

# 西辽河流域地表地下复合生态需水研究

王高旭, 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 黄昌硕

(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)

**摘要:** 针对西辽河流域水资源开发利用强度大、地下水超采、平原河流断流等严重的生态问题,将河道生态流量与地下水位作为整体来考虑,系统地确定复合型生态需水。首先以河道为对象,计算了最小生态流量、适宜生态流量;其次,以河岸为对象,以地下水与河流补排关系和避免盐碱化为依据,以河道生态流量为边界条件,确定了支撑河道生态需水的生态地下水位。西辽河流域的地表地下复合生态需水指标由河道最小生态流量和适宜生态流量以及地下生态水位构成,可为流域水资源规划和管理、生态系统保护和恢复提供科学依据。

**关键词:** 生态流量; 生态地下水位; 生态需水复合指标; 西辽河流域

中图分类号: TV856

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0007-04

## Study on ecological water requirement in Xiliao River basin

WANG Gaoxu, CHEN Minjian, FENG Huali, WANG Liqun, HUANG Changshuo

(State Key Lab of Hydrology and Water Resources and Hydraulic Engineering Science,  
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Aimed at the severe ecological problems such as large scale development of water resources, over-exploiting groundwater and cutting off of plain rivers in the Xiliao river basin, the paper considered the ecological flow and groundwater level of river as a whole, and systematically determined the composite ecological water requirement. First, it calculated the minimum river flow and appropriate ecological flow; secondly, taking bank of river as objective and ecological flow as confine condition, according to the relation between replenishment and discharge and avoiding salinization, the paper determined the ecological groundwater level that can support the ecological flow of rivers. The composite indexes of ecological water requirement are composed of minimum river flow, appropriate ecological flow and ecological level of groundwater, which can provide scientific reference for the plan and management of water resources, protection and recovery of water ecosystem in that region.

**Key words:** ecological flow; ecological level of groundwater; composite indexes of ecological water requirement; Xiliao river basin

西辽河流域位于半干旱半湿润地区,水资源禀赋相对较差,在大规模的开发利用下,已经出现了严重的生态问题。从1981-2005年的25 a间,西辽河断流时间达20 a,累计断流达25次<sup>[1]</sup>。其中,2001年西辽河流域河道断流长度约100 km,超采地下水形成地下水漏斗区面积约991 km<sup>2</sup>、地下水位最大降深达13 m。由于超采地下水难以恢复,西辽河流域已经出现了土地沙化,2001年已经沙化的土地约为30 852 km<sup>2</sup>,占整个西辽河流域沙化面积的98%。与此同时,西辽河流域已形成东北地区最为

严重的超采区,河道断流问题日趋严重,与相邻的海河流域有诸多相似之处。大范围河道断流与地下水下降构成了西辽河流域最为严峻的生态用水问题<sup>[2-3]</sup>。因此,针对西辽河流域存在的主要生态环境问题,需要将河流生态流量与地下水位作为整体来考虑,系统地确定复合型生态需水。

## 1 西辽河复合生态需水分析

我国的生态需水研究始于20世纪90年代,在水生态问题日益严重的背景下,生态需水理论和计

算方法的相关研究发展迅速<sup>[4-7]</sup>。目前,国内常用的河流生态需水计算方法有十几种之多<sup>[6-8]</sup>,每种方法都有它的特点和适用范围。对于具体的研究区域,需要分析其特点和面临的主要生态环境问题,有针对性地进行生态需水研究重点分析,选择合理的方法确定生态需水指标。

