

基于改进湿周法的贾鲁河河道内生态需水量计算

于鲁冀^{1,2},陈慧敏¹,王莉^{1,2},吕晓燕²,范鹏宇²

(1. 郑州大学水利与环境学院,河南 郑州 450001; 2. 郑州大学环境政策规划评价研究中心,河南 郑州 450002)

摘要:针对贾鲁河实际情况,选取中牟和扶沟水文站作为控制断面,利用斜率法、曲率法和多目标评价法3种改进湿周法计算分析贾鲁河不同频率年河道内生态需水量。结果表明,采用多目标评价法($r=2$)计算结果最大,曲率法最小,中牟断面用多目标评价法($r=2$)计算生态需水量较为合理,扶沟断面用斜率法计算生态需水量较为合理。

关键词:生态需水量;湿周法;斜率法;曲率法;多目标评价法;贾鲁河

中图分类号:X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)03-0005-05

Study of ecological instream flow requirement of Jialu River based on improved wetted perimeter method//YU Luji^{1,2}, CHEN Huimin¹, WANG Li^{1,2}, LÜ Xiaoyan², FAN Pengyu²(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2 Research Center for Environmental Policy Planning and Assessment of Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: According to the actual conditions along the Jialu River, we selected the Zhongmou and Fugou Hydrological Stations as the control sections, and calculated the ecological instream flow requirements of the Jialu River in different frequency years using three kinds of improved wetted perimeter methods, including the slope method, the curvature method, and the multi-objective evaluation method. The results show that the calculated ecological flow requirement is greatest when using the multi-objective evaluation method ($r=2$), and least when using the curvature method. It is more reasonable to use the multi-objective evaluation method ($r=2$) to calculate the ecological flow requirement of the Zhongmou section, and to use the slope method to calculate the ecological water requirement of the Fugou section.

Key words: ecological flow requirement; wetted perimeter method; slope method; curvature method; multi-objective evaluation method; Jialu River

随着人口的增加和社会经济的不断发展,人类对水资源的需求与日俱增,长期挤占生态用水造成了河道生态系统的破坏,因此,生态需水量研究成为河流生态系统保护的重要研究方向。Covich^[1]提出了生态需水量的概念,即保证恢复和维持生态系统健康发展所需要的水量。湿周法计算生态需水量的基本假设是,保护好临界区的水生生物栖息地的湿周的同时,也将对非临界区的栖息地提供足够的保护^[2]。该方法是通过建立流量与湿周的关系曲线,由曲线上的临界点确定河道内生态需水量。Gippel等^[3]提出用斜率法和曲率法确定湿周-流量关系曲线上的临界点,但到底曲率法合理还是斜率法合理,目前还没有定论^[4];Shang^[5]建立了以河道流量最小和河道湿周最大为目标的多目标评价模型来求解生态需水量。国内很多学者采用湿周法对生态需水量进行了计算研究。王占兴^[6]用湿周法确定了西南

岔河3个河段的生态需水量;郭文献等^[7-10]用改进湿周法计算了生态需水量,并且计算所得结果都能满足河道内最小生态需水量要求;王庆国等^[11]对湿周法拐点斜率取值进行了改进研究;彭涛等^[12]采用基于湿周法的多目标评价模型对增江生态需水量进行了计算,结果可行。

贾鲁河是一条千年古河,发挥着灌溉、发电和旅游等多重作用,对当地经济发展的作用不可忽视,但过量的用水会导致生态系统受到破坏,因此,研究贾鲁河生态需水量对于合理利用水资源、保护生态系统具有重要意义。本文基于贾鲁河的实际情况,采用湿周法的3种改进方法——斜率法、曲率法和多目标评价法计算其生态需水量,对比3种方法的计算结果,并对生态需水量计算结果的合理性进行实证研究,可为贾鲁河生态保护和水资源配置提供参考。

1 改进湿周法

1.1 选择控制断面及典型计算时期

湿周法断面的选取应遵循以下 3 个原则:①典型性,选取能够代表所在河道特性的断面;②稳定性,包括河道形态的稳定性以及水文情况的稳定性;③实用性,选取能够突出反映河道流量与河道断面形态特性关系的断面。水文站点一般符合这样的原则。

