamic system model. The sandiness time series on Lijin section infers the dynamic characters of the whole Yellow River basin, its correlation dimension is 7.34 and the saturated inlay dimension is 10. Therefore, the dynamic model of the whole Yellow River basin needs eight state variables and two control variables at least. A general form of the dynamic model of the whole Yellow River basin was given in this paper.

Key words: dynamic system of the Yellow River basin; sandiness time series; chaotic character; integrative research for geographic system