西辽河发源于大兴安岭南缘,西北以大兴安岭山脉为界,南有燕山山脉将其与滦河分隔,正北与洮儿河为邻。流域内地貌以平原为主,地势略呈西高东低,西接大兴安岭山区,中部是低山丘陵与台地,东部为东北平原,海拔多在 100 ~ 1 000 m 之间。西辽河年降水量在 350 ~ 450 mm 之间,处于干旱半干旱过渡形态;流域多年平均径流量为 29.6 亿 m<sup>3</sup>,但近年来在降水减少和人类活动共同作用下,流域地表水资源量呈显著减少的趋势,2001 - 2010 年的平均径流量仅 16.3 亿 m<sup>3</sup>。根据松辽流域水资源开发利用调查评价的结果,西辽河流域共建有水库 206 座,总蓄水能力 5.0 亿 m<sup>3</sup>;平原区有引水工程 191 座,供水能力 7.0 亿 m<sup>3</sup>;流域内有地下水灌溉井 14.6 万眼,供水能力 43.8 亿 m<sup>3</sup>。上游的水库拦蓄和沿途引水减少了河流下泄水量,加上平原地区大规模的地表引水和地下水超采,导致河道补给条件发生变化。特别是在枯水季节,河岸潜水位下降以致无法补给河流,在仅依赖于上游下泄水量的情况下,河道维持水量难以保证,出现大范围断流,即所谓“准内陆河化”效应<sup>[9]</sup>。西辽河流域水资源大规模开发利用引发的河流生态问题,其关键原因可以概括为两点:一是上游下泄量减少,造成河道径流量衰减;二是平原区地下水超采导致地下水河岸调节补给作用散失,无法实现对河道径流的支撑。因此,针对上述原因,从两方面研究西辽河流域的生态需水问题。一方面,分析河流生态需求,确定河道生态流量;另一方面,分析地下水对河流水文的调节作用,确定合理的生态地下水位。合理的地下水位埋深,有利于降水入渗,在洪水时可减少洪水流量;在枯水时可以补给河道径流,支撑河道的最小生态流量,避免出现断流。

## 2 复合生态需水计算方法

首先计算河道生态流量,通过分析地表、地下生态需水关系提出对河道生态需水有支撑功能的生态地下水位,确定辽河流域的复合生态需水指标。

### 2.1 河道生态需水计算方法

针对河流流量衰减时出现的两个临界状态,确

定河流的最小生态需水和适宜生态需水。最小生态需水对应于维持河流的一定规模所必须保持的低水流量,当流量小于这个数值时,河流将迅速消退直至干涸<sup>[10]</sup>;其基本功能是保证目标水体成为一个连续体,并且以最小的水量条件获得尽可能大的河道规模,采用形态学法进行计算<sup>[11-12]</sup>。适宜生态需水对应于水生态系统处于衰退临界时的水量条件<sup>[10]</sup>,其基本功能是保持水生态系统的生物完整性,采用鱼类生境法进行计算<sup>[12-13]</sup>。

### 2.2 生态地下水位计算方法

根据前文分析,将西辽河流域生态地下水位研究重点放在平原地区的浅层地下水。分析生态地下水位时,需要考虑 3 个方面的因素:①该地下水位不能过低,能够实现补排平衡;②该水位也不能过高,以避免出现土地盐碱化现象;③该地下水位要能够补给和支撑河道生态用水。

生态地下水位的计算可分两步进行。首先,确定维持河岸调节作用、兼顾补排、避免盐碱化的地下水位范围。考虑地下水入渗计算补排平衡的最低地下水位  $G_1$ 、防止盐碱化的最高地下水位  $G_2$  以及河底、湖底高程  $Z$ , 3 个参数,根据公式(1) 确定具备河岸调节功能地下水位  $G_e$  的范围。

$$G_e = \max\{G_1, Z_r\}, \text{ 且 } G_e < G_2 \quad (1)$$

其次,综合考虑支撑河道内生态需水的地下水位,确定用于流域管理的生态地下水位值。生态地下水位既满足河道外生态对地下水位要求又对河道内生态流量具有支撑作用。考虑到西辽河流域下游河道断流现象十分普遍,而最小生态流量是维持地表水体生存的最小需水,因而选择最小生态流量对应的水位为边界条件,分析最小生态水位与具备河岸调节功能的地下水位  $G_e$  的关系,确定用于流域管理的生态地下水位的范围。

## 3 西辽河复合生态需水计算与结果分析

### 3.1 选用站点与资料

以水文站作为河流控制断面计算最小生态流量和适宜生态流量时,尽量在同一河流的上、中、下游选取多个水文站,以便进行河流适宜生态流量的系统分析;而地下水水位下降带来的生态问题在平原区更突出,计算生态地下水位只考虑选择平原区的水文站。所选取的水文站,均需具备最基本的、10 年以上的可用数据资料。如水位、流量、大断面等,并且要求资料具有可靠性和代表性。根据水文控制

性断面选取准则,确定以西辽河的麦新站和郑家屯站进行生态需水复合指标计算。

麦新站位于西辽河上游主河道,测验河段顺直,属于沙质复式断面。该断面位于西辽河两大主要支流西拉木伦河和老哈河汇合后,控制面积为 $5.09 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占西辽河流域的29%,能从整体上反映西辽河上游源头流量的变化过程。郑家屯站位于西辽河下游主河道,测验河段顺直,河床由细沙组成,属于复式断面。该断面是西辽河汇入辽河干流前的控制性断面,控制面积为 $12.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占西辽河流域面积的93%,能够集中反映西辽河流域的流量变化过程。