计算时期的选择主要考虑河床演变相对平衡,一般对水文站历年流量进行排序分析,选取频率 $P=25\%$ (丰水年)、 $P=50\%$ (平水年)、 $P=75\%$ (枯水年)、 $P=95\%$ (特枯水年) 所对应的年份作为典型年。

1.2 建立湿周-流量关系

对于明渠均匀流,河道的湿周与流量关系可用曼宁公式表达^[13-14]:

$$Q = \frac{1}{n} A^{5/3} R^{-2/3} S^{1/2} \tag{1}$$

式中: Q 为流量; n 为曼宁糙率系数; A 为过水断面面积; R 为湿周; S 为水面坡降。

天然河道断面的几何形状不规则,可以用梯形、矩形、三角形及抛物线形等来近似。矩形、梯形、三角形、抛物线形河流断面形态的湿周-流量关系分别为

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{3.17n} [(R - B)B]^{5/3} - R^{-2/3} \tag{2}$$

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} \left[\frac{b(R - b)}{2\sqrt{1 + m^2}} + \frac{m(R - b)^2}{4(1 + m^2)} \right]^{5/3} R^{-2/3} \tag{3}$$

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{32n} (\sin\theta)^{5/3} R^{8/3} \tag{4}$$

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} \left[\frac{2}{3} B \sqrt{\frac{3B(R - B)}{8}} \right]^{5/3} R^{-2/3} \tag{5}$$

式中: B 为水面宽度; m 为边坡系数; b 为河底宽度; θ 为断面夹角。

一般情况下,为了消除坐标尺度的影响,常常将流量与湿周标准化,令相对流量 $q = \frac{Q}{Q_m}$, 相对湿周 $p = \frac{R}{R_m}$, 其中 Q_m 和 R_m 分别为最大流量及其对应湿周。对于规则断面,矩形和梯形断面的湿周和流量关系呈现出对数关系,三角形和抛物线形断面的湿周和流量呈现幂函数关系^[3]:

$$p = a \ln q + 1 \tag{6}$$

$$p = q^b \tag{7}$$

式中 a 和 b 为与断面形状有关的参数。

1.3 湿周-流量关系曲线临界点的确定

a. 斜率法^[4]:取湿周-流量关系曲线上斜率为 1 的点为临界点,可根据 $dp/dq = 1$ 计算得到。

b. 曲率法^[4]:取湿周-流量关系曲线上曲率最大点为临界点,即曲率对流量的导数为零的点,曲率 k 的数学表达式为

$$k = \frac{\frac{d^2p}{dq}}{\left[1 + \left(\frac{dp}{dq} \right)^2 \right]^{3/2}} \tag{8}$$

c. 多目标评价法^[5]:以水资源利用率 $1-q$ 最高作为社会经济用水目标 (z_1),以湿周 p 最大作为生态保护目标 (z_2),建立模型为

$$\begin{cases} \max z_1 = 1 - q \\ \max z_2 = p(q) \\ \text{s. t. } 0 \leq q \leq 1 \end{cases} \tag{9}$$

该模型可以采用评价函数法求解,如理想点位法、线性加权法等^[15],这里以理想点位法进行计算。以河道湿周 $p=1$ (栖息地最大) 和河道流量 $q=0$ (河道流量最小) 为理想点,以目标点 (p, q) 与理想点 ($1, 0$) 之间的距离 d 作为评价函数, d 可以表示为

$$d = [\omega_1^r (1 - p)^r + (\omega_2 q)^r]^{1/r} \tag{10}$$

式中: ω_1, ω_2 为权重; r 为尺度系数。考虑到栖息地保护和经济用水同等重要,可取等权重; r 可取 1 和 2,对应的 d 分别为 Hamming 距离和 Euclidean 距离。 d 最小时对应的流量即为生态需水量。

3 种临界点确定方法得到的生态需水量计算公式如表 1 所示。

表 1 生态需水量计算公式比较

临界点确定方法	对数函数拟合	幂函数拟合
斜率法	$q = a$	$q = b^{1/(1-b)}$
曲率法	$q = \frac{a}{\sqrt{2}}$	$q = \left[\frac{2-b}{b^2(1-2b)} \right]^{\frac{1}{2(b-1)}}$
多目标评价法	$q = a(r = 1)$	$q = b^{1/(1-b)} (r = 1)$
	$a^2 \ln q + q^2 = 0 (r = 2)$	$q^{b-2} (1 - q^b) = \frac{1}{b} (r = 2)$

