



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.008

梁忠民, 胡义明, 黄华平, 等. 非一致性条件下水文设计值估计方法探讨[J]. 2016, 14(1): 50-53, 83.

LIANG Zhong min, HU Yi ming, HUANG Hua ping, et al. Study on the estimation of design value under non stationary environment[J]. 2016, 14(1): 50-53, 83. (in Chinese)

非一致性条件下水文设计值估计方法探讨

梁忠民, 胡义明, 黄华平, 王 军, 李彬权

(河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 非一致性水文频率分析中, 为了刻画未来环境变化对水文极值分布函数的影响, 常假定分布函数中的分布参数随时间或其它因子变化, 这就导致了某一量级洪水在未来发生的可能性每年均不同, 是随时间变化的, 使得现行水文频率分析框架中易于理解的重现期/设计值概念难于应用。为此, 提出“等可靠度”概念, 即假定在工程的设计使用寿命期内, 非一致条件下的频率分析结果与平稳条件下的成果应具有相同的水文设计可靠度, 由此可以继续采用现行水文频率分析框架中的重现期与可靠度的概念探讨非一致条件下频率分析中设计值的估计问题, 并建立了一致/非一致性条件下计算方法的联系, 保证了非一致性条件下水文设计成果与现行工程采用的成果之间的衔接与协调。

关键词: 非一致性; 水文频率分析; 重现期; 设计值; 等可靠度

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0050-04

Study on the estimation of design value under non stationary environment

LIANG Zhong min, HU Yi ming, HUANG Hua ping, WANG Jun, LI Bin quan

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In non stationary hydrological frequency analysis (NSHFA), with the purpose of considering the impact of environment change on the characteristic of distribution function of hydrological extreme series, the parameter of distribution function is usually regarded as the function of time or other factors (precipitation, temperature, etc.), which leads to the fact that the design value related to a given return period varies with time or other driving factors change. That is to say that during the design life period, for the given design standard, the corresponding design value obtained by the NSHFA method is changeable, which makes it be difficult to employ the concept of return period and design value in traditional frequency analysis (TFA) to NSHFA. Therefore, the paper introduces the "equivalent reliability" method to solve hydrological design problems under non stationary case. The "equivalent reliability" means that the design reliability of the hydraulic engineering is the same both in stationary and non stationary conditions. Meanwhile, using "equivalent reliability" method can establish the relationship between NSHFA and TFA, which ensures the coordination of hydrological design obtained by NSHFA with TFA.

Key words: non stationary; hydrological frequency analysis; return period; design value; equivalent reliability

收稿日期: 2015-12-02 修回日期: 2016-01-21 网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1623.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51190095); 国家科技支撑计划课题(2013BAB06B01)

Fund: Major Program of National Natural Science Foundation of China (51190095); National Science and Technology Support Plan (2013BAB06B01)

作者简介: 梁忠民(1962-), 男, 辽宁凤城人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: zmlianghu@126.com

1 问题的提出

气候变化及人类活动的影响,使得不同时期水文极值(如洪水)形成的气候和下垫面条件发生改变,最终导致水文极值系列一致性的丧失^[1],这一现象与现行的水文频率分析方法中假设水文极值系列满足一致性的要求相矛盾。为了解决变化环境下非一致性水文极值系列的频率分析问题,国内外学者开展了大量研究工作并取得了一些代表性成果。这些成果大体上可以归为三类解决问题的途径。

(1)非一致性水文极值系列重构途径(或还原/还现途径),即对非一致性的水文极值系列进行重构,使其满足一致性要求,通过对重构的一致性水文系列进行频率分析,获得分布函数 F ,并以 F 作为该极值变量在未来条件下的分布函数,从而推断不同重现期对应的分位点值(水文设计值)^[2-3]。该方法实质上是将非一致性极值系列修正到当前或历史的某种水平状态下,并认为未来仍将保持这一状态(即分布函数 F 不变),所以并没有考虑未来环境变化对极值分布特征的影响。

