

黄河中下游河道生态需水研究^{*}

王高旭¹, 陈敏建², 丰华丽¹, 王立群¹, 黄昌硕¹

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京, 210029;
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘 要: 根据黄河流域生态需水的特点, 将研究重点放在中下游河道, 选择黄河中下游及部分支流的主要控制断面研究黄河流域河道内生态需水。以河流水体存在(不断流或干涸)、水生生物完整性以及河流系统的水沙平衡为保护目标, 分别计算河道最小生态流量、适宜生态流量和洪水期生态流量, 将不同生态流量耦合时间特征计算了全过程生态需水。研究结果表明, 黄河中下游河道适宜生态流量、洪水期生态流量和最小生态流量的相对值分别为18%~29%、156%~187%、9%~15%, 对应于汛前期(4~6月)、汛期(7~8月)和汛后枯水期(9~3月)的河道生态需水, 据此算得黄河中下游流域年生态需水总量占多年平均径流量的35%~43%。从河流生态需水时间特征出发提出的全过程生态需水计算成果, 将为黄河流域的水资源合理调度和管理, 生态系统保护和恢复提供科学依据。

关键词: 时间特征; 生态流量; 全过程生态需水; 黄河中下游

中图分类号: TV213.4; P963 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)05-0125-06

Ecological Flow Regime in Middle and Lower Reaches of the Yellow River

WANG Gaoxu¹, CHEN Minjian², FENG Huali¹, WANG Liqun¹, HUANG Changshuo¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Lab of Hydrology and
Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Nanjing 210029, China;
2. China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Maintaining the natural hydrologic variability of river flows is critical for protecting river ecosystems. Minimum ecological flow, appropriate ecological flow and ecological flow during flood period and the ecological flow regime in the middle and lower reaches of the Yellow River are calculated and studied respectively for maintaining river scale (avoid flow-breaking or drying-up), sustaining the basic integrality of aquatic species and preventing the river sediment accumulation. Based on temporal characteristics of three kinds of ecological flows, ecological flow regime in the middle and lower reaches of the Yellow River is set up. The calculation results indicate that the appropriate ecological flow (April to June) is between 18% and 29% of mean annual flow, the ecological flow of flood period (July to August) is 156%~187%, and the minimum ecological flow (September to March) is 9%~15%. Mean annual ecological water requirement is 43%~71% of multi-year average discharge. The results can provide scientific supports for water resources management and water ecosystem protection in that region.

Key words: temporal characteristics; ecological flow; ecological flow regime; the middle and lower reaches of the Yellow River

^{*} 收稿日期: 2008-09-12

基金项目: “十五”国家科技攻关计划基金资助项目(2004BA610A-01), “十一五”国家科技支撑计划基金资助项目(2006BAB14B07); 南京水利科学研究院基金资助项目(Y50603)

作者简介: 王高旭(1979年生), 男, 工程师, 博士研究生; E-mail: gxwang@nhri.cn

黄河流域地跨干旱、半干旱、半湿润气候带,由于水资源不足,加之用水增加,河道径流量减少,重要干支流干涸断流频繁。1999年实施全河水量统一调度后,上述问题虽然有所缓解,但断流危机并没有解除。目前下游河段仅能保证很低的径流量,徘徊在断流边缘,使得河流规模大幅度减少,长期下去将改变河流生态效应。长期的小流量过程,致使黄河下游河道主河槽淤积严重,20世纪90年代以来,黄河下游河道年均淤积2.2亿t。河槽的严重淤积,造成过水断面严重萎缩,其结果是同流量水位升高,平滩流量大幅度减少。近十几年来水量减少、河流污染严重等原因,使部分水生生物处于濒危状态,黄河天然鱼类的商业捕获量基本为零,洄游性鱼类已近绝迹,水生态系统已严重退化。因此,确保黄河水生态系统的健康和健康,研究黄河河道生态需水意义重大。本文分析黄河生态需水研究的重点,针对不同的保护目标分级计算河道生态流量,将不同生态流量耦合时间特征计算了全过程生态需水,给出确定黄河下游的生态需水量的方法。

1 黄河流域生态需水研究重点

河流是连续流动的水体,应该保证河流从源头到河口水流的连续性。但由于黄河流域经济社会用水量的增加,水资源供需矛盾日益突出,生态用水被挤占,黄河主要干支流干涸断流频繁。需要对黄河干流和重要支流生态流量进行系统研究,黄河干流、特别是中下游河道生态环境需水标准的研究应该是整个流域生态环境需水研究的突破口及关键所在。