从表 2 可知, $r=1$ 时多目标评价法计算结果和斜率法相同;用对数函数拟合时,斜率法计算的生态需水量是曲率法的 $\sqrt{2}$ 倍;用幂函数拟合时斜率法计算的生态需水量是曲率法的 $\left[b + \sqrt{\frac{2-b}{(1-2b)b^2}} \right]^{1/(1-b)}$ 倍;对于三角形断面, $b=0.375$,斜率法计算的生态需水量是曲率法的 4.47 倍^[4]。

2 贾鲁河生态需水量计算

贾鲁河位于河南省境内,发源于新密市,向东北

流经郑州市,至市区北郊折向东流,经中牟,入开封,过尉氏县,后至周口市入沙颍河,最后流入淮河,全长 255.8 km,河道平均比降约为 0.058%。

2.1 基础数据选取

根据贾鲁河实际情况,遵循典型性、稳定性和实用性原则,选取中牟和扶沟水文站作为控制断面。对中牟站和扶沟站 1982—2012 年流量作频率分析,分别以频率 $P=25%$ (丰水年)、 $P=50%$ (平水年)、 $P=75%$ (枯水年)、 $P=95%$ (特枯水年)的年份为典型年,画出断面形状图,利用实测流量和水位计算生态需水量。扶沟站和中牟站选取的典型年如表 2 所示。

表 2 贾鲁河不同频率下的典型年

水文站	$P=25\%$	$P=50\%$	$P=75\%$	$P=95\%$
中牟	2005 年	2003 年	1991 年	2002 年
扶沟	2005 年	1992 年	1991 年	2002 年

2.2 生态需水量计算

中牟和扶沟水文站实测断面分别如图 1 和图 2 所示。

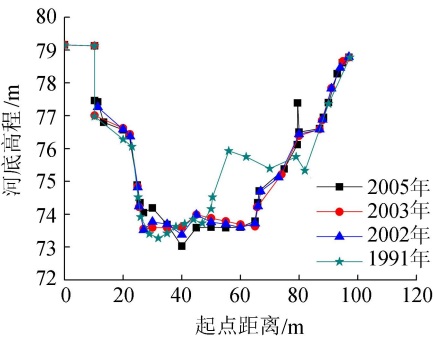


图 1 中牟水文站实测断面形状

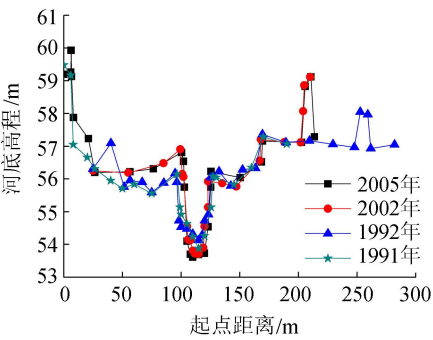


图 2 扶沟水文站实测断面形状

根据对中牟、扶沟实测断面图以及历年水位情况的分析,中牟断面近似梯形断面,扶沟断面历年水位一般不超过 56 m,所以将扶沟断面近似于三角形断面,分别计算不同流量下对应的湿周,选取 1998—2012 年年平均流量中的最大值作为 Q_m 计算相对流量,建立断面湿周-流量关系图,并分别用对数函数和幂函数进行拟合(图 3 和图 4),由图 3 和图 4 可知拟合相关系数非常接近于 1,拟合效果较好。