(2)混合分布途径,即采用不同的分布函数分别拟合系列变异前后的各个子系列,通过加权综合各子分布函数,获得混合分布函数,并用该分布函数来推断极值事件在未来条件下不同重现期对应的分位点值^[4-7]。该方法本质上也是仅是加权综合了观测期的不同子系列分布特征,同样没有考虑未来环境变化对极值分布特征的影响。

(3)参变频率分析模型途径,即通过建立分布函数的统计参数与时间或其它因子(如降雨、气温等)的数理关系,驱动分布函数 $F(t)$ 随影响因子的变化;在未来的不同时刻 t ,分布函数 $F(t)$ 是不同的^[8-9]。该方法通过利用时间或其它因子来驱动分布函数中分布参数的变化,进而实现描述未来变化环境下水文极值事件分布特征的目的。

从上述的分析可以看出,对未来任一年发生超过某一量级洪水的概率或可能性而言,基于第(1)和(2)类方法的计算结果是常数,因为这两个方法采用的是还原/还现构建平稳系列的思路,本质上没有考虑未来环境的变化。而采用第(3)种方法时,无论是以时间为协变量,还是以其它因子为协变量驱动分布函数,都涉及到一个关键性问题,即对于给定的设计标准(频率或重现期),其对应的设计值估计是随时间或驱动因子而变化的,每年不同不是常数。为了探讨非一致性条件下给定设计频率或重现期的设计值估计问题,国外学者曾提出了期望等待时间

法^[10]和期望发生次数法^[11]。然而,这两个方法自身都存在一些不足^[12]。如被研究较多的期望等待时间法,对于呈减少趋势系列而言,其可能导致无解或需要将已建的趋势模型随着时间无限外延,即如推求100年洪水,可能需要将确定性趋势模型外推到1000年以外的时间后才能求解,这将导致更大的不确定性,毕竟,未来1000年的变化情况难以刻画,并不是用目前仅有的几十年资料就可以可靠外延。所以,变化环境下的工程水文设计,更应该关注工程的设计使用寿命问题^[12]。因为在不同时期,环境的影响是很难一致,如对于洪水极值系列持续增加情况,第一个未来100年和第二个未来100年,两个时期的环境很难相同,以期望等待时间或期望发生次数去求解,得到的只是一个平均情况,这就可能导致计算成果对工程寿命期内的变化特征考虑不足,这是与一致性条件下采用平均或期望概念的不同之处。在一致性条件下,某一量级洪水每年发生的概率是固定不变的,而非一致性条件下每年均不同,所以有学者建议采用可靠性等指标作为水文设计的依据^[12]。

因此,本文提出“等可靠度”概念,以推求非一致性条件下的水文设计值。即认为:对指定的某一设计标准,一致性和非一致性条件下的设计值虽然不同,或者说对同一量级洪水,两种条件下每年发生的概率不同,但在工程的使用寿命期内,非一致性条件下的水文设计结果与一致性条件下的成果应具有相同的水文设计可靠度。这从实际应用角度而言,不仅可以避开因非一致性下重现期估计理论尚不完善所带来的应用问题,也可尽可能解决非一致性条件设计成果与现有工程建设标准的协调与衔接问题。作为示例,选取黄河上游唐乃亥站1960年-2012年共53年的15日最大洪量系列,采用一个简单的时变频率分析模型对本文提出的方法进行应用研究,以说明方法的特点。

2 时变水文频率分析模型描述

在非一致性水文频率分析的相关研究中,参变频率分析模型是研究较多的一种,其基本思想是假定分布函数中的分布参数与时间或其它因子(降雨、气温等)成线性或非线性函数关系,以此来驱动分布函数的变化,使其适应未来环境的变化,以便更好地刻画未来变化环境下水文极值事件的分布特征。本次以我国设计洪水计算中常用的皮尔逊三型分布($P-III$)为例,假定分布中的参数随时间呈线性变化,来描述时变频率分析模型的概念。

平稳状态下, $P-\hat{O}$ 的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{\beta^\gamma}{\Gamma(\gamma)}(x - \mu)^{\gamma-1} e^{-\beta(x-\mu)}, x > \mu \quad (1)$$