表1 西辽河流域主要河流水文控制断面概况

| 控制断面 | 集水面积  | 河底高程  | 年降水量  | 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> , m, mm, m <sup>3</sup> /s |             |
|------|-------|-------|-------|------------------------------------------------------------|-------------|
|      |       |       |       | 多年平均天然流量                                                   | 计算年份        |
| 麦新   | 5.09  | 280.2 | 394.5 | 43.1                                                       | 1970 - 1985 |
| 郑家屯  | 12.67 | 114.9 | 394.3 | 53.2                                                       | 1965 - 1985 |

3.2 河道生态流量

首先计算最小生态流量。对选取的辽河控制断面的水位、流量、大断面等实测水文资料序列进行计算分析,绘制出序列历年相对流量-河道规模关系图<sup>[11-12]</sup>。图1为麦新站的相对流量-河道规模关系图。

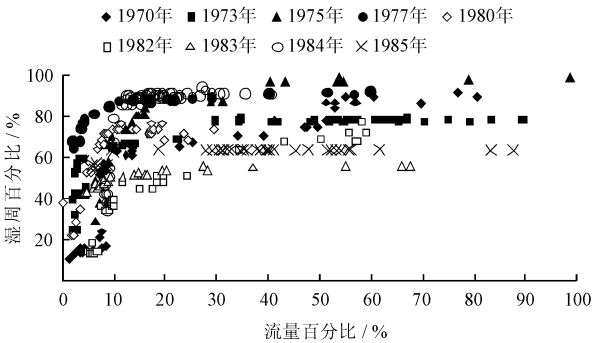


图1 麦新站相对流量-河道规模关系图

由图1可以看出,在相对流量为9.5%处,麦新站的相对流量-河道规模关系出现明显转折。因此,可以确定麦新站控制断面的最小生态流量占多年平均天然流量的9.5%。由图可以得出,麦新站最小生态流量为 $4.09 \text{ m}^3/\text{s}$ ,维持的相对河道规模约为65.7%。同样的,郑家屯站的相对流量-河道规模关系图在相对流量为8.9%时,出现较为明显的转折点(图略),以确定郑家屯站控制断面的最小生态流量占多年平均天然流量的8.9%。郑家屯站最小生态流量为 $4.73 \text{ m}^3/\text{s}$ ,维持的相对河道规模约为

35.7%。

在选定的辽河流域水文控制断面,通过建立水位、流量、流速之间的关系,以鱼类产卵繁殖需要的最小适宜流速 $0.3 \text{ m/s}$ 计算河流适宜生态流量<sup>[12-13]</sup>。由于河道流速受断面水深、冰冻、风及上下游河道形势等很多因素影响,因此尽量选择汛前畅流期水文资料建立水位、流量和流速关系。图2为麦新站1973年的流量和流速关系图,之所以选择1973年作为计算适宜流量的年份,是因为这一年与对应控制断面的多年平均水力参数最为接近。由此,得到麦新站的适宜生态流量为 $9.75 \text{ m}^3/\text{s}$ ,相对流量为22.7%。采用同样方法得出郑家屯站适宜生态流量为 $10.10 \text{ m}^3/\text{s}$ ,相对流量为19.1%。已有研究表明,从河流的上游至下游,最小生态流量逐渐增大,而最小相对流量存在着逐渐递减的规律。因此,利用河流生态流量的这种渐变规律,可以推求西辽河其他突变点不明显或资料缺乏的断面的最小生态流量。

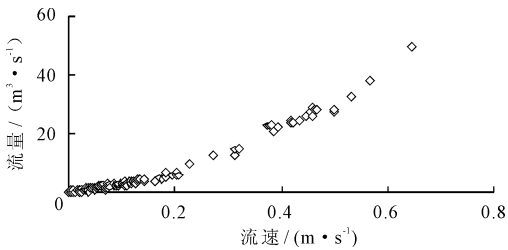


图2 麦新站1973年流量流速关系图

表2 西辽河最小生态流量、适宜生态流量计算成果

| 断面名称 | 流量   | 最小生态流量 |      |      | 适宜生态流量 |      |       |
|------|------|--------|------|------|--------|------|-------|
|      |      | 流量比    | 湿周比  | 建议流量 | 流量     | 流量比  | 建议流量  |
| 麦新   | 4.09 | 9.5    | 65.7 | 8~10 | 9.75   | 22.7 | 19~23 |
| 郑家屯  | 4.73 | 8.9    | 35.7 |      | 10.10  | 19.1 |       |