下游河段的生态状态集中反映了全流域用水安全状况。由于黄河花园口以下为地上悬河,区间很少入流,其生态环境可利用水量完全取决于花园口站的来水量。上中游地区用水过多,势必减少下游地区的生态环境用水量,这将会造成生态环境的恶化。

下游是保持黄河连通性和输沙的关键。黄河中游的黄土高原水土流失极其严重,大量泥沙流入下游河道,使本已高出两岸背河洼地5~10m的悬河面临更大的行洪压力,泥沙的输运也需要河道保证一定的水量。

下游河段是控制河口地区生态状态的关键。黄河河口地区有国家级湿地自然保护区,物种多样性丰富,生态意义显著。维持河口地区生态系统稳定需要有合理的水量入海,它是保证河口地区生态系统完整之所需。

黄河在蜿蜒流过几千公里之后,其主要的生态环境问题在下游集中暴露显现。黄河下游是整个流域生态环境需水研究的控制性区段,在下游河道分段生态需水量确定之后就可以通过水量调度控制进入下游的水量,保障河流生态用水安全。

2 黄河流域河道生态流量计算

2.1 生态需水的时间特征

我国从20世纪90年代开始进行生态需水研究,形成了较为完备的生态需水理论体系和方法^[1-6]。就我国河流系统生态需水研究而言,已有成果主要是借鉴国外的相关研究理论和方法^[5]。国外将生态用水优先考虑,河流管理集中于枯水季节最枯时段的流量调控,已有生态需水计算方法多侧重于提供一个偏安全的“外包线”,不涉及分季节的危机管理。我国受季风影响显著、水文情势复杂,所面临的水问题远比国外复杂,已有生态需水理论方法尚不能满足我国流域水资源管理的需求,使得相关生态需水研究往往只是理论上的核算,在实践中却难以利用。为解决这一问题,应该从水资源规划与管理角度研究与生态相关的水文水资源问题,考虑生态需水的时间特征,分季节提出服务于流域管理的生态需水特征值。

对于一个流域,流域水情和生态系统有显著季节变化特点,分为汛前期、汛期、汛后枯水期,可称之为生态水文季节^[7]。在不同的生态水文季节,河流生态系统的生态需求明显不同。汛前期,河流水量增加、流速变快、水温升高,生物从枯水期休眠蛰伏中恢复活跃。鱼类开始产卵繁殖,孵化幼鱼。因此汛前期是鱼类繁殖的季节,对于水生态系统的生物完整性至关重要。汛期,大流量丰富了河流生境,生物快速生长。洪水提高了造床输沙能力、增加向下游输送养分,维持河流与湿地、湖泊的连通。如果水利工程的拦蓄和引、提水造成径流量减少,使汛期洪水逐渐丧失,将会降低河道作为输沙通道、生物廊道等重要功能,违背生态系统天然属性。汛后枯水期,河流水量减少、流速变缓、水温下降、饵料缺乏,河流生物逐步进入蛰伏状态,生态系统进入冬季休眠期。枯水期降水稀少,河流主要依靠地下水补给,不当的水资源利用会造成河道断流,危及鱼类等水生生物的生存。

非汛期生态需水分为最小生态需水和适宜生态需水^[7-9],它们对应于流量变化改变河流生态效应的两个临界状态,反应了河流非汛期的生态需求。洪水是河流生态系统的固有特征,洪水期生态需水

通过影响河流造床输沙、水文连通性、河流生境等,影响河流生态系统的健康。

最小生态需水:以目标水体(河流、湖泊)处于生存危机(如断流、干涸)临界状态的水分条件定义为维持地表水体生存的最小生态需水。对于河流,最小生态需水对应于维持河流的一定规模所必须保持某种低水流量,当流量小于这个数值时,河流将迅速消退直至干涸。

适宜生态需水:目标水体生态系统的生物完整性随水量持续减少而发生演变,以生态系统衰退临界状态的水分条件定义为适宜生态需水。适宜生态需水对应于维持水生态系统的生物完整性所必须保持的流量,当流量小于这个数值时,会对水生生态系统带来难以恢复的损害。