式中: $\mu > 0, \beta > 0$ 和 $\gamma > 0$ 是常数, 分别表示 $P-\hat{O}$ 分布函数的位置、尺度和形状参数。

而在时变参数模型中, $\mu > 0, \beta > 0$ 和 $\gamma > 0$ 是时间的线性/非线性函数, 现假定参数随时间呈线性变化:

$$\begin{aligned} \mu(t) &= \mu_0 + \mu_1 t \\ \beta(t) &= \beta_0 + \beta_1 t \\ \gamma(t) &= \gamma_0 + \gamma_1 t \end{aligned} \quad (2)$$

则, 变化环境下, 水文极值变量 $P-\hat{O}$ 概率密度函数表示为

$$f(x | \mu(t), \beta(t), \gamma(t)) = \frac{\beta(t)^{\gamma(t)}}{\Gamma(\gamma(t))} \cdot (x - \mu(t))^{\gamma(t)-1} e^{-\beta(t)(x-\mu(t))} \quad (3)$$

显然, 式(3)中的统计参数随时间变化, 意味着对某一指定的水文设计标准(如百年一遇), 根据不同年份的概率分布将得到不同的设计值估计, 但应该取用哪一个估值作为工程的设计值? 这是非一致性条件下水文频率分析需要回答的问题。

3 基于“等可靠度”概念的非一致水文频率分析方法

在非一致性水文频率分析模型中, 采用“等可靠度”概念推求给定设计标准条件下设计值的思路如下。

我国的水文频率分析中, 习惯采用 $P(X > x)$ 超过概率描述极值事件, 如超过百年洪水的概率为 0.01。假定工程的设计标准为防御 T 年一遇极值事件, 工程设计寿命周期为 N 年, 则在一致性条件下, 对应于 T 年设计标准和 N 年工程使用寿命的水文设计可靠度为

$$R_s = \left[1 - \frac{1}{T} \right]^N \quad (4)$$

在非一致性条件下, 由式(3), 对于某一给定的阈值 x_{thr} , 未来第 t 年发生超过 x_{thr} 事件的概率为 $P(X > x_{thr}) = F(x_{thr} | \mu(t), \beta(t), \gamma(t))$, 而不超过 x_{thr} 的概率为 $1 - F(x_{thr} | \mu(t), \beta(t), \gamma(t))$, 故 N 年生命周期的水文设计可靠度为

$$R_{ns} = \prod_{i=1}^N [1 - F(x_{thr} | \mu(t), \beta(t), \gamma(t))] \quad (5)$$

为了保证在平稳和变化环境下, 工程在设计寿命期内具有同等的水文设计可靠度, 令 $R_{ns} = R_s$, 即

$$\prod_{i=1}^N [1 - F(x_{thr} | \mu(t), \beta(t), \gamma(t))] = \left[1 - \frac{1}{T} \right]^N \quad (6)$$

计算使式(6)成立的阈值 x_{thr} , 则该值 x_{thr} 即是非一致性条件下的水文设计值估计。

应用时, 先根据与现行工程水文计算相同的原則选择设计标准 T 和 N , 得到式(6)方程右侧数值, 再采用迭代或其它数值计算方法求解, 该值即为变化环境下 T 年一遇的设计值, 从而可以避开通过推导非一致条件下重现期表达式以推求设计值的困难。

4 示例研究

本文以黄河上游唐乃亥站 1960 年-2012 年共 53 年的 15 日最大洪量系列为例, 对上述所提方法进行示例研究。图 1 是唐乃亥站 15 日最大洪量系列的时序图, 从图中可以看出, 系列的下降趋势较为明显。为此, 采用 Mann-Kendall 法对趋势的显著性进一步检验, 结果表明, 在 5% 置信水平下系列存在显著的下降趋势。