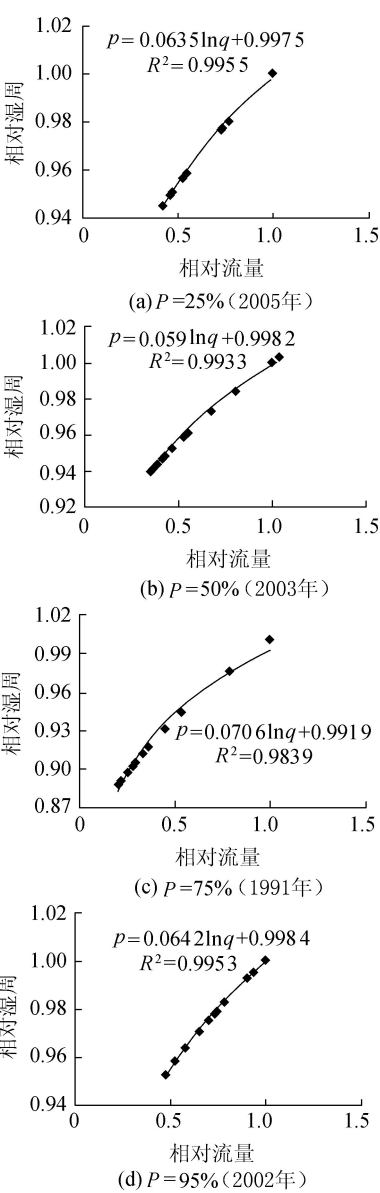


图 3 中牟断面湿周-流量关系

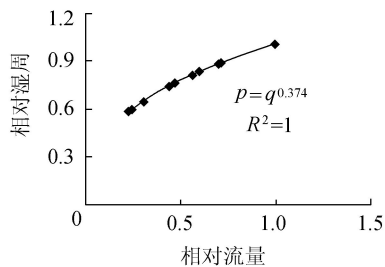
根据中牟和扶沟断面湿周-流量关系,分别采用斜率法、曲率法和多目标评价法计算河道内生态需水量,结果如图 5 和图 6 所示,图中水平实线为多年平均流量的 10%,水平虚线为多年平均流量的 30%,中牟断面和扶沟断面的多年平均流量分别为 $14\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $14.2\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.3 分析与讨论

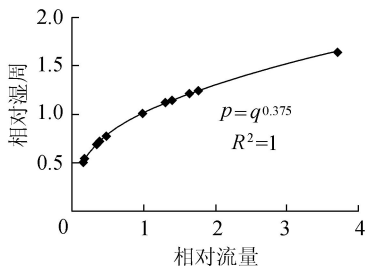
河流生态需水量应该按照一定的原则来确定,主要包括功能性需求原则、分时段考虑原则、分河段考虑原则、效率最大化原则和多功能协调原则等^[16-17]。

由图 5 和图 6 可知,曲率法计算结果比斜率法和多目标评价法小,多目标评价法($r=1$)计算结果与斜率法相同,多目标评价法($r=2$)计算结果大于斜率法和曲率法。

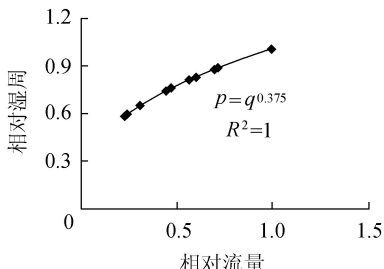
根据实测水质资料以及实地调查,贾鲁河中牟



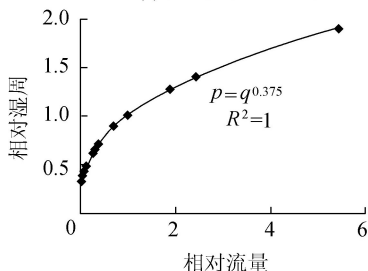
(a) $P=25\%$ (2005年)



(b) $P=50\%$ (1992年)



(c) $P=75\%$ (1991年)



(d) $P=95\%$ (2002年)

图4 扶沟断面湿周-流量关系

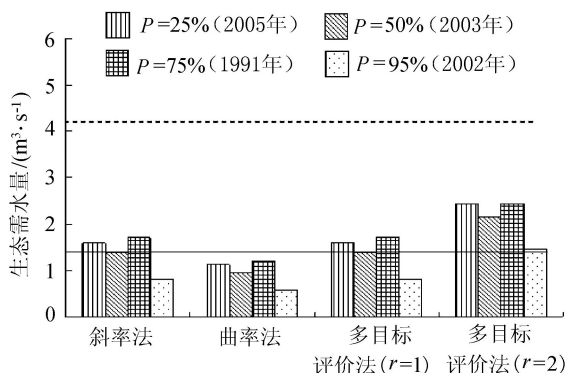


图5 中牟断面生态需水量不同方法计算结果

断面存在严重的水污染现象,按照功能性需求原则,对于污染严重区域,一般采用较大的值较为合理^[18],然而对于中牟断面,曲率法4个典型年的计算结果都小于多年平均流量的10%,其中特枯水年的计算结果仅占多年平均流量的4%,计算结果不