洪水期生态需水:维持河流系统的整体动态平衡,河流需要的周期性的大流量水分条件。如果洪水期生态需水长时间得不到满足,河床淤积抬高,河流、湿地、洪泛区之间将成为孤立的、脆弱的生态斑块,易受到干扰和破坏。

将河流汛期和非汛期生态需水耦合,形成维持河流生态系统的整体健康的临界需水过程,能够为不同时段的水资源调度和管理提供科学依据。汛前期生态需水应该以鱼类繁殖为控制目标,是适宜生态需水的保障范围;汛后枯水期生态需水以保持水体自我生存、维持生物蛰伏休眠空间为目标,是最小生态需水的保障范围。根据水文情势,黄河汛期河道水量充足,大大超过了维持水体自我生存和生物多样性所需水量,洪水期生态需水概括为维持河流系统的水沙平衡的输沙流量。

2.2 非汛期生态流量计算

本文主要选择黄河中下游河道区间的控制断面来计算最小和适宜生态流量。干流选取了从河口镇到利津共5个控制断面进行研究,支流渭河、汾河、伊洛河和沁河各选择了一个控制断面,控制断面分布情况如图1所示;计算采用的是1966-1989年的水文资料。

采用相对流量-河流规模模型^[7,9],计算控制断面的最小生态流量。通过对河流大断面、水位流量关系等多年实测水文资料地分析,在同一坐标下点绘多年的无量纲相对流量-河道规模(湿周)关系图,其中横轴为实测流量占多年天然平均流量的比重(q/Q),纵轴为该流量对应的湿周占多年平均流量对应湿周的比重(l/L)。对各年的结果进行集中综合分析,相对流量-河道规模关系出现明显转折点处即为最小生态相对流量。图2为利津站

最小生态流量计算实例。由图2可以看出,在相对流量为9%处,相对流量-河道规模关系出现明显转折。尽管由于河道冲淤变化,不同年份转折点对应的河道规模有所不同,但相对流量基本不变。当相对流量大于9%时,河流规模变化不大,而当相对流量小于9%时,河流规模迅速衰减,直至消失。由此确定利津站最小生态相对流量为9%。

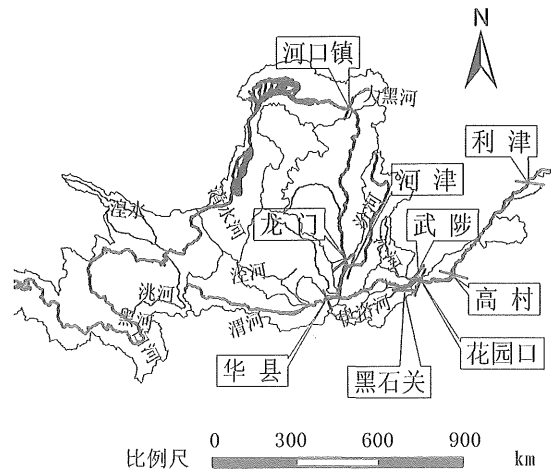


图1 黄河流域主要控制断面分布

Fig. 1 Distribution of main control sections in the middle and lower reaches of the Yellow River

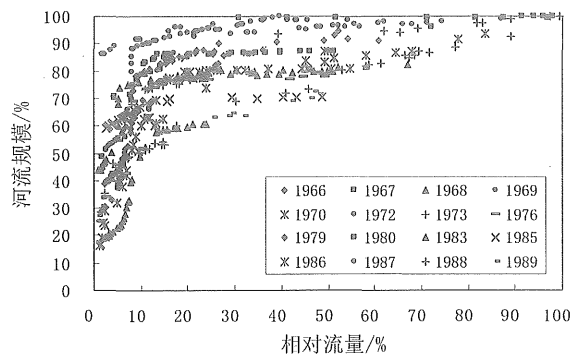


图2 黄河利津站最小生态流量计算

Fig. 2 Minimum flow calculation at Lijin Station

采用鱼类生境法^[8]计算河流适宜生态流量。黄河中下游地区鱼类资源主要包括黄河铜鱼、鲫鱼、鲤鱼、刀鲚鱼、草鱼、鲶鱼等。其中,黄河铜鱼是黄河的特有鱼种,属于国家二级保护鱼类;刀鲚鱼是最具乡土价值的物种,鲤鱼是其最具经济价值的物种。因此,选择铜鱼、刀鲚鱼和鲤鱼为重点保护对象^[10]。已有的研究表明,大多数鱼类产卵要求的适宜流速为0.3~1.5 m/s不等^[11-12]。对于黄河干流,考虑到河流自我调节能力较强,以及鱼