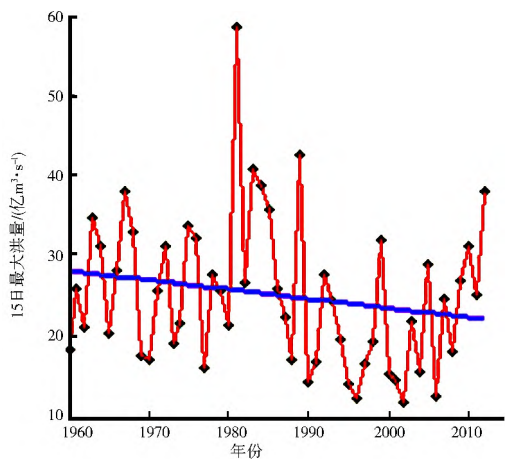


图 1 最大 15 日洪量时序图

Fig. 1 Time series of 15-day maximum flood volume

采用以时间为协变量的非一致性频率分析模型对该系列的分布特征进行分析。考虑到本研究的重点在于阐述如何基于“等效风险率”概念推求非一致性条件下设计值估计问题, 为此, 仅采用 $P-\hat{O}$ 分布对系列进行拟合, 不再做其它分布函数拟合效果的对比性研究。同时, 为简化计算, 只考虑位置参数 μ 和尺度参数 β 随时间呈线性变化, 而形状参数 γ 设为常数, 即: $\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t, \beta(t) = \beta_0 + \beta_1 t, \gamma(t) = \gamma_0 + \gamma_1 t$ 。

图 2 提供了在观测期 1960 年-2012 年共 53 年期间, 100 年、50 年、20 年、10 年和 2 年一遇最大 15 日洪量随时间的演变特征。从图中可以看出不同重现期的分位点估计值都随时间在不断减少, 这与系列呈减少趋势相吻合。53 年间, 最大 15 日洪量超过 100 年一遇的次数为 0; 超过 50 年一遇的次数为 1, 平均 50 年发生一次; 超过 20 年一遇的次数为 1; 超过 10 年一遇的次数为 4, 平均 13 年发生一次; 超过 2 年一遇的次数为 30 次, 平均 1.7 年发生

一次。总体来说,该模型分析的结果与实际观测较为符合。

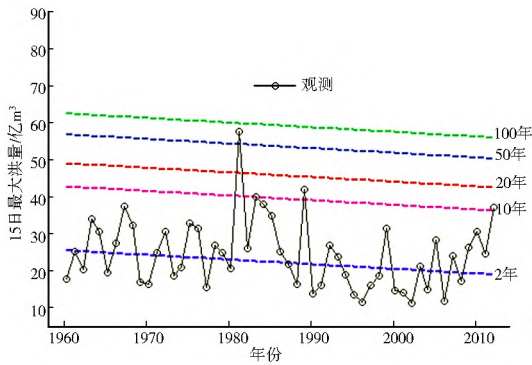


图2 观测期不同重现期对应的分位点估计值随时间演变特征

Fig. 2 Quantiles for given periods evolves with time in the observed period

图3提供了2013年-2112年未来100年(相对于观测期1960年-2012年而言),100年、50年、20年、10年和2年一遇最大15日洪量随时间的演变特征。因为假定未来系列的变化仍然遵从历时系列中的下降趋势特征,所以从图3中可以看出,对于给定的重现期,其对应的设计值随着时间的变化也均呈现减少的变化趋势。从2013年到2112年,100年重现期对应的设计值从56.81亿 m^3 减少到42.42亿 m^3 ;50年重现期的设计值从51.13亿 m^3 减少到38.73亿 m^3 ;20年重现期的设计值从43.29亿 m^3 减少到30.89亿 m^3 ;10年重现期的设计值从37.01亿 m^3 减少到24.61亿 m^3 ;2年重现期设计值从19.63亿 m^3 减少到7.25亿 m^3 。