3.3 维持河道生态需水的生态地下水位

维持补排平衡的生态地下水位( $G_1$ )是指地下水的降水入渗补给与蒸发排泄相等的水位,此水位以下地下水的年入渗补给量和入渗补给系数逐渐趋于稳定,不再受降水的影响。防止土壤盐碱化的地下水位( $G_2$ )是指枯水季节防止土壤表层积盐量不超过作物耐盐度临界值的地下水位。从土壤积盐规律看,毛管水上升高度是土壤积盐的转折点,如果潜水埋深低于毛管水上升高度,土壤积盐强烈,反之,土壤积盐微弱,因此,可把毛管水上升高度作为防止土

壤积盐危害作物生长的临界深度<sup>[14]</sup>。因此,可以把毛管水上升高度与根系层高度之和作为防止土壤盐碱化的临界埋深。根据国家十五科技攻关研究专题的研究成果<sup>①</sup>,西辽河上游山前平原区维持补排平衡的浅层地下水最佳控制生态水位埋深在 5~10m,

防止土壤盐碱化的埋深控制在 3~5 m;西辽河下游平原区维持补排平衡的浅层地下水最佳控制生态水位埋深在 6~11 m,防止土壤盐碱化的埋深暂无。麦新站位于山前平原区,郑家屯站位于中部平原区,计算成果见表 3。

表 3 西辽河流域河道外生态地下水位分析 m

| 水系    | 代表站 | 所处生态<br>分区位置 | 补排平衡地下水     |      | 防盐碱地下水      |     |
|-------|-----|--------------|-------------|------|-------------|-----|
|       |     |              | 水位          | 埋深   | 水位          | 埋深  |
| 西辽河上游 | 麦新  | 山前平原区        | 278.5~273.5 | 5~10 | 280.5~278.5 | 3~5 |
| 西辽河下游 | 郑家屯 | 中部平原区        | 110~105     | 6~11 | 无           | 无   |

由于河流上游下泄的水量减少,再加上地下水位下降夺取了更多的河道径流,造成河道断流、干涸现象,给水生态系统带来严重的破坏,因而需要将地下水位与地表地下生态需水统一考虑。以维持河道规模的最小生态流量为边界条件,并通过水位-流量关系确定河流最小生态水位,根据大断面资料确定河底高程,确定西辽河平原区支撑河道流量的生态地下水位。麦新站最小生态流量及其对应生态水位分别为 4.1 m<sup>3</sup>/s 和 280.5 m。通过与河道外生态地下水位的关系分析,确定最小生态流量对应的河道外生态地下水位范围为 280.2~280.5 m。见表 4。

表 4 支撑河道生态流量的西辽河生态地下水位 m

| 河名    | 站名  | 河底<br>高程 | 河流最小<br>生态水位 | 支撑河道内生态需<br>水的生态地下水位 |
|-------|-----|----------|--------------|----------------------|
| 西辽河上游 | 麦新  | 280.2    | 280.5        | 280.2~280.5          |
| 西辽河下游 | 郑家屯 | 114.9    | 115.4        | 114.9~115.4          |

由上面计算可知,西辽河流域支撑河道生态流量的生态地下水位是大于维持补排平衡的地下水位而小于防止盐碱化的地下水位。因此,西辽河流域的合理生态地下水位应该在支撑河道生态流量的生态地下水位和防止盐碱化的地下水位之间。上文计算得到的河道内最小生态流量、适宜生态流量和生态地下水位共同构成了西辽河地表-地下水复合生态需水指标,其中生态地下水位对河道内最小生态流量具有支撑作用。