类繁殖所需的生境要求，确定断面可接受的平均流速为 0.60 m/s；支流断面集水面积小，河流自我调节能力较弱，以及支流鱼类生长特性（例如刀鲚鱼，受精卵漂浮于水的上层进行发育孵化），确定断面平均流速为 0.40 m/s，可以满足刀鲚鱼等黄河支流鱼类的生长繁殖要求。根据鱼类产卵繁殖需要的适宜流速，以及各控制断面的流量－断面平均流速关系可确定断面的适宜生态流量。具体计算方法已另著专文细述，见参考文献^[8]。

黄河中下游各站最小生态流量和适宜生态流量的计算结果见表 1。

由计算结果分析得出，黄河干流的最小和适宜生态相对流量从中游至下游均表现为沿程递减，从河口镇的 11.5% 渐变至利津的 9%；黄河支流与干流相比，支流的最小及适宜生态相对流量均呈增加的趋势，符合流域的水文水力特性。

依据计算分析结果和地区分布规律，配合流域面积、降水和径流关系的对比分析，可以形成相应的生态流量推求经验模式，在流域水资源综合规划和流域管理中应用。黄河流域生态流量经验推求模式见表 2。

表 1 黄河流域最小和适宜生态流量计算结果

Table 1 The results of minimum and appropriate ecological flow of main control sections in the Yellow River

区域	断面名称	平均流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最小生态流量					适宜生态流量		
			流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对流量 %	取值范围	河流规模	取值范围	流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对流量 %	取值范围
黄河	河口镇	1070	123	11.5	10.4 ~ 11.5	69	64 ~ 69	244	22.8	22 ~ 23
中游	龙门	1230	128	10.4		64		276	22.4	
黄河下游	花园口	1790	172	9.6	9.0 ~ 9.8	48	38 ~ 66	327	18.3	18 ~ 20
	高村	1780	174	9.8		38		357	20.1	
	利津	1840	166	9.0		66		371	20.2	
黄河支流	华县	264	27.7	10.5	10.5 ~ 15.2	59	36 ~ 59	75.2	28.5	21 ~ 29
	河津	64.6	7.82	12.1		44		15.0	23.2	
	黑石关	100	11.0	11.0		36		21.1	21.1	
	武陟	36.3	5.52	15.2		42		8.57	23.6	

表 2 黄河中下游生态流量比例取值范围

Table 2 Rate of minimum and appropriate ecological flow in the middle and lower reaches of the Yellow River %

区域	依据站	最小生态流量	维持河流规模	适宜生态流量
黄河中游	河口镇、龙门	10.4 ~ 11.5	64 ~ 69	22.4 ~ 22.8
黄河下游	花园口、高村、利津	9.0 ~ 9.8	38 ~ 66	18.3 ~ 20.2
黄河支流	华县、河津、黑石关、武陟	10.5 ~ 15.2	36 ~ 59	21.1 ~ 28.5

2.3 汛期生态流量计算

汛期河道水量大，能满足河流生态系统的需水。但黄河是多沙的河流，黄河中游的黄土高原水土流失极其严重，大量泥沙流入下游河道。下游是保持黄河连通性和输沙的关键，汛期河道保证一定的水量对泥沙输运、维护河道整体形态特别重要^[13]。故设定黄河中下游汛期生态流量主要服务于输沙功能。黄河汛期的生态需水概括成为防止下游的淤积，维持河流系统的水沙平衡的输沙流量。

黄河汛期为 7－10 月份，输沙需水主要发生在这一时段。但是由于黄河中下游用水紧张，输沙流

量不可能在 7－10 月的 4 个月内都能实现。从水资源利用的角度看，短时间大流量输沙用水最为经济性，而且在小浪底水库的调节下有可能实现。采用这一理念，确定 7－8 月为输沙流量的时间段。根据黄河水利科学研究院《黄河输沙水量研究》报告，按照来沙量 8 亿 t、允许淤积量 2 亿 t 计，花园口站输沙水量 178 亿 m^3 ，利津站输沙水量 150 亿 m^3 ；以来沙量 10 亿 t，允许淤积量 3 亿 t 计，花园口站输沙水量 178 亿 m^3 ，利津站输沙水量 150 亿 m^3 。据此输沙量和时段数据计算出花园口和利津站的洪水期生态流量分别为 3 322 和 2 800 m^3/s ，