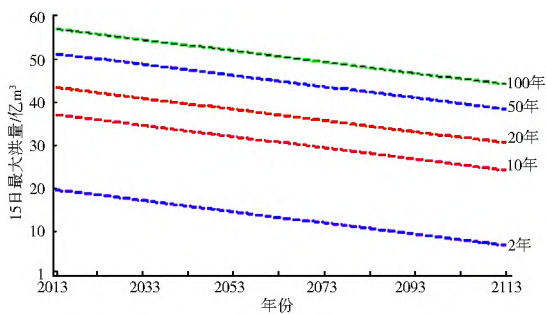


图3 未来2013年-2112年期间不同重现期对应的分位点估计值随时间演变特征

Fig. 3 Quantiles for given periods evolves with time in the future period 2013-2112

基于公式(6),采用非一致性频率分析方法计算了工程设计生命期 n 为100年、80年、50年、30年、20年和重现期 T 为100年、50年、20年和10年情况下,设计值随工程寿命变化情况(见图4)。

从图4中可以看出,重现期 $T=100$ 年时,设计

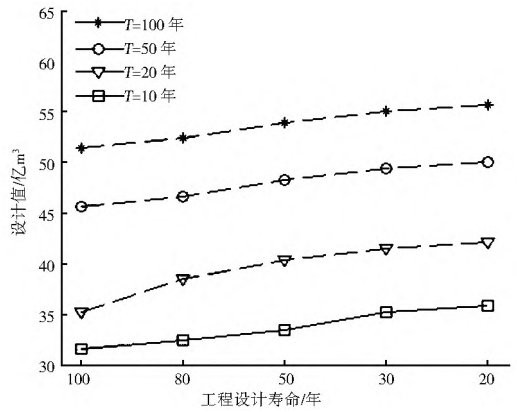


图4 给定设计重现期条件下设计值随工程寿命变化情况

Fig. 4 Quantiles for given periods evolves with engineering life

值随着工程设计寿命 n 的减少而呈现增加趋势,从 $n=100$ 年时的设计值51.34亿 m^3 增加到 $n=20$ 年时的55.66亿 m^3 。这主要是因为原系列呈现减少趋势,即给定超过概率时,对应的分位点估计随着时间的增加呈现减少趋势。因此,对于给定重现期,对应的设计值会随工程寿命的增加而减少。为此,变化环境下的工程水文设计,将工程的寿命考虑在内,更为合理。

5 结论

在研究变化环境下非一致性水文极值系列的频率分析问题中,为了刻画未来环境变化对水文极值分布函数的影响,通常假定分布函数中的分布参数随时间或降雨、气温等其它因子变化,这就导致了对于给定的设计标准而言,每年对应的设计值是随时间而变化的。为了探讨非一致性水文频率分析中设计值估计问题,本文提出“等可靠度”的概念,假定在工程的设计寿命期内,非一致性条件下保持与一致性条件下具有相同的水文设计可靠度,由此为变化环境下工程水文设计提供了一条新途径。该方法同样适用对于以其它要素(如降雨、气温等)为协变量驱动的非一致性水文频率分析计算

参考文献(References):

[1] 梁忠民,胡义明,王军.非一致性水文频率分析的研究进展[J].水科学进展,2011(6):864-871. (LIANG Zhong min, HU Yi min, WANG Jun. Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series[J]. Advances in Water Science, 2011(6):864-871. (in Chinese))

[2] 谢平,陈广才,雷红富.变化环境下基于趋势分析的水资源评价方法[J].水力发电学报,2009(2):14-19. XIE Ping CHEN Guang cai, LEI Hong fu. The assessment method of water resources based on trend analysis of changing environments[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009(2):14-19. (in Chinese))

(下转第83页)