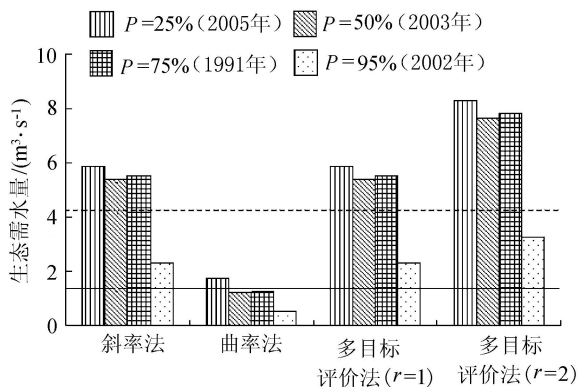


图6 扶沟断面生态需水量不同方法计算结果

符合 Tennant 法最小生态需水量要求(多年平均流量的10%)^[19-20],无法提供河流生态系统所需的基本流量。根据枯水年对生态环境需水要求更加突出的原则,斜率法和多目标评价法($r=1$)特枯水年计算结果仅占多年平均流量的5.8%,不能保障河流生态系统安全,多目标评价法($r=2$)计算结果都在多年平均流量的10%~30%之间,能够提供当地鱼类生存所需要生境,综合考虑,选取多目标评价法($r=2$)的计算结果作为中牟断面生态需水量。

对于扶沟水文站断面,湿周-流量关系采用幂函数关系拟合。根据尚松浩^[21]研究结果,湿周-流量关系符合幂函数关系时曲率法不宜用于确定河流生态需水量。扶沟断面水质良好,生态需水量的确定不需要考虑水质的影响,按照 Tennant 法标准,斜率法、多目标评价法计算结果均大于多年平均流量的10%,都能够满足生态系统的要求。然而根据确定生态需水量的效率最大化原则,即在考虑河流生态功能最小需水量的同时,还应该注意水资源利用效率最大化^[17],对比曲率法和多目标评价法($r=1$)的计算结果,在均能满足生态需求条件下,多目标评价法($r=2$)的生态需水量太大,会使河道内可支配的经济用水量相对变小,一定程度上会影响流域内经济发展,而斜率法和多目标评价法($r=1$)计算结果在多年平均流量的30%附近,能较好地反映扶沟断面的生态需水量,综合考虑,选取斜率法和多目标评价法($r=1$)的计算结果较为合适,这也印证了尚松浩^[21]对湿周-流量关系符合幂函数关系时确定生态需水量的研究成果,即在湿周-流量关系符合幂函数关系时,斜率法和多目标评价法($r=1$)确定河流生态需水量的方法是适宜的。

综上所述,中牟断面生态需水量采用多目标评价法($r=2$)的计算结果,扶沟断面生态需水量采用斜率法和多目标评价法($r=1$)的计算结果。具体如表3所示。

表3 中牟和扶沟断面各典型年的生态需水量			
断面	典型年	生态需水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	占多年平均流量 百分比/%
中牟	丰水年(2005年)	2.42	17.3
	平水年(2003年)	2.14	15.3
	枯水年(1991年)	2.43	17.4
	特枯水年(2002年)	1.45	10.4
扶沟	丰水年(2005年)	5.86	41.2
	平水年(1992年)	5.41	38.1
	枯水年(1991年)	5.53	38.9
	特枯水年(2002年)	2.31	16.3

3 结 论

a. 对于中牟断面,综合考虑 Tennant 法、污染严重区域取其大以及枯水年生态需水问题更加突出等,其生态需水量采用多目标评价法($r=2$)来计算较为合理;而扶沟断面,根据水资源利用效率最大化原则,选用斜率法和多目标评价法($r=1$)计算较为合适。

b. 中牟断面丰水年(2005年)、平水年(2003年)、枯水年(1991)和特枯水年(2002年)的生态需水量分别为 $2.42\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2.14\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2.43\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.45\text{ m}^3/\text{s}$;扶沟断面丰水年(2005年)、平水年(1992年)、枯水年(1991年)和特枯水年(2002年)的生态需水量分别为 $5.86\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.41\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.53\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2.31\text{ m}^3/\text{s}$ 。

参考文献:

[1] COVICH A. Water in crisis: a guide to the worlds freshwater resources [M]. New York: Oxford University Press,1993 : 40-55.