从而得出黄河下游汛期输沙流量约为多年平均流量的1.56~1.87倍。

3 黄河流域河道生态需水量

黄河汛后枯水期一般为11~3月份,因此以枯水季节11~3月作为最小生态流量对应的时段。黄河的代表性鱼种铜鱼和刀鲚鱼、最具经济价值的物种鲤鱼,一般活动在黄河中下游,生殖期为4~6月。为了维持鱼类产卵繁殖条件,综合确定4~6月份为适宜生态流量对应的时段。黄河汛期为7~10月份,输沙需水主要发生在这一时段。考虑输沙用水的经济性,以主汛期7~8月作为洪水期生态流量对应的时段,9~10月可作为最小生态流量对应的时段。由以上计算结果得到黄河中下游河道全过程生态需水(见表3),各时段标准值通过与多年平均流量的相对流量形式来表示,即适宜生态相对流量、洪水期生态相对流量、最小生态相对流量。

表3 黄河流域各区间全过程生态需水

Table 3 Ecological flow regimes of some reaches in the Yellow River

区域	相对流量/%		
	汛前期 (4~6月)	汛期 (7~8月)	汛后枯水期 (9~3月)
黄河中游	22~23		10~12
黄河下游	18~20	156~187	9~10
黄河支流	21~29		11~15

根据全过程生态需水,可以计算多年平均情况下的生态需水量。生态需水量是从年水量平衡的角度给出的数值,在水资源配置中具有应用价值。年生态需水量占多年平均流量的比重可以表示为:

年生态需水相对量 = (汛前期时段 × 适宜生态相对流量 + 汛期时段 × 洪水期生态相对流量 + 汛后枯水期时段 × 最小生态相对流量) / 12。

对于黄河流域,汛前期按3个月,主汛期2个月,汛后枯水期按7个月计算。据此得到,黄河中下游生态需水量占多年平均径流量的35%~43%。

4 结 论

本文对黄河生态需水进行了分析计算,根据生态需水的时间特征,将汛期和非汛期的生态需水耦合计算了黄河中下游全过程生态需水。最小生态流量是维持河流生存的临界流量,对应于9月到第2

年3月共7个月的汛后枯水期时段;对黄河中下游9个断面的计算结果表明,最小生态相对流量为9.0%~15.2%,维持的河流规模在36%~69%之间。适宜生态流量是维持水生生物完整性的临界流量,对应于4~6月的汛前期时段;黄河中下游河道适宜生态相对流量为18%~29%。洪水期生态流量是防止河道淤积、维持河流水沙平衡的临界流量,对应于7~8月的汛期时段;黄河中下游河道洪水期生态相对流量为156%~187%。按照全过程生态需水计算成果,黄河中下游河道内总生态需水占年径流比重在35%~44%之间。

鉴于黄河中下游生态系统的实际情况,对生态需水进行分时段研究十分必要。本文提出的全过程生态流量,反映了不同时段河流生态系统的临界需求,为河流调度和管理提供了科学依据。据此计算的年生态需水量,对水资源规划和管理有重要指导意义。

参考文献:

- [1] 王西琴,杨志峰,刘昌明. 河道最小环境需水量确定方法及其应用[J]. 环境科学学报, 2001, 21(5): 548~552.
WANG Xiqin, YANG Zhifeng, LIU Changming. Method of resolving lowest environmental water demands in river course [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(5): 548~552.
- [2] 王西琴,刘昌明,杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 507~514.
WANG Xiqin, LIU Changming, YANG Zhifeng. Research advance in ecological water demand and environmental water demand [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 507~514.
- [3] 杨爱民,唐克旺,王浩,等. 生态用水的基本理论与计算方法[J]. 水利学报, 2004, (12): 39~45.
YANG Aimin, TANG Kewang, WANG Hao, et al. Theory and calculation method of ecological water use [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (12): 39~45.
- [4] 占车生,夏军,丰华丽,等. 河流生态系统合理生态用水比例的确定[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2005, 44(2): 121~124.
ZHAN Chesheng, XIA Jun, FENG Huali, et al. Determination of the reasonable proportion of ecological water used of river ecological system [J], Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2005, 44(2): 121~124.
- [5] 严登华,王浩,王芳,等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 267