- Predict seasonal low flows in the upper Yangtze River using random forest model[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012(3): 18-24, 38. (in Chinese)
- [13] 康有, 陈元芳, 顾圣华, 等. 基于随机森林的区域水资源可持续利用评价[J]. *水电能源科学*, 2014(3): 34-38. (KANG You, CHEN Yuanfang, GU Shenghua, et al. Assessment of sustainable utilization of regional water resources based on random forest[J]. *Water Resources and Power*, 2014, (3): 34-38. (in Chinese))
- [14] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [15] Breiman L, Friedman J, Stone C J, et al. *Classification and regression trees*[M]. CRC Press, 1984.
- [16] Breiman L. Bagging predictors[J]. *Machine Learning*, 1996, 24(2): 123-140.
- [17] 张春霞, 郭高. Out of bag 样本的应用研究[J]. *软件*, 2011, 32(4): 1-4. (ZHANG Chunxia, GUO Gao. Research of the Applications of Out of bag Sample[J]. *Software*, 2011, 32(4): 1-4. (in Chinese))
- [18] 杨柳, 王钰. 泛化误差的各种交叉验证估计方法综述[J/OL]. *计算机应用研究*, 2015 <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1196.TP.20141229.0911.072.html> (YANG Liu, WANG Yu. Survey for various cross validation estimators of generalization error [J/OL]. *Computer Application and Research*, 2015. (in Chinese))
- [19] 方匡南. 随机森林组合预测理论及其在金融中的应用[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2012. (FANG Kuangnan. *Random Forest Combination Forecast Theory and its Application in Financial* [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2012. (in Chinese))
- [20] 肖坚. 基于随机森林的不平衡数据分类方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (XIAO Jian. *Research on Imbalanced Data Classification Method Based on Random Forest Algorithm* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese))
- [21] 74 项环流特征量资料是国家气候中心气候系统诊断预测室再处理资料, 版权归国家气候中心气候系统诊断预测室所有. (74 circulation characteristic data is the process data of the national climate center prediction system diagnosis room, and the copyright belongs to the national climate center prediction system diagnosis room. (in Chinese))

(上接第 53 页)

- [3] 胡义明, 梁忠民, 杨好周, 等. 基于趋势分析的非一致性水文频率分析方法研究[J]. *水力发电学报*, 2013(5): 21-25. HU Yimin, LIANG Zhongming, Yang Haizhou, et al. Study on frequency analysis method of nonstationary observation series based on trend analysis[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013(5): 21-25. (in Chinese)
- [4] FIORENTINO M, ARORA K, SINGH V P. The two component extreme value distribution for flood frequency analysis: derivation of a new estimation method[J]. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 1987, 1: 199-208.
- [5] 成静清, 宋松柏. 基于混合分布非一致性年径流序列频率参数的计算[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010(2): 229-234. CHEN Jingqing, SONG Songbai. Hydrologic frequency analysis for inconsistent annual runoff series [J]. *Journal of North West Agriculture and Forestry University: Natural Science*, 2010(2): 229-234. (in Chinese)
- [6] 冯平, 曾杭, 李新. 混合分布在非一致性洪水频率分析中的应用[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2013, 46(4): 298-303. FENG Ping, ZENG Hang, LI Xin. Non-Stationary flood frequency analysis based on mixed distribution[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2013, 46(4): 298-303. (in Chinese)
- [7] Singh V P, Wang S X, Zhang L. Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 307: 175-195.
- [8] Strupczewski W G, Singh V P, Feluch W. Nonstationary approach to at-site flood frequency modelling I. Maximum likelihood estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 248(4): 123-142.
- [9] 叶长青, 陈晓宏, 张家鸣, 等. 具有趋势变异的非一致性东江流域洪水序列频率计算研究[J]. *自然资源学报*. 2013, 28(12): 2105-2116. (YE Changqing, CHEN Xiaohong, ZHANG Jiaming, et al. Methods of hydrological frequency analysis for nonstationary flood data with trend components in Dongjiang River Basin[J]. *Journal of natural resources*, 2013, 28(12): 2105-2116. (in Chinese))
- [10] Olsen, J. R., Lambert J. H., and Haimes Y. Y. Risk of extreme events under nonstationary conditions, *Risk Anal.*, 1998, 18, 497-510.
- [11] Parey, S., Hoang T. T. H., and Dacunarh Castelle D. Different ways to compute temperature return levels in the climate change context, *Environmetrics*, 2010, 21: 698-718.
- [12] Read, L. K., Vogel, R. M. Reliability, return periods, and risk under nonstationarity. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6381-6398.