[2] ARTHINGTON A H, KING J. Development of a holistic approach for assessing environmental flow requirements of riverine ecosystems [C]//Proceedings of an international seminar and workshop on water allocation for the environment. Armidale:University of New England,1992: 76.

[3] GIPPEL C J, STEWARDSON M J. Use of the wetted perimeter in defining minimum environmental flows [J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1998, 14 (1): 53-67.

[4] 刘苏峡,莫兴国,夏军,等.用斜率法和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较 [J]. 地理学报,2006,61 (3):273-281. (LIU Suxia, MO Xingguo, XIA Jun, et al. Uncertainty analysis in estimating the minimum ecological insteam flow requirements via wetted perimeter method: curvature technique slope technique [J]. Acta Geographica Sinica,2006,61 (3): 273-281. (in Chinese))

[5] SHANG Songhao. Amultiple criteria decision making approachto estimate minimum environmental flows using wetted perimeter [J]. River Research and Applications, 2008,24 (1): 54-67.

[6] 王占兴.湿周法确定河流生态环境需水量临界点的应用 [J]. 东北水利水电, 2009 (6): 26-28. (WANG Zhanxing. Application of wetted perimeter method in determining critical point of river eco-environment water demand [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2009 (6): 26-28. (in Chinese))

[7] 郭文献,夏自强.对计算河道最小生态流量湿周法的改进研究 [J]. 水力发电学报, 2009, 28 (3): 171-175. (GUO Wenxian, XIA Ziqiang. Improved research on wetted perimeter method to calculate minimum stream ecological discharge [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28 (3): 171-175. (in Chinese))

[8] 史芳芳,黄薇.用改进湿周法计算河道内最小生态流量 [J]. 长江科学学院院长报, 2009, 26 (4): 9-12. (SHI Fangfang, HUANG Wei, Minimum instreaming ecological discharge by using improved wetted perimeter method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009,26 (4): 9-12. (in Chinese))

[9] 吉利娜,刘苏峡,王新春.湿周法估算河道内最小生态需水量:以滦河水系为例 [J]. 地理科学进展,2010,29 (3): 287-291. (JI Lina, LIU Suxia, WANG Xinchun. Wetted perimeter approach to estimate instream flow requirements: a case study in luanhe water system [J]. Progress in Geography, 2010, 29 (3): 287-291. (in Chinese))

[10] 宋兰兰,陆桂华,刘凌.湿周法的改进与应用 [J]. 水利水电技术, 2007, 38 (10): 10-13. (SONG Lanlan, LU Guihua, LIU Ling. Application and improvement of wetted perimeter method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2007,38 (10): 10-13. (in Chinese))

[11] 王庆国,李嘉,李克峰,等.河流生态需水量计算的湿周法拐点斜率取值的改进 [J]. 水利学报, 2009, 40 (5): 550-555. (WANG Qingguo, LI Jia, LI Kefeng, et al. Modification of wetted perimeter method for determining the ecological flow requirement [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40 (5): 550-555. (in Chinese))

[12] 彭涛,陈晓宏,王高旭,等.基于湿周法的河道最小生态需水量多目标评价模型 [J]. 水利水电科技进展,2012, 32 (5): 6-10. (PENG Tao, CHEN Xiaohong, WANG Gaoxu, et al. Multi-objective evaluation model for minimum environmental flows based on wetted perimeter method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32 (5): 6-10. (in Chinese))

[13] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2003, 18 (5): 294-301. (YANG Zhifeng, ZHANG Yuan. Comparisonm of methods for ecological and environmental flow in river channels [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2003, 18 (5): 294-301. (in Chinese))

(下转第 94 页)