## 4 结 语

针对西辽河流域平原河流断流、地下水超采等主要水生态问题,将河流生态流量与地下水位作为整体来考虑,系统地确定复合型生态需水。以西辽

河上游麦新站和下游郑家屯站为例,采用河流形态学方法,通过点绘的无量纲的流量-规模关系图,计算得到西辽河的最小生态流量占多年天然平均流量的 8%~10%;采用鱼类生境法,得到辽河干支流的适宜生态流量占多年天然平均流量的 19%~23%。半湿润半干旱地区,河道生态流量与地下水状况密不可分。从 3 个方面定量分析生态地下水位:①该地下水位不能过低,能够实现补排平衡;②该水位也不能过高,避免出现土地盐碱化现象;③该地下水位要能够补给和支撑河道生态用水。在已有成果的基础上计算得到在支撑河道生态流量的生态地下水位和防止盐碱化的地下水位之间,是一个区间范围。本文对生态地下水位的确定进行了探索,相关研究仍待进一步深入,生态地下水水位的确定可循以下思路继续推进。运用地下水、土壤水与植物学基础知识,研究西辽河平原考虑植被根系吸水作用下的毛管水上升高度,以确定地下水影响植被的临界埋深;结合降雨入渗机理,基于饱和与非饱和土壤水运动规律,计算西辽河地区降雨入渗深度,确定降雨入渗补给地下水的临界埋深;在此基础上确定西辽河平原的临界地下水位条件,以维护西辽河平原的生态稳定与水资源合理开发利用。

## 参考文献:

[1] 王西琴,李 力. 西辽河断流问题及解决对策[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(6):79-83.  
[2] 钱正英. 东北地区有关水土资源配置、生态环境保护 and 可持续发展的若干战略问题研究综合卷[M]. 北京: 科学出版社,2007.  
[3] 闫百兴,宋新山,闫敏华,等. 辽河流域水资源演化趋势分析[J]. 水土保持通报,2000,20(6):1-5.  
[4] 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.

寿)降水偏弱。在重现期增大过程中,存在一个 10 a 的临界值,前后对应最大日降水量增加速率不同:临界点前最大日降水量增加明显,临界点后最大日降水量增加不明显。

### 参考文献:

- [1] 闵 岫,钱永甫. 我国近 40 年各类降水事件的变化趋势[J]. 中山大学学报(自然科学版),2008,47(3):105-111.
- [2] Meehl G A, Karl T, Easterling D R, et al. An introduction to trends in extreme weather and climate events: observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 413-416.
- [3] 黄 琰,董文杰,支 蓉,等. 强降水持续过程对上海市内交通经济损失评估模型初探[J]. 物理学报,2011,60(4):803-812.
- [4] 苏布达,姜 彤,董文杰. 长江流域极端强降水分布特征的统计拟合[J]. 气象科学,2008,28(6):625-629.
- [5] 陈子燊,路剑飞,刘曾美. 广东极端降水的三参数概率分布模式对比[J]. 中山大学学报(自然科学版),2012,51(1):102-106.
- [6] Iqbal M J, Ali M. A probabilistic approach for estimating return period of extreme annual rainfall in different cities of

Punjab [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(7): 2599-2606.

- [7] 荣艳淑,王 文,王 鹏,等. 淮河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):1-8.
- [8] 韩军彩,王传辉,陈 静,等. 石家庄市暴雨变化特征及降水极值重现期研究[J]. 干旱区研究,2013,30(5):796-801.
- [9] 李景刚,黄诗峰,李纪人,等. 1960-2008 年间洞庭湖流域降水变化时空特征分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2011,8(4):275-280.
- [10] 张小玲,陶诗言,张顺利,等. 1996 年 7 月洞庭湖流域持续性暴雨过程分析[J]. 应用气象学报,2004,15(1):21-31.
- [11] Hennessy K J, Gregory J M, Mitchell J F B. Change in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions [J]. Climate Dynamics, 1997, 13(9): 667-680.
- [12] Fowler H J, Kilsby C G. A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000 [J]. International Journal of Climatology, 2003, 23(11): 1313-1334.
- [13] 卢安平,赵 林,郭增伟,等. 基于 Monte Carlo 法的极值分布类型及其参数估计方法比较[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(2):88-95.

(上接第 10 页)

- [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.
- [6] 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,2004,35(12):39-45.
- [7] 张 丽,李丽娟,梁丽乔,等. 流域生态需水的理论及计算研究进展[J]. 农业工程学报,2008,24(7):307-312.
- [8] 徐志侠,陈敏建,董增川. 河流生态需水计算方法评述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(1):5-9.
- [9] 陈敏建. 水循环生态效应与区域生态需水类型[J]. 水利学报,2007,38(3):282-288.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] 王高旭,陈敏建,丰华丽,等. 黄河中下游河道生态需水研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2009,48(5):125-130.
- [13] 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,2007,18(5):745-750.
- [14] 张长春,邵景力,李慈君,等. 地下水位生态环境效应及生态环境指标[J]. 水文地质工程地质,2003,30(3):6-11.