- 273.
- YAN Denghua, WANG Hao, WANG Fang, et al. Frame of research work on ecological water demand and key topics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 267-273.
- [6] 马广慧, 夏自强, 郭利丹, 等. 黄河干流不同断面生态径流量计算[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(5): 496-500.
- MA Guanghui, XIA Ziqiang, GUO Lidan, et al. Ecological runoff of different cross-sections of the mainstream of Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(5): 496-500.
- [7] 陈敏建, 王浩. 中国分区域生态需水研究[J]. 中国水利, 2007, 9: 31-37.
- CHEN Minjian, WANG Hao. The Divisional standard of ecological water use in China[J]. China Water Resources, 2007, 9: 31-37.
- [8] 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 等. 适宜生态流量计算方法研究[J]. 水科学进展, 2007, 8(5): 745-750.
- CHEN Minjian, FENG Huali, WANG Liqun, et al. Calculation methods for appropriate ecological flow[J]. Advances in Water Science, 2007, 8(5): 745-750.
- [9] 苏飞, 陈敏建, 董增川, 等. 辽河河道最小生态流量研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 136-139.
- SU Fei, CHEN Minjian, DONG Zengchuan, et al. Minimum ecological discharge of Liaohe River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(2): 136-139.
- [10] 黄锦辉, 史晓新, 张 蓓, 等. 黄河生态系统特征及生态保护目标识别[J]. 中国水土保持, 2006, 12: 14-18.
- HUANG Jinhui, SHI Xiaoxin, ZHANG Qiang, et al. Characteristics of ecological system and target identification of ecological protection of the Yellow River[J]. Soil and Water Conservation in China, 2006, 12: 14-18.
- [11] 刘建康, 何碧梧. 中国淡水鱼类养殖学[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 1992.
- [12] LEOPOLD L B, ORTH D J. Use of habitat guilds of fish to determine instream flow requirements[J]. North Am J Fish Manage, 1998, 8: 399-409.
- [13] 刘成, 王兆印, 隋觉义. 黄河干流沿程水沙变化及其影响因素分析[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 1-7.
- LIU Cheng, WANG Zhaoyin, SUI Jueyi. Variation of flow and sediment of the Yellow River and their influential factors[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 1-7.

(上接第124页)

- [12] ALTSTADT T J, FAIRCHILD C R, GOLIK J, et al. Synthesis and antitumor activity of novel C-7 paclitaxel ethers: discovery of BMS-184476[J]. J Med Chem, 2001, 44: 4577-4583.
- [13] THOMPSON J D, HIGGINS D G, GIBSON T J. CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice[J]. Nucl Acids Res, 1994, 22: 4673-4680.
- [14] POSADA D, CRANDALL K A. MODELTEST: testing the model of DNA substitution[J]. Bioinformatics, 1998, 14: 817-818.
- [15] HUELSENBECK J P, RONQUIST F, NIELSEN R, et al. Bayesian inference of phylogeny and its impact on evolutionary biology[J]. Science, 2001, 294: 2310-2314.
- [16] YANG Z. PAML: a program package for phylogenetic analysis by maximum likelihood[J]. Comput Appl Biosci, 1997, 13: 555-556.
- [17] VON WACHENFELDT C, JOHNSON E F. Structures of Eukaryotic Cytochrome P450 Enzymes in Cytochrome P450: Structure, Mechanism, and Biochemistry[M]. New York: Plenum Press, 1995: 183-223.
- [18] SCHULER M A. The role of cytochrome P450 monooxygenases in plant-insect interactions[J]. Plant Physiol, 1996, 112: 1411-1419.
- [19] ELEMENTO O, GASCUEL O, LEFRANC M P. Reconstructing the duplication history of tandemly repeated genes[J]. Mol Biol Evol, 2002, 19: 278-288.
- [20] NELSON D R, KAMATAKI T, WAXMAN D J, et al. The P450 superfamily: update on new sequences, gene mapping, accession numbers, early trivial names of enzymes, and nomenclature[J]. DNA Cell Biol, 1993, 12: 1-51.