- Geology, 2007, 28(5): 621-627. (in Chinese))
- [33] 邓宏文, 王洪亮, 李小孟. 高分辨率层序地层对比在河流相中的应用[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 90-95. (DENG Hongwen, WANG Hongliang, LI Xiaomeng. Application of high-resolution sequence stratigraphic correlation to fluvial facies [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(2): 90-95. (in Chinese))
- [34] 郑荣才, 柯光明, 文华国, 等. 高分辨率层序分析在河流相砂体等时对比中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 641-647. (ZHENG Rongcai, KE Guangming, WEN Guohua, et al. Isochronic correlation of fluvial sandbodies by high-resolution sequence technique [J]. Journal of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(6): 641-647. (in Chinese))
- [35] 邓宏文, 王红亮, 阎伟鹏, 等. 河流相层序地层构成模式探讨[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 373-379. (DENG Hongwen, WANG Hongliang, YAN Weipeng, et al. Architecture model of sequence stratigraphy in fluvial facies [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 373-379. (in Chinese))
- [36] 纪友亮, 周勇, 吴胜和, 等. 河流相地层高精度地层构型界面形成机制及识别方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 8-15. (JI Youliang, ZHOU Yong, WU Shenghe, et al. Formation mechanism and recognizing method of high resolution strata architecture boundary in fluvial strata [J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(2): 8-15. (in Chinese))
- [37] 邓宏文, 马立祥, 姜正龙, 等. 车镇凹陷大王北地区沙二段滩坝成因类型、分布规律与控制因素研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 715-724. (DENG Hongwen, MA
- Lixiang, JIANG Zhenglong, et al. Sand band generation types and its controls on their distribution, the second member of Shahejie Formation, Lower Tertiary, Dawangbei, Chechen Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 715-724. (in Chinese))
- [38] 邓宏文. 高分辨率层序地层学应用中的问题探析[J]. 古地理学报, 2009, 11(5): 471-480. (DENG Hongwen. Discussion on problems of applying high resolution sequence stratigraphy [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(5): 471-480. (in Chinese))
- [39] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249-255. (ZHENG Rongcai, PENG Jun, WU Chaorong. Grade division of base level cycles of terrigenous basin and its implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 249-254. (in Chinese))
- [40] 张明禄, 郑荣才, 达世攀, 等. 砂体等时对比的高分辨率层序分析技术[J]. 矿物岩石, 2004, 24(1): 113-120. (ZHANG Minglu, ZHENG Rongcai, DA Shipan, et al. Isochronic correlation of sandy bodies by high-resolution sequence technique [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(1): 113-120. (in Chinese))
- [41] 黄彦庆, 张尚锋, 张昌民, 等. 高分辨率层序地层学中自旋回作用的探讨[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(2): 6-8. (HUANG Yanqing, ZHANG Shangfeng, ZHANG Changmin, et al. Discussion on problems of autocyclicity in high resolution sequence stratigraphy [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(2): 6-8. (in Chinese))
- [42] EMERY D, MYERS K J. Sequence stratigraphy [M]. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd., 1996: 111-133.

(收稿日期: 2015-06-16 编辑: 熊水斌)

(上接第9页)

- [14] 张新华, 李红霞, 肖玉成, 等. 河流最小生态基础流量计算方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 66-73. (ZHANG Xinhua, LI Hongxia, XIAO Yucheng, et al. Study on computational methods for minimum environmental flows [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(1): 66-73. (in Chinese))
- [15] 尚松浩. 水资源系统分析方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 134-138.
- [16] 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水量[J]. 水利学报, 2001(9): 22-28. (NI Jinren, CUI Shubin, LI Tianhong, et al. On water demand of river ecosystem [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(9): 22-28. (in Chinese))
- [17] 倪晋仁, 金玲, 赵业安, 等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J]. 水利学报, 2002(10): 1-7. (NI Jinren, JIN Ling, ZHAO Yean, et al. Minimum water demand for ecosystem protection in the Lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(10):
- 1-7. (in Chinese))
- [18] 吉利娜. 水力学方法估算河道内基本生态需水量[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [19] TENNAT D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976(4): 6-10.
- [20] 于松延, 徐宗学, 武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2/3): 175-179. (YU Songyan, XU Zongxue, WU Wei. Ecological baseflow in the Guanzhong Reach of the Wei River estimated by using different hydrological methods [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(2/3): 175-179. (in Chinese))
- [21] 尚松浩. 确定河流生态流量的几种湿周法比较[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 41-44. (SHANG Songhao. Comparison among several wetted perimeter methods to determine the minimum environmental flows of rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 41-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-04-14 编辑: 郑孝宇)